



镉胁迫对草地贪夜蛾生长发育及 松毛虫赤眼蜂寄生的影响

王杰^{1,2}, 刘莎¹, 甘甜¹, 邸宁², 王甦², 李元喜^{1,*}

(1. 南京农业大学植物保护学院昆虫学系, 南京 210095;
2. 北京市农林科学院植物保护研究所, 北京 100097)

摘要: 【目的】为探究镉胁迫对植食性昆虫草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的影响以及是否通过“bottom-up”级联效应影响赤眼蜂 *Trichogramma* 的寄生能力。【方法】在室内调查了孵化 24 h 内的草地贪夜蛾幼虫取食添加了不同浓度 (0, 0.2 和 51.2 mg/kg) Cd^{2+} 的饲料后, 草地贪夜蛾生长发育和繁殖力 (单雌产卵量) 和子一代卵内镉含量, 并调查了松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi* 成蜂对低浓度 (0.2 mg/kg) Cd^{2+} 胁迫的草地贪夜蛾卵的寄生能力及偏好性。【结果】与对照 (正常人工饲料) 相比, 人工饲料中 0.2 和 51.2 mg/kg Cd^{2+} 均导致草地贪夜蛾幼虫历期显著延长、雌蛹重显著降低; 高浓度 (51.2 mg/kg) Cd^{2+} 处理下草地贪夜蛾的化蛹率、成虫羽化率、成虫寿命和单雌产卵量均显著降低; 而低浓度 (0.2 mg/kg) Cd^{2+} 处理下草地贪夜蛾的单雌产卵量略高于对照, 且低浓度 Cd^{2+} 胁迫下草地贪夜蛾卵的镉含量为 1.03 mg/kg。松毛虫赤眼蜂成蜂对 0.2 mg/kg Cd^{2+} 胁迫的草地贪夜蛾卵 24 h 的寄生率约为 52%, 显著高于对照, 而子一代松毛虫赤眼蜂的成虫羽化率和雌性占比与对照无显著差异; 当单独或同时提供 0.2 mg/kg Cd^{2+} 胁迫卵与对照卵时, 松毛虫赤眼蜂成蜂对镉胁迫草地贪夜蛾卵的寄生率均显著高于对对照卵的寄生率; 而单独或同时提供这 2 种寄主卵时松毛虫赤眼蜂子一代成虫羽化率和雌性占比无显著差异。【结论】本研究结果表明镉胁迫能够影响草地贪夜蛾的生长发育及繁殖力, 且饲料中的镉能够从草地贪夜蛾幼虫传递到卵内, 并影响松毛虫赤眼蜂的寄生能力。

关键词: 草地贪夜蛾; 镉胁迫; 植食性昆虫; 传递; 赤眼蜂; 寄生

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2023)02-0209-10

Effects of cadmium stress on the development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and parasitism by *Trichogramma dendrolimi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae)

WANG Jie^{1,2}, LIU Sha¹, GAN Tian¹, DI Ning², WANG Su², LI Yuan-Xi^{1,*} (1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Plant Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract 【Aim】To explore the influence of cadmium stress on the herbivore *Spodoptera frugiperda* and whether the parasitization capability of *Trichogramma* is affected by “bottom-up” cascade effect of cadmium. 【Methods】The larvae of *S. frugiperda* hatched within 24 h were fed with the artificial diets containing different concentrations (0, 0.2 and 51.2 mg/kg) of Cd^{2+} , the growth and fecundity (number of eggs laid per female) of *S. frugiperda* and Cd^{2+} content in the eggs of F_1 generation of

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (KYZ201920)

作者简介: 王杰, 男, 1995 年 10 月生, 河南信阳人, 博士研究生, 研究方向为昆虫化学生态学, E-mail: wj_insect@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yxli@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-09-02; 接受日期 Accepted: 2022-11-10

S. frugiperda were investigated, and the parasitization capability and preference of *T. dendrolimi* adults to the eggs of *S. frugiperda* stressed by a low concentration (0.2 mg/kg) of Cd^{2+} were also investigated. 【Results】Compared with the control (normal artificial diet), 0.2 and 51.2 mg/kg Cd^{2+} in the artificial diet significantly prolonged the larval duration and significantly reduced the female pupal weight of *S. frugiperda*. The pupation rate, adult emergence rate, adult longevity and number of eggs laid per female of *S. frugiperda* in the treatment with high concentration (51.2 mg/kg) of Cd^{2+} decreased significantly. However, the number of eggs laid per female of *S. frugiperda* in the treatment with low concentration (0.2 mg/kg) of Cd^{2+} was slightly higher than that of the control, and the Cd^{2+} content in eggs of *S. frugiperda* in the low Cd^{2+} concentration treatment was 1.03 mg/kg. The parasitism rate of *T. dendrolimi* on *S. frugiperda* eggs stressed by 0.2 mg/kg Cd^{2+} within 24 h was 52%, which was significantly higher than that of the control, while no significant differences were found in the adult emergence rate and proportion of females of F_1 generation of *T. dendrolimi* between the treatment and control. When the eggs of *S. frugiperda* stressed by 0.2 mg/kg Cd^{2+} and the control eggs were separately and simultaneously exposed to *T. dendrolimi* females, the parasitism rate of *T. dendrolimi* adults on cadmium-stressed *S. frugiperda* eggs was significantly higher than that on the control eggs, while no significant differences were found in the adult emergence rate and proportion of females of F_1 generation of *T. dendrolimi* when the two kinds of host eggs were separately and simultaneously provided. 【Conclusion】The results of this study suggest that cadmium stress affects the growth, development and fecundity of *S. frugiperda*, and cadmium in the artificial diet can be transferred into eggs via larval feeding, and affects the performance of *T. dendrolimi*.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; cadmium stress; herbivorous insects; transfer; *Trichogramma*; parasitism

农田重金属污染是全球农业面临的重要问题之一 (Zhao *et al.*, 2015; Tóth *et al.*, 2016)。据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤点位超标率为 19.4%,重金属是主要的污染物 (环境保护部和国土资源部, 2014)。土壤中的重金属随着植物根系吸收进入地上部分的其他组织中,不仅影响植物正常的生长发育 (Haider *et al.*, 2021),而且会富集到谷物、蔬菜和水果等食物中,进而威胁食品安全和人类健康 (Zheng *et al.*, 2020)。此外,重金属可以沿食物链传递、富集,进而对农业生态系统中的营养级关系、生态系统内的相互作用及生态功能产生影响 (Dar *et al.*, 2017; Gardiner and Harwood, 2017; 吴磊等, 2022)。

作为农田生态系统中食物链和食物网的重要组成部分,植食性昆虫在重金属的传递与累积过程中起到重要的媒介作用 (Gardiner and Harwood, 2017; 陈瑾等, 2020; 黄江南等, 2021)。在已知产生污染的重金属中,镉污染最严重 (环境保护部和国土资源部, 2014)。研究发现,植食性昆虫取食富含镉的植物后,会出现发育历期延长 (Winter *et al.*, 2012)、存活率下降 (Jiang *et al.*, 2020)、繁殖力降低 (Gao *et*

al., 2012; Chen *et al.*, 2022)、飞行能力下降 (邹金城等, 2017) 等现象。此外,长期重金属胁迫会引起害虫提高对其他逆境 (如杀虫剂等) 的耐受性,增加害虫种群暴发的几率 (Płachetka-Bożek *et al.*, 2018)。有关镉通过食物链对植食性昆虫的影响研究多选择幼虫作为起点,探究镉对植食性昆虫的幼虫、成虫生长发育及其行为影响 (Su *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2020),而镉是否可以传递到后代体内未见报道。

环境中的非生物胁迫会通过“自下而上” (bottom-up) 级联效应对高营养级生物产生影响 (Hunter and Price, 1992; Han *et al.*, 2022)。作为一种重要的非生物胁迫,镉经植食性昆虫的生物放大后,可能会破坏农业生态系统中的营养级关系、生态相互作用及功能 (Winter *et al.*, 2012; Dar *et al.*, 2017)。已有研究表明,镉通过“bottom-up”级联效应对天敌昆虫产生间接影响 (Gardiner and Harwood, 2017; Han *et al.*, 2022),不仅会影响捕食性天敌,如降低捕食性步甲 *Chrysocarabus splendens* 存活率 (Scheifler *et al.*, 2002),还会影响寄生性天敌的寄生能力及行为,如镉通过土壤-蚕豆传递给豌豆蚜

Acyrtosiphon pisum, 导致其寄生蜂阿尔蚜茧蜂 *Aphidius ervi* 种群增长率下降 (Kramarz and Stark, 2003)。一般情况下, 重金属对寄生性天敌的影响与寄主体内的重金属含量以及转移程度有关, 并且不同寄生类型寄生蜂存在很大差异 (Ortel, 1995; Kramarz and Stark, 2003; Chen *et al.*, 2022)。

鳞翅目害虫是危害作物生产的一类重要害虫, 由于其寄主范围广及食性大而导致其面临重金属胁迫可能性大, 在重金属的跨营养级传递与累积过程中起到重要的媒介作用 (Ortel, 1995; Su *et al.*, 2014)。草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*, 是一种迁飞性重大农业害虫 (Sun *et al.*, 2021), 能够取食高粱 *Sorghum bicolor*、水稻 *Oryza sativa* 等 76 科的 353 种植物 (Montezano *et al.*, 2018), 尤其偏好取食玉米 *Zea mays*, 能够造成玉米 15% ~ 73% 的产量损失 (Day *et al.*, 2017)。作为田间卵寄生性天敌昆虫中的优势类群, 赤眼蜂属 *Trichogramma* 天敌昆虫已在世界范围应用于防治鳞翅目害虫 (Zang *et al.*, 2021), 如玉米田中防治草地贪夜蛾 (Jin *et al.*, 2021)。已有研究表明, 食物中的镉胁迫会影响夜蛾科昆虫 (如甜菜夜蛾 *S. exigua*、斜纹夜蛾 *S. litura*) 的生长发育、交配行为以及繁殖力等, 并且存在浓度效应 (Su *et al.*, 2014; Plachetka-Božek *et al.*, 2018)。而镉胁迫对草地贪夜蛾及其营养级关系的影响尚未明确, 镉是否通过草地贪夜蛾幼虫的取食传递到子代卵中, 以及通过“bottom-up”级联效应影响天敌昆虫赤眼蜂的寄生, 进而影响害虫生物防治效率尚不清楚。

因此, 本研究以草地贪夜蛾及其卵寄生蜂松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi* 为研究对象, 在实验室条件下将不同浓度 (0, 0.2 和 51.2 mg/kg) 的 Cd^{2+} 添加到草地贪夜蛾人工饲料中, 以研究 Cd^{2+} 对草地贪夜蛾生长发育和繁殖力的影响以及能否通过幼虫取食传递到子代卵中, 同时考察了松毛虫赤眼蜂对 Cd^{2+} 胁迫的草地贪夜蛾卵的寄生能力及偏好性。目的是明确镉污染对植食性昆虫及其寄生性天敌的影响, 探明镉污染对赤眼蜂生物防治效率的影响, 为理解环境胁迫下的植物-植食性昆虫-天敌三级营养级关系及其机制以及优化土壤重金属污染下的害虫生物防治策略提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

草地贪夜蛾 *S. frugiperda* 于 2020 年 6 月采自于

广西农业科学院实验基地 (23.25°N, 108.06°E), 实验室内以人工饲料 (王世英等, 2019) 饲养在人工气候箱内 (PGX-450C 型, 宁波赛福实验仪器有限公司)。饲养条件为温度 (25 ± 1) °C 相对湿度 (relative humidity, RH) 60% ~ 70%, 光周期 14L: 10D。本试验所用虫源为室内扩繁 10 代后的实验种群。

松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi* 为实验室种群, 饲养方法参考宋静等 (2017) 方法, 使用紫外灭活的米蛾卵在室内条件下 [(26 ± 1) °C, RH 80% ± 5%, 光周期 16L: 8D] 繁育多代供试。

1.2 人工饲料配制

氯化镉 (CdCl_2) (分析纯 99.99%, 上海麦克林生化科技有限公司) 溶于去离子水, 制成母液, 配成系列梯度浓度, 置于冰箱中备用。参考夜蛾科昆虫的镉相关研究的浓度 (Su *et al.*, 2020, 2021), 设置含不同浓度 Cd^{2+} 的草地贪夜蛾人工饲料: 0 (CK), 0.2 和 51.2 mg/kg, 参考王世英等 (2019) 草地贪夜蛾人工饲料配制方法, 当配制的人工饲料温度降至 50 °C 时, 按每公斤饲料加入 5 mL 的 CdCl_2 溶液 (含 0.2 mg 或 51.2 mg 的 Cd^{2+}) 或去离子水 (即正常人工饲料, 作为对照), 迅速搅拌使其与饲料充分混合, 待冷却至室温后, 放置于 4 °C 冰箱中密封冷藏待用。

1.3 草地贪夜蛾生长发育观察

选取孵化后 24 h 内的草地贪夜蛾幼虫, 单头接入装有含不同浓度 Cd^{2+} 的人工饲料 70 g 的塑料管中 (15 mL), 以正常人工饲料为对照, 每个处理 40 头幼虫, 重复 3 次。每天观察并记录发育进度, 使用万分之一分析天平 (Mettler Toledo XPR404S, 梅特勒-托利多国际有限公司) 称量 4 日龄雌、雄蛹重, 统计幼虫和蛹历期、幼虫化蛹率、成虫羽化率、蛹和成虫性比 (雌/雄)。成虫羽化后, 将各处理的雌、雄蛾按 15: 15 放入塑料盒 (长 × 宽 × 高 = 30 cm × 15 cm × 10 cm), 每日提供蘸有 10% 蔗糖水的棉球作为成虫营养补充, 纱布作为产卵介质。每日更换纱布, 记录产卵量, 直至雌蛾死亡, 记录雌雄成虫的死亡时间。每处理各包含 3 个产卵盒, 每盒产卵量的平均值 ($n = 3$) 用于比较处理间的差异。

1.4 草地贪夜蛾卵内镉含量的测定

每处理每重复随机挑取草地贪夜蛾新鲜卵块, 置于 -80 °C 用于 Cd^{2+} 含量测定。参考 Chen 等 (2022) 测定昆虫体内 Cd^{2+} 含量方法: 将草地贪夜蛾卵的样品放入烘箱 60 °C 干燥 48 h。取 80 mg 样品置于 50 mL 消解管中, 加入 3 mL HNO_3 , 在微波消化

系统(APL Touchwin 2.0 奥普乐科技集团成都有限公司) 进行消解。通过滤纸过滤后, 将澄清溶液转移到容量瓶中, 然后用去离子水定容至 50 mL, 每处理 3 个重复。同时设置 3 个对照处理组的样品。以标样 GBW07603(GSV-2) 构建标准曲线。通过电感耦合等离子体质谱仪(iCAP RQ ICP-MS, 赛默飞世尔科技中国有限公司) 测量 Cd^{2+} 浓度。按照以下方式计算卵内 Cd^{2+} 含量:

卵内 Cd^{2+} 含量(mg/kg 干重) = $(C \times 50) / W$ 。

其中 C 为 ICP-MS 检测量, W 为样品干重。

1.5 赤眼蜂对镉胁迫草地贪夜蛾卵的寄生能力及选择性的测定

1.5.1 寄生能力: 在实验室内测试赤眼蜂对 0.2 mg/kg Cd^{2+} 处理草地贪夜蛾的卵的寄生能力。将 30 粒草地贪夜蛾卵用水按 0.2 mm 间距粘在长方形纸片(长 $\times$ 宽 = 4.0 cm $\times$ 2.0 cm) 上, 放入塑料管(15 mL) 后, 引入单头羽化 24 h 内的已交配的雌性松毛虫赤眼蜂, 放置在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、RH 70% 和光照强度 6 000 lx 的培养箱中, 24 h 后除去雌蜂。同时设置空白对照组, 即赤眼蜂对正常人工饲料饲养的草地贪夜蛾的卵的寄生能力。每处理重复 30 次。每 12 h 观察一次草地贪夜蛾卵的孵化情况, 并去除孵化幼虫, 以防止孵化幼虫取食其他卵。寄主卵变黑时, 统计各寄主卵被寄生的卵粒数; 子代羽化后, 统计羽化的雌、雄蜂数, 计算并比较赤眼蜂对 Cd^{2+} 处理和对照的草地贪夜蛾卵的寄生率及子一代羽化率和雌性占比的差异($n = 30$) 。

1.5.2 寄生选择性: 参考 Jin 等(2021) 方法, 在实验室内分别将 30 粒 0.2 mg/kg Cd^{2+} 处理的和 30 粒正常人工饲料饲养的草地贪夜蛾卵按 0.2 mm 间距用水粘在长方形纸片两边(长 $\times$ 宽 = 4 cm $\times$ 2 cm) , 放入塑料管(15 mL) 后, 引入单头羽化 24 h 内的已交配的雌性松毛虫赤眼蜂, 放置在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、70% RH、光照强度 6 000 lx 的培养箱中, 24 h 后除去雌蜂, 并将两种卵分别装于新试管内。每处理重复 30 次。每 12 h 观察一次草地贪夜蛾卵的孵化情况, 并去除孵化幼虫, 以防止孵化幼虫取食其他卵。寄主卵变黑时, 统计各处理被寄生的卵粒数; 子代羽化后, 统计羽化的雌、雄蜂数, 计算松毛虫赤眼蜂对 Cd^{2+} 处理草地贪夜蛾的卵的寄生率及子一代羽化率和雌性占比($n = 30$) 。

1.6 数据分析

对所有数据分别使用 Levene 检验和夏皮罗-威尔克检验(Shapiro-Wilk test) 进行方差齐性检验和

正态性检验。符合正态分布和方差齐性的数据(草地贪夜蛾性比和蛹重) 以及经平方根转化后符合正态分布和方差齐性的数据(草地贪夜蛾化蛹率和羽化率) 进行单因素方差分析(ANOVA) , 并使用 LSD 进行事后比较。利用非参数检验分析不符合正态分布和方差齐性的数据, 使用克鲁斯卡尔-沃利斯检验(Kruskal-Wallis test) 分析 3 组间草地贪夜蛾的发育历期、成虫寿命、产卵量的差异显著性, 并使用 LSD 进行事后比较; 使用曼-惠特尼 U 检验(Mann-Whitney U test) 比较松毛虫赤眼蜂成蜂对两种处理草地贪夜蛾卵的寄生率及子一代羽化率和雌性占比; 使用威尔科克森符号秩检验(Wilcoxon signed-rank test) 比较松毛虫赤眼蜂对两种处理草地贪夜蛾卵的寄生率。数据分析和作图分别在 SPSS 25.0 (IBM) 和 GraphPad Prism 9.0.0 (GraphPad LLC) 中进行。

2 结果

2.1 镉胁迫对草地贪夜蛾生长发育的影响

2 个浓度 Cd^{2+} 胁迫下, 草地贪夜蛾幼虫历期较对照的显著延长($P < 0.05$) (表 1) 。高浓度(51.2 mg/kg) Cd^{2+} 处理下的幼虫历期为 (22.89 ± 0.79) d, 约为对照的 2 倍; 而低浓度(0.2 mg/kg) Cd^{2+} 处理下的幼虫历期为 (11.92 ± 0.09) d, 显著长于对照的($H = 80.154$, $P < 0.001$) (表 1) 。高浓度 Cd^{2+} 处理下的草地贪夜蛾幼虫历期的范围为 15 ~ 29 d(表 1) 。

高浓度(51.2 mg/kg) Cd^{2+} 处理下的草地贪夜蛾的化蛹率(35.00%) 显著低于对照的(75.83%) 和低浓度(0.2 mg/kg) Cd^{2+} 处理的(80.00%) , 且不足对照的 1/2($F = 51.365$, $df = 2, 6$, $P < 0.001$) ; 高浓度 Cd^{2+} 处理下的草地贪夜蛾的蛹性比(雌: 雄) 显著高于对照和低浓度 Cd^{2+} 处理的($F = 14.479$, $df = 2, 6$, $P < 0.005$) (表 1) 。高浓度 Cd^{2+} 处理下的草地贪夜蛾的雌、雄蛹历期均显著长于对照的(雌蛹: $H = 26.627$, $P < 0.001$; 雄蛹: $H = 17.706$, $P < 0.001$) (表 2) , 而低浓度 Cd^{2+} 处理下的雌、雄蛹历期与对照不存在显著差异($P > 0.05$) (表 1) 。雄蛹重在不同浓度 Cd^{2+} 处理间无显著差异($F = 2.110$, $df = 2, 36$, $P = 0.135$) , 而 Cd^{2+} 处理的雌蛹重均显著低于对照的($F = 40.532$, $df = 2, 52$, $P < 0.001$) (图 1) 。

草地贪夜蛾成虫羽化率在不同浓度 Cd^{2+} 处理间存在显著差异, 而成虫性比(雌: 雄) 在不同浓度

表 1 含 Cd²⁺ 人工饲料对草地贪夜蛾生长发育的影响
Table 1 Effects of Cd²⁺ in the artificial diet on the development of *Spodoptera frugiperda*

参数 Parameters	Cd ²⁺ 浓度 Cd ²⁺ concentration (mg/kg)		
	0 (CK)	0.2	51.2
幼虫历期 Larval duration (d)	11.29 ± 0.09 c	11.92 ± 0.09 b	22.89 ± 0.79 a
雌蛹历期 Female pupal duration (d)	12.63 ± 0.18 b	12.81 ± 0.18 b	17.50 ± 0.93 a
雄蛹历期 Male pupal duration (d)	14.19 ± 0.13 b	14.33 ± 0.12 b	17.67 ± 0.83 a
雌成虫寿命 Female adult longevity (d)	13.81 ± 0.34 a	13.19 ± 0.42 a	10.10 ± 0.59 b
雄成虫寿命 Male adult longevity (d)	12.81 ± 0.30 a	12.14 ± 0.36 a	10.22 ± 0.72 b
化蛹率 Pupation rate (%)	75.83 ± 3.60 a	80.00 ± 2.36 a	35.00 ± 2.36 b
蛹性比(雌:雄) Sex ratio (female to male ratio) of pupae	0.73 ± 0.13 a	0.78 ± 0.04 a	0.83 ± 0.07 b
成虫羽化率 Adult emergence rate (%)	75.97 ± 1.33 a	81.39 ± 2.02 a	46.53 ± 6.54 b
成虫性比(雌:雄) Sex ratio (female to male ratio) of adult	0.91 ± 0.20 a	0.86 ± 0.06 a	1.31 ± 0.49 a

CK: 正常人工饲料 Normal artificial diet. 表中数据为平均值 ± 标准误。草地贪夜蛾成虫和蛹性比、化蛹率及羽化率进行单因素方差分析 (ANOVA), 草地贪夜蛾的幼虫和蛹历期以及成虫寿命使用克鲁斯卡尔-沃利斯检验 (Kruskal-Wallis 检验); 同一行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Data in the table are mean ± SE. The sex ratio of adults and pupae, pupation rate and emergence rate of *S. frugiperda* were analyzed with ANOVA. Larval duration, pupal duration and adult longevity were analyzed with Kruskal-Wallis test. Different lowercase letters following the data in the same row indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

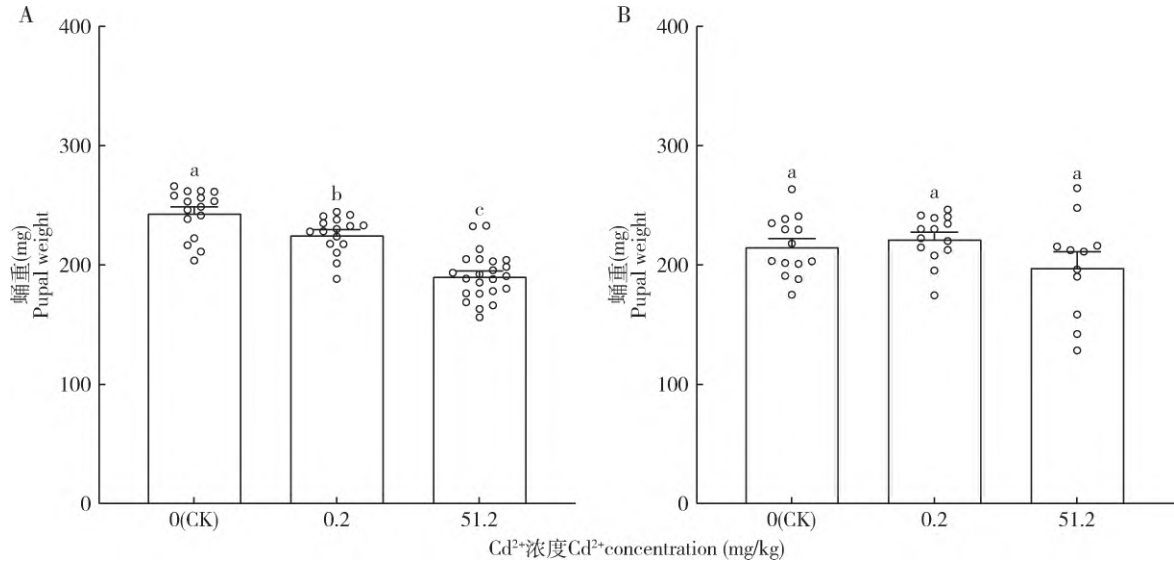


图 1 含 Cd²⁺ 人工饲料对草地贪夜蛾雌 (A)、雄 (B) 蛹重的影响

Fig. 1 Effects of Cd²⁺ in the artificial diet on the female (A) and male (B) pupal weight of *Spodoptera frugiperda*
CK: 正常人工饲料 Normal artificial diet. 图 2-4 同。The same for Figs 2-4. 图中数据为平均值 ± 标准误; 柱上不同小写字母不同表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, ANOVA)。Data in the figure are mean ± SE. Different lowercase letters above bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, ANOVA).

Cd²⁺ 处理间不存在显著差异 (羽化率: $F = 56.483$, $df = 2, 6$, $P < 0.001$; 性比: $F = 0.421$, $df = 2, 6$, $P = 0.675$) (表 1)。高浓度 (51.2 mg/kg) Cd²⁺ 处理的草地贪夜蛾雌、雄成虫寿命较对照和低浓度 (0.2 mg/kg) Cd²⁺ 处理的显著降低 (雌成虫: $H = 18.597$, $P < 0.001$; 雄成虫: $H = 8.349$, $P = 0.015$)。低浓度 (0.2 mg/kg) Cd²⁺ 处理的雌、雄成虫寿命与对照无显著差异 ($P > 0.05$) (表 1)。此外, 高浓度 Cd²⁺ 处理后羽化的草地贪夜蛾成虫的平均

单雌产卵量为 (170 ± 14) 粒, 显著低于低浓度 Cd²⁺ 处理的 [(579 ± 37) 粒] ($P < 0.05$)。而低浓度 Cd²⁺ 处理时的单雌产卵量与对照 [(382 ± 100) 粒] 间无显著差异 ($H = 0.596$, $P = 0.051$) (图 2)。低浓度 Cd²⁺ 胁迫处理的草地贪夜蛾子一代卵的 Cd²⁺ 含量为 1.03 mg/kg。

2.2 松毛虫赤眼蜂对 Cd²⁺ 胁迫草地贪夜蛾卵的寄生能力

当单独提供草地贪夜蛾卵 30 粒时, 松毛虫赤眼

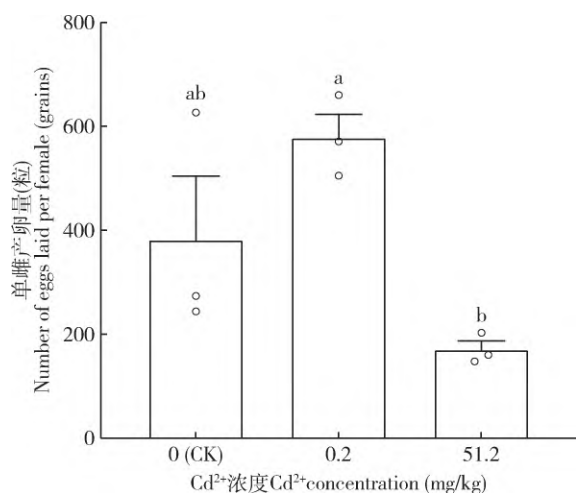


图2 含 Cd²⁺ 人工饲料对草地贪夜蛾繁殖力 (单雌产卵量) 的影响

Fig. 2 Effects of Cd²⁺ in the artificial diet on the fecundity (number of eggs laid per female) of *Spodoptera frugiperda*. Data in the figure are mean $\pm$ SE. Different lowercase letters above bars indicate significant difference among treatments (Kruskal-Wallis test, $P < 0.05$).

蜂对低浓度 (0.2 mg/kg) Cd²⁺ 胁迫的草地贪夜蛾卵 24 h 的寄生率约为 52% ,显著高于对照的 ($Z = -2.103$, $P = 0.035$) (图 3: A)。而低浓度 Cd²⁺ 胁迫下 松毛虫赤眼蜂的子一代羽化率 (76.48%) 与对照 (91.67%) 无显著差异 ($Z = -2.149$, $P = 0.050$) (图 3: B) 0.2 mg/kg Cd²⁺ 胁迫对松毛虫赤眼蜂子一代的雌性占比无显著影响 ($Z = -0.463$, $P = 0.643$) (图 3: C)。

当同时提供低浓度 (0.2 mg/kg) Cd²⁺ 胁迫和对照草地贪夜蛾卵各 30 粒时 松毛虫赤眼蜂对低浓度 Cd²⁺ 胁迫的草地贪夜蛾卵的寄生率显著高于对照的 ($Z = 2.079$, $P = 0.038$) (图 4: A)。此外 低浓度 Cd²⁺ 胁迫下 松毛虫赤眼蜂的子一代羽化率 ($Z = -0.587$, $P = 0.557$) (图 4: B) 和雌性占比与对照也无显著差异 ($Z = -0.322$, $P = 0.748$) (图 4: C)。

3 讨论

农业生态系统中的重金属胁迫大多会对植食性

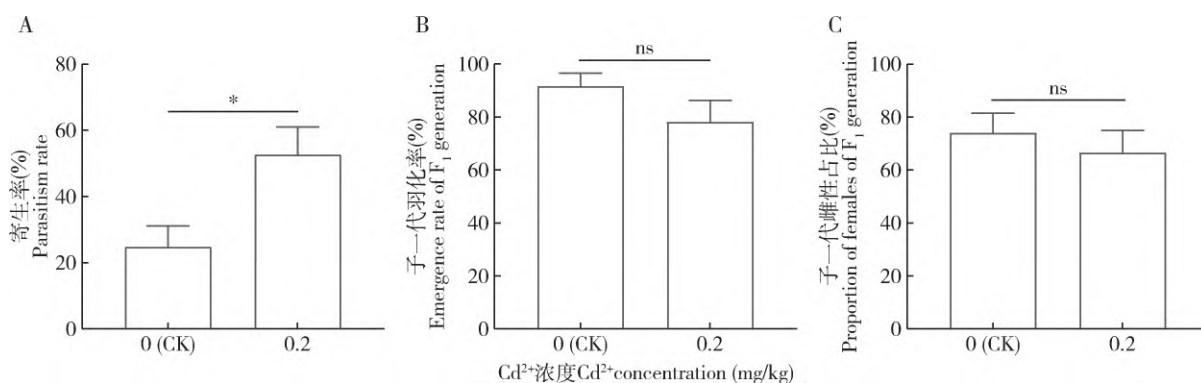


图3 松毛虫赤眼蜂成蜂对低浓度 (0.2 mg/kg) Cd²⁺ 胁迫草地贪夜蛾卵的寄生能力

Fig. 3 Parasitization capability of *Trichogramma dendrolimi* adults on the eggs of *Spodoptera frugiperda* stressed by a low concentration (0.2 mg/kg) of Cd²⁺

单独提供正常人工饲料 (CK) 或 Cd²⁺ 胁迫人工饲料饲养草地贪夜蛾卵时 检测松毛虫赤眼蜂的寄生率 (A) 以及子一代羽化率 (B) 和雌性占比 (C)。图中数据为平均值 $\pm$ 标准误; 柱上星号和 ns 分别表示两组间差异显著 ($P < 0.05$) 和不显著 ($P > 0.05$) (Mann-Whitney U 检验)。图 4 同。The parasitism rate (A), emergence rate of F₁ generation (B) and proportion of females of F₁ generation (C) of *T. dendrolimi* were detected when provided with *S. frugiperda* eggs reared on the normal artificial diet (CK) or Cd²⁺-stressed artificial diet. Data in the figure are mean $\pm$ SE. The asterisk and ns above bars denote significant difference ($P < 0.05$) and non-significant difference ($P > 0.05$), respectively, between two groups (Mann-Whitney U test). The same for Fig. 4.

昆虫产生不利影响 (陈瑾等, 2020; 黄江南等, 2021), 表现为昆虫发育历期延长 (Winter *et al.*, 2012)、存活率下降 (Jiang *et al.*, 2020) 等。本研究发现, 食物中镉胁迫导致草地贪夜蛾幼虫历期显著延长, 且高浓度抑制生长的能力强于低浓度, 这与张宇瑶等 (2017) 研究 Cd²⁺ 对二化螟 *Chilo suppressalis* 的影响结果相一致, 其发现幼虫历期随 Cd²⁺ 浓度的

增加而逐渐增加。Wei 等 (2020) 研究发现, 随着食物中镉浓度的增加, 黏虫 *Mythimna separata* 幼虫存活率逐渐下降, 化蛹率和蛹畸形率逐渐增加。此外, 环境中污染物通常以极低剂量存在, 暴露于低浓度污染物条件下的生物体会产生稳态过度补偿响应机制, 表现为低浓度促进生长发育, 即毒物兴奋效应 (Morkunas *et al.*, 2018)。本研究发现, 高浓度 Cd²⁺

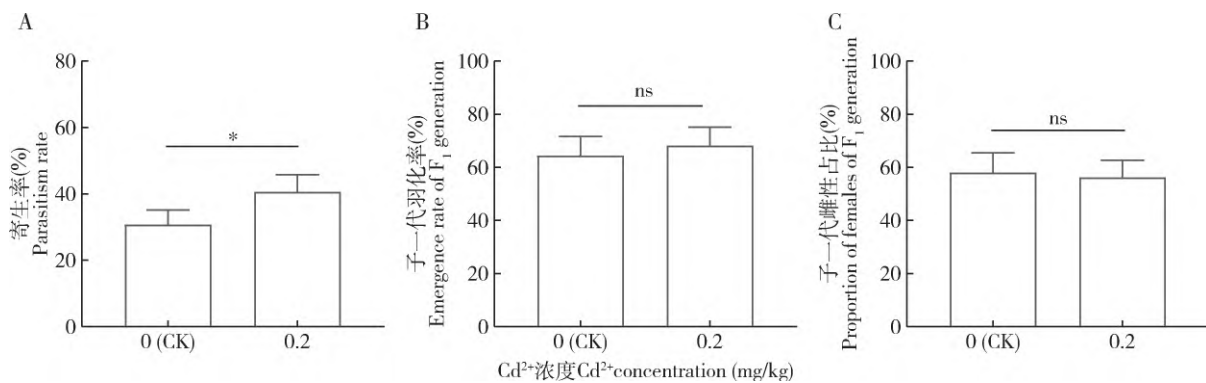


图4 松毛虫赤眼蜂成蜂对低浓度(0.2 mg/kg) Cd²⁺胁迫草地贪夜蛾卵的寄生偏好性

Fig. 4 Parasitism preference of *Trichogramma dendrolimi* adults on *Spodoptera frugiperda* eggs stressed by a low concentration (0.2 mg/kg) of Cd²⁺

同时提供正常人工饲料(CK)或Cd²⁺胁迫人工饲料饲养草地贪夜蛾卵时,检测松毛虫赤眼蜂的寄生率(A)以及子一代成虫羽化率(B)和雌性占比(C)。The parasitism rate (A), emergence rate of F₁ generation (B) and proportion of females of F₁ generation (C) of *T. dendrolimi* were detected when simultaneously provided with *S. frugiperda* eggs reared on the normal artificial diet (CK) and Cd²⁺-stressed artificial diet.

处理下的草地贪夜蛾的化蛹率、成虫羽化率和成虫寿命均显著降低;而低浓度Cd²⁺处理下的化蛹率、成虫羽化率均略高于对照的(表1),这表明镉对草地贪夜蛾的影响符合毒物兴奋效应,即低浓度促进生长发育而高浓度抑制生长(Cutler *et al.*, 2022)。此外,针对不同的研究对象,如植物、植食性昆虫或是天敌昆虫,毒物兴奋效应的剂量差异比较大(Cutler *et al.*, 2022)。本研究发现,低浓度Cd²⁺的促进作用仅能针对草地贪夜蛾的部分生长发育指标,这与镉对黏虫、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的影响结果类似,其研究表明较低浓度Cd²⁺仅促进了其部分生长发育指标(Zhan *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2020)。

重金属胁迫亦对植食性昆虫的体重存在低浓度促进而高浓度抑制的毒物兴奋效应(曹红妹等, 2015; 张宇瑶等, 2017)。例如,低浓度Ni²⁺对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 雄蛹重有促进作用,高浓度对雄蛹重有抑制作用(曹红妹等, 2015)。二化螟取食不同浓度Cd²⁺人工饲料后,低浓度Cd²⁺导致雌、雄蛹重升高,高浓度Cd²⁺导致雌、雄蛹重降低(张宇瑶等, 2017)。而本研究发现,Cd²⁺胁迫对草地贪夜蛾的雄蛹重没有显著影响,但雌蛹重随Cd²⁺浓度增加显著下降(图1)。这可能与雌、雄蛹生长发育过程中对镉的积累、代谢能力或敏感度不同有关,如中华稻蝗 *Oxya chinensis* 雌成虫的镉累积量高于雄虫(刘雪梅等, 2006)。

重金属胁迫会影响植食性昆虫的繁殖力(Gao *et al.*, 2012; 曹红妹等, 2015; 钱媛媛等, 2017; Su

et al., 2021)。利用生命表方法,Gao等(2012)发现取食镉胁迫小麦导致麦长管蚜 *Sitobion avenae* 的存活率与繁殖力下降。本研究发现,低浓度Cd²⁺处理下的草地贪夜蛾的单雌产卵量略高于对照和高浓度Cd²⁺处理的,高浓度Cd²⁺处理下的单雌产卵量略低于空白对照的(图2),这与钱媛媛等(2017)研究结果类似,钱媛媛等(2017)发现甜菜夜蛾在较低浓度(0.3 mg/kg)的铅胁迫下的产卵量高于对照,而高浓度铅胁迫下的产卵量低于对照。本研究与Su等(2021)研究结果也类似,其发现甜菜夜蛾在0.2和51.2 mg/kg Cd²⁺胁迫下的前10 d累计产卵量与对照没有显著差异。这也表明镉对草地贪夜蛾的生殖能力可能具有低浓度促进而高浓度抑制的毒物兴奋效应(钱媛媛等, 2017; Cutler *et al.*, 2022)。此外,高浓度Cd²⁺处理的草地贪夜蛾成虫性比虽与对照和低浓度Cd²⁺处理无显著差异,但略高于对照和低浓度处理的(表1),这与钱媛媛等(2017)发现人工饲料中的铅胁迫可以增加甜菜夜蛾的雌性比的结果相一致。

有关重金属对植食性昆虫的影响研究多以植食性昆虫幼虫、成虫生长发育及其行为影响的为主(Su *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2020),而重金属是否可以传递到后代体内及含量研究较少(Jin *et al.*, 2020)。Jin等(2020)发现人工饲料中的Zn²⁺可以传递到斜纹夜蛾的卵内。本研究发现,低浓度(0.2 mg/kg)Cd²⁺胁迫的草地贪夜蛾卵中Cd²⁺含量为1.03 mg/kg,表明食物中的镉可以传递到草地贪夜蛾下一代,可能对害虫种群变化产生长期影响。已

有研究表明 植食性昆虫对植物中的镉具有生物放大作用(Naikoo *et al.*, 2021), 可能通过“bottom-up”级联效应对天敌昆虫产生间接影响(Gardiner and Harwood, 2017; Han *et al.*, 2022), 进而破坏农业生态系统中的营养级关系、生物防治效果等(Winter *et al.*, 2012; Dar *et al.*, 2017)。夏婧等(2006) 研究发现斜纹夜蛾幼虫饲料中高浓度的 Zn^{2+} 能通过食物链影响双斑侧沟茧蜂 *Microplitis bicoloratus* 的生存和发育。本研究发现, 无论是单独提供还是在选择条件下, 松毛虫赤眼蜂对低浓度 Cd^{2+} 胁迫的草地贪夜蛾卵的寄生率显著高于对照的(图 3 和 4), 表明赤眼蜂对低浓度 Cd^{2+} 胁迫的害虫的控制效果反而会更好, 这将有助于田间害虫的种群控制。由于本研究中高浓度 Cd^{2+} 胁迫处理的草地贪夜蛾产卵量低而无法测定卵内镉含量, 进一步明确高浓度 Cd^{2+} 胁迫对天敌的影响作用将有助于田间防治策略的制定。

松毛虫赤眼蜂对镉胁迫的草地贪夜蛾卵的寄生差异可能与镉胁迫抑制昆虫的免疫能力相关(Borowska and Pyza, 2011; 俞玲园等, 2019)。如斜纹夜蛾幼虫的免疫反应速率在高浓度的 Ni^{2+} 处理下显著降低(Li *et al.*, 2012)。重金属胁迫也会影响昆虫对昆虫病原微生物的敏感性。结合转录组和蛋白组分析, Jiang 等(2021) 发现, 镉胁迫下, 舞毒蛾 *Lymantria dispar* 幼虫对球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 的易感性增加, 镉胁迫和球孢白僵菌感染对其死亡率有叠加效应。因此, 本研究推断镉胁迫导致寄主免疫反应降低, 可能是松毛虫赤眼蜂对低浓度镉胁迫的草地贪夜蛾卵寄生能力增强的原因之一。本研究仅在实验室条件下探究了镉通过人工饲料的传递效应, 而在实际农田生态系统中, 镉胁迫可能导致植物的生物学或生态学性状(如植物挥发物、叶片厚度等) 发生改变, 进而间接影响植食性昆虫及其天敌昆虫(Winter *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2022)。如 Lin 等(2022) 发现镉胁迫改变了杨树叶片挥发物成分及含量, 降低了对植食性昆虫的吸引力。植物挥发物在赤眼蜂寄主定位中发挥重要作用(Romeis *et al.*, 2005)。因此, 进一步研究重金属胁迫下的植物挥发物变化及其对天敌昆虫的影响对于理解环境生物胁迫下的三级营养关系具有重要意义。

综上, 本研究在实验室条件下, 探究镉胁迫在植食性昆虫-天敌昆虫食物链中的传递效应及生物生态学影响作用, 明确了食物中的镉胁迫影响草地贪

夜蛾的生长发育及繁殖力, 并且镉能够传递到草地贪夜蛾的子代卵内; 非选择情况下, 镉通过草地贪夜蛾的“bottom-up”级联效应能够影响第三营养级-松毛虫赤眼蜂, 单位时间内寄生的卵量增加, 但羽化率降低; 当同时提供低浓度 Cd^{2+} 胁迫草地贪夜蛾产出卵与对照卵时, 前者被松毛虫赤眼蜂寄生的比例高于后者。本研究为研究农田生态系统中的重金属胁迫沿食物链的传递效应、害虫防治策略的制定提供参考信息。

致谢 感谢南京农业大学资源与环境科学学院 2021 级博士研究生张金刚同学在昆虫体内镉含量测定过程中提供的帮助。

参考文献 (References)

- Borowska J, Pyza E, 2011. Effects of heavy metals on insect immunocompetent cells. *J. Insect Physiol.*, 57(6): 760–770.
- Cao HM, Zheng LX, Wei HY, 2015. Effects of heavy metal Ni^{2+} on the development and reproductive behavior of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomol. Sin.*, 58(6): 650–657.
- [曹红妹, 郑丽霞, 魏洪义, 2015. 重金属 Ni^{2+} 对亚洲玉米螟生长发育和生殖行为的影响. 昆虫学报, 58(6): 650–657]
- Chen J, Wang JW, Shu YH, 2020. Review on the effects of heavy metal pollution on herbivorous insects. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 31(5): 1773–1782. [陈瑾, 王建武, 舒迎花, 2020. 重金属污染影响植食性昆虫的研究进展. 应用生态学报, 31(5): 1773–1782]
- Chen YM, Huang JN, Wei JQ, Liu XL, Lu J, Baldwin IT, Lou YG, Li R, 2022. Low-level cadmium exposure influences rice resistance to herbivores by priming jasmonate signaling. *Environ. Exp. Bot.*, 194: 104741.
- Cutler GC, Amichot M, Benelli G, Guedes RNC, Qu YY, Rix RR, Ullah F, Desneux N, 2022. Hormesis and insects: Effects and interactions in agroecosystems. *Sci. Total Environ.*, 825: 153899.
- Dar MI, Green ID, Naikoo MI, Khan FA, Ansari AA, Lone MI, 2017. Assessment of biotransfer and bioaccumulation of cadmium, lead and zinc from fly ash amended soil in mustard-aphid-beetle food chain. *Sci. Total Environ.*, 584–585: 1221–1229.
- Day R, Abrahams P, Bateman M, Beale T, Clotey V, Cock M, Colmenarez Y, Corniani N, Early R, Godwin J, Gomez J, González-Moreno P, Murphy ST, Oppong-Mensah B, Phiri N, Pratt C, Silvestri S, Witt A, 2017. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa. *Outlooks Pest Manag.*, 28(5): 196–201.
- Gao HH, Zhao HY, Du C, Deng MM, Du EX, Hu ZQ, Hu XS, 2012. Life table evaluation of survival and reproduction of the aphid, *Sitobion avenae*, exposed to cadmium. *J. Insect Sci.*, 12: 44.
- Gardiner MM, Harwood JD, 2017. Influence of heavy metal contamination on urban natural enemies and biological control. *Curr. Opin. Insect Sci.*, 20: 45–53.
- Haider FU, Cai LQ, Coulter JA, Cheema SA, Wu J, Zhang RZ, Ma

- WJ, Farooq M, 2021. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 211: 111887.
- Han P, Lavoie AV, Rodriguez-Saona C, Desneux N, 2022. Bottom-up forces in agroecosystems and their potential impact on arthropod pest management. *Annu. Rev. Entomol.*, 67: 239–259.
- Huang JN, Chen YM, Huang Y, Wei JQ, 2021. The effect of heavy metal accumulation on plant and herbivore interaction: A review. *J. Agric.*, 11(5): 42–45. [黄江南, 陈雨萌, 黄越, 尉吉乾, 2021. 重金属积累影响植物和植食性昆虫互作的研究进展. *农学报*, 11(5): 42–45]
- Hunter MD, Price PW, 1992. Playing chutes and ladders: Heterogeneity and the relative roles of bottom-up and top-down forces in natural communities. *Ecology*, 73(3): 724–732.
- Jiang D, Wu S, Tan MT, Jiang H, Yan SC, 2021. The susceptibility of *Lymantria dispar* larvae to *Beauveria bassiana* under Cd stress: A multi-omics study. *Environ. Pollut.*, 276: 116740.
- Jiang D, Zhou YT, Tan MT, Zhang J, Guo QX, Yan SC, 2020. Cd exposure-induced growth retardation involves in energy metabolism disorder of midgut tissues in the gypsy moth larvae. *Environ. Pollut.*, 266: 115173.
- Jin P, Chen J, Zhan HR, Huang SM, Wang JW, Shu YH, 2020. Accumulation and excretion of zinc and their effects on growth and food utilization of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 202: 110883.
- Jin T, Lin YY, Ma GC, Liu JB, Hao Z, Han SC, Peng ZQ, 2021. Biocontrol potential of *Trichogramma* species against *Spodoptera frugiperda* and their field efficacy in maize. *Crop Prot.*, 150: 105790.
- Kramarz P, Stark JD, 2003. Population level effects of cadmium and the insecticide imidacloprid to the parasitoid, *Aphidius ervi* after exposure through its host, the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* (Harris). *Biol. Control*, 27(3): 310–314.
- Li AM, Jiang JJ, Zhang YT, Snowdon RJ, Liang GH, Wang YP, 2012. Molecular and cytological characterization of introgression lines in yellow seed derived from somatic hybrids between *Brassica napus* and *Sinapis alba*. *Mol. Breed.*, 29(1): 209–219.
- Lin TT, Zhu GQ, He WC, Xie JL, Li SJ, Han S, Li SY, Yang CL, Liu YG, Zhu TH, 2022. Soil cadmium stress reduced host plant odor selection and oviposition preference of leaf herbivores through the changes in leaf volatile emissions. *Sci. Total Environ.*, 814: 152728.
- Liu XM, Li LJ, Guo YP, Xi YY, Ma EB, 2006. Cadmium accumulation in *Oxya chinensis* in the ecosystem of soil-plant-insect. *J. Agro-Environ. Sci.*, 25(2): 301–304. [刘雪梅, 李丽君, 郭亚平, 席玉英, 马恩波, 2006. 土壤-作物-昆虫系统中镉在中华稻蝗体内的累积. *农业环境科学学报*, 25(2): 301–304]
- Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014. Bulletin of the national survey of soil pollution. *China Environ. Prot. Ind.*, (5): 10–11. [环境保护部, 国土资源部, 2014. 全国土壤污染状况调查公报. *中国环保产业*, (5): 10–11]
- Montezano DG, Specht A, Sosa-Gómez DR, Roque-Specht VF, Sousa-Silva JC, de Paula-Moraes SV, Peterson JA, Hunt T, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *Afr. Entomol.*, 26(2): 286–300.
- Morkunas I, Woźniak A, Mai VC, Rucińska-Sobkowiak R, Jeandet P, 2018. The role of heavy metals in plant response to biotic stress. *Molecules*, 23(9): 2320.
- Naikoo MI, Khan FA, Noureldeen A, Rinklebe J, Sonne C, Rajakaruna N, Ahmad P, 2021. Biotransfer, bioaccumulation and detoxification of nickel along the soil-faba bean-aphid-ladybird food chain. *Sci. Total Environ.*, 785: 147226.
- Ortel J, 1995. Accumulation of Cd and Pb in successive stages of *Galleria mellonella* and metal transfer to the pupal parasitoid *Pimpla turionellae*. *Entomol. Exp. Appl.*, 77(1): 89–97.
- Plachetka-Božek A, Kafel A, Augustyniak M, 2018. Reproduction and development of *Spodoptera exigua* from cadmium and control strains under differentiated cadmium stress. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 166: 138–145.
- Qian YY, Su HH, Cheng YM, Yang YZ, 2017. Effect of lead stress on the fecundity of five successive generations of the beet armyworm. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 54(5): 824–830. [钱媛媛, 苏宏华, 程禹铭, 杨益众, 2017. 铅胁迫对甜菜夜蛾连续五代生殖力的影响研究. *应用昆虫学报*, 54(5): 824–830]
- Romeis J, Babendreier D, Wäckers FL, Shanower TG, 2005. Habitat and plant specificity of *Trichogramma* egg parasitoids – Underlying mechanisms and implications. *Basic Appl. Ecol.*, 6(3): 215–236.
- Scheifler R, Gomot-de Vauflery A, Toussaint ML, Badot PM, 2002. Transfer and effects of cadmium in an experimental food chain involving the snail *Helix aspersa* and the predatory carabid beetle *Chrysocarabus splendens*. *Chemosphere*, 48(6): 571–579.
- Song J, Huang J, Wang LY, Li YX, 2017. Effects of sex pheromone of *Chilo suppressalis* on parasitic ability of *Trichogramma japonicum* and parasitization efficiency in field. *Chin. J. Biol. Control*, 33(4): 481–486. [宋静, 黄静, 王雷英, 李元喜, 2017. 二化螟性信息素对稻螟赤眼蜂寄生能力及田间寄生效果的影响. *中国生物防治学报*, 33(4): 481–486]
- Su HH, Hu MM, Harvey-Samuel T, Yang YZ, 2014. Accumulation and excretion of cadmium in three successive generations of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and impact on the population increase. *J. Econ. Entomol.*, 107(1): 223–229.
- Su HH, Wu JJ, Zhang ZX, Ye ZB, Chen YQ, Yang YZ, 2021. Effects of cadmium stress at different concentrations on the reproductive behaviors of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner). *Ecotoxicology*, 30(3): 402–410.
- Su HH, Yang Y, Zou JC, Cheng YQ, Yang Y, Wu JJ, Pollak P, Yang YZ, 2020. Transcriptome analysis of the ovary of beet armyworm *Spodoptera exigua* under different exposures of cadmium stress. *Chemosphere*, 251: 126372.
- Sun XX, Hu CX, Jia HR, Wu QL, Shen XJ, Zhao SY, Jiang YY, Wu KM, 2021. Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China. *J. Integr. Agric.*, 20(3): 664–672.
- Tóth G, Hermann T, Da Silva MR, Montanarella L, 2016. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food

- safety. *Environ. Int.*, 88: 299–309.
- Wang SY, Zhu QZ, Tan YT, Ma QL, Wang RF, Zhang MF, Xu HH, Zhang ZX, 2019. Artificial diets and rearing technique of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in laboratory. *J. Environ. Entomol.*, 41(4): 742–747. [王世英, 朱启旋, 谭煜婷, 马千里, 王瑞飞, 张美芳, 徐汉虹, 张志祥, 2019. 草地贪夜蛾室内人工饲料群体饲养技术. 环境昆虫学报, 41(4): 742–747]
- Wei ZH, Wang XQ, Li PR, Tan XL, Yang XQ, 2020. Diet-mediated effects of cadmium on fitness-related traits and detoxification and antioxidative enzymes in the oriental armyworm, *Mythimna separata*. *Entomol. Gen.*, 40(4): 407–419.
- Winter TR, Borkowski L, Zeier J, Rostás M, 2012. Heavy metal stress can prime for herbivore-induced plant volatile emission. *Plant Cell Environ.*, 35(7): 1287–1298.
- Wu L, Sun Q, Zhao JM, Wang DL, Zhang YW, 2022. Review on the effects of heavy metal accumulation in flowers on the mutual benefit relationship between plant and insect pollinators. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 33(5): 1429–1434. [吴磊, 孙奇, 赵骥民, 王德利, 张彦文, 2022. 花部重金属积累对植物-传粉昆虫互惠关系影响的研究进展. 应用生态学报, 33(5): 1429–1434]
- Xia Q, Hu XJ, Shu YH, Sun HX, Zhang GR, Gu DX, 2006. Survival and development of *Microplitis bicoloratus* Chen on larvae of *Spodoptera litura* Fabricius stressed by heavy metal zinc. *Acta Entomol. Sin.*, 49(3): 387–392. [夏婧, 胡新军, 舒迎花, 孙虹霞, 张古忍, 古德祥, 2006. 在受重金属 Zn^{2+} 胁迫的斜纹夜蛾幼虫寄主上双斑侧沟茧蜂的生存与发育. 昆虫学报, 49(3): 387–392]
- Yu LY, Wei Y, Chen XM, Ding YJ, Hu YW, Tang B, Wang SG, 2019. Effects of heavy metal cadmium on the trehalose metabolism in *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) larvae. *Acta Entomol. Sin.*, 62(11): 1250–1259. [俞玲园, 魏莹, 陈旭敏, 丁艳娟, 胡耀文, 唐斌, 王世贵, 2019. 重金属镉胁迫对白纹伊蚊幼虫海藻糖代谢的影响. 昆虫学报, 62(11): 1250–1259]
- Zang LS, Wang S, Zhang F, Desneux N, 2021. Biological control with *Trichogramma* in China: History, present status, and perspectives. *Annu. Rev. Entomol.*, 66: 463–484.
- Zhan HX, Zhang JP, Chen Z, Huang YJ, Ruuhola T, Yang SY, 2017. Effects of Cd^{2+} exposure on key life history traits and activities of four metabolic enzymes in *Helicoverpa armigera* (Lepidopteran: Noctuidae). *Chem. Ecol.*, 33(4): 325–338.
- 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]
- Zhao FJ, Ma YB, Zhu YG, Tang Z, McGrath SP, 2015. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. *Environ. Sci. Technol.*, 49(2): 750–759.
- Zheng SN, Wang Q, Yuan YZ, Sun WM, 2020. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China. *Food Chem.*, 316: 126213.
- Zou JC, Sun Y, Yang Y, Yang YZ, Zhang ZX, Wang SY, Su HH, 2017. Cadmium stress significantly affects the flight performance of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) adults. *Acta Entomol. Sin.*, 60(9): 1021–1030. [邹金城, 孙宇, 杨勇, 杨益众, 张子昕, 王思雨, 苏宏华, 2017. 镉胁迫显著影响甜菜夜蛾成虫的飞行能力. 昆虫学报, 60(9): 1021–1030]

(责任编辑: 赵利辉)