

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230039

红火蚁次适宜区本地蚂蚁群落研究 ——以昆明为例

高舒桐^{1,2,3}, 王思铭⁴, 张翔^{1,2}, 沈丹⁵, 卢志兴^{1,2*}, 陈又清^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院高原林业研究所, 云南昆明 650224; 2. 国家林业和草原局资源昆虫培育与利用重点实验室, 云南昆明 650224; 3. 南京林业大学, 江苏南京 210037; 4. 云南林业职业技术学院, 云南昆明 650051; 5. 西南林业大学, 云南昆明 650224)

摘要: [目的] 红火蚁入侵导致了严重的生态问题。温度是制约红火蚁入侵并发展的关键因素。本研究在云南省昆明市不同生境调查蚂蚁群落, 旨在揭示红火蚁在次适宜区对本地蚂蚁群落的影响。[方法] 于2021年6月和8月, 选择云南省昆明市虹桥路和沙朗乡区域5种生境作为研究样地, 采用陷阱法调查了不同样地蚂蚁群落, 分析不同生境蚂蚁群落多样性、群落结构相似性以及本地蚂蚁群落与红火蚁发生情况关系。[结果] 5种生境基于蚂蚁个体数的物种稀疏和预测曲线较平缓, 抽样充分; 5种生境中共采集蚂蚁2748头, 隶属于4亚科19属34种, 其中红火蚁1920头; 桉树林中采集到红火蚁个体数最多(99.2%), 其次为荒地(高红火蚁蚁巢密度HW 94.2%, 低红火蚁蚁巢密度LW 90.7%), 云南松次生林与荒地交错区最少(44.7%); 云南松次生林中未采集到红火蚁; 桉树林中仅采集到1种本地蚂蚁, 荒地中分别采集到3种(HW)和7种(LW), 交错区中采集到15种, 云南松次生林中采集到18种; 云南松次生林和交错区蚂蚁物种丰富度和Chao-1估计值显著高于桉树林, 而二者优势度指数则显著低于桉树林; 5种生境的蚂蚁群落结构相似性有显著差异, 有红火蚁发生的生境的蚂蚁群落结构与云南松次生林不相似; 红火蚁蚁巢密度与红火蚁工蚁多度、本地蚂蚁多度、物种丰富度无显著关联; 随着红火蚁工蚁多度的增加, 本地蚂蚁物种丰富度和多度均呈显著线性下降。[结论] 在昆明红火蚁次适宜区, 红火蚁多发生于受干扰的开阔生境, 特别是稀疏的桉树林, 而很少入侵郁闭度高的生境; 红火蚁入侵后导致本地蚂蚁群落多样性水平显著降低, 改变蚂蚁群落结构; 红火蚁入侵后, 需要种群发展至较大规模才表现出种群数量优势, 进而对本地蚂蚁产生显著影响; 减少红火蚁适宜生境, 对适宜生境加强巡查, 及时对大中型蚁巢开展药剂治理将有利于降低红火蚁发生发展。

关键词: 红火蚁; 次适宜区; 本地蚂蚁群落; 适应对策

中图分类号: S969.554.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)06-0020-10

红火蚁 (*Solenopsis invicta* Buren) 原产南美洲^[1], 是世界上百种危险入侵生物之一^[2-3]。由于其主动攻击性、高繁殖力、强竞争能力、广食性、高破坏性的特点, 对人体健康和公共设施设备及生态环境造成危害^[4-7]。随着全球运输网络的建立和贸易往来的加速, 地理屏障对红火蚁的阻隔作用越来越

小。在人类活动参与下, 阻止红火蚁扩散变得十分困难^[8-9]。目前红火蚁已广泛入侵全球多个国家地区^[4, 9-10]。大量研究表明, 红火蚁入侵会对本地生物多样性产生威胁, 导致本地物种多样性丧失^[6, 11-14], 甚至会破坏生态系统过程^[14-15]。红火蚁入侵不同生境后, 通过干扰、资源竞争等显著降低区域内蚂蚁

收稿日期: 2023-02-02 修回日期: 2023-02-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020SY028); 国家自然科学基金(41701285)

作者简介: 高舒桐, 从事昆虫生态学研究

* 通讯作者: 卢志兴, 副研究员, luzhixing@caf.ac.cn

群落多样性^[16-24]。

温度是红火蚁觅食活动的重要影响因子^[25],温度和降水决定红火蚁分布格局和能否成功入侵^[26]。相比本地蚂蚁,红火蚁具有极强的温度适应能力^[27-28],对恶劣环境胁迫具有极高的耐受性^[27, 29-30],并且它们在受人类改造或干扰的生境中能够快速定殖和发展,可以实现较大的种群规模^[25]。随着红火蚁进一步扩散和适应,其入侵并适应的生境类型更加多样化^[31]。然而,在红火蚁发生次适宜区,相关研究还较少,其生物学特性、入侵机制、与本地蚂蚁群落的关系等是否会发生改变等应加强研究和探索。

云南省于2013年报道有红火蚁入侵,随后在10余个州(市)发现红火蚁疫情,并且呈现加重趋势,对当地生物多样性、人民生活以及公众健康造成了严重影响^[32-33]。目前昆明市盘龙区、官渡区、五华区、西山区和呈贡区均有红火蚁发生,呈贡区的发生程度较重,多发生于城市绿地、人工林和撂荒地等生境,通过定期开展药剂防治,红火蚁发生发展处于可控状态。昆明地处滇中高原,经模型预测属于红火蚁中低度适生区,可能不适宜红火蚁长期生存繁殖^[34-35]。然而,自发现红火蚁近十年来,红火蚁在本地区发生较为频繁,红火蚁显然对昆明地区生态环境产生了一定的适应性。例如,昆明地区红火蚁的活动盛期为6至11月,与广东吴川地区(盛期为5—6月和10—11月)有一定差异^[33]。与起源地相比,昆明地区气温相对偏低,红火蚁在温度适宜的季节能够有一定程度发展,但种群发展总体处于较低水平,种群存在较大波动^[32]。在此背景下,昆明地区作为红火蚁的次适宜区,红火蚁入侵及其适应过程对本地蚂蚁造成的影响需要进一步关注。本研究选取昆明两地5种生境类型调查蚂蚁群落,比较不同生境中蚂蚁群落多样性、群落结构差异,分析红火蚁发生密度与本地蚂蚁群落关系,探讨2个科学问题:1)次适宜区红火蚁入侵是否对本地蚂蚁群落产生影响,如何影响?2)次适宜区红火蚁入侵对当地蚂蚁群落产生影响的机制是通过蚁巢密度实现还是种群数量实现?为昆明地区红火蚁防控提供理论参考。

1 研究地概况

研究地位于云南省昆明市虹桥路(25°02'13.66" N, 102°47'28.08" E, 海拔1 995 m)和沙朗乡

(25°09'59.29" N, 102°40'45.76" E, 海拔2 035 m)两地。该地区2019年的年平均气温为15.6℃,年均降雨量850 mm,最冷月平均气温8.6℃,极端低温-6.7℃^[36]。在昆明市虹桥路和沙朗乡发现红火蚁发生,虹桥路红火蚁发生地为废弃工厂荒地及育苗地,场地为废弃状态,裸地覆盖有草本层;沙朗乡红火蚁发生地为废弃建筑用地,种植有绿化苗木,草本层不发达。两地相对封闭,人为活动相对较少,可排除人为干扰对蚂蚁群落的影响。为了避免人工药剂防治造成影响,所选择的调查样地调查前未开展过药剂防治,经与管理部门协商在调查期间未开展红火蚁防治。

在上述两个地点选取红火蚁发生和未发生区域,选择红火蚁发生的常见生境类型调查蚂蚁群落,每种类型选择2个重复样地,所选取的调查样地间距200 m以上,调查样地信息见表1。

2 材料与方法

2.1 蚂蚁调查

分别于2021年6月和8月,选择晴朗天气,采用陷阱法调查了各样地的蚂蚁群落,在每个调查样地中设置5×3网格状分布的陷阱15个,间距10 m(红火蚁发生区要避开红火蚁蚁巢),陷阱为口径6 cm、高9 cm的塑料杯。以50 mL 50%乙二醇作为陷阱溶液,设置48 h后收集陷阱中的蚂蚁带回实验室鉴定。根据形态分类学将蚂蚁鉴定到种,不能鉴定到种的,按形态种对待。

2.2 分析方法

(1)多样性比较:使用物种丰富度、多度和优势度来度量不同样地中蚂蚁群落多样性水平,使用软件EstimateS中的Chao-1方法估算各样地蚂蚁群落物种丰富度水平,由于数据不满足单因素方差分析要求,因此对不同样地各多样性指数进行非参数检验(Kruskal-Wallis检验)差异比较,并使用Games-Howell方法进行两两样地间的多重比较并绘制箱线图,上述检验比较以及箱线图绘制使用R语言中的ggstatsplot包进行^[37]。使用R语言iNEXT在线软件包绘制基于个体数的物种稀疏和预测曲线(Rarefaction and Extrapolation curve, <https://chao.shinyapps.io/iNEXTOnline/>)。

(2)群落结构相似性:使用软件PRIMER v7中的非度量多维标度方法(Non-metric

表1 昆明市虹桥路和沙朗乡蚂蚁调查样地信息

Table 1 Information of ant sample sites in Hongqiao and Shalang of Kunming

项目 Item	代码 Code	红火蚁巢密度 Nest density of red fire ant/hm ²	生境类型 Habitat	主要特点 Characteristics
红火蚁发生地	HW1	20.2	高红火蚁巢密度荒地	红火蚁入侵超过5年，废弃场地，四周有围栏，基本无人活动干扰，无乔木，阳光能直射地面。
	HW2	17.1		
	EP1	7.0	桉树林	红火蚁入侵超过4年，与HW相邻，基本无人活动干扰，种植桉树，树龄7年以上，郁闭度约30%，大部分区域透射阳光。
	EP2	6.1		
	LW1	8.5	低红火蚁巢密度荒地	红火蚁入侵约3年左右，有车辆碾压及堆废弃建筑材料痕迹，人为活动干扰轻微，无乔木，阳光直射地面。
	LW2	11.8		
红火蚁未发生	EC1	11.1	LW和SF交错区	有挖土、踩踏等人为活动痕迹，人为活动干扰轻微，部分区域有乔木荫蔽，地面在部分时段能阳光直射或透射。
	EC2	9.5		
红火蚁未发生	SF1	NA	云南松次生林	云南松林为主的杂木林，有枯落物，有捡菌、踩踏痕迹，人为活动干扰中等，郁闭度约70%，能透射阳光。
	SF2	NA		

注：红火蚁巢密度计算未包括废弃蚁巢，统计蚁巢直径超过5 cm的独立蚁丘并且有红火蚁存活，仅在样地选择首次调查时统计

Notes: Abandoned ant nests were not included in the nest density calculation of red fire ant. Independent anthills with nests over 5 cm in diameter and surviving red fire ants were counted, only counted in the first survey

Multidimensional Scaling, nMDS) 进行不同样地蚂蚁群落结构相似性排序，使用群落结构相似性 (ANOSIM) 方法检验群落结构相似性差异的显著程度。

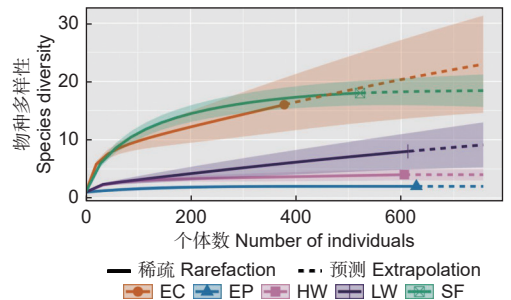
(3) 本地蚂蚁与红火蚁发生情况关系：使用 R 语言中的 ggstatsplot 包分别绘制蚁巢密度与红火蚁多度、本地蚂蚁多度、本地蚂蚁物种丰富度关系散点图以及红火蚁多度与本地蚂蚁物种丰富度、本地蚂蚁多度关系散点图，使用 Pearson 相关分析方法分析两两间的关系。

3 结果与分析

3.1 不同生境蚂蚁物种组成

5 种类型样地的地表蚂蚁群落基于个体数的物种稀疏和预测曲线如图 1。5 条曲线的实线部分代表的是实际上抽样的个体总数以及物种总数，而虚线部分则代表的是对个体数和物种数的预测值，当虚线部分趋于平缓时说明抽样比较充分，阴影部分表示置信区间。由图可知，5 种类型生境抽样曲线较为平缓，尾部虚线趋于平缓，表明 5 种类型样地的蚂蚁群落抽样较为充分。

在昆明市虹桥路和沙朗乡两地先后 2 次共采集蚂蚁 2 748 头，隶属于 4 亚科 19 属 34 种（形态种）。共采集红火蚁 1 920 头，本地蚂蚁 828 头。在桉树林中采集到的红火蚁个体数最多，占比为 99.2%，仅采到 1 种本地蚂蚁，其次为荒地（HW



注：EC、EP、HW、LW 和 SF 分别代表交错区、桉树林、红火蚁高密度发生区、红火蚁低密度发生区和次生林。下同

Notes: EC、EP、HW、LW and SF represent ecotone between secondary forest and wasteland with low nest density of red fire ant, eucalyptus forest, wasteland with high nest density of red fire ant, wasteland with low nest density of red fire ant and secondary forest, respectively. The same below

图1 不同栖境基于蚂蚁个体数的物种稀疏和预测曲线
Fig. 1 Rarefaction and extrapolation curves of different habitats based on ant individuals

中红火蚁个体数占比 94.2%，3 种本地蚂蚁，LW 中红火蚁个体数占比 90.7%，7 种本地蚂蚁），在云南松次生林与荒地的交错区（以下简称交错区）中采集到的红火蚁个体数最少，占比为 44.7%，15 种本地蚂蚁。在云南松次生林中采集到本地蚂蚁 18 种，未采集到红火蚁，本地蚂蚁物种丰富度及多度最多（表 2）。

3.2 多样性比较

5 种类型生境蚂蚁群落物种丰富度和 Chao-1 估计值有显著差异（物种丰富度：Kruskal-Wallis

表2 昆明市虹桥路和沙朗乡不同生境蚂蚁物种名录及多度

Table 2 Ant species and abundance of different habitats in Hongqiao and Shalang of Kunming

物种名称 Species	EP	HW	LW	EC	SF
猛蚁亚科 Ponerinae					
环纹大齿猛蚁 <i>Odontomachus circulus</i>				1	
黄足短猛蚁 <i>Brachyponera luteipes</i>			1	1	
扁头猛蚁属待定种1 <i>Ectomomyrmex</i> sp.1					4
扁头猛蚁属待定种2 <i>Ectomomyrmex</i> sp.2			1		
扁头猛蚁属待定种3 <i>Ectomomyrmex</i> sp.3					1
切叶蚁亚科 Myrmicinae					
棒刺大头蚁 <i>Pheidole spathifera</i>				13	2
大头蚁属待定种1 <i>Pheidole</i> sp.1					10
大头蚁属待定种2 <i>Pheidole</i> sp.2				1	8
厚结大头蚁 <i>Pheidole nodifera</i>					3
乌木举腹蚁 <i>Crematogaster ebenina</i>				1	1
盘腹蚁属待定种1 <i>Aphaenogaster</i> sp.1					3
阿普特铺道蚁 <i>Tetramorium aptum</i>					18
草地铺道蚁 <i>Tetramorium caespitum</i>					12
铺道蚁属待定种1 <i>Tetramorium</i> sp.1					7
铺道蚁属待定种2 <i>Tetramorium</i> sp.2				1	
疏毛无刺蚁 <i>Kartidris sparsipila</i>				12	361
裸心结蚁 <i>Cardiocondyla nuda</i>	5	25	1	102	
宽结摇蚁 <i>Eromyrma latifodis</i>					2
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i>	624	571	556	169	
臭蚁亚科 Dolichoderinae					
无毛凹臭蚁 <i>Ochetellus glaber</i>			2		
黑头酸臭蚁 <i>Tapinoma melanocephalum</i>				1	2
酸臭蚁属待定种1 <i>Tapinoma</i> sp.1				1	
蚁亚科 Formicinae					
开普刺结蚁 <i>Lepisiota capensis</i>				4	
角弓背蚁 <i>Camponotus cornis</i>			50	25	
弓背蚁属待定种1 <i>Camponotus</i> sp.1			1		
弓背蚁属待定种2 <i>Camponotus</i> sp.2				11	
弓背蚁属待定种3 <i>Camponotus</i> sp.3				1	
长角立毛蚁 <i>Paratrechina longicornis</i>		1			
林间毛蚁 <i>Lasius hayashi</i>					6
玉米毛蚁 <i>Lasius alienus</i>				34	74
毛蚁属待定种1 <i>Lasius</i> sp.1					6
缅甸尼氏蚁 <i>Nylanderia birmana</i>		9			
黄足尼氏蚁 <i>Nylanderia flavipes</i>					2
斜结蚁待定种1 <i>Plagiolepis</i> sp.1			1		
物种丰富度 Species richness	2	4	8	16	18
多度 Abundance	629	606	613	378	522

$\chi^2=15.63$, $P<0.01$; Chao-1 估计值: Kruskal-Wallis $\chi^2 = 15.62$, $P<0.01$), 其中, 云南松次生林和交错区的蚂蚁物种丰富度和 Chao-1 估计值均显著高于桉树林 (图 2a,b)。5 种类型样地蚂蚁群落多度无显著差异 (图 2c)。5 种类型样地蚂蚁群落的

优势度有显著差异 (Kruskal-Wallis $\chi^2 = 16.79$, $P<0.01$), 其中, 桉树林、高红火蚁巢密度荒地和低红火蚁巢密度荒地的蚂蚁优势度显著高于交错区 (图 2d)。

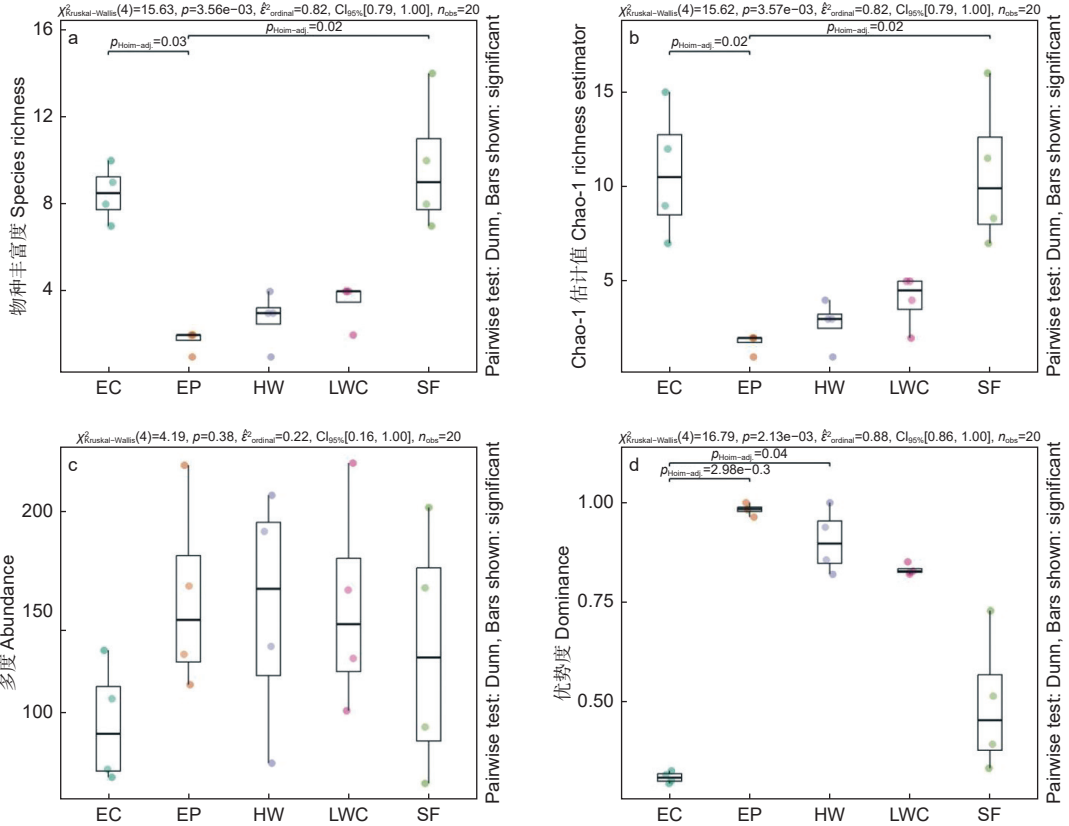


图 2 不同类型样地蚂蚁群落多样性指数比较箱线图

Fig. 2 Boxplots of ant community diversity indices among different sites

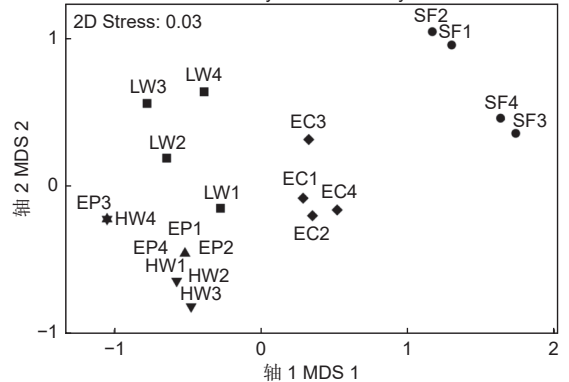
3.3 群落结构相似性比较

5 种类型生境的蚂蚁群落结构相似性有显著差异 (Global Test Sample statistic $R = 0.81$, $P < 0.01$), 云南松次生林的蚂蚁群落结构明显不同于红火蚁发生生境。在红火蚁发生生境中, 高密度红火蚁发生样地的蚂蚁群落结构与桉树林相似; 交错区的蚂蚁群落结构与高密度红火蚁发生样地和桉树林不相似; 低密度红火蚁发生样地的蚂蚁群落结构介于上述二者之间 (图 3)。

3.4 红火蚁巢密度与蚂蚁物种多样性的关系

红火蚁巢密度与红火蚁多度、本地蚂蚁多度和本地蚂蚁物种丰富度均无显著关联。随着红火蚁巢密度的增加, 红火蚁多度无显著增加 (图 4a); 随着红火蚁巢密度的增加, 本地蚂蚁多度及物种丰富度未发生明显变化 (图 4b,c)。

Transform: Presencelabsence
Resemblance: S17 Bray-Curtis similarity



注: 编号 1 和 2 为 6 月调查数据, 编号 3 和 4 为 8 月份调查数据

Notes: Numbers 1 and 2 are survey data in June, numbers 3 and 4 are survey data in August

图 3 不同生境蚂蚁群落结构非度量多维排序

Fig. 3 nMDS ordination of ant community structure among different habitats

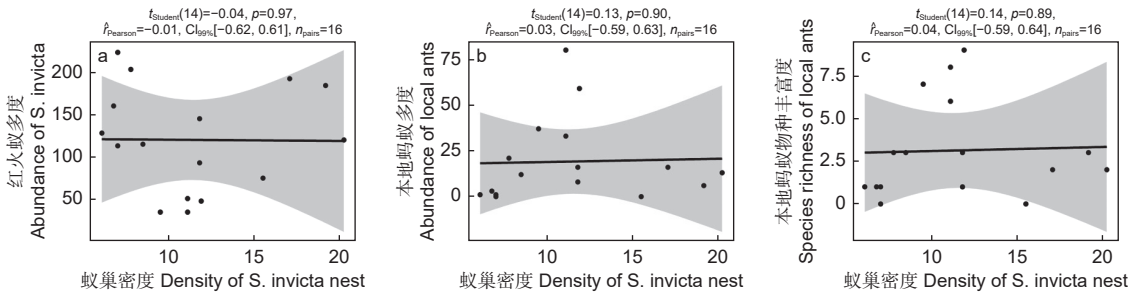


图4 红火蚁巢密度与蚂蚁多度及物种丰富度线性回归模型

Fig. 4 Liner regression models of density of *S. invicta* nest between ant abundance and species richness

3.5 红火蚁多度与本地蚂蚁物种丰富度及多度关系

随着红火蚁多度的增加, 本地蚂蚁物种丰富度呈显著线性下降 ($t = -3.36$, $P < 0.01$), 二者为中等程度负相关 (Pearson 相关系数 $= -0.67$)

(图 5a); 本地蚂蚁多度随着红火蚁多度的增加呈显著线性下降 ($t = -2.66$, $P < 0.05$), 二者也为中等程度负相关 (Pearson 相关系数 $= -0.58$) (图 5b)。

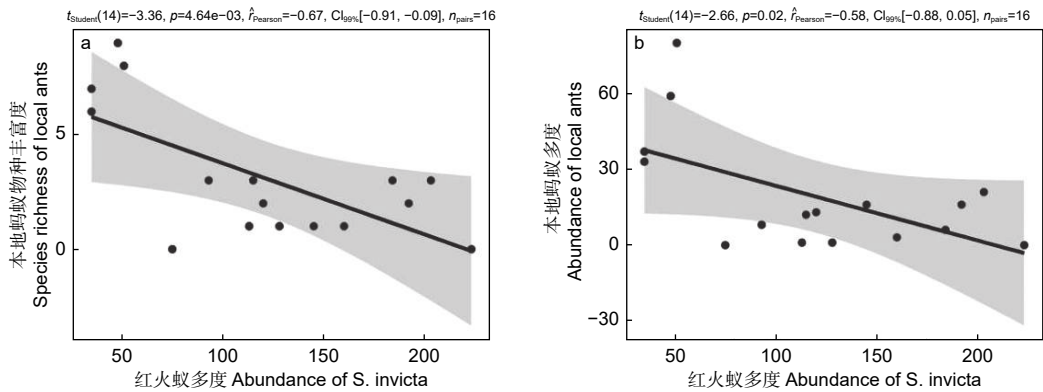


图5 红火蚁多度与本地蚂蚁多度及物种丰富度线性回归模型

Fig. 5 Liner regression models of *S. invicta* abundance between local ant abundance and species richness

4 讨论

红火蚁成功入侵后, 迅速成为入侵地的优势类群, 导致本地生物多样性下降^[6,13], 而对无脊椎动物的影响可能更加深远, 这些类群的变化可能产生级联效应而改变生态系统结构和功能^[38]。在适宜红火蚁生存的热量充足的区域, 红火蚁入侵导致本地蚂蚁多样性水平显著降低^[18,21,39-40], 但这种影响程度还受到生境质量的影响, 未受干扰的生境中存在更多的本地物种与红火蚁竞争资源, 捕食红火蚁生殖蚁导致入侵失败^[41], 在入侵初期红火蚁种群增长较慢, 但随着入侵时间的增加而加快, 数月内可成为优势种, 最终替代本地蚂蚁^[19]。与红火蚁在适宜区短期内严重影响本地蚂蚁群落不同, 本研究中, 红火蚁在次适宜区的入侵虽然也对本地蚂蚁群落产生影响, 但影响的程度相对偏弱, 这种影响会随着红火蚁种群发展而进一步增加。红火蚁巢密度高

的生境中本地蚂蚁物种丰富度明显降低, 桉树林中仅采集到 1 种本地蚂蚁, 在高密度红火蚁巢样地中采集到本地蚂蚁 3 种, 在低密度红火蚁巢样地中采集到本地蚂蚁 7 种; 在交错区采集到本地蚂蚁 15 种; 有红火蚁活动的生境蚂蚁群落结构明显不同于无红火蚁活动的生境。桉树林中采集到的红火蚁个体数最多, 其次为荒地类型, 高密度红火蚁巢样地与低密度红火蚁巢样地采集到的红火蚁个体数相差不大, 交错区采集到的红火蚁个体数最少。在生境受到干扰的初期 (如耕作或割草), 红火蚁种群数量先下降, 在随后的 3~5 a 呈指数增长^[39,42], 同时, 本地蚂蚁在受干扰生境中的恢复能力要远远弱于红火蚁, 很难与红火蚁抗衡^[39,43]。本研究中的样地红火蚁入侵均超过 3 a 以上, 但这些生境中仍然有本地蚂蚁共存, 说明红火蚁在次适宜区的入侵性存在波动。温度和降雨量对于红火蚁的分布起着重要的作用^[26,35,44], 红火蚁种群生长的最

适宜温度是 24~36 ℃ 之间, 温度低于 24 ℃ 种群停止生长^[41], 极端低温或高温会严重限制种群的发展^[45], 同时温度决定着红火蚁觅食活动。地表温度、蚂蚁活动时间、空间是决定红火蚁影响本地蚂蚁的重要因素^[46-47]。

红火蚁主要发生在开阔和经常受到干扰的地区, 很少选择有乔木荫蔽的生境。在有乔木荫蔽的生境中与红火蚁竞争的蚂蚁种类数也明显较多^[48]。本研究也得到了一致的结果, 在无乔木的荒地中, 本地蚂蚁的物种丰富度显著低于有乔灌木的交错区和云南松次生林。虽然红火蚁对开放生境和荫蔽生境的选择偏好原因还较少被关注, 但可能是因为有乔木荫蔽生境中, 红火蚁的生殖蚁更容易被其他蚂蚁捕食, 或可能与昆明地区有乔木荫蔽生境中, 红火蚁获得的太阳辐射热量减少, 地表空气和土壤温度偏低有关。在桉树林中, 与红火蚁竞争的本地蚂蚁种类少, 并且温度适宜, 红火蚁外出活动频繁。在荒地中虽然红火蚁蚁巢密度高, 但晴朗天气下, 可能直射阳光导致过高的地表气温和土壤温度不利于红火蚁外出觅食。

红火蚁成功入侵的优势是在短期内种群指数增长, 以数量优势占据资源, 导致本地蚂蚁无法生存^[11]。在有乔木荫蔽的生境中, 红火蚁与本地蚂蚁发生更频繁、强度更大的资源竞争, 红火蚁增加觅食工蚁数量提高成功率^[48-49]。本研究发现, 红火蚁对本地蚂蚁的影响也是通过种群数量实现。随着红火蚁多度的增加, 本地蚂蚁物种丰富度和多度均为显著的线性下降, 说明红火蚁主要通过种群数量优势来增加资源获取的成功率。一般来说, 红火蚁外出觅食工蚁的数量会随着蚁巢密度的增加而显著增加, 但本研究中红火蚁外出觅食工蚁数量与蚁巢密度未存在显著的线性关系。同时, 本地蚂蚁群落多样性与红火蚁蚁巢密度也没有显著的关联, 说明在次适宜区红火蚁的种群优势需要发展至一定规模后才能对本地蚂蚁产生显著的影响。例如, 交错区红火蚁个体数占比 44.7%, 红火蚁并没有展现出利用种群数量优势提高竞争力, 大量的本地蚂蚁与红火蚁共存, 可能是次适宜区红火蚁种群发展波动情况下, 其竞争力与原发生地相比有一定程度下降。

5 结论

在昆明红火蚁次适宜区, 红火蚁多入侵受干扰、开阔、日照充足的生境。随着红火蚁种群数量

的增加, 本地蚂蚁群落的物种丰富度和多度显著降低, 并改变蚂蚁群落结构, 但红火蚁在次适宜区对本地蚂蚁群落的影响存在波动, 即红火蚁种群数量需达到一定的规模才能产生优势。在次适宜区虽然有红火蚁发生, 相对于原发生地和热量充足地区, 其种群发展仍然受到温度制约, 特别是冬季, 红火蚁仅在太阳照射区域有少量活动(野外观察), 红火蚁在竞争中的种群优势也受到限制。在防治方面, 建议通过适宜的造林措施, 乔灌结合, 合理密植, 减少红火蚁适宜生境。对于有少量蚁巢分布的稀疏人工林, 应加强巡查, 在夏秋季节发现中大型蚁巢应及时药剂防治, 减少婚飞生殖蚁, 同时, 在秋冬季节注意背风、向阳荒坡地, 发现蚁巢及时治理。

参考文献:

- [1] WETTERER J K. Exotic spread of *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) beyond North America[J]. Sociobiology, 2013, 60(1): 50-55.
- [2] APPERSON C S, ADAMS C T. Medical and agricultural importance of red imported fire ant[J]. The Florida Entomologist, 1983, 66(1): 121.
- [3] PIMENTEL D, ZUNIGA R, MORRISON D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States[J]. Ecological Economics, 2005, 52(3): 273-288.
- [4] ASCUNCE M S, YANG C C, OAKLEY J, et al. Global invasion history of the fire ant *Solenopsis invicta*[J]. Science, 2011, 331(6020): 1066-1068.
- [5] WICKINGS K, RUBERSON J R. The red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, modifies predation at the soil surface and in cotton foliage[J]. Annals of Applied Biology, 2016, 169(3): 319-328.
- [6] ALLEN C R, BIRGE H E, SLATER J, et al. The invasive ant, *Solenopsis invicta*, reduces herpetofauna richness and abundance[J]. Biological Invasions, 2017, 19(2): 713-722.
- [7] HAINES A M, SISSON D C, GITZEN R A, et al. Impacts of red imported fire ants on northern Bobwhite nest survival[C]//National Quail Symposium Proceedings National Quail Symposium Proceedings, 2017, 8: 88.
- [8] BANKS N C, PAINI D R, BAYLISS K L, et al. The role of global trade and transport network topology in the human-mediated dispersal of alien species[J]. Ecology Letters, 2015, 18(2): 188-199.
- [9] BERTELSMEIER C, OLLIER S, LIEBHOLD A, et al. Recent human history governs global ant invasion dynamics[J]. Nature

- Ecology & Evolution, 2017, 1(7): 184.
- [10] 陆永跃, 曾玲. 发现红火蚁入侵中国10年: 发生历史、现状与趋势[J]. 植物检疫, 2015, 29(2): 1-6.
- [11] PORTER S D, SAVIGNANO D A. Invasion of polygyne fire ants decimates native ants and disrupts arthropod community[J]. Ecology, 1990, 71(6): 2095-2106.
- [12] MORRISON L W. Long-term impacts of an arthropod-community invasion by the imported fire ant, *Solenopsis invicta*[J]. Ecology, 2002, 83(8): 2337-2345.
- [13] VINSON S B. Impact of the invasion of the imported fire ant[J]. Insect Science, 2013, 20(4): 439-455.
- [14] WANG L, XU Y J, ZENG L, et al. Impact of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren on biodiversity in South China: A review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(4): 788-796.
- [15] WONG M K L, GUENARD B, LEWIS O T. The cryptic impacts of invasion: functional homogenization of tropical ant communities by invasive fire ants[J]. Oikos, 2020, 129(4): 585-597.
- [16] 沈鹏, 赵秀兰, 程登发, 等. 红火蚁入侵对本地蚂蚁多样性的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2007(2): 93-97.
- [17] 苏艳超, 侯有明. 入侵红火蚁对本地蚂蚁及节肢动物多样性的影响[A]. 第二届全国生物入侵学术研讨会论文摘要集[C]. 2008: 32.
- [18] 吴碧球, 陆永跃, 梁广文, 等. 红火蚁对新入侵龙眼园和荒草地蚂蚁类群多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2075-2083.
- [19] 宋侦东, 陆永跃, 许益鏊, 等. 红火蚁入侵草坪过程中蚂蚁类群变动趋势[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1287-1295.
- [20] LU Y Y, WU B qiu, XU Y J, et al. Effects of red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) on the species structure of ant communities in south China[J]. Sociobiology, 2012, 59(1): 275-285.
- [21] 齐国君, 黄永峰, 岑伊静, 等. 红火蚁入侵对人为干扰区蚂蚁群落结构及多样性的影响[J]. 应用昆虫学报, 2015, 52(6): 1368-1375.
- [22] 黄煜权. 本地蚂蚁对红火蚁入侵的行为适应及机制[D]. 广州, 华南农业大学, 2016.
- [23] 燕迪, 卢志兴, 王庆, 等. 红火蚁入侵强度对本地蚂蚁群落物种的发现-支配权的影响[J]. 昆虫学报, 2020, 63(3): 334-342.
- [24] CHAN K H, GUENARD B. Ecological and socio-economic impacts of the red import fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), on urban agricultural ecosystems[J]. Urban Ecosystems, 2020, 23(1): 1-12.
- [25] TSCHINKEL W R. The fire ants[M]. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 2013.
- [26] LEI Y, JALEEL W, FAISAL S M, et al. Effect of constant and fluctuating temperature on the circadian foraging rhythm of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae)[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(1): 64-72.
- [27] 许益鏊, 陆永跃, 黄俊, 等. 红火蚁自然种群耐寒性的研究[J]. 昆虫学报, 2009, 52(9): 974-983.
- [28] WANG H, ZHANG Q, LIU R, et al. Impacts of changing climate on the distribution of *Solenopsis invicta* Buren in mainland China: exposed urban population distribution and suitable habitat change[J]. Ecological Indicators, 2022, 139: 108944.
- [29] XU Y J, LU Y Y, PAN Z P, et al. Heat tolerance of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China[J]. Sociobiology, 2009, 54(1): 115-126.
- [30] 燕迪, 张念念, 李巧, 等. 红火蚁对无水乙醇的耐受性[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 812-818.
- [31] 陆永跃, 曾玲, 许益鏊, 等. 外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 149-160.
- [32] 张红梅, 王燕, 陈宗麒, 等. 昆明红火蚁种群发生特征[J]. 生物安全学报, 2019, 28(1): 29-33.
- [33] 李燕, 刘萍, 太一梅, 等. 昆明市呈贡区红火蚁工蚁消长动态及防控适期[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(6): 1552-1556.
- [34] 陈晓燕, 马平, 李永川, 等. 基于CLIMEX和ArcGIS预测红火蚁在云南的潜在适生区[J]. 植物检疫, 2015, 29(3): 34-39.
- [35] CHEN S, DING F, HAO M, et al. Mapping the potential global distribution of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) based on a machine learning method[J]. Sustainability, 2020, 12(23): 10182.
- [36] WANG T, WANG G, INNES J L, et al. ClimateAP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2017, 4(4): 448.
- [37] PATIL I. Visualizations with statistical details: The "ggstatsplot" approach[J]. Journal of Open Source Software, 2021, 6(61): 3167.
- [38] VINSON S B. Insect life: invasion of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae)[J]. American Entomologist, 1997, 43(1): 23-39.
- [39] STEELE C H, KING J R, BOUGHTON E H, et al. Distribution of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in central Florida pastures[J]. Environmental Entomology, 2020, 49(4): 956-962.
- [40] BAIDYA P, BAGCHI S. Influence of human land use and invasive species on beta diversity of tropical ant assemblages[J]. Insect Conservation and Diversity, 2022, 15(1): 73-85.
- [41] PORTER S D. Impact of temperature on colony growth and developmental rates of the ant, *Solenopsis invicta*[J]. Journal of Insect Physiology, 1988, 34(12): 1127-1133.
- [42] LEBRUN E G, PLOWES R M, GILBERT L E. Imported fire ants near the edge of their range: disturbance and moisture determine prevalence and impact of an invasive social insect[J]. Journal of Animal Ecology, 2012, 81(4): 884-895.
- [43] TSCHINKEL W R, KING J R. Ant community and habitat limit

- colony establishment by the fire ant, *Solenopsis invicta*[J]. *Functional Ecology*, 2017, 31(4): 955-964.
- [44] PETERSON A T, NAKAZAWA Y. Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, 17: 135-144.
- [45] KORZUKHIN M D, PORTER S D, THOMPSON L C, *et al.* Modeling temperature-dependent range limits for the fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in the United States[J]. *Environmental Entomology*, 2001, 30(4): 645-655.
- [46] RUANO F, TINAUT A, SOLER J J. High surface temperatures select for individual foraging in ants[J]. *Behavioral Ecology*, 2000, 11(4): 396-404.
- [47] HELMS K R, VINSON S B. Surface activity of native ants co-occurring with the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae)[J]. *Southwestern Entomologist*, 2005, 30(4): 223-237.
- [48] IPSEY R M, GARDNER W A. Abundance, activity, diversity, and species interactions of ground-dwelling ants (Hymenoptera: Formicidae) in open versus canopied habitats in central Georgia (USA)[J]. *Journal of Entomological Science*, 2020, 55(4): 469-486.
- [49] PENNISI E. When fire ants move in, others leave[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 231-231.

Influence of *Solenopsis invicta* on Local Ant Communities in Sub-suitable Areas——An Example in Kunming

GAO Shu-tong^{1,2,3}, WANG Si-ming⁴, ZHANG Xiang^{1,2}, SHEN Dan⁵, LU Zhi-xing^{1,2}, CHEN You-qing^{1,2}

(1. Institute of Highland Forest Science, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Breeding and Utilization of Resource Insects of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 4. Yunnan Forestry Technological College, Kunming 650051, Yunnan, China; 5. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] The invasion of *Solenopsis invicta* has caused serious ecological problems, and temperature is the key factor limiting the invasion and development of *S. invicta*. This study investigated the ant communities in different habitats in Kunming, Yunnan Province, to reveal the influence of *S. invicta* on local ant communities in sub-suitable areas. [Methods] In June and August 2021, based on five habitats in Hongqiao Road and Shalang, Kunming City, Yunnan Province, the ant communities in the different habitats were surveyed by pitfall traps, and the relationship between the local ant communities and the occurrence of *S. invicta* was analyzed. [Results] The thinning and prediction curves based on the ant individuals in five habitats were smooth and the sampling was sufficient; A total of 2 748 ants were collected from 5 habitats, belonging to 4 subfamilies, 19 genera and 34 species, of which 1 920 were *S. invicta*; the individual number of *S. invicta* collected from eucalyptus forest was the highest (99.2%), followed by wasteland (HW 94.2%, LW 90.7%), and the ecotone between *Pinus yunnanensis* secondary forest and wasteland had the lowest number of *S. invicta* collected (44.7%); *S. invicta* was not collected in *P. yunnanensis* secondary forest. Only 1 species of native ants was collected in the eucalypt forest, 3 species and 7 species were collected in the wasteland, and 15 species were collected in the ecotone. The species richness and Chao-1 estimate of ants in *P. yunnanensis* secondary forest and ecotone were significantly higher than those in eucalyptus forest, while the dominance index was significantly lower than that in eucalyptus forest. The similarity of ant community structure in five habitats was significantly different, and the ant community structure in habitats where *S. invicta* occurred was not similar with that in *P. yunnanensis* secondary forest; There was no significant correlation between nest density and abundance, local ant abundance and species richness of *S. invicta*. As the abundance of *S. invicta* increased, the species richness and abundance of local ants decreased linearly. [Conclusion] In the sub-suitable area of *S. invicta* in Kunming, *S. invicta* mostly occurs in disturbed open habitats, especially in eucalypt forests, but rarely invades habitats with high canopy density; After the invasion of *S. invicta*, the diversity level of the local ant community decreases significantly and the ant community structure changes; After the invasion of *S. invicta*, it is necessary for the population to develop to a large scale to show the population quantity advantage, and a small number of local ants can coexist with it during the population development; Reducing the suitable habitats of *S. invicta*, strengthening the inspection of suitable habitats, and carrying out chemical treatment on medium and large ant nests in time will help reduce the occurrence and development of *S. invicta*.

Keywords: *Solenopsis invicta*; sub-suitable region; local ant communities; adaptation strategy