

3 种杀虫剂对扶桑绵粉蚧的室内毒力及生理生化的影响

张嘉丽^{1,2}, 覃江梅², 覃武², 王昱莎³,

蔡晓燕², 李少斌^{1*}, 陈红松^{2*}

(1. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434000; 2. 广西农业科学院植物保护研究所/广西作物病虫害生物学重点实验室/农业农村部华南果蔬绿色防控重点实验室, 南宁 530007; 3. 广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* Tinsley 是一种重大入侵害虫, 目前其防治主要依赖化学杀虫剂。为筛选对扶桑绵粉蚧高效的杀虫剂并明确这些杀虫剂对其生理生化的影响, 选取 3 种能有效防治刺吸式口器害虫的不同化学类别杀虫剂 (啶虫脒、高效氯氟菊酯、灭多威), 采用带虫浸叶法测定 3 种不同类型杀虫剂对扶桑绵粉蚧 3 龄若虫的室内毒力, 进一步测定在 LC₅₀、LC₃₀、LC₁₀ 下扶桑绵粉蚧体内海藻糖、可溶性蛋白和甘油三酯的含量及解毒酶[谷胱甘肽 S-转移酶 (GSTs) 和羧酸酯酶 (CarE)] 的活性。结果表明, 啶虫脒的致死中浓度最低 (22.97 mg/L)。3 种杀虫剂 LC₅₀ 胁迫均显著提高 GSTs 活性; 相反, 高效氯氟菊酯和灭多威胁迫下 CarE 显著被抑制, 在灭多威 LC₃₀ 处理下 CarE 活性最低 (48.14 U/g)。3 种杀虫剂各浓度胁迫下扶桑绵粉蚧体内海藻糖含量均显著降低, 啶虫脒 LC₃₀ 处理下含量最低 (16.60 mg/g); 而可溶性蛋白含量仅在高效氯氟菊酯与灭多威胁迫下显著降低, 同一致死浓度下, 啶虫脒处理后可溶性蛋白含量显著高于高效氯氟菊酯和灭多威处理。扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量仅在灭多威 LC₁₀ 胁迫下显著升高 (31.11 mg/g), 高效氯氟菊酯 LC₅₀ 处理下降低 (11.93 mg/g)。表明扶桑绵粉蚧对啶虫脒更为敏感, 受到杀虫剂胁迫需消耗大量能源物质以求生存, GSTs 在扶桑绵粉蚧解毒过程可能起重要作用。研究结果为扶桑绵粉蚧化学防控药剂选择和抗药性治理提供科学参考。

关键词: 扶桑绵粉蚧; 杀虫剂; 毒力; 解毒酶; 能源物质

中图分类号: Q968.1; 文献标识码: A 文章编号: 1674-0858 (2024) 00-0000-00

Laboratory toxicity of three insecticides and effects to physiology

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2601400); 国家自然科学基金 (31760542); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2021YT076)

作者简介: 张嘉丽, 女, 2000 年生, 湖北神农架人, 硕士研究生, 研究方向为动物生态学, E-mail: 17362348186@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 李少斌, 男, 博士, 教授, 研究方向为动物生态学与进化生物学, E-mail: shaobinli@yangtzeu.edu.cn; 陈红松, 男, 博士, 研究员, 研究方向为入侵物种防控, E-mail: chenhongsong2061@163.com

收稿日期 Received: 2024-07-30; 接受日期 Accepted: 2024-10-09

biochemistry of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley

ZHANG Jia-Li^{1,2}, QIN Jiang-Mei², QIN Wu², WANG Yu-Sha³, CAI Xiao-Yan², LI Shao-Bin^{1*}, CHEN Hong-Song^{2*} (1. College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou 434000, Hubei Province, China; 2. Plant Protection Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Guangxi Key Laboratory of Biology for Crop Diseases and Insect Pests/Key Laboratory of Green Prevention and Control on Fruits and Vegetables in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning 530007, China; 3. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: *Phenacoccus solenopsis* Tinsley is an important invasive pest, whose control mainly depends on chemical insecticides. In order to select highly effective insecticides for the control of *P. solenopsis* and to clarify their physiological and biochemical effects, three different chemical types of insecticides (acetamiprid, beta-cypermethrin and methomyl), which are effective in controlling sucking mouthparts, were selected and analyzed the toxicity of these insecticides against 3rd instar of *P. solenopsis* nymphs with the immersion method under laboratory conditions. Moreover, we assessed the detoxification enzymes activity [glutathione-S-transferases (GSTs) and carboxylesterase (CarE)], and the energy substances content (soluble proteins, triglycerides and trehalose) of *P. solenopsis* at LC₅₀, LC₃₀ and LC₁₀. The results showed that acetamiprid had the lowest LC₅₀ (22.97 mg/L). The activity of GSTs was significantly increased when exposed to LC₅₀ of all three candidates. However, the activity of CarE was reduced which inhibited by beta-cypermethrin and methomyl stresses. The lowest activity of CarE was observed in methomyl LC₃₀ treatment (48.14 U/g). The contents of trehalose of *P. solenopsis* were significantly decreased in all the concentrations when exposed to three candidates. The lowest content of trehalose was observed in acetamiprid LC₃₀ treatment (16.60 mg/g). However, soluble protein content was significantly decreased only in the exposure of beta-cypermethrin and methomyl. At the same lethal concentration, the soluble protein content of acetamiprid treatment was significantly higher than that of beta-cypermethrin and methomyl treatment. The triglyceride content in *P. solenopsis* was significantly increased only under methomyl LC₁₀ stress (31.11 mg/g) and decreased under beta-cypermethrin LC₅₀ treatment (11.93 mg/g). It indicated that *P. solenopsis* were more sensitive to acetamiprid and consume a large amount of energy to survive when exposed to insecticides, and

GSTs may play an important role in the detoxification process of *P. solenopsis*. Our results provide a theoretical basis for the rational selection of insecticides and the study of resistance mechanism in the integrated pest management of *P. solenopsis*.

Key words: *Phenacoccus solenopsis*; insecticide; toxicity; detoxification enzyme; energy substance

扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* Tinsley 隶属半翅目 Hemiptera 粉蚧科 Pseudococcidae, 是一种全球范围内广泛分布的入侵害虫 (Tong *et al.*, 2019; 周忠实等, 2023), 最早发现于美国, 我国于 2008 年在广东首次发现该虫 (马骏等, 2009)。该虫可为害 55 科 149 属 207 种植物, 包括棉花 *Gossypium* spp.、土豆 *Solanum tuberosum* L.、番茄 *Solanum lycopersicum* L.、辣椒 *Capsicum annuum* L.等重要经济作物 (周忠实等, 2023)。其主要为害植物的幼嫩叶片、嫩芽及枝条, 吸食汁液并分泌蜜露, 诱发煤污病影响植物光合作用, 使植物萎蔫枯败甚至死亡 (朱艺勇等, 2011; Waqas *et al.*, 2021)。扶桑绵粉蚧为害植株时分泌蜜露, 除了会诱发煤污病, 也会吸引蚂蚁等昆虫取食, 蚂蚁与扶桑绵粉蚧形成互惠共生关系, 扶桑绵粉蚧为蚂蚁提供食物, 蚂蚁为扶桑绵粉蚧驱逐天敌等 (Xu *et al.*, 2020; 关子盈等, 2022), 促使扶桑绵粉蚧种群快速增长。由于寄主适应性强, 种群爆发及扩散极为容易, 目前扶桑绵粉蚧已广泛分布于我国广西、广东、湖北等多个省市 (覃武等, 2021)。根据中国有害生物危险性综合评价标准, 扶桑绵粉蚧的 R 值 (危险性评价总指标值) 达 2.28, 属于高度危险的有害生物 (吴贵宏等, 2018), 对作物以及生态具有较大的负面影响 (张辉盛等, 2023)。

广食性与强抗逆能力、高繁殖力等特性使得扶桑绵粉蚧极易扩散, 种群更易爆发, 人类活动导致的种群扩散也令其愈发难以防控。扶桑绵粉蚧若虫活动能力强, 能依附于人体、农具等进行传播, 且若虫较成虫对杀虫剂更为敏感, 因此应以压低种群密度为主, 在若虫期进行灭杀 (李萌等, 2023; 罗正玉等, 2023)。防治粉蚧类害虫主要使用有机磷类、氨基甲酸酯类、新烟碱类与拟除虫菊酯类杀虫剂 (Shankarganesh *et al.*, 2022); 当前已有不少研究表明生物源杀虫剂也具有好的杀虫活性 (Madasamy *et al.*, 2023), 然而相较于生物源杀虫剂, 化学药剂能够更快速地杀灭扶桑绵粉蚧 (Thammayya *et al.*, 2024)。昆虫病原菌等相较于化学杀虫剂而言对环境更加安全无害, 能够有效防治多种昆虫, 但在大规模防治时作用效果缓慢且不稳定 (袁盛勇等, 2016; Rizwan *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024)。Elabasy 等 (2020) 利用纤维素纳米晶体材料为载体对噻虫嗪进行释放, 发现其杀虫活性高于普通商业制剂, 这表明合适的施药方式能显著提高防治效果。当前, 化学药剂在扶桑绵

粉蚧的综合治理中仍为主要措施，选择正确的杀虫剂及施药方式是有效防治的前提。啮虫脒、灭多威、高效氯氰菊酯可有效防治同翅目、刺吸式口器害虫（方天松等，2016；胥庆安等，2016；张琪等，2020），可能对扶桑绵粉蚧亦具有较好的防控效果，因此本研究选择这3种杀虫剂。

长期使用单一杀虫剂、杀虫剂的不合理使用是导致农业害虫产生抗药性的重要原因（Gul *et al.*, 2023；张帅等，2024）。随着化学杀虫剂的大量使用，扶桑绵粉蚧已对多种化学药剂产生了抗性，对其防治带来了挑战（Waqas *et al.*, 2021），因此选择合适的杀虫剂极为重要。为了适应不良环境，昆虫会相应地改变自身生理、遗传机制等以获得更高的适合度（樊宗芳等，2021；覃武等，2021；张小香等，2021；刘琴等，2022）。研究表明，草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)，对毒死蜱的抗性需要付出巨大的适应性代价，例如子代发育历期延长、繁殖力降低等（Garlet *et al.*, 2021）。啮虫酰胺胁迫下，中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* (Okamoto) 体内的保护酶及解毒酶活性均在 72 h 内显著升高（Zhang *et al.*, 2022）。宋永辉等（2021）研究发现多杀霉素亚致死浓度胁迫下，棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 体内甘油三酯含量显著降低，参与脂肪酸合成信号通路中重要基因的相对表达量显著下调，而参与脂肪代谢的重要基因则显著上调。外界胁迫下，昆虫体内生理生化变化是典型的应激反应，对其种群延续至关重要。

为更好地选择能有效防治扶桑绵粉蚧的药剂，解析扶桑绵粉蚧对杀虫剂产生抗性的机制，本研究测定了3种杀虫剂对扶桑绵粉蚧的室内毒力及致死中浓度、亚致死浓度胁迫下扶桑绵粉体内解毒酶活性及能源物质含量的变化，为其防控及抗药性研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

扶桑绵粉蚧采自广西农业科学院本部及里建科研基地、横州市绿化带。带回实验室接种至室内种植的健康马铃薯植株，在 $27^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 RH 75% \pm 5%、光周期 14 L : 10 D 的条件下饲养 10 代后，用毛笔挑取 3 龄若虫用于试验。

1.2 试验药剂与仪器

供试试剂见表 1，解毒酶活性及体内能源物质含量采用谷胱甘肽 *S*-转移酶（GSTs）试剂盒、羧酸酯酶（CarE）试剂盒、可溶性蛋白试剂盒（考马斯亮蓝法）、甘油三酯含量试剂盒、海藻糖含量试剂盒（试剂盒均采用苏州科铭生物技术公司产品）。

25 和 500 mL 容量瓶、人工培养箱（科阳）、培养皿（ $\Phi=9$ cm）、电子分析天平

(d=0.001 g, Mettler S205)、酶标仪 (赛默飞)、研磨仪 (上海净信)、高速冷冻离心机 (美国热电 Thermo ST16R)、HH-4 恒温水浴锅、艾本德移液枪、96 孔板。

表 1 供试药剂

Table 1 Test agent

药剂 Agentia	类别 Type	提供厂家 Provider
98.1%啉虫脒原粉	氯化烟碱类	广西田园生化股份有限公司
98.1% Acetamiprid	Chlorinated nicotinoids	Guangxi Tianyuan Biochemical Co., Ltd
96.1%灭多威原粉	氨基甲酸酯类	广西田园生化股份有限公司
96.1% Methomyl	Carbamate	Guangxi Tianyuan Biochemical Co., Ltd
96.8%高效氯氰菊酯	拟除虫菊酯类	广西田园生化股份有限公司
96.8% Beta-cypermethrin	Pyrethroids	Guangxi Tianyuan Biochemical Co., Ltd
丙酮	有机溶剂	南宁国拓生物科技有限公司
Propanone	Organic solvent	Nanning Guotuo Biological Technology Co., Ltd
吐温-80	油酸酯	南宁国拓生物科技有限公司
Tween-80	Oleate ester	Nanning Guotuo Biological Technology Co., Ltd
98%浓硫酸	无机酸	重庆川东化工 (集团) 有限公司
98% Concentrated sulfuric acid	Inorganic acid	Chongqing Chuandong Chemical (Group) Co., Ltd

1.3 试验方法

1.3.1 杀虫剂对扶桑绵粉蚧的毒力测定

移液枪移取 0.5 mL 吐温 80 试剂, 溶于 500 mL 超纯水中, 配制成 0.1%吐温 80 水溶液。电子天平称取适量杀虫剂原药溶于少量丙酮, 用 0.1%吐温 80 水溶液配制成 500 mg/L 的母液, 根据预实验结果将 3 种药剂稀释成 6 个浓度梯度, 对照组为 0.1%吐温 80 水溶液, 配制好的溶液当天使用。

采用带虫浸叶法 (陈年春等, 1991), 挑取 30 头 3 龄扶桑绵粉蚧若虫放于健康的马铃薯叶片, 于人工培养箱 (27°C±1°C、相对湿度 RH 75%±5%、14 L : 10 D) 饲养 12 h。待扶桑绵粉蚧定殖后将带有扶桑绵粉蚧的马铃薯叶片浸入配制的药液中 10 s, 自然晾干, 叶柄插入湿润花泥中置于培养皿中, 保鲜膜包紧皿口, 扎孔。于人工培养箱 (与前述条件相同) 中观察, 24 h 后记录死亡数并计算校正死亡率, 对照组死亡率超过 10%视为无效数据, 每个处理重复 4 次。

1.3.2 扶桑绵粉蚧体内解毒酶活性及能源物质含量测定

根据 1.3.1, 配制 3 种杀虫剂 LC₁₀、LC₃₀、LC₅₀ 药液并对扶桑绵粉蚧 3 龄若虫进行处理, 24 h 后挑取未死亡若虫 100 头于 1.5 mL 离心管并称重。液氮速冻后置于-80°C冰箱中待用。酶活性及能源物质含量按照试剂盒说明书进行测定, 并计算出 GSTs、CarE 活性及

可溶性蛋白、甘油三酯与海藻糖含量。每处理重复 3 次。

1.3.3 数据统计与分析

采用 SPSS 26.0 软件, Probit 回归分析计算毒力回归方程, 致死中浓度与亚致死浓度。单因素方差分析及 Duncan 新复极差法计算同一杀虫剂不同浓度间、相同致死率下不同药剂间扶桑绵粉蚧酶活性与体内能源物质含量差异显著性, 差异水平 $P < 0.05$, 作图采用 Excel 2019 软件。

2 结果与分析

2.1 不同杀虫剂对扶桑绵粉蚧的毒力

根据室内毒力测定结果, 啶虫脒的 LC_{50} 最低 (22.97 mg/L), 灭多威与高效氯氰菊酯的 LC_{50} 相近, 分别为 71.92 mg/L 和 71.46 mg/L。同样地, 啶虫脒 LC_{30} 最低 (10.54 mg/L), 其次是高效氯氰菊酯 (24.39 mg/L) 和灭多威 (38.88 mg/L), 3 种杀虫剂的 LC_{10} 趋势与 LC_{30} 相同, 自低至高浓度分别为啶虫脒 (3.42 mg/L)、高效氯氰菊酯 (5.17 mg/L)、灭多威 (16.00 mg/L)。表明扶桑绵粉蚧 3 龄若虫对啶虫脒最为敏感、其次是高效氯氰菊酯, 而对灭多威最不敏感。

表 2 3 种杀虫剂对扶桑绵粉蚧的室内毒力

Table 2 Laboratory toxicity of three insecticides to *Phenacoccus solenopsis*

药剂 Insecticides	毒力回归方程 Regression equation	LC_{50} (mg/L) (95%置信限) (95% CI)	LC_{30} (mg/L) (95%置信限) (95% CI)	LC_{10} (mg/L) (95%置信限) (95% CI)	卡方值 χ^2
啶虫脒 Acetamiprid	$Y = -2.11X + 1.55$	22.97 (19.30-29.97)	10.54 (8.17-12.94)	3.42 (2.24-4.72)	8.53
灭多威 Methomyl	$Y = -3.65X + 1.96$	71.92 (62.59-87.59)	38.88 (32.11-45.60)	16.00 (11.76-20.36)	20.13
高效氯氰菊酯 Beta-cypermethrin	$Y = -2.08X + 1.12$	71.46 (58.16-88.15)	24.39 (17.80-31.20)	5.17 (2.80-8.00)	13.66

2.2 杀虫剂对扶桑绵粉蚧解毒酶活性的影响

啶虫脒和灭多威处理后, LC_{10} 下, 扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性与对照无显著差异; LC_{30} 和 LC_{50} 下, 扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性均显著高于对照。高效氯氰菊酯处理后, LC_{30} 下, 扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性与对照无显著差异; LC_{10} 和 LC_{50} 下, 扶桑绵粉蚧体内 GSTs

活性均显著高于对照。LC₁₀下，高效氯氰菊酯处理后，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性显著高于啶虫脒和灭多威处理的。LC₃₀下，灭多威处理后，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性最高，高效氯氰菊酯处理后 GSTs 活性最低，3 种药剂间差异显著。LC₅₀下，啶虫脒处理后，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性显著高于灭多威和高效氯氰菊酯处理的。同一杀虫剂较高致死浓度下，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性通常升高。3 个致死率浓度下，3 种杀虫剂胁迫后，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性变化规律性较弱（图 1）。

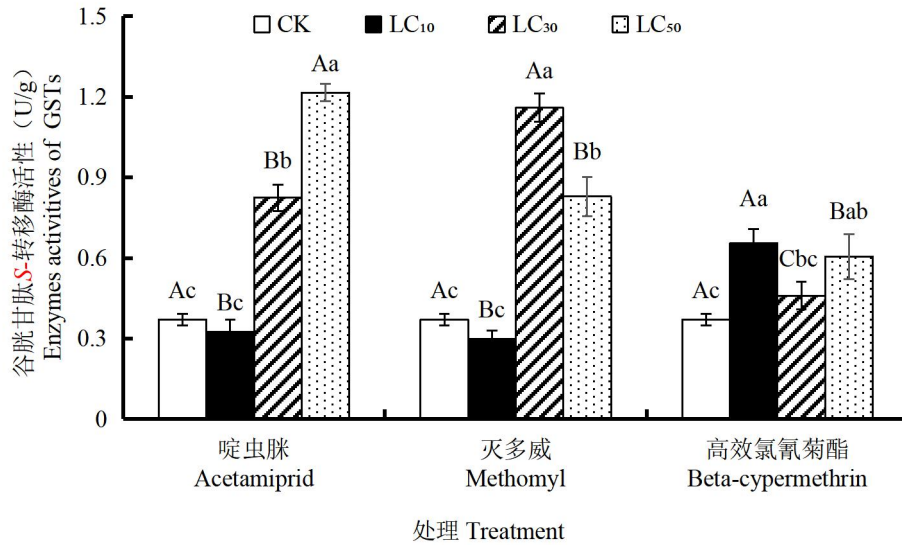


图 1 杀虫剂对扶桑绵粉蚧 GSTs 活性的影响

Fig. 1 Effects of insecticides on the activities of GSTs in *Phenacoccus solenopsis*

注：图中数据表示平均值±标准误，不同小写字母表示同一杀虫剂不同浓度间差异显著，不同大写字母表示不同杀虫剂同一致死浓度间差异显著（ANOVA, Duncan's 新复极差法, $P < 0.05$ ）。下图同。Note: Data in the figure represented Means ±SE, different lowercase letters indicated significant differences with different concentration in the same insecticide, different uppercase letters indicated significant differences with different agent at the same lethal concentration (ANOVA, Duncan's new multiple range test, $P < 0.05$). The same as below.

3 种杀虫剂处理后，扶桑绵粉蚧体内 CarE 活性均不同程度降低，但啶虫脒在 3 个浓度下，均与对照无显著差异；灭多威和高效氯氰菊酯在 3 个浓度下，扶桑绵粉蚧体内 CarE 活性均显著低于对照。LC₁₀下，灭多威处理后，扶桑绵粉蚧体内 CarE 活性最低，并显著低于啶虫脒处理的。LC₃₀下，3 种药剂处理后，扶桑绵粉蚧体内 CarE 活性无显著差异。LC₅₀下，灭多威处理后，扶桑绵粉蚧体内 CarE 活性最低，并显著低于啶虫脒和高效氯氰菊酯处理的。3 个致死率浓度下，灭多威处理后 CarE 活性最低，啶虫脒处理后 CarE 活性最高（图 2）。

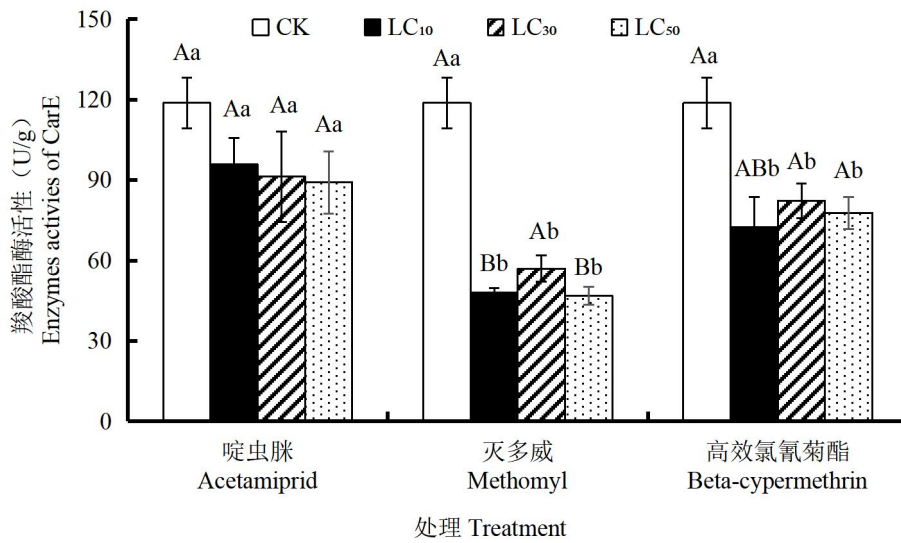


图2 杀虫剂对扶桑绵粉蚧 CarE 活性的影响

Fig. 2 Effects of insecticides on the activities of CarE in *Phenacoccus solenopsis*

2.3 杀虫剂对扶桑绵粉蚧体内能源物质含量的影响

啶虫脒 3 个浓度处理后，扶桑绵粉蚧体内可溶性蛋白含量均与对照无显著差异。灭多威和高效氯氰菊酯在 3 个浓度下，扶桑绵粉蚧体内可溶性蛋白含量均显著低于对照。3 个致死率浓度下，啶虫脒处理后，扶桑绵粉蚧体内可溶性蛋白含量显著高于灭多威和高效氯氰菊酯处理的（图 3）。

啶虫脒处理后，各浓度下，扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量均与对照无显著差异。灭多威在 LC₁₀ 下，扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量显著高于对照；LC₃₀ 和 LC₅₀ 下，扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量与对照无显著差异。高效氯氰菊酯在 LC₁₀ 和 LC₃₀ 下，扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量与对照无显著差异；LC₅₀ 下，扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量显著低于对照（图 4）。

3 种药剂在各浓度处理下，扶桑绵粉蚧体内海藻糖含量均显著低于对照。LC₁₀ 下，3 种药剂处理后，扶桑绵粉蚧体内海藻糖含量无显著差异。LC₃₀ 下，啶虫脒处理后，扶桑绵粉蚧体内海藻糖含量最低，并显著低于灭多威处理的。LC₅₀ 下，灭多威处理后，扶桑绵粉蚧体内海藻糖含量最低，并显著低于啶虫脒和高效氯氰菊酯处理的（图 5）。

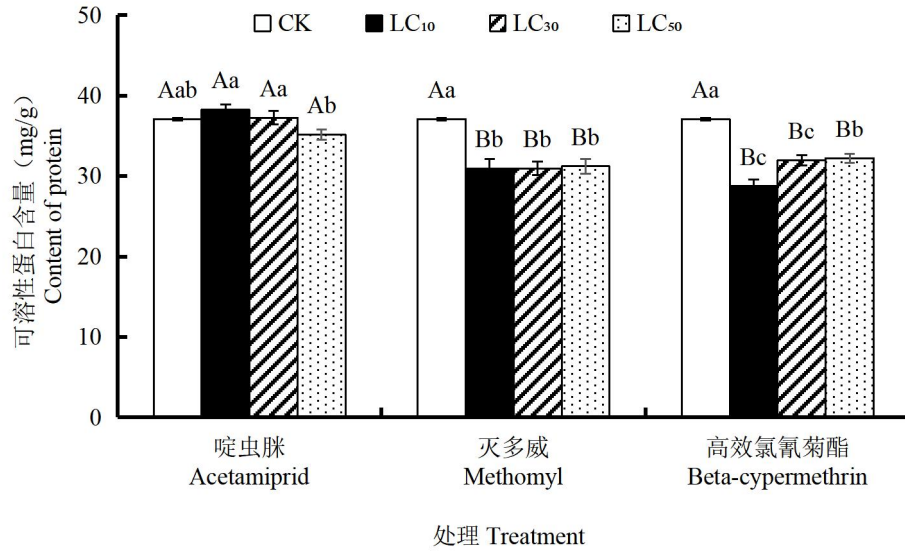


图 3 杀虫剂对扶桑绵粉蚧体内可溶性蛋白含量的影响

Fig. 3 Effects of insecticides on the protein content of *Phenacoccus solenopsis*

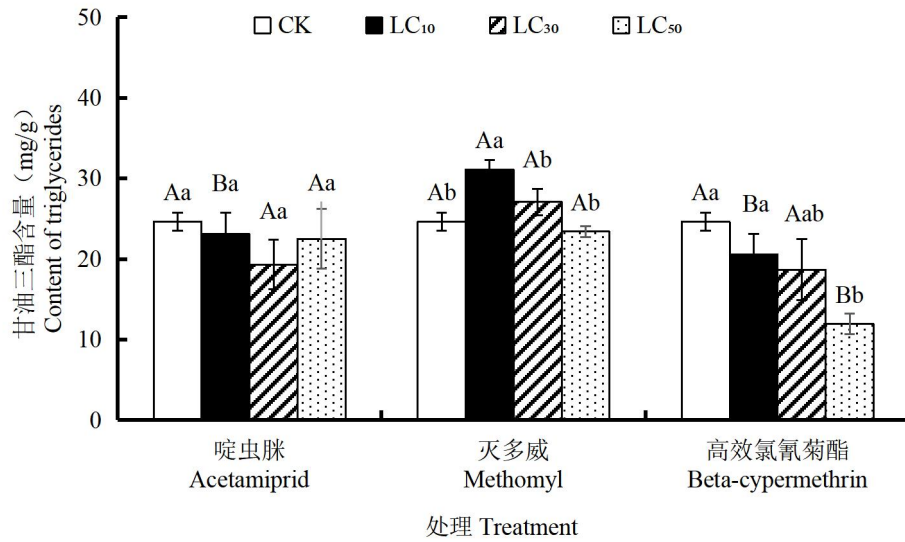


图 4 杀虫剂对扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量的影响

Fig. 4 Effects of insecticides on the triglycerides content of *Phenacoccus solenopsis*

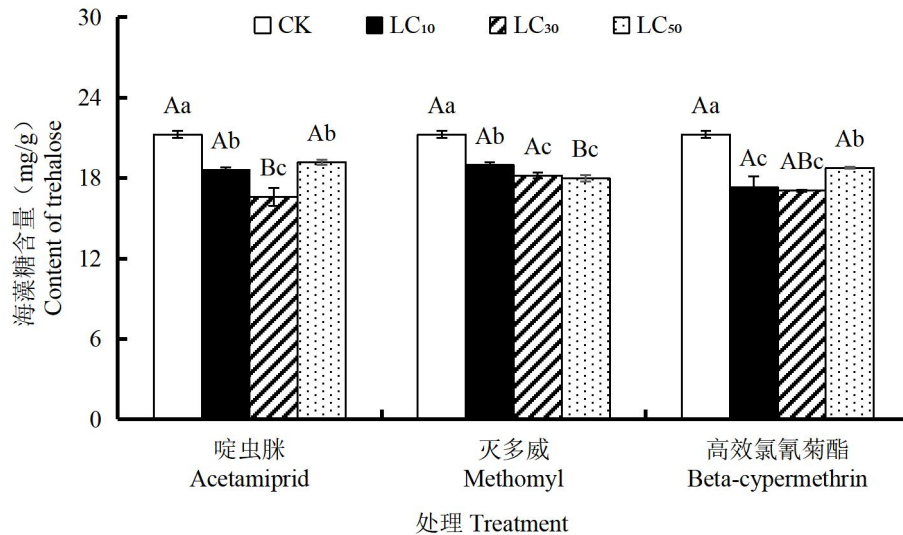


图 5 杀虫剂对扶桑绵粉蚧体内海藻糖含量的影响

Fig. 5 Effects of insecticides on the trehalose content of *Phenacoccus solenopsi*

3 结论与讨论

化学杀虫剂在害虫应急防控中至关重要。杨爱娟等（2010）的研究推荐使用吡虫啉、啉虫脒、高效氯氟氰菊酯、毒死蜱及马拉硫磷防治扶桑绵粉蚧；氟啶虫腈胺及螺虫乙酯也能有效杀灭扶桑绵粉蚧，并抑制后代生长发育（Eldesouky *et al.*, 2023）。本研究表明啉虫脒对扶桑绵粉蚧有较好的防效，而灭多威、高效氯氟氰菊酯效果稍差，与 Thammayya 等（2024）的研究结果相似，表明扶桑绵粉蚧对啉虫脒具有较高的敏感性，这可能是由于扶桑绵粉蚧被覆的蜡粉能阻隔部分杀虫剂进入体内，而除了触杀及胃毒作用外，啉虫脒具有良好的内吸性与渗透性，可迅速渗入叶片内部，更易被扶桑绵粉蚧摄取。研究表明新烟碱类杀虫剂能有效防治刺吸式口器害虫（Waqas *et al.*, 2019），与本研究结果一致。而张蕊等（2020）的研究结果则与本文略有不同，其研究发现木瓜秀粉蚧 *Paracoccus marginatus* Williams and Granara de Willink 对高效氯氟氰菊酯的敏感性要高于啉虫脒，这可能是由于其使用的是高效氯氟氰菊酯乳油，能够更有效地穿过粉蚧体表蜡粉层到达体壁。除药剂化学类别外，合适的药剂剂型及施药方式也是扶桑绵粉蚧治理的关键。

GSTs 和 CarE 是昆虫解毒酶系较为重要的两类（Li *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021），常用于检测昆虫是否对农药产生抗性，其活性也可用于观测昆虫对外源物质的降解能力。阿维菌素 LC₂₅ 与 LC₅₀ 胁迫 24 h 后，瓜实蝇 *Bactrocera cucurbitae* Coquillett 室内种群 GSTs 活性显著上升，而 CarE 则显著降低后回归正常水平（姜建军等，2023）。与前人结果相似，本研究表明较高浓度下，啉虫脒、灭多威与高效氯氟氰菊酯能显著提升扶桑绵粉蚧体内 GSTs

活性，且啶虫脒处理后扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性具有明显的剂量相关性，酶活性随着杀虫剂浓度的增加而升高；灭多威与高效氯氰菊酯能显著抑制 CarE 活性，而啶虫脒胁迫下 CarE 活性无显著变化。这表明 GSTs 参与了扶桑绵粉蚧对这 3 种杀虫剂的解毒调控过程，CarE 可能贡献较小，但 3 种杀虫剂所表现出的对不同解毒酶的不同诱导作用，其机制仍需进一步研究。啶虫脒高浓度处理下，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 和 CarE 酶活性更高，也与毒力测定呈现的结果一致：扶桑绵粉蚧对啶虫脒更为敏感。而与本研究不同的是，Gong 等（2021）用吡虫啉胁迫麦长管蚜 *Sitobion avenae* Fabricius、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* Linnaeus、麦蚜 *Schizaphis graminum* Rondani 和麦蚜 *Metopolophium dirhodum* Walker 后，GSTs 与 CarE 均无显著变化，这可能是由于物种不同所致。

糖类、蛋白质、脂质为昆虫生命活动提供能量。高云雷等（2020）研究表明，致死中浓度处理下，茄无网蚜 *Acyrtosiphon solani* (Kaltenbach) 体内能源物质含量随龄期而变化。崔家丽等（2018）研究表明，缩节胺处理后，棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 体内甘油三酯含量降低，而蛋白质与总糖含量则升高。本研究表明，扶桑绵粉蚧体内能源物质含量与 3 种药剂不同浓度间并非呈简单的线性关系。3 种杀虫剂处理后，扶桑绵粉蚧体内能源物质含量不同程度降低，表明扶桑绵粉蚧需消耗大量能源物质以求生存。而灭多威低浓度胁迫下，扶桑绵粉蚧体内甘油三酯含量略微升高是否与其代谢灭多威的能力有关尚需进一步研究。啶虫脒处理后扶桑绵粉蚧体内仅海藻糖含量降低，且可溶性蛋白含量显著高于同一致死率下灭多威与高效氯氰菊酯胁迫的，这可能是由于扶桑绵粉蚧需要产生更多蛋白以参与对啶虫脒的解毒代谢过程，从而保证自身存活，印证了扶桑绵粉蚧对啶虫脒更为敏感的结果。与本研究类似，氟啶虫脒亚致死浓度下，桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer) 体内脂肪酸、氨基酸及可溶性糖含量均显著变化，但在不同浓度处理下变化趋势并不一致（张莉娅等，2021）。这表明在杀虫剂胁迫下，昆虫可能会调节自身生理生化以响应外界胁迫，但其变化趋势可能因昆虫种类及龄期、杀虫剂和浓度而异。

综上所述，本研究表明室内条件下，扶桑绵粉蚧对啶虫脒更为敏感；在遭受毒性胁迫时，扶桑绵粉蚧能调动体内相关酶及能源物质以应对胁迫。研究表明，脂肪酰辅酶 A 还原酶能够影响扶桑绵粉蚧蜡质合成（Tong *et al.*, 2022），但本研究中甘油三酯含量变化是否与体表蜡质合成有关，尚待验证。杀虫剂如何诱导扶桑绵粉蚧体内相关解毒酶及能源物质发生变化，以及这些变化与抗药性的关系有待研究。本研究中，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性在 3 种杀虫剂诱导下升高，而 CarE 活性并未升高；低浓度下扶桑绵粉蚧体内酶活性与能源物质含量变化较为稳定；在 LC₃₀ 处理时，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性可能并未达峰值，

同时其体内的能源物质消耗量较大，尤其是海藻糖，据此推测 GSTs 与海藻糖在扶桑绵粉蚧耐受杀虫剂胁迫时发挥了关键作用。高浓度处理下，扶桑绵粉蚧体内 GSTs 活性显著升高，且 3 种能源物质含量不同程度的降低，表明杀虫剂高浓度胁迫下扶桑绵粉蚧反应更剧烈。因此，在防控扶桑绵粉蚧时，可以考虑施用低浓度的杀虫剂，一段时间后释放其优势天敌—班氏跳小蜂 *Aenasius bambawalei* Hayat，化学防治与生物防治相结合，以防扶桑绵粉蚧出现高抗药性及对自然天敌的大量灭杀，达到更好的防控效果。本文为杀虫剂合理选用，持续高效防治扶桑绵粉蚧的同时延缓其抗药性的产生、化学防治与生物防治的协调应用提供一定的理论依据。

参考文献 (References)

- Chen NC. Pesticide Bioassay Technology [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991. [陈年春. 农药生物测定技术 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1991]
- Cui JL, Wang JG, Zhong L, et al. Effects of mepiquat chloride (DPC) on energy substances in *Aphis gossypii* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (2): 446-451. [崔家丽, 王俊刚, 钟亮, 等. 缩节胺对棉蚜体内能源物质的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (2): 446-451]
- Elabasy A, Shoaib A, Waqas M, et al. Cellulose nanocrystals loaded with thiamethoxam: Fabrication, characterization, and evaluation of insecticidal activity against *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10 (4): 788.
- Eldesouky SE, Tawfeek ME, Esmacil MEM, et al. Biological effects and field persistence of different insecticides in controlling the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Tinsley) (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 2023, 56 (6): 452-465.
- Fan ZF, Song JL, Gui FR, et al. Effect of five insecticides on toxicity and physiological enzyme activities of *Frankliniella occidentalis* and *F. intonsa* [J]. *Journal of Biosafety*, 2021, 30 (3): 206-212. [樊宗芳, 宋洁蕾, 桂富荣, 等. 5种杀虫剂对西花蓟马和花蓟马的毒力及其生理酶活性的影响 [J]. 生物安全学报, 2021, 30 (3): 206-212]
- Fang TS, Yu HB, Chen J, et al. Toxicities of various pesticides commonly to *Phenacoccus solenopsis* Tinsley female adults and its influence on its natural enemies [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (4): 755-760. [方天松, 余海滨, 陈坚, 等. 常用药剂对扶桑绵粉蚧雌成虫的毒力测定及对天敌的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (4): 755-760]
- Gao HL, Lin XM, Yang BJ, et al. The roles of GSTs in fipronil resistance in *Nilaparvata lugens*: over-expression and expression induction [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2021, 177: 104880.
- Gao YL, Han LL, Zhao KJ, et al. Effect of a lethal concentration of deltamethrin on the growth and nutrient content of *Acyrtosiphon solani* nymphs [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (4): 861-867. [高云雷, 韩岚岚, 赵奎军, 等. 致死中浓度溴氰菊酯对茄无网蚜体内能源物质的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (4): 861-867]

- Garlet CG, Moreira RP, Gubiani PS, *et al.* Fitness cost of chlorpyrifos resistance in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) on different host plants [J]. *Environmental Entomology*, 2021, 50 (4): 898-908.
- Gong PP, Chen DF, Wang C, *et al.* Susceptibility of four species of aphids in wheat to seven insecticides and its relationship to detoxifying enzymes [J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 11: 623612.
- Guan ZY, Shao CC, Shi QX, *et al.* Recruitment effect of female adult individuals and honeydew of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley to the workers of *Solenopsis invicta* Buren [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (6): 1486-1492. [关子盈, 邵翠翠, 石庆型, 等. 扶桑绵粉蚧及其蜜露对红火蚁的召集作用 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1486-1492]
- Gul H, Gadratagi BG, Günçan A, *et al.* Fitness costs of resistance to insecticides in insects [J]. *Frontiers in Physiology*, 2023, 14: 1238111.
- Jiang JJ, Wang FY, Chen Q, *et al.* Effects of abamectin on the three detoxification enzyme systems in *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54 (7): 1893-1902. [姜建军, 王凤英, 陈黔, 等. 阿维菌素对瓜实蝇3种解毒酶系的影响 [J]. 南方农业学报, 2023, 54 (7): 1893-1902]
- Li M, Luo ZB, Rao Z, *et al.* Fitness and screening of insecticides of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley on tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2023, 44 (2): 52-57. [李萌, 罗昭标, 饶智, 等. 扶桑绵粉蚧在烟草上的适合度和药剂筛选研究 [J]. 中国烟草科学, 2023, 44 (2): 52-57]
- Li YQ, Bai LS, Zhao CX, *et al.* Functional characterization of two carboxylesterase genes involved in pyrethroid detoxification in *Helicoverpa armigera* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68 (11): 3390-3402.
- Liu Q, Li CM, Han GJ, *et al.* Sub-lethal effect of *Cnaphalocrocis medinalis* granulovirus to the growth, reproduction and physiology of host [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38 (4): 982-989. [刘琴, 李传明, 韩光杰, 等. 稻纵卷叶螟颗粒体病毒亚致死作用对宿主生长、繁殖和生理生化的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38 (4): 982-989]
- Luo ZY, Gao LP, Du JY, *et al.* Effects of population density on the fitness of *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 60 (5): 1467-1475. [罗正玉, 高莉萍, 杜嘉宜, 等. 利用生命表分析不同种群密度下扶桑绵粉蚧生长适应性 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60 (5): 1467-1475]
- Ma J, Hu XN, Liu HJ, *et al.* *Phenacoccus solenopsis* Tinsley was found on *Hibiscus rosasinensis* in Guangzhou [J]. *Plant Quarantine*, 23 (2): 35-36, 65. [马骏, 胡学难, 刘海军, 等. 广州扶桑上发现扶桑绵粉蚧 [J]. 植物检疫, 2009, 23 (2): 35-36, 65]
- Madasamy M, Sahayaraj K, Sayed SM, *et al.* Insecticidal mechanism of botanical crude extracts and their silver nanoliquids on *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Toxics*, 2023, 11 (4): 305.
- Qin W, Hu Y, Gui FR, *et al.* Effects of host plants on body size and energy substances contents of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [J]. *Journal of Biosafety*, 2021, 30 (3): 189-194. [覃武, 胡雍, 桂富荣, 等. 寄主植物对扶桑绵粉蚧体型及体内能源物质含量的影响 [J]. 生物安全学报, 2021, 30 (3): 189-194]

- Rizwan M, Freed S, Batool D, *et al.* Lethal and sub-lethal effects of *Cordyceps fumosorosea* on the demography and biochemistry of *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2023, 33 (1): 76-97.
- Shankarganesh K, Ricupero M, Sabtharishi S. Field evolved insecticide resistance in the cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* and its direct and indirect impacts on the endoparasitoid *Aenasius arizonensis* [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 16764.
- Song YH, Xu MC, Xue YY, *et al.* Effects of sublethal concentration of spinosad on the metabolism and physiology of cotton bollworm *Helicoverpa armigera* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2021, 48 (5): 1156-1163. [宋永辉, 徐梦超, 薛玉莹, 等. 多杀霉素亚致死浓度对棉铃虫幼虫生理及代谢的影响 [J]. *植物保护学报*, 2021, 48 (5): 1156-1163]
- Thammayya SK, Chandrashekhara KM, Chinapolaiah A, *et al.* Comparative effectiveness of biorational pesticides for management of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley and *Paracoccus marginatus* Williams & Granara de Willink in *Gymnema sylvestre* (Retz.) R.Br. ex Sm [J]. *Heliyon*, 2024, 10 (1): e23648.
- Tong HJ, Ao Y, Li ZH, *et al.* Invasion biology of the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley: Current knowledge and future directions [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (4): 758-770.
- Tong HJ, Wang Y, Wang SP, *et al.* Fatty acyl-CoA reductase influences wax biosynthesis in the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [J]. *Communications Biology*, 2022, 5 (1): 1108.
- Waqas MS, Qian LX, Shoaib AAZ, *et al.* Lethal and sublethal effects of neonicotinoid insecticides on the adults of *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) on tomato plants [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112 (3): 1314-1321.
- Waqas MS, Shi ZH, Yi TC, *et al.* Biology, ecology, and management of cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Pest Management Science*, 2021, 77 (12): 5321-5333.
- Wu GH, Shao WZ, Bai XH, *et al.* Identification and pest risk analysis of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2018, 38 (4): 81-84, 94.[吴贵宏, 邵维治, 白学慧, 等. 扶桑绵粉蚧鉴定初报及风险分析 [J]. *热带农业科学*, 2018, 38 (4): 81-84, 94]
- Xu C, Li QL, Qu XB, *et al.* Ant-hemipteran association decreases parasitism of *Phenacoccus solenopsis* by endoparasitoid *Aenasius bambawalei* [J]. *Ecological Entomology*, 2020, 45 (2): 290-299.
- Yang AJ, Ma J, Gao J, *et al.* Screening and efficacy of insecticides for the control of *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010, 32 (4): 552-555. [杨爱娟, 马骏, 高军, 等. 防治扶桑绵粉蚧化学农药的筛选及其防治效果 [J]. *环境昆虫学报*, 2010, 32 (4): 552-555]
- Yuan SY, Yan PF, Kong Q, *et al.* Study on virulence of *Verticillium lecanii* against *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (4): 748-754. [袁盛勇, 闫鹏飞, 孔琼, 等. 蜡蚧轮枝菌对扶桑绵粉蚧的致病性研究 [J]. *环境昆虫学报*, 2016, 38 (4): 748-754]

- Zan QA, Yan PF, Mao JM, *et al.* Toxicity and effect of pesticides against *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (4): 761-765. [管庆安, 闫鹏飞, 毛加梅, 等. 六种杀虫剂对扶桑绵粉蚧的毒力和防治效果 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (4): 761-765]
- Zhang CX, Wang ZJ, Li JJ, *et al.* Sublethal effects of tolfenpyrad on the development, reproduction, and predatory ability of *Chrysoperla sinica* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 236: 113482.
- Zhang HS, Xu L, Lv WW, *et al.* Multidimensional climatic niche conservatism and invasion risk of *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34 (6): 1649-1658. [张辉盛, 徐琳, 吕韦韦, 等. 扶桑绵粉蚧多维气候生态位保守性与入侵风险 [J]. 应用生态学报, 2023, 34 (6): 1649-1658]
- Zhang LY, Ruan CC, Hou ZG, *et al.* Effects on the energy substances of *Myzus persicae* by the sublethal concentration of sulfoxaflor [J]. *Agro Chemicals*, 2021, 60 (1): 28-31, 34. [张莉娅, 阮长春, 侯志广, 等. 亚致死浓度氟啶虫胺腈对桃蚜体内能量物质的影响 [J]. 农药, 2021, 60 (1): 28-31, 34]
- Zhang Q, Zhao C, Lu XX, *et al.* Advances in research on toxic effects of neonicotinoid insecticides on non-target organisms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15 (1): 56-71. [张琪, 赵成, 卢晓霞, 等. 新烟碱类杀虫剂对非靶标生物毒性效应的研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2020, 15 (1): 56-71]
- Zhang R, Yang SY, Mao XX, *et al.* Toxicities and synergism of different pesticides against *Paracoccus marginatus* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (1): 221-226. [张蕊, 杨石有, 毛欣欣, 等. 不同农药对木瓜秀粉蚧的毒力及复配增效作用 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (1): 221-226]
- Zhang S, Ye WN, Liu ZY, *et al.* Resistance monitoring and field control efficacy of different insecticides on *Nilaparvata lugens* in Lujiang county, Anhui Province [J]. *Plant Protection*, 2024, 50 (2): 303-306, 360. [张帅, 叶文男, 刘兆宇, 等. 安徽庐江褐飞虱的抗性监测及不同杀虫剂对其田间防效评价 [J]. 植物保护, 2024, 50 (2): 303-306, 360]
- Zhang W, Chen XY, Eleftherianos I, *et al.* Cross-talk between immunity and behavior: Insights from entomopathogenic fungi and their insect hosts [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2024, 48 (1): fuac003.
- Zhang XX, Junaid I, Du YZ. Advances in research on the rapid cold hardening of insects [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2021, 58 (2): 256-264. [张小香, Junaid Iqbal, 杜予州. 昆虫快速冷耐受的研究进展 [J]. 应用昆虫学报, 2021, 58 (2): 256-264]
- Zhou ZS, Qi GJ, Lv YB, *et al.* Biology and Management of Invasive Mealybug [M]. Beijing: Science Press, 2023. [周忠实, 齐国君, 吕要斌, 等. 入侵粉蚧生物学及其防控 [M]. 北京: 科学出版社, 2023]
- Zhu YY, Huang F, Lv YB. Bionomics of mealybug *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2011, 54 (2): 246-252. [朱艺勇, 黄芳, 吕要斌. 扶桑绵粉蚧生物学特性研究 [J]. 昆虫学报, 2011, 54 (2): 246-252]