



林草湿地与城市绿地红火蚁发生特点 与监测防控研究进展

杜澄举¹, 王 磊², 陆永跃², 贾彩娟³, 林绪平⁴,
许少嫦⁴, 温秀军¹, 王 侃^{1,*}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学植物保护学院, 广州 510642;
3. 深圳市梧桐山风景区管理处, 深圳 518004; 4. 广东省林业局, 广州 510130)

摘要: 红火蚁 *Solenopsis invicta* 是我国重大有害入侵生物, 目前我国对于红火蚁的科学研究、防治策略、政策法规多集中于农业领域。虽然红火蚁在林草湿地与城市绿地中也有着广泛分布与巨大危害, 但在这些领域的发生特点和防控策略被大大忽视。在林业中, 红火蚁的发生与砍伐、火烧和翻土等人为扰动, 以及生物多样性、林分郁闭度和土壤裸露程度等自然因素高度相关。人工林中的生物多样性与林分郁闭度较低, 人为扰动多, 因此人工林内部与周边地区均有较高的红火蚁入侵风险; 而在天然林中, 红火蚁的巢穴多分布于林缘、林窗及火烧迹地等阳光可以直接照射的区域。此外, 苗圃和城市绿地有大量的裸露土壤和人类活动, 红火蚁发生风险较高。在人类活动较多的人工林、苗圃和城市绿地, 红火蚁主要危害人体健康和基础设施, 并直接或间接危害林木。此外, 红火蚁的入侵降低了生境中节肢动物的丰度和多样性, 并威胁自然保护区和湿地中的野生动物。尽管有研究表明, 在某些条件下红火蚁有利于促进种子传播和土壤营养物质循环, 但其危害性远远大于可能带来的益处。在林业上, 预防红火蚁入侵主要有检疫、监测和防治 3 个环节。在检疫方面, 木材、带土苗木和草皮是可能携带红火蚁需要重点检疫的对象, 熏蒸可有效杀灭红火蚁。在监测方面, 诱饵法和陷阱法是主要的监测手段, 近年来快速发展的遥感和雷达技术也有望在天然草地和城市绿地的红火蚁监测中发挥作用。尽管化学防治是目前最主要的红火蚁防治手段, 使用高毒、广谱、难降解的杀虫剂可能危害自然保护区与湿地等生境中的生物多样性, 因此有必要研发更加绿色环保的红火蚁防治药剂和方法。

关键词: 红火蚁; 林业; 发生特点; 危害; 综合防治

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2023)08-1128-11

Research advances in occurrence characteristics and monitoring and control strategies of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in forests, grasslands, wetlands and urban green spaces

DU Cheng-Ju¹, WANG Lei², LU Yong-Yue², JIA Cai-Juan³, LIN Xu-Ping⁴, XU Shao-Chang⁴, WEN Xiu-Jun¹, WANG Cai^{1,*} (1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Management Office of Wutong Mountain National Park, Shenzhen 518004, China; 4. Guangdong Forestry Bureau, Guangzhou 510130, China)

Abstract: The red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, is a primary invasive pest in China. Currently,

scientific researches, control strategies and policy regulations regarding *S. invicta* mainly focus on the field of agriculture in China. Although *S. invicta* is also widely distributed in forests, grasslands, wetlands and urban green spaces and has caused huge damage, the occurrence characteristics and control strategies of *S. invicta* in these areas are largely overlooked. The occurrence of *S. invicta* is closely associated with human disturbances such as felling, burning and soil turning, and natural factors such as biodiversity, forest canopy density and soil bareness. Due to the low levels of biological diversity and forest canopy density and high levels of human disturbances, there is a high risk of *S. invicta* invasion in plantation forests and adjacent areas. In natural forests, *S. invicta* is usually distributed in forest edges and windows, as well as burned areas where the sunlight can directly irradiate. Moreover, nurseries and urban green spaces have a high risk of *S. invicta* invasion because of large areas of bare soil and high levels of human activities. In areas with high levels of human activities, including plantation forests, nurseries and urban green spaces, *S. invicta* mainly threatens human health and infrastructure, and directly or indirectly damages trees. In addition, the invasion of *S. invicta* significantly decreases the abundance and diversity of arthropods in habitats and poses significant threats to wildlife in natural reserves and wetlands. Although it has been reported that *S. invicta* contributes to promoting seed migration and enhancing soil nutrient circulation under certain conditions, its harmful impacts far exceed its potential beneficial effects. Quarantine, monitoring and control are three important aspects to prevent *S. invicta* invasion in forestry. Wood, seedlings with soil, and turf are the main objects that may carry *S. invicta* and need to be quarantined, and fumigation can effectively eliminate *S. invicta*. Baiting and trapping are the main methods to monitor *S. invicta*. Recently, some new technologies, including remote sensing and radar technology, also have been developed to monitor *S. invicta* in grasslands and urban green spaces. Although chemical control is the most predominant control strategy for *S. invicta*, the use of highly toxic, broad spectrum and hardly degradable insecticides may negatively affect non-target organisms in natural reserves and wetlands. Therefore, it is essential to develop environmentally friendly agents and methods to control *S. invicta*.

Key words: *Solenopsis invicta*; forest; occurrence characteristics; harm; integrated control

红火蚁 *Solenopsis invicta* 是膜翅目 (Hymenoptera) 蚁科 (Formicidae) 切叶蚁亚科 (Myrmicinae) 火蚁属 *Solenopsis* 昆虫, 原生于南美洲巴拉那河流域, 在原生地外是危害极大的入侵物种 (Morrison *et al.*, 2004; Zhang and Hou, 2014)。20 世纪 30 年代, 红火蚁伴随着贸易货物首次传入美国, 之后随着飞速发展的全球贸易迅速传播至环太平洋各国与地区 (Ascunce *et al.*, 2011)。我国最早于 2003 年在台湾省桃园市和嘉义市发现红火蚁 (Liu *et al.*, 2021), 并于 2004 年首次在大陆地区 (广东省湛江市吴川县) 发现红火蚁 (Wang *et al.*, 2020)。据我国农业农村部统计, 截至 2021 年底, 红火蚁已入侵我国 12 省 534 个县 (市、区), 发生面积达 42.14 万 hm^2 , 同比上年增加 4.27 万 hm^2 (增加 10.13%), 新增疫情发生县级行政区 128 个, 红火蚁疫情在我国的扩散蔓延及发生形势仍非常严峻。

红火蚁是喜温、喜湿、杂食性的社会性昆虫, 具

有极强的适应性, 对入侵地区的农业生产有着巨大影响 (Tschinkel and Wilson, 2014)。在农田中, 红火蚁会破坏作物根系和种子, 直接降低作物产量 (Morrison *et al.*, 1999; Knutson and Campos, 2008)。黄俊等 (2010) 发现红火蚁对芝麻 *Sesamum indicum*、藿香蓟 *Ageratum houstonianum*、象草 *Pennisetum purpureum* 及芥蓝 *Brassica alboglabra* 的种子有较高的搬运率和丢弃率, 其中芝麻、藿香蓟和象草种子被红火蚁破坏后发芽率大幅下降。红火蚁还可捕食大量有益昆虫和土壤生物, 从而对作物造成间接危害 (Eubanks *et al.*, 2002; Reeves and Reynolds, 2004)。如 Eubanks 等 (2002) 报道红火蚁使温室中的七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 和普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 的存活率分别下降 50% 和 38%。此外, 红火蚁与分泌蜜露的棉蚜 *Aphis gossypii*、扶桑棉粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* 等半翅目害虫存在互利共生关系, 这些害虫分泌蜜露为红火蚁提供食物, 后者则

保护前者免受天敌捕食 (Kaplan and Eubanks, 2002; Zhou *et al.*, 2013)。据估算,红火蚁的入侵对澳大利亚农产品产业造成的经济损失超过 3.3 亿澳元/年 (Wylie and Janssen-May, 2017)。

长期以来,我国高度重视红火蚁疫情防控工作。在农业领域,政府部门有针对性地出台了一系列政策法规,不断加强和推进红火蚁综合防控工作,相关研究人员也为防治红火蚁开展了大量科学研究并取得系列进展 (陆永跃等, 2019)。近年来,人们逐渐认识到在一般林地(人工林和天然林)、草地、苗圃、城市绿地、自然保护区和湿地等林业用地区域中,红火蚁也有着广泛的分布,并可造成巨大的危害。相对于传统农业区域,一些林业用地区域的红火蚁防控工作存在特殊的条件限制。例如,在自然保护区、湿地等野生动物较多或包含水源保护地的林业用地区域中,使用传统化学杀虫剂可能威胁非目标生物并污染水源 (Rust and Su, 2012)。在城市绿地和苗圃等人流量大、作业频繁的区域,使用化学杀虫剂有潜在的误触、误食风险。因此,针对不同林业用地区域的红火蚁防控工作需要使用不同的防治手段,以避免或降低对人类和其他非目标生物造成的危害 (Chen and Oi, 2020)。本文对林业用地区域红火蚁的发生特点、危害和防控手段进行综述,并对潜在的防治方法进行讨论与展望,以期林业及相关领域的红火蚁防控工作者和研究者提供参考。总体而言,林业红火蚁的相关研究主要是由国外学者完成的,而红火蚁在我国林草湿地与城市绿地的发生范围和特点及对本土物种的危害尚不清楚,未来应予以充分重视。

1 林业用地区域红火蚁发生特点

1.1 一般林地

Stile 和 Jones (1998) 对美国南卡罗来纳州面积为 800 km² 的森林内部的红火蚁分布特点进行了研究,发现森林中郁闭度低、干扰频率高的区域内红火蚁巢穴数量最多。Zettler 等 (2004) 调查了砍伐措施对林地蚂蚁多样性的影响,发现未砍伐的林地内红火蚁数量极少 (仅占采集蚂蚁数量的 0.25%); 而当植被被砍伐后,红火蚁数量在短时间内大幅增加 (可达采集蚂蚁数量的 84.4%)。在人工林 (尤其是幼龄林) 中,生物多样性较低,林分郁闭度不高,且抚育、采伐等人工扰动较大,因此林地内部与周边地区均是发生红火蚁入侵风险较高的区域;在天然林

中,生物多样性高、外部干扰少、郁闭度高,红火蚁的巢穴多分布于林缘、林窗等阳光可以直接照射的区域,以及森林内部的永久性道路、电缆隔断区域和早期自然演替的栖息地 (Stiles, 1998; Stiles and Jones, 1998)。此外,火烧迹地也是发生红火蚁入侵风险较高的区域。Atchison 等 (2018) 发现火灾高发的长叶松 *Pinus palustris* 林地 (每 1~3 年发生 1 次火灾) 常见红火蚁入侵,而在 75 年未发生火灾的林地中,未发现红火蚁。

1.2 苗圃

苗圃是红火蚁发生的高风险区域。此类生境中充足的阳光,大量的裸露土壤为红火蚁提供了适宜的筑巢环境。频繁的外部干扰如踩踏、松土、灌溉等,也可促进红火蚁的扩散。许益鏊等 (2007) 调查了华南地区多种典型生境中红火蚁的觅食行为特征,发现苗圃中常有大量红火蚁巢穴。此外,红火蚁也常在各类苗木的种植容器和基质中筑巢 (Costa *et al.*, 2005)。黄俊等 (2007) 调查了不同种植方式对红火蚁发生的影响,发现露天栽培植物上的红火蚁发生率显著高于大棚栽培植物上的,同时,盆、钵、袋栽苗木上的红火蚁发生率高于直接栽培于地面的苗木上的。

1.3 天然草地和草场

天然草地和草场有充足的光照,适宜红火蚁的发生和扩散。同时,由于生态系统相对简单,草地中蚂蚁的种类和丰度都相对较少 (Vasconcelos and Vilhena, 2006),使得红火蚁与其他蚂蚁的种间竞争较小,更易占据生态位。在红火蚁原产地,Calcaterra 等 (2008) 发现阿根廷北部廊道林窗中有 28 种蚂蚁可与红火蚁共存与竞争,而旱生草地中仅有 10 种蚂蚁与红火蚁竞争。Calcaterra 等 (2010) 调查了南美洲伊比利亚草地中蚂蚁的多样性,在收集的 50 种蚂蚁中,红火蚁的数量占比为 61.4%。Kelly 和 Sellers (2014) 调查了美国东南部稀树草原中红火蚁的种群数量和分布,虽然草原中红火蚁巢穴的密度低于道路边、牧场等干扰较强的生境中的,但红火蚁的巢穴仍遍布整个草原,并成为该生境中生物量最高的蚂蚁物种。Steele 等 (2020) 调查了经营草场和天然草场中的红火蚁巢穴密度,前者为 5.84 个/样地,而后者仅为 3.65 个/样地,表明犁地、翻土、割草等人为干扰措施可显著增加红火蚁巢穴数量。

1.4 城市绿地

我国的城市绿地通常指城市行政区域内以自然植被和人工植被为主要存在形态的用地,包括城市

建设用地范围内用于绿化的土地,如草坪、绿化带、屋顶绿化,以及城市建设用地之外对城市生态、景观和居民休闲生活具有积极作用、绿化环境较好的区域,如自然公园、生态公园等(《城市绿地分类标准》CJJ/T 85-2017)。相比于林地,城市绿地受到的踩踏、碾压、浇水、除草等日常管理措施(人为干扰活动)频率更高,适合红火蚁的入侵及定殖。近年来,伴随着我国城市绿化及美丽乡村工程需求的增加,大量跨区域运输草皮和带土苗木极大地增加了红火蚁入侵及发生的机率(Wang *et al.*, 2020)。同时,城市绿地区域内的基础设施和行道树也有引起红火蚁筑巢的风险。Liu 等(2021)调查了台湾省内红火蚁的入侵情况,发现红火蚁偏好在草坪中、电缆箱内、排水渠和下水道旁筑巢。Qin 等(2017, 2019)发现大量红火蚁栖息在城市绿化树木和行道树的根部土壤并筑巢,同时在树冠层觅食并将食物运输回巢内,表明红火蚁高度适应树栖生活。

1.5 自然保护区内的林地

相比一般林地,在自然保护区内的林地生物多样性与郁闭度更高,外部干扰更少,并有更封闭的管理与保护措施,因此该生态系统抵御红火蚁入侵的能力更强。然而,红火蚁入侵自然保护区仍时有报道。王佐霖等(2015)调查了广东省深圳市大鹏半岛自然保护区和田头山自然保护区中病虫害发生情况,结果表明红火蚁是保护区内阔叶纯林的常见有害生物之一。此外,海南省黎母山自然保护区、云南省高黎贡山自然保护区也报告了红火蚁疫情。

1.6 湿地

红火蚁有着极强的环境适应能力,可在盐碱度和积水程度高的区域生活。调查发现在美国南德克萨斯海岸、佛罗里达群岛的盐碱地和路易斯安那州的沼泽湿地中有大量红火蚁(Forys *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2016; Showler *et al.*, 2019)。Forys 等(2002)调查了湿地内部红火蚁的扩散途径,认为红火蚁随着货物、建筑材料运输等人类活动被携带至湿地附近地区,随后通过婚飞进入湿地内部并定殖。此外,巢穴被水淹没后,大量红火蚁会将身体连接成团,形成“蚁筏”,这使得蚁群可在水面上漂浮数日直至重新接触湿地边缘或内部的裸露土地(Mlot *et al.*, 2011)。我国对湿地生态系统中红火蚁的发生情况和入侵机制研究较少,仅有海南省报道红火蚁入侵红树林(肖霄等, 2019)。建议各级管理部门高度重视各种湿地生境中红火蚁的入侵风险,尽快对红火蚁的发生情况开展全面摸查。

2 红火蚁对林业生产及生态系统的影响

2.1 红火蚁对林业生产及生态系统的危害

2.1.1 对人类与基础设施的危害:红火蚁对人体健康和公共设施安全有巨大危害(Vinson, 2013)。人类被红火蚁叮咬后会出现持续的疼痛并伴随水泡、脓包、过敏、休克等不同程度的症状(Haddad Junior *et al.*, 2015; Bernaba *et al.*, 2019)。在人工林地、苗圃、城市绿地等区域,人类活动频繁,因此叮咬、伤人事件较多。此外,红火蚁常破坏各种用电设施和电线电缆,林业用地内的此类设施有较高的被损坏风险。Gutrich 等(2007)报道美国夏威夷的电力与通讯公司每年需要支出超过 1 000 万美元的设备更换或维护费用以应对红火蚁造成的破坏。

2.1.2 降低节肢动物多样性:红火蚁的入侵会导致自然和人工林地、城市绿地等生境中节肢动物多样性降低(Wang *et al.*, 2019)。Porter 和 Savignano (1990)报道红火蚁的入侵导致美国布拉肯里奇野外试验站林地和草地混合生境中的蚂蚁总数量下降 90%, 35 种本土蚂蚁种类中的 23 种变得更加稀少甚至难觅踪迹;Morrison (2002)报道在红火蚁入侵初期,本地蚂蚁和其他节肢动物的丰度和物种丰富度即急剧下降,12 年后再次调查,红火蚁仍是入侵地区丰度最高的物种;覃立微(2021)调查了广西省柳州市城市绿地昆虫生物多样性,在入侵区昆虫种类和数量均显著地低于非入侵区;齐国君等(2015)也报道红火蚁在广州市花都区保良村安置区的草坪与荒地中占据优势地位,并显著降低了其他蚂蚁物种的多样性、均匀度和丰富度。

2.1.3 对脊椎动物的危害:红火蚁的入侵能够直接或间接导致生境中脊椎动物的数量减少,严重危害生态系统生物多样性。红火蚁可直接捕食脊椎动物的卵和幼仔。Diffie 等(2010)报道红火蚁可穿透钻纹龟 *Malaclemys terrapin*、黄腹滑龟 *Trachemys scripta*、锦龟 *Chrysemys picta*、黄鼠蛇 *Elaphe obsoleta quadrivittata* 和缅甸蟒 *Python molurus bivittatus* 的卵壳。Ragheb 等(2019)记录了草地上的 149 个黄胸草鹀 *Ammodramus savannarum* 巢穴里的幼鸟被捕食的事件,其中 86% 事件有红火蚁参与。虽然成年脊椎动物个体对红火蚁的攻击有着较强的抵抗能力(Diffie *et al.*, 2010),但红火蚁的攻击可对成年个体的觅食、筑巢和繁殖行为造成严重干扰(Preisser *et al.*, 2005)。如红火蚁可迅速挖掘地下通道进入南

美宽吻鳄 *Caiman latirostris* 的产卵穴,干扰雌鳄的护卵行为,从而间接降低卵的孵化成功率 (Marcó *et al.*, 2015)。Venable 等 (2019) 发现在红火蚁入侵地,东方强棱蜥 *Sceloporus undulatus* 在避免捕食红火蚁的同时,也减少了对其他蚂蚁的捕食。

2.1.4 对植物的危害:红火蚁会取食植物种子,降低种子的发芽率。如 Seaman 和 Marino (2003) 研究表明,红火蚁能够捕食反枝苋 *Amaranthus retroflexus*、早熟禾 *Poa annua*、藜草 *Chenopodium album* 和北美一枝黄花 *Solidago altissima* 的种子,其中,红火蚁对藜草种子的捕食率高达 100%。同时,红火蚁与多种半翅目的林木害虫(如白蜡蚧 *Ericerus pela*、竹巢粉蚧 *Nesticoccus sinensis*、樟个木虱 *Trioza camphorae* 和夹竹桃蚜 *Aphis nerii* 等)存在互利共生关系 (Kaplan and Eubanks, 2002; Zhou *et al.*, 2013; 钱正伟和蒋巧根, 2016)。

2.2 红火蚁对林业生态系统的有益影响

2.2.1 促进种子传播:Stuble 等 (2010) 研究了长叶松生态系统中红火蚁和本地蚂蚁对植物种子传播的影响,发现共有包括红火蚁在内的 14 种蚂蚁参与了种子的传播,其中红火蚁传播了一半以上的种子,且生境中红火蚁的密度越高,传播的种子越多。Cumberland 和 Kirkman (2013) 利用染色标记追踪了种子的去向,发现 30% ~ 40% 种子被红火蚁搬运到了巢穴附近的土壤表面和地面垃圾堆中,且这些种子回收后,发芽率与对照种子相比无显著差异。这些研究表明,红火蚁可能促进了长叶松生态系统中植物种子的传播。

2.2.2 促进土壤营养物质循环与释放:红火蚁挖掘地下土壤筑巢(蚁丘),将深层土搬运至地表,对土壤中的营养物质循环与释放有一定促进作用。Lafleur 等 (2005) 收集并测定了长叶松天然林和人工林中红火蚁巢穴土壤与周围土壤的理化性质。结果显示,红火蚁巢穴土壤中的钙、镁、钾、钠、氨等无机离子含量显著高于周围土壤中的。进一步采集红火蚁巢穴土壤与周围土壤,并用于栽培栀子 *Gardenia japonicus*,使用巢穴土壤栽培栀子的生长速度是用周围土壤栽培的 2 ~ 3 倍。DeFauw 等 (2008) 调查了草坪上有蚁丘区域土壤(巢土)和无蚁丘区域土壤(对照)的理化性质,发现巢土的总碳含量、碳氮比、有机质含量、锌离子浓度和 pH 值均显著地高于对照土壤的。此外,红火蚁的筑巢行为还可增加土壤的通透性,降低土壤容重,起到类似蚯蚓的疏松作用 (Green *et al.*, 1998; Lafleur *et al.*, 2005)。

3 红火蚁检疫、监测与防治

3.1 带土苗木与草皮中的红火蚁检疫处理

3.1.1 红火蚁长距离传播途径:红火蚁的跨区域的长距离传播通常是伴随国家或地区间的货物运输发生的。在国际贸易中,易携带红火蚁的商品主要为木材产品及纸质和塑料废品。洗晓青等 (2019) 统计了 2005 - 2017 年间我国进境口岸截获红火蚁的数据,在所有截获货物中,未加工木材和已加工木材及其产品占比为 57.3%,纸质和塑料废品占比为 23.1%。在我国境内,红火蚁主要伴随带土花木、草皮、废旧塑料以及建筑废料的跨区域运输进行传播。应俊杰等 (2021) 对浙江省 20 县(市、区)发生的红火蚁进行了传播途径溯源,其中 19 起为随苗木调运传入,仅有 1 起为随废旧塑料传入。陆永跃和曾玲 (2015) 对我国 54 个红火蚁发生地区的红火蚁传入方式进行调查,发现 46 个 (85.2%) 地区可能是随草皮、苗木运输传入,5 个地区可能是随废旧塑料运输传入,其他 3 个地区则可能是分别随建筑废料、奶牛饲料、运土机械等的运输而传入。张翔等 (2015) 报道,红火蚁主要随草皮苗木和废旧资源传入福建省,其中随草皮苗木传入的红火蚁扩散速率快,发生面积大;而随废旧资源传入的红火蚁扩散速率较慢,发生面积也较小。因此,原产地及目的地需要加强检疫工作,并将木材产品、带土花木和草皮等设置为重点检疫对象,以遏制红火蚁疫情跨区域的长距离传播扩散。

3.1.2 红火蚁的检疫及处理:目前,目测法和取样法是跨境、跨区域运输货物的主要检疫方法(《农业植物调运检疫规程》(GB15569-2009)、《林业植物产地检疫技术规程》(LY/T 1829-2020))。然而,红火蚁常躲藏在木材与苗木土壤基质中,难以有效检测。使用专业嗅探犬并结合特异性气味吸附试纸可能是有效的红火蚁检测手段。如 Lin 等 (2011) 研究表明经过训练的嗅探犬对装有 10 头及以上红火蚁容器的识别率达 98%; Chi 等 (2021) 研究表明 ADVANTEC 试纸 (No. 2, 90 mm) (Toyo 公司,日本) 能够有效吸附红火蚁分泌的特异性挥发物并且能够被嗅探犬准确识别。当确认货物携带红火蚁后,熏蒸能够迅速、有效地杀灭红火蚁 (Rajendran, 2004)。如 Lee 等 (2019) 报道在 13 和 23 °C 条件下,使用浓度为 36.1 和 37.7 g/hm³ 甲酸乙酯 (ethyl formate) 进行熏蒸处理可杀死 99.9% 的工蚁和繁殖蚁;

Hashimoto 等(2020)发现使用异硫氰酸烯丙酯(allyl isothiocyanate, AITC)进行熏蒸处理可在 24 h 内完全杀死容器内的红火蚁工蚁。此外,使用微胶囊包裹异硫氰酸烯丙酯可有效减少刺激性气味,并能在少 13 d 内保持熏蒸剂的有效浓度(Hashimoto *et al.*, 2020)。

3.2 林草地与城市绿地红火蚁监测

3.2.1 基于诱饵法与陷阱法的红火蚁监测技术:开展监测工作有助于确认发生区内红火蚁的分布与数量,从而制定合理的防治方案,有效减少损失(Simberloff, 2003; Lodge *et al.*, 2006)。目前,诱饵法和陷阱法是主要的红火蚁监测方法(Bao *et al.*, 2011; 陆永跃等, 2015)。诱饵法指使用火腿肠等食物吸引红火蚁取食,而陷阱法指将装有酒精的离心管埋入地下并使管口与地面齐平,在一定时间后取回离心管并鉴定其中是否存在红火蚁。这两种方法还可通过统计红火蚁的数量来研究红火蚁的活动规律,并评估红火蚁发生的严重程度。Lei 等(2021)发现秋季广州的红火蚁觅食活动在日出后增加,并在 14:00 达到高峰,且在土壤温度为 26.7 ~ 29.2 ℃ 时觅食最为活跃。Ujiyama 和 Tsuji (2018)报道在红火蚁发生的早期阶段,诱饵管放置的间距为 30 m 时监测效率最高。陆永跃等(2015)发现 4-6 月是诱饵法的最佳使用时期,而 7-8 月是陷阱法的最佳使用时期。然而在实际应用中,陷阱法受到一些环境因素的限制,如地表植被茂盛或有水泥地面覆盖时,不易设置陷阱。以上研究主要针对农村与城市环境中的红火蚁,对于面积更广、地形与环境更加复杂的林草地,诱饵和陷阱的设置与回收的难度较大。同时,使用诱饵法和陷阱法监测红火蚁需要对采集的标本进行形态鉴定,而林草地与城市绿地中蚂蚁的种类往往更加丰富,种类鉴定难度增加,可结合红火蚁检测试剂盒(InvictDetect, Agdia 公司, 美国)等技术实现对红火蚁快速鉴定(Valles *et al.*, 2020)。此外,Wen 等(2021)报道了红火蚁独特的搬运颗粒覆盖黏胶表面的行为,期望利用这种行为开发鉴定难度较低的监测方法。

3.2.2 基于遥感和雷达的红火蚁监测技术:近年来,遥感和雷达技术被应用于红火蚁监测中。在草地、牧场等遮蔽物较少的区域,利用遥感技术可以在较大的地理尺度上对红火蚁巢穴进行监测。如 Vogt (2004)通过目测卫星图像调查了美国密西西比州东北部牧场不同区块中红火蚁蚁丘的数量,结果表明牧场中 46.9% ± 1.2% 的蚁丘被成功检出;

Vogt 和 Wallet (2008)通过机器识别技术,进一步将检测率提高至 79%; Wylie 等(2021)搭乘直升机在空中 700 ft (约 213 m)处采集了不同的传感器图像,发现使用长波红外图像监测红火蚁巢穴的性能显著高于紫外、近红外、短波红外和中波红外图像; Song 等(2020)使用 3 种搭载多光谱传感器的无人机(multiSPEC 4C, MicaSense RedEdge 3 和 DJI Phantom4 Multispectral)采集了红火蚁巢穴土壤和普通土壤的光谱信息,结果表明通过对比长波红外图像可以区分红火蚁巢穴土壤和普通土壤。此外,一些红火蚁巢穴的地上部分可能因外力破坏或雨水冲刷变得十分隐蔽,可使用探地雷达(ground penetrating radar, GPR)对区域地面进行扫描,通过探测地下蜂窝状结构来定位红火蚁巢穴。如 Yang 等(2009)使用探地雷达对美国新奥尔良市伦敦大道运河土堤内的红火蚁和台湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus* 进行了探测,在初步确认的 427 个疑似目标物中,209 个目标物被确认为红火蚁巢穴。然而,对于面积较大、内部环境复杂、遮蔽物较多的林地而言,遥感和雷达技术的应用受到了较大限制。

3.3 林草地与城市绿地的红火蚁化学防治

3.3.1 一般林地和城市绿地的红火蚁防治:化学防治是目前防治红火蚁的最有效的手段。目前,全球已有数十种杀虫剂被应用于红火蚁的防治工作中,常用的药剂包括拟除虫菊酯类农药、茚虫威、吡虫啉、氟虫腈、阿维菌素等(Chen and Oi, 2020)。在我国,“两步法”(即首先使用慢性胃毒杀虫剂制作的杀蚁饵剂进行大面积防治,随后使用触杀性药剂对蚁巢进行处理)作为主要防治策略及方法已在广东、广西等 12 省份取得了良好的防治效果(陆永跃等, 2019)。一些新型技术也不断被用于提高红火蚁药剂的防治效果。如 Tay 等(2017)研发了一种可以作为杀虫剂载体的可自然降解的海藻酸盐水凝胶,可在野外保持 8 周药效。谢锋(2019)使用明胶、玉米粉、虾粉等物质制成胶囊外壳包裹杀虫剂,使毒饵具有较高的防水性与引诱效率,药效持续时间也有显著延长。需要注意的是,在城市绿地等人员流动较大的区域中,使用红火蚁防治药剂应避免行人误触。Qin 等(2017, 2019)设置了一种固定在行道树树干基部的诱饵投放装置,不易被雨水冲刷或被行人发现,且能有效被红火蚁取食搬运。

3.3.2 苗圃的红火蚁防治:一些具有驱避作用的杀虫剂和化合物可抑制红火蚁的筑巢行为,减少带土苗木的红火蚁携带率,从而降低红火蚁长距离传

播的风险(Chen and Oi, 2020)。如 Costa 等(2005)使用氯氰菊酯浸渍的塑料包围苗圃中摆放的苗木,有效地防止了红火蚁进入苗木土壤容器。Chen 等(2019)报道低浓度($<100\text{ }\mu\text{L/L}$)的廉价食品添加剂邻氨基苯甲酸乙酯(ethyl anthranilate)和邻氨基苯甲酸丁酯(butyl anthranilate)可以有效阻止红火蚁进入花盆中的土壤筑巢。He 等(2023)发现低浓度(50 mg/kg)的天然化合物异丁香酚甲醚(methyl isoeugenol)也可以有效阻止红火蚁进入花盆筑巢。

3.3.3 自然保护区与湿地的红火蚁防治:化学杀虫剂通常具有高毒、广谱、难降解的特性(Woodcock *et al.*, 2016; Hladik *et al.*, 2018)。在自然保护区和湿地等生物多样性丰富的区域,杀虫剂会因雨水冲刷进入自然水体和土壤,造成环境污染并威胁非目标生物(Rust and Su, 2012)。近 10 年来,多项研究报道了更加绿色环保、可适用于自然保护区和湿地红火蚁防治的药剂。如 Zhang 等(2017)发现饲喂 0.1 g/mL 赤藓糖醇(erythritol)后,80%的工蚁在 72 h 内死亡,有翅蚁和幼虫在 9 d 后几乎完全死亡;Huang 等(2018)研究了一系列增味剂对红火蚁的毒性,发现饲喂甘氨酸(glycine)和 5'-鸟苷酸二钠(guanosine 5'-monophosphate disodium salt)后,工蚁在 84 h 内完全死亡,其 LC_{50} 值分别为 0.02 和 0.004 g/mL ;Zheng 等(2021)研究了可降解壳聚糖(chitosan)和羧甲基壳聚糖(carboxymethyl chitosan)的有机聚合纳米粒子(nano-particles)对红火蚁的致死效果,饲喂 0.2% 悬浮液 6 d 后,红火蚁死亡率达到 $98.33\% \pm 1.67\%$ 。尽管这些化合物在实验室条件下具有较高的杀灭红火蚁的潜力,且具有对非目标生物安全等特点,但目前尚未开发出成熟的商品化产品。

3.4 我国林业部门红火蚁防治政策与法规

自 2004 年发生红火蚁疫情以来,我国各政府部门制定出台了一系列政策法规与标准,如:《红火蚁疫情防控应急预案》(农农发[2005]1 号),《红火蚁检疫鉴定方法》(GB/T20477-2006)等,并在 2004 年 11 月将红火蚁列为进境检疫性有害生物,在 2005 年 7 月将红火蚁列为农业重大有害生物及重大外来林业有害生物(陆永跃和曾玲, 2015)。然而,在 2021 年以前,农业部门是红火蚁防控的主要实施部门,林业部门的职责多为配合联防,缺乏具体的实施方案和精细的防控目标。2021 年 3 月,国家农业与农村部、国家林业与草地局等九部门联合印发了《关于加强红火蚁阻截防控工作的通知》(农农发[2021]3 号)。与以往不同的是,这项政策在提出各

地需加强防控红火蚁的同时,进一步强调了部门协同分工的重要性,明确划分了不同部门的主要工作,其中林业部门的主要工作为组织开展林草地、苗圃等区域的防控工作,加强发生区带土苗木检疫等。随后,国家林草局防治总站发布《国家林业和草地局林草防治总站关于进一步加强红火蚁防控工作的通知》(林草防总[2021]17 号),提出了林业用地范围内红火蚁防控的总体策略。目前,广东、贵州、江西等省份的林业主管部门均已牵头或参与制定辖区内红火蚁疫情防控方案,明确了林业部门在防控工作中的具体职能,有效地推进了各地红火蚁疫情防控工作[《广东省人民政府办公厅关于印发广东省防控红火蚁若干措施的通知》(粤办函[2021]6 号);《广东省林业局关于做好林地红火蚁防控工作的通知》(粤林函[2021]11 号);《关于切实加强红火蚁阻截防控工作的通知》(黔农发[2021]15 号);《关于切实加强红火蚁疫情防控工作的通知》(赣农字[2021]36 号)]。

4 小结与展望

红火蚁对我国林业发展有重大危害。各类型林业用地区域均有发生红火蚁疫情的风险(Stiles, 1998; Zettler *et al.*, 2004),需要加强防控。红火蚁的入侵严重危害了入侵地的公共安全与生态环境(Vinson, 2013; Wang *et al.*, 2019)。尽管有少量研究报道了红火蚁具有一定的有益影响(Stuble *et al.*, 2010; Cumberland and Kirkman, 2013),但相比于其造成的严重危害,阻截消灭红火蚁仍是当前最重要的任务。目前,我国高度重视各领域红火蚁疫情防控工作,并针对红火蚁推进开展了诸多研究,政府部门也出台了一系列政策法规,支持和指导红火蚁的防控工作。然而,我国林业用地区域的红火蚁研究仍存在较多盲点,尤其是对一般林地、天然草地、湿地、自然保护区中红火蚁的发生特点、危害和监测防控等方面鲜有报道。建议未来在以下几个方面加强科学研究和政策导向:

(1) 针对不同类型的林业用地区域,系统研究红火蚁的发生特点与危害。重点解答以下问题:红火蚁在不同林草生境入侵和定殖的机制是什么,有哪些因素可促进或抑制红火蚁的入侵过程?红火蚁在哪些城市绿地类型发生程度较为严重,有哪些行为和生理机制帮助红火蚁适应城市环境?在我国湿地和自然保护区,红火蚁对本土物种尤其是珍稀保

护动物造成危害的程度如何?

(2) 研发简便高效的红火蚁检疫和监测技术。在林草湿地与城市绿地生境,传统诱饵法和陷阱法常采集到种类丰富的蚂蚁物种,而基层技术人员往往缺乏准确鉴定红火蚁的专业技能,可从以下两方面解决:①研发推广操作简单、成本较低、准确性高的红火蚁鉴定技术,并对各生境中常与红火蚁共存的蚂蚁物种进行调查,制定易于使用的检索表或鉴定手册;②探索遥感与雷达技术在我国林业用地区域红火蚁监测工作中的应用,提高大面积红火蚁监测的效率和准确性。

(3) 对于自然保护区和湿地等特殊环境,有必要研发对非目标生物低毒,易于降解的新型红火蚁防治药剂。对已研发出的一些绿色防控药剂,建议尽快开展野外实验,并对合适的药剂进行应用推广。同时,我国各级林业管理部门应更加重视红火蚁入侵的风险和危害,结合最新的科学研究成果,对政策和法规进行补充和更新,充分发挥政策导向作用。

参考文献 (References)

Ascunce MS, Yang CC, Oakey J, Calcaterra L, Wu WJ, Shih CJ, Goudet J, Ross KG, Shoemaker D, 2011. Global invasion history of the fire ant *Solenopsis invicta*. *Science*, 331(6020): 1066 – 1068.

Atchison RA, Hulcr J, Lucky A, 2018. Managed fire frequency significantly influences the litter arthropod community in longleaf pine flatwoods. *Environ. Entomol.*, 47(3): 575 – 585.

Bao SZ, Kafle L, Shih CJ, 2011. A new baited trap for monitoring *Solenopsis invicta* (Formicidae: Hymenoptera) in Taiwan. *Appl. Entomol. Zool.*, 46(2): 165 – 169.

Bernaba M, Power E, Campion J, Gotzek D, Schmidt JO, Klotz SA, 2019. Unconscious woman in shock and covered with ants pulled from an abandoned automobile. *Am. J. Med.*, 132(10): 1239 – 1241.

Calcaterra LA, Cabrera SM, Cuezso F, Pérez IJ, Briano JA, 2010. Habitat and grazing influence on terrestrial ants in subtropical grasslands and savannas of Argentina. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 103(4): 635 – 646.

Calcaterra LA, Livore JP, Delgado A, Briano JA, 2008. Ecological dominance of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, in its native range. *Oecologia*, 156(2): 411 – 421.

Chen J, Oi DH, 2020. Naturally occurring compounds/materials as alternatives to synthetic chemical insecticides for use in fire ant management. *Insects*, 11(11): 758.

Chen SQ, Chen HY, Xu YJ, 2019. Safe chemical repellents to prevent the spread of invasive ants. *Pest Manag. Sci.*, 75(3): 821 – 827.

Chen X, Adams B, Sabo A, Crupi T, Hooper-Bùi L, 2016. Ant assemblages and co-occurrence patterns in cypress-tupelo swamp. *Wetlands*, 36(5): 849 – 861.

Chi WL, Chen CH, Lin HM, Lin CC, Chen WT, Chen YC, Lien YY, Tsai YL, 2021. Utilizing odor-adsorbed filter papers for detection canine training and off-site fire ant indications. *Animals*, 11(8): 2204.

Costa HS, Greenberg L, Klotz J, Rust MK, 2005. Response of Argentine ants and red imported fire ants to permethrin-impregnated plastic strips: Foraging rates, colonization of potted soil, and differential mortality. *J. Econ. Entomol.*, 98(6): 2089 – 2094.

Cumberland MS, Kirkman LK, 2013. The effects of the red imported fire ant on seed fate in the longleaf pine ecosystem. *Plant Ecol.*, 214(5): 717 – 724.

DeFauw SL, Vogt JT, Boykin DL, 2008. Influence of mound construction by red and hybrid imported fire ants on soil chemical properties and turfgrass in a sod production agroecosystem. *Insectes Soc.*, 55(3): 301 – 312.

Diffie S, Miller J, Murray K, 2010. Laboratory observations of red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) predation on reptilian and avian eggs. *J. Herpetol.*, 44(2): 294 – 296.

Eubanks MD, Blackwell SA, Parrish CJ, Delamar ZD, Hull-Sanders H, 2002. Intraguild predation of beneficial arthropods by red imported fire ants in cotton. *Environ. Entomol.*, 31(6): 1168 – 1174.

Forys EA, Allen CR, Wojcik DP, 2002. Influence of the proximity and amount of human development and roads on the occurrence of the red imported fire ant in the lower Florida Keys. *Biol. Conserv.*, 108(1): 27 – 33.

Green WP, Pettry DE, Switzer RE, 1998. Impact of imported fire ants on the texture and fertility of Mississippi soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29(3 – 4): 447 – 457.

Gutrich JJ, VanGelder E, Loope L, 2007. Potential economic impact of introduction and spread of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, in Hawaii. *Environ. Sci. Policy*, 10(7 – 8): 685 – 696.

Haddad Junior V, Larsson CE, 2015. Anaphylaxis caused by stings from the *Solenopsis invicta*, lava-pés ant or red imported fire ant. *An. Bras. Dermatol.*, 90(3 Suppl 1): 22 – 25.

Hashimoto Y, Sakamoto H, Asai H, Yasoshima M, Lin HM, Goka K, 2020. The effect of fumigation with microencapsulated allyl isothiocyanate in a gas-barrier bag against *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Appl. Entomol. Zool.*, 55(3): 345 – 350.

He YH, Zhang JL, Shen LM, Wang L, Qian CY, Lyu HL, Yi C, Cai JC, Chen X, Wen XJ, Wen C, Wang C, 2023. Eugenol derivatives: Strong and long-lasting repellents against both undisturbed and disturbed red imported fire ants. *J. Pest Sci.*, 96(1): 327 – 344.

Hladik ML, Main AR, Goulson D, 2018. Environmental risks and challenges associated with neonicotinoid insecticides. *Environ. Sci. Technol.*, 52(6): 3329 – 3335.

Huang J, Xu YJ, Zeng L, Liang GW, Lu YY, 2010. Selective feeding of *Solenopsis invicta* on seeds of eight plant species and their influences on germination. *J. Environ. Entomol.*, 32(1): 6 – 10.

[黄俊, 许益鏘, 曾玲, 梁广文, 陆永跃, 2010. 红火蚁对 8 种植物种子的选择性取食及其对种子萌发的影响. 环境昆虫学

- 报, 32(1): 6–10]
- Huang J, Zeng L, Lu YY, 2007. Infestation probability of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, in nursery and stocks. *Chin. Bull. Entomol.*, 44(3): 375–378. [黄俊, 曾玲, 陆永跃, 2007. 带土园艺植物传播红火蚁的风险调查. 昆虫知识, 44(3): 375–378]
- Huang YT, Chen SQ, Li ZQ, Wang L, Xu YJ, 2018. Effects of flavor enhancers on the survival and behavior of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25(22): 21879–21886.
- Kaplan I, Eubanks MD, 2002. Disruption of cotton aphid (Homoptera: Aphididae) – Natural enemy dynamics by red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *Environ. Entomol.*, 31(6): 1175–1183.
- Kelly L, Sellers J, 2014. Abundance and distribution of the invasive ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), in cypress savannas of north Carolina. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 107(6): 1072–1080.
- Knutson AE, Campos M, 2008. Effect of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* on abundance of corn earworm, *Helicoverpa zea*, on maize in Texas. *Southwest. Entomol.*, 33(1): 1–13.
- Lafleur B, Hooper-Bùi LM, Paul Mumma E, Geaghan JP, 2005. Soil fertility and plant growth in soils from pine forests and plantations: Effect of invasive red imported fire ants *Solenopsis invicta* (Buren). *Pedobiologia*, 49(5): 415–423.
- Lee BH, Park CG, Park MG, Roh GH, Kim D, Riddick EW, Chen J, Cha DH, 2019. Ethyl formate fumigation for the disinfestation of red imported fire ants *Solenopsis invicta* Buren. *J. Asia Pac. Entomol.*, 22(3): 838–840.
- Lei Y, Jaleel W, Faisal Shahzad M, Ali S, Azad R, Muhammad Ikram R, Ali H, Ghramh HA, Ali Khan K, Qiu X, He Y, Lyu L, 2021. Effect of constant and fluctuating temperature on the circadian foraging rhythm of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae). *Saudi J. Biol. Sci.*, 28(1): 64–72.
- Lin HM, Chi WL, Lin CC, Tseng YC, Chen WT, Kung YL, Lien YY, Chen YY, 2011. Fire ant-detecting canines: A complementary method in detecting red imported fire ants. *J. Econ. Entomol.*, 104(1): 225–231.
- Liu YS, Huang SA, Lin IL, Lin CC, Lai HK, Yang CH, Huang RN, 2021. Establishment and social impacts of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, (Hymenoptera: Formicidae) in Taiwan. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(10): 5055.
- Lodge DM, Williams S, MacIsaac HJ, Hayes KR, Leung B, Reichard S, Mack RN, Moyle PB, Smith M, Andow DA, Carlton JT, McMichael A, 2006. Biological invasions: Recommendations for U. S. policy and management. *Ecol. Appl.*, 16(6): 2035–2054.
- Lu YY, Xu YJ, Zeng L, Wang L, Li ND, 2015. Quantitative relations between red imported fire ant workers captured by bait trap and pitfall trap. *J. Environ. Entomol.*, 37(4): 790–794. [陆永跃, 许益鏊, 曾玲, 王磊, 李宁东, 2015. 应用诱饵诱集法和陷阱法收集的红火蚁工蚁数量间关系研究. 环境昆虫学报, 37(4): 790–794]
- Lu YY, Zeng L, 2015. 10 years after red imported fire ant found to invade China: History, current situation and trend of its infestation. *Plant Quar.*, 29(2): 1–6. [陆永跃, 曾玲, 2015. 发现红火蚁入侵中国 10 年: 发生历史、现状与趋势. 植物检疫, 29(2): 1–6]
- Lu YY, Zeng L, Xu YJ, Liang GW, Wang L, 2019. Research progress of invasion biology and management of red imported fire ant. *J. South China Agric. Univ.*, 40(5): 149–160. [陆永跃, 曾玲, 许益鏊, 梁广文, 王磊, 2019. 外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展. 华南农业大学学报, 40(5): 149–160]
- Marcó MVP, Larriera A, Piña CI, 2015. Red fire ant (*Solenopsis invicta*) effects on broad-snouted caiman (*Caiman latirostris*) nest success. *J. Herpetol.*, 49(1): 70–74.
- Mlot NJ, Tovey CA, Hu DL, 2011. Fire ants self-assemble into waterproof rafts to survive floods. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108(19): 7669–7673.
- Morrison LW, 1999. Indirect effects of phorid fly parasitoids on the mechanisms of interspecific competition among ants. *Oecologia*, 121(1): 113–122.
- Morrison LW, 2002. Long-term impacts of an arthropod-community invasion by the imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Ecology*, 83(8): 2337–2345.
- Morrison LW, Porter SD, Daniels E, Korzukhin MD, 2004. Potential global range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*. *Biol. Invasions*, 6: 183–191.
- Porter SD, Savignano DA, 1990. Invasion of polygyne fire ants decimates native ants and disrupts arthropod community. *Ecology*, 71(6): 2095–2106.
- Preisser EL, Bolnick DI, Benard MF, 2005. Scared to death? The effects of intimidation and consumption in predator-prey interactions. *Ecology*, 86(2): 501–509.
- Qi GJ, Huang YF, Cen YJ, Lü LH, 2015. Effects of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, on the structure and diversity of the ant community in a human disturbed area. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 52(6): 1368–1375. [齐国君, 黄永峰, 岑伊静, 吕利华, 2015. 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, 52(6): 1368–1375]
- Qian ZW, Jiang QG, 2016. Main Homoptera forest pests and the control measures in Wuxi city. *Agric. Technol.*, 36(18): 182. [钱正伟, 蒋巧根, 2016. 无锡市主要同翅目林木害虫及防治措施. 农业与技术, 36(18): 182]
- Qin LW, 2021. Investigation on the effects of *Solenopsis invicta* on insect diversity in green spaces. *Chin. J. Hyg. Insectic. Equip.*, 27(4): 358–361. [覃立微, 2021. 红火蚁对绿地中昆虫多样性的影响调查. 中华卫生杀虫药械, 27(4): 358–361]
- Qin WQ, Lin SC, Chen X, Chen J, Wang L, Xiong HP, Xie QX, Sun ZH, Wen XJ, Wang C, 2019. Food transport of red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) on vertical surfaces. *Sci. Rep.*, 9: 3283.
- Qin WQ, Xiong HP, Wen YZ, Wen XJ, Wang H, Fang YH, Ma T, Sun ZH, Chen XY, Wang C, 2017. Laboratory and field evaluation

- of the repellency of six preservatives to red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *J. Asia Pac. Entomol.*, 20 (2): 535 – 540.
- Ragheb ELH, Miller KE, Leone EH, 2019. Exclosure fences around nests of imperiled Florida grasshopper sparrows reduce rates of predation by mammals. *J. Field Ornithol.*, 90(4): 309 – 324.
- Rajendran S, 2004. Fumigation of shipping or freight containers. *Outlooks Pest Manag.*, 15(5): 222 – 228.
- Reeves WK, Reynolds JW, 2004. Earthworms (Oligochaeta: Glossoscolecidae, Megascolecidae and Octochaetidae) and terrestrial polychaetes (Polychaeta: Nereididae) of Grand Cayman Island, with notes on their natural enemies. *Megadrilologica*, 10(6): 39 – 41.
- Rust MK, Su NY, 2012. Managing social insects of urban importance. *Annu. Rev. Entomol.*, 57: 355 – 375.
- Seaman RE, Marino PC, 2003. Influence of mound building and selective seed predation by the red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) on an old-field plant assemblage. *J. Torrey Bot. Soc.*, 130 (3): 193 – 201.
- Showler AT, Osbrink WLA, Abrigo V, Phillips PL, 2019. Relationships of salinity, relative humidity, mud flat fiddler crabs, ants, and sea ox-eye daisy with ixodid distribution and egg survival on the south Texas coastal plains. *Environ. Entomol.*, 48(3): 733 – 746.
- Simberloff D, 2003. How much information on population biology is needed to manage introduced species? *Conserv. Biol.*, 17(1): 83 – 92.
- Song YJ, Chen F, Liao KT, 2020. Comparison of UAV-based multispectral sensors for detection of *Solenopsis invicta* nests. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 569: 012051.
- Steele CH, King JR, Boughton EH, Jenkins D, 2020. Distribution of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in central Florida pastures. *Environ. Entomol.*, 49 (4): 956 – 962.
- Stiles JH, 1998. The Red Imported Fire Ant, *Solenopsis invicta*, in Early-successional Coastal Plain Forests: Tests of Distribution and Interaction Strength. MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.
- Stiles JH, Jones RH, 1998. Distribution of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, in road and powerline habitats. *Landsc. Ecol.*, 335: 335 – 346.
- Stuble KL, Kirkman LK, Carroll CR, 2010. Are red imported fire ants facilitators of native seed dispersal? *Biol. Invasions*, 12 (6): 1661 – 1669.
- Tay JW, Hoddle MS, Mulchandani A, Choe DH, 2017. Development of an alginate hydrogel to deliver aqueous bait for pest ant management. *Pest Manag. Sci.*, 73(10): 2028 – 2038.
- Tschinkel WR, Wilson EO, 2014. Scientific natural history: Telling the epics of nature. *BioScience*, 64(5): 438 – 443.
- Ujiyama S, Tsuji K, 2018. Controlling invasive ant species: A theoretical strategy for efficient monitoring in the early stage of invasion. *Sci. Rep.*, 8: 8033.
- Valles SM, Strong CA, Emmitt RS, Culkin CT, Weeks RD Jr, 2020. Efficacy of the InvictDetect™ immunostrrip® to taxonomically identify the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, using a single worker ant. *Insects*, 11(1): 37.
- Vasconcelos HL, Vilhena JMS, 2006. Species turnover and vertical partitioning of ant assemblages in the Brazilian Amazon: A comparison of forests and savannas. *Biotropica*, 38(1): 100 – 106.
- Venable CP, Adams TS, Langkilde T, 2019. Aversion learning in response to an invasive venomous prey depends on stimulus strength. *Biol. Invasions*, 21(6): 1973 – 1980.
- Vinson SB, 2013. Impact of the invasion of the imported fire ant. *Insect Sci.*, 20(4): 439 – 455.
- Vogt JT, 2004. Detection of imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) mounds with satellite imagery. *Environ. Entomol.*, 33 (6): 1718 – 1721.
- Vogt JT, Wallet B, 2008. Feasibility of using template-based and object-based automated detection methods for quantifying black and hybrid imported fire ant (*Solenopsis invicta* and *S. invicta* × *richteri*) mounds in aerial digital imagery. *Rangel. J.*, 30(3): 291 – 295.
- Wang L, Xu YJ, Zeng L, Lu YY, 2019. Impact of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren on biodiversity in South China: A review. *J. Integr. Agric.*, 18(4): 788 – 796.
- Wang L, Zeng L, Xu YJ, Lu YY, 2020. Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China. *NeoBiota*, (54): 89 – 124.
- Wang ZL, Deng H, Li Y, 2015. Study on pest control measures in Shenzhen municipal nature reserve. *J. Green Sci. Technol.*, (8): 1 – 5. [王佐霖, 邓辉, 李瑜, 2015. 深圳市级自然保护区有害生物防控措施研究. 绿色科技, (8): 1 – 5]
- Wen C, Chen J, Qin WQ, Chen X, Cai JC, Wen JB, Wen XJ, Wang C, 2021. Red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) cover inaccessible surfaces with particles to facilitate food search and transportation. *Insect Sci.*, 28(6): 1816 – 1828.
- Woodcock BA, Isaac NJB, Bullock JM, Roy DB, Garthwaite DG, Crowe A, Pywell RF, 2016. Impacts of neonicotinoid use on long-term population changes in wild bees in England. *Nat. Commun.*, 7: 12459.
- Wylie FR, Janssen-May S, 2017. Red imported fire ant in Australia: What if we lose the war? *Ecol. Manag. Restor.*, 18(1): 32 – 44.
- Wylie R, Oakey J, Williams ER, 2021. Alleles and algorithms: The role of genetic analyses and remote sensing technology in an ant eradication program. *NeoBiota*, 66: 55 – 73.
- Xian XQ, Zhou P, Wan FH, Zhang GF, 2019. The analysis of interception of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) from China's entry ports. *Plant Quar.*, 33(6): 41 – 45. [洗晓青, 周培, 万方浩, 张桂芬, 2019. 我国进境口岸截获红火蚁疫情分析. 植物检疫, 33(6): 41 – 45]
- Xiao X, Xie ZL, Xu LN, Xin K, 2019. Preliminary study on diversity and distribution pattern of ant species in Hainan Dongzhaigang mangroves. *J. Hainan Norm. Univ. (Nat. Sci.)*, 32(1): 108 – 118. [肖霄, 谢宗琳, 徐立娜, 辛琨, 2019. 东寨港红树林湿地蚂蚁物种多样性与分布格局初探. 海南师范大学学报(自然科学版), 32(1): 108 – 118]
- Xie F, 2019. Study on Red Imported Fire Ant Bait Capsule and Its

- Application Technology. MSc Thesis, South China Agricultural University, Guangzhou. [谢锋, 2019. 红火蚁诱饵胶囊剂及应用技术研究. 广州: 华南农业大学硕士学位论文]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, Liang GW, 2007. Foraging behavior and recruitment of red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in typical habitats of South China. *Acta Ecol. Sin.*, 27(3): 855–861. [许益鏘, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 2007. 华南地区典型生境中红火蚁觅食行为及工蚁召集规律. 生态学报, 27(3): 855–861]
- Yang XH, Henderson G, Mao LX, Evans A, 2009. Application of ground penetrating radar in detecting the hazards and risks of termites and ants in soil levees. *Environ. Entomol.*, 38(4): 1241–1249.
- Ying JJ, Yang YJ, Li YM, Ying WJ, Huang J, 2021. Countermeasures and suggestions on monitoring interception and risk prevention and control of *Solenopsis invicta* in Zhejiang Province. *China Plant Prot.*, 41(8): 87–91. [应俊杰, 杨俞娟, 李艳敏, 应卫军, 黄俊, 2021. 浙江省红火蚁监测阻截与风险防控对策建议. 中国植保导刊, 41(8): 87–91]
- Zettler JA, Taylor MD, Allen CR, Spira TP, 2004. Consequences of forest clear-cuts for native and nonindigenous ants (Hymenoptera: Formicidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 97(3): 513–518.
- Zhang X, Chen YX, Hou YM, Xie YX, 2015. Expansion of *Solenopsis invicta* Buren in Fujian Province. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 52(6): 1376–1384. [张翔, 陈艺欣, 侯有明, 谢毅璇, 2015. 福建省入侵红火蚁扩散规律研究. 应用昆虫学报, 52(6): 1376–1384]
- Zhang X, Hou YM, 2014. Invasion history of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in Fujian, China based on mitochondrial DNA and its implications in development of a control strategy. *Insect Sci.*, 21(4): 493–498.
- Zhang XQ, Chen SQ, Li ZQ, Xu YJ, 2017. Effect of sweeteners on the survival of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *J. Econ. Entomol.*, 110(2): 593–597.
- Zheng Q, Wang RF, Qin DQ, Yang LP, Lin SK, Cheng DM, Huang SQ, Zhang ZX, 2021. Insecticidal efficacy and mechanism of nanoparticles synthesized from chitosan and carboxymethyl chitosan against *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Carbohydr. Polym.*, 260: 117839.
- Zhou AM, Lu YY, Zeng L, Xu YJ, Liang GW, 2013. *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), defend *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) against its natural enemies. *Environ. Entomol.*, 42(2): 247–252.

(责任编辑: 赵利辉)