



吴凯旋, 陈瑾, 黄诗敏, 舒迎花. 镉在夜蛾科昆虫—蠋蝽的传递特征及其影响 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (5): 1151 - 1160. WU Kai-Xuan, CHEN Jin, HUANG Shi-Min, SHU Ying-Hua. Transfer characteristics and effects of cadmium in noctuidae insects-stink bug *Arma chinensis* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (5): 1151 - 1160.

镉在夜蛾科昆虫—蠋蝽的传递特征及其影响

吴凯旋^{1,2}, 陈瑾^{1,2,3}, 黄诗敏^{1,2}, 舒迎花^{1,2*}

(1. 农业农村部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 2. 华南农业大学资源环境学院生态系, 广州 510642;
3. 贵州师范大学生命科学院, 贵阳 550025)

摘要: 土壤镉 (Cd) 污染不仅危害植物, 还会通过植物吸收进入食物链进而影响植食性昆虫及其天敌。本研究使用含不同 Cd 浓度 (0、4.06 mg/kg 和 40.6 mg/kg) 的人工饲料饲喂斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 和草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 幼虫, 发育至蛹, 以蛹饲养其捕食性天敌蠋蝽 *Arma chinensis*, 研究了 Cd 在夜蛾科昆虫—蠋蝽的传递特征及其影响。结果表明: 斜纹夜蛾和草地贪夜蛾对 Cd 的摄取量、排泄量和积累量, 蠋蝽对 Cd 的摄取量和积累量均与人工饲料中 Cd 浓度呈剂量反应, 即随着饲料中 Cd 浓度增加而增加。饲料—夜蛾科昆虫 Cd 的生物浓缩系数 (BCF) 大于 1, 这表明夜蛾科昆虫会生物放大 Cd, 而夜蛾科昆虫蛹—蠋蝽 Cd 的生物放大系数 (BMF) 小于 1, 这表示发生了 Cd 生物稀释作用。4.06 mg/kg Cd 胁迫显著降低草地贪夜蛾幼虫相对生长率 (RGR), 而对斜纹夜蛾 RGR 没有影响, 这与体内 Cd 积累量和 BCF 显著相关; 40.6 mg/kg Cd 胁迫显著改变夜蛾科昆虫的食物利用, 抑制幼虫生长发育, 降低取食斜纹夜蛾蛹的蠋蝽体重, 但 Cd 胁迫对蠋蝽存活没有影响。因此, 尽管 Cd 在植食性昆虫—捕食者没有生物放大作用, 但仍然存在生物毒性效应。

关键词: 重金属传递; Cd 胁迫; 草地贪夜蛾; 斜纹夜蛾; 蠋蝽

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2024) 05-1151-10

Transfer characteristics and effects of cadmium in noctuidae insects-stink bug *Arma chinensis*

WU Kai-Xuan^{1,2}, CHEN Jin^{1,2,3}, HUANG Shi-Min^{1,2}, SHU Ying-Hua^{1,2*} (1. Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Department of Ecology, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Soil cadmium (Cd) pollution not only harms plants but also affects phytophagous insects and their natural enemies through plant absorption into the food chain. In this paper, the transfer characteristics, and effects of Cd in noctuidae insect-stink bug *Arma chinensis* were studied by feeding *Spodoptera litura* and *Spodoptera frugiperda* to pupae with artificial diets adding different Cd concentrations (0, 4.06 mg/kg and 40.6 mg/kg), and then rearing *A. chinensis* with above pupae. The results showed that the Cd uptake, excretion, and accumulation of *S. litura* and *S. frugiperda*, and Cd uptake and accumulation of *A. chinensis* were dose-response to Cd concentrations in diet, namely increasing with the increase of Cd concentrations in the diet. The bioconcentration factor (BCF) of the diet to noctuidae insects was greater than 1, indicating that noctuidae insects biomagnified Cd, whereas the biomagnification factor (BMF) of noctuidae insects' pupae to *A. chinensis* was less than 1, indicating that Cd bio-dilution has occurred. 4.06 mg/kg Cd stress

基金项目: 国家自然科学基金 (32071619); 广东省自然科学基金 (2023A1515011052)

作者简介: 吴凯旋, 男, 硕士研究生, 从事生态毒理学研究, E-mail: 839142615@qq.com

*通讯作者 Author for correspondence: 舒迎花, 女, 博士, 教授, 主要从事生态毒理学和农业生态学研究, E-mail: shuyinghua@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-08-28; 接受日期 Accepted: 2023-10-16

significantly reduced the relative growth rate (RGR) of *S. frugiperda* larvae but had no effect on the RGR of *S. litura*, which was significantly correlated with insect Cd accumulation and BCF. 40.6 mg/kg Cd stress significantly changed the food utilization, inhibited larval growth and development of noctuid insects, and reduced the weight of *A. chinensis* feeding on *S. litura* pupae, but Cd stress had no effect on the survival of *A. chinensis*. Therefore, although Cd has no biomagnification in phytophagous insects-predators, there are still biotoxic effects.

Key words: Heavy metal transfer; cadmium stress; *Spodoptera litura*; *Spodoptera frugiperda*; *Arma chinensis*

我国城市、城郊和农村均存在不同程度的土壤重金属污染问题, 涉及我国 83.9% 省份和 22.5% 地级市 (Yuan *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2014)。Yang 等 (2018) 对我国 1 443 处工农业用地土壤重金属含量的文献调研结果表明, 镉 (Cd)、铅 (Pb) 和砷 (As) 的污染风险较高, 其中 Cd 污染严重, 对人体健康和社会经济造成严重威胁 (Li *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2022)。

土壤中 Cd 会被植物吸收并引入食物链, 对植物、动物甚至人类造成了严重影响 (Dar *et al.*, 2015; Gall *et al.*, 2015)。植食性昆虫是农田生态系统中食物链和食物网的重要环节, 并在重金属的传递与累积过程中起到重要的媒介作用 (丁平等, 2012; 陈瑾等, 2020; 黄江南等, 2021)。植食性昆虫取食富含 Cd 的植物, 其食物利用、体重、存活率 (Vukašinić *et al.*, 2020)、繁殖力、卵孵化率 (Chen *et al.*, 2022) 和发育历期 (Čelić *et al.*, 2022) 等均受到不利影响。欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 幼虫发育期间长期暴露于较高浓度的 Cd, 其氧化应激被诱导, 幼虫的发育延迟, 死亡率增加 (Vukašinić *et al.*, 2020)。Cd 胁迫会破坏甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 雌性的求偶节律, 对交配行为产生负面影响, 导致繁殖力降低 (Su *et al.*, 2021)。家蚕 *Bombyx mori* 取食被 Cd 处理的桑叶后, 其体长和体重生长期明显受到抑制, 体重与长度之比会降低 (Si *et al.*, 2021)。天敌通过寄生或捕食植食性昆虫而间接受到重金属污染的影响 (Dar *et al.*, 2017)。波纹瓢虫 *Coccinella transversalis* 幼虫对体内含有高 Cd、镍 (Ni) 的蚜虫取食量减少, 且成虫体重明显减少, 但对体内含有低 Cd、Ni 的蚜虫取食量没有变化 (Naikoo *et al.*, 2021a; 2021b)。瓢虫取食被 Cd、Pb、Ni 处理的新菠萝灰粉蚧 *Dysmicoccus neobrevipes* 后, 其幼虫历期明显增长, 净繁殖率显著降低 (Sang *et al.*, 2018)。

一些研究比较了不同重金属通过土壤—植物—植食性昆虫—捕食者的食物链被生物转移和积

累到捕食者的程度 (Green *et al.*, 2003; Dar *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017; Sang *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2020; Naikoo *et al.*, 2021ab)。Naikoo 等 (2021b) 表明 Cd 在植物—蚜虫中呈放大作用, 而在蚜虫—瓢虫中呈稀释作用, 相似的规律也发生在其他研究中 (Dar *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017)。蚜虫和粉蚧等刺吸式口器昆虫, 因吸取植物汁液为生, 其对植物体内毒物的转移能力与咀嚼式口器昆虫可能存在差异 (Shu *et al.*, 2018), 重金属在天敌体内的积累情况也可能不同。目前, 有关捕食性天敌取食咀嚼式口器植食性昆虫而受到重金属污染影响的研究还未见报道。

夜蛾科昆虫斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 和草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 均具有咀嚼式口器, 食性多样, 繁殖潜力强, 扩散速度快, 广泛分布在世界各地, 是重要的农业害虫 (Lin *et al.*, 2017; He *et al.*, 2021)。草地贪夜蛾幼虫取食 76 科 353 种植物, 包括玉米、水稻、大麦、棉花和高粱等 (杨普云等, 2019; Yang *et al.*, 2021)。斜纹夜蛾取食 300 多种植物, 包括卷心菜、烟草、大豆和菜心等 (Cheng *et al.*, 2017; Babu and Singh, 2022)。本研究团队曾系统地研究了重金属对斜纹夜蛾的毒性效应及其机理, 斜纹夜蛾取食 Cd 处理的植物和饲料后, Cd 传递呈生物放大作用 (Li *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2021ab)。但有关重金属污染对草地贪夜蛾的影响报道很少 (王杰等, 2023)。捕食性昆虫蠋蝽 *Arma chinensis* 在中国广泛分布, 是许多农业和森林害虫的重要天敌, 可以捕食 40 余种农林害虫, 包括小菜蛾 *Plutella xylostella*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、粘虫 *Mythimna separata*、斜纹夜蛾和草地贪夜蛾等 (唐艺婷等, 2019; Meng *et al.*, 2022; 孟建玉等, 2022; 任春燕等, 2022)。因此, 本文利用添加了不同 Cd 浓度 (0、4.06 和 40.6 mg/kg) 的夜蛾幼虫人工饲料, 分别喂养上述昆虫幼虫至蛹, 以蛹饲喂蠋蝽, 测定饲料、夜蛾幼虫及其蛹、蠋蝽中 Cd 含量, 观测 Cd 胁迫下昆虫的食物利用、生长发育和

存活情况等，研究 Cd 在咀嚼式口器昆虫—蠋蝽的传递特征及其影响。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫饲养

斜纹夜蛾和草地贪夜蛾为华南农业大学资源环境学院生态学系养虫室提供，以人工饲料饲养数代 (Shu *et al.*, 2015)。蠋蝽购买于济源白云实业有限公司并在养虫室驯化饲养。所有的昆虫均饲养在温度 $27^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 60%、光照周期 14 L: 10 D 条件下，试验也在相同条件下进行。

1.2 重金属处理

在人工饲料中添加不同量的 CdCl_2 ，使人工饲料中 Cd 添加浓度分别为 4.06 和 40.6 mg/kg (记作 Cd1 和 Cd2)，并以不添加 CdCl_2 的人工饲料饲养的昆虫为对照。用上述饲料喂养的夜蛾幼虫化蛹后，以蛹饲喂蠋蝽若虫。

1.3 夜蛾科昆虫—蠋蝽中 Cd 含量测定

以不同 Cd 浓度的人工饲料喂养夜蛾幼虫至化蛹，期间收集幼虫粪便和蜕皮。幼虫长至 6 龄或化蛹时，每个处理选取 5 个重复，测定夜蛾幼虫、蛹和粪便的 Cd 含量。以不同 Cd 浓度处理的蛹喂养蠋蝽若虫，若虫长至成虫时，每个处理选取 10 个重复，测定蠋蝽成虫的 Cd 含量。

样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解：在消化管中加入 10 mL HNO_3 和 2 mL HClO_4 ，放入微波消解仪中进行消煮至完全，待消化管降至室温，加入 5 mL 去离子水，充分震荡后将洗液过滤，取滤液在 20 mL 容量瓶中定容待测。所有样品均用原子吸收火焰光度法 (Z-5300, 日立高科公司, 日本) 测定。样品中 Cd 含量的计算如下： $\text{Cd (mg/kg)} = (\text{C}\times 10) / \text{W}$ ，其中 C 为原子吸收火焰光度法测定的 Cd 浓度，W 为样品干重。

1.4 夜蛾科昆虫对 Cd 的摄取、排泄和积累

每个 Cd 处理浓度分别挑取 30 头长势均一的 2 龄幼虫，转至塑料杯中单头饲养，记录当天的虫重和添加饲料的鲜重 (g)；取同一批的 10 头 2 龄幼虫和各处理的人工饲料记录鲜重 (g) 并于 85°C 烘干后记录干重 (g)。收集各处理组 6 龄幼虫，记录每头虫鲜重，剩余饲料、粪便和蜕皮的干重。

计算斜纹夜蛾和草地贪夜蛾幼虫对重金属 Cd 的摄取、排泄和积累： $\text{Cd 的摄取量 (mg)} = (\text{初始}$

$\text{饲料干重} - \text{剩余饲料干重}) (\text{g}) \times \text{饲料测定的 Cd 含量 (mg/kg)} / 1000$ ； $\text{Cd 的排泄量 (mg)} = \text{排泄物干重 (g)} \times \text{排泄物测定的 Cd 含量 (mg/kg)} / 1000$ ； $\text{Cd 的积累量 (mg)} = \text{虫体干重 (g)} \times \text{虫体测定的 Cd 含量 (mg/kg)} / 1000$ 。

1.5 蠋蝽对 Cd 的摄取和积累

每个 Cd 处理浓度分别挑取 10 头长势均一的蠋蝽若虫，转至塑料杯中单头饲养，添加 Cd 处理人工饲料饲养的夜蛾蛹；取同一批各处理的 5 头蛹记录鲜重并于 85°C 烘干后记录干重 (g)。等若虫长至成虫时，收集各处理组成虫，记录每头成虫干重和剩余蛹的干重。

计算蠋蝽对 Cd 的摄取和积累： $\text{Cd 的摄取量 (mg)} = (\text{添加虫蛹的干重} - \text{剩余虫蛹的干重}) (\text{g}) \times \text{虫蛹测定的 Cd 含量 (mg/kg)} / 1000$ ； $\text{Cd 的积累量 (mg)} = \text{蠋蝽成虫的干重 (g)} \times \text{成虫测定的 Cd 含量 (mg/kg)} / 1000$ 。

1.6 Cd 胁迫对夜蛾科昆虫—蠋蝽的影响

斜纹夜蛾和草地贪夜蛾幼虫取食不同 Cd 处理人工饲料至化蛹时，统计夜蛾幼虫的体重和发育历期，蛹重和蛹的发育历期。此外，Cd 胁迫影响夜蛾幼虫的食物利用情况依据 Waldbauer (1968) 所提供的计算方法：

- (1) 消耗食物量 = 饲喂食物量 - 剩余食物量
- (2) 消化食物量 = 消耗食物量 - 排出粪便量
- (3) 相对消耗率 (Relative consumption rate, RCR) (g/g/d) = 消耗食物干重 / (发育历期 \times 幼虫平均体重)，其中幼虫平均体重 = (特定龄期初体重 + 特定龄期末体重) / 2
- (4) 相对生长率 (Relative growth rate, RGR) (g/g/d) = 幼虫增加干重 / (发育历期 \times 幼虫平均体重)
- (5) 食物转化率 (Efficiency of conversion of ingested food, ECI) (%) = 虫体生物量增加 / 取食量 $\times 100$
- (6) 近似消化率 (Approximate digestibility, AD) (%) = (取食量 - 粪便量) / 取食量 $\times 100$
- (7) 消化转化率 (Efficiency of conversion of digested food, ECD) (%) = 虫体生物量增加 / (取食量 - 粪便量) $\times 100$

不同 Cd 处理夜蛾蛹饲喂蠋蝽若虫至成虫时，记录其存活率和成虫体重。

1.7 数据分析

采用 SPSS 22.0 统计软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)、Duncan 多重比较 (差异水平 0.05) 和 Pearson 相关性分析。夜蛾幼虫化蛹率和蠋蝻存活率经 $\arcsin x$ 转换后再进行方差分析和多重比较。Cd 在人工饲料—夜蛾科昆虫—蠋蝻的传递特征按照如下公式进行:

(1) 生物浓缩系数 (Bioconcentration factor, BCF) = 夜蛾幼虫或蛹 Cd 含量/人工饲料 Cd 含量

(2) 生物积累系数 (Bioaccumulation factor, BAF) = 夜蛾蛹 Cd 含量/夜蛾幼虫 Cd 含量

(3) 生物放大系数 (Biomagnification factor, BMF) = 蠋蝻成虫 Cd 含量/夜蛾蛹 Cd 含量

2 结果与分析

2.1 Cd 在夜蛾科昆虫—蠋蝻的传递特征

随着人工饲料中 Cd 浓度的增加, 斜纹夜蛾和草地贪夜蛾的幼虫和蛹、蠋蝻虫体的 Cd 含量显著增加, 且最高 Cd 含量均在夜蛾幼虫体内检测到, 蛹次之, 蠋蝻体内 Cd 含量最低 (图 1-A 和图 2-A)。当幼虫取食 Cd1 处理饲料后, 斜纹夜蛾幼虫和蛹中 Cd 含量均显著小于草地贪夜蛾。相反, 取食 Cd2 处理饲料后, 斜纹夜蛾幼虫和蛹中 Cd 含量却大于草地贪夜蛾 (图 1-A 和图 2-A)。

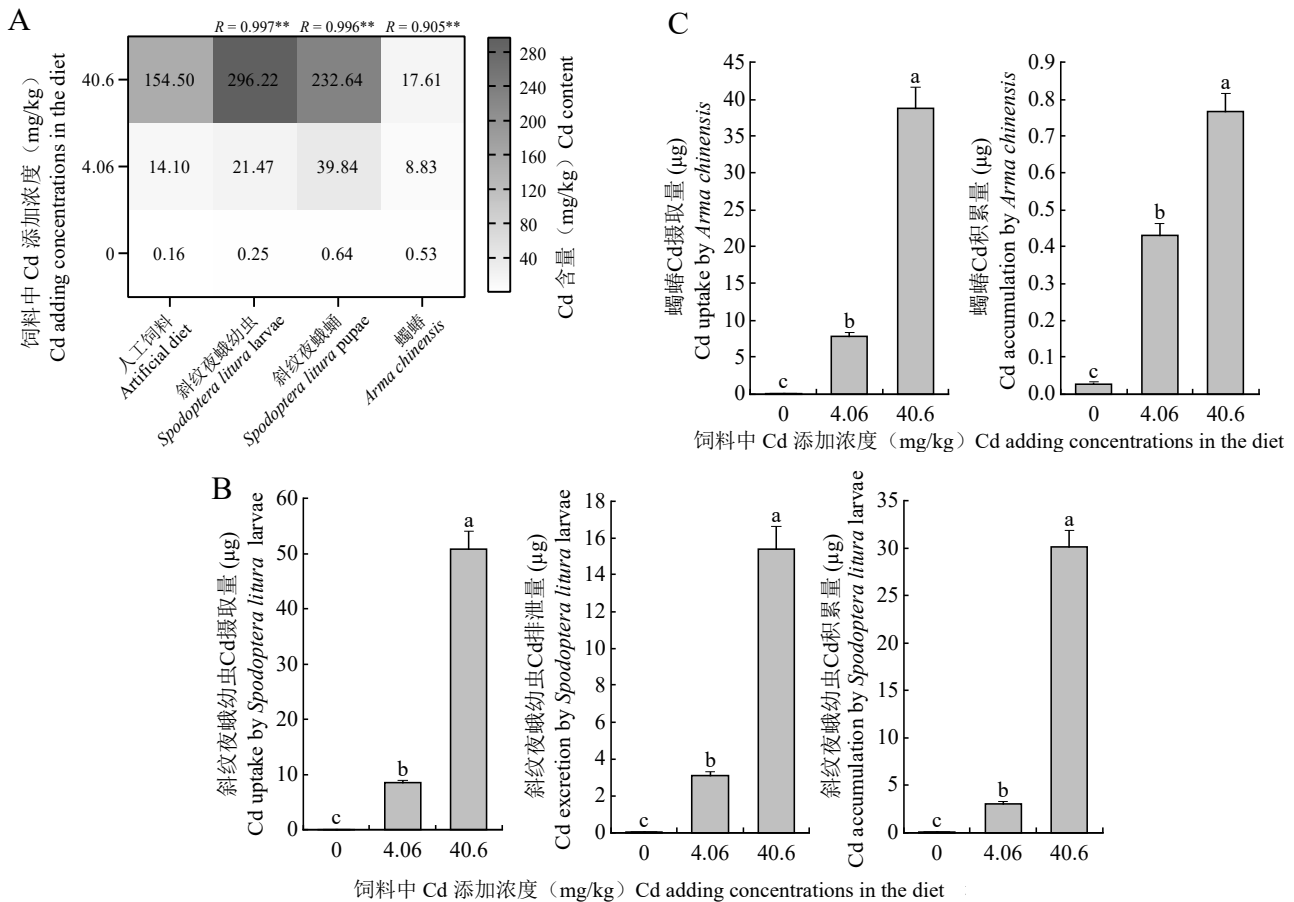


图 1 Cd 在人工饲料—斜纹夜蛾—蠋蝻中传递

Fig. 1 Cd transfer in artificial diet - *Spodoptera litura* - *Arma chinensis*

注: A, 样品中 Cd 含量; B, 斜纹夜蛾对 Cd 的摄取、排泄和积累量; C, 蠋蝻对 Cd 的摄取和积累量。R 表示样品中 Cd 含量与人工饲料 Cd 含量的 Pearson 相关系数, “***”表示 $P < 0.001$, 相关性显著; 不同小写字母表示各浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Note: A, Cd content in the samples; B, Cd uptake, excretion, and accumulation in *Spodoptera litura*; C, Cd uptake and accumulation in *Arma chinensis*. R was the Pearson correlation coefficient between Cd content in samples and Cd content in artificial diet. “***” indicated significant correlation at 0.001 level. Different lowercase letters indicated significant differences at 0.05 level among treatments, the same below.

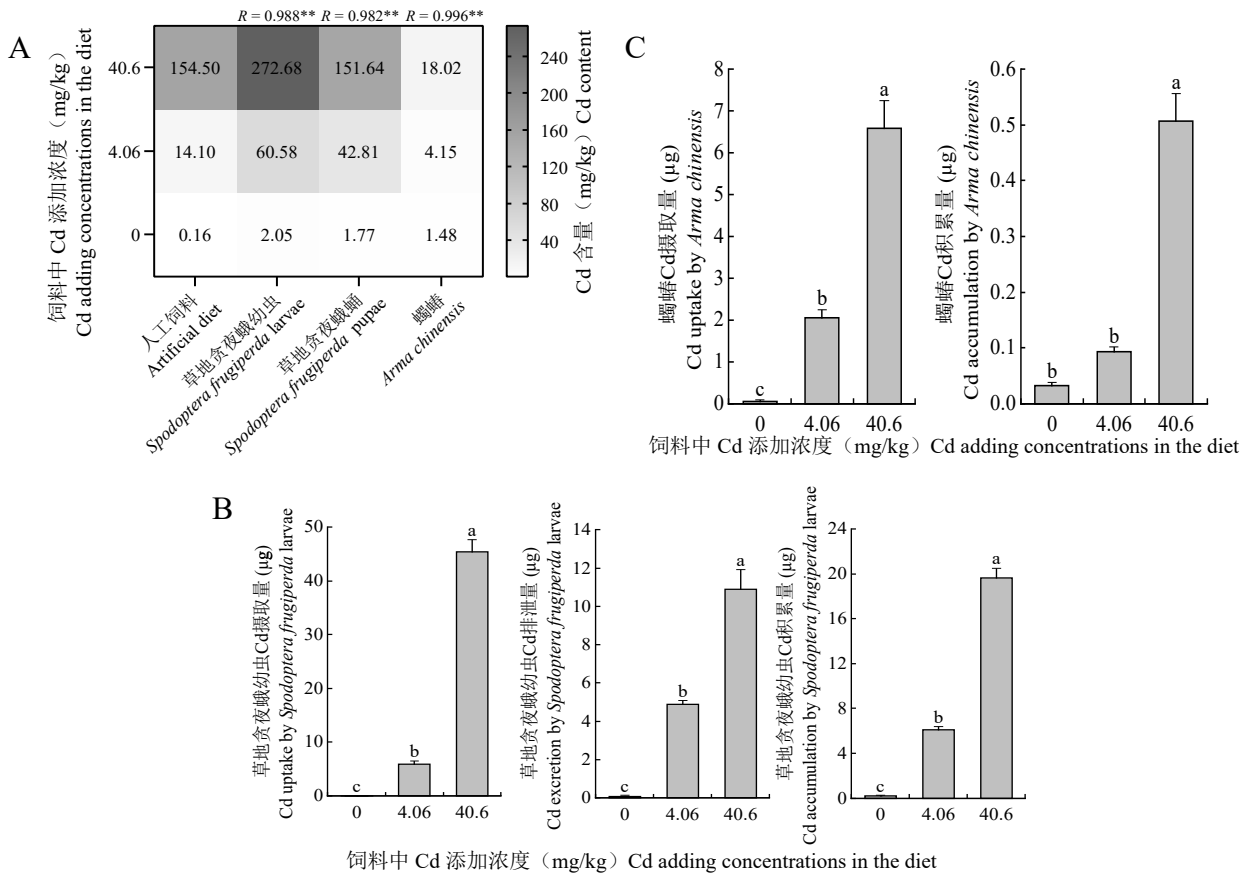


图 2 Cd 在人工饲料—草地贪夜蛾—蠋蜻中的传递

Fig. 2 Cd transfer in artificial diet - *Spodoptera frugiperda* - *Arma chinensis*

注：A，样品中的 Cd 含量；B，草地贪夜蛾对 Cd 的摄取、排泄和积累量；C，蠋蜻对 Cd 的摄取和积累量。

Note: A, Cd content in the samples; B, Cd uptake, excretion, and accumulation in *Spodoptera frugiperda*; C, Cd uptake and accumulation in *Arma chinensis*.

随着饲料添加 Cd 浓度的增加，斜纹夜蛾和草地贪夜蛾幼虫对 Cd 的摄取、排泄和积累显著增多（图 1-B 和图 2-B）；尽管蠋蜻通过取食夜蛾蛹而摄取了 Cd，但在体内的 Cd 积累量极少（图 1-C 和图 2-C）。

两种幼虫取食 Cd1 饲料后，其 BCF 均大于 1，且斜纹夜蛾 BCF（饲料—幼虫或蛹）显著低于草地

贪夜蛾相应的 BCF（表 1）。取食 Cd2 饲料后，草地贪夜蛾蛹对饲料的 BCF 为 0.97，显著低于饲料—斜纹夜蛾蛹的 BCF。除了 Cd1 处理的斜纹夜蛾蛹对幼虫的 BAF 大于 1，其他处理均小于 1。Cd 处理下，蠋蜻—夜蛾蛹的 BMF 均小于 1，即 Cd 在夜蛾科昆虫—蠋蜻食物链中不呈现生物放大作用（表 1）。

表 1 Cd 在饲料—夜蛾科昆虫—蠋蜻的传递特征

Table 1 Characteristics of Cd transfer in artificial diet - noctuidae insects - *Arma chinensis*

夜蛾科昆虫 Noctuidae insect	处理 Treatments	生物浓缩系数 (BCF)		生物积累系数 (BAF)	生物放大系 (BMF)
		幼虫-人工饲料 Larvae - diet	蛹-人工饲料 Pupae - diet	蛹-幼虫 Pupae - larvae	蠋蜻-蛹 <i>Arma chinensis</i> - pupae
斜纹夜蛾 <i>Spodoptera litura</i>	4.06	1.52 ± 0.16 b	2.83 ± 0.02 b	1.91 ± 0.18 a	0.22 ± 0.01 a
	40.6	1.92 ± 0.06 b	1.51 ± 0.03 c	0.79 ± 0.04 b	0.08 ± 0.00 d
草地贪夜蛾 <i>Spodoptera frugiperda</i>	4.06	4.30 ± 0.89 a	3.01 ± 0.04 a	0.76 ± 0.14 b	0.09 ± 0.01 c
	40.6	1.76 ± 0.03 b	0.97 ± 0.02 d	0.55 ± 0.02 b	0.13 ± 0.00 b

注：同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, 独立样本 T 检验)。Note: Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level (independent-samples T test) .

2.2 Cd 胁迫对夜蛾科昆虫—蠋蝻的影响

2.2.1 Cd 胁迫对斜纹夜蛾—蠋蝻的影响

斜纹夜蛾幼虫体重随着 Cd 处理浓度的升高而降低, Cd2 处理后幼虫体重为 0.87 g, 分别是对照和 Cd1 处理的 69.1%和 75.9% (表 2)。取食 Cd2 饲料后, 斜纹夜蛾幼虫发育历期为 11.75 d, 显著长于对照和 Cd1 处理。取食 Cd2 饲料后, 斜纹夜蛾幼虫相对消耗率 RCR 和相对生长率 RGR 显著低于对照

和 Cd1 处理, 但其食物转化率 ECI 和近似消化率 AD 却显著高于对照和 Cd1 (表 2)。Cd 胁迫对其消化转化率 ECD 没有影响。Cd1 处理下, 斜纹夜蛾蛹重为 0.53 g, 是 Cd2 处理的 1.1 倍。Cd 胁迫不影响斜纹夜蛾的蛹重和蛹的发育历期。除斜纹夜蛾 ECD 外, 其他生命参数均与昆虫体内 Cd 积累量显著相关 (表 2)。

表 2 Cd 胁迫对斜纹夜蛾的影响
Table 2 Effect of Cd stress on *Spodoptera litura*

生命参数 Life parameter	饲料中 Cd 添加浓度 (mg/kg) Cd adding concentrations in the diet			生命参数与 Cd 积累量的相关性 (R) Correlation between life parameters and Cd accumulation in insect
	0	4.06	40.6	
斜纹夜蛾幼虫虫重 (g) <i>Spodoptera litura</i> larval weight	1.26 ± 0.02 a	1.14 ± 0.04 b	0.87 ± 0.05 c	-0.549**
斜纹夜蛾幼虫历期 (d) <i>Spodoptera litura</i> larval duration	9.42 ± 0.21 b	9.69 ± 0.18 b	11.75 ± 0.25 a	0.678**
斜纹夜蛾幼虫 RCR (g/g/d) <i>Spodoptera litura</i> larval RCR	0.61 ± 0.01 a	0.63 ± 0.03 a	0.50 ± 0.01 b	-0.494**
斜纹夜蛾幼虫 RGR (g/g/d) <i>Spodoptera litura</i> larval RGR	0.27 ± 0.00 a	0.27 ± 0.00 a	0.26 ± 0.00 b	-0.510**
斜纹夜蛾幼虫 ECI (%) <i>Spodoptera litura</i> larval ECI	43.76 ± 0.82 b	44.73 ± 2.35 b	51.19 ± 0.54 a	0.455**
斜纹夜蛾幼虫 AD (%) <i>Spodoptera litura</i> larval AD	59.31 ± 0.71 b	60.75 ± 1.72 b	73.70 ± 0.77 a	0.653**
斜纹夜蛾幼虫 ECD (%) <i>Spodoptera litura</i> larval ECD	74.80 ± 1.01 a	72.72 ± 2.09 a	70.56 ± 1.07 a	-0.113
斜纹夜蛾蛹重 (g) <i>Spodoptera litura</i> pupal weight	0.52 ± 0.01 ab	0.53 ± 0.02 a	0.48 ± 0.01 b	-0.323*
斜纹夜蛾蛹历期 (d) <i>Spodoptera litura</i> pupal duration	12.33 ± 0.24 a	12.43 ± 0.30 a	12.07 ± 0.25 a	-0.376**

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 多重比较), R 表示生命参数与虫体 Cd 积累量的 Pearson 相关系数, “*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.001$, 相关性显著, 下同。Note: Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level (Duncan Multiple Comparison); R was the Pearson correlation coefficient between life parameters and Cd accumulation in insect; “*” indicated significant correlation at 0.05 level, “**” indicated significant correlation at 0.001 level, the same below.

蠋蝻取食 Cd 处理的斜纹夜蛾蛹后, 其存活没有受到影响 (图 3-A)。Cd2 处理的蠋蝻成虫体重为 0.08 g, 显著低于对照, 分别是对照和 Cd1 处理的 84.9%和 90.0% (图 3-B)。

2.2.2 Cd 胁迫对草地贪夜蛾—蠋蝻的影响

取食 Cd2 饲料后, 草地贪夜蛾幼虫体重显著降低, 分别为对照和 Cd1 处理的 75.3%和 71.6%, 幼虫的发育历期却显著延长, 是对照和 Cd1 处理的 1.7 倍 (表 3)。草地贪夜蛾幼虫 RCR 和 RGR 随

着饲料中 Cd 添加浓度的增加而显著降低。Cd 处理对其 ECI 没有影响, 但显著提高了 AD, 降低了幼虫的 ECD。取食 Cd2 饲料后, 草地贪夜蛾蛹重显著低于对照和 Cd1 处理 (表 3), 但其历期没有受到影响。除草地贪夜蛾 ECI 和蛹发育历期外, 其他生命参数均与草地贪夜蛾体内 Cd 积累量显著相关 (表 3)。

蠋蝻取食用 Cd 处理饲料喂养的草地贪夜蛾蛹后, 其存活率和体重均没有受到影响 (图 4-A, B)。

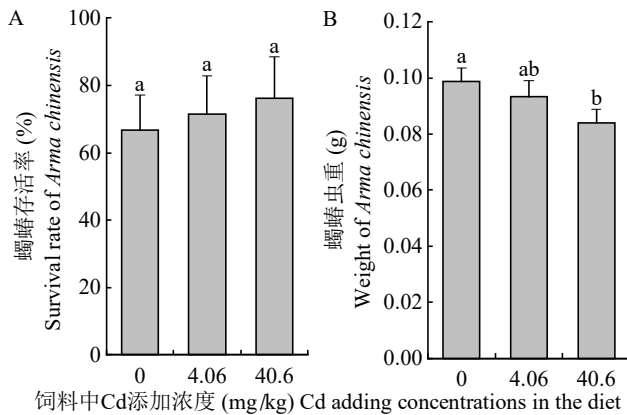


图3 Cd胁迫经斜纹夜蛾蛹对蠋蜻的影响

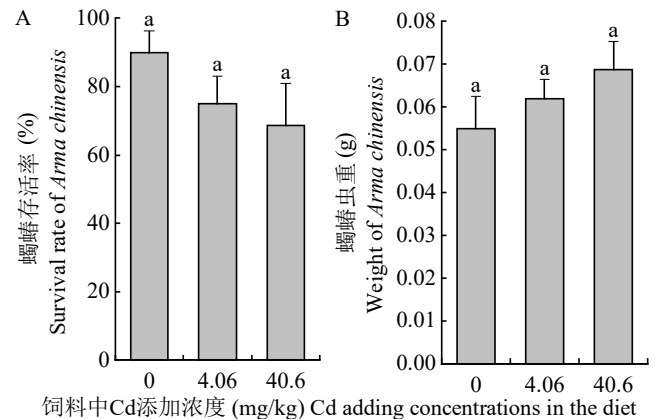
Fig. 3 Effect of Cd stress on *Arma chinensis* via the pupae of *Spodoptera litura*

图4 Cd胁迫经草地贪夜蛾蛹对蠋蜻的影响

Fig. 4 Effect of Cd stress on *Arma chinensis* via the pupae of *Spodoptera frugiperda*

表3 Cd胁迫对草地贪夜蛾的影响

Table 3 Effect of Cd stress on *Spodoptera frugiperda*

生命参数 Life parameter	饲料中 Cd 添加浓度 (mg/kg) Cd adding concentrations in the diet			生命参数与 Cd 积累量的相关性 (R) Correlation between life parameters and Cd accumulation in insect
	0	4.06	40.6	
草地贪夜蛾幼虫虫重 (g) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval weight	0.52 ± 0.00 a	0.54 ± 0.02 a	0.39 ± 0.02 b	-0.625**
草地贪夜蛾幼虫历期 (d) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval duration	7.87 ± 0.09 b	8.18 ± 0.13 b	13.47 ± 0.32 a	0.922**
草地贪夜蛾幼虫 RCR (g/g/d) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval RCR	1.60 ± 0.02 a	1.50 ± 0.05 b	0.84 ± 0.03 c	-0.927**
草地贪夜蛾幼虫 RGR (g/g/d) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval RGR	0.40 ± 0.00 a	0.34 ± 0.00 b	0.20 ± 0.00 c	-0.977**
草地贪夜蛾幼虫 ECI (%) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval ECI	24.82 ± 0.37 a	22.74 ± 0.72 a	23.76 ± 0.90 a	-0.064
草地贪夜蛾幼虫 AD (%) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval AD	50.46 ± 0.51 b	54.55 ± 1.40 b	72.48 ± 1.92 a	0.824**
草地贪夜蛾幼虫 ECD (%) <i>Spodoptera frugiperda</i> larval ECD	49.01 ± 0.65 a	41.99 ± 1.82 b	33.16 ± 1.71 c	-0.741**
草地贪夜蛾蛹重 (g) <i>Spodoptera frugiperda</i> pupal weight	0.25 ± 0.00 a	0.26 ± 0.01 a	0.20 ± 0.01 b	-0.609**
草地贪夜蛾蛹历期 (d) <i>Spodoptera frugiperda</i> pupal duration	9.89 ± 0.20 a	10.00 ± 0.15 a	9.93 ± 0.27 a	-0.036

3 结论与讨论

3.1 Cd 在夜蛾科昆虫—蠋蜻的迁移特征

昆虫体内重金属含量随食物中重金属浓度的升高而增加，且与昆虫的发育阶段有一定关系（丁平等，2012）。本研究中夜蛾幼虫、蛹和蠋蜻的 Cd 含量与饲料中 Cd 浓度呈剂量反应（图 1，图 2），

这与以往研究结果一致（Ding *et al.*, 2013; Jin *et al.*, 2020; Naikoo *et al.*, 2021b）。取食 Cd₂ 饲料后，夜蛾幼虫 Cd 含量均大于蛹，这与 Su 等（2014）的研究结果一致，即甜菜夜蛾取食含 Cd 的饲料后，不同发育阶段虫体内所含 Cd 含量的顺序为幼虫 > 蛹 > 成虫。亚洲玉米螟 *O. furnacalis* 取食含 Cd 饲料后，Cd 含量从幼虫、蛹到成虫逐渐降低（Luo *et al.*, 2020）。这是因为昆虫在变态过程中也会排出

体内的重金属,是昆虫的一种重要解毒机制(胡蒙蒙等,2012)。昆虫对重金属的摄取、排泄和积累量与食物中的重金属浓度有关(胡蒙蒙等,2012)。随着人工饲料添加 Cd 浓度增加,斜纹夜蛾和草地贪夜蛾幼虫对 Cd 的摄取、排泄和积累量显著增加,这与以往的研究结果一致(李长春等,2018; Jin *et al.*, 2020)。

重金属在昆虫食物链中具有流动性,昆虫的摄食方式极大地影响生物积累,且不同的金属根据其毒性和保留性表现出不同的生物累积率(Butt *et al.*, 2018)。本研究中夜蛾幼虫取食 Cd 处理饲料后,生物浓缩系数 BCF(饲料—幼虫)大于 1,这说明 Cd 在饲料—夜蛾幼虫阶段发生生物放大作用。研究 Cd 在蚕豆 *Vicia faba*—蚜虫—异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 食物链中的传递时发现,从蚕豆到蚜虫的 Cd 转移系数大于 1(Naikoo *et al.*, 2021b);研究 Cd 通过植物(茄子和番茄)—新菠萝灰粉蚧—孟氏隐唇瓢虫 *Cryptolaemus montrouzieri* 食物链的转移发现, Cd 在植物(茄子和番茄)—新菠萝灰粉蚧的转移系数均大于 1,且高浓度处理的转移系数小于低浓度处理(Wang *et al.*, 2017),与本研究中饲料—夜蛾科幼虫的 BCF 结果一致。饲料—蛹的 BCF 只有 Cd2 下草地贪夜蛾蛹的结果才小于 1,这可能是其在幼虫发育到蛹过程中通过粪便和化蛹排出大量 Cd,导致蛹中 Cd 含量低于取食饲料中的 Cd 含量,这一点从 Cd2 下草地贪夜蛾幼虫—蛹的生物积累系数 BAF 为 0.55,小于其他处理组中 BAF 值也能说明。而 Cd1 下斜纹夜蛾幼虫—蛹的 BAF 值大于 1,说明斜纹夜蛾在幼虫到蛹期间发生了生物积累,与草地贪夜蛾的结果存在差异,这可能是两种物种之间对重金属的排泄能力不同造成的,草地贪夜蛾 Cd1 幼虫 Cd 排泄量显著高于斜纹夜蛾的 Cd 排泄量。本研究中斜纹夜蛾蛹—蠋蝽和草地贪夜蛾蛹—蠋蝽的生物放大系数 BMF 均小于 1,这与 Naikoo 等(2021b)和 Wang 等(2017)研究中植食性昆虫到天敌的转移结果是一致的,均没有出现生物放大作用,这表明 Cd 在植食性昆虫—天敌阶段会出现生物稀释作用。

3.2 Cd 胁迫对夜蛾科昆虫—蠋蝽的影响

Cd 胁迫会对昆虫的生长发育产生影响,一般表现为高浓度抑制昆虫的生长。受 Cd 胁迫下,美国白蛾 *Hyphantria cunea* 4 龄、5 龄、6 龄幼虫重显著

降低(Zheng *et al.*, 2023),受 Cd 处理的亚洲玉米螟雄蛹重显著降低(Luo *et al.*, 2020),而舞毒蛾 *Lymantria dispar* 的幼虫和蛹重随着 Cd 处理浓度的升高而降低,且幼虫发育历期延长(Jiang and Yan, 2017; 董效文等, 2019)。本研究中受 Cd2 胁迫,夜蛾幼虫体重和蛹重、相对生长率 RGR 均显著降低,而幼虫的发育历期显著延长,这表明两种夜蛾科昆虫在此 Cd 浓度处理下受到显著的抑制作用。

食物利用是判别植食性昆虫对环境因素(如重金属胁迫和杀虫剂胁迫)响应的重要参数(Jiang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019)。本研究发现,高 Cd 胁迫下夜蛾幼虫的 RCR 显著降低,这说明 Cd 胁迫降低了人工饲料的适口性, Cd 胁迫下美国白蛾的食物消耗率也有相同的结果(Zheng *et al.*, 2023),而 AD 显著提高,表明 Cd 胁迫加强了斜纹夜蛾和草地贪夜蛾幼虫对食物的消化能力。昆虫会通过调节 AD 和 ECD 的变化保持 ECI 的稳定(Jiang *et al.*, 2018),但是本研究中 Cd2 胁迫下斜纹夜蛾的 ECI 显著增加,可能是因为它对 ECD 没有影响,导致这种调节机制失效,而 Cd2 胁迫下草地贪夜蛾 ECI 与其他处理没有差异,而 ECD 显著降低,正好抵消了 AD 的增加。斜纹夜蛾和草地贪夜蛾结果的差异表明, Cd 胁迫对不同昆虫食物利用的影响不同。高 Cd 胁迫下草地贪夜蛾 ECD 减少,可能原因是草地贪夜蛾使用食物中获得的能量优先用于解毒,而不是用于生长(Zheng *et al.*, 2023)。昆虫 RGR 可作为探讨植食性昆虫与寄主植物的相互关系过程中的重要参数,用以反映昆虫生长的状况等(王倩倩等, 2015)。Cd1 胁迫下,草地贪夜蛾幼虫的 RGR 显著下降,而斜纹夜蛾幼虫 RGR 没有受到影响,这与两种昆虫体内 Cd 含量相关的(表 3)(即草地贪夜蛾幼虫体内的 Cd 积累量显著高于斜纹夜蛾幼虫,草地贪夜蛾幼虫—饲料的 BCF 显著高于斜纹夜蛾)。

本研究发现, Cd 胁迫对蠋蝽的存活没有影响,主要原因可能是 Cd 在夜蛾科昆虫—蠋蝽的传递中没有发生生物放大,故蠋蝽体内的 Cd 含量较低,不足以影响蠋蝽的存活。但 Cd2 胁迫下,取食斜纹夜蛾蛹的蠋蝽体重下降,而取食草地贪夜蛾蛹的蠋蝽体重没有受到影响,这与两种夜蛾科昆虫蛹体内 Cd 含量相关的,斜纹夜蛾蛹内 Cd 含量显著高于草地贪夜蛾蛹。白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* 寄生在 Cd 胁迫的美国白蛾蛹后,其体重显著下降(Tan

et al., 2023), 与本研究中西蠋蝽取食斜纹夜蛾蛹结果相同。狭臀瓢虫 *Coccinella transversalis* 取食 25 mg/kg、50 mg/kg 和 75 mg/kg Pb 处理的黑豆蚜 *Aphis fabae* 后其体重没有受到影响 (Naikoo *et al.*, 2019), 这与蠋蝽取食草地贪夜蛾蛹的结果相似。Wang 等 (2022) 研究表明圆斑弯叶毛瓢虫 *Nephus ryuguus* 取食不同浓度 Cu 处理的腺刺粉蚧 *Ferrisia virgata* 后其体重会显著降低, 但异色瓢虫取食 25 mg/kg 和 50 mg/kg 浓度 Zn 处理的蚜虫后其体重没有受到影响。这些结果表明重金属通过食物链对天敌昆虫体重的影响与重金属种类、植食性昆虫种类和体内积累的重金属含量, 以及天敌昆虫种类有关。

本研究发发现夜蛾昆虫和以其蛹为食的蠋蝽对 Cd 的摄取、排泄和积累量随夜蛾幼虫饲料中 Cd 浓度增加而升高, Cd 在饲料—夜蛾科昆虫传递中发生生物放大作用, 但在夜蛾科昆虫—蠋蝽中发生生物稀释作用。高浓度 Cd 抑制了夜蛾科昆虫的生长, 延长了幼虫的发育历期。Cd 经夜蛾昆虫不会影响蠋蝽的存活, 但蠋蝽积累的少量 Cd 会对其生长产生抑制作用。因此, Cd 会在食物链中传递, 虽然在植食性昆虫—天敌中没有发生生物放大作用, 但仍对天敌存在生物毒性效应。

参考文献 (References)

- Babu SR, Singh B. Population dynamics of *Spodoptera exigua* (F.) and *S. litura* (F.) in soybean [J]. *Indian Journal of Entomology*, 2022, 84 (4): 1-5.
- Butt A, Qurat-ul-Ain, Rehman K, *et al.* Bioaccumulation of cadmium, lead, and zinc in agriculture-based insect food chains [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2018, 190 (12): 698.
- Čelić TV, Vukašinović EL, Kojić D, *et al.* Exposure to high concentrations of cadmium which delay development of *Ostrinia nubilalis* Hbn. larvae affected the balance of bioelements [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 83 (2): 193-200.
- Chen J, Guo YS, Huang SM, *et al.* Integration of transcriptome and proteome reveals molecular mechanisms underlying stress responses of the cutworm, *Spodoptera litura*, exposed to different levels of lead (Pb) [J]. *Chemosphere*, 2021a, 283: 131205.
- Chen J, Jin P, Huang SM, *et al.* Cabbage cultivars influence transfer and toxicity of cadmium in soil-Chinese flowering cabbage *Brassica campestris*-cutworm *Spodoptera litura* larvae [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021b, 213: 112076.
- Chen J, Wang JW, Shu YH. Review on the effects of heavy metal pollution on herbivorous insects [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (5): 1773-1782. [陈瑾, 王建武, 舒迎花. 重金属污染影响植食性昆虫的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (5): 1773-1782]
- Chen YM, Huang JN, Wei JQ, *et al.* Low-level cadmium exposure influences rice resistance to herbivores by priming jasmonate signaling [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 194: 104741.
- Cheng TC, Wu JQ, Wu YQ, *et al.* Genomic adaptation to polyphagy and insecticides in a major East Asian noctuid pest [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1 (11): 1747-1756.
- Dar MI, Green ID, Naikoo MI, *et al.* Assessment of biotransfer and bioaccumulation of cadmium, lead and zinc from fly ash amended soil in mustard-aphid-beetle food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 1221-1229.
- Dar MI, Khan FA, Green ID, *et al.* The transfer and fate of Pb from sewage sludge amended soil in a multi-trophic food chain: A comparison with the labile elements Cd and Zn [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22 (20): 16133-16142.
- Ding P, Zhuang P, Li ZA, *et al.* Accumulation and detoxification of cadmium by larvae of *Prodenia litura* (Lepidoptera: Noctuidae) feeding on Cd-enriched amaranth leaves [J]. *Chemosphere*, 2013, 91 (1): 28-34.
- Ding P, Zhuang P, Li ZA, *et al.* Transfer characteristics of cadmium in soil-vegetable-insect food chain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (11): 3116-3122. [丁平, 庄萍, 李志安, 等. 镉在土壤-蔬菜-昆虫食物链的传递特征 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (11): 3116-3122]
- Dong XW, Wang YY, Jiang D, *et al.* Effects of single and combined stresses of Cd and Pb on the growth and development of *Lymantria dispar* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47 (5): 108-111. [董效文, 王月月, 姜敏, 等. 镉、铅单一及复合胁迫下舞毒蛾的生长发育 [J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47 (5): 108-111]
- Gall JE, Boyd RS, Rajakaruna N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: A review [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187 (4): 201.
- Green ID, Merrington G, Tibbett M. Transfer of cadmium and zinc from sewage sludge amended soil through a plant-aphid system to newly emerged adult ladybirds (*Coccinella septempunctata*) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 99 (1-3): 171-178.
- He LM, Wu QL, Gao XW, *et al.* Population life tables for the invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* fed on major oil crops planted in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20 (3): 745-754.
- Hu MM, Wang Q, Yang YZ. Accumulation, distribution and excretion of heavy metals in insects [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (18): 213-217. [胡蒙蒙, 王青, 杨益众. 重金属在昆虫体内的累积、分布与排泄 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28 (18): 213-217]
- Huang JN, Chen YM, Huang Y, *et al.* The effect of heavy metal accumulation on plant and herbivore interaction: A review [J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11 (5): 42-45. [黄江南, 陈雨萌, 黄越, 等. 重金属积累影响植物和植食性昆虫互作的研究进展 [J]. *农学报*, 2021, 11 (5): 42-45]
- Jiang D, Dong XW, Yan SC. Heavy metal accumulation/excretion in and food utilization of *Lymantria dispar* larvae fed with Zn- or Pb-stressed *Populus alba berolinensis* leaves [J]. *Environmental Entomology*, 2018, 47 (5): 1329-1336.
- Jiang D, Yan SC. Effects of Cd, Zn or Pb stress in *Populus alba berolinensis* on the development and reproduction of *Lymantria dispar* [J]. *Ecotoxicology*, 2017, 26 (10): 1305-1313.
- Jin P, Chen J, Zhan HR, *et al.* Accumulation and excretion of zinc and their effects on growth and food utilization of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110883.
- Li CC, Wang Y, Yao GX, *et al.* Bioaccumulation of cadmium and its effects on the growth and development of *Drosophila* [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47 (8): 83-87. [李长春, 王永, 姚国新, 等. 镉在果蝇体内的积累及其对其生长发育的影响 [J]. *河南农业科学*, 2018, 47 (8): 83-87]
- Li KQ, Chen J, Jin P, *et al.* Effects of Cd accumulation on cutworm *Spodoptera litura* larvae via Cd treated Chinese flowering cabbage *Brassica campestris* and artificial diets [J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 151-163.
- Li XY, Zhang JR, Gong YW, *et al.* Status of mercury accumulation in agricultural soils across China (1976-2016) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 197: 110564.
- Lin XD, Zhang L, Jiang YY. Characterization of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) *Takeout* genes and their differential responses to insecticides and sex pheromone [J]. *Journal of Insect Science*, 2017, 17 (4): 80.

- Luo M, Cao HM, Fan YY, *et al.* Bioaccumulation of cadmium affects development, mating behavior, and fecundity in the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* [J]. *Insects*, 2020, 11 (1): 7.
- Meng JY, Li ZM, Dong XL, *et al.* Predation capability of *Arma chinensis* nymph on the 3rd to 5th instar larvae of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50 (8): 1-5. [孟建玉, 李治模, 董详立, 等. 蝽蟊若虫对草地贪夜蛾3-5龄幼虫的捕食能力 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (8): 1-5]
- Meng JY, Yang CL, Wang HC, *et al.* Molecular characterization of six heat shock protein 70 genes from *Arma chinensis* and their expression patterns in response to temperature stress [J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2022, 27 (6): 659-671.
- Naikoo MI, Dar MI, Khan FA, *et al.* Trophic transfer and bioaccumulation of lead along soil-plant-aphid-ladybird food chain [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26 (23): 23460-23470.
- Naikoo MI, Khan FA, Noureldeen A, *et al.* Biotransfer, bioaccumulation and detoxification of nickel along the soil-faba bean-aphid-ladybird food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2021a, 785: 147226.
- Naikoo MI, Raghav F, Dar MI, *et al.* Uptake, accumulation and elimination of cadmium in a soil-faba bean (*Vicia faba*)-aphid (*Aphis fabae*)-ladybird (*Coccinella transversalis*) food chain [J]. *Chemosphere*, 2021b, 279: 130522.
- Peng JY, Zhang SA, Han YY, *et al.* Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151632.
- Ren CY, Liu J, Luo MH, *et al.* A Review on *Arma chinensis* Fallou (Hemiptera: Pentatomidae): A natural enemy insect [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38 (12): 100-109. [任春燕, 刘杰, 罗明华, 等. 天敌昆虫—蝽蟊的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2022, 38 (12): 100-109]
- Sang W, Xu J, Bashir MH, *et al.* Developmental responses of *Cryptolaemus montrouzieri* to heavy metals transferred across multi-trophic food chain [J]. *Chemosphere*, 2018, 205: 690-697.
- Shi ZK, Wang SS, Pan BY, *et al.* Effects of zinc acquired through the plant-aphid-ladybug food chain on the growth, development and fertility of *Harmonia axyridis* [J]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127497.
- Shu YH, Romeis J, Meissle M. No interactions of stacked Bt maize with the non-target aphid *Rhopalosiphum padi* and the spider mite *Tetranychus urticae* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 39.
- Shu YH, Zhou JL, Lu K, *et al.* Response of the common cutworm *Spodoptera litura* to lead stress: Changes in sex ratio, Pb accumulations, midgut cell ultrastructure [J]. *Chemosphere*, 2015, 139: 441-451.
- Si LQ, Zhang JT, Hussain A, *et al.* Accumulation and translocation of food chain in soil-mulberry (*Morus alba* L.)-silkworm (*Bombyx mori*) under single and combined stress of lead and cadmium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111582.
- Su HH, Hu MM, Harvey-Samuel T, *et al.* Accumulation and excretion of cadmium in three successive generations of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and impact on the population increase [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107 (1): 223-229.
- Su HH, Wu JJ, Zhang ZX, *et al.* Effects of cadmium stress at different concentrations on the reproductive behaviors of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner) [J]. *Ecotoxicology*, 2021, 30 (3): 402-410.
- Tan MT, Wu HF, Li YN, *et al.* Cadmium exposure through the food chain reduces the parasitic fitness of *Chouioia cunea* to *Hyphantria cunea* pupae: An ecotoxicological risk to pest control [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 887: 164106.
- Tang YT, Li YY, Liu CX, *et al.* Predation and behavior of *Arma chinensis* to *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (4): 65-68. [唐艺婷, 李玉艳, 刘晨曦, 等. 蝽蟊对草地贪夜蛾的捕食能力评价和捕食行为观察 [J]. 植物保护, 2019, 45 (4): 65-68]
- Vukašinović EL, Čelić TV, Kojić D, *et al.* The effect of long term exposure to cadmium on *Ostrinia nubilalis* growth, development, survival rate and oxidative status [J]. *Chemosphere*, 2020, 243: 125375.
- Waldbauer GP. The consumption and utilization of food by insects [J]. *Advances in Insect Physiology*, 1968, 5: 229-288.
- Wang J, Liu S, Gan T, *et al.* Effects of cadmium stress on the development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and parasitism by *Trichogramma dendrolimi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2023, 66 (2): 209-218. [王杰, 刘莎, 甘甜, 等. 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 [J]. 昆虫学报, 2023, 66 (2): 209-218]
- Wang L, Pokharel SS, Chen FJ. Arbuscular mycorrhizal fungi alter the food utilization, growth, development and reproduction of armyworm (*Mythimna separata*) fed on *Bacillus thuringiensis* maize [J]. *Peer J*, 2019, 7: e7679.
- Wang QQ, Wang L, Li KB, *et al.* Influences of different host plants on the nutrition and digestive enzymes of *Loxostege sticticalis* [J]. *Plant Protection*, 2015, 41 (4): 46-51. [王倩倩, 王蕾, 李克斌, 等. 不同寄主植物对草地螟的营养作用及消化酶的影响 [J]. 植物保护, 2015, 41 (4): 46-51]
- Wang XM, Zhang C, Qiu BL, *et al.* Biotransfer of Cd along a soil-plant-mealybug-ladybird food chain: A comparison with host plants [J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 699-706.
- Wang XM, Zhang MT, Cao HY, *et al.* Transfer of copper (Cu) in the soil-plant-mealybug-ladybird beetle food chain [J]. *Insects*, 2022, 13 (9): 761.
- Yang PY, Zhu XM, Guo JF, *et al.* Strategy and advice for managing the fall armyworm in China [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (4): 1-6. [杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 等. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议 [J]. 植物保护, 2019, 45 (4): 1-6]
- Yang QQ, Li ZY, Lu XN, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 690-700.
- Yang XM, Wyckhuys KAG, Jia XP, *et al.* Fall armyworm invasion heightens pesticide expenditure among Chinese smallholder farmers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282: 111949.
- Yuan GL, Sun TH, Han P, *et al.* Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 136: 40-47.
- Zhang C, Wang XM, Ashraf U, *et al.* Transfer of lead (Pb) in the soil-plant-mealybug-ladybird beetle food chain, a comparison between two host plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 143: 289-295.
- Zhao L, Xu YF, Hou H, *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 654-662.
- Zheng L, Tan MT, Yan SC, *et al.* Cadmium exposure-triggered growth retardation in *Hyphantria cunea* larvae involves disturbances in food utilization and energy metabolism [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 256: 114886.