



梁铭荣, 刘珍, 陈涛, 岳鑫璐, 宋士成, 焦宇廷, 陆永跃, 许益鏊, 王磊. 三种植物源药剂对红火蚁的防治效果评估及其对本地蚂蚁群落影响 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1569 – 1581.

## 三种植物源药剂对红火蚁的防治效果评估 及其对本地蚂蚁群落影响

梁铭荣<sup>1\*</sup>, 刘珍<sup>2\*</sup>, 陈涛<sup>3</sup>, 岳鑫璐<sup>2</sup>, 宋士成<sup>1</sup>, 焦宇廷<sup>1</sup>,  
陆永跃<sup>1</sup>, 许益鏊<sup>1</sup>, 王磊<sup>1\*\*</sup>

(1. 华南农业大学植物保护学院, 广州 510642; 2. 深圳市农业科技促进中心, 深圳 518057;

3. 浙江天丰生物科学有限公司, 浙江金华 321000)

**摘要:** 红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是一种危险性入侵害虫, 可对人类健康、农林业生产、公共安全和生态系统产生严重的负面影响。目前, 化学农药是防治红火蚁的主要方法。然而, 大多数化学农药并不适用于有机农场、水产养殖区等生态敏感区。为筛选出用于生态敏感区红火蚁防治的药剂, 本文结合室内和田间试验评估了植物源杀虫剂苦参碱 Matrine、鱼藤酮 Rotenone 和除虫菊素 Pyrethrin 对红火蚁的防治效果。室内试验结果表明, 苦参碱、鱼藤酮和除虫菊素对红火蚁均具有较高的毒性。田间试验表明, 25.00 mg/L 和 12.50 mg/L 苦参碱、250.00 mg/L 和 125 mg/L 鱼藤酮、75.00 mg/L 和 37.50 mg/L 除虫菊素灌巢处理, 红火蚁蚁巢减退率分别达到 100%、81.25%、87.50%、79.17%、71.73% 和 66.67%。然而, 除 25.00 mg/L 苦参碱外, 其他处理均导致在被灌巢的蚁巢周围短期内出现新蚁巢。灌巢处理后, 处理区的蚂蚁多样性指数和均匀度指数升高, 优势度指数下降。综上所述, 苦参碱、鱼藤酮和除虫菊素适合灌巢处理防治红火蚁, 其中 0.5% 苦参碱可溶性液剂能有效降低红火蚁种群数量, 使得蚁巢减退率达 100%, 同时对本地蚂蚁群落没有负面影响, 因此该商品制剂在红火蚁防治方面具有较好的开发潜力。

**关键词:** 红火蚁; 植物源农药; 灌巢; 群落多样性

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 06-1569-13

### Evaluation of three botanical pesticides against the fire ant *Solenopsis invicta* and their impacts on native ant species

LIANG Ming-Rong<sup>1\*</sup>, LIU Zhen<sup>2\*</sup>, CHENG Tao<sup>3</sup>, YUE Xin-Lu<sup>2</sup>, SONG Shi-Cheng<sup>1</sup>, JIAO Yu-Ting<sup>1</sup>,  
LU Yong-Yue<sup>1</sup>, XU Yi-Juan<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1\*\*</sup> (1. Red Imported Fire Ant Research Center, South  
China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Shenzhen Agricultural Science and  
Technology Promotion Center, Shenzhen Administration for Market Regulation, Shenzhen 518057,  
China; 3. Zhejiang Tianfeng Biological Science Co. Ltd., Jinhua 321000, Zhejiang Province, China)

**Abstract:** The red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren is an invasive species that have seriously negative impact on agriculture, ecology, public safety, and human health in its invaded regions.

基金项目: 教育部“蓝火计划”(惠州)产学研联合创新资金(CXZJHZ201817); 国家重点研发计划项目(2021YFD1000500); 深圳市农业科技促进中心项目(2022090004zbzjbc); 广东省农业产业技术体系创新团队项目(2022KJ134)

\* 共同第一作者: 梁铭荣, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事昆虫生态学和害虫防治研究, E-mail: 1511857642@qq.com; 刘珍, 女, 1981 年生, 硕士, 高级农艺师, 主要从事农业有害生物防控及技术推广工作, E-mail: 304330368@qq.com

\*\* 通讯作者 Author for correspondence: 王磊, 男, 1986 年生, 讲师, 博士, 主要从事昆虫种群生态学、防控理论与技术研究, E-mail: leiwang@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-03-20; 接受日期 Accepted: 2022-05-26

Currently, chemical treatment is the main method for fire ant control. However, most chemicals are not suitable for ecologically sensitive areas, including organic farms, water resource regions, etc. To screen chemicals for controlling fire ants in ecologically sensitive areas, the control effects of three botanical pesticides, matrine, rotenone, and pyrethrin, against fire ants were evaluated under laboratory and field in this study. The results of laboratory bioassays showed that matrine, rotenone, and pyrethrin had significant toxicity against fire ants. The field trials showed that the mortality of fire ant mounds reached 100%, 81.25%, 87.50%, 79.17%, 71.73% and 66.67% under the 25.00 mg/L and 12.50 mg/L matrine, 250 mg/L and 125 mg/L rotenone, and 75 mg/L and 37.5 mg/L pyrethrin mound drench treatments, respectively. However, all these treatments caused new satellite mounds around treated mounds except 25.00 mg/L matrine after treatment. Investigations showed that the species diversity index and species evenness index increased, and the species dominance index decreased in treatment plots after mound drench with botanical pesticides, suggesting that the diversity of ants increased. This study suggested that matrine, rotenone, and pyrethrin are suitable for fire ant management by mound drench. The commercial product of 0.5% matrine soluble concentrate are effectively on fire ants control which caused 100% mortality of fire ant mounds in the field.

**Key words:** *Solenopsis invicta*; botanical insecticides; mound drench; diversity

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是一种重要的外来入侵物种, 可对公共安全、人体健康、农林业生产和生态环境产生巨大危害 (陆永跃和曾玲, 2015; 陆永跃等, 2019; Wang *et al.*, 2020)。自 2004 年在中国大陆发现其入侵为害后, 截止到 2022 年 7 月, 已经入侵中国大陆 12 个省区 579 个县 (陆永跃等, 2019; [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202207/t20220707\\_6404284.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202207/t20220707_6404284.htm))。红火蚁通过捕食无脊椎动物、攻击地栖性脊椎动物, 或者通过食物资源竞争, 降低入侵地的生物多样性, 使得生态系统失衡 (张波等, 2015; 王磊等, 2017; Wang *et al.*, 2020)。据推测我国《国家重点保护野生动物名录》中列举的 379 种野生动物名录中, 有 22 种鸟类 (占 9.6%)、1 种两栖类 (14%)、所有的 18 种爬行类 (占 100%) 可能因为红火蚁的入侵而种群数量下降甚至灭绝 (林芙蓉等, 2006)。红火蚁的入侵导致本地蚂蚁种类下降超过 30% 以上 (Tsai *et al.*, 2009; 宋侦东等, 2009; Lu *et al.*, 2012)。研究显示, 红火蚁入侵对我国南方荔枝园、绿化草坪、香蕉园、菜地等典型生境中的节肢动物群落产生了严重负面影响 (吴碧球等, 2010; 席银宝等, 2010; Wang *et al.*, 2019)。除了捕食节肢动物外, 该蚁还会取食、损坏多种植物种子 (黄俊等, 2010)。

化学防治仍然是红火蚁防治中高效、便捷的方法。检疫除害主要用熏蒸、浸液等方法 (周爱明等, 2011), 田间或者野外防治主要使用毒饵

法、触杀性粉剂法和灌巢法 (温凯等, 2017; Vogt *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2020)。目前我国用于红火蚁防控粉剂及饵剂的主要成分分别为高效氯氰菊酯和茚虫威 (<http://www.icama.org.cn/hysj/index.jhtml>), 长期、不规范使用, 极有可能诱导红火蚁耐药性或抗药性的产生。Zhang *et al.* (2016) 发现使用氟虫腈处理红火蚁后, 红火蚁工蚁体内的解毒酶基因 (细胞色素 P450) 增加了 36.4 倍。Siddiqui *et al.* (2022) 指出使用茚虫威处理红火蚁后, 该蚁体内大部分解毒酶相关基因发生差异性表达。同时, 毒饵等的大范围使用, 可能会给非靶标生物, 如本地蚂蚁群落带来严重的负面影响 (宋侦东等, 2009; Senthil-Nathan, 2013; Li *et al.*, 2018)。我国的有机种植区、水产养殖区等生态敏感区也有红火蚁发生, 但是目前适合上述地区使用的红火蚁防控药剂较缺乏。如果生态敏感区的红火蚁不能得到有效治理, 则会成为红火蚁扩散的源头。因此开展红火蚁防控药剂新成分筛选迫在眉睫。

植物源农药因对人畜安全、低残留、易降解、不易产生抗药性等优点, 在害虫防治中受到欢迎 (Isman, 2020; Riyaz *et al.*, 2022)。苦参碱是豆科植物苦参 *Sophora flavescens*、苦豆子 *S. alopecuroides*、越南槐 *S. tonkinensis* 等中草药植物的活性成分 (刘梅等, 2003)。该物质在农业上有广泛的应用前景, 目前作为农药登记用于防治的害虫有甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、美国白蛾

*Hyphantria cunea*、大螟 *Sesamia inferens*、小菜蛾 *Plutella xylostella*、茶尺蠖 *Ectropis obliqua hypulina*、松毛虫 *Dendrolimus*、茶毛虫 *Euproctis pseudoconspersa*、烟青虫 *Helicoverpa assulta*、小地老虎 *Agrotis ipsilon*、茶小绿叶蝉 *Empoasca pirisuga*、蚜虫 *Aphidoidea*、蓟马 *Thripidae*、韭蛆 *Bradysia odoriphaga* 和叶螨 *Tetranychidae* 等 14 种农林害虫 (张正炜等, 2020)。鱼藤酮是从鱼藤属 *Derris* 植物中提取出来的具有抑制神经作用的杀虫剂, 具有杀虫活性高、杀虫谱广、对人类及动物低毒, 对农业生态环境和农产品安全等特点 (徐汉虹和黄继光, 2001; 何军等, 2006; Opolot *et al.*, 2006), 对黄条跳甲 *Phyllotreta vittata*、斑潜蝇 *Liriomyza*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、菜青虫 *Pieris rapae*、小菜蛾、蚜虫等农业害虫具有良好的防治效果。除虫菊素的主要成分为天然除虫菊酯, 是从除虫菊植株中提取的有机酸和醇酮形成的酯类化合物 (Crombie and Elliott, 1961; 张正炜等, 2020), 对台湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus* 有较好的触杀和胃毒作用 (曾小虎等, 2019)。虽然鱼藤酮和除虫菊素对水生生物高毒 (Matsuo and Mori, 2012; 付建涛, 2016), 但苦参碱对水生生物毒性较低, 张继平等 (2005) 报道可使用 0.5 mg/L 苦参生物碱提取物驱杀鳊鱼 *Siniperca chuatsi* 体内的微小车轮虫 *Trichodinella ninuta* 寄生虫。因此, 防治红火蚁时可根据不同类型的生态敏感区选择相应的植物源药剂。

本文评估了植物源药剂苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素对红火蚁的毒力作用及其田间灌巢防效。同时, 分析了植物源农药灌巢降低红火蚁种群数量后对本地蚂蚁群落多样性的影响, 旨在为开发用于红火蚁发生区特别是有机种植区和水源保护地等生态敏感区使用的、绿色的红火蚁防控药剂提供技术支撑。

## 1 材料与试验

### 1.1 材料与试验供虫

77.1% 除虫菊素原药 (购自广州德诺生物科技有限公司)、95% 鱼藤酮原药 (购自广州德诺生物科技有限公司)、98% 苦参碱原药 (购自广州德诺生物科技有限公司)、0.5% 碧拓 (苦参碱) 可溶液剂 (韩国生物株式会社, 国内代理机构为沈阳科雅雅农业技术有限公司)。5% 三保罗腾 (鱼

藤酮) 可溶液剂 (云南南宝生物科技有限责任公司)、1.5% 三保奇花 (除虫菊素) 水乳剂 (云南南宝生物科技有限责任公司)。

试验所用红火蚁蚁群均于 2020 年 6 月采集于珠海市鼎元有机生态农场 (N113.28869°, E22.35188°)。将采集所得带土的红火蚁蚁群装入涂有滑石粉的塑料桶中, 放置 2~3 d 后采用滴水法, 待红火蚁蚁群浮于水面后, 将蚁群移至涂有滑石粉的塑料盒。以火腿肠和 10% v/v 糖水饲养, 7 d 后供试验使用。饲养室温 25°C, 相对湿度 60%~70%。试验所用的红火蚁为体型一致 (头宽 1.20~1.30 mm)、健康活跃的工蚁。

### 1.2 室内生测试验

药膜法: 根据预实验结果所确定需测药剂的浓度区间, 用丙酮溶液将苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素 3 种原药分别稀释成 5 个供试浓度。苦参碱供试浓度为 39.20、19.60、9.80、4.90 和 2.45 mg/L; 鱼藤酮为 76.00、38.00、19.00、9.50 和 4.75 mg/L; 除虫菊素为 15.42、3.86、0.77、0.15 和 0.03 mg/L。在直径 2.5 cm、高 7.5 cm 指形管玻璃管内壁涂抹一层特氟龙 (聚四氟乙烯, 购于东莞市展阳高分子材料有限公司), 以防止试虫逃逸, 再向管内加入 1 mL 供试浓度的药液, 迅速转动玻璃管, 使药液均匀地沾附于玻璃管内壁。将玻璃管倒立放置待丙酮完全挥发后, 即成药膜管, 用于试验。使用不含药剂的丙酮溶液处理作为对照组。每个药膜管中挑入 30 头大小相近、健康活跃的中型工蚁 (头宽 1.20~1.30 mm) 进行试验。处理 24 h 后, 观察并记录蚂蚁的死亡数。每个处理重复 5 次, 重复 3 个不同的蚁群 (邱华龙等, 2013)。当对照组死亡率 20% 以下时为有效试验。

毒土法: 从红火蚁废弃的蚁巢中收集约 1 Kg 土壤, 在 100°C 下烤箱中干燥 12 h, 通过 35 目筛网筛除去碎屑。将 10 g 蚁巢土倒入一次性塑料碗中 (直径 10 cm), 并加入 4.0 mL 纯净水混匀, 然后放入 30 头供试大型工蚁, 塑料碗上沿内壁涂抹特氟龙, 防止工蚁逃逸。让工蚁在塑料碗中的沙土上放置挖掘 12 h 至蚁巢土疏松, 用移液枪滴分别加入 4.0 mL 供试浓度溶液至塑料碗中蚁巢土中。使用纯净水分别将植物源制剂稀释为以下浓度梯度: 0.5% 苦参碱浓度为 3.00、1.50、0.75、0.38 和 0.19 mg/L; 5% 鱼藤酮浓度为 250.00、125.00、62.50、31.25 和 15.63 mg/L; 1.5% 除虫菊素浓度为 75.00、15.00、3.00、0.60 和 0.12 mg/L。

纯净水处理作为空白对照。每个处理重复 5 次。重复 3 个蚁群。处理 24 h 后计算工蚁死亡数。死亡率公式如下：死亡率 (%) = (死亡蚁数/供试总蚁数) × 100。

### 1.3 田间防治试验

#### 1.3.1 试验地和材料

试验于 2020 年 6 月 - 9 月在广东省珠海市斗门区白蕉镇六乡镇鼎元有机生态农场和竹银水库水源保护地进行。试验地红火蚁为多蚁后型。将 6 个蚁巢左右的占地面积设为 1 个试验小区 (面积约 200 m<sup>2</sup>)。

使用 0.5% 碧拓 (苦参碱) 可溶液剂, 5% 三保罗腾 (鱼藤酮) 可溶液剂, 1.5% 三保奇花 (除虫菊素) 水乳剂作为灌巢药剂。

灌巢使用本实验室自行设计的灌巢装置, 由背负式电动农用喷雾器 (18 L, 沛县蓝天植保器械厂)、追肥枪 (兴农农器械厂) 和 A 型智能流量计 (辽宁省海城市悯农金刚机械制造有限公司) 组成 (图 1)。该灌巢装置的液体最大流速为 3.5 L/min。该灌巢装置包括用于储存药液的箱体, 所述箱体上设置有输液管; 所述输液管的一端与所述箱体的内腔相连通, 所述输液管的另一端设置有用于插入蚁巢中的插管; 所述插管上设置有用于监测所述药液用量的流量计。该灌巢装置操作方便, 还能够监测药液的用量 (王磊等, 2020)。

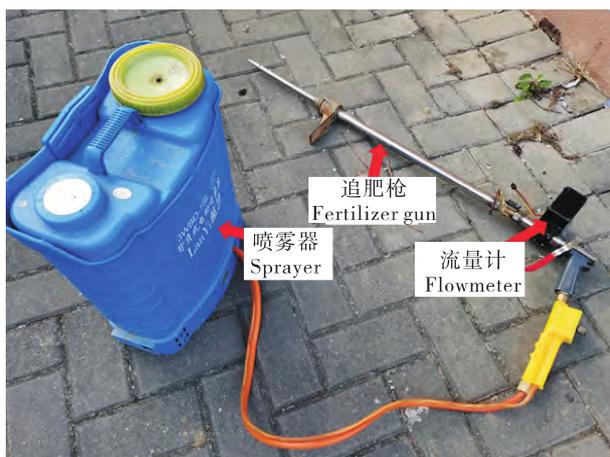


图 1 红火蚁蚁丘灌巢处理的装置图

Fig. 1 Device diagram of mound drench for fire ant management

#### 1.3.2 不同药剂灌巢对红火蚁的防治效果

根据预实验结果, 后用于灌巢试验, 即苦参

碱有效成分为 25.00 mg/L 和 12.5 mg/L、鱼藤酮有效成分为 250 mg/L 和 125.00 mg/L、除虫菊素有效成分为 75.00 mg/L 和 37.50 mg/L。灌巢时将灌巢枪插入蚁巢, 待药剂溶液溢满巢面时再调整灌巢位置继续重复以上步骤, 直至蚁巢处于浸润状态。灌巢前勿惊扰蚁巢, 灌巢后可在蚁巢周围浇少量药液杀死逃逸的工蚁。防治直径 20 cm 以上的蚁巢用药量 10 L, 20 cm 以下的蚁巢用药量 5 ~ 10 L。对照使用清水灌巢。每个处理使用 6 个蚁巢, 重复 4 次。

活动工蚁的调查采用诱饵诱集法进行取样 (宋侦东等, 2009), 并在试验前一个星期调查每个小区的活动工蚁及活蚁巢数量。施药后第 1、4、7 和 14 天每个小区进行一次活动工蚁的调查, 并在第 14 天进行挖巢记录蚁群存活情况和活蚁巢数。

诱饵诱集法。在每个小区内随机放置 5 个诱集瓶, 成直线排列, 每个诱饵相隔约 3 ~ 5 m。将切好的 5 mm 火腿肠切片放入 30 mL 塑料广口瓶中, 把诱集瓶横放于地表, 让瓶口靠近地面。30 ~ 40 min 后收回, 记录诱集瓶内红火蚁数量。活蚁巢防治效果、工蚁防治效果、蚁群发生级别防治效果、综合防治效果计算公式参考农药田间药效试验准则 (二) 第 149 部分: 杀虫剂防治红火蚁 (GB/T 17980.149 - 2009)。

$$\text{工蚁防治效果 PW}(\%) = \left(1 - \frac{WO \times WT_i}{WO_i \times WTO}\right) \times 100$$

WO: 药前对照区监测瓶中平均工蚁数; WT<sub>i</sub>: 药后处理区监测瓶中平均工蚁数; WO<sub>i</sub>: 药后对照区监测瓶中平均工蚁数; WTO: 药前处理区监测瓶中平均工蚁数。

试验后同时观察蚁巢处理后的存活情况。活蚁巢判定标准是用铁条或木棍插入蚁巢后, 在 1 min 内有超过 3 头红火蚁工蚁爬出, 就标定该蚁巢为活蚁巢; 若少于 3 头工蚁, 则记录为死蚁巢。在用药后第 14 天观察蚁巢是否为活蚁巢, 进行挖巢处理, 并观察 1.5 m 范围内是否出现新蚁巢, 使用表 1 进行评分评估灌巢的效果 (Vogt *et al.*, 2002)。在试验开始前用小红旗标记与记录在小区内的活蚁巢, 此后对该小区内出现的所有新蚁巢进行计数。

$$\text{活蚁巢防治效果 PN}(\%) = \left(1 - \frac{NO \times NT_i}{NO_i \times NTO}\right) \times 100$$

NO: 药前对照区活蚁巢; NT<sub>i</sub>: 药后处理区活

蚁巢数;  $NO_i$ : 药后对照区活蚁巢数;  $NTO$ : 药前处理区活蚁巢数。

表 1 评估灌巢处理效果的评分系统 (Vogt *et al.*, 2002)

Table 1 Scoring system used to evaluate the effect of the mound drench treatments

得分 Score	处理后蚁巢是否 为活蚁巢 Treated mound active	< 1.5 m 范围内新蚁巢数量 Number of new mounds within 1.5 m
1	否 No	0
2	否 No	1
3	否 No	2
4	是 Yes	0
5	是 Yes	1
6	是 Yes	2

注: 灌巢处理对蚁巢防治效果的得分说明: 若处理后为死蚁巢, 且 1.5 m 范围内: 不出现新巢得分 1、出现 1 个得分 2、出现 2 个得分 3; 若处理后为活蚁巢, 且 1.5 m 范围内: 不出现新巢得分 4、出现 1 个得分 5、出现 2 个得分 6。  
Note: The mound scores were assigned as follows. If the treatment resulted in an inactive mound, the score was 1, 2, or 3 based on whether there were zero, one, or two new mounds, respectively, within 1.5 m; if the treatment resulted in an active mound, the score was 4, 5, or 6, depending on whether there were zero, one, or two new mounds, respectively, within 1.5 m.

在用药后第 14 天进行挖巢处理。根据蚁群分级标准对蚁巢中红火蚁蚁群存活情况进行分级, 计算每个小区所有蚁巢蚁群的平均级数。由于试验区内供试蚁巢均为活蚁巢, 因此确定药剂处理前所有蚁群级别为 3 级。根据蚁群级别调查结果, 计算蚁群级别降低率。蚁群分级标准:

0 级——无任何虫态存活;

1 级——仅有工蚁或者蛹和幼虫存活;

2 级——有有翅生殖蚁、除蚁后外的其他虫态个体存活;

3 级——有蚁后及其他虫态个体存活。

$$\text{蚁群防治效果 PC}(\%) = \left(1 - \frac{CO \times CT_i}{CO_i \times CTO}\right) \times 100$$

$CO$ : 药前对照区蚁群平均级别;  $CT_i$ : 药后处理区蚁群平均级别;  $CO_i$ : 药后对照区蚁群平均级别;  $CTO$ : 药前处理区蚁群平均级别。

药剂对红火蚁的综合防治效果计算公式为  $P = 0.3PN + 0.2PW + 0.5PC$ 。PN: 活蚁巢防治效果;

PW: 工蚁防治效果; PC: 蚁群防治效果。

### 1.3.3 不同药剂溶液灌巢处理对蚂蚁群落结构的影响

掉落式陷阱法。将长为 115 mm、直径为 28 mm 的塑料离心管 (50 mL) 埋入地下, 使管口与地面平齐, 管口四周使用泥土回填, 将浓度为 45% v/v 酒精注入管中, 体积大约为离心管 1/3 (15 ~ 20 mL)。每个小区放置 5 个陷阱, 成直线排列, 每个陷阱间隔约 3 ~ 5 m。陷阱放置 24 h 后回收, 取出蚂蚁放入盛有 75% 酒精的小瓶 (30 mL) 分别标记保存, 带回室内鉴定种类并记录数量。蚂蚁种类的鉴定主要参照《广西蚂蚁》、《中国蚂蚁》和东亚蚂蚁网站等分类系统。

群落特征指数分析方法参考宋侦东 (2009)。

#### (1) 物种多样性指数

采用 Shannon-Wiener 物种多样性公式计算物种多样性指数:  $H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ 。式中,  $P_i = N_i/N$ ,  $N_i$  是第  $i$  个物种的个体数,  $N$  是  $S$  个物种的个体总数。

#### (2) 均匀度指数

采用 Pielou 均匀度公式计算均匀度指数:  $E = H/\ln S$ 。式中,  $H$  是 Shannon-Wiener 物种多样性指数,  $S$  是物种数目。

#### (3) 优势度指数

采用 Simpson 优势度公式计算优势度指数:  $C = \sum_{i=1}^s (P_i)^2 = \sum_{i=1}^s (N_i/N)^2$ 。式中,  $P_i = N_i/N$ ,  $N_i$  是第  $i$  个物种的个体数,  $N$  是  $S$  个物种的个体总数。以上数据均使用 Excel 处理。

### 1.4 数据分析

不同药剂对红火蚁室内毒力测定的数据运行于 Excel 2013 和 SPSS 21.0 软件。使用 One-Sample Kolmogorov-Smirnov test 对数据进行正态分布检验。符合正态分布的使用 Levene's test 进行方差齐性检验。对于方差齐性的, 使用单因素方差分析, 并使用 Tukey test 进行多重比较。对于不符合正态分布和方差不齐的, 先使用 Kruskal-Wallis test 进行检验, 如果总体  $P$  值小于 0.05, 使用 Mann-Whitney test 进行两两比较。室内毒力试验采用 SPSS 21.0 统计软件在 Probit 模块运行, 计算实验室条件下苦参碱等 3 种植物源农药对红火蚁的致死中浓度并进行毒力回归分析 (贾春生, 2006)。数据使用绘图软件 GraphPad Prism 8 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素原药对红火蚁室内毒力测定

药膜法处理下苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素原药对红火蚁工蚁的毒力测定结果表明,除虫菊素对红火蚁工蚁  $LC_{50}$  为 1.159 mg/L,触杀效果最优;其次是苦参碱 6.621 mg/L,鱼藤酮效果最差为

22.436 mg/L (表 2)。

### 2.2 苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素商品制剂对红火蚁的室内毒力测定

毒土法处理下苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素商品制剂对红火蚁工蚁的毒力测定结果表明,苦参碱对红火蚁  $LC_{50}$  为 0.397 mg/L,毒力最高;其次为除虫菊素 3.190 mg/L,而鱼藤酮的  $LC_{50}$  为 88.470 mg/L (表 3)。

表 2 苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素原药对红火蚁工蚁触杀毒力的致死中浓度

Table 2 Lethal concentration of matrine, rotenone, and pyrethrin technical against *Solenopsis invicta* workers

植物源农药原药	毒力回归方程	$LC_{50}$ 值 (mg/L)	95% 置信区间	卡方值	标准误差	P 值
Botanical insecticide TC	Regression equation	Lethal concentration 50	95% fiducial limits	$\chi^2$	Standard error	P value
苦参碱 Matrine	$Y = 1.100X - 0.903$	6.621	5.145 ~ 8.228	256.416	0.067	<0.0001
鱼藤酮 Rotenone	$Y = 1.197X - 1.617$	22.436	17.845 ~ 28.698	336.293	0.068	<0.0001
除虫菊素 Pyrethrin	$Y = 0.861X - 0.055$	1.159	0.756 ~ 1.835	525.278	0.034	<0.0001

表 3 苦参碱、鱼藤酮、除虫菊素商品制剂对红火蚁工蚁触杀毒力的致死中浓度

Table 3  $LC_{50}$  Lethal concentration of matrine, rotenone, and pyrethrin commercial products against *Solenopsis invicta* workers

植物源农药商品制剂	毒力回归方程	$LC_{50}$ 值 (mg/L)	95% 置信区间	卡方值	标准误差	P 值
Botanical insecticide EC	Regression equation	Lethal concentration 50	95% fiducial limits	$\chi^2$	Standard error	P value
苦参碱 Matrine	$Y = 1.653X + 0.662$	0.397	0.331 ~ 0.466	250.945	0.076	<0.0001
鱼藤酮 Rotenone	$Y = 2.834X - 5.517$	88.47	78.156 ~ 100.776	381.754	0.101	<0.0001
除虫菊素 Pyrethrin	$Y = 1.095X - 0.594$	3.490	2.313 ~ 5.318	671.393	0.038	<0.0001

### 2.3 不同灌巢处理对红火蚁蚁巢的防治效果

通过分析结果显示,浓度为 25.00 mg/L 的苦参碱灌巢对蚁巢防治效果最优 (表 4),处理第 14 天红火蚁蚁巢减退率高达 100%,显著高于其余处理;其次为 250.00 mg/L 的鱼藤酮,14 d 后蚁巢减退率为 87.5% ( $F = 60.157$ ,  $df = 6$ ,  $P < 0.0001$ )。对照组清水对红火蚁蚁巢的防治效果最差,蚁巢减退率为 0%。从蚁巢平均得分情况来看,得分越低,蚁巢防治效果越好,减退率越高。25.00 mg/L 的苦参碱灌巢处理蚁巢得分情况为 1.00,除 250.00 mg/L 的鱼藤酮得分 1.29 外,显著低于其余灌巢处理的得分;对照组得分 3.17,显著高于所有药剂灌巢处理 ( $F = 18.635$ ,  $df = 6$ ,  $P < 0.0001$ )。

### 2.4 不同灌巢处理对红火蚁工蚁的防治效果

灌巢处理前后诱集红火蚁工蚁数量的结果显

示,75.00 mg/L 和 37.50 mg/L 的除虫菊素对红火蚁活动工蚁数量均具有一定的抑制效果,处理第 1 天工蚁减退率分别为 87.38% 和 86.24%。处理第 4 天,对工蚁防效最好的为 75.00 mg/L 除虫菊素,工蚁减退率高达 93.15%。75.00 mg/L 和 37.50 mg/L 除虫菊素处理第 7 天,工蚁减退率分别为 91.83% 和 89.34%,依旧对工蚁的防治效果最好。75.00 mg/L 除虫菊素处理第 14 天对工蚁的防效达 95.23%,与 250.00 mg/L 鱼藤酮防效 78.30% 无显著性差异。清水灌巢处理第 14 天,工蚁防效仅为 10.83% (表 5)。

### 2.5 不同灌巢处理对红火蚁蚁群的防治效果

不同药剂灌巢处理对蚁群的防治结果表明,25.00 mg/L 苦参碱溶液处理第 14 天蚁群平均级别为 0,对蚁群防治效果高达 100%,显著地优于其他处理 ( $F = 95.846$ ,  $df = 9$ ,  $P < 0.001$ )。其次

表 4 不同药剂灌巢处理第 14 天红火蚁蚁巢的防治效果和蚁巢得分

Table 4 Mortality of fire ant mounds and mean mound score 14 d after mound drench with different botanical insecticides treatment

植物源农药种类 Botanical insecticides	浓度 (mg/L) Concentration	蚁巢防治效果 $P_N$ (%) Mortality of fire ant mounds $P_N$	处理后蚁巢得分 Mound score after treatment
苦参碱 Matrine	25.00	100.00 ± 0.00 a	1.00 ± 0.00 a
	12.50	81.25 ± 2.08 bc	1.40 ± 0.16 b
鱼藤酮 Rotenone	250.00	87.50 ± 4.17 b	1.29 ± 0.18 b
	125.0	79.17 ± 4.17 bcd	1.38 ± 0.18 b
除虫菊素 Pyrethrin	75.00	71.43 ± 5.83 cd	1.43 ± 0.16 b
	37.50	66.67 ± 7.04 d	1.48 ± 0.16 b
对照 Control	0.00	0.00 ± 0.00 e	3.17 ± 0.21 c

注: 表中数值为平均值 ± 标准误差。经单因素方差分析 (Tukey 法), 表中同列相同字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

Note: The data in the table were means ± standard errors. Mortality of mounds and mound score using one-way ANOVA (Tukey test). The same letters in the same column represent no significant difference ( $P > 0.05$ ).

表 5 不同药剂灌巢处理后红火蚁工蚁的防治效果

Table 5 Reduction rate of fire ant workers by different botanical insecticides at different concentrations after mound drench

植物源农药种类 Botanical insecticides	浓度 (mg/L) Concentration	工蚁防治效果 $P_w$ (%) The reduction rate of fire ant workers $P_w$			
		1 d	4 d	7 d	14 d
苦参碱 Matrine	25.00	35.32 ± 5.35 bc	66.19 ± 4.45 ab	73.97 ± 5.17 ab	68.04 ± 13.71 b
	12.50	29.39 ± 2.59 c	25.06 ± 1.71 c	43.04 ± 5.27 b	26.61 ± 2.74 c
鱼藤酮 Rotenone	250.00	64.47 ± 5.89 ab	52.22 ± 4.61 ab	59.66 ± 5.14 ab	69.94 ± 4.08 ab
	125.00	57.33 ± 4.24 abc	66.16 ± 4.58 ab	67.95 ± 1.94 ab	78.30 ± 4.11 ab
除虫菊素 Pyrethrin	75.00	87.38 ± 4.34 a	93.15 ± 2.50 a	91.83 ± 1.30 a	95.23 ± 1.95 a
	37.50	86.24 ± 2.84 a	53.36 ± 5.07 ab	89.34 ± 2.22 a	74.00 ± 2.36 ab
对照 Control	0.00	-23.50 ± 7.86 d	-29.27 ± 12.32 d	-10.48 ± 16.95 c	11.32 ± 1.83 c

注: 表中数值为平均值 ± 标准误差。经单因素方差分析 (Tukey 法), 表中同列相同字母表示没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

Note: The data in the table were means ± standard errors. By one-way ANOVA (Tukey's test), same letters in same column represented no significant difference ( $P > 0.05$ ).

250.00 mg/L 鱼藤酮溶液对蚁群的防治效果也达 90% 以上, 与防效分别为 87.50% 和 83.33% 的 25.00 mg/L 苦参碱和 250.00 mg/L 鱼藤酮差异不显著 (表 6)。

## 2.6 不同灌巢处理对红火蚁综合防治效果

根据相关公式计算, 25.00 mg/L、12.50 mg/L 苦参碱和 250.00 mg/L、125.00 mg/L 鱼藤酮和 75.00 mg/L、37.50 mg/L 除虫菊素灌巢处理后, 对红火蚁的综合防效分别为 93.61%、73.45%、85.38%、81.08%、78.57% 和 68.18%。25.0 mg/L 苦参碱灌巢处理综合防效最优, 显著高于其余灌

巢处理 (Kruskal-Wallis test,  $\chi^2 = 21.985$ ,  $df = 6$ ,  $P = 0.001$ )。对照清水灌巢处理对红火蚁的综合防效仅为 2.26%。

## 2.7 不同药剂红火蚁灌巢处理对蚂蚁丰富度的影响

### 2.7.1 不同灌巢处理区的蚂蚁种类

在试验区共采集到的蚂蚁种类属 4 亚科、19 属、25 种, 在药剂处理区共采集到 4 亚科 19 属 25 种, 在对照区共采集到 4 亚科 10 属 10 种。总体上, 药剂灌巢区后采集到的蚂蚁种类更丰富。其中包括 4 种外来种, 如细足捷蚁 *Anoplolepis*

*gracilipes*、黑头酸臭蚁 *Tapinoma melanocephalum*、*invicta* (Guenard and Dunn, 2012; Xu *et al.*, 2022) 长角立毛蚁 *Paratrechina longicornis* 和红火蚁 *S.* (表 7)。

表 6 不同药剂灌巢处理后对红火蚁蚁群防治效果

Table 6 Average activity level of fire ant colony and control effect of fire ant colony after mound drench with botanical insecticides treatment

植物源农药种类 Botanical insecticides	浓度 (mg/L) Concentration	灌巢处理后第 14 天蚁群平均级别 The average activity level of fire ant colony 14 d after mound drench	灌巢处理后蚁群防治效果 $P_c$ (%) Control effect of fire ant mound $P_c$
苦参碱 Matrine	25.00	0.00 ± 0.00 a	100.00 ± 0.00 a
	12.50	0.38 ± 0.18 b	87.50 ± 4.17 b
鱼藤酮 Rotenone	250.00	0.29 ± 0.18 ab	90.28 ± 4.17 b
	125.00	0.50 ± 0.22 b	83.33 ± 6.00 bc
除虫菊 Pyrethrin	75.00	0.71 ± 0.23 b	76.19 ± 4.35 bc
	37.50	1.00 ± 0.28 b	66.67 ± 3.37 c
对照 Control	0.00	3.00 ± 0.00 c	0.00 ± 0.00 d

注: 表中数值为平均值 ± 标准误。经非参数检验 (Mann-Whitney U 法), 表中同列相同字母表示没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。  
Note: The data in the table were means ± standard errors. By nonparametric test (Mann-Whitney U test), same letters in same column represented no significant difference ( $P > 0.05$ ).

表 7 不同灌巢处理区中蚂蚁的种类

Table 7 Ant species between control plots and treatment plots after mound drench

种类 Ant species	本地种/入侵种 Native/introduced species	对照区 Control plots	灌巢处理区 Experimental plots		
			苦参碱 Matrine	鱼藤酮 Rotenone	除虫菊素 Pyrethrin
<b>臭蚁亚科 Dolichoderinae</b>					
无毛凹臭蚁 <i>Ochetellus glaber</i>	本地种 Native	-	-	-	+
黑头酸臭蚁 <i>Tapinoma melanocephalum</i> (Fabricius)	外来种 Introduced	+	+	+	+
<b>蚁亚科 Formicinae</b>					
长足捷蚁 <i>Anoplolepis gracilipes</i> (F. Smith)	外来种 Introduced	-	+	-	+
黄斑弓背蚁 <i>Camponotus albosparsus</i> (Bingham)	本地种 Native	+	+	+	+
黄足尼氏蚁 <i>Nylanderia flavipes</i>	本地种 Native	+	+	+	+
尼氏蚁属 <i>Nylanderia</i> sp.	本地种 Native	-	+	+	+
双齿多刺蚁 <i>Polyrhachis dives</i> (Smith)	本地种 Native	+	+	+	+
长角立毛蚁 <i>Paratrechina longicornis</i> (Latreille)	外来种 Introduced	-	-	-	+
<b>切叶蚁亚科 Myrmicinae</b>					
裸心结蚁 <i>Cardiocondyla nuda</i> (Mayr)	本地种 Native	-	+	-	-
心结蚁属 <i>Cardiocondyla</i> sp.	本地种 Native	-	-	+	-
盲切叶蚁属 <i>Carebara</i> sp.	本地种 Native	+	+	-	+
隐居瘤颚蚁 <i>Dacatria templaris</i>	本地种 Native	-	+	-	-

续表 7 Continued table 7

种类 Ant species	本地种/入侵种 Native/introduced species	对照区 Control plots	灌巢处理区 Experimental plots		
			苦参碱 Matrine	鱼藤酮 Rotenone	除虫菊素 Pyrethrin
中华小家蚁 <i>Monomorium chinense</i> (Santschi)	本地种 Native	-	-	-	+
法老小家蚁 <i>Monomorium pharaonis</i> (Linnaeus)	本地种 Native	-	+	-	-
小家蚁属 <i>Monomorium</i> sp.	本地种 Native	-	+	+	-
暗小家蚁 <i>Monomorium subopacum</i> (F. Smith)	本地种 Native	+	+	+	+
刻纹棱胸切叶蚁 <i>Pristomyrmex punctatus</i>	本地种 Native	-	-	-	+
大头蚁属 <i>Pheidole</i> sp.	尚不清楚 Dubious	+	+	+	+
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i> (Buren)	外来种 Introduced	+	+	+	+
双隆骨铺道蚁 <i>Tetramorium bicarinatum</i> (Nylander)	本地种 Native	+	+	+	+
铺道蚁属 <i>Tetramorium</i> sp.	本地种 Native	-	+	+	+
<b>猛蚁亚科 Ponerinae</b>					
短猛蚁属 <i>Brachyponera</i> sp.	本地种 Native	-	+	-	+
姬猛蚁属 <i>Hypoponera</i> sp.	本地种 Native	-	+	-	-
细颚猛蚁属 <i>Leptogenys</i> sp.	本地种 Native	+	-	+	+
横纹齿猛蚁 <i>Odontoponera transversa</i> (Smith)	本地种 Native	-	-	+	-
合计 Total		10	18	14	18

注 “+”表示该生境中该种蚂蚁存在，“-”表示不存在。Note “+”denoted the species were trapped，“-”denoted the species was not trapped.

### 2.7.2 不同处理区蚂蚁类群特征指数变化

使用植物源药剂对红火蚁蚁巢灌巢处理第 14 天, 处理区诱集到的红火蚁活动工蚁数由防治前的 644 头降为防治后的 200 头, 下降了 68.94%。比较不同灌巢处理对蚂蚁群落多样性的影响, 结果表明, 药剂灌巢防治第 14 天蚂蚁多样性指数为  $1.34 \pm 0.13$  显著高于防治前  $0.87 \pm 0.14$  (Student test,  $t = -2.483$ ,  $df = 10$ ,  $P = 0.032$ );

防治后蚂蚁均匀度指数为  $0.70 \pm 0.04$  显著高于防治前  $0.50 \pm 0.07$  (Student test,  $t = -2.426$ ,  $df = 10$ ,  $P = 0.036$ ); 防治后蚂蚁优势度指数为  $0.35 \pm 0.03$  显著低于防治前  $0.57 \pm 0.08$  (Student test,  $t = 2.564$ ,  $df = 10$ ,  $P = 0.028$ ) (表 8)。可见, 灌巢处理后的各区蚂蚁类群多样性指数和均匀度指数升高, 优势度指数下降 (表 8 和表 9)。其中苦参碱和除虫菊素处理区灌巢处理后蚂蚁类群物种

表 8 药剂灌巢处理后蚂蚁类群特征指数变化

Table 8 Change of characteristic index of ants exposed to botanical insecticides after mound drench treatments

特征指数 Characteristic index	施药前 Before treatment	施药第 14 天 14 d after treatment
<i>H</i>	$0.87 \pm 0.14$ a	$1.34 \pm 0.13$ b
<i>E</i>	$0.50 \pm 0.07$ a	$0.70 \pm 0.04$ b
<i>C</i>	$0.57 \pm 0.08$ a	$0.35 \pm 0.03$ b

注: *H*、*E* 和 *C* 分别代表物种多样性指数、均匀度指数和优势度指数。表中特征值指数为平均值  $\pm$  标准误。数据后相同字母表示经独立样本 T 检验差异不显著 ( $P > 0.05$ )。Note: *H*, *E*, and *C* represented the species diversity index, species evenness index, and species dominance index. Data in the table was the mean  $\pm$  standard error. Same letters within a column indicated no significant difference (student test,  $P > 0.05$ ).

表 9 不同药剂灌巢处理区蚂蚁类群特征指数变化

Table 9 Change of characteristic index of ants exposed to botanical insecticides after mound drench treatments

处理时间 (d) Days after treatment	特征指数 Characteristic index	苦参碱 (mg/L) Matrine		鱼藤酮 (mg/L) Rotenone		除虫菊素 (mg/L) Pyrethrin		对照 Control	
		25.00	12.50	250.00	125.00	75.00	37.50		
施药前 Before treatment	<i>H</i>	0.66 ± 0.22	0.92 ± 0.18	0.31 ± 0.09	0.92 ± 0.01	1.07 ± 0.04	1.31 ± 0.08	0.54 ± 0.18	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
	1	<i>H</i>	1.20 ± 0.15	1.44 ± 0.25	0.92 ± 0.10	1.05 ± 0.21	1.66 ± 0.26	1.55 ± 0.03	0.77 ± 0.09
			Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa
	4	<i>H</i>	1.25 ± 0.16	1.06 ± 0.41	1.19 ± 0.05	0.91 ± 0.15	1.34 ± 0.31	1.82 ± 0.04	0.71 ± 0.12
Aa			Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
7	<i>H</i>	1.32 ± 0.27	1.71 ± 0.09	0.77 ± 0.13	0.63 ± 0.15	1.22 ± 0.06	1.27 ± 0.13	1.42 ± 0.08	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
14	<i>H</i>	1.46 ± 0.22	1.50 ± 0.11	0.85 ± 0.25	1.07 ± 0.20	1.45 ± 0.57	1.71 ± 0.03	1.00 ± 0.24	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
施药前 Before treatment	<i>E</i>	0.41 ± 0.10	0.57 ± 0.02	0.19 ± 0.03	0.57 ± 0.01	0.67 ± 0.03	0.59 ± 0.06	0.39 ± 0.12	
		Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	
	1	<i>E</i>	0.75 ± 0.18	0.63 ± 0.11	0.43 ± 0.06	0.59 ± 0.13	0.69 ± 0.11	0.68 ± 0.04	0.47 ± 0.19
			Aa	Aa	Aab	Aa	Aa	Aa	Aa
	4	<i>E</i>	0.78 ± 0.18	0.48 ± 0.14	0.62 ± 0.03	0.51 ± 0.06	0.75 ± 0.03	0.83 ± 0.05	0.44 ± 0.15
Aa			Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
7	<i>E</i>	0.68 ± 0.13	0.71 ± 0.07	0.48 ± 0.09	0.46 ± 0.11	0.63 ± 0.01	0.71 ± 0.03	0.73 ± 0.23	
		Aa	Aa	Aab	Aa	Aa	Aa	Aa	
14	<i>E</i>	0.66 ± 0.13	0.77 ± 0.02	0.53 ± 0.02	0.77 ± 0.03	0.75 ± 0.12	0.69 ± 0.09	0.51 ± 0.20	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
施药前 Before treatment	<i>C</i>	0.68 ± 0.08	0.53 ± 0.07	0.88 ± 0.04	0.56 ± 0.01	0.39 ± 0.03	0.35 ± 0.02	0.75 ± 0.15	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
	1	<i>C</i>	0.32 ± 0.03	0.30 ± 0.14	0.60 ± 0.04	0.49 ± 0.12	0.33 ± 0.13	0.29 ± 0.04	0.64 ± 0.10
			Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa
	4	<i>C</i>	0.34 ± 0.14	0.57 ± 0.16	0.44 ± 0.02	0.53 ± 0.06	0.32 ± 0.11	0.19 ± 0.01	0.67 ± 0.04
Aa			Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
7	<i>C</i>	0.34 ± 0.12	0.25 ± 0.04	0.63 ± 0.09	0.69 ± 0.09	0.44 ± 0.01	0.37 ± 0.03	0.28 ± 0.04	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	
14	<i>C</i>	0.37 ± 0.15	0.28 ± 0.01	0.43 ± 0.10	0.42 ± 0.11	0.33 ± 0.25	0.25 ± 0.02	0.44 ± 0.06	
		Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	

注: *H*、*E* 和 *C* 分别代表物种多样性指数、均匀度指数和优势度指数。表中特征值指数为平均值 ± 标准误。同行数据后相同大写字母表示经方差分析 (Tukey 检验) 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 同列数据后相同小写字母表示经方差分析 (Tukey 检验) 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。Note: *H*, *E*, and *C* represented the species diversity index, species evenness index and species dominance index, respectively. Data in the table was mean ± standard error. Same capital letters within a row indicated no significant difference. Same lowercase letters within a column indicated no significant difference (Tukey's test,  $P > 0.05$ ).

多样性指数上升较为明显。蚂蚁类群均匀度指数相比于处理前同样均有上升; 物种优势度指数均下降, 其中苦参碱和 250 mg/L 鱼藤酮优势度指数

下降得较为明显。综上所述, 灌巢处理降低了该生物群落中红火蚁的比例, 增加其他蚂蚁的种类和数量, 丰富处理区蚂蚁群落的生物多样性。

### 3 结论与讨论

灌巢药剂的选择是影响灌巢技术防治效果的最关键因子之一。曾玲等 (2005) 和陈焕瑜等 (2006) 指出氨基甲酸酯类、有机磷类和拟除虫菊酯类等化学杀虫剂对红火蚁有很好的触杀毒力, 但生物杀虫剂阿维菌素的触杀毒力非常低, 不适用于灌巢使用。植物源农药具有毒性低、对人和动物安全、良好的生态、环境和应用安全性 (徐士超等, 2019; Chen and Oi, 2020), 可以在家居、野外等多种复杂场合使用, 并已具备商品化的生产、贮运和应用安全性评价。为研制多样化的红火蚁防治药剂, 同时探索绿色、安全、环境友好的综合防治方法, 本论文在实验室和田间评价了苦参碱、鱼藤酮以及除虫菊素 3 种植物源农药对红火蚁的毒力及防治效果。在室内红火蚁药膜法触杀试验中, 效果最好为除虫菊素, 苦参碱次之。室内毒土法试验结果表明, 0.5% 苦参碱可溶液剂对红火蚁工蚁防效最优,  $LC_{50}$  最低, 仅为 0.397 mg/L。田间灌巢处理对红火蚁综合防治效果最优的为 25 mg/L 0.5% 苦参碱可溶液剂, 防效高达 93.61%, 1.5% 除虫菊素水乳剂防效最差。药膜法和毒土法出现结果上的差异, 推测可能是苦参碱、鱼藤酮和除虫菊素商品制剂所使用的助剂不同, 使得苦参碱红火蚁触杀效果最优。对于野外灌巢的药剂试验浓度高于室内毒土法的  $LC_{50}$ , 这是基于野外红火蚁蚁巢结构复杂、巢内蚂蚁数量基数大和制剂的成本考虑, 因此将药剂浓度各提升了相应的倍数进行野外灌巢。盆栽植物防控红火蚁时可以推荐使用 0.5% 苦参碱可溶液剂灭除。由于苦参碱的防效最高以及防治成本较低, 使其在红火蚁灭除方面具有很好的潜力。

红火蚁可通过资源竞争和干扰竞争与当地蚂蚁争夺食物和生态位, 使本地蚂蚁群落的多样性、均匀度和优势度均发生剧烈变化, 排挤或逐渐取代本地蚂蚁, 严重破坏当地生态系统平衡 (Morrison and Lloyd, 2000; Arnett and Gotelli, 2000; 张波等, 2012; 刘杰等, 2015), 但红火蚁数量消退后, 本地蚂蚁的种类和数量则会恢复, 生态平衡将会重建或恢复 (陈兢, 2008)。有研究指出, 红火蚁消退后蚂蚁的种类和数量分别为防治前的 1.58 和 2.23 倍, 其它节肢动物种

类数比防治前多 1 纲 5 目 6 科, 数量也高于防治前 (陈兢, 2008)。本研究使用植物源药剂对红火蚁蚁巢灌巢处理第 14 天, 处理区诱集到的红火蚁活动工蚁数由防治前的 644 头降为防治后的 200 头, 下降了 68.94%; 防治后蚂蚁多样性指数、均匀度指数显著地高于防治前的, 蚂蚁优势度显著地低于防治前的, 说明药剂灌巢处理降低了蚂蚁群落中红火蚁种群数量, 增加其它蚂蚁的种类和数量, 蚂蚁群落多样性增加。前人的研究也显示类似现象, 如刘杰等 (2015) 发现药剂灌巢等 3 种方法对本地蚂蚁产生不同的影响, 结果显示, 药剂灌巢后蚂蚁群落多样性指数为 1.94, 显著高于防治前的 1.56, 但饵剂处理前后本土蚂蚁群落多样性指数差异不显著。结果表明, 药剂灌巢法可以显著增加其处理区的蚂蚁多样性。刘杰 (2006) 等使用 5% 氟虫腈灌巢处理使得红火蚁工蚁的诱捕率从 92.86% 下降至 35.71%, 但不会降低本地蚂蚁种类和数量。宋侦东等 (2009) 测试了饵剂、粉剂和灌巢 3 种不同施药方法对红火蚁的防治效果及对绿化带本地蚂蚁的影响, 其中饵剂和粉剂虽能有效降低红火蚁数量, 但同时也杀灭本地蚂蚁, 能显著降低绿化带本地蚂蚁的种类和数量, 使得蚂蚁多样性指数降低; 灌巢处理则对本地蚂蚁的影响较小。本研究发现灌巢处理区蚂蚁群落的物种多样性和均匀度指数均有上升。然而, 本研究蚂蚁多样性调查的时间过短, 仅在 14 d 期间, 不足以完全说明群落的变化。未来将延长调查周期作进一步研究, 以确认植物源农药在红火蚁可持续防控中的作用。

### 参考文献 (References)

- Arnett AE, Gotelli NJ. Biogeographic effects of red fire ant invasion [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3 (4): 257–261.
- Chen HY, Feng X, Lü LH, et al. Bioassay of contact insecticides to red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006, 5: 28–30. [陈焕瑜, 冯夏, 吕利华, 等. 防治红火蚁触杀型药剂的筛选 [J]. 广东农业科学, 2006, 5: 28–30]
- Chen HY, Yang LP, Cheng DM, et al. Effects of pyrethrins and nicotine sulfate on toxicity and behavior of *Solenopsis invicta* Buren [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38 (2): 176–182. [陈慧雅, 杨留鹏, 程东美, 等. 2 种植物源农药对红火蚁的毒杀活性和行为影响 [J]. 四川农业大学学报, 2020, 38 (2): 176–182]
- Chen J, Oi DH. Naturally occurring compounds/materials as alternatives to synthetic chemical insecticides for use in fire ant management

- [J]. *Insects*, 2020, 11: 758.
- Chen J. The Restoration of Arthropods Diversity in Different Habitat after the Regression of Red Imported Fire Ant (*Solenopsis invicta* Buren) [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University Master Thesis, 2008. [陈斌. 红火蚁消退后不同生境节肢动物多样性的恢复研究 [D]. 福州: 福建农林大学硕士论文, 2008]
- Crombiel E. Chemistry of the natural pyrethrins [J]. *Chemistry of the Natural Pyrethrins*, 1961, 19 (1): 120–164.
- Fu JT. Study on the Toxic Effects of Three Formulations Rotenone on Mud Carp and Earthworm and Environmental Safety Evaluation [D]. Guangzhou: South China Agricultural University Master Thesis, 2016. [付建涛. 三种剂型鱼藤酮对土鲮鱼和蚯蚓的毒性效应以及环境安全性评价 [D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2016]
- Guenard B, Dunn RR. A checklist of the ants of China [J]. *Zootaxa*, 2012, 3558: 1–77.
- He J, Ma ZQ, Zhang X. Review of botanical pesticide [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2006, 34 (9): 79–85. [何军, 马志卿, 张兴. 植物源农药概述 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (9): 79–85]
- 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]
- Isman MB. Botanical insecticides in the twenty-first century – fulfilling their promise [J]. *Annual Review of Entomology*, 2020, 65: 233–249.
- Jia CS. Calculating the LC<sub>50</sub> of insecticides with software SPSS [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2006, 43 (3): 414–417. [贾春生. 利用 SPSS 软件计算杀虫剂的 LC<sub>50</sub> [J]. 昆虫知识, 2006, 43 (3): 414–417]
- Li J, Jiang L, Zhang YW, et al. Study of a new biological control method combining an enteropathogen and a chemical insecticide against *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111 (2): 817–822.
- Liu J, Lü LH, Chen HY, et al. Red imported fire ant control with fipronil mound drench and its impact in ant community [J]. *Guangdong Agriculture Science*, 2006, 33 (5): 24–27. [刘杰, 吕利华, 陈焕瑜, 等. 灌巢对红火蚁的防效评价及对蚂蚁群落的影响 [J]. 广东农业科学, 2006, 33 (5): 24–27]
- Liu J, Qi GJ, Lü LH, et al. Effects of using fipronil to control *Solenopsis invicta* Buren on ant colony diversity in a greenbelt [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (6): 1385–1391. [刘杰, 齐国君, 吕利华, 等. 氟虫腈防治红火蚁对绿地蚂蚁群落多样性的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (6): 1385–1391]
- Liu M, Liu XY, Cheng JF, et al. Advance in the pharmacological research on matrine [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2003, 28 (9): 801–804. [刘梅, 刘雪英, 程建峰, 等. 苦参碱的药理研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2003, 28 (9): 801–804]
- Lu YY, Wu BQ, Xu YJ, et al. Effects of red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) on the species structure of ant communities in South China [J]. *Sociobiology*, 2012, 59 (1): 275–285.
- Lu YY, Zeng L, Xu YJ, 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. [陆永跃, 曾玲, 许益鏊, 等. 外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40 (5): 149–160]
- Lu YY, Zeng L. Ten years after red imported fire ant found to invade China: History, current situation and trend of its infestation [J]. *Plant Quarantine*, 2015, 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 [J]. 植物检疫, 2015, 29 (2): 1–6]
- Matsuo N, Mori T. Pyrethroids: From Chrysanthemum to Modern Industrial Insecticide [M]. Heidelberg: Springer, 2012: 314.
- Ministry of agriculture and rural areas. List of national administrative regions for the distribution of agricultural plant quarantine pests [EB/OL]. (2022-07-01) [2022-09-18]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGSL/202207/t20220707\\_6404284.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGSL/202207/t20220707_6404284.htm). [农业农村部. 《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区划名录》[EB/OL]. (2022-07-01) [2022-09-18]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGSL/202207/t20220707\\_6404284htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGSL/202207/t20220707_6404284htm)]
- Morrison LW. Mechanisms of interspecific competition among invasive and two native fire ants [J]. *Oikos*, 2000, 90 (2): 238–252.
- Opolot HN, Agona A, Kyamanywa S, et al. Integrated field management of cowpea pests using selected synthetic and botanical pesticides [J]. *Crop Protection*, 2006, 25 (11): 1145–1152.
- Riyaz M, Mathew P, Zuber SM, et al. Botanical pesticides for an eco-friendly and sustainable agriculture: New challenges and prospects. In: Bandh SA, eds. *Sustainable Agriculture* [C]. Cham: Springer, 2022: 69–96.
- Senthil-Nathan S. Physiological and biochemical effect of neem and other Meliaceae plants secondary metabolites against Lepidopteran insects [J]. *Frontiers in Physiology*, 2013, 4: 359.
- Siddiqui JA, Zhang Y, Luo Y, et al. Comprehensive detoxification mechanism assessment of red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) against indoxacarb [J]. *Molecules*, 2022, 27: 870.
- Song ZD, Xu YJ, Lu YY, et al. Effect of chemical control on red imported fire ant and native ants in greenbelt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29: 6148–6155.
- Tsai YH, Yang CC, Lin CC, et al. The impact of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, and bait treatment on the diversity of native ants a case study at National Taipei University, Sanshia campus [J]. *Formosan Entomologist*, 2009, 29 (4): 263–277.
- Vogt JT, Shelton TG, Merchant ME, et al. Efficacy of three citrus oil formulations against *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae), the red imported fire ant [J]. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, 2002, 19 (3): 159–171.

- Wang L, Chen J. Fatty amines from little black ants, *Monomorium minimum*, and their biological activities against red imported fire ants, *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2015, 41: 708–715.
- Wang L, Lu YY, Deng JF, et al. A device of controlling ants: CN210492319U [P]. 2020–05–12 [2022–05–18]. [王磊, 陆永跃, 邓杰夫, 等. 一种灭蚁装置: CN210492319U [P]. 2020–05–12 [2022–05–18]]
- Wang L, Wang Z, Zeng L, et al. Negative effects of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) invasion on arthropod community in the banana plantations [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (4): 835–847 [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]
- 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, Xu YJ, et al. Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China [J]. *NeoBiota*, 2020, 54: 89–124.
- Wen K, Li ZQ, Zhang QS, et al. Influence of habitat types on controlling efficacy of indoxacarb bait on *Solenopsis invicta* Buren [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (4): 854–861. [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]
- Wu B Q, Lu YY, Liang GW, et al. Influence of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) on the diversity of ant communities in a newly infested longan orchard and grass areas nearby [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 D, Zeng L, Lu YY, et al. Effects of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) and its interaction with aphids on the seed productions of mungbean and rapeseed plants [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107 (5): 1758–1764.
- Xi YB, Lu YY, Liang GW, et al. Effects of the red imported fire ant (RIFA), *Solenopsis invicta* Buren, on diversity and stability of invertebrate community in litchi orchards [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 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, 2010, 30 (8): 2084–2099]
- Xu HH, Huang JG. Advances in the research of rotenone [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2001, 2: 140–143. [徐汉虹, 黄继光. 鱼藤酮的研究进展 [J]. 西南农业大学学报, 2001, 2: 140–143]
- Xu SC, Dong HH, Zeng XJ, et al. Research progress in screening and bioactivity of terpenoid botanical pesticides [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2019, 39 (1): 1–12. [徐士超, 董欢欢, 曾小静, 等. 萜类植物源农药的筛选及活性研究进展 [J]. 林产化学与工业, 2019, 39 (1): 1–12]
- Xu YJ, Vargo EL, Tsuji K, et al. Exotic ants of the Asia–Pacific: Invasion, national response, and ongoing needs [J]. *Annual Review of Entomology*, 2022, 7 (67): 27–42.
- Zeng L, Lu YY, Chen ZN, et al. Detection and Control for Red Imported Fire Ant *Solenopsis invicta* Buren [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2005: 5. [曾玲, 陆永跃, 陈忠南, 等. 红火蚁检测与防治 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2005: 5]
- Zeng XH, Chen SH, Wang SZ, et al. Study on the contact toxicity and stomach poisoning of four botanical pesticide against *Coptotermes formosanus* [J]. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 2019, 25 (4): 370–373. [曾小虎, 陈尚海, 王思忠, 等. 4种植物源农药对台湾乳白蚁的触杀和胃毒作用研究 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2019, 25 (4): 370–373]
- Zhang B, He YR, Chen T, et al. Dietary composition of foragers of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in two habitats, mulberry orchard and barren land, in South China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58 (4): 382–390. [张波, 何余容, 陈婷, 等. 华南地区桑园和荒地两种生境中红火蚁觅食工蚁的食物组成 [J]. 昆虫学报, 2015, 58 (4): 382–390]
- Zhang B, Lü LH, Chen J, et al. Dietary habits of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mulberry field and wasteland in South China [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39 (9): 83–86. [张波, 吕利华, 陈健, 等. 华南地区桑园和荒地生境内红火蚁食物组成研究 [J]. 广东农业科学, 2012, 39 (9): 83–86]
- Zhang B, Zhang L, Cui R, et al. Cloning and expression of multiple cytochrome p450 genes: Induction by fipronil in workers of the red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) [J]. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0150915.
- Zhang JP, He SL, Hu WP. Effect on lustrating of fish's *Trichodinella minuta* by extractions from lightyellow *Sophora* (*Sophora flavescens*) through different methods [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2005, 2: 57–59, 107. [张继平, 贺顺连, 胡卫平. 苦参不同方法提取物抗鱼体车轮虫作用的研究 [J]. 长江大学学报 (自然科学版), 2005, 2: 57–59, 107]
- Zhang ZZ, Xi HC, Chang WC, et al. Current situation of commercialized application of plant–derived pesticides in China and suggestions for industrial development [J]. *World Pesticide*, 2020, 42 (12): 6–15. [张正炜, 郝厚诚, 常文程, 等. 我国植物源农药商品化应用现状及产业发展建议 [J]. 世界农药, 2020, 42 (12): 6–15]
- 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]