

• 研究报告 •

热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的分布特征及其影响因素

王邵军* 王 红 李霁航

(西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224)

摘要: 为探明热带森林蚂蚁巢穴的分布特征及其影响因素, 采用样方法研究了西双版纳不同演替阶段热带森林定居巢穴蚂蚁的种类及其巢穴的密度、盖度和空间分布特征, 并分析了土壤理化环境与蚂蚁种类总数、巢穴密度及盖度的相关性。结果表明, 不同演替阶段热带森林蚂蚁种类总数、巢穴的密度及盖度大小顺序为: 小果野芭蕉 (*Musa acuminata*) 群落 > 白背桐 (*Mallotus paniculatus*) 群落 > 思茅崖豆 (*Mellettia leptobotrya*) 群落, 并且热带森林的演替类型显著影响蚂蚁种类总数及巢穴密度, 而对巢穴盖度的影响未达到显著水平; 蚂蚁种类总数、巢穴密度与土壤总有机碳和水解氮显著正相关, 与土壤容重和土壤含水率显著负相关, 但所选择的土壤理化指标与巢穴盖度的相关性均未达到显著水平; 蚂蚁巢穴的空间分布呈随机分布格局。我们的数据表明, 不同演替阶段热带森林所形成的植被类型及土壤环境状况共同影响定居的蚂蚁种类总数与筑巢密度。

关键词: 蚂蚁巢穴; 蚂蚁种类; 空间分布; 土壤性质; 热带森林演替

Distribution characteristics of ant mounds and correlating factors across different succession stages of tropical forests in Xishuangbanna

Shaojun Wang*, Hong Wang, Jihang Li

Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224

Abstract: In order to understand the distribution characteristics of ant mounds and influencing factors in tropical forests, we surveyed ant species, density, coverage and spatial distribution patterns of ant mounds in three successional stages of tropical forests in Xishuangbanna and analyzed correlations between these variables with soil physico-chemical properties. We found that (1) ant species richness, density and coverage of ant mounds in the three successional stages of tropical forests were ranked as: *Musa acuminata* community > *Mallotus paniculatus* community > *Mellettia leptobotrya* community; (2) successional forest type significantly impacted ant species richness and density of ant mounds but had no significant effects on ant mound coverage; (3) ant species richness and nest density was significantly and positively correlated with total soil organic carbon and soil hydrolysis nitrogen, but negatively correlated with soil bulk density and soil moisture content, besides, there were no significant correlations between soil physico-chemical properties and mound coverage. The spatial patterns of ant mounds indicated a random distribution. We conclude that the successional vegetation types and soil properties may exert a crucial effect on ant species richness and settlement density in secondary tropical forests of Xishuangbanna.

Key words: ant mounds; ant species; spatial distribution; soil properties; tropical forest succession

蚂蚁作为主要的土壤大型节肢动物, 在生态系统中属互利共生者及捕食者, 具有重要的地位及功能(Hölldobler & Wilson, 1990; Schumacher, 2011)。

蚂蚁筑巢定居活动通过搬运、混和、改造及取食有机残体, 能够改变土壤C、N、P等养分循环(Kilpelinen et al, 2007; Wu et al, 2013), 改变土壤孔

收稿日期: 2016-03-27; 接受日期: 2016-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(41461052)和国家林业局 948 项目(2015-4-39)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shaojunwang2009@163.com

隙度、温湿度、pH值及C、N含量等土壤理化状况(Cammeraat & Risch, 2008; Frouz & Jilkova, 2008; 陈元瑶等, 2012)以及与微生物的共栖关系(Mueller et al, 2011), 从而影响地上植物的生长、多样性及演替(Whitford & Di, 1995; Schumacher, 2011)。

位于热带北缘的西双版纳地区, 是我国大陆热带雨林集中分布的重要区域。由于农业生产方式改变及人口增加等因素的影响, 热带雨林遭到严重破坏, 形成了大面积处于不同演替阶段的次生恢复类型。同时, 该区地貌复杂、小气候多样, 是我国蚂蚁多样性最为丰富的地区(徐正会, 1999; 杨效东等, 2001), 森林次生演替将对蚂蚁筑巢定居活动及巢穴分布产生重要影响。然而, 目前关于蚂蚁的研究主要集中于分类与区系, 而蚂蚁巢穴分布特征及其与土壤理化性质关系的研究还十分缺乏, 且主要以草地与湿地为研究对象, 未见关于热带森林蚂蚁巢穴空间分布特征的研究报道。

本研究以中国科学院西双版纳热带植物园为实验样地, 选择不同演替阶段的热带森林, 研究定居巢穴蚂蚁种类以及巢穴的密度、盖度及空间分布特征, 分析森林演替阶段及土壤理化环境对蚂蚁及巢穴分布的影响, 以期了解蚂蚁筑巢定居活动与不同演替阶段热带森林土壤理化性质之间的相互作用机制。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区位于中国科学院西双版纳热带植物园, 其地理位置为101°16' E、21°55' N。由于地处东南亚热带北缘, 属北热带季风气候区, 年平均气温21.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温7,860℃, 终年无霜。一年中干湿季分明, 年平均降水量1,557 mm, 其中雨季(5–10月)为1,335 mm, 占全年的87%, 干季(11月至次年4月)为202 mm, 仅占全年降水量的13%。地带性植被类型为热带雨林和季雨林。土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤。在实验区内, 选择3个处于不同演替阶段的热带森林群落, 样地基本情况如下:

白背桐(*Mallotus paniculatus*)群落, 简称MP, 演替年限约12年, 海拔600 m, 盖度60%左右, 枯枝落叶层厚1–2 cm; 样地主要树种为白背桐、高檐蒲桃(*Syzygium oblatus*)、椴叶山麻秆(*Alchornea tiliifolia*)、粉被金合欢(*Acacia pruinescens*)、野生风轮草(*Clinopodium chinensis*)等。

小果野芭蕉(*Musa acuminata*)群落, 简称MA, 演替年限约28年, 海拔535 m, 盖度85%左右, 覆盖枯枝落叶2–4 cm; 样地主要树种为小果野芭蕉、董棕(*Caryota urens*)、勐仑翅子树(*Pterospermum menglungense*)、银叶砂仁(*Amomum sericeum*)、宽叶楼梯草(*Elatostema platyphyllum*)、密果短肠蕨(*Allantodia spectabilis*)等。

思茅崖豆(*Mellettia leptobotrya*)群落, 简称ML, 演替年限约42年, 海拔568 m, 盖度90%左右, 覆盖枯枝落叶4–5 cm; 样地主要树种为思茅崖豆、椴叶山麻秆、猪肚木(*Canthium horridum*)、锈毛鱼藤(*Derris ferruginea*)、钝叶金合欢(*Acacia megaladena*)、滇南九节(*Psychotria henryi*)、刚莠竹(*Microstegium ciliatum*)、银叶砂仁等。

1.2 蚂蚁巢穴空间分布特征调查

在每个样地中, 随机选择3个10 m × 10 m的样方, 于2015年3月(干季)及9月(湿季)调查样地中各巢穴中蚂蚁的种类、巢穴密度(个/m²)及盖度(%), 盖度为蚂蚁巢穴面积占样地面积的百分比。采用平均拥挤度(m^*)、丛生指数(I)、久野指数(C_d)、聚块性指数(I_w)、负二项分布 K 值等参数(丁岩钦, 1994; 陈向阳等, 2006), 研究3个样地蚂蚁巢穴的空间格局。用泊松分布和负二项分布进行 χ^2 拟合检验。

1.3 土壤理化指标测定

采用土壤环刀法, 在每个样地的3个样方中, 随机选取6个蚁丘和距离蚁丘5 m处的非筑巢地, 采集0–5 cm土层土样, 装入土壤袋内带回实验室, 风干并过筛, 用于土壤含水量及理化性质分析(鲁如坤, 1999)。其中土壤含水率(%)采用烘干称量法(105℃, 24 h), 土壤总有机碳采用重铬酸钾氧化–外土壤加热法测定, 土壤全氮采用扩散法测定, 水解氮采用碱解扩散法测定, pH值按土:水=1:2.5水浸提, 电位法测定, 土壤容重采用环刀法测定。

1.4 数据处理与分析

所有数据统计分析均基于SPSS 11.5软件进行, 数据分析前对所有数据进行正态性与方差齐性检验, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)及最小显著差异法(LSD)比较不同数据之间的差异性。

2 结果

2.1 不同演替阶段热带森林定居巢穴的蚂蚁种类

不同演替阶段热带森林定居巢穴的蚂蚁种类

组成存在一定差异(表1), 大小顺序为: 小果野芭蕉群落(28种) > 白背桐群落(22种) > 思茅崖豆群落(18种)。热带森林类型对蚂蚁种类总数的影响达到显著水平(表2, $P < 0.05$)。对蚂蚁种类总数与土壤理化性质的相关性分析结果表明: 蚂蚁种类总数与土壤温度、含水率、容重、pH值负相关, 而与土壤总有机碳、全氮、水解氮正相关(表3)。显著性检验结果表明, 蚂蚁种类总数与土壤总有机碳极显著相关($P < 0.01$), 与全氮及水解氮显著正相关($P < 0.05$); 与土壤含水率呈极显著负相关($P < 0.01$), 与土壤容重呈

显著负相关($P < 0.05$)。

2.2 热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的密度

不同演替阶段热带森林蚂蚁巢穴密度范围为 0.78–1.41 个/m² (图1)。热带森林类型对蚂蚁巢穴密度的影响达到显著水平(表2, $P < 0.05$)。不同演替阶段热带森林蚂蚁巢穴数量的大小顺序为: 小果野芭蕉群落 > 白背桐群落 > 思茅崖豆群落, 表明巢穴数量随森林演替呈现先增加后减少的变化趋势。

热带森林巢穴密度与土壤环境因子的相关性分析结果表明(表3), 蚂蚁巢穴密度与土壤温度、含

表1 西双版纳热带森林不同演替类型蚂蚁种类及其筑巢数量
Table 1 Ant species and their nesting numbers across the three succession stages in the Xishuangbanna tropical forest

种类 Species	白背桐群落 (MP)	小果野芭蕉群落 (MA)	思茅崖豆群落 (ML)
卡泼林大头蚁 <i>Pheidole capellini</i>	28	15	31
中华大头蚁 <i>Pheidole sinensis</i>	7	39	0
宽结大头蚁 <i>Pheidole noda</i>	0	9	20
棒刺大头蚁 <i>Pheidole spathifera</i>	36	31	14
塞奇大头蚁 <i>Pheidole sagei</i>	0	16	11
印度大头蚁 <i>Pheidole indica</i>	6	8	0
罗伯特大头蚁 <i>Pheidole roberti</i>	17	0	10
沃森大头蚁 <i>Pheidole watsoni</i>	0	22	0
横纹齿猛蚁 <i>Odontoponera transversa</i>	38	28	14
黄足短猛蚁 <i>Brachyponera luteipes</i>	15	16	12
环纹大齿猛蚁 <i>Odontomachus circulus</i>	13	18	9
爪哇扁猛蚁 <i>Ectomomyrmex javanus</i>	10	11	0
郑氏扁猛蚁 <i>Ectomomyrmex zhengi</i>	0	0	9
双色曲颊猛蚁 <i>Gnamptogenys bicolor</i>	0	14	0
邻巨首蚁 <i>Pheidologeton affinis</i>	17	13	13
黄足立毛蚁 <i>Paratrechina flavipes</i>	11	10	11
亮立毛蚁 <i>Paratrechina vividula</i>	9	12	0
双针棱胸蚁 <i>Pristomyrmex pungens</i>	12	15	0
黑可可臭蚁 <i>Dolichoderus thoracicus</i>	0	11	12
光颚铺道蚁 <i>Tetramorium insolens</i>	9	16	0
毛发铺道蚁 <i>Tetramorium ciliatum</i>	0	12	14
汤普森多刺蚁 <i>Polyrhachis thompsoni</i>	0	9	0
四刺冠胸蚁 <i>Lophomyrmex quadrispinosus</i>	6	10	11
西氏拟毛蚁 <i>Pseudolasius silvestrii</i>	0	12	13
黑头酸臭蚁 <i>Tapinoma melanocephalum</i>	12	0	0
印度酸臭蚁 <i>Tapinoma indicum</i>	11	17	10
立毛举腹蚁 <i>Crematogaster ferrarii</i>	9	13	0
贝卡盘腹蚁 <i>Aphaenogaster beccarii</i>	11	0	0
东方小家蚁 <i>Monomorium orientale</i>	10	11	11
宽结小家蚁 <i>Monomorium latinode</i>	0	13	0
长足光结蚁 <i>Anoplolepis gracilipes</i>	13	0	0
狭唇细长蚁 <i>Tetraponera attenuata</i>	0	6	0
弯刺角腹蚁 <i>Recurvidris recurvispinosa</i>	10	9	9
罗氏棒切叶蚁 <i>Rhoptromyrmex wroughtonii</i>	0	8	0

表2 热带森林演替类型对蚂蚁种类总数、巢穴密度及盖度影响的单因素方差分析
Table 2 One-way ANOVA on the ant species richness, density and coverage of ant mounds, showing the effect of tropical forest successional types.

	自由度 df	均方 Mean square	F	P
蚂蚁种类总数 Ant species richness	2	7,769.42	7.36	0.01
巢穴密度 Nest density	2	6,921.14	5.53	0.02
巢穴盖度 Nest coverage	2	5,844.36	2.17	1.38

表3 蚂蚁种类总数、巢穴密度及盖度与土壤环境因子的相关性
Table 3 Correlation of ant species richness, density and coverage of ant mounds to soil properties

	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	土壤温度 Soil temperature (°C)	土壤含水率 Soil moisture (%)	pH	总有机碳 Total organic carbon (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	水解氮 Hydrolysis nitrogen (mg/kg)
蚂蚁种类总数 Ant species richness (Num.)	-0.896*	-0.665	-0.966**	-0.527	0.916**	0.811*	0.875*
巢穴密度 Nest density (ind./m ²)	-0.878*	-0.719	-0.952**	-0.424	0.886*	0.635	0.875*
巢穴盖度 Nest coverage (%)	-0.457	-0.525	-0.568	-0.116	0.654	0.557	0.639

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

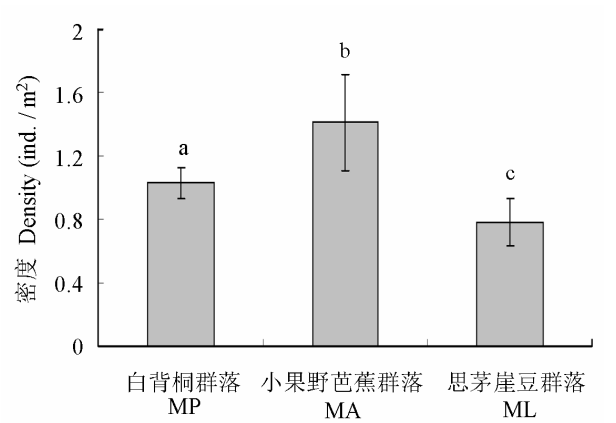


图1 不同演替阶段热带森林蚂蚁巢穴的密度(平均值±标准误)。不同字母表示群落之间差异显著($P < 0.05$)。
Fig. 1 Density (mean ± SE) of ant mounds across the three succession stages of Xishuangbanna tropical forests. The different letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

落 > 思茅崖豆群落, 表明巢穴的盖度亦随森林演替呈现先增加后减少的变化趋势。但是热带森林类型对蚂蚁巢穴盖度的影响未能达到显著水平($P > 0.05$)。

对热带森林蚂蚁巢穴盖度分布和土壤环境因子的相关分析表明(表3), 巢穴盖度与土壤温度、含

水率、pH值负相关, 而与土壤总有机碳、全氮、水解氮正相关。相关显著性检验表明, 巢穴密度与土壤总有机碳、水解氮显著正相关($P < 0.05$); 巢穴密度与土壤容重呈显著负相关($P < 0.05$)、而与土壤含水率呈极显著负相关($P < 0.01$)。

2.3 热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的盖度

热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的盖度范围为21–28% (图2)。不同演替阶段热带森林蚂蚁巢穴的盖度大小顺序为: 小果野芭蕉群落 > 白背桐群

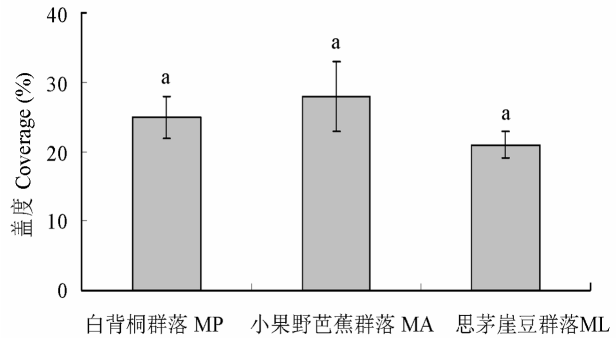


图2 不同演替阶段热带森林蚂蚁巢穴的盖度(平均值±标准误)。相同字母表示群落之间差异不显著($P > 0.05$)。
Fig. 2 Coverage (mean ± SE) of ant mounds across the three succession stages of Xishuangbanna tropical forests. The same letter indicates no significant difference among treatments ($P > 0.05$).

水率及容重负相关, 而与土壤总有机碳、全氮、水解氮正相关, 但巢穴盖度与土壤环境因子相关性均不显著($P > 0.05$)。

2.4 热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的空间分布

热带森林不同演替阶段样地中, 平均拥挤度、丛生指数、久野指数、聚块指数等指标比较近似, 表明蚂蚁巢穴呈类似的空间分布格局(表4)。蚂蚁巢穴平均拥挤度均小于1, 表明蚂蚁巢穴平均拥有的邻

表4 热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴的空间分布特征
Table 4 Spatial distribution characteristics of ant mounds across the three succession stages of Xishuangbanna tropical forests

	方差 Variance	丛生指数 <i>I</i>	聚块指数 <i>I_w</i>	平均拥挤度 <i>m</i> *	久野指数 <i>C_A</i>	负二项分布 <i>K</i>	泊松分布检验 Poisson test	负二项分布检验 Binomial test
白背桐群落 MP	0.242	-0.136	0.424	0.816	-0.536	-2.403	<i>P</i> <0.05	<i>p</i> >0.05
小果野芭蕉群落 MA	0.435	-0.252	0.572	0.925	-0.364	-2.615	<i>P</i> <0.05	<i>p</i> >0.05
思茅崖豆群落 ML	0.357	-0.087	0.358	0.637	-0.382	-1.836	<i>P</i> <0.05	<i>p</i> >0.05

居数量少于1个, 因此不同演替阶段样地中蚂蚁巢穴在平面空间上不呈现聚集分布格局; 丛生指数数值均在0以下, 久野指数小于0, 聚块性指数均小于1, 表明不同演替阶段样地中蚂蚁巢穴以随机分布为主。负二项分布*K*是一个负性指数, *K*值越小, 聚集程度越高; *K*值越大, 则聚集程度越低。负二项分布*K*值大小顺序为: 思茅崖豆群落>白背桐群落>小果野芭蕉群落, 说明思茅崖豆群落巢穴聚集程度较低, 空间分布的斑块性较低, 而小果野芭蕉群落巢穴聚集程度较高, 空间分布的斑块性较高。

3 讨论

不同植被类型及土壤理化性质对土壤动物活动的影响存在一定差异(王邵军和阮宏华, 2008; 王邵军等, 2010), 因此, 热带森林的次生演替能对蚂蚁种类及筑巢的数量及盖度产生重要影响。本研究表明, 不同演替阶段热带森林蚂蚁的种类总数、巢穴的数量及盖度均为小果野芭蕉群落(演替约28年)>白背桐群落(演替约12年)> 思茅崖豆群落(演替约42年)。森林群落恢复初期(白背桐群落), 由于地表环境易受干扰, 土壤环境比较严酷, 不利于蚂蚁筑巢活动, 蚂蚁种类总数及筑巢的数量及盖度均较小; 随着森林演替的进行(小果野芭蕉群落), 蚂蚁栖息的物理环境及土壤养分环境得到改善, 蚂蚁种类总数及筑巢的数量及盖度增加。但是演替到一定阶段(思茅崖豆群落), 随着森林群落郁闭度增加, 某些土壤物理因子(如高温、高湿)及土壤养分因子, 可能不利于蚂蚁筑巢与定居, 从而使蚂蚁种类及筑巢的数量减少。

蚂蚁种类总数及巢穴密度与土壤理化性质的相关性分析表明, 蚂蚁种类总数、巢穴密度均与土壤总有机碳、水解性氮显著正相关, 而与土壤温度、含水率和容重呈显著或极显著负相关。说明疏松的土壤、比较低的土壤温湿环境、丰富的土壤养分, 是

促进蚂蚁筑巢定居的重要土壤环境因素; 另一方面, 蚂蚁巢穴盖度与土壤环境关系之间具有一定相关性, 但是, 其影响程度未能达到显著水平, 一个重要原因可能是蚂蚁巢穴的盖度大小主要由蚂蚁自身筑巢特性所决定, 因为不同蚂蚁种类具有特定的巢穴类型及面积大小(徐正会, 2002), 这将对蚂蚁巢穴盖度产生重要影响。

热带森林不同演替阶段蚂蚁巢穴空间分布格局基本类似, 均呈现随机分布方式, 基本分布单元为单个蚁巢, 说明蚁巢间存在相互排斥现象, 且蚁巢密度越高, 分布越趋于均匀(表1)。但是随着森林演替的进行, 森林植被和土壤条件等一系列生态因子发生变化, 对蚂蚁巢穴的空间分布也产生了一定影响(李庆新等, 2003; 陈向阳等, 2006; 郭东艳等, 2007)。本研究中, 蚂蚁巢穴格局强度随森林演替进行出现了一定规律的变化, 负二项分布*K*值大小顺序为思茅崖豆群落(-1.836)>白背桐群落(-2.403)>小果野芭蕉群落(-2.615), 说明森林演替中期(小果野芭蕉群落)森林地表环境及土壤环境有利于蚂蚁的筑巢定居, 巢穴聚集程度较大, 因此空间分布的斑块性也较高。

致谢: 衷心感谢中国科学院西双版纳热带植物园杨效东研究员在野外实验中所给予的热心帮助!

参考文献

Cammeraat LH, Risch AC (2008) The impact of mineral soil ants on soil properties and processes at different scales. *Journal of Applied Entomology*, 132, 285–294.
Chen XY, Zou YD, Ding YZ, Wu HZ, Li ZZ, Lin XF, Wang WJ, Tian FX (2006) Three-dimensional spatial distribution patterns of *Monochamus alternates* and its natural enemy *Dastarcus helophoroides*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 1547–1550. (in Chinese with English abstract) [陈向阳, 邹运鼎, 丁玉洲, 巫厚长, 李增智, 林雪飞, 汪文俊, 田方鑫 (2006) 松墨天牛及其天敌花绒坚甲种群的

- 三维空间分布格局. 应用生态学报, 17, 1547–1550.]
- Chen YY, Wei C, He H, Wang YG (2012) Correlation of physicochemical characteristics and microbial biomass among nest soil of *Camponotus japonicus* and *Pachycondyla astute* in Qinling Mountains. Journal of Northwest Forestry University, 27, 121–126. (in Chinese with English abstract) [陈元瑶, 魏琮, 贺虹, 王云果 (2012) 秦岭地区2种蚂蚁巢内土壤理化性质和微生物量的相关性研究. 西北林学院学报, 27, 121–126.]
- Ding YQ (1994) Mathematical Ecology of Insects. Science Press, Beijing. (in Chinese) [丁岩钦 (1994) 昆虫数学生态. 科学出版社, 北京.]
- Frouz J, Jilkova V (2008) The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). Myrmecological News, 11, 191–199.
- Guo DY, Dou CH, Chen YW, Wei LX, Zhang XH (2007) The nest-site selection of *Formica cunicularia* in the Shapotou sand-fixing vegetation area. Journal of Gansu Agricultural University, 42, 116–119. (in Chinese with English abstract) [郭东艳, 窦彩虹, 陈应武, 魏列新, 张新虎 (2007) 沙坡头固沙植被区掘穴蚁的巢位选择. 甘肃农业大学学报, 42, 116–119.]
- Hölldobler B, Wilson EO (1990) The Ants. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Kilpelinen J, Finér L, Niemel P, Domisch T, Neuvonen S, Ohashi M, Risch AC, Sundström L (2007) Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics of ant mounds (*Formica rufa* group) in managed boreal forests of different successional stages. Applied Soil Ecology, 36, 156–163.
- Li QX, Sheng LX, Zhou DW, Zhang Y (2003) Effect of the *Lasius flavus* in Songnen grassland on structure and biomass of the *Leymus chinensis* community. Journal of Ecology, 22(6), 49–52. (in Chinese with English abstract) [李庆新, 盛连喜, 周道玮, 张燕 (2003) 松嫩草原黄墩蚁对羊草群落组成与生物量的影响. 生态学杂志, 22(6), 49–52.]
- Lu RK (1999) Soil Agrochemistry Analysis Protocols. China Agriculture Science Press, Beijing. [鲁如坤 (1999) 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Mueller UG, Mikheyev AS, Hong E, Sen R, Warren DL, Solomon SE, Ishak HD, Cooper M, Miller JL, Shaffer KA, Juenger TE (2011) Evolution of cold-tolerant fungal symbionts permits winter fungiculture by leafcutter ants at the northern frontier of a tropical ant–fungus symbiosis. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 108, 4053–4056.
- Schumacher E (2011) The Impact of Ants on the Aboveground and Belowground Ecological Network-Field Studies in a Grassland and Experiments with Microcosms. PhD dissertation, Niedersächsische Staats-und Universitätsbibliothek Göttingen.
- Wang SJ, Ruan HH (2008) Feedback mechanisms of soil biota to aboveground biology in terrestrial ecosystems. Biodiversity Science, 16, 407–416. (in Chinese with English abstract) [王邵军, 阮宏华 (2008) 土壤生物对地上生物物的反馈作用及其机制. 生物多样性, 16, 407–416.]
- Wang SJ, Ruan HH, Wang JS, Xu ZK, Wu YY (2010) Composition structure of soil fauna community under the typical vegetations in the Wuyi Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 30, 5174–5184. (in Chinese with English abstract) [王邵军, 阮宏华, 汪家社, 徐自坤, 吴焰玉 (2010) 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征. 生态学报, 30, 5174–5184.]
- Whitford WG, Di MR (1995) Variability in soils and vegetation associated with harvester ant (*Pogonomyrmex rugosus*) nests on a Chihuahuan desert watershed. Biology and Fertility of Soil, 20, 169–173.
- Wu HT, Batzer DP, Yan XM, Lu XG, Wu DH (2013) Contributions of ant mounds to soil carbon and nitrogen pools in a marsh wetland of Northeastern China. Applied Soil Ecology, 70, 9–15.
- Xu ZH (1999) An analysis on the ant fauna of the tropical rain forest in Xishuangbanna of China. Zoological Research, 20, 379–384. (in Chinese with English abstract) [徐正会 (1999) 西双版纳热带雨林蚁科昆虫区系分析. 动物学研究, 20, 379–384.]
- Xu ZH (2002) A Study on the Biodiversity of Formicidae Insect of Xishuangbanna Nature Reserve. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [徐正会 (2002) 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究. 云南科技出版社, 昆明.]
- Yang XD, She YP, Zhang ZY, Cao M, Deng XB (2001) Studies on structure and diversity of ant groups in fragmentary tropical rainforests of “Holy hills” of Dai nationality in Xishuangbanna, China. Acta Ecologica Sinica, 21, 1322–1328. (in Chinese with English abstract) [杨效东, 余宇平, 张智英, 曹敏, 邓小保 (2001) 西双版纳傣族“龙山”片断热带雨林蚂蚁类群结构与多样性研究. 生态学报, 21, 1322–1328.]