



李琳, 李晓媚, 冶晓莉, 李广升, 林伟强, 杜澄举, 王偲. 尼泊金酯类防腐剂不影响红火蚁饵料搬运行为及茚虫威饵剂防治效果 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 580–588. LI Lin, LI Xiao-Mei, YE Xiao-Li, LI Guang-Sheng, LIN Wei-Qiang, DU Cheng-Ju, WANG Cai. Paraben preservatives do not affect bait transport behavior of *Solenopsis invicta* and control effectiveness of indoxacarb bait [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 580–588.

尼泊金酯类防腐剂不影响红火蚁饵料搬运行为及 茚虫威饵剂防治效果

李琳*, 李晓媚*, 冶晓莉, 李广升, 林伟强, 杜澄举**, 王偲**

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642)

摘要: 【目的】饵剂法是防治红火蚁的重要方法之一。然而, 商业红火蚁饵剂含有大量油脂, 极易滋生微生物, 导致有效成分降解和适口性降低。【方法】添加脂溶性防腐剂既可降低红火蚁饵剂的灭菌工艺成本, 又能通过抑制微生物增殖延长产品货架期和使用时间。本研究假设3种可溶于油脂的尼泊金酯类防腐剂(对羟基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯和对羟基苯甲酸丁酯)不会影响红火蚁饵剂的适口性和防治效果。通过野外多选择试验, 分别比较了红火蚁对含有每种防腐剂(在大豆油中的浓度为0.05%、0.1%、0.2%)的饵料和对照饵料的搬运量。【结果】结果表明3种防腐剂均未干扰红火蚁的搬运行为(含各浓度防腐剂饵料的搬运量与对照无显著差异)。随后在实验室比较了添加防腐剂和未添加防腐剂的0.1%茚虫威饵剂对红火蚁的防治效果。结果表明无论是否添加防腐剂, 红火蚁取食茚虫威饵剂的死亡率与致死中时间(LT₅₀)均无显著差异, 表明防腐剂对茚虫威无拮抗作用。【结论】本研究表明3种脂溶性尼泊金酯类防腐剂均可应用于红火蚁饵剂的生产。

关键词: 红火蚁; 饵剂; 变质; 尼泊金酯; 脂溶性防腐剂

中图分类号: Q968.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0580-09

Paraben preservatives do not affect bait transport behavior of *Solenopsis invicta* and control effectiveness of indoxacarb bait

LI Lin*, LI Xiao-Mei*, YE Xiao-Li, LI Guang-Sheng, LIN Wei-Qiang, DU Cheng-Ju**, WANG Cai** (College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Aim】Baiting is one of the main methods for controlling red imported fire ants (*Solenopsis invicta*). However, commercial fire ant baits contain large amounts of lipids that may cause microbial contamination, leading to active-ingredient degradation and palatability reduction. 【Methods】Adding lipid-soluble preservatives may reduce production costs associated with the sterilization processes of fire ant bait and extend product shelf life during storage and field application by inhibiting microbial proliferation. This study hypothesized that the three lipid-soluble paraben preservatives (methylparaben, propylparaben, and butylparaben) would not adversely affect palatability and effectiveness of fire ant baits. Field multiple-choice tests were conducted to compare bait transport amounts of *S. invicta* responding to bait containing each preservative (at concentrations of 0.05%, 0.1%, or 0.2% in soybean oil) and control

基金项目: 广东省林业科技计划项目 (F25018)

*共同第一作者: 李琳, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为林业有害生物防治, E-mail: li20223154036@stu.scau.edu.cn; 李晓媚, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为林业有害生物防治, E-mail: lixiaomei@stu.scau.edu.cn

**共同通讯作者 Author for correspondence: 杜澄举, 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市与林业有害生物综合防治, E-mail: 463957526@qq.com; 王偲, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为昆虫行为学与林业有害生物综合防治, E-mail: wangcai@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2025-03-24; 修回日期 Revision received: 2025-04-20; 接受日期 Accepted: 2025-04-22

baits. **【Results】** Results showed no significant differences in transportation among preservative-treated and control bait (the amounts of baits transported containing each preservative concentration showed no significant difference from the control). Laboratory bioassays were then conducted to evaluate the effectiveness of 0.1% indoxacarb baits with/without preservatives. Mortality and median lethal time (LT_{50}) of fire ants were not significantly different among 0.1% indoxacarb baits containing preservative or not, indicating the absence of antagonistic effects between preservatives and the active ingredient. **【Conclusion】** This study demonstrates the applicability of these three lipid-soluble paraben preservatives in fire ant bait production.

Key words: Red imported fire ant; bait; contamination; paraben; lipid-soluble preservative

红火蚁是世界广泛分布的重要的害虫, 对农林生产和生物多样性造成严重破坏 (Wang *et al.*, 2019; 杜澄举等, 2023; 王偲等, 2024; Zhao *et al.*, 2024)。由于红火蚁攻击性强并能蜇刺人体, 也对人民群众的生命健康安全造成重大威胁 (Kemp *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2012)。目前, 防治红火蚁的主要方法有饵剂法和蚁巢处理法。前者通过红火蚁的觅食和交哺行为, 将饵剂内的有效成分传递至蚁巢中的其它个体, 尤其是蚁后, 最终实现整巢杀灭的效果, 其有效性为大量实验室和野外研究所证实 (McNaught *et al.*, 2014; Allen and Miller, 2015; 谭德龙等, 2016; 谭煜婷等, 2020; Yasudai *et al.*, 2022)。与蚁巢处理相比, 饵剂法具有3个突出优点: (1) 饵剂法的成本较低 (Drees *et al.*, 2013); (2) 通过撒播器、无人机和飞机撒播饵剂, 能在较大范围内防治红火蚁 (Li and Cui, 2023); (3) 在一些降雨较多的季节或人为扰动较大的生境中, 红火蚁的筑巢行为可能被抑制, 在一些复杂环境中也不易找到所有蚁巢并进行防治 (尹艳琼等, 2022), 但使用饵剂仍能起到较好的防治效果。近来, 将饵剂法和蚁巢处理集成“两步法”(先使用饵剂对红火蚁进行区域防治, 再使用蚁巢处理杀灭残存的红火蚁), 能够进一步提高防治效果, 已在国内获得了广泛应用 (Wang *et al.*, 2020; 龚磊等, 2021; 钱明辉等, 2022)。

尽管商业性的红火蚁饵剂生产工艺已较为成熟, 但仍有提升和优化的空间。例如, 一些诱食剂、引诱剂、示踪信息素有望增强红火蚁对饵剂的觅食行为 (黎淳锋等, 2015; 邱华龙等, 2023; 沈嘉程和侯有明, 2024; 钟家美等, 2024); 研发防水饵剂则有望在多雨气候和潮湿环境下防治红

火蚁 (Kafle *et al.*, 2009, 2010)。此外, 由于红火蚁饵剂使用油脂作为引诱剂和灭蚁活性成分的溶剂, 极易滋生微生物, 造成饵剂适口性的降低和活性成分的分解, 因此饵剂生产中的灭菌工艺尤为重要。尼泊金酯类防腐剂能够溶解于油脂, 并通过破坏微生物细胞膜结构达到抑菌效果 (陈国安等, 2003; 李永飞等, 2003)。在红火蚁饵剂中添加脂溶性防腐剂具有两个潜在优点: (1) 与高温处理等灭菌工艺相比, 添加防腐剂不需要特殊设备, 处理成本也较低; (2) 防腐剂可持续保护饵剂免受微生物侵染, 因此可能延长产品货架期, 在野外使用后也可能延缓饵剂的变质速度。然而, 使用防腐剂需满足两个前提条件: (1) 防腐剂不能对饵剂的适口性造成负面影响, 使得红火蚁搬运和取食饵剂的意愿降低; (2) 防腐剂不能与饵剂中的灭蚁活性成分存在拮抗作用, 降低饵剂的防治效果。本研究首先开展野外多选择试验, 比较了3种尼泊金酯类防腐剂 (对羟基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯和对羟基苯甲酸丁酯) 在不同浓度下对红火蚁饵剂搬运行为的影响。此外, 本研究在实验室条件下比较了添加或不添加防腐剂的0.1% 茚虫威饵剂对红火蚁的毒杀效果。

1 材料与方法

1.1 试验1: 在饵料中添加防腐剂对红火蚁搬运行为的影响

本试验旨在探索在饵料中添加防腐剂是否对红火蚁的搬运行为具有负面影响。在野外开展多选择试验, 分别比较了红火蚁对含不同浓度防腐剂饵料 (在大豆油中的浓度分别为0.05%、0.1%、0.2%) 和对照饵料的搬运量。每种防腐剂 (对羟

基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯或对羟基苯甲酸丁酯)的多选择试验分别重复测试10次。

试验使用的3种防腐剂(试剂纯)均购自上海麦克林生化科技股份有限公司(上海,中国)。在试验前2 d,制备含不同浓度防腐剂及不含防腐剂(对照)的饵料。油脂中尼泊金酯类防腐剂添加量为0.045%~0.2%时能起到较为理想的防腐效果(Soni *et al.*, 2001),因此本试验中各防腐剂在大豆油中的添加量设置为0.05%、0.1%和0.2%。具体而言,使用万分之一天平称取0.0600 g对羟基苯甲酸甲酯添加到装有29.9400 g分析纯大豆油(上海麦克林生化科技股份有限公司,上海,中国)的50 mL离心管中,置于65°C水浴锅中4 h,使得对羟基苯甲酸甲酯充分溶解,从而制得对羟基苯甲酸甲酯浓度为0.2%的大豆油溶液。以此类推,制得对羟基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯和对羟基苯甲酸丁酯浓度分别为0.05%、0.1%、0.2%的大豆油溶液。无防腐剂的大豆油也置于65°C水浴锅中4 h作为对照。将玉米芯颗粒(夏津县圣脉农业开发有限公司,德州,中国)置于电热鼓风干燥箱内,在60°C恒温下烘24 h至恒重,随后放入高速多功能粉碎机中粉碎,并使用筛网收集粒径介于0.9 mm和2 mm之间的玉米芯粒。称取60.0 g玉米芯粒放入密封袋,并加入17.0 g含防腐剂的大豆油溶液或对照大豆油,充分混匀使玉米芯粒完全吸附油分,最终制得含油量为22%饵料。之后,使用电子天平称取(6.00 ± 0.05) g饵料置于50 mL离心管底部。

野外试验地点为肇庆市高要区回龙镇林下草地(22.96°N, 112.07°E)。对每种防腐剂,随机挑选10个红火蚁巢(直径为20~40 cm),并将含有不同浓度防腐剂及对照饵料的离心管环绕蚁巢放置(图1-A)。管口距离蚁巢10 cm,相邻两个离心管管口相距6 cm,顺序随机。试验共持续2.5 h,随后将离心管盖上盖子并放置于-20°C冰箱中杀灭红火蚁。进行试验数据记录前,将离心管从冰箱取出在室温条件下放置3 h,以防止因温度较低在管壁和饵料表面形成冷凝水影响结果。然后分别将每个离心管中的剩余饵料及红火蚁倒在塑封膜上,使用镊子和过塑卡片小心地将管内的红火蚁与饵料分离,对红火蚁进行计数,并用电子天平对管内剩余饵料进行称重。参考汪岚峰等(2025)

提供的方法,分别计算(1)饵料搬运量(搬运量=原始饵料质量-剩余饵料质量);(2)离心管内红火蚁相对数量(红火蚁相对数量=管内红火蚁数量/管内剩余饵料重量)。

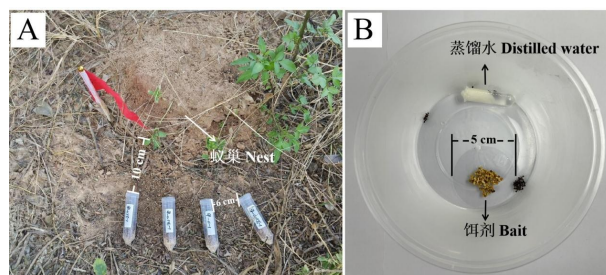


图1 野外多选择试验(A)和室内试验(B)示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the field multiple-choice test (A) and laboratory test (B)

1.2 试验2: 在茛虫威饵料中添加防腐剂对红火蚁防治效果的影响

本试验将防腐剂和杀虫剂(茛虫威)联用,以探究在红火蚁饵料中添加防腐剂是否对茛虫威的防治效果造成影响。试验在实验室进行,共设置8个处理(饵料中仅含茛虫威、仅含对羟基苯甲酸甲酯、仅含对羟基苯甲酸丙酯、仅含对羟基苯甲酸丁酯、同时含有茛虫威和对羟基苯甲酸甲酯、同时含有茛虫威和对羟基苯甲酸丙酯、同时含有茛虫威和对羟基苯甲酸丁酯、以及不添加任何化学药剂的空白对照);每个处理设置6个重复。

仅含防腐剂饵料(对羟基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯或对羟基苯甲酸丁酯)的制备方法如下:称取0.0060 g防腐剂添加到装有2.9940 g大豆油的10 mL离心管中,并置于65°C水浴锅内加热8 h,待防腐剂充分溶解后获得浓度为0.2%大豆油溶液,随后称取2.2082 g大豆油溶液添加到7.7918 g玉米芯中制得仅含防腐剂的饵料。仅含茛虫威饵料的制备方法如下:称取0.0136 g茛虫威添加到装有3.0000 g大豆油的10 mL离心管中,并置于65°C水浴锅内加热8 h直至茛虫威完全溶解,随后称取2.2160 g油溶液添加到7.7840 g玉米芯中并充分混合制得茛虫威浓度为0.1%饵料。同时含有茛虫威和防腐剂饵料的制备方法如下:称取0.0060 g防腐剂(对羟基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯或对羟基苯甲酸丁酯)和0.0136 g茛虫威添加到装有2.9940 g大豆油的10 mL离心管中,并置于65°C水浴锅内加热8 h,随后称取2.2160 g油溶液添加到

7.7840 g 玉米芯中制得含 0.1% 茛虫威与防腐剂的饵剂。不含杀虫剂和防腐剂饵剂(空白对照)的制备方法如下:称取 3.0000 g 大豆油置于 10 mL 离心管中,并置于 65°C 水浴锅内加热 8 h,称取 2.2082 g 大豆油添加到 7.7918 g 玉米芯中并充分混合。最终,各防腐剂在大豆油中的浓度为 0.2%,茛虫威在饵剂中的浓度为 0.1%,饵剂的含油量为 22%。

试验所需的红火蚁采集自广东省肇庆市高要区回龙镇,方法如下:首先准备一个容积为 60 L 的塑料箱,将含有 3% 乙醇的滑石粉均匀涂抹在其内壁,以防止红火蚁逃逸。使用铁锹挖取包含卵、幼虫、蛹及成虫的蚁巢土,倒入准备好的塑料箱中,在 2 h 内运送至实验室。之后按照 Chen (2007) 提供的方法将蚁群与土壤分离并饲养。简而言之,向装有红火蚁巢穴的塑料箱中缓慢地滴加自来水。当水面完全没过土壤后,将漂浮的蚁群从水面捞出,转移到内壁涂有 3% 乙醇-滑石粉的饲养箱(50.0 cm × 35.0 cm × 15.0 cm)中饲养,饲养箱内提供 1 个由塑料培养皿(直径 9.0 cm)和牙科石膏粉制成的人工蚁巢和若干装有蒸馏水的 10 mL 离心管,并提供 20% 蜂蜜水和冰冻蟋蟀作为食物。

试验前,从饲养箱中随机挑选 30 头大小一致的红火蚁工蚁(各处理中不同重复使用的红火蚁均来自不同巢群),放入一个内壁涂有 3% 乙醇-滑石粉的圆形塑料盒内(底部直径为 11.0 cm),塑料盒底部一侧提供装有蒸馏水的 2 mL 离心管(图 1-B)。在储物箱(50.0 cm × 37.0 cm × 26.0 cm)底部铺三层纸巾,并加入 200 mL 蒸馏水。在整个试验过程中,将塑料盒按随机顺序放入储物箱内并盖上储物箱盖,以保持湿度,避免红火蚁脱水死亡。红火蚁适应并饥饿 24 h 后(此时无红火蚁死亡),在每个圆形塑料盒底部放置一片盛有 0.50 ± 0.01 g 各处理或对照饵剂的 PVC 圆形薄片(直径 5.0 cm)。每 24 h 观察和记录红火蚁的死亡数量(使用牙签轻触红火蚁,若失去活动能力则判断为死亡个体),并将死亡个体移出以避免污染。试验在 (26 ± 2) °C 条件下进行,共持续 9 d。

1.3 数据统计

使用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验。对于符合正态分布的数据,使用单因素方差分析(One-way ANOVA)对数据进行统计分析,并使用 Tukey's HSD 检验进行多重比较。若数据不

符合正态分布,则对数据进行 $\log(x+1)$ 或平方根转换。如果转换后的数据符合正态分布,使用单因素方差分析进行统计分析,并使用 Tukey's HSD 检验进行多重比较。否则,使用 Kruskal-Wallis 检验进行数据分析,并使用 Dunn's 检验进行多重比较。以上数据分析均使用 SAS 9.5 统计软件(SAS 9.5, SAS Institute, Cary, NC)进行。此外,使用 SPSS 软件(SPSS 21, IBM Corporation, Armonk, NY)中的 Probit 回归模型计算试验 2 中红火蚁的致死中时间(LT₅₀)。所有统计分析的显著性水平设置为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 试验 1: 在饵料中添加防腐剂对红火蚁搬运行为的影响

红火蚁对含 0.05%、0.1%、0.2% 对羟基苯甲酸甲酯饵料和对照饵料的平均搬运量(图 2-A)及装有各饵料的离心管中红火蚁的相对数量(图 2-B)均无显著差异($P > 0.05$)。红火蚁对含 0.05%、0.1%、0.2% 对羟基苯甲酸丙酯饵料和对照饵料的平均搬运量(图 3-A)也无显著差异($P > 0.05$),然而在装有 0.1% 对羟基苯甲酸丙酯饵料的离心管中的红火蚁相对数量显著低于装有对照饵料的离心管($P < 0.05$; 图 3-B)。此外,红火蚁对含不同浓度对羟基苯甲酸丁酯饵料和对照饵料的平均搬运量(图 4-A)及装有各饵料的离心管中红火蚁的相对数量(图 4-B)均无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 试验 2: 在茛虫威饵剂中添加防腐剂对红火蚁防治效果的影响

在整个试验过程中(1~9 d),是否含有防腐剂对 0.1% 茛虫威饵剂的防治效果(红火蚁死亡率)无显著影响($P > 0.05$; 图 5),且从第 5 天起均显著高于对照($P < 0.05$)。此外,仅含防腐剂饵剂与对照饵剂间的红火蚁死亡率也无显著差异($P > 0.05$),表明饵剂中的防腐剂对红火蚁无明显毒性。仅含茛虫威、同时含有茛虫威和对羟基苯甲酸甲酯、同时含有茛虫威和对羟基苯甲酸丙酯或同时含有茛虫威和对羟基苯甲酸丁酯的饵剂对红火蚁的 LT₅₀ 值分别为 3.8、3.2、3.1、4.7 d,四者无显著差异(表 1)。上述结果表明,防腐剂对茛虫威无拮抗作用,在茛虫威饵剂中添加防腐剂不影响红火蚁的防治效果。

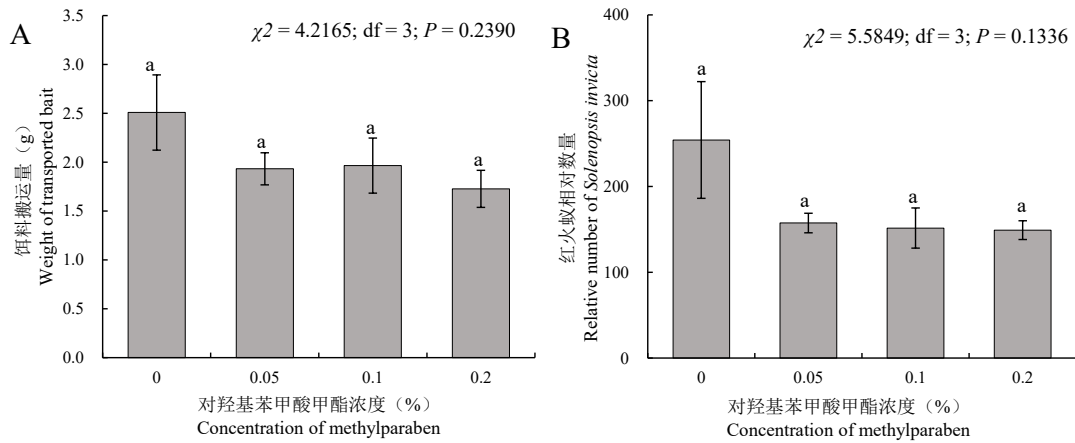


图2 红火蚁对含不同浓度对羟基苯甲酸甲酯饵料及对照饵料的搬运量 (A) 和离心管中红火蚁的相对数量 (B)
Fig. 2 Weight of transported bait (A), and relative number of *Solenopsis invicta* (B) in response to bait containing different concentrations of methylparaben and the control bait

注: 数据由平均值±标准误 (mean ± SE) 表示。相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下图同。Note: Data were expressed as mean ± SE. The same letters above the bars indicated no significant differences ($P > 0.05$). Same below.

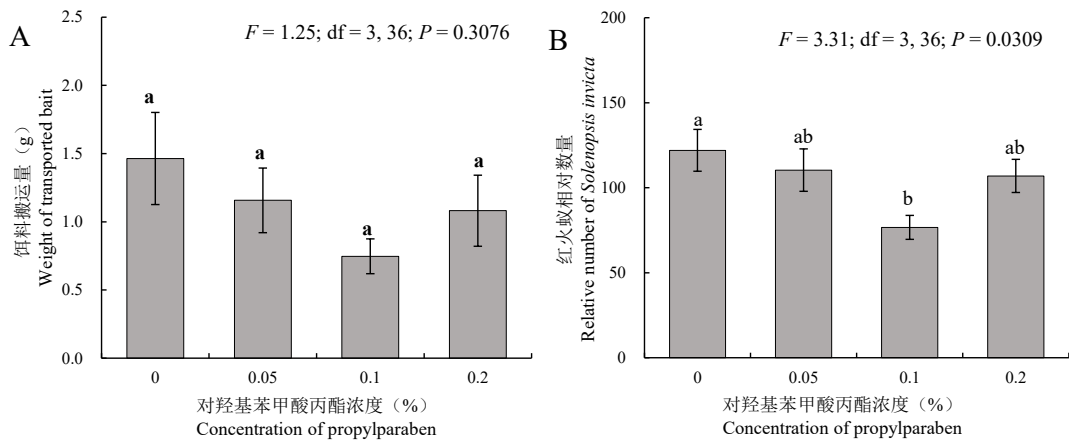


图3 红火蚁对含不同浓度对羟基苯甲酸丙酯饵料及对照饵料的搬运量 (A) 和离心管中红火蚁的相对数量 (B)
Fig. 3 Weight of transported bait (A), and relative number of *Solenopsis invicta* (B) in response to bait containing different concentrations of propylparaben and the control bait

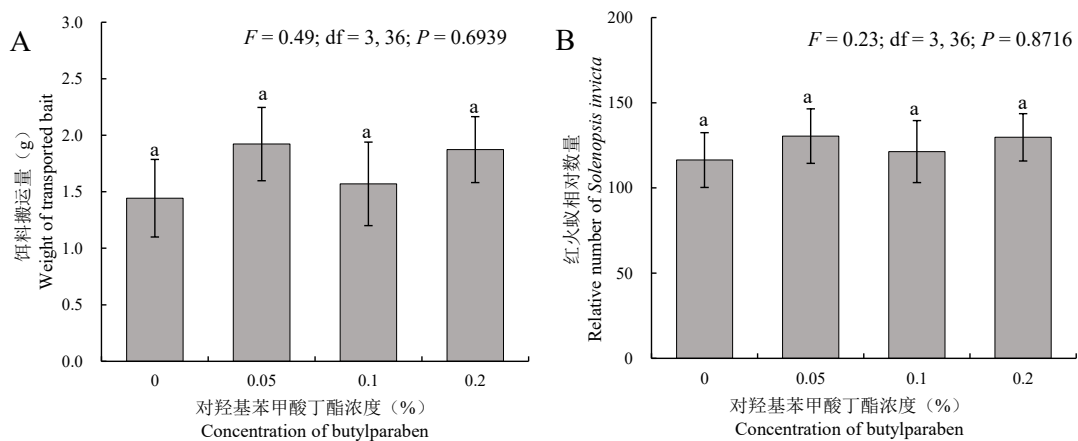


图4 红火蚁对含不同浓度对羟基苯甲酸丁酯饵料及对照饵料的搬运量 (A) 和离心管中红火蚁的相对数量 (B)
Fig. 4 Weight of transported bait (A), and relative number of *Solenopsis invicta* (B) in response to bait containing different concentrations of butylparaben and the control bait

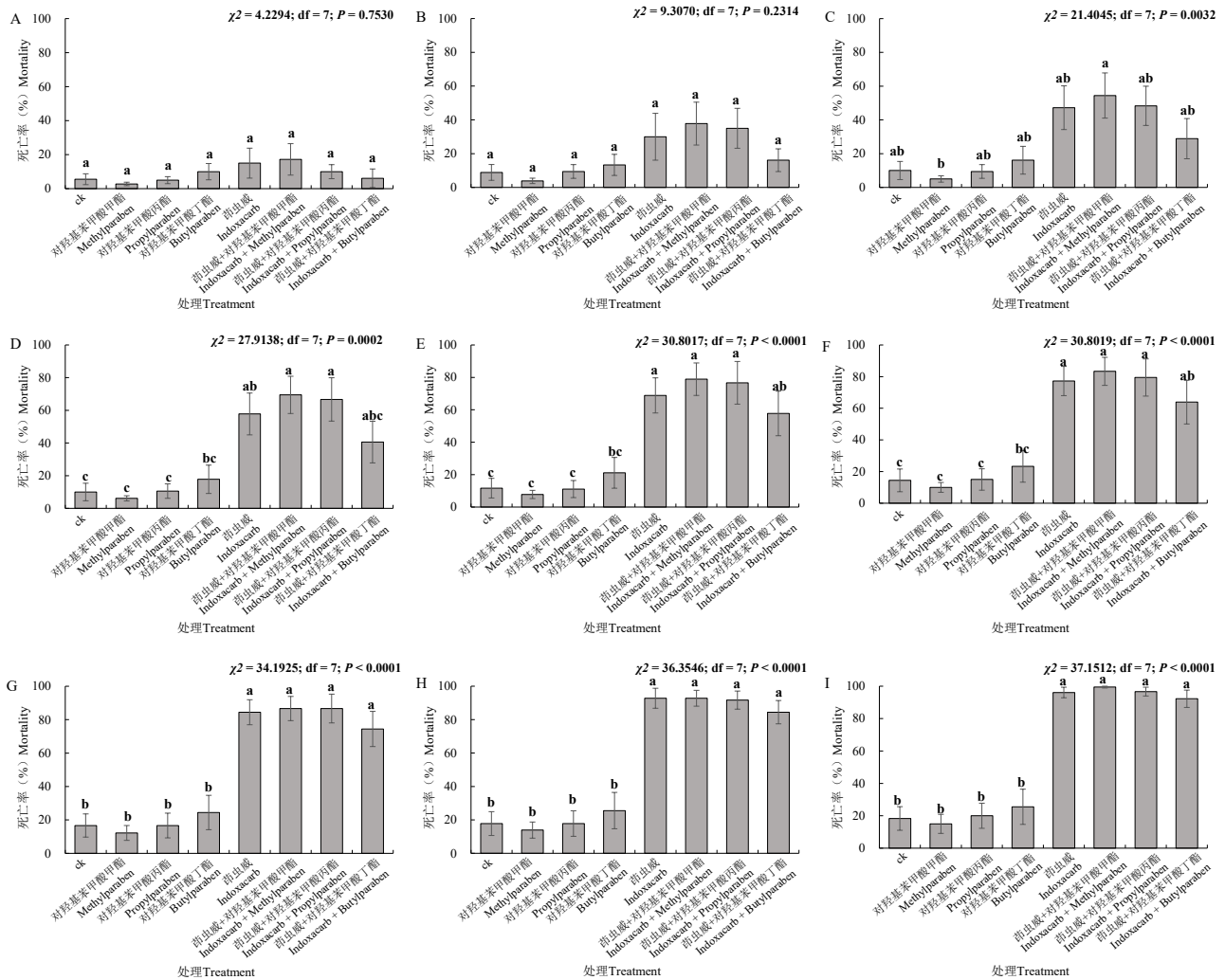


图5 不同处理组中红火蚁在1~9 d (A~I) 的死亡率

Fig. 5 Mortality of *Solenopsis invicta* in different treatments from day 1 to day 9 (A~I)

表1 在0.1% 茛虫威饵剂中添加或不添加防腐剂对红火蚁的致死中时间 (LT₅₀)

Table 1 Median lethal time (LT₅₀) of *Solenopsis invicta* in response to 0.1% indoxacarb baits with/without preservatives

处理组 Treatment	n	LT ₅₀ (d)	95%置信区间 (d) 95% Confidence interval	回归方程 Regression	χ^2	df	P
茛虫威 Indoxacarb	180	3.8	2.1 ~ 4.9	$Y = -2.230 + 3.812x$	466.007	51	< 0.0001
茛虫威+对羟基苯甲酸甲酯 Indoxacarb+Methylparaben	180	3.2	1.4 ~ 4.3	$Y = -1.741 + 3.482x$	444.996	51	< 0.0001
茛虫威+对羟基苯甲酸丙酯 Indoxacarb+Propylparaben	180	3.1	1.3 ~ 4.2	$Y = -1.559 + 3.200x$	484.517	51	< 0.0001
茛虫威+对羟基苯甲酸丁酯 Indoxacarb +Butylparaben	180	4.7	3.3 ~ 5.6	$Y = -2.696 + 4.003x$	468.973	51	< 0.0001

3 结论与讨论

本研究表明添加3种脂溶性防腐剂(对羟基苯

甲酸甲酯、对羟基苯甲酸丙酯或对羟基苯甲酸丁酯)后均未显著影响红火蚁的饵料搬运行为;此外,3种防腐剂与茛虫威无拮抗作用,添加防腐剂

与否不影响0.1%茚虫威饵剂对红火蚁的毒性。

由于红火蚁具有嗜油性，其防治饵剂中含有大量油脂。此外，红火蚁饵剂还含有灭蚁活性成分（溶于油脂）、吸收和容纳油脂的载体、以及其它添加成分。此前的研究表明红火蚁的觅食行为可能受到灭蚁活性成分（Du *et al.*, 2023a）、油脂类型（汪岚峰等，2025）和载体物理特性（Hooper-Bùi *et al.*, 2002; Neff *et al.*, 2011; Kafle and Shih, 2012; 李磊等，2022）等因素的影响。例如，Neff等（2011）等报道红火蚁对粒径为1.4~2 mm的饵料颗粒的搬运量显著高于粒径<0.71 mm、0.71~1 mm、1~1.4 mm的颗粒，且到1.4~2 mm粒径颗粒处觅食的红火蚁数量显著更多。汪岚峰等（2025）比较了7种油脂（大豆油、玉米油、椰子油、棕榈油、花生油、黄油和猪油）对红火蚁饵料搬运的影响，发现玉米油饵料的搬运量显著高于椰子油饵料。

然而，仅有少量研究关注添加剂对红火蚁饵剂适口性的影响。例如，汪岚峰等（2025）报道在0.01%浓度下（大豆油中），抗氧化剂（丁基羟基茴香醚、二丁基羟基甲苯、叔丁基对苯二酚和没食子酸丙酯）不影响红火蚁对饵料的搬运量。本研究也表明，3种脂溶性防腐剂在不同浓度下（大豆油中的浓度为0.05%、0.1%、0.2%）对红火蚁的饵料搬运量无显著影响。尽管在0.1%浓度下，对羟基苯甲酸丙酯较对照显著降低了离心管内红火蚁的相对数量，但饵料搬运量并未受影响。需要指出的是，这两个结果可能并不矛盾。除了本研究统计的离心管内红火蚁的相对数量，饵料搬运量可能还受到搬运饵料的红火蚁尺寸和搬运速度等因素的影响，未来可进行更多研究。Qin等（2017）分别用6种水溶性防腐剂（乳酸链球菌素、山梨酸钾、双乙酸钠、脱氢乙酸钠、丙酸钙和苯甲酸钠）制成的溶液（5 000和10 000 ppm）浸泡火腿肠，发现脱氢乙酸钠显著降低了诱集管中红火蚁的数量，但其它5种防腐剂对红火蚁觅食行为无负面影响，可用于诱饵的防腐处理并有望在监测中发挥作用。然而，这些防腐剂不溶于油脂，无法应用于商业化的红火蚁饵剂。有趣的是，红火蚁常搬运土壤颗粒将不受青睐或具有驱避性的食物掩埋起来（Qin *et al.*, 2017; Wen *et al.*, 2021, 2024; 文超等，2022; Du *et al.*, 2023a; 杨欣亚等，2024）。如Qin等（2017）报道红火蚁用

土壤颗粒覆盖脱氢乙酸钠溶液（2 000、5 000或10 000 ppm）处理的火腿肠片。Du等（2023a）也发现高浓度的氟虫腈饵剂（0.0125%）对红火蚁具有驱避作用（显著减少觅食蚁数量和饵剂搬运量）；与此同时，在投饵管中发现大量红火蚁搬运的土壤颗粒。在本研究中，未发现离心管中有土壤颗粒，从另一个角度表明测试的三种脂溶性防腐剂对红火蚁无驱避作用。

茚虫威是一种新型的钠通道抑制剂，通过昆虫的代谢转化抑制钠通道的活性，达到毒杀的效果。Du等（2023b）通过质谱成像MSI技术与非靶向代谢组学发现，茚虫威会显著影响红火蚁的关键代谢途径，从而干扰红火蚁正常生理水平。目前，茚虫威已被广泛用于红火蚁防治。例如，陈军等（2020）利用0.1%茚虫威进行野外红火蚁防治，发现在施药7 d后，红火蚁蚁巢的退减率为73.13%，且3次补充施药后红火蚁蚁巢的退减率达到98.85%。此外，Li和Cui（2023）通过使用无人机播撒的方式测试0.1%茚虫威饵剂的防治效果，发现在第14天时，撒播饵剂用量为15 000 g/hm²时防治的效果最好，而撒播饵剂用量为6 000 g/hm²时防治效果最差。本研究表明是否含有3种尼泊金酯类防腐剂对0.1%茚虫威饵剂的防治效果（红火蚁死亡率和LT₅₀值）无显著影响，说明这3种防腐剂对茚虫威无拮抗作用，可用于茚虫威饵剂的生产，有望减少灭菌工艺成本。此外，未来可进一步在野外测试尼泊金酯类防腐剂是否能够抑制红火蚁饵剂中微生物的生长繁殖（尤其在微生物较为活跃的高温高湿条件下），从而延长饵剂使用时间，增强防治效果。

参考文献 (References)

- Allen H, Miller DM. Field evaluations of broadcast and individual mound treatment for red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, (Hymenoptera: Formicidae) control in Virginia [J]. *Sociobiology*, 2015, 62 (1): 10-17.
- Chen GA, Yang K, Peng CY, *et al.* A new-type food preservative - nipagin [J]. *China Condiment*, 2003, 3: 31-36. [陈国安, 杨凯, 彭昌亚, 等. 新型食品防腐剂——尼泊金酯 [J]. 中国调味品, 2003, 3: 31-36]
- Chen J, Zhang WJ, Yin QX, *et al.* Demonstration of pesticides against *Solenopsis invicta* [J]. *Guangxi Plant Protection*, 2020, 33 (2): 26-28. [陈军, 张文杰, 尹奇勋, 等. 药剂防治红火蚁应用示范效果 [J]. 广西植保, 2020, 33 (2): 26-28]

- Chen J. Advancement on techniques for the separation and maintenance of the red imported fire ant colonies [J]. *Insect Science*, 2007, 14 (1): 1–4.
- Drees BM, Calixto AA, Nester PR. Integrated pest management concepts for red imported fire ants *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Insect Science*, 2013, 20 (4): 429–438.
- Du CJ, Lyu HL, Wang L, et al. Foraging behaviors of red imported fire ants (Hymenoptera Formicidae) in response to bait containing different concentrations of fipronil, abamectin, or indoxacarb [J]. *Insects*, 2023a, 14 (11): 852.
- Du CJ, Wang L, Lu YY, et al. Research advances in occurrence characteristics and monitoring and control strategies of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in forests, grasslands, wetlands and urban green spaces [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2023, 66 (8): 1128–1138. [杜澄举, 王磊, 陆永跃, 等. 林草湿地与城市绿地红火蚁发生特点与监测防控研究进展 [J]. 昆虫学报, 2023, 66 (8): 1128–1138]
- Du MY, Yin ZB, Xu KJ, et al. Integrated mass spectrometry imaging and metabolomics reveals sublethal effects of indoxacarb on the red fire ant *Solenopsis invicta* [J]. *Pest Management Science*, 2023b, 79 (9): 3122–3132.
- Gong L, Yao YH, Luo Y, et al. Surveillance and eradication practice of *Solenopsis invicta* in Changsha city [J]. *China Plant Protection*, 2021, 41 (5): 91–94. [龚磊, 姚艳红, 罗莹, 等. 长沙市红火蚁疫情监测及扑灭根除实践与启示 [J]. 中国植保导刊, 2021, 41 (5): 91–94]
- Hooper-Bùi LM, Appel AG, Rust MK. Preference of food particle size among several urban ant species [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2002, 95 (6): 1222–1228.
- Kafle L, Shih CJ. Determining the most effective concentration of cypermethrin and the appropriate carrier particle size for fire ant (Hymenoptera: Formicidae) bait [J]. *Pest Management Science*, 2012, 68 (3): 394–398.
- Kafle L, Wu WJ, Shih CJ. A new fire ant (Hymenoptera: Formicidae) bait base carrier for moist conditions [J]. *Pest Management Science*, 2010, 66 (10): 1082–1088.
- Kafle L, Wu WJ, Vander Meer RK, et al. Microencapsulated bait: does it work with red imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae)? [J]. *Sociobiology*, 2009, 53 (3): 729–737.
- Kemp SF, deShazo RD, Moffitt JE, et al. Expanding habitat of the imported fire ant (*Solenopsis invicta*): a public health concern [J]. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2000, 105 (4): 683–691.
- Li CF, Li YS, Zheng XL, et al. Feeding preference of red imported fire ant on plant-derived baits [J]. *Guangxi Plant Protection*, 2015, 28 (4): 3–5. [黎淳锋, 李岳诗, 郑霞林, 等. 红火蚁对植物源饵料的取食选择 [J]. 广西植保, 2015, 28 (4): 3–5]
- Li L, Xing ZH, Han DY, et al. Selective behavior and utilization of *Solenopsis invicta* workers to chromatic cues [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (6): 1452–1457. [李磊, 邢增华, 韩冬银, 等. 红火蚁工蚁对颜色信号的选择与利用 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1452–1457]
- Li S, Cui C. The effect of bait air broadcasting by unmanned aerial vehicles on the ant community diversity [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2023, 147 (1): 55–62.
- Li YF, Xu MY, Shen L, et al. Study on the inhibition effect of nipagin esters on three kinds of bacteria in neutral culture medium [J]. *China Brewing*, 2003, (6): 18–20. [李永飞, 许敏燕, 沈良, 等. 关于尼泊金酯等防腐剂对3种细菌抑制作用的研究 [J]. 中国酿造, 2003, (6): 18–20]
- McNaught MK, Ross Wylie F, Harris EJ, et al. Effect of broadcast baiting on abundance patterns of red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) and key local ant genera at long-term monitoring sites in Brisbane, Australia [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107 (4): 1307–1315.
- Neff R, Puckett RT, Gold RE. Particle size and bait preference of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Sociobiology*, 2011, 58 (2): 473.
- Qian MH, Zhang CG, Xu XX, et al. Research on suitable time for controlling red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) in winter [J]. *China Plant Protection*, 2022, 42 (8): 69–73. [钱明辉, 张晨光, 许新新, 等. 冬季防治红火蚁灌巢适宜时间的研究 [J]. 中国植保导刊, 2022, 42 (8): 69–73]
- Qin WQ, Xiong HP, Wen YZ, et al. Laboratory and field evaluation of the repellency of six preservatives to red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, 20 (2): 535–540.
- Qiu HL, Zhong JM, Xu JZ, et al. Application of ethyl oleate in the attraction of red imported fire ant: CN116473057A [P]. (2023–06–15) [2023–07–25]. [邱华龙, 钟家美, 徐金柱, 等. 油酸乙酯在引诱红火蚁中的应用: CN116473057A [P]. (2023–06–15) [2023–07–25]]
- Shen JC, Hou YM. Research progresses and application prospects of chemical communication in the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2024, 67 (12): 1696–1706. [沈嘉程, 侯有明. 红火蚁化学通讯研究进展及其应用前景 [J]. 昆虫学报, 2024, 67 (12): 1696–1706]
- Soni MG, Burdock GA, Taylor SL, et al. Safety assessment of propyl paraben: a review of the published literature [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2001, 39 (6): 513–532.
- Tan DL, Zeng L, Xu YJ. The control effect of different concentrations of indoxacarb on fire ants *Solenopsis invicta* Buren [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (6): 1256–1261. [谭德龙, 曾玲, 许益鏊. 不同浓度茛虫威对红火蚁的防治效果 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (6): 1256–1261]
- Tan YT, Xiao CX, Huang LJ, et al. Effects of sulfoxaflor bait on the toxic activity and behavior of *Solenopsis invicta* [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (1): 157–161, 174. [谭煜婷, 肖春霞, 黄玲俊, 等. 氟啶虫腈饵剂对红火蚁毒杀活性及行为影响 [J]. 植物保护, 2020, 46 (1): 157–161, 174]

- Wang C, Zhu T, Yang XY, *et al.* Advances in red imported fire ant impacts on vertebrates [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (9): 3575–3585. [王偲, 朱婷, 杨欣亚, 等. 入侵红火蚁对脊椎动物的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2024, 44 (9): 3575–3585]
- 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.
- Wang LF, Li XM, Mao L, *et al.* Effects of different kinds of oils and antioxidants on the bait-transport behavior of *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2025, 47 (1): 151–158. [汪岚峰, 李晓媚, 毛磊, 等. 不同油脂和抗氧化剂对红火蚁饵料搬运行为的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2025, 47 (1): 151–158]
- Wen C, Chen J, He Y, *et al.* Electrophysiological and behavioral responses of red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) to an essential balm and its components [J]. *Pest Management Science*, 2021, 77 (4): 1971–1980.
- Wen C, Du CJ, Shen LM, *et al.* Research progress of animal tool use behavior [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2022, 57 (3): 462–477. [文超, 杜澄举, 申黎明, 等. 动物使用工具行为研究进展 [J]. 动物学杂志, 2022, 57 (3): 462–477]
- Wen C, Wang C, Guo X, *et al.* Object use in insects [J]. *Insect Science*, 2024, 31 (4): 1001–1014.
- Xu YJ, Huang J, Zhou A, *et al.* Prevalence of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) venom allergic reactions in mainland China [J]. *Florida Entomologist*, 2012, 95 (4): 961–965.
- Yang XY, Wang LF, Mao L, *et al.* Foraging behavior of red imported fire ant and its application in fire ant control [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (4): 873–885. [杨欣亚, 汪岚峰, 毛磊, 等. 红火蚁觅食行为及其在防治中的应用 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (4): 873–885]
- Yasudai R, Matsubara A, Hsu PW, *et al.* Laboratory and field evaluations of two bait formulations against the invasive fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2022, 115 (2): 624–630.
- Yin YQ, Li XY, Chen AD, *et al.* Analysis of the occurrence and management of red imported fire ants *Solenopsis invicta* Buren in Yunnan after it invading for 10 years [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (6): 1356–1364. [尹艳琼, 李向永, 谌爱东, 等. 红火蚁入侵云南10年的发生状况与防控策略探析 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1356–1364]
- Zhao T, Zhang YH, Dou HL, *et al.* Study on the effects of red imported fire ants invasion on the Chinese pangolin in Guangdong, China [J]. *Wildlife Letters*, 2024, 2 (3): 115–123.
- Zhong JM, Xu JZ, Ling SQ, *et al.* Relative attractiveness of the major components of *Mylabris phalerata* extract to *Solenopsis invicta* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2024, 61 (5): 1026–1036. [钟家美, 徐金柱, 凌斯全, 等. 大斑芫菁浸提物及其主要成分对红火蚁的引诱作用 [J]. 应用昆虫学报, 2024, 61 (5): 1026–1036]