

亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性及田间发育动态的影响

杨春林¹, 胡 强², 李洪浩³, 席亚东^{4*}

¹乐山市植保植检站, 四川 乐山 614000; ²乐山师范学院竹类病虫害防控与资源开发四川省重点实验室, 四川 乐山 614000; ³四川省农业科学院, 四川 成都 610066; ⁴四川省农业科学院植物保护研究所/蔬菜品种改良与种质创新四川省重点实验室, 四川 成都 610066

摘要:【目的】了解氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的亚致死效应,为水稻生产中使用氯虫苯甲酰胺科学高效防治稻水象甲提供参考。【方法】以越冬代稻水象甲成虫为试虫,通过测定不同种群(RW-Js、RW-Gy、RW-Mz、RW-Zy、RW-Lc)稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性,确定氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的致死中浓度(LC₅₀)和亚致死剂量(LC₂₅);分别采用室内测定和田间调查的方法,研究亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲体内多种生物酶活性及田间发育动态的影响。【结果】不同来源稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性差异较大,RW-Js种群的LC₅₀值为RW-Gy种群的13.45倍,达到中等抗性水平;解毒酶抑制剂胡椒基丁醚(piperomyl butoxide, PBO)对氯虫苯甲酰胺的协同增效作用明显高于磷酸三苯酯(triphenyl phosphate, TPP)和顺丁烯二酸二乙酯(diethyl maleate, DEM);抗性种群RW-Js体内3种解毒酶活性较敏感种群RW-Gy显著增高($P<0.05$),其中多功能氧化酶(mixed function oxidase, MFO)变化最为明显。稻水象甲成虫经氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后,虫体内几种生物酶活性总体呈先升高后降低的趋势,具明显的时间效应,其中MFO活性在整个测定周期内均显著高于对照处理($P<0.05$);氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量对稻水象甲各虫态的田间始见期、发生高峰期和发生末期均产生不同程度的影响。【结论】解毒酶活性可能与稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性有关,MFO是稻水象甲对氯虫苯甲酰胺解毒代谢过程中最重要的酶,在抗性形成中起主要作用;亚致死剂量氯虫苯甲酰胺可延缓稻水象甲幼虫、蛹和一代成虫的生长发育,缩短成虫寿命、加快田间成虫消亡。

关键词: 稻水象甲; 氯虫苯甲酰胺; 亚致死剂量; 生物酶活性; 解毒酶抑制剂; 发育动态



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the enzyme activity and field development dynamics of *Lissorhoptrus oryzophilus*

YANG Chunlin¹, HU Qiang², LI Honghao³, XI Yadong^{4*}

¹Leshan Plant Protection and Quarantine Station, Leshan, Sichuan 614000, China; ²Bamboo Diseases and Pests Control and Resources Development Key Laboratory of Sichuan Province, Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614000, China;

³Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China; ⁴The Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Vegetable Germplasm Innovation and Variety Improvement Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610066, China

Abstract:【Aim】This study aimed to understand the sublethal effect of chlorantraniliprole on rice water weevil (*Lissorhoptrus oryzophilus* Kusehel) and to provide reference for the scientific and efficient control of *L. oryzophilus* Kusehel using chlorantraniliprole in rice production.【Method】Using the overwintering *L. oryzophilus* adults as test insects, the median lethal concentration (LC₅₀) and sublethal dose (LC₂₅) of chlorantraniliprole to populations RW-Js, RW-Gy, RW-Mz, RW-Zy, and RW-Lc were determined by

收稿日期(Received): 2023-10-24 接受日期(Accepted): 2024-01-25

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFYZ0021); 四川省农业科学院科技成果中试熟化与示范转化项目(2023ZSSFXD02); 国家现代农业产业技术体系四川创新团队项目(川农函[2019]472号); 乐山市重点科技计划项目(14NZD141)。

作者简介: 杨春林, 男, 高级农艺师。研究方向: 农作物病虫害绿色防控。E-mail: myone23456789@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 席亚东, E-mail: xiyadong2002@126.com

measuring the sensitivity of *L. oryzaophilus* to chlorantraniliprole. The effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the activities of various biological enzymes and field development dynamics of *Lissorhoptrus oryzaophilus* were studied using indoor measurements and field investigations, respectively. 【Result】 Significant differences were noted in the sensitivity of different *L. oryzaophilus* populations to chlorantraniliprole, with the LC_{50} value of RW-Js population being 13.45 times that of RW-Gy population, reaching a moderate resistance level. The synergistic effect of the detoxification enzyme inhibitor PBO on chlorantraniliprole was significantly greater than that of TPP and DEM. The activities of the three detoxifying enzymes in the resistant population, RW-Js, were significantly higher than those in the sensitive population, RW-Gy ($P<0.05$), with the most significant change observed in multifunctional oxidase (MFO). The activities of several biological enzymes in the *L. oryzaophilus* treated with LC_{25} dose of chlorantraniliprole increased first and then decreased, and the activity of MFO was significantly higher than that of the control treatment throughout the entire measurement period ($P<0.05$). The LC_{25} dose of chlorantraniliprole had a certain degree of impact on the initial, peak, and final stages of *L. oryzaophilus* occurrence in the field. 【Conclusion】 The activity of detoxification enzyme is possibly related to the sensitivity of *L. oryzaophilus* to chlorantraniliprole. MFO is the most important detoxification enzyme in the metabolism of chlorantraniliprole in *L. oryzaophilus*, and plays a major role in the development of resistance. Sublethal doses of chlorantraniliprole can delay the growth and development of *L. oryzaophilus* larvae, pupae, and first-generation adults, shorten their lifespan, and accelerate their extinction in the field.

Key words: *Lissorhoptrus oryzaophilus*; chlorantraniliprole; sublethal dose; biological enzyme activity; detoxifying enzyme inhibitors; developmental dynamics

外来入侵物种对当地生物多样性造成严重影响,是人类面临最严重的生态威胁之一,已经在全世界范围内造成巨大的经济损失(王蝉娟等, 2023)。稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzaophilus* Kusehel 属鞘翅目象甲科害虫,是全国农业植物检疫性有害生物(中华人民共和国农业农村部, 2020),被认为是世界最具威胁的 100 种外来入侵生物之一(Tindallkv & Stout, 2003)。稻水象甲起源于美国密西西比河流域,在美洲、欧洲、亚洲等水稻 *Oryza sativa* L. 种植区均有发生(Mohammad-amir & Godfrey, 2014)。稻水象甲成虫取食危害水稻叶片,幼虫蛀食水稻根部,影响水稻分蘖并造成生长缓慢、生育期延长(王小武等, 2018),可引起水稻严重减产,部分地区已成为仅次于稻飞虱 *Sogatella furcifera* Horvath 的水稻第二大害虫(孙文鹏, 2006)。稻水象甲具有扩散能力强、适生范围广、蔓延速度快等特点(丁新华等, 2017),防治难度大,一旦入侵很难根除。我国于 1988 年首次在河北省唐海县发现疫情(齐国君等, 2012),截至 2023 年 6 月底,全国 25 个省(自治区、直辖市),492 个县(市、区、旗)均有稻水象甲分布(中华人民共和国农业农村部, 2023)。

目前,我国稻水象甲防控以化学防治为主(王小武等, 2017),农业农村部登记用于稻水象甲防治的农药主要有氯虫苯甲酰胺、醚菊酯、三唑磷等 9 个化学农药品种,其中氯虫苯甲酰胺由于具有较好的内吸性和持效性等优点,是水稻生产上应用最多

的化学杀虫剂之一。氯虫苯甲酰胺(chlorantraniliprole)是新一代双酰胺类超高效广谱性杀虫剂,其通过激活鱼尼丁受体,引起靶标昆虫细胞内钙离子过度释放,使肌肉细胞不能收缩,进而导致害虫瘫痪抽搐、停止进食(唐振华和陶黎明, 2008; Teixeira & Andaloro, 2013)。氯虫苯甲酰胺对鳞翅目、鞘翅目、双翅目、半翅目等多种害虫有较好的防控效果(何发林等, 2019),随着二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker)、稻水象甲等害虫常年多发、高发,水稻生产上施用氯虫苯甲酰胺的频率越来越高,增加了靶标害虫抗性风险(Sial & Brunner, 2010)。目前,已有一些重要农业害虫如卷叶蛾、二化螟、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hiibner、小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 等对氯虫苯甲酰胺产生了不同水平的抗性(胡虢等, 2017; 尹飞等, 2022; 支昊宇等, 2021; Lai et al., 2011a)。

杀虫剂施于田间后,其毒力随时间的增长逐渐递减并达到不足以杀死昆虫个体的亚致死剂量(李会仙等, 2005),该剂量能影响昆虫的生长发育、抗药性发展,改变昆虫对杀虫剂的代谢能力(梁炜博等, 2017; Vojoudi et al., 2011),了解杀虫剂对害虫的亚致死效应是评价其药效和评估农药风险管理的关键(Desneux et al., 2007)。与植物机体的防御策略相对应,昆虫也进化出系列防御机制来适应各种不利因素,其中解毒酶系统和保护酶系统是最重要的适应方式(刘建业等, 2014)。亚致死剂量的杀

虫剂或植物次生物质会对昆虫体内的保护酶系和解毒酶系产生诱导或抑制作用,从而为害虫抗药性进化提供持续的选择压力(高希武等,1997)。保护酶系和解毒酶系在维持昆虫正常的生理生化功能及抗药性的形成等方面发挥着重要作用,常被用作生物群体生理、生化状态改变的度量指标(Zhu-salzman & Zeng, 2015),通过监测其活性变化来探讨某一类杀虫剂对害虫的亚致死效应,进而预测害虫的种群动态变化规律是毒理学研究的重要内容(尹显慧等,2008)。已有很多亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对农业害虫生物酶活性及生长发育影响的研究(陈羿渠等,2017;韩文素等,2022;马冲等,2012;尹飞等,2014),研究对象主要集中在鳞翅目害虫,未见亚致死剂量氯虫苯甲酰胺影响稻水象甲体内生物酶活性或发育进度的相关研究。本研究在毒力测定的基础上,以亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理稻水象甲成虫,分析其体内保护酶和解毒酶活性变化及种群田间发育进度,旨在阐明氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的亚致死效应机制,为科学合理地使用氯虫苯甲酰胺防治稻水象甲、降低抗药性、减少农药使用量提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试药剂 200 g · L⁻¹氯虫苯甲酰胺悬浮剂(美国富美实公司);胡椒基丁醚(piperomyl butoxide, PBO)、磷酸三苯酯(triphenyl phosphate, TPP)、顺丁烯二酸二乙酯(diethyl maleate, DEM);98%毒扁豆碱、98%乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、98%牛血清蛋白、99%十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS);Triton X-100、 α -萘酚、 α -萘酚-1-氯-2,4-二硝基苯(chlorodinitrobenzene, CDNB)、固蓝B盐、对硝基苯甲醚;考马斯亮蓝 G250、丙三醇、NaH₂PO₄、Na₂HPO₄、NaOH、85%磷酸、37%盐酸;二硫苏糖醇(dithiothreitol, DTT)、苯甲基磺酰氟(phenylmethylsulfonyl fluoride, PMSF)、还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)、还原型辅酶Ⅱ(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH)。

1.1.2 供试虫源 室内毒力测定供试稻水象甲成虫于2023年4月15—20日采自四川省乐山市五通桥区金山镇(RW-Js种群)、五通桥区冠英镇(RW-Gy种群)、市中区牟子镇(RW-Mz种群)、井研县竹

园镇(RW-Zy种群)、犍为县罗城镇(RW-Lc种群)。于19:00—21:00在揭膜3 d以上的水稻苗床,以网捕法采集越冬代稻水象甲成虫,置于50 mL离心管中,同时采集未施用任何农药的水稻秧苗,带回实验室于温度(26±1)℃、光周期L:D=14:10、相对湿度70%±2%饲养备用(王小武等,2017)。

1.2 生物测定

根据预试验结果,将氯虫苯甲酰胺用丙酮配制成1 g · L⁻¹的母液,用0.1% TritonX-100稀释成梯度浓度,工作浓度分别为1.25、2.50、5.00、10.00、20.00、40.00 mg · L⁻¹,以0.1% TritonX-100为空白对照,每个浓度处理稻水象甲成虫30头·皿⁻¹,每处理3次重复,共90头。解毒酶抑制剂测定时,先将酶抑制剂PBO、TPP和DEM以丙酮配制成10 g · L⁻¹的母液,再用0.1% TritonX-100稀释成100 mg · L⁻¹的工作液,以酶抑制剂工作液为溶剂将氯虫苯甲酰胺配制成所需的梯度工作浓度,使酶抑制剂在所有药液中的浓度为100 mg · L⁻¹。

采用浸渍法(马冲等,2012;尹飞等,2014)进行室内毒力测定:将长度5 cm的新鲜秧叶在药液中浸泡渍10 s后取出晾干(25℃,2 h),放入置有保湿滤纸的培养皿中;将试虫在相应浓度的药液中浸渍3 s后置于吸水纸上吸去多余的药液,然后放入上述培养皿于人工气候箱[温度(26±1)℃、光周期L:D=14:10、相对湿度70%±2%]饲养48 h后统计各处理虫口死亡数,并计算不同处理的稻水象甲死亡率和校正死亡率。其中,死亡率/%=(死亡虫数/处理总虫数)×100;校正死亡率/%=[(处理死亡率-空白对照死亡率)/(1-空白对照死亡率)]×100。

1.3 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性的影响

1.3.1 解毒酶活力测定 羧酸酯酶(carboxylesterase, CarE)活性测定:分别以亚致死剂量氯虫苯甲酰胺、酶抑制剂+亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理稻水象甲成虫3、12、24、48、72、96 h,将试虫用液氮速冻后放入-80℃冰箱保存备用。羧酸酯酶的测定参照陈羿渠等(2017)的方法,取冷冻处理的稻水象甲成虫置于玻璃匀浆器中,加入1 mL预冷磷酸缓冲液(0.04 mol · L⁻¹, pH=7.0)在冰浴条件下迅速充分匀浆,4℃,10000 r · min⁻¹离心10 min,上清液作为待测酶液冰浴备用。每个试管中分别加入0.45 mL磷酸缓

冲液、50 μL 待测酶液、1.8 mL $\alpha\text{-NA}$ 溶液 ($3\times 10^{-4}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 含 $0.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 毒扁豆碱), 混匀后于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温育 15 min , 加入 0.9 mL 显色液 (1% 固蓝 B 盐溶液: 5% SDS 溶液 = $2:5$, 体积比, 现配现用), 对照组在显色反应终止后补加 $50\text{ }\mu\text{L}$ 酶液, 分光光度计测定 D_{600} 值, 每处理 3 次重复, 每重复平行测定 3 次。制作 α -萘酚标准曲线并得出 α -萘酚生成量, 测定酶液蛋白质含量, 计算 CarE 酶比活力, 以酶催化反应体系中每毫克组织蛋白每分钟生成 1 mmol α -萘酚对应的酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)。

谷胱甘肽 S-转移酶 (glutathione S-transferase, GST) 活性测定: 参照 Wu & Miyata (2005) 的方法, 取冷冻处理的稻水象甲成虫置于玻璃匀浆器中, 加入 2 mL 预冷磷酸缓冲液 ($\text{pH} = 7.0$, 含 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA) 在冰浴条件下迅速充分匀浆, 于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min , 上清液作为待测酶液冰浴备用。以 CDNB 为底物, 向显色皿中依次加入 2.4 mL 磷酸缓冲液 ($66\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 0.3 mL GSH ($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 0.1 mL CDNB ($0.03\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 0.2 mL 待测酶液, 立即混匀, 在 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴条件下反应 5 min , 分光光度计测定 D_{340} 值, 对照组以 0.2 mL 磷酸缓冲液替代酶液, 每处理 3 次重复, 每重复平行测定 3 次。根据 D_{340} 值和酶液蛋白质含量计算 GST 酶比活力, 以酶催化反应体系中每毫克组织蛋白每分钟使 D_{340} 值变化 0.01 对应的酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)。

多功能氧化酶 (mixed function oxidase, MFO) 活性测定: 参照 Yu & Nguyen (1992) 的方法, 取冷冻处理的稻水象甲成虫置于玻璃匀浆器中, 加入 2.5 mL 预冷磷酸缓冲液 ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.8$; 含 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA、 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ DTT、 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PMSF、 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PTU、 10% 甘油), 冰浴匀浆, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min , 上清液用磷酸缓冲液稀释 10 倍作为待测酶液冰浴备用。试管中依次加入 0.2 mL 对硝基苯甲醚 ($4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 0.8 mL 磷酸缓冲液 ($\text{pH}=7.8$)、 1 mL NADPH ($0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 1 mL 待测酶液, 以不加 NADPH 为对照。于 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴 30 min 后加入 1 mL HCl ($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 终止反应; 加入 5 mL 氯仿萃取 10 min , 移取氯仿层 3.5 mL 到另一试管内, 加入 3.5 mL NaOH ($0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 再次萃取 10 min , 取 3 mL NaOH 溶液层用分光光度计测定 D_{405} 值, 每处理 3 次重复, 每重复平行测定 3

次。制作对硝基苯酚标准曲线并得出对硝基苯酚生成量, 测定酶液中蛋白质含量, 计算 MFO 比活力, 以酶催化反应体系中每毫克组织蛋白每分钟生成 1 pmol 对硝基苯酚对应的酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)。

1.3.2 保护酶比活力测定 试虫处理方法同 1.3.1, 过氧化氢酶 (catalase, CAT)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性使用南京建成生物研究所生产的检测试剂盒进行测定, 硫氧还蛋白还原酶 (thioredoxin reductase, TrxR) 活性使用北京索莱宝科技有限公司生产的检测试剂盒测定, 测定方法按照检测试剂盒说明书进行。CAT 活性单位定义为每毫克组织蛋白每秒钟分解 $1\text{ }\mu\text{mol}$ 的 H_2O_2 所需酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$); POD 活性单位定义为每毫克组织蛋白每分钟催化 $1\text{ }\mu\text{g}$ 底物所需酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$); SOD 活性单位定义为每毫克组织蛋白在 1 mL 反应液中抑制率达 50% 时所需酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$); TrxR 活性单位定义为每毫克组织蛋白每分钟生成 1 nmol TNB 所需酶量为一个酶活力单位 ($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)。

1.3.3 蛋白质含量测定 蛋白质含量测定方法参照 Bradford (1976) 采用考马斯亮蓝法: 取一支具塞试管, 加入 0.1 mL 待测酶液、 0.9 mL 蒸馏水、 5 mL 考马斯亮蓝 G250 试剂, 充分混合后静置 2 min , 在 595 nm 波长下测定吸光度值, 以牛血清蛋白为标准蛋白制作标准曲线, 求出待测酶液蛋白含量。

1.4 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲田间发育动态的影响

1.4.1 试验处理 试验在四川乐山市井研县千佛镇瓦子坝“百里粮油走廊”水稻病虫绿色防控示范基地进行, 试验地为冬闲田 (前茬水稻秸秆全部还田泡冬), 水稻品种为宜香优 2115, 2023 年 3 月 15 日播种, 4 月 21 日移栽, 宽窄行 ($33.3+16.7$) $\text{cm}\times 16.7\text{ cm}$, 单株栽插。于 4 月 27 日以氯虫苯甲酰胺 LC_{25} 剂量喷雾处理约 1 hm^2 移栽后返青水稻, 以不施药田块为对照, 5 月 1 日开始每天调查田间稻水象甲各虫态虫口数量, 直到 8 月田间所有虫态完全消亡或迁出稻田。

1.4.2 调查方法 采用双对角线取样法 (杨春林等, 2020), 每个处理选取 5 个样点, 每个样点调查 15 丛水稻, 观察叶片及稻丛下部, 统计大田内稻水

象甲成虫数;挖取稻丛及周边 5 cm 半径内泥土,放入 40 目网筛中进行漂洗,记录附着在根须上的幼虫、土茧及漂浮在水中的幼虫数量。

1.5 数据分析处理

采用 DPS 数据处理系统对生物测定数据进行 *F* 检验并计算毒力回归方程、*LC*₁₀、*LC*₂₅、*LC*₅₀ 及相关系数,生物酶活测定数据使用 Duncan 氏新复极差法进行方差分析,采用 Microsoft Excel 2007 软件进行简单运算和图表制作。

2 结果与分析

2.1 氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的亚致死剂量

不同稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性

差异较大,稻水象甲 RW-Gy 种群对氯虫苯甲酰胺最为敏感,*LC*₁₀、*LC*₂₅、*LC*₅₀ 值分别为 0.0406、0.1914、1.0728 mg · L⁻¹,RW-Js 种群对氯虫苯甲酰胺抗性较强,*LC*₁₀、*LC*₂₅、*LC*₅₀ 值分别为 6.5499、9.5244、14.4378 mg · L⁻¹,氯虫苯甲酰胺对 RW-Js 种群的 *LC*₅₀ 值是 RW-Gy 种群的 13.45 倍;其余 3 个稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性相差不大,*LC*₅₀ 值范围为 4.3543~5.8624 mg · L⁻¹。经反向验证,即用含氯虫苯甲酰胺 6.5499、9.5244、14.4378 mg · L⁻¹ 的药液分别处理稻水象甲 RW-Js 种群成虫 48 h 后,各处理校正死亡率分别为 10.56%、24.44%、48.89%,分别接近 10%、25%、50% (表 1)。

表 1 氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的毒力
Table 1 Toxicity of chlorantraniliprole to *L. oryophilus*

种群 Population	毒力回归方程 Toxicity regression equation	相关系数 Correlation coefficient	<i>LC</i> ₁₀ /(mg · L ⁻¹)	<i>LC</i> ₂₅ /(mg · L ⁻¹)	<i>LC</i> ₅₀ /(mg · L ⁻¹)	<i>F</i>	<i>P</i>
RW-Zy	<i>y</i> = 4.1374 + 1.3500 <i>x</i>	0.9861	0.4893	1.3781	4.3543	141.2752	0.0003
RW-Mz	<i>y</i> = 3.7542 + 1.7758 <i>x</i>	0.9853	0.9547	2.0977	5.0300	133.2483	0.0003
RW-Lc	<i>y</i> = 3.6192 + 1.7978 <i>x</i>	0.9916	1.1356	2.4712	5.8624	235.7657	0.0001
RW-Gy	<i>y</i> = 4.9725 + 0.9012 <i>x</i>	0.9939	0.0406	0.1914	1.0728	327.0120	0.0001
RW-Js	<i>y</i> = 0.6711 + 3.7334 <i>x</i>	0.9505	6.5499	9.5244	14.4378	37.4005	0.0036

2.2 解毒酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用

酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺协同增效结果及对稻水象甲的毒力差异见图 1。结果表明,不同酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺均有明显的协同增效作用。3 种酶抑制剂处理后氯虫苯甲酰胺对稻水象甲的 *LC*₅₀ 值均大幅下降,酶抑制剂对 RW-Js 种群 (抗性种群) 的增效作用最强,TPP、DEM 和 PBO 的增效倍数分别为 3.56、4.43 和 5.50 倍;对 RW-Gy 种群 (敏感种群) 的增效作用最弱,增效倍数分别为 1.

31、1.73 和 2.53 倍;对 RW-Zy、RW-Mz 和 RW-Lc 等 3 个种群增效倍数分别为 2.14~3.76 倍,种群间差异不大。酶抑制剂 TPP 对 5 个稻水象甲种群的增效倍数分别为 1.31~3.56 倍,DEM 对不同种群的增效倍数分别为 1.73~4.43 倍,PBO 的增效倍数分别为 2.53~5.50 倍,表明同一种酶抑制剂对不同种群的增效作用存在明显差异,其中 PBO 与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用明显高于 TPP 和 DEM。

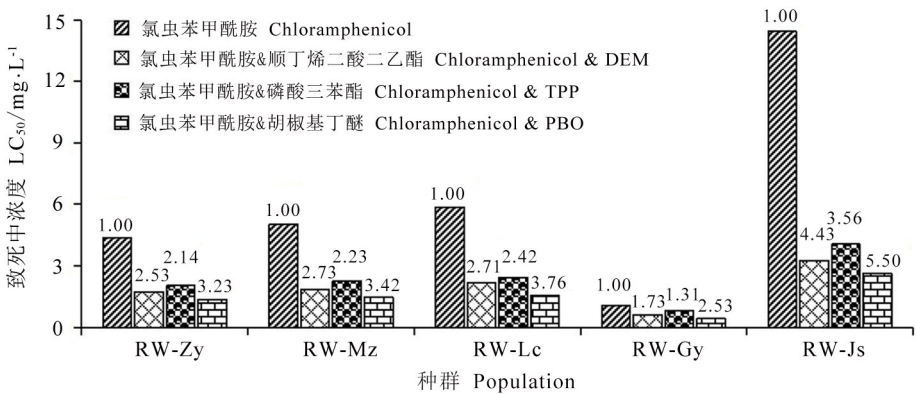


图 1 酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用

Fig.1 Synergistic effect of enzyme inhibitors and chloramphenicol

柱状图顶部的数字表示每个种群不同酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺的协同增效倍数。

The numbers on the top of the bar chart mean the synergistic effect of different enzyme inhibitors and chlorantraniliprole for each population.

2.3 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲解毒酶活性的影响

解毒酶活性测定结果(表2)表明,RW-Js种群体内3种解毒酶活性较RW-Gy种群显著增高($P<0.05$),其中MFO活性变化最为明显,增长1倍以上,提示种群间对氯虫苯甲酰胺敏感性的差异跟解毒酶活性正相关。RW-Js种群稻水象甲成虫经氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后,CArE活性随处理时间总体呈上升趋势,在3~48 h内显著高于对照($P<0.05$),处理后72、96 h增长趋势放缓,与对照差异不显著($P>0.05$);GST活性随时间的增加呈先

上升后下降的趋势,处理后3、12 h酶活显著高于对照($P<0.05$),24 h后与对照差异不显著($P>0.05$),48~96 h后比对照低,且差异达显著水平($P<0.05$);多功能氧化酶活性在3~48 h内呈上升趋势,72、96 h后逐渐下降,但仍显著高于对照($P<0.05$)。以酶抑制剂+氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后,RW-Js种群稻水象甲成虫体内3种解毒酶活性较单一氯虫苯甲酰胺处理显著降低,且随着时间增加降幅逐渐减小,其中多功能氧化酶活性下降最多,降幅达33.78%~63.60%。

表2 不同处理稻水象甲体内解毒酶比活力
Table 2 The specific activity of detoxifying enzymes in *L. oryophilus* under different treatments

处理 Treatment	羧酸酯酶 CArE					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	0.381±0.022c	0.595±0.032c	0.442±0.027c	0.573±0.020c	0.647±0.021b	0.527±0.032b
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	0.518±0.019b	0.751±0.036b	0.663±0.047b	0.807±0.012b	0.924±0.048a	0.734±0.014a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chlorantraniliprole	0.874±0.020a	1.210±0.050a	0.922±0.019a	0.891±0.012a	0.963±0.035a	0.797±0.041a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺+羧酸酯酶抑制剂 RW-Js+chlorantraniliprole+carboxylesterase inhibitor TTP	0.420±0.021c	0.574±0.031c	0.530±0.040c	0.641±0.033c	0.712±0.051b	0.445±0.031b

处理 Treatment	谷胱甘肽 S-转移酶 GST					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	10.69±0.32c	6.81±0.21d	8.98±0.74b	10.94±0.09b	9.88±0.34b	10.58±0.37b
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	12.55±0.67b	10.55±0.67b	12.48±0.53a	15.96±0.59a	14.78±0.27a	15.05±0.39a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chlorantraniliprole	15.77±0.55a	13.12±0.41a	11.16±0.33a	9.82±0.39c	7.43±0.39c	6.57±0.18c
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺+谷胱甘肽 S-转移酶抑制剂 RW-Js+chlorantraniliprole+glutathione S-transferase inhibitor DEM	11.35±0.32c	8.77±0.09c	7.77±0.55b	6.78±0.25d	5.71±0.32d	6.94±0.38c

处理 Treatment	多功能氧化酶 MFO					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	1.09±0.02c	1.11±0.06c	1.04±0.07d	1.13±0.06c	1.18±0.09d	1.21±0.08d
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	2.28±0.06b	2.34±0.07b	2.51±0.17b	2.38±0.11b	2.60±0.18b	2.52±0.13b
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chlorantraniliprole	2.83±0.03a	3.19±0.09a	3.59±0.12a	4.38±0.12a	3.52±0.12a	2.96±0.16a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺+多功能氧化酶抑制剂 RW-Js+chlorantraniliprole+multifunctional oxidase inhibitor PBO	1.03±0.03c	1.25±0.05c	1.78±0.13c	2.11±0.08b	1.96±0.09c	1.96±0.09c

表中数据为平均值±标准误,同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Dates show as means±SE. The data in the same column with the same letters mean significant differences ($P<0.05$).

2.4 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲保护酶活性的影响

解毒酶活性测定结果(表3)表明,RW-Js种群稻水象甲体内4种保护酶活性与RW-Gy种群无显著差异($P>0.05$);RW-Js种群稻水象甲成虫经氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后3、12 h CAT活性分别提

高17.99%、26.45%,与对照差异显著($P<0.05$),处理后72、96 h比对照下降26.59%、37.83%,表现为先激活后抑制;POD活性在氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后12、24 h显著高于对照($P<0.05$),其余时间段与对照之间无显著差异($P>0.05$);SOD活性在氯虫苯甲酰胺LC₂₅剂量处理后3~24 h内比对照提

高 3.25%~7.92%,达显著差异 ($P<0.05$), 48~96 h LC_{25} 剂量处理的稻水象甲 TrxR 活性在整个测定周内与对照差异不显著 ($P>0.05$); 氯虫苯甲酰胺 期内与对照无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 不同处理稻水象甲体内保护酶比活力
Table 3 The specific activity of protective enzymes in *L. oryzaephilus* under different treatments

单位 Unit: U · mg⁻¹

处理 Treatment	过氧化氢酶 CAT					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	11.23±0.47c	10.83±0.33b	12.73±0.35ab	11.50±0.32a	10.84±0.10a	12.08±0.46a
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	11.67±0.41c	11.57±0.43b	13.77±0.57a	10.09±0.49b	11.47±0.38a	12.82±0.23a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	13.77±0.49b	14.63±0.52a	13.07±0.61ab	9.22±0.49bc	8.42±0.26b	7.97±0.17b

处理 Treatment	过氧化物酶 POD					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	6.71±0.46b	6.92±0.20bc	7.11±0.17b	7.30±0.21a	6.52±0.32a	6.81±0.16a
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	6.89±0.29b	7.25±0.13b	6.93±0.09b	7.17±0.18a	6.81±0.20a	7.09±0.12a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	6.58±0.17b	8.28±0.21a	8.96±0.15a	7.34±0.29a	6.97±0.17a	7.23±0.15a

处理 Treatment	超氧化物歧化酶 SOD					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	79.39±0.98c	82.07±1.47b	78.43±1.65bc	79.71±0.56bc	81.33±1.04a	83.24±1.04a
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	78.67±1.37c	81.88±0.94b	80.47±0.98b	81.47±0.83ab	82.25±1.19a	81.25±1.20a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	81.23±1.48b	85.63±0.55a	86.84±1.18a	82.84±0.95a	83.52±1.28a	82.52±1.28a

处理 Treatment	硫氧还蛋白还原酶 TrxR					
	3 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
RW-Gy 种群 RW-Gy population	0.767±0.027a	0.780±0.017a	0.823±0.023a	0.803±0.012a	0.746±0.023a	0.743±0.019a
RW-Js 种群(对照) RW-Js population (CK)	0.746±0.030a	0.773±0.030a	0.847±0.038a	0.813±0.012a	0.697±0.047a	0.830±0.023a
RW-Js 种群+氯虫苯甲酰胺 RW-Js+chloran-traniliprole	0.753±0.021a	0.850±0.021a	0.850±0.046a	0.793±0.052a	0.843±0.027a	0.767±0.030a

表中数据为平均值±标准误,同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Dates show as means±SE. The data in the same column with the same letters mean significant differences ($P<0.05$).

2.5 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲田间发育动态的影响

由图 2 可知,氯虫苯甲酰胺处理稻水象甲各虫态的始见期、发生高峰期和发生末期与对照有一定的差异。氯虫苯甲酰胺处理对稻水象甲越冬代成虫高峰期无影响,但对越冬代成虫寿命影响较大,田间比对照提前 9 d 查不见成虫(图 2A);稻水象甲幼虫始见期比对照延迟 3 d,幼虫高峰期和发生末期均比对照延迟 6 d 左右(图 2B);稻水象甲蛹的始见期、发生高峰期和发生末期均比对照延迟 6 d(图 2C);稻水象甲一代成虫始见期、发生高峰期比对照延迟 6 d,发生末期无明显差异(图 2D)。

调查结果显示,氯虫苯甲酰胺 LC_{25} 剂量处理稻水象甲不同虫态的高峰期虫口数较对照减少 30.20%~35.05%,各虫态田间总计虫口数峰值为 8.707 头·丛⁻¹,比对照 13.227 头·丛⁻¹减少 34.17%;

氯虫苯甲酰胺 LC_{25} 剂量处理田块的越冬代成虫、幼虫、蛹及一代成虫高峰期虫口数占田间总虫口数的比例分别为 89.81%、84.12%、59.84%和 55.89%,与对照无明显差异 ($P>0.05$)。结果表明,亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理可不同程度延缓稻水象甲幼虫、蛹和成虫的生长发育,并具有缩短成虫寿命、加快田间成虫消亡进度的作用。

3 讨论
3.1 稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性
2011 年首次在四川省乐山市、内江市等地发现稻水象甲入侵(何春兰和何军,2013)以来,氯虫苯甲酰胺及其复配药剂一直是该地区稻水象甲防控的主推药剂(刘可等,2012;刘学英,2020)。氯虫苯甲酰胺长期大量使用导致稻水象甲一直处在高压的选择条件下,增加了抗药性形成风险。

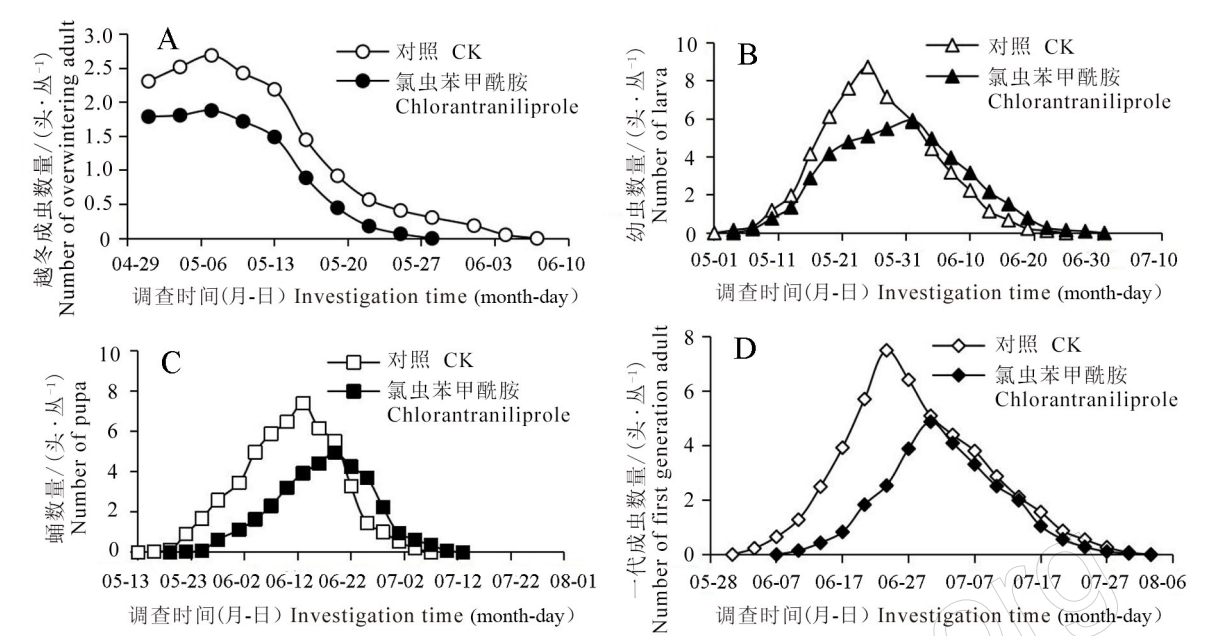


图2 稻水象甲田间发育动态

Fig.2 Development dynamics of *L. oryophilus* in the field

A: 越冬成虫; B: 幼虫; C: 蛹; D: 一代成虫。

A: Overwintering adult; B: Larva; C: Pupa; D: First generation adult.

笔者调查发现,近年来四川省内不同稻区使用氯虫苯甲酰胺防控稻水象甲时,用药剂量和施用频率均有较大区别。由于不同地理区域用药水平和用药习惯的不同,害虫对杀虫剂的敏感性、抗药性发展程度产生较大差异(姜兴印等,2000)。苏欣等(2011)测定了氯虫苯甲酰胺对辽阳地区稻水象甲3个田间种群的毒力,发现该药剂对不同种群的LD₅₀值相差4倍以上;刘秀红等(2018)测定了新疆主要稻区不同稻水象甲地理种群对常用杀虫剂的抗药性,北疆伊犁河谷稻区察布查尔县稻水象甲种群和乌鲁木齐稻区五家渠市种群对氯虫苯甲酰胺的抗性倍数均高于5.92倍,表明这2个稻区稻水象甲种群已对氯虫苯甲酰胺产生了低水平抗性。

本研究结果显示,不同稻水象甲种群对氯虫苯甲酰胺的敏感性差异较大,RW-Gy种群对氯虫苯甲酰胺最敏感,RW-Js种群对氯虫苯甲酰胺敏感性最差,其中RW-Js种群的LC₅₀值为RW-Gy种群的13.45倍,已经达到中等抗性水平。在目前以化学药剂为主要防控手段的背景下,应及时对不同地区稻水象甲的抗性水平进行系统监测,以便制定有效的抗性治理措施,延缓其对药剂的抗性形成。由于未能在稻水象甲发生早期建立不同杀虫药剂的敏感基线,本研究通过比较不同种群对氯虫苯甲酰胺LC₅₀值的差异判定其抗性的变化(苏欣等,2011)。此

外,敏感种群RW-Gy采自五通桥区冠英镇,该稻区于2023年首次发现稻水象甲,其对氯虫苯甲酰胺的较高敏感性表明该地区稻水象甲可能由氯虫苯甲酰胺使用水平较低的稻区迁入。

3.2 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生物酶活性及抗药性的影响

CarE、GST和MFO是昆虫体内重要的解毒酶系,其主要功能是代谢机体内的有毒物质以适应逆境胁迫(Tiwari & Pelz-stelinskil, 2011)。CAT、POD和SOD是昆虫体内重要的保护酶系,其主要作用是维持昆虫机体内活性氧及生理代谢平衡(Lozinskaya *et al.*, 2004)。昆虫体内生物酶活性与外界刺激强度及昆虫自身的耐药性和抗逆性有关(王宏民等,2013),亚致死剂量杀虫剂可诱导昆虫体内解毒酶和保护酶活性变化以调节虫体对杀虫剂的解毒代谢能力(贾变桃等,2016)。已有研究表明,亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对小菜蛾(尹飞等,2014)、甜菜夜蛾(陈羿渠等,2017;马冲等,2012)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner (欧善生等,2012)、蜂巢小甲虫 *Aethina tumida* Murray (韩文素等,2022)等昆虫体内解毒酶和保护酶活性具有刺激或抑制作用。TrxR是硫氧还蛋白系统主要的功能蛋白,广泛存在于从原核生物到哺乳动物等多个物种之中,是一种间接的抗氧化酶

(孟飞等, 2012), 能够在氧化胁迫下通过维持硫氧还蛋白(thioredoxin, Trx)的还原性来减缓氧化胁迫的压力, 是机体调节各种氧化应激损伤的重要途径, 对昆虫调节代谢和繁殖等生命活动有着不可替代的作用(秦馨等, 2018), 目前未见亚致死剂量杀虫剂胁迫影响昆虫体内硫氧还蛋白还原酶相关报道。

本研究结果显示, 抗性种群 RW-Js 体内 3 种解毒酶(CarE、GST、MFO)活性较敏感种群 RW-Gy 显著增高, 其中多功能氧化酶变化最为明显, 增长 1 倍以上; 种群间 3 种保护酶(CAT、POD、SOD)及 TrxR 活性无显著差异, 提示种群间对氯虫苯甲酰胺敏感性的差异跟解毒酶活性正相关, 而与保护酶活性无相关性。RW-Js 种群稻水象甲经氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量处理后, 体内多种生物酶活性总体呈先升高后降低的趋势, 具明显的时间效应, 其中 MFO 活性在测定时间内显著高于对照。解毒酶抑制剂 PBO、TPP 和 DEM 常用于间接探索昆虫 MFO、CarE、GST 等昆虫体内解毒酶活性与抗药性的关系(王敏等, 2023)。试验以酶抑制剂+氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量处理稻水象甲成虫, 结果表明 3 种解毒酶活性较单一氯虫苯甲酰胺处理显著降低, 其中 MFO 活性下降最多。此外, 酶抑制剂与氯虫苯甲酰胺协同增效结果显示, PBO 与氯虫苯甲酰胺的协同增效作用明显高于 TPP 和 DEM, 说明降低 MFO 活性是增加稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的敏感性效率最高的方式。害虫解毒酶活性的增强是其产生抗药性的主要机制之一(Sial *et al.*, 2011), 根据昆虫抗药性机理, MFO 可能是稻水象甲对氯虫苯甲酰胺代谢过程中最重要的解毒酶, 并与稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的抗性形成或基因表达有关(Li *et al.*, 2007)。本研究对上述生物酶活性的测定都是在抗性水平较低或亚致死剂量杀虫剂短期胁迫下进行的, 结论存在一定局限性, 要明确某种解毒酶与稻水象甲对氯虫苯甲酰胺的抗性形成的关系, 需进行系统性研究。

3.3 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲田间发育动态的影响

亚致死剂量杀虫剂对不仅影响昆虫的抗药性形成, 还不同程度影响其生殖力、生长发育、行为等生物学特性(Desneux *et al.*, 2007)。杀虫剂亚致死剂量对不同靶标昆虫种群的增长存在有利和不利

两方面的影响, 陈羿渠等(2017)研究表明, 甜菜夜蛾经过连续 6 代亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理, 各虫龄阶段的存活率与雌成虫繁殖力明显下降; Han *et al.* (2012)用氯虫苯甲酰胺 LC₁₀、LC₂₅ 剂量处理小菜蛾, 其发育历期明显增长, 雌成虫产卵量降低; 余慧灵等(2015)用亚致死剂量溴氰虫酰胺处理甜菜夜蛾 3 龄幼虫, 显著抑制甜菜夜蛾的生长发育和繁殖; 杨洪等(2012)用氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量处理白背飞虱, 雌成虫寿命明显缩短; 宋月芹等(2013)用氯虫苯甲酰胺 LC₁₀ 剂量处理亚洲玉米螟, 其成虫寿命变长且雌成虫寿命明显延长; Lai *et al.* (2011b)采用亚致死剂量氯虫苯甲酰胺处理甜菜夜蛾幼虫后, 其成虫寿命没有显著变化。本研究发现, 氯虫苯甲酰胺 LC₂₅ 剂量对稻水象甲各虫态的田间始见期、发生高峰期和发生末期均有一定的影响, 不同程度延缓稻水象甲幼虫、蛹和成虫的生长发育, 并具有缩短成虫寿命、加快田间成虫消亡的作用。亚致死剂量氯虫苯甲酰胺虽然增加了稻水象甲的抗性形成压力, 一定程度提高抗性个体在药剂选择压力下的存活率, 但由于药剂的持续胁迫使得害虫的生存繁殖力下降, 以至抗性种群与敏感种群相比并没有明显生存竞争优势(陈羿渠等, 2017)。本研究通过稻水象甲田间发育动态来探讨亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对稻水象甲生长发育的影响, 比传统的实验室饲养观察法更符合实际生理、生态条件, 研究结论更具实践指导价值。

参考文献

- 陈羿渠, 向兴, 贡常委, 王学贵, 2017. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾主要解毒酶活性与生长繁殖的影响. 中国农业科学, 50(8): 1440-1451.
- 丁新华, 王小武, 吐尔逊·阿合买提, 付开赞, 何江, 关志坚, 付文君, 郭文超, 2017. 新疆荒漠绿洲稻区稻水象甲危害损失及防治阈值研究. 生物安全学报, 26(1): 63-67.
- 高希武, 董向丽, 郑炳宗, 陈青, 1997. 棉铃虫的谷胱甘肽 S-转移酶(GSTs): 杀虫剂和植物次生物质的诱导与 GSTs 对杀虫药剂的代谢. 昆虫学报, 40(2): 122-127.
- 韩文素, 李健, 高景林, 钟义海, 王释婕, 赵珊, 2022. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对蜂巢小甲虫解毒酶和保护酶活性的影响. 农药, 61(10): 726-730.
- 何春兰, 何军, 2013. 稻水象甲普查与防控技术措施. 四川农业科技(9): 40-41.

- 何发林, 乔治华, 姚向峰, 于灏泳, 孙石昂, 李向东, 张吉旺, 姜兴印, 2019. 低致死剂量氯虫苯甲酰胺对沟金针虫食物利用和相关生理生化指标的剂量和时间效应. 昆虫学报, 62(8): 948-959.
- 胡虢, 王晓辉, 孙刚忠, 周莉, 潘渝, 刘守德, 李青, 金海燕, 尹飞, 李振宇, 湛爱东, 谢圣华, 刘华梅, 2017. 氯虫苯甲酰胺、阿维菌素与苏云金芽胞杆菌桶混对不同地区抗性小菜蛾的防治效果. 中国生物防治学报, 33(6): 732-738.
- 贾变桃, 洪珊珊, 张雨超, 曹永伟, 2016. 维菌素对半闭弯尾姬蜂保护酶系和解毒酶系的影响. 环境昆虫学报, 38(5): 990-995.
- 姜兴印, 王开运, 仪美芹, 2000. 不同地区小菜蛾对杀虫剂的抗性差异. 农药学学报, 2(4): 44-48.
- 李会仙, 郝赤, 王利英, 魏波, 2005. 高效氯氰菊酯和溴氰菊酯对棉铃虫的亚致死效应. 山西农业大学学报, 25(3): 231-233.
- 梁炳博, 向兴, 王学贵, 杨群芳, 罗家栋, 2017. 噻虫啉亚致死剂量对斜纹夜蛾解毒酶系活性与生长繁殖的影响. 昆虫学报, 60(10): 1187-1197.
- 刘建业, 钱蕾, 蒋兴川, 和淑琪, 李正跃, 桂富荣, 2014. 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. 昆虫学报, 57(7): 754-761.
- 刘可, 郭迪金, 吴志平, 2012. 四川稻水象甲防控要点浅析及药剂推荐. 四川农业与农机(3): 35-36.
- 刘秀红, 王小武, 丁新华, 付开赞, 吐尔逊·阿合买提, 何江, 郭文超, 2018. 新疆主要稻区不同稻水象甲地理种群对常用杀虫剂抗药性测定. 新疆农业科学, 55(10): 1847-1853.
- 刘学英, 2020. 浅谈井研县丘区稻水象甲的发生规律及防治策略. 四川农业科技(3): 37-38.
- 马冲, 路兴涛, 刘震, 马士仲, 张田田, 2012. 氯虫苯甲酰胺、毒死蜱亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育和繁殖力的影响. 植物保护, 38(4): 38-41.
- 孟飞, 胥保华, 郭兴启, 2012. 中华蜜蜂重要生物学特性相关功能基因研究进展. 应用昆虫学报, 49(5): 1338-1344.
- 欧善生, 梁沛, 宋敦伦, 史雪岩, 高希武, 2012. 氯虫苯甲酰胺亚致死剂量对棉铃虫生长发育和解毒酶活性的影响. 植物保护, 38(4): 1-8.
- 齐国君, 高燕, 黄德超, 吕利华, 2012. 基于 MAXENT 的稻水象甲在中国入侵扩散动态及适生性分析. 植物保护学报, 39(2): 129-136.
- 秦馨, 李锴, 张静, 张爽, 武卫华, 陆合, 2018. 硫氧还蛋白还原酶对弓形虫速殖子增殖的影响. 中国病原生物学杂志, 13(12): 1368-1371.
- 宋月芹, 董钧锋, 孙会忠, 2013. 亚致死浓度氯虫苯甲酰胺可降低亚洲玉米螟的种群增长. 昆虫学报, 56(4): 446-451.
- 苏欣, 于娜, 梁沛, 高希武, 2011. 辽阳地区稻水象甲对六种杀虫剂的敏感及解毒酶活性测定. 农药学学报, 13(6): 581-585.
- 孙文鹏, 2006. 稻水象甲 (*Lissorhoptrus oryzophilus* Kusche) 的生物防治. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学.
- 唐振华, 陶黎明, 2008. 新型二酰胺类杀虫剂对鱼尼丁受体作用的分子机理. 昆虫学报, 51(6): 645-651.
- 王蝉娟, 陆浩磊, 赵志森, 鲁仙, 韩浩宇, 张饮江, 2023. 2 种中草药对福寿螺的杀灭效果及对肝脏影响. 生物安全学报, 32(1): 63-67.
- 王宏民, 张奂, 郝赤, 张仙红, 2013. 玫烟色棒束孢对小菜蛾幼虫体内不同酶活性的影响. 菌物学报, 32(2): 269-276.
- 王敏, 王新溪, 王圣印, 2023. 橘小实蝇对甲氨基阿维菌素苯甲酸盐的抗性机制及对其他药剂的交互抗性. 植物保护, 49(1): 278-284.
- 王小武, 丁新华, 付开赞, 吐尔逊·阿合买提, 黄红梅, 木拉提·塔里木别克, 何江, 郭文超, 2018. 小型植保无人机超低量喷雾防治稻水象甲. 生物安全学报, 27(3): 216-223.
- 王小武, 丁新华, 吐尔逊·阿合买提, 付开赞, 何江, 付文君, 郭文超, 2017. 不同生物药剂对稻水象甲的毒力、拒食活性及防效分析. 生物安全学报, 26(1): 68-74.
- 杨春林, 李洪浩, 牟成君, 王锐, 席亚东, 2020. 水稻生育期对稻水象甲成虫种群空间格局影响及抽样技术. 生物安全学报, 29(3): 181-190.
- 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.
- 尹飞, 冯夏, 李振宇, 林庆胜, 胡珍娣, 张德雍, 陈焕瑜, 2014. 亚致死剂量氯虫苯甲酰胺对小菜蛾体内活性酶的影响. 植物保护, 40(2): 66-69.
- 尹飞, 李振宇, SAMINA SHABBIR, 林庆胜, 2022. P450 基因在氯虫苯甲酰胺不同抗性品系小菜蛾中的表达及功能分析. 中国农业科学, 55(13): 2562-2571.
- 尹显慧, 吴青君, 李学锋, 张友军, 徐宝云, 2008. 多杀菌素亚致死浓度对小菜蛾解毒酶系活力的影响. 农药学报, 10(1): 28-34.
- 余慧灵, 向兴, 袁贵鑫, 陈羿渠, 王学贵, 2015. 溴氰虫酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育及体内解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 58(6): 634-641.
- 支昊宇, 丁新华, 陈萍, 叶茂林, 闫阳阳, 姜卫华, 2021. 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟解毒酶活性及生长发育的影响. 南京农业大学学报, 44(1): 89-96.
- 中华人民共和国农业农村部, 2020. 中华人民共和国农业部公告第 351 号. (2020-11-10) [2023-09-23]. <http://www.>

- moa.gov.cn/xw/bmdt/202011/t20201110_6356064.htm.
- 中华人民共和国农业农村部, 2023. 全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录. (2023-11-01) [2023-09-23]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2023/202310/202311/t20231101_6439586.htm.
- BRADFORD M M, 1976. A rapid sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of proteindye binding. *Analytical Biochemistry*, 72 (1/2): 248–254.
- DESNEUX N, DECOURTYE A, DELPUECH J M, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52(1): 81–106.
- HAN W S, ZHANG S F, SHEN F Y, LIU M, REN C C, GAO X W, 2012. Residual toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Management Science*, 68(8): 1184–1190.
- LAI T C, LI J, SU J Y, 2011a. Monitoring of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to chlorantraniliprole in China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 101(3): 198–205.
- LAI T C, SU J A, 2011b. Effects of chlorantraniliprole on development and reproduction of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner). *Journal of Pest Science*, 84(3): 381–386.
- LI X C, SCHULER M A, BERENBAUM M R, 2007. Molecular mechanisms of metabolic resistance to synthetic and natural xenobiotics. *Annual Review of Entomology*, 52(1): 231–253.
- LOZINSKAYA Y L, SLEPNEVA I A, KHRAMTSOV V V, GLUPOV V V, 2004. Changes of the antioxidant status and System of generation of free radicals in hemolymph of *Galleria mellonella* larvae at microsporidiosis. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 40(2): 119–125.
- MOHAMMAD-AMIR A, GODFREY L D, 2014. A century of *Lissorhoptrus oryzophilus* Kusehel (Coleoptera: Curculionidae): a history of research and management with an emphasis on the United States. *Journal of Integrated Pest Management*, 5(4): 1–14.
- SIAL A A, BRUNNER J F, 2010. Assessment of resistance risk in obliquebanded leafroller (Lepidoptera: Tortricidae) to the reduced-risk insecticides chlorantraniliprole and spinetoram. *Journal of Economic Entomology*, 103(4): 1378–1385.
- SIAL A A, BRUNNER J F, GARCZYNSKI S F, 2011. Biochemical characterization of chlorantraniliprole and spinetoram resistance in laboratory-selected obliquebanded leafroller, *Choristoneura rosaceana* (Harris) (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 99(3): 279–284.
- TEIXEIRA L A, ANDALORO J T, 2013. Diamide insecticides: global efforts to address insect resistance stewardship challenges. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 106(3): 76–78.
- TINDALLKV, STOUT M J, 2003. Use of common weeds of rice as hosts for the rice water weevil (Coleoptera Curculionidae). *Environmental Entomology*, 32(5): 1227–1233.
- TIWARI S, PELZ-STELINSKI L, 2011. Effect of *Candidatus Liberibacter asiaticus* infection on susceptibility of Asian citrus psyllid, *Diaphrina citri*, to selected insecticides. *Pest Management Science*, 67(1): 94–99.
- VOJOUDI S, SABER M, HEJAZI M J, TALAEI-HASSAN-LOUI R, 2011. Toxicity of chlorpyrifos, spinosad and abamectin on cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* and their sublethal effects on fecundity and longevity. *Bulletin of Insectology*, 64(2): 189–193.
- WU G, MIYATA T, 2005. Susceptibilities to methamidophos and enzymatic characteristics in 18 species of pest insects and their natural enemies in crucifer vegetable crops. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 82(1): 79–93.
- YU S J, NGUYEN S N, 1992. Detection and biochemical characterization of insecticide resistance in the diamondback moth. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 44(1): 74–81.
- ZHU-SALZMAN K, ZENG R S, 2015. Insect response to plant defensive protease inhibitors. *Annual Review of Entomology*, 60(1): 233–252.

(责任编辑:郑姗姗)