



王磊, 许益鏊, 曾玲, 梁钰铃, 李潘潘, 吴娇, 陆永跃. 发现红火蚁入侵中国 19 年: 科技支撑体系构建 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1341 - 1350.

## 发现红火蚁入侵中国 19 年: 科技支撑体系构建

王磊, 许益鏊, 曾玲, 梁钰铃, 李潘潘, 吴娇, 陆永跃\*

(华南农业大学红火蚁研究中心, 广州 510642)

**摘要:** 2003 年 9 月中国台湾、2004 年 9 月大陆相继被发现国际重大危险性外来入侵害虫红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 发生为害。为有效防控该蚁的入侵、扩张与成灾, 在过去的 19 年里我国各级政府部门、科研院所、企事业单位、社会组织等均投入了大量人力物力, 组织、开展了卓有成效的科技研发与技术推广应用工作。基于广泛收集分析已有资料, 本文总结了自发现红火蚁入侵危害以来我国科技研发/支撑机构/组织建立、科技人才培养、科研课题立项、研究领域及进展、科技成果产出、科学技术普及等总体情况, 认为所构建的科技支撑体系在我国阻截与控制红火蚁工作中发挥了重要作用。

**关键词:** 红火蚁; 入侵; 扩张; 防控; 科技支撑体系

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 06-1341-10

### Nineteen years for finding the red imported fire ant in China: Constructing a supporting system of science and technology

WANG Lei, XU Yi-Juan, ZENG Ling, LIANG Yu-Ling, LI Pan-Pan, WU Jiao, LU Yong-Yue\* (Red Imported Fire Ant Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong Province, China)

**Abstract:** The red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, was firstly found in Chinese Taiwan in 2003 and Mainland in 2004, respectively. In order to effectively manage the invasion, expansion and disaster of the fire ant, the Chinese government at all levels, research institutions, enterprises and social organizations have made great efforts to organize and implement fruitful scientific and technological researches, and promote and apply the technology in the past 19 years. This paper reviewed the establishment of the research organizations (teams), cultivation of the talents, approval of the projects, research fields and their progress, output of the achievements, and popularization of the knowledge on the fire ant in China since 2003. The paper concludes that established supporting system of science and technology has played an important role in intercepting and controlling the fire ants in China.

**Key words:** *Solenopsis invicta* Buren; invasion; expansion; supporting system of science and technology

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 作为全球 100 种最具危险性的外来入侵生物之一, 因其具生殖潜

能强、种群数量大、适应范围广、竞争力强、暴发成灾风险高等生物学优势, 且对新入侵区农林

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1000500, 2021YFC2600404); 广东省农业产业技术体系创新团队项目 (2022KJ134); 广东省乡村振兴战略专项资金省级项目 (粤财农 [2022] 92 号); 深圳市农业科技促进中心项目 (20220900044zbzjbc)

作者简介: 王磊, 博士, 研究方向为昆虫种群生态学、防控理论与技术, E-mail: leiwang@scau.edu.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence: 陆永跃, 教授, 研究方向为昆虫生态学、害虫治理与入侵生物学, E-mail: luyongyue@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-07-05; 接受日期 Accepted: 2022-11-02

业生产、人畜生命健康、公共安全、生物多样性等均可能造成严重威胁,已成为受到全球高度重视的危险性外来入侵物种之一(Tschinkel, 2006; Xu *et al.*, 2022)。2003年9月,我国台湾在台北桃园机场首次发现该虫入侵,随后调查发现桃园、嘉义等地均有发生,面积约为4 000 hm<sup>2</sup>;目前已入侵11个县区,发生面积超过6万hm<sup>2</sup>(<http://www.fireant.tw>)。2004年9月,我国大陆在广东吴川发现该虫,2005年6月普查结果显示广东、广西、湖南等3个省(区)20个县(区)发现了红火蚁为害,香港和澳门亦发现了该蚁入侵(曾玲等, 2005; 陆永跃等, 2008)。据推测1990年代中期红火蚁可能已经入侵我国大陆(陆永跃和曾玲, 2015)。截至2022年7月,红火蚁已经传播扩张至中国大陆12个省区579个县区(农业农村部, 2022),且其扩散蔓延仍然处于快速阶段,预测这种快速扩张可能还要持续15年以上(王磊等, 2022)。

自2003年在台湾、2004年在大陆发现红火蚁发生危害后,政府部门、科学界、相关机构/组织等均高度重视与红火蚁入侵疫情防控相关的科技研发工作,投入了大量人力物力,坚持开展科技理论与技术研发,并取得了显著进展,基于该蚁入侵生物生态学理论研究构建了相应的监测检测、检疫除害、应急灭除、根除与控害等管理及技术体系(陆永跃等, 2019; Xu *et al.*, 2022)。关于中国红火蚁入侵发现过程、发生危害历史与现状、入侵生物学及防控研究、过敏反应情况、入侵对生物多样性的影响、管理对策技术及防控实施组织等均已有了相关总结(Wang *et al.*, 2013; 陆永跃和曾玲, 2015; 陆永跃等, 2019; Xu *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2022)。本文从科技研究/支撑机构(平台、组织)组建、科技人才培养、科研项目支持、研究领域进展、科技成果产出、科学技术普及等6个方面,回顾和总结了2003年9月-2022年4月近19年来我国为应对和防控红火蚁而建立的相关科技支撑体系情况,并对进一步完善该体系作了简要讨论,以期提升我国对红火蚁等重大外来入侵害虫的高效、安全治理能力提供参考。

## 1 科技组织建设

关于我国红火蚁科技研究与管理相关的组织、

机构(平台),陆永跃和曾玲(2015)已经对2004年-2015年情况作了较为详细的梳理。2015年至今,相关组织或者机构主要发生了以下变化。

2020年6月,广东省农业农村厅组建了新一届红火蚁防控技术指导专家组,并实施全省由专家分区分组负责开展监测、防控技术指导的方式;在此基础上,2021年指导、组织全省各地市组建了以省级专家为顾问、市县(区)级专家为核心的地市级红火蚁防控技术指导专家组,形成了省市县(区)三级指导专家体系。2020年9月,云南省林业和草原局成立了红火蚁防控工作专家组。2021年6月,四川省重大疫情防控指挥部制定并颁布了省红火蚁防控联席会议制度,成立了红火蚁防控省级专家组。2021年8月,广东省农业科学院植物保护研究所成立了红火蚁防控科技创新中心,成为了我国大陆第二个专门开展红火蚁科技研究与技术示范应用的专业机构。

## 2 科技人才培养

为了更好地为红火蚁防控提供人才支持,2004年至今我国大陆和台湾共计有24所大学和科研院所开展了以红火蚁为主要研究对象的博士后、博士、硕士研究生培养工作。2004年-2021年累计有6名博士后出站,30名博士研究生、144名硕士研究生毕业。

大陆共有17所高校、科研院所开展了专门人才的培养工作,累计6名博士后出站、24名博士研究生和106名硕士研究生毕业。培养红火蚁研究专门人才最多的是华南农业大学,出站博士后2名,19名博士研究生、77名硕士研究生获得了学位,占大陆总数量72.1%;培养人才数量由多到少的其他单位依次是南京农业大学(1名博士、5名硕士)、福建农林大学(6名硕士)、中国科学院动物研究所(4名博士后)、华中农业大学(1名博士、3名硕士)、中国农业科学院(1名博士、2名硕士)、广西师范大学、河北大学、湖南农业大学、西南大学等11所院校分别培养了1~2名博士或者硕士研究生。

台湾共有7所高校培养了红火蚁研究方面的专门人才,累计44名研究生(博士生6名、硕士生38名)获得了学位;以台湾大学最多,毕业的博士生、硕士生数量分别是5名、24名;其次是

中兴大学, 培养了 5 名硕士生; 台湾师范大学、台北市立教育大学分别毕业了 3 名硕士生, 中央大学毕业了 1 名博士生、1 名硕士生, 屏东科技大学、彰化师范大学分别培养了 1 名硕士。

如果将监测、防控与管理等行业从业人员职业能力提升亦纳入科技人才培养范畴的话, 则我国培养的红火蚁方面相关人才数量是比较多的。初步统计, 举办的全国性红火蚁知识培训班在 20 场以上, 举办省级区域层次培训班 80 场次以上、县区级层次培训班 3 000 场次以上, 其他各类社会组织、企业等举办的培训班 1 600 场次以上, 接受专业培训人数累计 27 万人次以上, 其中各级行政管理部门公务人员在 8 000 人次以上。

### 3 科技课题立项

从以农业农村部为代表的中央部门到各入侵危害省区均高度重视与红火蚁疫情防控相关的科技研发工作, 已经投入了大量资金开展相关研究。经文献检索发现, 2004 年 - 2022 年中国大陆共立项了与红火蚁相关的科研课题 229 个。按照项目来源可分为国家部委、省级政府、省级部门及地市、县区及其他等四类。其中, 国家部委共立项课题 70 个, 以农业农村部及所属机构立项最多, 为 20 多个, 占总项目数 28.6%; 国家自然科学基金委员会立项 17 个, 占总项目数 24.3%; 省级政府共立项 88 个, 广东、广西、福建、云南等 11 个省区均有立项, 其中广东省立项 59 个, 占总项目数 67.0%; 省级其他部门及地市立项 47 个, 其中广东省农业农村厅及相关地市立项 36 个, 占总项目数 76.6%; 县区及其他机构共立项 22 个, 其中广东相关县区/其他机构立项 16 个, 占 72.7%。另外, 与美国农业部农业科学研究所 (USDA - ARS) 等开展的国际合作项目 2 个。由以上统计结果可知, 我国红火蚁相关科研项目立项以国家部委和省级政府为主, 合计为 158 个, 占总项目数 69.0%; 广东省立项的红火蚁相关科研项目数量最多, 为 113 个, 占全国的 49.3%。

### 4 研究领域进展

根据陆永跃等 (2019) 的分类体系, 结合 Wang *et al.* (2013, 2019, 2020)、Liu *et al.* (2021)、Xu *et al.* (2022) 的综述, 对我国红火

蚁研究领域及进展情况作简要概述。

#### 4.1 传播扩散

基于遗传多样性研究的证据显示我国红火蚁可能是多点多途径多次侵入; 对全国口岸截获信息分析、明确了携带红火蚁入境的物品有 17 类, 以废旧物品、原木等为主; 国内调查结果显示 27 种阳生花卉、苗木具有携带该蚁传播的风险, 草皮也是主要传播源头之一, 绝大部分新发地区入侵源头均与从疫区输入以上 2 类物品有关; 当前, 红火蚁分布呈现出明显的特征, 即局部地区较为普遍、大部分地区块 (点) 状、少数地区零星, 并且以中短距离在邻近区间渐进式扩散为主, 以长距离在省区之间跳跃式扩张为辅, 随着入侵区域数量不断增多, 中短距离扩散比例将越来越高。进一步研究、阐明了华南地区红火蚁局部区域扩散规律及长距离扩散速度等 (许益鏖等, 2006; 陆永跃等, 2008; 陆永跃, 2014; 王磊等, 2022); 发现该蚁自然迁移、扩散速度不大 (187.9 m/年), 远距离扩散传播速度是 48 ~ 80 km/年。对红火蚁入侵扩张趋势的长期预测显示, 我国红火蚁快速扩散传播从 2009 年 - 2010 年开始, 整个快速扩张期可能持续 26 ~ 28 年, 预计在 2041 年 - 2043 年及以后进入缓慢增长期 (王磊等, 2022)。鉴于我国红火蚁远距离传播主要依赖于带土苗木、花卉、草皮等调运, 因此要阻截红火蚁侵入务必要做好带土苗木、花卉、草皮等检疫工作 (黄俊等, 2007; 胡希红等, 2011; 李慎磊等, 2014)。明确了人为干扰、覆盖、阴蔽度、药剂等外界因素对红火蚁自然扩散的促进作用 (王磊等, 2010; 王磊等, 2012)。

#### 4.2 入侵生物学

关于红火蚁入侵生物学研究内容较为丰富, 重点研究了实验室条件下及野外不同区域多样化生境中该蚁生物学特征, 系统研究揭示了红火蚁入侵种群行为特征、竞争优势与规律, 以及不同生境、温度等与觅食的关系、饵料对觅食发现时间影响等 (Lu *et al.*, 2012ab; 陆永跃等, 2019)。阐明了不同季节不同生境中红火蚁防御区域的最大防卫域 (1.07 ~ 1.72 m<sup>2</sup>)、防卫速度 (王磊, 2010)。较为全面地阐明中国南方红火蚁新入侵种群重要生物学特性, 明确生境干扰程度与红火蚁入侵程度呈正相关; 红火蚁活动时间以夏秋最为猖獗, 温度是影响种群变动的最主要因子 (李宁东, 2006; 席银宝, 2007; 许益鏖等, 2007; 许益

鏊, 2007; 李宁东等, 2008; 郝东川, 2009; 席银宝等, 2010a; 周爱明等, 2011)。该蚁对低温、干旱等还有很好的适应性和调节能力 (Xu *et al.*, 2008; 许益鏊等, 2009; Xu *et al.*, 2009)。红火蚁群体存在社会性免疫现象, 该蚁对病原菌孢子不存在识别、清除行为, 但可产生抑制病原真菌孢子萌发和菌丝生长的挥发性物质, 达到降低有害微生物侵染的风险。研究发现新交配的蚁后可通过识别土壤中可抑制昆虫病原生长的细菌所产生的气味来选择昆虫病原含量相对较低的地点筑巢 (Huang *et al.*, 2020)。

#### 4.3 入侵化学生态学

鉴定明确了红火蚁毒液生物碱及不同品级的生物碱含量差异等, 建立了基于主成分分析和聚类分析的毒腺生物碱区分红火蚁不同地理种群的方法 (赖丽娟, 2008; 官迪等, 2013; 刘先福等, 2015; 张惠菊等, 2018)。发现红火蚁毒液在蚁后建巢中发挥重要的防御作用 (Fox *et al.*, 2019)。首次揭示了红火蚁可通过示踪信息素促进共生蚜虫的种群增长, 加强了蚁蚜共生关系 (Xu *et al.*, 2021)。

#### 4.4 遗传与进化

基于较广泛采样基础上, 明确了中国红火蚁的社会型为多后型与单后型共存, 主要为多蚁后型; 揭示了红火蚁从南美、美国直接或者转经香港、台湾等地多点、多次、多途径入侵中国大陆 (何晓芳等, 2006; 邵敬国等, 2008; 许嘉增, 2008; 黄奕雯, 2010)。

#### 4.5 入侵的生态影响

红火蚁通过干扰、资源掠夺竞争方式取代其他蚂蚁成为主要或者单一优势种 (吴碧球等, 2009; 吴碧球等, 2010; Lu *et al.*, 2012c; Wu *et al.*, 2014)。红火蚁对我国入侵地区的物种关系、群落结构、控害功能、农作物产量、传粉功能、土壤环境等造成了负面效应 (黄俊等, 2010; 张静淑, 2010; 席银宝等, 2010b; 席银宝等, 2010c; Zhou *et al.*, 2013; 吴段, 2014; Wu *et al.*, 2016)。

#### 4.6 检测与监测

研究设计了研究饲养专用新装置, 创制了多种诱集新器具、新方法, 筛选出具有良好效果的多种诱集饵料和放置方式, 提出了监测、调查方式、方法 (包士哲, 2006; 黄俊等, 2007; 陆永跃等, 2011)。构建了多蚁后型发生程度分级标准体系,

并形成国家标准; 研发了近红外反射蚁巢检测系统 (Wu *et al.*, 2014)、饵剂撒施工具 (邹韦, 2005)、疫情信息管理系统, 建立“云采集”、“云监测”“随手拍”等疫情监测管理小程序, 初步实现疫情数字化监测预警和实时管理。

#### 4.7 检疫除害

提出了应检高风险植物名单及防止带土植物传播红火蚁的检疫策略与措施 (黄俊, 2007)。研制了高效实用的检测方法, 筛选出用于花卉、苗木、草场、原木、废纸的化学除害技术、热处理技术、熏蒸除害技术, 可达到高效灭除 (王磊等, 2011; 周爱明等, 2011a; 周爱明等 2011b; 王磊等, 2012)。

#### 4.8 化学防治

筛选出具有良好毒力和防控效果的药剂, 构建了评价药剂防治效果的科学指标, 阐明了部分药剂的作用机制 (郭景, 2007; 黄田福等, 2007; 鄢勤, 2011)。研制出多个高效饵剂和粉剂, 形成了配套使用技术, 较为广泛地应用于防治, 取得了良好防效 (卡雷纳, 2009; 潘凤香, 2017; 杜依芸, 2018; 张东举, 2019)。

#### 4.9 生物防治

评估了病原线虫、绿僵菌 *Metarhizium*、白僵菌 *Beauveria*、淡紫拟青霉菌 *Paecilomyces lilacinus*、病毒等生防因子对红火蚁活性及防效 (许弘玮, 2009; 刘晓燕等, 2010; Zhang *et al.*, 2010; 吕利华等, 2011; Kafle *et al.*, 2011; 曾钰芳, 2012; 王磊等, 2018)。为了提高白僵菌的野外防效, Kafle 等 (2011) 发现将白僵菌 *Beauveria bassiana* F256 与诱饵载体混合配制成的毒饵, 其防治效果不亚于化学药剂毒饵。Li 等 (2016) 利用自制的蚁巢喷粉装置提高了白僵菌对红火蚁的防治效果。

#### 4.10 防控策略

形成了由联防联控、统防统治、群防群治组成的管理机制和管理原则; 编订了红火蚁疫情管理全过程规范化程序, 为各地管理工作提供参考 (陆永跃, 2017); 建立了全面防治和重点防治相结合的新二阶段防治法; 提出了“监测-防治-补治-评估”循环工作程序及饵剂-粉剂多组合使用方式; 构建了全领域、全温区、多目标、多手段、多方式、多要领等多种疫情管理模式和专业化社会化标准化服务体系, 并较为广泛地应用于防治实践中。

## 5 科技成果产出

### 5.1 论文与著作

据不完全统计, 2004 年 - 2022 年 4 月我国大陆共发表红火蚁相关中英文学术论文 870 多篇, 其中 SCI 源期刊论文近 130 篇; 除去发现红火蚁当年 (2004 年) 和 2022 年, 平均每年约发表 50 篇; 近三年论文发表数量呈上升趋势, 2021 年累计达 72 篇。在相关机构中华南农业大学发表论文数量最多, 为 280 多篇, 占我国大陆总论文数 32.2%; 其中 SCI 源论文 100 多篇, 占总 SCI 源论文数 76.9%。同期, 我国台湾共计发表红火蚁研究论文近百篇, 其中 SCI 源期刊论文 60 多篇, 以台湾大学、中央研究院生物多样性研究中心、中兴大学等机构为主。

出版了红火蚁研究相关著作 6 部, 分别是《红火蚁监测与防治》、《红火蚁》、《中国红火蚁防控纪实》、《红色小恶魔 - 红火蚁的入侵: 3D》、《防控红火蚁》、《红火蚁防控手册》(曾玲等, 2005; 王福祥和张润志, 2005; 张润志, 2007; 许益鏊等, 2016; 陆永跃, 2017; 冯晓东等, 2020)。以红火蚁研究作为章节出版的相关著作有 11 部, 包括《全国植物检疫性有害生物手册》、《生物入侵: 生物防治篇》、《中国生物入侵研究》、《Research on Biological Invasions In China》、《生物入侵: 预警篇》、《生物入侵: 检测与监测篇》、《生物入侵 - 问题与对策》、《入侵生物学》、《全国农业植物检疫性有害生物风险分析手册 (昆虫篇)》、《植物保护案例分析》、《Biological Invasions and Its Management in China》(万方浩等, 2008; 万方浩等, 2009; Wan *et al.*, 2009; 万方浩等, 2010; 万方浩等, 2011; 谢联辉等, 2011; 万方浩等, 2015; 胡琼波等, 2015; Wan *et al.*, 2017)。在以上著作中华南农业大学主编或者联合主编了 4 部, 负责编写了 8 部著作的红火蚁相关章节。

### 5.2 专利

我国大陆申报红火蚁相关发明专利累计 187 件, 被驳回或撤回 71 件, 获得授权并有效 47 件, 丧失权利 15 件, 处于实质审查阶段 54 件, 其内容主要包括监测、检测、生物防治菌株、驱避剂、防控药剂及其制剂制备等多个方面; 申报实用新型专利 107 件, 获得授权并有效 93 件, 内容主要包括红火蚁诱捕装置、灭除设备、施药设

备等; 申报外观专利 5 件, 主要是防治药剂外包装等, 均获得授权; 申报国际专利 3 项, 涉及红火蚁生物防治天敌及其释放方法。

台湾累计申报了红火蚁相关专利 12 件, 其内容除了 1 件是关于火蚁侦测方法的、1 件是关于火蚁相关抗体及噬菌体基因片段及其应用的, 其他专利均是关于防治方法及装备的, 包括电击灭除法、高压脉冲热气流法、蒙脱土黏固法、诱饵使用、诱灭装置、饵剂撒布机等。

### 5.3 标准

已制订颁布了红火蚁相关技术标准 10 项, 其中国家标准 4 项、农业行业标准 2 项、地方标准 3 项、团体标准 1 项, 内容包括红火蚁种类鉴定、检疫除害、疫情监测调查、药剂防治效果试验、化学防控技术、专业化防控组织实施、防控效果评价、专业化防控服务组织等级评定等。

### 5.4 农药

目前我国有 36 家企业登记了 60 种红火蚁专用防控药剂, 其中毒饵剂 49 种、粉剂 8 种、颗粒剂 1 种、可湿性粉剂 1 种、乳油 1 种 (<http://www.icama.org.cn/hysj/index.jhtml>)。存在的主要问题是药剂有效成分较为单一。毒饵剂有效成分主要是茚虫威、氟虫胺、氟蚁脍、多杀霉素等, 以茚虫威最多 (22 种), 其次是氟蚁脍 (16 种), 而含有属于禁限用农药氟虫脒的毒饵剂也有 13 种。触杀性粉剂有效成分以高效氯氟菊酯为主, 8 种粉剂中 6 种含有这种成分。目前登记的药剂中 50% 以上没有投入生产或没有投入市场。单次使用防效超过 80% 的药剂可能仅占已登记上市销售药剂 20% 左右。部分毒饵剂防效不佳的主要原因是载体引诱力不高、制剂理化性状差、有效成分含量过高或者作用速度过快等。

### 5.5 设备

已经研发、生产了红火蚁野外监测调查快速计数装置、监测调查装置、婚飞收集装置, 完成了人工播撒器、电动播撒器、车载式播撒机、无人机播撒器、压力喷粉机等研发、评估和配套使用技术研究, 并应用于监测、防治实践中。

### 5.6 成果

全国 30 家单位共组织鉴定了相关科技成果 47 项。其中以红火蚁为主要研究内容的共 32 项, 其研究集中于该蚁监测技术、疫情普查、发生危害规律、检疫对策与技术、防控技术、防治药剂等几个方面; 以红火蚁研究为部分内容或者仅少

量涉及的成果有 15 项, 主要是在外来入侵生物入侵规律、调查、预警、检疫、防控、相关蚂蚁类群分类、鉴定等研究中包含了一些红火蚁相关内容。

## 6 科学技术普及

让大众掌握红火蚁基本知识和防控基本技能是开展群防群控的基础。红火蚁入侵区域各级政府部门、一些企事业单位和社会组织等均开展了相关培训、宣传工作, 尤其是 2021 年以来, 使得红火蚁的社会认知度得到不断提升, 影响面逐渐广泛。除了举办培训班、出版科普书籍、印发科普手册等常规形式外, 拍摄电视/电影、视频、开展直播等, 结合融媒体平台传播, 成为了普及红火蚁知识的有力工具。仅在 2021 年 3 月 - 5 月, 华南农业大学红火蚁研究中心有关专家就接受了中央电视台农业频道、新华社(新华网)、中国新闻周刊、农民日报、中国科学报(科学网)等 30 多家媒体采访, 普及了红火蚁疫情发生扩张现状与趋势、入侵危害类型与程度、应对和防控机制、策略与技术措施、伤害避免和应急处理等知识, 受众数量超过千万人次。这对于我国传播红火蚁科学防控知识、完善防控机制、提升防控能力和水平等均起到了显著促进作用。

## 7 展望

发现红火蚁入侵发生后, 无论是我国大陆还是台湾均在不断研讨、建立相应的管理组织、政策、制度、标准与程序, 制订了防控规划和方案, 持续支持开展科技研究, 基本形成了相应的管理体系和科技创新(支撑)体系(陆永跃等, 2008; Liu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2022)。但是, 在过去 19 年的全国红火蚁防控实践中, 限于众多的实际困难, 无论是管理所产生的实效还是科技支撑所发挥的作用均存在一些不足。欲达到有效地抑制红火蚁快速蔓延扩张、高效地控制其发生危害, 更广泛和更深入的研究、更高效的阻截防控技术与产品、更强的管理能力和更有效的管理机制, 与实际入侵发生分布区域规模相匹配的人力物力投入等是必不可少的。在建设和健全相关科技支撑体系方面, 集中力量研究解决红火蚁入侵关键科技问题、研发高效安全技术与产品、提升管理

部门尤其是基层人员科学管理和科技应用能力等应该成为未来的重要任务。

## 参考文献 (References)

- Bao SZ. Improvement of Investigation Method of *Solenopsis invicta* Buren [D]. Taipei: Taiwan University, 2006. [包士哲. 入侵红火蚁调查方法之改良 [D]. 台北: 台湾大学, 2006]
- Carena. Based on the Foraging Habits of Invasive Red Imported Fire Ants (Hymenoptera: Formicidae), Water Resistant Baits were Developed [D]. Taipei: Taiwan University, 2009. [卡雷纳. 以入侵红火蚁(膜翅目: 蚁科)觅食习性为基础研发其抗水性防治饵剂 [D]. 台北: 台湾大学, 2009]
- Du YY. Toxicity of Four Pyrrole Agents to Red Imported Fire Ant [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018. [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]
- Feng XD, Sun ZY, Lu YY. Red Imported Fire Ant Control Manual [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020. [冯晓东, 孙阳昭, 陆永跃. 红火蚁防控手册 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2020]
- Fox EG, Wu XQ, Wang L, *et al.* Queen venom isosolenopsin A delivers rapid incapacitation of fire ant competitors [J]. *Toxicon*, 2019, 158: 77 - 83.
- Guan D, Liao XL, Chen L. Comparative analysis of alkaloids in the toxic glands of red imported fire ant from China and the United States [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2013, 56 (4): 365 - 371. [官迪, 廖晓兰, 陈立. 中国和美国红火蚁毒腺生物碱组分的比较分析 [J]. 昆虫学报, 2013, 56 (4): 365 - 371]
- Guo J. Study on Foraging Habits and Application Technology of Stomach Poisons of Red Imported Fire Ant [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2007. [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]
- Hao DC. Effects of Rainfall and Soil Water Content on Red Imported Fire Ant Population [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2007. [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]
- He XF, Lu YY, Zhang WQ, *et al.* Three haplotypes of imported red imported fire ant from China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2006, 49 (6): 1046 - 1049. [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]
- Hu QB, Zhang JL, Jiang JX. Case Analysis of Plant Protection [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 105 - 116. [胡琼波, 张金林, 蒋军喜. 植物保护案例分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 105 - 116]
- Hu XH, Zhou AM, Zeng L. Investigation and analysis of intercepted pests in imported cargo at Nansha port of Guangdong Province [J]. *Plant Quarantine*, 2011, 25 (5): 96 - 98. [胡希红, 周爱明, 曾玲. 广东南沙口岸进口货物截获有害生物调查分析 [J]. 植物检疫, 2011, 25 (5): 96 - 98]
- Huang J, Lu YY, Zeng L, *et al.* Comparison of attracting effects of

- different bait placement methods on red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2007, 28 (4): 23–25. [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]
- Huang J, Xu YJ, Zeng L, et al. Selective feeding of seeds of eight plant species by red imported fire ant and their effects on seed germination [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010, 32 (1): 6–10. [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]
- Huang J, Zeng L, Lu YY. Risk investigation of red imported fire ant spread by horticultural plants with soil [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2007, 44 (3): 375–378. [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]
- Huang J. Study on Chemical Control and Quarantine Technology of Red Imported Fire Ant [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2007. [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]
- Huang TF, Xiong ZH, Zeng XN. Study on the insecticidal activity of 15 insecticides against red imported fire ant worker [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2007, 28 (4): 26–29. [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]
- Huang YW. Genetic Structure of Red Imported Fire Ant Population in China Based on Microsatellite and COI [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2010. [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]
- Kafle L, Wu WJ, Kao SS, et al. Efficacy of *Beauveria bassiana* against the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), in Taiwan [J]. *Pest Management Science*, 2011, 67 (11): 1434–1438.
- Lai LJ. Chemical Ecology and Toxicology of Alkaloids of Invasive Red Imported Fire Ants (*Solenopsis invicta*) in Taiwan and Tropical Red Imported Fire Ants (*Solenopsis invicta*) [D]. Taipei: National Taiwan University, 2008. [赖丽娟. 台湾入侵红火蚁与热带红火蚁毒液生物碱的化学生态与杀虫毒理之研究 [D]. 台北: 台湾大学, 2008]
- Li J, Guo Q, Lin MF, et al. Evaluation of a new entomopathogenic strain of *Beauveria bassiana* and a new field delivery method against *Solenopsis invicta* [J/OL]. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0158325. DOI: 10.1371/journal.pone.0158325.
- Li ND, Zeng L, Liang GW, et al. Growth and decline of red imported fire ant in Wuchuan, Guangdong Province [J]. *Entomology Knowledge*, 2008, 45 (1): 54–57. [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]
- Li ND. Population Dynamics of Red Imported Fire Ants in Newly Invaded Area [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. [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]
- Li SL, Zeng L, Xu YJ, et al. Investigation on the occurrence and damage degree of red imported fire ant in turf plantation and urban lawn in Guangdong Province [J]. *Journal of Biosafety*, 2014, 23 (2): 103–106. [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]
- Liu HK, Lin CC, Huang LH, et al. Eradication and control strategies for red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) in Taiwan [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (10): 3951.
- Liu XF, Chen L, Li JK. Dynamic analysis of alkaloid content in the toxic glands of red imported fire ants reared indoors [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58 (1): 22–27. [刘先福, 陈立, 李俊凯. 室内饲养的红火蚁工蚁毒腺生物碱含量动态分析 [J]. 昆虫学报, 2015, 58 (1): 22–27]
- Liu XY, Lv LH, He YR. Isolation, identification and pathogenicity of naturally parasitic red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) pathogenic fungi [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2010, 26 (3): 373–377. [刘晓燕, 吕利华, 何余容. 自然寄生红火蚁病原真菌的分离、鉴定及其对红火蚁的致病力 [J]. 中国生物防治, 2010, 26 (3): 373–377]
- Liu YS, Huang SA, Lin IL, et al. Establishment and social impacts of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in Taiwan [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (10): 5055.
- Lu YY, Hou YM, Zeng L. Monitoring techniques and methods of red imported fire ants. In: Wan FH, et al. editor. *Biological Invasions: Detection and Monitoring* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 446–464. [陆永跃, 侯有明, 曾玲. 红火蚁的监测技术与方法. 万方浩, 等, 主编. 生物入侵: 检测与监测篇 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 446–464]
- Lu YY, Liang GW, Zeng L. Study on the local and long-distance dispersal of red imported fire ant in South China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2008, 41 (4): 1053–1063. [陆永跃, 梁广文, 曾玲. 华南地区红火蚁局部和长距离扩散规律研究 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (4): 1053–1063]
- Lu YY, 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*, 2012b, 59 (2): 573–583.
- Lu YY, Wu BQ, Xu YJ, 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.
- Lu YY, Zeng L, Xu YJ, et al. Advances in invasive biology and control of red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 40 (5): 149–160. [陆永跃, 曾玲, 许益鏊, 等. 外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展 [J]. 华南农业大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (5): 149–160]
- Lu YY, Zeng L, Xu YJ, et al. Comparison of foraging ability between *Solenopsis invicta* and *Tapinoma melanocephalum* (Hymenoptera:

- Formicidae] [J]. *Sociobiology*, 2012c, 59 (3): 1015 – 1024.
- Lu YY, Zeng L. The red imported fire ants have been discovered in China for 10 years: Historical status and trends [J]. *Plant Quarantine*, 2015, 29 (2): 1 – 6. [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]
- Lu YY. Prevention and Control of Red Imported Fire Ants [M]. South China University of Technology Press, 2007. [陆永跃. 防控红火蚁 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2017]
- Lu YY. Study on long – distance transmission rate and trend prediction of red imported fire ant in mainland china [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41 (10): 70 – 72. [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]
- Lv LH, Liu XY, Xie MQ, et al. Screening of high virulence strains of entomogenous fungi of parasitic red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2011, 32 (4): 35 – 39. [吕利华, 刘晓燕, 谢梅琼, 等. 寄生红火蚁虫生真菌高致病力菌株的筛选 [J]. 华南农业大学学报, 2011, 32 (4): 35 – 39]
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. 2022. List of national administrative regions for the distribution of agricultural plant quarantine pests [EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202207/t20220707\\_6404284.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202207/t20220707_6404284.htm). [农业农村部. 2022. 全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录 [EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202207/t20220707\\_6404284.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202207/t20220707_6404284.htm)]
- Pan FX. Determination of Toxicity of Various Insecticides to Red Imported Fire Ant and Evaluation of Control Effect of Poison Bait [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. [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]
- Shao JG, Luo LZ, Chen HT, et al. Identification of the social type of Red imported fire ant in China by multiplex PCR [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2008, 51 (5): 551 – 555. [邵敬国, 罗礼智, 陈浩涛, 等. 应用多元 PCR 技术对我国红火蚁社会型的鉴定 [J]. 昆虫学报, 2008, 51 (5): 551 – 555]
- Tschinkel WR. The Fire Ants [M]. Massachusetts: Belknap Press of Harvard University Press, 2006: 10 – 20.
- Wan FB, Guo JY, Zhang F. Research on Biological Invasions in China [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- Wan FH, Feng J, Xu J, et al. Biological Invasions: Testing and Monitoring [M]. Beijing: Science Press, 2011: 446 – 453. [万方浩, 冯洁, 徐进, 等. 生物入侵: 检测与监测篇 [M]. 北京: 科技出版社, 2011: 446 – 453]
- Wan FH, Guo JY, Zhang F, et al. Research on Biological Invasions in China [M]. Beijing: Science Press, 2009: 51 – 53. [万方浩, 郭建英, 张峰, 等. 中国生物入侵研究 [M]. 北京: 科技出版社, 2009: 51 – 53]
- Wan FH, Hou YM, Jiang MX. Invasive Biology [M]. Beijing: Science Press, 2015: 259 – 262. [万方浩, 侯有明, 蒋明星. 入侵生物学 [M]. 北京: 科技出版社, 2015: 259 – 262]
- Wan FH, Jiang M, Zhan AB. Biological Invasions and Its Management in China [M]. Dordrecht: Springer Nature, 2017: 299 – 316.
- Wan FH, Li BP, Guo JY, et al. Biological Invasions: Biological Control [M]. Beijing: Science Press, 2008. [万方浩, 李保平, 郭建英, 等. 生物入侵: 生物防治篇 [M]. 北京: 科技出版社, 2008]
- Wan FH, Peng DL, Wang R, et al. Biological Invasions: Prewarning [M]. Beijing: Science Press, 2010: 351 – 358. [万方浩, 彭德良, 王瑞, 等. 生物入侵: 预警篇 [M]. 北京: 科技出版社, 2010: 351 – 358]
- Wang FX, Zhang RZ. Red Imported Fire Ants [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. [王福祥, 张润志. 红火蚁 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005]
- Wang L, Chen KW, Feng XD, et al. Long – term forecast of red imported fire ant invasion and expansion in mainland china [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (2): 339 – 344. [王磊, 陈科伟, 冯晓东, 等. 我国大陆红火蚁入侵扩张趋势长期预测 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (2): 339 – 344]
- Wang L, Li SL, Wang L, et al. Quarantine effects of 11 insecticides on red imported fire ant in turf [J]. *Plant Quarantine*, 2011, 25 (6): 13 – 16. [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]
- Wang L, Li SL, Zeng L, et al. Screening of medicament for control of red imported fire ant in turf plantation [J]. *China Plant Protection*, 2012, 32 (7): 56 – 57. [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]
- Wang L, Lu YY, Xu YJ, et al. The current status of research on *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in Mainland China [J]. *Asian Myrmecology*, 2013, 5: 125 – 137.
- Wang L, Lu YY, Zeng L, et al. Study on spatial relations and migration dynamics of red imported fire ant nests in turf habitat [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33 (2): 149 – 153. [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]
- Wang L, Xu YJ, Li ZL, et al. Determination of pathogenicity of three strains of *Metarhizium anisopliae* to red fire imported ant [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (4): 820 – 824. [王磊, 许益鏊, 李梓琳, 等. 三株金龟子绿僵菌对红火蚁的致病力测定 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (4): 820 – 824]
- Wang L, Xu YJ, Zeng L, et al. Impact of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren on biodiversity in South China: A review [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (4): 788 – 796.
- Wang L, Zeng L, Lu YY, et al. Effects of anthill damage on migration of red imported fire ants [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2010, 47 (5): 941 – 944. [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]
- Wang L, Zeng L, Xu YJ, et al. Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China [J]. *NeoBiota*, 2020, 54: 89 – 124.
- Wang L. Study on Migration and Activity of Red Imported Fire Ant Colony [D]. Guangzhou: South China Agricultural University,



2010. [王磊. 红火蚁蚁群迁移及活动规律研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2010]
- Wu BQ, Lu YY, Liang GW, *et al.* Effects of red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) on the diversity of ant populations in longan gardens and barren grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (8): 2075–2083. [吴碧球, 陆永跃, 梁广文, 等. 红火蚁对新入侵龙眼园和荒草地蚂蚁类群多样性的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30 (8): 2075–2083]
- Wu BQ, Lu YY, Zeng L. Effects of red imported fire Ants (*Solenopsis invicta*) in a single ant nest on ant groups at different distances [J]. *Chinese Agricultural Science*, 2009, 42 (12): 4248–4259. [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]
- Wu BQ, Wang L, Liang GW, *et al.* Food competition mechanism between *Solenopsis invicta* Buren and *Tapinoma melanocephalum* Fabricius [J]. *Sociobiology*, 2014, 61 (3): 265–273.
- Wu D, Zeng L, Lu YY, *et al.* Effect of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) on flower-visiting behavior of insects on *Brassica napus* (Brassicales: Brassicaceae) [J]. *Florida Entomologist*, 2016, 99 (2): 166–171.
- Wu D. Effects of Red Imported Fire Ants (*Solenopsis invicta*) and Their Interaction with Aphids on Flower Visiting and Crop Setting [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2014. [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]
- Wu WB, Hong TS, Zeng L, *et al.* Detection of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) nests using spectral data [J]. *Florida Entomologist*, 2014, 97: 967–971.
- Xi YB, Jiang JQ, Xu YJ, *et al.* Temporal dynamics and influencing factors of red imported fire ant foraging activity in litchi orchard [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2010a, 37 (1): 67–70. [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, 2010a, 37 (1): 67–70]
- Xi YB, Lu YY, Liang GW, *et al.* Effects of red imported fire ant on invertebrate community diversity and stability in litchi orchard [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010c, 30 (8): 2084–2099. [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, 2010c, 30 (8): 2084–2099]
- Xi YB, Lu YY, Zeng L, *et al.* Effects of red imported fire ant invasion on soil physical and chemical properties of litchi orchard [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010b, 32 (2): 145–151. [席银宝, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对荔枝园土壤性理化质的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2010b, 32 (2): 145–151]
- Xi YB. Effects of Red Imported Fire Ant on Invertebrate Community in Litchi Orchard [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008. [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]
- Xie LH, You MS, Hou YM, *et al.* Biological Invasion – Problems and Countermeasures [M]. Beijing Science and Technology Press, 2011: 216–286. [谢联辉, 尤民生, 侯有明, 等. 生物入侵 – 问题与对策 [M]. 北京: 科技出版社, 2011: 216–286]
- Xu HW. Characteristics and Effects of Taiwan Isolate of Bishomozygous Virus on Imported Red Imported Fire Ants [D]. Taipei: Taiwan University, 2009. [许弘玮. 入侵红火蚁双顺子病毒台湾分离株之特性及对入侵红火蚁之影响 [D]. 台北: 台湾大学, 2009]
- Xu JZ. Genetic Structure of Chinese Red Imported Fire Ant Population Based on COI and Gp-9 Genes [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008. [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]
- Xu T, Xu M, Lu YY, *et al.* A trail pheromone mediates the mutualism between ants and aphids [J]. *Current Biology*, 2021, 31 (21): 4738–4747.
- Xu YJ, Huang J, Zhou AM, *et al.* Prevalence of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) venom allergic reactions in mainland China [J]. *Florida Entomologist*, 2012, 95: 961–965.
- Xu YJ, Lu YY, Huang J, *et al.* Study on the cold tolerance of the natural population of red imported fire ant [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2009, 52 (9): 974–983. [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]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Foraging behavior of red imported fire ants and the regularity of worker ant assembly in typical habitats in South China [J]. *Journal of Ecology*, 2007, 27 (3): 855–861. [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]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Heat tolerance of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China [J]. *Sociobiology*, 2009, 54: 115–126.
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Study on the local diffusion of red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2006, 26 (1): 40–42. [许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁局部扩散规律研究 [J]. 华南农业大学学报 (自然科学版), 2006, 26 (1): 40–42]
- Xu YJ, Ran H, Xing LD, *et al.* Red Devil – Invasion of Red Imported Fire Ant: 3D [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016. [许益鏊, 冉浩, 邢立达, 等. 红色小恶魔 – 红火蚁的入侵: 3D [M]. 北京: 航空工业出版社, 2016]
- Xu YJ, Vargo EL, Tsugi K, *et al.* Exotic ants of the Asia – Pacific: Invasion, national response, and ongoing needs [J]. *Annual Review of Entomology*, 2022, 67: 27–42.
- Xu YJ, Zeng L, Lu YY, *et al.* Effect of soil humidity on the survival of *Solenopsis invicta* Buren workers [J]. *Insectes Sociaux*, 2009, 56: 367–373.
- Xu YJ. Basic Study on Invasion Ecology of Red Imported Fire Ant [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2007. [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]
- Yan Q. Study on the Sensitivity of Red Imported Fire Ant Larvae to Pesticides [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. [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]
- Zeng L, Lu YY, Chen ZN, *et al.* Monitoring and Prevention of Red Imported Fire Ant [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2005. [曾玲, 陆永跃, 陈忠南, 等. 红火蚁监测与防治 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2005]
- Zeng L, Lu YY, He XF, *et al.* Identification and damage investigation of *Solenopsis invicta* Buren in Mainland China [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2005, 42 (2): 144–148, 230–231. [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, 230–231]
- Zeng YF. To Evaluate the Potential of Isolated Photobacterium to Control Red Imported Fire Ant [D]. Taipei: Taiwan University, 2012. [曾钰芳. 评估本土分离光杆菌防治入侵红火蚁之潜力 [D]. 台北: 台湾大学, 2012]
- Zhang DJ. Study on Luring and Killing Activity of Several New Bait to Red Imported Fire Ant [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. [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]
- Zhang HJ, Chen L, Wang WK. Comparison of alkaloid contents in red imported fire ants of different grades [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (2): 468–473. [张惠菊, 陈立, 王文凯. 不同品级红火蚁体内生物碱含量的比较 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (2): 468–473]
- Zhang JS. Study on the Effects of the Control Drugs of Red Imported Fire Ant on the Soil Ecological Environment [D]. Taipei: Taiwan University, 2010. [张静淑. 入侵红火蚁防治用药影响土壤生态环境之研究 [D]. 台北: 台湾大学, 2010]
- Zhang LK, Zhang PB, Cao L, *et al.* Susceptibility of red imported fire ant queens to the entomopathogenic nematodes *Steinernema carpocapsae* All and *S. scapterisci* [J]. *Sociobiology*, 2010, 55 (2): 527–546.
- Zhang RZ. Record of Red Imported Fire Ant Control in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007. [张润志. 中国红火蚁防控纪实 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007]
- Zhou AM, Lu YY, Xu YJ, *et al.* Fumigation effect of bromomethane on red imported fire ant [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2011, 33 (1): 70–73. [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]
- Zhou AM, Lu YY, Xu YJ, *et al.* Lethal effect of hot water immersion on red imported fire ant [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2011, 33 (3): 342–345. [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]
- Zhou AM, Lu YY, Zeng L, *et al.* *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), defend *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) against its natural enemies [J]. *Environmental Entomology*, 2013, 42 (2): 247–252.
- Zhou AM, Wang Z, Zeng L, *et al.* Study on temporal dynamics of red imported fire ant population in banana garden [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2011, 33 (4): 466–470. [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]
- Zou W. Development and Performance Analysis of Red Imported Fire Ant Bait Spatter for Field Ridge [D]. Taipei: Taiwan University, 2008. [邹韦. 田埂用红火蚁饵剂撒布机之研制及性能分析 [D]. 台北: 台湾大学, 2005]