

陆永跃, 曾玲, 许益镛, 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.
LU Yongyue, ZENG Ling, XU Yijuan, et al. Research progress of invasion biology and management of red imported fire ant [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 149-160.

外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展

陆永跃, 曾玲, 许益镛, 梁广文, 王磊
(华南农业大学 红火蚁研究中心, 广东 广州 510642)

摘要: 截至 2019 年, 我国大陆发现红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 发生危害已经 15 年了。在有关部门/机构的支持下, 围绕着种群控制理论和技术, 华南农业大学红火蚁研究中心坚持开展红火蚁相关基础研究和防控应用工作。本文系统总结了我国大陆红火蚁入侵、传播和扩张的时空规律, 阐明了红火蚁暴发灾变的生物学基础和规律以及入侵对农业生态系统的影响, 明确了其入侵优势和生态学效应, 阐释了红火蚁的化学防治理论基础; 介绍了监测技术体系、检疫除害技术体系和应急防控、根除与治理技术体系的创建, 以及推广应用。研究成果可为我国红火蚁的防治提供重要科技支撑与保障。

关键词: 外来入侵物种; 红火蚁; 入侵生物学; 防控

中图分类号: S482.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)05-0149-12

Research progress of invasion biology and management of red imported fire ant

LU Yongyue, ZENG Ling, XU Yijuan, LIANG Guangwen, WANG Lei

(Red Imported Fire Ant Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: As of 2019, it has been 15 years since red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) was found in mainland China. With the great attention and support from the government and other institutions, our research center has focused on the basic research and application study on the theory and technology of fire ant management. Through systematic researches, the temporal and spatial regulations of fire ant invasion, spread and expansion in mainland China were revealed. The biological basis, regulations and impact of fire ant outbreak on agro-ecosystem were clarified, and its invasive advantages and ecological effects were presented. The theoretical basis for chemical control of fire ant was explained, and monitoring system, quarantine system, and emergency control, eradication and management system were established and widely applied. The results provide scientific and technological supports and guarantee for the control and management of fire ants in China.

Key words: invasive alien species; *Solenopsis invicta*; invasion biology; control and management

生物入侵 (Biological invasion) 是生物由原生存或者分布区域经自然的或人为的途径传入另一个新的区域, 并定居、繁衍和扩散, 对新区域的生物多样性、农林牧渔业生产、人类健康等造成损失或生态灾难的过程^[1-2]。其本质是物种从历史和传统分布

区向其他区域扩张的过程。在较长时期的生物入侵过程、特性、规律、预防、控制等研究和实践过程中形成了“入侵生物学” (Invasion biology) 这一门多领域交叉的学科, 其研究核心包括 2 个方面: 外来种的入侵性与生态系统的可入侵性和外来入侵种

收稿日期: 2019-05-31 网络首发时间: 2019-07-26 16:18:41

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190726.1259.002.html>

作者简介: 陆永跃 (1972—), 男, 教授, 博士, E-mail: luyongyue@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技发展专项资金 (2017B020202009); 广东省农业科技创新及推广项目 (2018LM2161)

的预防与控制^[3-4]。众多而广泛的生物入侵会严重制约国民经济的持续发展,导致农林牧渔业生产的严重经济损失,破坏人类赖以生存的生态环境,严重威胁生物多样性,导致生物遗传资源的损失与灭绝,也损害了国际贸易利益^[5-10]。生物入侵还可能威胁人类的健康,如有毒农业生物、人畜共患疾病的传播等^[11-12]。鉴于其广泛而持久的负面影响,生物入侵已经成为全球共同关注和迫切需要解决的问题之一。随着社会经济的发展,全球化(地球村)不断深入,传统入侵途径数量不断增加,新的入侵途径不断产生,全球外来生物入侵呈现出种类不断增多、频率不断加快、范围持续扩大、危害明显加重的显著特点和趋势^[12-17]。

我国幅员辽阔,自然环境多样,世界各地大多数物种在我国都可能适应、生存,且可能都会有合适发展的栖息地,因此,我国一直是深受外来有害生物危害的国家之一,几乎所有类型的生态系统都有入侵发生^[12, 18-22]。资料统计结果表明,截至 2017 年 12 月入侵我国农林生态系统的外来生物有 630 多种,其中较大面积发生、危害严重的达 100 多种;在 IUCN 所列的全球 100 种最具威胁的外来种中,入侵我国的就有 51 种^[3, 23]。其中,1998—2017 年我国大陆农林生态系统新增外来入侵物种共计 90 种,每年平均新增 4~5 种,入侵速度是 1950s 至 1990s 年代的 20~30 倍^[23]。这些外来入侵种已经导致严重的经济损失与生态灾难,据不完全统计,每年给我国农林业、生态环境等造成的损失超过 2 000 亿元人民币^[24]。随着我国经济国际化与区域化快速发展、“一带一路”等重大战略实施,加之口岸通关一体化和快速化政策,有害生物原有地理隔离、生态屏障和管理限制等逐渐被削弱,甚至被打破,在不同国家之间、我国不同区域之间物种更容易持续迁移、转移,导致外来有害生物传入频率和扩散扩张风险剧增。为了有效应对和控制外来生物入侵为害,我国正在加大投入力度,从防控科学理论基础到应用技术体系等多个方面开展工作,力图建立起一套行之有效的预防、阻击、控制与管理的技术措施与技术标准体系^[3, 12, 18-19, 25]。

作为国际上最具危险性的入侵物种之一,红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 历经 80 多年已从原产地南美洲部分国家扩张至中美洲、北美洲、澳洲、亚洲等 24 个国家和地区,对农林业生产、人畜健康、生物多样性、公共安全等造成了显著威胁^[26-29]。2004 年 9 月,华南农业大学红火蚁中心首次报道并准确鉴定了入侵中国大陆的红火蚁^[30-32]。经大范围持续

调查,发现该蚁入侵已造成我国南方部分地区出现作物(植物)受损、农田弃耕、咬伤家禽、攻击蜚伤群众、危及敏感人群生命安全等多方面危害,对公共安全、农林业生产和生态系统安全等均构成了潜在威胁^[33-36]。为有效阻击该蚁的传播蔓延和控制其猖獗为害,除了被侵入地区政府部门大力开展监测、实施防控外,我国科技人员也在红火蚁监测、检测、生物学和生态学、发生危害规律、防除药剂及技术等多个方面开展了研究,取得丰富的研究成果^[32-34]。发现红火蚁入侵后,我校于 2005 年 7 月成立了红火蚁研究中心,同时制订了研究规划,启动了相关防控基础与应用研究;通过近 15 年科技攻关,较为系统地解决了该虫防控的基础理论问题,构建了适合于我国大陆的监测检测技术体系、检疫除害技术体系、应急防控与根除技术体系,并且在红火蚁入侵区域得到了较为广泛的应用。虽然,我国政府部门及科学家一直都很重视对该虫的管理和研究,也取得了一些成绩,但由于传播载体数量巨大,红火蚁的入侵区域还是从 2005 年的 30 多个县区增加到 2018 年 12 月的 380 多个县区,平均每年新增约 27 个县区,并且当前及今后一定时期内该蚁仍将处于快速扩张蔓延阶段,可能扩展至临近该蚁生物学耐受极限区域时才会减速^[37-38]。本文将综述华南农业大学红火蚁研究中心所开展的红火蚁相关研究及应用工作情况,期望能够为进一步的研究和应用等提供参考。

1 红火蚁研究的总体思路

为了更好地指导研究和应用工作,2005 年华南农业大学红火蚁研究中心制订了红火蚁防控理论与技术研究规划。按照该规划的总体思路(图 1),围绕种群控制基础理论和关键技术这个中心,设置了 8 个方面 26 个研究课题,并努力创造条件予以实施。14 年来,综合应用多学科理论和方法,重点开展了以下 5 个方面的研究:红火蚁入侵生物学、灾变规律及其机制;红火蚁入侵的生态学效应,重点研究其入侵对本地近缘种、其他生物和物种之间关系的影响及互作规律、机制;红火蚁入侵传播扩张规律、监测/检测技术和检疫除害技术;红火蚁化学防治理论基础、关键技术及高效防治药剂;红火蚁生物防治资源挖掘与利用。从红火蚁入侵灾变、关键技术到集成技术体系与应用均取得了较为系统的成果,所构建的种群控制关键技术体系在我国红火蚁入侵发生区较为广泛地示范推广,也取得了显著成效。

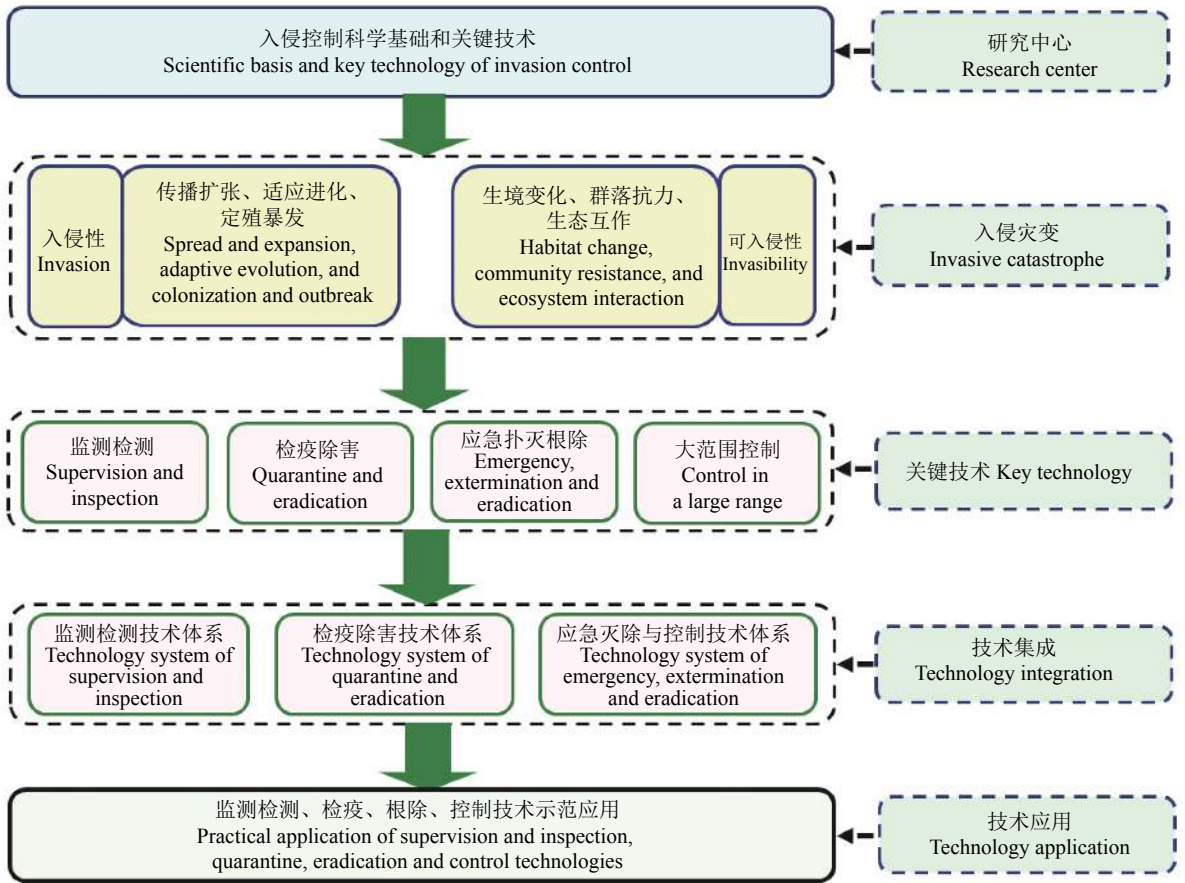


图 1 红火蚁科技研究与应用总体思路

Fig. 1 General plan of science and technology research and application for red imported fire ant

2 我国大陆红火蚁入侵、传播和扩张的时空规律

2.1 我国大陆红火蚁的社会型和入侵、传播过程

发现并准确鉴定了入侵中国大陆的红火蚁后, 我们通过研究建立了我国常见蚂蚁类群鉴定的分子生物学方法, 通过一定范围采样, 研究明确了入侵我国大陆的红火蚁的社会型、遗传关系和入侵、传播过程。研究明确了红火蚁等切叶蚁亚科 Myrmicinae、蚁亚科 Formicinae 58 种蚂蚁多酶切位点扩增条带、多基因序列差异, 揭示了切叶蚁亚科及蚁亚科各属间的系统发育关系, 建立快速鉴别、遗传检测分子方法^[39]。研究明确了国内外 45 个红火蚁种群 *COI* 基因片段序列多样性、单倍型、亲缘关系以及在我国扩散传播过程, 结果显示该蚁应是从南美、美国直接或者转经香港、台湾等地多点、多次、多途径入侵大陆^[40-42]。研究探明了多个红火蚁中国种群与阿根廷的红火蚁在 *Gp-9* 基因、蛋白 B 型多个位点存在突变, 提出了等位基因类型鉴定方法, 明确了入侵我国大陆的红火蚁主要为多蚁

后型^[43]。

2.2 中国南方红火蚁入侵的生境多样性、空间分布、地理格局和传播路线

对入侵后分布的调查分析表明, 我国南方可入侵的生境类型多样, 除了森林高覆盖度区域外红火蚁均可入侵发生, 以人为干扰后区域更为适合^[44]; 入侵种群蚁巢空间分布类型与生境异质性相关, 较为均一的环境中以随机至均匀分布为主, 非均一环境中呈现随机分布向聚集分布的变化^[44-46]。同一区域蚁巢间具有空间相关性, 其变程分别为 12.6、14.1、9.7、13.3 和 14.5 m, 均值为 12.8 m^[45]。随着空间尺度增大蚁巢聚集程度增强, 局域变异与空间呈现相关性^[47]。红火蚁入侵我国大陆后早期呈 2 大块、2 小块和 2 个跳跃点分布特征, 10 年后呈 4 个普遍区、多个新发点分布; 各个入侵区域扩散方式存在差异, 渐进式占 90% 以上, 跳跃式在 10% 以下^[48]。截至 2018 年 12 月, 在县级区域水平红火蚁较为普遍至普遍分布区域增加至广西中东部、广东全省、福建中南部、江西南部、海南大部分地区、云南东部和南部、贵州南部、台湾中北部等 8 个, 局部分布区

包括云南西南部和北部、四川南部、广西西部等 4 个, 跳跃式点状分布区包括重庆、贵州北部、湖南、湖北、江西东北部、浙江等 6 个^[49]。

2.3 华南地区红火蚁入侵历史与局域、长距离扩散规律

红火蚁蚁巢总是在不断迁移, 以 4 月份迁移率最高、迁移最为活跃, 蚁巢平均使用时间为 43 d, 平均迁移距离为 5.57 m; 人为干扰破坏、覆盖、阴蔽度高、施用药剂等均可能促进其迁移和分巢^[50-51]。单一入侵区域红火蚁蚁巢总体呈现出单一或者多个高密度中心向四周逐渐降低的规律, 其方向性与地形地貌、风向风力、水流等因素有关; 河流流域随水流、婚飞等进行扩散的速度为每年 187.9 m, 蚁巢密度向源头呈梯度聚集^[52]。基于初期多个入侵区域数据, 研究发现入侵区域面积、蚁巢分布面积、蚁巢数量、中心区蚁巢密度和入侵时间长度间关系为指数模型, 局域扩散速度为每年 110~190 m; 构建了用入侵时间、局域扩张速度、面积等计算、预测新模型和新方法; 明确了早期入侵大陆 24 个地区的时间, 最早可能在 20 世纪 90 年代中期入侵深圳、广州; 基于 20 年数据建立了入侵区数量和入侵时间长度关系模型, 研究明确了初期扩张速度为每年 4~5 个县, 近年及今后 20~30 年将处于快速扩张期, 增长速度约为每年 20~40 个县, 早期至当前传播速度为每年 48~80 km^[32, 37, 47]。

2.4 中国大陆红火蚁传播方式

从入境口岸截获的 300 多批次 17 类物品证实废旧物品(废纸、废旧电子产品等)、原木是携带红火蚁入侵中国的主要途径^[53]。国内红火蚁的传播以草皮、花卉苗木等携带为主, 调查的 95 种花卉苗木中有 27 种携带红火蚁; 草皮种植场红火蚁发生率为 48.8%; 122 个传入地区中草皮/苗木携带入侵比率为 85.2%^[54-55]。

3 红火蚁入侵暴发灾变的生物学规律

3.1 中国南方红火蚁新入侵种群的重要生物学特性

调查明确了南方蔬菜、玉米、荔枝、龙眼、香蕉、荒草、草坪、草皮种植场等多种生境中红火蚁觅食、婚飞等活动节律或动态规律, 显示周年以 4—6 月最为猖獗, 9—11 月次之^[56-64]。冬春季中午、夏季早晚红火蚁活动旺盛, 月平均气温、降水量、最低气温是影响该蚁种群变动最主要的因子^[57, 60-61]。建立了 5 类生境中红火蚁蚁群结构特征、数量与蚁丘参数

间 10 个模型^[65-67], 明确了性别偏移规律^[68-70]。降雨、土壤含水量明显影响了红火蚁生物学、行为学、建巢等活动^[61, 71-73]。红火蚁入侵种群对温、湿度具有较高的适应性, 建立的高温暴露工蚁存活率与温度、暴露时间关系模型显示该蚁对高温胁迫具一定适应能力, 致死高温 41.5 °C 以上; 发现适应低温的种群更具耐寒性^[74-75]; 明确了该蚁具备干旱调节能力及其生态生理机制^[57]。

3.2 红火蚁入侵种群的行为特征、竞争优势与规律

系列研究阐明了 4 类生境中红火蚁工蚁觅食与活动动态规律, 建立了气温、裸地温度、土壤温度与工蚁觅食活动数量关系模型, 为监测和调查奠定了基础^[59-60, 63, 76]; 构建了工蚁对不同饵料的发现与召集时间关系模型, 为饵剂研发提供了依据^[59, 77-78]; 应用创立的刻度图示法及指标体系研究揭示了工蚁活动、攻击数量与温度、湿度、干扰频度、干扰程度、使用农药的关系^[79-80]; 阐明了不同季节草坪、荒草地、香蕉园生境中工蚁防卫域与蚁巢间关系及最大防卫域(1.07~1.72 m²)、防卫速度等^[81]。

3.3 红火蚁入侵对我国南方生物多样性造成的负面影响

研究阐明了红火蚁入侵对我国南方本地物种的影响, 以及对主要生态系统结构、功能的干扰规律。红火蚁通过干扰、资源掠夺等竞争方式取代了本地其他蚂蚁成为主要或者单一优势种, 使得入侵地蚂蚁群落结构变得单一化, 种类减少了 23%~84%^[82-93]。红火蚁入侵荔枝园等 8 类生态系统对本地物种关系、群落结构、控害功能、传粉功能、土壤环境等均造成了负面效应^[58, 94-98]。入侵地 14 种植物, 包括作物, 40% 以上种子被红火蚁刮啃或者搬走、丢弃, 种子萌发率最低低于 50%; 部分植物的空间分布因红火蚁入侵而发生改变^[99-102]。红火蚁的入侵减少或者改变了绿豆、油菜等显花植物访花昆虫的种类和行为, 并显著降低了作物结实率, 造成了减产^[103-104]。红火蚁入侵后土壤、地面、杂草、大型植物植株中下部、冠层等不同位置上害虫、天敌、中性昆虫等亚群群落结构发生了改变, 种类及数量大幅度减少, 群落波动性增大, 可入侵性显著增强, 多样化生境有利于抑制红火蚁入侵^[58, 94]。系统研究表明, 红火蚁入侵我国后明显干扰了本地害虫和天敌之间的关系。与本地蚂蚁相比较, 红火蚁入侵与本地蚜虫、本地蚧虫建立了更为紧密的互惠关系, 促进了产蜜昆虫的扩散和数量的增长; 瓢虫、蜘蛛、寄

生蜂等天敌数量和控害功能受到了红火蚁的抑制^[105-119]。这些研究结果揭示了红火蚁与扶桑绵粉蚧等协同入侵规律及机制。红火蚁的入侵不仅影响了生物多样性,在红火蚁发生严重的区域土壤性质也发生了改变,质地变细,可塑性增强,pH升高,有机质、碱解N和有效P减少^[120]。

4 适合我国南方的红火蚁监测、检疫与防控技术体系的构建

4.1 我国南方红火蚁监测技术体系的建立

系列研究设计了多种诱集新器具、新方法,筛选出具有良好效果的3种诱集饵料和放置方式,提出了红火蚁监测、调查方法;明确了多种生境中5种诱饵对红火蚁的诱集效果,监测准确率高于98%;提出了诱集法指标,建立了4个季节日视法、陷阱法、诱集法之间的关系模型;构建了多蚁后型发生程度分级标准体系,并形成了国家标准^[121-124];发展了近红外反射蚁巢检测技术^[125-127]。

4.2 红火蚁检测与检疫除害的技术方法

研究筛选出用于花卉、苗木、草场、原木、废纸等的化学除害技术、热处理技术和熏蒸除害技术;提出了高风险植物名单;明确了生产环境、栽培方式对红火蚁发生风险的影响,以及防止带土植物传播红火蚁的检疫策略与措施;研发了检测原木、废纸、货柜中红火蚁的技术,提高了检疫检测效率;明确了12种液剂、饵剂和颗粒剂对草场、草皮的检疫除害效果,其中4种药剂灭除效果达100%^[128-133]。基于宣传培训和公众认知,提出了红火蚁检疫管理策略与方式^[134-135]。

4.3 应用杀虫剂防治红火蚁的毒理学基础

基于杀虫剂作用的毒理学研究,筛选出具有良好防治效果的触杀性药剂;摸清了幼虫体壁的超微形态结构,明确了18种杀虫剂对4龄幼虫触杀毒力,17种杀虫剂对工蚁触杀活性,11种杀虫剂的瞬时接触、传导毒杀效果和驱避作用;阐明了红火蚁3个品级对多种杀虫剂敏感性与代谢酶活性、增效剂及其互作关系;阐明了辛硫磷、毒死蜱、氟虫腈对工蚁和幼虫表皮穿透率规律^[136-147]。明确了蚁巢大小和灌巢药液用量关系,摸清了不同深度土壤中灌巢后辛硫磷和高效氯氰菊酯对红火蚁的防治效果、持效期以及土壤吸附规律^[148]。发现了印楝素、苯氧威和虫酰肼等药剂对雌性蛹期生殖发育的干扰抑制作用,阐明了通过降低保幼激素滴度与抑制卵巢中 $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ 活力破坏蚁后生殖功能等机制^[149]。

4.4 筛选获得对红火蚁具良好作用的液剂、饵剂和粉剂

系列研究提出了药剂防治效果综合指标体系,并应用此方法评价了40多种药剂的防治效果,获得了更为全面和准确的结果;通过传导毒力研究,获得了多种对红火蚁具良好毒杀作用的活性成分^[150-155]。以对红火蚁的引诱力、搬运力、喜食性、毒力为指标,研制出含有多杀菌素、阿维菌素、苯氧威、茚虫威、氟蚁腈、氟虫胺、氯溴虫腈等10多种农药的低毒毒饵、防水型毒饵,并形成配套应用技术^[156-166]。创制出灭杀红火蚁的高效药剂:0.1%(w)茚虫威饵剂和新型速效具防水性药剂:0.1%(w)高效氯氰菊酯粉剂,形成了配套使用技术,解决了雨季、低温季节红火蚁防效低或者无法防治的瓶颈问题,单次防效在80%以上,2次复合使用防效在90%以上。

4.5 集成创建了适合于我国南方多类生态区域的红火蚁应急防控、根除与治理模式和技术体系

研究提出了红火蚁疫情管理标准化模式及程序、防除决策依据指标体系、灭除循环与组合程序、防控组织模式与方式、施药手段与效率、专业化防控实施程序与要求等系列模式、方式,为构建我国应对红火蚁的管理和技术标准体系奠定了基础;提出了科学防控策略、全面防治与重点防治相结合的新“两步法”准则、全温区防控模式、全区域防控模式等,获得了8个饵剂、粉剂高效的防治组合;创建了适合我国南方多类生态区域不同季节的应急防控技术体系,防效达96%~100%,并在广东等多个南方省/市区较为广泛应用;构建了疫情根除管理和技术体系,连续、全面实施2~3年,可达到根除独立疫点/疫区疫情目标,已在福建、湖南、云南等地根除多个红火蚁疫情点^[167-168]。

4.6 红火蚁监测与防控技术的推广应用

华南农业大学红火蚁研究中心注重红火蚁监测与防控技术应用工作,依托包括19个省区的“全国红火蚁联合监测与防控协作组”体系、各个地区相关部门、大学、科研院所和其他企事业单位等,进行了红火蚁监测、检疫、防治等各项技术示范推广。自2005年以来,通过多种形式的宣传、培训,示范应用红火蚁监测、防治技术;通过实施区域防治,降低红火蚁的种群密度,减轻红火蚁的危害和威胁,14年间,已在广东、福建、广西、湖南、江西、海南、云南、重庆、四川、贵州、浙江、湖北等12省

(直辖市、自治区)应用了红火蚁监测、检疫、防治相关技术和产品,并取得了显著社会效益。

5 展望

除围绕高效防控的理论基础及应用技术开展了以上系列研究外,华南农业大学红火蚁研究中心还在电场对红火蚁工蚁聚集的影响^[169]、红火蚁的毒液化学成分及其功能^[170-174]、信息素^[175-176]、表皮化学成分^[177-178]、遗传与基因调控^[179-180]、共生微生物及其功能^[181-182]、社会免疫物质^[183-184]、生物防治^[185-187]、天然物对红火蚁的生物效应^[188-190]、药剂残留及安全性^[191-192]等多个方面开展了研究,并取得了系列成果。

为了应对和解决红火蚁的入侵和扩散蔓延、暴发成灾问题,华南农业大学红火蚁研究中心无论是在红火蚁生物学基础理论,还是在监测、检测、检疫、应急灭除与控制关键技术等方面均取得了系统性成果,所研发的技术和产品应用范围广泛,取得了显著效益,在促进社会发展、推进检疫性有害生物管理行业科技进步中也发挥了明显作用。根据自然和社会因素变化的新形势新情况,对红火蚁的科学研究应该在以下 3 个方面进行探索。

随着该虫的进一步扩散蔓延,被入侵的新生态区域类型将不断增多,环境条件的多样性、异质性将进一步增大。为了适应环境因子的变化,红火蚁将可能产生更大的生物学适应性变化,特别是在全球气候变化条件下,当进入一些极端环境中,如高湿、干旱、高温、低温、高辐照、低气压等,该蚁的生物学特性、发生和扩散规律及其机制等应不断地予以探索和研究。这给科学研究和防控实践提出了需要进一步应对的课题。因此,在更大空间、更长时间范围不断地开展防控基础理论研究和监测、防治应用技术研发,建立适用范围更广泛的防控科学基础和关键技术体系将是重要的研究发展方向。

已有的研究结果显示红火蚁传播扩散主要依靠苗木、花卉、草皮、肥料、土壤、废旧物品等长距离运输,搞好检疫、控制入侵源头是有效压制该蚁扩散传播和减缓入侵速度的关键。但是,目前我国红火蚁发生区相关物品外运类型众多、数量巨大,而相关检疫管理技术部门和机构由于人员、经费的严重不足,即使竭尽所能,也只能对少量调运物品实施有效检疫,仅能部分阻截和延缓红火蚁入侵。因此,进一步研发适用于我国检疫实际需要的更高效的检疫技术和管理系统将是红火蚁防控管理中发

展方向之一。

红火蚁入侵中国时间较短,同时限于其特有的生物学特性,当前及今后一段时间内可用于防治该蚁的药剂来源、品种尤其是高效、低风险的药剂等不够丰富。长期使用同一类或者相近的药剂进行防治,该虫存在产生抗药性的风险。一旦产生抗药性,常用药剂的防效可能降低甚至失效。通过长期研究,弄清楚红火蚁对有毒物质的反应变化及其调节机制,筛选获得更多种类高效杀虫剂,开发出更为丰富、有效的专用药剂品种将是未来研究的第 3 个方向。

参考文献:

- [1] 万方浩,郑小波,郭建英.重要农林外来入侵物种的生物学与控制[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 戈峰.现代生态学[M].北京:中国科学出版社,2007.
- [3] 万方浩,侯有明,蒋明星.入侵生物学[M].北京:科学出版社,2015.
- [4] FALK-PETERSEN J, BØHN T, SANDLUND O T. On the numerous concepts in invasion biology[J]. *Biol Invasions*, 2006, 8: 1409-1424.
- [5] BINIMELIS R, BORN W, MONTERROSO I, et al. Socio-economic impact and assessment of biological invasions[M]//NENTWIG W. Biological invasions. Berlin: Springer International Publishing, 2007: 331-347.
- [6] CHARLE H, DUKES J S. Impacts of invasive species on ecosystem services[M]//NENTWIG W. Biological invasions. Berlin: Springer International Publishing, 2007: 217-237.
- [7] ZISKA L H, BLUMENTHAL D M, RUNION G B, et al. Invasive species and climate change: An agronomic perspective[J]. *Climatic Change*, 2011, 105(1/2): 13-42.
- [8] COOK D C, THOMAS M B, CUNNINGHAM S A, et al. Predicting the economic impact of an invasive species on an ecosystem service[J]. *Ecol Appl*, 2007, 17(6): 1832-1840.
- [9] MOONEY H A, CLELAND E E. The evolutionary impact of invasive species[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2001, 98(10): 5446-5451.
- [10] NEW T R. Mutualisms and insect conservation[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 153-165.
- [11] MCGEOCH M A, BUTCHART S H M, SPEAR D, et al. Global indicators of biological invasion: Species numbers, biodiversity impact and policy responses[J]. *Divers Distrib*, 2010, 16(1): 95-108.
- [12] WAN F H, JIANG M X, ZHAN A B. Biological invasions and its management in China[M]. Singapore: Springer Nature Singapore Press Ltd., 2017.
- [13] ALLENDORF F W, LUNDQUIST L L. Introduction:

- Population biology, evolution, and control of invasive species[J]. *Conserv Biol*, 2003, 17(1): 24-30.
- [14] MCGEOCH M A, CHOWN S L, KALWIJ J M. A global indicator for biological invasion[J]. *Conserv Biol*, 2006, 20(6): 1635-1646.
- [15] HULME P E. Trade, transport and trouble: Managing invasive species pathways in an era of globalization[J]. *J Appl Ecol*, 2009, 46(1): 10-18.
- [16] SEEBENS H, BLACKBURN T M, DYER E E, et al. Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2018, 115(10): e2264-e2273.
- [17] MEYERSON L A, CARLTON J T, SIMBERLOFF D, et al. The growing peril of biological invasions[J]. *Front Ecol Environ*, 2019, 17(4): 191.
- [18] XIE Y, LI Z Y, GREGG W P, et al. Invasive species in China: An overview[J]. *Biodivers Conserv*, 2001, 10(8): 1317-1341.
- [19] WAN F H, YANG N W. Invasion and management of agricultural alien insects in China[J]. *Annu Rev Entomol*, 2016, 61: 77-98.
- [20] DING J Q, MACK R N, LU P, et al. China's booming economy is sparking and accelerating biological invasions[J]. *BioScience*, 2008, 58(4): 317-324.
- [21] 王国欢,白帆,桑卫国. 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素[J]. *植物科学学报*, 2017, 35(4): 513-524.
- [22] 王瑞,周忠实,张国良,等. 重大外来入侵杂草在我国的分布危害格局与可持续治理[J]. *生物安全学报*, 2018, 27(4): 317-320.
- [23] 洗晓青,王瑞,郭建英,等. 我国农林生态系统近20年新入侵物种名录分析[J]. *植物保护*, 2018, 44(5): 168-175.
- [24] XU H G, DING H, LI M Y, et al. The distribution and economic losses of alien species invasion to China[J]. *Biol Invasions*, 2006, 8(7): 1495-1500.
- [25] 胥丹丹,陈立,王晓伟,等. 我国入侵昆虫学研究进展[J]. *应用昆虫学报*, 2017, 54(6): 885-897.
- [26] VINSON S B. Invasion of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae): Spread, biology, and impact[J]. *American Entomol*, 1997, 43(1): 23-39.
- [27] ALLEN C R, EPPERSON D M, GARMESTANI A S. Red imported fire ant impacts on wildlife: A decade of research[J]. *Am Midl Nat*, 2004, 152(1): 88-103.
- [28] MORRISON L W, PORTER S D, DANIELS E, et al. Potential global range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*[J]. *Biol Invasions*, 2004, 6(2): 183-191.
- [29] ASCUNCE M S, YANG C C, JANE O, et al. Global invasion history of the fire ant *Solenopsis invicta*[J]. *Science*, 2011, 331(6020): 1066-1068.
- [30] 曾玲,陆永跃,何晓芳,等. 入侵中国大陆的红火蚁的鉴定及发生为害调查[J]. *昆虫知识*, 2005, 42(2): 144-148.
- [31] 曾玲,陆永跃,陈忠南. 红火蚁监测与防治[M]. 广州: 广东科技出版社, 2005.
- [32] 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.
- [33] WANG L, LU Y Y, XU Y J, et al. The current status of research on *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in Mainland China[J]. *Asian Myrmecol*, 2013, 5: 125-138.
- [34] WANG L, XU Y J, ZENG L, et al. A review of the impact of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren on biodiversity in South China[J]. *J Integr Agr*, 2019, 18(4): 788-796.
- [35] XU Y J, HUANG J, ZHOU A M, et al. Prevalence of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) venom allergic reactions in mainland China[J]. *Fla Entomol*, 2012, 95: 961-965.
- [36] 赵静妮,许益鏊. 基于互联网的红火蚁在中国伤人事件调查[J]. *应用昆虫学报*, 2015, 52(6): 1409-1412.
- [37] 陆永跃. 中国大陆红火蚁远距离传播速度探讨和趋势预测[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(10): 70-72.
- [38] ZHANG R Z, LI Y C, LIU N, et al. An overview of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China[J]. *Fla Entomol*, 2007, 90(4): 723-731.
- [39] 梁婷婷. 切叶蚁亚科 (Myrmicinae) 和蚁亚科 (Formicinae) 部分属间系统发育研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2015.
- [40] 何晓芳,陆永跃,张维球,等. 入侵我国红火蚁的三种单倍型(英文)[J]. *昆虫学报*, 2006, 49(6): 1046-1049.
- [41] 黄奕雯. 基于微卫星和 *COI* 的中国红火蚁种群遗传结构[D]. 广州: 华南农业大学, 2010.
- [42] 黄奕雯,何晓芳,陆永跃,等. 基于微卫星的中国红火蚁种群遗传结构的研究[J]. *生物安全学报*, 2014, 23(2): 131-138.
- [43] 许嘉增. 基于 *COI* 和 *Gp-9* 基因的中国红火蚁种群遗传结构研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2008.
- [44] 李宁东,陆永跃,曾玲,等. 广东省吴川红火蚁生境类型、空间分布和抽样技术研究[J]. *华中农业大学学报*, 2006, 25(1): 31-36.
- [45] 陆永跃,李宁东,梁广文,等. 红火蚁多蚁后型种群婚飞新形成蚁巢的局域空间分布特征[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28(4): 1-5.
- [46] 许益鏊,陆永跃,曾玲. 新入侵地红火蚁蚁巢的空间分布特征[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(8): 16-19.
- [47] 陆永跃,李宁东,梁广文,等. 红火蚁多蚁后型种群有效蚁巢局域分布的空间相关性[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 140-144.
- [48] 陆永跃,梁广文,曾玲. 华南地区红火蚁局域和长距离扩散规律研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(4): 1053-1063.
- [49] 农业农村部办公厅. 关于印发《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录》的通知(农办农[2019] 12

- 号[EB/OL]. (2019-05-16)[2019-05-20] http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201905/t20190530_6315909.
- [50] 王磊, 曾玲, 陆永跃, 等. 蚁丘被破坏程度对红火蚁蚁群迁移的影响[J]. 昆虫知识, 2010, 47(5): 941-944.
- [51] 王磊, 陆永跃, 曾玲, 等. 草坪生境中红火蚁蚁巢空间关系和蚁群迁移动态规律研究[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 149-153.
- [52] 许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁局域扩散规律研究[J]. 华南农业大学学报, 2006, 26(1): 34-36.
- [53] 周爱明. 进出境货物携带红火蚁风险和检疫处理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [54] 黄俊, 曾玲, 陆永跃. 带土园艺植物传播红火蚁的风险调查[J]. 昆虫知识, 2007, 44(3): 375-378.
- [55] 李慎磊, 曾玲, 许益鏊, 等. 广东省草皮种植场和城市草坪红火蚁发生为害程度调查[J]. 生物安全学报, 2014, 23(2): 103-106.
- [56] 李宁东. 红火蚁在新入侵区种群动态[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
- [57] 许益鏊. 红火蚁入侵生态学基础研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [58] 席银宝. 红火蚁对荔枝园无脊椎动物群落的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [59] 许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 等. 华南地区典型生境中红火蚁觅食行为及工蚁召集规律[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 855-861.
- [60] 李宁东, 曾玲, 梁广文, 等. 广东吴川红火蚁消长规律[J]. 昆虫知识, 2008, 45(1): 54-57.
- [61] 郝东川. 降雨与土壤含水量对红火蚁种群的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [62] XU Y J, HUANG J, LU Y Y, et al. Observation of nuptial flights of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China[J]. Sociobiology, 2009, 54(3): 831-840.
- [63] 席银宝, 江俊起, 许益鏊, 等. 荔枝园红火蚁觅食活动的时序动态及影响因子[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(1): 67-70.
- [64] 周爱明, 王正, 曾玲, 等. 香蕉园内红火蚁种群时序动态规律研究[J]. 环境昆虫学报, 2011, 33(4): 466-470.
- [65] 黄俊, 陆永跃, 许益鏊, 等. 红火蚁蚁丘大小与诱集工蚁数量的关系[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1992-1997.
- [66] 许益鏊, 陆永跃, 曾玲. 几种生境内红火蚁蚁群结构的变动规律[J]. 植物保护学报, 2009, 36(6): 575-576.
- [67] 李宁东, 陆永跃, 曾玲, 等. 冬季红火蚁蚁群结构特点[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 16-18.
- [68] YE J W, LU Y Y, XU Y J, et al. Sex ratio dynamics in polygyne colonies of red imported fire ants, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae), in south China[J]. Sociobiology, 2011, 57(2): 341-346.
- [69] YE J W, LU Y Y, XU Y J, et al. Sex-ratio bias in natural polygyne colonies of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae)[J]. Sociobiology, 2011, 58(1): 195-206.
- [70] YE J W, LU Y Y, XU Y J, et al. Sex-ratio bias in alates of polygyne colonies of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in China[J]. J Insect Behav, 2010, 23(5): 396-404.
- [71] XU Y J, ZENG L, LU Y Y, et al. Effect of soil humidity on the survival of *Solenopsis invicta* Buren workers[J]. Insect Soc, 2009, 56: 367-373.
- [72] LU Y Y, HAO D C, LIANG G W. Impact of rainfall on the nesting activity of *Solenopsis invicta* in South China[J]. Sociobiology, 2012, 59(3): 633-640.
- [73] 许益鏊, 陆永跃, 梁广文, 等. 红火蚁觅食活动的气象因子相关性及其等级划分[J]. 生物安全学报, 2014, 23(2): 75-80.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] LU Y Y, WANG L, ZENG L, et al. The effects of temperature on the foraging activity of red imported fire ant workers (Hymenoptera: Formicidae) in south China[J]. Sociobiology, 2012, 59(2): 585-588.
- [77] 许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 等. 几种饵料对红火蚁觅食的引诱作用[J]. 昆虫知识, 2006, 43(6): 856-857.
- [78] 宋侦东, 陆永跃, 吴碧球, 等. 广东红火蚁多个生境中诱饵对蚂蚁诱集作用比较[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 19-22.
- [79] 高亿波, 陆永跃, 曾玲, 等. 研究红火蚁工蚁活动性的新方法—刻度图示法[J]. 昆虫知识, 2007, 44(5): 758-762.
- [80] 高亿波, 曾玲, 陆永跃, 等. 荒地红火蚁工蚁活动性程度研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 11-15.
- [81] XU Y J, ZENG L, LU Y Y. Temporarily defended dispersal area of alarmed workers of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera, Formicidae) provoked by physical disturbance[J]. Sociobiology, 2011, 58(1): 119-132.
- [82] LU Y Y, WU B Q, XU Y J, et al. Effects of red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) on the species structure of several ant communities in South China[J]. Sociobiology, 2012, 59(1): 275-286.
- [83] LU Y Y, WU B Q, ZENG L, et al. Comparison of foraging ability between *Solenopsis invicta* and *Tapinoma melanocephalum* (Hymenoptera: Formicidae)[J]. Sociobiology, 2012, 59(3): 1015-1024.
- [84] WU B Q, WANG L, LIANG G W, et al. Food competition mechanism between *Solenopsis invicta* Buren and *Tapinoma melanocephalum* Fabricius[J]. Sociobiology, 2014, 61(3): 265-273.
- [85] 席银宝, 曾玲, 陆永跃, 等. 荔枝园红火蚁和哀弓背蚁种间关系研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(4): 6-10.

- [86] 吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对广东多种生境中蚂蚁类群的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 151-156.
- [87] 许益鏊, 曾玲, 陆永跃, 等. 红火蚁弃尸堆的食物结构[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 5791-5798.
- [88] 吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁入侵和未入侵生境中蚂蚁的觅食强度[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2513-2518.
- [89] 吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 等. 单个蚁巢红火蚁对不同距离蚂蚁类群的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4248-4259.
- [90] 吴碧球, 陆永跃, 梁广文, 等. 红火蚁对新入侵龙眼园和荒地蚂蚁类群多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2075-2083.
- [91] 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.
- [92] 吴碧球, 梁广文, 许益鏊, 等. 荒草地和荔枝园生境短期入侵的红火蚁与黑头酸臭蚁种间的干扰竞争[J]. 生物安全学报, 2014, 23(2): 97-102.
- [93] HUANG Y T, ZHU S, TAN D L, et al. Aggression of *Solenopsis invicta* towards other ants is not affected by colony rafting[J]. Asian Myrmecol, 2016, 8: 1-4.
- [94] 席银宝, 陆永跃, 梁广文, 等. 红火蚁对荔枝园无脊椎动物群落多样性及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2084-2099.
- [95] 黄俊, 许益鏊, 陆永跃, 等. 红火蚁入侵对玉米地蜘蛛类群多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1111-1116.
- [96] WANG L, WANG Z, ZENG L, et al. Red imported fire ant invasion reduced the populations of two banana insect pests in south China[J]. Sociobiology, 2016, 63(3): 889-893.
- [97] WU D, ZENG L, LU Y Y, et al. Effect of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) on flower-visiting behavior of insects on *Brassica napus* (Brassicales: Brassicaceae)[J]. Fla Entomol, 2016, 99(2): 166-171.
- [98] 王磊, 王正, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对香蕉园节肢动物群落的负面效应研究[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(4): 835-847.
- [99] 黄俊, 许益鏊, 梁广文, 等. 红火蚁对2种旱地作物种子萌发的影响[J]. 生物安全学报, 2014, 23(2): 88-92.
- [100] 黄俊, 许益鏊, 曾玲, 等. 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[J]. 环境昆虫学报, 2010, 32(1): 6-10.
- [101] HUANG J, XU Y J, ZENG L, et al. Changes to the spatial distribution of *Ageratum conyzoides* (Asterales: Asteraceae) due to red imported fire ants *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in China[J]. J Insect Behav, 2011, 24(4): 307-316.
- [102] 黄俊, 许益鏊, 陆永跃, 等. 红火蚁对蚁运植物种子影响的研究概况[J]. 生物安全学报, 2014, 23(2): 71-740.
- [103] 吴段. 红火蚁及其与蚜虫互作对昆虫访花和作物结实的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2014.
- [104] 吴段, 曾玲, 许益鏊. 红火蚁及其与蚜虫互作对绿豆植株上昆虫访花的影响[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(4): 715-719.
- [105] HUANG J, XU Y J, LU Y Y, et al. Effects of red imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) on the relationship between native ants and *Aphis craccivora* (Hemiptera: Aphididae) in mungbean fields[J]. Sociobiology, 2010, 55(2): 415-425.
- [106] HUANG J, XU Y J, LU Y Y, et al. Effects of the invasive ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) on *Menochilus sexmaculatus* (Coleoptera: Coccinellidae) as a predators of *Aphis craccivora* (Hemiptera: Aphididae) in laboratory conditions[J]. Sociobiology, 2011, 57(3): 565-574.
- [107] ZHOU A M, LU Y Y, ZENG L, et al. Does mutualism drive the invasion of two alien species? The case of *Solenopsis invicta* and *Phenacoccus solenopsis*[J]. PLoS One, 2012, 7(7): e41856.
- [108] ZHOU A M, ZENG L, LU Y Y, et al. Fire ants protect mealybugs against their natural enemies by utilizing the leaf shelter constructed by a leaf roller, *Sylepta derogata*[J]. PLoS One, 2012, 7(11): e49982.
- [109] ZHOU A M, LU Y Y, ZENG L, et al. Fire ant-hemipteran mutualisms: Comparison of ant preference for honeydew excreted by an invasive mealybug and a native aphid[J]. Sociobiology, 2012, 59(3): 795-804.
- [110] ZHOU A M, LU Y Y, XU Y J, et al. Effect of honeydew of *Phenacoccus solenopsis* on foliar foraging by *Solenopsis invicta*[J]. Sociobiology, 2012, 59(1): 71-80.
- [111] 程寿杰, 曾玲, 许益鏊. 红火蚁与扶桑绵粉蚧互惠关系对松粉蚧抑虱跳小蜂和美棘蓟马的影响[J]. 环境昆虫学报, 2013, 35(5): 555-559.
- [112] ZHOU A M, LU Y Y, ZENG L, et al. *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), defend *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) against its natural enemies[J]. Environ Entomol, 2013, 42(2): 247-252.
- [113] WU D, ZENG L, ZHOU A M, et al. Effects of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) tending on the probing behavior of *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae)[J]. Fla Entomol, 2013, 96: 1343-1349.
- [114] 周爱明, 梁广文, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对棉花粉蚧近距离扩散的促进作用[J]. 生物安全学报, 2014, 23(2): 93-96.
- [115] WU D, ZENG L, LU Y Y, et al. Effects of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) and its interaction with aphids on the seed productions of mungbean and rapeseed plants[J]. J Econ Entomol, 2014, 107(5): 1758-1764.

- [116] ZHOU A M, LIANG G W, LU Y Y, et al. Interspecific competition between the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren and ghost ant, *Tapinoma melanocephalum* Fabricius for honeydew resources produced by an invasive mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsiley[J]. *Arthropod-Plant Inte*, 2014, 8(5): 469-474.
- [117] ZHOU A M, WU D, LIANG G W, et al. Effects of tending by *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) on the sugar composition and concentration in the honeydew of an invasive mealybug, *Phenacoccus Solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae)[J]. *Ethology*, 2015, 121(5): 492-500.
- [118] CHENG S J, ZENG L, XU Y J. Mutualism between fire ants and mealybugs reduces lady beetle predation[J]. *J Econ Entomol*, 2015, 108: 1560-1569.
- [119] ZHOU A M, LIANG G W, ZENG L, et al. *Solenopsis invicta* Suppress native ant by excluding mutual exploitation from the invasive mealybug, *Phenacoccus solenopsis*[J]. *Pak J Zool*, 2017, 49(1): 133-141.
- [120] 席银宝, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对荔枝园土壤理化性质的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2010, 32(2): 145-151.
- [121] 黄俊, 陆永跃, 曾玲, 等. 不同放置方式的诱饵对红火蚁的诱集作用比较[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28(4): 23-25.
- [122] 陆永跃, 侯有明, 曾玲. 第三十二章红火蚁的监测技术与方法[M]//万方浩, 等. 主编: 生物入侵: 检测与监测篇. 北京: 科学出版社, 2011: 446-464.
- [123] LU Y Y, WANG L, XU Y J, et al. Correlation of the nest density and the number of workers in bait traps for fire ant (*Solenopsis invicta*) in southern China[J]. *Sociobiology*, 2012, 59(3): 1197-1204.
- [124] 陆永跃, 许益鏊, 曾玲, 等. 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[J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37(4): 790-794.
- [125] 吴伟斌, 洪添胜, 许益鏊, 等. 基于光谱技术的红火蚁蚁巢检测系统的研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 重庆: 中国农业工程学会, 2011.
- [126] 吴伟斌, 支磊, 洪添胜, 等. 利用光谱分析技术探测红火蚁蚁巢[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 175-182.
- [127] WU W B, HONG T S, ZENG L, et al. Detection of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) nests using spectral data[J]. *Fla Entomol*, 2014, 97: 967-971.
- [128] 黄俊, 曾玲, 陆永跃, 等. 多种杀虫剂对盆栽花卉上红火蚁的检疫处理效果[C]//成卓敏, 主编. 中国植物保护学会 2006 年学术年会“科技创新与绿色植保”. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006: 44-47.
- [129] 黄俊, 曾玲, 卢玉华, 等. 携带红火蚁的盆栽花卉和象草的检疫处理方法研究[J]. *植物检疫*, 2009, 23(3): 5-9.
- [130] 王磊, 李慎磊, 王琳, 等. 11 种杀虫剂对草皮中红火蚁的检疫除害效果[J]. *植物检疫*, 2011, 25(6): 13-16.
- [131] 周爱明, 陆永跃, 许益鏊, 等. 热水浸泡对红火蚁的致死效果研究[J]. *环境昆虫学报*, 2011, 33(3): 342-345.
- [132] 周爱明, 陆永跃, 许益鏊, 等. 溴甲烷对红火蚁的熏蒸效果研究[J]. *环境昆虫学报*, 2011, 33(1): 70-73.
- [133] 王磊, 李慎磊, 曾玲, 等. 草皮种植场防治红火蚁的药剂筛选[J]. *中国植保导刊*, 2012, 32(7): 56-57.
- [134] 李志强, 周琪琳, 张森泉, 等. 深圳居民对红火蚁的认知程度评估[J]. *植物检疫*, 2011, 25(5): 86-90.
- [135] 王超, 李慎磊, 陆永跃. 基于认知程度评估的红火蚁管理策略与方式探讨[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(10): 232-236.
- [136] 曾鑫年, 熊忠华, 郭景, 等. 多杀菌素对红火蚁的毒力及传导毒杀作用[J]. *华南农业大学学报*, 2006, 27(3): 26-29.
- [137] 黄田福, 熊忠华, 曾鑫年. 15 种杀虫剂对红火蚁工蚁的触杀活性研究[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28(4): 26-29.
- [138] 苗建忠, 马伏宁, 曾鑫年. 红火蚁对辛硫磷敏感性及其乙酰胆碱酯酶活性的研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(19): 200-202.
- [139] 鄢勤. 红火蚁幼虫对杀虫剂敏感性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.
- [140] 鄢勤, 曾鑫年, 苗建忠. 红火蚁幼虫的杀虫剂敏感性及代谢酶活性研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(18): 293-296.
- [141] 谭德龙, 陆永跃, 李鑫, 等. 高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪对红火蚁的室内毒力[J]. *生物安全学报*, 2014, 23(2): 121-125.
- [142] 潘达强, 曾鑫年, 鄢勤. 茚虫威在红火蚁工蚁间的横向接触传导效应[J]. *生物安全学报*, 2014, 23(2): 117-120.
- [143] 苗建忠. 红火蚁对杀虫剂敏感性的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2015.
- [144] 郭文举, 刘家莉, 崔儒坤, 等. 红火蚁不同品级个体的药剂敏感性研究[J]. *应用昆虫学报*, 2015, 52(6): 1392-1396.
- [145] WANG L, ZENG L, CHEN J. Impact of imidacloprid on new queens of imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae)[J]. *Sci Rep-UK*, 2015, 5: 17938.
- [146] WANG L, ZENG L, CHEN J. Sublethal effect of imidacloprid on *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) feeding, digging, and foraging behavior[J]. *Environ Entomol*, 2015, 44(6): 1544-1552.
- [147] PAN F X, LU Y Y, WANG L. Toxicity and sublethal effects of sulfoxaflo on the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2017, 139: 377-383.
- [148] 黄田福. 红火蚁触杀药剂及灌巢应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [149] 熊忠华. 红火蚁生殖发育及生殖控制的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [150] 黄俊. 红火蚁的化学防治与检疫技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.

- [151] 李惠陵. 防治红火蚁药剂筛选及防除技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [152] 郭景. 红火蚁觅食习性及其胃毒药剂应用技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [153] 潘凤香. 多种药剂对红火蚁的毒性测定及毒饵防效评价[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [154] 杜依芸. 4种吡咯类药剂对红火蚁的毒力[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [155] 张东举. 几种新型毒饵对红火蚁引诱及毒杀活性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [156] 朱均权, 赖沛茂, 熊忠华, 等. 多杀菌素药剂防治红火蚁田间药效试验初报[J]. *广东农业科学*, 2006, 33(8): 63-64.
- [157] 黄俊, 曾玲, 梁广文, 等. 红火蚁疫情灭除技术示范[J]. *中国植保导刊*, 2007, 27(8): 41-43.
- [158] 李惠陵, 吴仕豪, 李华, 等. 红火蚁防控药剂的田间药效试验评价[J]. *广东农业科学*, 2007, 34(10): 57-59.
- [159] 黄俊, 陆永跃, 梁广文, 等. 四种毒饵对红火蚁的田间防治效果评价[J]. *环境昆虫学报*, 2008, 30(2): 135-140.
- [160] 黄俊, 陆永跃, 许益鏊, 等. 0.045% 茚虫威饵剂对红火蚁的田间防治效果评价[J]. *植物保护*, 2009, 35(3): 145-149.
- [161] 宋侦东, 许益鏊, 陆永跃, 等. 化学防治对绿化带中红火蚁及本地蚂蚁的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6148-6155.
- [162] 李平东, 李志强, 张森泉, 等. 红火蚁防治中茚虫威饵剂使用剂量的确定[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(17): 88-92.
- [163] 黄俊, 陆永跃, 梁广文, 等. 不同剂量灭蚁威饵剂对红火蚁的田间防治效果评价[J]. *应用昆虫学报*, 2015, 52(6): 1397-1402.
- [164] 谭德龙, 李鑫, 曾玲, 等. 高效氯氟氰菊酯微囊悬浮剂与二阶段法对红火蚁的田间防治效果评价[J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37(6): 1226-1231.
- [165] 谭德龙, 曾玲, 许益鏊. 不同浓度茚虫威对红火蚁的防治效果[J]. *环境昆虫学报*, 2016, 38(6): 1256-1261.
- [166] 温凯, 李志强, 张森泉, 等. 生境类型影响了茚虫威饵剂对红火蚁的防治效果[J]. *环境昆虫学报*, 2017, 39(4): 854-861.
- [167] 陆永跃. 我国红火蚁疫情点根除体系的构建与应用[C]//中国植物保护学会青年工作委员会. 中国青年植保科技创新. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015: 244-247.
- [168] 陆永跃. 防控红火蚁[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2017.
- [169] 崔灿, 曾玲, 陆永跃, 等. 电场对红火蚁工蚁聚集的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40(4): 809-814.
- [170] 马伏宁, 曾鑫年, 潘达强. 多后型红火蚁工蚁和蚁后毒液生物碱成分的比较[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 57-61.
- [171] CHEN L, LU Y Y, HU Q B, et al. Similarity in venom alkaloid chemistry of alate queens of imported fire ants: Implication for hybridization between *Solenopsis richteri* and *S. invicta* in the Southern United States[J]. *Chem Biodivers*, 2012, 9(4): 702-713.
- [172] FOX E G P, XU M, WANG L, et al. Gas-chromatography and UV-spectroscopy of hymenoptera venoms obtained by trivial centrifugation[J]. *Data in Brief*, 2018, 18: 992-998.
- [173] FOX E G P, XU M, WANG L, et al. Speedy milking of fresh venom from aculeate hymenopterans[J]. *Toxicon*, 2018, 146: 120-123.
- [174] FOX E G P, WU X Q, WANG L, et al. Queen venom isosolenopsin delivers rapid incapacitation of fire ant competitors[J]. *Toxicon*, 2019, 158: 77-83.
- [175] GUAN D, LU Y Y, LIAO X L, et al. Electroantennogram and behavioral responses of the imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, to an alarm pheromone component and its analogs[J]. *J Agr Food Chem*, 2014, 62: 11924-11932.
- [176] HU L, BALUSU R R, ZHANG W Q, et al. Intra- and inter-specific variation in alarm pheromone produced by *Solenopsis* fire ants[J]. *B Entomol Res*, 2018, 108(5): 667-673.
- [177] XU M, LU Z K, LU Y Y, et al. Cuticular hydrocarbon chemistry, an important factor shaping the current distribution pattern of the imported fire ants in the USA[J]. *J Insect Physiol*, 2018, 110: 34-43.
- [178] 李群臣. 三种火蚁表皮碳氢化合物组成分析及其应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [179] CHENG D F, LU Y Y, ZENG L, et al. Si-CSP9 regulates the integument and moulting process of larvae in the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*[J]. *Sci Rep-UK*, 2015, 5: 9245.
- [180] QI Y X, ZENG T, WANG L, et al. Biogenic amine signaling systems in the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*: Possible contributors to worker division of labor[J]. *Gen Comp Endocr*, 2018, 262: 59-70.
- [181] WANG L, JIANG J J, XU Y J, et al. Occurrence of three intracellular symbionts (*Wolbachia*, *Arsenophonus*, *Cardinium*) among ants in southern China[J]. *J Asia-Pac Entomol*, 2016, 19(4): 981-988.
- [182] 张晓宇, 赵晓峰, 许益鏊, 等. 红火蚁共生链霉菌 *Streptomyces* sp. DF-5 的分离培养及其发酵液对植物病原真菌的抑制活性研究[J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40(4): 917-924.
- [183] WANG L, ELLIOTT R B, JIN X, et al. Antimicrobial properties of nest volatiles in red imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae)[J]. *Naturwissenschaften*, 2015, 102: 66.
- [184] 王磊, 曾玲, 陆永跃. 社会性昆虫的社会免疫[C]//中国植物保护学会青年工作委员会编: 中国青年植保科技创新. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015: 63-65.
- [185] 王磊, 许益鏊, 陆永跃, 等. 不同土壤类型和含水量下

- 金龟子绿僵菌对红火蚁的致病力[J]. *生物安全学报*, 2014, 23(2): 107-111.
- [186] 王磊, 陆永跃, 许益镬, 等. 绿僵菌与 8 种红火蚁防控常用农药相容性[J]. *中国生物防治学报*, 2016, 32(2): 172-179.
- [187] 陆永跃, PORTER S D, 曾玲. 寄生红火蚁的蚤蝇类群野外监测新技术[J]. *环境昆虫学报*, 2011, 33(1): 91-95.
- [188] WANG L, CHEN J. Fatty amines from little black ants, *Monomorium minimum*, and their biological activities against red imported fire ants, *Solenopsis invicta*[J]. *J Chem Ecol*, 2015, 41(8): 708-715.
- [189] 陈思琪, 张小强, 陆永跃, 等. 亚致死浓度赤藓糖醇对红火蚁工蚁觅食和弃尸行为的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40(4): 803-808.
- [190] CHEN S Q, CHEN H Y, XU Y J. Safe chemical repellents to prevent the spread of invasive ants[J]. *Pest Manag Sci*, 2019, 75(3): 821-827.
- [191] 于鑫, 王磊, 曾鑫年, 等. 红火蚁防治区农药残留动态规律研究[J]. *应用昆虫学报*, 2015, 52(6): 1361-1367.
- [192] 于鑫, 王磊, 梁广文, 等. 红火蚁防控药剂使用后对草坪节肢动物群落的影响[J]. *应用昆虫学报*, 2015, 52(6): 1353-1360.

【责任编辑 霍 欢】



陆永跃, 教授。农业部重点实验室和广东省工程技术研究中心副主任, 广东省现代农业产业技术研发中心主任, 广东省现代农业产业技术体系创新团队首席专家, 中国昆虫学会理事和 2 个专业委员会委员或副主任, 中国植物保护学会 3 个专业委员会委员或副主任, 农业部种植业专家指导组专家, 广东省 7 个学会和专家委员会(专家组)理事或专家, 《华南农业大学学报》和《昆虫学报》等 6 个期刊编委或副主编, 多个省区科技咨询专家。致力于昆虫生态学、害虫治理和入侵生物学教育与研究工作。承担了国家、省部科技项目 40 多个, 对多个种(类)农林和外来入侵害虫防控理论与技术开展了深入研究。完成科技成果 15 项, 申请和授权专利、软件著作权等 36 件, 报批和颁布国家、行业、地方标准 17 个, 研发科技产品 20 多个; 发表论文、著作 420 多篇(部、章), 其中 SCI/EI 源 72 篇。参加或者主持完成的科技成果获国家科学技术进步奖二等奖 1 项、省部级科学技术奖/技术推广应用奖一等奖 7 项、二等奖 5 项、三等奖 4 项。获得全国优秀科技工作者、广东省丁颖科技奖等多个荣誉称号。