



扶桑绵粉蚧性信息素室内活性测定和田间应用技术初探^{*}

王丽坤^{1**} 罗佳垚¹ 邱紫璇¹ 钱鸣蓉¹ 吕要斌^{2***}

(1. 浙江树人大学交叉科学研究院, 浙江省污染暴露与健康干预重点实验室, 杭州 310015; 2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 杭州 310021)

摘要 【目的】探究扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* 性信息素引诱雄虫的化学通讯规律, 为开发其性诱剂产品、实现绿色防控提供科学依据。【方法】采用室内活性测定和室外诱捕实验, 分别测试不同剂量性信息素对扶桑绵粉蚧雄虫的引诱效果, 并比较田间不同诱芯剂量下的诱捕数量。【结果】室内活性测定显示, 性信息素剂量为 20 和 40 μg 时对雄虫具有极显著的引诱作用 ($P < 0.01$); 田间诱捕实验进一步表明, 当诱芯剂量为 40 μg 时, 雄虫诱捕量最大。【结论】本研究明确了扶桑绵粉蚧性信息素的有效引诱剂量, 为其性诱剂的开发与田间应用提供了重要依据。

关键词 扶桑绵粉蚧; 性信息素; 诱捕; 生物活性; 害虫综合管理

Laboratory determination of the biological activity, and preliminary investigation of the field application potential, of the sex pheromones of the cotton mealybug (*Phenacoccus solenopsis*)

WANG Li-Kun^{1**} LUO Jia-Yao¹ QIU Zi-Xuan¹ QIAN Ming-Rong¹ LÜ Yao-Bin^{2***}

(1. Key Laboratory of Pollution Exposure and Health Intervention of Zhejiang Province, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China; 2. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract [Aim] To investigate the chemical communication mechanism by which the sex pheromones of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley attract males, and thereby provide a scientific basis for developing sex attractants for the environmentally-friendly control of this pest. [Methods] Laboratory bioassays and field trapping experiments were conducted to evaluate the attractiveness of different doses of sex pheromone to male *P. solenopsis*. The efficacy of various lure doses was also compared under field conditions. [Results] Laboratory bioassays showed that doses of 20 μg and 40 μg were highly attractive to males ($P < 0.01$). Field trapping experiments further demonstrated that most males were captured with a dose of 40 μg . [Conclusion] These results identify the most effective dose of female sex pheromone for trapping male *P. solenopsis*, thereby providing important evidence for the development and application of sex attractants for this pest.

Key words *Phenacoccus solenopsis*; sex pheromone; trapping; biological activity; integrated pest management

利用昆虫性信息素防治虫害是近些年来发展迅速的一项绿色生物防治技术, 该项技术只针对靶标生物而对其他生物基本无影响, 是一种低

毒、高效、专一性强、灵敏度高、对环境友好的“绿色农药” (Souza *et al.*, 2023; Shashank *et al.*, 2024; Slavković and Bendahmane, 2025)。利用性

*资助项目 Supported project: 浙江省公益技术应用研究计划 (LGN22C140009)

**第一作者 First author, E-mail: wanglikun@zjsru.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: luybcn@163.com

收稿日期 Received: 2025-06-08; 接受日期 Accepted: 2026-04-08

信息素进行害虫防治,不会影响农产品品质、无残留,是一种理想的生态防治方案。相比于应用广泛的鳞翅目 Lepidoptera 类昆虫,性信息素技术在粉蚧科 Pseudococcidae 类昆虫中的应用则相对较为滞后。

扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis*, 又称棉花粉蚧 (Cotton mealybug), 属于半翅目 Hemiptera, 粉蚧科, 绵粉蚧属 *Phenacoccus* (王艳平等, 2009)。扶桑绵粉蚧最早原产于北美, 于 2008 年首次在我国广东省发现, 现已扩散至全国, 南北均有分布, 已成为我国农林业生产中重要的入侵害虫, 每年造成损失严重 (马骏等, 2009; 武三安和张润志, 2009)。扶桑绵粉蚧繁殖能力强, 种群增长速度快, 且寄主广泛, 能够危害粮食作物、蔬菜作物、观赏花卉植物和园林植物等 (王超等, 2014; Afzal and Shad, 2016; 徐良梓等, 2016; Spodek *et al.*, 2018)。由于扶桑绵粉蚧体表有蜡质层, 使得化学防治难以达到理想效果。因此, 开展基于扶桑绵粉蚧性信息素的害虫监测和防治技术迫在眉睫。

随着化学分析技术和合成技术的发展, 越来越多的粉蚧科昆虫性信息素被鉴定出来。日本科学家 Tabata 和 Ichiki (2016) 通过对当地未交配的扶桑绵粉蚧雌虫挥发物进行提取、分离和合成, 鉴定出扶桑绵粉蚧性信息素为 (*R*)-异戊烯酸 (2,2-二甲基-3-异亚丙基环丁基) 甲酯, 初步活性研究表明, 该化合物对雄虫有较强的吸引作用。然而, 该生物测定工作皆在室内进行, 对于其作用剂量、作用方式以及田间引诱效果等仍不清楚。因此, 本研究利用合成的扶桑绵粉蚧性信息素, 通过对其室内活性和田间引诱方式和效果进行初步探究, 为扶桑绵粉蚧的绿色防控提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试试剂

(*R*)-异戊烯酸 (2,2-二甲基-3-异亚丙基环丁基) 甲酯为实验室合成, 合成方法参照 Tabata 和 Ichiki (2016), 其化学纯度为 90%, 光学纯度为 92%。化合物经气相色谱法测定, GC-MS (电子电离 70 eV): 质荷比 (*m/z*) 236 (M^+ ,

1.36%), 136 (25.42%), 121 (100%), 107 (11.64%), 93 (25.16%), 79 (11.05%), 55 (27.02%); 正己烷为色谱纯 (HPLC, 99%), 购自西格玛奥德里奇 (上海) 贸易有限公司 (Sigma-Aldrich)。

1.2 供试虫源

扶桑绵粉蚧采自于浙江省农业科学院试验田中茄子和番茄植株, 在浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所人工气候室内饲养, 以土豆为寄主植物连续饲养, 人工气候室温度 (27 ± 1) °C, 相对湿度为 70%±5%, 光周期 14 L : 10 D。

1.3 嗅觉行为

选用 Y 型嗅觉仪评价性信息素对扶桑绵粉蚧的行为反应, 实验装置分别由 Y 型管、味源瓶、空气加湿瓶、活性炭过滤器、进气装置和橡胶软管连接而成。将化合物用正己烷分别配置成 1 和 10 mg/mL, 分别取不同体积的性信息素溶液, 滴加到 1.5 cm × 1.5 cm 的正方形滤纸上并放入味源瓶中, 使得最终剂量为 1、10、20、40、60、80 和 100 µg, 另一个气味瓶中作为对照 (正己烷)。管内气流为 400 mL/min, 逐头引入雄虫进行试验。

选择性试验参照当雄虫处于基臂 2/3 处开始计时, 当其向某一味源方向爬行到达或超过臂长的 1/3 处以上, 或者停留 5 s 以上后又向其他方向爬行的, 都记为对该气味源有趋向反应, 如在 5 min 内仍未作出选择则不与统计。试验重复 3 次, 每个重复取 100 头未交配的扶桑绵粉蚧雄虫, 每头虫仅使用一次。每测试 5 头后交换气体方向, 并更换 Y 型管, 试验于每天相同的时间段 (7:00-9:00 am) 进行。

1.4 田间诱捕

1.4.1 不同剂量引诱效果比较 准确称量 10 mg 扶桑绵粉蚧性信息素, 溶解在 10 mL 正己烷中, 制成浓度为 1 mg/mL 性诱剂溶液, 分别向诱芯中加入不同体积的性诱剂溶液, 最终剂量分别为 10、20、40、60、80 和 100 µg/诱芯, 向制作好的诱芯中加入 2 µL 抗氧化剂丁基羟基苯甲醚 (Butylated hydroxyanisole, BHA)。田间试

验均在浙江省农业科学院杨渡基地 (30.4483°N, 120.4145°E) 进行, 该区域内有大量扶桑绵粉蚧发生, 主要危害茄子、黄瓜和番茄等作物。将上述制作好的不同剂量的诱芯置于黄板 (200 mm × 250 mm) 正中位置, 悬挂于扶桑绵粉蚧发生地, 悬挂高度为 2.5 m, 间隔为 8 m。在放置 3 d 后调查粘虫板上扶桑绵粉蚧雄虫数量, 并进行统计分析。本次试验每个处理 5 次重复, 并计算平均值及误差。

1.4.2 不同色板诱捕效果比较 将制作好的 40 μg/诱芯的橡胶塞放入到不同颜色的粘虫板中, 悬挂于扶桑绵粉蚧发生地, 悬挂高度为 2.5 m, 间隔为 8 m。在放置 3 d 后调查粘虫板上扶桑绵粉蚧雄虫数量, 并进行统计分析。每个处理 5 个重复, 通过比较诱捕扶桑绵粉蚧雄虫的数量来分析不同色板的效果。

1.5 数据分析

室内嗅觉行为试验中, 分别统计各剂量组雄虫对性信息素臂和对照臂的选择数量, 采用卡方检验 (Chi-square test) 比较两者间的差异显著性 ($P=0.05$, 极显著性水平 $P=0.01$)。田间诱捕试验中, 不同剂量性信息素诱芯及不同色板诱捕的雄虫数量以“平均值±标准误”表示, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验各处理间的总体差异, 并采用最小显著差异法 (LSD 法) 进行多重比较, 检验水准 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 扶桑绵粉蚧室内活性

分别统计雄虫对不同剂量扶桑绵粉蚧性信息素的选择性, 并与空白对照比较, 对两者之间的差异进行卡方检验 (χ^2), 结果如图 1 所示, 当剂量为 1 μg ($\chi^2=0.026$, $df=1$, $P=0.0871$) 和 10 μg/诱芯 ($\chi^2=1.467$, $df=1$, $P=0.226$) 时, 差异不显著, 表明在此浓度下性信息素对雄虫吸引作用较弱, 随着剂量的增加, 当达到 20 ($\chi^2=7.78$, $df=1$, $P=0.005$) 和 40 μg ($\chi^2=11.145$, $df=1$, $P<0.001$) 时, 对雄虫有极显著的引诱作用。剂量为 60 μg ($\chi^2=3.886$, $df=1$, $P=0.049$) 对雄虫也

表现出显著的吸引作用。然而, 当剂量增加到 80 ($\chi^2=3.005$, $df=1$, $P=0.083$) 和 100 μg ($\chi^2=1.616$, $df=1$, $P=0.204$) 时, 性信息素对雄虫无吸引作用。

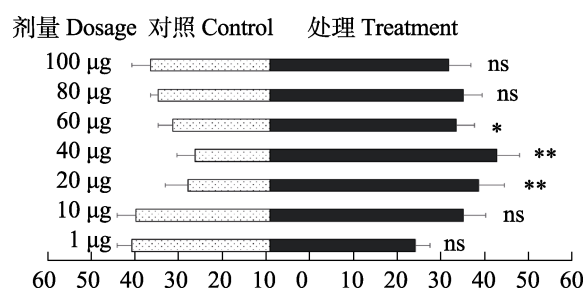


图 1 扶桑绵粉蚧雄虫对不同浓度性信息素趋向反应
Fig. 1 Response of *Phenacoccus solenopsis* adult males to different concentrations of sex pheromone

*表示处理与其对照间差异显著 ($P<0.05$, χ^2 检验); **表示处理与对照间差异极显著 ($P<0.01$, χ^2 检验); ns 表示差异不显著 ($P>0.05$, χ^2 检验)。

* indicates significant difference between treatment and control ($P<0.05$, χ^2 test); ** indicates extremely significant difference between treatment and control ($P<0.01$, χ^2 test); ns indicates no significant difference ($P>0.05$, χ^2 test).

2.2 不同剂量性信息素诱捕效果

田间诱捕结果表明, 不同剂量的扶桑绵粉蚧性信息素均对雄虫有引诱作用, 不同剂量之间表现出一定的差异性, 其中, 当剂量达 40 μg/诱芯时, 对雄虫诱捕量最高 (27.00±4.04) 头, 当剂量增加到 80 或 100 μg/诱芯时并没有表现出更强的引诱活性 (图 2)。

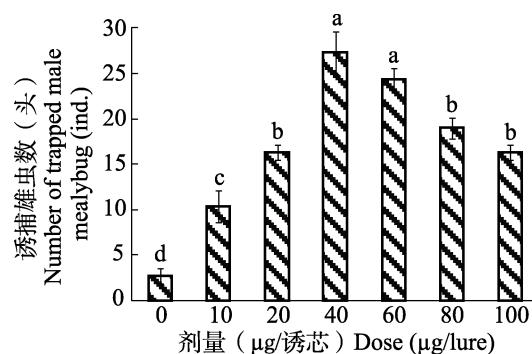


图 2 不同剂量扶桑绵粉蚧性信息素对雄虫引诱效果
Fig. 2 Trapping efficiency of different doses of the synthetic sex pheromone of *Phenacoccus solenopsis*

图中数据为平均值±标准误, 柱上不同字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 检验)。

Data are presented as mean ± SE. Different letters above bars indicate significant difference ($P<0.05$, LSD test).

2.3 不同色板诱捕效果评价

由于昆虫的趋光性,特定颜色的色板可能对扶桑绵粉蚧的田间引诱作用不同,因此在相同性信息素剂量下,开展不同颜色色板对扶桑绵粉蚧雄虫的诱捕效果,可以明确扶桑绵粉蚧性信息素的田间使用方法。结果表明,黄板比蓝板和白板诱捕效果更好,诱捕雄虫虫量存在显著差异 ($P < 0.01$) (图 3),表明扶桑绵粉蚧雄虫具有一定的颜色选择性,因此在田间应用中应优先使用黄板作为诱捕器。

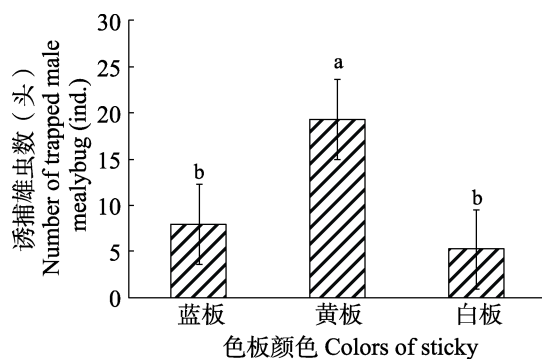


图 3 不同颜色的粘虫板对扶桑绵粉蚧雄虫引诱效果比较

Fig. 3 Trapping efficiency of different colors of sticky traps on male *Phenacoccus solenopsis*

图中数据为平均值±标准误,柱上不同字母表示差异极显著 ($P < 0.01$, LSD 检验)。

Data are presented as mean $\pm$ SE. Different letters above bars indicate extremely significant difference ($P < 0.01$, LSD test).

3 结论与讨论

目前,在多种已明确性信息素成分的粉蚧科昆虫中已经成功应用性信息素干扰交配技术进行害虫防治 (Zou and Millar, 2015; Mansour *et al.*, 2018; Urbina *et al.*, 2018; Hogg *et al.*, 2021),该方法能够显著抑制害虫的发生,降低害虫对作物的危害,有效减少农药使用,成为蚧壳类害虫综合防治中的一项关键技术。大量研究充分表明,在蚧壳虫中利用性信息素干扰交配等方式能够显著影响雌雄虫交配过程,降低雌虫产卵率,减少虫口密度,从而降低害虫对农林作物的危害,有效减少化学农药的使用。例如

Ballesteros 等 (2021) 在 2017-2020 年期间通过开展盖氏桔粉蚧 *Pseudococcus calceolariae* 性信息素田间干扰交配实验发现,与对照果园相比,释放性信息素的果园中盖氏桔粉蚧雄虫数量明显减少,3 年平均干扰交配指数 (Mating disruption index, MDI) 达到 80%; Cocco 等 (2018) 利用性信息素开展了为期 3 年的葡萄粉蚧 *Planococcus ficus* 干扰交配实验,结果表明,与对照相比,性信息素处理过的地块中雌虫的产卵率下降了 18.8%-66.2%; Sullivan 等 (2023) 利用性信息素对长尾粉蚧 *Planococcus longispinus* 和嗜桔粉蚧 *Planococcus calceolariae* 的田间种群进行了有效监测,田间引诱活性能够持续 90 d。

本研究在室内嗅觉行为测定中发现,扶桑绵粉蚧性信息素对雄虫的引诱作用表现出典型的剂量依赖性特征:低剂量 (1 和 10 μg) 时引诱作用不显著,在 20-60 μg 范围内表现出显著至极显著的引诱效果,其中 20 和 40 μg 达到极显著水平;然而,当剂量进一步增加到 80 和 100 μg 时,引诱活性反而下降,差异不显著。在田间诱捕实验中,不同剂量的性信息素均对雄虫有一定的引诱作用,其中 40 μg /诱芯处理的诱捕量最高,为 (27.00 $\pm$ 4.04) 头,80 和 100 μg 处理同样未表现出更强的引诱活性,这与室内活性测定的趋势基本一致。然而,需要注意的是,室内实验中 20 μg 剂量已表现出极显著的引诱作用,且其趋向率与 40 μg 剂量相当,但在田间实验中 40 μg 剂量的诱捕量明显高于 20 μg 剂量。这一剂量-反应曲线的差异可能反映了室内实验与田间实际应用场景之间的区别。在室内 Y 型嗅觉仪中,雄虫处于封闭、受控的环境中,无气流扰动和遮挡物干扰,信息素气味以均匀的扩散方式传递,雄虫的选择行为主要反映其对特定浓度气味的趋性反应;而在田间开放环境中,信息素从诱芯中持续缓慢释放,在气流、温度、湿度以及作物冠层结构等多种环境因素的共同作用下,形成一个随距离和方向而变化的不均匀气味羽流。在此复杂条件下,更高的信息素剂量 (40 μg) 可能产生更强、更远的气味羽流信号,从而在更大的空间范围内吸引更多雄虫,因此在实际诱捕数量

上表现出显著优势。此外, Tabata 和 Ichiki(2016) 在室内生物测定中也发现, 合成扶桑绵粉蚧性信息素对雄虫具有吸引作用, 但未涉及不同剂量间的定量比较。本研究的田间数据为确定性信息素的最佳应用剂量提供了直接参考, 表明 40 μg /诱芯是当前条件下较为理想的田间使用剂量。

值得注意的是, 本研究中扶桑绵粉蚧性信息素在田间诱捕实验中表现出的剂量-效应关系与南非洲橘粉蚧 *Delottococcus aberiae* 的研究结果有相似之处 (Gavara *et al.*, 2025)。有研究发现, 南非洲橘粉蚧性信息素的释放速率与诱捕效率呈非线性关系, 最佳诱捕区间为 0.4-40 $\mu\text{g}/\text{d}$, 超出该阈值时诱捕量显著下降, 并将其归因于雄性感受器的适应性钝化, 提示在高剂量条件下可能发生非竞争性交配干扰机制。本研究也观察到, 80 和 100 μg 高剂量处理的诱捕量低于 40 μg 处理, 且室内实验中这两组处理的趋向反应不显著, 与此类“过载抑制”现象相符。因此, 在扶桑绵粉蚧性信息素的田间应用中, 并非剂量越高诱捕效果越好, 合理控制诱芯中的信息素装载量对于实现最优诱捕效率具有重要意义。这一发现为性诱剂产品的优化设计和田间推广应用提供了重要的剂量参数依据。

在诱捕器颜色的选择方面, 本研究比较了黄色、蓝色和白色粘虫板配合性信息素诱芯对扶桑绵粉蚧雄虫的诱捕效果, 结果表明黄板的诱捕效果显著优于蓝板和白板, 说明扶桑绵粉蚧雄虫对黄色具有较强的趋性。这一现象可以从昆虫的趋色性机制中得到解释。昆虫的趋色行为与其视觉系统中光感受器的光谱敏感性密切相关, 不同波长的光刺激会诱发昆虫产生不同的趋向反应 (Donners *et al.*, 2018)。黄色粘虫板通常在 550-590 nm 波长范围内具有较高的反射率, 这一波段与许多同翅目昆虫的视觉偏好相符。研究表明, 蚜虫、粉虱、叶蝉、潜叶蝇等多种同翅目昆虫对黄色具有较强的趋性, 因此黄色粘虫板已成为这些害虫田间监测和诱杀的重要手段 (Bian *et al.*, 2016)。

此外, 相比于鳞翅目昆虫, 性信息素技术在扶桑绵粉蚧的防治中可能发挥作用更大。扶桑绵

粉蚧为典型的雌雄异型昆虫, 雌雄个体在形态上差异很大, 雄虫属于完全变态发育, 雄成虫有一对翅, 能够自由飞行, 而雌虫则属于不完全变态发育, 雌成虫周身覆盖白色蜡粉, 体缘有蜡突, 不能飞行 (朱艺勇等, 2011)。因此, 利用扶桑绵粉蚧性信息素技术干扰交配, 或通过性信息素诱捕雄虫, 减少雄虫的虫口密度, 雌虫由于无法自由飞行, 大大限制了其行动范围, 当雄虫数量显著减少后, 则能够显著抑制雌虫产卵量, 从而减少虫口密度, 达到控制其种群的目的。

综上所述, 性信息素是昆虫个体之间进行通讯的重要化学信号物质, 通过性信息素传递, 昆虫可以识别或定位异性个体, 从而完成求偶和交配行为。目前, 大部分性信息素物质为挥发性较强的化合物, 在田间应用中易受到各种环境因素的影响, 如光照、温度、湿度以及风雨等影响。开展扶桑绵粉蚧性信息素的室内和田间实验, 可以揭示性信息素成分与生物活性之间的关系, 阐明扶桑绵粉蚧性信息素发挥引诱作用的最佳剂量和最优化合物配比, 为进一步开发利用性诱剂进行综合防控提供技术支撑。

参考文献 (References)

- Afzal M, Shad SA, 2016. Characterization of *Phenacoccus solenopsis* (Tinsley) (Homoptera: Pseudococcidae) resistance to emamectin benzoate: Cross-resistance patterns and fitness cost analysis. *Neotropical Entomology*, 45(3): 310-319.
- Ballesteros C, Romero A, Castro MC, Miranda S, Bergmann J, Zaviezo T, 2021. Mating disruption of *Pseudococcus calceolariae* (Maskell) (Hemiptera, Pseudococcidae) in fruit crops. *Insects*, 12(4): 343.
- Bian L, Yang PX, Yao YJ, Luo ZX, Cai XM, Chen ZM, 2016. Effect of trap color, height, and orientation on the capture of yellow and stick tea *Thrips* (Thysanoptera: Thripidae) and nontarget insects in tea gardens. *Journal of Economic Entomology*, 109(3): 1241-1248.
- Cocco A, Muscas E, Mura A, Iodice A, Savino F, Lentini A, 2018. Influence of mating disruption on the reproductive biology of the vine mealybug, *Planococcus ficus* (Hemiptera: Pseudococcidae), under field conditions. *Pest Management Science*, 74(12): 2806-2816.
- Donners M, Grunsven RHAV, Groenendijk D, Langevelde FV,

- Bikker J, Longcore T, Veenendaal EM, 2018. Colors of attraction: Modeling insect flight to light behavior. *Journal of Experimental Zoology*, 329(8/9): 434–440.
- Gavara A, Zarzo M, Bagues JM, Vacas S, Fuertes IN, Navarro-Llopis V, 2025. Modelling response of *Delottococcus aberiae* (De lotto) male captures to pheromone emission rates. *Pest Management Science*, 81(12): 8543–8551.
- Hogg BN, Cooper ML, Daane KM, 2021. Areawide mating disruption for vine mealybug in California vineyards. *Crop Protection*, 148: 105735.
- Mansour R, Belzunces LP, Suma P, Zappalà L, Mazzeo G, Grissa-Lebdi K, Russo A, Biondi A, 2018. Vine and citrus mealybug pest control based on synthetic chemicals. *Agronomy For Sustainable Development*, 38(4): 20–37.
- Ma J, Hu XN, Liu HJ, Liang F, Zhao JP, 2009. *Phenacoccus solenopsis* was found on Guangzhou. *Plant Quarantine*, 23(2): 35–36. [马骏, 胡学难, 刘海军, 梁帆, 赵菊鹏, 2009. 广州扶桑上发现扶桑绵粉蚧. 植物检疫, 23(2): 35–36.]
- Shashank DU, Sujatha GS, Teja KSS, Hema AP, Mishra R, Abinaya S, Shewta K, Kumar GA, 2024. A comprehensive review of advances in semiochemical exploitation for insect pest management. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(9): 845–863.
- Slavković F, Bendahmane A, 2025. Plants, Pollinators and Pheromones: Promises and lies of semiochemicals. *Plant, Cell & Environment*, 48(9): 6865–6873.
- Souza JP, Bandeira PT, Bergmann J, Zarbin PH, 2023. Recent advances in the synthesis of insect pheromones: An overview from 2013 to 2022. *Natural Product Reports*, 40(4): 866889.
- Spodek M, Ben-Dov Y, Mondaca L, Protasov A, Erel E, Mendel Z, 2018. The cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) in Israel: Pest status, host plants and natural enemies. *Phytoparasitica*, 46(1): 45–55.
- Sullivan NJ, Bell VA, Butler RC, Wallis R, Ramesh R, Reddy DS, Twidle AM, Bunn B, Unelius CR, Manning LM, Suckling DM, 2023. Developing a mealybug pheromone monitoring tool to enhance IPM practices in New Zealand vineyards. *Journal of Pest Science*, 96(1): 29–39.
- Tabata J, Ichiki RT, 2016. Sex pheromone of the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis*, with an unusual cyclobutane structure. *Journal of Chemical Ecology*, 42(11): 1193–1200.
- Urbina A, Verdugo JA, López E, Bergmann J, Zaviezo T, Flores MF, 2018. Searching behavior of *Cryptolaemus montrouzieri* (Coleoptera: Coccinellidae) in response to mealybug sex pheromones. *Journal of Economic Entomology*, 111(4): 1996–1999.
- Wang C, Chen F, Lu YY, 2014. Study on the male fecundity of an alien invasive pest, cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae). *Journal of Environmental Entomology*, 36(5): 661–666. [王超, 陈芳, 陆永跃, 2014. 外来入侵害虫棉花粉蚧雄虫生殖能力研究. 环境昆虫学报, 36(5): 661–666.]
- Wang YP, Wu SA, Zhang RZ, 2009. Risk analysis of invasive pest *Phenacoccus solenopsis* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(1): 101–106. [王艳平, 武三安, 张润志, 2009. 入侵害虫扶桑绵粉蚧在中国的风险分析. 昆虫知识, 46(1): 101–106.]
- Wu SA, Zhang RZ, 2009. A new invasive alien pest threatening cotton production, *Phenacoccus solenopsis*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(1): 159–162. [武三安, 张润志, 2009. 威胁棉花生产的外来入侵新害虫——扶桑绵粉蚧. 昆虫知识, 46(1): 159–162.]
- Xu LZ, Wang L, Liang GW, Chen L, Lu YY, 2016. Sexual selection in male mealybug *Phenacoccus solenopsis* and daily mating activity. *Journal of Environmental Entomology*, 38(4): 680–684. [徐良梓, 王磊, 梁广文, 陈立, 陆永跃, 2016. 棉花粉蚧雄成虫对雌虫的性选择及日交配节律. 环境昆虫学报, 38(4): 680–684.]
- Zhu YY, Huang F, Lu YB, 2011. Bionomics of mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley on cotton. *Acta Entomologica Sinica*, 54(2): 246–252. [朱艺勇, 黄芳, 吕要斌, 2011. 扶桑绵粉蚧生物学特性研究. 昆虫学报, 54(2): 246–252.]
- Zou Y, Millar JG, 2015. Chemistry of the pheromones of mealybug and scale insects. *Natural Product Reports*, 32(7): 1067–1113.