

DOI: 10.20103/j.stxb.202406051307

倪美虹, 蒋明星. 红火蚁迁巢的时间动态及与生境类型和蚁群社会型的关系分析. 生态学报, 2025, 45(9): - .

Ni M H, Jiang M X. Temporal dynamics of colony relocation in the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, and its associations with habitat type and social form. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): - .

红火蚁迁巢的时间动态及与生境类型和蚁群社会型的关系分析

倪美虹, 蒋明星*

浙江大学昆虫科学研究所/农业农村部农业昆虫学重点实验室/浙江省作物病虫害生物学重点实验室, 杭州 310058

摘要: 红火蚁 *Solenopsis invicta* 是我国具有重大生态和经济影响的入侵物种, 明确其蚁群迁移(迁巢)发生情况对理解其生态适应性及科学制定防控策略具有重要意义, 迄今虽已有这方面的一些报道, 但有关其迁巢发生程度、季节特点及不同生境中是否存在差异等缺乏认识。本研究对浙江中部一草地中两种社会型红火蚁迁巢情况进行了观察, 同时在浙江、江西、广东调查了 31 个红火蚁发生区块中(以绿化带和荒草地为主)的空巢比例。结果显示, 在单蚁后型红火蚁活动季节, 几乎各个时期均有蚁巢被废弃, 以 2—7 月废弃比例较高(最高接近 12%), 8 月下旬后则明显较低; 废弃巢穴和新巢形成之间无明显数量关系。废弃蚁巢被重新利用的现象也在各月均有发生, 且与废弃巢穴总数存在显著正相关。多蚁后型弃巢比例总体要低于单蚁后型。在所调查的各地 31 个区块中, 有 27 个(87.1%)见到空巢; 空巢比例在不同社会型、生境和区块间存在一定差异。其中绿化带中 80% 所查区块的空巢比例为 10%—35%, 在荒草地中则接近 70% 的区块空巢比例不到 10%, 但这两类生境中均有个别区块空巢比例高于 35%。表明红火蚁迁巢是一种普遍现象并存在明显的季节特征, 迁巢后所形成的空巢比例因地而异, 且与生境类型、蚁群社会型等存在一定关系。

关键词: 红火蚁; 迁巢; 生境; 生态适应性; 生物入侵

Temporal dynamics of colony relocation in the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, and its associations with habitat type and social form

NI Meihong, JIANG Mingxing*

Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Entomology/Key Laboratory of Biology of Crop Pathogens and Insects of Zhejiang Province/Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: The red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, a serious invasive species, has caused striking ecological and economic impacts in China. Clarifying the occurrence of nest relocation in this pest is significant for understanding its ecological adaptability and formulating rational management strategies. However, despite a few reports on its nest relocation, little is known about the degree of nest relocation, seasonal features, and the possible differences among different habitats. In this study, we observed the nest-relocation dynamics of two social types (monogyne and polygyne) of *S. invicta* in a grassland in central Zhejiang Province, and we also investigated proportions of abandoned nests in 31 randomly sampled plots (mostly grasslands and green belts) in Zhejiang, Jiangxi and Guangdong provinces. Our results show that during the active seasons of monogynous *S. invicta*, their nests were abandoned in almost every period, with the proportion of such nests was evidently higher during February to July than following seasons. However, no significant quantitative relationship was found between abandoned nests and newly formed nests. A part of abandoned nests were reused every month, and the

基金项目: 浙江省 2023 年度“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C02025)

收稿日期: 2024-06-05; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mxjiang@zju.edu.cn

number of reused nests correlated positively with the total number of abandoned nests. The overall proportion of nests abandoned by polygynous ants was lower than that of by monogynous ants. Of the 31 plots investigated, 27 have a certain proportion of abandoned nests, with the proportions varying with habitats and locations. In the investigated green belts, most (80%) had an abandoned-nest proportion ranging from 10% to 35%, while nearly 70% of the grasslands had proportions of only less than 10%. For both green belts and grasslands, the abandoned nests reached more than 35% in some plots. This indicates that nest relocation, as a phenomenon frequently taking place in *S. invicta* life, varies substantially with seasons and may also be closely related with habitats and somehow social forms of this ant.

Key Words: *Solenopsis invicta*; nest relocation; habitats; ecological adaptation; biological invasion

许多蚂蚁在一处繁衍和生活一段时间之后便迁走,选择他处重新建巢,即具有迁巢行为(Relocation behavior)^[1]。许多生物或非生物环境因子可诱发蚂蚁迁巢,包括小气候波动^[2-3]、物理扰动^[4-5]、种内或种间竞争^[1, 6]、可利用资源恶化^[7-8]、捕食或寄生者压力^[9-11],通过迁巢,蚂蚁可从空间上避开这些不利因素的影响,并转而获得合适的小气候条件^[12]、食物资源^[13]等供其繁衍。除了此空间上的直接作用,迁巢还有利于降低个体间聚集程度而间接对蚁群起保护作用。例如,在一种盘腹蚁 *Aphaenogaster araneoides* 中,迁巢有利于减少蚁群自身气味(Colony odor)的积累,由此保证工蚁在蚁群遭遇天敌突袭时能准确识别天敌的气味,而不会受到蚁群自身气味的干扰^[14]。显然,迁巢已成为许多蚂蚁生活史过程的重要组成部分,为一种适应性表现,对蚂蚁种群生存和繁衍具有重要生态学 and 进化意义^[1, 15]。

蚂蚁迁巢现象在不同地理区域均可发生,已见于蚁群大小不同、生活史各异的多种蚂蚁中^[16],迁巢的发生程度、发生时间因蚂蚁种类而异。有的蚂蚁迁巢或分巢(Budding)行为具明显的季节性^[17],如阿根廷蚁 *Linepithema humile*^[2]、矮酸臭蚁 *Tapinoma sessile*^[18]等,其迁巢或分巢主要发生在夏季,由此形成一些暂时性的、较为分散的巢穴,而至冬季这些巢穴又会合成一些大巢;而有的蚂蚁迁巢或分巢则无季节性,在任何一个活动季节均可发生^[19]。有的种类甚至能频繁迁巢,如盘腹蚁 *A. araneoides*^[10]。迁巢或分巢能否成功,一定程度上取决于所参与蚁群的大小、其中蚁后的数量等^[20-21]。在入侵性蚂蚁中,有关迁巢的研究在阿根廷蚁中开展相对较多,但也主要集中在诱因方面。据报道,当生境小气候条件发生变化而出现可利用的资源(如食物)时,阿根廷蚁便会发生迁巢,在其中一些合适地点建立临时性巢穴^[2, 22-24]。在其他入侵性蚂蚁中迁巢现象也已有所报道,如黄褐尼氏蚁 *Nylanderia fulva*^[17]、法老蚁 *Monomorium pharaonis*^[5]、中华短猛蚁 *Brachyponera chinensis*^[25]等。综上所述,迁巢作为蚂蚁的一种重要适应性现象,其外在诱因、发生过程、生态学作用等已得到较多关注,但是,有关迁巢的发生程度、季节动态以及迁巢之后空巢的出现情况等对蚁巢数量动态监测具重要指导价值的一些方面,总体研究较少。

红火蚁是全球最具威胁的入侵性蚂蚁之一,已扩张至全球多个国家和地区,在部分入侵地已对农林生产和生态系统功能造成巨大损失,且对民众正常生活造成严重影响。红火蚁可在多种生境中发生,包括农田、绿化带(区)、荒草地、苗木基地、居民区等。它具有蚁群迁移现象,甚至还可频繁迁巢^[26],所迁距离 1—30 m 不等^[27];在新巢中生活一段时间之后,还可回到(即重新利用)原来的巢穴^[28-29]。在外迁过程中,蚁后的移动受工蚁控制,包括外迁目的地,由工蚁负责护送至新建巢点,期间所参与的蚁后与工蚁彼此受对方选择,以此提高迁巢成功率^[30]。已知许多因子可诱发红火蚁迁巢,包括蚁丘受到破坏^[31]、病原菌感染所导致的蚁丘土壤化学特性变化^[29]、防治过程如使用触杀性颗粒剂^[32]、粉剂^[33]、药液灌巢^[34-35]等。土壤细菌因可吸引或驱避红火蚁,对其迁巢也可能起到一定调控作用^[36]。对红火蚁迁巢的发生程度、发生时间等具体特点也有所报道。据王磊等^[37]在广州研究,当地草坪上 4 月份红火蚁蚁巢迁移率可达 20.7%,迁移活跃程度高于其他月份,平均迁移距离为 5.5 m 左右;但是新出现的蚁巢一周内有接近 1/3 会被遗弃,且一些巢在被遗弃之后一周内又被重新利用。

探明红火蚁迁巢发生情况,对揭示红火蚁生态适应途径、定殖和扩张机制具有重要意义。迄今为止,虽对

其迁巢行为、迁巢距离、迁巢诱因等已有所报道,但有关其迁巢的发生程度、季节特点等重要方面仍了解甚少(仅有王磊等^[37]极少数报道),尤其对不同生境中的迁巢情况差异缺乏认识。显然,不同生境中红火蚁迁巢的潜在诱因不尽相同,迁巢具体发生特点、蚁群迁走后被遗弃的巢(下简称空巢)数量与比例可能会有所不同;同样,红火蚁的两种不同社会型(单蚁后和多蚁后)在蚁巢数量扩充方式、蚁巢密度和空间格局等方面本身就存在明显差异,预示着两者迁巢特点有所不同,这些均值得探讨。本研究中,作者观察了浙中一草地中红火蚁两种社会型蚁群的迁巢季节特征,并在多地观察了绿化带、荒草地等生境中其空巢出现比例,分析了迁巢与生境类型和社会型的关系,以期为进一步研究该蚂蚁的迁巢规律、生态学意义等积累基础信息,同时为红火蚁巢发生动态精准监测提供依据。

1 材料与方法

1.1 红火蚁迁巢季节动态

观察地点位于浙江金华市新能源汽车小镇附近。选择2块荒草地用于观察。其中一块草地狭长,南北走向,长宽分别约460 m和10 m(面积0.46 hm²);草地内植物种类繁多,但以禾本科和菊科为主,密度中等;草地西侧紧邻一条宽约2 m的沟渠,东侧紧邻数量和大小不等的鱼塘、旱作农田和撂荒地;所发生的红火蚁为单蚁后型,密度0.87个/10² m²。另一块草地位于上述草地东侧一鱼塘边,长宽分别约200 m和15 m(面积0.30 hm²),植被条件与上述草地类似,红火蚁为多蚁后型,密度0.60个/10² m²。

对上述第一块荒草地,自2022年12月至2024年3月调查;第二块荒草地,调查也于2022年12月开始,但因红火蚁对附近居民造成影响较大而于2023年7月1日中止。每7—10天调查一次新出现蚁丘的数量、新废弃巢穴的数量、废弃巢穴中重新被红火蚁利用的数量;这些数量是指与上次调查相比当次新查到的数量,而非累计值。观察到的新蚁丘直径(最宽处)至少达到10 cm,轻拍蚁丘表面后60 s内至少出现3头红火蚁工蚁方视为新增蚁巢的蚁丘;新废弃或被重新利用的巢穴也采用轻拍蚁丘的方法判断。统计各次调查时发现的废弃蚁巢比例,废弃比例=X/N,式中X和N分别为当次调查所发现的红火蚁空巢总数和红火蚁蚁丘总数。

1.2 不同生境中红火蚁的空巢发生情况

考虑到红火蚁迁巢动态、空巢出现比例等可能受到社会型、生境特征等多种因素影响,而且还可能存在地区间差异,因此,赴国内不同地区针对该问题进行了调查。方法是,在浙江金华、江西上饶和赣州、广东广州和韶关共五地共随机选取31个红火蚁发生区块用于调查空巢发生情况。各地调查区块数3—11个不等,具体数量因红火蚁发生程度、可取样到的蚁巢数量等因素而异。不同区块之间至少间隔100 m。本研究选择荒草地和绿化带(区)作为调查的主要生境类型,理由是两者为红火蚁主要发生场所,受到的人为干扰相对较少,故所得结果(空巢比例)能更好反映实际情况,同时也方便地区之间(或区块之间)的比较分析。此外,本研究还调查了2块农田和1个苗木园。

在各区块内,随机取样一定数量的蚁巢,判断和记录其中活蚁巢和空蚁巢的数量。判断方法同1.1。记录各区块的植被情况,包括覆盖度、主要植物种类、植株高度等。每个区块随机取3个以上蚁巢的红火蚁工蚁,带回实验室鉴定其社会型。

1.3 社会型鉴定

采用多重PCR(Multiplex Polymerase Chain Reaction)及*Gp-9^b*等位基因单独扩增的方法。引物参照Valles and Porter^[38]和王晨轩^[39],其中多重PCR的引物为:26BS(5'-CTCGCCGATTCTAACGAAGGA-3')、16BAS(5'-ATGTATACTTTAAAGCATTTCCTAATATTTTGTG-3')、24bS(5'-TGGAGCTGATTATGATGAAGAGAAAATA-3')、25bAS(5'-GCTGTTTTTAATTGCATTTCTTATGCAG-3');*Gp-9^b*等位基因扩增的引物为:Insert59-b-F(5'-CCAAGGAAAGACGTGATGGT-3')、Insert59-b-R(5'-GAAAAGGTGCGGTTATGAA-3'),PCR反应程序为:95℃预变性5 min,35个循环[95℃变性40 s,55℃退火40 s,72℃延伸1 min],72℃延伸7 min。用2%琼脂糖凝胶电泳检测PCR产物。

1.4 数据分析

采用 Pearson 相关系数分别分析废弃蚁巢的数量与新形成蚁巢、被重新利用的蚁巢数量之间的相关性。由于存在数据 0, 不符合正态分析, 分析之前所有数据先进行 $(n+1)$ 平方根转换。对于所调查的 31 个不同区块, 进一步采用广义线性模型 (Generalized linear model, GLM) 分析空巢比例与蚁群社会型、生境类型和所在地区的关系, 其中社会型和生境作为固定因子, 地区作为协变量纳入模型。其中供分析的生境分为荒草地和绿化带 (区) 两类; 农田和苗木园因样本少 (仅 3 个, 表 1), 不纳入分析。取显著性水平 $P=0.05$ 。分析软件为 SPSS 25.0。

2 结果

2.1 红火蚁迁巢季节动态

(1) 单蚁后型

结果表明, 红火蚁新增蚁巢的数量具明显的季节性变化特征。其中单蚁后型在 2 月下旬春季温度开始回升后即有少量新巢出现; 进入 3 月份后新巢开始明显增多, 此后至 11 月上旬, 各月份均有一定数量新巢形成; 但自 11 月近月底至 2 月中旬, 因处于冬季和初春而温度较低, 未见新巢形成 (图 1)。纵观全年变化动态, 新巢增加幅度起伏较大, 以 3—4 月增加较为明显, 5—6 月次之, 7—8 月因处于夏季和初秋高温季节, 很少有蚁巢增加, 自 9 月下旬开始至 11 月上旬因环境温度较适宜, 新巢再次明显增多, 即春季和秋季是新增蚁巢的高峰期。本调查中, 以 4 月各旬、9 月下旬、10 月中旬等几个时期观察到的新巢数量最多 (图 1)。

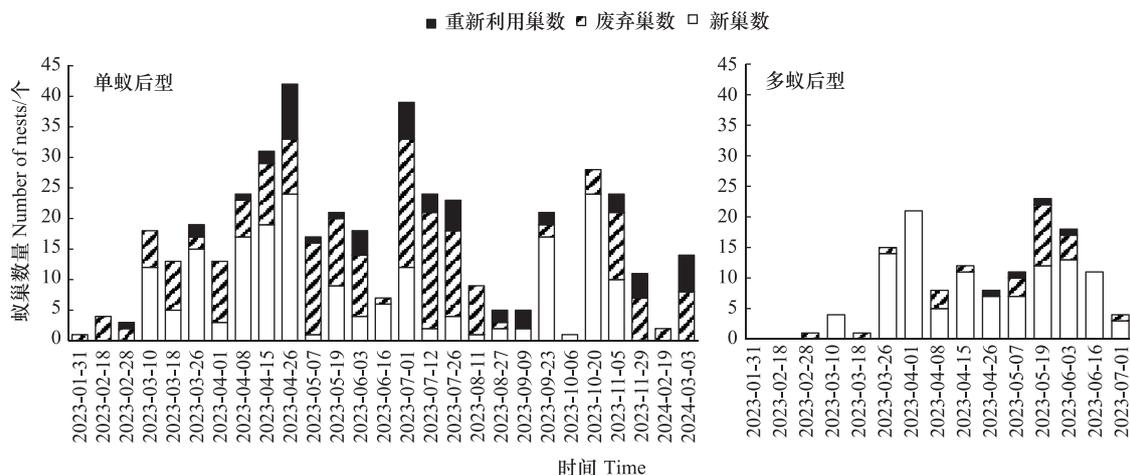


图 1 不同季节红火蚁各社会型蚁群的蚁巢新增、废弃和重新利用情况

Fig.1 Seasonal formation, abandonment, and reuse of *Solenopsis invicta* nests in different social forms

除了 9 月上旬、10 月上旬等个别时间, 其他调查日 (红火蚁活动多数季节) 均可见到新废弃的蚁巢, 其数量 1—21 个不等 (图 1)。其中以 7 月的废弃巢数最多, 月初、中旬和下旬分别有 21、19 和 14 个 (图 1), 分别占蚁丘总数的 11.7%、10.4% 和 7.5% (图 2); 除了 7 月份, 也有一些其他时期空巢比例达到或接近 10%, 包括 3 月上中旬、4 月上旬、5 月上旬等。相比之下, 8 月下旬开始直至 10 月中旬废弃的蚁巢明显较少 (图 1), 期间 5 次调查中各次均仅有 0—4 个, 最高占所观察到的蚁丘总数量 1.7%。废弃比例具一定的季节变化特点, 总体趋势是 2—7 月较高 (最高接近 12%), 而 8 月下旬后至冬季明显较低 (图 2)。结合新巢数据分析, 发现巢穴废弃与新巢形成两者无明显数量关系 (Pearson 相关系数 = 0.074, $P=0.714$), 存在新巢多同时废弃也多 (4 月)、新巢少却废弃多 (7 月)、新巢多且废弃少 (9 月下旬和 10 月中旬) 等几个季节。

先前被弃蚁巢后来被重新利用的现象各月均有发生, 其中以 4 月下旬、7 月、11 月下旬等较为明显 (图 1)。废弃巢被重新利用的数量与废弃巢总数量之间存在显著正相关性 (Pearson 相关系数 = 0.445, $P=0.020$)。

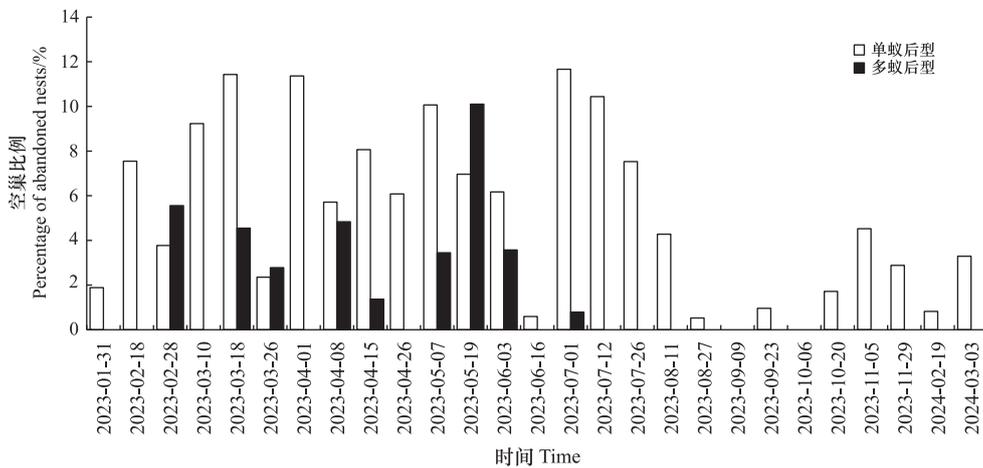


图 2 不同季节红火蚁两种社会型蚁群的蚁巢废弃比例

Fig.2 Proportions of abandoned nests in the two social forms of *Solenopsis invicta* in different seasons

(2)多蚁后型

多蚁后新增蚁巢的季节动态大体与上述单蚁后相似,即前期先振荡上升,达到观察期内新增峰值,然后新增趋缓。在3月有一明显蚁巢新增过程。该社会型弃巢的数量明显较少,在上半年,仅在5月中旬观察到相对较多的弃巢数量,占所观察蚁丘数量的10.1%(图1)。

2.2 不同生境中红火蚁的空巢发生情况

在江西、浙江和广东5个地区共31个区块调查中,有27个(87.1%)发现一定比例的空巢(表1)。区块之间空巢比例差别较大,有的不到5%,有的则高达30%—40%,个别区块甚至存在大部分为空巢(比例86.7%)的情况。GLM分析表明,空巢比例与蚁群社会型的关系接近显著($F=3.40, P=0.07$),以单蚁后型空巢比例相对较大(图3)。空巢比例与生境类型无显著关系($F=0.17, P=0.68$;图3)。

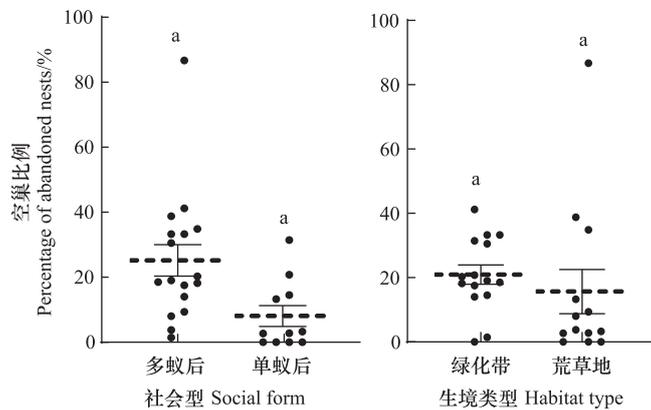


图 3 红火蚁空巢比例与蚁群社会型、生境类型的关系

Fig.3 Relationship of *Solenopsis invicta* abandoned-nest proportions with social form and habitat type

图中数据为平均数±标准误;具相同字母者表示差异不显著($P>0.05$)

在15个绿化带(区)区块中,80%区块空巢比例处于10%—35%,另有一区块高达41.2%(7/17),位于江西上饶稼轩大道一侧以草皮为主的绿化带(简称上饶稼轩大道绿化带)中;有一区块空巢比例仅1.5%(1/67),另一区块则未发现空巢(0/180),两者分别位于上饶稼轩大道绿化带和金东区赤松镇北二环路附近。另外,在上饶稼轩大道绿化带中,发现有2个区块空巢比例差异很大,分别为30.6%(11/36)和1.5%(1/67)。在空巢比例较高(>20%)的绿化带区块中,2种社会型皆有,在空巢比例较低(<5%)的绿化带区块中也是如此。

表 1 我国部分地区红火蚁空巢发生情况

Table 1 Information of abandoned *Solenopsis invicta* nests investigated in some regions of China

编号 No.	省份和地区 Provinces and districts	地点 Locations	纬度和经度 Latitude and longitude	调查日期 Investigation dates	生境类型 Habitat types	社会型 Social forms	观察总巢数 Total no. of nests observed	空巢比例 Percentage of abandoned nests
1	江西上饶	天佑文化公园	28.487°N, 118.007°E	2023-10-13	绿化区(草皮为主)	单蚁后	99	33.3
2		稼秆大道	28.499°N, 117.994°E	2024-03-23	荒地(植被稀疏)	单蚁后	43	34.9
3				2024-03-23	绿化带 a(草皮为主)	单蚁后	17	41.2
4				2024-03-23	绿化带 b(草皮为主)	单蚁后	21	19.1
5				2024-03-23	绿化带 c(草皮为主)	单蚁后	27	18.5
6				2024-03-23	绿化带 d(草皮为主)	单蚁后	67	1.5
7				2024-03-23	绿化带 e(草皮为主)	单蚁后	36	30.6
8		东瓦窑村	28.459°N, 118.003°E	2024-03-23	荒草地和田埂(植被覆盖中等)	单蚁后	133	3.8
9		灵山大道	28.495°N, 117.912°E	2024-05-19	绿化带 a(草皮为主)	单蚁后	48	33.3
10				2024-05-19	绿化带 b(草皮为主)	单蚁后	64	20.3
11				2024-05-19	绿化带 c(草皮为主)	单蚁后	57	17.5
12	江西赣州	润城河路	25.769°N, 114.882°E	2024-03-28	绿化带(小灌木和乔木)	单蚁后	22	18.2
13		新世纪大道	25.808°N, 114.896°E	2024-03-28	绿化带(草皮为主)	单蚁后	50	14.0
14		章江国家湿地公园	25.829°N, 114.895°E	2024-03-28	荒草地(植被茂密)	多蚁后	50	0.0
15		迎宾高架路	25.842°N, 114.836°E	2024-03-28	荒草地(植被茂密)	单蚁后	32	9.4
16		滨江大道	25.809°N, 114.825°E	2024-03-28	荒草地(植被茂密)	多蚁后	15	0.0
17				2024-03-28	农田(旱作)	多蚁后	28	14.3
18	浙江金华	新源路	29.030°N, 119.594°E	2023-03-04	荒草地(植被稀疏,工程堆土)	单蚁后	15	86.7
19		东盛村	29.098°N, 119.724°E	2023-07-26	苗木园(植被稀疏)	多蚁后	99	1.0
20				2023-07-26	荒草地(植被茂密)	多蚁后	73	2.7
21		罗店镇大仙路	29.146°N, 119.642°E	2024-04-10	荒草地(植被茂密)、农田边	多蚁后	106	2.8
22		新能源汽车小镇	29.024°N, 119.622°E	2024-01-27	荒草地(植被稀疏)	单蚁后	67	38.8
23		赤松镇北二环路	29.151°N, 119.714°E	2024-05-09	绿化带(草皮为主)	多蚁后	180	0.0
24		苏孟乡仙华南街	29.019°N, 119.622°E	2022-11-26	荒草地(植被稀疏)	单蚁后	50	8.0
25	广东广州	花都大道	23.436°N, 113.318°E	2024-03-29	绿化带(植被稀疏)	多蚁后	35	31.4
26				2024-03-29	荒草地 a(植被茂密)	多蚁后	56	0.0
27				2024-03-29	荒草地 b(植被稀疏,工程堆土)	多蚁后	75	13.3
28		花东镇渔村	23.409°N, 113.358°E	2024-03-29	绿化带(草皮为主)	多蚁后	103	14.6
29	广东韶关	东河街道鑫汇路	24.825°N, 113.629°E	2024-03-30	绿化带(草皮为主)	多蚁后	53	20.8
30		三江三鸟批发市场附近	24.774°N, 113.601°E	2024-03-30	荒草地(植被稀疏)	多蚁后	30	3.3
31		惠民二棉小区	24.818°N, 113.576°E	2024-03-31	农田(旱作)	多蚁后	22	4.5

草皮为主的绿化带中主要草皮种类为狗牙根 *Cynodon dactylon* 和马尼拉草 *Zoysia matrella*, 有小灌木和乔木的绿化带中的主要灌木种类为红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum* 和红叶石楠 *Photinia × fraseri*

在 13 个荒草地区块中,有 9 个(69.2%)空巢比例低于 10%,而另有 3 个区块则高于 30%,其中 2 个(分别 38.8%和 86.7%)位于金华新能源汽车小镇附近的荒草地中,1 个(34.9%)位于上饶稼轩大道一侧的荒草地中。在多蚁后的 7 个荒草地区块中,6 个空巢比例不到 5%;只有 1 个区块达到 13.3%(区块位于路边,工程土堆积,地面虽有荒草,但大多裸露);在单蚁后的 6 个荒草地区块中,则空巢比例明显有高有低,其中 1 个区块不到 5%,2 个为 8%—10%,3 个高于 35%,其中 1 个高达 86.7%。

3 讨论

本研究中,作者开展了一年的迁巢情况野外观察,并在国内多个地方对空巢发生比例进行了调查。发现两种社会型的红火蚂蚁群均会季节性地遗弃部分巢穴,并可对其中部分空巢加以重新利用,这些现象在部分季节较为明显,且不同社会型、不同生境中的蚁群在迁巢频率、空巢发生程度等方面存在差异。这些结果可丰富对红火蚁迁巢规律的认识。

巢穴被废弃的数量与比例变化动态、与新巢形成的关系是本研究考察的一个重点。其中重要发现之一是,在所选观察地,红火蚁(单蚁后型)巢穴废弃比例明显呈现 2—7 月较高而其后较低的特点(图 2)。这种情况在其他入侵地或非荒地生境中是否如此,年度间有何变化,还有待进一步观察、比较和验证;但是,鉴于本研究较为密集的观察次数,以及数据本身呈现的规律性(图 2),结合王磊等^[37]、Briano 等^[40]报道的火蚂蚁巢迁移存在季节差异等结果,本研究认为这种巢穴废弃比例“前高后低”的现象并非偶然,值得关注。在与新巢形成的关系上,虽然巢穴废弃与形成均为蚁群水平的行为,各自有季节变化特征(图 1),但两者并无明显数量关系,表明不论在春季的蚁群活动活跃期(如 3—4 月,图 1),还是在非活跃期(如 7 月中旬至 8 月上旬的盛夏时期),均有可能出现蚁群迁移而空巢的现象。另外本研究发现,重新利用的巢数与废巢总数量之间存在显著正相关性,这说明在蚁巢被弃较多的季节,它们当中被重新利用的数量也相对较多;这种现象在盘腹蚁 *A. araneoides* 中也曾发现^[10]。综上所述,可认为迁巢是红火蚁季节性出现的一种重要生态适应性。

本研究发现,在所处生境类型相同的情况下,红火蚁的空巢比例可能因具体地理位置不同而存在较大差异。一个典型的例子是:如结果中所述,同样处于江西上饶稼轩大道绿化带的 2 个区块,一个空巢比例高达 30.6%,而另一个则几乎未见空巢。对两者差异如此之大的原因,本地蚁竞争、光照、食料不可能成为主要因素。理由是,据调查,这 2 个区块中存在的本地蚁主要为中华小家蚁 *Monomorium chinense*,该蚂蚁虽已报道于多地^[41—44],被视为红火蚁的主要竞争者,且还有可能通过分泌毒液杀死红火蚁^[42],但在两者共同存在的区域内,鉴于红火蚁具有极强的竞争力、攻击性、庞大的种群数量以及极快的招募速度,中华小家蚁往往被挤压至生境边缘^[45],因此中华小家蚁促进红火蚁迁巢的可能性很小。这 2 个区块均为开放系统,生境条件高度一致,光照充足,植被条件良好,除了狗牙根,还有草本、灌木等植物,看不出食料匮乏而促进红火蚁迁巢的迹象。另外,曾推测割草等人为干扰程度不同是上述 2 个区块空巢比例差异大的主要原因,但据现场考察,看不出园艺工人会对这 2 个区块采取明显不同的管理措施,同时在另外 2 个定期割草的区块中未观察到空巢或仅有极少的空巢(比例 0.0%—2.0%),表明割草这一重要管理措施不会引起红火蚁迁巢。排除这些因素,作者认为地表湿度差异大可能是影响迁巢比例高低的重要因素:在上述 2 个绿化区块中,其中几乎未见空巢的区块两侧排水顺畅,积水可能性小,调查日测得土壤湿度为 55%—65%,而空巢比例达 30.6%的区块其一侧毗邻小坡地,部分区域土壤十分潮湿,土壤湿度达 99%,甚至有些区段有少量积水,显然,这种地表(近地表土壤)的高湿环境一定程度上会对红火蚁的生活、觅食等造成一定影响^[40],甚至会引起迁巢。需注意的是,地面积水对红火蚁的影响程度可能与积水时间长短有关,短期积水可能不会对其巢穴、觅食通道网络、领地等造成影响,故红火蚁在这样的条件下依然能通过一些通道正常觅食^[29]。

同样,在荒草地这一类型生境中,不同区块之间的红火蚁空巢比例也可能存在较大差异。本研究中,有超过一半的荒草地区块空巢比例不到 5%,这些区块的共同特点是受到的人为干扰程度小,植株生长茂盛但生境不郁闭,适于红火蚁生存和繁衍;相比之下,空巢比例较高(>30%)的几个荒草地区块中,有的地面由工程

土堆积而成,砾石多、持水能力差而易干旱,有的则植被稀少、毗邻池塘或水渠,食物资源有限且觅食范围也受到限制,故它们明显存在小气候、可利用资源等方面的胁迫,不利于红火蚁生存。其中又以干旱的影响为甚,据研究,红火蚁对土壤干旱的耐性较弱,当土壤含水量低于 50% 时,若不迁走,即有可能遭受较高死亡率^[46]。干旱引起迁巢这一现象在其他蚂蚁中也有报道,如紫彩虹臭蚁 *Iridomyrmex purpureus*^[12]。可见干旱对迁巢的诱发作用在蚂蚁中不是个例。究其机制,这可能与蚂蚁对于干旱胁迫较为敏感有关,其丰富度和种类结构易受干旱影响^[47]。因此,本研究认为,当红火蚁所处生境小气候条件发生较大变化时,它就有可能发生迁巢,对此在调查红火蚁蚁巢的数量动态和空间分布时需加以考虑。无独有偶,在阿根廷蚁中发现,小气候变化是促进其迁巢的重要因素^[2]。这进一步支持了上述小气候条件恶化可引起红火蚁迁巢这一推测。

红火蚁迁巢比例的高低与社会型存在一定关系。本研究确实在荒草地中观察到单蚁后型空巢比例变化较大(从不到 5% 到超过 80% 皆有)、多蚁后型则似乎空巢比例总体偏低的趋势(大部分区块 < 5%)。荒草地中多蚁后型少见空巢,这可能与这一社会型的蚁群多为多巢型有关,而不同巢的个体相互之间攻击性弱、可在不同巢穴之间频繁迁移^[48-50]。在我国,虽未见有关红火蚁巢穴类型(是多巢型还是单巢型)的报道,但在本研究所观察的一些有多蚁后型红火蚁的区块中,数个蚁巢相互间距不到 1 m 甚至相连的情况不在少数,因此推测它们为多巢型,极有可能在不同巢穴之间频繁迁移,由此观察到的空巢比例很小。据报道,许多蚂蚁优势种经常以多巢的形式出现,对此类蚂蚁而言,不论是发生迁巢还是分巢,均有助于提高其竞争能力、觅食效率和利用多种不同环境的能力^[13,48]。尤其是入侵性很强的蚂蚁种类,其中多数具有多巢型特征,如阿根廷蚁^[13]、红火蚁、法老蚁 *M. pharaonis*^[51]。因此本研究认为,迁巢发生程度、空巢形成比例之所以存在社会型间差异,一定程度上是因为其蚁群的巢穴类型不同所致。对诸如红火蚁等具多巢型的入侵性蚂蚁,从社会型角度研究迁巢和空巢情况差异,可能是揭示其生态适应性、研判蚁巢数量发展趋势的一个重要着眼点。

另外,本研究发现,除了小蚁巢,一些大巢也可被废弃,这一定程度上说明了巢中蚁群过大是其选择迁出、寻找新地方建巢的重要内在诱因。在盘腹蚁 *A. araneoides* 中也发现,该蚁可频繁迁巢,其中大蚁群的迁巢频繁程度要高于小蚁群^[10]。这也一定程度上说明了红火蚁迁巢是蚁群内在因素和环境因素共同作用的结果。

红火蚁上述迁巢行为和形成空巢的现象,需在开展红火蚁发生动态监测、蚁巢密度调查时加以关注。本研究表明,有些生境中各季节总有一定比例的空巢存在,对此在监测调查红火蚁时需加以甄别,否则得到的监测数据(如蚁巢密度)会偏高。尤其像公园、绿化带(区)等地面主体植被低矮、地势平坦、蚁丘易识别而被认为适于采用无人机监测的区域,其实可能存在不低的空巢比例(表 1),这些空巢有可能无法被无人机准确识别而被误判为活巢,导致监测结果出现偏差。对此,本研究所呈现的空巢数量与比例变化动态、不同生境中的空巢比例等信息可供红火蚁监测时参考。从研究红火蚁入侵和扩张机制的角度,因其迁巢具一定的季节性,不同生境内的迁巢和空巢出现情况存在差异,且不论大巢或小巢均可发生,还跟社会型存在一定关系,故迁巢是研究红火蚁生态适应性、成功入侵机制的重要着眼点,值得继续关注。今后,有待通过系统的实地观测和实验模拟,探讨红火蚁在不同生境条件下的迁巢诱因、迁巢社会行为学策略、迁巢同种群扩张、适合度提升之间的关系等。这些研究将有助于更全面地理解红火蚁的生物学特性和入侵机制,为制订科学、有效的红火蚁防控策略提供依据。

参考文献(References):

- [1] McGlynn T P. The ecology of nest movement in social insects. *Annual Review of Entomology*, 2012, 57: 291-308.
- [2] Heller N E, Gordon D M. Seasonal spatial dynamics and causes of nest movement in colonies of the invasive Argentine ant (*Linepithema humile*). *Ecological Entomology*, 2006, 31(5): 499-510.
- [3] McGlynn T P, Dunn T, Wayman E, Romero A. A thermophile in the shade: light-directed nest relocation in the Costa Rican ant *Ectatomma ruidum*. *Journal of Tropical Ecology*, 2010, 26(5): 559-562.
- [4] Möglich M. Social organization of nest emigration in *Leptothorax* (Hym., Form.). *Insectes Sociaux*, 1978, 25(3): 205-225.
- [5] Tay J W, Lee C Y. Induced disturbances cause *Monomorium pharaonis* (Hymenoptera: Formicidae) nest relocation. *Journal of Economic*

- Entomology, 2015, 108(3): 1237-1242.
- [6] Dahbi A, Retana J, Lenoir A, Cerdú X. Nest-moving by the polydomous ant *Cataglyphis iberica*. Journal of Ethology, 2008, 26(1): 119-126.
- [7] Freitas A V L. Nest relocation and prey specialization in the ant *Leptogenys propefalcigera* Roger (Formicidae; Ponerinae) in an urban area in southeastern Brazil. Insectes Sociaux, 1995, 42(4): 453-456.
- [8] McGlynn T P. Ants on the move: Resource limitation of a litter-nesting ant community in Costa Rica. Biotropica, 2006, 38(3): 419-427.
- [9] Droual R. Anti-predator behaviour in the ant *Pheidole desertorum*: The importance of multiple nests. Animal Behaviour, 1984, 32(4): 1054-1058.
- [10] McGlynn T P, Carr R A, Carson J H, Buma J. Frequent nest relocation in the ant *Aphaenogaster araneoides*: resources, competition, and natural enemies. Oikos, 2004, 106(3): 611-621.
- [11] Koenig P A, Moreau C S. *Temnothorax longispinosus* acorn ant colonies respond to parasitic raids by emigrating. Insectes Sociaux, 2024, 71(2): 149-155.
- [12] Ord T. Drought-induced relocation of ant colonies and its consequences for the long-term spatial ecology of a population under stress. Functional Ecology, 2023, 37(8): 2231-2245.
- [13] Holway D A, Case T J. Mechanisms of dispersed central-place foraging in polydomous colonies of the Argentine ant. Animal Behaviour, 2000, 59(2): 433-441.
- [14] McGlynn T P. Serial monodomy in ants: an antipredator strategy? Ecological Entomology, 2007, 32(6): 621-626.
- [15] Franks N R, Fletcher C R. Spatial patterns in army ant foraging and migration: *Eciton burchelli* on Barro Colorado Island, Panama. Behavioral Ecology and Sociobiology, 1983, 12(4): 261-270.
- [16] Moyano M, Feener D H. Nest relocation in the ant *Pheidole dentata*. Insectes Sociaux, 2014, 61(1): 71-81.
- [17] Oi D. Seasonal prevalence of queens and males in colonies of tawny crazy ants (Hymenoptera: Formicidae) in Florida. Florida Entomologist, 2020, 103(3): 415-417.
- [18] Buczkowski G, Bennett G. Seasonal polydomy in a polygynous supercolony of the odorous house ant, *Tapinoma sessile*. Ecological Entomology, 2008, 33(6): 780.
- [19] Herbers J M. Seasonal structuring of a north temperature ant community. Insectes Sociaux, 1985, 32(3): 224-240.
- [20] Hee J J, Holway D A, Suarez A V, Case T J. Role of propagule size in the success of incipient colonies of the invasive Argentine ant. Conservation Biology, 2000, 14(2): 559-563.
- [21] Sagata K, Lester P J. Behavioural plasticity associated with propagule size, resources, and the invasion success of the Argentine ant *Linepithema humile*. Journal of Applied Ecology, 2009, 46(1): 19-27.
- [22] Enríquez M L, Abril S, Díaz M, Gómez C. Nest site selection by the Argentine ant and suitability of artificial nests as a control tool. Insectes Sociaux, 2013, 60(4): 507-516.
- [23] Buitrago M, Abril S, Lenis M, López C. Where to move when it gets cold: winter nesting sites attractive to the Argentine ant (Hymenoptera: Formicidae). Myrmecological News, 2013, 18(18): 51-58.
- [24] Holway D A, Lach L, Suarez A V, Tsutsui N D, Case T J. The causes and consequences of ant invasions. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 181-233.
- [25] Allen H R, Zungoli P A, Benson E P, Gerard P. Nest emigration behavior of the Asian needle ant, *Brachyponera chinensis* Emery (Hymenoptera: Formicidae). Sociobiology, 2017, 64(4): 430.
- [26] Hays S B, Horton P M, Bass J A, Stanley D. Colony movement of imported fire ants. Journal of the Georgia Entomological Society, 1982, 17(2): 266-274.
- [27] Green H B. On the biology of the imported fire Ant. Journal of Economic Entomology, 1962, 55(6): 1003-1004.
- [28] Byron D W, Hays S B. Occurrence and significance of multiple mound utilization by colonies of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). Journal of Economic Entomology, 1986, 79(3): 637-640.
- [29] Showler A T, Knaus R M, Reagan T E. Studies of the territorial dynamics of the red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren, Hymenoptera: Formicidae). Agriculture, Ecosystems & Environment, 1990, 30(1-2): 97-105.
- [30] Kuriachan I, Vinson S B. A queen's worker attractiveness influences her movement in polygynous colonies of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) in response to adverse temperatures. Environmental Entomology, 2000, 29(5): 943-949.
- [31] 王磊, 曾玲, 陆永跃, 许益鏊. 蚁丘被破坏程度对红火蚁蚁群迁移的影响. 昆虫知识, 2010, 47(5): 941-944.
- [32] 洪璟昕, 梁钰铃, 隆琨, 梁铭荣, 刘晓鹏, 陆永跃. 多种方式撒施噻虫嗪·联苯菊酯颗粒剂对红火蚁的灭除效果. 植物检疫, 2023, 37(6): 41-44.
- [33] 齐国君, 王刚, 石庆型, 陆嘉进, 关子盈, 陈婷, 陈洁, Muhammad Irfan Waris, 吕利华. 0.2% 高效氯氟菊酯粉剂对田间红火蚁种群数量及蚁巢迁移的影响. 植物保护学报, 2023, 50(5): 1184-1192.

- [34] 莫让瑜, 黄求应, 雷朝亮. 挖巢、水灌巢和杀虫剂灌巢对红火蚁迁巢的影响. 华中农业大学学报, 2009, 28(1): 20-22.
- [35] 齐国君, 刘杰, 陈婷, 吕利华, 何余容. 药剂灌巢剂量对红火蚁巢巢迁移的影响. 环境昆虫学报, 2017, 39(4): 848-853.
- [36] Travanty N V, Vargo E L, Schal C, Apperson C S, Ponnusamy L. Bacterial isolates derived from nest soil affect the attraction and digging behavior of workers of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren. *Insects*, 2022, 13(5): 444.
- [37] 王磊, 陆永跃, 曾玲, 何晓芳. 草坪生境中红火蚁巢巢空间关系和蚁群迁移动态规律研究, 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 149-153.
- [38] Valles S M, Porter S D. Identification of polygyne and monogyne fire ant colonies (*Solenopsis invicta*) by multiplex PCR of *Gp-9* alleles. *Insectes Sociaux*, 2003, 50(2): 199-200.
- [39] 王晨轩, 贾玲艺, 李天楚, 陈立, 黄大卫. 不同方法对红火蚁社会型鉴定效果的比较. 环境昆虫学报, 2020, 42(2): 450-458.
- [40] Briano J A, Patterson R S, Cordo H A. Colony movement of the black imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) in Argentina. *Environmental Entomology*, 1995, 24(5): 1131-1134.
- [41] Zheng J H, Mao R Q, Zhang R J. Comparisons of foraging activities and competitive interactions between the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) and two native ants under high soil-surface temperatures. *Sociobiology*, 2007, 50: 1165-1175.
- [42] Chen Y C, Kaffle L, Shih C J. Interspecific competition between *Solenopsis invicta* and two native ant species, *Pheidole fervens* and *Monomorium chinense*. *Journal of Economic Entomology*, 2011, 104(2): 614-621.
- [43] 齐国君, 黄永峰, 岑伊静, 吕利华. 红火蚁入侵对人为干扰区蚂蚁群落结构及多样性的影响. 应用昆虫学报, 2015, 52(6): 1368-1375.
- [44] 燕迪, 卢志兴, 王庆, 于潇雨, 张念念, 李巧, 陈又清. 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. 昆虫学报, 2020, 63(3): 334-342.
- [45] Ni M H, Yang X Y, Zheng Y R, Wang Y, Jiang M X. Discovering native ant species with the potential to suppress red imported fire ants. *Insects*, 2024, 15(8): 582.
- [46] Xu Y J, Zeng L, Lu Y Y, Liang G W. Effect of soil humidity on the survival of *Solenopsis invicta* Buren workers. *Insectes Sociaux*, 2009, 56(4): 367-373.
- [47] Parr C L, Bishop T R. The response of ants to climate change. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3188-3205.
- [48] Debout G, Schatz B, Elias M, McKey D. Polydomy in ants: what we know, what we think we know, and what remains to be done. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2007, 90(2): 319-348.
- [49] Vander Meer R K, Porter S D. Fate of newly mated queens introduced into monogyne and polygyne *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) colonies. *Annals of the Entomological Society of America*, 2001, 94(2): 289-297.
- [50] Helanterä H. Supercolonies of ants (Hymenoptera: Formicidae): ecological patterns, behavioural processes and their implications for social evolution. *Myrmecological News*, 2022, 32: 1-22.
- [51] Oi D H, Vail K M, Williams D F. Bait distribution among multiple colonies of Pharaoh ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 2000, 93(4): 1247-1255.