

生物多样性

SHENGWU DUOYANGXING

第24卷 第12期 2016年12月

目次

编者按

- 1315 通过发表实现生物多样性数据共享
严岳鸿 黄晓磊 马克平

数据论文

- 1317 生物多样性数据论文发表趋势分析
李俊洁 黄晓磊
- 1325 东亚特有珍稀蕨类植物岩穴蕨(碗蕨科)高通量
转录组测序及分析
刘 莉 舒江平 韦宏金 张 锐 沈 慧
严岳鸿
- 1335 三种珍稀有蹄类动物的警戒行为数据
李忠秋
- 1341 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成
贾 龙 任国栋 张建英
- 1345 植物标本标签设计的原则及R程序包herblabel
张金龙 朱慧玲 刘金刚 Gunter A. Fischer

研究报告

植物多样性

- 1353 百山祖常绿阔叶林灌草层物种组成和分布的10
年动态
黄云霞 徐 萱 张莉芎 宋 玥 骆争荣
- 1364 风筝果镜像花的雌雄异位变化及传粉生态型的
形成
钱贞娜 孟千万 任明迅

- 1373 华东三省转 Bt 基因棉花种植对边际水体中
Cry1Ab/c蛋白残留的影响
刘 华 常晓蕾 蒋 玮 白 蓝 郑曙峰
王金斌 王 维 潘爱虎 王荣谈 唐雪明
- 1381 三叶鬼针草与不同本地植物竞争对土壤微生物
和土壤养分的影响
闫 静 张晓亚 陈 雪 王 月 张风娟
万方浩

动物多样性

- 1390 未来气候变化对我国特有濒危动物黑鹿适宜生
境的潜在影响
雷军成 王 莎 王军围 吴 军

研究简报

- 1400 龙须草种质资源生境特征与主要经济性状比较
刘 飞 邹冬生 喻夜兰 朱战强 吴少平
朱育峰
- 1408 四川省猛禽多样性及迁徙路线
梁敏仪 冉江洪 梁思琪 吴永杰 余 翔

生物编目

- 1414 滇西北县域生物多样性本底调查与评估
武建勇 彭 华 蒋学龙 薛达元 杜 凡
韩联宪 杨祝良 税玉民 刘培贵 杨晓君
江望高 王跃华 赵富伟 戴 蓉

- 1421 2016年第24卷总目录

- 1432 征稿简则

封面:《生物多样性》自1993年创刊以来发表的论文全部开放获取。图示本刊所有共享论文的关键词词云。字体大小体现该词出现的频率,其中“生物多样性”出现122次,之后依次是“物种多样性”(89次)、“多样性”(65次)、“遗传多样性”(50次)、“保育”(47次)等。反映了本刊关注的热点和趋势涉及从物种到基因等各层次的研究。本期发表5篇数据论文以进一步推动数据共享。(数据分析和绘图:上海辰山植物园陈建平)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 24 No. 12 December 2016

CONTENTS

Editorial

- 1315 **Sharing biodiversity data through academic publishing**

Yuehong Yan, Xiaolei Huang and Keping Ma

Data Paper

- 1317 **Analysis of publication trends of biodiversity data papers**

Junjie Li and Xiaolei Huang

- 1325 ***De novo* transcriptome analysis of the rare fern *Monachosorum maximowiczii* (Dennstaedtiaceae) endemic to East Asia**

Li Liu, Jiangping Shu, Hongjin Wei, Rui Zhang, Hui Shen and Yuehong Yan

- 1335 **Datasets of vigilance behavior for three rare ungulates**

Zhongqiu Li

- 1341 **Diversity and faunal composition of Tenebrionidae from Alxa Plateau**

Long Jia, Guodong Ren and Jianying Zhang

- 1345 **Principles behind designing herbarium specimen labels and the R package ‘herblabel’**

Jinlong Zhang, Huiling Zhu, Jingang Liu and Gunter A. Fischer

Original Papers

Plant Diversity

- 1353 **Ten-years period of grass and small woody plant dynamics in a 5-ha evergreen forest plot in Baishanzu, Zhejiang Province**

Yunxia Huang, Xuan Xu, Lixiang Zhang, Yue Song and Zhengrong Luo

- 1364 **Pollination ecotypes and herkogamy variation of *Hiptage benghalensis* (Malpighiaceae) with mirror-image flowers**

Zhenna Qian, Qianwan Meng and Mingxun Ren

- 1373 **Effect of Cry1Ab/c protein residues from *Bt* cotton-producing areas in regions with marginal water in three provinces in eastern China**

Hua Liu, Xiaolei Chang, Wei Jiang, Lan Bai, Shufeng Zheng, Jinbin Wang, Wei Wang, Aihu Pan, Rongtan Wang and Xueming Tang

- 1381 **Effects of rhizosphere soil microorganisms and soil nutrients on competitiveness of *Bidens pilosa* with different native plants**

Jing Yan, Xiaoya Zhang, Xue Chen, Yue Wang, Fengjuan Zhang and Fanghao Wan

Animal Diversity

- 1390 **Potential effects of future climate change on suitable habitat of *Muntiacus crinifrons*, an endangered and endemic species in China**

Juncheng Lei, Sha Wang, Junwei Wang and Jun Wu

Research Bulletin

- 1400 **Habitat features and principal economic characteristics of *Eulaliopsis binata* germplasm resources**

Fei Liu, Dongsheng Zou, Yelan Yu, Zhanqiang Zhu, Shaoping Wu and Yufeng Zhu

- 1408 **Diversity and migration routes of raptors in Sichuan Province**

Minyi Liang, Jianghong Ran, Siqi Liang, Yongjie Wu and Xiang Yu

Bioinventory

- 1414 **An inventory of county-level biodiversity in Northwest Yunnan**

Jianyong Wu, Hua Peng, Xuelong Jiang, Dayuan Xue, Fan Du, Lianxian Han, Zhuliang Yang, Yumin Shui, Peigui Liu, Xiaojun Yang, Wanggao Jiang, Yuehua Wang, Fuwei Zhao and Rong Dai

- 1421 **Index to Volume 24, 2016**

Cover Illustration: All the papers published in *Biodiversity Science* are freely available on the Internet. The figure shows the word cloud for the keywords of all the open-access papers in *Biodiversity Science*. Font size reflects the word's frequency: the word “biodiversity” appeared 122 times, followed by “species diversity” (89 times), “diversity” (65 times), “genetic diversity” (50 times), “conservation” (47 times), etc. The word cloud shows the hotspots and trends that the journal focuses on, including studies at the species and gene levels. To further promote biodiversity data sharing, five data papers are included in this issue. (Data and Figure prepared by Jianping Chen from Shanghai Chenshan Botanical Garden)

•编者按•

通过发表实现生物多样性数据共享

严岳鸿^{1*} 黄晓磊^{2*} 马克平³

1 (上海辰山植物园, 中国科学院上海辰山植物科学研究中心, 上海 201602)

2 (福建农林大学植物保护学院, 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福州 350002)

3 (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)

Sharing biodiversity data through academic publishing

Yuehong Yan^{1*}, Xiaolei Huang^{2*}, Keping Ma³

1 Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201602

2 State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002

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

20世纪30年代, 中国植物学家鉴定一份标本大多要邮寄给世界各地的专家来帮助鉴定, 原因很简单, 因为中国植物的模式标本大都在国外, 中国学者无法独立鉴定标本和发表新种。秦仁昌先生在访问欧洲植物标本馆时意识到: 中国必须把国外的中国植物标本信息“采集”回来! 在当时的北京静生生物调查所支持下, 秦仁昌先生拍摄了欧洲各大标本馆的中国植物标本特别是模式标本1.8万余张邮寄回国。胡先骕先生收到这些照片后, 洗印7套分别存在当时国内主要的植物分类学研究机构。这套植物标本照片虽然不是以论文著作的方式出现, 但是对中国学者开始独立鉴定标本、发表新种、编撰植物志起到了关键作用, 直至今天仍然具有参考价值。

这个数据共享的故事是中国植物分类学发展史上最为灿烂的一笔。时至今日, 科学研究正向两个方向发展, 一是从边界越来越模糊的宏观方向探讨万物的联系, 二是在尺度越来越精细的微观方向解释万物的机理。要实现科学研究的广度和深度, 需要综合越来越多的信息和数据, 科学数据共享也因而成为各国科学家近几年来最为强烈的呼吁。

2015年4月30日, *Nature* 一篇文章称中国科学家越来越难以获得高质量的公共数据, 并认为主要的责任在于政府部门(Wan, 2015)。Huang和Ma (2015)认为该文并没能真实反映中国近些年在数据共享

方面所取得的进展, 他们回应称中国政府近年来资助建设了多个国家级数据库, 且在地球系统、海洋、气象、农业、林业、人口与健康、基础科学等很多领域的数据共享方面取得了实质性进展, 尽管有些政府部门掌握的基础数据还不能共享。应该说, 中国这种越来越开放的总体趋势主要归功于“自上而下”式的政府部门主导的项目, 而作为科学数据主要生产者的科学家群体如何看待及是否愿意践行数据共享仍不确定。

近年来, 作为一种新的数据共享方式, 基于同行评审的数据论文(data paper)引起了广泛关注, 一些全球知名的出版商如自然出版集团也创办了专门用于发表数据论文的数据期刊(data journal)。本期李俊洁和黄晓磊(2016)对两本代表性数据期刊(*Biodiversity Data Journal*和*Scientific Data*)进行了分析, 结果显示数据论文在发文数量、被引用次数等方面都有很好的表现, 越来越被科学家认可。然而, 中国科学家发表的生物多样性数据论文的数量很少, 远低于世界平均水平。

自2011年始, 《生物多样性》期刊尝试推动以物种信息共享为目的的“生物编目”栏目, 发表论文数量逐年增加, 至本期已达61篇, 得到了越来越多读者的认同, 有较高的下载频次(附录1), 反映出更多中国科学家愿意与同行共享科学数据的开放心

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: yan.yh@126.com; huangxl@fafu.edu.cn

态。数据共享的推动取决于两个方面:数据贡献者的利益共享和数据共享平台建设,一个有效的平台对数据共享至关重要。为此,《生物多样性》期刊拟增设“数据论文”栏目,以建立一个更直接的生物多样性数据共享平台,发表日益增加的DNA及RNA测序、蛋白质组学、代谢组学、植被样方调查、物种分布、物种性状、生物多样性监测、生物多样性信息管理等多个方面的数据,以全面促进研究者之间的数据交流与共享。本期集中报道岩穴蕨(*Monachosorum maximowiczii*)转录组测序(刘莉等, 2016)、3种偶蹄类动物警戒行为(李忠秋, 2016)、阿拉善高原拟步甲的多样性组成(贾龙等, 2016)以及植物标本标签打印和信息管理程序包(张金龙等, 2016)等几方面的数据。

DNA及RNA序列是当前生命科学领域增长最为迅速的数据。然而,并非所有的测序数据最后都形成了研究论文,而是有很大一部分测序数据沉睡在研究人员的电脑中。刘莉等(2016)的文章为高通量测序数据的共享及如何开展简要的数据分析提供了一个案例。中国有大量珍稀、濒危、特有及保护生物,对所有种类开展全基因组测序显然在近期内不太现实,但通过开展转录组测序(RNA-sequence)、简化基因组测序(RAD-sequence)、叶绿体基因组测序、线粒体基因组测序等却是简单可行的办法,让国人能及时了解这些物种的基因组信息和特点,为进一步开展这些物种的研究、开发和保护提供基础数据。

生物物种信息数据库是伴随着动植物标本馆的建设而发展起来的,历史非常悠久。从1885年英国皇家植物园邱园开发的邱园索引(Index Kewensis)到现在的国际植物名称索引(International Plant Names Index)、植物名录数据库(The Plant List)、生物多样性遗产图书馆(Biodiversity Heritage Library),以及具有重要影响的数字标本信息数据库如全球生物多样性信息网络(Global Biodiversity Information Facility)、美国生物标本数字化平台(Integrated Digitized Biocollections, iDigBio)、中国数字植物标本馆(Chinese Virtual Herbarium, CVH)等,全世界各

类相关物种信息数据库林林总总。这些数据库一个共同的特点是,所有的信息收集都是依靠专门的工作人员,而不是由科学家自动上传原始数据,导致数据库信息不能较快更新以致影响科研人员有效使用数据;而且,大量数据库的数据标准不统一,难以进行有效整合。如果分类学家发表新的物种信息(如新种、新记录、物种名录)时,能够同时将数字标本信息上传到指定数据库,那么读者在阅读相关论文时则可以同时查看相关物种原始信息。为帮助科研人员更加高效和准确的管理标本信息,张金龙等(2016)基于R语言编写了一个植物标本管理系统herblabel,实现了标签打印、信息准确性和完整性的自动化检查,输入数据基于Darwin Core和CVH 5.0数据共享标准,可直接用于数字标本馆建设和标本数据共享。贾龙等(2016)则为物种组成和分布数据的共享提供了实例。

遥感技术、卫星追踪技术、红外相机、数码相机、水下机器人视频追踪等各种技术或监测设备的使用和普及,让生物多样性监测数据同样呈现井喷式发展(马克平, 2016)。面对海量的生物多样性监测数据,数据平台共享和数据分析成为重要难题。目前,中国各地自然保护区、生物多样性研究样地已积累了大量的监测数据,但数据之间的互联互通与共享尚无实质性的推动。李忠秋(2016)共享了我国3种有蹄类动物的警戒行为相关原始数据,尝试通过建立标准的行为学数据模式,为未来的行为学研究数据的共享及深度挖掘提供思路。

数据是科学研究的生命,因此也被很多科学家视为命根子。这应该是很多学者不愿意轻易共享数据的重要原因。基于同行评审的数据论文使得数据使用者可以引用相关论文,从一定程度上维护了数据共享者的利益。为更有效地促进科学家的共享意愿,需要采用更多措施,如数据使用者邀请数据共享者联合署名、考评体系中加强对数据共享行为的认可、加强对科学家群体的开放数据教育等,逐步形成中国科学群体良好的数据共享文化。

文中引用的参考文献见附录2。

附录 Supplementary Material

附录1 《生物多样性》发表的生物编目论文 (<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016368-1.pdf>)

附录2 参考文献 (<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016368-2.pdf>)

严岳鸿和黄晓磊. 通过发表实现生物多样性数据共享. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1315–1316.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016368>

附录1 《生物多样性》发表的生物编目论文

文章 题目	文章 作者	年卷期 页码	DOI	下载 次数
中国被子植物科属概览: 依据 APG III 系统	刘冰, 叶建飞, 刘夙, 汪远, 杨永, 赖阳均, 曾刚, 林秦文	2015 Vol. 23 (2): 225–231	DOI:10.17520/biods.2015052	6696
怒江河谷低海拔地区残存原生植被中兰科植物多样性	金效华, 向小果, 陈彬	2011 Vol. 19 (1): 120–123	DOI:10.3724/SP.J.1003.2011.04238	2399
中国兰科植物属的界定: 现状与展望	金伟涛, 向小果, 金效华	2015 Vol. 23 (2): 237–242	DOI:10.17520/biods.2014268	2377
中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析	闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 曾宪锋, 张勇, 陈丽, 刘演, 马海英, 齐淑艳, 马金双	2014 Vol. 22 (5): 667–676	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14069	2287
香港西贡牛尾海邻近岛屿植被与植物物种多样性	胡普炜, 邢福武, 陈林, 王美娜, 王发国, 陈红锋	2011 Vol. 19 (5): 605–609	DOI:10.3724/SP.J.1003.2011.05049	2028
广东南岭国家级自然保护区兰科植物物种多样性及其保护	田怀珍, 陈林, 邢福武	2013 Vol. 21 (2): 224–231	DOI:10.3724/SP.J.1003.2013.08005	1972
湖南丹霞地貌区蕨类植物多样性	严岳鸿, 何祖霞, 马其侠, 周喜乐, 陆奇勇	2012 Vol. 20 (4): 517–521	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.05215	1954
北京及其邻近地区野生鱼类物种多样性及其资源保育	张春光, 赵亚辉, 邢迎春, 郭瑞禄, 张清, 冯云, 樊恩源	2011 Vol. 19 (5): 597–604	DOI:10.3724/SP.J.1003.2011.08072	1925
湖南丹霞地貌区的苔藓植物多样性	何祖霞, 严岳鸿, 马其侠, 陆奇勇	2012 Vol. 20 (4): 522–526	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.05216	1907
中国高等植物多样性	王利松, 贾渝, 张宪春, 覃海宁	2015 Vol. 23 (2): 217–224	DOI:10.17520/biods.2015049	1758
中国爬行纲动物分类厘定	蔡波, 王跃招, 陈跃英, 李家堂	2015 Vol. 23 (3): 365–382	DOI:10.17520/biods.2015037	1717
中国哺乳动物多样性	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 Vol. 23 (3): 351–364	DOI:10.17520/biods.2014202	1714
中国西沙群岛植物多样性	童毅, 简曙光, 陈权, 李玉玲, 邢福武	2013 Vol. 21 (3): 364–374	DOI:10.3724/SP.J.1003.2013.11222	1699
珍稀濒危植物乐东拟单性木兰伴生植物编目	陈红锋, 周劲松, 张荣京, 王美娜, 曾庆文, 邢福武	2012 Vol. 20 (4): 527–531	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.05013	1697
中国豆科植物新分类实体和新异名	朱相云	2015 Vol. 23 (2): 247–251	DOI:10.17520/biods.2015002	1673
中国樟科物种编目: 问题和展望	杨永, 刘冰	2015 Vol. 23 (2): 232–236	DOI:10.17520/biods.2015027	1638
中国裸子植物的多样性和地理分布	杨永	2015 Vol. 23 (2): 243–246	DOI:10.17520/biods.2015017	1636
全球裸子植物物种编目: 现状和问题	杨永	2012 Vol. 20 (6): 755–760	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.06005	1517
青藏高原特有禾本科植物三蕊草受威胁等级评估	李伟伟, 张慧, 赵莉娜, 包颖, 陈文俐	2012 Vol. 20 (6): 769–773	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.05016	1499
基于标本信息初评囊瓣芹属六个种的绝灭风险	王利松 赵丽娜 覃海宁	2012 Vol. 20 (6): 761–768	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.08059	1416
上海市外来入侵物种	张晴柔, 蒋赏, 鞠瑞亭, 潘晓云	2013 Vol. 21 (6): 732–737	DOI:10.3724/SP.J.1003.2013.06089	1414
黑龙江省外来入侵植物的种类组成	郑宝江, 潘磊	2012 Vol. 20 (2): 231–234	DOI:10.3724/SP.J.1003.2012.04154	1396
物种中文名的选定/拟定原则的建议: 以蜘蛛类为例	张志升, 陈建, 李枢强, 彭贤锦, 张锋, 佟艳丰, 林玉成	2015 Vol. 23 (2): 264–266	DOI:10.17520/biods.2015034	1358
建立植物中文学名的构想	武秀之	2015 Vol. 23 (2): 259–263	DOI:10.17520/biods.2014271	1338
中国蜘蛛目物种编目研究进展	李枢强, 林玉成	2015 Vol. 23 (2): 267–270	DOI:10.17520/biods.2015045	1280
中国近海甲藻环沟藻属 2 个新记录种: 纺锤环沟藻和莫氏环沟藻	顾海峰, 罗肇河, 刘丽丽, 高越	2014 Vol. 22 (3): 401–406	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.13226	1252
中国维管植物属中文普通名选定规则新探	刘夙, 刘冰	2015 Vol. 23 (2): 254–258	DOI:10.17520/biods.2015047	1227
植物学名校订工具	王钧杰, 陈国科, 马克平	2015 Vol. 23 (2): 252–253	DOI:10.17520/biods.2015055	1182
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	张明霞, 曹林, 权锐昌, 肖治术, 杨小飞, 张文富, 王学志, 邓晓保	2014 Vol. 22 (6): 830–832	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14064	1168
古田山森林动态监测样地内鸟兽种群动态的红外	斯幸峰, 丁平	2014 Vol. 22 (6):	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14211	1146

严岳鸿和黄晓磊. 通过发表实现生物多样性数据共享. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1315–1316.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016368>

文章 题目	文章 作者	年卷期 页码	DOI	下载 次数
相机监测		819–822		
球状绿藻的隐性生物多样性及其分类学进展	宋会银, 张琪, 胡愈忻, 刘国祥, 胡征宇	2015 Vol. 23 (3): 383–397	DOI:10.17520/biods.2014252	1086
运用红外相机和样线法调查黑龙江双河自然保护区兽类资源	张鹏, 姜广顺, 肖治术	2014 Vol. 22 (6): 773–775	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14058	1054
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	刘芳, 宿秀江, 李迪强, 王本忠, 张自亮	2014 Vol. 22 (6): 779–784	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14177	1037
弄岗森林动态监测样地及周边鸟兽的红外相机初步监测	施泽攀, 周岐海, 李先琨, 肖治术	2014 Vol. 22 (6): 826–829	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14043	1037
西藏墨脱鸟兽红外相机监测初报	温立嘉, 时坤, 黄建, 宋阳, 郭玉民	2014 Vol. 22 (6): 798–799	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.13256	1036
利用红外相机对河南宝天曼森林动态监测样地鸟兽的初步调查	肖治术, 杜晓军, 王学志, 黄小群, 闫满玉	2014 Vol. 22 (6): 813–815	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14074	1033
我国森林动态监测样地的野生动物红外相机监测	肖治术	2014 Vol. 22 (6): 808–809	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14108	1032
运用红外相机对八大公山森林动态样地鸟兽的初步调查	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 Vol. 22 (6): 816–818	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14022	993
花坪保护区鸟兽物种的红外相机初步监测	汪国海, 施泽攀, 刘秀菊, 周岐海, 肖治术	2014 Vol. 22 (6): 785–787	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14125	983
运用红外相机对鼎湖山森林动态监测样地鸟兽的初步调查	肖治术, 吴林芳, 唐林芳, 卢学理, 黄忠良, 叶万辉, 黄小群	2014 Vol. 22 (6): 823–825	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14027	965
青城山森林公园兽类和鸟类资源初步调查: 基于红外相机数据	肖治术, 王学志, 黄小群	2014 Vol. 22 (6): 788–793	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14028	941
长白山森林动态监测样地鸟兽的红外相机初步监测	李欣海, 朴正吉, 武耀祥, 周海成, 张鹏, 刘丙万, 黄小群, 肖治术	2014 Vol. 22 (6): 810–812	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14019	932
利用红外相机对安徽天马国家级自然保护区鸟兽的初步调查	周文良, 潘涛, 李斌, 陈锦云, 宋涛, 彭昭杰, 张国晨, 蒲发光, 张保卫	2014 Vol. 22 (6): 776–778	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14068	931
汶川地震后鸟兽资源现状: 以都江堰光光山峡谷区为例	肖治术, 胡力, 王翔, 尚涛, 朱大海, 赵志龙, 黄小群	2014 Vol. 22 (6): 794–797	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14029	928
卡拉麦里山有蹄类自然保护区鸟兽的红外相机监测	董潭成, 初红军, 吴洪潘, 王渊, 葛炎, 布兰	2014 Vol. 22 (6): 804–807	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14178	901
新疆布尔根河狸国家级自然保护区野生动物的红外相机监测	刘元超, 黄效文, 初红军, 刘冬志, 张帆, 陈刚, 戚英杰	2014 Vol. 22 (6): 800–803	DOI:10.3724/SP.J.1003.2014.14181	879
湖南大围山杜鹃灌丛的群落组成及结构特征	李家湘, 张旭, 谢宗强, 卢从发, 涂向阳, 寻院	2015 Vol. 23 (6): 815–823	DOI:10.17520/biods.2015024	876
中国石松类和蕨类植物的多样性与地理分布	周喜乐, 张宪春, 孙久琼, 严岳鸿	2016 Vol. 24 (1): 102–107	DOI:10.17520/biods.2015256	798
西藏墨脱不同海拔区鸟兽红外相机监测	吴建普, 罗红, 朱雪林, 李炳章, 刘务林, 次平	2016 Vol. 24 (3): 351–354	DOI:10.17520/biods.2015106	614
重庆大巴山国家级自然保护区苔藓植物多样性	刘艳, 皮春燕, 田尚	2016 Vol. 24 (2): 244–247	DOI:10.17520/biods.2015236	593
海南岛维管植物物种多样性的现状	陈玉凯, 杨小波, 李东海, 龙文兴	2016 Vol. 24 (8): 948–956	DOI:10.17520/biods.2016002	498
金沙江上游干旱河谷植被	李云琴, 杜凡, 汪健, 李瑞年, 刘洋	2016 Vol. 24 (4): 489–494	DOI:10.17520/biods.2015238	489
利用红外相机调查青海三江源国家级自然保护区中铁一军功分区兽类资源	李佳, 刘芳, 张宇, 李广良, 李迪强	2016 Vol. 24 (6): 709–713	DOI:10.17520/biods.2016053	480
浅议中国高等植物多样性在世界上的排名	李春香, 苗馨元	2016 Vol. 24 (6): 725–727	DOI:10.17520/biods.2015370	455
利用红外相机调查西藏洛隆县鸟类和兽类的物种多样性	郭克疾, 陆鹏飞, 石胜超, 唐梓钧, 张同, 熊嘉武, 李炳章, 邓学建	2016 Vol. 24 (9): 1077–1081	DOI:10.17520/biods.2016128	412
贵州省翼手类名录修订	杨天友	2016 Vol. 24 (8): 957–962	DOI:10.17520/biods.2015360	410
中国蔷薇科、荨麻科和壳斗科植物新组合	童毅华, 夏念和	2016 Vol. 24 (6): 714–718	DOI:10.17520/biods.2016071	398
中国唇形科植物的一些新组合和新异名	向春雷, 胡国雄, 彭华	2016 Vol. 24 (6): 719–722	DOI:10.17520/biods.2016018	336
中国莎草科新组合与新名称	张树仁, 毕海燕	2016 Vol. 24 (6):	DOI:10.17520/biods.2016109	309

严岳鸿和黄晓磊. 通过发表实现生物多样性数据共享. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1315–1316.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016368>

文章 题目	文章 作者	年卷期 页码	DOI	下载 次数
		723–724		
浅谈《墨尔本法规》中的“采集”、“新命名”和“命名人引证”等术语	朱相云	2016 Vol. 24 (10): 1197–1199	DOI:10.17520/biods.2016177	308
滇西北县域生物多样性本底调查与评估	武建勇, 彭华, 蒋学龙, 薛达元, 杜凡, 韩联宪, 杨祝良, 税玉民, 刘培贵, 杨晓君, 江望高, 王跃华, 赵富伟, 戴蓉	2016 Vol. 24 (12): 1414–1420	DOI:10.17520/biods.2016154	无数 据

严岳鸿等. 通过发表实现生物多样性数据共享. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1315–1316.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016368>

附录2 参考文献

- Huang XL, Ma KP (2015) Chinese scientists are sharing data. *Nature*, 522, 287.
- Jia L, Ren GD, Zhang JY (2016) Diversity and faunal composition of Tenebrionidae from Alxa Plateau. *Biodiversity Science*, 24, 1341–1344. (in Chinese) [贾龙, 任国栋, 张建英 (2016) 阿拉善高原拟步甲的多样性组成与区系组成. 生物多样性, 24, 1341–1344.]
- Li JJ, Huang XL (2016) Analysis of publication trends of biodiversity data papers. *Biodiversity Science*, 24, 1317–1324. (in Chinese with English abstract) [李俊洁, 黄晓磊 (2016) 生物多样性数据论文发表趋势分析. 生物多样性, 24, 1317–1324.]
- Li ZQ (2016) Datasets of vigilance behavior for three rare ungulates. *Biodiversity Science*, 24, 1335–1340. (in Chinese with English abstract) [李忠秋 (2016) 三种珍稀有蹄类动物的警戒行为数据. 生物多样性, 24, 1335–1340.]
- Liu L, Shu JP, Wei HJ, Zhang R, Shen H, Yan YH (2016) *De novo* transcriptome analysis of the rare fern *Monachosorum maximowiczii* (Dennstaedtiaceae) endemic to East Asia. *Biodiversity Science*, 24, 1325–1334. (in Chinese with English abstract) [刘莉, 舒江平, 韦宏金, 张锐, 沈慧, 严岳鸿 (2016) 东亚特有珍稀蕨类植物岩穴蕨(碗蕨科)高通量转录组测序及分析. 生物多样性, 24, 1325–1334.]
- Ma KP (2016) Biodiversity monitoring relies on the integration of human observation and automatic collection of data with advanced equipment and facilities. *Biodiversity Science*, 24, 1201–1202. (in Chinese) [马克平 (2016) 生物多样性监测依赖于地面人工观测与先进技术手段的有机结合. 生物多样性, 24, 1201–1202.]
- Wan Z (2015) China's scientific progress hinges on access to data. *Nature*, 520, 587.
- Zhang JL, Zhu HL, Liu JG, Fischer GA (2016) Principles behind designing herbarium specimen labels and the R package 'herblabel'. *Biodiversity Science*, 24, 1345–1352. (in Chinese with English abstract) [张金龙, 朱慧玲, 刘金刚, Gunter A. Fischer (2016) 植物标本标签设计的原则及 R 程序包 herblabel. 生物多样性, 24, 1345–1352.]

• 数据论文 •

生物多样性数据论文发表趋势分析

李俊洁 黄晓磊*

(福建农林大学植物保护学院, 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福州 350002)

摘要: 近年来有关科学数据共享的呼声越来越高, 基于同行评审的生物多样性数据论文也受到越来越多的关注, 并出现了一些专门发表数据论文的数据期刊。本文总结了近年来生物多样性数据发表方面的进展, 选择两本代表性数据期刊(*Biodiversity Data Journal*和*Scientific Data*), 分析了它们自创刊以来的发文数量、涉及生物类群、文章浏览量和被引次数等指标。结果显示两本数据期刊的发文量都呈稳步增长趋势, 其生物多样性数据论文覆盖了包括动物界、植物界、真菌界在内的众多生物类群, 文章浏览量和被引次数方面也有可喜的表现, 说明数据论文正在被越来越多的研究者所接受。对文章作者国别的分析则显示了不同地区的研究者在发表生物多样性数据论文或数据共享方面的不平衡。建议相关领域的中国研究者和期刊关注生物多样性数据论文和数据共享政策, 更多地践行数据共享。

关键词: 数据共享; 数据期刊; 开放科学; 生态学; 文献计量学

Analysis of publication trends of biodiversity data papers

Junjie Li, Xiaolei Huang*

State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002

Abstract: In recent years, there have been more and more appeals for sharing of biodiversity data. ‘Biodiversity data paper’ has been proposed as a reward mechanism for sharing data by individual scientists. Some data journals dedicated to publishing data papers have been founded. In this paper, we analyze the number of articles, coverage of biological groups, article views, and citations of two representative data journals (*Biodiversity Data Journal* and *Scientific Data*). Results show that the number of articles in both data journals has been steadily increasing. Biodiversity data papers cover a wide range of biological groups in Animalia, Plantae and Fungi. The article views and citations also show encouraging performance. These results indicate that data papers are being accepted by more and more researchers. Analysis of author regions of biodiversity data papers indicates a disequilibrium in the data sharing culture among different geographical regions. We suggest Chinese researchers and journals in related fields pay more attention to biodiversity data papers and trends of data sharing policies, as well as improving data sharing practices.

Key words: data sharing; data journal; open science; ecology; bibliometrics

大科学时代的来临以及人类所面临的环境问题对生物多样性和生态学提出了新的要求, 科学家不但要通过大尺度研究来理解众多全球性问题(如多样性丧失、气候变化、粮食安全), 而且要基于科学证据提出相应的对策(Michener & Jones, 2012; Hampton et al, 2013)。然而, 如何有效地共享及整合

生物多样性数据成为解决这些重要生物多样性和生态学问题所面临的重要挑战(黄晓磊和乔格侠, 2014)。生物多样性数据共享不但是提升生物多样性研究的深度和广度、开展整合性研究的需要(Reichman et al, 2011; Hampton et al, 2013), 而且是检验生态学研究可重复性(Cassey & Blackburn,

收稿日期: 2016-11-16; 接受日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(31272348)和福建省杰出青年科学基金(2015J06005)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huangxl@fafu.edu.cn

2006; Ryan, 2011; Shapiro & Báldi, 2012)和科学制定生物多样性和环境政策的重要基础(Pullin & Salafsky, 2010; Haddaway & Pullin, 2013)。

作为最主要的数据生产者、分享者和使用者,科学家群体的态度和行为在很大程度上决定了数据共享的效果。Vines等(2014)调查了1991–2011年间发表的516篇生态学论文,结果发现这些论文数据的可获得性受到文章已发表时长的严重影响,且以每年17%的速度递减。这项研究体现了科学数据共享的重要性,也说明科学数据的长期保存需要公共数据库和数据政策的支持。Huang等(2012)开展的一项国际调研发现,生物多样性领域的数据分享文化并不发达,科学家面临一些技术和认知上的障碍(比如同行竞争、不熟悉数据保存机构、缺少时间和经费来管理数据等),而且科学家希望能从数据共享中获得相应的回报。最近由Digital Science、Springer Nature和Figshare联合发布的一份有关科学数据共享的报告也反映了研究者面临的技术和认知障碍,而且近70%的研究者认为数据引用和论文引用应该具有同等价值(Fane et al, 2016)。

推进生物多样性数据共享仅仅靠增强生物多样性数据所有利益方(科研工作者、研究和资助机构、期刊等)对于数据共享价值的认识是远远不够的,同时也需要所有利益方积极采取有效的共享策略。近年来新出现了几种数据共享策略,包括Dryad (<http://datadryad.org/>)和Figshare(<http://figshare.com/>)等数据保存机构集中保存论文数据、生物多样性数据论文和数据期刊(Chavan & Penev, 2011; Costello et al, 2013)、期刊和数据保存机构间的联合数据保存政策(Huang & Qiao, 2011; De Wever et al, 2012)等。这些数据共享策略大多从增加数据共享者的收益(如数据集的所有权和可引用性)出发,取得了一定的效果。这其中,生物多样性数据论文采用科研工作者熟知的学术出版形式,与科研工作的关系密切,是本文关注的对象。

生物多样性数据论文由全球生物多样性信息网络(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)和学术出版商Pensoft在2011年联合提出,主要目的是“用于网络共享的数据集的元数据文件可以采用学术论文的形式发表”,从而为数据共享、数据质量控制和改善科研评价提供一个有效的方法。2013年9月, Pensoft创办了数据期刊*Biodiversity Data Jour-*

nal (BDJ, <http://bdj.pensoft.net/>), 专门用于发表生物多样性数据论文, 论文的数据集则可以无缝分享到GBIF。近两三年在生物医学、地球科学、基因组学等领域也出现了专门发表数据论文的数据期刊。最为突出的是, 自然出版集团(Nature Publishing Group)也于2014年3月开始正式出版综合性数据期刊 *Scientific Data* (SD, <http://www.nature.com/sdata/>)。

作为较新的数据共享方式, 生物多样性数据论文被研究者接受的程度如何? 数据期刊发表论文的数量有什么趋势? 数据论文被使用或引用的情况如何? 回答这些问题有助于增进研究者对数据论文的认识和理解。为此, 本文选择了两本代表性数据期刊 (*Biodiversity Data Journal* 和 *Scientific Data*), 分析了它们创刊以来的发文数量、涉及生物类群、文章浏览量和被引用次数等指标, 以期基于实证数据揭示数据论文的发表趋势。

1 资料来源与研究方法

1.1 研究对象

本研究主要关注发表生物多样性相关数据论文的两本代表性数据期刊*Biodiversity Data Journal* (BDJ)和*Scientific Data* (SD)。BDJ自2013年9月16日开始出版, 旨在基于同行评审的学术出版模式, 快速发表生物多样性数据。BDJ发表的文章类型主要包括Data Paper (数据论文)、Taxonomic Paper (分类论文)、General Article (综合论文)、Software Description (软件描述)、Species Inventory (物种目录)、Interactive Key (交互式检索表)等。BDJ要求所有基于原始数据的论文以符合规范的形式共享数据, 因此虽然有文章类型的人为划分, 它们(除Software Description外)的区别更多的只是所共享数据的类型和多少, 实际上都属于数据论文的范畴。BDJ发表的文章涉及物种分类和标本信息、生物区系数据库、植被组成、形态特征、鸣声记录、DNA条形码等多种生物多样性数据类型。SD自2014年3月11日开始出版, 作为自然出版集团力推的综合性数据期刊, 主要发表具有重要科学价值、数据量大的原始数据集及其分析(Data Descriptor), 面向众多科学领域。

本研究期望基于对BDJ的分析揭示生物多样性数据论文的发表和使用趋势, 对SD的分析则可以

从更广泛的角度揭示数据论文的发表情况,因此未单独提取生物多样性相关领域文章。

1.2 数据收集

BDJ和SD均为在线出版期刊,本研究的数据主要基于两本期刊网站提供的文献计量指标,收集了两本期刊自创刊截止到2016年6月17日的文献信息。BDJ文章信息包括每篇文章的出版时间、文章类型、涉及生物类群、作者国别、文章内容、浏览量等6个方面;SD文章信息包括每篇文章的出版时间、文章类型、浏览量、引用量等4个指标。使用微软Excel软件对以上信息进行分类整理及校对,最终获得的BDJ原始数据集包含313条文献、1,878个数据项,SD数据集包含174条文献、696个数据项。本文的原始数据集共享在Figshare,链接为:https://figshare.com/articles/Data_papers/4311917/。同时,也以本文附录材料的形式共享在《生物多样性》网站(附录1)。

1.3 数据分析

基于所获得的原始数据集,主要开展了4个方面的分析:

(1) BDJ和SD两本数据期刊在时间序列上的发文量趋势。为更好地揭示发文趋势,最初比较分析了按“每月”和“每2月”绘制的折线图,发现以每2月为划分标准能更好地反映发文量趋势。由于BDJ有些文章类型的发文数量极少,最终反映发文趋势的折线图中主要呈现Taxonomic Paper、Data Paper、General Article、Software Description 4种文章类型以及它们的总和。对于SD来说,Data Descriptor是其主要发文类型(占93.7%),因此发文趋势对Data Descriptor文章进行了分析。另外值得指出的是,按照本文对两本期刊统计的时间范围,趋势图中最后一个时间段仅约为1个月。

(2) BDJ发表论文所涉及生物类群的多样性。BDJ发文数量前三位的Taxonomic Paper、Data Paper、General Article均报道生物多样性原始数据,因此对这些文章进行了生物类群多样性分析。依次提取每篇文章提及的生物类群,并确定其所属的纲。由于昆虫纲所占比例较大,进而将昆虫类群具体到目开展分析。

(3) BDJ发表论文的作者国别。作者国别的统计有助于了解不同地区研究者对于数据论文及数据共享的态度,以论文作者单位地址为数据源统计了

BDJ文章作者国别信息,并按发文数量进行排序。

(4) BDJ和SD发表论文的被使用情况。考虑到BDJ和SD网站均提供了文章浏览量信息,SD网站还提供了文章被引用数据,本文主要分析了两本期刊文章的浏览量和SD文章的被引次数,以此来了解数据论文被使用的情况。采用网站提供的唯一身份浏览量(unique view)对不同类型文章的浏览量进行了分析,该指标比总访问量(total view)更能客观揭示论文被使用的情况。结果中主要呈现BDJ发文量较多的4种文章类型(Taxonomic Paper, Data Paper, General Article, Software Description)。SD网站提供了分别来自CrossRef和Scopus的文章引用数据,由于这两个数据库覆盖的期刊范围有所差别,引文数据也略有差别,但总体引用量常基本一致。我们比较分析了每篇Data Descriptor来自这两个数据库的引用情况。

2 结果

2.1 BDJ和SD在时间序列上的发文趋势

在本文统计的时间范围内,BDJ共发表Taxonomic Paper 218篇、Data Paper 38篇、General Article 36篇、Software Description 11篇、Species Inventory 3篇、Corrigendum 3篇、Editorial 3篇、Interactive Key 1篇。由图1a可以看出,自创刊以来,BDJ不同类型文章数量虽有波动,但总体发文量(红线)呈上升趋势,2014、2015、2016年(截至6月中旬)每2月平均发文数量分别为13.3篇、18.6篇、25.5篇。统计时间内,SD共发表Data Descriptor 163篇,发文数量总体呈稳步增加趋势(图1b),2014、2015、2016年(截至6月中旬)每2月平均发文数量分别为10篇、12.3篇、15篇。

2.2 BDJ论文涵盖的生物类群

BDJ所发表报道生物多样性原始数据的文章(Taxonomic Paper、Data Paper、General Article)共涉及动物界的26纲、植物界的3纲、真菌界的2纲(图2a)。其中报道昆虫纲的文章远多于其他类群,达185篇;其次为蛛形纲14篇,双子叶植物纲10篇。基于目级单元对昆虫纲185篇文章进一步分析发现(图2b),报道膜翅目和双翅目的文章占一半以上,有关鞘翅目和半翅目的文章也较多。按文章数量多少排序依次为:膜翅目63篇,双翅目47篇,鞘翅目24篇,半翅目18篇,鳞翅目10篇,脉翅目4篇,直翅目和螳

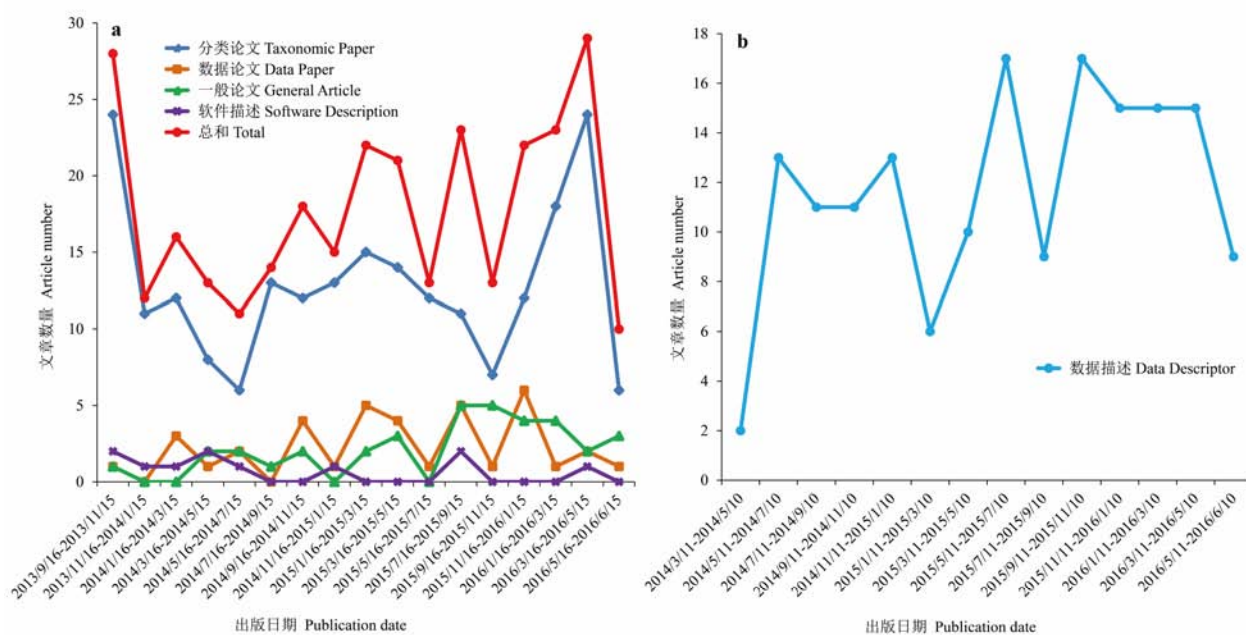


图1 *Biodiversity Data Journal* (a)和*Scientific Data* (b)两本数据期刊自创刊以来的发文量趋势

Fig. 1 Time-series trends of article numbers of two data journals, *Biodiversity Data Journal* (a) and *Scientific Data* (b)

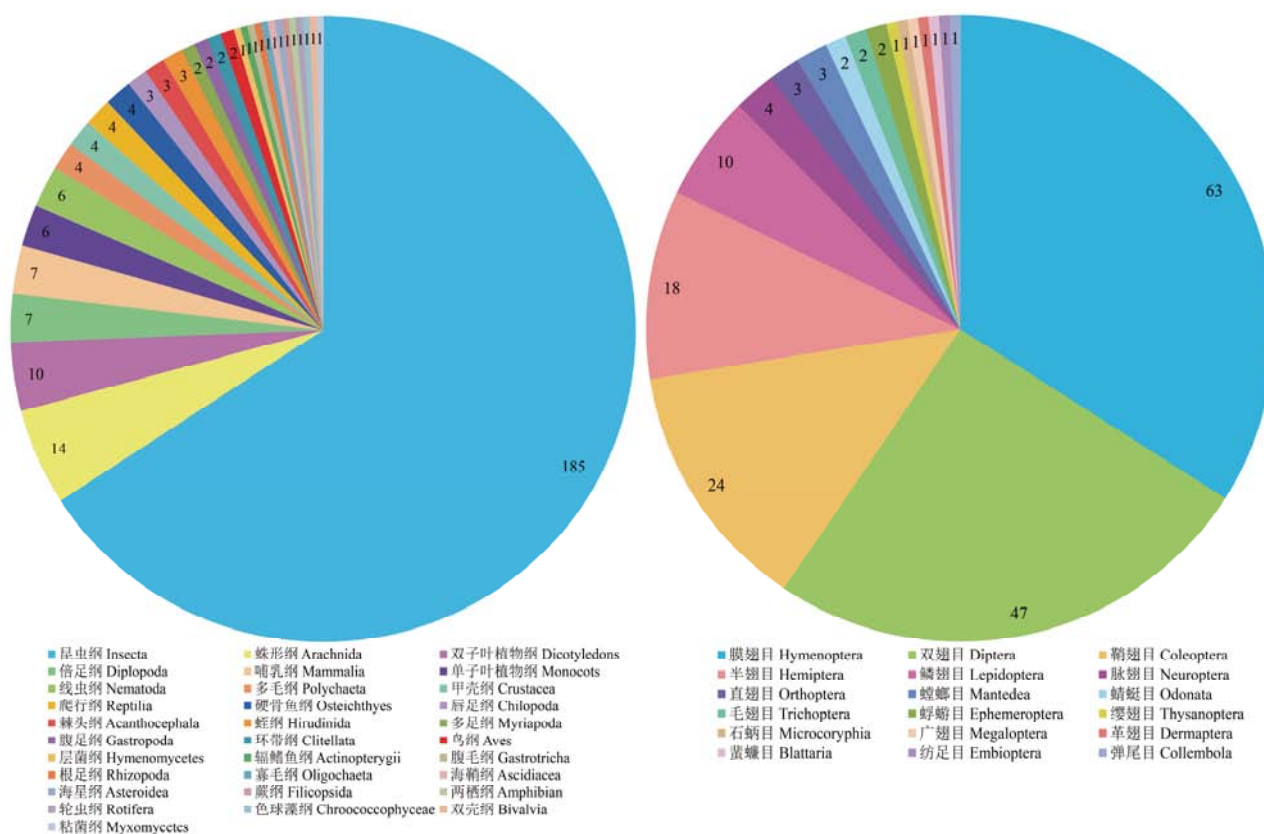


图2 *Biodiversity Data Journal*的文章所覆盖的生物类群: (a)所有生物类群; (b)昆虫纲。

Fig. 2 The coverage of biological groups in *Biodiversity Data Journal* papers: (a) All groups; (b) Insecta.

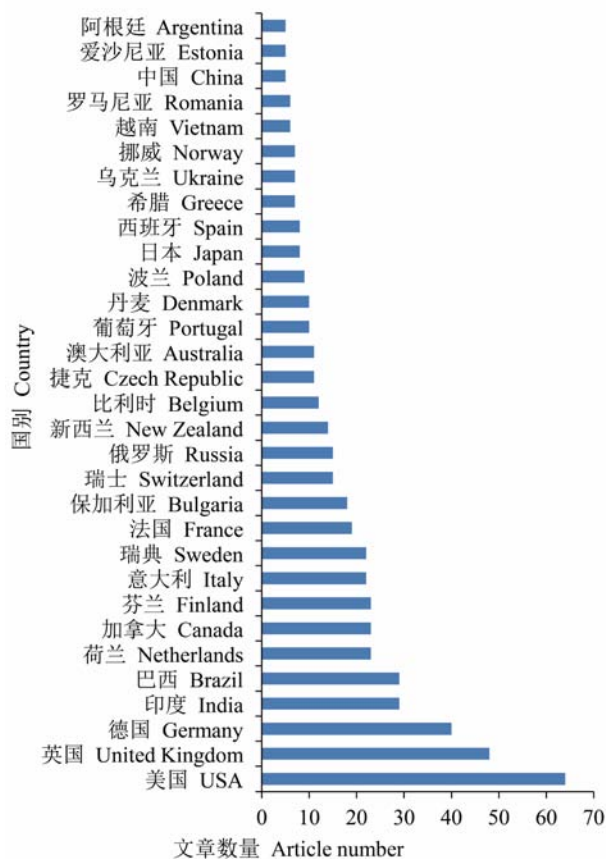


图3 不同国别作者在*Biodiversity Data Journal*的发文数量 (这里显示了发文数量超过5篇的31个国家或地区, 另有38个发文数量少于5篇的国家或地区未显示)
Fig. 3 Article numbers published by authors from different countries or regions. The 31 countries or regions with five and more articles are shown, and 38 countries or regions with articles less than five are not shown.

螂目各3篇, 蜻蜓目、蜉蝣目和毛翅目各2篇, 缨翅目、石蛾目、广翅目、革翅目、蜚蠊目、纺足目、弹尾目(本文仍将弹尾目归于广义昆虫纲)各1篇。

2.3 BDJ论文作者国别

经统计, BDJ文章的作者来自69个国家或地区。发文量前10位依次是美国64篇、英国48篇、德国40篇、印度29篇、巴西29篇、荷兰23篇、加拿大23篇、芬兰23篇、意大利22篇、瑞典22篇(图3)。另外法国、保加利亚、瑞士、俄罗斯、新西兰、比利时、捷克、澳大利亚、葡萄牙、丹麦等国家的发文数量均在10篇以上。这些国家中, 经济和科技发达国家占大多数。涉及中国研究者的论文共5篇, 其中中国研究者为主要作者的2篇, 为合作作者的3篇; 从内容来看, 一篇报道石蜈蚣科1新种, 一篇报道蝶角蛉科2新记

录种, 3篇涉及膜翅目部分类群的物种名录和物种鉴定。

2.4 BDJ和SD论文浏览量和被引用次数

两本期刊文章浏览量的分布如图4所示。BDJ发文数量较多的4类文章(Taxonomic Paper, Data Paper, General Article, Software Description)浏览量平均为1,189次。分别来看, Taxonomic Paper浏览量平均1,065次; Data Paper平均1,177次; General Article平均1,221次; Software Description平均2,912次。总体而言, 涉及生物多样性和生态学科学问题讨论的General Article和涉及生物多样性信息学软件的Software Description浏览量普遍较高, 其中一篇软件类文章的浏览量达到近10,000次, 反映出读者对于软件的关注度较高。相较而言, SD文章平均浏览量较BDJ高, 所发表的163篇Data Descriptor的浏览量平均为5,741次, 其中23篇文章浏览量大于10,000次, 更有5篇文章大于20,000次。对浏览量突出的SD论文内容进行分析发现, 这些论文均报道了数据量大的全球性数据集, 比如全球综合干旱监测和预测系统、埃博拉病毒在人类传播暴发的地理综合数据库、湖面温度全球数据集、病原体-宿主物种关系全球分布数据集、全球城市化历史数据集等。相关性检验显示, 对于这两本创刊时间并不长的数据期刊来说, 其文章浏览量与发表时长总体上具有一定的正相关关系, 即发表时间越长, 浏览量可能越大。

SD所发表的163篇Data Descriptor文章中, 有103篇(63.2%)被引用, 来自CrossRef和Scopus的引用量分布如表1所示, CrossRef和Scopus数据反映的趋势总体一致。据统计, 103篇文章共被引用515次, 篇均被引5次; 引用排名前30%的文章贡献了约

表1 *Scientific Data* 文章的被引次数分布。表中“文章数量”表示在某个引用量区间内的文章数量。

Table 1 The citation numbers of *Scientific Data* papers. ‘Article numbers’ in this table means the numbers of articles within certain citation ranges

CrossRef引用量 CrossRef citations	文章数量 Article numbers	Scopus引用量 Scopus citations	文章数量 Article numbers
0–5	77	0–5	53
5–10	10	5–10	14
10–15	4	10–15	5
15–20	4	15–20	2
20–25	1	20–25	2
25–30	2	25–30	1

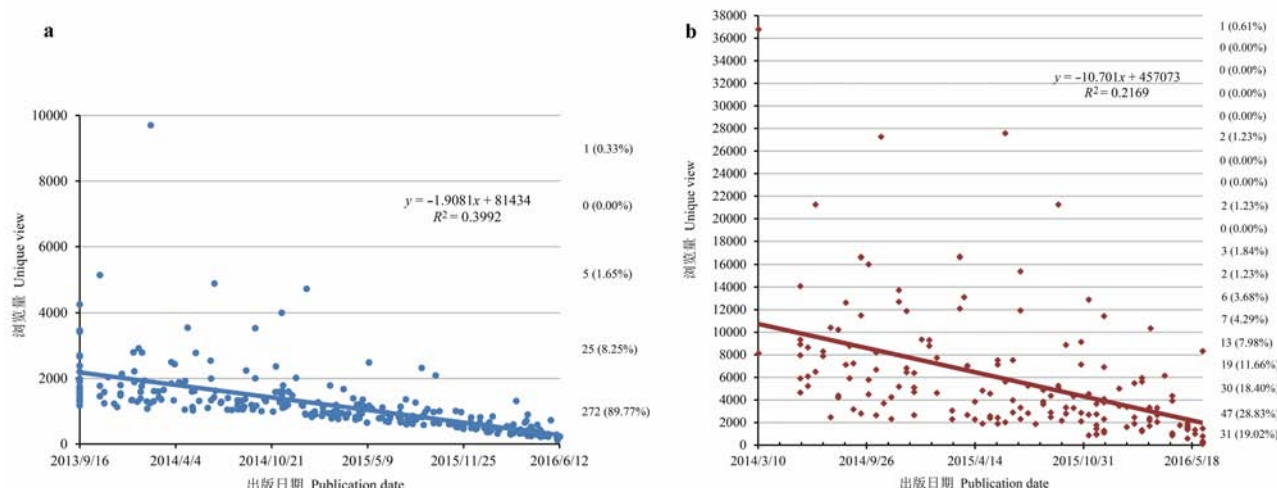


图4 *Biodiversity Data Journal* (a)四类文章(Taxonomic Paper, Data Paper, General Article, Software Description)和*Scientific Data* (b) Data Descriptor文章的浏览量

Fig. 4 The unique view numbers of four types of articles (Taxonomic Paper, Data Paper, General Article, Software Description) in *Biodiversity Data Journal* (a) and *Data Descriptor* articles in *Scientific Data* (b)

70%的引用次数。总体来说, 论文引用数和论文数量呈指数分布关系, 符合期刊论文引用分布的一般性规律(Chatterjee et al, 2016)。对比分析SD文章的浏览数和被引次数, 虽然发现部分被引次数高的论文往往也有较大的浏览量, 但两者之间并无明显的关联。

3 讨论

虽然科学数据共享包括生物多样性数据共享在近几年被广泛关注和推动, 但不同领域、不同地区研究者的数据共享意识和意愿仍很不均衡且有待提高(Alsheikh-Ali et al, 2011; Tenopir et al, 2011; Huang et al, 2012; Fane et al, 2016)。生物多样性数据论文之所以被提出, 核心目的是让研究者能够采用熟悉的、基于同行评审的学术出版形式, 一方面可以促进生物多样性数据共享, 另一方面可以应对现行的以论文为主的科研评价模式。我们对BDJ和SD的分析发现, 这两本数据期刊自创刊以来的发文量都呈增长趋势, 说明数据论文这种较新的数据共享方式正在被越来越多的研究者所接受。除了BDJ和SD等专门发表数据论文的数据期刊, 数据论文这种形式也越来越被更多学术期刊认可。比如, Faculty of 1000旗下的*F1000 Research*, BioMed Central旗下的*BMC Research Notes*、*GigaScience*等发表“Data Note”, Frontiers旗下期刊*Frontiers in Ecology*

and *Evolution*和*Frontiers in Plant Science*等发表“Data Report”。国内一些相关领域期刊也开设了重在数据发表的栏目, 比如《生物多样性》的“生物编目”栏目, 《植物生态学报》的“资料论文”栏目。但总体来看, 国内期刊在数据论文发表数量、数据共享方式等方面需要提高。

研究发现, 数据论文(基于BDJ的分析)所报道的生物多样性数据已经覆盖了众多生物类群, 包括动物界26纲、植物界3纲、真菌界2纲, 暗示不同领域、不同类群的研究者均开始尝试这种新的发表形式。然而, 类群的总体覆盖度和均匀度仍需要提高, 比如目前植物和微生物类群数据报告偏少, 不同昆虫类群的数据发表也不均衡。基于文章内容的分析也发现, BDJ所发表的部分文章存在数据量过少的问题。相较而言, SD所发表的文章都为较大数据集。Huang等(2013)曾讨论过生物多样性数据论文应当报道多少数据量的问题, 认为虽然数据论文是否值得发表取决于对数据量、类群的重要性、研究地区等不同因素的综合判断, 但一篇数据论文还是应当达到一定的数据量才更有价值, 同时发挥激励研究者共享的作用。

浏览量和被引次数分析说明, 数据论文能够获得足够的关注和使用。BDJ文章的平均浏览量与同为Pensoft出版的SCI期刊*ZooKeys*和*PhytoKeys*相当甚至更高。SD文章平均浏览量较高, 可能与该刊为

综合性数据期刊, 以及由知名度高的自然出版集团出版有关。截至本文数据采集时间, SD 文章的平均被引次数为 5 次, 已高于很多生物多样性和生态学领域期刊同时期发表的研究论文。浏览量和被引数据均表明数据论文有足够的价值以获得相当数量的使用, 近期的一项调研也说明了研究者对于数据引用价值的认可(Fane et al, 2016)。对浏览量和被引次数都很突出的论文数据集进行分析发现, 具有较广泛意义、数据量大的综合数据集更能引起关注, 这对科学家基于数据论文的数据共享实践有重要的启示。

数据论文的数量可以在某种程度上反映出不同国家或地区的研究者对生物多样性数据共享的态度。分析 BDJ 文章作者的国别发现, 经济和科技都较为发达的北美和欧洲地区的研究者更倾向于共享生物多样性数据。虽然中国是生物多样性大国, 但有中国作者署名的 BDJ 文章仅为 5 篇, 而同为生物多样性大国、经济发展水平处于类似阶段的巴西和印度的研究者在生物多样性数据论文发表方面多于中国研究者。这一方面反映了中国研究者对生物多样性数据论文这种新的数据共享方式尚不了解, 相关领域的中国期刊可以做些推进工作; 另一方面反映出中国相关领域的数据共享文化有待普及。之前有关生物多样性领域科学家对数据共享态度的一项国际调研(Huang et al, 2012), 以及最近一份有关科学数据共享的报告(Fane et al, 2016), 均显示亚洲地区研究者的数据共享意愿较低, 这也可能与部分亚洲国家普遍采用以 SCI 论文作为科研评价的主要指标有关。

对 BDJ 和 SD 两本数据期刊的分析, 为理解生物多样性数据论文的发表趋势提供了实证数据, 也说明了数据论文对于生物多样性领域的研究和数据共享实践具有重要价值。近期, *Ecology Letters* 等期刊联合发表社论, 呼吁生态进化领域的科学家应该通过数据共享等增加研究的透明性和可靠性, 并称将开始实施有关数据共享等的新举措(Parker et al, 2016)。我们建议中国生物多样性领域的研究者和期刊关注生物多样性论文和生态进化领域期刊有关数据共享政策的进展, 并更多地践行生物多样性数据共享。

致谢: 审稿专家和责任编委对本文提出了宝贵的修

改建议, 特此致谢!

参考文献

- Alsheikh-Ali AA, Qureshi W, Al-Mallah MH, Ioannidis JPA (2011) Public availability of published research data in high-impact journals. *PLoS ONE*, 6, e24357.
- Cassey P, Blackburn TM (2006) Reproducibility and repeatability in ecology. *BioScience*, 56, 958–959.
- Chatterjee A, Ghosh A, Chakrabarti BK (2016) Universality of citation distributions for academic institutions and journals. *PLoS ONE*, 11, e0146762.
- Chavan V, Penev L (2011) The data paper: a mechanism to incentivize data publishing in biodiversity science. *BMC Bioinformatics*, 12 (Suppl. 15), S2.
- Costello MJ, Michener WK, Gahegan M, Zhang ZQ, Bourne PE (2013) Biodiversity data should be published, cited, and peer reviewed. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 454–461.
- De Wever A, Schmidt-Kloiber A, Gessner MO, Tockner K (2012) Freshwater journals unite to boost primary biodiversity data publication. *BioScience*, 62, 529–530.
- Fane B, Treadway J, Gallagher A, Penny D, Hahnel M (2016) Open season for open data: a survey of researchers. doi: <https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.4036398>.
- Haddaway N, Pullin A (2013) Evidence-based conservation and evidence-informed policy: a response to Adams & Sandbrook. *Oryx*, 47, 336–338.
- Hampton SE, Strasser CA, Tewksbury JJ, Gram WK, Budden AE, Batcheller AL, Duke CS, Porter JH (2013) Big data and the future of ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 156–162.
- Huang XL, Hawkins BA, Lei FM, Miller GL, Favret C, Zhang RL, Qiao GX (2012) Willing or unwilling to share primary biodiversity data: results and implications of an international survey. *Conservation Letters*, 5, 399–406.
- Huang XL, Hawkins BA, Qiao GX (2013) Biodiversity data sharing: will peer-reviewed data papers work? *BioScience*, 63, 5–6.
- Huang XL, Qiao GX (2011) Biodiversity databases should gain support from journals. *Trends in Ecology & Evolution*, 26, 377–378.
- Huang XL, Qiao GX (2014) Sharing and publishing of biodiversity data: recent trends and future suggestions. *Biodiversity Science*, 22, 293–301. (in Chinese with English abstract) [黄晓磊, 乔格侠 (2014) 生物多样性数据共享和发表: 进展和建议. *生物多样性*, 22, 293–301.]
- Michener WK, Jones MB (2012) Ecoinformatics: supporting ecology as a data-intensive science. *Trends in Ecology & Evolution*, 27, 85–93.
- Parker TH, Nakagawa S, Gurevitch J, IIEEE Workshop Participants (2016) Promoting transparency in evolutionary biology and ecology. *Ecology Letters*, 19, 726–728.
- Pullin AS, Salafsky N (2010) Save the whales? Save the rainforest? Save the data! *Conservation Biology*, 24, 915–917.
- Reichman OJ, Jones MB, Schildhauer MP (2011) Challenges

- and opportunities of open data in Ecology. *Science*, 331, 703–705.
- Ryan MJ (2011) Replication in field biology: the case of the frog-eating bat. *Science*, 334, 1229–1230.
- Shapiro JT, Báldi A (2012) Lost locations and the (ir)repeatability of ecological studies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10, 235–236.
- Tenopir C, Allard S, Douglass K, Aydinoglu AU, Wu L, Read E, Manoff M, Frame M (2011) Data sharing by scientists: practices and perceptions. *PLoS ONE*, 6, e21101.
- Vines TH, Albert AYK, Andrew RL, Débarre F, Bock DG, Franklin MT, Gilbert KJ, Moore JS, Renaut S, Rennison DJ (2014) The availability of research data declines rapidly with article age. *Current Biology*, 24, 94–97.

(责任编辑: 严岳鸿 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 *Biodiversity Data Journal*和*Scientific Data*两本数据期刊截止2016年6月17日的文献信息

Appendix 1 Bibliographical information of the two data journals, *Biodiversity Data Journal* and *Scientific Data*, by 17 June 2016
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016325-1.xls>

附录1 Biodiversity Data Journal和Scientific Data两本数据期刊截止2016年6月17日的文献信息

Appendix 1 Bibliographical information of the two data journals, Biodiversity Data Journal and Scientific Data, by 17 June 2016

Publication date	Article type	Unique view	Biological group	Country/Region	Paper content
2013/9/16	Editorial	5323		United Kingdom、Bulgaria、Netherlands、Germany、France、USA、Czech Republic、Switzerland	
2013/9/16	Taxonomic Paper	2206	Diplopoda,Polydesmida	Russia、Bulgaria	新种（1种）+新记录
2013/9/16	Taxonomic Paper	1524	Hymenoptera: Platygasteridae s.l.,Scelioninae	USA、Australia、China	物种名录（18个）+分布
2013/9/16	Taxonomic Paper	2666	Balistidae	USA	新种（1种）
2013/9/16	Taxonomic Paper	4255	（Arachnida,Araneae） and (Insecta, Hymenoptera, Ichneumonidae, Ephialtini)	Netherlands	用DNA条形码匹配蜘蛛和寄生蜂
2013/9/16	Interactive Key	5337	Plantae,Cyperaceae	USA	用一种新的工具——The Carices Interactive Visual Identification Key (CIVIK)识别北美的苔属植物
2013/9/16	General Article	3466	Echinorhynchus	United Kingdom	鱼类寄生虫—鱼棘头虫形态变异在希腊和意大利（地中海）中沿海带的14个采集地采集的一组多毛类数据集
2013/9/16	Data Paper	2704	polychaetes (Annelida)	Greece、Italy	软件（BioCAsE监控服务——一种通过分布式数据网络监测进展和数据质量的工具）
2013/9/16	Software Description	1991		Germany、Belgium	
2013/9/16	Software Description	3420		United Kingdom	软件——EXIF Custom
2013/9/16	Taxonomic Paper	1695	spider	Slovenia、Liechtenstein、Switzerland、USA	蜘蛛多样性永久保存
2013/9/16	Taxonomic Paper	1720	Coleoptera,Scarabaeidae	Russia	圣甲虫多样性，物种清单+分布
2013/9/16	Taxonomic Paper	2386	Araneae	Bulgaria、Macedonia、Canada、	蜘蛛多样性及分布
2013/9/16	Taxonomic Paper	1294	Hemiptera:Triozidae	New Zealand	新记录（1种）
2013/9/16	Taxonomic Paper	1288	Hemiptera:Cicadellidae	New Zealand	新记录（1种）

2013/9/16	Taxonomic Paper	1961	Coleoptera:Staphylinidae:Pselaphinae	Bulgaria	新种 (1种)
2013/9/16	Taxonomic Paper	1419	Neuroptera:Hemerobiidae	Canada	气候变化的1种潜在指示物种
2013/9/16	Taxonomic Paper	1679	Hymenoptera,Platygastridae	India	更改1个物种的名字, 即新异名+分布
2013/9/16	Taxonomic Paper	1173	Diplopoda,Glomerida,Glomeridellidae	Russia	新记录 (1种)
2013/9/16	Taxonomic Paper	1625	Insecta,Hemiptera,Cicadulidae	Portugal	新记录 (1种)
2013/9/16	Taxonomic Paper	1751	Ephemeroptera,Leptophlebiidae	Finland	新记录 (2种)
2013/9/16	Taxonomic Paper	1543	Diptera:Sciarioidea:Lygistorrhinidae	United Kingdom、Hungary、Sweden	新种 (1种)
2013/9/16	Taxonomic Paper	1902	Hymenoptera:Pteromalidae	New Zealand	先前在一地区引进一物种, 后来消失, 第二次在该地区发现同一
2013/9/16	Taxonomic Paper	1349	Hymenoptera:Encyrtidae	New Zealand	新记录 (1种)
2013/10/28	Taxonomic Paper	1454	Annelida:Clitellata	Italy	新记录 (2种)
2013/10/28	Taxonomic Paper	1773	Diptera:Dolichopodidae	Finland	更新芬兰长足虻科名录清单, 重新评估某物种的地位
2013/10/28	Taxonomic Paper	5151	Chilopoda:Lithobiomorpha:Lithobiidae	Bulgaria、Croatia、Denmark、China、Germany、Belgium、France、Italy、United Kingdom、Greece	新种 (1种)
2013/11/6	Taxonomic Paper	1239	Heteroptera: Reduviidae	New Zealand	新记录 (1种)
2013/11/6	Taxonomic Paper	1585	Diplopoda,Glomerida,Glomeridae	Russia	新种 (3种)
2013/11/14	Taxonomic Paper	2039	Coleoptera:Carabidae	Italy	不同生境 (稻田、生境恢复区等) 的步甲科昆虫研究+物种名
2013/11/27	Taxonomic Paper	1230	Coleoptera,Scarabaeidae	Russia	新种 (4种)+分布
2013/12/3	Taxonomic Paper	1126	Diptera:Hesperinidae	Estonia	新记录 (1种)
2013/12/10	Taxonomic Paper	1482	Hymenoptera,Ichneumonidae	Sweden	新种 (1种)
2013/12/10	Taxonomic Paper	1795	reptiles	Vietnam、Germany、Lao People's Democratic Republic	新记录 (4种)
2013/12/10	Taxonomic Paper	1540	Hymenoptera,Ichneumonidae	Ukraine	新记录 (2种), 新异名

2013/12/13	Taxonomic Paper	2138		Albania、Denmark	新记录（12个分类群），物种名录+分布
2014/1/2	Taxonomic Paper	1335	Hymenoptera:Ceraphronoidea:Megaspilidae	India	新记录（1属）+新种（1种）
2014/1/3	Taxonomic Paper	1343	Hymenoptera: Braconidae: Microgasterinae	Canada	新记录（1种）
2014/1/6	Taxonomic Paper	2793	aquatic plants	New Zealand、Denmark	更新物种名录
2014/1/8	Taxonomic Paper	1889	Mantodea:Mantidae and Amorphoscelidae	Portugal、United Kingdom	新记录（3种）
2014/1/8	Software Description	2217		United Kingdom	an implementation of the Darwin Core Archive (DwC-A) standard
2014/1/14	Taxonomic Paper	1291	Hymenoptera,Ichneumonidae,Campopleginae	Ukraine	新记录（1属，2种）
2014/1/17	Data Paper	2919	Polychaeta	Greece、Italy、Germany	数据库（海洋多毛类）
2014/1/21	Taxonomic Paper	1389	Basidiomycota,Polyporales	Hungary	新记录（1种）
2014/1/21	Taxonomic Paper	1592	vascular plants	Kyrgyzstan、Finland	新记录（4种）+分布区扩散
2014/1/23	Taxonomic Paper	1764	Hemiptera:Pseudococcidae	USA	新记录（1种）
2014/1/24	Data Paper	2785		Cameroon、France	树种多样性（数据集）
2014/1/29	Data Paper	1929	Odonata	United Kingdom	特性数据集（蜻蜓目）
2014/2/3	Taxonomic Paper	1297	Neuroptera:Myrmeleontidae	Italy	报道罕见物种（4种）+新记录（1种）
2014/2/4	Taxonomic Paper	1078	Coleoptera:Tenebrionidae:Alleculinae	New Zealand	物种继续存在的证据
2014/2/10	Taxonomic Paper	1249	Asteiidae	USA	新记录（5种）
2014/2/11	Software Description	9702		United Kingdom	为低成本的环境监测开源数据记录器
2014/2/14	Species Inventory	1668	Arachnida:Araneae	Portugal、Finland、Brazil	特有种的空间分布
2014/2/17	Taxonomic Paper	1304	Hirudinida:Arhynchobdellida: Erpobdelliformes	Japan、Russia	新记录（1种）
2014/2/18	Taxonomic Paper	1613	Hymenoptera:Formicidae	India	新种（1种）
2014/2/25	Species Inventory	1686	Hymenoptera: Ichneumonidae	Norway、Russia、Sweden	新记录（61种），物种名录+分布

2014/2/27	Taxonomic Paper	1602	Hymenoptera: Braconidae	Canada	物种保护、物种命名+分布+保护
2014/2/28	Taxonomic Paper	1424	Potamogetonaceae	New Zealand、Japan、Thailand	新记录（1种）
2014/3/5	Taxonomic Paper	1357	Hymenoptera, Ichneumonidae	Sweden、Netherlands	新种（1种），新记录（1种），重新审查1个属
2014/3/10	Taxonomic Paper	1651	Insecta: Diptera: Mydidae: Syllegomydinae	USA	重新回顾物种（物种描述+诊断+分布）
2014/3/26	Software Description	1845		United Kingdom Netherlands、Switzerland、	软件包（超级树工具包）
2014/3/26	Taxonomic Paper	2497	Araneae, Symphytognathidae	Malaysia、Denmark、USA、Czech Republic、United Kingdom、Belgium	新种（1种）
2014/3/31	Taxonomic Paper	1331	Elateridae	Italy	新记录（1种）
2014/4/2	Taxonomic Paper	2437	Diptera: Ditiomyiidae, Keroplatidae, Bolitophilidae and Mycetophilidae	Finland、Russia	两个地方新记录（64种、34种）、欧洲动物区系新记录（9种）
2014/4/11	Taxonomic Paper	1876	Myriapoda: Diplopoda, Chilopoda	Germany	物种名录+分布，新记录（9种）
2014/4/11	Species Inventory	1700	Coleoptera: Carabidae	Greece	景观异质性地对地面甲虫的影响，物种名录+分布
2014/4/22	General Article	1871	Coldenia, Colsmannia, Cynoglossum, and Omphalodes	Germany、Italy	对4个属的观察，原始文献重新发表，翻译
2014/4/23	Taxonomic Paper	1049	Heteroptera: Anthocoridae	New Zealand	新西兰1个物种的生物学性状、分布、生物安全现状和历史
2014/4/24	General Article	1921	Honey bees、Graminoids	USA	蜜蜂为禾草类传粉
2014/4/29	Software Description	3549		USA	一个网站（The Encyclopedia of Life v2，提供地球生命信息的全球访问）
2014/5/8	Taxonomic Paper	1600	fish species	Australia、Mexico	物种名录+分布，新记录（5种）
2014/5/9	Taxonomic Paper	1126	Hemiptera: Cicadoidea	Portugal	新记录（1种）
2014/5/10	Data Paper	1022	Arecaceae	Canada	数据集（同域植物形态类型的土壤和光照条件）
2014/5/13	Taxonomic Paper	1618	aquatic monocots	New Zealand、Japan	水生单子叶植物的染色体研究

2014/5/16	Taxonomic Paper	2780		USA	植物区系库存, 物种名录+分布
2014/5/23	Taxonomic Paper	1312	Coleoptera,Coccinellidae	India	重新描述物种 (1种), 新记录 (1种), 命名法
2014/6/10	Data Paper	1100	vascular plants	Belgium	维管植物的分布
2014/6/16	General Article	2541		Netherlands、Bulgaria、Italy、United Kingdom、USA、Belgium、Germany、New Zealand、Switzerland、Canada、Finland	生物多样性数据 (作为一种资源和服务)
2014/6/17	General Article	1995	Hymenoptera	United Kingdom	膜翅目昆虫清单
2014/6/17	Taxonomic Paper	1335	Hymenoptera: Evanioidea	United Kingdom	物种清单
2014/6/23	Taxonomic Paper	1425	Hymenoptera:Apoidea	Austria	物种组成+第1份物种清单
2014/6/24	Software Description	4894		USA	Symbiota软件 (基于生物多样性信息的虚拟平台)
2014/6/26	Taxonomic Paper	1626	Diptera:Calliphoridae	India	新记录 (1种)
2014/7/7	Data Paper	1250		Australia	数据集 (出版新的澳大利亚昆虫的研究趋势)
2014/7/8	Taxonomic Paper	1290	Crustacea,Brachyura,Gecarcinidae	Bolivia	陆地蟹的生态系统, 新记录 (9种)
2014/7/21	Taxonomic Paper	1043	Hymenoptera: Braconidae:Alysiinae	Spain、Russia	物种多样性
2014/7/22	Taxonomic Paper	1401	Saproxylic beetles	Italy	Saproxylic甲虫 (物种名录+分布+注释)
2014/7/30	Taxonomic Paper	1037	Lamiaceae	United Kingdom	新种 (1种)
2014/8/11	General Article	1171		USA	蓝花颜色的使用模式代表生活百科全书内容提供商
2014/8/11	Taxonomic Paper	1331	Nematoda,Dorylaimida,Belonididae	Vietnam、Germany、Spain	新记录 (3属)
2014/8/12	Taxonomic Paper	1055	Hymenoptera:Formicidae	India	第一次描述工蚁
2014/8/18	Taxonomic Paper	1094	Diptera: Ephydriidae	USA	特有种新的岛屿记录 (4种)
2014/8/19	Taxonomic Paper	1319	Nematodes	Sweden	更新北极陆地和淡水栖息地的线虫列表
2014/8/22	Taxonomic Paper	1050	Hymenoptera:Formicidae	India	首次描述喜马拉雅特有种雄蚁, 重新描述雌蚁和蚁后

2014/8/25	Taxonomic Paper	1140	Coleoptera:Coccinellidae:Coc cinellinae	India	新种（1种）
2014/8/27	Taxonomic Paper	1365	Hymenoptera: Ceraphronoidea	United Kingdom	物种清单
2014/8/29	Taxonomic Paper	2240	Hymenoptera - Sawflies, ‘ Symphyta’	Germany、United Kingdom	物种清单
2014/9/9	Taxonomic Paper	1193	Diptera,Keroplastidae	Finland	新种（1种）
2014/9/12	Taxonomic Paper	1050	Hymenoptera:Apidae: Eucerini	Brazil	雄性蜜蜂聚集睡觉（2属）
2014/9/17	General Article	3532		Finland、Netherlands、Switzerland 、Denmark、Philippines、France、 Poland、Slovakia、Germany、 Bulgaria	数据库（欧洲动物区系）
2014/9/17	Data Paper	2002	Helminths	United Kingdom、Bulgaria、Czech Republic、Norway、Poland、USA、 France、Denmark、Netherlands	欧洲动物区系数据库中的寄生虫
2014/9/19	Taxonomic Paper	1168	Lepidoptera:Geometridae,Ge ometrinae,Lophochoristini	Estonia	新种（2种）
2014/9/30	Taxonomic Paper	1000	Diptera:Therevidae	Australia	新种（1种）
2014/10/6	Taxonomic Paper	1374	Reptilia,Gekkonidae	Spain、Portugal、Czech Republic、 Italy	新记录（2种），更新分布图
2014/10/9	Taxonomic Paper	1305	Trichoptera	Brazil	第2份物种清单（物种名录+分布 +注释）
2014/10/24	Taxonomic Paper	988	Staphylinidae:Pselaphinae:Fa ronitae	New Zealand	物种额外记录（1种）
2014/10/29	Taxonomic Paper	1582	Hymenoptera:Braconidae	Canada、Bulgaria	简化使用生命的条码数据系统 （BOLD）中的样本数据来记录物 种分布
2014/10/30	Data Paper	2364	Amphibians	France、Germany	数据库（两栖动物生活史特性）
2014/11/5	Data Paper	1587	Arachnida:Opiliones:Laniator es:Travunioidea and Triaenonychoidea	Brazil	世界物种清单

2014/11/7	Taxonomic Paper	1273	fish	Japan	比较预测的物种丰富度和实际调查的物种丰富度
2014/11/11	General Article	4001		USA、Germany、Australia	通过谷歌分析揭示植物多样性数据的访问趋势
2014/11/12	Taxonomic Paper	1608	Diptera:Phoridae	USA	新种 (1种),新的物种描述方法
2014/11/12	Taxonomic Paper	1290	Coleoptera:Coccinellidae	India	新种 (1种)
2014/11/12	Taxonomic Paper	1507	Insecta:Mantodea	Portugal	新记录 (2种), 1个更新的物种名录
2014/11/13	Taxonomic Paper	1102	Hymenoptera: Braconidae: Microgastrinae	Canada、USA	新记录 (1属), 新种 (2种)
2014/11/14	Taxonomic Paper	1243	Diptera: Milichiidae and Hymenoptera: Formicidae: Polyrhachis	Malaysia、United Kingdom、Czech Republic	新记录 (叶蝇科+蚁属)
2014/11/14	Data Paper	1782	Annelida: Hirudinea: Acanthobdellea and Branchiobdellea	Italy、Slovenia、Finland、Netherlands	数据库 (欧洲动物区系)
2014/11/17	Taxonomic Paper	1152	Diptera, Sciaridae	Canada、Germany	新种 (1种)
2014/11/18	Taxonomic Paper	1132	Trichoptera: Limnephilidae	Kosovo	新记录 (1属)
2014/11/20	Taxonomic Paper	1290	Chiroptera: Hipposideridae	India	分类笔记, 分布区扩展, 物种描述 (1种, 特有种)
2014/11/24	Taxonomic Paper	1196	Diptera: Tachinidae	Canada、USA	新种 (1种)
2014/11/25	Taxonomic Paper	1598	Insecta: Lepidoptera	Brazil	蝴蝶清单
2014/12/3	Taxonomic Paper	1480	Diptera, Limoniidae	Finland	新种 (1种), DNA条形码
2014/12/11	Software Description	2018		Germany、Sweden、Italy、United Kingdom、Finland、Netherlands	网络服务 (生物多样性数据自动化工作流程)
2014/12/23	Taxonomic Paper	1187	Leguminosae: Papilionoideae	India	新种 (1种)
2014/12/25	Taxonomic Paper	1166	Rodentia: Diatomyidae	Vietnam	物种分布及栖息地 (1种)
2014/12/25	Data Paper	1204	Arachnida, Opiliones	France	数据库 (物种发生记录)
2014/12/30	Taxonomic Paper	929	Diptera: Tipulidae	Lithuania	物种次异名 (1种)
2014/12/31	Taxonomic Paper	894	Insecta: Hemiptera: Cicadellidae	Brazil	物种描述 (1种, 雌性, 强调生殖结构)
2015/1/2	Taxonomic Paper	4732	Insecta: Diptera: Phoridae	USA	物种行为 (蚤蝇、蚂蚁)

2015/1/12	Taxonomic Paper	912	Fish,Crayfish, Macroinvertebrates	USA	生物多样性（保护、分布）
2015/1/13	Taxonomic Paper	827	Amoebozoa:Arcellinida	Bulgaria	物种描述（形态、生物统计、生物地理学）
2015/1/16	Taxonomic Paper	959		India	植物区系
2015/1/19	General Article	992	Chiroptera	Brazil	蝙蝠物种丰富度（新热带地区）
2015/1/20	Taxonomic Paper	898	Gastropoda	Bulgaria	物种名录
2015/1/21	Corrigendum	796	spider	Slovenia、Liechtenstein、 Switzerland、USA	更正物种清单
2015/1/21	Editorial	1061		Netherlands、Switzerland、Bulgaria	
2015/1/26	Taxonomic Paper	1270	Teleostei:Beryciformes: holocentrid	USA	新种（1种）
2015/2/3	Taxonomic Paper	854	Insecta:Mantodea	Brazil	新种（1种）
2015/2/5	Taxonomic Paper	966	Squamata:Scincidae	Vietnam、Germany	新记录（6种）
2015/2/5	Data Paper	1101		Colombia	收集爬行动物信息
2015/2/16	Taxonomic Paper	937	Araneae,Tetragnathidae	India、United Kingdom	物种描述（雄性蜘蛛，习性，保护地位）
2015/2/20	Data Paper	1783	Diptera: Brachycera	Denmark、Netherlands、United Kingdom、Russia、Poland、 Switzerland、Sweden、Germany、 Ukraine、Belgium、Czech Republic 、Hungary、Norway、Italy、 Ireland、France、Spain、USA、 Singapore、Bulgaria、Finland	欧洲动物区系
2015/2/23	Data Paper	781	coniferous trees , Lepidoptera: Notodontidae	France	农业景观中针叶树的详尽清单
2015/2/25	Taxonomic Paper	893	Pteridophyta	Brazil	新记录（13种）
2015/2/27	Data Paper	834	Vascular plant	Brazil	维管植物群落组成
2015/2/27	General Article	979	Polychaeta,Annelida	Indonesia	物种丰富度和大量营养素含量
2015/3/4	Data Paper	1192	Insecta,Coleoptera	France	参考库（甲虫DNA条形码）
2015/3/5	Taxonomic Paper	821	Fabaceae	India	物种清单
2015/3/5	Taxonomic Paper	1053	Insecta:Diptera:Asilidae	USA	重新审查1个属，新种（1种）

2015/3/6	Taxonomic Paper	874	Fabaceae	India	新种（1种）
2015/3/6	Taxonomic Paper	1138	Diptera:Phoridae	USA	雌性行为
2015/3/9	Taxonomic Paper	885	Diptera:Culicidae	Germany	更新列表
2015/3/9	Taxonomic Paper	762	Amoebozoa, Myxomycetes	Finland	新种（6种）
2015/3/10	Taxonomic Paper	948	Hymenoptera:Chalcidoidea	India	新记录（1种），新的分布记录（一些物种）
2015/3/11	Taxonomic Paper	929	Coleoptera: Eucnemidae	Finland	新记录（9属）
2015/3/17	Taxonomic Paper	942	Hymenoptera:Ichneumonidae	Sweden	新种、新记录（1种）
				Romania、United Kingdom、Serbia、Ukraine、Sweden、Italy、Austria、Romania、USA、Czech Republic、Belgium、Estonia、Germany、Netherlands、Finland	欧洲动物区系
2015/3/20	Data Paper	1674	Hymenoptera: Apocrita (excl.Ichneumonoidea)		
2015/3/25	Taxonomic Paper	806	Diptera:Tachinidae	Canada、USA	新种（7种）
2015/3/26	Taxonomic Paper	838	Coleoptera:Buprestidae	Bolivia	新记录（2种）
2015/3/26	Taxonomic Paper	808	Araneae:Tetragnathidae	India	缩小物种名和新异名之间的差距
2015/3/27	Taxonomic Paper	899	Hymenoptera:Formicidae	India	蚂蚁的分类和分布（1种）
2015/3/30	Taxonomic Paper	934	Diptera:Ephydriidae	Finland、Poland	物种名录+分布，新记录（4种）
			Coleoptera (Elateriformia, Scarabaeiformia, Staphyliniformia and superfamily Curculionoidea)	Italy、Spain、Australia、Sweden、Czech Republic、Switzerland、Poland、Austria、Russia、France、Germany、United Kingdom、Netherlands、USA、Finland	网络服务（欧洲动物区系：甲虫类）
2015/4/9	Data Paper	1391			
2015/4/14	Taxonomic Paper	824	Insecta:Coleoptera:Staphylinidae	USA	重新审查1个属，新种（1种）
2015/4/14	Taxonomic Paper	742	Hemiptera:Heteroptera:Gerronomorpha & Nepomorpha	Brazil	物种名录（43个）+分布，新记录（11种）
2015/4/17	Editorial	1074		USA	
2015/4/17	Data Paper	1203	Raphidioptera,Megaloptera,Neuroptera	Austria、Italy、Netherlands、Finland	网络服务（欧洲动物区系：脉翅总目）
2015/4/22	Taxonomic Paper	783	Diptera:Simuliidae	Turkey	物种名录（18个），新记录（1种）

2015/4/22	Data Paper	987	Boraginaceae,Cynoglosseae	Germany	数据库（分类群和名字）
2015/4/24	Taxonomic Paper	1211	Insecta:Hemiptera	Japan	物种清单
2015/4/27	Taxonomic Paper	932	Hirudinida,Arhynchobdellida, Praobdellidae	Japan、Kazakhstan	新记录（1种），遗传多样性
2015/4/27	Taxonomic Paper	1208	Perciformes,Serranidae	USA	新种（1种）
2015/4/29	Taxonomic Paper	1355	Ostariophysi,Siluriformes	Brazil	物种清单
2015/5/8	General Article	1140	Hymenoptera:Apidae:Bombu s spp.	USA	物种组成、分布、季节性生物学 和寄生物
2015/5/8	Taxonomic Paper	654	Ephemeroptera:Neoephemer eidae	India	新记录（1种）
2015/5/12	General Article	1168	Crustacea:Peracarida	USA	收集和保护海洋和淡水中的等足 目
2015/5/12	General Article	2486		Netherlands、Switzerland、Bulgaria 、Germany、Australia、United Kingdom	从具前瞻性和遗留分类文献中整 合原始数据并使其可视化
2015/5/18	Taxonomic Paper	1083	Hymenoptera:Braconidae	Mexico	DNA条形码技术
2015/5/19	Taxonomic Paper	1058	Mammalia:Rodentia	Vietnam	新数据（1种，材料、描述、分 布、生态学、保护）
2015/6/2	Taxonomic Paper	779	Chiroptera,Vespertilionidae	Brazil、French Guyana、France、 Switzerland	新记录（1种）
2015/6/5	Taxonomic Paper	790	Chalcidoidea: Encyrtidae and Mymaridae	India	增加信息，新记录（分布和寄 主，8种，1属）
2015/6/8	Taxonomic Paper	807	Diptera,Mycetophilidae	Brazil、USA	新记录（1属，菌蚊科幼虫和真 菌之间的关系）
2015/6/9	Taxonomic Paper	1111	Diplopoda,Glomerida,Glomer idae	Germany、United Kingdom	千足虫种群综合研究（条形码技 术）
2015/6/16	Taxonomic Paper	692	Hemiptera:Reduviidae:Harpa ctorinae	Brazil、Colombia	新异名，新组合
2015/6/19	Taxonomic Paper	937	Hymenoptera: Ichneumonidae	Italy、Sweden、Germany、Austria	新记录（55个）
2015/6/22	Taxonomic Paper	670	Coleoptera:Coccinellidae: Scymnini	India	新种（2种）
2015/6/25	Taxonomic Paper	786	Diptera,Nematocera	Finland	新记录（12种）

2015/6/26	Taxonomic Paper	898	Sepsidae	Singapore、Switzerland	新记录（1种），物种清单
2015/7/13	Data Paper	820		Spain	真菌和地衣模式标本目录
2015/7/15	Taxonomic Paper	948	Pteridaceae	Togo、France	蕨类多样性
2015/7/17	General Article	848		USA	生物多样性评估（比较传统的和系统发生多样性指数）
2015/7/17	Taxonomic Paper	663	Euphydryas maturna and Melampyrum sylvaticum	Finland	寄主植物
2015/7/17	Data Paper	1138	Mollusca: Bivalvia	Spain、Netherlands、Germany	网络服务（欧洲动物区系：双壳纲）
2015/7/17	Taxonomic Paper	712	Lepidoptera:Geometridae	Germany	物种名录+分布
2015/7/28	Software Description	1361		Sweden	一种工具（ignorance maps）
2015/7/29	Software Description	598		Greece	反转RML（研究如何对基于列的数据源执行相反的过程）
2015/7/31	Data Paper	755		Brazil	树的多样性和森林动态
2015/7/31	General Article	654	Diptera:Calliphoridae	Belgium	初始数据（蛹的发育、寿命、雌体繁殖力）
2015/8/10	Taxonomic Paper	629	Coleoptera,Scarabaeidae,Orp hninae and Scarabaeinae	Russia	新的位置记录（2种）
2015/8/10	Taxonomic Paper	836	Diptera:Tachinidae	Canada、USA	新种（3种）
2015/8/11	Taxonomic Paper	610	Indirana	India	一种濒危青蛙新的分布记录
2015/8/11	Taxonomic Paper	855	Diptera:Tachinidae	Canada、USA	新种（3种）
2015/8/14	General Article	744	Triticum	Italy	小麦育种
2015/8/14	Data Paper	835	Gastrotricha	Italy、France、Poland、Netherlands、Germany	网络服务（欧洲动物区系：腹毛动物门）
2015/8/17	General Article	1264	millipede	USA	一种方法（大的千足虫的收集、管理和遗传分析保护）
2015/8/18	General Article	737	Chiroptera,Vespertilionidae , Myotinae	Brazil、USA、Argentina	分布范围扩大
2015/8/21	Taxonomic Paper	800	Diptera:Limoniidae	Romania	新种(1种)，新记录（8种）

2015/8/30	Taxonomic Paper	2319		Canada、France、Argentina、New Zealand、Dominican Republic、Germany、Australia、Bhutan、Namibia、Finland、Bulgaria、Colombia、USA、Mexico、Nepal、Belarus、Sweden	DNA条形码技术（物种鉴定、生物多样性评估）
2015/8/31	Taxonomic Paper	821	Hymenoptera:Orussidae	USA	新记录（1种）
2015/9/2	Data Paper	870	Cicada	United Kingdom、South Africa	蝉声收集
2015/9/3	Taxonomic Paper	581	Aegialoalaimidae,Nematoda incertae sedis	Sweden	新种（1种），重新审查（1属）
2015/9/7	Taxonomic Paper	980	Araneae: Dysderidae	Turkey、Russia	新种（1种）
2015/9/11	Data Paper	1068	Annelida - Terrestrial Oligochaeta(Enchytraeidae and Megadrili), Aphanoneura and Polychaeta	Italy、Netherlands、Germany	网络服务（欧洲动物区系：环节动物门：寡毛类、Aphanoneura、多毛类）
2015/9/24	General Article	973		Sweden	鸟类觅食的生态学和系统学
2015/9/24	Taxonomic Paper	638	Hymenoptera, Ichneumonidae	Ukraine Netherlands、Finland、Belgium、Germany、Norway、United Kingdom、Ireland、Denmark、Greece、New Zealand、France、Turkey、Romania、Portugal、Albania、Armenia、Austria、Azerbaijan、Belarus、Czech Republic、Croatia、Cyprus、Estonia、Georgia、Hungary、Iceland、Israel、Italy、Latvia、Lithuania、Luxembourg、Macedonia、Malta、Moldova、Montenegro、Norway、Poland、Portugal、Russia、Serbia、Slovakia、Spain、Sweden、Switzerland、Ukraine、Bulgaria	物种清单+分布，新记录（4种）
2015/9/28	General Article	2088			PESI（一个泛欧洲的物种名录基础设施）

2015/10/5	Taxonomic Paper	625	Diptera: Heleomyzidae	Canada	新种（1种），修改了新北区一些关键物种
2015/10/6	Taxonomic Paper	1001	Insecta:Diptera:Apioceridae	USA、Switzerland	利用网络资源进行分类
2015/10/7	Corrigendum	438	Diptera:Tachinidae	Canada、USA	纠正物种名的拼音错误，新种（3种）
2015/10/26	Taxonomic Paper	605	Hymenoptera:Aphelinidae and Hemiptera: Aleyrodidae	United Kingdom、Taiwan	新种（1种），粉虱和寄生蜂
2015/10/30	Taxonomic Paper	678	Megachile	USA	新的分布记录（1种）+寄主植物列表
2015/10/30	General Article	610	Salix	Canada、United Kingdom	柳树的纬度多样性
2015/11/9	General Article	1008	Chiroptera,Vespertilionidae, Myotinae	Brazil	鼠耳蝠吃水果的第一个证据
2015/11/10	Taxonomic Paper	566	Amblypygi and Opiliones	Brazil	新记录（2种）
2015/11/10	Taxonomic Paper	521	Nematoda: Hoplolaimidae	Vietnam	新种（1种）
2015/11/13	Data Paper	513	earthworm	France	蚯蚓的空间分布模式
2015/11/13	General Article	553		Brazil	虫瘿的寄主植物清单
2015/11/16	Taxonomic Paper	554	Hymenoptera:Formicidae	India	第一次被证实的记录（1种），修订了东洋界主要物种
2015/11/20	Taxonomic Paper	974	Birds	Portugal、France	物种清单+分布，新种（38种）
2015/11/23	Taxonomic Paper	528	Siricidae:Hymenoptera	South Africa、Canada	新的分布记录（2种），交互式清晰识别关键物种
2015/11/25	Taxonomic Paper	459	Hymenoptera,Tenthredinidae	Germany、Estonia	前蛹和幼虫
2015/11/25	Taxonomic Paper	519	Asteroidea	Belgium	物种清单（更新注册的南极海洋物种）
2015/11/26	Taxonomic Paper	591	Diptera:Ceratopogonidae	Denmark	新种（3种）
2015/12/10	Data Paper	669	Coleoptera:Buprestidae,Cara bidae,Cerambycidae,Curculio noidea excluding Scolytinae	USA	新的州记录（31种）
2015/12/11	Taxonomic Paper	487	Ostracoda,Crustacea	Japan	新种（1种）+几乎完整的线粒体基因组序列
2015/12/11	General Article	810	Butterfly	Malaysia	蝴蝶计数（物种鉴定，DNA条形码）

2015/12/21	Data Paper	501	Arachnida: Opiliones: Laniatores: Samooidea, Zalmoxoidea and Grassatores	Brazil、Argentina	世界物种清单
2015/12/21	General Article	517	Arachnida: Opiliones: Laniatores: Samooidea, Zalmoxoidea and Grassatores	Brazil、Argentina	世界物种清单（接上一篇）
2015/12/21	Data Paper	462	Orthoptera: Gryllotalpidae	United Kingdom	英国日蛉科文献物种清单（1科）+三维扫描burrow casts (洞)
2015/12/21	Taxonomic Paper	453	Hymenoptera,Ichneumonida e,Anomaloniinae	Ukraine	重新审查1个亚科，新记录（8属，9种）
2015/12/22	Taxonomic Paper	536	Limbodessus	Germany、Indonesia	新种（2种）
2015/12/23	Taxonomic Paper	478	Diptera:Tachinidae: Itaplectops	Canada、USA	新种（9种）
2015/12/29	Data Paper	658	vascular plants	Belgium、United Kingdom	普通植物的基础调查
2015/12/30	Data Paper	814	Hymenoptera,Apidae,Bombu e	USA、Germany	数据库（大黄蜂）
2016/1/7	General Article	552	Diptera:Tachinidae	Belgium、United Kingdom	保存物种颜色（1种）
2016/1/8	Data Paper	481	Hymenoptera:Chrysididae: Amiseginae and Loboscelidiinae	United Kingdom	在线分类数据库
2016/1/8	Taxonomic Paper	511	Lepidoptera:Geometridae	Germany	物种清单
2016/1/13	Taxonomic Paper	363	Hymenoptera:Pergidae	Uruguay、Germany	新记录（1种）+寄主植物+生物学特性
2016/1/14	Corrigendum	289		Sweden	更改先前的错误，漏掉一些内容
2016/1/15	General Article	595	Arachnida:Araneae	Brazil、Argentina	蜘蛛多样性
2016/1/18	Taxonomic Paper	661	Diptera, Mycetophilidae	Finland	新种（4种），新记录（3种），同义词（1种）
2016/1/18	Taxonomic Paper	365	Neuroptera:Ascalaphidae	China	新记录（2属，2种）
2016/1/20	Taxonomic Paper	473	Nematoda:Oncholaimida:Onc holaimidae	Japan	世界物种清单（1亚科：属、物种、分布，分类学家和生态学家的参考列表）
2016/1/21	Taxonomic Paper	435	Hymenoptera:Chalcididae	India	新记录（20种）
2016/1/21	Taxonomic Paper	405	Diptera: Trichoceridae	Lithuania、Norway	新记录（2种）

2016/1/25	Taxonomic Paper	840	Echinodermata	United Kingdom、USA、Australia、Norway、Sweden	形态和基因数据鉴定物种（17种）
2016/2/4	Taxonomic Paper	461	Serpentes: Dipsadidae、Colubridae、Boidae、Viperidae、Anomalepididae、Elapidae、Typhlopidae	Brazil、Sweden	蛇的多样性（28种）
2016/2/4	General Article	316	Echinorhynchus	United Kingdom	一种分类工具
2016/2/8	Taxonomic Paper	439	Insecta:Diptera:Phoridae:Melalontha	USA	新种（2种）
2016/2/8	Taxonomic Paper	450	Diptera:Anisopodidae	Romania、Czech Republic、Netherlands	新记录（2种）
2016/2/24	Data Paper	541		Australia、Brazil	热带雨林植被和植物组成列表，分析了干密度和物种多样性
2016/3/2	Taxonomic Paper	330	Liliana	Brazil	水生和湿地的单子叶植物清单
2016/3/2	General Article	291	Rotifera,Cladocera,Copepoda	Bulgaria	新记录（3类群）
2016/3/2	Taxonomic Paper	338	Tunicata:Ascidacea	India	新记录（30种）
2016/3/7	Taxonomic Paper	375	Coleoptera,Cerambycidae	Panama	新记录（2种）
2016/3/7	Taxonomic Paper	315	Crustacea,Decapoda,Achelata,Palinuridae	Indonesia	新记录（1种）
2016/3/7	Taxonomic Paper	350	Acrididae,Hemiacridinae	Singapore、Malaysia	物种重新描述（1种），按照现在的分类标准描述，雄性生殖器的复杂性，证实了亚科物种的地位、新种（2种）
2016/3/8	Taxonomic Paper	381	Hymenoptera:Encyrtidae	India	大型城市公墓的生物丰富度
2016/3/8	General Article	597		Germany	新记录（1种）
2016/3/9	Taxonomic Paper	424	Lepidoptera:Lycaenidae	Serbia、Croatia	物种鉴定（分子数据，DNA条形码，CO1），古北区物种（2种），东洋区物种（1种）
2016/3/9	Taxonomic Paper	421	Braconidae,Euphorinae	Sweden、Netherlands、China	
2016/3/10	Taxonomic Paper	431	Heteroptera:Reduviidae:Emesinae	India	新记录（1种）
2016/3/14	General Article	1311		United Kingdom	收集水生昆虫的方法（光照诱捕，LEDs）

2016/3/21	Taxonomic Paper	322	Lepidoptera:Geometridae: Larentiinae	Germany	物种名录+取食植物
2016/3/23	Software Description	442		Sweden	网络服务（瑞典生物多样性信息 分析门户）
2016/3/25	Taxonomic Paper	328	Coccinellidae	India、United Kingdom	新记录（1种），新异名
2016/3/28	Taxonomic Paper	340	Diptera:Syrphidae	Netherlands、Cyprus	新记录（1种）
2016/4/1	Taxonomic Paper	651	Diptera:Sciaridae	Germany	新种（1种），入侵物种
2016/4/1	Taxonomic Paper	333	Coleoptera:Carabidae	Bulgaria	物种列表
2016/4/4	Taxonomic Paper	709	Cyprinodontiformes:Rivulidae	Brazil	新种（1种）
2016/4/5	Taxonomic Paper	345	vascular plant	USA	物种名录（命名法、分布、注 释）
2016/4/6	Data Paper	413	cyanobacteria	Greece	在线数据库（蓝藻细菌+寄主）
2016/4/7	Taxonomic Paper	899	Hymenoptera: Apoidea,Chrysidoidea and Vespoidea	United Kingdom	物种清单（3总科）
2016/4/7	Taxonomic Paper	251	Nematoda:Diplogastridae	India	新种（1种）
2016/4/8	Taxonomic Paper	304	Diptera, Canacidae, Procanace	USA	新种（1种）、新记录（4个）
2016/4/13	General Article	384	Hymenoptera:Formicidae	Slovenia、Turkey、Poland	蚂蚁清单+分类地位+分布，新记 录（108个）
2016/4/14	Taxonomic Paper	527	Diptera:Phoridae	USA、United Kingdom	新种（12种）
2016/4/14	Taxonomic Paper	238	Hymenoptera:Platygastridae	Brazil	新记录（2种）
2016/4/15	Taxonomic Paper	264	Poaceae	United Kingdom、Tanzania	物种清单+分布
2016/4/15	Taxonomic Paper	326	Hymenoptera: Proctotrupoidea	United Kingdom	更新的物种清单+命名法+分布
2016/4/15	Taxonomic Paper	328	Hymenoptera: Trigonaloidea	United Kingdom	更新的物种清单（1种）+国家层 面的分布+命名法
2016/4/18	Taxonomic Paper	278	Hymenoptera:Aphelinidae; Coleoptera:Curculionidae	United Kingdom、Portugal	寄生蜂和象甲
2016/4/19	Taxonomic Paper	299	Diptera:Tachinidae	Canada、USA	新种（2种）
2016/4/21	Taxonomic Paper	388	Hymenoptera: Braconidae	United Kingdom	史前的物种清单+命名法+分布， 新记录（83个），新异名（1 个）

2016/4/22	Taxonomic Paper	337	Hymenoptera: Platygastridae	Denmark、United Kingdom	更新的物种清单+命名法+分布
2016/4/25	Taxonomic Paper	299	Diptera:Tachinidae invertebrate organisms (Arthropoda, Hexapoda, Insecta, Lepidoptera, Odonata, Coleoptera, Hymenoptera, Diptera, Hemiptera, Heteroptera, Orthoptera, Neuroptera, Psocodea, Thysanoptera, Blattodea, Embioptera, Dermaptera, Microcoryphia, Collembola, Arachnida, Araneae, Acari, Mollusca, Gastropoda)	Canada、USA	新种 (1种)
2016/4/27	General Article	584	Hymenoptera:Ichneumonidae:Tryphoninae	USA	生物多样性, 物种列表
2016/4/28	Taxonomic Paper	281	Aves:Icteridae	Poland、Sweden	新记录 (3种)
2016/5/3	Taxonomic Paper	425	Hymenoptera:Braconidae:Rhysipolinae	Ecuador、USA	分布范围扩大 (1种)
2016/5/4	Taxonomic Paper	214	Insecta:Hymenoptera:"Symphyta"	China、Netherlands	物种介绍 (1种), 材料+形态描述+诊断+分布+生物学)+识别的关键
2016/5/9	Data Paper	327	Insecta:Hemiptera:Heteroptera	USA	物种收集记录 (47种), 新记录 (30种)
2016/5/13	Taxonomic Paper	240	Myriapoda: Chilopoda and Diplopoda	Brazil、Slovakia、Switzerland	新记录 (21种)
2016/5/16	Data Paper	251	Mollusks	USA	物种收集记录 (54种), 新记录 (11种)
2016/5/19	Taxonomic Paper	302		Russia、Czech Republic	物种注释清单 (33种)
2016/5/20	General Article	300		Germany	物种名错用、修改 (从不同网站整合物种名, 查证、修改)
2016/5/20	General Article	223		Mexico、USA	新记录 (11种)+环境和生活史
2016/5/25	General Article	725		Australia、USA、Canada	挑战使用名字链接到数字生物多样性信息

2016/6/6	Taxonomic Paper	283	Hymenoptera: Chalcidoidea and Mymarommatoidea	United Kingdom、France	更新的物种清单+命名法+分布
2016/6/7	Taxonomic Paper	176	Hymenoptera:Aphelinidae; Hemiptera: Aleyrodidae	United Kingdom、Taiwan	新种（2种，蚜小蜂），两种蚜 小蜂寄生于两种粉虱上
2016/6/8	Taxonomic Paper	115	Ehretiaceae,Boraginales	Romania、Germany	分类学修订
2016/6/9	Taxonomic Paper	221		Canada	植物集合（维管植物、地衣、藻 类和蓝细菌），太空生物学
2016/6/13	Taxonomic Paper	228	Hymenoptera:Formicidae	USA	刀尖子修订（1属），刺蜂（ 种、

•数据论文•

东亚特有珍稀蕨类植物岩穴蕨(碗蕨科)高通量转录组测序及分析

刘 莉^{1,3} 舒江平^{1,3} 韦宏金¹ 张 锐¹ 沈 慧^{1*} 严岳鸿^{1,2}

1 (上海辰山植物园, 中国科学院上海辰山植物科学研究中心, 上海 201602)

2 (华东野生濒危资源植物保育中心, 上海 201602)

3 (上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234)

摘要: 岩穴蕨(*Monachosorum maximowiczii*)隶属于碗蕨科稀子蕨属, 是东亚中高海拔地区所特有的珍稀濒危植物。为了在分子水平对该物种有进一步的认识, 本文首次利用二代高通量测序技术(RNA-seq)对岩穴蕨进行了转录组测序分析。通过Illumina Hiseq 2500测序平台, 共计获得4.95 Gb原始数据(raw data), 经过滤后得到4.83 Gb有效数据(clean reads), 并进行从头组装得到了101,448条unigene。其中, 54,106条unigene预测到完整的开放阅读框。我们利用目前已知的51个植物基因组数据, 对岩穴蕨的unigene进行了详尽的功能注释, 并通过GO、COG、KEGG注释进一步了解了这些编码基因的作用方式、特征以及所参与的代谢通路。同时, 转录因子分析结果也为岩穴蕨的环境适应机制研究提供了初步线索。

关键词: 蕨类植物; 转录组学; 高通量测序; 生物多样性; 适应性

De novo transcriptome analysis of the rare fern *Monachosorum maximowiczii* (Dennstaedtiaceae) endemic to East Asia

Li Liu^{1,3}, Jiangping Shu^{1,3}, Hongjin Wei¹, Rui Zhang¹, Hui Shen^{1*}, Yuehong Yan^{1,2}

1 Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201602

2 National Conservation Center for Endangered Useful Plants in East China, Shanghai 201602

3 College of Life and Environmental Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234

Abstract: *Monachosorum maximowiczii*, which belongs to the family Dennstaedtiaceae, is a unique fern rarely distributed in the middle-high altitudinal areas in East Asia. In order to identify the molecular basis of this species at the transcriptome level, a second generation sequencing technology (RNA-seq) was employed here for the first time. Using Illumina Hiseq 2500 platform, a total of 4.95 Gb raw data were obtained. After filtration, 4.83 Gb clean reads were kept and 101,448 unigene were generated using *de novo* assembly. Among them, 54,106 unigene were predicted to have a complete open reading frame. The functional annotation of the unigene obtained here was carried out using the Phytozome v11.0 databases. The gene function pattern and participated pathway were further explored based on GO, COG and KEGG annotation. Meanwhile, transcription factors prediction and analysis will provide preliminary insights into mechanisms of *Monachosorum maximowiczii* for environmental adaptation.

Key words: ferns; transcriptomics; high-throughput sequencing; biodiversity; adaptation

蕨类植物是一类不开花的、借助孢子繁殖的维管植物。全球现存蕨类植物约一万余种, 多分布于中低海拔的热带亚热带地区(Christenhusz & Byng,

2016)。岩穴蕨(*Monachosorum maximowiczii*)原属稀子蕨科岩穴蕨属(*Ptilopteris*) (秦仁昌, 1978), 后被归入碗蕨科稀子蕨属(*Monachosorum*) (Wu et al,

收稿日期: 2016-08-23; 接受日期: 2016-11-09

基金项目: 上海市绿化和市容管理局科学技术项目(G142433)和中国科学院战略生物资源科技支撑体系运行专项(ZSZY-001)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shenhui@sibs.ac.cn

2013)。该种数量稀少,仅分布于中国东部至日本一带,是东亚特有种(附录1)(Wu et al, 2013; Li et al, 2015)。与大部分喜好温暖湿润环境的蕨类植物不同,岩穴蕨多生长在气候寒冷的中高海拔(800–2,500 m)地区(Wu et al, 2013),该区域年平均气温最低可达–15℃ (祁承经等, 1994),生长环境十分独特。因此,对蕨类植物低温环境的适应性机制研究而言,岩穴蕨是难得的理想材料。

近年来,随着高通量测序技术的不断发展,转录组测序技术(RNA-seq)已成为对非模式植物进行分子生物学研究的有效手段(魏利斌等, 2012; 杨楠等, 2012; 朱帅旗等, 2015)。该技术通过对某物种的特定组织在某一时空状态下的转录本进行大规模测序,并利用生物信息学手段进行拼接组装,能够快速获得该物种特定组织在该时空条件下几乎所有的转录本序列,具有成本低、数据量大、效率高、准确性高等优点(Wang et al, 2009; Costa et al, 2010)。利用这些序列信息可以对重要的功能基因进行挖掘,从代谢通路、分子机制等方面对植物的生物学特性进行深入的研究(Franssen et al, 2011; Wu et al, 2014; Yang et al, 2015; Zhou et al, 2016)。

对于缺乏基因组信息的蕨类植物而言,转录组测序技术的发展为我们进一步研究蕨类植物提供了新机遇。目前,已发表转录组数据的蕨类植物主要有:欧洲蕨(*Pteridium aquilinum*)、水蕨(*Ceratopteris richardii*)、鸟巢蕨(*Asplenium nidus*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)、巨木贼(*Equisetum giganteum*)等(表1)(Der et al, 2011; Bushart et al, 2013; 贾新平等, 2014; Aya et al, 2015; Vanneste et al, 2015)。2011年, Der等利用Roche 454平台对欧洲蕨的配子体进行转录组测序,这是人们首次利用二代测序技术对蕨类植物进行研究(Der et al, 2011)。但是到目

前为止,利用二代测序技术对蕨类植物的环境适应机制研究还未见报道。

本研究利用RNA-seq技术对岩穴蕨的转录组进行测序分析,拼接组装获得了大量的转录本序列信息。通过进一步的功能注释、功能分类、代谢途径注释等生物信息学分析,对这些基因的功能、特性、作用方式进行了研究,并针对岩穴蕨的环境适应性进行了重点分析。希望可为从分子水平开展蕨类植物生物多样性研究提供数据支持,并为蕨类植物的环境适应研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 转录组测序

转录组测序样品取自湖南省张家界市八大公山(29°41'24" N, 109°49'12" E)岩穴蕨植株的营养叶和孢子叶,取样后迅速将样品放到液氮中冷冻。利用TRIzol® Reagent试剂(Invitrogen, 上海)提取总RNA,然后利用Plant RNA Purification Reagent试剂(Invitrogen, 上海)对提取的总RNA进行纯化,之后用Agilent 2100检测RNA提取质量。利用带有Oligo dT的磁力架(Invitrogen, 上海)与polyA进行A-T碱基配对,从总RNA中分离出mRNA。利用金属离子将获得的mRNA随机断裂成200 bp左右的小片段。以这些小片段mRNA为模板,用随机引物合成第一条cDNA链,然后加入缓冲液、dNTPs、RNase H和DNA polymerase I合成第二条cDNA链。对双链cDNA进行加工修饰,末端加poly(A)并连接上测序接头adaptor,得到完整的cDNA。利用PCR进行cDNA扩增,构建测序文库,用Illumina HiSeq 2500进行测序。

1.2 序列组装

利用Illumina双末端测序(paired-end, PE)方法

表1 已发表的5个蕨类植物转录组测序及组装信息

Table 1 Sequencing and assembly information of five published ferns transcriptomes

物种名 Species	测序部位 Description	测序平台 Platform	数据总量 Total size (Mb)	单基因簇或转录本 数目 No. of unigene or transcript	文献 References
欧洲蕨 <i>Pteridium aquilinum</i>	配子体 Gametophyte	Roche 454	254	56,256	Der et al, 2011
水蕨 <i>Ceratopteris richardii</i>	孢子 Spore	Roche 454	266	15,730	Bushart et al, 2013
鸟巢蕨 <i>Asplenium nidus</i>	叶片 Leaf	Illumina HiSeq 2000	5,910	42,907	贾新平等, 2014
海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	原叶体、营养叶、孢子体、根状茎 Pro-thalli, trophophylls, sporophylls, rhizomes	Roche 454 Illumina HiSeq 2000	28 268	18,999 381,814	Aya et al, 2015
巨木贼 <i>Equisetum giganteum</i>	茎、叶、孢子囊 Stem, leaf, strobili	Illumina RNA-Seq	8,800	34,282	Vanneste et al, 2015

进行高通量测序, 得到的原始图像数据经过Base Calling转化为序列数据, 即原始序列读取片段(raw reads), 以FASTQ格式储存。对原始序列进行质量评估和可信度分析, 并去除制备文库时产生的接头序列、两端低质量序列($Q < 20$ bp)、含N $> 10\%$ 的序列以及修剪后长度 < 20 bp的序列, 得到有效数据(clean data)。利用Trinity (<http://trinityrnaseq.sourceforge.net/>, 版本号 trinityrnaseq-r2013-02-25)对所有有效数据进行从头组装。由于Trinity组装结果中含有大量的冗余序列, 利用Cd-hit去除重复序列, 得到unigene序列。

1.3 ORF预测

利用Trinity中的transcoder工具对unigene进行开放阅读框架(open reading frame, ORF)预测, 得到序列中最佳的ORF区域, 使用pfam (<http://pfam.xfam.org/>)数据库对预测结果进行校正, 将比对结果保留到pfam数据库的蛋白序列中。

1.4 功能注释、分类及代谢途径分析

采用序列比对方法对unigene进行序列相似性分析。我们首先利用blast 2.2.24+将所有unigene比对到Nr数据库($E\text{ value} \leq 1e-5$)进行功能注释; 同时从Phytozome v11.0 (<https://phytozome.jgi.doe.gov/pz/portal.html/>)下载了51个植物基因组数据(物种信息见附录2), 将其作为本地blast数据库, 利用blastx ($E\text{ value} \leq 1e-5$)将所有unigene比对到该数据库, 获得unigene的详细注释信息。GO (gene ontology)是一个标准化的国际基因功能分类数据库, 可以全面描述不同生物体中基因的生物学特征(张贤等, 2015)。使用blast2go (<http://www.blast2go.com/> b2ghome)软件和WEGO软件将比对到本地数据库中的unigene分别进行GO功能注释及分类统计。然后根据注释信息进行COG (clusters of orthologous groups of proteins)功能分类。运用blast算法(blastx/blastp 2.2.24+)将unigene与KEGG (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes)的基因数据库(GENES) (<http://www.genome.jp/kegg/genes.html/>)进行比对, 根据比对得到的KO编号去查找具体的生物学通路, 进行代谢途径分析。

1.5 转录因子预测

将预测得到ORF的蛋白序列比对到PlantTFDB v3.0中拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)的转录因子库中(<http://planttfdb.cbi.pku.edu.cn/prediction.php/>), 进行

转录因子的预测。

2 结果

2.1 转录组数据的组装

采用Illumina HiSeq 2500高通量测序平台对岩穴蕨进行转录组测序, 得到4.95 Gb原始数据(raw data), 包含49,027,722条原始序列读取片段。原始数据已上传至NCBI的SRA数据库(SAMN03575883)。Q20、Q30分别达到96.54%和91.54%, GC含量为47.82%。为了保证后续生物信息分析的准确性, 对原始数据进行过滤去杂, 获得了4.83 Gb有效数据, 包含48,497,004条待分析的序列读取片段(clean reads)。Q20、Q30分别达到98.61%和93.58%, GC含量为47.71% (表2)。

对有效数据进行de novo拼接组装, 共得到107,197个转录本。转录本总长度达到102,393,559 bp, 平均长度955 bp。其中长度大于400 bp的转录本有56,806条, 占有转录本的47.61%; 大于1 kb的转录本有32,534条, 占30.35%。去除冗余序列后得到101,448条unigene, 总长度达到91,256,432 bp, 其长度分布见图1。最长为14,804 bp, 最短为201 bp, 平均长度900 bp, N50为1,817 bp (表3)。其中, 长度大于400 bp的unigene有51,563条, 占有unigene的50.83%; 大于1 kb的有28,463条, 占28.06%。

2.2 ORF预测

在101,448条unigene中, 共预测到54,106条ORF, 占总unigene的53.33%。其平均长度为787.9 bp, 最短为150 bp, 最长为14,016 bp (附录3)。其中, 有47,342条unigene未预测到ORF, 占总unigene的46.67%。

2.3 功能注释、分类及代谢途径分析

为了预测岩穴蕨编码基因的生物学功能, 我们将unigene分别比对到Nr和本地化数据库进行功能

表2 岩穴蕨转录组测序及质控结果统计
Table 2 The results and qualities of sequencing for *Monachosorum maximowiczii* transcriptome

	原始数据 Raw data	有效数据 Clean data
序列数目 Number of sequences	49,027,722	48,497,004
全长 Total length (Gb)	4.95	4.83
Q20值 Q20%	96.54%	98.61%
Q30值 Q30%	91.54%	93.58%
GC值 GC%	47.82%	47.71%

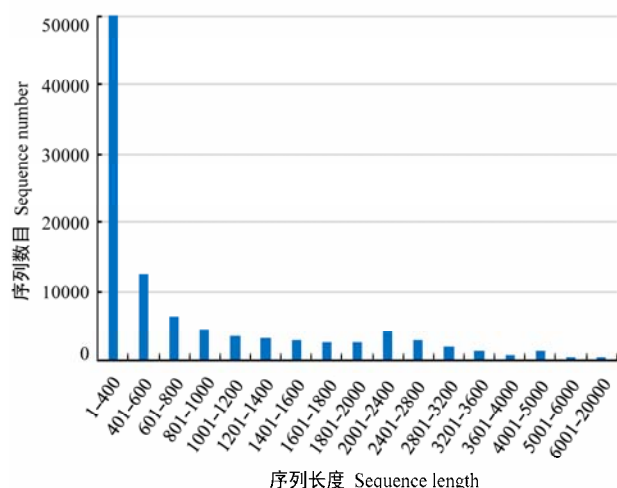


图1 unigene的长度分布图

Fig. 1 Length distribution of the unigene

表3 岩穴蕨转录组*de novo*组装结果统计Table 3 Summary of *de novo* assembly analysis for *Mona-chosorum maximowiczii* transcriptome

	转录本 Transcript	单基因簇 Unigene
序列数目 Sequence number	107,197	101,448
平均长度 Mean length (bp)	955	900
最大长度 Max. length (bp)	14,804	14,804
最小长度 Min. length (bp)	201	201
N50值 N50	1,907	1,817
GC含量 GC content	0.44	0.44

注释,并将比对到本地数据库的unigene分别进行GO、COG、KEGG功能分类。

对101,448条unigene比对结果进行统计,有30,607条比对到Nr数据库;38,007条比对到本地blast数据库。对38,007条unigene注释结果进行统计,有18,600条注释到GO数据库;有12,113条注释到COG数据库;有11,368条注释到KEGG数据库。

2.3.1 GO分类

利用GO数据库对岩穴蕨的unigene进行功能注释并分类,18,600条unigene被分成细胞组分、分子功能、生物学过程3个功能大类。平均每条unigene获得3.51个GO注释(表4)。有31,428条unigene被归入“生物学过程”功能大类:其中参与代谢过程(9,458个,50.85%)和细胞过程(8,525个,45.83%)的unigene最多,均在45%以上;而生物粘附和细胞杀伤所占比例最少,分别为0.01%和0.005%。有13,183条unigene被归入“细胞组分”功能大类:细胞和细胞部

分所占比例最高,均为13.97% (2,598个),其次为膜结构(2,329个),所占比例为12.52%,而胞外基质、胞外基质部分、病毒体及病毒体部分所涉及的unigene极少。有20,644条unigene归入“分子功能”功能大类:其中,结合活性和催化活性所占比例最高,分别为51.97%和46.89%,其余所占比例均在6%以下(表4)。

2.3.2 COG分类

将unigene比对到COG数据库,进行COG分类统计及分析(表5)。结果表明,共有12,113条unigene根据其功能大致可分成25类。其中,信号转导机制类基因数量最多(1,933个,15.96%),其次是一般功能预测类(1,380个,11.39%),翻译后修饰、蛋白质折叠和分子伴侣类(1,209个,9.98%);而参与细胞运动(2个,0.02%)的基因数目最少。

2.3.3 KEGG分类

利用KEGG数据库中的通路数据库(Pathway databases)对unigene的功能进行分类和分析,结果见表6。共有11,368条unigene能够注释到128个KEGG标准通路。根据功能可将这些通路分成代谢途径、遗传信息加工过程、环境信息处理、生物系统、细胞过程和人类疾病6大类。其中,参与代谢途径的unigene最多(10,379条,占有注释基因的73.41%),其次是遗传信息加工过程(2,551条,所占比例为18.04%)。

对通路的数据分析表明,与代谢途径有关的通路最多,有96条,占有所有通路的75%。在该类别中参与代谢通路的unigene最多(2,618条),其次是碳水化合物(1,511条)、氨基酸代谢(831条)和脂类物质代谢(813条);而与碳水化合物代谢、脂类物质代谢及氨基酸代谢相关的通路数量最多,分别是15条、14条、14条(表6)。在128个KEGG标准通路中,其中参与代谢通路的unigene数量最多(2,618条),其余依次为次生代谢产物的生物合成(1,418条)、碳代谢(406条)、氨基酸生物合成(330条)、剪接体(297条)等途径(表7)。

2.4 转录因子预测

将预测到ORF的unigene进行转录因子预测,共预测到1,130个转录因子,可分为55个转录因子大家族。其中,最大的家族是bHLH (basic Helix-Loop-Helix, 碱性-螺旋-环-螺旋) (151个,13.36%),其次是C3H (82个,7.26%)、AP2/ERF (74

表4 岩穴蕨unigene的GO功能类别

Table 4 GO-slim functional categories of the assembled unigene for *Monachosorum maximowiczii*

三大类 Three categories	GO条目 GO term	Unigene 数目 No. of unigene
生物学过程 Biological process	生物过程调控 Regulation of biological process	1,368
	细胞组织部分或生物合成 Cellular component organization or biogenesis	561
	定位活性 Establishment of localization	1,559
	免疫系统进程 Immune system process	9
	单一的生物过程 Single-organism process	5,268
	定位 Localization	1,576
	细胞活动 Locomotion	8
	生物粘附 Biological adhesion	2
	刺激反应 Response to stimulus	994
	细胞杀伤 Cell killing	1
	繁殖进程 Reproductive process	24
	生物调节 Biological regulation	1,448
	代谢进程 Metabolic process	9,458
	信号传导 Signaling	393
	生长 Growth	16
	细胞进程 Cellular process	8,525
	发育进程 Developmental process	37
	有机体进程 Multi-organism process	32
	繁殖 Reproduction	12
	生物过程的负调控 Negative regulation of biological process	48
	多细胞进程 Multicellular organismal process	54
	生物过程的正调控 Positive regulation of biological process	35
细胞组分 Cellular component	细胞器部分 Organelle part	864
	细胞 Cell	2,598
	高分子复合物 Macromolecular complex	1,399
	膜结构 Membrane	2,329
	胞外区域 Extracellular region	21
	膜部分 Membrane part	1,361
	病毒体 Virion	1
	膜关闭内腔 Membrane-enclosed lumen	150
	细胞部分 Cell part	2,598
	细胞器 Organelle	1,859
	胞外基质部分 Extracellular region part	1
	胞外基质 Extracellular matrix	1
	病毒体部分 Virion part	1
分子功能 Molecular function	结合蛋白转录活性 Protein binding transcription factor activity	60
	鸟嘌呤核苷酸交换因子活性 Guanyl-nucleotide exchange factor activity	33
	抗氧化活性 Antioxidant activity	114
	受体活性 Receptor activity	105
	结构分子活性 Structural molecule activity	294
	分子转导活性 Molecular transducer activity	116
	酶调节活性 Enzyme regulator activity	118
	营养库活性 Nutrient reservoir activity	7
	金属伴侣蛋白活性 Metallochaperone activity	4
	催化活性 Catalytic activity	8,722
	转运活性 Transporter activity	936
	结合活性 Binding	9,666
	电子载体活性 Electron carrier activity	119
	核苷酸结合转录因子活性 Nucleic acid binding transcription factor activity	350

表5 岩穴蕨unigene的COG分类
Table 5 Classification of the clusters of orthologous groups (COG) for *Monachosorum maximowiczii*

COG功能分类 COG function classifications	Unigene数目 No. of unigene	百分比 Percentage (%)
RNA加工与修饰 RNA processing and modification	576	4.76
染色质结构和活力 Chromatin structure and dynamics	168	1.39
能量生成与转换 Energy production and conversion	475	3.92
细胞周期控制、细胞分裂、染色体分区 Cell cycle control, cell division, chromosome partitioning	288	2.38
氨基酸转运与代谢 Amino acid transport and metabolism	318	2.63
核苷酸转运与代谢 Nucleotide transport and metabolism	181	1.49
碳水化合物转运与代谢 Carbohydrate transport and metabolism	546	4.51
辅酶转运与代谢 Coenzyme transport and metabolism	154	1.27
脂类转运与代谢 Lipid transport and metabolism	424	3.50
翻译、核糖体结构和生物发生 Translation, ribosomal structure and biogenesis	562	4.64
转录 Transcription	669	5.52
复制、重组和修复 Replication, recombination and repair	403	3.33
细胞壁膜生物合成 Cell wall membrane biogenesis	66	0.54
细胞运动 Cell motility	2	0.02
翻译后修饰、蛋白质折叠、分子伴侣 Posttranslational modification, protein turnover, chaperones	1,209	9.98
无机离子转运与代谢 Inorganic ion transport and metabolism	315	2.60
次生代谢物合成、转运与代谢 Secondary metabolites biosynthesis, transport and catabolism	441	3.64
一般功能预测 General function prediction only	1,380	11.39
未知功能 Function unknown	932	7.69
信号转导机制 Signal transduction mechanisms	1,933	15.96
细胞内转运、分泌和小泡运输 Intracellular trafficking, secretion, and vesicular transport	610	5.04
防卫机制 Defense mechanisms	114	0.94
胞外结构 Extracellular structures	56	0.46
核结构 Nuclear structure	32	0.26
细胞骨架 Cytoskeleton	259	2.14

个, 6.55%)、bZIP (64个, 5.66%) (图2)。根据已有报道, bHLH、AP2/ERF、WRKY、MYB、NAC等转录因子可能与抗寒有关, 统计表明这些转录因子大约有388个, 占整体转录因子的34.34%。

3 讨论

随着高通量测序技术的发展, 转录组测序技术作为后基因组时代发展的产物, 已经广泛应用到各个物种的生物学研究(贾昌路等, 2015)。本研究利用Illumina高通量测序技术对岩穴蕨的叶片(营养叶和孢子叶)进行转录组测序, 共获得原始数据4.95 Gb, 有效数据4.83 Gb, clean reads的Q20、Q30值都在93%以上(表2)。通过de novo拼接组装及去冗余处理后, 最终得到101,448条unigene, N50为1,817 bp (表3)。以上结果表明此次转录组测序数据量和质量都比较高, 为后续分析提供很好的基础。

在ORF预测中, 共有54,106 (53.33%)条unigene

预测到了ORF, 还有47,342 (46.67%)条unigene未预测到ORF, 可见未预测到ORF的unigene所占的比例较高。在本研究中, 我们首次利用陆生植物(包括藻类植物)的基因组信息作为数据库, 对蕨类植物的基因进行功能注释。与Nr数据库注释结果相比(30,607条unigene), 陆生植物的基因组数据库注释结果(38,007条unigene)较好, 但仍有62.54%的unigene未得到注释信息。造成以上结果的原因可能有: 目前蕨类植物还没有全基因组信息, 转录组方面的研究也刚刚起步(Der et al, 2011; Bushart et al, 2013; Aya et al, 2015; Vanneste et al, 2015), 这就使生物信息数据库中基因功能注释信息不全, 会导致一些序列暂时无法获得对应的功能注释信息; 蕨类植物作为陆地植物中比较原始的一个类群, 在其进化过程中必定含有一些特有基因, 这也可能是导致岩穴蕨同源序列较难发现的原因之一。随着研究的深入, 可进一步将岩穴蕨的unigene与其他蕨类、苔

表6 岩穴蕨unigene的KEGG注释结果及分类
Table 6 The KEGG classification and metabolism pathways for the annotated unigene for *Monachosorum maximowiczii*

类别 Categories	通路 Pathways	Unigene数目 No. of unigene	通路数 No. of pathways
代谢途径 Metabolism etabolism	碳水化合物代谢 Carbohydrate metabolism	1,511	15
	脂类物质代谢 Lipid metabolism	813	14
	辅助因子和维生素代谢 Metabolism of cofactors and vitamins	371	11
	能量代谢 Energy metabolism	477	6
	核苷酸代谢 Nucleotide metabolism	446	2
	氨基酸代谢 Amino acid metabolism	831	14
	多酮类和萜类化合物的代谢 Metabolism of terpenoids and polyketides	224	8
	其他次生代谢产物的生物合成 Biosynthesis of other secondary metabolites	314	8
	其他氨基酸代谢 Metabolism of other amino acids	270	5
	多糖生物合成与代谢 Glycan biosynthesis and metabolism	166	7
	全球与总体图 Global and overview maps	4,956	6
	小计 Sub-total	10,379 (73.41%)	96 (75%)
遗传信息加工 Genetic information processing	折叠、分类和降解 Folding, sorting and degradation	769	7
	翻译 Translation	876	5
	转录 Transcription	413	3
	复制与修复 Replication and repair	493	6
	小计 Sub-total	2,551 (18.04%)	21 (16.41%)
环境信息处理 Environmental information processing	信号转导 Signal transduction	350	2
	膜运输 Membrane transport	36	1
	小计 Sub-total	386 (2.73%)	3 (2.34%)
细胞过程 Cellular processes	运输与代谢 Transport and catabolism	506	4
	小计 Sub-total	506 (3.58%)	4 (3.13%)
生物系统 Organismal systems	环境适应性 Environmental adaptation	252	2
	小计 Sub-total	252 (1.78%)	2 (1.56%)
人类疾病 Human diseases	耐药性: 抗菌 Drug resistance: Antimicrobial	7	1
	内分泌与代谢性疾病 Endocrine and metabolic diseases	57	1
	小计 Sub-total	64 (0.45%)	2 (1.56%)

表7 KEGG分类中unigene数量最多的10个代谢通路
Table 7 Top ten metabolism pathways involving unigene in KEGG

编码 ID	代谢通路名称 Pathway	unigene数目 No. of unigene	百分比 Percentage (%)
ko01100	代谢通路 Metabolic pathways	2,618	23.03
ko01110	次生代谢产物的生物合成 Biosynthesis of secondary metabolites	1,418	12.47
ko01200	碳代谢 Carbon metabolism	406	3.57
ko01230	氨基酸生物合成 Biosynthesis of amino acids	330	2.90
ko03040	剪接体 Spliceosome	297	2.61
ko03010	核糖体 Ribosome	292	2.57
ko00500	淀粉与蔗糖代谢 Starch and sucrose metabolism	263	2.31
ko04075	植物激素信号转导 Plant hormone signal transduction	255	2.24
ko00230	嘌呤代谢 Purine metabolism	243	2.14
ko04141	内质网中的蛋白质加工 Protein processing in endoplasmic reticulum	230	2.02

藓、裸子植物、被子植物进行比较分析, 这将为植物的系统进化研究提供重要的信息。

GO和COG的功能分类对初步了解基因功能有重要作用, 而KEGG数据库中的参考通路不仅可以推测基因功能, 而且可以研究基因在不同代谢通路中的位置及作用。本研究通过GO功能分类的结果可知, 参与代谢进程和结合活性的unigene数目最多, 分别是9,458条和9,666条。通过KEGG数据库及通路分析发现, 与代谢途径有关的unigene (10,379条)和通路数量均最多(96条)。GO分类和KEGG分析

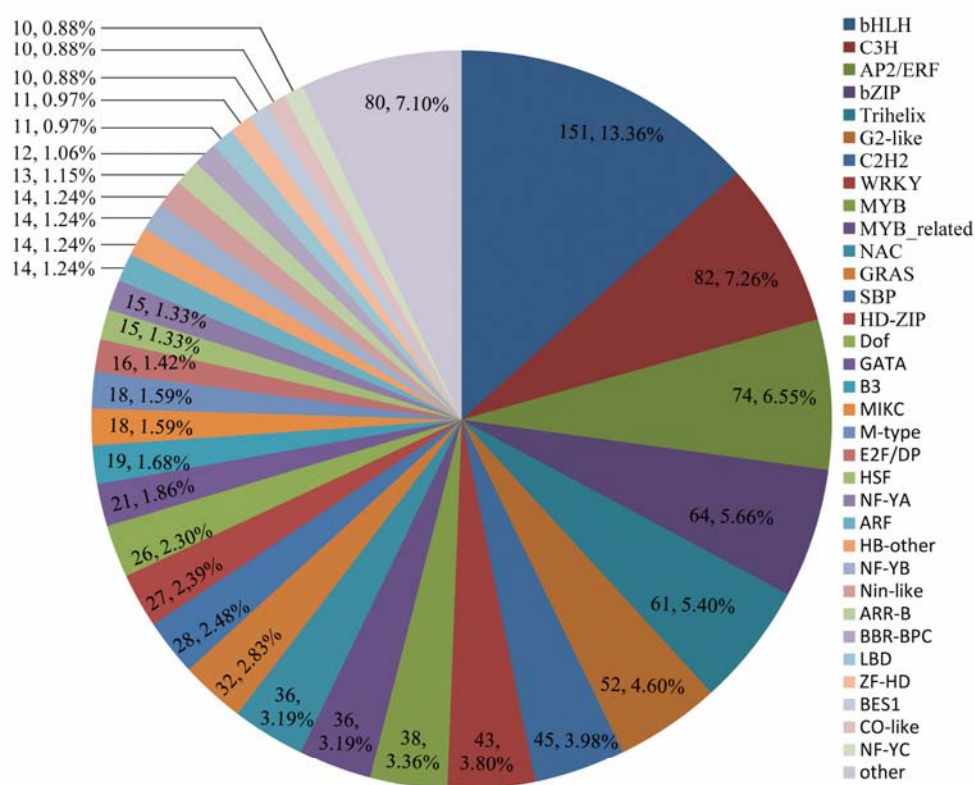


图2 岩穴蕨unigene的转录因子预测。将54,106个预测到ORF的unigene比对到拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)的转录因子数据库, 预测到1,130个转录因子。

Fig. 2 Number of *Monachosorum maximowiczii* unigene that were predicted as transcription factors. The 54,106 unigene which had been predicted ORF were aligned to *Arabidopsis thaliana* in PlantTFDB v3.0, and 1,130 unigene were predicted as transcription factors.

结果一致, 进一步说明岩穴蕨在生长过程中代谢活动非常旺盛。通过COG功能分类可知, 参与信号转导机制和一般功能预测的unigene最多, 分别是1,933条和1,380条。这可能与岩穴蕨的中高海拔分布有关, 因为岩穴蕨受到低温胁迫后, 会诱导一些与抗冷相关的基因表达, 从而提高其抗冷性。

转录因子是重要的上游调控蛋白, 在植物的生物和非生物胁迫应答中发挥着重要作用(Li et al, 2015)。本研究对岩穴蕨进行转录因子预测的结果显示, 岩穴蕨中bHLH类转录因子最多, 其次是C3H、AP2/ERF、bZIP等转录因子。其中bHLH是一类参与植物抗逆反应的转录因子, 在低温、干旱、盐等非生物胁迫下发挥着极其重要的调节作用(Zhou et al, 2009; Seo et al, 2011; Wang et al, 2011)。另外, AP2/ERF、MYB、WRKY、NAC等转录因子在植物的抗寒胁迫中均有重要作用(Chinnusamy et al,

2003; 张丽丽等, 2008; 刘辉等, 2014)。对这些转录因子进行统计, 大约有388个(34.34%)可能与抗冷相关。这些转录因子很可能参与了岩穴蕨在低温环境下诱导抗寒基因表达的关键信号途径, 这为进一步开展岩穴蕨的环境适应性分子机制研究提供了重要线索。

随着全球气候变暖、旅游开发等因素的影响, 一些特殊生境的珍稀物种的生存受到了严重威胁, 对此类物种进行研究具有重要生物学意义。本研究选取东亚中高海拔地区所特有的珍稀物种——岩穴蕨作为研究材料, 利用Illumina (HiSeq 2500)高通量测序技术构建其转录组数据库, 获得了大量的转录本序列信息, 并对其进行功能注释和分类、代谢途径和转录因子等分析, 揭示了岩穴蕨在生长发育过程中转录组的整体表达特征。这为深入研究岩穴蕨的环境适应性机制、繁殖机制及基因工程育种等

提供了分子基础和依据, 也可为珍稀濒危物种多样性研究与保护提供更丰富的数据资源。同时, 该转录组数据可作为蕨类植物基因组的参考序列, 促进蕨类植物分子生物学发展。

参考文献

- Aya K, Kobayashi M, Tanaka J, Ohyanagi H, Suzuki T, Yano K, Takano T, Yano K, Matsuoka M (2015) *De novo* transcriptome assembly of a fern, *Lygodium japonicum*, and a web resource database, Ljtrans DB. *Plant and Cell Physiology*, 56, e5.
- Bushart TJ, Cannon AE, ul Haque A, San MP, Mostajeran K, Clark GB, Porterfield DM, Roux SJ (2013) RNA-seq analysis identifies potential modulators of gravity response in spores of *Ceratopteris* (Parkeriaceae): evidence for modulation by calcium pumps and apyrase activity. *American Journal of Botany*, 100, 161–174.
- Chinnusamy V, Ohta M, Kanrar S, Lee BH, Hong X, Agarwal M, Zhu JK (2003) ICE1: a regulator of cold-induced transcriptome and freezing tolerance in *Arabidopsis*. *Genes Development*, 17, 1043–1054.
- Ching RC (1978) The Chinese fern families and genera: systematic arrangement and historical origin (cont.). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 16(4), 16–37. (in Chinese) [秦仁昌 (1978) 中国蕨类植物科属的系统排列和历史来源(续). *植物分类学报*, 16(4), 16–37.]
- Christenhusz MJM, Byng JW (2016) The number of known plants species in the world and its annual increase. *Phytotaxa*, 261, 201–217.
- Costa V, Angelini C, de Feis I, Ciccodicola A (2010) Uncovering the complexity of transcriptomes with RNA-Seq. *BioMed Research International*, 2010, 853916.
- Der JP, Barker MS, Wickett NJ, dePamphilis CW, Wolf PG (2011) *De novo* characterization of the gametophyte transcriptome in bracken fern, *Pteridium aquilinum*. *BioMed Central Genomics*, 12, doi: 10.1186/1471-2164-12-99.
- Franssen SU, Shrestha RP, Brautigam A, Bornberg BE, Weber AP (2011) Comprehensive transcriptome analysis of the highly complex *Pisum sativum* genome using next generation sequencing. *BioMed Central Genomics*, 12, doi: 10.1186/1471-2164-12-227.
- Jia CL, Zhang Y, Zhu L, Zhang R (2015) Application progress of transcriptome sequencing technology in biological sequencing. *Molecular Plant Breeding*, 13, 2388–2394. (in Chinese with English abstract) [贾昌路, 张瑶, 朱玲, 张锐 (2015) 转录组测序技术在生物测序中的应用研究进展. *分子植物育种*, 13, 2388–2394.]
- Jia XP, Sun XB, Deng YM, Liang LJ, Ye XQ (2014) Sequencing and analysis of the transcriptome of *Asplenium nidus*. *Acta Horticulturae Sinica*, 41, 2329–2341. (in Chinese with English abstract) [贾新平, 孙晓波, 邓衍明, 梁丽建, 叶晓青 (2014) 鸟巢蕨转录组高通量测序及分析. *园艺学报*, 41, 2329–2341.]
- Li H, Yao WJ, Fu Y, Li S, Guo QQ (2015) *De novo* assembly and discovery of genes that are involved in drought tolerance in Tibetan *Sophora moorcroftiana*. *PLoS ONE*, 10, e111054.
- Liu H, Li DJ, Deng Z (2014) Advances in research of transcriptional regulatory network in response to cold stress in plants. *Scientia Agricultura Sinica*, 47, 3523–3533. (in Chinese with English abstract) [刘辉, 李德军, 邓治 (2014) 植物应答低温胁迫的转录调控网络研究进展. *中国农业科学*, 47, 3523–3533.]
- Qi CJ, Yu XL, Cao TR, Zhou JR (1994) Flora of Hunan Badagongshan Mountains and its phytogeographical significance. *Acta Botanica Yunnanica*, 16, 321–332. (in Chinese with English abstract) [祁承经, 喻勋林, 曹铁如, 周建仁 (1994) 湖南八大公山的植物区系及其在植物地理学上的意义. *云南植物研究*, 16, 321–332.]
- Seo JS, Joo J, Kim MJ, Kim YK, Nahm BH, Song SI, Cheong JJ, Lee JS, Kim JK, Choi YD (2011) OsHLLH148, a basic helix-loop-helix protein, interacts with OsJAZ proteins in a jasmonate signaling pathway leading to drought tolerance in rice. *The Plant Journal*, 65, 907–921.
- Vannesta K, Sterck L, Mybury AA, Peer YV, Mizrahi E (2015) Horsetails are ancient polyploids: evidence from *Equisetum giganteum*. *The Plant Cell*, 27, 1567–1568.
- Wang Y, Jiang CJ, Li YY, Wei CL, Deng WW (2011) CsICE1 and CsCBF1: two transcription factors involved in cold responses in *Camellia sinensis*. *Plant Cell Reports*, 31, 27–34.
- Wang Z, Gerstein M, Snyder M (2009) RNA-Seq: a revolutionary tool for transcriptomics. *Nature Reviews Genetics*, 10, 57–63.
- Wei LB, Miao HM, Zhang HY (2012) Transcriptomic analysis of sesame development. *Scientia Agricultura Sinica*, 45, 1246–1256. (in Chinese with English abstract) [魏利斌, 苗红梅, 张海洋 (2012) 芝麻发育转录组分析. *中国农业科学*, 45, 1246–1256.]
- Wu Y, Wei W, Pang XY, Wang XF, Zhang HL, Dong B, Xing YP, Li XG, Wang MY (2014) Comparative transcriptome profiling of a desert evergreen shrub, *Ammopiptanthus mongolicus*, in response to drought and cold stresses. *BioMed Central Genomics*, 15, 1–16.
- Wu ZY, Raven P, Hong DY (2013) *Flora of China*. Vol. 2 (Dennstaedtiaceae). Science Press, Beijing; Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Yang N, Zhao KG, Chen LQ (2012) Deep sequencing-based transcriptome profiling analysis of *Chimonanthus praecox* reveals insights into secondary metabolites biosynthesis. *Journal of Beijing Forestry University*, 34(1), 104–107. (in Chinese with English abstract) [杨楠, 赵凯歌, 陈龙清 (2012) 蜡梅花转录组数据分析及次生代谢产物合成途径研究. *北京林业大学学报*, 34(1), 104–107.]
- Yang Y, Li X, Kong X, Ma L, Hu X, Yang Y (2015) Transcriptome analysis reveals diversified adaptation of *Stipa purpurea* along a drought gradient on the Tibetan Plateau. *Functional & Integrative Genomics*, 15, 295–307.

- Zhang LL, Li JF, Wang AX (2008) The role of the transcription factor CBF genes in cold-responsive molecular mechanism. *Acta Horticulturae Sinica*, 35, 765–771. (in Chinese with English abstract) [张丽丽, 李景富, 王傲雪 (2008) 转录激活因子CBF基因在植物抗冷分子机制中的作用. *园艺学报*, 35, 765–771.]
- Zhang X, Wang JH, Yu M, Cao K, Zhuang L, Xu CX, Cao WD (2015) Transcriptome analysis of bioenergy plant *Miscanthus sinensis* Anderss by RNA-Seq. *Chinese Journal of Biotechnology*, 31, 1437–1448. (in Chinese with English abstract) [张贤, 王建红, 喻曼, 庄俐, 徐昌旭, 曹卫东 (2015) 基于RNA-Seq的能源植物芒转录组分析. *生物工程学报*, 31, 1437–1448.]
- Zhou D, Gao S, Wang H, Lei T, Shen J, Gao J, Chen S (2016) *De novo* sequencing transcriptome of endemic *Gentiana straminea* (Gentianaceae) to identify genes involved in the biosynthesis of active ingredients. *Gene*, 575, 160–170.
- Zhou J, Li F, Wang JL, Ma Y, Chong K, Xu YY (2009) Basic helix-loop-helix transcription factor from wild rice (OrbHLH2) improves tolerance to salt- and osmotic stress in *Arabidopsis*. *Journal of Plant Physiology*, 166, 1296–1306.
- Zhu SQ, Gong YF, Hang YQ, Liu H, Wang HY (2015) Transcriptome analysis of *Dunaliella viridis*. *Hereditas*, 37, 828–836. (in Chinese with English abstract) [朱帅旗, 龚一富, 杭雨晴, 刘浩, 王何瑜 (2015) 绿色杜氏藻转录组分析. *遗传*, 37, 828–836.]

(责任编辑: 袁耀武 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 岩穴蕨及其分布图。(a)岩穴蕨(韦宏金摄); (b)通过全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、台湾植物资讯整合查询系统(<http://tai2.ntu.edu.tw/index.php/>)以及我们采集的标本信息, 对岩穴蕨进行整理分析, 得到本分布图。

Appendix 1 The picture of *Monachosorum maximowiczii* and its distribution. (a) *Monachosorum maximowiczii* (photoed by Hong-jin Wei); (b) The distribution of *Monachosorum maximowiczii* with distributive information from Global Biodiversity Information Facility (<http://www.gbif.org/>), Chinese Virtual Herbarium (<http://www.cvh.org.cn/>), Plants of Taiwan (<http://tai2.ntu.edu.tw/index.php/>), and the specimens we collected.

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016231-1.pdf>

附录2 从Phytozome v11.0下载51个植物基因组形成blast本地数据库

Appendix 2 The blast local database was constituted by 51 plant genomes, which were downloaded from Phytozome v11.0

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016231-2.pdf>

附录3 预测的开放阅读框架(ORF)长度分布图

Appendix 3 Length distribution of the predicted open reading frame (ORF)

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016231-3.pdf>

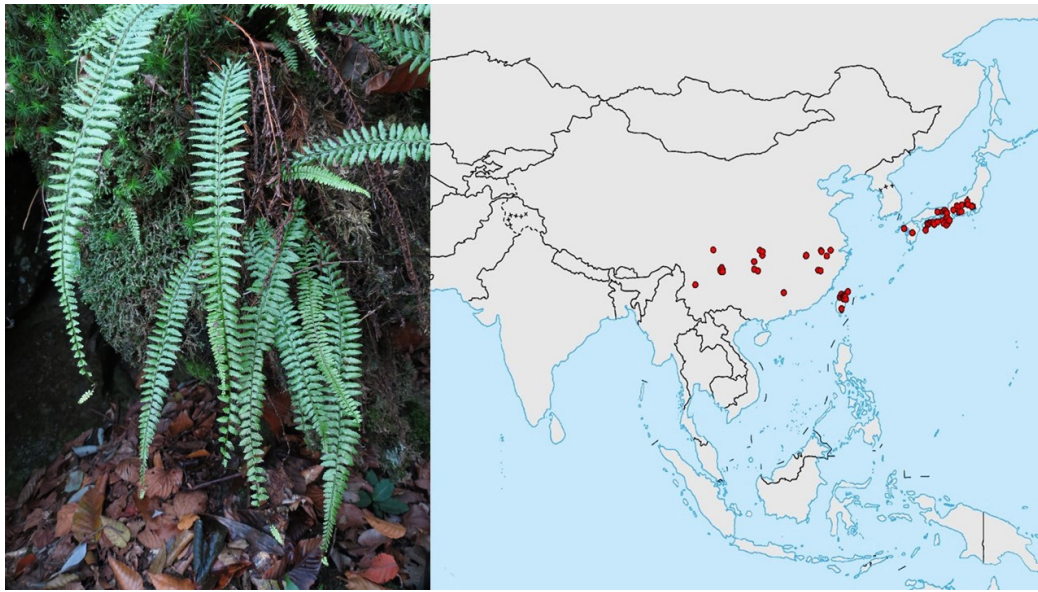


图1 岩穴蕨及其分布图。(a)岩穴蕨(韦宏金摄); (b)通过全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、台湾植物资讯整合查询系统(<http://tai2.ntu.edu.tw/index.php/>)以及我们采集的标本信息,对岩穴蕨进行整理分析,得到本分布图。
Fig. 1 The picture of *Monachosorum maximowiczii* and its distribution. (a) *Monachosorum maximowiczii* (photoed by Hongjin Wei); (b) The distribution of *Monachosorum maximowiczii* with distributive information from Global Biodiversity Information Facility (<http://www.gbif.org/>), Chinese Virtual Herbarium (<http://www.cvh.org.cn/>), Plants of Taiwan (<http://tai2.ntu.edu.tw/index.php/>), and the specimens we collected.

刘莉, 舒江平, 韦宏金, 张锐, 沈慧, 严岳鸿. 东亚特有珍稀蕨类植物岩穴蕨(碗蕨科)高通量转录组测序及分析. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1325–1334.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016231>

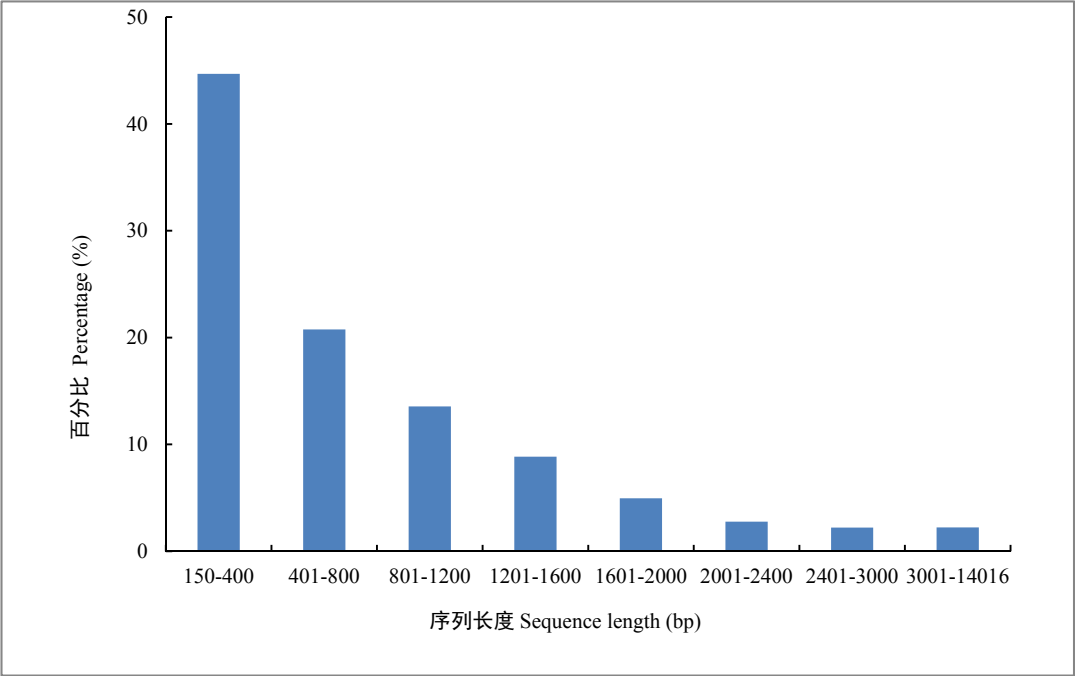
附录 2 从 Phytozome v11.0 下载 51 个植物基因组形成本地数据库

Appendix 2 The blast local database was constituted by 51 plant genomes, which were downloaded from Phytozome v11.0

序号 No.	物种 Species	科 Family	蛋白序列 No.of proteins
1	洛矶山耬斗菜 <i>Aquilegia coerulea</i>	毛茛科 Ranunculaceae	41,063
2	琴叶拟南芥 <i>Arabidopsis lyrata</i>	十字花科 Cruciferae	32,670
3	拟南芥 <i>Arabidopsis thaliana</i>	十字花科 Cruciferae	35,386
4	无油樟 <i>Amborella trichopoda</i>	无油樟科 Amborellaceae	26,846
5	二穗短柄草 <i>Brachypodium distachyon</i>	禾本科 Gramineae	52,972
6	芜菁 <i>Brassica rapa</i>	十字花科 Cruciferae	43,370
7	<i>Brachypodium stacei</i>	禾本科 Gramineae	36,357
8	<i>Boechera stricta</i>	十字花科 Cruciferae	29,812
9	克莱门柚 <i>Citrus clementina</i>	芸香科 Rutaceae	33,929
10	<i>Capsella grandiflora</i>	十字花科 Cruciferae	26,561
11	番木瓜 <i>Carica papaya</i>	番木瓜科 Caricaceae	27,775
12	莱茵衣藻 <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	衣藻科 Chlamydomonadaceae	19,526
13	<i>Capsella rubella</i>	十字花科 Cruciferae	28,447
14	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	葫芦科 Cucurbitaceae	30,364
15	香橙 <i>Citrus sinensis</i>	芸香科 Rutaceae	46,147
16	胶球藻 <i>Coccomyxa subellipsoidea</i>	胶球藻科 Coccomyxaceae	9,629
17	大桉 <i>Eucalyptus grandis</i>	桃金娘科 Myrtaceae	46,280
18	<i>Eutrema salsugineum</i>	十字花科 Cruciferae	29,284
19	野草莓 <i>Fragaria vesca</i>	蔷薇科 Rosaceae	32,831
20	大豆 <i>Glycine max</i>	豆科 Leguminosae	88,647
21	雷蒙德氏棉 <i>Gossypium raimondii</i>	锦葵科 Malvaceae	77,267
22	<i>Kalanchoe marnieriana</i>	景天科 Crassulaceae	69,177
23	亚麻 <i>Linum usitatissimum</i>	亚麻科 Linaceae	43,484
24	小果野蕉 <i>Musa acuminata</i>	芭蕉科 Musaceae	36,528
25	苹果 <i>Malus domestica</i>	蔷薇科 Rosaceae	63,517
26	木薯 <i>Manihot esculenta</i>	大戟科 Euphorbiaceae	41,381
27	猴面花 <i>Mimulus guttatus</i>	玄参科 Scrophulariaceae	33,573
28	细小微胞藻 <i>Micromonas pusilla</i>	色球藻科 Chroococcaceae	10,660
29	<i>Micromonas</i> sp.	Mamiellaceae	10,103
30	蒺藜状苜蓿 <i>Medicago truncatula</i>	豆科 Leguminosae	62,319
31	绿色鞭毛藻 <i>Ostreococcus lucimarinus</i>	绿色鞭毛藻科 Prasinocladaceae	7,796
32	水稻 <i>Oryza sativa</i>	禾本科 Gramineae	52,424
33	<i>Panicum hallii</i>	禾本科 Gramineae	49,852
34	小立碗藓 <i>Physcomitrella patens</i>	葫芦藓科 Funariaceae	87,533
35	桃 <i>Prunus persica</i>	蔷薇科 Rosaceae	47,089
36	毛果杨 <i>Populus trichocarpa</i>	杨柳科 Salicaceae	73,013
37	菜豆 <i>Phaseolus vulgaris</i>	豆科 Leguminosae	31,638

刘莉, 舒江平, 韦宏金, 张锐, 沈慧, 严岳鸿. 东亚特有珍稀蕨类植物岩穴蕨(碗蕨科)高通量转录组测序及分析. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1325–1334.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016231>

序号 No.	物种 Species	科 Family	蛋白序列 No.of proteins
38	柳枝稷 <i>Panicum virgatum</i>	禾本科 Gramineae	125,439
39	蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	大戟科 Euphorbiaceae	31,221
40	高粱 <i>Sorghum bicolor</i>	禾本科 Gramineae	47,205
41	小米 <i>Setaria italica</i>	禾本科 Gramineae	43,001
42	番茄 <i>Solanum lycopersicum</i>	茄科 Solanaceae	34,727
43	江南卷柏 <i>Selaginella moellendorffii</i>	卷柏科 Selaginellaceae	22,285
44	紫萍 <i>Spirodela polyrhiza</i>	浮萍科 Lemnaceae	19,623
45	杞柳 <i>Salix purpurea</i>	杨柳科 Salicaceae	61,520
46	马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	茄科 Solanaceae	51,472
47	狗尾巴草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科 Gramineae	48,594
48	可可 <i>Theobroma cacao</i>	梧桐科 Sterculiaceae	44,404
49	团藻 <i>Volvox carteri</i>	团藻科 Volvocaceae	16,075
50	葡萄 <i>Vitis vinifera</i>	葡萄科 Vitaceae	26,346
51	玉米 <i>Zea mays</i>	禾本科 Gramineae	88,760



附录3 预测的开放阅读框架(ORF)长度分布图

Appendix 3 Length distribution of the predicted open reading frame (ORF)

•数据论文•

三种珍稀有蹄类动物的警戒行为数据

李忠秋*

(南京大学生命科学院, 南京 210023)

摘要: 警戒行为是野生动物重要的反捕食策略之一, 警戒行为的研究已经成为行为生态学中动物的采食行为、繁殖行为之外的另一热点研究领域。然而, 尽管研究人员至今已经在数百种鸟类、兽类中开展了各种类型的警戒行为学研究, 但相关研究的原始数据却鲜有共享。本文公开了利用焦点取样法采集的我国3种珍稀有蹄类动物警戒行为数据样本716个, 其中普氏原羚(*Procapra przewalskii*) 175个、藏原羚(*P. picticaudata*) 180个、麋鹿(*Elaphurus davidianus*) 361个, 并同时公布了采集该行为学数据时的相关变量, 包括性别、群体类型、群体大小、捕食风险、人类干扰等。结果显示在上述3种有蹄类动物中, 均存在明显的集群效应, 且此效应与性别及捕食风险存在交互作用。本文尝试建立标准的行为学数据规范, 以期未来的行为学研究数据的共享及深度挖掘提供可能。

关键词: 捕食风险; 反捕食策略; 集群效应; 麋鹿; 普氏原羚; 群体大小; 人类干扰; 藏原羚

Datasets of vigilance behavior for three rare ungulates

Zhongqiu Li*

School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract: Vigilance is an important strategy of anti-predation. After foraging and reproductive behavior, vigilance behavior has become another important research domain in behavioral ecology. However, original raw data of such kinds of study are seldom shared, despite the mounting studies on vigilance behavior of hundreds of birds and mammals. Here I publish vigilance datasets of three rare ungulates in China collected by focal sampling. These datasets include 716 samples, of which 175 are from Przewalski's gazelle *Procapra przewalskii*, 180 are from the Tibetan gazelle *P. picticaudata* and 361 are from Père David's deer *Elaphurus davidianus*. I also include environmental variables, including sex, group type, group size, predation risk and human disturbance. A positive group size effect was found in all three ungulates, and this interacted with sex and predation risk/human disturbance. I attempt to establish a criterion for behavioral data collection, and to improve data sharing and exploration in ethology.

Key words: predation risk; anti-predation strategy; group-size effect; Père David's deer; Przewalski's gazelle; group size; human disturbance; Tibetan gazelle

1 引言

警戒行为是动物对群体内部或外部刺激的行为反应, 主要表现为抬头环视或凝视周围环境(Beauchamp, 2015)。将抬头环视作为警戒行为的标准的原因是: (1)抬头的姿势使所有感觉器官处于能够增大探测范围的位置; (2)环视行为的发生以减少花费在其他行为上的时间为代价; (3)当一个捕食者

出现时, 环视是可观测到的警戒状态(Childress & Lung, 2003)。警戒行为可以侦察潜在的捕食者, 防御捕食者的攻击, 是动物重要的反捕食策略之一。此外, 由于群体内部或群体间广泛存在的食物、配偶、领域的争夺, 警戒行为还具有社群监控的作用, 从而达到抑制偷窃寄生现象、表达支配关系、识别配偶或同伴等目的(Robinette & Ha, 2001; Childress & Lung, 2003; Cameron & Du Toit, 2005; Beauc-

收稿日期: 2016-10-04; 接受日期: 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(30670267; 31000174)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lizq0314@gmail.com

hamp, 2014, 2015)。警戒行为的表达有利于个体的生存和适合度的增加(Beauchamp, 2014, 2015)。

在实际观测中, 衡量个体警戒行为的指标主要有警戒比例(警戒行为占有行为时间的比例)、警戒频率(单位时间内警戒的次数)和警戒时长(单次警戒行为的持续时间)等, 其中使用警戒比例和警戒频率代表警戒水平较为普遍(Beauchamp, 2008, 2014)。此外, 还可以用警戒距离和逃逸距离等对警戒强度作出判断(Ge et al, 2011a; Lian et al, 2012)。

在对鸟类和哺乳类动物的广泛研究中发现, 诸多因素均会影响到动物的警戒行为模式和强度(Beauchamp, 2015)。从内部因素的个体层面来看, 个体的年龄、性别、个性、繁殖状态、采食模式以及所处空间位置或者个体在群体中的社会地位等级、同伴的出现或靠近, 以及群体内成员对食物或配偶的竞争等因素均会影响到动物的警戒行为(Li et al, 2009; Couchoux & Cresswell, 2012; Li et al, 2012a; Li et al, 2013; Zheng et al, 2013); 从内部因素中的群体特征来看, 群体的组成、大小、集群模式和群体在自然环境中所处的空间位置等也具有不可忽视的作用(Li & Jiang, 2008; Li et al, 2009; Shi et al, 2010)。外部因素如捕食风险和人类活动干扰等也会对动物的警戒行为产生影响(Li et al, 2009; Wang et al, 2011; Zheng et al, 2013)。并且, 这些因素之间并非相互独立, 而是相互作用, 共同影响着动物警戒行为的表现(Wang et al, 2011)。

作为重要的反捕食策略之一, 动物的警戒行为在近年来已经吸引了大量关注(Beauchamp, 2014, 2015)。加拿大学者Guy Beauchamp博士、美国学者Daniel Blumstein教授和Esteban Fernandez-Juricic教授、法国学者Olivier Pays博士等先后在警戒行为的集群效应(Beauchamp, 2008, 2010)、遗传基础(Blumstein & Daniel, 2005)、同步性(Pays et al, 2007, 2009; Ge et al, 2011b)等方面开展了大量研究。我国学者也在近10年对有蹄类、鹤类的警戒行为, 尤其是集群效应方面开展了系列研究(车烨和李忠秋, 2014)。笔者收集了30余年来哺乳动物警戒行为的研究文献, 截至2015年, 至少已经有127个涉及警戒行为集群效应的独立研究。然而, 这些研究的原始数据鲜有公布。本文将首次公开本人及本研究组近年开展的3种有蹄类动物包括普氏原羚(*Procapra przewalskii*)、藏原羚(*P. picticaudata*)、麋鹿

(*Elaphurus davidianus*)的警戒行为数据, 并尝试建立标准的行为学数据规范, 以期为未来的行为学数据共享及深度挖掘提供基础。

2 研究方法

2.1 研究物种

普氏原羚属于哺乳纲偶蹄目牛科羚羊亚科原羚属, 为我国特有物种, 仅分布于青藏高原青海湖地区, 由湖东、元者、哈尔盖、刚察、鸟岛、天峻等数个种群构成, 数量约1,600只(Li et al, 2012b)。因数量稀少, 普氏原羚被列为国家一级重点保护野生动物, 并被中国脊椎动物红皮书评为极危级(蒋志刚等, 2016)。

藏原羚同属于羚羊亚科原羚属, 分布在青藏高原地区(Schaller, 1998; 蒋志刚, 2004)。除分布于我国以外, 少量种群亦见于拉达克地区(Bhatnagar et al, 2006)。藏原羚虽然分布较广, 但其种群密度很低, 而且在最近几十年中其种群数量不断减少, 已被列为国家二级重点保护野生动物, 并被中国脊椎动物红皮书评为近危(蒋志刚等, 2016)。

普氏原羚与藏原羚为近缘物种, 且同域分布, 我们主要根据以下形态特征进行区分(蒋志刚, 2004): (1)普氏原羚体型较大, 体长110 cm左右, 成年雄性体重可达30 kg, 成年雌性体重约23 kg (Lei et al, 2001); 而藏原羚体型较小, 体长90 cm左右, 成年个体体重通常小于20 kg; (2)普氏原羚雄性个体有角, 角形短粗, 并且在两个矢形面上弯曲; 藏原羚的雄性个体也有角, 但角形细长, 仅在一个矢形面上弯曲; (3)普氏原羚头骨的面部较长, 鼻骨较宽; 藏原羚头骨的面部较短, 鼻骨较窄; (4)普氏原羚毛色为棕黄色; 而藏原羚毛色为暗灰色。

麋鹿属于鹿科麋鹿属。1985年和1986年两次从欧洲重引入中国, 先后建立了北京、大丰和石首3个种群(Jiang et al, 2000; 蒋志刚等, 2001; Ding, 2004)。截至2016年, 麋鹿全球个体约6,000只, 本研究所涉及的大丰麋鹿保护区麋鹿种群达到3,223只, 占到世界种群的50%以上。自1998年以来, 大丰麋鹿保护区管理局先后5次将约60头麋鹿野放到保护区第三核心区, 截至2016年, 该野放种群已达到295只。麋鹿目前被列为国家一级重点保护动物, 并被中国脊椎动物红皮书评为极危级(蒋志刚等, 2016)。

2.2 研究地区概况

普氏原羚与藏原羚的行为观察点位于青海省东北部的海西州天峻县(96°49'42"–99°41'48" E, 36°53'00"–48°39'12" N)。天峻县海拔最低2,850 m, 最高5,826.8 m, 相对高差近3,000 m。属高原寒带气候, 全年无明显无霜期, 年均温–1.5℃, 年降雨量360 mm。布哈河为境内最大的河流, 也是青海湖水量最大的河流, 年径流量达 $10.96\times10^9\text{ m}^3$ 。研究的具体区域位于布哈河上游的生格乡, 海拔介于3,400–4,200 m之间。境内植被多为高寒草甸, 优势物种有矮蒿草(*Kobresia humilis*)、针茅(*Stipa* spp.)、羊茅(*Festuca* spp.)、黄芪(*Astragalus* spp.)等。

麋鹿的观察点位于江苏省盐城市黄海之滨的大丰麋鹿国家级自然保护区(120°42'–120°51' E, 32°56'–33°36' N)。保护区面积最初为1,000 ha, 1996年扩增至78,000 ha; 1986年始建为省级自然保护区, 1997年晋升为国家级自然保护区, 2002年被列入国际重要湿地名录, 主要保护对象为麋鹿及其栖息地。保护区共有三个核心区, 其中一二区主要用于保护半散养麋鹿, 三区用于保护野放麋鹿。

大丰麋鹿保护区平均海拔2–4 m。气候为介于亚热带与暖温带之间的过渡性气候, 年平均气温14.1℃, 1月平均气温0.8℃, 7月平均气温27.0℃。全年无霜期217天, 年均降水1,068 mm, 降水多在6–9月。保护区内水网交错、生境复杂, 由林地、草地、芦苇滩、米草滩、沼泽地、盐裸地、农田等组成。

2.3 行为学观察及参数定义

2.3.1 警戒行为及动物社群定义

有蹄类动物的警戒行为定义为头高于肩并向四周观望。衡量指标包括警戒比例、警戒频率、警戒时长。在普氏原羚和藏原羚的野外观察中, 记录了以上3个指标; 在麋鹿的野外观察中, 仅记录了警戒比例1个指标。

当群体中的个体间距小于50 m, 且具有相对一致的行为表现时, 将其定义为一群(Clutton-Brock et al, 1982)。有蹄类的社群类型根据性别年龄可以大致分为4类: 雌性群、雄性群、混合群以及母子群。羚羊类和鹿类动物在社群结构上有些差异: 普氏原羚和藏原羚同性聚群现象明显, 除繁殖季节外, 雌雄两性多各自聚群活动, 故夏季两种原羚主要以雌性群、雄性群及母子群为主; 麋鹿同性聚群现象不甚明显, 且夏季为麋鹿的繁殖季节, 故麋鹿主要以

表1 青海省天峻县布哈河上游普氏原羚夏季的警戒行为
Table 1 Summer vigilance behavior of Przewalski's gazelle in the Upper Buha River, Tianjun County, Qinghai Province

变量 Variables	均值±标准误 Mean±SE	极差 Range	样本量 N
群体类型 Group type			175
雌性群 Female			98
雄性群 Male			26
母子群 Mother-offspring			51
性别 Sex			175
雌性 Female			98
雄性 Male			26
携幼雌性 Mother			51
捕食风险 Predation risk			175
高 High			16
低 Low			159
群体大小 Group size	5.86 ± 0.35	1–25	175
警戒比例 Vigilant (%)	5.43 ± 0.50	0–40.90	175
警戒频率 Vigilant rate (No./h)	19.26 ± 1.23	0–97.6	175
警戒时长 Vigilant duration (s)	9.60 ± 0.70	2.00–61.67	175

一雄多雌的繁殖群及多雄多雌的混合群为主。

2.3.2 焦点取样法

警戒行为观察主要采用全事件焦点取样法(Altmann, 1974), 即随机选择有蹄类社群中的1只个体, 跟踪记录其行为20–30 min或直至群体结构发生变化或者焦点个体在视野中消失。当群体规模较大时, 我们也会对同一群不同位置个体分别采样。考虑到目标种群均有上百只个体, 且对每一群每天仅取样1次, 伪重复的问题基本可以解决。

影响动物警戒行为的因素众多, 因此对每个行为样本尽可能全地记录社群及环境变量。其中, 较为重要的变量包括: 集群类型、集群大小、性别、年龄、捕食风险或人类干扰。在两种原羚的行为观察中, 将焦点个体周围300 m内是否有天敌(狐狸、狼等)作为评估捕食风险高低的标准, 300 m内有天敌定义为高风险, 没有天敌则定义为低风险。在麋鹿行为观察中, 由于第一核心区和第二核心区的游客数量有明显差异, 将不同区域作为划分人类干扰高低的标准, 一区为高干扰区域, 二区为低干扰区域。除以上因素外, 记录内容通常还包括时间、地理坐标、植被类型、天气、海拔等。普氏原羚与藏原羚警戒行为数据的采集时间为2007年6–7月, 麋鹿警戒行为数据的采集时间为2010年和2011年的7–8月。为避免产生观察者效应, 所有的行为学观察均在焦点个体200 m之外进行(李春旺等, 2006; Li

表2 青海省天峻县布哈河上游藏原羚夏季的警戒行为
Table 2 Summer vigilance behavior of Tibetan gazelle in Upper Buha River in Tianjun, Qinghai Province

变量 Variables	均值±标准误 Mean±SE	极差 Range	样本量 N
群体类型 Group type			180
雌性群 Female			135
雄性群 Male			19
母子群 Mother-offspring			26
性别 Sex			180
雌性 Female			135
雄性 Male			19
携幼雌性 Mother			26
捕食风险 Predation risk			180
高 High			35
低 Low			145
群体大小 Group size	5.10 ± 0.22	1–12	180
警戒比例 Vigilant percentage (%)	6.44 ± 0.68	0–55.41	180
警戒频率 Vigilant rate (No./h)	21.11 ± 1.49	0–117.92	180
警戒时长 Vigilant duration (s)	9.84±0.65	2.00–38.00	180

表3 江苏省大丰麋鹿自然保护区麋鹿夏季的警戒行为
Table 3 Summer vigilance behavior of Père David's deer in in Dafeng National Nature Reserve, Jiangsu Province

变量 Variables	均值±标准误 Mean±SE	极差 Range	样本量 N
群体类型 Group type			361
雌性群 Female			40
雄性群 Male			26
一雄多雌群 Polygamous			143
多雄多雌群 Mixed			152
性别 Sex			361
雌性 Female			203
雄性 Male			158
区域 Area			361
一区 First zone			149
二区 Second zone			212
群体大小 Group size	31.08 ± 2.10	1–303	361
警戒比例 Vigilant percentage (%)	3.50 ± 0.35	0–52.33	361

et al, 2007)。

2.4 数据整理、校正及分析

所有的警戒行为数据均录入电子表格，分别计算每个样本的警戒比例、警戒频率以及警戒时长，并详细注明各社群及环境因素。整理完毕后，将数据分别按照降序或者升序重排，校正可能出现的录入或计算错误。对于普氏原羚和藏原羚而言，每个群体规模不大，通常仅对其中1只个体取样，因此各行行为样本可以认为相互独立，采用一般线性模型

(即多因素方差分析)即可进行数据分析；对于麋鹿而言，群体规模相对较大，很多样本均取自同一群体，这些样本并不完全独立，因此可以采用混合线性模型(将群体编号作为随机因素加入模型)进行分析。本文主要目的并非探讨数据分析方法，因此对数据分析部分略过，具体的数据分析过程可以参考已经发表的普氏原羚及麋鹿的论文(Li et al, 2009; Zheng et al, 2013)。

3 结果及简要结论

本文共公布警戒行为样本716个(数据已上传至 Figshare, doi: 10.6084/m9.figshare.4287821)，其中普氏原羚175个(表1, 附录1)，藏原羚180个(表2, 附录2)，麋鹿361个(表3, 附录3)。所有的样本均采自夏季，其中普氏原羚与藏原羚为产羔期，而麋鹿处于繁殖期中后段。

利用线性模型对3种有蹄类警戒行为的分析显示，群体大小对警戒行为具有显著的影响：群体越大，它们警戒的投入越低。这种集群效应还和性别及繁殖状态存在交互作用，如集群效应在普氏原羚的雌性群及母子群中均显著存在，而在雄性群中并不存在(Li et al, 2009)；同理，集群效应在麋鹿雌性群中显著存在，而在混合群及雄性群中则不明显(Zheng et al, 2013)。

性别对有蹄类警戒行为的影响并不一致，在普氏原羚中，雄性个体的警戒投入明显高于雌性；而在麋鹿中，雄性的警戒投入则低于雌性，这可能与雌雄两性所在群体大小差异及不同的繁殖策略有关(Li et al, 2009; Zheng et al, 2013)。

除此之外，简单比较3种有蹄类的警戒比例，似乎可以看出一个大致趋势：体型越大，警戒比例越低。这是因为警戒行为的最重要功能为探测外界捕食风险，体型越大，往往抵御捕食者的能力也越强，警戒的投入也就相应越小(Beauchamp, 2015)。

致谢：实验设计得到蒋志刚研究员指导，野外研究得到卢星、郑炜、丁玉华、刘彬等帮助，在此一并致谢。

参考文献

Altmann J (1974) Observational study of behavior: sampling methods. *Behaviour*, 49, 227–267.
Beauchamp G (2008) What is the magnitude of the group-size

- effect on vigilance? Behavioral Ecology, 19, 1361–1368.
- Beauchamp G (2010) A comparative analysis of vigilance in birds. Evolutionary Ecology, 24, 1267–1276.
- Beauchamp G (2014) Social Predation: How Group Living Benefits Predators and Prey. Academic Press, London.
- Beauchamp G (2015) Animal Vigilance: Monitoring Competitors and Predators. Academic Press, Oxford.
- Bhatnagar YV, Wangchuk R, Mishra C (2006) Decline of the Tibetan gazelle *Procapra picticaudata* in Ladakh, India. Oryx, 40, 229–232.
- Blumstein DT, Daniel JC (2005) The loss of anti-predator behaviour following isolation on islands. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 272, 1663–1668.
- Cameron EZ, du Toit JT (2005) Social influences on vigilance behaviour in giraffes, *Giraffa camelopardalis*. Animal Behaviour, 69, 1337–1344.
- Che Y, Li ZQ (2014) Vigilance behavior of animals: overview and perspective. Sichuan Journal of Zoology, 33, 144–150. (in Chinese with English abstract) [车烨, 李忠秋 (2014) 动物的警戒行为——回顾与展望. 四川动物, 33, 144–150.]
- Childress MJ, Lung MA (2003) Predation risk, gender and the group size effect: does elk vigilance depend upon the behaviour of conspecifics? Animal Behaviour, 66, 389–398.
- Clutton-Brock TH, Iason GR, Albon SD, Guinness FE (1982) The effects of lactation on feeding behaviour and habitat use of wild red deer hinds. Journal of Zoology, 198, 227–236.
- Couchoux C, Cresswell W (2012) Personality constraints versus flexible antipredation behaviors: how important is boldness in risk management of redshanks (*Tringa totanus*) foraging in a natural system? Behavioral Ecology, 23, 290–301.
- Ding YH (2004) Chinese Milu Research. Jilin Publishing House for Science and Technology, Changchun. (in Chinese) [丁玉华 (2004) 中国麋鹿研究. 吉林科技出版社, 长春.]
- Ge C, Li ZQ, Li J, Huang C (2011a) The effects on birds of human encroachment on the Qinghai-Tibet Plateau. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16, 604–606.
- Ge C, Beauchamp G, Li ZQ (2011b) Coordination and synchronisation of anti-predation vigilance in two crane species. PLoS ONE, 6, e26447.
- Jiang ZG, Yu CQ, Feng ZJ, Zhang LY, Xia JS, Ding YH, Lindsay N (2000) Père David's deer in China. Wildlife Society Bulletin, 28, 681–687.
- Jiang ZG (2004) Przewalski's Gazelle. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [蒋志刚 (2004) 中国普氏原羚. 中国林业出版社, 北京.]
- Jiang ZG, Zhang LY, Yang RS, Xia JS, Rao CG, Ding YH, Shen H, Xu AH, Yu CQ (2001) Density dependent growth and population management strategy for Père David's deer in China. Acta Zoologica Sinica, 47, 53–58. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 张林源, 杨戎生, 夏经世, 饶成刚, 丁玉华, 沈华, 徐安红, 于长青 (2001) 中国麋鹿种群密度制约现象与发展策略. 动物学报, 47, 53–58.]
- 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 X, 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 with English abstract) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹖, 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.]
- Lei RH, Jiang ZG, Liu BW (2001) Group pattern and social segregation in Przewalski's gazelle (*Procapra przewalskii*) around Qinghai Lake, China. Journal of Zoology, 255, 175–180.
- Li CW, Jiang ZG, Li LL, Li ZQ, Fang HX, Li CW, Beauchamp G (2012a) Effects of reproductive status, social rank, sex and group size on vigilance patterns in Przewalski's gazelle. PLoS ONE, 7, e32607.
- Li CL, Jiang ZG, Ping XG, Cai J, You ZQ, Li CL, Wu YL (2012b) Current status and conservation of the endangered Przewalski's gazelle *Procapra przewalskii*, endemic to the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Oryx, 46, 145–153.
- Li CW, Jiang ZG, Tang SH, Zeng Y (2007) Evidence of effects of human disturbance on alert response in Père David's deer (*Elaphurus davidianus*). Zoological Biology, 26, 461–470.
- Li CW, Yang XB, Ding YH, Zhang LY, Fang HX, Tang SH, Jiang ZG (2011) Do Père David's deer lose memories of their ancestral predators? PLoS ONE, 6, e23623.
- Li CW, Jiang ZG, Tang SH (2006) Patterns of vigilance behavior, alert distance and its seasonal difference in free-ranging Père David's deer. Acta Zoologica Sinica, 52, 942–947. (in Chinese with English abstract) [李春旺, 蒋志刚, 汤宋华 (2006) 散放麋鹿的警戒行为模式、警戒距离及其季节差异. 动物学报, 52, 942–947.]
- Li ZQ, Jiang ZG (2008) Group size effect on vigilance: evidence from Tibetan gazelle in Upper Buha River, Qinghai-Tibet Plateau. Behavioural Processes, 78, 25–28.
- Li ZQ, Jiang ZG, Beauchamp G (2009) Vigilance in Przewalski's gazelle: effects of sex, predation risk and group size. Journal of Zoology, 277, 302–308.
- Li ZQ, Wang Z, Ge C (2013) Time budgets of wintering red-crowned cranes: effects of habitat, age and family size. Wetlands, 33, 227–232.
- Lian XM, Li XX, Zhou DX, Yan PS (2012) Avoidance distance from Qinghai-Tibet highway in sympatric Tibetan antelope and gazelle. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17, 585–587.
- Pays O, Dubot AL, Jarman PJ, Loisel P, Goldizen AW (2009)

- Vigilance and its complex synchrony in the red-necked pademelon, *Thylogale thetis*. Behavioral Ecology, 20, 22–29.
- Pays O, Renaud PC, Loisel P, Petit M, Gerard JF, Jarman PJ (2007) Prey synchronize their vigilant behaviour with other group members. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 274, 1287–1291.
- Robinette RL, Ha JC (2001) Social and ecological factors influencing vigilance by northwestern crows, *Corvus caurinus*. Animal Behaviour, 62, 447–452.
- Schaller GB (1998) Wildlife of the Tibetan Steppe. The University of Chicago Press, Chicago.
- Shi JB, Beauchamp G, Dunbar R (2010) Group-size effect on vigilance and foraging in a predator-free population of Feral goats (*Capra hircus*) on the Isle of Rum, NW Scotland. Ethology, 116, 329–337.
- Wang Z, Li ZQ, Beauchamp G, Jiang ZG (2011) Flock size and human disturbance affect vigilance of endangered red-crowned cranes. Biological Conservation, 144, 101–105.
- Zheng W, Beauchamp G, Jiang XL, Li ZQ, Yang QL (2013) Determinants of vigilance in a reintroduced population of Père David's deer. Current Zoology, 59, 265–270.

(责任编辑: 黄晓磊 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究观察警戒行为的175个普氏原羚样本

Appendix 1 175 vigilance samples of Przewalski's gazelle
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016284-1.xlsx>

附录2 本研究观察警戒行为的180个藏原羚样本

Appendix 2 180 vigilance samples of Tibetan gazelle
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016284-2.xlsx>

附录3 本研究观察警戒行为的361个麋鹿样本

Appendix 3 361 vigilance samples of Père David's deer
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016284-3.xlsx>

附录1 本研究观察警戒行为的175个普氏原羚样本

Appendix 1 175 vigilance samples of Przewalski's gazelle

ID	Year	Date	Time	Group size	Sex	Group type	Predation risk	Lambs	Sample length	Vigilance time	No. Scans	Vigilance proportion	Vigilance rate	Scan duration
1	2007	6月25日	12	1	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
2	2007	6月25日	13	3	1	1	2	0	851	71	16	0.083	67.7	4.44
3	2007	6月25日	13	1	1	1	2	0	1438	247	39	0.172	97.6	6.33
4	2007	6月25日	14	9	1	1	2	0	1469	72	14	0.049	34.3	5.14
5	2007	6月25日	16	7	1	1	2	0	1800	29	5	0.016	10.0	5.80
6	2007	6月26日	10	2	1	1	2	0	1800	52	6	0.029	12.0	8.67
7	2007	6月26日	12	5	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
8	2007	6月26日	13	5	1	1	2	0	1716	102	18	0.059	37.8	5.67
9	2007	6月26日	13	8	1	1	2	0	1200	43	6	0.036	18.0	7.17
10	2007	6月26日	14	2	1	1	2	0	977	90	8	0.092	29.5	11.25
11	2007	6月26日	14	9	1	1	2	0	545	3	1	0.006	6.6	3.00
12	2007	6月26日	14	1	1	1	2	0	174	9	2	0.052	31.6	5.90
13	2007	6月29日	13	5	1	1	2	0	1110	30	5	0.027	16.2	6.00
14	2007	6月29日	15	8	1	1	2	0	434	32	2	0.074	16.6	16.00
15	2007	6月29日	15	9	1	1	2	0	1307	79	10	0.060	27.5	7.90
16	2007	6月30日	7	1	2	2	2	0	833	59	10	0.071	43.2	5.90
17	2007	6月30日	8	15	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	
18	2007	6月30日	8	1	2	2	2	0	740	45	7	0.061	34.1	6.43
19	2007	6月30日	9	6	1	1	2	0	966	12	4	0.012	14.9	3.00
20	2007	6月30日	9	5	1	1	2	0	356	10	2	0.028	20.2	5.00
21	2007	6月30日	10	11	1	1	2	0	573	7	2	0.012	12.6	3.50
22	2007	6月30日	10	2	1	1	2	0	1800	61	8	0.034	16.0	7.63

23	2007	6月30日	10	5	1	1	2	0	1800	9	1	0.005	2.0	9.00
24	2007	6月30日	11	6	1	1	2	0	1800	10	1	0.006	2.0	10.00
25	2007	6月30日	12	5	1	1	2	0	1800	4	2	0.002	4.0	2.00
26	2007	6月30日	13	8	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
27	2007	6月30日	14	2	1	1	2	0	977	96	9	0.098	33.2	10.67
28	2007	6月30日	16	7	1	1	2	0	1800	6	1	0.003	2.0	6.00
29	2007	6月30日	17	8	1	1	2	0	1800	53	10	0.029	20.0	5.30
30	2007	7月3日	9	5	1	1	2	0	377	16	2	0.042	19.1	8.00
31	2007	7月3日	9	1	2	2	2	0	860	60	7	0.070	29.3	8.57
32	2007	7月3日	10	1	2	2	2	0	1200	5	1	0.004	3.0	5.00
33	2007	7月3日	10	13	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
34	2007	7月3日	11	2	1	1	2	0	1200	25	7	0.021	21.0	3.57
35	2007	7月3日	11	2	1	1	2	0	1200	14	4	0.012	12.0	3.50
36	2007	7月3日	11	13	1	1	2	0	1469	41	8	0.028	19.6	5.13
37	2007	7月3日	12	13	1	1	2	0	959	21	2	0.022	7.5	10.50
38	2007	7月3日	13	8	1	1	2	0	1080	24	2	0.022	6.7	12.00
39	2007	7月4日	7	4	1	1	2	0	900	15	3	0.017	12.0	5.00
40	2007	7月4日	7	2	1	1	2	0	918	34	6	0.037	23.5	5.67
41	2007	7月4日	8	1	3	3	2	1	1109	261	10	0.235	32.5	26.10
42	2007	7月4日	10	13	1	1	2	0	1800	2	1	0.001	2.0	2.00
43	2007	7月4日	11	13	1	1	2	0	1473	0	0	0.000	0.0	
44	2007	7月7日	11	7	1	1	2	0	293	4	1	0.014	12.3	4.00
45	2007	7月7日	15	10	1	1	2	0	1800	26	4	0.014	8.0	6.50
46	2007	7月7日	16	15	1	1	2	0	774	20	5	0.026	23.3	4.00
47	2007	7月7日	17	1	3	3	2	1	1800	192	34	0.107	68.0	5.65
48	2007	7月7日	17	7	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
49	2007	7月7日	18	7	3	3	2	1	1800	36	6	0.020	12.0	6.00

50	2007	7月8日	7	4	1	1	2	0	900	21	3	0.023	12.0	7.00
51	2007	7月8日	7	2	1	1	2	0	914	28	6	0.031	23.6	4.67
52	2007	7月8日	8	3	3	3	1	2	1418	165	21	0.116	53.3	7.86
53	2007	7月8日	8	3	3	3	2	2	1800	17	4	0.009	8.0	4.25
54	2007	7月8日	8	1	3	3	2	1	1200	307	14	0.256	42.0	21.93
55	2007	7月8日	11	1	3	3	2	1	1363	558	11	0.409	29.1	50.73
56	2007	7月8日	12	13	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	
57	2007	7月8日	13	8	1	1	2	0	1080	0	0	0.000	0.0	
58	2007	7月11日	7	4	1	1	2	0	729	4	2	0.005	9.9	2.00
59	2007	7月11日	8	5	1	1	2	0	1800	22	4	0.012	8.0	5.50
60	2007	7月11日	8	3	1	1	2	0	1454	63	9	0.043	22.3	7.00
61	2007	7月11日	8	3	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	
62	2007	7月11日	9	1	2	2	2	0	1200	27	6	0.023	18.0	4.50
63	2007	7月11日	9	3	1	1	2	0	768	53	7	0.069	32.8	7.57
64	2007	7月11日	9	2	1	1	2	0	743	3	1	0.004	4.8	3.00
65	2007	7月11日	10	4	3	3	2	3	1726	76	10	0.044	20.9	7.60
66	2007	7月11日	10	7	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	
67	2007	7月11日	11	1	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
68	2007	7月11日	11	2	2	2	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
69	2007	7月11日	11	6	1	1	1	0	556	66	8	0.119	51.8	8.25
70	2007	7月11日	11	7	1	1	1	0	391	27	4	0.069	36.8	6.75
71	2007	7月11日	12	9	1	1	2	0	1800	10	3	0.006	6.0	3.33
72	2007	7月11日	12	2	1	1	2	0	1800	61	11	0.034	22.0	5.55
73	2007	7月11日	13	10	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	
74	2007	7月11日	15	2	1	1	2	0	900	29	2	0.032	8.0	14.50
75	2007	7月11日	17	1	1	1	2	0	1179	45	7	0.038	21.4	6.43
76	2007	7月11日	17	3	2	2	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	

77	2007	7月12日	7	4	1	1	2	0	729	16	3	0.022	14.8	5.33
78	2007	7月12日	8	5	1	1	2	0	1800	13	3	0.007	6.0	4.33
79	2007	7月12日	9	1	1	1	2	0	1800	14	1	0.008	2.0	14.00
80	2007	7月12日	9	1	3	3	2	1	930	54	8	0.058	31.0	6.75
81	2007	7月12日	10	4	3	3	2	3	1785	158	15	0.089	30.3	10.53
82	2007	7月12日	10	1	3	3	2	1	607	122	10	0.201	59.3	12.20
83	2007	7月12日	10	6	2	2	2	0	1027	104	12	0.101	42.1	8.67
84	2007	7月12日	11	2	1	1	2	0	1200	22	4	0.018	12.0	5.50
85	2007	7月12日	11	1	1	1	2	0	897	55	9	0.061	36.1	6.11
86	2007	7月12日	11	7	1	1	1	0	416	13	2	0.031	17.3	6.50
87	2007	7月12日	11	2	2	2	2	0	1800	36	6	0.020	12.0	6.00
88	2007	7月12日	11	6	1	1	1	0	651	59	7	0.091	38.7	8.43
89	2007	7月12日	12	9	1	1	2	0	1800	5	1	0.003	2.0	5.00
90	2007	7月12日	12	2	1	1	2	0	1200	29	6	0.024	18.0	4.83
91	2007	7月12日	13	10	1	1	2	0	1800	18	3	0.010	6.0	6.00
92	2007	7月12日	17	3	2	2	2	0	1200	23	5	0.019	15.0	4.60
93	2007	7月16日	8	3	1	1	2	0	1454	28	6	0.019	14.9	4.67
94	2007	7月16日	9	3	1	1	2	0	743	26	3	0.035	14.5	8.67
95	2007	7月16日	10	4	3	3	2	3	1780	207	11	0.116	22.2	18.82
96	2007	7月16日	10	6	2	2	2	0	1035	185	9	0.179	31.3	20.56
97	2007	7月16日	11	7	1	1	2	0	413	5	2	0.012	17.4	2.50
98	2007	7月16日	11	6	1	1	1	0	531	31	4	0.058	27.1	7.75
99	2007	7月16日	11	7	2	2	1	0	416	32	3	0.077	26.0	10.67
100	2007	7月16日	12	2	1	1	2	0	1800	324	7	0.180	14.0	46.29
101	2007	7月16日	15	10	1	1	2	0	1800	20	3	0.011	6.0	6.67
102	2007	7月16日	16	4	3	3	2	3	900	83	7	0.092	28.0	11.86
103	2007	7月16日	16	4	3	3	2	3	900	48	5	0.053	20.0	9.60

104	2007	7月16日	17	4	1	1	2	0	1800	14	2	0.008	4.0	7.00
105	2007	7月17日	7	4	1	1	2	0	729	25	3	0.034	14.8	8.33
106	2007	7月17日	8	3	1	1	2	0	1454	7	1	0.005	2.5	7.00
107	2007	7月17日	8	5	1	1	2	0	1800	24	5	0.013	10.0	4.80
108	2007	7月17日	9	5	1	1	2	0	1500	0	0	0.000	0.0	
109	2007	7月17日	9	3	1	1	2	0	768	36	5	0.047	23.4	7.20
110	2007	7月17日	9	2	1	1	2	0	743	40	6	0.054	29.1	6.67
111	2007	7月17日	9	5	1	1	2	0	1500	9	3	0.006	7.2	3.00
112	2007	7月17日	10	6	2	2	2	0	1040	116	13	0.112	45.0	8.92
113	2007	7月17日	11	7	1	1	2	0	418	3	1	0.007	8.6	3.00
114	2007	7月17日	11	2	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	
115	2007	7月17日	12	9	1	1	2	0	1800	13	2	0.007	4.0	6.50
116	2007	7月17日	12	2	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.0	
117	2007	7月23日	16	7	3	3	2	6	1800	92	7	0.051	14.0	13.12
118	2007	7月23日	16	15	1	1	2	0	839	17	4	0.020	17.2	4.25
119	2007	7月23日	17	4	1	1	2	0	1800	134	9	0.074	18.0	14.89
120	2007	7月23日	17	3	2	2	2	0	1200	9	2	0.008	6.0	4.50
121	2007	7月23日	18	11	3	3	2	7	1861	57	7	0.031	13.5	8.14
122	2007	7月23日	18	15	3	3	1	10	409	2	1	0.005	8.8	2.00
123	2007	7月23日	19	7	3	3	2	5	470	99	6	0.211	46.0	16.50
124	2007	7月24日	8	3	1	1	2	0	879	7	3	0.008	12.3	2.33
125	2007	7月24日	9	25	3	3	1	9	741	133	4	0.179	19.4	33.25
126	2007	7月24日	9	3	2	2	2	0	632	94	8	0.149	45.6	11.75
127	2007	7月24日	9	4	2	2	2	0	473	34	4	0.072	30.4	8.50
128	2007	7月24日	11	2	3	3	2	3	900	66	8	0.073	32.0	8.25
129	2007	7月24日	15	15	3	3	2	8	1695	19	5	0.011	10.6	3.80
130	2007	7月24日	16	15	1	1	2	0	929	15	4	0.016	15.5	3.75

131	2007	7月24日	16	7	3	3	2	6	1797	84	16	0.047	32.1	5.25
132	2007	7月24日	16	7	3	3	2	4	946	50	3	0.053	11.4	16.67
133	2007	7月24日	18	11	3	3	2	7	1861	64	8	0.034	15.5	8.00
134	2007	7月24日	19	5	3	3	2	4	1217	107	5	0.088	14.8	21.40
135	2007	7月27日	18	15	3	3	1	8	469	53	3	0.113	26.4	15.41
136	2007	7月27日	19	7	3	3	2	6	900	31	5	0.034	20.0	6.20
137	2007	7月28日	8	10	3	3	2	7	780	106	11	0.136	50.8	9.64
138	2007	7月28日	9	25	3	3	1	9	684	82	5	0.120	24.3	17.77
139	2007	7月28日	10	3	3	3	2	2	1003	99	7	0.099	25.1	14.14
140	2007	7月28日	12	6	3	3	2	3	580	10	4	0.017	24.8	2.50
141	2007	7月28日	15	15	3	3	2	8	1680	0	0	0.000	0.0	
142	2007	7月28日	19	7	3	3	1	6	1035	19	4	0.018	13.9	4.75
143	2007	7月31日	18	4	3	3	2	1	600	31	6	0.052	36.0	5.17
144	2007	7月31日	18	3	1	1	2	0	600	185	3	0.308	18.0	61.67
145	2007	7月31日	19	5	3	3	2	4	1217	29	7	0.024	20.7	4.14
146	2007	7月31日	19	1	2	2	2	0	942	162	10	0.172	38.2	16.20
147	2007	7月31日	19	7	3	3	1	7	541	100	5	0.185	33.3	20.00
148	2007	8月1日	8	3	3	3	1	2	1418	219	13	0.154	33.0	16.85
149	2007	8月1日	8	3	1	1	2	0	734	15	2	0.020	9.8	7.50
150	2007	8月1日	9	2	3	3	2	1	1800	118	5	0.066	10.0	23.60
151	2007	8月1日	9	4	2	2	2	0	473	23	3	0.049	22.8	7.67
152	2007	8月1日	9	2	2	2	1	0	860	122	6	0.142	25.1	20.33
153	2007	8月1日	10	6	2	2	1	0	1200	95	4	0.079	12.0	23.75
154	2007	8月1日	10	2	2	2	2	0	1819	140	6	0.077	11.9	23.33
155	2007	8月1日	11	1	3	3	2	1	1054	252	18	0.239	61.5	14.00
156	2007	8月1日	11	2	3	3	2	3	900	84	11	0.093	44.0	7.64
157	2007	8月1日	12	2	2	2	2	0	1800	0	0	0.000	0.0	

158	2007	8月1日	12	6	3	3	2	3	1280	86	9	0.067	25.3	9.56
159	2007	8月1日	15	15	3	3	2	8	590	7	1	0.012	6.1	7.00
160	2007	8月1日	15	2	1	1	2	0	900	19	5	0.021	20.0	3.80
161	2007	8月1日	15	2	1	1	2	0	900	17	4	0.019	16.0	4.25
162	2007	8月1日	17	15	3	3	2	10	885	4	2	0.005	8.1	2.00
163	2007	8月1日	19	7	3	3	2	6	900	45	6	0.050	24.0	7.50
164	2007	8月1日	19	13	2	2	2	0	520	52	5	0.100	34.6	10.40
165	2007	8月3日	15	15	3	3	2	8	1680	0	0	0.000	0.0	
166	2007	8月3日	16	15	1	1	2	0	879	25	4	0.028	16.4	6.25
167	2007	8月3日	17	15	3	3	2	7	885	0	0	0.000	0.0	
168	2007	8月3日	18	4	3	3	2	1	600	87	8	0.145	48.0	10.88
169	2007	8月3日	19	7	3	3	2	7	470	129	7	0.274	53.6	18.43
170	2007	8月3日	19	13	2	2	2	0	519	42	1	0.081	6.9	42.00
171	2007	8月4日	8	10	3	3	2	7	780	78	8	0.100	36.9	9.75
172	2007	8月4日	9	2	3	3	2	1	1800	46	4	0.026	8.0	11.50
173	2007	8月4日	9	3	2	2	2	0	632	69	8	0.109	45.6	8.63
174	2007	8月4日	10	2	2	2	2	0	1823	9	3	0.005	5.9	3.00
175	2007	8月4日	10	3	3	3	2	2	1003	93	7	0.093	25.1	13.29

附录2 本研究观察警戒行为的180个藏原羚样本

Appendix 2 180 vigilance samples of Tibetan gazelle

ID	Year	Date	Time	Group size	Sex	Group type	Predation risk	Lamb status	Sample length/	Vigilance time/s	No. Scans	Vigilance proportion	Vigilance rate	Scan duration/s
1	2007	#####	7	1	2	2	2	0	465	75	7	0.161	54.19	10.71
2	2007	#####	7	3	1	1	2	0	1210	32	5	0.026	14.88	6.40
3	2007	#####	7	3	1	1	2	0	1210	33	6	0.027	17.85	5.50
4	2007	#####	7	9	1	1	1	0	551	54	5	0.098	32.67	10.80
5	2007	#####	8	1	2	2	2	0	619	94	10	0.152	58.16	9.40
6	2007	#####	16	2	1	1	2	0	1230	112	20	0.091	58.54	5.60
7	2007	#####	16	9	1	1	2	0	900	27	5	0.030	20.00	5.40
8	2007	#####	16	9	1	1	2	0	900	15	3	0.017	12.00	5.00
9	2007	#####	17	3	1	1	1	0	1200	84	6	0.070	18.00	14.00
10	2007	#####	7	9	1	1	1	0	551	53	3	0.096	19.60	17.67
11	2007	#####	8	3	1	1	2	0	900	14	3	0.016	12.00	4.67
12	2007	#####	8	3	1	1	2	0	900	22	7	0.024	28.00	3.14
13	2007	#####	8	3	1	1	2	0	900	0	0	0.000	0.00	
14	2007	#####	9	1	2	2	2	0	900	102	15	0.113	60.00	6.80
15	2007	#####	17	6	1	1	2	0	1080	134	10	0.124	33.33	13.40
16	2007	#####	17	3	1	1	2	0	1800	10	1	0.006	2.00	10.00
17	2007	#####	17	6	1	1	2	0	671	31	6	0.046	32.19	5.17
18	2007	#####	17	6	1	1	2	0	668	66	7	0.099	37.72	9.43
19	2007	#####	8	9	1	1	2	0	1800	18	3	0.010	6.00	6.00
20	2007	#####	8	6	1	1	2	0	900	7	2	0.008	8.00	3.50
21	2007	#####	9	2	2	2	2	0	673	114	12	0.169	64.19	9.50
22	2007	#####	17	4	1	1	2	0	861	72	14	0.084	58.54	5.14
23	2007	#####	17	4	1	1	2	0	858	8	1	0.009	4.20	8.00
24	2007	#####	18	1	1	1	1	0	1871	344	20	0.184	38.48	17.20
25	2007	#####	8	6	1	1	2	0	900	8	2	0.009	8.00	4.00
26	2007	#####	8	2	1	1	2	0	1764	13	3	0.007	6.12	4.33

27	2007	#####	8	4	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
28	2007	#####	8	1	1	1	2	0	550	158	6	0.287	39.27	26.33
29	2007	#####	9	8	1	1	2	0	1832	51	8	0.028	15.72	6.38
30	2007	#####	9	8	1	1	2	0	1832	237	13	0.129	25.55	18.23
31	2007	#####	18	4	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
32	2007	#####	18	4	1	1	2	0	1800	41	7	0.023	14.00	5.86
33	2007	#####	18	6	1	1	2	0	1800	16	3	0.009	6.00	5.33
34	2007	#####	18	8	1	1	2	0	900	19	5	0.021	20.00	3.80
35	2007	#####	19	8	1	1	1	0	1832	266	7	0.145	13.76	38.00
36	2007	7月1日	9	1	2	2	2	0	521	19	4	0.036	27.64	4.75
37	2007	7月1日	11	1	2	2	2	0	1200	59	9	0.049	27.00	6.56
38	2007	7月3日	9	6	1	1	2	0	1852	11	1	0.006	1.94	11.00
39	2007	7月3日	9	6	1	1	2	0	1852	0	0	0.000	0.00	
40	2007	7月3日	10	3	1	1	2	0	1200	18	4	0.015	12.00	4.50
41	2007	7月3日	10	3	1	1	2	0	1200	12	3	0.010	9.00	4.00
42	2007	7月3日	19	9	1	1	2	0	1800	35	6	0.019	12.00	5.83
43	2007	7月3日	19	9	1	1	2	0	1800	21	6	0.012	12.00	3.50
44	2007	7月3日	19	7	1	1	2	0	1500	14	3	0.009	7.20	4.67
45	2007	7月3日	19	3	1	1	2	0	1307	102	9	0.078	24.79	11.33
46	2007	7月3日	19	6	1	1	1	0	902	216	10	0.239	39.91	21.60
47	2007	7月4日	9	10	3	3	2	4	1800	21	5	0.012	10.00	4.20
48	2007	7月4日	10	5	1	1	1	0	1530	95	8	0.062	18.82	11.88
49	2007	7月4日	10	12	1	1	2	0	1200	11	3	0.009	9.00	3.67
50	2007	7月4日	13	1	2	2	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
51	2007	7月4日	13	4	2	2	2	0	532	43	10	0.081	67.67	4.30
52	2007	7月4日	19	6	1	1	1	0	718	146	4	0.203	20.06	36.50
53	2007	7月7日	9	10	3	3	2	4	1800	18	4	0.010	8.00	4.50
54	2007	7月7日	10	12	1	1	2	0	1200	0	0	0.000	0.00	
55	2007	7月7日	11	7	3	3	2	3	908	147	16	0.162	63.44	9.19
56	2007	7月7日	11	2	1	1	2	0	1895	59	8	0.031	15.20	7.38

57	2007	7月7日	11	8	1	1	1	0	1895	37	4	0.020	7.60	9.25
58	2007	7月7日	14	7	2	2	1	0	1005	213	13	0.212	46.57	16.38
59	2007	7月7日	14	2	2	2	2	0	1800	137	7	0.076	14.00	19.57
60	2007	7月8日	11	7	3	3	2	3	908	49	9	0.054	35.68	5.44
61	2007	7月8日	11	2	1	1	2	0	1895	31	4	0.016	7.60	7.75
62	2007	7月8日	11	5	1	1	2	0	1212	43	11	0.035	32.67	3.91
63	2007	7月8日	11	5	1	1	2	0	1212	26	4	0.021	11.88	6.50
64	2007	#####	11	7	3	3	2	3	918	0	0	0.000	0.00	
65	2007	#####	11	5	1	1	2	0	900	0	0	0.000	0.00	
66	2007	#####	11	5	1	1	2	0	900	0	0	0.000	0.00	
67	2007	#####	12	7	1	1	2	0	1843	25	4	0.014	7.81	6.25
68	2007	#####	12	4	1	1	2	0	890	66	7	0.074	28.31	9.43
69	2007	#####	12	12	1	1	2	0	1800	14	3	0.008	6.00	4.67
70	2007	#####	12	6	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
71	2007	#####	13	10	1	1	2	0	1800	4	1	0.002	2.00	4.00
72	2007	#####	13	2	1	1	2	0	1800	34	7	0.019	14.00	4.86
73	2007	#####	13	5	1	1	2	0	569	13	3	0.023	18.98	4.33
74	2007	#####	13	5	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
75	2007	#####	13	5	1	1	1	0	460	51	6	0.111	46.96	8.50
76	2007	#####	13	7	1	1	2	0	1440	24	2	0.017	5.00	12.00
77	2007	#####	15	9	3	3	1	3	1855	139	4	0.075	7.76	34.75
78	2007	#####	15	9	3	3	1	3	1395	93	11	0.067	28.39	8.45
79	2007	#####	15	2	2	2	2	0	900	68	8	0.076	32.00	8.50
80	2007	#####	14	5	1	1	2	0	335	2	1	0.006	10.75	2.00
81	2007	#####	14	12	1	1	1	0	975	43	5	0.044	18.46	8.60
82	2007	#####	14	12	1	1	1	0	988	89	6	0.090	21.86	14.83
83	2007	#####	15	9	3	3	1	3	1855	9	2	0.005	3.88	4.50
84	2007	#####	19	3	3	3	2	2	962	533	15	0.554	56.13	35.53
85	2007	#####	14	1	1	1	2	0	519	229	17	0.441	117.92	13.47
86	2007	#####	14	4	1	1	2	0	491	219	6	0.446	43.99	36.50

87	2007	#####	15	2	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
88	2007	#####	15	5	1	1	2	0	778	33	7	0.042	32.39	4.71
89	2007	#####	7	1	3	3	2	1	960	120	13	0.125	48.75	9.23
90	2007	#####	9	4	3	3	2	1	1020	78	8	0.076	28.24	9.75
91	2007	#####	15	5	1	1	2	0	1757	27	3	0.015	6.15	9.00
92	2007	#####	16	5	1	1	2	0	1800	6	1	0.003	2.00	6.00
93	2007	#####	19	3	3	3	2	2	963	331	12	0.344	44.86	27.58
94	2007	#####	9	3	3	3	1	1	900	80	8	0.089	32.00	10.00
95	2007	#####	9	3	3	3	1	1	900	39	7	0.043	28.00	5.57
96	2007	#####	16	5	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
97	2007	#####	16	7	1	1	2	0	1800	33	6	0.018	12.00	5.50
98	2007	#####	10	1	3	3	1	1	660	266	11	0.403	60.00	24.18
99	2007	#####	11	2	3	3	2	1	510	79	9	0.155	63.53	8.78
100	2007	#####	11	2	3	3	2	1	510	47	7	0.092	49.41	6.71
101	2007	#####	15	2	3	3	1	1	1735	217	6	0.125	12.45	36.17
102	2007	#####	15	2	3	3	1	1	1735	331	15	0.191	31.12	22.07
103	2007	#####	17	6	3	3	2	1	1478	92	9	0.062	21.92	10.22
104	2007	8月1日	16	2	2	2	2	0	701	65	7	0.093	35.95	9.29
105	2007	8月1日	16	3	1	1	2	0	1192	71	6	0.060	18.12	11.83
106	2007	8月1日	17	6	3	3	2	1	1500	0	0	0.000	0.00	
107	2007	8月1日	18	1	3	3	1	1	1871	622	28	0.332	53.87	22.21
108	2007	8月1日	18	1	2	2	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
109	2007	8月3日	18	4	3	3	2	1	1192	293	15	0.246	45.30	19.53
110	2007	#####	9	12	1	1	2	0	982	11	3	0.011	11.00	3.67
111	2007	#####	10	5	1	1	1	0	1530	178	9	0.116	21.18	19.78
112	2007	#####	14	5	1	1	2	0	330	17	2	0.052	21.82	8.50
113	2007	#####	18	4	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
114	2007	#####	12	3	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
115	2007	#####	12	7	1	1	2	0	1803	38	4	0.021	7.99	9.50
116	2007	#####	15	9	1	1	2	0	1800	14	3	0.008	6.00	4.67

117	2007	#####	15	9	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
118	2007	#####	11	12	1	1	2	0	1200	14	2	0.012	6.00	7.00
119	2007	#####	11	12	1	1	2	0	1200	2	1	0.002	3.00	2.00
120	2007	#####	13	10	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
121	2007	#####	16	7	1	1	2	0	1800	19	3	0.011	6.00	6.33
122	2007	#####	16	3	1	1	2	0	1182	63	10	0.053	30.46	6.30
123	2007	#####	9	3	2	2	2	0	471	88	9	0.187	68.79	9.78
124	2007	7月1日	8	3	1	1	2	0	900	17	4	0.019	16.00	4.25
125	2007	7月1日	15	1	1	1	2	0	300	0	0	0.000	0.00	
126	2007	7月1日	15	2	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
127	2007	7月1日	18	4	1	1	2	0	1800	43	8	0.024	16.00	5.38
128	2007	7月1日	18	6	1	1	2	0	1800	41	7	0.023	14.00	5.86
129	2007	7月3日	8	9	1	1	2	0	1800	7	1	0.004	2.00	7.00
130	2007	7月3日	9	2	2	2	2	0	317	13	5	0.041	56.78	2.60
131	2007	7月3日	9	3	1	1	2	0	1232	33	7	0.027	20.45	4.71
132	2007	7月3日	9	1	1	1	2	0	1232	66	16	0.054	46.75	4.13
133	2007	7月3日	12	6	1	1	2	0	1800	26	4	0.014	8.00	6.50
134	2007	7月4日	11	8	1	1	1	0	1895	0	0	0.000	0.00	
135	2007	7月4日	13	2	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
136	2007	7月4日	14	7	1	1	1	0	1024	173	6	0.169	21.09	28.83
137	2007	7月4日	14	7	1	1	1	0	1005	73	2	0.073	7.16	36.50
138	2007	7月5日	13	5	1	1	2	0	1800	6	2	0.003	4.00	3.00
139	2007	7月5日	13	5	1	1	2	0	483	5	2	0.010	14.91	2.50
140	2007	7月7日	7	6	1	1	2	0	1534	23	5	0.015	11.73	4.60
141	2007	7月7日	7	6	1	1	2	0	1534	10	2	0.007	4.69	5.00
142	2007	7月7日	8	2	1	1	2	0	1764	9	2	0.005	4.08	4.50
143	2007	7月7日	8	4	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
144	2007	7月7日	9	12	1	1	2	0	952	6	1	0.006	3.78	6.00
145	2007	7月7日	16	3	1	1	2	0	1192	60	6	0.050	18.12	10.00
146	2007	7月7日	16	2	1	1	2	0	1230	63	15	0.051	43.90	4.20

147	2007	7月7日	17	3	1	1	1	0	1200	114	7	0.095	21.00	16.29
148	2007	7月8日	17	6	3	3	2	1	1483	316	24	0.213	58.26	13.17
149	2007	#####	7	3	1	1	2	0	1200	24	6	0.020	18.00	4.00
150	2007	#####	16	2	2	2	2	0	759	45	4	0.059	18.97	11.25
151	2007	#####	7	3	1	1	2	0	1200	37	10	0.031	30.00	3.70
152	2007	#####	9	4	3	3	2	1	1020	83	9	0.081	31.76	9.22
153	2007	#####	9	3	1	1	2	0	892	77	11	0.086	44.39	7.00
154	2007	#####	9	3	1	1	2	0	892	63	13	0.071	52.47	4.85
155	2007	#####	10	8	1	1	1	0	1210	26	7	0.021	20.83	3.71
156	2007	#####	10	8	1	1	1	0	1210	37	4	0.031	11.90	9.25
157	2007	#####	13	5	2	2	2	0	1262	86	16	0.068	45.64	5.38
158	2007	#####	9	3	2	2	2	0	471	30	5	0.064	38.22	6.00
159	2007	#####	17	4	1	1	2	0	801	33	8	0.041	35.96	4.13
160	2007	#####	18	8	1	1	2	0	900	14	4	0.016	16.00	3.50
161	2007	#####	19	8	1	1	1	0	1803	45	3	0.025	5.99	15.00
162	2007	#####	14	2	1	1	2	0	900	170	6	0.189	24.00	28.33
163	2007	#####	14	2	1	1	2	0	900	39	3	0.043	12.00	13.00
164	2007	#####	14	2	1	1	2	0	900	18	3	0.020	12.00	6.00
165	2007	#####	17	6	1	1	2	0	1080	0	0	0.000	0.00	
166	2007	#####	17	3	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
167	2007	#####	19	4	1	1	1	0	830	144	10	0.173	43.37	14.40
168	2007	#####	19	4	1	1	1	0	830	128	8	0.154	34.70	16.00
169	2007	#####	18	4	3	3	2	1	1192	248	19	0.208	57.38	13.05
170	2007	8月1日	7	6	1	1	2	0	1800	0	0	0.000	0.00	
171	2007	8月1日	11	8	1	1	1	0	1895	43	4	0.023	7.60	10.75
172	2007	8月2日	8	9	1	1	2	0	1800	17	4	0.009	8.00	4.25
173	2007	8月3日	12	12	1	1	2	0	1800	8	3	0.004	6.00	2.67
174	2007	8月3日	13	5	1	1	1	0	437	70	7	0.160	57.67	10.00
175	2007	8月3日	13	5	1	1	1	0	460	59	6	0.128	46.96	9.83
176	2007	8月3日	15	5	1	1	2	0	1746	35	5	0.020	10.31	7.00

177	2007	8月3日	19	1	2	2	2	0	780	30	5	0.038	23.08	6.00
178	2007	8月3日	19	7	1	1	2	0	1560	9	2	0.006	4.62	4.50
179	2007	8月3日	19	3	1	1	2	0	1307	22	6	0.017	16.53	3.67
180	2007	8月4日	13	7	1	1	2	0	1500	26	6	0.017	14.40	4.33

附录3 本研究观察警戒行为的361个麋鹿样本

Appendix 3 361 vigilance samples of Père David's deer

ID	Group ID	Year	Season	Age	Sex	Group size	Group size	Group type	Sample length/s	Vigilance time/s	Vigilance Proportion
1	1	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	39	0.033
2	2	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	0	0.000
3	3	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	13	0.011
4	4	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	0	0.000
5	5	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	14	0.012
6	6	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	152	0.127
7	7	2010	Summer	1	2	1	1	4	1200	0	0.000
8	8	2010	Summer	1	1	1	1	1	1200	200	0.167
9	9	2010	Summer	1	2	2	1	4	1200	35	0.029
10	10	2010	Summer	1	1	2	1	1	1200	36	0.030
11	11	2010	Summer	1	1	3	1	3	1200	10	0.008
12	11	2010	Summer	1	1	3	1	3	1200	49	0.041
13	12	2010	Summer	1	2	3	1	4	1200	50	0.041
14	13	2010	Summer	1	1	3	1	3	1200	0	0.000
15	13	2010	Summer	1	2	3	1	3	1200	20	0.017
16	14	2010	Summer	1	1	4	1	3	1200	10	0.008
17	15	2010	Summer	1	2	4	1	3	1200	0	0.000
18	15	2010	Summer	1	1	4	1	3	1200	27	0.022
19	16	2010	Summer	1	1	4	1	1	1200	0	0.000
20	16	2010	Summer	1	1	4	1	1	1200	4	0.003
21	17	2010	Summer	2	1	4	1	1	1200	49	0.041
22	17	2010	Summer	2	1	4	1	1	1200	80	0.066
23	17	2010	Summer	2	1	4	1	1	1200	118	0.099
24	17	2010	Summer	2	1	4	1	1	1200	169	0.141
25	18	2010	Summer	2	2	4	1	3	1200	0	0.000
26	18	2010	Summer	2	1	4	1	3	1200	91	0.076
27	19	2010	Summer	1	2	5	1	4	1200	29	0.024

28	20	2010 Summer	1	2	5	1	3	1200	17	0.014
29	21	2010 Summer	1	2	5	1	3	1200	12	0.010
30	22	2010 Summer	2	2	5	1	3	1200	10	0.009
31	22	2010 Summer	2	1	5	1	3	1200	329	0.274
32	23	2010 Summer	2	2	5	1	3	1200	27	0.023
33	23	2010 Summer	2	1	5	1	3	1200	52	0.043
34	24	2010 Summer	1	2	6	1	3	1200	16	0.013
35	25	2010 Summer	1	1	6	1	3	1200	14	0.012
36	25	2010 Summer	1	1	6	1	3	1200	20	0.017
37	26	2010 Summer	2	2	6	1	3	1200	0	0.000
38	26	2010 Summer	2	1	6	1	3	1200	3	0.003
39	27	2010 Summer	1	2	7	1	3	1200	68	0.057
40	28	2010 Summer	1	2	7	1	4	1200	44	0.037
41	29	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	3	0.002
42	29	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	13	0.011
43	29	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	16	0.014
44	29	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	38	0.032
45	30	2010 Summer	1	2	7	1	4	1200	0	0.000
46	31	2010 Summer	2	1	7	1	2	1200	52	0.043
47	31	2010 Summer	2	2	7	1	2	1200	85	0.071
48	31	2010 Summer	2	1	7	1	2	1200	149	0.124
49	31	2010 Summer	2	1	7	1	2	1200	169	0.140
50	32	2010 Summer	1	1	7	1	3	1200	0	0.000
51	32	2010 Summer	1	1	7	1	3	1200	2	0.002
52	32	2010 Summer	1	2	7	1	3	1200	23	0.019
53	33	2010 Summer	1	1	7	1	3	1200	4	0.003
54	34	2010 Summer	1	2	7	1	2	1200	0	0.000
55	35	2010 Summer	1	2	7	1	4	1200	25	0.021
56	36	2010 Summer	2	2	7	1	2	1200	0	0.000
57	36	2010 Summer	2	2	7	1	2	1200	29	0.024

58	36	2010 Summer	2	1	7	1	2	1200	31	0.026
59	36	2010 Summer	2	1	7	1	2	1200	66	0.055
60	37	2010 Summer	1	1	7	1	1	1200	0	0.000
61	37	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	0	0.000
62	37	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	0	0.000
63	37	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	0	0.000
64	37	2010 Summer	2	2	7	1	3	1200	0	0.000
65	38	2010 Summer	1	2	7	1	2	1200	47	0.039
66	39	2010 Summer	1	1	7	1	1	1200	58	0.048
67	40	2010 Summer	2	1	7	1	3	1200	0	0.000
68	40	2010 Summer	2	2	7	1	3	1200	0	0.000
69	41	2010 Summer	1	2	8	1	4	1200	27	0.023
70	42	2010 Summer	1	2	8	1	4	1200	25	0.021
71	43	2010 Summer	1	2	8	1	2	1200	0	0.000
72	44	2010 Summer	1	1	8	1	3	1200	9	0.008
73	44	2010 Summer	1	2	8	1	3	1200	32	0.027
74	45	2010 Summer	1	2	8	1	2	1200	0	0.000
75	45	2010 Summer	1	2	8	1	2	1200	30	0.025
76	45	2010 Summer	1	2	8	1	2	1200	170	0.142
77	46	2010 Summer	1	1	8	1	2	1200	3	0.003
78	47	2010 Summer	2	1	9	1	3	1200	0	0.000
79	47	2010 Summer	2	1	9	1	3	1200	0	0.000
80	47	2010 Summer	2	1	9	1	3	1200	22	0.018
81	48	2010 Summer	1	2	9	1	3	1200	39	0.033
82	49	2010 Summer	1	2	9	1	3	1200	4	0.003
83	50	2010 Summer	1	2	9	1	4	1200	0	0.000
84	51	2010 Summer	1	1	9	1	3	1200	0	0.000
85	52	2010 Summer	1	2	10	1	2	1200	0	0.000
86	53	2010 Summer	2	1	10	1	3	1200	0	0.000
87	53	2010 Summer	2	1	10	1	3	1200	0	0.000

88	53	2010 Summer	2	1	10	1	3	1200	0	0.000
89	53	2010 Summer	2	2	10	1	3	1200	0	0.000
90	54	2010 Summer	2	1	10	1	1	1200	0	0.000
91	54	2010 Summer	2	1	10	1	1	1200	0	0.000
92	54	2010 Summer	2	1	10	1	1	1200	10	0.009
93	55	2010 Summer	1	2	10	1	3	1200	87	0.072
94	56	2010 Summer	1	2	10	1	3	1200	628	0.523
95	57	2010 Summer	1	1	10	1	3	1200	12	0.010
96	57	2010 Summer	1	1	10	1	3	1200	32	0.027
97	58	2010 Summer	1	1	10	1	3	1200	0	0.000
98	58	2010 Summer	1	2	10	1	3	1200	0	0.000
99	58	2010 Summer	1	1	10	1	3	1200	19	0.016
100	59	2010 Summer	1	1	10	1	1	1200	0	0.000
101	59	2010 Summer	1	1	10	1	1	1200	18	0.015
102	59	2010 Summer	1	1	10	1	1	1200	142	0.118
103	60	2010 Summer	2	1	10	1	2	1200	25	0.021
104	60	2010 Summer	2	2	10	1	2	1200	52	0.043
105	60	2010 Summer	2	1	10	1	2	1200	58	0.048
106	60	2010 Summer	2	1	10	1	2	1200	95	0.079
107	61	2010 Summer	2	2	10	1	3	1200	0	0.000
108	61	2010 Summer	2	1	10	1	3	1200	32	0.026
109	62	2010 Summer	2	2	10	1	3	1200	34	0.028
110	62	2010 Summer	2	1	10	1	3	1200	266	0.222
111	63	2010 Summer	2	1	11	1	1	1200	0	0.000
112	63	2010 Summer	2	1	11	1	1	1200	7	0.006
113	63	2010 Summer	2	1	11	1	1	1200	15	0.013
114	64	2010 Summer	1	2	11	2	4	1200	18	0.015
115	65	2010 Summer	1	2	11	2	4	1200	36	0.030
116	66	2010 Summer	1	2	11	2	4	1200	18	0.015
117	66	2010 Summer	1	2	11	2	4	1200	120	0.100

118	67	2010 Summer	1	2	11	2	2	1200	8	0.007
119	68	2010 Summer	2	1	11	1	2	1200	0	0.000
120	68	2010 Summer	2	2	11	1	2	1200	0	0.000
121	68	2010 Summer	2	2	11	1	2	1200	0	0.000
122	68	2010 Summer	2	1	11	1	2	1200	31	0.026
123	69	2010 Summer	2	2	11	1	3	1200	0	0.000
124	69	2010 Summer	2	1	11	1	3	1200	2	0.002
125	69	2010 Summer	2	1	11	1	3	1200	7	0.005
126	69	2010 Summer	2	1	11	1	3	1200	15	0.013
127	70	2010 Summer	1	2	12	2	2	1200	39	0.033
128	70	2010 Summer	1	1	12	2	2	1200	85	0.071
129	71	2010 Summer	1	2	13	2	3	1200	159	0.132
130	72	2010 Summer	1	1	13	2	1	1200	0	0.000
131	73	2010 Summer	1	1	13	2	1	1200	13	0.011
132	74	2010 Summer	1	2	13	2	4	1200	95	0.079
133	74	2010 Summer	1	2	13	2	4	1200	114	0.095
134	75	2010 Summer	1	1	13	2	1	1200	10	0.008
135	76	2010 Summer	2	1	13	1	3	1200	0	0.000
136	76	2010 Summer	2	2	13	1	3	1200	47	0.039
137	76	2010 Summer	2	1	13	1	3	1200	49	0.041
138	77	2010 Summer	2	2	13	1	3	1200	0	0.000
139	77	2010 Summer	2	1	13	1	3	1200	11	0.009
140	78	2010 Summer	1	2	14	2	3	1200	42	0.035
141	79	2010 Summer	2	1	14	2	3	1200	0	0.000
142	79	2010 Summer	2	1	14	2	3	1200	0	0.000
143	79	2010 Summer	2	1	14	2	3	1200	0	0.000
144	79	2010 Summer	2	2	14	2	3	1200	0	0.000
145	80	2010 Summer	2	2	14	2	3	1200	0	0.000
146	80	2010 Summer	2	1	14	2	3	1200	58	0.048
147	81	2010 Summer	2	1	14	2	3	1200	0	0.000

148	81	2010 Summer	2	2	14	2	3	1200	0	0.000
149	82	2010 Summer	2	1	15	2	3	1200	0	0.000
150	82	2010 Summer	2	1	15	2	3	1200	0	0.000
151	82	2010 Summer	2	2	15	2	3	1200	0	0.000
152	82	2010 Summer	2	1	15	2	3	1200	23	0.019
153	83	2010 Summer	2	1	15	2	1	1200	0	0.000
154	83	2010 Summer	2	1	15	2	1	1200	0	0.000
155	83	2010 Summer	2	1	15	2	1	1200	0	0.000
156	83	2010 Summer	2	1	15	2	1	1200	43	0.036
157	84	2010 Summer	1	1	16	2	1	1200	14	0.012
158	84	2010 Summer	1	1	16	2	1	1200	50	0.042
159	85	2010 Summer	1	2	16	2	3	1200	101	0.084
160	86	2010 Summer	2	1	16	2	3	1200	0	0.000
161	86	2010 Summer	2	2	16	2	3	1200	0	0.000
162	86	2010 Summer	2	1	16	2	3	1200	2	0.002
163	87	2010 Summer	1	2	17	2	2	1200	0	0.000
164	87	2010 Summer	1	2	17	2	2	1200	0	0.000
165	88	2010 Summer	1	2	17	2	3	1200	166	0.138
166	89	2010 Summer	1	2	17	2	2	1200	74	0.062
167	90	2010 Summer	2	1	17	2	2	1200	0	0.000
168	90	2010 Summer	2	1	17	2	2	1200	0	0.000
169	90	2010 Summer	2	2	17	2	2	1200	12	0.010
170	90	2010 Summer	2	1	17	2	2	1200	44	0.036
171	91	2010 Summer	1	2	17	2	3	1200	0	0.000
172	91	2010 Summer	1	1	17	2	3	1200	134	0.112
173	92	2010 Summer	2	1	17	2	2	1200	0	0.000
174	92	2010 Summer	2	1	17	2	2	1200	0	0.000
175	92	2010 Summer	2	1	17	2	2	1200	0	0.000
176	92	2010 Summer	2	2	17	2	2	1200	0	0.000
177	93	2010 Summer	1	2	18	2	3	1200	62	0.052

178	94	2010 Summer	1	2	18	2	2	1200	0	0.000
179	94	2010 Summer	1	2	18	2	2	1200	0	0.000
180	95	2010 Summer	2	1	19	2	2	1200	0	0.000
181	95	2010 Summer	2	1	19	2	2	1200	0	0.000
182	95	2010 Summer	2	1	19	2	2	1200	0	0.000
183	95	2010 Summer	2	2	19	2	2	1200	0	0.000
184	96	2010 Summer	2	1	20	2	1	1200	0	0.000
185	96	2010 Summer	2	1	20	2	1	1200	0	0.000
186	96	2010 Summer	2	1	20	2	1	1200	0	0.000
187	96	2010 Summer	2	1	20	2	1	1200	0	0.000
188	97	2010 Summer	2	1	20	2	2	1200	0	0.000
189	97	2010 Summer	2	1	20	2	2	1200	0	0.000
190	97	2010 Summer	2	1	20	2	2	1200	0	0.000
191	97	2010 Summer	2	2	20	2	2	1200	0	0.000
192	98	2010 Summer	2	1	21	2	3	1200	0	0.000
193	98	2010 Summer	2	2	21	2	3	1200	0	0.000
194	99	2010 Summer	2	2	22	2	3	1200	0	0.000
195	99	2010 Summer	2	1	22	2	3	1200	79	0.066
196	99	2010 Summer	2	1	22	2	3	1200	318	0.265
197	100	2010 Summer	2	2	22	2	3	1200	8	0.007
198	100	2010 Summer	2	1	22	2	3	1200	28	0.024
199	100	2010 Summer	2	1	22	2	3	1200	82	0.069
200	101	2010 Summer	2	2	22	2	3	1200	0	0.000
201	101	2010 Summer	2	1	22	2	3	1200	5	0.004
202	102	2010 Summer	1	2	23	3	3	1200	335	0.279
203	103	2010 Summer	1	2	23	3	3	1200	138	0.115
204	104	2010 Summer	1	1	23	3	2	1200	0	0.000
205	105	2010 Summer	2	1	24	2	2	1200	0	0.000
206	105	2010 Summer	2	2	24	2	2	1200	0	0.000
207	105	2010 Summer	2	1	24	2	2	1200	5	0.004

208	105	2010 Summer	2	1	24	2	2	1200	13	0.011
209	106	2010 Summer	1	2	27	3	2	1200	0	0.000
210	107	2010 Summer	2	1	28	3	2	1200	0	0.000
211	107	2010 Summer	2	1	28	3	2	1200	0	0.000
212	107	2010 Summer	2	1	28	3	2	1200	0	0.000
213	107	2010 Summer	2	2	28	3	2	1200	0	0.000
214	108	2010 Summer	2	1	28	3	2	1200	0	0.000
215	108	2010 Summer	2	1	28	3	2	1200	0	0.000
216	108	2010 Summer	2	1	28	3	2	1200	5	0.004
217	109	2010 Summer	2	1	28	3	3	1200	0	0.000
218	109	2010 Summer	2	2	28	3	3	1200	0	0.000
219	109	2010 Summer	2	1	28	3	3	1200	19	0.016
220	110	2010 Summer	2	1	30	3	1	1200	0	0.000
221	110	2010 Summer	2	1	30	3	1	1200	0	0.000
222	110	2010 Summer	2	1	30	3	1	1200	0	0.000
223	110	2010 Summer	2	1	30	3	1	1200	0	0.000
224	111	2010 Summer	1	1	31	3	2	1200	265	0.220
225	112	2010 Summer	2	1	31	3	3	1200	0	0.000
226	112	2010 Summer	2	1	31	3	3	1200	0	0.000
227	112	2010 Summer	2	2	31	3	3	1200	0	0.000
228	113	2010 Summer	2	1	32	3	2	1200	0	0.000
229	113	2010 Summer	2	1	32	3	2	1200	0	0.000
230	113	2010 Summer	2	1	32	3	2	1200	0	0.000
231	113	2010 Summer	2	2	32	3	2	1200	0	0.000
232	114	2010 Summer	2	2	32	3	3	1200	0	0.000
233	114	2010 Summer	2	1	32	3	3	1200	22	0.019
234	114	2010 Summer	2	1	32	3	3	1200	53	0.044
235	115	2010 Summer	1	2	33	3	3	1200	54	0.045
236	115	2010 Summer	1	2	33	3	3	1200	59	0.049
237	116	2010 Summer	2	2	34	3	2	1200	168	0.140

238	116	2010 Summer	2	1	34	3	2	1200	192	0.160
239	116	2010 Summer	2	1	34	3	2	1200	198	0.165
240	116	2010 Summer	2	1	34	3	2	1200	421	0.351
241	117	2010 Summer	1	1	37	3	2	1200	229	0.190
242	118	2010 Summer	1	2	43	3	2	1200	0	0.000
243	118	2010 Summer	1	2	43	3	2	1200	0	0.000
244	118	2010 Summer	1	2	43	3	2	1200	50	0.041
245	119	2010 Summer	1	2	44	3	2	1200	306	0.255
246	120	2010 Summer	1	2	44	3	2	1200	120	0.100
247	121	2010 Summer	2	1	44	3	3	1200	0	0.000
248	121	2010 Summer	2	2	44	3	3	1200	0	0.000
249	121	2010 Summer	2	1	44	3	3	1200	33	0.028
250	122	2010 Summer	2	1	47	3	3	1200	0	0.000
251	122	2010 Summer	2	1	47	3	3	1200	0	0.000
252	122	2010 Summer	2	2	47	3	3	1200	0	0.000
253	123	2010 Summer	2	1	55	3	3	1200	0	0.000
254	123	2010 Summer	2	2	55	3	3	1200	0	0.000
255	123	2010 Summer	2	1	55	3	3	1200	40	0.034
256	124	2010 Summer	2	1	57	3	3	1200	0	0.000
257	124	2010 Summer	2	2	57	3	3	1200	0	0.000
258	124	2010 Summer	2	1	57	3	3	1200	50	0.042
259	125	2010 Summer	2	1	59	3	3	1200	0	0.000
260	125	2010 Summer	2	1	59	3	3	1200	11	0.009
261	125	2010 Summer	2	2	59	3	3	1200	73	0.061
262	126	2010 Summer	1	2	61	3	2	1200	22	0.019
263	127	2010 Summer	1	2	61	3	2	1200	15	0.012
264	128	2010 Summer	1	2	61	3	2	1200	2	0.001
265	129	2010 Summer	1	2	61	3	2	1200	0	0.000
266	129	2010 Summer	1	2	61	3	2	1200	5	0.004
267	129	2010 Summer	1	2	61	3	2	1200	13	0.011

268	130	2010 Summer	1	2	65	3	3	1200	0	0.000
269	130	2010 Summer	1	2	65	3	3	1200	179	0.149
270	131	2010 Summer	2	1	66	3	3	1200	0	0.000
271	131	2010 Summer	2	2	66	3	3	1200	0	0.000
272	131	2010 Summer	2	1	66	3	3	1200	12	0.010
273	132	2010 Summer	2	1	67	3	3	1200	0	0.000
274	132	2010 Summer	2	2	67	3	3	1200	0	0.000
275	132	2010 Summer	2	1	67	3	3	1200	23	0.019
276	133	2010 Summer	1	2	85	3	3	1200	65	0.054
277	134	2010 Summer	1	2	87	3	3	1200	47	0.039
278	135	2010 Summer	1	2	100+	3	2	1200	0	0.000
279	135	2010 Summer	1	2	100+	3	2	1200	6	0.005
280	136	2011 Summer	2	1	6	1	1	1200	90	0.075
281	136	2011 Summer	2	1	6	1	1	1200	130	0.108
282	136	2011 Summer	2	1	6	1	1	1200	349	0.291
283	136	2011 Summer	2	1	6	1	1	1200	349	0.291
284	137	2011 Summer	2	2	9	1	4	1200	3	0.003
285	137	2011 Summer	2	2	9	1	4	1200	4	0.003
286	137	2011 Summer	2	2	9	1	4	1200	51	0.043
287	137	2011 Summer	2	2	9	1	4	1200	60	0.050
288	138	2011 Summer	2	1	16	2	2	1200	6	0.005
289	138	2011 Summer	2	2	16	2	2	1200	61	0.051
290	138	2011 Summer	2	2	16	2	2	1200	85	0.071
291	138	2011 Summer	2	1	16	2	2	1200	103	0.086
292	139	2011 Summer	1	2	19	2	2	1200	250	0.208
293	139	2011 Summer	1	2	19	2	2	1200	280	0.233
294	139	2011 Summer	1	2	19	2	2	1200	339	0.283
295	139	2011 Summer	1	2	19	2	2	1200	339	0.283
296	140	2011 Summer	2	2	28	3	2	1200	0	0.000
297	140	2011 Summer	2	2	28	3	2	1200	2	0.002

298	140	2011 Summer	2	2	28	3	2	1200	12	0.010
299	140	2011 Summer	2	2	28	3	2	1200	14	0.012
300	141	2011 Summer	2	1	32	3	2	1200	0	0.000
301	141	2011 Summer	2	2	32	3	2	1200	3	0.003
302	141	2011 Summer	2	2	32	3	2	1200	87	0.073
303	141	2011 Summer	2	1	32	3	2	1200	116	0.097
304	141	2011 Summer	1	1	33	3	2	1200	2	0.002
305	141	2011 Summer	1	2	33	3	2	1200	12	0.010
306	141	2011 Summer	1	1	33	3	2	1200	38	0.032
307	141	2011 Summer	1	2	33	3	2	1200	52	0.043
308	142	2011 Summer	2	1	35	3	2	1200	0	0.000
309	142	2011 Summer	2	1	35	3	2	1200	30	0.025
310	142	2011 Summer	2	1	35	3	2	1200	110	0.092
311	142	2011 Summer	2	1	35	3	2	1200	127	0.106
312	143	2011 Summer	2	1	39	3	2	1200	0	0.000
313	143	2011 Summer	2	2	39	3	2	1200	6	0.005
314	143	2011 Summer	2	2	39	3	2	1200	48	0.040
315	143	2011 Summer	2	1	39	3	2	1200	158	0.132
316	144	2011 Summer	1	1	41	3	2	1200	0	0.000
317	144	2011 Summer	1	2	41	3	2	1200	0	0.000
318	144	2011 Summer	1	2	41	3	2	1200	30	0.025
319	144	2011 Summer	1	1	41	3	2	1200	33	0.028
320	145	2011 Summer	2	1	57	3	3	1200	10	0.008
321	145	2011 Summer	2	1	57	3	3	1200	40	0.033
322	145	2011 Summer	2	1	57	3	3	1200	247	0.206
323	145	2011 Summer	2	2	57	3	3	1200	301	0.251
324	146	2011 Summer	1	1	62	3	2	1200	0	0.000
325	146	2011 Summer	1	2	62	3	2	1200	0	0.000
326	146	2011 Summer	1	1	62	3	2	1200	29	0.024
327	146	2011 Summer	1	2	62	3	2	1200	57	0.048

328	147	2011 Summer	2	1	66	3	3	1200	10	0.008
329	147	2011 Summer	2	1	66	3	3	1200	10	0.008
330	148	2011 Summer	1	2	66	3	2	1200	2	0.002
331	148	2011 Summer	1	1	66	3	2	1200	15	0.013
332	148	2011 Summer	1	2	66	3	2	1200	126	0.105
333	148	2011 Summer	1	1	66	3	2	1200	148	0.123
334	149	2011 Summer	2	1	87	3	2	1200	0	0.000
335	149	2011 Summer	2	1	87	3	2	1200	8	0.007
336	149	2011 Summer	2	1	87	3	2	1200	63	0.053
337	149	2011 Summer	2	1	87	3	2	1200	151	0.126
338	150	2011 Summer	1	1	88	3	2	1200	0	0.000
339	150	2011 Summer	1	2	88	3	2	1200	17	0.014
340	150	2011 Summer	1	1	88	3	2	1200	22	0.018
341	150	2011 Summer	1	2	88	3	2	1200	46	0.038
342	151	2011 Summer	1	1	108	3	2	1200	0	0.000
343	151	2011 Summer	1	2	108	3	2	1200	9	0.008
344	151	2011 Summer	1	1	108	3	2	1200	12	0.010
345	151	2011 Summer	1	2	108	3	2	1200	47	0.039
346	152	2011 Summer	2	1	109	3	2	1200	0	0.000
347	152	2011 Summer	2	1	109	3	2	1200	14	0.012
348	152	2011 Summer	2	1	109	3	2	1200	59	0.049
349	152	2011 Summer	2	2	109	3	2	1200	222	0.185
350	153	2011 Summer	2	1	113	3	2	1200	45	0.038
351	153	2011 Summer	2	1	113	3	2	1200	64	0.053
352	153	2011 Summer	2	1	113	3	2	1200	69	0.058
353	153	2011 Summer	2	1	113	3	2	1200	211	0.176
354	154	2011 Summer	1	1	116	3	2	1200	0	0.000
355	154	2011 Summer	1	2	116	3	2	1200	5	0.004
356	154	2011 Summer	1	2	116	3	2	1200	12	0.010
357	154	2011 Summer	1	2	116	3	2	1200	40	0.033

358	155	2011 Summer	1	2	303	3	2	1200	96	0.080
359	155	2011 Summer	1	1	303	3	2	1200	130	0.108
360	155	2011 Summer	1	1	303	3	2	1200	139	0.116
361	155	2011 Summer	1	1	303	3	2	1200	150	0.125

•数据论文•

阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成

贾 龙^{1*} 任国栋² 张建英³¹ (宁夏大学农学院, 银川 750021)² (河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)³ (宁夏大学生命科学学院, 银川 750021)

Diversity and faunal composition of Tenebrionidae from Alxa Plateau

Long Jia^{1*}, Guodong Ren², Jianying Zhang³¹ College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021² College of Life Science, Hebei University, Baoding, Hebei 071002³ College of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021

拟步甲科昆虫对环境的适应能力极强, 在全球广泛分布, 目前已知约20,000种, 隶属于9亚科97族, 约2,300属(Matthews et al, 2010; Bouchard et al, 2011)。

阿拉善高原位于贺兰山以西、甘肃新疆边界以东的沙漠、戈壁集中分布区; 北至中蒙国界线, 东至贺兰山, 西至马鬃山地东端, 南部边界以阿拉善地台边缘为界, 包括龙首山、合黎山, 其南缘邻接河西走廊(胡乔木, 1992)。东西跨度800 km, 南北跨度400 km。包含三大沙漠: 腾格里、巴丹吉林、乌兰布和; 地势东南高, 西北低。地处温带荒漠地区, 气候干燥, 降水量少, 蒸发强烈。土壤养分含量低、松散。植被稀疏, 组成以耐干旱和盐碱的小灌木为主(龚家栋, 2005; 周志宇等, 2009; 陈曦, 2010)。按照张荣祖(2011)对中国动物地理区划的划分方法, 阿拉善高原应属于古北界蒙新区西部荒漠亚区。拟步甲科昆虫在本区广泛分布、发育、繁衍, 使得研究该区域的拟步甲组成与区系, 乃至地理分布、适应性等具有现实意义。

1 研究方法

本项目研究方法主要包括标本来源、分类系统的完善两部分。

标本来源: 项目团队在阿拉善高原长期采集并

制成标本(附录1); 河北大学博物馆馆藏标本; 少量国内科研单位及个人借阅、赠送、交换等获得标本。

以Bouchard等(2011)及Löbl等(2008)的最新分类系统、目录为原则, 统计阿拉善高原拟步甲科物种的分类及分布名录。参考张荣祖(2011), 研究区系构成和分布特征。

观察、鉴定已有标本, 并参阅相关著作, 如《古北区鞘翅目名录 第5卷》、《中国土壤拟步甲志(第二卷 鼈甲类)》、《中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫》、《中国土壤拟步甲志(第一卷 土甲类)》等, 得到每种拟步甲的分布地。

2 结果与分析

2.1 物种多样性

阿拉善高原拟步甲有5亚科23族52属206种(亚种)(表1, 附录2), 分别占世界已知拟步甲亚科、族、属、种(亚种)的55.6%、23.7%、2.3%、1.0%; 与中国已知拟步甲7亚科46族约254属1,810种(亚种)相比较, 分别占71.4%、50.0%、20.5%、11.4%, 种数较为丰富。

从各亚科物种组成来看, 拟步甲亚科10族(43.5%) 25属(48.1%) 96种(46.6%) > 漠甲亚科7族(30.4%) 21属(40.4%) 92种(44.7%) > 伪叶甲亚科3族(13.0%) 3属(5.8%) 9种(4.4%) > 朽木甲亚科1族

收稿日期: 2016-04-18; 接受日期: 2016-06-27

基金项目: 宁夏大学科学研究基金(ZR1453)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jlwa123@163.com

表1 阿拉善高原拟步甲的种类构成及区系成分
Table 1 Species composition and geographical elements of tenebrionid fauna in the Alxa Plateau

亚科 Subfamilies	族数(占中国已知 族的比例) No. of tribe (Per- centage of known tribes in China)	属数 No. of genus	物种数 No. of species	区系成分 Geographical elements				
				古北 P	东洋 O	古北 + 东洋 P + O	特有成分 Endemic	其他 Others
朽木甲亚科 Alleculinae	1 (50.0%)	1	6	5	0	1	1	0
漠甲亚科 Pimeliinae	7 (63.6%)	21	92	92	0	0	20	0
伪叶甲亚科 Lagriinae	3 (50.0%)	3	9	4	0	5	3	0
拟步甲亚科 Tenebrioninae	10 (66.7%)	25	96	83	0	5	17	8
菌甲亚科 Diaperinae	2 (25%)	2	3	2	0	0	0	1
总计 Total	23	52	206	186	0	11	41	9

P: Palearctic realm; O: Oriental realm.

(4.3%) 1属(1.9%) 6种(2.9%) > 菌甲亚科2族(8.7%) 2属(3.8%) 3种(1.5%); 拟步甲亚科和漠甲亚科合计 188种, 占阿拉善高原拟步甲科昆虫总数的91.3%, 共同构成了阿拉善高原拟步甲昆虫的主体(附录3)。

各族所含物种数顺序依次为: 鳖甲族(6属54种) > 土甲族(10属48种) > 毳甲族(4属26种) > 漠甲族(8属24种) > 刺甲族(3属9种) > 背毛甲族(3属8种) > 栉甲族 (1属6种) > 拟粉甲族 (2属4种) = 伪叶甲族(1属4种) = 刺足甲族(1属4种) > 粉甲族(1属2种) = 龙甲族(1属2种) = 砚甲族(1属2种) = 小黑甲族(1属2种) = 拟步甲族(1属2种) = 隐甲族(1属2种) > 掘甲族(1属1种) = 长足甲族(1属1种) = 莱甲族(1属1种) = 扁足甲族(1属1种) = 褐甲族(1属1种) = 扁荆甲族(1属1种) = 菌甲族(1属1种)。

各属所含物种数差异明显, 单种属有18属, 占总属数的34.6%; 寡种属(含有2–5种)有26个, 占总属数的50.0%; 多种属(含有6种及以上)有8个, 占总属数的15.4%(图1)。单种属和寡种属占优势。毳甲属(*Blaps*)在本区分布23种, 数量最丰富; 其次为东鳖甲属(*Anatolica*), 分布22种。阿拉善高原特有属稀少, 仅有1属, 为景土甲属(*Jintaium*), 该属为单种属。

2.2 与世界动物地理区的关系

古北界成分最多, 有186种, 占阿拉善高原拟步甲总物种数的90.3%, 其次为古北 + 东洋成分(11种, 5.3%), 其余成分所占比例均不足5%。世界范围内广泛分布的仓储害虫数量为6种, 占总数的2.9%。由此可见, 阿拉善拟步甲区系与古北界关系最近, 而与其余5界关系较远, 与东洋界仅11个共有种, 与新北界仅1个共有种, 跨界组合2种, 甚至

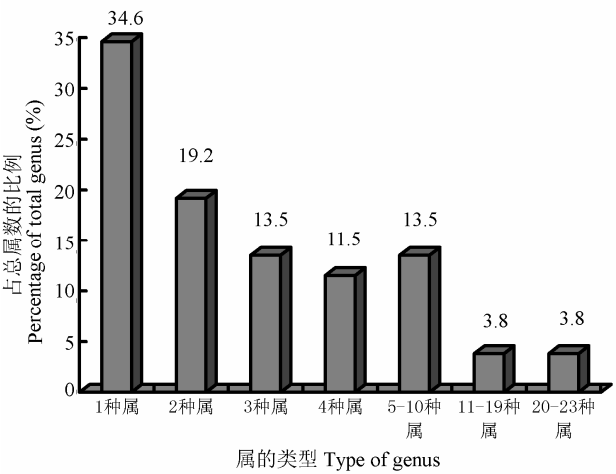


图1 阿拉善高原拟步甲科各属的大小及其所占的比例
Fig. 1 The size (i.e. the number of species) of tenebrionid genera and their percentages in the Alxa Plateau

与非洲界、新热带界无共有种(表2)。该数据表明, 阿拉善高原拟步甲跨大区分布者极少, 绝大多数为狭域地理种。

2.3 与中国动物地理区的关系

阿拉善高原拟步甲物种在中国7个动物地理区的分布情况如下: 蒙新区52属(100%) 206种(100%) > 华北区29属(55.8%) 56种(27.2%) > 青藏区15属(28.8%) 33种(16.0%) > 华中区9属(17.3%) 14种(6.8%) > 西南区8属(15.4%) 14种(6.8%) > 东北区9属(17.3%) 12种(5.8%) > 华南区6属(11.5%) 9种(4.4%)(附录4)。

阿拉善高原目前已知拟步甲物种在中国7个动物地理区的分布型情况见表3。

由各个物种在中国7个动物地理区跨区的分布

表2 阿拉善高原拟步甲在世界动物区系中的归属
Table 2 Position of Tenebrionidae from the Alxa Plateau in the world fauna

区系地理成分 Composition of animal geographical fauna						种数	占总数的
古北界	东洋界	非洲界	澳洲界	新北界	新热带界	No. of species	百分率
Palearctic Realm	Oriental Realm	Afrotropical Realm	Australian Realm	Nearctic Realm	Neotropical Realm		Percentage (%)
+						186	90.3
+	+					11	5.3
+	+			+		1	0.5
+	+		+	+		1	0.5
+				+		1	0.5
+	+	+	+	+	+	6	2.9
合计 Total						206	100

表3 阿拉善高原拟步甲在中国动物区系中的归属
Table 3 Position of Tenebrionidae from the Alxa Plateau in Chinese fauna

中国动物地理区 Geographical regions of fauna in China							种数	占总数的百分率
东北区	华北区	蒙新区	青藏区	西南区	华中区	华南区	No. of species	Percentage (%)
Northeast Region	North China Region	Mongo-Xinjiang Region	Qinghai-Tibet Region	Southwest Region	Central China Region	South China Region		
		+					130	63.1
		+	+				19	9.2
	+	+					30	14.6
+		+					1	0.5
+	+	+					1	0.5
+	+	+	+	+	+	+	6	2.9
	+	+	+				6	2.9
	+	+	+	+			2	1.0
+	+	+				+	1	0.5
	+	+		+	+	+	1	0.5
	+	+		+			1	0.5
	+	+			+		3	1.5
+	+	+		+	+	+	1	0.5
	+	+		+	+		2	1.0
+	+	+		+			1	0.5
+	+	+			+		1	0.5
合计 Total							206	100

型分析,阿拉善高原拟步甲与我国7个区的关系依次为:蒙新区单区分布型39属(75.0%) 130种(63.1%) > 阿拉善特有分布型41种(19.9%) > (华北区 + 蒙新区)分布型17属(32.7%)30种(14.6%) > (蒙新区 + 青藏区)分布型8属(15.4%) 19种(9.2%) > (东北区 + 华北区 + 蒙新区 + 青藏区 + 西南区 + 华中区 + 华南区)分布型4属(7.7%) 6种(2.9%) = (华北区+蒙新区+青藏区)分布型3属(5.8%) 6种(2.9%)。蒙新区成分最多,共计206种,隶属于52属,属种数均占本高原拟步甲属、种总数的比例为

100%;其次为华北区成分,属种数均分别占本高原拟步甲属、种总数的比例为27.2%和55.8%。

参考文献

Bouchard P, Bousquet Y, Davies AE, Alonso-Zarazaga MA, Lawrence JF, Lyal CHC, Newton AF, Reid CAM, Schmitt M, Ślipiński SA, Smith ABT (2011) Family-group names in Coleoptera (Insecta). ZooKeys, 88, 1–972. doi: 10.3897/zookeys.88.807
Chen X (2010) Physical Geography of Arid Land in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈曦 (2010) 中国干旱区自然地理. 科学出版社, 北京.]

- Gong JD (2005) Idea for integrated control of eco-environment in Alxa Region. *Journal of Desert Research*, 25, 98–105. (in Chinese with English abstract) [龚家栋 (2005) 阿拉善地区生态环境综合治理意见. *中国沙漠*, 25, 98–105.]
- Hu QM (1992) *Encyclopedia of China: Geography of China*. Encyclopedia of China Publishing House, Beijing. (in Chinese) [胡乔木 (1992) 中国大百科全书: 中国地理. 中国大百科全书出版社, 北京.]
- Löbl I, Merkl O, Ando K, Bouchard P, Egorov LV, Iwan D, Lillig M, Masumoto K, Nabozhenko M, Novák V, Petterson R, Schawaller W, Soldati F (2008) *Catalogue of Palaearctic Coleoptera*, vol. 5, Tenebrionoidea. Apollo Books, Stenstrup.
- Matthews EG, Lawrence JF, Bouchard P, Steiner WE, Ślipiński SA (2010. 11. 14) Tenebrionidae Latreille, 1802. In: *Handbook of Zoology. A Natural History of the Phyla of the Animal Kingdom. Volume IV: Arthropoda: Insecta. Part 38. Coleoptera, Beetles. Volume 2: Systematics (Part 2)*(eds Leschen RAB, Beutel RG, Lawrence JF), pp. 574–659. Walter de Gruyter, Berlin.
- Zhang RZ (2011) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zhou ZY, Yan SY, Qin Y, Zou LN (2009) The characters of shrubby diversity of Alxa arid desert region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23(9), 146–150. (in Chinese with English abstract) [周志宇, 颜淑云, 秦彧, 邹丽娜 (2009) 阿拉善干旱荒漠区灌木多样性的特点. *干旱区资源与环境*, 23(9), 146–150.]

(责任编辑: 黄晓磊 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 阿拉善高原拟步甲主要采集时间及路线

Appendix 1 The collecting time and route of tenebrionid specimens in the Alxa Plateau
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016106-1.pdf>

附录2 阿拉善高原拟步甲地理分布

Appendix 2 District distribution of tenebrionid beetles in the Alxa Plateau
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016106-2.pdf>

附录3 阿拉善高原拟步甲的亚科、族、属(包含种数)

Appendix 3 The subfamily, tribe, genera and number of tenebrionid specimens in the Alxa Plateau
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016106-3.pdf>

附录4 阿拉善高原拟步甲在中国动物区系中的归属及其区域分布

Appendix 4 Position of tenebrionid beetles in the Alxa Plateau in Chinese fauna and their district distribution
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016106-4.pdf>

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

附录1 阿拉善高原拟步甲主要采集时间及路线

Appendix 1 The collecting time and route of tenebrionid specimens in the Alxa Plateau

时间	考察人员	考察路线
1985.05.24–05.30	任国栋	宁夏: 贺兰山林区
1986.07.12–08.28	任国栋	宁夏: 中卫→内蒙古(腾格里沙漠东部)
1987.05.24–05.30	任国栋	宁夏: 平罗县→(贺兰山东麓)
1987.07.16–08.24	任国栋	内蒙古: 阿拉善左→右旗→巴丹吉林沙漠
1988.06.05–06.14	任国栋	宁夏: 贺兰山滚钟口→盐池县
1988.07.15–07.29	任国栋	内蒙古: 阿拉善左旗→右旗→巴丹吉林沙漠(塔木素)→甘肃(民勤)→武威→宁夏(中卫)
1988.10.03–11.05	任国栋	宁夏: 石嘴山大武口→彭阳灯盏山→海原→中宁
1989.04.09–10.06	任国栋	内蒙古: 阿拉善左旗鄂托克旗→宁夏(中卫)→同心→贺兰山→平罗→海原→泾源→永宁→陶乐→石嘴山→隆德→盐池
1990.07.05–07.25	任国栋、马峰、孙全有	宁夏: 贺兰山林区→盐池县→中卫→中宁→石嘴山→大武口→海原→平罗县(贺兰山东麓)→同心→灵武→吴忠→银川
1990.10.07–10.30	任国栋	宁夏: 中卫
1991.07.28–08.05	任国栋、于有志、马峰	内蒙古: 巴彦淖尔→乌拉特中→后旗→乌海→巴丹吉林沙漠→阿拉善左→右旗→巴丹吉林沙漠(塔木素)
1991.08.16–09.27	任国栋、于有志、马峰	宁夏: 中卫→陶乐→甘肃: 武威→山丹→金塔→三元→高台; 内蒙古(阿拉善: 乌力吉)→苏海图→巴彦浩特→额济纳旗
1992.05.15–05.19	于有志、马峰	宁夏: 固原→彭阳→灵武
1992.07.19–08.27	任国栋、马峰	甘肃: 皋兰→兰州→酒泉→嘉峪关→玉门→敦煌→柳园→安西→清水
1995.07.11–08.13	任国栋、于有志	青海: 祁连→甘肃(肃南)→酒泉→玉门→马鬃山→安西→高台→山丹→武威
1996.07.25–08.10	王新谱、吴振邦	甘肃(敦煌)
1998.05.02–05.26	任国栋、王新谱	甘肃: (永登)→民勤→周家井→金昌→张掖→肃南→酒泉→安西→敦煌→阿克塞→内蒙古(阿拉善右旗)→额济纳旗
2006.7.20–8.20	任国栋、巴义彬	内蒙古: (额济纳旗)→阿拉善→甘肃(嘉峪关)→马鬃山→玉门→景泰
2007.07.14–08.22	张承礼	甘肃: (肃南县)→榆中县
2008.07.6–08.16	张承礼	内蒙古: 乌拉特中旗(乌加河镇)→川井镇→石兰计乡→赛镇→北山→风水岭)→乌海(市区)→火车站机务段)→额济纳旗→甘肃: 酒泉→肃南县祈山镇→安西县→瓜洲→玉门→清水县→永昌县→宁夏: 中卫→中宁→石嘴山
2009.06.06–07.10	张承礼、潘昭	宁夏: 大武口→平罗
2009.07.02–08.14	任国栋、侯文君、巴义彬、周勇	宁夏: 六盘山→同心
2010.07.22–08.05	任国栋、侯文君、于有志、贾龙	内蒙古: 大武口(清水沟)→阿左旗(宗别立)→查哈尔→阿左旗城郊→巴润别立→边关口→古拉本→扎哈乌苏→北寺→阿左旗北部→豪斯布尔都→巴彦诺日公→苏宏图→乌力吉→巴彦诺日公)→贺兰山(哈拉乌)→阿右旗(孟根布拉格)→雅布赖→雅布赖山前→莎日台→额肯呼都格镇→努日盖→呼和浩特→喇嘛井→塔木素→筭布日→固日班图拉格→苏海图)→额济纳旗(东风镇)→达来呼布→策克口岸→苏泊淖尔→马鬃山→马宗镇→呼鲁赤古特→雅干)→宁夏: 银川(镇北堡)→甘肃: 金塔(鼎

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

		新→金塔县城→野马井→梧桐沟→酒泉(怀茂乡)→嘉峪关(文殊山)→玉门市(大红泉)→肃南(镜铁山→镜铁山口(4100 m))
2010.07.20–08.24	王新谱、潘昭	宁夏: 平罗暖泉→甘肃: 榆中兴隆山→肃南东柳沟→康乐→临泽→肃北→敦煌杨家桥乡鸣山村 宁夏: 中宁(牛首山)37°44'50.6"N, 105°58'2.7"E; 1187–1332 m→中宁(长山头农场)37°15'30.1"N, 105°43'9.8"E; 1232 m→中宁(长山头)37°09'36.2"N, 105°45'39.54"E; 1299 m→中宁(宣和镇东台村)37°24'54.0"N, 105°23'47.4"E; 1282 m→中卫(香山镇三眼井村)37°04'28.9"N, 105°04'49.0"E; 1740 m→甘肃: 民勤县(东湖乡)38°56'32.0"N, 103°41'25.5"E; 1309 m→山丹县(龙首山)38°45'53.3"N, 101°11'06.4"E; 1867 m→嘉峪关 39°48'17.3"N, 98°13'08.7"E; 1709 m→敦煌(鸣沙山)40°05'25.5"N, 94°39'30.8"E; 1154 m→阿克塞(红柳沟)39°40'47.6"N, 94°17'12.8"E; 1649 m→肃北县(三北)39°34'47.3"N, 94°48'21.2"E; 2034 m→玉门镇(老君庙)39°46'55.1"N, 97°32'20.7"E; 2333 m→肃南县 38°50'20.5"N, 99°36'53.7"E; 2415 m→青海: 祁连县 38°10'58.8"N, 100°15'19.4"E; 2842m→门源县(浩门镇)37°20'50.0"N, 101°38'39.6"E; 2889 m→甘肃古浪县. 八步沙 37°38'23.6"N, 103°07'03.0"E; 1736 m→内蒙古: 巴彦浩特(吉兰泰沙漠植物园)39°45'26.3"N, 105°46'13.1"E; 1027 m

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

附录2 阿拉善高原拟步甲地理分布

Appendix 2 District distribution of tenebrionid beetles in the Alxa Plateau

物种名录				地理分布信息 District distribution	数据来源 Data from
亚科 Subfamily	族 Tribe	属 Genus	种 Species		
朽木甲亚科 Alleculinae	栉甲族 Cteniopodini	栉甲属 <i>Cteniopinus</i> Seidlitz, 1896	波氏栉甲 <i>C. potanini</i>	甘肃、宁夏(贺兰山)、河北、东北、河南、四川、陕西; 朝鲜, 俄罗斯。	文献 1
			小栉甲 <i>C. parvus</i>	宁夏(贺兰山)。	文献 1
			异角栉甲 <i>C. varicornis</i>	宁夏(贺兰山: 苏峪口、小口子、大口子、椿树沟、小口子、响水沟、独树沟、拜寺口、马莲口)、甘肃、陕西。	文献 1
			窄跗栉甲 <i>C. tenuitarsis</i>	内蒙古(中西部)、甘肃、宁夏(贺兰山: 小口子)、河南、陕西; 朝鲜。	检视标本及文献 1
			阿栉甲 <i>C. altaicus</i>	内蒙古、甘肃、宁夏(贺兰山)、河南、陕西; 俄罗斯(西伯利亚)。	检视标本及文献 1
漠甲亚科 Pimeliinae	背毛甲族 Epitragini	驼毛甲属 <i>Cyphostethe</i> Marseul, 1867	格氏驼毛甲 <i>C. grombcewskii</i>	甘肃、新疆南疆。	检视标本及文献 2
		楔毛甲属 <i>Trichosphaena</i> Reitter, 1916	莱氏楔毛甲 <i>T. reitteri</i>	包括阿拉善在内的内蒙古西部	文献 2
			方胸楔毛甲 <i>T. quadrate</i>	甘肃	检视标本及文献 2
			敦煌楔毛甲 <i>T. dunhuangensis</i>	甘肃北部	检视标本及文献 2
			乌兰楔毛甲 <i>T. ulanbuhensis</i>	内蒙古	检视标本及文献 2
		背毛甲属 <i>Epitrichia</i> Gebler, 1859	谢氏背毛甲 <i>E. semenovi</i>	中国(内蒙古西部: 阿拉善高原); 蒙古, 哈萨克斯坦。	文献 2
			宁夏背毛甲 <i>E. ningsiana</i>	宁夏(银川)	文献 2
			棕色背毛甲 <i>E. fuscus</i>	宁夏(中卫)	检视标本及文献 2
	龙甲族 Leptodini	龙甲属 <i>Leptodes</i> Dejean, 1834	中华龙甲 <i>L. chinensis</i>	内蒙古、甘肃中北部、宁夏、新疆(东北部)。	检视标本及文献 2
			谢氏龙甲 <i>L. szekessyiv</i>	内蒙古(西部、中部)、宁夏(中部、北部)、山西北部、陕西北部。	检视标本及文献 2
	砚甲族 Akidini	砚甲属 <i>Cyphogenia</i> Solier, 1837	中华砚甲 <i>C. chinensis</i>	内蒙古(西部)、甘肃(东北部)、宁夏(中北部)、陕西(北部)、新疆(北部); 蒙古。	检视标本及文献 2
			肩脊砚甲 <i>C. humeralis</i>	甘肃、新疆; 哈萨克斯坦, 蒙古, 喀什米尔。	检视标本及文献 2
	掘甲族 Lachnogyini	掘甲属 <i>Netuschilia</i> Reitter, 1904	郝氏掘甲 <i>N. hauseri</i>	甘肃(酒泉: 敦煌)、内蒙古、新疆、河北; 中亚	文献 3
	长足甲族 Adesmiini	长足甲属 <i>Adesmia</i> Fischer von Waldheim, 1822	德氏长足甲 <i>A. anomala dejeanii</i>	内蒙古(中西部)、新疆(北部); 蒙古。	文献 3

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

漠甲族 <i>Pimeliini</i>	漠王属 <i>Platyope</i> Fischer von Waldheim, 1822	鄂漠王 <i>P. ordossica</i>	内蒙古(巴彦淖尔市磴口、阿拉善盟阿左旗 吉兰泰)、宁夏、甘肃。	检视标本 及文献 3
		维氏漠王 <i>P. victori</i>	甘肃(肃北县)	检视标本 及文献 3
		蒙古漠王 <i>P. mongolica</i>	内蒙古(中部)、宁夏(中北部); 蒙古, 图瓦。	检视标本 及文献 3
		条纹漠王 <i>P. balteiformis</i>	宁夏	检视标本 及文献 3
	宽漠王属 <i>Mantichorula</i> Reitter, 1889	内蒙宽漠王 <i>M. mongolica</i>	内蒙古(鄂尔多斯地区北部)	文献 3
		宽漠王 <i>M. grandis</i>	内蒙古(西部)、甘肃(中北部)、宁夏(西部)。	检视标本 及文献 3
		谢氏宽漠王 <i>M. semenowi</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部)、宁夏(中北部)、陕西(北部); 蒙古(南戈壁省)。	检视标本 及文献 3
	卵漠甲属 <i>Ocnere</i> Fischer von Waldheim, 1822	光滑卵漠甲 <i>O. sublaevigata</i>	甘肃(北部)、新疆(中南部、西北部); 哈萨克斯坦。	检视标本 及文献 3
	脊漠甲属 <i>Pterocomma</i> Dejean, 1834	埃氏脊漠甲 <i>P. amandana edmundi</i>	甘肃(中北部)、新疆(东部: 罗布泊)。	检视标本 及文献 3
		莱氏脊漠甲 <i>P. reitteri</i>	内蒙古(中西部含阿拉善高原)、甘肃(中北部)、宁夏(中北部); 蒙古国。	检视标本 及文献 3
		小脊漠甲 <i>P. parvula</i>	内蒙古(西部地区)、甘肃(北部); 蒙古国南部地区。	检视标本 及文献 3
		洛氏脊漠甲 <i>P. loczyi</i>	内蒙古(中部)、甘肃(中北部)、新疆(东部、北部); 克什米尔, 哈萨克斯坦。	检视标本 及文献 3
	角漠甲属 <i>Trigonocnere</i> Reitter, 1893	粒角漠甲 <i>T. granulata</i>	内蒙古(西部、中部)、宁夏北部。	检视标本 及文献 3
		突角漠甲指名亚种 <i>T. pseudopimelia pseudopimelia</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部)、宁夏。	检视标本 及文献 3
	宽漠甲属 <i>Sternoplax</i> Frivaldszky, 1890	大瘤宽漠甲 <i>S. lacerta</i>	甘肃、新疆; 吉尔吉斯斯坦。	检视标本 及文献 3
		巴氏宽漠甲 <i>S. ballioni</i>	甘肃西北部、新疆(库尔勒、奇台、木垒)。	文献 3
		谢氏宽漠甲 <i>S. szechenyi</i>	甘肃(中部、北部)、新疆。	检视标本 及文献 3
	扁漠甲属 <i>Sternotrigon</i> Skopin, 1973	拱背扁漠甲 <i>S. grandis</i>	内蒙古、甘肃; 蒙古。	检视标本 及文献 3
		克氏扁漠甲 <i>S. kraatzii</i>	内蒙古(西部)、甘肃(中北部)、宁夏; 蒙古。	检视标本 及文献 3
		暗色扁漠甲 <i>S. opaca</i>	内蒙古(阿拉善西部戈壁)	文献 3

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

鳖甲族 Tentyriini	胖漠甲属 <i>Trigonoscelis</i> Solier, 1836	多毛扁漠甲 <i>S. setosa setosa</i>	内蒙古(阿拉善盟阿左旗)、甘肃(武威民勤)、宁夏(北部)、新疆; 塔吉克斯坦, 乌兹别克斯坦, 哈萨克斯坦。	检视标本及文献 3
		紫奇扁漠甲 <i>S. zichyi</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部)、宁夏(中北部); 蒙古。	检视标本及文献 3
		光滑胖漠甲 <i>T. sublaevigata sublaevigata</i>	甘肃(中北部)、新疆。	检视标本及文献 3
	塔鳖甲属 <i>Tamena</i> Reitter, 1900	皱额塔鳖甲 <i>T. rugiceps</i>	内蒙古、甘肃、新疆。	检视标本及文献 2
	小鳖甲属 <i>Microdera</i> Eschscholtz, 1831	姬小鳖甲 <i>M. elegans</i>	甘肃、青海、新疆。	检视标本及文献 2
		克小鳖甲 <i>M. kraatzi kraatzi</i>	内蒙古中西部、甘肃中北部、宁夏(中部、北部); 蒙古(南戈壁省)。	检视标本及文献 2
		阿小鳖甲 <i>M. kraatzi alashanica</i>	内蒙古(西部: 阿拉善高原)、甘肃中北部、宁夏(中部、北部)。	检视标本及文献 2
		光亮小鳖甲 <i>M. lampabilis</i>	宁夏(中部)	检视标本及文献 2
		罗山小鳖甲 <i>M. luoshanica</i>	宁夏(吴忠同心)	检视标本及文献 2
		球胸小鳖甲 <i>M. globata</i>	内蒙古(中部、西部)、甘肃、青海、宁夏(中北部)、山西; 蒙古。	检视标本及文献 2
		显刻小鳖甲 <i>M. promptipuncta</i>	甘肃(中南部)	检视标本及文献 2
		重点小鳖甲 <i>M. duplicatipunctatus</i>	甘肃(白银: 景泰)	检视标本及文献 2
		甘肃小鳖甲 <i>M. kanssuana</i>	甘肃(中部)	检视标本及文献 2
		圆胸小鳖甲 <i>M. rotundithorax</i>	宁夏中部	检视标本及文献 2
		耳褶小鳖甲 <i>M. aurita</i>	内蒙古(西部)、甘肃(北部)、新疆; 蒙古。	检视标本及文献 2
		山丹小鳖甲 <i>M. shandanana</i>	甘肃(张掖市: 山丹县)。	检视标本及文献 2
		蒙古小鳖甲 <i>M. mongolica mongolica</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部)、青海、新疆。	检视标本及文献 2
		克蒙小鳖甲 <i>M. mongolica kozlovi</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部); 蒙古。	检视标本及文献 2
		宽颈小鳖甲 <i>M. laticollis laticollis</i>	内蒙古(西部)、甘肃(中北部)、新疆; 哈萨克斯坦。	检视标本及文献 2
		条纹小鳖甲 <i>M. strigiventris</i>	内蒙古西部、甘肃(山丹)、新疆(阿勒泰、富蕴、罗布泊); 蒙古(科布多省, 戈壁阿戈泰省)。	检视标本及文献 2

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

圆鳖甲属 <i>Scytosoma</i> Reitter, 1895	梯胸圆鳖甲 <i>S. scalaris</i>	内蒙古、甘肃、宁夏、陕西。	检视标本及文献 2
	小圆鳖甲 <i>S. pygmaeum</i>	内蒙古中部、宁夏中北部; 蒙古, 俄罗斯远东地区。	检视标本及文献 2
	裂缘圆鳖甲 <i>S. dissitiimarginis</i>	内蒙古(阿拉善高原)、宁夏。	检视标本及文献 2
	狭胸圆鳖甲 <i>S. humeridens</i>	甘肃(中北部)、青海(北部)。	检视标本及文献 2
	卵翅圆鳖甲 <i>S. ovadis</i>	甘肃	检视标本及文献 2
	显带圆鳖甲 <i>S. fascia</i>	宁夏中南部	检视标本及文献 2
	棕腹圆鳖甲 <i>S. rufiabdomina</i>	内蒙古、宁夏北部。	检视标本及文献 2
杯鳖甲属 <i>Scythis</i> Schaum, 1865	邻杯鳖甲 <i>S. affinis</i>	甘肃、新疆; 塔吉克斯坦。	检视标本及文献 2
	南疆杯鳖甲 <i>S. intermedia scythiformis</i>	甘肃、新疆南部。	检视标本及文献 2
东鳖甲属 <i>Anatolica</i> Eschscholtz, 1831	突颊东鳖甲 <i>A. tsendsureni</i>	内蒙古、甘肃(北部)、新疆(北部); 蒙古。	检视标本及文献 2
	磨光东鳖甲 <i>A. polita polita</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(北部)。	检视标本及文献 2
	弯胫东鳖甲 <i>A. pandaroides</i>	内蒙古、甘肃(中部)、宁夏(中北部)。	检视标本及文献 2
	平坦东鳖甲 <i>A. planata</i>	甘肃(中北部)	检视标本及文献 2
	瘦东鳖甲 <i>A. strigosa</i>	青海、宁夏(贺兰山)。	文献 2
	无边东鳖甲 <i>A. immarginata</i>	内蒙古(西部)、甘肃、宁夏(中北部); 蒙古。	检视标本及文献 2
	奇异东鳖甲 <i>A. paradoxa</i>	内蒙古、甘肃(北部)、青海(北部)、新疆; 蒙古。	检视标本及文献 2
	塞东鳖甲 <i>A. cechinae</i>	内蒙古、新疆; 蒙古。	检视标本及文献 2
	波氏东鳖甲 <i>A. potanini</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(东北部)、宁夏(中北部)、陕西(北部)、四川(北部)、新疆(东南部); 蒙古。	检视标本及文献 2
	尖尾东鳖甲 <i>A. mucronata</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部)、宁夏(中北部)、陕西北部; 蒙古。	检视标本及文献 2
	宽突东鳖甲 <i>A. sternalis</i>	内蒙古(中部、西部)、甘肃(中部、西部)、宁夏、新疆。	检视标本及文献 2
	纳氏东鳖甲 <i>A. nureti</i>	内蒙古、甘肃、宁夏(贺兰山: 柳条沟); 蒙古	文献 2
	宽腹东鳖甲 <i>A. gravidula</i>	内蒙古(中部、西部)、甘肃(中部、西部)、新疆。	检视标本及文献 2
	小东鳖甲 <i>A. minima</i>	内蒙古(中部、西部)、甘肃、宁夏(中北部)。	
	平颊东鳖甲 <i>A. dashidorzsi temporalis</i>	内蒙古(中东部); 蒙古。	检视标本及文献 2
	凹缝东鳖甲 <i>A. suturalis</i>	内蒙古、宁夏。	检视标本及文献 2

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

			库氏东鳖甲 <i>A. kulzeri</i>	内蒙古(中部、西部)、甘肃(中部、西部)、新疆。	检视标本及文献 2
			小丽东鳖甲 <i>A. amoenula</i>	内蒙古(中部、东部、西部)、甘肃、宁夏(中北部); 蒙古。	检视标本及文献 2
			平原东鳖甲 <i>A. ebenina</i>	宁夏(中北部)、北京。	检视标本及文献 2
			皱纹东鳖甲 <i>A. rugata</i>	甘肃(中部)	检视标本及文献 2
			谢氏东鳖甲 <i>A. semenowi</i>	甘肃(西北部)	检视标本及文献 2
			宁夏东鳖甲 <i>A. ningxiana</i>	宁夏(中北部)	检视标本及文献 2
胸鳖甲属 <i>Colposcelis</i> Dejean, 1834			达蒙胸鳖甲 <i>C. damone</i>	甘肃(中西部)、新疆; 蒙古西南部。	检视标本及文献 2
			福氏胸鳖甲 <i>C. forsteri</i>	甘肃(中部、西部)、新疆; 蒙古西南部。	检视标本及文献 2
			隆胸鳖甲 <i>C. montivaga</i>	甘肃、新疆; 蒙古。	检视标本及文献 2
			狭胸鳖甲 <i>C. microderoides microderoides</i>	甘肃、宁夏中北部、陕西北部、新疆; 蒙古。	检视标本及文献 2
			李氏胸鳖甲 <i>C. licenti</i>	内蒙古(阴山地区)	检视标本及文献 2
			三沟胸鳖甲 <i>C. trisulcata</i>	甘肃、新疆(中北部); 哈萨克斯坦	检视标本及文献 2
伪叶甲亚科 <i>Lagriinae</i>	伪叶甲族 <i>Lagriini</i>	伪叶甲属 <i>Lagria</i> Fabricius, 1775	林氏伪叶甲 <i>L. hirta</i>	甘肃、宁夏(中南部)、天津、河北(张家口、承德)、黑龙江(伊春)、河南(三门峡、嵩县)、四川、陕西; 亚洲: 地中海东南沿岸, 中亚; 欧洲: 芬诺斯堪底亚, 俄罗斯(东西西伯利亚地区); 北非: 摩洛哥, 阿尔及利亚。	检视标本及文献 4
			眼伪叶甲 <i>L. ophthalmica</i>	甘肃(陇南)、宁夏(中部、南部)、河北(保定、张家口、唐山)、黑龙江(伊春)、河南(三门峡、安阳、新乡)、湖北、湖南(湘西)、四川(雅安、乐山)、贵州(遵义)、云南(昭通)、陕西(咸阳、汉中、宝鸡及太白山)。	检视标本及文献 4
			红翅伪叶甲 <i>L. rufipennis</i>	宁夏(贺兰山、彭阳)、北京、河北(张家口)、重庆、四川、云南(曲靖)、陕西; 日本, 俄罗斯。	检视标本及文献 4
			黑头伪叶甲 <i>L. atriceps</i>	宁夏(中南部)、北京、河北、云南、陕西(汉中、咸阳)、河南、新疆(伊犁、昌吉)、四川、湖南; 缅甸, 印度, 土库曼斯坦, 土耳其。	检视标本及文献 4
	莱甲族 <i>Laenini</i>	莱甲属 <i>Laena</i> Dejean, 1821	二点莱甲 <i>L. bifoveolata</i>	甘肃、陕西、四川、湖北。	检视标本及文献 5
	刺足甲族 <i>Belopini</i>	刺足甲属 <i>Centorus</i> Mulsant, 1854	贺兰刺足甲 <i>C. helanensis</i>	宁夏北部	检视标本及文献 3

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

			亮黑刺足甲 <i>C. luculentus</i>	甘肃	检视标本及文献 3
			梅氏刺足甲 <i>C. medvedevi</i>	宁夏(石嘴山)	检视标本及文献 6
			阿拉善刺足甲 <i>C. alanshanicus</i>	内蒙古西部	检视标本及文献 3
拟步甲亚科 <i>Tenebrioninae</i>	小黑甲族 <i>Melanimonini</i>	齿足甲属 <i>Cheirodes</i> Gené, 1839	郑氏齿足甲 <i>C. zhengi</i>	宁夏北部	检视标本及文献 3
			梯胸齿足甲 <i>C. scalarithoracus</i>	内蒙古阿拉善	检视标本及文献 7
	土甲族 <i>Opatrini</i>	漠土甲属 <i>Melanesthes</i> Lacordaire, 1859	希氏漠土甲 <i>M. csikii</i>	内蒙古西部、甘肃中北部、宁夏西北部; 蒙古南部。	检视标本及文献 8
			何氏漠土甲 <i>M. heydeni heydeni</i>	内蒙古中部; 蒙古(中戈壁, 巴彦洪戈尔)。	检视标本及文献 8
			多刻漠土甲 <i>M. punctipennis</i>	甘肃(中部、北部)、青海(北部)、宁夏(中北部)。	检视标本及文献 8
			粗壮漠土甲 <i>M. gigas</i>	宁夏(中北部)	检视标本及文献 8
			多皱漠土甲 <i>M. rugipennis</i>	内蒙古(中西部)、甘肃、宁夏。	检视标本及文献 8
			粒刻漠土甲 <i>M. granulates</i>	青海(西宁)	检视标本及文献 8
			多瘤漠土甲 <i>M. tuberculosa</i>	甘肃、青海(海东区)。	检视标本及文献 8
			宁夏漠土甲 <i>M. ningxiaensis</i>	宁夏(中部)	检视标本及文献 8
			景泰漠土甲 <i>M. jintaiensis</i>	甘肃(中西部)、宁夏(北部)。	检视标本及文献 8
			达氏漠土甲 <i>M. davadshamsi</i>	内蒙古(中部)、宁夏(中部、北部); 蒙古。	检视标本及文献 8
			纤毛漠土甲 <i>M. ciliata</i>	内蒙古(中西部)、宁夏(北部)、新疆; 蒙古	检视标本及文献 8
			沙地漠土甲 <i>M. psammophila</i>	内蒙古(中东部)、宁夏(中北部); 蒙古(东南戈壁省)。	检视标本及文献 8
			大漠土甲 <i>M. maxima maxima</i>	内蒙古(中西部)、宁夏(中北部); 蒙古(南戈壁和东戈壁)。	检视标本及文献 8

	蒙古漠土甲 <i>M. mongolica</i>	内蒙古(中西部)、宁夏(北部); 蒙古。	检视标本及文献 8
	梅氏漠土甲 <i>M. medvedevi</i>	内蒙古(中西部)	检视标本及文献 8
	蒙南漠土甲 <i>M. jenseni meridionalis</i>	内蒙古; 蒙古。	检视标本及文献 8
	暗漠土甲 <i>M. opaca</i>	内蒙古(中西部)、陕西(北部); 蒙古。	检视标本及文献 8
	短齿漠土甲 <i>M. exilidentada</i>	内蒙古(中西部)、宁夏(北部)。	检视标本及文献 8
	荒漠土甲 <i>M. desertora</i>	宁夏(北部)	检视标本及文献 8
伪坚土甲属 <i>Scleropatrum</i> Reitter, 1887	瘤翅伪坚土甲 <i>S. tuberculatum</i>	甘肃、青海(西北部)、宁夏、西藏(北部)、陕西、新疆(东南部)。	检视标本及文献 8
	条脊伪坚土甲 <i>S. tuberculiferum</i>	内蒙古(阿拉善地区)、甘肃(中南部)、宁夏中北部、青海。	检视标本及文献 8
	希氏伪坚土甲 <i>S. csikii</i>	甘肃(张掖、靖安、酒泉)、宁夏(北部)、新疆(东北部)。	检视标本及文献 8
	粗背伪坚土甲 <i>S. horridum horridum</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(北部)、宁夏(中北部)、山西。	检视标本及文献 8
近坚土甲属 <i>Scleropatroides</i> Löbl et Merkl, 2003	塞近坚土甲 <i>S. seidlitzii</i>	内蒙古(西部)、甘肃(中北部); 土耳其。	检视标本及文献 8
土甲属 <i>Gonocephalum</i> Solier, 1834	网目土甲 <i>G. reticulatum</i>	内蒙古、甘肃(文县)、青海、宁夏、北京、天津、河北、山西、吉林、黑龙江、江苏、山东、河南、陕西; 朝鲜, 蒙古, 俄罗斯。	检视标本及文献 8
沙土甲属 <i>Opatrum</i> Fabricius, 1775	亚皱土甲 <i>G. subrugulosum</i>	内蒙古(西部)、甘肃(中北部)、新疆; 蒙古西南部。	检视标本及文献 8
	粗翅沙土甲 <i>O. asperipenne</i>	内蒙古(西部), 甘肃(中部、北部); 蒙古。	检视标本及文献 8
	沙土甲 <i>O. sabulosum</i>	内蒙古、甘肃(酒泉)、新疆(北疆); 蒙古, 俄罗斯。	文献 8
阿土甲属 <i>Anatrum</i> Reichardt, 1936	类沙土甲 <i>O. subaratum</i>	内蒙古、甘肃(文县)、宁夏、北京、河北、山西、辽宁、吉林、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、广西、四川、贵州、陕西、青海(同仁)、台湾; 蒙古, 俄罗斯, 朝鲜。	检视标本及文献 8
	松阿土甲 <i>A. songoricum</i>	宁夏(中北部); 蒙古西部。	检视标本及文献 8
	山丹阿土甲 <i>A. shandanicum</i>	甘肃(中北部), 宁夏(北部)。	检视标本及文献 8
景土甲属 <i>Jintaium</i> Ren, 1999	条脊景土甲 <i>J. sulcatum</i>	甘肃、宁夏。	检视标本及文献 8
方土甲属 <i>Myladina</i> Reitter, 1889	长爪方土甲 <i>M. unguiculina</i>	内蒙古(中西部)、宁夏(中北部)、陕西。	检视标本及文献 8

		光背方土甲 <i>M. lissonota</i>	宁夏(中北部)。	检视标本及文献 8
	真土甲属 <i>Eumylada</i> Reitter, 1889	同点真土甲 <i>E. punctifera</i>	内蒙古(中部、西部); 蒙古南部。	检视标本及文献 8
		粗壮真土甲 <i>E. glandulosa</i>	内蒙古	检视标本及文献 8
		奥氏真土甲 <i>E. oberbergeri</i>	内蒙古(中部、西部)、甘肃、宁夏(中部、北部)。	检视标本及文献 8
		波氏真土甲 <i>E. potanini</i>	甘肃(中北部)、宁夏(中北部)。	检视标本及文献 8
	笨土甲属 <i>Penthicus</i> Faldermann, 1836	弯笨土甲 <i>P. lenczyi</i>	甘肃(中北部); 蒙古。	检视标本及文献 8
		钝突笨土甲 <i>P. nojonicus</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(祁连山)、宁夏(北部)。	检视标本及文献 8
		直角笨土甲 <i>P. schusteri</i>	甘肃、青海(近祁连山区)、新疆; 土耳其。	检视标本及文献 8
		祁连笨土甲 <i>P. (M.) nanshanicus</i>	甘肃中北部	检视标本及文献 8
		齿肩笨土甲 <i>P. humeridens</i>	内蒙古(中西部)、新疆(阿勒泰); 蒙古。	检视标本及文献 8
		吉氏笨土甲 <i>P. kiritshenkoi</i>	内蒙古(中部)、宁夏(西北部); 蒙古南部。	文献 8
		阿笨土甲 <i>P. alashanicus</i>	内蒙古(阿拉善高原)、宁夏(贺兰山、中北部)。	检视标本及文献 8
		福笨土甲 <i>P. frater</i>	内蒙古(中西部); 蒙古。	检视标本及文献 8
		厉笨土甲 <i>P. laelaps</i>	内蒙古(西部)、宁夏(北部); 蒙古。	检视标本及文献 8
		钝角笨土甲 <i>P. obtusangulus</i>	内蒙古(中部)、甘肃(中北部); 蒙古(南戈壁省)。	检视标本及文献 8
扁足甲族 Pedinini	直扁足甲属 <i>Blindus</i> Mulsant et Rey, 1853	瘦直扁足甲 <i>B. strigosus</i>	内蒙古中东部(包括阴山)、北京、河北(张家口、承德)、辽宁; 俄罗斯(远东及沿海地区), 朝鲜半岛。	文献 3
琵琶甲族 Blaptini	琵琶甲属 <i>Blaps</i> Fabricius, 1775	尖尾琵琶甲指名亚种 <i>B. acuminata acuminata</i>	内蒙古(西部)、甘肃(中北部)、青海(中北部)、新疆(北部); 蒙古, 西伯利亚。	检视标本及文献 3
		拟步行琵琶甲 <i>B. caraboides</i>	甘肃(北部)、青海(北部)、宁夏(贺兰山)、陕西、新疆; 中亚。	检视标本及文献 3
		达氏琵琶甲 <i>B. davidis</i>	内蒙古、宁夏(中北部)、北京、河北、山西、陕西。	检视标本及文献 3
		缢脰琵琶甲 <i>B. dentitibia</i>	内蒙古, 甘肃(中南部)青海、宁夏(中北部)、新疆。	检视标本及文献 3
		弯齿琵琶甲 <i>B. femoralis</i>	内蒙古(西部、中东部)、甘肃(中部)、宁夏(北部)、陕西、河北北部; 蒙古。	检视标本及文献 3

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

	叉尾琵琶甲 <i>B. furcata</i>	内蒙古(中西部)	检视标本及文献 3	
	戈壁琵琶甲 <i>B. gobiens</i>	内蒙古(中西部)、甘肃、青海(中北部)、宁夏(中北部)、新疆; 蒙古。	检视标本及文献 3	
	粗翅琵琶甲 <i>B. granulata</i>	甘肃(中南部)、新疆; 吉尔吉斯斯坦, 哈萨克斯坦。	检视标本及文献 3	
	步行琵琶甲 <i>B. gressoria</i>	内蒙古、甘肃、宁夏、青海。	检视标本及文献 3	
	异距琵琶甲 <i>B. kiritshenkoi</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中北部)、宁夏(北部); 蒙古。	检视标本及文献 3	
	中型琵琶甲 <i>B. medusa</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(北部)、宁夏; 蒙古。	检视标本及文献 3	
	钝齿琵琶甲 <i>B. medusula</i>	内蒙古(中西部); 蒙古。	检视标本及文献 3	
	边粒琵琶甲 <i>B. miliaria</i>	内蒙古(西部)、甘肃、宁夏(中部、北部)、山西、新疆; 蒙古, 俄罗斯。	检视标本及文献 3	
	祁连琵琶甲 <i>B. nanshanica</i>	内蒙古(西部)、甘肃(祁连山区)、青海(德令哈)。	检视标本及文献 9	
	磨光琵琶甲 <i>B. opaca</i>	内蒙古、甘肃、宁夏(贺兰山)、新疆。	检视标本及文献 3	
	条纹琵琶甲 <i>B. potanini</i>	甘肃、青海(北部)、宁夏(中北部)、西藏。	检视标本及文献 3	
	弯背琵琶甲 <i>B. reflexa</i>	河北、内蒙古、陕西、宁夏; 蒙古, 俄罗斯(西伯利亚)。	检视标本及文献 3	
	皱纹琵琶甲 <i>B. rugosa</i>	内蒙古、甘肃(中南部)、宁夏(中北部)、河北(张家口)、辽宁、吉林、陕西(中部、南部)、青海; 蒙古, 西伯利亚。	检视标本及文献 3	
	脐点琵琶甲 <i>B. umbilicata</i>	甘肃(中部)、青海(北部)。	检视标本及文献 3	
	长尾琵琶甲 <i>B. varicosa</i>	内蒙古(贺兰山)、甘肃、宁夏(北部、贺兰山)、河北。	检视标本及文献 3	
	异形琵琶甲 <i>B. variolosa</i>	内蒙古(中西部)、甘肃(中部、南部)、宁夏(中部、北部)、陕西(中北部); 俄罗斯, 蒙古, 土库曼斯坦。	检视标本及文献 3	
阿拉琵琶甲 <i>B. allardiana allardiana</i>	甘肃(中部)、青海(东北部)、四川、西藏。	检视标本及文献 3		
侧脊琵琶甲 <i>B. latericosta</i>	甘肃、青海、宁夏、新疆。	检视标本及文献 3		
小琵琶甲属 <i>Gnaptorina</i> Reitter, 1887	圆小琵琶甲 <i>G. cylindricollis</i>	甘肃、宁夏、四川、西藏。	检视标本及文献 3	
齿琵琶甲属 <i>Itagonia</i> Reitter, 1887	原齿琵琶甲 <i>I. provostii</i>	内蒙古、宁夏、北京、河北、陕西。	检视标本及文献 3	
侧琵琶甲属 <i>Prosodes</i> Eschscholtz, 1829	北京侧琵琶甲 <i>P. pekinensis</i>	甘肃、宁夏、北京、河北、山西、陕西。	检视标本及文献 3	
刺甲族 <i>Platyscelidini</i> Lacordaire, 1859	双刺甲属 <i>Bioramix</i> Bates, 1879	完美双刺甲 <i>B. integra</i>	宁夏(中部)、西藏、四川。	检视标本及文献 10

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

			烁光双刺甲 <i>B. micans</i> *	内蒙古、甘肃、青海(青海湖、泽库、祁连)、宁夏、西藏、新疆。	检视标本及文献 10
			弗氏双刺甲 <i>B. frivaldszkyi</i>	甘肃北部	检视标本及文献 3
		刺甲属 <i>Platyscelis</i> Latreille, 1818	短体刺甲 <i>P. brevis</i>	内蒙古(阿左旗、东乌珠、科尔沁、正白旗、锡林郭勒盟、白云鄂博)、新疆; 蒙古, 东西伯利亚, 哈萨克斯坦, 吉尔吉斯。	检视标本及文献 10
			郝氏刺甲 <i>P. hauseri</i>	甘肃、青海、宁夏、新疆。	检视标本及文献 10
			盖氏刺甲 <i>P. gebieni</i>	内蒙古、宁夏(中部)、东北。	检视标本及文献 10
			佛氏刺甲 <i>P. freyi</i>	甘肃、宁夏(中部)、山西。	检视标本及文献 10
			绥原刺甲 <i>P. suiyuana</i>	甘肃(中东部)、宁夏(中部)、陕西(中北部)、山西、河南。	检视标本及文献 10
		小刺甲属 <i>Myatis</i> Bates, 1879	短毛小刺甲 <i>M. breipilosum</i>	中国(青海东南部)。	检视标本及文献 10
	褐甲族 Helopini	窄褐甲属 <i>Catomus</i> Allard, 1876	王氏窄褐甲 <i>C. wangae</i>	甘肃(北部)	检视标本及文献 3
	扁胫甲族 Phaleriini	扁胫甲属 <i>Phthora</i> Germar, 1836	阿拉善扁胫甲 <i>P. alashanensis</i>	内蒙古(阿拉善盟地区)。	检视标本及文献 3
	拟步甲族 Tenebrionini	拟步甲属 <i>Tenebrio</i> Linnaeus, 1758	黄拟步甲 <i>T. molitor</i>	甘肃、宁夏、陕西、华北、东北、山东、四川; 蒙古, 北美。	检视标本及文献 3
			黑拟步甲 <i>T. obscurus</i>	阿拉善高原; 世界范围内广泛分布。	检视标本及文献 3
	拟粉甲族 Triboliini	拟粉甲属 <i>Tribolium</i> MacLeay, 1825	黑拟粉甲 <i>T. madens</i>	甘肃、宁夏、新疆、山西; 欧洲; 北美; 北非。	检视标本及文献 3
			赤拟粉甲 <i>T. confusum</i>	阿拉善高原; 世界性广泛分布。	检视标本及文献 3
			杂拟粉甲 <i>T. confusum</i>	内蒙古、宁夏、新疆、陕西、河北、山西、东北、华东、华中、华南和云南; 世界性分布。	检视标本及文献 3
		隐拟粉甲属 <i>Latheticus</i> Waterhouse, 1880	长头隐拟粉甲 <i>L. oryzae</i>	河北、河南、广东、广西、湖北、江苏、江西、内蒙、四川、上海、山西; 世界性广布。	文献 6
	粉甲族 Alphitobiini	粉甲属 <i>Alphitobius</i> Stephens, 1829	黑粉甲 <i>A. diaperinus</i>	黑龙江、辽宁、河北、陕西、山西、河南、安徽、江苏、江西、浙江、福建、台湾、广东、香港、湖南、广西、四川、云南; 蒙古; 俄罗斯; 世界性分布。	文献 3
			姬粉甲 <i>A. laevigatus</i>	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、河南、山西、湖北、江苏、江西、福建、台湾、广东、湖南、广西、贵州、四川、云南; 世界性广布。	文献 11
菌甲亚科 Diaperinae	菌甲族 Diaperini	粉菌甲属 <i>Alphitophagus</i> Stephens, 1832	二带粉菌甲 <i>A. bifasciatus</i>	甘肃、宁夏、陕西、河北、山东、江苏; 欧洲, 北美洲, 澳洲。	文献 3
	隐甲族 Crypticini	隐甲属 <i>Crypticus</i> Latreille, 1817	淡红毛隐甲 <i>C. rufipes</i>	内蒙古、宁夏、陕西北部; 蒙古。	检视标本及文献 3

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

朱氏隐甲 *C. zubei* 内蒙古(中西部)、甘肃(北部); 中亚, 蒙古。 检视标本
及文献 3

注: 1. 王新谱, 杨贵军 (2010) 宁夏贺兰山昆虫. 黄河出版传媒集团, 宁夏人民出版社, 银川.

2. 任国栋, 巴义彬 (2010) 中国土壤拟步甲志(第二卷 螯甲类). 科学出版社, 北京.

3. 任国栋, 于有志 (1999) 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫. 河北大学出版社, 保定.

4. 周勇 (2011) 中国伪叶甲亚族分类研究(鞘翅目 拟步甲科 伪叶甲族). 河北大学理学硕士学位论文.

5. 赵小林 (2012) 中国莱甲属 *Laena* 和小莱甲属 *Hypolaenopsis* 分类(鞘翅目 拟步甲科 伪叶甲亚科). 河北大学理学硕士学位论文.

6. 张承理 (2010) 中国荒漠半荒漠拟步甲的区系起源与平行进化. 河北大学理学硕士学位论文.

7. 任国栋, 宁靖, 贾龙 (2011) 阿拉善齿足甲属一新种记述(鞘翅目, 拟步甲科, 小黑甲族). 动物分类学报, 36, 564–567.

8. 任国栋, 杨秀娟 (2006) 中国土壤拟步甲志(第一卷 土甲类). 高等教育出版社, 北京.

9. 李哲 (2002) 中国琵甲族 *Blaptini*(鞘翅目: 拟步甲科)系统学研究. 河北大学理学硕士学位论文.

10. 孟磊 (2005) 中国刺甲族系统学研究(鞘翅目: 拟步甲科). 河北大学理学硕士学位论文.

11. 徐吉山 (2013) 云南拟步甲区系与地理分布特征(鞘翅目: 拟步甲总科). 河北大学理学博士学位论文.

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

附录3 阿拉善高原拟步甲的亚科、族、属(包含种数)

Appendix 3 The subfamily, tribe, genera and number of tenebrionid specimens in the Alxa Plateau

亚科 Subfamily	族 Tribe	属(种数) Genus (No. of species)	
Alleculinae	Cteniopodini	Cteniopinus (6)	
Pimeliinae	Epitragini	Cyphostethe (1)	
		Trichosphaena (4)	
		Epitrichi (3)	
	Leptodini	Leptodes (2)	
	Akidini	Cyphogenia (2)	
	Lachnogyini	Netuschilia (1)	
	Adesmiini	Adesmia (1)	
	Pimeliini	Platyope (4)	
		Mantichorula (3)	
		Ocnera (1)	
		Pterocoma (5)	
		Trigonocnema (2)	
		Sternoplax (3)	
		Sternotrigon (5)	
		Trigonoscelis (1)	
		Tentyriini	Tamena (1)
			Microdera (16)
			Scytosoma (7)
			Scythis (2)
			Anatolica (22)
			Colposcelis (6)
		Lagriinae	Lagriini
Laenini	Laena (1)		
Belopini	Centorus (4)		
Tenebrioninae	Melanimonini	Cheirodes (2)	
	Opatrini	Melanesthes (19)	
		Scleropatrum (4)	
		Scleropatroides (1)	
		Gonocephalum (2)	
		Opatrum (3)	
		Anatrum (2)	
		Jintaium (1)	
		Myladina (2)	
		Eumylada (4)	
		Penthicus (10)	
		Pedinini	Blindus (1)
		Blaptini	Blaps (23)
			Gnaptorina (1)
			Itagonia (1)

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

		<i>Prosodes</i> (1)
	Platyscelidini	<i>Bioramix</i> (3)
		<i>Platyscelis</i> (5)
		<i>Myatis</i> (1)
	Helopini	<i>Catomus</i> (1)
	Cataphronetini	<i>Phthora</i> (1)
	Tenebrionini	<i>Tenebrio</i> (2)
	Triboliini	<i>Tribolium</i> (3)
		<i>Latheticus</i> (1)
	Alphitobiini	<i>Alphitobius</i> (2)
Diaperinae	Diaperini	<i>Alphitophagus</i> (1)
	Crypticini	<i>Crypticus</i> (2)

贾龙, 任国栋, 张建英. 阿拉善高原拟步甲的多样性与区系组成. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1341–1344.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016106>

附录4 阿拉善高原拟步甲在中国动物区系中的归属及其区域分布

Appendix 4 Position of tenebrionid beetles in the Alxa Plateau in Chinese fauna and their district distribution

	古北界				东洋界			阿拉善高原特有属种
	东北区	华北区	蒙新区	青藏区	西南区	华中区	华南区	
朽木甲亚科 Alleculinae	*	*	*	*	*	*	*	
栉甲族 Cteniopodini	*	*	*	*	*	*	*	
栉甲属 <i>Cteniopinus</i> Seidlitz, 1896	*	*	*	*	*	*	*	
波氏栉甲 <i>C. potanini</i> *	+	+	+				+	
小栉甲 <i>C. parvus</i> *		+	+					
异角栉甲 <i>C. varicornis</i> *		+	+					
窄跗栉甲 <i>C. tenuitarsis</i> *		+	+					
阿栉甲 <i>C. altaicus</i> *		+	+					
异点栉甲 <i>C. diversipunctatus</i>			+					+
漠甲亚科 Pimeliinae		*	*	*	*			
背毛甲族 Eptiragini			*					
驼毛甲属 <i>Cyphostethe</i> Marseul, 1867			*					
格氏驼毛甲 <i>C. grombaczewskii</i>			+					
楔毛甲属 <i>Trichosphaena</i> Reitter, 1916			*					
莱氏楔毛甲 <i>T. reitteri</i>			+					+
方胸楔毛甲 <i>T. quadrate</i>			+					
敦煌楔毛甲 <i>T. dunhuangensis</i>			+					+
乌兰楔毛甲 <i>T. ulanbuhensis</i>			+					
背毛甲属 <i>Eptirichia</i> Gebler, 1859			*					
谢氏背毛甲 <i>E. semenovi</i>			+					
宁夏背毛甲 <i>E. ningsiana</i> *			+					+
棕色背毛甲 <i>E. fuscus</i> *			+					+
龙甲族 Leptodini		*	*	*				
龙甲属 <i>Leptodes</i> Dejean, 1834		*	*					
中华龙甲 <i>L. chinensis</i> *			+					
谢氏龙甲 <i>L. szekessyiv</i> *		+	+					
砚甲族 Akidini		*	*	*				
砚甲属 <i>Cyphogenia</i> Solier, 1837		*	*					
中华砚甲 <i>C. chinensis</i> *		+	+					
肩脊砚甲 <i>C. humeralis</i>			+					
掘甲族 Lachnogyini			*					
掘甲属 <i>Netuschilia</i> Reitter, 1904		*	*					
郝氏掘甲 <i>N. hauseri</i>		+	+					
长足甲族 Adesmiini			*					
长足甲属 <i>Adesmia</i> Fischer von Waldheim, 1822			*					
德氏长足甲 <i>A. anomala dejeanii</i>			+					
漠甲族 Pimeliini		*	*					
漠王属 <i>Platyope</i> Fischer von Waldheim, 1822		*	*					

鄂漠王 <i>P. ordossica</i> *		+		
维氏漠王 <i>P. victori</i>		+		+
蒙古漠王 <i>P. mongolica</i> *		+		
条纹漠王 <i>P. balteiformis</i>		+		
宽漠王属 <i>Mantichorula</i> Reitter, 1889	*	*		
内蒙宽漠王 <i>M. mongolica</i>		+		
宽漠王 <i>M. grandis</i> *		+		
谢氏宽漠王 <i>M. semenowi</i> *	+	+		
卵漠甲属 <i>Ocnera</i> Fischer von Waldheim, 1822		*		
光滑卵漠甲 <i>O. sublaevigata</i>		+		
脊漠甲属 <i>Pterocomma</i> Dejean, 1834		*		
莱氏脊漠甲 <i>P. reitteri</i> *		+		
小脊漠甲 <i>P. parvula</i>		+		
泥脊漠甲 <i>P. vittata</i> *		+		
埃氏脊漠甲 <i>P. amandana edmundi</i>		+		
洛氏脊漠甲 <i>P. loczyi</i>		+		
角漠甲属 <i>Trigonocnena</i> Reitter, 1893	*	*		
粒角漠甲 <i>T. granulata</i>		+		
突角漠甲指名亚种 <i>T. pseudopimelia pseudopimelia</i> *	+	+		
宽漠甲属 <i>Sternoplax</i> Frivaldszky, 1890		*		
大瘤宽漠甲 <i>S. lacerta</i>		+		
巴氏宽漠甲 <i>S. ballioni</i>		+		
谢氏宽漠甲 <i>S. szechenyi</i> *		+		
扁漠甲属 <i>Sternotrigena</i> Skopin, 1973		*	*	
多毛扁漠甲 <i>S. setosa setosa</i>		+		
紫奇扁漠甲 <i>S. zichyi</i>		+		
拱背扁漠甲 <i>S. grandis</i>		+		
克氏扁漠甲 <i>S. kraatzi</i>		+		
暗色扁漠甲 <i>S. opaca</i>		+		+
胖漠甲属 <i>Trigonoscelis</i> Solier, 1836		*		
光滑胖漠甲 <i>T. sublaevigata</i>		+		
鳖甲族 <i>Tentyriini</i>	*	*	*	
塔鳖甲属 <i>Tamena</i> Reitter, 1900		*		
皱额塔鳖甲 <i>T. rugiceps</i>		+		
小鳖甲属 <i>Microdera</i> Eschscholtz, 1831		*	*	
姬小鳖甲 <i>M. elegans</i> *		+	+	
克小鳖甲 <i>M. kraatzi kraatzi</i> *		+		
阿小鳖甲 <i>M. kraatzi alashanica</i> *		+		+
光亮小鳖甲 <i>M. lampabilis</i> *		+		+
罗山小鳖甲 <i>M. luoshanica</i> *		+		+
球胸小鳖甲 <i>M. globata</i> *		+	+	
显刻小鳖甲 <i>M. promptipuncta</i>		+		

重点小鳖甲 <i>M. duplicatipunctatus</i>		+		+
甘肃小鳖甲 <i>M. kanssuana</i>		+		+
圆胸小鳖甲 <i>M. rotundithorax*</i>		+		+
耳褶小鳖甲 <i>M. aurita</i>		+		
山丹小鳖甲 <i>M. shandanana</i>		+		+
蒙古小鳖甲 <i>M. mongolica mongolica*</i>		+	+	
克蒙小鳖甲 <i>M. mongolica kozlovi</i>		+		
宽颈小鳖甲 <i>M. laticollis laticollis</i>		+		
条纹小鳖甲 <i>M. strigiventris</i>		+		
圆鳖甲属 <i>Scytosoma</i> Reitter, 1895	*	*	*	
狭胸圆鳖甲 <i>S. humeridens</i>		+		+
梯胸圆鳖甲 <i>S. scalaris*</i>	+	+		
显带圆鳖甲 <i>S. fascia*</i>		+		
卵翅圆鳖甲 <i>S. ovadis</i>		+		+
小圆鳖甲 <i>S. pygmaeum*</i>		+		
裂缘圆鳖甲 <i>S. dissitiimarginis*</i>		+		+
棕腹圆鳖甲 <i>S. rufiabdomina*</i>		+		
杯鳖甲属 <i>Scythis</i> Schaum, 1865	*	*	*	
南疆杯鳖甲 <i>S. intermedia scythiformis</i>		+		+
邻杯鳖甲 <i>S. affinis</i>		+		
东鳖甲属 <i>Anatolica</i> Eschscholtz, 1831	*	*	*	
突颊东鳖甲 <i>A. tsendsureni</i>		+		
无边东鳖甲 <i>A. immarginata*</i>		+		
磨光东鳖甲 <i>A. polita polita</i>		+		+
谢氏东鳖甲 <i>A. semenowi*</i>		+		+
弯胫东鳖甲 <i>A. pandaroides*</i>		+		
平坦东鳖甲 <i>A. planata*</i>		+		
瘦东鳖甲 <i>A. strigosa*</i>		+		+
奇异东鳖甲 <i>A. paradoxa</i>		+		+
塞东鳖甲 <i>A. cechiniae</i>		+		
波氏东鳖甲 <i>A. potanini*</i>	+	+		
尖尾东鳖甲 <i>A. mucronata*</i>	+	+		
宽突东鳖甲 <i>A. sternalis*</i>		+		
纳氏东鳖甲 <i>A. nureti*</i>		+		
宽腹东鳖甲 <i>A. gravidula*</i>		+		
小东鳖甲 <i>A. minima*</i>		+		
平颊东鳖甲 <i>A. dashidorzsi temporalis</i>		+		
凹缝东鳖甲 <i>A. suturalis</i>		+		+
库氏东鳖甲 <i>A. kulzeri</i>		+		
小丽东鳖甲 <i>A. amoenula*</i>		+		
平原东鳖甲 <i>A. ebenina*</i>	+	+		
皱纹东鳖甲 <i>A. rugata</i>		+		+
宁夏东鳖甲 <i>A. ningxiana*</i>		+		+
胸鳖甲属 <i>Colposcelis</i> Dejean, 1834	*	*		

达蒙胸鳖甲 <i>C. damone</i>								+
福氏胸鳖甲 <i>C. forsteri</i>								+
隆胸鳖甲 <i>C. montivaga</i>								+
狭胸鳖甲 <i>C. microderoides</i>		+						+
<i>microderoides*</i>								
李氏胸鳖甲 <i>C. licenti</i>								+
三沟胸鳖甲 <i>C. trisulcata</i>								+
伪叶甲亚科 <i>Lagriinae</i>	*	*	*	*	*	*	*	*
伪叶甲族 <i>Lagriini</i>	*	*	*		*	*	*	*
伪叶甲属 <i>Lagria</i> Fabricius, 1775	*	*	*		*	*	*	*
黑头伪叶甲 <i>L. atriceps</i>		+	+		+	+	+	+
林氏伪叶甲 <i>L. hirta*</i>		+	+		+			
红翅伪叶甲 <i>L. rufipennis*</i>		+	+		+	+		
眼伪叶甲 <i>L. ophthalmica*</i>	+	+	+		+	+	+	+
莱甲族 <i>Laenini</i>		*	*		*	*		
莱甲属 <i>Laena</i> Dejean, 1821		*	*		*	*		
二点莱甲 <i>L. bifoveolata</i>		+	+		+	+		
刺足甲族 <i>Belopini</i>			*					
刺足甲属 <i>Centorus</i> Mulsant, 1854			*					
贺兰刺足甲 <i>C. helanensis*</i>			+					+
亮黑刺足甲 <i>C. luculentus</i>			+					
阿拉善刺足甲 <i>C. alanshanicus</i>			+					+
梅氏刺足甲 <i>C. medvedevi*</i>			+					+
拟步甲亚科 <i>Tenebrioninae</i>	*	*	*	*	*	*	*	*
小黑甲族 <i>Melanimonini</i>			*					
齿足甲属 <i>Cheirodes</i> Gené, 1839			*					
梯胸齿足甲 <i>C. scalarithoracus</i>			+					+
郑氏齿足甲 <i>C. zhengi*</i>			+					+
土甲族 <i>Opatrini</i>	*	*	*	*	*	*	*	*
漠土甲属 <i>Melanesthes</i> Lacordaire, 1859		*	*	*				
希氏漠土甲 <i>M. csikii*</i>			+					
何氏漠土甲 <i>M. heydeni heydeni</i>			+					
多刻漠土甲 <i>M. punctipennis*</i>			+	+				
粗壮漠土甲 <i>M. gigas*</i>			+					+
多皱漠土甲 <i>M. rugipennis*</i>		+	+					
粒刻漠土甲 <i>M. granulates</i>			+	+				
多瘤漠土甲 <i>M. tuberculosa</i>			+	+				
宁夏漠土甲 <i>M. ningxiaensis*</i>		+	+					+
景泰漠土甲 <i>M. jintaiensis*</i>			+					+
达氏漠土甲 <i>M. davadshamsi*</i>			+					
纤毛漠土甲 <i>M. ciliata*</i>			+					
沙地漠土甲 <i>M. psammophila*</i>			+					
大漠土甲 <i>M. maxima maxima*</i>			+					
蒙古漠土甲 <i>M. mongolica*</i>			+					
梅氏漠土甲 <i>M. medvedevi</i>			+					

蒙南漠土甲 <i>M. jenseni meridionalis</i> *									+
暗漠土甲 <i>M. opaca</i>		+							+
短齿漠土甲 <i>M. exilidentada</i> *									+
荒漠土甲 <i>M. desertora</i> *									+
伪坚土甲属 <i>Scleropatrum</i> Reitter, 1887		*		*		*			
粗背伪坚土甲 <i>S. horridum horridum</i> *		+		+					
瘤翅伪坚土甲 <i>S. tuberculatum</i> *				+		+			
条脊伪坚土甲 <i>S. tuberculiferum</i> *				+		+			+
希氏伪坚土甲 <i>S. csikii</i> *				+					
近坚土甲属 <i>Scleropatroides</i> Löbl et				*					
Merk1, 2003									
塞近坚土甲 <i>S. seidlitzii</i>				+					
土甲属 <i>Gonocephalum</i> Solier, 1834	*		*	*		*		*	*
网目土甲 <i>G. reticulatum</i> *		+		+				+	
亚皱土甲 <i>G. subrugulosum</i>				+					
沙土甲属 <i>Opatrum</i> Fabricius, 1775	*		*	*		*			
粗翅沙土甲 <i>O. asperipenne</i> *				+					
沙土甲 <i>O. sabulosum</i> *				+					
类沙土甲 <i>O. subaratum</i> *	+		+	+				+	
阿土甲属 <i>Anatrum</i> Reichardt, 1936				*					
松阿土甲 <i>A. songoricum</i> *				+					
山丹阿土甲 <i>A. shandanicum</i> *				+					+
景土甲属 <i>Jintaium</i> Ren, 1999				*					*
条脊景土甲 <i>J. sulcatum</i> *				+					+
方土甲属 <i>Myladina</i> Reitter, 1889			*	*					
长爪方土甲 <i>M. unguiculina</i> *		+		+					
光背方土甲 <i>M. lissonota</i> *				+					+
真土甲属 <i>Eumylada</i> Reitter, 1889				*					
同点真土甲 <i>E. punctifera</i>				+					
粗壮真土甲 <i>E. glandulosa</i>				+					
波氏真土甲 <i>E. potanini</i> *				+					
奥氏真土甲 <i>E. oberbergeri</i> *				+					
笨土甲属 <i>Penthicus</i> Faldermann, 1836		*		*		*			
弯笨土甲 <i>P. lenczyi</i>				+					
直角笨土甲 <i>P. schusteri</i>				+					
钝突笨土甲 <i>P. nojonicus</i> *				+					+
祁连笨土甲 <i>P. (M.) nanshanicus</i>				+					+
齿肩笨土甲 <i>P. humeridens</i>				+					
吉氏笨土甲 <i>P. kiritshenkoi</i> *				+					
阿笨土甲 <i>P. alashanicus</i> *				+					+
福笨土甲 <i>P. frater</i>				+					
厉笨土甲 <i>P. laelaps</i> *				+					
钝角笨土甲 <i>P. obtusangulus</i>				+					
扁足甲族 <i>Pedinini</i>	*		*	*		*			

直扁足甲属 <i>Blindus</i> Mulsant et Rey,	*	*	*		*		
1853							
瘦直扁足甲 <i>B. strigosus</i>	+	+	+				
琵琶甲族 Blaptini		*	*	*	*	*	*
琵琶甲属 <i>Blaps</i> Fabricius, 1775		*	*	*			
条纹琵琶甲 <i>B. potanini</i> *			+				
粗翅琵琶甲 <i>B. granulata</i>			+				
步行琵琶甲 <i>B. gressoria</i> *			+	+			
达氏琵琶甲 <i>B. davidis</i> *		+	+			+	
边粒琵琶甲 <i>B. miliaria</i> *			+				
弯背琵琶甲 <i>B. reflexa</i> *		+	+				
异形琵琶甲 <i>B. variolosa</i> *			+				
弯齿琵琶甲 <i>B. femoralis</i> *		+	+				
钝齿琵琶甲 <i>B. medusula</i> *			+				
缢脰琵琶甲 <i>B. dentitibia</i> *		+	+	+			
中型琵琶甲 <i>B. medusa</i> *		+	+				
异距琵琶甲 <i>B. kiritshenkoi</i> *			+				
脐点琵琶甲 <i>B. umbilicata</i>			+	+			
叉尾琵琶甲 <i>B. furcata</i>			+				+
戈壁琵琶甲 <i>B. gobiensis</i> *		+	+	+			
长尾琵琶甲 <i>B. varicosa</i> *		+	+				
皱纹琵琶甲 <i>B. rugosa</i> *		+	+				
祁连琵琶甲 <i>B. nanshanica</i>			+	+			
尖尾琵琶甲指名亚种 <i>B. acuminata</i>			+	+			
<i>acuminate</i>							
拟步行琵琶甲 <i>B. caraboides</i> *		+	+	+			
磨光琵琶甲 <i>B. opaca</i> *			+				
侧脊琵琶甲 <i>B. latericosta</i> *		+	+	+			
阿拉琵琶甲 <i>B. allardiana allardiana</i>			+	+			
小琵琶甲属 <i>Gnaptorina</i> Reitter, 1887		*	*	*	*		*
圆小琵琶甲 <i>G. cylindricollis</i> *		+	+	+	+		
齿琵琶甲属 <i>Itagonia</i> Reitter, 1887		*	*	*	*		
原齿琵琶甲 <i>I. provostii</i> *		+	+				
侧琵琶甲属 <i>Prosodes</i> Eschscholtz, 1829		*	*	*			
北京侧琵琶甲 <i>P. pekinensis</i> *		+	+				
刺甲族 Platyscelidini	*	*	*	*			
双刺甲属 <i>Bioramix</i> Bates, 1879		*	*	*	*		
完美双刺甲 <i>B. integra</i> *		+	+	+	+		
弗氏双刺甲 <i>B. frivaldszkyi</i>			+				+
烁光双刺甲 <i>B. micans</i> *		+	+	+			
刺甲属 <i>Platyscelis</i> Latreille, 1818	*	*	*	*			
绥原刺甲 <i>P. suiyouana</i> *		+	+				
短体刺甲 <i>P. brevis</i>		+	+				
郝氏刺甲 <i>P. hauseri</i> *		+	+	+			
盖氏刺甲 <i>P. gebieni</i> *	+		+				

佛氏刺甲 <i>P. freyi</i> *		+	+					
小刺甲属 <i>Myatis</i> Bates, 1879				*	*			
短毛小刺甲 <i>M. breipilosum</i>				+	+			
褐甲族 Helopini				*				
窄褐甲属 <i>Catomus</i> Allard, 1876				*				
王氏窄褐甲 <i>C. wangae</i>				+				+
扁胫甲族 Phaleriini				*				
扁胫甲属 <i>Phthora</i> Germar, 1836				*				*
阿拉善扁胫甲 <i>P. alashanensis</i>				+				+
拟步甲族 Tenebrionini	*	*	*	*	*	*	*	*
拟步甲属 <i>Tenebrio</i> Linnaeus, 1758	*	*	*	*	*	*	*	*
黑拟步甲 <i>T. obscurus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
黄拟步甲 <i>T. molitor</i> *	+	+	+		+			
拟粉甲族 Triboliini	*	*	*	*	*	*	*	*
拟粉甲属 <i>Tribolium</i> MacLeay, 1825	*	*	*	*	*	*	*	*
杂拟粉甲 <i>T. confusum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
黑拟粉甲 <i>T. madens</i> *			+					
赤拟粉甲 <i>T. castaneum</i> *	+	+	+	+	+	+	+	+
隐拟粉甲属 <i>Latheticus</i> Waterhouse, 1880	*	*	*	*	*	*	*	*
长头隐拟粉甲 <i>L. oryzae</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
粉甲族 Alphitobiini	*	*	*	*	*	*	*	*
粉甲属 <i>Alphitobius</i> Stephens, 1829	*	*	*	*	*	*	*	*
黑粉甲 <i>A. diaperinus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
姬粉甲 <i>A. laevigatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
菌甲亚科 Diaperinae	*	*	*	*	*	*	*	*
菌甲族 Diaperini	*	*	*	*	*	*	*	*
粉菌甲属 <i>Alphitophagus</i> Stephens, 1832	*	*	*	*	*	*	*	*
二带粉菌甲 <i>A. bifasciatus</i> *		+	+			+		
隐甲族 Crypticini		*	*					
隐甲属 <i>Crypticus</i> Latreille, 1817		*	*					
淡红毛隐甲 <i>C. rufipes</i> *		+	+					
朱氏隐甲 <i>C. zubei</i>			+					
合计 Total	9(12)	29(56)	52(206)	15(33)	8(14)	9(14)	6(9)	21(41)

•数据论文•

植物标本标签设计的原则及R程序包herblabel

张金龙* 朱慧玲 刘金刚 Gunter A. Fischer

(嘉道理农场暨植物园植物保育部, 香港)

摘要: 植物标本是分类学、生态学和分子生物学最重要的凭证之一。标本的采集和鉴定信息需清晰、准确、美观地展示和保存于标本标签中, 不能有歧义以及拼写错误。在标签的制作过程中, 数据输入的方式要简单、直接, 标签文件生成过程中最好能自动分析错误, 且在打印之前要便于修改和调整。本文探讨了打印植物标本标签的若干原则以及注意事项, 并介绍了用R语言编写的herblabel程序包生成植物标本标签以及鉴定标签的过程。herblabel程序包基于Darwin Core和CVH5.0数据交换标准, 可快速批量生成几种样式的RTF标签, 且标签简洁、美观, 易于编辑。herblabel程序包具有检查地点完整程度, 学名拼写和接受状态, 科、属在APG等新系统下的对应关系等功能, 可有效减少数据录入过程中产生的错误。此外, 本程序包在打印标签时使用的是基于Darwin Core标准保存的标本数据库, 不仅方便统计和管理, 也可以直接用于全球生物多样性信息网络(GBIF)数据共享或者数字植物标本馆的建设。该程序包可显著提高植物标本馆标本制作、管理和信息录入的工作效率, 减轻工作人员的负担, 并在植物生物多样性编目中发挥重要作用。

关键词: 标本馆; 植物标本; 标签; R语言程序包; 拼写; APG III; Darwin Core

Principles behind designing herbarium specimen labels and the R package ‘herblabel’

Jinlong Zhang*, Huiling Zhu, Jingang Liu, Gunter A. Fischer

Flora Conservation Department, Kadoorie Farm and Botanic Garden, Hong Kong

Abstract: Voucher specimens are essential for plant taxonomy, ecology, and plant molecular biology. Collection and identification information should be clearly, accurately and formally printed on herbarium labels, without confusion or spelling mistakes. During the preparation of the labels, data entry should be straight-forward and easy to manage. Ideally, the herbarium label printing software should conduct a thorough evaluation to avoid potential errors, and should issue warnings accordingly. By taking these principles into account, we developed the herblabel R package for generating herbarium labels based on Darwin Core and CVH5.0 data exchange standards. During the implementation of herblabel, the spelling and status of scientific names and the family-genera relationship are compared with the embedded databases to determine potential mistakes or incongruence against APG or other new classification systems. As the template is based on Darwin Core exchange standards, the database could not only be used to generate summaries and reports but also could be shared via GBIF or virtual herbaria. This package will increase efficiency and reduce workload for herbarium specimen preparation, management, and data entry, and should play an important role in cataloging plant diversity.

Key words: herbarium; specimens; label; R package; spelling; APG III; Darwin Core

植物标本是系统分类学、生态学、中药学、林学、园林学等很多领域的研究基础, 它包含了物种形态特征、地理分布、生境和物候期等大量信息。

植物标本除了用于分类学研究、编撰植物志和植物名录外, 其采集信息在生物多样性研究中也具有极其重要的价值。植物标本是植被调查的重要凭证,

收稿日期: 2016-08-23; 接受日期: 2016-12-14

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jinlongzhang01@gmail.com

优势种一般需采集标本;在野外未能鉴定出的种往往也需要采集标本进一步鉴定和分析。植物标本还是DNA条形码以及群体遗传学研究的重要凭证,分子生物学家可以从标本上取样,提取DNA并测序,从而获得各物种的DNA序列,以推断各类群的系统发育关系(CBOL Plant Working Group et al, 2009)。通过标本采集记录,人们还可以了解物种分布区大小(Rivers et al, 2011),分析或预测物种潜在分布区对气候变化或人为干扰的响应(McGraw, 2001),探讨物种适应性进化的格局与过程(Evans et al, 2009; Smith & Donoghue, 2010),评估生物入侵的风险(Weber, 1998; Delisle et al, 2003; 朱丽和马克平, 2010)等。标本数据更是全球生物多样性信息网络(Global Biodiversity Information Facility, GBIF, <http://www.gbif.org/>)最基础的数据之一。

采集和整理标本是植物标本馆最基本的工作(Bridson & Forman, 1998)。据纽约植物园世界标本馆索引(Herbarium Index, <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>)统计,截止到2016年12月,全世界约有3,000家标本馆,收藏了大约3.5亿份植物标本。中国在世界标本馆索引登记过的标本馆约350家,馆藏最为丰富的是中国科学院植物研究所标本馆(PE, 260万份),其次是中国科学院昆明植物研究所标本馆(KUN, 110万份)和中国科学院华南植物园(SCIB, 100万份)。即使是小型的标本馆,如香港植物标本室(HK)也保存约4万份,嘉道理农场暨植物园植物标本室(KFBG)的标本数量也超过1万份。标本的采集、鉴定信息等一般都包括在标本标签中。面对数量庞大的标本,植物考察队以及标本馆工作人员每天要耗费大量时间和精力为成百上千的标本准备标签,并校对标签上的采集和鉴定信息,以确保准确无误。

我国标本馆的标签通常分为采集标签(collecting notes)和鉴定标签(determination/annotation slips)两种。采集标签是植物工作者在野外采集标本的记录,其信息包括:采集人、采集号、采集日期、采集地点、植株高度、花果特征、生境以及伴生种等,过去多为手写。采集标签一般贴在台纸的左上角。鉴定标签或备注标签主要是植物学家或者标本馆工作人员对该标本的鉴定或者其他备注(如DNA采样、异名、科属变化等)。记录的信息一般包括:完整学名、鉴定人、鉴定日期等。如果该份标本为模

式标本,还需要标注模式标本的类型(如Holotype、Isotype)、参考文献以及与近缘种的区别等。鉴定标签一般较小,贴于标本的右下角或者左下角。

随着电脑和激光打印机的普及,国际上多数标本馆都已将标本采集和鉴定信息更加简洁、美观地整合到一张标本标签中。为了方便查阅,标本标签一般位于台纸的右下角。如果标本有新的鉴定,则增加新的鉴定标签,贴在原标本标签上方或台纸的左下角。

打印植物标本标签常通过数据库生成报表完成。国内外用于打印标本标签的软件已经有很多,如中国科学院植物研究所开发的EasyLabels(<http://pe.ibcas.ac.cn/download/download.html/>),英国牛津大学植物科学系编写的BRAHMS(<http://herbaria.plants.ox.ac.uk/bol/brahms/>),美国佛罗里达大学植物标本馆Kent Perkins编写的PLabel(<http://www.flmnh.ufl.edu/herbarium/pl/>),康涅狄格大学Robert K. Colwell编写的Biota(<http://viceroy.eeb.uconn.edu/biota/biota/>),堪萨斯大学生物多样性研究所编写的Specify(<http://specifyx.specifysoftware.org/>)等。也有人通过Microsoft Word的邮件合并(mail merge)功能生成标本标签(<https://cmllr.uq.edu.au/guide-creating-herbarium-specimen-labels-using-mail-merge/>, <https://www.idigbio.org/sites/default/files/workshop-presentations/small-herbarium2013/Using%20Label%20Merge.pdf/>)。

虽然生成标本标签的软件众多,但是不同的软件运行的操作系统可能不同,如EasyLabels、BRAHMS、PLabel只能在Windows上运行,且不同软件数据录入的格式和字段多有不同,往往导致数据传输上的不便。为了更方便地进行标本数据传输,方便数据的集中处理和分析,人们提出了Darwin Core数据标准(Wieczorek et al, 2012, <http://rs.tdwg.org/dwc/>)。Darwin Core规定了标本数据传输的标准字段,从而简化了数据共享等阶段需要进行的数据标准化过程,减少了工作量。Darwin Core在2009年成为全球生物多样性信息网络的标准数据格式。然而使用Darwin Core格式保存国内标本馆的标本记录时,某些字段需要扩展,某些字段需要简化,这就形成了中国数字植物标本馆CVH5.0标准(<http://www.cvh.org.cn/news/3/>)。

基于简化过的Darwin Core数据标准和CVH5.0

标准, 我们用R语言(R Core Team, 2016)编写了herblabel程序包, 它可以在Windows、MacOS、Linux等多种操作系统上运行。考虑到易用性, 标本采集记录以人们熟悉的Microsoft Excel格式输入, 继而读取到R中。herblabel生成的标签文件为富文本格式(rich text format, RTF), 可在Microsoft Word等办公软件中方便地编辑。最重要的是, herblabel在生成标本标签过程中加入了纠错机制, 可检查所输入采集信息的完整性以及拼写错误, 并将日期转换为完整格式, 避免歧义(图1)。为了更好地在标签中展示采集、鉴定信息, 本文总结了植物标本标签设计的原则, 介绍了herblabel程序包及其功能, 并通过实例介绍了如何通过herblabel生成标本标签和鉴定标签。

1 植物标本标签设计的原则

为了提高标本标签的可读性与科研价值, 同时减少标签内容检查的工作量, 建议在打印标本标签

时参考以下原则: 信息完整、准确、简明清晰、统一、美观和可编辑、自动纠错。

1.1 信息完整

(1)基本采集信息的完整性。标本标签需要提供采集人、采集号、采集日期、采集地点、经纬度、海拔, 以及所采标本的植株高度、颜色、气味、多度、伴生种等信息。同时, 标本标签上应该有初步鉴定结果。这几项中, 采集人、采集号、采集地点、采集日期是4项最基本的信息。如果这些信息不完整, 标本的价值就会大大降低。其中采集人和采集号相当于标本的身份证, 不能缺失或有歧义。

(2)地名等级的完整性。从国家、省份、县到乡镇、村寨等各地名等级, 都必须完整且规范, 符合当前的地名标准。例如, 中国广东省肇庆市鼎湖山鸡笼山, 英文地点仍然按照由大到小的顺序, 即CHINA, Guangdong, Zhaoqing, Dinghushan, Jilongshan。也可以在标签标题中注明是某一国家或

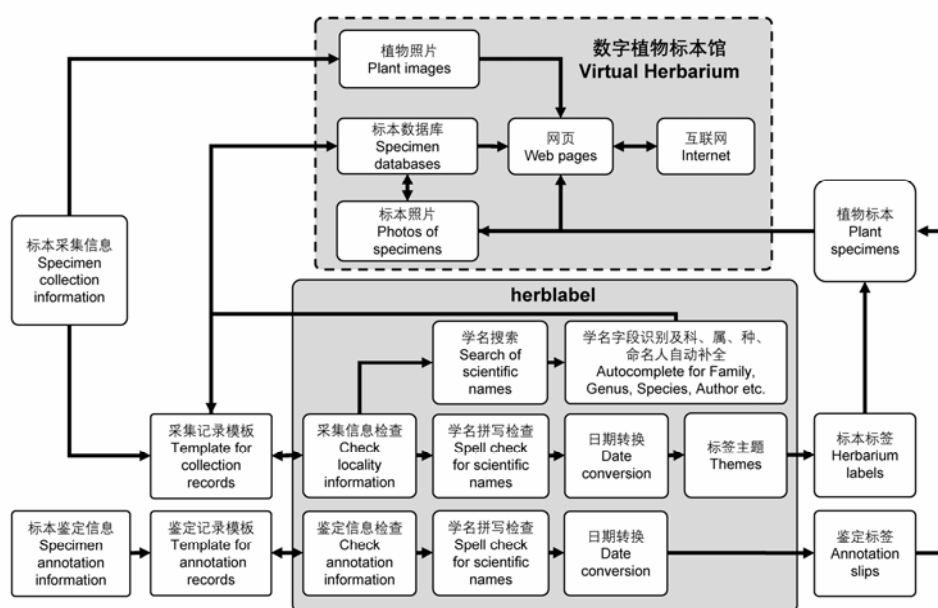


图1 R程序包herblabel的工作流程及其在标本馆中的作用。herblabel要求标本采集数据以简化的Darwin Core数据交换标准的数据框输入, 可自动进行采集信息完整性、学名拼写以及科属对应关系检查, 用户只需要提供完整学名或《中国植物志》、*Flora of China*的中文名, herblabel便可在内置的数据库中查找对应的学名, 并对科、属、种和命名人信息自动补全, 生成富文本格式(RTF)的标本标签或者鉴定标签。贴好采集或鉴定标签后, 标本的照片可用于数字植物标本馆中。同时, 经过herblabel检查过的标本采集数据, 可以直接用于数字植物标本馆的数据库建设中。

Fig. 1 The workflow of the herblabel R package and its role in a herbarium. herblabel uses data.frame based on the simplified Darwin Core data exchange template, and can check spelling of scientific names, find out the family in new classification systems as well as examine completeness of the collection records. Users need to supply complete scientific names for a species or Chinese names either from *Flora Reipublicae Popularis Sinicae* or *Flora of China*. The package will automatically search and find out the corresponding scientific names based on embedded databases, and will fill in the family, genus, specific epithet, authority etc. for the records. Herbarium specimen labels and annotation labels will be in Rich Text Format (RTF), suitable for being viewed and edited in Microsoft Word. The photos of the herbarium specimen, and the examined collection records could then be used in a virtual herbarium.

地区的植物,地名由省份开始。

(3)学名的完整性。目前有些标本馆标本标签上仅有中文名,或者仅有不带作者的学名,这种情况需要避免。标签上的学名必须包含命名人和鉴定日期,同时命名人的缩写要规范。

1.2 准确

标签中的信息不能有歧义。如采集日期09-07-13, 09/07/13, 09/July/13等在不同国家或地区含义不同,这样的格式是不能采用的。我们建议采用英文全称,如09 July 2013,或者中文全称的格式,如2013年7月9日。

1.3 简明清晰

充分利用标签的空间,不显示无信息的项目。例如,无经纬度的标本就不要留出经纬度的位置,无花果特征的描述则不要显示相应的项目。采集信息应该按照条理组织,建议以如下的顺序打印:(1)标本馆名称;(2)科名;(3)学名;(4)采集地点;(5)经度;(6)纬度;(7)海拔;(8)花果特征;(9)生境;(10)采集人;(11)采集号;(12)采集日期;(13)鉴定人;(14)鉴定日期。标本采集信息按照顺序排列,会提高标签的可读性。

1.4 统一

包括格式和度量单位统一。命名人的拼写要遵循学界接受的标准;学名的拼写以专家意见或者植物志的接受名为准。经纬度统一采用WGS1984坐标系,并遵循度、分、秒格式,标明东经、北纬,如22°23'16" N, 114°59'59" E。海拔则统一用米。

1.5 美观

标签的字体、布局应美观易读,采用中英文对照或纯英文打印,以方便国际交流。字体大小适中;段落之间的行距合适;拉丁文统一用斜体,以便和英文相区别;标签的边距适当,文字不能太靠近标签边缘,以免裁切时损坏;标签的高度应随文字多少而自动调整;标签需要有裁切线作为指引,保证边缘整齐。建议英文使用Times New Roman字体、9磅,中文使用宋体、小五号;行距以1.2–1.5倍为佳。

1.6 可编辑

生成的标签文件要能灵活地编辑,对于发现的问题,无论是在标本采集数据本身还是在生成的标签中,都可以快速修改。

1.7 具备纠错机制

生成标签的程序最好具备纠错机制,能够自动

检查的信息包括:(1)学名的拼写,如是否为接受名或者有无拼写错误等;(2)科属的拼写;(3)科属的对应关系等。在检查过程中如果发现错误,需要给出相应的提示。

我们在设计herblabel程序包时充分考虑了以上原则,并努力将标本数据的输入标准化,以使生成的标签准确、清晰、易读。

2 herblabel程序包及其功能

herblabel是用R语言开发的,用于植物标本标签和鉴定标签打印的程序包。源代码保存在Rforge(Theußl & Zeileis, 2008, https://r-forge.r-project.org/R/?group_id=2053/)以及github(<https://github.com/helixcn/herblabel/>)上,可以自由下载和使用(参见附录1)。该程序包可以在Windows、MacOS以及Linux等多种操作系统上运行,可直接通过Rforge安装,安装命令为install.packages("herbalbel", repos="http://R-Forge.R-project.org")。生成的标签为富文本格式(RTF)的文件,可通过Microsoft Word等办公软件进行进一步编辑修改。一般情况下,herblabel自动生成的标签已经足够美观,无需进一步编辑。

在当前版本(0.5.5)中,herblabel的函数包括:herbarium_label、annotation_label、fill_dwc和parse_taxa等,下面分别介绍。

2.1 herbarium_label: 生成植物标本标签

调用格式为herbarium_label(dat = NULL, spellcheck = TRUE, theme = c("KFBG", "PE", "KUN", "HU"), outfile = "herblabel.rtf"),该函数能够基于简化的Darwin Core格式的数据框(data.frame, 其字段参见附录3)生成RTF格式的标本标签(图2),各标签之间设3个点组成的裁切线。其中:dat为基于简化的Darwin Core数据标准的标本采集记录,必须是数据框格式。spellcheck为逻辑选项,为TRUE或者FALSE,默认为TRUE,即进行拼写检查,此时函数会检查学名的接受状态(参见4.1),科名的拼写以及科属的对应关系,如果与内置数据库出现冲突,会在生成的RTF标签文件中提示正确的科属关系(图3)。theme为标签的样式,这里称为主题(见附录1),目前只能为"KFBG", "PE", "KUN", "HU"中的一个,分别为嘉道理农场暨植物园植物标本室、中国科学院植物研究所标本馆、中国科学院昆明植物研究所标本馆、哈佛大学植物标本馆的缩写。这

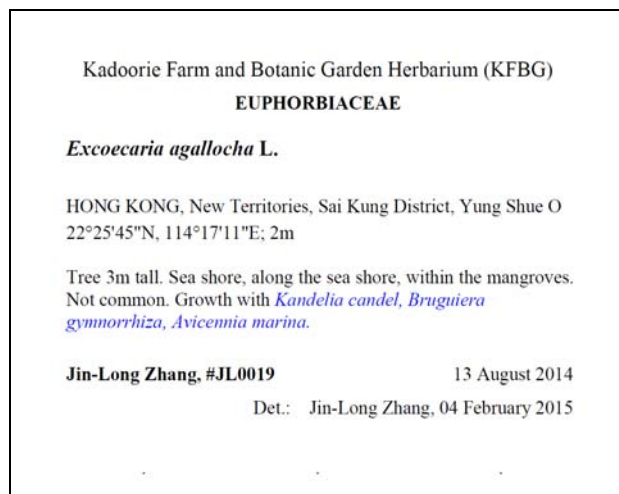


图2 herblabel生成的RTF标本标签。拉丁名自动设定为斜体, 请注意底部由三个点组成的裁切线。

Fig. 2 An RTF herbarium label generated by herblabel, note the scientific names have been automatically identified and changed to italic. Please note the cutting lines comprised by three dots at the bottom.

些标签的样式均参考中国数字植物标本馆CVH新近收录的标本设计, 样式上与以上标本馆目前所用的标签类似, 但不一定完全相同。outfile字符串表示生成的RTF标签文件的文件名。

2.2 annotation_label: 生成鉴定标签

调用格式为 `annotation_label(dat = NULL, spellcheck = TRUE, outfile = "Annotation_Labels.RTF")`, 可基于标本鉴定记录生成RTF的鉴定标签。其中dat为标本鉴定记录模板(参见附录4), 格式为数据框; `spellcheck = TRUE`, 表示进行学名的拼写检查。在设定进行学名检查后, 如果标签中的学名并非接受名(参见4.1), RTF标签中就会给出提示。outfile为字符串, 表示生成的RTF标签文件的文件名。

2.3 fill_dwc: 查找学名并补齐科、属、种、命名人等信息

将一个完整的学名按照属、种、命名人、种下等级、种下等级加词、种下等级命名人逐项填写相当费时费力。fill_dwc函数能根据《中国植物志》或Flora of China收录的中文标准名或完整的学名, 自动将以上信息填写完整。调用格式为 `fill_dwc(dat, namedb = c("spfrps", "spfoc"))`, 其中dat是简化的Darwin Core格式数据框, namedb只能是"spfrps"或"spfoc", 表示按照中文名将模板数据中的学名自动

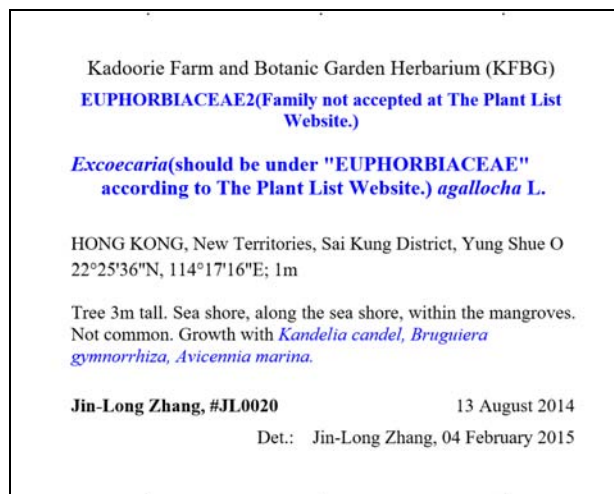


图3 标本标签中拼写以及科属关系的检查示例。图中大戟科EUPHORBIACEAE因为输入时不慎加入数字, 导致herblabel提示其科名未获接受。Excoecaria在APG III系统属于大戟科EUPHORBIACEAE, 但是因为科名的拼写错误造成不匹配, 所以这里提示“按照The Plant List网站, 应为大戟科”。

Fig. 3 Checking of spelling and the family-genus relationship. Note that a digit was appended to EUPHORBIACEAE, so the family name could not be found among the embedded family name database. Excoecaria should be in EUPHORBIACEAE, however it could not be matched due to the spelling error and a warning was issued.

补充完整时, 分别依据的是《中国植物志》或Flora of China。该函数同时能为高等植物各类群的学名匹配科名: 其中苔藓植物分科完全遵循The Plant List网站数据, 蕨类植物(Christenhusz et al, 2011b)、裸子植物(Christenhusz et al, 2011a)、被子植物主要遵循The Plant List网站, 按照APG III分类系统(The Angiosperm Phylogeny Group, 2009), 部分属的科名参考刘冰等(2015)关于APG III系统的论文。

fill_dwc以及herbarium_label函数配合时使用的R代码如下:

```
## 导入openxlsx程序包, 以读取xlsx文件
library(openxlsx)
## 读取程序包内置模板文件
dat <- read.xlsx(system.file("extdata",
"DARWIN_CORE_HERBARIUM_RECORDS.xlsx", package
= "herblabel"))
## 自动填写科属种以及命名人信息
dwc_filled <- fill_dwc(dat)
```

2.4 parse_taxa: 将学名分成属、种、命名人等字段

格式为parse_taxa(taxa), 用于将学名划分成属、种加词、命名人、种下等级(如subsp., var., f.)、种下等级加词、命名人等字段。

3 用herblabel生成标本标签和采集标签

3.1 打印标本标签

假设有名为herbarium_records.xlsx的标本记录数据保存在D:/herbarium/, 则在R控制台(RGui)中输入以下命令, 即可生成RTF标签:

```
## 设定工作路径, 注意斜杠要向右
setwd("D:/herbarium/")
library(herblabel)
library(openxlsx)
dat <- read.xlsx("herbarium_records.xlsx")
#### 检查拼写等
herbarium_label(dat, outfile = "herbarium_labels.RTF")
#### 不进行拼写检查
herbarium_label(dat, spellcheck = FALSE, outfile = "herbarium_labels.RTF")
```

默认情况下, spellcheck = TRUE, 此时herbarium_label函数将进行以下检查: (1)学名有效性, 即是否是The Plant List网站上的接受名; (2)属名的拼写; (3)科的拼写; (4)科属对应关系(图1)。这些信息会在生成的RTF文件中给出提示。

3.2 打印鉴定标签

将该annotation_template.xlsx拷贝到D:/herbarium/, 填好相应的鉴定信息后, 在R控制台中运行如下命令:

```
setwd("D:/herbarium")
library(herblabel)
library(openxlsx)
dat <- read.xlsx("annotation_template.xlsx")
annotation_label(dat)
```

由herbarium_label和annotation_label函数生成的RTF文件(图2-4), 可方便地用Microsoft Word进一步编辑。

为了更方便地使用herblabel打印标本标签及鉴定标签, 并做好数据备份, 作者编写了run_herblabel R脚本(下载地址: <https://github.com/helixcn/>

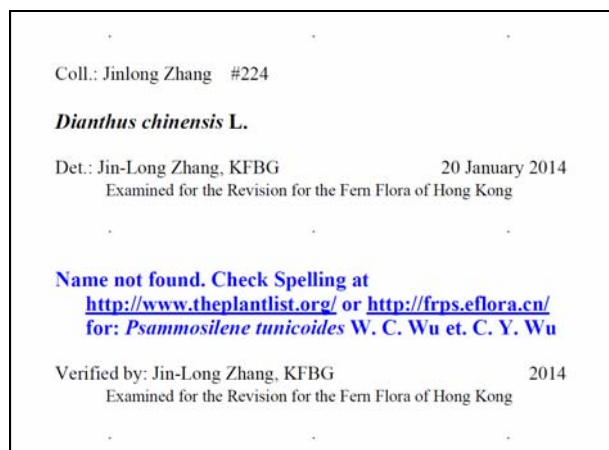


图4 标本鉴定标签举例。根据输入的文字, 鉴定标签的大小可以非常灵活。鉴定标签也可以检查拼写以及学名是否为接受名。请注意底部由三个点组成的裁切线。

Fig. 4 Example of Annotation labels. These labels can be quite flexible in size depending on the text provided. Checking of the spelling and validity could also be implemented. Please note the cutting lines comprised by three dots at the bottom.

run_herblabel/ 或 <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=attachment&id=92319/>, 文件夹说明参见附录2)。用户在采集信息模板输入数据后(附录3), 通过双击相同文件夹下的Window批处理(.bat)文件, 就可以直接生成相应的标签, 同时按照时间顺序做好备份。程序会自动检查出现的错误或者问题, 同时会在Microsoft Excel模板文件中给出提示。由于数据以简化的Darwin Core标准保存, 可以直接用于GBIF数据共享或者数字植物标本馆(纪力强, 2000; 许哲平等, 2010)的建设中。

4 标签上学名、科属的可能错误及其改正

4.1 学名或者命名人拼写错误或者为异名

在准备标签时直接输入学名往往容易出错, 这些错误通常包括: (1)属名或者种加词的拼写错误; (2)大小写错误; (3)命名人的缩写不符合规范等。命名人的拼写方式不统一严格说来虽然不能称为错误, 但也可能会影响标签的阅读, 这些问题将影响标本的整理。herbarium_label函数可以将Microsoft Excel中输入的学名与内置的数据库进行严格比对, 内置的数据库基于The Plant List网站(<http://www.theplantlist.org/>)所有的接受名以及《中国植物志》(<http://frps.eflora.cn/>)和Flora of China(http://www.efloras.org/flora_page.aspx?flora_id=2/)

的接受名。若输入的学名与数据库中的学名拼写不符, 生成的RTF文件中就会给出提示, 以使用户及时发现和处理。

4.2 科属拼写错误以及对应关系的检查

APG分类系统是目前为止最接近被子植物真实系统发育关系的分类系统(The Angiosperm Phylogeny Group, 2016), 很多标本馆(包括英国的邱园, Royal Botanical Gardens, Kew)正在转向使用APG分类系统, 而该系统的科属划分和《中国植物志》以及地方志有很多不一致的地方。物种所在的APG III等现代分类系统的科名以及接受状态可在The Plant List网站查询, 但如果每一条记录都在该网站查询会十分费时。为此herbarium_label函数在生成标本标签时会进行科名和属名的拼写以及对应关系检查。若该条标本存在科、属拼写错误, 或者标本的科属对应关系与APG III等新分类系统分科不同时给出提示(图3)。由于分子以及解剖学等多方面的证据不断更新, APG等新系统也在不断变化中, 最新的APG IV (The Angiosperm Phylogeny Group, 2016)已经发表, 但是涉及的科属变化还有待进一步整理。高等植物其他类群的新系统也在不断变化中。我们会适时将herblabel的内置数据更新到APG IV等新的分类系统。

4.3 伴生种学名的斜体

生境描述中如出现伴生种的学名, herbarium_label函数可基于内置的拉丁文数据库自动匹配拉丁文, 并将其转换为斜体, 用蓝色标记。因此, 如果伴生种的学名出现拼写错误则不会被识别, 这样在查看标签时容易发现并改正。

4.4 处理有歧义的时间

herblabel生成的标签中, 日期尽量采用英文全称, 输出格式为“21 July 2016”, 其中月份为英文全称, 年份用4位数字, 置于最后。但在模板中输入日期时, 不必按照英文全称填写, 只需按照yyyy-mm-dd的ISO 8601格式(Wolf & Wicksteed, 1998)填写即可, 即年、月、日用“-”隔开, 例如“2015-12-8”表示2015年12月8日。如果用户使用自己的日期格式导致软件无法识别和自动转换, herblabel将保留作者提供的日期格式。由于输入数据用的是Microsoft Excel模板, 而Excel倾向于将数据转换为一系列整数, herblabel考虑到这种情况, 在0.5.5版本后能够读取并识别Excel转换为整数之后

的日期。

基于简化的Darwin Core和CVH5.0的数据交换标准利用R语言编写的程序包herblabel, 实现了标本标签的快速批量生成; 其自动纠错功能能够对学名的拼写以及科属对应关系进行检查, 有效减少了数据录入过程中产生的错误。本程序包在打印标签时使用的是以Darwin Core标准保存的标本数据库, 不仅方便统计和管理, 也可以直接用于GBIF数据共享或者数字植物标本馆的建设。该程序包将显著提高植物标本馆在标本制作、管理和信息录入时的工作质量和效率, 并在植物生物多样性编目相关的研究中发挥重要作用。

致谢: 感谢Stephan Gale博士、Pankaj Kumar博士、黄世芳女士、冯嘉恩女士对植物标本标签的设计提出宝贵意见。衷心感谢三位审稿专家以及编委提出的建设性意见和建议。

参考文献

- Bridson D, Forman L (1998) The Herbarium Handbook, 3rd edn. Royal Botanic Gardens: Kew, Richmond.
- CBOL Plant Working Group, Hollingsworth PM, Forrest LL, Spouge JL, Hajibabaei M, Ratnasingham S, van der Bank M, Chase MW, Cowan RS, Erickson DL, Fazekas AJ, Graham SW, James KE, Kim KJ, Kress WJ, Schneider H, van AlphenStahl J, Barrett SCH, van den Berg C, Bogarin D, Burgess KS, Cameron KM, Carine M, Chacón J, Clark A, Clarkson JJ, Conrad F, Devey DS, Ford CS, Hedderson TAJ, Hollingsworth ML, Husband BC, Kelly LJ, Kesanakurti PR, Kim JS, Kim YD, Lahaye R, Lee HL, Long DG, Madriñán S, Maurin O, Meusnier I, Newmaster SG, Park CW, Percy DM, Petersen G, Richardson JE, Salazar GA, Savolainen V, Seberg O, Wilkinson MJ, Yi DK, Little DP (2009) A DNA barcode for land plants. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 106, 12794–12797.
- Christenhusz M, Reveal J, Farjon A, Gardner MF, Mill RR, Chase MW (2011a) A new classification and linear sequence of extant gymnosperms. Phytotaxa, 19, 55–70.
- Christenhusz M, Zhang XC, Schneider H (2011b) A linear sequence of extant families and genera of lycophytes and ferns. Phytotaxa, 19, 7–54.
- Delisle F, Lavoie C, Jean M, Lachance D (2003) Reconstructing the spread of invasive plants: taking into account biases associated with herbarium specimens. Journal of Biogeography, 30, 1033–1042.
- Evans MEK, Smith SA, Flynn RS, Donoghue MJ (2009) Climate, niche evolution, and diversification of the “Bird-Cage” evening primroses (*Oenothera*, sections *Anogra* and *Kleinia*). The American Naturalist, 173,

- 225–240.
- Ji LQ (2000) The construction status of biodiversity information system and a brief introduction of CBIS. *Chinese Biodiversity*, 8, 41–49. (in Chinese with English abstract) [纪力强 (2000) 生物多样性信息系统建设的现状及CBIS简介. *生物多样性*, 8, 41–49.]
- Liu B, Ye JF, Liu S, Wang Y, Yang Y, Lai YJ, Zeng G, Lin QW (2015) Families and genera of Chinese angiosperms: a synoptic classification based on APG III. *Biodiversity Science*, 23, 225–231. (in Chinese with English abstract) [刘冰, 叶建飞, 刘夙, 汪远, 杨永, 赖阳均, 曾刚, 林秦文 (2015) 中国被子植物科属概览: 依据APG III系统. *生物多样性*, 23, 225–231.]
- McGraw JB (2001) Evidence for decline in stature of American ginseng plants from herbarium specimens. *Biological Conservation*, 98, 25–32.
- Rivers MC, Taylor L, Brummitt NA, Meagher TR, Roberts DL, Lughadha EN (2011) How many herbarium specimens are needed to detect threatened species? *Biological Conservation*, 144, 2541–2547.
- R Core Team (2016) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2016-8-18)
- Smith SA, Donoghue MJ (2010) Combining historical biogeography with niche modeling in the *Caprifolium* clade of *Lonicera* (Caprifoliaceae, Dipsacales). *Systematic Biology*, 59, 322–341.
- The Angiosperm Phylogeny Group (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1–20.
- Theußl S, Zeileis A (2008) Collaborative software development using R-Forge. <https://r-forge.r-project.org/>. (accessed on 2016-8-18)
- Weber E (1998) The dynamics of plant invasions: a case study of three exotic goldenrod species (*Solidago* L.) in Europe. *Journal of Biogeography*, 25, 147–154.
- Wieczorek J, Bloom D, Guralnick R, Blum S, Döring M, Giovanni R, Robertson T, Vieglais D (2012) Darwin Core: an evolving community-developed biodiversity data standard. *PLoS ONE*, 7, e29715.
- Wolf M, Wicksteed C (1998) Date and time formats. <http://www.w3.org/TR/NOTE-datetime/>. (accessed on 2016-8-18)
- Xu ZP, Cui JZ, Qin HN, Ma KP (2010) On the architecture of biodiversity e-Science infrastructure in China. *Biodiversity Science*, 18, 480–488. (in Chinese with English abstract) [许哲平, 崔金钟, 覃海宁, 马克平 (2010) 中国生物多样性 e-Science平台建设构想. *生物多样性*, 18, 480–488.]
- Zhu L, Ma KP (2010) On the niche stasis of intercontinental invasive plants. *Biodiversity Science*, 18, 547–558. (in Chinese with English abstract) [朱丽, 马克平 (2010) 洲际入侵植物生态位稳定性研究进展. *生物多样性*, 18, 547–558.]

(责任编辑: 严岳鸿 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 herblabel程序包的安装、配置和使用

Appendix 1 Installation, configuration and using of herblabel
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016230-1.pdf>

附录2 对run_herblabel文件夹下各文件的详细说明

Appendix 2 Description for the files in folder "run_herblabel"
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016230-2.pdf>

附录3 标本标签模板各列说明

Appendix 3 Description for the columns of the herbarium label template
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016230-3.pdf>

附录4 鉴定标签模板各列说明

Appendix 4 Description for the columns of the annotation label template
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016230-4.pdf>

附录1 herblabel程序包的安装、配置和使用

Appendix 1 Installation, configuration and using of herblabel

herblabel 程序包既可单独使用, 也可通过 run_herblabel 脚本运行, 生成不同样式的标签。run_herblabel 下的 R 脚本同时提供数据检查功能, 可有效减少标签中的错误。用户只需要在模板中录入数据, 双击 run.bat 文件即可生成标签, 同时完成标本记录的备份和检查。

用 run_herblabel R 脚本运行 herblabel, 需要安装 1. R 软件, 2. Rtools 软件包, 3. openxlsx 程序包, 同时配制好启动路径。herblabel 程序包对中文字符的处理基于 GB18030 编码, 因此操作系统最好为 Windows 7 或者以上。本文介绍如何在 Windows 7 中安装和使用 herblabel 打印标本标签。在 Windows 8 以及 Windows 10 的安装与 Windows 7 类似。

1 安装 R 软件

R 软件下载的地址为: <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/>, 请按照默认路径安装 R 软件。建议用户下载最新版的 R, 因为涉及到字符编码转换, R 版本不能低于 3.0.3。

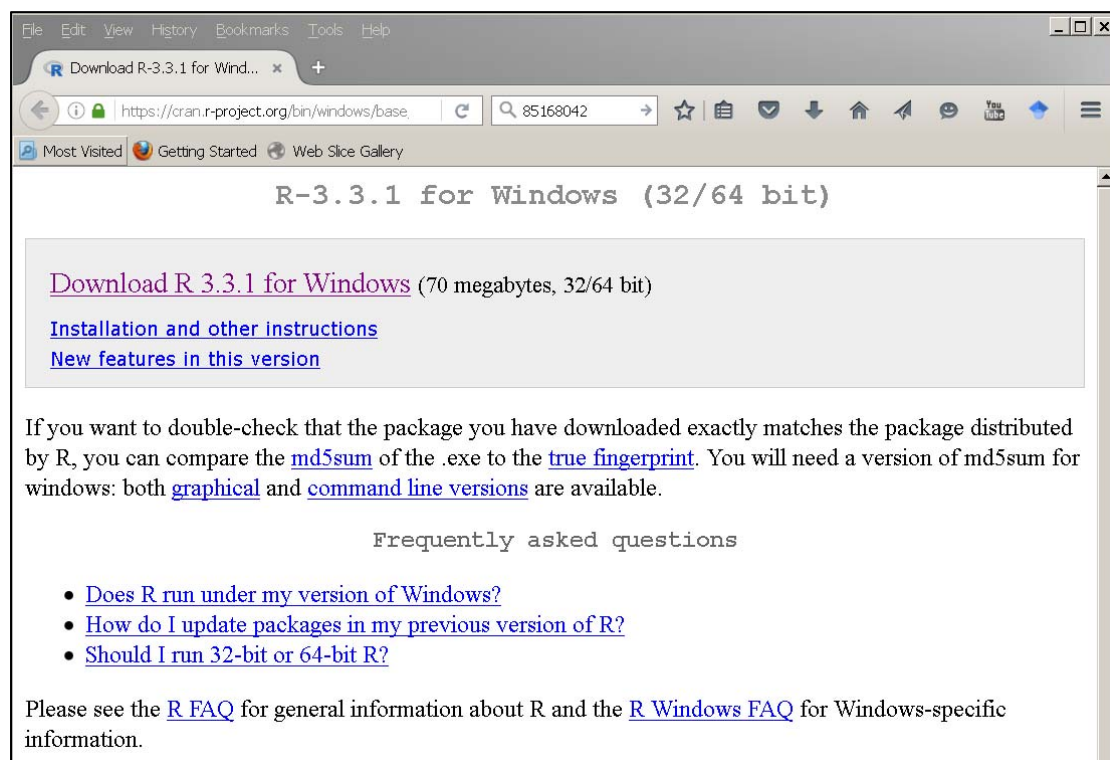


图 1 R 软件 windows 版本下载页

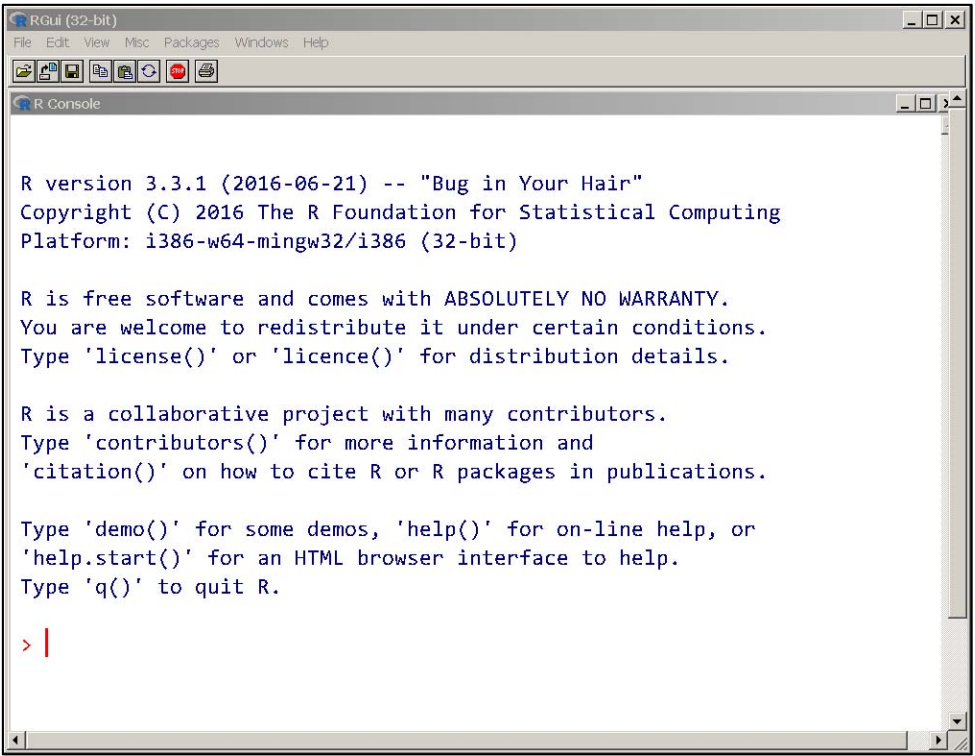


图2 R 软件 3.3.1 的登录界面

2 设置 Rscript 的启动路径

Rscript 是 R 软件的组件之一，可以直接在控制台(console)运行 R 脚本。例如安装的 R 软件版本为 3.3.1，则 Rscript.exe 所在的文件夹一般为"C:\Program Files\R\R-3.3.1\bin;"。要运行 run.bat 批处理文件，必须在系统路径中添加 Rscript.exe 的启动路径。

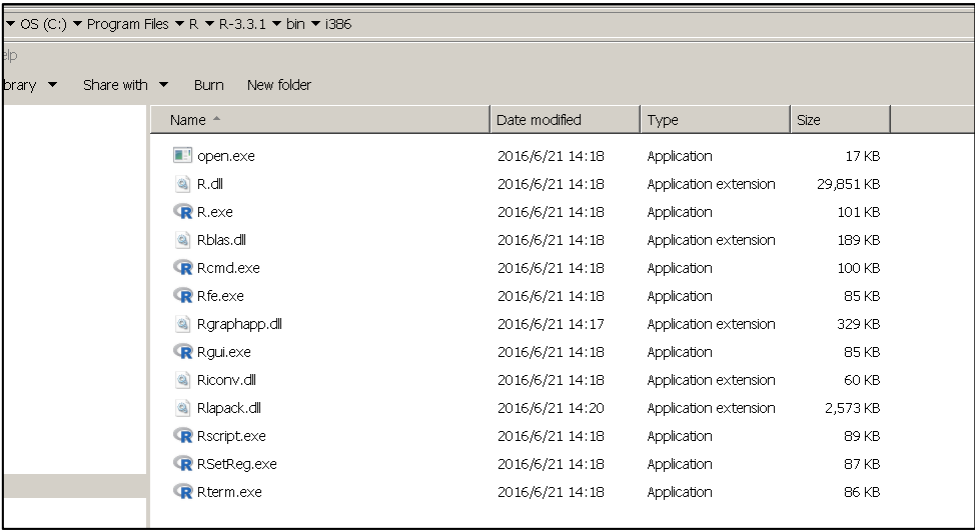


图3 Rscript.exe 所在的位置

设置方法为：右键点击"我的电脑">属性>高级>环境变量>系统变量，找到 Path，点击“编辑”。通常已经安装的一些软件会自动添加启动路径，这些已经存在的项目不能删除，否则会影响相应软件的功能，因此只能在原有的文件启动路径后面添加 Rscript.exe 的路径。

添加方法为: 拷贝";C:\Program Files\R\R-3.3.1\bin;C:\Program Files\R\R-3.3.1\bin\i386;" (注意: 仅拷贝双引号里面的内容, 且依据 R 的版本不同, 需要更改相应的版本号, 并以 Rscript.exe 所在的真实路径为准)到 Path 的最后.注意首位的分号";"必须保留.然后点确定。

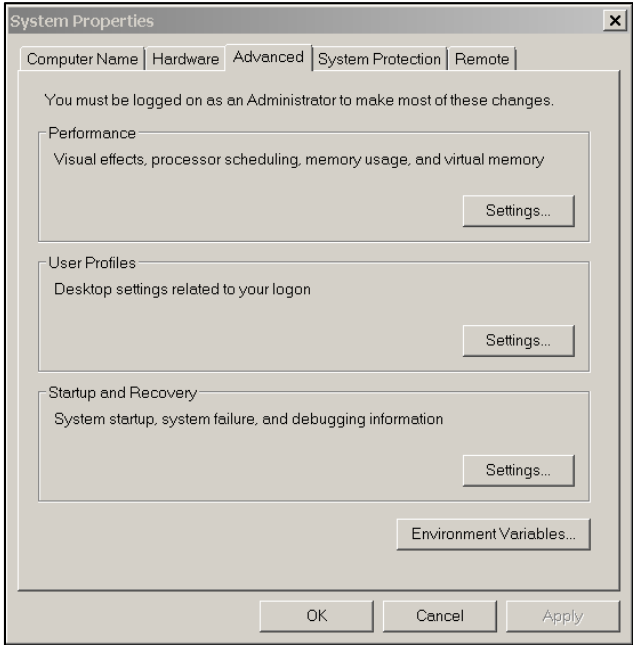


图 4 点击“环境变量”Environmental Variables 设定系统变量

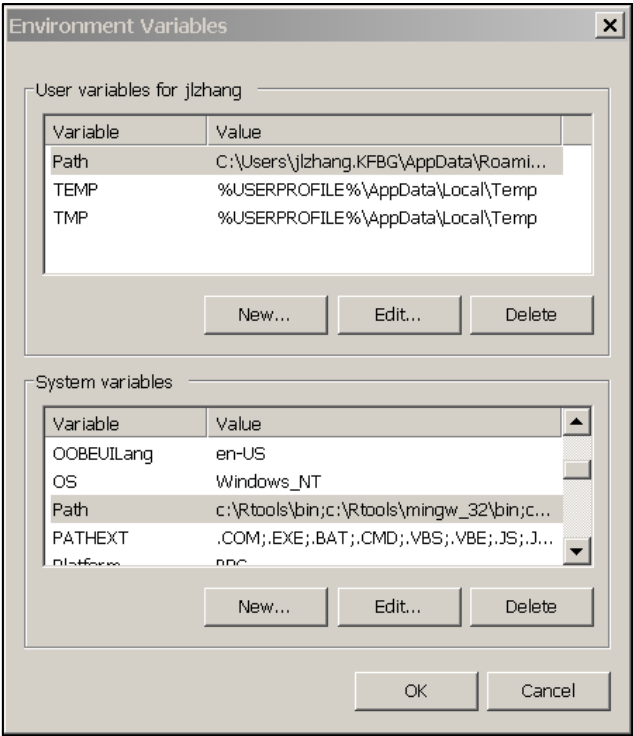


图 5 通过“系统变量”System variables >Path 添加启动路径

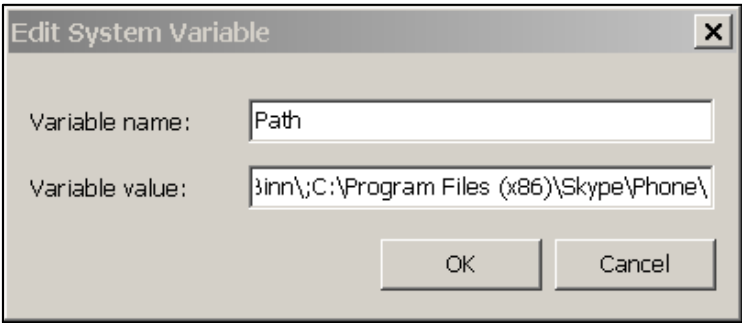


图 6 在 Variable value 一栏的最后, 添加 Rscript.exe 的启动路径

3 安装 Rtools

Rtools 是编写 R 程序包的工具软件, 含有读写 xlsx 文件所需的 unzip 和 zip 函数, 安装时必须允许 Rtools 修改启动路径, 以便从控制台中调用 zip 等命令读写 Excel 模板, 其下载地址为: <https://cran.r-project.org/bin/windows/Rtools/>。

Building R for Windows

This document is a collection of resources for building packages for R under Microsoft Windows, or for building R itself (version 1.9.0 or later). The original collection was put together by Prof. Brian Ripley; it is currently being maintained by Duncan Murdoch.

The authoritative source of information for tools to work with the current release of R is the "R Administration and Installation" manual. In particular, please read the ["Windows Toolset" appendix](#).

Rtools Downloads

Some of the tools are incompatible with obsolete versions of R. We maintain one actively updated version of the tools, and other "frozen" snapshots of them. We recommend that users use the latest release of Rtools with the latest release of R.

The current version of this file is recorded here: [VERSION.txt](#).

Download	R compatibility	Frozen?
Rtools34.exe	R 3.3.x and later	No
Rtools33.exe	R 3.2.x to 3.3.x	Yes
Rtools32.exe	R 3.1.x to 3.2.x	Yes

图 7 Rtools 下载页面, 以未冻结(Frozen)的版本为准

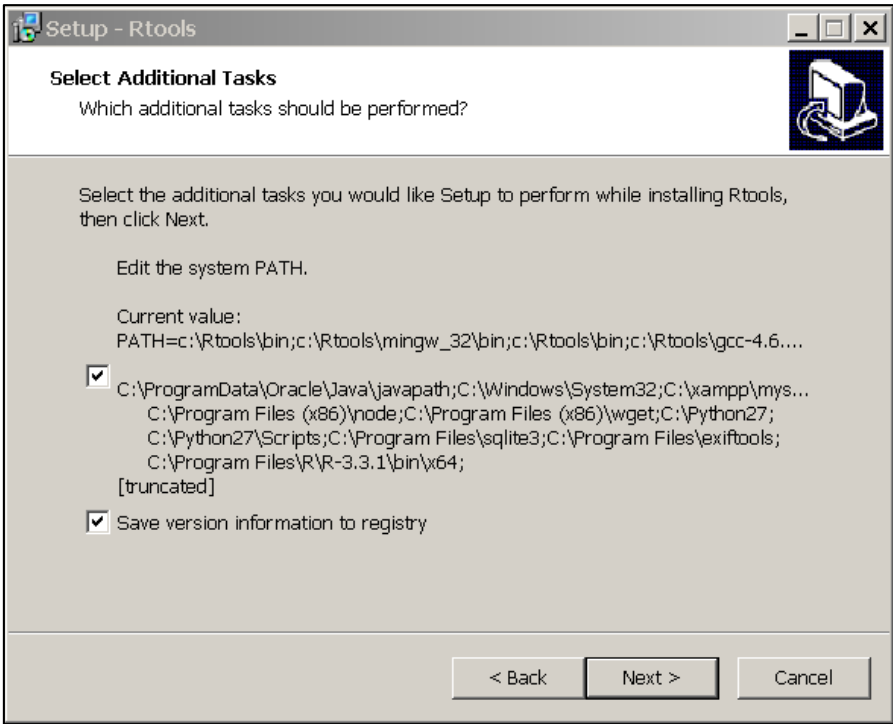


图 8 安装 Rtools 时应该勾选 Edit the system PATH 选项，允许其修改 system PATH。

4 检查 Rtools 和 Rscript 路径是否正确配置

Rtools 和 Rscript 安装完成后可以通过以下方式检查是否安装成功:

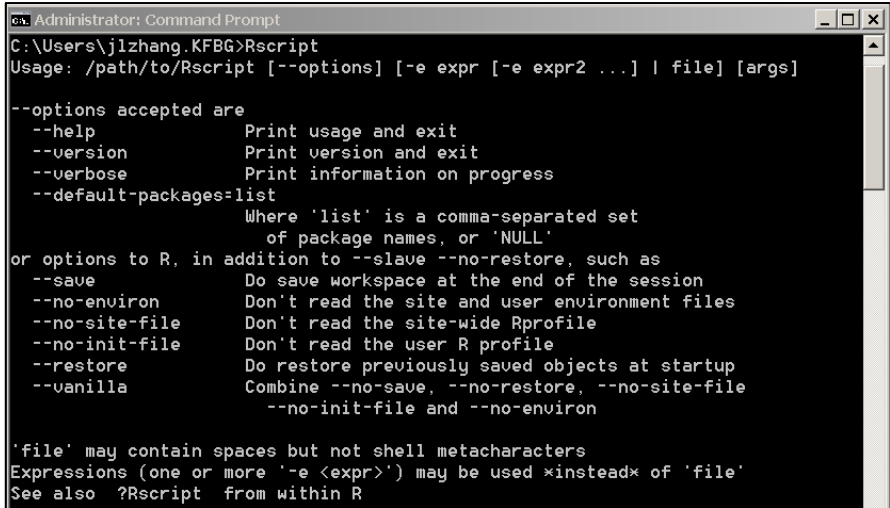


图 9 在 Windows 左下角的“开始”，“搜寻”输入 cmd 打开控制台，在控制台中输入 Rscript，如上图所示，若未提示错误，则 Rscript 配置成功。

```
C:\Users\j1zhang.KFBG>zip
Copyright (c) 1990-2008 Info-ZIP - Type 'zip -L' for software license.
Zip 3.0 (July 5th 2008). Usage:
zip [-options] [-b path] [-t mmdyyy] [-n suffixes] [zipfile list] [-xi list]
The default action is to add or replace zipfile entries from list, which
can include the special name - to compress standard input.
If zipfile and list are omitted, zip compresses stdin to stdout.
-f freshen: only changed files      -u update: only changed or new files
-d delete entries in zipfile        -m move into zipfile (delete OS files)
-r recurse into directories         -j junk (don't record) directory names
-o store only                       -l convert LF to CR LF (-ll CR LF to LF)
-1 compress faster                  -9 compress better
-q quiet operation                  -v verbose operation/print version info
-c add one-line comments            -z add zipfile comment
-@ read names from stdin            -o make zipfile as old as latest entry
-x exclude the following names      -i include only the following names
-F fix zipfile (-FF try harder)     -D do not add directory entries
-A adjust self-extracting exe       -J junk zipfile prefix (unzipsfx)
-T test zip integrity               -X eXclude eXtra file attributes
-f use privileges (if granted) to   -S include system and hidden files
-$ include volume label              -s include system and hidden files
-e encrypt                          -n don't compress these suffixes
-h2 show more help
```

图 10 在控制台中输入 zip, 如图所示, 若未提示错误, 则 Rtools 配置成功

5 从 rforge 安装 herblabel

herblabel 程序包的代码保存在 R-Forge 上, 网址为:

https://r-forge.r-project.org/R/?group_id=2053, 可在 RGUI 的命令中输入:

`install.packages("herblabel", repos="http://R-Forge.R-project.org")` 进行安装:

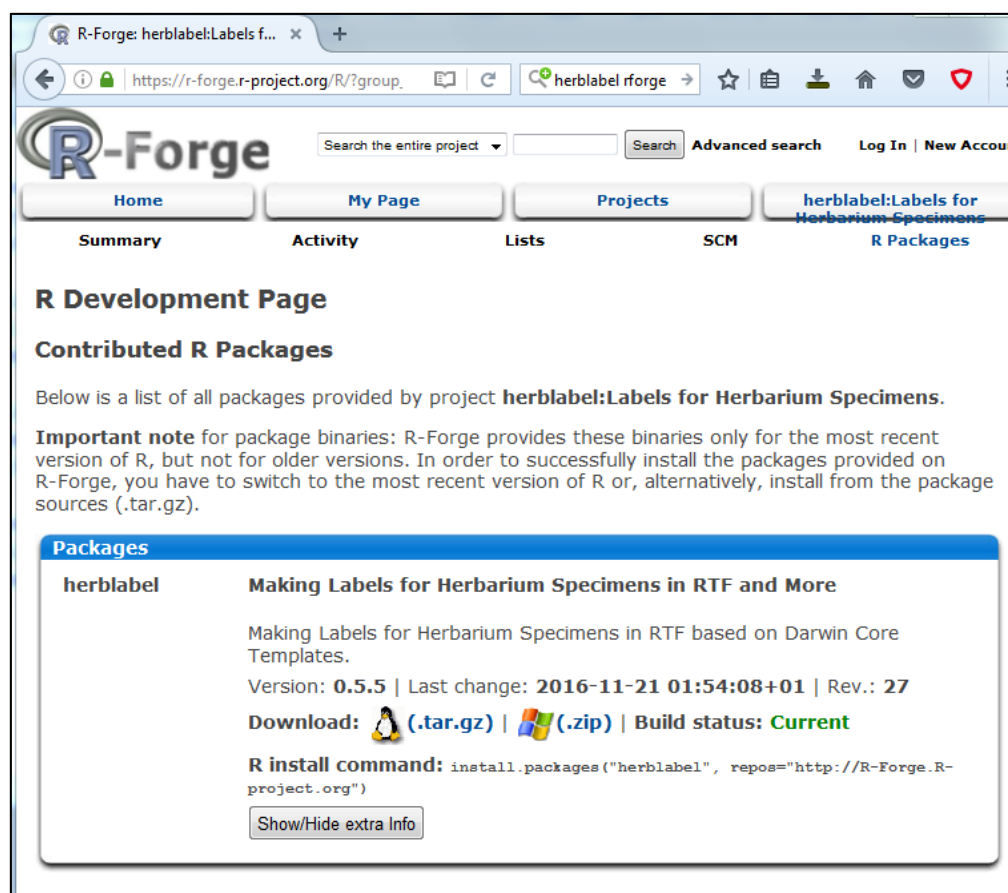
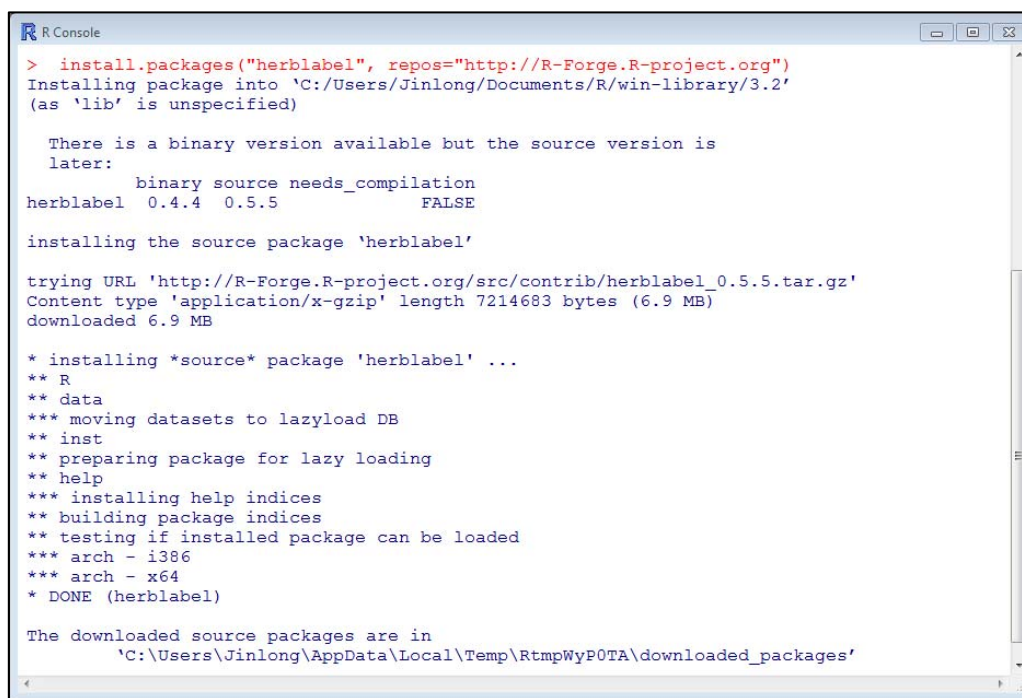


图 11 herblabel 在 rforge 的下载页 https://r-forge.r-project.org/R/?group_id=2053



```
R Console
> install.packages("herblabel", repos="http://R-Forge.R-project.org")
Installing package into 'C:/Users/Jinlong/Documents/R/win-library/3.2'
(as 'lib' is unspecified)

There is a binary version available but the source version is
later:
      binary source needs_compilation
herblabel 0.4.4 0.5.5                FALSE

installing the source package 'herblabel'

trying URL 'http://R-Forge.R-project.org/src/contrib/herblabel_0.5.5.tar.gz'
Content type 'application/x-gzip' length 7214683 bytes (6.9 MB)
downloaded 6.9 MB

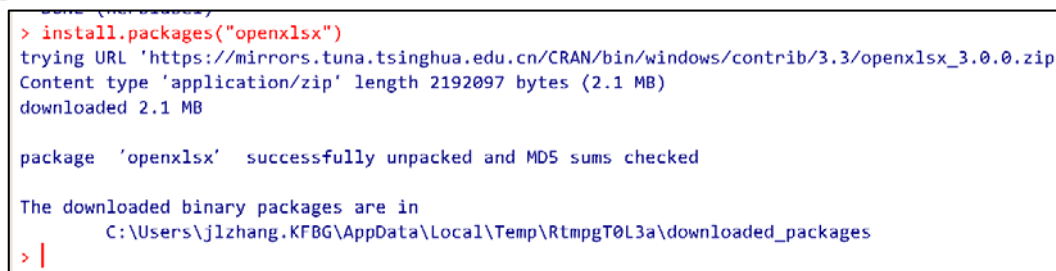
* installing *source* package 'herblabel' ...
** R
** data
*** moving datasets to lazyload DB
** inst
** preparing package for lazy loading
** help
*** installing help indices
** building package indices
** testing if installed package can be loaded
*** arch - i386
*** arch - x64
* DONE (herblabel)

The downloaded source packages are in
  'C:\Users\Jinlong\AppData\Local\Temp\RtmpWyP0TA\downloaded_packages'
```

图 12 通过 install.packages, 从 Rforge 网站安装 herblabel

6 安装 openxlsx 程序包

openxlsx 是用来读写 xlsx 文件的 R 程序包, 这里用来读写标本采集记录和鉴定记录的 Excel 模板, 在 RGUI 的命令行中输入 install.packages("openxlsx"), 选择距离较近的 CRAN 镜像, openxlsx 程序包会自动下载并安装好。



```
> install.packages("openxlsx")
trying URL 'https://mirrors.tuna.tsinghua.edu.cn/CRAN/bin/windows/contrib/3.3/openxlsx_3.0.0.zip'
Content type 'application/zip' length 2192097 bytes (2.1 MB)
downloaded 2.1 MB

package 'openxlsx' successfully unpacked and MD5 sums checked

The downloaded binary packages are in
  C:\Users\jylzhang.KFBG\AppData\Local\Temp\RtmpgT0L3a\downloaded_packages
> |
```

图 13 通过 install.packages 命令安装 openxlsx 程序包

至此, herblabel 及其依赖的程序包安装完成。可通过输入 library(openxlsx)检查该程序包是否安装成功, 若提示缺少 Rcpp 程序包, 则输入 install.packages("Rcpp")安装即可。

7 下载 run_herblabel 文件夹模板

run_herblabel 是打印标本标签的工作目录, 解压缩后应放到路径中没有中文的文件夹中使用。run_herblabel 文件夹包含数据模板以及 R 脚本文件, 在 xlsx 模板中输入数据后, 双击 run.bat 批处理文件即可生成不同主题的 RTF 标签文件。

run_herblabel 可在以下任意一个网址下载:

- (1) http://jinlongzhang.weebly.com/uploads/7/5/3/6/7536331/run_herblabel.zip
- (2) <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=attachment&id=92319>

(3) https://github.com/helixcn/run_herblabel
用 7zip (<http://www.7-zip.org/>)或 winRAR (<http://www.rarlab.com/>)解压缩。

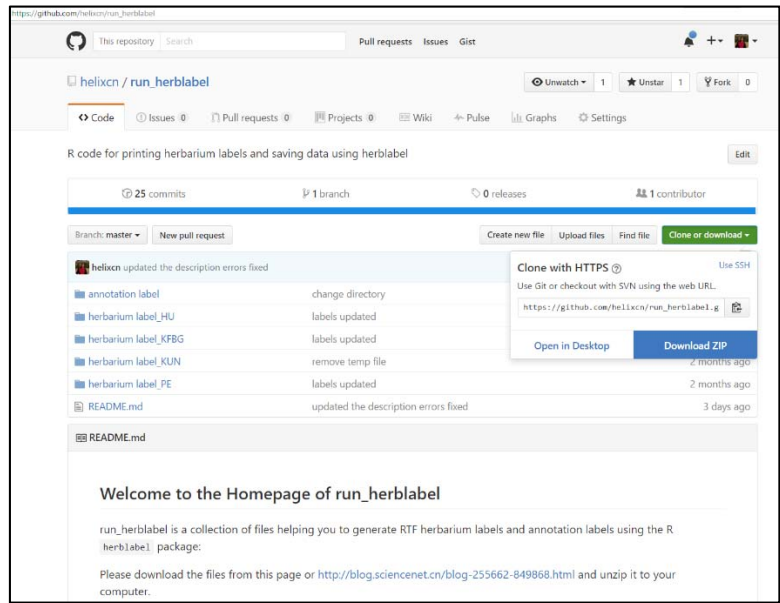


图 14 在 <https://www.github.com/helixcn/herblabel> 下载 run_herblabel 文件夹

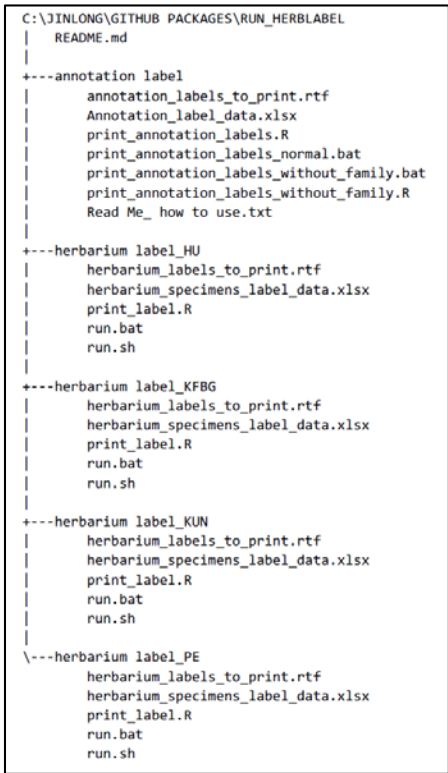


图 15 run_herblabel 文件夹的基本结构

解压缩后, 可见若干子文件夹, 分别是 1. Annotation label; 2. herbarium label_HU; 3. herbarium label_KFBG; 4. herbarium label_KUN; 5. herbarium label_PE。其中 Annotation label 文件夹下的文件用来生成鉴定标签, 其余文件夹分别用来生成不同样式的标本标签。各

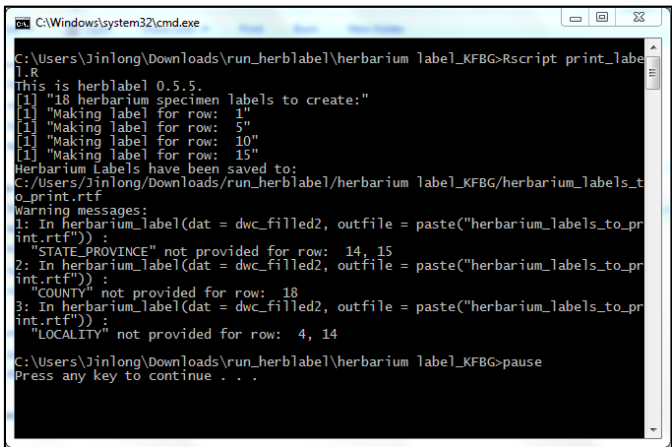


图 18 运行.bat 文件，可以显示标本标签打印的进程，数据检查过程中的警告，标签文件所保存位置等信息等。

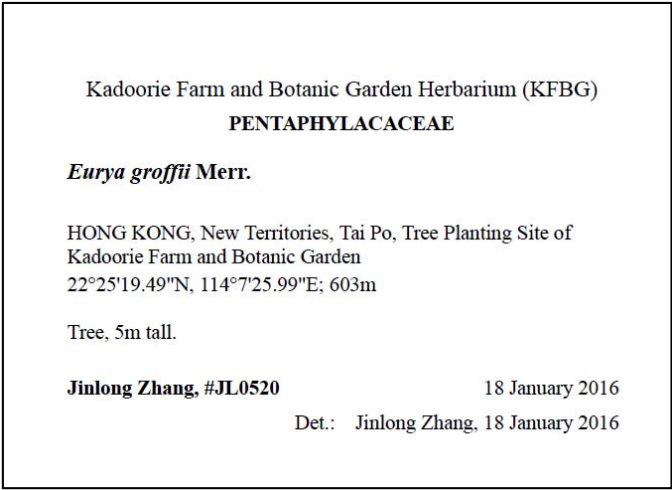


图 19 嘉道理农场暨植物园植物标本室(KFBG)式样的标本标签

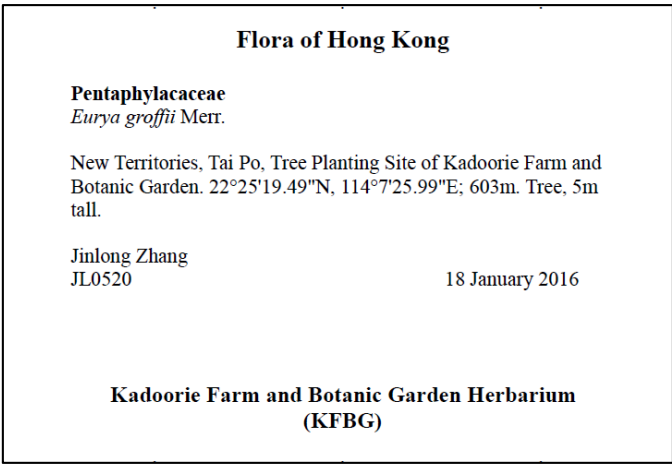


图 20 哈佛大学植物标本馆(HU)式样的标本标签

Kadoorie Farm and Botanic Garden Herbarium
(KFBG)

Col.: Jinlong Zhang
No.: JL0520
Date.: 18 January 2016
Loc: HONG KONG, New Territories, Tai Po, Tree Planting Site
of Kadoorie Farm and Botanic Garden
Lat.: 22°25'19.49"N, Lon.: 114°7'25.99"E
Alt.: 603m
Remarks:
Description: Tree, 5m tall.

Family: PENTAPHYLACACEAE
Local Name: 岗桉
Species: *Eurya groffii* Merr.

图 21 中国科学院昆明植物研究所植物标本馆(KUN)式样的标本标签

Kadoorie Farm and Botanic Garden Herbarium (KFBG)

Collector: Jinlong Zhang

No.: JL0520 Date of Coll. : 18 January 2016

Location: HONG KONG, New Territories, Tai Po, Tree Planting
Site of Kadoorie Farm and Botanic Garden

Description: Tree, 5m tall.
Remarks:

Altitude.: 603m; Lat.: 22°25'19.49"N, Lon.: 114°7'25.99"E

Family: PENTAPHYLACACEAE Local Name: 岗桉

Species: *Eurya groffii* Merr.

图 22 中国科学院植物研究所标本馆(PE)式样的标本标签

9 打印鉴定标签

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S				
1	PROJECT	TYPE	STA	TYPE	REF	FAMILY	LOCAL_N	GENUS	SPECIES	AUTHOR	INFRASPE	INFRASPE	AUTHOR	ABBREVIATION	IDENTIFIED	INSTITUTION	DATE	IDENT	DET.	NOTES	SPECIMEN	COLLECTOR	COLLECTOR_N
2	Examined	ISOTYPE	DC	Mono	Ophioglossaceae			Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Det.	Jin-Long Z KFBG	2014-1-21				The specimen is ext.	Jinlong Zh	224	
3	Examined	for the Revision	for	Ophioglossaceae				Botrychium	yunnanense	Ching				Verified	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20					Jinlong Zh	224	
4	Examined	for the Revision	for	Caryophyllaceae				Dianthus	chinensis	L.				Det.	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20					Jinlong Zh	224	
5	Examined	for the Revision	for	Caryophyllaceae				Psammodes	tunicae	W. C. Wu				Verified	Jin-Long Z KFBG	2014							
6	Examined	for the Barcoding	of Plants	in Hong Kong										Det.	Jin-Long Zhang	2014-1-20					Jinlong Zh	224	
7		Holotype	Perkins	f	Ophioglossaceae			Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Verified	Jin-Long Zhang	20 Jan 2014							
8		Holotype	Perkins	f	Ophioglossaceae			Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Det.	Jin-Long Zhang	2014-1-20							
9		Holotype	Perkins	f	Ophioglossaceae			Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Verified	Jin-Long Zhang	20 Jan 2014					Jinlong Zh	224	
10	Revision	for the Fern Flora	of f	Ophioglossaceae				Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Det.	Jin-Long Z KFBG	20 Jan 2014							
11		ISOTYPE	DC	Mono	Ophioglossaceae			Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Verified	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20					Jinlong Zh	224	
12	Revision	for the Fern Flora	of f	Ophioglossaceae				Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Det.	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20							
13	Revision	for the Fern Flora	of f	Ophioglossaceae				Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Verified	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20					Jinlong Zh	224	
14				Ophioglossaceae				Ophioglossos	petiolatus	Hook.				Det.	KFBG	2014-1-20							
15				Magnoliaceae										Det.	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20				APGIII Family, The P	Jinlong Zh	224	
16				Orchidaceae										Det.	Jin-Long Z KFBG	2014-1-20				APGIII Family, The P	Jinlong Zh	224	

图 23 Annotation_label_data.xlsx 模板

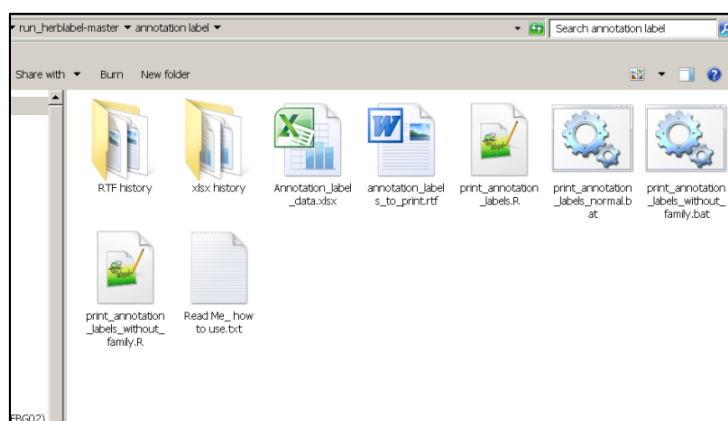


图 24 Run_herblabel 解压缩之后的 annotation label 文件夹, 双击.bat 文件, 即可生成 rtf 文件。两个.bat 文件生成标签的区别在于是否在标签上打印科名。

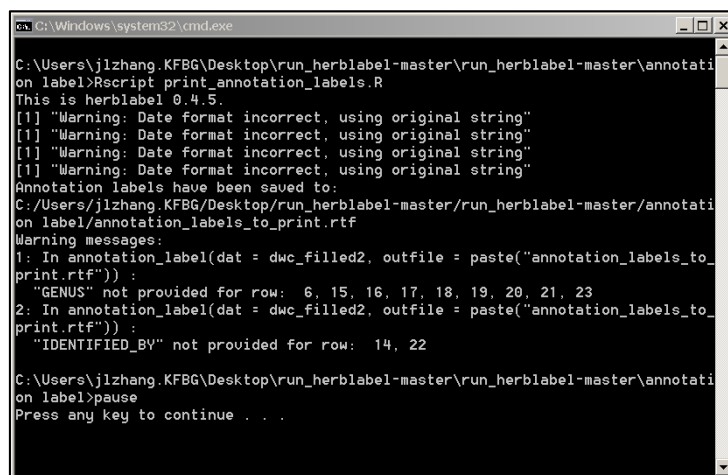


图 25 双击 bat 文件后打印鉴定标签, 考虑到有些学者喜欢手写鉴定标签, 程序包允许打印空白标签, 但是在运行过程中会给出警告。

1. 在 run_herblabel\annotation label 子文件夹下, 找到 Annotation_label_data.xlsx, 按照各列内容分别输入鉴定信息。可只在 LOCAL_NAME 一列输入植物的中文名, FAMILY、GENUS、SPECIES 等各列会在运行中自动补充完整。
2. 双击 print_annotation_labels_without_family.bat 生成不带科名的鉴定标签。双击 print_annotation_labels_normal.bat 生成带科名的鉴定标签。
3. 鉴定数据以及标签数据的备份, 分别保存在 RTF history/和 xlsx history/文件夹下。

注意: 在运行.bat 文件之前, 均应该关闭 xlsx 模板文件以及 RTF 标签文件。

10 更新 herblabel 程序包

我们会根据用户反馈的意见进行修改或更新, 不定期发布新版本。用户如果要使用更新的功能, 需要及时更新程序包。更新程序包请用如下 R 命令从 rforge 重新安装:

```
install.packages("herblabel", repos="http://R-Forge.R-project.org")
```

如果您有意见或者建议, 可以发电子邮件到 jinlongzhang01@gmail.com。

附录2 对run_herblabel文件夹下各文件的详细说明

Appendix 2 Description for the files in folder "run_herblabel"

run_herblabel 文件夹包括五个子文件夹和一个 README.md 文件:

[annotation label/文件夹](#): 包含打印鉴定标签的 Excel 模板、R 脚本以及批处理文件。

[herbarium label_HU/文件夹](#): 包含打印植物标本标签的 Excel 模板、R 脚本以及批处理文件。
可生成哈佛大学标本馆(HU)式样的标本标签。

[herbarium label_KFBG/文件夹](#): 包含打印植物标本标签的 Excel 模板、R 脚本以及批处理文件。可生成嘉道理农场暨植物园标本馆(KFBG)式样的标本标签。

[herbarium label_KUN/文件夹](#): 包含打印植物标本标签的 Excel 模板、R 脚本以及批处理文件。可生成中国科学院昆明植物研究所(KUN)式样的标本标签。

[herbarium label_PE/文件夹](#): 包含打印植物标本标签的 Excel 模板、R 脚本以及批处理文件。可生成中国科学院植物研究所标本馆(PE)式样的标本标签。

[README.md 文件](#): 这是 github 上对该项目的 Markdown 说明文件。

/annotation label: 文件夹下的文件:

[Annotation_label_data.xlsx](#): 鉴定标签的 Excel 模板, 该 Excel 模板的文件名以及列名都不要更改。

[annotation_labels_to_print.rtf](#): 生成的鉴定标签文件。

[print_annotation_labels.R](#): 生成鉴定标签的 R 脚本(带科名)。

[print_annotation_labels_normal.bat](#): 生成鉴定标签的 Windows 批处理文件。填好 Excel 模板后, 只需双击该文件, 即可生成 RTF 格式的鉴定标签。本文件调用 print_annotation_labels.R, 所以生成的标签有科名。

[print_annotation_labels_without_family.bat](#): 生成鉴定标签的 Windows 批处理文件。填好 Excel 模板后, 只需双击该文件, 即可生成 RTF 格式的鉴定标签。本文件调用 print_annotation_labels_without_family.R, 所以生成的标签无科名。

[print_annotation_labels_without_family.R](#): 生成鉴定标签的 R 脚本(无科名)。

[Read Me_how to use.txt](#): 使用说明 (英文)。

[RTF history/](#): 每次生成新标签, 旧的 RTF 文件都会自动备份一次, 文件名中带有年月日时分秒等信息, 以便查找。

[xlsx history/](#): 每次生成新标签, 之前的 Excel 数据都会自动备份一次, 文件名中带有年月日时分秒等信息, 以便查找。

运行.bat 文件后, 备份文件名举例:

[/annotation label/RTF history 文件夹](#): 该文件夹用来保存鉴定标签的备份。

- [2016-03-24-150030_annotation_labels_to_print.rtf](#): 生成鉴定标签的备份文件, 以年月日时分秒开头。

[/annotation label/xlsx history 文件夹](#): 此文件夹用来保存鉴定信息的备份。

- [2016-03-24-150030_Annotation_label_data.xlsx](#): 鉴定模板的备份文件, 以年月日时分秒开头。

/herbarium label: 文件夹下的文件(HU, KFBG, KUN, PE 各目录结构相同)

[DARWIN_CORE_DB_SAVE/文件夹](#): 本文件夹用来保存标本记录 Darwin Core 文件的备份。

[herbarium_labels_to_print.rtf](#): 生成的标本标签。

[herbarium_specimens_label_data.xlsx](#): 输入数据用的 Excel 模板。

[print_label.R](#): 用来生成 RTF 标签的 R 脚本。

[RTF history/文件夹](#): 文件夹, 用来备份之前生成的标本标签, 文件以年月日时分秒作为时间标签。

[run.bat](#): Windows 批处理文件, 在 Excel 模板中填写好数据后, 双击该 bat 文件, 即可生成标本标签。

[run.sh](#): Shell 文件, 可用于 Linux 和 MacOS 生成标签。

[xlsx history/文件夹](#): Excel 模板备份文件夹。

[/herbarium label/DARWIN_CORE_DB_SAVE/文件夹](#): 标本数据模板备份文件夹。

运行 [run.bat](#) 之后, 生成的备份文件名举例:

- [2016-03-24-145907_darwin_core_database_saved.xlsx](#): 整合历次打印数据的标本数据备份。
- [darwin_core_database.xlsx](#): 添加了最近一次标本打印记录的完整标本记录。

[/herbarium label/RTF history](#): 打印出的 RTF 标签文件备份文件夹。

- [2016-03-24-145907_herbarium_labels_to_print.rtf](#): RTF 标签备份文件。

[/herbarium label/xlsx history](#): 标本数据备份。

- [2016-03-24-145907_herbarium_specimens_label_data.xlsx](#) 标本数据备份。

附录3 标本标签模板各列说明

Appendix 3 Description for the columns of the herbarium label template

herblabel 程序包自带了标本标签的模板。安装好 herblabel 后, 在 R 中输入 `system.file("extdata", package = "herblabel")` 可找到 ARWIN_CORE_HERBARIUM_RECORDS.xlsx 文件, 该文件包括如下各列:

- **GLOBAL_UNIQUE_IDENTIFIER**: 标本的条形码号
- **INSTITUTION_CODE**: 标本馆缩写
- **COLLECTION_CODE**: 标本馆号, 可能和条形码号相同
- **BASIS_OF_RECORD**: 标本的类型, 一般为腊叶标本
- **PREPARATIONS**: 标本的状态, 如有花有果, 有花无果, 无花有果, 无花无果
- **HERBARIUM(必填)**: 标本馆名
- **TITLE**: 该植物所属地区, 如 *Plants of Yunnan*, *Flora of Hainan*
- **COLLECTOR(必填)**: 采集人
- **ADDITIONAL_COLLECTOR**: 共同采集人
- **COLLECTOR_NUMBER(必填)**: 采集号
- **DATE_COLLECTED(必填)**: 采集日期, 建议格式 2015-8-6 表示 2015 年 8 月 6 日, 标签中会自动转换为英文的年月日
- **LOCAL_NAME**: 植物的俗名, 这里可以填写《中国植物志》(默认)或 *Flora of China* 的中文名或完整的学名, 并用 `fill_dwc()` 函数处理后自动填写上科、属、种、命名人等信息
- **FAMILY(重要)**: 科名, 必须是拉丁文
- **FAMILYCN**: 中文科名
- **GENUS**: 属
- **SPECIES**: 种
- **AUTHOR_OF_SPECIES**: 种作者
- **INFRASPECIFIC_RANK**: 种下等级, 只能是 *subsp.*, *var.* 或者 *f.* 中的一个
- **INFRASPECIFIC_EPITHET**: 种下等级加词
- **AUTHOR_OF_INFRASPECIFIC_RANK**: 种下等级作者
- **COUNTRY(必填)**: 国家或者地区
- **STATE_PROVINCE(必填)**: 省或者州
- **COUNTY(重要)**: 县
- **LOCALITY(重要)**: 小地点
- **LOCALITY_ORIGINAL**: 地名原始信息, 如中文地名
- **IMAGE_URL**: 标本照片的路径
- **RELATED_INFORMATION**: 与地名相关的附记
- **LAT_DEGREE(重要)**: 纬度的度
- **LAT_MINUTE(重要)**: 纬度的分
- **LAT_SECOND(重要)**: 纬度的秒
- **LAT_FLAG(重要)**: 纬度的标签, 北纬为 N, 南纬为 S
- **LON_DEGREE(重要)**: 经度的度
- **LON_MINUTE(重要)**: 经度的分
- **LON_SECOND(重要)**: 经度的秒

- **LON_FLAG(重要)**: 经度的标签, 东经为 E, 西经为 W
- **ELEVATION (重要)**: 海拔
- **ATTRIBUTES (重要)**: 关于形态的描述, 如树高、花色、果的颜色以及树皮等的描述
- **REMARKS (重要)**: 关于生境以及伴生种的描述, 如 along the stream
- **CABINET**: 标本所保存的柜子
- **DISPOSITION**: 该标本是否在馆, 是否外借等信息。
- **GEOREFERENCE_SOURCES**: 位置的数据来源, 是 GPS 直接读取的, 还是 Google Earth 或者其他来源
- **GEOREFERENCE_VERIFICATION_STATUS**: 地理位置是否经过确认
- **GEOREFERENCE_REMARKS**: 地理位置的准确度, 如 50 m
- **PROJECT**: 该标本的研究项目
- **IDENTIFIED_BY(重要)**: 标本的鉴定人
- **DATE_IDENTIFIED(重要)**: 鉴定的日期, 最好是 2015-8-6 类似的格式, 表示 2015 年 8 月 6 日
- **TYPE_STATUS**: 该标本是否为模式标本
- **PROCESSED_BY**: 本条记录的录入人
- **DATE_LASTMODIFIED**: 本条记录上次更改的日期

附录4 鉴定标签模板各列说明

Appendix 4 Description for the columns of the annotation label template

herblabel 程序包自带了鉴定标签的模板, 在 R 中输入 `system.file("extdata", package = "herblabel")` 可找到 ANNOTATION_TEMPLATE.xlsx 文件, 该文件包括如下的列:

- **PROJECT**: 鉴定整理标本的有关项目
- **TYPE_STATUS**: 是何种模式标本, 如果不是可不填
- **TYPE_REF**: 如果是模式标本, 则需要写清楚发表该种的文献
- **FAMILY**: 科
- **LOCAL_NAME**: 中文名或者完整的学名
- **GENUS(重要)**: 属
- **SPECIES(重要)**: 种
- **AUTHOR_OF_SPECIES(重要)**: 种作者
- **INFRASPECIFIC_RANK(重要)**: 种下单位, 只能包括 subsp., var. 或者 f.
- **INFRASPECIFIC_EPITHET(重要)**: 种下单位加词
- **AUTHOR_OF_INFRASPECIFIC_RANK(重要)**: 种下单位作者
- **ABBREVIATION(重要)**: 鉴定人的名称 如打印标签上, 鉴定人之前要显示 Det., 则此处应该输入 Det.
- **IDENTIFIED_BY(重要)**: 鉴定人
- **INSTITUTION**: 鉴定人的机构
- **DATE_IDENTIFIED(重要)**: 鉴定日期
- **DET_NOTE**: 鉴定的依据或附注
- **SPECIMEN_NUMBER**: 标本条形码号
- **COLLECTOR**: 采集人
- **COLLECTOR_NUMBER**: 采集号

• 研究报告 •

百山祖常绿阔叶林灌草层物种组成和分布的10年动态

黄云霞 徐 萱 张莉莎 宋 玥 骆争荣*

(丽水学院生态学院, 浙江丽水 323000)

摘要: 森林群落的动态受多方面因素的影响。林下的草本植物和木本植物幼苗幼树对于森林的更新及动态具有重要作用。为了解百山祖常绿阔叶林群落下层植物物种组成和分布的动态变化, 我们分析了2003–2013年间百山祖5 ha森林动态样地灌草层物种(包括DBH < 1 cm的木本植物和所有草本植物)在物种重要值、 α 多样性以及物种分布等方面的变化。结果表明: (1) 10年间, 群落灌草层植物个体数减少了28.7%, 其中草质藤本植物个体数下降比例最大(76.9%), 而乔木的幼苗和幼树下降比例最小(14.4%); (2) 整个灌草层的物种数明显下降, 同时乔木的幼苗和幼树及直立灌木的均匀度均下降, 而草本植物均匀度有所上升; (3) 除短尾柯(*Lithocarpus brevicaudatus*)、叶萼山矾(*Symplocos phyllocalyx*)、显脉野木瓜(*Stauntonia conspicua*)和福建悬钩子(*Rubus fujianensis*)等植物重要值逆势上扬外, 直立灌木物种重要值10年间的变化值与其在2003年时的重要值呈显著正相关, 而其余各类生活型植物都显示, 初始重要值越高的物种在10年后下降幅度越大; (4) 物种分布与生境类型的相关性变化复杂, 除与山谷生境正相关的物种数量增加外, 研究期间与生境存在显著相关性的物种数都有所减少; (5) 10年来仅陡坡处物种多样性指数没有显著下降。总体来说, 百山祖常绿阔叶林灌草层群落仍未达到顶极状态, 2003–2013年间正缓慢向顶极群落演替。群落内部的种间和种内竞争应是当前群落动态的主导因素。

关键词: 森林动态; 物种组成; 生境相关; 灌草层; 气候变暖

Ten-years period of grass and small woody plant dynamics in a 5-ha evergreen forest plot in Baishanzu, Zhejiang Province

Yunxia Huang, Xuan Xu, Lixiang Zhang, Yue Song, Zhengrong Luo*

College of Ecology, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000

Abstract: Forest dynamics are directly driven by multiple factors, including changes in understory grasses and small woody plants. Yet the dynamics of these small woody plants and grasses as well as underlying ecological forces are still not fully understood, particularly in evergreen forests. Here, we analyzed ten year (from 2003 to 2013) shifts in species importance values, diversity, habitat associations, and distributions of understory small woody plants and grasses (including herbs, herbal lianas and woody plants with diameter at breast height (DBH) < 1 cm) in a 5-ha subtropical forest plot in Baishanzu, Zhejiang, China. Results showed that the number of individuals decreased by 28.7% overall, 76.9% in herbal lianas, and 14.4% in seedlings or saplings of tree species. Species richness of shrubs and grasses decreased notably, while evenness decreased in small woody plant communities and increased in herb communities. Except for *Lithocarpus brevicaudatus*, *Symplocos phyllocalyx*, *Stauntonia conspicua*, *Rubus fujianensis*, whose importance values increased conversely, correlations between changes of importance values during the ten-years period and initial importance values were positive among erective shrub species and negative among species of other life forms. Shifts in species-habitat associations were complex, as the number of species with significant habitat-associations decreased during the ten year period, except for the increasing richness of species with positive gully associations. Only species diversity in

收稿日期: 2016-04-01; 接受日期: 2016-10-19

基金项目: 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2014R429009)、“十二五”浙江省高校重点学科生态学(XJXK02)和凤阳山-百山祖国家级自然保护区委托课题

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: extra@lsu.edu.cn

steep slope habitats did not decrease significantly. These findings suggest the small woody plants and grasses of the Baishanzu evergreen forest have not yet reached climax status, and were developing to the climax over 2003 to 2013. Internal community-level processes, such as intraspecific and interspecific competitions, should be dominant factors that drive the forest dynamics.

Key words: forest dynamics; species composition; habitat association; shrub and grass layer; climate warming

森林动态一直是森林生态研究的热点问题之一(Clements, 1916; Gleason, 1926; Condit et al, 1999; Enquist & Enquist, 2011)。Clements (1916)认为在稳定的气候条件下, 由于群落内部不同植物之间以及植物与环境之间相互作用, 群落的物种组成会有序地变化发展。就森林的自然演替而言, 往往是耐阴植物逐渐取代阳性速生树种。Zhang等(2015)对加拿大西部无干扰自然森林半个世纪的动态研究表明, 北半球北方针叶林的长期动态变化主要受群落内部植物间竞争的驱动。但事实上, 气候并非稳定不变。已有研究表明, 在较大时间尺度上, 森林群落结构的变化也受到气候变迁的影响(Bush & Colinvaux, 1990; McIntyre et al, 2015; Zhang et al, 2015)。而在短期内的极端气候事件如炎热高温、冰雪灾害、季节性旱涝急转等也会对森林结构造成很大影响。例如, 1983年因厄尔尼诺现象引起的严重干旱极大地提高了中美洲Barro Colorado岛上森林树木的死亡率(Condit et al, 1995), 使所有喜湿物种的种群规模快速下降(Condit et al, 1996)。2008年发生在中国南方的严重冰雪灾害也导致古田山森林群落的树木受到了严重损伤(曼兴兴等 2011), 森林树木的种子产量和种子雨组成也发生了较大变化(Du et al, 2012)。因此, 某些严重的气候事件将打断森林群落的有序变化, 甚至引起短期退化。

由于树木大多寿命很长, 世代更替缓慢, 因此对森林的动态研究较为困难。先前多通过树木年轮或者主要树种的径级结构来间接反映森林动态及其与气候的关系(如Peterson & Peterson, 2001; White, 2011)。近年来, 随着国际上大型森林动态样地研究的兴起, 越来越多的学者开始通过比较同样地内森林物种组成的时间动态来研究森林的动态变化(Condit et al, 1999, 2004; Enquist & Enquist, 2011; 汪殷华等, 2011)。由于这些森林监测样地大多仅调查了胸径(DBH) ≥ 1 cm的个体, 而对小规格植物的研究数据则显得较为缺乏; 现在已有很多学者开始关注林下木本植物的幼苗或幼树来弥补这

一不足(如Connell & Green, 2000; McLaren et al, 2016)。由于取样面积不足, 这类研究中很多种类还是会被遗漏, 以致生态学界对森林幼苗和幼树动态变化的了解仍不够全面。同时, 草本和藤本植物在森林群落中具有特殊的功能, 它们可以改变林下微环境、影响森林更新^①, 其动态变化可更全面地反映森林物种组成和分布的变化。

常绿阔叶林在我国植被体系和生态保护中具有重要意义(吴征镒, 1980)。本世纪初我国陆续在不同省份建立了许多森林动态监测样地, 其中在亚热带常绿阔叶林区域建立了3个20 ha以上的样地(Feng et al, 2016)。百山祖的5 ha森林动态监测样地是2003年参照美国Smithsonian热带森林研究中心(CTFS)的基本规范建立的(徐敏等, 2007)。除常规监测DBH (1.3 m处直径) ≥ 1 cm的木本植物外, 该样地特别对DBH < 1 cm的木本植物幼苗、幼树, 以及草本植物(包括草质藤本, 以下统称为“灌草层”)进行了调查。

本研究重点分析了2003–2013年间百山祖常绿阔叶林灌草层的物种组成、 α 多样性和物种空间分布变化及其与地形生境的关系, 拟探讨群落结构和格局变化的规律及主要驱动力, 为气候变化条件下我国东部常绿阔叶林生物多样性保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地自然概况

研究样地位于浙江省凤阳山–百山祖国家级自然保护区百山祖主峰北坡(27°40'54" N, 119°03'53" E), 海拔1,400–1,600 m的中山地带。由于人为干扰相对较少, 该地段至今保留着一些成熟的亚热带东部中山典型常绿阔叶林。样地坡度大多在20°–35°。地表凋落物层较厚, 土壤类型为黄壤, pH值4.5–6.5。

样地所在区域属于中亚热带季风气候, 受夏季风影响较大, 雨热同期, 一年中有明显的季节变

^① 朱慧玲 (2015) 幼苗对物种多样性的影响及不同生活史阶段的生境过滤作用. 硕士学位论文, 中山大学, 广州.

化。据百山祖镇车根气象观测站(海拔1,090 m) 2006–2015年自动监测资料显示,最近10年该地区年平均温度13.3℃,极端最高温34.0℃,极端最低温–11.8℃,年均降水量2,294.2 mm,年均无霜期293.2 d,日均温高于10℃的年均生长期积温4,134.9℃。年均温和极端高、低温均较1982–2001年间有明显升高。

1.2 样地设置与调查

百山祖样地为250 m × 200 m (5 ha)的矩形。整个样地参照美国Smithsonian热带森林研究中心(CTFS)的规范建立(Condit, 1998):以水平距离20 m为单位在样地内划分方形网格(最后1列为20 m × 10 m),测量相邻网格点之间的高差;用皮尺将网格(样方)划分成16个水平投影为5 m × 5 m的小样方;在对DBH ≥ 1 cm的乔灌木个体进行挂牌、定位、鉴定并测量DBH的同时,以5 m边长的小样方为单位,调查样地内所有的草本植物和DBH < 1 cm的木本植物的种类和个体数量。由于部分草本和灌木为丛生构型,给定量计数带来困难,在实际操作中,对这些灌木和草本植物以丛为单位进行计数。根据实际情况,一般当同种草本植物基部间距达到15 cm以上,灌木基部间距达到30 cm以上即视为不同草/灌木。

2003年8月完成第1次全面调查。2013年,参照2003年的方法,再次对样地内所有的草本植物和DBH < 1 cm的木本植物个体进行了调查。

1.3 数据处理和统计方法

(1)生活型分类。根据样方内植物的特点,将所有植物分为乔木、直立灌木、蔓性(藤状)灌木、木质藤本、草质藤本、草本蕨类和其他草本植物等类型。其他草本植物大多为多年生,极少物种为一年生,本研究不作进一步细分。

(2)群落数量特征。由于没有实测灌草层植物的DBH或盖度,本研究根据物种在样地内的多度和频度(5 m × 5 m小样方为单位)数据计算样地2003年和2013年各物种的重要值,所用公式如下:

$$IV_i = \left(\frac{F_i}{\sum F_i} + \frac{N_i}{\sum N_i} \right) \times 100\% / 2 \quad (1)$$

式中 IV_i 为第*i*种的重要值, N_i 为第*i*种的株(丛)数, F_i 为第*i*种的频度。

为探究不同因素在群落动态中可能的作用,利用散点图直观显示各生活型物种在2003年时的重

要值与其10年变化量的关系,并用一元线性回归进一步分析了这种关系的性质和显著性。

为了解10年来群落株(丛)数的变化,我们计算了灌草层和不同类群植物株(丛)数的变化率,计算公式如下:

$$C = (N_t - N_0) / N_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中 C 为株(丛)数变化率, N_0 和 N_t 分别为2003和2013年的株(丛)数。

为比较10年间物种均匀度的变化,我们计算了Camargo均匀度指数(Camargo, 1993):

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S \left| \frac{N_i}{N} - \frac{N_j}{N} \right|}{2S} \quad (3)$$

式中 E' 为Camargo均匀度指数, N_i 和 N_j 分别为第*i*种和第*j*种的株(丛)数, N 为全部种的总株(丛)数(即 $\sum N_i$), S 为所关注生活型类群或整个灌草层的所有物种数。 E' 的取值范围为0–1,数值越大表示群落内物种多度分布越均匀。该指数最大的特点在于其大小与物种数量 S 无关,仅与种间的多度分布差异有关,因此能较好地反映各物种数量分布的均匀程度。

(3)物种分布的生境变化。为了解植物在群落内的空间分布变化,我们比较了2003年和2013年所有灌草层物种的分布与生境的关系。样地的生境类型划分参照王伟等(2011)的研究结果,即以10 m × 10 m样方为单位,根据地形参数和DBH ≥ 1 cm的物种组成信息将生境类型分为:沟谷、陡坡、缓坡和山脊。山脊生境指明显凸起的地形(凹凸度 ≥ 3.36),主要间断分布在山脊线上,该处一般相对干旱。缓坡指下陡上缓的山坡(凹凸度0.063–3.36),主要分布在山岗向山谷的过渡带或两个小山岗间的缓坡上。陡坡指地形凹陷或微凸且坡度较陡的山坡(凹凸度 ≤ 0.063,坡度 ≥ 35.6°),主要分布在山谷向缓坡或山脊延伸的陡峭山坡,该生境面积比例较小,土层和落叶层一般较薄,部分样方石壁裸露、常年渗水。山谷指地形凹陷坡度较缓的溪谷(凹凸度 ≤ 0.063,坡度 < 35.6°),该处溪流经过,凉爽湿润,由于水流冲刷,土层很薄,石块裸露。为排除空间自相关的影响,用圆筒转换检验法(torus translation)分别检验了2003年和2013年样地灌草层内所有物种与4类生境的相关性及显著性(Harms et al, 2001),该方法的详细计算过程参见相关文献(Harms et al, 2001; 王伟等, 2011)。

(4)典范对应分析(canonical corresponding anal-

ysis, CCA)。典范对应分析是一种结合植被与环境因子数据的多元直接梯度排序方法。为了研究群落2003–2013年的物种分布变化及其与环境因子的关系,我们以两次调查总个体数超过50的灌草层物种在10 m × 10 m小样方的株(丛)数作为典范对应分析的因变量矩阵;将样方地形数据(相对高度、凹凸度和坡度)和2003年调查的每样方内DBH ≥ 1 cm的乔灌木胸高断面积作为解释因子,其具体计算过程参见Legendre和Legendre (2012)的相关论著。其中,胸高断面积用以反映上层乔灌木的郁闭程度对灌草层植物的影响;样方的相对高度为样方4个顶点相对高度的平均值;凹凸度为样方的相对高度减去周围与该样方至少共享一个顶点的8个样方的平均相对高度;坡度为由该样方任意3个顶点组成的平面与水平面间的二面角的平均值 (Valencia et al, 2004)。

(5)不同生境的物种多样性。为了探究群落内部物种多样性的变化,我们比较了各生境类型中2003年与2013年两次调查的灌草层物种多样性的差异。Shannon-Wiener指数能较好地反映稀有种的变化,而Simpson指数能较好地反映优势种的变化(马克平和刘玉明, 1994),故我们采用Shannon-Wiener指数(H)和Simpson指数(D)作为 α 多样性的测度。计算公式如下(Legendre & Legendre 2012):

$$H = -\sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \right) \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S \frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)} \quad (5)$$

式中, N_i 为种 i 的株(丛)数, N 为全部种的总株(丛)数, S 为该区域包含的物种数。 H 和 D 的数值越大表示多样性越高。

利用成对 t 检验考察各种生境类型中灌草层物种多样性10年变化的显著性。由于多样性数据存在空间自相关性,用常规的 t 检验分析多样性变化存在高估自由度的问题(Dutilleul, 1993)。故本文采用空间自相关系数来矫正有效样本量(或自由度)。Dale和Fortin (2002)提出,可以用以下公式矫正有效样本量:

$$n' = \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{Cor}(x_i, x_j)} \quad (6)$$

式中, x 为2003年和2013年间某样方的某物种多样性指数的差异, $\text{Cor}(x_i, x_j)$ 为 x_i 和 x_j 之间的自相关系数

矩阵, n 为观测样本量, n' 即为有效样本量。由于自相关一般仅在较近距离发生,本研究仅考虑二阶自相关系数(即直接相邻样方间的自相关),其余全部按0处理。

所有数据统计处理都在R软件中完成(R Core Team, 2016)。

2 结果

2.1 群落数量特征

从2003年到2013年,该样地内灌草层植物数量从85,723株(丛)下降到61,097株(丛),变化率为-28.7%。个体数下降比例最大的是草质藤本植物,减少了76.9%;其次是其他草本植物,下降了37.6%;个体数下降比例最小、相对稳定的是乔木的幼苗和幼树,下降比例为14.4%。就植物个体下降的数量来看,直立灌木最多,10年间减少了14,349株(丛),是乔木幼苗幼树减少量的10.63倍;其次是草本蕨类植物和其他草本植物,10年间分别减少了5,010个和2,459个个体。总体来看,木本植物(-17,111个, -29.64%)比草本植物(-7,489个, -26.83%)下降的数量和比例都更大(表1)。

个体数量严重减少的同时,整个灌草层的物种数和均匀度也明显下降(表1)。10年间,群落灌草层物种总数从180种(60科117属)减少到166种(60科113属)。有22种植物从本群落的灌草层中消失,其中草本蕨类植物2种,其他草本植物5种,木质藤本植物2种,乔木3种,直立灌木9种,藤状灌木1种,样地灭绝率分别为33.3% (2/6)、13.5% (5/37)、11.8% (2/17)、10.3% (3/29)、11.4% (9/79)和10.0% (1/10)。另有8种植物在过去10年进入群落灌草层,其中草本蕨类植物2种,其他草本植物3种,木质藤本植物1种,直立灌木2种,新物种相对于本生活型中原有物种的迁入率分别为33.3%、8.1%、5.9%和2.5%。在减少的22个物种中有17种在样地中完全消失,其余5个物种仍有DBH ≥ 1 cm的个体存在。此外,整个灌草层的Camargo均匀度指数从2003年的0.127下降为2013年的0.114。就不同生活型来说,各类草本植物(包括草质藤本、草本蕨类和其他草本植物)均匀度都有所上升,蔓性灌木的均匀度也有所上升,而木质藤本植物和直立灌木、乔木幼苗幼树的均匀度下降,以木质藤本植物的均匀度下降幅度最大。

从10年间灌草层各物种重要值变化来看,去除

表1 2003–2013年百山祖常绿阔叶林灌草层各生活型的数量变化特征
Table 1 Shifts in numerical characteristics of different life forms in the shrub and grass layer of the Baishanzu evergreen broad-leaved forest between 2003 and 2013

生活型 Life form	个体数 No. of individuals		物种数 No. of species		Camargo指数 Camargo index	
	2003	2013	2003	2013	2003	2013
乔木 Tree species	9,402	8,052	29	26	0.224	0.173
直立灌木 Erective shrubs	43,352	29,003	79	72	0.167	0.135
蔓性灌木 Spreading shrubs	3,431	2,453	10	9	0.176	0.229
木质藤本 Woody lianas	1,630	1,170	17	16	0.191	0.130
草质藤本 Herbaceous lianas	26	6	2	2	0.692	1.000
草本蕨类 Herbaceous ferns	21,333	16,323	6	6	0.198	0.225
其他草本 Other herbs	6,549	4,090	37	35	0.145	0.192
总计 Total	85,723	61,097	180	166	0.127	0.114

异常值后, 直立灌木的重要值差异与其初始重要值呈极显著正相关关系(斜率 $\beta = 0.128$, $P < 0.01$); 而对于其他各类生活型植物来说, 2003年重要值越高的物种其下降越多(图1), 其中蔓性灌木和其他草本植物重要值10年间的差异和其初始重要值显著负相关(斜率分别为 -0.139 和 -0.283 , $P < 0.01$); 去除异常值后, 乔木和木质藤本重要值10年间的差异与其初始重要值显著负相关(斜率分别为 -0.138 和 -0.429 , $P < 0.05$)。但草本蕨类植物重要值的变化与其初始重要值没有显著线性关系(图1f)。

不管哪种生活型植物, 10年来重要值排在第1位的物种都没有发生变化, 但不同生活型的优势种重要值的变化趋势不一。乔木幼苗和幼树中, 优势种的重要值排序基本不变, 最优种短尾柯(*Lithocarpus brevipendulus*)的相对株(丛)数和相对频度在10年间都大幅增长, 重要值呈现逆势上扬(图1a)。同时, 多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)的相对株(丛)数下降但相对频度上升; 木荷(*Schima superba*)的相对株(丛)数和相对频度在10年间都略有下降(表2)。在直立灌木中, 主要优势种连蕊茶(*Camellia cuspidata*)、新木姜子(*Neolitsea aurata*)和四川山矾(*Symplocos setchuensis*)的相对株(丛)数和相对频度都略有上升。重要值排序变化最大的是叶萼山矾(*Symplocos phylloclalyx*), 从2003年的第15位上升到2013年的第3位, 相对多度和相对频度都有较大幅度增长; 同时, 薄叶山矾(*S. anomala*)重要值减小, 排序从2003年的第3位下降到2013年的第14位, 尤其是相对多度大幅下降(表2)。这两个物种的重要值都呈现出逆势变化(图1b)。

木质藤本植物重要值排序相对稳定, 但第1优势种显脉野木瓜(*Stauntonia conspicua*)的相对株(丛)

数和相对频度都有较大幅度上升, 重要值出现逆势上扬(图1c); 而其余2个优势种钻地风(*Schizophragma integrifolium*)和南五味子(*Kadsura longipedunculata*)的相对株(丛)数和相对频度10年间均有不同程度下降(表2)。就蔓性灌木来说, 优势度最高的2个种中, 尖叶菝葜(*Smilax arisanensis*)的相对株(丛)数和相对频度都明显下降, 而福建悬钩子(*Rubus fujianensis*)的相对株(丛)数和相对频度明显上升, 其重要值呈现逆势上扬(图1d); 同时, 巴东胡颓子(*Elaeagnus difficilis*) (2003年排第3位)的地位到2013年已被暗色菝葜(*Smilax lanceifolia* var. *opaca*)取代(表2)。

草本蕨类植物是本样地灌草层草本植物的主体, 10年来占优的一直是华东瘤足蕨(*Plagiogyria japonica*)、美观复叶耳蕨(*Arachniodes speciosa*)和林下凸轴蕨(*Metathelypteris hattorii*), 其中华东瘤足蕨和美观复叶耳蕨在10年间优势度有所下降, 而林下凸轴蕨的个体数量和优势度明显上升(表2)。草质藤本植物种类稀少, 物种重要性排位变化不明显。在其他草本植物中, 山麦冬(*Liriope spicata*)的重要值从第3位下降到第11位; 而求米草(*Oplismenus undulatifolius*)重要值从2003年的第18位上升到第3位。

其他几种优势植物的重要值排序虽没有变化, 但其相对多度和相对频度都有不同程度的升降, 尤其是麦冬(*Ophiopogon japonicus*), 其相对株(丛)数和相对频度下降幅度较大(表2)。另外, 异药花(*Fordiophyton faberi*)和赤车(*Pellionia radicans*)的个体数量也出现了不同程度的上升。

2.2 物种分布生境的变化

2003年和2013年各物种与生境的相关性分析表明, 与各类生境呈负相关的物种数有所减少

表2 2003–2013年百山祖常绿阔叶林灌草层主要物种重要值(IV)的变化
Table 2 Shifts in importance value (IV) of dominant species in the shrub and grass layer of the Baishanzu evergreen broad-leaved forest between 2003 and 2013

物种 Species	株数 Number of individuals		频度 Frequency		重要值排序 Rank of IV	
	2003	2013	2003	2013	2003	2013
木质藤本植物(前3位) Woody lianas (Top 3)						
显脉野木瓜 <i>Stauntonia conspicua</i>	994 (60.98%)	914 (78.12%)	474 (59.62%)	524 (77.86%)	1	1
钻地风 <i>Schizophragma integrifolium</i>	264 (16.19%)	148 (12.65%)	119 (14.97%)	68 (10.10%)	2	2
南五味子 <i>Kadsura longipedunculata</i>	167 (10.25%)	21 (1.79%)	83 (10.44%)	16 (2.38%)	3	3
乔木(前3位) Tree species (Top 3)						
短尾柯 <i>Lithocarpus brevicaudatus</i>	3,430 (36.48%)	4,366 (54.22%)	1,288 (26.62%)	1,536 (38.79%)	1	1
多脉青冈 <i>Cyclobalanopsis multinervis</i>	1,716 (18.25%)	1,200 (14.90%)	885 (18.28%)	747 (18.86%)	2	2
木荷 <i>Schima superba</i>	980 (10.42%)	621 (7.71%)	468 (9.67%)	362 (9.18%)	3	3
直立灌木(前5位) Erective shrubs (Top 5)						
连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	5,894 (13.59%)	4,384 (19.38%)	1,561 (13.18%)	1,558 (16.07%)	1	1
新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i>	5,856 (13.51%)	4,318 (14.89%)	1,517 (12.81%)	1,501 (15.22%)	2	2
薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	4,560 (10.52%)	1,691 (0.62%)	973 (5.22%)	875 (1.43%)	3	14
叶萼山矾 <i>Symplocos phyllocalyx</i>	795 (1.83%)	4,426 (15.26%)	142 (1.20%)	1,117 (11.33%)	15	3
四川山矾 <i>Symplocos setchuensis</i>	4,032 (9.30%)	2,912 (10.04%)	990 (5.36%)	1,000 (10.14%)	4	4
厚叶红淡比 <i>Cleyera pachyphylla</i>	4,824 (11.13%)	2,114 (7.29%)	525 (4.43%)	592 (6.00%)	5	5
蔓性/攀援灌木(前3位) Spreading shrubs (Top 3)						
尖叶蒴蕨 <i>Smilax arisanensis</i>	2,752 (80.21%)	1,667 (67.96%)	1,129 (81.46%)	852 (72.63%)	1	1
福建悬钩子 <i>Rubus fujianensis</i>	434 (12.65%)	579 (23.60%)	133 (9.60%)	159 (13.55%)	2	2
巴东胡颓子 <i>Elaeagnus difficilis</i>	95 (2.77%)	36 (1.47%)	50 (3.61%)	32 (2.73%)	3	5
暗色蒴蕨 <i>Smilax lanceifolia</i> var. <i>opaca</i>	34 (0.99%)	66 (2.69%)	20 (1.44%)	47 (4.01%)	5	3
草本蕨类植物(前3位) Herbaceous ferns (Top 3)						
华东瘤足蕨 <i>Plagiogyria japonica</i>	20,106 (94.25%)	14,477 (88.69%)	1,683 (84.02%)	1,621 (79.27%)	1	1
美观复叶耳蕨 <i>Arachniodes speciosa</i>	746 (3.50%)	479 (2.93%)	162 (8.09%)	80 (3.91%)	2	3
林下凸轴蕨 <i>Metathelypteris hattorii</i>	286 (1.34%)	1,143 (7.00%)	96 (4.79%)	289 (14.13%)	3	2
草质藤本 Herbaceous lianas						
鸡屎藤 <i>Paederia foetida</i>	21 (80.77%)	3 (50.00%)	11 (68.75%)	2 (66.67%)	1	1
三叶崖爬藤 <i>Tetrastigma hemsleyanum</i>	5 (19.23%)	3 (50.00%)	5 (31.25%)	1 (33.33%)	2	2
其他草本植物(前5位) Other herbs (Top 5)						
藁草属多种 <i>Carex</i> spp.	2,415 (36.88%)	1,570 (38.39%)	715 (45.60%)	412 (40.95%)	1	1
麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	2,683 (40.97%)	763 (18.65%)	508 (32.40%)	152 (15.11%)	2	2
山麦冬 <i>Liriope spicata</i>	185 (2.82%)	27 (0.66%)	46 (2.93%)	15 (1.49%)	3	11
求米草 <i>Oplismenus undulatifolius</i>	36 (0.55%)	637 (15.57%)	5 (0.32%)	22 (2.18%)	18	3
异药花 <i>Fordiophyton faberi</i>	111 (1.69%)	333 (8.14%)	36 (2.30%)	50 (4.97%)	4	4
赤车 <i>Pellionia radicans</i>	139 (2.12%)	240 (5.87%)	23 (1.47%)	42 (4.17%)	5	5

括号内数字为相对多度或相对频度。Data in the brackets are relative abundance or relative frequency.

(表3)。2003年与山谷生境呈显著负相关的物种有东方古柯(*Erythroxylum sinense*)、显脉野木瓜、温州冬青(*Ilex wenchowensis*)、短尾柯、小叶石楠(*Photinia parvifolia*)、四川山矾和茶菱蕨(*Viburnum setigerum*)等7个物种;到2013年,除原有的显脉野木瓜、温州冬青、短尾柯和四川山矾等4种外,窄基红褐柃(*Eurya rubiginosa* var. *attenuata*)也与山谷存在显著负相关。与陡坡呈负相关的物种由2003年的福建假卫矛(*Microtropis fokienensis*)变为2013年的木荷;而

庆元华箬竹(*Sasa qingyuanensis*)与缓坡呈现的负相关仅在2003年被检测到。另外,在2003年有鸦椿卫矛(*Euonymus euscaphis*)、异叶榕(*Ficus heteromorpha*)、中国绣球(*Hydrangea chinensis*)和麦冬等4个种与山脊呈显著负相关,到2013年则仅剩中国绣球和麦冬仍与山脊呈负相关。

2003–2013年,与山谷呈正相关的物种由原来的南五味子、异药花、周毛悬钩子(*Rubus amphidasys*)、盾叶莓(*R. peltatus*)和楮头红(*Sarcopyramis*

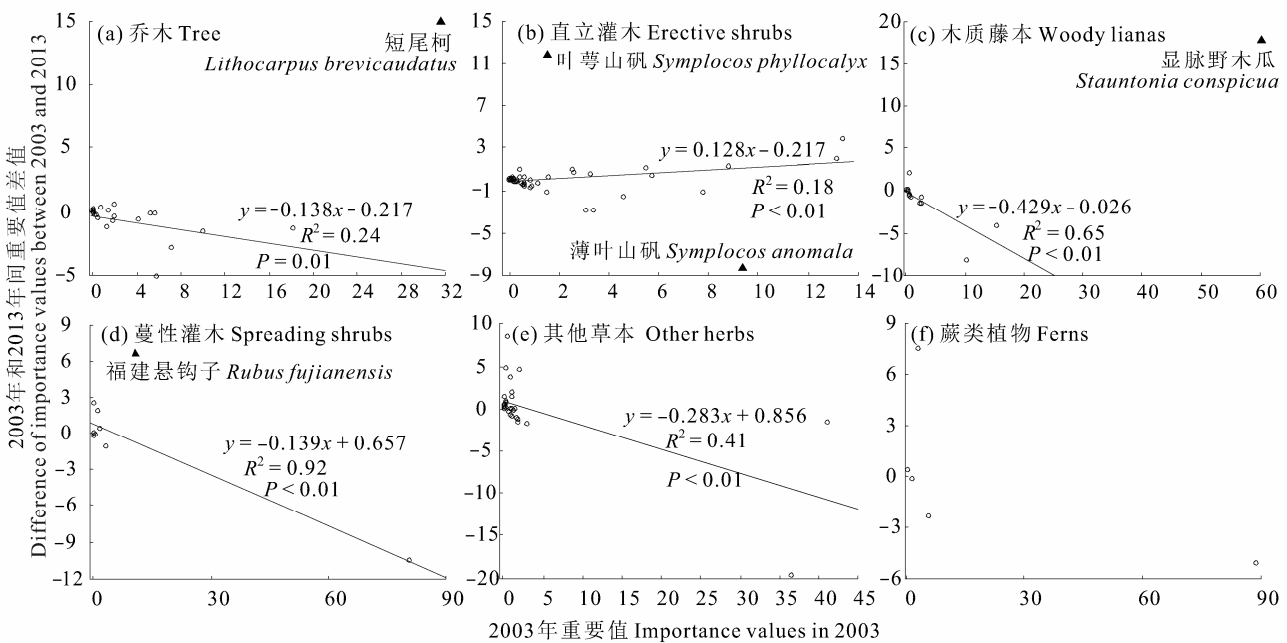


图1 不同生活型物种2003年的重要值与其10年间变化的关系。黑色三角形表示异常值，其旁边标注了对应物种的学名，实线表示不含异常值的回归直线。
Fig. 1 Relationships between importance values of species with different life forms in 2003 and its changes from 2003 to 2013. Solid triangles indicate oddities labeled with the corresponding species names nearby. Solid lines display linear regression curves for data without or excluding oddities.

表3 百山祖常绿阔叶林灌草层2003和2013年间与生境相关的物种在各类生境中的分布
Table 3 Number of species with remarkable association to each habitat type of the Baishanzu evergreen broad-leaved forest in 2003 and 2013

生境 Habitat	与生境负相关的物种数 Number of species positively associated with habitats			与生境正相关的物种数 Number of species negatively associated with habitats		
	2003	2013	差异 Difference	2003	2013	差异 Difference
山谷 Gull	7	5	-2	5	11	6
陡坡 Steep slope	1	1	0	1	1	0
缓坡 Mild slope	1	0	-1	7	4	-3
山脊 Ridge	4	2	-2	4	4	0

表4 百山祖常绿阔叶林各类生境的平均胸高断面面积与2003-2013年灌草层植物密度和多样性的变化
Table 4 Average basal area and changes in density and diversity in each habitat in the Baishanzu evergreen broad-leaved forest between 2003 and 2013

生境 Habitat	胸高断面面积 Basal area (m ² /quadrat)	密度 Density (ind./m ²)		Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index		Simpson指数 Simpson index	
		2003	2013	2003	2013	2003	2013
山谷 Gull	1.36	1.54	1.08	2.44	2.29	0.86	0.84
陡坡 Steep slope	1.74	2.04	1.74	2.49	2.41	0.85	0.84
缓坡 Mild slope	1.82	1.80	1.25	2.41	2.25	0.85	0.84
山脊 Ridge	1.97	1.83	1.28	2.38	2.27	0.84	0.85

* P < 0.05

nepalensis)等5种增加到软枣猕猴桃(*Actinidia arguta*)、老鸦糊(*Callicarpa giraldii*)、草绣球(*Cardiandra moellendorffii*)、巴东胡颓子、翅柃(*Eurya alata*)、异药花、求米草、山麦冬、麦冬、云和假糙苏(*Paraphlomis lancidentata*)和水丝梨(*Sycopsis sinensis*)等11种。除异药花外，其余呈正相关的物种与10

年前均不一样。此外,与缓坡呈显著正相关的物种2003年有树参(*Dendropanax dentiger*)、鸦椿卫矛、银钟花(*Halesia macgregorii*)、显脉野木瓜、短尾柯、四川山矾和毛漆树(*Toxicodendron trichocarpum*)等7种,到2013年仅剩显脉野木瓜、短尾柯、光亮山矾以及温州冬青等4种(表3)。

2.3 典范对应分析

典范对应分析结果表明,样方凹凸度对灌草层物种分布影响最大,其次是样方内DBH ≥ 1 cm的上部树木的总胸高断面积,样方坡度和相对高度对灌草层植物分布影响较小(图2)。从物种分布10年变化来看,在排序平面上,2003–2013年期间总体物种分布沿着坡度和相对高度增大的方向发生了轻微的移动;同时在总胸高断面积轴上又存在向中间聚集的趋势。

2.4 不同生境的物种多样性

比较两次调查中各类生境小样方的物种多样性发现:山谷、缓坡和山脊3类生境的Shannon-Wiener指数都显著下降;而在陡坡处,10年间Shannon-Wiener多样性指数变化不显著。从Simpson指数来看,仅有山谷处的物种多样性显著下降,而其他生境的物种多样性变化不明显(表4)。

3 讨论

通过比较百山祖常绿阔叶林5 ha样地2003年和2013年灌草层的物种组成和分布,我们发现这10年间的动态总体上体现出稳中有变的特点。虽然灌草层个体数量和物种多样性都大幅下降,且除直立灌木外,大多数生活型类群的优势种重要值10年来下降明显,但各生活型的优势种地位仍基本不变,少数优势种的重要值还逆势上扬;与生境存在显著相关性的物种数量较少,且10年间进一步减少。这一动态过程是受多种因素影响的。

3.1 群落自身过程的作用

群落上层的郁闭度是决定百山祖常绿阔叶林灌草层植物分布的最重要因素。本研究结果表明,10年间百山祖常绿阔叶林灌草层的植物个体数减少了近30%,大量个体死亡,同时群落总体物种多样性也快速下降。这一现象与针对该群落DBH ≥ 1 cm木本植物的动态监测和局部幼苗动态监测结果一致(陈小荣等, 2013; 施露露等, 2014)。这种大规模减员现象可能与上层郁闭后竞争增强有关。

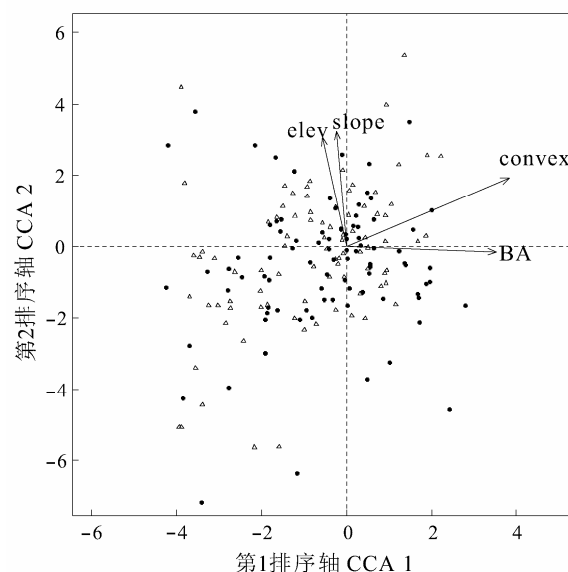


图2 灌草层内主要物种与生境因子间的典范对应分析排序图。黑点表示2003年的物种, 三角形表示2013年的物种。图中elev, slope, convex和BA分别表示10 m \times 10 m样方的相对高度、坡度、凹凸度和其中胸径1 cm以上所有植物的胸高断面积。

Fig. 2 Ordination of the main species and four habitat factors in the canonical correspondence analysis (CCA). Black points indicate species living in 2003, while hollow triangles indicate species living in 2013. The marks of elev, slope and convex mean elevation, slope and convexity of 10 m \times 10 m quadrates which plants was allocated in, while BA means basal area of all plants with DBH ≥ 1 cm in the quadrates.

通过比较国内主要森林动态监测样地的数据,可以发现百山祖常绿阔叶林胸径1 cm以上的植物主干和分枝密度为8,763.8/ha, 高于海南尖峰岭热带森林样地(8,077.3/ha), 更远高于同在浙江省的古田山(5,862.5/ha)和天童山(4,730.2/ha)常绿阔叶林(李步杭, 个人交流)。这说明百山祖常绿阔叶林内植物间的竞争比较激烈。而灌草层植物由于个体较小, 争夺资源的能力相对较差, 在群落自疏过程中首先受到影响。在这10年中, 随着群落郁闭度不断增加, 林下变得更加阴暗。同时, 整个群落冠层对降水的截留和大树对土壤水分的蒸散导致地表干旱。因此, 巴东胡颓子、华东瘤足蕨这样的耐阴性较差的物种和山麦冬、麦冬、南五味子等喜潮湿环境的植物重要性下降较快, 周毛悬钩子、山莓(*Rubus corchorifolius*)、掌叶覆盆子(*R. chingii*)等群落演替早期阶段的喜光物种甚至从群落中消失, 而短尾柯、显脉野木瓜、叶萼山矾、福建悬钩子这样的耐竞争物种的重要值却逐渐上升。

在这一机制影响下, 灌草层植物更趋向于分布在林冠郁闭度较小的生境中。CCA分析结果表明, 群落内物种的分布重心有向更陡峭和胸高断面积适中的生境中移动的趋势。分析发现, 不管是2003年还是2013年, 陡坡处灌草层植物平均个体数最高且样方平均胸高断面积适中, 且10年间个体减少的数量和比例都最低(表4)。这是由于陡坡生境郁闭度相对较低, 灌草层植物受到上层植物竞争的影响相对较小, 且雨季一般不会受流水冲刷, 因此, 陡坡处的灌草层植物能够较好地保存。正因如此, 在样地植物多样性整体下降的情况下, 陡坡处的Shannon-Wiener指数和Simpson指数下降趋势均不显著。

理论上, 在群落演替过程中物种间竞争加剧的情况下, 优势物种的重要值将进一步上升, 而非优势物种重要值下降。而本文的研究结果则表明, 仅直立灌木的重要值在10年间的变化符合这一预期, 对于其余各类生活型植物来说, 大部分优势种的重要值在过去10年中下降明显。这说明种间竞争对包含种类最丰富的直立灌木的物种组成结构影响较大, 而种内竞争对其他生活型植物种类的影响很大, 从而使其他各类木本植物次优势种的地位和草本植物优势种的地位有所下降。总体上, 群落内部过程将进一步推动整个群落向顶极群落发展。在此过程中不耐竞争的稀有种将受优势种排挤, 植物物种多样性将进一步下降(Connell, 1978)。但同时, 乔木类第1优势种短尾柯、木质藤本类第1优势种显脉野木瓜的重要值逆势上扬。这说明对于主要木本植物(乔木、直立灌木和木质藤本)来说, 最优种已经基本确立。尤其是百山祖常绿阔叶林的建群种——短尾柯的幼苗幼树在灌草层中的优势地位的进一步巩固, 有利于群落的稳定。

除此之外, 密度制约效应在森林群落动态中常具有明显作用(Connell & Green, 2000)。本研究的结果表明, 尽管2013年百山祖常绿阔叶林中仍有部分物种出现了新的生境相关, 但从整体上看, 除了与山谷正相关的物种数量增加外, 10年间与生境存在显著相关性的物种数都有所减少。这说明对这些灌草层植物来说, 过去10年的大量减员更多地发生在原先种群密度较高的一些区域。生活在合适的生境虽然给植物的生存提供了优良的资源环境, 但是聚集在这些生境也给植物带来了新的风险——种内竞争激烈和更容易被天敌捕食(Augspurger, 1984)。

Luo等(2012)对百山祖常绿阔叶林优势树种各生活史阶段的密度制约效应研究发现, 百山祖常绿阔叶林的密度制约效应主要存在于植物生活史的早期阶段。这种针对幼小植物个体的密度制约效应使各物种在空间上的分布更趋均匀, 从而使原先的生境相关性逐步消失。

3.2 气候因子的影响

气候变化因素对百山祖常绿阔叶林物种组成和分布的10年动态变化具有重要影响。本研究结果表明, 群落内物种的分布重心有向高海拔生境中移动的趋势。此外, 虽然涉及的物种不同, 但是总体上与山谷具有显著正关联的物种数量大幅增加。我们通过比较1982–2001年和2006–2013年两个时期百山祖保护区的气象资料发现, 2006–2013年间的年均温比上一时期升高了0.5℃, 极端高、低温都出现上升。更为重要的是, 由于气候变暖, 百山祖保护区的年均无霜期显著增加, 由早先的187.0 d增加到近期的293.2 d。冬季蓄冷不足将对很多植物的花芽分化造成严重影响, 从而影响植物的繁育(Bernier, 1981)。对于森林野生植物来说, 向高海拔山地移动是适应气候变暖的有效策略之一(Hannah, 2010)。

3.3 草本植物和木本植物的差异

由于生活史特征存在很大差异, 在森林群落动态中, 草本植物和木本植物的表现差异较大。一般认为草本是比较木本更进化的性状, 对环境变化的适应能力也更强。我们的研究表明, 相较于木本植物, 10年间草本植物各生活型间株(丛)数的下降比例差异很大, 且物种周转率较高(局部灭绝率和迁入率都高), 重要值排序变化较大。这很大程度上与草本植物普遍生活史周期较短有关。由于生活史短, 不适应新环境的草本植物很快会随世代结束而局域灭绝, 而新迁入灌草层的植物也会在一、二年内完成生活史, 快速繁殖扩大种群, 从而形成较高的草本物种周转率。在多样性方面, 草本植物和木本植物也存在较大差异。本研究结果显示, 在灌草层群落多样性整体下降的情况下, 虽然草本植物种类也减少了, 但其减少率(4.44%)仅是木本植物(8.89%)的一半。另外, 木本植物中仅有蔓性灌木的均匀度指数略有上升, 但各类草本植物的均匀度却均有所上升。这说明草本植物种类组成的动态变化可能比我们先前了解的更复杂。因此, 在森林的长期动态监测中, 有必要重视草本植物的监测。

3.4 动态监测的重要性

虽然受到很多挑战,但考虑到必要性和方便性,先前很多研究都使用空间替代时间的方法(或叫静态方法)来揭示森林的演替规律(Pickett, 1989; Johnson & Miyanishi, 2008)。Lai等(2009)和王伟等(2011)分别对古田山和百山祖DBH ≥ 1 cm的木本植物不同径级的生境相关性进行了分析,结果都表明多数物种的生境相关性会随着径级的不同发生改变。而本研究结果表明,与不同生境有显著正相关和/或负相关的38种次中,仅有11种次的生境相关性在10年间未改变。这说明即便属于同一发育阶段,很多植物的生境相关也发生了动态变化。因此,不能简单地将植物的生境相关性会随着径级的不同发生改变归因于植物生境偏好随生活史阶段改变而改变。

先前利用时间替代空间的研究普遍认为,在亚热带森林演替过程中,随着演替的进行,一般草本植物多样性逐渐下降(胡正华和于明坚, 2006; 谭珊珊, 2012^①)。然而本研究结果表明,短期内虽然百山祖常绿阔叶林草本植物种类略有减少,但各类草本植物的均匀度均有所上升。这说明在森林演替过程中草本植物多样性并非简单的下降,其中间过程可能要复杂得多。

以上这些动态和静态研究结果的差异表明,在今后关于森林的长期研究中,需要更加注重通过动态监测收集数据,尽量将静态分析和动态监测结合起来(Pickett, 1989; Johnson & Miyanishi, 2008; Luo et al, 2012)。

致谢: 感谢凤阳山-百山祖国家级自然保护区百山祖管理处、浙江大学生命科学学院、台州学院生命科学学院、温州大学生环学院、丽水学院生态学院参加2003年或2013年百山祖样地建设和调查的所有老师和同学。

参考文献

- Augspurger CK (1984) Seedling survival of tropical tree species: interactions of dispersal distance, light-gaps and pathogens. *Ecology*, 65, 1705–1712.
- Bernier G, Kinet J, Sachs RM (1981) *The Physiology of Flowering*. CRC Press, Boca Raton.
- Bush MB, Colinvaux PA (1990) A pollen record of a complete

- glacial cycle from lowland Panama. *Journal of Vegetation Science*, 1, 105–118.
- Camargo JA (1993) Must dominance increase with the number of subordinate species in competitive interaction? *Journal of Theoretical Biology*, 161, 537–542.
- Chen XR, Chen YY, Luo ZR, Ding BY (2013) A 5-year study of mid-mountain subtropical evergreen broadleaved forest in Baishanzu, East China. *Journal of Zhejiang A & F University*, 20, 821–829. (in Chinese with English abstract) [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*, 20, 821–829.]
- Clements FE (1916) *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Carnegie Institution, Washington.
- Condit R (1998) *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots*. Springer-Verlag, Berlin.
- Condit R, Aguilar S, Hernandez A, Perez R, Lao S, Angehr G, Hubbell SP, Foster RB (2004) Tropical forest dynamics across a rainfall gradient and the impact of an El Nino dry season. *Journal of Tropical Ecology*, 20, 51–72.
- Condit R, Ashton PS, Manokaran N, LaFrankie JV, Hubbell SP, Foster RB (1999) Dynamics of the forest communities at Pasoh and Barro Colorado: comparing two 50-ha plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 354, 1739–1748.
- Condit R, Hubbell SP, Foster RB (1995) Mortality rates of 205 neotropical tree and shrub species and the impact of a severe drought. *Ecological Monograph*, 65, 419–439.
- Condit R, Hubbell SP, Foster RB (1996) Changes in a tropical forest with a shifting climate: results from a 50 ha permanent census plot in Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 12, 231–256.
- Connell JH (1978) Tropical rain forests and coral reefs as open non-equilibrium systems. In: *Population Dynamics: the 20th Symposium of the British Ecological Society* (ed. Anderson RM), pp. 141–163. Blackwell Scientific Publications, London.
- Connell JH, Green PT (2000) Seeding dynamics over thirty-two years in a tropical rain forest tree. *Ecology*, 81, 568–584.
- Dale MRT, Fortin MJ (2002) Spatial autocorrelation and statistical tests in ecology. *Ecoscience*, 9, 162–167.
- Du YJ, Mi XC, Liu XJ, Ma KP (2012) The effects of ice storm on seed rain and seed limitation in an evergreen broadleaved forest in east China. *Acta Oecologica*, 39, 87–93.
- Dutilleul P (1993) Modifying the t-test for assessing the correlation spatial processes. *Biometrics*, 49, 305–314.
- Enquist BJ, Enquist CAF (2011) Long-term change within a neotropical forest: assessing differential functional and floristic responses to disturbance and drought. *Global Change Biology*, 17, 1408–1424.
- Feng G, Mi XC, Yan H, Li YF, Svenning JC, Ma KP (2016) CForBio: a network monitoring Chinese forest biodiversity. *Science Bulletin*, 61, 1163–1170.

① 谭珊珊 (2012) 百山祖自然保护区植物群落结构和物种多样性分析. 硕士学位论文, 浙江大学, 杭州.

- Gleason HA (1926) The individualistic concept of the plant association. *Bulletin of the Torrey Botany Club*, 53, 7–26.
- Hannah L (translated by Zhao B, Ming HB) (2010) *Climate Change Biology*. Higher Education Press, Beijing. [赵斌, 明泓博 (译) (2014) 气候变化生物学. 高等教育出版社, 北京.]
- Harms KE, Condit R, Hubbell SP, Foster RB (2001) Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. *Journal of Ecology*, 89, 947–959.
- Hu ZH, Yu MJ (2006) Species diversity in four successional communities of evergreen broad-leaved forest in Gutian Mountain, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Ecology*, 25, 603–606. (in Chinese with English abstract) [胡正华, 于明坚 (2006) 浙江古田山常绿阔叶林演替序列研究: 群落物种多样性. 生态学报, 25, 603–606.]
- Johnson EA, Miyanishi K (2008) Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters*, 11, 419–431.
- 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.
- Legendre P, Legendre L (2012) *Numerical Ecology*, 3rd edn. Elsevier, Amsterdam.
- 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.
- 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.]
- 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.]
- McIntyre PJ, Thorne JH, Dolanc CR, Flint AL, Flint LE (2015) Twentieth-century shifts in forest structure in California: denser forests, smaller trees and increased dominance of oaks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 112, 1458–1463.
- Mclaren K, Monroe S, Wilson B (2016) The Arctic oscillation, climatic variability and biotic factors influenced seedling dynamics in a Caribbean moist forest. *Ecology*, 97, 2416–2435.
- Peterson DW, Peterson DL (2001) Mountain hemlock growth responds to climatic variability at annual and decadal time scales. *Ecology*, 82, 3330–3345.
- Pickett STA (1989) Space-for-time substitution as an alternative to long-term studies. In: *Long-term Studies in Ecology: Approaches and Alternatives* (ed. Likens GE), pp. 110–135. Springer-Verlag, Berlin.
- R Core Team (2016) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2016-03-15)
- Shi LL, Luo ZR, Xia JT, Zhao WJ, Wu YG, Ding BY (2014) Woody seedling dynamics and the correlation between habitat and regeneration mortality in a subtropical evergreen broad-leaved forest in China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6510–6518. (in Chinese with English abstract) [施璐璐, 骆争荣, 夏家天, 赵文娟, 吴友贵, 丁炳扬 (2014) 亚热带中山常绿阔叶林木本植物幼苗数量动态及其与生境的相关性. 生态学报, 34, 6510–6518.]
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC, Hernández C, Romoleroux K, Losos E, Magård E, Balslev H (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.
- 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 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.]
- White PB, van de Gevel SL, Grissino-Mayer HD, Laforest LB, Dewees GG (2011) Climatic response of oak species across an environmental gradient in the southern Appalachian mountains, USA. *Tree-Ring Research*, 67, 27–37.
- Wu ZY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Xu M, Luo ZR, Yu MJ, Ding BY, Wu YG (2007) Floristic composition and community structure of mid-montane evergreen broad-leaved forest in north slope of Baishanzu Mountain. *Journal of Zhejiang University (Agricultural & Life Science)*, 33, 450–457. (in Chinese with English abstract) [徐敏, 骆争荣, 于明坚, 丁炳扬, 吴友贵 (2007) 百山祖北坡中山常绿阔叶林的物种组成和群落结构. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 33, 450–457.]
- Zhang J, Huang SM, He FL (2015) Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the national Academy of Sciences, USA*, 112, 4009–4014.

(责任编辑: 沈泽昊 责任编辑: 黄祥忠)

• 研究报告 •

风筝果镜像花的雌雄异位变化及传粉生态型的形成

钱贞娜^{1,2} 孟千万^{1,2} 任明迅^{1,2*}

1 (海南大学海南省热带生物资源可持续利用重点实验室, 海口 570228)

2 (海南大学热带农林学院, 海口 570228)

摘要: 亚洲特有植物风筝果(*Hiptage benghalensis*)镜像花(mirror-image flowers)的雌雄异位变化极大, 柱头与可育花药的空间距离在海南岛与云南西双版纳种群仅有2–4 mm, 而在贵州及云南东南部种群可达10–12 mm。为验证“镜像花雌雄异位的变化是各个地理种群受到传粉昆虫体型大小选择的结果”假说, 本文开展了传粉生态学与分子生物学研究, 探讨风筝果不同地理种群的雌雄异位变化是否与当地传粉者体型相关, 是否有着遗传基础, 以及是否形成了“传粉生态型”(pollination ecotype)。结果表明, 雌雄异位程度大的贵州种群和云南东南部种群, 其传粉者也是体型较大的木蜂(*Xylocopa nasalis*)和熊蜂一种(*Bombus* sp.); 雌雄异位程度小的海南岛种群和云南西双版纳种群的传粉者则是体型较小的大蜜蜂(*Apis dorsata*)、西方蜜蜂(*A. mellifera*)。除了雌雄异位的明显分化($F = 53.69, P < 0.01$)之外, 花柱长度也在这两类种群之间差异显著($F = 12.5, P < 0.05$), 与传粉昆虫身体长度密切相关。通过叶绿体*ycf1b*、*rbcL*和细胞核ITS 3个DNA片段的序列分析, 由大型蜂传粉的雌雄异位程度较大的3个种群(贵州和云南东南部种群)遗传关系极近, 与小型蜂传粉种群(雌雄异位较小的海南岛种群和云南西双版纳种群)存在明显的遗传分化。这些结果显示, 风筝果不同地理种群的镜像花雌雄异位程度的变化可能是适应局域不同体型大小的传粉昆虫的选择结果, 而且种群间出现了基因流的隔断, 可能与大型蜂、小型蜂传粉的两种生态型有关。镜像花通过雌雄异位的变化适应不同地域的传粉者而形成传粉生态型, 这种传粉生态型及其传粉隔离机制可能是风筝果属物种形成与维持的一个重要原因。

关键词: 适应进化; 传粉效率; 繁殖隔离; 遗传距离; *ycf1b*; *rbcL*; ITS

Pollination ecotypes and herkogamy variation of *Hiptage benghalensis* (Malpighiaceae) with mirror-image flowers

Zhenna Qian^{1,2}, Qianwan Meng^{1,2}, Mingxun Ren^{1,2*}

1 Hainan Key Laboratory for Sustainable Utilization of Tropical Bioresources, Hainan University, Haikou 570228

2 Faculty of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228

Abstract: Herkogamy, the spatial separation of sexual organs within flowers, has long been thought to be a floral adaptation of reducing self pollination in hermaphrodites. Herkogamy of mirror-image flowers in the Asian endemic *Hiptage benghalensis* (Malpighiaceae) varies greatly between populations on Hainan Island (smaller than 4 mm) and Guizhou Province (larger than 10 mm). Such divergence in herkogamy could be adaptive to pollinator body size, which relates to pollen placement and stigma contact position. Recipient selection between local pollinators and plants may facilitate pollinator assembly in isolated populations, even forming pollination ecotypes. Pollinators were investigated in six geographic populations of *H. benghalensis* to study whether variations in herkogamy correspond to pollinator size. Molecular markers with nuclear ITS 1/4, chloroplast *ycf1b* and *rbcL* were also used to detect genetic differentiation between populations with large or small herkogamy. Our data showed small herkogamy in two populations from Hainan Island and one population from Xishuangbanna (southern Yunnan Province) as they were pollinated by small bees including *Apis dorsata* and *Apis mellifera*, with an abdomen width varying from 2 to 4 mm. Two populations from Guizhou Province and one population from Southeast Yunnan with larger herkogamy were pollinated by

收稿日期: 2016-09-05; 接受日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(31670230)和海南大学科研启动经费项目(kyqd1501)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: renmx@hainu.edu.cn

carpenter bees *Xylocopa nasalis* and bumble bees (*Bombus* sp.), with an obvious larger body size with a mean abdomen width of 11 mm. The style length ($F = 12.5$, $P < 0.05$) was also significantly different between large versus small herkogamous populations. Genetic data based on nuclear (ITS 1/4) and chloroplast (*rbcL* and *ycf1*) DNA also supported the differentiation between small and large herkogamous populations. These results indicated associations between flower and pollinator size, suggesting pollination ecotypes in *H. benghalensis*. This study indicated that the pollination ecotype in mirror-image flowers was associated with variations in herkogamy.

Key words: adaptive evolution; pollination efficiency; reproductive isolation; genetic distance; *ycf1b*; *rbcL*; ITS

由于环境因子与资源的斑块状分布, 同种植物的不同地理种群往往处于水热条件与伴生生物大不相同的微生境中。在局域不同环境条件的选择下, 不同地理种群可能在个体形态与结构、遗传背景方面都呈现出显著的不同, 形成不同的“生态型”(ecotype)。生态型是植物同一种内表现出的具有遗传基础的生态分化(Parisod & Joost, 2010), 是物种形成的一个初级阶段(Johnson & Steiner, 1997; Whittall & Hodges, 2007)。对于以异交传粉为主的植物而言, 不同地理种群还可能面临不同的传粉者类群与组成, 特别是异交物种拓殖到一个新分布区的先锋种群必然经历着适应局域“更有效传粉者”的强烈选择(Grant & Grant, 1965; Stebbins, 1970; Johnson & Steiner, 1997; Fortuna et al, 2008)。为适应最有效传粉者、促进繁殖成功, 不同地理种群的个体可能出现适应局域传粉者的花部特征调整(Robertson & Wyatt, 1990), 形成在形态特征与遗传背景都出现分化的“传粉生态型”(pollination ecotype) (Johnson, 1997; Johnson & Steiner, 1997, 2000, 2003; Anderson et al, 2009; Van der Niet et al, 2014)。与其他类型的生态型相比, 传粉生态型可直接影响到传粉隔离从而更易导致物种分化(Grant & Grant, 1965), 是认识植物物种形成、花-传粉昆虫交互选择的一个重要方面。

金虎尾科风筝果属(*Hiptage*)是亚洲特有属, 遍布整个亚洲热带地区, 特别是广布种风筝果(*H. benghalensis*)从南亚印度河流域、东南亚、中国南部(含云南、贵州、广西、广东、海南岛、台湾以及福建南部)等地都有大量分布, 分布区北缘可达贵州南部的南盘江-红水河流域(陈书坤, 1977; Ren, 2015)。风筝果属具有极其特化的传粉系统——镜像花(mirror-image flowers) (Sirirugsa, 1991; Ren et al, 2013)。镜像花是通过偏向一侧的花柱与偏向另一侧的可育雄蕊分别接触昆虫腹部两侧来进行传粉的

一种异交机制(Todd, 1882; Jesson & Barrett, 2002, 2003; 任明迅和张大勇, 2004; 林玉和谭敦炎, 2007; Tang & Huang, 2007)。侧偏的花柱与可育雄蕊的距离(雌雄异位, herkogamy) (Webb & Lloyd, 1986; 任明迅和张大勇, 2004)需与传粉者体型特别是腹部宽度相适应, 才有利于镜像花柱头与花药接触到传粉昆虫腹部两侧, 成功实现传粉(Barrett et al, 2000; Ren et al, 2013)。

我们的野外研究发现, 风筝果不同地理种群的镜像花在雌雄异位程度上表现出了极大的变化, 位于物种分布区北缘(南盘江-红水河流域)种群的雌雄异位程度可达云南西双版纳与海南种群的3倍之多。这种巨大的种内差异是由于分布区北缘缺乏合适传粉者而发生的松弛选择的结果, 还是对当地局域分布的较大体型传粉者的一种适应呢? 如果是后者, 这种适应性分化是不是已经造成了分布区北缘种群与其他地理种群间的遗传分化? 这是否又可能是风筝果属狭域特有种形成与维持的一种机制呢? 对这些问题的回答, 将极大促进人们对传粉生态型与物种形成、镜像花特化传粉系统的适应进化等的深入认识。

1 材料与方法

1.1 研究物种

风筝果是多年生木质藤本植物, 主要分布于亚洲热带地区的森林林缘、河谷滩地或石灰岩裸岩, 常攀爬于高大树木, 或铺散于石上。花期3-4月, 总状花序, 每花序约有花20朵。花大, 极芳香, 花瓣5枚、白色且向后方反折, 最上方的旗瓣基部具黄色斑点(图1)。风筝果除了具有特化的传粉系统“镜像花”之外, 雄蕊还分化成1大9小的异型雄蕊(陈书坤, 1977; Ren et al, 2013) (图1), 较大的1枚雄蕊可育、花粉活性高, 而9枚小雄蕊的花粉活性极低, 可能是提供花粉诱物吸引传粉昆虫的不育雄蕊(Ren et al,

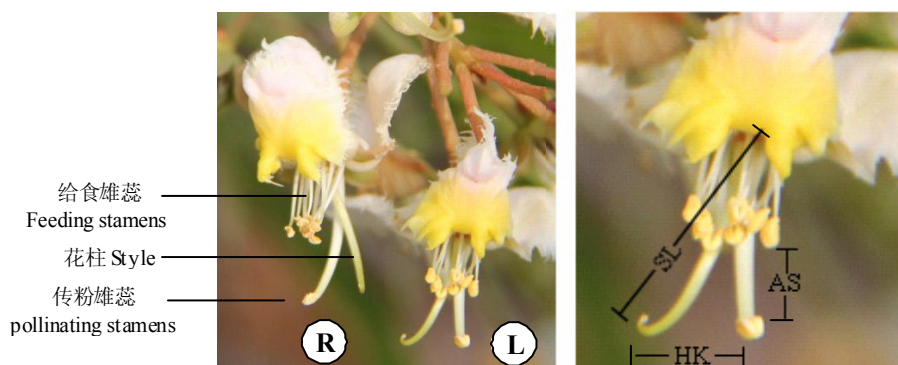


图1 风筝果的镜像花及花部关键性状的测量。R: 右偏花柱型; L: 左偏花柱型; HK: 雌雄异位; SL: 花柱长; AS: 花药分离。
Fig. 1 Mirror-image flowers and measurements of key floral traits in *Hiptage benghalensis*. R, Right-styled flower; L, Left-styled flower; HK, Herkogamy; SL, Style length; AS, Anther separation.

2013)。萼片5, 上方1枚具一分泌花蜜的大腺体(Ren et al, 2013)。果实是典型的翅果, 具窄翅3。叶对生、革质, 幼叶呈现闪亮的红色。风筝果适应性较强, 花、果、叶均有较高的观赏价值, 已在国内外一些植物园和庭院引种(Vitelli et al, 2009; 任明迅, 个人观察)。

风筝果的自然分布范围几乎遍布亚洲整个热带地区, 且在季风气候作用下得以沿着红河、右江与红水河等河谷向北迁移至贵州南部、滇东南等地河谷与石灰岩山坡(Ren, 2015; 钱贞娜和任明迅, 2016), 使得贵州南部的南盘江—红水河流域成为风筝果以及整个风筝果属的分布区北缘(Ren, 2015)。

1.2 实验地点

选择风筝果分布区北缘的贵州南部(雌雄异位程度大)、海南岛(雌雄异位程度较小)、云南(雌雄异位程度变化较大)等3个地理区域, 每个区域选择2个地理种群。贵州南部的2个地理种群位于望谟县的乐康村(GZ-LK)和蔗香乡(GZ-ZX); 海南岛的2个种群位于海南岛西部的霸王岭(HN-BW)和东部的吊罗山(HN-DL); 云南省的2个种群分别是西双版纳热带植物园(YN-BN)和元江县的羊街村(YN-YJ)。各地理种群的基本信息见表1。

野外观察与实验时间是在2015年3月(贵州种群)、2015年和2016年的4月(海南岛种群)以及2016年4月(云南种群)。

1.3 花部关键性状

盛花期时每个种群随机选取15个开花植株, 测量每个植株所有可测量到的完全开放的花。如种群处于花期末期, 花数量较少, 则测量整个种群所有可测量到的花。用精度1 mm的直尺测量3个花部关

键性状(图1): 雌雄异位(柱头与可育花药的水平距离。可育花药指与花柱呈相反侧偏方向的大型可育雄蕊的花药)、花柱长(花柱基部到柱头的距离)、花药分离(可育雄蕊的花药与其余9个较小雄蕊花药之间的最小距离)。具体测量方法见图1所示。使用 χ^2 分析, 对花柱左偏、花柱右偏的两种花型的数量比率进行统计分析, 看是否偏离理论预测的1:1的比率(Jesson & Barrett, 2002, 2003)。

1.4 访花昆虫及行为

每个种群的观察时间从9:00至17:00, 昆虫访花频率与次数观测时间为11:00—14:00、15:00—17:00。在每种群内随机标记10个花序进行访花昆虫的观察和拍照。特别注意访花昆虫身体与花内各部位的接触情况, 及其与3个关键花部性状的关系。将访花时能够接触到花药和柱头的昆虫视为传粉昆虫。记录传粉者种类、拍摄传粉昆虫的访花路径。

用2个电蚊拍夹击(Huang & Shi, 2013), 捕捉访花频率较高的传粉昆虫。将捕获的昆虫放入样品瓶, 带回室内测量昆虫的体长、腹部宽度, 以及花粉粘附部位。测量完成后将昆虫制成标本并鉴定。

1.5 种群遗传关系

每个种群随机选取覆盖整个种群分布范围的15个植株, 采集幼叶, 用变色硅胶干燥。使用改良的CTAB法提取叶片总DNA(Doley & Doley, 1987)。选取变异程度大的2个叶绿体片段 $rbcL$ 、 $ycf1b$ 和1个核基因ITS, 确定风筝果不同地理种群的遗传关系。引物序列及文献来源见表2。

PCR反应体积为25 μ L: ddH₂O 17 μ L; 10 \times Buffer 5 μ L; 10 mM dNTPs 1 μ L; 50 μ M前后引物各0.5 μ L; 5 U *Taq*酶0.25 μ L; DNA模板1 μ L。PCR反应

表1 风筝果6个种群的地理位置与花柱右偏、左偏两种花型的比率
Table 1 Geographic locations and ratio of right- and left-styled flowers of *Hiptage benghalensis* populations

地点 Location	居群 Population	经纬度 Latitude/longitude	海拔 Altitude (m)	种群两种花型比率 Right/Left-styled flowers	χ^2	<i>P</i>
贵州 Guizhou	GZ-LK	25°05'24" N, 106°12'59" E	466	1:1 (21/21)	0	1
	GZ-ZX	24°58'29" N, 106°08'09" E	442	1:1 (18/18)	0	1
云南 Yunnan	YN-YJ	23°20'17" N, 102°11'52" E	1,758	1:1.18 (11/13)	0.75	0.68
	YN-BN	21°52'16" N, 101°19'27" E	570	1:1 (32/32)	0	1
海南 Hainan	HN-BW	19°06'18" N, 109°06'18" E	223	1:1.50 (36/41)	1.2	0.27
	HN-DL	18°43'19" N, 109°52'24" E	332	1:1.33 (28/39)	0.28	0.59

表2 确定风筝果地理种群遗传关系的DNA片段及其引物
Table 2 DNA fragments and the primers used for genetic studies of *Hiptage benghalensis* populations

DNA片段	引物序列 Sequence	片段大小 Fragment size	参考文献 Reference
核基因 ITS 1/4	ITS1: TCCGTAGGTGAACCTGCG ITS4: TCCTCCGCTTATTGATATGC	651 bp	White et al, 1990
叶绿体 <i>rbcL</i>	1F: ATGTCACCACAAACAGAAAC 724R: TCGCATGTACCTGCAGTAGC	715 bp	Davis & Anderson, 2010
叶绿体 <i>ycf1b</i>	F: TCTCGACGAAAATCAGATTGTTGTGAAT R: ATACATGTCAAAGTGATGGAAAA	926 bp	Dong et al, 2015

程序, ITS为: 预变性94℃ 4 min, 变性94℃ 1 min, 退火55℃ 1 min, 延伸72℃ 1 min; *rbcL*: 预变性94℃ 4 min, 变性94℃ 30 s, 退火54℃ 1 min, 延伸72℃ 1 min; *ycf1b*: 预变性94℃ 4 min, 变性94℃ 30 s, 退火52℃ 40 s, 延伸72℃ 1 min。以上变性、退火、延伸三步均为35个循环, 最终在72℃延伸10 min。所获得的PCR产物送华大基因公司测序。

1.6 数据分析

花部关键性状的数据用SPSS 13.0 for Windows统计软件分析, 与传粉昆虫体宽的关系采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)。对不同地理种群DNA测序结果用MEGA 6.0 (Tamura et al, 2013)自行比对, 将叶绿体基因序列和核基因序列用Sequence Matrix (Vaidya et al, 2011)合并, 再使用MEGA 6.0的邻接法(neighbor-joining method)对6个地理种群进行遗传关系的聚类分析, 并将种群遗传关系与雌雄异位程度的关系进行比对, 判断雌雄异位程度相差较大的种群是否也有着较远的遗传关系。使用GenAlEx 6.501 (Excoffier et al, 1992)对遗传结构进行AMOVA分析, 区分种群间与种群内的遗传变异相对比例。

2 结果

2.1 花部关键性状

各个地理种群的左偏花柱花型/右偏花柱花型的比率几乎都呈1:1 (表1)。贵州GZ-LK、GZ-ZX种

群和云南元江YN-YJ种群的雌雄异位都大于10 mm, 而海南HN-BW、HN-DL种群和云南YN-BN种群雌雄异位均小于5 mm (图2A), 两者的差异极显著($F = 53.69, P < 0.01$)。雌雄异位较大的贵州2个种群、云南YN-YJ种群之间的雌雄异位程度则差异不显著($P > 0.05$), 雌雄异位较小的海南2个种群和云南YN-BN种群之间的雌雄异位也相差无几($P > 0.05$)。因此, 可以把贵州2个种群和云南的YN-YJ种群归为“大雌雄异位种群”, 海南岛2个种群及云南的YN-BN种群则为“小雌雄异位种群”。

花柱长方面, 大雌雄异位种群(GZ-LK、GZ-ZX、YN-YJ)的花柱也明显较长, 基本都在16 mm以上, 而小雌雄异位种群(HN-BW、HN-DL、YN-BN)花柱长也较小, 平均值在12 mm左右(图2B), 差异显著($F = 12.5, P < 0.05$)。

花药分离程度在不同地理种群之间没有出现明显差异($P > 0.05$) (图2C)。但是, 从图2C可以看出, 大雌雄异位种群有着略大的花药分离程度(> 6 mm), 小雌雄异位种群的花药分离程度较小(~ 5 mm)。

2.2 传粉昆虫及访花行为

大雌雄异位种群的有效传粉者是竹木蜂(*Xylocopa nasalis*)、和熊蜂一种(*Bombus* sp.)等大型昆虫(图3), 这些昆虫的腹部宽度均可达10 mm左右。在访花过程中, 竹木蜂与熊蜂都在反折的花柱与可育雄蕊之间降落, 腹部两侧可轻易触碰到柱头与可育雄蕊的花药(图3A, B, C)。每个种群平均每天

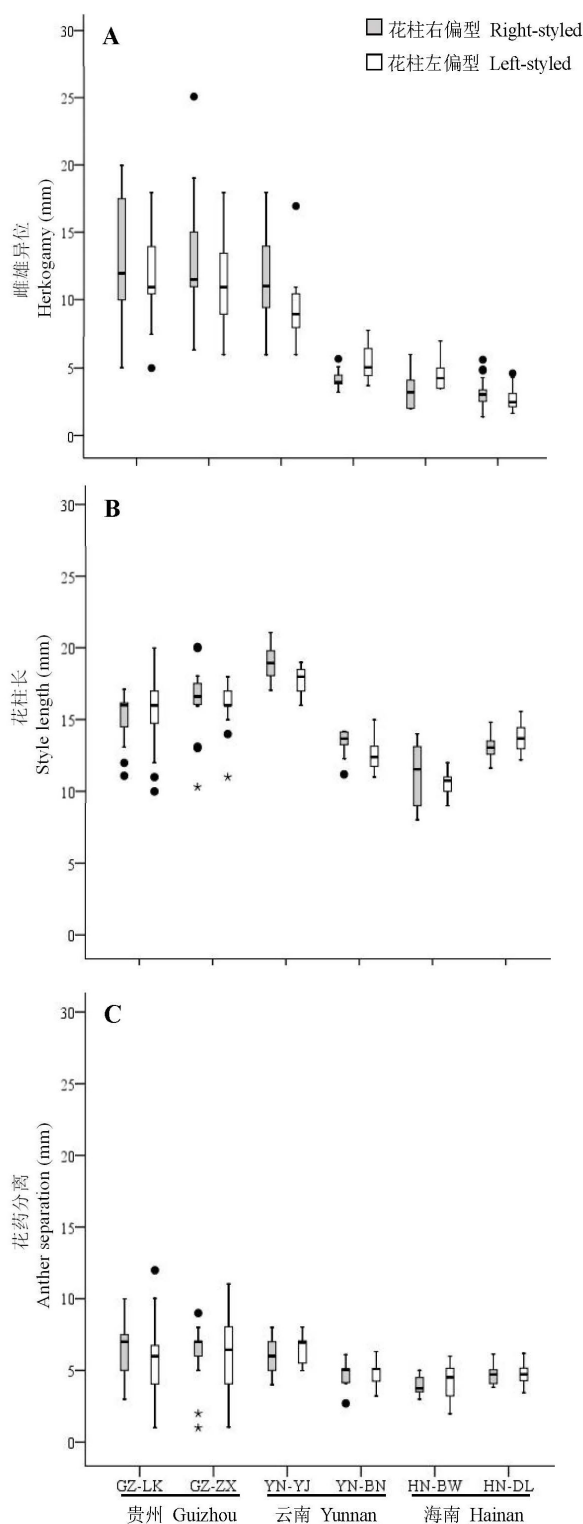


图2 不同地理种群的风筝果镜像花的雌雄异位(A)、花柱长(B)、花药分离(C)情况

Fig. 2 Boxplot of variations in herkogamy (A), style length (B) and anther separation (C) of mirror-image flowers among *Hiptage benghalensis* populations

5 h的观测时间内, 竹木蜂与熊蜂访花次数共460次, 其中竹木蜂315次(68.5%)、熊蜂145次(31.5%)。竹木蜂访花频率为 6.857 ± 0.89 次·朵⁻¹·h⁻¹、熊蜂访花频率为 2.60 ± 1.94 次·朵⁻¹·h⁻¹。偶见极少数的蝇类或食蚜蝇来访, 但访问频率低, 仅在9个小雄蕊上快速采集花粉, 停留时间往往少于3 s, 未见接触柱头及可育雄蕊的花药。

小雌雄异位种群的传粉者体型较小, 主要是腹部宽度在3–5 mm之间的大蜜蜂(*Apis dorsata*)和西方蜜蜂(*A. mellifera*) (图3E, F)。大蜜蜂和西方蜜蜂访花频率分别为 2.217 ± 0.55 次·朵⁻¹·h⁻¹、 5.725 ± 1.35 次·朵⁻¹·h⁻¹, 大蜜蜂为主要的有效传粉者。根据雌雄异位程度与传粉者体型大小(腹部宽度)的相关性来看, 传粉者体型与雌雄异位程度呈现出非常明显的对应变化关系(图4)。

竹木蜂与熊蜂访花时, 大多降落在花柱之上, 或花柱与大型可育雄蕊之间(图3), 取食9个小雄蕊上的花粉或扒开雄蕊群通过花瓣间的缝隙吸取旗瓣后方的萼片腺体分泌物。在这个过程中, 昆虫胸部紧压9个小雄蕊花药, 而腹部两侧接触到柱头与可育花药, 携带上可育花粉或给柱头授粉。竹木蜂和熊蜂偶尔会伸长喙吸食萼片腺体的分泌物, 但由于花瓣的强烈反折且旗瓣紧抱花萼, 这些体型巨大的昆虫难以钻进花瓣间隙(图3), 身体在花内的移动空间不大, 往往都是头部顶在旗瓣之下、身体腹部两侧仍位于反折的花柱或可育雄蕊之上(图3)。对捕捉到的传粉昆虫体表进行观察(图3D), 发现其胸部携带大量花粉, 应为来自小雄蕊花药的花粉, 而腹部侧面附有来自可育花药的少量花粉。由此可判断竹木蜂与熊蜂确实是可以实现镜像花传粉机制的“合法的”传粉者。大蜜蜂访花行为与前二者类似, 几乎完全采集花粉, 极少取食萼片腺体分泌物(图3)。

2.3 不同地理种群间遗传关系

基于ycf1b、rbcL、ITS基因片段序列变异的AMOVA分析发现, 风筝果种群86%的遗传变异出现在种群间, 仅有14%的遗传变异出现在种群内。这表明, 风筝果地理种群之间存在着较大的遗传分化, 种群间的基因流强度较低。

根据种群遗传关系的聚类分析, 地理距离较远的种群也有着较远的遗传距离(图4)。特别值得注意的是, 大雌雄异位种群(贵州GZ-ZX、GZ-LK种群和云南YN-YJ种群)相互间的遗传距离较近, 而它们

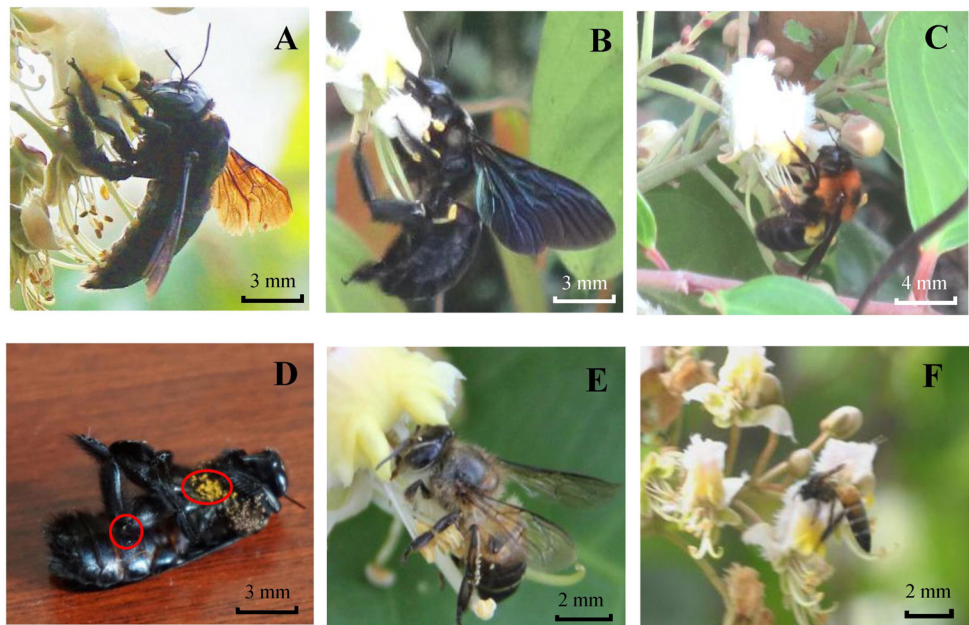


图3 风筝果不同地理种群的传粉者。(A)竹木蜂(贵州GZ-LK种群); (B)竹木蜂(贵州GZ-ZX种群); (C)熊蜂(云南YN-YJ种群); (D)花粉粘附在竹木蜂胸部与腹部(红色圆圈处); (E)西方蜜蜂(云南YN-BN种群); (F)大蜜蜂(海南HN-BW种群)。
Fig. 3 Pollinators in different geographic populations of *Hiptage benghalensis*. (A) and (B), *Xylocopa nasalis* visiting GZ-LK and GZ-ZX populations in Guizhou Province; (C) *Bombus* sp. visiting YN-YJ Population in Yunnan Province; (D) Pollen grains (red circles) on the thorax and abdomen of a carpenter bee; (E) *Apis mellifera* in YN-BN Population in Yunnan Province; (F) *Apis dorsata* in HN-BW Population on Hainan Island.

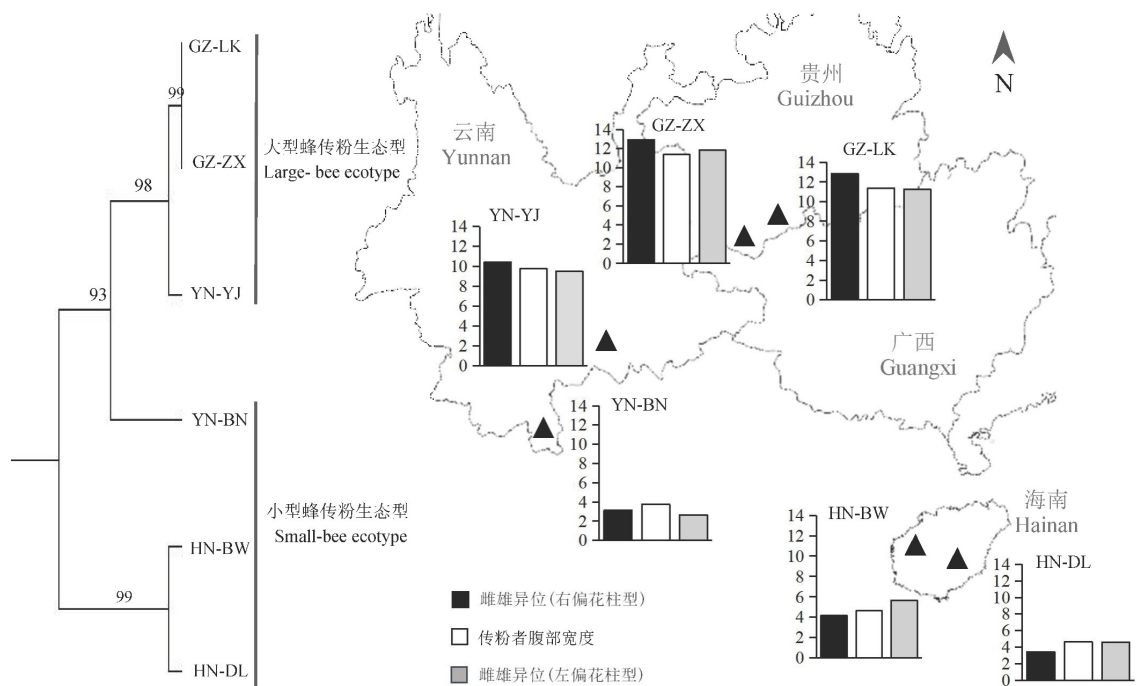


图4 风筝果的传粉生态型。种群遗传关系树使用邻接法(分支上的数字代表支持率), 数据来源于1个核基因片段(ITS 1/4)及2个叶绿体基因片段(*rbcL*和*ycf1b*)。柱状图为雌雄异位程度与传粉昆虫腹部宽度的平均值, 纵坐标单位为mm。
Fig. 4 Pollination ecotypes of *Hiptage benghalensis*. Neighbor-joining phylogenetic tree was drawn based on ITS1/4 and chloroplast (*rbcL* and *ycf1b*) DNA sequences. The histograms on the map refer to the mean values of herkogamy, and the unit of ordinate is millimeter (mm). ■ Herkogamy (right-styled flower); □ Pollinator abdomen width; ▒ Herkogamy (left-styled flower).

与小雌雄异位种群HN-BW和HN-DL有着明显的遗传隔离,而小雌雄异位种群YN-BN种群则位于两者之间(图4)。

3 讨论

3.1 风筝果镜像花的传粉生态型

本文通过野外传粉生态学实验证实风筝果的小雌雄异位种群(海南HN-BW、HN-DL和云南YN-BN种群)传粉者是体型较小的大蜜蜂和西方蜜蜂,大雌雄异位种群(贵州GZ-LK、GZ-ZX和云南YN-YJ种群)的传粉者则为体型较大的木蜂与熊蜂(图3),并通过分子生物学研究证实了两类种群间存在着明显的基因流阻隔(图4)。这两方面的结论一致证实,风筝果的地理种群可能存在着“小蜂传粉生态型”和“大蜂传粉生态型”(图4)。

由于镜像花特殊的传粉机制,雌雄异位是风筝果2个传粉生态型的关键花部性状(图1, 2, 4)。镜像花依赖左偏花柱和右偏花柱两种花型的花柱与可育雄蕊分别接触传粉者身体的左右两侧来实现花型间的异交传粉。因此,柱头与可育花药之间的空间距离(雌雄异位)只有与传粉者体型大小相对应,才有利于花粉的准确传递。对于一个特定的传粉者,雌雄异位程度如果过大,可能导致柱头和/或花药无法触碰到传粉者;而雌雄异位程度如果过小,则花药与柱头在传粉者身体上接触部位过于靠近而易导致自交或雌雄干扰。因此,风筝果分布区北缘(南盘江-红水河流域)的贵州种群与海南岛和西双版纳种群在面临体型(腹部宽度)相差2-3倍的传粉昆虫(图3)的时候,雌雄异位程度受到了适应局域“更有效传粉者”的强烈的歧化选择,这成为导致传粉生态型出现的关键因素(图2, 4)。

传粉生态型在兰科、杜鹃花科、鸢尾科等植物中已有报道,往往也与花部关键性状如花距长、花冠管长的适应性变化息息相关。Robertson和Wyatt (1990)发现,高海拔地区和低海拔地区分布的兰科植物*Platantha ciliaris*具有不同的矩长,吸引不同吻长的蝴蝶为其传粉。南非开普敦地区的兰科植物*Satyrium hallackii*与鸢尾科植物*Gladiolus longicollis*的种群间也出现了不同长度花冠管适应不同吻长蝇类传粉者的传粉生态型(Johnson, 1997; Anderson et al, 2009)。杜鹃花科的*Erica plukenetii*也在适应鸟媒和蛾媒传粉者的过程中出现了3种传粉生态型,

花冠管长度与形态在其中扮演着关键的角色(Van der Niet et al, 2014)。风筝果的情况与此类似,镜像花的雌雄异位作为关键性状在适应不同体型传粉者的过程中分化出传粉生态型,也证实了镜像花这类特化传粉系统对传粉环境变化有着一定的适应灵活性。

虽然镜像花一直被认为是一种非常特化、复杂的传粉机制,但大多数研究也发现镜像花的访花昆虫专一性并不特别强,体型大小与访花行为近似的多种昆虫都可以是其有效的传粉者(Jesson & Barrett, 2003; Gao et al, 2006; Ren et al, 2013)。本文发现的风筝果镜像花出现了适应不同类型传粉者的两种生态型这一现象,进一步证实了镜像花这类特化传粉系统可能具有较多样的传粉者。风筝果大蜂传粉生态型的传粉昆虫包括了体型较大的木蜂和熊蜂,这类传粉昆虫有着体型大、动作粗暴、以花粉和花蜜为回报物的共同特点(吴燕如, 2000)。小蜂传粉生态型的传粉者则是以体型较小的西方蜜蜂与大蜜蜂为主,这类蜜蜂属典型的热带分布昆虫,体型偏小、访花时间较短,对花气味有超强的记忆识别能力(卿卓等, 2014),回报物也是花蜜与花粉(Ren et al, 2013)。

3.2 风筝果传粉生态型的形成与维持

风筝果及其整个属的地理分布范围集中在亚洲的热带区域,特别是南亚、中南半岛、东南亚群岛(Sirirugsa, 1991; Chen & Funston, 2008)。海南岛和云南的西双版纳地区(小蜂传粉生态型)邻近上述地域,气候与环境条件相差不大;而大蜂传粉生态型所处的南盘江-红水河流域属于风筝果地理分布区的北缘,是因为东南季风沿着纵向河谷带来的暖湿气流使得风筝果等热带植物北迁至此。此外,小蜂传粉生态型的主要传粉者大蜜蜂的地理分布范围与风筝果绝大部分地理分布区域几乎完全重叠(Cao & Hu, 2012),显示出两者可能有着长期的协同进化历史(Thomas et al, 2009; Ren et al, 2013)。由此推测,雌雄异位程度较小的小蜂传粉生态型更有可能是风筝果的原始状态。

在我国,大蜜蜂主要分布于海南岛、云南南部、广西与越南交界处(吴燕如, 2000),恰恰没有分布在大蜂传粉生态型所在的滇黔桂交界区的南盘江-红水河流域。当风筝果在东南季风作用下扩散至南盘江-红水河流域一带后,缺乏与之长期协同进化的

小型蜜蜂, 而面临的大多是体型大、访花行为粗鲁的大型昆虫如木蜂与熊蜂。这些大型访花昆虫给风筝果的镜像花造成了至少两方面的影响: (1) 大型昆虫较大的腹部宽度使得柱头与可育花药都接触到昆虫腹部下方, 由于位置靠近, 可能造成自交与雌雄功能干扰; (2) 由于风筝果花瓣反折(图1)、传粉昆虫来访都是降落在长长探出的花柱与可育雄蕊之上(图3), 大型昆虫对花柱造成的压力和物理损伤将远远高于小型蜂。Dulberger (1981) 认为, 镜像花(侧偏花柱)进化的一个主要选择压力就是避免昆虫对花柱的损害。因此, 当访花昆虫转为大体型昆虫的时候, 风筝果镜像花较大的雌雄异位程度将受到选择, 并逐渐形成了适应于大型蜂的传粉生态型。

地理环境可能是风筝果传粉生态型出现和维持的另一个重要原因。风筝果分布北缘南盘江—红水河流域位于生境隔离程度大的滇黔桂交界区石灰岩集中分布地域, 与风筝果分布区中心(中南半岛、东南亚地区)和海南岛种群之间的种子扩散(基因流)有限。这些位于分布区边缘的“先锋种群”(Duffy et al, 2009; Parisod & Joost, 2010)发生的变异性状容易被选择固定, 逐渐积累遗传分化并最终导致生态型的形成(图4)。

3.3 风筝果传粉生态型与物种形成的关系

风筝果大蜂传粉生态型形成的地方(南盘江—红水河流域)既是该物种的分布区北缘, 也是该属6个狭域特有种集中分布的地区(陈书坤, 1977; Chen & Funston, 2008; Ren, 2015)。这些特有种的形成可能与早期的传粉生态型导致的传粉隔离有关。

我们的野外研究发现, 南盘江—红水河流域一带的狭域特有种如多花风筝果(*Hiptage multiflora*)、小花风筝果(*H. minor*)、田阳风筝果(*H. tianyangensis*)的雌雄异位程度和花柱长度差异较明显。这些物种可能利用不同的传粉昆虫进行传粉, 也可能通过长度不同的花柱与可育雄蕊利用同一传粉昆虫体侧的不同部位实现传粉隔离(Ren, 2015)。雌雄异位与花柱长度的不同显然是这些物种传粉隔离与物种分化与维持的一个主要原因, 这与风筝果种内雌雄异位程度的变化导致传粉生态型形成的情况类似。

由于风筝果的地理分布范围极广, 本文的研究区域还不能代表风筝果大部分种群的情况, 不排除在其他区域可能出现另一类传粉生态型的可能。今

后的研究可以对更多的相距较远的地理种群特别是风筝果分布区西界(印度河流域)、东端(台湾岛与菲律宾)、南沿(印度尼西亚)等地进行传粉生物学和分子生物学研究, 进一步全面确认风筝果镜像花的传粉生态型, 解释风筝果属的物种形成机制, 揭示镜像花特化传粉系统的进化。

致谢: 云南大学李庆军教授、高江云教授、中国科学院西双版纳热带植物园黄健博士在野外采样与实验中给予了大力支持; 中国农业大学徐环李教授帮助鉴定访花昆虫。特此致谢。

参考文献

- Anderson B, Alexandersson R, Johnson SD (2009) Evolution and coexistence of pollination ecotypes in an African *Gladiolus* (Iridaceae). *Evolution*, 64, 960–972.
- Barrett SCH, Jesson LK, Baker AM (2000) The evolution and function of stylar polymorphisms in flowering plants. *Annals of Botany*, 85, 253–265.
- Cao LF, Hu FL (2012) Biological characters of *Apis dorsata* from China. *Journal of Bee*, 32, 1–2.
- Chen SK (1977) *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*, Tomus 43, p.119. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈书坤 (1977) 中国植物志, 43卷, 119页. 科学出版社, 北京.]
- Chen S, Funston AM (2008) Malpighiaceae. In: *Flora of China* (eds Wu ZY, Raven PH, Hong DY), pp. 132–138. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Davis CC, Anderson WR (2010) A complete generic phylogeny of Malpighiaceae inferred from nucleotide sequence data and morphology. *American Journal of Botany*, 97, 2031–2048.
- Doley JJ, Doley JL (1987) A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*, 19, 11–15.
- Dong WP, Chao X, Li CH, Sun JH, Zuo YJ, Shi S, Cheng T, Guo JJ, Zhou SL (2015) *ycf1*, the most promising plastid DNA barcode of land plants. *Scientific Reports*, 5, 8348.
- Duffy KJ, Scopece G, Cozzolino S, Fay MF, Smith RJ, Stout JC (2009) Ecology and genetic diversity of the dense-flowered orchid, *Neotinea maculata*, at the centre and edge of its range. *Annals of Botany*, 104, 507–516.
- Dulberger R (1981) The floral biology of *Cassia didymobotrya* and *C. auriculata* (Caesalpinaceae). *American Journal of Botany*, 68, 1350–1360.
- Excoffier L, Smouse PE, Quattro JM (1992) Analysis of molecular variance inferred from metric distance among DNA haplotypes: application to human mitochondrial DNA restriction data. *Genetics*, 131, 479–491.
- Fortuna MA, García C, Guimarães PR Jr, Bascompte J (2008) Spatial mating networks in insect-pollinated plants. *Ecology Letters*, 11, 490–498.
- Gao JY, Ren PY, Yang ZH, Li QJ (2006) The pollination ecol-

- ogy of *Paraboea rufescens* (Gesneriaceae), a buzz-pollinated tropical herb with mirror-image flowers. *Annals of Botany*, 97, 371–376.
- Grant V, Grant KA (1965) Flower Pollination in the Phlox Family. Columbia University Press, New York.
- Huang SQ, Shi XQ (2013) Floral isolation in *Pedicularis*: how do congeners with shared pollinators minimize reproductive interference? *New Phytologist*, 199, 858–865.
- Jesson LK, Barrett SCH (2002) Solving the puzzle of mirror-image flowers. *Nature*, 417, 707.
- Jesson LK, Barrett SCH (2003) The comparative biology of mirror-image flowers. *International Journal of Plant Sciences*, 164, 237–249.
- Johnson SD (1997) Pollination ecotypes of *Satyrium hallackii* (Orchidaceae) in South Africa. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 123, 225–235.
- Johnson SD, Steiner KE (1997) Long-tongued fly pollination and evolution of floral spur length in the *Disa draconis* Complex (Orchidaceae). *Evolution*, 51, 45–53.
- Johnson SD, Steiner KE (2000) Generalization vs. specialization in plant pollination systems. *Trends in Ecology & Evolution*, 15, 140–143.
- Johnson SD, Steiner KE (2003) Specialized pollination systems in southern Africa. *South African Journal of Science*, 99, 345–348.
- Lin Y, Tan DY (2007) Enantiostyly in angiosperms and its evolutionary significance. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 45, 901–916. (in Chinese with English abstract) [林玉, 谭敦炎 (2007) 被子植物镜像花柱及其进化意义. *植物分类学报*, 45, 901–916.]
- Parisod C, Joost S (2010) Divergent selection in trailing-versus leading-edge populations of *Biscutella laevigata*. *Annals of Botany*, 105, 655–660.
- Qian ZN, Ren MX (2016) Floral evolution and pollination shifts of the “Malpighiaceae route” taxa, a classical model for biogeographical study. *Biodiversity Science*, 24, 95–101. (in Chinese with English abstract) [钱贞娜, 任明迅 (2016) “金虎尾路线”植物的花进化与传粉转变. *生物多样性*, 24, 95–101.]
- Qing Z, Su R, Dong K, Shao Y (2014) Research progress on nectar compositions and their ecological functions. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 825–836. (in Chinese with English abstract) [卿卓, 苏睿, 董坤, 绍禹 (2014) 花蜜化学成分及其生态功能研究进展. *生态学杂志*, 33, 825–836.]
- Ren MX (2015) The upper reaches of the largest river in Southern China as an ‘evolutionary front’ of tropical plants: evidences from Asia-endemic genus *Hiptage* (Malpighiaceae). *Collectanea Botanica*, 34, e003.
- Ren MX, Zhang DY (2004) Herkogamy. In: *Plant Life-History Evolution and Reproductive Ecology* (ed. Zhang DY), pp. 303–320. Science Press, Beijing. (in Chinese) [任明迅, 张大勇 (2004) 雌雄异位. 见: *植物生活史进化与繁殖生态学* (张大勇主编), 303–320页. 科学出版社, 北京.]
- Ren MX, Zhong YF, Song XQ (2013) Mirror-image flowers without buzz pollination in the Asia-endemic *Hiptage benghalensis* (Malpighiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 173, 764–774.
- Robertson JL, Wyatt R (1990) Evidence for pollination ecotypes in the yellow fringed orchid, *Platanthera ciliaris*. *Evolution*, 44, 121–133.
- Siriruga P (1991) Malpighiaceae. In: *Flora of Thailand* (eds Smitinand T, Larsen K), pp. 272–299. The Forest Herbarium, Royal Forest Department, Bangkok.
- Stebbins GL (1970) Adaptive radiation of reproductive characteristics in angiosperms. I. Pollination mechanisms. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1, 307–326.
- Tamura K, Stecher G, Peterson D, Filipowski A, Kumar S (2013) MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis, version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, 16, 1–5.
- Tang LL, Huang SQ (2007) Evidence for reductions in floral attractants with increased selfing rates in two heterandrous species. *New Phytologist*, 175, 588–595.
- Thomas SG, Rehel SM, Varghese A, Davidar P, Potts SG (2009) Social bees and food plant associations in the Nilgiri Biosphere Reserve, India. *Tropical Ecology*, 50, 79–88.
- Todd JE (1882) On the flowers of *Solanum rostratum* and *Cassia chamaecrista*. *The American Naturalist*, 16, 281–287.
- Van der Niet T, Pirie MD, Shuttleworth A, Johnson SD, Midgley JJ (2014) Do pollinator distributions underlie the evolution of pollination ecotypes in the Cape shrub *Erica plukenetii*? *Annals of Botany*, 113, 301–315.
- Vaidya G, Lohman DJ, Meier R (2011) Sequence Matrix, concatenation software for the fast assembly of multi-gene datasets with character set and codon information. *Cladistics*, 27, 171–180.
- Vitelli JS, Madigan BA, Van Haaren PE, Setter S, Logan P (2009) Control of the invasive liana, *Hiptage benghalensis*. *Weed Biology and Management*, 9, 54–62.
- Webb CJ, Lloyd DG (1986) The avoidance of interference between the presentation of pollen and stigmas in angiosperms. II. Herkogamy. *New Zealand Journal of Botany*, 24, 163–178.
- White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor J (1990) Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications* (eds Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ), pp. 315–322. Academic Press, New York.
- Whittall JB, Hodges SA (2007) Pollinator shifts drive increasingly long nectar spurs in columbine flowers. *Nature*, 447, 706–709.
- Wu YR (2000) *Fauna Sinica. Insecta, Vol. 20. Hymenoptera: Melittidae, Apidae*, pp. 21–30, 123–130. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴燕如 (2000) 中国动物志: 昆虫纲, (第二十卷): 膜翅目, 准蜂科, 蜜蜂科, 21–30, 123–130页. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 黄双全 责任编辑: 时意专)

• 研究报告 •

华东三省转 Bt 基因棉花种植对边际水体中Cry1Ab/c蛋白残留的影响

刘 华^{1,2} 常晓蕾³ 蒋 玮^{2,4} 白 蓝^{1,4} 郑曙峰⁵ 王金斌^{1,4}
王 维⁵ 潘爱虎^{1,4} 王荣谈⁶ 唐雪明^{1,2,4*}

1 (农业部转基因植物环境安全监督检验检疫(上海)中心, 上海 201106)

2 (上海市农业科学院生物技术研究所, 上海 201106)

3 (上海海洋大学, 上海 201306)

4 (上海市农业遗传育种重点实验室, 上海 201106)

5 (安徽省农业科学院棉花研究所, 安徽安庆 246003)

6 (上海瑞丰农业科技有限公司, 上海 201106)

摘要: 为调查转基因棉花种植地区边际水体中的Cry1Ab/c蛋白残留情况, 在华东地区的山东、江苏、安徽三省棉田设置采样点, 连续3年在棉花的花铃期和收获季节, 对棉区地块内部及周围边际水体随机采样, 进行去杂及纯化处理后, 利用ELISA (酶联免疫吸附测定)方法检测水样中的Cry1Ab/c蛋白含量。结果表明: (1)在花铃期和收获季前后两周, 分别在5个布控点边际水体中检出Cry1Ab/c蛋白, 其中1个布控点阳性蛋白残留浓度最高达到0.4 ppb, 另外4个布控点检测出的阳性蛋白量均在0.04 ppb以下; (2)距离棉田越近, 蛋白检出阳性率越高, 其中棉田内水渠阳性率为13.3%; (3)连续种植时间超过7年的田地周围水体中蛋白阳性率为12.4%。在所有取样时间点中, 与花铃期相比, 收获季更容易检测到阳性结果。这表明在转基因棉花产区, 应在收获季进行适当的指导和监控, 以预防和降低转基因棉花中Cry1Ab/c蛋白对边际水体的潜在影响。

关键词: 转基因棉花; 酶联免疫吸附测定(ELISA); Cry1Ab/c蛋白含量

Effect of Cry1Ab/c protein residues from Bt cotton-producing areas in regions with marginal water in three provinces in eastern China

Hua Liu^{1,2}, Xiaolei Chang³, Wei Jiang^{2,4}, Lan Bai^{1,4}, Shufeng Zheng⁵, Jinbin Wang^{1,4}, Wei Wang⁵, Aihu Pan^{1,4}, Rongtan Wang⁶, Xueming Tang^{1,2,4*}

1 Supervision, Inspection and Test Center for Environmental Safety of Genetically Modified Crops of Ministry of Agriculture, Shanghai 201106

2 Biotechnology Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106

3 Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

4 Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106

5 Cotton Research Institute of Anhui Academy of Agricultural Sciences (CRI, AAAS), Anqing, Anhui 246003

6 Shanghai Rui-feng Agro-Technology Company Limited, Shanghai 201106

Abstract: To investigate Cry1Ab/c protein residues in marginal water regions of transgenic cotton-producing areas, this study focused on 15 sampling points from three provinces of eastern China using random sampling. We sampled three consecutive years during the flowering and harvesting of cotton, respectively, purified Cry1Ab/c proteins in these samples were detected using the ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) method. Results showed that: (1) The highest concentration of Cry1Ab/c protein in marginal water reached 0.4 ppb at one sampling point. At the other four monitoring points, the residual concentration of Cry1Ab/c protein was less than 0.04 ppb. (2) The closer the cotton field, the higher the positive detection

收稿日期: 2016-05-20; 接受日期: 2016-08-24

基金项目: 上海市农委青年人才项目(沪农青(2016)1-15)、上海市农委重点攻关项目(2015-4-3)和科技部国际合作项目(CS06-L10)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: saas_xmtang@foxmail.com

rate, and the positive rate was 13.3% in the cotton field canals. (3) The positive protein detection rate was 12.4% in planting fields that had been planted for more than 7 years. We also found that during the harvest season the positive protein detection rate was easier to detect than during the flowering period. Our findings indicated that the *Bt* cotton-producing areas should be properly monitored during the harvest season, in order to reduce the potential impacts of Cry1Ab/c protein on the marginal water sources in transgenic cotton producing areas.

Key words: transgenic cotton; enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA); Cry1Ab/c protein residues

生物技术在农业方面的应用近20年来发展很快,其主要目标是用更少的土地生产更多的食物,缓解全球因人口增长而产生的食品短缺,同时又可以减少农药的使用。生物技术的应用为全人类带来了巨大的经济和社会效益。生物技术育种是一种经DNA重组与遗传转化或直接运载进入受体生物,经过筛选获得稳定表达的遗传工程育种方法。如在番茄(*Lycopersicon esculentum*)中植入延熟的基因,可以延长其保存时间(Thomas, 2008)。据调查,截至2015年,全球转基因作物的累计种植面积达20亿ha。在转基因作物中,抗虫转基因作物(主要是转*Bt*基因农作物)的种植比例就占15% (Clive, 2016)。随着我国新型转基因抗虫棉培育和产业化的全面推进,仅2008–2010年间就新培育了36个抗虫棉品种,累计推广1,100多万ha,实现经济效益160亿元,有效控制了棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)的危害,彻底打破了国外抗虫棉种子公司的垄断地位。作为一种新的生物成员,转基因棉花的商业化种植对农田生态系统中生物群落的影响已引起广泛关注。长期种植转基因作物对环境安全和人类健康的影响是我们不得不面对的新问题。

有研究表明,当*Bt*蛋白进入生态环境中的量和速度超过其降解速率时,可能会产生蛋白的富集,进而对土壤和水体中的微生物及动物产生影响(樊龙江等, 2001)。Lu等(2010)针对转*Bt*基因抗虫棉开展了一项为期10年的田间实验,其结果表明,尽管转*Bt*基因棉花的种植使农药的使用量减少,但导致非靶标昆虫盲蝽蟊(*Lygus lucorum*)呈爆炸式增长。目前全球转基因棉花的累计种植面积为3亿ha,我国是转*Bt*基因抗虫棉的种植大国,仅2015年就种植了370万ha,占我国棉花种植总面积的97.3% (<http://www.isaaa.org/inbrief/default.asp>)。因此亟需研究转*Bt*基因抗虫棉对棉产区生态系统的影响。

由基因表达产物引发的土壤生物群落结构的

变化复杂,有必要对不同类型转基因作物释放后的生态效应进行长期的跟踪研究。有研究表明,导入作物中的外源基因及其表达蛋白均可通过多种途径进入土壤或边际水体中(王洪兴等, 2002)。目前已经进行商业化应用的转*Bt*基因抗虫棉所含外源杀虫基因均来自苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*, *Bt*),主要包括杀虫晶体蛋白(insecticidal crystal proteins, IPS)基因Cry1Ac、Cry1Ab、Cry2Ab以及营养期杀虫蛋白(vegetative insecticidal proteins, VIP)基因VIP3A等。其中Cry1蛋白对鳞翅目害虫有专一性; Cry2蛋白对鳞翅目和双翅目害虫有专一性;而VIP3A蛋白对棉铃虫、烟草夜蛾(*Heliothis assulta*)、红铃虫(*Pectinophora gossypiella*)等某些鳞翅目害虫有专一性(王立国等, 2014)。有研究表明,转*Bt*基因抗虫棉田土壤中的蛋白降解速率先快后慢,2个月仍有一半未降解(Head, 2002, Saxena et al, 2002a),而转*Bt*基因玉米(*Zea mays*)的根际土壤中则需7–8个月才检测不到(孙彩霞等, 2003; 邢珍娟等, 2010)。姜伟丽等(2014)对双抗棉棉田中昆虫群落多样性的季节动态研究发现,种植转基因抗虫棉对棉田内昆虫的群落结构影响较小,不会扰乱其稳定性。另外,对连续种植多年*Bt*-SY63水稻(*Oryza sativa*)的水体和土壤中的*Bt*蛋白残留动态进行监测发现,与非转基因稻田相比,其Cry1Ab/c蛋白残留量未达到显著水平($P > 0.05$),且不会造成Cry1Ab/c蛋白在稻田水体和土壤中的累积(张莉等, 2015)。Liu等(2009)用转*Bt*基因抗虫棉叶喂食蚯蚓(*Arenicola cristata*),发现蚯蚓体内并未产生急性毒性效应。

转*Bt*基因作物中的*Bt*蛋白不仅可以通过其根际分泌物、秸秆还田等方式进入土壤中,收获后堆积于农田边的作物还会被风或水流输送到周围水体中。另外,它还可通过花粉、作物残体和陆源碎屑等途径进入其邻近水域。*Bt*蛋白可溶于水中,这使邻近水域中的水生生物有接触到*Bt*蛋白的可能

(Viktorov, 2011; Carstens et al, 2012)。也有研究表明, 进入水体的*Bt*蛋白并不十分稳定, 随时间推移会很快发生降解(Prihoda & Coats, 2007; Tank et al, 2010)。现有转基因作物中的外源蛋白残留的相关研究主要集中在土壤生态系统, 对*Bt*蛋白进入河道及其边际水体的后续研究较少, 对这方面的环境风险评估也较少, 目前国内外对转基因作物的种植是否会对其边际水体造成影响还没有明确的结论。Andrew等(2009)研究表明, 在种植转基因玉米周围的沟渠及河流湖泊中, 转基因玉米副产物会增加水生昆虫的死亡率, 降低其增长率。Tank等(2010)发现, 在玉米收获6个月, 美国中西部地区的密西西比河河水中仍可检测出Cry1Ab/c蛋白残留。目前国内外还未有对转基因棉花种植地边际水体中的Cry1Ab/c蛋白含量进行连续采样及系统的研究。本文就山东、江苏、安徽3省多地的转*Bt*基因抗虫棉种植地的邻近水域进行了多年不同时空的连续采样, 对水体中*Bt*蛋白的含量进行检测分析, 拟评估Cry1Ab/c蛋白的富集效应, 探究转*Bt*基因抗虫棉对种植地边际水体生态环境的影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集

水体样品采集于华东地区棉花主产区: 山东(5个布控点)、江苏(4个布控点)、安徽(6个布控点)的转*Bt*基因抗虫棉种植地的邻近水域, 布控点均位于棉产区中心位置(表1), 采集时间为棉花的花铃期(7月)和收获期(11月)。将每个布控点收集的水样进行编号, 并用GPS记录经纬度。共采集了2012年11月、2013年7月和11月、2014年7月和11月5个时间段的样品。样品采集原则是优先选取棉田周围自然生态系统中的水体, 若半径1 km内无水体则选择周围河道水, 均为流动水体。取样方式为: 将30 mL消毒玻璃针筒插入水体50 cm深处取活水, 收集于250 mL消毒的塑料瓶中, 密封后放在装有冰袋的塑料泡沫盒中带回实验室。采集水体样品的同时, 随机采集棉田内的棉花叶片作为ELISA (酶联免疫吸附测定, enzyme-linked immunosorbent assay)实验的对照材料。

因不同省份不同地区的水文图谱不同, 种植灌

表1 华东三省棉产区水体样品布控点具体位置及样品编号
Table 1 GPS coordinates and water sample number at cotton cultivated areas in three provinces in eastern China

棉产区 Cotton cultivated areas	经纬度 GPS coordinates	不同时间段采样编号 Sample number at different time frames				
		2012.11	2013.7	2013.11	2014.7	2014.11
山东省 Shandong Province						
东营三坝三村 Sanqingsan Village of Dongying City	37°52'48" N, 116°20'11" E	72(ABC)	80(ABC)	10(ABC)	42(ABC)	96(ABC)
德州宋楼村 Songlou Village of Dezhou City	36°54'37" N, 115°55'56" E	58(ABC)	87(ABC)	25(ABC)	43(ABC)	97(ABC)
滨州南赵村 Nanzhao Village of Binzhou City	37°41'7" N, 118°5'22" E	75(ABC)	81(ABC)	8(ABC)	46(ABC)	98(ABC)
德州陶店村 Taodian Village of Dezhou City	36°56'15" N, 115°57'24" E	73(ABC)	82(ABC)	11(ABC)	44(ABC)	99(ABC)
滨州西黄村 Xihuang Village of Binzhou City	37°52'5" N, 117°46'11" E	76(ABC)	83(ABC)	9(ABC)	45(ABC)	100(ABC)
江苏省 Jiangsu Province						
江苏省农业科学院 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences	32°2'17" N, 118°51'50" E	52(ABC)	91(ABC)	—	41(ABC)	95(ABC)
大丰稻麦原种场 Rice and Wheat Seeds stock station of Dafeng City	33°24'09" N, 120°34'54" E	54(ABC)	24(ABC)	2(ABC)	38(ABC)	93(ABC)
泰州荻垛村 Diduo Village of Taizhou City	32°54'19" N, 120°5'39" E	68(ABC)	22(ABC)	1(ABC)	39(ABC)	92(ABC)
启东兴益村 Xingyi Village of Qidong City	31°57'5" N, 121°46'2" E	56(ABC)	21(ABC)	4(ABC)	40(ABC)	94(ABC)
安徽省 Anhui Province						
安庆棉花所 Anqing Cotton Research Institute	30°31'2" N, 117°5'19" E	51(ABC)	19(ABC)	28(ABC)	35(ABC)	103(ABC)
宿松复兴村 Fuxing Village of Susong City	29°54'58" N, 116°30'23" E	65(ABC)	20(ABC)	30(ABC)	33(ABC)	102(ABC)
望江雷池村 Leichi Village of Wangjiang City	30°9'45" N, 116°48'43" E	67(ABC)	14(ABC)	26(ABC)	34(ABC)	101(ABC)
全椒县 Quanjiao County	32°4'18" N, 118°12'12" E	49(ABC)	13(ABC)	29(ABC)	77(ABC)	106(ABC)
东至县 Dongzhi County	30°30'55" N, 117°3'45" E	48(ABC)	12(ABC)	32(ABC)	36(ABC)	105(ABC)
铜陵市 Tongling City	31°10'24" N, 117°7'48" E	50(ABC)	15(ABC)	31(ABC)	37(ABC)	107(ABC)

A、B、C分别表示同一地点采集的3个不同样品。
A, B, C represent different samples in the same place.

溉方式也不一致, 故根据棉田内部及周边的具体地理位置设置了4种不同的采样地点: (1)棉田内流动水渠(距离棉田 < 50 m); (2)棉田河岸流动河道(距离棉田 < 100 m); (3)棉田内封闭水渠; (4)棉田附近流动河道(方圆半径 $< 1,000$ m), 以便于分析不同监测距离下Cry1Ab/c蛋白的残留情况(图1)。

1.2 实验方法

采样时间分别为花铃期和收获期的前后两周内, 连续采样3年, 在样品采集过程中均采用随机3点取样法。因采用针筒吸取样品, 棉花植株及其碎屑均被过滤, 且样品采集后又经过低速离心去除杂质, 故水体中蛋白含量均为溶解的Cry1Ab/c蛋白。

1.2.1 样品前处理

(1)将采集的水体样品置于50 mL离心管中, 进行4,000 rpm低速离心, 取其上清液。若样品含有大量杂质, 为防止搜集*Bt*蛋白时堵塞超滤膜, 则需多次离心, 直至肉眼看不见杂质为止。

(2)取上清液25 mL到截留量为50 kD的超滤管中(Cry1Ab/c蛋白的分子量在130 kD左右), 放置于高速离心机(HitachiCR22G, 日立公司, 日本)中, 6,850 rpm离心20 min, 重复4次, 将浓缩的蛋白液体1 mL置于灭菌的1.5 mL离心管中, 于4℃保存备用。

(3)将采集的整片棉花叶片用打孔器取样, 孔面积5–10 mm², 取好分别放入1.5 mL的Eppendorf管中捣碎, 加入250 μL的样品提取液(试剂盒内提供), 震荡混匀5 min, 4,000 rpm离心3 min, 取100 μL上清液作为阳性对照备用。

1.2.2 ELISA检测

采用EnviroLogix试剂盒检测所有样品, 具体步骤如下: (1)将所有试剂放置于室温(20–25℃)中平衡回温30 min以上, 混匀; (2)将样品、阳性品及标准品分别进行编号, 并记录标准孔和各个样品孔所在位置; (3)加入样品稀释液(空白对照, 试剂盒提供)、标准品(试剂盒提供)、种子提取液(试剂盒提供)、叶子提取液(试剂盒提供)、样品等均50 μL至对应的微孔中, 轻轻混匀震荡, 37℃避光孵育30 min; (4)小心取出微孔板, 将孔内液体甩干, 加入300 μL洗涤液洗涤3次, 每次间隔10 s, 并用吸水纸拍干; (5)加入酶标抗体100 μL/孔, 轻轻混匀后, 放置于37℃摇床上, 150 rpm轻摇, 孵育20 min, 取出后重复步骤(4); (6)加入显色液50 μL, 并置微孔板于37℃摇床上, 100 rpm轻摇混匀, 孵育15 min; (7)加入终止液100 μL, 手动轻轻震荡混匀, 利用多功能酶标仪(InfiniteM200, Tecan公司, 瑞士)测定每孔的OD值,

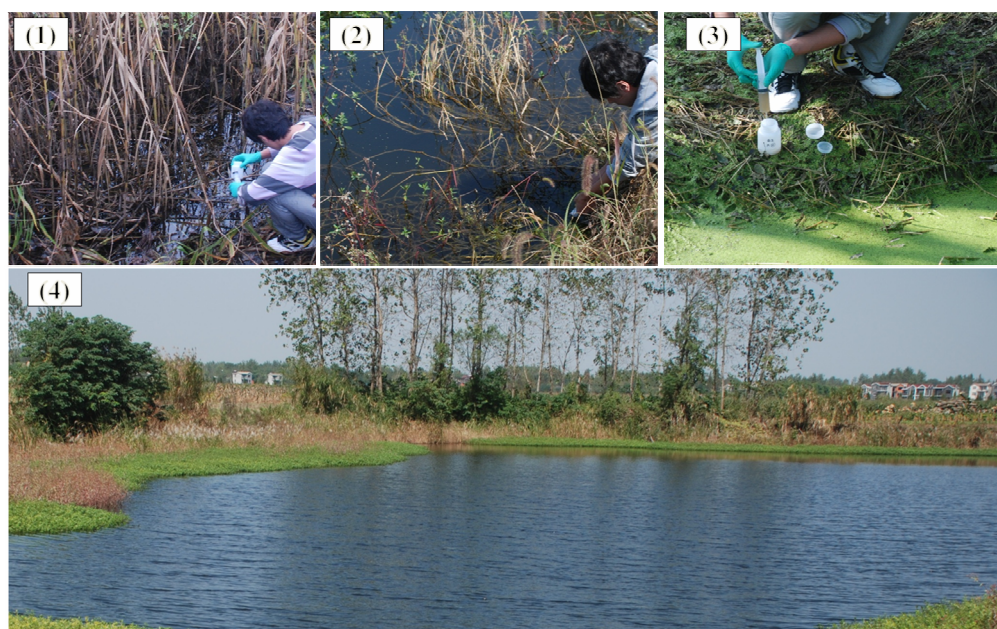


图1 采样点类型。(1)棉田内流动水渠(距离棉田 < 50 m); (2)棉田河岸流动河道(距离棉田 < 100 m); (3)棉田内封闭水渠; (4)棉田附近流动河道(方圆半径 $< 1,000$ m)。

Fig. 1 Pictures of sampling practical point. (1) The canal flow in cotton fields (distance < 50 m); (2) The river flowing in the river at cotton field edge (distance < 100 m); (3) Closed canal in cotton fields; (4) The river flowing near cotton fields (radius $< 1,000$ m).

测定波长为450 nm和630 nm。

1.2.3 标准曲线制定

将Cry1Ab/c 蛋白(购自 Envirologix 公司, 货号 ACC-999, 纯度为1.0 ppb)标准品进行梯度稀释后制作标准曲线(图2)。从图中可以看出, 标准曲线线性关系良好, 可用于计算蛋白的浓度, 以判断样品是否含有Cry1Ab/c蛋白。

2 结果

2.1 不同监测距离水体中的Cry1Ab/c蛋白含量

由表2可以看出, 距离棉田越近, 检测出Cry1Ab/c蛋白的几率越大。其中, 棉田内封闭水渠中检测出的阳性率最高, 达到13.3%。棉田附近流动河道未检出阳性结果, 这说明流动河道内水渠聚积物较少, 即便转移到这些水体, 也会降解并被稀释

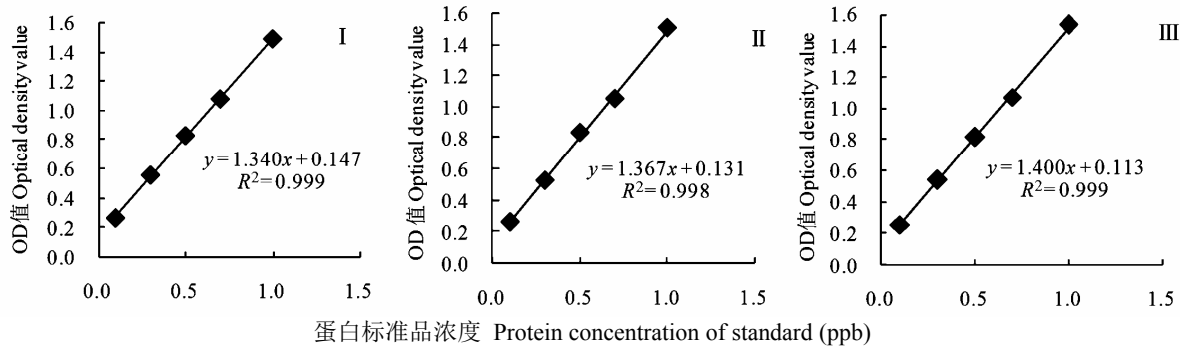


图2 Cry1Ab/c样品标准曲线。(I)山东省; (II)江苏省; (III)安徽省。
Fig. 2 Standard curves of Cry1Ab/c protein sample. (I) Shandong Province; (II) Jiangsu Province; (III) Anhui Province.

表2 不同监测距离的检测样品中Cry1Ab/c蛋白的含量
Table 2 The content of Cry1Ab/c protein was detected in the samples with different distance

	检测结果 Detected results				
	2012.11	2013.7	2013.11	2014.7	2014.11
(1)棉田内流动水渠(距离棉田< 50 m) The canal flow in cotton fields (distance from cotton < 50 m)					
德州陶店村 Taodian Village of Dezhou City	---	---	---	---	---
江苏省农业科学院 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences	---	+ - +		---	+++
安庆棉花所 Anqing Cotton Research Institute	---	---	---	---	---
大丰稻麦原种场 Rice and Wheat Seeds stock station of Dafeng City	---	---	---	---	---
(2)棉田河岸流动河道(距离棉田< 100 m) The river flowing in the river of cotton field edge (distance from cotton < 100 m)					
德州宋楼村 Songlou Village of Dezhou City	---	---	---	---	---
宿松复兴村 Fuxing Village of Susong City	---	---	---	---	+++
望江雷池村 Leichi Village of Wangjiang City	---	---	---	---	---
(3)棉田内封闭水渠 Closed canal in the cotton fields					
东营三坝三村 Sanqingsan Village of Dongying City	---	---	---	---	+++
全椒县 Quanjiao County	---	---	- + +	---	---
东至县 Dongzhi County	+++	---	---	---	---
泰州荻垛村 Diduo Village of Taizhou City	---	---	---	---	---
(4)棉田附近流动河道(方圆半径< 1,000 m) The river flowing near cotton fields (radius < 1,000 m)					
滨州西黄村 Xihuang Village of Binzhou City	---	---	---	---	---
启东兴益村 Xingyi Village of Qidong City	---	---	---	---	---
滨城南赵村 Nanzhao Village of Binzhou City	---	---	---	---	---
铜陵市 Tongling City	---	---	---	---	---

“—”表示低于试剂盒最低检测限, “+”表示可以检测到Cry1Ab/c蛋白。
- Below the lowest detection limit of the kit; + Cry1Ab/c protein can be detected.

到检测限下。检出结果中山东省东营市的三顷三村采样点的Cry1Ab/c蛋白含量最高, 达到了0.4 ppb, 其他地区均在0.04 ppb以下。对于含量高的这些区域应加以防控, 持续跟踪监测。

2.2 不同种植年限水体中的Cry1Ab/c蛋白含量

对采样点进行分类, 分别为种植年限大于7年和种植年限在3–7年间。由表3可以看出, 种植年限大于7年的采样点的Cry1Ab/c蛋白阳性检出率高于种植年限3–7年的地区。其中, 全椒、东至和三顷三村3个采样点土壤较为贫瘠, 适合种植棉花, 其种植年限超过10年, 且处于内陆地区, 河流较为稀少, 检出阳性率较高, 达到12.4%。而种植时间在3–7年的取样点, 由于种植年限短且管理相对稳定, 仅宿松复兴村(也属于内陆地区)有1处检出阳性结果, 说明连续种植转基因棉花不会造成边际水体中Cry1Ab/c蛋白含量的不断累积。

2.3 不同采样时间样品Cry1Ab/c蛋白的阳性检出率

在各省份的花铃期前后, 即每年7月的Cry1Ab/c蛋白在水体中的残留都在检测限下, 蛋白含量的总比率较低(图3)。这说明随着时间的推移, 水体中的Cry1Ab/c蛋白并未产生年度富集效应, 上一年的残留会在来年全部降解。从收获季节前后的采样结果可以看出, 11月的Cry1Ab/c蛋白残留检测比率相对较高, 达到了5.3%。就不同省份来说, 安徽省近3年的检出率为3.6%, 山东省和江苏省的检出率分别为1.35%和2.25%。

3 讨论

通过连续3年在棉花花铃期和收获季节对华东地区三省棉田地块内部及其边际水体随机采样调查发现, 棉田地块内部水体中的Cry1Ab/c蛋白含量较高, 最高可达0.4 ppb, 其余检出点均在0.04 ppb以下。距离棉田越近, 检出阳性率越高, 其中棉田内水渠阳性率为13.3%。江苏农科院采样点相对较为特殊, 因该取样点的河流在科研单位内部, 可能会有交叉污染。连续种植时间超过7年的田地周围水体中阳性率为12.4%。在所有随机取样时间点中,

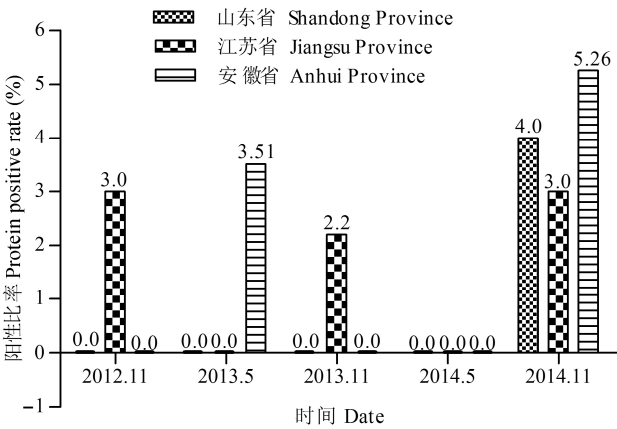


图3 各省份不同采样时间Cry1Ab/c蛋白残留检测的阳性比率
Fig. 3 Cry1Ab/c protein residue detected ratio of samples in different time from three provinces

表3 不同种植年限的检测样品含有Cry1Ab/c蛋白的情况
Table 3 Detected samples Cry1Ab/c protein contents of different cultivated years

种植年限 Cultivated years	检测结果 Detected results				
	2012.11	2013.7	2013.11	2014.7	2014.11
种植年限大于7年 Cultivated more than 7 years					
德州宋楼村 Songlou Village of Dezhou City	---	---	---	---	---
东营三顷三村 Sanqingsan Village of Dongying City	---	---	---	---	+++
全椒县 Quanjiao County	---	---	-++	---	---
东至县 Dongzhi County	+++	---	---	---	---
大丰稻麦原种场 Rice and Wheat Seeds stock station of Dafeng City	---	---	---	---	---
启东兴益村 Xingyi Village of Qidong City	---	---	---	---	---
江苏农科院 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences	---	++	---	---	+++
种植年限3至7年 Cultivated between 3 to 7 years					
滨州南赵村 Nanzhao Village of Binzhou City	---	---	---	---	---
德州陶店村 Taodian Village of Dezhou City	---	---	---	---	---
宿松复兴村 Fuxing Village of Susong City	---	---	---	---	+++
安庆棉花所 Anqing Cotton Research Institute	---	---	---	---	---
泰州荻垛村 Diduo Village of Taizhou City	---	---	---	---	---

收获季有3处共9次检测到Cry1Ab/c蛋白, 而花铃期有2处共4次检测到Cry1Ab/c蛋白。因此, 笔者认为收获季相比花铃期更容易检测到Cry1Ab/c蛋白。这表明转*Bt*基因棉花的种植可能会对边际水体中的Cry1Ab/c蛋白残留造成影响, 特别是在收获季节, 因此应进行适当的指导和监控, 以减少转*Bt*基因棉花对边际水体的影响。

有研究发现, *Bt*蛋白可溶于水中, 在风和强降水引发的地表径流作用下, 可从陆地转移到河流(Tank et al, 2010), 从而使邻近水域中的生物有接触到*Bt*蛋白的可能。本研究在不同时间段对华东三省棉产区附近的边际水体进行分批次随机取水样, 通过ELISA方法对河流及封闭水渠中的Cry1Ab/c蛋白含量进行分析, 进而对*Bt*蛋白的分布状况有了一定了解。大多数农业区域都存在网状的河流通道, 这些河流通道可以迅速地积累并传输水以及相关溶质和碎屑, 本实验取样点均设置在棉田附近水体, 取样点具有代表性, 可以反映整个边际水体的Cry1Ab/c蛋白含量情况。

中国大多数农业区域河流河道复杂交错, 能更迅速地积累并传输*Bt*蛋白。地形区域水文的变化将导致河流水位变动频繁, 从而使包括农副产品在内的陆源碎屑进入河流并向下游移动。我国转*Bt*基因抗虫棉已得到广泛种植, 作物采收后常用的耕作方式是秸秆还田(即保护性耕作), 这种耕作方式可能会促进棉花秸秆碎屑在风和由强降水引发的地表径流作用下, 从陆地转移到河流。降水的随机性使碎屑在一年中的任何时间都可以进入河水中, 棉花采收后, 由于风力或人为堆放的原因, 易导致河道或水渠等出现棉花残枝(采样过程中看到过)。棉花碎屑可能包含*Bt*蛋白, 这些碎屑可随河流扩散到农田以外甚至穿过很大一片区域。我们观察到, 在棉花收获几个月后, 河岸带和河道内积累了大量的棉花碎屑, 这些都可能是Cry1Ab/c蛋白的来源。抗虫棉的广泛种植以及对收获后溪流中积累大量碎屑的观察, 促使我们对棉花碎屑中的*Bt*蛋白以及其在河水中的溶解情况进行调查分析。根据实验结果可以看出, 尽管种植转*Bt*基因抗虫棉的棉产区周围有大量秸秆枯枝碎屑, 但进入水体后, 水中*Bt*蛋白的含量很少, 仅部分棉田内水渠中可以测出。这除了与水体中碎屑量的多少有关外, 还可能与棉花碎屑在水体中的溶解和降解速率有关。

据报道, 转基因抗虫玉米碎屑会进入河流, 并随之漂移(Tank et al, 2010), 可使水生无脊椎动物因食用转基因玉米碎屑而直接受其影响。但玉米碎屑在水环境中发生衰败腐烂后其*Bt*蛋白的去向尚不清楚, 抗虫棉也存在同样的问题。转基因棉花的陆源碎屑一旦进入水渠, 将被微生物分解、物理分解和无脊椎动物食用(Griffiths et al, 2009; Chambers et al, 2010; Swan et al, 2010), 然后迅速降解, 进入河流的食物链。我们在研究中检测到的Cry1Ab/c蛋白都是最近进入边际水体(Zwahlen et al, 2003)。在棉田内的封闭水渠中, 我们检测到Cry1Ab/c蛋白的最高含量可达0.4 ppb, 这可能和封闭河道的输入速率相关。转基因棉花的种植对非靶标生物的影响取决于输入速率、残留速率、分解速率和持久性等因素。本研究表明, 在周围都是网状河流的棉田中, 尽管花铃期中花粉传播占据了优势, 收获季节的检出率仍明显高于花铃期的检出率。如果在更接近收获季节的时间点采样, Cry1Ab/c蛋白残留可能更高。要想更深入了解Cry1Ab/c蛋白残留在时间和空间上的分布情况, 需要了解转基因棉花碎屑和残枝等进入边际水体时其输入速率和输出(分解)速率的相互联系。

从地理位置上来说, 本文主要针对华东地区的山东省、江苏省和安徽省进行了布控点检测, 发现山东和江苏的部分采样点水系分别为靠海靠江区域, 检出率为1.35%和2.25%, 稍低于内陆省份安徽(3.6%)。这可能与不同地区网状河流密集度不同有关。从图3可以看出, 连续3年的采样中, 没有一个采样点连续监测到有Cry1Ab/c蛋白, 即并未表现出富集效应, 这和Stotaky (2004)的研究一致。地下排水渠道的研究表明, 陆源碎屑和土壤中的Cry1Ab/c蛋白会进行垂直移动, 农田中的Cry1Ab/c蛋白可能通过土壤剖面向土壤表面下1 m处的水渠移动, 从而运送到地表水中并进入水渠集中起来(Saxena et al, 2002b)。但我们所检测到的最高浓度对水生生物或微生物有何生态影响, 还需要进一步的研究。

参考文献

- Andrew M (2009) 13.3 million farmers cultivate GM crops. *Nature Biotechnology*, 27, 221–222.
- Carstens K, Anderson J, Bachman P, Schrijver AD, Dively G, Federici B (2012) Genetically modified crops and aquatic ecosystems: considerations for environmental risk assessment and non-target organism testing. *Transgenic Research*,

- 21, 813–842.
- Chambers CP, Whiles MR, Rosi-Marshall EJ, Tank JL, Royer TV, Griffiths NA (2010) Responses of stream macroinvertebrates to Bt maize leaf detritus. *Ecological Applications*, 20, 1949–1960.
- Clive J (2016) The global status of commercialized biotech/GM crops: 2016. *China Biotechnology*, 36(4), 1–11. (in Chinese with English abstract) [Clive J (2016) 2016年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势. *中国生物工程杂志*, 36(4), 1–11.]
- Fan LJ, Zhou XP, Hu BM, Shi CH, Wu JG (2001) Gene dispersal risk of transgenic plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 630–632. (in Chinese with English abstract) [樊龙江, 周雪平, 胡秉民, 石春海, 吴建国 (2001) 转基因植物的基因漂流风险. *应用生态学报*, 12, 630–632.]
- Griffiths NA, Tank JL, Royer TV, Rosi-Marshall EJ, Whiles MR, Chambers CP, Frauendorf TC, Evans-White MA (2009) Rapid decomposition of maize detritus in agricultural headwater streams. *Ecological Applications Publication of the Ecological Society of America*, 19, 133–142.
- Head G, Surber JB, Watson JA, Martin JW, Duan JJ (2002) No detection of Cry1Ac protein in soil after multiple years of transgenic Bt cotton (bollgard) use. *Environmental Entomology*, 31, 30–36.
- Jiang WL, Ma XY, Peng J, Ma YJ, Ma Y (2014) Seasonal dynamics of diversity of insect communities in transgenic glyphosate-insect-resistant cotton. *Cotton Science*, 26, 105–112. (in Chinese with English abstract) [姜伟丽, 马小艳, 彭军, 马亚杰, 马艳 (2014) 转基因抗草甘膦抗虫棉田害虫群落多样性季节动态研究. *棉花学报*, 26, 105–112.]
- Liu B, Wang L, Zeng Q, Meng J, Hu W, Li X (2009) Assessing effects of transgenic Cry1Ac cotton on the earthworm *Eisenia fetida*. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 1841–1846.
- Lu YH, Wu KM, Jiang YY, Bing X, Ping L, Feng HQ (2010) Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide-scale adoption of Bt cotton in China. *Science*, 328, 1151–1154.
- Prihoda KR, Coats JR (2007) Aquatic fate and effects of *Bacillus thuringiensis* Cry3bb1 protein: toward risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27, 793–798.
- Saxena D, Flores S, Stotzky G (2002a) Vertical movement in soil of insecticidal Cry1Ab protein from *Bacillus thuringiensis*. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 111–120.
- Saxena D, Flores S, Stotzky G (2002b) Bt toxin is released in root exudates from 12 transgenic corn hybrids representing three transformation events. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 133–137.
- Stotzky G (2004) Persistence and biological activity in soil of the insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis*, especially from transgenic plants. *Plant & Soil*, 266, 77–89.
- Sun CX, Chen LJ, Wu ZJ, Zhang YL, Zhang LL (2003) Effect of transgenic Bt rice planting on soil enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 2261–2264. (in Chinese with English abstract) [孙彩霞, 陈利军, 武志杰, 张玉兰, 张丽莉 (2003) 种植转Bt基因水稻对土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 14, 2261–2264.]
- Swan CM, Jensen PD, Dively GP, Lamp WO (2010) Processing of transgenic crop residues in stream ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 46, 1304–1313.
- Tank JL, Rosi-Marshall EJ, Royer TV, Whiles MR, Griffiths NA, Frauendorf TC (2010) Occurrence of maize detritus and a transgenic insecticidal protein (Cry1Ab) within the stream network of an agricultural landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 107, 17645–17650.
- Thomas EN (2008) Planning environmental risk assessment for genetically modified crops: problem formulation for stress-tolerant crops. *Plant Physiology*, 6, 494–502.
- Viktorov AG (2011) Transfer of Bt corn byproducts from terrestrial to stream ecosystems. *Russian Journal of Plant Physiology*, 58, 543–548.
- Wang HX, Chen X, Tang JJ, Shimizu K (2002) Influence of released transgenic pest and disease-resistant crops on plant associated microorganisms in soil. *Biodiversity Science*, 10, 232–237. (in Chinese with English abstract) [王洪兴, 陈欣, 唐建军, 志水胜好 (2002) 释放后的转抗病虫基因作物对土壤生物群落的影响. *生物多样性*, 10, 232–237.]
- Wang LG, Li F, Liu QH, Liu ZJ, Liu RZ (2014) Research progress on biosafety of transgenic Bt cotton. *Shandong Agricultural Sciences*, 7, 150–156. (in Chinese with English abstract) [王立国, 李菲, 刘勤红, 柳展基, 刘任重 (2014) 转Bt基因抗虫棉的生物安全性研究进展. *山东农业科学*, 7, 150–156.]
- Xing ZJ, Wang ZY, He KL, Bai SX (2010) Degradation dynamics of crylab insecticidal protein within transgenic *Bacillus thuringiensis* corn root debris and rhizosphere soil in field. *Scientia Agricultura Sinica*, 43, 4970–4976. (in Chinese with English abstract) [邢珍娟, 王振营, 何康来, 白树雄 (2010) 转Bt基因抗虫玉米根茬和根际土壤中Cry1Ab杀虫蛋白的田间降解动态. *中国农业科学*, 43, 4970–4976.]
- Zhang L, Hu WJ, Shen WJ, Fang ZX, Liu B (2015) Residue of Cry1Ab/c protein in soil and water of paddy field cultivated with Bt-SY63 rice for years in a row. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31, 534–539. (in Chinese with English abstract) [张莉, 胡文军, 沈文静, 方志翔, 刘标 (2015) 多年连续种植转基因Bt汕优63稻田水体和土壤中Cry1ab/c蛋白残留调查. *生态与农村环境学报*, 31, 534–539.]
- Zwahlen C, Hilbeck A, Gugerli P, Nentwig W (2003) Degradation of the Cry1Ab protein within transgenic *Bacillus thuringiensis* corn tissue in the field. *Molecular Ecology*, 12, 765–775.

(责任编辑: 卢宝荣 责任编辑: 黄祥忠)

• 研究报告 •

三叶鬼针草与不同本地植物竞争对土壤微生物和土壤养分的影响

闫 静¹ 张晓亚¹ 陈 雪² 王 月¹ 张凤娟^{1*} 万方浩^{3*}¹ (河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)² (河北师范大学汇华学院, 石家庄 050091)³ (中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要: 入侵植物三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)对我国农牧业生产造成了重大的损失。本文主要研究三叶鬼针草入侵与不同本地植物竞争对土壤微生物群落结构和土壤养分的影响。利用磷脂脂肪酸方法(phospholipid fatty acids, PLFAs)测定土壤微生物群落组成, 同时测定土壤养分和酶活性, 并利用Canoco4.5软件分析了土壤微生物、土壤养分和土壤酶活性的相关性。结果表明: (1)三叶鬼针草对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、丛枝菌根真菌等土壤微生物具有较强的聚集能力, 且其根际土壤聚集的微生物类群与本地植物种类密切相关。(2)三叶鬼针草入侵显著增加了入侵地土壤的有机碳含量, 降低了铵态氮的含量; 土壤中的速效钾、速效磷和硝态氮的含量则与本地植物种类密切相关。(3)相关性分析表明, 16:00和16:1 ω 5c对铵态氮的含量影响较大, 而三叶鬼针草入侵地16:00和16:1 ω 5c的含量显著高于裸土对照, 进而推测这一状况导致了铵态氮含量的降低。(4) 15:1 anteiso A和18:1 ω 5c与速效钾的含量呈显著正相关, 而其含量在狗尾草(*Setaria viridis*)中显著高于其他处理, 三叶鬼针草与狗尾草混种处理中土壤中速效钾的含量高于其他处理。以上结果说明, 三叶鬼针草通过改变土壤微生物群落结构影响了土壤酶活性和土壤养分, 且这种改变与入侵地本地植物种类有关。

关键词: 三叶鬼针草; 本地植物; 土壤微生物; 土壤养分; 土壤酶活性

Effects of rhizosphere soil microorganisms and soil nutrients on competitiveness of *Bidens pilosa* with different native plants

Jing Yan¹, Xiaoya Zhang¹, Xue Chen², Yue Wang¹, Fengjuan Zhang^{1*}, Fanghao Wan^{3*}¹ College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002² Huihua College of Hebei Normal University, Shijiazhuang 050091³ Institute of Plant Protection (South Campus), Chinese Academy of Agricultural Sciences, State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Beijing 100193

Abstract: The invasive plant *Bidens pilosa* has caused losses to agriculture and livestock. We studied the effects of *B. pilosa* on rhizosphere soil microorganisms and soil nutrients of different native species. The soil microbial species were examined using phospholipid fatty acid (PLFA), and the concentrations of soil nutrients and the activities of soil enzyme activities were measured. Correlation analysis of soil microbial, soil nutrients, and soil enzyme activities was used in Canoco 4.5. Results showed that *B. pilosa* had a strong ability to aggregate soil microorganisms such as gram-positive bacterium (G^+), gram-negative bacterium (G^-), and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). The microbial species in the rhizosphere soil of *B. pilosa* was closely related to the native plant species. *Bidens pilosa* significantly increased the concentration of organic carbon, while decreasing the concentration of ammonium. The concentrations of available potassium, available phosphorus, and nitrate were strongly related to the native plant species. Correlation analysis showed that 16:00 and 16:1 ω 5c had a significant influence on the concentration of ammonium. The concentrations of

收稿日期: 2015-12-23; 接受日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31172000); 河北省自然科学基金项目(C2015201021; C2015201241)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: fengjuanzhang@126.com; wanfanghaocaas@163.com

16:00 and 16:1 ω 5c in the rhizosphere soil of *B. pilosa* were significantly higher than that in the soil of the control, which may lead to the decrease of the concentration of ammonium in the rhizosphere soil of *B. pilosa*. The concentrations of 15:1 anteiso A and 18:1 ω 5c were significantly positively correlated with the concentration of available potassium, and its content were significantly greater than the other treatments in *Setaria viridis*. The concentration of available potassium in the competition treatment between *B. pilosa* and *S. viridis* was significantly higher than the other treatments. The above results show that the invasive plant *B. pilosa* affected soil enzyme activities and soil nutrients via altering microbial communities, and these changes impacted the native plant species.

Key words: *Bidens pilosa*; native plant species; soil microorganisms; soil nutrient; soil enzymy activity

外来植物的入侵可导致入侵地土壤微生物结构和功能以及土壤养分的改变(Callaway et al, 2004)。目前许多研究主要集中于入侵植物如何导致土壤微生物的变化, 以及这种变化对外来植物入侵的反馈作用(Belnap & Philips, 2001; Klironomos, 2002; Vries et al, 2012)。通过我们前期的研究获知不同入侵地对入侵植物的抵御能力不同(贾月月等, 2015), 这可能与入侵地的非生物学特性(如土壤的 pH 值和养分)和生物学特性(如入侵地植物和动物种类等)有关, 其中植物种类被认为是土壤微生物变化的重要驱动力(Bardgett et al, 2005; Cantarel et al, 2015)。我们推测入侵植物入侵地的本地植物种类与土壤微生物和土壤养分的变化密切相关。研究入侵植物与不同本地植物竞争生长过程中根际土壤微生物和土壤养分的变化, 有助于从土壤微生物的角度研究不同本地植物对入侵植物的抵御能力及相关作用机理, 也为竞争替代植物的筛选提供理论依据。

三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)为菊科鬼针草属草本植物, 原产于美洲, 由于其强烈的入侵性, 目前已广泛分布于我国, 对入侵地农、林、牧业生产和生物多样性造成严重威胁(杜凤移等, 2007)。已有研究表明, 三叶鬼针草可通过改变土壤微生物群落结构来达到成功入侵(于兴军等, 2005)。一方面, 土壤微生物的改变与入侵植物的入侵程度有关(严琦等, 2009)。如陈亮等(2011)采集了广州郊区三叶鬼针草不同入侵程度的土壤, 发现不仅土壤细菌多样性发生改变, 而且细菌的优势种群也发生了变化。另一方面, 土壤微生物的改变也与入侵地植物种类有关(Ben & Kris, 2015)。许多研究表明, 土著植物是决定其对入侵植物生态防御能力高低的重要因素(Mokany et al, 2008; Godoy et al, 2011, 2012), 入侵地本地植物种类是影响土壤微生物和土壤养分变化的重要因素, 但是到目前为止, 有关三叶鬼针草

与不同本地植物竞争生长过程中对土壤生态的影响鲜有报道。本研究拟采用野外同质园实验, 系统研究三叶鬼针草与不同本地植物竞争生长过程对土壤微生物群落结构和土壤养分的影响, 以期为揭示三叶鬼针草的入侵机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

实验地点坐落于河北省廊坊市中国农业科学院廊坊科研中试基地。土壤类型为棕色砂质粘壤土。狗尾草(*Setaria viridis*)、藜(*Chenopodium serotinum*)和草木樨(*Melilotus suaveolens*)是三叶鬼针草入侵地常见伴生种, 且3种植物属于不同的功能类型: 狗尾草属于单子叶菌根植物, 藜属于双子叶非菌根植物, 草木樨为双子叶固氮植物。

1.2 实验样地设计

样地设置了8种处理, 包括三叶鬼针草单种、狗尾草单种、藜单种、草木樨单种、三叶鬼针草与狗尾草混种、三叶鬼针草和藜混种以及三叶鬼针草和草木樨混种和裸土对照, 其中裸土对照为没有任何植物生长的样方。每种处理设置5个重复, 一共40个样方, 大小均为3 m \times 2 m (长 \times 宽), 间距为1 m, 以防止边缘效应。长期定位实验开始于2008年, 样方设置随机分布。每个样方中播种100粒种子, 混种中三叶鬼针草与本地植物的比例为1:1。每2周进行人工除草, 保持每样方植物种类不变。每年秋天拔除植物, 第二年靠其自身种子自然繁衍生长。经过7年生长后, 2014年8月对所有样方的植被进行调查及土样采集。由于每样方植被密度较大, 所以选择样方内具有代表性的小面积(0.5 m \times 0.5 m)样方统计植物数目。植物生长情况见表1。

1.3 根际土样的采集和保存

2014年8月份采集各小区土样, 每个小区沿对

表1 不同处理样方的植物生长状况(平均值 ± 标准差)。B: 三叶鬼针草; S: 狗尾草; C: 藜; M: 草木樨。
Table 1 Plant growth in different plots (mean ± SD). B, *Bidens pilosa*; S, *Setaria viridis*; C, *Chenopodium serotinum*; M, *Melilotus suaveolens*.

处理 Treatment	植物 Plant	密度 Density (inds./m ²)	生物量 Biomass (kg/m ²)
B	B	274.00 ± 62.12	0.92±0.22
B+S	B	180.00 ± 72.04	0.48 ± 0.16
	S	56.00 ± 35.68	0.17 ± 0.05
B+C	B	148.00 ± 36.00	0.43 ± 0.11
	C	208.00 ± 9.64	0.59 ± 0.09
B+M	B	144.00 ± 36.00	0.51 ± 0.01
	M	192.00 ± 6.08	0.55 ± 0.01

角线随机采取生长状况良好的5株植物的根际土壤, 入侵植物样地内采集入侵植物根际土, 入侵植物和本地植物混种样地采集对角线上入侵植物根际土壤。清除枯枝落叶及表层土壤, 用土钻(直径3 cm)采集距地表0–15 cm处的根际土, 将同一小区的5株植物的根际土壤混合为1个土样。对照组的土壤采集也采用沿对角线随机选取5个点, 然后按照植物根际土的采集方法进行采集。将采集的土壤样品放入自封袋后进行编号立即带回实验室过2 mm筛(国家标准筛)后储存在–20℃冰箱内以备后续实验使用。将采集的土样分成2份: 1份用于测定土壤微生物磷脂脂肪酸含量; 1份用于测定土壤酶活性和土壤养分。

1.4 土壤微生物群落结构的测定和分析

土壤微生物磷脂脂肪酸的提取和分析参考Frostegård和Bååth (1996)和Kourtev等(2002)的方法。具体步骤为: 取4 g土样于50 mL离心管中, 加入20 mL 0.2 M的KOH-CH₃OH混合溶液(11.2 g KOH溶于1 LCH₃OH), 振荡提取脂类, 加入19:0甲基酯内标, 利用气相色谱(Agilent 6890N)分析各种脂肪酸的含量。GC-MS的测定条件为: 二阶程序升高柱温, 以5℃/min的速率使柱温由170℃升至260℃, 而后以40℃/min的速度升温至310℃, 维持90 s; 汽化室温度为250℃, 检测器温度为300℃; 载气为H₂ (2 mL/min), 尾吹气为N₂ (30 mL/min); 柱前压10.00 psi (1 psi = 6.895 kPa); 进样量1 μL, 分流比为100/1。磷脂脂肪酸成分分析采用美国MIDI公司生产的基于细菌细胞脂肪酸成分鉴定的Sherlock MIS

4.5系统。根据加入内标19:0的量可以计算出土壤中微生物的PLFAs的量。通常11:0 2OH、14:0 anteiso、15:0 anteiso、16:0 anteiso、17:0 anteiso、14:0 iso、15:0iso、16:0 iso、17:0 iso表征革兰氏阳性菌(G⁺), 12:0 2OH、12:0、14:0、17:0、18:0、16:0 Nalcohol、i15:3OH、18:1 ω5c表征革兰氏阴性菌(G⁻)(Drijber et al, 2000; Hill et al, 2000), 18:1 ω9c、18:2 ω6,9c表征真菌(F)(Bååth et al, 1998), 16:1 ω5c表征丛枝菌根真菌(AMF)(Olsson & Alström, 2000), 14:1 ω5c、17:0 10-methyl表征放线菌(A), 20:4 ω6,9,12,15c表征原生生物(P)(Kourtev et al, 2002)。

1.5 土壤养分和土壤酶活性的测定

土壤有机碳测定采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄比色标曲线法: 以每克土壤中含有机碳的mg数表示; 速效钾采用1 M中性醋酸铵(NH₄OAC)浸提, 浸提用量10 mL/g, 用火焰光度计测定, 结果以每克土壤中速效钾含有的微克数表示; 有效磷采用0.5 M NaHCO₃浸提–钼锑抗比色法, 结果以每克土壤中含有效磷的微克数(鲍士旦, 2000)表示; 土壤硝态氮和铵态氮含量采用SmartChem全自动间断化学分析仪进行测定, 结果以每克土壤中铵态氮、硝态氮含量的毫克数表示(周晓光, 2010)^①。土壤酶活性采用分光光度计比色法测定: 蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法, 以每克土壤中含葡萄糖的毫克数表示; 脲酶采用苯酚钠–次氯酸钠比色法, 酶活性以每克土壤中含铵态氮的毫克数表示; 酸性磷酸酶和碱性磷酸酶均采用磷酸苯二钠比色法, 土壤磷酸酶活性以1 g 土样1 h催化PNPP分解生成对硝基苯酚的(转换为Gly)微克数表示(关松荫, 1986)。

1.6 数据处理与分析

实验数据采用平均值±标准差的形式表示, 用Excel统计作图。采用SPSS19.0对各处理中PLFAs含量进行单因素方差分析, Duncan多重比较(P = 0.05)。利用SPSS19.0对各样地土壤微生物磷脂脂肪酸群落组成进行主成分分析(PCA), 计算各因子的贡献率, 利用主成分分析因子的载荷量算出各因子作用的大小, 以确定它们的权重。采用Canoco 4.5软件对土壤微生物群落、土壤养分和酶活性三者进行典范对应分析(Canoninal Correspondence Analysis, CCA), 以土壤微生物作为环境变量, 土壤理化

① 周晓光 (2010) 有机和常规蔬菜生产系统土壤可溶性氮素的分析比较. 硕士学位论文, 上海交通大学, 上海.

性质、土壤酶活性数据作为典范函数变量进行典范对应分析,确定土壤微生物与各因子之间的关系。其中箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线与排序轴的夹角代表着某个土壤因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高。

2 结果

2.1 本地植物种类对三叶鬼针草根际土壤微生物的影响

2.1.1 土壤微生物PLFAs总量的变化

三叶鬼针草入侵显著提高了入侵地土壤微生物的PFLAs总量,其中三叶鬼针草与狗尾草混种处理(B+S)中土壤微生物PLFAs总量显著高于其他两种混种处理(图1)。

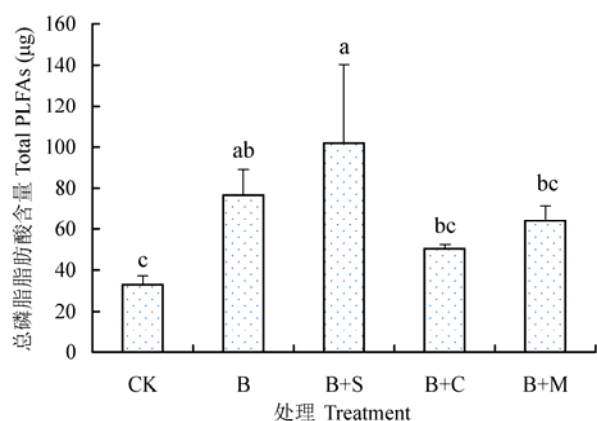


图1 不同处理三叶鬼针草根际土壤微生物PLFAs总量的变化($P<0.05$)。CK: 裸土, 其他各处理的代号见表1。

Fig. 1 Change of total PLFAs from rhizosphere soils under *Bidens pilosa* individuals in different treatments ($P<0.05$). CK, Bare soil. Other treatments correspond to those in Table 1.

2.1.2 土壤微生物不同类群PLFAs量的变化

由表2可知,三叶鬼针草与狗尾草混种处理(B+S)中放线菌、格兰氏阴性菌、格兰氏阳性菌的含量和G⁻/G⁺值显著高于其他处理。三叶鬼针草单种处理(B)中革兰氏阴性菌显著高于三叶鬼针草与藜混种处理(B+C)和三叶鬼针草与草木樨混种处理(B+M)(表2)。

2.1.3 土壤微生物群落结构的主成分分析

图2a为三叶鬼针草不同处理根际土壤微生物

群落的主成分分析结果,主成分1和2的贡献率分别为52.43%和10.66%,二者的累计贡献率为63.09%。三叶鬼针草与狗尾草混种处理(B+S)的土壤微生物群落结构在主成分1的正方向,主成分2的原点附近;三叶鬼针草与藜混种处理(B+C)和三叶鬼针草与草木樨混种处理(B+M)和三叶鬼针草单种处理(B)在主成分1和主成分2的坐标原点附近,且三者有重叠,说明3种处理之间的微生物群落结构差异性不大,但它们都与三叶鬼针草和狗尾草混种处理(B+S)差异较大。载荷分析表明15:0 anteiso、17:0、18:0、17:0 10-methyl等对主成分1的贡献较大,13:0 2OH、20:0 iso和11:0 2OH对主成分2的贡献较大,结合图2a可知11:0 2OH在三叶鬼针草和藜混种处理(B+C)中占优势,体现为B+C处理相比于其他处理往主成分2的正方向移动;16:1 ω5c、15:0 anteiso、17:0、和18:0等是三叶鬼针草和狗尾草混种处理(B+S)中的优势脂肪酸,其含量显著高于其他处理,体现为B+S处理相比于其他处理往主成分1的正方向移动。

2.2 本地植物种类对土壤养分和土壤酶活性的影响

三叶鬼针草入侵显著增强了入侵地土壤中有有机碳、速效磷和硝态氮的含量,提高了pH值并降低了铵态氮的含量(表3)。在不同的本地植物与鬼针草混种处理中,土壤中的速效钾、速效磷和硝态氮的含量与本地植物种类相关:三叶鬼针草与狗尾草混种(B+S)显著增加了土壤中速效钾和速效磷的含量并提高了土壤的pH值;三叶鬼针草与藜混种(B+C)显著降低了土壤速效钾含量,提高了土壤pH值和硝态氮含量;三叶鬼针草与草木樨混种(B+M)显著降低了速效钾含量,提高了速效磷含量(表3)。

与裸土对照相比,三叶鬼针草入侵地土壤中蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性显著提高,且在三叶鬼针草的单种处理中脲酶和碱性磷酸酶的活性显著高于三叶鬼针草与3种本地植物的混种处理,三叶鬼针草与藜混种处理中蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性显著高于其他处理(表4)。

2.3 不同处理三叶鬼针草根际土壤微生物与土壤养分、土壤酶活性的相关性分析

图3为三叶鬼针草入侵地PLFAs与土壤养分的典范对应分析(CCA),前两个排序轴的贡献率分别为87.3%和95.6%,能够较全面地反映出PLFAs与土壤养分之间的相关性。其中速效钾和速效磷与

表2 不同处理对三叶鬼针草根际不同类群微生物PLFAs量的影响(单位 $\mu\text{g/g}$) (平均值 \pm 标准差,)。A: 放线菌; AMF: 丛枝菌根真菌; F: 真菌; G⁻: 格兰氏阴性菌; G⁺: 格兰氏阳性菌; P: 放线菌; F/B: 真菌和细菌的比值; G⁻/G⁺: 革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌的比值。CK: 裸土, 各处理的代号见表1。不同字母表示多重比较差异显著($P < 0.05$)

Table 2 The change of PLFAs extracted from rhizosphere soils of *Bidens pilosa* in different treatments (unit $\mu\text{g/g}$) (mean \pm SD, $P < 0.05$). A, Actinomycetes; AMF, Arbuscular mycorrhizal fungi; F, Fungi; G⁻, Gram-negative bacterium; G⁺, Gram-positive bacterium; P, Actinomycetes; F/B, Ratio of fungi and bacterium; G⁻/G⁺, Ratio of gram-negative bacterium and gram-positive bacterium. CK, Bare soil. The treatments correspond to those in Table 1. The different superscripts indicate significant difference between treatments after multiplicative comparison ($P < 0.05$).

处理 Treatment	A	AMF	F	G ⁻	G ⁺	P	F/B	G ⁻ /G ⁺
CK	1.21 \pm 0.04 ^c	1.48 \pm 0.44 ^b	3.63 \pm 0.67 ^b	4.01 \pm 0.47 ^d	5.04 \pm 0.67 ^d	0.37 \pm 0.10 ^c	0.80 \pm 0.04 ^a	0.12 \pm 0.00 ^d
B	1.82 \pm 0.07 ^b	14.87 \pm 6.69 ^{ab}	6.28 \pm 0.43 ^{ab}	6.66 \pm 0.32 ^b	7.71 \pm 0.44 ^b	1.19 \pm 0.33 ^{ab}	0.91 \pm 0.06 ^a	0.14 \pm 0.00 ^b
B+S	2.29 \pm 0.17 ^a	16.96 \pm 4.20 ^a	8.40 \pm 2.19 ^a	9.11 \pm 0.32 ^a	9.73 \pm 0.58 ^a	1.41 \pm 0.79 ^a	0.92 \pm 0.19 ^a	0.15 \pm 0.00 ^a
B+C	1.70 \pm 0.06 ^b	4.97 \pm 1.26 ^{ab}	4.78 \pm 0.05 ^{ab}	5.32 \pm 0.06 ^c	7.35 \pm 0.08 ^{bc}	0.54 \pm 0.06 ^{bc}	0.74 \pm 0.00 ^a	0.14 \pm 0.00 ^b
B+M	1.73 \pm 0.18 ^b	9.08 \pm 4.78 ^{ab}	8.01 \pm 4.00 ^a	5.65 \pm 0.84 ^c	6.63 \pm 0.12 ^c	1.04 \pm 0.16 ^{abc}	1.38 \pm 0.33 ^a	0.13 \pm 0.00 ^c

表3 三叶鬼针草不同处理根际土壤的养分含量。不同字母表示多重比较差异显著($P < 0.05$)。CK: 裸土, 各处理的代号见表1。

Table 3 Change of total nutrient extracted from rhizosphere soils of *Bidens pilosa* in different treatments. The different superscripts indicate significant difference between treatments after multiplicative comparison ($P < 0.05$). CK, Bare soil. The treatments correspond to those in Table 1.

	速效钾 Available K	有机碳 Organic carbon	pH	速效磷 Available P	硝态氮 Nitrate N	铵态氮 Ammonium N
CK	221.67 \pm 8.62 ^a	6.7.0 \pm 0.07 ^c	7.94 \pm 0.01 ^c	1.13 \pm 0.18 ^c	21.72 \pm 1.96 ^c	71.50 \pm 1.54 ^a
B	201.33 \pm 4.93 ^b	10.34 \pm 0.3 ^a	8.26 \pm 0.04 ^a	1.77 \pm 0.09 ^b	23.65 \pm 2.01 ^{ab}	66.07 \pm 0.71 ^{bc}
B+S	221.67 \pm 0.58 ^a	9.46 \pm 0.53 ^b	8.09 \pm 0.06 ^b	2.52 \pm 0.10 ^a	21.51 \pm 1.19 ^c	66.41 \pm 2.68 ^b
B+C	205.00 \pm 1.73 ^b	9.75 \pm 0.24 ^b	8.07 \pm 0.02 ^b	1.73 \pm 0.06 ^b	25.05 \pm 0.73 ^a	63.93 \pm 1.53 ^c
B+M	198.00 \pm 2.65 ^b	9.29 \pm 0.09 ^b	7.97 \pm 0.09 ^c	2.48 \pm 0.28 ^a	20.85 \pm 0.71 ^c	64.45 \pm 2.13 ^c

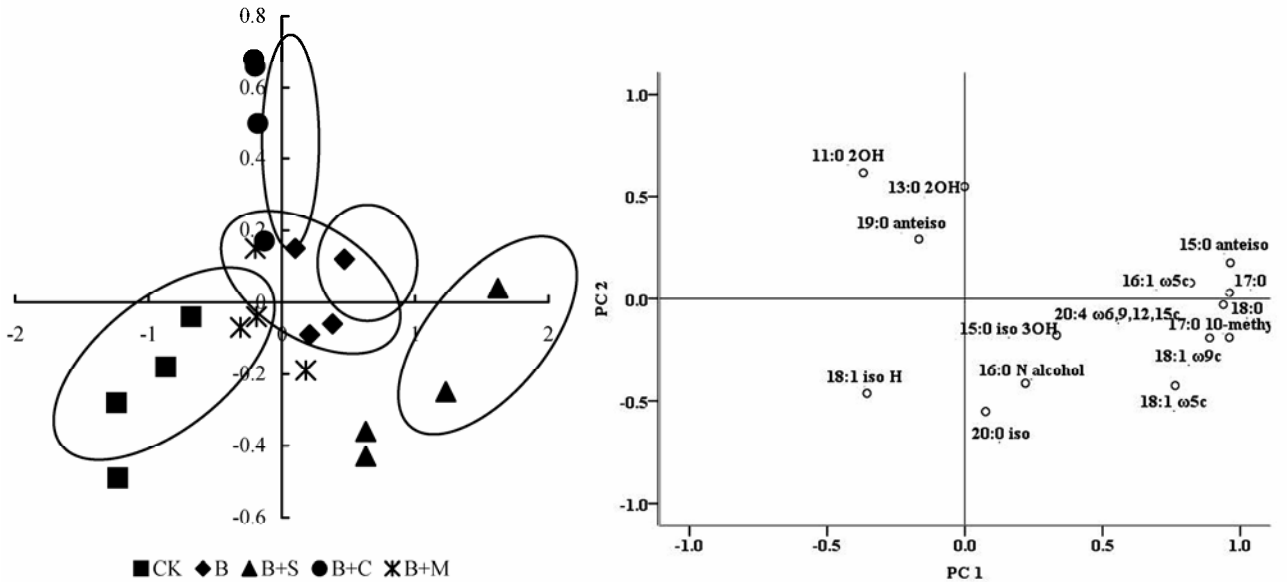


图2 三叶鬼针草不同处理根际土壤微生物群落PLFA的主成分分析及载荷因子贡献。各处理的代号见表1。
Fig. 2 Principle components analysis (PCA) of PLFA profiles from rhizosphere soil microbial communities and loadings factors of PLFA contributing to soil microbial communities ordination pattern of the different treatments of *Bidens pilosa*. The treatments correspond to those in Table 1.

第二排序轴的正相关性较高,表明第二排序轴从上到下微生物对速效钾和速效磷的吸收利用逐渐减弱。15:1 anteiso A和18:1 ω5c与代表速效钾箭头的连线距离最近,说明15:1 anteiso A和18:1 ω5c与速效钾的相互影响较大。铵态氮与第一排序轴的负相关性较高,16:00和16:1 ω5c与铵态氮的箭头距离很近,说明16:00和16:1 ω5c对铵态氮的含量影响较大。

图4为三叶鬼针草入侵地PLFAs与土壤酶活性的典范对应分析(CCA),前两个排序轴的贡献率分

别为85.9%和97.2%,能够较全面地反映PLFAs与土壤酶活性之间的相关性。蔗糖酶、脲酶与第一和第二排序轴均呈负相关,酸性磷酸酶和碱性磷酸酶与第一排序轴呈负相关,与第二排序轴呈正相关。其中16:00、18:0 2OH与酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的箭头距离很近,说明16:00、18:0 2OH对磷酸酶活性影响较大,而16:00、20:4 ω6,9,12,15c对蔗糖酶、脲酶的活性影响较大。16:1 ω5c与蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶均呈显著正相关。

表4 三叶鬼针草不同处理根际土壤酶的活性。不同字母表示多重比较差异显著($P < 0.05$)。CK: 裸土,各处理的代号见表1。
Table 4 Enzyme activity extracted from rhizosphere soils of *Bidens pilosa* in different treatments. The different superscripts indicate significant difference between treatments after multiplicative comparison ($P < 0.05$). CK, Bare soil. The treatments correspond to those in Table 1.

处理 Treatment	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase
CK	42.74±0.15 ^d	10.99±0.49 ^e	64.41±0.87 ^d	23.04±0.55 ^d
B	66.13±3.78 ^{bc}	18.46±0.14 ^a	100.63±1.41 ^b	74.05±1.03 ^a
B+S	61.83±0.65 ^c	12.68±0.57 ^d	103.00±1.87 ^b	66.9±4.65 ^b
B+C	73.33±5.52 ^a	16.02±0.22 ^c	108.67±1.51 ^a	66.32±1.02 ^b
B+M	69.77±3.88 ^{ab}	16.92±0.09 ^b	96.89±0.62 ^c	59.50±3.03 ^c

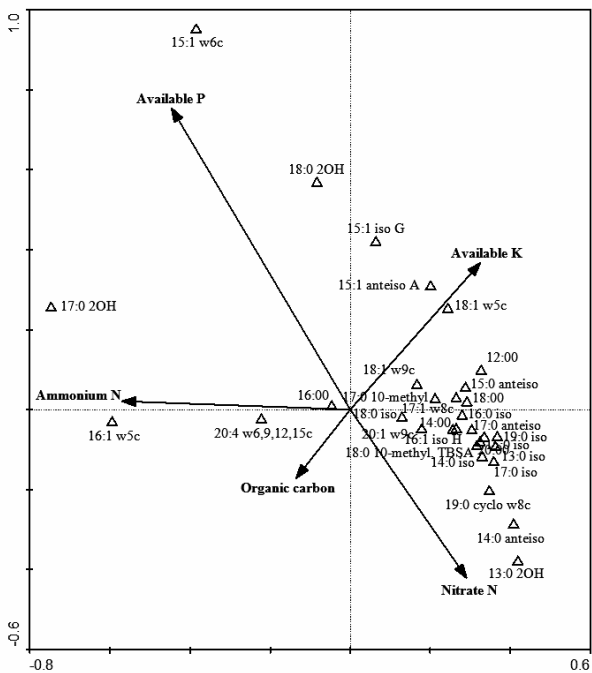


图3 三叶鬼针草入侵地PLFAs与土壤养分的典范对应分析(CCA)二维排序
Fig. 3 Canonical correspondence analysis (CCA) ordination of the relationship of PLFAs and soil nutrients in *Bidens pilosa* invasion region

3 讨论

3.1 三叶鬼针草对土壤微生物群落结构的影响

多数研究表明,外来植物入侵后直接或间接地影响入侵地的土壤微生物群落结构。一方面是因为地上植物群落的改变必然会引起地下土壤微生物群落的变化,另一方面,外来植物可以释放化感物质,改变入侵地土壤微生物的群落结构组成和功能(Kourtev et al, 2002; Vries et al, 2012),增强自身的竞争能力。Reinhart和Callaway (2004)研究发现真菌菌群可以调节和反馈地上不同种植物间的竞争和生长,特别是AMF在入侵植物的竞争反馈中起着重要的作用(Wagg et al, 2011a, b)。聚集的菌根真菌与入侵植物互惠共生,发生改变的AMF通过影响入侵植物与土著植物的竞争关系增强入侵种的竞争能力(Weidenhamer & Callaway, 2010; Zhang et al, 2010)。肖博等(2014)的研究结果表明,紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)改变了入侵生境的土壤微生物群落结构,增加了土壤中真菌和AMF含量,从而形成对植物生长的正反馈。本研究中三叶鬼针草根际土壤聚集的微生物种类和含量不同:在三叶鬼针

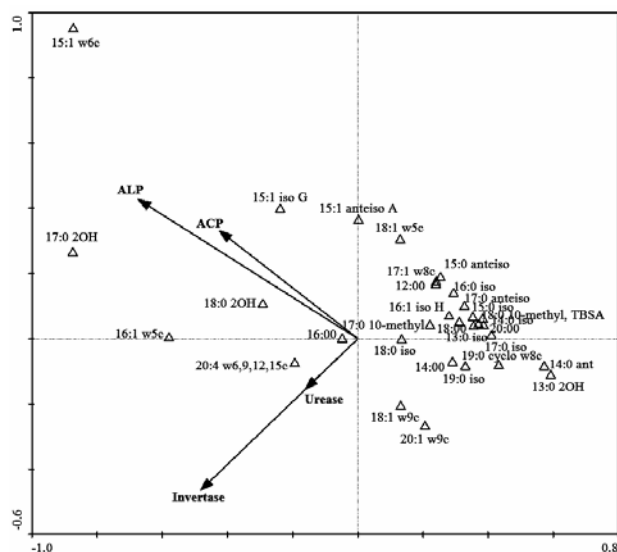


图4 三叶鬼针草入侵地PLFAs与土壤酶活性典范对应分析(CCA)二维排序, ALP, 碱性磷酸酶; ACP, 酸性磷酸酶。

Fig. 4 Canonical correspondence analysis (CCA) ordination of the relationship of PLFAs and soil enzyme activities in *Bidens pilosa* invasion region. ALP, Alkaline phosphatase; ACP, Acid phosphatase.

草和藜混种处理(B+C)中11:0 2OH为优势脂肪酸,而在三叶鬼针草和狗尾草混种处理(B+S)中15:0 anteiso、17:0、18:0等为优势脂肪酸,说明不同的植物与三叶鬼针草混种对土壤微生物产生的影响不同,且其优势菌群不同。三叶鬼针草对一些类群微生物的聚集能力较强。i15:0、17:0 anteiso、18:1 ω9c、16:1 ω5c等是三叶鬼针草入侵样地中的优势脂肪酸,其中15:0 iso、17:0 anteiso属于革兰氏阳性菌,18:1 ω9c属于真菌,16:1 ω5c属于AMF,主要聚集的是细菌和真菌,与肖博等(2014)的研究结果一致。这一结果暗示三叶鬼针草通过改变入侵地土壤微生物群落的结构,聚集有利于自身生长的微生物群落,以提高自身的竞争能力。

3.2 三叶鬼针草对土壤养分和土壤酶活性的影响

土壤酶在土壤养分的转化过程中起着非常重要的作用,是微生物代谢分泌的活性物质,催化土壤生态系统中生物化学过程,能准确地反映土壤的生态功能(Holmgren et al, 1997; 张天瑞等, 2010)。外来植物的入侵通过改变土壤微生物群落结构来影响土壤养分循环(Ehrenfeld et al, 2005; Bannert et al, 2011)。马杰等(2011)对黄顶菊(*Flaveria bidentis*)的替代竞争的研究发现,黄顶菊入侵显著提高了其

入侵地蔗糖酶、脲酶、磷酸酶的活性。Li等(2006)研究发现,薇甘菊(*Mikania micrantha*)入侵可显著提高脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性。本研究表明三叶鬼针草入侵地土壤中蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性显著提高,且在三叶鬼针草的单种处理中脲酶和碱性磷酸酶的活性显著高于三叶鬼针草与3种本地植物的混种处理,三叶鬼针草与藜混种处理中蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性显著高于其他处理,与上述结果一致。

研究表明,许多外来植物通过改变新生境的土壤养分循环增加自身的竞争能力,实现成功入侵,如入侵植物土荆芥(*Chenopodium ambrosioides*)(阿的鲁骥等, 2015)和火炬树(*Rhus typhina*)(侯玉平等, 2015)等均是通过对改变其入侵地的土壤养分循环,从而为自身生长提供有利条件。本研究发现三叶鬼针草显著提高了土壤中有机碳、速效磷和硝态氮的含量,提高了土壤pH值,与何兵等(2013)对三叶鬼针草的研究结论一致。越来越多的研究表明植物种类和植物性状可以影响植物与土壤微生物的互作关系(Moreau et al, 2015)和土壤的养分循环(Hooper & Vitousek, 1998)。植物种类在一定空间范围内决定土壤生物学过程,土壤的反硝化速率与植物的相对生长速率密切相关,硝化速率与根的特征(特定的根长、根中氮的含量和植物吸收铵态氮的速率)密切相关(Hooper & Vitousek, 1998)。不同的本地植物对土壤养分的影响不同,三叶鬼针草与狗尾草混种显著增加了土壤中速效钾的含量,而三叶鬼针草与藜混种以及三叶鬼针草与草木樨混种显著降低了土壤中速效钾的含量。这一结果暗示土壤酶活性的改变必将引起土壤养分的变化,且这种改变与入侵地本地植物的种类有关。三叶鬼针草具有生长速度快和养分吸收能力强的特性(Huenneke et al, 1990; Grubb, 1994),本研究中发现三叶鬼针草显著降低了土壤铵态氮的含量,与Kourtev等(1999)研究美国新泽西州外来植物日本小檗(*Berberis thunbergii*)和柔枝莠竹(*Microstegium vimineum*)的结果一致,但与Yelenik等(2004)发现外来植物金环相思树(*Acacia saligna*)显著增加了土壤无机氮的含量的结果不一致。相关性分析表明16:00和16:1 ω5c对铵态氮的含量影响较大,且三叶鬼针草入侵地16:00和16:1 ω5c的含量显著高于裸土对照,进而推测16:00和16:1 ω5c含量的提高与三叶鬼针草入侵地铵态氮含量的

降低密切相关。目前对于入侵植物能否增加土壤铵态氮的含量的相关研究有待于进一步开展。

综上,外来入侵植物三叶鬼针草的入侵通过改变土壤微生物群落结构影响了土壤酶活性和土壤养分,创造了对自身竞争有利的土壤环境,且这种改变与入侵地本地植物的种类密切相关。

参考文献

- ADe LJ, He B, Wang CT, Hu L, Zi HB (2015) Effects of *Chenopodium ambrosioides* on soil enzyme activity, micro-organism quantity and soil nutrient content of three cultivated pastures of rhizosphere soil in northwestern Sichuan. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 28, 815–821. (in Chinese with English abstract) [阿的鲁骥, 何兵, 王长庭, 胡雷, 字洪标 (2015) 入侵植物土荆芥对川西北高寒草甸3种培育牧草根际土壤酶活性、微生物数量及土壤养分的影响. *西南农业学报*, 28, 815–821.]
- Bååth E, Díaz-Raviña M, Frostegård A, Campbell CD (1998) Effect of metal-rich sludge amendments on the soil microbial community. *Applied and Environmental Microbiology*, 64, 238–245.
- Bannert A, Kleinedam K, Wissing L, Mueller-Niggemann C, Vogelsang V, Welzl G, Cao ZH, Schlöter M (2011) Changes in diversity and functional gene abundances of microbial communities involved in nitrogen fixation, nitrification, and denitrification in a tidal wetland versus paddy soils cultivated for different time periods. *Applied and Environmental Microbiology*, 77, 6109–6116.
- Bao SD (2000) *Soil Assay on Properties of Agro Chemistry*, 3rd edn, pp. 207–237. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [鲍士旦 (2000) 土壤农化分析(第3版), 207–237页. 中国农业出版社, 北京.]
- Bardgett RD, Bowman WD, Kaufmann R, Schmidt SK (2005) A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 634–641.
- Belnap J, Philips SL (2001) Soil biota in an ungrazed grassland: response to annual grass (*Bromus tectorum*) invasion. *Ecological Applications*, 11, 1261–1275.
- Ben G, Kris F (2015) Impacts of alien plant invasion on native plant communities are mediated by functional identity of resident species, not resource availability. *Oikos*, 124, 298–306.
- Callaway RM, Thelen GC, Rodriguez A, Holben WE (2004) Soil biota and exotic plant invasion. *Nature*, 427, 731–733.
- Cantarel AAM, Pommier T, Desclos-Theveniau M, Diquélou S, Dumont M, Grassein F, Kastl E-M, Grigulis K, Láiné P, Lavorel S, Lemaufiel-Lavénant S, Personeni E, Schlöter M, Poly F (2015) Using plant traits to explain plant-microbe relationships involved in nitrogen acquisition. *Ecology*, 96, 788–799.
- Chen L, Li HN, Yang MH, Wan FH (2011) Influence of invasion of *Mikania micrantha* and *Bidens pilosa* to the bacterial community in the root soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(8), 63–68. (in Chinese with English abstract) [陈亮, 李会娜, 杨民和, 万方浩 (2011) 入侵植物薇甘菊和三叶鬼针草对土壤细菌群落的影响. *中国农学通报*, 27(8), 63–68.]
- Drijber RA, Doran JW, Parkhurst AM, Lyon DJ (2000) Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 1419–1430.
- Du FY, Zhang MM, Ma DW (2007) Preliminary study on the allelopathic effects of *Bidens pilosa*. *China Plant Protection*, 27(9), 8–11. (in Chinese with English abstract) [杜凤移, 张苗苗, 马丹炜 (2007) 三叶鬼针草化感作用的初步研究. *中国植保导刊*, 27(9), 8–11.]
- Ehrenfeld JG, Ravit B, Elgersma K (2005) Feedbacks in the plant-soil system. *Annual Review of Environment and Resource*, 30, 75–115.
- Frostegård Å, Bååth E (1996) The use of phospholipids fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 22, 59–65.
- Godoy O, Valladares F, Castro-Díez P (2011) Multispecies comparison reveals that invasive and native plants differ in their traits but not in their plasticity. *Functional Ecology*, 25, 1248–1259.
- Godoy O, Valladares F, Castro-Díez P (2012) The relative importance for plant invasiveness of trait means, and their plasticity and integration in a multivariate framework. *New Phytologist*, 195, 912–922.
- Grubb PJ (1994) Root competition in soil of different fertility: A paradox resolved? *Phytocoenologia*, 24, 495–505.
- Guan SY (1986) *Soil Enzyme and Its Research Methods*, pp. 274–339. Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [关松荫 (1986) 土壤酶及其研究方法, 274–339页. 农业出版社, 北京.]
- He B, Li RY, Luo MY, Wei HM, Zhang H, Ma DW (2013) Effects of *Bidens pilosa* of invasive plant on soil ecological system at different developmental stages. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 26, 1953–1956. (in Chinese with English abstract) [何兵, 李睿玉, 罗曼元, 魏豪梅, 张红, 马丹炜 (2013) 入侵植物三叶鬼针草不同发育期对土壤生态系统的影响. *西南农业学报*, 26, 1953–1956.]
- Hill GT, Mitkowski NA, Aldrich-Wolfe L, Emele LR, Jurkonie DD, Ficke A, Maldonado-Ramirez S, Lynch ST, Nelson EB (2000) Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 15, 25–36.
- Holmgren M, Scheffer M, Huston MA (1997) The interplay of facilitation and competition in plant communities. *Ecology*, 78, 1966–1975.
- Hooper DU, Vitousek PM (1998) Effects of plant composition and diversity on nutrient cycling. *Ecological Monographs*, 68, 121–149.
- Hou YP, Liu L, Chu H, Ma SJ, Zhao D, Liang RR (2015) Ef-

- fects of exotic plant *Rhus typhina* invasion on soil properties in different forest types. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5324–5330. (in Chinese with English abstract) [侯玉平, 柳林, 初航, 马淑杰, 赵丹, 梁荣荣 (2015) 外来植物火炬树入侵对不同林型土壤性质的影响. *生态学报*, 35, 5324–5330.]
- Huenneke L, Hamburg SP, Koide R (1990) Effects of soil resources on plant invasion and community structure in Californian serpentine grassland. *Ecology*, 71, 478–491.
- Jia YY, Zhang XY, Yan J, Yin JL, Zhang FJ (2015) Effect of three Asteraceae invasive plants on soil fertility of invaded domain. *Journal of Hebei University*, 35, 494–502. (in Chinese with English abstract) [贾月月, 张晓亚, 闫静, 殷吉林, 张凤娟 (2015) 3种入侵菊科植物对入侵域土壤肥力的影响. *河北大学学报*, 35, 494–502.]
- Klironomos JN (2002) Feedback with soil biota contributes to plant rarity and invasiveness in communities. *Nature*, 417, 67–70.
- Kourtev PS, Ehrenfeld JG, Häggelom M (2002) Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil. *Ecology*, 83, 3152–3166.
- Kourtev PS, Huang WZ, Ehrenfeld JG (1999) Differences in earthworm densities and nitrogen dynamics in soils under exotic and native plant species. *Biological Invasions*, 1, 237–245.
- Li WH, Zhang CB, Jiang HB, Xin GR, Yang ZY (2006) Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* H.B.K. *Plant and Soil*, 281, 309–324.
- Ma J, Huangfu CH, Yi J, Yang DL (2011) Effects of four replacement plants on nutrient and enzymatic activities of soil invaded by *Flaveria bidentis*. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 805–812. (in Chinese with English abstract) [马杰, 皇甫超河, 易津, 杨殿林 (2011) 4种替代植物对黄顶菊入侵土壤养分和酶活性的影响. *生态环境学报*, 20, 805–812.]
- Mokany K, Ash J, Roxburgh S (2008) Functional identity is more important than diversity in influencing ecosystem processes in a temperate native grassland. *Journal of Ecology*, 96, 884–893.
- Moreau D, Pivato B, Bru D, Busset H, Deau F, Faivre C, Matejcek A, Strbik F, Philippot L, Mougel C (2015) Plant traits related to nitrogen uptake influence plant-microbe competition. *Ecology*, 96, 2300–2310.
- Niu HB, Liu WX, Wan FH (2007) Invasive effects of *Ageratina adenophora* Sprengel (Asteraceae) on soil microbial community and physical and chemical properties. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 3051–3060. (in Chinese with English abstract) [牛红榜, 刘万学, 万方浩 (2007) 紫茎泽兰入侵对土壤微生物群落和理化性质的影响. *生态学报*, 27, 3051–3060.]
- Olsson S and Alström S (2000) Characterisation of bacteria in soils under barley monoculture and crop rotation. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 1443–1451.
- Reinhart KO, Callaway RM (2004) Soil biota facilitate exotic *Acer* invasions in Europe and North America. *Ecological Applications*, 14, 1737–1745.
- Vries FT, Manning P, Tallowin JRB, Mortimer SR, Pilgrim ES, Harrison KA, Hobbs PJ, Quirk H, Shipley B, Cornelissen JHC, Kattge J, Bardgett RD (2012) Abiotic drivers and plant traits explain landscape-scale patterns in soil microbial communities. *Ecology Letters*, 15, 1230–1239.
- Wagg C, Jansa J, Schmid B, van der Heijden MGA (2011b) Belowground biodiversity effects of plant support aboveground productivity. *Ecology Letters*, 14, 1001–1009.
- Wagg C, Jansa J, Stadler M, Schmid B, van der Heijden MGA (2011a) Mycorrhizal fungal identity and diversity relaxes plant-plant competition. *Ecology*, 92, 1303–1313.
- Weidenhamer JD, Callaway RM (2010) Direct and indirect effects of invasive plants on soil chemistry and ecosystem function. *Journal of Chemical Ecology*, 36, 59–69.
- Xiao B, Zhou W, Liu WX, Jiang ZL, Wan FH (2014) Feedback of *Ageratina adenophora* soil microbe on *A. adenophora* and native plants. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16, 151–158. (in Chinese with English abstract) [肖博, 周文, 刘万学, 蒋智霖, 万方浩 (2014) 紫茎泽兰入侵地土壤微生物对紫茎泽兰和本地植物的反馈. *中国农业科技导报*, 16, 151–158.]
- Yan Q, Liu WX, Li HN, Wan FH (2009) Effects of *Ageratina adenophora*-invaded soil and its extract on upland rice *Oryza sativa* seed germination and seedling growth. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 879–883. (in Chinese with English abstract) [严琦, 刘万学, 李会娜, 万方浩 (2009) 紫茎泽兰不同入侵程度的土壤及其提取物对旱稻生长的影响. *生态学杂志*, 28, 879–883.]
- Yelenik SG, Stock WD, Richardson DM (2004) Ecosystem level impacts of invasive *Acacia saligna* in South African fynbos. *Restoration Ecology*, 12, 44–51.
- Yu XJ, Yu D, Lu ZJ, Ma KP (2005) A possible plant invasive mechanism: the invasive species affected the growth of native species by changing microbial communities in his invasive range. *Chinese Science Bulletin*, 50, 896–903. (in Chinese) [于兴军, 于丹, 卢志军, 马克平 (2005) 一个可能的植物入侵机制: 入侵种通过改变入侵地土壤微生物群落影响本地种的生长. *科学通报*, 50, 896–903.]
- Zhang Q, Yang RY, Tang JJ, Yang HS, Hu SJ, Chen X (2010) Positive feedback between mycorrhizal fungi and plants influences plant invasion success and resistance to invasion. *PLoS ONE*, 5, e12380.]
- Zhang TR, Huangfu CH, Bai XM, Yang DL, Li G, Lai X, Zhao JN (2010) Effect of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrient contents and enzyme activities. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1353–1358. (in Chinese with English abstract) [张天瑞, 皇甫超河, 白小明, 杨殿林, 李刚, 赖欣, 赵建宁 (2010) 黄顶菊入侵对土壤养分和酶活性的影响. *生态学杂志*, 29, 1353–1358.]

(责任编辑: 丁建清 责任编辑: 时意专)

• 研究报告 •

未来气候变化对我国特有濒危动物黑麂适宜生境的潜在影响

雷军成¹ 王 莎² 王军围³ 吴 军^{4*}¹ (赣南师范大学地理与规划学院, 江西赣州 341000)² (赣南师范大学化学化工学院, 江西赣州 341000)³ (江苏第二师范学院美术学院, 南京 210013)⁴ (环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 了解气候变化情景下野生动物适宜生境的可能变化, 对未来有关保护策略的制定具有重要意义。本研究利用20世纪60年代至今记录的黑麂(*Muntiacus crinifrons*)分布数据和9种物种分布模型, 模拟了两种温室气体浓度情景(RCP2.6和RCP8.5)下未来两个时期(2050s和2080s)黑麂的适宜生境。结果表明, 到2050s和2080s: (1)在RCP2.6情景下, 黑麂适宜生境面积相对于基准气候条件下将分别减少11.9%和6.2%, 而在RCP8.5情景下, 则分别减少36.9%和52.0%; (2)在RCP2.6情景下, 黑麂适宜生境中的“核心区域”景观面积相对于基准气候条件将分别减少20.5%和10.5%, 而在RCP8.5情景下, 则分别减少55.2%和65.2%; (3)在RCP2.6情景下, 稳定不变适宜生境的面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例分别为75.1%和84.2%, 而在RCP8.5情景下, 分别为48.3%和35.8%。总体而言, 在RCP2.6情景下, 与基准气候条件下相比气候变化对黑麂适宜生境的影响并不显著, 而在RCP8.5情景下则较为显著, 主要表现为适宜生境面积和适宜生境中“核心区域”景观的面积明显减少, 不变适宜生境面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例大幅度降低。建议未来加强浙江、安徽、江西三省交界地区黑麂适宜生境的保护, 建立黑麂保护区之间的廊道。

关键词: 鹿科; 气候情景; 物种分布模型; 生境; 保护

Potential effects of future climate change on suitable habitat of *Muntiacus crinifrons*, an endangered and endemic species in China

Juncheng Lei¹, Sha Wang², Junwei Wang³, Jun Wu^{4*}¹ School of Geography and Planning, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000² School of Chemistry and Chemical Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000³ School of Fine Art, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013⁴ Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042

Abstract: Understanding the possible changes of suitable habitats for wild animals in the context of climate change has important implications for creating relevant conservation policies in the future. Based on presence records of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*), which were recorded from 1960s to current day, and nine species distribution models, we simulated black muntjac's suitable habitat under the future climate scenarios. Future climate scenarios were derived from two greenhouse gas concentrations scenarios (RCP2.6 and RCP8.5), and two future time slices (2050s and 2080s). Results show that, by the 2050s and 2080s, under the scenario of RCP2.6, areas of the suitable habitat of black muntjac will decrease by 11.9% and 6.2%, respectively, while under the scenario of RCP8.5, they will decrease by 36.9% and 52.0%, respectively. Under the scenario of RCP2.6, the areas of 'core' landscape for the suitable habitat of black muntjac will decrease by 20.5% and 10.5%, while under the scenario of RCP8.5, they will decrease by 55.2% and 65.2%, respectively.

收稿日期: 2016-06-06; 接受日期: 2016-11-02

基金项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目(1213114)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wujun@nies.org

Under the scenario of RCP2.6, the proportion of stable suitable habitat to the suitable habitat under baseline climate conditions are 75.1% and 84.2%, while under the scenario of RCP8.5, they are 48.3% and 35.8%, respectively. In general, using the scenario with RCP2.6, the effects of future climate change on suitable habitat of black muntjac are minimal. In contrast, under the scenario of RCP8.5, the future climate will have drastic effects on suitable habitat for black muntjac. In particular, the area of suitable habitat and its 'core' landscape will significantly decrease, and so will the proportion of stable suitable habitat to the suitable habitat under baseline climate conditions. Therefore, we propose to conserve suitable habitat for black muntjac in the border area of Zhejiang, Anhui, and Jiangxi provinces, and to build corridors to connect different nature reserves for black muntjac.

Key words: Cervidae; climate scenario; species distribution model; habitat; conservation

人为原因导致的气候异常变化正以空前的速度改变着地球上物种的分布格局, 物种分布范围向高纬度和(或)高海拔地区移动是最为明显的表现形式(Walther et al, 2002; Parmesan & Yohe, 2003)。根据IPCC第五次评估报告预估结果, 全球气候变化总体趋势在未来几十年间仍不会得到有效遏制, 因此气候变化被认为是21世纪全球生物多样性面临的最主要威胁之一(Dawson et al, 2011; CBD, 2014)。建立自然保护区保护物种赖以生存的生境是珍稀濒危野生动植物保护最为有效的手段(Liu et al, 2001; 张镱铨等, 2015), 但目前的自然保护区多是基于物种的现状分布而设计, 难以满足未来气候变化情景下物种的保护需求(Hole et al, 2011; 吴建国等, 2011)。因此, 了解未来气候变化对珍稀濒危物种适宜生境的影响, 并主动采取针对性的保护措施, 对于提高保护成效至关重要(Austin & Van Niel, 2011; Moritz & Agudo, 2013)。

物种分布模型(species distribution models)基于物种分布点位数据(presence records), 采用特定的算法构建物种分布与环境因子之间的关系, 并可将这一关系映射于不同的空间或(和)时间, 预测物种的适宜生境或潜在分布(Guisan & Thuiller, 2005; 乔慧捷等, 2013)。随着气候变化情景数据的发展, 利用物种分布模型探究未来气候变化背景下物种适宜生境的可能变化已成为相关学科的研究热点(Liu et al, 2011; Araújo & Peterson, 2012)。目前, 物种分布模型已被广泛应用于气候变化潜在影响评估(Elith & Leathwick, 2009; 朱耿平等, 2013)。随着对气候变化影响认识的日渐深入, 利用物种分布模型进行未来气候变化对有蹄类动物的潜在影响评估正逐渐受到重视, 并有许多成功的示例: 如Hu和Jiang (2011)利用物种分布模型评估未来气候变化

对我国特有物种普氏原羚(*Procapra przewalskii*)的潜在影响; Luo等(2015)利用物种分布模型评估未来气候变化对青藏高原32种有蹄类动物的潜在影响。

黑麂(*Muntiacus crinifrons*)俗称蓬头鹿、红头鹿、乌金鹿等, 属偶蹄目鹿科, 为中国特有种, 分布于浙江、安徽、江西、福建等4省(27.5°–31.0° N, 117.0°–121.5° E)约 $7.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的狭小范围内(程宏毅等, 2008; 程松林等, 2012)。目前黑麂已被列为国家I级重点保护野生动物, 濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)附录I物种, IUCN濒危物种红色名录“易危”(VU)物种(郑伟成等, 2012)。截至目前, 针对黑麂的研究多集中在分子水平上的遗传特性分析、保护区尺度上的生境适宜性评价等方面(陈良等, 2010; 徐文辉等, 2013; Chen et al, 2015), 未见关于大尺度上未来气候变化对黑麂潜在影响的研究报道。本研究基于黑麂分布点位数据、气候数据和气候变化的情景数据, 借助物种分布模型和地理信息系统工具ArcGIS (V9.3, ESRI, 2009), 在了解影响黑麂分布的大尺度气候因子的基础上, 从适宜生境变化角度分析气候变化对其分布区的潜在影响, 以期为这一物种的保护提供基础资料。需要说明的是, 气候变化可通过影响物种生存(直接作用)和栖息地质量(间接作用)来决定动物的分布和迁移扩散, 本研究仅从直接作用的角度展开。

1 研究方法

1.1 黑麂分布数据

黑麂分布数据主要来源于《中国濒危动物红皮书: 兽类》(汪松, 1998), 辅以2010–2016年间公开发表的文献。文献中对黑麂分布的记录方式可分为两类: 一类是直接记录了黑麂的详细分布地(如经纬度、保护区等), 可直接利用; 另一类则仅记录了黑

鹿分布的县域单元,则需通过查询文献进一步确定黑鹿的详细分布地,若文献中无记载,则参照《中国濒危动物红皮书:兽类》中对黑鹿生境需求的描述,在该县域单元内查找黑鹿的适宜生境,作为黑鹿在该县域的分布地。最后在Google Earth中查询分布地点对应的经纬度信息,最终共整理获得黑鹿分布点位45个(附录1)。

1.2 预测环境变量

本研究初步选择受到广泛应用的19个生物气候因子作为基准气候条件下黑鹿适宜生境预测的气候因子(附录2, Hijmans et al, 2005),数据来源于Worldclim网站(<http://www.worldclim.org/>),空间分辨率选用30"×30" (约0.85 km×0.85 km)。由于这些因子间可能存在较强的相关性,本研究利用ArcGIS V9.3软件将它们均裁剪为中国行政区域范围后,利用R软件计算两两间的Spearman相关系数(附录2),相关系数绝对值≥0.7则认为2个气候因子间有强相关性(Braunisch et al, 2013; Olson et al, 2014)。由于极端气候条件对物种分布的限制更为显著(Giovanelli et al, 2010; Liu et al, 2012),因此,在相关性强的气候因子中按优先选择反映极值气候因子的原则,最终选择如下6个生物气候因子,即等温性、温度季节性变化标准差、最暖月最高温、最冷月最低温、最干月降水量和降水量季节性变异系数。

选择21世纪50年代和80年代两个气候变化情景。温室气体浓度情景选择RCP2.6和RCP8.5两种极端的浓度情景(IPCC, 2014),大气环流模型选择澳大利亚联邦科学与工业研究组织开发的CSIRO_MK3_6_0 (以下简称CSIRO)及美国国家航空航天局戈达德空间科学研究所开发的GISS_E2_h (以下简称GISS)(张芳等, 2014)。上述6个气候因子在未来各种气候情景下的数据均来源于国际农业研究磋商组织气候变化、农业和粮食安全研究项目网站(CCAFS, <http://www.ccafs-climate.org/>),空间分辨率与基准气候条件下的气候因子数据保持一致,并同样利用ArcGIS V9.3软件裁剪为中国行政区范围。

1.3 预测模型软件

选择集成了广义线性模型、广义相加模型及最大熵模型等10个物种分布模型的biomod2软件包(<https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/index.html>)作为黑鹿适宜生境预测的模型软件。

biomod2软件包基于R软件平台运行,可在单模型预测结果的基础上进行不同方式的加权集合预测,通常情况下可以提高预测结果的精度和可信度(Brown & Yoder, 2015)。各模型的参数均采用系统默认设置。

1.4 适宜生境预测和气候变化的影响分析

1.4.1 非分布点生成

除面域包络模型外,其他9个模型在进行物种适宜生境预测时,都需要物种非分布点的数据(absence records)。本研究参照Aranda和Lobo (2011)的方法,首先应用biomod2软件包中的面域包络模型生成黑鹿分布的气候包络,然后在气候包络外随机生成2组黑鹿伪非分布点(pseudo-absence records)数据。伪非分布点的数量参照Barbet-Massin等(2012)的建议,广义线性模型、广义相加模型及最大熵模型选择生成10,000个,其他模型均选择生成100个。

1.4.2 适宜生境预测

随机选取70%的分布数据(包括分布点和伪非分布点),分别用除面域包络模型外的其余9个物种分布模型建模,余下30%的分布数据用于模型验证,并进行3次交叉验证。在单模型预测结果的基础上选择受试者曲线(receiver operating characteristic, ROC)下面积(area under the curve, AUC)值≥0.8的模型预测结果,根据公式(1)方法进行加权集合预测(AUC值<0.8的模型不参与集合预测分析)(Biomod Team, 2012):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (AUC_i \times M_i)}{\sum_{i=1}^n AUC_i} \quad (1)$$

式中, P 为加权平均后的适宜程度分值; AUC_i 为第 i 个模型的AUC值; M_i 为第 i 个模型预测的适宜程度分值; n 为AUC值≥0.8的模型的数量。

在不同气候情景下黑鹿适宜生境分别预测结果的基础上,对同一温室气体浓度情景、同一时期、两种不同大气环流模型下黑鹿适宜生境的预测结果,采用Thuiller (2004)的方法进行集合预测分析。

1.4.3 预测模型检验及气候因子重要性分析

本研究中模型的直接输出结果为取值从0-1,000的适宜度分值形式,其中0表示最不适宜,1,000表示最适宜,而进行气候变化影响分析需要二值化形式,即“适宜生境—1”、“不适宜生境—0”。本研究分别选择非阈值依赖的AUC值和阈值依赖

的真实技巧指数(true skill statistics, TSS)两种评价指标对模型的直接输出结果和阈值划分后的结果进行精度评价。AUC取值从0到1, 其中 $0.90 < \text{AUC} \leq 1.00$ 为“极好”, $0.80 < \text{AUC} \leq 0.90$ 为“好”, $0.70 < \text{AUC} \leq 0.80$ 为“一般”, $0.60 < \text{AUC} \leq 0.70$ 为“差”, $\text{AUC} \leq 0.60$ 为“失败”; TSS取值从-1到1, 其中 $0.85 < \text{TSS} \leq 1.00$ 为“极好”, $0.70 < \text{TSS} \leq 0.85$ 为“好”, $0.55 < \text{TSS} \leq 0.70$ 为“一般”, $0.40 < \text{TSS} \leq 0.55$ 为“差”, $\text{TSS} \leq 0.40$ 为“失败”(Cohen, 1960; Allouche et al, 2006)。阈值选择参考 Jiménez-Valverde 和 Lobo (2007)的建议, 选用基准气候条件下黑鹿分布点最低出现概率作为基准气候条件下和未来气候情景下黑鹿适宜生境和不适宜生境划分的阈值。

采用刀切法(Jackknife)分析在全国尺度上各气候因子对黑鹿分布的重要性(钟良平等, 2009)。

1.4.4 气候变化影响分析

在进行气候变化影响分析前, 将所有结果均转化为同一投影(WGS_1984_Albers, 中央经线: 105.0°E), 栅格数据的分辨率设为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。

为反映黑鹿适宜生境的空间变化特征, 参考雷军成等(2015)的研究方法, 用公式(2)所示地图代数方法, 计算未来某一气候情景下黑鹿适宜生境相对于基准气候条件下黑鹿适宜生境的转换关系:

$$SC = CS \times 10 + FS \quad SC \in (00, 01, 10, 11) \quad (2)$$

式中, CS 为基准气候条件下黑鹿适宜生境栅格数据; FS 为未来某一气候情景下黑鹿适宜生境栅格数据; SC 为黑鹿适宜生境转换的栅格数据, $SC = 00$ 表示始终为不适宜生境, $SC = 01$ 表示不适宜生境转换为适宜生境, $SC = 10$ 表示适宜生境转换为不适宜生境, $SC = 11$ 表示始终为适宜生境。

统计基准气候条件下和未来4种气候情景下黑鹿适宜生境面积、各种生境转换类型的面积, 并计算某一气候情景下稳定不变适宜生境面积相对于基准气候条件下适宜生境面积的比例。

本研究利用ArcGIS外挂的景观破碎化分析工具 Landscape Fragmentation Analysis (LFT v2.0, <http://clear.uconn.edu/>)进一步分析未来气候变化对黑鹿适宜生境景观构成的影响。LFT建立在二元栅格数据基础上, 它通过对比每一栅格点上的景观类型与周围一定距离范围内景观类型的差异来将每一栅格点划分为核心区域(core)、贯穿区域(perforated)、边缘区域(edge)或斑块区域(patch)

(Vogt et al, 2007; 雷军成, 2014)。

2 结果

2.1 模型精度

9个模型分别预测结果的AUC平均值为 0.97 ± 0.04 , TSS平均值为 0.93 ± 0.03 (图1); 多个物种分布模型的集合模型的AUC值为0.98, TSS值为0.96。各模型的表现均达到“好”以上水平, 表明模型预测结果具有较高的精度和可信度。

2.2 气候因子的重要性

在6个气候因子影响黑鹿分布的重要性方面, 9个物种分布模型并未得出完全一致的结论(表1), 但在影响黑鹿分布最为重要的气候因子方面却高度统一, 均指向“最干月降水量”。另外, 有7个模型的分析结果表明最冷月最低温为仅次于最干月降水量的关键气候因子。

2.3 基准气候条件下黑鹿适宜生境分布

基准气候条件下, 黑鹿适宜生境主要分布在

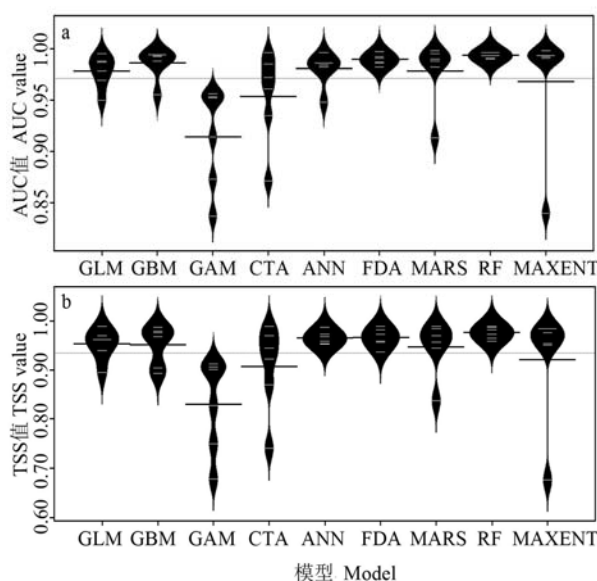


图1 9个物种分布模型对黑鹿适宜生境预测结果的AUC值(a)和TSS值(b)。GLM: 广义线性模型; GBM: 广义增强模型; GAM: 广义相加模型; CTA: 分类树分析模型; ANN: 人工神经网络模型; FDA: 混合判别式分析模型; MARS: 多元自适应回归样条函数模型; RF: 随机森林模型; MAXENT: 最大熵模型。

Fig. 1 AUC values (a) and TSS values (b) for the nine models in predicting the suitable habitat for *Muntiacus crinifrons*. GLM, Generalized linear model; GBM, Generalized boosting model; GAM, Generalized additive model; CTA, Classification tree analysis; ANN, Artificial neural networks; FDA, Flexible discriminant analysis; MARS, Multiple adaptive regression splines; RF, Random forest; MAXENT, Maximum entropy.

表1 基于刀切法的各气候因子对黑麂分布的重要性百分比(%)
Table 1 Importance of each climatic factor to the distribution of *Muntiacus crinifrons* based on the Jackknife method (%)

	等温性 Isother- mality	温度季节性变化 标准差 Standard devia- tion of tempera- ture seasonality	最暖月最高温 Max. tempera- ture of warmest month	最冷月最低温 Min. temperature of coldest month	最干月 降水量 Precipitation of driest month	降水量季节性变异 系数 Coefficient of varia- tion of precipitation seasonality
广义线性模型 Generalized linear model	14	24	25	60	76	52
广义相加模型 Generalized additive model	52	44	46	45	88	57
广义增强模型 Generalized boosting model	4	0	0	15	96	1
分类树分析模型 Classification tree analysis	9	0	1	10	98	1
人工神经网络模型 Artificial neural networks	23	58	56	63	96	72
混合判别式分析模型 Flexible discriminant analysis	2	14	13	18	84	0
多元自适应回归样条函数模型 Multiple adaptive regression splines	9	43	10	19	94	6
随机森林模型 Random forest	3	4	3	7	62	7
最大熵模型 Maximum entropy	28	1	12	47	99	13
平均 Average	16	21	18	31	88	23

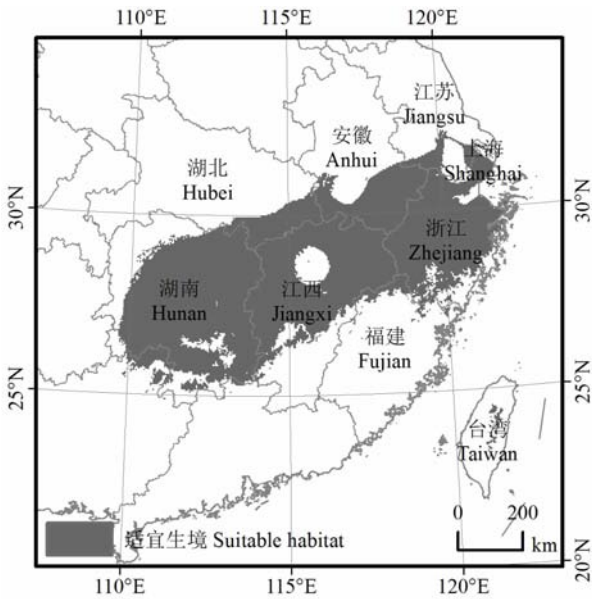


图2 基准气候条件下黑麂适宜生境
Fig. 2 Suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under baseline climate conditions

25°–32° N, 110°–123° E之间的区域, 包括浙江和湖南两省的大部、江西省中北部、安徽省南部以及湖北省东南部等地区, 适宜生境面积约44.9 × 10⁴ km² (图2)。

2.4 气候变化对黑麂适宜生境的潜在影响

2.4.1 适宜生境面积变化

未来两个时期, RCP2.6浓度情景下, 黑麂适宜生境面积相对于基准气候条件下均有所减少, 减少幅度分别为11.9% (2050s)和6.2% (2080s)(图3), 整体呈先减少后增加的趋势; RCP8.5浓度情景下, 黑麂适宜生境面积相对于基准气候条件下将分别减少36.9% (2050s)和52.0% (2080s), 整体呈持续减少的趋势(图3)。

2.4.2 适宜生境景观变化

两种温室气体浓度情景下, 黑麂适宜生境中核心区域面积的变化趋势与适宜生境面积的变化趋势一致。未来两个时期, RCP2.6浓度情景下, 核心区域面积相对基准气候条件下减少的幅度分别为20.5% (2050s)和10.5% (2080s), 整体呈先减少后增加的变化特征(图4); RCP8.5浓度情景下, 核心区域面积相对基准气候条件下将分别减少55.2% (2050s)和65.2% (2080s), 整体呈持续减少的趋势(图4)。

相对于核心区域, 两种温室气体浓度情景下, 黑麂适宜生境中贯穿区域、边缘区域及斑块区域的变化规律均不甚明显。

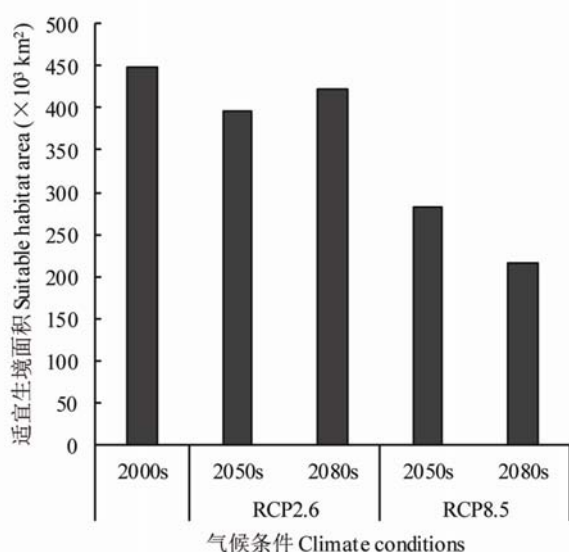


图3 不同气候条件下黑麂适宜生境面积。RCP2.6表示辐射强迫在2100年之前达到约3W/m²的峰值, RCP8.5表示辐射强迫在2100年之前超过8.5W/m²。

Fig. 3 Areas of suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under various climate conditions. RCP2.6 represents radiative forcing peaks at approximately 3 W/m² before 2100, while RCP8.5 represents radiative forcing reaches > 8.5 W/m² by 2100.

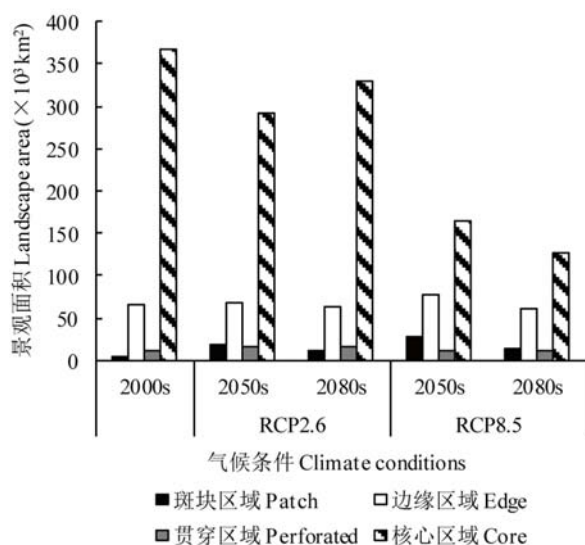


图4 不同气候条件下黑麂适宜生境的景观构成。RCP2.6表示辐射强迫在2100年之前达到约3W/m²的峰值, RCP8.5表示辐射强迫在2100年之前超过8.5W/m²。

Fig. 4 Landscape composition of suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under various climate conditions. RCP2.6 represents radiative forcing peaks at approximately 3 W/m² before 2100, while RCP8.5 represents radiative forcing reaches > 8.5 W/m² by 2100.

2.4.3 适宜生境转换关系

RCP2.6浓度情景下, 黑麂适宜生境的空间位置变化并不明显, 未来两个时期稳定不变适宜生境面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例分别为75.1%和84.2% (图5)。RCP8.5浓度情景下, 黑麂适宜生境的空间位置发生较为明显的变化, 主要表现为适宜生境的整体萎缩和分布向高纬度地区移动, 未来两个时期不变适宜生境面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例分别为48.3%和35.8% (图5)。

3 讨论

3.1 预测方法

目前, 有许多物种分布模型可以用于物种适宜生境的预测研究。在众多的物种分布模型中, 哪一种才是最优的模型, 或者说哪一种才是最适合特定研究对象的模型? 这往往成为困扰研究人员的一个难题(Elith et al, 2006)。虽然有很多学者设法回答这一问题, 但到目前为止尚未有一致的结论(Qiao et al, 2015)。很多学者认为受模型本身的局限和物种-环境关系复杂性的影响, 单一物种分布模型的预测结果通常会存在较多的不确定性, 进而影响模型预测结果的可信度(Thuiller et al, 2009; Guo & Liu, 2010; 翟天庆和李欣海, 2012)。本研究采用多模型集合预测的方法, 从AUC和TSS两种模型评价指标的对比可以看出, 集合模型预测结果的精度较单物种分布模型有较为明显的提高。

3.2 模型表现

本研究中, 虽然AUC和TSS两种模型评价指标均表明模型预测的黑麂适宜生境具有很高的精度和可信度, 但模型预测的基准气候条件下黑麂的适宜生境范围要明显大于其实际的分布区(图2)。造成这一差异的主要原因可能是由于决定物种分布的关键环境要素随空间尺度而异(Pearson & Dawson, 2003), 黑麂的分布除了受气候条件的影响外, 还受地形、植被、水源、干扰等多种因素的影响(陈良等, 2010; 徐文辉等, 2013)。另外, 受制于技术条件因素, 本研究仅仅考虑了气候因素对黑麂分布的直接影响, 而未考虑气候变化引起植被、食物、种间关系(吴伟伟等, 2012; 黎磊和陈家宽, 2014)等的变化对黑麂分布的间接影响。

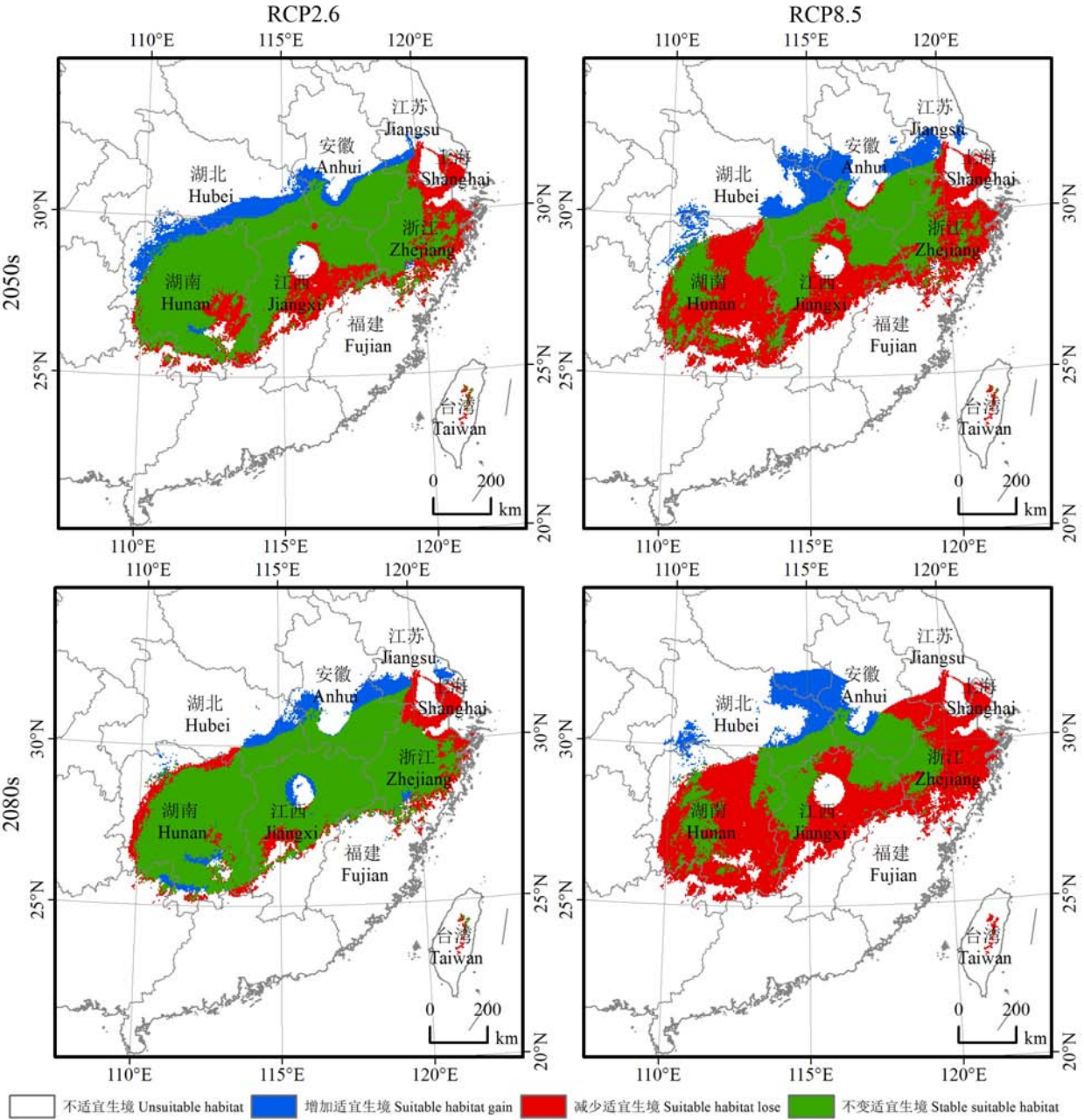


图5 不同气候情景下黑麂适宜生境空间变化。RCP2.6表示辐射强迫在2100年之前达到约 $3\text{W}/\text{m}^2$ 的峰值，RCP8.5表示辐射强迫在2100年之前超过 $8.5\text{W}/\text{m}^2$ 。

Fig. 5 Spatial changes of suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under various climate scenarios. RCP2.6 represents radiative forcing peaks at approximately $3\text{W}/\text{m}^2$ before 2100, while RCP8.5 represents radiative forcing reaches $> 8.5\text{W}/\text{m}^2$ by 2100.

更细致的微生境模型需要未来进一步的研究。

3.3 气候变化影响分析

本研究除了从面积变化角度，更从景观特征变化角度深入分析了未来气候变化对黑麂适宜生境的潜在影响。对比黑麂适宜生境面积变化特征和景观变化特征可以发现：同一温室气体浓度情景下，

同一时期黑麂适宜生境中核心斑块景观面积的变化幅度要明显高于同期适宜生境面积的变化幅度。由于生境景观特征能够在很大程度上反映生境质量的高低(张会儒和蔡小虎, 2008; 刘云珠等, 2013), 这要求在今后的相关研究中, 除了要分析气候变化对物种适宜生境面积的影响, 更要同时分析气候变

化对物种适宜生境景观特征的影响。

4 结论与建议

本研究基于黑麂分布点位数据和物种分布模型,研究了2种温室气体浓度情景下、未来2个时期黑麂适宜生境相对于基准气候条件下适宜生境的变化特征。结果表明2种温室气体浓度情景下,未来可能发生的气候变化均会对黑麂适宜生境产生影响,但影响程度和变化趋势并不一致。在RCP2.6浓度情景下,气候变化对黑麂适宜生境产生的影响较弱,且从本世纪中叶至本世纪末,这种影响将逐渐减小;在RCP8.5浓度情景下,气候变化对黑麂适宜生境产生的影响十分明显,且这种影响随着时间推移呈逐渐增强趋势。在同一时期,RCP8.5浓度情景下气候变化对黑麂适宜生境产生的影响要明显强于RCP2.6浓度情景。

虽然不同气候情景下黑麂适宜生境的变化特征并不一致,但所有气候情景下的预测结果均表明,浙江、安徽、江西三省交界地区为黑麂的适宜生境。因此,今后必须针对性地加强这一地区黑麂适宜生境的保护与恢复工作。这一地区目前已有浙江九龙山、古田山、临安清凉峰、安徽清凉峰、江西武夷山、福建武夷山等多个国家级自然保护区,并且在这些自然保护区中都有观察到黑麂的活动,但多数保护区之间空间距离较远,保护区之间缺乏廊道连接,不利于不同保护区之间黑麂种群的基因交流。2010年发布的《中国生物多样性保护与行动战略(2011–2030)》在全国内陆陆地及水域范围内划定了32个生物多样性保护优先区。浙江、安徽、江西三省交界区域的大部分位于32个保护优先区中的“黄山——怀玉山区”以及“武夷山区”,从客观上讲这将有益于未来黑麂和本区域其他物种的长期保护。

参考文献

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223–1232.
- Aranda SC, Lobo JM (2011) How well does presence-only-based species distribution modelling predict assemblage diversity? A case study of the Tenerife flora. *Ecography*, 34, 31–38.
- Araújo MB, Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527–1539.
- Austin MP, Van Niel KP (2011) Improving species distribution

- models for climate change studies: variable selection and scale. *Journal of Biogeography*, 38, 1–8.
- Barbet-Massin M, Jiguet F, Albert CH, Thuiller W (2012) Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 327–338.
- Biomod Team (2012) BIOMOD: Tutorial. <http://www.will.chez-alice.fr/pdf/BiomodTutorial.pdf>. (accessed on 2016-05-04)
- Braunisch V, Coppes J, Arlettaz R, Suchant R, Schmid H, Bollmann K (2013) Selecting from correlated climate variables: a major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecography*, 36, 971–983.
- Brown JL, Yoder AD (2015) Shifting ranges and conservation challenges for lemurs in the face of climate change. *Ecology and Evolution*, 5, 1131–1142.
- CBD (Convention on Biological Diversity) (2014) Global Biodiversity Outlook 4. <https://www.cbd.int/gbo/gbo4/publication/gbo4-en.pdf>. (accessed on 2016-02-22)
- Chen L, Bao YX, Zhang LL, Cheng HY, Zhang JY, Zhou YQ (2010) Seasonal changes in habitat selection by black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) in Jiulong Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 1227–1237. (in Chinese with English abstract) [陈良, 鲍毅新, 张龙龙, 程宏毅, 张家银, 周元庆 (2010) 九龙山保护区黑麂栖息地选择的季节变化. *生态学报*, 30, 1227–1237.]
- Chen X, Jiang K, Bao Y, Wang H, Shi W, Zheng W, Liu J (2015) The mating system study of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) based on fecal DNA. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 137–141.
- Cheng HY, Bao YX, Chen L, Zhou XW, Hu ZY, Ge BM (2008) Genetic diversity of the black muntjac *Muntiacus crinifrons* population in the central area of Anhui and Zhejiang Province. *Acta Zoologica Sinica*, 54, 96–103. (in Chinese with English abstract) [程宏毅, 鲍毅新, 陈良, 周襄武, 胡知渊, 葛宝明 (2008) 黑麂皖-浙分布中心种群的遗传多样性. *动物学报*, 54, 96–103.]
- Cheng SL, Yuan RB, Zou SC (2013) Black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) found in Wuyishan, Jiangxi. *Acta Theriologica Sinica*, 33, 94. (in Chinese) [程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. *兽类学报*, 33, 94.]
- Cheng SL, Zou SC, Yuan RB (2012) Preliminary report of *Muntiacus crinifrons* and its habitat survey in Wuyishan National Natural Reserve, Jiangxi, China. *Jiangxi Science*, 30, 594–598. (in Chinese with English abstract) [程松林, 邹思成, 袁荣斌 (2012) 江西武夷山国家级自然保护区黑麂及其生境调查初报. *江西科学*, 30, 594–598.]
- Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37–46.
- Dawson TP, Jackson ST, House JI, Prentice IC, Mace GM (2011) Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332, 53–58.
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li

- J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JM, Peterson AT, Phillips ST, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Elith J, Leathwick JR (2009) Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2009) ArcGIS Desktop 9.3 help. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=welcome>. (accessed on 2016-04-15)
- Giovanelli JGR, de Siqueira MF, Haddad CFB, Alexandrino J (2010) Modeling a spatially restricted distribution in the Neotropics: how the size of calibration area affects the performance of five presence-only methods? *Ecological Modelling*, 221, 215–224.
- Guisan A, Thuiller W (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993–1009.
- Guo QH, Liu Y (2010) ModEco: an integrated software package for ecological niche modeling. *Ecography*, 33, 1–6.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hole DG, Huntley B, Arinaitwe J, Butchart SH, Collingham YC, Fishpool LD, Pain DJ, Willis SG (2011) Toward a management framework for networks of protected areas in the face of climate change. *Conservation Biology*, 25, 305–315.
- Hu JH, Jiang Z (2011) Climate change hastens the conservation urgency of an endangered ungulate. *PLoS ONE*, 6, e22873.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf. (accessed on 2016-02-20)
- Jiménez-Valverde A, Lobo JM (2007) Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica*, 31, 361–369.
- Lei JC (2014) Study on the Change Characteristics of Suitable Habitat for Sichuan Hill-Partridge and Identification of the Critical Conserve Region under Future Climate Change. PhD dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [雷军成 (2014) 气候变化情景下四川山鹧鸪适宜生境变化特征研究与保护关键区识别. 博士学位论文, 南京林业大学, 南京.]
- Lei JC, Xu HG, Wu J, Guan QW (2015) IPCC AR5-based analysis of variation of potential suitable habitats for evergreen broadleaf forest in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31(1), 69–76. (in Chinese with English abstract) [雷军成, 徐海根, 吴军, 关庆伟 (2015) 基于IPCC AR5的我国常绿阔叶林潜在适宜生境变化分析. 生态与农村环境学报, 31(1), 69–76.]
- Li L, Chen JK (2014) Influence of climate change on wild plants and the conservation strategies. *Biodiversity Science*, 22, 549–563. (in Chinese with English abstract) [黎磊, 陈家宽 (2014) 气候变化对野生植物的影响及保护对策. 生物多样性, 22, 549–563.]
- Liu H, Wang W, Song G, Qu Y, Li S, Fjeldsø J, Lei F (2012) Interpreting the process behind endemism in China by integrating phylogeography and ecological niche models of the *Stachyridopsis ruficeps*. *PLoS ONE*, 7, e46761.
- Liu J, Linderman M, Ouyang Z, An L, Yang J, Zhang H (2001) Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science*, 292, 98–101.
- Liu X, Guo Z, Ke ZW, Wang SP, Li YM (2011) Increasing potential risk of a global aquatic invader in Europe in contrast to other continents under future climate change. *PLoS ONE*, 6, e18429.
- Liu YZ, Shi LL, Duo HR, Peng BY, Lü C, Zhu Y, Lei GC (2013) Disturbance-driven changes to landscape patterns and responses of waterbirds at West Dongting Lake, China. *Biodiversity Science*, 21, 666–676. (in Chinese with English abstract) [刘云珠, 史林鹭, 朵海瑞, 彭波涌, 吕偲, 朱轶, 雷光春 (2013) 人为干扰下西洞庭湖湿地景观格局变化及冬季水鸟的响应. 生物多样性, 21, 666–676.]
- Luo Z, Jiang Z, Tang S (2015) Impacts of climate change on distributions and diversity of ungulates on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 25, 24–38.
- Moritz C, Agudo R (2013) The future of species under climate change: resilience or decline? *Science*, 341, 504–508.
- Olson LE, Sauder JD, Albrecht NM, Vinkey RS, Cushman SA, Schwartz MK (2014) Modeling the effects of dispersal and patch size on predicted fisher (*Pekania [Martes] pennanti*) distribution in the US Rocky Mountains. *Biological Conservation*, 169, 89–98.
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
- Pearson RG, Dawson TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361–371.
- Qiao H, Soberón J, Peterson AT (2015) No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 1126–1136.
- Qiao HJ, Hu JH, Huang JH (2013) Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models. *Scientia Sinica Vitae*, 43, 915–927. (in Chinese with English abstract) [乔慧捷, 胡军华, 黄继红 (2013) 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. 中国科学: 生命科学, 43, 915–927.]
- Thuiller W (2004) Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*, 10,

- 2020–2027.
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB (2009) BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 369–373.
- Vogt P, Riitters KH, Estreguil C, Kozak J, Wade TG, Wickham JD (2007) Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology*, 22, 171–177.
- Walther G, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin J, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395.
- Wang S (1998) China Red Data Book of Endangered Animals: Mammalia. Science Press, Beijing. (in Chinese) [汪松 (1998) 中国濒危动物红皮书: 兽类. 科学出版社, 北京.]
- Wu JG, Wang L, Yang YW, Dai SF, Liu JQ, Zhu G (2011) Nature reserve need to face the challenge of climate change. *Environmental Protection*, (4), 30–32. (in Chinese) [吴建国, 王亮, 杨永伟, 代拴发, 刘建泉, 朱高 (2011) 自然保护区还需面对气候变化挑战. 环境保护, (4), 30–32.]
- Wu WW, Xu HG, Wu J, Cao MC (2012) The impact of climate change on birds: a review. *Biodiversity Science*, 20, 108–115. (in Chinese with English abstract) [吴伟伟, 徐海根, 吴军, 曹铭昌 (2012) 气候变化对鸟类影响的研究进展. 生物多样性, 20, 108–115.]
- Xu WH, Yue XL, Gao P, Xia SJ (2013) Potential ecological habitat of *Muntiacus crinifrons* within National Nature Reserve of Mount Tianmu, Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang A & F University*, 30, 896–903. (in Chinese with English abstract) [徐文辉, 岳晓雷, 高鹏, 夏淑娟 (2013) 天目山国家级自然保护区黑麂潜在栖息地的生态适宜性. 浙江农林大学学报, 30, 896–903.]
- Zhai TQ, Li XH (2012) Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2361–2370. (in Chinese with English abstract) [翟天庆, 李欣海 (2012) 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响. 生态学报, 32, 2361–2370.]
- Zhang F, Dong M, Wu TW (2014) Evaluation of the ENSO features simulations as done by the CMIP5 models. *Acta Meteorologica Sinica*, 72, 30–48. (in Chinese with English abstract) [张芳, 董敏, 吴统文 (2014) CMIP5 模式对 ENSO 现象的模拟能力评估. 气象学报, 72, 30–48.]
- Zhang HR, Cai XH (2008) Research advances in landscape pattern and dynamics. *Journal of Southwest Forestry College*, 28, 23–28. (in Chinese with English abstract) [张会儒, 蔡小虎 (2008) 景观格局动态研究进展. 西南林学院学报, 28, 23–28.]
- Zhang YL, Hu ZJ, Qi W, Wu X, Bai WQ, Li LH, Ding MJ, Liu LS, Wang ZF, Zheng D (2015) Assessment of protection effectiveness of nature reserves on the Tibetan Plateau based on net primary production and the large-sample-comparison method. *Acta Geographica Sinica*, 70, 1027–1040. (in Chinese with English abstract) [张懿锂, 胡忠俊, 祁威, 吴雪, 摆万奇, 李兰晖, 丁明军, 刘林山, 王兆锋, 郑度 (2015) 基于NPP数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析. 地理学报, 70, 1027–1040.]
- Zheng WC, Liu J, Pan CC, Bao YX, Lin JJ (2012) Review of research on black muntjac (*Muntiacus crinifrons*), an endemic species in China. *Chinese Journal of Wildlife*, 33, 283–288. (in Chinese with English abstract) [郑伟成, 刘军, 潘成椿, 鲍毅新, 林杰君 (2012) 中国特有动物黑麂的研究. 野生动物, 33, 283–288.]
- Zhong GP, Shen WJ, Wan FH, Wang JJ (2009) Potential distribution areas of *Solanum rostratum* in China: a prediction with GARP niche model. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 162–166. (in Chinese with English abstract) [钟艮平, 沈文君, 万方浩, 王进军 (2009) 用GARP生态位模型预测刺萼龙葵在中国的潜在分布区. 生态学杂志, 28, 162–166.]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, Gao YB (2013) Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 21, 90–98. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆 (2013) 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 21, 90–98.]

(责任编辑: 李义明 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 黑麂分布点来源及处理方法

Appendix 1 Sources and processing methods for *Muntiacus crinifrons*' presence records
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016152-1.pdf>

附录2 19个生物气候因子之间的Spearman相关系数

Appendix 2 Pair-wise Spearman's correlation coefficient for the 19 bioclimatic factors
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016152-2.pdf>

附录 1 黑麂分布点来源及处理方法

Appendix 1 Sources and processing methods for *Muntiacus crinifrons*' presence records

县域名	资料来源	数据处理方法	文献来源
桐庐	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
安吉	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
余杭	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
临安	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	徐文辉等, 2013
富阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
诸暨	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
建德	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
淳安	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
东阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
金华	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
开化	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	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.
常山	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
衢县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
遂昌	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	陈良, 鲍毅新, 张龙龙, 程宏毅, 张家银, 周元庆 (2010) 九龙山保护区黑麂栖息地选择的季节变化. 生态学报, 30, 1227–1237.
武义	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
缙云	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
松阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
云和	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
龙泉	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	刘龙友, 周仁爱 (2015) 龙泉市天平山自然保护区保护与经营设想. 安徽农学通报, 21, 66–67.
庆元	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	吴方兴, 姚德炉 (2003) 迷途黑麂放归自然. 浙江林业, (11), 40.
宁海	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
临海	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
仙居	杨德盛 (1998) 黑麂跑进农民家. 大自然, (5), 24.	文献记录的详细分布地	杨德盛 (1998) 黑麂跑进农民家. 大自然, (5), 24.
景宁	陈丽燕, 商良忠, 周贤兴, 柳海林 (2015) 景宁县野生动物的管理对策. 农业与技术, 35(23), 174–176.	县域单元内选择适生区	/
广德	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
宁国	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
泾县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/

雷军成, 王莎, 王军围, 吴军. 未来气候变化对我国特有濒危动物黑麂适宜生境的潜在影响. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1390–1399.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016152>

青阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
贵池	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
石埭	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地		张应松 (2015) 生态明珠牯牛降大放异彩盼“统一”. 资源与人居环境, (12), 42–44.
太平	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
旌德	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
绩溪	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
歙县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
休宁	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地		张海军, 李健, 施燕峰, 张晓梅, 徐春宏, 单祥年 (2004) 黑麂线粒体基因组序列分析. 中国生物化学与分子生物学报, 20, 513–518.
黟县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
祁门	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
东至	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
婺源	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
玉山	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
铅山	程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 94–93.	文献记录的详细分布地		程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 93–94.
德兴	程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 94–93.	县域单元内选择适生区	/	
浮梁	程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 94–93.	县域单元内选择适生区	/	
浦城	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
建阳	张春英, 洪伟, 吴承祯, 陈平留, 林从华 (2009) 武夷山自然保护区珍稀动植物空间分布特征研究. 北华大学学报(自然科学版), 10, 258–264.	县域单元内选择适生区	/	

徐文辉, 岳晓雷, 高鹏, 夏淑娟 (2013) 天目山国家级自然保护区黑麂潜在栖息地的生态适宜性. 浙江农林大学学报, 30, 896–903.

雷军成, 王莎, 王军围, 吴军. 未来气候变化对我国特有濒危动物黑麂适宜生境的潜在影响. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1390–1399.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016152>

附录 2 19 个生物气候因子之间的 Spearman 相关系数

Appendix 2 Pair-wise Spearman's correlation coefficient for the 19 bioclimatic factors

	bio_1	bio_2	bio_3	bio_4	bio_5	bio_6	bio_7	bio_8	bio_9	bio_10	bio_11	bio_12	bio_13	bio_14	bio_15	bio_16	bio_17	bio_18	bio_19
bio_1																			
bio_2	−0.60																		
bio_3	−0.13	0.39																	
bio_4	−0.29	0.32	−0.69																
bio_5	0.83	−0.32	−0.40	0.19															
bio_6	0.92	−0.59	0.15	−0.59	0.62														
bio_7	−0.42	0.53	−0.51	0.97	0.07	−0.69													
bio_8	0.87	−0.42	−0.36	0.10	0.94	0.67	−0.03												
bio_9	0.89	−0.49	0.24	−0.62	0.60	0.97	−0.70	0.63											
bio_10	0.92	−0.51	−0.39	0.04	0.97	0.74	−0.11	0.96	0.70										
bio_11	0.91	−0.53	0.21	−0.62	0.60	0.99	−0.71	0.65	0.98	0.71									
bio_12	0.52	−0.78	−0.13	−0.49	0.15	0.55	−0.62	0.28	0.48	0.37	0.55								
bio_13	0.51	−0.75	−0.14	−0.44	0.15	0.51	−0.57	0.30	0.45	0.37	0.52	0.98							
bio_14	0.56	−0.82	−0.31	−0.33	0.29	0.53	−0.49	0.37	0.47	0.47	0.51	0.90	0.85						
bio_15	−0.57	0.54	0.17	0.27	−0.44	−0.57	0.37	−0.39	−0.56	−0.50	−0.54	−0.39	−0.25	−0.60					
bio_16	0.51	−0.75	−0.11	−0.48	0.13	0.53	−0.60	0.28	0.46	0.35	0.53	0.99	0.99	0.86	−0.30				
bio_17	0.53	−0.82	−0.26	−0.38	0.24	0.53	−0.54	0.32	0.48	0.43	0.51	0.90	0.85	0.98	−0.61	0.86			
bio_18	0.49	−0.73	−0.10	−0.47	0.11	0.51	−0.59	0.27	0.44	0.33	0.52	0.98	0.99	0.85	−0.27	1.00	0.85		
bio_19	0.51	−0.81	−0.23	−0.41	0.22	0.53	−0.56	0.30	0.48	0.40	0.50	0.88	0.83	0.97	−0.62	0.85	1.00	0.83	

bio_1 = 年均温; bio_2 = 昼夜温差月均值; bio_3 = 等温性; bio_4 = 温度季节性变化标准差; bio_5 = 最暖月最高温; bio_6 = 最冷月最低温; bio_7 = 温度年较差; bio_8 = 最湿季均温; bio_9 = 最干季均温; bio_10 = 最暖季均温; bio_11 = 最冷季均温; bio_12 = 年降水量; bio_13 = 最湿月降水量; bio_14 = 最干月降水量; bio_15 = 降水量季节性变异系数; bio_16 = 最湿季降水量; bio_17 = 最干季降水量; bio_18 = 最暖季降水量; bio_19 = 最冷季降水量

bio_1 = Mean annual temperature; bio_2 = Mean diurnal range (Mean of monthly (max temperature – min temperature)); bio_3 = Isothermality (bio_2/bio_7 × 100); bio_4 = Standard deviation of temperature seasonality; bio_5 = Max. temperature of warmest month; bio_6 = Min. temperature of coldest month; bio_7 = Temperature annual range (bio_5 – bio_6); bio_8 = Mean temperature of wettest quarter; bio_9 = Mean temperature of driest quarter; bio_10 = Mean temperature of warmest quarter; bio_11 = Mean temperature of coldest quarter; bio_12 = Annual precipitation; bio_13 = Precipitation of wettest month; bio_14 = Precipitation of driest month; bio_15 = Coefficient of variation of precipitation seasonality; bio_16 = Precipitation of wettest quarter; bio_17 = Precipitation of driest quarter; bio_18 = Precipitation of warmest quarter; bio_19 = Precipitation of coldest quarter

•研究简报•

龙须草种质资源生境特征与主要经济性状比较

刘 飞^{1,2} 邹冬生^{1*} 喻夜兰² 朱战强³ 吴少平² 朱育峰¹

1 (湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

2 (湖南农业大学东方科技学院, 长沙 410128)

3 (中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要: 龙须草(*Eulaliopsis binata*)是一种特色野生生物资源,是优质造纸原料和防止水土流失的优良草种。以往针对龙须草种质资源收集和评价研究近于空白。本文通过对中国内陆龙须草种质资源集中分布的9省20县的实地考察,收集了20个居群的龙须草样本,分析了龙须草种质资源生境的主要特征,并对龙须草种质资源主要经济性状进行比较。结果表明:收集的龙须草种质资源集中分布于22°–34° N、101°–114° E,海拔集中在100–1,000 m,年平均气温在14–22℃,年日照时数在1,112–2,624 h,年平均降水量在642–2,330 mm之间。气候因子主成分分析显示,龙须草分布受温度与降水量影响较大,其次为海拔和日照时数。不同龙须草种质资源叶长、胞壁厚度、腔径、壁径比、产量等主要经济性状呈现出极显著差异。主要经济性状ward聚类可将收集的龙须草种质资源分为3类,其中9个种质资源可优先作为优良龙须草筛选育种的参考对象。

关键词: 龙须草; 造纸材料; 生境; 经济性状; 产量

Habitat features and principal economic characteristics of *Eulaliopsis binata* germplasm resources

Fei Liu^{1,2}, Dongsheng Zou^{1*}, Yelan Yu², Zhanqiang Zhu³, Shaoping Wu², Yufeng Zhu¹

1 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128

2 Oriental Science & Technology College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128

3 Geography and Planning School of Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

Abstract: *Eulaliopsis binata*, a typical wild living resource, is an excellent grass species which is used as material for papermaking and can prevent water loss and soil erosion. Since there are few studies examining the resource collection and assessment of *E. binata*, in this paper we attempt to use field studies on concentrated areas of Chinese *E. binata* germplasm resources in 20 counties in nine provinces, collect 20 kinds of *E. binata* germplasm resources, analyse the principal living environmental characteristics of collection areas of *E. binata* germplasm resources, and compare the principal economic characteristics of *E. binata* germplasm resources. Results showed that the collections of *E. binata* were mainly located in the ranges of 22°–34° N, 101°–114° E, with an elevation of 100–1,000 m, annual average temperatures of 14–22℃, annual sunshine hour ranges of 1,112–2,624 h, and annual average rainfall amounts between 642–2,330 mm. Principal component analysis of climate factors of *E. binata* showed that the distribution of *E. binata* was more influenced by temperature and rainfall, while less so by elevation and sunshine hours. The principal economic characteristics of *E. binata* germplasm resources, such as leaf length, thickness of cell walls, diameter of the cavity, ratio of cell wall and diameter of cavity and yield, show significant differences. Using ward clustering analysis of the principal economic characteristics, the collected *E. binata* germplasm resources can be divided into 3 categories, of which nine *E. binata* germplasm resources can be used as reference species for excellent *E. binata* selection and breeding. The study provides evidence for the selection of improved varieties and utilization of *E. binata* germplasm resources.

Key words: *Eulaliopsis binata*; paper making material; habitat; economic characters; yield

收稿日期: 2016-09-02; 接受日期: 2016-11-28

基金项目: 国家“863”计划项目(2011AA100209)和国家自然科学基金(41401166)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zoudongsheng2@sina.com

龙须草(*Eulaliopsis binata*)是禾本科拟金茅属的多年生宿根性草本植物。它不仅是一种优质造纸原料,而且是一种优良的水土保持先锋草种,是山区脱贫致富的一项短、平、快的绿色产业资源。我国有着丰富的龙须草种质资源,早在20世纪50年代,我国不少地区就将其作为优质造纸原料开发利用,并且随着需求量的增加进行了大规模的人工种植,尤其是近年来在我国南方丘陵地区龙须草广泛用于防治荒山坡地水土流失。关于龙须草的研究,国内外已有不少报道,但主要集中在其生育特性(邹冬生等, 1999; 邹冬生和喻夜兰, 2011; 邹典等, 2012; 朱育锋, 2013^①; 周仁杰等, 2014)、生态效益(黄宇等, 2003; 马定渭等, 2008; Zhang et al, 2010; 刘爱中等, 2011)和人工栽培技术(Dadhwai, 1998; 邹冬生等, 2000; Sur, 2001; 喻夜兰, 2003^②)等方面。目前有关龙须草种质资源方面的研究报道不多,种质资源收集和评价研究近于空白。加强龙须草种质资源材料的收集和评价,开发出适应性更强、产量更高、纤维品质更优异的品种或种质资源,对于我国龙须草的生产栽

培、育种具有重要意义。我们在前人研究的基础上,从我国龙须草种质资源主要分布区域收集了20个居群的龙须草样本,对其主要经济性状进行比较研究,结合实地考察分析了其生境特征,以期龙须草进一步开发和良种选育研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 生境调查

据有关记载,中国龙须草在湖南南部、西南部,湖北北部、西北部,贵州南部、东南及西南部,云南大部分地区,广西西部、西南及西北部,广东北部地区有大量分布。在上述省自治区其他地区和川、赣、闽、台、甘、青、宁等省(自治区)局部地区也有少量分布(邹冬生和喻夜兰, 2011; 朱育锋, 2013)。根据多年的研究和掌握的信息,选择中国龙须草种质资源集中分布的广东、广西、云南、贵州、重庆、湖南、湖北、河南、陕西9省(市)20县进行实地考察,收集到20份龙须草种质资源植株样本(每份样本不少于15莖),并从群落类型、气候类型、土

表1 中国龙须草种质资源收集区域
Table 1 Collecting area of germplasm resources for *Eulaliopsis binata* in China

收集区域 Collecting area	采集地(乡、镇) Site (Township)	采集地地理坐标 Geographical coordinates of resource land
云南元谋 Yuanmou, Yunnan	姜驿乡 Jiangyi	26°04'28" N, 101°55'01" E
云南金平 Jinping, Yunnan	金河镇 Jinhe	22°47'28" N, 103°14'13" E
贵州麻江 Majiang, Guizhou	下司镇 Xiasi	26°31'23" N, 107°48'42" E
贵州黄平 Huangping, Guizhou	新洲镇 Xinzhou	26°54'09" N, 107°54'42" E
贵州安龙 Anlong, Guizhou	万峰湖镇 Wanfenghu	24°56'29" N, 105°05'55" E
贵州兴义 Xingyi, Guizhou	下五屯镇 Xiawutun	25°04'18" N, 104°53'57" E
广西河池 Hechi, Guangxi	河池镇 Hechi	24°42'04" N, 107°51'08" E
广西田东 Tiandong, Guangxi	那拔镇 Naba	23°51'26" N, 107°09'13" E
广西柳城 Liucheng, Guangxi	龙头乡 Longtou	24°45'43" N, 109°11'11" E
广西大化 Dahua, Guangxi	都阳镇 Duyang	23°59'03" N, 107°39'46" E
广东连州 Lianzhou, Guangdong	大路边镇 Dalubian	25°02'32" N, 112°38'36" E
湖南衡阳 Hengyang, Hunan	栏垌乡 Lanlong	27°03'18" N, 112°20'21" E
湖南慈利 Cili, Hunan	零阳镇 Lingyang	29°25'36" N, 111°08'02" E
重庆巫山 Wushan, Chongqing	龙井乡 Longjing	31°05'47" N, 109°54'04" E
湖北丹江 Danjiang, Hubei	龙山镇 Longshan	32°35'16" N, 111°15'59" E
湖北郧县 Yunxian, Hubei	大柳乡 Daliu	33°01'08" N, 110°45'04" E
湖北郧西 Yunxi, Hubei	土门镇 Tumen	33°03'39" N, 110°21'05" E
河南淅川 Xichuan, Henan	毛堂乡 Maotang	33°13'25" N, 111°23'17" E
河南西峡 Xixia, Henan	军马河乡 Junmahe	33°31'29" N, 111°29'54" E
陕西洋县 Yangxian, Shaanxi	磨子桥镇 Moziqiao	33°11'33" N, 107°31'43" E

① 朱育锋 (2013) 不同种质资源龙须草叶片光合特性及解剖结构比较研究. 硕士学位论文, 湖南农业大学, 长沙.
② 喻夜兰 (2003) 栽培生态条件对龙须草生长性能及产量形成的影响. 硕士学位论文, 湖南农业大学, 长沙.

表2 龙须草种质资源主要生境特征
Table 2 Main habitat characteristics of *Eulaliopsis binata* germplasm resources

种源 Origin	群落类型 Community type	气候类型 Climate type	土壤 Soil	经纬度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	年均降水量 Mean annual precipitation (mm)	年平均温度 Mean annual temperature (°C)	日照时数 Sunshine hours (h)
云南金平 Jinping, Yunnan	乔灌木 Arbor-bush-grass	亚热带季风气候 Dry heat south subtropical monsoon	山坡地石灰土 Hillside land limestone soil	101°35'–102°06' E	25°23'–26°06' N	700–800	642.2	21.7	2,624
贵州麻江 Majiang, Guizhou	乔灌木 Arbor-bush-grass	热带季风气候 Tropical monsoon	山坡地紫色土 Hillside land purple soil	102°31'–103°38' E	22°26'–23°04' N	300–400	2,330	18	2,397
贵州黄平 Huangping, Guizhou	草丛 Grass	亚热带季风性湿润气候 Humid subtropical monsoon	丘陵地红壤 Hilly land red soil	107°18'–107°53' E	26°17'–26°37' N	600–700	1,200–1,500	14–16	1,200
贵州安龙 Anlong, Guizhou	草丛 Grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	丘陵地红壤 Hilly land red soil	107°38'–108°12' E	26°17'–27°14' N	600–700	1,150	14	1,104.7
贵州兴义 Xingyi, Guizhou	灌木 Shrub and grass	亚热带季风性湿润气候 Humid subtropical monsoon	喀斯特地貌石灰土 Karst landform limestone soil	104°59'–105°41' E	24°55'–25°33' N	900–1,000	1,356.1	15.6	1,504.7
广西河池 Hechi, Guangxi	灌木 Shrub and grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	喀斯特地貌石灰土 Karst landform limestone soil	104°51'–104°55' E	24°38'–25°23' N	800–900	1,516.7	16.8	1,616.2
广西田东 Tiandong, Guangxi	乔灌木 Arbor-bush-grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	喀斯特地貌石灰土 Karst landform limestone soil	106°34'–109°09' E	23°41'–25°37' N	120–180	1,400	19.2	1,523.5
广西柳州 Liucheng, Guangxi	乔灌木 Arbor-bush-grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	河谷土山冲积土 Mountain valley alluvial soil	106°53'–107°26' E	23°16'–24°01' N	100–180	1,172.3	21.9	1,945.7
广西大化 Dahua, Guangxi	灌木 Shrub and grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	岩溶低山丘陵石灰土 Karst low mountain and hill limestone soil	108°50'–109°36' E	24°26'–24°50' N	130–170	1,334.3	20.2	1,680.8
广东连州 Lianzhou, Guangdong	乔灌木 Arbor-bush-grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	低山丘陵石灰土 Low mountain and hill limestone soil	107°09'–108°02' E	23°33'–24°22' N	201–230	1,461	19.9	1,945.7
湖南衡阳 Hengyang, Hunan	灌木 Shrub and grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	岩溶低山丘陵石灰土 Karst low mountain and hill limestone soil	112°07'–112°47' E	24°37'–25°12' N	600	1,334.3	20.2	1,680.8
湖南慈利 Cili, Hunan	草丛 Grass	亚热带季风气候 Subtropical monsoon	丘陵紫色土 Hilly land purple soil	110°32'–113°16' E	26°07'–27°27' N	320	1,452	17.9	1,730.5
重庆巫山 Wushan, Chongqing	草丛 Grass	亚热带季风性湿润气候 Humid mid subtropical monsoon	低山坡地石灰土 Low mountain slope land limestone soil	110°27'–111°20' E	29°04'–29°41' N	580	1,390	16.8	1,563.3
湖北丹江 Danjiang, Hubei	灌木 Shrub and grass	亚热带季风性湿润气候 Humid mid subtropical monsoon	高山坡地石灰土 High mountain slope land limestone soil	109°11'–110°11' E	30°45'–32°28' N	700–800	1,041	18.4	1,112
	灌木 Shrub and grass	亚热带季风性湿润气候 Humid mid subtropical monsoon	低山坡地石灰土 Low mountain and hill yellow cinnamon soil	110°47'–111°35' E	32°14'–32°58' N	320	834	15.9	1,950

湖北郧县 Yunxian, Hubei	灌木 Shrub and grass	北亚热带大陆性季风气候 North subtropical continental monsoon	低山丘陵黄泥土 Low mountain and hill yellow soil	110°07'–111°16' E	32°25'–33°16' N	350	816	15.9	1,984
湖北郧西 Yunxi, Hubei	灌木 Shrub and grass	北亚热带大陆性季风气候 North subtropical continental monsoon	低山坡地石灰土 Low mountain slope land limestone soil	109°25'–110°40' E	32°47'–33°16' N	580	769	15.4	1,874
河南淅川 Xichuan, Henan	禾灌木 Arbor-bush-grass	北亚热带向暖温带过渡的季风性气候 Monsoon climate of north sub-tropical transition to warm temperate	低山丘陵黄棕壤土 Low mountain and hill yellow brown soil	110°58'–111°53' E	32°55'–33°23' N	567	817.3	15.7	1,994.4
河南西峡 Xixia, Henan	灌木 Shrub and grass	暖温带大陆性季风气候 Warm temperate continental monsoon	低山丘陵棕壤土 Low mountain and hill brown soil	110°01'–111°44' E	33°05'–33°48' N	567	650	13.9	2,354.3
陕西洋县 Yangxian, Shaanxi	草从 Grass	北亚热带大陆性季风气候 North subtropical continental monsoon	低山丘陵黄棕壤土 Low mountain and hill yellow brown soil	107°11'–108°33' E	33°02'–33°43' N	675	839.7	14.5	1,752.2

壤、经纬度、海拔、年降水量、年平均温度、日照时数等方面,分析其主要生境特征。

1.2 主要经济性状

1.2.1 大田栽培实验

实验地位于湖南省长沙市芙蓉区湖南农业大学耘园基地,属中亚热带季风性湿润气候。多年平均气温为16.8–17.2℃,多年平均降雨量1,400 mm,土壤为第四纪红色粘土母质发育成的红壤,土层厚度35 cm左右。将收集到的20份龙须草种质资源活体植株样本,采取分茺繁殖方式,将20份种质资源于同一大田栽培。实验于2010–2012年进行,初次定植时间为2010年3月下旬,每个小区面积18 m²,单行定植,行株距为33.3 cm × 66.6 cm,3次重复,共60个小区,随机区组排列。田间接邹冬生和喻夜兰(2011)开发的龙须草速生丰产栽培技术规程统一管理。

1.2.2 指标测定

2012年11月下旬,在田间测定不同种质资源龙须草的成熟新鲜叶片的倒三叶的叶长、叶宽(测定20株,取平均值,叶宽统一测定叶中部)(邹冬生和喻夜兰,2011;周仁杰等,2014)。选择不同种质资源的成熟新鲜叶片的倒三叶,用刷子将叶片上的杂质去除,取2 mm × 2 mm左右的中部叶脉(各取样部位保持一致),严格按照石蜡切片法(王静等,2011)程序制成样品。将样品在SEM-6380LV型扫描电子显微镜下观察照相并用显微镜测微尺测定纤维细胞胞壁厚度(T)、腔径(W)并计算壁腔比(2T/W)。每项指标重复测定20次,取平均值(邹冬生和喻夜兰,2011;周仁杰等,2014)。产量测定于2012年12月下旬进行,由于天气好,加上植株叶片已脱水枯黄,采取现场按重复小区分别收割(留茺15 cm刈割),即时称取鲜重。

1.3 数据分析

对调查区气候因子进行主成分分析,探讨龙须草种质资源分布的影响因素。主成分分析是利用少数几个互不相关的综合变量来尽可能地反映原来数据所含有的绝大部分信息的多元统计方法(杨志香等,2014;李蒙等,2014)。采用SPSS软件,选取年平均温度、年均降水量、海拔、纬度、经度、日照时数6个气候因子进行主成分分析。种质资源主要经济性状差异采用LSD多重比较法,采用Ward法进行聚类。

2 结果

2.1 龙须草种质资源主要生境特征

龙须草种质资源收集实地考察区域见表1,各地的主要生境特征见表2。从表2可知,龙须草群落主要以草丛、灌草、乔灌草3种形式存在,主要生长在地、丘陵地带。20份龙须草种质资源分布于22°–34° N、101°–114° E区域,经度、纬度相差幅度均在12°左右,分布区域相对比较集中。从海拔来看,龙须草种质资源收集区海拔高度在100–1,000 m,最低为广西田东,最高为贵州安龙,平均海拔460 m,显示龙须草比较适宜中低海拔区域。从温度来看,年平均气温在14–22℃,其中最低温度出现在贵州麻江、贵州黄平、河南西峡、陕西洋县等区域,年平均气温约14℃,贵州安龙、湖北丹江、湖北郧县、湖北郧西、河南淅川等地年平均温度也相对较低,约16℃,分布区域年平均温度最高的为云南元谋和广西田东,近22℃。龙须草对温度的适应范围大,在日平均气温大于22℃甚至达到50℃时也能生长,只是生长较慢或者受限,一般情况下只要气温不低于10℃的春、夏、秋季节都能生长(邹冬生和喻夜兰, 2011)。从年日照时数来看,收集区年日照时数介于1,104.7–2,624 h之间,其中河南西峡、云南金平、云南元谋的年日照时数分别达到2,354.3 h、2,397 h、2,624 h,其余地区都在2,000 h以下,日照时数最低值出现在贵州黄平和重庆巫山,约1,100 h。由此可见,龙须草对日照条件要求不高,国内大部分地区的日照条件都能满足其生长的需要。从降水量来看,收集区年平均降水量变化范围较大,在642–2,330 mm之间,平均降水量为1,175.3 mm,年均降水量最少的是云南元谋(642.2 mm)和河南西峡(650 mm),降水量最丰富的是云南金平(2,330 mm左右),说明龙须草生长对降水量有一定要求,在品种选育时需考虑。

2.2 龙须草种质资源收集区气候因子主成分分析

气候因子主成分分析结果见表3。当 $m = 3$ 时,主成分的累积贡献率达到了84.63%,说明少数几个因子能够代表原始因子所代表的大部分信息,因此主成分分析方法运用于龙须草分布区生境数据相关性分析是可行的(杨志香等, 2014; 李蒙等, 2014)。从分析结果来看(表3),第一主成分的贡献率是41.84%,主要指数是纬度(0.94)、年平均温度

(–0.76)、年降水量(–0.74),显示在纬度梯度的影响下,温度和降水量对龙须草的分布影响较大。第二主成分的贡献率是23.04%,主要指标是海拔(–0.72)和日照时数(0.64),显示了海拔和日照时数对龙须草分布也有重要影响。第三主成分的贡献率是19.76%,主要指标是日照时数(0.67)和经度(–0.66),说明配合经度的变化,日照时数对龙须草生长分布有着重要影响。其他主成分的贡献率仅占总贡献率的15.37%,说明对最终结果没有太大影响。

2.3 龙须草种质资源主要经济性状比较

龙须草作为造纸原料的部分主要是叶片,因此就其经济性状而言主要体现在叶片的性状上。将龙须草种质资源主要经济性状比较结果列于表4。叶长是影响龙须草产量的重要因素(邹冬生和喻夜兰, 2011),不同种质资源差异极显著($P < 0.01$),变幅为75.00–107.83 mm,平均89.51 mm,湖北丹江种质最长,云南元谋种质最短。而从叶宽来看,不同龙须草种质资源间虽存在差异,但不显著,叶宽变幅为0.23–0.47 mm,平均宽度0.37 mm。

从表4中还可以看出,龙须草种质资源平均产量7.92 t/ha,其中单位面积产量最高的为广西河池,达到10.94 t/ha,最低的为重庆巫山,仅为4.69 t/ha。方差分析显示,龙须草种质资源之间的产量达到极显著差异($P < 0.01$)。多重比较(LSD)显示,广西河池、广西田东、河南淅川、云南金平、陕西洋县、贵州安龙、湖北郧县、广西大化、湖北丹江、贵州麻江、广西柳城等种质资源产量之间差异不显著,产量相对较高。按单位面积产量高低排序:广西河池>广西田东>河南淅川>云南金平>陕西洋县>贵州安龙>湖北郧县>广西大化>湖北丹江>贵州麻江>广西柳城>河南西峡>湖南慈利>湖南衡阳>贵州黄平>湖北郧西>贵州兴义>广东连州>云南元谋>重庆巫山。

龙须草叶片纤维细胞特征反映龙须草纤维自身的理化特征,能够为优化和选育优质龙须草提供依据。从表4中看出,龙须草种质资源的纤维细胞胞壁厚度变幅为1.80–4.80 μm ,平均3.14 μm ,湖南慈利种质最厚,云南元谋种质最薄;腔径变幅为0.80–12.10 μm ,平均3.10 μm ,广西柳城种质最长,贵州兴义种质最短;壁腔比变幅为0.30–5.64,平均2.95,贵州黄平种质最大,广西柳城种质最小。方差分析显示,龙须草种质资源之间的叶片纤维细胞胞壁厚度、腔径、壁腔比均存在极显著差异($P < 0.01$)。

表3 龙须草气候因子主成分分析
Table 3 Principal component analysis of climatic factor to *Eulaliopsis binata*

主成分 Principal component	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4	Axis5	Axis6
年平均温度 Mean annual temperature	17.35	2.50	-0.76	0.39	0.02	-0.49	0.13	0.12
年均降水量 Mean annual precipitation	1,182.80	400.50	-0.74	-0.35	-0.32	0.43	0.19	0.12
海拔 Altitude	508.25	242.91	0.39	-0.72	0.45	-0.20	0.29	0.00
纬度 Latitude	28.08	4.02	0.94	0.22	0.10	0.10	-0.02	0.23
经度 Longitude	108.40	2.90	0.58	0.36	-0.66	-0.04	0.30	-0.07
日照时数 Sunshine hours	1,776.89	402.61	-0.16	0.64	0.67	0.30	0.19	-0.05
特征根 Characteristic root			2.51	1.38	1.19	0.57	0.27	0.09
贡献率 Contribution rate			41.84	23.04	19.76	9.43	4.43	1.51
累积贡献率 Cumulative contribution rate			41.84	64.88	84.63	94.06	98.49	100.00

表4 龙须草种质资源主要经济性状差异
Table 4 Comparison of the main economic characters among the germplasm resources of *Eulaliopsis binata*

种源 Origin	叶片外形 Leaf shape		叶片纤维细胞解剖特征 Anatomical characteristics of leaf fibers			产量 Yield (t/ha)
	叶长 Leaf length (mm)	叶宽 Leaf width (mm)	胞壁厚度 Cell wall thickness (μm)	腔径 Cavity diameter (μm)	壁腔比 The ratio of wall to cavity	
云南元谋 Yuanmou, Yunnan	75.00±14.04bAB	0.23±0.04aA	1.80±0.58dC	1.80±0.41aA	2.89±1.26deD	5.34±1.85bcB
云南金平 Jinping, Yunnan	81.17±18.43bB	0.36±0.07aA	3.05±0.76cdC	1.40±0.53bB	4.36±0.41bcBC	9.53±0.32abAB
贵州麻江 Majiang, Guizhou	88.50±25.21bB	0.37±0.07aA	2.74±0.31dC	3.57±0.31bBC	1.55±0.28efE	7.98±2.86abAB
贵州黄平 Huangping, Guizhou	100.83±3.19abAB	0.37±0.10aA	3.41±0.53cdBC	1.21±0.66bBC	5.64±0.19aA	6.91±2.29bcAB
贵州安龙 Anlong, Guizhou	76.17±8.11bB	0.31±0.06aA	3.28±0.39cdBC	1.84±0.50cBC	3.76±0.99cCD	8.81±0.76abAB
贵州兴义 Xingyi, Guizhou	88.17±15.25bB	0.36±0.07aA	3.20±0.47cdC	0.80±0.21cdBC	4.00±0.88cC	6.37±1.52bcB
广西河池 Hechi, Guangxi	100.50±8.76abAB	0.42±0.07aA	2.04±0.64dC	1.30±0.42cdBC	3.14±0.22dD	10.94±3.47aA
广西田东 Tiandong, Guangxi	84.33±12.49bB	0.40±0.03aA	4.24±0.67bAB	4.90±1.89cdC	1.73±0.37efE	10.50±1.89abAB
广西柳城 Liucheng, Guangxi	95.50±6.29bB	0.33±0.06aA	1.80±0.44dC	12.10±3.12cdC	0.30±0.04fE	7.94±3.46abAB
广西大化 Dahua, Guangxi	78.50±13.93bB	0.47±0.04aA	2.38±0.62dC	4.48±1.72cdC	1.29±0.72efE	8.31±1.95abAB
广东连州 Lianzhou, Guangdong	94.83±14.91bB	0.44±0.08aA	4.10±1.16bcB	2.10±0.77cdC	3.90±0.53cCD	6.27±1.61bcB
湖南衡阳 Hengyang, Hunan	89.33±13.71bB	0.37±0.07aA	3.57±1.05cBC	2.30±0.59cdC	3.10±0.63dD	7.53±1.91bcAB
湖南慈利 Cili, Hunan	92.50±6.06bB	0.40±0.01aA	4.80±0.20aA	2.40±0.83cdC	4.00±0.44cC	7.56±2.01bcAB
重庆巫山 Wushan, Chongqing	85.83±9.52bB	0.38±0.56aA	1.95±1.06dC	2.15±1.92cdC	2.29±1.06eDE	4.69±0.20cB
湖北丹江 Danjiang, Hubei	107.83±18.07aA	0.36±0.04aA	3.83±0.94bcBC	1.60±0.43cdC	4.79±0.78bB	8.24±1.71abAB
湖北郧县 Yunxian, Hubei	83.67±14.14bB	0.32±0.04aA	3.90±0.87bcBC	3.50±1.21dC	2.23±0.26eDE	8.70±2.44abAB
湖北郧西 Yunxi, Hubei	107.00±18.16aAB	0.39±0.07aA	3.83±1.51bcBC	2.87±0.68dC	2.96±1.88deD	6.63±2.15bcAB
河南淅川 Xichuan, Henan	83.67±14.14bB	0.32±0.04aA	2.29±0.55dC	5.95±1.51dC	1.35±0.82efE	9.69±1.79abAB
河南西峡 Xixia, Henan	90.67±8.85bB	0.35±0.05aA	3.76±0.65bcBC	2.10±0.57dC	3.63±0.36cdCD	7.62±1.74bAB
陕西洋县 Yangxian, Shaanxi	86.17±17.02bB	0.36±0.05aA	2.89±0.75cdC	3.62±1.62dC	2.12±1.57eDE	8.89±1.07abAB
平均 Average	89.51	0.37	3.14	3.10	2.95	7.92

数据为平均值±标准差。同列数值后小写字母表示0.05显著性水平, 大写字母表示0.01显著性水平。
Data is the mean plus or minus standard deviation. Different lower case letters within the same column show significant difference among different germplasm resources at 0.05 level. Different capital letters within the same column show significant difference among different germplasm resources at 0.01 level.

经多重比较(LSD)显示, 以上指标在不同龙须草种质资源间存在不同程度的差异。

2.4 龙须草种质资源主要经济性状聚类分析

将不同种质资源主要经济性状进行聚类分析, 如图1所示以阈值为15, 将20种龙须草分为3类。第1类: 陕西洋县、贵州麻江、湖北郧县、河南淅川、

广西田东、广西大化、云南金平、贵州安龙、广西河池9个种源, 叶长中等、胞壁厚度中等、腔径大、壁腔比偏小、产量高, 此类龙须草种质资源产量高、纤维品质较优, 可优先作为优良龙须草品种选育的对象。第2类: 河南西峡、湖南衡阳、贵州兴义、湖南慈利、广东连州、湖北郧西、湖北丹江、贵州黄

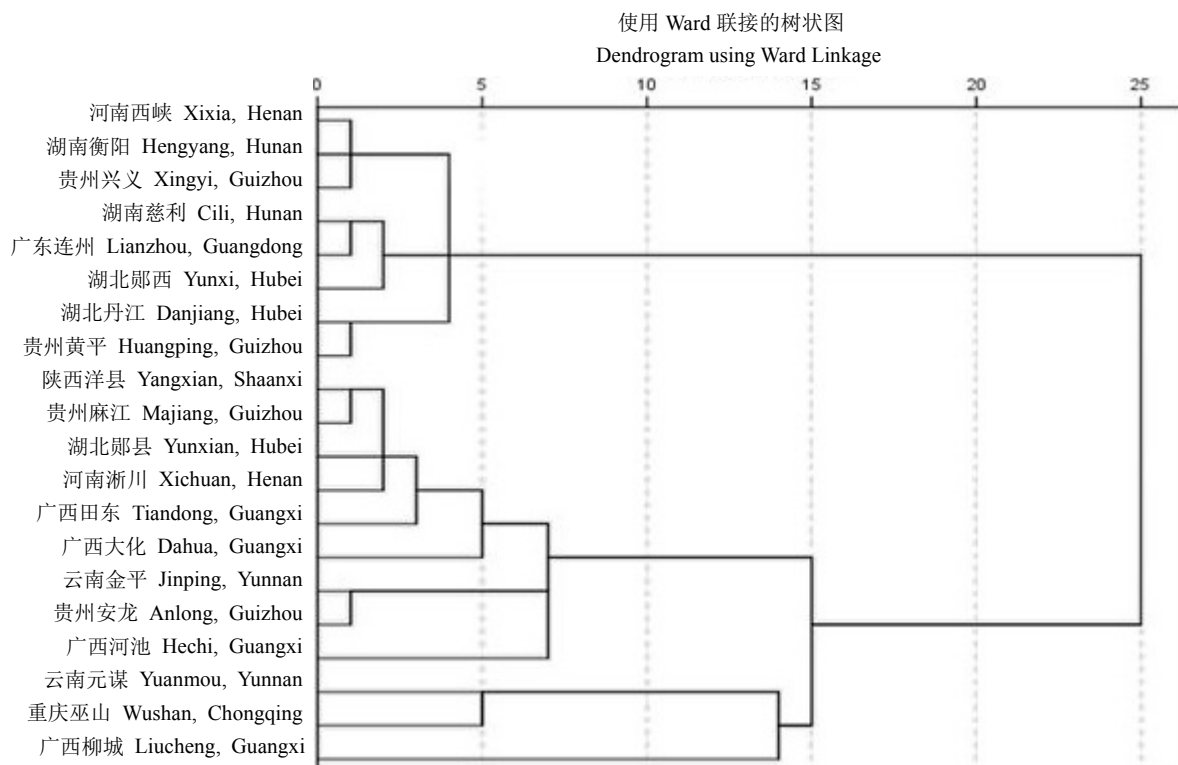


图1 龙须草种质资源主要经济性状聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of the main economic characters for the germplasm resources of *Eulaliopsis binata*

平8个种源, 叶片长、胞壁厚度较厚、腔径小、壁腔比大、产量中等。第3类: 云南元谋、重庆巫山、广西柳城3个种源, 叶片较短、叶片窄、胞壁很薄、壁腔比小、产量低。

3 结论

实地调查显示龙须草种质资源集中分布区主要生境特征呈现明显的差异。气候因子主成分分析表明, 影响龙须草分布的重要环境因子为年平均温度、平均降水量、海拔和日照时数, 其中受温度与降水量影响最大, 中国境内温度和降水量与纬度密切相关, 反映出龙须草呈现一定的纬度分布, 是龙须草人工栽培和引种中应重点考虑的因子。20份龙须草种质资源的叶长、胞壁厚度、腔径、壁径比、产量等主要经济性状呈现出极显著差异, 对其主要经济性状进行ward聚类分析可分为3类, 其中陕西洋县、贵州麻江、湖北郧县、河南淅川、广西田东、广西大化、云南金平、贵州安龙、广西河池9个种源, 产量高、纤维品质较优, 可优先作为优良龙须

草新品种培育的利用对象。

参考文献

- Dadhwal KS (1998) Performance of some plant species in limestone mine soil. *Indian Forester*, 124, 261–263.
- Huang Y, Zou DS, Wang H (2003) Studies on ecological benefits of *Eulaliopsis binata* planted in purple shale region. *Acta Prataculturae Sinica*, 12(4), 63–68. (in Chinese with English abstract) [黄宇, 邹冬生, 王华 (2003) 紫色页岩地区种植龙须草生态效益研究. *草业学报*, 12(4), 63–68.]
- Li M, Yi XG, Wang HC, Shang T, Gu Y, Wang XR (2014) Studies on the relationship between *Cerasus serrulata* distribution region and the environmental factors. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 38(9), 74–80. (in Chinese with English abstract) [李蒙, 伊贤贵, 王华辰, 商韬, 顾宇, 王贤荣 (2014) 山樱花地理分布与水热环境因子的关系. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 38(9), 74–80.]
- Liu AZ, Zou DS, Liu F (2011) Cadmium tolerance and enrichment characteristics of *Eulaliopsis binata*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 473–480. (in Chinese with English abstract) [刘爱中, 邹冬生, 刘飞 (2011) 龙须草对镉的耐受性和富集特征. *应用生态学报*, 22, 473–480.]
- Ma DW, Zou DS, Wu WG, Duan WJ (2008) Effects of *Eulali-*

- opsis binata* on water retaining of purple soil in Hunan. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 34, 150–153. (in Chinese with English abstract) [马定渭, 邹冬生, 吴万刚, 段文君 (2008) 龙须草对湖南紫色土荒山坡地蓄水性能的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 34, 150–153.]
- Sur PR (2001) Taxonomic review of the genus *Eulaliopsis* Honda (Poaceae) in India. Journal of Economic & Taxonomic Botany, 25, 374–378.
- Wang J, Zuo X, Huang ZW (2011) Improvement and application of plant paraffin sectioning. Anhui Agricultural Science Bulletin, 17(11), 36–39. (in Chinese with English abstract) [王静, 左幸, 黄正文 (2011) 常规植物石蜡制片技术的改进及应用. 安徽农学通报, 17(11), 36–39.]
- Yang ZX, Zhou GS, Yin XJ, Jia BR (2014) Geographic distribution of *Larix gmelinii* natural forest in China and its climatic suitability. Chinese Journal of Ecology, 33, 1429–1435. (in Chinese with English abstract) [杨志香, 周广胜, 殷晓洁, 贾丙瑞 (2014) 中国兴安落叶松天然林地分布及其气候适宜性. 生态学杂志, 33, 1429–1435.]
- Yao JL, Hong L, Zhang YD, Hu CG, Luo BS (2004) Genetic diversity and classification of ecotypes of *Eulaliopsis binata* via morphological traits and AFLP markers. Scientia Agricultura Sinica, 37, 1699–1704. (in Chinese with English abstract) [姚家玲, 洪柳, 张友德, 胡春根, 骆炳山 (2004) 龙须草生态型的划分及其遗传差异的AFLP分析. 中国农业科学, 37, 1699–1704.]
- Zhang G, Guo G, Hu X (2010) Deep RNA sequencing at single base-pair resolution reveals high complexity of the rice transcriptome. Genome Research, 20, 646–654.
- Zhou RJ, Yu H, Zou DX, Luo YW, Qiao NQ, Yu YL (2014) Comparative study of leaf fiber cells of seven different ecological *Eulaliopsis binata*. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 42, 2841–2842, 2867. (in Chinese with English abstract) [周仁杰, 于辉, 邹登相, 罗毅文, 乔匿戡, 喻夜兰 (2014) 7个不同生态型龙须草纤维细胞的比较研究. 安徽农业科学, 42, 2841–2842, 2867.]
- Zou D, Zhu YF, Yu YL, Jian Y, Dai J (2012) Comparison of photosynthesis abilities and photosynthetic pigment of leaf among populations of *Eulaliopsis binata*. Hunan Agricultural Sciences, (17), 35–39. (in Chinese with English abstract) [邹典, 朱育锋, 喻夜兰, 简燕, 戴菁 (2012) 龙须草居群间叶片光合性能与光合色素比较研究. 湖南农业科学, (17), 35–39.]
- Zou DS, Rong XM, Hu SP, Zhou Q, Hou CS (2000) Cultivation method for seedling production of *Eulaliopsis binata*. Acta Prataculturae Sinica, 9(3), 43–47. (in Chinese with English abstract) [邹冬生, 荣湘民, 胡颂平, 周青, 侯昌生 (2000) 龙须草壮苗培育技术研究. 草业学报, 9(3), 43–47.]
- Zou DS, Yang SY, Jiang JA, Hu SP, Rong XM, Zhou Q (1999) Comparisons of productive properties among various varieties of *Eulaliopsis binata*. Journal of Hunan Agricultural University, 25, 366–369. (in Chinese with English abstract) [邹冬生, 阳树英, 江巨鳌, 胡颂平, 荣湘民, 周青 (1999) 龙须草不同品种间生产性能比较研究. 湖南农业大学学报, 25, 366–369.]
- Zou DS, Yu YL (2011) Research on Growing Ecology of *Eulaliopsis binata* and Its Application. Hunan Science & Technology Press, Changsha. (in Chinese) [邹冬生, 喻夜兰 (2011) 龙须草生育生态学研究与应用. 湖南科学技术出版社, 长沙.]

(责任编辑: 杨庆文 责任编辑: 时意专)

•研究简报•

四川省猛禽多样性及迁徙路线

梁敏仪 冉江洪* 梁思琪 吴永杰 余翔

(四川大学生命科学学院教育部生物资源与生态环境重点实验室, 成都 610064)

摘要: 基于文献、标本馆数据和野外调查记录, 共收集四川省猛禽分布记录数据2,410条, 依此分析了四川省猛禽的分布与迁徙路线。四川省猛禽记录有56种(76种及亚种), 其中隼形目3科41种, 占全国隼形目鸟类总数的64.06%; 鸢形目2科15种, 占全国鸢形目鸟类总数的48.39%; 国家一级重点保护猛禽5种。四川省猛禽总体呈现西部多东部少的格局, 记录最多的平武县有32种; 在垂直分布上以1,000–3,500 m海拔段物种丰富度最高。在四川省境内具有迁徙习性的猛禽有19种, 其中金堂县迁徙猛禽最多。主要迁移路线有3条: 1条属于中亚–印度迁徙路线, 经过四川省西北角的石渠和德格县; 另外2条属东亚–澳大利亚迁徙路线, 其中1条沿四川省盆地西缘的岷山–邛崃山–凉山一线向南到我国云南、缅甸; 另外1条沿四川北部岷山至金堂和南充一线向东南至重庆、贵州。本研究为保护四川猛禽资源和了解猛禽迁徙路线提供了参考。

关键词: 四川; 猛禽; 分布格局; 迁徙路线; 生物多样性; 鸟类

Diversity and migration routes of raptors in Sichuan Province

Minyi Liang, Jianghong Ran*, Siqi Liang, Yongjie Wu, Xiang Yu

Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064

Abstract: Based on published literatures, museum records, and field investigation records, we collected 2,410 records of raptor distribution data, to study the diversity patterns and migration routes of raptors in Sichuan Province. There were 56 species of raptors (76 species and subspecies) recorded in Sichuan. Forty-one species are from 3 families of Falconiformes, accounting for 64.06% of nationwide Falconiformes species, and fifteen species are from 2 families of Strigiformes, accounting for 48.39% of nationwide Strigiformes species. Five key species of raptors are first-class national protected animals. Raptors have a heterogeneous horizontal distribution pattern in Sichuan, as generally the raptors are richer in the western areas than the eastern areas. The county with the greatest species richness (up to 32) was Pingwu County. Species richness peaked at 1,000–3,500 m on an elevational gradient. Nineteen species of raptors have migratory habits in Sichuan while Jintang County has the greatest number of migration raptors. There are three main migration flyways of raptors in Sichuan. The first one belongs to the Central Asia Migration Flyway passing through the Shiqu and Dege County in the north-west region of Sichuan Province. The second flyway passes through the mountains on western side of the Sichuan Basin from Minshan, Qionglai and Liangshan mountains to Yunnan Province even to Burma. The third flyway passes from the Minshan Mountains to Jintang County and Nanchong Plain and finally reaches Chongqing and Guizhou Province. The latter two flyways belong to the East Asia-Australian Migration Flyway. This study provides a valuable reference for studying and protecting raptors as well as improves our understanding regarding the migration routes of raptors in Sichuan.

Key words: Sichuan; raptors; distribution pattern; migration flyway; biodiversity; birds

猛禽是隼形目和鸢形目鸟类的统称, 绝大多数在生态系统中处于食物链顶端, 对维持生态系统平

衡起着不可或缺的作用, 作为鸟类中最重要的生态类群之一, 全部被列为国家重点保护野生动物。目

收稿日期: 2016-08-30; 接受日期: 2016-12-03

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: rjhong-01@163.com

前我国猛禽正面临分布区面积缩小、栖息地质量下降、滥捕乱猎等因素的威胁(郑光美和王岐山, 1998)。由于大多数猛禽种类之间存在激烈的生存竞争和较高的领域性, 再加上性成熟较晚、繁殖率较低、繁殖周期较长、对环境变化敏感等特点, 目前许多猛禽处于濒危状态(马鸣等, 2014; Newton et al, 2016)。

对物种及其分布的研究, 不仅可以了解区域生物多样性的状况, 也是实施生物多样性保护的基本前提。猛禽因具有迁徙能力强、分布范围广和对环境变化敏感等特点, 其丰富度格局的研究尤为受到关注(雍凡等, 2015)。迁徙路线是鸟类迁徙研究的重要内容, 但我国对猛禽迁徙路线的研究多数都是对一种或多种猛禽迁徙时间的观察, 研究区域主要集中在中东部沿海和湖滨地区, 如环渤海湾的山东长岛和青岛(王希明等, 1991; 范强东等, 1992; 范鹏等, 2006)、辽宁大连老铁山(侯韵秋等, 1990; 万冬梅等, 2002), 西部地区的资料相对缺乏, 仅有关于贵州、云南、四川个别猛禽迁徙时间观察的报道(管绍荣等, 1997; 隆廷伦等, 1998; 冯理等, 2008)。

国际上划分出的8条鸟类主要迁徙路线中有2条都经过四川省(赵学敏, 2006; 郑光美, 2012), 但四川省范围内的相关研究极其缺乏(包括水禽和猛禽)。本文在全面收集历史文献、标本记录、自然保护区综合科学考察记录、观鸟记录等资料的基础上, 对猛禽在四川省的分布和迁徙路线进行了初步研究和分析, 以了解四川省猛禽的物种资源、居留状况和多样性的分布格局, 并归纳总结猛禽的主要迁徙通道, 为猛禽资源以及区域生物多样性的保护提供基础资料和参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文通过对有关四川省猛禽的文献(附录1)、标本、野外调查和观察记录等资料的收集、查阅、整理, 对每条记录信息进行厘定, 并剔除重复和错误信息后, 建立相应的物种信息数据库。共得到四川省猛禽分布数据2,410条。数据构成为: 1912年到2015年有关四川省猛禽分布记录的公开发表文献84篇共50个物种849条(占总数据的35.2%); 四川大学标本馆馆藏的采集于四川省的猛禽标本数据共31个物种104条(4.3%); 本团队2001–2014年在28个

自然保护区综合科学考察和野外鸟类调查中记录的猛禽数据共32个物种330条(13.7%); 中国鸟类记录中心有关四川省猛禽的观察记录共48个物种1,127条(46.8%)。猛禽的分类体系参照《中国鸟类分类与分布名录》(郑光美, 2011)。

1.2 海拔段划分

根据范建容等(2015)对四川山地分类的界定, 本研究将四川山地分为7个海拔段, 分别是低于500 m (丘陵)、500–1,000 m (低山)、1,000–1,500 m (中低山)、1,500–2,500 m (中山)、2,500–3,500 m (次高山)、3,500–4,500 m (高山)和大于4,500 m (极高山)。对于有多个海拔记录点和调查点的物种, 直接统计其分布海拔段; 对于海拔数据点少的物种, 根据调查海拔、调查地点, 以及分布生境范围, 综合判断其分布海拔段, 同时着重参考《四川鸟类鉴定手册》(张俊范, 1997)对每个物种海拔分布的描述; 对于只有1–2次调查记录的物种, 不对其进行海拔段的统计。根据每个物种的分布海拔范围, 分别统计7个海拔区段的猛禽物种数。

1.3 居留类型划分

主要根据物种野外调查或者采集记录的时间或者时间段进行划分, 同时参照《四川鸟类鉴定手册》(张俊范, 1997)、《中国鸟类志》(赵正阶, 2001)、《中国鸟类野外手册》(马敬能等, 2000)等专著综合划分确定。

1.4 迁徙路线划分

根据划分出的旅鸟种类, 分别在ArcGIS 10.0中制作每种旅鸟在四川省各行政县的分布图, 初步归纳出每个种的大致迁徙路线。统计每个县旅鸟的种数, 将数据导入ArcGIS 10.0中使用分级方法在地图上体现, 丰富度越高的区域就是鸟类迁徙的主要路线。根据分布图和每个物种的迁徙路线, 再结合每个物种在全球的分布状况, 以及已有的鸟类迁徙路线研究结果, 归纳出四川省猛禽的主要迁徙通道。

1.5 物种丰富度图制作

先统计出四川省每个县的猛禽种数, 将物种数信息导入ArcGIS 10.0地理信息系统中, 使用分级方法在地图上体现物种丰富度, 获得以县为单位的全省猛禽种类丰富度分布图。四川省地图采用1:25万电子地图, 以县级行政边界成图。成图时以资料记录时的行政边界为准。如记录成都市的资料, 将成都市的9个区合并成1个成图单元, 包括南充市

区、乐山市区等(本文的地图在国家测绘局网站下载)。

2 结果与分析

2.1 物种多样性、区系及居留类型

根据数据统计,四川省猛禽共有2目5科56种(76种及亚种),占全国猛禽总数(95种)的58.9%;其中隼形目有3科41种,占全国隼形目鸟类总数(64种)的64.06%;鸮形目有2科15种,占全国鸮形目鸟类总数(31种)的48.39%。国家I级重点保护物种5种(全国7种)。按《中国动物地理》(张荣祖,2011)对分布型的划分,四川省猛禽中有东洋型17种,古北型和全北型各11种,中亚型4种,东北型3种,不易归类的10种,猛禽类南北种类混杂明显,以古北界成分占优(附录2)。按居留类型划分,本省留鸟占34.85%,旅鸟占28.79%,夏候鸟占18.18%,冬候鸟占13.63%,还有4.55%因数据信息太少暂不能确定其居留类型,以繁殖的猛禽数量最多,有35种(种及亚种),占全

省猛禽的53.03%。

从已有猛禽记录可知,四川省仍有约1/3的行政区域缺少猛禽的研究资料和数据。本文统计出四川省隼形目和鸮形目共56种,比李桂垣(1995)的记录增加7种,比郑光美(2011)新增4种,分别是白腹隼雕(*Hieraaetus fasciata*)、黑翅鸢(*Elanus caeruleus*)、林雕(*Ictinaetus malayensis*)和蛇雕(*Spilornis cheela*)。白腹隼雕在宣汉县有分布,黑翅鸢在盐边县和西昌市有分布,林雕在洪雅县有分布,蛇雕在崇州市、大邑县、荣经县和洪雅县均有分布。

2.2 物种多样性分布

2.2.1 水平分布

根据物种分布信息统计,猛禽物种丰富度最高的县(21–32种)为平武县、青川县、汶川县、若尔盖县、康定县、石渠县、九寨沟县、雅安市、成都市和南充市区。其中以黑鸢(*Milvus migrans*)、雀鹰(*Accipiter nisus*)、普通鵟(*Buteo buteo*)、红隼(*Falco tinnunculus*)4个种分布范围最广,超过50个县(市);

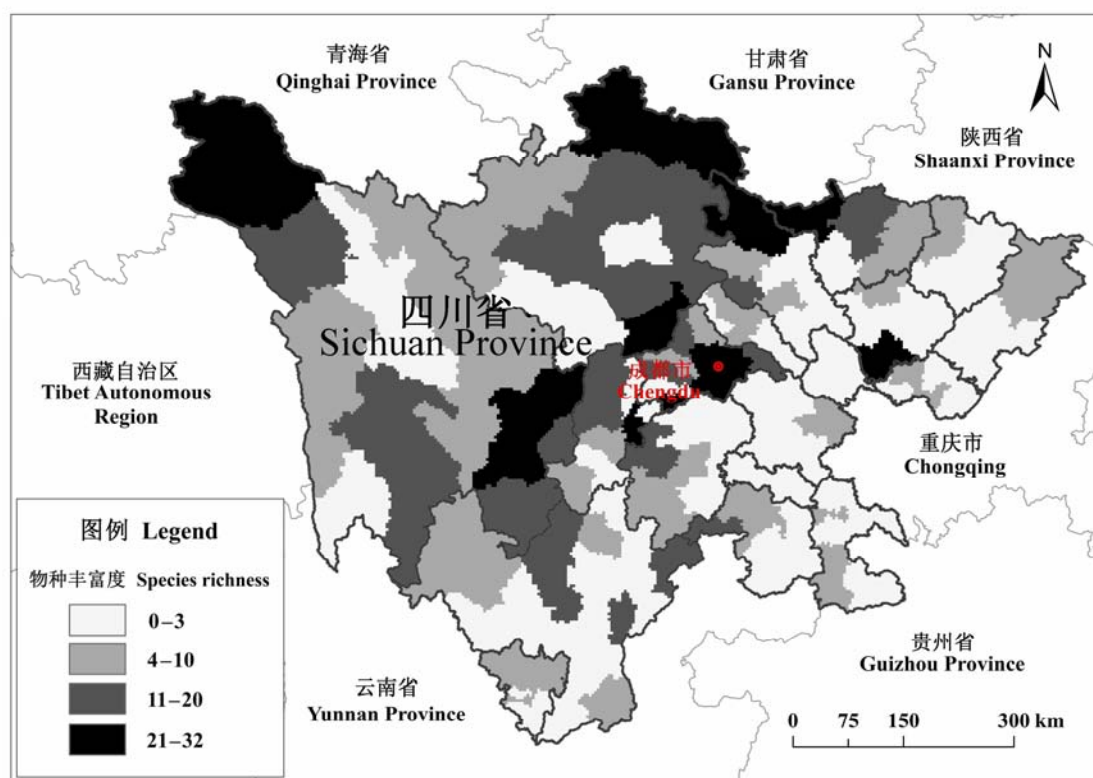


图1 四川省各县猛禽物种丰富度

Fig. 1 Raptor species richness in each county of Sichuan Province

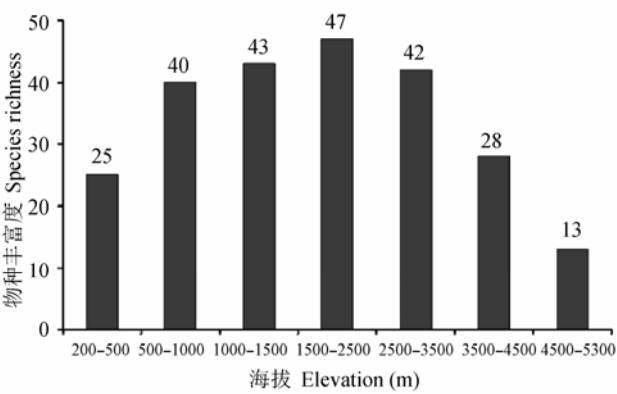


图2 四川省猛禽丰富度垂直分布
Fig. 2 Elevational distribution of raptor richness in Sichuan Province

而白腹隼雕、黑翅鸢、靴隼雕(*Hieraaetus pennatus*)、褐林鸢(*Strix leptogrammica*)、林雕、蛇雕以及白肩雕(*Aquila heliaca*) 7个种, 仅在1-2个县(市)有记录。按照四川省地貌分区, 本省猛禽物种丰富度较高的区域在岷江上游-川西南高山深谷区, 而川东四川

盆地区域物种丰富度则较低(图1)。国家I级重点保护动物主要分布在若尔盖县、平武县、石渠县、松潘县、红原县、康定县和炉霍县等川西高原及川西北高山深谷区。

2.2.2 垂直分布

四川省猛禽的垂直分布范围较广, 从海拔280-5,300 m均有分布记录, 物种丰富度沿海拔梯度先增加, 在中高海拔地区达到最大值后再逐渐减少。通过对53个种的分布海拔统计, 在1,500-2,500 m海拔的中山区猛禽种类最多(47种), 其次是2,500-3,500 m的次高山和1,000-1,500 m的中低山(图2)。垂直海拔跨度超过4,500 m的物种有白尾鹞(*Circus cyaneus*)、秃鹫(*Aegypius monachus*)、白腹鹞(*Circus spilonotus*)、大鵟(*Buteo hemilasius*)和苍鹰(*Accipiter gentilis*)。普通鵟、黑鸢、草原雕(*Aquila nipalensis*)和金雕(*A. chrysaetos*)等物种垂直海拔跨度较大, 约4,500 m; 垂直海拔跨度小的物种有赤腹鹰(*Accipiter soloensis*)、白腹隼雕和灰脸鵟鹰(*Butastur indicus*), 约600 m。

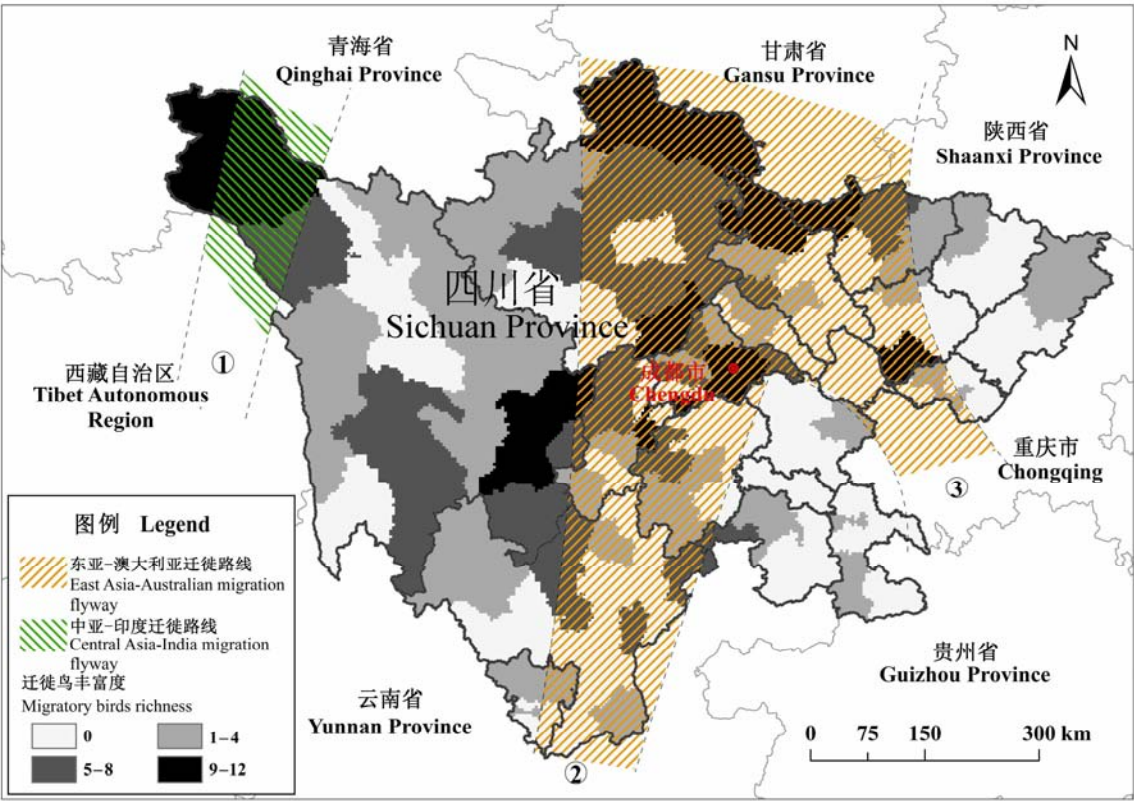


图3 四川猛禽迁徙通道
Fig. 3 Raptor migration routes in Sichuan Province

2.3 主要迁徙路线

在四川省境内迁徙的猛禽有19种,其主要迁徙路线有2条3支:一是中亚-印度迁徙路线(1支),二是东亚-澳大利亚迁徙路线(2支)。中亚-印度迁徙路线(图3, ①)主要有白尾鹫、苍鹰、草原雕等物种,主要经过四川西北部的石渠、德格等县,迁至西藏及印度等地。东亚-澳大利亚迁徙路线迁徙鸟类主要有白腹鹫、白尾鹫、鹊鹬(*Circus melanoleucos*)、灰脸鵟鹰、乌雕(*Aquila clanga*)、鸢(*Pandion haliaetus*)、灰背隼(*Falco columbarius*)、长耳鸮(*Asio otus*)、短耳鸮(*A. flammeus*)等物种,在四川省大致分为两支:1支沿岷山-邛崃山-凉山山系,至云南以及南亚、印度等地(图3, ②);另1支从岷山入川,经金堂、南充等县(市),后经重庆、贵州至东南沿海及东南亚等地(图3, ③)。

我国对候鸟迁徙(主要是水鸟)的研究主要集中在东亚-澳大利亚迁徙路线,东亚-澳大利亚路线是我国最重要的候鸟迁徙通道,涉及中部和东部的21个省份(Wang et al, 2016)。国内对猛禽迁徙路线几乎没有研究,已有对猛禽迁徙的研究都主要集中在迁徙时间方面。四川省是我国候鸟迁徙的重要通道之一,猛禽与水鸟的迁徙时间基本相同,均在春秋两季。与水鸟类似,很多猛禽并不只沿着一条迁徙通道进行迁徙,如白尾鹫和苍鹰等既沿东亚-澳大利亚通道迁徙至中南半岛、香港等地,也有部分沿中亚-印度通道迁徙至印度。本文尝试用迁徙猛禽在空间分布上的种类多度,结合每个物种的分布和居留信息,探讨猛禽在四川省内的迁徙路线,虽然受限于研究数据,但根据已有数据归纳总结出来的迁徙路线仍有参考意义。进一步理清猛禽在四川省内的迁徙路线,还需加大对猛禽资源分布及在迁徙时节的调查,并开展环志和卫星追踪等相关研究。

致谢:感谢本研究团队多年来野外工作收集数据,感谢四川大学郑志荣老师对物种鉴定提供的宝贵意见,感谢张语克博士、晏婷婷和杨荔钧等对数据分析和制图提供的帮助。

参考文献

Fan JR, Zhang ZY, Li LH (2015) Mountain demarcation and mountainous area divisions of Sichuan Province. *Geographical Research*, 34, 65–73. (in Chinese with English abstract) [范建容, 张子瑜, 李立华 (2015) 四川省山地类型

- 界定与山区类型划分. *地理研究*, 34, 65–73.]
- Fan P, Zhong HB, Zhao F, Fan QJ (2006) The study of bird banding in Changshan Islands. *Shandong Forestry Science and Technology*, (3), 43–45. (in Chinese) [范鹏, 钟海波, 赵方, 范强军 (2006) 长山列岛猛禽的环志研究. *山东林业科技*, (3), 43–45.]
- Fan QD, Sun WL, Yuan YT, Zhao F (1992) The study on bird banding of raptors in Changdao, Shandong Province. *Sichuan Journal of Zoology*, 11(4), 16–19. (in Chinese) [范强东, 孙为连, 袁嫵婷, 赵方 (1992) 山东长岛猛禽的环志研究. *四川动物*, 11(4), 16–19.]
- Feng L, Min L, Han LX, Zhao JL, Liu XX, Song JH (2008) Wintering observation of birds of prey in Napahai Nature Reserve, Yunnan. *Sichuan Journal of Zoology*, 27, 445–448. (in Chinese with English abstract) [冯理, 闵龙, 韩联宪, 赵健林, 刘学先, 松建华 (2008) 云南纳帕海自然保护区越冬猛禽考察初报. *四川动物*, 27, 445–448.]
- Guan SR, Tian YZ, Li S (1997) Preliminary observation of migration and overwintering habits on Western marsh harrier. *Sichuan Journal of Zoology*, 16, 25–26. (in Chinese) [管绍荣, 田应洲, 李松 (1997) 白头鹫迁徙和越冬习性的初步观察. *四川动物*, 16, 25–26.]
- Hou YQ, Yang RL, Liu DJ, Fan QD, Wang L (1990) The study on raptors migration in eastern coast of China. *Forest Research*, 3, 207–214. (in Chinese) [侯韵秋, 杨若莉, 刘岱基, 范强东, 王黎 (1990) 中国东部沿海地区猛禽迁徙规律研究. *林业科学研究*, 3, 207–214.]
- MacKinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) *A Field Guide to the Birds of China*. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [约翰·马敬能, 卡伦·菲尔普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Li GY (1995) *The Colour Handbook of the Birds of Sichuan*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [李桂垣 (1995) 四川鸟类原色图鉴. 中国林业出版社, 北京.]
- Long TL, Yang RL, Deng J, Hu SX, Zheng JX (1998) Preliminary observation on raptors southward migration in Longquan Mountains. *Sichuan Journal of Zoology*, 17, 160–161. (in Chinese) [隆廷伦, 杨若莉, 邓杰, 胡尚贤, 郑继勋 (1998) 龙泉山脉猛禽南迁的初步观察. *四川动物*, 17, 160–161.]
- Ma M, Dao C, Shan J, Xing R, Aizijiang M, Mardan T, Luo B, Xu GH, Wu DN (2014) Study of the reproductive behavior of Himalayan vulture (*Gyps himalayensis*) by mini camera-traps in the Tianshan Mountains. *Chinese Journal of Wildlife*, 35, 414–419. (in Chinese with English abstract) [马鸣, 道·才吾加甫, 山加甫, 邢睿, 艾孜江·买买提明, 买尔旦·吐尔干, 罗彪, 徐国华, 吴道宁 (2014) 高山兀鹫 (*Gyps himalayensis*) 的繁殖行为研究. *野生动物学报*, 35, 414–419.]
- Newton I, McGrady MJ, Oli MK (2016) A review of survival estimates for raptors and owls. *Ibis*, 158, 227–248.

- Wan DM, Gao W, Zhao J, Wang HT, Liu MY (2002) The study on raptors migration in Liaoning Province. *Journal of Northeast Normal University (Nature Science Edition)*, 34(2), 78–83. (in Chinese) [万冬梅, 高玮, 赵匠, 王海涛, 刘明玉 (2002) 辽宁猛禽迁徙规律的研究. 东北师大学报 (自然科学版), 34(2), 78–83.]
- Wang HM, Zhang ZJ, Chen ZQ, Zhang YR, Lü Q, An XP, Tong YG, Carr MJ, Sun SH, Shi WF (2016) High genetic diversity and frequent genetic reassortment of avian influenza A (H9N2) viruses along the East Asian–Australian migratory flyway. *Infection, Genetics and Evolution*, 39, 325–329.
- Wang XM, Liu DJ, Wang YL, Xin MY (1991) Preliminary observation of Besra sparrow hawk migration in Qingdao. *Sichuan Journal of Zoology*, 10(4), 34–35. (in Chinese) [王希明, 刘岱基, 王元亮, 辛美云 (1991) 青岛松雀鹰迁徙的初步观察. 四川动物, 10(4), 34–35.]
- Yong F, Xu HG, Cui P, Cao MC, Lei JC, Wu Y, Ding H, Wu J, Lu XQ, Le ZF (2015) Distribution pattern of forest birds in breeding and wintering season in China and the influencing factors. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31, 658–663. (in Chinese with English abstract) [雍凡, 徐海根, 崔鹏, 曹铭昌, 雷军成, 吴翼, 丁晖, 吴军, 卢晓强, 乐志芳 (2015) 中国森林鸟类繁殖季和越冬季分布格局及其影响因子. 生态与农村环境学报, 31, 658–663.]
- Zhang JF (1997) *A Manual to Identify Sichuan Birds*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [张俊范 (1997) 四川鸟类鉴定手册. 中国林业出版社, 北京.]
- Zhang RZ (2011) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zhao ZJ (2001) *A Handbook of the Birds of China (Volume I): Non-passerines*. Jilin Science and Technology Press, Changchun. (in Chinese) [赵正阶 (2001) 中国鸟类志 (上卷): 非雀形目. 吉林科学技术出版社, 长春.]
- Zhao XM (2006) *Bird Migration and Bird Flu in the Mainland of China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [赵学敏 (2006) 中国大陆野生鸟类迁徙动态与禽流感. 中国林业出版社, 北京.]
- 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. 科学出版社, 北京.]
- Zheng GM (2012) *Ornithology*. Beijing Normal University Publishing Group, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2012) 鸟类学. 北京师范大学出版社, 北京.]
- Zheng GM, Wang QS (1998) *China Red Data Book of Endangered Animals: Aves*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美, 王歧山 (1998) 中国濒危动物红皮书: 鸟类卷. 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 历史文献资料

Appendix 1 Historical reference data

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016238-1.pdf>

附录2 四川省猛禽名录

Appendix 2 The raptors list of Sichuan Province

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016238-2.pdf>

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

附录1 历史文献资料

Appendix 1 Historical reference data

- Chen YX, Zhang HX (1995) Birds in the outskirts of Mianyang City. *Sichuan Journal of Zoology*, 13, 23–24. (in Chinese) [陈玉祥, 张华宣 (1995) 四川绵阳市郊的鸟类. *四川动物*, 13, 23–24.]
- Chen LM, Ou WF (2002) Birds resources of Tangjiahe Nature Reserve in Sichuan. *Sichuan Journal of Zoology*, 21, 76–81. (in Chinese) [谌利民, 欧维富 (2002) 四川唐家河自然保护区鸟类资源. *四川动物*, 21, 76–81.]
- Chen SD, Guo KJ, Chen GY, Zhou CL (2009) Investigation of bird diversity in campus of Sichuan Normal University. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 37, 7484–7486. (in Chinese with English abstract) [陈顺德, 郭克疾, 陈贵英, 周成龙 (2009) 四川师范大学校园鸟类多样性调查. *安徽农业科学*, 37, 7484–7486.]
- Cui XZ, Yang LZ, Chen AK, Zhang YS, He FQ (1992) Investigation on wintering wetland birds in Lugu Lake and Qionghai Lake. *Sichuan Journal of Zoology*, 11(4), 27–28. (in Chinese) [崔学振, 杨拉珠, 陈安康, 张荫荪, 何芬奇 (1992) 泸沽湖、邛海越冬湿地鸟类调查. *四川动物*, 11(4), 27–28.]
- Deng QX, Hu JC, Yu ZW, Chen HX (1980) Investigation report on birds in Nanchong Area. *Journal of China West Normal University (Natural Science)*, (2), 46–88, 44. (in Chinese) [邓其祥, 胡锦涛, 余志伟, 陈鸿熙 (1980) 南充地区鸟类调查报告. *南充师院学报(自然科学版)*, (2), 46–88, 44.]
- Deng QX, Li HT (1993) Bird composition at Qionghai Lake in autumn and winter. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 14, 55–61, 75. (in Chinese) [邓其祥, 李海涛(1993) 邛海秋冬季鸟类组成. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 14, 55–61, 75.]
- Fu JR, Ran JH, Cai G, Hu JC (2005) Survey on bird resources in Qianfoshan Nature Reserve in Sichuan Province. *Sichuan Journal of Zoology*, 24, 158–163. (in Chinese with English abstract) [符建荣, 冉江洪, 蔡国, 胡锦涛 (2005) 四川千佛山自然保护区的鸟类资源. *四川动物*, 24, 158–163.]
- Fu JR, Liu SY, Sun ZY, Liu Y, Cai G, Zheng ZR, Zhao J (2005) The community structure and biodiversity of birds in Haizishan Nature Reserve in Sichuan Province. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 26(6), 1–4. (in Chinese with English abstract) [符建荣, 刘少英, 孙治宇, 刘洋, 蔡国, 郑志荣, 赵杰 (2005) 四川海子山自然保护区鸟类群落结构及多样性. *四川林业科技*, 26(6), 1–4.]
- Fu JR, Liu SY, Hu JC, Ran JH, Cai G (2006) Avian fauna of Haizishan Natural Reserve in Sichuan Province. *Sichuan Journal of Zoology*, 25, 501–508. (in Chinese with English abstract) [符建荣, 刘少英, 胡锦涛, 冉江洪, 蔡国 (2006) 四川海子山自然保护区鸟类资源及区系. *四川动物*, 25, 501–508.]
- Fu JR, Liu SY, Sun ZY, Liu Y, Wang X, Zhao J (2009) Survey on bird resources in Changshagongma Nature Reserve

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

in Sichuan Province. Sichuan Journal of Zoology, 28, 298–301. (in Chinese with English abstract) [符建荣, 刘少英, 孙治宇, 刘洋, 王新, 赵杰 (2009) 四川长沙贡玛自然保护区的鸟类资源. 四川动物, 28, 298–301.]

Fu CK, Zong H, Chen SD, Liao Y, Li DQ, Jiao RF, Li J, Zheng L, Fu H (2014) Statistical analysis of bird species in Sichuan Province. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 35(4), 32–36. (in Chinese with English abstract) [付长坤, 宗浩, 陈顺德, 廖颖, 李东强, 焦瑞芳, 李江, 郑朗, 付花 (2014) 四川省鸟类物种增补与统计分析. 四川林业科技, 35(4), 32–36.]

Guo YS (2001) Birds in Tiebu Nature Reserve, Sichuan, China. Sichuan Journal of Zoology, 20, 185–189. (in Chinese with English abstract) [郭延蜀 (2001) 四川铁布自然保护区的鸟类. 四川动物, 20, 185–189.]

He L, Wu ZL (2003) A research of birds in the area influenced by the project of Shuiniujia Hydropower Station in Huoxihe, Pingwu Sichuan and Huoxihe River Basin. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 29, 591–594. (in Chinese with English abstract) [何玲, 伍自力 (2003) 四川平武水牛家水电站工程影响区及火溪河流域鸟类研究. 西南民族大学学报(自然科学版), 29, 591–594.]

Hu JC (1960) A new record of non-passerine species in Sichuan. Chinese Journal of Zoology, 7, 307–309. (in Chinese) [胡锦矗 (1960) 四川省非雀形目鸟类的新记录. 动物学杂志, 7, 307–309.]

Hu JC (2000) Supplement of birds in Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 19, 21. (in Chinese) [胡锦矗 (2000) 四川省一种鸟类补述. 四川动物, 19, 21.]

Huang Q, Huang YZ, Deng HL (1993) Investigation on birds in Pingshan County. Chinese Journal of Zoology, 28(3), 20–26. (in Chinese) [黄强, 黄永昭, 邓合黎 (1993) 四川屏山县鸟类调查报告. 动物学杂志, 28(3), 20–26.]

Huang Q, Deng HL, Mao K (1995) Investigation of birds in Yibin Area. Chinese Journal of Zoology, 30(6), 7–15. (in Chinese) [黄强, 邓合黎, 毛珂 (1995) 四川宜宾地区鸟类调查报告. 动物学杂志, 30(6), 7–15.]

Huang XF, Yang ZS, Zhang J (2001) Survey for birds of Mianzhu County in Sichuan Province. Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science), 22, 217–224. (in Chinese with English abstract) [黄小富, 杨志松, 张君 (2001) 四川绵竹县鸟类调查. 四川师范学院学报(自然科学版), 22, 217–224.]

Jiang HM, Long TL (2004) Structure and diversity of wetland bird community in Kasha Lake. Journal of China West Normal University (Natural Science), 25, 78–81, 98. (in Chinese with English abstract) [江华明, 隆廷伦 (2004) 卡莎湖湿地鸟类群落组成及多样性分析. 西华师范大学学报(自然科学版), 25, 78–81, 98.]

Jiang MD, Wu XZ (1960) Eagle was first found in Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 7(2), 14. (in Chinese) [江明道, 吴先智 (1960) 四川首次发现鹰雕. 四川动物, 7(2), 14.]

- 梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>
- Li GY, Liu LC, Zhang RY, Liu CY (1963) A survey report of avian birds. Chinese Journal of Zoology, 1, 19–22, 42.
(in Chinese) [李桂垣, 刘良才, 张瑞云, 刘昌宇 (1963) 雅安鸟类调查报告. 动物学杂志, 1, 19–22, 42.]
- Li GY, Zhang RY (1964) Preliminary investigation report on birds in Erlang Mountain. Chinese Journal of Zoology, (3), 110–115. (in Chinese) [李桂垣, 张瑞云 (1964) 四川二郎山鸟类初步调查报告. 动物学杂志, (3), 110–115.]
- Li GY, Liu LC, Zhang RY, Zhang QM (1976) On the avifauna of Baoxing, Sichuan. Acta Zoologica Sinica, 22, 101–114. (in Chinese with English abstract) [李桂垣, 刘良才, 张瑞云, 张清茂 (1976) 四川宝兴的鸟类区系. 动物学报, 22, 101–114.]
- Li GY, Zhang QM, Zhang RY (1983) A preliminary investigation on bird fauna of Washan Mountain, Sichuan. Chinese Journal of Zoology, (2), 5–11. (in Chinese) [李桂垣, 张清茂, 张瑞云 (1983) 四川瓦山鸟类区系的初步调查. 动物学杂志, (2), 5–11.]
- Li GY, Zhang RY, Zhang QM (1983) Floristic composition and environment adaptation of birds in Baoxing. Sichuan Journal of Zoology, 2(1), 19–29. (in Chinese) [李桂垣, 张瑞云, 张清茂 (1983) 宝兴鸟类区系组成与环境的适应. 四川动物, 2(1), 19–29.]
- Li GY, Zhang RY, Zhang QM, Liu CY (1984) On the avifauna of Liangshan Yizu Autonomous Region, Sichuan, China. Journal of Sichuan Agricultural College, 2, 19–58. (in Chinese) [李桂垣, 张瑞云, 张清茂, 刘昌宇 (1984) 四川凉山彝族自治州的鸟类区系. 四川农学院学报, 2, 19–58.]
- Li GY, Zhang QM (1989) Investigation on birds in Wanglang Nature Reserve. Sichuan Journal of Zoology, 8(3), 17–20. (in Chinese) [李桂垣, 张清茂 (1989) 王朗自然保护区鸟类调查报告. 四川动物, 8(3), 17–20.]
- Li GY, Zhang QM, Luo JZ, Meng SM, Mou WL, Lin WZ, Gao HY (1994) Investigation of birds in Labahe Nature Reserve. Sichuan Journal of Zoology, 13, 57–61. (in Chinese) [李桂垣, 张清茂, 罗家泽, 孟水明, 牟万禄, 林文昭, 高华银 (1994) 喇叭河自然保护区的鸟类调查. 四川动物, 13, 57–61.]
- Li S, Zhang DF, Huang K, Cao S, Liu SL (2010) Study of the avian community in Jiang'an Campus of Sichuan University. Sichuan Journal of Zoology, 29, 249–254. (in Chinese with English abstract) [李偲, 张敦房, 黄科, 曹森, 刘绍龙 (2010) 四川大学江安校区鸟类调查. 四川动物, 29, 249–254.]
- Li XJ, Zhou CQ, Wan Q (2008) Community composing of bird strike avoidance in Gaoping Airport of Nanchong. Sichuan Journal of Zoology, 27, 253–258. (in Chinese with English abstract) [李晓娟, 周材权, 万强 (2008) 四川南充高坪机场夏季鸟类群落组成及鸟撞预防措施. 四川动物, 27, 253–258.]

- 梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>
- Liu H, Shi HY, Zhang LQ (2004) The birds in the urban and suburb areas of Mianyang City. Journal of Mianyang Normal University, 23(5), 67–73, 81. (in Chinese with English abstract) [刘昊, 石红艳, 张利权 (2004) 绵阳市及近郊鸟类初步调查. 绵阳师范学院学报, 23(5), 67–73, 81.]
- Liu KZ, Huang Q, Deng HL, Pan GR, Zhang JF (1994) Investigation on birds in Luzhou Area. Chinese Journal of Zoology, 29(5), 22–31. (in Chinese) [刘克志, 黄强, 邓合黎, 潘国荣, 张家福 (1994) 四川泸州地区鸟类调查报告. 动物学杂志, 29(5), 22–31.]
- Lu QB (2001) Analysis and survey of birds in Anyue County. Journal of Neijiang Teachers College, 16(4), 37–42. (in Chinese with English abstract) [鲁庆彬 (2001) 安岳县鸟类概况及分析. 内江师范学院学报, 16(4), 37–42.]
- Lu QB, Hu JC (2002) Analysis and survey of birds in hilly land of Sichuan. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 27, 965–969. (in Chinese with English abstract) [鲁庆彬, 胡锦涛 (2002) 四川丘陵地区鸟类现状及分析. 西南师范大学学报 (自然科学版), 27, 965–969.]
- Peng JT, Zhou HM (2000) Investigation on bird of prey in Ganzi Prefecture, Sichuan Province. Sichuan Journal of Zoology, 19, 62–64. (in Chinese) [彭基泰, 周华明 (2000) 四川甘孜地区的猛禽调查. 四川动物, 19, 62–64.]
- Ran JH, Liu SY, Lin Q, Liu SC, Shao KQ, Zhang M (2001) Avifauna of birds in Sichuan Xiaman Nature Reserve. Sichuan Journal of Zoology, 20, 9–12. (in Chinese with English abstract) [冉江洪, 刘少英, 林强, 刘世昌, 邵开清, 张明 (2001) 四川辖曼自然保护区的鸟类资源调查. 四川动物, 20, 9–12.]
- Ran JH, Liu SY, Sun ZY, Fu JR, Zheng ZR, Cai G, Lei KM (2004) Avifauna of Jiuzhaigou Nature Reserve in Sichuan Province. Chinese Journal of Zoology, 39(5), 51–59. (in Chinese with English abstract) [冉江洪, 刘少英, 孙治宇, 符建荣, 郑志荣, 蔡国, 雷开明 (2004) 四川九寨沟自然保护区的鸟类资源及区系. 动物学杂志, 39(5), 51–59.]
- Ran JH, Li LC, Fu JR (2005) Notes of birds in Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 24, 60–62. (in Chinese with English abstract) [冉江洪, 李丽纯, 符建荣 (2005) 四川省鸟类种类记叙. 四川动物, 24, 60–62.]
- Riley JH (1932) A Second Collection of Birds from the Provinces of Yunnan and Szechwan, China: Made for the National Geographic Society by Dr. Joseph F. Rock. Smithsonian Institution. Proceeding U.S. National Museum, 80, 71–91.
- Sheng XJ, Yuan WJ, Zhang YZ (2006) Analysis on fauna of terrestrial vertebrate in Sichuan Chayagou Wetland. Sichuan Forestry Exploration and Design, (2), 20–24, 33. (in Chinese with English abstract) [盛行军, 袁万军, 张炎周 (2006) 四川茶垭沟湿地陆栖脊椎动物区系分析. 四川林勘设计, (2), 20–24, 33.]

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

Shi DC, Li GH, Hu TQ (1984) Investigation on birds in Baihe Nature Reserve, Nanping. Chinese Journal of Zoology, 19(2), 13–17, 7. (in Chinese) [史东仇, 李贵辉, 胡铁卿 (1984) 四川南坪白河自然保护区鸟类调查报告. 动物学杂志, 19(2), 13–17, 7.]

Song Y, Liu Q, Liao Y, Liu QD, Qiu DY, Fu YQ, Liu Z (2009) A preliminary investigation on the bird resources in the “Three-river” Region in Leshan, Sichuan. Journal of China West Normal University (Natural Science), 30, 141–148. (in Chinese with English abstract) [宋轶, 刘秋, 廖莹, 刘庆大, 邱东昀, 付义强, 刘忠 (2009) 四川乐山市“三江”地区鸟类资源初步调查. 西华师范大学学报(自然科学版), 30, 141–148.]

Stone W (1933) Zoological Results of the Dolan West China Expedition of 1931: Part 1. Birds. Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 85, 165–222.

Tang CZ, Xu TG, Yang L (1996) Birds of Hengduan Mountains. Science Press, Beijing. (in Chinese) [唐蟾珠, 徐延恭, 杨岚 (1996) 横断山区鸟类. 科学出版社, 北京.]

Tang ZH, Zhang WG, Qi DW, Qing Y, Li C, Hu JC (2004) Investigation on birds in Xiaohegou Nature Reserve. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 25, 130–134. (in Chinese with English abstract) [唐中海, 张文广, 齐敦武, 青云, 李操, 胡锦鑫 (2004) 四川省平武县小河沟自然保护区鸟类资源调查初报. 西华师范大学学报(自然科学版), 25, 130–134.]

Tang P, Wang LH, Li C, Hu J, Zhang HM (2005) A survey of avian diversity in Yanbian County, Sichuan Province. Journal of Southwest Forestry College, 25(3), 60–65. (in Chinese with English abstract) [唐平, 王丽华, 李操, 胡杰, 张洪茂 (2005) 四川省盐边县鸟类多样性调查. 西南林学院学报, 25(3), 60–65.]

Thayer JE, Bangs O (1912) Some Chinese vertebrates: aves. Museum, 40, 107–200.

Wang RF, Deng QX, Song GW (1994) Investigation report on bird and beast in Huaying City, Sichuan Province. Sichuan Journal of Zoology, 13, 130–134. (in Chinese) [王仁飞, 邓其祥, 宋功文 (1994) 四川华莹市鸟兽调查报告. 四川动物, 13, 130–134.]

Wu XZ (1987) New bird records in Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 6(3), 24–25. (in Chinese) [吴先智 (1987) 四川鸟类新纪录. 四川动物, 6(3), 24–25.]

Wu XZ (1988) An investigation on bird fauna in Jintang County. Sichuan Journal of Zoology, 7(4), 39–40. (in Chinese) [吴先智 (1988) 四川金堂县鸟类区系调查报告. 四川动物, 7(4), 39–40.]

Wu XZ, Zhao L, Pu AN, Qian YH, She Y (2001) Observation and protection of wild birds in giant panda breeding research base in Chengdu. Sichuan Journal of Zoology, 19(5), 28–30. (in Chinese) [吴先智, 赵力, 蒲安宁, 钱宇

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

辉, 余轶 (2001) 成都大熊猫繁育研究基地野生鸟类观察及其保护初探. 四川动物, 19(5), 28–30.]

Xing N, Zeng ZY, Ran JH, Li LC, Yang B, Li F (2006) Avifauna changes of Muli River Valley and Shuiluo River

Valley in Muli County, Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 25, 557–564. (in Chinese with English abstract) [幸

宁, 曾宗永, 冉江洪, 李丽纯, 杨彪, 李枫 (2006) 四川木里县木里河与水洛河流域鸟类资源变化调查. 四川动物, 25, 557–564.]

Xu CX, Zhang ZJ (2014) Avian fauna and diversity in Wujiao Nature Reserve. Journal of China West Normal

University (Natural science), 35, 301–314. (in Chinese with English abstract) [胥昌询, 张泽钧 (2014) 勿角自然保护区鸟类区系及多样性. 西华师范大学学报(自然科学版), 35, 301–314.]

Xu ZH (2001) Birds in suburbs of Guangyuan City. Sichuan Journal of Zoology, 19(5), 35–36. (in Chinese) [徐中辉

(2001) 四川省广元市城郊的鸟类. 四川动物, 19(5), 35–36.]

Yang L, Li GY (1989) A new subspecies of the *Athene brama* (spotted little owl) - A.B. *Poikila* (Belly - Mottled Little

Owl). Zoological Research, 10, 303–308. (in Chinese) [杨岚, 李桂垣 (1989) 横斑腹小鸮一新亚种—杂斑腹小鸮 (鸮形目: 鸮科). 动物学研究, 10, 303–308.]

Yang XY, Dai B, Long TL, Wang SY, Zhang RL, Xiong QQ, Wu Y (1997) A survey of water fowls and predatory

birds in the Roergai Wetland. Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science), 18, 12–15. (in Chinese with English abstract) [杨旭煜, 戴波, 隆廷伦, 王顺洋, 张荣亮, 熊清泉, 五一 (1997) 若尔盖沼泽冬夏季水禽和猛禽的调查. 四川师范学院学报(自然科学版), 18, 12–15.]

Yang ZS, Gong MH, Huang XF, Li C, Liu XQ (2000) Biodiversity of birds of prey in Shiqu County. Journal of

Sichuan Teachers College (Natural Science), 21, 137–140. (in Chinese with English abstract) [杨志松, 龚明昊, 黄小富, 李春, 刘雪卿 (2000) 石渠县猛禽的生物多样性. 四川师范学院学报(自然科学版), 21, 137–140.]

Yang B, Ran JH, Cai G, Zeng ZY (2006) A survey of bird community at Baiposhan Nature Reserve of Sichuan in

Winter. Sichuan Journal of Zoology, 25, 509–515. (in Chinese with English abstract) [杨彪, 冉江洪, 蔡国, 曾宗永 (2006) 四川白坡山自然保护区冬季鸟类群落调查. 四川动物, 25, 509–515.]

Yang J, Zhang XL, Lu G, Li RG, Yue BS, Ran JH (2007) Bird communities in different habitats at Laojunshan Nature

Reserve, Sichuan Province. Sichuan Journal of Zoology, 26, 760–763. (in Chinese with English abstract) [杨杰, 张秀雷, 陆钢, 李仁贵, 岳碧松, 冉江洪 (2007) 四川老君山自然保护区不同生境鸟类多样性研究. 四川动物, 26, 760–763.]

Yang M, Gao J, Yang ZP (2015) Investigation and analysis of bird resources in Tianquan County, Sichuan Province.

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

Journal of Anhui Agricultural Sciences, 43(12), 139–144, 147. (in Chinese with English abstract) [杨梅, 高健, 杨再平 (2015) 四川天全县鸟类资源调查与分析. 安徽农业科学, 43(12), 139–144, 147.]

You B, Yu XG, Yang L, Wang XH (2003) Resources and protection of raptor in Deyang City. Journal of Sichuan

Forestry Science and Technology, 24(2), 53–56. (in Chinese) [游杉, 喻晓钢, 杨林, 王肖华 (2003) 德阳市猛禽资源及保护. 四川林业科技, 24(2), 53–56.]

Yu ZW, Deng QX, Hu JC, Li HC, Wang PY (1983) Vertebrates in the Wolong Nature Reserve. Journal of China West

Normal University (Natural Science), 1, 6–56. (in Chinese) [余志伟, 邓其祥, 胡锦矗, 李洪成, 王培勇 (1983) 卧龙自然保护区的脊椎动物. 南充师院学报(自然科学版), 1, 6–56.]

Yu ZW, Deng QX, Li HC, Wang PY (1984) A new record of birds and animals in Sichuan. Sichuan Journal of

Zoology, 3(1), 12–13. (in Chinese) [余志伟, 邓其祥, 李洪成, 王培勇 (1984) 四川省鸟兽新纪录. 四川动物, 3(1), 12–13.]

Yu ZW, Deng QX, Hu JC, Chen HX, Chen EY (1986) Investigation report of birds on Daba Mountains and Micang

Mountains, Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 5(4), 11–18. (in Chinese) [余志伟, 邓其祥, 胡锦矗, 陈鸿熙, 陈恩渝 (1986) 四川省大巴山、米仓山鸟类调查报告. 四川动物, 5(4), 11–18.]

Yu ZW, Deng QX (1993) Findings report on birds in Wolong Nature Reserve. Journal of Sichuan Teachers College

(Natural Science), 14, 233–235. (in Chinese with English abstract) [余志伟, 邓其祥 (1993) 卧龙自然保护区鸟类调查报告. 四川师范学院学报(自然科学版), 14, 233–235.]

Yu ZW, Deng QX, Hu JC (1995) A finding report on birds at the Jincheng Mountain in Sichuan. Journal of Sichuan

Teachers College (Natural Science), 16, 93–99. (in Chinese with English abstract) [余志伟, 邓其祥, 胡锦矗 (1995) 四川金城山鸟类调查报告. 四川师范学院学报(自然科学版), 16, 93–99.]

Yu ZW, Deng QX, Jiang DM, Chen LM (2000) The study on avifauna of Tangjiahe Natural Reserve. Journal of

Sichuan Teachers College (Natural Science), 21, 29–35. (in Chinese with English abstract) [余志伟, 邓其祥, 江明道, 谌利民 (2000) 唐家河自然保护区的鸟类区系研究. 四川师范学院学报(自然科学版), 21, 29–35.]

Zhang JF, Wu DJ, Dou FM, Chu YN, He GX, Song YF (1985) Bird fauna in the suburbs of Chengdu. Journal of

Sichuan University (Natural Science Edition), 22(2), 78–87. (in Chinese) [张俊范, 吴大均, 窦丰满, 楚一男, 何光听, 宋云芳 (1985) 成都市郊的鸟类区系. 四川大学学报(自然科学版), 22(2), 78–87.]

Zhang JF, Luo JH, Li RJ (1991) The main resource birds of Emei Mountain in Sichuan. Sichuan Journal of Zoology,

10(2), 32–34. (in Chinese) [张俊范, 罗江虹, 李如嘉 (1991) 四川峨眉山的主要资源鸟类. 四川动物, 10(2),

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

32–34.]

Zhang JF, Zheng ZR, Wei L, He JL, Li JH (1994) Investigation report on birds in Dayi County, Sichuan. Sichuan

Journal of Zoology, 13, 62–64. (in Chinese) [张俊范, 郑志荣, 韦燎, 何家禄, 李剑豪 (1994) 四川大邑县鸟类
考察报告. 四川动物, 13, 62–64.]

Zhang JF, Zheng ZR (1997) The first discovery of the booted eagle in Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 16, 60.

(in Chinese) [张俊范, 郑志荣 (1997) 四川首次发现靴隼雕. 四川动物, 16, 60.]

Zhang J, Hou WR, Meng YJ (2004) Preliminary report on birds fauna in Zhile Nature Reserve, Sichuan Province.

Journal of China West Normal University (Natural Science), 25, 123–129. (in Chinese with English abstract) [张君,
侯万儒, 孟英君 (2004) 四川冶勒自然保护区鸟类区系研究. 西华师范大学学报(自然科学版), 25, 123–129.]

Zhang XL, Lu G, Li RG, Yang J, Yue BS, Ran JH (2007) Bird diversity in different habitats at Mamize Nature

Reserve in Sichuan Province. Sichuan Journal of Zoology, 26, 82–85. (in Chinese with English abstract) [张秀雷,
陆钢, 李仁贵, 杨杰, 岳碧松, 冉江洪 (2007) 四川麻咪泽自然保护区不同生境类型鸟类多样性调查. 四川
动物, 26, 82–85.]

Zhang J, Yang ZS, Huang XF, Zhou CQ (2009) New definitions of the open set and closed set and their advantages.

Journal of China West Normal University (Natural Science), 30, 327–339, 353. (in Chinese with English abstract)
[张君, 杨志松, 黄小富, 周材权 (2009) 四川东阳沟自然保护区鸟类区系初步调查. 西华师范大学学报(自
然科学版), 30, 327–339, 353.]

Zheng ZX, Qian YW, Guan GX, Li GY, Chen FG (1962) An avifaunal survey of the Qinling and Tapashan Region.

Acta Zoologica Sinica, 14, 361–380. (in Chinese with English abstract) [郑作新, 钱燕文, 关贯勋, 李桂垣, 陈服
官 (1962) 秦岭、大巴山地区的鸟类区系调查研究. 动物学报, 14, 361–380.]

Zheng ZX, Tan YK, Luo QS, Min ZL (1962) Taxonomic studies on birds from southwestern Szechwan and

Northwestern Yunnan. Part I. Non-Passeriformes. Acta Zoologica Sinica, 14, 537–554. (in Chinese with English
abstract) [郑作新, 谭耀匡, 罗泉笙, 闵芝兰 (1962) 四川西南与云南西北地区鸟类的分类研究. I. 非雀形目.
动物学报, 14, 537–554.]

Zheng ZX, Tan YK, Liang ZY, Zhang JF (1963) Studies on birds of Mount Emei and their vertical distribution. Acta

Zoologica Sinica, 15, 317–335. (in Chinese with English abstract) [郑作新, 谭耀匡, 梁中宇, 张俊范 (1963) 四
川峨眉山鸟类及其垂直分布的研究. 动物学报, 15, 317–335.]

Zheng ZX, Tan YK, Li YX (1965) On the avifauna of northwestern Szechwan. Acta Zoologica Sinica, 17, 435–450.

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

(in Chinese with English abstract) [郑作新, 谭耀匡, 李永新 (1965) 四川西北部鸟类区系调查. 动物学报, 17, 435–450.]

Zhou YB, Zhang J, Zhang WG, Zhou CQ, Hu JC, Zhang JQ (2004) Resources and preserve of birds in Xiaozhaizigou Nature Reserve. Journal of China West Normal University (Natural Science), 25, 68–72. (in Chinese with English abstract) [周友兵, 张君, 张文广, 周材权, 胡锦涛, 张敬旗 (2004) 四川小寨子沟自然保护区鸟类资源现状与保护. 西华师范大学学报(自然科学版), 25, 68–72.]

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

附录 2 四川省猛禽名录

Appendix 2 The raptors list of Sichuan Province

序号 No.	物种 Species	居留类型 Resident type	区系 Fauna	分布型 Distributi on charts	海拔 Elevation
I 隼形目 Falconiformes					
一 鸢科 Pandionidae					
1	鸢 <i>Pandion haliaetus</i>	旅	古	C	450–1500
二 鹰科 Accipitridae					
2	黑冠鹃隼 <i>Aviceda leuphotes</i>	夏	东	W	450–1400
3	凤头蜂鹰 <i>Pernis ptilorhyncus</i>	<i>P. p. orientalis</i> : 旅 <i>P. p. ruficollis</i> : 夏	东	W	450–2884
4	黑翅鸢 <i>Elanus caeruleus</i>	—	东	W	1234, 1520
5	黑鸢 <i>Milvus migrans</i>	留	古	U	300–4730
6	玉带海雕 <i>Haliaeetus leucoryphus</i> *	夏	古	D	2000–5100
7	白尾海雕 <i>Haliaeetus albicilla</i> *	冬	古	U	1300–5249
8	胡兀鹫 <i>Gypaetus barbatus</i> *	留	广	O	2000–4920
9	高山兀鹫 <i>Gyps himalayensis</i>	留	广	O	2500–4750
10	秃鹫 <i>Aegypius monachus</i>	留	广	O	300–5000
11	短趾雕 <i>Circus gallicus</i>	旅	广	O	1900–3400
12	蛇雕 <i>Spilornis cheela</i>	留	广	W	900–1760
13	白腹鸢 <i>Circus spilonotus</i>	旅	古	M	300–5000
14	白尾鸢 <i>Circus cyaneus</i>	旅	古	C	270–5000
15	草原鸢 <i>Circus macrourus</i>	留	古	D	1900–4200
16	鹊鸢 <i>Circus melanoleucos</i>	旅	古	M	500–2670
17	凤头鹰 <i>Accipiter trivirgatus</i>	夏	东	W	500–1800
18	赤腹鹰 <i>Accipiter soloensis</i>	夏	东	W	500–1000
19	日本松雀鹰 <i>Accipiter gularis</i>	旅	东	W	300–1300

20	松雀鹰 <i>Accipiter virgatus</i>	夏	东	W	400–3200
		<i>A.n.nisosimilis</i> : 冬			
21	雀鹰 <i>Accipiter nisus</i>	<i>A.n.melaschistos</i> : 留	古	U	300–4109
		<i>A.g.schvedowi</i> : 旅			
22	苍鹰 <i>Accipiter gentilis</i>	<i>A.g.khamensis</i> : 夏	古	C	400–5000
23	灰脸鵟鹰 <i>Butastur indicus</i>	旅	古	M	850–1500
		<i>B.b.vulpinus</i> : 冬			
24	普通鵟 <i>Buteo buteo</i>	<i>B.b.japonicus</i> : 冬	古	U	200–4680
25	大鵟 <i>Buteo hemilasius</i>	留	古	D	315–5000
26	毛脚鵟 <i>Buteo lagopus</i>	冬	古	C	910–2884
27	林雕 <i>Ictinaetus malayensis</i>	–	东	W	1500–2800
28	乌雕 <i>Aquila clanga</i>	旅	古	U	500–2600
29	草原雕 <i>Aquila nipalensis</i>	旅	古	D	800–5100
30	白肩雕 <i>Aquila heliaca</i> *	冬	广	O	3450
31	金雕 <i>Aquila chrysaetos</i> *	留	古	C	1000–5300
32	白腹隼雕 <i>Hieraaetus fasciata</i>	–	东	W	600–1200
33	靴隼雕 <i>Hieraaetus pennatus</i>	旅	广	O	550
34	鹰雕 <i>Spizaetus nipalensis</i>	留	东	W	1480–2800
三 隼科 Falconidae					
35	黄爪隼 <i>Falco naumanni</i>	旅	古	U	800–3850
		<i>F.t.interstinctus</i> : 留			
36	红隼 <i>Falco tinnunculus</i>	<i>F.t.tinnunculus</i> : 冬	广	O	350–4402
37	红脚隼 <i>Falco amurensis</i>	旅	古	U	350–4000
38	灰背隼 <i>Falco columbarius</i>	旅	古	C	300–4000
		<i>F.s.subbuteo</i> : 旅			
39	燕隼 <i>Falco subbuteo</i>	<i>F.s.streichi</i> : 夏	东	U	550–3697
40	猎隼 <i>Falco cherrug</i>	留	古	C	3000–4120

41	游隼 <i>Falco peregrinus</i>	留	古	C	2300–4040
II 鸮形目 Strigiformes					
四 草鸮科 Tytonidae					
42	东方草鸮 <i>Tyto longimembris</i>	留	广	O	350–1500
五 鸱鸃科 Strigidae					
43	领角鸮 <i>Otus lettia</i>	<i>O.lussuriensis</i> : 冬 <i>O.l.erythrocampe</i> : 夏	东	W	350–3900
44	红角鸮 <i>Otus sunia</i>	<i>O.s.stictonotus</i> : 旅 <i>O.s.malayanus</i> : 夏	广	O	300–2800
45	雕鸮 <i>Bubo bubo</i>	<i>B.b.hemachanus</i> : 留 <i>B.b.kiautschensis</i> : 留	古	U	500–4410
46	黄腿渔鸮 <i>Ketupa flavipes</i>	留	东	W	2000–3200
47	褐林鸮 <i>Strix leptogrammica</i>	夏	东	W	280–1300
48	灰林鸮 <i>Strix aluco</i>	留	广	O	500–3600
49	四川林鸮 <i>Strix davidi</i>	留	古	U	1000–3820
50	领鸺鹠 <i>Glaucidium brodiei</i>	留	东	W	280–3300
51	斑头鸺鹠 <i>Glaucidium cuculoides</i>	留	东	W	400–3900
52	纵纹腹小鸮 <i>Athene noctua</i>	<i>A.n.ludlowi</i> : 留 <i>A.n.impasta</i> : 留	古	U	1700–3400
53	鬼鸮 <i>Aegolius funereus</i>	冬	古	C	1900–4000
54	鹰鸮 <i>Ninox scutulata</i>	夏	东	W	400–1500
55	长耳鸮 <i>Asio otus</i>	旅	古	C	400–2600
56	短耳鸮 <i>Asio flammeus</i>	旅	古	C	350–2600

1. “*”物种为国家一级重点保护动物。“*”The first class national protected animals.
2. 居留类型: 旅: 旅鸟; 留: 留鸟; 夏: 夏候鸟; 冬: 冬候鸟。“–”现有调查数据和文献资料不能确定居留类型的物种。
- Resident type: P, Passage migrant; R, Resident; S, Summer visitor; W, Winter visitor. “–”: Uncertain species.

梁敏仪, 冉江洪, 梁思琪, 吴永杰, 余翔. 四川省猛禽多样性及迁徙路线. 生物多样性, 2016, 24 (12): 1408–1413.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016238>

3. 区系: 古: 古北界; 东: 东洋界; 广: 广布种。

Fauna: P, Palearctic realm; O, Oriental realm; W, Widespread species.

4. 分布型: 按张荣祖(2011): “C”全北型; “U”古北型; “M”东北型; “D”中亚型; “W”东洋型; “O”不易归类的分布。

Distribution charts: C, The north type; U, Palaearctic type; M, Northeast type;

D, Central-Asia type; W, Oriental type; O, Difficult to classify.

•生物编目•

滇西北县域生物多样性本底调查与评估

武建勇¹ 彭 华² 蒋学龙³ 薛达元^{4*} 杜 凡⁵ 韩联宪⁵ 杨祝良² 税玉民²
刘培贵² 杨晓君³ 江望高⁶ 王跃华⁶ 赵富伟¹ 戴 蓉¹

1 (环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

2 (中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650201)

3 (中国科学院昆明动物研究所, 昆明 650223)

4 (中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081)

5 (西南林业大学林学院, 昆明 650224)

6 (云南大学生命科学学院, 昆明 650091)

摘要: 中国是世界上生物多样性最丰富的国家之一, 同时也是生物多样性受威胁最严重的国家之一。为了有效保护生物多样性, 2010年国务院批准实施了《中国生物多样性保护战略与行动计划(2010–2030年)》, 划定了32个陆地生物多样性保护优先区, 并设定了开展优先区生物多样性本底调查的战略目标、优先领域与优先行动。为此, 2010–2011年, 环境保护部联合中国科学院和高校的科研人员, 在滇西北开展了18个县的以县域为单元的生物多样性本底示范调查与研究。调查内容包括生态系统(植被类型)和物种两个层次。生态系统主要调查县域内植被类型的多样性, 完成了以群系为单位的植被类型编目; 物种层次主要调查县域内高等植物、脊椎动物、大型真菌的物种多样性组成、数量和用途等, 分析了特有物种和珍稀濒危物种数量等, 完成了县域物种编目。本文基于调查结果, 比较研究了不同县域间的生物多样性组成, 发现植被类型(108个群系)和物种(高等植物4,481种、脊椎动物625种、大型真菌222种)最丰富的县均为玉龙县。同时, 与历史记录对比研究发现, 滇西北的生物多样性分布数据十分欠缺, 严重影响了生物多样性保护的客观有效决策。生物多样性本底调查是生物多样性保护的一项基础工作, 本研究为中国未来开展大规模的生物多样性本底调查与评估提供了案例。

关键词: 生物多样性; 调查; 编目; 保护; 滇西北

An inventory of county-level biodiversity in Northwest Yunnan

Jianyong Wu¹, Hua Peng², Xuelong Jiang³, Dayuan Xue^{4*}, Fan Du⁵, Lianxian Han⁵, Zhuliang Yang², Yumin Shui², Peigui Liu², Xiaojun Yang³, Wanggao Jiang⁶, Yuehua Wang⁶, Fuwei Zhao¹, Rong Dai¹

1 Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Nanjing 210042

2 Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

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

4 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081

5 College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224

6 School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract: China is one of the world's richest countries in terms of biodiversity, which has been seriously threatened. In 2010, to effectively protect biodiversity, the State Council of China authorized the Protection Strategy and Action Plan of China Biological Diversity (Year 2010–2030), in which 32 terrestrial Biodiversity Priority Areas were delineated as preferential areas, and background surveys of biodiversity in these areas were also discussed. To protect biodiversity, the Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, alongside various research institutions such as Chinese Academy of Sciences and universities, conducted biodiversity background surveys at the county level in 18 counties in Northwest Yunnan of

收稿日期: 2016-06-11; 接受日期: 2016-10-24

基金项目: 环境保护部“生物多样性保护专项”

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xuedayuan@hotmail.com

the southern section of the Hengduan Mountains Area from 2010 to 2011. The survey included ecosystems and species. At the ecosystem level, the survey investigated the diversity of vegetation formations within each county. At the species level, the survey investigated diversity of species composition, quantity, and usage of higher plants, vertebrates, and macro-fungi, analyzed the quantities of endemic, rare, and endangered species. The survey culminated in a species inventory at the county level. Based on the survey results, a comparative analysis of biodiversity composition among different counties was conducted. Among the 18 investigated counties, Yulong County, Jianchuan County, Gucheng District, Shangri-La County, and Eryuan County have relatively abundant ecosystem types. While all of these counties have more than 48 formations, Yulong County has the largest number of formations (108 formations). The formations of other counties ranged from 20 to 40. Yulong County not only has the richest vegetation formations, it also has the most abundant number of species (including 4,550 higher plants, 625 vertebrates, and 222 macro-fungi). The region also has a high proportion of endemic species. With respect to higher plants, the ratio of endemic species in most of the counties is about 20%, however, the ratio can approach or exceed 50%. With respect to animal species, the ratio of endemic species in most of the counties is about 10%, with the highest ratio in Heqing County, where 46 endemic species account for 17% of the total species. The authors hold that a comprehensive biodiversity survey is a necessary basis and hence suggest that this study be taken as a case for large-scale biodiversity investigations in the future.

Key words: biodiversity; survey; inventory; conservation; Northwest Yunnan

1993年生效的《生物多样性公约》是全球环境保护领域最重要的多边协定之一(薛达元等, 2012)。

《生物多样性公约》将生物多样性定义为生物(动物、植物、微生物)与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和, 包括生态系统、物种、遗传3个层次的多样性(Chandra & Idrisova, 2011)。生物多样性是人类生产生活的重要物质基础, 对于维持人类生存起着十分重要的作用。尽管如此, 人类对生物多样性现状的掌握仍十分有限, 而且由于气候变化、资源过度利用、外来物种入侵、污染、土地利用变化等因素, 生物多样性面临着严重的威胁(Ayyad, 2003; Bellard et al, 2012)。全球生物多样性持续下降, 在被评估的350,000种植物中, 有20%处于受威胁状态(Walsh et al, 2015)。一个国家的生物多样性编目是开展生物多样性保护与规划的首要步骤(Smith & Figueiredo, 2010), 是生物多样性保护的核心内容。准确的生物多样性分布数据有助于识别亟需优先保护的区域或类群。

中国是世界上生物多样性最丰富的国家之一, 具有森林、灌丛、草甸、草原、荒漠和湿地等各类陆地生态系统以及黄海、东海、南海和黑潮河流域等海洋生态系统; 拥有高等植物35,112种(居世界第3位)(王利松等, 2015), 脊椎动物6,445种(占世界总数的13.7%), 已查明真菌种类约1万种(占世界总数的14%); 据不完全统计, 有栽培作物1,339种, 家养

动物品种576个(武建勇等, 2013)。尽管中国过去也开展了大量的生物多样性调查工作, 但主要集中于对重要物种和局部区域的生物多样性开展调查, 缺乏系统性、精细化的生物多样性本底性质的全面调查。2010年国务院批准发布实施的《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年)》明确提出要开展生物多样性本底调查与评估。为此, 2010–2011年, 环境保护部组织专家启动了生物多样性保护优先区县域生物多样性本底调查与评估示范研究工作, 旨在为更大规模的本底调查工作提供示范。本文主要介绍县域生物多样性本底调查方案的设计与滇西北18个县的调查成果, 为开展类似工作提供参考。

1 研究地概况

滇西北地区位于24°38′–29°15′ N、98°05′–101°16′ E之间, 面积为7.98万km², 约占云南省总面积的20.2%, 占全国陆域总面积的0.8%。行政区域包括云南省迪庆州的德钦、香格里拉、维西县, 怒江州的贡山、福贡、泸水、兰坪县, 大理州的大理市、宾川、剑川、鹤庆、洱源、云龙县, 丽江市的古城、宁蒗、玉龙县, 保山市的隆阳区、腾冲县(图1)。滇西北是横断山的核心区域, 处于青藏高原至云贵高原的过渡地带, 是典型的高山峡谷地貌, 从海拔6,742 m的梅里雪山最高峰到700 m左右的怒江河



图1 开展生物多样性本底调查的滇西北18县市区分布图
Fig. 1 Map for 18 counties of the biodiversity background survey at the county level in Northwest Yunnan

谷,具有明显而完整的地带垂直带谱,特殊的地形地貌和复杂多样的气候使该区域成为全球生物多样性最为丰富的地区之一(张燕妮等, 2013);同时,还是《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年)》划定的32个陆地生物多样性保护优先区的部分区域。滇西北在自然区域上属于喜马拉雅山系东部的横断山脉纵谷区,地形地貌特殊,气候复杂多样,拥有中国近1/3的高等植物和动物种数,属中国三大特有物种起源和分化中心区域,分布着丰富而多样化的基因资源和动植物类群,保存有大量古老的生物类群,是中国原生生态系统保留最完好、垂直生态系统最完整以及全球温带生态系统最具代表性的地区。

2 方法

2010–2011年,环境保护部委托环境保护部南京环境科学研究所组织中国科学院昆明植物研究

所、中国科学院昆明动物研究所、云南大学、西南林业大学4个单位对滇西北18个县(市、区)的植被与高等植物、脊椎动物、大型真菌开展了调查(附录1)。实地调查中,按县域范围和类群划分了10个调查组,各县依据调查内容分为了植被与植物调查组、动物调查组、大型真菌调查组,有些调查组又分不同的调查小组,如动物调查组又分为哺乳动物调查小组、鸟类调查小组、两栖爬行类调查小组。在野外调查中,主要依据不同的植被类型、生境类型等布设样点,再依据类群采取不同的调查方法。调查结果以县域为单位进行汇总,即每个县单独提交植被与植物、动物、大型真菌的名录和报告。本文是在各调查组提交的共54个名录与报告的基础上,汇总整理、分析提炼编写而成。

2.1 植被类型调查

主要以《中国植被》(中国植被编辑委员会, 1980)中的群系为具体单位,通过踏查、样方调查等方法,调查每一县域内植被类型的组成、分布、受威胁因素等,记录建群种、优势种、伴生种等群落组成和特征以及盖度、多度、频度等信息,结合文献资料(如《云南植被》(云南植被编写组, 1987)、区域性调查资料等)记载,完成县域植被类型群系名录构建。

2.2 物种调查

按照不同的季节,通过样线和样方调查等方法(不同类群采用一种或多种调查方法),对每个县域内所有的高等植物、陆生脊椎动物和大型真菌物种进行多次调查,记录、采集标本、拍摄照片等,按照要求,每个物种采集4份标本分别保存在不同的单位(考虑到动物的特殊性,减少标本采集)。在调查的基础上,结合历史资料(馆藏标本和文献资料),完成每个县的物种编目,每一物种须有标本、照片、文献等来源凭证(附录2)。标本包括本次采集的标本和馆藏历史标本,引证最近年份标本(包括标本馆藏处与采集时间);照片主要是本次或近年调查拍摄的能准确确定种名的照片,不包括不能确定种名的照片,疑难物种的鉴定请专科专属类群的专家协助完成;文献主要指国内外权威的分类学文献,包括地方志书、专类著作、区域性考察资料、学术期刊等;记名或目击是指在实地调查中,对于一些常见且在野外可以确定种名的物种,可不采集标本,只记录种名。调查共采集植物标本37,000余号、动

物标本7,400余号、大型真菌标本7,000余份,由于一些单位保存条件的限制等,目前大部分标本主要保存在相应调查承担单位的标本馆(室)。

2.3 数据整理

参考《中国生物物种名录》(中国科学院生物多样性委员会, 2015)对物种名称进行规范,确定物种的接受名,最终完成了县域物种编目;同时,在调查的基础上,分析了每个县内的物种多样性、中国特有物种、重点保护物种、珍稀濒危物种、资源物种等信息。其中,物种多样性分析包括科、属、种各分类阶元的多样性;重点保护物种主要依据国家林业局分别于1999年和1989年发布的《国家重点保护野生植物名录》(第一批)和《国家重点保护野生动物名录》;珍稀濒危物种主要依据环境保护部和中国科学院分别于2013年和2015年联合发布的《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)和《中国生物多样性红色名录: 脊椎动物卷》(http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201505/t2015-0525_302233.htm);资源物种主要参考《中国资源植物》(朱太平等, 2007)一书,将其分为材用、药用、园林绿化、食用、鞣质与染料、油料、香料、蜜源、纤维和其他10类,因数据不系统,下文不作详细统计分析。

3 结果

3.1 植被类型多样性

在所调查的18个县中,依据群系数量来划分,

分布最多的为玉龙县(9个植被型108个群系),其次为剑川县(9个植被型88个群系),古城区(8个植被型86个群系),香格里拉县(9个植被型72个群系),洱源县(9个植被型68个群系);分布群系较少的县为鹤庆县(7个植被型12个群系)、宾川县(6个植被型15个群系)、隆阳区(7个植被型15个群系)、宁蒗县(6个植被型17个群系)、腾冲县(7个植被型18个群系);其余县域群系数量都在20–40之间(图2)。

3.2 物种多样性

(1)植物物种多样性。在所调查的18个县中,依据物种数量来划分,分布最丰富的为玉龙县(274科1,206属4,481种),其次为香格里拉县(251科1,141属4,242种)、德钦县(244科1,134属4,055种)和贡山县(276科1,228属4,011种);其余县物种数量都在2,000种左右,物种数量最少的为云龙县(196科730属1,638种)(附录3)。

(2)动物物种多样性。在所调查的18个县中,依据兽类、鸟类、两栖类、爬行类合计种类数量来划分,物种数量在500种以上的有腾冲县(120科351属625种)、玉龙县(112科317属568种)、隆阳区(116科357属562种)、泸水县(111科302属532种);近一半县域分布物种数在400种左右;其他县域都有300种左右,种类数量最少的为鹤庆县(89科189属277种)(附录3)。

在各县的动物物种中,一般鸟类占比例最高,其次为兽类,两栖和爬行类种类较少。比如在动物种类最多的腾冲县的120科351属625种动物物种中,有鸟类75科222属431种、兽类26科81属116种、爬

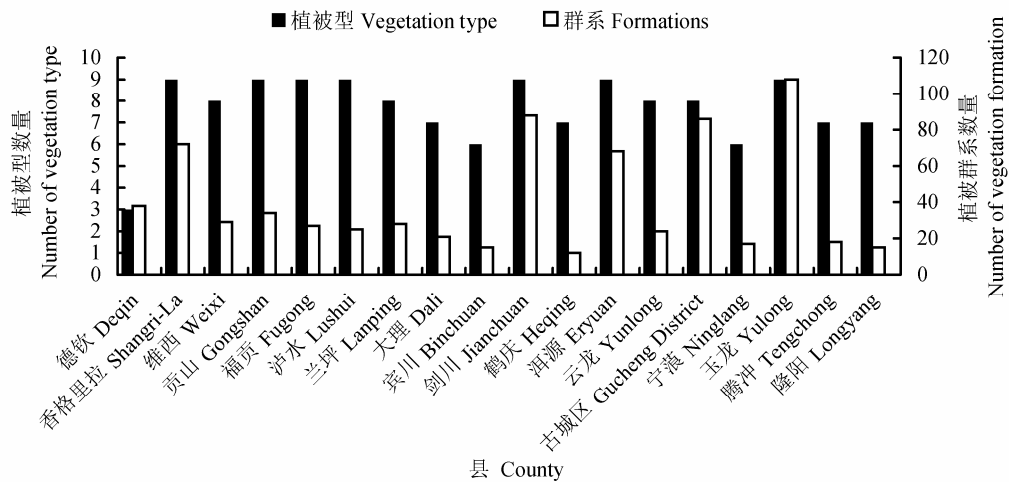


图2 滇西北18县县域植被类型多样性
Fig. 2 Vegetation diversity of 18 counties in Northwest Yunnan

行类10科27属42种、两栖类9科21属36种。

兽类最多的为腾冲县(26科81属116种)、泸水县(25科78属116种)、香格里拉县(26科77属113种)、隆阳区(28科83属112种)、玉龙县(26科76属109种), 种类都在100种以上, 分布较少的为剑川县(20科39属43种)、古城区(14科30属43种)、洱源县(21科37属46种)、维西县(19科43属55种)、福贡县(16科45属68种), 其余7个县物种数量都在70–90种之间。

鸟类最多的县为腾冲县(75科222属431种)、玉龙县(70科207属415种)、隆阳区(70科228属383种)、泸水(68科184属355种), 种类最少的为鹤庆县(51科104属164种), 其余县域包含种类都在200–300种。

两栖类物种分布多在20–30种, 分布最多的为腾冲县(9科21属36种), 其次为隆阳区(9科20属32种)、云龙县(9科18属26种)、泸水县(8科15属26种); 分布种类最少的为维西县(5科6属9种)和贡山县(5科7属9种)。

各县记录到的爬行类物种比两栖类物种多, 爬行类分布最多的为腾冲县(10科27属42种), 其次为隆阳区(9科26属35种)和泸水县(10科25属35种); 大多数县域爬行类分布数量在20种左右, 如兰坪县(7科22属28种)、玉龙县(6科16属21种)、福贡县(6科16属18种); 个别县域种类在15种以下, 分布种类最少的为维西县(2科6属9种), 其次为德钦县(5科10属12种)、古城区(5科10属12种)和云龙县(5科14属15种)。

(3)大型真菌物种多样性。在所调查的18个县中, 大型真菌分布种类最多的为香格里拉县(63科130属417种); 分布种类最少的为剑川县(30科56属94种), 其次为鹤庆县(25科29属124种), 云龙县(33科64属129种); 大多数县分布的种类在200种左右, 例如兰坪县有48科101属252种, 古城区有34科61属182种(附录3)。

(4)中国特有种多样性。滇西北不仅物种丰富, 而且特有种比例较高。就高等植物而言, 大多数县域特有种比例在20%左右, 个别县域接近或超过50%, 如香格里拉有特有种2,858种(占总物种数的66%), 古城区有1,981种(占总物种数的58%), 洱源县1,211种(占县域总物种数的53%); 少数县域特有种比例在20%以下, 甚至10%以下, 如维西县记录到的特有种仅105种(占县域植物总数的4%)。

对于动物物种来说, 大多数县域的特有种比例在10%左右; 特有种比例最小的为洱源县, 记录到19

种(占县域动物物种总数的5%); 特有种比例最大的为鹤庆县, 记录到46种(占县域总数的17%); 其次为德钦县(62种, 占比15%)、维西县(43种, 占比15%)、宾川县(45种, 占比15%)和云龙县(56种, 占比15%)。

(5)珍稀濒危物种。在所调查到的县域物种中, 很多物种处于濒危状态。就植物物种而言, 各县都有近100种为受威胁物种, 受威胁物种数最多的为贡山县(192种), 其次为腾冲县(163种)和德钦县(159种); 对于动物物种而言, 各县受威胁物种多在30种左右, 受威胁物种最多的为腾冲县(60种), 其次为泸水县(52种)、隆阳区(51种)、玉龙县(49种)和香格里拉县(40种)。

(6)保护物种。各县有国家重点保护植物10种左右, 国家重点保护植物分布最多的县为贡山县(20种), 其次为腾冲县(19种)和德钦县(15种), 其余县域都在15种以下; 各县分布的国家重点保护动物多在40–50种, 分布最多的县为腾冲县(75种), 其次为玉龙县(73种)、隆阳区(67种)和兰坪县(65种), 国家重点保护动物最少的为宾川县(17种)和鹤庆县(18种)。

4 讨论

有效获取生物多样性分布数据是可持续利用和管理决策的关键(Sousa-Baena et al, 2014), 许多案例表明, 可靠的物种分布信息的缺乏导致物种的保护效果难以达到预期(Swan et al, 2014)。尽管中国已在生物多样性调查方面做了大量的工作, 也初步在大尺度上掌握了基本组成, 但通过滇西北示范调查发现, 中国生物多样性本底调查工作薄弱, 物种分布数据掌握不够详尽。就高等植物来说, 与历史记录(陈丽等, 2013)相比, 除了维西县和大理市受调查范围所限, 种类较历史记录较少外, 其余县域调查数据都较历史记录大量增加, 增加种类最多、比例最大的县域为隆阳区(较历史记录增加1,226种, 增加比例为123.5%); 其次为腾冲县、云龙县和剑川县, 增加种类都在700种以上, 增加比例都在50%以上。

中国还面临现有分布数据比较分散、缺乏有效整合的问题。一些调查数据、标本、资料集中在个人手里, 缺乏全国范围内系统而全面的调查和对现有零散调查成果的系统整合。本次调查数据远远多于中国植物数字标本馆记录的数据, 18个县中有8个县的植物分布种类记录增加100%以上, 个别县

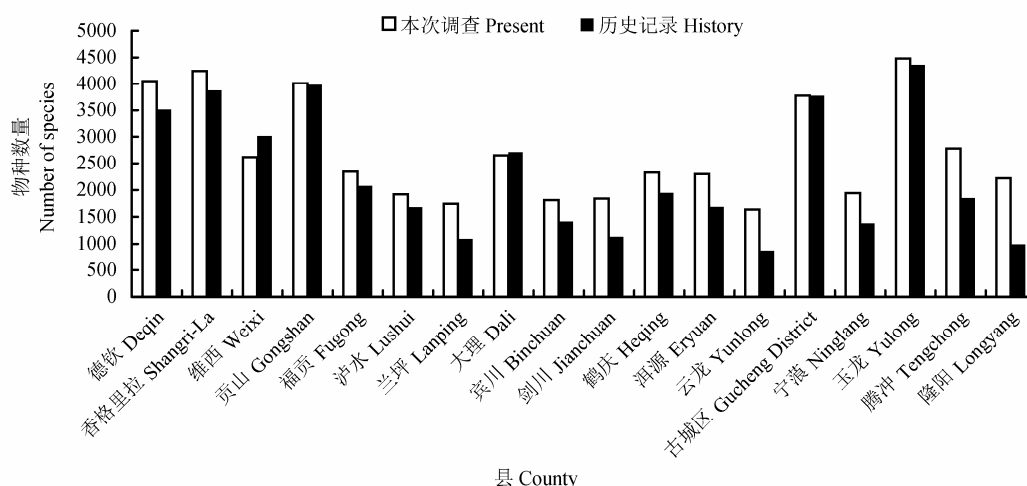


图3 本次调查数据与历史记录比较

Fig. 3 Compare of present and history number of plant species in 18 counties

域增加种类百分比高达400%多,甚至达1000%多(附录4)。在中国数字植物标本馆中一些县的物种分布数据仅与物种数相当,也就是说一个物种的分布记录只有一笔数据或有限数量的记录。另外,馆藏标本的代表性很差,各地区、各类群的采集十分不均衡,而取样的偏差直接影响到生物多样性丰富度统计的准确性(杨永, 2012; Yang et al, 2013)。如本研究中,玉龙和香格里拉两县物种多样性最为丰富,除了两县本身面积较大外,主要的原因是历史以来两县的调查工作较多,调查充分,同时专家本人手里也积攒了一些调查资料,致使两县的本底数据比较翔实。

生物多样性本底不清是中国生物多样性保护面临的重大问题之一。很多国家已经完成以经纬度范围、采用拉网式的物种资源普查。如意大利为有效落实全球植物保护战略目标并评估落实程度,在调查的基础上,以100 km²一个网格完成了全国植物重要区域的识别与划分(Blasi et al, 2011)。长期以来,中国的生物多样性调查工作主要以行政单元开展,积累了丰富的数据,大部分数据以县作为基本单元进行记录和统计,同时,县域也是中国当前进行行政管理的基本单元。2010–2011年,环保部组织开展了云南、贵州、广西三省(区)26县(市、区)县域生物多样性综合示范调查,取得了成功经验(薛达元和武建勇, 2016)。鉴于中国的实际情况,为获得细致的生物多样性分布数据,加强生物多样性的精细化、系统化管理,同时,考虑到与历史数据的衔

接,后期便于管理和利用相关数据,建议我国投入大量资金,开展以县域为单元的生物多样性本底调查,建立以县域为单元的生物多样性数据库。在开展生物多样性普查的同时,选择符合条件的样点,建立固定样线(样方、样点等),作为生物多样性监测的永久观察点,进行定期观察,获得动态数据,形成地区乃至全国的生物多样性监测网络体系。此外,需要关注珍稀濒危物种以外其他物种的保护以及遗传多样性的保护,并提升保护区的管理质量。同时,要完善中国生物多样性保护的法律法规体系,加强现有法规的执法力度。

致谢: 感谢云南省环境保护厅在野外调查中的协调帮助。感谢中国科学院昆明植物研究所、中国科学院昆明动物研究所、西南林业大学、云南大学相关专家的辛苦工作。感谢中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)提供数据查询,为本文讨论提供了对比。感谢审稿专家提出的宝贵建议和意见。

参考文献

- Ayyad MA (2003) Case studies in the conservation of biodiversity: degradation and threats. *Journal of Arid Environments*, 54, 165–182.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365–377.
- Biodiversity Committee, Chinese Academy of Sciences (2015) *Catalogue of Life China*. Science Press, Beijing. [中国科学院生物多样性委员会 (2015) 中国生物物种名录. 科学出版社, 北京.]
- Blasi C, Marignani M, Copiz R, Fipaldini M, Bonacquisti S,

- Vico ED, Rosati L, Zavattero L (2011) Important plant areas in Italy: from data to mapping. *Biological Conservation*, 144, 220–226.
- Chandra A, Idrisova A (2011) Convention on Biological Diversity: a review of national challenges and opportunities for implementation. *Biodiversity and Conservation*, 20, 3295–3316.
- Chen L, Dong HJ, Peng H (2013) Diversity and distribution of higher plants in Yunnan, China. *Biodiversity Science*, 21, 359–363. (in Chinese with English abstract) [陈丽, 董洪进, 彭华 (2013) 云南省高等植物多样性与分布状况. *生物多样性*, 21, 359–363.]
- Compilation Group of the Yunnan Vegetation (1987) *Yunnan Vegetation*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [云南植被编写组 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Smith GF, Figueiredo E (2010) E-taxonomy: an affordable tool to fill the biodiversity knowledge gap. *Biodiversity and Conservation*, 19, 829–836.
- Sousa-Baena SM, Garcia LC, Peterson AT (2014) Completeness of digital accessible knowledge of the plants of Brazil and priorities for survey and inventory. *Diversity and Distributions*, 20, 369–381.
- Swan M, Stefano JD, Christie F, Steel E, York A (2014) Detecting mammals in heterogeneous landscapes: implications for biodiversity monitoring and management. *Biodiversity and Conservation*, 23, 343–355.
- The Editorial Committee of Vegetation of China (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国植被编辑委员会 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Walsh A, Finn J, Jebb M, Waldren S, Sullivan C (2015) The distribution of vascular plant species of conservation concern in Ireland, and their coincidence with designated areas. *Journal of Nature Conservation*, 24, 56–62.
- Wang LS, Jia Y, Zhang XC, Qin HN (2015) Overview of higher plant diversity in China. *Biodiversity Science*, 23, 217–224. (in Chinese with English abstract) [王利松, 贾渝, 张宪春, 覃海宁 (2015) 中国高等植物多样性. *生物多样性*, 23, 217–224.]
- Wu JY, Xue DY, Zhao FW, Wang YJ (2013) Progress of the study on investigation and conservation of biodiversity in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 29, 146–151. (in Chinese with English abstract) [武建勇, 薛达元, 赵富伟, 王艳杰 (2013) 中国生物多样性调查与保护研究进展. *生态与农村环境学报*, 29, 146–151.]
- Xue DY, Wu JY, Zhao FW (2012) Action, progress and prospects in implementation of the Convention on Biological Diversity during the past 20 years in China. *Biodiversity Science*, 20, 623–632. (in Chinese with English abstract) [薛达元, 武建勇, 赵富伟 (2012) 中国履行《生物多样性公约》二十年: 行动、进展和展望. *生物多样性*, 20, 623–632.]
- Xue DY, Wu JY (2016) The Technical Guidelines for Biodiversity Survey and Inventory, and Demonstration Practices in the 26 Counties of Yunnan, Guizhou and Guangxi Provinces in China. China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese) [薛达元, 武建勇 (2016) 生物多样性本底调查技术规范与滇黔桂26县调查示范研究. 中国环境出版社, 北京.]
- Yang WJ, Ma KP, Kreft H (2013) Geographical sampling bias in a large distributional database and its effects on species richness-environment models. *Journal of Biogeography*, 40, 1415–1426.
- Yang Y (2012) Holdings of type specimens of plants in herbaria of China. *Biodiversity Science*, 20, 512–516. (in Chinese with English abstract) [杨永 (2012) 中国植物模式标本的馆藏量. *生物多样性*, 20, 512–516.]
- Zhang YN, Zhang ZM, Geng YP, Ou XK, Peng SJ, Wang WL, Feng X, Guo JW (2013) Priority plant communities for conservation in Northwest Yunnan. *Biodiversity Science*, 21, 296–305. (in Chinese with English abstract) [张燕妮, 张志明, 耿宇鹏, 欧晓昆, 彭声静, 王文礼, 冯欣, 吕靖雯 (2013) 滇西北地区优先保护的植物群落类型. *生物多样性*, 21, 296–305.]
- Zhu TP, Liu L, Zhu M (2007) *Resource Plants in China*. Science Press, Beijing [朱太平, 刘亮, 朱明 (2007) 中国资源植物. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 各类群承担单位与负责人

Appendix 1 Units and persons of responsible for group
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016154-1.pdf>

附录2 物种编目凭证引用格式

Appendix 2 Format of vouchers for species inventory
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016154-2.pdf>

附录3 滇西北18县市区县域物种多样性

Appendix 3 County-level species diversity of 18 counties in Northwest Yunnan
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016154-3.pdf>

附录4 中国数字植物标本馆收集的18县主要标本馆的标本数据(申请于中国数字植物标本馆)

Appendix 4 Specimen data of 18 counties from the collection of Chinese Virtual Herbarium
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016154-4.pdf>

武建勇, 彭华, 蒋学龙, 薛达元, 杜凡, 韩联宪, 杨祝良, 税玉民, 刘培贵, 杨晓君, 江望高, 王跃华, 赵富伟, 戴蓉. 滇西北县域生物多样性本底调查与评估. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1414–1420.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016154>

附录1 各类群承担单位与负责人
Appendix 1 Units and persons of responsible for group

类群	县域范围	承担单位及负责人
Group	Range of county	Units and persons
植物与植被	维西、兰坪、大理和云龙 4 县市	中科院昆明植物研究所 彭华 研究员
	德钦、宾川、鹤庆和宁蒗 4 县	中科院昆明植物研究所 税玉民 研究员
	香格里拉、剑川、洱源、玉龙和古城 区 5 县区	西南林业大学 杜凡 教授
	贡山、福贡、泸水、腾冲和隆阳 5 县 区	云南大学 王跃华 教授
陆生脊椎动物	泸水、鹤庆、腾冲和隆阳 4 县区	中科院昆明动物研究所 杨晓君 研究员
	大理、宾川、云龙、宁蒗和玉龙 5 县 市	中科院昆明动物研究所 蒋学龙 研究员
	香格里拉、兰坪、剑川、洱源和古城 区 5 县区	西南林业大学 韩联宪 教授
	德钦、贡山和福贡 4 县	云南大学 江望高 教授
大型真菌	贡山、福贡、兰坪、古城、隆阳区、 玉龙、宁蒗、泸水、腾冲 9 县区	中科院昆明植物研究所 杨祝良 研究员
	德钦、维西、香格里拉、洱源、大理、 宾川、云龙、鹤庆和剑川 9 县市	中科院昆明植物研究所 刘培贵 研究员

武建勇, 彭华, 蒋学龙, 薛达元, 杜凡, 韩联宪, 杨祝良, 税玉民, 刘培贵, 杨晓君, 江望高, 王跃华, 赵富伟, 戴蓉. 滇西北县域生物多样性本底调查与评估. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1414–1420.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016154>

附录2 物种编目凭证引用格式
Appendix 2 Format of vouchers for species inventory

中文名 Chinese name	拉丁学名 Latin name	来源及凭证 Resources and vouchers						
		实地调查 Field investigation				资料 Records		
		本次标本 Specimens in this investigation	5 年内标本 Specimens in five years	照片 Photo	记名 Register	标本 Specimens	照片 Photo	文献 Literature

说明: 实地调查(本次标本、5 年内标本、照片、记名)和资料(历史标本、历史照片、文献), 标本、照片栏填 1–3 个最近年份采集或拍摄的标本或照片凭证号, [格式为: “采集号或照片号(藏处), 年份”], 藏处写标本馆代码或简写存放处, 年份为采集或拍摄年份, 文献栏填写相应文献序号, 记名栏填“√”。

武建勇, 彭华, 蒋学龙, 薛达元, 杜凡, 韩联宪, 杨祝良, 税玉民, 刘培贵, 杨晓君, 江望高, 王跃华, 赵富伟, 戴蓉. 滇西北县域生物多样性本底调查与评估. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1414–1420.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016154>

附录3 滇西北18县市区县域物种多样性

Appendix 3 County-level species diversity of 18 counties in Northwest Yunnan

大类	类群	分类等级	德 钦	香 格 里 拉	维 西	贡 山	福 贡	泸 水	兰 坪	大 理	宾 川	剑 川	鹤 庆	洱 源	云 龙	古 城 区	宁 蒗	玉 龙	腾 冲	隆 阳 区
高等植物 Higher Plants	苔藓植物 Bryophytes	科Family	63	53	58	79	53	43	41	50	34	15	31	13	37	71	36	68	41	29
		属Genus	166	154	166	232	126	74	82	166	89	20	69	16	74	176	91	203	83	47
		种Species	353	314	404	682	302	116	113	356	133	24	105	19	102	413	183	479	178	55
	蕨类植物 Ferns	科Family	33	32	25	43	41	35	15	35	27	27	31	28	29	31	26	37	43	33
		属Genus	64	56	55	120	86	66	29	72	56	54	58	52	58	70	38	78	84	58
		种Species	220	202	163	389	187	155	69	193	120	137	144	144	140	216	75	253	163	93
	裸子植物 Gymnosperms	科Family	7	5	5	6	6	6	5	4	4	4	7	4	5	6	6	5	9	7
		属Genus	17	15	14	14	12	15	12	7	8	12	12	8	12	16	11	15	14	12
		种Species	36	32	23	20	16	22	15	10	10	18	19	14	26	33	19	32	17	14
	被子植物 Angiosperms	科Family	141	161	120	148	136	147	133	124	146	136	144	158	125	181	143	164	162	155
		属Genus	887	916	633	862	690	720	648	681	710	628	807	741	586	895	692	910	930	850
		种Species	3446	3694	2031	2920	1839	1623	1546	2091	1550	1660	2059	2122	1370	3115	1666	3717	2426	2056
	合计 Total	科Family	244	251	208	276	236	231	194	213	211	182	213	203	196	289	211	274	255	224
		属Genus	1134	1141	868	1228	914	875	759	926	863	714	946	817	730	1157	832	1206	1111	967
		种Species	4055	4242	2621	4011	2344	1916	1743	2650	1813	1839	2327	2299	1638	3777	1943	4481	2784	2218
脊椎动物 Vertebrata	兽类 Mammals	科Family	20	26	19	19	16	25	22	23	21	20	23	21	23	14	23	26	26	28
		属Genus	58	77	43	55	45	78	56	61	49	39	54	37	65	30	57	76	81	83
		种Species	89	113	55	83	68	116	86	85	71	43	76	46	89	43	80	109	116	112
	鸟类 Birds	科Family	60	63	55	67	63	68	59	63	54	54	51	63	58	58	60	70	75	70
		属Genus	158	155	120	167	156	184	126	156	122	125	104	160	139	131	141	207	222	228
		种Species	295	314	213	318	296	355	238	301	202	216	164	296	252	226	254	415	431	383
	两栖类 Amphibia	科Family	5	7	5	5	5	8	8	9	8	7	9	8	9	7	8	10	9	9
		属Genus	6	10	6	7	8	15	14	19	17	10	17	11	18	9	15	18	21	20
		种Species	10	16	9	9	10	26	20	21	19	13	19	15	26	10	18	23	36	32
	爬行类 Reptiles	科Family	5	5	2	3	6	10	7	8	7	4	6	5	5	5	6	6	10	9
		属Genus	10	14	6	13	16	25	22	17	14	12	14	17	14	10	17	16	27	26
		种Species	12	19	9	20	18	35	28	19	18	18	18	19	15	12	20	21	42	35
	合计 Total	科Family	90	101	81	94	90	111	96	103	90	85	89	95	95	84	97	112	120	116
		属Genus	232	256	175	242	225	302	218	253	202	186	189	225	236	180	230	317	351	357
		种Species	406	462	286	430	392	532	372	426	310	290	277	376	382	291	372	568	625	562
大型真菌 Macrofungi	合计 Total	科Family	42	63	51	33	46	49	48	28	36	30	25	27	33	34	45	40	46	39
		属Genus	101	130	93	77	68	92	101		83	56	29		64	61	85		90	76
		种Species	217	417	237	199	160	214	252	207	136	94	124	181	129	182	219	229	222	185

武建勇, 彭华, 蒋学龙, 薛达元, 杜凡, 韩联宪, 杨祝良, 税玉民, 刘培贵, 杨晓君, 江望高, 王跃华, 赵富伟, 戴蓉. 滇西北县域生物多样性本底调查与评估. 生物多样性, 2016, **24** (12): 1414–1420.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016154>

附录4 中国数字植物标本馆收集的18县主要标本馆的标本数据(申请于中国数字植物标本馆)
Appendix 4 Specimen data of 18 counties from the collection of Chinese Virtual Herbarium

县名	德钦	贡山	维西	福贡	香格里拉	丽江	宁蒗	兰坪	剑川	鹤庆	宾川	大理	洱源	云龙	泸水	腾冲	隆阳	古城区
记录数	15325	16641	10364	3636	19286	15050	917	1032	538	3166	2693	11223	2240	213	3308	3921	—	—
种数	2712	2884	2042	1325	2931	3221	397	481	332	1154	845	2156	952	140	1318	1297	—	—

注：保山隆阳区和丽江古城区为新设立行政区，无数据记录。