

氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的亚致死效应*

陈冬婧** 杨灯海 俞政平 操海群 李桂亭 周丽君***

(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 【目的】探究氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 亲代 (F_0) 和子一代 (F_1) 的亚致死效应, 为草地贪夜蛾的防治和氯虫苯甲酰胺的合理使用提供理论依据。【方法】采用饲料拌毒法测定氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾的毒力, 利用生命表技术研究了氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾 F_0 代和 F_1 代生长发育及繁殖的亚致死效应。【结果】与丙酮对照相比, LC_{25} 的氯虫苯甲酰胺处理后草地贪夜蛾 F_0 代雌蛾产卵量显著下降 ($P < 0.05$)、成虫寿命显著延长 ($P < 0.001$); F_1 代 4 龄和 5 龄幼虫历期和成虫寿命均显著延长 ($P < 0.05$), 雌蛾产卵前期及总产卵前期显著延长 ($P < 0.05$), 而产卵期显著缩短 ($P < 0.05$), 产卵量 ($P < 0.001$) 和卵孵化率 ($P < 0.05$) 均显著下降; 此外, F_1 代种群净增值率 (R_0) 显著降低 ($P < 0.05$), 平均世代周期 (T) 显著延长 ($P < 0.05$)。【结论】 LC_{25} 的氯虫苯甲酰胺显著影响草地贪夜蛾的生长发育和繁殖, 并抑制其种群增长, 对草地贪夜蛾综合防治策略的制定有积极意义。

关键词 草地贪夜蛾; 氯虫苯甲酰胺; 亚致死效应

Sublethal effects of chlorantraniliprole on the development and reproduction of *Spodoptera frugiperda*

CHEN Dong-Jing** YANG Deng-Hai YU Zheng-Ping CAO Hai-Qun
LI Gui-Ting ZHOU Li-Jun***

(School of Plant Protection, Anhui Agricultural University, Key Laboratory of Biology and Sustainable Management of Plant Diseases and Pests of Anhui Higher Education Institutes, Hefei 230036, China)

Abstract [Objectives] To determine the sublethal effects of chlorantraniliprole on the F_0 and F_1 generation of *Spodoptera frugiperda* and thereby provide a theoretical basis for the rational use of chlorantraniliprole to control this pest. [Methods] The feed mixing method was used to determine the toxicity of chlorantraniliprole to *S. frugiperda*, and its sublethal effects on the development and reproduction of the F_0 and F_1 generations were studied using life tables. [Results] Treatment with a sublethal concentration (LC_{25}) of chlorantraniliprole significantly reduced ($P < 0.05$) the fecundity and increased the longevity ($P < 0.001$) of F_0 females compared to the acetone-control. The duration of the 4th and 5th larval instars and adult longevity of the F_1 generation were significantly longer ($P < 0.001$), as were the pre-oviposition period (APOP) and total pre-oviposition period (TPOP) ($P < 0.05$). The oviposition period was significantly shorter than that of the control ($P < 0.05$). The oviposition period, fecundity ($P < 0.001$) and hatch rate ($P < 0.05$) of F_1 females were significantly less than in the control group, and, in addition, the net reproductive rate (R_0) of the F_1 generation was significantly lower ($P < 0.05$) and the average generation cycle (T) significantly longer ($P < 0.05$). [Conclusion] The results suggest that sublethal concentrations of chlorantraniliprole can inhibit the population growth of *S. frugiperda*, which could contribute developing a comprehensive control strategy for this pest.

Key words *Spodoptera frugiperda*; chlorantraniliprole; sublethal effects

*资助项目 Supported projects: 安徽省高等学校自然科学研究项目 (KJ2021A0195); 高校优秀青年骨干教师国内外访学研修项目 (gxgnfx2021116); 安徽省科技重大专项 (201903a06020027); 安徽农业大学大学生创新创业项目 (202110364602)

**第一作者 First author, E-mail: chenadong0664@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: ljzhou0720@163.com

收稿日期 Received: 2022-03-31; 接受日期 Accepted: 2023-3-22

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 属于鳞翅目夜蛾科, 原产于美洲热带和亚热带地区, 其幼虫具有暴食性, 喜取食幼苗基部, 造成幼苗整株死亡, 严重危害了玉米、高粱及甘蔗等禾本科作物(中华人民共和国农业农村部, 2019; 吴孔明, 2020)。2019 年 1 月从缅甸传入我国云南省并迅速扩散到近二十多个省市(吴孔明, 2019)。自草地贪夜蛾入侵我国以来, 对其进行有效防治已经成为我国农作物保护领域研究的重要任务。目前, 国内尚无登记用于防治草地贪夜蛾的化学药剂, 氯虫苯甲酰胺(Chlorantraniliprole)是 2020 年农业农村部公布的《草地贪夜蛾应急防治用药推荐名单》中推荐药剂。氯虫苯甲酰胺是一种以昆虫鱼尼丁受体(Ryanodine receptor, RyR)为作用靶标的双酰胺类杀虫剂, 通过高效激活 RyR 的钙离子通道, 导致钙离子失控性释放, 进而使昆虫肌肉麻痹、瘫痪, 停止取食, 最终中毒死亡(Lahm *et al.*, 2009)。氯虫苯甲酰胺杀虫谱广, 主要防治多种鳞翅目害虫, 对鞘翅目和部分半翅目害虫也有较好的防效, 同时对捕食性和寄生性天敌表现出低毒且环境生态安全性高等优良特性(Tohnishi *et al.*, 2005)。

随着氯虫苯甲酰胺在田间的大量使用, 已有多种鳞翅目害虫的田间种群对其产生了抗性。Sun 等(2018)报道 2016 年江西省南昌市潼南区二化螟 *Chilo suppressalis* 田间种群对氯虫苯甲酰胺已达到了高等水平抗性, 抗性倍数为 249.6。徐巨龙(2020)检测了来自广东、云南、江苏和山东等地区的小菜蛾 *Plutella xylostella* 田间种群, 发现小菜蛾田间种群已对氯虫苯甲酰胺产生了高等水平的抗性, 广东种群达到 6 642.12 倍。草地贪夜蛾具有多食性、繁殖能力强、迁飞扩散快等生物学特性非常利于抗性的增加和扩散。截止 2019 年, 草地贪夜蛾已对至少 41 种杀虫剂有效成分产生了不同程度的抗性, 其中主要包括已知作用机制的有机磷和拟除虫菊酯等传统杀虫剂, 也包括双酰胺、多杀菌素等新型杀虫剂(吴益东等, 2019)。2019 年, 美国波多黎各部分地区已检测到田间种群草地贪夜蛾对氯虫苯甲酰胺产生了 160 倍高等水平抗性, 室内连续筛选所

得抗氯虫苯甲酰胺草地贪夜蛾种群抗性达 237 倍(Bolzan *et al.*, 2019; Gutiérrez *et al.*, 2019)。害虫抗药性的产生不仅与杀虫剂的使用次数及选择压等有关, 还与害虫本身的生物学特性密切相关(张余杰, 2019)。在田间施用杀虫剂, 害虫除了直接被杀死外, 还有部分个体由于药剂喷洒不均、降解等原因存在亚致死效应(Desneux *et al.*, 2007)。亚致死效应会引发害虫生物学特性的改变, 并影响抗药性的产生, 而这种影响甚至可持续多代(Perveen, 2011; Wang *et al.*, 2013), 因此杀虫剂的亚致死效应需多加重视。刘宴弟等(2021)研究发现 LC₁₀、LC₃₀ 和 LC₅₀ 的氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫 *Carposin niponensis walsingham* 种群增长有一定抑制作用, 与敏感品系相比, 存在产卵量和卵孵化率降低以及后代卵历期延长等差异。目前, 氯虫苯甲酰胺的研究主要集中在化学合成和抗性机理方面, 对草地贪夜蛾亚致死效应的研究报道较少。

本研究以草地贪夜蛾 3 龄幼虫为试虫, 研究 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对其亲代(F₀)成虫繁殖力和寿命、子一代(F₁)发育历期及繁殖力的影响, 旨在全面评价氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾种群生物学特性的影响, 为草地贪夜蛾的田间的综合防治和氯虫苯甲酰胺的合理使用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

草地贪夜蛾初始种群于 2019 年 5 月采集于安徽省黄山市黄山区玉米田中, 带回实验室内采用人工饲料饲养且不接触任何杀虫药剂。饲养条件温度为 (25 ± 1) °C, 相对湿度为 50% ± 10%, 光周期为 16L : 8D。成虫以 10% 蜂蜜水饲养。室内饲养 20 代以后, 取 3 龄初期幼虫用于本试验。供试药剂为 97.8% 氯虫苯甲酰胺原药, 购自上海安谱实验科技股份有限公司(上海)。

1.2 氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾的生物测定

采用国际杀虫剂抗性行动委员会(Insecticide Resistance Action Committee, IRAC)的饲料混毒法(Su *et al.*, 2014)。首先用

二甲基亚砜 (Dimethyl sulfoxide, DMSO) 作为溶剂, 将氯虫苯甲酰胺原药溶解配制成 1 000 mg/L 的母液, 再用丙酮将母液稀释成 0.062 5、0.125、0.25、0.5 和 1 mg/L 5 个浓度梯度, 并均匀地混入 15 g 人工饲料中, 以丙酮溶剂作为对照组。在 24 孔板中平均加入已配好的混毒饲料, 待丙酮挥发后, 接入长势均匀、相同龄期且活力较强的草地贪夜蛾 3 龄幼虫, 每个浓度处理 10 头, 每个处理 3 次重复。饲养条件同 1.1, 96 h 后检查试虫的死亡情况, 用细毛笔轻触幼虫后无反应则视为死亡, 并记录死亡幼虫数量。采用 PoloPlus 2.0 (LeOra Software, Petaluma, CA, USA) 计算剂量-反应曲线, 确定 LC_{25} 值。

1.3 LC_{25} 的氯虫苯甲酰胺对 F_0 代草地贪夜蛾成虫生殖力与寿命的影响

制备含有 LC_{25} (0.15 mg/L) 的氯虫苯甲酰胺混毒饲料, 接入 400 头生理状况一致的草地贪夜蛾 3 龄幼虫作为 F_0 代个体, 单头饲养, 以丙酮溶剂作为对照组 (Li *et al.*, 2021)。96 h 后观察试虫的死亡率, 将存活的幼虫转移到至未经药剂处理的新鲜饲料中喂养, 直至化蛹, 雌雄蛹鉴别后分开放置于塑料盒中, 羽化后配对饲养 (每个处理 40 对), 提供 10% 的蜂蜜水供成虫吸食, 并且每隔 24 h 更换蜂蜜水。饲养条件同 1.1, 每隔 24 h 观察记录每对草地贪夜蛾产卵量和死亡率, 直至成虫死亡。随机收集药剂处理组和对照组卵块 (各 5 个卵块, 每卵块不少于 100 粒), 记录孵化率后作为 F_1 代虫源。

1.4 LC_{25} 的氯虫苯甲酰胺对 F_1 代草地贪夜蛾发育历期和繁殖力的影响

F_0 代卵块孵化后, 药剂处理组和对照组各随机挑选 200 头幼虫置于 1.1 饲养条件下饲养, 每

隔 24 h 监测并记录幼虫各龄期生长发育进度和存活率, 待化蛹羽化后配对饲养, 方法同 1.3, 每隔 24 h 监测并记录包括产卵量、卵孵化率、产卵时长和成虫寿命等在内的种群特征。

1.5 数据统计与分析

运用 TWOSEX-MSChart 程序计算草地贪夜蛾生命表参数原始数据, 包括发育历期、成虫寿命、产卵前期 (Pre-oviposition period, APOP)、总产卵前期 (Total pre-oviposition period, TPOP)、产卵期、繁殖力以及种群的净增殖率 (R_0)、周限增长率 (λ)、内禀增长率 (r_m) 和平均世代周期 (T) 等生命表参数; 利用 bootstrap 技术计算生命表参数的平均值和标准误; 利用 Graphpad prism 7.04 软件进行作图, 采用 SPSS18.0 软件分析草地贪夜蛾药剂处理组和对照组间发育历期、繁殖力和各种群参数间的差异。具体计算公式如下:

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x, \lambda = e^{r_m}, T = \ln R_0 \cdot r_m^{-1},$$

$$T = \sum_{x=0}^{\infty} (x l_x m_x) / \sum_{x=0}^{\infty} (l_x m_x)。$$

式中, x 表示年龄 (d), l_x 表示特定年龄为 x 时的存活率, m_x 表示 x 期限内存活的平均每一个雌虫所产生的雌虫的后代。

2 结果与分析

2.1 氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾的毒力

氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾 3 龄幼虫 96 h 的室内毒力测定结果见表 1。 LC_{25} 、 LC_{50} 和 LC_{75} 分别为 0.15、0.28 和 0.51 mg/L, 其中 LC_{25} 值用于后续研究氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对草地贪夜蛾实验室种群生命表参数的影响。

表 1 氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾 3 龄幼虫毒力测定

Table 1 Toxicity of chlorantraniliprole to the 3rd instar larvae of *Spodoptera frugiperda*

LC_{25} (95%置信限) (mg/L)	LC_{50} (95%置信限) (mg/L)	LC_{75} (95%置信限) (mg/L)	斜率±标准误	卡方 (自由度)
LC_{25} (95% CL) (mg/L)	LC_{50} (95% CL) (mg/L)	LC_{75} (95% CL) (mg/L)	Slope ± SE	χ^2 (df)
0.15 (0.11 - 0.19)	0.28 (0.22 - 0.35)	0.51 (0.40 - 0.72)	2.55 ± 0.35	8.25 (13)

2.2 LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₀代草地贪夜蛾成虫生殖力与寿命的影响

LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₀代草地贪夜蛾雌成虫产卵量及卵孵化率的影响结果见图1。LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₀代雌蛾产卵量有显著影响($P < 0.05$)(图1:A)。LC₂₅处理组和对照组F₀代雌蛾的产卵量分别为($1\,175.15 \pm 91.40$)粒和($1\,507.00 \pm 107.37$)粒,与对照组相比,LC₂₅的氯虫苯甲酰胺处理后雌蛾产卵量显著下降($P < 0.05$)。LC₂₅处理组和对照组F₀代雌蛾卵

孵化率分别为 $84.18\% \pm 5.69\%$ 和 $88.40\% \pm 5.45\%$,且二者差异不显著($P > 0.05$)(图1:B)。这说明LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₀代雌蛾卵孵化率没有显著影响。

LC₂₅的氯虫苯甲酰胺处理显著影响F₀代成虫寿命($P < 0.001$)(图2)。LC₂₅处理组F₀代雄蛾和雌蛾的寿命分别为(12.02 ± 1.54)d和(12.90 ± 1.57)d,对照组F₀代雄蛾和雌蛾的寿命分别为(10.58 ± 2.25)d和(10.51 ± 1.34)d。与对照组相比,LC₂₅的氯虫苯甲酰胺处理后成虫的寿命均显著延长($P < 0.001$)。

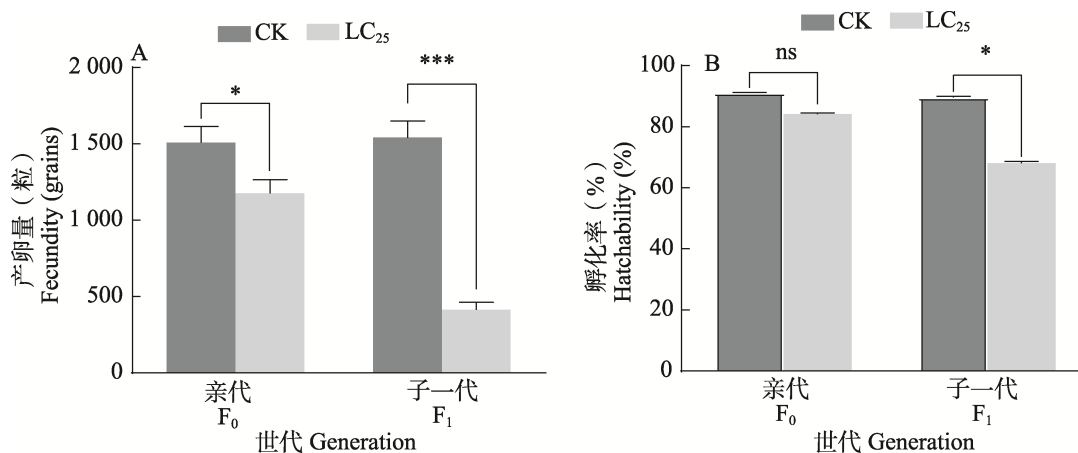


图1 LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₀代和F₁代雌蛾产卵量(A)和卵孵化率(B)的影响

Fig. 1 LC₂₅ of chlorantraniliprole on fecundity and hatchability of F₀ and F₁ generations of *Spodoptera frugiperda*

*表示具有显著差异($P < 0.05$, Student's t 检验); ***表示具有极显著差异($P < 0.001$, Student's t 检验)和 ns 表示不具有显著差异($P > 0.05$, Student's t 检验)。下图同。

* indicates significant differences ($P < 0.05$, Student's t -test); *** indicates extremely significant differences ($P < 0.001$, Student's t -test) and ns indicates no significant differences ($P > 0.05$, Student's t -test). The same below.

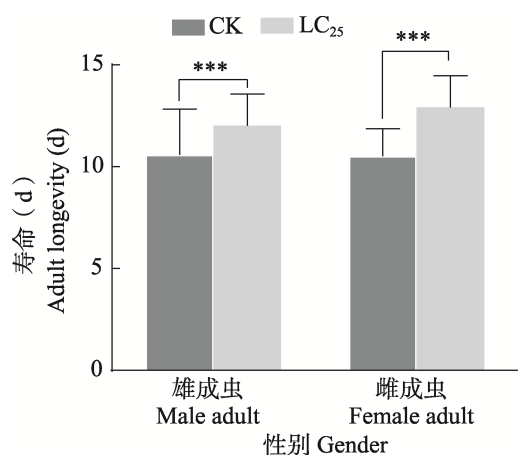


图2 LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₀代成虫寿命的影响

Fig. 2 LC₂₅ of chlorantraniliprole on adult longevity of F₀ generation of *Spodoptera frugiperda*

2.3 LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₁代草地贪夜蛾发育历期和繁殖力的影响

LC₂₅的氯虫苯甲酰胺处理草地贪夜蛾3龄幼虫后对F₁代发育历期和寿命的影响结果见表2。LC₂₅的氯虫苯甲酰胺对F₁代幼虫发育历期和成虫寿命均有延长。与对照组相比,LC₂₅处理组F₁代4龄和5龄幼虫历期、雌雄成虫寿命、产卵前期(APOP)及总产卵前期(TPOP)显著延长($P < 0.05$),而产卵期显著缩短($P < 0.05$)。

LC₂₅的氯虫苯甲酰胺处理草地贪夜蛾3龄幼虫后,F₁代雌蛾产卵量和卵孵化率均受到显著影响(图1)。与对照组相比,处理组F₁代的产卵量

表 2 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对 F₁ 代不同阶段发育历期的影响
Table 2 Developmental duration of different stages for F₁ generation of *Spodoptera frugiperda* when F₀ generation were treated with LC₂₅ of chlorantraniliprole

发育阶段 (d) Stages (d)	CK	LC ₂₅
卵 Egg	2.00 ± 0.00	2.50 ± 0.00
1 龄 1st instar	1.82 ± 0.03	1.81 ± 0.03
2 龄 2nd instar	1.52 ± 0.03	2.00 ± 0.01
3 龄 3rd instar	2.17 ± 0.03	2.07 ± 0.03
4 龄 4th instar	1.98 ± 0.03	2.59 ± 0.02*
5 龄 5th instar	2.13 ± 0.02	3.01 ± 0.01*
6 龄 6th instar	3.54 ± 0.02	3.84 ± 0.022
蛹期 Pupa	6.68 ± 0.07	9.52 ± 0.096
雌虫成虫寿命 Male adult longevity	11.08 ± 0.24	13.27 ± 0.26*
雄虫成虫寿命 Female adult longevity	10.58 ± 0.19	11.81 ± 0.20*
产卵前期 Pre-oviposition period	7.69 ± 0.28	9.43 ± 0.39*
总产卵前期 Total pre-oviposition period	28.77 ± 0.35	30.46 ± 0.43*
产卵期 Oviposition period	2.59 ± 0.23	1.86 ± 0.21*

同行数据后标有*表示具有显著差异 ($P < 0.05$, Student's t 检验)。下表同。

Data with * in the same row indicates significant differences ($P < 0.05$, Student's t -test). The same below.

($P < 0.001$) 和卵孵化率 ($P < 0.05$) 均显著下降, LC₂₅ 处理组和对照组 F₁ 代产卵量分别为 (413.24 ± 48.79) 粒和 (1 540.43 ± 110.60) 粒, LC₂₅ 处理组和对照组 F₁ 代卵孵化率分别为 68.13% ± 4.54% 和 89.65% ± 3.03%。

2.4 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对 F₁ 代生命表参数的影响

LC₂₅ 处理显著降低 F₁ 代净增值率 (R_0) ($P < 0.05$), 显著延长平均世代周期 (T) ($P < 0.05$) (表 3)。这说明 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对 F₁ 代表现为抑制作用。

表 3 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对 F₁ 代生命表参数的影响
Table 3 LC₂₅ of chlorantraniliprole on the life table parameters for F₁ generation of *Spodoptera frugiperda*

生命表参数 Life table parameters	CK	LC ₂₅
R_0	403.49 ± 3.36	45.51 ± 4.43*
λ	0.85 ± 0.33	1.10 ± 0.01
r_m	0.17 ± 0.00	0.09 ± 0.06
T (d)	35.25 ± 0.10	37.48 ± 0.09*

3 讨论

在田间施用杀虫剂防治害虫时, 由于杀虫剂在田间的分布和不断降解以及害虫的个体特性等因素, 使得亚致死效应普遍存在, 并对害虫的生长发育和繁殖产生不同程度的影响 (Desneux *et al.*, 2007)。研究发现亚致死剂量处理后, 棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和舞毒蛾 *Lymantria dispar* 幼虫生长发育受到抑制, 其原因可能是亚致死剂量药剂导致幼虫营养匮乏, 从而抑制其生长发育 (Ren *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012)。同样研究发现, 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对小菜蛾和甜菜夜蛾 *Spodopira exigua* 幼虫生长也具有明显抑制作用 (Lai and Su, 2011; 谭晓伟, 2012)。本研究结果表明, LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾的生长发育和繁殖均产生不同程度的影响, 表现为 F₀ 代和 F₁ 代产卵量及卵孵化率下降、F₁ 代发育历期延长, 其原因可能是氯虫苯甲酰胺降低了草地贪夜蛾的适合度, 从而改变了草地贪夜蛾的营养代谢, 或者是影响了草地贪夜蛾体内激

素平衡所致 (Desneux *et al.*, 2007)。本研究中 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺处理后草地贪夜蛾 F₀ 代和 F₁ 代雌、雄成虫寿命显著延长。而 Tobias (2021) 采用浸叶法测定 LC₁₀ 和 LC₃₀ 的氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的亚致死效应, 与对照组相比, 处理 48 h 后 F₀ 代成虫寿命较对照组显著缩短, 这与本研究结果不同。这可能与氯虫苯甲酰胺的施用条件和方法以及受药昆虫的种类、生理状况和生态型不同等因素有关 (张余杰, 2019)。

本研究结果表明, LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺处理后草地贪夜蛾 F₀ 代和 F₁ 代雌蛾产卵量均显著下降且 F₁ 代卵孵化率显著降低, 与刘宴弟等 (2021) 发现 LC₃₀ 和 LC₅₀ 的氯虫苯甲酰胺处理桃小食心虫后, 其产卵量和卵孵化率降低, 以及后代卵历期延长的研究结果一致。亚致死剂量杀虫剂影响昆虫产卵量的原因较多, 涉及到营养、性信息素通讯和生殖生理等多方面 (杨广明等, 2016), 如昆虫在受到杀虫剂的作用后, 遗留在其体内的杀虫剂会继续对卵子和精子造成不同程度的影响, 从而对产卵量和卵孵化率以及卵历期等繁殖力指标产生影响 (Abd-Elghafar and Appel, 1992)。

此外, 氯虫苯甲酰胺处理后草地贪夜蛾 F₁ 代种群的净增殖率显著降低, 而平均世代周期显著延长。杨洪等 (2012) 研究发现 LC₁₀ 和 LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺处理白背飞虱 *Sogatella furcifera* 若虫后, 其种群的净增殖率和内禀增长率降低, 世代平均周期和种群加倍时间延长。Guo 等 (2013) 的研究表明, LD₂₅ 的氯虫苯甲酰胺处理小菜蛾后, 其种群净增殖率显著降低和世代周期显著延长。这些报道与本研究结果相一致。

综合以上研究结果, LC₂₅ 的氯虫苯甲酰胺对草地贪夜蛾产生明显的亚致死效应, 主要表现为幼虫生长发育明显延缓、寿命延长、产卵量和卵孵化率显著下降, 对草地贪夜蛾种群的增长存在一定的抑制作用。

参考文献 (References)

Abd-Elghafar SF, Appel AG, 1992. Sublethal effects of insecticides on adult longevity and fecundity of German cockroaches (Dictyoptera: Blattellidae). *Journal of Economic Entomology*,

85(5): 1809–1817.

Bolzan A, Padovez FE, Nascimento AR, Kaiser IS, Lira EC, Amaral FS, Kanno RH, Malaquias JB, Omoto C, 2019. Selection and characterization of the inheritance of resistance of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) to chlorantraniliprole and cross-resistance to other diamide insecticides. *Pest Management Science*, 75(10): 2682–2689.

Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81–106.

Guo L, Desneux N, Sonoda S, Liang P, Han P, Gao XW, 2013. Sublethal and transgenerational effects of chlorantraniliprole on biological traits of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L.. *Crop Protection*, 48: 29–34.

Gutiérrez-Moreno R, Mota-Sanchez D, Blanco CA, Whalon ME, Terán-Santofimio H, Rodríguez-Maciél JC, DiFonzo C, 2019. Field-evolved resistance of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to synthetic insecticides in Puerto Rico and Mexico. *Journal of Economic Entomology*, 112(2): 792–802.

Lahm GP, Cordova D, Barry JD, 2009. New and selective ryanodine receptor activators for insect control. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 17(12): 4127–4133.

Lai TC, Su JY, 2011. Effects of chlorantraniliprole on development and reproduction of beet armyworm, *Spodopira exigua* (Hiibner). *Journal of Pest Science*, 84(3): 381–386.

Li XX, Yin F, Cao HQ, 2021. Sublethal effects of short-term and long-term exposure to triflumezopyrim on the small brown planthopper *Laodelphax striatellus* (Hemiptera: Delphacidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 24(1): 91–95.

Liu YD, Sun LN, Zhang HJ, Yan WT, Yue Q, Qiu GS, 2021. Sublethal effects of chloranbenzoamide on the growth and development of *Ostoma persicae*. *Plant Protection*, 47(5): 158–163. [刘宴弟, 孙丽娜, 张怀江, 闫文涛, 岳强, 仇贵生, 2021. 氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫生长发育的亚致死效应. 植物保护, 47(5): 158–163.]

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC, 2019. Press Conference. 2019-6-26. [中华人民共和国农业农村部, 2019. 新闻发布会. 2019-6-26.]

Perveen F, 2011. Effects of sublethal doses of chlorfluazuron on the biochemical constituents of eggs of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Canadian Entomologist*, 143(2): 178–184.

Ren L, Tan XW, Xu XB, Rui CH, 2012. Sublethal effects of methoxyfenozide on the growth and development of *Helicoverpa armigera*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(2): 434–438. [任龙, 谭晓伟, 徐希宝, 芮昌辉, 2012. 甲氧虫酰肼

- 对棉铃虫生长发育的亚致死效应研究. *应用昆虫学报*, 49(2): 434–438.]
- Su J, Zhang Z, Wu M, Gao C, 2014. Geographic susceptibility of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Crambidae), to chlorantraniliprole in China. *Pest Management Science*, 70(6): 989–995.
- Sun Y, Xu L, Chen Q, Qin W, Huang S, Jiang Y, Qin H, 2018. Chlorantraniliprole resistance and its biochemical and new molecular target mechanisms in laboratory and field strains of *Chilo suppressalis* (Walker). *Pest Management Science*, 74(6): 1416–1423.
- Tan XW, 2012. Study on the risk and sublethal effect of resistance to chlorantraniliprole in *Plutella xylostella*. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [谭晓伟, 2012. 小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗性风险及亚致死效应研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Tobias OT, 2021. Lethal and sublethal effects of pesticides on the third instar larvae of *Spodoptera exuloides*. Master dissertation. Chongqing: Southwest university. [Tobias OT, 2021. 农药对草地贪夜蛾三龄幼虫的致死和亚致死效应. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Tohnishi M, Nakao H, Furuya T, Seo A, Kodama H, Tsubata K, Fujioka S, Kodama H, Hirooka T, Nishimatsu T, 2005. Flubendiamide, a novel insecticide highly active against Lepidopterous insect pests. *Journal of Pesticide Science*, 30(4): 354–360.
- Wang XL, Khakame SK, Ye C, Yang YH, Wu YD, 2013. Characterisation of field-evolved resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from China. *Pest Management Science*, 69(5): 661–665.
- Wu KM, 2019. Message for the column "Biological control of *Spodoptera frugiperda*". *Chinese Journal of Biological Control*, 35(5): 657. [吴孔明, 2019. "草地贪夜蛾生物防治"专栏寄语. 中国生物防治学报, 35(5): 657.]
- Wu KM, 2020. Prevention and control strategies of *Spodoptera frugiperda* in China. *Plant Protection*, 46(2): 1–5. [吴孔明, 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5.]
- Wu YD, Shen HW, Zhang Z, Wang XL, Shi Y, Wu SW, Yang YH, 2019. Current status of insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* and counter measures to prevent its development. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 599–604. [吴益东, 沈慧雯, 张正, 王兴亮, 施雨, 武淑文, 杨亦桦, 2019. 草地贪夜蛾抗药性概况及其治理对策. 应用昆虫学报, 56(4): 599–604.]
- Xu JL, 2020. Resistance detection of diamondback moth to ten insecticides and risk assessment of resistance to cyananthramide. Master dissertation. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. [徐巨龙, 2020. 小菜蛾对十种杀虫剂的抗性检测及对溴氰虫酰胺的抗性风险评估. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Xu PF, Shu RH, Gong PP, Li WH, Hu W, Li JH, 2019. Sublethal and transgenerational effects of triflumezopyrim on the biological traits of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae). *Crop Protection*, 117: 63–68.
- Yang GM, Zhi JR, Li SX, Liu L, 2016. Sublethal effects of spinetoram and azadirachtin on development and reproduction of *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(11): 3698–3704. [杨广明, 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.]
- Yang H, Wang Z, Jin DC, 2012. Sublethal effects of chloranbenzoamide on the experimental populations of White-back planthopper, *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(10): 1161–1167. [杨洪, 王召, 金道超, 2012. 氯虫苯甲酰胺对白背飞虱实验种群的亚致死效应. 昆虫学报, 55(10): 1161–1167.]
- Zhang YJ, 2019. Study on resistance mechanism to thiamethoxam in *Empoasca onukii*. Doctoral dissertation. Guiyang: Guizhou University. [张余杰, 2019. 小贯小绿叶蝉对噻虫嗪抗性机制研究. 博士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]