

ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

BIODIVERSITY SCIENCE

生物多样性

第25卷 第3期
2017年3月

Vol. 25 No. 3
March 2017



主 办

中国科学院生物多样性委员会

中国植物学会

中国科学院植物研究所

中国科学院动物研究所

中国科学院微生物研究所

Biodiversity Committee, CAS

Botanical Society of China

Institute of Botany, CAS

Institute of Zoology, CAS

Institute of Microbiology, CAS

<http://www/biodiversity-science.net>

编辑委员会 Editorial Board

主 编 Editor-in-Chief

马克平 Keping Ma Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (CAS)

副 主 编 Deputy Editors-in-Chief

傅声雷 Shenglei Fu Henan University
郭良栋 Liangdong Guo Institute of Microbiology, CAS
蒋志刚 Zhigang Jiang Institute of Zoology, CAS

孔宏智 Hongzhi Kong Institute of Botany, CAS
李 博 Bo Li Fudan University
薛达元 Dayuan Xue Minzu University of China

特邀顾问 Advisory Board

陈宜瑜 Yiyu Chen National Natural Science Foundation of China
方精云 Jingyun Fang Institute of Botany, CAS; Peking University
韩兴国 Xingguo Han Institute of Botany, CAS
洪德元 Deyuan Hong Institute of Botany, CAS
刘 旭 Xu Liu Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS)

马建章 Jianzhang Ma Northeast Forestry University
魏江春 Jiangchun Wei Institute of Microbiology, CAS
吴常信 Changxin Wu China Agricultural University
张亚平 Yaping Zhang Kunming Institute of Zoology, CAS
郑光美 Guangmei Zheng Beijing Normal University
朱有勇 Youyong Zhu Yunnan Agricultural University
庄文颖 Wenying Zhuang Institute of Microbiology, CAS

编 委 Members

白永飞 Yongfei Bai Institute of Botany, CAS
卜文俊 Wenjun Bu Nankai University
曹坤芳 Kunfang Cao Guangxi University
陈圣宾 Shengbin Chen Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection

陈双林 Shuanglin Chen Nanjing Normal University
陈小勇 Xiaoyong Chen East China Normal University
陈小勇 Xiaoyong Chen Kunming Institute of Zoology, CAS
陈又生 Yousheng Chen Institute of Botany, CAS
邓建明 Jianming Deng Lanzhou University
丁建清 Jianqing Ding Henan University
丁 平 Ping Ding Zhejiang University
东秀珠 Xiuzhu Dong Institute of Microbiology, CAS
冯玉龙 Yulong Feng Shenyang Agricultural University
傅金钟 Jinzhong Fu University of Guelph, Canada
高连明 Lianming Gao Kunming Institute of Botany, CAS
高天翔 Tianxiang Gao Zhejiang Ocean University
戈 峰 Feng Ge Institute of Zoology, CAS
葛 颂 Song Ge Institute of Botany, CAS
葛学军 Xuejun Ge South China Botanical Garden, CAS
郭亚龙 Yalong Guo Institute of Botany, CAS
郝占庆 Zhanqing Hao Institute of Applied Ecology, CAS
何舜平 Shunping He Institute of Hydrobiology, CAS
贺纪正 Jizheng He Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS

贺金生 Jinsheng He Peking University
胡征宇 Zhengyu Hu Institute of Hydrobiology, CAS
黄双全 Shuangquan Huang Central China Normal University
黄晓磊 Xiaolei Huang Fujian Agriculture and Forestry University
纪力强 Liqiang Ji Institute of Zoology, CAS
江建平 Jianping Jiang Chengdu Institute of Biology, CAS
蒋 林 Lin Jiang Georgia Institute of Technology, USA
蒋学龙 Xuelong Jiang Kunming Institute of Zoology, CAS
李俊生 Junsheng Li Chinese Research Academy of Environmental Sciences

李 明 Ming Li Institute of Zoology, CAS
李新正 Xinzheng Li Institute of Oceanology, CAS
李义明 Yiming Li Institute of Zoology, CAS
李振宇 Zhenyu Li Institute of Botany, CAS
刘杏忠 Xingzhong Liu Institute of Microbiology, CAS
龙春林 Chunlin Long Minzu University of China
卢宝荣 Baorong Lu Fudan University
马克明 Keming Ma Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS
马月辉 Yuehui Ma Institute of Animal Sciences, CAAS

米湘成 Xiangcheng Mi Institute of Botany, CAS
强 胜 Sheng Qiang Nanjing Agricultural University
邱英雄 Yingxiong Qiu Zhejiang University
曲鲁江 Lujiang Qu China Agricultural University
邵广昭 Guangzhao Shao Biodiversity Research Center, Academia Sinica
沈泽昊 Zehao Shen Peking University
束文圣 Wensheng Shu Sun Yat-sen University
孙 军 Jun Sun Tianjin University of Science and Technology
谭敦炎 Dunyan Tan Xinjiang Agricultural University
唐志尧 Zhiyao Tang Peking University
万方浩 Fanghao Wan Institute of Plant Protection, CAAS
汪小全 Xiao-Quan Wang Institute of Botany, CAS
王国宏 Guohong Wang Institute of Botany, CAS
王洪铸 Hongzhu Wang Institute of Hydrobiology, CAS
王 岭 Ling Wang Northeast Normal University
王 艇 Ting Wang South China Agricultural University
王 文 Wen Wang Kunming Institute of Zoology, CAS
王希华 Xihua Wang East China Normal University
王绪高 Xugao Wang Institute of Applied Ecology, CAS
王 勇 Yong Wang Alabama A & M University, USA
王志恒 Zhiheng Wang Peking University
梶光一 Koichi Kaji Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan

郭建国 Jianguo Wu Arizona State University, USA
吴东辉 Donghui Wu Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS
吴纪华 Jihua Wu Fudan University
徐奎栋 Kuidong Xu Institute of Oceanology, CAS
严岳鸿 Yuehong Yan Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, CAS
杨庆文 Qingwen Yang Institute of Crop Sciences, CAAS
杨祝良 Zhuliang Yang Kunming Institute of Botany, CAS
于飞海 Feihai Yu Beijing Forestry University
袁耀武 Yaowu Yuan University of Connecticut, USA
臧润国 Runguo Zang Chinese Academy of Forestry
张大勇 Dayong Zhang Beijing Normal University
张德兴 Dexing Zhang Institute of Zoology, CAS
张全国 Quanguo Zhang Beijing Normal University
张元明 Yuanming Zhang Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS
周开亚 Kaiya Zhou Nanjing Normal University
周世良 Shiliang Zhou Institute of Botany, CAS
朱瑞良 Ruiliang Zhu East China Normal University
邹晓明 Xiaoming Zou University of Puerto Rico, USA

编 辑 黄祥忠 Xiangzhong Huang 时意专 Yizhuan Shi 闫文杰 Wenjie Yan (本期值班编辑) 周玉荣 Yurong Zhou

生物多样性

SHENGWU DUOYANGXING

第25卷 第3期 2017年3月

目次

编者按

- 227 森林动态大样地是生物多样性科学综合研究平台
马克平

生物多样性监测专题

- 229 中国森林冠层生物多样性监测
沈浩 蔡佳宁 李萌姣 陈青 叶万辉
王峥峰 练璐愉 宋亮
- 237 中国兽类多样性监测网的建设规划与进展
肖治术 李学友 向左甫 李明 蒋学龙
张礼标
- 246 中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究
李成 谢锋 车静 江建平
- 255 玉龙雪山寒温性云冷杉林动态监测样地的物种组成及群落结构
黄华 陈智发 刘德团 和国星 和荣华
李德铎 许琨
- 265 北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态
郭屹立 李冬兴 王斌 何运林 向悟生
蒋裕良 李先琨
- 275 湖北七姊妹山亚热带常绿落叶阔叶混交林的物种组成和群落结构
姚良锦 姚兰 易咏梅 艾训儒 冯广
刘峻城 林勇 黄伟 丁易 臧润国

研究报告

植物多样性

- 285 福建6个港湾浮游植物多样性及其与水系的关系
叶又茵 项鹏 王雨 林茂

动物多样性

- 294 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究
梁健超 丁志锋 张春兰 胡慧建 朵海瑞
唐虹
- 304 上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性
靳亚丽 李必成 耿龙 卜云

自然保护区

- 312 自然保护区物种多样性保护价值评价方法
郭子良 邢韶华 崔国发

综述

- 325 灵长类动物对植物种子的传播作用
陈远 王征 向左甫

生物编目

- 332 云南泸水高黎贡山高山生境的鸟兽多样性
高歌 王斌 何臣相 罗旭
- 340 蕨类植物PPG I系统与中国石松类和蕨类植物分类
张丽兵

封面: 高黎贡山拥有丰富的生物多样性。高歌等(见本期第332-339页)利用红外相机对高黎贡山泸水段高山生境中的鸟兽多样性和季节活动规律进行了研究。图示白尾梢虹雉(*Lophophorus sclateri*)雄鸟,是高黎贡山高山生境的代表物种,也是国家一级保护鸟类。(照片提供者:高歌)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 25 No. 3 March 2017

CONTENTS

Editorial

- 227 **Forest dynamics plot is a crosscutting research platform for biodiversity science**
Keping Ma

Special Feature: Biodiversity Monitoring

- 229 **On Chinese forest canopy biodiversity monitoring**
Hao Shen, Jianing Cai, Mengjiao Li, Qing Chen, Wanhui Ye, Zhengfeng Wang, Juyu Lian and Liang Song
- 237 **Overview of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON**
Zhishu Xiao, Xueyou Li, Zuofu Xiang, Ming Li, Xuelong Jiang and Libiao Zhang
- 246 **Monitoring and research of amphibians and reptiles diversity in key areas of China**
Cheng Li, Feng Xie, Jing Che and Jianping Jiang
- 255 **Species composition and community structure of the Yulongxueshan (Jade Dragon Snow Mountains) forest dynamics plot in the cold temperate spruce-fir forest, Southwest China**
Hua Huang, Zhifa Chen, Detuan Liu, Guoxing He, Ronghua He, Dezhu Li and Kun Xu
- 265 **Composition and spatio-temporal dynamics of litter fall in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China**
Yili Guo, Dongxing Li, Bin Wang, Yunlin He, Wusheng Xiang, Yuliang Jiang and Xiankun Li
- 275 **Species composition and community structure of a 6-ha subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest plot in the Qizimei Mountains, Hubei Province**
Liangjin Yao, Lan Yao, Yongmei Yi, Xunru Ai, Guang Feng, Juncheng Liu, Yong Lin, Wei Huang, Yi Ding and Runguo Zang

Original Papers

Plant Diversity

- 285 **Phytoplankton diversity and its relationship with currents in the six bays of Fujian**
Youyin Ye, Peng Xiang, Yu Wang and Mao Lin

Animal Diversity

- 294 **Bird diversity spatial distribution patterns and hotspots in Maixiu Area of Sanjiangyuan National Nature Reserve, Qinghai Province**
Jianchao Liang, Zhifeng Ding, Chunlan Zhang, Huijian Hu, Hairui Duo and Hong Tang
- 304 **Soil fauna community in different natural vegetation types of Dajinshan Island, Shanghai**
Yali Jin, Bicheng Li, Long Geng and Yun Bu

Protected Area

- 312 **A method for assessing species diversity conservation value of nature reserves**
Ziliang Guo, Shaohua Xing and Guofa Cui

Review

- 325 **Seed dispersal by primates**
Yuan Chen, Zheng Wang and Zuofu Xiang

Bioinventory

- 332 **Biodiversity of birds and mammals in alpine habitat of Mt. Gaoligong, Lushui County, Yunnan**
Ge Gao, Bin Wang, Chenxiang He and Xu Luo
- 340 **The PPG I classification and pteridophytes of China**
Libing Zhang

Cover Illustration: Gaoligong Mountains is known for the richest biodiversity. In this issue, Gao et al (see pages 332–339) monitored the biodiversity of mammals and birds in the alpine habitat of Mt. Gaoligong using infrared cameras. The picture shows a male Sclater's Monal (*Lophophorus sclateri*) which is listed as a first-category national protected species. (Provided by Ge Gao)

•编者按•

森林动态大样地是生物多样性科学综合研究平台

马克平*

(中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

Forest dynamics plot is a crosscutting research platform for biodiversity science

Keping Ma*

State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

近年来, 物种共存或群落构建机制研究取得明显进展, 成为群落生态学的标志性成果。大型森林动态样地途径为此提供了独特的研究平台。中国森林生物多样性监测网络(CForBio)自2004年开始建立以来, 在各方面的共同努力下快速发展, 是全球森林生物多样性研究最活跃的组成部分。已经建立的大型森林监测样地18个(附录1), 1–5 ha的辅助样地50多个, 比较好地代表了中国从寒温带到热带的地带性森林类型, 样地面积达到538.6 ha, 监测木本植物227.9万株, 隶属于1,737种。截至2017年2月底, 基于CForBio大样地网络, 已经发表论文370多篇(附录2), 其中SCI论文195篇, 在国内外同行中产生了非常积极的影响。大型森林动态样地已经从建立之初以植物群落生态学研究为主发展成多学科交叉的生物多样性科学综合研究平台。以古田山亚热带常绿阔叶林动态样地为例, 除24 ha主样地外, 还包括: (1)覆盖不同森林类型的13个1 ha辅助样地和27个处于不同演替阶段的30 m × 30 m的卫星样地; (2)将整个古田山国家级自然保护区分成1 km × 1 km的格子, 每个格子建立一个 20 m × 20 m的卫星样地, 同时布设一台红外相机(已连续监测近3年时间); (3)选择主样地和辅助样地的3,000多株胸径5 cm以上的树木布设生长环监测径级的年度变化; (4)通过无人机搭载的激光雷达(LiDAR)、高光谱和多光谱设备监测森林群落变化; (5)应用分子-组学方法开展植物和微生物多样性研究; (6)正在建设森林塔吊, 将覆盖1.3 ha林地。良好的综合研究平台促进

了物种共存机制研究的快速发展。

1 植物功能性状研究的新进展

由于取样难度大, 从植物功能性状角度研究森林群落构建机制多以物种水平的平均功能性状为依据(刘晓娟和马克平, 2015)。基于古田山森林动态样地59种822株树的生长环季节动态监测和12种个体功能性状数据, 通过构建包含种间竞争、生境过滤和功能分化的结构方程模型, 揭示了植物生长的差异是由发生在个体水平上的功能性状策略差异直接造成的, 而竞争和生境过滤则是间接地通过塑造不同的功能策略来影响生长动态(Liu et al, 2016)。该研究将个体水平的功能性状引入生长模型, 从更小的尺度揭示了形成群落季节性动态的根本原因。随着新一代测序技术的发展, 可以在没有参考基因组的情况下对植物的转录组进行快速测序、拼接和注释, 得到基因的序列和在特定环境下的基因表达量。基于此, 转录组方法被引入古田山亚热带常绿阔叶林物种共存机制的研究。Han等(2017)通过对同种和异种邻居幼苗以及同源基因等对目标幼苗的存活进行线性混合效应的拟合分析, 检测了同种和异种幼苗密度、同种和异种大树密度以及同源基因的相似性对古田山24 ha样地的85种木本植物幼苗存活的影响。结果表明与光相关的15个基因本体中有3个是与幼苗存活相关的。同时发现光的光谱组成(光质)在幼苗对光合作用的响应方面起重要作用, 使得具有相似光合作用能力的幼苗

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: kpma@ibcas.ac.cn

共存,反映了环境的过滤作用。该研究展示了转录组信息在群落构建研究中的应用前景。

2 微生物生态学研究起点高发展快

基于古田山大型森林样地的微生物生态学研究取得了重要进展。大型森林动态样地的特色在于胸径1 cm以上的木本植物都测定空间位置和径级大小,并且每隔5年全部复查一次。对于微生物而言,有些木本植物是其宿主,有些是其重要的生长环境。如此翔实的植物分布数据,对于微生物生态学研究是十分难得的。Gao等(2013)通过分析外生菌根菌与其宿主植物的关系,发现二者在宿主植物属级水平相关性最好,而非种级。说明外生菌根菌的专一性不是很强,但具有较强的偏好性。土壤真菌多样性在山脊和山谷不同,而且与植物多样性相关。在山脊,腐生菌和病原菌多样性与植物丰富度及土壤养分和湿度显著相关,在山谷,却与微地形和甜槠(*Castanopsis eyrei*)的胸高断面积相关。外生菌根菌多样性在山脊生境与甜槠的胸高断面积正相关,而在山谷生境则与全部木本植物的胸高断面积正相关(Gao et al, 2017)。随着森林演替的进展,外生菌根真菌群落构建机制发生变化。环境过滤在所有的演替阶段都是群落构建的重要影响因素,而扩散限制则只在老龄林检测到(Gao et al, 2015)。谱系关联性与丛枝菌根菌和植物形成的互惠共生网络相关。植物及其丛枝菌根菌共生体的谱系保守性是亚热带常绿阔叶林群落构建机制之一(Chen et al, 2017)。

3 近地面遥感与大样地数据结合具良好前景

近年来,无人机在生态学中的应用发展很快,为生态学研究由点到面的尺度拓展提供了有力支持。在鼎湖山森林动态样地,通过无人机搭载相机

拍摄高分辨率影像获取林冠参数(主要是林窗和林冠高度),将其与地面调查的大样地数据结合,更好地解析了森林植物多样性的空间分布格局(Zhang et al, 2016)。LiDAR、高光谱和多光谱等设备在森林动态样地及更大范围的应用,使得森林三维可视化与更多功能性状数据的自动获取成为可能,为森林群落构建机制研究展示了令人期待的光辉前景。

4 中国森林动态样地网络向海外拓展

中国科学院西双版纳热带植物园积极推动与泰国的合作,将中国的森林动态样地网络拓展到中南半岛,初步形成由10个大型森林样地组成的亚洲热带雨林动态样地网络,其中两个为亚高山常绿阔叶林和针叶林样地(附录3)。监测的木本植物约3,000种100万株。该区域网络弥补了中国森林生物多样性监测网络热带雨林代表性不充分的问题。

本期组织了生物多样性监测专题,包括6篇文章。有3篇文章介绍中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)的3个专项网的设计框架和科学基础,分别是林冠生物多样性监测(沈浩等, 2017)、兽类多样性监测(肖治术等, 2017)和两栖爬行动物监测(李成等, 2017)。两篇文章来自中国森林生物多样性监测网络,分别是关于玉龙雪山森林样地的物种组成和群落结构(黄华等, 2017),以及弄岗样地北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态特征(郭屹立等, 2017)。本专题的另外一篇文章是关于湖北七姊妹山亚热带常绿落叶阔叶混交林森林动态样地的物种组成和群落结构(丁易等, 2017)。6篇文章从不同角度展示了生物多样性监测与研究进展,其中4篇基于森林动态样地研究。

文中引用的文献见附录4(<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017113-4.pdf>)

附录 Supplementary Material

附录1 中国森林生物多样性监测网络样地信息汇总

Appendix 1 Forest dynamics plots of Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017113-1.pdf>

附录2 中国森林生物多样性监测网络发表论文目录

Appendix 2 Publication list of Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017113-2.pdf>

附录3 亚洲热带雨林动态样地网络

Appendix 3 Asia regional network for tropical rainforest dynamics plots
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017113-3.pdf>

附录4 参考文献(<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017113-4.pdf>)

附录1 中国森林生物多样性监测网络样地信息汇总
Appendix 1 Forest dynamics plots of Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio)

序号	样地名称	面积(ha)	纬度(N)	经度(E)	负责单位
1	大兴安岭兴安落叶松林样地	25	51.82°	122.99°	黑龙江省科学院自然与生态研究所
2	小兴安岭丰林阔叶红松林样地	30	48.08°	129.12°	东北林业大学
3	小兴安岭凉水典型阔叶红松林样地	9	47.18°	128.88°	东北林业大学
4	小兴安岭谷地云冷杉林样地	9	47.2°	128.85°	东北林业大学
5	穆棱东北红豆杉林样地	25	43.95°	130.07°	黑龙江省森林工程与环境研究所
6	长白山阔叶红松林样地	25	42.38°	128.08°	中国科学院沈阳应用生态研究所
7	东灵山暖温带落叶阔叶林样地	20	39.96°	115.43°	中国科学院植物研究所
8	宝天曼暖温带落叶阔叶林样地	25	33.49°	111.94°	中国科学院植物研究所
9	温带-亚热带过渡区秦岭落叶阔叶林样地	25	33.69°	107.82°	中国科学院武汉植物园
10	八大公山中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林样地	25	29.77°	110.09°	中国科学院武汉植物园
11	天童亚热带常绿阔叶林样地	20	29.8°	121.8°	华东师范大学
12	古田山亚热带常绿落叶林样地	24	29.25°	118.12°	中国科学院植物研究所
13	玉龙雪山寒温性云冷杉林样地	25	27.14°	100.23°	中国科学院昆明植物研究所
14	哀牢山亚热带常绿阔叶林样地	20	24.54°	101.03°	中国科学院西双版纳热带植物园
15	木论喀斯特常绿落叶阔叶混交林样地	25	25.13°	108.00°	中国科学亚热带农业生态研究所
16	鼎湖山亚热带常绿阔叶林样地	20	23.10°	112.32°	中国科学院华南植物园
17	弄岗喀斯特季节性雨林样地	15	22.43°	106.95°	中国科学院广西植物研究所
18	西双版纳热带雨林样地	20	21.61°	101.57°	中国科学院西双版纳热带植物园

马克平. 森林动态大样地是生物多样性科学综合研究平台. 生物多样性, 2017, 25 (3): 227–228.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2017113>

附录 2 中国森林生物多样性监测网络发表论文目录(2006–2016, 徐学红整理)

Appendix 2 Publication list of Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (2006–2016, Collected by Xu Xuehong)

- Anderson-Teixeira KJ, Davies SJ, Bennett AC, Gonzalez-Akre EB, Muller-Landau HC, Wright SJ, Salim KA, Zambrano AMA, Alonso A, Baltzer JL, Basset Y, Bourg NA, Broadbent EN, Brockelman WY, Bunyavejchewin S, Burslem DFRP, Butt N, Cao M, Cardenas D, Chuyong GB, Clay K, Cordell S, Dattaraja HS, Deng XB, Detto M, Du XJ, Duque A, Erikson DL, Ewango CEN, Fischer GA, Fletcher C, Foster RB, Giardina CP, Gilbert GS, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Hargrove WW, Hart TB, Hau BCH, He FL, Hoffman FM, Howe RW, Hubbell SP, Inman-Narahari FM, Jansen PA, Jiang MX, Johnson DJ, Kanzaki M, Kassim AR, Kenfack D, Kibet S, Kinnaird MF, Korte L, Kral K, Kumar J, Larson AJ, Li YD, Li XK, Liu SR, Lum SKY, Lutz JA, Ma KP, Maddalena DM, Makana JR, Malhi Y, Marthews T, Serudin RM, McMahon SM, McShea WJ, Memiaghe HR, Mi XC, Mizuno T, Morecroft M, Myers JA, Novotny V, Oliveira de AA, Ong PS, Orwig DA, Ostertag R, Ouden den J, Parker GG, Phillips RP, Sack L, Sainge MN, Sang WG, Sri-ngernyuang K, Sukumar R, Sun IF, Sungpalee W, Suresh HS, Tan S, Thomas SC, Thomas DW, Thompson J, Turner BL, Uriarte M, Valencia R, Vallejo MI, Vicentini A, Vrška T, Wang XH, Wang XG, Weiblen G, Wolf A, Xu H, Yap S, Zimmerman J (2014) CTFs-ForestGEO: a worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, 21, 528–549.
- Bai XJ, Brenes-Arguedas T, Ye J, Wang XG, Lin F, Yuan ZQ, Shi S, Xing DL, Hao ZQ (2014) Dynamics of two multi-stemmed understory shrubs in two temperate forests. *PLoS ONE*, 9, e98200.
- Bai XJ, Li BH, Zhang J, Wang LW, Yuan ZQ, Lin F, Hao ZQ (2010) Species composition, structure, and spatial distribution of shrubs in broad leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 1899–1960. (in Chinese with English abstract) [白雪娇, 李步杭, 张健, 王利伟, 原作强, 蔺菲, 郝占庆 (2010) 长白山阔叶红松林灌木物种组成、结构和空间分布. *应用生态学报*, 21, 1899–1960.]
- Bai XJ, Queenborough SA, Wang XG, Zhang J, Li BH, Yuan ZQ, Xing DL, Lin F, Ye J, Hao ZQ (2012) Effects of local biotic neighbors and habitat heterogeneity on tree and shrub seedling survival in an old-growth temperate forest. *Oecologia*, 170, 755–765.
- Bartlett MK, Zhang Y, Yang J, Kreidler N, Sun SW, Lin LX, Hu YH, Cao KF, Sack L (2016) Drought tolerance as a driver of tropical forest assembly: resolving spatial signatures for multiple processes. *Ecology*, 97, 503–514.
- Bin Y, Lian JY, Wang ZM, Ye WH, Cao HL (2011) Tree mortality and recruitment in a subtropical broadleaved monsoon forest in South China. *Journal of Tropical Forest Science*, 23, 57–66.
- Bin Y, Lin GJ, Li BH, Wu LF, Shen Y, Ye WH (2012) Seedling recruitment patterns in a 20 ha subtropical forest plot: hints for niche-based processes and negative density dependence. *European Journal of Forest Research*, 131, 453–461.
- Bin Y, Spence J, Wu LF, Li BH, Hao ZQ, Ye WH, He FL (2016) Species-habitat associations and demographic rates of forest trees. *Ecography*, 39, 9–16.
- Bin Y, Wang ZG, Wang ZM, Ye WH, Cao HL, Lian JY (2010) The effects of dispersal limitation and topographic heterogeneity on beta diversity and phylobetadiversity in a subtropical forest. *Plant Ecology*, 209, 237–256.
- Bin Y, Ye WH, Cao HL, Huang ZL, Lian JY (2011) Seedling distribution in a subtropical evergreen broad-leaved forest plot in the Dinghu Mountain. *Biodiversity Science*, 19, 127–133. (in Chinese with English abstract) [宾粤, 叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 练琚瑜 (2011) 鼎湖山亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地幼苗的分布. *生物多样性*, 19, 127–133.]
- Bin Y, Ye WH, Muller-Landau HC, Wu LF, Lian JY, Cao HL (2012) Unimodal tree size distributions possibly result from relatively strong conservatism in intermediate size classes. *PLoS ONE*, 7, e52596.
- Cáceres MD, Legendre P, Valencia R, Cao M, Chang LW, Chuyong G, Condit R, Hao ZQ, Hsieh CF, Hubbell S, Kenfack D, Ma KP, Mi XC, Noor MNS, Rahman KA, Ren HB, Su SH, Sun IF, Thomas DC, Ye WH, He FL (2012) The variation of tree beta diversity across a global network of forest plots. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1191–1202.
- Cai HY, Di XY, Chang SX, Jin GZ (2016) Stand density and species richness affect carbon storage and net primary productivity in early and late successional temperate forests differently. *Ecological Research*, 31, 525–533.
- Cai HY, Di XY, Chang SX, Wang CK, Shi BK, Geng PF, Jin GZ (2016) Carbon storage, net primary production, and net ecosystem production in four major temperate forest types in northeastern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 46, 143–156.
- Cai HY, Di XY, Jin GZ (2014) Carbon density and production in valley spruce-fir forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 2794–2802. (in Chinese with English abstract) [蔡慧颖, 邸雪颖, 金光泽 (2014) 小兴安岭谷地云冷杉林的碳密度与生产力. *应用生态学报*, 25, 2794–2802.]
- Cai HY, Di XY, Jin GZ (2015) Carbon density of coarse woody debris in a spruce-fir valley forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 8194–8201. (in Chinese with English abstract) [蔡慧颖, 邸雪颖, 金光泽 (2015) 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体碳密度特征. *生态学报*, 35, 8194–8201.]
- Cao K, Rao MD, Yu JZ, Liu XJ, Mi XC, Chen JH (2013) The phylogenetic signal of functional traits and their effects on community structure in an evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 21, 564–571. (in Chinese with English abstract) [曹科, 饶米德, 余建中, 刘晓娟, 米湘成, 陈建华 (2013) 古田山木本植物功能性状的系统发育信号及其对群落结构的

影响. 生物多样性, 21, 564–571.]

- Chen GK, Kéry M, Plattner M, Ma KP, Gardner B (2013) Imperfect detection is the rule rather than the exception in plant distribution studies. *Journal of Ecology*, 101, 183–191.
- Chen GK, Kéry M, Zhang JL, Ma KP (2009) Factors affecting detection probability in plant distribution studies. *Journal of Ecology*, 97, 1383–1389.
- Chen J, Rui YC, Zhou X, Ye WH, Liu W (2016) Determinants of the biodiversity patterns of ammonia-oxidizing archaea community in two contrasting forest stands. *Journal of Soil and Sediments*, 16, 878–888.
- Chen JL, Jin GZ, Zhao FX (2010) Litter decomposition and nutrient dynamics at different succession stages of typical mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2209–2216. (in Chinese with English abstract) [陈金玲, 金光泽, 赵凤霞 (2010) 小兴安岭典型阔叶红松林不同演替阶段凋落物分解及养分变化. *应用生态学报*, 21, 2209–2216.]
- Chen JY, Bi LZ, Song GH, Zhang W, Wang QB, Liu YY, Jin GZ (2016) Characteristics of woody debris in broadleaved-Korean pine forest plot in Fenglin National Nature Reserve in Xiaoxing'anling Mountains, China. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 40(6), 76–84. (in Chinese with English abstract) [陈镜园, 毕连柱, 宋国华, 张伟, 王全波, 刘妍妍, 金光泽 (2016) 小兴安岭丰林阔叶红松林木质物残体的贮量特征分析. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 40(6), 76–84.]
- Chen L, Mi XC, Comita L, Zhang LW, Ren HB, Ma KP (2010) Community-level consequences of density dependence and habitat association in a subtropical broad-leaved forest. *Ecology Letters*, 13, 695–704.
- Chen TB, Sung YH, Chan PLB, Meng YJ, Wan PH (2013) Influence of surface water availability on mammal distributions in Nonggang National Nature Reserve, Guangxi, China. *Zoological Research*, 34, 145–151. (in Chinese with English abstract) [陈天波, 宋亦希, 陈辈乐, 蒙渊君, 温柏豪 (2013) 利用红外线相机监测地表水对广西弄岗国家级自然保护区兽类分布的影响. *动物学研究*, 34, 145–151.]
- Chen XR, Chen YY, Luo ZR, Ding BY (2013) A 5-year mid-mountain subtropical evergreen broadleaved forest study in Baishanzu, east China. *Journal of Zhejiang A & F University*, 30, 821–829. [陈小荣, 陈圆圆, 骆争荣, 丁炳扬 (2013) 百山祖中山中亚热带常绿阔叶林群落 5 年动态特征. *浙江农林大学学报*, 30, 821–829.]
- Chen Y (2009) Detection effect of phylogenetic diversity on seedling mortality in an evergreen broad-leaved forest in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1084–1089. (in Chinese with English abstract) [陈英 (2009) 常绿阔叶林谱系多样性对幼苗存活率的影响. *植物生态学报*, 33, 1084–1089]
- Chen Y, Yuan ZL, Li PK, Cao RF, Jia HR, Ye YZ (2016) Effects of environment and space on species turnover of woody plants across multiple forest dynamic plots in East Asia. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1533.
- Chen Y, Yuan ZL, Ren SY, Wei BL, Jia HR, Ye YZ (2014) Correlation analysis of soil and species of different life forms in Baotianman Nature Reserve. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2367–2376. (in Chinese with English abstract) [陈云, 袁志良, 任思远, 韦博良, 贾宏汝, 叶永忠 (2014) 宝天曼自然保护区不同生活型物种与土壤相关性分析. *科学通报*, 59, 2367–2376.]
- Chen Z, Zhu H (2009) Investigation on the flora of herbaceous plants under the tropical rain forest of Xishuangbanna. *Journal of Northwest Forestry University*, 4(1), 11–15. (in Chinese with English abstract) [陈征, 朱华 (2009) 西双版纳热带雨林草本植物区系初步分析. *西北林学院学报*, 4(1), 11–15.]
- Cheng JJ, Mi XC, Ma KP, Zhang JT (2011) Responses of species–abundance distribution to varying sampling scales in a subtropical broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 19, 168–177. (in Chinese with English abstract) [程佳佳, 米湘成, 马克平, 张金屯 (2011) 亚热带常绿阔叶林群落物种多度分布格局对取样尺度的响应. *生物多样性*, 19, 168–177.]
- Cheng JJ, Mi XC, Zhang JT, Ma KP (2012) Separating the effect of mechanisms shaping species-abundance distributions at multiple scales in a subtropical forest. *Oikos*, 121, 236–244.
- Chisholm RA, Muller-Landau HC, Rahman KA, Bebbler DP, Bin Y, Bohlman SA, Bourg NA, Brinks J, Bunyavejchewin S, Butt N, Cao HL, Cao M, Cardenas D, Chang LW, Chiang JM, Chuyong G, Condit R, Dattaraja HS, Davies S, Duque A, Fletcher C, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Harrison RD, Howe R, Hsieh CF, Hubbell SP, Itoh A, Kenfack D, Kiratiprayoon S, Larson AJ, Lian JY, Lin DM, Liu HF, Lutz JA, Ma KP, Malhi Y, McMahon S, McShea W, Meegaskumbura M, Razman SM, Morecroft MD, Nytech CJ, Oliveira A, Parker GG, Pulla S, Punchi-Manage R, Romero-Saltos H, Sang WG, Schurman J, Su SH, Sukumar R, Sun IF, Suresh HS, Sylvester T, Thomas DC, Thomas S, Thompson J, Valencia R, Wolf A, Yap S, Ye WH, Yuan ZQ, Zimmerman JK (2013) Scale-dependent relationships between tree species richness and ecosystem function in forests. *Journal of Ecology*, 101, 1214–1224.
- Cui FX, Song JF, Zhu DG, Li JB, Qi ZY, Shan L, Ni HW (2016) Effects of oxalic acid on physiological-biochemical traits of cold temperate *Larix gmelinii* seedlings under soil nutrient deficiency. *International Conference on Biological Sciences and Technology (BST 2016)*, 331–336.
- Diao YF, Jin GZ, Tian SY, Liu YK, Liu YL, Han LD, Li YH (2016) Species composition and community structure of a *Taxus cuspidate* forest in Muling Nature Reserve of Heilongjiang Province, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(5), 26–36. (in Chinese with English abstract) [刁云飞, 金光泽, 田松岩, 刘延坤, 刘玉龙, 韩丽冬, 李云红 (2016) 黑龙江省穆棱东北红豆杉物种组成与群落结构. *林业科学*, 52(5), 26–36.]
- Ding J, Wu Q, Yan H, Zhang SR (2011) Effects of topographic variations and soil characteristics on plant functional traits in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 19, 158–167. (in Chinese with English abstract) [丁佳, 吴茜,

- 闫慧, 张守仁 (2011) 地形和土壤特性对亚热带常绿阔叶林内植物功能性状的影响. 生物多样性, 19, 158–167.]
- Dong L, Wang ZF, Zhu P, Ye WH (2010) Isolation and characterization of microsatellite loci in *Castanopsis fissa* in lower subtropical China. *Silvae Genetica*, 299–300.
- Du YJ, Ma KP (2012) Advancements and prospects in forest seed rain studies. *Biodiversity Science*, 20, 94–107. (in Chinese with English abstract) [杜彦君, 马克平 (2012) 森林种子雨研究进展与展望. 生物多样性, 20, 94–107.]
- Du YJ, Ma KP (2012) Temporal and spatial variation of seedfall in a broad-leaved evergreen forest in Gutianshan Nature Reserve of Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 717–728. (in Chinese with English abstract) [杜彦君, 马克平 (2012) 浙江古田山自然保护区常绿阔叶林种子雨的时空变异. 植物生态学报, 36, 717–728.]
- Du YJ, Mao LF, Queenborough SA, Freckleton RP, Chen B, Ma KP (2015) Phylogenetic constraints and trait correlates of flowering phenology in the angiosperm flora of China. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 928–938.
- Du YJ, Mi XC, Liu XJ, Ma KP (2012) The effects of ice storm on seed rain and seed limitation in an evergreen broad-leaved forest in east China. *Acta Oecologica*, 39, 87–93.
- Du YJ, Mi XC, Ma KP (2012) Comparison of seed rain and seed limitation between community understory and gaps in a subtropical evergreen forest. *Acta Oecologica*, 1–9.
- Du YJ, Mi XC, Ren HB, Liu XJ, Chen L, Fang T, Zhu Y, Ma KP (2009) Seed dispersal phenology and dispersal syndromes in a subtropical broad-leaved forest of China. *Forest Ecology and Management*, 258, 1147–1152.
- Fang S, Yuan ZQ, Lin F, Ye J, Hao ZQ, Wang XG (2014) Functional and phylogenetic structures of woody plants in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains, Jilin, China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2342–2348. (in Chinese with English abstract) [房帅, 原作强, 藺菲, 叶吉, 郝占庆, 王绪高 (2014) 长白山阔叶红松林木本植物系统发育与功能性状结构. 科学通报, 59, 2342–2348.]
- Fang XB, Qiu X, Zhou YL, Yang LY, Zhao Y, Zheng WH, Liu JS (2015) Acoustic characteristics of advertisement calls in *Babina adenopleura*. *Asian Herpetological Research*, 6, 220–228.
- Fang XF, Shen GC, Yang QS, Liu HM, Ma ZP, Deane DC, Wang XH. (2017) Habitat heterogeneity explains mosaics of evergreen and deciduous trees at local-scales in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Journal of Vegetation Science*, 28, 379–388.
- Fang XF, Yang QS, Liu HM, Ma ZP, Dong S, Cao Y, Yuan MJ, Fei XY, Sun XY, Wang XH (2016) Distribution of species abundance of evergreen and deciduous woody plants in the evergreen broad-leaved forests at Tiantong, Zhejiang. *Biodiversity Science*, 26, 629–638. (in Chinese with English abstract) [方晓峰, 杨庆松, 刘何铭, 马遵平, 董舒, 曹烨, 袁铭皎, 费希昉, 王希华 (2016) 天童常绿阔叶林中常绿与落叶物种的物种多度分布格局. 生物多样性, 26, 629–638.]
- Feng G, Mi XC, Böcher PK, Mao LF, Brody S, Cao M, Ye WH, Hao ZQ, Gong HD, Zhang YT, Zhao XH, Jin GZ, Ma KP, Svenning JC (2014) Relative roles of local disturbance, current climate and palaeoclimate in determining phylogenetic and functional diversity in Chinese forests. *Biogeosciences*, 11, 1361–1370.
- Feng G, Mi XC, Eiserhardt WL, Jin GZ, Sang WG, Lu ZJ, Wang XH, Li XK, Li BH, Sun IF, Ma KP, Svenning JC (2015) Assembly of forest communities across East Asia—insights from phylogenetic community structure and species pool scaling. *Scientific Reports*, 5, 9337.
- Feng G, Mi XC, Yan H, Li FY, Svenning JC, Ma KP (2016) CForBio: a network monitoring Chinese forest biodiversity. *Science Bulletin*, 61, 1163–1170.
- Feng G, Svenning JC, Mi XC, Jia Q, Rao MD, Ren HB, Bebbier DP, Ma KP (2014) Anthropogenic disturbance shapes phylogenetic and functional tree community structure in a subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 313, 188–198.
- Feng G, Zhang JL, Pei NC, Rao MD, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2012) Comparison of phylobetadiversity indices based on community data from Gutianshan forest plot. *Chinese Science Bulletin*, 57, 623–630.
- Gao C, Shi NN, Liu YX, Peay KG, Zheng Y, Ding Q, Mi XC, Ma KP, Wubet T, Buscot F, Guo LD (2013) Host plant genus-level diversity is the best predictor of ectomycorrhizal fungal diversity in a Chinese subtropical forest. *Molecular Ecology*, 22, 3403–3414.
- Gao C, Zhang Y, Shi NN, Zheng Y, Chen L, Wubet T, Bruehlheide H, Both S, Buscot F, Ding Q, Erfmeier A, Kühn P, Nadrowski K, Scholten T, Guo LD (2015) Community assembly of ectomycorrhizal fungi along a subtropical secondary forest succession. *New Phytologist*, 205, 771–785.
- Gao WF, Shi BK, Jin GZ (2016) Effect of simulated nitrogen deposition on soil respiration in the typical mixed broadleaved-Korean pine forest. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 40(1), 8–14. (in Chinese with English abstract) [高伟峰, 史宝库, 金光泽 (2016) 模拟氮沉降对典型阔叶红松林土壤呼吸的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 40(1), 8–14.]
- Geng PF, Jin GZ (2016) Spatial and temporal patterns of fine root biomass in four forest types in Xiaoxing'an Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 52, 140–148. (in Chinese with English abstract) [耿鹏飞, 金光泽 (2016) 小兴安岭 4 种森林类型细根生物量的时空格局. 林业科学, 52, 140–148.]
- Gong GQ, Chen JM, Mi XC, Chen SW, Fang T (2007) Habitat associations of wood species in the Gutianshan subtropical broad-leaved evergreen forest. *Science of Soil and Water Conservation*, 5(3), 79–83. (in Chinese with English abstract) [宫贵权, 程积民, 米湘成, 陈声文, 方腾 (2007) 古田山常绿阔叶林木本植物与生境的相关性. 中国水土保持科学, 5(3), 79–83.]
- Gong GQ, Huang ZL, Huang JX, Ye WH, Cao HL, Lian JY, Lin GJ (2011) How individual species structure the community in

- Dinghushan 20 ha forest plot? Ecology and Environmental Sciences, 20, 991–995. (in Chinese with English abstract) [宫贵权, 黄忠良, 黄建雄, 叶万辉, 曹洪麟, 练琚愉, 林国俊 (2011) 鼎湖山 20 公顷森林样地单个物种对群落的构建. 生态环境学报, 20, 991–995.]
- Guo Y, Wang YQ, Chen L, Mi XC, Ren HB, Chen SW, Chen JH (2016) Comparing tree seedling composition and distribution patterns under different sampling intensities in the 24 ha Gutianshan forest dynamics plot. Biodiversity Science, 24, 1093–1104. (in Chinese with English abstract) [郭印, 王云泉, 陈磊, 米湘成, 任海保, 陈声文, 陈建华 (2016) 不同取样强度下古田山木本植物幼苗组成及其分布格局比较. 生物多样性, 24, 1093–1104.]
- Guo YL, Lu JM, Franklin S, Wang QG, Xu YZ, Zhang KH, Bao DC, Qiao XJ, Huang HD, Lu ZJ, Jiang MX (2013) Spatial distribution of tree species in a species-rich subtropical mountain forest in central China. Canadian Journal of Forest Research, 43, 826–835.
- Guo YL, Lu ZJ, Wang QG, Xu YZ, Zhang KH, Bao DC, Qiao XJ, Huang HD, Jiang MX (2015) Detecting density dependence from spatial patterns in a heterogeneous subtropical forest of central China. Canadian Journal of Forest Research, 45, 710–720.
- Guo YL, Wang B, Mallik AU, Huang FZ, Xiang WS, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Li DX, He YL, Li XK (2016) Topographic species–habitat associations of tree species in a heterogeneous tropical karst seasonal rain forest, China. Journal of Plant Ecology, DOI: 10.1093/jpe/rtw057.
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang FZ, Li DX, Wen SJ, He YL, Li XK (2015) Density-dependent effects of tree species in a 15 ha seasonal rain forest plot in northern tropical karst in Nonggang, Guangxi, southern China. Chinese Science Bulletin, 60, 1602–1611. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄甫昭, 李冬兴, 文淑均, 何运林, 李先琨 (2015) 弄岗喀斯特季节性雨林 15 ha 样地密度制约效应分析. 科学通报, 60, 1602–1611.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang FZ, Wen SJ, Li DX, Li XK (2016) Spatial distribution and habitat-association of snags in the tropical karst seasonal rainforest of Southwest Guangxi, China. Guihaia, 36, 154–161. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄甫昭, 文淑均, 李冬兴, 李先琨 (2016) 桂西南喀斯特季节性雨林枯立木的空间格局及生境关联性分析. 广西植物, 36, 154–161.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang FZ, Wen SJ, Li DX, He YL, Li XK (2016) Responses of spatial pattern of woody plants' basal area to topographic factors in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. Biodiversity Science, 24, 30–39. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄甫昭, 文淑均, 李冬兴, 何运林, 李先琨 (2016) 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面面积分布格局及其对地形因子的响应. 生物多样性, 24, 30–39.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang YS, Huang FZ, Li DX, Li XK (2015) Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. Biodiversity Science, 23, 183–191. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄俞淞, 黄甫昭, 李冬兴, 李先琨 (2015) 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间点格局分析. 生物多样性, 23, 183–191.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Wen SJ, Huang FZ, Li DX, Li XK (2015) Sprouting characteristics of tree species in 15-hm² plot of northern tropical karst seasonal rain forest in Nonggang, Guangxi, southern China. Chinese Journal of Ecology, 34, 955–961. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 文淑均, 黄甫昭, 李冬兴, 李先琨 (2015) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林 15 hm² 样地木本植物萌生特征. 生态学杂志, 34, 955–961.]
- Han BC, Wei W, Mi XC, Ma KP (2016) De novo sequencing and comparative analysis of Schima superb seedlings to explore the response to drought stress. PLoS ONE, 11, e0166975.
- Han MG, Shi BK, Jin GZ (2016) Temporal variations of soil respiration at multiple timescales in a spruce-fir valley forest, northeastern China. Journal of Soils and Sediments, 16, 2385–2394.
- Hao ZQ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Yao XL (2008) Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: community composition and structure. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 32, 238–250. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳 (2008) 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构. 植物生态学报, 32, 238–250.]
- Hao ZQ, Zhang J, Li BH, Ye J, Wang XG, Yao XL (2008) Natural secondary poplar-birch forest in Changbai Mountain: species composition and community structure. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 32, 251–261. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 张健, 李步杭, 叶吉, 王绪高, 姚晓琳 (2008) 长白山次生杨桦林样地: 物种组成与群落结构. 植物生态学报, 32, 251–261.]
- Hao ZQ, Zhang J, Song B, Ye J, Li BH (2007) Vertical structure and spatial associations of dominant tree species in an old-growth temperate forest. Forest Ecology and Management, 252, 1–11.
- He J, Li XY, Gao DD, Zhu P, Wang ZF, Wang ZM, Ye WH, Cao HL (2013) Topographic effects on fine-scale spatial genetic structure in *Castanopsis chinensis* Hance (Fagaceae). Plant Species Biology, 28, 87–93.
- He ZY, Tang Y, Deng XB, Cao M (2013) Buttress trees in a 20-hectare tropical dipterocarp rainforest in Xishuangbanna, SW China. Journal of Plant Ecology, 6, 187–192.
- Hu XL, Chang-Yang CH, Mi XC, Du YJ, Chang ZY (2015) Influence of climate, phylogeny, and functional traits on flowering phenology in a subtropical evergreen broad-leaved forest, East China. Biodiversity Science, 23, 601–609. (in Chinese with English abstract) [胡小丽, 张杨家豪, 米湘成, 杜彦君, 常朝阳 (2015) 浙江古田山亚热带常绿阔叶林开花物候: 气候因

素、系统发育关系和功能性状的影响. 生物多样性, 23, 601–609.]

- Hu YH, Cao M, Lin LX (2010) Dynamics of tree species composition and community structure of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 949–957. (in Chinese with English abstract) [胡跃华, 曹敏, 林露湘 (2010) 西双版纳热带季节雨林的树种组成和群落结构动态. 生态学报, 30, 949–957.]
- Hu YH, Kitching LR, Lan GY, Zhang JL, Sha LQ, Cao M (2014) Size-class effect contributes to tree species assembly through influencing dispersal in tropical forests. *PLoS ONE*, 9, e108450.
- Hu YH, Lan GY, Sha LQ, Cao M, Tang Y, Li YD, Xu DP (2012) Strong neutral spatial effects shape tree species distributions across life stages at multiple scales. *PLoS ONE*, 7, e38247.
- Hu YH, Sha LQ, Blanchet FG, Zhang JL, Tang Y, Lan GY, Cao M (2012) Dominant species and dispersal limitation regulate tree species distributions in a 20-ha plot in Xishuangbanna, southwest China. *Oikos*, 952–960.
- Hu ZH, Qian HY, Yu MJ (2009) The niche of dominant species populations in *Castanopsis eyrei* forest in Gutian Mountain National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 3670–3677. (in Chinese with English abstract) [胡正华, 钱海源, 于明坚 (2009) 古田山国家级自然保护区甜槠林优势种种群生态位. 生态学报, 29, 3670–3677.]
- Huang FZ, Ding T, Li XK, Guo YL, Wang B, Xiang WS, Wen SJ, Li DX, He YL (2016) Species diversity of associations changing along with relative altitude in the northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang plot. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 4509–4517. (in Chinese with English abstract) [黄甫昭, 丁涛, 李先琨, 郭屹立, 王斌, 向悟生, 文淑均, 李冬兴, 何运林 (2016) 弄岗喀斯特季节性雨林不同群丛物种多样性随海拔的变化. 生态学报, 36, 4509–4517.]
- Huang FZ, Ding T, Li XK, Guo YL, Wang B, Xiang WS, Wen SJ, Li DX, He YL (2016) Species diversity for various associations along an altitudinal gradient in the karst seasonal rainforest in Nonggang. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 4509–4517. (in Chinese with English abstract) [黄甫昭, 丁涛, 李先琨, 郭屹立, 王斌, 向悟生, 文淑均, 李冬兴, 何运林 (2016) 弄岗喀斯特季节性雨林不同群丛物种多样性随海拔的变化. 生态学报, 26, 4509–4517.]
- Huang FZ, Wang B, Ding T, Xiang WS, Li XK, Zhou AP (2014) Numerical classification of associations in a northern tropical karst seasonal rain forest and the relationships of these associations with environmental factors. *Biodiversity Science*, 22, 157–166. (in Chinese with English abstract) [黄甫昭, 王斌, 丁涛, 向悟生, 李先琨, 周爱萍 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系. 生物多样性, 22, 157–166.]
- Huang GM, Hong L, Ye WH, Shen H, Cao HL, Wei X (2009) Isolation and characterization of polymorphic microsatellite loci in *Castanopsis chinensis* Hance (Fagaceae). *Conservation Genetics*, 10, 1069–1071.
- Huang JX, Mi XC, Ma KP (2011) A genome evolution-based framework for measures of originality for clades. *Journal of Theoretical Biology*, 276, 99–105.
- Huang JX, Ye WH, Lian JY, Cao HL (2014) Detecting the influence of phylogenetic structure, environmental factors and PCNM factors in population dynamics in a subtropical forest community in Guangdong, China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 3471–3478. (in Chinese with English abstract) [黄建雄, 叶万辉, 练琚愉, 曹洪麟 (2014) 谱系结构、环境因子及空间因子对群落动态变化的影响. 科学通报, 59, 3471–3478.]
- Huang JX, Zhang J, Shen Y, Lian JY, Cao HL, Ye WH, Wu LF, Bin Y (2014) Different relationships between temporal phylogenetic turnover and phylogenetic similarity and in two forests were detected by a new null model. *PLoS ONE*, 9, e95703.
- Huang JX, Zheng FY, Mi XC (2010) Influence of environmental factors on phylogenetic structure at multiple spatial scales in an evergreen broad-leaved forest of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 309–315. (in Chinese with English abstract) [黄建雄, 郑凤英, 米湘成 (2010) 不同尺度上环境因子对常绿阔叶林群落的谱系结构的影响. 植物生态学报, 34, 309–315.]
- Huang XC, Ci XQ, Conran JG, Li J (2015) Application of DNA barcodes in Asian tropical trees—a case study from Xishuangbanna Nature Reserve, Southwest China. *PLoS ONE*, 10, e0129295.
- Huang YS, Liu SY, Peng RC, Xu WB (2012) A newly recorded species of *Phaius* (Orchidaceae) from China. *Guihaia*, 32, 143–145. (in Chinese with English abstract) [黄俞淞, 刘晟源, 彭日成, 许为斌 (2012) 中国鹤顶兰属(兰科)一新记录种. 广西植物, 32, 143–145.]
- Huang YS, Lu MX, Yang JC, Xu WB (2011) *Didymoplexis vietnamica*, a newly recorded species of *Didymoplexis* (Orchidaceae) from China. *Guihaia*, 31, 578–580. (in Chinese with English abstract) [黄俞淞, 陆茂新, 杨金财, 许为斌 (2011) 中国双唇兰属(兰科)一新记录种——中越双唇兰. 广西植物, 31, 578–580.]
- Huang YS, Wu WH, Jiang RH, Liu SY, Liu Y, Li XK (2013) Primary study on species diversity of plant in Longgang National Nature Reserve of Guangxi. *Guihaia*, 33, 346–355. (in Chinese with English abstract) [黄俞淞, 吴望辉, 蒋日红, 刘晟源, 刘演, 李先琨 (2013) 广西弄岗国家级自然保护区植物物种多样性初步研究. 广西植物, 33, 346–355.]
- Jesse LR, Yang J, Zhang GC, Cao M, Tang Y, Timothy KH (2014) The role of functional traits and individual variation in the co-occurrence of *Ficus* species. *Ecology*, 95, 978–990.
- Jia HR, Chen Y, Yuan ZL, Ye YZ, Huang Q (2016) Effects of environmental and spatial heterogeneity on tree community assembly in Baotianman National Nature Reserve, Henan, China. *Polish Journal of Ecology*, 63, 175–183.
- Jiang YL, Bai KD, Guo YL, Wang B, Li DX, Li XK, Liu ZS (2016) Floral traits of woody plants and their habitat differentiations in a northern tropical karst forest. *Biodiversity Science*, 24, 148–156. (in Chinese with English abstract) [蒋裕良, 白坤栋, 郭屹立, 王斌, 李冬兴, 李先琨, 刘志尚 (2016) 北热带喀斯特森林木本植物花性状及其生境分异. 生物多样性, 24, 148–156.]

- Jiang ZH, Jin GZ (2010) Effects of selection cutting on diameter growth and vertical growth among major tree species in the mixed broadleaved-Korean pine forest. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 5843–5852. (in Chinese with English abstract) [蒋子涵, 金光泽 (2010) 择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响. *生态学报*, 30, 5843–5852.]
- Jiang ZH, Jin GZ (2010) Effects of selective cutting on intra- and interspecies competitions among major tree species in mixed broadleaved-Korean pine forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2179–2186. (in Chinese with English abstract) [蒋子涵, 金光泽 (2010) 择伐对阔叶红松林主要组成树种种内、种间竞争的影响. *应用生态学报*, 21, 2179–2186.]
- Jin GZ, Li R, Li ZH, Kim JH (2007) Spatial pattern of *Acer tegmentosum* in the mixed broadleaved-Korean pine forest of Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Korean Forest Society*, 96, 730–736.
- Jin GZ, Li ZH, Tang Y, Kim JH (2009) Spatial distribution pattern and association of crowns and saplings for major tree species in the mixed broadleaved-Korean pine forest of Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Korean Forest Society*, 98, 189–196.
- Jin GZ, Liu L, Liu ZL, Kim JH (2010) Spatial pattern of *Larix gmelini* in a Spruce-fir valley forest of Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Korean Forest Society*, 99, 720–725.
- Jin GZ, Liu YY, Liu S, Kim JH (2007) Effect of gaps on species diversity in the naturally regenerated mixed broadleaved-Korean pine forest of the Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Ecology and Field Biology*, 30, 325–330.
- Jin GZ, Liu ZL, Cai HY, Tai BY, Jiang XL, Liu YY (2009) Coarse woody debris (CWD) in a spruce-fir valley forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Natural Resources*, 24, 1256–1266. (in Chinese with English abstract) [金光泽, 刘志理, 蔡慧颖, 台秉洋, 蒋小兰, 刘妍妍 (2009) 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体的研究. *自然资源学报*, 24, 1256–1266.]
- Jin GZ, Tian YY, Zhao FX, Kim JH (2007) The pattern of natural regeneration by gap size in the broadleaved-Korean pine mixed forest of Xiaoxing'an mountains, China. *Journal of Korean Forest Society*, 96, 227–234.
- Jin GZ, Xie XC, Tian YY, Kim JH (2006) The pattern of seed rain in the broadleaved-Korean pine mixed forest of Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Korean Forest Society*, 95, 621–627.
- Jin GZ, Yang GY, Ma JZ, Li LJ, Xu ZG, Zhao X, Hong MJ (2010) Effect of anthropogenic cone-picking on seed bank and seedling bank of Korean pine in the major forest types in Lesser Hing'an Mountains. *Journal of Natural Resources*, 25, 1845–1854. (in Chinese with English abstract) [金光泽, 杨桂燕, 马建章, 李兰君, 徐正刚, 赵雪, 洪美静 (2010) 松果采摘对小兴安岭主要林型红松土壤种子库和幼苗库的影响. *自然资源学报*, 25, 1845–1854.]
- Jin GZ, Zhao FX, Liu L, Kim JH (2008) The production and spatial heterogeneity of litterfall in the mixed broadleaved-Korean pine forest of Xiaoxing'an Mountains, China. *Journal of Korean Forest Society*, 97, 165–170.
- Jin Y, Chen JH, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ (2015) Impacts of the 2008 ice storm on structure and composition of an evergreen broad-leaved forest community in eastern China. *Biodiversity Science*, 23, 610–618. (in Chinese with English abstract) [金毅, 陈建华, 米湘成, 任海保, 马克平, 于明坚 (2015) 古田山 24 ha 森林动态监测样地常绿阔叶林群落结构和组成动态: 探讨 2008 年冰雪灾害的影响. *生物多样性*, 23, 610–618.]
- Jin Y, Qian H, Yu MJ (2015) Phylogenetic structure of tree species across different life stages from seedlings to canopy trees in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *PLoS ONE*, 10, e0131162.
- Kang M, Chang SX, Yan ER, Wang XH (2014) Trait variability differs between leaf and wood tissues across ecological scales in subtropical forests. *Journal of Vegetation Science*, 25, 703–714.
- Kuang X, Xing DL, Zhang ZC, Song HJ, Wang YY, Fang S, Yuan ZQ, Ye J, Lin F, Wang XG, Hao ZQ (2014) Species composition and community structure of a spruce-fir forest and a larch forest on the northern slope of Changbai Mountains, northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 2149–2157. (in Chinese with English abstract) [匡旭, 邢丁亮, 张昭臣, 宋厚娟, 王芸芸, 房帅, 原作强, 叶吉, 蔺菲, 王绪高, 郝占庆 (2014) 长白山北坡云冷杉林和落叶松林物种组成与群落结构. *应用生态学报*, 25, 2149–2157.]
- Lai JS, Coomes DA, Du XJ, Hsieh CF, Sun IF, Chao WC, Mi XC, Ren HB, Wang XG, Hao ZQ, Ma KP (2013) A general combined model to describe tree-diameter distributions within subtropical and temperate forest communities. *Oikos*, 122, 1636–1642.
- Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2009) Species-habitat associations change in a subtropical forest of China. *Journal of Vegetation Science*, 20, 415–423.
- Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) Numerical classification of associations in subtropical evergreen broad-leaved forest based on multivariate regression trees—a case study of 24 hm² Gutianshan forest plot in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 761–769. (in Chinese with English abstract) [赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平 (2010) 基于多元回归树的常绿阔叶林群落数量分类——以古田山 24 公顷森林样地为例. *植物生态学报*, 34, 761–769.]
- Lai JS, Yang B, Lin DM, Kerkhoff AJ, Ma KP (2013) The allometry of coarse root biomass: log-transformed linear regression or nonlinear regression? *PLoS ONE*, 8, e77007.
- Lan GY, Getzin S, Wiegand T, Hu YH, Xie GS, Zhu H, Cao M (2012) Spatial distribution and interspecific associations of tree species in a tropical seasonal rain forest of China. *PLoS ONE*, 7(9), e46074.
- Lan GY, Hu YH, Cao M, Zhu H (2011) Topography related spatial distribution of dominant tree species in a tropical rain forest in China. *Forest Ecology and Management*, 262, 1507–1513.
- Lan GY, Hu YH, Cao M, Zhu H, Wang H, Zhou SS, Deng XB, Cui JY, Huang JG, Liu LY, Xu HL, Song JP, He YC (2008) Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: species compositions and spatial distribution patterns. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 287–298. (in Chinese with English abstract) [兰国玉, 胡跃华, 曹敏, 朱华, 王洪, 周仕

- 顺, 邓晓保, 崔景云, 黄建国, 刘林云, 许海龙, 宋军平, 何有才 (2008) 西双版纳热带森林动态监测样地——树种组成与空间分布格局. 植物生态学报, 32, 287–298.]
- Lan GY, Zhu H, Cao M (2012) Tree species diversity of a 20-ha plot in a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, southwest China. *Journal of Forest Research*, 17, 432–439.
- Lang AC, Härdtle W, Bruelheide H, Geibler C, Nadrowski K, Schuldt A, Yu MJ, Von Oheimb G (2010) Tree morphology responds to neighbourhood competition and slope in species-rich forests of subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 260, 1708–1715.
- Legendre P, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ, Sun IF, He FL (2009) Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90, 663–674.
- Li BH, Hao ZQ, Bin Y, Zhang J, Wang M (2012) Seed rain dynamics reveals strong dispersal limitation, different reproductive strategies and response to climate in a temperate forest in Northeast China. *Journal of Vegetation Science*, 23, 271–279.
- Li BH, Zhang J, Yao XL, Ye J, Wang XG, Hao ZQ (2008) Seasonal dynamics and spatial distribution patterns of herbs diversity in broadleaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 467–473. (in Chinese with English abstract) [李步杭, 张健, 姚晓琳, 叶吉, 王绪高, 郝占庆 (2008) 长白山阔叶红松林草本植物多样性季节动态及空间分布格局. 应用生态学报, 19, 467–473.]
- Li C, Li FR, Wang SL, Yue SF, Wang XP, Liu YB, Jin GZ (2010) Stumpage coordinate extraction based on large-scale aerial photographs. *Journal of Northeast Forestry University*, 138, 31–34. (in Chinese with English abstract) [李超, 李凤日, 王胜蕾, 岳树峰, 王绪鹏, 刘银帮, 金光泽 (2010) 基于大比例尺航片的单株立木坐标提取. 东北林业大学学报, 138, 31–34.]
- Li H, Wang XG, Liang C, Hao ZQ, Zhou LS, Ma S, Li XB, Yang S, Yao F, Jiang Y (2015) Aboveground-belowground biodiversity linkages differ in early and late successional temperate forests. *Scientific Reports*, 5, 122234.
- Li JB, Zhu DG, Cui FX, Ni HW (2015) Analysis on the relationship between soil organic carbon content and soil organic carbon in different leaves of larch in alpine region. *Territory & Natural Resources Study*, 5, 73–75. (in Chinese with English abstract) [李金博, 朱道光, 崔福星, 倪红伟 (2015) 寒温带落叶松林不同林型土壤有机碳含量及相关性分析. 国土与自然资源研究, 5, 73–75.]
- Li L, Chen JH, Ren HB, Mi XC, Yu MJ, Yang B (2010) Spatial patterns of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* in mid-subtropical broadleaved evergreen forest in Gutianshan National Nature Reserve, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 241–252. (in Chinese with English abstract) [李立, 陈建华, 任海保, 米湘成, 于明坚, 杨波 (2010) 古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析. 植物生态学报, 34, 241–252.]
- Li L, Liu HF, Bai F, Zhu Y, Li GQ, Li WC, Sang WG (2011) Species composition and community structure of four deciduous broadleaved secondary forest in Dongling Mountain. *Biodiversity Science*, 19, 243–251. (in Chinese with English abstract) [李亮, 刘海丰, 白帆, 祝燕, 李广起, 李文超, 桑卫国 (2011) 东灵山4种落叶阔叶次生林的物种组成与群落结构. 生物多样性, 19, 243–251.]
- Li L, Wei SG, Huang ZL, Ye WH, Cao HL (2008) Spatial patterns and interspecific associations of three canopy species at different life stages in a subtropical forest, China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50, 1140–1150.
- Li L, Wei SG, Huang ZL, Ye WH, Cao HL, Wang ZG, Lian JY, Sun IF, Ma KP, He FL (2009) Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China. *Oikos*, 118, 495–502.
- Li L, Ye WH, Wei SG, Lian JY, Huang ZL (2014) Spatial patterns and associations between species belonging to four genera of the Lauraceae family. *PLoS ONE*, 9, e111500.
- Li N, Xu WB, Lai JS, Yang B, Lin DM, Ma KP (2013) The coarse root biomass of eight common tree species in subtropical evergreen forest. *Chinese Science Bulletin*, 58, 329–335. (in Chinese with English abstract) [李宁, 徐武兵, 赖江山, 杨波, 林敦梅, 马克平 (2013) 亚热带常绿阔叶林8个常见树种粗根生物量. 科学通报, 58, 329–335.]
- Li QX, Wang XG, Jiang MX, Wu Y, Yang XL, Liao C, Liu F (2016) How environmental and vegetation factors affect spatial patterns of soil carbon and nitrogen in a subtropical mixed forest in Central China. *Journal of Soils and Sediments*, DOI 10.1007/s11368-016-1491-5.
- Li SQ, Wang GH, Shi ZP, Li XK, Xiao ZS, Zhou QH (2016) Infrared camera traps for monitoring mammal and bird diversity and activity pattern in limestone habitats. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 272–281. (in Chinese with English abstract) [李生强, 汪国海, 施泽攀, 李先琨, 肖治术, 周岐海 (2016) 红外相机技术监测喀斯特生兽类和鸟类多样性及活动节律. 兽类学报, 36, 272–281.]
- Li XL, Wang H, Zheng Z, Lin LX, Deng XB, Cao M (2009) Composition, spatial distribution and survival during the dry season of tree seedlings in a tropical forest in Xishuangbanna, SW China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 658–671. (in Chinese with English abstract) [李晓亮, 王洪, 郑征, 林露湘, 邓晓保, 曹敏 (2009) 西双版纳热带森林树种幼苗的组成、空间分布和旱季存活. 植物生态学报, 33, 658–671.]
- Li XP, Chang SX, Liu JT, Zheng ZM, Wang XH (2017) Topography-soil relationships in a hilly evergreen broadleaf forest in subtropical China. *Journal of Soils & Sediments*, 17, 1101–1115.
- Lian JY, Chen C, Huang ZL, Cao HL, Ye WH (2015) Community composition and stand age in a subtropical forest, southern China. *Biodiversity Science*, 23, 174–182. (in Chinese with English abstract) [练琚愉, 陈灿, 黄忠良, 曹洪麟, 叶万辉 (2015) 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林不同成熟度群落特征比较. 生物多样性, 23, 174–182.]

- Lin DM, Anderson-Teixeira KJ, Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2016) Traits of dominant tree species predict local scale variation in forest aboveground and topsoil carbon stocks. *Plant and Soil*, 409, 435–446.
- Lin DM, Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2013) Spatial variation in community structure of a subtropical evergreen broad-leaved forest: implications for sampling design. *Chinese Science Bulletin*, 58, 1181–1186.
- Lin DM, Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2013) Spatial variation in community structure of a subtropical evergreen broad-leaved forest: implications for sampling design. *Chinese Science Bulletin*, 58, 69–74. (in Chinese, English vision: , 58, 1181–1186.
- Lin DM, Lai JS, Muller-Landau HC, Mi XC, Ma KP (2012) Topographic variation in aboveground biomass in a subtropical evergreen broad-leaved forest in China. *PLoS ONE*, 7, e48244.
- Lin DM, Lai JS, Yang B, Song P, Li N, Ren HB, Ma KP (2015) Forest biomass recovery after different anthropogenic disturbances: relative importance of changes in stand structure and wood density. *European Journal of Forest Research*, 134, 769–780.
- Lin F, Comita L, Wang XG, Bai XJ, Yuan ZQ, Xing DL, Hao ZQ (2014) The contribution of understory light availability and biotic neighborhood to seedling survival in secondary versus old-growth temperate forest. *Plant Ecology*, 215, 795–807.
- Lin GJ, Huang ZL, Zhu L, Ouyang XJ (2010) Beta diversity of forest community on Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 4875–4880. (in Chinese with English abstract) [林国俊, 黄忠良, 竺琳, 欧阳学军 (2010) 鼎湖山森林群落 β 多样性. *生态学报*, 30, 4875–4880.]
- Lin GJ, Stralberg D, Gong GQ, Huang ZL, Ye WH, Wu LF (2013) Separating the effects of environment and space on tree species distribution: from population to community. *PLoS ONE*, 8, e56171.
- Lin LX, Comita L, Zheng Z, Cao M (2012) Seasonal differentiation in density-dependent seedling survival in a tropical rainforest. *Journal of Ecology*, 100, 905–914.
- Lin YW, Jin GZ (2016) Effects of root resectioning on soil microbial biomass in six forest types in the Xiaoxing'an Mountains during freezing-thawing cycles. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 6159–6169. (in Chinese with English abstract) [林尤伟, 金光泽 (2016) 冻融期去根处理对小兴安岭 6 种林型土壤微生物量的影响. *生态学报*, 36, 6159–6169.]
- Liu C, Liu YK, Jin GZ (2014) Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 451–459. (in Chinese with English abstract) [刘纯, 刘延坤, 金光泽 (2014) 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征. *生态学报*, 34, 451–459.]
- Liu HB, Wang QG, Lu JM, Xu YZ, Lu ZJ, Qiao XJ, Bao DC, Guo YL, Meng HJ, Jiang MX (2014) Root-sprouting ability in an evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest. *Chinese Science Bulletin*, 59, 3491–3498. (in Chinese with English abstract) [刘海波, 王庆刚, 路俊盟, 徐耀粘, 卢志军, 乔秀娟, 鲍大川, 郭屹立, 孟红杰, 江明喜 (2014) 八大公山常绿落叶阔叶混交林根萌能力. *科学通报*, 59, 3491–3498.]
- Liu HF, Li L, Sang WG (2011) Species composition and community structure of the Donglingshan forest dynamic plot in a warm temperate deciduous broad-leaved secondary forest, China. *Biodiversity Science*, 19, 232–242. (in Chinese with English abstract) [刘海丰, 李亮, 桑卫国 (2011) 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地:物种组成与群落结构. *生物多样性*, 19, 232–242.]
- Liu HF, Sang WG, Xue DY (2013) Topographical habitat variability of dominant species populations in a warm temperate forest. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1–7. (in Chinese with English abstract) [刘海丰, 桑卫国, 薛达元 (2013) 暖温带森林优势种群的地形生境变异性. *生态学杂志*, 32, 1–7.]
- Liu HF, Xue DY, Sang WG (2012) Effect of topographic factors on the relationship between species richness and aboveground biomass in a warm temperate forest. *Ecology and Environmental Sciences*, 21, 1403–1407. (in Chinese with English abstract) [刘海丰, 薛达元, 桑卫国 (2012) 地形因子对暖温带森林群落物种丰富度-地上生物量关系的影响. *生态环境学报*, 21, 1403–1407.]
- Liu HF, Xue DY, Sang WG (2014) Species diffusion and niche differentiation of the warm temperate deciduous broad-leaved forest in its functional development process. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2359–2366. (in Chinese with English abstract) [刘海丰, 薛达元, 桑卫国 (2014) 暖温带森林功能发育过程中的物种扩散和生态位分化. *科学通报*, 59, 2359–2366.]
- Liu HM, Shen GC, Ma ZP, Yang QS, Xia JY, Fang XF, Wang XH (2016) Conspecific leaf litter-mediated effect of conspecific adult neighborhood on early-stage seedling survival in a subtropical forest. *Scientific Reports*, 6, 37830.
- Liu HM, Yang QS, Fang XF, Ma ZP, Shen GC, Zhang ZG, Wang ZH, Wang XH (2015) Influences on gap species richness in a subtropical evergreen broadleaved forest. *Biodiversity Science*, 23, 149–156. (in Chinese with English abstract) [刘何铭, 杨庆松, 方晓峰, 马遵平, 沈国春, 张志国, 王樟华, 王希华 (2015) 亚热带常绿阔叶林林窗物种丰富度的影响因素. *生物多样性*, 23, 149–156.]
- Liu JC, Chen JL, Jin GZ (2014) Response of soil organic carbon and nutrients to simulated nitrogen deposition in typical mixed broadleaved-Korean pine forest. *Bulletin of Botanical Research*, 34, 121–130. (in Chinese with English abstract) [刘建才, 陈金玲, 金光泽 (2014) 模拟氮沉降对典型阔叶红松林土壤有机碳和养分的影响. *植物研究*, 34, 121–130.]
- Liu JJ, Tan YH, Ferry SJW (2014) Topography related habitat associations of tree species traits, composition and diversity in a Chinese tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 330, 75–81.
- Liu JY, Zheng Z (2012) Abundance and distribution pattern of tree cavity in tropical forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 271–275. (in Chinese with English abstract) [刘俊雁, 郑征 (2012) 西双版纳热带森林树洞丰度及其分配特点. *生态学杂志*, 31, 271–275.]

- Liu L, Wang ZF, Li QM, Ye WH, Cao HL, Wang ZM (2013) Isolation and characterization of microsatellite markers in *Beilschmiedia roxburghiana* (Lauraceae). *Applications in Plant Sciences*, 1, 1200549.
- Liu Q, Cai HY, Jin GZ (2013) Effects of selective cutting on the carbon density and net primary productivity of a mixed broadleaved-Korean pine forest in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 2709–2716. (in Chinese with English abstract) [刘琦, 蔡慧颖, 金光泽 (2013) 择伐对阔叶红松林碳密度和净初级生产力的影响. *应用生态学报*, 24, 2709–2716.]
- Liu S, Jin GZ (2008) Spatiotemporal dynamics of seed rain in a broadleaved-Korean pine mixed forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 5731–5740. (in Chinese with English abstract) [刘双, 金光泽 (2008) 小兴安岭阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林种子雨的时空动态. *生态学报*, 28, 5731–5740.]
- Liu WP, Cao HL, Liu W, Lian JY, Wu LF (2011) Study on diversity of monsoon evergreen broad leaved forest in different kinds of habitat in Dinghushan. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39, 16159–16163. (in Chinese with English abstract) [刘文平, 曹洪麟, 刘卫, 练琚愉, 吴林芳 (2011) 鼎湖山季风常绿阔叶林不同生境物种多样性研究. *安徽农业科学*, 39, 16159–16163.]
- Liu XJ, Ma KP (2015) Plant functional traits—concepts, applications and future directions. *Scientia Sinica Vitae*, 45, 325–339. (in Chinese with English abstract) [刘晓娟, 马克平 (2015) 植物功能性状研究. *中国科学: 生命科学*, 45, 325–339.]
- Liu XJ, Ren SY, Li LX, Ye YZ, Yuan ZL, Wang T (2016) Detecting density dependence on tree survival in a deciduous broadleaved forest in Baotianman National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 26, 639–648. (in Chinese with English abstract) [刘晓静, 任思远, 李鹿鑫, 叶永忠, 袁志良, 王婷 (2016) 宝天曼国家级自然保护区落叶阔叶林密度制约效应对树木存活的影响. *生物多样性*, 26, 639–648.]
- Liu XJ, Swenson NG, Lin DM, Mi XC, Umana MN, Schmid B, Ma KP (2016) Linking individual-level functional traits to tree growth in a subtropical forest. *Ecology*, 97, 2396–2405.
- Liu XJ, Swenson NG, Wright SJ, Zhang LW, Song K, Du YJ, Zhang JL, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2012) Covariation in plant functional traits and soil fertility within two species-rich forests. *PLoS ONE*, 7, e34767.
- Liu XJ, Swenson NG, Zhang JL, Ma KP (2013) The environment and space, not phylogeny, determine trait dispersion in a subtropical forest. *Functional Ecology*, 27, 264–272.
- Liu YY, Jin GZ (2009) Influence of topography on coarse woody debris in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1398–1407. (in Chinese with English abstract) [刘妍妍, 金光泽 (2009) 地形对小兴安岭阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林粗木残质体分布的影响. *生态学报*, 29, 1398–1407.]
- Liu YY, Jin GZ (2010) Character of coarse woody debris in a mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(4), 8–14. (in Chinese with English abstract) [刘妍妍, 金光泽 (2010) 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体基础特征. *林业科学*, 46(4), 8–14.]
- Liu YY, Jin GZ (2010) Spatial point pattern analysis for coarse woody debris in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 6072–6081. (in Chinese with English abstract) [刘妍妍, 金光泽 (2010) 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析. *生态学报*, 30, 6072–6081.]
- Liu YY, Jin GZ, Li FR (2014) Influence of forest gaps on seedling establishment in a mixed broadleaved-Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest in Xiao Hinggan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2396–2406. (in Chinese with English abstract) [刘妍妍, 金光泽, 李凤日 (2014) 典型阔叶红松林林隙对幼苗建立的影响. *科学通报*, 59, 2396–2406.]
- Liu YY, Jin GZ, Li R (2010) Storage characteristics of coarse woody debris in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, China. *World Forestry Research*, 23(9), 24–30. (in Chinese with English abstract) [刘妍妍, 金光泽, 黎如 (2010) 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体的贮量特征. *世界林业研究*, 23(9), 24–30.]
- Liu YY, Li FR, Jin GZ (2014) Spatial patterns and associations of four species in an old-growth temperate forest. *Journal of Plant Interactions*, 9, 745–753.
- Liu ZL, Chen JM, Jin GZ, Qi YJ (2015) Estimating seasonal variations of leaf area index using litterfall collection and optical methods in four mixed evergreen-deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209, 36–48.
- Liu ZL, Jin GZ (2012) Estimation of leaf area index of three forest types in Xiaoxing'an Mountains of northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 2437–2444. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2012) 小兴安岭三种林型叶面积指数的估测. *应用生态学报*, 23, 2437–2444.]
- Liu ZL, Jin GZ (2013) Estimation of leaf area index of secondary *Betula platyphylla* forest in Xiaoxing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 2505–2513. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2013) 小兴安岭白桦次生林叶面积指数的估测. *生态学报*, 33, 2505–2513.]
- Liu ZL, Jin GZ (2014) Estimation of seasonal changes in leaf area index based on optical methods in spruce-fir valley forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3420–3428. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2014) 基于光学仪器法测定谷地云冷杉林叶面积指数的季节变化. *应用生态学报*, 25, 3420–3428.]
- Liu ZL, Jin GZ (2015) Using litter collection and tree data to model leaf area index in the mixed broadleaved-Korean pine forest in the Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3190–3198. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2015) 利用凋落物法和林木因子模拟小兴安岭阔叶红松林叶面积指数. *生态学报*, 35, 3190–3198.]

- Liu ZL, Jin GZ (2016) Bias analysis of seasonal changes of leaf area index derived from optical methods. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(9), 11–21. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2016) 光学仪器法测定叶面积指数季节变化的误差分析. *林业科学*, 52(9), 11–21.]
- Liu ZL, Jin GZ, Chen JM, Qi YJ (2015) Evaluating optical measurements of leaf area index against litter collection in a mixed broadleaved-Korean pine forest in China. *Trees: Structure and Function*, 29, 59–73.
- Liu ZL, Jin GZ, Qi YJ (2012) Estimate of leaf area index in an old-growth mixed broadleaved-Korean pine forest in northeastern China. *PLoS ONE*, 7, e32155.
- Liu ZL, Jin GZ, Zhou M (2014) Measuring seasonal dynamics of leaf area index in a mixed conifer-broadleaved forest with direct and indirect methods. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 843–856. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽, 周明 (2014) 利用直接法和间接法测定针阔混交林叶面积指数的季节动态. *植物生态学报*, 38, 843–856.]
- Liu ZL, Jin GZ, Zhou M (2016) Evaluation and correction of optically derived leaf area index in different temperate forests. *iForest: Biogeosciences and Forestry*, 9, 55–62.
- Liu ZL, Qi YJ, Jin GZ (2013) Seasonality and spatial pattern of leaf area index of a spruce-fir forest at the valley in Xiaoxing'an Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(8), 58–64. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 戚玉娇, 金光泽 (2013) 小兴安岭谷地云冷杉林叶面积指数的季节动态及空间格局. *林业科学*, 49(8), 58–64.]
- Liu ZL, Wang CK, Chen JM, Wang XC, Jin GZ (2015) Empirical models for tracing seasonal changes in leaf area index in deciduous broadleaf forests by digital hemispherical photography. *Forest Ecology and Management*, 351, 66–77.
- Liu ZL, Wang XC, Chen JM, Wang CK, Jin GZ (2015) On improving the accuracy of digital hemispherical photography measurements of seasonal leaf area index variation in deciduous broadleaf forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 721–731.
- Lu JM, Johnson DJ, Qiao XJ, Lu ZJ, Wang QG, Jiang MX (2015) Density dependence and habitat preference shape seedling survival in a subtropical forest in central China. *Journal of Plant Ecology*, 8, 568–577.
- Lu P, Jin Y, Chen JH, Li MH, Yu MJ (2013) Influences of geographical distance and topographic difference on β diversity of two large-scale forest dynamics plots. *Biodiversity Science*, 21, 554–563. (in Chinese with English abstract) [卢品, 金毅, 陈建华, 李铭红, 于明坚 (2013) 地理距离和地形差异对两个大型森林动态样地 β 多样性的影响. *生物多样性*, 21, 554–563.]
- Lu ZJ, Bao DC, Guo YL, Lu JM, Wang QG, He D, Zhang KH, Xu YZ, Liu HB, Meng HJ, Huang HD, Wei XZ, Liao JX, Qiao XJ, Jiang MX, Gu ZR, Liao CL (2013) Community composition and structure of Badagongshan (BDGS) Forest Dynamics Plot in a mid-subtropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest, Central China. *Plant Science Journal*, 31, 336–344. (in Chinese with English abstract) [卢志军, 鲍大川, 郭屹立, 路俊盟, 王庆刚, 何东, 张奎汉, 徐耀粘, 刘海波, 孟红杰, 黄汉东, 魏新增, 廖建雄, 乔秀娟, 江明喜, 谷志容, 廖春林 (2013) 八大公山亚热带山地常绿阔叶混交林物种组成与结构. *植物科学学报*, 31, 336–344.]
- Lu ZJ, Liu FL, Wu H, Jiang M (2015) Species composition, size class, and spatial patterns of snags in the Badagongshan (BDGS) mixed evergreen and deciduous broad-leaved forest in central China. *Biodiversity Science*, 23, 167–173. (in Chinese with English abstract) [卢志军, 刘福玲, 吴浩, 江明喜 (2015) 八大公山常绿阔叶混交林枯立木物种组成、大小级与分布格局. *生物多样性*, 23, 167–173.]
- Luo ZR, Mi XC, Chen XR, Ye ZL, Ding BY (2012) Density dependence is not very prevalent in a heterogeneous subtropical forest. *Oikos*, 121, 1239–1250.
- Luo ZR, Yu MJ, Chen DL, Wu YG, Ding BY (2012) Spatial associations of tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Journal of Plant Ecology*, 5, 346–355.
- Ma J, Wu LF, Xiao W, Ye WH, Cao HL, Shen H (2015) Habitat adaptation of two dominant tree species in a subtropical monsoon forest: leaf functional traits and hydraulic properties. *Guihaia*, 35, 261–268. (in Chinese with English abstract) [马金, 吴林芳, 韦霄, 叶万辉, 曹洪麟, 沈浩 (2015) 鼎湖山季风常绿阔叶林两种优势树种的生境适应研究: 叶片功能性状和水力结构特征. *广西植物*, 35, 261–268.]
- Ma L, Chen C, Shen Y, Wu LF, Huang ZL, Cao HL (2014) Determinants of tree survival at local-scale in a subtropical forest. *Ecological Research*, 29, 69–80.
- Ma L, Huang MC, Shen Y, Cao HL, Wu LF, Ye WH, Lin GJ, Wang ZM (2015) Species diversity and community structure in forest fragments of Guangzhou, south China. *Journal of Tropical Forest Science*, 27, 148–157.
- Ma L, Lian JY, Lin GJ, Cao HL, Huang ZL, Guan DS (2016) Forest dynamics and its driving forces of sub-tropical forest in South China. *Scientific Reports*, 6, 22561.
- Man XX, Mi XC, Ma KP (2011) Effects of an ice storm on community structure of an evergreen broadleaved forest in Gutianshan National Nature Reserve, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 19, 197–205. (in Chinese with English abstract) [曼兴兴, 米湘成, 马克平 (2011) 雪灾对古田山常绿阔叶林群落结构的影响. *生物多样性*, 19, 197–205.]
- Mao HR, Chen JL, Jin GZ (2016) Effects of nitrogen addition on litter decomposition and nutrient release in typical broadleaf-Korean pine mixed forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(3), 21–31. (in Chinese with English abstract) [毛宏蕊, 陈金玲, 金光泽 (2016) 氮添加对典型阔叶红松林凋落叶分解及养分释放的影响. *北京林业大学学报*, 38(3), 21–31.]
- Mi XC, Bao L, Chen JH, Ma KP (2014) Point process models, the dimensions of biodiversity and the importance of small-scale

- biotic interactions. *Journal of Plant Ecology*, 7, 126–133.
- Mi XC, Swenson NG, Jia Q, Rao MD, Feng G, Ren HB, Bebbier DP, Ma KP (2016) Stochastic assembly in a subtropical forest chronosequence: evidence from contrasting changes of species, phylogenetic and functional dissimilarity over succession. *Scientific Reports*, 6, 32596.
- Mi XC, Swenson NG, Valencia R, Kress J, Erickson DL, Pérez ÁJ, Ren HB, Su SH, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Ye WH, Cao M, Suresh, Dattaraja HS, Sukumar R, Ma KP (2012) The contribution of rare species to community phylogenetic diversity across a global network of forest plots. *The American Naturalist*, 180, E17–E30.
- Mo XX, Shi LL, Zhang YJ, Zhu H, Slik JWF (2013) Change in phylogenetic community structure during succession of traditionally managed tropical rainforest in Southwest China. *PLoS ONE*, 8, e71464.
- Ning YJ, Chen SP, Qian HY, Ren HB, Bebbier D, Chen JH (2013) Diurnal and seasonal patterns of soil respiration in subtropical evergreen broad-leaved forests with different degrees of human disturbance in Gutianshan, Zhejiang Province. *Chinese Science Bulletin*, 58, 3839–3848. (in Chinese with English abstract) [宁亚军, 陈世莘, 钱海源, 任海保, Bebbier D, 陈建华 (2013) 浙江古田山亚热带常绿阔叶林不同干扰强度下土壤呼吸的日动态与季节变化. *科学通报*, 58, 3839–3848.]
- Niu HY, Li XY, Ye WH, Wang ZF, Cao HL, Wang ZM (2012) Isolation and characterization of 36 polymorphic microsatellite markers in *Schima superba* (Theaceae). *American Journal of Botany*, e123–e126.
- Niu HY, Wang ZF, Lian JY, Ye WH, Shen H (2011) New progress in community assembly: community phylogenetic structure combining evolution and ecology. *Biodiversity Science*, 19, 275–283. (in Chinese with English abstract) [牛红玉, 王峥嵘, 练据愉, 叶万辉, 沈浩 (2011) 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. *生物多样性*, 19, 275–283.]
- Niu HY, Ye WH, Wang ZF, Chen Y, Cao HL, Wu LF, Wang ZM (2013) Development and characterization of 16 new polymorphic microsatellite loci for *Schima superba* (Theaceae). *Silvae Genetica*, 62, 124–127.
- Niu XM, Shi S, Wang ZF, Ye WH, Hao ZQ (2014) Spatial autocorrelation of genetic structure of *Prunus padus* population in broadleaved Korean pine forest of Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 305–310. (in Chinese with English abstract) [牛小敏, 师帅, 王峥嵘, 叶万辉, 郝占庆 (2014) 长白山阔叶红松林稠李居群遗传结构的时空自相关分析. *应用生态学报*, 25, 305–310.]
- Pan X, Zhou RF, Gu SS, Xia JT, Wang DD, Ding BY (2013) Structure and distribution pattern of *Cyclobalanopsis multinervis* population in an evergreen broad-leaved forest in Baishanzu. *Subtropical Plant Science*, 42, 227–232. (in Chinese with English abstract) [潘霞, 周荣飞, 顾莎莎, 夏家天, 王丹丹, 丁炳扬 (2013) 百山祖北坡常绿阔叶林多脉青冈种群结构和分布格局. *亚热带植物科学*, 42, 227–232.]
- Pei NC, Lian JY, Erickson DL, Swenson NG, Kress WJ, Ye WH, Ge XJ (2011) Exploring tree-habitat associations in a Chinese subtropical forest plot using a molecular phylogeny generated from DNA barcode Loci. *PLoS ONE*, 6, e21273.
- Pei NC, Zhang JL, Mi XC, Ge XJ (2011) Plant DNA barcodes promote the development of phylogenetic community ecology. *Biodiversity Science*, 19, 284–294. (in Chinese with English abstract) [裴男才, 张金龙, 米湘成, 葛学军 (2011) 植物 DNA 条形码促进系统发育群落生态学发展. *生物多样性*, 19, 284–294.]
- Peng GQ, Guo YL, Wei SJ, Chen HL, He YL, Tang SQ (2016) Age structure and spatial pattern of *Camellia flavida* in Nonggang. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 34(3), 138–143. (in Chinese with English abstract) [彭国清, 郭屹立, 韦素娟, 陈海玲, 何运林, 唐绍清 (2016) 弄岗淡黄金花茶种群年龄结构与空间分布格局. *广西师范大学学报 (自然科学版)*, 34(3), 138–143.]
- Piao TF, Comita LS, Jin GZ, Kim JH (2013) Density dependence across multiple life stages in a temperate old-growth forest of northeast China. *Oecologia*, 172, 207–217.
- Qi YJ, Jin GZ, Liu ZL (2013) Optical and litter collection methods for measuring leaf area index in an old-growth temperate forest in northeastern China. *Journal of Forest Research*, 18, 430–439.
- Qi YJ, Li FR, Liu ZL, Jin GZ (2014) Impact of understorey on overstorey leaf area index estimation from optical remote sensing in five forest types in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198/199, 72–80.
- Qian H, Hao ZQ, Zhang J (2014) Phylogenetic structure and phylogenetic diversity of angiosperm assemblages in forests along an elevational gradient in Changbaishan, China. *Journal of Plant Ecology*, 7, 154–165.
- Qiao XJ, Li QX, Jiang QH, Lu JM, Franklin S, Tang ZY, Wang QG, Zhang JX, Lu ZJ, Bao DC, Guo YL, Liu HB, Xu YZ, Jiang MX (2015) Beta diversity determinants in Badagongshan, a subtropical forest in central China. *Scientific Reports*, 5, 17043.
- Rao MD, Feng G, Zhang JL, Mi XC, Chen JH (2013) Effects of environmental filtering and dispersal limitation on species and phylogenetic beta diversity in Gutianshan National Nature Reserve. *Chinese Science Bulletin*, 58, 1204–1212. (in Chinese with English abstract) [饶米德, 冯刚, 张金龙, 米湘成, 陈建华 (2013) 生境过滤和扩散限制作用对古田山森林物种和系统发育 β 多样性的影响. *科学通报*, 58, 1204–1212.]
- Ren HB, Condit R, Chen B, Mi XC, Cao M, Ye WH, Hao ZQ, Ma KP (2013) Geographical range and local abundance of tree species in China. *PLoS ONE*, 8, e76374.
- Ren SY, Wang T, Zhu Y, Ye YZ, Yuan ZL, Li C, Pan N, Li LX (2014) Phylogenetic structure of individuals with different DBH sizes in a deciduous broad-leaved forest community in the temperate-subtropical ecological transition zone, China. *Biodiversity Science*, 22, 574–582. (in Chinese with English abstract) [任思远, 王婷, 祝燕, 叶永忠, 袁志良, 李聪, 潘娜, 李鹿鑫 (2014)

暖温带-北亚热带过渡带落叶阔叶林群落不同径级系统发育结构的变化. 生物多样性, 22, 574–582.]

- Shen GC, He FL, Waagepetersen R, Sun IF, Hao ZQ, Chen ZS, Yu MJ (2013) Quantifying effects of habitat heterogeneity and other clustering processes on spatial distributions of tree species. *Ecology*, 94, 2436–2443.
- Shen GC, Wiegand T, Mi XC, He FL (2013) Quantifying spatial phylogenetic structures of fully stem-mapped plant communities. *Methods in Ecology and Evolution*, 4, 1132–1141.
- Shen GC, Yu MJ, Hu XS, Mi XC, Ren HB, Sun IF, Ma KP (2009) Species–area relationships explained by the joint effects of dispersal limitation and habitat heterogeneity. *Ecology*, 90, 3033–3041.
- Shen Y, Santiago LS, Ma L, Lin GJ, Lian JY, Cao HL, Ye WH (2013) Forest dynamics of a subtropical monsoon forest in Dinghushan, China: recruitment, mortality and the pace of community change. *Journal of Tropical Ecology*, 29, 131–145.
- Shen Y, Santiago LS, Shen H, Ma L, Lian JY, Cao HL, Lu HP, Ye WH (2014) Determinants of change in subtropical tree diameter growth with ontogenetic stage. *Oecologia*, 175, 1315–1324.
- Shen Y, Yu SX, Lian JY, Shen H, Cao HL, Lu HP, Ye WH (2016) Inferring community assembly processes from trait diversity across environmental gradients. *Journal of Tropical Ecology*, 32, 290–299.
- Shen Y, Yu SX, Lian JY, Shen H, Cao HL, Lu HP, Ye WH (2016) Tree aboveground carbon storage correlates with environmental gradients and functional diversity in a tropical forest. *Scientific Reports*, 6, 25304.
- Shi BK, Gao WF, Cai HY, Jin GZ (2016) Spatial variation of soil respiration is linked to the forest structure and soil parameters in an old-growth mixed broadleaved-Korean pine forest in northeastern China. *Plant and Soil*, 400, 263–274.
- Shi BK, Gao WF, Jin GZ (2015) Effects on rhizospheric and heterotrophic respiration of conversion from primary forest to secondary forest and plantations in northeast China. *European Journal of Soil Biology*, 66, 11–18.
- Shi BK, Jin G, Wang ZY (2012) Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 5416–5428. (in Chinese with English abstract) [史宝库, 金光泽, 汪兆洋 (2012) 小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异. 生态学报, 32, 5416–5428.]
- Shi BK, Jin GZ (2016) Variability of soil respiration at different spatial scales in temperate forests. *Biology and Fertility of Soils*, 52, 561–571.
- Shi LL, Mortimer PE, Slik JWF, Zou XM, Xu JC, Feng WT, Qiao L (2014) Variation in forest soil fungal diversity along a latitudinal gradient. *Fungal Diversity*, 64, 305–315.
- Shi ZP, Zhou QH, Li XK, Xiao ZS (2014) Estimation of species richness of mammals and birds using camera traps in Nonggang Forest Dynamics Plot, South China. *Biodiversity Science*, 22, 826–829. (in Chinese with English abstract) [施泽攀, 周岐海, 李先琨, 肖治术 (2014) 弄岗森林动态监测样地及周边鸟兽的红外相机初步监测. 生物多样性, 22, 826–829.]
- Song HJ, Ye J, Lin F, Yuan ZQ, Hao ZQ, Wang XG (2014) Effects of sampling scales on spatial patterns of woody species in forests. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2388–2395. (in Chinese with English abstract) [宋厚娟, 叶吉, 蔺菲, 原作强, 郝占庆, 王绪高 (2014) 取样面积对森林木本植物空间分布格局分析的影响. 科学通报, 59, 2388–2395.]
- Song HJ, Ye J, Shi S, Zhang ZC, Kuang X, Xing DL, Yuan ZQ, Lin F, Cai CJ, Wang XG, Hao ZQ (2014) Woody plant species composition and community structure in residual fragments of broad-leaved Korean pine mixed forests in Changbai mountains area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 1239–1249. (in Chinese with English abstract) [宋厚娟, 叶吉, 师帅, 张昭臣, 匡旭, 邢丁亮, 原作强, 蔺菲, 蔡成军, 王绪高, 郝占庆 (2014) 长白山区阔叶红松林残留片段木本植物物种组成与群落结构. 应用生态学报, 25, 1239–1249.]
- Song K, Mi XC, Jia Q, Ren HB, Bebbier D, Ma KP (2011) Variation in phylogenetic structure of forest communities along a human disturbance gradient in Gutianshan forest, China. *Biodiversity Science*, 19, 190–196. (in Chinese with English abstract) [宋凯, 米湘成, 贾琪, 任海保, Bebbier D, 马克平 (2011) 不同程度人为干扰对古田山森林群落谱系结构的影响. 生物多样性, 19, 190–196.]
- Song P, Ren HB, Jia Q, Guo JX, Zhang NL, Ma KP (2015) Effects of historical logging on soil microbial communities in a subtropical forest in southern China. *Plant and Soil*, 397, 115–126.
- Song XY, Li JQ, Zhang WF, Tang Y, Sun Z, Cao M (2016) Variant responses of tree seedling to seasonal drought stress along an elevational transect in tropical montane forests. *Scientific Reports*, 6, 36438.
- Song XY, Nakamura A, Sun ZH, Tang Y, Cao M (2016) Elevational distribution of adult trees and seedlings in a tropical montane transect, southwest China. *Mountain Research and Development*, 36, 342–354.
- Sun SJ, Zhang HM (2013) Cache sites preferred by small rodents facilitate cache survival in a subtropical primary forest, central China. *Wildlife Research*, 40, 294–302.
- Suo YY, Yuan ZQ, Lin F, Wang XG, Ye J, Bai E, Hao ZQ (2016) Local-scale determinants of elemental stoichiometry of soil in an old-growth temperate forest. *Plant and Soil*, 408, 401–414.
- Tan ZH, Deng XB, Hughes A, Tang Y, Cao M, Zhang WF, Yang XF, Sha LQ, Song L, Zhao JF (2015) Partial net primary production of a mixed dipterocarp forest: spatial patterns and temporal dynamics. *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, 120, 570–583.
- Tang HX, Chen TB, Liu SY, Nong DP, Meng YJ, Lu MX (2011) The population dynamics of Francois Langur *Trachypithecus francoisi* in Nonggang Nature Reserve, Guangxi, China. *Sichuan Journal of Zoology*, 30(1), 136–140. (in Chinese with English abstract) [唐华兴, 陈天波, 刘晟源, 农登攀, 蒙渊君, 陆茂新 (2011) 广西弄岗自然保护区黑叶猴的种群动态. 四川动物, 30(1), 136–140.]

- Tang Y, Roger KL, Cao M (2012) Lianas as structural parasites: a re-evaluation. *Chinese Science Bulletin*, 57, 307–312.
- Tang Y, Yang XF, Cao M, Baskin CC, Baskin JM (2011) Buttress trees increase environmental heterogeneity and regulate seedling diversity in a tropical rainforest. *Plant and Soil*, 338, 301–309.
- Tian K, Chen L, Mi XC, Ma KP, Chen JH (2013) The effect of habitat filtering on tree seedling distribution in a subtropical evergreen broadleaf forest in China. *Chinese Science Bulletin*, 58, 3561–3569. (in Chinese with English abstract) [田锴, 陈磊, 米湘成, 马克平, 陈建华 (2013) 亚热带常绿阔叶林木本植物幼苗分布格局及其对生境过滤的响应. *科学通报*, 58, 3561–3569.]
- Umaña M, Zhang CC, Cao M, Lin LX, Swenson N (2015) Commonness, rarity, and intraspecific variation in traits and performance in tropical tree seedlings. *Ecology Letters*, 18, 1329–1337.
- Wang B, Huang YS, Li XK, Xiang WS, Ding T, Huang FZ, Lu SH, Han WH, Wen SJ, He LJ (2014) Species composition and spatial distribution of a 15 ha northern tropical karst seasonal rain forest dynamics study plot in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 22, 141–156. (in Chinese with English abstract) [王斌, 黄俞淞, 李先琨, 向悟生, 丁涛, 皇甫昭, 陆树华, 韩文衡, 文淑均, 何兰军 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林 15 ha 监测样地的树种组成与空间分布. *生物多样性*, 22, 141–156.]
- Wang B, Xiang WS, Ding T, Huang FZ, Wen SJ, Li DX, Guo YL, Li XK (2014) Spatial distribution of standing dead trees abundance and its impact factors in the karst seasonal rain forest, Nonggang, southern China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 3479–3490. (in Chinese with English abstract) [王斌, 向悟生, 丁涛, 皇甫昭, 文淑均, 李冬兴, 郭屹立, 李先琨 (2014) 弄岗喀斯特季节性雨林枯立木多度的空间分布及影响因子. *科学通报*, 59, 3479–3490.]
- Wang BQ, Liu ZL, Qi YJ, Jin GZ (2014) Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1956–1964. (in Chinese with English abstract) [王宝琦, 刘志理, 戚玉娇, 金光泽 (2014) 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态. *生态学报*, 34, 1956–1964.]
- Wang F, Wang ZF, Ye WH, Liang Y, Ma KP (2014) Isolation and characterization of microsatellite loci in an endemic species *Styrax odoratissimus* (Styracaceae) in subtropical forests. *Conservation Genetics Resources*, 6, 579–580.
- Wang LW, Li BH, Ye J, Bai XJ, Yuan ZQ, Xing DL, Lin F, Shi S, Wang XG, Hao ZQ (2011) Dynamics of short-term tree mortality in broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in the Changbai Mountains. *Biodiversity Science*, 19, 260–270. (in Chinese with English abstract) [王利伟, 李步杭, 叶吉, 白雪娇, 原作强, 邢丁亮, 藺菲, 师帅, 王绪高, 郝占庆 (2011) 长白山阔叶红松林树木短期死亡动态. *生物多样性*, 19, 260–270.]
- Wang M, Shi S, Lin F, Hao ZQ, Jiang P, Dai GH (2012) Effects of soil water and nitrogen on growth and photosynthetic response of Manchurian ash (*Fraxinus mandshurica*) seedlings in northeastern China. *PLoS ONE*, 7, e30754.
- Wang QG, Bao DC, Guo YL, Lu JM, Lu ZJ, Xu YZ, Zhang KH, Liu HB, Meng HJ, Jiang MX, Qiao XJ, Huang HD (2014) Species associations in a species-rich subtropical forest were not well-explained by stochastic geometry of biodiversity. *PLoS ONE*, 9, e7300.
- Wang QG, Ruwane PM, Lu ZJ, Scott F, Wang ZH, Li YQ, Chi XL, Bao DC, Guo YL, Lu JM, Xu YZ, Qiao XJ, Jiang MX (2016) Effects of topography on structuring species assemblages in a subtropical forest. *Journal of Plant Ecology*, DOI: 10.1093/jpe/rt47.
- Wang QG, Xu YZ, Lu ZJ, Bao DC, Guo YL, Lu JM, Zhang KH, Liu HB, Meng HJ, Qiao XJ, Huang HD, Jiang MX (2014) Disentangling the effects of topography and space on the distributions of dominant species in a subtropical forest. *Chinese Science Bulletin*, 59, 5113–5122.
- Wang T, Ren SY, Chen Y, Yuan ZL, Li LX, Pan N, Ye YZ (2014) Carbon storage dynamics of *Pinus armandii* forest at different diameter levels based on tree ring data in the Baotianman National Nature Reserve, central China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 3499–3507. (in Chinese with English abstract) [王婷, 任思远, 陈云, 袁志良, 李鹿鑫, 潘娜, 叶永忠 (2014) 基于树木年轮信息的宝天曼不同径级华山松碳储量动态变化. *科学通报*, 59, 3499–3507.]
- Wang T, Ren SY, Yuan ZL, Zhu Y, Pan N, Li LX, Ye YZ (2014) Effects of density dependence on the spatial patterns of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* trees in deciduous broad-leaved forest in the Baotianman Nature Reserve, central China. *Biodiversity Science*, 22, 449–457. (in Chinese with English abstract) [王婷, 任思远, 袁志良, 祝燕, 潘娜, 李鹿鑫, 叶永忠 (2014) 密度制约对宝天曼落叶阔叶林锐齿栎死亡前后分布格局的影响. *生物多样性*, 22, 449–457.]
- Wang W, Luo ZR, Zhou RF, Xu DM, Ai JG, Ding BY (2011) Habitat associations of woody plant species in Baishanzu subtropical broad-leaved evergreen forest. *Biodiversity Science*, 19, 134–142. (in Chinese with English abstract) [王伟, 骆争荣, 周荣飞, 许大明, 袁建国, 丁炳扬 (2011) 百山祖常绿阔叶林木本植物的生境相关性分析. *生物多样性*, 19, 134–142.]
- Wang W, Rao MD, Chen SW, Zhu DH, Mi XC, Zhang JT (2014) Effects of negative density dependence and habitat filtering on temporal variation in phylogenetic community structure of seedlings in a mid-subtropical forest. *Chinese Science Bulletin*, 59, 1844–1850. (in Chinese with English abstract) [王薇, 饶米德, 陈声文, 朱大海, 米湘成, 张金屯 (2014) 负密度制约和生境过滤对古田山幼苗系统发育多样性时间变化的影响. *科学通报*, 59, 1844–1850.]
- Wang XG, Comita LS, Hao ZQ, Davies SJ, Ye J, Lin F, Yuan ZQ (2012) Local-scale drivers of tree survival in a temperate forest. *PLoS ONE*, 7, e29469.
- Wang XG, Hao ZQ, Ye J, Zhang J, Li BH, Yao XL (2008) Relationships between species abundance and spatial distribution pattern of broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains of China. *Chinese Journal of Ecology*, 27,

- 145–150. (in Chinese with English abstract) [王绪高, 郝占庆, 叶吉, 张健, 李步杭, 姚晓琳 (2008) 长白山阔叶红松林物种多度和空间分布格局的关系. 生态学杂志, 27, 145–150.]
- Wang XG, Hao ZQ, Ye J, Zhang J, Li BH, Yao XL (2008) Spatial pattern of diversity in an old-growth temperate forest in Northeastern China. *Acta Oecologica*, 33, 345–354.
- Wang XG, Hao ZQ, Ye J, Zhang J, Li BH, Yao XL (2008) Spatial variation of species diversity across scales in an old-growth temperate forest of China. *Ecological Research*, 23, 709–717.
- Wang XG, Hao ZQ, Zhang J, Lian JY, Li BH, Yao XL (2009) Tree size distributions in an old-growth temperate forest. *Oikos*, 118, 25–36.
- Wang XG, Li H, Bezemer TM, Hao ZQ (2016) Drivers of bacterial beta diversity in two temperate forests. *Ecological Research*, 31, 57–64.
- Wang XG, Swenson NG, Wiegand T, Wolf A, Howe R, Lin F, Ye J, Yuan ZQ, Shi S, Bai XJ, Xing DL, Hao ZQ (2013) Phylogenetic and functional diversity area relationships in two temperate forests. *Ecography*, 36, 883–893.
- Wang XG, Wiegand T, Hao ZQ, Li BH, Ye J, Lin F (2010) Species associations in an old-growth temperate forest in north-eastern China. *Journal of Ecology*, 98, 674–686.
- Wang XG, Wiegand T, Kraft NJB, Swenson NG, Davies SJ, Hao ZQ, Howe RW, Lin YJ, Ma KP, Mi XC (2016) Stochastic dilution effects weaken deterministic effects of niche-based processes in species rich forests. *Ecology*, 97, 347–360.
- Wang XG, Wiegand T, Wolf A, Howe R, Davies SJ, Hao ZQ (2011) Spatial patterns of tree species richness in two temperate forests. *Journal of Ecology*, 99, 1382–1393.
- Wang XG, Wiegand TT, Swenson N, Wolf A, Howe R, Hao ZQ, Lin F, Ye J, Yuan ZQ (2015) Mechanisms underlying local functional and phylogenetic beta diversity in two temperate forests. *Ecology*, 96, 1062–1073.
- Wang XG, Ye J, Li BH, Zhang J, Lin F, Hao ZQ (2010) Spatial distributions of species in an old-growth temperate forest, northeastern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 1011–1019.
- Wang YH, Mi XC, Chen SW, Li MH, Yu MJ (2011) Regeneration dynamics of major tree species during 2002–2007 in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Gutianshan National Nature Reserve in East China. *Biodiversity Science*, 19, 178–189. (in Chinese with English abstract) [汪殷华, 米湘成, 陈声文, 李铭红, 于明坚 (2011) 古田山常绿阔叶林主要树种 2002–2007 年间更新动态. 生物多样性, 19, 178–189.]
- Wang YY, Shi S, Lin F, Yuan ZQ, Ye J, Wang XG, Hao ZQ (2014) Reproductive traits and their correlation among woody plants in a broadleaf-Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2407–2415. (in Chinese with English abstract) [王芸芸, 师帅, 蔺菲, 原作强, 叶吉, 王绪高, 郝占庆 (2014) 长白山阔叶红松林木本植物繁殖特征及其关联性. 科学通报, 59, 2407–2415.]
- Wang ZF, Lian JY, Huang GM, Ye WH, Cao HL, Wang ZM (2012) Genetic groups in the common plant species *Castanopsis chinensis* and their associations with topographic habitats. *Oikos*, 121, 2044–2051.
- Wang ZF, Lian JY, Ye WH, Cao HL, Wang ZM (2014) The spatial genetic pattern of *Castanopsis chinensis* in a large forest plot with complex topography. *Forest Ecology and Management*, 318, 318–325.
- Wang ZF, Lian JY, Ye WH, Cao HL, Zhang QM, Wang ZM (2016) Pollen and seed flow under different predominant winds in wind-pollinated and wind-dispersed species *Engelhardia roxburghiana*. *Tree Genetics & Genomes*, 12, 19.
- Wang ZG, Ye WH, Cao HL, Huang ZL, Lian JY, Li L, Wei SG, Sun IF (2009) Species-topography association in a species-rich subtropical forest of China. *Basic and Applied Ecology*, 10, 648–655.
- Wang ZG, Ye WH, Cao HL, Lian JY (2008) Spatial distribution of species diversity indices in a monsoon evergreen broadleaved forest at Dinghushan Mountain. *Biodiversity Science*, 16, 454–461. (in Chinese with English abstract) [王志高, 叶万辉, 曹洪麟, 练琚愉 (2008) 鼎湖山季风常绿阔叶林物种多样性指数空间分布特征. 生物多样性, 16, 454–461.]
- Warren-Thomas E, Zhou Y, Dong LJ, Yao XN, Yang MJ, Zhang XL, Qin Y, Liu YH, Sang WG, Axmacher JC (2014) Ground beetle assemblages in Beijing's new mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 334, 369–376.
- Wei SG, Li L, Chen ZC, Lian JY, Lin GJ, Huang ZL, Yin ZY (2014) Which models are appropriate for six subtropical forests: species-area and species-abundance models. *PLoS ONE*, 9, e95890.
- Wei SG, Li L, Huang ZL, Ye WH, Gong GQ, Zhou XY, Lian JY (2013) Multifractal analysis of diversity scaling laws in a subtropical forest. *Ecological Complexity*, 13, 1–7.
- Wei SG, Li L, Liu HG, Du YJ, Huang ZL (2008) Analyses of the dynamic state of *Erythrophloeum fordii* population. *Ecology and Environment*, 17, 285–289. (in Chinese with English abstract) [魏识广, 李林, 刘海岗, 杜彦君, 黄忠良 (2008) 鼎湖山格木种群动态分析. 生态环境, 17, 285–289.]
- Wei SG, Li L, Walther B, Ye WH, Huang ZL, Cao HL, Lian JY, Wang ZG, Chen YY (2010) Comparative performance of species-richness estimators using data from a subtropical forest tree community. *Ecological Research*, 25, 93–101.
- Wiegand T, Huth A, Getzin S, Wang XG, Hao ZQ, Gunatilleke CVS, Gunatilleke IAUN (2012) Testing the independent species' arrangement assertion made by theories of stochastic geometry of biodiversity. *Proceedings of Royal Society B: Biological Sciences*, 27, 3312–3320.
- Wu JJ, Swenson NG, Brown C, Zhang CC, Yang J, Ci XQ, Li J, Sha LQ, Cao M, Lin LX (2016) How does habitat filtering affect the detection of conspecific and phylogenetic density dependence? *Ecology*, 97, 1182–1193.
- Wu Q, Ding J, Yan H, Zhang SR, Fang T, Ma KP (2011) Effects of simulated precipitation and nitrogen addition on seedling growth

- and biomass in five tree species in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 256–267. (in Chinese with English abstract) [吴茜, 丁佳, 闫慧, 张守仁, 方腾, 马克平 (2011) 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山 5 个树种幼苗生长和生物量的影响. *植物生态学报*, 35, 256–267.]
- Xia SW, Chen J, Schaefer D, Detto M (2015) Scale-dependent soil macronutrient heterogeneity reveals effects of litterfall in a tropical rainforest. *Plant and Soil*, 391, 51–61.
- Xia SW, Chen J, Schaefer D, Goodale UM (2016) Effect of topography and litterfall input on fine-scale patch consistency of soil chemical properties in a tropical rainforest. *Plant and Soil*, 404, 385–398.
- Xiang WS, Ding T, Lü SH, Li XK (2015) A comparison of tree species diversity in two subtropical forests, Guangxi, southwest China. *Journal of Resources and Ecology*, 6, 208–216. (in English with Chinese Abstract)
- Xiang WS, Lu SH, Wen SJ, Ding T, Wang B, Zhou AP, Huang FZ, Li XK (2015) Sample effects on species–area relationships of typical forests in karst and non-karst mixing distribution areas. *Guihaia*, 35, 309–316. (in Chinese with English abstract) [向悟生, 陆树华, 文淑均, 丁涛, 王斌, 周爱萍, 黄甫昭, 李先琨 (2015) 取样方式对喀斯特和非喀斯特混合分布区森林种—面积关系的影响. *广西植物*, 35, 309–316.]
- Xiang WS, Nong CG, Wang B, Liu SY, Ding T, He LJ, Li XK, Huang FZ (2013) Growth models of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rainforest. *Guihaia*, 33, 285–290. (in Chinese with English abstract) [向悟生, 农重刚, 王斌, 刘晟源, 丁涛, 何兰军, 李先琨, 黄甫昭 (2013) 喀斯特季节性雨林蚬木种群的增长模型. *广西植物*, 33, 285–290.]
- Xiang WS, Wang B, Ding T, Huang YS, Nong CG, Liu SY, Li XK (2013) Age structure and quantitative dynamics of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest in South China. *Chinese Journal of Ecology*, 2, 825–831. (in Chinese with English abstract) [向悟生, 王斌, 丁涛, 农重刚, 李先琨, 刘晟源, 黄俞淞 (2013) 喀斯特季节性雨林蚬木种群结构和数量动态. *生态学杂志*, 2, 825–831.]
- Xiao L, Yang QS, Liu HM, Xing JZ, Wang XH (2015) Character of seed rain of species with different dispersal modes in Tiantong evergreen broad leaved forest, Zhejiang Province. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 122–132. (in Chinese with English abstract) [雷霄, 杨庆松, 刘何铭, 邢九州, 王希华 (2015) 浙江天童常绿阔叶林不同传播方式物种种子雨的基本特征. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 122–132.]
- Xie WH, Yang XF, Li JN, Tao SL, Xiao ZS (2014) A preliminary study of the biodiversity of ground-dwelling small mammals in Badagongshan National Nature Reserve, Hunan Province. *Biodiversity Science*, 22, 216–222. (in Chinese with English abstract) [谢文华, 杨锡福, 李俊年, 陶双伦, 肖治术 (2014) 八大公山自然保护区地栖性小兽多样性初步研究. *生物多样性*, 22, 216–222.]
- Xie WH, Yang XF, Yu JJ, Li JN, Tao SL, Lu ZJ, Wang XZ, Xiao ZH (2014) A survey of mammals and birds using camera traps in Badagongshan Forest Dynamics Plot, Central China. *Biodiversity Science*, 22, 816–818. (in Chinese with English abstract) [谢文华, 杨锡福, 于家捷, 李俊年, 陶双伦, 卢志军, 王学志, 肖治术 (2014) 运用红外相机对八大公山森林动态样地鸟兽的初步调查. *生物多样性*, 22, 816–818.]
- Xie Y, Ma ZP, Yang QS, Fang XF, Zhang ZG, Yan ER, Wang XH (2012) Coexistence mechanisms of evergreen and deciduous trees based on topographic factors in Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China. *Biodiversity Science*, 20, 159–167. (in Chinese with English abstract) [谢玉彬, 马遵平, 杨庆松, 方晓峰, 张志国, 阎恩荣, 王希华 (2012) 基于地形因子的天童地区常绿树种和落叶树种共存机制研究. *生物多样性*, 20, 159–167.]
- Xing DL, Hao ZQ (2011) The principle of maximum entropy and its applications in ecology. *Biodiversity Science*, 19, 295–302. (in Chinese with English abstract) [邢丁亮, 郝占庆 (2011) 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. *生物多样性*, 19, 295–302.]
- Xing DL, Swenson NG, Weiser MD, Hao ZQ (2014) Determinants of species abundance for eastern north American trees. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 903–911.
- Xing P, Zhang QB, Baker PJ (2012) Age and radial growth pattern of four tree species in a subtropical forest of China. *Trees*, 26, 283–290.
- Xu LN, Jin GZ (2012) Species composition and community structure of a typical mixed broadleaved-Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest plot in Liangshui Nature Reserve, northeast China. *Biodiversity Science*, 20, 470–481. (in Chinese with English abstract) [徐丽娜, 金光泽 (2012) 小兴安岭凉水典型阔叶红松林动态监测样地: 物种组成与群落结构. *生物多样性*, 20, 470–481.]
- Xu WB, Chen GK, Liu CR, Ma KP (2015) Latitudinal differences in species abundance distributions, rather than spatial aggregation, explain beta-diversity along latitudinal gradients. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1170–1180.
- Xu WM, Ci XQ, Song CY, He TH, Zhang WF, Li QM, Li J (2016) Soil phosphorus heterogeneity promotes tree species diversity and phylogenetic clustering in a tropical seasonal rainforest. *Ecology and Evolution*, 6(24), 8719–8726.
- Xu WM, Liu L, He TH, Cao M, Sha LQ, Hu YH, Li QM, Li J (2016) Soil properties drive a negative correlation between species diversity and genetic diversity in a tropical seasonal rainforest. *Scientific Reports*, 6, 20652.
- Xu YJ, Lin DM, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2014) Recovery dynamics of secondary forests with different disturbance intensity in the Gutianshan National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 22, 358–365. (in Chinese with English abstract) [徐远杰, 林敦梅, 米湘成, 任海保, 马克平 (2014) 古田山不同干扰程度森林的群落恢复动态. *生物多样性*, 22, 358–365.]
- Xu YZ, Franklin SB, Wang QG, Shi Z, Luo YQ, Lu ZJ, Zhang JX, Qiao XJ, Jiang MX (2015a) Topographic and biotic factors

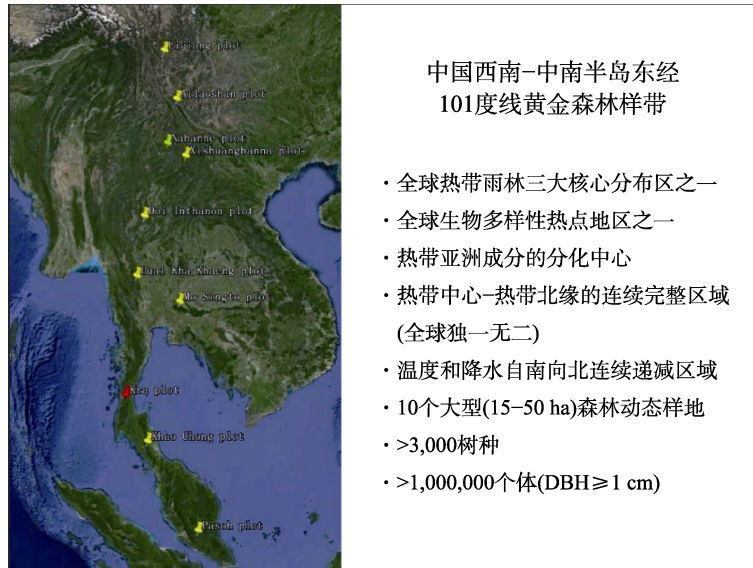
- determine forest biomass spatial distribution in a subtropical mountain moist forest. *Forest Ecology and Management*, 357, 95–103.
- Xu YZ, Zhang JX, Franklin SB, Liang JY, Ding P, Luo YQ, Lu ZJ, Bao DC, Jiang MX (2015b) Improving allometry models to estimate the above- and belowground biomass of subtropical forest, China. *Ecosphere*, 6, 289.
- Yan ER, Wang XH, Chang SX, He FL (2013) Scaling relationships among twig size, leaf size and leafing intensity in a successional series of subtropical forests. *Tree Physiology*, 33, 609–617.
- Yan ER, Yang XD, Chang SX, Wang XH (2013) Plant trait-species abundance relationships vary with environmental properties in subtropical forests in eastern China. *PLoS ONE*, 8, e61113.
- Yan H, Wu Q, Ding J, Zhang SR (2012) Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4226–4236. (in Chinese with English abstract) [闫慧, 吴茜, 丁佳, 张守仁 (2012) 不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响. *生态学报*, 33, 4226–4236.]
- Yan MY, Du XJ, Zhao AH, Peng MC (2015) Individual woody species–area relationship in a deciduous broad-leaved forest in Baotianman, Henan Province. *Biodiversity Science*, 23, 630–640. (in Chinese with English abstract) [闫满玉, 杜晓军, 赵爱花, 彭明春 (2015) 河南宝天曼落叶阔叶林木本植物单物种–面积关系. *生物多样性*, 23, 630–640.]
- Yang J, Ci XQ, Lu MM, Zhang GC, Cao M, Li J, Lin LX (2014) Functional traits of tree species with phylogenetic signal co-vary with environmental niches in two large forest dynamics plots. *Journal of Plant Ecology*, 7, 115–125.
- Yang J, Swenson NG, Cao M, Chuyong GB, Ewango CEN, Howe R, Kenfack D, Thomas DC, Wolf A, Lin LX (2013) A phylogenetic perspective on the individual species–area relationship in temperate and tropical tree communities. *PLoS ONE*, 8, e63192.
- Yang J, Swenson NG, Zhang GC, Ci XQ, Cao M, Sha LQ, Li J, Ferry S, Lin LX (2015) Functional and phylogenetic beta diversity in a tropical tree assemblage. *Scientific Reports*, 5, 12731.
- Yang J, Zhang GC, Ci XQ, Swenson NG, Cao M, Sha LQ, Li J, Baskin CC, Ferry SJW, Lin LX (2014) Functional and phylogenetic assembly in a Chinese tropical tree community across size classes, spatial scales and habitats. *Functional Ecology*, 28, 520–529.
- Yang QS, Ma ZP, Xie YB, Zhang ZG, Wang ZH, Liu HM, Li P, Zhang N, Wang DL, Yang HB, Fang XF, Yan ER, Wang XH (2011) Community structure and species composition of an evergreen broadleaved forest in Tiantong's 20 ha dynamic plot, Zhejiang Province, eastern China. *Biodiversity Science*, 19, 215–223. (in Chinese with English abstract) [杨庆松, 马遵平, 谢玉彬, 张志国, 王樟华, 刘何铭, 李萍, 张娜, 王达力, 杨海波, 方晓峰, 阎恩荣, 王希华 (2011) 浙江天童 20 ha 常绿阔叶林动态监测样地的群落特征. *生物多样性*, 19, 215–223.]
- Yang QS, Shen GC, Liu HM, Wang ZH, Ma ZP, Fang XF, Zhang J, Wang XH (2016) Detangling the effects of environmental filtering and dispersal limitation on aggregated distributions of tree and shrub species: life stage matters. *PLoS ONE*, 11, e0156326.
- Yang XD, Yan ER, Chang SX, Wang XH, Zhao YT, Shi QR (2014) Twig-leaf size relationships vary with soil moisture gradient in subtropical forests. *Acta Oecologica*, 60, 17–25.
- Yang XD, Yan ER, Zhang ZH, Sun BW, Huang HX, Ali A, Ma WJ, Shi QR (2013) Tree architecture of overlapping species among successional stages in evergreen broad-leaved forests in Tiantong region, Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 611–619. (in Chinese with English abstract) [杨晓东, 阎恩荣, 张志浩, 孙宝伟, 黄海侠, Ali A, 马文济, 史青茹 (2013) 浙江天童常绿阔叶林演替阶段共有种的几何构型. *植物生态学报*, 37, 611–619.]
- Yang XF, Tang Y, Cao M (2010) Diaspore traits of 145 tree species from a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China. *Acta Botanica Yunnanica*, 32, 367–377. (in Chinese with English abstract) [杨小飞, 唐勇, 曹敏 (2010) 西双版纳热带季节雨林 145 个树种繁殖体特征. *云南植物研究*, 32, 367–377.]
- Yao B, Yu JP, Liu XJ, Mi XC, Ma KP (2015) Effect of seed traits on spatial aggregation of trees in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 23, 157–166. (in Chinese with English abstract) [姚蓓, 余建平, 刘晓娟, 米湘成, 马克平 (2015) 亚热带常绿阔叶林种子性状对木本植物聚集格局的影响. *生物多样性*, 23, 157–166.]
- Yao XL, Piao ZJ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Hao ZQ (2008) *Pinus koraiensis* seed consumption by rodents and birds. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 1759–1763. (in Chinese with English abstract) [姚晓琳, 朴正吉, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 郝占庆 (2008) 啮齿动物和鸟类对红松种子的消耗. *应用生态学报*, 19, 1759–1763.]
- Ye J, Hao ZQ, Wang XG, Bai XJ, Xing DL, Yuan ZQ (2014) Local-scale drivers of multi-stemmed tree formation in *Acer*, in a temperate forest of Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 320–325.
- Ye WH, Cao HL, Huang ZL, Lian JY, Wang ZG, Li L, Wei SG, Wang ZM (2008) Community structure of a 20 hm² lower subtropical evergreen broad-leaved forest plot in Dinghushan, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 274–286. (in Chinese with English abstract) [叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 练琚瑜, 王志高, 李林, 魏识广, 王章明 (2008) 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地群落特征研究. *植物生态学报*, 32, 274–286.]
- Yu XD, Luo TH, Zhou HZ (2014) Composition and distribution of ground-dwelling beetles among oak fragments and surrounding pine plantations in a temperate forest of North China. *Insect Science*, 21, 114–124.
- Yuan ZL, Chen Y, Wei BL, Zhang BQ, Wang DY, Ye YZ (2013) Species habitat correlation analysis in temperate subtropical ecological transition zone. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7819–7826. (in Chinese with English abstract) [袁志良, 陈云, 韦博良,

- 张斌强, 汪东亚, 叶永忠 (2013) 暖温带-北亚热带生态过渡区物种生境相关性分析. 生态学报, 33, 7819–7826.]
- Yuan ZL, Wang T, Zhu XL, Sha YY, Ye YZ (2011) Patterns of spatial distribution of *Quercus variabilis* in deciduous broadleaf forests in Baotianman Nature Reserve. Biodiversity Science, 19, 224–231. (in Chinese with English abstract) [袁志良, 王婷, 朱学灵, 沙迎迎, 叶永忠 (2011) 宝天曼落叶阔叶林样地栓皮栎种群空间格局. 生物多样性, 19, 224–231.]
- Yuan ZQ, Gazol A, Lin F, Wang XG, Ye J, Suo YY, Fang S, Mellard J, Hao ZQ (2016) Scale-dependent effect of biotic interactions and environmental conditions in community assembly: insight from a large temperate forest plot. Plant Ecology, 217, 1003–1014.
- Yuan ZQ, Gazol A, Lin F, Ye J, Shi S, Wang XG, Wang M, Hao ZQ (2013) Soil organic carbon in an old-growth temperate forest: spatial pattern, determinants and bias in its quantification. Geoderma, 195, 48–55.
- Yuan ZQ, Gazol A, Wang XG, Lin F, Ye J, Zhang ZC, Suo YY, Kuang X, Wang YY, Jia SH, Hao ZQ (2016) Pattern and dynamics of biomass stock in old growth forests: the role of habitat and tree size. Acta Oecologica, 75, 15–23.
- Yuan ZQ, Gazol A, Wang XG, Xing DL, Lin F, Bai XJ, Zhao YQ, Li BH, Hao ZQ (2012) What happens below the canopy? Direct and indirect influences of the dominant species on forest vertical layers. Oikos, 121, 1145–1153.
- Yuan ZQ, Li BH, Bai XJ, Lin F, Shi S, Ye J, Wang XG, Hao ZQ (2010) Composition and seasonal dynamics of litter falls in a broad leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains, Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 21, 2171–2178. (in Chinese with English abstract) [原作强, 李步杭, 白雪娇, 蔺菲, 师帅, 叶吉, 王绪高, 郝占庆 (2010) 长白山阔叶红松林凋落物组成及其季节动态. 应用生态学报, 21, 2171–2178.]
- Yuan ZQ, Wang SP, Gazol A, Mellard J, Lin F, Ye J, Hao ZQ, Wang XG, Loreau M (2016) Multiple metrics of diversity have different effects on temperate forest functioning over succession. Oecologia, 182, 1175–1185.
- Yuan ZQ, Wang XG, Gazol A, Li BH, Lin F, Ye J, Bai XJ, Hao ZQ (2011) Scale specific determinants of tree diversity in an old growth temperate forest in China. Basic and Applied Ecology, 12, 488–495.
- Zhang B, Jin GZ (2014) Effects of selective cutting on the spatial and temporal distribution of fine biomass in mixed broadleaved Korean pine forest. Forest Research, 27, 240–245. (in Chinese with English abstract) [张犇, 金光泽 (2014) 择伐对阔叶红松林细根生物量及其时空分布的影响. 林业科学研究, 27, 240–245.]
- Zhang DD, Luo P, Chen Y, Wang ZF, Ye WH, Cao HL (2014) Isolation and characterization of 12 polymorphic microsatellite markers in *Engelhardia roxburghiana* (Juglandaceae). Silvae Genetica, 63, 109–112.
- Zhang J, Hao ZQ, Li BH, Ye J, Wang XG, Yao XL (2008) Composition and seasonal dynamics of seed rain in broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest, Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 28, 2445–2454. (in Chinese with English abstract) [张健, 郝占庆, 李步杭, 叶吉, 王绪高, 姚晓琳 (2007) 长白山阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林种子雨组成及其季节动态. 生态学报, 28, 2445–2454.]
- Zhang J, Hao ZQ, Song B, Li BH, Wang XG, Ye J (2009) Fine-scale species co-occurrence patterns in an old-growth temperate forest. Forest Ecology and Management, 257, 2115–2120.
- Zhang J, Hao ZQ, Song B, Ye J, Li BH, Yao XL (2007) Spatial distribution patterns and associations of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 18, 1681–1687. (in Chinese with English abstract) [张健, 郝占庆, 宋波, 叶吉, 李步杭, 姚晓琳 (2007) 长白山阔叶红松林中红松与紫椴的空间分布格局及其关联性. 应用生态学报, 18, 1681–1687.]
- Zhang J, Hao ZQ, Sun IF, Song B, Ye J, Li BH, Wang XG (2009) Density dependence on tree survival in an old-growth temperate forest in northeastern China. Annals of Forest Science, 66, 204.
- Zhang J, Hu JB, Lian JY, Fan ZJ, Ouyang XJ, Ye WH (2016) Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. Biological Conservation, 198, 60–69.
- Zhang J, Li BH, Bai XJ, Yuan ZQ, Wang XG, Ye J, Hao ZQ (2009) Composition and interannual dynamics of tree seedlings in broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountain. Biodiversity Science, 17, 385–396. (in Chinese with English abstract) [张健, 李步杭, 白雪娇, 原作强, 王绪高, 叶吉, 郝占庆 (2009) 长白山阔叶红松林乔木树种幼苗组成及其年际动态. 生物多样性, 17, 385–396.]
- Zhang J, Song B, Li BH, Ye J, Wang XG, Hao ZQ (2010) Spatial patterns and associations of six congeneric species in an old-growth temperate forest. Acta Oecologica, 36, 29–38.
- Zhang JL, Swenson NG, Chen SB, Liu XJ, Li ZS, Huang JH, Mi XC, Ma KP (2013) Phylogenetic beta diversity in tropical forests: implications for the roles of geographical and environmental distance. Journal of Systematics and Evolution, 51, 71–85.
- Zhang L, Wang XH, Mi XC, Chen JH, Yu MJ (2011) Temporal dynamics of and effects of an ice storm on litter production in an evergreen broad-leaved forest in Gutianshan National Nature Reserve. Biodiversity Science, 19, 206–214. (in Chinese with English abstract) [张磊, 王晓荷, 米湘成, 陈建华, 于明坚 (2011) 古田山常绿阔叶林凋落量时间动态及冰雪灾害的影响. 生物多样性, 19, 206–214.]
- Zhang LW, Mi XC, Shao HB, Ma KP (2011) Strong plant–soil associations in a heterogeneous subtropical broad-leaved forest. Plant and Soil, 347, 211–220.
- Zhang M, Mi XC, Jin GZ (2014) Composition and spatial patterns of the Liangshui spruce-fir valley forest in the Xiao Hing'an Mountains. Chinese Science Bulletin, 59, 2377–2387. (in Chinese with English abstract) [张冕, 米湘成, 金光泽 (2014) 小兴安岭凉水谷地云冷杉林群落组成与空间格局. 科学通报, 59, 2377–2387.]

- Zhang N, Wang XH, Zheng ZM, Ma ZP, Yang QS, Fang XF, Xie YB (2012) Spatial heterogeneity of soil properties and its relationships with terrain factors in broad-leaved forest in Tiantong of Zhejiang Province, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 2361–2369. (in Chinese with English abstract) [张娜, 王希华, 郑泽梅, 马遵平, 杨庆松, 方晓峰, 谢玉彬 (2012) 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系. *应用生态学报*, 23, 2361–2369.]
- Zhang S, Lin F, Yuan ZQ, Kuang X, Jia SH, Wang YY, Suo YY, Fang S, Wang XG, Ye J, Hao ZQ (2015) Herb layer species abundance distribution patterns in different seasons in an old-growth temperate forest in Changbai Mountain, China. *Biodiversity Science*, 23, 641–648. (in Chinese with English abstract) [张姗, 蔺菲, 原作强, 匡旭, 贾仕宏, 王芸芸, 索炎炎, 房帅, 王绪高, 叶吉, 郝占庆 (2015) 长白山阔叶红松林草本层物种多度分布格局及其季节动态. *生物多样性*, 23, 641–648.]
- Zhang SS, Bao YX, Wang YN, Fang PF, Ye B (2012) Activity rhythms of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) revealed with infrared camera. *Acta Theriologica Sinica*, 32, 368–372. (in Chinese with English abstract) [章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 方平福, 叶彬 (2012) 基于红外相机技术的黑麂活动节律. *兽类学报*, 32, 368–372.]
- Zhang SS, Bao YX, Wang YN, Fang PF, Ye B (2012) Comparisons of different camera trap placement patterns in monitoring mammal resources in Gutianshan National Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 2016–2022. (in Chinese with English abstract) [章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 方平福, 叶彬 (2012) 不同相机布放模式在古田山兽类资源监测中的比较. *生态学杂志*, 31, 2016–2022.]
- Zhang SS, Bao YX, Wang YN, Fang PF, Ye B (2013) Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 3241–3247. (in Chinese with English abstract) [章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 方平福, 叶彬 (2013) 红外相机技术在鼠类密度估算中的应用. *生态学报*, 33, 3241–3247.]
- Zhang X, Ye WH, Cao HL, Wang ZF, Shen H, Lian JY (2009) Isolation and characterization of microsatellites in Chinese white olive (*Canarium album*) and cross-species amplification in *Canarium pimela*. *Conservation Genetics*, 10, 1833–1835.
- Zhang Y, Jin GZ (2016) Effects of decay classes and diameter classes on physico-chemical properties of *Pinus koraiensis* log in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1276–1288. (in Chinese with English abstract) [张瑜, 金光泽 (2016) 腐烂等级、径级对典型阔叶红松林红松倒木物理化学性质的影响. *植物生态学报*, 40, 1276–1288.]
- Zhang YH, Ni J, Tang FP, Pei KQ, Luo YQ, Jiang LF, Sun LF, Liang Y (2016) Root-associated fungi of *Vaccinium carlesii* in subtropical forests of China: intra- and inter-annual variability and impacts of human disturbances. *Scientific Reports*, 6, 22399.
- Zhang ZC, Hao ZQ, Ye J, Lin F, Yuan ZQ, Xing DL, Shi S, Wang XG (2013) Short-term death dynamics of trees in natural secondary poplar-birch forest in Changbai Mountains of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 303–310. (in Chinese with English abstract) [张昭臣, 郝占庆, 叶吉, 蔺菲, 原作强, 邢丁亮, 师帅, 王绪高 (2013) 长白山次生杨桦林树木短期死亡动态. *应用生态学报*, 24, 303–310.]
- Zhao AH, Du XJ, Zang J, Zhang SR, Jiao ZH (2015) Soil bacterial diversity in the Baotianman deciduous broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 23, 649–657. (in Chinese with English abstract) [赵爱花, 杜晓军, 臧婧, 张守仁, 焦志华 (2015) 宝天曼落叶阔叶林土壤细菌多样性. *生物多样性*, 23, 649–657.]
- Zhao QQ, Liu HM, Mathieu J, Wang ZH, Wang XH (2014) Applicability analysis of spatially explicit model of leaf litter in evergreen broad-leaved forests. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3117–3124. (in Chinese with English abstract) [赵青青, 刘何铭, Mathieu J, 王樟华, 王希华 (2014) 凋落叶空间扩散模型在常绿阔叶林的适用性分析. *应用生态学报*, 25, 3117–3124.]
- Zhao X, Liu YY, Jin GZ (2013) Effects of topography on seedling regeneration in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 3035–3042. (in Chinese with English abstract) [赵雪, 刘妍妍, 金光泽 (2013) 地形对阔叶红松林幼苗更新的影响. *应用生态学报*, 24, 3035–3042.]
- Zhao X, Xu LN, Jin GZ (2015) Effect of topography on shrub regeneration in a mixed broadleaved-Korean pine forest in the Xiaoxing'an Mountains. *Biodiversity Science*, 23, 767–774. (in Chinese with English abstract) [赵雪, 徐丽娜, 金光泽 (2015) 地形对典型阔叶红松林灌木更新的影响. *生物多样性*, 23, 767–774.]
- Zhao Y, Du YJ, Cao HL, Hu XL, Ma KP (2016) Intra- and inter-specific variation on flowering and fruiting phenology in Gutianshan subtropical evergreen broad-leaved forest, Zhejiang Province. *Scientia Sinica Vitae*, 46, 1312–1323. (in Chinese with English abstract) [赵袁, 杜彦君, 曹洪麟, 胡小丽, 马克平 (2016) 浙江古田山亚热带常绿阔叶林开花和结实物候的种内种间差异. *中国科学*, 46, 1312–1323.]
- Zhong JD, Li XK, Lü SH, Liu SY, Lu Maoxin, Chen Y, Cheng XL (2012) Studies on the stability of different communities in Nonggang karst region of Guangxi. *Carsologica Sinica*, 31(1), 17–22. (in Chinese with English abstract) [钟军弟, 李先琨, 吕仕洪, 刘晟源, 陆茂新, 陈燕, 成夏岚 (2012) 广西弄岗喀斯特区域不同群落的稳定性评价分析. *中国岩溶*, 31(1), 17–22.]
- Zhou M, Liu ZL, Jin GZ (2016) Improving the accuracy of indirect methods in estimating leaf area index using three correction schemes in a *Larix gmelinii* plantation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 574–584. (in Chinese with English abstract) [周明, 刘志理, 金光泽 (2016) 利用 3 种校正方案提高间接法测定兴安落叶松人工林叶面积指数的精度. *植物生态学报*, 40, 574–584.]
- Zhou YL, Qiu X, Fang XB, Yang LY, Zhao Y, Fang T, Zheng WH, Liu JS (2014) Acoustic characteristics of eight common Chinese

- anurans during the breeding season. *Zoological Research*, 35, 42–50.
- Zhu LJ, Jin GZ, Du WX, Wang XC (2016) Characteristics of canopy disturbance for a typical broadleaf-Korean pine mixed forest in Xiaoxing'an Mountains, Liangshui, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(6), 17–27. (in Chinese with English abstract) [朱良军, 金光泽, 杜文先, 王晓春 (2016) 小兴安岭凉水典型阔叶红松林林冠干扰特征分析. *北京林业大学学报*, 38(6), 17–27.]
- Zhu LJ, Jin GZ, Wang XC (2015) Reconstruction of disturbance history of a typical broad-leaved *Pinus koraiensis* forest and mechanisms of disturbance occurrence. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 125–139. (in Chinese with English abstract) [朱良军, 金光泽, 王晓春 (2015) 典型阔叶红松林干扰历史重建及干扰形成机制. *植物生态学报*, 39, 125–139.]
- Zhu P, Wang ZF, Ye WH, Cao HL (2013) Maintenance of genetic diversity in a small, isolated population of ancient tree *Erythrophloeum fordii*. *Journal of Systematics and Evolution*, 51, 722–730.
- Zhu P, Ye WH, Wang ZF, Cao HL, Zhang M, Li L, Xiao W (2009) Isolation and characterization of ten polymorphic microsatellite in the endangered tree *Erythrophloeum fordii* Oliv. *Conservation Genetics*, 10, 1017–1019.
- Zhu Y, Bai F, Liu HF, Li WC, Li L, Li GQ, Wang SZ, Sang WG (2011) Population distribution patterns and interspecific spatial associations in warm temperate secondary forests, Beijing. *Biodiversity Science*, 19, 252–259. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 白帆, 刘海丰, 李文超, 李亮, 李广起, 王顺忠, 桑卫国 (2011) 北京暖温带次生林种群分布格局与种间空间关联性. *生物多样性*, 19, 252–259.]
- Zhu Y, Comita LS, Hubbell SP, Ma KP (2015) Conspecific and phylogenetic density-dependent survival differs across life stages in a tropical forest. *Journal of Ecology*, 103, 957–966.
- Zhu Y, Getzin S, Wiegand T, Ren HB, Ma KP (2013) The relative importance of Janzen-Connell effects in influencing the spatial patterns at the Gutianshan subtropical forest. *PLoS ONE*, 8, e74560.
- Zhu Y, Mi XC, Ma KP (2009) A mechanism of plant species coexistence: the negative density-dependent hypothesis. *Biodiversity Science*, 17, 594–604. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 米湘成, 马克平 (2009) 植物群落物种共存机制: 负密度制约假说. *生物多样性*, 17, 594–604.]
- Zhu Y, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) Density dependence is prevalent in a heterogeneous subtropical forest. *Oikos*, 119, 109–119.
- Zhu Y, Zhao GF, Zhang LW, Shen GC, Mi XC, Ren HB, Yu MJ, Chen JH, Chen SW, Fang T, Ma KP (2008) Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, east China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 262–273. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 赵谷风, 张俐文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平 (2008) 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. *植物生态学报*, 32, 262–273.]
- Zou Y, Sang WG, Axmacher JC (2015) Resilience of insect assemblages to climate change in mature temperate mountain forests of NE China. *Journal of Insect Conservation*, 19, 1163–1172.
- Zou Y, Sang WG, Hausmann A, Axmacher JC (2016) High phylogenetic diversity is preserved in species-poor high-elevation temperate moth assemblages. *Scientific Reports*, 6, 9116.
- Zou Y, Sang WG, Wang SZ, Warren-Thomas E, Liu YH, Yu ZR, Wang CL, Axmacher JC (2015) Diversity patterns of ground beetles and understory vegetation in mature, secondary, and plantation forest regions of temperate northern China. *Ecology and Evolution*, 5, 531–542.
- Zou Y, Sang WG, Warren-Thomas E, Axmacher JC (2016) Geometrid moth assemblages reflect high conservation value of naturally regenerated secondary forests in temperate China. *Forest Ecology and Management*, 374, 111–118.

附录3 亚洲热带雨林动态样地网络
Appendix 3 Asia regional network for tropical rainforest dynamics plots



参考文献

- Chen L, Zheng Y, Gao C, Mi XC, Ma KP, Wubet T, Guo LD (2017) Phylogenetic relatedness explains highly interconnected and nested symbiotic networks of woody plants and arbuscular mycorrhizal fungi in a Chinese subtropical forest. *Molecular Ecology*, doi: 10.1111/mec.14061
- Gao C, Shi NN, Chen L, Ji NN, Wu BW, Wang YL, Xu Y, Zheng Y, Mi XC, Ma KP, Guo LD (2017) Relationships between soil fungal and woody plant assemblages differ between ridge and valley habitats in a subtropical mountain forest. *New Phytologist*, 213, 1874–1885.
- Gao C, Shi NN, Liu YX, Peay GK, Zheng Y, Ding Q, Mi XC, Ma KP, Wubet T, Buscot F, Guo LD (2013) Host plant genus level diversity is the best predictor of ectomycorrhizal fungal diversity in a Chinese subtropical forest. *Molecular Ecology*, 22, 3403–3414.
- Gao C, Zhang Y, Shi NN, Zheng Y, Chen L, Wubet T, Bruehlheide H, Both S, Buscot F, Ding Q, Erfmeier A, Kuhn P, Nadrowski K, Scholten T, Guo LD (2015) Community assembly of ectomycorrhizal fungi along a subtropical secondary forest succession. *New Phytologist*, 205, 771–785.
- Guo YL, Li DX, Wang B, He YL, Xiang WS, Jiang YL, Li XK (2017) Composition and spatio-temporal dynamics of litter fall in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 25, 265–274. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 李冬兴, 王斌, 何运林, 向悟生, 蒋裕良, 李先琨 (2017) 北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态. 生物多样性, 25, 265–274.]
- Han BC, Umana MN, Mi XC, Liu XJ, Chen L, Wang YQ, Liang Y, Wei W, Ma KP (2017) The role of transcriptomes linked with responses to light environment on seedling mortality in a subtropical forest, China. *Ecology*, doi: 10.1111/1365-2745.12760
- Huang H, Chen ZF, Liu DT, He GX, He RH, Li DZ, Xu K (2017) Species composition and community structure of the Yulongxueshan (Jade Dragon Snow Mountains) forest dynamics plot in the cold temperate spruce-fir forest, Southwest China. *Biodiversity Science*, 25, 255–264. (in Chinese with English abstract) [黄华, 陈智发, 刘德团, 和国星, 和荣华, 李德铎, 许琨 (2017) 玉龙雪山寒温性云冷杉林动态监测样地的物种组成及群落结构. 生物多样性, 25, 255–264.]
- Li C, Xie F, Che J, Jiang JP (2017) Monitoring and research of amphibians and reptiles diversity in key areas of China. *Biodiversity Science*, 25, 246–254. (in Chinese with English abstract) [李成, 谢锋, 车静, 江建平 (2017) 中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究. 生物多样性, 25, 246–254.]
- Liu XJ, Ma KP (2015) Plant functional traits—concepts, applications and future directions. *Scientia Sinica Vitae*, 45, 325–339. (in Chinese with English abstract) [刘晓娟, 马克平 (2015) 植物功能性状研究进展. 中国科学: 生命科学, 45, 325–339.]
- Liu XJ, Swenson NG, Lin DM, Mi XC, Umana MN, Schmid B, Ma KP (2016) Linking individual-level functional traits to tree growth in a subtropical forest. *Ecology*, 97, 2396–2405.
- Shen H, Cai JN, Li MJ, Chen Q, Ye WH, Wang ZF, Lian JY, Song L (2017) On Chinese forest canopy biodiversity monitoring. *Biodiversity Science*, 25, 229–236. (in Chinese with English abstract) [沈浩, 蔡佳宁, 李萌姣, 陈青, 叶万辉, 王峥嵘, 练琚愉, 宋亮 (2017) 中国森林冠层生物多样性监测. 生物多样性, 25, 229–236.]
- Xiao ZS, Li XY, Xiang ZF, Li M, Jiang XL, Zhang LB (2017) Overview of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON. *Biodiversity Science*, 25, 237–245. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李学友, 向左甫, 李明, 蒋学龙, 张礼标 (2017) 中国兽类多样性监测网的建设规划与进展生物多样性, 25, 237–245.]
- Yao LJ, Yao L, Yi YM, Ai XR, Feng G, Liu JC, Lin Y, Huang W, Ding Y, Zang RG (2017) Species composition and community structure of a 6-ha subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest plot in the Qizime Mountains, Hubei Province. *Biodiversity Science*, 25, 275–284. (in Chinese with English abstract) [姚良锦, 姚兰, 易咏梅, 艾训儒, 冯广, 刘峻城, 林勇, 黄伟, 丁易, 臧润国 (2017) 湖北七姊妹山亚热带常绿阔叶混交林的物种组成和群落结构. 生物多样性, 25, 275–284.]
- Zhang J, Hu JB, Lian JY, Fan ZJ, Ouyang XJ, Ye WH (2016) Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60–69.

•生物多样性监测专题•

中国森林冠层生物多样性监测

沈 浩¹ 蔡佳宁^{1,2} 李萌姣^{1,2} 陈 青^{1,2} 叶万辉^{1*}
王峥峰¹ 练琚愉¹ 宋 亮³

1 (中国科学院华南植物园, 广州 510650)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303)

摘要: 林冠作为森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的关键生态界面, 承载了森林生物多样性的主体, 在生物多样性的形成与维持以及生态系统功能过程中发挥着重要的作用, 被称为地球的“第八大洲”。同时, 林冠对气候变化和人为干扰高度敏感, 在人类活动和全球气候变化加剧的背景下, 森林生态系统正面临着严重的威胁, 首当其冲的就是森林冠层。气候变化下的林冠生物多样性保护与可持续利用已成为现代生态研究的热点问题, 受到森林生态学、气候学、环境科学等研究领域的学者越来越多的关注。据此, 中国生物多样性监测与研究网络以网络内拥有森林冠层塔吊的生物多样性监测样地为平台, 建立了林冠生物多样性监测专项网。该专项网将参照国际标准, 统一监测指标, 规范监测标准, 通过大尺度地带性森林冠层内植物(包括附生种子植物和附生孢子植物)多样性、动物多样性、微生物多样性及其动态变化的长期监测, 结合林冠小气候环境特征监测, 建立林冠小环境特征、植物多样性、节肢动物多样性和微生物多样性等4个动态更新的数据库, 以阐明我国典型森林林冠生物多样性变化的规律, 揭示其对森林生态系统功能过程的影响和对全球变化的响应。

关键词: 林冠; 塔吊; 生物多样性监测; 全球变化

On Chinese forest canopy biodiversity monitoring

Hao Shen¹, Jianing Cai^{1,2}, Mengjiao Li^{1,2}, Qing Chen^{1,2}, Wanhui Ye^{1*}, Zhengfeng Wang¹, Juyu Lian¹, Liang Song³

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

Abstract: As the most direct and active ecological interface of the interaction between forest and its environment, the forest canopy, known as the earth's “eighth continent”, contains the greatest forest biological diversity, and plays an important role in the formation and maintenance of biodiversity as well as the processes and functions of the ecosystem. However, the forest canopy is highly sensitive to global climate change and human disturbance. In the wake of increasing human activities and global climate change, the forest ecosystem, especially the forest canopy, is facing a serious threat. Therefore, protection of forest canopy biodiversity and sustainable utilization are increasingly important issues in modern ecology research under the scenarios of climate change, and have gained more and more attention in the fields of forest ecology, climatology, and environmental science. Accordingly, in 2015, the Chinese Forest Canopy Biodiversity Monitoring Network was created within the framework of Sino BON. This network includes biodiversity monitoring plots those were or will be equipped with forest canopy cranes. According to international standards, the network will unify monitoring parameters of forest canopy biodiversity using monitoring standards and norms, and conduct long-term monitoring of plant diversity (including epiphytic seed plants and epispore plants), fauna diversity, microbial diversity and their dynamic changes, through large scale zonal forest cano-

收稿日期: 2016-10-12; 接受日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(31370446)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: why@scbg.ac.cn

pies. Combined with monitoring of the microclimate, we will build four dynamic databases (including a forest canopy microclimate database, canopy plant, canopy arthropod, and canopy microbial). The network is expected to discern the change patterns of forest canopy biodiversity of typical forest ecosystems in China, and to reveal how they influence the functioning of forest ecosystems and respond to global change.

Key words: forest canopy; canopy crane; biodiversity monitoring; global change

森林冠层(简称林冠)是由森林群落的树冠组成的集合体,为森林生态系统的重要组成部分,承载了地球上大约40%的现存物种(其中10%为冠层特有种)(Ozanne et al, 2003),被称为地球上的“第八大洲”(Lowman & Schowalter, 2012)。作为森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的关键生态界面,林冠对气候变化和人为干扰高度敏感,在维持生态系统的多样性、弹性和功能等方面起着重要的作用(Clark & Clark, 1994, 2001; Emilio et al, 2010)。在人类活动和全球气候变化加剧的背景下,森林生态系统正面临着严重的威胁,而首当其冲的就是森林冠层。考察森林冠层的结构与功能及其时空变化是深入理解整个森林生态系统格局、过程及其运作机制的重要基础(李德志和臧润国, 2004)。林冠生物多样性及其与全球变化的关联以及林冠附生生物的保护与可持续利用等已成为现代生态学研究热点问题,受到森林生态学、气候学、环境科学等研究领域学者越来越多的关注。由于林冠生态学过程在空间和功能上表现出的独特性,有人将其称为“林冠科学”。

然而,长期以来由于缺乏接近林冠层的有效手段,人们对林冠的了解甚少(Neto, 1989),无法从生态系统的整体层面全面揭示其在全球环境维持中的作用,更无法预测林冠对全球变化的响应及适应。直到20世纪70年代后期, Perry (1978)提出单绳攀爬技术(single rope technique)之后,人们才初步找到了接近森林冠层的方法而开始了林冠生物多样性的研究,此后利用的技术手段还有热气球、空中廊道、塔吊等。一些致力于林冠学研究的国际组织也应运而生,如国际林冠网络(International Canopy Network, ICAN)、全球林冠项目(Global Canopy Program, GCP)、国际林冠塔吊网络(International Canopy Crane Network, ICCN, https://www.stri.si.edu/english/research/facilities/terrestrial/cranes/canopy_crane_network.php)等。这些工作进一步推动了林冠研究的发展(吴毅等, 2016)。林冠生物多样性、

林冠与全球气候变化等相关研究成果相继在*Nature*和*Science*等期刊发表,其中林冠微生物多样性的研究成果尤为突出(Norby, 1996; Ozanne et al, 2003; Hopkin, 2005; Lambais et al, 2006; Leveau, 2009; Basset et al, 2012)。在此背景下,林冠学有望逐步发展成为一门新兴学科。

近年来,在中国生物多样性监测与研究网络的统一组织和部署下,成立了中国森林冠层生物多样性监测专项网(马克平, 2015)。该专项网通过调查与监测大尺度地带性森林林冠内植物、动物、微生物多样性的格局及其变化,来研究林冠生物多样性对森林生态系统功能和过程的影响及其对全球变化的响应。

1 林冠生物多样性监测与研究现状及趋势

有关林冠的生物多样性研究起步较晚,最初以描述性的定性研究为主。由于生境的特殊性,林冠生物多样性研究受到时间与空间多种因素的限制,特别是林冠层极为丰富的生物多样性(很多生物至今仍然未被命名或被发现)以及量化研究通用规程的缺乏(Lowman & Moffett, 1993; 李德志和臧润国, 2004),严重阻碍了林冠研究的发展。近些年来,随着更加便捷、有效和量化的林冠实测技术和研究方法不断问世并取得长足发展,大大深化了人类对于森林冠层结构和功能过程的理解(李德志和臧润国, 2004; 吴毅等, 2016)。

从森林生态学的发展历史来看,大多数的相关研究理论和观点都是从温带地区的森林开始的,而关于林冠的研究工作则是从热带地区最先开始的。生态学家转而关注热带林冠学研究的原因在于:(1)热带林冠是最复杂的森林类型组分;(2)面临灭绝威胁的热带生物有很多生活在林冠层,促使研究者加强研究(Lowman & Moffett, 1993)。

1.1 相关国际组织

由于巨型吊车等新型设备的出现,人们对森林冠层的兴趣伴随着林冠的数据信息也日益增加,因

此林冠生态学家需要新的手段和分析方法以共享、管理、分析和对比来自不同研究项目的林冠数据。在此背景下, 1993年7月, 在美国国家科学基金会(National Science Foundation)的数据库活动计划(Database Activities Program)和生态计划(Ecosystems Program)的资助下成立了国际林冠网络(ICAN) (Nadkarni & Parker, 1994; Nadkarni et al, 1996; 彭少麟和任海, 2002)。ICAN致力于整合林冠研究者、数量科学家和计算机科学家, 以挖掘、收集、贮存、分析、解译并显示有关树冠与林冠的三维空间数据(植物、动物、微生物及生物和非生物环境)的技术和方法, 促进世界各地学者之间的持续互动。该组织是一个由全球范围内的科学家、保护倡导者、冠层教育者和环境保护专业人士共同组成的非营利组织, 由会员的会费、捐赠和基金项目资助。ICAN每年出版3期名为“*What's Up?*”的通讯, 主要介绍关于林冠的一些研究主题和专题论文, 以及有关林冠研究和教育的资源库和引文情况。

1997年3月, 在巴拿马举行的首次国际林冠塔吊研讨会(International Canopy Crane Symposium)将“整合研究力量, 发挥林冠塔吊研究的最大影响力”作为核心议题, 并成立了国际林冠塔吊网络; 1999年, 在由欧洲科学基金会和美国国家科学基金会联合资助的于牛津大学召开的国际林冠科学研讨会(International Canopy Science Workshop)上, 设立了全球林冠项目。这些林冠研究组织的宗旨、研究内容及关注的科学问题详见有关文献(宋亮和刘文耀, 2013; 吴毅等, 2016)。

为了高效利用已经建立的塔吊设备, 充分发挥其在林冠研究中的作用, 中国科学院西双版纳热带植物园于2015年10月27-29日举办了“林冠生态学与生物多样性”国际学术研讨会。该研讨会旨在加强国内外同行在林冠科学研究中的新成果、新技术的交流, 探讨未来合作研究的机遇和设想, 促进国内外林冠科学的合作研究。

1.2 相关技术和方法

早期林冠研究是通过获得下层枝叶的样本资料来推断林冠上层乃至整个林冠的结构(李德志和臧润国, 2004)。随后, 望远镜、梯子、摘棉机、超轻便小型飞机、单绳攀爬、冠层步道、热气球、林冠筏、塔吊等设备和技术先后被用于林冠研究, 研究方法的可靠性、研究者的安全性以及获取数据资

料的准确性等方面逐步得到提升(Lowman & Wittman, 1996; Lowman & Rinker, 2004; 李德志和臧润国, 2004; 张云等, 2007; 杨洁等, 2008; 吴毅等, 2016; 杨龙等, 2016)。其中, 林冠塔吊在三维空间作业中具有“全方位、高精度、非破坏、可重复”的特征, 已成为当前林冠学研究的标志(吴毅等, 2016)。自1990年全球第一个用于森林冠层观测的塔吊由美国史密森热带研究院(Smithsonian Tropical Research Institute, STRI)建立于巴拿马, 目前全球已有8个国家建成了11个塔吊(不包括中国)。

1.3 监测与研究内容和对象

如前文所述, 新技术的发展使得林冠科学家在树冠进行定量化研究成为可能, 包括固着生物(*sessile organisms*)、可移动生物(*mobile organisms*)以及冠层的相互作用和过程的研究。从类群上可以分为植物、动物和微生物的研究, 且都已成为林冠生物学研究的分支; 在获取数据方面需要使用不同的技术和方法(Lowman & Wittman, 1996)。林冠研究涉及的问题非常多样, 且均强调时空分异: 空间上从叶片(如定量化每个叶面上昆虫的数量)、树体(如测量阳叶和阴叶的光合作用)、森林立地(如观测冠层上部的湍流)到整个景观尺度(如比较不同森林类型之间的哺乳动物)。时间分异在热带森林冠层特别重要, 主要包括生物种群及其所利用资源的日变化、季节动态甚至年际的周期性变化(Lowman & Moffett, 1993; Lowman & Wittman, 1996; Lowman, 2009; Lowman & Schowalter, 2012)。

近年来, 针对小气候环境(崔启武和朱劲伟, 1981; 王汉杰, 1986; 刘和平等, 1997; 苗世光和蒋维楣, 2004; 鲜靖苹等, 2014)、(附生)植物多样性(刘文耀等, 2006; 杨洁等, 2008; 江浩等, 2011, 2012; 刘广福等, 2011; 吴毅等, 2016)及动物多样性(孟庆繁, 2007; 张云等, 2007; 郑国和李枢强, 2013)的观测与研究报道较多, 并取得了长足进步。但是, 针对林冠微生物多样性的研究相对较晚。较为经典的案例是来自全球生物多样性热点地区之一的巴西大西洋沿岸森林林冠细菌多样性的研究(Lambais et al, 2006, 2014)。该研究发现, 尽管该研究区域森林中相同树种的细菌群落存在差异, 却还是可用判别分析归为同一组; 平均每个叶面可栖息95-671种细菌, 并且97%的细菌物种尚未有分类描述。因此, 叶际微生物种群远比想象的复杂(Yang et al, 2001)。

Kembel等(2014)通过新热带森林的研究发现, 叶际细菌的多样性与其所栖息植物的生长、死亡及功能关系密切, 因而探讨植物-微生物间的关系对于理解植物功能生物地理学和植物及生态系统变异的驱动机制具有重要意义。

2 中国森林冠层生物多样性监测专项网

2.1 科学目标

林冠生物多样性监测专项网旨在围绕气候变化和人为干扰下的林冠生物多样性保护与可持续利用等热点问题, 在中国生物多样性监测与研究网络框架内, 以安装有森林冠层塔吊的监测样地为平台, 参照国际标准, 统一监测指标, 规范监测标准, 通过调查与监测大尺度地带性森林林冠内的植物、动物、微生物多样性及其动态变化的时空格局与纬度分布格局, 阐明我国典型森林林冠生物多样性的组成及其动态变化规律, 揭示林冠各生物类群之间的互动与协同进化机制, 探讨林冠生态系统功能及其对全球变化的响应与适应机制, 为生物多样性在全球变化背景下的动态监测、维持机制的研究提供支撑条件, 为我国生物多样性研究和制定保护行动计划提供系统科学的数据, 并推动林冠生物多样性相关学科的跨越式发展。

2.2 总体设计

林冠生物多样性监测专项网目前主要由中国生物多样性监测与研究网络中安装了森林塔吊的样地组成。考虑监测点的代表性与全局性, 从北到南共有8个监测样点, 具体的森林类型及地理位置见表1。在前期这8个样点的基础上, 将不断增加网络内后续装备森林塔吊的其他样地。

2.3 监测的主要内容、方法和指标

2.3.1 林冠小气候环境

按群落垂直结构特征选取5–10个树种, 分林冠内外利用自动微气象系统监测小气候环境参数, 实现林冠层环境的实时立体监测。主要方法是: 在林冠内外各装备1套微气象环境监测系统, 包括: 空气温湿度传感器、雨量传感器、光合有效辐射传感器、无线数据采集器、数据采集扩展单元、太阳能供电系统等。另外, 在各样地装备1套风速风向传感器和大气压强传感器等, 进行样地的气象监测。主要监测指标包括: 林冠内外的空气相对湿度、温度、太阳辐射、风速、风向、降雨量等。

2.3.2 林冠植物多样性

生活在森林冠层的植物主要包括具有独立根系统、营缠绕或攀援习性的木质藤本植物和不具有独立根系统的其他附生植物, 对气候变化具有高度

表1 中国森林冠层生物多样性监测专项网样点布局
Table 1 The plot distribution within the Chinese Forest Canopy Biodiversity Monitoring Network

序号 No.	样点名称 Plot name	森林类型 Forest type	地理坐标 Geographic coordinates
1	吉林长白山阔叶红松林25 ha样地 25-ha deciduous broad-leaved-Korean pine mixed forest plot at Changbai Mountain in Jilin Province	温带阔叶红松林 Temperate broadleaved-Korean pine mixed forest	42.38° N, 128.08° E
2	湖南八大公山中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林25 ha样地 25-ha mid-subtropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest plot at Badagong Mountain in Hunan Province	中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林 Mid-subtropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest	29.77° N, 110.09° E
3	浙江古田山亚热带常绿阔叶林24 ha样地 24-ha subtropical evergreen broad-leaved forest plot at Gutian Mountain in Zhejiang Province	中亚热带常绿阔叶林 Mid-subtropical evergreen broad-leaved forest	29.25° N, 118.12° E
4	四川栗子坪亚高山针叶林20 ha样地 20-ha subalpine coniferous forest plot at Liziping in Sichuan Province	亚高山针叶林 Subalpine coniferous forest	28.91° N, 102.36° E
5	云南云杉坪暗针叶林25 ha样地 25-ha dark coniferous forest plot at Yunshanping in Yunnan Province	寒温性云冷杉林 Cold temperate spruce-fir forest	27.14° N, 100.23° E
6	云南哀牢山亚热带常绿阔叶林20 ha样地 20-ha subtropical evergreen broad-leaved forest plot at Ailao Mountain in Yunnan Province	亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broadleaved forest	24.54° N, 101.03° E
7	广东鼎湖山亚热带常绿阔叶林20 ha样地 20-ha lower subtropical evergreen broad-leaved forest plot at Dinghu Mountain in Guangdong Province	南亚热带常绿阔叶林 South subtropical evergreen broadleaved forest	23.10° N, 121.32° E
8	云南西双版纳热带雨林20 ha样地 20-ha tropical rain forest plot at Xishuangbanna in Yunnan Province	热带雨林 Tropical rain forest	21.61° N, 101.57° E

的敏感性。附生植物在维持森林生态系统的物质循环和能量流动过程中有重要作用。但林冠附生植物却因受攀爬技术限制以及人们的认识不足而长期被忽略。为此,我们将围绕附生植物开展一系列的监测。类群上将包括附生非维管束植物(附生藻类、苔藓和地衣植物)和附生维管束植物(附生蕨类和被子植物)两大类。主要是基于林冠塔吊,采用常规方法进行人工观测、分类采样和功能指标测定。在物种监测方面,采用形态和DNA条形码(DNA bar-coding)相结合的方法进行分类鉴定;在数量监测方面,对于可通过形态肉眼鉴定的物种进行传统计数统计,对于无法进行上述计数的物种,利用分子技术中的DNA扩增片段重复次数进行丰度估算。

(1)附生非维管束植物:选取单位面积树皮(干)进行取样。

附生藻类植物:传统藻类分类鉴定主要依据细胞的大小、形状和大孢子的形态结构及纹饰等,但对于隐形种的鉴定来说,这些特征是远远不够的。拟辅以 $cox1 + rbcL + 18S\ rDNA$ 三个DNA片段进行鉴定。

附生地衣植物:地衣是由共生菌(子囊菌或担子菌)与共生藻(蓝藻或绿藻)经过漫长的生物演化形成的,传统的地衣分类是基于对表型的比较分析。然而由于很难保证样品采集的完整性,导致样品经常缺少子囊盘形状、生长位置和子囊孢子的性状等重要的分类指标。拟采用 $GADPH + ITS + rbcL$ 三个DNA片段辅助进行鉴定。

附生苔藓植物:苔藓植物形态微小且高度变异,类群划分相当混乱和困难。由于很多种类孢子体并不多见,因此主要基于配子体形态进行分类。分类上常利用叶片形状、分枝长度、叶片细胞疣的特征,但这些特征往往因环境不同使得种内呈现很大差异。拟采用 $trnH-psbA + rps4$ 两个片段辅助进行鉴定。

(2)附生维管束植物:采用单个个体逐一采样。

附生蕨类植物:相对种子植物而言,蕨类植物可用的形态学性状较少,且存在同源性状不易判定等因素,因此仅利用形态学性状对蕨类植物进行分类面临着很多困难。拟采用 $rps4 + trnL-F + rps4-trnS$ 三个DNA片段辅助进行鉴定。

附生被子植物:采用目前国际公认的 $matK + rbcL + trnH-psbA$ 三个片段辅助进行鉴定。

2.3.3 林冠节肢动物多样性

冠层节肢动物是冠层动物的主体,也是森林生态系统的关键调节因子,具有重要研究价值。近几十年来,尽管该领域的研究有了比较快速的发展,但森林冠层仍然是我们了解最少的生境之一,冠层生物学中还有很多科学问题有待解答。为此,我们将结合传统冠层动物取样技术,并研制新型取样技术,围绕冠层节肢动物多样性及其动态开展一系列的监测和研究。类群上将主要包括节肢动物门的蛛形纲和昆虫纲,监测其种类和丰度。

主要方法是:基于林冠塔吊,集成传统冠层节肢动物取样技术,如杀虫剂击倒法、冠层喷雾法、灯诱技术、拦截器法、剪枝法等。在种类监测方面,采用形态和DNA条形码相结合的方法进行分类鉴定;在数量监测方面,对于可通过形态肉眼鉴定的物种进行传统计数统计,对于无法进行上述计数的物种,拟利用DNA扩增片段进行丰度估算。具体来说,将采集的节肢动物初步分为肉眼可见动物和肉眼不可见微小型动物两类,减小库容,各自混合成“DNA soup”,然后对这两类动物采用国际通用的线粒体细胞色素c氧化酶I基因(COI)片段($cox1$)进行DNA条形码分类鉴定。

2.3.4 林冠微生物多样性

在地球生态系统中微生物的多样性和数量都极其丰富,对陆地生态系统中的众多过程产生影响,对生物多样性形成和维持等有着极其重要的作用。因此,对其动态进行长期监测是生物多样性研究的重要方面。为此,我们将利用分子遗传标记方法开展一系列的监测和研究。由于分子标记手段对微生物的研究是混合样,因此无需进行形态分类。故我们将分两个生境类型即森林群落树干和叶际分别进行监测。

主要方法是:分别采用手工方法和剪枝法进行树干和树叶的样品采集。在种类监测方面,采用形态(如大型真菌)和分子技术相结合的方法进行分类鉴定;在数量监测方面,对于可通过形态肉眼鉴定的物种进行传统计数统计,对于无法进行上述计数的物种,拟利用DNA扩增片段进行丰度估算。具体来说,将采集的样品初步分为肉眼可见和肉眼不可见微生物,后者采用16S rDNA和ITS两个区段进行种类和数量监测。

2.4 组织方式

林冠生物多样性监测网络主要依托中国森林生物多样性监测网络,将建立由Sino BON总PI和各个参加样地PI或者林冠研究负责人组成的专家委员会,负责冠层生物多样性研究与监测工作的设计与协调,并制定相关工作标准。专家委员会每年例会一次,总结上一年工作和部署下一年的任务。

主要参加单位有:中国科学院华南植物园、动物研究所、西双版纳热带植物园、沈阳应用生态研究所、武汉植物园、微生物研究所、昆明植物研究所、成都生物研究所。

2.5 预期产出

林冠生物多样性监测网络将以生物多样性保护和生物资源持续利用的国家战略需求为导向,采用先进监测技术支撑,利用广泛的数据获取渠道和多样的数据整合分析方法,以各监测样点为平台,通过林冠植物、动物、微生物多样性及其动态变化的长期监测,结合林冠小气候环境特征的实时立体监测,建立4个动态更新的数据库:(1)林冠小环境(光照、温度)特征监测数据库:包括林冠内外的空气相对湿度、温度、太阳辐射、风速、风向、降雨量等环境参数;(2)林冠植物多样性动态监测数据库:包括附生植物的物种名录、物种空间位置、各物种数量、盖度、生活状况、DNA条形码鉴定序列等;(3)林冠节肢动物多样性动态监测数据库:主要包括林冠节肢动物门蛛形纲和昆虫纲的物种组成和数量分布;(4)林冠微生物多样性动态监测数据库:主要包括林冠微生物采集空间位置、种类、数量、DNA鉴定序列。

在建立以上4个数据库的基础上,完成以下两项内容:

(1)提交林冠生物多样性及格局分布数据。以数据集技术规范文本、项目报告、咨询报告和数据报告、专题图集、数据库和信息系统的形式提交成果。摸清林冠生物多样性的本底,提交相应的数据集和图件,建立和完善数据库;提交有关林冠生物多样性调查、在科学研究与监测中的基准作用与保护功能提升、林冠生物多样性环境脆弱性与指示作用等方面的报告。

(2)建立可查询和展示的林冠生物多样性资源调查信息管理及发布平台。通过整理监测所得的林冠生物多样性的图片、数据和标本,结合GIS应用系

统与基因库,形成林冠生物多样性信息管理及发布平台,并对公众开放。

林冠生物多样性监测网的建成,将保证在野外复杂的环境条件下,实现有效监测、网络传送与数据分析处理三位一体的研究系统。其成果将服务于中国生物多样性监测与研究网络,以完善我国林冠生物多样性的公共信息数据库,完成长期监测、网络化分析管理、中长期预警分析的要求与目标。

参考文献

- Basset Y, Cizek L, Cuenoud P, Didham RK, Guilhaumon F, Missa O, Novotny V, Odegaard F, Roslin T, Schmidl J, Tishechkin AK, Winchester NN, Roubik DW, Aberlenc HP, Bail J, Barrios H, Bridle JR, Castano-Meneses G, Corbara B, Curletti G, da Rocha WD, de Bakker D, Delabie JHC, Dejean A, Fagan LL, Floren A, Kitching RL, Medianero E, Miller SE, de Oliveira EG, Orivel J, Pollet M, Rapp M, Ribeiro SP, Roisin Y, Schmidt JB, Sorensen L, Leponce M (2012) Arthropod diversity in a tropical forest. *Science*, 338, 1481–1484.
- Clark DA, Clark DB (1994) Climate-induced annual variation in canopy tree growth in a Costa-Rican tropical rain-forest. *Journal of Ecology*, 82, 865–872.
- Clark DA, Clark DB (2001) Getting to the canopy: tree height growth in a neotropical rain forest. *Ecology*, 82, 1460–1472.
- Cui QW, Zhu JW (1981) The transmissive and reflective theories of light for various structures of the forest canopy. *Acta Geographica Sinica*, 36, 196–208. (in Chinese with English abstract) [崔启武, 朱劲伟 (1981) 林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论. *地理学报*, 36, 196–208.]
- Emilio T, Nelson BW, Schietti J, Desmouliere SJM, Santo HMVE, Costa FRC (2010) Assessing the relationship between forest types and canopy tree beta diversity in Amazonia. *Ecography*, 33, 738–747.
- Hopkin M (2005) Biodiversity and climate form focus of forest canopy plan. *Nature*, 436, 452.
- Jiang H, Huang YH, Zhou GY, Hu XY, Liu SZ, Tang XL (2011) Leaf morphological and anatomical characteristics of epiphytes and their host trees in lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 1805–1812. (in Chinese with English abstract) [江浩, 黄钰辉, 周国逸, 胡晓颖, 刘世忠, 唐旭利 (2011) 南亚热带常绿阔叶林林冠层附生植物及其宿主叶片的形态解剖特征. *生态环境学报*, 20, 1805–1812.]
- Jiang H, Huang YH, Zhou GY, Hu XY, Liu SZ, Tang XL (2012) Acclimation in leaf morphological and eco-physiological characteristics of different canopy-dwelling epiphytes in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *Plant Science Journal*, 30, 250–260. (in Chinese with English abstract) [江浩, 黄钰辉, 周国逸, 胡晓颖, 刘世忠, 唐旭利 (2012) 亚热带常绿阔叶林冠层附

- 生植物叶片形态结构及生理功能特征的适应性研究. 植物科学学报, 30, 250–260.]
- Kembel SW, O'Connor TK, Arnold HK, Hubbell SP, Wright SJ, Green JL (2014) Relationships between phyllosphere bacterial communities and plant functional traits in a neotropical forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 111, 13715–13720.
- Lambais MR, Crowley DE, Cury JC, Bull RC, Rodrigues RR (2006) Bacterial diversity in tree canopies of the Atlantic forest. *Science*, 312, 1917.
- Lambais MR, Lucheta AR, Crowley DE (2014) Bacterial community assemblages associated with the phyllosphere, dermosphere, and rhizosphere of tree species of the Atlantic forest are host taxon dependent. *Microbial Ecology*, 68, 567–574.
- Leveau JHJ (2009) Life on leaves. *Nature*, 461, 741.
- Li DZ, Zang RG (2004) The research advances on the structure and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes. *World Forestry Research*, 17(3), 12–16. (in Chinese with English abstract) [李德志, 臧润国 (2004) 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展. 世界林业研究, 17(3), 12–16.]
- Liu GX, Zang RG, Ding Y (2011) A review of research on epiphytes in forest canopies. *World Forestry Research*, 24(1), 33–40. (in Chinese with English abstract) [刘广福, 臧润国, 丁易 (2011) 林冠附生植物研究综述. 世界林业研究, 24(1), 33–40.]
- Liu HP, Liu SH, Zhu TY, Jin CJ, Kong FZ, Guan DX (1997) Determination of aerodynamic parameters of Changbai Mountain forest. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 33, 522–528. (in Chinese with English abstract) [刘和平, 刘树华, 朱廷曜, 金昌杰, 孔繁智, 关德新 (1997) 森林冠层空气动力学参数的确定. 北京大学学报 (自然科学版), 33, 522–528.]
- Liu WY, Ma WZ, Yang LP (2006) Advances in ecological studies on epiphytes in forest canopies. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 522–533. (in Chinese with English abstract) [刘文耀, 马文章, 杨礼攀 (2006) 林冠附生植物生态学研究进展. 植物生态学报, 30, 522–533.]
- Lowman MD (2009) Canopy research in the twenty-first century, a review of arboreal ecology. *Tropical Ecology*, 50, 125–136.
- Lowman MD, Moffett M (1993) The ecology of tropical rain forest canopies. *Trends in Ecology & Evolution*, 8, 104–107.
- Lowman MD, Rinker HB (2004) *Forest Canopies*, 2nd edn. Elsevier Academic Press, San Diego.
- Lowman MD, Schowalter TD (2012) Plant science in forest canopies—the first 30 years of advances and challenges (1980–2010). *New Phytologist*, 194, 12–27.
- Lowman MD, Wittman PK (1996) Forest canopies: methods, hypotheses, and future directions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 27, 55–81.
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. 生物多样性, 23, 1–2.]
- Meng QF (2007) Sampling methods for insect diversity in forest canopy. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44, 815–820. (in Chinese with English abstract) [孟庆繁 (2007) 森林冠层昆虫多样性研究方法. 昆虫知识, 44, 815–820.]
- Miao SG, Jiang WM (2004) Large eddy simulation of turbulent flow in the forest canopy and the forest boundary layer. *Chinese Journal of Geophysics*, 47, 597–603. (in Chinese with English abstract) [苗世光, 蒋维楣 (2004) 森林冠层和森林边界层大涡模拟. 地球物理学报, 47, 597–603.]
- Nadkarni NM, Parker G (1994) Creation of the canopy research network. *Ambio*, 23, 461.
- Nadkarni NM, Parker GG, Ford ED, Cushing JB, Stallman C (1996) The international canopy network: a pathway for interdisciplinary exchange of scientific information on forest canopies. *Northwest Science*, 70, 104–108.
- Neto RB (1989) Environment—rain-forest canopy remains elusive. *Nature*, 340, 586.
- Norby RJ (1996) Forest canopy productivity index. *Nature*, 381, 564.
- Ozanne CMP, Anhuf D, Boulter SL, Keller M, Kitching RL, Korner C, Meinzer FC, Mitchell AW, Nakashizuka T, Dias PLS, Stork NE, Wright SJ, Yoshimura M (2003) Biodiversity meets the atmosphere: a global view of forest canopies. *Science*, 301, 183–186.
- Peng SL, Ren H (2002) Promoting the sustainable development of forestry through forest canopy research: an introduction to the 3rd International Canopy Conference. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1371–1732. (in Chinese) [彭少麟, 任海 (2002) 通过森林冠层研究促进林业可持续发展——第3届国际冠层大会介绍. 生态学报, 22, 1371–1372.]
- Perry DR (1978) A method of access into the crowns of emergent and canopy trees. *Biotropica*, 10, 155–157.
- Song L, Liu WY (2013) Anthropogenic influence on forest canopies: a review on the 6th International Canopy Conference. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 2632–2635. (in Chinese) [宋亮, 刘文耀 (2013) 人类活动对森林林冠的影响——第六届国际林冠学大会述评. 生态学报, 33, 2632–2635.]
- Wang HJ (1986) A numerical simulation model of radiation in forest canopy. *Chinese Journal of Ecology*, 5(2), 19–23, 27. (in Chinese with English abstract) [王汉杰 (1986) 森林冠层辐射的数值模拟. 生态学报, 5(2), 19–23, 27.]
- Wu Y, Liu WY, Song L, Chen X, Lu HZ, Li S, Shi XM (2016) Advances in ecological studies of epiphytes using canopy cranes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 508–522. (in Chinese with English abstract) [吴毅, 刘文耀, 宋亮, 陈曦, 卢华正, 李苏, 石贤萌 (2016) 基于林冠塔吊的附生植物生态学研究进展. 植物生态学报, 40, 508–522.]
- Xian JP, Zhang JY, Hu HB (2014) Forest canopy hydrology: A review. *Journal of Northwest Forestry University*, 29(3), 96–104. (in Chinese with English abstract) [鲜靖苹, 张家洋, 胡海波 (2014) 森林冠层水文研究进展. 西北林学院

- 学报, 29(3), 96–104.]
- Yang CH, Crowley DE, Borneman J, Keen NT (2001) Microbial phyllosphere populations are more complex than previously realized. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 98, 3889–3894.
- Yang J, Chen WH, Shui YM, Sheng JS (2008) Investigating methods of epiphytes in forest canopy. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 26, 661–667. (in Chinese with English abstract) [杨洁, 陈文红, 税玉民, 盛家舒 (2008) 林冠附生植物观测方法概述. *武汉植物学研究*, 26, 661–667.]
- Yang L, Sun ZY, Tang GL, Lin ZW, Chen YQ, Li Y, Li Y (2016) Identifying canopy species of subtropical forest by lightweight unmanned aerial vehicle remote sensing. *Tropical Geography*, 36, 833–839. [杨龙, 孙中宇, 唐光良, 林志文, 陈燕乔, 黎喻, 李勇 (2016) 基于微型无人机遥感的亚热带林冠物种识别. *热带地理*, 36, 833–839.]
- Zhang Y, Li ZH, Shi DL (2007) Progress on sampling of forest canopy arthropods. *Forest Pest and Diseases*, 26(1), 29–32. (in Chinese with English abstract) [张云, 李兆华, 石道良 (2007) 森林冠层节肢动物取样研究进展. *中国森林病虫*, 26(1), 29–32.]
- Zheng G, Li SQ (2013) The biodiversity of arthropods from forest canopies. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 38, 178–182. (in Chinese with English abstract) [郑国, 李枢强 (2013) 森林冠层节肢动物多样性研究进展. *动物分类学报*, 38, 178–182.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 黄祥忠)

•生物多样性监测专题•

中国兽类多样性监测网的建设规划与进展

肖治术^{1,5*} 李学友² 向左甫³ 李 明¹ 蒋学龙² 张礼标⁴

1 (中国科学院动物研究所, 北京 100101)

2 (中国科学院昆明动物研究所, 昆明 650223)

3 (中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004)

4 (广东省生物资源应用研究所, 广州 510260)

5 (中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

摘要: 兽类类群和物种多样, 分布范围广, 适应于多种生境类型, 对栖息地变化特别敏感, 是生物多样性保护管理与评价的关键指示类群。中国兽类多样性监测网是由中国科学院近年来推动建立的中国生物多样性监测与研究网络的专项网之一, 重点对分布于我国境内的陆生兽类物种多样性及资源进行监测与研究。针对当前我国兽类监测研究面临的三大根本任务(兽类物种有什么? 在哪里? 有多少?), 当务之急是应尽快建立和完善我国兽类各类群的监测技术规范, 制定常态监测计划, 全面建设全国性的兽类多样性监测网络技术体系和监测数据公共信息平台。本文在总结国内外兽类监测研究的基础上, 提出了我国陆生兽类多样性监测网的建设规划, 重点介绍该监测网的科学目标、布局、监测技术和监测数据产品等。本文也总结了近年来我国陆生兽类多样性监测网建设所取得的重要进展及存在的问题, 为全面推动我国兽类多样性监测网明确发展方向。

关键词: 中国兽类多样性监测网; 生物多样性保护; 科学目标; 监测数据产品; 监测技术

Overview of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON

Zhishu Xiao^{1,5*}, Xueyou Li², Zuofu Xiang³, Ming Li¹, Xuelong Jiang², Libiao Zhang⁴

1 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 Kunming Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

3 College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004

4 Guangdong Institute of Applied Biological Resources, Guangzhou 510260

5 College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Mammals are key indicators for biodiversity conservation and management due to their high diversity, wide distribution range, and sensitivity to habitat changes. Recently launched by the Chinese Academy of Sciences, the Mammal Diversity Monitoring Network of Sino BON (Sino BON-Mammal) is a key member of the Biodiversity Monitoring Networks of Sino BON for the monitoring and inventory of terrestrial mammal resources in China. Firstly, this paper reviews several major advances in terrestrial mammal diversity observations in both China and other parts of the world. We then provide an overview of Sino BON-Mammal, including the major scientific goals, monitoring framework, methods, and data products. In addition, we also summarize some working advances of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON since 2011. This overview will be helpful for the development of national observation programs of mammal diversity in China.

Key words: Mammal Diversity Monitoring Network of Sino BON (Sino BON-Mammal); biodiversity conservation; scientific goals; monitoring data products; monitoring methods

兽类类群和物种多样, 分布范围广, 适应于多种生境类型, 对栖息地变化特别敏感, 是生物多样

性保护管理与评价的关键指示类群。据 IUCN (2014) 公布的红色名录统计, 近 500 年来全世界有 79 种大

收稿日期: 2016-06-14; 接受日期: 2017-02-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500105)、“十二五”国家科技支撑项目(2012BAD19B02)和中国生物多样性监测与研究网络项目(Y6236G1001)

*通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xiaozs@ioz.ac.cn

中型兽类已经灭绝, 1,199 种兽类濒临灭绝(Monastersky, 2014)。近百年来, 我国已有赛加羚羊(*Saiga tatarica*)、普氏野马(*Equus przewalskii*)、华南虎(*Panthera tigris amoyensis*)等 10 余种(或亚种)大中型野生兽类种群灭绝。研究表明, 大肆捕杀、栖息地丧失或变化等人类活动的直接和间接影响是造成这些珍稀兽类灭绝或种群显著减少的重要驱动因子(Dirzo et al, 2014; Monastersky, 2014)。

相对于鸟类, 有关兽类的长期监测研究多集中于局部区域和少数类群(物种), 并在调查监测过程中也存在着较多问题和困难, 具体表现在: (1)许多兽类(特别是大型食肉动物)的种群数量日渐减少、密度低, 甚至濒临灭绝; (2)许多物种的外形和痕迹相似, 难以准确进行物种判定; (3)许多动物活动隐秘, 很难直接观察到实体或痕迹; (4)许多兽类仅分布在人迹罕至的森林或其他生境中, 监测难度大、成本高; (5)兽类行为习性和生存空间多种多样(Rovero et al, 2010; 肖治术等, 2014a)。从已有的监测研究来看, 大中型兽类调查多采用目击实体、足迹、粪便和其他痕迹等传统调查方法, 小型兽类调查则多采用笼捕、夹捕和陷阱等方法, 翼手类多采用网捕法(杨锡福等, 2014)。自 20 世纪 90 年代以来, 现代科技手段开始广泛应用于兽类的监测研究, 如“3S”技术、分子生物学技术(如 DNA 条形码技术)、数码影像技术(如红外相机技术)和网络信息技术等。近 10 年来, 红外相机技术比传统调查方法对大中型兽类的监测研究具有明显的优越性, 如能在恶劣环境中昼夜连续工作, 通过获得各种动物的真实图像来确认物种存在, 实现区域内兽类资源的快速评价等。目前, 该技术已逐渐发展成地栖性大中型兽类和鸟类的常规监测方法(Rovero et al, 2010; O'Connell et al, 2011; 肖治术等, 2014a)。

中国兽类多样性监测网(Mammal Diversity Monitoring Network of Sino BON, 简称 Sino BON-Mammal)是中国科学院发起建立的中国生物多样性监测与研究网络的重要专项网之一, 重点对分布于我国境内的陆生兽类资源进行监测与研究。本文在总结国内外兽类监测研究的基础上, 提出了中国兽类多样性监测网的建设规划, 重点介绍该监测网的科学目标、布局、监测技术和监测数据产品等。本文也总结了近年来中国兽类多样性监测网建设所取得的重要进展与存在的问题, 为全面推动我国

兽类多样性联网监测明确发展方向。

1 国际兽类多样性监测概况

国际上, 许多兽类物种及种群在欧洲、北美、非洲、澳洲和亚洲各地局部区域均有长达数十年甚至上百年的长期监测记录, 如北半球的小型兽类——田鼠(*Microtus* spp.)、旅鼠(*Lemmus* spp.)等(Elton, 1942; Krebs, 2013); 基于毛皮记录的雪兔(*Lepus americanus*)与猞猁(*Lynx canadensis*)的数据(1845–1937, MacLulich, 1937); 基于狩猎者狩猎行为和狩猎收获的数据(1950–1990s: Brinkman et al, 2009; 1950s–2010: Coad et al, 2013); 基于本土市场野生动物肉类流通量的数据(Fa et al, 2015); 基于本土生态知识和猎人狩猎经验的等秩分析(ordinal-scale measures)数据(1953 年以前及 1953–2005 年: Loucks et al, 2009)。然而, 针对大中型兽类在群落多样性水平的长期监测研究却极少。近 20 多年来, 随着红外相机技术、DNA 条形码技术等现代科学技术的发展, 当前兽类多样性监测呈现以下发展趋势: (1)不限于某些特定物种, 监测类群更加多样、全面; (2)开展长期定位监测(定时、定点和定量), 保证时间和空间上的长期性、连续性和可比性; (3)监测技术客观, 建立同步监测规范; (4)数据管理规范化和数据分析标准化, 监测数据信息实现网络化和可视化管理; (5)建立区域性、乃至全球性的监测网络(Ahumada et al, 2011; 肖治术等, 2014a)。

近年来, 国外关于兽类监测研究网络的建设处于快速发展之中, 如美国史密森研究院(Smithsonian Institution)和北卡罗莱纳州立大学于 2013 年合作建立的网络数据信息平台 eMammal(<http://emammal.si.edu/>), 主要通过红外相机技术来记录和收集美国 and 全球其他区域的兽类数据, 以便解答兽类分布和数量变化的相关问题, 为保护提供详实的科学数据。热带生态评价与监测网络(Tropical Ecology Assessment and Monitoring Network, TEAM Network)提出并执行了针对陆生脊椎动物(兽类和鸟类)多样性的红外相机监测规范(Team Network, 2011), 于 2007 年起已在南美洲、非洲、亚洲等 17 个热带森林监测样地陆续开展监测研究(<http://www.teamnetwork.org>)。该监测规范提出每个监测样地需建立 2–3 个公里网格的监测样方, 每个样方由 20–30 台相机构成一个相机列阵, 相机布设密度为

1台/1–2 km², 覆盖面积可达 60–90 km²。每个相机位点每年在旱季完成为期 30 天的监测(Ahumada et al, 2011)。2014 年全球森林生物多样性监测网络(CTFS/ForestGEO, <http://www.ctfs.si.edu/>)的部分森林动态监测样地采用 TEAM Network 红外相机监测规范用于陆生脊椎动物的监测。这些监测网络针对兽类的监测均以红外相机技术为支撑。此外, 一些区域性或国家层面的兽类多样性监测计划也正在实施和筹划中, 但通常与其他生物多样性长期监测计划结合在一起。

2 我国兽类多样性调查与监测概况

我国地域辽阔, 自然环境和生境类型多样, 蕴含了丰富多样的兽类资源。新中国成立以来, 我国曾多次开展重点区域或全国性兽类等野生动物资源调查, 对全国兽类本底资源有了整体了解。1995–2001 年间, 由国家林业局组织完成了第一次全国陆生脊椎动物资源调查, 初步掌握了 252 种动物(包括兽类 78 种)的种群数量、分布、栖息地以及影响这些动物资源变动的主要因子等。2009–2011 年, 国家环境保护部在一些生物多样热点地区(如云南省滇西北地区)开展了生物物种资源调查试点工作, 并以县域为单位编制野生动物物种名录。2010 年 9 月, 环境保护部会同 20 多个行业部门和相关单位编制了《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011–2030), 提出了我国未来 20 年的生物多样性保护总体目标、战略任务和优先行动, 并将“开展生物多样性调查、评估与监测”列入优先领域和行动计划中。2011 年起, 国家林业局又启动了第二次全国陆生脊椎动物资源调查项目。这些野生动物资源调查结果初步反映了全国野生动物资源的现状。

然而, 由于传统监测方法的局限性与受重视程度差异, 过去我国兽类监测的种类(或类群)或区域较少, 仅少数旗舰濒危物种有长期监测数据, 如大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)(<http://www.forestry.gov.cn/main/72/content-742880.html>), 东北虎(*Panthera tigris altaica*)和东北豹(*P. pardus orientalis*)(Jiang et al, 2015; Wang et al, 2016), 江豚(*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*, Kimura et al, 2010; Dong et al, 2015)。关于区域性大中型兽类多样性的长期监测仅见于吉林长白山国家级自然保护区。该保护区自 1980 年起已由吉林长白山科学研究院采

用样带痕迹调查和访问调查等方法对大中型兽类进行了连续 30 多年的监测, 发现东北虎、东北豹、梅花鹿(*Cervus nippon*)和原麝(*Moschus moschiferus*)等在这里可能已绝迹, 而马鹿(*C. elaphus*)、亚洲黑熊(*Ursus thibetanus*)和棕熊(*U. arctos*)等的种群数量急剧减少(朴正吉等, 2011, 2012)。此外, 我国农田害鼠等有害动物也有一些长期监测研究(Zhang et al, 2003, 2010; Yan et al, 2013)。

依据早年的贸易数据, 有研究对少数物种的种群动态曾进行过分析, 如: 王应祥等(1997)基于 1954–1992 年间云南各地、州、市豹猫(*Prionailurus bengalensis*)皮张收购量的统计, 分析了 36 年间豹猫在云南不同区域的密度变化, 从而对豹猫皮张的出口配额提出了建议。Yang 等(2003)从 11 省市药材公司收集了 1952–1988 年间的麝香历史收购量, 通过统计模型对我国麝(*Moschus spp.*)种群动态及趋势进行分析和预测。但是由于早年的购销模式已不存在, 现已很难获取类似数据, 尽管当代电商平台可提供一些数据, 但其真实性难以保证。

由于缺乏国家层面的整体性、全局性的设计和规划, 一些珍稀濒危兽类物种的监测主要为研究者根据具体研究需要而开展的, 如秦岭羚牛(*Budorcas taxicolor*)季节性迁移路线(Guan et al, 2013), 西黑冠长臂猿(*Nomascus concolor*)和海南长臂猿(*N. hainanus*)种群动态与繁殖特征和交配行为(Huang et al, 2013; Zhou et al, 2008), 滇西北地区麝(*Moschus spp.*)种群萎缩程度(Li XY & Jiang, 2014), 亚洲象(*Elephas maximus*)种群动态(林柳等, 2011)、气候变化与分布区退缩(Luo et al, 2014; Li XH et al, 2015)、亚洲象对生态走廊的利用(Pan et al, 2009)和人象冲突(Zhang & Wang, 2003)。

随着现代科技的发展, 监测手段与方法得到很大改进, 监测效率与结果可信度也得到极大提高。Zhan 等(2006)通过在四川王朗国家级自然保护区全面收集野生大熊猫粪便样品的基础上, 利用微卫星分子标记准确地鉴定了大熊猫个体, 并以 DNA 为基础的标记重捕法确定了王朗保护区的大熊猫种群数量, 从而建立了一种全新的大熊猫种群数量调查方法。Li XY 等(2014)通过对样线粪堆计数法和红外相机技术监测高山麝(*Moschus chrysogaster*)等 4 种高山偶蹄类动物监测结果的比较, 评估了红外相机技术在高山偶蹄类种群监测中的应用前景。然

而,我国许多珍稀濒危兽类,如印度野牛(*Bos gaurus*)、赤斑羚(*Naemorhedus baileyi*)、豚鹿(*Axis porcinus*)、云豹(*Neofelis nebulosa*)等,由于缺乏调查和长期监测,其种群现状及动态尚不清楚。2007 年在陕西镇坪发生的“华南虎事件”凸显了我国兽类资源长期监测研究的缺失。

近年来,红外相机技术作为新型监测方法开始广泛应用于我国大中型兽类的监测研究,并取得了重要进展(李晟等, 2014; 肖治术等, 2014a; 张履冰等, 2014; 肖治术, 2016)。20 世纪 90 年代,我国台湾(裴家骐等, 1997; 裴家骐, 1998)和云南高黎贡山(马世来和 Harris, 1996)陆续将自动感应照相系统用于野生动物调查。特别令人惊喜的是, Li C 等(2015)近期借助红外相机在西藏墨脱县格当乡的岗日嘎布山拍摄了大量猕猴的精彩照片,经与猕猴属(*Macaca*)近缘物种的对比研究和声音声谱分析,确定为灵长类新物种——白颊猕猴(*M. leucogenys*)。近 5 年来,价廉、质优的被动式红外相机在我国野生动物监测中所投入的数量达 2 万多台(据不完全统计)。目前中国科学院动物研究所联合国内外科研院所和相关自然保护区,已在全国初步建立了 30 余个基于红外相机技术的监测样区,并以此为基础建设兽类多样性监测网络(肖治术等, 2014b)和野生动物多样性监测图像数据管理系统 CameraData (肖治术等, 2014c)。此外,北京大学、北京师范大学、东北林业大学、北京林业大学、中国林业科学研究院等高校和科研院所也建立了一些基于红外相机技术的区域性兽类监测专项网(李晟等, 2014),尤以对东北虎、东北豹及其猎物的监测研究取得了显著成效(Jiang et al, 2015; Wang et al, 2016)。

总的来看,我国多数生态功能区如自然保护区、国家公园等的兽类本底资源仍未完全掌握,许多区域甚至没有调查记录,更是缺乏针对兽类多样性资源开展长期监测研究的工作。因此,当前我国兽类物种多样性监测研究面临 3 大根本任务,即弄清不同区域兽类物种资源现状(有什么物种?),这些物种的分布(在哪里?),每个物种的种群数量(有多少?)。当务之急是应尽快建立和执行我国兽类各类群的监测技术规范(包括数据管理与分析规范),制定常态监测计划,全面建设全国性兽类多样性监测网络体系和监测数据公共信息平台。

3 中国兽类多样性监测网的建设规划

基于中国森林生物多样性监测网络(CForBio, www.cfbiodiv.org/)、中国生态系统研究网络(CERN, <http://www.cern.ac.cn/>)、自然保护区网络以及我国重点生态功能区划要求,在野生动物行政主管部门的支持下及其他相关部门的配合下,中国兽类多样性监测网将针对我国森林、农田和草原荒漠等陆地生态系统的分布格局和特点,拟在我国境内典型陆地生态系统中设立一系列监测网点,逐渐形成覆盖全国陆生兽类多样性的监测网络,推动并建立兽类多样性的监测技术规范,准确记录兽类物种出现与否及其丰富度,以比较兽类多样性与种群的时空变化及环境因素所产生的影响。目前,中国兽类多样性监测网的监测对象包括我国境内重要监测区域内的各种陆生兽类。

3.1 科学目标

服务于国家生态文明建设和生态安全战略的整体需要,中国兽类多样性监测网的科学目标涉及以下几个方面:

(1)促进兽类多样性监测研究的健康发展。根据我国兽类资源的地理分布特征和多样性格局,以监测样地、样带、样点为核心分别在森林、农田草原和关键区域建立布局合理、综合配套的陆生兽类多样性监测站点,以科研院所和基层监测单位为主体联合组建全国兽类多样性监测研究专业队伍。

(2)促进国家兽类生物多样性本底调查与客观评价,探索兽类资源常态监测的长期方案。中国兽类多样性监测网的近期目标还将包括对所监测的重点区域内的兽类本底资源进行调查和评价,以便掌握这些重点监测区域内的兽类资源现状,为在全国范围内开展长期监测研究确定综合监测技术和关键监测指标等。

(3)完善监测标准与技术规范,促进国家兽类资源监测网络化和信息化发展。通过完善适合我国国情的兽类多样性监测长远目标和监测技术规范,建立和完善全国兽类多样性监测信息数据库,实现网络化分析管理、中长期态势分析的要求与目标,逐步形成全国兽类监测网络公共信息平台,同时为科普、教育、科研、生产与保护等各领域提供多样化的信息服务与决策支持。

(4)促进多学科、多平台的协同合作,提高国家

兽类资源监测水平和社会服务功能。依靠计算机网络信息技术、数码影像技术、“3S”技术、DNA 条形码技术等现代科学技术手段,建立比较领先的兽类监测技术体系和公共服务平台,建设一批具有自主创新与自我研究思路的观测设施,对兽类进行全面、多层次的监测与研究,为国家生物多样性保护和生物资源可持续利用提供科学数据和咨询建议。

3.2 总体设计

针对我国兽类资源特点和地理分布格局,在野生动物行政主管部门的支持和其他相关部门的配合下,中国兽类多样性监测网拟在全国逐步设立森林动态监测样地兽类监测系统、关键区域珍稀兽类监测系统和农田草原兽类监测系统(附录 1)。

(1)森林动态监测样地兽类监测系统。依托中国森林生物多样性监测网络所设立的森林大样地对兽类多样性进行长期监测与研究,建立并执行统一的兽类多样性监测技术规范,准确记录兽类物种多样性与资源变化,比较兽类多样性与种群的时空变化及环境因素所产生的影响,开展兽类的生态系统功能和生态服务评价研究,服务于我国森林生物多样性监测网络的建设和发展,为我国森林生物多样性资源保护提供科学依据和决策支持。

(2)关键区域珍稀兽类监测系统。对我国青藏高原、云贵高原、横断山、秦岭、东北和海南等关键区域珍稀兽类资源(大熊猫、灵长类、东北虎和有蹄类等)及其栖息地进行长期监测与研究,建立并执行统一的兽类多样性监测技术规范,服务于我国生物多样性关键区域珍稀兽类的物种保护与自然保护区管理成效的评价等,为我国重要珍稀濒危物种和其他土著物种及其栖息地的保护管理提供科学依据和决策支持。

(3)农田草原兽类监测系统。对我国重要农区(华北平原、东北平原、洞庭湖区)和草原荒漠区(内蒙古锡林郭勒、青海湖)有害兽类及其天敌资源进行长期监测与研究,建立并执行统一的兽类多样性监测技术规范,服务于我国农田和草原荒漠生态系统兽类多样性资源管理以及有害生物控制,为我国农牧业可持续发展提供科学依据和决策支持。

上述兽类多样性监测网点的设立具有代表性,既涵盖了我国兽类多样性和特有物种丰富的关键区域,又涉及了我国陆地生态系统的主要生态功能区(森林、农田和草原荒漠)。“十三五”期间,兽类监测

网点建设将在此基础上补充一些监测网点(特别是西部区域),加强对特有物种和重要类群的监测研究,最终形成覆盖全国重要生态功能区的综合性兽类监测研究网络。此外,我国上述森林动态监测样地也是全球森林生物多样性监测网络的重要组成部分,有关监测结果将可与全球其他监测样地进行比较研究。通过采用公里网格监测方案,我国这些监测样地获得的红外相机监测数据也可与热带生态评价与监测网络相关样地所获得的数据进行比较研究。

3.3 主要内容、方法和指标

3.3.1 主要内容

中国兽类多样性监测网选择我国重要生态功能区域和生物多样性热点区域,按森林(12 个样地)、关键区域(12 个样地)和农田草原(5 个样地)等形成全国陆生兽类物种多样性监测网络,重点监测陆生大中型兽类(包括部分地栖鸟类)和小型兽类(含翼手类)物种与群落组成及种群变化以及影响其变化的关键环境驱动因子。内容包括建立并完善兽类物种多样性监测的标准化技术体系,并按照标准化的监测技术规范对兽类物种组成、种群动态及其相关驱动因子开展长期监测研究;建立并完善兽类物种多样性监测数据公共信息平台,为我国重要兽类资源保护、有害生物管理与控制提供科学依据和决策支持。

3.3.2 主要监测方法

中国兽类多样性监测网将以监测样地、监测样点为单位分类采集。陆生兽类监测主要方法将覆盖所有兽类类群以及相关兽类的行为、扩散和通讯等方面。因此主要监测数据包括依据图像、音频、视频、标本和组织样品等,以确定分类单元,纲、目、科、属或物种、种群数量以及其相关指标(种群数量、分布、行为、家域大小等),从而明确兽类资源的时空动态、造成兽类资源变化的影响因素以及兽类资源变化所产生的后果等。主要监测方法分述如下:

(1)红外相机技术:该技术的应用受地形、气候影响小,可有效提供监测区域内兽类的物种多样性与丰富度(种类及数量)、地理分布、栖息地利用、人为干扰、野生动物肇事等重要信息,对于大中型兽类、行踪诡秘、夜行性、稀有物种、外形易于识别物种更为有效,适用于地栖性物种。兽类监测专项网拟采用公里网格抽样方案对所设监测样点进

行长期监测。公里网格抽样方案参考 TEAM Network (2011) 所提出并执行的监测规范。公里网格抽样方案整体上考虑了大中型兽类的活动范围和分布情况,但对大型猫科动物的监测效果不理想(Wearn et al, 2013)。建议每个监测区域设置 2–3 个公里网格的监测样方,每一样方布设 20–30 台红外相机组成一个相机阵列,相机布设密度为 1 台/2 km² 或 1 台/km²(肖治术等, 2014b)。每个相机位点在每年旱季(热带和亚热带区域)或秋冬季(温带区域)完成为期 30–60 天的监测,有条件的监测点可开展常年监测。监测样方的选择需考虑植被类型、海拔梯度和人类活动干扰梯度等。具体相机位点的设置和布设可根据当地地形、动物行走路线、工作难度和相机安全性等进行综合考虑。公里网格抽样方案从 2014 年起已在我国各森林动态监测样地和相关自然保护区陆续开展。

(2) 标记重捕技术: 小型兽类(占我国兽类物种的 40% 以上, 不包括翼手类)在兽类多样性组成和生态系统功能中具有重要作用,但由于其体型较小、外形相似,难以通过红外相机技术所获得的影像进行物种识别。因此,标本采集与标记重捕法是掌握小型兽类物种与群落动态的重要途径。以森林动态监测样地为例,每个样地(15–30 ha)随机选取 3–5 个 1 ha (100 m × 100 m) 的样方作为重复,每个样方布设 7 × 7 = 49 个捕鼠笼(笼间距为 12 m),连续放置 3 天(谢文华等, 2014)。每个森林动态监测样地在每年秋季完成 1 次调查,对捕获的个体记录种类、性别、体重和繁殖情况等。此外,利用陷阱法在样方内随机埋设 9 只小桶,调查食虫目种类和小型啮齿类物种(杨锡福等, 2014)。

(3) 超声波监测技术: 为翼手目种类的主要监测手段,可以用于分析物种组成、行为活动以及种群内个体间通讯交流等内容(Kunz & Parsons, 2009)。

(4) 视频监测技术: 该技术主要用于多数兽类物种的各种行为以及兽类与植物之间种间互作关系等数据的收集和分析(赵清建等, 2016)。

(5) 声音监测技术: 野生动物栖息地内的声音信号可以反映栖息地质量、人为干扰强度、野生动物个体及种群的分布、活动、种群结构及生理状况等保护生物信息(Blumstein et al, 2011)。声音信号具有传递范围远、受障碍物限制小的优点,对于生性胆怯、行踪隐秘、栖息于亚冠层生境中的动物,由

于光线和离地高度导致视觉信号传递受限,声音信号在物种调查及监测中优势更为明显。该技术可实时监测兽类物种及其栖息地,通过设置多台录音机组成的阵列,采集兽类物种声音数据分析物种组成、种群内个体间声音通讯行为等内容。

(6) GPS 跟踪技术: 该技术主要用于兽类物种的时间和空间定位、家域大小、扩散、迁移等方面的研究(Kays et al, 2015)。

(7) 非损伤性 DNA 监测技术: 主要针对一些珍稀濒危且分布区较狭窄的大型种类的监测,可用于分析物种的种群数量、迁移扩散等内容(Mondol et al, 2009)。

3.3.3 监测数据产品

中国兽类多样性监测网的监测数据产品包括:

(1) 制定我国陆生兽类各类群的监测技术规范 and 监测标准,建立示范性监测网点和监测示范区,并在全中国范围内各部门进行示范推广。

(2) 建立和完善我国陆生兽类多样性监测数据公共信息平台,包括兽类图像、视频及音频数据集、哺乳动物的活动规律和迁移扩散模式、兽类与植物之间相互关系的数据集或数据库。

(3) 建立和完善我国陆生哺乳动物资源的分布数据库。

(4) 基于上述数据库,建立和完善我国陆生兽类多样性保护管理成效的评估标准和评价细则,及时发布我国陆生兽类多样性监测的年度报告、进展报告以及相关论著等。

4 中国兽类多样性监测网的进展及展望

经过 6 年来的发展(2011–2016),中国兽类多样性监测网主要在兽类多样性红外相机联网监测方面取得了如下重要进展:

(1) 在全国陆续建立了兽类监测样区 30 余个,其纬度跨度大(从大兴安岭寒温带森林到西双版纳热带森林),涉及了我国主要森林植被类型,如: 针阔混交林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林和热带雨林。每个监测样区布设了 20–150 余台红外相机,采用公顷网格方案和公里网格方案监测大中型兽类和地面活动鸟类(肖治术, 2014, 2016; 肖治术等, 2014b)。

(2) 初步建立了基于红外相机技术的监测数据库管理规范与分析标准,率先在国内建立了针对红

外相机监测数据的图像数据管理系统 CameraData (<http://cameradata.ioz.ac.cn>, 于2013年9月起开始运行) (肖治术等, 2014c)。CameraData 为所有上传的图像数据建立规范的分析标准, 实现了网络化管理, 并将按监测区域和类群(物种)建立多种类型的数据库、图片库和物种分布地图等。目前, CameraData 上传照片超过100多万张, 已鉴定兽类80余种和鸟类160余种, 有关数据仍在进一步积累中。

(3)为了推动我国野生动物红外相机监测规范的建立和执行, 促进我国红外相机监测数据信息的快速分析和及时发布, 于2014年7月和2016年8月在北京成功举办了两届野生动物多样性监测学术研讨会及相关的红外相机监测技术培训班。参会代表充分认识到野生动物红外相机监测规范和数据管理规范的重要性, 对我国野生动物红外相机监测规范、数据管理与分析、数据共享、科研合作等方面展开了讨论, 为全面推进我国野生动物红外相机联网监测研究工作起到了承前启后的作用。

(4)近期在《生物多样性》(2014)、《森林与人类》(2015)和《兽类学报》(2016)等杂志组织发表了野生动物红外相机监测研究专辑。上述专辑总结了近20年来红外相机技术在我国野生动物监测中的应用成果和经验教训, 为我国野生动物红外相机联网同步监测研究明确了发展方向(肖治术等, 2014a; 肖治术, 2016)。

中国兽类多样性监测网的运行以及所取得的重要进展, 标志着我国兽类多样性联网监测进入新的发展阶段。2016年年底, 环保部负责的生物多样性保护专项启动了长江经济带58个监测样区(自然保护区)的大中型哺乳动物红外相机监测, 这将进一步推动我国兽类多样性资源网络化和标准化监测与研究。然而, 全面建设全国尺度的兽类多样性监测网络还存在不足, 监测网络建设任重而道远, 今后需要落实以下3个方面: (1)针对不同生态功能区和不同兽类类群, 在全国范围内制定并严格执行的监测技术规范和相关监测标准, 保证数据的连续性、可比性和长效性; (2)建立和健全我国兽类多样性监测数据库和公共信息共享平台, 实现监测数据的信息化、网络化和可视化; (3)对我国兽类多样性长期监测予以稳定支持, 发展和壮大专业监测队伍, 开展技术培训, 加强学术交流, 有效促进国内和国际的科研合作。

参考文献

- Ahumada JA, Silva K, Gajapersad C, Hallam J, Hurtado E, Martin A, McWilliam B, Mugerwa T, O'Brien T, Rovero F (2011) Community structure and diversity of tropical forest mammals, data from a global camera trap network. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences*, 366, 2703–2711.
- Blumstein DT, Mennill DJ, Clemins P, Girod L, Yao K, Patricelli G, Deppe JL, Krakauer AH, Clark C, Cortopassi KA, Hanser SF, McCowan B, Ali AM, Hanser SF (2011) Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48, 758–767.
- Brinkman TJ, Chapin T, Kofinas G, Person DK (2009) Linking hunter knowledge with forest change to understand changing deer harvest opportunities in intensively logged landscapes. *Ecology and Society*, 14, 36.
- Coad L, Schleicher J, Milner-Gulland EJ, Marthews TR, Starkey M, Manica A, Abernethy KA (2013) Social and ecological change over a decade in a village hunting system, central Gabon. *Conservation Biology*, 27, 270–280.
- Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJB, Collen B (2014) Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345, 401–406.
- Dong L, Wang D, Wang K, Mei Z, Wang S, Akamatsu T, Kimura S (2015) Yangtze finless porpoises along the main channel of Poyang Lake, China: implications for conservation. *Marine Mammal Science*, 31, 612–628.
- Elton C (1942) *Voles, Mice and Lemmings: Problems in Population Dynamics*. Clarendon Press, Oxford.
- Fa JE, Olivero J, Farfán MÁ, Márquez AL, Duarte J, Nackoney J, Vargas JM (2015) Correlates of bushmeat in markets and depletion of wildlife. *Conservation Biology*, 29, 805–815.
- Guan TP, Ge BM, McShea W, Li S, Song YL, Stewart C (2013) Seasonal migration by a large forest ungulate: a study on takin (*Budorcas taxicolor*) in Sichuan Province, China. *European Journal of Wildlife Research*, 59, 81–91.
- Huang B, Guan ZH, Ni QY, Orkin J, Fan PF, Jiang XL (2013) Observation of intra- and extra-group copulation and reproductive characters in free ranging groups of western black crested gibbon (*Nomascus concolor jingdongensis*). *Integrative Zoology*, 8, 427–440.
- Jiang G, Qi J, Wang G, Shi Q, Darman Y, Hebblewhite M, Miquelle DG, Li Z, Zhang X, Gu J, Chang Y, Zhang M, Ma J (2015) New hope for the survival of the Amur leopard in China. *Scientific Reports*, 5, 15475.
- Kays R, Crofoot MC, Jetz W, Wikelski M (2015) Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, 348, aaa2478.
- Kimura S, Akamatsu T, Li S, Dong S, Dong L, Wang K, Wang D, Arai N (2010) Density estimation of Yangtze finless porpoises using passive acoustic sensors and automated

- click train detection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128, 1435–1445.
- Krebs CJ (2013) *Population Fluctuations in Rodents*. University of Chicago Press, Chicago.
- Kunz TH, Parsons S (2009) *Ecological and Behavioral Methods for the Study of Bats*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Li C, Zhao C, Fan PF (2015) White-cheeked macaque (*Macaca leucogenys*): a new macaque species from Modog, southeastern Tibet. *American Journal of Primatology*, 36, 679–690.
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. *生物多样性*, 22, 685–695.]
- Li XY, Jiang X (2014) Implication of musk deer (*Moschus* spp.) depletion from hunter reports and dung transect data in northwest Yunnan, China. *Journal for Nature Conservation*, 22, 474–478.
- Li XY, Buzzard P, Jiang X (2014) Habitat associations of four ungulates in mountain forests of southwest China, based on camera trapping and dung counts data. *Population Ecology*, 56, 251–256.
- Li XH, Jiang G, Tian H, Xu L, Yan C, Wang Z, Zhang Z (2015) Human impact and climate cooling caused range contraction of large mammals in China over the past two millennia. *Ecography*, 38, 74–82.
- Lin L, Zhang LT, Luo AD, Wang LF, Zhang L (2011) Population dynamics, structure and seasonal distribution pattern of Asian elephant (*Elephas maximus*) in Shangyong Protected Area, Yunnan, China. *Acta Theriologica Sinica*, 31, 226–234. (in Chinese with English abstract) [林柳, 张龙田, 罗爱东, 王利繁, 张立 (2011) 尚勇保护区亚洲象种群数量动态、种群结构及季节分布格局. *兽类学报*, 31, 226–234.]
- Loucks C, Mascia MB, Maxwell A, Huy K, Duong K, Chea N, Seng T (2009) Wildlife decline in Cambodia, 1953–2005: exploring the legacy of armed conflict. *Conservation Letters*, 2, 82–92.
- Luo Z, Jiang Z, Tang S (2014) Impacts of climate change on distributions and diversity of ungulates on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 25, 24–38.
- Ma SL, Harris RB (1996) Use of remote camera systems to document wildlife species presence in forested areas of Yunnan. *Zoological Research*, 17, 360–370. (in Chinese) [马世来, Harris RB (1996) 自动感应照相系统在野生动物调查中的应用. *动物学研究*, 17, 360–370.]
- MacLulich DA (1937) *Fluctuations in the Numbers of Varying Hare (*Lepus americanus*)*. University of Toronto Press, Toronto.
- Mondol S, Karanth UK, Samba Kumar N, Gopalaswamy AM, Andheria A, Ramakrishnan U (2009) Evaluation of non-invasive genetic sampling methods for estimating tiger population size. *Biological Conservation*, 142, 2350–2360.
- Monastersky R (2014) Life, a status report. *Nature*, 516, 158–161.
- O'Connell AF, Nichols JD, Karanth KU (2011) *Camera Traps in Animal Ecology: Methods and Analyses*. Springer, New York.
- Pan W, Lin L, Luo A, Zhang L (2009) Corridor use by Asian elephants. *Integrative Zoology*, 4, 220–231.
- Pei KQ (1998) An evaluation of using auto-trigger camera to record activity patterns of wild animals. *Taiwan Journal of Forestry Science*, 13, 317–324. (in Chinese with English abstract) [裴家骐 (1998) 利用自动照相设备记录野生动物活动模式之评估. *台湾森林科学*, 13, 317–324.]
- Pei KQ, Chen CZ, Wu ST, Teng MQ (1997) Use of camera-trapping and geographic information system to study spatial distribution of forest wildlife. *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 30, 279–289. (in Chinese with English abstract) [裴家骐, 陈朝圳, 吴守徒, 滕民强 (1997) 利用相机捕获和地理信息系统研究野生动物在森林中的空间分布. *中华林学季刊*, 30, 279–289.]
- Piao ZJ, Piao LG, Wang ZC, Luo YM, Wang C, Sui YC (2012) Population size variation of black bear (*Ursus thibetanus*) and brown bear (*U. arctos*) between 1986 to 2010 in the Changbai Mountain Nature Reserve, China. *Chinese Journal of Zoology*, 47(3), 66–72. (in Chinese with English abstract) [朴正吉, 朴龙国, 王卓聪, 罗玉梅, 王超, 睢亚橙 (2012) 长白山自然保护区黑熊和棕熊种群数量动态分析. *动物学杂志*, 47(3), 66–72.]
- Piao ZJ, Sui YC, Cui ZG, Zhang GL, Wang Q, Fu XK (2011) The history and current status of felid population in Changbai Mountain Nature Reserve. *Chinese Journal of Zoology*, 46(3), 78–84. (in Chinese with English abstract) [朴正吉, 睢亚橙, 崔志刚, 张国利, 王群, 傅学魁 (2011) 长白山自然保护区猫科动物种群数量变化及现状. *动物学杂志*, 46(3), 78–84.]
- Rovero F, Tobler M, Sanderson J (2010) Camera trapping for inventorying terrestrial vertebrates. In: *Manual on Field Recording Techniques and Protocols for All Taxa Biodiversity Inventories and Monitoring* (eds Eymann J, Degreef J, Häuser C, Monje JC, Samyn Y, Vanden Spiegel D), pp. 100–128. The Belgian National Focal Point to the Global Taxonomy Initiative.
- TEAM Network (2011) *Terrestrial Vertebrate Protocol: Implementation Manual*, v. 3.1. Tropical Ecology, Assessment and Monitoring Network, Center for Applied Biodiversity Science, Conservation International, Arlington VA (accessed on April 2011)
- Wang TM, Feng LM, Mou P, Wu JG, Smith JLD, Xiao WH, Yang HT, Dou HL, Zhao XD, Cheng YC, Zhou B, Wu HY, Zhang L, Tian Y, Guo QX, Kou XJ, Han XM, Miquelle DG, Oliver CD, Xu RM, Ge JP (2016) Amur tigers and leopards returning to China: direct evidence and a landscape conservation plan. *Landscape Ecology*, 31, 491–503.

- Wang YX, Jiang XL, Feng Q, Chen ZP, Wang WM (1997) Abundance, sustainable utilization and conservation of leopard cat in Yunnan. *Acta Theriologica Sinica*, 17, 31–42. (in Chinese with English abstract) [王应祥, 蒋学龙, 冯庆, 陈志平, 王为民 (1997) 云南豹猫资源量的可持续利用与保护. 兽类学报, 17, 31–42.]
- Wearn OR, Rowcliffe JM, Carbone C, Bernard H, Ewers RM (2013) Assessing the status of wild felids in a highly-disturbed commercial forest reserve in Borneo and the implications for camera trap survey design. *PLoS ONE*, 8, e77598.
- Xiao ZS (2014) An introduction to wildlife camera trapping monitoring from Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio). *Biodiversity Science*, 22, 808–809. (in Chinese) [肖治术 (2014) 我国森林动态监测样地的野生动物红外相机监测. 生物多样性, 22, 808–809.]
- Xiao ZS (2016) Wildlife resource inventory using camera-trapping in natural reserves in China. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 270–271. (in Chinese) [肖治术 (2016) 红外相机技术促进我国自然保护野生动物资源编目调查. 兽类学报, 36, 270–271.]
- Xiao ZS, Li XH, Jiang GS (2014a) Applications of camera trapping to wildlife surveys in China. *Biodiversity Science*, 22, 683–684. (in Chinese) [肖治术, 李欣海, 姜广顺 (2014a) 红外相机技术在我国野生动物监测研究中的应用. 生物多样性, 22, 683–684.]
- Xiao ZS, Li XH, Wang XZ, Zhou QH, Quan RC, Shen XL, Li S (2014b) Developing camera-trapping protocols for wildlife monitoring in Chinese forests. *Biodiversity Science*, 22, 704–711. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李欣海, 王学志, 周岐海, 权锐昌, 申小莉, 李晟 (2014b) 探讨我国森林野生动物红外相机监测规范. 生物多样性, 22, 704–711.]
- Xiao ZS, Wang XZ, Li XH (2014c) An introduction to CameraData: an online database of wildlife camera trap data. *Biodiversity Science*, 22, 712–716. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 王学志, 李欣海 (2014c) 野生动物多样性监测图像数据管理系统CameraData介绍. 生物多样性, 22, 712–716.]
- Xie WH, Yang XF, Li JN, Tao SL, Xiao ZS (2014) A preliminary study of the biodiversity of ground-dwelling small mammals in Badagongshan National Nature Reserve, Hunan Province. *Biodiversity Science*, 22, 216–222. (in Chinese with English abstract) [谢文华, 杨锡福, 李俊年, 陶双伦, 肖治术 (2014) 八大公山自然保护区地栖性小兽多样性初步研究. 生物多样性, 22, 216–222.]
- Yan C, Xu L, Xu T, Cao X, Wang F, Hao S, Yang H, Zhang Z (2013) Agricultural irrigation mediates climatic effects and density dependence in population dynamics of Chinese striped hamster in North China Plain. *Journal of Animal Ecology*, 82, 334–344.
- Yang XF, Xie WH, Tao SL, Li JN, Xiao ZS (2014) A comparison of live traps and pitfall traps for monitoring the diversity of ground-dwelling small mammals in forests. *Acta Theriologica Sinica*, 34, 193–199. (in Chinese with English abstract) [杨锡福, 谢文华, 陶双伦, 李俊年, 肖治术 (2014) 笼捕法和陷阱法对森林小型兽类多样性监测效率比较. 兽类学报, 34, 193–199.]
- Yang Q, Meng X, Xia L, Feng Z (2003) Conservation status and causes of decline of musk deer (*Moschus* spp.) in China. *Biological Conservation*, 109, 333–342.
- Zhan X, Li M, Zhang Z, Goossens B, Chen Y, Wang H, Wei F (2006) Molecular censusing doubles giant panda population estimate in a key nature reserve. *Current Biology*, 16, 451–452.
- Zhang LB, Cui SP, Huang YJ, Chen DQ, Qiao HJ, Li CW, Jiang ZG (2014) Infrared camera traps in wildlife research and monitoring in China: issues and insights. *Biodiversity Science*, 22, 696–703. (in Chinese with English abstract) [张履冰, 崔绍朋, 黄元骏, 陈代强, 乔慧捷, 李春旺, 蒋志刚 (2014) 红外相机技术在我国野生动物监测中的应用: 问题与限制. 生物多样性, 22, 696–703.]
- Zhang L, Wang N (2003) An initial study on habitat conservation of Asian elephant (*Elephas maximus*), with a focus on human elephant conflict in Simao, China. *Biological Conservation*, 112, 453–459.
- Zhang ZB, Pech R, Davis S, Shi DZ, Wan XR, Zhong WQ (2003) Extrinsic and intrinsic factors determine the eruptive dynamics of Brandt's voles *Microtus brandti* in Inner Mongolia, China. *Oikos*, 100, 299–310.
- Zhang ZB, Xu L, Guo C, Wang Y, Guo YW (2010) Effect of ENSO-driven precipitation on population irruptions of the Yangtze vole *Microtus fortis calamorum* in the Dongting Lake region of China. *Integrative Zoology*, 5, 176–184.
- Zhao QJ, Gu HF, Yan C, Cao K, Zhang ZB (2016) Impact of forest fragmentation on rodent-seed network. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 15–23. (in Chinese with English abstract) [赵清建, 顾海峰, 严川, 曹科, 张知彬 (2016) 森林破碎化对鼠类-种子互作网络的影响. 兽类学报, 36, 15–23.]
- Zhou J, Wei FW, Li M, Pui Lok CB, Wang DL (2008) Reproductive characters and mating behaviour of wild *Nomascus hainanus*. *International Journal of Primatology*, 29, 1037–1046.

(责任编辑: 蒋志刚 责任编辑: 闫文杰)

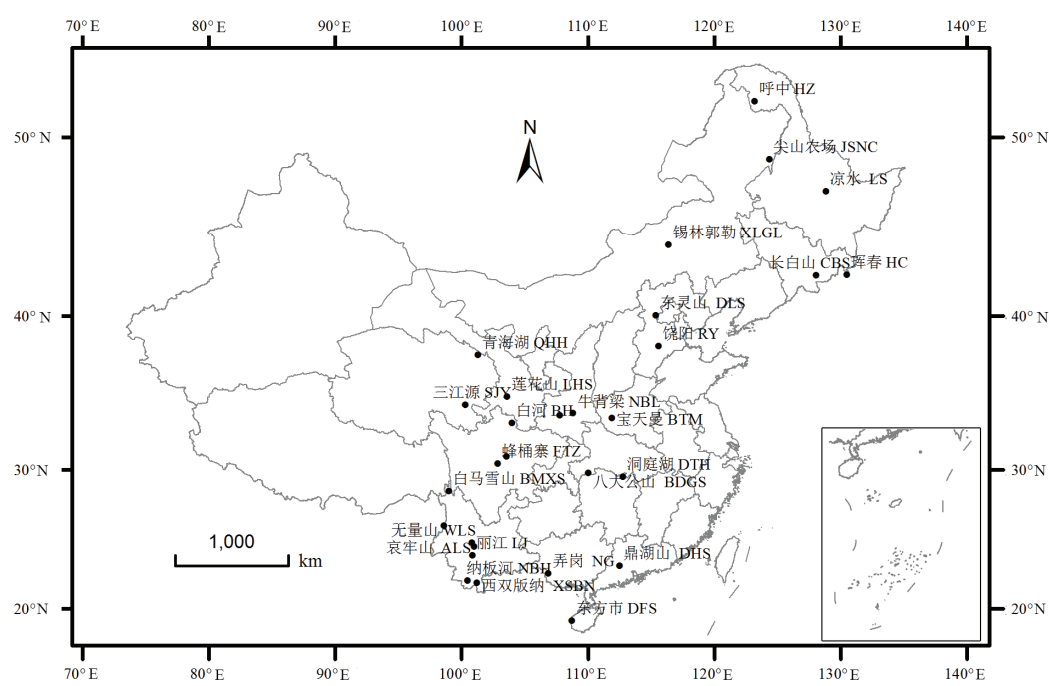
附录 Supplementary Material

附录1 中国兽类多样性监测网首批监测网点分布示意图

Appendix 1 Map of the first proposed monitoring sites for Mammal Diversity Monitoring Network of Sino BON

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016159-1.pdf>

肖治术, 李学友, 向左甫, 李明, 蒋学龙, 张礼标. 中国兽类多样性监测网的建设规划与进展. 生物多样性, 2017, 25 (3): 237–245.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016159>



附录 1 中国兽类多样性监测网首批监测网点分布示意图
Appendix 1 Map of the first proposed monitoring sites for Mammal Diversity Monitoring Network of Sino BON

•生物多样性监测专题•

中国关键地区两栖爬行动物多样性 监测与研究

李 成¹ 谢 锋¹ 车 静² 江建平^{1*}¹ (中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)² (中国科学院昆明动物研究所, 昆明 650223)

摘要: 两栖爬行动物是良好的环境指示物种, 是环境变化的早期预警系统之一, 目前正经历着全球范围的种群快速下降和物种灭绝。为了观测和研究物种及种群下降或灭绝的态势和机制, 亟需对我国两栖爬行动物多样性开展长期监测和研究。在中国, 对两栖爬行动物的监测研究始于1997年对若尔盖湿地两栖动物的监测。此后, 两栖爬行动物监测率先在西南山地、台湾等生物多样性丰富地区开展起来。2011年, 在借鉴美国和英国的两栖爬行动物监测计划的基础上, 环境保护部启动了“两栖类示范观测项目”, 初步实现了由点到面、由定性到定量、由静态向动态的突破。因为单一类群的监测仅代表生态系统的基本组成, 而从生态系统角度考量, 必须深入研究生态系统的结构(食物网中各类群的捕食、竞争、共生等种间关系)和动态(各类群的生长、繁殖、种群波动和致危因素等)。因此, 作为中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)的重要组成部分, “中国关键地区两栖爬行动物监测与研究专项网”项目将在22个生物多样性关键地区对典型生态系统中的两栖爬行动物组成、种群动态和结构进行长期监测与研究, 构建生态模型, 探讨两栖爬行动物的种群现状、群落结构及其动态趋势和相关机制, 制定和不断完善我国两栖爬行动物应对未来环境变化的保护和管理对策。

关键词: 监测网络; 两栖动物; 爬行动物; 监测指标; 监测方法; 中国

Monitoring and research of amphibians and reptiles diversity in key areas of China

Cheng Li¹, Feng Xie¹, Jing Che², Jianping Jiang^{1*}¹ Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041² Kunming Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

Abstract: Amphibians and reptiles are important indicator species of ecosystem health, and they are sensitive to environmental changes and are often regarded as critical “early warning systems”. Many of their populations are undergoing rapid decline and therefore a long-term monitoring system is imperative to identify immediate threats to the animals. Monitoring program on Chinese amphibians began in the Zoige wetlands in 1997. Since 2000, a great number of monitoring studies of amphibians and reptiles have been carried out in mountains of Southwest China, Taiwan, and other regions with rich biodiversity. In 2011, the Ministry of Environmental Protection officially launched the “Amphibian Observation Initiative of China” program, which expanded regional programs to country-wide using both qualitative and quantitative methods to collect amphibian biodiversity data across long-term temporal scales. From an ecosystem viewpoint, long-term monitoring studies should include not only species distribution, richness, and population structure, but also population growth, key life-history traits, species interactions (e.g., predation, competition, and mutualism), community structure, and other dynamic factors. The program “Monitoring and Research of Amphibians and Reptiles in Key Areas of China” will cover 22 key areas with rich biodiversity and high habitat heterogeneity across China. As part of the Chinese Biodiversity Monitoring and Research Network (Sino BON), this pro-

收稿日期: 2016-05-16; 接受日期: 2016-09-02

基金项目: 中国生物多样性监测与研究网络项目(Sino BON)和国家自然科学基金(31471964)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jiangjp@cib.ac.cn

gram aims to combine intensive field surveys and ecological modeling techniques to evaluate population dynamics and community structures of amphibian and reptile species in the study areas.

Key words: monitoring networks; amphibians; reptiles; monitoring variables; monitoring methods; China

两栖动物是脊椎动物中由水生到陆生的过渡类型,具有水生脊椎动物和陆生脊椎动物的双重特性;爬行动物则是真正摆脱对水的依赖征服陆地的脊椎动物。两栖爬行动物是研究陆生四足动物起源和水生到陆生演化的典型对象及关键代表,在脊椎动物演化过程中占据重要的地位。在食物链和生态系统中,两栖爬行动物也是重要的中间类群,对于维持生态系统的完整性和健康具有重要的作用。因此两栖动物又被认为是环境健康的重要指示类群,是监测环境变化的关键早期预警系统(Pounds et al, 2006; Wake, 2007)。

近50年来,全球两栖爬行动物面临着多种威胁并经历着种群快速下降和物种灭绝(Stuart et al, 2004; Hoffmann et al, 2010)。评估分析结果显示,全球大约20%的脊椎动物受到灭绝威胁,包括25%的哺乳动物、13%的鸟类、22%的爬行动物以及41%的两栖动物(Hoffmann et al, 2010)。显然两栖爬行动物的境况尤其严峻,长期系统地监测两栖爬行动物种群动态并确定其致危因素是应对危机的迫切需求(Wake, 1998; Urban, 2015)。

我国涵盖多个生物多样性保护热点地区(Myers et al, 2000),两栖爬行动物丰富而独特(张孟闻等, 1998; 赵尔宓等, 1998, 1999; Xie et al, 2007; 费梁等, 2012)。对我国两栖爬行动物的最新评估结果表明:我国两栖类受威胁物种达到43.1% (江建平等, 2016),爬行类为29.7% (蔡波等, 2016),分别超过IUCN (2016)报道的世界平均值31.6%和20.2%。然而,当前的评估方法主要基于物种的分布信息和专家意见,尚缺乏长期的种群动态信息和主要致危因素的评估,亟需开展对我国两栖爬行动物多样性的长期监测与研究。

本文在分析国内外两栖爬行动物监测计划的基础上,结合已有的工作基础、人才与技术储备,提出了我国生物多样性关键地区两栖爬行动物监测与研究计划,包括科学目标、布局、监测指标和技术方法,并展望了监测与研究计划的发展前景。

1 两栖爬行动物监测计划与进展

20世纪70、80年代,科学家发现全球许多地区的两栖动物的物种种类和种群数量都在神秘地快速下降;Wake (1990)指出全球范围内两栖动物呈明显衰退趋势。为了更好地比较和评估两栖动物的种群变化,1994年,Heyer等编辑出版了*Measuring and Monitoring Biological Diversity Standard Methods for Amphibians*一书,该书总结了10种代表性两栖动物的监测方法。谢锋等(2002)对这些方法做了综述和评价。为开展爬行动物多样性的监测和评价,McDiarmid等(2012)编辑出版了*Reptile Biodiversity Standard Methods for Inventory and Monitoring*。监测方法的标准化极大地推动了全球范围内两栖爬行动物的监测工作,其中,美国和英国的监测计划具有很好的代表性和示范作用。

1.1 美国两栖动物研究和监测计划

2000年,美国内政部下属的地质调查局牵头开展了首次国家级的两栖动物研究和监测计划(Amphibian Research and Monitoring Initiative, ARMI),其目标包括:建立一个框架来监测美国两栖动物的分布、种群状况和动态;了解全国两栖动物下降的范围和程度;收集影响两栖动物分布的环境因子;研究并识别导致两栖动物下降的威胁因素;为制定科学的保护和管理对策提供信息(<http://armi.usgs.gov/>)。ARMi是一个多部门合作和广泛参与的监测计划,农业部、渔业和野生动物管理局以及一些大学、科研院所、自然保护区等均参与了该项监测计划。

ARMi没有规定统一的监测方法,主要基于以下原因:一是两栖动物分布相对狭窄,很少有全美广布种;二是各种两栖动物的生境、繁殖方式等都有所不同,因此难以采用统一的方法来进行监测。ARMi采取的是一个金字塔型的概念(Corn et al, 2005; Muths et al, 2005),即将监测结构分为3层:基础层是广泛而粗放的监测,在全国各地布设很多点,主要依靠志愿者、高校、科研机构提供关于两

栖动物的编目、分布、种群等基础信息;中间层是整个监测体系的核心,主要在一些国家公园和保护区开展,主要采用目视法,也称空间占有调查方法,即在监测区域内随机选择监测地点,只记录某个地点两栖动物的有无,进而推断整个监测区域两栖动物的状态和变化;最顶层是选择少数典型的地区开展深入的种群监测和研究,精心选择一些重要的和濒危的物种的典型栖息地,监测这些物种的地理分布、种群数量、动态、繁殖、生活史和疾病等详细信息,探讨环境变化和两栖动物种群动态之间的关系。

1.2 英国两栖爬行动物监测计划

2007年,英国启动了两栖爬行动物监测计划(National Amphibian and Reptile Recording Scheme, NARRS),其目的是监测英国所有的两栖动物和爬行动物的保护状态(<http://www.narrs.org.uk/>)。该计划由英国两栖爬行动物保护基金会牵头,两栖爬行动物志愿者等民间组织参与。NARRS是一个基于志愿者的监测计划,每年对志愿者进行培训,然后将其安排到特定的地点开展监测工作。NARRS采取随机抽样的方法,对全英两栖爬行动物状况进行推断。统计分析显示,如对全英的两栖爬行动物状况进行推断,至少需要随机抽取400个样点。因此,NARRS将全国划分为1 km × 1 km栅格,随机选取其中的400个,调查每个栅格中的水体;将城市化或半城市化率面积大于50%的栅格以及明显不适于两栖动物的生境(如海洋、河口、内陆深水区等)排除在外。每个志愿者被安排负责邻近其居住地的一个或多个方格。主要采用3种方法进行监测:目视法、网捕法、夜间灯光搜寻法;每个水体需重复1-3次。在每年的春季开展监测,记录两栖动物的种类、数量、成体、幼体、栖息地状况等信息,并上传到数据库。另外,英国还有针对特定濒危两栖爬行动物如黄条背蟾蜍(*Bufo calamita*)、沙地蜥蜴(*Lacerta agilis*)和滑鳞蛇(*Coronella austriaca austriaca*)等的精细监测项目,其中对黄条背蟾蜍分布的60个左右的地点,每年4-8月开展野外监测,已持续了40多年(Buckley & Beebee, 2004)。

1.3 中国的两栖动物监测计划

我国的监测工作始于1997年Feller等(2003)对若尔盖湿地两栖动物的监测研究;此后,两栖动物监测在台湾、西南山地等生物多样性丰富地区相继

开展起来(周文豪等, 2002; 李成等, 2008)。经过十多年的积累,在全国范围实施两栖动物监测工作的时机已经成熟。2011年,在环境保护部支持下,环境保护部南京环境科学研究所联合中国科学院成都生物研究所启动了“两栖类示范观测项目”,2011-2013年,先期选择了26个样区,参加单位16个;在规范技术、培训队伍之后,从2014年开始,样区数增加到54个,参加单位增加到32个,覆盖了25个省区,监测到了我国30%以上的两栖动物物种数。项目以两栖动物种群动态为主要监测目标,采用了多种监测方法,包括以人为主、主动取样的样线法、样方法、限时取样法和标志重捕法,以及以物为主、被动取样的围栏陷阱法、人工掩蔽物法、人工避难所法等。监测内容包括了物种多样性、种群动态、栖息地、遗传结构、威胁因素等。该项工作基本形成了覆盖全国的两栖动物监测网络,实现了点到面的突破;并基本实现了两栖动物监测从定性到定量、从静态到动态的突破。“两栖类示范观测项目”的立项和实施,为构建全面系统的“中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究专项网”开展了有益探索和示范。

1.4 国内外监测计划的对比分析

我国的两栖动物监测计划具有鲜明的特色,如物种丰富、自然环境多样,采用了更多样化的监测方法,设立了更细致的监测指标体系。从1997年至今,我国的两栖爬行动物监测工作已开展了19年,早期以地区性的监测工作为主,并自2011年起已开展了5年全国性的两栖动物监测工作。与国际监测计划相比,我国的两栖动物监测工作起步较晚,投入较少,层次不健全,尤其是缺少基础层和最顶层的工作;而全国性的爬行动物监测尚未开展。随着中国科学院和环境保护部对此项工作的大力推进,我国的两栖爬行动物监测计划正日益完善,必将达到世界先进水平。

目前,我国已构建的生物多样性监测网络多以单一类群为调查和监测对象,类群不完整,空间覆盖有缺漏。从生态位角度考量,不同类群的物种可能占据相似的生态位,类群间的种间关系可能较同类群内更加密切,因此,在分析群落结构时,宜从生态位角度解析同域分布的不同类群间的种间互作关系。籍此,中国科学院资助建设了中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON),尤其是中国科学

院生物多样性委员会2004年开始建设的中国森林生物多样性监测网络(CForBio, <http://www.cfbi.org/>)。在已有大型监测样地中已经开展了植物和鸟类、兽类等动物的互作研究。作为食物链的重要类群,两栖爬行动物监测与研究专项网的建立,对于完善中国生物多样性监测与研究网络、开展更高水平的生物学和生态学研究、切实有效地保护我国丰富的生物多样性资源有重要意义。

2 我国两栖爬行动物监测工作基础

2.1 物种多样性和种群密度的研究

围绕我国两栖爬行动物编目和种群现状评估,1998–1999年,《中国动物志·爬行纲》3卷出版(张孟闻等,1998;赵尔宓等,1998,1999);2006–2009年,《中国动物志·两栖纲》3卷出版(费梁等,2006,2009a, b);2012年又出版了《中国两栖动物及其分布彩色图鉴》(费梁等,2012),更新了物种编目。2014年,中国科学院成都生物研究所组织全国专家进一步订正中国两栖动物和爬行动物名录并开展了红色名录评估,记录两栖动物3目13科82属408种,爬行动物3目28科137属461种;评估报告已经由环境保护部和中国科学院联合发布公告(2015年第32号),并于2016年正式发表(蔡波等,2016;江建平等,2016)。

围绕物种多样性及种群密度动态,1997–2002年,Fellers等(2003)在我国若尔盖湿地使用样方法对湿地两栖类开展了野外调查并评估了放牧对两栖动物的影响;1998–2001年,Xie等(2000)和Sparreboom等(2001)开展了中国二级保护动物镇海棘螈(*Echinotriton chinhaiensis*)的繁殖生物学研究;2004年以来,李义明等在浙江舟山群岛等地综合采用样线法、样方法等对当地两栖类 and 外来入侵种美国牛蛙(*Lithobates catesbeianus*)开展了种群密度、物种丰富度和丰盛度的野外研究(Li et al, 2006, 2011; Liu & Li 2009; Liu et al, 2015);2014–2015年,王杰(2015)通过实地调查日本大鲵(*Andrias japonicus*)的种群现状探讨了我国极危物种中国大鲵(*A. davidianus*)的保护策略。

上述研究工作围绕我国两栖动物物种分类、生物学特点、分布、种群现状和保护措施等领域,推动了我国两栖爬行动物多样性的研究,是未来我国两栖爬行动物多样性研究与监测工作的重要基础。

2.2 两栖爬行动物多样性监测和研究队伍

中国两栖爬行动物学会成立于1982年,会员遍及中国各省区市。2006年,在保护国际(Conservation International)的资助下,我国科学家成立了两栖动物保护行动专家组。2000年和2012年,中国科学院成都生物研究所联合中国两栖爬行动物学会先后主办了第四届和第五届亚洲两栖爬行动物学大会;2016年,中国两栖爬行动物学会联合中国科学院、南京师范大学等国内主要两栖爬行动物研究机构承办了第八届世界两栖爬行动物学大会。广泛的国际交流促进了学会的发展和人才培养和建设,为开展全国范围的两栖爬行动物监测与研究提供了保障。

3 中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究专项网

监测是评估生物多样性保护进展的有效途径(马克平,2011)。2014年,中国科学院组织院内从事物种多样性研究的科学家,设计和成立了中国生物多样性监测与研究网络。中国科学院成都生物研究所作为主持单位,牵头组织了“中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究专项网”(以下简称专项网)。为了更好地协调与环境保护部的两栖动物观测项目的关系,发挥中国科学院的学科和科研优势,专项网以生态位相近的两栖爬行动物为监测和研究对象,以解析生态功能群为研究目标,选择少数关键地区开展深入的种群监测和研究,以探讨和揭示环境变化与两栖爬行动物种群动态之间的关系。

两栖类示范观测项目和专项网在研究对象上有重叠,但分属两个不同的研究层次,前者以覆盖全国的、单一类群的物种组成和种群动态、保护区为主体的监测为特色,重点在物种多样性层次。后者以关键地区的、生态位相近的两栖爬行动物、大型样地内生态功能群的结构和动态研究为特色。

3.1 科学目标

专项网依托国内已有的两栖爬行动物多样性研究机构和人员,全面构建了研究框架和工作方案。主要内容包括:以生态位相近的常见物种和珍稀保护物种及其生境为监测与研究对象,开展关键地区两栖爬行动物多样性监测,有针对性地实施对重要物种的有效监测。从两栖动物和爬行动物种

资源的分布、丰度、生活史、个体健康、遗传结构,环境因素,社会经济因素等方面提供定量数据,阐明其变化趋势,揭示自然因素和人为因素对两栖爬行动物的影响机制,解析典型生态系统中生态功能群的结构、形成机制和动态变化机理。建设两栖动物和爬行动物多样性监测和研究信息系统,开发监测数据模拟及分析系统,评价保护成效,提出适应性管理对策,为制定生物多样性保护宏观战略提供支撑。

3.2 总体设计和布局

根据我国两栖动物和爬行动物多样性的分布格局,综合自然环境因素,选择关键地区布设监测与研究样地,重点以大型监测样地为基地,开展多类群的联合监测与研究。计划在全国22个生物多样性关键地区开展系统的监测和研究(表1),结合当地景观特征设置样线、样方,辅以围栏陷阱、人工掩蔽物、人工避难所、鸣声监测等方法,因地制宜,采用多种技术和方法进行调查监测和研究。

3.3 监测与研究指标

- (1)物种及种群。监测物种组成、优势种和稀有种、种群密度、性比、空间分布、年龄结构等。
- (2)个体健康状况。采用肥满度指数(戴强等, 2006)评估个体健康状况。
- (3)生态位环境要素。监测研究区域的气温、水温、湿度、降水量、pH值、水体信息(深度、宽度、流速、清澈度、硬度、溶氧量、氨氮含量)、栖息地类型(林缘草甸、沼泽、草地、灌丛、大型溪流、中型溪流、小溪、地下水出口、池塘、林地、洞穴、沙地等)等指标。
- (4)监测点位动物面临的威胁因素,如栖息地受干扰和破坏状态、社区经济活动、病虫害等。
- (5)种群遗传结构。采取剪指取样获得样品,选用线粒体基因序列和微卫星位点多态性信息监测物种的种群遗传结构。
- (6)食性组成与结构。采用宏基因组和形态相结合的方法获得食物的物种及其组成信息,进而分析

表1 中国两栖动物和爬行动物监测与研究的关键样区
Table 1 Key areas list of research and monitoring of amphibians and reptiles in China

省份 Province	所在县/市 County/City	关键样区 Key area	经度 Longitude	纬度 Latitude
1 黑龙江 Heilongjiang	呼玛县 Huma County	呼中 Huzhong	123.25° E	51.78° N
2 新疆 Xinjiang	阜康市 Fukang City	天山 Tianshan Mountains	88.16° E	43.85° N
3 内蒙古 Inner Mongolia	锡林浩特市 Xilinhaote City	锡林郭勒 Xilingol	116.43° E	44.18° N
4 吉林 Jilin	抚松县 Fusong County	长白山 Changbai Mountains	128.08° E	42.38° N
5 北京 Beijing	北京市 Beijing City	东灵山 Dongling Mountain	115.43° E	39.96° N
6 新疆 Xinjiang	若羌县 Ruoqiang County	阿尔金山 Altun Mountains	88.69° E	36.42° N
7 宁夏 Ningxia	中卫市 Zhongwei City	沙坡头 Shapotou	104.97° E	37.50° N
8 山东 Shandong	东营市 Dongying City	黄河三角洲 Yellow River delta	119.05° E	37.82° N
9 陕西 Shaanxi	佛坪县 Foping County	佛坪 Foping	107.68° E	33.55° N
10 河南 Henan	内乡县 Neixiang County	宝天曼 Baotianman	111.94° E	33.49° N
11 四川 Sichuan	九寨沟县 Jiuzhaigou County	九寨沟 Jiuzhaigou	103.89° E	33.12° N
12 四川 Sichuan	都江堰市 Dujiangyan City	龙溪-虹口 Longxi-Hongkou	103.57° E	31.13° N
13 湖南 Hunan	桑植县 Sangzhi County	八大公山 Badagong Mountains	110.09° E	29.77° N
14 西藏 Xizang	拉萨市 Lasa City	雅鲁藏布江中游 Middle reach valley of the Yarlung Zangbo River	89.66° E	29.20° N
15 湖南 Hunan	岳阳市 Yueyang City	洞庭湖 Dongting Lake	112.80° E	29.50° N
16 浙江 Zhejiang	开化县 Kaihua County	古田山 Gutian Mountain	118.12° E	29.25° N
17 四川 Sichuan	石棉县 Shimian County	栗子坪 Liziping	102.35° E	28.89° N
18 云南 Yunnan	丽江市 Lijiang City	玉龙雪山 Yulong Snow Mountain	100.22° E	27.14° N
19 广东 Guangdong	肇庆市 Zhaoqing City	鼎湖山 Dinghu Mountain	112.32° E	23.10° N
20 广西 Guangxi	龙州县 Longzhou County	弄岗 Nonggang	106.95° E	22.43° N
21 云南 Yunnan	勐腊县 Mengla County	西双版纳 Xishuangbanna	101.57° E	21.61° N
22 海南 Hainan	乐东县 Ledong County	尖峰岭 Jianfengling	108.80° E	18.60° N

其食性组成和结构。

(7)种群结构。采用微计算机断层扫描技术(micro computed tomography, Micro-CT)等方法获得个体骨龄信息,进而分析个体年龄和种群年龄结构。

(8)生态功能群结构。监测大型样地中食物链各类群的组成。

(9)生态系统动态。分析大型样地中各类群的生长、繁殖、捕食、竞争、共生关系及其动态。

3.4 监测方法

两栖爬行动物的生理、生态和地理分布特点是选择监测方法、实施有效监测的重要基础。两栖动物监测以水生环境为主,爬行动物监测以陆生环境为主。由于两栖爬行动物的日节律明显,两栖动物以夜行性为主,爬行动物以昼行性为主,而两栖动物还具有季节性节律,如集群繁殖。因此,监测两栖动物以夜间为主,在繁殖期监测将起到事半功倍的效果;爬行动物以白天为主,监测区域要相应增加。每年进行2–4次调查观测。方法主要有以下8种:

(1)样线法。这是两栖爬行动物监测的基本方法。调查时行进速度为2 km/h(行进期间以记录物种和个体数量为主),记录区间水陆交汇处各1 m宽(共2 m宽)。每条样线长50–1,000 m,样线尽可能地涵盖不同的生态系统类型,样线数因地制宜。每条样线要进行3次重复调查。

(2)样方法。该方法主要针对林蛙属(*Rana*)、蟾蜍属(*Bufo*)、沙蜥属(*Phrynocephalus*)、麻蜥属(*Eremias*)等特定类群。具体为选择1个区域设置样方,调查该样方内种群的所有个体。

(3)围栏陷阱法。这是两栖爬行动物监测的备选或辅助方法(古晓东等, 2009)。每个陷阱连续监测10天,建议每天检视(对于分布较远的陷阱,可以隔天检查)。对于水位变动较大的河湖周边的陷阱,建议随水位线距离增补监测点,保持不同季节的陷阱距离水位线位置一致,以防雨季雨水注满或淹没陷阱而影响监测效果。除采集两栖爬行动物的信息外,也记录落入陷阱中的其他动物,如兽类、鸟类等,这些数据对于分析生态功能群会非常有用。

(4)人工掩蔽物法。对地势宽阔而又缺少自然动物隐蔽处的区域可以采用该方法,尤其是缺少隐蔽物的湿地中的两栖动物监测(王刚等, 2012)。各样地设置统一的掩蔽物样方,掩蔽物用尺寸统一的瓦片

或木片(尺寸如30 cm × 20 cm或以上)制作,间距1–5 m, 10组5个× 5个掩蔽物为1个样方。建议每天早晨8–10点监测1次(对于分布较远的掩蔽物样方,可以隔天检查)。每次连续10天。该法配合标志重捕法使用效果更佳。

(5)人工避难所法。该方法重点针对树栖两栖动物类群(Stewart & Pough, 1983; Boughton et al, 2000)。在10 m × 10 m的样地布设100个竹筒(或PVC桶),挑选树蛙物种常选择的产卵树25棵,每棵树捆绑固定4个竹筒(或PVC桶),2个离地面70 cm,2个离地面150 cm;竹筒长15–18 cm,可根据实际情况调整竹筒内径大小,竹筒内加入5–10 cm的水。3天监测一次。

(6)标志重捕法。该方法主要用于种群数量的推测性监测。推荐使用基于无线识别技术的电子标签和扫描仪来进行两栖动物和爬行动物的标志重捕。电子标签呈米粒大小,每个均有单独的编号,通过扫描仪可以读取该编号。两栖动物和爬行动物皮肤疏松,与肌肉分离,通过注射器将电子标签注入其体内,注射位置以胯部皮肤上方为宜,因为该部位皮肤最疏松,而且远离重要的脏器(王刚等, 2012)。

(7)定点鸣声监测法。这是重点针对鸣叫的两栖爬行动物的监测方法。选择固定的地点,利用自动鸣声记录仪监测两栖类、蜥蜴类或龟鳖类的鸣声,这有助于估测目标动物种群的大小以及繁殖活动(物候)。固定的鸣声监测点要选择在目标物种的附近,通过控制鸣声记录仪自动记录动物的鸣叫行为数据。这种技术可以通过鸣叫率(单位时间的鸣叫次数)来量化目标物种的鸣叫行为,也可以用来计算并自动记录鸣叫强度(声音的能量)随时间变化的平均值。这些数据可用于估计繁殖季节鸣叫雄性的个体数量,评估鸣叫的雄性繁殖种群的长期动态变化,以及比较不同地点鸣叫雄性种群的大小。

(8)生物多样性分子遗传监测法。该方法使用低损伤或无损伤的采样方法进行样品收集工作。拟使用两栖爬行类通用线粒体DNA条形码COI碱基序列(Che et al, 2012),重点物种使用微卫星基因分型的方法,全面掌握两栖爬行类物种的遗传分化和遗传多样性。

3.5 预期成果

通过专项网的监测工作,主要获得3方面的成果:基础数据、综合研究报告、平台和队伍建设。

(1)基础数据。系统地获得中国关键地区两栖和爬行动物的物种多样性及其分布、种群结构和动态变化、个体健康、食性、种群年龄、遗传多样性、主要环境及致危因素等数据。

(2)综合研究报告。基于获得的基础数据开展系统的分析研究,以期获得系列研究成果,包括中国关键地区的两栖和爬行动物多样性现状与变化趋势报告、中国关键地区的环境变化和两栖爬行动物种群动态之间的关系、中国关键地区的典型生态功能群的组成和结构、形成机制和动态变化机理等。

(3)平台与队伍建设。进一步发展和完善支撑专项网发展的平台与人才队伍。构建布局合理并覆盖中国关键地区的两栖爬行动物多样性监测和研究网络体系,为加强生态文明建设、建设美丽地球做出中国贡献。编写和完善监测与研究技术规程,通过培训不断提升监测和研究队伍的技术力量。建立统一的信息化平台,实现监测数据和信息的高效管理与共享,通过平台发布专项网的研究成果,提高两栖爬行动物多样性监测和研究对国家生物多样性管理的支撑作用。

3.6 组织方式

该专项网是中国生物多样性监测与研究网络的组成部分,接受中国生物多样性监测与研究网络的监督和指导。专项网的组织方式将遵循自上而下的方法,制定监测方案,组建监测和研究核心团队,并协调各个关键地区的监测和研究工作。每个关键地区的监测方案将遵循自下而上的方法,重点关注区域的生态特点和需求。为了科学、有效地开展监测与研究,从工作组和专家组中组建4个职能单元:监测和研究技术规范研制组、监测和研究专业技术培训组、两栖爬行动物多样性信息化组、专项网数据管理和分析中心。由专项网数据管理和分析中心提交和发布监测与研究成果。

中国是世界上生物多样性最丰富的国家之一,两栖纲物种数占全球物种数的5.4%,居世界第4位(Koo et al, 2013)。爬行纲物种数占全球物种数的4.5%,居世界第8位(蔡波等, 2016)。本专项网将通过关键样区的两栖爬行动物多样性及其环境特征开展长期的定位监测和研究,在统一组织和领导下加强数据共享,深化国际交流与合作,积极参与国际生物多样性保护计划和战略行动,为我国及世界的生物多样性研究与保护做出贡献。

参考文献

- Boughton RG, Staiger J, Franz R (2000) Use of PVC pipe refugia as a sampling technique for hylid treefrogs. *The American Midland Naturalist*, 144, 168–177.
- Buckley J, Beebee T (2004) Monitoring the conservation status of an endangered amphibian: the Natterjack toad *Bufo calamita* in Britain. *Animal Conservation*, 7, 221–228.
- Cai B, Li JT, Chen YY, Wang YZ (2016) Exploring the status and causes of China's threatened reptiles through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 578–587. (in Chinese with English abstract) [蔡波, 李家堂, 陈跃英, 王跃招 (2016) 通过红色名录评估探讨中国爬行动物受威胁现状及原因. *生物多样性*, 24, 578–587.]
- Che J, Chen HM, Yang JX, Jin JQ, Jiang K, Yuan ZY, Murphy RW, Zhang YP (2012) Universal *COI* primers for DNA barcoding amphibians. *Molecular Ecology Resources*, 12, 247–258.
- Chou WH, Lee MC, Yu HT (2002) Community structure of ground-dwelling vertebrates sampled with drift-fence pitfall traps in a subtropical montane forest in Central Taiwan. *Endemic Species Research*, 4(1), 1–11. (in Chinese with English abstract) [周文豪, 李敏嘉, 于宏灿 (2002) 台湾中部亚热带山地森林地栖脊椎动物的群落结构——兼论拦截篱掉落桶研究法的应用. *特有生物研究*, 4(1), 1–11.]
- Corn PS, Muths E, Adams MJ, Dodd CK Jr (2005) The United States Geological Survey's Amphibian Research and Monitoring Initiative. *Alytes*, 22(3–4), 65–71.
- Dai Q, Dai JH, Li C, Liu ZJ, Wang YZ (2006) Discussion on relative fatness. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 12, 715–718. (in Chinese with English abstract) [戴强, 戴建洪, 李成, 刘志君, 王跃招 (2006) 关于肥满度指数的讨论. *应用与环境生物学报*, 12, 715–718.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2006) *Fauna Sinica, Amphibia, Vol. 1, General Accounts of Amphibia, Gymnophiona and Urodela*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2006) 中国动物志·两栖纲·第一卷, 总论、蚓螈目、有尾目. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2009a) *Fauna Sinica, Amphibia, Vol. 2, Anura*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2009a) 中国动物志·两栖纲·第二卷, 无尾目. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2009b) *Fauna Sinica, Amphibia, Vol. 3, Anura, Ranidae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2009b) 中国动物志·两栖纲·第三卷, 无尾目, 蛙科. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Ye CY, Jiang JP (2012) *Colored Atlas of Chinese Amphibians and Their Distributions*. Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu. (in Chinese) [费梁, 叶昌媛, 江建平 (2012) 中国两栖动物及其分布彩色图鉴. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Fellers GM, Wang YZ, Liu SY (2003) Status of amphibians at the Zoige wetlands, Sichuan Province, China. *Froglog*, 58, 1.

- Gu XD, Liang CP, Dai Q, Li C (2009) A Simple and Convenient Method for Measuring and Monitoring Small Terrestrial Vertebrates: Drift Fences and Pitfall Traps. *Sichuan Journal of Zoology*, 28, 273–275. (in Chinese with English abstract) [古晓东, 梁春平, 戴强, 李成 (2009) 一种简便实用的小型陆栖脊椎动物监测方法——围栏陷阱法. *四川动物*, 28, 273–275.]
- Heyer WR, Donnelly MA, McDiarmid RW, Hayek LAC, Foster MS (1994) *Measuring and Monitoring Biological Diversity: Standard Methods for Amphibians*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Hoffmann M, Hilton-Taylor C, Angulo A, Böhm M, Brooks TM, Butchart SH, Carpenter KE, Chanson J, Collen B, Cox NA, Darwall WR, Dulvy NK, Harrison LR, Katariya V, Pollock CM, Quader S, Richman NI, Rodrigues AS, Tognelli MF, Vié JC, Aguiar JM, Allen DJ, Allen GR, Amori G, Ananjeva NB, Andreone F, Andrew P, Aquino Ortiz AL, Baillie JE, Baldi R, Bell BD, Biju SD, Bird JP, Black-Decima P, Blanc JJ, Bolaños F, Bolivar-G W, Burfield IJ, Burton JA, Capper DR, Castro F, Catullo G, Cavanagh RD, Channing A, Chao NL, Chenery AM, Chiozza F, Clausnitzer V, Collar NJ, Collett LC, Collette BB, Cortez Fernandez CF, Craig MT, Crosby MJ, Cumberlidge N, Cuttelod A, Derocher AE, Diesmos AC, Donaldson JS, Duckworth JW, Dutson G, Dutta SK, Emslie RH, Farjon A, Fowler S, Freyhof J, Garshelis DL, Gerlach J, Gower DJ, Grant TD, Hammerson GA, Harris RB, Heaney LR, Blair Hedges S, Hero JM, Hughes B, Ainul Hussain S, Javier Icochea M, Inger RF, Ishii N, Iskandar DT, Jenkins RKB, Kaneko Y, Kottelat M, Kovacs KM, Kuzmin SL, La Marca E, Lamoreux JF, Lau MWN, Lavilla EO, Leus K, Lewison RL, Lichtenstein G, Livingstone SR, Lukoschek V, Mallon DP, McGowan PJK, McIvor A, Moehlman PD, Molur S, Muñoz Alonso A, Musick JA, Nowell K, Nussbaum RA, Olech W, Orlov NL, Papenfuss TJ, Parra-Olea G, Perrin WF, Polidoro BA, Pourkazemi M, Racey PA, Ragle JS, Ram M, Rathbun G, Reynolds RP, Rhodin AGJ, Richards SJ, Rodríguez LO, Ron SR, Rondinini C, Rylands AB, Rondinini C, Rylands AB, Sadovy de Mitcheson Y, Sanciango JC, Sanders KL, Santos-Barrera G, Schipper J, Self-Sullivan C, Shi Y, Shoemaker A, Short FT, Sillero-Zubiri C, Silvano DL, Smith KG, Smith AT, Snoeks J, Stattersfield AJ, Symes AJ, Taber AB, Talukdar BK, Temple HJ, Timmins R, Tobias JA, Tsytsulina K, Tweddle D, Ubeda C, Valenti SV, van Dijk PP, Veiga LM, Veloso A, Wege DC, Wilkinson M, Williamson EA, Xie F, Young BE, Akçakaya HR, Bennun L, Blackburn TM, Boitani L, Dublin HT, da Fonseca GAB, Gascon C, Lacher TE Jr, Mace GM, Mainka SA, McNeely JA, Mittermeier RA, Reid GM, Rodríguez JP, Rosenberg AA, Samways MJ, Smart J, Stein BA, Stuart SN (2010) The impact of conservation on the status of the world's vertebrates. *Science*, 330, 1503–1509.
- IUCN (2016) IUCN Red List of Threatened Species. Version 2016-3. <http://www.iucnredlist.org/>. (accessed on 2016-12-07)
- Jiang JP, Xie F, Zang CX, Cai L, Li C, Wang B, Li JT, Wang J, Hu JH, Wang Y, Liu JY (2016) Assessing the threat status of amphibians in China. *Biodiversity Science*, 24, 588–597. (in Chinese with English abstract) [江建平, 谢锋, 臧春鑫, 蔡蕾, 李成, 王斌, 李家堂, 王杰, 胡军华, 王燕, 刘炯宇 (2016) 中国两栖动物受威胁现状评估. *生物多样性*, 24, 588–597.]
- Koo MS, Vredenburg VT, Gross J, Spencer CL, Tunstall T, Wake DB (2013) Visualizing AmphibiaWeb Data with Continuous Cartograms. *AmphibiaWeb: Information on Amphibian Biology and Conservation*. Berkeley, California: AmphibiaWeb. <http://amphibiaweb.org/>. (accessed on 2016-12-07)
- Li C, Gu HJ, Dai Q, Liu ZJ, Wang YZ (2008) Impacts on anurans in Caopohe River impounded by a small-sized dam. *Resources and Environmental in the Yangtze Basin*, 17(Z1), 114–118. (in Chinese with English abstract) [李成, 顾海军, 戴强, 刘志君, 王跃招 (2008) 草坡河流域小水电开发对无尾两栖动物的影响. *长江流域资源与环境*, 17(Z1), 114–118.]
- Li YM, Wu ZJ, Duncan RP (2006) Why islands are easier to invade: human influences on bullfrog invasion in the Zhoushan archipelago and neighboring mainland China. *Oecologia*, 148, 129–136.
- Li YM, Xu F, Guo ZW, Liu X, Jin CN, Wang YP, Wang SP (2011) Reduced predator species richness drives the body gigantism of a frog species on the Zhoushan Archipelago in China. *Journal of Animal Ecology*, 80, 171–182.
- Liu X, Li YM (2009) Aquaculture enclosures relate to the establishment of feral populations of introduced species. *PLoS ONE*, 4, e6199. doi:10.1371/journal.pone.0006199.
- Liu X, Luo Y, Chen JX, Guo YS, Bai CM, Li YM (2015) Diet and prey selection of the invasive American bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) in Southwestern China. *Asian Herpetological Research*, 6, 34–44.
- Ma KP (2011) Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach. *Biodiversity Science*, 19, 125–126. (in Chinese) [马克平 (2011) 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. *生物多样性*, 19, 125–126.]
- McDiarmid RW, Foster MS, Guyer C, Gibbons JW, Chernoff N (2012) *Reptile Biodiversity: Standard Methods for Inventory and Monitoring*. University of California Press, Los Angeles.
- Muths E, Jung RE, Bailey LL, Adams MJ, Corn PS, Dodd CK, Fellers GM, Sadinski WJ, Schwalbe CR, Walls SC, Fisher RN, Gallant AL, Battaglin WA, Green DE (2005) Amphibian Research and Monitoring Initiative (ARMI): a successful start to a national program in the United States. *Applied Herpetology*, 2, 355–372.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Pounds JA, Bustamante MR, Coloma LA, Consuegra JA, Fogden MPL, Foster PN, La Marca E, Masters KL, Meri-

- no-Viteri A, Puschendorf R, Ron SR, Sánchez-Azofeifa G A, Still CJ, Young BE (2006) Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439, 161–167.
- Sparreboom M, Xie F, Fei L (2001) Reproductive behavior of the Chinghai salamander (*Echinotriton chinghaiensis*) (Caudata: Salamandridae). *Amphibia-Reptilia*, 22, 309–320.
- Stewart MM, Pough FH (1983) Population density of tropical forest frogs: relation to retreat sites. *Science*, 221, 570–572.
- Stuart SN, Chanson JS, Cox NA, Young BE, Rodrigues AS, Fischman DL, Waller RW (2004) Status and Trends of Amphibian Declines and Extinctions Worldwide. *Science*, 306, 1783–1786.
- Urban MC (2015) Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348, 571–573.
- Wake DB (1990) Declining amphibian populations. *Science*, 253, 860.
- Wake DB (1998) Action on amphibians. *Trends in Ecology & Evolution*, 13, 379–380.
- Wake DB (2007) Climate change implicated in amphibian and lizard declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 8201–8202.
- Wang G, Li C, Xie F, Jiang JP (2012) Application of providing artificial cover method in monitoring amphibian population. *Chinese Journal of Zoology*, 47(3), 53–58. (in Chinese with English abstract) [王刚, 李成, 谢锋, 江建平 (2012) 应用人工掩蔽物法监测两栖动物种群动态. *动物学杂志*, 47(3), 53–58.]
- Wang J (2015) Current status of Japanese giant salamander and the enlightenment on the conservation of Chinese giant salamander. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 21, 683–688. (in Chinese with English abstract) [王杰 (2015) 日本大鲵的现状及对中国大鲵保护的启示. *应用与环境生物学报*, 21, 683–688.]
- Xie F, Fei L, Ye CY, Cai CM, Wang ZW, Sparreboom M (2000) Breeding migration and oviposition of the Chinghai salamander, *Echinotriton chinghaiensis* (Caudata: Salamandridae). *The Herpetological Journal*, 10, 111–118.
- Xie F, Jiang JP, Zheng ZH (2002) Survey on amphibians and reptiles. *Herpetologica Sinica*, 9, 218–223. (in Chinese with English abstract) [谢锋, 江建平, 郑中华 (2002) 两栖爬行动物野外调查方法. *两栖爬行动物学研究*, 9, 218–223.]
- Xie F, Lau MW, Stuart SN, Chanson JS, Cox NA, Fischman DL (2007) Conservation needs of amphibians in China: a review. *Sciences in China C: Life Sciences*, 50, 265–276.
- Zhang MW, Zong Y, Ma JF (1998) *Fauna Sinica, Reptilia, Vol. 1, General Accounts of Reptilia, Testudoformes and Crocodyliformes*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张孟闻, 宗愉, 马积藩 (1998) 中国动物志·爬行纲·第一卷, 总论、龟鳖目、鳄目. 科学出版社, 北京.]
- Zhao EM, Huang MH, Zong Y (1998) *Fauna Sinica, Reptilia Vol. 3, Squamata (Serpentes)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵尔宓, 黄美华, 宗愉 (1998) 中国动物志·爬行纲·第三卷, 有鳞目: 蛇亚目. 科学出版社, 北京.]
- Zhao EM, Zhao KT, Zhou KY (1999) *Fauna Sinica, Reptilia Vol. 2, Squamata (Lacertilia)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵尔宓, 赵肯堂, 周开亚 (1999) 中国动物志·爬行纲·第二卷, 有鳞目: 蜥蜴亚目. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 傅金钟 责任编辑: 黄祥忠)

•研究报告•

玉龙雪山寒温性云冷杉林动态监测样地的物种组成及群落结构

黄 华¹ 陈智发¹ 刘德团¹ 和国星² 和荣华² 李德铎^{1*} 许 琨^{1*}¹ (中国科学院昆明植物研究所丽江森林生态系统定位研究站, 昆明 650201)² (玉龙雪山省级自然保护区管护局, 云南丽江 674100)

摘要: 云冷杉林是玉龙雪山东坡保存最完整的森林植被, 为了更好地了解其物种组成和群落结构等基本特征, 中国科学院昆明植物研究所联合玉龙雪山省级自然保护区管护局, 按照CTFS (Center for Tropical Forest Science)的样地建设标准, 于2012–2014年在玉龙雪山省级自然保护区内建立了25 ha (500 m × 500 m)的长期监测样地。本研究以样地内所有胸径(DBH) ≥ 1 cm的木本植物(不含竹子)为研究对象, 分析了该样地的区系成分、群落组成、垂直结构及径级结构。结果表明: 样地内DBH ≥ 1 cm的木本植物(不含竹子)独立个体数为47,751, 分属26科41属62种, 以温带分布尤其是北温带成分为主要区系特征。重要值 ≥ 1的物种有18个, 贡献了90.24%的重要值。群落垂直结构可分为4层, 川滇冷杉(*Abies forrestii*)、丽江云杉(*Picea likiangensis*)和帽斗栎(*Quercus guajavifolia*)为主林层优势种和建群种, 径级分布为峰型或近倒“J”型, 持续更新能力较好; 吴茱萸五加(*Gambelia ciliata* var. *evodiifolia*)、篦齿槭(*Acer pectinatum*)和短梗稠李(*Padus brachypoda*)是主亚林层的优势种, 在某些片段可形成落叶阔叶林的优势群落, 径级分布出现明显断层, 未来将出现衰退。西康花楸(*Sorbus prattii*)、桦叶荚蒾(*Viburnum betulifolium*)和云南杜鹃(*Rhododendron yunnanense*)是次林层的优势种; 灌木层假小檗(*Berberis fallax*)是样地内个体数最多的物种, 占总个体数的59.51%, 其重要值最高, 占总数的22.75%, 径级分布呈“L”型。

关键词: 生物多样性; 径级结构; 区系; 分布格局

Species composition and community structure of the Yulongxueshan (Jade Dragon Snow Mountains) forest dynamics plot in the cold temperate spruce-fir forest, Southwest China

Hua Huang¹, Zhifa Chen¹, Detuan Liu¹, Guoxing He², Ronghua He², Dezhu Li^{1*}, Kun Xu^{1*}¹ Lijiang Forest Ecosystem Research Station, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201² Administration Bureau of Yulongxueshan Provincial Nature Reserve, Lijiang, Yunnan 674100

Abstract: Spruce-fir forests are one of the best protected areas of forest vegetation occurring on the eastern slope of the Yulongxueshan (Jade Dragon Snow Mountains). To further understand the spruce-fir species composition and community structure, a 25 ha (500 m × 500 m) forest dynamics plot was established in the Yulongxueshan Provincial Nature Reserve by the Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences and Administration Bureau of Yulongxueshan Provincial Nature Reserve from 2012 to 2014, according to the standards from the Center for Tropical Forest Science (CTFS). In this study, we analyzed the flora, community composition, structure, DBH size-classes and spatial distribution based data collected from all woody (excluding bamboo) plants with DBH ≥ 1 cm. Our results demonstrated that a total of 47,751 free-standing individuals with DBH ≥ 1 cm were recorded, belonging to 62 species, 41 genera and 26 families. The north temperate distribution plant contributed to the most significant floristic characteristics. In the plot, the 18 species with importance value (*IV*) ≥ 1 contributed 90.24% to the *IV* of the community. Based on the vertical structure of plant heights, the community was divided into four layers. The dominant species in

收稿日期: 2016-09-22; 接受日期: 2017-01-23

基金项目: 国家重大科学研究计划(2014CB954100)和云南省应用基础研究基金(2014GA003)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: dzl@mail.kib.ac.cn, xukun@mail.kib.ac.cn

the canopy layer were *Abies forrestii*, *Picea likiangensis* and *Quercus guajavifolia*, which exhibited a pattern of ridge type and a reverse-J shape in DBH size-classes structure and strong regenerating capacity. *Gamblea ciliata* var. *evodiifolia*, *Acer pectinatum* and *Padus brachypoda* occupied the sub-canopy layer, and could be the constructive community species in some fragmented habitats. These species were lacking small DBH trees, so their populations are predicted to decline in the future. *Sorbus prattii*, *Viburnum betulifolium* and *Rhododendron yunnanense* dominated the sub-tree layer. In the shrub layer, *Berberis fallax* consisted of the largest number of individuals and accounting for 59.51% of the total number of individuals; together with the highest importance value, accounting for 22.75% of the total IV, and DBH size-class distribution in a “L” shape.

Key words: biodiversity; DBH size-classes structure; flora; spatial pattern

物种组成和群落结构不仅反映了群落中物种间的关系,也反映了环境对物种生存和生长的影响,它们是群落最基本的特征,也是群落生态学研究的基础(曲仲湘等, 1983; Loreau et al, 2001; Hooper et al, 2005; Tilman et al, 2006)。尽管国内外有关物种组成与群落结构的研究已有较长历史,但对物种共存的维持机制和生物多样性的监测和指标体系、森林生态系统结构动态和物种组成的关系、稀有种的生境需求、特有种种群的分布格局等诸多问题至今依然无法给予较全面的解释。现代生态学研究表明这些基于传统的生态学方法的研究实际上都具有尺度依赖性,仅依靠短时期、小样方的研究是无法回答上述问题的,建立较大面积的长期动态监测样地才是解决问题的有效途径(Condit, 1995)。

寒温性针叶林是我国重要的植被类型之一,主要分布在温带、暖温带、亚热带和热带地区的高海拔山地,构成垂直分布的山地寒温性针叶林带,分布的海拔高度由北向南逐渐上升。玉龙雪山省级自然保护区具有丰富的寒温性针叶林种类和独特的类群,目前还保存着很好的高海拔原始植被,而且玉龙雪山所处的滇西北地区是我国3大特有物种分化中心之一(吴征镒和朱彦丞, 1987; 李锡文, 1996; 郭辉军和龙春林, 1998; 冯建孟等, 2006),也是中国17个生物多样性保护关键地区之一(赵淑清等, 2000)。该自然保护区的云冷杉林具有典型性和代表性,为长期监测和研究云冷杉林的生物多样性形成和维持机制提供了很好的平台。

基于上述原因,中国科学院昆明植物研究所与云南玉龙雪山省级自然保护区管护局于2012–2014年在该保护区建立了25 ha (500 m × 500 m)的长期动态监测样地。样地采用美国史密森研究院热带森林研究中心(Centre for Tropical Forest Science,

CTFS)的样地建设标准(Condit, 1998),该样地的建成填补了中国森林生物多样性监测网络(Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network, CForBio)在这一区域的空白。本文分析了该样地的区系成分、物种组成、群落的垂直结构和径级结构,以期认识该区域云冷杉林的物种组成和群落结构、探讨云冷杉林的更新和演替规律提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玉龙雪山寒温性云冷杉林25 ha长期监测样地(简称玉龙雪山样地,缩写YLXS)位于云南玉龙雪山省级自然保护区(27°10′–27°40′ N, 100°10′–100°20′ E)(图1)。该保护区建立于1984年,总面积26,000 ha,主要保护对象为山地混合森林生态系统、珍稀动植物种、冰川及其遗迹。保护区内有野生植物3,800多种,其中藻类植物31科72属196种,地衣植物17科14属20多种,苔藓植物175种,蕨类植物220种,种子植物145科758属3,200种。保护区气候垂直差异较大,从河谷至山顶依次出现暖性、暖湿性、温凉性、北亚热带和寒温性等山地垂直气候带。

1.2 样地建设

玉龙雪山样地投影面积25 ha,南北长500 m,东西宽500 m,最低海拔3,220 m,最高海拔3,344 m,最大高差124 m,平均海拔3,284 m(图1)。样地地势平缓,坡度0°–20°,植被类型属寒温性针叶林,土壤类型为山地暗棕壤和草甸暗棕壤(刘庆等, 2003; 高富等, 2013),pH值5.5–8。样地所在的云杉坪为寒温性气候,年均温5.5℃,极端最高温18.8℃,极端最低温–11.8℃,年降水量1,587.5 mm,年蒸发量966.1 mm,相对湿度82%。

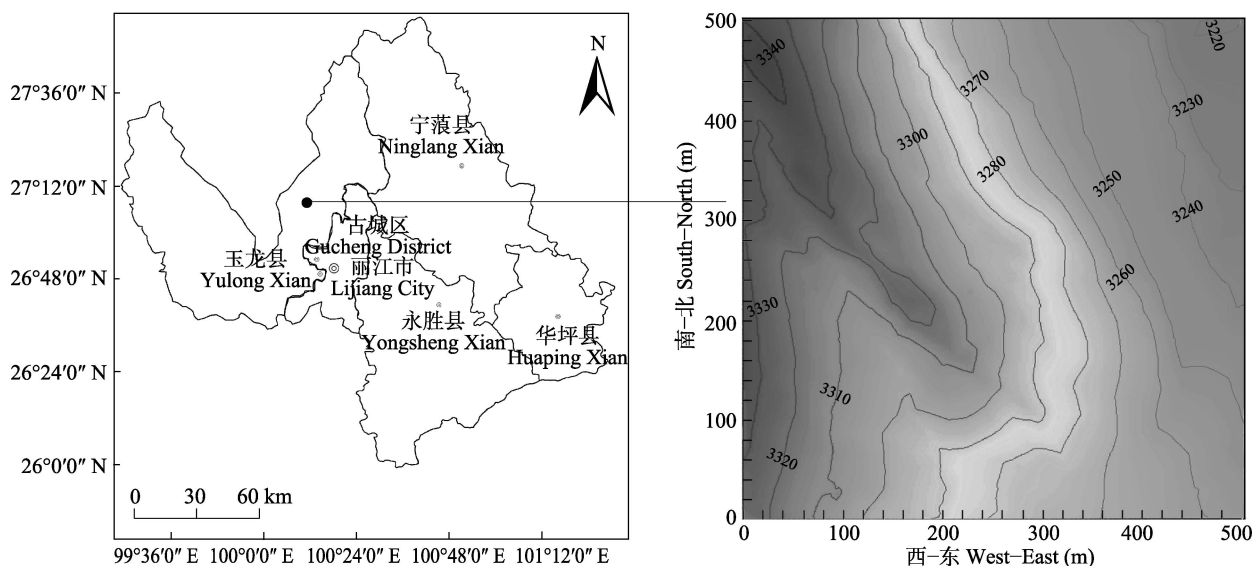


图1 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地的位置示意图(左)和等高线图(右)

Fig. 1 Location (left) and contour map (right) of the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

参照巴拿马Barro Colorado Island (BCI) 50 ha样地(Condit, 1998), 用全站仪把样地分成625个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样方, 每个样方又分为16个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的小样方。记录样方内所有 $\text{DBH} \geq 1\text{ cm}$ 的木本植物的树种名称、DBH和坐标并挂牌标记。定义每公顷个体数不多于1株的物种为稀有种, 1–10株的为偶见种, 多于10株的为常见种(Hubbell & Foster, 1986; He et al, 1997)。

1.3 数据处理

重要值(IV) = 相对密度+相对频度+相对优势度(相对基盖度)(孙儒泳等, 2002)。其中, 相对密度(%) = 某个物种的个体数/全部物种的个体数 $\times 100\%$; 相对频度(%) = 某个物种在所有样方内出现的次数/所有种出现的总次数 $\times 100\%$; 相对优势度(%) = 某个种的胸高断面积之和/所有种的胸高断面积之和 $\times 100\%$ 。计算相对密度时仅使用独立植株的数量, 相对频度采用的样方单位面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, 相对优势度仅计算独立个体的胸高断面积。

利用Excel 2010、R 3.6.1和Sigma Plot 10.0软件对数据进行统计分析和作图。

2 结果

2.1 物种组成

样地内共有木本植物69种, 隶属30科47属。其中 $\text{DBH} \geq 1\text{ cm}$ 的活体乔木个体共有47,751株, 隶属26科41属62种(表1, 附录1)。从科的分布水平来看,

蔷薇科植物最丰富, 共7属12种; 忍冬科次之, 有3属7种。从属的分布水平来看, 杜鹃属(*Rhododendron*)和忍冬属(*Lonicera*)植物最多, 均有5种。大约1/2的科及3/4的属仅有一个物种分布。个体数最多的是小檗科植物, 占总个体数的60.10%, 其次是松科, 占总个体数的12.22%; 优势度最高的是松科, 其胸高断面积之和可达 612.32 m^2 , 壳斗科次之; 多度最高的小檗科植物优势度较低, 其胸高断面积之和仅有 5.05 m^2 ; 有13个科的重要值 ≥ 1 , 其中最大的是松科和小檗科, 有7个科的重要值小于0.05。

2.2 区系特征

从表2可以看出, 玉龙雪山样地中科的分布以北温带成分最多, 达42.31%; 世界广布的科为6个, 占23.08%; 热带成分占26.92%。属的分布主要以北温带成分为主, 占53.66%; 世界广布、旧世界温带、东亚成分、东亚及北美间断成分等也有分布, 每种分布类型不及总属数的1/10; 热带成分仅占12.20%。

2.3 多度格局

整个样地中, $\text{DBH} \geq 1\text{ cm}$ 的独立活个体有47,751株(表3)。其中, 以假小檗(*Berberis fallax*)最多, 占总个体数的59.51% (表4), 包含了小檗科植物总个体数的99%以上(表1); 其次为川滇冷杉(*Abies forrestii*), 占总数的10.90%, 包含了松科植物总个体数的89.21%。另外, 个体数超过500株的还有帽斗栎(*Quercus guajavifolia*)、云南杜鹃(*Rhododendron yunnanense*)、桦叶荚蒾(*Viburnum betulifolium*)、吴

表1 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地的物种组成
Table 1 Species composition of the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

科 Family	属数 No. of genus	种数 No. of species	多度 Abundance	胸高断面积 Basal area (m ²)	重要值 Importance values
小檗科 Berberidaceae	1	3	28,697	5.05	23.34
松科 Pinaceae	4	4	5,837	612.32	26.02
忍冬科 Caprifoliaceae	3	7	2,888	7.46	8.21
蔷薇科 Rosaceae	7	12	2,014	47.57	7.67
壳斗科 Fagaceae	1	1	1,324	323.03	12.04
槭树科 Aceraceae	1	4	1,315	67.32	5.68
杜鹃花科 Ericaceae	1	5	1,265	17.33	2.83
五加科 Araliaceae	2	2	1,243	67.50	4.93
冬青科 Aquifoliaceae	1	1	656	0.32	1.40
清风藤科 Sabiaceae	2	2	605	0.77	1.48
绣球花科 Hydrangeaceae	1	1	528	2.51	1.70
樟科 Lauraceae	1	2	402	3.39	1.40
卫矛科 Celastraceae	1	2	374	1.20	1.31
茶藨子科 Grossulariaceae	1	2	277	0.16	0.84
唇形科 Labiatae	1	1	130	0.02	0.35
木樨科 Oleaceae	2	2	53	0.49	0.23
五味子科 Schisandraceae	1	1	52	0.03	0.14
红豆杉科 Taxaceae	1	1	40	0.72	0.19
毛茛科 Ranunculaceae	1	1	21	0.00	0.11
山茱萸科 Cornaceae	2	2	8	0.11	0.04
杨柳科 Salicaceae	1	1	5	0.03	0.02
柏科 Cupressaceae	1	1	4	0.01	0.02
芍药科 Paeoniaceae	1	1	4	0.00	0.02
菊科 Compositae	1	1	4	0.00	0.01
旌节花科 Stachyuraceae	1	1	4	0.04	0.01
椴树科 Tiliaceae	1	1	1	0.12	0.01
总计 Total	41	62	47,751	1,157.47	100

表2 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地乔木种子植物的分布区类型
Table 2 Distribution types of spermatophytes in the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

分布区类型 Areal types	科数 No. of family	属数 No. of genera
1 世界广布 Cosmopolitan	6	—
2 泛热带 Pantropic	3	1
3 东亚(热带、亚热带)及热带南美间断 Tropical & Subtropical East Asia & (South) Tropical America disjuncted	2	2
4 旧世界热带 Old World Tropics	—	1
5 热带亚洲至热带大洋洲 Tropical Asia to Tropical Australasia Oceania	—	—
6 热带亚洲至热带非洲 Tropical Asia to Tropical Africa	1	—
7 热带东南亚至印度-马来, 太平洋诸岛(热带亚洲) Tropical Southeast Asia + Indo-Malaya + Tropical South & Southwest Pacific Island (Tropical Asia)	1	1
8 北温带 North Temperate	11	22
9 东亚及北美间断 East Asia & North America disjuncted	1	3
10 旧世界温带 Old World Temperate	—	3
11 温带亚洲 Temperate Asia	—	—
12 地中海、西亚至中亚 Mediterranean, West to Central Asia	—	—
13 中亚 Central Asia	—	—
14 东亚 East Asia	1	4
15 中国特有 Endemic to China	—	1
16 南半球热带以外间断或星散分布 Extratropical South Hemisphere disjuncted or dispersed	—	—
17 热带非洲-热带美洲间断 Tropical Africa & Tropical America disjuncted	—	—
18 泛南极 Holantarctic	—	—
合计 Total	26	41

茱萸五加(*Gamblea ciliata* var. *evodiifolia*)、篦齿槭(*Acer pectinatum*)、西康花楸(*Sorbus prattii*)、唐古特忍冬(*Lonicera tangutica*)、陷脉冬青(*Ilex delavayi*)、丽江云杉(*Picea likiangensis*)、阔叶清风藤(*Sabia yunnanensis* subsp. *latifolia*)和丽江山梅花(*Philadelphus calvescens*)。个体数超过100株的物种有28个, 占总物种数的45.16%。

个体数最多的前2种植物占了总数的70.41%; 个体数超过1,000株的前6个物种之和为38,288株, 占总数的80.18%; 超过500株的前13个物种之和为43,193株, 占总数的90.45%。超过100株的前28个物种之和为46,989株, 占总数的98.40% (图2)。整个样地中, 所有物种的个体密度为1,910.04株/ha。样地中偶见种19个, 稀有种22个, 分别占总物种数的31.15%和35.48%, 其个体数分别占总个体数的3.84%和0.30%; 个体数量仅为1株的有4种, 占物种总数的6.45%。

2.4 优势物种与层次结构

重要值 ≥ 1 的物种有18个, 占总物种数的

29.03%, 其重要值之和达到90.24。排名前5位的假小槲、川滇冷杉、帽斗栎、丽江云杉、吴茱萸五加的重要值之和占样地全部重要值的65.07%。所有重要值 ≥ 1 的物种, 其相对频度之和为81.80。胸高断面面积之和占前3位的分别是川滇冷杉、帽斗栎和丽

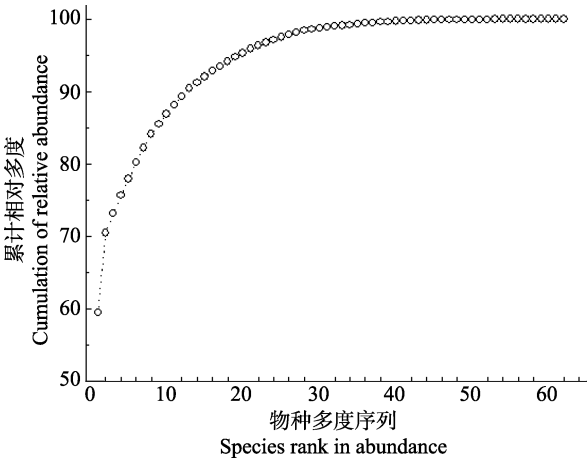


图2 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地的物种多度累积分布图
Fig. 2 Cumulative distribution curve of species abundance in the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

表3 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地重要值 ≥ 1 的物种
Table 3 Species with the importance value ≥ 1 in the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

物种 Species	多度 Abundance	相对频度 Relative frequency	胸高断面面积 Basal area (m ²)	胸径 (mean \pm SE) (cm)	重要值 Importance values
假小槲 <i>Berberis fallax</i>	28,416	8.31	4.98	1.44 \pm 0.00	22.75
川滇冷杉 <i>Abies forrestii</i>	5,207	7.78	379.53	19.63 \pm 0.32	17.16
帽斗栎 <i>Quercus guajavifolia</i>	1,324	5.45	323.03	45.09 \pm 0.90	12.04
丽江云杉 <i>Picea likiangensis</i>	596	4.78	225.75	50.84 \pm 1.94	8.51
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodiifolia</i>	1,065	5.84	66.66	25.74 \pm 0.36	4.61
篦齿槭 <i>Acer pectinatum</i>	958	5.32	50.16	23.30 \pm 0.36	3.89
西康花楸 <i>Sorbus prattii</i>	915	5.80	12.36	11.78 \pm 0.19	2.93
桦叶荚蒾 <i>Viburnum betulifolium</i>	1,114	5.91	1.53	3.78 \pm 0.05	2.79
云南杜鹃 <i>Rhododendron yunnanense</i>	1,162	3.47	16.73	10.95 \pm 0.23	2.45
短梗稠李 <i>Padus brachypoda</i>	328	2.74	25.92	28.46 \pm 0.77	1.89
唐古特忍冬 <i>Lonicera tangutica</i>	671	4.02	0.54	2.78 \pm 0.06	1.82
丽江山梅花 <i>Philadelphus calvescens</i>	528	3.77	2.51	7.08 \pm 0.14	1.70
陷脉冬青 <i>Ilex delavayi</i>	656	2.79	0.32	2.20 \pm 0.05	1.40
阔叶清风藤 <i>Sabia yunnanensis</i> subsp. <i>latifolia</i>	581	2.82	0.39	2.63 \pm 0.05	1.36
高山木姜子 <i>Litsea chunii</i>	372	2.89	2.85	8.56 \pm 0.26	1.30
湖北花楸 <i>Sorbus hupehensis</i>	309	2.67	6.43	14.65 \pm 0.40	1.29
紫花卫矛 <i>Euonymus porphyreus</i>	366	2.95	0.91	5.05 \pm 0.13	1.27
华西忍冬 <i>Lonicera webbiana</i>	265	2.59	1.38	6.94 \pm 0.26	1.09
云南双盾木 <i>Dipelta yunnanensis</i>	385	1.88	3.19	9.64 \pm 0.18	0.99
其他 Others	2,533	18.20	32.31	—	8.77
总计 Total	47,751	100	1,157.47	—	100

表4 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地物种数排名前7位的树种
Table 4 Top seven tree species with the maximum number in the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

物种 Species	占总个体数的比例 Accounts for the proportion of the total number of individuals (%)
假小檗 <i>Berberis fallax</i>	59.51
川滇冷杉 <i>Abies forrestii</i>	10.90
帽斗栎 <i>Quercus guajavifolia</i>	2.77
云南杜鹃 <i>Rhododendron yunnanense</i>	2.43
桦叶荚蒾 <i>Viburnum betulifolium</i>	2.33
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodiifolia</i>	2.23
篦齿槭 <i>Acer pectinatum</i>	2.01
其他 Others	17.81

江云杉, 其大径级数量最多, DBH ≥ 50 cm、 ≥ 80 cm 和 ≥ 100 cm 的分别有1,601株、614株和220株, 占有物种DBH ≥ 50 cm、 ≥ 80 cm 和 ≥ 100 cm 的个体数的94.01%、98.87%和98.65%。落叶树种篦齿槭、吴茱萸五加、短梗稠李(*Padus brachypoda*)次之, 有少量的大径级个体, DBH ≥ 50 cm 和 ≥ 80 cm 的个体分别仅占4.76%和0.16%; 尽管假小檗的重要值在样地内排第一, 但其胸高断面积之和仅有4.98 m², 平均DBH为1.44 cm。

样地群落垂直结构可分为4层。主林层即乔木层第I亚层, 包含4个种, 树高 ≥ 30 m, 林冠高度多在40 m左右, 个别达50–55 m, 优势物种是川滇冷杉、帽斗栎、丽江云杉, 重要值排名分别为第2、3、4位。其中, 川滇冷杉为建群种, 无论多度、频度、

胸高断面积、重要值都处于相对优势地位。主亚林层即乔木层第II亚层, 有10个种, 树高在15–30 m之间, 优势物种是吴茱萸五加和篦齿槭, 重要值排名第5和第6位; 此外, 短梗稠李也是较常见的物种, 重要值排名第10位。次林层即乔木层第III亚层, 有20个种, 树高在5–15 m间, 优势物种是西康花楸、桦叶荚蒾、云南杜鹃, 重要值排名第7、8、9位。灌木层即林下层, 有25个种, 树高在5 m以下, 优势物种是假小檗, 重要值是整个群落中最大的; 次常见的唐古特忍冬和陷脉冬青重要值分别排名第11和第13位。

2.5 径级结构

玉龙雪山样地的平均DBH为7.50 cm, 最大为167.52 cm。所有个体的总径级呈倒“J”型分布(图3), 随着DBH等级增加, 个体数量逐渐减少, 表明群落较为稳定。DBH < 2 cm的个体数量极多, 超过其他径级之和, 占总个体数的58.47%; 1 cm \leq DBH < 3 cm的个体占总数的68.19%; 1 cm \leq DBH < 5 cm的个体占总数的76.24%; 1 cm \leq DBH < 10 cm的个体占总个体数的83.61%; 而DBH ≥ 10 cm、 ≥ 20 cm、 ≥ 50 cm 和 ≥ 100 cm 的个体数分别仅占总个体数的17.54%、9.92%、3.57%和0.47%。其中, DBH ≥ 120 cm 的个体数有72株, DBH ≥ 150 cm 的有5株。

从群落的自然分层来看, 每个林层的径级结构有所不同。主林层平均胸径为27.01 cm, 径级分布呈倒“J”型(图4A), 结构相对稳定, 47.25%和69.14%的个体分别集中在1–10 cm、1–30 cm间; 虽然只有28.25%的个体分布在24–87 cm间, 其结构分布却是最稳定的, 每个径级平均多度为31.64 \pm 0.86株, 波

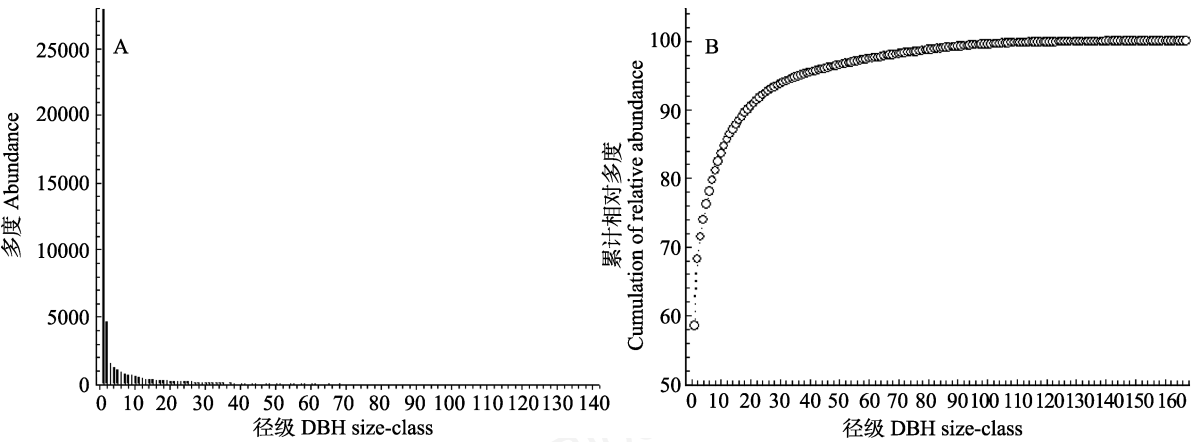


图3 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地所有树种的径级分布图(A)和径级累计分布图(B)
Fig. 3 DBH size-class abundance (A) and cumulative distribution (B) of all tree species in the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

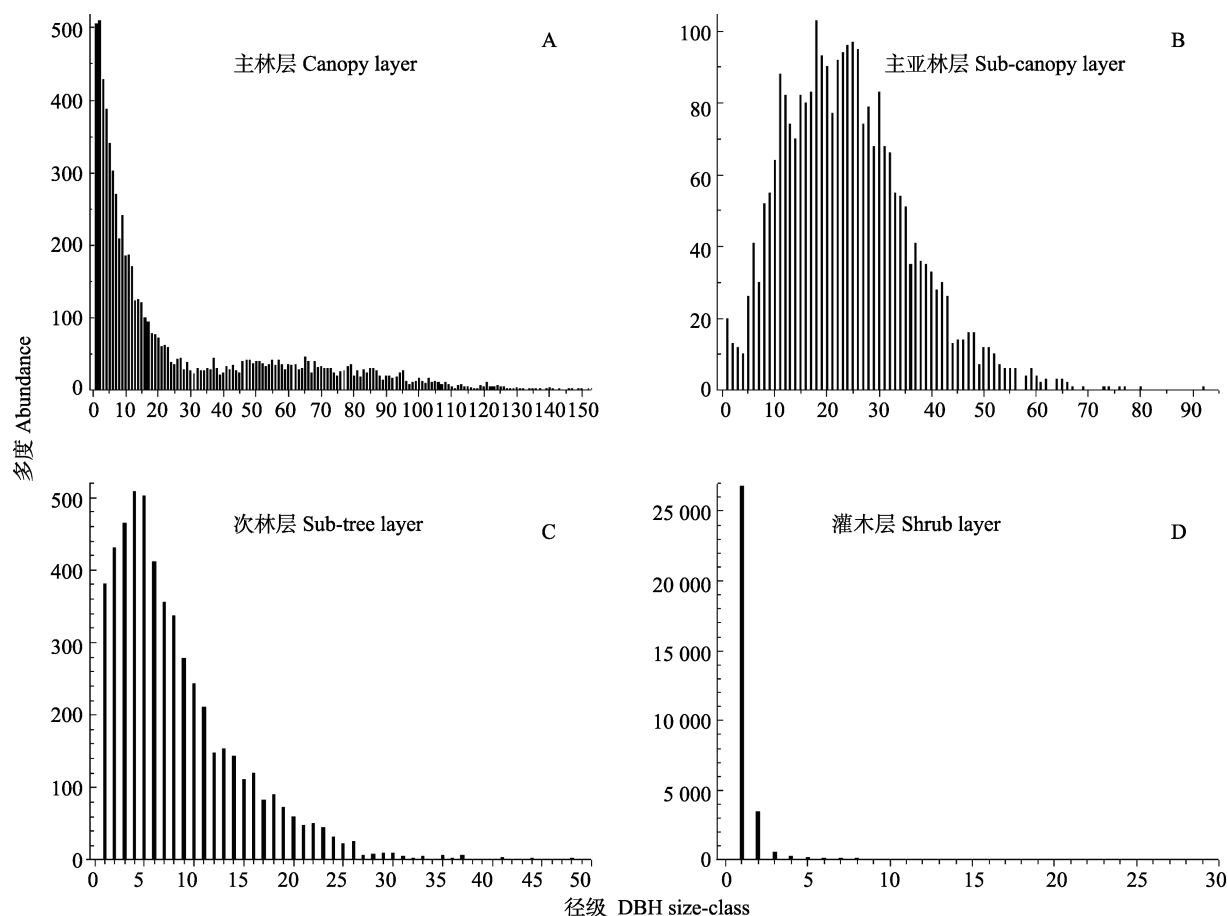


图4 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地群落垂直分层的径级结构

Fig. 4 DBH class distribution of different vertical layers in the Yulongxueshan spruce-fir forest 25ha dynamics plot

动比较小。主亚林层的径级呈近“正态”分布(图4B), 在18–26 cm间形成高峰, 63.98%的个体集中在10–30 cm间, 结构稳定, 没有出现明显的断层。次林层的径级呈近“泊松”分布(图4C), 在DBH = 4 cm时达到最高峰, 之后随着径级增大急剧减少, 大径级较少。灌木层的径级分布呈“L”型(图4D), 84.28%的个体集中在DBH < 2 cm, 98.28%的个体DBH介于1–5 cm间; DBH > 10 cm的个体共128株, 仅占0.40%, 这是受灌木层的树种生理因素制约所致。

依据重要值的排名, 样地内9个优势物种的径级分布主要可以归为5类(图5): (1)倒“J”型分布, 如川滇冷杉(A), 作为建群种, 其结构非常稳定; (2)近倒“J”型, 如帽斗栎(B)、丽江云杉(C), 它们是冠层的优势物种, 出现明显的断层, 小径级数量较多, 中径级数量较少, 大径级数量适中; (3)“正态”型, 如吴茱萸五加(D)、篦齿槭(E)、西康花楸(F), 它们是主亚林层的优势物种, 其结构稳定, 以中径级为主, 缺乏大径级和小径级; (4)“泊松”型, 如桦叶荚

蒴(G)和云南杜鹃(H), 它们是次林层的优势物种, 因树种的生理限制, 几乎没有大径级; (5)“L”型, 如假小槭(I), 它是灌木层的优势物种, 个体主要集中在DBH < 3 cm, 占99.38%, DBH ≥ 5 cm的个体仅5株。

3 讨论

玉龙雪山样地属寒温性针叶林, 植物种类丰富, 区系以北温带成分为主, 世界广布、旧世界温带、东亚成分、东亚及北美间断成分等也有分布(吴征镒等, 2003)。从物种丰富度来看, 略高于长白山阔叶红松林25 ha样地的52种(郝占庆等, 2008)和东灵山暖温带落叶阔叶次生林20 ha样地的58种(刘海丰等, 2011), 远少于天童山常绿阔叶林20 ha样地的152种(杨庆松等, 2011)、古田山中亚热带常绿阔叶林24 ha样地的159种(祝燕等, 2008)、弄岗热带喀斯特季节性雨林15 ha样地的223种(王斌等, 2014)和西双版纳热带雨林20 ha样地的468种(兰国玉等, 2008)。从物

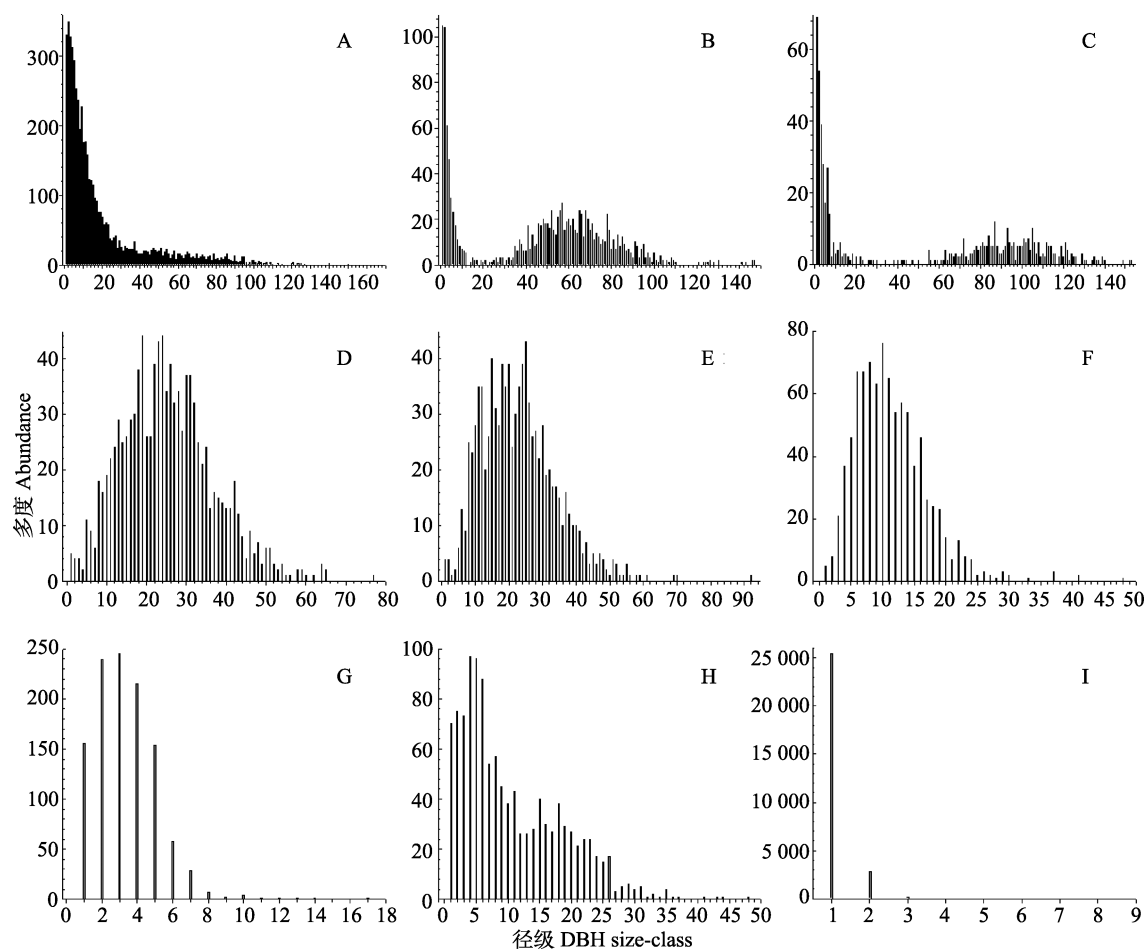


图5 9个优势物种的径级结构图。A, 川滇冷杉; B, 帽斗栎; C, 丽江云杉; D, 吴茱萸五加; E, 篦齿槭; F, 西康花楸; G, 桦叶荚蒾; H, 云南杜鹃; I, 假小檗。

Fig. 5 DBH size-class distribution of the nine dominant species. A, *Abies forrestii*; B, *Quercus guajavifolia*; C, *Picea likiangensis*; D, *Gamblea ciliata* var. *evodiifolia*; E, *Acer pectinatum*; F, *Sorbus prattii*; G, *Viburnum betulifolium*; H, *Rhododendron yunnanense*; I, *Berberis fallax*.

种科属组成来看, 玉龙雪山样地和长白山样地具有相同的12科和17属, 分别占长白山样地科属的66.67%和53.13%, 占玉龙雪山样地科属的46.15%和41.46%; 玉龙雪山样地蔷薇科、忍冬科和槭树科物种比较丰富, 这点与长白山样地中蔷薇科、槭树科和忍冬科物种最丰富具有高度相似性(郝占庆等, 2008); 玉龙雪山样地与长白山样地的不同点是玉龙雪山样地杜鹃花科植物较长白山样地丰富, 而在长白山样地没有樟科和红豆杉科植物记录。

玉龙雪山样地的区系特征与东灵山暖温带落叶阔叶次生林20 ha样地(刘海丰等, 2011)、长白山阔叶红松林25 ha样地(郝占庆等, 2008)极为相似, 都是温带成分占优势, 而和同纬度热带区系向温带区系过渡的天童山常绿阔叶林20 ha样地(杨庆松等, 2011)、古田山中亚热带常绿阔叶林24 ha样地(祝燕

等, 2008)、八大公山亚热带山地常绿落叶阔叶混交林25 ha样地(卢志军等, 2013)相差甚远。其中, 北温带成分的科(东灵山44.44%; 长白山36.84%)的比例较接近; 而属(东灵山75%; 长白山68.75%)的比例却差异较大, 玉龙雪山样地中热带成分更多。

物种之间的多度、胸高断面积和平均胸径存在较大差异。丽江云杉、川滇冷杉和帽斗栎在样地内占绝对优势, 属于该群落的优势种。而偶见种与稀有种占物种数比例与长白山阔叶红松林25 ha样地(30.8%, 34.6%)非常相近(郝占庆等, 2008)。且稀有种的比例与天童山常绿阔叶林20 ha样地(杨庆松等, 2011)、弄岗热带喀斯特季节性雨林15 ha样地(王斌等, 2014)、古田山中亚热带常绿阔叶林24 ha样地(祝燕等, 2008)相差不大, 低于八大公山亚热带山地常绿落叶阔叶混交林25 ha样地(卢志军等, 2013)、西

双版纳热带雨林20 ha样地(兰国玉等, 2008)、鼎湖山亚热带常绿阔叶林20 ha样地(叶万辉等, 2008)。

径级结构分析表明, 由上到下4个林层分别呈现出倒“J”型、近倒“J”型、正态分布、“泊松”分布和“L”型5种类型。单个物种的径级结构也表现出与该物种所在林层相似的径级结构, 但不同物种之间依然存在着极大的差异。对玉龙雪山样地群落结构与物种组成的分析, 为进一步研究该样地内物种共存机制、群落动态及其更新演替规律提供了基础数据。

致谢: 在本文写作过程中得到中国科学院昆明植物研究所张石宝研究员和中国科学院西双版纳热带植物园杨洁博士的指导和帮助, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- Condit R (1995) Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 18–22.
- Condit R (1998) *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots*. Springer, Berlin.
- Feng JM, Wang XP, Li J, Fang JY (2006) Effect of area and mid-domain effect on altitudinal pattern of seed plants richness in Lijiang, Yunnan, China. *Biodiversity Science*, 14, 107–113. (in Chinese with English abstract) [冯建孟, 王襄平, 李晶, 方精云 (2006) 面积和中间膨胀效应对丽江地区种子植物物种丰富度垂直分布格局的影响. *生物多样性*, 14, 107–113.]
- Gao F, He RH, Liu DT, Liu WW, Chen ZF, Wu ZK, Huang H, Chen XL, Xu K (2013) Spatial and temporal patterns of the surface soil moisture in southern Jade Dragon Snow Mountain forest ecosystem. *Journal of West China Forestry Science*, 42(4), 87–90. (in Chinese with English abstract) [高富, 和荣华, 刘德团, 刘维璋, 陈智发, 吴之坤, 黄华, 陈小灵, 许琨 (2013) 玉龙雪山南段主要森林群落表层土壤水分的时空变化研究. *西部林业科学*, 42(4), 87–90.]
- Guo HJ, Long CL (1998) *Biodiversity of Yunnan, SW China*. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [郭辉军, 龙春林 (1998) 云南生物多样性. 云南科技出版社, 昆明.]
- Hao ZQ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Yao XL (2008) Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: community composition and structure. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 238–250. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳 (2008) 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构. *植物生态学报*, 32, 238–250.]
- He FL, Legendre P, LaFrankie JV (1997) Distribution patterns of tree species in a Malaysian tropical rain forest. *Journal of Vegetation Science*, 8, 105–114.
- Hooper DU, Chapin FS III, Ewel JJ, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton JH, Lodge DM, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad AJ, Vandermeer J, Wardle DA (2005) Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3–35.
- Hubbell SP, Foster RB (1986) Commonness and rarity in a neotropical forest: implications for tropical tree conservation. In: *Conservation Biology: the Science of Scarcity and Diversity* (ed. Soulé ME), pp. 205–231. Sinauer Associates, Sunderland.
- Lan GY, Hu YH, Cao M, Zhu H, Wang H, Zhou SS, Deng XB, Cui JY, Huang JG, Liu LY, Xu HL, Song JP, He YC (2008) Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamic plot: species composition and spatial distribution pattern. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 287–298. (in Chinese with English abstract) [兰国玉, 胡跃华, 曹敏, 朱华, 王洪, 周仕顺, 邓晓保, 崔景云, 黄建国, 刘林云, 许海龙, 宋军平, 何有才 (2008) 西双版纳热带森林动态监测样地——树种组成与空间分布格局. *植物生态学报*, 32, 287–298.]
- Li XW (1996) Floristic statistics and analyses of seed plants from China. *Acta Botanica Yunnanica*, 18, 363–384. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1996) 中国种子植物区系统计分析. *云南植物研究*, 18, 363–384.]
- Liu HF, Li L, Sang WG (2011) Species composition and community structure of the Donglingshan forest dynamic plot in a warm temperate deciduous broad-leaved secondary forest, China. *Biodiversity Science*, 19, 232–242. (in Chinese with English abstract) [刘海丰, 李亮, 桑卫国 (2011) 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构. *生物多样性*, 19, 232–242.]
- Liu Q, Wu Y, Wu N (2003) Forest gap characteristic in a coniferous-*Picea likiangensis* forest in the Yulong Snow Mountain Natural Reserve, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 845–848. (in Chinese with English abstract) [刘庆, 吴彦, 吴宁 (2003) 玉龙雪山自然保护区丽江云杉林林窗特征研究. *应用生态学报*, 14, 845–848.]
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime JP, Hector A, Hooper DU, Huston MA, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle DA (2001) Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenge. *Science*, 294, 804–808.
- Lu ZJ, Bao DC, Guo YL, Lu JM, Wang QG, He D, Zhang KH, Xu YN, Liu HB, Meng HJ, Huang HD, Wei XZ, Liao JX, Qiao XJ, Jiang MX, Gu ZR, Liao CL (2013) Community composition and structure of Badagongshan (BDGS) forest dynamic plot in a mid-tropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest, central China. *Plant*

- Science Journal, 31, 336–344. (in Chinese with English abstract) [卢志军, 鲍大川, 郭屹立, 路俊盟, 王庆刚, 何东, 张奎汉, 徐耀粘, 刘海波, 孟红杰, 黄汉东, 魏新增, 廖建雄, 乔秀娟, 江明喜, 谷志容, 廖春林 (2013) 八大公山中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林物种组成与结构. 植物科学学报, 31, 336–344.]
- Qu ZX, Wu YS, Jiang HQ, Tang TG (1983) Plant Ecology. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [曲仲湘, 吴玉树, 姜汉侨, 唐廷贵 (1983) 植物生态学. 高等教育出版社, 北京.]
- Sun RY, Li QF, Niu CJ, Lou AR (2002) Basic Ecology. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 娄安如 (2002) 基础生态学. 高等教育出版社, 北京.]
- Tilman D, Reich PB, Knops JMH (2006) Biodiversity and ecosystem stability in a decade long grassland experiment. *Nature*, 441, 629–632.
- Wang B, Huang YS, Li XK, Xiang WS, Ding T, Huang FZ, Lu SH, Han WH, Wen SJ, He LJ (2014) Species composition and spatial distribution of the 15 ha northern tropical karst seasonal rain forest dynamic plot in Nonggang of Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 22, 141–156. (in Chinese with English abstract) [王斌, 黄俞淞, 李先琨, 向悟生, 丁涛, 黄甫昭, 陆树华, 韩文衡, 文淑均, 何兰军 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林15ha监测样地的树种组成与空间分布. 生物多样性, 22, 141–156.]
- Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H (2003) The areal-types of the world families of seed plant. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 245–257. (in Chinese with English abstract) [吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 彭华, 孙航 (2003) 世界种子植物科的分布区类型系统. 云南植物研究, 25, 245–257.]
- Wu ZY, Zhu YC (1987) Vegetation in Yunnan. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 朱彦丞 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Yang QS, Ma ZP, Xie YB, Zhang ZG, Wang ZH, Liu HM, Li P, Zhang N, Wang DL, Yang HB, Fang XF, Yan ER, Wang XH (2011) Community structure and species composition of an evergreen broad-leaved forest in Tiantong's 20 ha dynamic plot, Zhejiang Province, eastern China. *Biodiversity Science*, 19, 215–223. (in Chinese with English abstract) [杨庆松, 马遵平, 谢玉彬, 张志国, 王樟华, 刘何铭, 李萍, 张娜, 王达力, 杨海波, 方晓峰, 阎恩荣, 王希华 (2011) 浙江天童20 ha常绿阔叶林动态监测样地的群落特征. 生物多样性, 19, 215–223.]
- Ye WH, Cao HL, Huang ZL, Lian JY, Wang ZG, Li L, Wei SG, Wang ZM (2008) Community structure of a 20 ha lower subtropical evergreen broadleaved forest plot in Dinghusan, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 274–286. (in Chinese with English abstract) [叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 练琚愉, 王志高, 李林, 魏识广, 王章明 (2008) 鼎湖山亚热带常绿阔叶林20 ha样地群落特征研究. 植物生态学报, 32, 274–286.]
- Zhao SQ, Fang JY, Lei CG (2000) Global 200: an approach to setting large-scale biodiversity conservation priorities. *Chinese Biodiversity*, 8, 435–440. (in Chinese with English abstract) [赵淑清, 方精云, 雷光春 (2000) 全球200: 确定大尺度生物多样性优先保护的一种方法. 生物多样性, 8, 435–440.]
- Zhu Y, Zhao GF, Zhang LW, Shen GC, Mi XC, Ren HB, Yu MJ, Chen JH, Chen SW, Fang T, Ma KP (2008) Community composition and structure of Gutianshan forest dynamics plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, East China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 262–273. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 赵谷风, 张俪文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平 (2008) 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. 植物生态学报, 32, 262–273.]

(责任编辑: 王国宏 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地木本植物(不含竹子)物种名录

Appendix 1 Checklist of woody (excluding bamboo) plants of the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016274-1.pdf>

黄华, 陈智发, 刘德团, 和国星, 和荣华, 李德铎, 许琨. 玉龙雪山寒温性云冷杉林动态监测样地的物种组成及群落结构. 生物多样性, 2017, 25 (3): 255–264.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016274>

附录1 玉龙雪山云冷杉林25 ha样地木本植物(不含竹子)物种名录

Appendix 1 Checklist of woody (excluding bamboo) plants of the Yulongxueshan spruce-fir forest 25 ha dynamics plot

物种 Species	重要值 Importance value	物种 Species	重要值 Importance value
假小檗 <i>Berberis fallax</i>	22.75	灰栒子 <i>Cotoneaster acutifolius</i>	0.29
川滇冷杉 <i>Abies forrestii</i>	17.16	乳突小檗 <i>Berberis papillifera</i>	0.26
帽斗栎 <i>Quercus guajavifolia</i>	12.04	云南丁香 <i>Syringa yunnanensis</i>	0.22
丽江云杉 <i>Picea likiangensis</i>	8.51	高山红豆杉 <i>Taxus florinii</i>	0.19
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodiifolia</i>	4.61	钝叶蔷薇 <i>Rosa sertata</i>	0.18
篦齿槭 <i>Acer pectinatum</i>	3.89	亮叶杜鹃 <i>Rhododendron vernicosum</i>	0.17
西康花楸 <i>Sorbus prattii</i>	2.93	球蕊五味子 <i>Schisandra sphaerandra</i>	0.14
桦叶荚蒾 <i>Viburnum betulifolium</i>	2.79	泡花树 <i>Meliosma cuneifolia</i>	0.13
云南杜鹃 <i>Rhododendron yunnanense</i>	2.45	红棕杜鹃 <i>Rhododendron rubiginosum</i>	0.12
短梗稠李 <i>Padus brachypoda</i>	1.89	大花绣球藤 <i>Clematis montana</i> var. <i>longipes</i>	0.11
唐古特忍冬 <i>Lonicera tangutica</i>	1.82	绢毛木姜子 <i>Litsea sericea</i>	0.09
丽江山梅花 <i>Philadelphus calvescens</i>	1.70	紫玉盘杜鹃 <i>Rhododendron uvariifolium</i>	0.08
陷脉冬青 <i>Ilex delavayi</i>	1.40	冠萼花楸 <i>Sorbus coronata</i>	0.06
阔叶清风藤 <i>Sabia yunnanensis</i> subsp. <i>latifolia</i>	1.36	糖茶藨子 <i>Ribes himalense</i>	0.04
高山木姜子 <i>Litsea chunii</i>	1.30	染用卫矛 <i>Euonymus tingens</i>	0.04
湖北花楸 <i>Sorbus hupehensis</i>	1.29	华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.03
紫花卫矛 <i>Euonymus porphyreus</i>	1.27	泡叶栒子 <i>Cotoneaster bullatus</i>	0.03
华西忍冬 <i>Lonicera webbiana</i>	1.09	株木 <i>Cornus macrophylla</i>	0.02
云南双盾木 <i>Dipelta yunnanensis</i>	0.99	中华柳 <i>Salix cathayana</i>	0.02
柳叶忍冬 <i>Lonicera lanceolata</i>	0.89	越桔叶忍冬 <i>Lonicera angustifolia</i> var. <i>myrtillus</i>	0.02
冰川茶藨子 <i>Ribes glaciale</i>	0.80	高山柏 <i>Juniperus squamata</i>	0.02
四蕊槭 <i>Acer stachyophyllum</i> subsp. <i>tetramerum</i>	0.79	青菜叶 <i>Helwingia japonica</i>	0.02
微毛樱桃 <i>Cerasus clarifolia</i>	0.64	紫牡丹 <i>Paeonia delavayi</i>	0.02
深灰槭 <i>Acer caesium</i>	0.63	红缨合耳菊 <i>Synotis erythropappa</i>	0.01
齿叶忍冬 <i>Lonicera setifera</i>	0.60	小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	0.01
丽江槭 <i>Acer forrestii</i>	0.38	绢毛蔷薇 <i>Rosa sericea</i>	0.01
川滇绣线菊 <i>Spiraea schneideriana</i>	0.35	华榎 <i>Tilia chinensis</i>	0.01
苍山香茶菜 <i>Isodon bulleyanus</i>	0.35	短穗旌节花 <i>Stachyurus chinensis</i> var. <i>brachystachyus</i>	0.01
粉叶小檗 <i>Berberis pruinosa</i>	0.34	峨眉蔷薇 <i>Rosa sericea</i> var. <i>omeiensis</i>	0.01
云南铁杉 <i>Tsuga yunnanensis</i>	0.32	大白杜鹃 <i>Rhododendron decorum</i>	0.01
楸木 <i>Aralia chinensis</i>	0.32	粉枝莓 <i>Rubus biflorus</i>	0.01

•研究报告•

北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态

郭屹立^{1,2} 李冬兴^{1,2} 王 斌^{1,2} 何运林^{1,2} 向悟生^{1,2} 蒋裕良^{1,2} 李先琨^{1,2*}

1 (广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006)

2 (广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西凭祥 532699)

摘要: 森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分, 在森林生态系统的物质循环和养分平衡中起重要作用。自2012年5月开始, 我们在弄岗北热带喀斯特季节性雨林15 ha森林动态监测样地中布设了90个凋落物收集器进行凋落物收集。本文选取2013–2014年期间相关数据, 研究了凋落物的组分特征、物种组成、时间动态和空间分布特征等。结果表明, 2013年和2014年凋落物总量分别为4,858.0 kg/ha和4,928.8 kg/ha; 凋落物组分以凋落叶为主且高达85%以上, 其他组分所占比例较小。凋落物总量和凋落叶均有两个高峰期, 分别发生在每年的春季(3–4月)和秋冬季(8–11月), 凋落果的高峰期在8月左右; 其他组分由于凋落量较少, 年际动态并不明显。不同生态因子对凋落物总量分布格局的影响差异显著, 且存在年际变化, 但总体表现出凋落物总量受凋落物收集器所在样方的坡向和样方内所有DBH ≥ 1 cm个体的平均胸径影响最为显著。喀斯特季节性雨林凋落物的组分构成和时空动态特征反映了不同生物和非生物因素影响下的物质循环规律, 为深入揭示喀斯特独特地质、地貌背景下物质循环和能量流动的特殊性提供了基础。

关键词: 喀斯特季节性雨林; 凋落物; 组分构成; 生态因子; 弄岗15 ha森林动态监测样地

Composition and spatio-temporal dynamics of litter fall in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China

Yili Guo^{1,2}, Dongxing Li^{1,2}, Bin Wang^{1,2}, Yunlin He^{1,2}, Wusheng Xiang^{1,2}, Yuliang Jiang^{1,2}, Xiankun Li^{1,2*}

1 Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Research Station, Pingxiang, Guangxi 532699

Abstract: Litter fall is a significant component of forest ecosystems and has important ecological functions in material cycling and nutrient balance of forest ecosystems. In this study, we studied litter fall production, composition, spatial and temporal dynamics in a 15-ha northern tropical karst seasonal rainforest dynamics plot in Nonggang National Nature Reserve, Guangxi. We set up 90 litter fall traps, and collected litter fall weekly since May 2012. All litter fall in each trap was dried, classified and weighed. We used litter fall data from January 2013 to December 2014. The total annual litter production in 2013 and 2014 was 4,858.0 kg/ha and 4,928.8 kg/ha, respectively. Litter fall of leaves accounted for 85% while other components made up a small amount. Fruit litter fall was significantly higher in 2013. There were two litter fall peaks in each year, one in spring (March and April) and the other occurring in autumn to early winter (between August and November). The peak of fruit litter fall peak occurred in August. There were no significant inter-annual fluctuations in other litter fall components. The prevailing ecological factors of litter fall production were significantly different between 2013 and 2014. Litter fall production was significantly influenced by aspect and mean DBH (diameter at breast height). Composition and spatio-temporal dynamics of litter fall reflected material cycles affected by multiple biotic and abiotic factors. Our results provide basic information to reveal the

收稿日期: 2016-11-28; 接受日期: 2017-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(31500342, 31660130)、广西重点研发计划项目(桂科 AB16380256)、广西自然科学基金(2015GXNSFBA139050)和广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室开放基金(GKB15-A-22)

* 通讯作者 Authors for correspondence. E-mail: xiankunli@163.com

unique characteristics of material circulation and energy flows in the geological background and geomorphology of karst.

Key words: karst seasonal rainforest; litter fall; components; ecological factors; Nonggang 15 ha forest dynamics plot

森林凋落物是指森林生态系统内由生物组分产生并归还到林地表面作为分解者的物质和能量来源, 借以维持生态系统功能的所有有机物质的总称(王凤友, 1989)。它具有维持土壤肥力、促进森林生态系统中的物质循环和养分平衡的功能, 关系着森林生态系统的物质循环和能量流动(Maguire, 1994; Liu et al, 2003; Vasconcelos & Luizão, 2004), 对维持森林生态系统的稳定具有不可或缺的作用。自 1876 年 Ebernayer 首次阐述森林凋落物在养分循环中的重要作用之后, 尤其是在全球气候变化日益受到关注的今天, 森林凋落物及其时空动态一直是生态系统物质和能量循环研究的重要内容之一(Schlesinger & Lichter, 2001; Magnani et al, 2007; Parsons et al, 2014)。

在全球气候变化背景下, 研究者非常重视凋落物在陆地生态系统碳循环和养分地球化学循环中所起的作用、凋落物分解和土壤微生物活动释放的 CO₂ 对温室效应的贡献及全球气候变化对凋落物时空动态的影响等(彭少麟和刘强, 2002; Zhang et al, 2014; Newbold et al, 2015)。此外, 凋落物的分解速率、分解效应及其化学营养元素的释放动态等也是凋落物相关研究的热点之一(Vitousek, 1984; Tang et al, 2010; Xia et al, 2015; 李宜浓等, 2016)。

中国西南喀斯特区是全球三大喀斯特集中分布区之一, 其山地地质、地貌形态丰富, 土壤富钙、偏碱, 发育着独特且类型多样的热带和亚热带喀斯特植被生态系统。尽管喀斯特地区面积占我国国土面积的 35.93% (Yuan, 1991), 但针对该生态系统中凋落残体归还给土壤的养分再循环特征等相关研究却较少, 少量研究主要集中于桂西北木伦和黔南茂兰国家级自然保护区; 但多选择小尺度、不同演替阶段的典型群落类型(俞国松等, 2011; 曾昭霞等, 2011; 俞月凤等, 2015), 存在凋落物收集年限短且凋落节律无重复性, 缺乏与不同植被类型的比较等问题。在统一标准、全球尺度、多气候带、长期定位监测等条件下建立的大型森林动态监测样地, 为揭示全球背景下我国西南喀斯特区森林凋落物的

时空格局与动态变化的独特性提供了可能。

北热带喀斯特季节性雨林是我国北热带石灰岩山地分布的典型森林植被类型之一, 目前仅在我国桂西南和滇东南有零星斑块状分布, 又以桂西南的弄岗国家级自然保护区所保存的面积最大、生态系统结构最为完整(郭屹立等, 2015)。桂西南喀斯特季节性雨林是我国 3 个植物区系特有现象分布中心之一, 也是我国具有国际意义的 14 个陆地生物多样性关键地区之一(陈灵芝, 1993)。该区植物种类之丰富堪称广西岩溶地区之冠, 且孕育着众多的岩溶特有植物(梁畴芬等, 1988)。这种富钙偏碱、土层薄且贫瘠的特殊地球化学背景下的森林生态系统是如何实现养分交流与循环过程以维持高生物多样性等方面的研究还鲜有报道。

本文以桂西南喀斯特季节性雨林森林生态系统内建立的弄岗 15 ha 森林动态监测样地为研究平台, 以样地内布设的 90 个凋落物收集器所收集的凋落物为研究对象, 分析了凋落物的组分结构和时空动态等特征。其目的是: (1)探讨喀斯特季节性雨林凋落物的组分结构、物种组成和年际变化规律等特征; (2)分析喀斯特季节性雨林中凋落物总量与生态因子的相关性, 揭示影响凋落物总量的关键因子。希望本研究为今后揭示喀斯特富钙偏碱、土层薄且土壤贫瘠等独特地质背景下物质循环和能量流动的过程和机制等深层次研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

广西弄岗国家级自然保护区位于广西壮族自治区龙州县和宁明县交界处(22°13'56"—22°33'09" N, 106°42'28"—107°04'54" E), 呈东南—西北长条状, 分为弄岗、陇呼和陇瑞 3 个片区, 总面积 10,077 ha。主要土壤类型有原始石灰土、黑色石灰土、棕色石灰土、水化棕色石灰土及淋溶红色石灰土; 年平均降水量 1,150–1,550 mm, 最多可达 2,043 mm, 最小 890 mm, 年降水量分布不均, 主要集中在 5–9 月, 具有明显的干湿季节交替; 年均气温 22°C, 最冷月

平均温在 13℃ 以上; 春夏季多出现冰雹, 夏季易受台风侵袭, 冬季常受寒潮侵袭; 风速小, 风向变化与谷向一致, 受季风环流影响, 每年的 1–4 月风速较大(图 1)。

在中国科学院生物多样性委员会的资助下, 广西植物研究所于 2011 年在上述森林群落内建立了弄岗 15 ha 森林动态监测样地, 该样地(22°25' N, 106°57' E)严格遵循 CTFS (Center for Tropical Forest Science)的样地建设标准(Condit, 1998)。样地东西长 500 m, 南北长 300 m, 海拔范围 180–370 m。样地内生境异质性较高, 包括了从山顶、山坡到洼地等一系列典型的“峰丛–洼地”生境类型。岩石裸露率达 70% 以上, 绝大部分地段土层厚度不足 30 cm; 局部地形复杂多变, 小生境类型丰富, 个别 10 m × 10 m 样方内最大高差可达十几米。样地物种丰富, 其中 DBH ≥ 1 cm 的木本植物有 223 种, 隶属于 56 科 157 属(王斌等, 2014)。

1.2 研究方法

1.2.1 凋落物收集器布设方案

依据地形和生境等特征在样地内共布设了 90 个凋落物收集器(图 2)。凋落物收集器的布设基本包含了样地内所有的群落类型, 其设置参考以下原则: (1)在样地调查时形成的步道两侧 4–10 m 的范围内交替设置; (2)根据树种冠幅, 样地内两个收集器之间的距离不小于 10 m; (3)样地边缘 20 m 内不设置收集器, 以尽可能地保证凋落物都来自于样地内的母树(Du et al, 2009)。

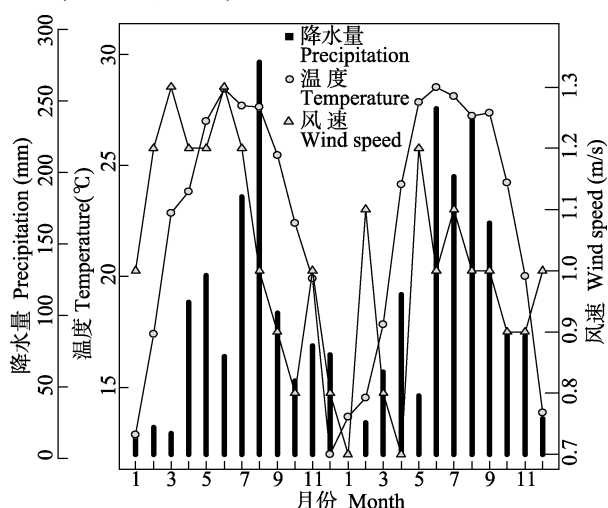


图 1 广西龙州县 2013–2014 年降水量、风速和温度的月变化
Fig. 1 Monthly variations of precipitation, wind speed and temperature between 2013 and 2014 in Longzhou County, Guangxi

收集器由白色 PVC 管收集框和灰黑色尼龙网组成。收集框大小为 0.71 m × 0.71 m, 面积约 0.50 m², 距离地面平均高度 0.80 m, 尼龙网孔径 1 mm, 收集器内部尼龙网深度约 0.33 m。

1.2.2 凋落物的收集、鉴定与分类

结合弄岗北热带喀斯特季节性雨林的气候特征, 于每年 6–11 月每周收集 1 次, 其他月份半个月 1 次。如遇连续降雨则适当推迟收集日期, 但最少保证每月 2 次。每次以凋落物收集器为单位, 依次按花、果实、枝干、叶片及其他杂物进行分类, 并对叶片和果实进行物种鉴定。在 80℃ 烘干至恒重并称重。

样地内自 2012 年 5 月开始收集凋落物, 目前已持续 4 年。本研究选取 2013 年 1 月第一次收集至 2014 年 12 月最后一次收集的数据。

1.3 数据分析

分别计算每个凋落物收集器所在 10 m × 10 m 样方的生物和非生物等生态因子。非生物因子主要为地形因子, 包括海拔、凹凸度、坡度、坡向、地形湿润度指数(topographic wetness index)和干旱度指数(altitude above channel), 其中, 坡向进行正弦和余弦转换。有关这 7 个地形因子的定义和计算方法可参考相关文献(郭屹立等, 2016; Guo et al, 2016)。生物因子包括凋落物收集器所在 10 m × 10 m 样方内所有胸径(DBH) ≥ 1 cm 植株的株数及胸高断面积之和、所有个体的平均胸径和最大胸径等 4 个, 合计 11 个生态因子。

为分析生态因子对凋落物总量的影响及相关性大小, 本研究以每个凋落物收集器年度内所收集的凋落物总量为因变量, 以该收集器所在样方的上述 11 个生态因子为自变量, 利用广义线性模型中标准化偏回归系数的大小来说明各自变量对因变量线性影响的大小。由于凋落物量即因变量具备正态性, 故使用 Gaussian 分布的广义线性模型(同线性模型)。依据赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)用向后剔除法逐步筛选变量的方法筛选影响程度最高的模型, AIC 值越小说明模型的拟合效果越好, 进而确定对凋落物总量影响明显的生态因子。

先对每一个变量(包括因变量)进行标准化, 再计算方程的偏回归系数, 可得到标准化偏回归系数, 常用 $\hat{\beta}_i^*$ 表示:

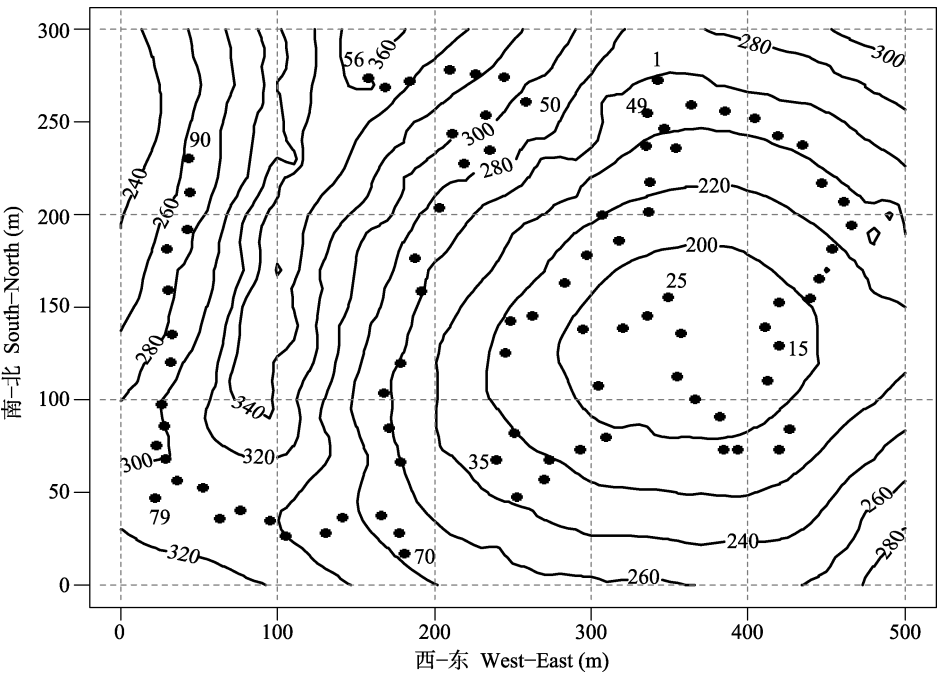


图 2 弄岗 15 ha 森林动态监测样地等高线图及 90 个凋落物收集器的编号和位置图
Fig. 2 The contour map and location of 90 litter fall traps of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

$$\hat{\beta}_i^* = \hat{\beta}_i \frac{s_i}{s_y}$$

(1)

式中, $s_i (i = 1, 2, \cdots, p)$ 与 s_y 分别是各自变量和因变量的标准差, $\hat{\beta}_i$ 为偏回归系数(McCullagh & Nelder, 1989)。

使用 Wilcoxon 符号检验法检验 2013 年和 2014 年每个凋落物收集器收集的凋落物总量和不同组分的年际间差异。

广义线性模型拟合基于 R 软件中的 *glm* 函数等, 所有数据分析和绘图均在 R3.2.2 (R Core Team, 2015)中实现。

2 研究结果

2.1 凋落物总量及其组分构成

2013 年和 2014 年弄岗 15 ha 森林动态监测样地 90 个收集器共收集到凋落物 21,860.43 g 和 22,179.47 g, 年凋落量分别为 4,858.0 kg/ha 和 4,928.8 kg/ha。凋落物的不同组分中, 凋落叶所占的比例最大, 各年分别占年总凋落量的 89.23%和 94.48%, 而花、枝和杂物所占的比例很小。2013 年和 2014 年每个凋落物收集器的年凋落物总量差别并不显著(Wilcoxon 统计量 $V = 2,293, P = 0.1621$), 但 2013 年果的凋落量显著高于 2014 年($V = 732, P =$

0.0435), 这表明 2013 年的果实产量要明显高于 2014 年(表 1)。

对收集到的凋落叶进行物种鉴定, 并计算每个物种凋落叶占年总凋落量的比例。其中, 2013 年共鉴定出 79 种, 已鉴定物种的凋落叶占凋落物总量的 85.25%; 2014 年鉴定出 64 种, 已鉴定物种凋落叶占总量的 80.27%。2013 年和 2014 年凋落叶的优势物种组成差别并不明显, 均以闭花木(*Cleistanthus sumatranus*)、广西牡荊(*Vitex kwangsiensis*)、苹婆(*Sterculia monosperma*)、海南椴(*Diplodiscus trichosperma*)、蚬木(*Excentrodendron tonkinense*)等乔木物种为优势, 且相关优势种凋落物所占比例的顺序大致相当(表 2)。

表 1 2013 年和 2014 年凋落物组分构成比较
Table 1 Comparison of the components of the litter fall between 2013 and 2014

组分 Components	凋落量 Litter fall (kg/ha) (%)	
	2013	2014
花 Flower	64.6 (1.33)	34.8 (0.71)
果 Fruit	417.8 (8.60)	64.6 (1.31)
叶 Leaf	4,334.8 (89.23)	4,656.6 (94.48)
枝 Twig	17.8 (0.37)	63.4 (1.28)
杂物 Debris	23.0 (0.47)	109.4 (2.22)
合计 Total	4,858.0 (100.00)	4,928.8 (100.00)

2.2 凋落物总量及其组分的时间动态

2013 年和 2014 年凋落物总量的年际动态变化差异显著, 表现为 2013 年的 1–5 月凋落物总量显著低于 2014 年同期, 而 6–12 月则高于 2014 年同期。但总体表现出近“双峰型”, 即 3–4 月和 9–10 月相对较高, 而其他时间段则相对较低, 但 2013 年 6 月有明显的高峰异常值(图 3)。

由于凋落叶占据了凋落物总量的 85%以上, 因此凋落叶的时间动态和凋落物总量相似: 第一个高峰出现在 3–4 月, 第二个在 10 月前后。凋落果在 8–10 月有略微的高峰期, 其中 2013 年 8 月凋落果有一个明显的高峰值。凋落物中花、枝等所占比例很小, 因此这两种组分的年际动态并不明显(表 3)。

2.3 凋落物总量的空间分布

结果表明, 不同生态因子对凋落物总量的影响差异显著, 且不同年际间亦存在明显差别。2013 年, 样方内所有个体的胸高断面面积之和、平均胸径和所有植株株数与凋落物总量表现为显著正相关, 坡向的正弦值为显著负相关, 其他则不显著, 表现出微弱的或正或负的相关性($AIC = 1,008$); 2014 年, 尽

表 2 2013 年和 2014 年凋落物中凋落叶优势种组成特征
Table 2 The feature of dominant species composition of litter fall production of leaves between 2013 and 2014

物种 Species	凋落量 Litter fall (kg/ha) (%)	
	2013	2014
闭花木 <i>Cleistanthus sumatranus</i>	738.7 (15.21)	694.3 (14.09)
广西牡荊 <i>Vitex kwangsiensis</i>	471.6 (9.71)	542.5 (11.01)
苹婆 <i>Sterculia monosperma</i>	450.3 (9.27)	470.9 (9.55)
海南椴 <i>Diplodiscus trichosperma</i>	343.4 (7.07)	425.1 (8.62)
蚬木 <i>Excentrodendron tonkinense</i>	239.0 (4.92)	247.1 (5.01)
广西棋子豆 <i>Archidendron guangxiensis</i>	215.8 (4.44)	127.9 (2.60)
中国无忧花 <i>Saraca dives</i>	207.9 (4.28)	161.3 (3.27)
劲直刺桐 <i>Erythrina stricta</i>	180.0 (3.70)	106.6 (2.16)
鱼骨木 <i>Canthium dicoccum</i>	172.2 (3.54)	119.8 (2.43)
米扬噎 <i>Streblus tonkinensis</i>	112.4 (2.31)	113.5 (2.30)
羽叶白头树 <i>Garuga pinnata</i>	99.1 (2.04)	54.5 (1.11)
广西澄广花 <i>Orophea anceps</i>	92.8 (1.91)	94.8 (1.92)
金丝李 <i>Garcinia paucinervis</i>	80.4 (1.65)	69.1 (1.40)
南烛厚壳桂 <i>Cryptocarya lyoniifolia</i>	59.0 (1.21)	57.9 (1.17)
五瓣子楝树 <i>Decaspermum parviflorum</i>	55.6 (1.14)	—
黄梨木 <i>Boniodendron minus</i>	—	70.4 (1.43)
合计 Total	3,518.2 (72.40)	3,355.7 (68.07)

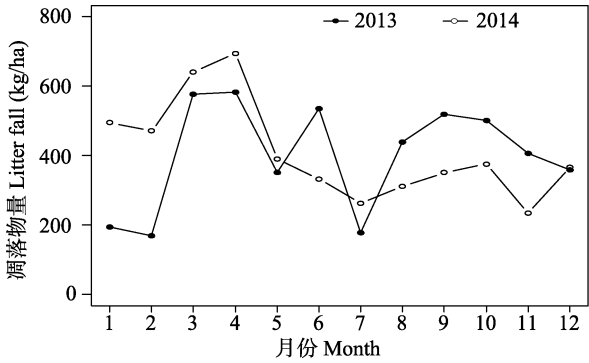


图 3 2013 年和 2014 年凋落物总量的时间动态
Fig. 3 Temporal dynamics of total litter fall production between 2013 and 2014

管海拔和凹凸度表现出较高的标准化偏回归系数, 但所有生态因子对凋落物总量分布格局形成的检验结果并不显著($AIC = 1,130$) (表 4)。

进一步使用向后剔除法逐步筛选变量的方法, 选取 AIC 值最小时的广义线性模型, 以筛选影响程度最高的模型, 确定对凋落物总量影响明显的生态因子。结果表明, 不同生态因子对凋落物总量分布格局的影响差异明显, 且影响不同年际间凋落物总量分布格局形成的因素亦存在明显差异。2013 年, 平均胸径和所有植株株数与凋落物总量表现为显著正相关, 其标准化偏相关系数较大, 其他环境变量虽亦表现出显著性或边际显著, 但其标准化偏相关系数较小, 对凋落物总量分布格局形成的影响并不明显($AIC = 1,000$); 2014 年, 平均胸径和坡向的余弦值与凋落物总量表现为显著正相关, 其他生态因子则未表现出相关性($AIC = 1,113.8$); 平均胸径和坡向的余弦值与 2013 年和 2014 年的平均凋落物总量表现为显著正相关, 其他生态因子则未表现出相关性, 且平均胸径表现为边际显著($AIC = 1,041.4$) (表 5)。

3 讨论

3.1 凋落物总量及其组分构成

喀斯特生态系统是以碳酸盐岩为物质基础, 在大气–水–岩石–生物交互作用下形成的具有特殊物质、能量、结构和功能的一种生态系统(Yuan, 1991), 其内广泛分布着峰林、峰丛、洼地、漏斗、槽谷、坡立谷等特殊地形, 形成了地表基岩出露面积较大、土层浅薄、土壤总量少、贮水能力低、周期性干旱或水淹, 以及富钙偏碱性的严酷生存环境(郭

表 3 2013 年和 2014 年凋落物各组分量的时间动态
Table 3 Temporal dynamics of different litter fall production between 2013 and 2014

月份 Month	果 Fruits		叶 Leaves		花 Flowers		枝 Twigs	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
1 月 January	0.7	0.4	193.9	494.8	0	0	0.1	0
2 月 February	4.5	2.1	165.7	444.8	0	0.1	21	12.4
3 月 March	7.1	3.8	565.6	632.8	3.8	1.5	1	1.6
4 月 April	1.5	4.6	565	637.5	16	16.3	20	17.5
5 月 May	11.6	0.5	338.3	344.5	1.9	14.1	5	8.5
6 月 June	47.9	1.3	487.7	281.6	0.4	2.4	3	4.3
7 月 July	71.4	7.5	106.5	239.5	0.1	0	9	11.1
8 月 August	151	12.5	288.3	289.4	0	0	3	5.3
9 月 September	84.4	9.6	435.1	341.7	0	0	0.5	0
10 月 October	32.1	12.7	469.9	362.9	0	0	0	0
11 月 November	4.5	7.4	402	224.2	0	0	0.9	2.6
12 月 December	1.1	2.1	357.5	362.8	0.2	0.4	0	0

表 4 2013 年和 2014 年凋落物总量与生态因子的广义线性回归模型检验
Table 4 Tests of generalized linear models for modeling total litter fall production and ecological factors between 2013 and 2014

	偏回归系数 Partial regression coefficient ($\hat{\beta}_i$)		标准差 SD		P		标准化偏回归系数 Stan- dardized coefficient ($\hat{\beta}_i^*$)	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
截距 Intercept	83.643	-78.420	142.151	280.363	0.558	0.780		
海拔 Elevation	-0.142	0.786	0.249	0.491	0.570	0.114	-0.093	0.292
坡度 Slope	0.615	0.640	0.989	1.951	0.536	0.744	0.111	0.066
凹凸度 Convexity	11.08	-3.739	12.525	24.702	0.379	0.880	0.124	-0.008
坡向正弦值 Sine of aspect	-24.012	-10.606	9.612	18.958	0.015	0.577	-0.262	-0.066
坡向余弦值 Cosine of aspect	18.492	40.214	10.708	21.120	0.088	0.061	0.174	0.215
地形湿润度指数 Topographic wetness index	-4.275	17.891	11.019	21.732	0.699	0.413	-0.080	0.190
干旱度指数 Altitude above channel	-3.683	1.946	5.165	10.187	0.478	0.849	-0.099	0.030
胸高断面积 Basal area	219.000	-99.223	179.596	354.213	0.026	0.780	0.363	-0.093
最大胸径 Maximum DBH	0.405	1.007	1.383	2.726	0.770	0.713	0.066	0.094
平均胸径 Mean DBH	31.149	25.945	12.939	15.520	0.018	0.816	0.497	0.254
个体数 Individuals	1.758	0.051	0.652	1.287	0.009	0.969	0.572	0.009

柯等, 2011; 曹坤芳等, 2014; 郭屹立等, 2015)。这种地质背景下的森林生态系统属于低生物量的森林生态系统, 但限制生物量积累的不是生物或气候条件, 而是立地条件的严酷性以及由此造成的树种增长速度缓慢, 导致森林生物量明显低于同等水热条件的非喀斯特环境, 同时可能会表现出物质循环和能量流动较快等特征。

凋落量受地带性气候、植物组分、林木的生理特性和森林结构以及森林经营活动等因素的影响 (Ranger et al, 2003; Polyakova & Billor, 2007; Tateno et al, 2007), 并与立地环境条件有关。弄岗北热带喀

斯特季节性雨林 2013 年和 2014 年凋落物总量分别为 4,858.0 kg/ha 和 4,928.8 kg/ha, 高于温带长白山阔叶红松林(3,918.4 kg/ha) (原作强等, 2010), 低于中亚热带古田山常绿阔叶林正常年份的 5,320.5 kg/ha (张磊等, 2011), 远低于亚热带鼎湖山常绿阔叶林(8,450–9,000 kg/ha) (官丽莉等, 2004; Li et al, 2005)、热带雨林或季雨林(8,100–14,300 kg/ha) (Kaspari et al, 2008), 略高于茂兰中亚热带喀斯特阔叶混交林(4,503 kg/ha, 俞国松等, 2011)。这反映了非地带性因素, 如喀斯特地质、地貌背景下形成的多岩石且土层浅薄等不利立地条件下形成的低生

表 5 2013 年和 2014 年凋落物总量与生态因子的最佳广义线性回归模型检验(*AIC* 值最小)
Table 5 Tests of best model of generalized linear models for modeling total litter fall production and ecological factors between 2013 and 2014 (with the lowest value of *AIC*)

		偏回归系数 Partial regres- sion coefficient ($\hat{\beta}_i$)	标准差 <i>SD</i>	<i>P</i>	标准化偏回归系数 Standardized coefficient ($\hat{\beta}_i^*$)
2013	截距 Intercept	27.516	49.672	0.081	
	坡度 Slope	0.909	0.585	0.024	0.164
	坡向余弦值 Cosine of aspect	15.011	10.036	0.039	0.141
	坡向正弦值 Sine of aspect	-27.444	8.764	0.002	-0.300
	胸高断面积 Basal area	-148.935	84.552	0.082	-0.045
	平均胸径 Mean DBH	27.965	9.822	0.006	0.446
	个体数 Individuals	1.511	0.437	0.001	0.491
2014	截距 Intercept	92.670	69.406	0.045	
	坡向余弦值 Cosine of aspect	43.303	18.941	0.025	0.432
	平均胸径 Mean DBH	26.615	8.272	0.026	0.458
平均值 Average	截距 Intercept	235.340	35.658	0.000	
	坡向余弦值 Cosine of aspect	32.684	12.614	0.011	0.268
	平均胸径 Mean DBH	1.865	7.446	0.053	0.215

物量森林生态系统, 其森林凋落物量较少。

弄岗北热带喀斯特季节性雨林凋落叶占凋落物总量的 85%以上, 明显高于其他非喀斯特森林生态系统, 亦高于茂兰喀斯特阔叶混交林(64.72%, 俞国松等, 2011)。在常绿阔叶林中, 凋落叶所占比例通常不超过 75% (Wang et al, 2008), 而在针叶落叶林和针阔混交林中其凋落叶的比例均远大于常绿林, 如长白山阔叶红松林约为 80% (原作强等, 2010)。相对于叶片而言, 果实和枝干可能需要耗费更多的资源, 花费更长的时间实现资源的循环利用。喀斯特森林生态系统通过提高凋落叶的比例以实现资源的快速循环和光合作用效率, 进而影响其对光的截取和碳获取能力。凋落叶的比例高体现了落叶在喀斯特季节性雨林物质归还中的关键地位, 体现了植物在喀斯特特殊地质背景下的构型塑造和对特定生境的适应性。但这一推断还需要进一步深入研究。凋落叶的高比例对应着果、花和枝的凋落量小, 可能意味着种子产量小、繁殖力低等。这也可能与种子的大小年有关, 如 2013 年凋落果的比例明显高于 2014 年。凋落枝的比例低可能与弄岗喀斯特季节性雨林单位面积个体数少有关, 也可能与喀斯特季节性雨林群落结构的稳定性有关。

3.2 凋落物总量及其组分的时间动态

尽管弄岗喀斯特季节性雨林凋落物总量存在年际变化, 但总体表现出春季(3–4 月)和秋季(8–10

月) 2 个凋落高峰。这与中亚热带的古田山常绿阔叶林(张磊等, 2011)和南亚热带鼎湖山常绿阔叶林(官丽莉等, 2004)类似, 而巴拿马热带雨林(Wieder & Wright, 1995)和巴西雨林(Schessl et al, 2008)则只有 1 个干季凋落高峰。同为喀斯特森林的茂兰中亚热带阔叶混交林也表现出 2 个凋落高峰, 但凋落期要比弄岗北热带季节性雨林推迟 1–2 个月(每年的 3–5 月和 10–12 月) (俞国松等, 2011)。温度是影响物候最重要的气象因子, 植物的落叶和展叶与温度紧密相关(Linkosalo et al, 2006)。地处北热带的弄岗喀斯特季节性雨林比处于中亚热带的茂兰阔叶混交林更早进入展叶准备期, 因此会表现出较早的常绿物种落叶期。生长季初期(春季)、生长期末期(秋末冬初)、干季和台风期是各类森林凋落量高峰形成的主要时期(张磊等, 2011)。弄岗喀斯特季节性雨林于 2013 年 6 月形成的凋落物高峰异常值可能与第 5 号台风“贝碧嘉”过境有关。

凋落叶是凋落物的最主要组成部分, 主导着凋落物总量的动态变化, 与凋落物总量趋势一致, 其动态变化也表现出 2 个高峰。凋落果在不同年际间表现出明显的差异。以 2013 年为例, 从 5 月开始出现凋落果, 到 8 月左右进入高峰。北热带喀斯特季节性雨林中全年都有植物开花, 但多数植物都集中在春夏开花(蒋裕良等, 2016), 秋冬结果, 所以凋落果在 5 月出现, 而 8–10 月出现的高峰主要是由落果

形成。本研究在凋落物组分分类时将果蒂、果实碎片、成熟和未成熟果实统一归为凋落果,因此 5 月出现的凋落果多为未成熟的生理落果。凋落花和凋落枝所占比例很小,因此年际和季节动态变化并不明显。

3.3 凋落物总量的空间分布

区域尺度内凋落物总量与地带性气候和森林类型有关,而局域尺度内凋落物总量与立地条件有关。北热带喀斯特季节性雨林地形复杂、物种多样性丰富,物种的分布格局与地形密切相关,存在显著的生境关联性(郭屹立等, 2015; Guo et al, 2016),而物种凋落物的空间分布主要取决于优势种的空间分布。喀斯特季节性雨林不同生态因子对凋落物总量的影响差异显著,且不同年际间亦存在明显差别。一般而言,森林凋落物总量随海拔的升高而减少(Reiners & Lang, 1987)。然而,弄岗喀斯特季节性雨林凋落量与海拔的关系并不明显,且不同年际间表现出不确定性。这可能一方面与弄岗样地内的峰丛与洼地相对海拔不高(180–370 m)有关,另一方面还可能与林分密度和平均胸径有关。弄岗样地中胸高断面积与海拔存在非线性关系(郭屹立等, 2016),因此海拔与凋落物量的相关性并不明显,二者可能表现出非线性关系。此外,峰顶和高坡位等高海拔地区因为广泛分布着盖度达 80%以上的芸香竹(*Bonia saxatilis*)而未布置凋落物收集器,且该区域因生境条件恶劣而形成山顶矮林,凋落物较少,这也可能是凋落量与海拔相关性并不明显的潜在原因之一。

坡度、坡向和凹凸度等地形因子通过对太阳辐射、水热条件、土壤养分等资源的空间再分配对植物的生长和分布产生重要影响(Punchi-Manage et al, 2013; 郭屹立等, 2016)。剔除不显著生态因子干扰后,坡向和凋落物收集器所在样方内所有个体的平均胸径与凋落物量存在显著相关性。如与坡向的余弦值负相关,表明南坡位凋落量最多,北坡较少。这可能与南坡接收光照较多、温湿度较北坡更为适宜,植物表现出较强的新陈代谢能力有关。除地形因子之外,生物因子中样方内的平均胸径与凋落量存在显著正相关,即样方内平均胸径越大则凋落量越大。平均胸径作为个体数、最大胸径、胸高断面积等指数的综合性指标,可以较好地代表凋落物收集器所在样方的生物因子。

凋落物的季节动态还与当地气候条件变化如冰雪灾害有密切关系(张磊等, 2011)。此外,台风也是引起森林凋落物出现剧烈波动的重要原因,如 2013 年 6 月第 5 号台风“贝碧嘉”过境引起凋落量明显增加。本研究只分析了喀斯特季节性雨林中凋落物组分特征及其空间分布与生态因子的相关性,并未以获得的同期精准气象数据来分析气象条件与森林凋落物的关联性,这可能是导致生态因子与凋落量的相关性不明显且存在年际差异的原因之一。森林凋落物分解速率及其化学元素的生态化学计量学是深入研究物质循环和能量流动的重要方法,也是揭示喀斯特季节性雨林独特地质、地貌背景下物化循环过程和机制特殊性的有效手段,是弄岗北热带喀斯特季节性雨林今后研究的重要方向之一。

致谢:衷心感谢龙州县气象局提供气象数据,弄岗国家级自然保护区管理局在野外工作期间提供帮助,龙州县弄岗村黄春和苏理生协助凋落物收集等。

参考文献

- Cao KF, Fu PL, Chen YJ, Jiang YJ, Zhu SD (2014) Implications of the ecophysiological adaptation of plants on tropical karst habitats for the ecological restoration of desertified rocky lands in southern China. *Scientia Sinica Vitae*, 44, 238–247. (in Chinese with English abstract) [曹坤芳, 付培立, 陈亚军, 姜艳娟, 朱师丹 (2014) 热带岩溶植物生理生态适应性对于南方石漠化土地生态重建的启示. *中国科学: 生命科学*, 44, 238–247.]
- Chen LZ (1993) Present Situation and Protection Countermeasures of Biodiversity in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈灵芝 (1993) 中国的生物多样性现状及其保护对策. 科学出版社, 北京.]
- Condit R (1998) Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and A Comparison with Other Plots. Springer, Berlin.
- Du YJ, Mi XC, Liu XJ, Chen L, Ma KP (2009) Seed dispersal phenology and dispersal syndromes in a subtropical broad-leaved forest of China. *Forest Ecology and Management*, 258, 1147–1152.
- Guan LL, Zhou GY, Zhang DQ, Liu XJ, Zhang QM (2004) Twenty years of litter fall dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghushan Forest Ecosystem Research Station. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 449–456. (in Chinese with English abstract) [官丽莉, 周国逸, 张德强, 刘菊秀, 张倩媚 (2004) 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量 20 年动态研究. *植物生态学报*, 28, 449–456.]
- Guo K, Liu CC, Dong M (2011) Ecological adaptation of

- plants and control of rocky-desertification on karst region of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 991–999. (in Chinese with English abstract) [郭柯, 刘长成, 董鸣 (2011) 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. *植物生态学报*, 35, 991–999.]
- Guo YL, Wang B, Mallik AU, Huang FZ, Xiang WS, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Li DX, He YL, Li XK (2016) Topographic species-habitat associations of tree species in a heterogeneous tropical karst seasonal rain forest, China. *Journal of Plant Ecology*. doi:10.1093/jpe/rtw057.
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang FZ, Wen SJ, Li DX, He YL, Li XK (2016) Responses of spatial pattern of woody plants' basal area to topographic factors in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 24, 30–39. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄甫昭, 文淑均, 李冬兴, 何运林, 李先琨 (2016) 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面面积分布格局及其对地形因子的响应. *生物多样性*, 24, 30–39.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang YS, Huang FZ, Li DX, Li XK (2015) Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 23: 183–191. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄俞淞, 黄甫昭, 李冬兴, 李先琨 (2015) 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间点格局分析. *生物多样性*, 23, 183–191.]
- Jiang YL, Bai KD, Guo YL, Wang B, Li DX, Li XK, Liu ZS (2016) Floral traits of woody plants and their habitat differentiations in a northern tropical karst forest. *Biodiversity Science*, 24, 148–156. (in Chinese with English abstract) [蒋裕良, 白坤栋, 郭屹立, 王斌, 李冬兴, 李先琨, 刘志尚 (2016) 北热带喀斯特森林木本植物花性状及其生境分异. *生物多样性*, 24, 148–156.]
- Kaspari M, Garcia MN, Harms KE, Santana M, Wright SJ, Yavitt JB (2008) Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. *Ecology Letters*, 11, 35–43.
- Li YN, Zhou XM, Zhang NL, Ma KP (2016) The research of mixed litter effects on litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 4977–4987. (in Chinese with English abstract) [李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 马克平 (2016) 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展. *生态学报*, 36, 4977–4987.]
- Li ZA, Zou B, Xia HP, Ren H, Mo JM, Weng H (2005) Litterfall dynamics of an evergreen broad-leaf forest and a pine forest in the subtropical region of China. *Forest Science*, 51, 608–615.
- Linkosalo T, Häkkinen R, Hänninen H (2006) Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing? *Tree Physiology*, 26, 1165–1172.
- Liang CF, Liang JY, Liu LF, Mo XL (1988) A report on the floristic survey on the Nonggang Natural Reserve. *Guihaia*, 8 (Suppl. 1), 83–184. (in Chinese with English abstract) [梁畴芬, 梁健英, 刘兰芳, 莫新礼 (1988) 弄岗自然保护区植物区系考察报告. *广西植物*, 8(增刊1), 83–184.]
- Liu CJ, Ilvesniemi H, Björn B, Werner K, Yang YS, Ma XQ, Carl JW (2003) Aboveground litter fall in Eurasian forests. *Journal of Forestry Research*, 14, 27–34.
- Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis PG, Kolari P, Kowalski AS, Lankreijer H, Law BE, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff JB, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J (2007) The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 447, 848–852.
- Maguire DA (1994) Branch mortality and potential litter fall from Douglas fir in stands of varying density. *Forest Ecology and Management*, 70, 41–53.
- Newbold T, Hudson LN, Hill SL, Contu S, Lysenko I, Senior RA, Börger L, Bennett DJ, Choimes A, Collen B, Day J, de Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar MJ, Feldman A, Garon M, Harrison ML, Alhousseini T, Ingram DJ, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia DL, Martin CD, Meiri S, Novosolov M, Pan Y, Phillips HR, Purves DW, Robinson A, Simpson J, Tuck SL, Weiher E, White HJ, Ewers RM, Mace GM, Scharlemann JP, Purvis A (2015) Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520, 45–50.
- McCullagh P, Nelder JA (1989) *Generalized Linear Models*, 2nd edn. Chapman and Hall Ltd, New York.
- Parsons SA, Valdez-Ramirez V, Congdon RA, Williams SE (2014) Contrasting patterns of litterfall seasonality and seasonal changes in litter decomposability in a tropical rainforest region. *Biogeosciences*, 11, 5047–5056.
- Peng SL, Liu Q (2002) The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1534–1544. (in Chinese with English abstract) [彭少麟, 刘强 (2002) 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 22, 1534–1544.]
- Polyakova O, Billor N (2007) Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. *Forest Ecology and Management*, 253, 11–18.
- Punchi-Manage R, Getzin S, Wiegand T, Kanagaraj R, Gunatilleke CVS, Gunatilleke IAUN, Wiegand K, Huth A (2013) Effects of topography on structuring local species assemblages in a Sri Lankan mixed dipterocarp forest. *Journal of Ecology*, 101, 149–160.
- R Core Team (2015) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (accessed on 2015-12-01)
- Ranger J, Gerard F, Lindemann M, Gelhaye D, Gelhaye L (2003) Dynamics of litterfall in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stands in the Beaujolais Mounts (France). *Annual Forest Science*, 60, 475–488.
- Reiners WA, Lang GE (1987) Changes in litterfall along a

- gradient in altitude. *Journal of Ecology*, 5, 629–638.
- Schessl M, Silva WLD, Gottsberger G (2008) Effects of fragmentation on forest structure and litter dynamics in Atlantic rainforest in Pernambuco, Brazil. *Flora*, 203, 215–228.
- Schlesinger WH, Lichter J (2001) Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 411, 466–469.
- Tang JW, Cao M, Zhang JH (2010) Litterfall production, decomposition and nutrient use efficiency varies with tropical forest types in Xishuangbanna, SW China: a 10-year study. *Plant Soil*, 335, 271–288.
- Tateno R, Tokuchib N, Yamanaka N, Du S, Otsuki K, Shimamura T, Xue ZD, Wang SQ, Hou QC (2007) Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black locust plantation and an indigenous oak forest near Yan'an on the Loess Plateau, China. *Forest Ecology and Management*, 241, 84–90.
- Vasconcelos HL, Luizão FJ (2004) Litter production and litter nutrient concentrations in a fragmented Amazonian landscape. *Ecological Applications*, 14, 884–892.
- Vitousek PM (1984) Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, 65, 285–298.
- Wang B, Huang YS, Li XK, Xiang WS, Ding T, Huang FZ, Lu SH, Han WH, Wen SJ, He LJ (2014) Species composition and spatial distribution of a 15 ha northern tropical karst seasonal rain forest dynamics study plot in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 22, 141–156. (in Chinese with English abstract) [王斌, 黄俞淞, 李先琨, 向悟生, 丁涛, 黄甫昭, 陆树华, 韩文衡, 文淑均, 何兰军 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林15 ha 监测样地的树种组成与空间分布. 生物多样性, 22, 141–156.]
- Wang FY (1989) Review on the study of forest litterfall. *Advances in Ecology*, 6(2), 82–89. (in Chinese with English abstract) [王凤友 (1989) 森林凋落量研究综述. 生态学进展, 6(2), 82–89.]
- Wang QK, Wang SL, Huang Y (2008) Comparisons of litter-fall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China. *Forest Ecology and Management*, 255, 1210–1218.
- Wieder RK, Wright SJ (1995) Tropical forest litter dynamics and dry season irrigation on Barro Colorado Island, Panama. *Ecology*, 76, 1971–1979.
- Xia SW, Chen J, Schaefer D, Detto M (2015) Scale-dependent soil macronutrient heterogeneity reveals effects of litterfall in a tropical rainforest. *Plant Soil*, 391, 51–61.
- Yu GS, Wang SJ, Rong L, Ran JC (2011) Litter dynamics of major successional communities in Maolan karst forest of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1019–1028. (in Chinese with English abstract) [俞国松, 王世杰, 容丽, 冉景丞 (2011) 茂兰喀斯特森林主要演替群落的凋落物动态. 植物生态学报, 35, 1019–1028.]
- Yu YF, He TG, Peng WX, Song TQ, Zeng FP, Du H, Han C, Li SS (2015) Dynamics of nutrient elements in different types of forests in depressions between karst hills. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 7531–7542. [俞月凤, 何铁光, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 韩畅, 李莎莎 (2015) 喀斯特峰丛洼地不同类型森林养分循环特征. 生态学报, 35, 7531–7542.]
- Yuan DX (1991) *Karst of China*. Geological Publishing House, Beijing.
- Yuan ZQ, Li BH, Bai XJ, Lin F, Shi S, Ye J, Wang XG, Hao ZQ (2010) Composition and seasonal dynamics of litter fall in a broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2171–2178. (in Chinese with English abstract) [原作强, 李步杭, 白雪娇, 蔺菲, 师帅, 叶吉, 王绪高, 郝占庆 (2010) 长白山阔叶红松林凋落物组成及其季节动态. 应用生态学报, 21, 2171–2178.]
- Zeng ZX, Liu XL, Song XJ, Wang KL, Zeng FP, Song TQ (2011) Litter fall mass and its decomposition in typical primary and secondary forests in karst region of Northwest Guangxi. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 201–207. (in Chinese with English abstract) [曾昭霞, 刘孝利, 宋希娟, 王克林, 曾馥平, 宋同清 (2011) 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物量及其降解. 生态学杂志, 30, 201–207.]
- Zhang H, Yuan W, Dong W, Liu S (2014) Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 20, 240–247.
- Zhang L, Wang XH, Mi XC, Chen JH, Yu MJ (2011) Temporal dynamics of and effects of an ice storm on litter production in an evergreen broad-leaved forest in Gutianshan National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 19, 206–214. (in Chinese with English abstract) [张磊, 王晓荷, 米湘成, 陈建华, 于明坚 (2011) 古田山常绿阔叶林凋落量时间动态及冰雪灾害的影响. 生物多样性, 19, 206–214.]

(责任编辑: 郝占庆 责任编辑: 黄祥忠)

• 研究报告 •

湖北七姊妹山亚热带常绿落叶阔叶混交林的物种组成和群落结构

姚良锦¹ 姚 兰² 易咏梅² 艾训儒² 冯 广³ 刘峻城²
林 勇² 黄 伟² 丁 易^{1,4*} 臧润国^{1,4}

1 (中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

2 (湖北民族学院林学院园艺学院, 湖北恩施 445000)

3 (北京林业大学林学院, 北京 100083)

4 (南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: 亚热带常绿落叶阔叶混交林是亚热带山地中重要的森林植被类型之一, 是维持区域生态安全和保护生物多样性的屏障。为深入研究亚热带常绿落叶阔叶混交林中的生物多样性维持机理和动态过程, 我们在湖北恩施七姊妹山国家级自然保护区6 ha亚热带常绿落叶阔叶混交林动态监测样地调查了所有胸径(DBH) ≥ 1 cm的木本植物, 分析了其群落组成、径级结构和优势种的空间结构特征。共记录到木本植物50,316株, 其中独立个体有36,596株(去除分枝和萌生), 隶属于57科124属245种, 包括7种国家级保护植物和76种稀有种(每公顷个体数不超过1株)。样地内落叶物种分别占总物种数的61.2% (150种)和总个体数的52.6% (26,503株)。整个样地内植物个体胸径呈明显的倒“J”型分布, 平均胸径为4.38 cm。样地小径级木本植物较多, 胸径 ≥ 30 cm的木本植物仅175株。样地中重要值排名前4位的物种分别是川陕鹅耳枥(*Carpinus fargesiana*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、交让木(*Daphniphyllum macropodum*)和缺萼枫香(*Liquidambar acalycina*)。这些优势种虽然在整个样地均有分布, 但大径级个体(DBH ≥ 10 cm)的空间分布差异较为明显。依据群落组成和径级结构特征, 湖北七姊妹山森林动态样地属于人为干扰后处于自然恢复中期的森林群落。针对该样地开展长期的森林动态监测, 将有助于深入了解亚热带常绿落叶阔叶混交林恢复过程中的群落构建规律和物种多样性维持机制。

关键词: 森林; 物种多样性; 径级结构; 空间分布; 优势种

Species composition and community structure of a 6-ha subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest dynamics plot in the Qizimei Mountains, Hubei Province

Liangjin Yao¹, Lan Yao², Yongmei Yi², Xunru Ai², Guang Feng³, Juncheng Liu², Yong Lin², Wei Huang², Yi Ding^{1,4*}, Runguo Zang^{1,4}

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

2 School of Forestry and Horticulture, Hubei University for Nationalities, Enshi, Hubei 445000

3 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083

4 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

Abstract: The subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest (SEDBMF) is one of the most important forest vegetation types in subtropical mountainous regions. It can provide an important foundation to maintain regional ecological security and conserve biodiversity. To further explore maintenance mechanisms of species diversity in SEDBMF, a 6-ha forest dynamics plot was established in Hubei Qizimei Mountains National Nature Reserve, western Hubei Province in 2015. All living

收稿日期: 2016-07-04; 接受日期: 2016-11-04

基金项目: 湖北民族学院博士基金(201707)和国家自然科学基金(41671047)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ydingcaf@163.com

woody stems with diameter at breast height (DBH) ≥ 1 cm were tagged, identified, measured, and mapped according to the methods of CTFS (Center for Tropical Forest Science). Community composition, diameter class structure, and characteristics of the spatial structure of dominant species were analyzed. Results showed that there were in total 50,316 stems and 36,596 independent individuals, belonging to 245 species 124 genera 57 families. Seven species that are national protected plants and 76 rare species (density ≤ 1 stem/ha) occurred in this plot. Among those stems, 61.2% of total species and 52.6% of the total stems were deciduous tree species. The structure of DBH size-classes of all stems showed a reverse “J” shape. The average stem DBH was 4.38 cm and there were only 175 stems with DBH ≥ 30 cm in this plot. The top four dominant species in the plot were *Carpinus fargesiana*, *Cyclobalanopsis multinervis*, *Daphniphyllum macropodum*, and *Liquidambar acalycina*. They nearly distributed all around the plot but large size trees (DBH ≥ 10 cm) showed relatively different spatial distributions. Based on community composition and stem size structure, the Qizime Mountains forest dynamics plot belongs to the middle stage of secondary forests after anthropogenic disturbance. Consequently, monitoring long-term forest dynamics in this plot will promote a deeper understanding of community assemblage rules and maintenance mechanisms of species diversity during the natural recovery process in SEDBMF.

Key words: forest; species diversity; structure of stem size class; spatial distribution; dominant species

研究群落的物种组成和结构是了解生态系统过程及其功能形成机制的重要途径, 并为进一步理解生态系统的时空动态格局提供重要的参考依据 (Denslow, 1987; Bugmann, 1996; Sagar et al, 2003; Gamfeldt et al, 2013)。不同物种的个体空间分布格局是群落生态学研究的重点内容之一, 也是深入理解森林群落结构和物种共存动态变化机制的关键 (Hou et al, 2004; Condit et al, 2007)。在研究森林生态系统结构动态、物种空间分布格局、物种共存机制等问题时, 采用短时期和小面积样地调查研究难以准确地了解生物多样性形成和维持的内在机制 (Condit, 1995)。近年来, 通过大型森林动态样地进行长期监测已成为生态学和生物多样性研究的重要方法, 这种监测体系也为森林生态学理论的验证和新理论发展提供了重要途径 (Brienen et al, 2015; 马克平, 2015)。自 1980 年巴拿马 Barro Colorado Island (BCI) 的热带雨林动态监测样地开始, 目前全球已经建立了跨越热带、亚热带和温带等植被类型的森林动态监测平台网络 (CTFS-ForestGEO) (Anderson-Teixeira et al, 2015)。通过整合分布于各区域的大样地数据, 生态学家对森林基本生态过程、生物多样性维持机制和全球变化背景下的森林动态有了更深入的认识, 取得了大量理论成果并引起全球广泛关注 (Anderson-Teixeira et al, 2015)。

在中国科学院生物多样性委员会的主导下, 中

国森林生物多样性监测网络(CForBio)已建立 13 个大型森林动态监测样地, 覆盖了我国主要森林类型 (马克平, 2015)。这些跨越不同气候带的森林动态监测样地为全球变化背景下的生态学基础研究提供了重要的支撑平台, 并有力地提升了我国生物多样性研究水平, 在物种空间分布格局、生境适应机制、物种维持机制以及跨区域的生态多样性梯度规律等方面取得了重要突破 (Chen et al, 2010; 马克平, 2015; Zhu et al, 2015; Feng et al, 2016)。然而由于我国较大的自然环境梯度、不同地质历史过程和长期人类干扰等原因, 基于单一或者少数森林动态监测样地得出的基本规律是否也适用于同气候区域的其他森林群落还有待研究。另外, 广泛存在的干扰历史对区域群落构建具有重要的影响, 但是目前对干扰后恢复的森林动态样地研究较少 (仲磊等, 2015)。因此, 进一步拓展森林动态样地建设, 并开展长期监测, 有利于更加全面地了解我国不同森林类型的物种多样性特征、群落物种共存与构建机制、森林群落恢复动态格局等重要生态学问题, 同时也将有助于阐明气候变化背景下我国不同环境梯度和干扰体系下的物种适应规律和响应机制。

亚热带常绿阔叶林是我国亚热带地区最具代表性的植被类型, 是结构最复杂、生产力最高、生物多样性最丰富的地带性植被类型之一 (宋永昌,

2004)。地带性的亚热带常绿阔叶林在纬度偏北或海拔偏高处, 往往会由于适应低温环境而出现不同程度的落叶成分, 从而形成亚热带常绿落叶阔叶混交林。常绿和落叶物种通常具有不同的生态策略和资源利用方式(唐青青等, 2016), 研究同一群落内不同叶习性物种的共存机制有利于进一步研究大尺度环境梯度上的群落稳定维持机理(Ommen et al, 2012)。亚热带常绿落叶阔叶混交林是我国亚热带纬度偏北或海拔较高处山地森林的主体, 具有落叶阔叶林与常绿阔叶林之间过渡的特征, 对于山地生态安全和森林植被恢复具有重要的战略意义。目前已在湖南八大公山和湖北木林子分别针对亚热带常绿落叶阔叶混交林老龄林建立了2个长期动态监测样地, 并在物种组成、空间分布、密度依赖、生境关联等方面取得了初步研究成果(卢志军等, 2013; Guo et al, 2015; 姚兰等, 2016)。

湖北西部地区拥有极具代表性的亚热带常绿落叶阔叶混交林群落, 是我国该群落分布的代表地区之一, 也是武陵山区森林植被的重要组成部分。中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所和湖北民族学院依照CTFS (Center for Tropical Forest Science)森林样地建设标准(Condit, 1995), 在湖北恩施土家族苗族自治州宣恩县的湖北七姊妹山国家级自然保护区内建立了一个6 ha的亚热带常绿落叶阔叶混交林森林动态监测样地。该样地与湖南八大公山森林动态监测样地(卢志军等, 2013)和湖北木林子森林动态监测样地(姚兰等, 2016)共同成为武陵山区森林生物多样性研究的平台。但与其他两个样地相比, 七姊妹山森林动态监测样地主要用于揭示干扰后森林演替过程中的物种变化格局和共存机制。本文主要分析了该样地的物种组成、物种多样性和群落径级结构等, 以期深入了解该样地的干扰背景、空间格局、群落构建过程和未来恢复动态提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖北七姊妹山国家级自然保护区位于湖北省恩施土家族苗族自治州宣恩县的东部(109°38'30"–109°47'00" E, 29°39'30"–30°05'15" N), 南部与湖南的八大公山相连, 总面积为34,550 ha, 是我国中亚热带向北亚热带的过渡地区。整个保护区地形复杂,

地势东北高西南低, 最高峰火烧堡海拔2,014.5 m, 最低海拔650 m (方元平等, 2007)。七姊妹山保护区属典型的大陆性季风湿润气候, 春夏季降水量一般多于秋冬季。春秋时节多阴雨天气, 夏季多暴雨, 冬季降雨少但多雾。海拔800 m以下的低山地带年均气温15.8℃, 年降水量1,491.3 mm; 海拔800–1,200 m年均气温13.7℃, 年降水量1,635.3 mm; 海拔1,200 m以上的高山地带年均气温8.9℃, 年降水量1,876 mm。土壤类型随海拔由低到高依次为山地棕壤、山地黄棕壤、山地黄壤和黄壤。代表性植被为典型的亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林以及落叶阔叶林, 而亚热带常绿落叶阔叶混交林是该区域的主要森林植被类型。该保护区20世纪80年代前期受到较大的人为干扰, 主要包括农业耕种和薪炭采伐等, 这也是亚热带山区广泛存在的干扰方式。1990年建立自然保护区后, 森林植被有了较大的恢复, 部分农业弃耕地通过自然演替已经逐步转变为次生林。由于山区农业耕种面积较小, 因而弃耕地恢复的次生林和薪炭采伐后的森林通常相互交错, 形成复杂的森林空间结构。

1.2 研究方法

1.2.1 样方调查

2015年7–8月, 在保护区内选择典型的亚热带常绿落叶阔叶混交林群落, 根据CTFS (Center for Tropical Forest Science)样地建设标准(Condit, 1995)建立6 ha (200 m × 300 m)的森林动态监测样地。利用全站仪将整个样地划分为150个20 m × 20 m的样方, 在每个样方的4个边角用不锈钢管作永久标记。样地原点坐标为30°02'05" N, 109°43'50" E, 海拔范围1,356–1,486 m。将每个20 m × 20 m的样方划分为16个5 m × 5 m的小样方, 对样地内植物进行全面调查。对每个小样方内胸径(DBH) ≥ 1 cm的存活木本植物个体使用铝牌进行编号, 并在高度1.3 m处利用红漆进行测量点标记。记录所有标记木本植物个体的物种名称、DBH、树高、坐标、分枝和萌生状况等。

1.2.2 数据分析

各个物种的重要值 = (相对多度+相对频度+相对显著度)/3。根据样地的取样面积和对应的物种数绘制种–面积曲线; 按照物种的个体多度与物种之间的对应关系绘制种–多度曲线和种–多度等级分布曲线。采用R软件(R Core Team, 2016)的vegan软

件包对数据进行处理。参考目前森林动态样地广泛使用的标准,将样地中每公顷个体数不多于1株的物种定义为稀有种,1–10株的定义为偶见种,多于10株的定义为常见种(Hubbell & Foster, 1986)。植物科属种名称参照*Flora of China* (www.efloras.org/),并根据描述特征进行生长型分类,包括乔木、小乔木、灌木以及藤本。珍稀濒危植物划分参考《中国珍稀濒危植物图鉴》(国家林业局野生动植物保护与自然保护司和中国科学院植物研究所, 2016)。

2 结果

2.1 个体数量和物种组成

样地内共记录到存活木本植物个体50,316株(DBH ≥ 1 cm),不包括分枝和萌生的独立个体数为36,596株,分枝3,581个,萌条10,139个。样地个体密度为8,386株/ha (包含萌条和分枝)或6,099株/ha (不包含萌条和分枝)。样地内共记录到57科124属245种木本植物(附录1),其中裸子植物2科4属4种,分别为杉科(3属3种)和三尖杉科(1属1种)。物种占据优势的科主要有蔷薇科(15属31种)、樟科(7属20种)、壳斗科(5属14种)、冬青科(1属12种)、杜鹃花科(4属12种)、忍冬科(4属11种)和槭树科(1属7种)。样地内共有乔木107种、小乔木67种、灌木50种、木质藤本21种。常绿木本植物共计95种(共23,265株),分别占总物种数和总个体数的38.8%和46.7%。落叶木本植物共计150种(26,503株),分别占总物种数和总个体数的61.2%和53.3% (其中去除样地中未识别的548个树木个体)。整个6 ha样地的总胸高断面积为167.35 m²,平均胸高断面积为27.89 m²/ha。

样地内的珍稀濒危植物共有18种(共1,340株),其中12种是中国特有物种(附录2)。国家I级重点保护植物2种,为珙桐(*Davidia involucrata*)和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*);国家II级重点保护植物5种,分别为香果树(*Emmenopterys henryi*)、红椿(*Toona ciliata*)、樟(*Cinnamomum bodinieri*)、榉树(*Zelkova serrata*)和青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)。列入世界自然保护联盟(IUCN)受威胁物种红色名录(2016)的有4种,其中极危(CR) 1种,即水杉;易危(EN) 3种,分别是瘿椒树(*Tapiscia sinensis*)、糙木(*Aralia elata*)和白辛树(*Pterostyrax psilophyllus*)。列入中国物种红色名录濒危物种(国家林业局野生动

植物保护与自然保护司和中国科学院植物研究所, 2016)评价体系的有13种,其中易危(VU)物种包括珙桐、水杉等9种,近危(NT)物种包括三尖杉(*Cephalotaxus fortunei*)、阔叶槭(*Acer amplum*)、香果树和瘿椒树。

2.2 种–面积曲线、种–多度曲线和种–多度等级分布曲线

种–面积曲线(图1A)表明,当取样面积为1 ha时,物种数为170个,占样地总物种数的69.4%。当取样面积为2 ha时,物种数为198个,占总物种数的80.8%。当取样面积达到3 ha时,物种数为218个,占总物种数的89.0%。种–多度曲线(图1B)表明,在取样个体数量较小时,物种数量上升速度快;随着取

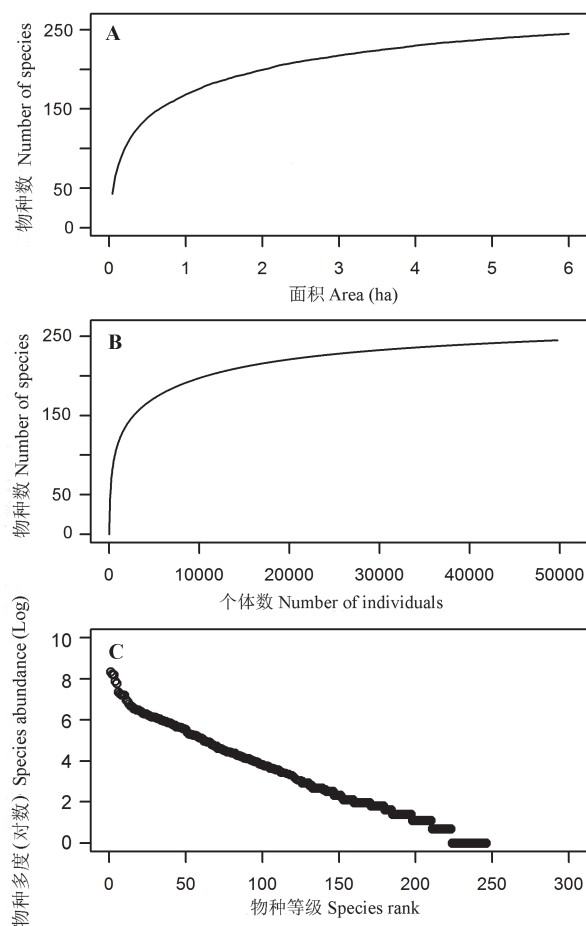


图1 湖北七姊妹山6 ha森林动态监测样地的木本植物(A)种–面积曲线、(B)种–多度曲线、(C)种–多度等级分布曲线
Fig. 1 The species–area (A), species–abundance (B), and species–abundance rank distribution (C) curves for woody plants in the 6-ha Qizime Mountains forest dynamics plot, Hubei Province

样个体数量的增加, 物种数量增加的速度逐渐趋于平缓。当取样个体数为10,000时, 物种数为197个, 占总物种数的80.4%; 当取样个体数达到30,000时, 物种数达到232种, 占总物种数的95.5%。种-多度等级分布曲线(图1C)表明样地存在明显的多度优势种, 而且也有较多的稀有种。样地中个体数量不超过30株的物种有131种, 在3-9株之间的有59种, 仅有1株的有23种。样地中稀有种、偶见种和常见种的物种数分别为76种、79种和90种。

2.3 优势种组成

样地中重要值大于1的物种有25个(表1), 这些物种分别占总个体数和总胸高断面积的67.2%和80.0%。重要值和胸高断面积排名前5位的物种序列基本一致, 均为川陕鹅耳枥(*Carpinus fargesiana*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、交让木(*Daphniphyllum macropodum*)、缺萼枫香(*Liquidambar acalycina*)和灯台树(*Cornus controversa*)。以

上5个物种分别占样地内所有个体多度的25.1%和胸高断面积的46.6%。样地中个体多度前6位的物种分别为多脉青冈、川陕鹅耳枥、交让木、四照花(*Cornus kousa*)、翅柃(*Eurya alata*)和黄丹木姜子(*Litsea elongata*), 共占总株数的36.1%。

2.4 径级结构

样地内所有木本植物个体的平均胸径为4.38 cm, 整体径级分布呈明显的倒“J”型(图2), 小径级(1.0 cm ≤ DBH ≤ 5 cm)植株的比例最高(表2)。样地中1.0 cm ≤ DBH ≤ 5 cm的个体为37,807株, 占个体总数的75.14%; DBH ≤ 10 cm的个体为45,188株, 占总个体数的89.81%; DBH ≥ 20 cm的个体为1,091株, 占总个体数的2.1%; DBH ≥ 30 cm的个体仅175株, 占总个体株数的0.32%。

2.5 物种空间分布特征

七姊妹山样地中重要值排在前6位的优势植物川陕鹅耳枥、多脉青冈、交让木、缺萼枫香、灯台

表1 湖北七姊妹山6 ha森林动态监测样地的优势木本植物种类
Table 1 Dominant species of woody plants in the 6-ha Qizimei Mountains forest dynamics plot

物种 Species	多度 Abundance	最大胸径 Max DBH (cm)	平均胸径 Mean DBH (cm)	胸高断面积 Basal area (m ²)	重要值 Importance value	叶习性 Leaf habit
川陕鹅耳枥 <i>Carpinus fargesiana</i>	3,738	60.0	7.03	15.00	8.23	落叶 Deciduous
多脉青冈 <i>Cyclobalanopsis multinervis</i>	4,153	40.8	4.64	8.01	6.06	常绿 Evergreen
交让木 <i>Daphniphyllum macropodum</i>	3,647	30.8	4.42	6.76	5.39	常绿 Evergreen
缺萼枫香 <i>Liquidambar acalycina</i>	479	65.0	16.00	8.72	3.70	落叶 Deciduous
灯台树 <i>Cornus controversa</i>	596	45.2	13.8	7.98	3.66	落叶 Deciduous
四照花 <i>Cornus kousa</i>	2,658	13.8	3.59	2.63	3.35	落叶 Deciduous
亮叶桦 <i>Betula luminifera</i>	559	36.8	13.2	5.96	2.89	落叶 Deciduous
翅柃 <i>Eurya alata</i>	2,398	18.0	2.75	1.12	2.50	常绿 Evergreen
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1,450	37.0	4.54	2.75	2.25	常绿 Evergreen
黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	1,578	17.1	2.94	0.90	2.04	常绿 Evergreen
尖叶四照花 <i>Cornus elliptica</i>	1,332	16.3	3.87	1.62	2.04	常绿 Evergreen
野漆 <i>Toxicodendron vernicifluum</i>	345	30.4	12.60	3.43	1.92	落叶 Deciduous
楝木 <i>Cornus macrophylla</i>	464	33.8	9.20	2.91	1.80	落叶 Deciduous
日本锦带花 <i>Weigela japonica</i>	881	22.0	6.12	1.95	1.77	落叶 Deciduous
茶茱萸 <i>Viburnum setigerum</i>	1,362	18.0	1.97	0.31	1.68	落叶 Deciduous
君迁子 <i>Diospyros lotus</i>	459	31.0	8.49	2.58	1.57	落叶 Deciduous
中华猕猴桃 <i>Actinidia chinensis</i>	1,071	12.5	2.89	0.52	1.51	落叶 Deciduous
绿叶甘櫟 <i>Lindera neesiana</i>	1,360	8.2	1.58	0.18	1.51	落叶 Deciduous
石灰花楸 <i>Sorbus folgneri</i>	433	25.0	6.90	1.55	1.24	落叶 Deciduous
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	697	25.7	3.89	1.01	1.10	常绿 Evergreen
宜昌木姜子 <i>Litsea ichangensis</i>	807	7.8	2.24	0.24	1.09	落叶 Deciduous
珍珠花 <i>Lyonia ovalifolia</i>	627	15.4	5.00	0.92	1.09	落叶 Deciduous
木姜子 <i>Litsea pungens</i>	523	25.5	4.29	0.71	1.07	落叶 Deciduous
南蛇藤 <i>Celastrus orbiculatus</i>	652	8.9	2.21	0.18	1.04	落叶 Deciduous
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	984	23.5	2.97	0.54	1.00	常绿 Evergreen

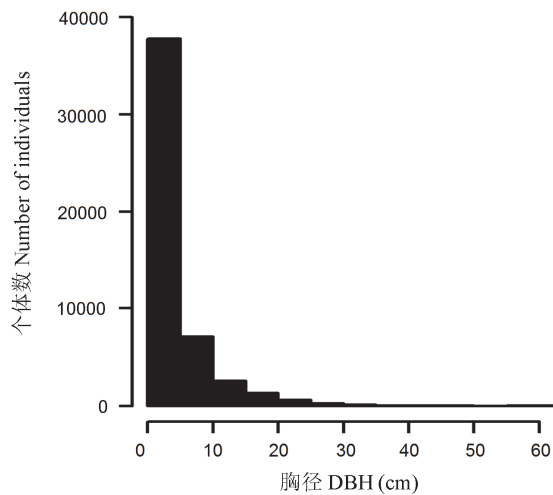


图2 七姊妹山6 ha森林动态监测样地胸径 ≥ 1 cm木本植物径级分布

Fig. 2 Size-class distribution of diameter at breast height (DBH) ≥ 1 cm of woody plants in the 6-ha Qizime Mountains forest dynamics plot, Hubei Province

树和翅桫在空间分布上存在一定差异，其大径级个体(DBH ≥ 10 cm)差异更加明显(图3)。川陕鹅耳枥在整个样地均有分布，但大径级个体主要分布在山脊(图3A)。多脉青冈的分布总体上和川陕鹅耳枥相似，在山谷相对较少，大径级个体集中分布在样地的海拔较高处(图3B)。交让木在较高海拔的山谷分布较多(图3C)，大径级个体主要集中在样地海拔较低处，但与多脉青冈大径级个体的空间分布差异显著。缺萼枫香与交让木表现出相反的分布规律，该物种通常分布在交让木个体数量较少的位置，而且大径级个体散布于样地海拔相对较高的位置(图3D)。灯台树整体相对分布在样地的山谷处，且与缺萼枫香的分布存在一定差异(图3E)。翅桫在样地高海拔处分布较广，但在山脊的分布更为密集(图3F)。

表2 湖北七姊妹山6 ha森林动态监测样地不同起测胸径的植株和科属种数量

Table 2 Number of stems, species, genera, and families with different minimum diameter at breast height (DBH) in the 6-ha Qizime Mountains forest dynamics plot, Hubei Province

起测胸径 Minimum DBH	个体数 Number of individuals	物种数 Number of species	属数 Number of genera	科数 Number of families
≥ 1.0 cm	50,316	245	124	57
≥ 5.0 cm	12,509	174	100	51
≥ 10.0 cm	5,128	134	84	47
≥ 15.0 cm	2,489	101	68	40
≥ 20.0 cm	1,091	73	50	35
≥ 30.0 cm	175	24	21	16

3 讨论

与国内其他亚热带地区的森林动态监测样地相比，湖北七姊妹山森林动态监测样地拥有较高的植株个体密度和物种丰富度。植株个体密度达8,386株/ha，高于邻近的八大公山亚热带常绿落叶阔叶混交林样地(7,462株/ha) (卢志军等, 2013)、湖北木林子保护区亚热带常绿落叶阔叶混交林样地(5,612株/ha) (姚兰等, 2016)、浙江古田山亚热带常绿阔叶林样地(5,834株/ha) (祝燕等, 2008)和浙江天童山常绿阔叶林样地(4,730株/ha) (杨庆松等, 2011)。这主要源于其较多的小径级个体和较小的树木平均胸径。样地所有个体的平均胸径为4.38 cm，低于湖南八大公山样地(平均胸径5.41 cm) (卢志军等, 2013)和古田山样地(平均胸径5.21 cm) (祝燕等, 2008)。虽然七姊妹山样地面积相对较小(6 ha)，但物种丰富度却高于其他面积更大的亚热带森林动态监测样地。样地中共有植物245种(124属57科)，高于湖北木林子15 ha样地的228种(112属61科) (姚兰等, 2016)和八大公山25 ha样地的238种(114属53科) (卢志军等, 2013)。样地的种-面积曲线也进一步表明，在6 ha取样面积上，七姊妹山样地具有较高的物种丰富度。

七姊妹山样地如此之高的物种多样性可能主要来源于两个方面：(1)山地常绿落叶阔叶混交林属于亚热带地带性植被常绿阔叶林向高海拔落叶阔叶林的过渡类型，低海拔的常绿阔叶林物种和高海拔的落叶阔叶林物种的垂直海拔分布区中海拔范围重叠，造成该区域内物种数量较多，物种丰富度较高。七姊妹山和邻近的木林子常绿落叶阔叶混交林样地、八大公山常绿落叶阔叶混交林大样地均处于这种过渡位置，均具有较高的物种多样性(卢志军等, 2013; 姚兰等, 2016)。常绿与落叶阔叶物种

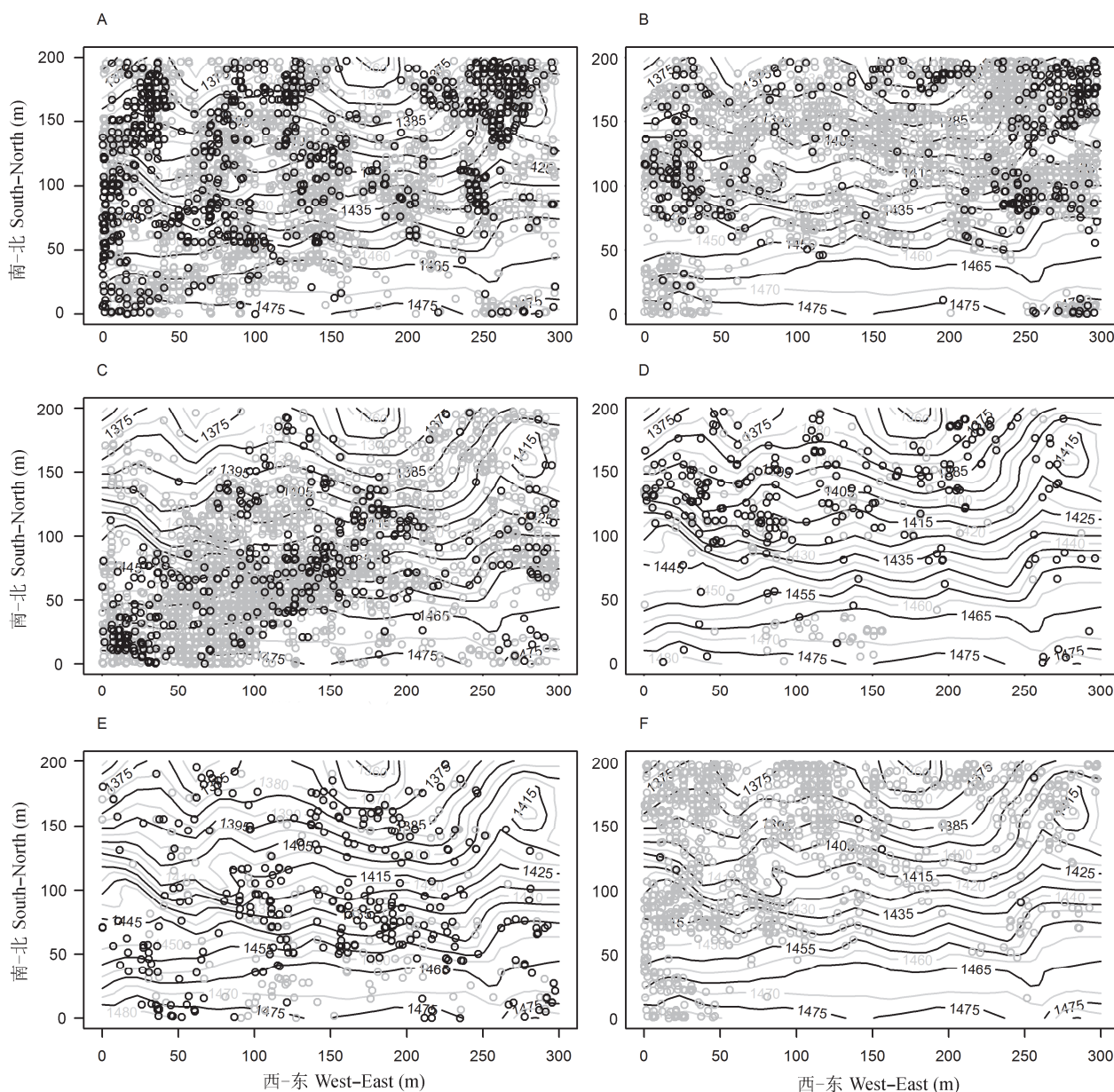


图3 七姊妹山6 ha森林动态监测样地6种植物的空间分布图。灰色圆圈代表DBH < 10 cm, 黑色圆圈代表DBH ≥ 10 cm。(A) 川陕鹅耳枥; (B)多脉青冈; (C)交让木; (D)缺萼枫香; (E)灯台树; (F)翅铃。

Fig. 3 Spatial distribution map of six species in the 6-ha Qizimei Mountains forest dynamics plot, Hubei Province. Gray circles represents stems DBH < 10 cm, black circles represents stems ≥ 10 cm DBH. (A) *Carpinus fargesiana*; (B) *Cyclobalanopsis multinervis*; (C) *Daphniphyllum macropodum*; (D) *Liquidambar acalycina*; (E) *Cornus controversa*; (F) *Eurya alata*.

因功能性状(如比叶面积、比茎密度等)不同所形成生态策略的差异(唐青青等, 2016)可能降低了群落内物种间的竞争强度, 而林冠的季节性落叶为物种更新和生长提供了更多的生态位空间。(2)从七姊妹山样地的物种组成来看, 占据优势的川陕鹅耳枥、灯台树等均是鄂西地区典型的先锋物种(姚兰等, 2015), 而且树木径级结构也表现出胸径偏低, 缺乏

大径级植物个体的特征。这些组成和结构特征表明该样地还处于干扰后自然恢复的中期阶段, 而该阶段通常也是森林物种多样性最为丰富的阶段(Pulsford et al, 2016)。在此阶段中, 群落内既有大量演替先锋物种(如灯台树和川陕鹅耳枥)的存在, 又有相对稳定的顶级群落物种(如多脉青冈等)的存在。

七姊妹山样地中常绿物种相对较少(占总物种

数的38.8%),而落叶物种相对较多(占总物种数的61.2%),这与邻近的湖南八大公山样地高度相似,八大公山样地常绿和落叶物种分别占总物种数量的39.5%和60.5% (卢志军等, 2013)。虽然这两者的常绿与落叶物种的个体数量相对接近,但七姊妹山4种优势种(川陕鹅耳枥、多脉青冈、交让木和缺萼枫香)中的常绿物种在重要值和多度比例上占优势。本结果也符合亚热带地区中海拔范围内常绿物种占优势的特征(方元平等, 2007; 卢志军等, 2013)。常绿物种具备更高的比茎密度(唐青青等, 2016),因而对于生态系统功能的维护发挥着更加重要的作用。

影响森林物种空间分布格局的因素较多,如物种的环境适应性、环境异质性、种内与种间的相互竞争、物种生活史策略等,都会对物种的分布产生影响(Kenkel et al, 1997; Rozas, 2003)。样地中主要物种的大径级个体(DBH ≥ 10 cm)在空间分布上表现出特定的生境偏好。如川陕鹅耳枥是该地区典型的演替先锋物种,具备快速的扩散能力(姚兰等, 2015)。山脊良好的光照环境对于川陕鹅耳枥的更新和生长具有促进作用,因而该物种大树均分布在山脊。本研究还发现常绿物种多脉青冈和交让木的大径级个体的空间分布存在较为明显的差异,表明这两个常绿物种可能由于相同的叶习性而存在一定的竞争关系,但还需要进一步分析。

相对于老龄林群落样地,干扰后的森林结构和组成具有更快的时空变化和更高的物种多样性,而且这些森林在未来的生物多样性保护和生态系统服务方面将发挥更加重要的作用(Chazdon, 2014)。事实上,国际著名的森林动态样地如巴拿马BCI样地(Foster & Brokaw, 1982)和波多黎各Luquillo样地(Thompson et al, 2002)都经历过不同程度的干扰。国内浙江乌岩岭新建的9 ha森林动态监测样地(仲磊等, 2015)也是人为干扰后形成的常绿阔叶次生林样地。开展自然恢复森林的动态监测,将有助于理解多个物种在演替过程中的竞争变化规律,并为今后探讨群落演替过程和森林生态系统功能恢复机制等提供重要的研究平台。

参考文献

Anderson-Teixeira KJ, Davies SJ, Bennett AC, Gonzalez-Akre EB, Muller-Landau HC, Joseph WS, Abu SK, Almeyda ZAM, Alonso A, Baltzer JL, Bourg NA, Broadbent EN,

- Brockelman WY, Bunyavejchewin S, Burslem DFRP, Butt N, Cao M, Cardenas D, Chuyong GB, Clay K, Cordell S, Dattaraja HS, Deng XB, Detto M, Du XJ, Duque A, Erikson DL, Ewango CEN, Fischer GA, Fletcher C, Foster RB, Giardina CP, Gilbert GS, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Hargrove WW, Hart TB, Hau BCH, He FL, Hoffman FM, Howe RW, Hubbell SP, Inmanmarahari FM, Jansen PA, Jiang M, Johnson DJ, Kanzaki M, Rahman A, Kassim AR, Kenfack D, Kibet S, Kinnaird MF, Korte L, Kral K, Kumar J, Larson AJ, Li YD, Li XK, Liu SR, Lum SKY, Luta JA, Ma KP, Maddalena DM, Makana JR, Malhi Y, Marthews T, Serudin RM, McMahon SM, Shea WJMC, Myers JA, Novotny V, Oliveira AAD, Song P, Orwig DA, Ostertag R, Ouden JD, Parker GG, Phillips RP, Sack L, Sainge MN, Sang WG, Ngernyuang KS, Sukumar R, Sun IF, Sungpalee W, Suresh HS, Tan S, Thomas SC, Thomas DW, Thompson J, Turner BL, Uriarte M, Valencia R, Vallejo MI, Vicentini A, Asvrska T, Wang XH, Wang XG, Weiblen G, Wolf A, Xu H, Yap S, Zimmerman JSS (2015) CTFIS-ForestGEO: a worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, 21, 528–549.
- Brienen RJW, Phillips OL, Feldpausch TR, Gloor E, Baker TR, Lloyd J, Lopez-Gonzalez G, Monteagudo-Mendoza A, Malhi Y, Lewis SL, Vásquez MR, Alexiades M, Álvarez DE, Alvarez-Loayza P, Andrade A, Aragão LEOC, Araujo-Murakami A, Arets EJMM, Arroyo L, Aymard CGA, Bánki OS, Baraloto C, Barroso J, Bonal D, Boot RGA, Camargo JLC, Castilho CV, Chama V, Chao KJ, Chave J, Comiskey JA, Cornejo VF, Da CL, Oliveira EA, Di FA, Erwin TL, Fauset S, Forsthofer M, Galbraith DR, Grahame ES, Groot N, Hérault B, Higuchi N, Honorio CEN, Keeling H, Killeen TJ, Laurance WF, Laurance S, Licona J, Magnussen WE, Marimon BS, Marimon-Junior BH, Mendoza C, Neill DA, Nogueira EM, Núñez P, Pallqui CNC, Parada A, Pardo-Molina G, Peacock J, Peña-Claros M, Pickavance GC, Pitman NCA, Poorter L, Prieto A, Quesada CA, Ramírez F, Ramírez-Angulo H, Restrepo Z, Roopsind A, Rudas A, Salomão RP, Schwarz M, Silva N, Silva-Espejo JE, Silveira M, Stropp J, Talbot J, Steege H, Teran-Aguilar J, Terborgh J, Thomas-Caesar R, Toledo M, Torello-Raventos M, Umetsu RK, Vander HGMF, Vander H P, Guimarães VIC, Vieira SA, Vilanova E, Vos VA, Zagt RJ (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519, 344–348.
- Bugmann HKM (1996) A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology*, 77, 2055–2074.
- Chazdon RL (2014) *Second Growth: the Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*. University of Chicago Press, Chicago.
- Chen L, Mi XC, Comita LS, Zhang LW, Ren HB, Ma KP (2010) Community-level consequences of density dependence and habitat association in a subtropical broad-leaved forest. *Ecology Letters*, 13, 695–704.
- Condit R (1995) Research in large, long-term tropical forest

- plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 18–22.
- Condit R, Ashton PS, Baker P, Bunyavejchewin S, Gunatilleke S, Gunatilleke N, Hubbell SP, Foster RB, Itoh A, Lafrankie JV (2007) Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Development & Psychopathology*, 19, 167–185.
- Denslow JS (1987) Tropical rainforest gaps and tree species diversity. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 18, 431–451.
- Fang YP, Liu SX, Wang ZX, Lei G, Man JS (2007) Quantitative assessment of priority for conservation of the national protected plants in Qizime Mountain Nature Reserve. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 27, 348–355. (in Chinese with English abstract) [方元平, 刘胜祥, 汪正祥, 雷耘, 满金山 (2007) 七姊妹山自然保护区野生保护植物优先保护定量研究. *西北植物学报*, 27, 348–355.]
- Feng G, Mi XC, Yan H, Li FYH, Svenning JC, Ma KP (2016) CForBio: a network monitoring Chinese forest biodiversity. *Science Bulletin*, 61, 1163–1170.
- Foster RB, Brokaw NVL (1982) Structure and history of the vegetation of Barro Colorado Island. In: *The Ecology of a Tropical Forest* (eds Leigh EG, Rand AS Jr, Windsor DM), pp. 67–81. Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, Jonsson M, Gustafsson L, Kjellander P, Ruiz-Jaen MC, Fröberg M, Stendahl J, Philipson CD (2013) Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*, 4, 1340.
- Guo YL, Lu ZJ, Wang QG, Lu JM, Xu YZ, Meng HJ, Liu HB, Zhang JX, Bao DC, Qiao XJ, Huang H, Jiang MX (2015) Detecting density dependence from spatial patterns in a heterogeneous subtropical forest of central China. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(6), 34–41.
- Hou JH, Mi XC, Liu CR, Ma KP (2004) Spatial patterns and associations in a *Quercus-Betula* forest in northern China. *Journal of Vegetation Science*, 15, 407–414.
- Hubbell SP, Foster RB (1986) Commonness and rarity in a neotropical forest: implications for tropical tree conservation. In: *Conservation Biology the Science of Scarcity and Diversity* (ed. Soulé ME), pp. 205–231. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.
- Kenkel NC, Hendrie ML, Bella IE (1997) A long-term study of *Pinus banksiana* population dynamics. *Journal of Vegetation Science*, 8, 241–254.
- Lu ZJ, Bao DC, Guo QL, Lu JM, Wang QG, He D, Zhang KH, Xu YZ, Liu HB, Meng HJ (2013) Community composition and structure of Badagongshan (BDGS) Forest Dynamic Plot in a mid-subtropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest, Central China. *Plant Science Journal*, 31, 336–344. (in Chinese with English abstract) [卢志军, 鲍大川, 郭屹立, 路俊盟, 王庆刚, 何东, 张奎汉, 徐耀粘, 刘海波, 孟红杰 (2013) 八大公山中亚热带山地常绿阔叶混交林物种组成与结构. *植物科学学报*, 31, 336–344.]
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. *生物多样性*, 23, 1–2.]
- Ommen KAE, Douma JC, Ordoñez JC, Reich PB, Bodegom PM (2012) Global quantification of contrasting leaf life span strategies for deciduous and evergreen species in response to environmental conditions. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 224–235.
- Pulsford SA, Lindenmayer DB, Driscoll DA (2016) A succession of theories: purging redundancy from disturbance theory. *Biological Reviews*, 91, 148–167.
- R Core Team (2016) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org/>. (accessed on 2016-03-15)
- Rozas V (2003) Regeneration patterns, dendroecology, and forest-use history in an old-growth beech oak lowland forest in Northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 182, 175–194.
- Sagar R, Raghubanshi AS, Singh JS (2003) Tree species composition, dispersion and diversity along a disturbance gradient in a dry tropical forest region of India. *Forest Ecology and Management*, 186, 61–71.
- Song YC (2004) Tentative classification scheme of evergreen broad-leaved forests of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 435–448. (in Chinese with English abstract) [宋永昌 (2004) 中国常绿阔叶林分类试行方案. *植物生态学报*, 28, 435–448.]
- Tang QQ, Huang YT, Ding Y, Zang RG (2016) Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests. *Biodiversity Science*, 24, 262–270. (in Chinese with English abstract) [唐青青, 黄永涛, 丁易, 臧润国 (2016) 亚热带常绿阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异. *生物多样性*, 24, 262–270.]
- Thompson J, Brokaw N, Zimmerman JK, Waide RB, Everham III EM, Lodge DJ, Taylor CM, García-Montiel D, Fluet M (2002) Land use history, environment, and tree composition in a tropical forest. *Ecological Applications*, 12, 1344–1363.
- Wildlife Conservation and Nature Reserve Management Division, State Forestry Administration, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (2016) *Chinese Rare and Endangered Plants*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [国家林业局野生动植物保护与自然保护区管理司, 中国科学院植物研究所 (2016) *中国珍稀濒危植物图鉴*. 中国林业出版社, 北京.]
- Yao L, Ai XR, Lü SA, Feng G, Liu JC, Huang YT (2015) Characteristics of community types and structures, and species diversity of natural secondary forests in Xingdou Mountain of Hubei Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(11), 1–7. (in Chinese with English abstract) [姚兰, 艾训儒, 吕世安, 冯广, 刘峻城, 黄永涛 (2015) 湖北星斗山天然次生林的群落类型, 结构与物种多样性特征. *林业科学*, 51(11), 1–7.]

- Yao L, Cui GF, Yi YM, Huang YT, Feng G, Liu JC, Ai XR (2016) Species diversity of woody plants in Mulinzi Nature Reserve of Hubei Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(1), 1–9. (in Chinese with English abstract) [姚兰, 崔国发, 易咏梅, 黄永涛, 冯广, 刘峻城, 艾训儒 (2016) 湖北木林子保护区大样地的木本植物多样性. *林业科学*, 52(1), 1–9.]
- Yang QS, Ma ZP, Xie YB, Zhang ZG, Wang ZH, Liu HM, Li P, Zhang N, Wang DL, Yang HB, Fang XF, Yan ER, Wang XH (2011) Community structure and species composition of an evergreen broadleaved forest in Tiantong's 20 ha dynamic plot, Zhejiang Province, eastern China. *Biodiversity Science*, 19, 215–223. (in Chinese with English abstract) [杨庆松, 马遵平, 谢玉彬, 张志国, 王樟华, 刘何铭, 李萍, 张娜, 王达力, 杨海波, 方晓峰, 闫恩荣, 王希华 (2011) 浙江天童20 ha常绿阔叶林动态监测样地的群落特征. *生物多样性*, 19, 215–223.]
- Zhong L, Chang-Yang CH, Lu P, Gu XP, Lei ZP, Cai YB, Zheng FD, Sun IF, Yu MJ (2015) Community structure and species composition of the secondary evergreen broad-leaved forest : the analyses for a 9 ha forest dynamics plot in Wuyanling Nature Reserve, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 23, 619–629. (in Chinese with English abstract) [仲磊, 张杨家豪, 卢品, 顾雪萍, 雷祖培, 蔡延奔, 郑方东, 孙义方, 于明坚 (2015) 次生常绿阔叶林的群落结构与物种组成: 基于浙江乌岩岭9 ha森林动态样地. *生物多样性*, 23, 619–629.]
- Zhu Y, Comita LS, Hubbell SP, Ma KP (2015) Conspecific and phylogenetic density-dependent survival differs across life stages in a tropical forest. *Journal of Ecology*, 103, 957–966.
- Zhu Y, Zhao GF, Zhang LW, Shen GC, Mi XC, Ren HB, Yu MJ, Chen JH, Chen SW, Fang T, Ma KP (2008) Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, East China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 262–273. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 赵谷风, 张俐文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平 (2008) 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. *植物生态学报*, 32, 262–273.]

(责任编辑: 王希华 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 湖北七姊妹山6 ha森林动态监测样地物种名录

Appendix 1 Checklist of the tree species in the 6-ha Qizimei Mountains forest dynamics plot, Hubei Province

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016180-1.pdf>

附录2 湖北七姊妹山6 ha森林动态监测样地的珍稀濒危物种

Appendix 2 The rare and endangered tree species in the 6-ha Qizimei Mountains forest dynamics plot, Hubei Province

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016180-2.pdf>

姚良锦, 姚兰, 易咏梅, 艾训儒, 冯广, 刘峻城, 林勇, 黄伟, 丁易, 臧润国. 湖北七姊妹山亚热带常绿落叶阔叶混交林的物种组成和群落结构. 生物多样性, 2017, 25 (3): 275–284.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016180

附录1 湖北七姊妹山6 ha森林动态监测样地物种名录

Appendix 1 Checklist of the tree species in the 6-ha Qizimei Mountains forest dynamics plot, Hubei Province

	种名 Species	科名 Family	叶习性 Leaf habit	形态特征 Morpho-logical characteristics
1	算盘子 <i>Glochidion puberum</i>	大戟科 Euphorbiaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
2	杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	杜鹃花科 Ericaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
3	满山红 <i>Rhododendron mariesii</i>	杜鹃花科 Ericaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
4	无梗越橘 <i>Vaccinium henryi</i>	杜鹃花科 Ericaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
5	银果牛奶子 <i>Elaeagnus magna</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
6	四川溲疏 <i>Deutzia setchuenensis</i>	虎耳草科 Saxifragaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
7	绢毛山梅花 <i>Philadelphus sericanthus</i>	虎耳草科 Saxifragaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
8	山梅花 <i>Philadelphus incanus</i>	虎耳草科 Saxifragaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
9	中国旌节花 <i>Stachyurus chinensis</i>	旌节花科 Stachyuraceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
10	华紫珠 <i>Callicarpa cathayana</i>	马鞭草科 Verbenaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
11	紫珠 <i>Callicarpa bodinieri</i>	马鞭草科 Verbenaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
12	恩施栒子 <i>Cotoneaster fangianus</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
13	中华绣线梅 <i>Neillia sinensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
14	小叶石楠 <i>Photinia parvifolia</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
15	软条七蔷薇 <i>Rosa henryi</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
16	白叶莓 <i>Rubus innominatus</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
17	川莓 <i>Rubus setchuenensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
18	高粱泡 <i>Rubus lambertianus</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
19	山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
20	粉花绣线菊 <i>Spiraea japonica</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
21	糯米条 <i>Abelia chinensis</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
22	茶菱蒴 <i>Viburnum setigerum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
23	蝴蝶戏珠花 <i>Viburnum plicatum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
24	菱蒴 <i>Viburnum dilatatum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
25	宜昌菱蒴 <i>Viburnum erosum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
26	日本锦带花 <i>Weigela japonica</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
27	青荚叶 <i>Helwingia japonica</i>	山茱萸科 Cornaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
28	勾儿茶 <i>Berchemia sinica</i>	鼠李科 Rhamnaceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
29	卫矛 <i>Euonymus alatus</i>	卫矛科 Celastraceae	落叶 Deciduous	灌木 Shrub
30	尖连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
31	翅柃 <i>Eurya alata Kobuski</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
32	粉白杜鹃 <i>Rhododendron hypoglaucum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
33	马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
34	腺萼马银花 <i>Rhododendron bachii</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
35	棱果海桐 <i>Pittosporum trigonocarpum</i>	海桐科 Pittosporaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
36	胡颓子 <i>Elaeagnus pungens</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
37	蔓胡颓子 <i>Elaeagnus glabra</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
38	宜昌胡颓子 <i>Elaeagnus henryi</i>	胡颓子科 Elaeagnaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
39	马桑绣球 <i>Hydrangea aspera</i>	虎耳草科 Saxifragaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
40	鸡爪茶 <i>Rubus henryi</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub

	种名 Species	科名 Family	叶习性 Leaf habit	形态特征 Morpho-logical characteristics
41	忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
42	球核荚蒾 <i>Viburnum propinquum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
43	桃叶珊瑚 <i>Aucuba chinensis</i>	山茱萸科 Cornaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
44	大果卫矛 <i>Euonymus myrianthus</i>	卫矛科 Celastraceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
45	鹅掌柴 <i>Schefflera heptaphylla</i>	五加科 Araliaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
46	豪猪刺 <i>Berberis julianae</i>	小檗科 Berberidaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
47	十大功劳 <i>Mahonia fortunei</i>	小檗科 Berberidaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
48	阔叶十大功劳 <i>Mahonia bealei</i>	小檗科 Berberidaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
49	茵芋 <i>Skimmia reevesiana</i>	芸香科 Rutaceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
50	四川山胡椒 <i>Lindera setchuenensis</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	灌木 Shrub
51	八角枫 <i>Alangium chinense</i>	八角枫科 Alangiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
52	山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	大风子科 Flacourtiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
53	合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	豆科 Leguminosae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
54	山槐 <i>Albizia kalkora</i>	豆科 Leguminosae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
55	粉椴 <i>Tilia oliveri</i>	椴树科 Tiliaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
56	华椴 <i>Tilia chinensis</i>	椴树科 Tiliaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
57	珙桐 <i>Davidia involucrata</i>	珙桐科 Davidiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
58	青钱柳 <i>Cyclocarya paliurus</i>	胡桃科 Juglandaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
59	化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	胡桃科 Juglandaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
60	湖北枫杨 <i>Pterocarya hupehensis</i>	胡桃科 Juglandaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
61	糙皮桦 <i>Betula utilis</i>	桦木科 Betulaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
62	亮叶桦 <i>Betula luminifera</i>	桦木科 Betulaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
63	川陕鹅耳枥 <i>Carpinus fargesiana</i>	桦木科 Betulaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
64	川榛 <i>Corylus heterophylla</i>	桦木科 Betulaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
65	枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
66	缺萼枫香 <i>Liquidambar acalycina</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
67	栗 <i>Castanea mollissima</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
68	锥栗 <i>Castanea henryi</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
69	光叶水青冈 <i>Fagus lucida</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
70	水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
71	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
72	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	苦木科 Simaroubaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
73	苦树 <i>Picrasma quassioides</i>	苦木科 Simaroubaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
74	香椿 <i>Toona sinensis</i>	楝科 Meliaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
75	红椿 <i>Toona ciliata</i>	楝科 Meliaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
76	望春玉兰 <i>Yulania biondii</i>	木兰科 Magnoliaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
77	苦槠木 <i>Fraxinus insularis</i>	木樨科 Oleaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
78	七叶树 <i>Aesculus chinensis</i>	七叶树科 Hippocastanaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
79	漆 <i>Toxicodendron vernicifluum</i>	漆树科 Anacardiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
80	房县枫 <i>Acer sterculiaceum</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
81	鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor

	种名 Species	科名 Family	叶习性 Leaf habit	形态特征 Morpho-logical characteristics
82	建始槭 <i>Acer henryi</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
83	阔叶槭 <i>Acer amplum</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
84	青榨槭 <i>Acer davidii</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
85	五裂槭 <i>Acer oliverianum</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
86	中华槭 <i>Acer sinense</i>	槭树科 Aceraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
87	香果树 <i>Emmenopterys henryi</i>	茜草科 Rubiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
88	华中樱桃 <i>Cerasus conradinae</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
89	樱桃 <i>Cerasus pseudocerasus</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
90	湖北海棠 <i>Malus hupehensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
91	稠李 <i>Padus avium</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
92	绢毛稠李 <i>Padus wilsonii</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
93	细齿稠李 <i>Padus obtusata</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
94	李 <i>Prunus salicina</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
95	杜梨 <i>Pyrus betulifolia</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
96	湖北花楸 <i>Sorbus hupehensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
97	华西花楸 <i>Sorbus wilsoniana</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
98	石灰花楸 <i>Sorbus folgeri</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
99	多花泡花树 <i>Meliosma myriantha</i>	清风藤科 Sabiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
100	红柴枝 <i>Meliosma oldhamii</i>	清风藤科 Sabiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
101	暖木 <i>Meliosma veitchiorum</i>	清风藤科 Sabiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
102	楮 <i>Broussonetia kazinoki</i>	桑科 Moraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
103	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	桑科 Moraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
104	灯台树 <i>Cornus controversa</i>	山茱萸科 Cornaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
105	四照花 <i>Cornus kousa</i>	山茱萸科 Cornaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
106	水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	杉科 Taxodiaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
107	瘦椒树 <i>Tapiscia sinensis</i>	省沽油科 Staphyleaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
108	君迁子 <i>Diospyros lotus</i>	柿树科 Ebenaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
109	枳椇 <i>Hovenia acerba</i>	鼠李科 Rhamnaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
110	大叶杨 <i>Populus lasiocarpa</i>	杨柳科 Salicaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
111	响叶杨 <i>Populus adenopoda</i>	杨柳科 Salicaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
112	白辛树 <i>Pterostyrax psilophyllus</i>	野茉莉科 Styracaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
113	西川朴 <i>Celtis vandervoetiana</i>	榆科 Ulmaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
114	紫弹树 <i>Celtis biondii</i>	榆科 Ulmaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
115	榉树 <i>Zelkova serrata</i>	榆科 Ulmaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
116	楝叶吴茱萸 <i>Tetradium glabrifolium</i>	芸香科 Rutaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
117	宜昌木姜子 <i>Litsea ichangensis</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
118	檫木 <i>Sassafras tzumu</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
119	蓝果树 <i>Nyssa sinensis</i>	紫树科 Nyssaceae	落叶 Deciduous	乔木 Abor
120	木荷 <i>Schima superba</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
121	大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
122	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor

	种名 Species	科名 Family	叶习性 Leaf habit	形态特征 Morpho-logical characteristics
123	猫儿刺 <i>Ilex pernyi</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
124	香冬青 <i>Ilex suaveolens</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
125	中型冬青 <i>Ilex intermedia</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
126	日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	杜英科 Elaeocarpaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
127	光叶海桐 <i>Pittosporum glabratum</i>	海桐科 Pittosporaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
128	交让木 <i>Daphniphyllum macropodum</i>	交让木科 Daphniphyllaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
129	多脉青冈 <i>Cyclobalanopsis multinervis</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
130	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
131	小叶青冈 <i>Cyclobalanopsis myrsinifolia</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
132	云山青冈 <i>Cyclobalanopsis sessilifolia</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
133	包果柯 <i>Lithocarpus cleistocarpus</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
134	灰柯 <i>Lithocarpus henryi</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
135	乌冈栎 <i>Quercus phillyreoides</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
136	巴东栎 <i>Quercus engleriana</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
137	刺叶桂樱 <i>Laurocerasus spinulosa</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
138	光叶石楠 <i>Photinia glabra</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
139	石楠 <i>Photinia serratifolia</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
140	三尖杉 <i>Cephalotaxus fortunei</i>	三尖杉科 Cephalotaxaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
141	山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	山矾科 Symplocaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
142	薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	山矾科 Symplocaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
143	光亮山矾 <i>Symplocos lucida</i>	山矾科 Symplocaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
144	光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	山矾科 Symplocaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
145	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	杉科 Taxodiaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
146	柳杉 <i>Salix wilsonii</i>	杉科 Taxodiaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
147	亮叶鼠李 <i>Rhamnus hemsleyana</i>	鼠李科 Rhamnaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
148	穗序鹅掌柴 <i>Schefflera delavayi</i>	五加科 Araliaceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
149	朝鲜木姜子 <i>Actinodaphne lancifolia</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
150	川桂 <i>Cinnamomum wilsonii</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
151	猴樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
152	长叶乌药 <i>Lindera pulcherrima</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
153	黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
154	利川润楠 <i>Machilus lichuanensis</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
155	小果润楠 <i>Machilus microcarpa</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
156	宜昌润楠 <i>Machilus ichangensis</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
157	白楠 <i>Phoebe neurantha</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	乔木 Abor
158	大血藤 <i>Sargentodoxa cuneata</i>	大血藤科 Sargentodoxaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
159	异果鸡血藤 <i>Callerya dielsiana</i>	豆科 Leguminosae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
160	大金刚藤 <i>Dalbergia dyeriana</i>	豆科 Leguminosae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
161	葛 <i>Pueraria montana</i>	豆科 Leguminosae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
162	中华猕猴桃 <i>Actinidia chinensis</i>	猕猴桃科 Actinidiaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
163	软枣猕猴桃 <i>Actinidia arguta</i>	猕猴桃科 Actinidiaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto

	种名 Species	科名 Family	叶习性 Leaf habit	形态特征 Morpho-logical characteristics
164	串果藤 <i>Sinofranchetia chinensis</i>	木通科 Lardizabalaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
165	羽叶蛇葡萄 <i>Ampelopsis chaffanjonii</i>	葡萄科 Vitaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
166	秋葡萄 <i>Vitis romanetii</i> Romanet	葡萄科 Vitaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
167	清风藤 <i>Sabia japonica</i>	清风藤科 Sabiaceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
168	南蛇藤 <i>Celastrus orbiculatus</i>	卫矛科 Celastraceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
169	南五味子 <i>Kadsura longipedunculata</i>	五味子科 Schisandraceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
170	华中五味子 <i>Schisandra sphenanthera</i>	五味子科 Schisandraceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
171	五味子 <i>Schisandra chinensis</i>	五味子科 Schisandraceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
172	翼梗五味子 <i>Schisandra henryi</i>	五味子科 Schisandraceae	落叶 Deciduous	藤本 Fujimoto
173	牛姆瓜 <i>Holboellia grandiflora</i>	木通科 Lardizabalaceae	常绿 Evergreen	藤本 Fujimoto
174	五月瓜藤 <i>Holboellia angustifolia</i>	木通科 Lardizabalaceae	常绿 Evergreen	藤本 Fujimoto
175	钩藤 <i>Uncaria rhynchophylla</i>	茜草科 Rubiaceae	常绿 Evergreen	藤本 Fujimoto
176	扶芳藤 <i>Euonymus fortunei</i>	卫矛科 Celastraceae	常绿 Evergreen	藤本 Fujimoto
177	常春藤 <i>Hedera nepalensis</i>	五加科 Araliaceae	常绿 Evergreen	藤本 Fujimoto
178	蚬壳花椒 <i>Zanthoxylum dissitum</i>	芸香科 Rutaceae	常绿 Evergreen	藤本 Fujimoto
179	小果菝葜 <i>Smilax davidiana</i>	百合科 Liliaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
180	菝葜 <i>Smilax china</i>	百合科 Liliaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
181	野桐 <i>Mallotus tenuifolius</i>	大戟科 Euphorbiaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
182	齿缘吊钟花 <i>Enkianthus serrulatus</i>	杜鹃花科 Ericaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
183	珍珠花 <i>Lyonia ovalifolia</i>	杜鹃花科 Ericaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
184	瑞木 <i>Corylopsis multiflora</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
185	星毛蜡瓣花 <i>Corylopsis stelligera</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
186	茅栗 <i>Castanea seguinii</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
187	猫儿屎 <i>Decaisnea insignis</i>	木通科 Lardizabalaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
188	蜡子树 <i>Ligustrum leucanthum</i>	木樨科 Oleaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
189	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科 Anacardiaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
190	毛叶石楠 <i>Photinia villosa</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
191	绒毛石楠 <i>Photinia schneideriana</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
192	中华石楠 <i>Photinia beauverdiana</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
193	木莓 <i>Rubus swinhoei</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
194	垂枝泡花树 <i>Meliosma flexuosa</i>	清风藤科 Sabiaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
195	桦叶荚蒾 <i>Viburnum betulifolium</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
196	异叶榕 <i>Ficus heteromorpha</i>	桑科 Moraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
197	鸡桑 <i>Morus australis</i>	桑科 Moraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
198	白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	山矾科 Symplocaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
199	城口桤叶树 <i>Clethra fargesii</i>	山柳科 Clethraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
200	株木 <i>Cornus macrophylla</i>	山茱萸科 Cornaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
201	野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	省沽油科 Staphyleaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
202	冻绿 <i>Rhamnus utilis</i>	鼠李科 Rhamnaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
203	多脉猫乳 <i>Rhamnella martini</i>	鼠李科 Rhamnaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
204	多脉鼠李 <i>Rhamnus sargentiana</i>	鼠李科 Rhamnaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees

	种名 Species	科名 Family	叶习性 Leaf habit	形态特征 Morpho-logical characteristics
205	猫乳 <i>Rhamnella franguloides</i>	鼠李科 Rhamnaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
206	青皮木 <i>Schoepfia jasminodora</i>	铁青树科 Olacaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
207	楸木 <i>Aralia elata</i>	五加科 Araliaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
208	山柳 <i>Salix pseudotangii</i>	杨柳科 Salicaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
209	野茉莉 <i>Styrax japonicus</i>	野茉莉科 Styracaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
210	黄花倒水莲 <i>Polygala fallax</i>	远志科 Polygalaceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
211	绿叶甘橿 <i>Lindera neesiana</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
212	三桠乌药 <i>Lindera obtusiloba</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
213	毛叶木姜子 <i>Litsea mollis</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
214	木姜子 <i>Litsea pungens</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
215	山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	樟科 Lauraceae	落叶 Deciduous	小乔木 Small trees
216	杨桐 <i>Adinandra millettii</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
217	山茶 <i>Camellia japonica</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
218	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
219	长瓣短柱茶 <i>Camellia grijsii</i>	茶科 Theaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
220	云南冬青 <i>Ilex yunnanensis</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
221	厚叶冬青 <i>Ilex elmerrilliana</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
222	三花冬青 <i>Ilex triflora</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
223	珊瑚冬青 <i>Ilex corallina</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
224	四川冬青 <i>Ilex szechwanensis</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
225	尾叶冬青 <i>Ilex wilsonii</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
226	显脉冬青 <i>Ilex editicostata</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
227	美丽马醉木 <i>Pieris formosa</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
228	耳叶杜鹃 <i>Rhododendron auriculatum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
229	喇叭杜鹃 <i>Rhododendron discolor</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
230	长蕊杜鹃 <i>Rhododendron stamineum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
231	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	木樨科 Oleaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
232	小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	木樨科 Oleaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
233	网脉木犀 <i>Osmanthus reticulatus</i>	木樨科 Oleaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
234	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
235	红果树 <i>Stranvaesia davidiana</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
236	毛萼红果树 <i>Stranvaesia amphidoxa</i>	蔷薇科 Rosaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
237	巴东荚蒾 <i>Viburnum henryi</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
238	水红木 <i>Viburnum cylindricum</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
239	尖叶四照花 <i>Cornus elliptica</i>	山茱萸科 Cornaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
240	树参 <i>Dendropanax</i>	五加科 Araliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
241	黄叶五加 <i>Gamblea ciliata</i>	五加科 Araliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
242	异叶梁王茶 <i>Metapanax davidii</i>	五加科 Araliaceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
243	红果黄肉楠 <i>Actinodaphne cupularis</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
244	乌药 <i>Lindera aggregata</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees
245	香叶树 <i>Lindera communis</i>	樟科 Lauraceae	常绿 Evergreen	小乔木 Small trees

姚良锦, 姚兰, 易咏梅, 艾训儒, 冯广, 刘峻城, 林勇, 黄伟, 丁易, 臧润国. 湖北七姊妹山亚热带常绿落叶阔叶混交林的物种组成和群落结构. 生物多样性, 2017, 25 (3): 275–284.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016180>

附录 2 湖北七姊妹山 6 ha 森林动态监测样地的珍稀濒危物种

Appendix 2 The rare and endangered tree species in the 6-ha Qizimei Mountains forest dynamics Plot, Hubei Province

物种	保护级别		世界自然保护联盟(IUCN)				中国红色物种名录			中国
	I	II	极危	濒危	易危	近危	濒危	易危	近危	
珙桐 <i>Davidia involucrata</i>	√							√		√
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	√		√					√		√
香果树 <i>Emmenopterys henryi</i>		√							√	√
樟 <i>Cinnamomum bodinieri</i>		√								
榉树 <i>Zelkova serrata</i>		√								√
红椿 <i>Toona ciliate</i>		√						√		√
三尖杉 <i>Cephalotaxus fortunei</i>									√	√
水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i>								√		
长瓣短柱茶 <i>Camellia grijsii</i>								√		
阔叶槭 <i>Acer amplum</i>									√	√
房县枫 <i>Acer sterculiaceum</i>										√
鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>								√		
瘿椒树 <i>Tapiscia sinensis</i>					√				√	√
楸木 <i>Aralia elata</i>					√					
美丽马醉木 <i>Pieris formosa</i>								√		
耳叶杜鹃 <i>Rhododendron auriculatum</i>								√		√
白辛树 <i>Pterostyrax psilophyllus</i>					√			√		√
青钱柳 <i>Cyclocarya paliurus</i>		√								√

珍稀物种的保护级别均采用《中国珍稀濒危植物图鉴》。
The level of protection of rare species are used *China Rare and Endangered Plants Atlas*.

•研究报告•

福建6个港湾浮游植物多样性及其与水系的关系

叶又茵[#] 项 鹏[#] 王 雨 林 茂^{*}

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005)

摘要: 本文分析了2010年和2011年春季和秋季于福建宁德、莆田、湄洲、厦门、漳浦和东山等6个港湾采集的浮游植物样品和相关数据。6个港湾共记录浮游植物4门102属206种, 种数以硅藻最多, 甲藻次之, 金藻和蓝藻较少。6个港湾中, 种类数最多的为莆田(110种), 其次为东山(106种)、厦门(100种)、漳浦(95种)、湄洲(86种), 宁德最少(63种)。季节分析表明, 春季的浮游植物种数呈北部港湾高于南部的分布态势, 秋季反之; 春季的浮游植物细胞丰度分布大致为由北部港湾至南部港湾递减, 秋季相反。春季多样性指数变化范围在1.15–3.05, 最高值出现在东山, 最低值出现在宁德; 秋季多样性指数在2.55–3.65之间, 最高值在东山, 最低值在厦门。分析认为, 浮游植物多样性分布模式受不同水系消长的影响。与历史数据相比, 浮游植物总平均丰度较以往上升, 优势种排序出现变化, 适应高营养盐的种类成为主要优势种。

关键词: 浮游植物; 季节动态; 空间分布; 水系变化; 年际变化; 多样性指数

Phytoplankton diversity and its relationship with currents in the six bays of Fujian

Youyin Ye[#], Peng Xiang[#], Yu Wang, Mao Lin^{*}

Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen, Fujian 361005

Abstract: In this study, species composition, species abundance, and seasonal variation of phytoplankton were surveyed in six Fujian bays, including Ningde, Putian, Meizhou, Xiamen, Zhangpu, and Dongshan from 2010 to 2011. During these surveys, 206 species belonging to 102 genera were identified, and diatoms were the dominant species followed by dinoflagellate species. The bay with the most species was Putian (110), followed by Dongshan (106), Xiamen (100), Zhangpu (95), Meizhou (86), and the least number of species was found in Ningde. Using a seasonal analysis, the amount of phytoplankton species in northern bays was higher than that in the southern bays in the spring, and the reverse was true in the fall. Interestingly, the abundance of phytoplankton species was higher in northern bays than in southern bays in the spring and the reverse was found in the fall. The diversity index ranged from 1.15 to 3.05 in the spring, and was highest in Dongshan, and lowest in Ningde. In the fall, the highest diversity index value was found in Dongshan, and the lowest was found in Xiamen. The results indicated that phytoplankton diversity in this area was mainly controlled by the growth and decline of the Fujian-Zhejiang coastal current and the South China Sea warm current. Compared with historical data, the abundance of phytoplankton has increased, and the species which adapt to high nutrient concentrations become main dominant species.

Key words: phytoplankton; seasonal dynamics; spatial distribution; currents change; interannual variation; diversity indices

浮游植物是海洋生态系统的初级生产者, 是海洋食物网的基础环节, 对海洋生态系统中能量流动、物质循环和信息传递起关键作用。浮游植物物

种分布与海洋环境变化密切相关, 海洋环境的改变直接或间接地影响浮游植物的群落结构, 同时浮游植物物种分布的变化对环境的变化起着指示作用

收稿日期: 2016-11-03; 接受日期: 2017-02-17

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费(海三科 2015022)

[#] 共同第一作者 Co-first authors

^{*} 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: linmao@tio.org.cn

(Round et al, 1981)。因此, 研究浮游植物群落结构对于了解环境变化对海域生态系统产生的影响有着重要的理论和实际应用价值。

20世纪70年代以来, 我国学者陆续开展了台湾海峡浮游植物多样性和生态研究。程兆第(1997)、金德祥(1982)、杨清良(1995)、谢文玲等(2007)、林更铭和杨清良(2007)在对台湾海峡浮游植物群落结构进行分析时发现, 福建沿海浮游植物以广温种占优, 其次为暖水种和温带种; 黄加琪等(2000)在台湾海峡南部用改进的Manta型漂浮生物网采集浮游植物, 发现其数量具有一定的昼夜变化; 黄邦钦等(2003)分析了台湾海峡微微型浮游植物的时空分布及其调控机制, 发现微微型浮游植物不同类群在时空分布上存在“位移”现象, 与不同类群对温度敏感性和对光的利用能力的差异以及生存空间的互补性因素有关; 张壮丽等(2006)在对福建海区春夏两季浮游植物的分析中发现, 种类和数量分布变化与不同水流消长密切相关; 林更铭和杨清良(2007)在整合两岸学者有关台湾海峡的浮游植物物种多样性研究的基础上, 整理了福建沿海及台湾海峡小型浮游植物共620种; 王雨等(2011)对闽浙沿岸流消退时期福建北部海域的研究发现, 该时期浮游植物种类具有典型亚热带生物特点。对福建港湾浮游植物多样性和生态调查的报道较少, 林更铭等(1993, 1994)、杨清良等(2000)在对厦门岛周围海域浮游植物的调查分析中发现细胞总量年高峰在夏季, 次高峰在春季; 唐森铭和陈兴群(2006)对泉州湾的浮游植物分析发现, 底栖硅藻是生物量昼夜变化的重要部分, 并且在潮汐和昼夜变化综合作用下, 浮游植物的群落结构也发生相应变化; 江兴龙和宋立荣(2009)在对泉州湾赤潮常规检测中发现, 海域水质营养盐含量和组成结构的变化会引起赤潮藻类种群增殖竞争力间强弱的相对变化, 而种群增殖竞争力强的种类有可能迅速增殖取代原有的优势种而演替为新的优势种。

那么, 在较大空间尺度下(多港湾), 福建港湾浮游植物有什么分布模式? 空间的异质性是如何影响港湾浮游植物多样性的? 本研究依据2010–2011年春、秋季自北至南, 在宁德、莆田、湄洲、厦门、漳浦和东山6个港湾调查所获的浮游植物样品和收集的相关数据, 分析了浮游植物种类组成、类群特征、丰度分布等, 探讨了福建港湾浮游

植物多样性特征和空间分异格局及其多样性模式与生境条件的关联。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2010年和2011年春秋两季在宁德(2010年5月、10月)、莆田(2011年5月、10月)、湄洲(2010年4月、2011年9月)、厦门(2011年5月、9月)、漳浦(2011年4月、9月)和东山(2011年4月、9月) 6个港湾区域开展浮游植物多样性调查(图1), 两季度共设置87个采样站位。6个港湾的地理位置北起宁德港湾, 南至东山港湾, 位于福建沿岸117.49°–120.40° E, 23.68°–27.07° N之间。受九龙江、闽江、漳江等大陆径流以及闽浙沿岸流、南海暖流等沿岸流季节变化的影响, 水系特征复杂。

1.2 取样和分析方法

参照GB/T 12373.6-2007, 分表层(离水面0.5 m)和底层(离海底1 m)各取500 mL水样, 个别站在某季节水深不足5 m时, 仅采集表层水样。样品用5%中性甲醛固定, 静止沉淀至少24 h, 再用细小虹吸管小心吸去上清液, 视样品浓度浓缩至一定体积。抽取分样于Olympus BH-2光学镜下用浮游植物计数板进行种类鉴定和计数, 并按种类计算细胞丰度(cells/dm³)。种名参照《中国海区常见浮游植物种名更改初步意见》(孙军和刘东艳, 2002)。

浮游植物群落按生态类群划分为广温种、暖水种和温带种。

物种丰度相似性采用多维尺度分析方法。

物种多样性采用Shannon-Wiener指数(H')计算(孙军和刘东艳, 2004): $H' = -\sum (n_i/N) \log_2(n_i/N)$ 。

均匀度采用Pielou均匀度公式计算(国家技术监督局, 2007): $J = H'/\log_2(S)$ 。

优势度 $Y = (n_i/N) f_i$ 。

上述各式中, N 为所有物种的个体总数, n_i 为第 i 种的个体总数, f_i 为该种在各样品中出现的频率。

2 结果

2.1 浮游植物种类组成和种数变化

6港湾共记录浮游植物206种, 隶属于4门102属, 其中, 硅藻89属174种, 甲藻10属26种, 金藻2属4种, 蓝藻1属2种。6港湾都以硅藻种类数最多, 甲藻次之, 蓝藻和金藻只出现在个别港湾中(图2)。春秋两季总种数以莆田最多, 为110种, 其次为东山(106种)、厦

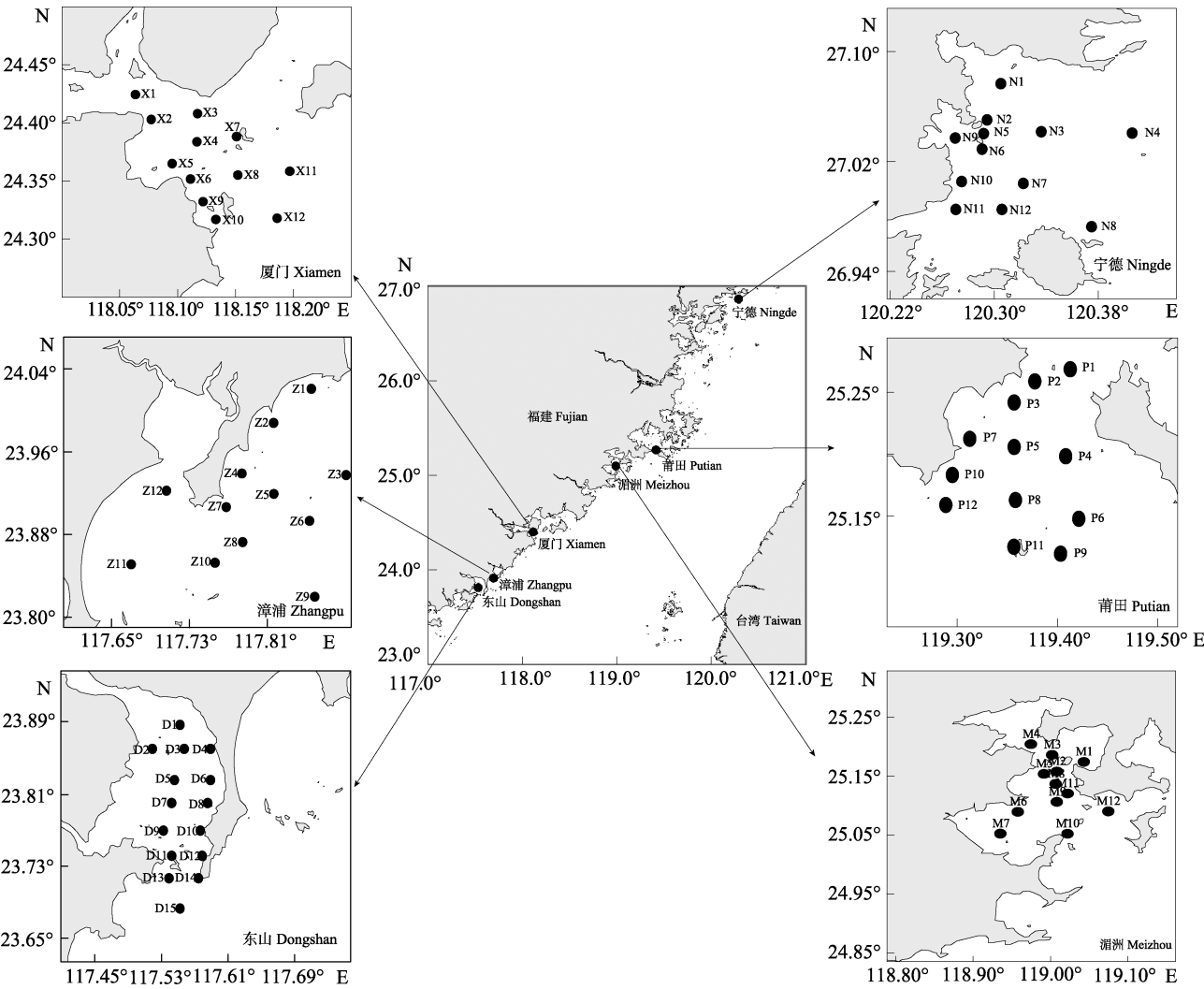


图1 福建6个港湾调查站位的分布
Fig. 1 Phytoplankton sampling stations in the six bays of Fujian Province

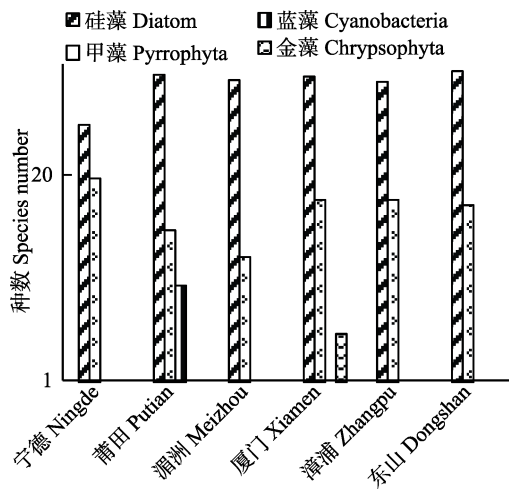


图2 福建6个港湾浮游植物各类别种数
Fig. 2 The species number of phytoplankton groups in the six bays of Fujian

门(100种)、漳浦(95种)、湄洲(86种), 宁德最少(63种)(图3)。其中, 春季于莆田港湾发现的种类数最多(68种), 其次为湄洲和东山港湾(66种), 宁德港湾发现的种类数最少, 只有44种; 秋季港湾种类数呈由北往南递增的趋势, 东山港湾发现的种类数最多, 达到83种, 其次为漳浦(66种), 宁德港湾最少, 仅为41种。

从季节变化上来看, 处于福建海域北部的宁德、莆田、湄洲港湾春季种类数多于秋季, 而处于南部的厦门、漳浦和东山港湾则相反(图3)。

6港湾共记录优势种20种(附录1), 其中中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)被检出的频率最高, 除宁德、漳浦港湾的春季和东山港湾的秋季外, 在其余港湾皆是优势种; 其次为旋链角毛藻(*Chaetoceros*

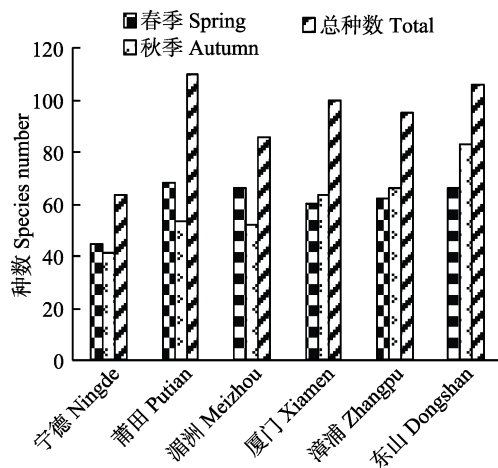


图3 福建6个港湾浮游植物春秋两季种数

Fig. 3 The species number of phytoplankton in spring and autumn in the six bays of Fujian

curvisetus)和具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*); 星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphus*)、笔尖形根管藻(*Rhizosolenia syliformis*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacific*)、圆海链藻(*T. rotula*)和伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)仅在单个港湾中的单个季节成为优势种。

2.2 浮游植物生态类群

由图4可知,两季皆以广温种为主。春季,广温种种类数最高值在莆田港湾检出(51种),次高值区集中在厦门和东山海域,宁德港湾检出最低值(29种);暖水种种类数于东山港湾最高(17种),次高值区集中在莆田和湄洲港湾;温带种种类数变化趋势与暖水种基本一致。秋季,广温种种类数变化趋势

与总种数一致,呈由北至南递增的趋势,最高值出现在东山港湾(54种),最低值在宁德港湾(33种);暖水种种类数高值区集中在南部的厦门和东山港湾,低值区在北部的宁德和湄洲港湾;温带种种类数最高值于东山港湾检出(9种),莆田次之(8种),宁德最低(2种)。

按各生态类群丰度占总丰度比例来看,两季各生态类群丰度组成皆以广温种占优(图5)。春季,除宁德、厦门港湾外,其余各港湾温带种丰度所占比例大于暖水种;秋季,除莆田、湄洲港湾外,其余港湾暖水种丰度皆远大于温带种。

2.3 浮游植物丰度时空分布

春季浮游植物细胞丰度高值区主要集中在中北部港湾,其中,最高值在宁德港湾检出,丰度达到 616.47×10^3 cells/dm³,于湄洲港湾检测出次高值(390.38×10^3 cells/dm³),最低值为厦门港湾(6.74×10^3 cells/dm³);秋季福建各港湾浮游植物细胞丰度值总体下降,丰度高值区向南部移动:东山港湾检测出最高值(53.40×10^3 cells/dm³),厦门次之(40.12×10^3 cells/dm³),莆田最低,仅为 4.63×10^3 cells/dm³(图6)。

2.4 浮游植物群落多样性指数和均匀度

春季浮游植物群落多样性指数在东山港湾最高($H' = 3.05$),次高值出现在湄洲港湾($H' = 3.02$),宁德港湾多样性指数最低($H' = 1.15$)。秋季各港湾多样性指数总体提升,中南部各港湾除厦门之外皆大于3.00,其中最高值为东山港湾($H' = 3.65$),湄洲次之($H' = 3.58$),厦门最低($H' = 2.55$)。可以看出,各港湾两季多样性指数大体呈现由南至北递减趋势(表1)。

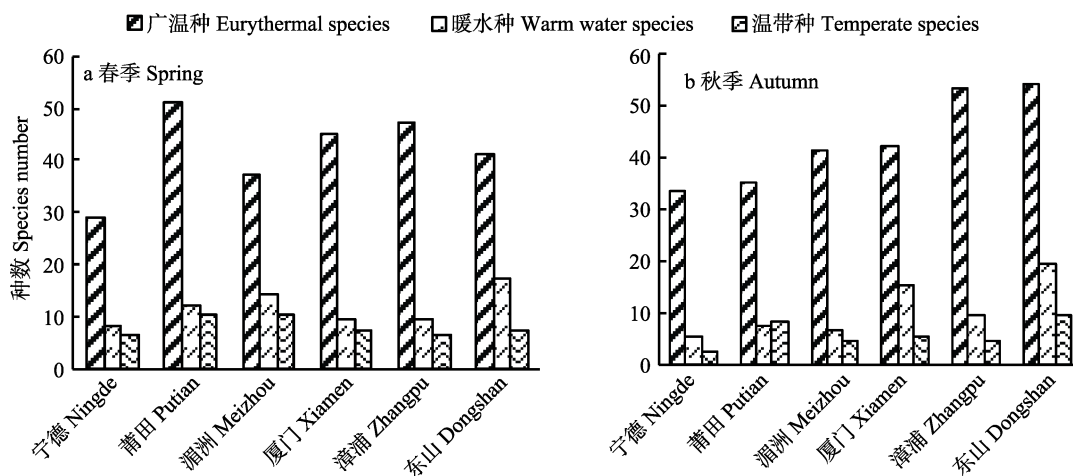


图4 福建6个港湾春季(a)和秋季(b)浮游植物各生态类群物种数

Fig. 4 The species number of phytoplankton ecological groups in spring (a) and autumn (b) in the six bays of Fujian

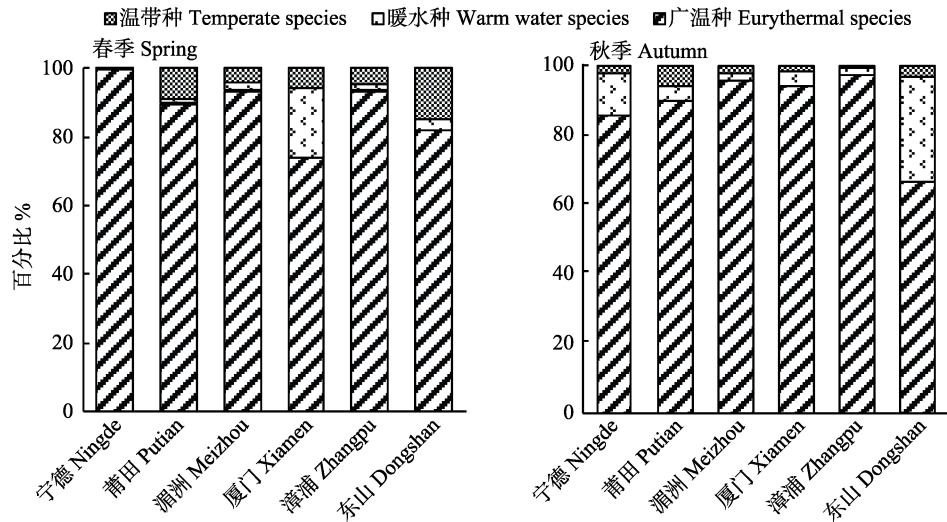


图5 福建6个港湾浮游植物各生态类群丰度所占比例
Fig. 5 The proportion of abundance of phytoplankton ecological groups in the six bays of Fujian

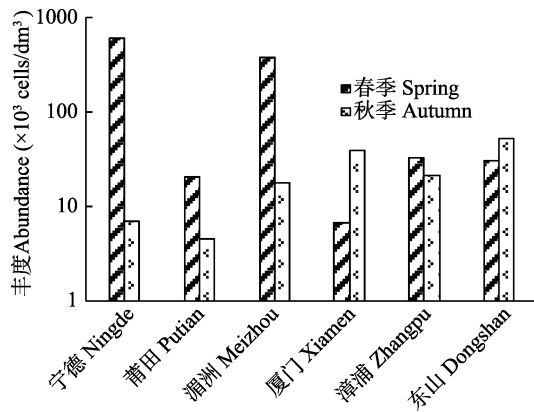


图6 福建6个港湾浮游植物丰度($\times 10^3$ cells/ dm^3)
Fig. 6 The phytoplankton abundance in the six bays of Fujian ($\times 10^3$ cells/ dm^3)

由表1可以看出,各港湾均匀度指数(J)较高,空间变化趋势与多样性指数一致。春季均匀度指数最低值为宁德港湾($J = 0.28$),最高值出现在南部的厦门港湾(0.79),其余港湾差异不明显;秋季均匀度总体提升,最高值在湄洲港湾检出($J = 0.84$),东山港湾次之($J = 0.81$),厦门最低($J = 0.60$)。

2.5 浮游植物群落多维尺度分析

分别对春季和秋季各港湾物种丰度数据为基

础进行多维尺度分析,可以分别将两季浮游植物划分为5大类。春季划分为东山至漳浦类群、厦门类群、莆田类群、湄洲类群和宁德类群,且莆田和东山至漳浦类群相似度较为接近,宁德港湾沿岸和近海的类群有一定区别。秋季划分为东山类群、漳浦至厦门类群、湄洲类群、宁德类群和莆田类群(图7)。

浮游植物分布与空间异质性的关系分析表明,处于不同区域的港湾有较为独立的浮游植物群落结构,即使是同一个港湾,位于沿岸和近岸、近湾顶和近湾口的浮游植物群落也略有不同。

3 讨论

3.1 春秋季福建沿岸海洋水文特征

福建沿海位于台湾海峡以西,是南海暖流、闽浙沿岸流和粤东沿岸流流经之处。冬季伊始,低温($<15^{\circ}\text{C}$)低盐(≤ 30)的闽浙沿岸流经台湾海峡由东北向西南贴岸流动,海洋锋面集中在福建海域中、北部海域。春季,西南季风渐强,南海高温($>18^{\circ}\text{C}$)高盐(≥ 31)水逐渐北上,直至春末消退。秋季,西南季风渐退,在东北季风的推动下,闽浙沿岸流南侵入

表1 福建6个港湾浮游植物群落的Shannon-Wiener多样性指数(H')及Pielou均匀度(J)
Table 1 Diversity and evenness indices of phytoplankton in the six bays of Fujian

		宁德 Ningde	莆田 Putian	湄洲 Meizhou	厦门 Xiamen	漳浦 Zhangpu	东山 Dongshan
H'	春季 Spring	1.15	2.31	3.02	2.39	2.68	3.05
	秋季 Autumn	2.83	2.58	3.58	2.55	3.22	3.65
J	春季 Spring	0.28	0.69	0.66	0.79	0.61	0.71
	秋季 Autumn	0.73	0.72	0.84	0.60	0.72	0.81

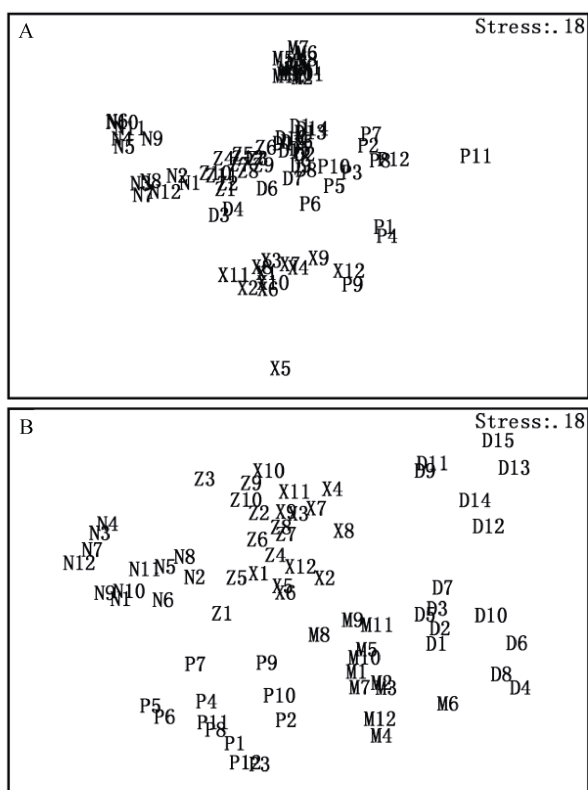


图7 春季(A)、秋季(B)福建6个港湾浮游植物群落多维尺度分析。N: 宁德; P: 莆田; M: 湄洲; X: 厦门; Z: 漳浦; D: 东山

Fig. 7 Multidimensional scaling of phytoplankton in spring and autumn in the six bays of Fujian. N, Ningde; P, Putian; M, Meizhou; X, Xiamen; Z, Zhangpu; D, Dongshan.

福建海域并达到平潭湾附近, 并随着东北季风的加强直至冬季基本控制福建海域(伍伯瑜, 1982; 肖晖等, 2002; 王雨等, 2011; 万小芳等, 2013)。因此, 研究区受湾内径流与湾外水文状况的影响。

3.2 水系对福建港湾浮游植物物种数的影响

春季, 南下的闽浙沿岸流与北上的南海暖流交汇于莆田、湄洲港湾附近的福建中北部(伍伯瑜, 1982; 肖晖等, 2002; 刘金芳等, 2002; 王雨等, 2011), 因此浮游植物种数于莆田、湄洲最多, 暖水种与温带种在其中占据较高比例(图5), 多样性指数也相应地处于较高值(表1); 秋季伊始, 南海暖流减弱, 闽浙沿岸水渐强, 水温由南至北呈现下降趋势(伍伯瑜, 1982; 肖晖等, 2002; 王雨等, 2011; 万小芳等, 2013), 各港湾浮游植物的种数亦表现出显著的由北至南递增的趋势, 特别是受高温高盐南海暖流以及营养盐较丰富的粤东沿岸水影响, 东山港湾浮游植物生长繁殖旺盛, 种类数达到高值, 暖水种

及温带种数量的激增导致东山港湾多样性指数于该季达到一个高值($H' = 3.65$)。因此, 研究区春季浮游植物种数呈北部港湾高于南部港湾的分布态势, 秋季浮游植物种数呈南部港湾高于北部港湾的分布态势。

3.3 水系对福建港湾浮游植物丰度分布的影响

长江口海域和浙江沿岸海域时常爆发大规模甲藻赤潮, 赤潮生物随着闽浙沿岸流进入福建北部海域, 一旦水域环境条件适宜, 就可能引起赤潮(蔡燕红等, 2002; 王金辉和黄秀清, 2003; 唐静亮等, 2005)。在本次调查中, 宁德港湾个别站位有大量具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)富集, 其丰度已达到赤潮阈值($\geq 1.0 \times 10^6$ cells/dm³), 导致该海域均匀度和多样性指数最低(表1)。这一区域时常爆发甲藻赤潮, 也可能是由于甲藻赤潮爆发后, 赤潮生物产生的孢囊沉积于海底, 在底泥团中作为细小的淤泥粒, 可被水流运输而逐渐集中至深水谷盆, 当底层水温等环境条件合适, 就又会发生同一赤潮(王金辉和黄秀清, 2003)。此外, 由于闽浙沿岸流及南海暖流在春季与福建中北部海域交汇, 形成营养盐和颗粒有机碳的高值区, 满足浮游植物大量繁殖的条件, 使得湄洲港湾丰度出现次高值。这与王雨等(2011)和林更铭等(2012)的研究结果一致。因此, 从丰度平面分布上来看, 春季最高值出现在宁德港湾, 湄洲次之, 莆田最低。

秋季丰度平面分布由北至南呈现显著的递增趋势, 于东山港湾处丰度达到最高值(47.18×10^3 cells/dm³)。根据林更铭、杨清良以及2011年生物生态近海调查等对台湾海峡浮游植物的分析(杨清良, 1995; 林更铭和杨清良, 2007; 唐森铭, 2011), 秋季浮游植物密集区往南推移, 密集中心在东山至厦门之间海域, 而平潭岛外局部站位丰度很低, 与本次调查结果一致。这是因为秋季随着闽浙沿岸流的增强, 南海暖流开始减弱, 全区水温、盐度普遍下降, 导致浮游植物丰度迅速下降。而此时, 由九龙江、韩江径流与外海水混和而成的粤东沿岸流影响该区(暨卫东和黄尚高, 1989), 由于水体中的营养盐含量比夏季更为丰富, 水温较高, 光照强, 东山港湾浮游植物繁殖生长旺盛, 相比其他海域丰度达到最高值(图6), 物种多样性同样显著提升(表1), 其中暖水种占据了很大的比例(图4, 5)。莆田港湾两季丰度

皆检出最低值,可能与调查海区环境及地形有关,有待进一步探讨。

3.4 水系对福建港湾浮游植物物种多样性及均匀度的影响

春季,仅湄洲和东山两个港湾的物种多样性指数高于3.00,其余港湾皆低于3.00,其中宁德港湾多样性指数最低($H' = 1.15$)(表1)。这是因为受闽浙沿岸流影响,该季部分站位具齿原甲藻繁盛,其丰度已达到赤潮阈值($\geq 1.0 \times 10^6$ cells/dm³),群落结构趋向简单化,导致浮游植物多样性降低。而受南海暖流影响的宁德以南港湾,物种多样性指数较高,在2.31–3.05之间,最高值出现于东山湾($H' = 3.05$),次高值出现于湄洲港湾($H' = 3.02$)。秋季福建海域温度高于春季,多样性指数总体上亦高于春季,变化趋势与春季基本一致。

物种多样性指数反映浮游植物种类丰富度和种间细胞数量关系,并与环境的异质性有关。均匀度代表群落内物种分布的均匀程度,是反映群落是否成熟和稳定的特征之一。综合上述群落特征指数,可见福建港湾两季异质性较高,种间分布在秋季较为均匀,种类多样性不丰富,浮游植物群落不稳定。这种不稳定在春季表现得尤为明显,这是因为初春还处于闽浙沿岸流强盛时期的末梢,底层水体较表层环境的异质性高,浮游植物种间分布不均匀(谢文玲等, 2007; 林更铭和杨清良, 2007)。这种现象的出现是由于初春近底层还有向北流动的南海暖水,海水涡动混合较为强烈的结果(伍伯瑜, 1983; 黄荣祥等, 1989; 谢文玲等, 2007)。

3.5 水系对福建港湾浮游植物优势种的影响

春季和秋季福建各港湾优势种以广温沿岸种为主(附录1)。春季,6港湾以广温广盐种以及广温低盐种为主,这些类群种类较多,个别种类细胞丰度较大,在福建海域颇为常见,是闽浙沿岸流的主要特征种类。初春闽浙沿岸流的低温低盐水在东北季风的推动下水舌范围可直达福建海域中北部(伍伯瑜, 1982; 暨卫东和黄尚高, 1989; 肖晖等, 2002),加之春季为福建梅雨季节,大量雨水及淡水径流的冲刷导致海水盐度不稳定,浮游植物群落以广温广盐种及低盐种为主导。但逐渐北上的南海高温高盐水也将暖水高盐种类带至福建海域中部,使得笔尖形根管藻、圆海链藻等在莆田、东山等海域占据一

定优势。秋季伊始,东北季风逐渐强劲,闽浙沿岸流南下影响到平潭海域附近,但此时南海高温高盐水仍控制着大部分福建海域,暖水性种类如有翼圆筛藻(*Coscinodiscus bipartitus*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)等在6个港湾依然有较大丰度,个别种类如洛氏角毛藻为东山的第一优势种(附录1)。

强烈的海水涡动混合会影响到海洋底部的生态环境,使得底栖生物种类受扰动而浮游于水体之中。如前文所述,春季闽浙沿岸流与南海暖水交汇于福建中北部海域,秋季南海暖流南缩,与粤东沿岸水、近岸及台湾浅滩涌升流形成混合水影响着东山港湾附近海域,复杂的水文环境使得具槽帕拉藻、派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)等底栖种大量浮游于水体中,在表层浮游植物群落中占据优势(附录1)。此外,湄洲和东山港湾底栖种出现在表层水体中也可能是与其半封闭式港湾的特殊地势有关(李孟国, 2001)。

3.6 港湾浮游植物多样性变化

与可比历史资料(附录2)对比发现,福建各港湾浮游植物细胞总平均丰度呈增长趋势,优势种排序出现变化,原先不占据优势的种类如中肋骨条藻、具槽帕拉藻等喜肥种成为主要优势种,这可能与近几年营养盐的增加有关(郑小宏, 2010; 邵留, 2014; 侯丽媛, 2014; 王臻, 2015)。这与王江涛和曹婧(2012)在长江口海域和吴玉霖(2004)对胶州湾浮游植物长期变化的研究结果基本一致。

参考文献

- Cai YH, Jiang XS, Huang XQ (2002) Studies on the red tide of *Prorocentrum dantatum* in Zhoushan archipelago sea area. Marine Environmental Science, 21(1), 30–45. (in Chinese with English abstract) [蔡燕红, 蒋晓山, 黄秀清 (2002) 舟山海域一次具齿原甲藻赤潮初探. 海洋环境科学, 21(1), 30–45.]
- Cheng ZD (1997) Planktonic diatoms in the southern region of Taiwan Strait, Fujian, China. Journal of Xiamen University (Natural Science), 18(4), 112–117. (in Chinese with English abstract) [程兆第 (1997) 福建南部海区的浮游硅藻及其季节变化. 厦门大学学报(自然科学版), 18, 112–117.]
- Hou LY, Hu AY, Yu CP (2014) Evaluation on spatial-temporal distribution of nutrients and potential eutrophication in surface waters of Jiulongjiang River and its Estuary. Journal of Applied Oceanography, 33, 369–378. (in Chinese with Eng-

- lish abstract) [侯丽媛, 胡安谊, 于昌平 (2014) 九龙江河口表层水体营养盐含量的时空变化及潜在富营养化评价. 应用海洋学报, 33, 369–378.]
- Huang BQ, Hong HS, Lin XJ, Chen JX (2003) Ecological study on picophytoplankton in the Taiwan Strait. 1. Spatial and temporal distribution and its controlling mechanism. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(4), 72–82. (in Chinese with English abstract) [黄邦钦, 洪华生, 林学举, 陈纪新 (2003) 台湾海峡微微型浮游植物的生态研究. 1. 时空分布及其调控机制. 海洋学报, 25(4), 72–82.]
- Huang JQ, Li SJ, Yu Y (2000) Phytoneuston in the southern Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 22(4), 67–73. (in Chinese with English abstract) [黄加祺, 李少菁, 俞瑶 (2000) 台湾海峡南部漂浮植物. 海洋学报, 22(4), 67–73]
- Huang RX (1989) Characteristics of water temperature and salinity in North central Taiwan Strait. *Marine Sciences*, 6, 33–38. (in Chinese with English abstract) [黄荣祥 (1989) 台湾海峡中、北部海域温、盐度特征. 海洋科学, 6, 33–38.]
- Ji WD, Huang SG (1989) Relationship between nutrients, salinity and phytoplankton in Fujian coastal water. *Tropic Oceanology*, 8(2), 55–64. (in Chinese with English abstract) [暨卫东, 黄尚高 (1989) 福建海岸带海水营养盐消长与温、盐、浮游植物的关系. 热带海洋, 8(2), 55–64.]
- Jiang XL, Song LR (2009) The influence factors on dominant red-tide algal species succession in Quanzhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 40, 761–767. (in Chinese with English abstract) [江兴龙, 宋立荣 (2009) 泉州湾赤潮藻类优势种演替影响因子探讨. 海洋与湖沼, 40, 761–767.]
- Jin DX (1982) Ecological studies on diatoms from Taiwan strait. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1(1), 80–86. (in Chinese with English abstract) [金德祥 (1982) 台湾海峡硅藻类的特点. 台湾海峡, 1(1), 80–86.]
- Li MG (2001) Hydrographic and sediment analyses of Xinghua Bay. *Journal of Waterway and Harbour*, 22(4), 156–159. (in Chinese with English abstract) [李孟国 (2001) 兴化湾水文泥沙特征分析. 水道港口, 22(4), 156–159.]
- Lin GM, Yang QL (2007) Species diversity and the distribution of micro-phytoplankton in the Taiwan Strait. *Biodiversity Science*, 15, 31–45. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良 (2007) 台湾海峡小型浮游植物的物种多样性和分布特征. 生物多样性, 15, 31–45.]
- Lin GM, Yang QL, Lin JM (1993) Relationship between phytoplankton and environment factors in waters around Xiamen Island. *Marine Science Bulletin*, 12(6), 40–45. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良, 林金美 (1993) 厦门岛周围海域浮游植物与环境因子的关系. 海洋通报, 12(6), 40–45.]
- Lin GM, Yang QL, Lin JM (1994) Abundance and species composition of phytoplankton in waters around Xiamen Island. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 13, 353–358. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良, 林金美 (1994) 厦门岛周围海域浮游植物的种类组成及丰度. 台湾海峡, 13, 353–358.]
- Lin GM, Yang QL, Wang Y, Lin WH (2012) Species composition and distribution characteristics of phytoplankton in Northern sea of Fujian, China during withdraw of Zhe-Min Coastal current. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 18, 411–420. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良, 王雨, 林维含 (2012) 福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游植物的种类组成与分布特征. 应用与环境生物学报, 18, 411–420.]
- Liu JF, Liu Z, Gu YY, Ren S, Zhang GY (2002) Analysis of the hydrographic elements features in Taiwan Strait. *Marine Forecasts*, 19(3), 22–32. (in Chinese with English abstract) [刘金芳, 刘忠, 顾翼炎, 任帅, 张国友 (2002) 台湾海峡水文要素特征分析. 海洋预报, 19(3), 22–32.]
- Round FE (1981) *The Ecology of Algae*. Cambridge University Press, London.
- Shao L, Yu KF, Wu HL, Huo YZ, He Q, Shen AL (2014) Annual analysis and evaluation of water quality in Sansha Bay, Fujian. *Journal of Shanghai Ocean University*, 23, 229–237. (in Chinese with English abstract) [邵留, 于克锋, 吴海龙, 霍元子, 何青, 沈盎绿 (2014) 三沙湾海域水质周年变化分析与评价. 上海海洋大学学报, 23, 229–237.]
- Sun J, Liu DY (2002) The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China seas waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33, 271–286. (in Chinese with English abstract) [孙军, 刘东艳 (2002) 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见. 海洋与湖沼, 33, 271–286.]
- Sun J, Liu DY (2004) The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica*, 26, 62–75. (in Chinese with English abstract) [孙军, 刘东艳 (2004) 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, 26, 62–75.]
- State Bureau of Technical Supervise (2007) *The Specification for Oceanographic Survey-Marine Biological Survey* (GB/T12736. 6-2007), pp. 30–35. China Standard Press, Beijing. [国家技术监督局 (2007) 《海洋调查规范》(GB/T12736. 6-2007), 30–35页. 中国标准出版社, 北京.]
- Tang JL, Mao HY, Guo MR (2005) Analysis of the red tide of *Prorocentrum dantatum* in the north of Zhejiang coastal water. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 24(4), 330–334. (in Chinese with English abstract) [唐静亮, 毛宏跃, 过美蓉 (2005) 浙江北部海域的具齿原甲藻赤潮分析. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 24(4), 330–334.]
- Tang SM (2011) *Harbour Biological Ecological Investigation Report*. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen. (in Chinese) [唐森铭 (2011) 港湾生物生态调查报告. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门.]
- Tang SM, Chen XQ (2006) Phytoplankton diel rhythm in the waters of Quanzhou Bay in Fujian, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(4), 129–137. (in Chinese with English abstract) [唐森铭, 陈兴群 (2006) 泉州湾水域浮游植物群落的昼夜变化. 海洋学报, 28(4), 129–137.]
- Wan XF, Pan AJ, Guo XG, Jing CS, Huang J (2013) Seasonal variation features of the hydrodynamic environment in the western Taiwan Strait. *Journal of Oceanography in Taiwan*

- Strait, 32, 156–163. (in Chinese with English abstract) [万小芳, 潘爱军, 郭小刚, 靖春生, 黄奖 (2013) 台湾海峡西侧水动力环境的季节变化特征. 台湾海峡, 32, 156–163.]
- Wang JH (2003) The HAB species *Prorocentrum dentatum* and its characteristics in East China Sea. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 22(2), 128–131. (in Chinese with English abstract) [王金辉 (2003) 东海赤潮生物具齿原甲藻及其特征. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 22(2), 128–131.]
- Wang JH, Huang XQ (2003) Ecological characteristics of *Prorocentrum dentatum* and the cause of harmful algal bloom formation in China Sea. Chinese Journal of Applied Ecology, 14, 1065–1069. (in Chinese with English abstract) [王金辉, 黄秀清 (2003) 具齿原甲藻的生态特征及赤潮成因浅析. 应用生态学报, 14, 1065–1069.]
- Wang JT, Cao J (2012) Variation and effect of nutrient on phytoplankton community in Changjiang Estuary during last 50 years. Marine Environmental Science, 31, 310–315. (in Chinese with English abstract) [王江涛, 曹婧 (2012) 长江口海域近50年来营养盐的变化及其对浮游植物群落演替的影响. 海洋环境科学, 31, 310–315.]
- Wang Y, Lin M, Lin GM, Xiang P (2011) Community structure of phytoplankton during the fading period of Zhe-Min coastal water in Taiwan Strait. Marine Science Bulletin, 30, 220–225. (in Chinese with English abstract) [王雨, 林茂, 林更铭, 项鹏 (2011) 浙闽沿岸流消退时期的浮游植物群落结构特征. 海洋通报, 30, 220–225.]
- Wang Z (2015) Preliminary research of the nutrient structure and restriction in Dongshan bay. Environmental protection science, 41, 93–97. (in Chinese with English abstract) [王臻 (2015) 东山湾营养盐结构及限制作用的初步研究. 环境保护科学, 41, 93–97.]
- Wu BY (1982) Some problems on circulation study in Taiwan Strait. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1(1), 1–7. (in Chinese with English abstract) [伍伯瑜 (1982) 台湾海峡环流研究中的若干问题. 台湾海峡, 1(1), 1–7.]
- Wu BY (1983) The current pattern and hydrologic character in the Taiwan straits and its adjacent waters. Marine Science Bulletin, 2(4), 1–8. (in Chinese with English abstract) [伍伯瑜 (1983) 台湾海峡及其邻近水域的流型和水文特征. 海洋通报, 2(4), 1–8.]
- Wu YL, Sun S, Zhang YS, Zhang F (2004) Quantitative study on long-term variation of phytoplankton in Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 35, 518–523. (in Chinese with English abstract) [吴玉霖, 孙松, 张永山, 张芳 (2004) 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 35, 518–523.]
- Xiao H, Guo XG, Wu RS (2002) Summarization of studies on hydrographic characteristics in Taiwan Strait. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 21, 126–138. (in Chinese with English abstract) [肖晖, 郭小刚, 吴日升 (2002) 台湾海峡水文特征研究概述. 台湾海峡, 21, 126–138.]
- Xie WL, Chen CP, Gao YH (2007) Diatom community in sea waters between middle north of Taiwan Strait and Nanji Archipelago in winter, 2005. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 26, 370–379. (in Chinese with English abstract) [谢文玲, 陈长平, 高亚辉 (2007) 台湾海峡中北部至南麂列岛海域2005冬季硅藻群落结构特征. 台湾海峡, 26, 370–379.]
- Yang QL (1995) Species composition and distribution of planktonic diatoms in west side of Taiwan Strait. Acta Oceanologica Sinica, 17, 99–107. (in Chinese) [杨清良 (1995) 台湾海峡西侧浮游硅藻类的种类组成与分布. 海洋学报, 17, 99–107.]
- Yang QL, Lin GM, Cai BJ (2000) Species composition and distribution of phytoplankton in eastern Xiamen waters. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 19, 337–343. (in Chinese with English abstract) [杨清良, 林更铭, 蔡秉及 (2000) 厦门东侧海域浮游植物的种类组成与分布. 台湾海峡, 19, 337–343.]
- Zhang ZL, Ye SZ, Ye QT (2006) The species composition and quantity distribution characteristics of phytoplankton in Fujian sea area. South China Fisheries Science, 5(10), 45–50. (in Chinese with English abstract) [张壮丽, 叶孙忠, 叶泉土 (2006) 福建海区浮游植物种类组成及数量分布特点. 南方水产, 5(10), 45–50.]
- Zheng XH (2010) Changes in nitrogen and phosphate and eutrophication character in Minjiang estuary. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 29, 42–46. (in Chinese with English abstract) [郑小宏 (2010) 闽江口海域氮磷营养盐含量的变化及富营养化特征. 台湾海峡, 29, 42–46.]

(责任编辑: 孙军 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 福建6港湾浮游植物表底层优势种

Appendix 1 Dominant species in surface and bottom in the six bays of Fujian

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016315-1.pdf>

附录2 本次调查与历史数据比较

Appendix 2 Compare with this survey and historical records

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016315-2.pdf>

附录1 福建6港湾浮游植物表底层优势种(S: 表层; B: 底层)

Appendix 1 Dominant species in surface and bottom in the six bays of Fujian

	宁德 Ningde		莆田 Putian		湄洲 Meizhou		厦门 Xiamen		漳浦 Zhangpu		东山 Dongshan	
	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季
	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn
	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.
<i>Asterionellopsis glacialis</i>					√	√						
<i>Bacillaria paxillifera</i>					√	√	√	√				√
<i>Chaetoceros curvisetus</i>			√	√			√		√	√	√	√
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>											√	√
<i>Coscinodiscus asteromphus</i>							√					
<i>Coscinodiscus granii</i>							√	√				
<i>Guinaridia striata</i>												√
<i>Leptocylindrus danicus</i>			√	√	√	√	√				√	
<i>Nitzschia closterium</i>						√	√					
<i>Paralia sulcata</i>			√		√	√	√		√	√	√	
<i>Pleurosigma acutum</i>						√	√					
<i>Prorocentrum dentatum</i>	√	√										
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>					√	√	√					
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>					√	√	√					
<i>Rhizosolenia styliformis</i>			√									
<i>Skeletonema costatum</i>		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
<i>Thalassionema nitzschioides</i>					√							
<i>Thalassiosira pacifica</i>										√		
<i>Thalassiosira rotula</i>											√	
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>					√							

附录2 本次调查与历史数据比较

Appendix 2 Compare with this survey and historical records

	种数 Species	优势种 Dominant species	丰度 Abundance (cells/dm ³)	文献 References
宁德 Ningde				
春季 Spring	51	纺锤角藻、夜光藻、旋链角毛藻、柔弱角毛藻 <i>Ceratium fusus</i> , <i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Chaetoceros debilis</i>	2.37×10 ³	林金美, 1995
	43	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	616.47×10 ³	本次调查
秋季 Autumn	50	—	0.05×10 ³	林金美, 1995
	40	中肋骨条藻、具槽帕拉藻、有翼圆筛藻、叉分角藻、汉氏束毛藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Coscinodiscus bipartitus</i> , <i>Ceratium furca</i> , <i>Trichodesmium hildebrandtii</i>	7.09×10 ³	本次调查
莆田 Putian				
春季 Spring	98	奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i>	8.7×10 ³	杜庆红, 1996
	73	旋链角毛藻、丹麦细柱藻、笔尖根管藻、中肋骨条藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i> , <i>Rhizosolenia syliformis</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	20.97×10 ³	本次调查
秋季 Autumn	118	中肋骨条藻、琼氏圆筛藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Coscinodiscus jonensianus</i>	0.17×10 ³	杜庆红, 1996
	50	具槽帕拉藻、中肋骨条藻、新月菱形藻 <i>Paralia sulcata</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Nitzschia closterium</i>	4.63×10 ³	本次调查
湄洲 Meizhou				
春季 Spring	30	笔尖形根管藻、并基角毛藻、密联角毛藻、钝根管藻半棘型、印度角毛藻 <i>Rhizosolenia syliformis</i> , <i>Chaetoceros decipiens</i> , <i>Chaetoceros densus</i> , <i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>semispina</i> , <i>Chaetoceros indicus</i>	13.17×10 ³	林金美, 1991
	72	中肋骨条藻、柔弱几内亚藻、布氏双尾藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Guinardia delicatula</i> , <i>Ditylum brightwellii</i>	49.20×10 ³	唐森铭, 2011
	61	中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻、派格棍形藻、丹麦细柱藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i>	390.38×10 ³	本次调查
秋季 Autumn	39	—	5.02×10 ³	林金美, 1991
	88	菱形海线藻、具槽帕拉藻、中肋骨条藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	13×10 ³	唐森铭, 2011
	51	派格棍形藻、新月菱形藻、中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻、具槽帕拉藻 <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Paralia sulcata</i>	23.76×10 ³	本次调查

漳浦 Zhangpu					
春季	97	冰河拟星杆藻、并基角毛藻	57.50×10 ³	许翠娅, 2008	
Spring		<i>Asterionellopsis glacialis</i> , <i>Chaetoceros decipiens</i>			
	62	具槽帕拉藻、尖刺伪菱形藻、中肋骨条藻、锥状斯氏藻	32.67×10 ³	本次调查	
		<i>Paralia sulcata</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Scrippsiella trochiodes</i>			
秋季	56	长耳盒形藻、派格棍形藻、中肋骨条藻	0.22×10 ³	许翠娅, 2009	
Autumn		<i>Odontella aurita</i> , <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Skeletonema costatum</i>			
	66	中肋骨条藻、菱形海线藻、具槽帕拉藻、尖刺伪菱形藻	21.69×10 ³	本次调查	
		<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>			
东山 Dongshan					
春季	64	菱形海线藻、笔尖形根管藻、派格棍形藻、伯氏根管藻、距端根管藻、粗根管藻、二齿双管藻、三叉角藻、纺锤梨甲藻、夜光藻、透明辐杆藻	0.41×10 ³	林金美, 1996	
Spring		<i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Rhizosolenia syliformis</i> , <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Rhizosolenia bergonii</i> , <i>Rhizosolenia calcar-avis</i> , <i>Rhizosolenia robusta</i> , <i>Amphisolenia bidentata</i> , <i>Ceratium trichoceros</i> , <i>Pyrocystis fusiformis</i> , <i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Bacteristrum hylanus</i>			
	—	—	214.56×10 ³	唐森铭, 2011	
	65	中肋骨条藻、圆海链藻、旋链角毛藻、丹麦细柱藻	31.10×10 ³	本次调查	
		<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassiosira rotula</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i>			
秋季	74	粗刺角藻柔软变种、旋链角毛藻、菱形海线藻	32.38×10 ³	林金美, 1997	
Autumn		<i>Ceratium horridum</i> var. <i>molle</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i>			
	—	—	51.92×10 ³	唐森铭, 2011	
	82	洛氏角毛藻、斯氏几内亚藻、旋链角毛藻、丹麦细柱藻	53.4×10 ³	本次调查	
		<i>Chaetoceros lorenzianus</i> , <i>Guinardia striata</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i>			

•研究报告•

青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究

梁健超¹ 丁志锋¹ 张春兰¹ 胡慧建^{1*} 朵海瑞^{2*} 唐虹³

1 (广东省生物资源应用研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物保护与利用公共实验室, 广州 510260)

2 (北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

3 (广东省珠海淇澳-担杆岛省级自然保护区, 珠海 519000)

摘要: 生物多样性分布格局与热点区域的评估与确定是生物多样性保护规划的基础。三江源地区位于青藏高原腹地的长江、黄河、澜沧江源头汇水区, 是世界上高原物种最丰富、最集中的区域之一。本文在对三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类资源全面调查的基础上, 利用GAP分析和空间自相关分析对鸟类丰富度的空间分布格局与热点区域进行了探讨, 并对当前功能区划下的保护空缺进行了分析。结果表明: (1)调查期间共记录鸟类89种, 隶属10目29科57属, 其中列入《国家重点保护野生动物名录》的12种, 列入《濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)》附录I、II的11种; (2)不同环境梯度间鸟类群落组成差异显著, 低海拔的森林生境物种多样性要明显高于高海拔的草原草甸生境; (3)鸟类丰富度的空间格局表现为从东北部的峡谷林区分别往西北、东南部冰川雪山递减; 濒危保护鸟类的热点区域集中分布在西南部高山草甸, 与全部鸟类的热点区域之间存在明显差异; (4)麦秀分区核心区范围与全部鸟类的多样性热点区域的分布一致, 但未能覆盖濒危保护鸟类的热点区域, 可能不利于濒危鸟类的保护。本研究结果有助于保护区划的修订与完善, 同时亦能为小尺度下生物多样性保护规划的研究提供有益参考。

关键词: 鸟类多样性; 空间格局; 热点区域; 空间自相关; GAP分析; 三江源地区

Bird diversity spatial distribution patterns and hotspots in Maixiu Area of Sanjiangyuan National Nature Reserve, Qinghai Province

Jianchao Liang¹, Zhifeng Ding¹, Chunlan Zhang¹, Huijian Hu^{1*}, Hairui Duo^{2*}, Hong Tang³

1 Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization, Guangdong Institute of Applied Biological Resources, Guangzhou 510260

2 School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

3 Guangdong Zhuhai Qi'ao-Dan'gan Island Provincial Nature Reserve, Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract: Assessing and determining patterns and hotspots of biodiversity are the foundation of biodiversity conservation planning. Situated in the hinterland of the Qinghai-Tibetan Plateau, and being the source of the Yangtze, Yellow and Lancang rivers, the Sanjiangyuan region is considered to be one of the most abundant and concentrated areas of plateau species worldwide. We conducted bird censuses in the Maixiu Area of Sanjiangyuan National Nature Reserve in March, May and August of 2014. We examined the spatial patterns and identified bird community hotspots, and the conservation gaps of current zoning. Our results showed that: (1) there were 89 bird species in the Maixiu Area belonging to 10 orders, 29 families and 57 genera, among which 12 species belonged to the List of Key Protected Wild Animals of China and 11 species were listed in appendices I and II of the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES); (2) there were differences in bird community composition among habitat types and along an elevational gradient, and bird diversity in low altitude, forest habitats was higher than that found in high altitude, meadow habitats; (3) bird diversity decreased from forest to glaciers and snowberg, and from northeast to northwest and southeast; hotspots of endangered birds were concentrated in southwestern alpine meadows,

收稿日期: 2016-09-07; 接受日期: 2017-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(31400361)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: 13922339577@139.com; duohr@163.com

which differed from the hotspots of the overall bird community; and (4) the core zone of the reserve matched the hotspots of overall birds well, but failed to match the hotspots of endangered birds, which might be not conducive to their protection. Our results may help to make more effective decisions for biodiversity conservation in this region.

Key words: bird diversity; spatial patterns; hotspots; spatial autocorrelation; GAP analysis; Sanjiangyuan region

生物多样性是人类赖以生存和发展的基础, 人口膨胀、生境破碎化、资源过度利用等一系列问题给全球生物多样性带来前所未有的巨大威胁(万本太等, 2007)。如何利用有限的保护力量实现最佳的保护效果一直是保护生物学的热点研究问题(Wilson et al, 2007)。对多样性空间格局及热点区域进行评估与确定是当前生物多样性保护决策中最为直观有效的方法(李智琦等, 2010)。热点区域是指物种种类丰富或特有、稀有物种分布集中的区域(Reid, 1998; Grenyer et al, 2006), 该概念反映了保护的有效性和优先性原则, 自提出以来便得到广泛认可与关注(Myers, 1988), 目前研究者已经对热点区域的评价标准(Wu TY et al, 2013)、研究方法(栾晓峰等, 2009; Costa et al, 2010; Behera & Roy, 2010)、动态变化(Reddy et al, 2016)等方面进行了大量探讨, 成果丰富。然而, 这些研究大都在较大尺度范围下进行, 物种的分布信息主要依靠文献著作、调查报告或专家估计而获得, 具有一定的时空局限性及主观性(李迪强和宋延龄, 2000; 李智琦等, 2010)。在相对较小尺度下的(如自然保护区尺度)实践中, 这些数据往往会由于缺失或达不到精确分析的要求等问题, 而无法反映出物种的真实分布格局, 为保护决策带来困难。因此, 如何在小尺度范围内确定热点区域是目前多样性保护规划中亟待探讨的问题。

青海三江源国家级自然保护区地处青藏高原腹地的长江、黄河、澜沧江源头区域, 总面积15.23万 km², 是我国最大的天然湿地分布区和高原高寒草原区(陈孝全和苟新京, 2002), 素有“中华水塔”之称。保护区由18个相对独立的保护分区构成, 从高原湿地到山地森林, 各分区自然环境复杂多样, 共同孕育出世界上海拔最高, 高原物种最为丰富、集中的生物资源宝库, 在生物多样性保护方面具有重要意义。现有关于三江源地区的调查研究大都着眼于全局范围内物种资源的概况, 而对各分区特有环

境下的多样性分布格局缺乏关注, 特别是专门针对鸟类多样性热点区域的研究甚少。鸟类作为食物链中的中、高级消费者, 其数量与分布特征对生态系统中其他各成员的状况具有重要指示作用(Padoa-Schioppa et al, 2006)。

本文以三江源国家级自然保护区麦秀分区为研究地, 在野外实地调查的基础上, 利用GAP分析对鸟类丰富度空间格局进行评估, 并通过空间自相关分析识别出多样性的热点区域, 据此对当前功能区划进行保护空缺性分析, 拟为该区域生物多样性评估、保护资源的优化配置提供科学依据, 同时也是对小尺度下生物多样性保护规划作出的一次有益探索。

1 研究地概况

三江源国家级自然保护区麦秀分区位于青海黄南州泽库县境内, 地处34°44'–35°30' N, 101°22'–102°07' E, 总面积2,684.38 km², 是黄河一级支流隆务河源头区域。麦秀分区整体地势南高北低, 隆务河源头麦秀河及扎毛曲分别从东部与北部穿横而过, 形成了两大集中的高寒森林区, 是黄河上游流域重要的水源涵养地。隆务河上游其他支流在麦秀分区西部纵横交织, 形成广袤的高寒草甸湿地景观。分区内气候属典型的高原大陆性气候; 年平均气温2.8℃, 最暖月(7月)平均气温14.2℃; 最冷月(1月)平均气温–10.1℃; 年降水量530 mm (周华卿和樊国有, 2011)。

麦秀分区海拔范围2,800–4,428 m, 植被分布的垂直地带性明显, 由低至高大致分为温性针阔叶混交林、寒温性针叶林、亚高山落叶阔叶灌丛、高寒草甸及高山垫状植被。主要优势乔木有祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、紫果云杉(*P. purpurea*)、白桦(*Betula platyphylla*)等; 灌木有山生柳(*Salix oritrepha*)、杜鹃(*Rhododendron* spp.)、小叶金露梅(*Potentilla parvifolia*)、鲜卑花

(*Sibiraea laevigata*)、绣线菊(*Spiraea* spp.)等; 草甸植物以委陵菜(*Potentilla* spp.)、马先蒿(*Pedicularis* spp.)、棘豆(*Oxytropis* spp.)、薹草(*Carex* spp.)、嵩草(*Kobresia* spp.)等为主。

2 研究方法

2.1 鸟类调查

采用样线法进行鸟类调查。为使样线在空间上均匀分布, 将麦秀分区划分为27个10 km × 10 km的网格, 每个网格内依据地形地貌、植被类型及环境可达性设置调查样线1条(图1)。样线长度约6–10 km, 单侧宽度在50–100 m之间(根据地形与生境差异而定)。全区样线总长201.8 km, 涵盖了整个保护分区的所有生境类型。所有样线均进行3次调查, 时间分别为2014年3月14–30日, 5月23日至6月7日, 8月23日至9月6日, 每天调查时间为7:00–11:00和15:00–18:00; 在森林及灌丛等视野受限生境, 采取徒步调查方式, 行进速度一般为1–2 km/h; 草原、草甸等地形开阔生境以车行与步行相结合的方式进行调查, 行进速度约5–10 km/h, 调查时以双筒望远镜和单筒望远镜观察并辅以鸣声辨别, 记录样线上遇到鸟类的种类、个体数量、栖息生境及海拔高度。

2.2 数据统计

根据麦秀分区的地形地貌、植被、水文特征, 结合鸟类的生态习性, 将其栖息生境划分为森林、灌丛、草原草甸、湿地4种生态类型进行研究, 其中森林生境指以寒温性针叶林为主的高寒森林; 灌丛生境指区内的亚高山落叶灌丛植被; 草原草甸类生境包括区内高寒草原、高寒草甸、高山垫状植被及流石滩等以草本植物为主的生境; 湿地生境包括区内隆务河各级支流、高山湖泊及滩涂等涉水环境。根据麦秀分区海拔范围(2,800–4,428 m), 在参考前人研究的基础上(Fu et al, 2006; Acharya et al, 2011), 以200 m为间隔对鸟类栖息的垂直海拔段进行划分, 其中2,800–3,000 m与4,400–4,428 m的海拔段在分区内所占面积极小(两者均不足5 km²), 因此将这两者分别与3,000–3,200 m及4,200–4,400 m海拔段合并为< 3,200 m海拔段和> 4,200 m海拔段进行研究。分别统计不同生境类型及海拔梯度中鸟类群落的种类组成及数量, 通过计算各生境类型及海拔梯度鸟类群落丰富度、密度、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J_{sw})以及Sorensen相似性指数(C_s)(马克平和刘玉明, 1994; 马克平等, 1995), 对麦秀分区的鸟类多样性进行分析。

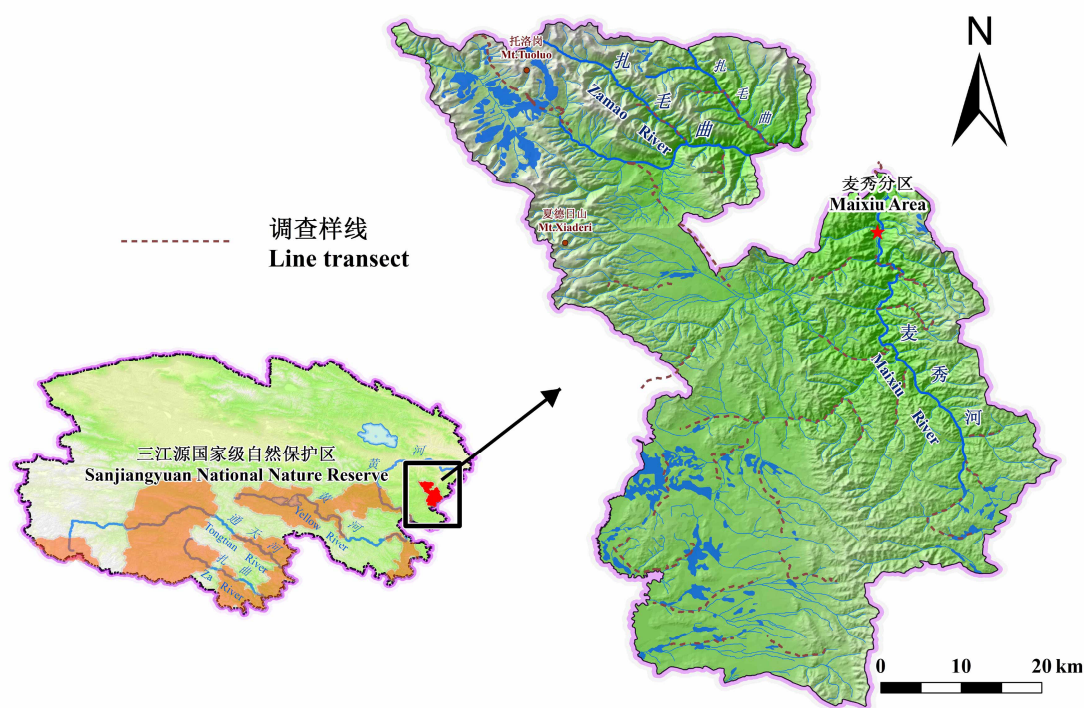


图1 研究区位置及调查样线示意图
Fig. 1 Location of the study area and the line transect

2.3 鸟类丰富度分布格局预测

通过GAP分析方法获得鸟类丰富度分布格局(刘吉平等, 2005; 肖海燕等, 2006), 该方法对物种分布的预测是基于以下外推原理: 如果物种实际分布在某种生境条件组合, 那么没有实际调查的所有具有类似生境组合的区域均可能为物种的潜在分布区(李晓文等, 2007)。具体过程为: 利用ArcGIS软件将麦秀分区划分为1 km × 1 km的等面积栅格2,826个, 将栅格图与数字化植被图和高程图进行叠加分析, 得到每个栅格对应的生境类型与海拔的属性表, 其中生境类型用1和0分别表示其在该栅格中出现与否, 海拔采用数字1–7对海拔段进行编码。根据野外实地调查数据, 确定麦秀分区内各鸟类出现的生境类型及海拔范围, 建立鸟类与环境的关系模型, 其中海拔范围定义为物种分布的海拔上限减去海拔下限(Colwell et al, 2004; Wu YJ et al, 2013)。在此基础上, 通过对栅格属性表的逻辑运算分别筛选出每种鸟类可能会出现的栅格, 并进行赋值, 出现为1, 否则为0。最后对各鸟类赋值数据叠加计算即得出每个栅格内出现鸟类的物种数, 从而获得整个麦秀分区的鸟类丰富度分布格局(张有瑜等, 2008; 刘吉平和吕宪国, 2011; 张殷波等, 2014)。

2.4 空间自相关及热点区域分析

空间自相关是指同一变量在不同空间位置上的相关性, 包括全局与局部两种分析方法, 前者与一般统计学中的相关系数类似, 使用单一的值来反映整体的自相关程度, 从而揭示整个研究区域的空间模式; 后者计算每一单元与其邻近单元就某一属性的相似性, 用以确定与识别空间聚集的分布(张松林和张昆, 2007)。局部空间自相关分析在疾病预防(曹磊等, 2015)、城市规划(胡明星, 2010)、经济管理(杜挺等, 2014)、生态保护(徐佩等, 2013)等领域已得到极为广泛的应用, 其中以Getis-Ord G_i^* 系数最为常用, 它是一种基于距离权重矩阵的局部空间自相

关指标, 能识别具有统计显著性的热点与冷点空间聚类。因此, 本文利用局部空间自相关分析对鸟类多样性热点区域进行识别与分析, 在对鸟类丰富度空间格局的预测基础上, 通过ArcGIS软件中的Spatial Statistic模块计算各空间单元的局部自相关 G_i^* 系数, 以其中的显著高值聚集区作为热点区域, 较显著高值聚集区作为次热点区域(张松林和张昆, 2007), 得到麦秀分区鸟类多样性热点区域的分布特征, 并以此与现有保护区功能区划对比, 进行保护空缺性分析。

3 结果

3.1 鸟类组成

在麦秀分区内共记录到鸟类89种, 隶属于10目29科57属, 其中12种列入《国家重点保护野生动物名录》、11种列入《濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)》附录I、II中, 主要为猛禽和雉类, 如高山兀鹫(*Gyps himalayensis*)、秃鹫(*Aegypius monachus*)、草原雕(*Aquila nipalensis*)、红隼(*Falco tinnunculus*)、藏雪鸡(*Tetraogallus tibetanus*)、蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)等。

3.2 鸟类多样性水平分布

麦秀分区的4种生境中, 林区面积虽然所占比例不大, 但其鸟类丰富度、密度及多样性指数均为最高(表1)。灌丛是分布于森林与草原、草甸之间的一种过渡性生境, 在植被表征上更接近于森林, 同样具有较高的鸟类多样性。草原、草甸区的鸟类丰富度仅次于林区, 但该生境是分区内分布最为广泛、面积最大的类型, 其物种密度不高, 且种间数量差异较大, 褐背拟地鸦(*Pseudopodoces humilis*)、棕颈雪雀(*Montifringilla ruficollis*)、白腰雪雀(*M. taczanowskii*)等种群数量大的小型鸟类优势明显, 使得其群落多样性及均匀度均远低于森林与灌丛生境。湿地生境中鸟类的组成最为简单, 丰富度与

表1 不同生境类型鸟类群落多样性
Table 1 Bird diversity indices of different habitats

生境类型 Habitat type	面积 Area (km ²)	物种丰富度 Species richness	密度 Density (species/km ²)	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index (H')	均匀度指数 Evenness index (J_{sw})
森林 Forest	126.6	48	0.379	3.134	0.938
灌丛 Bush	653.2	42	0.064	2.925	0.900
草甸草原 Meadow	1,613.2	46	0.028	2.093	0.547
湿地 Wetland	291.4	22	0.075	2.156	0.697

表2 不同生境类型鸟类共有种(对角线上)和群落相似性(对角线下)

Table 2 Number of mutual species (above the diagonal) and similarity (Sorensen's index, below the diagonal) of bird community between different habitats

生境类型 Habitat type	森林 Forest	灌丛 Bush	草甸草原 Meadow	湿地 Wetland
森林 Forest	—	30	19	8
灌丛 Bush	0.667	—	16	9
草甸草原 Meadow	0.404	0.364	—	15
湿地 Wetland	0.228	0.282	0.442	—

多样性指数均处于较低水平。

除森林与灌丛由于植被表征相近, 具有较高的鸟类群落相似性外(0.667), 其他各生境间鸟类群落组成差异较大(表2)。

3.3 鸟类多样性垂直分布

鸟类的丰富度、密度、Shannon-Wiener多样性指数、均匀度指数沿海拔从低到高整体上均呈递减的趋势, 即在最低海拔处于最大值而在最高海拔达到最小值(表3)。

表3 不同海拔梯度鸟类群落多样性
Table 3 Bird diversity indexes at different altitudes

海拔梯度 Altitude gradient	面积 Area (km ²)	物种丰富度 Species richness	密度 Density (species/km ²)	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index (<i>H'</i>)	均匀度指数 Evenness index (<i>J_{sw}</i>)
< 3,200 m	40.0	51	1.275	3.193	0.812
3,200–3,400 m	109.0	50	0.458	3.251	0.831
3,400–3,600 m	438.8	39	0.088	2.295	0.626
3,600–3,800 m	1,067.0	36	0.034	1.947	0.543
3,800–4,000 m	450.3	15	0.033	2.117	0.782
4,000–4,200 m	298.5	10	0.033	1.464	0.636
> 4,200 m	280.4	8	0.028	0.982	0.472

表4 不同海拔梯度鸟类共有种(对角线上)和群落相似性(对角线下)

Table 4 Number of mutual species (above the diagonal) and similarity (Sorensen's index, below the diagonal) of bird community between different altitudes

海拔梯度 Altitude gradient	< 3,200 m	3,200–3,400 m	3,400–3,600 m	3,600–3,800 m	3,800–4,000 m	4,000–4,200 m	> 4,200 m
< 3,200 m	—	32	24	15	6	4	1
3,200–3,400 m	0.634	—	27	18	7	4	2
3,400–3,600 m	0.534	0.607	—	23	12	8	7
3,600–3,800 m	0.344	0.419	0.613	—	12	8	7
3,800–4,000 m	0.181	0.215	0.444	0.471	—	6	4
4,000–4,200 m	0.131	0.134	0.327	0.348	0.480	—	6
> 4,200 m	0.034	0.067	0.298	0.318	0.348	0.334	—

随海拔上升, 相邻梯度间鸟类群落相似性递减(表4)。3,800 m以下是分区内林灌类生境集中分布的海拔段, 两者鸟类群落组成相近, 相邻海拔梯度间的鸟类群落具有较高的相似性。海拔超过3,800 m后, 生境转向以单一的草原、草甸为主, 相邻海拔梯度间鸟类群落差异性逐渐明显。

3.4 鸟类丰富度空间格局

全部鸟类丰富度最高在麦秀河、扎毛曲及其支流河谷处(图2a), 其次为中部的丘陵阶地。低丰富度区域主要分布于东南部与西北部托洛岗、夏德日等雪山中上段的高寒草甸及高山流石滩稀疏植被环境中。将国家重点保护鸟类以及CITES附录I、II中鸟类提取并进行丰富度分布格局分析(图2b, c), 结果显示, 两者分布格局基本一致, 但与全部鸟类丰富度格局之间具有明显的差异。在全部鸟类丰富度最高的峡谷林区中濒危保护鸟类的丰富度并不突出, 而是集中在海拔更高、生境更为简单的高山灌丛草甸区。

3.5 鸟类多样性热点区域

全部鸟类的多样性热点区域集中在北部与东

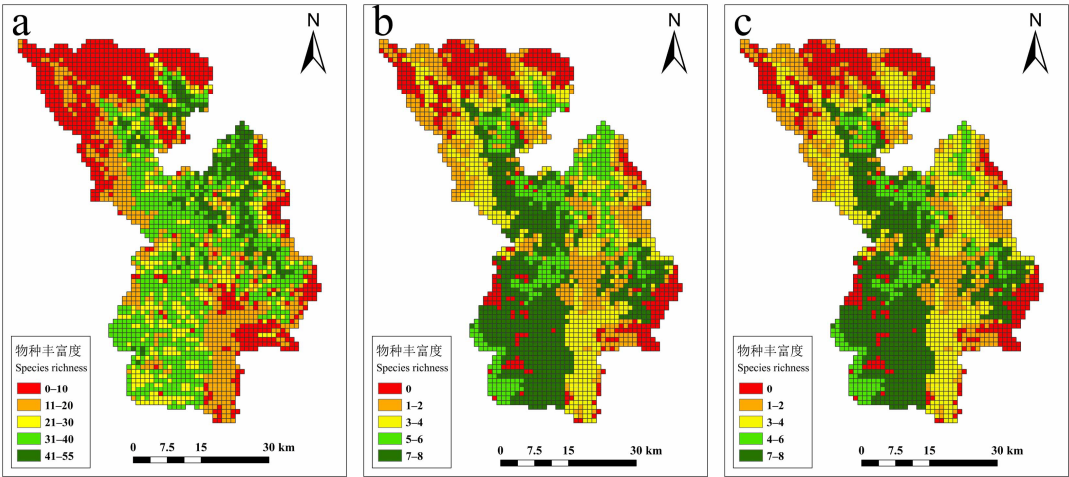


图2 麦秀分区鸟类丰富度空间分布格局。a: 全部鸟类; b: 国家重点保护鸟类; c: CITES附录I、II中的鸟类
Fig. 2 Spatial distribution patterns of bird richness in Maixiu Area. a, Overall species; b, Species belonged to the “List of Key Protected Wild Animals of China”; c, Species listed in CITES appendices I and II

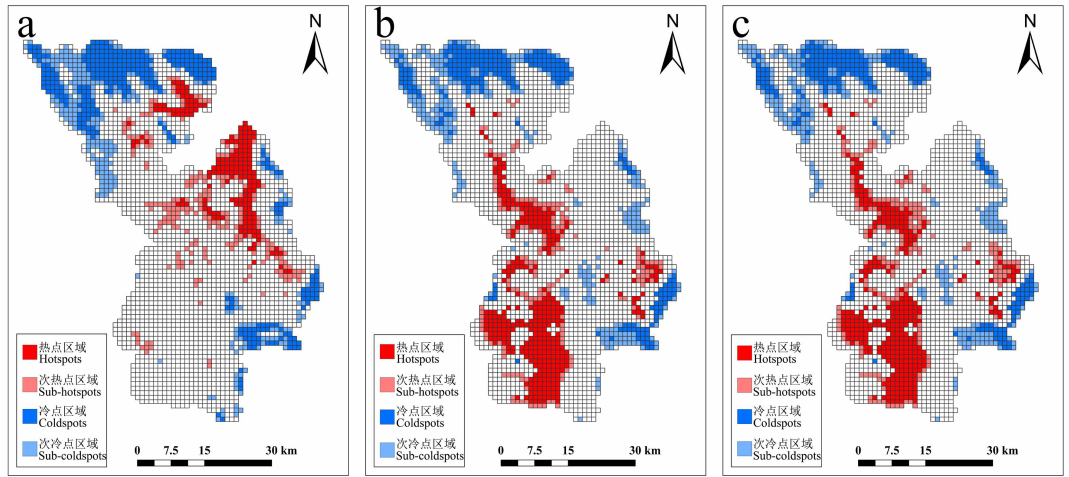


图3 麦秀分区鸟类多样性热点区域。a: 全部鸟类; b: 国家重点保护鸟类; c: CITES附录I、II中的鸟类
Fig. 3 Hotspots of bird diversity in Maixiu Area. a, Overall species; b, Species belonged to the “List of Key Protected Wild Animals of China”; c, Species listed in CITES appendices I and II

部的峡谷林区,沿河谷呈指状分布,总面积约188 km²,占麦秀分区总面积的6.65%,次热点区域包围于热点区域的外延,形成多样性的过渡地带,冷点区域主要集中在北部的高海拔的冰川雪山,面积约354 km²,占总面积的12.53%(图3a)。国家重点保护鸟类以及CITES附录鸟类的热点区域分布格局基本一致(图3b, c),集中于中部丘陵与西南部高山草原带,面积均为363 km²,占总面积的12.85%。全部鸟类的热点区域与濒危保护鸟类的热点区域在分布上存在明显差异,两者空间重叠率为0,次热点区域的重叠率为13.29%。

4 讨论与结论

麦秀分区地处青藏高原东部的黄河源头汇水区,海拔跨度大,多种生境交错并存,鸟类群落组成随环境梯度变化而表现出明显的差异。本次调查共记录到鸟类89种,占三江源保护区鸟类记录总数的37.5%(237种)(马强等, 2003),其中森林、灌丛类型生境的鸟类多样性明显高于草甸、湿地类型。生境植被特征被认为是决定鸟类群落多样性最重要的因素之一(MacArthur & MacArthur, 1961; 侯建华等, 2008; 程松林等, 2014)。林灌类生境物种组成多

样、内部结构复杂、生产力高,能提供丰富的食物资源与隐蔽条件,因此,相对于环境结构单一的草甸及湿地能支持更高的鸟类多样性,其空间分布与鸟类多样性分布格局关系密切(张跃等, 2012)。鸟类多样性的垂直变化是影响其空间分布格局的另一重要因素。麦秀分区鸟类多样性垂直格局呈单调递减模式,该结果与大多数研究所报道的单峰分布格局并不一致(Lee et al, 2004; Williams et al, 2010; Wu YJ et al, 2013),这可能与高原环境下气候条件在相对较小范围内的急剧变化有关(唐志尧和方精云, 2004),同时由于区内海拔起点较高(2,800 m),研究的海拔范围亦可能对最终观察的结果造成影响(Rahbek, 2005)。

麦秀分区全部鸟类的丰富度格局在空间上总体表现为从东北部分别向西北、东南部递减。东北部河谷是区内高寒森林集中分布区,海拔相对较低,能为多种鸟类提供栖息生境,因此物种丰富度最高;而西北、东南的冰川雪山气候恶劣,资源匮乏,只有极少数鸟类能生存,丰富度最低。全部鸟类的热点区域集中在东北部的低海拔峡谷林区,而濒危保护鸟类的热点区域集中在西南部的亚高山草甸。国外学者对不同类型的热点区域分布不一致的问题进行了大量的探讨(Lombard, 1995; Bonn et al, 2002; Orme et al, 2005),一般认为,地理环境的空间分异与不同物种在生境选择策略上的差别是造成热点区域分布差异的重要因素(Orme et al, 2005; Luo et al, 2015),在麦秀分区濒危保护的鸟类以高山兀鹫、秃鹫、草原雕、大鵟(*Buteo hemilasius*)等大型猛禽为主,在生境利用上偏好于中、高海拔开阔的高山环境。因此在制定保护规划时需要特别注意综合考虑不同物种的分布特性,以免特有或重要物种被遗漏。

功能区划是自然保护区规划管理的核心内容,科学的功能区划是保护资源合理配置的关键。在早期的保护区规划中,由于基础数据的缺失以及技术方法的限制,功能区的划分主观性较强,难以满足保护需求(呼延俊奇等, 2014)。本文在对麦秀分区鸟类热点区域识别的基础上,将热点区域与当前保护区的功能区划进行对比(图4),结果显示,核心区范围与全部鸟类多样性热点区域的分布一致,能够覆盖后者的82.98%,但却未能涵盖濒危保护鸟类的热点区域,濒危保护鸟类的热点区域中有30.03%落在

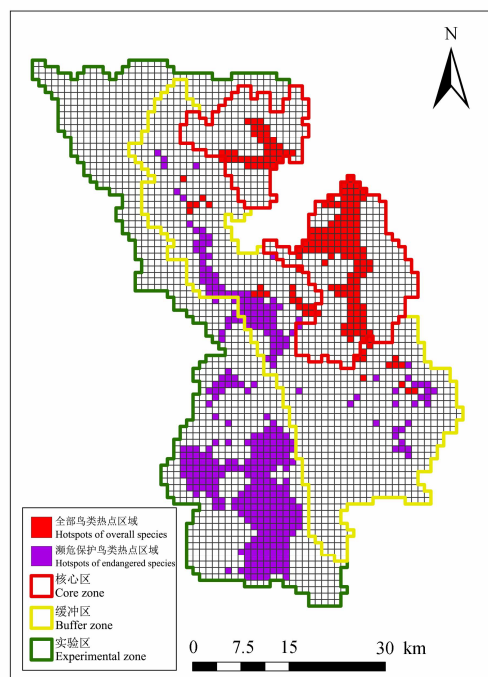


图4 麦秀分区鸟类多样性热点区域与功能区划的对比
Fig. 4 Comparison between hotspots of bird diversity and function zoning in the Maixiu Area

缓冲区内,而有69.70%被划入实验区内,仅有0.27%落在核心区中,说明当前的保护区功能区划并未充分考虑鸟类因素,可能不利于濒危鸟类的保护。濒危保护鸟类热点区域所在的西南部亚高山草甸环境除了对鸟类具有重要意义外,亦是兔狲(*Otocolobus manul*)、猞猁(*Lynx lynx*)、雪豹(*Uncia uncia*)等保护物种的主要栖息地,具有较高的保护价值,建议将其纳入核心区进行保护管理。该结果与前人基于不可替代性的三江源自然保护区功能区划中提出的核心区调整范围大致相符(曲艺等, 2011),对完善整个保护区功能区划具有积极意义,同时亦是对现有功能分区方法体系的一个重要补充。

对物种多样性格局及热点区域进行评估与识别,进而确定出优先保护区域,是生物多样性保护规划的重要途径。然而,在目前大尺度的多样性格局研究中,物种的分布信息绝大多数以行政区划作为记录单位(张有瑜等, 2008; 刘澈等, 2014; 张殷波等, 2014),这假设了物种在空间上是均匀分布的,因而在一些环境异质性强的区域(如山地、生境过渡带等)中难以适用。尤其在保护区等小范围尺度下,物种分布数据的可获得性与准确性是限制生物多

样性评估和保护工作进行的重要因素。因此, 本文以野外调查数据为基础, 利用鸟类与生境类型及海拔的关联特征对鸟类丰富度的空间格局进行预测, 并通过空间自相关分析识别出多样性热点区域。相对于单纯的行政区划分布数据叠加该方法考虑了生境条件对物种分布的限制, 提高了物种分布格局的精度(张殷波等, 2014), 结果能为生物多样性保护规划提供直观、可靠的参考。本文的研究亦存在一些不足, 文中鸟类与环境的关系是基于实地观测, 其准确性取决于调查的强度与次数, 但在自然环境复杂多样的高原地区, 由于人力、物力的限制, 短时间内掌握其详细物种信息的难度较大; 本文研究数据来自一年的野外调查, 样线布设只选择在具代表性的区域, 结果在广度与深度上可能具有一定的局限性, 给预测的准确性带来一定影响。此外, 物种生境选择是一个复杂的过程, 除生境类型与海拔外, 其他如人为干扰、生境结构等因素都可能会对物种的分布造成影响。因此, 在后续的研究中需要建立长期而稳定的监测机制并对环境因素的选择作更细致的考虑, 才能进一步提高物种分布预测的精度。

致谢: 感谢三江源麦秀保护分区管理局仁青多杰局长、周华卿副局长、樊国有主任等对本研究的大力支持, 同时感谢李晶晶、曹宏芬在野外调查中给予的帮助。

参考文献

- Acharya BK, Sanders NJ, Vijayan L, Chettri B (2011) Elevational gradients in bird diversity in the Eastern Himalaya: an evaluation of distribution patterns and their underlying mechanisms. *PLoS ONE*, 6, e29097.
- Behera MD, Roy PS (2010) Assessment and validation of biological richness at landscape level in part of the Himalayas and Indo-Burma hotspots using geospatial modeling approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38, 415–429.
- Bonn A, Rodrigues ASL, Gaston KJ (2002) Threatened and endemic species: are they good indicators of patterns of biodiversity on a national scale? *Ecology Letters*, 5, 733–741.
- Cao L, Liu F, Zhang Y, Deng Y, Chen S, Zhang ZC, Zhou TC (2015) Morbidity hotspots and outliers analysis of mumps in Shaanxi Province (2009–2014). *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 26(5), 18–21. (in Chinese with English abstract) [曹磊, 刘峰, 张义, 邓勇, 陈飒, 张志成, 周体操 (2015) 陕西省2009–2014年流行性腮腺炎发病热点及异常点分析. *公共卫生与预防医学*, 26(5), 18–21.]
- Chen XQ, Gou XJ (2002) *Ecological Environment of Sanjiangyuan Nature Reserve*. Qinghai People's Publishing House, Xining. (in Chinese) [陈孝全, 苟新京 (2002) 三江源自然保护区生态环境. 青海人民出版社, 西宁.]
- Cheng SL, Mao YX, Yuan RB (2014) Jiangxi Wuyishan-research on the diversity of forest breeding birds in the northwest slope of Huanggangshan. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6963–6974. (in Chinese with English abstract) [程松林, 毛夷仙, 袁荣斌 (2014) 江西武夷山-黄岗山西北坡森林繁殖鸟类多样性调查. *生态学报*, 34, 6963–6974.]
- Colwell RK, Rahbek C, Gotelli NJ (2004) The mid-domain effect and species richness patterns: what have we learned so far? *The American Naturalist*, 163, E1–E23.
- Costa GC, Nogueira C, Machado RB, Coil GR (2010) Sampling bias and the use of ecological niche modeling in conservation planning: a field evaluation in a biodiversity hotspot. *Biodiversity and Conservation*, 19, 883–899.
- Du T, Xie XJ, Liang HY, Huang A, Han QF (2014) County economy comprehensive evaluation and spatial analysis in Chongqing City based on entropy weight-TOPSIS and GIS. *Economic Geography*, 34(6), 40–47. (in Chinese with English abstract) [杜挺, 谢贤健, 梁海艳, 黄安, 韩全芳 (2014) 基于熵权TOPSIS和GIS的重庆市县域经济综合评价及空间分析. *经济地理*, 34(6), 40–47.]
- Fu CZ, Hua X, Li J, Chang Z, Pu ZC, Chen JK (2006) Elevational patterns of frog species richness and endemic richness in the Hengduan Mountains, China: geometric constraints, area and climate effects. *Ecography*, 29, 919–927.
- Grenyer R, Orme CDL, Jackson SF, Thomas GH, Davies RG, Davies TJ, Jones KE, Olson VA, Ridgely RS, Rasmussen PC, Ding TS, Bennett PM, Blackburn TM, Gaston KJ, Gittleman JL, Owens IPF (2006) Global distribution and conservation of rare and threatened vertebrates. *Nature*, 444, 93–96.
- Hou JH, Gao BJ, Dong JX, Gao LJ, Li LH, Fang C (2008) Avian community diversity of the forest-steppe ecotone in summer. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 1296–1306. (in Chinese with English abstract) [侯建华, 高宝嘉, 董建新, 高立杰, 李兰会, 房川 (2008) 森林-草原交错带夏季鸟类群落多样性特征. *生态学报*, 28, 1296–1306.]
- Hu MX (2010) Applications of GIS-based accessibility and spatial autocorrelation analysis in the green space system planning—a case study of Jiangyin. *Chinese Landscape Architecture*, (9), 20–24. (in Chinese with English abstract) [胡明星 (2010) 基于 GIS 的可达性和空间自相关分析在江阴绿地系统规划中的应用. *中国园林*, (9), 20–24.]
- Huyan JQ, Xiao J, Yu BW, Xu WH (2014) Research progress in function zoning of nature reserves in China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6391–6396. (in Chinese with English abstract) [呼延俊奇, 肖静, 于博威, 徐卫华 (2014) 我国自然保护区功能分区研究进展. *生态学报*, 34, 6391–6396.]

- Lee PF, Ding TS, Hsu FH, Geng S (2004) Breeding bird species richness in Taiwan: distribution on gradients of elevation, primary productivity and urbanization. *Journal of Biogeography*, 31, 307–314.
- Li DQ, Song YL (2000) Review on hot spot and GAP analysis. *Chinese Biodiversity*, 8, 208–214. (in Chinese with English abstract) [李迪强, 宋延龄 (2000) 热点地区与GAP分析研究进展. 生物多样性, 8, 208–214.]
- Li XW, Zheng Y, Zhao ZK, Li C (2007) The GAP analysis of wetland conservation and its conservation network building in Central Yangtze Ecoregion. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 4979–4989. (in Chinese with English abstract) [李晓文, 郑钰, 赵振坤, 黎聪 (2007) 长江中游生态区湿地保护空缺分析及其保护网络构建. 生态学报, 27, 4979–4989.]
- Li ZQ, Ouyang ZY, Zeng HQ (2010) Assessment methods for territorial biodiversity hotspot based on species richness at broad scale. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 1586–1593. (in Chinese with English abstract) [李智琦, 欧阳志云, 曾慧卿 (2010) 基于物种的大尺度生物多样性热点研究方法. 生态学报, 30, 1586–1593.]
- Liu C, Zheng CY, Zhang T, Zeng FX, Wang YR (2014) Geographic patterns of avian species richness in China and their environmental factors. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50, 429–438. (in Chinese with English abstract) [刘澈, 郑成洋, 张腾, 曾发旭, 王逸然 (2014) 中国鸟类物种丰富度的地理格局及其与环境因子的关系. 北京大学学报(自然科学版), 50, 429–438.]
- Liu JP, Lü XG, Yin SB (2005) GAP analysis: a geographic approach to protect biological diversity. *Progress in Geography*, 24, 41–51. (in Chinese with English abstract) [刘吉平, 吕宪国, 殷书柏 (2005) GAP 分析: 保护生物多样性的地理学方法. 地理科学进展, 24, 41–51.]
- Liu JP, Lü XG (2011) Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 5894–5902. (in Chinese with English abstract) [刘吉平, 吕宪国 (2011) 三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护. 生态学报, 31, 5894–5902.]
- Lombard AT (1995) The problems with multi-species conservation: do hotspots, ideal reserves and existing reserves coincide? *South African Journal of Zoology*, 30, 145–163.
- Luan XF, Huang WN, Wang XL, Liu MC, Liu SR, Wu B, Li DQ (2009) Identification of hotspots and gaps for biodiversity conservation in Northeast China based on a systematic conservation planning methodology. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 144–150. (in Chinese with English abstract) [栾晓峰, 黄维妮, 王秀磊, 刘敏超, 刘世荣, 吴波, 李迪强 (2009) 基于系统保护规划方法东北生物多样性热点地区和保护空缺分析. 生态学报, 29, 144–150.]
- Luo ZH, Wei SC, Zhang W, Zhao M, Wu H (2015) Amphibian biodiversity congruence and conservation priorities in China: Integrating species richness, endemism, and threat patterns. *Biological Conservation*, 191, 650–658.
- Ma KP, Liu YM (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (part 2). *Chinese Biodiversity*, 2, 231–239. (in Chinese) [马克平, 刘玉明 (1994) 生物群落多样性的测度方法. I. α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 2, 231–239.]
- Ma KP, Liu CR, Liu YM (1995) Measurement of biotic community diversity. II. β diversity. *Chinese Biodiversity*, 3, 38–43. (in Chinese) [马克平, 刘灿然, 刘玉明 (1995) 生物群落多样性的测度方法. II. β 多样性的测度方法. 生物多样性, 3, 38–43.]
- Ma Q, Su HL, Li DQ (2003) Investigation of avifauna distribution in the Water Origin of Three Rivers Nature Reserve. *Journal of Beijing Forestry University*, 25(5), 51–54. (in Chinese with English abstract) [马强, 苏化龙, 李迪强 (2003) 青海三江源自然保护区鸟类分布状况初步研究. 北京林业大学学报, 25(5), 51–54.]
- MacArthur RH, MacArthur JW (1961) On bird species diversity. *Ecology*, 42, 594–598.
- Myers N (1988) Threatened biotas: “hotspots” in tropical forests. *The Environmentalist*, 8, 187–208.
- Orme CDL, Davies RG, Burgess M, Eigenbrod F, Pickup N, Olson VA, Webster AJ, Ding TS, Rasmussen PC, Ridgely RS, Stattersfield AJ, Bennett PM, Blackburn TM, Gaston KJ, Owen IPF (2005) Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat. *Nature*, 436, 1016–1019.
- Padoa-Schioppa E, Baietto M, Massa R, Bottoni L (2006) Bird communities as bioindicators: the focal species concept in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 6, 83–93.
- Qu Y, Wang XL, Luan XF, Li DQ (2011) Irreplaceability-based function zoning of nature reserves in the Three Rivers Headwater Region of Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 3609–3620. (in Chinese with English abstract) [曲艺, 王秀磊, 栾晓峰, 李迪强 (2011) 基于不可替代性的青海省三江源地区保护区功能区划研究. 生态学报, 31, 3609–3620.]
- Rahbek C (2005) The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*, 8, 224–239.
- Reddy CS, Jha CS, Dadhwal VK (2016) Assessment and monitoring of long-term forest cover changes (1920–2013) in Western Ghats biodiversity hotspot. *Journal of Earth System Science*, 125, 103–114.
- Reid WV (1998) Biodiversity hotspots. *Trends in Ecology & Evolution*, 13, 275–280.
- Tang ZY, Fang JY (2004) A review on the elevational patterns of plant species diversity. *Biodiversity Science*, 12, 20–28. (in Chinese with English abstract) [唐志尧, 方精云 (2004) 植物物种多样性的垂直分布格局. 生物多样性, 12, 20–28.]
- Wan BT, Xu HG, Ding H, Liu ZL, Wang J (2007) Methodology of comprehensive biodiversity assessment. *Biodiversity Science*, 15, 97–106. (in Chinese with English abstract) [万本太, 徐海根, 丁晖, 刘志磊, 王捷 (2007) 生物多样性

- 综合评价方法研究. 生物多样性, 15, 97–106.]
- Williams SE, Shoo LP, Henriod R, Pearson RG (2010) Elevational gradients in species abundance, assemblage structure and energy use of rainforest birds in the Australian wet tropics bioregion. *Austral Ecology*, 35, 650–664.
- Wilson KA, Underwood EC, Morrison SA, Klausmeyer KR, Murdoch WW, Reyers B, Wardell-Johnson G, Marquet PA, Rundel PW, McBride MF, Pressey RL, Bode M, Hoekstra JM, Andelman S, Looker M, Rondinini C, Kareiva P, Shaw MR, Possingham HP (2007) Conserving biodiversity efficiently: what to do, where, and when. *PLoS Biology*, 5, 1850–1861.
- Wu TY, Walther BA, Chen YH, Lin RS, Lee PF (2013) Hot-spot analysis of Taiwanese breeding birds to determine gaps in the protected area network. *Zoological Studies*, 52, 29.
- Wu YJ, Colwell RK, Rahbek C, Zhang CL, Quan Q, Wang CK, Lei FM (2013) Explaining the species richness of birds along a subtropical elevational gradient in the Hengduan Mountains. *Journal of Biogeography*, 40, 2310–2323.
- Xiao HY, Zhao J, Jiang F, Zeng H (2006) GAP analysis and regional biodiversity conservation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42, 153–158. (in Chinese with English abstract) [肖海燕, 赵军, 蒋峰, 曾辉 (2006) GAP分析与区域生物多样性保护. 北京大学学报(自然科学版), 42, 153–158.]
- Xu P, Wang YK, Yang JF, Peng Y (2013) Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 718–725. (in Chinese with English abstract) [徐佩, 王玉宽, 杨金凤, 彭怡 (2013) 汶川地震灾区生物多样性热点地区分析. 生态学报, 33, 718–725.]
- Zhang SL, Zhang K (2007) Contrast study on Moran and Getis-Ord indexes of local spatial autocorrelation indices. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27, 31–34. (in Chinese with English abstract) [张松林, 张昆 (2007) 空间自相关局部指标Moran指数和G系数研究. 大地测量与地球动力学, 27, 31–34.]
- Zhang Y, Lei KM, Zhang YK, Xiao CL, Yang YH, Sun HG, Li SJ (2012) Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 4228–4235. (in Chinese with English abstract) [张跃, 雷开明, 张语克, 肖长林, 杨玉花, 孙鸿鸥, 李淑君 (2012) 植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响: 以九寨沟自然保护区为例. 生态学报, 32, 4228–4235.]
- Zhang YB, Guo LL, Wang W, Tian Y, Li JS (2014) Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2109–2117. (in Chinese with English abstract) [张殷波, 郭柳琳, 王伟, 田瑜, 李俊生 (2014) 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区. 生态学报, 34, 2109–2117.]
- Zhang YY, Zhou LZ, Wang QS, Wang XJ, Xing YJ (2008) Distribution pattern and hotspot analysis of breeding birds in Anhui Province. *Biodiversity Science*, 16, 305–312. (in Chinese with English abstract) [张有瑜, 周立志, 王岐山, 王新建, 邢雅俊 (2008) 安徽省繁殖鸟类分布格局和热点区分析. 生物多样性, 16, 305–312.]
- Zhou HQ, Fan GY (2011) Comprehensive evaluation of tourism resources in Maixiu national forest park reserve in Qinghai. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39, 4807–4809. (in Chinese with English abstract) [周华卿, 樊国有 (2011) 青海麦秀国家森林公园旅游资源综合评价. 安徽农业科学, 39, 4807–4809.]

(责任编辑: 王勇 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类名录

Appendix 1 Bird list in Maixiu Area of Sanjiangyuan Nature Reserve

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016252-1.pdf>

梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25 (3): 294–303.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016252

附录1 三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类名录
Appendix 1 Bird list in Maixiu Area of Sanjiangyuan Nature Reserve

国家保护级别, CITES 附录				
物种名	录	分布生境	分布海拔范围	出现频次
Species name	Endangered and protected species of China, CITES	Distribution habitat	Distribution altitude (m)	Occurrence frequency
appendices				
I 鸛形目 CICONIIFORMES				
(一)鹭科 Ardeidae				
1.池鹭 <i>Ardeola bacchus</i>		W	2800–3200	+
II 雁形目 ANSERIFORMES				
(二)鸭科 Anatidae				
2.斑头雁 <i>Anser indicus</i>		M, W	3600–3800	++
3.赤麻鸭 <i>Tadorna ferruginea</i>		M, W	3400–4000	++
III 隼形目 FALCONIFORME				
(三)鹰科 Accipitrida				
4.黑耳鸢 <i>Milvus lineatus</i>	二级, 附录 II	F, M	2800–4200	++
5.胡兀鹫 <i>Gypaetus barbatus</i>	一级, 附录 II	M	3600–3800	+
6.高山兀鹫 <i>Gyps himalayensis</i>	二级, 附录 II	F, M	2800–3800	++
7.秃鹫 <i>Aegypius monachus</i>	二级, 附录 II	M	3400–4428	++
8.普通鵟 <i>Buteo buteo</i>	二级, 附录 II	F	2800–3400	+
9.大鵟 <i>Buteo hemilasius</i>	二级, 附录 II	F, B, M	2800–4200	++
10.草原雕 <i>Aquila nipalensis</i>	二级, 附录 II	M	3600–3800	+
(四)隼科 Falconidae				
11.红隼 <i>Falco tinnunculus</i>	二级, 附录 II	F	2800–3200	+
12.燕隼 <i>Falco subbuteo</i>	二级, 附录 II	F	3600–3800	+
IV 鸡形目 GALLIFORMES				
(五)雉科 Phasianida				
13.藏雪鸡 <i>Tetraogallus tibetanus</i>	二级, 附录 I	F, B	3400–3600	+
14.高原山鹑 <i>Perdix hodgsoniae</i>		B, M	3200–3800	+
15.蓝马鸡 <i>Crossoptilon auritum</i>	二级	F, B	2800–3400	++
16.环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i>		F, B	2800–3400	++
V 鸽形目 COLUMBIFORME				
(六)鸠鸽科 Columbidae				
17.岩鸽 <i>Columba rupestris</i>		F, M, W	2800–3800	+
VI 鹃形目 CUCULIFORMES				
(七)杜鹃科 Cuculidae				
18.大杜鹃 <i>Cuculus canorus</i>		F	3200–3400	+
VII 鸱形目 STRIGIFORMES				
(八)鸱鸃科 Strigidae				
19.纵纹腹小鸱 <i>Athene noctua</i>	二级, 附录 I	M	3400–3800	+
VIII 雨燕目 APODIFORMES				
(九)雨燕科 Apodidae				
20.白腰雨燕 <i>Apus pacificus</i>		B, W	2800–3400	++

梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25 (3): 294–303.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016252>

IX戴胜目 UPUPIFORMES

(十)戴胜科 Upupidae

21.戴胜 *Upupa epops* M 3200–3800 ++

X雀形目 PASSERIFORMES

(十一)百灵科 Alaudida

22.小云雀 *Alauda gulgula* M 3200–4428 ++
23.角百灵 *Eremophila alpestris* M, W 3400–4428 +++

(十二)燕科 Hirundinidae

24.岩燕 *Ptyonoprogne rupestris* W 2800–3200 +
25.家燕 *Hirundo rustica* M 2800–3200 +

(十三)鹑鸽科 Mtacillidae

26.白鹑鸽 *Motacilla alba* F, B, M, W 2800–3800 ++
27.灰鹑鸽 *Motacilla cinerea* M 3800–4000 +
28.布氏鹑 *Anthus godlewskii* M 3600–4000 ++
29.树鹑 *Anthus hodgsoni* F 3200–3400 +
30.粉红胸鹑 *Anthus roseatus* M 4000–4200 +

(十四)伯劳科 Laniidae

31.灰背伯劳 *Lanius tephronotus* M 3200–3400 +

(十五)鸦科 Corvidae

32.灰喜鹊 *Cyanopica cyana* M, W 3200–3400 +
33.喜鹊 *Pica pica* F, B, M, W 2800–3800 ++
34.褐背拟地鸦 *Pseudopodoces humilis* M, W 2800–4428 +++
35.红嘴山鸦 *Pyrrhocorax pyrrhocorax* F, B, M, W 2800–3800 ++
36.黄嘴山鸦 *Pyrrhocorax graculus* B 3200–3400 +
37.达乌里寒鸦 *Corvus dauuricus* M 3200–3400 +
38.小嘴乌鸦 *Corvus corone* F, B, M, W 2800–3800 +++
39.大嘴乌鸦 *Corvus macrorhynchos* F, M 2800–3800 +
40.渡鸦 *Corvus corax* M 3400–4000 ++

(十六)河乌科 Cinclidae

41.河乌 *Cinclus cinclus* W 2800–3800 +
42.褐河乌 *Cinclus pallasi* W 2800–3200 +

(十七)鹇鹑科 Troglodytidae

43.鹇鹑 *Troglodytes troglodytes* F 3200–3400 +

(十八)岩鹑科 Prunellidae

44.领岩鹑 *Prunella collaris* F 2800–3400 +
45.鹇岩鹑 *Prunella rubeculoides* F, B, M 3200–4000 ++
46.棕胸岩鹑 *Prunella strophiata* F, B 2800–3600 ++

(十九)鹀科 Turdidae

47.红喉歌鹀 *Luscinia calliope* B 3200–3400 +
48.红胁蓝尾鹀 *Tarsiger cyanurus* F, B 2800–3200 +
49.赭红尾鹀 *Phoenicurus ochruros* F, B, M, W 2800–4200 ++
50.黑喉红尾鹀 *Phoenicurus hodgsoni* F, M 2800–3200 +
51.白喉红尾鹀 *Phoenicurus schisticeps* F, B, M, W 2800–4000 +++
52.北红尾鹀 *Phoenicurus aureus* F, B 2800–3600 ++

梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25 (3): 294–303.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016252>

53. 红腹红尾鸲 <i>Phoenicurus erythrogaster</i>	M	4000–4428	+
54. 蓝额红尾鸲 <i>Phoenicurus frontalis</i>	F, B	3200–3400	+
55. 红尾水鸲 <i>Rhyacornis fuliginosus</i>	M, W	3200–3400	+
56. 白顶溪鸲 <i>Chaimarrornis leucocephalus</i>	F, B, M, W	2800–3600	++
57. 棕背黑头鸲 <i>Turdus kessleri</i>	F, M	2800–3400	+
(二十)画眉科 Timaliidae			
58. 山噪鹛 <i>Garrulax davidi</i>	F, B	2800–3600	++
59. 大噪鹛 <i>Garrulax maximus</i>	B	2800–3200	+
60. 橙翅噪鹛 <i>Garrulax elliotii</i>	F, B	2800–3600	++
(二十一)鹎科 Muscicapidae			
61. 白眉姬鹎 <i>Ficedula zanthopygia</i>	B	2800–3200	+
62. 锈胸蓝姬鹎 <i>Ficedula hodgsonii</i>	F, B	2800–3400	++
(二十二)莺科 Sylviidae			
63. 凤头雀莺 <i>leptopoecile elegans</i>	F	2800–3200	+
64. 黄腹柳莺 <i>Phylloscopus affinis</i>	F, B	2800–3800	++
65. 橙斑翅柳莺 <i>Phylloscopus pulcher</i>	F	3200–3400	+
66. 淡黄腰柳莺 <i>Phylloscopus chloronotus</i>	B	2800–3200	+
67. 黄腰柳莺 <i>Phylloscopus proregulus</i>	F, B, M	2800–3400	+
68. 极北柳莺 <i>Phylloscopus borealis</i>	F, B, M	2800–3400	++
69. 暗绿柳莺 <i>Phylloscopus trochiloides</i>	F, B	2800–3600	++
(二十三)戴菊科 Regulidae			
70. 戴菊 <i>Regulus regulus</i>	F	2800–3200	+
(二十四)山雀科 Paridae			
71. 褐头山雀 <i>parus songarus</i>	F, B	2800–3600	++
72. 白眉山雀 <i>Parus superciliosus</i>	F, B, M	3200–3800	+
73. 黑冠山雀 <i>Parus rubidiventris</i>	F	2800–3600	++
74. 褐冠山雀 <i>Parus dichrous</i>	F, B	2800–3600	+
(二十五)旋壁雀科 Tichodromadidae			
75. 红翅旋壁雀 <i>Tichodroma muraria</i>	B, W	2800–3800	+
(二十六)旋木雀科 Certhidae			
76. 旋木雀 <i>Certhia familiaris</i>	F	3400–3600	+
(二十七)雀科 Passeridae			
77. 麻雀 <i>Passer montanus</i>	B, M	3200–4000	+++
78. 褐翅雪雀 <i>Montifringilla adamsi</i>	M	3400–4428	+
79. 白腰雪雀 <i>Onychostruthus taczanowskii</i>	M, W	3400–4428	+++
80. 棕颈雪雀 <i>Pyrgilauda ruficollis</i>	M, W	3400–4428	+++
(二十八)燕雀科 Fringillidae			
81. 高山岭雀 <i>Leucosticte brandti</i>	M	3600–3800	+
82. 红眉朱雀 <i>Carpodacus pulcherrimus</i>	F, B	2800–4000	+
83. 白眉朱雀 <i>Carpodacus thura</i>	F, B	2800–3600	++

梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹. 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 2017, 25 (3): 294–303.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016252>

84.拟大朱雀 <i>Carpodacus rubicilloides</i>	B	3600–3800	+
85.黄嘴朱顶雀 <i>Carduelis flavirostris</i>	M	2800–4000	++
86.白斑翅拟蜡嘴雀 <i>Mycerobas carnipes</i>	F, B	2800–3600	++
(二十九)鹀科 Emberizidae			
87.白头鹀 <i>Emberiza leucocephalos</i>	B, M	3200–3600	+
88.灰眉岩鹀 <i>Emberiza godlewskii</i>	F, B	2800–3600	++
89.小鹀 <i>Emberiza pusilla</i>	B	2800–3200	+

分布生境: F: 森林; B: 灌丛; M: 草原、草甸; W: 湿地, 出现频次: + 1–9; ++ 10–49; +++ >50。

Distribution habitat: F: Forest; B: Bush; M: Meadow; W: Wetland, Occurrence frequency: + 1–9; ++ 10–49; +++ >50.

•研究报告•

上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性

靳亚丽¹ 李必成¹ 耿 龙² 卜 云^{1*}

1 (上海科技馆, 上海自然博物馆, 自然史研究中心, 上海 200041)

2 (上海海洋管理事务中心, 上海 200050)

摘要: 大金山岛属上海市金山三岛海洋生态保护区, 岛上土壤未受到人为活动的污染。为了解不同自然植被类型下土壤动物群落结构组成及其生态分布, 于2015年秋季在大金山岛竹林、乔木林和灌木林的南、北坡中分别进行土壤动物采样。结果显示: 6个样地共捕获土壤动物12,769只, 隶属于28个类群, 优势类群为蜱螨亚纲和弹尾纲, 分别占总捕获量的70.15%和19.27%; 常见类群有原尾纲、半翅目、膜翅目和线蚓科, 占总捕获量的7.06%。北坡和南坡优势类群均为蜱螨亚纲(74.26%、65.32%)和弹尾纲(16.52%、22.49%), 但常见类群和稀有类群存在一定差异。不同植被类型土壤动物的群落结构组成存在一定差异, 但无论是北坡还是南坡密度均为灌木林 > 乔木林 > 竹林, 类群数变化为灌木林 > 竹林 > 乔木林。无论北坡还是南坡, 不同植被类型下土壤动物群落生态指数各不相同, Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数均为灌木林 > 乔木林 > 竹林。大金山岛灌木林中土壤动物群落多样性高于乔木林和竹林, 很可能与灌木林中较为适宜的微环境有关。

关键词: 岛屿; 自然植被; 群落密度; 坡度

Soil fauna community in different natural vegetation types of Dajinshan Island, Shanghai

Yali Jin¹, Bicheng Li¹, Long Geng², Yun Bu^{1*}

1 Natural History Research Center, Shanghai Natural History Museum, Shanghai Science & Technology Museum, Shanghai 200041

2 Shanghai Administration Center for Ocean Affairs, Shanghai 200050

Abstract: Dajinshan Island is part of Jinshan Three-Islands Marine Natural Reserve. Soil on the island has not been polluted by human activities and it is therefore an ideal place to study island ecosystem diversity. To understand the composition and ecological distribution of soil fauna communities in different natural forest vegetation types on Dajinshan Island, the soil fauna communities in three natural forests including bamboo forest, arboreal forest, and shrubbery were investigated during autumn 2015. Each forest included both north slope and south slope regions. A total of 12,769 individuals of soil fauna belonging to 28 groups were collected. The dominant groups were Acari and Collembola, accounting for 70.15% and 19.27%, respectively. The common groups were Protura, Hemiptera, Hymenoptera and Enchytraeidae, and they accounted for 7.06% of the total in terms of individual numbers. The dominant groups were Acari (74.26%, 65.32%) and Collembola (16.52%, 22.49%) in both north slope and south slope regions, but differed in common groups and rare groups. The soil fauna communities were different in the three natural forests. In both north and south slope region, the density of soil fauna followed the order of: shrubbery > arboreal forest > bamboo forest, but the number of groups of soil fauna followed the order of: shrubbery > bamboo forest > arboreal forest. Different ecological indexes of soil fauna communities in the three natural forests were different. Shannon-Wiener index, Pielou index, and Simpson index followed the following order: shrubbery > arboreal forest > bamboo forest in both north and south slope regions. The Shannon-Wiener index was significantly different in the three natural forests. The higher soil fauna diversity in shrubbery was probably induced by the

收稿日期: 2016-10-21; 接受日期: 2016-12-31

基金项目: 上海海洋管理事务中心2015年大金山岛生态调查项目、上海市自然科学基金资助项目(17ZR1418700)、上海科技馆引进高层次人才科研启动项目和上海科技馆种子课题

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: buy@sstm.org.cn

favorable microenvironment.

Key words: Island; natural vegetation; community density; slope

土壤动物是重要的分解者,在森林生态系统的物质循环和能量流动过程中有着不可替代的作用(Wolters, 2001; Decaëns et al, 2006)。近年来,国内外学者对于森林土壤动物开展了大量研究,结果表明,人为干扰(Malmström et al, 2008; 陈小鸟等, 2009a; Čuchta et al, 2012)、海拔(Sadaka & Ponge, 2003; 陈小鸟等, 2009b)、植被(廖崇惠等, 1997; 林英华等, 2005)等对土壤动物群落的动态分布均产生直接或间接的影响。土壤动物与地上植物群落之间有着动态的相互作用(Wardle et al, 2004),已有研究表明,地上植被的演替变化明显影响地下土壤动物群落组成(易兰, 2005)。

岛屿生态系统具有特殊的地理位置和环境特点,其中自然植被的变化对地下土壤动物会有怎样的影响,目前尚未见文献报道。国外对于岛屿土壤动物的研究多集中于系统分类(Sterzynska & Bloger, 2004; Babenko, 2010; Greenslade & Convey, 2011),群落多样性的研究相对较少,仅有Addison等(2003)研究了加拿大温哥华岛沿海温带森林的跳虫群落多样性;Hugo等(2006)研究了亚南极地区的爱德华王子岛上的土壤小型节肢动物,发现该岛与邻近的Marion岛上土壤动物多样性有显著差异;Gudleifsson 和 Bjarnadottir (2008)对冰岛上不同草地中的跳虫群落多样性进行了比较研究。

国内岛屿土壤动物多样性的研究十分匮乏,黄杰灵^①对浙江千岛湖人工形成的16个面积不等的岛屿土壤动物的研究表明,土壤节肢动物类群数随岛屿等级的增大显著增多;刘扬等(2011)发现崇明岛不同土地利用类型中的土壤动物存在明显差异,苗圃和公园中的多样性较高,农田的多样性最低;谢桐音^②对山东滨州贝壳堤岛土壤动物和跳虫群落的生态学研究发现,无植被覆盖的近海区域土壤动物表现出逆层分布的现象,且土壤跳虫丰度随覆被植物多样性的增加而显著增加。

大金山岛是上海市金山三岛海洋生态保护区

中最大的岛屿,其自然植被保护良好,土壤尚未受到人为污染(程芳等, 2013),是开展岛屿生态系统自然植被中土壤动物多样性研究的理想样地。本文通过对大金山岛具有代表性的3种自然植被的土壤动物群落组成进行研究,以期上海及邻近地区自然林地生物多样性的保护以及土壤生态系统评价及修复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大金山岛(30°41'42" N, 121°24'25" E)地处上海金山区附近的杭州湾中,位于中亚热带北缘,是金山三岛海洋生态自然保护区的核心区。大金山岛距金山嘴海岸约6.6 km,东西长约1 km,宽约0.3 km,最高处海拔105.3 m,年平均气温15.8℃,土壤为褐色山地黄壤,降水充沛,四周被水域包围,属海洋性气候,温和湿润,四季分明。岛上植被生长茂盛,是上海地区野生植物资源最丰富的地方,由于受人为干扰少,岛上植被进入自然的次生演替过程(李必成, 2014)。代表性植被类型有:以野桐属(*Mallotus*)、青冈属(*Cyclobalanopsis*)、润楠属(*Machilus*)、樟属(*Cinnamomum*)、朴属(*Celtis*)、花椒属(*Zanthoxylum*)、黄檀属(*Dalbergia*)植物为主的乔木林;以卫矛属(*Euonymus*)、大青属(*Clerodendron*)、算盘子属(*Glochidion*)、桤属(*Eurya*)植物为主的灌木林;以毛竹属(*Phyllostachys*)植物为主的竹林(杨永川等, 2002)。

1.2 采样方法

分别在竹林北(ZL-N)、竹林南(ZL-S)、乔木林北(QML-N)、乔木林南(QML-S)、灌木林北(GML-N)、灌木林南(GML-S)共设置6个样地(图1),每个样地随机设置5个采样点。于2015年秋季,采用土壤定量采样器,在每个样点采集15 cm × 15 cm × 15 cm的土样带回实验室,采用干漏斗法分离土壤动物,土壤动物收集在95%的乙醇溶液中。分离所得的土壤动物采用体视显微镜观察,参考《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英, 1998)和《中国亚热带土壤动物》(尹文英, 1992)进行分类鉴定,并统计数量。

① 黄杰灵 (2012) 千岛湖片段化景观中土壤节肢动物多样性研究. 硕士学位论文, 中国计量学院, 杭州.

② 谢桐音 (2010) 滨州贝壳堤岛土壤动物和跳虫群落生态学定量研究. 硕士学位论文, 山东师范大学, 济南.

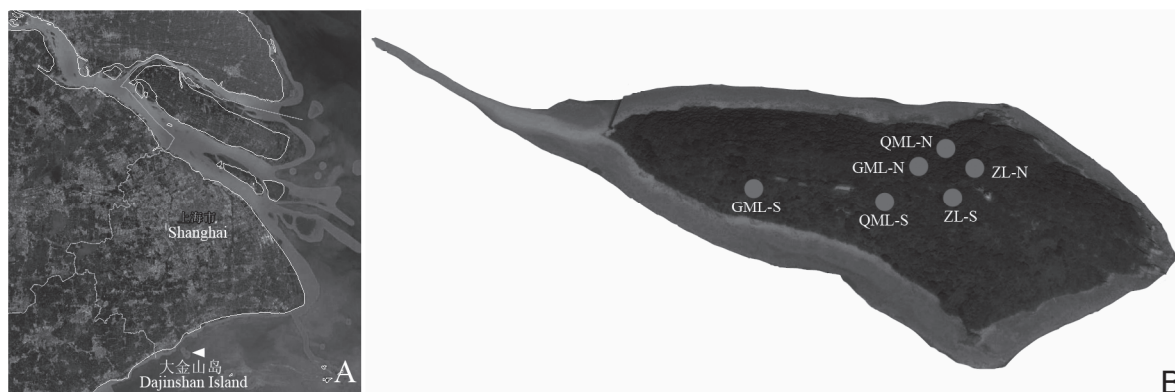


图1 大金山岛的地理位置及采样点设置。ZL: 竹林; QML: 乔木林; GML: 灌木林; N: 北坡; S: 南坡。

Fig. 1 The location of Dajinshan Island and soil fauna sampling sites. ZL, bamboo forest; QML, arboreal forest; GML, shrubbery; N, North slope; S, South slope.

1.3 数据分析

根据以下公式分别计算凋落物中土壤动物群落的多样性指数、均匀度指数、优势度指数和丰富度指数(孙儒泳, 2001)。

(1) Shannon-Wiener 多样性指数 (H'): $H' = -\sum n_i/N \ln(n_i/N)$ 。

(2) Pielou均匀度指数(J_s): $J_s = H'/\ln S$ 。

(3) Simpson优势度指数(C): $C = \sum P_i^2$ 。

(4) Margalef丰富度指数(D): $D = (S - 1) / \ln N$ 。

式中, n_i 为第*i*个类群的个体数; N 为群落中所有类群的总个体数; S 为类群数; $P_i = n_i / N$ 。

我们定义密度 > 10%的为优势类群; 1% ≤ 密度 ≤ 10%的为常见类群; 密度 < 1% 的为稀有类群。

采用Excel 2007进行图表绘制和计算, SPSS 19.0进行方差分析。

2 结果

2.1 土壤动物群落组成及南北坡比较

大金山岛自然植被调查共捕获土壤动物12,769只, 总密度为31,528只/m², 隶属于28个类群。经统计得出: 蜚蠊亚纲、弹尾纲分别占总捕获量的70.15%和19.27%, 为优势类群; 原尾纲、半翅目、膜翅目和线蚓科为常见类群, 合计占总捕获量的7.06%; 双尾纲、直翅目等21个类群为稀有类群, 合计占总捕获量的3.52%。

北坡共捕获土壤动物26类6,901只, 占54.05%, 南坡共捕获24类5,868只, 占45.96%。北坡和南坡优

势类群均为蜚蠊亚纲(74.26%、65.32%)和弹尾纲(16.52%、22.49%), 但常见类群和稀有类群存在一定差异(表1)。北坡的常见类群为原尾纲和线蚓科, 占北坡总数的4.39%, 南坡的常见类群为半翅目、双翅目幼虫和膜翅目, 占南坡总数的8.27%。稀有类群中直翅目和缨翅目只在南坡出现, 啮目、蜈蚣目、后孔寡毛目和腹足纲只在北坡出现。

2.2 各植被类型土壤动物密度比较

不同植被类型中土壤动物密度和群落组成不同(表2), 无论是北坡还是南坡密度均为灌木林 > 乔木林 > 竹林, 但各样地间密度和类群差异不显著($P > 0.05$); 竹林和乔木林优势类群都包括蜚蠊亚纲(60.65%、63.41%)和弹尾纲(28.41%、23.53%), 灌木林优势类群只有蜚蠊亚纲(81.95%); 竹林和乔木林的常见类群也相差不大, 都有原尾纲(2.79%、1.84%)、双翅目幼虫(1.21%、1.34%)和膜翅目(1.18%、1.60%)等, 但灌木林常见类群与竹林、乔木林不同, 多了弹尾纲(9.93%)、半翅目(2.57%)等; 稀有类群组成也存在一定差异, 直翅目只在乔木林出现, 等翅目、啮目、双翅目成虫和腹足纲只在灌木林出现, 蜈蚣目只在竹林出现。三种植被类型下土壤动物类群数为灌木林 > 竹林 > 乔木林。

2.3 土壤动物群落多样性比较

大金山岛不同植被类型下土壤动物群落各多样性指数不同(图2)。无论北坡还是南坡, Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数都是灌木林最高, 乔木林次之, 竹林最低, 且在竹林和乔木林两个类型中都是北坡高于南坡,

表1 大金山岛南坡和北坡土壤动物群落组成和密度(ind./m²)
Table 1 Soil fauna communities and densities (ind./m²) of south slope and north slope of Dajinshan Island

类群 Group	北坡 North slope			南坡 South slope		
	个体数 Individuals	密度 Density (%)	优势度 Dominance	个体数 Individuals	密度 Density (%)	优势度 Dominance
蜱螨亚纲 Acari	5,125	25,309 (74.26)	+++	3,833	18,928 (65.32)	+++
弹尾纲 Collembola	1,140	5,630 (16.52)	+++	1,320	6,519 (22.49)	+++
线虫纲 Nematoda	62	306 (0.90)	+	198	978 (3.37)	++
原尾纲 Protura	147	726 (2.13)	++	42	207 (0.72)	+
线蚓科 Enchytraediae	156	770 (2.26)	++	28	138 (0.48)	+
半翅目 Hemiptera	4	20 (0.06)	+	132	652 (2.25)	++
膜翅目 Hymenoptera	55	272 (0.80)	+	78	385 (1.33)	++
双翅目幼虫 Diptera larvae	48	237 (0.70)	+	77	380 (1.31)	++
综合纲 Symphyla	28	138 (0.41)	+	24	119 (0.41)	+
等足目 Isopoda	15	74 (0.22)	+	36	178 (0.61)	+
少足纲 Pauropoda	27	133 (0.39)	+	17	84 (0.29)	+
倍足纲 Diplopoda	25	123 (0.36)	+	16	79 (0.27)	+
双尾纲 Diplura	17	84 (0.25)	+	15	74 (0.26)	+
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	10	49 (0.14)	+	11	54 (0.19)	+
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	10	49 (0.14)	+	7	35 (0.12)	+
拟蝎目 Pseudoscorpionida	3	15 (0.14)	+	10	49 (0.17)	+
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	7	35 (0.10)	+	5	25 (0.09)	+
蜘蛛目 Araneae	6	30 (0.09)	+	4	20 (0.07)	+
缨翅目 Thysanoptera	0	0		6	30 (0.10)	+
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	5	25 (0.07)	+	1	5 (0.02)	+
等翅目 Isoptera	1	5 (0.01)	+	4	20 (0.07)	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	2	10 (0.03)	+	2	10 (0.03)	+
后孔寡毛目 Oligochaetaopisthopora	4	20 (0.06)	+	0	0	
双翅目成虫 Diptera adult	1	5 (0.01)	+	1	5 (0.02)	+
直翅目 Orthoptera	0	0		1	5 (0.02)	+
啮目 Psocoptera	1	5 (0.01)	+	0	0	
蜈蚣目 Scolopendromorpha	1	5 (0.01)	+	0	0	
腹足纲 Gastropoda	1	5 (0.01)	+	0	0	
总数 Total	6,901	34,079		5,868	28,978	

+++ 优势类群; ++ 常见类群; + 稀有类群。
+++ Dominant groups; ++ Common groups; + Rare groups.

灌木林只有Simpson优势度指数表现为北坡高于南坡。对南坡各样地Shannon-Wiener多样性指数进行比较发现: 灌木林南坡与竹林南坡、乔木林南坡之间存在显著差异($F = 2.56, P < 0.05$)。对各样地Pielou均匀度指数进行方差分析发现: 灌木林南坡显著高于其他样地, 灌木林北坡显著高于竹林南和乔木林南坡($F = 3.08, P < 0.05$)。灌木林不论南北坡Simpson优势度都显著高于其他样地($F = 8.13, P < 0.05$)。竹林北坡与竹林南坡Margalef丰富度存在显

著差异($F = 1.69, P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 土壤动物群落组成与密度

除温湿度外, 人为干扰是影响土壤动物群落结构的主要因素(武海涛等, 2006), 大金山岛为自然演替植被, 受人为干扰程度低, 土壤动物总密度明显比上海市森林中土壤动物密度高(王强等, 2012; 靳士科等, 2016), 类群数量多于上海城市绿地中土壤

表2 大金山岛各植被类型中土壤动物群落组成和密度(ind./m²)
Table 2 Soil fauna communities and densities (ind./m²) under different vegetation types on Dajinshan Island

类群 Group	竹林 Bamboo forest			乔木林 Arboreal forest			灌木林 Shrubbery		
	个体数 Indivi- duals	密度 Density (%)	优势度 Domin- ance	个体数 Indi- viduals	密度 Density (%)	优势度 Domin- ance	个体数 Indi- viduals	密度 Density (%)	优势度 Domin- ance
蜚蠊亚纲 Acari	1,851	13,711 (60.65)	+++	2,929	21,696 (63.41)	+++	4,178	30,948 (81.95)	+++
弹尾纲 Collembola	867	6,422 (28.41)	+++	1,087	8,052 (23.53)	+++	506	3,748 (9.93)	++
线虫纲 Nematoda	33	244 (1.08)	++	169	1,252 (3.66)	++	58	430 (1.14)	++
原尾纲 Protura	85	630 (2.79)	++	85	630 (1.84)	++	19	141 (0.37)	+
线蚓科 Enchytraediae	12	89 (0.39)	+	100	741 (2.16)	++	72	533 (1.41)	++
半翅目 Hemiptera	3	22 (0.10)	+	2	15 (0.04)	+	131	970 (2.57)	++
膜翅目 Hymenoptera	36	267 (1.18)	++	74	548 (1.60)	++	23	170 (0.45)	+
双翅目幼虫 Diptera larvae	37	274 (1.21)	++	62	459 (1.34)	++	26	193 (0.51)	+
综合纲 Symphyla	24	178 (0.79)	+	15	111 (0.32)	+	13	96 (0.26)	+
等足目 Isopoda	15	111 (0.49)	+	20	148 (0.43)	+	16	119 (0.31)	+
少足纲 Pauropoda	33	244 (1.08)	++	5	37 (0.11)	+	6	44 (0.12)	+
倍足纲 Diplopoda	18	133 (0.59)	+	15	111 (0.32)	+	8	59 (0.16)	+
双尾纲 Diplura	2	15 (0.07)	+	23	170 (0.50)	+	7	52 (0.14)	+
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	10	74 (0.33)	+	4	30 (0.09)	+	7	52 (0.14)	+
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	7	52 (0.23)	+	6	44 (0.13)	+	4	30 (0.08)	+
拟蝎目 Pseudoscorpionida	1	7 (0.03)	+	11	81 (0.24)	+	1	7 (0.02)	+
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	7	52 (0.23)	+	4	30 (0.09)	+	1	7 (0.02)	+
蜘蛛目 Araneae	1	7 (0.03)	+	4	30 (0.09)	+	5	37 (0.10)	+
缨翅目 Thysanoptera	2	15 (0.07)	+	2	15 (0.04)	+	2	15 (0.04)	+
鳞翅目幼虫 Lepodoptera lar- vae	2	15 (0.07)	+	0	0		4	30 (0.08)	+
等翅目 Isoptera	0	0		0	0		5	37 (0.10)	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	1	7 (0.03)	+	1	7 (0.02)	+	2	15 (0.04)	+
后孔寡毛目 Oligochaetaopis- thopora	4	30 (0.13)	+	0	0		0	0	
双翅目成虫 Diptera adult	0	0		0	0		2	15 (0.04)	+
直翅目 Orthptera	0	0		1	7 (0.02)	+	0	0	
啮目 Psocoptera	0	0		0	0		1	7 (0.02)	+
蜈蚣目 Scolopendromorpha	1	7 (0.13)	+	0	0		0	0	
腹足纲 Gastropoda	0	0		0	0		1	7 (0.02)	
合计 Total	3,052	22,607 (100)		4,619	34,215 (100)		5,098	37,763 (100)	

+++ 优势类群; ++ 常见类群; + 稀有类群。
+++ Dominant groups; ++ Common groups; + Rare groups.

动物的类群数(高艳等, 2007)。

植物群落结构差异能够对土壤动物群落组成产生影响(Kardol et al, 2010; 李伟等, 2015)。Gladys 等(2007)认为优势植物的凋落物与土壤动物群落组成具有一定的相关性, 丰富的植物群落结构增加了地下土壤的异质性, 进一步影响土壤动物的群落组成。本研究也发现不同植被类型中土壤动物密度、类群数均存在一定程度差异, 且明显表现为植物群落组成越简单的竹林土壤动物密度相对较低, 其次

分别为乔木林和灌木林。

此外, 不同林地凋落物层各自特殊的组成成分差异以及营养物质或次生物质间各自的相互作用, 为土层中土壤动物提供了不同的食物源和栖息小环境, 这也是导致各林地间土壤动物组成差异的主要原因之一(易兰等, 2005; 靳亚丽等, 2011)。

3.2 各林地土壤动物多样性

森林的次生演替对土壤动物群落结构产生影响, 大金山岛三种林型由于自然的次生演替形成

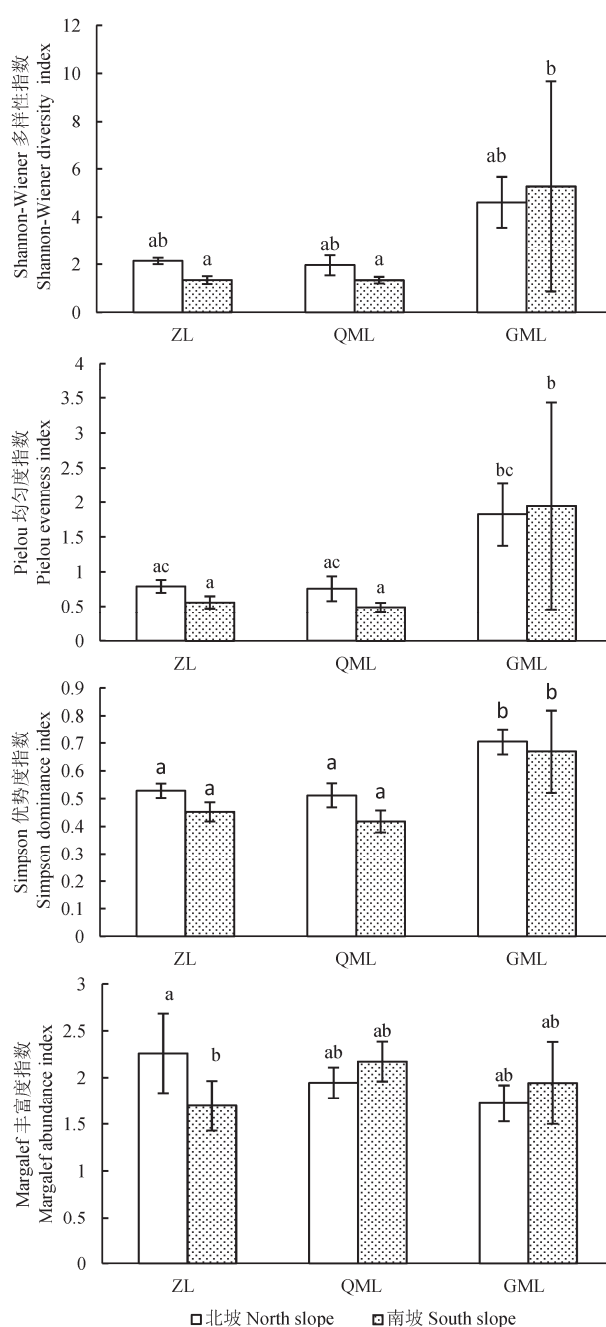


图2 大金山岛不同植被类型下土壤动物群落生态指数(平均值 ± 标准差)。字母不同表示差异显著($P = 0.05$)。ZL: 竹林; QML: 乔木林; GML: 灌木林。

Fig. 2 Ecological indices of soil fauna communities of different vegetation types in Dajinshan Island (Mean ± SD). Different letters show the significant difference at $P = 0.05$ level. ZL, bamboo forest; QML, arboreal forest; GML, shrubbery.

(达良俊等, 2004), 演替过程中植物群落的更替也是导致土壤动物多样性差异的原因之一(易兰, 2005)。本研究发现竹林土壤动物多样性均低于乔木林和

灌木林, 苏永春等(2004)的研究结果也表明竹林土壤动物丰度低, 竹林单一的植物群落可能是导致这一结果的主要原因。北坡接受阳光照射较南坡少, 土壤湿度相对较高, 因而除灌木林外其他林型土壤动物群落的Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数都表现为北坡高于南坡。灌木林相对于乔木林更接近地被层, 受外界环境干扰较小, 容易在下层形成温暖潮湿的小气候而更利于土壤动物的聚集, 因此灌木林土壤动物多样性指数最高, 均匀度指数和优势度指数也显著高于竹林和乔木林(图2)。而灌木林南坡相对位置较低, 靠近海域, 受海洋性气候影响而形成的土壤异质性可能是导致该样地均匀度显著高于其他样地的原因。

此外, 本研究中竹林、乔木林和灌木林的位置不同, 难以避免空间异质性造成的影响, 且南北坡的差异是基于3种不同林型得出的结论, 而不同林地类型本身也存在差异, 因此本研究只能说明该岛屿土壤动物群落多样性的整体状况, 对于各林型和坡向造成的土壤动物群落差异还有待进一步研究和探讨。

致谢: 本项目实施过程中受到上海市海洋局、上海市金山区海洋海塘管理所等单位的大力支持, 同时感谢杨斯琦、杨刚、高如峰、王万胜、杜运才、巢移等同志对本项目野外采样等工作的倾力协助。

参考文献

- Addison JA, Trofymow JA, Marshall VG (2003) Abundance, species diversity, and community structure of Collembola in successional coastal temperate forests on Vancouver Island, Canada. *Applied Soil Ecology*, 24, 233–246.
- Babenko AB (2010) The springtail (Hexapoda, Collembola) fauna of Wrangel Island. *Entomological Review*, 90, 571–584.
- Chen XN, You WH, Wang XY, Yi L (2009a) Community traits of soil animal under different ground cover treatments in evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 17, 160–167. (in Chinese with English abstract) [陈小鸟, 由文辉, 王向阳, 易兰 (2009a) 常绿阔叶林不同砍伐处理下土壤动物的群落特征. *生物多样性*, 17, 160–167.]
- Chen XN, You WH, Yi L (2009b) Community structure of soil fauna along an altitudinal gradient in Taibai Mountain of Tiantong Region, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 270–276. (in Chinese with English abstract) [陈小鸟, 由文辉, 易兰 (2009b) 浙江天童太白山不同海拔土壤动物的群落结构. *生态学杂志*, 28, 270–276.]

- Cheng F, Cheng JP, Sang HC, Yu JL, Xi L, Pi SS (2013) Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan Island. *Environmental Science*, 34, 1062–1066. (in Chinese with English abstract) [程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (2013) 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析. *环境科学*, 34, 1062–1066.]
- Čuchta P, Miklisová D, Kováč L (2012) A three-year study of soil Collembola communities in spruce forest stands of the High Tatra Mts (Slovakia) after a catastrophic windthrow event. *European Journal of Soil Biology*, 50, 151–158.
- Da LJ, Yang YC, Chen YP (2004) The diversity of plant community on Dajinshan Island, Shanghai. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2(3), 22–25. (in Chinese with English abstract) [达良俊, 杨永川, 陈燕萍 (2004) 上海大金山岛的自然植物群落多样性. *城镇绿化*, 2(3), 22–25.]
- Decaënsa T, Jiménez JJ, Gioia C, Measey GJ, Lavelle P (2006) The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, 23–38.
- Gao Y, Bu Y, Luan YX, Yang YM, Ke X (2007) Community composition and diversity of soil fauna in the land use of city planning: a case study in Shanghai World Exposition Site. *Biodiversity Science*, 15, 207–214. (in Chinese with English abstract) [高艳, 卜云, 栾云霞, 杨毅明, 柯欣 (2007) 城市新规划地土壤动物群落组成和多样性: 以上海市世博会会址为例. *生物多样性*, 15, 207–214.]
- Gladys LM, Daniel I, France BR, Patrick L (2007) Soil fauna abundance and diversity in a secondary semi-evergreen forest in Guadeloupe (Lesser Antilles): influence of soil type and dominant tree species. *Biology and Fertility of Soils*, 44, 269–276.
- Greenslade P, Convey P (2011) Exotic Collembola on subantarctic islands: pathways, origins and biology. *Biological Invasions*, 14, 405–417.
- Gudleifsson BE, Bjarnadottir B (2008) Springtail (Collembola) populations in hayfields and pastures in northern Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 21, 49–59.
- Hugo EA, Chown SL, McGeoch MA (2006) The microarthropods of sub-Antarctic Prince Edward Island: a quantitative assessment. *Polar Biology*, 30, 109–119.
- Jin SK, Wang JJ, Zhu S, Zhang Q, Li X, Zheng WJ, You WH (2016) Soil meso- and micro-fauna community structures in different urban forest types in Shanghai, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 2363–2371. (in Chinese with English abstract) [靳士科, 王娟娟, 朱莎, 张琪, 黎翔, 郑文静, 由文辉 (2016) 上海市不同类型城市森林中小型土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 27, 2363–2371.]
- Jin YL, You WH, Yi L, Wang XY, Wang Q (2011) Ecological distribution of collembola in the litter of Tiantong forest ecosystems, Zhejiang. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 241–247. (in Chinese with English abstract) [靳亚丽, 由文辉, 易兰, 王向阳, 王强 (2011) 天童森林生态系统凋落物层跳虫群落的生态学研究. *生态环境学报*, 20, 241–247.]
- Kardol P, Cregger MA, Company CE, Classen AT (2010) Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects. *Ecology*, 91, 767–781.
- Li BC (2014) Scientific Research Report of Dajinshan Island, Shanghai. Shanghai Science and Technology Education Publishing House, Shanghai. (in Chinese) [李必成 (2014) 大金山岛科学考察报告. 上海科技教育出版社, 上海.]
- Li W, Cui LJ, Zhao XS, Zhang MY, Gao CJ, Zhang Y, Wang YF (2015) Community structure and diversity of soil animals in the Lake Taihu lakeshore wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 944–955. (in Chinese with English abstract) [李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 张曼胤, 高常军, 张岩, 王义飞 (2015) 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与多样性. *生态学报*, 35, 944–955.]
- Liao CH, Li JX, Huang HT (1997) Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 17, 549–555. (in Chinese with English abstract) [廖崇惠, 李健雄, 黄海涛 (1997) 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 17, 549–555.]
- Lin YH, Zhang FD, Zhang JQ, Ouyang XJ, Mo DS, Zhou GY (2005) Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 2616–2622. (in Chinese with English abstract) [林英华, 张夫道, 张俊清, 欧阳学军, 莫定生, 周国逸 (2005) 鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化. *生态学报*, 25, 2616–2622.]
- Liu Y, Zhang A, Yan Y, Li K, Fang Y (2011) Diversity of soil animal community under different land-use types in Chongming Island. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 50, 288–295. (in Chinese with English abstract) [刘扬, 张岸, 严莹, 李恺, 方燕 (2011) 崇明岛不同土地利用类型下土壤动物群落多样性研究. *复旦学报(自然科学版)*, 50, 288–295.]
- Malmström A, Persson T, Ahlström K (2008) Effects of fire intensity on survival and recovery of soil microarthropods after a clearcut burning. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 2465–2475.
- Sadaka N, Ponge JF (2003) Soil animal communities in holm oak forests: influence of horizon, altitude and year. *European Journal of Soil Biology*, 39, 197–207.
- Sterzynska M, Bloger T (2004) Collembola of North Bull Island—new records for the Irish coast. *Fragmenta Faunistica*, 47, 47–50.
- Su YC, Gou YB, Yu D, Wang JY (2004) Diversity of soil invertebrate communities at Yushan Hill, Changshu, Jiangsu Province. *Biodiversity Science*, 12, 333–338. (in Chinese with English abstract) [苏永春, 勾影波, 郁达, 王继元 (2004) 江苏常熟虞山土壤动物群落多样性研究. *生物多样性*, 12, 333–338.]
- Sun RY (2001) *Principles of Animal Ecology*, 3rd version.

- Beijing Normal University Press, Beijing. (in Chinese) [孙儒泳 (2001) 动物生态学原理, 第3版. 北京师范大学出版社, 北京.]
- Wang Q, Luo Y, Jin YL, You WH (2012) Community structure of soil fauna in forest belt of different areas of Shanghai in Fall. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 28, 669–674. (in Chinese with English abstract) [王强, 罗燕, 靳亚丽, 由文辉 (2012) 上海市外环林带秋季不同区域土壤动物群落结构. *生态与农村环境学报*, 28, 669–674.]
- Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, Parton WH, Wall DH (2004) Ecological linkages between above-ground and belowground biota. *Science*, 304, 1629–1633.
- Wolters V (2001) Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology*, 37, 221–227.
- Wu HT, Lü XG, Yang Q, Jiang M (2006) Ecological characteristics and functions of soil fauna community. *Acta Pedologica Sinica*, 43, 314–323. (in Chinese with English abstract) [武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明 (2006) 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 43, 314–323.]
- Yang YC, Da LJ, Qin XK (2002) A study on the flora of Dajinshan Island in Shanghai, China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 20, 433–437. (in Chinese with English abstract) [杨永川, 达良俊, 秦祥堃 (2002) 上海大金山岛种子植物区系的研究. *武汉植物学研究*, 20, 433–437.]
- Yi L (2005) Influences of Secondary Succession of the Damaged Evergreen Broad-leaved Forest on Soil Animal Community in Tiantong, Zhejiang Province. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [易兰 (2005) 浙江天童受损常绿阔叶林的次生演替对土壤动物群落的影响. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Yi L, You WH, Song YC (2005) Soil animal communities in the litter of the evergreen broad-leaved forest at five succession stages in Tiantong. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 466–473. (in Chinese with English abstract) [易兰, 由文辉, 宋永昌 (2005) 天童常绿阔叶林五个演替阶段凋落物中的土壤动物群落. *生态学报*, 25, 466–473.]
- Yin WY (1998) Pictorial Keys to Soil Animals of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尹文英 (1998) 中国土壤动物检索图鉴. 科学出版社, 北京.]
- Yin WY (1992) Subtropical Soil Animals of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尹文英 (1992) 中国亚热带土壤动物. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 吴东辉 责任编辑: 闫文杰)

•研究报告•

自然保护区物种多样性保护价值评价方法

郭子良^{1,2} 邢韶华¹ 崔国发^{1*}¹ (北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)² (中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091)

摘要: 如何客观地确定自然保护区的保护优先性, 为自然保护区的晋级和确定管理类型提供科学依据, 已成为当前亟待解决的问题。本研究通过对已有评价指标和方法的对比、专家咨询、评价指标量化处理, 提出了量化评价自然保护区物种多样性保护价值的方法。此评价方法包括了自然保护区野生植物、野生动物、珍稀濒危野生植物和珍稀濒危野生动物多样性保护价值指数等量化模型。同时我们应用此方法对华北暖温带区域的39个自然保护区和东北温带区域的67个自然保护区的物种多样性保护价值进行了评价。结果表明, 位于华北暖温带区域的河北南大港湿地和辽河源及北京雾灵山, 以及位于东北温带区域的黑龙江镜泊湖、大佳河和翠北湿地等省级自然保护区的物种多样性保护价值较高, 可推荐优先晋级国家级自然保护区。该物种多样性保护价值评价方法能够较好地反映自然保护区之间物种及各类群多样性保护价值的差异, 确定自然保护区保护优先序列。此外自然保护区物种多样性保护价值在不同自然保护地理区和不同类型自然保护区之间存在显著差别。

关键词: 自然保护区; 野生植物; 野生动物; 多样性; 保护价值

A method for assessing species diversity conservation value of nature reserves

Ziliang Guo^{1,2}, Shaohua Xing¹, Guofa Cui^{1*}¹ College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083² Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

Abstract: In order to provide a scientific basis for upgrading the level of a nature reserve (NR) and selecting the appropriate management type, the conservation priority of NRs should be identified. How to objectively identify conservation priorities has become a key problem. We propose a mathematical method to comprehensively assess species diversity conservation values by comparing existing evaluation indexes and methods, consulting experts and processing indexes quantitatively. This evaluation method includes the following indices: the wild plant diversity conservation value index; wild animal diversity conservation value index; rare and endangered wild plant diversity conservation value index; and the rare and endangered wild animal diversity conservation value index of a NR. Meanwhile, 39 NRs in North China Warm Temperate Region and 67 NRs in Northeast China Temperate Region were selected as case studies to verify methods, based on species diversity data of the NRs. The evaluation results revealed that some provincial NRs could be recommended for an upgrade to national NRs, due to high species diversity conservation values, including the Nandagang Wetland and Liaohe River Source NRs of Hebei, Wuling Mountain NR of Beijing in the North China Warm Temperate Region, the Jingpo Lake, Dajia River, and Cuibei Wetland NRs of Heilongjiang in the Northeast China Temperate Region. The computation method showed a great advantage in comparing species (various groups) diversity conservation values for different NRs and determining the conservation priority sequence. Moreover, there were significant differences in the species diversity conservation value of NR among different natural conservation geographical areas, and types of NRs.

Key words: nature reserve; wild plant; wild animal; diversity; conservation value

收稿日期: 2016-12-11; 接受日期: 2017-02-07

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104029)和北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-BH-02)

*通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fa6716@163.com

生物多样性是自然生态系统健康和重要性的主要表现形式(马克平, 1993; Naeem et al, 1994; Tilman et al, 1996)。近些年区域生物多样性丧失的问题越来越严重, 其保护已成为人类共同面临的全球性问题(Abell et al, 2008; Nelson et al, 2009; Rands et al, 2010)。保护生物多样性已成为自然保护区建设的主要目标之一(Butchart et al, 2010; 马建章等, 2012)。截至目前, 全球已经建立了大量的自然保护区, 以期遏制区域野生动植物及其生境丧失的态势(Jenkins & Joppa, 2009)。如何评价这些自然保护区的生物多样性保护价值和保护优先性受到了越来越多的关注。研究人员提出了很多通过样方数据评估物种多样性的指数方法, 一定程度上反映了其保护价值, 包括 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数等(McIntosh, 1967; Whittaker, 1972); 但是这些指数在较大尺度的研究中却难以应用。而且多样性并不能作为评价保护价值的唯一标准, 特有性、分类独特性以及生境代表性等均应该成为评价内容(Clarke & Warwick, 1998; Veríssimo et al, 1998; Brooks et al, 2006; 王兵和宋庆丰, 2012)。“国际重要湿地”(International Important Wetland)、“世界生物圈保护区”(World Biosphere Reserve)等评估中均就区域保护优先性和保护价值的评价指标和要求等进行了描述。欧盟通过生境保护指令(European Commission Habitats Directive)要求按照区域内物种的稀有性、地理分布特征等确定其保护重要性, 作为保护区选址的参考(Gibbs et al, 2007; McGilivray, 2012)。

在我国, 李文华和赵献英(1984)首次提出从典型性、稀有性、自然性、脆弱性等9个方面评价自然保护区的保护价值, 并以此确定自然保护区的管理等级。郑允文等(1994)参考其指标内容, 提出了自然生态系统类和野生生物类自然保护区生态价值的评价方法, 并对自然性、多样性和脆弱性等各项指标进行了分析。而后研究人员基于此方法对我国不同自然保护区的保护价值评价等开展了相关研究(宋秀杰和赵彤润, 1997; 张崢等, 2000; 栾晓峰等, 2002; 戚继忠和张吉春, 2004)。国家级自然保护区的晋级评审中, 采用的《国家级自然保护区评审标准》也应用了相似的评价指标, 并增加了相应的管理指标。

科研人员对保护区保护价值的评价内容和等级划分等进行了很多探讨和实践, 但多停留在定性描述阶段(Humphries et al, 1995; Duelli & Obrist, 2003; Timonen et al, 2011)。主要从生态系统和物种的多样性、濒危性、特有性和独特性等方面评估自然保护区的保护价值, 确定其保护优先性(Prendergast et al, 1993; Ceballos et al, 2008; 张恒庆和张文辉, 2009; Primack 等, 2014)。近些年, 人们提出了多种评价指标体系及其评分标准、数量化评估方法等, 并对其进行了应用验证(Freitag et al, 1997; 李霄宇, 2011; 孙锐等, 2013; 聂宇一, 2014^①)。但不同的评估方法和模型对各个指标的量化赋值方式略有差异, 且多依赖于定性描述和专家打分等(Margules & Pressey, 2000; Margules et al, 2002; 魏永久等, 2014)。因此评价动机和专业背景等的差异可能影响生物多样性评价指标的选择及其赋值(Duelli & Obrist, 2003)。崔国发和孙锐(2014)以自然保护区水鸟的数量, 以及不同水鸟的重要性等为基础, 对湿地自然保护区的保护价值进行了测算和排序, 提出了新的保护价值定量评价途径。本研究通过对已有评价指标和方法的对比, 综合可靠性、可获得性等因素, 提出了一种量化的自然保护区物种多样性保护价值评价方法, 并进行了案例分析。

1 评价方法

1.1 评价指标的选择

物种多样性保护价值指生物多样性在物种层次所表现的保护优先性。目前对自然保护区内物种的保护价值评价指标很多, 但侧重点各有不同, 主要集中在物种的珍稀濒危特征、地理分布特征和保护等级等方面。在经过多次讨论和咨询12位野生动植物和自然保护区管理方面专家的基础上, 本文利用濒危性、特有性、保护等级和多样性(通过物种种类变化反映)等来量化评价自然保护区物种多样性的保护价值。

首先对野生动植物的濒危性、特有性和保护等级3个指标进行量化, 得到其保护重要值(表1, 表2)。其中, 濒危性指物种濒临灭绝风险等级; 特有性指物种在地理分布上的特有程度及特有等级; 保护等级指物种在我国受法律保护等级。然后根据自然

① 聂宇一 (2014) 江西省森林生态类型自然保护区保护价值评价研究. 硕士学位论文, 江西师范大学, 南昌.

表1 野生植物的保护重要性评价指标分级赋值标准
Table 1 Assignment for evaluation index of conservation importance of wild plants

评价指标 Evaluation index	分级赋值 Assignment			
	8	4	2	1
濒危性 Endangerment	极危 Critically Endangered	濒危 Endangered	易危 Vulnerable	近危和无危 Near Threatened and Least Concern
特有性 Endemism	植物地区特有 Endemic to plant province	植物亚区特有 Endemic to plant subarea	中国特有 Endemic to China	非中国特有 Not endemic to China
保护等级 Conservation level	国家一级保护或特殊保护 First-category national protected or special protected	国家二级保护 Second-category national protected	地方重点保护 Provincial key protected	其他 Others

野生植物的濒危性根据国际和中国最新和最权威的物种红色名录中不同等级予以分级并赋值，如《中国生物多样性红色名录——高等植物卷》等；未评估和数据缺乏等按照无危赋分。植物地区和植被亚区的划分依据中国植物区系分区。特殊保护野生植物是指国家开展的特殊保护工程中包括的野生植物，比如极小种群野生植物拯救保护工程。评价内容仅包括乡土物种。
Endangered wild plants can be graded and assigned according to the latest and most authoritative red list of species, such as “Red List of China’s Biodiversity: Higher Plant Volume” etc. DD (Data Deficiency) and NE (Not Evaluated) are in accordance with LC (Least Concern). The division of plant province and subarea are according to Chinese Plant Flora. Special protected wild plants means plants in the special protection projects carried out by the state, such as the conservation project for extremely small population of wild plant. Evaluation objects only include native species.

表2 野生动物的保护重要性评价指标分级赋值标准
Table 2 Assignment for evaluation index of conservation importance of wild animals

评价指标 Evaluation index	分级赋值 Assignment			
	8	4	2	1
濒危性 Endangerment	极危 Critically Endangered	濒危 Endangered	易危 Vulnerable	近危和无危 Near Threatened and Least Concern
特有性* Endemism	动物地理地区特有 Endemic to animal province	中国特有 Endemic to China	中国主要分布 Distributed mainly in China	中国次要或边缘分布 Distributed secondary or marginal in China
保护等级 Conservation level	国家一级保护或特殊保护 First-category national protected or special protected	国家二级保护 Second-category national protected	地方重点保护 Provincial key protected	其他 Others

野生动物的濒危性根据国际和中国最新和最权威的物种红色名录中不同等级予以分级并赋值，如《中国脊椎动物红色名录》等；未评估和数据缺乏等按照无危赋分。动物地理地区的划分依据中国动物地理区划。特殊保护野生动物是指国家开展的特殊保护工程中包括的野生动物。
*水鸟的特有性分级按照中国特有分布、中国主要分布、中国次要分布、中国边缘分布。
Endangered wild animals can be graded and assigned according to the latest and most authoritative red list of species, such as “Red list of China’s vertebrates” etc. DD (Data Deficiency) and NE (Not Evaluated) are in accordance with LC (Least Concern). The division of zoogeographical regions is according to the Zoogeographical Regionalization of China. Special protected wild animals means animals included in the special protection projects carried out by the state. Evaluation objects only include native species.
*The endemism of waterfowl can be classified to Endemic to China, distributed mainly in China, distributed secondary in China, distributed marginal in China.

保护区内物种的种类和每个物种的保护重要值评价该保护区的物种多样性保护价值。

1.2 野生植物多样性保护价值评价

(1)评价指标分级赋值

采用等比数列法进行赋值，即后一项与前一项的比数为常数，设定最高赋值为 8，常数为 2，数列为“8、4、2、1”；具体分级赋值标准见表 1。

(2)野生植物多样性保护价值指数计算

计算每种野生植物的保护重要值和自然保护区野生植物多样性保护价值指数(V_P)，公式如下：

$$V_{Pi} = T_{Pi} \times E_{Pi} \times P_{Pi} \tag{1}$$

$$V_P = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n V_{Pi}} \tag{2}$$

式中， V_{Pi} 为野生植物 i 的保护重要值，其取值数列为“1、2、4、8、16、32、64、128、256、512”，数值越大表明物种的受威胁程度、地理分布特有程度和重点保护级别越高，其保护价值越高，应予以优先保护； T_{Pi} 为野生植物 i 的濒危性赋值； E_{Pi} 为野生植物 i 的特有性赋值； P_{Pi} 为野生植物 i 的保护等级赋值； n 为自然保护区内野生植物种数。根据我国自然保护区本底调查情况，可选择维管束植物或高等植物作为评价对象。

1.3 野生动物多样性保护价值评价

(1)评价指标分级赋值

同样采用等比数列法进行赋值，即后一项与前一项的比数为常数，设定最高赋值为 8，常数为 2，

数列为“8、4、2、1”;具体分级赋值标准见表2。

(2) 野生动物多样性保护价值指数计算

计算每种野生动物的保护重要值和自然保护区野生动物多样性保护价值指数(V_A),公式如下:

$$V_{Ai} = T_{Ai} \times E_{Ai} \times P_{Ai} \quad (3)$$

$$V_A = \sqrt{\sum_{i=1}^m V_{Ai}} \quad (4)$$

式中, V_{Ai} 为野生动物 i 的保护重要值, 其取值数列为“1、2、4、8、16、32、64、128、256、512”, 数值越大表明物种的受威胁程度、地理分布特有程度和重点保护级别越高, 其保护价值越高, 应予以优先保护; T_{Ai} 为野生动物 i 的濒危性赋值; E_{Ai} 为野生动物 i 的特有性赋值; P_{Ai} 为野生动物 i 的保护等级赋值; m 为自然保护区内野生动物种数。根据我国自然保护区本底调查情况, 选择陆生脊椎动物或脊椎动物作为评价对象。

1.4 珍稀濒危物种多样性保护价值评价

珍稀濒危野生植物多样性保护价值指数(V_{PT})计算公式如下:

$$V_{PT} = \sqrt{\sum_{i=1}^p V_{Pi}} \quad (5)$$

式中, V_{Pi} 为珍稀濒危野生植物 i 的保护重要值; p 为自然保护区内珍稀濒危野生植物的种类数, 包括《中国生物多样性红色名录——高等植物卷》(中华人民共和国环境保护部和中国科学院, 2013)中极危和濒危植物、国家重点保护野生植物以及极小种群植物。

珍稀濒危野生动物多样性保护价值指数(V_{AT})计算公式如下:

$$V_{AT} = \sqrt{\sum_{i=1}^q V_{Ai}} \quad (6)$$

式中, V_{Ai} 为珍稀濒危野生动物 i 的保护重要值; q 为自然保护区内珍稀濒危野生动物的种类数, 包括《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)中极危和濒危动物、国家重点保护野生动物。

2 案例分析

2.1 数据来源及处理

本研究选择了华北暖温带区域 39 个自然保护区、东北温带区域 67 个自然保护区作为研究案例, 涉及黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、北京、天津和山西等 8 个省(市、自治区), 各自然保护区级

别为 2015 年数据。我们收集了这些自然保护区的科学考察报告和总体规划中的野生动植物名录, 并对其进行了数字化, 仅包括维管束植物和陆生脊椎动物。按照每个自然保护区的主要自然地理景观, 可以将其划分为森林、湿地和草原草甸等类型。

参考《国家重点保护野生植物名录》(1998)、《国家重点保护野生动物名录》(1989)、《中国生物多样性红色名录——高等植物卷》(中华人民共和国环境保护部和中国科学院, 2013)、《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)、各省区的省重点保护野生动植物名录, 以及动植物志和野生动植物分类专业网站信息, 对每个物种的不同属性进行分级赋值, 计算其保护重要值。

然后根据整理得到的每个自然保护区的野生动植物名录和每个物种的保护重要值, 计算得到各自然保护区野生植物多样性保护价值指数、野生动物多样性保护价值指数等。各自然保护区所属自然保护地理区参照中国自然保护综合地理区划方案(郭子良和崔国发, 2014)。

2.2 华北暖温带区域自然保护区物种多样性保护价值

华北暖温带区域各自然保护区物种多样性保护价值指数如表3所示。以保护森林为主的自然保护区野生植物多样性保护价值指数普遍较高, 其中河北小五台山国家级自然保护区最高(46.70), 而且其维管束植物多达 1,305 种。以保护湿地为主的自然保护区野生植物多样性保护价值指数较低, 均低于 20, 排在最后; 但是其野生动物多样性保护价值指数均较高, 普遍高于 50, 其中河北曹妃甸湿地和鸟类省级自然保护区最高(52.89)。而以草原草甸为主的自然保护区野生植物多样性和野生动物多样性保护价值指数多处于中等水平。珍稀濒危野生植物种类在各个自然保护区均很少, 特别是以湿地为主的自然保护区, 均不超过 1 种。而珍稀濒危野生动物种类在不同自然保护区均有一定数量, 但以保护湿地为主的自然保护区普遍高于其他类型, 且其珍稀濒危野生动物多样性保护价值指数也较高, 其中河北南大港湿地自然保护区最高, V_{AT} 为 40.25。

不同自然保护地理区的自然保护区物种多样性保护价值存在巨大差异(表3, 图1, 图2)。其中野生植物多样性保护价值指数较高的自然保护区主要集中在太行山东麓栽培植被与落叶阔叶林区

表 3 华北暖温带区域部分自然保护区物种多样性保护价值指数(* 截止到 2015 年确定的国家级自然保护区)

Table 3 The species diversity conservation value index of some nature reserves in North China Warm Temperate Region (* National nature reserve by 2015)

自然保护地理区 Natural conservation geographical area	自然保护区 Nature reserve (NR)	省份 Province	N_P	V_P	N_{PT}	V_{PT}	N_A	V_A	N_{AT}	V_{AT}
森林 Forest										
辽西冀北山地落叶阔叶林区 The North Hebei Province and West Liaoning Province Mountains Deciduous Broadleaf Forest Area	努鲁儿虎山 Nuluerhu Mountain NR*	辽宁 Liaoning	866	33.91	5	5.66	323	43.55	37	23.58
	大黑山 Dahei Mountain NR*	辽宁 Liaoning	792	33.48	4	4.90	352	47.91	50	29.87
	白狼山 Bailang Mountain NR*	辽宁 Liaoning	799	33.02	5	5.66	198	31.76	19	13.71
	虹螺山 Hongluo Mountain NR*	辽宁 Liaoning	783	32.83	8	7.21	197	31.89	18	14.00
	海棠山 Haitang Mountain NR*	辽宁 Liaoning	729	31.64	7	7.21	226	37.20	36	24.25
七老图山落叶阔叶林与草原区 Qilaotu Mountains Deciduous Broadleaf Forest and Steppe Area	辽河源 Liaohe River Source NR	河北 Hebei	831	34.64	5	6.00	241	39.18	37	24.49
	北大山 Beida Mountain NR	河北 Hebei	715	32.30	5	6.00	213	36.78	33	23.75
燕山落叶阔叶林区 Yanshan Mountains Deciduous Broadleaf Forest Area	松山 Songshan Mountain NR*	北京 Beijing	740	34.07	7	10.39	167	29.10	19	15.10
	雾灵山 Wuling Mountain NR	北京 Beijing	680	33.33	7	10.20	165	30.02	21	16.97
	青龙都山 Dushan Mountain NR, Qinglong	河北 Hebei	691	32.3	6	6.63	203	33.27	28	20.49
	青龙河 Qinglong River NR*	辽宁 Liaoning	730	32.08	4	5.29	193	34.73	27	20.88
	喇叭沟门 Labagoumen NR	北京 Beijing	622	29.97	4	5.29	152	30.35	24	19.08
	六里坪猕猴 Liuliping Rhesus Monkeys NR	河北 Hebei	604	29.78	4	5.29	206	36.46	28	22.09
	宽城都山 Dushan Mountain NR, Kuancheng	河北 Hebei	545	28.37	5	6.00	205	36.73	28	22.63
	宽城千鹤山 Qianhe Mountain NR, Kuancheng	河北 Hebei	572	28.32	4	5.29	221	41.80	33	28.28
	八仙山 Baxian Mountain NR*	天津 Tianjin	510	26.85	2	4.00	189	30.38	23	16.00
	驼梁 Tuoliang NR*	河北 Hebei	843	36.77	6	6.63	283	48.15	44	33.41
晋北中山落叶阔叶林与草原区 The North Shanxi Province Mountains Deciduous Broadleaf Forest and Steppe Area	灵空山 Lingkong Mountain NR*	山西 Shanxi	811	34.60	6	7.75	215	39.01	33	25.61
	芦芽山 Luya Mountain NR*	山西 Shanxi	651	30.97	3	4.90	299	44.38	40	28.21
	银河山 Yinhe Mountain NR	河北 Hebei	613	30.40	2	4.00	175	32.37	23	19.18
	漫山 Manshan Mountain NR	河北 Hebei	480	27.18	5	8.00	168	31.72	22	19.18
太行山东麓栽培植被与落叶阔叶林区 The East Taihang Mountains Cultivate Vegetation and Deciduous Broadleaf Forest Area	小五台山 Xiaowutai Mountain NR*	河北 Hebei	1,305	46.70	9	14.56	150	33.78	23	25.30
	青崖寨 Qingyazhai NR*	河北 Hebei	847	42.68	5	23.24	187	32.45	27	19.70
	百花山 Baihua Mountain NR*	北京 Beijing	821	37.84	11	14.97	172	31.80	14	19.80
	摩天岭 Motianling NR	河北 Hebei	775	34.31	6	6.63	177	33.78	23	22.09
	金华山-横岭子褐马鸡 Jinhua Mountain-Henglingzi Brown Eared-Pheasant NR	河北 Hebei	672	31.95	6	6.63	150	32.95	22	24.00
	三峰山 Sanfeng Mountain NR	河北 Hebei	676	31.84	4	5.29	161	29.36	19	16.73
	云蒙山 Yunmeng Mountain NR	北京 Beijing	514	27.29	2	4.00	123	26.80	13	16.49
太行山南段山地落叶阔叶林与湿地 The South Taihang Mountains Deciduous Broadleaf Forest and Wetland Area	大茂山 Damao Mountain NR	河北 Hebei	413	24.49	2	3.46	118	23.09	14	11.31
	蟒河猕猴 Manghe River Rhesus Monkeys NR*	山西 Shanxi	773	35.10	6	8.49	280	41.70	33	25.14
草原草甸 Steppe and Meadow										
燕山落叶阔叶林区 Yanshan Mountains Deciduous Broadleaf Forest Area	白草洼 Baicaowa NR	河北 Hebei	783	35.01	6	10.00	207	32.74	29	18.97

表 3 (续) Table 3 (continued)

自然保护地理区 Natural conservation geographical area	自然保护区 Nature reserve (NR)	省份 Province	N_P	V_P	N_{PT}	V_{PT}	N_A	V_A	N_{AT}	V_{AT}
	滦河源草地 Luanhe River Source Steppe NR	河北 Hebei	682	31.35	6	8.25	101	24.06	16	14.97
	红松洼 Hongsongwa NR*	河北 Hebei	517	27.89	3	8.94	267	43.31	42	28.57
	御道口 Yudaokou NR	河北 Hebei	495	27.33	3	6.93	196	39.32	36	28.35
湿地 Wetland										
海河平原栽培植被与湿地区 Haihe Plain Cultivate Vegetation and Wetland Area	曹妃甸湿地和鸟类 Caofeidian Wetland and Bird NR	河北 Hebei	217	16.09	0	0	297	52.89	55	39.24
	衡水湖 Hengshui Lake NR*	河北 Hebei	285	18.63	1	2	339	52.86	58	36.93
	南大港湿地 Nandagang Wetland NR	河北 Hebei	216	16.03	1	2	276	52.57	53	40.25
	古海岸与湿地 Paleocoast and Wetland NR*	天津 Tianjin	194	15.3	1	2	271	50.57	45	36.82
	白洋淀 Baiyangdian NR	河北 Hebei	324	19.95	0	0	220	42.93	33	29.73

N_P : 维管束植物种类; V_P : 野生植物多样性保护价值指数; N_{PT} : 珍稀濒危维管束植物种类; V_{PT} : 珍稀濒危野生植物多样性保护价值指数; N_A : 陆生脊椎动物种类; V_A : 野生动物多样性保护价值指数; N_{AT} : 珍稀濒危陆生脊椎动物种类; V_{AT} : 珍稀濒危野生动物多样性保护价值指数。
 N_P , Vascular plant species; V_P , The wild plant diversity conservation value index; N_{PT} , Rare and endangered vascular plant species; V_{PT} , The rare and endangered wild plant diversity conservation value index; N_A , Terrestrial vertebrate species; V_A , The wild animal diversity conservation value index; N_{AT} , Rare and endangered terrestrial vertebrate species; V_{AT} , The rare and endangered wild animal diversity conservation value index.

及太行山南段山地落叶阔叶林与湿地区。但野生动物多样性保护价值指数较高的自然保护区多分布于海河平原栽培植被与湿地区,该地理区的自然保护区均以保护湿地为主。此外,辽西冀北山地落叶阔叶林区的辽宁大黑山和努鲁儿虎山、晋北中山落叶阔叶林与草原区的河北驼梁和山西芦芽山国家级自然保护区野生动物多样性保护价值指数也较高,均超过了 40。

此外在不同自然保护地理区,自然地理景观一致的一些省级自然保护区野生植物或野生动物多样性保护价值指数高于部分国家级自然保护区,如燕山落叶阔叶林区的北京雾灵山和河北宽城千鹤山等省级自然保护区。评价结果表明,河北辽河源、北京雾灵山、河北摩天岭和河北白草洼等省级自然保护区的野生植物多样性保护价值指数较高,分别为 34.64、33.33、34.31 和 35.01,河北宽城千鹤山、河北曹妃甸湿地和鸟类、河北南大港湿地和河北白洋淀等省级自然保护区的野生动物多样性保护价值指数较高,分别为 41.80、52.89、52.57 和 42.93,超过了很多国家级自然保护区,应予以优先保护。

2.3 东北温带区域自然保护区物种多样性保护价值

东北温带区域的自然保护区物种多样性保护价值指数评价结果见表 4。野生植物多样性保护价值指数较高的自然保护区多以保护森林为主,部分以保护湿地为主。其中除吉林长白山和吉林松花江

三湖国家级自然保护区外,其他自然保护区野生植物多样性保护价值指数均低于 40。以保护湿地和草原草甸为主的大部分自然保护区野生植物多样性保护价值指数相对较低,但其野生动物多样性保护价值指数较高。吉林松花江三湖国家级自然保护区野生动物多样性保护价值指数最高(57.11);其野生动物种数(331)低于吉林莫莫格国家级自然保护区(334)。此外,东北温带区域不同自然保护区珍稀濒危野生动植物多样性及其保护价值的差异也较明显。其中吉林长白山和吉林松花江三湖国家级自然保护区的珍稀濒危野生植物种类均超过 20 种,其保护价值较高;但许多以保护湿地为主的自然保护区珍稀濒危野生植物种类很少。该区域自然保护区内珍稀濒危野生动物种类普遍超过 30 种,不同类型自然保护区之间差别不明显。野生动物多样性保护价值指数较高的自然保护区,其珍稀濒危野生动物多样性保护价值指数同样较高。

东北温带区域不同自然保护地理区内自然保护区的物种多样性保护价值也存在较大差异(表 4,图 1,图 2)。其中野生植物多样性保护价值指数较高的自然保护区主要集中在纬度较低的龙岗山针阔混交林区和辽东半岛落叶阔叶林与湿地区。但野生动物多样性保护价值指数较高的自然保护区多分布于张广才岭-完达山针阔混交林区、松嫩平原栽培植被与草原草甸区和穆稜-三江平原湿地草甸

区等地，其指数多高于 45。而长白山阔叶红松林区内自然保护区野生植物和野生动物多样性保护价值

值指数均很高，其珍稀濒危物种多样性保护价值也较高。

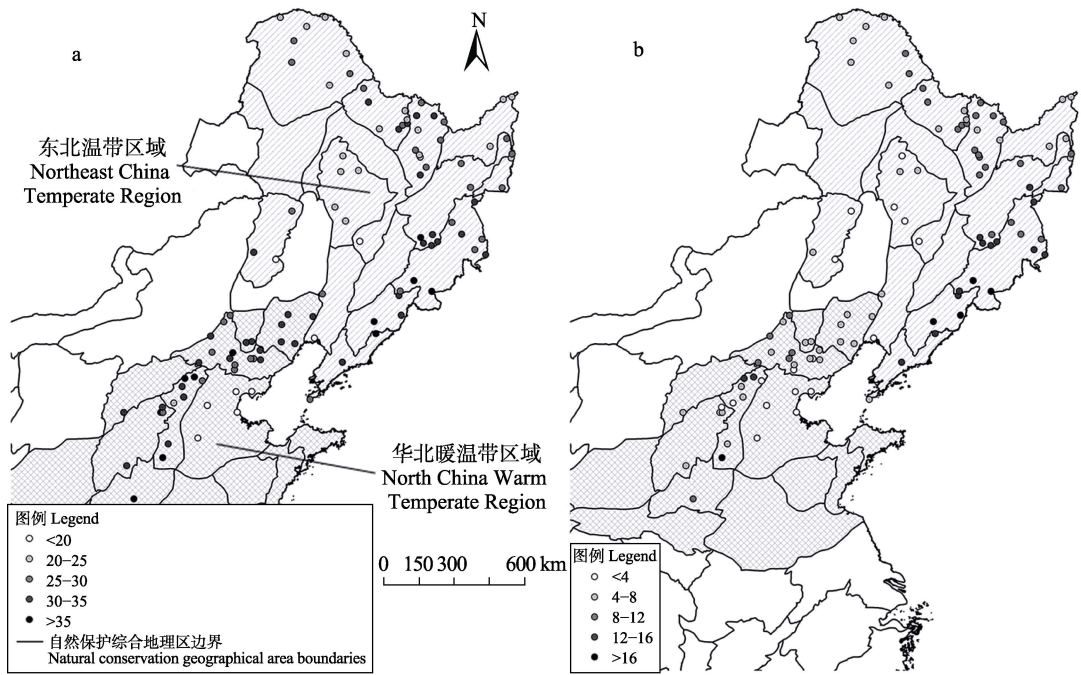


图 1 东北温带区域和华北暖温带区域部分自然保护区野生植物多样性保护价值指数(a)和珍稀濒危野生植物多样性保护价值指数(b)分布图

Fig. 1 The pattern for the wild plant conservation value index (a) and rare and endangered wild plant conservation value index (b) of some nature reserves in Northeast China Temperate Region and North China Warm Temperate Region

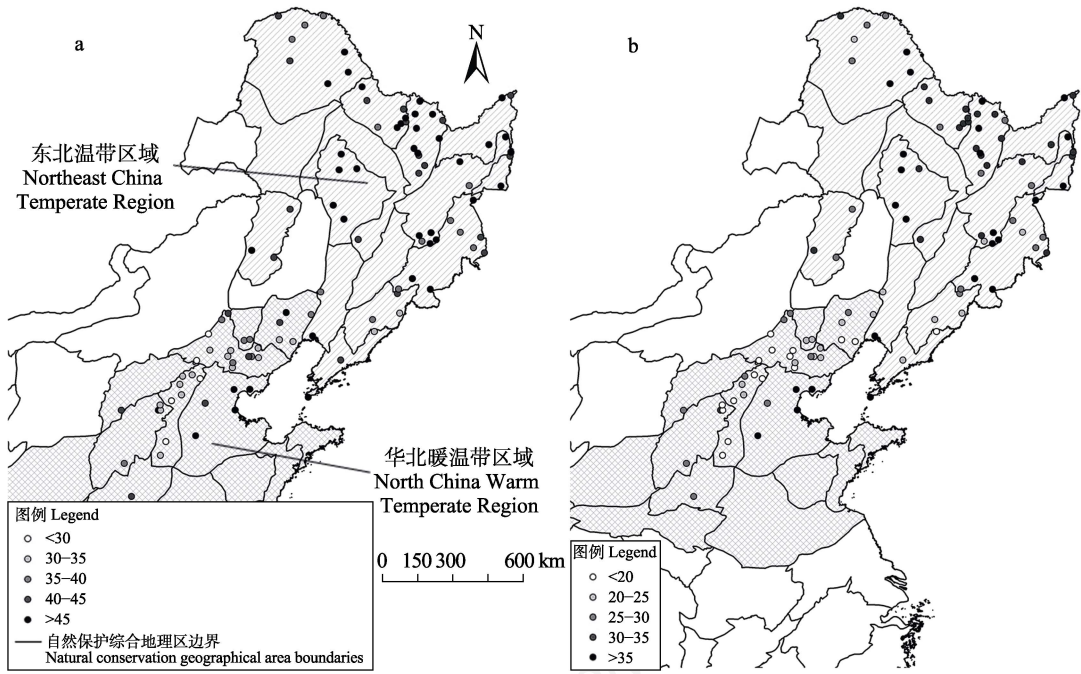


图 2 东北温带区域和华北暖温带区域部分自然保护区野生动物多样性保护价值指数(a)和珍稀濒危野生动物多样性保护价值指数(b)分布图

Fig. 2 The pattern for the wild animal conservation value index (a) and rare and endangered wild animal conservation value index (b) of some nature reserves in Northeast China Temperate Region and North China Warm Temperate Region

表4 东北温带区域部分自然保护区物种多样性保护价值指数(* 截止到2015年确定的国家级自然保护区)

Table 4 The species diversity conservation value index of some nature reserves in Northeast China Temperate Region (* National nature reserve by 2015)

自然保护地理区 Natural conservation geographical area	自然保护区 Nature reserve (NR)	省份 Province	N_P	V_P	N_{PT}	V_{PT}	N_A	V_A	N_{AT}	V_{AT}	
森林 Forest											
大兴安岭北段落叶针叶林区 The North Daxing'an Mountains Deciduous Coniferous Forest Area	岭峰 Lingfeng NR	黑龙江 Heilongjiang	612	28.20	7	7.48	250	38.92	41	24.41	
	中央站黑嘴松鸡 Zhongyangzhan Black-billed Capercaillie NR*	黑龙江 Heilongjiang	588	27.69	11	8.72	324	49.26	61	35.33	
	汗马 Khan Ma NR*	内蒙古 Inner Mongolia	526	26.34	6	6.63	265	42.98	49	29.87	
	盘中 Panzhong NR	黑龙江 Heilongjiang	414	23.11	5	6.32	238	39.34	43	26.38	
	北极村 Beijicun NR	黑龙江 Heilongjiang	414	22.87	4	5.29	226	41.63	51	31.56	
大兴安岭南段森林草原区 The South Daxing'an Mountains Forest and Steppe Area	乌兰坝 Wulanba NR*	内蒙古 Inner Mongolia	824	32.57	5	6.32	296	47.30	50	32.80	
	青山 Qingshan Mountain NR*	内蒙古 Inner Mongolia	528	25.57	2	3.46	221	41.30	41	29.93	
小兴安岭北部针阔混交林区 The North Xiaoxing'an Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Forest Area	胜山 Shengshan Mountain NR*	黑龙江 Heilongjiang	726	30.63	12	9.17	282	44.65	51	31.56	
	友好 Youhao NR*	黑龙江 Heilongjiang	634	28.91	11	8.94	285	46.68	45	33.47	
小兴安岭南部针阔混交林区 The South Xiaoxing'an Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Forest Area	平顶山 Pingding Mountain NR	黑龙江 Heilongjiang	724	31.26	12	9.17	253	40.36	39	27.13	
	太平沟 Taipinggou NR*	黑龙江 Heilongjiang	654	29.17	10	8.72	249	41.22	43	28.07	
	茅兰沟 Maolangou NR*	黑龙江 Heilongjiang	626	28.69	11	8.94	268	47.02	48	35.94	
	朗乡 Langxiang NR	黑龙江 Heilongjiang	502	25.87	10	8.72	261	44.33	44	32.06	
	乌马河紫貂 Wuma River Sable NR	黑龙江 Heilongjiang	482	25.50	10	8.49	281	45.65	51	32.68	
	丰林 Fenglin NR*	黑龙江 Heilongjiang	501	25.00	6	6.32	283	46.94	48	35.04	
	凉水 Liangshui NR*	黑龙江 Heilongjiang	447	24.56	9	8.49	306	50.16	58	37.31	
	碧水中华秋沙鸭 Bishui Chinese Merganser NR	黑龙江 Heilongjiang	439	24.31	9	8.49	266	44.63	40	31.69	
	辽河平原栽培植被与草原草甸区 Liaohe Plain Cultivate Vegetation and Steppe Area	章古台 Zhanggutai NR*	辽宁 Liaoning	492	25.57	5	6.00	237	37.78	30	20.59
	张广才岭-完达山针阔混交林区 Zhangguangcai Mountains-Wanda Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Forest Area	大峡谷 Daxiagu NR*	黑龙江 Heilongjiang	861	35.26	15	14.00	284	45.71	43	32.43
长白山阔叶红松林区 Changbai Mountains Broadleaf Korean Pine Forest Area	黄泥河 Huangni River NR*	吉林 Jilin	711	32.17	12	12.17	208	37.09	32	24.98	
	小北湖 Xiaobei Lake NR*	黑龙江 Heilongjiang	592	30.92	7	10.77	327	51.43	57	37.68	
	七星砬子东北虎 Qixinglazi Siberian Tiger NR	黑龙江 Heilongjiang	679	29.75	11	8.94	306	47.69	53	34.53	
	曙光 Shuguang NR	黑龙江 Heilongjiang	543	29.09	13	13.42	237	38.73	34	25.14	
	长白山 Changbai Mountain NR*	吉林 Jilin	1,312	45.19	26	19.49	309	48.86	52	35.10	
	松花江三湖 Songhua River Three Lake NR*	吉林 Jilin	1,236	42.81	20	18.55	331	57.11	62	44.54	
	穆稜东北红豆杉 Muling Japanese Yew NR*	黑龙江 Heilongjiang	805	33.12	13	10.95	203	36.19	33	24.17	
	琿春东北虎 Hunchun Siberian Tiger NR*	吉林 Jilin	663	32.28	12	15.10	279	44.81	44	31.11	
	凤凰山 Fenghuang Mountain NR*	黑龙江 Heilongjiang	607	30.46	13	13.27	310	50.18	53	36.99	

表 4 (续) Table 4 (continued)

自然保护地理区 Natural conservation geographical area	自然保护区 Nature reserve (NR)	省份 Province	N_P	V_P	N_{PT}	V_{PT}	N_A	V_A	N_{AT}	V_{AT}
龙岗山针阔混交林区 Longgang Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Forest Area	汪清 Wangqing NR*	吉林 Jilin	538	29.98	14	14.56	233	39.55	35	25.85
	牡丹峰 Mudanfeng NR*	黑龙江 Heilongjiang	627	29.85	10	11.31	241	39.89	38	28.00
	老爷岭东北虎 Laoyeling Siberian Tiger NR*	黑龙江 Heilongjiang	550	27.75	12	10.77	238	40.34	38	28.07
	老秃顶子 Laotudingzi NR*	辽宁 Liaoning	972	38.65	17	16.37	221	37.12	33	24.49
	哈泥 Hani NR*	吉林 Jilin	689	32.11	13	13.42	257	40.72	38	26.23
	通化石湖 Tonghua Shihu NR	吉林 Jilin	593	31.80	15	17.55	219	34.99	35	20.98
	白石砬子 Baishilazi NR*	辽宁 Liaoning	971	37.54	14	13.42	171	30.59	23	17.66
辽东半岛落叶阔叶林与湿地 Liaodong Peninsula Deciduous Broadleaf Forest and Wetland Area	仙人洞 Xianrendong NR*	辽宁 Liaoning	729	33.05	9	12.49	331	42.63	41	22.00
草原草甸 Steppe and Meadow										
大兴安岭南段森林草原区 The South Daxing'an Mountains Forest and Steppe Area	阿鲁科尔沁 Ar Horqin NR*	内蒙古 Inner Mongolia	261	17.66	1	2.00	184	40.55	37	29.73
湿地 Wetland										
大兴安岭北段落叶针叶林区 The North Daxing'an Mountains Deciduous Coniferous Forest Area	绰纳河 Chuona River NR*	黑龙江 Heilongjiang	443	24.74	10	8.49	301	49.98	57	38.37
	多布库尔 Duobukuer NR*	黑龙江 Heilongjiang	406	22.69	6	6.93	297	49.40	54	37.63
	双河 Shuanghe NR*	黑龙江 Heilongjiang	394	22.38	5	6.00	221	39.24	45	27.78
小兴安岭北部针阔混交林区 The North Xiaoxing'an Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Forest Area	库尔滨河 Kuerbin River NR	黑龙江 Heilongjiang	424	23.92	7	7.48	271	46.90	50	34.64
	大沾河湿地 Dazhan River Wetland NR*	黑龙江 Heilongjiang	713	30.35	11	8.94	265	46.50	51	34.87
	公别拉河 Gongbiela River NR	黑龙江 Heilongjiang	631	28.64	9	8.25	253	46.11	46	34.53
小兴安岭南部针阔混交林区 The South Xiaoxing'an Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Area	红星湿地 Hongxing Wetland NR*	黑龙江 Heilongjiang	342	21.35	5	6.32	259	44.87	45	33.17
	翠北湿地 Cuibei Wetland NR	黑龙江 Heilongjiang	850	32.95	13	9.59	217	41.95	41	31.05
	山口 Shankou NR	黑龙江 Heilongjiang	421	22.96	5	6.00	207	39.27	37	28.07
	乌伊岭 Wuyiling NR*	黑龙江 Heilongjiang	707	30.32	12	8.94	311	48.11	54	34.93
	细鳞河 Xilin River NR	黑龙江 Heilongjiang	511	26.12	7	7.48	285	46.31	51	33.41
	新青白头鹤 Xinqing Hooded Crane NR*	黑龙江 Heilongjiang	730	30.40	10	8.49	291	46.18	51	32.86
	波罗湖 Boluo Lake NR*	吉林 Jilin	187	14.73	1	2.00	169	40.51	29	30.46
松嫩平原外围蒙古栎、草原 Songnen Plain Cultivate Vegetation and Steppe Area	莫莫格 Momoge NR*	吉林 Jilin	332	20.07	2	3.46	334	52.88	53	38.11
	扎龙 Zhalong NR*	黑龙江 Heilongjiang	436	23.07	4	4.90	314	52.32	50	38.83
	乌裕尔河 Wuyuer River NR*	黑龙江 Heilongjiang	431	22.56	1	2.00	314	52.28	50	38.83
	查干湖 Chagan Lake NR*	吉林 Jilin	402	22.20	2	3.46	273	51.32	46	39.09
	明水 Mingshui NR*	黑龙江 Heilongjiang	452	23.19	3	4.47	271	45.61	37	31.43
辽河平原栽培植被与草原 Liaohe Plain Cultivate Vegetation and Steppe Area	辽河口 Liaohe River Estuary NR*	辽宁 Liaoning	124	12.45	1	2.00	302	52.37	47	38.26

表 4 (续) Table 4 (continued)

自然保护地理区 Natural conservation geographical area	自然保护区 Nature reserve (NR)	省份 Province	N_P	V_P	N_{PT}	V_{PT}	N_A	V_A	N_{AT}	V_{AT}
穆棱-三江平原湿地、草甸区 Muling-Sanjiang Plain Wetland and Meadow Area	兴凯湖 Xingkai Lake NR*	黑龙江 Heilongjiang	670	29.50	10	8.25	283	50.05	57	38.11
	黑瞎子岛 Bolshoy Ussuriysky Island NR	黑龙江 Heilongjiang	453	24.06	8	7.21	274	48.15	48	35.38
	东方红湿地 Dongfanghong Wetland NR*	黑龙江 Heilongjiang	683	30.00	11	8.72	274	46.11	47	33.29
	三环泡 Sanhuanpao NR*	黑龙江 Heilongjiang	402	22.34	5	5.29	258	45.78	36	31.75
	三江 Sanjiang NR*	黑龙江 Heilongjiang	470	24.52	6	6.32	215	44.34	44	34.70
	珍宝岛 Zhenbao Island NR*	黑龙江 Heilongjiang	385	22.65	7	7.21	228	42.10	37	30.79
张广才岭-完达山针阔混交林区 Zhangguangcai Mountain-Wanda Mountains Coniferous and Broadleaf Mixed Forest Area	大佳河 Dajia River NR	黑龙江 Heilongjiang	486	25.08	6	6.63	322	55.49	63	43.77
	雁鸣湖 Yanming Lake NR*	吉林 Jilin	819	34.83	14	14.70	324	50.40	53	35.72
	镜泊湖 Jingpo Lake NR	黑龙江 Heilongjiang	754	32.77	14	13.56	289	49.96	52	38.47
长白山阔叶红松林区 Changbai Mountains Broadleaf Korean Pine Forest Area	龙湾 Longwan NR*	吉林 Jilin	412	25.55	9	12.17	235	39.65	36	26.31
辽东半岛落叶阔叶林与湿地 Liaodong Peninsula Deciduous Broadleaf Forest and Wetland Area	蛇岛老铁山 Snake Island-Laotie Mountain NR*	辽宁 Liaoning	560	28.34	4	7.75	331	51.27	59	36.33

N_P 、 V_P 、 N_{PT} 、 V_{PT} 、 N_A 、 V_A 、 N_{AT} 、 V_{AT} 同表 3。
 N_P 、 V_P 、 N_{PT} 、 V_{PT} 、 N_A 、 V_A 、 N_{AT} 、 V_{AT} were consistent with Table 3.

在很多自然保护地理区,一些省级自然保护区野生植物或野生动物多样性保护价值指数高于已建国家级自然保护区。评价结果表明,黑龙江镜泊湖(V_P 为 32.77, V_A 为 49.96)和黑龙江七星砬子东北虎(V_P 为 29.75, V_A 为 47.69)省级自然保护区的野生植物和野生动物多样性保护价值指数均较高;黑龙江岭峰、黑龙江平顶山和黑龙江翠北湿地等省级自然保护区的野生植物多样性保护价值指数较高,分别为 28.20、31.26 和 32.95;黑龙江库尔滨河、黑龙江公别拉河、黑龙江黑瞎子岛、黑龙江大佳河和黑龙江乌马河紫貂等省级自然保护区的野生动物多样性保护价值指数较高,分别为 46.90、46.11、48.15、55.49 和 45.65,超过了很多国家级自然保护区,应予以优先保护。

3 讨论

生物多样性保护价值评估是确定自然保护区重要性和保护优先性的重要手段和途径。目前很多保护区体系均倾向于通过评估保护区(一定范围内)的生物多样性所具有的保护价值,来确定是否将其纳入保护名单或网络中(李霄宇, 2011; 魏永久等, 2014)。目前对物种多样性的评估主要围绕濒危性、

稀有性、特有性,以及保护等级等方面开展,本研究围绕以上评价内容,构建了一种定量评价自然保护区物种多样性保护价值的方法。但受数据来源限制,在珍稀濒危物种多样性保护价值指数的计算过程中目前未包含珍稀濒危物种的个体数量,而其个体数量的差异将直接影响自然保护区保护价值的高低,在未来条件允许的情况下,应考虑加入此指

标,将“公式(5)”改进为 $V_{PT} = \sqrt{\sum_{i=1}^p V_{Pi} \times Q_{Pi}}$, Q_{Pi} 为

珍稀濒危野生植物 i 的个体数量。而在保护对象独特的自然保护区,其生境的不可替代性较高,这些保护对象是该自然保护区内生境保护的旗舰种。可以从其旗舰种的保护重要值、种群个体数量和生境重要性等方面评价自然保护区旗舰种的保护价值,

计算公式如 $V_F = V \times H_R \times Q_R$, V_F 为自然保护区内旗舰种的保护价值指数, V 为自然保护区内旗舰种的保护重要值, H_R 为自然保护区内旗舰种的生境重要性, Q_R 为自然保护区内旗舰种的相对数量;将评价结果与具有相同保护对象的自然保护区进行比较,确定其保护优先性。

本研究中以自然保护区公开的野生动植物名录为依据,主要来自于自然保护区科学考察报告和总体规划。在物种名录整理过程中,未考虑各项资料之间的出版年代差异,也无法对其准确性进行验证,有些地区可能未包括进一步调查所发现的新分布物种。但是这些数据误差对分析结果的影响可能是有限的,而且目前许多评估也仅以已知调查数据或公开数据资料为依据。

对华北暖温带区域和东北温带区域的自然保护区物种多样性保护价值进行评价时,发现一些自然保护区在野生植物和野生动物多样性保护价值指数上的差异很大,特别是内陆湿地与水域类型自然保护区。因此在进行生物多样性保护价值评价和排序时应考虑自然保护区主要保护自然地理景观之间的差异。由于以保护湿地为主的自然保护区中迁徙候鸟较多,鸟类分布较集中,其脊椎动物种数普遍高于其他类型的自然保护区,且珍稀濒危脊椎动物种数也高于其他类型。东北温带区域的自然保护区野生动物多样性保护价值指数普遍高于华北暖温带区域,这可能与我国东北温带区域仍保留有大面积的天然森林和湿地生态系统,以及人类干扰程度较华北暖温带区域更弱等有关,因此物种多样性保护价值的比较应该在相同地理单元内进行。物种种类数的多少对物种多样性保护价值有一定的影响,但并不能直接决定野生植物和野生动物多样性保护价值。评价结果也与该自然保护区珍稀濒危物种、特有物种和保护物种等的构成有关。如辽宁仙人洞国家级自然保护区维管束植物总数低于黑龙江镜泊湖和翠北湿地自然保护区,但其珍稀濒危和特有植物较多,野生植物多样性保护价值指数高于这两个自然保护区。

4 结论

(1)本研究提出了从野生植物、野生动物和珍稀濒危物种等角度量化评价自然保护区物种多样性保护价值的数学模型和方法。该方法主要选择濒危性、特有性和保护等级三项指标来量化评价物种的保护重要值,再依据自然保护区内的物种种类来评价自然保护区野生植物、野生动物和珍稀濒危物种多样性保护价值等。

(2)通过案例分析,进一步验证了本研究提出的自然保护区物种多样性保护价值评价模型和方

法的科学性、实用性,野生植物和野生动物多样性保护价值指数均能够较好地反映自然保护区之间物种及其各类群多样性保护价值的差异,确定保护优先序列,能为自然保护区晋级和管理类型的确定等提供依据,并可以为保护成效评估提供参考。此外,其研究结果也可以反映不同自然保护地理区的物种多样性保护价值和保护优先性。而且保护森林、草原草甸和湿地等不同自然地理景观的自然保护区,其野生植物和野生动物多样性保护价值指数存在显著差别。

(3)研究结果表明,许多省级自然保护区的物种多样性保护价值明显高于相同自然保护地理区内已建国家级自然保护区。我国现有国家级自然保护区体系应开展“自上而下”的优化布局,提高其保护有效性。华北暖温带区域河北曹妃甸湿地和鸟类、河北南大港湿地、河北辽河源、河北宽城千鹤山和北京雾灵山等省级自然保护区的物种多样性保护价值较高,可推荐优先晋级国家级。东北温带区域黑龙江镜泊湖、黑龙江大佳河、黑龙江翠北湿地、黑龙江黑瞎子岛、黑龙江平顶山和黑龙江岭峰等省级自然保护区的物种多样性保护价值较高,可推荐优先晋级国家级。其中黑龙江翠北湿地自然保护区已经在 2016 年 5 月国务院公布的国家级自然保护区晋级名单中。

致谢: 审稿专家和责任编委对本文提出了宝贵的修改建议,特此感谢!

参考文献

- Abell R, Thieme ML, Revenga C, Bryer M, Kottelat M, Bogutskaya N, Coad B, Mandrak N, Balderas SC, Bussing W, Stiassny MLJ, Skelton P, Allen GR, Unmack P, Naseka A, Ng R, Sindorf N, Robertson J, Armijo E, Higgins JV, Heibel TJ, Wikramanayake E, Olson D, López HL, Reis RE, Lundberg JG, Pérez MHS, Petry P (2008) Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, 58, 403–414.
- Brooks TM, Mittermeier RA, da Fonseca GA, Gerlach J, Hoffmann M, Lamoreux JF, Mittermeier CG, Pilgrim JD, Rodrigues ASL (2006) Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313, 58–61.
- Butchart SHM, Walpole M, Collen B, Strien AV, Scharlemann JPW, Almond REA, Baillie JEM, Bomhard B, Brown C, Bruno J, Carpenter KE, Carr GM, Chanson J, Chenery AM,

- Csirke J, Davidson NC, Dentener F, Foster M, Galli A, Galloway JN, Genovesi P, Gregory RD, Hockings M, Kapos V, Lamarque JF, Leverington F, Loh J, McGeoch MA, McRae L, Minasyan A, Morcillo MH, Oldfield TEE, Pauly D, Quader S, Revenga C, Sauer JR, Skolnik B, Spear D, Stanwell-Smith D, Stuart SN, Symes A, Tierney M, Tyrrell TD, Vié JC, Watson R (2010) Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328, 1164–1168.
- Ceballos G, Rodríguez P, Medellín RA (2008) Assessing conservation priorities in megadiverse Mexico: mammalian diversity, endemism, and endangerment. *Ecological Applications*, 8, 8–17.
- Clarke KR, Warwick RM (1998) A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology*, 35, 523–531.
- Cui GF, Sun R (2014) Technique of Conservation Priority Assessment of Wetland Nature Reserves. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [崔国发, 孙锐 (2014) 湿地自然保护区保护优先性评价技术. 中国林业出版社, 北京.]
- Duelli P, Obrist MK (2003) Biodiversity indicators: the choice of values and measures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 98, 87–98.
- Freitag S, Jaarsveld ASV, Biggs HC (1997) Ranking priority biodiversity areas: an iterative conservation value-based approach. *Biological Conservation*, 82, 263–272.
- Gibbs D, While A, Jonas AEG (2007) Governing nature conservation: the European Union Habitats Directive and conflict around estuary management. *Environment and Planning A*, 39, 339–358.
- Guo ZL, Cui GF (2014) The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1284–1294. (in Chinese with English abstract) [郭子良, 崔国发 (2014) 中国自然保护综合地理区划. 生态学报, 34, 1284–1294.]
- Humphries CJ, And PHW, Wright RIV (1995) Measuring biodiversity value for conservation. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26, 93–111.
- Jenkins CN, Joppa L (2009) Expansion of the global terrestrial protected area system. *Biological Conservation*, 142, 2166–2174.
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red list of China's vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹏, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Li WH, Zhao XY (1984) Nature Reserves of China. The Commercial Press, Beijing. (in Chinese) [李文华, 赵献英 (1984) 中国的自然保护区. 商务印书馆, 北京.]
- Li XY (2011) Conservation Value Evaluation and Reasonable Distribution of National Nature Reserve for Forest. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [李霄宇 (2011) 国家级森林类型自然保护区保护价值评价及合理布局研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Luan XF, Xie YM, Du DC, Xu HF (2002) The ecological and management evaluation of Chongming Dongtan Birds Nature Reserve. *Journal of Shanghai Normal University (Nature Sciences)*, 31(3), 73–79. (in Chinese with English abstract) [栾晓峰, 谢一民, 杜德昌, 徐宏发 (2002) 上海崇明东滩鸟类自然保护区生态环境及有效管理评价. 上海师范大学学报(自然科学版), 31(3), 73–79.]
- Ma JZ, Rong K, Cheng K (2012) Research and practice on biodiversity *in situ* conservation in China: progress and prospect. *Biodiversity Science*, 20, 551–558. (in Chinese with English abstract) [马建章, 戎可, 程鲲 (2012) 中国生物多样性就地保护的研究与实践. 生物多样性, 20, 551–558.]
- Ma KP (1993) On the concept of biodiversity. *Chinese Biodiversity*, 1, 20–22. (in Chinese) [马克平 (1993) 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1, 20–22.]
- Margules CR, Pressey RL (2000) Systematic conservation planning. *Nature*, 405, 243–253.
- Margules CR, Pressey RL, Williams PH (2002) Representing biodiversity: data and procedures for identifying priority areas for conservation. *Journal of Biosciences*, 27, 309–326.
- Mcgillivray D (2012) Compensating biodiversity loss: The EU Commission's approach to compensation under article 6 of the habitats directive. *Journal of Environmental Law*, 24, 417–450.
- McIntosh RP (1967) An index of diversity and the relation of certain concepts to diversity. *Ecology*, 48, 392–404.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences (2013) Chinese Biodiversity Red List: Higher Plant Volume. (in Chinese) [中华人民共和国环境保护部和中国科学院 (2013) 中国生物多样性红色名录——高等植物卷.] http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201309/t20130912_260061.htm. (accessed on 2015-12-10)
- Naeem S, Thompson LJ, Lawler SP, Lawton JH, Woodfin RM (1994) Declining biodiversity can alter the performance of ecosystem. *Nature*, 368, 734–737.
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron DR, Chan KMA, Daily GC, Goldstein J, Kareiva PM, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts TH, Shaw MR (2009) Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, 4–11.

- Prendergast JR, Quinn RM, Lawton JH, Eversham BC, Gibbons DW (1993) Rare species, the coincidence of diversity hotspots and conservation strategies. *Nature*, 365, 335–337.
- Primack RB, Ma KP, Jiang ZG (2014) *Conservation Biology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [Primack RB, 马克平, 蒋志刚 (2014) 保护生物学. 科学出版社, 北京.]
- Qi JZ, Zhang JC (2004) Ecological evaluation for Hunchun Nature Reserve. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 5, 453–457. (in Chinese with English abstract) [戚继忠, 张吉春 (2004) 珲春自然保护区生态评价. 北华大学学报(自然科学版), 5, 453–457.]
- Rands MR, Adams WM, Bennun L, Butchart SH, Clements A, Coomes D, Entwistle A, Hodge I, Kapos V, Scharlemann JP, Sutherland WJ, Vira B (2010) Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science*, 329, 1298–1303.
- Song XJ, Zhao TR (1997) Study on ecological evaluation of Songshan Nature Reserve. *Environmental Science*, 18(4), 76–78. (in Chinese with English abstract) [宋秀杰, 赵彤润 (1997) 松山自然保护区的生态评价. 环境科学, 18(4), 76–78.]
- Sun R, Cui GF, Lei T, Zheng YM (2013) An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 1952–1963. (in Chinese with English abstract) [孙锐, 崔国发, 雷霆, 郑姚闽 (2013) 湿地自然保护区保护价值评价方法. 生态学报, 33, 1952–1963.]
- Tilman D, Wedin D, Knops J (1996) Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 379, 718–720.
- Timonen J, Gustafsson L, Kotiaho JS, Mönkkönen M (2011) Hotspots in cold climate: conservation value of woodland key habitats in boreal forests. *Biological Conservation*, 144, 2061–2067.
- Verissimo A, Júnior CS, Stone S, Uhl C (1998) Zoning of timber extraction in the Brazilian Amazon. *Conservation Biology*, 12, 128–136.
- Wang B, Song QF (2012) Value assessing methods of species diversity conservation in forest ecosystem. *Journal of Beijing Forestry University*, 34, 155–160. (in Chinese with English abstract) [王兵, 宋庆丰 (2012) 森林生态系统物种多样性保育价值评估方法. 北京林业大学学报, 34, 155–160.]
- Wei YJ, Guo ZL, Cui GF (2014) Assessment methods on biodiversity conservation value in nature reserves: research progress. *World Forestry Research*, 27(5), 37–42. (in Chinese with English abstract) [魏永久, 郭子良, 崔国发 (2014) 国内外保护区生物多样性保护价值评价方法研究进展. 世界林业研究, 27(5), 37–42.]
- Whittaker RH (1972) Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21, 213–251.
- Zhang HQ, Zhang WH (2009) *Conservation Biology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张恒庆, 张文辉 (2009) 保护生物学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang Z, Zhu L, Zhang JW, Wang X, Zhang T, Zhu T (2000) Study on ecological quality evaluation method for wetland in China. *China Environmental Science*, 20(Suppl.), 55–58. (in Chinese with English abstract) [张峥, 朱琳, 张建文, 王欣, 张涛, 朱彤 (2000) 我国湿地生态质量评价方法的研究. 中国环境科学, 20(增刊), 55–58.]
- Zheng YW, Xue DY, Zhang GS (1994) Study on ecological evaluation criteria and standards for nature reserves in China. *Rural Eco-Environment*, 10(3), 22–25. (in Chinese with English abstract) [郑允文, 薛达元, 张更生 (1994) 我国自然保护区生态评价指标和评价标准. 农村生态环境, 10(3), 22–25.]

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究选取的华北暖温带区域39个自然保护区基本信息(数据截至2015年)

Appendix 1 The basic information of 39 nature reserves selected from North China Warm Temperate Region in this paper (Data by 2015)

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016350-1.pdf>

附录2 本研究选取的东北温带区域67个自然保护区基本信息(数据截至2015年)

Appendix 2 The basic information of 67 nature reserves selected from Northeast China Temperate Region in this paper (Data by 2015)

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016350-2.pdf>

附录1 本研究选取的华北暖温带区域39个自然保护区基本信息(数据截至2015年)

Appendix 1 The basic information of 39 nature reserves selected from North China Warm Temperate Region in this paper (Data by 2015)

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
1	辽宁努鲁儿虎山	16,705.6	森林生态	森林生态系统 山地落叶阔叶 林生态系统及 辽梅杏、金雕 等	国家级	2000
2	辽宁大黑山	13,844	森林生态	华北植物区系 北缘森林生态 系统	国家级	2000
3	辽宁白狼山	17,440	森林生态	森林生态系统 及水曲柳、黄 羊等珍稀野生 动植物	国家级	2001
4	辽宁虹螺山	10,008	森林生态	森林生态系统 及野生动植物	国家级	2005
5	辽宁海棠山	11,002.7	森林生态	森林生态系统 及珍稀野生动 植物	省级	1986
6	河北辽河源	45,225.2	森林生态	华北典型天然 阔叶次生林生 态系统	省级	2004
7	河北北大山	10,185	森林生态	温带森林和野 生动植物	国家级	2009
8	北京松山	6,212.96	森林生态	森林生态系统 及金钱豹等珍 稀动植物	省级	1985
9	北京雾灵山	4,152.4	森林生态	森林生态系 统、珍稀、濒 危野生动植物	省级	2000
10	河北青龙都山	4,705.6	森林生态	燕山东段暖温 带北缘的天然 侧柏林、核桃 楸等珍稀濒危 植物	国家级	2013
11	辽宁青龙河	12,045	森林生态	森林生态系统 猕猴及温带森 林生态系统	省级	2001
12	北京喇叭沟门	18,482.5	森林生态		省级	1999
13	河北六里坪猕猴	14,970	森林生态		省级	2007

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
14	河北宽城都山	19,648	森林生态	森林生态系统 及珍稀野生动 植物	省级	2001
15	河北宽城千鹤山	14,037.5	野生动物	苍鹭及其生境	省级	2003
16	天津八仙山	1,049	森林生态	森林生态系统 褐马鸡及华北	国家级	1984
17	山西芦芽山	21,453	野生动物	落叶松、云杉 次生林	国家级	1980
18	河北驼梁	21,311.9	森林生态	森林生态系统 油松林和辽东 栎林等暖温带	国家级	2001
19	山西灵空山	10,116.8	森林生态	落叶阔叶林生 态系统及褐马 鸡	国家级	1993
20	河北银河山	36,210.9	森林生态	森林生态系 统、稀有地质 地貌资源	省级	2012
21	河北漫山	12,028	森林生态	森林生态系统 及珍稀野生动 植物	省级	2001
22	河北小五台山	21,833	森林生态	温带森林生态 系统及褐马鸡	国家级	1983
23	河北青崖寨	15,164	森林生态	森林及珍稀野 生动植物	国家级	2006
24	北京百花山	21,743.1	森林生态	温带次生林	国家级	1985
25	河北摩天岭	35,100	森林生态	温带森林生态 系统及野生动 植物	省级	2012
26	河北金华山-横岭 子褐马鸡	33,940	野生动物	褐马鸡及其生 境	省级	2003
27	河北三峰山	5,464.7	森林生态	森林生态系统 及珍稀野生动 植物	省级	2012
28	北京云蒙山	3,900	森林生态	森林生态系统 森林生态系统	省级	2000
29	河北大茂山	1,353.33	森林生态	及珍稀野生动 植物、自然文 化遗产	省级	2012

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
30	山西蟒河猕猴	5,600	野生动物	猕猴等珍稀野生动植物	国家级	1983
31	河北白草洼	17,680	草原草甸	森林草原	省级	2007
32	河北滦河源草地	21,500	草原草甸	草地生态系统	省级	1997
33	河北红松洼	7,970	草原草甸	草原生态系统	国家级	1994
34	河北御道口	32,620	草原草甸	草原、湿地生态系统	省级	2002
35	河北曹妃甸湿地和鸟类	10,081.4	内陆湿地	湿地生态系统及鸟类	省级	2004
36	河北衡水湖	16,365	内陆湿地	湿地生态系统及鸟类	国家级	2000
37	河北南大港湿地	7,500	内陆湿地	湿地生态系统及鸟类	省级	1995
38	天津古海岸与湿地	35,913	海洋海岸	贝壳堤、牡蛎滩古海岸遗迹、滨海湿地	国家级	1984
39	河北白洋淀	29,696	内陆湿地	湿地生态系统及野生动植物	省级	2002

附录2 本研究选取的东北温带区域67个自然保护区基本信息(数据截至2015年)

Appendix 2 The basic information of 67 nature reserves selected from Northeast China Temperate Region in this paper (Data by 2015)

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
1	黑龙江岭峰	68,373	森林生态	寒温带针叶林及 紫貂、原麝、貂熊 等濒危野生动物 黑嘴松鸡等珍稀 野生动植物以及	省级	2002
2	黑龙江中央站黑嘴 松鸡	46,743	野生动物	寒温带针叶林与 温带针阔叶混交 林过渡带的典型 森林生态系统	国家级	2006
3	内蒙古汗马	107,348	森林生态	寒温带苔原山地 明亮针叶林	国家级	1995
4	黑龙江盘中	55,074	森林生态	寒温带针叶林生 态系统及野生动 植物	省级	2006
5	黑龙江北极村	137,553	森林生态	寒温带森林生态 系统、森林湿地生 态系统	省级	2006
6	内蒙古乌兰坝	78,672	森林生态	西辽河源头区的 山地森林、湿地生 态系统, 斑羚、马 鹿和黑鹳等珍稀 动植物	国家级	1997
7	内蒙古青山	26,989	森林生态	蒙古栎林、黑桦 林、紫椴林等典型 温带天然林与草 原草甸生态系统 以及野大豆	国家级	1997
8	黑龙江胜山	60,000	森林生态	我国最北端的温 带森林生态系统 和红松、驼鹿等珍 稀濒危动植物	国家级	2003
9	黑龙江友好	60,687	内陆湿地	森林沼泽生态系 统及珍稀动植物	国家级	2001
10	黑龙江平顶山	20,241	森林生态	典型的小兴安岭 森林生态系统及 珍稀濒危野生动 植物	省级	2010

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
11	黑龙江太平沟	22,199	森林生态	温带森林生态系 统及黑熊、棕熊等 珍稀野生动植物	国家级	2009
12	黑龙江茅兰沟	35,868	森林生态	温带森林生态系 统及原麝、中华秋 沙鸭、红松等珍稀 野生动植物	国家级	1999
13	黑龙江朗乡	31,355	森林生态	原麝等野生动物 及红松林生态系 统	国家级	2004
14	黑龙江乌	20,949	野生动物	紫貂小兴安岭亚 种及森林生态系 统	省级	2006
15	黑龙江丰林	18,400	森林生态	为以红松为主的 北温带针阔叶混 交林生态系统和 珍稀的野生动物 植物资源	国家级	1958
16	黑龙江凉水	12,133	森林生态	以红松为主的温 带针阔叶混交林 及其生态系统	国家级	1980
17	黑龙江碧水中华秋 沙鸭	2,535	野生动物	中华秋沙鸭及红 松林生态系统	省级	1997
18	辽宁章古台	10,200	森林生态	沙地森林生态系 统	国家级	1986
19	黑龙江大峡谷	24,998	森林生态	典型的东北山地 森林生态系统及 东北红豆杉	国家级	2010
20	吉林黄泥河	41,583	森林生态	北温带森林生态 系统及多种珍稀 濒危野生动植物	国家级	2000
21	黑龙江小北湖	20,834	森林生态	红松林生态系统 及原麝、紫貂等珍 稀动植物	国家级	2006
22	黑龙江七星砬子东 北虎	55,740	野生动物	东北虎、马鹿等野 生动物及其生境	省级	1980
23	黑龙江曙光	9,766	野生动物	天蚕及柞林生态 系统	省级	1992
24	吉林长白山	196,465	森林生态	火山地貌景观和	国家级	1960

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
				森林生态系统		
25	吉林松花江三湖	115,253.2	森林生态	森林及水域生态 系统	国家级	1982
26	黑龙江穆稜东北红 豆杉	35,648	野生植物	东北红豆杉及其 森林生态系统	国家级	2004
27	吉林珲春东北虎	108,700	野生动物	东北虎、豹及其栖 息地	国家级	2001
28	黑龙江凤凰山	26,570	森林生态	兴凯松林、东北红 豆杉、松茸等野生 动植物及森林生 态系统	国家级	1989
29	吉林汪清	67,434	森林生态	东北红豆杉及针 阔混交林生态系 统	国家级	2002
30	黑龙江牡丹峰	19,468	森林生态	原始森林	国家级	1981
31	黑龙江老爷岭东北 虎	71,278	野生动物	东北虎、东北豹、 猎物种群及温带 山地森林生态系 统	国家级	2011
32	辽宁老秃顶子	15,219	森林生态	长白植物区系森 林及人参等珍稀 物种	国家级	1981
33	吉林哈泥	22,230	森林生态	以哈泥沼泽为主 的湿地生态系统 和哈泥河上游水 源涵养区	国家级	1991
34	吉林通化石湖	15,200	森林生态	温带山地森林生 态系统及东北红 豆杉、朝鲜崖柏	省级	1993
35	辽宁白石砬子	7,467	森林生态	原生型红松针阔 混交林	国家级	1981
36	辽宁仙人洞	3,574.7	森林生态	森林生态系统	国家级	1981
37	内蒙古阿鲁科尔沁	136,793.6	草原草甸	沙地草原、湿地生 态系统及珍稀鸟 类	国家级	1999
38	黑龙江绰纳河	105,580	内陆湿地	寒温带针叶林与 温带针阔叶混交 林	国家级	2002

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
39	黑龙江多布库尔	128,959	内陆湿地	寒温带湿地生态 系统及野生动植 物	国家级	2002
40	黑龙江双河	88,849	内陆湿地	寒温带森林生态 系统、森林沼泽系 统及濒危物种	国家级	2002
41	黑龙江库尔滨河	66,964	内陆湿地	湿地水域生态系 统及冷水鱼类	省级	2004
42	黑龙江大沾河湿地	211,618	内陆湿地	小兴安岭林区森 林湿地生态系统, 白头鹤等水禽及 其栖息地及温带 森林生态系统 沼泽湿地生态系 统及珍稀野生动 植物	国家级	2001
43	黑龙江公别拉河	47,983	内陆湿地	温带森林湿地生 态系统	省级	2005
44	黑龙江红星湿地	111,995	内陆湿地	森林湿地生态系 统及其湿地动植 物	国家级	2001
45	黑龙江翠北湿地	27,730	内陆湿地	内陆湿地生态系 统	省级	2001
46	黑龙江山口	99,489.9	内陆湿地	温带森林森林生 态系统、沼泽湿地 生态系统	国家级	2002
47	黑龙江乌伊岭	43,824	内陆湿地	森林、湿地生态系 统及珍稀动物	省级	2004
48	黑龙江细鳞河	20,617	内陆湿地	白头鹤、驼鹿等珍 稀动物及北温带 森林生态系统和 湿地生态系统	国家级	2004
49	黑龙江新青白头鹤	62,567	野生动物	湿地生态系统及 鹤、鹳类珍稀濒危 鸟类	国家级	2004
50	吉林波罗湖	24,915	内陆湿地	鹤、鹳类珍稀水 禽及湿地生态系 统	国家级	1981
51	吉林莫莫格	144,000	内陆湿地	丹顶鹤等珍禽及	国家级	1987
52	黑龙江扎龙	210,000	野生动物			

序号 Number	自然保护区名称 Name of nature reserve	面积 Area (ha)	类型 Types	主要保护对象 The main protected objects	级别 Levels	始建时间 Building time
				湿地生态系统		
53	黑龙江乌裕尔河	55,423	内陆湿地	湿地生态系统及 丹顶鹤、老鸹等珍 稀水禽	国家级	1992
54	吉林查干湖	50,684	内陆湿地	湿地生态系统及 珍稀鸟类	国家级	1986
55	黑龙江明水	30,840	内陆湿地	平原沼泽湿地生 态系统及大鸨等 珍稀野生动植物	国家级	2007
56	辽宁辽河口	80,000	野生动物	珍稀水禽及沿海 湿地生态系统	国家级	1985
57	黑龙江兴凯湖	222,488	内陆湿地	湿地生态系统及 丹顶鹤等珍稀鸟 类	国家级	1986
58	黑龙江黑瞎子岛	12,417	内陆湿地	湿地生态系统及 濒危水鸟	省级	2014
59	黑龙江东方红湿地	31,516	内陆湿地	湿地生态系统和 濒危动植物	国家级	2001
60	黑龙江三环泡	27,687	内陆湿地	湿地生态系统及 丹顶鹤、天鹅、小 叶樟	国家级	1991
61	黑龙江三江	198,089	内陆湿地	湿地生态系统及 东方白鹳等珍禽	国家级	1994
62	黑龙江珍宝岛	44,364	内陆湿地	湿地生态系统和 珍稀濒危动植物	国家级	2002
63	黑龙江大佳河	71,932	内陆湿地	湿地、森林生态系 统及珍稀野生动 植物	省级	2004
64	吉林雁鸣湖	53,940	内陆湿地	湿地生态系统	国家级	1991
65	黑龙江镜泊湖	126,000	内陆湿地	水域、森林生态系 统及火山口、熔 洞、熔岩台地等地 质地貌	省级	1980
66	吉林龙湾	15,061	内陆湿地	湿地、森林生态系 统及火山湖泊	国家级	1991
67	辽宁蛇岛老铁山	9,072	野生动物	蝮蛇、候鸟及蛇岛 特殊生态系统	国家级	1980

•综述•

灵长类动物对植物种子的传播作用

陈 远¹ 王 征² 向左甫^{1*}¹ (中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004)² (南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

摘要: 种子传播对植物种群空间分布和群落生物多样性维系有着深远的影响。森林灵长类动物可有效地传播植物种子, 其对果实的选择不仅受其自身形态、生理和行为特征的影响, 也与果实的形态特征和同域分布的其他动物类群的取食竞争密切相关。灵长类动物传播种子的模式可分为消化道传播、携带传播和颊囊传播, 其中消化道传播距离远、种子萌发或幼苗建成率高, 是最为有效的传播模式。灵长类动物对种子的传播作用还能促进退化生境的恢复。建议今后研究中应考虑灵长类动物的多途径种子传播和多种因素对种子扩散与萌发的综合影响, 同时要更加客观地评估灵长类动物缺失对森林植被更新的影响。

关键词: 灵长类动物; 食果过程; 种子传播; 植被更新; 生物多样性保护

Seed dispersal by primates

Yuan Chen¹, Zheng Wang², Zuofu Xiang^{1*}¹ College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004² College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

Abstract: Seed dispersal facilitates the recruitment of plants, which has profound influences upon the spatial distribution of forest plants and the maintenance of biodiversity. Recently, the role of primates in the process of seed dispersal has been increasingly studied. Primates play an important and special role in plant recruitment and vegetation regeneration in the form of feeding on fruits and dispersing seeds. The selection of different fruits is not only closely related to the quality of fruits and the feeding competition of sympatric animals, but also varies greatly with morphological, physiological, and behavioral features of different primates. According to the processes of fruit treatment, the patterns of seed dispersal by primates can be classified as endozoochory, epizoochory, and synzoochory. These patterns have different effects on the distance of seed dispersal, seed germination, and the establishment of seedlings. The most effective pattern is endozoochory, characterized by long-distance dispersal and high rates of seed germination and seedling establishment. Seed dispersal by many primate species helps to restore degraded habitats. Studies on the ecological processes of seed dispersal by primates and determined factors would be conducive to determine the role of primates in the forest ecological system, the contribution of primates to vegetation regeneration, and to provide theoretical evidence for forest ecosystem management and biodiversity conservation.

Key words: primates; frugivory; seed dispersal; vegetation regeneration; biodiversity conservation

在热带雨林中, 50%以上的植物果实被食果动物(以哺乳类和鸟类为主)取食(Howe & Smallwood, 1982; Levey et al, 2002), 并且60–94%的木本植物借助食果动物来实现种子的传播(Arroyo-Rodríguez et al, 2015)。啮齿类、翼手类和灵长类是传播种子的

主要的哺乳动物类群(鲁长虎, 2001), 关于前两类动物的种子传播作用研究历史较长, 而直到最近20年人们才认识到灵长类动物对植物种子传播的重要作用(Arroyo-Rodríguez et al, 2015)。栖息于森林中的灵长类虽然食性广泛多样, 但有25–40%的种类

收稿日期: 2016-06-02; 接受日期: 2017-01-11

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAD03-02)、国家自然科学基金(31670397)和国家林业局野生动物保护与繁育项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xiangzf@csuft.edu.cn

取食植物果实, 排出或吐出大量具有萌发能力的种子(Lambert, 1999), 对森林植被的更新和生物多样性的维系起着至关重要的作用(Cain et al, 2000; Wang & Smith, 2002)。迄今为止, 很多学者以狐猴科(Dew & Wright, 1998)、卷尾猴科(Wehncke & Dominguez, 2007)、僧面猴科(Barnett et al, 2012)、蜘蛛猴科(Bicca-Marques, 2003)、獾科(Cardoso et al, 2011)、猴科(Albert et al, 2013)、长臂猿科(范鹏飞等, 2008)和猩猩科(Petre et al, 2015)等灵长类动物为研究对象, 对它们的食果过程、传播种子数量、传播距离和种子萌发率等方面进行了比较详细的研究。

灵长类动物传播种子的过程较为复杂, 涉及到它们的食性、种子传播模式、传播距离、对种子萌发和幼苗建成的影响等多个层面(Schupp et al, 2010)。作为森林中典型的大型食果动物, 了解灵长类动物种子传播的生态过程, 不仅有助于探讨森林生态系统中动植物间的相互关系及其生态意义, 还可进一步明确灵长类动物对森林植被更新的贡献。

1 影响灵长类动物取食和传播果实的因素

灵长类动物的食性范围广泛, 不同种类取食的植物种类和数量也存在较大差异。而它们多样的取食行为和活动模式形成了较复杂的果实处理过程。一般来说, 影响灵长类取食和传播果实或者种子的因素主要有以下3点:

(1) 灵长类动物的个体特征, 如形态特征(口腔和肠道特点)、生理特征(食物消化时间)和行为习惯等因素, 均影响它们取食和传播植物的果实和种子。许多灵长类动物有着较长的消化道, 食物滞留时间(gut retention time)较长(Maisels, 1993), 往往能取食大量的种子(Rudran, 1978), 但其口腔大小、牙齿形态以及肠道形态结构都会影响它们吞咽的种子大小与种类。如, 南美洲的白面僧面猴(*Pithecia pithecia*)和红背僧面猴属(*Chiropotes*)动物因具有高度特化的牙齿, 能够取食具有硬质外壳的大型果实(Norconk et al, 2011)。动物的取食行为, 如取食果肉后是将种子吞下还是丢弃, 也会影响果实(种子)的传播(Lambert, 1998)。例如, 在厄瓜多尔亚松国家公园, 白额蜘蛛猴(*Ateles belzebuth*)至少取食152种植物的果实, 它们将绝大多数种子(98%)整体吞下, 其中毁坏的种子仅占极少数(Link & Fiore, 2006); 在中国云南的无量山, 黑长臂猿(*Nomascus*

concolor)取食31种植物果实, 并为27种肉质果植物传播种子(范鹏飞等, 2008)。

(2) 植物果实的丰富度或分布模式、果实和种子的硬度、大小、颜色和形态以及所具有的营养成分均能影响灵长类动物对果实的选择(Leighton, 1993; Russo & Chapman, 2011; 阮海河等, 2013)。栖息地果实数量多且成熟期持续时间长, 灵长类动物就会多次在该树采食, 对植物种子的搬运频次和数量也会增多(Agetsuma & Noma, 1995; Garber & Paciulli, 1997)。Sengupta和Radhakrishna (2015)发现, 猕猴(*Macaca mulatta*)更喜欢取食具有壳状外皮、多汁而柔软的果肉, 以及具有中大型种子和坚硬种皮的大型果实; 阮海河等(2013)也发现, 在越南的广平风芽-格邦国家森林公园, 河静黑叶猴(*Trachypithecus francoisi hatinhensis*)对处理难度较小的浆果和核果有着明显的偏好, 并且更多地选择黄色、红色和绿色的果实。

(3) 灵长类动物的觅食对策也受到同域生活的其他动物类群的竞争影响。如, McConkey等(2002)在印度尼西亚的加里曼丹岛发现, 灰长臂猿(*Hylobates muelleri*)和黑掌长臂猿(*H. agilis*)的果实选择受到了其他灵长类动物(猩猩和猕猴)的竞争影响。一般而言, 植物果实被森林中所有食果动物共同取食, 食性广泛的动物相对于食性较窄的动物更容易获取果实和传播种子(Sengupta & Radhakrishna, 2015)。

2 灵长类动物的种子传播作用

2.1 种子传播模式

灵长类动物对种子的传播模式可分为3种: 消化道传播(endozoochory)、携带传播(epizoochory)和颊囊传播(synzoochory) (Kaplin & Moermond, 1998; Albert et al, 2013)。

(1) 消化道传播模式, 即吞咽后排出种子。这是灵长类动物最主要的传播模式(Russo & Chapman, 2011)。如, 在非洲刚果的萨隆加国家公园, 倭黑猩猩(*Pan paniscus*)所传播的植物种子中, 93%以上是经消化道传播(Beaune et al, 2013); 在南美洲新热带区, 消化道传播亦是最为常见的灵长类动物的种子传播模式(Estrada & Coates-Estrada, 1984; Chapman, 1989; Andresen, 1999), 该模式无论从种子传播的距离或是对种子的萌发都起着积极作用(Lambert,

2002; Russo & Chapman, 2011)。

(2) 携带传播模式, 即取食果肉后丢弃种子。这种模式在灵长类动物种子传播中不太常见。一般的途径是灵长类动物取食果肉后直接丢弃或吐出种子, 有些甚至是将未吃完的果实整个丢弃。Koné等(2008)研究发现, 非洲西部国家公园的几种猴科灵长类动物能将果实带离母树一段距离, 它们常在打开果实时丢弃种子或把肉质的浆果取食后吐出种子。

(3) 颊囊传播模式, 即颊囊处理后吐出种子。仅见于具有颊囊的猕猴属 (*Macaca*) 和长尾猴属 (*Cercopithecus*) 灵长类动物 (Albert et al, 2013; Linden et al, 2015)。它们在取食时先将果实塞满颊囊并暂时储存, 在母树以外的地点处理完果实后吐出种子, 进而起到传播种子的作用 (Corlett & Lucas, 1990), 部分吞下的种子则可认为是经消化道传播。猕猴属动物通过使用颊囊, 能传播体积较大且数量多的种子, 而它们较大的活动范围则促进了种子的长距离传播 (Albert et al, 2014)。

2.2 种子传播距离

与其他动物类群相比, 灵长类动物活动于森林的各个林层 (Albert et al, 2013), 因此使得传播的种子在空间分布上更为广泛。不同的传播模式对种子传播的距离差异很大: 携带传播模式传播的距离通常仅有几米, 造成种子大量聚集在母树周围, 资源竞争等因素使种子死亡率大幅度上升 (Janzen, 1970; Connell, 1971)。消化道传播模式却能将种子带到离母树数百米甚至数千米的适宜生境而提高了种子的存活率 (Russo & Chapman, 2011)。颊囊传播模式中, 猕猴属动物虽然有特殊颊囊进行种子传播, 但其粪便内的种子平均传播距离 (116.5 m) 远长于口腔吐出种子的距离 (19.2 m), 并且猕猴属动物吐出的种子有 39% 是在取食树种的树冠下发现的, 而粪便中传播的种子通常都远离母树树冠 (Sengupta et al, 2014)。

种子的传播距离还受其他一些因素影响。如, 在消化道传播模式中, 灵长类动物的日间移动模式和消化道滞留时间均会影响种子的传播距离。许多灵长类动物多年栖息在同一地点 (如休息场所和夜宿地) (Chapman, 1989; Julliot, 1997), 导致这些地点的种子排放率很高而未进行有效传播 (Russo & Chapman, 2011)。一些体型较大的灵长类动物通常每天能进行长距离移动 (Carbone et al, 2005), 种子

传播距离也因其较长的消化道滞留时间而潜在增长 (Petre et al, 2015)。如, 在巴西片断化森林中体型较大的吼猴属 (*Alouatta*) 动物具有较长的日间活动距离, 能将种子传播至距离母树 497 m 远的地方 (Bicca-Marques, 2003); 少数大型猿类对种子的传播距离有时甚至超过 1,000 m (Tsuji et al, 2010; Beaune et al, 2013)。此外, 摄取种子的时间也会影响种子的传播距离, 例如, 安第斯绒毛猴 (*Lagothrix lagothericha*) 对上午取食种子的传播距离更远 (Stevenson et al, 2014)。

种子的传播距离对其后期萌发及扩散有着重要的影响, 长距离传播有助于提高植物更新的可能性, 对于植物种群的扩张、小种群的维系、定殖和基因流动有着重要意义 (Schupp et al, 2010)。一般而言, 距离母树 5 m 远的种子存活率明显高于母树树冠下的种子 (Chapman & Chapman, 1995), 但只有被传播至距离母树超过 100 m 远的地方, 才认为是最为有效的种子传播方式 (Cain et al, 2000; Schupp et al, 2010)。因此, 尽管灵长类动物对植物种子的传播距离因传播模式各异, 但仅消化道传播属于长距离传播, 才是维系植物动态、促进种群扩张和基因流动的关键的传播模式。

2.3 传播对种子萌发和幼苗建成的影响

灵长类动物取食果实不仅能将种子带到适宜萌发的微环境, 减少种子萌发时植物种间的竞争和被捕食者捕食的危险 (Andresen, 1999), 更重要的是在传播过程中, 种子经过动物的处理而改变了其萌发特性和幼苗的建成能力 (Arroyo-Rodríguez et al, 2015)。已有研究表明灵长类动物的传播作用促进了植物种子的萌发, 对幼苗的生长有着积极作用 (Stevenson et al, 2002; Righini et al, 2004; Beaune et al, 2013)。

消化道传播可以提高种子的萌发率, 缩短种子萌发所需的时间 (Traveset, 1998), 主要原因是: (1) 动物消化道对内果皮和种皮进行的化学或机械性摩擦产生了“破皮”作用, 促进了种子的萌发 (Traveset & Verdú, 2002); (2) 种子外的果肉能抑制种子的萌发或促进病原体的生长 (Traveset et al, 2007), 灵长类动物将它们移除起到了“解除抑制”的作用; (3) 灵长类动物粪便中所含的营养物质具有施肥效应 (Robertson et al, 2006)。如, 在委内瑞拉古里水库的陆桥岛屿上, 红吼猴 (*Alouatta seniculus*) 粪便的密

集堆积能够丰富土壤中氮、磷等营养物质,促进幼苗的建成(Feeley, 2004)。此外, Arroyo-Rodríguez等(2015)发现, 吼猴属灵长类的消化道对植物种子生存和萌发的另一个积极作用是控制了果实或种子中昆虫幼虫的发生。

但也有研究发现, 灵长类动物通过对果实(种子)的取食给种子的萌发带来了负作用(Estrada & Coates-Estrada, 1984; Poulsen et al, 2001; Stevenson et al, 2002)。主要原因是灵长类动物在取食过程中容易将种子的种皮一并嚼碎(Hemingway, 1996), 一些小型的种子经消化道处理后很难存活下来(Dew & Wright, 1998; Mourthé et al, 2008)。另外, 体型较大的灵长类动物粪堆中聚集着较多的种子(Chapman, 1989; González-Zamora et al, 2014), 这可能引起病原体感染或增加被取食(如啮齿类等)的概率(Howe & Smallwood, 1982), 使种子的存活率降低。

3 灵长类动物与森林植物的关系

灵长类动物通过取食植物果实, 将种子带离母树, 直至种子萌发和幼苗建成, 形成完整而有效的传播途径。在长期的进化过程中, 灵长类动物和食源植物间已经形成了广泛的互利或互惠关系, 它们之间的协同进化是一种动态平衡状态(Lord et al, 2002; Fleming & Kress, 2011)。研究表明, 食果动物对种子的传播在热带生态系统中是一种普遍存在的现象, 果食性猴科灵长类的食物至少包含80%的果实, 促进了75%的种子萌发(Fuzessy et al, 2016)。在本木植物中, 有50–90%的物种被食果性脊椎动物取食, 并且大部分树种的果实出现了明显利于动物传播的形态特征(Howe & Smallwood, 1982; Janson, 1983; Tabarelli & Peres, 2002)。

灵长类动物对种子的传播不仅对于森林植物的空间分布和植物多样性维系有着重要的影响, 而且在种子传播网络中所扮演的角色往往是关键性的。如, 在刚果萨隆加国家公园, 尽管在无动物传播和风力散播的作用下种子排放, 但许多植物物种因缺少倭黑猩猩而无法在果实掉落区域实现自我更新并充分地进行种群扩张(Beaune, 2015); 同样, 在新热带区森林中蜘蛛猴科灵长类的丰度和植物幼苗的多样性表现出正相关关系(Stevenson, 2011)。

灵长类动物对森林植被的恢复起到积极作用

(Russo & Chapman, 2011), 例如, 大多数非灵长类食果动物不能使用隔离或者空旷的栖息地(Albert et al, 2013), 而猕猴属动物却能够穿越各种类型的森林, 这种游走式的活动格局为退化生境的修复提供了帮助; 吼猴属动物有助于森林的次级演替, 能促进退化栖息地的恢复(Arroyo-Rodríguez et al, 2015)。

4 灵长类动物传播种子的生态学意义

灵长类动物是热带和亚热带地区食果脊椎动物的重要组成部分, 对植物果实的取食和种子传播产生了巨大的影响(Garber & Lambert, 1998)。许多研究表明, 灵长类动物之所以成为重要的植物种子传播者, 主要是因为植物种子经动物消化道排出后仍保持着良好的萌发能力(Stevenson et al, 2002; Righini et al, 2004; Sengupta et al, 2014)。很显然, 食果性的灵长类动物通过对植物果实和种子的取食, 对种子传播产生了积极影响(Fuzessy et al, 2016), 灵长类动物对种子的传播不但影响了植物从种子到幼苗期的存活状态(Janzen, 1970; McCanny, 1985), 最终还影响植物在群落中的空间分布格局(Nathan & Muller-Landau, 2000; Wang & Smith, 2002)。更为重要的是, 灵长类动物的种子传播对于许多热带树种的定殖起着关键作用, 这对维持植物种群的多样性有着重要意义(Howe & Smallwood, 1982; Julliot, 1997; Link & Fiore, 2006)。

灵长类动物在森林生态系统中扮演着独特的生态角色。与其他传播动物类群相比, 灵长类动物体型多样、活动范围大且具有复杂的取食行为等特点(Stevenson et al, 2002; Martins, 2006; Bravo, 2009), 这些特点为种子提供的传播途径较为独特, 并且这些传播方式(如种子传播距离等)通常是植物生长环境中其他动物传播者无法替代的(Tutin et al, 1991; Otani, 2010; Bueno et al, 2013)。一般来说, 成熟的大型植物果实无法由食果鸟类、果蝠类和某些食果性树栖哺乳动物(如蜜熊 *Potos flavus*)打开或吞下后带离母树进行传播(Hallwachs, 1986; Link & Fiore, 2006)。虽然掉落至地面的某些大型果实或种子可经贮藏性啮齿动物的分散贮食(scatter-hoarding)而传播, 但这对于种子传播的作用甚微, 只有通过灵长类动物的取食才能大幅度地改变此类种子扩散的模式(Tutin et al, 1991; Jansen et al, 2002; Otani, 2010)。如, 在哥伦比亚奎瓦国家公

园, 几种果实具有外皮包被的植物种子, 仅通过安第斯绒毛猴进行传播(Stevenson et al, 2014); 较小型的传播者, 如鸟类、啮齿类和果蝠类虽能传播一些植物种子, 但因果实处理过程、种子传播数量和种子排放生境的差异等而不能产生与倭黑猩猩相似的传播效果(Beaune, 2015)。

5 研究展望

我国关于灵长类动物与植物种子传播的关系研究起步较晚, 尚有大量的工作需要开展。目前, 灵长类动物种子传播过程的研究多在于独立探究单方面的传播途径, 但种子传播的过程是多途径同时进行的, 甚至传播后期种子萌发也受多种因素影响。为进一步理解灵长类动物在森林生态系统中的地位, 以及加强生物多样性保护、森林生态系统管理, 仍需要深入开展如下相关研究:

(1) 综合考虑灵长类动物的多途径种子传播。

由于灵长类动物特殊的取食行为, 传播种子时往往是几种模式同时进行, 还可能具有一定的互补性。若将多种传播模式结合起来分析, 并加以模型化, 能更充分地理解灵长类动物在森林生态系统中所扮演的角色。

(2) 充分考虑多种因素对种子扩散与萌发的影响。在灵长类动物传播种子后, 地面的种子还会受到森林中其他动物(如鸟类、啮齿类)的二次传播, 也可能受到蜚螂(*Onthophagus* spp.)等昆虫的捕食, 这些因素也会影响种子传播的有效性, 未来应该加强这方面的研究。

(3) 客观评估灵长类动物缺失对森林植被更新的影响。近年来, 生境破坏等因素使灵长类动物种群数量减少, 这无疑将改变动植物系统的稳定性, 进而给植物的更新带来消极影响(Stevenson, 2011)。在开展灵长类动物种子传播研究的同时, 更应该客观评估灵长类对森林植被更新的影响。

致谢: 陈浩春、张波、郭程、卢浪、魏博彦等在论文初稿形成过程中给予了有益的帮助; 两位审稿专家对论文的初稿提出了宝贵意见和建议, 在此一并致谢。

参考文献

Agetsuma N, Noma N (1995) Rapid shifting of foraging pattern by Yakushima macaques (*Macaca fuscata yakui*) in re-

- sponse to heavy fruiting of *Myrica rubra*. *International Journal of Primatology*, 16, 247–260.
- Albert A, Savini T, Huynen MC (2013) The role of *Macaca* spp. (Primates: Cercopithecidae) in seed dispersal networks. *The Raffles Bulletin of Zoology*, 61, 423–434.
- Albert A, McConkey K, Savini T, Huynen MC (2014) The value of disturbance-tolerant cercopithecine monkeys as seed dispersers in degraded habitats. *Biological Conservation*, 170, 300–310.
- Andresen E (1999) Seed dispersal by monkeys and the fate of dispersed seeds in a Peruvian rain forest. *Biotropica*, 31, 145–158.
- Arroyo-Rodríguez V, Andresen E, Bravo SP, Stevenson PR (2015) Seed dispersal by howler monkeys: current knowledge, conservation implications, and future directions. In: *Howler Monkeys* (eds Kowalewski MM, Garber PA, Cortés-Ortiz L, Urbani B, Youlatos D), pp. 111–139. Springer, New York.
- Barnett AA, Boyle SA, Pinto LP, Lourenço WC, Almeida T, Silva WS, Ronchi-Teles B, Bezerra BM, Ross C, MacLarnon A, Spironello WR (2012) Primary seed dispersal by three neotropical seed-predating primates (*Cacajao melanocephalus ouakary*, *Chiropotes chiropotes* and *Chiropotes albinasus*). *Journal of Tropical Ecology*, 28, 543–555.
- Beaune D, Bretagnolle F, Bollache L, Bourson C, Hohmann G, Fruth B (2013) Ecological services performed by the bonobo (*Pan paniscus*): seed dispersal effectiveness in tropical forest. *Journal of Tropical Ecology*, 29, 367–380.
- Beaune D (2015) What would happen to the trees and lianas if apes disappeared? *Oryx*, 49, 442–446.
- Bicca-Marques JC (2003) How do howler monkeys cope with habitat fragmentation? In: *Primates in Fragments: Ecology and Conservation* (ed. Marsh LK), pp. 283–303. Springer, New Mexico.
- Bravo SP (2009) Implications of behavior and gut passage for seed dispersal quality: the case of black and gold howler monkeys. *Biotropica*, 41, 751–758.
- Bueno RS, Guevara R, Ribeiro MC, Culot L, Bufalo FS, Galetti M (2013) Functional redundancy and complementarities of seed dispersal by the last neotropical megafrugivores. *PLoS ONE*, 8, e56252.
- Cain ML, Milligan BG, Strand AE (2000) Long-distance seed dispersal in plant populations. *American Journal of Botany*, 87, 1217–1227.
- Carbone C, Cowlshaw G, Isaac NJB, Rowcliffe JM (2005) How far do animals go? Determinants of day range in mammals. *The American Naturalist*, 165, 290–297.
- Cardoso NA, Pendu YL, Lapenta MJ, Raboy BE (2011) Frugivory patterns and seed dispersal by golden-headed lion tamarins (*Leontopithecus chrysomelas*) in Una Biological Reserve, Bahia, Brazil. *Mammalia*, 75, 327–337.
- Chapman CA (1989) Primate seed dispersal: the fate of dispersed seeds. *Biotropica*, 21, 148–154.
- Chapman CA, Chapman LJ (1995) Survival without dispersers: seedling recruitment under parents. *Conservation Biology*, 9, 675–678.

- Connell JH (1971) On the role of natural enemies in preventing competitive exclusion in some marine animals and in rain forest trees. *Dynamics of Populations*, 298, 298–312.
- Corlett RT, Lucas PW (1990) Alternative seed-handling strategies in primates: seed-spitting by long-tailed macaques (*Macaca fascicularis*). *Oecologia*, 82, 166–171.
- Dew JL, Wright P (1998) Frugivory and seed dispersal by four species of primates in Madagascar's eastern rain forest. *Biotropica*, 30, 425–437.
- Estrada A, Coates-Estrada R (1984) Fruit eating and seed dispersal by howling monkeys (*Alouatta palliata*) in the tropical rain forest of Los Tuxtlas, Mexico. *American Journal of Primatology*, 6, 77–91.
- Fan PF, Huang B, Jiang XL (2008) Seed dispersal by black gibbons (*Nomascus concolor*) in the Wuliang Mountains, Central Yunnan. *Acta Theriologica Sinica*, 28, 232–236. (in Chinese with English abstract) [范鹏飞, 黄蓓, 蒋学龙 (2008) 云南无量山黑长臂猿对植物种子的传播作用. 兽类学报, 28, 232–236.]
- Feeley K (2004) The role of clumped defecation in the spatial distribution of soil nutrients and the availability of nutrients for plant uptake. *Journal of Tropical Ecology*, 20, 1–4.
- Fleming TH, Kress WJ (2011) A brief history of fruits and frugivores. *Acta Oecologica*, 37, 521–530.
- Fuzessy LF, Cornelissen TG, Janson C, Silveira FAO (2016) How do primates affect seed germination? A meta-analysis of gut passage effects on neotropical plants. *Oikos*, 125, 1069–1080.
- Garber PA, Paciulli LM (1997) Experimental field study of spatial memory and learning in wild capuchin monkeys (*Cebus capucinus*). *Folia Primatologica*, 68, 236–253.
- Garber PA, Lambert JE (1998) Primates as seed dispersers: ecological processes and directions for future research. *American Journal of Primatology*, 45, 3–8.
- González-Zamora A, Arroyo-Rodríguez V, Escobar F, Ríos M, Oyama K, Ibarra-Manríquez G, Stoner KE, Chapman CA (2014) Contagious deposition of seeds in spider monkeys' sleeping trees limits effective seed dispersal in fragmented landscapes. *PLoS ONE*, 9, e89346.
- Hallwachs W (1986) Agoutis (*Dasyprocta punctata*): the inheritors of guapinol (*Hymenaea courbaril*: Leguminosae). In: *Frugivores and Seed Dispersal* (eds Estrada A, Theodore H), pp. 285–304. Springer, Dordrecht.
- Hemingway CA (1996) Morphology and phenology of seeds and whole fruit eaten by Milne-Edwards' sifaka, *Propithecus diadema edwardsi*, in Ranomafana National Park, Madagascar. *International Journal of Primatology*, 17, 637–659.
- Howe HF, Smallwood J (1982) Ecology of seed dispersal. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13, 201–228.
- Jansen PA, Bartholomeus M, Bongers F, Elzinga JA, Ouden JD, Wieren SEV (2002) The role of seed size in dispersal by a scatter-hoarding rodent. In: *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation* (eds Levey DJ, Silva WR, Galetti M), pp. 209–225. CABI Publishing, Wallingford.
- Janson CH (1983) Adaptation of fruit morphology to dispersal agents in a neotropical forest. *Science*, 219, 187–189.
- Janzen DH (1970) Herbivores and the number of tree species in tropical forests. *The American Naturalist*, 104, 501–528.
- Julliot C (1997) Impact of seed dispersal by red howler monkeys *Alouatta seniculus* on the seedling population in the understorey of tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 85, 431–440.
- Kaplin BA, Moermond TC (1998) Variation in seed handling by two species of forest monkeys in Rwanda. *American Journal of Primatology*, 45, 83–101.
- Koné I, Lambert JE, Refisch J, Bakayoko A (2008) Primate seed dispersal and its potential role in maintaining useful tree species in the Taï region, Côte-d'Ivoire: implications for the conservation of forest fragments. *Tropical Conservation Science*, 1, 293–306.
- Lambert JE (1998) Primate digestion: interactions among anatomy, physiology, and feeding ecology. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 7, 8–20.
- Lambert JE (1999) Seed handling in chimpanzees (*Pan troglodytes*) and redbell monkeys (*Cercopithecus ascanius*): implications for understanding hominoid and cercopithecine fruit-processing strategies and seed dispersal. *American Journal of Physical Anthropology*, 109, 365–386.
- Lambert JE (2002) Exploring the link between animal frugivory and plant strategies: the case of primate fruit processing and post-dispersal seed fate. In: *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation* (eds Levey DJ, Silva WR, Galetti M), pp. 365–379. CABI Publishing, Wallingford.
- Leighton M (1993) Modeling dietary selectivity by Bornean orangutans: evidence for integration of multiple criteria in fruit selection. *International Journal of Primatology*, 14, 257–313.
- Levey DJ, Silva WR, Galetti M (2002) *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation*. CABI Publishing, Wallingford.
- Linden B, Linden J, Fischer F, Linsenmair KE (2015) Seed dispersal by South Africa's only forest-dwelling guenon, the samango monkey (*Cercopithecus mitis*). *South African Journal of Wildlife Research*, 45, 88–99.
- Link A, Fiore AD (2006) Seed dispersal by spider monkeys and its importance in the maintenance of neotropical rain-forest diversity. *Journal of Tropical Ecology*, 22, 235–246.
- Lord JM, Markey AS, Marshall J (2002) Have frugivores influenced the evolution of fruit traits in New Zealand. In: *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation* (eds Levey DJ, Silva WR, Galetti M), pp. 55–68. CABI Publishing, Wallingford.
- Lu CH (2001) Effect of rodents on seed dispersal. *Chinese Journal of Ecology*, 20, 56–58. (in Chinese with English abstract) [鲁长虎 (2001) 啮齿类对植物种子的传播作用. 生态学杂志, 20, 56–58.]
- Maisels F (1993) Gut passage rate in guenons and mangabeys: ford.

- another indicator of a flexible feeding niche? *Folia Primatologica*, 61, 35–37.
- Martins MM (2006) Comparative seed dispersal effectiveness of sympatric *Alouatta guariba* and *Brachyteles arachnoides* in southeastern Brazil. *Biotropica*, 38, 57–63.
- McCanny SJ (1985) Alternatives in parent–offspring relationships in plants. *Oikos*, 45, 148–149.
- McConkey KR, Aldy F, Ario A, Chivers DJ (2002) Selection of fruit by gibbons (*Hylobates muelleri* × *agilis*) in the rain forests of central Borneo. *International Journal of Primatology*, 23, 123–145.
- Mourthé ÎMC, Strier KB, Boubli JP (2008) Seed predation of *Mabea fistulifera* (Euphorbiaceae) by northern muriquis (*Brachyteles hypoxanthus*). *Neotropical Primates*, 15, 40–45.
- Nathan R, Muller-Landau HC (2000) Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *Trends in Ecology and Evolution*, 15, 278–285.
- Nguyen HH, Bai B, Li N, Pan Y, Lu CH (2013) Fruit diet, selectivity and seed dispersal of Hatinh langur (*Trachypithecus francoisi hatinhensis*). *Acta Ecologica Sinica*, 33, 110–119. (in Chinese with English abstract) [阮海河, 白冰, 李宁, 潘扬, 鲁长虎 (2013) 河静黑叶猴果实性食物组成、选择及其对种子的扩散作用. *生态学报*, 33, 110–119.]
- Norconk MA, Veres M (2011) Physical properties of fruit and seeds ingested by primate seed predators with emphasis on sakis and bearded sakis. *The Anatomical Record*, 294, 2092–2111.
- Otani T (2010) Seed dispersal by Japanese macaques. In: *The Japanese Macaques* (eds Nakagawa N, Nakamichi M, Sugiura H), pp. 129–142. Springer, Tokyo.
- Petre CA, Tagg N, Beudels-Jamar RC, Haurez B, Doucet JL (2015) Western lowland gorilla seed dispersal: are seeds adapted to long gut retention times? *Acta Oecologica*, 67, 59–65.
- Poulsen JR, Clark CJ, Smith TB (2001) Seed dispersal by a diurnal primate community in the Dja Reserve, Cameroon. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 787–808.
- Righini N, Serio-Silva JC, Rico-Gray V, Martínez-Mota R (2004) Effect of different primate species on germination of *Ficus (Urostigma)* seeds. *Zoo Biology*, 23, 273–278.
- Robertson AW, Trass A, Ladley JJ, Kelly D (2006) Assessing the benefits of frugivory for seed germination: the importance of the deinhibition effect. *Functional Ecology*, 20, 58–66.
- Rudran R (1978) *Socioecology of the blue monkeys (Cercopithecus mitis stuhlmanni) of the Kibale forest, Uganda*. Smithsonian Institution Press, Washington DC.
- Russo SE, Chapman CA (2011) Primate seed dispersal: linking behavioral ecology with forest community structure. *Primates in Perspective*, 2, 523–534.
- Schupp EW, Jordano P, Gómez JM (2010) Seed dispersal effectiveness revisited: a conceptual review. *New Phytologist*, 188, 333–353.
- Sengupta A, McConkey KR, Radhakrishna S (2014) Seed dispersal by rhesus macaques *Macaca mulatta* in northern India. *American Journal of Primatology*, 76, 1175–1184.
- Sengupta A, Radhakrishna S (2015) Fruit trait preference in rhesus macaques (*Macaca mulatta*) and its implications for seed dispersal. *International Journal of Primatology*, 36, 999–1013.
- Stevenson PR, Castellanos MC, Pizarro JC, Garavito M (2002) Effects of seed dispersal by three ateline monkey species on seed germination at Tinigua National Park, Colombia. *International Journal of Primatology*, 23, 1187–1204.
- Stevenson PR (2011) The abundance of large ateline monkeys is positively associated with the diversity of plants regenerating in neotropical forests. *Biotropica*, 43, 512–519.
- Stevenson PR, Link A, Onshuus A, Quiroz AJ, Velasco M (2014) Estimation of seed shadows generated by Andean woolly monkeys (*Lagothrix lagothricha lugens*). *International Journal of Primatology*, 35, 1021–1036.
- Tabarelli M, Peres CA (2002) Abiotic and vertebrate seed dispersal in the Brazilian Atlantic forest: implications for forest regeneration. *Biological Conservation*, 106, 165–176.
- Traveset A (1998) Effect of seed passage through vertebrate frugivores' guts on germination: a review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 1, 151–190.
- Traveset A, Verdú M (2002) A meta-analysis of the effect of gut treatment on seed germination. In: *Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation* (eds Levey DJ, Silva WR, Galetti M), pp. 339–350. CABI Publishing, Wallingford.
- Traveset A, Robertson AW, Rodríguez-Pérez J (2007) A review on the role of endozoochory on seed germination. In: *Seed Dispersal: Theory and Its Application in a Changing World* (ed. Dennis AJ), pp. 78–103. CABI Publishing, Wallingford.
- Tsuji Y, Yangozene K, Sakamaki T (2010) Estimation of seed dispersal distance by the bonobo, *Pan paniscus*, in a tropical forest in Democratic Republic of Congo. *Journal of Tropical Ecology*, 26, 115–118.
- Tutin CEG, Williamson EA, Rogers ME, Fernandez M (1991) A case study of a plant–animal relationship: *Cola lizae* and lowland gorillas in the Lopé Reserve, Gabon. *Journal of Tropical Ecology*, 7, 181–199.
- Wang BC, Smith TB (2002) Closing the seed dispersal loop. *Trends in Ecology and Evolution*, 17, 379–386.
- Wehncke EV, Dominguez CA (2007) Seed dispersal ecology of non-restricted frugivores, capuchin monkeys in three neotropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 23, 519–528.

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 闫文杰)

•生物编目•

云南泸水高黎贡山高山生境的鸟兽多样性

高 歌¹ 王 斌² 何臣相² 罗 旭^{1*}¹ (西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 昆明 650224)² (云南高黎贡山国家级自然保护区泸水管理局, 云南泸水 673100)

摘要: 高黎贡山位于印缅生物多样性保护热点地区, 但由于地形复杂、交通不便等客观原因的限制, 以往对高黎贡山高山生境的鸟兽多样性调查数据较为缺乏。2014年10月至2016年6月, 我们利用红外相机在高黎贡山高山环境开展鸟类和兽类物种多样性调查, 以期对鸟兽多样性数据进行补充。调查期间, 于泸水辖区内选取北(金满)、中(听命湖)、南(片马垭口)3个样区, 每个样区布设20台红外相机。累计布设红外相机10,400台日, 拍摄到1,342张有效照片。共记录到18种兽类和44种鸟类, 分属9目28科, 包括3种国家一级、8种国家二级重点保护动物, IUCN濒危(EN)物种3种、易危(VU)物种3种、近危(NT)物种2种。相对丰富度较高的物种包括金色林鸮(*Tarsiger chrysaeus*)、血雉(*Ithaginis cruentus*)、光背地鸨(*Zoothera mollissima*)、灰颈鼠兔(*Ochotona forresti*)、小熊猫(*Ailurus fulgens*)等。记录到高黎贡山鸟类新记录1种: 黑胸歌鸲(*Luscinia pectoralis*)。金满样区1个年周期的监测结果显示, 高黎贡山高山生境鸟兽物种多样性有季节差异, 在5–10月动物活动频繁, 垂直迁移和鸟类的秋季迁徙对高山物种组成影响较大。本调查对高黎贡山高山环境的鸟兽多样性进行了有效补充, 可为高黎贡山高山鸟兽物种的保护和管理提供科学依据。

关键词: 高黎贡山; 高山生境; 红外相机; 物种丰富度

Biodiversity of birds and mammals in alpine habitat of Mt. Gaoligong, Lushui County, Yunnan

Ge Gao¹, Bin Wang², Chenxiang He², Xu Luo^{1*}¹ Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China of State Forestry Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224² Lushui Management Bureau of Gaoligongshan National Nature Reserve, Lushui, Yunnan 673100

Abstract: Gaoligong Mountains, known for its richest biodiversity, locates in the Indo-Burma Biodiversity Hotspot. However, our knowledge of the fauna in the alpine habitat of Mt. Gaoligong is still lacking due to complex terrain and poor accessibility. From October 2014 to June 2016, infrared cameras were established to monitor the biodiversity of mammals and birds in the alpine habitat of Mt. Gaoligong, Lushui County, Yunnan. In this survey, we selected three sample plots, North (Jinman), Central (Tingming Lake), and South (Pianma Pass), and in each sample plot, 20 cameras were established for 10,400 camera trapping days and 1,342 effective images were obtained. We identified 18 species of mammals and 44 species of birds belonging to 9 orders and 28 families, including 11 species listed as State Key Protected Wild Animals. The most abundant species was *Tarsiger chrysaeus*, along with *Ithaginis cruentus*, *Zoothera mollissima*, *Ochotona forresti*, and *Ailurus fulgens*. *Luscinia pectoralis* was recorded for the first time in Mt. Gaoligong. A one year survey at the Jinman sample plot revealed that faunal diversity in the alpine habitat had strongly seasonality, i.e. the months from May to October had much higher abundance than the other months. This was a consequence of the high immigration rate to alpine habitats during this period due to altitudinal movement and autumn migration. This survey is the first time to use infrared cameras for alpine faunal surveys at Mt. Gaoligong, and the generated data provided a scientific basis for the protection and management of this nature reserve.

Key words: Mt. Gaoligong; alpine habitat; camera traps; species richness

收稿日期: 2016-09-29; 接受日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(31660612)、云南省极小种群物种拯救保护项目(2015)和云南省林学一流学科建设项目资助

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xu_luo@aliyun.com

高黎贡山, 指怒江和伊洛瓦底江之间南北走向的狭长山脉以及山脉两侧的区域, 地处横断山区南段(薛纪如, 1995; Chaplin, 2005)。这里纬度和海拔跨度大, 气候垂直变化十分明显(薛纪如, 1995)。复杂的地理环境和多样的气候条件造就了高黎贡山丰富的生物多样性, 因此被纳入印缅生物多样性保护热点地区(Myers et al, 2000)。

高黎贡山鸟类和兽类的考察均始于19世纪末, 主要为国外传教士、博物学家的生物标本采集活动(徐志辉, 1998; 梁丹等, 2015), 国内学者于20世纪50年代初开始开展高黎贡山鸟兽的科学考察。历经多次动植物资源综合科学考察(Ma et al, 1995; Lan & Dunbar, 2000), 结果主要汇总于《高黎贡山自然保护区》和《怒江自然保护区》两本考察报告中(薛纪如, 1995; 徐志辉, 1998)。针对高黎贡山鸟类资源还进行过多次专项调查, 最近一次较为详尽的调查、结合历史数据显示高黎贡山鸟类记录汇总为486种(Dumbacher et al, 2011)。

在高黎贡山, 林线(tree line)海拔随纬度而变化, 林线以上主要为寒温性竹林、寒温性灌丛和草甸、岩石裸露地等, 这类生境区域广、面积大、生态环境相对简单和脆弱, 对高黎贡山生态环境状况具有重要的指示作用(薛纪如, 1995; 韩联宪等, 2004)。林线以上的植被称为高山植被(徐志辉, 1998), 本文将高黎贡山林线以上的区域定义为高山生境(alpine habitat)。因自然条件恶劣、人员难以到达、调查工作难度大等因素的限制, 以往对高黎贡山高山生境中的鸟兽多样性的调查数据较为缺乏。

近年来, 红外相机被越来越广泛地应用于自然保护区和偏远地区的生物多样性本底调查(李晟等, 2014; 刘芳等, 2014; 吴建普等, 2016)。与传统动物多样性调查方法相比, 红外相机技术具有能捕获难以发现的物种、对动物干扰小、节省人力等优点, 弥补了传统调查方法的缺陷(Carbone et al, 2001; O'Connell et al, 2011; 斯幸峰和丁平, 2014; 肖治术等, 2014; 张履冰等, 2014)。马世来和Harris (1996)早在1994年就利用该技术对高黎贡山的野生动物进行调查。最近, 陈奕欣等(2016)在高黎贡山中段西坡片马区域运用红外相机拍摄到鸟类和兽类45种, 为泸水辖区野生动物资源本底提供了良好的证据。以往的调查工作主要在林线以下的中山湿性阔叶林、温凉性针叶林等生境中开展, 少有涉及林

线以上的高山生境。

本研究于2014年10月至2016年6月, 在高黎贡山自然保护区林线以上的高山生境中采用红外相机开展鸟类和兽类调查, 以期补充完善高黎贡山泸水辖区的鸟类和兽类多样性数据, 并了解高山生境中的鸟兽多样性分布特点。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省怒江傈僳族自治州泸水县城内(图1), 属于高黎贡山中段(Dumbacher et al, 2011), 地理坐标为25°33'–26°31' N, 98°42'–98°50' E。处于我国西部季风气候区, 四季不分明、干湿季显著, 同时气候要素垂直变化十分明显, 东、西坡气候差异大, 南、北段气候存在差异(薛纪如, 1995)。植被类型随海拔有显著变化, 从低到高主要有河谷稀树灌木草丛(1,100 m以下)、暖性针叶林(1,100–1,800 m)、半湿润常绿阔叶林(1,800–2,200 m)、中山湿性常绿阔叶林(2,200–2,800 m)、温凉性针叶林和山顶苔藓矮林(2,700–3,100 m)、寒温性竹林和寒温性灌丛和草甸(3,100–3,600 m)以及裸岩流石滩(3,600 m以上)(薛纪如, 1995)。本文研究区域海拔在3,100–4,000 m之间, 属于寒温性湿润型气候, 长冬严寒、光照少、云雨多, 年平均气温小于7℃, 最冷月平均气温在1℃以下, 最热月平均气温低于13℃, 年日照时数不足1,500 h, 云雾多, 年降水量多在3,300 mm以上; 适宜苍山冷杉林、箭竹林生长, 主要为寒温性竹林、寒温性灌丛和草甸、岩石裸露地等生境(薛纪如, 1995)。

1.2 红外相机布设与数据采集

在研究区域内选取北(金满)、中(听命湖)、南(片马垭口) 3个样区, 样区均位于林线以上。实地布设前, 利用GIS在地形图上设置2排10列100 m × 100 m的网格。实地布设时, 在每个网格内选择鸟类和兽类水源地、觅食地、道路等位置布设1台红外相机。相机安装于树干或自制箭竹支架上, 距离地面的高度依据地形而异, 大致在20–100 cm的范围。各个样区内分别布设20台红外相机进行监测。

三个样区的红外相机布设时间分别为: 片马垭口样区: 从2015年1月27日至4月2日, 累计1,300台日; 听命湖样区: 从2014年10月4日至11月25日, 累计1,040台日; 金满样区布设红外相机2批次, 分别

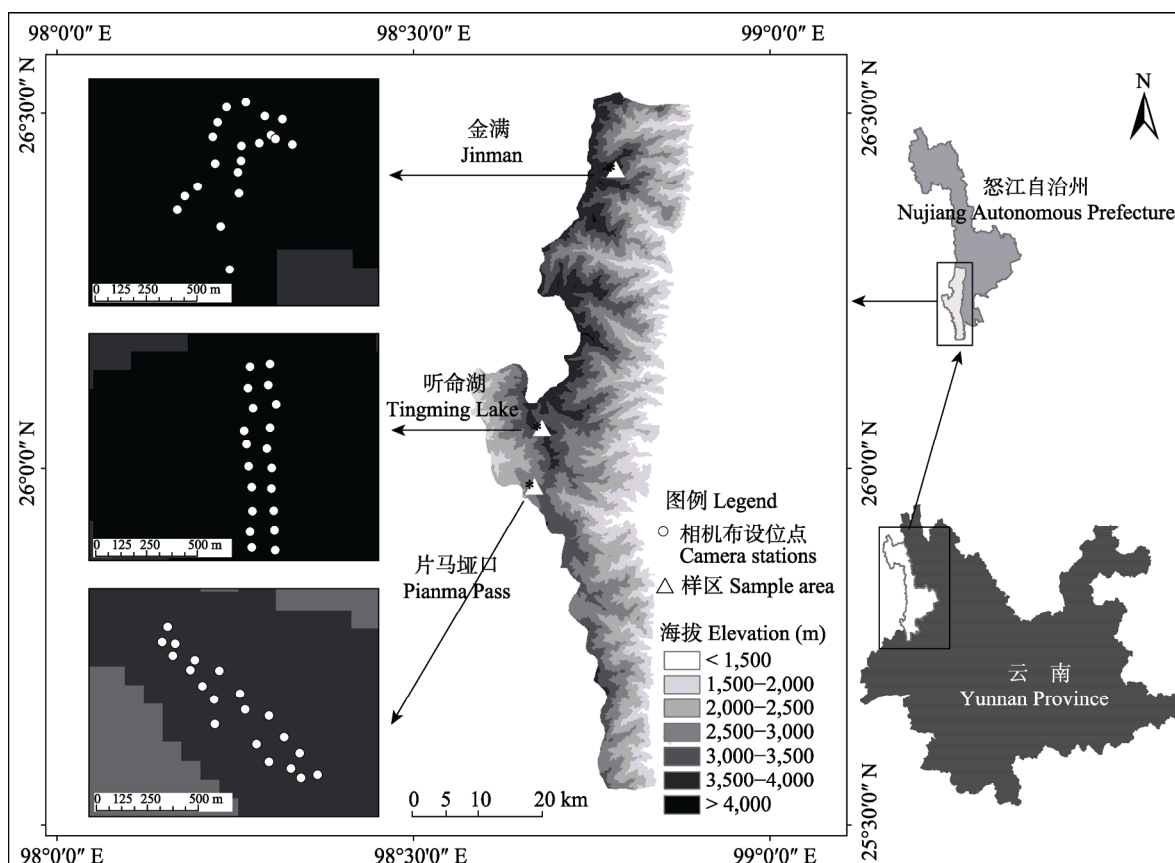


图1 研究地理位置与相机布设点

Fig. 1 Study site and the location of infrared cameras

为2014年10月11日至11月5日, 以及2015年5月20日至2016年6月2日, 累计8,060台日。研究期间, 在样区内共计布设红外相机10,400台日。

红外相机的重要参数设置为: 拍照 + 录像模式(触发后拍3张照片 + 录制30 s视频)、触发间隔“1 s”、灵敏度“中”。安放相机时记录安放时间、经纬度、海拔、坡向以及周围10 m × 10 m范围内的灌木盖度、草本盖度等生境因子。相机使用16 G的SD存储卡, 每台相机装12节锂电池供电。听命湖样区和片马垭口样区在监测期间相机布设时间不超过3个月, 未进行电池和存储卡更换, 金满样区2–3个月更换一次。

1.3 数据处理

1.3.1 物种识别与分类

对拍摄到的鸟类和兽类照片参考《中国鸟类野外手册》(约翰·马敬能等, 2000)、《中国兽类野外手册》(Smith et al, 2009)等进行鉴定。动物名称和分类系统参照《中国鸟类分类与分布名

录(第二版)》(郑光美, 2011)和《中国哺乳动物多样性》(蒋志刚等, 2015)。保护级别的界定参照《国家重点保护动物名录》(<http://www.forestry.gov.cn>)、CITES附录(<http://www.cites.gov.cn/>)、IUCN红色名录(IUCN, 2016)、《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)。

1.3.2 独立有效照片与物种相对丰富度

参照O'Brien等(2003)的标准, 对同一台相机所拍摄到的鸟类和兽类照片进行独立性判定, 即同一台相机在超过30 min 后所拍摄的同一种的照片或视频视为独立有效。将拍摄到各种鸟类和兽类物种的独立照片数与所拍摄物种独立照片总数的百分比作为每个物种的相对丰富度(relative abundance index, RAI)。物种相对丰富度的计算公式如下(武鹏峰等, 2012):

$$RAI = A_i / N \times 100 \quad (1)$$

式中, RAI 为物种相对丰富度; A_i 为红外相机所拍摄到第*i*种($i = 1, 2, 3, \dots, 63$)鸟类或兽类的独立照片数;

N 为所拍摄鸟类和兽类的独立照片总数。

本次拍摄到的啮齿类仓鼠科或鼠科物种难以鉴别,以“仓鼠科(*Cricetidae* spp.)或鼠科(*Muridae* spp.)”表示这个类群。计算物种丰富度时,合并为1个类群计算。

1.3.3 拍摄鸟兽物种月间变化

选择金满样区2015年6月1日至2016年5月31日的监测数据,分析该区域拍摄鸟兽物种的季节变化。按不同月份统计该样区红外相机所拍摄的鸟类和兽类物种独立照片数、物种数,分析月间变化。

2 结果

2.1 鸟类和兽类多样性

监测期间共拍摄到鸟类和兽类有效照片1,342张,其中兽类399张,鸟类943张。共鉴定出62种鸟类和兽类(不含啮齿类鼠科和仓鼠科物种),其中兽类18种,鸟类44种,分属9目28科(附录1,附录2)。雀形目鸟类最多,有38种,占鉴定物种总数的61.29%,占鸟种总数的86.36%。

拍摄到的动物中,国家一级重点保护动物有熊猴(*Macaca assamensis*)、林麝(*Moschus berezovskii*)和白尾梢虹雉(*Lophophorus sclateri*) 3种,国家二级重点保护动物有黑熊(*Ursus thibetanus*)、黄喉貂(*Martes flavigula*)、小熊猫(*Ailurus fulgens*)、中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)、普通鵟(*Buteo buteo*)、血雉(*Ithaginis cruentus*)、白鹇(*Lophura nythemera*)和红腹角雉(*Tragopan temminckii*) 8种。被IUCN红色名录收录8种: 3种被列为濒危(EN),即绒毛䟽鼠(*Eupetaurus cinereus*)、林麝、小熊猫; 3种被列为易危(VU),即黄喉貂、黑熊、白尾梢虹雉; 2种被列为近危(NT),即熊猴和中华鬣羚。被CITES附录收录物种12种,其中附录I物种有黑熊、小熊猫、中华鬣羚、白尾梢虹雉,附录II物种有熊猴、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、林麝和普通鵟,附录III物种有黄喉貂、黄鼬(*Mustela sibirica*)和果子狸(*Paguma larvata*) (附录1)。

物种相对丰富度最高的是金色林鸫(*Tarsiger chrysaeus*, 15.87%), 其次为血雉(13.79%)、光背地鸫(*Zoothera mollissima*, 8.27%)、灰颈鼠兔(*Ochotona forresti*, 7.45%)、小熊猫(6.11%)、黑顶噪鹛(*Garrulax affinis*, 5.59%)、白眉林鸫(*Luscinia indica*, 4.99%)、

白尾梢虹雉(3.50%) (附录1)。按不同目计,雀形目的相对丰富度最高,为52.53%,其次分别为鸡形目(17.59%)、食肉目(10.05%)、啮齿目(9.98%)和兔形目(8.27%)(附录1)。

2015年10月拍摄到丘鹑(*Scolopax rusticola*)、蓝额红尾鸲(*Phoenicurus frontalis*)、北红尾鸲(*Phoenicurus aureus*)、树鹩(*Anthus hodgsoni*)、粉红胸鹩(*Anthus roseatus*)、红胁蓝尾鸲(*Tarsiger eyanurus*)、灰背伯劳(*Lanius tephronotus*)、普通朱雀(*Carduelis erythrurus*)、黑胸歌鸲(*Luscinia pectoralis*)等9种迁徙鸟类。

2.2 鸟兽物种季节变化

金满样区1个年周期监测结果表明,高黎贡山高山生境每个月份均有鸟类或兽类活动,频繁活动期为5–10月(图2)。拍摄到独立有效照片808张,占这一年周期中拍摄到独立有效照片数的90.48%,其中又以7月份所拍摄到的独立有效照片数最多(208张)。

不同月份拍摄到的鸟类和兽类物种数不同,以4–10月居多(44种),其中以7月份最多(28种)。不同月份间物种数变化,鸟类比兽类更为明显(图3)。

3 讨论

3.1 高黎贡山野生动物红外相机监测

本次调查记录的62种鸟兽物种中,黑胸歌鸲为高黎贡山鸟类新记录。中华竹鼠(*Rhizomys sinensis*)、绒毛䟽鼠、高黎贡鼠兔(*Ochotona gaoligongensis*)、黑冠山雀(*Parus rubidiventris*)、黄颈拟蜡嘴雀

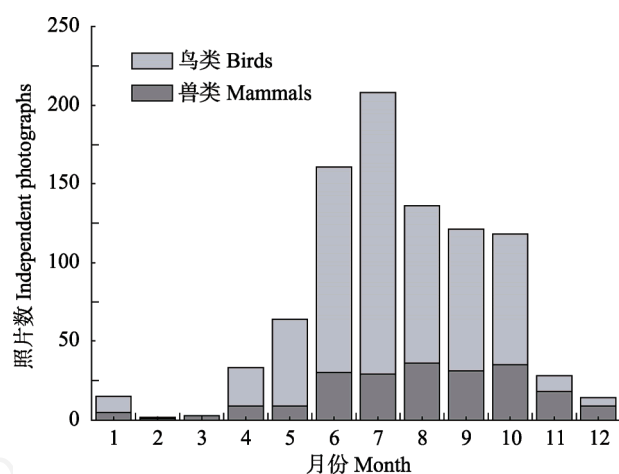


图2 物种有效照片数月间变化

Fig. 2 Camera-trap photos in different months (June 2015 to May 2016)

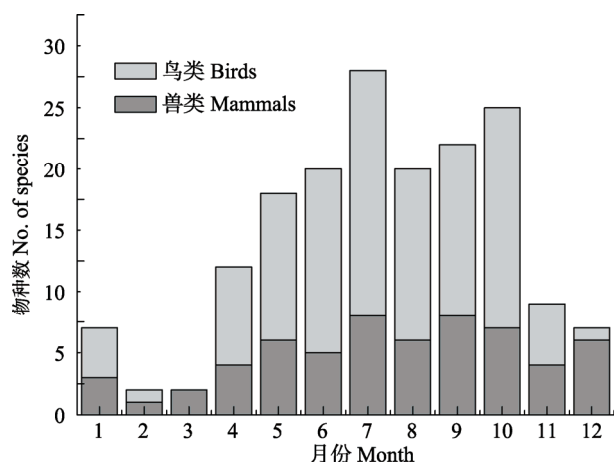


图3 鸟兽物种数的月变化

Fig. 3 Species number in different months (June 2015 to May 2016)

(*Mycerobas affinis*)为高黎贡山泸水县辖区首次记录(薛纪如, 1995; 徐志辉, 1998; Dumbacher et al, 2011; 梁丹等, 2015)。普通鵲、白鹇、树鹇、鸛鹑(*Troglodytes troglodytes*)等14种鸟类, 在梁丹等(2015) 3,300–3,800 m高海拔段未被记录到。隐纹花松鼠(*Tamias swinhoi*)、中华竹鼠、果子狸(*Paguma larvata*)、豹猫等8种兽类在薛纪如(1995)和徐志辉(1998)的3,100–4,162 m海拔带未记录到。表明利用红外相机作为调查工具, 可对高黎贡山高山生境中的鸟兽本底资料进行很好的补充。

结合陈奕欣等(2016)的调查结果, 在泸水县高黎贡山自然保护区共记录鸟兽物种82种, 其中鸟类56种, 兽类26种。在56种鸟类中, 仅有12种是本研究与陈奕欣等(2016)共同记录, 26种兽类中仅13种为共同记录, 说明高黎贡山高山与中低山的鸟兽物种组成差别较大, 这与高黎贡山的生境随海拔变化较大有关。另外, 本次调查较陈奕欣等(2016)记录到更多的物种, 其中鸟类增加较多, 主要是因为林线以上多为竹林、高山草甸、裸岩生境, 较少有高大树木, 鸟类多下地活动或栖于竹林中较低位置, 有利于红外相机拍摄。

本次调查拍摄到的绒毛鼯鼠为IUCN红色名录濒危(EN)物种(IUCN, 2016), 主要分布于喜马拉雅山脉(Corbet & Hill, 1992)。在中国, 绒毛鼯鼠仅在云南贡山县有2张毛皮标本记录(杨光荣和王应祥, 1989; Yu et al, 2004)。由于该物种主要栖息于高山悬崖(Corbet & Hill, 1992), 调查难度大, 以往对其在中国的分布以及种群数量情况了解甚少, 本调查为

绒毛鼯鼠在中国的分布提供了新的依据。本次调查还拍摄到高黎贡鼠兔, 该物种的模式标本产地是贡山县(王应祥等, 1988), 新种发表后再无新分布记录报道, 本次调查也为高黎贡鼠兔的分布提供了新的依据。

本次调查中未记录到梁丹等(2015)在研究区域3,300–3,800 m海拔段记录到的林雕(*Ictinaetus malayensis*)、剑嘴鹛(*Xiphirhynchus superciliaris*)、大树莺(*Cettia major*)、黑眉长尾山雀(*Aegithalos bonvaloti*)、红胸啄花鸟(*Dicaeum ignipectus*)等12种鸟类(梁丹等, 2015)。这些鸟种多为树栖, 很少下地活动, 而红外相机主要监测地面, 监测鸟类存在一定的局限性。本次调查中拍摄到部分啮齿目仓鼠科或鼠科物种照片, 但由于这些物种主要为夜行性, 拍摄的照片均为黑白照, 仅凭照片难以鉴定到种, 甚至连科都难以鉴定, 红外相机在鼠类监测中也存在局限性(刘芳等, 2012, 2014)。另外, 本调查对迁徙鸟类的记录, 表明高黎贡山高山生境存在候鸟迁徙。在以往对高黎贡山的鸟类调查中无专门涉及迁徙鸟类的调查数据, 高黎贡山鸟类迁徙的路线、规模等还需进一步调查。

3.2 高黎贡山高山生境鸟兽多样性特点

依据本次调查结果, 高黎贡山高山鸟兽物种多样性有如下两个特点:

(1)鸟兽物种活动季节性强, 具有垂直迁移习性。这个特点主要与印度洋暖湿气流带来的降水和温度变化有关。本次监测表明, 5–10月是高山鸟兽活动的高峰期(图2), 5月份高黎贡山开始进入雨季、同时温度回升(薛纪如, 1995), 植物生长、昆虫繁衍, 为鸟类和兽类提供了充足的食物资源和适宜生存、繁殖的场所, 如7月是鸟类物种多样性最高峰(图3), 物种组成以繁殖鸟为主。而11月到次年的4月为高黎贡山的旱季, 同时高山上开始降雪, 气温降低(薛纪如, 1995), 植物枯落, 鸟类和兽类多因缺少食物资源或者难以抵御低温而迁至低海拔活动, 如小熊猫(胡刚, 1998)和白尾梢虹雉(罗旭等, 2004), 因此该时期内高山上鸟兽极少(图2, 3)。季节性强还体现在鸟类迁徙对高山鸟类多样性的影响。本调查表明鸟类全年有2个高峰(图3), 10月高峰的形成与鸟类迁徙有关, 该月鸟种组成中迁徙鸟种较多。

(2)雀形目鸟类物种比例高。中国共有鸟兽物种2,044种(郑光美, 2011; 蒋志刚等, 2015), 其中雀形

目鸟类763种, 雀形目鸟类占鸟兽物种总数的37.33%, 该数值反映了雀形目鸟类在中国的基础比例。本调查雀形目鸟类物种比例(61.29%)不仅远高于全国平均水平, 还高于西南山地各类森林生态系统中类似工作所得到的数据, 如张明霞等(2014)在云南西双版纳热带季雨林调查到雀形目鸟种占全部物种的48.28%; 温立嘉等(2014)和吴建普等(2016)在西藏墨脱森林中调查到该比例为40.74%; 在四川龙溪—虹口森林中该比例为45.45%(胡力等, 2016); 陈奕欣等(2016)同在高黎贡山泸水辖区中低海拔森林中记录该值为35.56%。此外, 本调查的雀形目比例也高于在开阔生境中进行类似工作得到的数据, 如薛亚东等(2014)在阿尔金山干旱荒漠调查该值为30.77%; 董潭成等(2014)在新疆卡拉麦里山干旱荒漠调查该比例值为45.45%。虽然由于啮齿目物种难鉴定到种, 会导致本研究雀形目鸟类比例值偏高, 但是该问题普遍存在于以上类似工作中, 横向比较应可成立。

高黎贡山高山生境中雀形目鸟类物种比例高, 可能与两个因素有关: (1)相较于西南山地中低海拔的森林生态系统, 高山生境相对单调, 主要以箭竹林、草甸、流石滩为主, 鸟类多到地面取食活动, 增加了雀形目鸟类被拍摄到的可能性; (2)相较于干旱荒漠和高寒草甸等开阔生境, 高黎贡山高山生境存在较高的季节性鸟类物种迁入, 如春季温度回升后鸟类垂直迁移到高山进行繁殖、春秋季节迁徙鸟类过路停留等, 以年周期为统计单位计算物种比例时, 会得到较高的比例值。

致谢: 西南林业大学刘志洪同学协助分析红外相机照片, 袁华老师和丁春晓同学协助制作红外相机分布图; 中国科学院昆明动物研究所李权博士和岩道先生、中南林业科技大学陈奕欣博士、西南林业大学韩联宪教授、中山大学梁丹博士鉴定部分鸟兽照片, 在此一并表示感谢!

参考文献

- Carbone C, Christie S, Conforti K, Coulson T, Franklin N, Ginsberg JR, Griffiths M, Holden J, Kawanishi K, Kinnaid M, Laidlaw R, Lynam A, Macdonald DW, Martyr D, McDougal C, Nath L, O'Brien T, Seidensticker J, Smith DJL, Sunquist M, Tilson R, Wan Shahrudin WN (2001) The use of photographic rates to estimate densities of tigers and other cryptic mammals. *Animal Conservation*, 4, 75–79.
- Chaplin G (2005) Physical geography of the Gaoligong Shan area of Southwest China in relation to biodiversity. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 56, 527–556.
- Chen YX, Xiao ZS, Li M, Wang XW, He CX, He GP, Li HS, Shi SJ, Xiang ZF (2016) Preliminary survey for the biodiversity of mammal and bird using camera traps in the west of mid-section Mt. Gaoligong. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 302–312. (in Chinese with English abstract) [陈奕欣, 肖治术, 李明, 王新文, 何臣相, 何贵品, 李海曙, 施顺金, 向左甫 (2016) 利用红外相机对高黎贡山中段西坡兽类和鸟类多样性初步调查. *兽类学报*, 36, 302–312.]
- Corbet GB, Hill JE (1992) *The Mammals of the Indomalayan Region: A Systematic Review*, pp. 306–320. Oxford University Press, Oxford.
- Dong TC, Chu HJ, Wu HP, Wang Y, Ge Y, Bu L (2014) Monitoring birds and mammals through camera traps in Mount Kalamaili Ungulate Nature Reserve, Xinjiang. *Biodiversity Science*, 22, 804–807. (in Chinese) [董潭成, 初红军, 吴洪潘, 王渊, 葛炎, 布兰 (2014) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鸟兽的红外相机监测. *生物多样性*, 22, 804–807.]
- Dumbacher JP, Miller J, Flannery ME, Yang XJ (2011) Avifauna of the Gaoligong Shan Mountains of western China: a hotspot of avian species diversity. *Ornithological Monographs*, 70, 30–63.
- Han LX, Huang SL, Luo X, Yang HJ (2004) The distribution and conservation of Sclater's monal in Yunnan, China. *Biodiversity Science*, 12, 523–527. (in Chinese with English abstract) [韩联宪, 黄石林, 罗旭, 杨红军 (2004) 云南白尾梢虹雉的分布与保护. *生物多样性*, 12, 523–527.]
- Hu G (1998) A preliminary study on the bionomic strategies of the red panda in Gaoligong Mountains. *Zoological Research*, 19, 358, 366. (in Chinese) [胡刚 (1998) 高黎贡山小熊猫生态对策的初步研究. *动物学研究*, 19, 358, 366.]
- Hu L, Xie WH, Shang T, Jiang BK, Xiao ZS (2016) Preliminary survey for mammal and bird diversity using camera traps in the Longxi-Hongkou National Nature Reserve of Sichuan Province, Southwest China. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 330–337. (in Chinese with English abstract) [胡力, 谢文华, 尚涛, 姜丙坤, 肖治术 (2016) 龙溪—虹口国家级自然保护区兽类和鸟类多样性红外相机调查结果初报. *兽类学报*, 36, 330–337.]
- IUCN (2016) *The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2015-4*. <http://www.iucnredlist.org>. (accessed on 2016-07-25)
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's vertebrates. *Biodiversity Science*, 24,

- 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu SY, Luo ZH, Li CW (2015) China's mammalian diversity. *Biodiversity Science*, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015) 中国哺乳动物多样性. 生物多样性, 23, 351–364.]
- Lan D, Dunbar R (2000) Bird and mammal conservation in Gaoligongshan Region and Jingdong County, Yunnan, China: patterns of species richness and nature reserves. *Oryx*, 34, 275–286.
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. 生物多样性, 22, 685–695.]
- Liang D, Gao G, Wang B, Wang XW, Chen YX, Wu XR, Zhao C, Jiang DM, Han LX, Luo X (2015) The diversity and vertical distribution of the birds in middle Gaoligong Mountain, Yunnan. *Sichuan Journal of Zoology*, 34, 930–940. (in Chinese with English abstract) [梁丹, 高歌, 王斌, 王新文, 陈奕欣, 吴新然, 赵超, 蒋德梦, 韩联宪, 罗旭 (2015) 云南高黎贡山中段鸟类多样性和垂直分布特征. 四川动物, 34, 930–940.]
- Liu F, Li DQ, Wu JG (2012) Using infrared cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 730–739. (in Chinese with English abstract) [刘芳, 李迪强, 吴记贵 (2012) 利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种. 生态学报, 32, 730–739.]
- Liu F, Su XJ, Li DQ, Wang MZ, Zhang ZL (2014) Using camera trap to investigate animal diversity in Hunan Gaowangjie National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 22, 779–784. (in Chinese) [刘芳, 宿秀江, 李迪强, 王木忠, 张自亮 (2014) 利用红外相机调查湖南高望界国家级自然保护区鸟兽多样性. 生物多样性, 22, 779–784.]
- Luo X, Han LX, Ai HS (2004) Preliminary report on the movement and habitat preference of Sclater's monal at Mt. Gaoligong in winter. *Zoological Research*, 25, 48–52. (in Chinese with English abstract) [罗旭, 韩联宪, 艾怀森 (2004) 高黎贡山冬季白尾梢虹雉运动方式和生境偏好的初步观察. 动物学研究, 25, 48–52.]
- Ma SL, Han LX, Lan DY, Ji WZ, Harris RB (1995) Faunal resources of the Gaoligongshan Region of Yunnan, China: diverse and Threatened. *Environmental Conservation*, 22, 250–258.
- Ma SL, Harris RB (1996) Use of remote camera systems to document wildlife species presence in forested areas of Yunnan. *Zoological Research*, 17, 360–370. (in Chinese) [马世来, Harris RB (1996) 自动感应照像系统在野生动物调查中的应用. 动物学研究, 17, 360–370.]
- MacKinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, 6, 131–139.
- O'Connell AF, Nichols JD, Karanth KU (2011) Camera Traps in Animal Ecology: Methods and Analyses. Springer-Verlag, New York.
- Si XF, Ding P (2014) Camera trap survey on population dynamics of mammals and birds in Gutianshan forest dynamics plot, eastern China. *Biodiversity Science*, 22, 819–822. (in Chinese) [斯幸峰, 丁平 (2014) 古田山森林动态监测样地内鸟兽种群动态的红外相机监测. 生物多样性, 22, 819–822.]
- Smith A, Xie Y, Hoffmann RS, Lunde D, MacKinnon J, Wilson DE, Wozencraft WC, Gemma F (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [Smith A, 解焱, Hoffmann RS, Lunde D, MacKinnon J, Wilson DE, Wozencraft WC, Gemma F (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Wang YX, Gong ZD, Duan XD (1988) A new species of *Ochotona* (Cochotonidae, Lagomorpha) from Mt. Gaoligong, Northwest Yunnan. *Zoological Research*, 9, 201–207. (in Chinese with English abstract) [王应祥, 龚正达, 段兴德 (1988) 高黎贡山鼠兔一新种. 动物学研究, 9, 201–207.]
- Wen LJ, Shi K, Huang J, Song Y, Guo YM (2014) Preliminary analysis of mammal and bird diversity monitored with camera traps in Medog, Tibet. *Biodiversity Science*, 22, 798–799. (in Chinese) [温立嘉, 时坤, 黄建, 宋阳, 郭玉民 (2014) 西藏墨脱鸟兽红外相机监测初报. 生物多样性, 22, 798–799.]
- Wu JP, Luo H, Zhu XL, Li BZ, Liu WL, Ci P (2016) Monitoring mammals and birds with camera traps at different altitudes of Medog, Tibet. *Biodiversity Science*, 24, 351–354. (in Chinese) [吴建普, 罗红, 朱雪林, 李炳章, 刘务林, 次平 (2016) 西藏墨脱不同海拔区鸟兽红外相机监测. 生物多样性, 24, 351–354.]
- Wu PF, Liu XH, Cai Q, He XB, Songer M, Zhu Y, Shao XM (2012) The application of infrared camera in mammal research in Guanyinshan Nature Reserve. *Acta Theriologica*

- Sinica, 32, 67–71. (in Chinese with English abstract) [武鹏峰, 刘雪华, 蔡琼, 何祥博, Songer M, 朱云, 邵小明 (2012) 红外相机技术在陕西观音山自然保护区兽类监测研究中的应用. 兽类学报, 32, 67–71.]
- Xiao ZS, Li XH, Jiang GS (2014) Applications of camera trapping to wildlife surveys in China. *Biodiversity Science*, 22, 683–684. (in Chinese) [肖治术, 李欣海, 姜广顺 (2014) 红外相机技术在我国野生动物监测研究中的应用. 生物多样性, 22, 683–684.]
- Xu ZH (1998) Nujiang Nature Reserve. Yunnan Fine Arts Publishing House, Kunming. (in Chinese) [徐志辉 (1998) 怒江自然保护区. 云南美术出版社, 昆明.]
- Xue JR (1995) Gaoligong Mountain National Nature Reserve. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [薛纪如 (1995) 高黎贡山国家自然保护区. 中国林业出版社, 北京.]
- Xue YD, Liu F, Guo TZ, Yuan L, Li DQ (2014) Using camera traps to survey wildlife at water sources on the northern slope of the Altun Mountains, China. *Acta Theriologica Sinica*, 34, 164–171. (in Chinese with English abstract) [薛亚东, 刘芳, 郭铁征, 袁磊, 李迪强 (2014) 基于相机陷阱技术的阿尔金山北坡水源地鸟兽物种监测. 兽类学报, 34, 164–171.]
- Yang GR, Wang YX (1989) The list of rodents in Yunnan Province and its relationship with disease. *Chinese Journal of Rodents Control*, 5, 222–229. (in Chinese) [杨光荣, 王应祥 (1989) 云南省啮齿类动物名录及与疾病的关系. 中国鼠类防制杂志, 5, 222–229.]
- Yu FH, Yu FR, Guire PMM, Kilpatrick CW, Pang JF, Wang YX, Lu SQ, Woods CA (2004) Molecular phylogeny and biogeography of woolly flying squirrel (Rodentia: Sciuridae), inferred from mitochondrial cytochrome *b* gene sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 33, 735–744.
- Zhang LB, Cui SP, Huang YJ, Chen DQ, Qiao HJ, Li CW, Jiang ZG (2014) Infrared camera traps in wildlife research and monitoring in China: issues and insights. *Biodiversity Science*, 22, 696–703. (in Chinese with English abstract) [张履冰, 崔绍朋, 黄元骏, 陈代强, 乔慧捷, 李春旺, 蒋志刚 (2014) 红外相机技术在我国野生动物监测中的应用: 问题与限制. 生物多样性, 22, 696–703.]
- Zhang MX, Cao L, Quan RC, Xiao ZS, Yang XF, Zhang WF, Wang XZ, Deng XB (2014) Camera trap survey of animals in Xishuangbanna forest dynamics plot, Yunnan. *Biodiversity Science*, 22, 830–832. (in Chinese) [张明霞, 曹林, 权锐昌, 肖治术, 杨小飞, 张文富, 王学忠, 邓晓保 (2014) 利用红外相机监测西双版纳森林动态样地的野生动物多样性. 生物多样性, 22, 830–832.]
- Zheng GM (2011) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 2nd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2011) 中国鸟类分类与分布名录, 第2版. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 云南泸水高黎贡山高山生境中红外相机拍摄鸟兽物种名录

Appendix 1 Species list of birds and mammals in alpine habitat of Mt. Gaoligong, Lushui, Yunnan.
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016276-1.pdf>

附录2 云南高黎贡山泸水片区高山鸟兽代表性物种照片

Appendix 2 Some alpine habitat species captured by camera traps at Mt. Gaoligong, Lushui, Yunnan.
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016276-2.pdf>

附录 1 云南泸水高黎贡山高山生境中红外相机拍摄鸟兽物种名录

Appendix 1 Species list of birds and mammals in alpine habitat at Mt. Gaoligong, Lushui, Yunnan

物种 Species	独立有效照 片数 No. of in- dependent images	相对丰富度 指数 Relative abundance index (%)	国家保护 等级 Conserva- tion status	IUCN 红色名 录 IUCN Red List	CITES 附 录 CITES Appendix	中国脊椎 动物红色 名录 Red List of China's vertebrates
哺乳纲 MAMMALIA						
I 灵长目 Primates	4	0.30				
1 猴科 Cercopithecidae						
(1)熊猴 <i>Macaca assamensis</i>	4	0.30	I	NT	附录 II	VU
II 啮齿目 Rodentia	134	9.98				
2 松鼠科 Sciuridae						
(2)橙腹长吻松鼠 <i>Dremomys lokriah</i>	11	0.82		LC		NT
(3)隐纹花松鼠 <i>Tamias swinhoi</i>	4	0.30		LC		LC
(4)绒毛鼯鼠 <i>Eupetaurus cinereus</i>	31	2.31		EN		DD
3 鼯鼠科 Spalacidae						
(5)中华竹鼠 <i>Rhizomys sinensis</i>	1	0.07		LC		LC
4 豪猪科 Hystricidae						
(6)马来豪猪 <i>Hystrix brachyura</i>	1	0.07		LC		LC
(7)仓鼠科 Cricetidae spp. /鼠科 Muridae spp.	86	6.41				
III 兔形目 Lagomorpha	111	8.27				
5 鼠兔科 Ochotonidae						
(8)灰颈鼠兔 <i>Ochotona forresti</i>	100	7.45		LC		NT
(9)高黎贡鼠兔 <i>Ochotona gaoligongensis</i>	11	0.82				NT
IV 食肉目 Carnivora	135	10.05				
6 熊科 Ursidae						
(10)黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	1	0.07	II	VU	附录 I	VU
7 鼬科 Mustelidae						
(11)黄喉貂 <i>Martes flavigula</i>	1	0.07	II	VU	附录 III	NT
(12)黄鼬 <i>Mustela sibirica</i>	35	2.61		LC	附录 III	LC
8 灵猫科 Viverridae						
(13)果子狸 <i>Paguma larvata</i>	1	0.07		LC	附录 III	NT
9 猫科 Felidae						
(14)豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i>	15	1.12		LC	附录 II	VU
10 小熊猫科 Ailuridae						
(15)小熊猫 <i>Ailurus fulgens</i>	82	6.11	II	EN	附录 I	VU
V 偶蹄目 Artiodactyla	14	1.12				
11 猪科 Suidae						
(16)野猪 <i>Sus scrofa</i>	4	0.30		LC		LC
12 麝科 Moschidae						

物种 Species	独立有效照 片数 No. of in- dependent images	相对丰富度 指数 Relative abundance index (%)	国家保护 等级 Conserva- tion status	IUCN 红色名 录 IUCN Red List	CITES 附 录 CITES Appendix	中国脊椎 动物红色 名录 Red List of China's vertebrates
(17)林麝 <i>Moschus berezovskii</i>	4	0.30	I	EN	附录 II	CR
13 鹿科 Cervidae						
(18)赤麂 <i>Muntiacus vaginalis</i>	5	0.37		LC		NT
14 牛科 Bovidae						
(19)中华鬣羚 <i>Capricornis milneedwardsii</i>	1	0.07	II	NT	附录 I	VU
鸟纲 AVES						
I 隼形目 Falconiformes	1	0.07				
1 鹰科 Accipitridae						
(1)普通鵟 <i>Buteo buteo</i>	1	0.07	II	LC	附录 II	LC
II 鸡形目 Galliformes	236	17.59				
2 雉科 Phasianidae						
(2)血雉 <i>Ithaginis cruentus</i>	185	13.79	II	LC	附录 II	NT
(3)红腹角雉 <i>Tragopan temminckii</i>	2	0.15	II	LC		NT
(4)白尾梢虹雉 <i>Lophophorus scalateri</i>	47	3.50	I	VU	附录 I	EN
(5)白鹇 <i>Lophura nythemera</i>	2	0.15	II	LC		LC
III 鸽形目 Charadriiformes	2	0.15				
3 鸻科 Scolopacidae						
(6)丘鹬 <i>Scolopax rusticola</i>	2	0.15		LC		LC
IV 雀形目 Passeriformes	705	52.53				
4 鹟科 Motacillidae						
(7)树鹟 <i>Anthus hodgsoi</i>	1	0.07		LC		LC
(8)粉红胸鹟 <i>Anthus roseatus</i>	1	0.07		LC		LC
5 伯劳科 Laniidae						
(9)灰背伯劳 <i>Lanius tephronotus</i>	1	0.07		LC		LC
6 鸦科 Corvidae						
(10)星鸦 <i>Nucifraga caryocatactes</i>	7	0.52		LC		LC
7 鹡鹑科 Troglodytidae						
(11)鹡鹑 <i>Troglodytes troglodytes</i>	2	0.15		LC		LC
8 岩鹡鹑科 Prunellidae						
(12)领岩鹡鹑 <i>Prunella collaris</i>	9	0.67		LC		LC
(13)棕胸岩鹡鹑 <i>Prunella strophiatea</i>	2	0.15		LC		LC
9 鸫科 Turdidae						
(14)黑胸歌鸫 <i>Luscinia pectoralis</i>	2	0.15		LC		NT
(15)红胁蓝尾鸫 <i>Tarsiger cyanurus</i>	24	1.79		LC		LC
(16)金色林鸫 <i>Tarsiger chrysaeus</i>	213	15.87		LC		LC

物种 Species	独立有效照 片数 No. of in- dependent images	相对丰富度 指数 Relative abundance index (%)	国家保护 等级 Conserva- tion status	IUCN 红色名 录 IUCN Red List	CITES 附 录 CITES Appendix	中国脊椎 动物红色 名录 Red List of China's vertebrates
(17)棕腹林鸫 <i>Tarsiger hyperythrus</i>	30	2.24		LC		DD
(18)白眉林鸫 <i>Luscinia indica</i>	67	4.99		LC		LC
(19)蓝额红尾鸫 <i>Phoenicurus frontalis</i>	6	0.45		LC		LC
(20)北红尾鸫 <i>Phoenicurus aureus</i>	2	0.15		LC		LC
(21)白顶溪鸫 <i>Chaimarrornis leucocephalus</i>	10	0.75		LC		LC
(22)光背地鸫 <i>Zoothera mollissima</i>	111	8.27		LC		LC
10 画眉科 Timaliidae						
(23)眼纹噪鹛 <i>Garrulax ocellatus</i>	15	1.12		LC		NT
(24)纯色噪鹛 <i>Garrulax subunicolor</i>	37	2.76		LC		LC
(25)黑顶噪鹛 <i>Garrulax affinis</i>	75	5.59		LC		LC
(26)红头噪鹛 <i>Garrulax erythrocephalus</i>	8	0.60		LC		LC
(27)火尾绿鹛 <i>Myzornis pyrrhoura</i>	1	0.07		LC		NT
(28)白眉雀鹛 <i>Alcippe vinipectus</i>	6	0.45		LC		LC
(29)纹喉凤鹛 <i>Yuhina gularis</i>	1	0.07		LC		LC
(30)棕肛凤鹛 <i>Yuhina occipitalis</i>	1	0.07		LC		LC
(31)红嘴鸦雀 <i>Conostoma aemodium</i>	6	0.45		LC		LC
(32)褐鸦雀 <i>Paradoxornis unicolor</i>	3	0.22		LC		LC
(33)黄额鸦雀 <i>Paradoxornis fulvifrons</i>	3	0.22		LC		LC
11 莺科 Sylviidae						
(34)异色树莺 <i>Cettia flavolivaceus</i>	2	0.15		LC		LC
(35)棕顶树莺 <i>Cettia brunnifrons</i>	4	0.30		LC		LC
(36)橙斑翅柳莺 <i>Phylloscopus pulcher</i>	1	0.07		LC		LC
(37)比氏鹪莺 <i>Seicercus valentini</i>	1	0.07		LC		LC
12 山雀科 Paridae						
(38)黑冠山雀 <i>Parus rubidiventris</i>	1	0.07		LC		LC
13 花蜜鸟科 Nectariniidae						
(39)火尾太阳鸟 <i>Aethopyga ignicauda</i>	2	0.15		LC		LC
14 燕雀科 Fringillidae						
(40)暗胸朱雀 <i>Carpodacus nipalensis</i>	14	1.04		LC		LC
(41)棕朱雀 <i>Carpodacus edwardsii</i>	17	1.27		LC		LC
(42)普通朱雀 <i>Carpodacus erythrinus</i>	2	0.15		LC		LC
(43)黄颈拟蜡嘴雀 <i>Mycerobas affinis</i>	1	0.07		LC		LC
(44)白斑翅拟蜡嘴雀 <i>Mycerobas carnipes</i>	13	0.97		LC		LC

EN: 濒危; VU: 易危; NT: 近危; LC: 无危; CR: 极危; DD: 数据缺乏。

EN, Endangered; VU, Vulnerable; NT, Near threatened; LC, Least concern; CR, Critically endangered; DD, Data deficient.



(A) 白尾梢虹雉 *Lophophorus sclateri* ♂



(B) 白尾梢虹雉 *Lophophorus sclateri* ♀



(C) 血雉 *Ithaginis cruentus*



(D) 金色林鹧 *Tarsiger chrysaeus* ♀



(E) 小熊猫 *Ailurus fulgens*



(F) 高黎贡鼠兔 *Ochotona gaoligongensis*



(G) 绒毛鼯鼠 *Eupetaurus cinereus*



(H) 林麝 *Moschus berezovskii*

附录2 云南高黎贡山泸水片区高山鸟兽代表性物种照片

Appendix 2 Some alpine habitat species captured by camera traps at Mt. Gaoligong, Lushui, Yunnan.

•生物编目•

蕨类植物PPG I系统与中国石松类和蕨类植物分类

张丽兵*

(Missouri Botanical Garden, P. O. Box 299, St. Louis, Missouri 63166-0299, USA)

The PPG I classification and pteridophytes of China

Libing Zhang*

Missouri Botanical Garden, P. O. Box 299, St. Louis, Missouri 63166-0299, USA

广义蕨类植物 PPG I (Pteridophyte Phylogeny Group I)分类系统的出版(PPG I, 2016), 使得全世界蕨类植物学工作者自 Smith 等(2006)分类系统 10 年之后, 首次有了全面的最新指南, 其重大意义不言而喻。

与 Smith 等(2006)、Christenhusz 等(2011)及 Christenhusz 和 Chase (2014)的分类系统不同, PPG I 真正算是集体智慧的结晶。PPG I 由 Eric Schuettpelz 博士和 Harald Schneider 博士策划。在形成共识之前, 来自全世界 25 个单位的 26 位组织者分别组织了一个(或多个)有争议的较大的类群(一般为科)的小组讨论, 先由这些组织者在感兴趣的小组内对某一类群达成共识后, 再提交给 PPG I 的总组织者 Eric Schuettpelz 博士, 由 Eric 发送给大家讨论, 最后根据大家的意见修改后通过。PPG I 论文由来自全世界 68 个单位的 94 名作者联合署名发表, 包括 20 名华人蕨类学家。

PPG I 沿袭了以前许多蕨类分类系统的大概念的传统(如 Kramer & Green, 1990; Smith et al, 2006; Christenhusz et al, 2011; Christenhusz & Chase, 2014), 将全世界现存约 12,000 种石松类和蕨类植物分成 2 纲 14 目 51 科 337 属。石松类和蕨类植物的种类与藓类植物的种类相当, 但藓类学家承认 112 个或更多个科、845 或更多个属(Crosby et al, 1999; Buck & Goffinet, 2000; Goffinet & Buck, 2004)。大科和大属的概念有利于这些类群的稳定性, 因为它们单系

性不容易受单个新研究的影响。但大科和大属的概念也有不利的一面, 例如可能会使得蕨类学家申请经费(例如跟藓类学家竞争时)受影响, 因为他们研究的类群可能只是一个属下的组而不是一个属。另外, 对保育研究者和工作者来说, 大科和大属的概念可能使研究的类群因此而变成一个低等级的类群而不受政策制定者、管理者或项目审阅者的重视。实际上, 石松类和蕨类植物中大科和大属的概念反映了石松类和蕨类植物形态上的复杂性, 并暗示蕨类学家对许多类群内和类群间的系统关系还知之甚少, 还需深入研究。

1 PPG I与FOC蕨类分类的比较

Flora of China (FOC) (2–3 卷, 蕨类; Lin et al, 2013)是全世界第一个在科一级水平上采用基于现代分子系统学结果的分类系统的蕨类植物志。PPG I 分类系统与 FOC 在科一级水平上的处理基本一致, 但 PPG I 对一些属的处理与 FOC 不同, 具体如下:

石松科(Lycopodiaceae): 将该科分成 3 个亚科, 即石松亚科(Lycopodioideae)、小石松亚科(Lycopodielloideae)和石杉亚科(Huperzioideae)。在属一级, PPG I 恢复了 3 个《中国植物志》第 6(3)卷采用(张丽兵, 2004)但 FOC (Zhang & Iwatsuki, 2013)不承认的属, 即扁枝石松属(*Diphasiastrum*)、拟小石松属(*Pseudolycopodiella*)和垂穗石松属(*Palhinhaea*); 增加了单穗石松属(*Spinulum*)和笔直石松属

收稿日期: 2016-12-29; 接受日期: 2017-03-13

基金项目: 海外及港澳学者合作研究基金(#31628002)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: gonggashan@gmail.com

(*Dendrolycopodium*) (也见 Zhou & Zhang, 2017)。

紫萁科(Osmundaceae): PPG I 建立了 1 个新属, 即绒紫萁属(*Claytosmunda*)。

凤尾蕨科(Pteridaceae): PPG I 中, 一条线蕨属(*Monogramma*)被合并到书带蕨属(*Haplopteris*)中。

冷蕨科(Cystopteridaceae): 光叶蕨属(*Cystoathyrium*)被合并到冷蕨属(*Cystopteris*)中。

金星蕨科(Thelypteridaceae): 将该科分为 2 个亚科, 金星蕨亚科(Thelypteridoideae)和卵果蕨亚科(Phegopteridoideae)。茯蕨属(*Leptogramma*)和圣蕨属(*Dictyocline*)被合并到溪边蕨属(*Stegnogramma*)中。

岩蕨科(Woodsiaceae): 滇蕨属(*Cheilanthes*)和膀胱蕨属(*Protowoodsia*)被合并到岩蕨属(*Woodsia*)中。

乌毛蕨科(Blechnaceae): 崇澍蕨属(*Chienopteris*)被合并到狗脊属(*Woodwardia*)中。

蹄盖蕨科(Athyriaceae): 安蕨属(*Anisocampium*)和角蕨属(*Cornopteris*)被合并到蹄盖蕨属(*Athyrium*)。

鳞毛蕨科(Dryopteridaceae): 新增加了 1 个亚科, 即毛脉蕨亚科(Polybotryoideae) (Liu et al, 2016), 新增加了 1 属, 即毛脉蕨属(*Trichoneuron*)。黄腺羽蕨属(*Pleocnemia*)被从三叉蕨科(Tectariaceae)中移到鳞毛蕨科中。

三叉蕨科(Tectariaceae): 黄腺羽蕨属(*Pleocnemia*)被移到鳞毛蕨科中。

骨碎补科(Davalliaceae): 假钻毛蕨属(*Paradavallodes*)、小膜盖蕨属(*Araiostegia*)和阴石蕨属(*Humata*)被合并到骨碎补属(*Davallia*)中。全科现在只含 1 个属。

水龙骨科(Polypodiaceae): 该科变化很大, 被分为 6 个亚科, 即剑蕨亚科(Loxogrammoideae)、水龙骨科(Polypodioideae)、鹿角蕨亚科(Platycerioideae)、槲蕨亚科(Drynarioideae)、星蕨亚科(Microsoroideae)和禾叶蕨亚科(Grammitidoideae)。戟蕨属(*Christiopteris*)、槲蕨属(*Drynaria*)和顶育蕨属(*Photinopteris*)被合并到连珠蕨属(*Aglaomorpha*)中。篦齿蕨属(*Metapolypodium*)、拟水龙骨科属(*Polypodiastrum*)和水龙骨科属(*Polypodiodes*)被合并到棱脉蕨属(*Goniophlebium*)中。锡金假瘤蕨属(*Himalayopteris*)被合并到修蕨属(*Selliguea*)中。高平蕨属(*Caobangia*)被合并到伏石蕨属(*Lemmaphyllum*)中。瘤蕨属(*Phymatosorus*)被合并到星蕨属(*Microsorium*)中。

另外, PPG I 增加了由笔者和张良博士最近发表的翼囊蕨科(Didymochlaenaceae) (Zhang & Zhang, 2015)。其模式种近年也在我国西双版纳发现有分布 (Tan et al, 2015)。该科由秦仁昌先生(Ching, 1940)最先提出但未正式发表。

2 中国学者在蕨类植物科、属一级的贡献

在科级水平上, PPG I 共接受 51 科, 其中中国学者发表的有翼囊蕨科(Zhang & Zhang, 2015)、肿足蕨科(Hypodematiaceae; Ching, 1975)、轴果蕨科(Rhachidosoraceae; Christenhusz et al, 2011)和肠蕨科(Diplaziopsidaceae; Christenhusz et al, 2011)。在属级水平上, PPG I 共接受 337 个属, 其中中国学者参与发表的属有 21 个, 包括秦仁昌先生发表的 17 个(包括 5 个新等级)、邢公侠先生发表的金毛裸蕨属(*Paragymnopteris*) (Shing, 1993)、秦仁昌与邢公侠先生合作发表的鳞果星蕨属(*Lepidomicrosorium*) (秦仁昌和邢公侠, 1983)、笔者和张良博士发表的龙蕨属(*Draconopteris*) (Zhang et al, 2016), 以及笔者与 Schuettpelz 发表的马来蕨属(*Malaifilix*) (Zhang et al, 2016)。

秦仁昌先生发表的被 PPG I 承认的 17 个属(包含 5 个新等级)包括:

美洲里白属(*Gleichenella* Ching) (以下原始文献引证略; Gleicheniaceae);

轴果蕨属(*Rhachidosorus* Ching) (Rhachidosoraceae);

针毛蕨属(*Macrothelypteris* (H. Ito) Ching) (Thelypteridaceae);

紫柄蕨属(*Pseudophegopteris* Ching) (Thelypteridaceae);

方杆蕨属(*Glaphyopteridopsis* Ching) (Thelypteridaceae);

龙津蕨属(*Mesopteris* Ching) (Thelypteridaceae);

凸轴蕨属(*Metathelypteris* (H. Ito) Ching) (Thelypteridaceae);

金星蕨属(*Parathelypteris* (H. Ito) Ching) (Thelypteridaceae);

假毛蕨属(*Pseudocyclosorus* Ching) (Thelypteridaceae);

毛脉蕨属(*Trichoneuron* Ching) (Dryopteridaceae);

节毛蕨属(*Lastreopsis* Ching) (Dryopteridaceae);

拟耳蕨属(*Parapolystichum* (Keyserl.) Ching)

(Dryopteridaceae, 中国不产);

牙蕨属(*Pteridrys* C. Chr. & Ching) (Tectariaceae);

鳞果星蕨属(*Lepidomicrosorium* Ching & K. H. Shing) (Polypodiaceae);

瓦韦属(*Lepisorus* (J. Sm.) Ching) (Polypodiaceae);

盾蕨属(*Neolepisorus* Ching) (Polypodiaceae);

毛鳞蕨属(*Tricholepidium* Ching) (Polypodiaceae)。

除了发表的新类群被接受外, 众多华人学者近年来发现的新的系统关系也被 PPG I 系统接受, 特别是大量以中国为分布中心的类群的系统关系得到了 PPG I 系统的承认。但总体来说, 虽然中国蕨类植物种类众多, 近年来也开展了大量的系统发育研究工作, 但是华人学者在 PPG I 系统的发表过程中的主导作用有限。

致谢: 本文写作中得到梁燕女士的多方帮助。周新茂博士帮助输入科、属中文名。感谢审稿人的建议。

参考文献

- Buck WR, Goffinet B (2000) Morphology and classification of the mosses. In: Bryophyte Biology (eds Shaw AJ, Goffinet B), pp. 71–123. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ching RC (1940) On natural classification of the family “Polypodiaceae”. *Sunyatsenia*, 5, 1–37.
- Ching RC (1975) Two new fern families. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 13, 96–98. (in Chinese with English abstract) [秦仁昌 (1975) 蕨类植物的两新科. 植物分类学报, 13, 96–98.]
- Ching RC, Shing KH (1983) *Lepidomicrosorium* Ching et Shing, a new fern genus of Polypodiaceae from China. *Botanical Research: contributions from the Institute of Botany, Academia Sinica*, 1, 1–14. (in Chinese with English abstract) [秦仁昌, 邢公侠 (1983) 鳞果星蕨属——中国水龙骨科的一个新属. 见: 植物学集刊(第1集), 1–14页.]
- Christenhusz MJM, Chase MW (2014) Trends and concepts in fern classification. *Annals of Botany*, 113, 571–594.
- Christenhusz MJM, Zhang X-C, Schneider H (2011) A linear sequence of extant families and genera of lycophytes and ferns. *Phytotaxa*, 19, 7–54.
- Crosby MR, Magill RE, Allen B, He S (1999) Checklist of Mosses. Missouri Botanical Garden, St. Louis.
- Goffinet B, Buck WR (2004) Systematics of the bryophyta (mosses): from molecules to a revised classification. In: *Molecular Systematics of Bryophytes* (eds Goffinet B, Hollowell V, Magill R), pp. 205–239. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Kramer KU, Green PS (1990) Pteridophytes and gymnosperms. In: *The Families and Genera of Vascular Plants*, Vol. 1 (ed. Kubitzki K), pp. 1–404. Springer, Berlin, Heidelberg & New York.
- Lin Y-X, Zhang L-B, Zhang X-C, He Z-R, Wang Z-R, Lu S-G, Wu S-G, Xing F-W, Zhang G-M, Liao W-B, Xiang J-Y, Wang F-G, Qi X-P, Yan Y-H, Ding M-Y, Liu J-X, Dong S-Y, He H, Zhang Q-Y, Moore S-J, Wu Z-H, Li Z-Y, Jin X-F, Ding B-Y, Liu Q-R, Shi L, Barrington DS, Kato M, Iwatsuki K, Gilbert MG, Hovenkamp PH, Nootboom HP, Prado J, Viane R, Christenhusz MJM, Yatskievych G, Ebihara A, Serizawa S, Parris BS, Ranker TA, Sahashi N, Hooper EA, Barcelona J, Shmakov A, Nishida H, Lin S-J, Smith AR, Funston AM, Haufler C, Turland NJ, Hanks JG, Mickel JT, Kadokawa Y, Pryer KM, Taylor WC, Johnson DM, Alverson ER, Metzgar JS, Masuyama S (2013) Pteridophytes. In: *Flora of China*, Vol. 2–3 (eds Wu ZY, Raven PH, Hong DY), pp. 1–959. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Liu H-M, Zhang X-C, Wang M-P, Shang H, Zhou S-L, Yan Y-H, Wei X-P, Xu W-B, Schneider H (2016) Phylogenetic placement of the enigmatic fern genus *Trichoneuron* informs on the infra-familial relationship of Dryopteridaceae. *Plant Systematics and Evolution*, 302, 319–332.
- PPG I (2016) A community-derived classification for extant lycophytes and ferns. *Journal of Systematics and Evolution*, 54, 563–603.
- Shing K-H (1993) A new genus, *Paragymnopteris* Shing separated from *Gymnopteris* Bernh. *Indian Fern Journal*, 10, 226–231.
- Smith AR, Pryer KM, Schuettpelz E, Korall P, Schneider H, Wolf PG (2006) A classification for extant ferns. *Taxon*, 55, 705–731.
- Tan Y-H, Wei R, Li J-W, Zhang X-C (2015) *Didymochlaena* Desv. (Hypodematiaceae): a newly recorded fern genus to China. *Plant Diversity & Resources*, 37, 135–138.
- Zhang L, Schuettpelz E, Rothfels C, Zhou X-M, Gao X-F, Zhang L-B (2016) Circumscription and phylogeny of the fern family Tectariaceae based on plastid and nuclear markers, with the description of two new genera: *Draconopteris* and *Malaifilix* (Tectariaceae). *Taxon*, 65, 723–738.
- Zhang L-B (2004) Lycopodiaceae. In: *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*, Tomus 6(3) (ed. Wu ZY), pp. 55–85. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张丽兵 (2004) 石松科. 见: 中国植物志第6卷(3) (吴征镒主编), 55–85页. 科学出版社, 北京.]
- Zhang L-B, Iwatsuki K (2013) Lycopodiaceae. In: *Flora of China*, Vol. 2–3 (eds Wu ZY, Raven PH, Hong DY), pp. 13–36. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Zhang L-B, Zhang L (2015) Didymochlaenaceae—A new fern family of eupolypods I (Polypodiales). *Taxon*, 64, 27–38.
- Zhou X-M, Zhang L-B (2017) *Dendrolycopodium verticale* comb. nov. (Lycopodiopsida: Lycopodiaceae) from China. *Phytotaxa*, 295, 199–200.

(责任编辑: 严岳鸿 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 中国石松类和蕨类植物科、亚科、属列表

Appendix 1 List of families, subfamilies, and genera of lycophytes and ferns of China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016372-1.pdf>

附录 1 中国石松类和蕨类植物科、亚科、属列表 (科名按 FOC 的顺序排列, 括号内为 FOC 页码, 中文斜体的属为异名, 下划线表明为 PPG I 新增加而 FOC 中没有的类群, 中名依据原类群等级的中名或惯用法拟定, 建议规范使用)。

Appendix 1 List of families, subfamilies, and genera of lycophytes and ferns of China (The order of families follows that in FOC. Page numbers in parentheses denote those page numbers in FOC. italic Chinese generic names indicate synonyms. Underlined names indicate added names from the PPG I which were not in FOC. Chinese names follow original names adopted in FOC or are coined following tradition).

Lycopodiaceae 石松科 (p. 13)

Huperzioidae 石杉亚科

1. *Huperzia* 石杉属
2. *Phlegmariurus* 马尾杉属

Lycopodielloideae 小石松亚科

3. *Lycopodiella* 小石松属
4. *Palhinhaea* 灯笼石松属

Lycopodioidae 石松亚科

5. *Dendrolycopodium* 笔直石松属
6. *Diphasiastrum* 扁枝石松属
7. *Lycopodium* 石松属
8. *Lycopodiastrum* 藤石松属
9. *Pseudolycopodiella* 拟小石松属
10. *Spinulum* 单穗石松属

Isoëtaceae 水韭科 (p. 35)

1. *Isoëtes* 水韭属

Selaginellaceae 卷柏科 (p. 37)

1. *Selaginella* 卷柏属

Equisetaceae 木贼科 (p. 67)

1. *Equisetum* 木贼属

Ophioglossaceae 瓶尔小草科 (p. 73)

1. *Botrychium* 阴地蕨属
2. *Helminthostachys* 七指蕨属
3. *Ophioglossum* 瓶尔小草属

Psilotaceae 松叶蕨科 (p. 81)

1. *Psilotum* 松叶蕨属

Marattiaceae 合囊蕨科 (p. 82)

1. *Angiopteris* 莲座蕨属
2. *Christensenia* 天星蕨属

3. *Ptisana* 合囊蕨属

Osmundaceae 紫萁科 (p. 90)

1. *Claytonmunda* 绒紫萁属
2. *Osmunda* 紫萁属
3. *Osmundastrum* 桂皮紫萁属

Hymenophyllaceae 膜蕨科 (p. 93)

1. *Abrodictyum* 长片蕨属
2. *Callistopteris* 毛杆蕨属
3. *Cephalomanes* 厚叶蕨属
4. *Crepidomanes* 假脉蕨属
5. *Didymoglossum* 毛边蕨属
6. *Hymenophyllum* 膜蕨属
7. *Vandenboschia* 瓶蕨属

Gleicheniaceae 里白科 (p. 110)

1. *Dicranopteris* 芒萁属
2. *Diplopterygium* 里白属
3. *Sticherus* 假芒萁属

Dipteridaceae 双扇蕨科 (p. 116)

1. *Cheiropleuria* 燕尾蕨属
2. *Dipteris* 双扇蕨属

Lygodiaceae 海金沙科 (p. 118)

1. *Lygodium* 海金沙属

Schizaeaceae 莎草蕨科 (p. 122)

1. *Schizaea* 莎草蕨属

Marsileaceae 蘋科 (p. 123)

1. *Marsilea* 蘋属

Salviniaceae 槐叶苹科 (p. 125)

1. *Azolla* 满江红属
2. *Salvinia* 槐叶萍属

Plagiogyriaceae 瘤足蕨科 (p. 128)

1. *Plagiogyria* 瘤足蕨属

Cibotiaceae 金毛狗蕨科 (p. 132)

1. *Cibotium* 金毛狗蕨属

Cyatheaceae 桫欏科 (p. 134)

1. *Alsophila* 桫欏属
2. *Sphaopteris* 白桫欏属

Lindsaeaceae 鳞始蕨科 (p. 139)

1. *Lindsaea* 鳞始蕨属
2. *Odontosoria* 乌蕨属
3. *Osmolindsaea* 香鳞始蕨属
4. *Tapeinidium* 达边蕨属

Dennstaedtiaceae 碗蕨科 (p. 147)

1. *Dennstaedtia* 碗蕨属
2. *Histiopteris* 栗蕨属
3. *Hypolepis* 姬蕨属
4. *Microlepia* 鳞盖蕨属
5. *Monachosorum* 稀子蕨属
6. *Paesia* 曲轴蕨属
7. *Pteridium* 蕨属

Pteridaceae 凤尾蕨科 (p. 169)

Cheilanthesaceae 碎米蕨亚科

1. *Aleuritopteris* 粉背蕨属
2. *Calciphilopteris* 戟叶黑心蕨属
3. *Cheilanthes* 碎米蕨属
4. *Doryopteris* 黑心蕨属
5. *Parahemionitis* 泽泻蕨属
6. *Paragymnopteris* 金毛裸蕨属
7. *Pellaea* 旱蕨属

Cryptogrammoideae 珠蕨亚科

8. *Coniogramme* 凤了蕨属
9. *Cryptogramma* 珠蕨属

Parkerioideae 水蕨亚科 (FOC中采用

Ceratopteridoideae这一名称)

10. *Acrostichum* 卤蕨属
11. *Ceratopteris* 水蕨属

Pteridoideae 凤尾蕨亚科

12. *Anogramma* 翠蕨属
13. *Pityrogramma* 粉叶蕨属
14. *Onychium* 金粉蕨属
15. *Pteris* 凤尾蕨属
16. *Taenitis* 竹叶蕨属

Vittarioideae 书带蕨亚科

17. *Adiantum* 铁线蕨属
18. *Antrophyum* 车前蕨属
19. *Haplopteris* 书带蕨属
Monogramma 一条线蕨属 = *Haplopteris*

Cystopteridaceae 冷蕨科 (p. 257)

1. *Acystopteris* 亮毛蕨属
2. *Cystopteris* 冷蕨属
Cystoathyrium 光叶蕨属 = *Cystopteris*
3. *Gymnocarpium* 羽节蕨属

Aspleniaceae 铁角蕨科 (p. 267)

1. *Asplenium* 铁角蕨属
2. *Hymenasplenium* 膜叶铁角蕨属

Diplaziopsidaceae 肠蕨科 (p. 317)

1. *Diplaziopsis* 肠蕨属

Thelypteridaceae 金星蕨科 (p. 319)

Phegopteridoideae 卵果蕨亚科

1. *Macrothelypteris* 针毛蕨属
2. *Phegopteris* 卵果蕨属
3. *Pseudophegopteris* 紫柄蕨属

Thelypteridoideae 金星蕨亚科

4. *Ampelopteris* 星毛蕨属
5. *Craspedosorus* 边果蕨属
6. *Cyclogramma* 钩毛蕨属
7. *Cyclosorus* 毛蕨属
8. *Glaphyopteridopsis* 方杆蕨属
9. *Mesopteris* 龙津蕨属
10. *Metathelypteris* 凸轴蕨属
11. *Oreopteris* 假鳞毛蕨属
12. *Parathelypteris* 金星蕨属
13. *Pronephrium* 新月蕨属
14. *Pseudocyclosorus* 假毛蕨属

15. *Stegnogramma* 溪边蕨属

Dictyocline 圣蕨属 = *Stegnogramma*

Leptogramma 茯蕨属 = *Stegnogramma*

16. *Thelypteris* 沼泽蕨属

Didymochlaenaceae 翼囊蕨科

1. *Didymochlaena* 翼囊蕨属

Woodsiaceae 岩蕨科 (p. 397)

1. *Woodsia* 岩蕨属

Protowoodsia 膀胱蕨属 = *Woodsia*

Cheilanthes 滇蕨属 = *Woodsia*

Rhachidosoraceae 轴果蕨科 (p. 405)

1. *Rhachidosorus* 轴果蕨属

Onocleaceae 球子蕨科 (p. 408)

1. *Matteuccia* 荚果蕨属

2. *Onoclea* 球子蕨属

3. *Pentarhizidium* 东方荚果蕨属

Blechnaceae 乌毛蕨科 (p. 411)

1. *Blechnidium* 乌木蕨属

2. *Blechnum* 乌毛蕨属

3. *Brainea* 苏铁蕨属

4. *Diploblechnum* 扫把蕨属

5. *Stenochlaena* 光叶藤蕨属

6. *Struthiopteris* 荚囊蕨属

7. *Woodwardia* 狗脊属

Chieniopteris 崇澍蕨属 = *Woodwardia*

Athyriaceae 蹄盖蕨科 (p. 418)

1. *Athyrium* 蹄盖蕨属

Cornopteris 角蕨属 = *Athyrium*

Anisocampium 安蕨属 = *Athyrium*

2. *Deparia* 对囊蕨属

3. *Diplazium* 双盖蕨属

Hypodematiaceae 肿足蕨科 (p. 535)

1. *Hypodematum* 肿足蕨属

2. *Leucostegia* 大膜盖蕨属

Dryopteridaceae 鳞毛蕨科 (p. 541)

Dryopteridoideae 鳞毛蕨亚科

1. *Arachniodes* 复叶耳蕨属

2. *Ctenitis* 肋毛蕨属

3. *Cyrtomium* 贯众属

4. *Dryopteris* 鳞毛蕨属

5. *Lastreopsis* 节毛蕨属

6. *Polystichum* 耳蕨属

Elaphoglossoideae 舌蕨亚科

7. *Bolbitis* 实蕨属

8. *Elaphoglossum* 舌蕨属

9. *Lomagramma* 网藤蕨属

10. *Pleocnemia* 黄腺羽蕨属 (从Tectariaceae中移来)

11. *Teratophyllum* 符藤蕨属

Polybotryoideae 毛脉蕨亚科

12. *Trichoneuron* 毛脉蕨属

Lomariopsidaceae 藤蕨科 (p. 725)

1. *Cyclopeltis* 拟贯众属

2. *Lomariopsis* 藤蕨属

Nephrolepidaceae 肾蕨科 (p. 727)

1. *Nephrolepis* 肾蕨属

Tectariaceae 三叉蕨科 (p. 730)

1. *Arthropteris* 爬树蕨属

Pleocnemia 黄腺羽蕨属 (移到Dryopteridaceae)

2. *Pteridrys* 牙蕨属

3. *Tectaria* 叉蕨属

Oleandraceae 条蕨科 (p. 747)

1. *Oleandra* 条蕨属

Davalliaceae 骨碎补科 (p. 749)

1. *Davallia* 骨碎补属

Paradavallodes 假钻毛蕨属 = *Davallia*

Araiostegia 小膜盖蕨属 = *Davallia*

Humata 阴石蕨属 = *Davallia*

Polypodiaceae 水龙骨科 (p. 758)

Drynarioideae 槲蕨亚科

1. *Aglaomorpha* 连珠蕨属

Photinopteris 顶育蕨属 = *Aglaomorpha*

Drynaria 槲蕨属 = *Aglaomorpha*

- Christopteris* 戟蕨属 = *Aglaomorpha*
2. *Arthromeris* 节肢蕨属
3. *Gymnogrammitis* 雨蕨属
4. *Selliguea* 修蕨属
- Himalayopteris* 锡金假瘤蕨属 = *Selliguea*
- Grammitidoideae 禾叶蕨亚科
5. *Calymmodon* 荷包蕨属
6. *Chrysogrammitis* 金禾蕨属
7. *Ctenopterella* 小蒿蕨属
8. *Dasygrammitis* 毛禾蕨属
9. *Micropolypodium* 锯蕨属
10. *Oreogrammitis* 滨禾蕨属
11. *Prosaptia* 穴子蕨属
12. *Radiogrammitis* 辐禾蕨属
13. *Themelium* 蒿蕨属
14. *Tomophyllum* 裂禾蕨属
15. *Scleroglossum* 革舌蕨属
16. *Xiphopterella* 剑羽蕨属
- Microsorioideae 星蕨亚科
17. *Lemmaphyllum* 伏石蕨属
- Caobangia* 高平蕨属 = *Lemmaphyllum*
18. *Lepidomicrosorium* 鳞果星蕨属
19. *Lepisorus* 瓦韦属
20. *Leptochilus* 薄唇蕨属
21. *Microsorium* 星蕨属
- Phymatosorus* 瘤蕨属 = *Microsorium*
22. *Neocheiropteris* 扇蕨属
23. *Neolepisorus* 盾蕨属
24. *Tricholepidium* 毛鳞蕨属
- Loxogrammoideae 剑蕨亚科
25. *Loxogramme* 剑蕨属
- Platycerioideae 鹿角蕨亚科
26. *Pyrrosia* 石韦属
27. *Platycerium* 鹿角蕨属
- Polypodioideae 水龙骨亚科
28. *Goniophlebium* 棱脉蕨属
- Metapolypodium* 篦齿蕨属 = *Goniophlebium*
- Polypodiastrum* 拟水龙骨属 = *Goniophlebium*
- Polypodiodes* 水龙骨属 = *Goniophlebium*
29. *Pleurosoriopsis* 睫毛蕨属
30. *Polypodium* 多足蕨属

《生物多样性》投稿须知

《生物多样性》(*Biodiversity Science*)于1993年创刊,是中国科学院生物多样性委员会、中国植物学会、中国科学院植物研究所、动物研究所和微生物研究所共同主办的生物多样性科学领域的综合性学术刊物。2016年起变更为月刊。本刊旨在报道生物多样性科学领域的创新性研究成果,具引领和示范作用的保护实践案例或新范式,热点地区、调查空白地区或重要生物类群的生物编目,有新观点的高水平综述,以及履行相关国际公约的进展。

基本要求

1 主要栏目

综述 (1)选题有新意,具前瞻性,能引起读者广泛的兴趣,对读者具有启发和参考价值。(2)有述有评,有自己独到的观点。结合文献评述国内外学者在所阐述领域的研究进展,总结该领域存在的主要问题以及今后的发展方向。避免罗列文献、内容空泛、缺乏观点,切忌写成读书报告。(3)鼓励作者自己设计图表,以帮助读者理解所阐述内容。(4)引用原始文献,应包括近5年的国内外最新文献。

研究报告、研究简报和方法 是指生物多样性科学领域基础理论和应用基础研究方面具有创造性的、高水平的原始论文。要求有明确的科学问题、完整的研究方法和普遍的学术价值。其中研究简报可以是阶段性、局部性的创新成果,正文长度为2-3印刷页,要体现“新、短、快”的特点。

数据论文 旨在推动原始数据共享。要求数据具有一定的科学意义,数据结构完整、真实可靠,并达到一定的数据量。数据类型包括植被样方调查数据集、物种分布数据集、物种性状数据集、组学数据、DNA序列数据等。论文正文分为两部分:一是数据集元数据的描述,包括数据集概述、数据采集和处理方法、数据格式、数据凭证(如凭证标本号等)、数据集链接等信息,数据集本身仅在线发表;二是对数据集的初步分析。

生物编目 由正文和附录两部分组成。正文为生物多样性编目信息的简要分析,力求简明,一般为2,000-3,000字(2个印刷页,不要求写摘要);附录为所调查地区完整的生物名录和群落调查样方等,突出原始资料性价值,仅在网站上在线发表。生物编目理论、方法和应用研究的学术论文没有字数限制。

保护论坛 针对我国生物多样性保护与利用的政策、现状、存在问题,以及生物多样性科学相关热点问题的看法和评论。鼓励发表不同的观点、见解和方法。要求短小、精炼、观点明确。特别欢迎对本刊发表的论文展开学术争鸣。

2 排版格式

为缩短稿件处理时间,各类文章均请严格按照本刊格式及投稿须知要求撰写,格式不符合要求的论文,编辑部将退回作者修改后重新投稿。

编排顺序 按照投稿信、题目、摘要、引言(不列标题)、材料与方法、结果、讨论、致谢、参考文献、表、图、图注等顺序编排。

作者署名 网上注册的通讯作者应与文章中一致。所有署名作者应对稿件内容、署名顺序没有异议。如属于多个单位,要求单位之间无署名先后、知识产权等方面的争议。

字体、字号 文本用五号字,1.5倍行距,页边距3-5 cm,中文用宋体,英文用Times New Roman字体。

计量单位、拉丁名、序列号、公式、变量、统计量、数

字、标点等的详细要求参见网站。

3 投稿办法

稿件原则上文责自负。投稿必须清稿、定稿,需论点明确、数据可靠、文字流畅、结构严谨。无一稿两投、抄袭、剽窃等学术不端行为。投稿前应请英文水平较高的学者对英文进行把关。请登录本刊网站注册后上传稿件,并可随时上网查询稿件审理情况。

注册 (1)作者人数和顺序要与文章中一致,每位作者的信息要填写完整、准确。(2)如果已经拥有用户名和密码,不要重复注册,否则可能导致您的信息不一致,查询不便。(3)建议同时上传版权转让协议(要求每位作者签字)。如果有些作者不方便签署,可用邮件向编辑部说明同意署名。

投稿信 (1)重点说明文稿的创新性;(2)申明无一稿两投等问题;(3)建议的责任编委和审稿人(3-5人)(附单位、通讯地址、邮编、E-mail地址),但应回避本单位同事、导师等专家;也可以提出希望回避或有竞争关系的其他专家(最多3人);(4)通讯作者联系方式。

投稿文件 (1)文稿简要信息:要求为Word文件,包含文章题目、作者信息、基金项目、致谢。(2)文稿正文:要求Word文件和PDF文件中均删除作者、作者单位、联系方式、基金项目和致谢的内容,连续标注偶数行号;文件大小不超过10M。(3)附录或附图:在网上以附件的格式上传。

如果两周内没有收到编辑部回复,请咨询编辑部(010-62836137, biodiversity@ibcas.ac.cn)。

4 审稿流程

《生物多样性》稿件处理实行责任编委负责制,即受理的每篇稿件均由责任编委推荐审稿专家,并向副主编/主编提出退稿或推荐发表的建议。具体流程为:稿件→编辑部初筛(必要时请副主编初审)→责任编委初审并提交审稿专家→审稿专家审阅→责任编委二审→作者修改→责任编委复审→副主编终审(决定是否录用)。

不采用的稿件在2个月内通知作者。在没有收到编辑部的正式退稿通知之前,请不要转投其他刊物,以免造成一稿两投等不必要的麻烦。

稿件录用后1周内在线发表,并尽快安排印刷版发表。本刊的发表周期(投稿到印刷版刊出的时间)为5个月左右。

5 审稿费、版面费和稿费

稿件录用后,编辑部将收取审稿费和版面费(网上的附录资料免收)。凡是没有录用的稿件,不收取审稿费。建议通过银行汇款。开户银行:中国工商银行北京分行海淀西区支行;帐号:0200004509088100989;收款单位:中国科学院植物研究所,请注明《生物多样性》编辑部及文章稿号。汇款后请通过电子邮件通知编辑部,本部收到后即挂号寄去报销凭据。稿件一经刊登,酌付作者稿酬(包括印刷版、光盘版和网络版稿酬),赠送当期期刊2册。

6 其他说明

以下两类稿件编辑部不再受理:

(1)简单的资源调查和区系分析;(2)单纯的以RAPD和ISSR为标记开展的种群遗传多样性分析。

7 封面

本刊封面采用彩色照片,欢迎作者在投稿时将与论文有关的、科学性和艺术性俱佳的彩色照片提供给本刊。



中国科协精品科技期刊TOP50 (2015–2017)
中国科协精品科技期刊择优支持(2008–2014)
中国科学院科学出版基金择优支持(2013–2015)
百种中国杰出学术期刊(2007–2010, 2012–2013, 2015)
中国精品科技期刊(2008–2017)
北京大学《中文核心期刊要目总览》收录期刊
中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)
RCCSE中国核心学术期刊(2013–2016年A类期刊)
中国国际影响力优秀学术期刊(2012, 2014–2016)

生物多样性
SHENGWU DUOYANGXING
(月刊, 1993 年 10 月创刊)
第 25 卷 第 3 期 2017 年 3 月

BIODIVERSITY SCIENCE
(Monthly)
(Started in October, 1993)
Vol. 25 No. 3 March, 2017

编 辑 《生物多样性》编辑部
(北京香山南辛村 20 号, 邮政编码: 100093)
电子信箱: biodiversity@ibcas.ac.cn
网址: www.biodiversity-science.net
电话: 010-62836137, 62836665

主 编 马克平

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院生物多样性委员会
中国植物学会
中国科学院植物研究所
中国科学院动物研究所
中国科学院微生物研究所

出 版 《生物多样性》编辑部

印 刷 北京科信印刷有限公司

发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外总发行 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱, 邮政编码: 100044)

广告经营许可证 京海工商广字第 8010 号

Edited by the Editorial Office of Biodiversity Science
(20 Nanxincun Xiangshan, Beijing 100093, China)
E-mail: biodiversity@ibcas.ac.cn
http: //www.biodiversity-science.net
Tel: 86-10-62836137, 62836665

Editor-in-Chief: Keping Ma

Responsible Institution: The Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Biodiversity Committee of the Chinese Academy of Sciences (CAS), Botanical Society of China, Institute of Botany, Institute of Zoology and Institute of Microbiology, CAS

Published by the Editorial Office of Biodiversity Science

Printed by Beijing Kexin Printing Company

Distributed by

Domestic: Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Foreign: China International Book Trading Corporation
(P.O. Box 399, Beijing 100044, China)
E-mail: zw@www.cibtc.com.cn

国内外公开发行

ISSN 1005-0094
CN 11-3247/Q

国内邮发代号: 82-858

国外发行代号: 1395 BM

国内定价: 80.00 元



生物多样性官网



生物多样性微信号

ISSN 1005-0094



9 771005 009176

