



王裕华, 李群臣, 王刚, 吕利华, 何余容, 王德森. 热处理对红火蚁工蚁的致死效果评估 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1553–1561.

热处理对红火蚁工蚁的致死效果评估

王裕华^{1*}, 李群臣^{1*}, 王 刚¹, 吕利华², 何余容¹, 王德森^{1**}

(1. 华南农业大学植物保护学院昆虫学系, 广州 510642; 2. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广州 510640)

摘要: 热处理作为一种无污染、无残留、环境友好型防治措施, 在红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) 防控中具有广阔的应用前景。然而, 目前有关热处理对红火蚁防治效果的研究相对较少, 致死温度和致死时间的最佳组合仍值得进一步探究。为此, 本研究在实验室条件下, 采用干热 (45.5、46、46.5、47、47.5、48、49、50 和 51℃) 和热水 (41、41.5、42.5、43、45、46、47 和 48℃) 处理红火蚁工蚁 0.5~5 min, 记录工蚁的击倒率、及处理后 12 h 的存活情况。结果显示, 热处理温度越高、时间越长, 红火蚁工蚁的击倒率和死亡率越高。干热处理过程中, 48℃ 高温处理 4 min、49℃ 高温处理 3 min、50 或 51℃ 高温处理 2 min 均可杀死 100% 的工蚁。采用热水处理时, 45 或 46℃ 热水处理 5 min、48℃ 热水处理 2 min 便可杀死全部的工蚁。因此, 作为一种安全、高效的物理防治措施, 热处理可用于红火蚁的有效防控。

关键词: 红火蚁; 干热处理; 热水处理; 击倒率; 致死率

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 06-1553-09

Evaluation of the lethal effect of heat treatment on red imported fire ants, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae)

WANG Yu-Hua^{1*}, LI Qun-Chen^{1*}, WANG Gang¹, LV Li-Hua², HE Yu-Rong¹, WANG De-Sen^{1**}

(1. Department of Entomology, School of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: As a pollution-free, residue-free and environment-friendly control measure, heat treatment has broad application prospects in the control of the red imported fire ants, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae). However, there are relatively few studies on the control effect of heat treatment on red imported fire ants (RIFA), and the best combination of lethal temperature and lethal time is still worth further exploring. In this study, we evaluated the lethal effect of heat (high temperature and hot water) treatment on RIFA workers through means of bioassay. RIFA workers were treated with dry heat (45.5, 46, 46.5, 47, 47.5, 48, 49, 50 and 51℃) and hot water (41, 41.5, 42.5, 43, 45, 46, 47 and 48℃) for 0.5~5 min. The thermal knockdown rate of workers and their survival 12 hours after treatment were recorded. Results indicated that the higher the heat treatment temperature and the longer the treatment duration, the higher the thermal knockdown rate and mortality of RIFA workers. Dry

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1000500)

* 共同第一作者: 王裕华, 女, 1992 年生, 广东信宜人, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: thwyh525@qq.com; 李群臣, 男, 1991 年生, 山东潍坊人, 博士研究生, 研究方向为昆虫化学生态学、入侵生物防控, E-mail: 1240153574@qq.com

** 通讯作者 Author for correspondence: 王德森, 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为城市昆虫学和害虫生物防治, E-mail: desen@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-09-25; 接受日期 Accepted: 2022-10-20

heat treatment at 48°C for 4 minutes, 49°C for 3 minutes, 50 or 51°C for 2 minutes caused 100% mortality of workers; when hot water treatment was used, 45 or 46°C hot water treatment for 5 minutes and 48°C hot water treatment for 2 minutes could kill all workers. Thus, as a safe and efficient control measure, heat treatment can be used for the effective control of RIFA.

Key words: *Solenopsis invicta* Buren; dry heat treatment; hot water treatment; thermal knockdown rate; mortality rate

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) 是世界上最具有危险性的入侵生物之一 (Xu *et al.*, 2022)。该虫具有繁殖力强、攻击性强、扩散速度快等特点,能够在新入侵区域迅速定殖、扩散和暴发成灾。目前,红火蚁已从原产地南美洲巴拉那河流域扩散到了全世界 24 个国家和地区,截止 2022 年 7 月已入侵我国大陆 12 个省区 579 个县区,对入侵地的农林业生产、人畜健康、公共安全以及生态环境造成严重危害 (陆永跃和曾玲, 2015; 陆永跃等, 2019; Wang *et al.*, 2020; 王磊等, 2022)。药剂浸泡、药剂熏蒸、毒饵诱杀、药剂灌巢、粉剂撒施等化学防治方法见效快、使用方便,成为了红火蚁检疫阻截和野外防治中最常用的措施 (Williams *et al.*, 2001; 王磊等, 2011; 王磊等, 2012; 周爱明等, 2011; 于鑫等, 2015)。然而,化学药剂的不当使用极易导致红火蚁迁巢或分巢,长期使用同一类或相近的药剂还可能使该虫产生抗药性;此外,化学药剂的大量施用会对土壤、水体等生态环境造成不同程度的污染;甚至还会对非靶标生物的生存构成极大威胁 (刘杰等, 2006; 于鑫等, 2015; 陆永跃等, 2019)。随着人们环保意识和自身健康意识的逐渐增强,探讨高效、安全的红火蚁防治方法成为当前人们普遍关注的焦点。

昆虫属于变温动物,其存活、生长发育、生殖等各项生命活动均与环境温度关系密切。当温度超过一定阈值,昆虫的生命活动将会遭受严重影响;高温的出现会引起昆虫表皮蜡质层瓦解、油脂融化、表皮渗透性增加以及虫体大量失水,较高的温度还会直接导致昆虫死亡 (杜尧等, 2007)。因此,基于高温胁迫的热处理措施逐渐被人们所认可,并在害虫绿色、高效防控中展现出广阔的应用前景。热处理通常包括干热处理、热水处理和热蒸汽处理,其中后两者的杀虫效果优于前者 (杨杏等, 2007)。目前,热处理已在仓储害虫 (Mahroof *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2007)、家居害虫 (Doggett *et al.*, 2012; Wang *et al.*,

2018a; Kong *et al.*, 2022), 以及农林业害虫 (杨杏等, 2007; Oliver-Villanueva *et al.*, 2013; Uzunovic *et al.*, 2013; Massa *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2018) 的防治中得到了广泛应用。红火蚁对环境温度十分敏感,温度耐受上限为 41.8°C (暴露时间不超过 4 h) (Xu *et al.*, 2009)。此外,研究表明红火蚁对高温的耐受性与其筑巢地点和体型大小均存在一定的联系。在太阳直射区域筑巢的红火蚁对高温的耐受性明显高于阴暗区域筑巢的红火蚁 (Boyles *et al.*, 2009)。随着体型增大,红火蚁工蚁对高温的耐受能力逐渐增强 (Wendt and Verble-Pearson, 2016; 陈芳等, 2018)。热水灌巢被认为是一种理想的热处理措施,可对野外的红火蚁巢进行定点清除 (King and Tschinkel, 2006; Tschinkel and King, 2007)。其中,合适的热水处理温度和处理时间对于彻底杀灭红火蚁起着至关重要的作用。余玉婷等 (2013) 研究显示: 18.21°C 热水浸泡 10 h 可引起至少 7.04% 的红火蚁死亡, 35°C 浸泡 10 h 对红火蚁的致死率可达 100%。周爱明等 (2011) 发现,随着热水温度升高,导致红火蚁被完全杀死的时间逐渐缩短;当水温为 38°C 时,浸泡处理 50 min 后红火蚁才会全部死亡;而 41.8°C 热水处理时则仅需要 5 min。上述研究主要集中于探究红火蚁耐高温的上限、水浸与温度的联合致死效应,以及高温处理在红火蚁检疫处理中的作用等;而对于干热处理的致死温度和时间联合作用、热水即杀处理的致死温度与时间关系则未曾有详尽报道。

在水源保护地、居民社区、鱼塘和海岛等生态脆弱或生态敏感区域,采用热处理防控红火蚁既能有效避免化学防治所导致的环境污染,又可达到消除红火蚁危害的理想效果。然而,在热处理防治红火蚁过程中,处理温度和处理时间的最佳组合还需进一步探究,以便因地制宜地制定合理的红火蚁防控策略。为此,本研究将通过生物测定的方法评估干热及热水处理对红火蚁的致死效果,研究结果将为生态敏感区域内采用热处理防治红火蚁提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

红火蚁供试蚁巢于 2020 年 12 月 20 日和 2021 年 2 月 4 日采自广东省广州市增城区小楼镇新樟村 (E: 113.816485, N: 23.398945)、(E: 113.816434, N: 23.398909)。野外采集红火蚁、分离和饲养方法参照吕利华等 (2006) 和 Chen (2007)。采集后的红火蚁在室内 (温度 $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $70\% \pm 5\%$ 、光周期 12 L:12 D) 用 30% 蜂蜜水和黄粉虫幼虫饲养。

实验开始前, 从红火蚁人工饲养盒内随机挑取工蚁放入 10 mL 塑料离心管中备用, 每管约 38 头工蚁。管口内壁轻涂 1 cm 宽的特氟龙带, 防止供试工蚁逃逸。

1.2 干热处理红火蚁工蚁的最佳温度及处理时间测定

拟通过生物测定的方法, 明确干热处理防控红火蚁过程中的最佳处理温度和处理时间。干热处理的温度采用恒温水浴锅进行控制, 水浴温度通过 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 水银温度计校准。试验开始前, 先在水浴锅中放置试管架 (孔直径 3.1 cm), 再将内壁涂抹特氟龙的玻璃指形管 (直径 3 cm) 置于试管架上。待水浴温度达到实验所需温度时, 预热玻璃指形管 20 min。将供试工蚁迅速倒进指形管中, 开始计时。热处理后, 将工蚁置于内壁涂有特氟龙的带盖塑料盒 (直径 7 cm、高 7 cm) 中, 并立刻记录红火蚁的击倒率 (不能爬行或者足、触角仍抖动者记为热击倒个体)。处理后 12 h 统计红火蚁的存活情况 (软镊子触碰无任何反应的个体记为死亡)。

共设置两个实验。实验一设定 6 个处理温度: 45.5°C 、 46°C 、 46.5°C 、 47°C 、 47.5°C 和 48°C , 每个温度处理 5 min, 以 26°C 处理 5 min 作为对照, 实验重复 5~6 次。实验二包括 48°C 、 49°C 、 50°C 和 51°C 这 4 个温度处理, 每个温度分别处理 0.5、1、2、3 和 4 min, 对照组为 26°C 处理相应的时间, 实验重复 5~8 次。

1.3 热水处理红火蚁工蚁的最佳温度及处理时间测定

拟采用生物测定的方法, 探究热水处理防控红火蚁过程中的最佳热水温度和处理时间。采用

水浴锅作为热水处理的实验装置, 水温采用 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 水银温度计校准。待水温达到设定实验温度后, 将事先挑入离心管中的供试工蚁迅速倒进自制带纱网的塑料盒内 (口径 4 cm、高 3.2 cm、底径 3 cm, 塑料盒底部和盖换成 40 目铁纱网)。将装有供试工蚁的塑料盒缓慢 (以避免塑料盒内产生气泡) 放入水浴锅中, 待塑料盒完全浸泡在水中开始计时。处理一定时间后, 将塑料盒从热水中取出, 将盒中工蚁倒在玻璃培养皿 (直径 12 cm、高 2 cm) 中的滤纸上, 培养皿内壁涂上聚四氟乙烯防止工蚁逃逸。当工蚁体表的水被风干后 (大约需要 5 min), 立即倒入内壁涂有聚四氟乙烯的带盖塑料盒内 (直径 7 cm、高 7 cm)。参照 1.2 的方法记录红火蚁的击倒率, 以及处理后 12 h 红火蚁的存活情况。

本研究包括两个实验。实验一设置 5 个热水处理温度: 41°C 、 41.5°C 、 42.5°C 、 43°C 和 45°C , 每个温度处理 5 min, 以 26°C 温水处理 5 min 作为对照, 实验重复 6~8 次。实验二设置 4 个热水温度: 45°C 、 46°C 、 47°C 和 48°C , 每个温度分别处理 1、2 和 3 min, 26°C 温水处理相应的时间作为对照, 实验重复 5~8 次。

1.4 数据分析

红火蚁工蚁的击倒率和死亡率计算公式如下: 击倒率 (%) = (被击倒工蚁数/供试工蚁数) $\times 100$; 死亡率 (%) = (死亡工蚁数/供试工蚁数) $\times 100$; 校正击倒率 (%) = [(处理组击倒率 - 对照组击倒率) / (1 - 对照组击倒率)] $\times 100$; 校正死亡率 (%) = [(处理组死亡率 - 对照组死亡率) / (1 - 对照组死亡率)] $\times 100$ (Abbott, 1925)。论文中的结果如没有特殊说明, 均采用校正后的数据进行统计分析。

通过单因素方差分析比较不同温度热处理 (干热/热水处理) 所导致的红火蚁工蚁击倒率和死亡率差异, 均值通过 Tukey's HSD (honest significant difference) 检验进行多重比较。利用双因素方差分析评估不同温度 and 不同处理时间热处理对工蚁击倒率和校正死亡率的影响, 其中, 热处理的温度和处理时间为两个影响因子, 均值通过 Tukey's HSD 检验进行多重比较。方差分析前, 工蚁的击倒率和死亡率先进行反正弦平方根转换。采用线性回归分析红火蚁工蚁击倒率/死亡率与热处理温度 (和处理时间) 间的线性关系。统计分析采用 SPSS 22.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 干热处理红火蚁工蚁的最佳温度及处理时间测定

实验一结果表明, 47、47.5 和 48℃ 干热处理 5 min 后, 红火蚁工蚁的击倒率均为 100%, 显著高于 45.5、46 和 46.5℃ 干热处理 ($F_{5,28} = 197.2$, $P < 0.001$); 此外, 47.5℃ 和 48℃ 干热处理 5 min 所引起的工蚁死亡率分别为 93.81% $\pm$ 1.91% 和 100%, 显著高于 45.5、46、46.5 和 47℃ 干热处理 ($F_{5,28} = 118.7$, $P < 0.001$) (图 1)。回归分析结果表明, 红火蚁工蚁的击倒率 ($F_{1,32} = 133.6$, $P < 0.001$) /死亡率 ($F_{1,32} = 199.7$, $P < 0.001$) 均与处理温度呈正相关关系 (图 2)。工蚁的击倒率与处理温度间的模拟方程为 $y = 48.2x - 2198.7$ ($R^2 = 0.807$), 工蚁死亡率与处理温度间的模拟方程为 $y = 43.7x - 2001.4$ ($R^2 = 0.862$) (图 2)。

实验二结果表明, 干热处理的温度 (击倒率: $F_{3,106} = 362.4$, $P < 0.001$; 死亡率: $F_{3,106} = 7054.6$, $P < 0.001$)、处理时间 (击倒率: $F_{4,106} = 2105.1$, $P < 0.001$; 死亡率: $F_{4,106} = 801.9$, $P < 0.001$), 以及两者的交互作用 (击倒率: $F_{10,106} =$

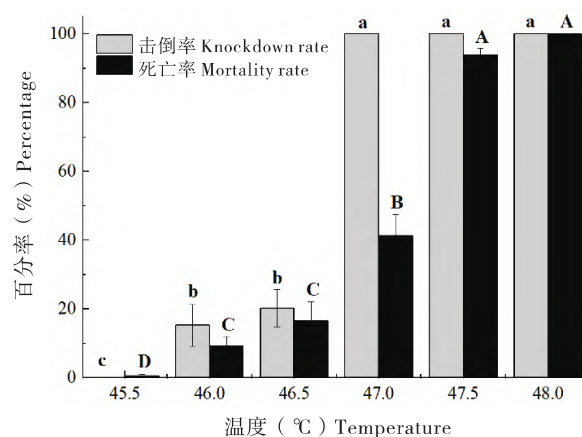


图 1 红火蚁工蚁经干热处理 5 min 后的击倒率和死亡率
Fig. 1 Knockdown rate and mortality rate of *Solenopsis invicta* workers after 5 min of dry heat treatment

注: 图中数值为平均值 $\pm$ 标准误。柱状图上方的不同小写字母表示在 0.05 水平上各处理间工蚁的击倒率存在显著差异, 柱状图上方的不同大写字母表示在 0.05 水平上各处理间工蚁的死亡率存在显著差异 (单因素方差分析, Tukey's HSD 检验)。图 3 同。Note: Data in the figure were mean $\pm$ SE. Different lower letters above the bars indicated significant differences of workers' knockdown rate between treatments, and different upper letters above the bars indicated significant differences of workers' mortality rate between treatments (one-way ANOVA; $P < 0.05$, Tukey's HSD test). Same to Fig. 3.

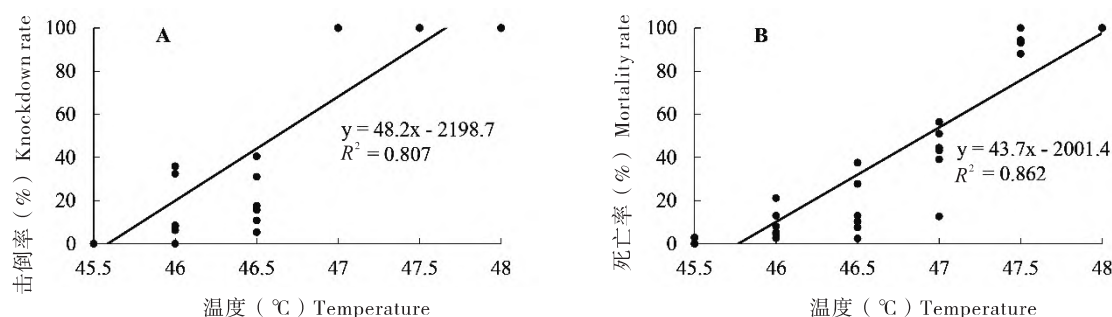


图 2 红火蚁工蚁击倒率 (A) /死亡率 (B) 与干热处理温度间的关系

Fig. 2 Relationship between *Solenopsis invicta* workers' knockdown rate (A) /mortality rate (B) and dry heat treatment temperature

191.7, $P < 0.001$; 死亡率: $F_{10,106} = 32.7$, $P < 0.001$) 均能显著影响红火蚁工蚁的击倒率和死亡率。在 48、49、50 和 51℃ 温度范围内, 随着处理温度升高, 工蚁被热击倒和致死的时间会逐渐缩短, 其中, 48℃ 条件下工蚁被完全击倒和 100% 死亡的处理时间分别为 3 min 和 4 min; 49℃ 时分别为 2 min 和 3 min; 50℃ 时分别为 1 min 和 2 min; 51℃ 时分别为 1 min 和 2 min (表 1)。进一步研究

发现, 工蚁的击倒率 ($F_{2,121} = 100.9$, $P < 0.001$) /死亡率 ($F_{2,121} = 216.4$, $P < 0.001$) 与干热处理的温度和处理时间均存在显著正相关关系。工蚁的击倒率与处理温度 (x_1) 和处理时间 (x_2) 的模拟方程为 $y = 15.7x_1 + 29.1x_2 - 765.7$ ($R^2 = 0.625$), 工蚁死亡率与处理温度 (x_1) 和处理时间 (x_2) 的模拟方程为 $y = 15x_1 + 32.2x_2 - 746.1$ ($R^2 = 0.781$)。

表 1 干热处理不同时间所导致的红火蚁工蚁击倒率和死亡率
Table 1 Knockdown rate and mortality rate of *Solenopsis invicta* workers after dry heat treatment

温度 (℃) Temperature	处理时间 (min) Treatment duration	重复次数 No. of replications	击倒率 (%) Knockdown rate	死亡率 (%) Mortality rate
48	0.5	5	0	0
	1	5	0	1.7 ± 1.1
	2	5	71.1 ± 10.5	6.7 ± 1.1
	3	5	100.0	97.6 ± 1.1
	4	8	100.0	100.0
49	0.5	8	0	5.5 ± 2.5
	1	8	4.7 ± 1.1	10.6 ± 3.0
	2	5	100.0	85.0 ± 3.9
	3	7	100.0	100.0
	4	7	100.0	100.0
50	0.5	8	1.6 ± 1.1	3.9 ± 1.3
	1	8	100.0	9.1 ± 2.0
	2	8	100.0	100.0
	3	7	100.0	100.0
	4	7	100.0	100.0
51	0.5	7	3.7 ± 1.1	14.4 ± 2.5
	1	8	100.0	66.6 ± 8.3
	2	8	100.0	100.0

注: 表中数值为平均值 ± 标准误。表 2 同。Note: Data in the table were mean ± SE. Same to Table 2.

2.2 热水处理红火蚁工蚁的最佳温度及处理时间测定

实验一结果显示, 温度为 41、41.5、42.5、43 和 45℃ 的热水处理 5 min 均能 100% 击倒红火蚁工蚁; 43℃ 和 45℃ 热水处理后 12 h 工蚁的死亡率显著高于 41℃、41.5℃ 和 42.5℃ 热水处理 ($F_{4,33} = 79, P < 0.001$), 42.5℃ 热水处理所导致的工蚁死亡率显著高于 41℃ 和 41.5℃ 热水处理, 其中 45℃ 处理 5 min 可完全杀死红火蚁工蚁 (图 3)。且工蚁的死亡率与热水温度间呈显著正相关关系 ($F_{1,36} = 89.6, P < 0.001$), 死亡率与热水温度间的模拟方程为 $y = 18.5x - 720.5$ ($R^2 = 0.713$) (图 4)。

从实验二的结果可以看出, 红火蚁工蚁的击倒率和死亡率均会受到热水温度 (击倒率: $F_{3,91} = 54.7, P < 0.001$; 死亡率: $F_{3,91} = 32.2, P < 0.001$)、处理时间 (击倒率: $F_{4,91} = 91.5, P < 0.001$; 死亡率: $F_{4,91} = 168.9, P < 0.001$), 以及

两者交互作用 (击倒率: $F_{9,91} = 27.7, P < 0.001$; 死亡率: $F_{9,91} = 8.8, P < 0.001$) 的显著影响。45℃ 或 46℃ 热水浸泡 5 min、48℃ 热水浸泡 2 min 不仅能瞬时击倒所有红火蚁工蚁, 还能导致工蚁在处理 12 h 的死亡率达到 100%; 45℃ 热水处理 4 min、46℃ 热水处理 4 min、47℃ 热水处理 3 min 和 4 min、48℃ 热水处理 1 min 虽然能导致工蚁的瞬时击倒率达 100%, 但是却不足以完全杀死工蚁; 被击倒的工蚁会随着处理后时间的延长而逐渐恢复正常 (表 2)。回归分析结果表明, 工蚁的击倒率 ($F_{2,105} = 28.3, P < 0.001$) /死亡率 ($F_{2,105} = 134.1, P < 0.001$) 与热水处理的温度和处理时间均存在显著正相关关系。工蚁的击倒率与热水温度 (x_1) 和处理时间 (x_2) 的模拟方程为 $y = 9.0x_1 + 9.6x_2 - 349.9$ ($R^2 = 0.351$), 工蚁死亡率与处理温度 (x_1) 和处理时间 (x_2) 的模拟方程为 $y = 13.5x_1 + 24.2x_2 - 27.7$ ($R^2 = 0.719$)。

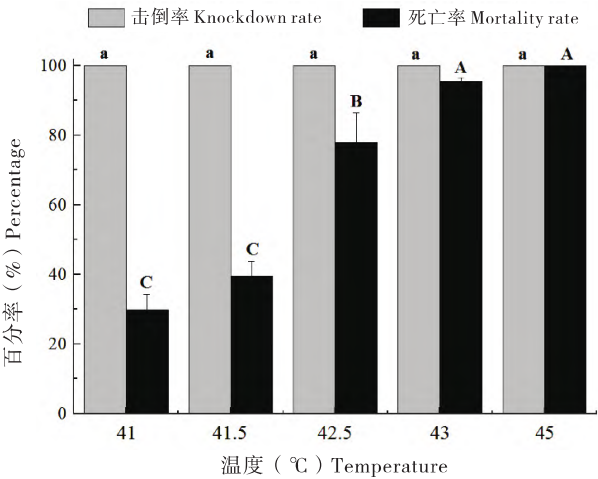


图3 红火蚁工蚁经热水处理 5 min 后的击倒率和死亡率
Fig. 3 Knockdown rate and mortality rate of *Solenopsis invicta* workers after 5 min of hot water treatment

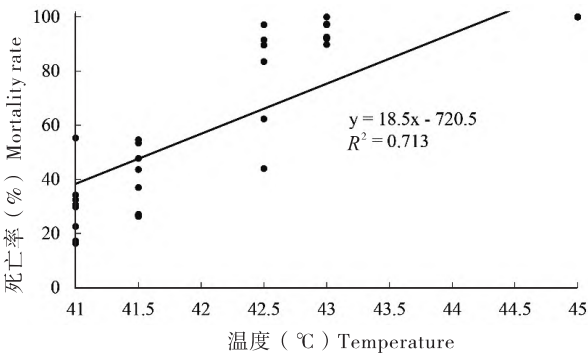


图4 红火蚁工蚁死亡率与热水处理温度间的关系
Fig. 4 Relationship between *Solenopsis invicta* workers' mortality rate and hot water treatment temperature

表 2 热水处理不同时间所导致的红火蚁工蚁击倒率和死亡率
Table 2 Knockdown rate and mortality rate of *Solenopsis invicta* workers after hot water treatment

温度 (°C) Temperature	处理时间 (min) Treatment duration	重复次数 No. of replications	击倒率 (%) Knockdown rate	死亡率 (%) Mortality rate
45	1	5	3.0 ± 0.9	2.1 ± 1.0
	2	6	83.8 ± 3.9	13.5 ± 4.4
	3	6	99.6 ± 0.4	77.6 ± 4.8
	4	6	100.0	91.7 ± 2.0
	5	8	100.0	100.0
46	1	7	89.3 ± 4.0	18.6 ± 3.7
	2	6	96.8 ± 3.2	57.7 ± 10.1
	3	8	99.0 ± 1.0	89.4 ± 2.9
	4	6	100.0	98.8 ± 0.6
	5	6	100.0	100.0
47	1	7	70.4 ± 11.7	29.6 ± 12.8
	2	6	99.6 ± 0.4	83.4 ± 2.6
	3	6	100.0	96.9 ± 1.7
	4	8	100.0	94.7 ± 2.2
48	1	6	100.0	21.3 ± 8.9
	2	5	100.0	100.0
	3	6	100.0	100.0

3 结论与讨论

本研究在实验室条件下测定了热处理（干热处理和热水处理）对红火蚁工蚁的防治效果。结

果表明，处理温度越高、处理时间越长，工蚁的击倒率和死亡率越高。作为无毒、无害、安全、高效的处理方法，干热处理和热水处理有望替代现行的化学防治用于水源保护地、居民社区、鱼塘和海岛等生态脆弱或生态敏感区域的红火蚁

防控。

热水浸泡对红火蚁工蚁的致死作用明显强于干热处理。本研究中, 当处理时间为 5 min 时, 干热处理和热水处理导致工蚁 100% 被击倒的最低温度分别为 47℃ 和 41℃, 完全杀死工蚁所需的最低干热处理温度为 48℃、最低热水温度仅为 45℃。导致这种差异的原因很可能与热水浸泡会引起工蚁窒息而亡有关。余玉婷等 (2013) 研究发现, 红火蚁工蚁的存活率与浸水时间呈正相关关系, 并且水温还能显著影响小型工蚁的浸水死亡率。

在热处理防治红火蚁过程中, 工蚁的死亡率会受到处理温度和处理时间两个因素的影响, 处理温度越高, 工蚁被完全杀死的时间便越短。Xu *et al.* (2009) 研究发现, 暴露时间短于 4 h 情况下, 红火蚁工蚁的致死温度会高于 41.48℃; 而采用更高温度处理工蚁时, 导致工蚁完全死亡的处理时间将会大大缩短。例如, 本研究采用干热处理红火蚁时, 48℃ 处理 4 min、49℃ 处理 3 min、50℃ 或 51℃ 处理 2 min 均可完全杀死工蚁; 通过热水处理时, 45℃ 或 46℃ 热水浸泡 5 min, 以及 48℃ 热水浸泡 2 min 便能导致工蚁 100% 死亡。此外, 研究表明, 红火蚁的高温耐受性与体型大小呈显著的正相关关系 (Wendt and Verble-Pearson, 2016; 陈芳等, 2018)。本研究中供试工蚁是通过随机的方式选取, 后续研究还应当对不同体型工蚁和生殖蚁的致死温度进行探究。

当处理温度尚未达到红火蚁热致死温度或处理时间时, 干热/热水处理虽然能够快速击倒工蚁, 但被击倒的工蚁会逐渐苏醒并恢复正常。对于这些被击倒后又恢复正常的工蚁而言, 热处理很可能仅导致工蚁产生了短暂的昏迷, 而并未对虫体酶系统造成破坏、虫体蛋白质尚未凝固 (Wang, 2011)。周爱明等 (2011) 通过建立回归方程的方式评估了热水浸泡对红火蚁的致死效果, 红火蚁的死亡判定时间为热水处理后 1 h。然而, 在 1 h 内被暂时击倒的红火蚁能否完全恢复正常则尚未可知。为了避免实验误差, 本研究将红火蚁工蚁死亡的判定时间确定为热处理后 12 h。

杨杏等 (2007) 曾报道, 热水和热蒸汽处理对害虫的防治效果优于干热处理。有关热蒸汽对家居害虫 - 臭虫杀灭效果的研究业已证实, 热蒸汽处理可作为化学防治的理想替代措施用于臭虫的实地防治中 (Wang *et al.*, 2018ab; Kong *et al.*, 2022)。在本研究中, 作者仅探讨了干热和热水处

理对红火蚁的防治效果, 热蒸汽的研究尚未开展。而在热蒸汽防治红火蚁的过程中, 最佳的处理温度、处理时间, 以及蒸汽压强等因素还需进一步研究。

本研究仅在实验室条件下评估了干热和热水处理对红火蚁工蚁的致死效果, 探究了热处理温度和处理时间的最佳组合, 明确了高致死温度快速击杀红火蚁的可行性; 然而, 在红火蚁实地防控中, 还有很多问题值得进一步探讨。例如, 热处理在应用过程中, 还需要将该措施对周围植被、处理对象的负面影响加以充分考虑。研究表明, 牡丹种苗内的根结线虫经 49 ~ 50℃ 热水处理 30 min 可完全被杀死, 并且热水处理不会影响牡丹植株的后续生长 (王希国等, 2006)。采用热水浸泡处理进口水果时, 也能够有效杀灭水果内的检疫害虫, 而不对水果的品质造成危害 (梁广勤等, 1993; 梁帆等, 2006)。在制定水源保护地、居民社区、鱼塘和海岛等生态脆弱或生态敏感区域红火蚁热处理防控策略时, 应当把热处理对周围植被的负面影响降到最低水平。另外, 采用热水灌巢防治红火蚁时, 随着注入蚁巢内部深度的增加, 热水的温度将会随之降低。为了彻底杀死蚁巢内的红火蚁, 灌巢处理的热水温度应当高于红火蚁的最高临界致死温度。

参考文献 (References)

- Abbott WS. A method of computing the effectiveness of an insecticide [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1925, 18: 265 - 267.
- Boyles JG, Aubrey DP, Hickman CR, *et al.* Variation in physiological response of red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) to small - scale thermal heterogeneity [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2009, 34 (2): 81 - 84.
- Chen F, Guan Y, Cui C, *et al.* Effects of different temperatures on the migration of *Solenopsis invicta* workers [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46 (7): 78 - 79, 91. [陈芳, 管云, 崔灿, 等. 不同温度对红火蚁工蚁迁移的影响 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46 (7): 78 - 79, 91]
- Chen J. Advancement on techniques for the separation and maintenance of the red imported fire ant colonies [J]. *Insect Science*, 2007, 14: 1 - 4.
- Doggett SL, Dwyer DE, Peñas PF, *et al.* Bed bugs: Clinical relevance and control options [J]. *Clinical Microbiology Reviews*, 2012, 25: 164 - 192.
- Du Y, Ma CS, Zhao QH, *et al.* Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms of insects: A literature review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (4): 1565 - 1572. [杜尧, 马春森, 赵清华, 等. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进

- 展 [J]. 生态学报, 2007, 27 (4): 1565–1572]
- King JR, Tschinkel WR. Experimental evidence that the introduced fire ant, *Solenopsis invicta*, does not competitively suppress co-occurring ants in a disturbed habitat [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2006, 75 (6): 1370–1378.
- Kong D, Han D, Zhai R, *et al.* A case study on tropical bed bug, *Cimex hemipterus* (Hemiptera: Cimicidae) infestation and management in dormitories [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2022, DOI: 10.1093/jee/toac055.
- Liang F, Liang GQ, Wu JJ, *et al.* Applied hot water treatment technical for pest treatment of entry papaya fruits [J]. *Plant Quarantine*, 2006, 20 (3): 139–140. [梁帆, 梁广勤, 吴佳教, 等. 应用热水处理技术对进境木瓜作杀虫处理 [J]. 植物检疫, 2006, 20 (3): 139–140]
- Liang GQ, Liang F, Lin CQ. Hot – water quarantine treatment to control oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) in mangoes [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1993, 15 (4): 448–453. [梁广勤, 梁帆, 林楚琼, 等. 热水处理芒果杀灭果实中的桔小实蝇 [J]. 江西农业大学学报, 1993, 15 (4): 448–453]
- Liu J, Lu LH, Chen HY, *et al.* Red imported fire ant control with firronil mound drenches and its impact in ant community [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006, 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, 5: 24–27]
- 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. 10 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. 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]
- Lv LH, Feng X, Chen HY, *et al.* A technique for field collecting and laboratory rearing red imported fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43 (2): 265–267. [吕利华, 冯夏, 陈焕瑜, 等. 介绍红火蚁的野外采集和实验室饲养的方法 [J]. 昆虫知识, 2006, 43 (2): 265–267]
- Mahroof R, Subramanyam B, Flinn P. Reproductive performance of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) exposed to the minimum heat treatment temperature as pupae and adults [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2005, 98 (2): 626–633.
- Massa R, Panariello G, Pinchera D, *et al.* Experimental and numerical evaluations on palm microwave heating for Red Palm Weevil pest control [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45299.
- Oliver – Villanueva JV, Gascón – Garrido P, Ibiza – Palacios MS. Evaluation of thermally – treated wood of beech (*Fagus sylvatica* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) against Mediterranean termites (*Reticulitermes* spp.) [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, 71: 391–393.
- Shi CH, Hu JR, Wei QW, *et al.* Control of *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae) by soil solarization [J]. *Crop Protection*, 2018, 114: 76–82.
- Tang J, Mitcham E, Wang S, *et al.* Heat Treatments for Postharvest Pest Control: Theory and Practice [M]. CABI, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom, 2007.
- Tschinkel WR, King JR. Targeted removal of ant colonies in ecological experiments, using hot water [J]. *Journal of Insect Science*, 2007, 7 (1): 41.
- Uzunovic A, Gething B, Coelho A, *et al.* Lethal temperature for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using radio frequency (RF) energy [J]. *Journal of Wood Science*, 2013, 59 (2): 160–170.
- Wang D, Wang C, Wang G, *et al.* Efficacy of three different steamers for control of bed bugs (*Cimex lectularius* L.) [J]. *Pest Management Science*, 2018a, 74: 2030–2037.
- Wang D, Wang C, Zha C. Effect of steam treatment on feeding, mating, and fecundity of the common bed bug (Hemiptera: Cimicidae) [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2018b, 55: 1536–1541.
- Wang L, Chen KW, Feng XD, *et al.* Long – term predication of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) 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, Zeng L, Xu Y, *et al.* Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China [J]. *NeoBiota*, 2020, 54: 89–124.
- Wang L. Lethal Effects of Heat Treatment on Four Kinds of Stored Products Insect Pests [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- Wang XG, Li ZQ, Ge SH. The heat water treatment for control of root knot nematode in the young plants of exportation peony [J]. *Plant Quarantine*, 2006, 20 (5): 283–284. [王希国, 李志强, 葛素华. 热处理出口牡丹种苗防治根结线虫 [J]. 植物检疫, 2006, 20 (5): 283–284]
- Wendt CF, Verble – Pearson R. Critical thermal maxima and body size positively correlate in red imported fire ants, *Solenopsis invicta* [J]. *Southwestern Naturalist*, 2016, 61 (1): 79–83.
- Williams DF, Homer LC, Oi DH. An historical perspective of treatment programs and the development of chemical baits for control [J]. *American Entomologist*, 2001, 47 (3): 146–159.
- Xu YJ, Lu YY, Pan ZP, *et al.* Heat tolerance of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mainland

- China [J]. *Sociobiology*, 2009, 54 (1): 115 – 126.
- 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.
- Yang X, Guan W, Chen DH. Influence of heat treatment on insect physiology and biochemistry and the study and application on fruits quarantine treatment [J]. *Plant Quarantine*, 2007, 21 (3): 180 – 182. [杨杏, 管维, 陈定虎. 热处理对昆虫生理生化的影响及其在进境水果检疫处理中的研究和应用 [J]. 植物检疫, 2007, 21 (3): 180 – 182]
- Yu X, Wang L, Zeng XN, *et al.* Residual half – life of pesticides used to control *Solenopsis invicta* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (6): 1361 – 1367. [于鑫, 王磊, 曾鑫年, 等. 红火蚁防治区农药残留动态规律研究 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (6): 1361 – 1367]
- Yu YT, Chen L, Wei HY. Effect of water immersion on worker mortality in the imported fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (5): 1392 – 1396. [余玉婷, 陈立, 魏洪义. 水浸对红火蚁工蚁死亡率的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (5): 1392 – 1396]
- 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.* Research on the lethal efficacy by hot-water treatment on the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren [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]