



蒋兴川, 沈恽丹, 孙劲超, 李秀霞, 黄勇, 董永成, 操海群. 氯虫苯甲酰胺和甲维盐对草地贪夜蛾幼虫的毒力及解毒酶活性的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (5): 961–967.

氯虫苯甲酰胺和甲维盐对草地贪夜蛾幼虫的毒力及解毒酶活性的影响

蒋兴川*, 沈恽丹*, 孙劲超, 李秀霞, 黄勇, 董永成, 操海群**

(安徽农业大学植物保护学院, 植物病虫害生物学与绿色防控安徽普通高校重点实验室, 合肥 230036)

摘要: 为了研究氯虫苯甲酰胺和甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 (甲维盐) 对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的毒杀作用及解毒机制, 采用叶片浸渍法测定了 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的 LC_{10} 、 LC_{20} 与 LC_{50} , 并研究这 2 种农药的亚致死剂量 (LC_{20}) 对幼虫的羧酸酯酶 (CarE)、谷胱甘肽-S-转移酶 (GST)、细胞色素 P450 (CYP450) 3 种主要解毒酶活性的影响。结果表明甲维盐对 3 龄幼虫的毒力更高, 48 h 时 LC_{10} 、 LC_{20} 、 LC_{50} 分别为 0.005、0.007、0.013 mg/L。2 种农药处理 72 h 内, 幼虫的 3 种酶活力呈现不同的动态变化。氯虫苯甲酰胺对 CarE 活力表现先诱导后抑制的作用, 在 24 h 时 CarE 活力最大 (36.75 U/mg); 甲维盐对 CarE 活力表现先抑制后诱导的作用, 在 72 h 时 CarE 活力最大 (42.44 U/mg)。2 种农药对 GST 活性在 72 h 内的变化一致, 均呈现“诱导-抑制-诱导”的规律。氯虫苯甲酰胺处理后 CYP450 活性与对照相比无显著差异; 甲维盐处理 36 h、48 h、72 h 幼虫体内 CYP450 活性均显著低于对照。

关键词: 草地贪夜蛾; 氯虫苯甲酰胺; 甲维盐; 毒力测定; 解毒酶

中图分类号: Q965.8; S433.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2019) 05-0961-07

Effect of chlorantraniliprole and emamectin benzoate on toxicity and detoxification enzymes activity in *Spodoptera frugiperda* larva

JIANG Xing-Chuan*, SHEN Yi-Dan*, SUN Jing-Chao, LI Xiu-Xia, HUANG Yong, DONG Yong-Cheng, CAO Hai-Qun** (College of Plant Protection, Key Laboratory of Biology and Sustainable Management of Plant Diseases and Pests of Anhui Higher Education Institutes, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To clarify the toxicity and detoxification mechanism of chlorantraniliprole and emamectin benzoate to *Spodoptera frugiperda*, the LC_{10} , LC_{20} and LC_{50} of two insecticides against third instar larvae were determined by leaf impregnation method, and the effects on the activities of the three main detoxifying enzymes carboxylesterase (CarE), glutathione-S-transferase (GST), cytochrome P450 (CYP450) of larvae were explored by two pesticides with the sublethal dose (LC_{20}). The results showed that the toxicity of methyvitamin was higher to larvae, and the values of LC_{10} , LC_{20} and LC_{50} were 0.005, 0.007 and 0.013 mg/L at 48 h, respectively. During 72 hours of treatment with two pesticides, the

基金项目: 国家自然科学基金 (31801806, 31500313, 31870640); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200902); 安徽省高等学校自然科学基金研究重点项目 (KJ2017A156, KJ2017A868)

作者简介: 蒋兴川, 博士, 讲师, 主要从事昆虫行为与化学生态研究, E-mail: jxc678@sina.cn

* 共同第一作者简介: 沈恽丹, 硕士研究生, 主要从事昆虫毒理学研究, E-mail: 1558798249@qq.com

** 通讯作者 Author for correspondence: 操海群, 博士, 教授, 主要研究方向为农药残留与环境毒理, E-mail: haiquncao@163.com

收稿日期 Received: 2019-07-22; 接受日期 Accepted: 2019-08-20

activity of three enzymes of larvae showed different dynamic changes. CarE activity was first induced and then inhibited by chlorantraniliprole, and CarE activity was the highest (36.75 U/mg) at 24 h. CarE activity was first inhibited and then induced by emamectin benzoate, and CarE activity was the highest (42.44 U/mg) at 72 h. The changes of GST activity of the two pesticides were consistent within 72 h, showing the rule of "induction-inhibition-induction". The activity of CYP450 in larvae treated with chlorantraniliprole was not significantly different from that of the control, and the activity of CYP450 in larvae treated with emamectin benzoate for 36, 48 and 72 hours was significantly lower than that of the control.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; chlorantraniliprole; emamectin benzoate; toxicity test; detoxification enzyme

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 属于鳞翅目夜蛾科, 是一种重要的全球性害虫, 其食性杂寄主广泛, 可取食玉米、水稻、小麦、高粱和甘蔗等多种作物, 造成了严重的经济损失 (Todde and Pooler, 1980; Salvadori *et al.*, 2012)。草地贪夜蛾原产于美洲热带和亚热带地区 (Sparks, 1979), 由于具有适生区域广、迁飞能力强等特点 (江幸福等, 2019), 现已入侵美洲、非洲、亚洲等 100 多个国家 (Goergen *et al.*, 2016; Sharanabasappa, 2018; Feldmann *et al.*, 2019; 王磊等, 2019); 自 2019 年 1 月在云南普洱发现该害虫入侵以来, 我国不同地区陆续发现该害虫危害作物, 截止 5 月 21 日我国已有 14 省 (自治区、直辖市) 报道其危害, 危害面积达 138.4 万亩 (王磊等, 2019)。

草地贪夜蛾的防治方法主要包括生物防治、化学防治、农业防治、作物抗性利用等 (郭井菲等, 2018; 姜玉英等, 2019; 王磊等, 2019); 对于爆发性和突发性害虫, 化学防治是一种非常有效的方法 (高希武, 2010), 目前在该害虫的防治中发挥着重要作用 (Togola *et al.*, 2018; Okuma *et al.*, 2018; 赵胜园等, 2019)。氯虫苯甲酰胺 (Chlorantraniliprole)、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 (Emamectin benzoate, 甲维盐) 等化学农药对草地贪夜蛾具有良好的防效 (王勇庆等, 2019; 赵胜园等, 2019)。

昆虫体内的羧酸酯酶 (carboxylesterase, CarE)、谷胱甘肽-S-转移酶 (glutathione S-transferase, GST) 和细胞色素 P450 (CYP450) 等解毒酶在应对化学农药及其他有毒物质的过程中起到重要作用 (Bao *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017); 解毒酶活性的改变与昆虫产生抗药性有关, 是昆虫对化学农药及其他有毒物质产生抗性的原因之一 (Liu *et al.*, 2006; 侍甜等, 2012; 邱星辉等, 2014)。

目前国内有关化学农药对草地贪夜蛾酶活性的研究未见报道。本研究首先测定氯虫苯甲酰胺和甲维盐对草地贪夜蛾幼虫的致死剂量, 进而明确这两种化学农药对草地贪夜蛾的最佳使用剂量, 为田间草地贪夜蛾的化学防治提供可靠的依据; 在此基础上选择 2 种农药的 LC_{20} 处理草地贪夜蛾幼虫, 检测不同处理时间下幼虫体内 GST、CarE 和 CYP450 活力的变化, 这 3 种解毒酶活力变化在毒理作用上具有一定的指示作用, 以期为进一步揭示氯虫苯甲酰胺、甲维盐对草地贪夜蛾的杀虫机理以及该虫对化学农药的抗性机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试虫源

草地贪夜蛾采自安徽省黄山市黄山区玉米田中, 室内利用玉米叶片在温度 $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $70\% \pm 10\%$ 、光周期 14L: 10D 的人工气候箱内饲养, 成虫饲以 10% 蜂蜜水, 成虫产卵孵化的 F_1 代幼虫继续用玉米进行饲养, 选取 3 龄幼虫进行毒力测定及酶活力检测试验。

1.1.2 供试药剂

氯虫苯甲酰胺 (纯度 97.8%)、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 (甲维盐, 纯度 95.6%) 为分析标准品, 均购自上海安谱实验科技股份有限公司; 丙酮 (色谱纯, 纯度 97.8%) 购自德国默克股份两合公司; 羧酸酯酶 (CarE)、谷胱甘肽-S-转移酶 (GST) 活性测定试剂盒均购自南京建成生物工程研究所, 昆虫细胞色素 P450 (CYP450) 酶联免疫分析 (ELISA) 试剂盒购自上海酶联生物科技有限公司。

1.2 生物测定与亚致死浓度处理

毒力测定参照 Ismail (2010) 提出的叶片药剂浸渍法, 并稍作改进: 根据前期预试验用丙酮将

两种待测农药稀释成 5 个浓度, 分别为氯虫苯甲酰胺 (10、2、0.4、0.08、0.016 mg/L)、甲维盐 (0.05、0.025、0.0125、0.00625、0.003125 mg/L)。将玉米叶片放入各处理药液中浸泡 20 s, 待其晾干后放入塑料培养皿 ($\Phi = 9\text{cm}$) 中, 每个培养皿接入 1 头饥饿 4 h 的 3 龄幼虫, 每个浓度处理 50 头, 3 次重复, 用丙酮处理的叶片作为对照。在 24 h、48 h 时统计各处理组的幼虫死亡数量, 计算出 LC_{50} 、 LC_{20} 和 LC_{10} 。

分别选取氯虫苯甲酰胺、甲维盐 24 h 的亚致死浓度 LC_{20} 对试虫进行致毒处理, 每个处理 50 头, 3 次重复。在 24 h、36 h、48 h、72 h 时对每组试虫进行羧酸酯酶 (CarE)、谷胱甘肽-S-转移酶 (GST)、昆虫细胞色素 P450 (CYP450) 的酶活力测定。

1.3 酶源的制备及蛋白含量的测定

酶液制备方法参考欧善生等 (2012) 的方法并稍作修改: 随机选取 3 头活跃的幼虫放入预冷的研钵中, 倒入适量的液氮将幼虫研磨粉碎后装入 1.5 mL 离心管中, 加入预冷缓冲液, 其中羧酸酯酶的制备采用 0.04 mol/L pH7.0 磷酸盐缓冲液、谷胱甘肽-S-转移酶的制备采用 0.1 mol/L pH6.5 磷酸盐缓冲液 (含 1.0 mmol/L EDTA)、昆虫细胞色素 P450 的制备采用 0.1 mol/L pH7.5 磷酸盐缓冲液 (含 10% 甘油、1 mmol/L DTT、1 mmol/L PMSF 和 1 mmol/L EDTA), 4℃ 10 800 r/min 离心 10 min 取上清液作为待测酶液放入 -80℃ 冰箱储存备用。

蛋白含量测定主要采用考马斯亮蓝 G250 法, 具体方法参考试剂盒说明书 (试剂盒购于南京建成生物工程研究所), 计算公式如下: 待测样本蛋白浓度 (g prot/L) = [(测定 OD 值 - 空白 OD 值) - (标准 OD 值 - 空白 OD 值)] × 标准品浓度 × 样本测试前稀释倍数。

1.4 酶活性测定

1.4.1 CarE 活力测定

CarE 酶活力测定方法参考试剂盒说明书 (购于南京建成生物工程研究所), 以每毫克组织蛋白在 37℃ 每分钟催化吸光值增加 1, 定义为一个酶活力单位 (U)。

$CarE \text{ 活力} = [(190 \text{ s 测定 OD 值} - 10 \text{ s 测定 OD 值}) - (190 \text{ s 对照 OD 值} - 10 \text{ s 对照 OD 值})] \times \text{反应总体积} / (\text{上清液蛋白质浓度} \times \text{加入反应体系中上清液体积}) / \text{催化反应时间}$ 。

1.4.2 GST 活力测定

GST 酶活力测定方法参考试剂盒说明书 (购

于南京建成生物工程研究所), 以每毫克组织蛋白, 在 37℃ 反应 1 min 扣除非酶促反应, 使反应体系中 GSH 浓度降低 1 $\mu\text{mol/L}$ 为一个酶活力单位 (U)。

$GST \text{ 活力} = (\text{对照 OD 值} - \text{测定 OD 值}) / (\text{标准 OD 值} - \text{空白 OD 值}) \times \text{标准品浓度} \times \text{反应体系稀释倍数} / \text{反应时间} / (\text{样本取样量} \times \text{匀浆液蛋白质量浓度})$ 。

1.4.3 CYP450 活力测定

CYP450 酶活力测定方法参考试剂盒说明书 (购于上海酶联生物科技有限公司)。用酶标仪测定标准品和待测样品 OD 值, 用标准品的浓度与 OD 值计算出标准曲线的直线回归方程, 将样品的 OD 值代入方程计算出样品中昆虫 CYP450 活性。

1.5 数据处理

采用 Excel 进行数据统计, 采用 SPSS 20.0 软件计算 LC_{10} 、 LC_{20} 、 LC_{50} 和 95% 置信区间及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 氯虫苯甲酰胺和甲维盐对草地贪夜蛾幼虫的毒力

氯虫苯甲酰胺和甲维盐对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的室内毒力测定结果见表 1。由表可知, 不同处理条件下 2 种化学农药对幼虫的致死中浓度均小于 0.7 mg/L, 说明这 2 种农药对草地贪夜蛾 3 龄幼虫均具有较高的毒力。随着处理时间由 24 h 增加到 48 h, 2 种农药对幼虫的致死中浓度 (LC_{50}) 均逐渐减少; 而在同一处理时间下, 甲维盐对幼虫的 LC_{50} 小于氯虫苯甲酰胺, 说明甲维盐对幼虫的毒力更高, 其中甲维盐在 48 h 时对幼虫的 LC_{10} 、 LC_{20} 、 LC_{50} 分别为 0.005、0.007、0.013 mg/L。

2.2 亚致死剂量农药对 CarE 活性的影响

经氯虫苯甲酰胺、甲维盐亚致死剂量处理后, 草地贪夜蛾 3 龄幼虫体内 CarE 活性在 72 h 内的变化规律存在差异 (图 1)。氯虫苯甲酰胺对 CarE 活力表现先诱导后抑制的作用, 在 24 h 时 CarE 活力最大 (36.75 U/mg), 为对照的 1.90 倍; 而在 36 h 时 CarE 活力最小 (13.58 U/mg), 为对照的 57.57%。甲维盐对 CarE 活力表现先抑制后诱导的作用, 不同处理时间下 CarE 活力均与对照存在差异 ($P < 0.05$); 在 36 h 时 CarE 活力最小 (6.98 U/mg), 为对照的 29.59%; 而在 72 h 时 CarE 活力最大 (42.44 U/mg), 为对照的 1.95 倍。

表 1 氯虫苯甲酰胺与甲维盐对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的毒力

Table 1 Toxicities of chlorantraniliprole and emamectin benzoate against the 3rd-instar larvae of *Spodoptera frugiperda*

药剂 Insecticide	处理时间 (h) Treatment time	LC ₁₀ (mg/L)		LC ₂₀ (mg/L)		LC ₅₀ (mg/L)		毒力回归方程 Regression equation
		均值 Mean value	95% 置信区间 Confidence interval	均值 Mean value	95% 置信区间 Confidence interval	均值 Mean value	95% 置信区间 Confidence interval	
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	24	0.118	0.023 ~ 0.243	0.198	0.058 ~ 0.378	0.531	0.262 ~ 1.125	$y = 0.539 + 1.960x$
甲维盐 Emamectin benzoate	48	0.024	0.003 ~ 0.058	0.047	0.010 ~ 0.101	0.169	0.073 ~ 0.387	$y = 1.157 + 1.501x$
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	24	0.010	0.005 ~ 0.015	0.017	0.010 ~ 0.024	0.043	0.029 ~ 0.092	$y = 2.803 + 2.053x$
甲维盐 Emamectin benzoate	48	0.005	0.003 ~ 0.007	0.007	0.005 ~ 0.009	0.013	0.010 ~ 0.017	$y = 6.215 + 3.298x$

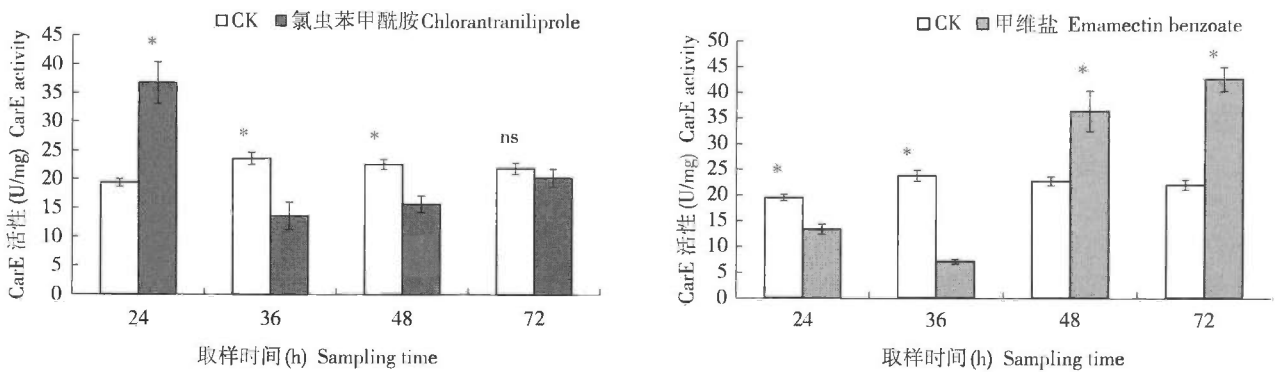


图 1 两种农药对草地贪夜蛾幼虫体内 CarE 活性的影响

Fig. 1 Effect of two pesticides on CarE activity in *Spodoptera frugiperda* larvae

注：图中数据为平均数 ± 标准误；“*”表示农药处理与对照间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。Note: Data are mean ± SE. “*” means that there is a significant difference between pesticide treatment and control ($P < 0.05$). The same below.

2.3 亚致死剂量农药对 GST 活性的影响

经两种农药亚致死剂量处理后，草地贪夜蛾 3 龄幼虫体内 GST 活性在 72 h 内的变化一致，均呈现“诱导 - 抑制 - 诱导”的规律；其中在 24 h 时 GST 活力最高，而在 36 h 时 GST 活力最低 (图 2)。在 24 h 时，氯虫苯甲酰胺处理的幼虫 GST 活力 (112.98 U/mg) 大于甲维盐处理的幼虫

GST 活力 (86.87 U/mg, $P < 0.05$)，说明此时氯虫苯甲酰胺对 GST 活力诱导作用较甲维盐高；而在 36 h 时，甲维盐处理的幼虫 GST 活力 (39.67 U/mg) 小于氯虫苯甲酰胺处理的幼虫 GST 活力 (49.58 U/mg, $P < 0.05$)，说明此时甲维盐对 GST 活力抑制作用较氯虫苯甲酰胺高。

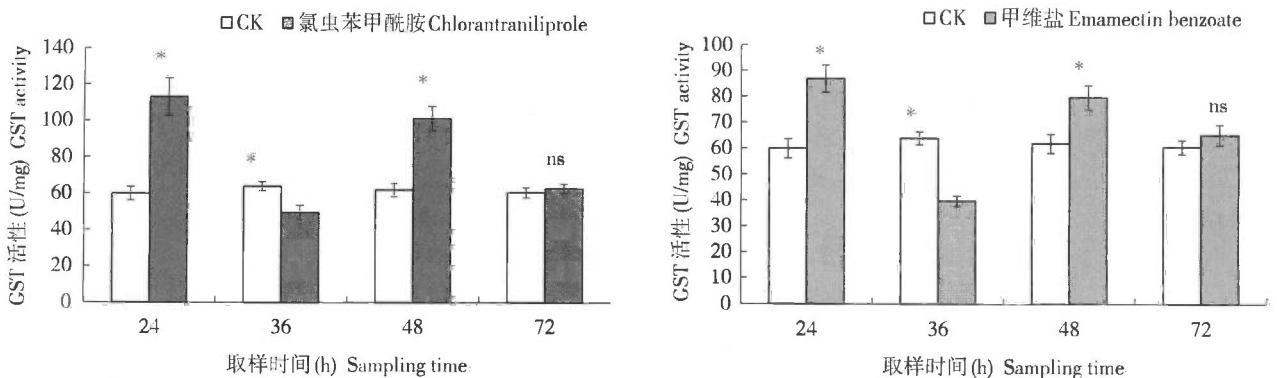


图 2 两种农药对草地贪夜蛾幼虫体内 GST 活性的影响

Fig. 2 Effect of two pesticides on GST activity in *Spodoptera frugiperda* larvae

2.4 亚致死剂量农药对 CYP450 活性的影响

经亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理后, 72 h 内草地贪夜蛾 3 龄幼虫体内 CYP450 活性均与对照差异不显著; 经亚致死剂量甲维盐处理后, 36 h、

48 h、72 h 幼虫体内 CYP450 活性均显著低于对照 ($P < 0.05$), 其中在 72 h 时 CYP450 活力最小, 为 19.76 U/L (图 3)。

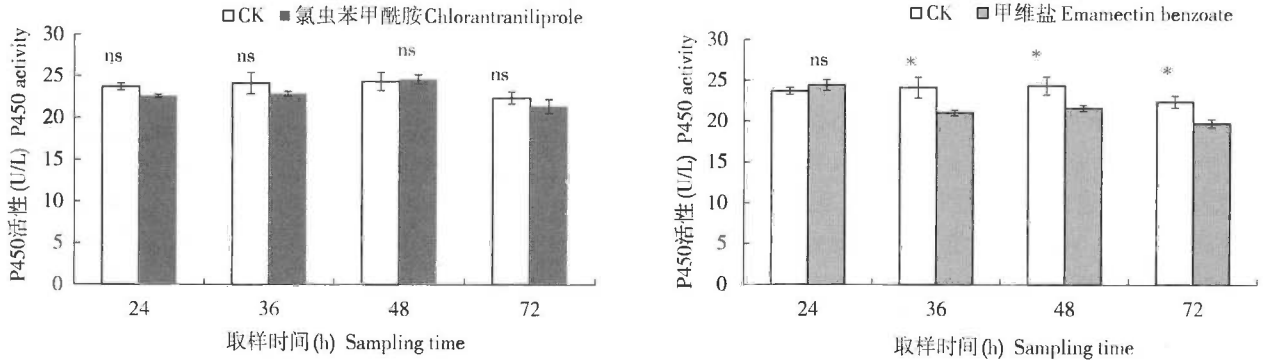


图 3 两种农药对草地贪夜蛾幼虫体内 CYP450 活性的影响

Fig. 3 Effect of two pesticides on CYP450 activity in *Spodoptera frugiperda* larvae

3 结论与讨论

氯虫苯甲酰胺可激活昆虫的鱼尼丁受体, 刺激昆虫释放横纹肌和平滑肌细胞内贮存的钙离子, 使害虫停止取食、抽搐、呕吐、致昏、肌肉收缩僵直及致死 (徐尚成等, 2008)。甲维盐主要扰乱昆虫体内的神经传导过程, 促进氯离子进入神经细胞导致细胞功能丧失, 使昆虫停止进食麻痹死亡 (王龙龙等, 2015)。室内及田间试验结果表明, 这 2 种化学农药对草地贪夜蛾的防治效果均较好 (王勇庆等, 2019; 赵胜园等, 2019)。本研究发现, 这 2 种农药对草地贪夜蛾 3 龄幼虫均具有较高的毒力; 并且甲维盐对幼虫的 LC_{50} 小于氯虫苯甲酰胺, 说明甲维盐对草地贪夜蛾幼虫的毒力更高。

为了应对环境中的化学农药及其他有毒物质等压力, 昆虫在长期的进化过程中形了解毒代谢途径, 其中体内的羧酸酯酶 (CarE)、谷胱甘肽-S-转移酶 (GST) 和细胞色素 P450 (CYP450) 等解毒酶在解毒代谢的过程中发挥着重要的作用 (Bao *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017)。本研究发现, 氯虫苯甲酰胺和甲维盐亚致死剂量处理下, 72 h 内草地贪夜蛾幼虫体内的 CarE、GST 和 CYP450 活力发生了明显的变化, 可见这 3 种酶与实验中的两种杀虫剂在幼虫体内的解毒代谢密切相关; 而这两种杀虫剂对草地贪夜蛾体内 3 种解毒酶不同时间的抑制、诱导激活结果存在着差异,

这可能是由于两种杀虫剂对草地贪夜蛾的杀虫机理不同。

羧酸酯酶 (CarE) 不仅可以调节昆虫的生长发育过程, 还在代谢化学药剂中发挥着重要作用。欧善生等 (2012) 研究表明, 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理棉铃虫幼虫 48 h 后, 幼虫体内的 CarE 的比活力高于对照组。本研究发现, 氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾幼虫 CarE 活力表现先诱导后抑制的作用, 这与何发林等 (2019) 关于溴氰虫酰胺对小地老虎 *Agrotis ypsilon* 的 CarE 活力影响规律一致; 而甲维盐对幼虫 CarE 活力则表现先抑制后诱导的作用; 这可能是由于两种药剂的作用方式和机理存在差异, 从而导致对同一种昆虫酶活力的差异 (何发林等, 2019)。

昆虫 GST 可增加虫体对有毒物质的可溶性将其排出体外, 从而达到解毒代谢作用; 在受到外界有毒物质刺激时, 其体内的 GST 活力会发生变化。欧善生等 (2012) 研究表明, 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量处理棉铃虫 3~6 龄幼虫后, 幼虫 GST 的比活力低于对照组; 张振威等 (2019) 研究发现, 甲维盐亚致死浓度处理舞毒蛾 *Lymantria dispar* 后, 昆虫 GST 活力呈现上升趋势并高于对照组的活力。不同种类物质对草地贪夜蛾幼虫 GST 活力影响差异较大, 黄酮等物质可诱导其幼虫 GST 活性增强, 而五羟黄酮等物质却抑制幼虫 GST 活性 (Yu and Hsu, 1993)。本研究表明, 两种农药处理后草地贪夜蛾 3 龄幼虫 GST 活性均呈现“诱导-抑制-诱导”的规律, 这与张珏锋等 (2019) 关

于制霉菌素对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 若虫 GST 活力影响的结果一致。

据欧善生等 (2012) 报道, 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量处理棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 48 h 后 CYP450 活性高于对照组; 而本研究利用亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理草地贪夜蛾 72 h 内幼虫 CYP450 活性与对照差异不显著。戴瀚洋等 (2015) 研究表明亚致死浓度甲维盐对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 幼虫体内多功能氧化酶 (MFO) 比活力具有促进作用; 而本研究发现亚致死剂量甲维盐在 36 h、48 h、72 h 对幼虫 CYP450 活性具有抑制作用。上述差异的结果可能是由于同一种杀虫药剂的亚致死剂量对不同种类昆虫体内酶活性影响存在差别 (欧善生等, 2012)。

草地贪夜蛾作为入侵我国的重要农业害虫, 在防治的过程中长期使用化学农药会使其产生一定的抗药性, 其中昆虫体内酶活性的变化是检测昆虫抗药的主要指标之一 (阮成龙等, 2012)。本文仅研究了这两种化学农药亚致死剂量对单代草地贪夜蛾酶活性的影响, 有关这两种化学农药亚致死浓度对草地贪夜蛾的连续多代影响有待进一步研究, 为进一步研究草地贪夜蛾对化学农药抗药性机制奠定基础。

参考文献 (References)

- Bao HB, Gao HL, Zhang YX, *et al.* The roles of CYP6AY1 and CYP6ER1 in imidacloprid resistance in the brown planthopper: Expression levels and detoxification efficiency [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2016, 129: 70–74.
- Dai HY, Sun Y, Bai LX, *et al.* Activities of detoxification enzymes and expressions of related genes in *Spodoptera exigua* larvae treated with sublethal concentrations of emamectin benzoate [J]. *Cotton Science*, 2015, 27 (2): 149–158. [戴瀚洋, 孙洋, 柏立新, 等. 亚致死浓度甲维盐胁迫对甜菜夜蛾幼虫解毒酶系活力及其相关基因表达量的影响 [J]. 棉花学报, 2015, 27 (2): 149–158]
- Feldmann F, Rieckmann U, Winter S. The spread of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Africa: What should be done next? [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2019, 126 (5): 97–101.
- Gao WX. Current status and development strategy for chemical control in China [J]. *Plant Protection*, 2010, 36 (4): 19–22. [高希武. 我国害虫化学防治现状与发展策略 [J]. 植物保护, 2010, 36 (4): 19–22]
- Goergen G, Kumar PL, Sankung SB, *et al.* First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa [J]. *PLoS One*, 2016, 11 (10): e0165632.
- Guo JF, Zhao JZ, He KL, *et al.* Potential invasion of the crop – devastating insect pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to China [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (6): 1–10. [郭井菲, 赵建周, 何康来, 等. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国 [J]. 植物保护, 2018, 44 (6): 1–10]
- He FL, Jiang XY, Shang DL, *et al.* Induction of the protective and detoxification enzymes by cyantraniliprole in *Agrotis ipsilon* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (2): 90–96, 102. [何发林, 姜兴印, 尚佃龙, 等. 溴氰虫酰胺胁迫对小地老虎保护酶和解毒酶活性的诱导效应 [J]. 植物保护, 2019, 45 (2): 90–96, 102]
- Ismail F. Cross – resistance between acylurea insect growth regulators in a strain of *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae) from Malaysia [J]. *Pest Management Science*, 2010, 33 (3): 359–370.
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YL, *et al.* Advances in migration and monitoring techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (1): 12–18. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 等. 草地贪夜蛾迁飞行为与监测技术研究进展 [J]. 植物保护, 2019, 45 (1): 12–18]
- Liu NN, Zhu F, Xu Q, *et al.* Behavioral change, physiological modification, and metabolic detoxification: Mechanisms of insecticide resistance [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2006, 49 (4): 671–679.
- Okuma DM, Daniel B, Horikoshi RJ, *et al.* Inheritance and fitness costs of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to spinosad in Brazil [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74 (6): 1441–1448.
- Ou SS, Liang P, Song DL, *et al.* Effects of sublethal dosage of chlorantraniliprole on development and detoxifying enzymes activity of *Helicoverpa armigera* [J]. *Plant Protection*, 2012, 38 (4): 1–8. [欧善生, 梁沛, 宋敦伦, 等. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对棉铃虫生长发育和解毒酶活性的影响 [J]. 植物保护, 2012, 38 (4): 1–8]
- Qiu XH. Molecular mechanisms of insecticide resistance mediated by cytochrome P450s in insects [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (4): 477–482. [邱星辉. 细胞色素 P450 介导的昆虫抗药性的分子机制 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (4): 477–482]
- Ruan CL, Mi Z, Zhu Y. Research progress on mechanism of insect resistance to insecticides [J]. *Science of Sericulture*, 2012, 38 (2): 322–328. [阮成龙, 米智, 朱勇. 昆虫抗药性机制研究进展 [J]. 蚕业科学, 2012, 38 (2): 322–328]
- Salvadori JD, Defferrari MS, Ligabue – Braun R, *et al.* Characterization of entomopathogenic nematodes and symbiotic bacteria active against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and contribution of bacterial urease to the insecticidal effect [J]. *Biological Control*, 2012, 63 (3): 253–263.
- Sharanabasappa D, Kalleshwaraswamy CM, Asokan R, *et al.* First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest on maize in India [J]. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 2018, 24 (1):

- 23 - 29.
- Shi T, Che WN, Wu YD, *et al.* Metabolic mechanisms of resistance to emamectin and cypermethrin in field populations of *Spodoptera exigua* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2012, 49 (6): 1482 - 1489. [侍甜, 车午男, 吴益东, 等. 甜菜夜蛾田间种群对甲氨基阿维菌素苯甲酸盐和高效氯氰菊酯的代谢抗性机制 [J]. 应用昆虫学报, 2012, 49 (6): 1482 - 1489]
- Sparks AN. A review of the Biology of the fall armyworm [J]. *Florida Entomologist*, 1979, 62 (2): 82 - 87.
- Todde L, Pooler RW. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenee from the Western Hemisphere [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1980, 73 (6): 722 - 738.
- Togola A, Meseka S, Menkir A, *et al.* Measurement of pesticide residues from chemical control of the invasive *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in a maize experimental field in Mokwa, Nigeria [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (5): 849.
- Wang L, Chen KW, Zhong HG, *et al.* Progress for occurrence and management and the strategy of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41, (3): 479 - 487. [王磊, 陈科伟, 钟国华, 等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 479 - 487]
- Wang LL, Liu Y, Cui RR, *et al.* Research status and prospects of emamectin benzoate [J]. *Agrochemicals*, 2015, 54 (6): 394 - 399. [王龙龙, 刘钰, 崔蕊蕊, 等. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐研究开发现状与展望 [J]. 农药, 2015, 54 (6): 394 - 399]
- Wang YQ, Ma QL, Tan YT, *et al.* The toxicity and field efficacy of chlorantraniliprole against *Spodoptera frugiperda* [J/OL]. *Journal of Environmental Entomology*, [2019 - 07 - 20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20190701.1722.004.html>. [王勇庆, 马千里, 谭煜婷, 等. 氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾的毒力及田间防效 [J/OL]. 环境昆虫学报, [2019 - 07 - 20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20190701.1722.004.html>]
- Xu SC, Yu YF, Wang XJ, *et al.* Rynaxypyr, a new insecticide and its research & development in application [J]. *Modern Agrochemicals*, 2008, 5: 8 - 11. [徐尚成, 俞幼芬, 王晓军, 等. 新杀虫剂氯虫苯甲酰胺及其研究开发进展 [J]. 现代农药, 2008, 5: 8 - 11]
- Yu SJ, Hsu EL. Induction of detoxification enzymes in phytophagous insects: Role of insecticide synergists, larval age, and species [J]. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 1993, 24 (1): 21 - 32.
- Zhang JF, Li F, Zhong HY, *et al.* Effects of nystatin treatment on detoxification enzymes and uricase content in nymphs of the brown planthopper [*Nilaparvata lugens* (Stål)] [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33 (2): 186 - 190. [张珏锋, 李芳, 钟海英, 等. 制霉菌素对褐飞虱若虫解毒酶、尿酸酶含量的影响 [J]. 中国水稻科学, 2019, 33 (2): 186 - 190]
- Zhang XL, Liao X, Mao KK, *et al.* The role of detoxifying enzymes in field - evolved resistance to nitenpyram in the brown planthopper *Nilaparvata lugens* in China [J]. *Crop Protection*, 2017, 94: 106 - 114.
- Zhang ZW, Zhao QQ, Hao X, *et al.* Effect of avermectin and emamectin benzoate on toxicity and detoxifying enzymes activity in *Lymantria dispar* larva [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47 (5): 118 - 122. [张振威, 赵清泉, 郝昕, 等. 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 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47 (5): 118 - 122]
- Zhao SY, Sun XX, Zhang HW, *et al.* Laboratory test on the control efficacy of common chemical insecticides against *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (3): 10 - 14, 20. [赵胜园, 孙小旭, 张浩文, 等. 常用化学杀虫剂对草地贪夜蛾防效的室内测定 [J]. 植物保护, 2019, 45 (3): 10 - 14, 20]