

# 兼性互利关系影响地表蚂蚁群落多样性的特点

付兴飞<sup>1,2</sup>, 卢志兴<sup>1</sup>, 陈又清<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学, 云南 昆明 650224)

**摘要:** [目的] 为探讨兼性互利关系在生物多样性保护方面的作用, [方法] 于 2015 年 5 月和 10 月, 采用陷阱法对云南墨江县雅邑镇 4 种类型样地地表蚂蚁群落进行调查。 [结果] 显示: (1) 物种组成及多度: 纯砂仁地 (样地 I) 采集蚂蚁 400 头, 23 种; 从未放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林样地 (样地 II) 采集蚂蚁 382 头, 15 种; 曾经放养过紫胶虫的紫胶-砂仁混农林样地 (样地 III) 采集蚂蚁 406 头, 18 种; 放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林样地 (样地 IV) 采集蚂蚁 655 头, 23 种。 (2) 多样性: 4 种类型样地地表蚂蚁群落物种丰富度和相对多度存在显著差异, 兼性互利关系可以提高地表蚂蚁的物种丰富度和相对多度, 物种丰富度大小为 IV > III > II > I, 相对多度排序为 III > IV > II > I。 (3) 群落结构相似性: 样地 III、IV 和样地 II、I 不相似。 (4) 指示物种: 样地 I 指示物种为毛发铺道蚁, 样地 II 指示物种为卡泼林大头蚁和茸毛铺道蚁, 样地 III、IV 中指示物种为巴瑞弓背蚁。 [结论] 互利关系对蚂蚁群落的物种丰富度、相对多度和群落结构具有明显的积极影响, 并且这种兼性互利关系对生物多样性保护有一定的时空效应。

**关键词:** 兼性互利关系; 地表蚂蚁群落; 多样性; 生态效应

中图分类号: S718.7

文献标识码: A

## Effects of Facultative Mutualism on the Diversity of Ground-dwelling Ant

FU Xing-fei<sup>1,2</sup>, LU Zhi-xing<sup>1</sup>, CHEN You-qing<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Resources Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** [Objective] To understand the facultative mutualism consequence in the biodiversity conservation and its spatial and temporal characteristics. [Method] The ground-dwelling ant communities were investigated by pitfall traps in four types of site in Mojiang County, Yunnan Province in May and October, 2015. [Result] (1) Species composition and relative abundance; 400 ant individuals were collected in the plot I (*Fructus amomi* plantation), representing 23 species; 382 ant individuals were collected in the plot II (*Lac-Fructus amomi* agroforestry without lac insect infestation), representing 15 species; 406 ant individuals were collected in the plot III (*Lac-Fructus amomi* agroforestry with lac insect infestation once), representing 18 species; 655 ant individuals were collected in the plot IV (*Lac-Fructus amomi* agroforestry with lac insect infestation), representing 23 species. (2) Ant diversity: there were significant differences of ground-dwelling ant species richness and relative abundance among the four sites. The richness and the relative abundance of ground-dwelling ant species increased by mutualism. The richness ranked as IV > III > II > I, and the relative abundance ranked as III > IV > II > I. (3) Community structure similarity: The ant communities of sites III and IV were dissimilar with those in sites II and I. (4) Indicator species: *Tetramorium ciliatum* Bolton was the indicator species of plot I, *Pheidole capellini* Emery and *Tetramorium lanuginosum* Mayr were the indicator species of plot II, *Camponotus parius* Emery was the indicator species of plots III and IV.

收稿日期: 2016-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470493 和 31270561)

作者简介: 付兴飞(1992—), 男, 云南昆明东川人, 昆虫学硕士研究生. E-mail: fuxingfei0918@sina.com

\* 通讯作者. E-mail: cyqcaf@126.com

[ **Conclusion** ] There were significant positive ecological consequences of facultative mutualism on ant species richness, relative abundance and community structure. Facultative mutualism had spatial and temporal effects on biodiversity conservation.

**Keywords:** facultative mutualism; ground-dwelling ant community; diversity; ecological consequence; spatial and temporal characteristics

互利关系作为当今国际重大科技领域中的热点,在生态关系中拥有不可缺少的重要地位。蚂蚁和产蜜露昆虫的相互作用被称为关键的相互关系<sup>[1]</sup>,因为产蜜露昆虫吸引的蚂蚁在群落层面具有十分重要的效应。首先,蚂蚁的有无,影响产蜜露昆虫的多度;其次,影响群落中其他节肢动物的种群动态,包括产蜜露昆虫的捕食者、寄生者和其他蚂蚁未照顾到的刺吸性昆虫<sup>[1-2]</sup>,这些昆虫又反过来影响植物的生长和适合度<sup>[3]</sup>。同时,产蜜露昆虫的许多寄生性天敌是泛化种,它们的存在对于系统中其他作物的植食性天敌也有控制作用<sup>[4]</sup>。除此之外,蚂蚁照顾产蜜露昆虫能间接减少产蜜露昆虫寄主植物的天敌,蚂蚁的存在,植物将在资源分配中减少需要昂贵投入的次生代谢化学防御,转而投入到其他重要的策略如繁殖和生长上<sup>[5]</sup>。因此,蚂蚁与产蜜露昆虫之间的关系产生的影响远比物种之间的大,而达到群落层面,进而系统层面。研究发现,蚂蚁和产蜜露昆虫这种局部的相互作用除对同一寄主植物上的节肢动物的多度和分布产生影响外,同样也对周围植物群落中节肢动物的多度和分布产生影响<sup>[6]</sup>。这种短时间的相互作用可以引起寄主植物质量长期变化,并进而在整个季节中影响其植食性天敌<sup>[7]</sup>。研究发现,以蜜露为纽带,云南紫胶虫和蚂蚁之间形成兼性互利关系<sup>[8]</sup>,这种互利关系在群落层面能显著提高节肢动物多样性<sup>[9-10]</sup>;然而,这种相互作用关系生态学效应的时空作用特点鲜见报道。

蚂蚁在生态系统中扮演着捕食者、互利者和生态系统的工程师等重要角色<sup>[1, 11]</sup>。蚂蚁群落多样性受土地利用强度<sup>[12]</sup>、人为干扰<sup>[13]</sup>、植被类型及盖度<sup>[14-15]</sup>、海拔<sup>[16]</sup>、生境变化<sup>[17]</sup>等多种因素的制约。本研究以紫胶-砂仁混农林系统为对象,调查是否放养紫胶虫及紫胶虫寄主放养频次不同样地中的地表蚂蚁群落,探讨兼性互利关系在时间和空间上的生物多样性保护效应。

## 1 研究地概况

研究地位于云南省墨江县雅邑镇,该区域土地

具有较强的景观异质性,山地由旱地、不同的经济林以及混农林系统斑块镶嵌构成。分别选取砂仁(*Amomum villosum* Lour)地(I)、从未放养过紫胶虫的样地(II)、短期(3年)放养过紫胶虫但本次不放虫的样地(III)和放养紫胶虫的样地(IV)4种类型试验地,样地III和IV相距大于30m,二者与样地I和样地II相距1500m以上。样地海拔:样地I为(861±5)m;样地II为(840±5)m;样地III为(935±5)m;样地IV为(949±5)m。样地面积:样地I为2.4hm<sup>2</sup>;样地II和样地III均为1.4hm<sup>2</sup>;样地IV为2hm<sup>2</sup>。4个样地均种植砂仁,密度基本一致,砂仁间距为2m×2m。样地I为纯砂仁地,无紫胶虫寄主植物,样地II、III和IV均为紫胶-砂仁混农林模式,样地II中紫胶虫的寄主植物为钝叶黄檀(*Dalbergia obtusifolia* (Baker) Prain),还有少量火绳树(*Eriolaena spectabilis* (DC.) Planch. ex Mast.)和聚果榕(*Ficus cunia* L.),样地III除钝叶黄檀外,还有少量景谷巴豆(*Croton laevigatus* Vahl),样地IV仅分布有钝叶黄檀。紫胶-砂仁混农林类型样地中植物的密度均约为525株·hm<sup>-2</sup>,平均树高2.5~3.0m,胸径约5~8cm。所选样地的坡度、坡向、土壤特点等条件基本一致。

## 2 研究方法

### 2.1 调查方法

于2015年5月和10月采用陷阱法对4种不同类型的样地进行地表蚂蚁群落调查,共调查2次。由于不同类型样地可用面积不一致,因此,样地I共设置4个重复,样地II共2个重复,样地III共2个重复,样地IV共3个重复,每个重复样地的面积大于100m<sup>2</sup>,各重复样地间距30m以上。每个样地设置5×3网格状的15个陷阱,陷阱间距为10m。样地I设陷阱60个,样地II设陷阱30个,样地III设陷阱30个,样地IV设陷阱45个。陷阱为直径60mm,高90mm的塑料杯,以50mL50%的乙二醇溶液为陷阱溶液。放置48h后收集陷阱内蚂蚁并保存于装有75%酒精的离心管中,带回实验室参照相

关蚂蚁鉴定工具书进行种类鉴定,不能鉴定到种的以形态种对待<sup>[18-19]</sup>。

## 2.2 分析方法

将 2 次数据合并整理得到物种名录,同时采用 6 级评分(1 分:1 头;2 分:2~5 头;3 分:6~10 头;4 分:11~20 头;5 分:21~50 头;6 分:>50 头)对蚂蚁多度数据进行转换,以防止某些种类导致个别样本中出现大量个体所导致的误差<sup>[20]</sup>。

(1) 抽样充分性:使用 R 语言的 iNEXT 软件包绘制基于个体数的物种稀疏和预测曲线,以曲线特征判断抽样是否充分<sup>[21]</sup>。(2) 物种多样性:以单个陷阱为重复,统计各样地中每个陷阱中蚂蚁的物种丰富度和相对多度,利用 PASW Statistics 18.0 中的单因素 ANOVA 方法分析 4 种类型样地地表蚂蚁的物种丰富度和相对多度的差异显著性,使用 LSD 多重比较方法进行不同类型样地蚂蚁物种丰富度和相对多度的比较。(3) 群落结构相似性:统计各重复样地的蚂蚁物种组成及多度,使用有无数据(0/1)进行 4 种不同模式地表蚂蚁群落结构的非度量多维度排序(nMDS),使用群落相似性分析方法(ANOSIM)分析不同类型样地地表蚂蚁群落结构差异的显著性,使用统计软件 PRIMER v7 完成以上分析<sup>[22]</sup>。(4) 指示物种:采用统计软件 R 语言中的 labdsv 软件包计算各物种的  $IndVal$  值:

$$IndVal_{ij} = A_{ij} \times B_{ij}$$

式中: $A_{ij}$ 表示物种  $i$  在样地  $j$  中的特异性, $B_{ij}$ 表示物种  $i$  在样地  $j$  中的保真度。参考相关研究以  $IndVal$  值  $\geq 0.7$  作为标准确定指示物种<sup>[19]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 物种组成及多度

2 次调查共采集蚂蚁 1 843 头,隶属于 7 亚科、23 属 39 种(表 1)。在样地 I 中共采集蚂蚁 400 头,隶属 5 亚科、15 属 23 种;样地 II 共采集蚂蚁 382 头,隶属 4 亚科、11 属 15 种;样地 III 共采集蚂蚁 406 头,隶属 4 亚科、12 属 18 种;样地 IV 共采集蚂蚁 655 头,隶属 6 亚科、15 属 23 种。4 种类型样地的物种曲线在显著上升后逐渐趋于平缓,抽样较为充分,由虚线部分可以看出:各样地蚂蚁物种丰富度大小为:IV>I>II>III(图 1)。

### 3.2 多样性比较

4 种类型样地中蚂蚁物种丰富度和相对多度的差异显著( $F_{(3,153)} = 5.351, P = 0.002; F_{(3,153)} = 9.085,$

表 1 不同样地地表蚂蚁群落的物种组成

物种	I	II	III	IV
猛蚁亚科(Ponerinae)				
环纹大齿猛蚁( <i>Odontomachus circulus</i> Wang)		2	1	
小眼钩猛蚁( <i>Anochetus subcoecus</i> Forel)		1		
格拉夫钩猛蚁( <i>Anochetus graeffei</i> Mayr)			1	
云南钩猛蚁( <i>Anochetus yunnanensis</i> Wang)				1
双色曲颚猛蚁( <i>Gnamptogenys bicolor</i> (Emery))			1	
黄足厚结猛蚁( <i>Pachycondyla luteipes</i> (Mayr))	42	6	1	5
红足厚结猛蚁( <i>Pachycondyla rufipes</i> (Jerdon))			7	1
安南厚结猛蚁( <i>Pachycondyla annamita</i> (Andre))	4			
爪哇厚结猛蚁( <i>Pachycondyla javana</i> (Mayr))	35	1	43	16
厚结猛蚁属 sp.1( <i>Pachycondyla</i> sp.1)		2		
费氏中盲猛蚁( <i>Centromyrmex feae</i> Emery)		1		
缅甸细颚猛蚁( <i>Leptogenys birmana</i> Forel)		3		
中华细颚猛蚁( <i>Leptogenys chinensis</i> (Mayr))		205	16	69
横纹齿猛蚁( <i>Odontoponera transversa</i> (Smith))	58	12	166	225
粗角蚁亚科(Cerapachyinae)				
里氏粗角蚁( <i>Cerapachys risii</i> (Forel))		6		
盲蚁亚科(Aenictinae)				
锡兰盲蚁( <i>Aenictus ceylonicus</i> (Mayr))				12
伪切叶蚁亚科(Pseudomyrmecinae)				
缅甸细长蚁( <i>Tetraoponera birmana</i> (Forel))				2
切叶蚁亚科(Myrmicinae)				
罗思尼脊腹蚁( <i>Crematogaster rothneyi</i> Mayr)				1
大阪脊腹蚁( <i>Crematogaster osakensis</i> Forel)		1		
邻巨首蚁( <i>Pheidologeton affinis</i> (Jerdon))	58	29		3
法老小家蚁( <i>Monomorium pharaonis</i> (Linnaeus))				1 4
中华小家蚁( <i>Monomorium chinensis</i> Santschi)	60	1	4	9
茸毛铺道蚁( <i>Tetramorium lanuginosum</i> Mayr)		2 22		1
毛发铺道蚁( <i>Tetramorium ciliatum</i> Bolton)	12			
棒刺大头蚁( <i>Pheidole spathifera</i> Forel)				1
卡泼林大头蚁( <i>Pheidole capellini</i> Emery)		26		1
伊大头蚁( <i>Pheidole yeensis</i> Forel)	14	4	130	128
沃森大头蚁( <i>Pheidole watsoni</i> Forel)		11		
皮氏大头蚁( <i>Pheidole pieli</i> Santschi)	27	13	7	9
大头蚁属 sp.1( <i>Pheidole</i> sp.1)	20	9	2	7
臭蚁亚科(Dolichoderinae)				
白足狡臭蚁( <i>Technomyrmex albipes</i> (Smith))				2
黑头酸臭蚁( <i>Tapinoma melanocephalum</i> (Fabricius))	4			
黑可可臭蚁( <i>Dolichoderus thoracicus</i> (Smith))	33	50	9	12
蚁亚科(Formicinae)				
长足光结蚁( <i>Anoplolepis gracilipes</i> (Smith))				5 14
普通拟毛蚁( <i>Pseudolasius familiaris</i> (Smith))		1		
黄足立毛蚁( <i>Paratrechina flavipes</i> (Smith))		1		
伊劳多刺蚁( <i>Polyrhachis illaudata</i> Walker)				1
巴瑞弓背蚁( <i>Camponotus parius</i> Emery)		2	10	122
平和弓背蚁( <i>Camponotus mitis</i> (Smith))		3	1	1 10
总计	400	382	406	655

$P < 0.01$ ):(1) 地表蚂蚁物种丰富度排序为 IV>III>II>I, 样地 IV 与样地 I 差异显著, 与样地 II、III 的差异不显著; 样地 III 与样地 I 的差异显著, 与样地 II 的差异不显著;(2) 相对多度排序为 III>IV>II>I, 样地 III 与样地 II、I 的差异显著; 样地 IV 和样地 I 的差异显著, 与样地 II 的差异不显著(表 2)。

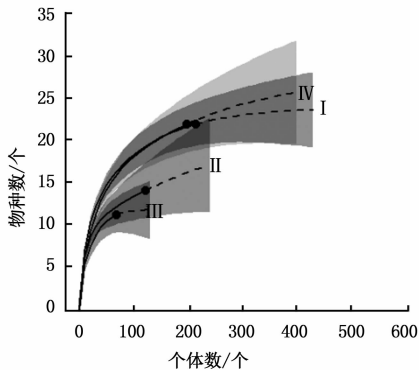


图1 不同调查样地地表蚂蚁基于个体数的物种稀疏和预测曲线

表2 4种不同类型样地地表蚂蚁多样性比较

样地类型	物种丰富度	相对多度
I	(2.54 ± 1.42) b	(2.68 ± 1.56) c
II	(2.97 ± 1.59) ab	(3.38 ± 1.74) bc
III	(3.62 ± 1.57) a	(4.43 ± 2.08) a
IV	(3.63 ± 1.63) a	(4.23 ± 1.91) ab

注:表中数值为均值 ± 标准误。

### 3.3 群落结构相似性

4种类型样地地表蚂蚁群落结构有差异(ANO-SIM Global  $R = 0.773$ ,  $P = 0.003$ ),样地IV和样地III群落结构相似,但与样地I和样地II地表蚂蚁群落结构不相似(图2)。

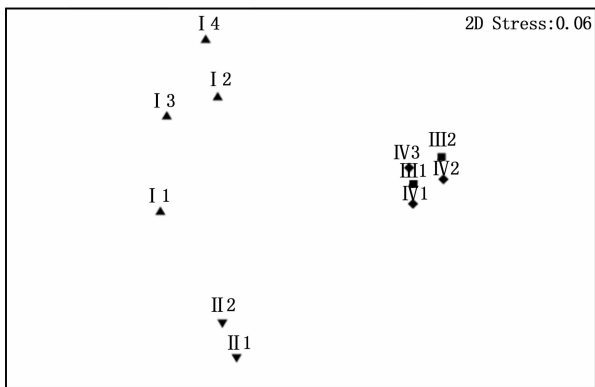


图2 4种不同类型样地的地表蚂蚁群落结构相似性比较

### 3.4 不同样地类型蚂蚁指示物种

4种类型样地地表蚂蚁指示物种有差异。样地I中有1种,为毛发铺道蚁;样地II中有2种,分别为卡泼林大头蚁和茸毛铺道蚁;样地III和IV有1种共同指示物种,为巴瑞弓背蚁(表3)。

表3 各样地地表蚂蚁群落指示物种分析

样地	物种	IndVal	P
I	毛发铺道蚁	1	0.008
II	卡泼林大头蚁	0.987	0.033
	茸毛铺道蚁	0.964	0.017
III和IV	巴瑞弓背蚁	0.995	0.009

## 4 讨论

分泌蜜露的昆虫能提供蚂蚁所需的多种营养物质,从而吸引蚂蚁的照顾<sup>[23-25]</sup>。蚂蚁与产蜜露昆虫之间的相互作用可以提高蚂蚁等节肢动物的生物多样性<sup>[26-27]</sup>。本研究发现,互利关系可以显著提高地表蚂蚁群落的相对多度和物种丰富度(表2),与前人研究结果一致。另外,已有研究发现,兼性互利关系并不是短暂和局部的,这种相互作用对其他群落的影响具有一定的时间和空间作用范围<sup>[6-7]</sup>;然而,目前这种报道仅有2篇,而且其研究结果显示这种时空效应的作用尺度十分有限,其中时间尺度约为3个月,空间尺度约3~5m的范围。本次调查结果显示,云南紫胶虫与蚂蚁的兼性互利关系作用的时间和空间尺度显著大于目前的报道。

相对于蚂蚁物种丰富度,蚂蚁群落结构最难改变<sup>[28]</sup>。本研究结果显示,曾经放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林样地(III)和放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林样地(IV)的地表蚂蚁群落结构与纯砂仁地(I)和从未放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林样地(II)的群落结构不相似,样地III和样地IV的地表蚂蚁群落结构相似(图2),说明紫胶虫-蚂蚁兼性互利关系改变了蚂蚁的群落结构,而且这种影响具有一定的时间和空间效应,长期放养紫胶虫的样地地表蚂蚁的物种丰富度和相对多度均高于没有兼性互利关系的样地,即使短期内这种兼性互利关系不存在的情况下,也能维持较高的地表蚂蚁多样性,群落结构变化也较小。在物种层面,兼性互利关系实质上对其中关键物种产生显著影响,由物种组成(表1)及指示物种(表3)看,这种互利关系增加了横纹齿猛蚁、红足厚结猛蚁、巴瑞弓背蚁、长足光结蚁等种类的相对多度,其中,巴瑞弓背蚁、长足光结蚁喜食蜜露资源,这些蚂蚁的种群数量均明显高于无兼性互利关系样地<sup>[29]</sup>。此外,横纹齿猛蚁、红足厚结猛蚁为典型的捕食性种类<sup>[30]</sup>,这些蚂蚁在兼性互利关系的样地中的多度也明显高于无兼性互利关系的样地,可能是兼性互利关系增加了栖境中其它节肢动物类群多样性,间接为它们提供更多的食物资源。是否放养紫胶虫样地间的指示物种也说明栖境之间存在一定差异性。从未放养紫胶虫样地II的指示物种为卡泼林大头蚁和茸毛铺道蚁,而这2种蚂蚁喜欢开放、干扰、生态位狭窄的生境<sup>[31-32]</sup>;而曾经放养过和正在放养紫胶虫的样地(III和IV)的指示物种为巴瑞弓背蚁,该蚂蚁是典型的喜食蜜露种类,指示

栖境蜜露资源曾经较为丰富<sup>[29]</sup>。

## 5 结 论

曾经放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林和放养紫胶虫的紫胶-砂仁混农林对地表蚂蚁多样性保护具有一定的积极作用,显著增加了地表蚂蚁物种丰富度和多度,对蚂蚁群落产生积极的影响。这说明兼性互利关系有利于保护地表蚂蚁多样性和群落结构,其生态学效益存在一定的时空影响,其中时间尺度约 3 年,空间尺度超过 30 m。

## 参 考 文 献:

- [1] Styrsky J D, Eubanks M D. Ecological consequences of interactions between ants and honeydew-producing insects[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B, 2007, 274(1607): 151-164.
- [2] Eubanks M D. Estimates of the direct and indirect effects of red imported fire ants on biological control in field crops[J]. Biological Control, 2001, 21(1): 35-43.
- [3] Mooney KA. Tritrophic effects of birds and ants on a canopy food web, tree growth, and phytochemistry[J]. Ecology, 2007, 88(8): 2005-2014.
- [4] Agrawal A A, Fordyce J A. Induced indirect defence in a lycaenid-ant association: the regulation of a resource in a mutualism[J]. Proceedings of the royal society of London B, 2000, 267(1455): 1857-1861.
- [5] Herms D A, Mattson W J. The dilemma of plants: to grow or defend [J]. Quarterly review of biology, 1992, 67(3): 283-335.
- [6] Wimp G M, Whitham T G. Biodiversity consequences of predation and host plant hybridization on an aphid-ant mutualism[J]. Ecology, 2001, 82(2): 440-452.
- [7] Van Zandt P A, Agrawal A A. Community-wide impacts of herbivore-induced plant responses in common milkweed *Asclepias syriaca* [J]. Ecology, 2004, 85(9): 2616-2629.
- [8] 王思铭, 陈又清, 卢志兴, 等. 云南紫胶虫与粗纹举腹蚁之间的互利关系[J]. 昆虫学报, 2013, 56(3): 286-292.
- [9] 卢志兴, 陈又清, 张 威, 等. 蚂蚁-紫胶虫兼性互利关系对蚂蚁群落多样性的影响[J]. 生物多样性, 2013, 21(3): 343-351, 389.
- [10] 卢志兴, 陈又清, 李 巧, 等. 云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6195-6202.
- [11] Heil M, McKey D. Protective ant-plant interactions as model systems in ecological and evolutionary research[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2003 (34): 425-453.
- [12] Roth D S, Perfecto I, Rathcke B. The Effects of Management Systems on Ground-Foraging Ant Diversity in Costa Rica[M]// Ecosystem Management. New York: Springer, 1994: 399-413.
- [13] Vasconcelos H L. Effects of forest disturbance on the structure of ground-foraging ant communities in central Amazonia[J]. Biodiversity and Conservation, 1999, 8(3): 407-418.
- [14] Schonberg L A, Longino J T, Nadkarni N M, et al. Arboreal ant species richness in primary forest, secondary forest, and pasture habitats of a tropical montane landscape[J]. Biotropica, 2004, 36(3): 402-409.
- [15] Klimes P, Idigel C, Rimandai M, et al, Novotny V. Why are there more arboreal ant species in primary than in secondary tropical forests[J] Journal of Animal Ecology, 2012, 81(5): 1103-1112.
- [16] Samson D A, Rickart E A, Gonzales P C. Ant diversity and abundance along an elevational gradient in the Philippines[J]. Biotropica, 1997, 29(3): 349-363.
- [17] Suarez A V, Bolger D T, Case T J. Effects of fragmentation and invasion on native ant communities in coastal southern California[J]. Ecology, 1998, 79(6): 2041-2056.
- [18] 吴 坚, 王常禄. 中国蚂蚁[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [19] 卢志兴, 李可力, 张念念, 等. 紫胶玉米混农林模式对地表蚂蚁多样性及功能群的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 81-89.
- [20] Hoffmann B D, Kay A. *Pisonia grandis* monocultures limit the spread of an invasive ant: a case of carbohydrate quality[J]. Biological Invasions, 2009, 11(6): 1403-1410.
- [21] Chao A, Gotelli N J, Hsieh T C, et al. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies [J]. Ecological Monographs, 2014, 84(1): 45-67.
- [22] Clarke K R, Gorley R N. PRIMER v6 user manual and program [M]. PRIMER-E Ltd: Plymouth, UK. 2006.
- [23] 陈又清, 王绍云. 蚂蚁和紫胶蚧互利关系中的行为机制[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 663-666.
- [24] Buckley R C, Gullan P. More aggressive ant species (Hymenoptera: Formicidae) provide better protection for soft scales and mealybugs (Homoptera: Coccidae, Pseudococcidae) [J]. Biotropica, 1991, 23(3): 282-286.
- [25] Moya-Raygoza G, Nault L R. Obligatory mutualism between *Dalbulus quinquenotatus* (Homoptera: Cicadellidae) and attendant ants [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2000, 93(4): 929-940.
- [26] Jackson D. Competition in the tropics: ants on trees[J]. Antenna, 1984 (8): 19-22.
- [27] Jackson D. Ant distribution patterns in a Cameroonian cocoa plantation: investigation of the ant mosaic hypothesis [J]. Oecologia, 1984, 62(3): 318-324.
- [28] Dunn R R, Agosti D, Andersen A N, et al. Climatic drivers of hemispheric asymmetry in global patterns of ant species richness [J]. Ecology Letters, 2009, 12(4): 324-333.
- [29] Schilman P E, Roces F. Energetics of locomotion and load carriage in the nectar feeding ant, *Camponotus rufipes* [J]. Physiological Entomology, 2005, 30(4): 332-337.
- [30] Chen C D, Nazni W A, Lee H L, et al. Research Note A preliminary report on ants (Hymenoptera: Formicidae) recovered from forensic entomological studies conducted in different ecological habitats in Malaysia[J]. Tropical biomedicine, 2014, 31(2): 381-386.
- [31] Hoffmann B D. Responses of ant communities to experimental fire regimes on rangelands in the Victoria River District of the Northern Territory[J]. Austral Ecology, 2003, 28(2), 182-195
- [32] Wetterer J K. Worldwide spread of the wooly ant, *Tetramorium lanuginosum* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. Myrmecological News, 2010, 13(2): 81-88.

(责任编辑:张 玲)