



杨璇, 石永芳, 何章章, 刘文茹, 王玲, 张国辉, 桂连友. 丁硫克百威和阿维菌素对柑橘大实蝇成虫运动行为的亚致死效应 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (5): 1257–1268.

丁硫克百威和阿维菌素对柑橘大实蝇成虫运动行为的亚致死效应

杨璇, 石永芳, 何章章, 刘文茹, 王玲, 张国辉, 桂连友*

(湖北省农林病虫害预警与调控工程技术研究中心, 长江大学农学院, 湖北荆州 434025)

摘要: 柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* (Enderlein) 是一种为害柑橘类果实的毁灭性害虫。评价亚致死浓度的丁硫克百威和阿维菌素对其成虫运动行为的影响, 可为预防和控制该害虫提供理论基础。本文通过不同亚致死浓度的丁硫克百威和阿维菌素处理柑橘大实蝇成虫, 并于药后 1 h 和 6 h 检测其起飞率、水平和垂直爬行距离。结果表明, 与空白对照组 (CK) 相比, LC_5 、 LC_{10} 丁硫克百威处理后 1 h 的雌、雄虫起飞率分别显著降低 66.7%、50.0%、43.3% 和 40.0%; LC_5 丁硫克百威处理的成虫垂直爬行距离也明显降低 34.6%, 而 LC_{10} 丁硫克百威处理的成虫水平爬行距离却显著增加 24.7%。与空白对照组 (CK) 相比, LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 阿维菌素的处理后 1 h 的柑橘大实蝇雌、雄成虫起飞率分别显著降低 33.3%、23.3%、23.3%、33.3%、53.3% 和 46.7%; LC_5 和 LC_{25} 阿维菌素处理的成虫水平爬行距离分别明显降低 24.2% 和 38.0%。 LC_{10} 和 LC_{25} 阿维菌素处理的成虫垂直爬行距离也分别明显降低 25.2% 和 84.4%。结果还表明, 丁硫克百威和阿维菌素对柑橘大实蝇成虫的水平爬行能力、垂直爬行能力和起飞能力的亚致死效应与其浓度相关。丁硫克百威的亚致死浓度处理对柑橘大实蝇成虫水平爬行能力的影响存在性别差异, 而阿维菌素的亚致死浓度处理对该成虫起飞能力和水平爬行能力的影响亦存在性别差异。此外, 丁硫克百威和阿维菌素对柑橘大实蝇成虫水平爬行能力和垂直爬行能力的亚致死效应与药剂处理后时间长短相关。

关键词: 柑橘大实蝇; 丁硫克百威; 阿维菌素; 亚致死剂量; 运动行为

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2020) 05-1257-12

Sublethal effects of carbosulfan and abamectin on the movement behavior of *Bactrocera minax*

YANG Xuan, SHI Yong-Fang, HE Zhang-Zhang, LIU Wen-Ru, WANG Ling, ZHANG Guo-Hui, GUI Lian-You* (Forewarning and Management of Agricultural and Forestry Pests, Hubei Engineering Technology Center, College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei Province, China)

Abstract: The Chinese citrus fly, *Bactrocera minax* (Enderlein) is a highly destructive pest of citrus fruit. Evaluating the impacts of carbosulfan and abamectin at different sublethal concentrations on the movement behavior of *B. minax* adults will provide the theoretical basis for prevention and control of this destructive pest. In the present study, the take-off rate and the horizontal and the vertical crawling distances of *B. minax* adults were detected at 1 h and 6 h after exposure to carbosulfan and abamectin at several sublethal concentrations. The results showed that the take-off rates of *B. minax* adults females and

基金项目: 国家自然科学基金 (31772206, 31972274)

作者简介: 杨璇, 硕士研究生, 主要研究方向为农业害虫综合治理, E-mail: 1911357476@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 桂连友, 博士, 教授, E-mail: guilianyou@126.com

收稿日期 Received: 2020-04-24; 接受日期 Accepted: 2020-07-20

males treated by LC₅ and LC₁₀ of carbosulfan were significantly reduced by 66.7% , 50.0% , 43.3% and 40.0% after 1 h, respectively, compared to the untreated group (CK). Comparison with CK, the horizontal crawling distances of *B. minax* adults treated by LC₅ carbosulfan were significantly reduced by 34.6% , whereas their vertical crawling distances exposure to LC₁₀ carbosulfan were significantly increased by 24.7%. The take-off rates of *B. minax* adults females and males treated by LC₅ , LC₁₀ and LC₂₅ of abamectin were significantly reduced by 33.3% , 23.3% , 23.3% , 33.3% , 53.3% and 46.7% after 1 h, respectively. Comparison with CK, the horizontal crawling distances of *B. minax* adults treated by LC₅ and LC₂₅ of abamectin were significantly reduced by 24.2% and 38.0% , respectively. The vertical crawling distances of *B. minax* adults treated by LC₁₀ and LC₂₅ of abamectin were significantly increased by 25.2% and 84.4% , respectively. Sublethal dose-dependent effects of carbosulfan and abamectin to the take-off rates, the horizontal crawling ability and the vertical crawling ability of *B. minax* adults were observed. There are gender differences for the horizontal crawling ability of *B. minax* adults after exposure to the sublethal doses of carbosulfan, whereas for the horizontal crawling ability and the vertical crawling ability of *B. minax* adults after exposure to the sublethal doses of abamectin. In addition, the horizontal crawling ability and the vertical crawling ability of *B. minax* adults are related to the time after exposure to the sublethal doses of carbosulfan and abamectin.

Key words: *Bactrocera minax* (Enderlein); carbosulfan; abamectin; sublethal dose; movement behavior

柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* (Enderlein), 隶属于双翅目 *Diptera* 实蝇科 *Tephritidae*, 是一种为害柑橘类果实的毁灭性检疫性害虫 (陈世骧和谢蕴贞, 1995; 梁鹏, 2018)。目前, 有效防治柑橘大实蝇的策略主要包括农业防治 (冬季翻耕土壤、收集落果)、生物防治 (引诱剂和诱蝇球诱集) 和化学防治 (喷施杀虫剂) 等 (汪兴鉴和罗禄怡, 1995; Dorji *et al.*, 2006; Xia *et al.*, 2018)。

昆虫长期暴露在自然环境中, 会摄入亚致死剂量的杀虫剂。研究表明, 亚致死剂量的杀虫剂不仅影响昆虫的生长、发育及寿命, 而且影响昆虫的扩散行为、产卵、取食、寻找配偶及交配等行为 (李曼等, 2018; 何发林等, 2019; Kipchoge *et al.*, 2020; Solmaz *et al.*, 2020)。如短舌熊蜂 *Bombus terrestris* 接触噻虫嗪 (thiamethoxam) 后会致使其飞行能力及对植株的选择能力的改变 (Stanley *et al.*, 2016), 而吡虫啉 (imidacloprid) 则损害短舌熊蜂的定向能力和飞行能力 (Henry *et al.*, 2015; Juho *et al.*, 2018)。

丁硫克百威 (carbosulfan) 和阿维菌素 (abamectin) 是柑橘园中防治柑橘大实蝇的常用杀虫剂 (石永芳等, 2018, 2019)。前者属于氨基甲酸酯类杀虫剂, 可引起试虫兴奋、痉挛、昏迷甚至死亡中毒症状 (马志卿, 2002)。崔新倩等 (2012) 报道家蚕 *Bombyx mori* 取食添加阿维菌素

的食物后出现吐液、头部或尾部翘起、拒食等症状。后者属于大环内酯抗生素类杀虫剂, 可使靶标昆虫表现出行动迟缓、麻痹、继而死亡的中毒症状 (马志卿, 2002)。研究表明, 亚致死剂量的阿维菌素对侧杂食跗线螨 *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) 存在显著的驱避作用 (Breda *et al.*, 2017), 还可显著降低巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* (Hughes) 日均捕食量 (汝阳, 2016)。此外, 石永芳等 (2019) 研究认为丁硫克百威和阿维菌素对柑橘大实蝇成虫有明显的驱避作用。然而, 目前有关以上两种杀虫剂对柑橘大实蝇成虫运动行为的亚致死效应研究尚未见报道。为此, 本文比较研究了亚致死浓度丁硫克百威和阿维菌素处理后不同时间段内柑橘大实蝇成虫起飞率、水平爬行距离和垂直爬行距离的差异, 旨在评价丁硫克百威和阿维菌素对该害虫的成虫运动行为的亚致死效应, 以期为田间有效防治柑橘大实蝇害虫提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试昆虫

柑橘大实蝇幼虫于2018年10月采自湖北省松滋市陈店镇 (30°18'N, 111°77'E) 失管的柑橘园,

并置于长江大学昆虫生态学实验室内饲养。待其化蛹后, 分期分批收集蛹转移到盛有河沙 (厚度 5~7 cm) 的塑料盆内 (直径 17 cm, 高 11 cm), 保持土壤湿度 20% 左右。收集羽化后的成虫置于养虫笼 (长、宽及高均为 35 cm) 中, 饲以酵母菌浸粉、蔗糖和蒸馏水 (质量比 1:3:30) 混匀的营养液。选取羽化后 5 日龄的成虫用于实验 (杜田华, 2018)。

1.1.2 供试药剂和试剂

丁硫克百威 (有效成分 96.5%, 江苏常隆化工有限公司)、阿维菌素 (有效成分 95.4%, 山东潍坊润丰化工股份有限公司)、丙酮 (分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司), 吐温 80 (化学纯, 上海沪试实验室器材股份有限公司) 和考马斯亮蓝 (上海染料研究所有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 药剂浓度和测试前处理

基于本实验室前期室内毒力测定的结果 (石永芳等, 2019) 配制药液, 具体操作步骤如下: 先将称量后的 96.5% 丁硫克百威原药和 95.4% 阿维菌素原药用 1~2 mL 丙酮和吐温 80 完全溶解后, 再加入一定量的蔗糖和 1% 考马斯亮蓝染液, 最后用蒸馏水稀释至对应浓度, 即丁硫克百威: 0.00 (LC₀, CK)、8.42 (LC₅)、15.66 (LC₁₀)、44.18 (LC₂₅)、139.84 mg/L (LC₅₀), 阿维菌素: 0.00 (LC₀, CK) 0.88 (LC₅)、2.04 (LC₁₀)、8.20 (LC₂₅)、38.40 mg/L (LC₅₀), 并确保各浓度药剂中蔗糖和考马斯亮蓝含量分别为 10%、0.5%。

将不同浓度待测药液浸渍 30 s 后的滤纸片 (2 cm × 2 cm) 置于培养皿 (直径 9 cm、高 1.8 cm) 中, 再将饥饿 24 h 后的柑橘大实蝇成虫 (6 日龄) 放于滤纸片边缘, 待其取食 20 s 后, 最后置于温度 25 ± 1℃、相对湿度 65% ± 5%、光周期 14 h:10 h (L:D) 的智能人工气候箱 (RXZ 型, 多段编程, 宁波江南仪器厂) 中。

1.2.2 柑橘大实蝇成虫运动行为测定

试验在长江大学昆虫生态学实验室 (温度 25 ± 2℃, 相对湿度 65% ± 5%, 自然光照) 进行。测试时间为 9:00–17:00。

1.2.2.1 起飞率测定

参照黄秀琴等 (2012) 的方法, 并做部分修改, 即亚致死浓度药剂处理后 1 h, 开始测定柑橘大实蝇成虫起飞情况。每次实验随机取 1 头成虫, 置于塑料纱网 (孔径 1 mm) 笼罩的养虫笼 (长

0.65 m、宽 0.45 m、高 1.35 m) 底部中央的起飞平台 (长 2 cm, 宽 2 cm, 高 65 cm) 上, 观察时间为 3 min。假如某只成虫降落点的位置离地面的高度 ≥ 65 cm, 则判定其为起飞成虫, 反之则视为未起飞成虫。此外, 假如 3 min 内成虫不起飞, 则用毛笔尖轻轻挑拨鼓励, 若此后 1 min 内仍不起飞, 则亦被判定为未起飞成虫。记录每次起飞的和未起飞的成虫数。实验设置 2 个因子: 成虫性别 (雌虫、雄虫) 和阿维菌素和丁硫克百威药剂浓度 (CK、LC₅、LC₁₀、LC₂₅ 和 LC₅₀)。阿维菌素和丁硫克百威各有 10 个处理, 每个处理每次测试 1 头, 重复 30 次, 共测试 30 头成虫。试虫不重复使用。起飞率 (%) = 起飞虫数 × 100 / (起飞虫数 + 未起飞虫数)。

1.2.2.2 水平爬行距离测定

参照梁鹏 (2019) 的测定方法, 具体操作步骤如下: 在 1 个培养皿 (直径 10 cm、高 1.8 cm) 下方贴与其尺寸相同且标有最小刻度为 1 mm 的一张坐标纸, 再随机取 1 头成虫置于培养皿中心点上, 并用 SONY PXW-FS7 录像观察 10 s, 最后通过视频分析 (AutoCAD, Autodesk), 计算其水平爬行距离。实验设置 3 个因子: 成虫性别 (雌虫、雄虫)、阿维菌素和丁硫克百威药剂浓度 (CK、LC₅、LC₁₀、LC₂₅ 和 LC₅₀) 和观察时间 (药剂处理后 1 h 和 6 h)。阿维菌素和丁硫克百威共有 20 个处理。每个处理每次测试 1 头, 重复 10 次, 共测试 10 头成虫。

1.2.3 垂直爬行距离测定

自制的垂直爬行能力测定装置由空心透明的有机玻璃材质的爬行柱 (高 90 cm、直径 4 cm、厚度 0.5 mm) 和旁边垂直放置的木质直尺 (长 1 m、最小刻度 1 mm) 组成。参照梁鹏 (2019) 的测定方法, 即每次实验随机取 1 头成虫置于爬行柱底部中心点, 待其开始爬行时观察, 并记录该成虫爬行 30 s 后的垂直距离。同一个爬行柱测试 5 头成虫后, 一是用 70% 酒精棉球擦拭其内壁, 待酒精完全挥发后再使用; 二是更换新的爬行柱, 以避免柑橘大实蝇成虫遗留的信息素或其它外源物质对其它昆虫的爬行行为产生影响。实验设置三个因子: 成虫性别 (雌虫、雄虫)、阿维菌素和丁硫克百威药剂浓度 (CK、LC₅、LC₁₀、LC₂₅ 和 LC₅₀) 和观察时间 (药后 1 h、6 h)。阿维菌素和丁硫克百威共有 20 个处理。每个处理每次测试 1 头, 重复 30 次, 共测试 30 头成虫。

1.3 数据处理

试验数据均采用 DPS 数据处理系统软件 (DPS 14.4 高级版) 进行分析。在柑橘大实蝇成虫起飞率测定实验中, 先将起飞率和未起飞率进行反正旋平方根转换, 最后采用卡方检验 (G -检验) 比较其差异显著性。柑橘大实蝇成虫水平或垂直爬行距离之间的差异比较, 均采用单因子方差分析 (ANOVA), 而其平均值差异则采用 Tukey 法多重比较。

由于实验过程中, 亚致死浓度的 LC_{25} 、 LC_{50} 丁硫克百威处理后的柑橘大实蝇成虫几乎不运动,

因此其起飞率试验数据没有进行统计分析。

2 结果和分析

2.1 杀虫剂对柑橘大实蝇成虫起飞影响

药剂处理后 1 h, LC_{10} 阿维菌素处理组柑橘大实蝇雌、雄成虫起飞率存在显著性差异 ($P < 0.05$), 而其它浓度阿维菌素处理及丁硫克百威所有处理成虫起飞率均无性别差异 ($P > 0.05$) (表 1)。

表 1 杀虫剂对柑橘大实蝇成虫的起飞率影响

Table 1 Effects of insecticides on the take-off rate of *Bactrocera minax* adult

药剂 Insecticide	浓度 Concentration	统计 Statistic	总数 (头) Total No.	起飞率 (%) Take off rate	未起飞率 (%) Without take-off rate	G	P
丁硫克百威 Carbosulfan	CK	♀	30	90.00	10.00	1.90	> 0.05
		♂	30	80.00	20.00		
	LC_5	♀	30	23.33	76.67	1.17	> 0.05
		♂	30	36.67	63.33		
	LC_{10}	♀	30	40.00	60.00	0.00	> 0.05
		♂	30	40.00	60.00		
阿维菌素 Abamectin	CK	♀	30	86.67	13.33	0.13	> 0.05
		♂	30	90.00	10.00		
	LC_5	♀	30	53.33	46.67	0.02	> 0.05
		♂	30	56.67	43.33		
	LC_{10}	♀	30	63.33	36.67	5.00	< 0.05
		♂	30	36.67	63.33		
	LC_{25}	♀	30	63.33	36.67	2.69	> 0.05
		♂	30	43.33	56.67		
	LC_{50}	♀	30	13.33	86.67	0.12	> 0.05
		♂	30	16.67	83.33		

LC_5 和 LC_{10} 丁硫克百威处理后 1 h 的柑橘大实蝇雌成虫起飞率比空白对照组 (CK) 分别显著降低了 66.7% 和 50.0%, 而雄成虫起飞率依次显著降低了 43.3% 和 40.0% ($P < 0.05$)。但 LC_5 和 LC_{10} 丁硫克百威处理后 1 h 的雌成虫与雄成虫起飞率的差异均不明显 ($P > 0.05$) (表 2)。

LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 和 LC_{50} 阿维菌素处理后 1 h 的雌成虫起飞率比 CK 分别显著降低了 33.3%、

23.3%、23.3% 和 73.3%, 而雄成虫起飞率分别显著降低了 33.3%、53.3%、46.7% 和 73.7% ($P < 0.05$)。 LC_5 、 LC_{10} 和 LC_{25} 阿维菌素处理后 1 h 的雌成虫起飞率以及 LC_5 和 LC_{25} 阿维菌素处理后 1 h 的雄成虫起飞率均显著高于 LC_{50} 处理组 ($P < 0.05$), 而除此之外的所有浓度阿维菌素处理组药后 1 h 的成虫起飞率之间的差异均不明显 ($P > 0.05$) (表 3 和表 4)。

表 2 丁硫克百威不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇成虫起飞率的影响

Table 2 Effects of carbosulfan at the different sublethal concentrations on the take-off rate of *Bactrocera minax* adults

处理组合 Treament combination	统计 Statistic	性别 Sex	总数（头） Total No.	起飞率（%） Take-off rate	未起飞率（%） Without take-off rate	G	P
CK vs LC	CK	♀	30	90.00	10.00	39.79	<0.05
	LC ₅		30	23.33	76.67		
	CK		30	90.00	10.00	26.17	<0.05
	LC ₁₀		30	40.00	60.00		
	CK	♂	30	80.00	20.00	14.06	<0.05
	LC ₅		30	36.67	63.33		
	CK		30	80.00	20.00	11.97	<0.05
	LC ₁₀		30	40.00	60.00		
LC ₅ vs LC	LC ₅	♀	30	23.33	76.67	1.91	> 0.05
	LC ₁₀		30	40.00	60.00		
	LC ₅	♂	30	36.67	63.33	0.02	>0.05
	LC ₁₀		30	40.00	60.00		

表 3 阿维菌素不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇雌成虫起飞率的影响

Table 3 Effects of abamectin at the different sublethal concentrations on the take-off rate of *Bactrocera minax* female adults

处理组合 Treament combination	统计 Statistic	总数（头） Total No.	起飞率（%） Take-off rate	未起飞率（%） Without take-off rate	G	P
CK vs LC	CK	30	86.67	13.33	10.69	<0.05
	LC ₅	30	53.33	46.67		
	CK	30	86.67	13.33	5.72	<0.05
	LC ₁₀	30	63.33	36.67		
	CK	30	86.67	13.33	5.72	<0.05
	LC ₂₅	30	63.33	36.67		
	CK	30	86.67	13.33	49.09	<0.05
	LD ₅₀	30	13.33	86.67		
LC ₅ vs LC	LC ₅	30	53.33	46.67	0.56	> 0.05
	LC ₁₀	30	63.33	36.67		
	LC ₅	30	53.33	46.67	0.56	> 0.05
	LC ₂₅	30	63.33	36.67		
	LC ₅	30	53.33	46.67	14.77	<0.05
	LC ₅₀	30	13.33	86.67		
LC ₁₀ vs LC	LC ₁₀	30	63.33	36.67	0.00	> 0.05
	LC ₂₅	30	63.33	36.67		
	LC ₁₀	30	63.33	36.67	22.05	<0.05
	LC ₅₀	30	13.33	86.67		
LC ₂₅ vs LC	LC ₂₅	30	63.33	36.67	22.05	<0.05
	LC ₅₀	30	13.33	86.67		

表 4 阿维菌素不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇雄成虫起飞率的影响

Table 4 Effects of abamectin at the different sublethal concentrations on the take-off rate of *Bactrocera minax* male adults

处理组合 Treatment combination	统计 Statistic	总数 (头) Total No.	起飞率 (%) Take-off rate	未起飞率 (%) Without take-off rate	G	P
CK vs LC	CK	30	90.00	10.00	12.20	<0.05
	LC ₅	30	56.67	43.33		
	CK	30	90.00	10.00	26.89	<0.05
	LC ₁₀	30	36.67	63.33		
	CK	30	90.00	10.00	21.40	<0.05
	LC ₂₅	30	43.33	56.67		
	CK	30	90.00	10.00	49.31	<0.05
	LD ₅₀	30	16.67	83.33		
LC ₅ vs LC	LC ₅	30	56.67	43.33	2.69	> 0.05
	LC ₁₀	30	36.67	63.33		
	LC ₅	30	56.67	43.33	1.09	> 0.05
	LC ₂₅	30	43.33	56.67		
	LC ₅	30	56.67	43.33	13.27	<0.05
	LC ₅₀	30	16.67	83.33		
LC ₁₀ vs LC	LC ₁₀	30	36.67	63.33	0.20	> 0.05
	LC ₂₅	30	43.33	56.67		
	LC ₁₀	30	36.67	63.33	3.57	> 0.05
	LC ₅₀	30	16.67	83.33		
LC ₂₅ vs LC	LC ₂₅	30	43.33	56.67	6.16	<0.05
	LC ₅₀	30	16.67	83.33		

2.2 杀虫剂对柑橘大实蝇成虫水平爬行距离的影响

除 LC₅ ($F_{1,18} = 8.40$, $P < 0.05$)、LC₁₀ ($F_{1,18} = 13.90$, $P < 0.05$) 丁硫克百威处理后 1 h 以及在 LC₅ ($F_{1,18} = 12.91$, $P < 0.05$) 丁硫克百威分别处理后 6 h 的柑橘大实蝇雌成虫、雄成虫水平爬行距离均存在显著差异外, 其余浓度 [CK (1 h: $F_{1,18} = 0.87$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,18} = 0.77$, $P > 0.05$)、LC₁₀ (6 h: $F_{1,18} = 0.41$, $P > 0.05$)] 丁硫克百威处理后 1 h 或 6 h 的差异均不明显 (图 1-A)。

丁硫克百威处理后 1 h 和 6 h 的雌成虫水平爬行距离仅在, LC₁₀ 浓度处理 ($F_{1,18} = 8.58$, $P < 0.05$) 存在显著差异, 而其余浓度 [CK (♀: $F_{1,18} = 3.70$, $P > 0.05$; ♂: $F_{1,18} = 2.96$, $P > 0.05$)、LC₅ (♀: $F_{1,18} = 0.21$, $P > 0.05$; $F_{1,18} = 0.40$, $P > 0.05$) 和 LC₁₀ (♂: $F_{1,18} = 2.59$, $P >$

0.05)] 丁硫克百威处理的雌、雄成虫水平爬行距离差异均不明显 (图 1-B)。

若不分成虫性别和处理时间, CK 组、LC₅ 丁硫克百威处理组和 LC₁₀ 丁硫克百威处理组之间的成虫水平爬行距离存在显著差异 ($F_{2,108} = 4.02$, $P < 0.05$); 其中, 除了 LC₁₀ 丁硫克百威处理组比 CK 组明显增加 24.7% 外, 其它浓度丁硫克百威处理组间的成虫水平爬行距离差异均不明显。药剂处理后 1 h, LC₅ 和 LC₁₀ 丁硫克百威处理组分别与 CK 组的雌、雄成虫水平爬行距离均存在显著差异 (♀: $F_{2,27} = 13.84$, $P < 0.05$; ♂: $F_{2,27} = 5.20$, $P < 0.05$) (图 1-C); 其中, 除了与 CK 组相比, LC₅ 丁硫克百威处理的雄成虫水平爬行距离以及 LC₁₀ 丁硫克百威处理的雌、雄成虫的水平爬行距离分别增加 80.3%、71.8% 和 16.1% 外, 在其它浓度丁硫克百威处理的雌成虫、雄成虫水平爬行距离差异均不明显。药剂处理后 6 h 所有处理组的雌

成虫、雄成虫水平爬行距离差异均不明显 (♀: $F_{2,27} = 3.00$, $P > 0.05$; ♂: $F_{2,27} = 0.38$, $P > 0.05$) (图 1-C)。

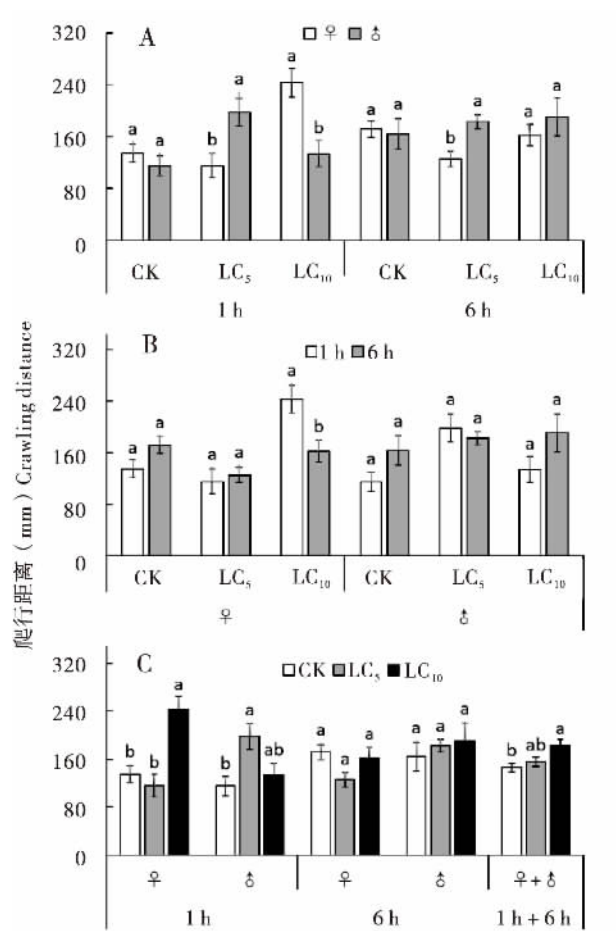


图 1 丁硫克百威不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇成虫水平爬行距离的影响

Fig. 1 Effects of carbosulfan at different sublethal concentrations on the horizontal crawling distance of *Bactrocera minax* adults

注: A, 性别; B, 处理后时间; C, 浓度。不同小写字母者表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: A, B and C indicate sex, time after treatment and sublethal concentration. Different lower-case letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same as below.

除 LC_5 ($F_{1,18} = 5.96$, $P < 0.05$) 阿维菌素处理后 1 h 以及 LC_{25} ($F_{1,18} = 10.111$, $P < 0.05$)、 LC_{50} ($F_{1,18} = 5.35$, $P < 0.05$) 阿维菌素分别处理后 6 h 的柑橘大实蝇雌成虫、雄成虫水平爬行距离均存在显著差异外, 其它浓度 [CK (1 h: $F_{1,18} = 0.87$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,18} = 0.09$, $P > 0.05$)、 LC_5 (6 h: $F_{1,18} = 0.58$, $P > 0.05$)、 LC_{10} (1 h: $F_{1,18} = 0.00$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,18} = 0.01$,

$P > 0.05$)、 LC_{25} (1 h: $F_{1,18} = 0.00$, $P > 0.05$)、 LC_{50} (1 h: $F_{1,18} = 1.74$, $P > 0.05$)] 阿维菌素处理后 1 h 或 6 h 的差异均不明显 (图 2-A)。

阿维菌素处理后 1 h 和 6 h 的雌虫水平爬行距离仅在 LC_{25} 浓度处理 ($F_{1,18} = 9.092$, $P < 0.05$) 存在显著差异, 而其它浓度 [CK (♀: $F_{1,18} = 3.70$, $P > 0.05$; ♂: $F_{1,18} = 2.96$, $P > 0.05$)、 LC_5 (♀: $F_{1,18} = 3.02$, $P > 0.05$; ♂: $F_{1,18} = 0.01$, $P > 0.05$)、 LC_{10} (♀: $F_{1,18} = 1.11$, $P > 0.05$; ♂: $F_{1,18} = 0.10$, $P > 0.05$)、 LC_{25} (♀: $F_{1,18} = 0.55$, $P > 0.05$)、 LC_{50} (♀: $F_{1,18} = 3.83$, $P > 0.05$; ♂: $F_{1,18} = 4.31$, $P > 0.05$)] 阿维菌素处理的雌、雄成虫水平爬行距离差异均不明显 (图 2-B)。

若不分成虫性别和处理时间, CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间的成虫水平爬行距离存在显著差异 ($F_{4,180} = 27.79$, $P < 0.05$) (图 2-C)。其中, 除了在 LC_5 、 LC_{25} 和 LC_{50} 阿维菌素处理组分别与 CK 之间、在 LC_5 和 LC_{50} 阿维菌素处理组之间、以及在 LC_{10} 分别与 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间成虫水平爬行距离均存在显著差异外, 其它浓度阿维菌素处理间的成虫水平爬行距离差异均不明显; 与 CK 组相比, LC_5 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组的成虫水平爬行距离分别明显降低 24.2%、38.0% 和 71.3%。

药剂处理后 1 h, CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间的雌、雄虫水平爬行距离均存在显著差异 (♀: $F_{4,45} = 11.90$, $P < 0.05$; ♂: $F_{4,45} = 6.12$, $P < 0.05$) (图 2-C)。其中, 除了在 CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 阿维菌素处理分别与 LC_{50} 阿维菌素处理之间的雌成虫、以及在 CK、 LC_{10} 、 LC_{25} 阿维菌素处理分别与 LC_{50} 阿维菌素处理之间的雄成虫水平爬行距离均存在显著差异外, 其它浓度阿维菌素处理之间的雌、雄成虫水平爬行距离差异均不明显; 与 CK 组相比, LC_{50} 阿维菌素处理的雌、雄虫的水平爬行距离分别明显降低 78.3% 和 61.9%。药剂处理后 6 h, CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理之间雌、雄成虫的水平爬行距离均存在显著差异 (♀: $F_{4,45} = 14.57$, $P < 0.05$; ♂: $F_{4,45} = 7.05$, $P < 0.05$) (图 2-C); 其中, 除了在 LC_5 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理分别与 CK 之间和在 LC_5 、 LC_{10} 阿维菌素处理分别与 LC_{25} 阿维菌素处理之间相比的雌成虫、以及在 CK、 LC_{10} 、 LC_{25} 阿维菌素处理分别与 LC_{50} 阿维菌素处理

之间相比的雄成虫的水平爬行距离均存在显著差异外, 在其余浓度阿维菌素处理之间的成虫水平爬行距离差异均不明显; 与 CK 相比, LC₅、LC₂₅ 和 LC₅₀ 阿维菌素处理的雌成虫、以及 LC₅₀ 阿维菌素处理的雄成虫的水平爬行距离分别明显降低 35.8%、78.8%、57.9% 和 86.4%。

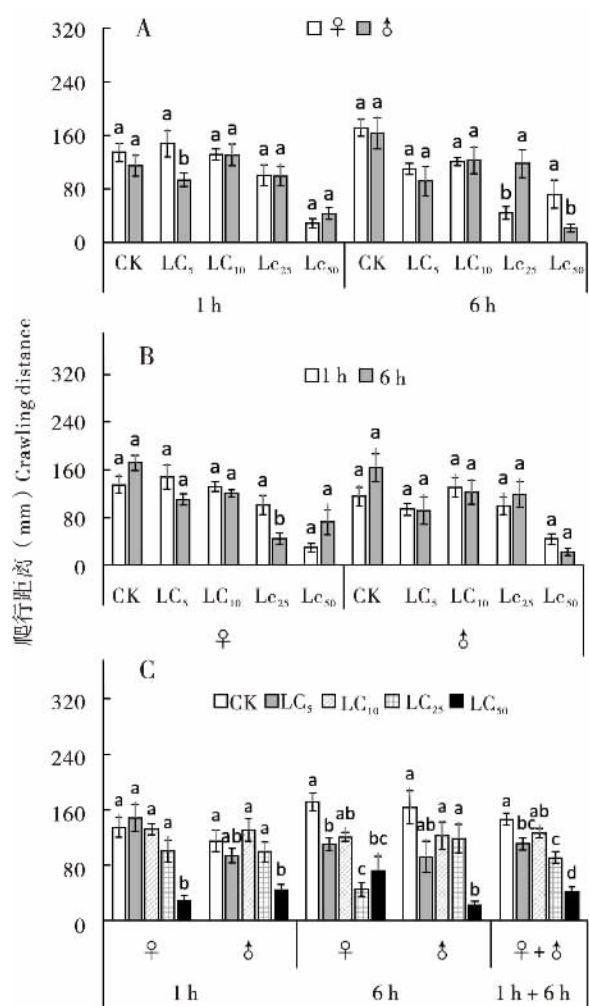


图2 阿维菌素不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇成虫水平爬行距离的影响

Fig.2 Effects of abamectin at different sublethal concentrations on the horizontal crawling distance of *Bactrocera minax* adults

2.3 杀虫剂对柑橘大实蝇成虫垂直爬行距离的影响

对比雌、雄成虫垂直爬行距离, 结果表明: 仅 CK 处理后 6 h 存在显著的性别差异 ($F_{1,58} = 4.27$, $P < 0.05$), 而该处理后 1 h (1 h: $F_{1,58} = 1.98$, $P > 0.05$) 以及 LC₅ (1 h: $F_{1,58} = 1.73$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,58} = 0.31$, $P > 0.05$)、LC₁₀ (1 h: $F_{1,58} = 0.38$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,58} = 0.04$,

$P > 0.05$) 丁硫克百威处理后不同时间点均无明显的性别差异 (图 3 - A)。对比药剂处理后不同时间点的成虫垂直爬行距离, 可得知: CK ($F_{1,58} = 22.93$, $P < 0.05$) 和 LC₁₀ 丁硫克百威处理组 ($F_{1,58} = 10.60$, $P < 0.05$) 的雌成虫以及 LC₁₀ 丁硫克百威处理组 ($F_{1,58} = 5.57$, $P < 0.05$) 的雄成虫均具有显著的时间效应, 其它处理组间 [CK (♀: $F_{1,58} = 0.29$, $P > 0.05$); LC₅ (♀: $F_{1,58} = 1.13$, $P > 0.05$; ♂: $F_{1,58} = 0.22$, $P > 0.05$)] 均无明显的时间差异 (图 3 - B)。

若不分成虫性别和处理时间, CK、LC₅ 丁硫克百威处理组和 LC₁₀ 丁硫克百威处理组之间的垂直爬行距离存在显著差异 ($F_{2,348} = 10.18$, $P < 0.05$) (图 3 - C), 且 LC₅ 丁硫克百威处理组比 CK 组降低 34.6%, 其它浓度处理组间差异均不明显。

药剂处理后 1 h, CK、LC₅、LC₁₀ 丁硫克百威处理组之间雌、雄成虫的垂直爬行距离均存在显著差异 (♀: $F_{2,87} = 16.48$, $P < 0.05$; ♂: $F_{2,87} = 3.23$, $P < 0.05$) (图 3 - C), 且 LC₅ 和 LC₁₀ 丁硫克百威处理组的雌成虫、雌成虫垂直爬行距离比 CK 分别明显降低 64.1%、44.6%、35.7% 和 25.3%, 其它浓度处理组间差异不明显。药剂处理后 6 h, LC₅、LC₁₀ 丁硫克百威处理组与 CK 的雌成虫的垂直爬行距离存在显著差异 ($F_{2,87} = 8.80$, $P < 0.05$), 且 LC₁₀ 丁硫克百威处理组比 CK 增加 105.9%, 上述处理组的雄成虫差异均不明显 ($F_{2,87} = 2.08$, $P > 0.05$) (图 3 - C)。

对比雌成虫、雄成虫垂直爬行距离, 结果表明: 除了药剂处理后 1 h 的 LC₅₀ 阿维菌素处理组 ($F_{1,58} = 9.33$, $P < 0.05$) 以及药剂处理后 6 h 的 CK ($F_{1,58} = 4.27$, $P < 0.05$) 均存在显著差异外, CK 处理后 1 h (1 h: $F_{1,58} = 1.98$, $P > 0.05$) 以及 LC₅ (1 h: $F_{1,58} = 0.01$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,58} = 2.33$, $P > 0.05$)、LC₁₀ (1 h: $F_{1,58} = 3.48$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,58} = 1.76$, $P > 0.05$)、LC₂₅ (1 h: $F_{1,58} = 1.17$, $P > 0.05$; 6 h: $F_{1,58} = 0.00$, $P > 0.05$)、LC₅₀ (6 h: $F_{1,58} = 0.83$, $P > 0.05$) 阿维菌素处理后不同时间点均无明显性别差异 (图 4 - A)。

对比药剂处理后不同时间点的成虫垂直爬行距离, 可得知: CK ($F_{1,58} = 22.93$, $P < 0.05$) 以及 LC₅ ($F_{1,58} = 30.10$, $P < 0.05$)、LC₁₀ ($F_{1,58} = 18.19$, $P < 0.05$)、LC₅₀ 阿维菌素处理组 ($F_{1,58} = 17.58$, $P < 0.05$) 的雌成虫和 LC₅

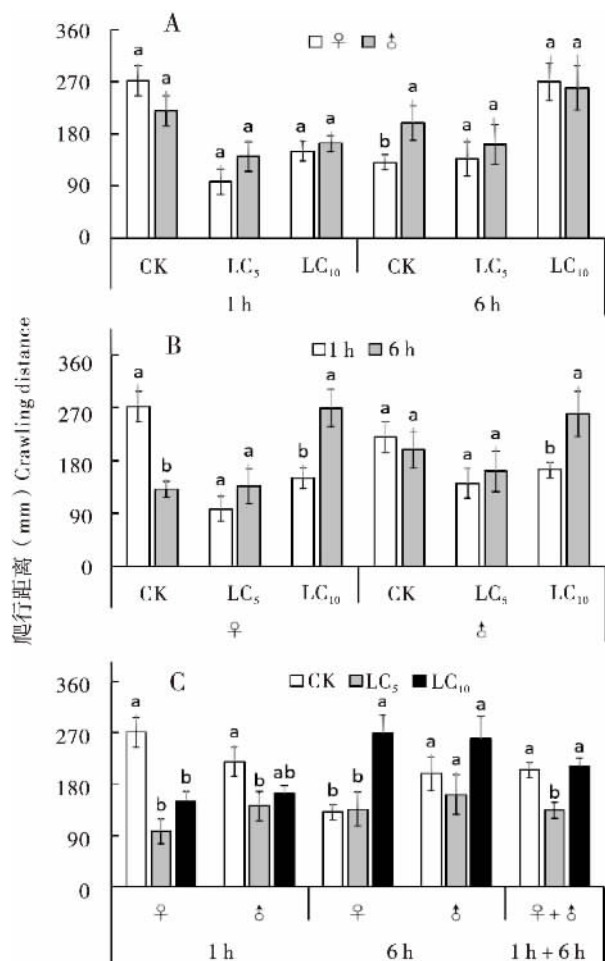


图3 丁硫克百威不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇成虫垂直爬行距离的影响

Fig. 3 Effects of carbosulfan at different sublethal concentrations on the vertical crawling distance of *Bactrocera minax* adults

($F_{1,58} = 9.62$, $P < 0.05$)、 LC_{10} ($F_{1,58} = 16.74$, $P < 0.05$)、 LC_{50} 阿维菌素处理组 ($F_{1,58} = 14.43$, $P < 0.05$) 的雄成虫均具有显著时间效应外, 其它处理组间 [CK (δ : $F_{1,58} = 0.30$, $P > 0.05$)、 LC_{25} (δ : $F_{1,58} = 1.17$, $P > 0.05$; δ : $F_{1,58} = 0.76$, $P > 0.05$)] 均无明显的时间效应 (图 4 - B)。

若不分成虫性别和处理时间, CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间的垂直爬行距离存在显著差异 ($F_{4,580} = 70.38$, $P < 0.05$) (图 4 - C); 其中, 除了在 LC_{10} 、 LC_{25} 和 LC_{50} 阿维菌素处理组分别与 CK 之间、在 LC_5 、 LC_{10} 阿维菌素处理组分别与 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间成虫垂直爬行距离均存在显著差异外, 其它浓度阿维菌素处理组间差异均不明显; 且 LC_{10} 、 LC_{25} 、

LC_{50} 阿维菌素处理组的成虫垂直爬行距离比 CK 分别明显降低 25.2%、84.4% 和 78.5%。药剂处理后 1 h, CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间雌、雄成虫的垂直爬行距离均存在显著差异 (δ : $F_{4,145} = 17.90$, $P < 0.05$; δ : $F_{4,145} = 31.33$, $P < 0.05$) (图 4 - C); 其中, 除了在 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组分别与 CK、 LC_5 、 LC_{10} 阿维菌素处理组之间的雌成虫、雄成虫的垂直爬行距离均存在显著差异外, 其它浓度处理组间差异均不明显; 且 LC_{25} 和 LC_{50} 阿维菌素处理组比 CK 的雌成虫、雄成虫的垂直爬行距离分别显著降低了 83.5%、53.9%、82.9% 和 82.1%。药剂处理后 6 h, CK、 LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间雌、雄成虫的垂直爬行距离存在显著差异 (δ : $F_{4,145} = 13.55$, $P < 0.05$; δ : $F_{4,145} = 16.85$, $P < 0.05$) (图 4 - C); 除了在 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组分别与 CK、 LC_5 、 LC_{10} 阿维菌素处理组之间的雌成虫、以及在 CK 分别与 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间、在 LC_5 分别与 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组之间、在 LC_{10} 与 LC_{50} 阿维菌素处理组之间的雄成虫垂直爬行距离均存在显著差异外, 其它浓度处理组间差异不明显; 且 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组雌成虫及 LC_{10} 、 LC_{25} 、 LC_{50} 阿维菌素处理组雄成虫的垂直爬行距离比 CK 分别显著降低了 82.2%、92.6%、58.3%、88.6% 和 98.8% (图 4 - C)。

3 结论与讨论

本研究表明, 亚致死浓度丁硫克百威 (LC_5 、 LC_{10}) 和阿维菌素 (LC_5 、 LC_{10} 、 LC_{25}) 均会损害柑橘大实蝇成虫的起飞能力, 且存在浓度效应。Tosi 等 (2017) 的研究结果表明, 噻虫嗪 1.34 ng/(头·d) 喂食处理意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 后 1 h, 其处于兴奋状态, 飞行时间和距离显著增加; 野外持续暴露 1 d 或 2 d 后, 蜜蜂摄入噻虫嗪的剂量为 1.96 ~ 2.90 ng/(头·d), 该蜜蜂的飞行时间、距离和速度皆显著减少。Odemer 等 (2018) 报道长期喂食亚致死剂量为 15 g/kg 或 15 ppb 的噻虫胺 (clothianidin) 对意大利蜜蜂的飞行活动无影响。Zheng 等 (2015) 报道赤藓糖醇 (erythritol)、天冬甜素 (aspartame) 和糖精 (saccharin) 降低柑橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 的飞行频率。以上结果表明, 亚致死剂量

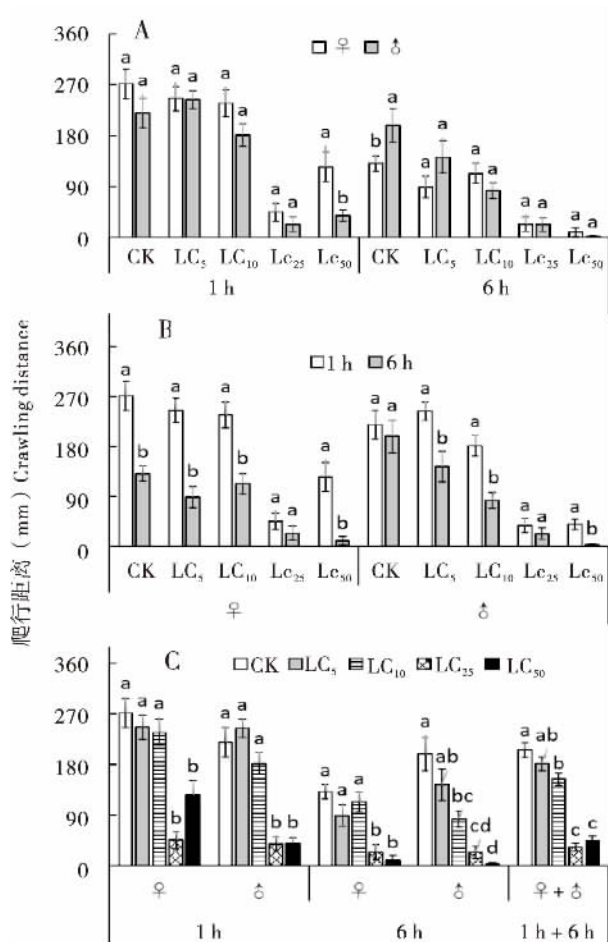


图4 阿维菌素不同亚致死浓度处理对柑橘大实蝇成虫垂直爬行距离的影响

Fig.4 Effects of abamectin at different sublethal concentrations on the vertical crawling distance of *Bactrocera minax* adults

杀虫剂或甜味剂对大多数昆虫的飞行行为存在负面影响,而新烟碱类杀虫剂对意大利蜜蜂飞行行为的影响因药剂种类和处理剂量而存在较大差异。

杀虫剂或其它外源物质对昆虫的爬行能力具有亚致死效应,且大多与剂量相关。本研究结果表明,丁硫克百威 LC₅处理未损害柑橘大实蝇成虫的水平爬行能力(图1),却损害其成虫的垂直爬行能力(图3),而 LC₁₀处理刺激了成虫水平爬行能力(图1)。LC₅、LC₁₀、LC₂₅阿维菌素均损害其成虫的水平爬行能力和垂直爬行能力(图2),且这种损害或刺激与亚致死浓度相关。Zheng 等(2015)认为赤藓糖醇、天冬甜素和糖精会降低柑橘小实蝇的爬行能力。Kerns 和 Gaylor (1992)发现用 LC₁₀硫丙磷(sulprofos)处理的叶片饲养棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 后,该害虫明显受到刺激而变得兴奋,且活动能力明显增加。王桂花等(2014)

报道与未处理棉相比,取食转 Bt 蛋白棉的 1 龄和 3 龄期棉铃虫在开始取食后 2 d 爬行能力显著下降,而取食转 Bt 蛋白棉的 5 龄棉铃虫在取食开始后 1 d 其爬行能力出现显著上升趋势。Bovi 等(2018)指出吡虫啉损害蜜蜂的爬行能力,而氟虫腈(fipronil)对其无负面影响。

本研究结果表明,亚致死浓度丁硫克百威处理对柑橘大实蝇成虫的水平爬行能力影响存在性别差异(图1)。如 LC₅丁硫克百威处理后 1 h 的雌、雄虫存在显著差异。亚致死浓度阿维菌素处理对成虫起飞能力和水平爬行能力的影响亦存在性别差异(表1和图2)。如 LC₁₀阿维菌素处理后 1 h 的雌、雄成虫起飞率存在显著差异(表1);而 LC₅阿维菌素处理后 1 h 的雌、雄虫水平爬行距离均存在显著差异(图2)。石永芳等(2019)研究结果表明,丁硫克百威、吡虫啉、毒死蜱(chlorpyrifos)、氟铃脲(hexaflumron)、噻嗪酮(buprofezin)对柑橘大实蝇成虫的选择行为存在性别差异。宫庆涛(2012)研究发现噻嗪酮、毒死蜱、氟铃脲和多杀菌素(spinosad)对柑橘大实蝇成虫的触角电位(electroantennogram, EAG)反应值也存在性别差异,而这种水平爬行能力的性别差异可能与雌、雄成虫各自具备独特的运动系统有关。

本研究还发现,亚致死浓度的丁硫克百威和阿维菌素处理对柑橘大实蝇成虫的水平爬行能力和垂直爬行能力的影响与药剂处理时间的长短有关(图1-4)。如 LC₁₀丁硫克百威处理后 1 h 和 6 h 间的雌虫水平爬行距离和垂直爬行距离均存在显著差异(图1和图3)。而 LC₂₅阿维菌素处理后 1 h 和 6 h 间的雌虫水平爬行距离以及 LC₁₀阿维菌素处理后 1 h 和 6 h 间的雌虫垂直爬行距离均存在显著差异(图2和图4)。

丁硫克百威和阿维菌素对昆虫运动行为的亚致死效应可能与其作用机理有关。丁硫克百威通过抑制昆虫乙酰胆碱酶的活性,从而造成昆虫体内乙酰胆碱的积累,并影响正常的神经传导,最终达到杀虫目的(张敬存和韩奎珍,2000)。阿维菌素通过干扰昆虫的神经生理活动,刺激其产生并释放更多的抑制神经传导信号的 γ -氨基丁酸(γ -amino-butyric acid, GABA),从而导致长时间的高强度神经抑制效应,最终导致昆虫麻痹甚至死亡(Macconnell *et al.*, 1989; Bloomquist *et al.*, 1993)。

研究表明,上述杀虫剂对昆虫的神经系统具有抑制或刺激作用,可能影响其成虫的嗅觉 (Breda *et al.*, 2017; 石永芳等, 2019) 或视觉 (梁鹏等, 2018) 等感觉器官的敏感性,从而使其成虫的水平、垂直爬行和飞行等运动行为失调 (Boiteau, 2005; 梁鹏, 2019), 最终导致成虫的迁移、扩散、取食、产卵、交配和逃避天敌等行为受到干扰 (Solmaz *et al.*, 2020)。

由于本研究仅于室内开展,但实际上室内与田间的环境条件差异较大;同时,昆虫成虫在田间的运动行为易受光、湿度、风力、天敌等外界自然因素的影响 (张孝羲, 2001), 势必导致两种生境条件下的柑橘大实蝇成虫对不同亚致死浓度丁硫克百威和阿维菌素处理后出现的运动行为反应可能存在差异。因此,本研究结果仍有待结合田间情况进一步验证。

参考文献 (References)

- Bloomquist JR. Toxicology, mode of action and target site – mediated resistance to insecticides acting on chloride channels [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology C, Comparative Pharmacology and Toxicology*, 1993, 106 (2): 301–314.
- BOVI TS, Zaluski R, Orsi RO. Toxicity and motor changes in Africanized honey bees (*Apis mellifera* L.) exposed to fipronil and imidacloprid [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2018, 90 (1): 239–245.
- Breda MO, Oliveira JV, Filho ABE, *et al.* Lethal and sublethal effects of pesticides in the management of *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae) on *Capsicum annum* L. [J]. *Pest Management Science*, 2017, 73 (10): 2054–2062.
- Chen SX, Xie YZ. Taxonomic notes on the Chinese citrus fly, *Tetracus citri* (Chen) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1955, 5 (1): 123–126. [陈世襄, 谢蕴贞. 关于桔大实蝇的学名及其种征 [J]. 昆虫学报, 1955, 5 (1): 123–126]
- Cui XQ, Zhang Q, Jiang H, *et al.* Acute toxicity evaluation of Neonicotinoid Insecticides to *Bombyx mori* and observation of toxic symptoms [J]. *Science of Sericulture*, 2012, 38 (2): 288–291. [崔新倩, 张骞, 姜辉, 等. 新烟碱类杀虫剂对家蚕的急性毒性评价与中毒症状观察 [J]. 蚕业科学, 2012, 38 (2): 288–291]
- Dorji C, Clarke AR, Drew RAI, *et al.* Seasonal phenology of *Bactrocera minax* (Diptera: Tephritidae) in western Bhutan [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2006, 96 (5): 531–538.
- Du TH, Hua DK, He ZZ, *et al.* Behavioral responses of adults *Bactrocera minax* (Diptera: Tephritidae) to volatile organic components from *Castanea* (Fagales: Fagaceae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (2): 474–484. [杜田华, 华登科, 何章章, 等. 柑橘大实蝇成虫对板栗挥发物的行为反应 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (2): 474–484]
- Gilles Boiteau. Role of vision throughout the flight initiation sequence of the Colorado potato beetle [J]. *The Canadian Entomologist*, 2005, 137 (4): 420–427.
- Gong QT. Studies on the Screening of the Chinese Citrus Fly Food Attractants and Fungicides [D]. Chongqing: Southwest University Master Thesis, 2012. [宫庆涛. 柑橘大实蝇食物引诱剂与防治药剂筛选研究 [D]. 重庆: 西南大学硕士论文, 2012]
- He FL, Qiao ZH, Yao XF, *et al.* 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) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2019, 62 (8): 948–959. [何发林, 乔治华, 姚向峰, 等. 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 [J]. 昆虫学报, 2019, 62 (8): 948–959]
- Henry M, Cerrutti N, Aupinel P, *et al.* Reconciling laboratory and field assessments of neonicotinoid toxicity to honeybees [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 282 (1819): 20152110.
- Juho L, Erno K, Juha T, *et al.* Low dose of neonicotinoid insecticide reduces foraging motivation of bumblebees [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285 (1883): 20180506.
- Kerns DL, Gaylor MJ. Behaviour of cotton aphid exposed to sublethal doses of three insecticides [J]. *Southwestern Entomologist*, 1992, 17 (1): 23–28.
- Kipchoge L, Li Cui, Han Ling, *et al.* Lethal and sublethal effects of fluralaner on the two – spotted spider mites, *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) [J]. *Pest Management Science*, 2020, 76 (3): 888–893.
- Li M, Wang WZ, Xu CL, *et al.* Sub – lethal effects of avermectin to *Blattisocius dolichus* (Acari: Aceosejidae) and control efficacy of different release modes of *B. dolichu* against root – knot nematode [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2018, 34 (6): 818–824. [李曼, 王文朝, 徐春玲, 等. 阿维菌素对修长蠼螋的亚致死效应以及不同方式释放该螨对根结线虫的防控效果 [J]. 中国生物防治学报, 2018, 34 (6): 818–824]
- Liang P. Light-sensitivity: Function of the Compound Eye of Adult *Bactrocera minax* [D]. Jingzhou: Yangtze University Master Thesis, 2019. [梁鹏. 柑橘大实蝇复眼的感光能力研究 [D]. 荆州: 长江大学硕士论文, 2019]
- Liang P, Hua DK, Shi YF, *et al.* Light-sensitivity of the compound eye of adult *Bactrocera minax* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2018, 55 (5): 927–935. [梁鹏, 华登科, 石永芳, 等. 柑橘大实蝇成虫复眼的感光作用 [J]. 应用昆虫学报, 2018, 55 (5): 927–935]
- Macconnell JG, Demchak RJ, Preiser FA, *et al.* Relative stability, toxicity, and penetrability of abamectin and its 8, 9-oxide [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1989, 37 (6): 1498–1501.
- Ma ZQ. Studies on the Relationship between the Symptoms and Mechanism of Different Kinds of Insecticides [D]. Yangling:

- Northwest A & F University Ph. D Thesis, 2002. [马致卿. 不同类杀虫药剂的致毒症状与作用机理关系研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学博士论文, 2002]
- Richard O, Lisa N, Nadine L, *et al.* Sublethal effects of clothianidin and *Nosema* spp. on the longevity and foraging activity of free flying honey bees [J]. *Ecotoxicology*, 2018, 27 (5): 527–538.
- Ru Y. Study on Sublethal Effects of Abamectin and Pyridaben to *Neoseiulus barkeri* (Hughes) [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University Master Thesis, 2016. [汝阳. 阿维菌素和吡蚜灵对巴氏新小绥螨的亚致死效应研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士论文, 2016]
- Shi YF, Hua DK, Liang P, *et al.* The olfactory behavioral responses and knockdown action of adults *Bactrocera minax* (Enderlein) (Diptera: Tephritidae) to 12 kinds of insecticides [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (1): 193–201. [石永芳, 华登科, 梁鹏, 等. 12 种杀虫剂对柑桔大实蝇选择行为的影响及击倒作用 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (1): 193–201]
- Shi YF, Hua DK, Liang P, *et al.* Toxicity of two insecticides against *Bactrocera minax* in laboratory [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, 738 (4): 95–97. [石永芳, 华登科, 梁鹏, 等. 2 种杀虫剂对柑橘大实蝇的室内毒力测定 [J]. 现代农业科技, 2018, 738 (4): 95–97]
- Solmaz E, Çevik B, Recep A. Abamectin resistance and resistance mechanisms in *Tetranychus urticae* populations from cut flowers greenhouses in Turkey [J]. *International Journal of Acarology*, 2020, 46 (2): 94–99.
- Stanley DA, Russell AL, Morrison SJ, *et al.* Investigating the impacts of field – realistic exposure to a neonicotinoid pesticide on bumblebee foraging, homing ability and colony growth [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53 (5): 1440–1449.
- Tosi S, Burgio G, Nieh JC. A common neonicotinoid pesticide, thiamethoxam, impairs honey bee flight ability [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 1201.
- Wang GH, Zhao QJ, Lv BQ, *et al.* Crawling capability of immature *Heliothis armigera* and *Prodenia litura* feeding on the Bt protein [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35 (7): 1409–1415. [王桂花, 赵庆杰, 吕宝乾, 等. 取食 Bt 蛋白对棉铃虫和斜纹夜蛾幼虫爬行能力的影响 [J]. 热带作物学报, 2014, 35 (7): 1409–1415]
- Wang XJ, Luo LY. The research progress of Chinese citrus fly, *Bactrocera minax* [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 1995, 32 (5): 310–315. [汪兴鉴, 罗禄怡. 桔大实蝇的研究进展 [J]. 昆虫知识, 1995, 32 (5): 310–315]
- Xia YL, Ma XL, Hou BH, *et al.* A review of *Bactrocera minax* (Diptera: Tephritidae) in China for the purpose of safeguarding [J]. *Advances in Entomology*, 2018, 6 (2): 35–61.
- Zheng CY, Zeng L, Xu YJ. Effect of sweeteners on the survival and behaviour of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) [J]. *Pest Management Science*, 2016, 72 (5): 990–996.
- Zhang JC, Han KZ. Analysis of carbosulfan by HPLC [J]. *Agrochemicals*, 2000, 39 (5): 25. [张敬存, 韩奎珍. 丁硫克百威的高效液相色谱分析 [J]. 农药, 2000, 39 (5): 25]
- Zhang XX. Insect Ecology and Forecast [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001. [张孝羲, 昆虫生态及预测预报 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001]