



韩文素, 李健, 高景林, 李翔, 钟义海, 王释婕, 赵珊. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫生长发育和繁殖的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (4): 1095–1102.

氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫生长发育和繁殖的影响

韩文素^{1 3}, 李健^{1 2}, 高景林^{1 3*}, 李翔²,
钟义海^{1 3}, 王释婕^{1 3}, 赵珊^{1 3}

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101; 2. 华中农业大学动物科学技术学院, 武汉 430070;
3. 中国热带农业科学院蜂业技术研究中心, 海口 571101)

摘要: 氯虫苯甲酰胺是我国蜂农防治蜂巢小甲虫 *Aethina tumida* 的主要杀虫剂。本研究旨在探讨氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫生长发育和繁殖的亚致死效应, 为氯虫苯甲酰胺的合理使用提供一定的理论依据。本文采用饲料混毒法测定了氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫的毒力以及亚致死剂量 LC₁₀ 和 LC₂₅ 对蜂巢小甲虫生长发育和繁殖的影响。结果表明, 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫 3 龄初幼虫的 LC₅₀、LC₂₅、LC₁₀ 分别为 5.193 μg/g、1.678 μg/g 和 2.865 μg/g。以氯虫苯甲酰胺亚致死剂量处理蜂巢小甲虫 3 龄初幼虫后, 幼虫发育历期、雌预蛹期 + 蛹期、雄预蛹 + 蛹期均显著延长, 且分别延长了 3.38% 和 4.50%、10.51% 和 21.92%、5.26% 和 12.20%。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组幼虫的存活率均降低, 尤其 LC₂₅ 处理组与对照组存在显著差异。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组漫游期幼虫重、初羽化雌虫重和初羽化雄虫重相比于对照组显著降低, 且分别减轻了 15.45%、21.54%、17.26% 和 13.47%、16.47%、16.46%。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组的产卵前期分别为 7.96 d 和 7.47 d, 比对照组显著缩短 12.36 d 和 12.85 d; 60 d 内单雌产卵总量与对照组间无显著性差异, 但在产卵期 5~7 d 时, LC₂₅ 处理组的单雌产卵量显著增加。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组蜂巢小甲虫种群趋势指数低于对照组, 但其种群趋势指数均远大于 1, 表明蜂巢小甲虫种群仍呈增长趋势, 因此应加强蜂巢小甲虫的防控以及对氯虫苯甲酰胺的抗性监测。

关键词: 蜂巢小甲虫; 氯虫苯甲酰胺; 亚致死效应; 发育; 繁殖

中图分类号: Q965.9; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2023) 04-1095-08

Effects of sublethal dosages of chlorantraniliprole on development and fecundity of *Aethina tumida* (Coleoptera: Nitidulidae)

HAN Wen-Su^{1 3}, LI Jian^{1 2}, GAO Jing-Lin^{1 3*}, LI Xiang², ZHONG Yi-Hai^{1 3}, WANG Shi-Jie^{1 3}, ZHAO Shan^{1 3} (1. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 2. College of Animal Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Bee Industry Technology Research Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract: Chlorantraniliprole is widely used to control the small hive beetle *Aethina tumida* Murray by beekeepers in our country. The aim of this study is focus on the sublethal effects of chlorantraniliprole on the development and reproduction of *A. tumida*. The diet incorporation method was used to test the toxicity

基金项目: 海南省科技专项 (ZDYF2021XDNY282); 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-44-SYZ11); 海南省自然科学基金 (2019RC273)

作者简介: 韩文素, 女, 1978 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为昆虫毒理学, E-mail: hwsuwill8@126.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 高景林, 硕士, 研究员, 主要研究方向为蜂学, E-mail: jinglin.g@163.com

收稿日期 Received: 2022-03-16; 接受日期 Accepted: 2023-01-04

of chlorantraniliprole and to investigate the sublethal effects (LC_{10} and LC_{25}) of chlorantraniliprole on development and fecundity of *A. tumida*. The results showed that the LC_{50} , LC_{25} and LC_{10} of chlorantraniliprole on initial 3rd instar larvae of *A. tumida* were 5.193 $\mu\text{g/g}$, 1.678 $\mu\text{g/g}$ and 2.865 $\mu\text{g/g}$, respectively. After treatment of 3rd instar larvae with sublethal dosages of chlorantraniliprole, the developmental duration of larvae, prepupal + pupae period of female, and prepupal + pupae period of male was significantly prolonged by 3.38% and 4.50%, 10.51% and 21.92%, 5.26% and 12.20%, respectively. The survival rate of the larvae in the LC_{10} and LC_{25} treatment groups were decreased, with a significant difference observed between the LC_{25} treatment and the control group. The weight of the wandering larvae, initial emerging females and males in the LC_{10} and LC_{25} treatment groups also significantly decreased by 15.45%、21.54%、17.26% and 13.47%、16.47%、16.46%, respectively. The preoviposition period of female adults in the LC_{10} and LC_{25} treatment groups was 7.96 d and 7.47 d, which were significantly shorter by 12.36 d and 12.85 d than that of control group. It's worth noting that there were no significant differences between treated groups and the control in the total number of eggs laid per female within 60 days. However, the number of eggs laid per female in the LC_{25} group significantly increased during the 5~7 days oviposition period. The population trend index of *A. tumida* in the LC_{10} and LC_{25} treatment groups were lower than that in the control group, but the population trend index was substantially larger than 1. The results indicated that the population of *A. tumida* exposed to sublethal dosages of chlorantraniliprole continued to increase. Therefore, it is necessary to strengthen management actions for controlling *A. tumida*, as well as to monitor resistance to chlorantraniliprole.

Key words: *Aethina tumida*; chlorantraniliprole; sublethal effect; development; fecundity

蜂巢小甲虫 *Aethina tumida* Murray 属鞘翅目 Coleoptera 露尾甲科 Nitidulidae, 是一种完全变态寄生在蜂群内的杂食性害虫, 是侵害蜜蜂的六大重要病原体之一 (World Organisation For Animal Health, 2019), 也是侵染我国蜜蜂的重要检疫性害虫 (中华人民共和国进境动物检疫疫病名录, 2020)。该虫原分布于非洲南部撒哈拉沙漠以南地区, 在当地危害性极小 (Neumann *et al.*, 2004)。1998 年首次在美国的佛罗里达州发现该虫危害蜂群, 并造成了 300 多万美元的经济损失 (Ellis *et al.*, 2002)。到 2003 年, 该虫遍及美国的 30 多个州, 引起了大量的蜂群飞逃和死亡 (Hood, 2004; Kanga *et al.*, 2021)。当前, 蜂巢小甲虫已扩散到除南极洲之外的所有大陆 (Neumann *et al.*, 2016), 在我国的广东 (赵红霞等, 2018)、海南 (钟义海等, 2019) 和广西 (蜜蜂产业行业内通报) 相继发现该虫危害蜂场并呈严重的扩散蔓延态势。

蜂巢小甲虫成虫入侵蜂群后, 在巢框缝隙内聚集、交配和产卵; 其成虫和幼虫均可取食蜂蜜、花粉、蜜蜂幼虫、蛹 (Ellis *et al.*, 2002; Neumann *et al.*, 2004); 幼虫在觅食过程中在蜂巢内到处挖洞, 破坏巢房, 同时传播病原菌 (如 *Paenibacillus larvae*) (Schäfer *et al.*, 2010), 病毒 (如蜜蜂残翅

病毒 *Deformed wing virus*、克什米尔病毒 *Kashmir bee virus*) (Eyer *et al.*, 2009; Nanetti *et al.*, 2021) 和蜜蜂寄生虫 (*Lotmaria passim*、*Crithidia bombi*) (de Landa *et al.*, 2020) 使蜜蜂幼虫感病; 还可携带酵母菌 *Kodamaea ohmeri* 使蜂蜜发酵, 并散发出腐臭气味, 从而失去商品价值 (Cornelissen *et al.*, 2019)。蜂巢小甲虫成虫可存活数月, 扩散飞行能力非常强, 一头雌虫一生可产卵 2000 多粒 (Papach *et al.*, 2020), 可在不同的蜂群间互相扩散, 世代重叠。

尽管蜂巢小甲虫造成了巨大的经济损失, 但当前还没有有效的绿色防控措施。化学杀虫剂依然是当前防治蜂巢小甲虫的主要手段 (Kanga *et al.*, 2012; Kanga *et al.*, 2021)。国外长期使用蝇毒磷 (Coumaphos), 氟氰胺菊酯 (Fluvalinate) 防治蜂巢小甲虫。据报道, 蜂巢小甲虫对蝇毒磷已产生了 43.7 倍的抗药性, 对氟胺菊酯产生了 5.4 倍的抗药性 (Kanga *et al.*, 2021)。蜂箱内用药比较困难, 一是高毒农药会造成蜜蜂农药中毒, 二是蜂蜜中农药残留也是令人担忧的食品安全问题。笔者对海南蜂场进行蜜蜂病虫害的普查过程中发现蜂农采用氯虫苯甲酰胺进行蜂巢小甲虫的防治, 具有良好的控制效果。

氯虫苯甲酰胺 (Chlorantraniliprole) 是新型邻氨基苯甲酰胺类杀虫剂, 作用于鱼尼丁受体 (Ryanodine receptor), 具有高效、低毒、对其它类型杀虫剂无交互抗性等特点, 主要用于农业害虫防治 (杨桂秋等, 2012)。但随着氯虫苯甲酰胺的推广使用, 一些重要农业害虫如甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、小菜蛾 *Plutella xylostella*、二化螟 *Chilo suppressalis* 等均对氯虫苯甲酰胺产生了较高水平的抗性 (支昊宇等, 2021)。昆虫抗药性的产生与农药产生的亚致死作用相关。如田间昆虫长期处于杀虫剂的低剂量选择压下, 抗药性或耐药性强的个体存活或繁殖的机会较大, 就有利于抗药性能力的积累和发展 (韩文素等, 2011)。伴随着蜂巢小甲虫的爆发, 蜂农施用氯虫苯甲酰胺的剂量因防止蜜蜂中毒不会太高, 但频率会相应增加。这样蜂巢小甲虫长期处于氯虫苯甲酰胺低剂量的选择压下, 必然对氯虫苯甲酰胺的敏感性逐渐降低。本研究测定了氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫生长发育和繁殖的影响, 旨在指导蜂农科学用药, 以减少过度使用杀虫剂带来的蜂产品污染, 同时为有效防治蜂巢小甲虫提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试虫来源及饲养

供试蜂巢小甲虫采自海南省琼中县吊罗山区域内蜂场, 带回实验室隔离养虫室内饲养。饲养方法参照 Neumann *et al.* (2013) 的方法, 蜂巢小甲虫成虫和幼虫均用蜂粮 (含蜂蜜、花粉、蛋白质) 饲喂。饲养条件为: 温度 $27 \pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度 $60\% \pm 10\%$, 未成熟幼虫黑暗无光照约 2 周; 老熟即将化蛹的幼虫, 自然光照 14 h, 持续 1 周, 以便老熟幼虫离开食物入土化蛹, 随后无光持续约 20 d; 羽化后的成虫, 自然光照 14 h, 成虫产卵孵化为幼虫后, 再黑暗饲养, 周而复始。

1.2 供试药剂

氯虫苯甲酰胺 96% 原药, 由海南博士威农用化学有限公司提供。

1.3 实验方法

1.3.1 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫幼虫亚致死剂量的测定

采用饲料混毒法进行幼虫的毒力测定 (IRAC, 2011)。使用 95% 丙酮将氯虫苯甲酰胺原药配置成

最大溶解度为 3.446 g/L 的母液, 备用。试验前, 用丙酮将母液稀释成 2.5、5、10、20、40 和 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的系列试验浓度。每浓度取 0.5 mL 药液与 0.5 mL 的蒸馏水混合, 空白对照采用 0.5 mL 丙酮与 0.5 mL 的蒸馏水, 然后将混匀的药液放入 1 g 蜂粮拌匀, 配置成最终浓度为 0、1.25、2.5、5、10、20、40 $\mu\text{g}/\text{g}$ 的混毒蜂粮。将配置好的蜂粮放入直径 6 cm 且垫有一层滤纸的培养皿内, 接入大小一致刚刚进入 3 龄的幼虫。每个浓度重复 3 次, 每个重复供试 10 头幼虫, 将各处理放入温度 $27 \pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度 $60\% \pm 10\%$, 无光照的暗室内, 48 h 后统计死亡率。记录结果时, 用毛刷轻轻推动不动的幼虫, 等待一段时间, 若幼虫仍没有反应则视为死亡。数据用 SPSS 17.0 软件处理, 计算 LC_{50} , LC_{10} 、 LC_{25} 和毒力回归方程的斜率 (b)。

1.3.2 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫的亚致死效应

使用丙酮配置氯虫苯甲酰胺浓度为 LC_{10} 和 LC_{25} 的药液, 对照为不含杀虫剂的丙酮溶液, 分别放入 1 g 蜂粮内混匀, 置于培养皿内, 再接入刚刚蜕皮的 3 龄幼虫, 放置于暗室内。每个浓度 10 次重复, 每重复处理 10 头幼虫。48 h 后将存活幼虫放入无毒的 2 mL 离心管中, 采用无毒蜂粮单头饲养。对离心管进行编号, 每日观察幼虫的生长发育情况, 直至其变成老熟幼虫。由于蜂巢小甲虫在土里化蛹的特性, 将快要化蛹的幼虫放入装满沙土 (高温灭菌, 湿度为 10%) 的 50 mL 离心管中供其化蛹。称量入土前幼虫的质量和初出土成虫的质量, 判断出土成虫的雌雄, 计算雌雄比。取单只雌虫和单只雄虫放入含无毒蜂粮和黑色塑料膜的 50 mL 离心管中配对, 置于养虫室内饲养。每日观察蜂巢小甲虫的产卵情况, 两个月以后 (从雌雄配对开始算起) 停止记录。收集各个处理组雌虫产卵期前 10 日内产的卵 (包括卵块和单卵), 将其分为平等的三份作为 3 个重复, 每个重复不少于 70 粒卵, 将卵放在消过毒的培养皿中放入光照培养箱, 待卵孵化后测其孵化率。记录孵化数时, 将没有孵化的卵算作死亡。

1.4 数据统计与分析

采用单因素方差分析 (ANOVA) 研究氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫各个阶段的存活率、性别比例、漫游期幼虫重和初羽化成虫重以及子代卵孵化率的影响。每处理间的差异显著性采用 Tukey's HSD 法 ($P < 0.05$)。存活率、孵化

率在方差分析前进行反正弦平方根转换,以满足方差齐性。采用 Morris-Watt 提出的公式计算种群趋势指数 (I): $I = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdots S_n \cdot P_{\varphi} \cdot F_m$ (Watt, 1961; Morris, 1963)。式中, $S_1, S_2, S_3 \cdots S_n$ 为生命表中各发育阶段的平均存活率, P_{φ} 为雌虫占成虫总数的百分率, F_m 指实际平均产卵量, $F_m = F \cdot P_f$, F 为雌虫最大产卵量, P_f 为卵的实际产出率。 $I = 1$, 表明下代种群数量与上一代持平; $I > 1$ 时, 表明下代种群数量增加; $I < 1$ 时, 表明下代种群数量减少。数据统计分析采用

SPSS 17.0 软件, 作图采用 SigmaPlot 12.0 软件, 数据均以平均值 \pm 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫的亚致死剂量

根据室内生物测定的结果, 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫幼虫 48 h 的 LC_{50} 、 LC_{25} 和 LC_{10} 分别为 5.193、2.865 和 1.678 $\mu\text{g/g}$ (表 1), 选取 LC_{25} 和 LC_{10} 两个浓度做亚致死效应研究。

表 1 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫 3 龄幼虫的致死中量和亚致死剂量

Table 1 Median lethal concentration and sublethal dosage of chlorantraniliprole to the 3rd instar of *Aethina tumida*

杀虫剂 Insecticide	Slope ($X \pm SE$)	卡方值 χ^2	LC_{50} ($\mu\text{g/g}$) (95% CL)	LC_{25} ($\mu\text{g/g}$) (95% CL)	LC_{10} ($\mu\text{g/g}$) (95% CL)
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	2.612 \pm 0.455	0.517	5.193 (4.114 ~ 6.910)	2.865 (2.032 ~ 3.640)	1.678 (0.958 ~ 2.297)

注: 表中 CL 为置信区间。Note: CL in the table was the confidence limits.

2.2 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫幼虫存活率和蛹羽化率的影响

氯虫苯甲酰胺亚致死剂量处理蜂巢小甲虫 3 龄初幼虫后, LC_{25} 处理组蜂巢小甲虫的存活率为

76.00% \pm 4.52%, 显著低于对照组; LC_{10} 处理组蜂巢小甲虫的存活率与对照组相比无显著性差异。 LC_{25} 和 LC_{10} 处理组蜂巢小甲虫蛹的羽化率与对照组相比均无显著性差异 (表 2)。

表 2 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫幼虫存活率和羽化率的影响

Table 2 Effects of sublethal dosages of chlorantraniliprole on survival rate and emergence rate of *Aethina tumida*

处理组 Treatment	处理剂量 Dosage ($\mu\text{g/g}$)	存活率 (%) Survival rate	羽化率 (%) Emergence rate
LC_{10}	1.678	90.00 \pm 3.94 a	95.53 \pm 2.32 a
LC_{25}	2.865	76.00 \pm 4.52 b	77.30 \pm 13.80 a
Control	-	100.00 \pm 0.00 a	100.00 \pm 0.00 a

注: 表中数据为平均值 \pm 标准误, 同一列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Tukey's HSD)。Note: Data in the table were mean \pm SE, and those within a column followed by different letters were significantly different ($P < 0.05$, Tukey's HSD)。

2.3 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫幼虫和蛹发育历期的影响

蜂巢小甲虫 3 龄初幼虫经氯虫苯甲酰胺亚致死剂量处理后, 对幼虫和蛹的生长发育影响结果见表 3。对照组幼虫的发育历期为 8.00 \pm 0.00 d, LC_{10} 和 LC_{25} 处理组蜂巢小甲虫幼虫的发育历期明显延长, 为 8.27 \pm 0.06 d 和 8.36 \pm 0.08 d, 分别延长了 3.38% 和 4.50%, 但两处理组间无显著性差异。 LC_{10} 处理组雌蛹的预蛹 + 蛹期为 26.82 \pm 0.20 d, 雄蛹的预蛹 + 蛹期为 27.00 \pm 0.23 d, LC_{25} 处理组

雌蛹的预蛹 + 蛹期为 29.59 \pm 1.31 d, 雄蛹的预蛹 + 蛹期为 28.78 \pm 1.14 d, 相对于对照组的 24.27 \pm 0.10 d 和 25.65 \pm 0.13 d, 均显著延长, 且分别延长了 10.51%、21.92% 和 5.26%、12.20%, 两处理组间存在显著性差异。 LC_{10} 和 LC_{25} 处理组漫游期幼虫体重、初羽化雌虫重和初羽化雄虫重分别为 124.67 \pm 1.71 mg、82.75 \pm 1.35 mg、93.03 \pm 2.41 mg 和 127.59 \pm 2.21 mg、88.10 \pm 1.44 mg、93.93 \pm 2.35 mg, 相对于对照组的 147.45 \pm 1.55 mg、105.47 \pm 1.28 mg、112.44 \pm 1.28 mg 均显著降低,

表 3 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫幼虫和蛹发育历期的影响

Table 3 Effects of sublethal dosages of chlorantraniliprole on the development of larvae and pupa of *Aethina tumida*

参数 Parameters	处理组 Treatments		
	Control	LC ₁₀	LC ₂₅
3 龄幼虫 (d) L3	8.00 ± 0.00 b	8.27 ± 0.06 a	8.36 ± 0.08 a
预蛹 + 雌蛹 (d) Prepupa + Female pupa	24.27 ± 0.10 c	26.82 ± 0.20 b	29.59 ± 1.31 a
预蛹 + 雄蛹 (d) Prepupa + Male pupa	25.65 ± 0.13 c	27.00 ± 0.23 b	28.78 ± 1.14 a
漫游期幼虫重 (mg) Larval weight	147.45 ± 1.55 a	124.67 ± 1.71 b	127.59 ± 2.21 b
初羽化雌成虫重 (mg) Female adult weight	105.47 ± 1.28 a	82.75 ± 1.35 c	88.10 ± 1.44 b
初羽化雄成虫重 (mg) Male adult weight	112.44 ± 1.28 a	93.03 ± 2.41 b	93.93 ± 2.35 b
雌性比例 (%) Sex ratio	59.29 ± 4.23 a	57.23 ± 3.96 a	54.49 ± 4.34 a

注: 表中数据为平均值 ± 标准误, 每行数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Tukey's HSD)。表 4 同。Note: Data in the table were mean ± SE, and those within a row followed by different letters were significantly different ($P < 0.05$, Tukey's HSD). Same to Table 4.

且分别减轻了 15.45%、21.54%、17.26% 和 13.47%、16.47%、16.46%。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组的雌性比例分别为 57.23% ± 3.96% 和 54.49% ± 4.34%，与对照组的 59.29% ± 4.23% 相比，无显著性差异。

2.4 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫繁殖的影响

蜂巢小甲虫雌雄配对后在第 6 天出现了第一个产卵高峰期, 随后大致在第 20 天、40 天和 55 天出现其余重叠的产卵峰 (图 1)。各组的每日产卵量趋势近乎相同, 但有所差别。对照组和 LC₁₀ 处理组的每日单雌产卵量的峰值高度重叠, 数目较多。而 LC₂₅ 处理组的每日单雌产卵量峰值相对较少, 在第 6 天时峰值高于对照组和 LC₁₀ 处理组, 其余时间均低于其它两组。各组产卵量虽不稳定, 但从图中可看出 LC₂₅ 最高峰与最低峰相差最大, 受到杀虫剂影响较大。

LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组蜂巢小甲虫雌虫的产卵前期分别为 7.96 d 和 7.47 d, 显著低于对照组的 20.32 d (表 4)。雌雄配对后, 对照组、LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组 60 d 内的平均产卵量分别为 142.63 ± 27.58 粒、151.38 ± 44.19 粒和 100.79 ± 22.20 粒。与对照组相比, LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组的蜂巢小甲虫产卵量分别增加了 6.31% 和减少了 29.33%, 但各组间并无显著性差异。值得注意的是, LC₂₅ 处理组在 5~7 d 平均产卵量显著高于对照组, 在 18~19 d 显著低于 LC₁₀ 处理组, 在 40~41 d 显著低于对照组。各组卵的孵化率相比, 对照组、LC₁₀ 处理组和 LC₂₅ 处理组的孵化率分别为 71.98%、81.04% 和 74.11%, 无显著性差异。

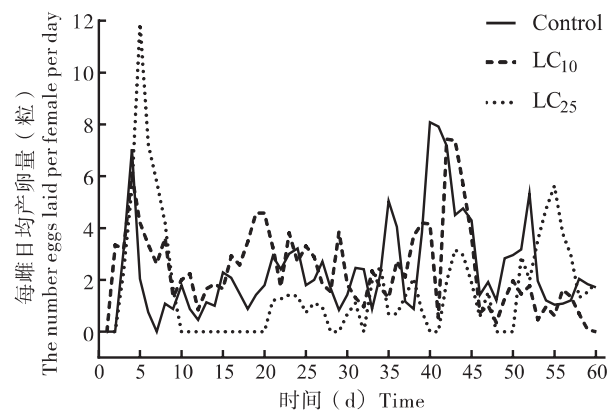


图 1 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫每日单雌产卵量的影响

Fig. 1 Effects of chlorantraniliprole at different dosages on the number of eggs laid by per female per day of *Aethina tumida*

2.5 暴露于氯虫苯甲酰胺亚致死剂量下的蜂巢小甲虫实验种群生命表

实验种群生命表的分析结果显示 (表 5), 与对照组相比, 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫的种群增长具有一定的抑制作用。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组的种群趋势指数与对照组相比分别降低了 22.49% 和 67.27%, 这与氯虫苯甲酰胺亚致死剂量降低蜂巢小甲虫各期的存活率和成虫的繁殖力有关。但本研究中 LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组实验种群的种群趋势指数远远大于 1, 表明暴露于氯虫苯甲酰胺亚致死剂量下的蜂巢小甲虫种群均处于增长态势, 且氯虫苯甲酰胺暴露的剂量越低, 蜂巢小甲虫的种群趋势指数越接近于对照。

表 4 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫繁殖力和卵孵化率的影响

Table 4 Effects of sublethal dosages of chlorantraniliprole on the fecundity and hatchability of *Aethina tumida*

参数 Parameters	处理组 Treatments		
	Control	LC ₁₀	LC ₂₅
产卵前期 (d) Preoviposition period	20.32 ± 3.64 a	7.96 ± 1.42 b	7.47 ± 2.29 b
平均产卵量 (粒/雌) Mean fecundity	142.63 ± 27.58 a	151.38 ± 44.19 a	100.79 ± 22.20 a
5~7 d 平均产卵量 (粒/雌) 5~7 d mean fecundity	2.79 ± 1.02 b	10.15 ± 5.34 ab	11.89 ± 7.10 a
18~19 d 平均产卵量 (粒/雌) 18~19 d mean fecundity	2.29 ± 1.65 ab	8.04 ± 2.82 a	0.00 ± 0.00 b
40~41 d 平均产卵量 (粒/雌) 40~41 d mean fecundity	16.00 ± 4.05 a	9.81 ± 4.24 ab	0.00 ± 0.00 b
卵孵化率 (%) Hatchability	71.98 ± 1.14 a	81.04 ± 3.64 a	74.11 ± 3.69 a

表 5 暴露于氯虫苯甲酰胺亚致死剂量下的蜂巢小甲虫实验种群生命表

Table 5 Experimental population life table of *Aethina tumida* exposed to sublethal dosages of chlorantraniliprole

发育阶段及指标 Development stage and indexes	处理组 Treatments		
	Control	LC ₁₀	LC ₂₅
L-lx	100	100	100
L-Sx	1.00	0.90	0.76
P-Sx	1.00	0.96	0.77
A-Sx	0.96	0.84	0.83
P _♀	0.59	0.57	0.54
P _m	142.63	151.38	100.79
I	80.79	62.62	26.44

注: L-lx, 起始幼虫存活数 (头); L-Sx, 幼虫存活率; P-Sx, 蛹存活率; A-Sx, 成虫存活率; P_♀, 雌性概率; P_m, 实际平均产卵量; I, 种群趋势指数。Note: L-lx, survival number of larvae; L-Sx, survival rate in larvae stage; P-Sx, survival rate in pupa stage; A-Sx, survival rate in adult stage; P_♀, female probability of *A. tumida*; P_m, average eggs per female produced; I, population trend index.

3 结论与讨论

近年来,蜂巢小甲虫呈严重的全球蔓延态势 (Cornelissen *et al.*, 2019), 国外对蜂巢小甲虫的防治研究较多, 物理、化学、生物的方法均有报道, 但使用最为普遍的仍是化学杀虫剂。当前, 美国佛罗里达州的蜂巢小甲虫种群已对有机磷类和拟除虫菊酯类杀虫剂产生了抗药性, 因此急需筛选其它类型杀虫剂治理蜂巢小甲虫 (Kanga *et al.*, 2021)。我国蜂农在防治蜂巢小甲虫时, 多

使用防治蜜蜂害虫巢虫的常用药剂氯虫苯甲酰胺 (秦裕本, 2018)。本研究结果表明, 氯虫苯甲酰胺对蜂巢小甲虫 3 龄初幼虫的 LC₅₀ 为 5.193 μg/g, 说明氯虫苯甲酰胺对非靶标害虫蜂巢小甲虫具有一定的生物活性。随着氯虫苯甲酰胺在农业上的广泛施用, 已造成一些重要农业害虫产生了抗药性。此外, 蜂巢小甲虫基因组测序表明, 其涉及解毒杀虫剂和适应不同食源的几个基因家族的拷贝数增加 (Evans *et al.*, 2018), 说明蜂巢小甲虫对氯虫苯甲酰胺抗性发展的风险较高。

亚致死效应是指由不能直接杀死害虫的低剂量杀虫剂所引起的一种应激性反应。杀虫剂的亚致死剂量可以影响害虫的生长发育、生态行为、生理生化及抗药性发展等多方面, 并对不同害虫的生长发育和繁殖作用存在一定的差异。这种由杀虫剂引起的亚致死效应可以持续影响下一代甚至多代 (Galvan *et al.*, 2006; Han *et al.*, 2012)。本研究使用氯虫苯甲酰胺亚致死剂量 LC₁₀ (1.678 μg/g) 和 LC₂₅ (2.865 μg/g) 处理蜂巢小甲虫 3 龄幼虫后, 与对照组相比, LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组幼虫和蛹的发育时间显著延长, 其中蛹的发育还存在明显的剂量效应。此研究结果与氯虫苯甲酰胺亚致死剂量延长梨小食心虫 *Grapholita molesta* (庾琴等, 2018)、桃小食心虫 *Carposina sasakii* (刘宴弟等, 2021)、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Lai *et al.*, 2011)、白背飞虱 *Sogatella furcifera* (杨洪等, 2012) 的发育历期结果相似。LC₁₀ 和 LC₂₅ 处理组入土前幼虫重和羽化后成虫重明显低于对照组, 这可能是氯虫苯甲酰胺抑制了蜂巢小甲虫幼虫的取食, 或者取食后获得营养一部分用于应付杀虫剂的解毒代谢, 从而改变了其营养状况。

蜂巢小甲虫成虫可存活数月, 一生可交配多次 (de Guzman *et al.*, 2015), 本研究发现成虫在 60 d 内可出现多个产卵高峰期。LC₁₀和 LC₂₅处理组蜂巢小甲虫的产卵前期显著低于对照组, LC₂₅处理组蜂巢小甲虫在 60 d 内的每雌产卵总和有所下降, 但却无显著性差异。值得注意的是, 进一步分析每日单雌产卵量, 发现 5~7 d 时, LC₂₅处理组显著高于对照组, 说明氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫首次产卵时具有一定的刺激繁殖作用。此研究结果不同于氯虫苯甲酰胺亚致死剂量显著降低小菜蛾 (Han *et al.*, 2012)、白背飞虱 (杨洪等, 2012)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Zhang *et al.*, 2013)、桃小食心虫 (刘宴弟等, 2021) 等雌虫的产卵量。据 Fujiwara 研究报道, 药剂的亚致死剂量对害虫的整个发育阶段的影响是不一样的, 可能对某一发育阶段造成一定的刺激作用, 而对另一发育阶段起到抑制作用 (Fujiwara *et al.*, 2002)。

综上所述, 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量延长蜂巢小甲虫的发育历期, 尤其是体现在预蛹和蛹期上, 这可能与昆虫的自我补偿有关。在繁殖方面, LC₂₅处理组蜂巢小甲虫的 60 d 产卵总量与对照相比呈下降趋势, 但需要注意的是, 在第一个产卵高峰时, 显著高于对照组, 出现这种情况的原因有待深入研究。氯虫苯甲酰胺亚致死剂量缩短蜂巢小甲虫的产卵前期, 刺激蜂巢小甲虫初次产卵量增加的现象, 可能会造成蜂巢小甲虫生活史缩短, 繁殖代数增加, 世代重叠。若蜂巢小甲虫连续暴露在氯虫苯甲酰胺的亚致死剂量下, 无疑会诱导蜂巢小甲虫抗药性增强, 种群大暴发, 从而扩散到无疫区。虽然本研究表明氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫处理代的种群增长具有一定的抑制作用, 但其种群趋势指数仍远远大于 1, 表明蜂巢小甲虫种群仍处于增长趋势。因此, 需要进一步监测蜂巢小甲虫对氯虫苯甲酰胺的抗性发展, 以及研究抗性产生的机制, 以期氯虫苯甲酰胺防治蜂巢小甲虫的合理应用提供理论基础。此外, 应该研发氯虫苯甲酰胺蜂箱内外施用的新方法, 最大限度的减少对蜜蜂的毒性影响。

参考文献 (References)

Announcement No. 256 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC and the General Administration of Customs, PRC. List of Quarantine Diseases for the Animals Imported to the People's

- Republic of China, 2020 - 01 - 15. [中华人民共和国农业农村部、中华人民共和国海关总署公告第 256 号: 中华人民共和国进境动物检疫疫病名录 (2020 - 01 - 15)]
- Cornelissen B, Neumann P, Schweiger O. Global warming promotes biological invasion of a honey bee pest [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25 (11): 3642 - 3655.
- de Guzman LI, Rinderer TE, Frake AM. The effects of diet, mating duration, female to male ratios, and temperature on ovary activation, mating success, and fecundity of *Aethina tumida* [J]. *Apidologie*, 2015, 46: 326 - 336.
- de Landa GF, Porrini MP, Revainera P, *et al.* Pathogens detection in the small hive beetle (*Aethina tumida* (Coleoptera: Nitidulidae)) [J]. *Neotropical Entomology*, 2020, 50 (2): 312 - 316.
- Ellis JD, Neumann P, Hepburn R, *et al.* Longevity and reproductive success of *Aethina tumida* (Coleoptera: Nitidulidae) fed different natural diets [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2002, 95 (5): 902 - 907.
- Evans JD, McKenna D, Scully E, *et al.* Genome of the small hive beetle (*Aethina tumida*, Coleoptera: Nitidulidae), a worldwide parasite of social bee colonies, provides insights into detoxification and herbivory [J]. *Giga Science*, 2018, 7 (12): 1 - 16.
- Eyer M, Chen YP, Schäfer MO, *et al.* Small hive beetle, *Aethina tumida*, as a potential biological vector of honeybee viruses [J]. *Apidologie*, 2009, 40 (4): 419 - 428.
- Fujiwara Y, Takahashi T, Yoshioka T, *et al.* Changes in egg size of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) treated with fenvalerate at sublethal doses and viability of the eggs [J]. *Applied Entomology Zoology*, 2002, 37: 103 - 109.
- Galvan TL, Koch RL, Hutchison WD. Toxicity of indoxacarb and spinosad to the multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae), via three routes of exposure [J]. *Pest Management Science*, 2006, 62 (9): 797 - 804.
- Han W, Zhang S, Shen F, *et al.* Residual toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) [J]. *Pest Management Science*, 2012, 68: 1184 - 1190.
- Han WS, Wang LH, Sun HH, *et al.* Research progress on sublethal effects of insecticides on insect [J]. *China Plant Protection*, 2011, 31 (11): 15 - 20. [韩文素, 王丽红, 孙姗姗, 等. 杀虫剂对昆虫的亚致死效应的研究进展 [J]. 中国植保导刊, 2011, 31 (11): 15 - 20]
- Hood WM. The small hive beetle, *Aethina tumida*: A review [J]. *Bee World*, 2004, 85 (3): 51 - 59.
- IRAC (Insecticide Resistance Action Committee), Susceptibility test methods series, Method No. 020. 2011. <http://www.ircac-online.org/>
- Kanga LHB, Marechal W, Legaspi JC, *et al.* First report of insecticide resistance to organophosphates and pyrethroids in the small hive beetle (Coleoptera: Nitidulidae) and development of a resistance

- monitoring technique [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2021, 114 (2): 922–927.
- Kanga LHB, Somorin AB. Susceptibility of the small hive beetle, *Aethina tumida* (Lepidoptera: Nitidulidae), to insecticides and insect growth regulators [J]. *Apidologie*, 2012, 43 (1): 95–102.
- Lai T, Su J. Effects of chlorantraniliprole on development and reproduction of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner) [J]. *Journal of Pest Science*, 2011, 84 (3): 381–386.
- Liu YD, Sun LN, Zhang HJ, et al. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the growth and development of *Carposina sasakii* [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (5): 158–163. [刘宴弟, 孙丽娜, 张怀江, 等. 氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫生长发育的亚致死效应 [J]. *植物保护*, 2021, 47 (5): 158–163]
- Morris RF. Predictive population equations based on key factors [J]. *The Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 1963, 95 (S32): 16–21.
- Nanetti A, Ellis JD, Cardaio I, et al. Detection of *Lotmaria passim*, *Crithidia mellificae* and replicative forms of deformed wing virus and Kashmir bee virus in the small hive beetle (*Aethina tumida*) [J]. *Pathogens*, 2021, 10 (3): 372.
- Neumann P, Elzen PJ. The biology of the small hive beetle (*Aethina tumida*, Coleoptera: Nitidulidae): Gaps in our knowledge of an invasive species [J]. *Apidologie*, 2004, 35 (3): 229–247.
- Neumann P, Evans JD, Pettis JS, et al. Standard methods for small hive beetle research [J]. *Journal of Apicultural Research*, 2013, 52 (4): 1–32.
- Neumann P, Pettis JS, Schäfer MO. Quo vadis *Aethina tumida*? Biology and control of small hive beetles [J]. *Apidologie*, 2016, 47 (3): 427–466.
- Papach A, Williams GR, Neumann P. Evolution of starvation resistance in an invasive insect species, *Aethina tumida* (Coleoptera: Nitidulidae) [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10 (16): 9003–9010.
- Qin YB. Application of chlorantraniliprole in apiculture [J]. *Journal of Bee*, 2018, 8: 29–30. [秦裕本. 氯虫苯甲酰胺在养蜂中的应用 [J]. *蜜蜂杂志*, 2018, 8: 29–30]
- Schäfer MO, Ritter W, Pettis J, et al. Small hive beetles, *Aethina tumida*, are vectors of *Paenibacillus larvae* [J]. *Apidologie*, 2010, 41: 14–20.
- Watt KEF. Mathematical models for use in insect pest control [J]. *The Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 1961, 93 (S19): 5–62.
- World Organisation for Animal Health, Diseases of bees, <https://www.oie.int/en/disease/diseases-of-bees/>.
- Yang GQ, Tong YC, Yang HB, et al. Summary of chlorantraniliprole: A nevol insecticide [J]. *World Pesticides*, 2012, 34 (1): 31–34. [杨桂秋, 童怡春, 杨辉斌, 等. 新型杀虫剂氯虫苯甲酰胺研究概述 [J]. *世界农药*, 2012, 34 (1): 31–34]
- Yang H, Wang Z, Jin DC. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the experimental populations of the white-backed planthopper, *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2012, 55 (10): 1161–1167. [杨洪, 王召, 金道超. 氯虫苯甲酰胺对白背飞虱实验种群的亚致死效应 [J]. *昆虫学报*, 2012, 55 (10): 1161–1167]
- Yu Q, Feng YT, Du EQ, et al. Effects of different sublethal concentrations of two pesticides on growth, development and fecundity of *Grapholita molesta* (Busck) [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (1): 101–104. [庾琴, 封云涛, 杜恩强, 等. 两种农药不同亚致死浓度对梨小食心虫生长发育和繁殖的影响 [J]. *植物保护*, 2018, 44 (1): 101–104]
- Zhang R, Dong J, Chen J, et al. The sublethal effects of chlorantraniliprole on *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12 (3): 457–466.
- Zhao HX, Wang HT, Hou CS, et al. Identification and investigation of an invasive pest *Aethina tumida* in China [J]. *Apiculture of China*, 2018, 11: 29–31. [赵红霞, 王华堂, 侯春生, 等. 入侵中国的蜂箱小甲虫鉴定及发生为害调查 [J]. *中国蜂业*, 2018, 11: 29–31]
- Zhi HY, Ding XH, Chen P, et al. Effects of chlorantraniliprole on activities of detoxification enzymes and growth and reproduction of *Ostrinia furnacalis* [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2021, 44 (1): 89–96. [支昊宇, 丁新华, 陈萍, 等. 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 [J]. *南京农业大学学报*, 2021, 44 (1): 89–96]
- Zhong YH, Han WS, Zhao DX, et al. Risk assessment for the introduction of small hive beetle, *Aethina tumida*, into China [J]. *Plant Quarantine*, 2020, 34 (2): 47–51. [钟义海, 韩文素, 赵冬香, 等. 蜂巢小甲虫传入中国的风险评估 [J]. *植物检疫*, 2020, 34 (2): 47–51]