

阿托品对西花蓟马保护酶和解毒酶的影响*

伍贝贝^{1,2**} 刘至幸² 胡美华³ 杨中侠^{1***} 张治军^{2***}

(1. 湖南农业大学, 植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室, 长沙 410128;

2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 农产品质量安全全国重点实验室, 杭州 310021;

3. 浙江省农业技术推广中心, 杭州 310020)

摘要 【目的】明确茄科植物曼陀罗次生代谢物质阿托品对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 雌成虫体内保护酶和解毒酶活性的影响。【方法】通过夹膜饲喂法对西花蓟马雌成虫进行生物毒力测定, 计算得到 25%、50% 和 75% 致死浓度相应的浓度, 分别作为低浓度、中浓度和高浓度; 用低、中、高 3 种浓度阿托品溶液饲喂胁迫西花蓟马雌成虫, 测定饲喂 12、24 和 48 h 后, 西花蓟马体内 3 种保护酶[过氧化氢酶 (Catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD)] 与 3 种解毒酶[谷胱甘肽硫转移酶 (Glutathione S-transferase, GST)、羧酸酯酶 (Carboxylesterase, CarE)、昆虫细胞色素 P450 (Cytochrome P450, CYP450)] 的活性。【结果】阿托品对西花蓟马雌成虫体内保护酶和解毒酶均产生了显著影响, 不同浓度阿托品胁迫显著提高了西花蓟马雌成虫体内 3 种保护酶 CAT、SOD 和 POD 活性 (CAT: $P < 0.001$; SOD: $P < 0.001$; POD: $P < 0.001$), 并呈现出与胁迫浓度正相关的趋势, 同时均在 48 h 酶活性达到最高值, 尤其是 SOD 和 POD 活性在高浓度下的升幅最大; 3 种浓度阿托品胁迫诱导西花蓟马解毒酶 GST 和 CYP450 酶活性, 先迅速增强而后下降, 分别在 12 和 24 h 达到峰值, CarE 酶活性仅在低浓度胁迫 12 h 显著增强 ($P < 0.001$), 中、高浓度下活性则持续被抑制。【结论】西花蓟马雌成虫体内保护酶和解毒酶活性在阿托品胁迫下发生了明显的变化, 说明西花蓟马通过调节保护酶和解毒酶适应植物次生代谢物质阿托品的影响。

关键词 植物次生代谢物质; 阿托品; 西花蓟马; 保护酶; 解毒酶

Effects of atropine on protective and detoxification enzyme activity in *Frankliniella occidentalis*

WU Bei-Bei^{1,2**} LIU Zhi-Xing² HU Mei-Hua³ YANG Zhong-Xia^{1***} ZHANG Zhi-Jun^{2***}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Diseases and Pests Biology and Prevention and Control, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. State Key Laboratory for Quality and Safety of Agro-Products, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3. Zhejiang Provincial Agricultural Technology Extension Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract [Aim] To investigate the effects of atropine, a secondary metabolite of *Datura stramonium*, on protective and detoxification enzyme activity in adult, female *Frankliniella occidentalis*. [Methods] Using the membrane feeding method, the bioassay for toxicity of *F. occidentalis* female adults was conducted, and the 25%, 50%, and 75% lethal concentrations were calculated and designated as low, medium, and high concentrations, respectively. Female adults were then exposed to atropine solutions at these three concentrations via membrane feeding. The activity of three protective enzymes [catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and peroxidase (POD)], and three detoxification enzymes [glutathione S-transferase (GST), carboxylesterase (CarE), and cytochrome P450 (CYP450)], were then determined in each treatment group after 12, 24 and 48 h. [Results] The activity of both protective and detoxification enzymes were significantly affected by atropine dosage.

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (32272537); 国家十四五重点研发项目 (2022YFD14012); 浙江省农业重大技术协同推广项目 (2023ZDXT04)

**第一作者 First author, E-mail: wubeibei095@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: zhongxiayang@hunau.edu.cn; Zhangzj@zaas.ac.cn

收稿日期 Received: 2025-12-05; 接受日期 Accepted: 2026-03-10

Protective enzyme (CAT, SOD, and POD) activity significantly increased in a concentration-dependent manner (CAT: $P < 0.001$; SOD: $P < 0.001$; POD: $P < 0.001$), with peak activity observed at 48 h. Notably, increases in SOD and POD activity were most pronounced in the high concentration treatment group. With respect to detoxification enzymes, GST and CYP450 activity initially increased, then decreased, peaking at 12 and 24 h, respectively. CarE activity was significantly enhanced only in the low-concentration group at 12 h ($P < 0.001$), but was continuously inhibited in the medium and high concentration groups. **[Conclusion]** The activity of protective and detoxification enzymes in adult female *F. occidentalis* were significantly affected by atropine stress, which indicates that females of this species adapt to the effects of this plant secondary metabolite by regulating their protective and detoxification enzyme activity.

Key words secondary metabolites; atropine; *Frankliniella occidentalis*; protective enzyme; detoxifying enzyme

西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 是缨翅目 Thysanoptera 蓟马科 Thripidae 的一种多食性入侵害虫, 起源于北美落基山脉, 在中国, 2003 年于北京市郊区大棚辣椒上首次被发现 (张友军等, 2003)。西花蓟马个体微小、繁殖力强、传播速度快且易产生抗药性, 对多种作物尤其是茄科作物构成巨大威胁 (Demirozer *et al.*, 2012)。在田间, 西花蓟马主要取食多种农作物的幼嫩组织、叶片等, 造成作物减产、品质下降等直接危害, 同时能够传播多种植物病毒造成间接危害 (Reitz *et al.*, 2020), 其中危害较严重的是番茄斑萎病毒 (Tomato spotted wilt virus, TSWV) 和凤仙花坏死斑病毒 (Impatiens necrotic spot virus, INSV)。

保护酶和解毒酶作为昆虫体内两类重要的酶系, 在维持昆虫正常生理生化代谢、分解有毒物质等方面具有重要作用, 因此常被用来作为生物体生理状态改变的度量指标。过氧化氢酶 (Catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 是昆虫体内重要的保护酶, 可以去除超氧自由基并保持动态平衡状态, 使昆虫体内自由基保持在较低的水平, 以防止中毒 (Winkiel *et al.*, 2024), 这些保护酶往往受寄主植物次生代谢物质或者有毒物质的诱导。吴青君等 (2011) 比较了小菜蛾 *Plutella xylostella* 阿维菌素敏感与抗性种群的保护酶活性, 发现抗性种群 3 种保护酶 CAT、SOD 和 POD 活性显著增强; 二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 雌成虫取食西花蓟马为害的菜豆 5 h 后, 体内 POD、CAT 和 SOD 的活性均显著高于取食健康菜豆, 分别是取食健康菜豆的

1.60、1.07 和 1.22 倍, 说明体内这 3 种保护酶可以快速响应寄主的防御 (郅军锐等, 2016)。3 龄飞蝗 *Locusta migratoria* 若虫在茶皂素胁迫处理后, SOD 活性随处理浓度升高持续上升并在高浓度下达到峰值, 而另外 2 种保护酶 POD 和 CAT 活性在低浓度下活性最高 (王铭铭等, 2023); 0.5% 绿原酸胁迫白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 3 龄幼虫 72 h 后, POD 和 CAT 活性显著提高, 但是 SOD 活性显著下降 (张爱莲等, 2025); 绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 取食添加不同棉酚含量的饲料后, 体内 3 种保护酶活性在 0-72 h 内呈先上升后下降的趋势, 在 48 h 时活性达高峰, 表明绿盲蝽受到次生物质胁迫后体内启动了适应机制 (朱香镇等, 2018)。

此外, 解毒酶是昆虫抵抗或建立耐受的关键防御机制, 昆虫体内谷胱甘肽硫转移酶 (Glutathione S-transferase, GST)、羧酸酯酶 (Carboxylesterase, CarE) 和细胞色素 P450 (Cytochrome P450, CYP450) 3 种解毒酶可帮助昆虫代谢多种外源植物次生物质, 从而减少外界生物逆境胁迫所造成的危害。例如, 亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 取食不同亚致死浓度印楝素和苦皮藤素的植物源杀虫剂后, 体内 GST 活性在低浓度印楝素处理 12 h 时被显著诱导, CYP450 在低浓度苦皮藤素处理 72 h 时被显著诱导, 而 CarE 在 2 种药剂胁迫下始终处于抑制状态不参与代谢, 表明 3 种解毒酶在参与杀虫剂解毒代谢过程中存在差异 (王晓曦等, 2025); 侯晓琳等 (2018) 的研究表明低剂量辣椒素能诱导西花蓟马雌成虫体内谷胱甘肽硫转移酶、乙酰胆碱酯酶 (Acetylcholinesterase, AChE) 和混合功能氧化酶 (Mixed

function oxidase, MFO) 活性明显升高, 高剂量辣椒素抑制 GSTs、AChE 及 MFO 活性; 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 氟苯虫酰胺抗性品系 3 种解毒酶 (GST、CarE 和 CYP450) 活性均显著高于敏感品系 (Cen *et al.*, 2026)。

茄科植物曼陀罗体内次生代谢物质主要有阿托品和东莨菪碱等 (Biswas *et al.*, 2023), 阿托品作为一种典型的抗胆碱能生物碱, 可通过与乙酰胆碱竞争突触后膜的 M 胆碱受体, 阻断乙酰胆碱与受体结合, 从而拮抗胆碱能神经的兴奋效应, 导致昆虫协调失常、痉挛和死亡 (Chowanski *et al.*, 2017; Gupta *et al.*, 2024)。Zhang 等 (2023c) 发现阿托品对西花蓟马成虫表现出拒食作用; 对 2 龄若虫具有显著的致死作用, 且死亡率随着阿托品浓度的升高而增加。目前, 针对生物碱对昆虫防治的研究多集中在毒力及药效评价等方面 (Farhan *et al.*, 2024; 于洪玉等, 2025), 而关于分析生物碱阿托品对昆虫体内生理生化变化影响的研究尚未见报道。因此, 本研究旨在研究阿托品对西花蓟马保护酶和解毒酶活性的影响, 研究结果将为理解阿托品对西花蓟马的毒性作用机理提供依据, 为使用生物碱防治害虫提供新思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用西花蓟马饲养于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 [温度 (25 ± 1) °C; 相对湿度 70% ± 5%; 光周期 14 L : 10 D], 饲养过程中未接触过任何农药。

1.2 阿托品对西花蓟马雌成虫的毒力测定

采用夹膜法饲喂 (Zhang *et al.*, 2023c) 西花蓟马雌成虫进行阿托品的毒力测定, 设置 9 个阿托品浓度梯度: 80、50、40、30、20、10、5、2.5 和 1.25 mg/mL, 溶解于 10% 蔗糖溶液中, 以 10% 蔗糖溶液为阴性对照。实验前, 选取羽化时间一致 (5 d) 及生命体征良好的西花蓟马雌成虫用于生物测定。选取 40 mL 塑料杯 (44 mm × 22 mm × 25 mm), 在塑料杯中挑入 20 头西花蓟

马, 用一层封口膜封住杯口, 饥饿 5 h 后, 在封口膜上滴入 100 μL 不同浓度的饲喂溶液, 再用一层封口膜覆盖饲喂液, 然后将装虫的塑料杯放置于西花蓟马饲养的气候室中, 每个处理 4 个重复。48 h 后检查试虫存活情况, 以触碰试虫后不能爬过一个虫体长度为死亡判定标准, 对照组死亡率 ≤ 10% 为有效实验。

1.3 西花蓟马保护酶和解毒酶活性测定

1.3.1 阿托品胁迫处理 酶活测定前, 用低、中、高浓度阿托品溶液对西花蓟马进行胁迫, 以 10% 蔗糖溶液为阴性对照。使用羽化第 5 天生长状态良好的西花蓟马成虫, 将西花蓟马 2 000 头成虫转移至 40 mL 塑料杯 (44 mm × 22 mm × 25 mm) 中, 用一层封口膜封住杯口。饥饿 5 h 后在每个塑料杯第一层封口膜上加入 1 mL 配置好的低、中、高 3 个浓度的阿托品饲喂溶液, 再用一层封口膜覆盖药液, 然后将塑料杯置于西花蓟马饲养的气候室中。每个浓度处理 4 杯, 即 4 个重复, 处理过程中每 24 h 更换一次饲喂液。

1.3.2 西花蓟马取样和酶液制备 处理 0、12、24 和 48 h 后, 分别从不同处理蓟马种群中, 随机吸取 50 头活的西花蓟马雌成虫进行酶活性测定。将 50 头生长状态良好的西花蓟马放入至已加入 400 μL 预冷磷酸缓冲液 (0.05 mol/L, pH = 7.0) 的 1.5 mL 离心管 (Eppendorf, Safe-Lock 微量离心管) 中, 用组织研磨仪 (TissuePrep TP-24, 杰灵仪器制造有限公司) 研磨充分匀浆, 将匀浆置于高速冷冻离心机 (TGL-16.5MS, 上海卢湘仪离心机仪器有限公司) 8 000 r/min 低温 4 °C 离心 5 min, 然后取上清液转移至新 1.5 mL 离心管, 于 -20 °C 条件下保存, 用于后续蛋白浓度测定及酶活检测。

1.3.3 蛋白含量测定 蛋白含量测定采用 BCA 法蛋白含量测定试剂盒 (碧云天 Beyotime, P0010) 测定, 将蛋白标准品稀释为 0、0.025、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 mg/mL 浓度梯度, 各取 20 μL 加入 96 孔板, 每孔加 200 μL BCA 工作液, 37 °C 孵育 30 min, 每个样品设置 3 个技术重复。用多功能酶标仪 (SuPerMax1900, 上海闪谱生物) 于 562 nm 测定吸光度, 以蛋白浓

度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线, 获得回归方程与 R^2 值。根据样品吸光度和回归方程计算蛋白浓度, 用于后续酶活性标准化。

1.3.4 保护酶与解毒酶活性测定

1.3.4.1 保护酶活性测定 保护酶活性测定使用试剂盒如下: 过氧化氢酶 (CAT) 试剂盒 (SW1032)、过氧化物酶 (POD) 试剂盒 (SW1031) 均购于普因特生物工程有限公司, 超氧化物歧化酶 (SOD) 试剂盒 (BC5165) 活性检测试剂盒购于北京索莱宝有限公司。分别按照试剂盒说明书配制待测液, 并分别在 240 (CAT)、450 (SOD) 和 470 nm (POD) 波长下检测吸光度, 每个处理设置 3 次技术重复, 最后根据说明书计算单位蛋白含量的酶活性。

1.3.4.2 解毒酶活性测定 解毒酶活性测定使用试剂盒如下: 谷胱甘肽硫转移酶 (GST) 试剂盒 (SW1301)、羧酸酯酶 (CarE) 试剂盒 (SW1336) 均购于普因特生物工程有限公司, 昆虫细胞色素 P450 (CYP450) 酶联免疫分析试剂盒 (MM-3442001) 购于江苏酶免实业有限公司。分别按照试剂盒说明书配制待测液, 并分别在 340 (GST)、450 (CarE) 和 450 nm

(CYP450) 波长下检测吸光度, 每个处理设置 3 次技术重复, 最后根据说明书计算单位蛋白含量的酶活性。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理, 使用 SPSS 26.0 进行统计分析, 采用 Probit 几率值分析法计算致死浓度及其 95% 置信区间。比较各处理间酶活性的差异采用单因素方差分析法, 采用独立样本 t 检验法比较阿托品处理组与对照组酶活性的差异, 差异显著水平设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 阿托品对西花蓟马毒力测定

根据阿托品对西花蓟马雌成虫毒力测定, 记录 48 h 各个浓度对应的死亡率, 经过回归分析得到毒力回归方程 $Y=1.86X+2.65$ ($R^2=0.985$)。计算获得低致死浓度 (25% 致死浓度 LC_{25}) 为 13.15 mg/mL、中致死浓度 (50% 致死浓度 LC_{50}) 为 27.64 mg/mL 和高致死浓度 (75% 致死浓度 LC_{75}) 为 58.10 mg/mL (表 1)。

表 1 阿托品毒力测定结果

Table 1 Toxicity assay results of atropine

生物碱 Alkaloid	毒力回归方程 Virulence regression equation	相关系数 Correlation coefficient	卡方值 Chi-square value	LC ₂₅ 及 95%	LC ₅₀ 及 95%	LC ₇₅ 及 95%
				置信区间 (mg/L) LC ₂₅ and 95% confidence interval (mg/L)	置信区间 (mg/L) LC ₅₀ and 95% confidence interval (mg/L)	置信区间 (mg/L) LC ₇₅ and 95% confidence interval (mg/L)
阿托品 Atropine	$Y=1.86X+2.65$	0.985	19.213	13.153 (5.743-18.475)	27.644 (19.370-34.075)	58.103 (37.973-156.569)

LC₂₅、LC₅₀、LC₇₅ 处理组分别为低致死浓度 (25% 致死浓度)、中致死浓度 (50% 致死浓度) 和高致死浓度 (75% 致死浓度)。

The LC₂₅, LC₅₀ and LC₇₅ treatment groups were low lethal concentration (25% lethal concentration), medium lethal concentration (50% lethal concentration) and high lethal concentration (75% lethal concentration), respectively.

2.2 阿托品对西花蓟马保护酶活性的影响

2.2.1 阿托品对西花蓟马 CAT 酶活性的影响

阿托品胁迫试虫 CAT 酶活性变化如表 2 所示。相同时间内不同浓度的阿托品处理, 在各取样时间点, 低、中、高 3 种浓度的阿托品处理组

西花蓟马 CAT 活性较对照组均显著升高 (12 h: $P < 0.001$)。处理 12 h 后, 高浓度组 CAT 活性显著高于中、低浓度组, 而中、低浓度两组间无显著差异 (24 h: $P < 0.001$)。处理 24 h 后, CAT 活性随阿托品浓度升高呈显著上升趋势

(48 h: $P < 0.001$)。处理 48 h 后, 高浓度组 CAT 活性仍显著高于中、低浓度组, 中浓度组虽略高于低浓度组, 但二者差异不显著 ($P < 0.001$)。相同浓度下不同时间的阿托品处理, 西花蓟马 CAT 活性在处理 12、24 和 48 h 均显著高于对照组, 且与胁迫时间呈正相关。低、中、高浓度处理 48 h 内, CAT 酶活性持续增强, 各浓度 48 h 活性均高于 12 和 24 h (LC_{25} : $P < 0.001$; LC_{50} : $P < 0.001$; LC_{75} : $P < 0.001$), 说明 CAT 对西花蓟马持续起到保护作用。

2.2.2 阿托品对西花蓟马 SOD 酶活性的影响

阿托品胁迫试虫 SOD 酶活性变化如表 3 所示。相同时间不同浓度的阿托品处理, 各取样时间点, 低、中、高 3 种浓度阿托品处理组西花蓟马 SOD 活性较对照组均显著升高 ($P < 0.001$),

且与胁迫浓度的升高呈正相关。高浓度组 SOD 活性均显著高于中、低浓度组 (LC_{25} : $P < 0.001$; LC_{50} : $P < 0.001$), 中浓度组显著高于低浓度组 ($P < 0.001$)。与对照组相比, 12 h 时低、中、高 SOD 活性分别增加 32.96%、53.75% 和 87.73%; 24 h 时 SOD 活性分别增加 64.86%、87.71% 和 121.51%; 48 h 时 SOD 活性分别增加 192.85%、213.91% 和 294.41%。相同浓度下不同时间的阿托品处理, 西花蓟马 SOD 活性在处理 12、24 和 48 h 均显著高于对照, 且与胁迫时间呈正相关。各浓度下 48 h 活性均显著高于 24 h 活性, 24 h 活性显著高于 12 h 活性 (LC_{25} : $P < 0.001$; LC_{50} : $P < 0.001$; LC_{75} : $P < 0.001$), 表明 SOD 在阿托品胁迫过程中被持续激活, 且激活程度随胁迫时间延长而增强。

表 2 阿托品对西花蓟马体内 CAT 活性的影响 (nmol/min/mg)

Table 2 Effect of the atropine on CAT activity (nmol/min/mg) in *Frankliniella occidentalis*

阿托品含量 (mg/L) Percent of atropine content (mg/L)	处理时间 (h) Treatment time (h)			
	0	12	24	48
CK	64.81±1.10 aB	73.05±0.48 dA	75.14±1.19 dA	72.52±1.91 cA
LC_{25}	64.42±0.32 aC	77.58±1.70 bcB	79.75±0.74 cB	87.02±0.86 bA
LC_{50}	65.06±0.97 aC	80.07±2.08 abB	83.95±1.89 bAB	91.16±0.34 bA
LC_{75}	64.43±1.11 aD	83.12±2.11 aC	88.79±1.65 aB	99.14±0.96 aA

CK 为对照组, 即 10% 蔗糖溶液。 LC_{25} 、 LC_{50} 、 LC_{75} 处理组分别对应阿托品浓度为 13.15 (低浓度)、27.64 (中浓度) 和 58.10 mg/mL (高浓度)。表中数值为平均值 ± 标准误, 同一列数据后标有不同小写字母表示同一时间不同浓度下虫体内酶活性差异显著 ($P < 0.05$, one-way ANOVA); 同一行数据后标有不同大写字母表示同一浓度不同时间下虫体内酶活性差异显著 ($P < 0.05$, one-way ANOVA)。下表同。

The control group (CK) was treated with a 10% sucrose solution. LC_{25} , LC_{50} and LC_{75} treatment groups correspond to atropine concentrations of 13.15 mg/mL (low concentration), 27.64 mg/mL (medium concentration) and 58.10 mg/mL (high concentration), respectively. Data in the table are presented as mean±SE. Different lowercase letters within the same column indicate significant difference in enzyme activity among different concentrations at the same time ($P < 0.05$, one-way ANOVA), and different uppercase letters within the same row indicate significant difference in enzyme activity for the same concentration at different times ($P < 0.05$, one-way ANOVA). The same below.

2.2.3 阿托品对西花蓟马 POD 酶活性的影响

阿托品胁迫试虫 POD 酶活性变化如表 4 所示。相同时间不同浓度阿托品处理, 各取样时间点, 低、中、高 3 种浓度阿托品处理组西花蓟马 POD 活性较对照组均显著升高 ($P < 0.001$), 且与胁迫浓度的升高呈正相关。与对照组相比, 12 h 时低、中、高组 POD 活性分别增加 112.44%、221.34% 和 387.38%; 24 h 时低、中、高组 POD

活性分别增加 213.98%、443.32% 和 537.24%; 48 h 时低、中、高组 POD 活性分别增加 189.61%、470.34% 和 509.38%。相同浓度下不同时间的阿托品处理, 3 种浓度不同时间点 POD 活性两两间均存在显著差异 (LC_{25} : $P < 0.001$; LC_{50} : $P < 0.001$; LC_{75} : $P < 0.001$), 高浓度胁迫下 POD 持续升高, 表明 POD 在阿托品的胁迫过程中持续发挥保护作用。

表 3 阿托品对西花蓟马体内 SOD 活性的影响 (U/mg)

Table 3 Effect of the atropine on SOD activity (U/mg) in *Frankliniella occidentalis*

阿托品含量 (mg/L) Percent atropine content (mg/L)	处理时间 (h) Treatment time (h)			
	0	12	24	48
CK	17.42±0.21 aC	18.30±0.21 dB	19.24±0.19 dA	19.09±0.34 dAB
LC ₂₅	17.12±0.09 aD	24.33±0.40 cC	31.72±0.45 cB	36.81±0.73 cA
LC ₅₀	17.18±0.21 aD	28.13±0.41 bC	34.96±0.50 bB	40.83±0.76 bA
LC ₇₅	17.51±0.24 aD	34.35±1.03 aC	42.61±0.89 aB	56.19±1.98 aA

表 4 阿托品对西花蓟马体内 POD 活性的影响 (U/mg)

Table 4 Effect of the atropine on POD activity (U/mg) in *Frankliniella occidentalis*

阿托品含量 (mg/L) Percent atropine content (mg/L)	处理时间 (h) Treatment time (h)			
	0	12	24	48
CK	238.00±15.13 aA	243.62±14.42 dA	210.39±7.22 dA	255.65±15.73 dA
LC ₂₅	237.51±9.70 aD	517.54±11.08 cC	660.57±28.71 cB	740.39±4.02 cA
LC ₅₀	239.03±8.55 aD	782.84±32.35 bC	1 143.09±30.99 bB	1 458.09±16.57 bA
LC ₇₅	209.42±28.97 aD	1 187.35±53.66 aC	1 340.69±40.70 aB	1 557.91±14.17 aA

2.3 阿托品对西花蓟马解毒酶活性的影响

2.3.1 阿托品对西花蓟马 GST 酶活性的影响

阿托品胁迫试虫 GST 酶活性变化如表 5 所示。相同时间不同浓度的阿托品处理,各取样时间点,低、中、高 3 种浓度阿托品处理组西花蓟马 GST 活性较对照组均显著升高 ($P < 0.001$)。处理 12 h 后,高浓度组 GST 活性显著高于低、中浓度组,而中浓度组与低浓度组间无显著差异 (12 h: $P < 0.001$); 处理 24 和 48 h 后,中浓度组 GST 活性均显著高于低、高浓度组,而低浓度组与高浓度组间无显著差异 (24 h: $P < 0.001$; 48 h: $P < 0.001$)。相同浓度下不同时间的阿托品处理,西花蓟马 GST 活性在处理 12、

24 和 48 h 后均显著高于对照组 (24 h: $P < 0.001$; 48 h: $P < 0.001$),且整体呈先升后降趋势。低、中、高浓度处理下,GST 活性均在 12 h 迅速达到峰值,分别为 274.10、287.85 和 301.40 nmol/min/mg,24 和 48 h 虽有所下降,但仍显著高于对照 ($P < 0.001$),表明 GST 在阿托品胁迫初期快速响应,但后期活性受到抑制。

2.3.2 阿托品对西花蓟马 CarE 酶活性的影响

阿托品胁迫试虫 CarE 酶活性变化如表 6 所示。相同浓度下不同时间阿托品处理,低浓度阿托品处理下,CarE 活性在 12 和 24 h 显著高于对照 (LC₂₅: $P < 0.001$),48 h 时恢复至对照水平;随时间延长,CarE 活性在 12 h 达峰值,

表 5 阿托品对西花蓟马体内 GST 活性的影响 (nmol/min/mg)

Table 5 Effect of the atropine on GST activity (nmol/min/mg) in *Frankliniella occidentalis*

阿托品含量 (mg/L) Percent of atropine content (mg/L)	处理时间 (h) Treatment time (h)			
	0	12	24	48
CK	210.77±2.75 aA	205.08±3.18 cA	201.88±2.73 cA	200.33±4.05 cA
LC ₂₅	211.69±0.87 aD	274.10±1.36 bA	254.63±1.24 bB	239.92±1.86 bC
LC ₅₀	209.66±1.97 aC	287.85±5.23 bA	266.19±5.3 7aB	260.80±2.54 aB
LC ₇₅	208.90±2.16 aD	301.40±4.90 aA	257.28±2.03 bB	233.67±5.84 bC

表 6 阿托品对西花蓟马体内 CarE 活性的影响 (U/mg)
Table 6 Effect of the atropine on CarE activity (U/mg) in *Frankliniella occidentalis*

阿托品含量 (mg/L) Percent of atropine content (mg/L)	处理时间 (h) Treatment time (h)			
	0	12	24	48
CK	16.78±0.25 aA	17.27±0.20 bA	17.22±0.17 bA	17.50±0.31 aA
LC ₂₅	17.07±0.24 aC	21.76±0.48 aA	19.15±0.16 aB	17.37±0.23 aC
LC ₅₀	16.73±0.37 aB	17.76±0.41 bA	17.40±0.17b AB	15.69±0.23 bC
LC ₇₅	16.68±0.16 aA	16.59±0.11 cA	13.11±0.14 cB	10.64±0.39 cC

为 21.76 U/mg, 随后呈下降趋势, 表现出先促进后恢复的作用模式。中浓度阿托品处理下, CarE 活性在 12 h 为 17.76 U/mg, 显著高于对照 ($P < 0.001$), 24 和 48 h 持续下降, 48 h 时显著低于对照 ($P < 0.001$), 表现出先促进后抑制的作用模式。高浓度阿托品处理下, CarE 活性在 12、24 和 48 h 持续下降, 各时间点均显著低于对照组 ($P < 0.001$), 表现出持续抑制作用。

2.3.3 阿托品对西花蓟马 CYP450 酶活性的影响 阿托品胁迫试虫 CYP450 酶活性变化如表 7 所示。相同时间不同浓度阿托品处理后, 低、中、高 3 种浓度阿托品胁迫对西花蓟马 CYP450 活性产生显著诱导作用 ($P < 0.001$), 但诱导效应随着浓度升高而递减。处理 12 h, 低、中浓

度组 CYP450 活性显著高于对照, 高浓度组与对照无显著差异 (12 h: $P < 0.001$); 处理 24 和 48 h 后, 低、中、高浓度组 CYP450 活性均显著高于对照 (24 h: $P < 0.001$; 48 h: $P < 0.001$), 且增强效果均表现为低浓度 > 中浓度 > 高浓度。

相同浓度下不同时间的阿托品处理, 低浓度阿托品处理下, CYP450 活性在 12 和 24 h 持续显著升高, 由 12 h 的 24.82 U/L 升至 24 h 的 34.68 U/L, 24 h 达峰值后于 48 h 降至 27.01 U/L, 仍显著高于对照 ($P < 0.001$)。中、高浓度阿托品处理下, CYP450 活性变化趋势相似: 24 h 迅速升高至峰值, 48 h 又显著下降, 各时间点差异显著 (LC₅₀: $P < 0.001$; LC₇₅: $P < 0.001$), 表现出先激活后抑制的时间动态模式。

表 7 阿托品对西花蓟马体内 CYP450 活性的影响 (U/L)
Table 7 Effect of the atropine on CYP450 activity (U/L) in *Frankliniella occidentalis*

阿托品含量 (mg/L) Percent of atropine content (mg/L)	处理时间 (h) Treatment time (h)			
	0	12	24	48
CK	16.05±0.04 aA	15.43±0.35 cA	15.15±0.32 cA	15.37±0.28 dA
LC ₂₅	16.60±0.14 aD	24.82±0.48 aC	34.68±0.36 aA	27.01±0.47aB
LC ₅₀	16.53±0.15 aC	16.91±0.07 bC	33.24±1.87 aA	25.39±0.28 bB
LC ₇₅	16.29±0.27 aC	15.63±0.26 cC	27.01±0.47 bA	22.95±0.28 cB

3 讨论

本研究发现, 茄科植物曼陀罗次生代谢物质阿托品对西花蓟马具有显著致死作用, 同时能诱导西花蓟马体内 3 种保护酶过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和 3 种解毒酶谷胱甘肽硫转移酶 (GST)、羧酸酯酶 (CarE)、昆虫细胞色素 P450 (CYP450)

的活性。阿托品对多类害虫具有毒杀和行为干扰作用, 主要通过干扰昆虫的神经系统, 影响昆虫消化、运动和繁殖等生理活动, 最终导致死亡 (Gupta *et al.*, 2024)。

本研究中, 西花蓟马在不同浓度阿托品胁迫下, 3 种保护酶的活性均被显著诱导, 表明氧化应激是阿托品毒理作用的重要机制之一。CAT 活性在各浓度处理下均显著增强, 尤其在高浓度

48 h 时达到峰值,说明 CAT 在抗氧化防御中发挥持续保护作用;SOD 活性随浓度和时间增加呈正相关升高,48 h 高浓度组较对照提高近 3 倍;POD 活性亦同步显著上升,这与其他研究结果相一致。例如,西花蓟马取食被二斑叶螨危害的菜豆后,其 POD、CAT 和 SOD 活性在特定时间点显著升高 (Qiu *et al.*, 2024)。豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 在摄食含芥子油苷饲料后,3 种保护酶活性亦均上调,表明保护酶的诱导是昆虫应对外源胁迫的保守生理策略 (Farhan *et al.*, 2024)。值得注意的是,SOD 和 POD 活性在 48 h 时的诱导倍数远高于 CAT 活性,这表明在应对阿托品引发的长期氧化胁迫时,SOD 和 POD 扮演了更主要的角色。SOD 作为第一道防线,负责将超氧阴离子转化为 H_2O_2 和 O_2 ,而 CAT 和 POD 则进一步将 H_2O_2 分解为水分子,三者协同作用以缓解氧化损伤 (Yuan *et al.*, 2021)。此外,本研究中对照组 CAT 活性在 12 h 后上升并趋于稳定,而 POD 与 SOD 变化不显著,进一步说明 CAT 在西花蓟马早期抗氧化应答中扮演主导角色,这可能与其对 H_2O_2 的高亲和力及快速反应特性有关 (Li *et al.*, 2014)。

本研究同时明确了阿托品对西花蓟马对不同解毒酶活性的影响,西花蓟马在阿托品胁迫下,3 种解毒酶 GST、CarE 和 CYP450 活性均发生显著变化,但响应模式存在差异,表现出典型的“浓度依赖”与“时间依赖”双重调控特征。西花蓟马在不同浓度阿托品胁迫下的谷胱甘肽硫转移酶 (GST) 活性均显著增强,尤其在胁迫 12 h 内迅速上调,随后呈下降趋势,表现出典型的“早期激活-后期抑制”动态模式。昆虫谷胱甘肽硫转移酶通常在植物次生代谢物、杀虫剂或氧化胁迫作用下被诱导表达,从而参与抗氧化与解毒代谢。例如,Koirala 等 (2022) 指出,GST 能通过结合谷胱甘肽清除体内脂质过氧化物,减轻氧化损伤。进一步研究表明,GST 在多种昆虫中可在化学胁迫初期迅速上调,随后因能量代谢重新分配而降低 (Zhu *et al.*, 2024)。羧酸酯酶 (CarE) 对阿托品的响应则表现出复杂的浓度依赖性;低浓度处理下,CarE 活性显著增强,可

能是阿托品作为诱导信号激活了该酶的表达;至 48 h 时活性下降,说明在长期胁迫下解毒功能可能受到抑制。中浓度阿托品胁迫下,CarE 呈“先促后抑”的双相变化,而高浓度处理则导致酶活性持续下降,表明该酶系统在强胁迫下可能被直接抑制或因酶结构受损而失活。这一规律与 Zhang 等 (2023b) 研究结果一致,CarE 在低浓度化学胁迫下被诱导以执行解毒功能,而在高浓度条件下可能因酶活性饱和或结构损伤而受到抑制。类似地,飞蝗在不同浓度茶皂素处理下,羧酸酯酶 (CarE) 活性呈现先升后降的规律 (王铭铭等, 2023),说明昆虫在面对外源化学胁迫时,解毒酶系统存在浓度依赖与时间依赖的精细调控。细胞色素 P450 酶活性表现出明显的浓度和时间依赖性差异。在低浓度胁迫下,CYP450 酶活性于 24 h 内迅速升高,随后在 12-48 h 呈下降趋势,但仍显著高于对照组;而在中、高浓度胁迫下,12 h 内未出现明显反应,至 24 h 时酶活性迅速升高,随后在 24 和 48 h 又快速下降,响应模式与低浓度显著不同。这说明,低浓度胁迫下 CYP450 酶系被迅速激活以执行解毒功能,而在中、高浓度胁迫下,其解毒反应则表现出明显的延迟效应,表明解毒系统的启动存在一个阈值或需要更长的应激准备时间。类似的现象在其他昆虫中亦有报道,比如烟草天蛾 *Manduca sexta* 通过特异性诱导 CYP6B46 解毒尼古丁,以及抗性棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 通过持续高表达 CYP450 以代谢杀虫剂 (Hu *et al.*, 2025)。昆虫 CYP450 基因家族通常在植物次生代谢物和杀虫剂刺激下迅速被诱导 (Zhang *et al.*, 2023a)。例如烟草天蛾取食烟草叶片后,烟草尼古丁诱导中肠细胞特异性表达 CYP6B46 解毒酶将有毒物质转化并代谢为无毒产物从而成功解除尼古丁的毒性。棉铃虫抗药品系也表现出显著更高的 CYP450 酶活性,用于应对多种化学胁迫 (Kumar *et al.*, 2014)。综上所述,西花蓟马应对阿托品胁迫的解毒反应同样存在显著的浓度与时间双重依赖性。

西花蓟马在阿托品胁迫下的保护酶与解毒酶系统呈现显著的时间阶段性响应特征,二者在

不同胁迫时间内分工明确、协同调控,共同构建了动态的防御体系。在 12 h 胁迫阶段,西花蓟马首先启动保护酶系统,以应对阿托品引起的氧化应激。此时 SOD、POD 和 CAT 活性显著增强,通过清除体内过量活性氧自由基维持细胞稳态。西花蓟马的解毒反应是一个动态的、依赖于胁迫强度和时间的精密调控过程,3 种主要解毒酶在应对阿托品胁迫时分工明确、协同作用,在不同浓度与时间阶段呈现出差异化的响应模式。保护酶为解毒过程提供前期防御屏障,而解毒酶在后期承担主要的代谢与清除任务,二者在时间上前后衔接、功能互补,共同实现了西花蓟马对阿托品胁迫的高效适应与稳态维持 (Gholami *et al.*, 2025)。

本研究较为全面地分析了西花蓟马保护酶与解毒酶活性随阿托品浓度和胁迫时间的响应规律,结果显示,阿托品可影响西花蓟马体内保护酶和解毒酶活性变化,影响其正常生理代谢功能,可以作为西花蓟马潜在的生物农药。本实验只研究了阿托品对西花蓟马保护酶和解毒酶活性的影响,昆虫体内还存在许多其他酶系,如消化酶系、免疫酶、代谢酶体系等。各种酶功能错综复杂,其活性变化与酶的种类、次生物质的种类及含量、外界环境因素等密切相关。后续应进一步加大研究的深度和广度,在明确阿托品对西花蓟马保护酶和解毒酶作用的前提下,全面评估阿托品的农用价值,为西花蓟马的绿色防控提供新思路与新策略。

参考文献 (References)

- Biswas D, Chakraborty A, Mukherjee S, Ghosh B, 2023. Hairy root culture: A potent method for improved secondary metabolite production of Solanaceous plants. *Frontiers in Plant Science*, 14:1197555.
- Cen YJ, Chen YM, Xu YM, Meng X, Feng QL, Ji S, Zheng SC, 2026. Nrf2 drives deltamethrin resistance of *Spodoptera frugiperda* by directly upregulating multiple detoxification enzyme genes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 74(1): 366–377.
- Chowanski S, Rosinski G, 2017. Myotropic effects of cholinergic muscarinic agonists and antagonists in the beetle *Tenebrio molitor* L. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 18(13): 1088–1097.
- Demirozer O, Tyler-Julian K, Funderburk J, Leppla N, Reitz S, 2012. *Frankliniella occidentalis* (Pergande) integrated pest management programs for fruiting vegetables in Florida. *Pest Management Science*, 68(12): 1537–1545.
- Farhan M, Pan J, Hussain H, Zhao J, Yang H, Ahmad I, Zhang S, 2024. Aphid-resistant plant secondary metabolites: Types, insecticidal mechanisms, and prospects for utilization. *Plants*, 13(16): 2332.
- Gholami Z, Fatehi F, Mehraban FH, Haynes PA, Jahromi KT, Hosseiniaveh V, Mosallanejad H, Ingvarsson PK, Farrokhi N, 2025. Comparative proteomics of resistant and susceptible strains of *Frankliniella occidentalis* to abamectin. *Electrophoresis*, 46(1/2): 112–126.
- Gupta SK, Mandal A, Ghosh A, Kundu A, Saha S, Singh A, Dutta A, 2024. Evaluating the insecticidal potential of alkaloids for the management of *Thrips palmi*: In vivo and in silico perspectives. *Scientific Reports*, 14(1): 28045.
- Hu B, Zhang YT, Xing ZP, Chen XZ, Rao C, Liu KT, Tan AJ, Su JY, 2025. Two independent regulatory mechanisms synergistically contribute to P450-mediated insecticide resistance in a lepidopteran pest, *Spodoptera exigua*. *BMC Biology*, 23(1): 122.
- Hou XL, Zhi JR, Hu X, Ye M, 2018. Effects of capsaicin on detoxification enzyme activity in adult female *Frankliniella occidentalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 230–236. [侯晓琳, 郅军锐, 胡雄, 叶茂, 2018. 辣椒素对西花蓟马雌成虫体内解毒酶活性的影响. *应用昆虫学报*, 55(2): 230–236.]
- Koirala BKS, Mural T, Zhu F, 2022. Functional and structural diversity of insect glutathione S-transferases in xenobiotic adaptation. *International Journal of Biological Sciences*, 18(15): 5713–5723.
- Kumar P, Pandit SS, Steppuhn A, Baldwin IT, 2014. Natural history-driven, plant-mediated RNAi-based study reveals cyp6b46's role in a nicotine-mediated antipredator herbivore defense. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(4): 1245–1252.
- Li HB, Zheng YT, Sun DD, Wang JJ, Du YZ, 2014. Combined effects of temperature and avermectins on life history and stress response of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 108: 42–48.
- Qiu XY, Huang WQ, Zeng G, Yue WB, Zhang CY, Zhi JR, 2024. Enzymatic activity and development of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) in response to exogenous calcium treatments of kidney bean plants. *Journal of Economic Entomology*,

- 117(1): 311–322.
- Reitz SR, Gao Y, Kirk WDJ, Hoddle MS, Leiss KA, Funderburk JE, 2020. Invasion biology, ecology, and management of western flower thrips. *Annual Review of Entomology*, 65: 17–37.
- Wang MM, Zhang YJ, Cui GY, Ji R, Zhang YJ, He L, 2023. Effects of tea saponin on the detoxification and protective enzyme activity of *Locusta migratoria*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(5): 1412–1422. [王铭铭, 张勇娟, 崔国盈, 季荣, 张永军, 何岚, 2023. 茶皂素对飞蝗解毒酶与保护酶活性的影响. *应用昆虫学报*, 60(5): 1412–1422.]
- Wang XX, Wang Y, Wang KQ, Liu XL, 2025. Effects of sublethal concentrations of azadirachtin and celangulin on the activities of detoxification enzymes in *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Acta Entomologica Sinica*, 68(9): 1261–1269. [王晓曦, 王宇, 王克勤, 刘兴龙, 2025. 亚致死浓度下印楝素和苦皮藤素对亚洲玉米螟解毒酶活性的影响. *昆虫学报*, 68(9): 1261–1269.]
- Winkiel MJ, Chowanski S, Walkowiak-Nowicka K, Lubawy J, Slocinska M, 2024. Modulation of the antioxidant system by glycoalkaloids in the beetle *Tenebrio molitor* L. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology & Pharmacology*, 286:110018.
- Wu QJ, Zhang YJ, Xu BY, Zhang WJ, 2011. The defending enzymes in abamectin resistant *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 291–295. [吴青君, 张友军, 徐宝云, 张文吉, 2011. 保护酶系在小菜蛾对阿维菌素抗性中的作用. *应用昆虫学报*, 48(2): 291–295.]
- Yu HY, Zheng TT, Li H, Chen JH, Niu HS, Tang X, Wang ZC, Zhang XY, 2025. Research progress on structural modification and action mechanism of plant-derived insecticidal alkaloids. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 27(5): 781–798. [于洪玉, 郑婷婷, 李红, 陈佳慧, 牛和山, 唐旋, 王兆成, 张秀云, 2025. 植物源杀虫生物碱的结构改造及作用机制研究进展. *农药学报*, 27(5): 781–798.]
- Yuan JW, Zheng Y, Chang YW, Bai J, Qin J, Du YZ, 2021. Differential regulation of antioxidant enzymes in *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) exposed to thermal stress. *PeerJ*, 9: e12089.
- Zhang AL, Nie JJ, Zhang S, 2025. Effects of chlorogenic acid on growth, detoxification enzymes and protective enzymes of *Protaetia brevitarsis*. *Forestry and Ecological Sciences*, 40(1): 33–40. [张爱莲, 聂佳佳, 张爽, 2025. 绿原酸对白星花金龟生长发育、解毒酶和保护酶活性的影响. *林业与生态科学*, 40(1): 33–40.]
- Zhang CN, Zhou TL, Li Y, Dai W, Du SK, 2023a. Activation of the CncC pathway is involved in the regulation of P450 genes responsible for clothianidin resistance in *Bradysia odoriphaga*. *Pest Management Science*, 79(9): 3071–3079.
- Zhang FM, Chen YJ, Zhao XC, Guo SB, Hong F, Zhi YN, Zhang L, Zhou Z, Zhang YH, Zhou XG, Li XR, 2023b. Antennal transcriptomic analysis of carboxylesterases and glutathione S-transferases associated with odorant degradation in the tea gray geometrid, *Ectropis griseescens* (Lepidoptera, Geometridae). *Frontiers in Physiology*, 14: 1183610.
- Zhang YJ, Wu QJ, Xu BY, Zhu GR, 2003. A dangerous alien invasive organism, *Frankliniella occidentalis*, is harmful in Beijing. *Plant Protection*, 29(4): 58–59. [张友军, 吴青君, 徐宝云, 朱国仁, 2003. 危险性外来入侵生物: 西花蓟马在北京发生危害. *植物保护*, 29(4): 58–59.]
- Zhang ZJ, Zhang JH, Li XW, Zhang JM, Wang YS, Lu YB, 2023c. The plant virus tomato spotted wilt orthotospovirus benefits its vector *Frankliniella occidentalis* by decreasing plant toxic alkaloids in host plant *Datura stramonium*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19): 14493.
- Zhi JR, Tian T, Wen J, Liu Y, 2016. Effects of kidney bean damaged by *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) or *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) on the activities of protective and detoxification enzymes in the other subsequent herbivore of both. *Acta Entomologica Sinica*, 59(7): 707–715. [鄧军锐, 田甜, 温娟, 刘勇, 2016. 西花蓟马或二斑叶螨为害的菜豆对两者间后取食者体内保护酶和解毒酶活性的影响. *昆虫学报*, 59(7): 707–715.]
- Zhu T, Wei B, Wang Y, Shang SQ, 2024. Glutathione S-transferase genes involved in response to short-term heat stress in *Tetranychus urticae* (Koch). *Antioxidants*, 13(4): 442.
- Zhu XZ, Luo JY, Zhang S, Lü LM, Wang CY, Cui JJ, 2018. Effects of plant secondary metabolites gossypol and rutin on the activities of protective enzymes and detoxification enzymes in green mirid bug *Apolygus lucorum*. *Journal of Plant Protection*, 45(5): 1044–1053. [朱香镇, 雒珺瑜, 张帅, 吕丽敏, 王春义, 崔金杰, 2018. 植物源次生物质棉酚和芸香苷对绿盲蝽保护酶与解毒酶活性的影响. *植物保护学报*, 45(5): 1044–1053.]