



肖丽娜, 钟家美, 凌斯全, 徐金柱, 阮志杰, 杨华, 侯晨, 李志强, 林梓韞, 邱华龙. 互叶白千层精油对红火蚁的驱避作用及活性成分筛选 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (5): 1224 - 1232. XIAO Li-Na, ZHONG Jia-Mei, LING Si-Quan, XU Jin-Zhu, RUAN Zhi-Jie, YANG Hua, HOU Chen, LI Zhi-Qiang, LIN Zi-Yun, QIU Hua-Long. Repellent effect of *Melaleuca alternifolia* essential oil on *Solenopsis invicta* Buren and identification of active components [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (5): 1224 - 1232.

互叶白千层精油对红火蚁的驱避作用及活性成分筛选

肖丽娜¹, 钟家美¹, 凌斯全¹, 徐金柱¹, 阮志杰¹, 杨华¹,
侯晨¹, 李志强², 林梓韞¹, 邱华龙^{1*}

(1. 广东省林业科学研究院, 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广州 510520;

2. 广东省科学院动物研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物保护与利用公共实验室, 广州 510260)

摘要: 红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是全球十大最具破坏性的入侵生物之一, 对人畜安全、农林业生产以及生态环境造成巨大危害。从植物精油中筛选红火蚁天然驱避化合物是红火蚁综合防控的重要手段之一。本研究采用动物运动轨迹跟踪系统 Ethovision XT 测试 6 种植物精油对红火蚁的驱避行为活性, 通过 GC-MS 技术分析驱避效果最佳精油的化合物成分, 并利用 GC-EAD 技术筛选对红火蚁具有触角电生理活性的目标化合物, 最后通过挖沙生测法和 Y 型尺法测试目标化合物对红火蚁的驱避活性。结果表明, 在所测试的 6 种植物精油中, 互叶白千层精油对红火蚁的驱避活性最强。互叶白千层精油中含量最高的 4 种化合物依次为 4-松油醇、萜品烯、 α -松油烯和 4-异丙基甲苯, 含量分别为 41.43%、11.22%、5.24% 和 4.61%。这 4 种化合物均能引起红火蚁工蚁的触角电生理反应。通过挖沙生测和 Y 型尺法行为实验表明, 4-松油醇对红火蚁的驱避活性最强, 而 α -松油烯与 4-异丙基甲苯在高浓度下对红火蚁具有一定的驱避活性, 萜品烯对红火蚁无驱避活性。上述研究结果表明, 4-松油醇是一种具有开发成红火蚁驱避剂潜力的天然活性化合物。

关键词: 红火蚁; 植物精油; 活性成分; 驱避作用; 天然化合物

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2024) 05-1224-09

Repellent effect of *Melaleuca alternifolia* essential oil on *Solenopsis invicta* Buren and identification of active components

XIAO Li-Na¹, ZHONG Jia-Mei¹, LING Si-Quan¹, XU Jin-Zhu¹, RUAN Zhi-Jie¹, YANG Hua¹, HOU Chen¹, LI Zhi-Qiang², LIN Zi-Yun¹, QIU Hua-Long^{1*} (1. Guangdong Academy of Forestry, Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangzhou 510520, China; 2. Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization, Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangzhou 510260, China)

Abstract: The red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) is considered one of the most destructive invasive species worldwide, posing significant threats to both human and livestock safety. Additionally, it causes substantial harm to agricultural and forestry production, as well as the ecological environment. One important method of integrated pest management for this species is screening natural repellents from plant essential oils. The study employed the Ethovision XT animal movement tracking system to evaluate the repellent activity of six plant essential oils against *S. invicta*. The most effective oil's compound

基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2023KJCX030); 中央财政林业改革发展基金 (林业科技推广示范) (2023GDTK-03)

作者简介: 肖丽娜, 女, 工程师, 主要从事林业有害生物防控工作, E-mail: xln1124@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 邱华龙, 男, 博士, 副研究员, 主要从事林业有害生物综合防治研究, E-mail: qiuhaulong2008@163.com

收稿日期 Received: 2024-04-30; 接受日期 Accepted: 2024-05-31

composition was analyzed using GC-MS, and the GC-EAD technique was used to screen target compounds with antennal electrophysiological activity against *S. invicta*. The repellent activity of the target compounds against *S. invicta* were tested using the digging sand assay and Y-maze method. Results showed that the essential oil from *Melaleuca alternifolia* exhibited the strongest repellent activity among the six plant essential oils tested. The four most abundant compounds in the *M. alternifolia* oil were 4-terpineol (41.43%), terpinolene (11.22%), α -pinene (5.24%), and 4-isopropyltoluene (4.61%). All four compounds elicited antennal electrophysiological responses in worker ants. Behavioural experiments were conducted using the digging sand assay and Y-maze method to determine the repellent activity of various compounds against *S. invicta*. The results showed that 4-terpineol exhibited the strongest repellent activity, while α -pinene and 4-isopropyltoluene showed some repellent activity at high concentrations. Terpinolene, on the other hand, did not exhibit any repellent activity. These findings suggest that 4-terpineol has potential as a natural repellent compound for *S. invicta*.

Key words: *Solenopsis invicta* Buren; essential oil; active constituents; repellent effect; natural compound

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 隶属于蚁科切叶蚁亚科, 是极具破坏性的入侵性蚂蚁, 已成为世界上危害最为严重的外来入侵物种之一, 对入侵地的农林生产、电力基础设施、人畜安全以及生态系统功能等方面造成严重威胁 (周丽丽等, 2021; 金奕亨等, 2023; 吴鹏等, 2023)。自 2005 年起, 中国大陆已将红火蚁列为重大检疫性害虫。截至 2022 年, 红火蚁已在我国扩散到 12 个省区、625 个县市区, 发生面积达 40 多万 ha (Wang *et al.*, 2020; 王晓亮等, 2022)。红火蚁凭借其强烈的攻击能力、极强的环境适应能力和繁殖能力, 可在城市、农田、苗圃、果园、林地、公园、绿化带等众多生境筑巢, 并造成严重危害 (许益鏊等, 2006)。红火蚁的蚁巢被扰动后, 工蚁会迅速从巢内涌出叮咬人畜, 被红火蚁叮咬者会出现红肿、瘙痒和刺痛等症状, 严重者还会出现过敏休克甚至死亡 (孙文锋, 2023)。因此, 亟需开发对红火蚁具有驱避活性的天然化合物。

植物精油是一种从植物不同部位提取的具有芳香气味的植物次生代谢物, 其主要成分通常包括生物碱、醛、酮、酚、酸、单萜、烯萜等多种化合物 (余帅, 2023)。植物精油中的化合物能与昆虫体内的多种嗅觉和味觉受体相互作用, 对昆虫表现出引诱、驱避和杀虫等生物活性 (彭映辉等, 2018; 令利军等, 2023)。由于植物精油是一种天然活性化合物, 使用后对人畜无毒、对环境无污染以及易降解等诸多优点而广受关注。因此, 植物精油具有潜在的应用前景, 可作为植物源杀虫和驱避剂、杀菌剂以及抗癌药物的候选药物 (余帅, 2023)。

目前, 在红火蚁新型药剂开发领域中, 驱避活性测试方法已日趋成熟。动物运动轨迹跟踪系统

(Ethovision XT) 测试和挖沙法可分别用于实验室条件下的个体和群体测试, Y型驱避测量尺则可作为一种有效的野外测试工具。这些方法的整合应用为红火蚁药剂的高效筛选和行为学研究提供了有力的技术支撑。本研究采用 Ethovision XT 测试 6 种植物精油对红火蚁的驱避行为活性, 并利用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 分析植物精油的化合物成分, 利用气相色谱-触角电位联用仪 (GC-EAD) 筛选对红火蚁具有潜在行为活性的化合物, 最后通过挖沙生测和 Y 型驱避测量尺测试潜在目标化合物对红火蚁的挖沙及驱避行为反应的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验材料和设备

红火蚁采集自广东省林业科学研究院油茶苗圃 (23°11'50" N, 113°22'52" E), 采集和饲养方法参照 Qiu 等 (2020) 的方法, 用铁锹将整个蚁巢挖出装入内壁上缘涂有聚四氟乙烯的塑料水桶并带回到实验室, 采用滴水法将红火蚁从巢土中分离, 用漏勺将蚂蚁转至内壁涂有聚四氟乙烯的塑料盒 (长×宽×高=60 cm×40 cm×15 cm) 中。红火蚁用 10% 蜂蜜水和黄粉虫喂养, 在温度 26°C±1°C, 相对湿度 70%~80%, 光周期 L:D=12 h:12 h 饲养。

互叶白千层精油、香茅精油由广东林业科学研究院乡土阔叶树研究团队提供, 用水蒸气蒸馏法提取。芒果精油、山苍籽精油、热带罗勒精油、甜马郁兰精油购于江西御美化妆品有限公司, 均为单方精油。

主要试剂: 4-松油醇 (>98%), 上海源叶生物科技有限公司; γ -萜品烯 (>95%), 上海源叶生物

科技有限公司; α -松油烯 (>95%), 上海麦克林生化科技股份有限公司; 4-异丙基甲苯 (>99.5%), 上海麦克林生化科技股份有限公司; C₇~C₄₀ 饱和烷烃混标 (1 mg/mL, 正己烷配制); 正己烷 (色谱纯), 福晨 (天津) 化学试剂有限公司。

主要设备: 气相色谱-质谱联用仪 (8890-5977B Gas Chromatography and Mass Spectrometry, GC-MS, 美国安捷伦科技有限公司); 气相色谱-触角电位仪 (Gas Chromatography-Electroantennographic detection, GC-EAD, 唐山定感科技有限公司), 动物运动轨迹跟踪系统 (Ethovision XT 15, 诺达思科技有限公司)。

1.2 植物精油对红火蚁驱避作用的测定

参照 Zhong 等 (2024) 的方法, 使用 Ethovision XT 系统测定 6 种供试植物精油对红火蚁工蚁的驱避活性。在直径为 9 cm 的培养皿两侧距离边缘 1 cm 位置对称放置两片直径为 2 cm 的圆形滤纸片, 在 Ethovision XT 11.5 软件捕获拍摄画面后, 将整个培养皿区域设置为观察区, 两个滤纸片分别设置为处理分析区和对照分析区, 视频模式设置为实时跟踪, 时间条件设置为 20 min, 采样率设置为 30 次/s, 检测方法选用灰度梯度法, 灰度区域范围设置为 40~255。开启掉帧矫正和轨迹平滑, 在自动设置时, 红火蚁工蚁胸部为红色, 头部和腹部为黄色视为有效个体。轨迹可视化和热图可视化的所有配置均默认为配置 1。将 1 头红火蚁工蚁放入培养皿内, 适应环境 5 min, 然后往处理滤纸片上滴 2 μ L 样品, 另外一张滤纸片滴加 2 μ L 正己烷作为对照, 随后开始记录 20 min 内红火蚁工蚁在不同区域运动轨迹并统计持续时间和运动距离。6 种供试精油均使用正己烷稀释至 1 μ L/mL, 每种精油测试 10 头大型工蚁。

1.3 互叶白千层精油化合物成分分析

利用 GC-MS 对筛选后对红火蚁驱避性最强的精油进行化学成分分析。色谱柱为 HP-5ms 毛细管色谱柱 (长度 \times 直径 \times 内壁厚度=30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m), 载气为 99.999% 高纯氮气, 柱流量为 1 mL/min。前进样口温度为 250 $^{\circ}$ C。GC 的升温程序为: 初始温度 40 $^{\circ}$ C, 保持 1 min, 以 8 $^{\circ}$ C/min 的速率升温至 200 $^{\circ}$ C 保持 3 min, 然后以 20 $^{\circ}$ C/min 的速率升温至 280 $^{\circ}$ C 保持 5 min。离子源、四极杆、柱接口温度分别设置为 230 $^{\circ}$ C、150 $^{\circ}$ C 和 280 $^{\circ}$ C。用色谱纯的正己烷将精油稀释至 0.5 μ L/mL, 采用不分流

手动进样, 进样量为 2 μ L, 溶剂延迟 3 min, 重复 3 次。在同样仪器条件下, 以饱和烷烃混标 C₇~C₄₀ 来计算各挥发物成分的相对保留指数 (Retention Index, RI)。通过匹配 NIST17 数据库中化合物的质谱特征峰、RI 值以及标准品比对来对化合物进行鉴定, 采用峰面积归一化法计算精油各成分的相对百分含量。

1.4 精油及主要化合物对红火蚁工蚁的触角电生理反应测定

采用 GC-EAD 技术测定红火蚁工蚁对互叶白千层精油各成分的触角电生理反应, 参照 Du 等 (2021) 和黄华等 (2022) 的方法; 。在体视镜下将红火蚁工蚁成虫的触角从基部切下, 切掉触角尖端与根部一节 (1 mm)。把触角的两端分别连接已吸取 0.9% 生理盐水的毛细玻璃管, 两根毛细玻璃管分别连接参考极和测量极, 完成触角与电极的连接。色谱柱为 HP-5ms 毛细管色谱柱 (长度 \times 直径 \times 内壁厚度=30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m), 进样口和检测器温度分别为 250 $^{\circ}$ C 和 280 $^{\circ}$ C, GC 的升温程序与上述 GC-MS 分析中相同。互叶白千层精油经正己烷稀释至 0.5 μ L/mL, 取 3 μ L 手动进样, 经色谱柱分离后 1:1 分流至 FID (氢火焰离子化检测器) 和 EAD。通过 GC-EAD 2014 软件采集气相色谱和 EAD 反应变化值。重复测试 6 头工蚁的触角, 每次重复中均有电位变化则表示触角对该挥发物有电位反应。

1.5 目标化合物对红火蚁的驱避活性测定 (挖沙法)

参考 Du 等 (2021) 的方法, 利用双向挖掘行为测试装置来测定 4 种化合物对红火蚁的驱避活性。使用热熔胶将 4 个 5 mL 样品瓶对称安装在一个内壁涂有聚四氟乙烯圆形塑料盆 (直径 \times 高=30 cm \times 5 cm) 底部。选择两个对称的样品瓶作为生测瓶, 在测定瓶瓶盖中心及塑料盘底部钻一个 5 mm 小孔, 另外两个小瓶仅用于支撑塑料容器。称取 10 g 石英砂, 将 1 mL 待测化合物与石英砂充分混合后装入生测瓶中, 对照组石英砂中 1 mL 正己烷。使用氮气对石英砂进行扫吹, 直至正己烷溶剂完全挥发, 然后往石英砂中加入 0.5 mL 蒸馏水。在塑料盆中放入 30 头红火蚁大型工蚁, 24 h 后称量各样品瓶中被红火蚁挖出来的石英砂重量。4 种化合物均使用正己烷稀释为 1 μ L/mL 和 2 μ L/mL, 每个浓度设置 6 个生物重复。

1.6 目标化合物对红火蚁的驱避活性测定(Y型尺法)

参照孙文锋等(2023)的方法,利用Y型尺来测定化合物对红火蚁的驱避活性。将美纹纸缠于Y型尺的两支,分别作为处理组和对照组。用移液枪向处理组区域均匀添加100 μL 待测化合物溶液,对照组则添加100 μL 正己烷。随后将Y型尺插入蚁丘上方,等待红火蚁工蚁爬上Y型尺。1 min后对Y型尺进行拍照,记录左右两支上工蚁的数量。4种化合物均使用正己烷配制为4个浓度梯度(1、2、4和5 $\mu\text{L}/\text{mL}$)进行测试,每个处理设置6个生物重复。

1.7 数据处理

使用SPSS statistics v23.0软件对数据进行统计分析,采用 t 检验分析红火蚁在不同滤纸片上的停

留时间、挖沙行为中处理组和对照组挖出石英砂的重量及Y型尺左右两支上红火蚁工蚁的数量差异, $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 分别表示差异显著(*)和极显著(**)。

2 结果与分析

2.1 不同精油对红火蚁的驱避活性测定

对比红火蚁工蚁在精油处理组和对照组的停留时间,结果显示,芒果、山苍籽、香茅、甜马郁兰和热带罗勒5种植物精油对红火蚁的驱避效果不显著,而互叶白千层精油对红火蚁表现出显著的驱避效果($t = -3.435$, $P = 0.004$,表1)。

表1 红火蚁对6种植物精油的持续时间相对百分比

Table 1 Relative percentages of spent time of *Solenopsis invicta* on essential oils of six essential oils

精油名称 Name of essential oil	停留时间(s) \pm 标准误 Spent time \pm SE		t 值 t value	P 值 P value
	处理组 Treatment	对照组 Control		
互叶白千层 <i>Melaleuca alternifolia</i>	53.84 \pm 10.63	102.70 \pm 18.98	-3.435	0.004
芒果 <i>Mangifera indica</i>	75.04 \pm 13.43	67.85 \pm 11.92	0.979	0.341
山苍籽 <i>Litsea cubeba</i>	59.09 \pm 9.13	55.83 \pm 11.50	0.294	0.773
香茅 <i>Cymbopogon citratus</i>	68.84 \pm 14.22	84.71 \pm 9.61	-1.008	0.328
甜马郁兰 <i>Origanum majorana</i>	97.10 \pm 30.49	61.56 \pm 8.78	1.163	0.261
热带罗勒 <i>Ocimum basilicum</i>	74.46 \pm 12.53	81.98 \pm 10.90	-0.623	0.542

2.2 互叶白千层精油化学成分分析及潜在活性化合物筛选

GC-MS分析表明,互叶白千层精油中含有36个物质峰(图1)。通过与NIST数据库和文献比对,鉴定了36种化合物(表2),其中4-松油醇的相对含量最高,占比41.43% \pm 0.25%,其它相对含量较

高的成分依次为萜品烯11.22% \pm 0.09%、 α -松油烯5.24% \pm 0.04%、4-异丙基甲苯4.61% \pm 0.03%和 α -松油醇4.05% \pm 0.02%。互叶白千层精油中的一些成分可引起红火蚁工蚁的触角电位反应,其中 α -松油烯、4-异丙基甲苯、萜品烯和4-松油醇这4种成分能引起响应值较大(图2)。

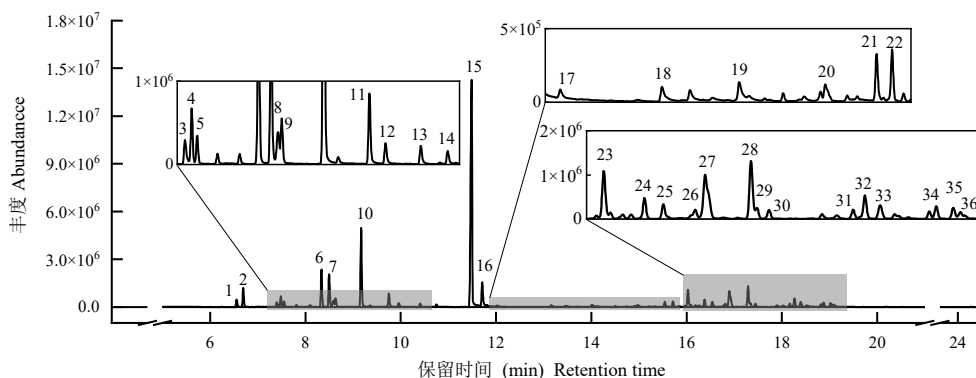


图1 互叶白千层精油 GC-MS 总离子流色谱图

Fig. 1 GC-MS total ion chromatogram of *Melaleuca alternifolia* essential oil

注: 色谱图峰上的数字为成分编号, 对应表2的序号。Note: Numbers on the peaks of the chromatograms correspond to the component numbers listed in Table 2.

表 2 互叶白千层精油成分及含量分析

Table 2 Compositions and relative contents of *Melaleuca alternifolia* essential oil

编号 Number	保留时间 (min) Retention time	化合物 Compounds	保留指数 <i>RI</i>	相对含量 (%) ± 标准误差 Contents ± SE
1	6.56	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene,4-	931	1.08 ± 0.01
2	6.70	环酚烯 Cyclofenchene	938	2.55 ± 0.03
3	7.40	蒿酮 Artemisyl ketone	974	0.76 ± 0.01
4	7.49	桉烯 Sabinene	978	1.48 ± 0.01
5	7.56	<i>L</i> - β -蒎烯 <i>L</i> - β -Pinene	981	0.74 ± 0.04
6	8.34	α -松油烯 α -Terpinene	1 020	5.24 ± 0.04
7	8.50	4-异丙基甲苯 <i>p</i> -isopropyltoluene	1 029	4.61 ± 0.03
8	8.59	右旋萜二烯 D-terpenadiene	1 034	1.10 ± 0.03
9	8.63	桉叶油醇 Eucalyptus oleanol	1 036	1.32 ± 0.03
10	9.17	萜品烯 Terpinene	1 064	11.22 ± 0.09
11	9.75	萜品油烯 Terpinolene	1 092	2.04 ± 0.01
12	9.96	水合桉烯 4-thujanol	1 102	0.67 ± 0.01
13	10.41	(<i>Z</i>)-para-2-menthen-1-ol	1 127	0.60 ± 0.01
14	10.75	(<i>Z</i>)-para-2-menthen-1-ol	1 146	0.29 ± 0.14
15	11.49	4-松油醇 Terpinen-4-ol	1 184	41.43 ± 0.25
16	11.71	α -松油醇 α -Terpineol	1 196	4.05 ± 0.02
17	11.80	(-) - α -松油醇 (-)- α -Terpineol	1 190	0.15 ± 0.15
18	13.16	2-Cyclohexene-1,4-diol, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-, (1 <i>R</i> ,4 <i>S</i>)-rel-	1 278	0.31 ± 0.15
19	14.01	反式巴豆醛 trans-crotonaldehyde	1 328	0.53 ± 0.01
20	14.97	α -蒎烯 α -Pinene	1 385	0.45 ± 0.01
21	15.54	香附子烯 Cyperene	1 420	0.79 ± 0.01
22	15.71	1-石竹烯 1-Caryophyllene	1 431	0.83 ± 0.01
23	16.03	(+) -香橙烯 (+) - Citroene	1 451	2.72 ± 0.02
24	16.38	2- π -反式- β -石竹烯 2-epi-trans- β -caryophyllene	1 473	1.10 ± 0.01
25	16.54	杜松烯 Cadinene	1 483	0.88 ± 0.01
26	16.81	γ -马阿里烯 γ -Maaliene	1 500	0.69 ± 0.01
27	16.90	(+) -喇叭烯 (+)-Ledene	1 506	3.83 ± 0.04
28	17.29	Δ -杜松烯 (+)- δ -Cadinene	1 533	3.25 ± 0.03
29	17.34	(-) -Zonarene	1 536	0.56 ± 0.01
30	17.44	卡地二烯 Cadinadiene	1 544	0.48 ± 0.01
31	18.16	桉油烯醇 Spathulenol	1 591	0.50 ± 0.01
32	18.26	(-) -蓝桉醇 (-) - Eucalyptol	1 598	1.39 ± 0.02
33	18.39	绿花白千层醇 (+)-Viridiflorol	1 607	0.92 ± 0.01
34	18.87	顺式立方烯醇 cis-Cubenol	1 641	0.70 ± 0.01
35	19.02	(-) -对苯二酚 (-)-Spathulenol	1 652	0.61 ± 0.01
36	19.08	萜澄茄油烯醇 (+)-Epicubenol	1 656	0.14 ± 0.14

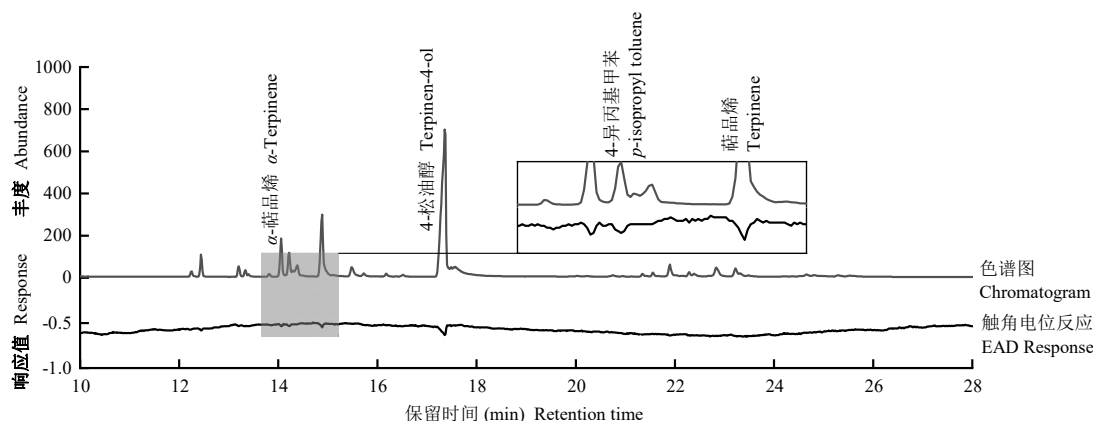


图2 红火蚁工蚁对互叶白千层精油的触角电生理反应

Fig. 2 Electroantennogram response of *Solenopsis invicta* workers to *Melaleuca alternifolia* essential oil

2.3 挖沙法测定活性物质对红火蚁的驱避性

利用红火蚁挖沙的行为特性来测定4种化合物在1 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 和2 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 两个浓度下对红火蚁工蚁的驱避效果。结果如图3所示,当浓度为1 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 时,4-松油醇对红火蚁具有显著的驱避效果($t = -3.102$, $P = 0.027$),其它3种化合物对红火蚁无显著驱避效果(萜品烯: $t = -1.859$, $P = 0.122$; α -松油烯:

$t = 0.017$, $P = 0.987$; 4-异丙基甲苯: $t = -1.387$, $P = 0.224$)。当浓度升高至2 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 后,4-松油醇有对红火蚁的驱避效果极为显著($t = -10.652$, $P < 0.001$),且4-异丙基甲苯也表现出对红火蚁显著的驱避效果($t = -2.568$, $P = 0.05$),而剩余两种化合物对红火蚁的驱避效果不显著(萜品烯: $t = -3.936$, $P = 0.11$; α -松油烯: $t = -2.412$, $P = 0.061$)。

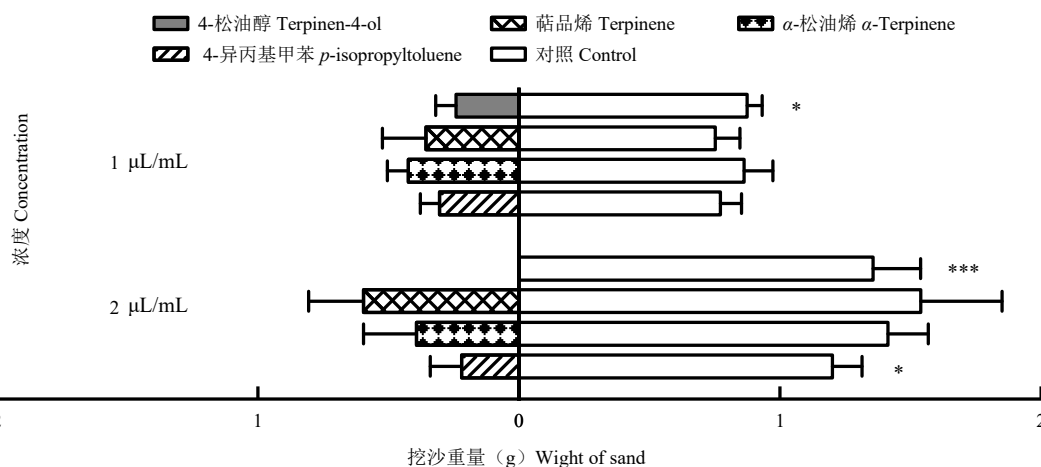


图3 挖沙法测定4种活性物质对红火蚁的驱避性

Fig. 3 Repellent effect of four active substances on *Solenopsis invicta* with digging sand assay

注: 图中*或***表示处理与对照在 $P = 0.05$ 或 $P = 0.001$ 水平差异显著。下图同。Note: Asterisks * or *** indicated significant differences at $P = 0.05$ or $P = 0.001$ level. Same below.

2.4 Y型尺法测定化合物对红火蚁的驱避性

利用Y型尺法测定4种化合物在1、2、4和5 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 浓度下对红火蚁工蚁的驱避效果。结果如图4所示,在4个不同浓度处理情况下,4-松油醇均对红火蚁表现出显著的驱避效果(1 $\mu\text{L}/\text{mL}$: $t = -4.16$, $P = 0.009$; 2 $\mu\text{L}/\text{mL}$: $t = -7.91$, $P < 0.001$; 4 $\mu\text{L}/\text{mL}$: $t = -10.63$, $P < 0.001$; 5 $\mu\text{L}/\text{mL}$: $t = -11.461$, $P < 0.001$)。当浓度为1 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 时,其它3种化合

物对红火蚁的驱避效果不显著(萜品烯: $t = 2.18$, $P = 0.081$; α -松油烯 $t = -2.47$, $P = 0.057$; 4-异丙基甲苯 $t = -2.48$, $P = 0.056$)。当浓度为2 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 时, α -松油烯对红火蚁表现出显著的驱避效果($t = -2.71$, $P = 0.042$),剩余两种化合物对红火蚁的驱避效果仍不显著(萜品烯: $t = -1.69$, $P = 0.151$; 4-异丙基甲苯: $t = -2.04$, $P = 0.097$)。当浓度为4 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 时, α -松油烯($t = -3.89$, $P = 0.012$)和4-异丙基甲

苯 ($t = -3.21$, $P = 0.024$) 对红火蚁具有显著的驱避效果, 萜品烯对红火蚁的驱避效果不显著 ($t = -0.76$, $P = 0.482$); 当药物浓度为 $5 \mu\text{L/mL}$ 时, 4-松油醇和 4-异丙基甲苯对红火蚁的驱避效果极为

显著 (4-松油醇: $t = -11.461$, $P < 0.001$; 4-异丙基甲苯: $t = -4.964$, $P = 0.004$), 萜品烯对红火蚁的驱避效果仍不显著 ($t = 0.862$, $P = 0.183$)。

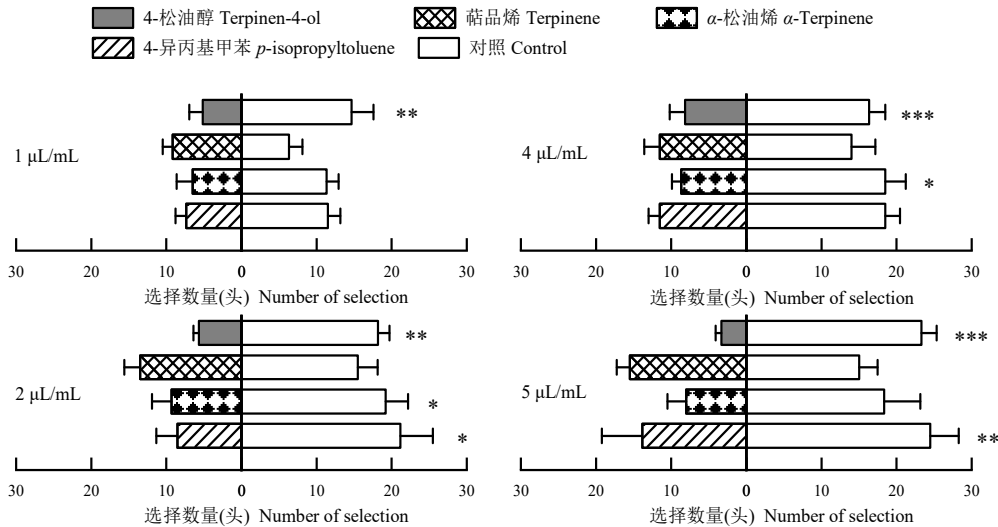


图4 Y型尺法测定4种活性物质在不同浓度下对红火蚁的驱避效果

Fig. 4 Repellent effect of four active substances at different concentrations on *Solenopsis invicta* using the Y-plate method

注: 图中*, **或***分别表示处理与对照在 $P = 0.05$, $P = 0.01$ 或 $P = 0.001$ 水平差异显著。Note: Asterisks *, ** or *** indicated significant differences at $P = 0.05$, $P = 0.01$ or $P = 0.001$ level.

3 结论与讨论

植物精油是一种从植物中通过蒸馏萃取等方法获得的天然产物, 主要成分通常为单萜、倍半萜及其衍生物, 该类化合物对昆虫的行为和生理等方面有着较强的生物活性, 而且因其独特的生物活性和环境友好性特点, 在农林及医学害虫的管理中受到了广泛关注 (Du *et al.*, 2021; 黄华等, 2022; 张坤和崔云峰, 2022)。因此, 研究植物精油及其主要活性化合物对红火蚁的驱避效果, 是一种开发安全无毒的红火蚁驱避剂的有效方法。本研究综合利用了动物行为和化学生态学分析技术测试了6种植物精油对红火蚁的驱避效果, 筛选出了对红火蚁驱避活性较强的互叶白千层精油, 并进一步采用GC-MS和GC-EAD技术确定了互叶白千层精油中4种丰度较高且对红火蚁具有潜在电生理活性的化合物, 最后采用挖沙法和Y型尺法两种不同生测方法测定了4种化合物对红火蚁的驱避效果, 表明4-松油醇是互叶白千层精油中对红火蚁具有强驱避活性的主要成分。

红火蚁的入侵和扩散对生态系统和人类活动

构成了严重威胁。传统的化学防治方法虽然效果显著, 但长期使用可能导致抗药性和环境污染问题 (陈婷等, 2024)。植物精油因其天然属性和多样的化学成分, 成为了控制红火蚁的有效手段。有研究表明, 肉桂精油对红火蚁具有显著的熏蒸致死效果, 肉桂精油中的主要成分反式肉桂醛和乙酸肉桂酯对红火蚁具有较强的驱避活性以及杀虫活性, 通过改变这些成分的比例, 可以有效地干扰红火蚁的同伴识别、攻击及梳理等社会行为, 进而使其社会结构的崩溃最终导致蚁巢死亡 (Xing *et al.*, 2023)。此外, 斑鸠菊精油也对红火蚁表现出熏蒸活性, 其中的 β -香树脂醇和 α -香树脂醇是其主要活性成分 (邝凡等, 2023)。本研究中, 供试的6种植物精油对红火蚁的驱避活性表现出明显差异, 这可能归因于不同精油在化学成分、浓度和挥发性等方面的差异 (Du *et al.*, 2021; 孙文锋, 2023)。互叶白千层精油对红火蚁的驱避效果最为显著, 表明互叶白千层可作为红火蚁驱避剂的一种重要植物来源。

本研究中互叶白千层挥发油所含的主要成分为4-松油醇 (41.43%)、萜品烯 (11.22%)、 α -松油烯 (5.24%)、4-异丙基甲苯 (4.61%)、 α -松油

醇(4.05%)和(+)-喇叭烯(3.83%)。据报道,巴西圣塔玛丽亚产地的互叶白千层挥发油主要成分为萜烯-4-醇(34.6%)、 γ -松油烯(20.3%)和 α -松油烯(10.1%)等(Li *et al.*, 2022)。广西南宁产地的互叶白千层花与叶挥发油的主成分为 1, 8-桉树脑、 α -松油醇、柠檬烯和 α -蒎烯等(陈海燕等, 2021)。这些研究表明,互叶白千层精油的化学成分和含量受到地理位置、品种和提取工艺等因素的影响,从而表现出差异性。化学成分和含量的差异对精油的生物活性具有显著的影响,可能在害虫管理方面的应用效果上存在差异。

本研究同时利用挖沙法和 Y 型尺法两种方法同时证明互叶白千层中的 4-松油醇是对红火蚁驱避效果最好的化合物。4-松油醇是一种天然存在的单萜醇类化合物,广泛存在于多种植物精油中,如茶树油、薰衣草油、互叶白千层油和柑橘类果皮油(赵振东和陈风雨, 2002; 谢佩吾等, 2019)。诸多研究表明,4-松油醇对多种昆虫具有驱避、杀虫和生长发育抑制等作用,是一种有潜力的天然杀虫剂候选物质。例如,在驱避活性方面,4-松油醇被发现可以有效驱避蜚蠊等卫生害虫,减少其对人类的骚扰和疾病传播的风险(Pascual *et al.*, 2010)。此外,4-松油醇还显示出对某些农作物害虫的驱避效果,有助于保护作物免受害虫的侵害。在杀虫活性方面,4-松油醇对多种农业害虫的幼虫和成虫均表现出毒性,能够干扰其神经系统的正常功能,导致害虫死亡(Isman, 2000)。同时,4-松油醇还具有影响昆虫生长发育的能力,如对赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 的化蛹和羽化过程产生抑制作用,进而减少害虫的种群数量(岳帅丽, 2023)。总之,4-松油醇作为一种具有广泛活性和多重作用机制的天然化合物,在害虫管理领域具有广阔的应用前景。

综上所述,本研究表明互叶白千层精油的主要成分为 4-松油醇、萜品烯、 α -松油烯和 4-异丙基甲苯等,其中 4-松油醇对红火蚁具有较强的驱避活性,是一种重要的红火蚁驱避剂候选物质。以上结果为研究和开发互叶白千层精油及其活性成分作为红火蚁天然驱避剂提供了理论基础,但其驱避行为的化学感受分子机制还需进一步研究。

参考文献(References)

- Burt S. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—a review [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2004, 94 (3): 223-253.
- Chen HY, Li GZ, Liang ZY. Analysis of volatile oil from flowers and leaves of 1, 8-Cineole type *Melaleuca alterniflora* [J]. *Journal of Anhui Agriculturae Sciences*, 2021, 49 (10): 164-166. [陈海燕, 李桂珍, 梁忠云. 1, 8-桉叶素型互叶白千层花与叶挥发油成分分析 [J]. *安徽农业科学*, 2021, 49 (10): 164-166]
- Chen T, Hu DL, Shi QX, *et al.* Application status, control effect evaluation of pesticides and control strategy for the red imported fire ant in China [J]. *Plant Quarantine*, 2024, 38 (1): 1-7. [陈婷, 胡德亮, 石庆型, 等. 我国红火蚁防治药剂应用现状、防效评价及防控对策 [J]. *植物检疫*, 2024, 38 (1): 1-7]
- Du Y, Zhou A, Chen J. Olfactory and behavioral responses of red imported fire ants, *Solenopsis invicta*, to ylang ylang oil and its components [J]. *Journal of Pest Science*, 2021, 94 (3): 1-14.
- Huang H, Ling SQ, Qiu HL, *et al.* Repellent activity and antennal electrophysiological responses of essential oil from *Psidium guajava* leaves against *Chilades pandava* [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2022, 38 (6): 7-14. [黄华, 凌斯全, 邱华龙, 等. 番石榴叶精油对曲纹紫灰蝶的驱避活性和触角电生理 [J]. *林业与环境科学*, 2022, 38 (6): 7-14]
- Isman MB. Plant essential oils for pest and disease management [J]. *Crop Protection*, 2000, 20 (1): 83-93.
- Jin YH, Ji DC, Xiong ZP. Research status of control methods of red imported fire ants [J]. *Plant Quarantine*, 2023, 37 (5): 22-26. [金奕亨, 姬党成, 熊忠平. 红火蚁防治的研究现状 [J]. *植物检疫*, 2023, 37 (5): 22-26]
- Kuang F, Wei Y, Wang JL, *et al.* The fumigation activity of essential oil from *Vernonia esculenta* against red imported fire ant [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2023, 43 (5): 171-176. [广凡, 魏巍, 王俊玲, 等. 斑鸠菊精油对红火蚁的熏蒸活性研究 [J]. *西南林业大学学报*, 2023, 43 (5): 171-176]
- Li X, Xu Y, Liu J, *et al.* Biological activities and gene expression of detoxifying enzymes in *Tribolium castaneum* induced by *Moutan cortex* essential oil [J]. *Toxicol Environ Health A*, 2022, 85 (14): 591-602.
- Ling LJ, Wang YY, Jiang KL, *et al.* Bioactivity of four essential oils of *Artemisia* plants against *Drosophila suzukii* Matsumura [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (6): 1341-1350. [令利军, 王圆圆, 蒋坤玲, 等. 四种蒿属植物精油对斑翅果蝇的生物活性 [J]. *中国生物防治学报*, 2023, 39 (6): 1341-1350]
- Pascual-villalobos MJ, Jiron LF. Insecticidal activity of essential oils from six plants of Peru against the tick *Amblyomma variegatum* (Acari: Ixodidae) [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2010, 47 (5): 911-915.
- Peng YH, Zhao HL, Xiong GH, *et al.* Chimecal composition, insecticidal and repellent activities of essential oils from two chamaecyparis species against mosquitoes [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34 (3): 364-369. [彭映辉, 赵何璐, 熊国红, 等. 两种扁柏属植物精油对蚊虫的毒杀、驱避活性及化学成分分析 [J]. *中国生物防治学报*, 2018, 34 (3): 364-369]
- Qiu HL, Qin CS, Fox EGP, *et al.* Differential behavioral responses of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) workers toward nestmate and non-nestmate corpses [J]. *Journal of Insect Science*, 2020, 20 (4): 11.
- Sun WF. A Novel Method for Repellency and Evaluation of Effective Components for *Solenopsis invicta* Workers [D]. Guangzhou, South China Agricultural University Master Thesis, 2023. [孙文锋. 红火蚁驱避作用测定新方法及其驱避成分筛选研究 [D]. 广州: 华南农业大学硕士学位论文, 2023]
- Wang L, Zeng L, Xu YJ, *et al.* Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China [J]. *NeoBiota*, 2020, 54: 89-124.

- Wang XL, Chen RR, Jiang P, *et al.* The invasion, management and measures of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (6): 1351-1355. [王晓亮, 陈冉冉, 姜培, 等. 中国红火蚁入侵扩散、防控及对策 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1351-1355]
- Wu P, Dong YJ, Chen JH, *et al.* Analysis of the difficulties of *Solenopsis invicta* Buren control [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, 13 (9): 1-3. [吴鹏, 董英健, 陈加红, 等. 红火蚁防治困难的原因分析 [J]. 农业灾害研究, 2023, 13 (9): 1-3]
- Xie PW, Zeng QT, Bai QS, *et al.* Phenotypic evaluation of introduced *Melaleuca alternifolia* resources in northern Guangdong Province [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2019, 39 (6): 1-8. [谢佩吾, 曾庆团, 白青松, 等. 互叶白千层粤北引种资源的表型评价 [J]. 西南林业大学学报, 2019, 39 (6): 1-8]
- Xing H, Hu Y, Yang L, *et al.* Fumigation activity of essential oils of cinnamomum loureirii toward red imported fire ant workers [J]. *Journal of Pest Science*, 2023, 96 (2): 647-662.
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Study on location expansion of *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2006, 27 (1): 34-36. [许益镬, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁局域扩散规律研究 [J]. 华南农业大学学报, 2006, 27 (1): 34-36]
- Yu S. Study on Biological Activity and Active Components of 10 Plant Essential Oils [D]. Guiyang: Guizhou Medical University Master Thesis, 2023. [余帅. 10 种植物精油生物活性及其活性成分研究 [D]. 贵阳: 贵州医科大学硕士论文, 2023]
- Yue SL. Study on the Regulation Mechanism of Terpinene-4-ol on the Pupation and Ecdysis of *Tribolium castaneum* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University Master Thesis, 2023. [岳帅丽. 4-松油醇调控赤拟谷盗化蛹和羽化作用机制研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学硕士论文, 2023]
- Zhang K, Cui YF. Chemical constituents of the essential oil from *Melaleuca alternifolia* and its anti-tumor and anti-insect activities [J]. *Journal of Shenyang Medical College*, 2022, 24 (6): 571-577. [张坤, 崔云峰. 互叶白千层挥发油的化学成分及其抗肿瘤和抗虫生物活性 [J]. 沈阳医学院学报, 2022, 24 (6): 571-577]
- Zhao ZD, Chen FY. Source preparation and application of 4-Terpineol [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2002, 36 (3): 4-6. [赵振东, 陈风雨. 4-松油醇的资源、制备及利用 [J]. 林产化工通讯, 2002, 36 (3): 4-6]
- Zhong JM, Fox EGP, Ling SQ, *et al.* Bioactivities of scent gland chemicals from *Mictis fuscipes* Hsiao (Hemiptera: Coreidae) on *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Pest Management Science*, 2024, 80 (6): 2892-2904.
- Zhou LL, Gao XX, Yang HJ, *et al.* Analysis on the harm and control measures of quarantine pest *Solenopsis invicta* [J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2021, 31 (5): 51-52. [周丽丽, 高晓晓, 杨洪娟, 等. 检疫性害虫红火蚁的危害与防控措施分析 [J]. 质量安全与检验检测, 2021, 31 (5): 51-52]