

互利共生关系下粗纹举腹蚁蚁巢及种群的时空动态

李可力¹, 陈又清^{1*}, 卢志兴¹, 张威², 王思铭¹

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

摘要:紫胶种植园中的粗纹举腹蚁与云南紫胶虫之间存在互利共生关系,为了揭示粗纹举腹蚁蚁巢和种群的时空分布,于2009年11月至2010年7月在云南省墨江县雅邑乡的紫胶林和对照林内分别调查了粗纹举腹蚁巢的数量、空间位置和体积,记录了蚁巢数量和工蚁数量的时间动态变化。结果表明:紫胶林中的蚁巢数量和工蚁数量均显著高于对照林;蚁巢的集群分布、随机分布和离散分布模式在研究样地内均有出现,但紫胶林中的随机分布频率高于对照林;蚁巢数量与工蚁数量随月份变化,紫胶虫成虫期的工蚁数量略高于紫胶虫幼虫期。本研究结果表明蚂蚁与紫胶虫的互利共生改变了蚁巢的分布模式,增加了蚂蚁的种群数量,为在紫胶种植园中利用粗纹举腹蚁进行生物防控提供了一定的生物学依据。

关键词:粗纹举腹蚁;分布型;互利共生;蚁巢;云南紫胶虫;种群动态

中图分类号:S718.7

文献标识码:A

Spatiotemporal Dynamics of Nests and Population of *Crematogaster macaoensis* Wheeler in Mutualistic Relationship

LI Ke-li¹, CHEN You-qing¹, LU Zhi-xing¹, ZHANG Wei², WANG Si-ming¹

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

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

Abstract: *Crematogaster macaoensis* Wheeler and *Kerria yunnanensis* Ou et Hong form a mutualistic relationship in lac plantation. In order to explore the distribution patterns of ant nests and the spatiotemporal dynamics of ant populations, the numbers, coordinates and sizes of ant nests were investigated, and the numbers of ant nests and numbers of total workers in different months were recorded in lac plantations and controlled plantations from November 2009 to July 2010 in Yayi Town, Mojiang County, Yunnan Province. The results showed that both the numbers of ant nests and workers in lac plantation were higher than that in the controlled plantations. There were aggregated, random and over-dispersed patterns of nests in sampling sites. The frequency of random pattern in lac plantation was more than that in controlled plantation. The number of workers in lac adulthood was a little more than that in larval phase. These results suggested that the nest distribution patterns were changed, and the quantity of ant population was increased under mutualistic relationship. This research could provide a scientific reference to utilize *Crematogaster macaoensis* Wheeler for biological control of pests.

Key words: *Crematogaster macaoensis*; distribution patterns; mutualism; ant nest; *Kerria yunnanensis*; population dynamics

收稿日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金(31470493和31270561)

作者简介:李可力(1986—),男,湖南浏阳人,硕士研究生,助理工程师,研究方向为昆虫生态。E-mail:lsgs160@126.com

* 通讯作者。E-mail:cyqcaf@126.com

在蚂蚁生态学的研究中,研究蚁巢的分布模式及数量和空间位置的动态变化是了解蚂蚁与其它生物相互作用的重要基础^[1]。其分布可分为3大类型:集群分布、随机分布以及离散分布或称均匀分布。一般来说,种内或种间竞争导致蚁巢的离散分布^[2-3],而随机分布通常出现在资源相对充足,种内或种间竞争不强的地点^[4],集群分布则可能由共生关系、蚁群的分裂等因素造成^[5]。此外,蚁巢分布还可能受地理方位、树荫情况、湿度^[6]、食物资源及筑巢位置^[7]等因素的影响。蚂蚁建造的巢多种多样,筑巢场所复杂多变,归纳起来可分为:游动巢、土壤巢、地表巢、木质巢、层纸巢和丝质巢^[8]。有关蚁巢分布的研究多集中在土壤巢和地表巢,很少有研究涉及互利共生关系下,筑巢位置为树干的蚁巢分布变化。

蚂蚁与产蜜露昆虫之间存在着互利共生关系^[9-10],在这些相互作用中,蚂蚁照顾寄生在寄主植物上的产蜜露昆虫,取食其分泌的蜜露的同时,保护产蜜露昆虫免遭捕食者和寄生者的危害^[9]。这可为物种间相互作用的研究提供一个很好的范例^[9]。由于蚂蚁数量庞大,种群稳定对害虫可以起到十分明显的控制作用^[11-14]。粗纹举腹蚁(*Crematogaster macaoensis* Wheeler)是紫胶种植园中的优势蚂蚁种群^[15]。已有研究证实,粗纹举腹蚁与云南紫胶虫(*Kerria yunnanensis* Ou et Hong)之间存在互利共生关系^[16-18]。粗纹举腹蚁可以建立保护膜,垄断紫胶虫分泌的蜜露资源,包裹并保护紫胶虫^[16],从而有效地减少紫胶虫天敌数量,并提高紫胶产量^[19]。已有研究虽证明了粗纹举腹蚁的存在对云南紫胶虫种群的生存有正面的影响^[16],但对有/无共生者存在情况下粗纹举腹蚁的种群动态变化仍缺乏研究。本文比较了有/无紫胶虫存在情况下,紫胶种植园内粗纹举腹蚁的蚁巢分布模式及巢和种群数量的时间动态变化,旨在从理论及应用层面上,为应用粗纹举腹蚁进行紫胶虫病虫害生物防控,促进紫胶生产提供生物学上的依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验地位于云南省墨江县雅邑乡(23°14' N, 101°43' E),海拔1 000~1 056 m,该地区干湿季分明,属于亚热带半湿润山地季风气候,平均温度17.8℃,年均降水量1 315.4 mm,年平均日照时数

2 161.2 h,适宜紫胶生产,也是我国紫胶的传统主产区之一。试验地内主要树种为钝叶黄檀(*Dalbergia obtusifolia* (Baker) Prain),树龄约5 a,树高3~4 m,胸径5~6 cm,种植密度约1 500株·hm⁻²,乔木盖度70%左右,能透射太阳光。地表草本层盖度30%左右,以紫茎泽兰(*Ageratina adenophora* (Spreng.) King & H. Rob.)、飞机草(*Chromolaena odorata* (L.) King & H. Rob.)、扭黄茅(*Heteropogon contortus* (L.) Beauv.)等占优势。土壤以赤红壤为主,腐殖质较少。

1.2 样地设置

试验样地分为2种类型:紫胶林和对照林(实验期内未放养紫胶虫)。紫胶林记为A,对照林记为B。试验区域内各样地内植被、土壤、坡度、坡向(均为南坡)等条件基本一致。试验地内长期从事紫胶的生产,林地内有大量蚂蚁栖息。每种类型的样地随机选择3块作为重复,大小均为35 m×35 m,不同类型的样地之间间隔30 m以上,相同类型样地相隔10 m以上。这是因为蚂蚁的有效觅食范围一般不会超过10 m^[20]。紫胶虫分泌紫胶的同时也分泌大量蜜露,成虫期显著高于幼虫期。于2009年10月开始人工放养云南紫胶虫,平均放养量约为有效枝条(适宜于云南紫胶虫寄生的枝条)的30%~60%,放虫密度基本一致。对照林中不放养紫胶虫。

1.3 研究材料

研究材料为粗纹举腹蚁巢和工蚁。举腹蚁属的巢通常位于树干上,由蚂蚁分泌物、真菌参与分解的木质素混合硬化而成,可防水,为层纸巢^[8]。

1.4 调查方法

于2009年11月至2010年7月,调查每块样地内所有树木上的蚁巢。分别在紫胶林和对照林内用卷尺设定坐标系,每月中旬统计样地内的蚁巢数量,并对每个蚁巢编号。使用卷尺测量蚁巢的大小参数(长半径、短半径和极半径),记录每个蚁巢在坐标系中的投影坐标。

1.5 统计分析

统计蚁巢数量时,将其分为2类,一类为正常巢,一类为废弃巢。废弃巢中无蚂蚁,或者巢严重损坏。废弃巢不纳入之后的分析。

有研究指出,可以利用蚁巢来预测粗纹举腹蚁的种群数量变化,粗纹举腹蚁蚁巢体积(V)和每巢工蚁数量(WN)的计算公式为:

$$V = 0.365 \times (4/3 \times \pi abc)^{1.056}$$

$$WN = 135.236 \times V^{0.660}$$

式中： a 、 b 、 c 分别代表蚁巢的长半径、短半径和极半径^[21]。

利用上述公式可以求出样地内粗纹举腹蚁巢的体积以及工蚁数量。运用 SPSS 18.0 中的协方差分析考察有/无互利共生关系对粗纹举腹蚁巢数量和种群数量的影响,固定因子为样地类型,协变量为月份^[22]。分别比较试验期间紫胶林与对照林内巢数量和工蚁数量的差异,并利用 Excel 绘制动态变化折线图。

判断样地内的蚁巢分布模式是基于最近邻指数 (NNI)^[23]。利用 ArcGIS V10.1 中的平均最近邻 (Average Nearest Neighbor) 分析工具,计算样地中的最近邻指数、 Z 得分和 P 值。置信度为 95% 时, Z 得分的临界值为 -1.96 和 1.96 倍标准差,与其关联的 P 值为 0.05 。如果 Z 得分 < -1.96 , 所表现的模式为集群分布; 如果 Z 得分在 $-1.96 \sim 1.96$ 间, 表现为随机分布; 如果 Z 得分 > 1.96 , 表现模式趋向于离散或均匀分布^[24]。NNI 的计算基于欧氏距离, 最近邻分析对面积变化非常敏感, 本研究是为了调查整块样地内的蚁巢分布, 设定样地面积较大, 均设定为 $1\ 225\ m^2$ 。

2 结果与分析

2.1 不同样地间蚁巢数量与种群大小的比较

在本研究时段内, 不同的样地类型是造成蚁巢数量 ($F = 111.70, P < 0.01, N = 54$) 和工蚁数量 ($F = 67.07, P < 0.01, N = 54$) 极显著差异的原因。紫胶林中的蚁巢数量 ((14.96 ± 0.78) 个; $N = 27$) 极显著高于对照林中的 ((5.56 ± 0.46) 个; $N = 27$) ($F = 111.70, P < 0.01, N = 54$); 紫胶林中的工蚁数量 ($(160\ 934.11 \pm 13\ 896.55)$ 头; $N = 27$) 也极显著高于对照林 ($(37\ 198.85 \pm 5\ 555.85)$ 头; $N = 27$) ($F = 67.07, P < 0.01, N = 54$)。

2.2 蚁巢分布型

经平均最近邻分析, 样地中蚁巢的分布模式较为复杂, 集群分布、随机分布和离散分布均有出现 (表 1、2)。在试验期间, 紫胶林中蚁巢的集群分布模式出现 2 次, 随机分布出现 22 次, 离散分布出现 3 次。对照林中蚁巢的集群分布模式出现 9 次, 随机分布出现 16 次, 离散分布出现 2 次。2010 年 1、2、4、5、6 月的紫胶林中, 各样地的蚁巢分布模式均为

随机分布。总体来说, 不同的时间段, 紫胶林和对照林中的蚁巢分布模式并不一致; 此外, 同一时间段内相同类型的样地中, 蚁巢的分布模式也不完全相同。

表 1 紫胶林 (A) 中蚁巢最近邻分析

时间(年-月)	样地	蚁巢数量/个	NNI	Z	P	分布模式
2009-11	A1	14	0.89	-0.78	0.43	随机分布
	A2	9	0.89	-0.66	0.51	随机分布
	A3	11	0.65	-2.21	0.03	集群分布
2009-12	A1	19	0.69	-2.98	<0.01	集群分布
	A2	9	0.90	-0.56	0.58	随机分布
	A3	12	0.74	-1.73	0.08	随机分布
2010-01	A1	23	1.15	1.48	0.14	随机分布
	A2	11	0.70	-1.92	0.06	随机分布
	A3	14	0.84	-1.32	0.19	随机分布
2010-02	A1	20	1.06	0.55	0.58	随机分布
	A2	10	1.07	0.43	0.67	随机分布
	A3	14	0.79	-1.48	0.14	随机分布
2010-03	A1	20	1.21	2.03	0.04	离散分布
	A2	12	1.25	1.62	0.10	随机分布
	A3	14	1.04	0.32	0.75	随机分布
2010-04	A1	19	1.10	0.92	0.36	随机分布
	A2	12	1.29	1.91	0.06	随机分布
	A3	15	1.11	0.79	0.43	随机分布
2010-05	A1	18	1.10	0.98	0.32	随机分布
	A2	16	1.07	0.54	0.59	随机分布
	A3	17	0.96	-0.34	0.73	随机分布
2010-06	A1	16	1.09	0.87	0.38	随机分布
	A2	16	1.10	0.76	0.45	随机分布
	A3	20	0.81	-1.63	0.10	随机分布
2010-07	A1	16	1.02	0.19	0.85	随机分布
	A2	16	1.36	2.75	0.01	离散分布
	A3	15	1.34	2.63	0.01	离散分布

2.3 蚁巢与种群数量的时间动态变化

从图 1 可看出: 紫胶林与对照林中的蚁巢数量随时间的变化趋势基本一致, 但仍有细微的差别。如在 2010 年 2 月至 4 月, 对照林中的蚁巢数量小幅下滑, 但紫胶林中的蚁巢数量却略有上升。此外, 对照林中的蚁巢数量从 2010 年 5 月开始下降, 但紫胶林中的蚁巢数量直到 2010 年 6 月才开始下降, 表现出滞后性。

从图 2 可看出: 紫胶林与对照林中的工蚁数量随时间的变化趋势基本一致, 但仍有细微的差别。紫胶林中工蚁数量在 2010 年 4 月达到最大值, 此后开始下降, 而对照林中的工蚁数量直到 2010 年 6 月才达到最大值。

同样样地内巢数量的变化与工蚁数量的变化在时间段上部分一致, 但还是有差异。2009 年 11 月至

表2 对照林(B)中蚁巢最近邻分析

时间(年-月)	样地	蚁巢数量/个	NNI	Z	P	分布模式
2009-11	B1	4	0.71	-1.12	0.26	随机分布
	B2	9	0.29	-4.07	<0.01	集群分布
	B3	3	0.96	-0.15	0.88	随机分布
2009-12	B1	4	0.71	-1.12	0.26	随机分布
	B2	9	0.29	-4.07	<0.01	集群分布
	B3	3	0.96	-0.15	0.88	随机分布
2010-01	B1	4	0.71	-1.12	0.26	随机分布
	B2	7	0.32	-3.90	<0.01	集群分布
	B3	5	1.09	0.40	0.69	随机分布
2010-02	B1	3	1.56	2.15	0.03	离散分布
	B2	8	0.37	-3.65	<0.01	集群分布
	B3	5	1.09	0.40	0.69	随机分布
2010-03	B1	4	1.50	1.90	0.06	随机分布
	B2	7	0.68	-1.82	0.07	随机分布
	B3	4	1.59	2.52	0.01	离散分布
2010-04	B1	3	1.03	0.12	0.91	随机分布
	B2	6	0.27	-3.94	<0.01	集群分布
	B3	4	1.09	0.42	0.67	随机分布
2010-05	B1	3	1.25	0.94	0.35	随机分布
	B2	9	0.29	-4.05	<0.01	集群分布
	B3	9	0.80	-1.15	0.25	随机分布
2010-06	B1	4	0.85	-0.58	0.56	随机分布
	B2	7	0.24	-4.38	<0.01	集群分布
	B3	8	0.52	-2.58	0.01	集群分布
2010-07	B1	3	1.43	1.63	0.10	随机分布
	B2	9	0.39	-3.52	<0.01	集群分布
	B3	7	1.18	0.99	0.32	随机分布

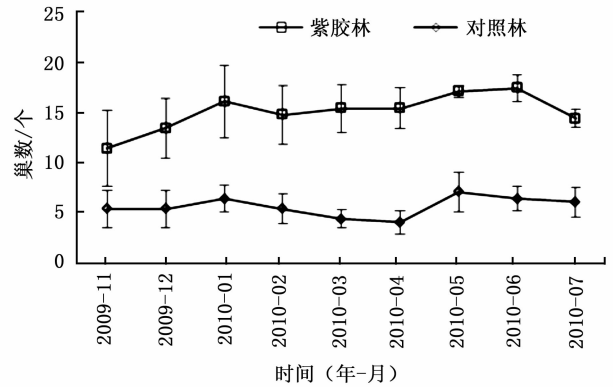


图1 不同样地类型蚁巢数量随时间的动态变化

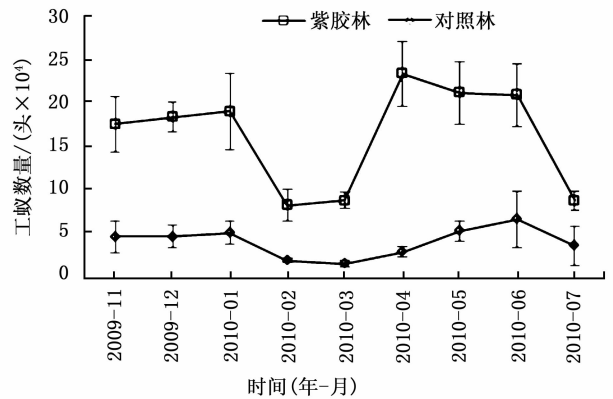


图2 不同样地类型工蚁数量随时间的动态变化

2010年3月,紫胶林样地中蚁巢数量与工蚁数量的变化趋势基本一致,但此后二者的变化趋势不一样,蚁巢数量的最大值((17.33 ± 1.33) 个, $N=3$)出现在2010年6月,而工蚁数量的最大值($(232\ 840.59 \pm 37\ 878.34)$ 头, $N=3$)出现在2010年4月(图1~2)。对照林样地中的蚁巢数量和工蚁数量变化趋势同样在2009年11月至2010年3月时间段内一致,蚁巢数量的最大值((7.00 ± 2.00) 个, $N=3$)出现在2010年5月,而工蚁数量的最大值($(63\ 760.43 \pm 32\ 555.17)$ 头, $N=3$)出现在2010年6月。

紫胶虫成虫期(2010年4月至6月)的工蚁数量稍高于紫胶虫幼虫期(2009年11月至2010年1月)。

3 结论与讨论

蜜露是一种可靠并且稳定的食物资源,能够提高蚂蚁物种丰富度及多度,并影响蚂蚁群落组成^[25-27]。有研究表明,紫胶虫与蚂蚁之间的互利共生关系,能提高紫胶林中地表蚂蚁和树冠层蚂蚁的种群数量^[22, 28]。本研究发现,紫胶虫分泌的蜜露能

为粗纹举腹蚁提供充足的食物来源,所以紫胶林可以维持较多的蚁巢及更大的蚂蚁种群数量。相同面积的紫胶林样地中蚁巢数量均值为对照林的2.69倍;工蚁数量均值为对照林的4.33倍。

蚁巢分布受很多生物或非生物因素的影响,如食物和筑巢资源^[7],湿度和方位^[6],种内或种间竞争^[3-4],互利共生关系和蚁群分裂^[5]及不同种类蚂蚁本身的习性^[29]等。本研究中,随机选择的样地内蚁巢的分布模式较为复杂多样,这可能与林地中的微环境相关。林地中某些斑块的条件(如湿度、植被盖度等)比较适合建巢,就容易吸引粗纹举腹蚁;当微环境改变时,蚁群迁移,从而改变蚁巢分布^[30]。紫胶林中的食物资源充足,蚁巢数量较多,且倾向于随机分布,这与前人的研究结果一致^[4];而对照林中的食物资源较紫胶林少,因此蚁巢数量显著低于紫胶林,且出现集群分布的频率高于紫胶林。大部分蚁巢分布的研究都集中在地表巢或土壤巢,其相对来说可供筑巢的空间较多,粗纹举腹蚁将巢安置在树干上,而且一棵树上通常只有1个巢,所以树木的分布在很大程度上制约着蚁巢的分布。本研究中,

不同时期粗纹举腹蚁蚁巢分布规律不同,这是粗纹举腹蚁对外界环境和食物资源季节性变化适应的结果。Traniello 等^[31]也发现 *Lasius neoniger* Emery 的蚁巢在不同时期的分布模式不一样,这是由于食物的多少与季节相关,本研究结果支持这一结论。

在不同时期,随着外界气候条件和食物资源的变化,林地内的蚁巢数和工蚁总数都在变化;但蚁巢数量的动态变化与工蚁数量的动态变化不完全吻合,这是因为林地内蚂蚁数量的增加可有2种方式,除增加蚁群数量外,还可以在蚁群数量稳定的情况下,增加单个蚁群中的蚂蚁个体数(即蚁群的扩大)。相比对照林,紫胶林中的蚁巢数量与工蚁数量的下降有一定滞后性,这可能是因为充足的食物资源能抵消一部分外界不利因素的影响。紫胶虫成虫期分泌的蜜露高于幼虫期^[22],但本结果显示,不同时期蜜露量虽然对蚂蚁工蚁种群数量有一定影响,但不明显。这也许是因为紫胶虫分泌的蜜露量十分充足,并未被蚂蚁完全利用^[22]。紫胶林中的工蚁数量在2010年2至3月及2010年7月出现2次明显的下降,这可能是因为从事紫胶生产时对寄主植物枝条和蚁巢干扰的较多,出现了较多破损巢的缘故。

粗纹举腹蚁作为紫胶种植园中的优势蚂蚁种群,可以应用于紫胶虫天敌的生物防治。有研究报道,紫胶园中通过数量方式垄断的胶被上的粗纹举腹蚁数量为 $15 \text{ 头} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[16],有蚂蚁光顾的云南紫胶虫的胶被上紫胶黑虫数量(5.58 ± 0.48)条, $n = 60$ 明显少于无蚂蚁光顾的胶被上紫胶黑虫数量(7.06 ± 0.46)条, $n = 60$ ^[19]。本研究表明,紫胶林的蚂蚁种群数量庞大,可充分保护林中的紫胶虫。在深入了解其蚁巢的分布规律和种群动态后,可以通过迁移蚁巢的方式,在紫胶种植园中散布粗纹举腹蚁来控制病虫害,以此促进紫胶的生产。

参考文献:

[1] Soares S M, Schoederer J H. Ant-nest distribution in a remnant of tropical rainforest in southeastern Brazil [J]. *Insectes Sociaux*, 2001, 48(3): 280-286.

[2] Cushman J H, Martinsen G D, Mazeroll A I. Density and size-dependent spacing of ant nests: evidence for intraspecific competition [J]. *Oecologia*, 1988, 77(4): 522-525.

[3] Deslippe R J, Savolainen R. Mechanisms of competition in a guild of formicine ants [J]. *Oikos*, 1995, 72(1): 67-73.

[4] Fernández-Escudero I, Tinaut A. Factors determining nest distribution in the high-mountain ant *Proformica longiseta* (Hymenoptera Formicidae) [J]. *Ethology Ecology & Evolution*, 1999, 11(4):

325-338.

[5] Herbers J M. Structure of an Australian ant community with comparisons to North American counterparts (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Sociobiology*, 1994, 24(3): 293-306.

[6] Doncaster C P. The spatial distribution of ants' nests on Ramsey Island, South Wales [J]. *The Journal of Animal Ecology*, 1981, 50(1): 195-218.

[7] Levings S C. Seasonal, annual, and among-site variation in the ground ant community of a deciduous tropical forest: some causes of patchy species distributions [J]. *Ecological Monographs*, 1983, 53(4): 435-455.

[8] 徐正会. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002.

[9] Stadler B, Dixon A F G. Ecology and evolution of aphid-ant interactions [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 20(36): 345-372.

[10] Styrsky J D, Eubanks M D. Ecological consequences of interactions between ants and honeydew-producing insects [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 274(1607): 151-164.

[11] 吴坚, 王常禄. 中国蚂蚁 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.

[12] Peng R K, Christian K. The weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae), an effective biological control agent of the red-banded thrips, *Selenothrips rubrocinctus* (Thysanoptera: Thripidae) in mango crops in the Northern Territory of Australia [J]. *International Journal of Pest Management*, 2004, 50(2): 107-114.

[13] Van Mele P, Vayssières J F, Van Tellingen E, et al. Effects of an African weaver ant, *Oecophylla longinoda*, in controlling mango fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Benin [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2007, 100(3): 695-701.

[14] Van Mele P. A historical review of research on the weaver ant *Oecophylla* in biological control [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2008, 10(1): 13-22.

[15] 王思铭, 陈又清, 卢志兴, 等. 紫胶园异质性栖境下的蚂蚁共存机制 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2684-2690.

[16] 王思铭, 陈又清, 卢志兴, 等. 粗纹举腹蚁垄断蜜露对紫胶生产的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 229-234.

[17] 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.

[18] Chen Y, Wang S, Lu Z, et al. The effects of ant attendance on aggregation of the honeydew producing lac insect *Kerria yunnanensis* [J]. *Tropical ecology*, 2013, 54(3): 301-308.

[19] 王思铭, 陈又清, 李巧, 等. 蚂蚁光顾云南紫胶虫对其天敌紫胶黑虫种群的影响 [J]. *昆虫知识*, 2010(4): 730-735.

[20] Hölldobler B. *The Ants* [M]. Cambridge: Harvard University Press, 1990.

[21] 王思铭, 陈又清, 卢志兴, 等. 粗纹举腹蚁蚁巢解剖及其数学建模 [J]. *应用昆虫学报*, 2013, 50(5): 1405-1412.

[22] 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.
- [23] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations[J]. *Ecology*, 1954, 35(4): 445-453.
- [24] Mitchell A. The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2, Spatial Measurements and Statistics[M]. Redlands California: Environmental Systems Research Institute Inc, 2005.
- [25] Jackson D. Competition in the tropics: ants on trees[J]. *Antenna*, 1984, 8: 19-22.
- [26] Jackson D A. Ant distribution patterns in a Cameroonian cocoa plantation: investigation of the ant mosaic hypothesis[J]. *Oecologia*, 1984, 62(3): 318-324.
- [27] Yanoviak S P, Kaspari M. Community structure and the habitat templet: ants in the tropical forest canopy and litter[J]. *Oikos*, 2000, 89(2): 259-266.
- [28] 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.
- [29] Tanner C J, Keller L. Nest distribution varies with dispersal method and familiarity-mediated aggression for two sympatric ants[J]. *Animal Behaviour*, 2012, 84(5): 1151-1158.
- [30] Gils H V, Vanderwoude C. Leafcutter Ant (*Atta sexdens*) (Hymenoptera: Formicidae) Nest Distribution Responds to Canopy Removal and Changes in Micro-Climate in the Southern Colombian Amazon[J]. *Florida Entomologist*, 2012, 95(4): 914-921.
- [31] Traniello J F A, Levings S C. Intra and intercolony patterns of nest dispersion in the ant *Lasius neoniger*: correlations with territoriality and foraging ecology[J]. *Oecologia*, 1986, 69(3): 413-419.