乙基多杀菌素和乙虫腈对西花蓟马解毒酶和乙酰胆碱酯酶活性的影响*

李定银** 邸军锐*** 张 涛 曾 广

（贵州大学昆虫研究所，贵州省山地农业病虫害重点实验室，贵阳 550025）

摘 要 【**目的**】为探讨乙基多杀菌素（Spinetoram）和乙虫腈（Ethiprole）对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 的毒力，及对解毒酶及乙酰胆碱酯酶活性影响。【**方法**】采用浸叶法分别测定了 2 种杀虫剂对西花蓟马的毒力，以及亚致死浓度（LC_{25}）分别处理西花蓟马 2 龄初期若虫 12、24、48 和 72 h 后虫体内羧酸酯酶（CarE）、谷胱甘肽-*S*-转移酶（GSTs）、微粒体多功能氧化酶（MFOs）、细胞色素 P450 单加氧化酶（P450）和乙酰胆碱酯酶（AChE）活性的变化。【**结果**】西花蓟马对乙虫腈和乙基多杀菌素均较为敏感，亚致死浓度（LC_{25}）分别为 0.708 9 mg/L 和 0.003 3 mg/L。亚致死浓度乙基多杀菌素处理下，西花蓟马体内 CarE、GSTs、MFOs 和 P450 活性不论在何时间下均显著升高，AChE 活性在 12-48 h 均受到抑制，在 72 h 和对照没有显著差异。乙虫腈处理下西花蓟马体内 CarE 和 P450 活性显著升高，GSTs 活性和对照无明显变化，MFOs 活性在在 12-24 h 和对照没有明显差异，在 48 h 和 72 h 后显著高于对照，AchE 活性显著降低。【**结论**】乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度处理下，西花蓟马体内的解毒酶和乙酰胆碱酯酶活性发生不同变化，响应的程度与药剂的种类有关，且具有时间效应。

关键词 西花蓟马；乙基多杀菌素；乙虫腈；亚致死浓度；解毒酶

Effects of spinetoram and ethiprole on detoxification enzyme and acetylcholin esterase activity in *Frankliniella occidentalis* (Pergande)

LI Ding-Yin** ZHI Jun-Rui*** ZHANG Tao ZENG Guang

(Institute of Entomology, Guizhou University, Guizhou Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Region, Guiyang 550025, China)

Abstract **[Objectives]** To determine the toxicity of spinetoram and ethiprole to *Frankliniella occidentalis*, and the effect of these pesticides on detoxification enzymes and acetylcholinesterase activity. **[Methods]** The effects of sublethal concentrations (LC_{25}) of spinetoram and ethiprole on 2nd instar nymphs of *F. occidentalis* were measured using the leaf dipping method. Changes in carboxylesterase (CarE), glutathione S-transferase (GSTs), cytochromeP450 (P450), multi-function oxidase (MFO) and acetylcholin esterase (AChE) activity were measured 12, 24, 48 and 72 hours, after insects had been treated with LC_{25} doses of spinetoram and ethiprole. **[Results]** *F. occidentalis* was sensitive to both spinetoram and ethiprole and the sublethal LC_{25} concentrations of these pesticides were 0.7089 mg/L and 0.0033 mg/L, respectively. CarE, GSTs, MFOs and P450 activity increased significantly after treatment with an LC_{25} dose of spinetoram. AChE activity decreased from 12 to 48 hours after treatment, falling to the level of the control group by 72 hours after treatment. After ethiprole treatment, CarE and P450 activity increased significantly but GSTs activity didn't change significantly, compared to the control. MFOs activity didn't differ significantly from that of the control after 12 and 24 hours, but was higher than the control 48 and 72 hours after treatment. AChE decreased significantly throughout the experimental period. **[Conclusion]**

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金项目（31660516）；贵州省国际科技合作基地（黔科合平台人才[2016]5802）

**第一作者 First author，E-mail：lidingyin553100@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhijunrui@126.com

收稿日期 Received：2020-01-19；接受日期 Accepted：2020-06-04

Sublethal concentrations of spinetoram and ethiprole affected the activities of detoxification enzymes and acetylcholin esterase in *F. occidentalis* to different degrees after different periods of time post-treatment.

Key words *Frankliniella occidentalis*; spinetoram; ethiprole; sublethal concentration; detoxification enzyme

西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande)，属典型的锉吸式口器昆虫，为多食性害虫，寄主约 60 多个科，500 多种植物（张治科等，2016）。2003 年首次在我国北京部分地区的温室发现西花蓟马，同时将其作为我国入侵种报道（杜予州等，2005；吴青君等，2005）。随后在北京、云南、贵州等多地也陆续发现其分布，并且危害范围仍在不断扩散蔓延（张友军等，2003；吕要斌等，2011；Kirk and Terry，2015）。西花蓟马不仅能直接产卵和取食危害寄主植物，还能在若虫期获得多种植物病毒，在成虫期进行传播，从而影响植物的正常生长（Stuartr *et al.*，2009；张桂芬等，2011），对作物造成的损失约为 30%-50%，严重发生时可导致作物绝产绝收（高杭等，2015；曹宇等，2016）。在西花蓟马暴发危害地区，化学防治仍是其主要的防治手段（王帅宇等，2018）。

田间施用杀虫剂后，除了直接杀死靶标害虫外，其毒力还会因为个体接触药量的差异和时间的推移逐渐递减到亚致死剂量，存活下来的个体其生长繁育、繁殖等生物学特性以及抗药性会发生显著变化（Elzen *et al.*，2000；龙贵云等，2017），即药剂的亚致死效应。昆虫对药剂胁迫的生理生化响应主要是通过调整自身相关防御酶活性进行代谢解毒（刘喃喃等，2006；谢苗和尤民生，2011）。解毒酶是昆虫体内主要的防御酶，包括羧酸酯酶（CarE）、谷胱甘肽-*S*-转移酶（GSTs）、微粒体多功能氧化酶（MFOs）和细胞色素 P450 单加氧化酶（P450）（唐振华和周成理，1993）。乙酰胆碱酯酶（AChE）在昆虫神经传导起着关键作用，该酶通过降解乙酰胆碱，终止递质对突触后膜的刺激，干扰神经信号的传导（Soreq and Seidman，2001）。大量文献报道表明解毒酶对昆虫适应杀虫剂压力以增强耐药性起关键作用（Enayati *et al.*，2005；Claudianos *et al.*，2006；来守国等，2018）。例如抗氰戊菊酯品系的棉铃虫 *Helicoverpa armigera* CarE 的活性比敏感品系高，用酯酶抑制剂处理后其抗性水平显著降低，表明棉铃虫对氰戊菊酯的抗性与酯酶有关（Gunning *et al.*，1997）。

研究表明亚致死浓度的多杀菌素能引起西花蓟马体内 CarE、GSTs 和 MFOs 比活性上升（龚佑辉等，2009），而乙基多杀菌素（Spinetoram）由多杀菌素里的特定成分经化学修饰后改造而成，杀虫效果更佳（王彭等，2017；张晓明等，2018；张治科等，2019）。目前，乙基多杀菌素（Spinetoram）是国内大部分地区防治西花蓟马的首选药剂。该药剂通过干扰昆虫神经中烟碱型乙酰胆碱受体和 r-氨基丁酸受体，致使虫体对兴奋性或抑制性的信号传递反应不敏感，影响正常的神经活动，直至死亡（华乃震，2015）。在乙基多杀菌素处理下，小菜蛾 *Plutella xylostella*（Linnaeus）体内 GSTs、CarE 和 AchE 活性增强（田雪莲等，2016；尹飞等，2016），而棉铃虫 GSTs 和 CarE 活性降低，AchE 和 MFOs 活性升高（谢丙堂等，2015）。表明同一种解毒酶活性在不同昆虫间变化不同。这可能与不同昆虫的解毒能力不同有关（张红英等，2002）。乙基多杀菌素对西花蓟马种群的增长有一定的刺激作用（杨广明等，2016），但西花蓟马对该药剂的代谢解毒机制目前还未见报道。

乙虫腈（Ethiprole）是氟虫腈的替代产品，具有更高的杀虫活性（Sammelson *et al.*，2004；唐良德等，2018），其化学结构和作用方式和氟虫腈相似（Arthur，2002），作用于 r-氨基丁酸受体，从而干扰氯离子通道破坏中枢神经系统（CNS）正常活动导致昆虫过度兴奋而死亡（Cole *et al.*，1993），对稻飞虱 *Nilaparvata lugens* Stål 和蓟马具有很好的防治效果（Allan *et al.*，2009；陆晓峰等，2010）。但目前西花蓟马该对药剂的代谢抗性机制研究还未见报道。

本实验通过用乙基多杀菌素和乙虫腈两种杀虫剂亚致死浓度处理西花蓟马后，研究不同处

理时间下存活虫体的解毒酶系活性, 以明确各两种杀虫剂亚致死浓度及处理时间与西花蓟马体内解毒酶系活性的变化关系, 该结果将为进一步研究西花蓟马对杀虫剂的抗性机制及田间化学防治提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

1.1.1　供试虫源　供试西花蓟马采自贵州省贵阳市花溪区各类蔬菜上, 在人工气候箱(RXZ 系列多段可编程智能人工气候箱)以菜豆 *Phaseolus vulgaris* 豆荚饲养 3 代以上备用。饲养条件为: 温度(25±1)℃, 湿度: 70%±5%, L∶D = 14∶10。

1.1.2　健康菜豆植株培育　供试寄主菜豆种子为泰国矮生菜豆, 以灭菌营养土种植于人工气候室内, 温度(25±1)℃, 湿度: 70%±10%, L∶D = 14∶10), 无病虫侵害, 待 2 片真叶长至 5-6 cm 的菜豆作为供试植株。

1.1.3　供试药剂和试剂盒　供试药剂: 60 g·L^{-1} 爱绿士 Spinetoram 悬浮剂(美国陶氏益农公司), 有效成分为乙基多杀菌素; 96%乙虫腈 Ethiprole(江苏托球农化股份有限公司)。乙酰胆碱酯酶、谷胱甘肽-*S*-转移酶、羧酸酯酶和蛋白含量测定试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司; 多功能氧化酶测定试剂盒购自上海研辉生物科技有限公司; 细胞色素 P450 酶活性测定试剂盒购自南京卡米洛生物工程有限公司。

1.2　试验方法

1.2.1　乙基多杀菌素对西花蓟马室内毒力测定　以叶片浸渍法进行毒力测定。用去离子水将 60 g·L^{-1} 爱绿士悬浮剂先配成 100 mg/L 母液, 再用等比法稀释成 6 个浓度, 分别将健康的菜豆植株叶片浸入 100 mL 药剂 20 s 后, 晾干待用。将处理好的叶片置于带盖且打孔的透明圆形塑料盒内(规格为: 高 3.5 cm, 上口径 3 cm, 底部直径 4 cm)。选取室内菜豆豆荚饲养的西花蓟马 2 龄初期若虫 20 头接入塑料盒中, 72 h 后统计死亡量。乙虫腈用丙酮稀释为 1 g/mL 的母液, 其他处理同上。每个浓度重复 4 次。用 SPSS 24.0 软件的 Probit 模块拟合毒力回归方程, 并确定杀虫剂亚致死浓度(LC_{25})。

1.2.2　亚致死浓度处理西花蓟马　以 1.2.1 所获得的乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度(LC_{25}), 用浸渍法处理从茎基部截取的离体菜豆植株 20 s 后, 自然晾干。茎秆插入自制饲养盒内(饲养盒规格为: 口径 15 cm, 高 20 cm, 底部直径略小), 饲养盒内部下方固定一块中心开孔的圆形 KT 板, 底部加入清水保持水分。选取室内菜豆豆荚饲养的西花蓟马 2 龄初期若虫置于饲养盒中, 对照用去离子水处理西花蓟马, 条件同上。每个处理 800-1 200 头 2 龄若虫, 分别在接虫后 12、24、48 和 72 h 时用 2 mL 离心管收集西花蓟马并加入液氮速冻作样, 每管 50 头, 每管为 1 个重复, 每个时段每个处理分别 4 个重复。

1.2.3　解毒酶活性测定　AChE、CarE 和 GSTs 活性测定均根据苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒说明书的操作步骤进行。MFOs 和细 P450 活性按照酶联免疫(ELISA)试剂盒说明书操作进行。

1.2.4　蛋白质含量测定　蛋白质含量测定采用 BCA 法, 按苏州科铭生物技术有限公司试剂盒说明书进行。

1.2.5　数据处理　试验数据采用 Microsoft Excel 2016 进行整理, 通过 SPSS 24.0 进行单因素方差分析, Probit 模块拟合毒力回归方程, 并确定杀虫剂亚致死浓度(LC_{25})。酶活性测定数据, 采用 Tukey 检验法分析取食不同处理时间以及不同杀虫剂对西花蓟马解毒酶活性的差异显著性。

2　结果与分析

2.1　两种杀虫剂对西花蓟马的毒力

乙基多杀菌素和乙虫腈对西花蓟马室内饲养种群的毒力测定结果见表 1。本实验选择处理后 72 h 的结果, 乙基多杀菌素和乙虫腈的 LC_{25} 值分别为 0.003 3 mg/L 和 0.708 9 mg/L, 根据回归方程可看出, 西花蓟马死亡数与两种杀虫剂浓度均呈正相关关系, 即随着杀虫剂浓度的增加,

表 1 两种杀虫剂对西花蓟马的毒力测定

Table 1 Toxicity of spinetoram and ethiprole to *Frankliniella occidentalis*

杀虫剂 Pesticide	毒力回归方程 Toxicity regression equations	卡方值 χ^2	LC_{25} (mg/L)	95%置信区间 95% confidence interval (mg/L)	相关系数 R^2
乙基多杀菌素 Spinetoram	y=6.223+2.778x	4.849	0.003 3	0.002 3–0.004 0	0.999 5
乙虫腈 Ethiprole	y=–0.230+2.972x	4.289	0.708 9	0.517 2–0.851 4	0.997 5

西花蓟马死亡数增加。

2.2 两种杀虫剂对西花蓟马体内 AChE 活性的影响

西花蓟马 2 龄若虫取食乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度处理的菜豆叶片后其体内 AChE 活性变化不同，且不同处理时间下，其活性也有所差异（图 1）。处理 12 h 和 24 h，乙基多杀菌素和乙虫腈处理的西花蓟马体内 AChE 活性都低于对照（P<0.05），两种药剂处理间差异不明显，处理 48 h，两种药剂处理的 AChE 活性也均低于对照（P<0.05），但乙基多杀菌素处理比乙虫腈处理的西花蓟马酶活性下降的更多。处理 72 h，只有乙虫腈处理的西花蓟马酶活性显著下降（P<0.05）。

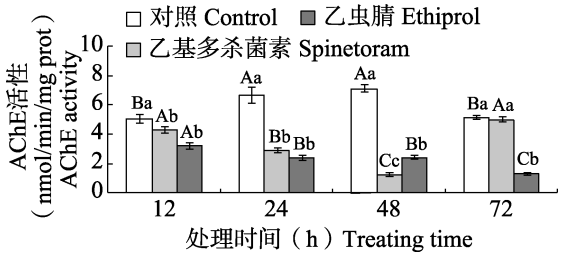

图 1 乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度处理对西花蓟马体内乙酰胆碱酯酶活性的影响

Fig. 1 Changes of AChE activity in *Frankliniella occidentalis* feeding kidney bean respectively treated by sublethal concentration of spinetoram and ethiprole

柱上标有不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著（P<0.05），不同大写字母表示同一处理不同时间差异显著（P<0.05，Tukey 法进行多重比较）。下图同。

Histograms with the different lowercase letters indicate significant difference at the 0. 05 level among different treatments at the same time, while with different capital letters indicate significant difference at the 0. 05 level among different time at the same pesticide treatment (Tukey multiple range test). The same below.

对照组西花蓟马体内 AChE 活性随着处理时间的延长，呈现先升高后降低的趋势，在 24 h 和 48 h 西花蓟马体内 AChE 酶活性最高。随乙基多杀菌素处理时间的延长，西花蓟马体内酶活性显著下降（P<0.05），在 48 h 时下降到最低 72 h 时 AChE 活性又明显上升水平（P>0.05）。亚致死浓度的乙虫腈处理后蓟马体内 AChE 活性随着处理时间的延长，虫体酶活逐渐下降，在 72 h 时将至最低。

2.3 两种杀虫剂对西花蓟马体内 CarE 活性的影响

不论在何处理时间下，2 种杀虫剂亚致死浓度处理的菜豆叶片饲养的西花蓟马 2 龄若虫，其体内 CarE 活性均显著升高（图 2）（P<0.05），如处理 12 h 时，对照相比亚致死浓度的乙虫腈处理下虫体 CarE 活性为对照的 1.93 倍，在 72 h 时乙基多杀菌素处理的 CarE 活性是对照的 4.72 倍，且酶活性升高幅度明显高于乙虫腈。

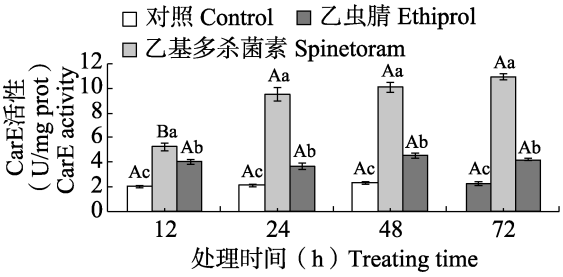

图 2 乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度对西花蓟马体内羧酸酯酶活性的影响

Fig. 2 Changes of CarE activity in *Frankliniella occidentalis* feeding kidney bean respectively treated by sublethal concentration of spinetoram and ethiprol

对照组和乙虫腈处理下西花蓟马体内的 CarE 活性在不同时间下没有明显的差异。乙基多杀菌素处理下西花蓟马体内 CarE 活性在 24 h

明显高于 12 h，但与 48 h 和 72 h 差异不显著。

2.4　两种杀虫剂对西花蓟马体内 GSTs 活性的影响

不论在何处理时间下，西花蓟马 2 龄若虫虫体 GSTs 对不同杀虫剂的响应不同（图 3）。亚致死浓度的乙基多杀菌素处理在各个时间下，其 GSTs 活性均显著高于对照组（P<0.05）。乙虫腈处理组与对照相比在各个处理时间内的酶活性无明显差异（P>0.05）。即乙虫腈对西花蓟马体内 GSTs 活性无明显的刺激或抑制作用。

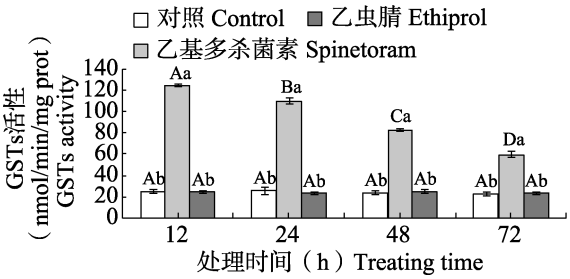

图 3　乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度对西花蓟马体内谷胱甘肽 *S*-转移酶活性的影响

Fig. 3　Changes of GSTs activity in *Frankliniella occidentalis* feeding kidney bean respectively treated by sublethal concentration of spinetoram and ethiprol

亚致死浓度的乙基多杀菌素处理的西花蓟马体内的 GSTs 活性随时间的延长不断下降，在 72 h 下降到最低。乙虫腈处理后西花蓟马体内的 GSTs 活性随着处理时间的延长，无显著变化（P>0.05）。

2.5　两种杀虫剂对西花蓟马 MFOs 酶活性的影响

以酶联免疫法（ELISA）测得的样品 MFOs 浓度再除以 BCA 法测得的蛋白浓度表示 MFOs 酶活性，得到不同处理下的比活性变化（图 4）。由图 4 可知，在 12 h 和 24 h 是，均是乙基多杀菌素处理下的西花蓟马 2 龄若虫体内 MFOs 活性明显高于对照和乙虫腈处理的，但对照和乙虫腈处理的没有明显差异。在 48 h，也是乙基多杀菌素处理下的西花蓟马 2 龄若虫体内 MFOs 活性最高，但乙虫腈处理的也明显高于对照。

对照组，西花蓟马体内的 MFOs 酶活性在 12 h 最高，其余 3 个时间下，活性明显降低，但它们之间没有明显的区别。乙基多杀菌素处理下的西花蓟马 2 龄若虫体内 MFOs 活性也是在 12 h 最高，24 h 和 48 h 明显降低，但到 72 h 又恢复到 12 h 水平，但乙虫腈处理的也明显高于对照。

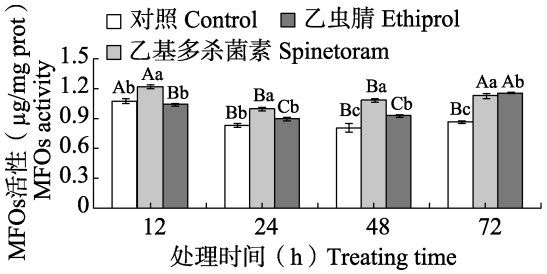

图 4　乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度对西花蓟马体内多功能氧化酶活性的影响

Fig. 4　Changes of MFOs activity in *Frankliniella occidentalis* feeding kidney bean respectively treated by sublethal concentration of spinetoram and ethiprol

乙虫腈处理下虫体 MFOs 活性，在 24 h 和 48 h 没有明显的差异（P>0.05），但低于 12 h 时的，在 72 h 时达到最高。

2.6　两种杀虫剂对西花蓟马细胞色素体内 P450 酶活性的影响

酶联免疫法（ELISA）测得的样品 P450 浓度再除以 BCA 法测得的蛋白浓度表示 P450 酶活性，得到不同处理下的比活性变化（图 5）。由图 5 可知，不论在何时间下，乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度处理下西花蓟马体内细胞色素 P450 酶活性均高于对照组（P<0.05），并且乙基

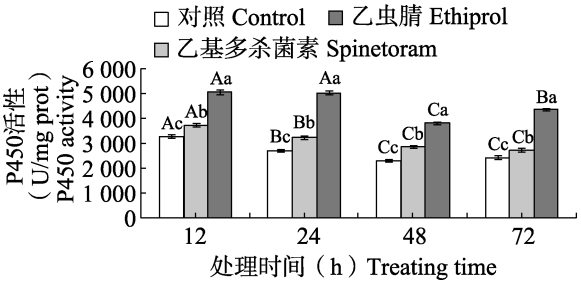

图 5　乙基多杀菌素和乙虫腈亚致死浓度对西花蓟马体内细胞色素 P450 酶活性的影响

Fig. 5　Changes of P450 activity in *Frankliniella occidentalis* feeding kidney bean respectively treated by sublethal concentration of spinetoram and ethiprol

多杀菌素比乙虫腈的激活作用更强。对照组和乙基多杀菌素处理下西花蓟马体内 P450 活性均随时间的延长有所下降，但 48 h 和 72 h 之间没有显著差异。乙虫腈亚致死浓度处理下西花蓟马体内 P450 酶活性在 12 h 和 24 h 之间没有显著差异。在 48 h 下降到最低值，到 72 h 活性有所上升但仍低于 12 h 和 24 h 的。

3 结论与讨论

昆虫解毒酶对杀虫剂的代谢解毒能力一直是研究昆虫对杀虫剂胁迫响应机制的主要途径之一。研究表明，杀虫剂胁迫下昆虫抗药性与其体内 CarE、GSTs、AChE、MFOs 和 P450 活性水平关系密切，且昆虫对不同杀虫剂的解毒代谢响应不同（刘喃喃等，2006；王圣印，2012；李娇娇等，2019）。目前，对亚致死浓度杀虫剂胁迫下昆虫体内解毒酶活性的变化的研究主要集中在处理后的某一时间点（刘倩等，2018），而关于在杀虫剂亚致死浓度的压力下，昆虫体内解毒酶活性在短期内随时间推移的变化研究相对较少。本研究通过研究亚致死浓度的乙基多杀菌素及乙虫腈分别处理 12、24、48 和 72 h 后西花蓟马体内解毒酶活性的变化，探究了在 2 种不同类型杀虫剂的胁迫下，西花蓟马解毒酶在短期内的变化情况。结果发现，2 种杀虫剂均能显著抑制西花蓟马 AChE 活性，降低西花蓟马的解毒能力（曹宇，2015）。但在 48 h 后乙基多杀菌素处理下虫体酶活开始恢复，即乙基多杀菌素药效减弱后对 AChE 活性的抑制效果也降低，而乙虫腈则能持续抑制 AChE 活性，说明不同杀虫剂对西花蓟马 AChE 活性的影响具有不同的时间效应，这可能与不同杀虫剂的持效性和作用机制有关。该研究结果与李娇娇等（2019）研究的抗吡虫啉棕榈蓟马 *Thrips palmi* Karny 种群的 AChE 活性显著低于敏感种群；来守国等（2018）以甲维盐和乙基多杀菌素处理黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 后，其体内 AChE 活性受到明显抑制等结果相似。但与谢丙堂等（2015）用乙基多杀菌素处理棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 后引起 AChE 活性升高的结果相反，原因可能与不同昆虫对杀虫剂的响应机制不同有关。

本研究还发现，GSTs 活性在乙虫腈处理下没有明显的变化，说明对乙虫腈的代谢解毒与 GSTs 无关。但西花蓟马体内 CarE、MFOs 和细胞色素 P450 酶活性在两种杀虫剂的处理下均有所升高，可见这 3 种酶与乙基多杀菌素和乙虫腈在西花蓟马体内的解毒代谢密切相关，而这 2 种杀虫剂对西花蓟马体内 3 种解毒酶不同时间的诱导激活结果存在差异，这可能是由于 2 种杀虫剂对西花蓟马的杀虫机理不同。此结果与谢丙堂等（2015）以乙基多杀菌素处理棉铃虫引起 CarE 和 GSTs 活性降低，MFOs 活性升高的结果有所差异，这可能与不同昆虫对体内解毒酶对同种杀虫剂的解毒响应不同（来守国等，2018；刘倩等，2018）。而乙虫腈处理下昆虫体内解毒酶活性的变化的研究未见报道，但与其同类药剂氟虫腈处理致使昆虫 P450 酶和 MFOs 活性上升的研究结果相似（王耀洲和韩召军，2010），黄诚华等（2006）用氟虫腈亚致死剂量（LD_{15}）二化螟 *Chilo suppressalis* 和大螟 *Sesamia inferens* 幼虫处理后，其体内 CarE 和 GSTs 的比活性均显著增强，MFOs 显著降低结果有所差异，原因可能是不同昆虫间的解毒代谢响应不同和昆虫对杀虫剂具不同的的剂量效应（Fournier and Brodeur，2002）。

本研究结果说明不同杀虫剂对西花蓟马解毒酶活性的影响有所差异。乙基多杀菌素和乙虫腈都对 AChE 活性有抑制作用，对 CarE、MFOs 和细胞色素 P450 活性有刺激作用，乙基多杀菌素对 GSTs 活性有刺激作用，乙虫腈对其则无影响。此结果与张振威（2019）研究舞毒蛾 *Lymantria dispar* AchE 活性在阿维菌素亚致死剂量下被激活和抑制，在 24 h 时达到极值，在前 36 h 低质量浓度下随时间先升高后降低趋势，在甲维盐的作用下均被显著抑制，GSTs 活性在阿维菌素和甲维盐亚致死剂量处理 24 h 后均呈激活作用的研究结果相似，说明昆虫对不同杀虫剂的防御机理不同（来守国等，2018）。

结果显示西花蓟马可通过调控其体内解毒酶活性来适应来自于杀虫剂的胁迫压力，以增强其对亚致死浓度药剂环境的适应性。但 2 种杀虫剂胁迫下西花蓟马解毒酶活性变化与抗药性的关系还有待进一步深入探讨。

参考文献 (References)

Allan M, Manku S, Therrien E, Nguyen N, Styhler S, Robert MF, Goulet AC, Petschner AJ, Rahil G, MacLeod AR, Déziel R, Besterman JM, Nguyen H, Wahhab A, 2009. N-benzyl-1-heteroaryl-3-(trifluoromethyl)-1h-pyrazole-5-carboxamides as inhibitors of co-activator associated arginine methyltransferase 1 (carm1). *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 19(4): 1218–1223.

Arthur FH, 2002. Efficacy of ethiprole applied alone and in combination with conventional insecticides for protection of stored wheat and stored corn. *Journal of Economic Entomology*, 95(6): 1314–1318.

Cao Y, 2015. Development of Frankliniella occidentalis on flowers of different horticultural hosts and relationship with flower compounds. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23(5): 634–641. [曹宇, 2015. 西花蓟马生长发育及其与寄主花化学物质的关系. 中国生态农业学报, 23(5): 634–641.]

Cao Y, Liu Y, Xiong ZN, Wang C, Li C, 2016. Oviposition preference of western flower thrips *Frankliniella occidentalis* to different horticultural host plants. *Journal of Plant Protection*, 42(5): 741–748. [曹宇, 刘燕, 熊正利, 王春, 李灿, 2016. 西花蓟马对不同花卉寄主的产卵选择性. 植物保护学报, 42(5): 741–748.]

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.

Cole LM, Nicholson RA, Casida JE, 1993. Action of phenylpyrazole insecticides at the GABA-gated chloride channel. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 46(1): 47–54.

Du YZ, Dai L, Ju RT, Gu J, Diao CY, Gong WH, 2005. Risk analysis of alien invasive western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande), in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 38(11): 2360–2364. [杜予州, 戴霖, 鞠瑞亭, 顾杰, 刁春友, 龚伟荣, 2005. 入侵害虫西花蓟马在中国的风险性初步分析. 中国农业科学, 38(11): 2360–2364.]

Elzen GW, Maldonado SN, Rojas MG, 2000. Lethal and sublethal effects of selected insecticides and an insect growth regulator on the boll weevil (Coleoptera: Curculionidae) ectoparasitoid *Catolaccus grandis* (Hymenoptera: Pteromalidae). *Journal of Economic Entomology*, 93(2): 300–303.

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

Fournier V, Brodeur J, 2000. Dose-response susceptibility of pest aphids (Homoptera: Aphididae) and their control on hydroponically grown lettuce with the entomopathogenic fungus *Verticillium lecanii*, azadirachtin, and insecticidal soap. *Environmental Entomology*, 29(3): 568–578.

Gao H, Zhi JR, Zhang J, Mu F, 2015. Selectivity of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) to six vegetables and chemical component changes of volatiles from infested vegetables. *Chinese Journal of Ecology*, 34(4): 1019–1025. [高杭, 郅军锐, 张骏, 牟峰, 2015. 西花蓟马对六种蔬菜的选择性及受害蔬菜挥发物化学成分的变化. 生态学杂志, 34(4): 1019–1025.]

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.]

Gunning RV, Moores GD, Devonshire AL, 1997. Esterases and fenvalerate resistance in a field population of *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 58(2): 155–162.

Hua NZ, 2015. A 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.]

Huang CH, Yao HW, Ye GY, Cheng JA, 2006. Effects of sublethal dose of fipronil on detoxifying enzymes in the larvae of *Chilo suppressalis* and *Sesamia inferens*. *Chinese Journal of Rice Science*, 20(4): 447–450. [黄诚华, 姚洪渭, 叶恭银, 程家安, 2006. 氟虫腈亚致死剂量处理对二化螟和大螟幼虫体内解毒酶系活力的影响. 中国水稻科学, 20(4): 447–450.]

Kirk WDJ, Terry LI, 2015. The spread of the Western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Agricultural & Forest Entomology*, 5(4): 301–310.

Lai SG, Gao HH, Zhai YF, Chen H, Liu Q, Dang HY, Yu Y, Zheng FQ, 2018. Effect of sublethal concentrations of three pesticides on the activity of detoxifying enzymes in *Drosophila melanogaster* and *Drosophila suzukii*. *Journal of Environmental Entomolog*, 40(3): 676–683. [来守国, 高欢欢, 翟一凡, 陈浩, 刘倩, 党海燕, 于毅, 郑方强, 2018. 3 种杀虫剂亚致死浓度对斑翅果蝇和黑腹果蝇体内解毒酶的影响. 环境昆虫学报, 40(3): 676–683.]

Li JJ, Ma HM, Zhang XX, Mao XH, Bai TT, Zhang AS, 2019. Comparative studies on enzyme activity between resistant and susceptible *Thrips palmi* populations to insecticide. *China Plant Protection*, 39(1): 5–8. [李娇娇, 马洪梅, 张秀霞, 毛晓红, 白

婷婷, 张安盛, 2019. 棕榈蓟马 2 种杀虫剂抗感种群间多种酶活性的比较. 中国植保导刊, 39(1): 5–8.]

Liu NN, Zhu F, Xu Q, Pridgeon JW, Gao XW, 2006. Behavioral change, physiological modification, and metabolic detoxification: Mechanisms of insecticide resistance. *Acta Entomologica Sinica*, 49(4): 671–679. [刘喃喃, 朱芳, 徐强, Julia W. Pridgeon, 高希武, 2006. 昆虫抗药性机理: 行为和生理改变及解毒代谢增强. 昆虫学报, 49(4): 671–679.]

Liu Q, Gao HH, Zhai YF, Chen H, Zheng L, Yu Y, 2018. Toxicities of six pesticides and their effects on detoxification enzymes in the adults of two Drosophila species in the laboratory. *Journal of Plant Protection*, 45(6): 1342–1348. [刘倩, 高欢欢, 翟一凡, 陈浩, 郑礼, 于毅, 2018. 六种农药对两种果蝇成虫室内毒力和主要解毒酶活性的影响. 植物保护学报, 45(6): 1342–1348.]

Long GY, Liu LL, Yang H, Wang Z, Jin DC, Zhou C, 2017. Sublethal effects of pymetrozine on the development, reproduction and insecticidal susceptibility of *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(7): 790–798. [龙贵云, 刘磊磊, 杨洪, 王召, 金道超, 周操等, 2017. 吡蚜酮对白背飞虱的发育、繁殖和药剂敏感性的亚致死效应. 昆虫学报, 60(7): 790–798.]

Lu XF, Ji YQ, Meng AZ, Zhang WG, 2010. Efficacy of ethiprole and pymetrozine on rice planthoppers. *Pesticide Science and Administration*, 31(3): 52–54. [陆晓峰, 吉用铨, 孟爱中, 张维根, 2010. 乙虫腈 10%悬浮剂和吡蚜酮 25%可湿性粉剂防治稻飞虱田间药效试验. 农药科学与管理, 31(3): 52–54.]

Lü YB, Zhang ZJ, Wu QJ, Du YZ, Zhang HR, Yu Y, Wang ED, Wang MH, Wang MQ, Tong XL, Lü LH, Tai XQ, Fu WD, 2011. Research progress of the monitoring, forecast and sustainable management of invasive alien pest *Frankliniella occidentalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 488–496. [吕要斌, 张治军, 吴青君, 杜予州, 张宏瑞, 于毅, 王恩东, 王鸣华, 王满囷, 童晓立, 吕利华, 谭新球, 付卫东, 2011. 外来入侵害虫西花蓟马防控技术研究与示范. 应用昆虫学报, 48(3): 488–496.]

Sammelson RE, Caboni P, Durkin KA, Casida JE, 2004. Show more GABA receptor antagonists and insecticides: Common structural features of 4-alkyl-1-phenylpyrazoles and 4-alkyl-1-phenyl trioxabicyclooctanes. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 12(12): 3345–3355.

Shan CH, Wang MH, Fan JQ, Gao CF, 2010. Laboratory screening of insecticides for controlling western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* Pergande. *Agrochemicals*, 49(10): 768–770. [单彩慧, 王鸣华, 范加勤, 高聪芬, 2010. 西花蓟马防治药剂的室内筛选. 农药, 49(10): 768–770.]

Soreq H, Seidman S, 2001. Acetylcholinesterase-new roles for an old actor. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(4): 294–302.

Stuartr R, 2009. Biology and ecology of the western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae): The making of a pest. *Florida Entomologist*, 92(1): 7–13.

Tang LD, Zhao HY, Fu BL, Qiu XY, Wu JH, Li P, Liu K, 2018. Insecticide resistance monitoring of the Hainan field populations of *Megalurothrips usitatus* and their susceptibility to 6 insecticides. *Journal of Environmental Entomolog*, 40(5): 1175–1181. [唐良德, 赵海燕, 付步礼, 邱海燕, 吴建辉, 李鹏, 刘奎, 2018. 海南普通大蓟马抗药性监测及对 6 种杀虫剂的敏感性. 环境昆虫学报, 40(5): 1175–1181.]

Tang ZH, Zhou CL, 1993. The role of detoxication esterases in insecticide resistance of diamondback moth *Plutella xylotella* larvae. *Acta Entomologica Sinica*, 36(1): 8–13. [唐振华, 周成理, 1993. 解毒酯酶在小菜蛾幼虫抗药性中的作用. 昆虫学报, 36(1): 8–13.]

Tian XL, Yin XH, Long YH, Li M, Cai T, Li RY Zhu LJ, 2016. Effect of low dose spinetoram on detoxification enzymes in *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 18(5): 589–595. [田雪莲, 尹显慧, 龙友华, 李明, 蔡滔, 李荣玉, 朱流红, 2016. 低剂量乙基多杀菌素对小菜蛾解毒酶的影响. 农药学学报, 18(5): 589–595.]

Wan YR, He BQ, Yuan GD, Wei GS, Wu QJ, 2016. Development of resistance to spinosyns in populations of western flower thrips in Beijing and Yunnan. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(2): 396–402. [万岩然, 何秉青, 苑广迪, 魏国树, 吴青君, 2016. 北京和云南地区西花蓟马对多杀菌素类药剂产生抗药性. 应用昆虫学报, 53(2): 396–402.]

Wang P, Lin GH, Huang DY, Li H, Liu QG, Huang ZY, 2017. Field efficacy of spinetoram against thrips pests on multiple different crops. *Agrochemicals*, 56(10): 72–75. [王彭, 林冠华, 黄大益, 李慧, 刘叙杆, 黄正谊, 2017. 乙基多杀菌素防治不同作物蓟马田间药效试验. 农药, 56(10): 72–75.]

Wang SY, 2012. Insecticide resistance monitoring of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) and resistance mechanisms to imidacloprid, emamectin benzoate and phoxim. Master dissertation. Taian: Shandong Agricultural University. [王圣印, 2012. 西花蓟马抗药性监测及对吡虫啉、甲维盐和辛硫磷的生化抗性机制. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]

Wang SY, Jia FY, Wu D, Liu YK, Wang JW, Yang JG, 2018. Control effect of seven pesticides on *Frankliniella occidentalis* in eggplant field. *Agrochemicals*, 57(8): 617–619. [王帅宇, 贾峰勇, 吴迪, 刘艳珂, 王俊伟, 杨建国, 2018. 7 种杀虫剂对茄子西花蓟马的防治效果. 农药, 57(8): 617–619.]

Wang YZ, Han ZJ, 2010. Fipronil resistance in small brown planthopper *Laodelphax striatellus* (Fallén) and mechanisms.

Journal of Nanjing Agricultural University, 33(4): 49–54. [王耀洲, 韩召军, 2010. 灰飞虱对氟虫腈的抗性及其机制研究. 南京农业大学学报, 33(4): 49–54.]

Wu QJ, Zhang YJ, Xu BY, Zhu GR, 2005. The biological character, damege and management of an invasive insect pest, *Frankliniella occidentalis*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 11–14. [吴青君, 张友军, 徐宝云, 朱国仁, 2005. 入侵害虫西花蓟马的生物学、危害及防治技术. 昆虫知识, 42(1): 11–14.]

Xie BT, Zhang LL, Wang BJ, Liang GM, 2015. Effects of spinetoram on detoxifying enzyme and acetylcholin esterase activity in *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(3): 600–608. [谢丙堂, 张丽丽, 王冰洁, 梁革梅, 2015. 乙基多杀菌素对棉铃虫解毒酶和乙酰胆碱酯酶活性的影响. 应用昆虫学报, 52(3): 600–608.]

Xie M, You MS, 2011. Effects of fipronil on detoxifying enzyme activities in *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1728–1733. [谢苗, 尤民生, 2011. 氟虫腈对小菜蛾幼虫体内解毒酶的影响. 应用昆虫学报, 48(6): 1728–1733.]

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 Entomology*, 27(11): 3698–3704. [杨广明, 郅军锐, 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.]

Yin F, Chen HY, Feng X, Hu ZD, Lin QS, Li ZY, Bao HL, 2016, The role of detoxifying enzymes in the resistance of *Plutella xylostella* to spinetoram. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(2): 314–319. [尹飞, 陈焕瑜, 冯夏, 胡珍娣, 林庆胜, 李振宇, 包华理, 2016. 乙基多杀菌素抗性小菜蛾代谢解毒酶酶活性研究. 应用昆虫学报, 53(2): 314–319.]

Zhang GF, Meng XQ, Wang FH, 2011. Advances in identification techniques of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pargande). *Journal of Biosafety*, 20(1): 81–88. [张桂芬, 孟祥钦, 万方浩, 2011. 西花蓟马检测鉴定技术研究进展. 生物安全学报, 20(1): 81–88.]

Zhang HY, Chi GT, Zhang JL, 2002. The progress of detoxification enzyme systems and resistance of insecticide. *Journal of Hebei Agricultural University*, 25(Suppl.): 193–195. [张红英, 赤国彤, 张金林, 2002. 昆虫解毒酶系与抗药性研究进展. 河北农业大学学报, 25(增刊): 193–195.]

Zhang XM, Liu Q, Li YR, Hu CX, Zhao HX, Chen GH, Zhang HR, Li ZY, 2018. Toxicity ofsix current commonly used pesticides on *Frankliniella occidentalis* and *Frankliniella intonsa*. *Journal of Environmental Entomolog*, 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 ZK, Wu SY, Lei ZR, Kang PZ, Du YN, Zhang LR, 2019. Toxicity and control efficacy of insecticides against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Biosafety*, 28(02): 127–132. [张治科, 吴圣勇, 雷仲仁, 康萍芝, 杜玉宁, 张丽荣, 2019. 不同杀虫剂对西花蓟马的室内毒力及田间药效. 生物安全学报, 28(2): 127–132.]

Zhang ZK, Zhang Y, Wu SY, 2016. The occurrence and characteristics of invaded insect pest *Frankliniella occidentalis* in Ningxia. *Plant Quarantine*, 30(4): 75–77. [张治科, 张烨, 吴圣勇, 2016. 西花蓟马在宁夏的发生及防控措施. 植物检疫, 30(4): 75–77.]

Zhang ZW, Zhao QL, He X, Pan JL, Ma L, 2019. Effect of avermectin and emamectin benzoate on toxicity and detoxifying enzymes activity in *Lymantria dispa*r larva. *Journal of Northeast Forestry University*, 47(5): 118–122. [张振威, 赵清泉, 郝昕, 潘佳亮, 马玲, 2019. 阿维菌素和甲维盐对舞毒蛾幼虫的毒力及解毒酶活性的影响. 东北林业大学学报, 47(5): 118–122.]