

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.028

引用格式:王嘉瑞,李知秋,崔竣玲,等.苜蓿草田常用杀虫剂致死中浓度对花蓟马生长发育与繁殖的影响[J].草地学报,2026,34(9):3446—3455

WANG Jia-rui, LI Zhi-qi, CUI Jun-ling, et al. Effects of Median Lethal Concentration of Commonly Used Insecticides in Alfalfa Fields on the Growth, Development and Reproduction of *Frankliniella intonsa*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3446—3455

苜蓿草田常用杀虫剂致死中浓度对花蓟马生长发育与繁殖的影响

王嘉瑞^{1,2#}, 李知秋^{1,2#}, 崔竣玲³, 傅祖英¹, 熊昌宇^{1,4}, 罗樱宁², 崔艺凡^{1,2}, 王颖¹,
孙伟¹, 张蓉¹, 班丽萍^{2*}, 魏淑花^{1*}

(1. 宁夏农林科学院植物保护研究所, 宁夏 银川 750002; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193;
3. 银川市公园管理中心, 宁夏 银川 750001; 4. 北方民族大学生物科学与工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:本研究为明确高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪致死中浓度(LC₅₀)对苜蓿草田花蓟马(*Frankliniella intonsa*)抗性种群生长发育与繁殖的影响,以宁夏两个田间抗性群体(YLC, MS)为对象,基于室内毒力测定开展胁迫试验,研究了两种杀虫剂对蓟马子代产卵量、发育历期、体长体宽、成虫寿命及存活率的影响。结果显示:两种杀虫剂LC₅₀胁迫下,F₁代成虫产卵量显著下降,F₂代卵期和1龄若虫历期显著延长,F₂代1~2龄若虫体长、体宽显著缩短,F₂代成虫寿命显著缩短,F₂代各龄期存活率显著降低。研究证实,杀虫剂高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪的致死中浓度可显著抑制花蓟马种群的繁殖能力、生长发育及存活,为科学治理田间虫害提供了重要技术支撑。

关键词:花蓟马;半致死浓度;杀虫剂;生长发育;抗药性

中图分类号:S435.41

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3446-10

Effects of Median Lethal Concentration of Commonly Used Insecticides in Alfalfa Fields on the Growth, Development and Reproduction of *Frankliniella intonsa*

WANG Jia-rui^{1,2#}, LI Zhi-qi^{1,2#}, CUI Jun-ling³, FU Zu-ying¹, XIONG Chang-yu¹, LUO Ying-ning²,
CUI Yi-fan^{1,2}, WANG Ying¹, SUN Wei¹, ZHANG Rong¹, BAN Li-ping^{2*}, WEI Shu-hua^{1*}

(1. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Science, Yinchuan, Ningxia 750002, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Yinchuan Park Management Center, Yinchuan Ningxia 750001, China; 4. School of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To clarify the effects of the median lethal concentrations (LC₅₀) of lambda-cyhalothrin and thiamethoxam on the growth, development and reproduction of *Frankliniella intonsa* resistant populations in alfalfa fields, two field-resistant populations (YLC and MS) from Ningxia were used as test materials. Stress treatments were conducted based on laboratory toxicity assays, and the effects of the two insecticides on the fecundity, developmental duration, body length, body width, adult longevity and survival rate of the offspring of *Frankliniella intonsa* were investigated. The results showed that under the stress of median lethal concentration

收稿日期:2026-02-23;修回日期:2026-04-12

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2024AAC02065);国家牧草产业技术体系-盐池综合试验站(CARS-34);宁夏回族自治区青年拔尖人才培养工程(宁人社函[2021]353号);宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-15-04);国家自然科学基金项目基金(32573603)资助

作者简介:王嘉瑞(2002-),女,汉族,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事草地害虫抗药性研究,E-mail:m18745116107@163.com;
李知秋(2002-),女,汉族,安徽淮北市人,硕士研究生,主要从事草地害虫抗药性研究,E-mail:zhiqu8769@163.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:lipingban@cau.edu.cn;weishuhua666@163.com

of the two insecticides, the fecundity of F_1 adults decreased significantly; the developmental duration of F_2 eggs and first-instar nymphs was significantly prolonged; the body length and body width of F_2 first- and second-instar nymphs were significantly reduced; the longevity of F_2 adults was significantly shortened; and the survival rate of F_2 at each developmental stage was significantly decreased. This study confirmed that the median lethal concentration of lambda-cyhalothrin and thiamethoxam could significantly inhibit the reproduction, growth, development and survival of *Frankliniella intonsa* populations, providing important technical support for the scientific management of field insect pests.

Key words: *Frankliniella intonsa*; Median lethal concentration; insecticide; growth and development; insecticide resistance

蓟马是缨翅目(*Thysanoptera*)昆虫的统称,目前全世界已记载的约6600种^[1],大部分为植食性昆虫,在全球生态中扮演重要的角色。其中花蓟马(*Frankliniella intonsa*)是近年来豆科作物的主要害虫^[2],主要分布在温带气候带,在中国、日本、韩国、拉脱维亚、波兰^[3-7]等地均有报道分布,在我国分布广泛,除重庆、青海等省份外,大部分省份都有发生^[8-11]等。其整个生活史都具有危害性,主要危害豆科植物的嫩叶、嫩梢和豆荚等。其寄主十分广泛,主要包括豆科(豇豆、苜蓿等)、菊科(向日葵等)、蔷薇科(月季等)等多科植物^[12],在我国苜蓿栽培地发生率极高,是我国苜蓿草田内害虫优势种^[13]。

苜蓿(*Medicago sativa*)作为西北部地区重要经济作物,在种植范围不断扩大的同时,虫害的发生也随之加剧,其中蓟马为常发性害虫。据资料统计,危害苜蓿的蓟马种类有十几种^[14-15]。在宁夏苜蓿种植区,为害种类主要为牛角花齿蓟马(*Odontothrips loti*)和花蓟马。从危害时序来看,牛角花齿蓟马盛发于苜蓿的苗期和分枝期(株高40 cm以下)^[16],花蓟马危害高峰期常集中于苜蓿始花期至盛花期(株高40 cm以上)^[17]。蓟马由于其体型小、发育历期短、世代重叠严重,且主要在幼嫩叶及生长点的重叠处为害,隐蔽性强的特点,增加了防治难度与药剂用量。目前防治措施主要包括:农业防治,一方面筛选和培育抗虫品种,另一方面在田间实施轮作、间作、套作、刈割等措施,降低害虫种群数量,从而达到抑制害虫暴发的目的^[18];物理防治,理化诱控是田间常用的一种物理防治方法,包括杀虫灯、信息素、诱虫板等手段对害虫进行诱杀^[19-20];生物防治,利用自然界中的有益生物,如寄生性天敌、捕食性天敌、微生物菌剂、植物源农药等抑制有害生物种群密度或消灭有害生物的防治方法^[21],针对蓟马的生物防治方法颇为丰富,主要包括捕食螨、寄生蜂、病原线虫及真菌等多种生物;化学防

治,采取高效低毒的化学杀虫剂进行防治,能够有效降低害虫的种群数量^[22]。由于杀虫剂的速效性较其他防治措施好,所以在实际生产中仍以杀虫剂为主^[23]。田间常用药剂有拟除虫菊酯类(高效氯氟氰菊酯、高效氯氰菊酯),新烟碱类(噻虫嗪、啉虫脒、吡虫啉),大环内酯类(甲氨基阿维菌素苯甲酸盐),吡咯类(溴虫腈),多杀菌素类(乙基多杀菌素),植物源杀虫剂(苦参碱)等^[24-26]。目前使用最多的为拟除虫菊酯类、新烟碱类、大环内酯类、多杀菌素类化学杀虫剂^[27]。其中,新烟碱类因其独特的作用机制、杀虫活性高等特点一直被广泛地应用在害虫防治之中。新烟碱类杀虫剂在短期内能控制害虫种群密度,在防治刺吸式害虫中效果尤为显著^[28]。拟除虫菊酯作为一种广谱杀虫剂,因其兼具触杀、胃毒与熏蒸作用,在控制蓟马爆发中发挥重要作用。但是随着用药量的增加,害虫的抗药性问题愈加严重^[29-30],成为害虫防治的瓶颈。为此,本试验测定了宁夏不同苜蓿种植区花蓟马对四种田间常用杀虫剂的抗性水平,基于室内毒力试验结果,探究杀虫剂致死中浓度对花蓟马抗性群体产卵量、发育历期、体长体宽、成虫寿命和存活率的影响,结果将为治理田间花蓟马种群密度和杀虫剂合理使用提供了理论基础和数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样地及供试虫源

采样地:供试花蓟马采自宁夏三处不同苜蓿种植地,分别是宁夏银川市西夏区军马场宁夏农垦茂盛(缩写为MS)草业有限公司苜蓿种植基地(38°33′09″N, 106°03′38″E),面积34 533 m²,为连续3年以上施用多种化学杀虫剂,每年第2茬开始施用5%高效氯氟氰菊酯微乳剂,交替复配5%吡虫啉乳油、15%啉虫脒乳油、10%啉虫脒乳油或1.8%阿维菌素乳油其中一种药剂进行防治,防治

时间为每茬割前和割后一周,视田间虫情和天气进行防治;宁夏银川市西夏区芦花台园林场(缩写为YLC)宁夏农林科学院植物保护研究所农业部病虫害银川试验站苜蓿种植基地(38°39′01″N,106°08′56″E),面积3667 m²,虽连续3年以上未采取任何害虫防治措施(包括未施用化学杀虫剂),但其周围种植有葡萄、玉米、枸杞等农作物,均喷施化学杀虫剂,每年5月时施用高效氯氟氰菊酯1000倍液、福美双1000倍液和阿维菌素1000倍液等,2022年6月时施用过噻虫嗪3000倍液;宁夏固原市彭阳县孟塬乡白阳庄村彭阳县(缩写为PY)荣发农牧有限公司苜蓿种植基地(35°58′37″N,106°53′18″E),面积14 667 m²,全年不施化学杀虫剂,且周围无喷施农药的农作物。

供试虫源:利用软毛刷在田间采集大量花蓟马成虫,带回实验室内以新鲜四季豆饲养,饲养条件设置为温度(25±1)℃、相对湿度65%±5%、光暗周期14L:10D。待孵化后,立刻将1龄幼虫移至新的圆柱形养虫罐(d×h=100 mm×100 mm)中,以新鲜四季豆饲养,四季豆在使用前用自来水冲洗两次,再用蒸馏水浸泡8~12 h,尽可能地去相关残留物,降低对试验的影响。

1.2 供试杀虫剂

生产中防治苜蓿害虫常用的四种杀虫剂,分别是96%高效氯氟氰菊酯可湿性粉剂;71%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐可湿性粉剂;94%乙基多杀菌素可湿性粉剂;98%噻虫嗪可湿性粉剂,具体信息见表1。

表 1 用于评估花蓟马抗药性的生测原药信息

Table 1 Information of technical-grade insecticides used for evaluating insecticide resistance of *Frankliniella intonsa*

杀虫剂类别 Chemical group	活性物质 Active ingredient	纯度 Purity	来源 Supplier
钠离子通道调节剂 Sodium channel regulator	高效氯氟氰菊酯 Lambda-cyhalothrin	96%	广东立威化工有限公司
谷氨酸门控氯离子通道(GluCl)变构调节剂 Glutamate-gated chloride channel (GluCl) allosteric modulators	甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	71%	山东潍坊润丰化工股份有限公司
烟碱型乙酰胆碱受体(nAChR)变构调节剂 Nicotinic acetylcholine receptor (nAChR) allosteric modulators	乙基多杀菌素 Spinetoram	94%	科迪华农业科技有限责任公司
烟碱型乙酰胆碱受体(nAChR)竞争性调节剂 Nicotinic acetylcholine receptor (nAChR) competitive modulators	噻虫嗪 Thiamethoxam	98%	广东立威化工有限公司

1.3 试验方法

1.3.1 毒力测定药剂配置 将各原药用有机溶剂乙醇溶解后,以蒸馏水定容至10 mL,配成浓度为10000 mg·L⁻¹的母液。用体积分数为0.1%的TritonX-100的溶液按10倍梯度等比稀释原药为5个试验浓度,即1000 mg·L⁻¹,100 mg·L⁻¹,10 mg·L⁻¹,1 mg·L⁻¹,0.1 mg·L⁻¹,0.1% TritonX-

100加入与最高试验浓度等量的有机溶液作空白对照,进行预实验。根据预实验结果选取死亡率在20%~80%的杀虫剂浓度区间,设置5~6个试验浓度梯度,以起始浓度为首页,使每组试验的浓度以指数的形式增长(表2),0.1% TritonX-100加入与最高试验浓度等量有机溶液作空白对照,进行正式实验。

表 2 毒力测定实验中4种杀虫剂的浓度梯度设置

Table 2 Concentration gradient design of four insecticides in toxicity bioassay

杀虫剂 Insecticide	来源 Source	起始浓度 Initial concentration/(mg·L ⁻¹)	浓度梯度 Concentration gradient	n 值
噻虫嗪 Thiamethoxam	YLC	25.00000	2 ⁿ	6
	MS	18.52000	3 ⁿ	5
	PY	0.12000	3 ⁿ	6
甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 Emamectin benzoate	YLC	0.01969	4 ⁿ	6
	MS	0.07800	2 ⁿ	5
	PY	0.19690	4 ⁿ	6
乙基多杀菌素 Spinetoram	YLC	0.02000	2 ⁿ	6
	MS	0.00050	6 ⁿ	5
	PY	0.00050	6 ⁿ	5
高效氯氟氰菊酯 Lambda-cyhalothrin	YLC	18.52000	3 ⁿ	6
	MS	18.52000	2 ⁿ	5
	PY	0.10000	2 ⁿ	5

1.3.2 毒力测定 采用浸叶法,将四种杀虫剂配置成不同浓度梯度的药液,以清水作为对照,分别处理 YLC, MS 和 PY 三个群体花蓟马。将 50 mm 的四季豆段浸在不同浓度杀虫剂药液中 15 s,取出风干备用,每个培养皿中放置两段四季豆,接入花蓟马 20 头,盖上培养皿盖子,用两根橡皮筋交叉缠住培养皿以防止蓟马逃脱,每个浓度为一组,每组重复 4 次,于温度 $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $65\% \pm 5\%$ 、光暗周期 14L:10D 的人工培养箱中处理。48 h 后检查三个群体的处理组和对照组试虫死亡情况,分别记录总虫数和死虫数。毛笔轻触虫体完全不动视为死亡,对照组死亡率 $<10\%$ 视为有效测定^[31]。

1.3.3 生测数据处理及抗性水平划分标准 采用 Excel 2019 对试验数据进行初步整理,SPSS statistics 26.0 软件中 Probit 回归模型计算毒力回归曲线和致死中浓度 LC_{50} ,采用卡方检验评估回归曲线对数据的模拟效果, $P < 0.05$ 则说明拟合良好。以田间种群 LC_{50} 较低的为敏感品系,以田间种群 LC_{50} 较高的为抗性品系计算抗性倍数。

抗性倍数 (RR) = 抗性品系的 LC_{50} 值/敏感品系的 LC_{50} 值

根据《2020 年全国农业有害生物抗药性监测结果及用药建议的相关标准》^[32]进行抗性水平等级划分,按抗性倍数 (RR) 由高到低划分为: $\text{RR} > 100$ 为高度抗性, $10 < \text{RR} \leq 100$ 为中度抗性, $5 < \text{RR} \leq 10$ 为轻度抗性, $\text{RR} \leq 5$ 为相对敏感。

1.3.4 杀虫剂致死中浓度对花蓟马抗性群体胁迫试验 试虫处理:在圆柱形养虫罐内放置新鲜的四季豆,接入田间采集的 F_0 代花蓟马成虫,8 h 后剔除成虫,每 24 h 观察养虫管内卵的孵化情况,待卵孵化后立刻将 F_1 代 1 龄幼虫移至新的养虫罐中,以新鲜四季豆饲养至 2 龄若虫,而后改用 YLC 群体的杀虫剂致死中浓度处理过的四季豆饲养 YLC 的 2 龄若虫,用 MS 群体的杀虫剂致死中浓度处理过的四季豆饲养 MS 的 2 龄若虫,同时设置蒸馏水处理的四季豆分别饲养 YLC 和 MS 群体作为对照组。

对花蓟马子代生长发育与繁殖影响:将 F_1 代若虫一直饲养至蛹期,羽化后立刻将 30 头活力强、大小相近的成虫挑出,作为一组,一同饲养在圆柱形养虫罐中,重复 3 次,其中放置蒸馏水处理的新鲜四季豆作为产卵场所,每隔 24 h 更换一次四季豆,并将更换出的四季豆转移至新的养虫罐中观察卵的孵化,以孵化的 F_2 代 1 龄若虫作为 F_1 代产卵量的估

计,观察至羽化为成虫,记录数量及存活率,试验重复 3 次,存活率计算方式为下一历期存活虫数与上一历期存活虫数的比值;其间分别随机选取每个处理的 F_2 代 1 龄若虫各 30 头,记录各虫态的发育历期,同时取 1 龄、2 龄及蛹期三个龄期活虫各 10 头作为一组,在解剖镜下测量体长体宽,记录数值,重复 3 次。应用上述饲养方法,培养 F_2 代成虫直至死亡,记录成虫寿命,重复 3 次。

1.5 数据统计与分析

使用 EXCEL 2019 和 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,确定杀虫剂对花蓟马的中致死浓度 LC_{50} 值。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对 F_1 代平均产卵量数据进行分析,应用 LSD 最小显著差数法进行差异显著性检验,GraphPad Prim 9.5.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 花蓟马成虫毒力测定

基于毒力测定试验,计算出了高效氯氟氰菊酯对 YLC 花蓟马群体的毒力回归方程为: $y = 0.87x - 2.05$ ($P < 0.001$), LC_{50} 值为 $222.927 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;噻虫嗪对 YLC 和 MS 花蓟马群体的毒力回归方程分别为: $y = 1.91x - 3.47$ ($P < 0.001$), $y = 0.86x - 1.71$ ($P < 0.001$); LC_{50} 值分别为 $63.839 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $97.240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 3)。

基于以上,测定了宁夏不同苜蓿种植区花蓟马成虫对四种常用杀虫剂的抗性水平,结果显示,只有 YLC 群体和 MS 群体对噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯药剂产生了抗性,其余苜蓿种植区花蓟马群体对其他药剂均未产生抗性。

为此,进一步探究了计划针对噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯药剂来处理不同抗性群体花蓟马,探究其对蓟马生长发育与繁殖的影响。

2.2 杀虫剂致死中浓度对花蓟马产卵量的影响

经过致死中浓度高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪处理的 YLC 花蓟马 F_1 代若虫,其羽化后的成虫平均每头单日产卵量分别为 12.06 粒和 10.06 粒,较对照组 (15.11 粒) 分别显著下降了 21.19% 和 35.42% (图 1A)。相同环境下,经致死中浓度噻虫嗪量处理 MS 花蓟马若虫后,其羽化后的成虫平均每头单日产卵量为 10.11 粒,较对照组 (15.16 粒) 显著下降了 33.31% (图 1B)。结果表明,杀虫剂致死

表 3 三个群体花蓟马对 4 种田间常用杀虫剂的抗性水平

Table 3 Resistance levels of three populations of *Frankliniella intonsa* to four commonly used insecticides in the field

杀虫剂 Insecticide	来源 Source	致死中浓度 LC ₅₀ /(mg·L ⁻¹)	卡方值 X ²	毒力回归方程 Toxicity regression equation	抗性倍数 RR at LC ₅₀	抗性水平 Resistance level	P 值 P-value
噻虫嗪 Thiamethoxam	YLC	63.839	0.830	y=1.91x-3.47	27.64	中度抗性	<0.001
	MS	97.240	2.371	y=0.86x-1.71	42.10	中度抗性	<0.001
	PY	2.310	4.231	y=1.48x-0.45	—	相对敏感	<0.001
甲维盐 Emamectin benzoate	YLC	0.184	0.504	y=1.12x+0.80	—	相对敏感	<0.001
	MS	0.264	0.525	y=2.78x+1.61	—	相对敏感	<0.001
	PY	0.432	0.515	y=1.14x-0.77	—	相对敏感	<0.001
乙基多杀菌素 Spinetoram	YLC	0.024	1.559	y=4.21x+2.62	—	相对敏感	<0.001
	MS	0.017	0.550	y=0.85x+1.54	—	相对敏感	<0.001
	PY	0.004	0.120	y=0.92x+2.25	—	相对敏感	<0.001
高效氯氟氰菊酯 Lambda-cyhalothrin	YLC	222.927	0.397	y=0.87x-2.05	1266.63	高度抗性	<0.001
	MS	145.220	2.132	y=1.56x-3.39	825.11	高度抗性	<0.001
	PY	0.176	4.309	y=2.00x+1.50	—	相对敏感	<0.001

注:试虫来源 YLC 指园林场苜蓿,MS 指茂盛苜蓿地,PY 指彭阳苜蓿地,—表示无抗性倍数

Note: Source of test insects-YLC refers to the alfalfa field in the garden farm, MS refers to the lush alfalfa field, and PY refers to the Pengyang alfalfa field; “—” indicates no resistance ratio

中浓度胁迫,对花蓟马 F₁代成虫平均产卵量有显著抑制作用。

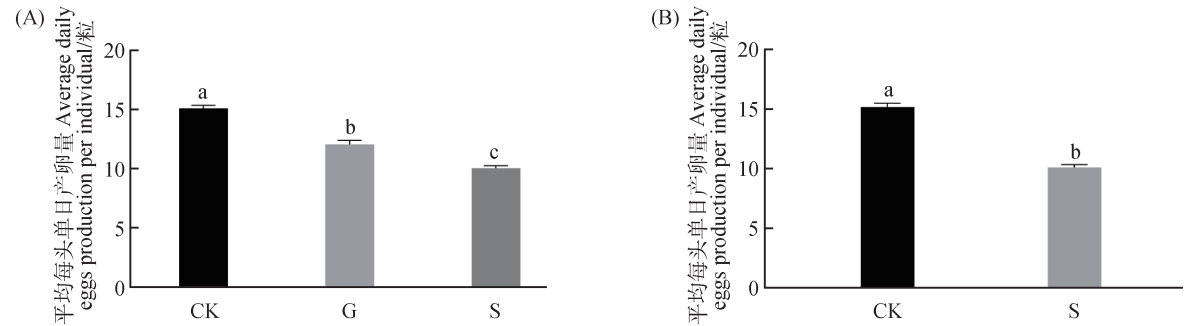


图 1 杀虫剂致死中浓度对 F₁代成虫平均每头单日产卵量的影响

Fig. 1 Effects of median lethal concentratin of insecticides on daily fecundity per adult of the F₁ generation

注:图中 A 为园林场群体,B 为茂盛群体;CK 为空白对照,S 为经致死中浓度噻虫嗪处理的群体,G 为经致死中浓度高效氯氟氰菊酯处理的群体。柱上不同小写字母表示不同处理间显著性差异(P<0.05,LSD)。下同

Note: In the figure, A represents the YLC population, and B represents the MS population; CK refers to the blank control, S refers to the population treated with the median lethal concentration of thiamethoxam, and G refers to the population treated with the median lethal concentration of lambda-cyhalothrin. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among different treatments (P<0.05, LSD). The same as below

2.3 杀虫剂致死中浓度对花蓟马发育历期的影响

试验结果显示,使用致死中浓度高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪处理花蓟马 F₁代,使两个群体 F₂代各发育历期均产生了不同变化。与对照组相比,高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪处理 YLC 花蓟马 F₁代,使其 F₂代卵期及 1 龄历期显著延长(P<0.05),其中高效氯氟氰菊酯延长作用更强,使卵期和 1 龄历期分别延长了 0.35 d 和 0.46 d,噻虫嗪作用略弱些,分别延长了 0.21 d 和 0.40 d (图 2A)。噻虫嗪处理 MS 花蓟马 F₁代,同样使 F₂代卵期和 1 龄若虫历期显著延长(P<0.05),使卵期和 1 龄历期均延长了 0.30 d (图 2B)。此外,各杀虫剂处理组的 2 龄和蛹历期与空白对照相比均无显著差异。

2.4 杀虫剂致死中浓度对花蓟马体长体宽的影响

经致死中浓度高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪处理均显著抑制 YLC 种群花蓟马 F₂代 1 龄和 2 龄的体长(P<0.05),显著抑制 1 龄的体宽。其中,噻虫嗪比高效氯氟氰菊酯抑制的作用更强,使 1 龄、2 龄的体长和 1 龄体宽分别缩短了 116.723 μm,96.793 μm 和 63.935 μm,同样的,致死中浓度高效氯氟氰菊酯处理 YLC 群体花蓟马,使 1 龄、2 龄的体长和 1 龄体宽分别缩短了 96.037 μm,76.993 μm 和 71.008 μm (图 3A、3B);噻虫嗪对 MS 种群的 1 龄、2 龄体长及 1 龄体宽也显著抑制(P<0.05),使 1 龄、2 龄的体长和 1 龄体宽分别缩短了 144.547 μm,256.173 μm 和

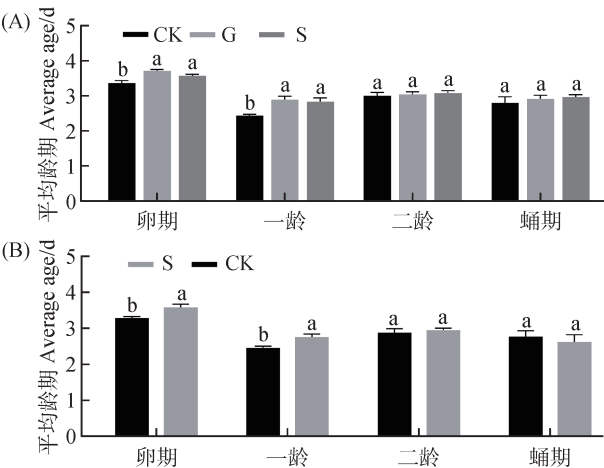


图 2 杀虫剂致死中浓度对花蓟马发育历期的影响

Fig. 2 Effects of the median lethal concentration of insecticides on the developmental duration of *Frankliniella intonsa*

注:图中 A 为园林场群体, B 为茂盛群体

Note: In the figure, A represents the YLC population, and B represents the MS population

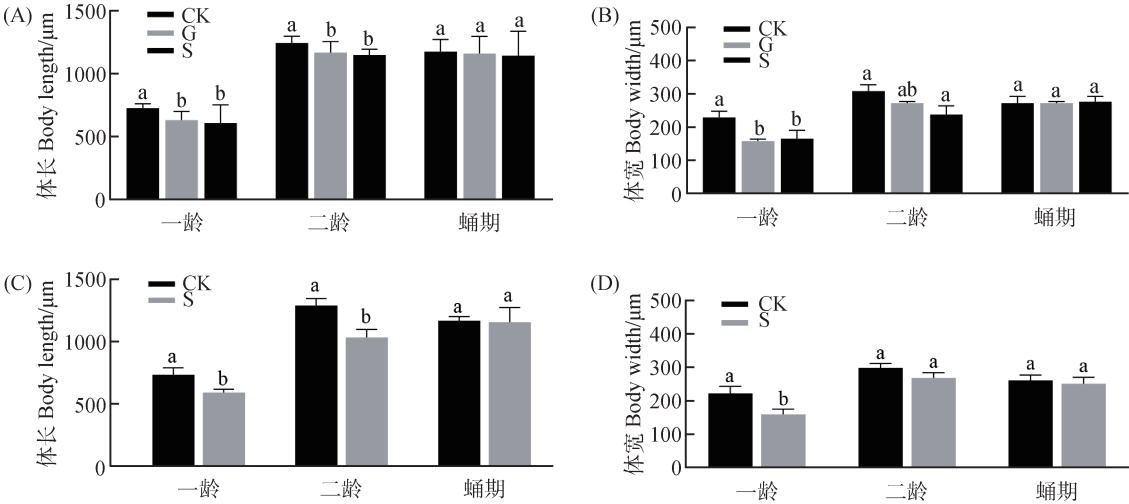


图 3 杀虫剂致死中浓度对花蓟马体长体宽的影响

Fig. 3 Effects of median lethal concentration of insecticides on body length and width of *Frankliniella intonsa*

注:图中 A、B 为园林场群体, C、D 为茂盛群体

Note: In the figure, A and B represent the YLC population, while C and D represent the MS population

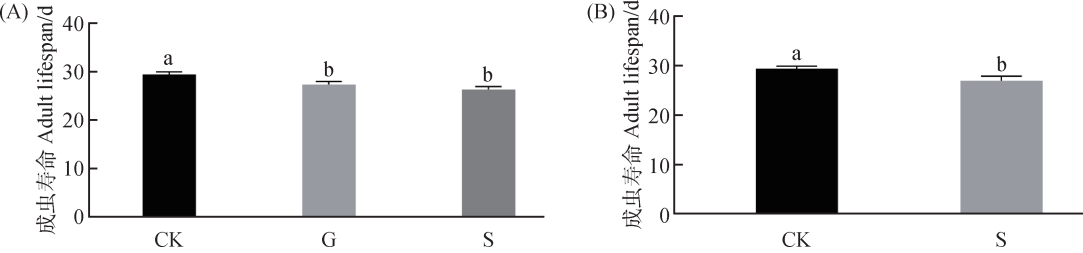


图 4 杀虫剂致死中浓度对花蓟马成虫寿命的影响

Fig. 4 Effects of median lethal concentration of insecticides on adult longevity of *Frankliniella intonsa*

注:图中 A 为园林场群体, B 为茂盛群体

Note: In the figure, A represents the YLC population, and B represents the MS population

63.290 μm (图 3C、3D),两种药剂对蛹期的体长体宽影响均不显著。

2.5 杀虫剂致死中浓度对花蓟马成虫寿命的影响

致死中浓度高效氯氟氰菊酯处理 YLC 群体 F_1 代花蓟马若虫,显著抑制 F_2 代成虫寿命 ($P < 0.05$),与对照组相比,实验组成虫寿命缩短了 2.04 d(图 4A);致死中浓度噻虫嗪处理 YLC 和 MS 群体 F_1 代若虫,显著抑制 F_2 代成虫寿命 ($P < 0.05$),使成虫寿命分别缩短了 3.14 d 和 2.49 d(图 4A、4B)。

2.6 杀虫剂致死中浓度对普通代大蓟马存活率的影响

由图 5 可知,与对照组相比,高效氯氟氰菊酯和噻虫嗪致死中浓度对 YLC 花蓟马种群 F_2 代的各发育历期的存活率均有显著抑制作用 ($P < 0.05$),其

中噻虫嗪的抑制作用更强,使1龄、2龄和蛹期的存活率与对照组相比分别降低了14.45%,6.8%和9.01%,存活量与对照组相比平均分别降低了4.33头,5.33头和5.67头,而高效氯氟氰菊酯影响稍弱,存活率与对照组相比分别降低了7.78%,6.62%和8.83%,存活量与对照组相比平均分别降低了2.33

头,3.67头和4.00头(图5A、5C);同样的,噻虫嗪致死中浓度对MS种群F₂代的1龄、2龄和蛹的存活率也显著抑制($P < 0.05$),使1龄、2龄和蛹期的存活率与对照组相比分别降低了14.33%,2.26%和2.73%,存活量与对照组相比分别降低了4.67头,5.00头和5.33头(图5B、5D)。

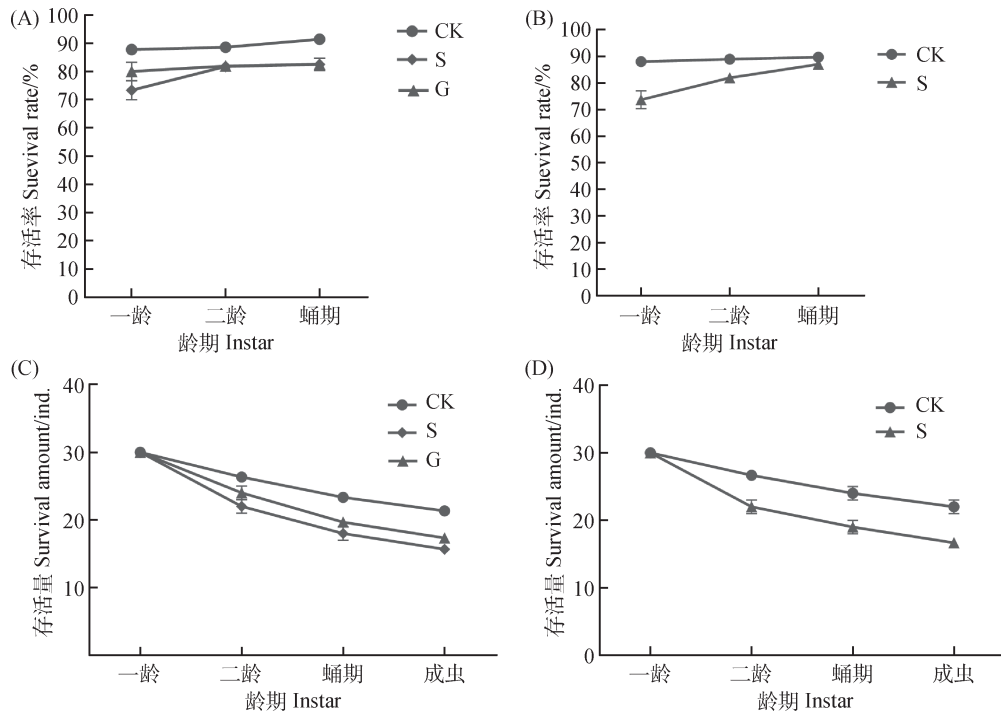


图5 杀虫剂致死中浓度对花蓟马存活率的影响

Fig. 5 Effects of median lethal concentration of insecticides on the survival rate of *Frankliniella intonsa*

注:图中A、C为园林场群体,B、D为茂盛群体

Note: In the figure, A and C represent the YLC population, and B and D represent the MS population

3 讨论与结论

杀虫剂致死中浓度对昆虫生长发育与繁殖特性的影响具有显著复杂性,其作用效应与机制存在明显差异,既可能对昆虫繁殖产生抑制作用,也可能呈现刺激效应,同时还会调控昆虫发育历期、体型特征、成虫寿命及存活率等多个生命参数。本文结合相关研究成果及本试验数据,对本研究结果进行系统讨论与分析。

杀虫剂亚致死浓度对昆虫繁殖的影响由多重机制共同介导,其繁殖力的刺激效应可能源于药剂处理后影响了生理生化环境而有益于昆虫的发育和繁殖^[33],也有可能是毒物兴奋效应的体现^[34],或是昆虫直接接触药剂或药剂代谢物经昆虫取食后的诱导效应^[35]。与之相对,杀虫剂导致昆虫产卵量下降的机制同样得到大量研究佐证,部分杀虫剂可

发挥拒食剂功效,通过抑制昆虫取食行为,引发营养匮乏而降低生殖力^[36]。另有研究表明,杀虫剂可干扰昆虫体内性信息素的合成与通讯行为,破坏其交配行为与繁殖节律,最终影响繁殖效率^[37-38]。本文研究结果表明,致死中浓度噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯胁迫对花蓟马繁殖都产生了不利影响,两群体产卵量均显著下降。其他研究也有类似结果,如程志^[39]的研究中表明,亚致死浓度噻虫嗪处理七星瓢虫(*Coccinella septempunctata*)后,其产卵量显著下降,来守国^[40]的研究结果显示亚致死浓度高效氯氟氰菊酯处理斑翅果蝇(*Drosophila sukuzii*)和黑腹果蝇(*Drosophila melanogaster*)同样会使产卵量显著下降,且浓度越高影响越显著。然而,张倩楠^[41]研究发现,低浓度(LC₁₀、LC₃₀)噻虫嗪处理情况下,有刺激昆虫繁殖的作用,如LC₁₀和LC₃₀噻虫嗪处理橘小实蝇(*Bactrocera dorsalis*)会显著延迟初次产卵和

初次交配日龄,刺激其繁殖,使平均单日产卵量显著增加;亚致死浓度多杀菌素处理西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)同样刺激繁殖致使产卵量显著增加^[42]。由此可见,杀虫剂亚致死浓度对昆虫繁殖的影响因药剂种类、作用浓度及昆虫种类而异,既可表现为产卵量下降的抑制作用,也可能呈现低浓度刺激繁殖的毒物兴奋效应。

杀虫剂胁迫还会显著影响子代不同龄期的发育历期。研究表明,杀虫剂的亚致死浓度对昆虫发育历期有抑制作用。例如,经杀虫剂亚致死浓度胁迫后的棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)幼虫发育缓慢,导致幼虫历期延长^[43]。与本试验结果相似,致死中浓度杀虫剂胁迫使两群体卵期和1龄若虫时期显著延长($P < 0.05$),且高效氯氟氰菊酯的延长作用更强,而2龄和蛹期无显著影响。但也有文章报道,亚致死浓度杀虫剂胁迫可缩短昆虫的发育历期。如冯从经等报道,亚致死浓度虫酰肼处理亚洲玉米螟(*Ostrinia furnacalis*),使其5龄幼虫发育历期缩短5.49 d,显著促进了幼虫的发育历期^[44]。综上,杀虫剂亚致死浓度对昆虫发育历期的影响具有物种和药剂特异性,既可能导致发育延缓,也可能促进发育进程。

在胁迫条件下,昆虫子代各龄期体长体宽与对照组相比产生了显著差异。相关研究表明,不同浓度 Cd^{2+} 胁迫条件下,亲代蛆症异蚤蝇(*Megaselia scalaris*)幼虫的体长、随着胁迫浓度的升高而显著降低^[45],与本试验获得的结果相似,在胁迫条件下,致死中浓度噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯显著抑制YLC群体1龄2龄若虫体长体宽;对于MS群体,致死中浓度噻虫嗪显著抑制1龄2龄体长及龄体宽;相似的结果在姜轶杰等人的研究也有出现,其结果显示在不同浓度 Cd^{2+} 胁迫对黑水虻(*Hermetia illucens*)体型变化有显著影响,随胁迫世代增加,体重显著降低^[46]。

杀虫剂不仅会影响昆虫幼虫的发育历期,对成虫的寿命也存在显著影响。惠婧婧等^[47]研究表明,吡虫啉不同亚致死浓度处理豌豆蚜(*Acyrtosiphon pisum*),使成蚜的寿命缩短3~5 d。与本试验结果类似,本试验结果表明致死中浓度噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯处理后花蓟马成虫寿命显著缩短;不过Liu^[48]等杀虫剂亚致死效应中有相反的发现,LC₂₀浓度甲维盐可显著延长草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)雄成虫的寿命,LC₅和LC₁₅浓度的甲维盐同

样延长了棉铃虫雄虫的寿命。

杀虫剂亚致死浓度对昆虫的存活率有显著影响。许晓萌等^[49]的研究显示:LD₁₀和LD₃₀甲维盐胁迫松褐天牛肿腿蜂(*Sclerodermus alternatus*)成虫降低了其F₁代的存活率;来守国^[40]的研究也表明,斑翅果蝇和黑腹果蝇受到亚致死浓度高线氯氟氰菊酯胁迫时表现为存活率有所下降。相关试验结果为本试验提供了数据支撑,本文研究显示,与对照组相比,噻虫嗪和高效氯氟氰菊酯处理后YLC群体花蓟马各龄期存活率均显著下降,其中噻虫嗪对1龄影响更显著;噻虫嗪处理后MS群体各龄期存活率也显著下降。

综上,杀虫剂致死中浓度对昆虫生长繁殖特性的影响呈现显著复杂性,既存在繁殖抑制、发育延缓、体型变小、寿命缩短及存活率下降等不利效应,也可能在特定药剂、低浓度条件下表现出繁殖刺激、发育促进等效应。究其原因可能是药剂刺激引起昆虫体内生理生化环境改变、接触或取食产生的诱导效应、拒食导致的营养匮乏、干扰信息素合成或通讯过程等,关于本试验的原因还需进一步研究。

参考文献

- [1] 李亚金,管庆安,曹轶乐,等. 农业蓟马种类鉴定技术研究进展[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1640.Q.20260507.1730.072,2026-05-08/2026-05-30>
- LI Y J, ZAN Q A, CAO Y L, et al. Research progress on species identification techniques for agricultural thrips [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1640.Q.20260507.1730.072,2026-05-08/2026-05-30>
- [2] 唐国文,龚信文,孟国玲. 武汉地区蔬菜蓟马种类研究[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(1): 5-9
- TANG G W, GONG X W, MENG G L. Studies on species of *Thrips* in fields of vegetable in Wuhan Region[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21(1): 5-9
- [3] 冯纪年. 中国动物志, 昆虫纲第69卷(上): 缨翅目[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 270
- FENG J N. Fauna sinica, Insecta vol. 69 (1): *Thysanoptera* [M]. Beijing: Science Press, 2021: 270
- [4] TODA S, KOMAZAKI S. Identification of *Thrips* species (*Thysanoptera*: *Thripidae*) on Japanese fruit trees by polymerase chain reaction and restriction fragment length polymorphism of the ribosomal ITS2 region[J]. Bulletin of Entomological Research, 2002, 92(4): 359-363
- [5] MAINALI B P, LIM U T. Evaluation of *Chrysanthemum* flower model trap to attract two *Frankliniella thrips* (*Thysanoptera*: *Thripidae*) [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2008, 11(3): 171-174
- [6] PETROVA V, JANKEVICA L, SAMSONE I. Species of phytophagous insects associated with strawberries in Latvia[J]. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences Section B

- Natural, Exact, and Applied Sciences, 2013, 67(2):124-129
- [7] OLCZYK M, POBOŹNIAK M. *Thrips* (Thysanoptera) associated with onion (*Allium cepa* L.) and Welsh onion (*Allium fistulosum* L.) [J]. *Folia Horticulturae*, 2020, 32(2):319-335.
 - [8] 肖婷, 刘宝生, 郭建, 等. 不同颜色诱虫板对草莓花蓟马的诱集作用[J]. *江苏农业科学*, 2011, 39(1):159-160
XIAO T, LIU B S, GUO J, et al. Trapping effect of different color insect traps on strawberry flower *Thrips* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(1):159-160
 - [9] 祝晓云, 张蓬军, 吕要斌. 花蓟马雄虫释放的聚集信息素的分离和鉴定[J]. *昆虫学报*, 2012, 55(4):376-385
ZHU X Y, ZHANG P J, LÜ Y B. Isolation and identification of the aggregation pheromone released by male adults of *Frankliniella intonsa* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2012, 55(4):376-385
 - [10] 李维娜, 冯纪年. 三种花蓟马触角感器的超微结构[J]. *昆虫学报*, 2013, 56(9):1088-1100
LI W N, FENG J N. Ultrastructure of antennal sensilla in three species of *Frankliniella* Karny (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2013, 56(9):1088-1100
 - [11] 刘建业, 钱蕾, 蒋兴川, 等. CO₂浓度升高对西花蓟马和花蓟马成虫体内解毒酶和保护酶活性的影响[J]. *昆虫学报*, 2014, 57(7):754-761
LIU J Y, QIAN L, JIANG X C, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on the activities of detoxifying enzymes and protective enzymes in adults of *Frankliniella occidentalis* and *F. intonsa* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57(7):754-761
 - [12] 渠汇, 啜泽润, 张文兵, 等. 花蓟马发生与防治研究进展[J]. *中国植保导刊*, 2023, 43(8):18-24, 30
QU H, CHUAI Z R, ZHANG W B, et al. Research progress on the occurrence and control of *Frankliniella intonsa* (Trybom) [J]. *China Plant Protection*, 2023, 43(8):18-24, 30
 - [13] 魏书艳, 黄延昌, 张庆文, 等. 虫螨腈与噻嗪酮对花蓟马毒力筛选及田间防效[J]. *农药*, 2014, 53(11):836-839
WEI S Y, HUANG Y C, ZHANG Q W, et al. Screening of toxicity and control efficacy of chlorfenapyr and buprofezin for controlling *Frankliniella intonsa* [J]. *Agrochemicals*, 2014, 53(11):836-839
 - [14] 姜晓红. 苜蓿抗蓟马代谢调控研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023:1
JIANG X H. Metabolic regulation of *Thrips* resistance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023:1
 - [15] 苗淼, 徐洋帆, 张海翔, 等. 宁夏苜蓿草田主要害虫与天敌昆虫发生动态和相关性及其对气候因子的响应[J]. *植物保护学报*, 2024, 51(5):1169-1178
MIAO M, XU Y F, ZHANG H X, et al. Dynamic and correlation of major pests with natural enemies and response to climatic factors in alfalfa fields in Ningxia [J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 51(5):1169-1178
 - [16] 芮静, 梁巧兰, 魏列新, 等. 苜蓿花叶病毒的症状类型及发生因素[J]. *草业科学*, 2025, 42(8):2032-2045
RUI J, LIANG Q L, WEI L X, et al. Symptom types of alfalfa mosaic virus infection and occurrence factors [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(8):2032-2045
 - [17] 韩冬银, 李磊, 牛黎明, 等. 芒果花果期蓟马群落结构变化[J]. *环境昆虫学报*, 2023, 45(6):1570-1578
HAN D Y, LI L, NIU L M, et al. Changes of community structure of *Thrips* during mango fruiting period [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45(6):1570-1578
 - [18] 郭文秀, 李丽莉, 姜文凤, 等. 番茄潜叶蛾对山东省番茄产业的危害风险及其监测、防控研究进展[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(11):1-11
GUO W X, LI L L, JIANG W F, et al. Hazard risk of *Tuta absoluta* to tomato industry in Shandong Province and its monitoring and control research progress [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(11):1-11
 - [19] 帕热提·艾山, 宁新元, 赵鹏, 等. 有机农业虫害管理策略及方法[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(6):102-108
PARETI A S, NING X Y, ZHAO P, et al. Strategies and methods for pest management in organic agriculture [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6):102-108
 - [20] 夏西亚, 付步礼, 李强, 等. 蓟马类害虫诱控技术研究进展[J]. *农学报*, 2017(2):31-35
XIA X Y, FU B L, LI Q, et al. Trapping technique in *Thrips* control [J]. *Journal of Agriculture*, 2017(2):31-35
 - [21] 杨朗, 陈恩海, 梁广文. 害虫生物防治在害虫生态控制中的作用[J]. *中南林业学院学报*, 2003, 23(4):111-115, 119
YANG L, CHEN E H, LIANG G W. Role of pest biological control in pest ecological control [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, 23(4):111-115, 119
 - [22] 潘雪红, 魏吉利, 商显坤, 等. 甘蔗黄螟幼虫龄数的划分及其发育历期观察[J]. *环境昆虫学报*, 2025, 47(2):651-657
PAN X H, WEI J L, SHANG X K, et al. Larval instars determination of *Tetramoera schistaceana* (Lepidoptera: Olethreutidae) and observation of its developmental periods [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2025, 47(2):651-657
 - [23] 彭斌, 崔晓宁, 张勃, 等. 10种杀虫剂对苜蓿斑蚜和牛角花齿蓟马的毒力测定及田间药效评价[J]. *草业学报*, 2024, 33(12):201-213
PENG B, CUI X N, ZHANG B, et al. Toxicity of 10 insecticides to alfalfa aphid *Therioaphis trifolii* and thrip *Odontothrips loti* and assessment of their field efficacy [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2024, 33(12):201-213
 - [24] 杨轩宇, 朱猛蒙, 史娟, 等. 五种杀虫剂对苜蓿种子田中主要害虫和传粉昆虫的影响[J]. *植物保护学报*, 2023, 50(6):1641-1650
YANG X Y, ZHU M M, SHI J, et al. Effects of five insecticides on main pests and pollinators in alfalfa seed fields [J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, 50(6):1641-1650
 - [25] 应德文. 4种杀虫剂防治紫花苜蓿田斜纹夜蛾的效果比较[J]. *中国植保导刊*, 2017, 37(10):66-67
YING D W. Comparison of control effects of four insecticides on *Spodoptera litura* in alfalfa fields [J]. *China Plant Protection*, 2017, 37(10):66-67
 - [26] 罗兰, 袁忠林, 孙娟. 3种杀虫剂对苜蓿蚜虫和蓟马的防效及其在苜蓿中的残留[J]. *草业学报*, 2017, 26(1):160-167
LUO L, YUAN Z L, SUN J. Effectiveness of different insecticides for control of aphids and *Thrips* on alfalfa [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2017, 26(1):160-167
 - [27] 唐良德, 赵海燕, 付步礼, 等. 海南普通大蓟马抗药性监测及对6种杀虫剂的敏感性[J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40(5):1175-1181
TANG L D, ZHAO H Y, FU B L, et al. Insecticide resistance monitoring of the Hainan field populations of *Megalurothrips usitatus* and their susceptibility to 6 insecticides [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40(5):1175-1181
 - [28] 程萱. 高效氟氰菊酯和噻嗪酮对紫薇长斑蚜亚致死效应研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024:1-95

- CHENG X. Study on sublethal effects of lambda-cyhalothrin and thiamethoxam on *Tinocallis kahawaluokalani* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024:1-95
- [29] 张洪英,魏淑花,张蓉,等. 豌豆蚜为害对苜蓿品种酶活性和营养物质的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(1):144-152
- ZHANG H Y, WEI S H, ZHANG R, et al. Effects of *Acyrtosiphon pisum* on enzyme activities and nutrients of different alfalfa varieties[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(1):144-152
- [30] JESCHKE P, NAUEN R, SCHINDLER M, et al. Overview of the status and global strategy for neonicotinoids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(7):2897-2908
- [31] 张晓明,胡昌雄,赵浩旭,等. 吡虫啉胁迫对西花蓟马生长发育及种群性比的影响[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(4):870-878
- ZHANG X M, HU C X, ZHAO H X, et al. Effects of imidacloprid stress on development and sex ratio of *Frankliniella occidentalis* populations [J]. Journal of Environmental Entomology, 2017, 39(4):870-878
- [32] 张帅. 2020年全国农业有害生物抗药性监测结果及科学用药建议[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(2):71-78
- ZHANG S. National monitoring Results of agricultural Pest Resistance in 2020 and suggestions for scientific pesticide application[J]. China Plant Protection, 2021, 41(2):71-78
- [33] 杨广明,郭军锐,李顺欣,等. 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[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11):3698-3704
- YANG G M, ZHI J R, LI S X, et al. Sublethal effects of spinetoram and azadirachtin on development and reproduction of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11):3698-3704
- [34] 雍小菊,张永强,丁伟. 东莨菪内酯对朱砂叶螨实验种群的亚致死效应[J]. 昆虫学报, 2011, 54(12):1377-1383
- YONG X J, ZHANG Y Q, DING W. Sublethal effects of scopoletin on the experimental population of the carmine spider mite, *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval) (Acari: Tetranychidae) [J]. Acta Entomologica Sinica, 2011, 54(12):1377-1383
- [35] XU G C, GU Z Y, XU D J, et al. Effects of sublethal dose of chlorpyrifos on the virulence and productivity of the small brown planthopper [J]. Laodelphax striatellus (Fallén) (Homoptera: Delphacidae). Acta Entomologica Sinica, 2011, 54(6):680-686
- [36] MIAO J, DU Z B, WU Y Q, et al. Sub-lethal effects of four neonicotinoid seed treatments on the demography and feeding behaviour of the wheat aphid *Sitobion avenae* [J]. Pest Management Science, 2014, 70(1):55-59
- [37] 周弘春,杜家伟,杨智化. 亚致死剂量溴氰菊酯对亚洲玉米螟雄性信息素通讯行为的影响[J]. 植物保护学报, 2002, 29(4):356-360
- ZHOU H C, DU J W, YANG Z H. Effects of deltamethrin on chemical communication of male Asian corn borer to sex pheromone under sublethal dosage [J]. Journal of Plant Protection, 2002, 29(4):356-360
- [38] 杨智化,杜家伟. 两种亚致死剂量的农药对亚洲玉米螟化学通讯系统的干扰作用[J]. 植物保护学报, 2003, 30(2):181-186
- YANG Z H, DU J W. Sublethal effects of two insecticides on the chemical communication system of *Ostrinia furnacalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. Journal of Plant Protection, 2003, 30(2):181-186
- [39] 程志. 七星瓢虫对亚致死剂量噻虫嗪长期胁迫的响应机制研究[D]. 保定:河北农业大学, 2022:1-12
- CHENG Z. Research on the response mechanism of *Coccinella septempunctata* to long-term stress of sublethal dosage thiamethoxam [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022:1-12
- [40] 来守国. 三种杀虫剂对斑翅果蝇和黑腹果蝇的亚致死效应研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2017:1-61
- LAI S G. Sublethal effect of three insecticides on *Drosophila suzuki* and *Drosophila melanogaster* [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017:1-61
- [41] 张倩楠. 噻虫嗪对橘小实蝇的亚致死效应研究[D]. 南宁:广西大学, 2021:1-55
- ZHANG Q N. Research on the sublethal effects of thiamethoxam to *Bactrocera dorsalis* (Hendel) [D]. Nanning: Guangxi University, 2021:1-55
- [42] GONG Y H, XU B Y, ZHANG Y J, et al. Demonstration of an adaptive response to preconditioning *Frankliniella occidentalis* (Pergande) to sublethal doses of spinosad: a hormetic-dose response [J]. Ecotoxicology, 2015, 24(5):1141-1151
- [43] 任龙,谭晓伟,徐希宝,等. 甲氧虫酰肼对棉铃虫生长发育的亚致死效应研究[J]. 应用昆虫学报, 2012, 49(2):434-438
- REN L, TAN X W, XU X B, et al. Sublethal effects of methoxyfenozide on the growth and development of *Helicoverpa armigera* [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2012, 49(2):434-438
- [44] 冯从经,陆剑锋,董秋安,等. 亚致死剂量双氧威和虫酰肼对亚洲玉米螟幼虫生长发育的影响[J]. 植物保护学报, 2008, 35(2):175-180
- FENG C J, LU J F, DONG Q A, et al. Effects of sublethal concentration of fenoxycarb and tebufenozide on the development of *Ostrinia furnacalis* Guenée larvae [J]. Journal of Plant Protection, 2008, 35(2):175-180
- [45] 褚梦颖. 蛆症异蚤蝇 *Megaselia scalaris* 对重金属镉的毒性反应和解毒机制研究[D]. 沈阳:沈阳大学, 2021:1-118
- CHU M Y. Toxicity and detoxification mechanism of *Megaselia scalaris* on heavy metal cadmium [D]. Shenyang: Shenyang University, 2021:1-118
- [46] 姜铁杰. 持续镉胁迫对黑水虻种群生存和繁殖的影响研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2023:1-84
- JIANG Y J. Effects of multi-generational cadmium exposure on the survival and reproduction of *Hermetia illucens* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023:1-84
- [47] 惠婧婧,刘长仲,孟银凤,等. 吡虫啉对豌豆蚜的亚致死效应[J]. 植物保护, 2009, 35(5):86-88
- HUI J J, LIU C Z, MENG Y F, et al. Sublethal effects of imidacloprid to *Acyrtosiphon pisum* [J]. Plant Protection, 2009, 35(5):86-88
- [48] LIU Z K, LI X L, TAN X F, et al. Sublethal Effects of Emamectin Benzoate on Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Agriculture, 2022, 12(7):959
- [49] 许晓萌,王咏琪,黄沙玲,等. 氨基阿维菌素苯甲酸盐对松褐天牛幼虫生长和发育的亚致死效应[J]. 昆虫学报, 2025, 68(11):1559-1569
- XU X M, WANG Y Q, HUANG S L, et al. Sublethal effects of emamectin benzoate on the growth, development and reproduction of *Sclerodermus alternatus* (Hymenoptera: Bethyilidae) [J]. Acta Entomologica Sinica, 2025, 68(11):1559-1569