



镉和氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟生长发育和解毒酶活性的影响

徐凡舒, 郭 欣, 柴钰淇, 叶丽文, 程丹芽, 魏洪义*, 陈丽慧*

(江西农业大学农学院, 昆虫研究所, 南昌 330045)

摘要:【目的】明确亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 对镉和氯虫苯甲酰胺的防御机制, 评价重金属和农药污染对昆虫的累积效应。【方法】将亚洲玉米螟初孵幼虫接入含 5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺以及 5 mg/kg 镉 + 0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料中饲养, 以正常饲料饲养作为对照。记录发育历期、体重、成虫羽化率和畸形蛹率, 测定不同发育阶段(3 龄幼虫、雌雄蛹和雌雄成虫)中解毒酶[谷胱甘肽-S-转移酶 (glutathione-S-transferase, GST)、羧酸酯酶 (carboxylesterase, CarE) 和乙酰胆碱酯酶 (acetylcholinesterase, AChE)] 活性。【结果】5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺及其复合处理(5 mg/kg 镉 + 0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺)对亚洲玉米螟的生长发育均产生影响, 氯虫苯甲酰胺处理组亚洲玉米螟幼虫历期最长, 较对照组显著延长 7.1 d; 其蛹重、成虫重和成虫羽化率最低, 较对照组分别显著降低 9.1 mg, 2.4 mg 和 25.5%。镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组亚洲玉米螟幼虫历期比氯虫苯甲酰胺处理组缩短 4.9 d, 其畸形蛹率最高, 较对照组显著上升 19.4%; 成虫历期最短, 较对照组显著降低 1.6 d。镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟的解毒酶活性也有影响, 与对照相比, 镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟 3 龄幼虫、雌雄蛹和雄成虫中 GST 活性均表现为诱导作用, 且镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组不同发育阶段亚洲玉米螟的 GST 活性均显著高于其他处理组和对照组。与对照相比, 镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺对不同发育阶段亚洲玉米螟的 CarE 活性表现为抑制作用, 且镉 + 氯虫苯甲酰胺处理对各发育阶段亚洲玉米螟 CarE 活性的抑制作用最强。与对照相比, 镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟 3 龄幼虫 AChE 活性表现为诱导作用, 而对蛹和成虫中 AChE 活性的作用不一。【结论】5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺及其复合处理均能够影响亚洲玉米螟的生长发育, 对其解毒酶活性有不同程度的影响。

关键词: 亚洲玉米螟; 镉; 氯虫苯甲酰胺; 生长发育; 解毒酶

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2023)08-1086-09

Effects of cadmium and chlorantraniliprole on the growth and development and detoxification enzyme activities of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Pyralidae)

XU Fan-Shu, GUO Xin, CHAI Zheng-Hao, YE Li-Wen, CHENG Dan-Ya, WEI Hong-Yi*, CHEN Li-Hui* (Institute of Entomology, College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: 【Aim】 To clarify the defense mechanism of *Ostrinia furnacalis* against cadmium and chlorantraniliprole, and to evaluate the cumulative effects of heavy metals and pesticide pollution on insects. 【Methods】 The newly hatched larvae of *O. furnacalis* were fed with the artificial diet containing

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760637); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200439)

作者简介: 徐凡舒, 男, 1998 年 12 月生, 陕西汉中, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: 873698451@qq.com

* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: hywei@jxau.edu.cn; clhui@jxau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-09-10; 接受日期 Accepted: 2022-11-10

5 mg/kg cadmium, 0.003 mg/kg chlorantraniliprole and 5 mg/kg cadmium + 0.003 mg/kg chlorantraniliprole, respectively, and those fed with the normal artificial diet were used as the control. The developmental duration, body weight, adult emergence rate and abnormal pupal rate were recorded, and the activities of detoxification enzymes including glutathione-S-transferase (GST), carboxylesterase (CarE) and acetylcholinesterase (AChE) in *O. furnacalis* at different developmental stages (3rd instar larva, female and male pupae, and female and male adults) were detected. 【Results】Cadmium (5 mg/kg), chlorantraniliprole (0.003 mg/kg), and their combined treatment (5 mg/kg cadmium + 0.003 mg/kg chlorantraniliprole) had effects on the growth and development of *O. furnacalis*. In chlorantraniliprole treatment group, the larval duration of *O. furnacalis* was the longest, significantly prolonged by 7.1 d as compared to that in the control group, and the pupal weight, adult weight and adult emergence rate of *O. furnacalis* were the lowest, significantly decreased by 9.1 mg, 2.4 mg and 25.5% as compared with those in the control group. In cadmium + chlorantraniliprole treatment group, the larval duration of *O. furnacalis* was 4.9 d shorter than that in chlorantraniliprole treatment group, and the abnormal pupal rate was the highest, significantly increased by 19.4% as compared to that in the control group. The adult duration of *O. furnacalis* in cadmium + chlorantraniliprole treatment group was the shortest, significantly reduced by 1.6 d as compared to that in the control group. Cadmium, chlorantraniliprole and cadmium + chlorantraniliprole had effects on the detoxification enzyme activities in *O. furnacalis*. Compared with the control, cadmium, chlorantraniliprole and cadmium + chlorantraniliprole showed inducing effects on the GST activities in the 3rd instar larvae, female and male pupae and male adults of *O. furnacalis*, and the GST activities in different developmental stages of *O. furnacalis* in cadmium + chlorantraniliprole treatment group were significantly higher than those in the other treatment groups and the control group. Compared with the control, cadmium, chlorantraniliprole and cadmium + chlorantraniliprole showed inhibitory effects on the CarE activities in different developmental stages of *O. furnacalis*, and the cadmium + chlorantraniliprole treatment had the strongest inhibitory effect on the CarE activities in various developmental stages of *O. furnacalis*. Compared with the control, cadmium, chlorantraniliprole and cadmium + chlorantraniliprole showed inducing effects on the AChE activity in the 3rd instar larvae of *O. furnacalis*, but had different effects on the AChE activities in the pupae and adults. 【Conclusion】Cadmium (5 mg/kg), chlorantraniliprole (0.003 mg/kg) and their combined treatment can all affect the growth and development of *O. furnacalis*, and have different effects on its detoxification enzyme activities.

Key words: *Ostrinia furnacalis*; cadmium; chlorantraniliprole; growth and development; detoxification enzymes

亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 是我国玉米生产的历史性、灾害性害虫,严重威胁我国玉米产量和品质(李妍颖等, 2022)。对于亚洲玉米螟的暴发,应及时施用杀虫剂进行化学防治(王振营和王晓鸣, 2019)。但由于农事操作不规范等问题,过量的杀虫剂被投入使用,残留杀虫剂通过多种方式进入土壤,直接或间接地对不同生物产生毒性效应(Morillo and Villaverde, 2017)。同时工业化、城市化的推进及对可持续发展的不重视,导致部分地区重金属、农药污染问题愈发严重(王颜昊等, 2019)。农药产品中也常检测出重金属或类金属,已有报道在多种草

甘磷制剂中检测出砷(As)、铅(Pb)、镍(Ni)等重金属(Defarge *et al.*, 2018)。

镉(Cadmium, Cd)是常见、分布广的重金属,通过表皮渗透、取食、呼吸等方式进入昆虫体内,影响昆虫生长发育及各种活动(孙虹霞等, 2007)。一般情况下,镉会导致动物的能量储存减少并加快新陈代谢速率(付伟利等, 2015),这种能量代谢异常又可影响昆虫的正常生长发育(Moolman *et al.*, 2007)。氯虫苯甲酰胺(chlorantraniliprole)是双酰胺类新型杀虫剂,通过激活昆虫鱼尼丁受体,使细胞内的 Ca^{2+} 过度释放,导致昆虫死亡(Hannig *et al.*,

2009),具有对害虫高效且对鱼、蜂及哺乳动物低毒等特性(Li *et al.*, 2011),对亚洲玉米螟也具有好的室内及田间防治效果(王猛等, 2014)。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*、沟金针虫 *Pleonomus canaliculatus* 等对该杀虫剂已产生中等至高水平抗性(Lai *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013; 何发林等, 2022)。

重金属与杀虫剂对昆虫产生的效应与施用毒剂的种类、浓度、受药昆虫的种类等有关。当昆虫取食带毒饲料时,能够诱导昆虫体内谷胱甘肽-S-转移酶(glutathione S-transferase, GST)、羧酸酯酶(carboxylesterase, CarE)、乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)等酶的活性,这对昆虫应对化学农药及重金属,维持正常生理代谢具有重要作用(Dvir *et al.*, 2010; Bao *et al.*, 2016)。GST可增加虫体对有毒物质的可溶性将其排出体外,从而达到解毒代谢的作用,在受到外界有毒物质刺激时,体内的 GST 活性会发生变化(蒋兴川等, 2019),例如镉处理后中华稻蝗 *Oxya chinensis* 体内 GST 活性显著上升(刘耀明等, 2013)。CarE 不仅能够调节昆虫的生长发育过程,还在代谢化学药剂中起着重要作用(全林发等, 2016),害虫可以通过大量产生 CarE 使其与杀虫剂结合,使杀虫剂在到达靶标位点之前被阻断或降解(唐培安等, 2007)。小菜蛾 3 龄幼虫经溴氰虫酰胺处理后 12、24 和 48 h 内对 CarE 表现为先诱导后抑制,即短时间内药剂摄入量较少,解毒酶被激活参与药剂代谢,随着取食量增加,酶活性将逐渐被抑制(Liu *et al.*, 2014)。AChE 能够迅速水解兴奋神经递质乙酰胆碱(acetylcholine, ACh)而保持神经突触传递的正常功能。杀虫剂通过与 AChE 不可逆结合降低其水解能力,造成突触间隙的 ACh 大量累积,使昆虫的正常神经系统严重紊乱,从而达到杀虫的目的(孟祥坤等, 2019)。低剂量氯虫苯甲酰胺处理可导致小菜蛾体内 AChE 活性显著降低(尹飞等, 2014);低浓度人参皂苷对桃蚜 *Myzus persicae* 的 AChE 有明显抑制作用(李海涛等, 2019),而乙基多杀菌素处理棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 导致 AChE 活性随剂量增加逐渐升高(谢丙堂等, 2015)。

重金属-农药作为经常共存,广泛存在的环境污染物(Machado *et al.*, 2017; Polidoro *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2019),两者之间的相互作用将产生复合效应(陈晨和钱永忠, 2015)。如果只关注单一毒性

效应而忽视联合毒性效应,将导致复合污染物的危害风险和潜在威胁被低估,只考虑急性暴露下污染物对昆虫的致死效应,将忽略污染物在较低浓度时,使昆虫抗逆性增强,引起适应性进化(Kafel *et al.*, 2012a, 2012b),最终导致害虫的猖獗发生(齐浩亮等, 2017)。当前,农药与重金属互作已有一定程度的研究,证明部分农药与重金属之间存在拮抗作用(杨永猛等, 2021)。如 Cd^{2+} 与毒死蜱、阿维菌素复合处理和单一处理相比会降低其对赤子爱胜蚓 *Eisenia foetida* 的毒性,表明三者之间存在拮抗作用(Li *et al.*, 2020);铅(Pb)可与草甘膦络合形成稳定的化合物,从而降低游离的 Pb^{2+} 对蚯蚓的毒性(Zhou *et al.*, 2017)。但迄今为止,尚未发现重金属和氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟复合处理的报道,因此,研究重金属镉与农药氯虫苯甲酰胺复合污染的毒理学效应具有重要意义。

本研究以亚洲玉米螟为实验对象,通过向人工饲料添加镉、氯虫苯甲酰胺,设置镉、氯虫苯甲酰胺、镉+氯虫苯甲酰胺和空白对照(不添加任何杀虫剂或重金属)4 个处理。测定各处理对亚洲玉米螟发育历期、体重、羽化率、畸形蛹率及 GST, CarE 和 AChE 活性的影响,探究其解毒机理,旨在为评价重金属、农药污染对亚洲玉米螟长期、累积效应提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试虫源及饲养条件:亚洲玉米螟卵块由中国农业科学院植物保护研究所玉米害虫研究组提供,经室内人工饲料饲养建立实验种群。幼虫放置于圆形玻璃罐(直径 15 cm、高 7 cm)中用人工饲料饲养(乔利等, 2008),每罐饲养 200 头,待长至老熟后挑至铺有草纸的长方形塑料盒中化蛹,化蛹后放置于另一长方形塑料盒中待其羽化,羽化后套入长×宽×高=30 cm×10 cm×10 cm 的塑料盒中使其交配产卵。3 d 后剪下卵块放置于玻璃罐中孵化,幼虫孵化后立即放入人工饲料。饲养条件:温度 $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 60%~70%,光周期 16L:8D。选其中一代卵放至培养皿中,将每日孵化幼虫作为试虫并标记。

1.1.2 供试药剂:氯化镉(CdCl_2),购自天津科密欧化学试剂,纯度为 99.99%,溶于蒸馏水中制成母液;氯虫苯甲酰胺,购自上海安谱实验科技股份有限公司,为分析纯标准品,溶于丙酮制成氯虫苯甲酰胺

母液,均置于冰箱中备用。

1.1.3 饲料配制:参照乔利等(2008)的人工饲料配方,根据课题组前期工作(曹红妹等,2016)及预实验确定亚洲玉米螟人工饲料中镉、氯虫苯甲酰胺、镉+氯虫苯甲酰胺的浓度,在配制饲料时加入相应剂量试剂并迅速混匀,以不添加的正常饲料作为对照,待冷却至室温后,放置于4℃冰箱中待用。

1.2 亚洲玉米螟生长发育指标测定

将同一天孵化的亚洲玉米螟初孵幼虫分别接入含5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺和5 mg/kg 镉+0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料以及正常人工饲料的玻璃罐中,并标记好日期,各处理饲养6~8罐。每天观察记录亚洲玉米螟的发育进度,最终记录以下生长发育参数:幼虫历期、蛹重(化蛹后第1天体重)、蛹历期、成虫重(羽化当天体重)、成虫历期、成虫羽化率和畸形蛹率。

1.3 亚洲玉米螟酶活性测定

1.3.1 酶液制备:随机挑选经镉、氯中苯甲酸胺和镉+氯虫苯甲酰胺及正常人工饲料饲喂后外观一致的3龄幼虫、雄蛹、雌蛹、雄成虫及雌成虫,用液氮速冻后放入-80℃冰箱保存备用。每个处理15个重复(3龄幼虫视3头为1个重复,蛹和成虫视2头为1个重复)。取待试处理于匀浆器内,分别加入0.8 mL不同酶的提取液进行匀浆,用于GST, CarE 和AChE活性测定。匀浆液于4℃ 8 000 g离心15 min后,取上清液即为酶原液,4℃保存待测。

1.3.2 酶活性测定:GST, CarE 和AChE活性的测定采用上海生工生物工程股份有限公司生产的试剂盒进行,编号分别为D799612-0100, D799812-0100和D799814-0100。具体方法参照试剂盒说明书进行。

1.3.3 总蛋白(total protein, TP)含量测定:采用蛋白定量测定试剂盒(A045-2,南京建成生物工程研究所)测定蛋白浓度。具体方法按照试剂盒说明书进行。

1.4 数据分析

数据处理采用SPSS 25.0分析软件对各数据进行单因素方差分析,用Tukey氏检验进行差异显著性分析。

2 结果

2.1 镉、氯虫苯甲酰胺及镉+氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟生长发育的影响

与取食正常饲料的亚洲玉米螟对照(CK)相比,

在亚洲玉米螟初孵幼虫取食含5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺和5 mg/kg 镉+0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料后其生长发育受到一定影响(表1)。镉、氯虫苯甲酰胺和镉+氯虫苯甲酰胺处理组幼虫历期分别较对照组显著延长0.7, 7.1和2.2 d($P<0.05$);镉处理导致蛹历期较对照显著降低0.4 d($P<0.05$),氯虫苯甲酰胺、镉+氯虫苯甲酰胺处理导致蛹历期较对照显著延长0.3和0.2 d($P<0.05$);镉和氯虫苯甲酰胺处理组成虫历期较对照组分别显著延长0.7和0.8 d($P<0.05$),镉+氯虫苯甲酰胺处理却导致成虫历期较对照显著降低1.6 d($P<0.05$);3种处理均导致亚洲玉米螟蛹重较对照显著降低($P<0.05$),表现为CK>镉>镉+氯虫苯甲酰胺>氯虫苯甲酰胺;成虫重也均降低,但镉处理组与对照组间成虫重无显著差异($P>0.05$),氯虫苯甲酰胺、镉+氯虫苯甲酰胺处理组成虫重较对照组显著降低2.4和2.2 mg($P<0.05$);畸形蛹率较对照组上升,除镉处理组与对照组畸形蛹率无显著差异($P>0.05$)外,氯虫苯甲酰胺、镉+氯虫苯甲酰胺处理组畸形蛹率较对照组显著增加13.8%和19.4%($P<0.05$);成虫羽化率有所降低,但镉处理组与对照组间成虫羽化率无显著差异($P>0.05$),氯虫苯甲酰胺、镉+氯虫苯甲酰胺处理组成虫羽化率较对照组显著降低25.5%和15.3%($P<0.05$)。

2.2 镉、氯虫苯甲酰胺及镉+氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟解毒酶活性的影响

2.2.1 GST活性:与取食正常饲料的亚洲玉米螟(对照)相比,亚洲玉米螟初孵幼虫取食含5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺和5 mg/kg 镉+0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料后其GST活性较对照有所上升,基本表现为诱导(表2)。镉处理、氯虫苯甲酰胺处理及镉+氯虫苯甲酰胺处理组3龄幼虫中GST活性较对照组分别显著增加48%, 37%和85%($P<0.05$);雌蛹中GST活性较对照组分别显著增加32%, 44%和74%($P<0.05$);雄蛹中GST活性较对照组分别增加24%, 19%和48%,除氯虫苯甲酰胺处理组外,其余组别雄蛹中GST活性与对照组均具有显著差异($P<0.05$)。氯虫苯甲酰胺处理和镉+氯虫苯甲酰胺处理组雌成虫中GST活性较对照组分别显著增加39%和53%($P<0.05$),镉处理组GST活性虽较对照组增加7%,但不具有显著差异($P>0.05$);镉+氯虫苯甲酰胺处理组雄成虫GST活性较对照组显著增加20%($P<$

表1 亚洲玉米螟初孵幼虫取食含不同毒剂的人工饲料后的生长发育参数
Table 1 Growth and development parameters of *Ostrinia furnacalis* after feeding of the newly hatched larvae on the artificial diets containing different toxins

处理 Treatments	幼虫历期 Larval duration (d)	蛹历期 Pupal duration (d)	成虫历期 Adult duration (d)	蛹重 Pupal weight (mg)	成虫重 Adult weight (mg)	畸形蛹率 Abnormal pupal rate (%)	成虫羽化率 Adult emergence rate (%)
CK	16.5 ± 0.1 d	6.6 ± 0.1 b	8.0 ± 0.3 b	38.0 ± 0.6 a	19.7 ± 0.3 a	9.9 ± 0.9 c	93.7 ± 1.0 a
Cd	17.2 ± 0.1 c	6.2 ± 0.1 c	8.7 ± 0.3 a	31.8 ± 0.5 b	19.0 ± 0.5 a	18.0 ± 2.5 bc	86.7 ± 2.1 ab
Cl	23.6 ± 0.2 a	6.9 ± 0.1 a	8.8 ± 0.2 a	28.9 ± 0.4 c	17.3 ± 0.3 b	23.7 ± 3.8 ab	68.2 ± 3.5 c
Cd + Cl	18.7 ± 0.1 b	6.8 ± 0.1 a	6.4 ± 0.2 c	29.4 ± 0.4 c	17.5 ± 0.3 b	29.3 ± 4.7 a	78.4 ± 1.7 bc

CK: 正常人工饲料 Normal artificial diet; Cd: 含 5 mg/kg 镉的人工饲料 Artificial diet containing 5 mg/kg Cd; Cl: 含 0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料 Artificial diet containing 0.003 mg/kg chlorantraniliprole; Cd + Cl: 含 5 mg/kg 镉 + 0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料 Artificial diet containing 5 mg/kg Cd and 0.003 mg/kg chlorantraniliprole. 表中数据以平均值 ± 标准误差表示; 同一列数据后不同小写字母代表经 Tukey 氏检验差异显著 ($P < 0.05$)。Data in the table are mean ± SE. Different small letters following the data in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$) by Tukey's test. 下表同。The same for the following tables.

表2 初孵幼虫取食含不同毒剂的人工饲料后亚洲玉米螟不同发育阶段的 GST 活性
Table 2 GST activities in different developmental stages of *Ostrinia furnacalis* after feeding of the newly hatched larvae on the artificial diets containing different toxins

处理 Treatments	不同发育阶段的 GST 活性 [mmol/(min·mg)] GST activities in different developmental stages				
	3 龄幼虫 3rd instar larva	雌蛹 Female pupa	雄蛹 Male pupa	雌成虫 Female adult	雄成虫 Male adult
CK	0.123 ± 0.002 c	0.087 ± 0.002 c	0.210 ± 0.006 c	0.193 ± 0.007 b	0.251 ± 0.008 b
Cd	0.182 ± 0.005 b	0.115 ± 0.002 b	0.261 ± 0.008 b	0.207 ± 0.006 b	0.248 ± 0.004 b
Cl	0.168 ± 0.005 b	0.125 ± 0.011 b	0.249 ± 0.012 bc	0.269 ± 0.014 a	0.251 ± 0.011 b
Cd + Cl	0.228 ± 0.008 a	0.151 ± 0.008 a	0.310 ± 0.014 a	0.296 ± 0.016 a	0.301 ± 0.014 a

0.05), 但镉处理、氯虫苯甲酰胺处理组 GST 活性较对照组无显著差异 ($P > 0.05$)。其中, 镉 + 氯虫苯甲酰胺对不同发育阶段亚洲玉米螟的 GST 活性诱导作用最强, 分别较对照组显著提高 85%, 74%, 48%, 53% 和 20% ($P < 0.05$)。

2.2.2 CarE 活性: 与取食正常饲料的亚洲玉米螟 (对照) 相比, 在亚洲玉米螟初孵幼虫取食含 5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺和 5 mg/kg 镉 + 0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料后其 CarE 活性均受到抑制 (表 3)。氯虫苯甲酰胺处理组和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组 3 龄幼虫 CarE 活性较对照组分别显著降低 51% 和 62% ($P < 0.05$), 镉处理组 CarE 活性较对照组降低 12% 但不具显著差异 ($P > 0.05$); 镉和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组雌蛹 CarE 活性较对照组分别显著降低 15% 和 34% ($P < 0.05$), 氯虫苯甲酰胺处理组雌蛹 CarE 活性较对照组仅降低 3%, 二者无显著差异 ($P > 0.05$); 镉、氯虫苯甲酰胺、镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组雄蛹 CarE 活性分别较对照组显著降低 10%, 7% 和 53% ($P < 0.05$); 镉、氯虫苯甲酰胺和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理

组雌成虫 CarE 活性较对照组分别降低 1%, 5% 和 25%, 但只有镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组 CarE 活性与对照组具有显著差异 ($P < 0.05$); 镉、氯虫苯甲酰胺和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组雄成虫 CarE 活性较对照组分别降低 11%, 18% 和 29%, 其中氯虫苯甲酰胺和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组 CarE 活性与对照组间具有显著差异 ($P < 0.05$)。镉 + 氯虫苯甲酰胺处理对不同发育阶段亚洲玉米螟的 CarE 活性的抑制作用最强, 镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组 3 龄幼虫、雌蛹、雄蛹、雌成虫和雄成虫 CarE 活性分别较对照组显著降低 62%, 34%, 53%, 25% 和 29% ($P < 0.05$), 低于单一镉、氯虫苯甲酰胺处理组各发育阶段亚洲玉米螟的 CarE 活性。

2.2.3 AChE 活性: 与取食正常饲料的亚洲玉米螟 (对照) 相比, 在亚洲玉米螟初孵幼虫取食含 5 mg/kg 镉、0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺和 5 mg/kg 镉 + 0.003 mg/kg 氯虫苯甲酰胺的人工饲料后, 亚洲玉米螟体内 AChE 活性变化复杂 (表 4)。其中氯虫苯甲酰胺处理组 3 龄幼虫体内 AChE 活性最高, 较对照组显著增加 186% ($P < 0.05$), 镉处理组 3 龄幼虫

表 3 初孵幼虫取食含不同毒剂的人工饲料后亚洲玉米螟不同发育阶段的 CarE 活性
Table 3 CarE activities in different developmental stages of *Ostrinia furnacalis* after feeding of the newly hatched larvae on the artificial diets containing different toxins

处理 Treatments	不同发育阶段的 CarE 活性[mmol/(min·mg)] CarE activities in different developmental stages				
	3 龄幼虫 3rd instar larva	雌蛹 Female pupa	雄蛹 Male pupa	雌成虫 Female adult	雄成虫 Male adult
CK	4.097 ±0.694 a	5.505 ±0.355 a	7.147 ±0.108 a	6.939 ±0.168 a	4.576 ±0.174 a
Cd	3.597 ±0.139 a	4.653 ±0.259 b	6.446 ±0.094 b	6.877 ±0.082 a	4.054 ±0.338 ab
Cl	2.021 ±0.183 b	5.345 ±0.188 ab	6.615 ±0.157 b	6.555 ±0.177 a	3.756 ±0.284 bc
Cd + Cl	1.539 ±0.293 b	3.628 ±0.153 c	3.374 ±0.346 c	5.210 ±0.028 b	3.257 ±0.163 c

表 4 初孵幼虫取食含不同毒剂的人工饲料后亚洲玉米螟不同发育阶段的 AChE 活性
Table 4 AChE activities in different developmental stages of *Ostrinia furnacalis* after feeding of the newly hatched larvae on the artificial diets containing different toxins

处理 Treatments	不同发育阶段的 AChE 活性[mmol/(min·mg)] AChE activities in different developmental stages				
	3 龄幼虫 3rd instar larva	雌蛹 Female pupa	雄蛹 Male pupa	雌成虫 Female adult	雄成虫 Male adult
CK	21.199 ±1.006 c	366.520 ±25.734 b	139.186 ±9.463 bc	47.766 ±11.633 a	64.465 ±1.724 a
Cd	47.453 ±3.305 b	372.102 ±34.056 b	116.702 ±2.304 c	48.766 ±4.483 a	67.668 ±8.594 a
Cl	60.618 ±2.978 a	254.322 ±14.464 c	165.608 ±10.075 ab	37.608 ±3.842 a	51.284 ±3.850 b
Cd + Cl	26.008 ±2.080 c	528.489 ±35.411 a	194.357 ±16.357 a	53.216 ±1.561 a	46.120 ±1.602 b

AChE 活性较对照组显著增加 124% ($P < 0.05$), 镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组 3 龄幼虫 AChE 活性较对照组增加 23% 但差异不显著 ($P > 0.05$)。而镉、氯虫苯甲酰胺和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组其他发育阶段(雌蛹、雄蛹、雌成虫、雄成虫)亚洲玉米螟体内 AChE 活性较对照组变化有增有减。氯虫苯甲酰胺处理组雌蛹体内 AChE 活性较对照组显著降低 31%, 而镉处理组和镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组较对照上升 2% ($P > 0.05$) 和 44% ($P < 0.05$)。镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组雄蛹 AChE 活性最高, 较对照组显著增加 40% ($P < 0.05$)。镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组雌成虫体内 AChE 活性也最高, 较对照组增加 11%, 但二者无显著性差异 ($P > 0.05$)。镉处理组雄成虫体内 AChE 活性最高, 较对照组增加 5%, 二者间亦无显著性差异 ($P > 0.05$), 但镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组雄成虫体内 AChE 活性最低, 较对照组显著降低 28% ($P < 0.05$)。

3 讨论

研究重金属、农药的联合毒性效应对于合理使用杀虫剂等方面具有重要意义。本研究结果表明, 镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米

螟的生长发育造成负面影响, 这可能与其体内不同酶系活性的改变有关。镉、氯虫苯甲酰胺及其复合处理均导致亚洲玉米螟幼虫历期延长(表 1), 这与已有报道 Hg, As 和 Hg-As 处理均显著延长二化螟 *Chilo suppressalis* 的幼虫历期(张宇瑶等, 2017); 桃小食心虫 *Carposina sasakii*(刘宴弟等, 2021)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*(欧善生等, 2012) 经低浓度氯虫苯甲酰胺处理后幼虫历期延长等结果一致。但本研究发现, 镉 + 氯虫苯甲酰胺处理的幼虫历期较氯虫苯甲酰胺单一处理的幼虫历期显著缩短, 表现为 CK < 镉 < 镉 + 氯虫苯甲酰胺 < 氯虫苯甲酰胺, 可以看出镉的加入使氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟幼虫生长的影响减弱(表 1), 可能是镉的加入抑制亚洲玉米螟幼虫对氯虫苯甲酰胺的吸收, 产生拮抗作用。但镉 + 氯虫苯甲酰胺处理的亚洲玉米螟成虫历期显著低于对照, 且显著低于镉、氯虫苯甲酰胺单一处理(表 1)。说明镉的加入并未缓和氯虫苯甲酰胺的毒害作用, 反而对亚洲玉米螟成虫造成危害。幼虫历期的显著延长可能是因为亚洲玉米螟在抵御毒物过程中产生适合度代价, 摄入的能量一部分被用于毒物的解毒代谢, 而剩下的部分才被用于自身生长发育, 从而对昆虫的生理功能造成影响, 这一反应也可能导致昆虫的体重降低(Moolman *et al.*, 2007), 这

与本研究得出的镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺处理组亚洲玉米螟蛹重、成虫重数值均小于对照组(表 1)相符。综上所述,用含镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺的人工饲料饲养亚洲玉米螟的对其生长发育造成抑制作用。

昆虫适应外界不良环境的重要生理生化机制之一是昆虫的解毒酶系的活性会被各种内源、外源毒物诱导。本研究通过测定昆虫体内酶活性的变化,发现亚洲玉米螟经镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺处理后,除镉处理组的成虫、氯虫苯甲酰胺处理组的雄成虫中外,其余处理组其他发育阶段亚洲玉米螟的 GST 活性均显著高于对照组(表 2)。这与伊米果蝇 *Drosophila immigrans* 经低浓度的乙基多杀菌素处理后, GST 活性显著高于其他处理(刘倩等, 2018),氯虫苯甲酰胺处理后甜菜夜蛾体内 GST 活性显著增加(陈羿渠等, 2017)等结果相符; CarE 不仅可以调节昆虫的生长发育,还在代谢化合药剂中发挥着重要作用(全林发等, 2016)。有报道低浓度的氯虫苯甲酰胺对旋幽夜蛾 *Discestra trifolii* 幼虫 CarE 活性表现出抑制趋势(张航等, 2020),本研究也表明氯虫苯甲酰胺对亚洲玉米螟 CarE 活性表现为抑制(表 3)。并且由于 CarE 底物广泛,可以水解多种含酯键的外源毒物,也可作为结合蛋白与外源毒物不可逆结合,使其不能达到靶标,从而起到对外源毒物的隔离作用(Hemingway, 2000)。在靶标抗性中, AChE 的敏感性降低是抗性产生的主要原因之一(魏秋学等, 2004)。本研究发现,亚洲玉米螟 3 龄幼虫经镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺处理后 AChE 活性均上升,除镉 + 氯虫苯甲酰胺处理与对照无显著差异外,镉、氯虫苯甲酰胺单独处理均较对照显著增加(表 4)。刘丹等(2012)研究表明,黄褐天幕毛虫 *Malacosoma neustria testacea* 幼虫经多杀菌素处理 3, 6 和 12 h, AChE 活性均显著高于对照,这与本实验结果(表 4)基本一致。GST, CarE 和 AChE 这 3 种酶均不同程度参与对亚洲玉米螟的解毒代谢过程,低浓度镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺处理会影响昆虫的生理代谢,主要表现为对不同解毒酶的诱导作用不同,具体机制仍需要进一步开展研究。

本研究通过采用带毒饲料饲喂亚洲玉米螟初孵幼虫,明确了镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺影响亚洲玉米螟的生长发育及解毒酶活性。单一氯虫苯甲酰胺处理会显著增长亚洲玉米螟的幼虫历期与成虫历期,加入镉后反而显著缩短亚洲玉米螟幼

虫历期与成虫历期。3 种处理后,亚洲玉米螟不同发育阶段 GST 活性基本升高、CarE 活性基本降低、AChE 活性变化复杂,究其原因可能是由于受药昆虫的生理状况、使用的毒剂类型、浓度及处理方法引起的。亚洲玉米螟经镉、氯虫苯甲酰胺及镉 + 氯虫苯甲酰胺处理引起的解毒酶活性改变的分子机制有待进一步探明。在害虫的防治过程中,需要针对具体的害虫和药剂品种结合当地重金属污染情况考虑,选择更为合适的治理策略。在实际生产中,对于已经存在镉污染的地区,更应注意农事操作、同时配合其他防治措施。

参考文献 (References)

- Bao HB, Gao HL, Zhang YX, Fan DZ, Fang JC, Liu ZW, 2016. The roles of *CYP6AY1* and *CYP6ER1* in imidacloprid resistance in the brown planthopper: Expression levels and detoxification efficiency. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 129: 70–74.
- Cao HM, Wei HY, 2016. Effect of the heavy metals Cd^{2+} and Ni^{2+} on the calling behavior of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Chin. J. Appl. Entomol.*, 53(4): 793–801. [曹红妹, 魏洪义, 2016. Cd^{2+} 和 Ni^{2+} 对亚洲玉米螟求偶行为的影响. *应用昆虫学报*, 53(4): 793–801]
- Chen C, Qian YZ, 2015. Research progress on risk assessment of combined effects of mixed pollution of pesticide residues. *Qual. Saf. Agro. Prod.*, (5): 49–53. [陈晨, 钱永忠, 2015. 农药残留混合污染联合效应风险评估研究进展. *农产品质量与安全*, (5): 49–53]
- Chen YQ, Xiang X, Gong CW, Wang XG, 2017. Effects of sublethal doses of chlorantraniliprole on the detoxification enzymes activities and the growth and reproduction of *Spodoptera exigua*. *Sci. Agric. Sin.*, 50(8): 1440–1451. [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]
- Defarge N, Spiroux de Vendômois J, Séralini GE, 2018. Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicol. Rep.*, 5: 156–163.
- Dvir H, Silman I, Harel M, Rosenberry TL, Sussman JL, 2010. Acetylcholinesterase: From 3D structure to function. *Chem. Biol. Interact.*, 187(1–3): 10–22.
- Fu WL, Du YZ, Zhang M, 2015. Toxicity effect of cadmium stress exposure to insects and defense mechanism of insects. *Chin. J. Pharmacol. Toxicol.*, 29(6): 1001–1006. [付伟利, 杜移珍, 张敏, 2015. 镉胁迫对昆虫的毒性效应及昆虫防御机制的研究进展. *中国药理学与毒理学杂志*, 29(6): 1001–1006]
- Hannig GT, Ziegler M, Marçon PG, 2009. Feeding cessation effects of chlorantraniliprole, a new anthranilic diamide insecticide, in comparison with several insecticides in distinct chemical classes and mode-of-action groups. *Pest Manag. Sci.*, 65(9): 969–974.
- He FL, Sun SA, Tan HL, Sun X, Shang DL, Yao CT, Jiang XY,

2022. Screening for optimum proportion and field effect of mixtures of chlorantraniliprole and lambda-cyhalothrin against canalculated wireworm *Pleonomus canaliculatus*. *J. Plant Prot.*, 49(4): 1233 – 1240. [何发林, 孙石昂, 谭海丽, 孙晓, 尚佃龙, 姚晨涛, 姜兴印, 2022. 氯虫苯甲酰胺与高效氯氟氰菊酯复配防治沟金针虫配方筛选与田间应用效果. 植物保护学报, 49(4): 1233 – 1240]
- Hemingway J, 2000. The molecular basis of two contrasting metabolic mechanisms of insecticide resistance. *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 30(11): 1009 – 1015.
- Jiang XC, Shen YD, Sun JC, Li XX, Huang Y, Dong YC, Cao HQ, 2019. Effect of chlorantraniliprole and emamectin benzoate on toxicity and detoxification enzymes activity in *Spodoptera frugiperda* larva. *J. Environ. Entomol.*, 41(5): 961 – 967. [蒋兴川, 沈怿丹, 孙劲超, 李秀霞, 黄勇, 董永成, 操海群, 2019. 氯虫苯甲酰胺和甲维盐对草地贪夜蛾幼虫的毒力及解毒酶活性的影响. 环境昆虫学报, 41(5): 961 – 967]
- Kafel A, Nowak A, Bembenek J, Szczygieł J, Nakonieczny M, Świergosz-Kowalewska R, 2012a. The localisation of HSP70 and oxidative stress indices in heads of *Spodoptera exigua* larvae in a cadmium-exposed population. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 78: 22 – 27.
- Kafel A, Zawisza-Raszka A, Szulińska E, 2012b. Effects of multigenerational cadmium exposure of insects (*Spodoptera exigua* larvae) on anti-oxidant response in haemolymph and developmental parameters. *Environ. Pollut.*, 162: 8 – 14.
- Lai TC, Li J, Su JY, 2011. Monitoring of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to chlorantraniliprole in China. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 101(3): 198 – 205.
- Li HT, Huang XM, Li Y, Liu GN, Xi GS, 2019. Influence of ginsenoside on the feeding, detoxifying enzyme and acetyl cholinesterase activity of *Myzus persicae*. *J. Agric. Sci. Technol.*, 21(11): 103 – 110. [李海涛, 黄曦漫, 李玉, 刘广娜, 奚广生, 2019. 人参单体皂苷对桃蚜取食、解毒酶及乙酰胆碱酯酶活性的影响. 中国农业科技导报, 21(11): 103 – 110]
- Li XZ, Wang ME, Jiang R, Zheng LP, Chen WP, 2020. Evaluation of joint toxicity of heavy metals and herbicide mixtures in soils to earthworms (*Eisenia fetida*). *J. Environ. Sci.*, 94: 137 – 146.
- Li YX, Mao MZ, Li YM, Xiong LX, Li ZM, Xu JY, 2011. Modulations of high-voltage activated Ca^{2+} channels in the central neurones of *Spodoptera exigua* by chlorantraniliprole. *Physiol. Entomol.*, 36(3): 230 – 234.
- Li YY, Li MM, Yang Q, Chen LH, Li BL, Fang AS, He KH, Dong JG, Zhao YW, Yu ZH, Hao YC, Wu JX, 2022. Effects of *Ostrinia furnacalis* (Guenée) on maize yield and treatment threshold. *Plant Prot.*, 48(1): 82 – 89. [李妍颖, 李梅梅, 杨琪, 陈丽慧, 李伯辽, 房爱省, 何柯杭, 董继广, 赵玉婉, 于志浩, 郝引川, 仵均祥, 2022. 亚洲玉米螟为害对玉米产量的影响与防治指标研究. 植物保护, 48(1): 82 – 89]
- Liu D, Yan SC, Cao CW, Liao YZ, 2012. Effect of spinosad on the detoxifying and protective enzymes of *Malacosoma neustria* Testacea. *Sci. Silv. Sin.*, 48(4): 67 – 74. [刘丹, 严善春, 曹传旺, 廖月枝, 2012. 多杀菌素对黄褐天幕毛虫解毒酶及保护酶的影响. 林业科学, 48(4): 67 – 74]
- Liu Q, Gao HH, Zhai YF, Chen H, Zheng L, Yu Y, 2018. Toxicities of six pesticides and their effects on detoxification enzymes in the adults of two *Drosophila* species in the laboratory. *J. Plant Prot.*, 45(6): 1342 – 1348. [刘倩, 高欢欢, 翟一凡, 陈浩, 郑礼, 于毅, 2018. 六种农药对两种果蝇成虫室内毒力和主要解毒酶活性的影响. 植物保护学报, 45(6): 1342 – 1348]
- Liu X, Wang HY, Xia XM, Qiao K, Wang KY, 2014. Effects of cyantraniliprole on biological characteristics and the related enzyme activities in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Acta Entomol. Sin.*, 57(7): 815 – 823.
- Liu YD, Sun LN, Zhang HJ, Yan WT, Yue Q, Qiu GS, 2021. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the growth and development of *Carposina sasakii*. *Plant Prot.*, 47(5): 158 – 163. [刘宴弟, 孙丽娜, 张怀江, 闫文涛, 岳强, 仇贵生, 2021. 氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫生长发育的亚致死效应. 植物保护, 47(5): 158 – 163]
- Liu YM, Yang HM, Zhang YP, Wu HH, Zhang JZ, Ma EB, Guo YP, 2013. Acute effects of Cd^{2+} and Cr^{6+} on detoxification enzymes and polyphenol oxidase in *Oxya chinensis*. *J. Agro-Environ. Sci.*, 32(7): 1321 – 1327. [刘耀明, 杨慧敏, 张育平, 吴海花, 张建珍, 马恩波, 郭亚平, 2013. 镉和铬急性染毒对中华稻蝗解毒酶及多酚氧化酶的影响. 农业环境科学学报, 32(7): 1321 – 1327]
- Machado CS, Fregonesi BM, Alves RIS, Tonani KAA, Sierra J, Martinis BS, Celere BS, Mari M, Schuhmacher M, Nadal M, Domingo JL, Segura-Muñoz S, 2017. Health risks of environmental exposure to metals and herbicides in the Pardo River, Brazil. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24(25): 20160 – 20172.
- Meng XK, Miao LJ, Dong F, Wang JJ, 2019. Advances in the research on invertebrate acetylcholinesterase. *J. Environ. Entomol.*, 41(3): 508 – 519. [孟祥坤, 缪丽君, 董帆, 王建军, 2019. 无脊椎动物乙酰胆碱酯酶研究进展. 环境昆虫学报, 41(3): 508 – 519]
- Moolman L, Van Vuren JHJ, Wepener V, 2007. Comparative studies on the uptake and effects of cadmium and zinc on the cellular energy allocation of two freshwater gastropods. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 68(3): 443 – 450.
- Morillo E, Villaverde J, 2017. Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils. *Sci. Total Environ.*, 586: 576 – 597.
- Ou SS, Liang P, Song DL, Shi XY, Gao XW, 2012. Effects of sublethal dosage of chlorantraniliprole on development and detoxifying enzymes activity of *Helicoverpa armigera*. *Plant Prot.*, 38(4): 1 – 8. [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]
- Polidoro BA, Comerros-Raynal MT, Cahill T, Clement C, 2017. Land-based sources of marine pollution: Pesticides, PAHs and phthalates in coastal stream water, and heavy metals in coastal stream sediments in American Samoa. *Mar. Pollut. Bull.*, 116(1 – 2): 501 – 507.

- Qi HL, Cui L, Wang QQ, Liu F, Rui CH, 2017. Toxicity of broflanilide to *Plutella xylostella* and its influence on the activities of related enzymes in *P. xylostella*. *Plant Prot.*, 43(1): 112–116, 130. [齐浩亮, 崔丽, 王芹芹, 刘峰, 芮昌辉, 2017. 溴虫氟苯双酰胺对小菜蛾的毒力及相关酶活性的影响. 植物保护, 43(1): 112–116, 130]
- Qiao L, Zheng JW, Cheng WN, Li YP, 2008. Impact of 4 different artificial fodders on life span of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenee). *J. Northwest A & F Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 36(5): 109–112. [乔利, 郑坚武, 成卫宁, 李怡萍, 2008. 不同饲料配方对亚洲玉米螟生长发育和繁殖的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 36(5): 109–112]
- Quan LF, Zhang HJ, Sun LN, Li YY, Yan WT, Yue Q, Qiu GS, 2016. Research advances in sublethal effect of pesticide. *J. Agric.*, 6(5): 33–38. [全林发, 张怀江, 孙丽娜, 李艳艳, 闫文涛, 岳强, 仇贵生, 2016. 杀虫剂对害虫的亚致死效应研究进展. 农学学报, 6(5): 33–38]
- Sun HX, Liu Y, Zhang GR, 2007. Effects of heavy metal pollution on insects. *Acta Entomol. Sin.*, 50(2): 178–185. [孙虹霞, 刘颖, 张古忍, 2007. 重金属污染对昆虫生长发育的影响. 昆虫学报, 50(2): 178–185]
- Tang PA, Deng YX, Wang JJ, 2007. Effects of ethyl formate on acetylcholinesterase and carboxylesterase in *Sitophilus oryzae*. *Plant Prot.*, 33(1): 44–47. [唐培安, 邓永学, 王进军, 2007. 甲酸乙酯对米象乙酰胆碱酯酶和羧酸酯酶的影响. 植物保护, 33(1): 44–47]
- Wang M, Wang K, Liu F, Mu W, 2014. Comparison of the bioactivity of cyantraniliprole and chlorantraniliprole against three important lepidopterous pests. *J. Plant Prot.*, 41(3): 360–366. [王猛, 王凯, 刘峰, 慕卫, 2014. 溴虱虫酰胺和氯虫苯甲酰胺对三种鳞翅目害虫的毒力作用比较. 植物保护学报, 41(3): 360–366]
- Wang XL, Khakame SK, Ye C, Yang YH, Wu YD, 2013. Characterisation of field-evolved resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from China. *Pest Manag. Sci.*, 69(5): 661–665.
- Wang YH, Liu ZH, Liu XW, Song XY, Cui DJ, 2019. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in the Topsoil of the Yellow River Delta. *J. Soil Water Conserv.*, 33(3): 305–311, 319. [王颜昊, 刘增辉, 柳新伟, 宋祥云, 崔德杰, 2019. 黄河三角洲表层土壤重金属空间分布与潜在生态风险评价. 水土保持学报, 33(3): 305–311, 319]
- Wang ZY, Wang XM, 2019. Current status and management strategies for corn pests and diseases in China. *Plant Prot.*, 45(1): 1–11. [王振营, 王晓鸣, 2019. 我国玉米病虫害发生现状、趋势与防控对策. 植物保护, 45(1): 1–11]
- Wei QX, He YX, Yang XJ, Weng QY, Wang MM, 2004. Effects of host plants on CarE and AChE activity of *Liriomyza huidobrensis*. *Acta Agric. Univ. Jiangxi*, 26(3): 345–347. [魏秋学, 何玉仙, 杨秀娟, 翁启勇, 王茂明, 2004. 寄主植物对南美斑潜蝇羧酸酯酶及乙酰胆碱酯酶活力的影响. 江西农业大学学报, 26(3): 345–347]
- Xie BT, Zhang LL, Wang BJ, Liang GM, 2015. Effects of spinetoram on detoxifying enzyme and acetylcholin esterase activity in *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Chin. J. Appl. Entomol.*, 52(3): 600–608. [谢丙堂, 张丽丽, 王冰洁, 梁革梅, 2015. 乙基多杀菌素对棉铃虫解毒酶和乙酰胆碱酯酶活性的影响. 应用昆虫学报, 52(3): 600–608]
- Yang YM, Tao YL, Dou HS, Xu JM, Yang Y, Bu YQ, Shan ZJ, Zhou R, 2021. Progress in research on ecological toxicity of combined pollution of pesticide and heavy metals. *Chin. J. Pestic. Sci.*, 23(1): 10–21. [杨永猛, 陶玉龙, 窦华山, 许加明, 杨彦, 卜元卿, 单正军, 周蓉, 2021. 农药与重金属复合污染的生态毒理学研究进展. 农药学报, 23(1): 10–21]
- Yin F, Feng X, Li ZY, Lin QS, Hu ZD, Zhang DY, Chen HY, 2014. Effects of sublethal concentrations of chlorantraniliprole on detoxifying enzyme activity in *Plutella xylostella* (L.). *Plant Prot.*, 40(2): 66–69. [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]
- Yu YJ, Li XF, Yang GL, Wang YH, Wang XQ, Cai LM, Liu XJ, 2019. Joint toxic effects of cadmium and four pesticides on the earthworm (*Eisenia fetida*). *Chemosphere*, 227: 489–495.
- Zhang H, Yang AP, Bai WW, Gao HF, Li GK, Wang SL, 2020. Effects of sublethal concentrations of three insecticides on detoxifying enzymes activities in *Discestra trifolii* larvae. *Agrochemicals*, 59(11): 846–850. [张航, 杨安沛, 白微微, 高海峰, 李广阔, 王锁牢, 2020. 3种杀虫剂亚致死浓度对旋幽夜蛾幼虫解毒酶活性的影响. 农药, 59(11): 846–850]
- Zhang YY, Hu XD, Zheng LX, Wei HY, 2017. Effect of Cd^{2+} on development and male orientational behaviors to the conspecific female pheromones in the striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *J. Environ. Entomol.*, 39(2): 423–430. [张宇瑶, 胡新娣, 郑丽霞, 魏洪义, 2017. Cd^{2+} 对二化螟生长发育及雄蛾对性信息素定向行为的影响. 环境昆虫学报, 39(2): 423–430]
- Zhou ZW, Zhang YJ, Kang JY, Dong C, Chen NY, Li X, Guo ZY, Wu AG, 2017. Detection of herbicide glyphosates based on an anti-aggregation mechanism by using unmodified gold nanoparticles in the presence of Pb^{2+} . *Anal. Methods*, 9(19): 2890–2896.

(责任编辑: 赵利辉)