

## 三种杀虫剂对两种鳞翅目害虫生长发育及解毒代谢的影响

卫丽丽<sup>1,2\*</sup>,徐美琳<sup>1</sup>,张瑞洁<sup>1</sup>,付月君<sup>2</sup>

(1.运城学院 生命科学系,山西省特优农产品梯次高值利用技术创新中心,山西 运城 044000;

2.山西大学 生物技术研究,山西 太原 030006)

**摘要:**化学杀虫剂是鳞翅目害虫防治的主要手段,因化学杀虫剂过度使用导致害虫产生抗药性的研究备受关注。为评估和揭示虫酰肼、溴氰虫酰胺和茚虫威三种化学杀虫剂对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾的防治效果及其生理生化效应,本研究采用室内生物测定法测定了三种杀虫剂的亚致死浓度,之后统计分析了三种杀虫剂亚致死浓度处理对这两种鳞翅目害虫存活率、化蛹率、羽化率、平均体长、平均体重、发育历期的影响,并利用酶活检测试剂盒检测了幼虫体内解毒酶活性的变化情况。结果发现三种杀虫剂均可以不同程度抑制幼虫的生长发育,虫酰肼处理对甜菜夜蛾幼虫的抑制效果最佳,可以显著抑制甜菜夜蛾幼虫生长,延长发育历期,幼虫存活率相较于对照组减少27.77%。幼虫体内的羧酸酯酶的活性在处理12 h、36 h、48 h显著高于对照组,谷胱甘肽S-转移酶的活性在处理12 h后均显著高于对照组。茚虫威处理可显著抑制草地贪夜蛾幼虫生长,延长发育期,幼虫存活率相较于对照组减少27.22%,幼虫中羧酸酯酶活性在12 h显著高于对照组,之后逐渐下降,48 h又显著高于对照组,谷胱甘肽S-转移酶活性在24 h和48 h显著高于对照组。结果表明虫酰肼和茚虫威分别对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾具有较高的杀虫活性,且二者可以导致幼虫中谷胱甘肽S-转移酶和羧酸酯酶的活性在不同时间点上调,而溴氰虫酰胺对两种昆虫的杀虫效果不如虫酰肼和茚虫威,以上结果可以为鳞翅目害虫防治及杀虫剂的合理应用提供理论依据和参考。

**关键词:**甜菜夜蛾;草地贪夜蛾;溴氰虫酰胺;茚虫威;虫酰肼

**中图分类号:**S482.3 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2395(2025)06-1226-12

## The Effects of Three Insecticides on the Growth and Detoxification Metabolism of Two Lepidoptera Pests

WEI Lili<sup>1,2\*</sup>, XU Meilin<sup>1</sup>, ZHANG Ruijie<sup>1</sup>, FU Yuejun<sup>2</sup>

(1. Shanxi Technology Innovation Center of High Value-Added Echelon Utilization of Premium Agro-Products, Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;

2. Institute of Biotechnology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Chemical pesticides are the main controlling means of Lepidoptera pests. Research on pest resistance due to the excessive use of chemical pesticides has attracted much attention. In order to evaluate and reveal the insecticidal efficiency and physiological biochemical effects of three chemical insecticides (ebufenozide, cyantraniliprole and indoxacarb) on *Spodoptera exigua* (*S. exigua*) and *Spodoptera frugiperda* (*S. frugiperda*), the sublethal concentrations of three insecticides were determined by indoor bioassay, and the effects of sublethal concentrations insecticides on key biological parameters were determined, including the survival rate, pupation rate, eclosion rate, average body length, average body weight, developmental duration of these two Lepidoptera pests. Addi-

**收稿日期:**2025-01-03;**接受日期:**2025-06-16

**基金项目:**山西省基础研究计划资助项目(20240302212066);山西省高等学校科技创新项目(2022L473);山西省科技创新人才团队项目(202204051001035);山西省技术创新中心基地项目(202404010920021)

\* **通信作者:**卫丽丽(1991-),女,山西运城人,博士后,讲师,研究方向为生物杀虫剂、植物保护。E-mail:13603555705@163.com.

**引文格式:**卫丽丽,徐美琳,张瑞洁,等.三种杀虫剂对两种鳞翅目害虫生长发育及解毒代谢的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2025,48(6):1226-1237. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2025085.

tionally, the activity of detoxification enzymes in the larvae were measured using enzyme activity detection kits. It was found that three pesticides could inhibit the growth and development of larvae in varying degrees. Tebufenozide most effectively inhibited larval growth in *S. exigua*, prolonged its developmental period and reduced larval survival by 27.77% compared to the control group. Furthermore, the carboxylesterase activity in *S. exigua* larvae were significantly higher than that in control group at 12 h, 36 h and 48 h post-treatment, while glutathione S-transferase activity in *S. exigua* larvae were significantly higher than that in control group after 12 h. In contrast, Indoxacarb significantly suppressed larval growth of *S. frugiperda*, extended its developmental period, and decreased the larval survival rate by 27.22% compared with the control group. Carboxylesterase activity in *S. frugiperda* larvae was significantly higher than that in the control group at 12 h, then gradually decreased, and rose again significantly by 48 h, and glutathione S-transferase activity in *S. frugiperda* were significantly higher than that in control group at 24 h and 48 h post-treatment. The results indicated that tebufenozide and indoxacarb exhibit high insecticidal efficiency against *S. exigua* and *S. frugiperda* respectively, while both can upregulate glutathione S-transferase and carboxylesterase activity in the larvae at different time points. However, the insecticidal efficiency of cyantraniliprole against the two kinds of insects was not as good as that of tebufenozide and indoxacarb. Results from this study can provide scientific basis and reference for the comprehensive control strategy of Lepidoptera pests and the rational application of insecticides.

**Key words:** *Spodoptera exigua*; *Spodoptera frugiperda*; cyantraniliprole; indoxacarb; tebufenozide

## 0 引言

甜菜夜蛾 (*Spodoptera exigua*) 属于鳞翅目夜蛾科昆虫, 是一种分布于热带和亚热带的害虫, 也是一种抗药性强的杂食性害虫<sup>[1-2]</sup>, 对农业生产构成了严重威胁。草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 隶属于鳞翅目夜蛾科灰翅夜蛾属, 最初在美洲被发现, 其后迅速在全球范围内广泛扩散<sup>[3]</sup>, 繁殖能力异常强大。2019年年初, 草地贪夜蛾首次被观测到侵入我国云南地区, 严重威胁我国粮食生产安全, 尤其对玉米产区带来了巨大经济损失。化学防治是治理甜菜夜蛾、草地贪夜蛾这类食性较广的害虫最有效的方法<sup>[4]</sup>。然而, 化学农药的不合理使用容易导致害虫产生抗药性, 增加防控难度。害虫抗药性的产生与其体内的解毒酶密切相关, 对化学杀虫剂亚致死浓度及亚致死浓度处理对害虫生长发育及解毒酶的影响进行测定, 可以为化学杀虫剂的合理使用提供依据, 是害虫防治领域的研究热点。

王永山等的研究表明, 氰氟虫腙的亚致死剂量处理可以抑制草地贪夜蛾3龄幼虫的生长发育<sup>[5]</sup>。草地贪夜蛾幼虫的发育历期会随着氯虫苯甲酰胺的处理浓度的增加而增加, 蛹期显著延长1 d~2 d<sup>[6]</sup>。亚致死浓度的氰氟虫腙处理甜菜夜蛾后, 处理组单雌产卵量以及蛹重减少<sup>[7]</sup>。张凯伦等的研究发现亚致死剂量的溴氰虫酰胺处理灰飞虱后, 成虫体内谷胱甘肽

S-转移酶 (Glutathione S-transferase, GST) 和多功能氧化酶 (Multifunctionaloxidase, MFO) 的酶活均显著升高<sup>[8]</sup>。斜纹夜蛾对茚虫威的抗药性与羧酸酯酶 (Carboxylesterase, CarE) 活性升高有关, 多个羧酸酯酶基因共同参与了斜纹夜蛾对茚虫威的抗性形成过程<sup>[9-10]</sup>。虫酰肼作用于两种不同品系棉铃虫后, 幼虫体内谷胱甘肽S-转移酶活性显著高于对照组, 抗性种群GST活性明显降低, 这表明亚致死浓度的虫酰肼处理对抗性种群和敏感种群的GST具有相反的作用<sup>[11-12]</sup>。亚致死浓度的氟虫腙处理小菜蛾抗性品系后, 小菜蛾幼虫体内的羧酸酯酶活性明显提高, 说明CarE参与小菜蛾对氟虫腙的解毒代谢<sup>[13]</sup>。然而, 关于溴氰虫酰胺、茚虫威、虫酰肼这三种化学杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾生长发育及解毒代谢的影响及对比分析尚不明确。

本研究先用不同浓度的溴氰虫酰胺、茚虫威、虫酰肼处理甜菜夜蛾和草地贪夜蛾三龄幼虫后统计各处理组的死亡虫数, 在SPSS软件中采用机率值分析法分别确定了三种杀虫剂处理两种幼虫的亚致死浓度; 之后用亚致死浓度(LC<sub>30</sub>)的三种杀虫剂分别处理甜菜夜蛾和草地贪夜蛾三龄幼虫, 检测三种杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾存活率、化蛹率、羽化率、平均体长、平均体重以及发育历期的影响; 最后利用酶活检测试剂盒检测了亚致死浓度虫酰肼和茚虫威处理对甜菜夜蛾和草地

贪夜蛾羧酸酯酶和谷胱甘肽 S-转移酶活性的影响。本研究的结果分析了三种化学杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾生长发育、杀虫效率及其解毒代谢生理生化效应的影响,可以为甜菜夜蛾和草地贪夜蛾的化学防治提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试昆虫和实验试剂

甜菜夜蛾、草地贪夜蛾的虫卵购自河南省济源白云实业有限公司。幼虫饲养温度为 27℃,相对湿度 50%~70%,光周期为 L:D=16 h:8 h,用人工饲料进行饲养。成虫在养虫笼中进行饲养,养虫笼中放入浸透体积分数 10% 蜂蜜水的脱脂棉,供成虫补充营养。质量分数 99% 溴氰虫酰胺,购自漳州市嘉益生物科技有限公司;质量分数 95% 茚虫威,购自常熟恒耀新材料有限公司;质量分数 98% 虫酰肼,购自上海吉至生化科技有限公司;谷胱甘肽转移酶活性检测试剂盒、羧酸酯酶活性检测试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

### 1.2 室内生物测定法

我们通过人工饲料混毒法检测了 3 种杀虫剂对两种鳞翅目害虫的毒力。使用二甲基亚砜将溴氰虫酰胺、茚虫威、虫酰肼分别配制成 100 mg/kg 母液,再利用二甲基亚砜将母液进行稀释。处理甜菜夜蛾的三种杀虫剂稀释浓度如下:溴氰虫酰胺梯度稀释为 40、20、10、5、2.5 mg/kg,虫酰肼梯度稀释为 16、8、4、2、1 mg/kg,茚虫威母液梯度稀释为 32、16、8、4、2 mg/kg;处理草地贪夜蛾的三种杀虫剂稀释浓度如下:溴氰虫酰胺梯度稀释为 56、28、14、7、3.5 mg/kg,虫酰肼梯度稀释为 40、20、10、5、2.5 mg/kg,茚虫威母液梯度稀释为 32、16、8、4、2 mg/kg。采用混毒饲料法对试虫进行处理,将 1 mL 梯度稀释后的溴氰虫酰胺、茚虫威和虫酰肼分别加到 100 g 的人工饲料中充分混匀配置成混毒饲料,在人工饲料中加入等量的二甲基亚砜作为对照组。将准备好的混毒饲料置于 12 孔养虫盒内,每个孔内引入一只处于三龄初期的幼虫,每组 12 头幼虫,重复 3 次。72 h 后观察试虫并记录试虫死亡数,通过 SPSS 软件计

算出三种农药的亚致死浓度  $LC_{30}$  及置信区间。毛笔轻触幼虫,若其不能正常爬行,则视为死亡<sup>[14]</sup>。

### 1.3 杀虫剂处理

根据前面计算的结果配置亚致死浓度  $LC_{30}$  的溴氰虫酰胺、茚虫威、虫酰肼杀虫剂,加入到人工饲料中配置成混毒饲料,方法同上。用混毒饲料对三龄幼虫进行饲喂,每组处理 12 头,重复 3 次。

### 1.4 生命表参数的测定

#### a. 平均体重、体长的测定

用亚致死浓度  $LC_{30}$  处理三龄幼虫 48 h 后,将存活的幼虫用毛笔挑出,在电子天平称量其总重量,计算平均体重,同时用 10 分度的游标卡尺测量每条虫子的体长并计算平均值,之后隔一天统计一次。

#### b. 死亡率

用亚致死浓度  $LC_{30}$  处理 48 h 后,观察并统计幼虫的死亡数,计算死亡率(%)=死亡数/每组处理的试虫数。

#### c. 化蛹率和羽化率

化蛹率(%)=化蛹数/每组处理的幼虫数;羽化率(%)=羽化的成虫数/蛹数。

#### d. 发育历期

幼虫发育历期从孵化至化蛹结束,每一龄期都会经历一次蜕皮,由于昆虫骨化部位每蜕一次皮就显著增长一次,且头壳骨化强而形态较为稳定,故常用幼虫头宽作为昆虫龄期划分的重要指标<sup>[15]</sup>。甜菜夜蛾 3~5 龄幼虫的头壳宽度范围分别为 0.65 mm~0.75 mm、1.05 mm~1.15 mm、1.65 mm~1.80 mm<sup>[16]</sup>,草地贪夜蛾 3~6 龄幼虫头壳宽度范围分别为 0.77 mm~0.99 mm、1.14 mm~1.39 mm、1.74 mm~2.07 mm、2.38 mm~2.83 mm<sup>[17]</sup>。杀虫剂处理三龄幼虫后,每隔 3 h 在显微镜下用显微测量尺(15×,精度 0.01 mm)测一次幼虫头壳宽度,记录头壳宽度从一个龄期范围到下一龄期范围的时间为各龄期的历期。预蛹期是统计末龄幼虫化蛹前缩短身体、停止摄食、进入不活动的阶段到完全化蛹所用的时间,蛹期是统计化蛹第一天到羽化为成虫所用的时间,每隔 3 h 统计一次。

### 1.5 酶活测定

#### a. 谷胱甘肽转移酶活性测定方法:

酶液制备:用三种杀虫剂的亚致死浓度 $LC_{30}$ 处理3龄幼虫12 h、24 h、36 h和48 h后,每个时间点收集3头虫子,加液氮充分研磨,称取0.1 g研磨后的虫体组织,加入0.1 mol/L pH 7.6的磷酸缓冲液1 mL,转入1.5 mL离心管,12 000 r/min,4 °C,离心30 min,取200  $\mu$ L上清液作为酶液备用。

蛋白含量测定:使用碧云天二喹啉甲酸(Bicinchoninic Acid, BCA)蛋白浓度测定试剂盒对蛋白含量进行测定,测定方法按照说明书进行。

酶活检测:先将谷胱甘肽转移酶活性检测试剂盒中的试剂1—4配好,按照说明书的加样顺序加好试剂后进行酶促反应,反应结束后4 000 r/min,4 °C,离心10 min,取上清液,按照说明书的加样顺序加好试剂进行显色反应,每个样品均设置对照组和处理组,具体测定方法和计算方法参照试剂盒规定,酶活力单位定义如下:即每毫克组织蛋白在37 °C每分钟扣除非酶促反应,使反应体系中GSH浓度降低1  $\mu$ mol/L为一个酶活力单位U。每个处理组进行3次重复。

#### b. 羧酸酯酶活性测定:

酶液制备:用三种杀虫剂的亚致死浓度 $LC_{30}$ 处理3龄幼虫12 h、24 h、36 h和48 h后,每个时间点收集3头虫子,加液氮充分研磨,称取0.1 g研磨后的虫体组织至1.5 mL离心管,加

入羧酸酯酶活性检测试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)中的试剂—1 mL后冰浴匀浆,12 000 r/min,4 °C,离心30 min,取上清液作为酶液备用。

酶活检测:待测酶液在37 °C预热30 min以上,依次在1 mL玻璃比色皿中分别加入5  $\mu$ L蒸馏水(对照组)或5  $\mu$ L待测酶液(实验组),迅速在450 nm测定10 s和190 s的光吸收值,具体计算方法参照说明书,酶活单位定义如下:每克组织在37 °C每分钟催化吸光值增加1,定义为1 U。每个处理组进行3次重复。

### 1.6 数据分析

在SPSS Statistics 19 win32软件中采用机率值分析法分别计算了虫酰肼、茚虫威和溴氰虫酰胺处理两种幼虫的 $LC_{30}$ 和 $LC_{50}$ 以及95%置信区间<sup>[18]</sup>。利用单因素方差分析的统计方法进行数据分析,用字母表示差异显著性,标记相同字母的处理组为差异不显著,标记不同字母的处理组为差异显著( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 三种杀虫剂对两种夜蛾的亚致死剂量的测定

为了对比三种杀虫剂对两种夜蛾的毒力,采用饲料混毒法分别处理两种幼虫72 h以后统计死亡虫数,用SPSS软件计算了三种杀虫剂对甜菜夜蛾(表1)和草地贪夜蛾(表2)的亚致死浓度。表1的结果显示三种杀虫剂对甜菜夜蛾幼虫的毒力从大到小依次为:虫酰肼、茚虫威和溴氰虫酰胺。其中,虫酰肼毒力最高, $LC_{50}$ 为3.36 mg/kg,

表1 三种杀虫剂对甜菜夜蛾3龄幼虫的毒力分析

Table 1 Toxicity analysis of three insecticides to the 3<sup>rd</sup> instar larvae of *S. exigua*

| 杀虫剂   | $LC_{30}$ (95%置信限)<br>/(mg/kg) | $LC_{50}$ (95%置信限)<br>/(mg/kg) | 斜率±标准误    | 卡方值(自由度df) |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|------------|
| 溴氰虫酰胺 | 6.45(2.68~9.80)                | 10.87(6.32~15.78)              | 2.32±0.55 | 1.73(3)    |
| 虫酰肼   | 1.42(0.00~4.27)                | 3.36(0.08~7.43)                | 1.39±0.56 | 2.40(3)    |
| 茚虫威   | 4.98(1.35~8.30)                | 9.09(4.22~13.86)               | 2.01±0.54 | 1.63(3)    |

表2 三种杀虫剂对草地贪夜蛾3龄幼虫的毒力分析

Table 2 Toxicity analysis of three insecticides to the 3<sup>rd</sup> instar larvae of *S. frugiperda*

| 杀虫剂   | $LC_{30}$ (95%置信限)<br>/(mg/kg) | $LC_{50}$ (95%置信限)<br>/(mg/kg) | 斜率±标准误    | 卡方值(自由度df) |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|------------|
| 溴氰虫酰胺 | 6.37(0.01~10.78)               | 14.04(5.70~51.23)              | 1.53±0.69 | 0.04(3)    |
| 虫酰肼   | 6.29(2.71~9.42)                | 10.31(6.09~14.80)              | 2.44±0.58 | 1.23(3)    |
| 茚虫威   | 2.79(0.02~6.67)                | 7.06(0.62~13.21)               | 1.30±0.48 | 1.04(3)    |

LC<sub>30</sub>值为1.42 mg/kg。表2的结果显示,三种杀虫剂对草地贪夜蛾幼虫的毒力从大到小的顺序依次为:茚虫威、虫酰肼、溴氰虫酰胺。毒力最高的是茚虫威,LC<sub>30</sub>为2.79 mg/kg;溴氰虫酰胺毒力最小的,LC<sub>30</sub>为6.37 mg/kg。后续实验选择3种杀虫剂的LC<sub>30</sub>作为亚致死浓度来进行处理。

## 2.2 三种杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾发育历期的影响

为了比较三种杀虫剂对两种鳞翅目昆虫发育历期的影响,我们对各处理组的发育历期进行了统计分析。甜菜夜蛾发育历期的统计结果如表3所示,虫酰肼处理组甜菜夜蛾幼虫的发育历期受到较大的影响,4龄、5龄幼虫以及预蛹期和蛹期的发育时间比对照组均显著延长( $P<0.05$ )。茚虫威处理组甜菜夜蛾3龄和5龄幼虫的龄期以及蛹期相较于对照组均有所延长,而4龄幼虫的龄期和预蛹期则相对缩短,其中5龄幼虫的龄期和蛹期与对照组存在显著差异。溴氰虫酰胺处理组,甜菜夜蛾从3龄幼虫到蛹期的整个发育过程都有所延长,其中4龄、5龄幼虫龄期以及蛹期的历期与对照组相比均存在显著差异。这些结果表明,虫酰肼处理对甜菜夜蛾幼虫的发育具有显著的延缓作用,特别是在其发育后期阶段。草地贪夜蛾发育历期的统计结果如表4所示,与对照组相比,虫酰肼处理组的草地贪夜蛾5龄幼虫的龄期和蛹期历期显著延长,其他发育阶段与对照组无明显差异;溴氰虫酰胺处理组相较于对照组而言,4龄之后的草地贪夜蛾幼虫各龄期和蛹期都有所延长。茚虫威处理组,3龄、4龄、5龄、6龄草地贪夜蛾幼虫期和蛹期历期均长于对照组,差异显著( $P<0.05$ )。综上,相较于虫酰肼和溴氰虫酰胺处理组,茚虫威处理组的草地贪夜蛾与对照组相比发育历期显著延长。

## 2.3 三种杀虫剂亚致死浓度处理对两种夜蛾平均体重、体长的影响

三种杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾平均体重的影响如图1(a)所示,虫酰肼饲喂组在1 d~3 d平均体重增长速率平缓,3 d~5 d快速增长,随后又逐步减缓;溴氰虫酰胺处理的甜菜夜蛾幼虫在处理5 d后平均体重增长高于其他两种杀虫剂,茚虫威处理组甜菜夜蛾幼虫1

表3 三种杀虫剂亚致死浓度对甜菜夜蛾发育历期的影响

Table 3 Effects of sublethal concentrations of three insecticides on developmental duration of *S. exigua*

| 发育<br>历期<br>/d | 处理组                     |                        |                        |                           |
|----------------|-------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
|                | 对照<br>CK                | 虫酰肼<br>Tebufenozide    | 茚虫威<br>Indoxacarb      | 溴氰虫酰胺<br>Cyantraniliprole |
| 3龄幼虫           | 3.03±0.09 <sup>b</sup>  | 2.87±0.09 <sup>a</sup> | 3.40±0.12 <sup>b</sup> | 3.40±0.1 <sup>b</sup>     |
| 4龄幼虫           | 2.83±0.03 <sup>a</sup>  | 3.10±0.06 <sup>b</sup> | 2.73±0.03 <sup>a</sup> | 3.17±0.03 <sup>b</sup>    |
| 5龄幼虫           | 3.43±0.09 <sup>a</sup>  | 4.63±0.03 <sup>c</sup> | 3.87±0.03 <sup>b</sup> | 4.03±0.03 <sup>b</sup>    |
| 预蛹期            | 2.30±0.10 <sup>ab</sup> | 3.93±0.40 <sup>c</sup> | 2.10±0.62 <sup>a</sup> | 3.00±0.20 <sup>b</sup>    |
| 蛹期             | 8.37±0.22 <sup>a</sup>  | 9.00±0.06 <sup>b</sup> | 8.9±0.06 <sup>b</sup>  | 8.83±0.12 <sup>b</sup>    |

注:所列数据是平均值±标准误。同列数据后的不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

d~7 d平均体重增长速率保持平稳。图1(b)的结果显示,虫酰肼处理组的草地贪夜蛾幼虫在1 d~3 d平均体重增长速率不大,3天后开始快速增长;茚虫威处理的草地贪夜蛾幼虫在处理1 d~7 d平均体重增长较慢,第9 d平均体重超过其他两种杀虫剂处理组。图1(c)的结果显示,处理后的1 d~5 d,虫酰肼处理组的甜菜夜蛾幼虫平均体长增长速率较慢,而溴氰虫酰胺和茚虫威处理组的甜菜夜蛾幼虫平均体长增长速率相对较快。处理后7 d~9 d,虫酰肼处理组甜菜夜蛾幼虫平均体长的增长速率高于其他两个处理组的幼虫。从图1(d)可以看出,1 d~5 d,虫酰肼和茚虫威处理组草地贪夜蛾幼虫的平均体长增长速率缓慢,而溴氰虫酰胺处理组草地贪夜蛾幼虫的平均体长增长速率相对较快。这些结果表明,虫酰肼对甜菜夜蛾幼虫体重和体长的影响较大,而茚虫威对草地贪夜蛾幼虫体重和体长的影响较大。

## 2.4 三种杀虫剂亚致死浓度处理对两种夜蛾化蛹率、羽化率的影响

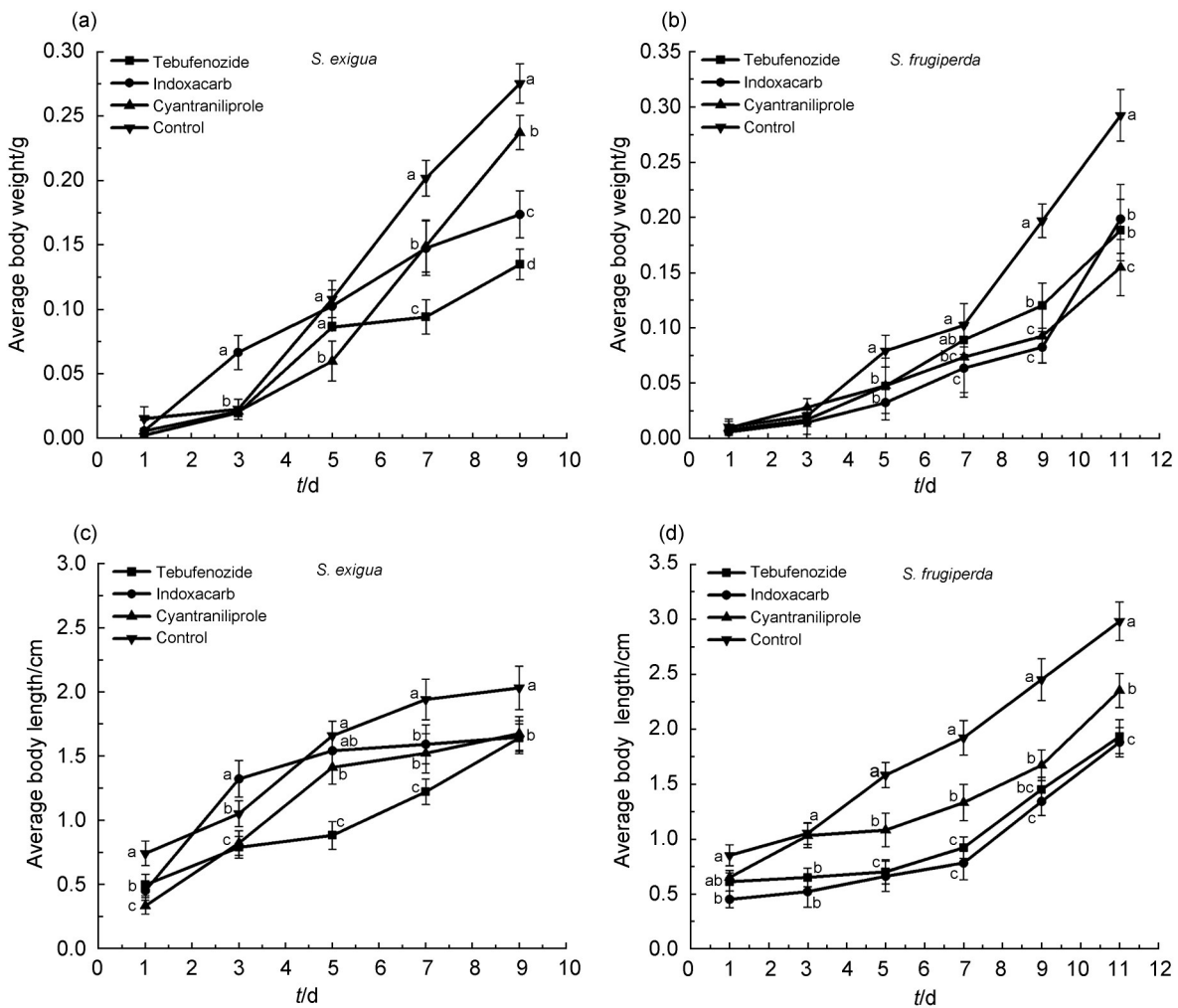
如图2(a)所示,对甜菜夜蛾幼虫化蛹率影响最大的是虫酰肼,与对照相比其化蛹率减少33.79%,有显著性差异。茚虫威、溴氰虫酰胺对甜菜夜蛾的化蛹率的影响低于虫酰肼,分别比对照低17.59%、9.34%。图2(b)的结果显示,茚虫威处理对草地贪夜蛾化蛹率的影响最大,比对照组化蛹率低37.25%,具有显著性差异。虫酰肼、溴氰虫酰胺处理组与对照组相比化蛹率分别降低了22.12%、9.39%。图2(c)的结果显示,虫酰肼处理对甜菜夜蛾羽化率影响

表4 三种杀虫剂亚致死浓度处理对草地贪夜蛾发育历期的影响

Table 4 Effects of sublethal concentrations of three insecticides on developmental duration of *S. frugiperda*

| 发育历期/d | 处理组                     |                          |                           |                          |
|--------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|        | 对照<br>CK                | 虫酰肼<br>Tebufenozide      | 溴氰虫酰胺<br>Cyantraniliprole | 茚虫威<br>Indoxacarb        |
| 3龄幼虫   | 2.90±0.06 <sup>a</sup>  | 2.83±0.09 <sup>a</sup>   | 3.53±0.09 <sup>b</sup>    | 3.73±0.09 <sup>b</sup>   |
| 4龄幼虫   | 3.00±0.06 <sup>a</sup>  | 2.87±0.12 <sup>a</sup>   | 3.37±0.09 <sup>b</sup>    | 3.37±0.09 <sup>b</sup>   |
| 5龄幼虫   | 3.77±0.03 <sup>b</sup>  | 3.47±0.03 <sup>a</sup>   | 3.97±0.12 <sup>bc</sup>   | 4.07±0.09 <sup>c</sup>   |
| 6龄幼虫   | 2.90±0.06 <sup>a</sup>  | 2.80±0.06 <sup>a</sup>   | 3.20±0.12 <sup>b</sup>    | 3.83±0.09 <sup>c</sup>   |
| 预蛹期    | 2.73±0.15 <sup>a</sup>  | 2.63±0.09 <sup>a</sup>   | 3.77±0.07 <sup>b</sup>    | 3.33±0.03 <sup>c</sup>   |
| 蛹期     | 11.23±0.50 <sup>a</sup> | 11.77±0.27 <sup>ab</sup> | 12.10±0.15 <sup>b</sup>   | 12.13±0.20 <sup>ab</sup> |

注:所列数据是平均值±标准误。同列数据后的不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。



注:采用单因素方差分析法对同一时间点的四组数据进行分析,标记相同字母的处理组差异不显著,标记不同字母的处理组差异显著( $P<0.05$ )。

图1 三种杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾幼虫的平均体重和平均体长的影响

(a)甜菜夜蛾幼虫的平均体重;(b)草地贪夜蛾幼虫的平均体重;(c)甜菜夜蛾幼虫的平均体长;(d)草地贪夜蛾幼虫的平均体长

Fig. 1 Effects of sublethal concentrations of three insecticides on average body weight and average body length of *S. exigua* larva and *S. frugiperda* larva

(a) The average body weight of *S. exigua* larvae; (b) the average body weight of *S. frugiperda* larvae; (c) the average body length of *S. exigua* larvae; (d) the average body length of *S. frugiperda* larvae

最大,与对照相比减少 58.24%,具有显著性差异。茚虫威处理的甜菜夜蛾幼虫羽化率与对照组相比减少 24.73%,无显著性差异。图 2(d)的结果显示,茚虫威处理的草地贪夜蛾幼虫羽化率为 38%,显著低于对照组和其他两个处理组,与其他处理组存在显著性差异。溴虫酰胺、氰虫酰胺处理组草地贪夜蛾幼虫羽化率与对照组相比,分别降低了 9% 和 20%。

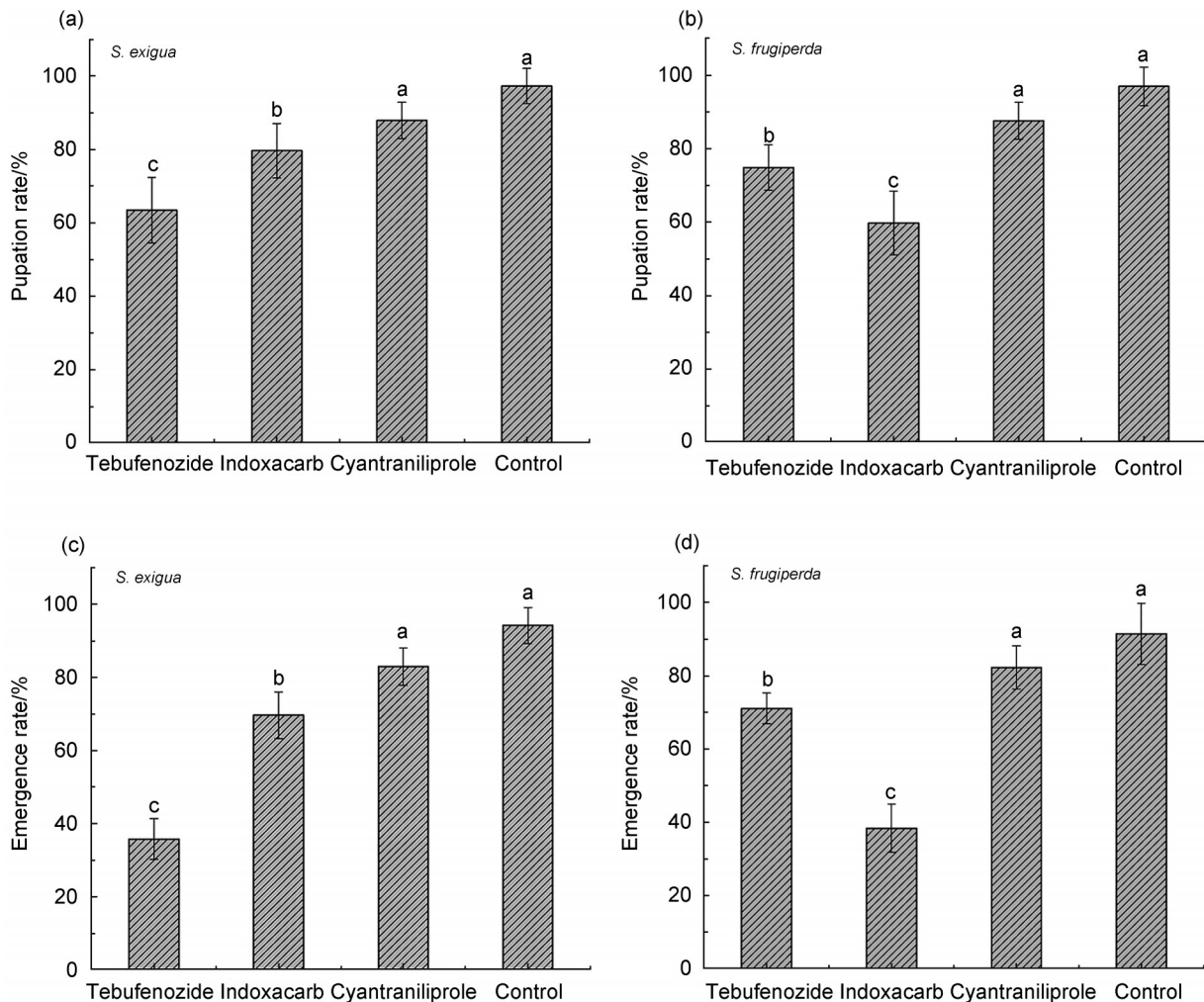
### 2.5 三种杀虫剂处理后两种夜蛾幼虫的存活率测定

图 3(a)的结果显示,经过杀虫剂处理的甜菜夜蛾幼虫存活率相较于对照组均呈现显著下降趋势。虫酰肼和茚虫威处理组,幼虫的存

活率比对照组分别降低了 27.77% 和 16.67%。图 3(b)的结果显示,茚虫威处理组的草地贪夜蛾幼虫存活率比对照组减少 27.22%,是三种杀虫剂中对存活率影响最大的;虫酰肼处理组和溴氰虫酰胺处理组的存活率都为 88.89%,与对照组相比降低 8.33%,对草地贪夜蛾的影响较小。

### 2.6 亚致死浓度虫酰肼、茚虫威处理对两种夜蛾幼虫解毒酶活性的影响

由前面的结果可知,虫酰肼处理对甜菜夜蛾幼虫的影响最为显著,茚虫威处理对草地贪夜蛾幼虫的影响最为显著。接着,我们检测了虫酰肼处理的甜菜夜蛾幼虫和茚虫威处理的草



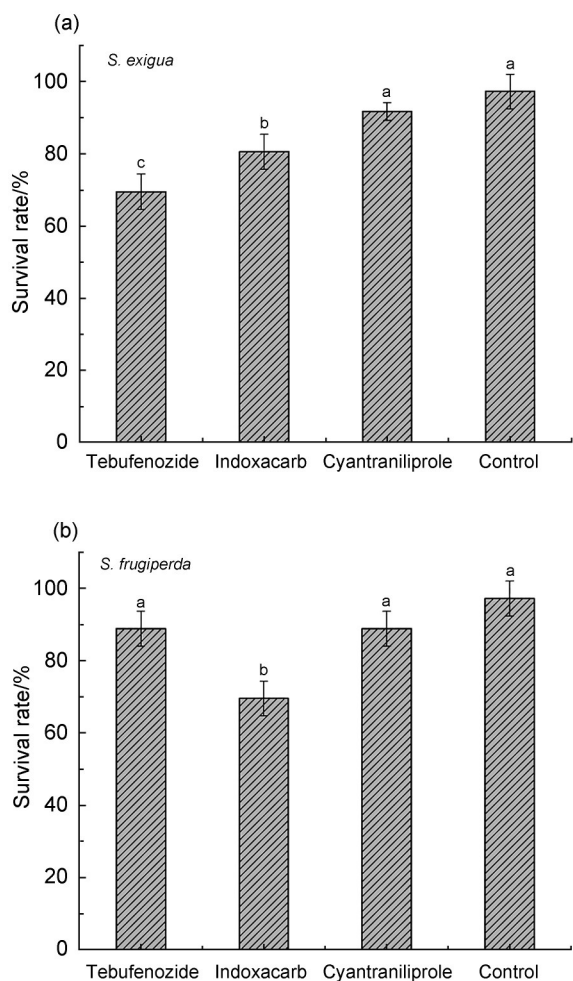
注:图中标记相同字母的处理组差异不显著,标记不同字母的处理组差异显著( $P < 0.05$ )。

图 2 三种杀虫剂亚致死浓度处理对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾化蛹率、羽化率的影响

(a) 甜菜夜蛾幼虫的化蛹率; (b) 草地贪夜蛾幼虫的化蛹率; (c) 甜菜夜蛾蛹的羽化率; (d) 草地贪夜蛾蛹的羽化率

Fig. 2 Effects of sublethal concentrations of three insecticides on pupation rate and emergence rate of *S. exigua* and *S. frugiperda*  
(a) The pupation rate of *S. exigua* larvae; (b) the pupation rate of the *S. frugiperda* larvae; (c) the emergence rate of *S. exigua* pupa;  
(d) emergence rate of *S. frugiperda* pupa

地贪夜蛾幼虫中羧酸酯酶、谷胱甘肽转移酶的酶活性,进一步探究这两种杀虫剂影响鳞翅目害虫生长发育的作用机制。图4(a)表明,虫酰肼处理的甜菜夜蛾幼虫中GST酶的酶活性在处理12 h后均显著的高于对照组。图4(b)表明,相较于未处理组,虫酰肼处理的甜菜夜蛾幼虫中羧酸酯酶活性在12 h显著高于对照组,24 h下降,36 h之后又显著升高。图4(c)表明,茚虫威处理的草地贪夜蛾幼虫中GST酶活性在24 h和48 h显著高于对照组。图4(d)表明,茚虫威处理的草地贪夜蛾幼虫中羧酸酯酶活性在12 h显著高于对照组,之后逐渐下降,48 h的时候又显著高于对照组。



注:图中标记相同字母的处理组为差异不显著,标记不同字母的处理组差异显著( $P < 0.05$ )。

图3 三种杀虫剂对甜菜夜蛾(a)和草地贪夜蛾(b)存活率的影响

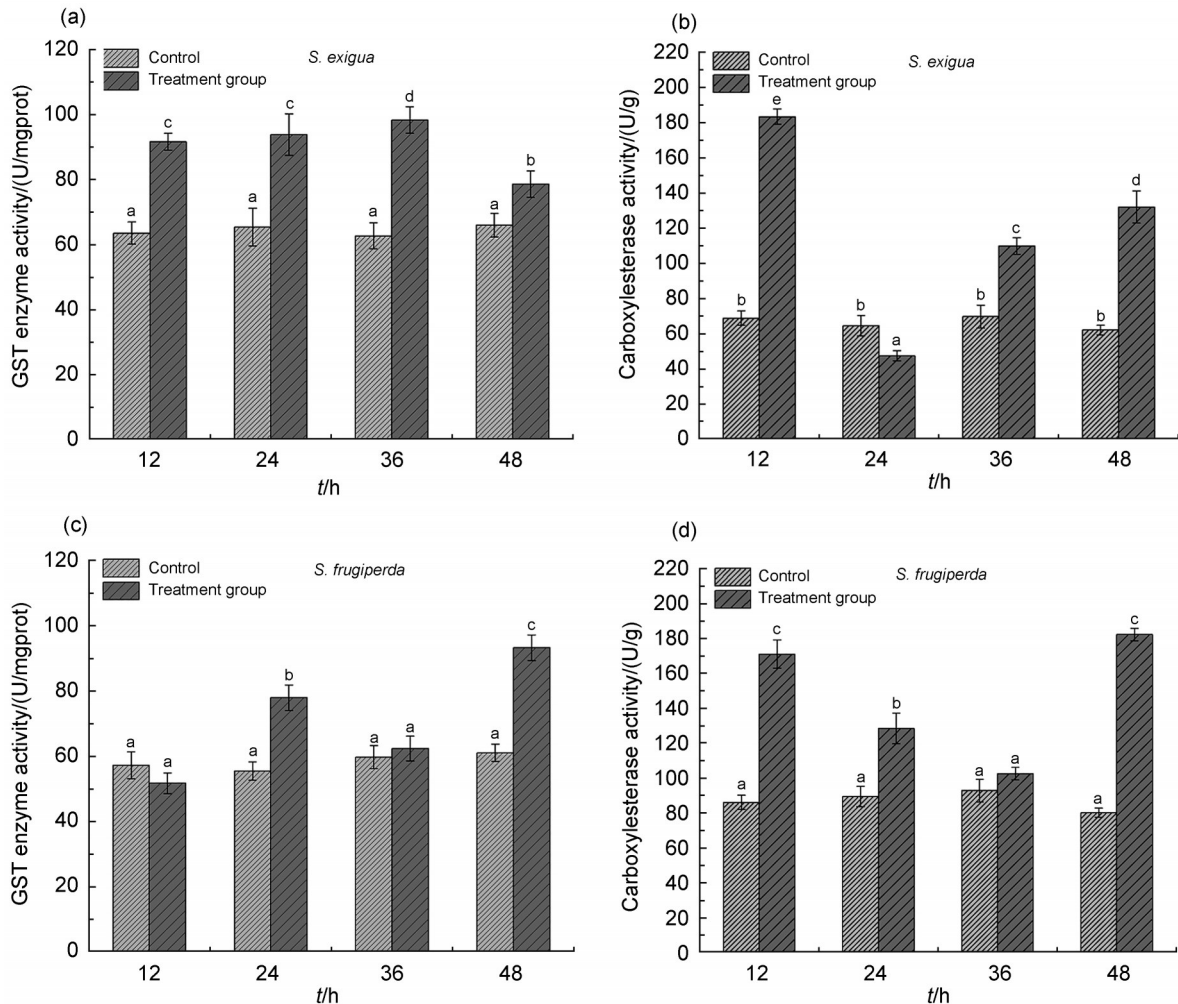
Fig. 3 Effects of three insecticides on survival rate of *S. exigua* (a) and *S. frugiperda* (b)

### 3 结论与讨论

近年来,关于化学杀虫剂亚致死浓度对害虫生长发育的影响及害虫耐药性机制的研究备受关注。使用亚致死浓度虫酰肼处理亚洲玉米螟5龄幼虫后,亚洲玉米螟的5龄历期、幼虫体重及化蛹率都有明显的降低,影响其繁育后代,对子代种群增长有抑制作用<sup>[19-20]</sup>。本研究发现亚致死浓度虫酰肼处理延缓了甜菜夜蛾幼虫的发育历程,且实验过程中发现部分幼虫形成了介于幼虫和蛹之间的中间体,不能继续发育,因为蜕皮的完成是多种激素共同作用的结果,虫酰肼只模拟其中的蜕皮激素作用<sup>[21]</sup>,可以诱导蜕皮开始但不能完成蜕皮,致使出现变异畸形个体。亚致死浓度的溴氰虫酰胺和茚虫威处理后,甜菜夜蛾幼虫的发育历期和蛹期有所延长,但对幼虫化蛹率和羽化率的影响没有虫酰肼显著,结果表明虫酰肼对甜菜夜蛾的防治效果优于其他两种杀虫剂。

宋亮等<sup>[22]</sup>的研究发现亚致死浓度的茚虫威和高效氯氟菊酯处理后小菜蛾各虫态发育历期比对照组显著延长,本研究发现亚致死剂量的茚虫威处理草地贪夜蛾三龄幼虫后,可以抑制草地贪夜蛾的生长发育,增加草地贪夜蛾的致死率,可能是因为茚虫威通过阻断神经细胞钠离子通道,使靶标昆虫麻痹致死。陈琼等的研究发现,亚致死浓度的氯虫苯甲酰胺处理后,甜菜夜蛾幼虫历期和蛹期显著延长,幼虫体重和蛹重显著减轻<sup>[23]</sup>。本研究发现亚致死浓度的溴氰虫酰胺处理后草地贪夜蛾幼虫和蛹的发育历期延长,幼虫体重降低,抑制了草地贪夜蛾的生长发育,可能是由于溴氰虫酰胺同时具有胃毒和触杀作用,对幼虫营养摄取产生了影响<sup>[24]</sup>。虫酰肼处理组草地贪夜蛾幼虫发育历期缩短,化蛹率、羽化率降低。三种杀虫剂中对草地贪夜蛾幼虫存活率影响最大的是茚虫威,其幼虫死亡数显著高于虫酰肼和溴氰虫酰胺处理组。这些结果表明,茚虫威杀虫剂对草地贪夜蛾的防治效果优于其他两种杀虫剂。

虫酰肼处理棉铃虫48 h后,通过影响GST的酶活增强棉铃虫对杀虫剂的抗性<sup>[25]</sup>。本研究发现虫酰肼处理的甜菜夜蛾幼虫中GST酶活性在处理12 h后均显著高于对照组,可能是



注:图中标记相同字母的处理组为差异不显著,标记不同字母的处理组差异显著( $P < 0.05$ )。

图4 杀虫剂亚致死浓度处理对两种夜蛾幼虫解毒酶活性的影响

(a) 虫酰肼处理对甜菜夜蛾幼虫中GST酶活性的影响;(b)虫酰肼处理对甜菜夜蛾幼虫中羧酸酯酶活性的影响;(c)茚虫威处理对草地贪夜蛾幼虫中GST酶活性的影响;(d)茚虫威处理对草地贪夜蛾幼虫中羧酸酯酶活性的影响

Fig. 4 Effects of sublethal concentration of insecticide treatment on detoxification enzyme activity of *S. exigua* and *S. frugiperda* larvae

(a) Effect of tebufenozide treatment on the GST enzyme activity in *S. exigua* larvae; (b) effect of tebufenozide treatment on carboxylesterase activity in *S. exigua* larvae; (c) effect of indoxacarb treatment on the GST enzyme activity in *S. frugiperda* larvae; (d) effects of indoxacarb treatment on carboxylesterase activity of in in *S. frugiperda* larvae

由于GST酶活性增加提高了昆虫对虫酰肼的分解代谢,从而提高昆虫对逆境的适应性<sup>[26-27]</sup>。Han等的研究发现,氯氟氰菊酯、氟虫脲、硫丹处理马铃薯甲虫后,LdGSTe2a、LdGSTe2b、LdGSTo5和LdGSTt1均显著过表达<sup>[28]</sup>。本研究发现茚虫威处理对草地贪夜蛾幼虫中GST酶活性有显著影响,具体是哪些GST基因在发挥作用,还有待进一步研究。羧酸酯酶在昆虫生理过程中起着重要的作用,同时也是昆虫防治的一个关键点<sup>[29]</sup>,虫酰肼处理

甜菜夜蛾幼虫12h、36h后羧酸酯酶的活性显著高于对照组,茚虫威处理的草地贪夜蛾幼虫中,羧酸酯酶活性在12h、48h显著高于对照组。尹菲等人发现通过RNA干扰降低CarE基因表达可以显著增加褐飞虱对毒死蜱的易感性,推测羧酸酯酶与虫酰肼的分解代谢有关<sup>[30-31]</sup>,在抗性昆虫中,羧酸酯酶代谢能力的增强一般以增加羧酸酯酶的表达量来实现并对多种杀虫剂产生抗药性<sup>[32]</sup>。这些结果表明草地贪夜蛾对茚虫威的解毒代谢、甜菜夜蛾对虫

酰肼的解毒代谢均与 CarE 和 GST 有关, 可以作为 RNA 生物农药潜在的作用靶点。

综上所述, 本研究评估认为虫酰肼和茚虫威分别对甜菜夜蛾和草地贪夜蛾具有较高的杀虫活性, 然而这两种杀虫剂均会导致害虫中与药物代谢相关的羧酸酯酶和 GST 酶活性在不同的时间点上调, 长期使用容易导致害虫产生抗药性, 后续可以用 RNAi 干扰可能导致害虫产生抗药性的羧酸酯酶和 GST 酶, 探究 RNA 生物杀虫剂与化学杀虫剂共处理是否存在协同效应, 可为鳞翅目害虫的综合防治以及杀虫剂的合理应用提供科学依据和参考。

#### 参考文献:

- [1] 潘纪龙, 孙清明, 苏宏华. 不同光周期对甜菜夜蛾生长发育及生殖行为的影响[J]. 中国生物防治学报, 2024, **40**(6): 1302-1309. DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2024.03.010.
- PAN J L, SUN Q M, SU H H. Effect of Photoperiod on Growth and Development and Reproductive Behaviors of *Spodoptera exigua*(Hübner) [J]. *Chin J Biol Control*, 2024, **40**(6): 1302-1309. DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2024.03.010.
- [2] 曾纪岚, 孔祥东, 董梓慧, 等. 五种寄主植物对甜菜夜蛾幼虫中肠蛋白酶活性的影响[J]. 环境昆虫学报, 2019, **41**(1): 42-49. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0858.2019.01.6.
- ZENG J L, KONG X D, DONG Z H, *et al.* Effects of Five Different Host Plants on the Midgut Protease Activities of the Larva in *Spodoptera exigua*[J]. *J Environ Entomol*, 2019, **41**(1): 42-49. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0858.2019.01.6.
- [3] 谭心阳, 赵海婷, 曹美伦, 等. 国内草地贪夜蛾发生、为害及防治现状[J]. 现代农药, 2022, **21**(5): 13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5284.2022.05.003.
- TAN X Y, ZHAO H T, CAO M L, *et al.* The Occurrence, Damage and Control Status of *Spodoptera frugiperda* in China[J]. *Mod Agrochem*, 2022, **21**(5): 13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5284.2022.05.003.
- [4] 郑霞林, 王攀, 王小平, 等. 转基因棉甜菜夜蛾的为害现状、暴发成因及防治现状[J]. 植物保护, 2010, **36**(3): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.0529-1542.2010.03.008.
- ZHENG X L, WANG P, WANG X P, *et al.* Damage, Occurrence and Control of *Spodoptera exigua* on Transgenic Cottons[J]. *Plant Prot*, 2010, **36**(3): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.0529-1542.2010.03.008.
- [5] 王永山, 王风良, 金中时, 等. 大丰市甜菜夜蛾发生现状及综合防治对策[J]. 广西植保, 2006, **19**(1): 30-31. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8779.2006.01.014.
- WANG Y S, WANG F L, JIN Z S, *et al.* Occurrence Status and Comprehensive Control Measures of *Spodoptera exigua* in Dafeng City[J]. *Guangxi Plant Prot*, 2006, **19**(1): 30-31. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8779.2006.01.014.
- [6] 冯行利. 三种杀虫剂对草地贪夜蛾的亚致死效应研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2022. DOI: 10.27756/d.cnki.gzjlx.2022.000138.
- FENG X L. Study on Sublethal Effects of Three Insecticides on *Spodoptera frugiperda*[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2022. DOI: 10.27756/d.cnki.gzjlx.2022.000138.
- [7] 马凤娟, 李永丹, 高希武. 氟氰虫脒亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育和繁殖力的影响[J]. 应用昆虫学报, 2012, **49**(2): 428-433.
- MA F J, LI Y D, GAO X W. Sublethal Effects of Metaflumizone on the Development and Reproduction of the Beet Armyworm, *Spodoptera exigua*[J]. *Chin J Appl Entomol*, 2012, **49**(2): 428-433.
- [8] 张凯伦, 李忠芹, 丁杰, 等. 山东省不同地区灰飞虱对溴氰虫酰胺的敏感性及其亚致死剂量溴氰虫酰胺对灰飞虱解毒酶活性的影响[J]. 环境昆虫学报, 2020, **42**(1): 212-220. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0858.2020.01.27.
- ZHANG K L, LI Z Q, DING J, *et al.* Sensitivity Detection of Cyantraniliprole to *Laodelphax striatellus* in Shandong and Effect of Sublethal Cyantraniliprole on Detoxification Enzyme Activities[J]. *J Environ Entomol*, 2020, **42**(1): 212-220. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0858.2020.01.27.
- [9] 周宇良. 斜纹夜蛾 microRNA 调控抗茚虫威羧酸酯酶基因表达的分子机制[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022. DOI: 10.27136/d.cnki.ghunu.2022.001249.
- ZHOU Y L. Molecular Mechanism of MicroRNA Regulating the Expression of Anti-indocarb Carboxylesterase Gene in *Spodoptera litura*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022. DOI: 10.27136/d.cnki.ghunu.2022.001249.
- [10] 王光峰, 张友军, 柏连阳, 等. 多杀菌素对甜菜夜蛾多酚氧化酶和羧酸酯酶的影响[J]. 农药学报, 2003, **5**(2): 40-46. DOI: 10.3321/j.issn.1008-7303.2003.02.005.
- WANG G F, ZHANG Y J, BAI L Y, *et al.* Effect of Spinosad on the Polyphenol Oxidase and Carboxyl Esterase in Beet Armyworm, *Spodoptera Exigua* (Hübner)[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2003, **5**(2): 40-46. DOI: 10.3321/j.issn.1008-7303.2003.02.005.
- [11] 张丽. 3种杀虫剂对草地贪夜蛾亚致死效应及解毒代谢作用初探[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023. DOI: 10.26919/d.cnki.gannu.2023.000675.
- ZHANG L. Study on Sublethal Effect and Detoxification

- Metabolism of Three Insecticides on *Armyworm*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. DOI: 10.26919/d.cnki.gannu.2023.000675.
- [12] HUANG J, WU S F, YE G Y. Molecular Characterization of the Sigma Class Gutathione S-transferase from *Chilo suppressalis* and Expression Analysis Upon Bacterial and Insecticidal Challenge[J]. *J Econ Entomol*, 2011, **104**(6): 2046–2053. DOI: 10.1603/ec11181.
- [13] 任娜娜, 谢苗, 尤燕春, 等. 羧酸酯酶介导的小菜蛾对氟虫腈的抗性[J]. *昆虫学报*, 2015, **58**(3): 288–296. DOI: 10.16380/j.kcxb.2015.03.008.
- REN N N, XIE M, YOU Y C, *et al.* Fipronil-resistance Mediated by Carboxylesterases in the Diamondback Moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) [J]. *Acta Entomol Sin*, 2015, **58**(3): 288–296. DOI: 10.16380/j.kcxb.2015.03.008.
- [14] BROWN F, PATON D G, CATTERUCCIA F, *et al.* A Steroid Hormone Agonist Reduces Female Fitness in Insecticide-resistant *Anopheles* Populations[J]. *Insect Biochem Mol Biol*, 2020, **121**: 103372. DOI: 10.1016/j.ibmb.2020.103372.
- [15] 胡霞, 周祖基, 蒋学建, 等. 川硬皮肿腿蜂幼虫龄期的划分[J]. *四川动物*, 2005, **24**(4): 99–101.
- HU X, ZHOU Z J, JIANG X J, *et al.* Division of the Instar of *Scleroderma Sichuanensis* Xiao Larva[J]. *Sichuan J Zool*, 2005, **24**(4): 99–101.
- [16] 章金明, 周书行, 林雅, 等. 甜菜夜蛾幼虫龄数和龄期的测定[J]. *浙江农业学报*, 2021, **33**(6): 1035–1041. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1524.2021.05.08.
- ZHANG J M, ZHOU S X, LIN Y, *et al.* Determination of Larval Instars of *Spodoptera exigua* (Hübner) [J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2021, **33**(6): 1035–1041. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1524.2021.05.08.
- [17] 李林好, 李豪, 赵怀志, 等. 草地贪夜蛾幼虫龄期的划分[J]. *山东农业科学*, 2022, **54**(1): 126–130. DOI: 10.14083/j.issn.1001-4942.2022.01.019.
- LI L Y, LI H, ZHAO H Z, *et al.* Determination of Larval Instars of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Shandong Agric Sci*, 2022, **54**(1): 126–130. DOI: 10.14083/j.issn.1001-4942.2022.01.019.
- [18] 贾春生. 利用SPSS软件计算杀虫剂的LC<sub>50</sub>[J]. *昆虫知识*, 2006, **43**(3): 414–417. DOI: 10.3969/j.issn.0452-8255.2006.03.035.
- JIA C S. Calculating the LC<sub>50</sub> of Insecticides with Software SPSS[J]. *Chin Bull Entomol*, 2006, **43**(3): 414–417. DOI: 10.3969/j.issn.0452-8255.2006.03.035.
- [19] 冯从经, 陆剑锋, 董秋安, 等. 亚致死剂量双氧威和虫酰肼对亚洲玉米螟幼虫生长发育的影响[J]. *植物保护学报*, 2008, **35**(2): 175–180. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-7518.2008.02.016.
- FENG C J, LU J F, DONG Q A, *et al.* Effects of Sublethal Concentration of Fenoxycarb and Tebufenozide on the Development of *Ostrinia furnacalis* Guenée Larvae[J]. *J Plant Prot*, 2008, **35**(2): 175–180. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-7518.2008.02.016.
- [20] 王贻莲, 司升云, 汪钟信, 等. 虫酰肼对甜菜夜蛾子代种群的影响[J]. *植物保护学报*, 2006, **33**(2): 193–196. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-7518.2006.02.017.
- WANG Y L, SI S Y, WANG Z X, *et al.* Influence of Tebufenozide on Progeny Population of *Spodoptera exigua*[J]. *J Plant Prot*, 2006, **33**(2): 193–196. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-7518.2006.02.017.
- [21] 周利琳, 司升云, 望勇, 等. 虫酰肼对甜菜夜蛾汰选种群生长发育及生殖的影响[J]. *昆虫知识*, 2009, **46**(3): 415–419.
- ZHOU L L, SI S Y, WANG Y, *et al.* Effect of Tebufenozide on Growth and Fecundity of the Selected Strain of *Spodoptera exigua*[J]. *Chin Bull Entomol*, 2009, **46**(3): 415–419.
- [22] 宋亮, 章金明, 吕要斌. 印虫威和高效氯氟菊酯对小菜蛾的亚致死效应[J]. *昆虫学报*, 2013, **56**(5): 521–529. DOI: 10.16380/j.kcxb.2013.05.009.
- SONG L, ZHANG J M, LÜ Y B. Sublethal Effects of Indoxacarb and Beta-cypermethrin on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae)[J]. *Acta Entomol Sin*, 2013, **56**(5): 521–529. DOI: 10.16380/j.kcxb.2013.05.009.
- [23] 陈琼, 黄水金, 秦文婧. 氯虫苯甲酰胺对甜菜夜蛾的亚致死效应研究[J]. *江西农业大学学报*, 2011, **33**(4): 690–695. DOI: 10.13836/j.jjau.2011123.
- CHEN Q, HUANG S J, QIN W J. Sublethal Effects of Chlorantraniliprole on *Spodoptera exigua*[J]. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2011, **33**(4): 690–695. DOI: 10.13836/j.jjau.2011123.
- [24] 余慧灵, 向兴, 袁贵鑫, 等. 溴氰虫酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育及体内解毒酶活性的影响[J]. *昆虫学报*, 2015, **58**(6): 634–641. DOI: 10.16380/j.kcxb.2015.06.007.
- YU H L, XIANG X, YUAN G X, *et al.* Effects of Sublethal Doses of Cyantraniliprole on the Growth and Development and the Activities of Detoxifying Enzymes in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. *Acta Entomol Sin*, 2015, **58**(6): 634–641. DOI: 10.16380/j.kcxb.2015.06.007.
- [25] 徐希宝, 张靖, 芮昌辉. 甲氧虫酰肼对不同抗性棉铃虫种群谷胱甘肽S-转移酶活性和基因表达量的影响[J]. *昆虫学报*, 2014, **57**(12): 1381–1388. DOI: 10.16380/j.kcxb.2014.12.005.

- XU X B, ZHANG J, RUI C H. Effects of Methoxyfenozide on the Activities and Gene Expression Levels of Glutathione S-transferases (GST) in the Methoxyfenozide-resistant and Homologous Control Populations of *Helicoverpa armigera*(Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Acta Entomol Sin*, 2014, **57**(12): 1381-1388. DOI: 10.16380/j.kcxb.2014.12.005.
- [26] 李时荣, 葛朝虹, 刘德广, 等. 寄主植物对不同基因型麦长管蚜解毒酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2018, **27**(2): 283-293. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2018.02.017.
- LI S R, GE Z H, LIU D G, *et al.* Effects of Host Plants on Activities of Detoxification Enzymes in Different Genotypes of Cereal Aphid *Sitobion avenae*[J]. *Acta Agric Boreali Occidentalis Sin*, 2018, **27**(2): 283-293. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2018.02.017.
- [27] 樊艳平, 党海燕, 王宏民, 等. 绿豆胰蛋白酶抑制剂对绿豆象生长发育及体内解毒酶和保护酶活性的影响[J]. 昆虫学报, 2020, **63**(12): 1473-1481. DOI: 10.16380/j.kcxb.2020.12.005.
- FAN Y P, DANG H Y, WANG H M, *et al.* Effects of Mung Bean Trypsin Inhibitor on the Growth and Development and the Activities of Detoxifying and Protective Enzymes in *Callosobruchus chinensis* (Coleoptera: Bruchidae)[J]. *Acta Entomol Sin*, 2020, **63**(12): 1473-1481. DOI: 10.16380/j.kcxb.2020.12.005.
- [28] HAN J B, LI G Q, WAN P J, *et al.* Identification of Glutathione S-transferase Genes in *Leptinotarsa decemlineata* and Their Expression Patterns under Stress of Three Insecticides[J]. *Pestic Biochem Physiol*, 2016, **133**: 26-34. DOI: 10.1016/j.pestbp.2016.03.008.
- [29] 税良勇, 赵忠祎, 冯印, 等. 茶尺蠖羧酸酯酶 EoCarE592 的重组表达及其对农药的降解能力测定[J]. 昆虫学报, 2024, **67**(1): 48-57. DOI: 10.16380/j.kcxb.2024.01.006.
- SHUI L Y, ZHAO Z Y, FENG Y, *et al.* Recombinant Expression of Carboxylesterase EoCarE592 of *Ectropis obliqua* (Lepidoptera: Geometridae) and Determination of Its Ability to Degrade Pesticides[J]. *Acta Entomol Sin*, 2024, **67**(1): 48-57. DOI: 10.16380/j.kcxb.2024.01.006.
- [30] 尹菲, 杨洋, 张徐波, 等. 转飞蝗羧酸酯酶基因果蝇品系的构建及其在有机磷农药代谢解毒中的作用[J]. 昆虫学报, 2020, **63**(7): 843-850. DOI: 10.16380/j.kcxb.2020.07.008.
- YIN F, YANG Y, ZHANG X B, *et al.* Construction of Transgenic *Drosophila* strains with Carboxylesterase Genes of *Locusta migratoria* (Orthoptera: Acrididae) and Their Roles in the Metabolic Detoxification of Organophosphorus Pesticides[J]. *Acta Entomol Sin*, 2020, **63**(7): 843-850. DOI: 10.16380/j.kcxb.2020.07.008.
- [31] LU K, LI Y M, XIAO T X, *et al.* The Metabolic Resistance of *Nilaparvata lugens* to Chlorpyrifos Is Mainly Driven by the Carboxylesterase CarE17[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2022, **241**: 113738. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.113738.
- [32] LI Y F, SUN H, TIAN Z, *et al.* Identification of Key Residues of Carboxylesterase PxEst-6 Involved in Pyrethroid Metabolism in *Plutella xylostella* (L.) [J]. *J Hazard Mater*, 2021, **407**: 124612. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124612.