多杀菌素类农药对花蓟马的毒力、发育繁殖及生理酶活性的影响*

张红利[1, 2**] 肖 菲[1] 王阳阳[1] 刘建霞[1, 2]
王旭枚[1] 黄鹏芸[1] 韩志平[1, 2***]

（1. 山西大同大学农学与生命科学学院，大同 037009；2. 山西大同大学特色有机旱作大同市重点实验室，大同 037009）

摘 要 **【目的】** 花蓟马 *Frankliniella intonsa* 是为害黄花菜的重要害虫，本研究旨在探究多杀菌素类农药对花蓟马的毒力、发育繁殖、保护酶和解毒酶活性的影响。**【方法】** 分别采用饲喂法和浸虫法测定乙基多杀菌素（Spinetoram）和多杀菌素（Spinosad）对花蓟马成虫、若虫和蛹的毒力，以及亚致死浓度（LC_{25}）处理对花蓟马发育历期和繁殖力的影响，并探究 LC_{25} 胁迫 6、12、18 和 24 h 花蓟马体内保护酶超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（Catalase，CAT）、过氧化物酶（Peroxidase，POD）和解毒酶谷胱甘肽 *S*-转移酶（Glutathione *S*-transferase，GSTs）、羧酸酯酶（Caboxylesterase，CarE）活性的变化趋势。**【结果】** 花蓟马不同发育阶段（雌成虫、2 龄若虫、蛹）对乙基多杀菌素均表现出显著敏感性，其半致死浓度 LC_{50} 依次为 0.004 4、0.004 7 和 0.023 4 mg/L。两种多杀菌素类农药 LC_{25} 胁迫下，花蓟马的产卵前期较对照均显著延长（P<0.05），同时，1 龄若虫期均极显著延长（P<0.001）。多杀菌素 LC_{25} 胁迫下，花蓟马体内保护酶活性变化较为显著，除 6 h 的 POD 活性和 18 h 的 SOD 活性，胁迫 24 h 内，3 种保护酶 SOD、CAT 和 POD 活性在 6、12、18 和 24 h 均极显著升高（P<0.01）；解毒酶 GSTs 活性在 24 h 内显著升高（P<0.05）。乙基多杀菌素 LC_{25} 胁迫下，花蓟马 CAT 活性在 6、12、18 和 24 h 相比对照均极显著升高（P<0.01），SOD 和 POD 活性变化相对平稳，胁迫 24 h 后二者同对照无显著差异（P>0.05），解毒酶 GSTs 和 CarE 在 24 h 内均显著高于对照（P<0.05）。**【结论】** 乙基多杀菌素对花蓟马不同虫态的毒力效果显著；LC_{25} 多杀菌素类农药胁迫主要影响花蓟马的产卵前期和 1 龄若虫期；多杀菌素能够诱导花蓟马 SOD、CAT 和 POD 协同响应保护虫体，激活 GSTs 代谢解毒；乙基多杀菌素胁迫对花蓟马保护酶影响不明显，主要诱导 CAT 活性升高，解毒酶 GSTs 和 CarE 活性均被激活。

关键词 花蓟马；多杀菌素；乙基多杀菌素；毒力；繁殖发育；保护酶；解毒酶

Effects of spinosyn-based pesticides on the development, reproduction, and physiological enzyme activity, of *Frankliniella intonsa*

ZHANG Hong-Li[1, 2**] XIAO Fei[1] WANG Yang-Yang[1] LIU Jian-Xia[1, 2]
WANG Xu-Mei[1] HUANG Peng-Yun[1] HAN Zhi-Ping[1, 2***]

(1. School of Agriculture and Life Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;
2. Datong Key Laboratory of Organic Dry Farming for Special Crops, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the toxicity of the pesticides spinetoram and spinosad to *Frankliniella intonsa*, an important pest of daylilies, and on the activity of protective and detoxifying enzymes in this species. **[Methods]** The feeding and

*资助项目 Supported projects：山西省基础研究青年项目（202303021212247）；大同市应用基础研究项目（2024077）；山西省高等学校科技创新项目（2021L384）；大同市农业农村局院校合作科研项目（DT-YXHZ-202105）

**第一作者 First author，E-mail：bonus0301@163.com

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

收稿日期 Received：2025-08-02；接受日期 Accepted：2025-09-27

immersion methods were used to determine the toxicity of spinetoram and spinosad to adults, nymphs, and pupae of *F. intonsa*. The effects of a sublethal concentration (LC_{25}) of spinetoram and spinosad on the developmental duration and fecundity of *F. intonsa* were measured using the feeding method. In addition, changes in the activity of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), glutathione *S*-transferases (GSTs) and carboxylesterase (CarE), were measured 6, 12, 18, and 24 hours, after exposure to LC_{25} doses of spinetoram and spinosad. **[Results]** Different developmental stages (female adults, 2nd instar nymphs and pupae) of *F. intonsa* showed significant susceptibility to spinetoram, with corresponding LC_{50} values of 0.004 4 mg/L, 0.004 7 mg/L, and 0.023 4 mg/L, respectively. Exposure to LC_{25} levels of both spinetoram and spinosad, significantly prolonged the pre-oviposition period ($P < 0.05$) and the duration of the 1st-instar nymph stage ($P < 0.001$) relative to the control. Protective enzyme activity changed markedly after exposure to an LC_{25} doses of spinosad. With the exception of POD at 6 h and SOD at 18 h, activity of SOD, CAT, and POD increased significantly at 6, 12, 18, and 24 h post-exposure ($P < 0.01$), relative to the control. GSTs activity also increased significantly over 24 h ($P < 0.05$). CAT activity significantly increased relative to the control at 6, 12, 18, and 24 h after exposure to an LC_{25} dose of spinetoram ($P<0.01$), whereas SOD and POD activity was not significantly different to that of the control after 24 h ($P>0.05$). GSTs and CarE activity significantly increased compared to the control over 24 h ($P<0.05$). **[Conclusion]** An LC_{25} dose of spinetoram is toxic to different developmental stages of *F. intonsa*. The duration of the pre-oviposition period and 1st-instar nymph stage *were* significantly prolonged by exposure to LC_{25} doses of spinetoram and spinosad. Spinosad induces a synergistic increase in SOD, CAT, and POD activity, and activates GSTs for metabolic detoxification. Spinetoram had no significant effect on protective enzymes but induced an increase in CAT activity. Both detoxifying GSTs and CarE were activated by exposure to this pesticide.

Key words *Frankliniella intonsa*; spinosad; spinetoram; toxicity; reproduction and development; protective enzyme; detoxifying enzyme

大同黄花菜是首个中国地理标志保护产品。近年来，伴随种植面积扩大和种苗调运，病虫害发生严重，其中，花蓟马 *Frankliniella intonsa* 是为害黄花菜整个生长发育期的重要优势害虫（张东霞等, 2021）。花蓟马在大同黄花菜田的发生高峰期集中在 5-8 月，以成虫和若虫锉吸黄花菜幼嫩组织汁液，主要为害黄花菜的叶片、心叶及嫩薹，严重影响黄花菜植株生长和花蕾品质。经前期调研，黄花菜蓟马防控中，仍主要以常见低毒化学农药噻虫嗪、吡虫啉和啶虫脒等进行防治，长期使用化学农药将导致环境、生态、土壤、抗性等系列问题。目前市场上常见的多杀菌素类农药为多杀菌素和乙基多杀菌素（Thomas *et al.*, 2008；华乃震, 2015），兼具高效性与安全性，对靶标害虫杀灭高效，且对非靶标生物无明显毒性（Liu *et al.*, 2016）。已有研究表明，多杀菌素类农药是目前防治蓟马效果较好的低毒杀虫剂（沈登荣等, 2017；张晓明等, 2018；樊宗芳等, 2021；张暄翊等, 2023）。

农药施用随时间推移及个体接触药量的差异，对部分害虫的生态行为、生殖力、生长发育及抗药性等会产生亚致死效应（Desneux *et al.*, 2004；Cutler *et al.*, 2006）。已有研究表明农药的亚致死浓度 LC_{25} 对害虫的生殖和发育可能会产生影响。如刘慧娟等（2007）研究发现阿维菌素 LC_{25} 胁迫对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 产卵有抑制作用。龚佑辉（2009）研究发现多杀菌素 LC_{25} 能诱导西花蓟马生殖力上升，提升产卵量。杨广明等（2016）研究发现乙基多杀菌素 LC_{25} 可促进西花蓟马种群增长，而印楝素则表现出抑制作用。李定银等（2021）研究表明乙基多杀菌素 LC_{25} 连续汰选 6 代后，会抑制西花蓟马的发育与繁殖。此外，低浓度杀虫剂不仅会影响昆虫的发育繁殖，当昆虫接触刺激后，其体内酶系可被外源或内源化合物诱导，通过调节保护酶和解毒酶的活性，进而增强耐药性与抗逆性（Enayati *et al.*, 2005；Claudianos *et al.*, 2006；Boina *et al.*, 2009）。如王爱玉等（2021）研究发现乙基多杀菌素 LC_{25} 胁迫能显著升高棉田烟蓟马 *Thrips tabaci* 体内的细胞色素 P450 单加氧酶（Cytochrome P450，CYP450）、羧酸酯酶 CarE 及谷胱甘肽 *S*-转移酶 GSTs 活性，因此推测这 3 种酶可能是棉田烟蓟马解毒乙基多杀菌素的代谢机理。樊宗芳等（2021）研究发现，乙基多杀

菌素胁迫下，西花蓟马和花蓟马的保护酶[超氧化物歧化酶 SOD、过氧化物酶 POD、过氧化氢酶 CAT）及解毒酶（CarE、GSTs、乙酰胆碱酯酶（Acetyl-Cholinesterase，AChE）]活性同对照形成显著差异，且不同蓟马间各类酶的活性不同。总之，昆虫主要通过调整保护酶与解毒酶等酶系的协同作用应对药剂胁迫，进而降低药剂的毒杀效应。其中，POD、SOD、CAT 3 种保护酶通过协同清除自由基累积产生的毒害，增强昆虫的抗逆性与耐药性；而解毒酶（AChE、CarE、GSTs）作为昆虫的主要防御酶，在分解外源毒物过程中发挥关键作用（樊宗芳等, 2021；王自杰等, 2024）。

目前，多杀菌素类农药对花蓟马的不同发育阶段的毒力差异、亚致死效应和生理酶活性调控机制的系统研究尚未见报道。本研究以乙基多杀菌素（Spinetoram）和多杀菌素（Spinosad）为试验农药，通过室内毒力试验、亚致死浓度（LC_{25}）胁迫下的发育繁殖参数监测及生理酶活性动态分析，系统评估其对花蓟马不同发育阶段的致死效应、种群动态调控及保护酶/解毒酶系统的影响。研究旨在解析多杀菌素类农药对目标害虫的生态-生理影响规律，为农药精准施用提供理论依据，同时为蓟马类害虫的综合治理及抗药性管理策略制定奠定研究基础。

1　材料与方法

1.1　供试材料

1.1.1　供试昆虫　供试花蓟马 2023 年采自山西省大同市云洲区三十里铺黄花菜植株上，采用新鲜市售豆角（豆王）饲养建立种群。饲养条件：人工气候箱（上海博迅 BIC-400），温度（25±1）℃，相对湿度 65%±5%，光周期 16 L∶8 D，连续饲养 50 代以上，饲养过程不接触任何农药。

1.1.2　供试药剂和试剂盒　60 g/L 艾绿士悬浮剂（有效成分：乙基多杀菌素），购自北京中保绿农科技集团公司；10%多杀霉素悬浮剂，购自德强生物股份有限公司。SOD、CAT 和 POD 活性测定试剂盒购自南京建成科技有限公司，GSTs 和 CarE 活性测定试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司。

1.2　试验方法

1.2.1　多杀菌素类农药对花蓟马不同发育龄期虫态的室内毒力测定　参照 NY/T1154.16-2013 和 NY/T1154.6-2006《农药室内生物测定试验准则》，分别采用饲喂法和浸虫法进行毒力测定。用去离子水分别将 60 g/L 艾绿士悬浮剂和 10%多杀霉素悬浮剂先配成 100 mg/L 母液，再分别等比稀释成 5 个浓度，以清水为对照。采用豆角浸渍饲喂法进行成虫、若虫毒力测定（李定银等, 2021）：豆角段经不同浓度药液浸渍 30 s 后晾干，转移至塑料培养皿中，分别接入 20 头花蓟马雌成虫或 2 龄若虫，保鲜膜封口针扎 90 微孔，置于人工气候箱。24 h 后，以毛笔轻触虫体无反应视为死亡，统计试虫死亡数量。采用浸虫法测定蛹的毒力（樊宗芳等, 2021）：采用不同浓度药液浸渍蛹 10 s，吸干多余药液，转移至正常条件继续饲养，每皿置 20 头蛹，3-4 d 后观察记录羽化数量。每个浓度设 3 个重复。

1.2.2　亚致死浓度多杀菌素类农药对花蓟马繁殖力和生长发育的影响　繁殖力：选取刚羽化的花蓟马雌成虫 20 头，分别采用乙基多杀菌素和多杀菌素 LC_{25} 处理 24 h，将处理后存活的成虫转移至正常条件饲养 24 h 后移除，清水处理豆角饲养的同代花蓟马作对照，重复 3 次。每日进行 2 次观察（早 8:00，晚 20:00），记录若虫数目后将其移除（李定银等, 2021），由于花蓟马将卵产于豇豆组织内部，肉眼难以观察，故本试验单雌产卵量（24 h）以孵化的若虫数进行计数。

生长发育：选取刚羽化的花蓟马雌成虫 20 头，正常饲养，待其产卵孵化发育至若虫。用多杀菌素和乙基多杀菌素的亚致死剂量 LC_{25} 处理同批次若虫，直至蛹期，移至新培养皿。待其羽化后将成虫移至新培养皿，正常条件下饲养。清水处理豆角饲养的同代花蓟马作对照，重复 3 次，每个重复 20 头。每天观察 2 次（早 8:00，晚 20:00），记录各虫态的发育期（杨广明, 2016）。

1.2.3　亚致死浓度多杀菌素类农药胁迫对花蓟马生理酶活性的动态影响　酶源制备：LC_{25} 浓度

乙基多杀菌素和多杀菌素分别胁迫花蓟马成虫6、12、18 和 24 h，以清水处理的豆角饲养的花蓟马作为对照组。选取处理后存活的花蓟马成虫20 头，分别加入 1 200 μL 0.86%生理盐水（保护酶）和 pH 7.6、0.1 mol/L 磷酸缓冲液（解毒酶），经冰浴研磨后，于 4 ℃条件下以 3 000 r/min 离心 10 min（保护酶液）和 10 000 r/min 离心 15 min（解毒酶液），取上清液作为待测酶液（樊宗芳, 2022; 樊宗芳等, 2022）。每个时间段每种酶活性的测定用 20 头存活花蓟马。

酶活性测定：3 种保护酶 SOD、CAT、POD 和 2 种解毒酶 CarE、GSTs 活性测定均严格按照试剂盒说明书操作，每个处理设置 3 个重复。

蛋白质含量测定：采用考马斯亮蓝法，以牛血清白蛋白为标准品制作蛋白标准曲线。取 300 μL 待测酶液样品，加入 3.0 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色液，振荡混匀后于 25 ℃静置 15 min，在 595 nm 波长下测定吸光度值，并根据标准曲线计算样品中的蛋白质浓度。

1.3 数据分析

实验数据使用 Microsoft Excel 2019 进行整理，采用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析，并借助其 Probit 模块拟合毒力回归方程，以计算确定 2 种多杀菌素类农药的半致死浓度（LC_{50}）和亚致死浓度 LC_{25}。不同处理间花蓟马繁殖与发育指标的差异显著性通过 Student *t* 检验进行分析，同一时间不同处理组的酶活性差异显著性采用 GraphPad Prism 8 中的双因素方差分析检验，同一处理不同时间花蓟马生理酶活性的差异显著性采用 Tukey 检验进行分析。

2 结果与分析

2.1 多杀菌素类农药对花蓟马不同龄期虫态的毒力

两种多杀菌素类农药对花蓟马各龄期的毒力测定结果见表 1。本实验选择处理后 24 h 测定对花蓟马雌成虫、2 龄若虫的毒力结果，处理后 96 h 测定对花蓟马蛹的毒力结果。乙基多杀菌素对花蓟马雌成虫、2 龄若虫和蛹的 LC_{50} 依次为 0.004 4、0.004 7 和 0.023 4 mg/L。多杀菌素对上述 3 种虫态的 LC_{50} 值分别为 0.303 0、0.503 0 和 0.125 0 mg/L。由回归方程可知，花蓟马雌成虫、2 龄若虫的死亡数以及蛹的死亡率随着 2 种农药浓度增加而增加，呈正相关关系。

表 1 两种多杀菌素类农药对花蓟马的毒力测定

Table 1 Toxicity of two spinosyn-based pesticides to *Frankliniella intonsa*

杀虫剂 Pesticides	虫态 Developmental stage	毒力回归方程 Toxicity regression equation	致死中浓度（mg·L^{-1}） LC_{50} (mg·L^{-1})	95%置信区间（mg·L^{-1}） 95% Confidence interval (mg·L^{-1})	亚致死浓度（mg·L^{-1}） LC_{25} (mg·L^{-1})	卡方 χ^2 Chi-square value	相关系数 *R* Related coefficient
乙基多杀菌素 Spinetoram	雌成虫 Female adult	$y = 0.94x - 0.58$	0.004 4	0.003 0-0.006 9	0.000 8	4.650	0.949 2
	2 龄若虫 2nd instar nymph	$y = 1.71x - 1.15$	0.004 7	0.003 2-0.009 9	0.002 0	0.608	0.979 3
	蛹 Pupa	$y = 1.30x - 0.50$	0.023 4	0.014 0-0.045 7	0.007 2	0.629	0.978 8
多杀菌素 Spinosad	雌成虫 Female adult	$y = 2.40x+1.26$	0.303 0	0.208 0-0.400 0	0.159 0	1.110	0.978 3
	2 龄若虫 2nd instar nymph	$y = 1.38x+0.40$	0.503 0	0.142 0-0.851 0	0.153 0	0.762	0.979 3
	蛹 Pupa	$y = 1.10x+1.01$	0.125 0	0.021 0-0.236 0	0.031 0	0.452	0.972 6

2.2 多杀菌素类农药对花蓟马繁殖力和生长发育的影响

根据表 2 结果，乙基多杀菌素和多杀菌素的 LC_{25} 处理均对花蓟马的繁殖力有一定影响，同清水处理对照相比，雌性成虫产卵前期显著延长 0.75（P=0.014）和 1.00 d（P=0.025），但单雌产卵量（24 h）并未受到显著影响（P>0.05）。与

对照组相比，乙基多杀菌素和多杀菌素的 LC_{25} 处理对花蓟马的卵期、预蛹期及蛹期均未产生显著影响（P>0.05）；若虫的不同龄期表现出不同的效应，1 龄若虫期在 2 种农药胁迫下均极显著延长（P<0.001），2 龄若虫期仅在乙基多杀菌素胁迫下极显著缩短（P<0.001）。

表 2　两种多杀菌素类农药亚致死浓度对花蓟马发育和繁殖的影响

Table 2　Effect of two spinosyn-based pesticides at LC_{25} concentration on the fecundity and development of *Frankliniella intonsa*

处理 Treatment	雌虫繁殖力 Fecundity of female		发育历期（d） Developmental duration (d)				
	产卵前期（d） Pre-oviposition period (d)	24 h 单雌产卵量（粒） Number of eggs laid per female in 24 h (grains)	卵期 Egg stage	1 龄若虫期 1st instar nymphal stage	2 龄若虫期 2nd instar nymphal stage	预蛹期 Prepupal stage	蛹期 Pupal stage
对照（清水） Control (Distilled water)	1.75±0.25	6.80±1.40	5.81±0.27	0.97±0.07	4.93±0.20	1.02±0.14	2.28±0.30
乙基多杀菌素 Spinetoram	2.50±0.00 *	5.20±1.70	5.64±0.23	1.79±0.03 **	3.46±0.18 **	1.10±0.01	2.38±0.16
多杀菌素 Spinosad	2.75±0.25 *	4.70±0.30	5.50±0.16	1.96±0.12 **	5.10±0.13	1.17±0.05	2.66±0.16

表中数值为平均值±标准误，同一列数据后星号表示处理组同对照组相比差异显著（*P < 0.05，**P < 0.01，Student t 检验）。

Data in the table are presented as mean±SE, and followed by asterisk within the same column indicate significant difference between the treatment group and the control group (*P < 0.05, ** P < 0.01, Student t-test).

2.3　多杀菌素类农药对花蓟马保护酶活性的影响

乙基多杀菌素和多杀菌素亚致死剂量 LC_{25} 胁迫处理花蓟马成虫不同时间，其体内 SOD 活性变化差异显著（图 1）。乙基多杀菌素处理 12 和 18 h，花蓟马体内 SOD 活性均显著高于对照组，且 12 h 处理组的活性升高达到极极显著水平（P<0.000 1）。多杀菌素处理 6、12 和 24 h 时，SOD 活性均极极显著高于对照（P<0.000 1）；然而在处理 18 h 时，该酶活性显著下降，且极极显著低于对照组（P<0.000 1）。

从图 1 可以看出，对照组花蓟马的 SOD 活性随时间变化较为平稳，相比之下，乙基多杀菌素处理组则表现出先上升后下降的动态变化：12 h 时 SOD 活性达峰值，随时间延长活性逐渐降低，24 h 时 SOD 活性相比 18 h 显著降低（P<0.05）。经多杀菌素处理 6 h 后，花蓟马体内 SOD 活性升至峰值，随后随处理时间延长呈先下降后回升的变化趋势，18 h 时 SOD 活性降至最低，24 h 时，花蓟马体内 SOD 活性恢复并显著升高（P<0.05）。与乙基多杀菌素相比，多杀菌素处理下花蓟马 SOD 活性的波动幅度较大。

2 种多杀菌素类农药 LC_{25} 胁迫处理 6、12、18 和 24 h，花蓟马体内 CAT 活性均显著高于对照（P<0.01）（图 2）。乙基多杀菌素胁迫 18 和 24 h，CAT 活性同对照相比极极显著升高（P<0.000 1）。多杀菌素处理 12、18 和 24 h，花蓟马体内 CAT 活性均极极显著高于对照（P<0.000 1）。

如图 2 所示，对照组花蓟马体内 CAT 活性随时间的延长呈现缓慢升高逐渐平稳态势，整体相对稳定。乙基多杀菌素胁迫组花蓟马体内 CAT 活性呈先升后稳趋势，18 和 24 h 时活性达峰值；多杀菌素胁迫组 CAT 活性则先迅速升高后缓慢降低，12 h 时 CAT 活性显著高于 6 h（P<0.05），达到最高峰，后缓慢降低，24 h 时 CAT 活性显著低于 12 和 18 h（P<0.05）。24 h 范围内，多杀菌素处理对 CAT 活性的诱导效应强于乙基多杀

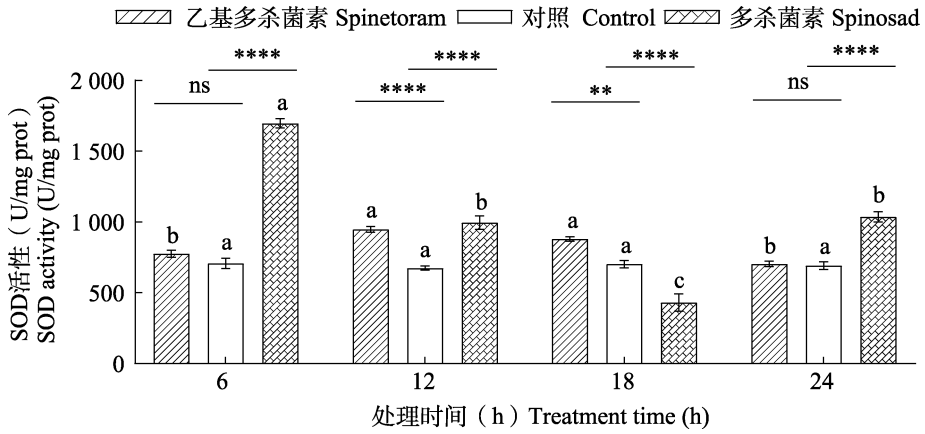


图 1　乙基多杀菌素和多杀菌素对花蓟马体内超氧化物歧化酶（SOD）活性的影响

Fig. 1　Effects of spinetoram and spinosad on the activity of superoxide dismutase (SOD) in *Frankliniella intonsa*

图中数值为平均值±标准误，对照 Control 代表清水。柱上 ns 表示差异不显著（*P*>0.05，双因素方差分析检验），星号代表同时间处理组同对照组相比差异显著（*：*P*<0.05，**：*P*<0.01，***：*P*<0.001，****：*P*<0.000 1，双因素方差分析检验），柱上不同小写字母表示同一处理不同时间之间差异显著（Tukey's 多重比较检验）。下图同。

Data in the figure are presented as means±SE. Control: Distilled water. ns above bars indicates no significance difference (*P* > 0.05, two-way ANOVA); Asterisks above bars indicate significance difference between treatment groups and the control group at the same time point (*: *P* < 0.05, **: *P* < 0.01, ***: *P* < 0.001, ****: *P* < 0.000 1, two-way ANOVA). Different lowercase letters above bars indicated significant difference among different time points within the same treatment (*P* < 0.05, Tukey's multiple range test). The same below.

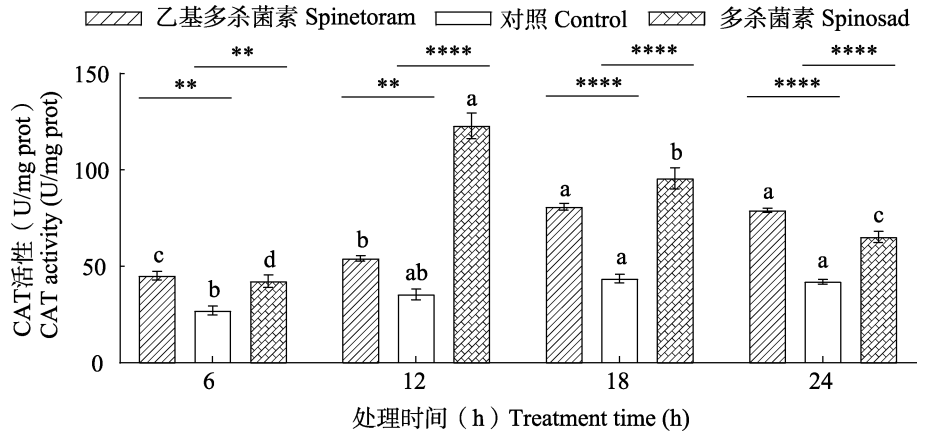


图 2　乙基多杀菌素和多杀菌素对花蓟马体内过氧化氢酶（CAT）活性的影响

Fig. 2　Effects of spinetoram and spinosad on the activity of catalase (CAT) in *Frankliniella intonsa*

菌素，但其活性随处理时间延长逐渐下降；乙基多杀菌素则引起 CAT 活性持续上升。

2 种多杀菌素类农药 LC_{25} 胁迫后，花蓟马成虫体内 POD 活性变化相比 SOD 和 CAT 活性变化波动幅度较小（图 3）。乙基多杀菌素处理 6 和 12 h，花蓟马体内 POD 活性均高度显著高于对照（*P*<0.01），胁迫 18 和 24 h，POD 活性回落近对照组（*P*>0.05）。多杀菌素处理 12、18 和 24 h，花蓟马体内 POD 活性均极极显著高于对照（*P*<0.000 1）。

如图 3 所示，对照组花蓟马体内 POD 活性随时间变化较为平稳。乙基多杀菌素处理组中，POD 活性表现为先升高后降低的趋势，在 12 h 达到峰值，而 18 和 24 h 时活性显著回落，明显低于 12 h 时的水平（*P*<0.05）；多杀菌素胁迫组 POD 活性则先缓慢升高后降低，18 h 时活性迅速升至最高峰，显著高于 6 和 12 h（*P*<0.05），24 h 时活性显著下降（*P*<0.05）。相较而言，

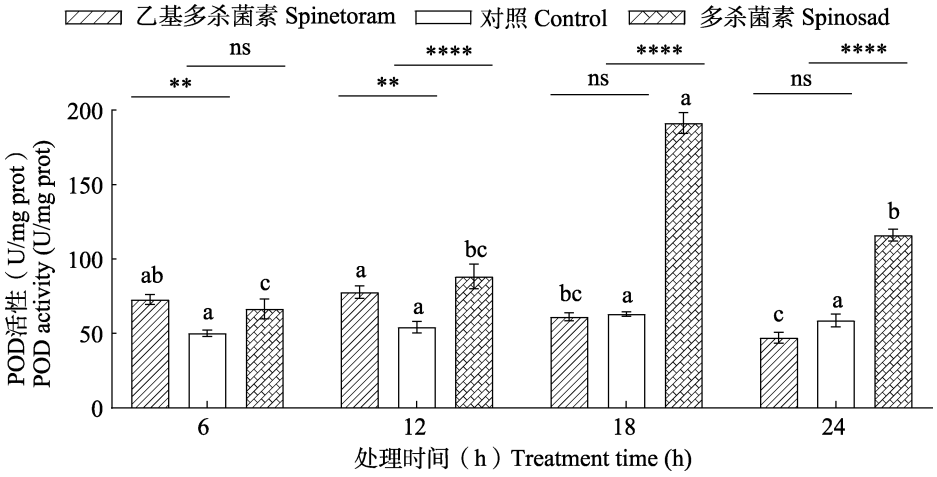


图 3　乙基多杀菌素和多杀菌素对花蓟马体内过氧化物酶（POD）活性的影响

Fig. 3　Effects of spinetoram and spinosad on the activity of peroxidase (POD) in *Frankliniella intonsa*

多杀菌素对花蓟马 POD 活性的诱导效应较强。

2.4　多杀菌素类农药对花蓟马解毒酶活性的影响

采用乙基多杀菌素和多杀菌素 LC_{25} 对花蓟马成虫进行不同时间的胁迫处理，其体内解毒酶 GSTs 活性变化见图 4，各处理组与对照组相比，GSTs 活性均存在显著差异（P<0.05）。乙基多杀菌素处理 6、18 及 24 h 时，花蓟马体内 GSTs 活性均较对照组极极显著升高（P<0.000 1），胁迫 12 h 时，GSTs 活性相比 6 h 呈现回落迹象，但是仍显著高于对照组（P<0.05）。经多杀菌素处理 12、18 和 24 h 后，花蓟马体内 GSTs 活性均较对照组极极显著升高（P<0.000 1）。

如图 4 所示，对照组中 GSTs 活性表现为初期缓慢上升，随后逐渐下降的变化趋势。乙基多杀菌素处理后，GSTs 活性随时间延长呈波动变化，18 h 时达峰值，显著高于 6 和 12 h（P<0.05），24 h 时相比 18 h 活性显著降低（P<0.05）；经多杀菌素处理后，GSTs 活性随处理时间呈现先上升后下降的趋势，于 12 h 达到峰值，显著高于 6 h 的活性（P<0.05），而在 18 和 24 h 时，酶活性显著回落，明显低于 12 h 的水平（P<0.05）。表明乙基多杀菌素和多杀菌素均能显著诱导花蓟马 GSTs 活性，但随时间延长活性均呈降低趋势。

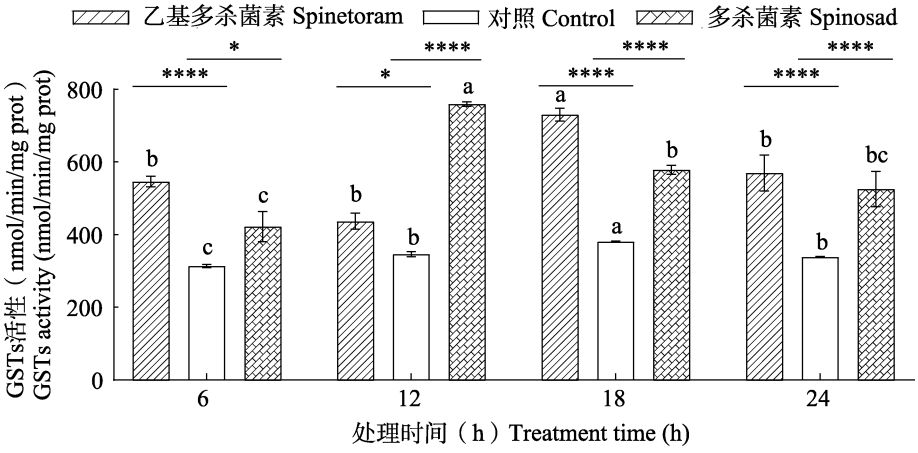


图 4　乙基多杀菌素和多杀菌素对花蓟马体内谷胱甘肽 *S*-转移酶（GSTs）活性的影响

Fig. 4　Effects of spinetoram and spinosad on the activity of glutathione *S*-transferase (GSTs) in *Frankliniella intonsa*

2 种多杀菌素农药 LC_{25} 对花蓟马成虫进行不同时间的胁迫处理，其体内解毒酶 CarE 活性变化见图 5。在乙基多杀菌素处理 6、12 和 24 h 后，花蓟马体内 CarE 活性较对照组极极显著升高（P<0.000 1），而在处理 18 h 时，该酶活性显著降低，并低于对照组（P<0.05）。多杀菌素处理 6 h 时，CarE 活性也表现为极极显著高于对照（P<0.000 1）；处理 18 h 时，花蓟马体内 CarE 活性下降，较对照组极极显著降低（P<0.000 1）；处理至 24 h 时，CarE 活性有所恢复，但与对照组相比差异不显著（P>0.05）。

如图 5 所示，对照组花蓟马 CarE 活性整体表现为先上升后下降。乙基多杀菌素处理组中，该酶活性则呈现先缓慢下降而后回升的变化模式：18 h 时活性迅速下降，显著低于 6 和 12 h（P<0.05），24 h 时活性呈现回升现象，同 6 和 12 h 无显著差异（P>0.05）。在多杀菌素处理下，CarE 活性总体表现为先下降后上升的变化趋势：18 h 时活性降至最低，显著低于 6 和 12 h，24 h 时活性呈现上升现象，显著高于 18 h（P<0.05）。与多杀菌素相比，乙基多杀菌素对花蓟马 CarE 活性的诱导效应更强。

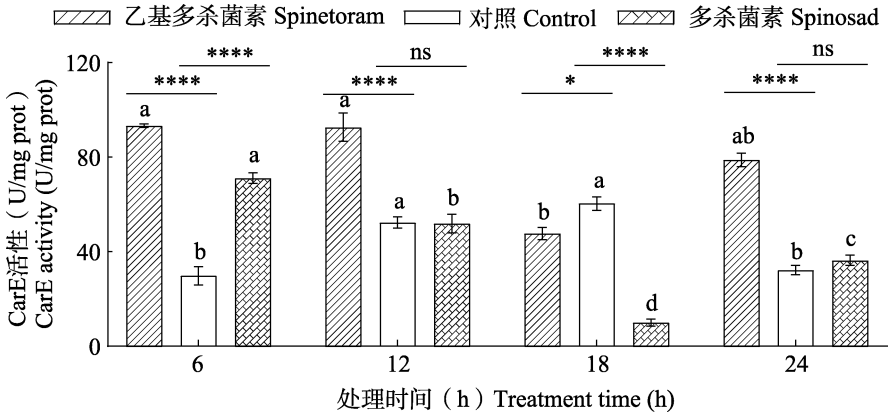


图 5　乙基多杀菌素和多杀菌素对花蓟马体内羧酸酯酶（CarE）活性的影响

Fig. 5　Effects of spinetoram and spinosad on the activity of caboxylesterase (CarE) in *Frankliniella intonsa*

3　结论与讨论

本研究在室内条件下评估了乙基多杀菌素与多杀菌素对花蓟马雌成虫、2 龄若虫及蛹的毒力。结果表明，乙基多杀菌素对各虫态的致死效应均高于多杀菌素，且雌成虫与 2 龄若虫对药剂的敏感程度较为接近。蛹期对乙基多杀菌素的敏感度相对较低，同花蓟马蛹期不食不动，对外界刺激反应相对迟缓有直接关系。本研究采用豆角浸渍饲喂法测定乙基多杀菌素对采自大同市云州区黄花菜田的花蓟马（室内饲养 50 代）的室内毒力，结果表明，其对花蓟马雌成虫的 24 h LC_{50} 为 0.004 4 mg/L。张晓明等（2018）通过菜豆浸渍饲喂法评估 6 种杀虫剂对花蓟马的毒力，发现其对乙基多杀菌素最为敏感，24 h LC_{50} 为 1.423 mg/L；樊宗芳等（2021）采用类似方法测定 5 种药剂对花蓟马的毒力，也显示乙基多杀菌素的毒力最高，48 h LC_{50} 为 0.029 mg/L。与上述研究相比，本试验中花蓟马对乙基多杀菌素表现出更高的敏感性，该差异可能与其地理种群差异及此类农药使用历史有关。

已有研究显示，杀虫剂在亚致死浓度下对害虫繁殖能力可产生双向调节作用。如龚佑辉（2009）研究表明多杀菌素能够促进西花蓟马的产卵行为。而李定银等（2021）则观察到，乙基多杀菌素 LC_{25} 胁迫西花蓟马 6 代后，其单雌产卵量显著下降 16.07%；胁迫至第 7 代时，产卵量进一步极显著降低 23.04%。本研究发现，乙基多杀菌素和多杀菌素低浓度胁迫会影响黄花菜花蓟马的产卵前期，但是对其单雌产卵量（24 h）没有影响。亚致死浓度杀虫剂不仅干扰昆虫的繁殖，也会调控其发育进程。杨广明等（2016）研究发现，乙基多杀菌素 LC_{25} 处理可缩短西花蓟马若虫期，导致整个发育周期减少

1.53 d；李定银等（2021）研究则显示，经该药剂 LC_{25} 浓度汰选 6 代后，西花蓟马的卵期、若虫期明显缩短，蛹期延长，总发育时间减少 0.26 d。本研究中，2 种多杀菌素类农药均显著延长了花蓟马的产卵前期和 1 龄若虫期，乙基多杀菌素还极显著缩短 2 龄若虫期，但是二者对花蓟马的单雌产卵量（24 h）、卵期、预蛹期和蛹期均无显著影响。

昆虫在受到外界刺激时，会通过调节体内保护酶系统的活性以维持正常的生理代谢功能（查黎春, 2011；王爱玉等, 2021）。超氧化物歧化酶（SOD）可催化超氧阴离子自由基（Superoxide anion radical，O^{2-}）转化为过氧化氢（Hydrogen peroxide，H_2O_2），而过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）则能够进一步分解 H_2O_2（Ahmad and Pardini, 1990），3 种酶协同作用，共同调控自由基代谢平衡，从而减轻或避免外界胁迫对虫体造成的伤害。本研究聚焦于 2 种多杀菌素类农药 LC_{25} 分别处理 6、12、18 和 24 h 时，花蓟马体内保护酶在短期内的动态变化情况，结果发现，花蓟马保护酶对 2 种生物农药的响应不尽相同。多杀菌素胁迫后，同对照相比花蓟马体内保护酶 SOD、CAT、POD 活性显著升高，并随时间延长 3 种保护酶活性呈现大幅度动态变化。同对照相比，SOD 活性在胁迫 6 和 12 h 时显著升高，18 h 显著降低，24 h 时显著升高，说明在 LC_{25} 多杀菌素胁迫条件下，花蓟马体内的 SOD 通过催化反应将大量自由基转化为 H_2O_2，当 H_2O_2 积累至一定浓度后，SOD 活性受到抑制，随着 H_2O_2 被清除，SOD 活性逐渐恢复并显著升高，进一步将自由基歧化为 H_2O_2。CAT 和 POD 活性在 12、18 和 24 h 均显著高于对照，CAT 活性在 12 h 达到峰值，POD 活性在 18 h 达到峰值，由此推测胁迫 12-24 h 范围内，花蓟马通过升高 CAT 和 POD 活性协同清除体内大量 H_2O_2，并在 18 h 时将其控制在较低水平，减少了 H_2O_2 对 SOD 活性的抑制，三者保护酶协同动态调整从而减少自由基对机体的氧化损伤。乙基多杀菌素胁迫下虫体保护酶 SOD、CAT、POD 活性动态变化幅度较小，同对照相比，SOD 活性在胁迫 12 和 18 h 时显著升高，24 h 时恢复至正常水平，说明乙基多杀菌素胁迫下，花蓟马在 18 h 范围内 SOD 逐步将大量自由基歧化为 H_2O_2，但是随着 H_2O_2 浓度达到一定范围，SOD 活性受到抑制。CAT 活性在 6、12、18 和 24 h 均显著高于对照，POD 活性在 6 和 12 h 均显著高于对照，18 和 24 h 时又恢复至常态，由此推测 POD 在 12 h 范围内参与 H_2O_2 的清除，CAT 则在 24 h 范围内作为主要保护酶持续清除体内大量 H_2O_2。相比较而言，多杀菌素胁迫下花蓟马体内的保护酶反应更强，能够在一定程度或时间范围内通过酶活性的时空性补偿机制延缓农药的损伤效应，而乙基多杀菌素处理组保护酶活性波动幅度较小且恢复较快，这种差异印证了乙基多杀菌素对花蓟马具有更强的毒力作用，导致其生理调节阈值被更快突破。与樊宗芳等（2021）的研究结果一致，乙基多杀菌素对花蓟马和西花蓟马的总体诱导效应较弱，仅对花蓟马 SOD 活性的提升作用最为显著。

同时，低浓度杀虫剂胁迫也可显著激活或抑制昆虫体内解毒酶活性，其效应取决于药剂种类、作用时间及昆虫种类的特异性响应。GSTs 和 CarE 作为昆虫体内关键的解毒酶系，参与代谢外源性和内源性有毒化合物（樊宗芳等, 2021）。已有研究证实，多杀菌素类农药可显著激活蓟马体内解毒酶活性（龚佑辉等, 2009；李定银等, 2021）。在本研究中，2 种多杀菌素类农药处理均引起花蓟马体内 GSTs 和 CarE 活性大幅度变化，GSTs 活性在胁迫 6、12、18 和 24 h 时均显著高于对照，表明乙基多杀菌素和多杀菌素的 LC_{25} 处理均能显著诱导花蓟马体内 GSTs 活性升高，该酶可催化 2 种农药分子中的亲电子基团与还原型谷胱甘肽（Reduced glutathione，GSH）的巯基发生结合反应，增强其疏水性以促进外排（尤燕春等, 2013）。2 种药剂在不同时间点对 GSTs 的诱导效果存在差异，总体表现为先上升后下降趋势，至 24 h 时酶活性虽有所回落，但仍显著高于对照组。由此推测花蓟马 GSTs 解毒系统对多杀菌素类农药响应迅速，可能在短期内通过提升酶活性以应对药剂胁迫，随时间的延

长，GSTs 活性逐渐受到抑制。研究表明，在遭受不同外界环境胁迫时，昆虫可通过提高 CarE 活性以增强逆境适应性，推测 CarE 在代谢内源或外源毒素过程中无需额外能量输入即可催化酯类物质水解（Terriere and Yu, 1974）。本研究中 CarE 活性则对 2 种农药的响应截然不同，乙基多杀菌素胁迫下，CarE 活性在 6 和 12 h 极显著高于对照，18 h 时显著降低，24 h 时显著升高，表明 12 h 内，花蓟马能够迅速提升 CarE 活性，以水解乙基多杀菌素的酯键或与其结合，从而降低该药剂的有效浓度并减轻其毒性作用（张丽阳和刘承兰, 2016）。随着时间延长，CarE 活性短暂受到抑制后又迅速恢复升高，推测 CarE 活性可能是花蓟马抵抗乙基多杀菌素胁迫的重要代谢机制。在多杀菌素胁迫下，CarE 活性仅在 6 h 时极显著高于对照组，12 和 24 h 时同对照无显著差异，18 h 时极显著低于对照，由此推测多杀菌素短时间内能够迅速诱导花蓟马 CarE 活性的升高，然而随处理时间延长，CarE 活性逐渐受到抑制。推测在 24 h 内，乙基多杀菌素主要通过 GSTs 和 CarE 协同作用实现解毒代谢，而多杀菌素则更依赖 GSTs 途径。该结果与李定银等（2021）关于乙基多杀菌素汰选西花蓟马 6 代后 CarE 和 GSTs 活性显著上升的结论一致，同樊宗芳等（2021）比较 5 种杀虫剂对 2 种蓟马生理酶活性的研究相符，其中乙基多杀菌素对 GSTs 的诱导效应最为显著。

综上所述，本研究结果表明，花蓟马对乙基多杀菌素极为敏感，可作为防治黄花菜田花蓟马发生的重要生物杀虫剂。2 种多杀菌素类农药低浓度胁迫下花蓟马的保护酶防御效应机制差异较大，多杀菌素胁迫 24 h 范围内能够显著诱导花蓟马 SOD、CAT 和 POD 活性，相互协调共同维持体内自由基代谢的动态平衡。乙基多杀菌素短时间内显著诱导保护酶活性，但是 SOD 和 POD 活性很快受到抑制，CAT 活性被显著诱导，可能作为花蓟马防御乙基多杀菌素毒害的重要生理响应。2 种多杀菌素类农药低浓度胁迫下花蓟马的解毒酶响应有所差异，GSTs 活性均被显著诱导激活，CarE 活性则仅对乙基多杀菌素胁迫做出正向响应，因此乙基多杀菌素胁迫 24 h 内，GSTs 和 CarE 活性可能是花蓟马的重要代谢响应，而多杀菌素胁迫下，GSTs 活性被显著诱导激活，CarE 活性短时间内被诱导，很快被抑制恢复至正常水平。本研究较为全面地分析了花蓟马保护酶和解毒酶活性随乙基多杀菌素和多杀菌素处理时间的响应规律。

参考文献 (References)

Ahmad S, Pardini RS, 1990. Antioxidant defense of the cabbage looper, *Trichoplusia ni*: Enzymatic responses to the superoxide-generating flavonoid, quercetin, and photodynamic furanocoumarin, xanthotoxin. *Photochemistry and Photobiology*, 51(3): 305–311.

Boina DR, Onagbola EO, Salyani M, Stelinski LL, 2009. Antifeedant and sublethal effects of imidacloprid on Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. *Pest Management Science*, 65(8): 870–877.

Claudianos C, Ranson H, Johnson RM, Biswas S, Schuler MA, Berenbaum MR, Feyereisen R, Oakeshott JG, 2006. A deficit of detoxification enzymes: Pesticide sensitivity and environmental response in the honeybee. *Insect Molecular Biology*, 15(5): 615–636.

Cutler GC, Scott-Dupree CD, Tolman JH, Harris CR, 2006. Toxicity of the insect growth regulator novaluron to the non-target predatory bug *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae). *Biological Control*, 38(2): 196–204.

Desneux N, Rafalimanana H, Kaiser L, 2004. Dose-response relationship in lethal and behavioural effects of different insecticides on the parasitic wasp *Aphidius ervi*. *Chemosphere*, 54(5): 619–627.

Enayati AA, Ranson H, Hemingway J, 2005. Insect glutathione transferases and insecticide resistance. *Insect Molecular Biology*, 14(1): 3–8.

Fan ZF, Song JL, Gui FR, He SQ, 2021. Effect of five insecticides on toxicity and physiological enzyme activities of *Frankliniella occidentalis* and *F. intonsa*. *Journal of Biosafety*, 30(3): 206–212. [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.]

Fan ZF, 2022. Response and mechanism of *Frankliniella occidentalis* and *Frankliniella intonsa* to spinetoram under elevated CO_2. Doctor dissertation. Kunming: Yunnan Agricultural University. [樊宗芳, 2022. 高CO_2浓度下西花蓟马和花蓟马对乙基多杀菌素的响应及其机理. 博士学位论文. 昆明: 云南农业大学.]

Fan ZF, Chen YP, Li BL, Gou DY, He SQ, Gui FR, 2022. Effects of flupyradifurone on the activities of protective and detoxifying enzymes in western flower thrips *Frankliniella occidentalis* under elevated CO_2 concentration. *Journal of Plant Protection*,

49(4): 1225–1232. [樊宗芳, 陈亚平, 李碧兰, 勾德映, 和淑琪, 桂富荣, 2022. CO_2 浓度倍增下氟吡呋喃酮对西花蓟马保护酶和解毒酶活性的影响. 植物保护学报, 49(4): 1225–1232.]

Gong YH, 2009. Sublethal Effects of spinosad applied to *Frankliniella occidentalis*. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [龚佑辉, 2009. 多杀菌素对西花蓟马的亚致死效应研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Gong YH, Wu QJ, Zhang YJ, Xu BY, 2009. Effect of sublethal concentration of spinosad on the activity of detoxifying enzymes in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Chinese Journal of Pesticide Science*, 11(4): 427–433. [龚佑辉, 吴青君, 张友军, 徐宝云, 2009. 亚致死浓度多杀菌素对西花蓟马解毒酶系活力的影响. 农药学学报, 11(4): 427–433.]

Hua NZ, 2015. Review of green biological insecticide spinosad and spinetoram. *Agrochemicals*, 54(1): 1–5. [华乃震, 2015. 绿色环保生物杀虫剂多杀霉素和乙基多杀菌素的述评. 农药, 54(1): 1–5.]

Li DY, Zhi JR, Zhang T, Yue WB, 2021. Effects of multigenerational spinetoram stress on the detoxification enzyme activities, development and reproduction of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Acta Entomologica Sinica*, 64(10): 1176–1186. [李定银, 邸军锐, 张涛, 岳文波, 2021. 乙基多杀菌素多代胁迫对西花蓟马解毒酶活性、发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 64(10): 1176–1186.]

Liu HJ, Xu XN, Miao Y, Wang ED, 2007. Effects of sublethal concentration of avermectin to *Neoseiulus cucumeris*. *Chinese Journal of Biological Control*, 23(2): 198–200. [刘慧娟, 徐学农, 缪勇, 王恩东, 2007. 阿维菌素防治西花蓟马的亚致死浓度对黄瓜钝绥螨的影响. 中国生物防治, 23(2): 198–200.]

Liu YQ, Li XY, Zhou C, Liu F, Mu W, 2016. Toxicity of nine insecticides on four natural enemies of *Spodoptera exigua*. *Scientific Reports*, 6: 39060.

Shen DR, He C, Zhao YY, Tian XJ, Yuan SY, Zhang HR, 2017. Joint toxicity of spinosad combined with four insecticides against *Frankliniella occidentalis*. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 45(23): 91–93. [沈登荣, 何超, 赵远艳, 田学军, 袁盛勇, 张宏瑞, 2017. 多杀菌素与 4 种杀虫剂复配对西花蓟马的联合毒力. 江苏农业科学, 45(23): 91–93.]

Terriere LC, Yu SJ, 1974. Induction of detoxifying enzymes in insects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 22(3): 366–373.

Thomas CS, Gary DC, James ED, Anzeveno P, Martynow J, Deamicis CV, Gifford J, 2008. Neural network-based QSAR and insecticide discovery: Spinetoram. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 22(6/7): 393–401.

Wang AY, Maimaiti·Aihemaiti, Yang YX, Li Z, Xue C, Duan AL, Zhao M, 2021. Screening of biological pesticides for controlling *Thrips tabaci* and their effects on the activities of detoxification enzymes. *Cotton Science*, 33(2): 180–188. [王爱玉, 艾合买提·买买提, 杨媛雪, 李卓, 薛超, 段爱玲, 赵鸣, 2021. 防治烟蓟马的生物源农药筛选及其对解毒酶活性影响. 棉花学报, 33(2): 180–188.]

Wang ZJ, Yang FZ, Liu TJ, Tian XY, Wang YY, Shi SS, Gao Y, 2024. Effects of different concentrations of thiamethoxam on the activity of protective and detoxification enzymes in *Riptortus pedestris*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(5): 1037–1047. [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.]

Yang GM, 2016. The relationship between fecundity and development of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) with food and reproductive model. Master dissertation. Guiyang: Guizhou University. [杨广明, 2016. 西花蓟马生长发育和繁殖力与食物及生殖方式的相关性. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]

Yang GM, Zhi JR, Li SX, Liu L, 2016. Sublethal effects of spinetoram and azadirachtin on development and reproduction of *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(11): 3698–3704. [杨广明, 邸军锐, 李顺欣, 刘利, 2016. 乙基多杀菌素和印楝素对西花蓟马生长发育及繁殖的亚致死效应. 应用生态学报, 27(11): 3698–3704.]

You YC, Xie M, You MS, 2013. The diversity and role of glutathione *S*-transferase in insecticide resistance in insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 831–840. [尤燕春, 谢苗, 尤民生, 2013. 昆虫谷胱甘肽 *S*-转移酶的多样性及其介导的抗药性. 应用昆虫学报, 50(3): 831–840.]

Zha LC, 2011. The influences of the three pesticides to *Malacosoma neustria testacea* Motschulsy and *Lymantria dispar* Linnaeus superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activity. Master dissertation. Harbin: Northeast Forestry University. [查黎春, 2011. 三种农药对天幕毛虫、舞毒蛾超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性的影响. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.]

Zhang DX, Yao JT, Huo YH, 2021. Practice and reflections on emergency control of daylily thrips in Yunzhou District, Datong City. *China Plant Protection*, 41(11): 104–106. [张东霞, 姚继唐, 霍宇恒, 2021. 大同市云州区黄花蓟马应急防控实践与思考. 中国植保导刊, 41(11): 104–106.]

Zhang LY, Liu CL, 2016. Research progress on mechanism of insect resistance to insecticides and its management. *Journal of Environmental Entomology*, 38(3): 640–647. [张丽阳, 刘承兰, 2016. 昆虫抗药性机制及抗性治理研究进展. 环境昆虫学报, 38(3): 640–647.]

Zhang XM, Liu Q, Li YR, Hu CX, Zhao HX, Chen GH, Zhang HR, Li ZY, 2018. Toxicity of six current commonly used pesticides on *Frankliniella occidentalis* and *Frankliniella intonsa*. *Journal of Environmental Entomology*, 40(1): 215–223. [张晓明, 柳青, 李宜儒, 胡昌雄, 赵浩旭, 陈国华, 张宏瑞, 李正跃, 2018. 六种常见杀虫剂对西花蓟马和花蓟马的毒力测定. 环境昆虫学报, 40(1): 215–223.]

Zhang XY, Wang K, Hong B, Guojia R, Sun JW, Zhang YL, Jia YX, 2023. Reduction and synergistic effect of spray adjuvants mixed with two kinds of insecticides against *Frankliniella intonsa*. *Journal of Environmental Entomology*, 45(3): 778–786. [张暄翊, 王堃, 洪波, 郭佳茹, 孙建伟, 张愉力, 贾彦霞, 2023. 喷雾助剂对 2 种药剂防治花蓟马的减量增效作用. 环境昆虫学报, 45(3): 778–786.]