

甲氨基阿维菌素苯甲酸盐和氯虫苯甲酰胺 亚致死浓度对草地贪夜蛾消化酶活性和 生长发育繁殖的影响^{*}

鲁智慧^{**} 李 浩 陶 璇 万 坤 陈 尧 马睿馨 桂富荣 陈亚平^{***}

(云南农业大学植物保护学院, 云南生物资源保护与利用国家重点实验室, 昆明 650201)

摘 要 【目的】明确草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 幼虫体内消化酶对常用杀虫剂甲氨基阿维菌素苯甲酸盐(甲维盐)和氯虫苯甲酰胺的响应及亚致死浓度(LC₂₅)胁迫后子代生物学参数的变化, 为杀虫剂的科学合理使用及害虫的综合防治提供理论依据。【方法】在甲维盐和氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾3龄幼虫毒力的基础上, 分别用此2类杀虫剂亚致死浓度处理的小麦叶片饲喂3龄幼虫, 比较取食48 h后F₀和F₁代幼虫体内胃蛋白酶(Pepsin)、 α -淀粉酶(α -AMS)和脂肪酶(Lipase)的活性变化, 分析亚致死浓度对子代发育历期、体重、产卵期、产卵量和种群参数的影响。【结果】2类杀虫剂亚致死浓度胁迫下草地贪夜蛾F₀代幼虫胃蛋白酶活性显著低于对照($P < 0.05$), 且甲维盐对F₁代幼虫胃蛋白酶活性具有持续的显著抑制作用, 氯虫苯甲酰胺处理后其胃蛋白酶活性降低差异不显著。 α -淀粉酶和脂肪酶活性与对照相比无显著差异。经2类杀虫剂亚致死浓度处理后, 子代(F₁)高龄幼虫(6龄)和蛹体重显著降低, 蛹期显著延长, 产卵期和平均单雌产卵量显著减少。对F₁代种群参数的影响体现在, 净增值率(R_0)、内禀增长率(r_m)和周限增长率(λ)显著降低, 平均世代周期(T)和种群加倍时间(DT)延长。【结论】草地贪夜蛾在甲维盐和氯虫苯甲酰胺亚致死浓度作用下, 幼虫胃蛋白酶活性被抑制, 子代发育历期延长, 繁殖力降低, 种群增长缓慢, 2种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾有持续控制作用。

关键词 亚致死浓度; 消化酶; 发育历期; 体重; 繁殖力

Effects of sublethal concentrations of emamectin benzoate and chlorantraniliprole on digestive enzyme activity, growth and reproduction, of *Spodoptera frugiperda*

LU Zhi-Hui^{**} LI Hao TAO Xuan WAN Kun CHEN Yao MA Rui-Xin
GUI Fu-Rong CHEN Ya-Ping^{***}

(State Key Laboratory of Conservation and Utilization of Biological Resources of Yunnan, College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract 【Objectives】The objective To investigate the effects of two different insecticides on the digestive enzymes of *Spodoptera frugiperda* larvae, and assess changes in the biological characteristics of the offspring of *S. frugiperda* exposed to sublethal concentrations (LC₂₅) of these pesticides. 【Methods】Third instar *S. frugiperda* larvae were exposed to sublethal concentrations of emamectin benzoate and chlorantraniliprole, based on the virulence of each pesticide. These larvae were then fed on wheat leaves and the pepsin (Pepsin), α -amylase (α -AMS), and lipase (LPS) activity levels of both the F₀ (parental) and F₁ (offspring) generations were measured and compared 48 hours after feeding. In addition, we analyzed the impact of exposure to sublethal pesticide concentrations on offspring developmental period, weight, oviposition characteristics, and

^{*}资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1400701)

^{**}第一作者 First author, E-mail: 962196361@qq.com

^{***}通讯作者 Corresponding author, E-mail: cyp83@ynau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-09-30; 接受日期 Accepted: 2023-04-13

population parameters. **[Results]** Exposure to sublethal concentrations of both insecticides significantly reduced the pepsin activity of the F_0 generation compared to the control ($P < 0.05$). Furthermore, exposure to emamectin benzoate consistently, and significantly, inhibited the pepsin activity of F_1 larvae. Exposure to chlorantraniliprole did not, however, significantly reduce pepsin activity. No significant differences were observed in α -amylase and lipase activity compared to the control group. Exposure to sublethal pesticide concentrations reduced the weight of F_1 6th instar larvae and pupae, significantly prolonged the pupal period, decreased the oviposition period, and reduced average egg production per female. These effects resulted in a significant decrease in the F_1 generation's net value-added rate (R_0), intrinsic growth rate (r_m), weekly growth rate (λ), and also extended its average generation period (T) and population doubling time (DT). **[Conclusion]** Exposure to sublethal concentrations of emamectin benzoate and chlorantraniliprole, inhibited the pepsin activity of *S. frugiperda* larvae, and prolonged the developmental period, lowered the fecundity and slowed the population growth of the F_1 generation. Exposure to sublethal concentrations of these two insecticides can therefore provide sustained control of *S. frugiperda*.

Key words sublethal concentration; digestive enzymes; developmental period; body weight; fecundity

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), 又名秋粘虫, 隶属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 原产于美洲热带和亚热带地区, 具有很强的迁飞能力和繁殖力, 是一种危害严重的重大入侵性农业害虫 (Montezano *et al.*, 2018)。自 2019 年 1 月入侵我国以来, 草地贪夜蛾迅速扩散蔓延至全国 26 省 (直辖市、自治区) 1 518 个县, 当年危害面积达 100 多万公顷, 严重威胁玉米、甘蔗和马铃薯等重要农作物的生产安全 (姜玉英等, 2019; 郭井菲等, 2019; 陈辉等, 2020)。目前, 除种植 Bt 玉米外, 对草地贪夜蛾的防治手段仍以化学防治为主 (赵胜园等, 2019; 梁铭荣等, 2020, 曹斌等, 2023)。大量研究表明, 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 (Emamectin benzoate, 简称甲维盐) 和氯虫苯甲酰胺 (Chlorantraniliprole) 两种杀虫剂对草地贪夜蛾具有良好的防效 (闫文娟等, 2019)。甲维盐是一种新型高效半合成抗生素杀虫剂, 具有超高效、低毒、低残留、无公害等生物农药的特点。氯虫苯甲酰胺是双酰胺类杀虫剂, 也是世界上重点发展的超高效、广谱、低毒性、低污染、对环境友好的第五代新型杀虫剂, 是联合国粮农组织重点发展的“五大”绿色农药之一 (Okuma *et al.*, 2018; 宋洁蕾等, 2019; 李浩等, 2021)。探明 2 种不同作用类型杀虫剂对草地贪夜蛾生物学特性的影响, 对杀虫剂在田间的科学合理使用具有重要意义。

除了具毒杀效果外, 杀虫剂还会对昆虫的营

养利用产生不利影响, 并在世代繁殖中持续产生影响 (张艳蕾等, 2021)。有研究发现, 在杀虫剂胁迫下, 昆虫的消化酶 (淀粉酶 Amylase、蛋白酶 Protease) 活性降低, 导致昆虫的食物摄取和利用受到抑制, 从而引起生长发育的延缓和滞育现象 (张丽等, 2018; 何发林等, 2019)。另一项研究指出, 高浓度吡虫啉药液添加于食料中, 显著抑制了家蚕 *Bombyx mori* 幼虫的生长和发育, 降低了其营养效应指标, 同时抑制了肠道中消化酶的活性 (李二兰等, 2016)。

田间施用农药时, 药剂在农作物上分布不均匀, 随着时间的推移, 毒力会逐渐减弱至亚致死浓度, 这导致部分昆虫个体产生了亚致死效应。这些效应包括生长发育的变化和繁殖力的降低, 对害虫种群的增长产生不利影响 (李志雄等, 2020; 谭德龙等, 2021)。例如, 亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 经氯虫苯甲酰胺胁迫后, F_0 代蛹重和单雌产卵量显著降低 (支昊宇等, 2021)。毒死蜱亚致死浓度 (LC_{10} 和 LC_{25}) 处理对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的影响表现为: 3-5 龄幼虫历期显著延长, 蛹历期缩短 (杨亚军等, 2018)。杀虫剂亚致死浓度不仅延缓了害虫的生长发育, 也对种群的增长存在不利影响 (Zhen *et al.*, 2018)。环氧虫啉 (Wang *et al.*, 2016)、噻虫胺 (Fang *et al.*, 2018)、溴氰虫酰胺 (Wang *et al.*, 2017) 和呋虫胺 (Qu *et al.*, 2017) 亚致死浓度处理烟粉虱 *Bemisia tabaci* 成虫后 F_1 代各龄若虫、伪蛹和成虫历期延长, 雌成虫产卵

期缩短,产卵量减少。在茼虫威 LC_{20} 胁迫下,棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 生长和繁殖力显著下降,包括化蛹率和羽化率降低,成虫畸形率增加(王芹芹等,2019)。甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 经氯虫苯甲酰胺和溴氰虫酰胺亚致死浓度处理后,发育历期延长,繁殖力降低,种群增长延缓(余慧灵等,2015;陈羿渠等,2017)。

然而,目前尚未有关于甲维盐和氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾子代种群增长影响的研究。探明不同作用类型杀虫剂对草地贪夜蛾生物学特性的影响,对杀虫剂在田间的科学合理使用具有重要意义。本研究在2种作用类型杀虫剂(抗生素杀虫剂甲维盐和双酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺,)对草地贪夜蛾3龄幼虫毒力的基础上,用酶动力法测定了草地贪夜蛾幼虫体内4种消化酶活性对2种杀虫剂的响应及经亚致死浓度(LC_{25})胁迫后子代生物学参数的变化,这些研究结果将为杀虫剂的科学合理使用及害虫的综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试虫源 草地贪夜蛾于2019年5月采集自云南省元江县($101^{\circ}58'E$, $23^{\circ}35'N$,海拔421 m),在人工气候箱(上海一恒科学仪器有限公司 MG-300A)内采用未施用化肥及农药的小麦 *Triticum aestivum* L. (淮麦36) 叶片饲养10代以上,饲养温度(27 ± 0.5) $^{\circ}C$,相对湿度70% $\pm$ 5%,光周期16L:8D,下同。

1.1.2 供试试剂 98%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐(甲维盐)原药和98%氯虫苯甲酰胺原药购自江苏泰越生物科技有限公司;胃蛋白酶 Pepsin、 α -淀粉酶 α -AMS 和脂肪酶 LPS 试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.2 试验方法

1.2.1 2种杀虫剂处理后草地贪夜蛾消化酶活性测定 样品药剂处理:根据前期实验毒力结果(李浩等,2021),用含0.1% Triton X-100 的双蒸水分别将2种药剂稀释至 LC_{25} (甲维盐=

0.006 5 mg/L,氯虫苯甲酰胺=0.032 1 mg/L),将新鲜小麦叶片在药液中浸渍15 s后取出,以在0.1% Triton X-100溶液中浸渍15 s的小麦叶片为对照,晾干后放入足量3龄幼虫的养虫盒(18 cm $\times$ 12 cm $\times$ 8 cm)内。离心管收集48 h存活幼虫,10头为1个重复,每处理3次重复,立即浸入液氮,置于-80 $^{\circ}C$ 保存备用,此处理设为 F_0 代。其余存活的(以毛笔轻触幼虫无反应视为死亡)草地贪夜蛾继续用未经任何处理的小麦叶片进行饲养,待其产下 F_1 代,收集进入3龄后48 h的幼虫,立即浸入液氮,置于-80 $^{\circ}C$ 保存备用。酶活性测定按试剂盒说明操作。分别取上述试虫10头(约0.03 g),加入适量的预冷匀浆介质后用高通量研磨仪粉碎,4 $^{\circ}C$ 下12 000 r/min 离心10 min,取上清液作为待测酶液。酶活性测定按照南京建成生物工程研究所试剂盒说明书使用 Varioskan LUX 多功能酶标仪(Thermo Fisher Scientific,美国)测定酶活性并计算最终数值。

1.2.2 2种杀虫剂处理草地贪夜蛾 F_1 代后生物学参数的测定 用含0.1% Triton X-100 双蒸水将甲维盐和氯虫苯甲酰胺稀释成 LC_{25} 浓度,将新鲜小麦叶片在药液中浸渍15 s后取出,以在0.1% Triton X-100溶液中浸渍15 s的小麦叶片为对照,晾干后放入装有60头大小一致、健康的3龄 F_0 代幼虫的养虫盒内,每处理3次重复,置于人工气候箱中饲养。48 h后,将存活的(以毛笔轻触幼虫无反应视为死亡)草地贪夜蛾继续用未经任何处理的小麦叶片进行饲养,直至羽化为成虫,养虫杯内雌雄成虫一一配对,放入5%-10%蜂蜜水浸湿的脱脂棉球,并及时更换脱脂棉球和补充蜂蜜水,以保持清洁和湿润。记录雌成虫产卵日期和卵孵化日期。

取上述各处理子代卵块3块(每个卵块约200粒),分别放入装有小麦叶片的培养皿中,用扎孔的保鲜膜封住培养皿。待卵孵化后,记录其卵历期和卵孵化率,并各挑选60头大小一致的1龄幼虫接入装有新鲜小麦的指形管($d=2.5$ cm)内进行单头饲养,管口用扎孔的保鲜膜封口,并在管壁上编号。每12 h在解剖镜下观

察记录 F_1 代幼虫及蛹的发育历期和体重, 幼虫自 1 龄起每蜕皮一次计为龄期增长 1 龄。及时清理管中粪便和更换小麦叶片。至成虫羽化后, 进行雌雄一一配对, 记录产卵期、产卵量和成虫寿命等参数。

1.2.3 生命表参数测定 参照段艳茹等 (2021) 的方法计算不同药剂处理下草地贪夜蛾的种群参数。净增殖率(R_0)、平均世代周期(T)、内禀增长率(r_m)、周限增长率(λ)和种群加倍时间(DT)的计算公式如下:

$$\begin{aligned} R_0 &= \sum L_x M_x; \\ T &= \sum x L_x M_x / R_0; \\ r_m &= (\ln R_0) / T; \\ \lambda &= e^{r_m}; \\ DT &= \ln 2 / r_m. \end{aligned}$$

式中, L_x 为种群年龄-特征存活率, 表示从卵发育到年龄 x 的存活率; M_x 为种群年龄-特征繁殖力, 表示种群在年龄 x 的平均产雌量。

1.3 统计分析

采用 Excel 2013 记录和整理数据, 应用 SPSS 24.0 检验方差齐性和数据的正态分布情况后, 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), Tukey HSD 检验比较草地贪夜蛾 3 龄幼虫体内不同处理间的消化酶活性和生物学特性差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾幼虫体内消化酶活性的影响

2 种杀虫剂亚致死浓度胁迫下, 草地贪夜蛾 F_0 和 F_1 代 3 龄幼虫体内的胃蛋白酶(图 1: A)、 α -淀粉酶(图 1: B)和脂肪酶(图 1: C)活性均下降, 且处理后 F_1 代消化酶活性高于 F_0 代。其中甲维盐胁迫下 F_0 、 F_1 代胃蛋白酶[(10.60±0.73) 和 (11.13±0.47) U/(mg·prot)] 活性显著低于对照 ($P < 0.05$)。氯虫苯甲酰胺胁迫下 F_0 代胃蛋白酶[(11.75±0.68) U/(mg·prot)] 活性也显著低于对照 ($P < 0.05$), 仅为对照的 71.22%; F_1 代胃蛋白酶[(13.23±1.38 U/(mg·prot)] 活性低于对照但未达到差异显著性 ($P > 0.05$)。2 种杀虫剂胁迫下 F_0 、 F_1 代 α -淀粉酶和脂肪酶活性与对照相比无差异显著性 ($P > 0.05$)。

2.2 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾 F_1 代生长发育及繁殖力的影响

2.2.1 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾 F_1 代发育历期的影响 2 种杀虫剂亚致死浓度胁迫后草地贪夜蛾 F_1 代卵、幼虫、蛹和世代周期较对照延长, 而成虫期缩短 (图 2)。其中蛹期[(14.03±0.62) 和 (12.81±0.10) d] 显著延长 ($P < 0.05$), 分别为对

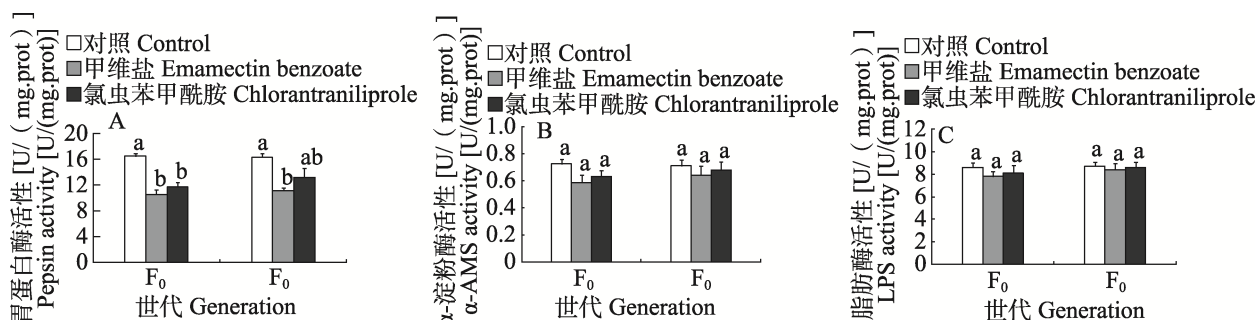


图 1 2 种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾 3 龄幼虫体内消化酶活性的影响

Fig. 1 Effects of sublethal concentrations of two insecticides on digestive enzyme activities in the 3rd instar larvae of *Spodoptera frugiperda*

A. 草地贪夜蛾胃蛋白酶活性; B. 草地贪夜蛾 α -淀粉酶活性; C. 草地贪夜蛾脂肪酶活性。

柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, Tukey HSD 检验)。下同图。

A. Pepsin activity of *Spodoptera frugiperda*; B. α -amylase activity of *Spodoptera frugiperda*; C. Lipase activity of *Spodoptera frugiperda*. Histograms with different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$, Tukey HSD test). The same as below.

照的 1.94 和 1.77 倍, 而卵期和幼虫期无差异显著性 ($P>0.05$)。甲维盐胁迫下成虫期 $[(9.60\pm0.31)\text{d}]$ 显著缩短 ($P<0.05$), 为对照的 74.23%, 世代历期 $[(44.88\pm1.06)\text{d}]$ 显著延长 ($P<0.05$), 为对照的 1.15 倍。

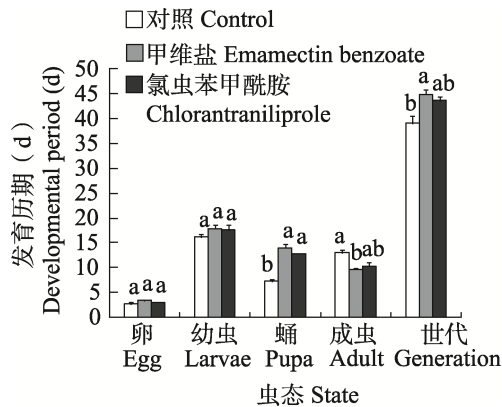


图 2 2 种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾 F₁ 代不同虫态发育历期的影响

Fig. 2 Effects of sublethal concentrations of two insecticides on the development period of different insect stages in F₁ generation of *Spodoptera frugiperda*

2.2.2 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾 F₁ 代体重的影响 2 种杀虫剂亚致死浓度胁迫后, 草地贪夜蛾 F₁ 代幼虫(1-6 龄)和蛹体重均低于对照, 且甲维盐处理后 3-6 龄幼虫和蛹体重低于氯虫苯甲酰胺处理 (表 1)。甲维盐胁迫下 5 龄幼虫 $[(40.02\pm1.75)\text{mg}]$ 、6 龄幼虫 $[(187.39\pm4.10)\text{mg}]$ 和蛹 $[(179.05\pm4.12)\text{mg}]$ 重与对照相比均显著降低 ($P<$

0.05)。氯虫苯甲酰胺亚致死浓度胁迫后, 草地贪夜蛾 F₁ 代 6 龄幼虫和蛹重显著低于对照 ($P<0.05$)。这表明 2 种药剂亚致死浓度对草地贪夜蛾的生长发育均有显著负面影响。

2.2.3 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾 F₁ 代繁殖力的影响 2 种杀虫剂亚致死浓度胁迫下, 草地贪夜蛾 F₁ 雌成虫的产卵前期延长, 而产卵期显著缩短 (图 3: A) ($P<0.05$)。其中甲维盐处理后产卵前期 $[(8.0\pm0.5)\text{d}]$ 较对照和氯虫苯甲酰胺 $[(4.4\pm0.3)\text{d}]$ 处理显著延长 ($P<0.05$), 分别为 2 种处理的 1.8 和 1.4 倍, 而产卵期 $[(1.8\pm0.1)\text{d}]$ 较对照和氯虫苯甲酰胺处理显著缩短 ($P<0.05$), 仅为 2 种处理的 33.38%和 52.82%; 氯虫苯甲酰胺处理后产卵期 $[(3.4\pm0.3)\text{d}]$ 较对照显著缩短 ($P<0.05$), 为对照的 63.19%, 产卵前期无显著差异性 ($P>0.05$)。

2 种杀虫剂亚致死浓度胁迫下, 草地贪夜蛾 F₁ 雌成虫的平均单雌产卵量和日均单雌产卵量均降低 (图 3: B)。其中甲维盐处理后平均单雌产卵量 $[(226.5\pm27.8)\text{粒/雌/日}]$ 显著低于对照和氯虫苯甲酰胺处理 ($P<0.05$), 仅为 2 种处理的 25.77%和 47.07%; 日均单雌产卵量 $[(126.5\pm7.5)\text{粒/雌/日}]$ 显著降低 ($P<0.05$), 为对照的 76.49%。氯虫苯甲酰胺处理后平均单雌产卵量 $[(481.2\pm28.5)\text{粒/雌/日}]$ 显著降低 ($P<0.05$), 仅为对照的 54.75%; 日均单雌产卵量无显著差异性 ($P<0.05$)。

表 1 2 种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾 F₁ 代体重的影响
Table 1 Effects of sublethal concentrations of two insecticides on body weight of F₁ generation of *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatment	体重 (mg) Weight (mg)						
	1 龄幼虫 1st instar	2 龄幼虫 2nd instar	3 龄幼虫 3rd instar	4 龄幼虫 4th instar	5 龄幼虫 5th instar	6 龄幼虫 6th instar	蛹 Pupa
对照 Control	0.06±0.01 a	0.52±0.05 a	3.58±0.27 a	16.75±0.76 a	55.73±2.19 a	224.88±8.34 a	205.76±3.13 a
甲维盐 Emamectin benzoate	0.05±0.01 a	0.50±0.02 a	3.10±0.39 a	15.43±0.89 a	40.02±1.75 b	187.39±4.10 b	179.05±4.12 b
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	0.05±0.01 a	0.50±0.01 a	3.44±0.19 a	15.89±0.83 a	50.43±2.85 a	195.52±3.16 b	187.17±3.92 b

同列数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Tukey HSD 检验)。下表同。

Data with different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$, Tukey HSD test). The same as below.

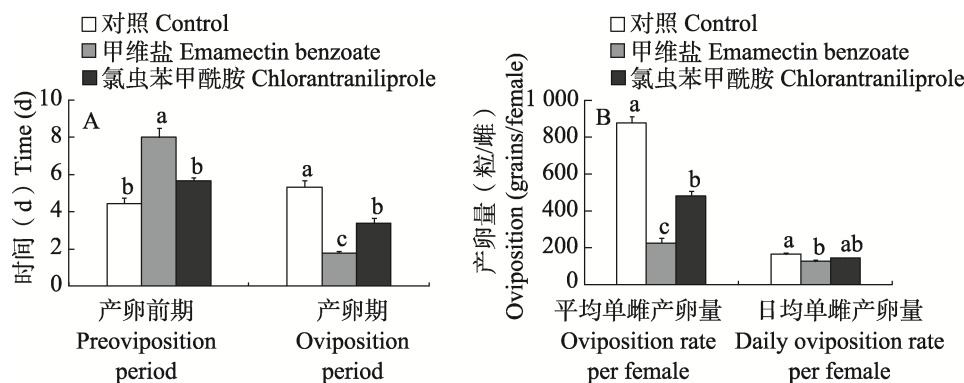


图 3 2 种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾 F_1 代产卵期和单雌产卵量的影响
Fig. 3 Effects of sublethal concentrations of two insecticides on oviposition period and female fecundity of the F_1 generation of *Spodoptera frugiperda*

A. 草地贪夜蛾产卵前期及产卵期时长; B. 草地贪夜蛾单雌产卵量。
A. The length of the preoviposition period and the oviposition period of *Spodoptera frugiperda*;
B. The number of eggs laid by a single female of *Spodoptera frugiperda*.

2.3 2 种杀虫剂对草地贪夜蛾 F_1 代种群参数的影响

2 种杀虫剂亚致死浓度胁迫下, 草地贪夜蛾 F_1 代净增殖率、内禀增长率和周限增长率均降低, 平均世代周期和种群加倍时间延长 (表 2)。其中甲维盐处理后净增殖率 (58.68 ± 8.40) 显著降低 ($P<0.05$), 仅为对照的 11.62%; 内禀增长

率 (0.10 ± 0.00) 和周限增长率 (1.11 ± 0.00) 显著低于对照 ($P<0.05$); 种群加倍时间 [6.6 ± 0.2] d 较对照显著延长 ($P<0.05$), 为 1.64 倍。氯虫苯甲酰胺处理后草地贪夜蛾 F_1 代净增殖率 (160.27 ± 9.71)、内禀增长率 (0.13 ± 0.00) 和周限增长率 (1.14 ± 0.00) 显著低于对照 ($P<0.05$); 种群加倍时间 [5.1 ± 0.1] d 显著延长, 为对照的 1.28 倍。平均世代周期无显著差异性 ($P>0.05$)。

表 2 2 种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾 F_1 代种群参数的影响
Table 2 Effects of sublethal concentrations of two insecticides on the population parameters of the F_1 generation of *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatment	种群参数 Population parameters				
	净增殖率 R_0 Net reproductive rate	内禀增长率 r_m Intrinsic rate of increase	周限增长率 λ Finite rate of increase	平均世代周期 T (d) Mean generation time (d)	种群加倍时间 DT (d) Population doubling time (d)
对照 Control	505.02±40.14 a	0.17±0.00 a	1.19±0.00 a	35.86±0.63 a	4.00±0.05 c
甲维盐 Emamectin benzoate	58.68±8.40 b	0.10±0.00 c	1.11±0.00 c	38.25±0.12 a	6.56±0.20 a
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	160.27±9.71 b	0.13±0.00 b	1.14±0.00 b	37.39±0.88 a	5.10±0.07 b

3 讨论

前期室内试验表明, 甲维盐和氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾具有较好的杀虫效果 (李浩等, 2021), 在夜蛾科害虫防治中使用频率较高。杀

虫剂除对昆虫具有毒杀作用外, 还对其体内消化酶活性有影响 (张丽等, 2018)。昆虫的消化酶包括蛋白酶、 α -淀粉酶和脂肪酶, 这些酶负责分解食物中的糖类、蛋白质、淀粉和脂肪, 直接影响昆虫对营养物质的消化和吸收 (张平等,

2019)。蛋白酶参与昆虫生长发育过程中的多种生理反应,如纤维蛋白溶解和组织重建等(秦加敏等,2015;周诗敏等,2021)。何发林等(2019)研究发现沟金针虫 *Pleonomus canaliculatus* 3 龄幼虫在亚致死浓度的氯虫苯甲酰胺处理土壤中 24 h 后,其体内的蛋白酶、 α -淀粉酶和脂肪酶活性显著降低,严重影响沟金针虫对食物的消耗与利用能力,对其生长发育产生不利的影响。本研究表明,草地贪夜蛾 3 龄幼虫经甲维盐和氯虫苯甲酰胺亚致死浓度处理后,其 F_0 代幼虫体内胃蛋白酶活性显著降低,且甲维盐处理对 F_1 代幼虫胃蛋白酶活性具有持续的抑制作用,使昆虫对食物的利用效率降低(Xu *et al.*, 2016; 张莉娅等, 2021)。

杀虫剂的亚致死浓度不仅影响害虫的生理和行为特性(Zhao *et al.*, 2018; Fan *et al.*, 2021; 樊宗芳等, 2021; 何云川等, 2021),也能导致其当代或子代生长发育和繁殖力的变化(Cui *et al.*, 2018; 王芹芹等, 2019; Xu *et al.*, 2021)。支昊宇等(2021)报道了用亚致死浓度氯虫苯甲酰胺处理亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 后当代种群蛹重量和单雌产卵量降低,且幼虫生长期和蛹期都延长。梁炜博等(2017)发现噻虫嗪亚致死浓度对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 种群增长有抑制作用。本研究发现甲维盐和氯虫苯甲酰胺亚致死浓度处理草地贪夜蛾 3 龄幼虫后,子代(F_1)高龄幼虫(6 龄)和蛹重显著降低,蛹期显著延长,产卵期和平均单雌产卵量显著减少,表明经杀虫剂处理后草地贪夜蛾 F_1 代的繁殖潜力明显降低,可能是杀虫剂在体内的残留抑制或延长雌成虫的卵巢发育(全林发等, 2016),使其产卵前期延长,缩短产卵期,减少产卵量。这些现象与前述研究结果一致,均表现出杀虫剂的亚致死浓度对害虫生长繁殖具有一定的不利性。梁炜博等(2017)研究报道噻虫嗪亚致死浓度处理斜纹夜蛾后, F_1 代的内禀增长率、周限增长率显著降低,平均世代周期显著延长。本研究结果显示,草地贪夜蛾经甲维盐和氯虫苯甲酰胺亚致死浓度胁迫后 F_1 代净增值率、内禀增长率和周限增

长率显著降低,平均世代周期和种群加倍时间延长,与近年来关于杀虫剂亚致死浓度对棉铃虫和烟草粉蛾 *Ephestia elutella* 等鳞翅目害虫的亚致死效应研究结果一致(王芹芹等, 2019; 袁敏等, 2020),这表明杀虫剂亚致死浓度胁迫后草地贪夜蛾 F_1 代具有更低的种群增长潜力。

本研究比较了草地贪夜蛾消化酶对 2 种不同作用类型杀虫剂的响应,探究了杀虫剂亚致死浓度胁迫下其 F_1 代生长发育及繁殖力的变化,进一步通过两性生命表技术测定对其种群参数的影响,为这 2 种杀虫剂的科学合理使用及害虫的综合治理提供理论依据。

4 结论

草地贪夜蛾在甲维盐和氯虫苯甲酰胺亚致死浓度作用下,幼虫胃蛋白酶活性被抑制,子代发育历期延长,繁殖力降低,种群增长缓慢,2 种杀虫剂亚致死浓度对草地贪夜蛾有持续控制作用。

参考文献 (References)

- Cao B, Sheng SJ, Tao JJ, Chen L, Yang Q, 2023. Experiment on the effectiveness of different pesticides in controlling *Spodoptera frugiperda* in corn fields. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 64(11): 2753–2755. [曹斌, 盛森杰, 陶嘉杰, 陈丽, 杨强, 2023. 不同药剂防治玉米草地贪夜蛾效果试验. *浙江农业科学*, 64(11): 2753–2755.]
- Chen YQ, Xiang X, Gong CW, Wang XG, 2017. Effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the detoxification enzymes activities and the growth and reproduction of *Spodoptera exigua*. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(8): 1440–1451. [陈羿渠, 向兴, 贡常委, 王学贵, 2017. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾主要解毒酶活性与生长繁殖的影响. *中国农业科学*, 50(8): 1440–1451.]
- Cui L, Wang QQ, Qi HL, Wang QY, Yuan HZ, Rui CH, 2018. Resistance selection of indoxacarb in *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae): Cross-resistance, biochemical mechanisms and associated fitness costs. *Pest Management Science*, 74(11): 2636–2644.
- Chen H, Yang XL, Chen AD, Li YC, Wang DH, Liu J, Hu G, 2020. Immigration timing and origin of the first fall armyworms (*Spodoptera frugiperda*) detected in China. *Journal of Applied*

- Entomology*, 57(6): 1270–1278. [陈辉, 杨学礼, 谌爱东, 李永川, 王德海, 刘杰, 胡高, 2020. 我国最早发现为害地草地贪夜蛾的入侵时间及其虫源分布. 应用昆虫学报, 57(6): 1270–1278.]
- Duan YR, He SQ, Chen YP, Ma R, Yang JZ, Gui FR, 2021. Development and reproduction characters of *Frankliniella occidentalis* fed on tobacco under elevated CO₂ concentration. *Journal of Southern Agriculture*, 52(2): 404–411. [段艳茹, 和淑琪, 陈亚平, 马若, 杨军章, 桂富荣, 2021. 高 CO₂ 浓度下西花蓟马在烟草上的生长发育和繁殖特征. 南方农业学报, 52(2): 404–411.]
- Fan ZF, Qian L, Chen YP, Fan R, He SQ, Gao YL, Gui FR, 2021. Effects of elevated CO₂ on activities of protective and detoxifying enzymes in *Frankliniella occidentalis* and *F. intonsa* under spinetoram stress. *Pest Management Science*, 78(1): 274–286.
- 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.]
- Fang Y, Wang JD, Luo C, Wang R, 2018. Lethal and sublethal effects of clothianidin on the development and reproduction of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) MED and MEAM1. *Journal of Insect Science*, 18(2): 37.
- Guo JF, He KL, Wang ZY, 2019. Biological characteristics, trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, and the strategy for management of the pest. *Journal of Applied Entomology*, 56(3): 361–369. [郭井菲, 何康来, 王振营, 2019. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策. 应用昆虫学报, 56(3): 361–369.]
- He FL, Qiao ZH, Yao XF, Yu HY, Sun SA, Li XD, Zhang JW, Jiang XY, 2019. Dose-response and time-effect relationships of low lethal doses of chlorantraniliprole on food utilization and related physiological and biochemical parameters in *Pleonomus canaliculatus* (Coleoptera: Elateridae). *Acta Entomologica Sinica*, 62(8): 948–959. [何发林, 乔治华, 姚向峰, 于灏泳, 孙石昂, 李向东, 张吉旺, 姜兴印, 2019. 低致死剂量氯虫苯甲酰胺对沟金针虫食物利用和相关生理生化指标的剂量和时间效应. 昆虫学报, 62(8): 948–959.]
- He YC, Wang XP, Hong B, Zhang TT, Zhou XF, Jia YX, 2021. Effects of four insecticides LC₂₅ on feeding behavior of Q-type *Bemisia tabaci* adults. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(2): 324–333. [何云川, 王新谱, 洪波, 张婷婷, 周雪飞, 贾彦霞, 2021. 四种杀虫剂 LC₂₅ 对 Q 型烟粉虱成虫取食行为的影响. 中国农业科学, 54(2): 324–333.]
- Jiang YY, Liu J, Xie MH, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- Li EL, Sun YL, Guo HW, Gao HJ, Ren CJ, Wang FJ, Wang YW, Mu ZM, 2016. Effect of neonicotinoid insecticide imidacloprid on growth, development and food utilization of *Bombyx mori* larvae. *Acta Sericologica Sinica*, 42(3): 473–482. [李二兰, 孙永亮, 郭红伟, 高绘菊, 任春久, 王凤娟, 王彦文, 牟志美, 2016. 新烟碱类杀虫剂吡虫啉对家蚕幼虫生长发育及食物利用的影响. 蚕业科学, 42(3): 473–482.]
- Li H, Chen YP, Lu ZH, Guo JY, Li YH, Zhu LY, He SQ, Gui FR, 2021. Response comparison of protective and detoxification enzymes in *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) and *Spodoptera litura* (Fabricius) larvae to two insecticides. *Journal of Southern Agriculture*, 52(3): 559–569. [李浩, 陈亚平, 鲁智慧, 郭建洋, 李亚红, 朱林云, 和淑琪, 桂富荣, 2021. 草地贪夜蛾和斜纹夜蛾幼虫体内保护酶及解毒酶对 2 种杀虫剂的响应比较. 南方农业学报, 52(3): 559–569.]
- Li ZX, Wei YD, Cao W, Ma X, Ma ZH, Su Y, Han X, Yao YS, 2020. Effects of matrine and veratrine sublethal doses on growth, development and reproduction of cotton aphids. *Agrochemicals*, 59(12): 880–884. [李志雄, 魏引弟, 曹巍, 马雪, 麻正辉, 苏悦, 韩旭, 姚永生, 2020. 苦参碱和藜芦碱亚致死剂量对棉花蚜虫生长发育及繁殖的影响. 农药, 59(12): 880–884.]
- Liang MR, Li ZY, Da QX, Lu YY, Chen KW, Wang L, 2020. Virulence of four entomopathogenic nematodes on fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)(Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Biosafety*, 29(2): 82–89. [梁铭荣, 李子园, 戴钊萱, 陆永跃, 陈科伟, 王磊, 2020. 4 种昆虫病原线虫对草地贪夜蛾的致死作用. 生物安全学报, 29(2): 82–89.]
- Liang WB, Xiang X, Wang XG, Yang QF, Luo JD, 2017. Effects of sublethal doses of thiacloprid on the detoxifying enzyme activities and the growth and reproduction of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(10): 1187–1197. [梁炜博, 向兴, 王学贵, 杨群芳, 罗家栋, 2017. 噻虫啉亚致死剂量对斜纹夜蛾解毒酶系活性与生长繁殖的影响. 昆虫学报, 60(10): 1187–1197.]
- Montezano DG, Sosa-Gómez DR, Specht A, Roque-Specht VF, Sousa-Silva JC, Paula-Moraes SV, Peterson JA, Hunt TE, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286–300.
- Okuma DM, Bernardi D, Horikoshi RJ, Bernardi O, Silva AP,

- Omoto C, 2018. Inheritance and fitness costs of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to spinosad in Brazil. *Pest Management Science*, 74(6): 1441–1448.
- Qu C, Zhang W, Li FQ, Tetreau G, Luo C, Wang R, 2017. Lethal and sublethal effects of dinotefuran on two invasive whiteflies, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(2): 325–330.
- Quan LF, Zhang HJ, Sun LN, Li YY, Yan WT, Yue Q, Qiu GS, 2016. Research advances in sublethal effect of pesticide. *Journal of Agriculture*, 6(5): 33–38. [全林发, 张怀江, 孙丽娜, 李艳艳, 闫文涛, 岳强, 仇贵生, 2016. 杀虫剂对害虫的亚致死效应研究进展. 农学学报, 6(5): 33–38.]
- Qin JM, Luo SD, He SY, Wu J, 2015. Researching in characters and functions of trehalose and trehalase in insects. *Journal of Environmental Entomology*, 37(1): 163–169. [秦加敏, 罗术东, 和绍禹, 吴杰, 2015. 昆虫海藻糖与海藻糖酶的特性及功能研究. 环境昆虫学报, 37(1): 163–169.]
- Song JL, Li YL, Li YH, Huang BF, Kang YC, Ma TC, Zhang SL, Gui FR, 2019. Measurements of indoor toxic effects and virulence of different insecticides against *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Southern Agriculture*, 50(7): 1489–1495. [宋洁蕾, 李艳丽, 李亚红, 黄碧芬, 康云昌, 马庭鑫, 张澍雷, 桂富荣, 2019. 不同杀虫剂对草地贪夜蛾的室内毒杀效果及毒力测定. 南方农业学报, 50(7): 1489–1495.]
- Tan DL, Liao WT, Zheng Y, Zheng JR, Zhang CY, Zhang BX, Li DS, 2021. Effects of the insecticide cyflumetofen on the growth and development of the spider mite, *Tetranychus urticae* Koch. *Journal of Biosafety*, 30(1): 50–55. [谭德龙, 廖伟涛, 郑苑, 郑锦荣, 张长远, 张宝鑫, 李敦松, 2021. 丁氟螨酯对二斑叶螨生长发育的影响. 生物安全学报, 30(1): 50–55.]
- Wang QQ, Cui L, Wang QY, Wang L, Xie N, Yuan HZ, Rui CH, 2019. Effects of sublethal concentration of indoxacarb on the biological parameters and detoxifying enzyme activities in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) with reduced susceptibility to indoxacarb. *Acta Entomologica Sinica*, 62(8): 960–969. [王芹芹, 崔丽, 王奇渊, 王立, 谢娜, 袁会珠, 芮昌辉, 2019. 茚虫威亚致死浓度对茚虫威敏感性降低的棉铃虫生物学参数及解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 62(8): 960–969.]
- Wang R, Zhang W, Che WN, Qu C, Li FQ, Desneux N, Luo C, 2017. Lethal and sublethal effects of cyantraniliprole, a new anthranilic diamide insecticide, on *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Crop Protection*, 91: 108–113.
- Wang R, Zheng HX, Qu C, Wang ZH, Kong ZQ, Luo C, 2016. Lethal and sublethal effects of a novel cis-nitromethylene neonicotinoid insecticide, cycloxaprid, on *Bemisia tabaci*. *Crop Protection*, 83: 15–19.
- Xu CM, Zhang ZQ, Cui KD, Zhao YH, Han JK, Liu F, Mu W, 2016. Effects of sublethal concentrations of cyantraniliprole on the development, fecundity and nutritional physiology of the black cutworm *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae). *PLoS ONE*, 11(6): e0156555.
- Xu L, Meng XL, Bangash SH, Zhang F, Zeng DQ, Tang WW, 2021. Effects of itol A on the larval growth and development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Pest Management Science*, Doi: 10.1002/ps.6614.
- Yu HL, Xiang X, Yuan GX, Chen YQ, Wang XG, 2015. Effects of sublethal doses of cyantraniliprole on the growth and development and the activities of detoxifying enzymes in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(6): 634–641. [余慧灵, 向兴, 袁贵鑫, 陈羿渠, 王学贵, 2015. 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. 昆虫学报, 58(6): 634–641.]
- Yang YJ, Wang CY, Xu HX, Lu YH, Lu ZX, 2018. Effects of sublethal concentration of two insecticides on growth and development of rice leafhoppers, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) and activities of detoxification enzymes. *Chinese Journal of Rice Science*, 32(3): 304–310. [杨亚军, 王彩云, 徐红星, 鲁艳辉, 吕仲贤, 2018. 两种药剂亚致死浓度对稻纵卷叶螟生长发育及解毒酶活性的影响. 中国水稻科学, 32(3): 304–310.]
- Yuan M, Wei ZY, Yang H, Ou HD, Yang MF, Jin X, 2020. Effects of sublethal concentrations of deltamethrin on the biological characteristics of *Ephestia elutella* Hübner. *Journal of Environmental Entomology*, 42(2): 459–470. [袁敏, 韦治艳, 杨洪, 欧后丁, 杨茂发, 金鑫, 2020. 溴氰菊酯亚致死浓度对烟草粉螟生物学特性的影响. 环境昆虫学报, 42(2): 459–470.]
- Yan WJ, Yang S, Wang YQ, Zheng Q, Zhang ZX, Xu HH, 2019. Comparison of the effectiveness of chemical and biological agents for the emergency control of *Spodoptera frugiperda* in the field. *Journal of Applied Entomology*, 56(4): 7887–92. [闫文娟, 杨帅, 王勇庆, 郑群, 张志祥, 徐汉虹, 2019. 草地贪夜蛾应急防控药剂田间药效筛选. 应用昆虫学报, 56(4): 788–792.]
- Zhang L, Zhang XH, Zhang JG, 2018. Influence of beta-cypermethrin pesticides on digestive enzyme activity in stomach of *Mamestra brassicae* L. larvae. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 46(11): 74–77. [张丽, 张仙红, 张建刚, 2018. 高效氯氰菊酯对甘蓝夜蛾幼虫中肠消化酶活性的影响. 江苏农业科学, 46(11): 74–77.]
- Zhang LY, Ruan CC, Hou ZG, Lu ZB, Wang XM, 2021. Effects on the energy substances of *Myzus persicae* by the sublethal

- concentration of sulfoxaflor. *Agrochemicals*, 60(1): 28–31, 34. [张莉娅, 阮长春, 侯志广, 逯忠斌, 王秀梅, 2021. 亚致死浓度氟啶虫胺胍对桃蚜体内能量物质的影响. *农药*, 60(1): 28–31, 34.]
- Zhang P, Ma L, Ma XQ, 2019. Poisoning effect of hazelnut weevil and influence of sulfoxaflor to midgut digestive enzymes and protective enzyme activity. *Journal of Northeast Forestry University*, 47(1): 88–91. [张平, 马玲, 马晓乾, 2019. 氟啶虫胺胍对榛实象甲成虫毒杀效果及中肠消化酶和保护酶活性的影响. *东北林业大学学报*, 47(1): 88–91.]
- Zhang YL, Song WH, Lin CY, Liu CZ, 2021. The sublethal effects of avermectin and avermectin. imidacloprid on *Myzus persicae* (Sulzer) in potato. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 37(20): 108–112. [张艳蕾, 宋维虎, 林春燕, 刘长仲, 2021. 阿维菌素和阿维·吡虫啉对马铃薯桃蚜的亚致死效应. *中国农学通报*, 37(20): 108–112.]
- Zhao SY, Sun XX, Zhang HW, Yang XM, Wu KM, 2019. Laboratory test on the control efficacy of common chemical insecticides against *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(3): 10–14. [赵胜园, 孙小旭, 张浩文, 杨现明, 吴孔明, 2019. 常用化学杀虫剂对草地贪夜蛾防效的室内测定. *植物保护*, 45(3): 10–14.]
- Zhao YH, Wang QH, Ding JF, Wang Y, Zhang ZQ, Liu F, Mu W, 2018. Sublethal effects of chlorfenapyr on the life table parameters, nutritional physiology and enzymatic properties of *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 148: 93–102.
- Zhen CA, Miao L, Gao XW, 2018. Sublethal effects of sulfoxaflor on biological characteristics and vitellogenin gene (*AlVg*) expression in the mirid bug, *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 144: 57–63.
- Zhi HY, Ding XH, Chen P, Ye ML, Yan YY, Jiang WH, 2021. Effects of chlorantraniliprole on activities of detoxification enzymes and growth and reproduction of *Ostrinia furnacalis*. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 44(1): 89–96. [支昊宇, 丁新华, 陈萍, 叶茂林, 闫阳阳, 姜卫华, 2021. 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟解毒酶活性及生长发育的影响. *南京农业大学学报*, 44(1): 89–96.]
- Zhou SM, Gu QJ, Huang JH, Shi M, Chen XX, 2021. Advances in research on serine protease inhibitors (Serpins) and their role in regulating insect immune systems. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(2): 245–255. [周诗敏, 谷启娟, 黄健华, 时敏, 陈学新, 2021. 丝氨酸蛋白酶抑制剂 Serpins 对昆虫免疫调控作用的研究进展. *应用昆虫学报*, 58(2): 245–255.]