

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.20250042

# 欧洲甘蓝粉虱及 *Aleyrodes* sp. 成虫对 8 种杀虫剂的敏感性及其生理响应差异

孙颖颖, 陈爱松, 黄 勋, 张瑞星月, 马德英\*

新疆农业大学农学院, 农林有害生物监测与安全防控重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052

**摘要:** 【目的】比较入侵种欧洲甘蓝粉虱与 *Aleyrodes* sp. 对不同杀虫剂敏感性及其生理生化响应差异, 解析敏感性差异机制, 为制定差异化防控策略提供依据。【方法】采用叶片浸渍法测定 8 种杀虫剂对 2 种粉虱成虫的室内毒力, 通过田间药效试验评价田间防效, 并检测亚致死浓度 ( $LC_{25}$ ) 处理后 2 种粉虱成虫体内保护酶、解毒酶及氧化应激指标的活性。【结果】2 种粉虱成虫对 8 种杀虫剂的敏感性不同, 欧洲甘蓝粉虱对联苯菊酯、阿维菌素、溴氰虫酰胺较为敏感,  $LC_{50} < 2.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而 *Aleyrodes* sp. 对联苯菊酯、阿维菌素较为敏感,  $LC_{50} < 3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 不同药剂的亚致死浓度 ( $LC_{25}$ ) 处理下, 欧洲甘蓝粉虱 SOD 活性上升 1.86%, POD 活性上升 2.12%~16.89%, GST 活性上升 4.75%~22.74%, 而 *Aleyrodes* sp. 的 CarE 活性上升 0.99%~23.97%, CAT 活性上升 2.74%~9.61%。田间药效结果表明, 药后 7 d, 70% 噻虫嗪水分散粒剂和 10% 乙虫腈悬浮剂对欧洲甘蓝粉虱成虫的防效达到 90% 以上, 显著高于 5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂、10% 乙虫腈悬浮剂; 10% 阿维菌素悬浮剂对 *Aleyrodes* sp. 成虫的防效为 89.63%, 显著高于 5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂、10% 虱螨脲悬浮剂。【结论】通过室内毒力测定和田间药效试验可知, 8 种不同杀虫剂对欧洲甘蓝粉虱的毒力强于对 *Aleyrodes* sp. 的毒力。在杀虫剂胁迫下, 欧洲甘蓝粉虱与 *Aleyrodes* sp. 体内生理酶活性存在不同响应。药后 7 d, 70% 噻虫嗪水分散粒剂对欧洲甘蓝粉虱的防效最好, 5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂对 *Aleyrodes* sp. 的防效最好; 药后 14 d, 70% 噻虫嗪水分散粒剂对欧洲甘蓝粉虱的持效性最好, 10% 阿维菌素悬浮剂对 *Aleyrodes* sp. 的持效性最好。因此, 田间推荐交替施用 70% 噻虫嗪水分散粒剂、5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂和 10% 阿维菌素悬浮剂联合防控欧洲甘蓝粉虱及 *Aleyrodes* sp.。

**关键词:** 欧洲甘蓝粉虱; *Aleyrodes* sp.; 敏感差异; 室内毒力; 田间药效

## Analysis of sensitivity and physiological response differences in *Aleyrodes proletella* L. and *Aleyrodes* sp. adults to eight insecticides

SUN Yingying, CHEN Aisong, HUANG Xun, ZHANG Ruixingyue, MA Deying\*

Key Laboratory of the Pest Monitoring and Safety Control of Crops and Forests, College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China

**Abstract:** 【Aim】By comparing the differences in sensitivity and physiological and biochemical responses of the invasive species *Aleyrodes proletella* and *Aleyrodes* sp. to different insecticides, we analyzed the mechanism of the sensitivity differences, and provided a basis for the development of differentiated prevention and control strategies. 【Method】The indoor virulence of eight insecticides against two species of whitefly adults was determined by leaf dipping method, and the field efficacy was evaluated by field efficacy test, and the contents of protective enzymes, detoxification enzymes and oxidative stress indexes of the two species of whitefly adults were examined after the treatment of sub-lethal concentration ( $LC_{25}$ ). 【Result】The adult whiteflies of the two species differed in their sensitivity to the eight insecticides, *A. proletella* was more sensitive to bifenthrin, abamectin, and bromoxynil, with an  $LC_{50} < 2.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , while *Aleyrodes* sp. whiteflies were more sensitive to bifenthrin and abamectin, with an  $LC_{50} < 3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; the sub-lethal concentrations of the different agents ( $LC_{25}$ ) treatments significantly altered the enzyme activity response patterns of the two whitefly species. Under insecticide treatment, *A. proletella* SOD activities increased by 1.86%, POD activities increased by

收稿日期 (Received): 2025-03-26 接受日期 (Accepted): 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金 (31960563)

作者简介: 孙颖颖, 女, 硕士研究生。研究方向: 农药学。E-mail: 1348979527@qq.com

\* 通信作者 (Author for correspondence), 马德英, E-mail: mdyxd@163.com

2.12%–16.89%, and GST content rose 4.75%–22.74%, while *Aleyrodes* sp. formed the main detoxification pathway through the up-regulation of CarE activity by 0.99%–23.97%, and the CAT content rose 2.74%–9.61%. The results of field efficacy showed that 7 d after the drug, 70% thiamethoxam and 10% acetonitrile suspension reached more than 90% against *A. proletella* adults, which was significantly higher than that of 5% methylamino abamectin benzoate microemulsion and 10% acetonitrile suspension; the efficacy of 10% avermectin against *Aleyrodes* sp. adults was 89.63%, which was significantly higher than that of 5% methamino abamectin benzoate microemulsion and 10% acetonitrile suspension; and the efficacy of 10% abamectin suspension concentrate *Aleyrodes* sp. adults was 89.63%, which was significantly higher than that of 5% methamino abamectin benzoate microemulsion. It was significantly higher than that of 5% methylamino abamectin benzoate microemulsion and 10% lufenuron suspension. 【Conclusion】 As shown in the indoor toxicity determination and field efficacy test, the toxicity of eight different insecticides to *A. proletella* was stronger than that to *Aleyrodes* sp. Under insecticide stress, *A. proletella* developed different sensitivities to insecticides through different responses to physiological enzyme contents in *Aleyrodes* sp. The best efficacy of 70% thiamethoxam water-dispersible granules against *A. proletella* was 94.02% at 7 d post-dose, and the best efficacy of 5% methamido-abamectin benzoate microemulsion against *Aleyrodes* sp. was 89.93% at 14 days post-dose, and the best efficacy of 70% thiamethoxam water-dispersible granules against *A. proletella* with 81.85% and 10% abamectin suspension with 80.96%. Therefore, it can be recommended to apply 70% thiamethoxam aqueous dispersible granules, 5% methamido-abamectin benzoate microemulsion and 10% abamectin suspension alternately in the field for the control and prevention of *A. proletella* and *Aleyrodes* sp.

**Key words:** *Aleyrodes proletella*.; *Aleyrodes* sp.; sensitivity differences; indoor toxicity; field efficacy

欧洲甘蓝粉虱 *Aleyrodes proletella* L., 又称芸苔粉虱, 属半翅目粉虱科, 20 世纪 90 年代在英国南部首次被发现 (Hill, 1987), 是欧洲十字花科蔬菜的次要害虫 (Barro & Carver, 1997)。我国于 2012—2013 年在北京市朝阳区、新疆乌鲁木齐市及吐鲁番市发现该粉虱 (张桂芬等, 2014)。研究发现, 欧洲甘蓝粉虱在新疆乌鲁木齐、吐鲁番及塔城地区常与另一种粉虱种群 *Aleyrodes* sp. 相伴出现 (阿布都热孜克·库玩等, 2018)。2 种粉虱成虫的主要形态特征相似, 仅腹部含菌体存在明显差异, 前者颜色为淡黄色, 而后者颜色为橙红色 (阿布都热孜克·库玩, 2019; Kuwan *et al.*, 2021), 但卵、若虫和蛹的外观形态上存在明显差异, 欧洲甘蓝粉虱 (以下简称 *Ap*) 的若虫在蜕皮时, 外皮直接脱落, 体背无附属物覆盖, 称之为“裸型”蛹; *Aleyrodes* sp. (以下简称 *As*) 每龄期若虫在蜕皮时, 蜕下的外皮不会脱落, 而是持续附着于其体表, 形成如瓦片重叠的覆盖结构, 直至蛹期, 称之为“背负型”蛹 (阿布都热孜克·库玩等, 2018, 2019)。2 种粉虱均为刺吸式口器害虫, 主要危害十字花科和菊科植物 (Miguel *et al.*, 2005), 油麦菜 *Lactuca sativa* var. *asparagina* L. H. Bailey ex Holub、毒莴苣 *Lactuca serriola* L. 为其嗜好性寄主 (吉宇星等, 2022)。它们与植物争夺营养, 导致寄主叶片黄化老化, 影响作物产量和质量。此外, 成虫产生大量的白色粉状物覆盖在受害叶片表面, 成虫和若虫分泌的蜜露诱发煤污病, 均影响植

物的光合作用, 影响作物品质。目前, 尚无法确定它们是否具备传播植物病毒的能力 (阿布都热孜克·库玩, 2019; Martin *et al.*, 2000)。2 种粉虱可单独发生, 也常混合发生, 表现出出口密度大、繁殖力强和世代重叠严重等特点, 有暴发成灾的危险。

目前, 国内外仅有关于对 *Ap* 防控措施的研究, 如, Springate & Colvin (2012) 研究表明, 控制 *Ap* 最有效的杀虫剂是内吸性杀虫剂; Kovaříková *et al.* (2017) 在室内比较 21 种常用杀虫剂的药效, 认为螺虫乙酯、氰虫酰胺、哒螨灵和菜籽油对 *Ap* 若虫时期最有效; 刘祯妍等 (2020) 研究表明, 阿维菌素对 2 个种群成虫具有较强的毒力。但目前关于 *Ap*、*As* 2 个种群对不同杀虫剂的敏感差异及生理响应差异还未见报道。

昆虫遭遇病原物入侵或外源物质毒害后, 体内保护酶系被破坏, 自由基代谢发生异常, 从而诱发脂质过氧化反应, 并可能导致组织细胞发生氧化应激性损伤 (王自杰, 2024)。昆虫体内的酶系统因多种内源或外源物质的诱导而发生改变, 从而调整其生理状态以适应新的生存条件 (樊宗芳等, 2021)。黄云等 (2022) 和聂鹏成等 (2023) 研究表明, 昆虫受外源有毒物质刺激后, 可通过解毒酶、保护酶、氧化应激反应来抵抗损伤。丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 作为昆虫在氧化应激条件下产生的代谢产物, 其浓度水平是评估脂质过氧化程度的重要指标 (王彦, 2024), 含量过高时昆虫受到的损伤越严重。

超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (peroxidase, POD) 和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 是 3 种关键的抗氧化酶, 通过调节酶活性来增强昆虫对逆境和药物胁迫的耐受能力 (贾变桃等, 2016; 王丹丹等, 2024)。羧酸酯酶 (carboxylesterase, CarE)、谷胱甘肽转移酶 (glutathione-s-transferase, GST) 和乙酰胆碱酯酶 (acetylcholinesterase, AChE) 作为重要的代谢酶, 能够有效分解外源性毒素, 帮助昆虫应对环境压力和植物防御机制 (Tiwari *et al.*, 2011)。这些酶系统的协同作用为昆虫提供了应对复杂环境变化的生理基础 (何发林等, 2019)。

本文选择了 8 种不同类型的杀虫剂, 测定 *Ap*、*As* 成虫对不同类型杀虫剂的敏感性差异及生理响应的差异, 解析其对杀虫敏感性的差异及产生差异的原因, 为科学防控提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源及其寄主

供试虫源: 2024 年 5 月于新疆农业大学农学院东面试验田 (E87°34'18.543", N43°48'38.663") 油麦菜上采集 *Ap*、*As* 成虫, 将成虫接入室内无污染、无病害的油麦菜上, 建立室内单一种群, 并在室内连续饲养 3~5 代作为供试虫源。

寄主植物: 选用油麦菜 (彩云香油麦, 产地河北省青县流河镇青县兴运种业有限公司) 种植于塑料花盆中, 在人工气候箱中培育, 种植期间, 按需浇水, 保证无粉虱及其他病虫害污染, 不使用任何化学农药。

田间种植地点位于新疆农业大学农学院农学院农学实验室试验田 (面积均 56 m<sup>2</sup>)。使用沟播法进行播种, 小沟间距 15 cm, 种子密度约 0.5 cm, 撒好种子后在上覆盖 1 cm 土, 当供试植物长到 2 片真叶时开始进行间苗, 去除弱苗、病苗、杂苗和过密的苗, 每穴留一株苗。毒莴苣因种子需要春化而入冬前种植, 其余供试植物于 4 月 30 日播种, 各植物间以 40 cm 宽小埂分隔开, 田间管理按照各植物的常规管理方式进行, 整个生育期均不使用化学杀虫剂防治供试植物上的任何害虫。

### 1.2 供试材料

试验仪器: RXM-258A 型智能人工气候箱 (宁波江南仪器厂)、SMZ-161 型双目体式显微镜 (宁波舜宇仪器有限公司)、冰箱 (中国美菱公司)、C21-

RH2103XING 多功能电磁炉 (广东美的生活电器制造有限公司)、移液枪 [大龙兴创实验仪器 (北京) 股份公司]。

试验材料: 500 mL 玻璃烧杯、90 mm 玻璃培养皿、打孔器、毛刷、镊子、玻璃棒、昆虫针、毛刷、琼脂糖。

### 1.3 供试药剂

室内毒力测定所用杀虫剂: 98% 阿维菌素原药 (深圳诺普信农业化股份有限公司)、98% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 (甲维盐) 原药 (河北省邯郸市瑞田农药有限公司)、98% 噻虫嗪原药 (沈阳化工研究院有限公司)、98% 联苯菊酯原药 (黑龙江欣太生物科技有限公司)、98% 高效氯氟氰菊酯原药 (榆林成泰恒生物科技有限公司)、95% 溴氰虫酰胺原药 (沈阳化工研究院有限公司)、97% 虱螨脲原药 (沈阳化工研究院有限公司)、95% 乙虫腓原药 (沈阳化工研究院有限公司)。

田间药效试验所用杀虫剂: 10% 阿维菌素悬浮剂 (河北农信生物科技有限责任公司) 90 mL · hm<sup>-2</sup>、5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂 (山东滨海泰山作物科学有限公司) 45 mL · hm<sup>-2</sup>、70% 噻虫嗪水分散粒剂 (山东绿丰农药有限公司) 75 mL · hm<sup>-2</sup>、10% 联苯菊酯乳油 (山东鑫星农药有限公司) 450 mL · hm<sup>-2</sup>、20% 高效氯氟氰菊酯水乳剂 (宁南泰达丰生物科技有限公司) 75 mL · hm<sup>-2</sup>、10% 溴氰虫酰胺可分散油悬浮剂 (美国富美实公司) 150 mL · hm<sup>-2</sup>、10% 虱螨脲悬浮剂 (河南比赛尔农业科技有限公司) 300 mL · hm<sup>-2</sup>、10% 乙虫腓悬浮剂 (拜耳作物科学 (中国) 有限公司) 450 mL · hm<sup>-2</sup>。

### 1.4 试验方法

1.4.1 室内毒力测定 参照 NY/T 1154.16-2013 《农药室内生物测定试验准则》采用琼脂保湿浸叶法加以改进, 以 2 种粉虱雌成虫为供试对象。将不同杀虫剂原药用丙酮稀释液配制成 10 000 mg · L<sup>-1</sup> 母液, 用 0.01% 吐温 80 稀释液配制成 0.1、1.0、10、100、1 000 mg · L<sup>-1</sup> 5 个浓度梯度, 以 0.01% 吐温 80 为对照, 共 6 个处理。将琼脂配制成 1.7% 溶液加到培养皿 (直径 90 mm) 中, 选取干净新鲜的油麦菜叶片, 将油麦菜打成直径为 38 mm 的叶饼进行浸叶处理。由低向高浓度将叶片于各浓度药液浸渍 20 s, 晾干叶片, 背面朝上置于凝固的琼脂表面。将羽化 5 d 内的试虫于 -20 °C 下 30 s 短暂麻醉后放入透气培养皿中, 每个重复 30 头成虫, 每个处理重复 3 次。待成虫苏醒后, 记录每个处理试虫总数和死亡

数(统计有效活虫数)。用毛笔轻轻触动虫体,不动者视为死亡。将培养皿置于(26±1)℃、光照 16 L:8 D 的人工气候箱中,48 h 后记录 2 个种群成虫的死亡数。

1.4.2 2 种粉虱对亚致死浓度杀虫剂生理生化反应 取 2 种粉虱成虫(羽化 5 d 内),选择  $LC_{25}$  浓度对 2 种粉虱成虫进行处理(处理方法同 1.4.1),以清水作对照,收集处理 24 h 后存活的粉虱,每 30 头装入一个 2 mL 的离心管中,液氮速冻后置于-80℃保存,送至北京峰格生物技术有限公司使用 ELISA 试剂盒测定 MDA 含量、SOD、CAT、CarE、GST 和 AChE 活性,测定时每处理设 3 个重复,每个重复 5 次技术重复。

1.4.3 田间药效试验 试验地点:新疆农业大学农学院农药学试验田,使用杀虫剂推荐剂量,采用喷雾法施药。处理区随机排列,共设 8 个处理,一个空白对照,每个处理重复 3 次,每个处理小区为 6 m×1 m,每小区不少于 30 株油菜麦,施药前统计虫口基数,以清水为对照。使用小型手动喷雾器,喷洒后清洗喷雾器。

调查方法:采用 5 点取样法进行调查,每个点调查 1 株,挂牌标记,每株分上、中、下各选 3 张叶片,施药后 3、5、7、14 d 调查 2 种粉虱虫口数量,计算虫口减退率和防治效果。

虫口减退率/%=(处理前虫口数-处理后虫口数)/处理后虫口数×100

防治效果/%=(处理区虫口减退率-对照区虫口减退率)/(100-对照区虫口减退)×100

## 1.5 数据处理

室内毒力数据采用 SPSS 21 软件拟合毒力回归方程,并计算杀虫剂致死中浓度( $LC_{50}$ )、回归方程、95%置信区间、 $R^2$ 、df、 $\chi^2$ ;采用独立样本  $t$  检验分析同一药剂处理不同物种差异显著性;采用 one-way ANOVA (Duncan's) 分析不同药剂处理同一物种的差异显著性,显著水平设定为  $P=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 2 个种群对 8 种杀虫剂的敏感性差异

2 种粉虱( $A_p$ 、 $A_s$ )对 8 种杀虫剂的敏感性存在差异(表 1), $A_p$  对联苯菊酯、阿维菌素、溴氰虫酰胺较为敏感, $LC_{50}<2.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而  $A_s$  对联苯菊酯、阿维菌素较为敏感, $LC_{50}<3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其中, $A_p$ 、 $A_s$  成虫对联苯菊酯最敏感,致死中浓度( $LC_{50}$ )最高(分别为 0.21、0.48  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),表明  $A_p$  对拟除虫菊酯类药剂更敏感。其次,阿维菌素对  $A_p$  的致死中浓度(0.97  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )显著低于  $A_s$  (3.21  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。2 种粉虱对溴氰虫酰胺的敏感度相反, $A_p$  的  $LC_{50}$  (2.31  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )显著低于  $A_s$  (6.60  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。虱螨脲对  $A_p$ 、 $A_s$  成虫的毒力最低, $LC_{50}$  分别为 105.99、178.67  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综上所述, $A_p$  对 8 种药剂的敏感度均高于  $A_s$  ( $LC_{50}$  降低 32%~82%)。

表 1 8 种杀虫剂对  $A_p$  和  $A_s$  粉虱成虫的毒力  
Table 1 Toxicity of 8 insecticides to adult  $A_p$  and  $A_s$

杀虫剂 Insecticides	粉虱种类 <i>Aleyrodidae</i> species	毒力回归方程 Toxicity regression equation	$LC_{50}$ /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	95%置信区间 95% confidence interva	$R^2$	df	$\chi^2$	$LC_{25}$ /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
阿维菌素 Abamectin	$A_p$	$y=0.49x+0.01$	0.97	0.44~1.85	0.96	3	4.04	0.04
	$A_s$	$y=0.48x-0.24$	3.21	1.64~5.88	0.98	3	2.19	0.13
联苯菊酯 Bifenthrin	$A_p$	$y=0.34x+0.23$	0.21	0.04~0.60	0.98	3	0.75	0.02
	$A_s$	$y=0.41x+0.13$	0.48	0.16~1.08	0.98	3	2.09	0.01
高效氯氟氰菊酯 Cyhalothrin	$A_p$	$y=0.39x-0.31$	6.12	2.82~12.69	0.98	3	1.36	0.11
	$A_s$	$y=0.60x-0.73$	16.42	9.89~27.73	0.99	3	0.98	1.21
溴氰虫酰胺 Cyantraniliprole	$A_p$	$y=0.27x-0.10$	2.31	0.60~6.54	0.94	3	2.33	0.07
	$A_s$	$y=0.41x-0.33$	6.60	3.17~13.32	0.99	3	1.25	0.14
虱螨脲 Lufenuron	$A_p$	$y=0.45x-0.91$	105.99	52.80~252.38	0.99	3	0.52	3.28
	$A_s$	$y=0.44x-1.01$	189.42	89.68~501.58	0.97	3	2.48	5.67
噻虫嗪 Thiamethoxam	$A_p$	$y=0.57x-0.50$	7.25	1.89~25.74	0.96	3	5.99	0.49
	$A_s$	$y=0.44x-0.55$	18.40	9.54~36.93	0.96	3	3.77	0.52
乙虫腈 Ethiprole	$A_p$	$y=0.46x-0.57$	17.59	9.36~34.15	0.98	3	2.65	0.59
	$A_s$	$y=0.48x-0.75$	38.34	20.71~76.76	0.99	3	1.10	1.47
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	$A_p$	$y=0.39x-0.23$	3.88	1.73~7.98	0.99	3	0.51	0.07
	$A_s$	$y=0.44x-0.34$	6.04	3.04~11.64	0.99	3	1.36	0.17

## 2.2 2 种粉虱的生化响应分化及机制解析

2 种粉虱对杀虫剂的生理响应呈显著差异(表 2)。拟除虫菊酯类药剂(高效氯氟氰菊酯)显著诱导  $A_p$  MDA 含量升高(7.22%,  $P < 0.05$ ), 而  $A_s$  MDA 在甲维盐处理下增幅最大, 达 12.387% ( $P < 0.01$ ), 表明其脂质过氧化损伤更为严重。虱螨脲处理则导致  $A_p$  MDA 降低 6.10%, 但  $A_s$  MDA 升高 6.30%, 反映二者氧化应激调控通路分化。

表 2 不同杀虫剂处理后 2 种粉虱体内丙二醛含量

Table 2 Contents of MDA of two whitefly species after different insecticide treatments

处理 Treatment	单位 Unit: (nmol · L <sup>-1</sup> )	
	$C_{A_p}$	$C_{A_s}$
ck	9.34±0.23bcd	9.07±0.08c
阿维菌素 Abamectin	8.47±0.18e	8.66±0.24cd
联苯菊酯 Bifenthrin	9.87±0.20ab	9.87±0.07b
高效氯氟氰菊酯 Cyhalothrin	10.01±0.31a*	8.70±0.49d
溴氰虫酰胺 Cyantraniliprole	9.33±0.33cde	8.84±0.11cd
虱螨脲 Lufenuron	8.77±0.18de*	9.62±0.38ab
噻虫嗪 Thiamethoxam	9.96±0.33a*	8.77±0.43d
乙虫腈 Ethiprole	8.81±0.25de	8.60±0.27cd
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emeactin benzoate	9.50±0.14abc*	10.19±0.31a

表中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示同一粉虱不同药剂之间差异显著; \* 表示同一药剂不同粉虱之间差异显著。

Data in this table are means±SE. Different lowercase letters indicate significant differences between different insecticides for the same whitefly. \* indicate significant differences between different whitefly for the same insecticides.

2 种粉虱体内 SOD、POD、CAT 3 种保护酶活性存显著差异(表 3)。8 种杀虫剂处理下使  $A_p$ 、 $A_s$  SOD 活性均下降(分别为 9.67%~21.70%、3.04%~22.98%)表明杀虫剂使 2 种粉虱抗氧化能力减弱, 导致氧化应激水平上升, 而  $A_p$  的 SOD 活性下降幅度普遍大于  $A_s$ , 表明  $A_p$  对杀虫剂的抗氧化能力更为弱。其中,  $A_p$  在联苯菊酯处理下的 SOD 活性(55.40 ng · L<sup>-1</sup>)下降最大, 较对照组降低了 21.70%, 而  $A_s$  仅下降 3.04% ( $P < 0.05$ ), 表明  $A_p$  对联苯菊酯的抗氧化能力更弱, 对杀虫剂更敏感。邻氨基苯酰胺类(溴氰虫酰胺)处理下  $A_s$  的 SOD 活性下降 22.98%, 显著高于  $A_p$  的 9.67% ( $P < 0.05$ ), 表明  $A_s$  对该药剂的抗氧化能力强于  $A_p$ ; 苯甲酰脲类(虱螨脲)处理下  $A_p$  的 SOD 活性(69.44 ng · L<sup>-1</sup>)仅下降 1.86%, 而  $A_s$  (65.49 ng · L<sup>-1</sup>)下降 7.44%, 表明虱螨脲对  $A_s$  的抗氧化能力弱, 对此杀虫剂更敏感。经过杀虫剂处理后  $A_p$  POD 活性在部分处理中升高, 而  $A_s$  的 POD 活性在所有处理中均

下降, 表明  $A_s$  对 8 种杀虫剂的氧化应激响应更为一致。新烟碱类(噻虫嗪)处理下  $A_p$  POD 活性显著升高 16.89%, 而  $A_s$  下降 14.48%, 表明噻虫嗪对  $A_p$  的氧化应激调控作用与  $A_s$  相反。邻氨基苯酰胺类(溴氰虫酰胺)处理下  $A_p$  和  $A_s$  的 POD 活性为 38.29、41.39 ng · L<sup>-1</sup>, 与对照相比分别下降 7.33%、16.81%, 表明该药剂对二者的氧化应激均有显著影响, 对  $A_s$  的影响更强。经过联苯菊酯处理后  $A_p$  POD 活性升高 2.81%, 而  $A_s$  下降 8.47%, 进一步表明  $A_p$ 、 $A_s$  对同一种药剂的响应差异。拟除虫菊酯类杀虫剂(联苯菊酯、高效氯氟氰菊酯)、苯甲酰脲类(虱螨脲)、新烟碱类(噻虫嗪)处理后显著诱导了  $A_s$  CAT 活性, 上升 0.79%~9.61% ( $P < 0.05$ ), 而  $A_p$  联苯菊酯、噻虫嗪处理后诱导了  $A_s$  CAT 活性, 上升 1.64%~4.12%。通过新烟碱类(噻虫嗪)处理下  $A_p$  CAT 活性升高 4.12%, 而  $A_s$  仅升高 0.79%, 表明对  $A_p$  CAT 活性有更强的诱导作用。综上,  $A_p$ 、 $A_s$  的 SOD、POD 和 CAT 变化趋势不一致, 表明二者在抗氧化防御通路上存在分化。

2 种粉虱体内 CarE、GST、AChE 解毒酶活性存在差异(表 4)。经 8 种杀虫剂处理后除甲氨基阿维菌素苯甲酸盐外, 其他杀虫剂处理均导致  $A_p$  CarE 活性下降(1.62%~14.24%), 抑制 CarE 活性, 使  $A_p$  对杀虫剂的敏感性增加, 而  $A_s$  经 8 种杀虫剂处理后均导致 CarE 活性升高(0.99%~23.97%), 增强 CarE 活性, 增强其解毒能力。拟除虫菊酯类药剂(联苯菊酯)处理后使  $A_p$  CarE 活性下降 13.16%, 而  $A_s$  CarE 活性上升 13.93% ( $P < 0.05$ ), 2 种粉虱存在不同的解毒能力。经高效氯氟氰菊酯处理后导致  $A_p$  的 CarE 活性仅下降 3.16%, 而  $A_s$  显著升高 17.88% ( $P < 0.05$ ), 进一步表明  $A_s$  对该药剂的 CarE 响应更强, 解毒能力更强。经 8 种杀虫剂处理后  $A_p$  GST 活性上升(4.75%~22.74%), 参与脂质代谢, 帮助分解和利用脂类物质, 维持能量平衡, 而  $A_s$  GST 活性则下降(4.50%~20.56%), 表明经高效氯氟氰菊酯处理后对  $A_s$  GST 活性抑制最大, 下降 20.56% ( $P < 0.05$ ), 而  $A_p$  却升高了 4.75%, 表明  $A_s$  对该药剂的 GST 响应更为强烈。值得注意的是,  $A_s$  GST 活性普遍降低 3.99%~26.64%, 可能削弱其解毒能力, 导致对阿维菌素 LC<sub>50</sub>(3.21 mg · L<sup>-1</sup>)显著高于  $A_p$ (0.97 mg · L<sup>-1</sup>)。这些生化响应差异为 2 种粉虱的敏感性差异提供了关键生理证据。经溴氰虫

酰胺处理后显著激活 *Ap* AChE, 达  $71.43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 较对照组上升 4.46% ( $P < 0.05$ ), 可能通过增强神经信号传导补偿毒性效应, 而联苯菊酯抑制 *Ap* AChE 活性, 较对照组降低了 7.92% ( $P < 0.05$ ), 与其高致死中浓度 ( $\text{LC}_{50} = 0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 直接相关。 *Ap*、*As*

CarE 和 GST 响应存在显著差异, 表明二者不同解毒机制, *Ap* 主要通过增强 GST 活性来应对杀虫剂, 而 *As* 主要通过增强 CarE 活性来应对杀虫剂, *Ap*、*As* 经不同杀虫剂处理后 AChE 产生不同响应, 进一步表明了 2 个种群不同的响应机制。

表 3 不同杀虫剂处理后 2 种粉虱体内超氧化物歧化酶、过氧化物酶及过氧化氢酶活性  
Table 3 Activities of SOD, POD, and CAT of two whitefly species after different insecticide treatments

杀虫剂 Insecticides	单位 Unit: ( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ )					
	<i>Ap</i>			<i>As</i>		
	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	过氧化物酶活性 POD activity	过氧化氢酶活性 CAT activity	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	过氧化物酶活性 POD activity	过氧化氢酶活性 CAT activity
CK	68.86±1.55ab	41.32±0.68dc *	147.78±3.64b	70.76±0.45a	49.76±0.55a	142.09±2.67b
阿维菌素 Abamectin	58.67±1.13cde	42.20±0.69b	127.14±3.42cd	59.88±1.20de	41.42±0.97cd	126.10±2.04c
联苯菊酯 Bifenthrin	55.40±2.13e *	42.48±0.57bc *	150.21±2.17b *	68.61±1.30ab	45.54±1.24b	155.75±2.46a
高效氯氟氰菊酯 Cyhalothrin	58.61±1.73cd	41.24±1.19bcd	135.96±1.42a *	64.93±2.59d	43.29±1.041cd	143.99±6.47c
溴氰虫酰胺 Cyantraniliprole	63.91±1.26b *	38.29±0.83d *	134.93±0.60c	54.50±2.19f	41.39±0.35cd	137.02±4.01b
虱螨脲 Lufenuron	69.44±1.87a	40.12±1.29bc	134.13±2.98c *	65.49±2.22bc	43.07±1.015bc	145.99±5.44a
噻虫嗪 Thiamethoxam	60.50±3.79de *	48.30±1.09a *	153.98±4.54a *	62.97±.80cd	42.56±1.25cd	143.22±2.89b
乙虫腈 Ethiprole	60.65±1.66c	43.51±2.07bc	135.50±5.34c	63.11±1.29d	41.14±1.13d	129.05±3.13c
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	59.89±0.56cd	40.02±1.04cd *	126.55±4.75d *	57.00±1.27ef	47.37±1.92a	128.56±0.85c

表中数据为平均值±标准误。不同小写字母表示同一粉虱不同药剂之间差异显著; \* 表示同一药剂不同粉虱之间差异显著。

Data in this table are means±SE. Different lowercase letters indicate significant differences between different insecticides for the same whitefly.

\* indicate significant differences between different whitefly for the same insecticides.

表 4 不同杀虫剂处理后 2 种粉虱体内羧酸酯酶、谷胱甘肽 S 转移酶及乙酰胆碱酯酶活性  
Table 4 Activities of CarE, GST sand AChE of two whitefly species after different insecticide treatments

杀虫剂 Insecticides	单位 Unit: ( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ )					
	<i>Ap</i>			<i>As</i>		
	羧酸酯酶活性 CarE activity	谷胱甘肽 S 转移酶活性 GST activity	乙酰胆碱酯酶活性 AChE activity	羧酸酯酶活性 CarE activity	谷胱甘肽 S 转移酶活性 GST activity	乙酰胆碱酯酶活性 AChE activity
CK	40.15±0.38b *	875.81±25.68de *	68.37±1.84cd *	34.36±0.86d	1 105.76±13.31a	73.73±1.35bc
阿维菌素 Abamectin	36.28±0.63c	1 028.53±21.92b	73.41±1.34bc	36.78±0.83c	1 014.07±11.68bc	70.07±1.29cd
联苯菊酯 Bifenthrin	34.87±0.83cd *	958.31±26.56c *	62.96±2.21e *	39.15±0.46bc	1 033.12±5.52bc	71.14±1.82bcd
高效氯氟氰菊酯 Cyhalothrin	38.88±1.24b	917.38±8.63cde	70.37±1.82bc	40.51±0.75b	878.43±28.07de	73.86±1.36b
溴氰虫酰胺 Cyantraniliprole	39.50±0.63b	865.19±16.14e	71.43±1.80b	37.03±1.05c	880.06±29.91d	75.74±1.58bc
虱螨脲 Lufenuron	39.36±1.14b	1 037.90±66.73a *	79.51±2.17a	37.22±0.56bc	940.00±52.43c	81.39±3.85a
噻虫嗪 Thiamethoxam	37.20±0.67c *	1 064.45±30.86ab	72.15±2.3bcd *	34.70±1.49d	1 042.53±25.17ab	80.85±0.35a
乙虫腈 Ethiprole	34.43±1.07d *	1074.94±19.91ab	68.95±0.89bcd	38.55±1.90b	1 055.96±24.55ab	68.83±2.16e
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	41.60±1.82a	964.63±27.88cd	66.84±1.40de *	42.60±1.02a	922.56±24.13d	79.60±2.09a

表中数据为平均值±标准误。不同小写字母表示同一粉虱不同药剂之间差异显著; \* 表示同一药剂不同粉虱之间差异显著。

Data in this table are means±SE. Different lowercase letters indicate significant differences between different insecticides for the same whitefly.

\* indicate significant differences between different whitefly for the same insecticides.

### 2.3 2 种粉虱对杀虫剂敏感性差异与生化响应差异的相关性分析

2 种粉虱对杀虫剂的敏感性差异与其抗氧化和解毒系统的协同调控显著相关(图 1), 在 *Ap* 中,  $\text{LC}_{50}$  与 SOD 活性 ( $r = 0.7, P < 0.05$ )、GST 活性 ( $r = 0.61, P < 0.05$ ) 呈强正相关, 表明其通过上调 SOD

活性清除超氧阴离子 ( $\text{O}_2^-$ ), 并依赖 GST 代谢脂质过氧化物(如 MDA), 共同缓解氧化损伤(图 1A)。相反, *As*  $\text{LC}_{50}$  与 GST 活性负相关(图 1B), 提示其 GST 可能通过修饰靶标位点(如乙酰胆碱受体)而非解毒途径参与对不同杀虫剂的耐受性。

进一步分析发现, *Ap* 中 POD 与 CAT 活性均与

LC<sub>50</sub> 负相关, 可能因二者未能有效清除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 导致其积累并诱发脂质过氧化 (MDA, 1.73% ~ 7.22%), 最终加剧细胞死亡。这一机制与 *Ap* 对拟除虫菊酯的高敏感性 (LC<sub>50</sub> = 0.21 mg · L<sup>-1</sup>) 一致。而 *As* 通过

CarE 活性上调 (0.99% ~ 23.97%) 直接降解杀虫剂, 降低对抗氧化系统的依赖, 形成独特农药耐受性策略。本研究揭示不同酶功能在近缘种间的分化, 为靶向代谢通路的精准防控提供了理论依据。

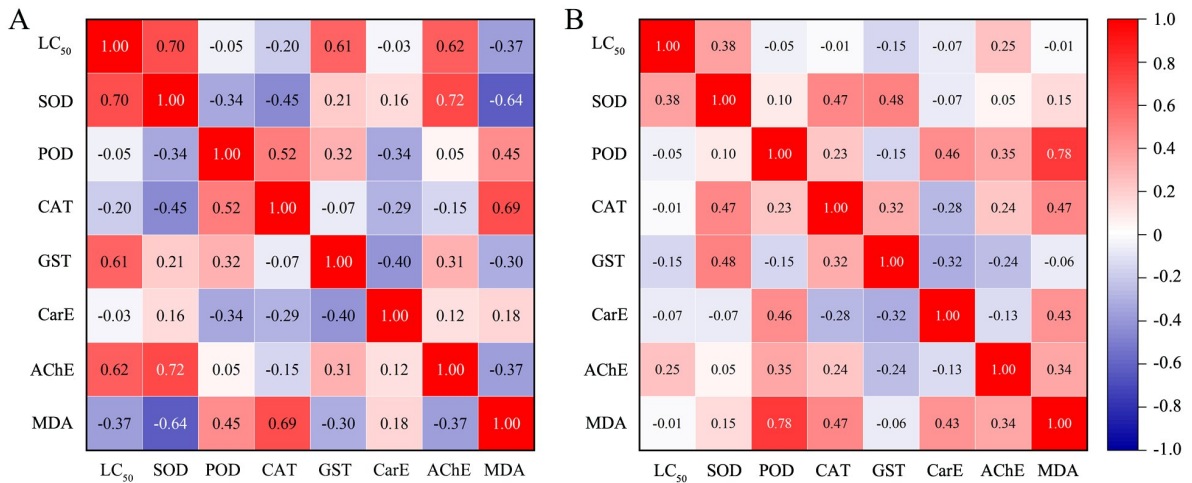


图 1 *Ap* (A) 和 *As* (B) 对杀虫剂敏感性差异与生化响应差异的相关性

Fig.1 Correlation between differences in susceptibility to insecticides and biochemical responses in *Ap* (A) and *As* (B)

## 2.4 8 种杀虫剂对 2 种粉虱成虫的田间防效

由表 5 可知, 10% 联苯菊酯乳油、70% 噻虫嗪水分散剂、10% 乙虫腈悬浮剂对 *Ap* 有较好的速效性, 药后 3 d 的防效分别为 77.29%、77.96%、70.64%, 10% 阿维菌素悬浮剂、20% 高效氯氟氰菊酯水乳剂、10% 虱螨脲悬浮剂对 *As* 具有较好的速效性, 药后 3 d 的防效分别为 64.58%、62.22%、82.05%。10% 联苯菊酯乳油、70% 噻虫嗪水分散剂在药后 3 d 对 *Ap* 成虫的防效无显著差异, 而对 *As* 成虫的防效仅 58.91%、53.61%; *As* 成虫对 10% 虱螨脲悬浮剂较敏感, 药后 3 d 防效达到 82.05%, 而对 *Ap* 的防效仅 60.28%。药后 7 d, 各杀虫剂对 2 种粉虱防效均最好, 70% 噻虫嗪水分散剂对 *Ap* 成虫的防效最好 (94.02%); 而 5% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂对 *As* 成虫的防效最差 (43.89%), 其对 *Ap* 成虫的防效 (89.93%) 是 *As* 成虫防效的 2.05 倍。70% 噻虫嗪水分散剂对 *Ap* 成虫的防效最长, 药后 14 d 防效为 81.85%, 而 10% 阿维菌素悬浮剂对 *As* 成虫的防效最长, 药后 14 d 防效为 80.96%。

## 3 讨论与结论

随着我国经济的快速发展和进出口贸易量的

增加, 外来入侵生物的风险持续升高, 已对我国的自然生态系统、经济和社会发展造成了严重为害 (杜素洁, 2023)。 *Ap* 与 *As* 同为入侵性粉虱, 二者对杀虫剂的敏感性及其生理响应差异此前尚未明确。本研究比较了这 2 种近缘种对不同杀虫剂的敏感性, 发现 *Ap* 对各杀虫剂的敏感性均强于 *As*。 *Ap* 通过 GST 活性上调 (4.75% ~ 22.74%) 增强解毒效率, 而 *As* 依赖 CarE 活性升高 (0.99% ~ 23.97%) 形成主要抗氧化途径, 这为入侵种间竞争替代机制提供了新视角。

逆境胁迫及外源有毒物质能促使昆虫体内羟自由基、过氧化氢以及超氧离子等活性氧自由基数量增加, 对昆虫产生毒害作用 (沈渊等, 2023)。 POD、SOD 与 CAT 等保护酶能帮助昆虫清除其体内多余的活性氧自由基, 保护机体不被外源毒物毒害 (王自杰等, 2024)。 本研究中, 在 8 种杀虫剂胁迫下, *Ap* 主要通过 SOD、GST 来调节, 清除超氧阴离子 (O<sup>2-</sup>) 缓解氧化损伤, 结合谷胱甘肽 (GSH) 与亲电性物质促进解毒, 这与郭春晖等 (2018) 研究结果相同, 印楝素能够使黄粉虫 *Tenebrio molitor* L. 内保护酶活性升高, 这是因为当昆虫受到毒素侵扰时, 能够通过改变自身保护酶活性来适应外界毒害作用。

表 5 不同药剂对 *Ap*、*As* 成虫的田间药效  
Table 5 Field efficacy of different agents on *Ap* and *As* adults

杀虫剂 Insecticides	粉虱种类 whitefly species	虫口基数 Number of insect/头	药后 3 d 3 d after application			药后 5 d 5 d after application			药后 7 d 7 d after application			药后 14 d 14 d after application		
			活虫数 Number of living insect / 头	减退率 Reduction /%	防效 Control efficacy /%	活虫数 Number of living insect / 头	减退率 Reduction /%	防效 Control efficacy /%	活虫数 Number of living insect / 头	减退率 Reduction /%	防效 Control efficacy /%	活虫数 Number of living insect / 头	减退率 Reduction /%	防效 Control efficacy /%
10%阿维菌素悬浮剂	<i>Ap</i>	41.34	24.71	40.30±3.74	46.75±5.78cd	19.12	53.79±3.90	61.86±5.31c	15.96	61.57±4.71	70.10±6.42b	29.83	28.08±5.67	49.57±5.56e
10% Abamectin SC	<i>As</i>	43.72	16.06	62.92±3.41	64.58±5.77b	7.77	82.15±1.11	84.80±0.25a	5.61	87.17±0.13	89.63±0.13a	10.32	76.12±2.59	80.96±3.71a
10%联苯菊酯乳油	<i>Ap</i>	36.22	8.94	74.96±5.44	77.29±6.18a	7.40	79.51±0.97	83.18±1.67ab	6.24	82.59±1.77	86.52±2.67a	17.40	51.98±2.64	66.40±2.79bc
10% Bifenthrin EC	<i>As</i>	45.15	19.61	56.15±6.16	58.91±5.22b	17.21	61.86±3.50	67.56±1.89c	11.22	75.07±1.07	79.87±0.65abc	19.81	56.00±2.27	65.55±3.64
20%高效氟氰菊酯水乳剂	<i>Ap</i>	46.47	28.45	38.17±6.63	45.71±3.51d	24.13	48.37±1.93	57.78±3.04c	21.04	54.05±6.12	64.16±8.08b	31.82	31.20±4.12	52.02±3.09de
20% Cyhalothrin EW	<i>As</i>	43.01	17.33	59.42±5.85	62.22±4.41b	14.76	65.71±0.68	70.67±0.98c	6.56	84.74±0.73	87.69±0.46ab	13.23	69.15±1.74	76.08±0.83a
10%溴氰虫酰胺可分散油悬浮剂	<i>Ap</i>	32.98	11.95	63.81±0.92	67.86±1.96ab	9.70	65.85±1.44	75.89±1.64ab	15.21	53.55±2.82	64.85±4.54b	17.76	45.76±7.29	61.83±6.36cd
10% Cyantamiprole OD	<i>As</i>	50.98	19.70	61.22±5.28	63.92±3.75b	12.39	75.67±1.26	79.14±1.55b	13.56	73.38±3.75	78.44±3.24bc	24.12	52.68±0.42	63.01±2.94b
10%虱螨脲悬浮剂	<i>Ap</i>	42.80	18.87	55.61±4.91	60.28±6.03bc	14.13	66.63±5.03	72.38±5.12b	6.75	84.15±1.53	87.85±2.26a	26.67	37.70±1.51	56.46±2.37cde
10% Lufenuron SC	<i>As</i>	40.76	7.67	81.23±1.91	82.05±3.11a	15.47	61.96±3.29	67.25±3.90c	16.99	58.15±3.70	66.18±3.09d	19.36	52.43±1.38	62.83±2.95b
70%噻虫嗪水分散粒剂	<i>Ap</i>	44.28	10.91	75.44±2.92	77.96±6.48a	7.26	83.65±1.39	86.76±0.60a	3.30	92.43±1.91	94.02±3.47a	11.61	73.78±3.80	81.85±3.92a
70% Thiamethoxam WG	<i>As</i>	52.23	26.24	49.84±1.24	52.61±3.74c	12.73	75.47±5.32	79.20±3.98b	16.61	68.06±4.91	74.27±3.69cd	27.80	46.68±2.95	58.59±2.19b
10%虱螨脲悬浮剂	<i>Ap</i>	38.56	15.85	66.43±5.58	70.64±3.76ab	8.21	78.48±4.72	82.17±4.55ab	4.46	88.33±1.63	90.96±2.09a	13.87	63.98±4.37	75.16±1.36ab
10% Ethiprole SC	<i>As</i>	40.14	17.71	55.81±2.38	58.51±2.03b	13.19	67.16±0.79	71.84±1.72bc	14.37	64.44±7.69	71.16±6.40cd	20.90	47.87±2.19	59.50±1.81b
5%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂 5% Emamectin benzoate ME	<i>Ap</i>	35.16	16.04	54.29±1.13	59.46±2.06bcd	9.16	74.07±3.23	79.11±1.56ab	4.64	86.73±1.10	89.93±1.55a	17.30	50.65±3.19	65.53±2.80bc
	<i>As</i>	48.27	28.81	40.21±3.37	43.40±6.14c	31.68	34.10±4.60	43.74±3.22d	33.56	30.58±3.21	43.89±2.96e	41.54	13.94±0.30	32.62±5.96c
CK	<i>Ap</i>	27.07	30.61	-13.24±5.48	/	33.29	-23.17±7.41	/	36.67	-35.77±16.82	/	38.93	-44.01±9.24	/
	<i>As</i>	38.67	41.13	-6.97±7.22	/	45.39	-17.30±6.03	/	47.84	-23.80±11.25	/	49.79	-29.69±11.14	/

表中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。  
Data in this table are means±SE. Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level.

本研究中, *As* 的 CAT 活性显著被抑制, 导致  $H_2O_2$  积累并加剧脂质过氧化, 从而使 AChE 受到间接影响, 导致乙酰胆碱 (ACh) 积累并干扰神经信号传递 (Fang *et al.*, 2021; Qu *et al.*, 2021), MDA 含量升高进一步证实了氧化损伤的加剧。 *As*、*As* 保护酶、解毒酶等其他生理指标含量存在差异, 表现出不同的解毒与抗氧化功能, 因此使 2 个种群表现出不同的敏感差异, 这与樊宗芳 (2021) 研究西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 和花蓟马 *Frankliniella intonsa* (Trybom) 的毒力及其生理酶活性的差异结果类似。2 种粉虱体内不同酶活性的差异, 相互调节从而维持正常的生理代谢, 这是导致 2 种粉虱对不同杀虫剂产生敏感差异的原因之一。本研究的局限性在于未解析 GST/CarE 活性差异的分子遗传基础, 未来需结合转录组学揭示基因表达调控网络。

本研究中, *Ap* 对各杀虫剂的敏感性强于 *As*, 室内毒力的结果与田间防效的结果一致, 但对不同杀虫剂的敏感性存在差异, 这可能是 2 种粉虱体内不同酶活性的差异引起 2 种粉虱产生敏感性差异, 且室内毒力测定环境稳定, 不易受到干扰, 田间药效受环境的影响较大, 因此会产生不同的敏感差异。室内试验中, 噻虫嗪对 *Ap* 的毒力为  $7.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 较其他杀虫剂敏感性较差, 但在田间药效试验中, 70% 噻虫嗪水分散剂药后 7 d 对 *Ap* 的防效最好, 防效达到 90% 以上, 与室内结果存在差异。在田间, 昆虫暴露于复杂的环境压力, 氧化应激水平较高, 抗氧化酶活性可能显著增强。这种增强的抗氧化能力可能帮助昆虫更有效地降解杀虫剂, 从而降低田间药效。噻虫嗪是第二代烟碱类高效低毒杀虫剂, 对害虫具有胃毒、触杀及内吸活性, 施药后迅速被内吸, 并传导到植株各部位, 对刺吸式害虫等有良好的防效 (魏义兰等, 2022)。室内试验中, 阿维菌素对 *As* 的毒力为  $3.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 较为敏感, 而田间 10% 阿维菌素悬浮剂药后 7 d 对 *As* 防效最好达 89.63%, 与室内结果相似。

本研究通过整合室内毒力测定、酶活性分析与田间验证, 明确 *Ap* 与 *As* 的抗性分化机制, *Ap* 对 8 种杀虫剂的敏感性均显著高于 *As*, 其中, 联苯菊酯 ( $0.212 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  vs.  $0.484 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 与阿维菌素 ( $0.970 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  vs.  $3.209 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 差异最显著。 *Ap* 依赖 GST 活性上调缓解氧化损伤, 形成“抗氧化

-解毒”双重屏障, *As* 通过 CarE 活性升高直接代谢杀虫剂, 降低对抗氧化系统的依赖, 从而导致不同杀虫剂对 2 种粉虱在田间存在不同的防控效果。田间防治时, 对 *Ap* 优先选用新烟碱类药剂 70% 噻虫嗪水分散剂; 对 *As* 采用 10% 阿维菌素悬浮剂; 针对混合种群, 可复配 70% 噻虫嗪水分散剂与 10% 阿维菌素悬浮剂以延长药效持效期。

## 参考文献

- 阿布都热孜克·库玩, 2019. 两种入侵粉虱的主要生物生态学特性. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.
- 阿布都热孜克·库玩, 李敬桦, 王盼盼, 杜新玉, 马德英, 2018. 欧洲甘蓝粉虱两种表型的形态学及遗传特征比较研究 // 第五届全国入侵生物学大会——入侵生物与生态安全会议摘要. 北京: 中国植物保护学会: 46.
- 阿布都热孜克·库玩, 李敬桦, 王盼盼, 窦新玉, 马德英, 2019. 新疆外来入侵害虫欧洲甘蓝粉虱主要生物学特性分析. 植物保护学报, 46(5): 997-1003.
- 杜素洁, 郭建洋, 赵浩翔, 万方浩, 刘万学, 2023. 近十年我国入侵生物预防与监控研究. 植物保护, 49(5): 410-418, 440.
- 樊宗芳, 宋洁蕾, 桂富荣, 和淑琪, 2021. 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. 生物安全学报, 30(3): 206-212.
- 郭春晖, 宁昌龙, 王蕊蕊, 吴广, 赵鹏飞, 杨丙焯, 杨振德, 2018. 印楝素对黄粉虫幼虫呼吸作用和保护酶活性的影响. 湖北农业科学, 57(8): 55-58.
- 黄云, 吴沛卓, 郑钧月, 张瑜, 邱立红, 2022. 棉铃虫对化学杀虫剂的抗性现状及分子机制研究进展. 植物保护学报, 49(1): 336-350.
- 何发林, 乔治华, 姚向峰, 于灏泳, 孙石昂, 李向东, 姜兴印, 2019. 低致死剂量氯虫苯甲酰胺对沟金针虫食物利用和相关生理生化指标的剂量和时间效应. 昆虫学报, 62(8): 948-959.
- 吉宇星, 帕提玛·乌木尔汗, 张瑞星月, 马德英, 2022. 裸型甘蓝粉虱和背负型甘蓝粉虱两种入侵甘蓝粉虱对 3 种寄主的选择性. 新疆农业大学学报, 45(6): 474-479.
- 贾变桃, 焦鹏, 杨素梅, 2016. 虱螨脲亚致死浓度对小菜蛾保护酶系和解毒酶系活力的影响. 植物保护学报, 43(2): 293-299.
- 刘祯妍, 吕欢欢, 吴明媚, 郭佩佩, 刘明月, 马德英, 2020. 不同药剂对欧洲甘蓝粉虱 2 种表型的毒力及田间药效. 生物安全学报, 29(4): 284-291.
- 聂鹏成, 杨若兰, 袁绍, 白欣, 王菲菲, 尚素琴, 2023. 乙唑螨腈亚致死剂量对二斑叶螨解毒酶系的影响. 西北农业

- 学报, 32(8): 1297-1305.
- 沈渊, 姚莉英, 彭婷婷, 卫季辉, 周伟, 2023. 绿僵菌-芽孢杆菌微生物制剂对金山区鲜食玉米病虫害的防控效果初探. *上海农业科技* (2): 39-40.
- 王丹丹, 王星, 张晓婉, 刘丹梅, 2024. 吡虫啉胁迫对红光熊蜂抗氧化酶系与解毒酶系的影响. *东北师大学报(自然科学版)*, 56(1): 125-132.
- 王彦, 杨若兰, 袁绍, 白欣, 王菲菲, 尚素琴, 2024. 高温胁迫下二斑叶螨体内海藻糖、山梨醇、丙二醛和蛋白质含量的应激变化. *西北农业学报*, 33(8): 1549-1558.
- 王自杰, 杨芳哲, 柳添杰, 田鑫月, 王月英, 史树森, 高宇, 2024. 不同浓度噻虫嗪对点蜂缘蝽若虫体内保护酶和解毒酶活性的影响. *应用昆虫学报*, 61(5): 1037-1047.
- 魏义兰, 王良芥, 王宇, 2022. 新烟碱类杀虫剂研究进展. *河南化工*, 39(11): 8-10.
- 张桂芬, 洗晓青, 张金良, 李小凤, 马德英, 万方浩, 2014. 甘蓝粉虱入侵中国大陆. *生物安全学报*, 23(1): 66-70.
- BARRO P J, CARVER M, 1997. Cabbage whitefly, *Aleyrodes proletella* (L.) (Hemiptera: Aleyrodidae), newly discovered in Australia. *Austral Entomology*, 36(3): 255-256.
- FANG G Q, ZHANG Q, CHEN X E, CAO Y H, WANG Y H, QI M M, WU N N, QIAN L S, ZHU C X, HUANG Y P, ZHAN S, 2021. The draft genome of the Asian corn borer yields insights into ecological adaptation of a devastating maize pest. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 138: 103638.
- HILL D S, 1987. *Agricultural insect pests of temperate regions and their control*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KUWAN A, ZHANG G F, LI J H, MA D Y, 2021. Morphological, genetic and biological differences in two populations of *Aleyrodes proletella* from northwestern China. *Entomologia Generalis*, 41(1): 27-37.
- KOVAŘÍKOVÁ K, HOLÝ K, SKUHROVEC J, SASKA P, 2017. The efficacy of insecticides against eggs and nymphs of *Aleyrodes proletella* (Hemiptera: Aleyrodidae) under laboratory conditions. *Crop Protection*, 98: 40-45.
- MIGUEL N, GLORIA N, MARIANO M, 2005. Comparative host suitability of some brassica cultivars for the whitefly, *Aleyrodes proletella* (Homoptera: Aleyrodidae). *Environmental Entomology*, 34(1): 205-209.
- MARTIN J H, MIFSUD D, RAPISARDA C, 2000. The whiteflies (Hemiptera: Aleyrodidae) of Europe and the Mediterranean Basin. *Bulletin of Entomological Research*, 90(5): 407-448.
- QU M B, SUN S P, LIU Y S, DENG X R, YANG J, YANG Q, 2021. Insect group II chitinase of ChtII promotes chitin degradation during larva-pupa molting. *Insect Science*, 28(3): 692-704.
- SPRINGATE S, COLVIN J, 2012. Pyrethroid insecticide resistance in British populations of the cabbage whitefly, *Aleyrodes proletella*. *Pest Management Science*, 68(2): 260-267.
- TIWARI S, PELZ-STELINSKI K, STELINSKI L L, 2011. Effect of *Candidatus Liberibacter asiaticus* infection on susceptibility of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, to selected insecticides. *Pest Management Science*, 67(1): 94-99.

(责任编辑:郭莹)