

长期取食染镉小麦后中华稻蝗体内镉的累积分布

孙 鸽¹, 吴海花², 席玉英³, 杨美玲², 马恩波², 郭亚平¹

(1.山西大学生命科学与技术学院, 山西 太原 030006; 2.山西大学应用生物研究所, 山西 太原 030006; 3.山西大学环境科学与资源学院, 山西 太原 030006)

摘 要: 重金属镉在动物体内的代谢过程主要通过消化途径实现。以食物染毒的方法, 采用不同浓度镉溶液培养的麦苗饲喂中华稻蝗(从一龄若虫至成虫), 将中华稻蝗成虫不同组织部位(头、翅、足、卵巢/精巢、体壁、前肠、中肠、后肠)解剖, 并通过原子吸收分光光度计测定其镉的浓度, 统计分析各组织部位镉的累积分布规律。火焰原子吸收测定结果表明, 生长于浓度为 0、36.67、73.34、110.01、146.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 镉溶液中的小麦, 其叶片中镉的累积浓度分别达到 1.99、102.88、159.92、255.48、372.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 与培养液中镉浓度呈显著正相关($Y=2.437\ 9X-0.206$, $R^2=0.988$ $P<0.01$; Y 为小麦中镉浓度, X 为镉溶液浓度); 随着镉处理浓度的增加, 中华稻蝗头、翅、足、卵巢、体壁、前肠、中肠、后肠中镉的累积浓度基本都呈增加的趋势, 例如, 在各组织部位中镉累积浓度最高的为中肠, 4 个处理浓度中雌虫分别为对照组的 139.29、82.11、197.94、212.74 倍, 雄虫为对照组的 99.89、70.32、100.17、91.23 倍; 在各组织部位中镉累积浓度较低的足, 雌、雄虫也分别达到了对照组的 4.95、8.80、16.23、16.90 倍和 7.14、12.22、20.59、27.98 倍。对中华稻蝗成虫各组织部位镉累积浓度进行比较发现, 消化道各部位的累积浓度较其他部位为高, 其中, 中肠内镉的累积浓度均为最高, 前后肠间的累积浓度次之; 此外, 镉在中华稻蝗头部也有明显的累积, 其次是体壁和翅, 而卵巢/精巢和足的累积浓度最低。研究结果表明长期取食染毒小麦可导致镉在中华稻蝗体内的累积, 且镉在不同组织部位中的累积分布存在差异。

关键词: 中华稻蝗; 镉; 小麦; 组织分布; 累积

中图分类号: X503.223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)09-1812-06

Accumulation and Distribution of Cadmium in *Oxya chinensis* after Feeding on Wheat Seedlings Contaminated with Cd

SUN Ge¹, WU Hai-hua², XI Yu-ying³, YANG Mei-ling², MA En-bo², Guo Ya-ping¹

(1.College of Life Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Applied Biology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3.School of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Cadmium (Cd) is one of the harmful heavy metals, and is accumulated in animals usually through digestion pathway in ecosystem. In this study, *Oxya chinensis*, from the first-instar nymphs to the adults, was fed on wheat seedlings cultured in Cd solutions of different concentrations (0, 36.67, 73.34, 110.01, 146.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), the accumulation and anatomical distribution (head, wings, legs, ovary/ spermary, body wall, foregut, midgut, hindgut) of Cd in the adults of *Oxya chinensis* were further analyzed. The accumulated Cd concentrations of wheat seedlings leaves were: 1.99, 102.88, 159.92, 255.48, and 372.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ when cultured in the Cd solutions of different concentrations 0, 36.67, 73.34, 110.01, 146.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, there was a positive correlation between the Cd concentrations in wheat seedlings leaves and the Cd culture solutions ($Y=2.437\ 9X-0.206$, $R^2=0.988$ $P<0.01$; Y : Concentration of Cd in wheat seedlings, X : Concentration of Cd in culture solution). Moreover, the accumulated Cd concentrations in different parts of *Oxya chinensis* were increased when fed on wheat seedlings cultured in Cd solutions of different concentrations as above. Cd concentrations of midgut were 139.29, 82.11, 197.94, 212.74 times for females and 99.89, 70.32, 100.17, 91.23 times for males compared with those in controls; Cd concentrations of the legs of *Oxya chinensis* were 4.95, 8.80, 16.23, 16.90 fold in females and 7.14, 12.22, 20.59, 27.98 fold in males compared with those in controls. The results indicated that accumulation of Cd in the midgut was the highest, which was a significant difference compared to that of other parts. Cd was apparently accumulated

收稿日期: 2009-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(30870320, 30810103907)

作者简介: 孙 鸽 (1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为动物生化与分子生物学。E-mail: sunge@yml.cn

通讯作者: 郭亚平 E-mail: guoyip1955@163.com

in the head, followed by the body wall and wings, while the Cd concentration of ovary/spermary and legs were the lowest. The results showed that Cd can be accumulated in *Oxya chinensis* through the plant, and there were some differences among the different anatomical parts.

Keywords: *Oxya chinensis*; cadmium; wheat; anatomical distribution; accumulation

镉的化合物广泛存在于地壳、岩石和水体中,目前有色金属矿产的开发和冶炼、磷酸盐肥料、电池、塑料包装等行业在生产过程中都会向环境中排放含镉废物,从而对环境造成严重的污染^[1]。镉一旦进入农田生态系统,便会通过污染的土壤和水循环累积于植物和有机体中^[2],镉的污染不但会危害植物生长,也对动物的生长发育造成不良影响,并沿食物链传递,危害生态系统中各级消费者以及人类健康^[3-4]。昆虫处于食物链的一个环节同样会通过呼吸、摄食、体表接触等遭受生态环境中重金属离子的入侵,尽管它自身具有抵御重金属的多种生理生化机制,但重金属仍会对其生长发育以及生殖繁育造成严重的毒害效应^[5-7]。

中华稻蝗(*Oxya chinensis*)是广布于我国大多数省区的重要农业害虫,主要以禾本科植物为食,尤喜食水稻,其严重发生对水稻等粮食作物的生产造成很大损失。随着重金属污染进入农业生态系统,中华稻蝗的生长环境和食物也受到重金属污染的影响,当其取食被污染的农作物及其他植物时,环境中的重金属便会通过食物链在其体内累积。本实验室近年来以中华稻蝗为材料,系统地研究了重金属对其急性、亚急性毒性效应^[8-10]。本文通过长期喂食染毒的方法,以被镉污染的小麦饲喂中华稻蝗从一龄若虫发育至成虫,研究中华稻蝗体内各组织部位镉的分布情况,探讨其不同组织部位重金属镉的累积规律。

1 材料与方法

1.1 小麦

优质小麦种子(晋太 170)购于山西省农业科学研究院。12 h 浸泡催芽后,播撒在统一规格的白色冰盘(23 cm×16.5 cm×7 cm)内,用含 0、36.67、73.34、110.01、146.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的氯化镉溶液分别培养,每个浓度设 3 个重复,培养 7 d 后将麦苗置于纱笼中饲喂中华稻蝗。同时每笼内将约 20 株麦苗隔离,避免被中华稻蝗取食,取被隔离的麦苗,蒸馏水洗净后-80℃冻存储备用。

1.2 中华稻蝗

中华稻蝗蝗卵,于 2007 年 1 月在山西省太原市晋源区采集,5 月中旬放入人工气候箱(27℃,14 h 黑暗/10 h 光照,60% 湿度)内孵化,两周后虫卵孵化,将刚孵化出的若虫分别放入 15 个纱笼(40 cm×29 cm×29 cm)内室温下饲养,每笼 50 头,每个处理浓度 3 个重复,同时把各浓度镉溶液培养好的麦苗放入纱笼中供蝗虫取食,饲喂过程中定期更换新培养好的麦苗,直至中华稻蝗发育为成虫,随机取样,每个处理浓度雌雄虫各取 15 头,每个重复雌雄各 5 头。

1.3 虫体解剖

取活体中华稻蝗,采用医用剪刀、镊子将中华稻蝗的消化道和生殖器取出,在解剖镜下剪开消化道,去除内容物并用蒸馏水洗净,分开前肠、中肠、后肠 3 个部分,将每头蝗虫样本的头、翅、足、体壁分别取出,并按头、翅、足、生殖器、体壁、前肠、中肠、后肠分类编号用于后续分析。

1.4 重金属含量测定

将蝗虫各组织部位和小麦样品在烘箱中烘至恒重(65℃),采用火焰原子吸收法测定小麦以及中华稻蝗不同组织部位的镉浓度。具体方法为:将样品在 $\text{HNO}_3+\text{HClO}_4$ 体系中消化,消化后的无机物转移至比色管中定容,然后用原子吸收分光光度计(SHIMADZU AA-6300, Japan)以火焰原子吸收法对各样品进行测定,测定结果以 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示(即:每克干重中含多少微克镉)。

1.5 数据分析

利用 Excel 软件对数据进行计算和处理,以平均数±标准差(Mean±STD)表示;采用 SPSS 11.5 对数据进行方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan's 和 LSD)。

2 结果

2.1 小麦中镉的累积

表 1 为不同浓度镉溶液培养下小麦中镉的累积浓度。由表中可以看出,小麦中镉的累积浓度随镉溶

表 1 小麦叶片中镉的浓度(N=3)

Table 1 Concentrations of Cd in the wheat leaves (N=3)

镉溶液的浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0	36.67	73.34	110.01	146.68
小麦叶片中镉浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	1.99±1.03	102.88±26.23	159.92±33.39	255.48±8.57	372.68±56.97

液浓度的提高而增大。通过相关性和回归分析,二者具有极显著的线性关系($Y=2.437\ 9X-0.206,R^2=0.988\ P<0.01$; Y 为小麦中镉浓度, X 为镉溶液浓度)。

2.2 中华稻蝗雌性成虫体内镉的累积

由表 2 可见,对于雌性中华稻蝗,随着镉溶液浓度的增加,其头、翅、足、卵巢、体壁、前肠、中肠、后肠中镉的累积浓度基本都呈增加的趋势($P<0.05$),例如,在各组织部位中镉浓度最高的为中肠,分别为对照组的 139.29、82.11、197.94、212.74 倍,各组织部位中镉浓度较低的足也分别达到对照组的 4.95、8.80、16.23、16.90 倍;而对于同一浓度,各处理组内中华稻蝗消化道(前肠、中肠、后肠)中镉的累积浓度都远高于其几个组织部位,其次是头部镉的累积,而翅和体壁的镉累积浓度较低,卵巢和足的镉累积浓度最低。

本文对表中数据进行了 Duncan's 和 LSD 的多重比较,结果表明,对照组和各处理组同一个浓度内,虫体头、翅、足、卵巢、体壁中镉的累积浓度之间均无显著差异($P>0.05$);对于 36.67 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,前后肠

镉的累积浓度之间无显著差异($P>0.05$),中肠的最高,与其余 7 个组织部位都存在着极显著差异($P<0.01$),虫体各部位镉累积浓度依次为中肠>前肠>后肠>头>体壁、翅>卵巢、足;对于 73.34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,后肠镉的累积浓度高于前肠,前后肠之间无显著差异($P>0.05$),虫体各部位镉累积浓度依次为中肠>后肠>前肠>头>体壁、翅>卵巢>足;对于 110.01 和 146.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,前肠、中肠和后肠的镉累积浓度与其余 5 个组织部位都存在着极显著差异($P<0.01$),后肠镉的累积浓度高于前肠,虫体各部位镉累积浓度依次为中肠>后肠>前肠>头>翅、体壁>卵巢>足。

2.3 中华稻蝗雄性成虫体内镉的累积

由表 3 可知,中华稻蝗雄虫的头、翅、足、精巢、体壁、后肠中镉的累积浓度随着镉处理浓度的增加而升高($P<0.05$),在各组织部位中镉浓度最高的为中肠,分别为对照组的 99.89、70.32、100.17、91.23 倍,而各组织部位中镉浓度较低的足,也分别达到对照组的 7.14、12.22、20.59、27.98 倍,前肠和中肠的累积

表 2 雌性中华稻蝗取食染镉麦苗后各组织部位镉的累积浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 2 The accumulated Cd concentrations in different parts of female *Oxya chinensis* after feeding on wheat seedlings contaminated with Cd

部位	处理组/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
	0	36.67	73.34	110.01	146.68
头	0.34±0.19Db	20.70±19.31CDb	37.10±21.62BCe	53.48±10.99ABd	73.84±8.10Ac
翅	0.54±0.68Bb	7.19±0.37ABb	19.01±14.31ABc	37.73±11.19Ad	39.99±20.84Ac
足	1.08±0.06Cb	5.35±1.17Bb	9.51±2.93Bc	17.53±2.52Ad	18.26±3.30Ac
卵巢	0.12±0.12Cb	4.69±3.75BCb	11.45±3.33Bc	23.03±9.21ABd	14.45±5.94Ac
体壁	0.35±0.14Cb	7.22±3.71BCb	15.50±9.87BCe	27.04±16.64Bd	43.83±4.66Ac
前肠	1.85±1.09Bab	221.40±37.05ABb	219.32±45.28Ab	323.87±73.83Ac	422.86±208.55Ab
中肠	3.66±2.36Cab	509.83±182.13ABa	300.52±22.82BCa	724.45±155.57Aa	778.63±312.61Aa
后肠	4.53±2.88Da	154.31±46.79CDb	263.22±55.57Cab	525.16±171.04Bb	705.68±77.64Aa

注:不同大写字母代表同部位不同浓度的差异显著性($P<0.05$)。不同小写字母代表同浓度不同部位的差异显著性($P<0.05$), $N=3$ 。

表 3 雄性中华稻蝗取食染镉麦苗后各部位镉的累积浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 3 The accumulated Cd concentrations in different parts of male *Oxya chinensis* after feeding on wheat seedlings contaminated with Cd

部位	处理组/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
	0	36.67	73.34	110.01	146.68
头	0.47±0.23Bc	20.09±16.61Bd	55.72±6.38Ac	82.79±41.44Ab	71.99±14.23Ac
翅	0.13±0.30Bc	8.90±1.99Bd	13.05±1.33Bc	47.76±19.22Bb	105.06±43.04Ac
足	0.83±0.41Dc	5.93±1.18Cd	10.15±0.84Cc	17.09±3.79Bb	23.23±3.79Ac
精巢	0.23±0.46Bc	6.28±0.24ABd	17.00±5.38ABc	24.46±6.48Ab	25.64±16.45Ac
体壁	0.29±0.14Bc	9.46±3.59Bd	25.09±11.65Ac	27.29±5.37Ab	38.35±4.84Ac
前肠	2.55±1.57Bb	449.32±116.49Ab	300.90±92.60Ab	383.92±101.80Aab	409.37±159.65Ab
中肠	6.18±3.10Ba	617.32±166.33Aa	434.56±67.75ABa	619.04±228.13ABa	563.84±48.43ABa
后肠	4.69±1.98Cab	179.99±7.76BCc	222.80±58.98BCb	392.04±100.82ABab	540.94±16.77Aa

注:不同大写字母代表同部位不同浓度的差异显著性($P<0.05$)。不同小写字母代表同浓度不同部位的差异显著性($P<0.05$), $N=3$ 。

浓度在 $36.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组中达到较大值,这与雌性中华稻蝗体内的累积情况相似。此外,无论是对照组还是处理组,中华稻蝗消化道(中肠、前肠、后肠)中镉的累积浓度都是最高的,而其精巢和足的累积浓度为最低。

根据多重比较结果,对于 36.67 和 $73.34 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,前肠、中肠和后肠的累积浓度差异极显著($P<0.01$),且前肠、中肠和后肠均与其余部位的累积浓度存在极显著差异($P<0.01$),各部位之间的累积浓度的高低顺序为:中肠>前肠>后肠>头>体壁、翅>精巢、足。对于 110.01 和 $146.68 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,各部位之间镉的累积浓度基本相同,为中肠>后肠>前肠>头>翅、体壁>精巢>足,在 $110.01 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,中肠与头、翅、足、精巢、体壁之间的累积浓度存在极显著差异($P<0.01$),前肠、中肠、后肠之间的累积浓度差异不显著,而其他 5 个组织部位之间差异也不显著;对于 $146.68 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组,前肠、中肠、后肠与头、翅、足、精巢、体壁之间的累积浓度差异极显著($P<0.01$),而中肠与后肠的累积浓度无显著差异,前肠与后肠之间存在显著差异($P<0.05$)。

总之,雌、雄中华稻蝗身体各部位对镉的积累分布有着相似的规律:消化道累积量最显著,以中肠为最高;对于最低处理组($36.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),其前肠和中肠的镉累积浓度均出现较高值:雌虫 221.40 和 $509.83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,雄虫 449.32 和 $617.32 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;而对于高浓度处理组(110.01 和 $146.68 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),后肠的累积浓度高于前肠,处理组以头部的累积浓度次高,累积浓度最低的部位均为生殖器官和足。

3 讨论

在受污农田中,农作物的根系及茎叶等营养器官具有较强富集镉的能力^[10-12]。本文表 1 结果显示,以镉溶液培养的小麦其叶片富集了不同浓度的镉,而且叶片中重金属镉的累积量与其生长环境中镉的浓度有着显著的正相关,其累积规律符合染毒剂量-叶片镉累积量效应,表明小麦的生长能够忍受一定量的重金属镉污染。中华稻蝗长期取食染镉麦苗后,其雌、雄成虫体内富集了大量镉,且随着镉处理浓度的增加,麦苗中的镉富集量增加,导致虫体各部位的累积浓度也随之增加,表明重金属镉不仅可以在植物和动物之间传递,同时也产生了显著的累积效应。

由于动物对食物的消化吸收过程主要在消化道,当通过摄食途径进行重金属染毒时,必然导致重金属

在消化道的大量累积,Sasser 对初生的大鼠、Pedersen 对甲虫(*Tenebrio molitor*)、Saavedraa 对扇贝(*Pecten maximus*)的研究均表明重金属在消化道的累积最为显著^[13-15]。本文结果(表 2 和表 3)中,中华稻蝗取食染镉小麦后,导致重金属镉在其不同组织部位累积,其中最显著的部位也是在消化道,这是由于中华稻蝗取食染镉小麦后,食物主要在消化道内被磨碎、贮存、消化,镉离子被肠壁细胞所吸收,导致镉在消化道内的累积量最高。昆虫的消化道分为前肠、中肠、后肠,中肠是消化吸收营养物质的主要场所^[16],本文结果表明中肠镉的累积在各处理组中最为显著,雌、雄虫体分别达到 3.66 、 509.83 、 300.52 、 724.45 、 $778.63 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 6.18 、 617.32 、 434.56 、 619.04 、 $563.84 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,此结果与有关报道相一致。如 Tyra 在对大鼠的研究中发现,怀孕与未怀孕的母鼠体内十二指肠中镉的累积都高于空肠和回肠^[17]。Everaarts 对蚌(*Mytilus edulis* L.)的研究也表明镉在中肠的累积是最明显的^[18]。此外对于前后肠而言,本文结果表明,除高浓度处理组(110.01 和 $146.68 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)后肠的镉累积浓度高于前肠外,镉在中华稻蝗前肠和后肠的累积总体上并无显著的统计学差异,这与昆虫的前后肠均为外胚层内陷而成,结构相似有关^[9];另一方面由于后肠的主要功能是水分及营养物质的重吸收和排遗,从解剖结构来看,后肠肌肉层较前肠不发达,其内膜层薄,利于对物质的重吸收,由此导致了高浓度处理组后肠镉累积浓度高于前肠。除此之外,对于雌、雄中华稻蝗,在 $36.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 处理组其前肠和中肠的镉累积浓度较高(分别为 221.40 和 $509.83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 449.32 和 $617.32 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),这是因为生物体存在“毒物兴奋效应”^[19],使低浓度镉未严重抑制中华稻蝗的进食量,从而造成低浓度处理组镉在前肠和中肠内的大量累积。

镉进入消化道后,消化道的肠壁细胞不能完全吸收贮存重金属离子,镉通过中肠上皮细胞基底膜进入血淋巴,与蛋白结合,随血淋巴循环被转运到机体的其他组织器官分泌或贮存^[6]。在本研究结果表 2 和表 3 中,雌、雄中华稻蝗的头、翅、足、体壁、生殖器也存在不同程度镉的累积,总体顺序为:头>体壁、翅>生殖器>足。李来好等的研究表明,南美对虾等的头部是重金属累积的重要部位^[20-21],但有其他文献报道哺乳动物存在血脑屏障以保护大脑免受重金属离子的过度损伤,大脑中重金属累积浓度低^[22],而昆虫头部对重金属累积量较高可能与昆虫的开管式血液循环有关,具体原因尚待进一步研究。

镉在中华稻蝗体壁和翅的累积浓度远低于消化道(表2、表3),体壁是昆虫的外骨骼,昆虫必须经过周期性蜕皮才能发育为成虫,虽然蜕皮过程可以排出一些体内的重金属,但由于体壁是一个复杂旺盛的代谢库^[16],所以镉还是会在体壁内累积。Stephen 等在对克氏螯虾(*Procambarus clarkii*)的研究中发现镉在其外骨骼中有少量累积,但是累积浓度显著低于消化道^[23],本文的结果与其相一致。昆虫的翅是由中、后胸背部体壁向外扩展形成的,是外骨骼的派生物,结构比较简单,所以镉在中华稻蝗的翅和体壁内的累积不存在显著差异,均远低于消化道。

本研究结果表明,每个处理组雌、雄中华稻蝗的生殖器官和足的镉浓度都是最低的(中肠>前肠、后肠>头>翅、体壁>卵巢或精巢、足)。一方面,肌肉对重金属的亲和能力相对较弱^[20],因此肌肉组织是受重金属影响最低的部位^[23-25],本文研究结果中,中华稻蝗的足主要由肌肉组织构成,所以镉的累积浓度很低。另一方面,对于中华稻蝗的生殖器官(卵巢和精巢),其镉浓度也呈最低值,这可能是由于中华稻蝗为避免重金属镉对后代的影响而形成的一种生殖保护机制,用来阻止重金属入侵对生殖器官的损害,类似的结果亦有报道:在Saavedraa对扇贝(*Pecten maximus*)和Julshamn对挪威水域扇贝(*Pecten maximus*)和蚌类(*Modiolus modiolus*)的研究结果中均表明,其肌肉和生殖腺对镉等重金属的累积均比其他器官低^[15,26]。总之,本文结果表明,重金属镉通过麦苗富集于中华稻蝗体内时,其足和生殖器官的累积量最低,是受到影响较小的部位。

重金属镉的污染主要来源于电镀、冶金等工业部门,随着生态系统中物质的循环过程而广泛存在于农业生态系统中。进入土壤或水中的镉沿着食物链从植物到各级消费者之间传递累积,最终将威胁到人类的健康。本文研究表明,重金属镉通过水溶液经植物累积于中华稻蝗体内,其累积浓度不仅随小麦叶片中镉浓度增大而升高,且其累积量依不同组织部位而异。本文通过分析镉在中华稻蝗体内不同部位的累积规律,为重金属在食物链中的传递及其在植食性昆虫体内的累积等研究提供基础资料。

参考文献:

- [1] 孟紫强. 环境毒理学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2000:135-136.
- MENG Zi-qiang. Environmental toxicology [M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2000:135-136.

- [2] Agency for toxic substances and disease registry. Draft toxicological profile for cadmium[R]. U. S. Department of Health and Human Services, 2008(9):2-11.
- [3] McLaughlin M, Whatmuff M, Warne M, et al. Cadmium transfer to crops from biosolids-amended soils: implications for food quality, national regulations and international markets[R]. Muresk Institute, 2006.
- [4] Šmirjčková S, Ondrašovičová, Kašková, A, et al. The effect of cadmium and lead pollution on human and animal health[J]. *Folia Veterinaria*, 2005, 49(3):31-32.
- [5] WU Guo-xing, YE Gong-yin, HU Cui, et al. Accumulation of cadmium and its effects on growth, development and hemolymph biochemical compositions in *Boettcherisca peregrina* Larvae (Diptera: Sarcophagidae)[J]. *Insect Science*, 2006, 13(1):31-39.
- [6] 孙虹霞, 刘 颖, 张古忍. 重金属污染对昆虫生长发育的影响[J]. 昆虫学报, 2007, 50(2):178-185.
- SUN Hong-xia, LIU Ying, ZHANG Gu-ren. Effects of heavy metal pollution on insects[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2007, 50(2):178-185.
- [7] Cervera A, Maymó A C, Sendra M, et al. Cadmium effects on development and reproduction of *Oncopeltus fasciatus* (Heteroptera: Lygaeidae)[J]. *Journal of Insect Physiology*, 2004, 50(8):737-749.
- [8] 刘雪梅, 李丽君, 郭亚平等. 土壤-作物-昆虫系统中镉在中华稻蝗体内的累积[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):301-304.
- LIU Xue-mei, LI Li-jun, GUO Ya-ping, et al. Cadmium accumulation in *Oxya chinensis* in the ecosystem of soil-plant-insect[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2006, 25(2):301-304.
- [9] LI Li-jun, LIU Xue-mei, GUO Ya-ping, et al. Activity of the enzymes of the antioxidative system in cadmium-treated *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidea)[J]. *Environ Toxicol Phar*, 2005, 20:412-416.
- [10] 李铭红, 李 侠, 宋瑞生. 受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):675-679.
- LI Ming-hong, LI Xia, SONG Rui-sheng. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farm lands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):675-679.
- [11] 王海鸥, 钟广蓉, 刘晓峰, 等. 小麦在铜、镉胁迫下体内含硫基物质对解毒机制的研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(3):158-161.
- WANG Hai-ou, Zhong Guang-rong, LIU Xiao-feng, et al. The study on sulfhydryl compound to the mechanism of detoxification in wheat under copper and cadmium stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(3):158-161.
- [12] 万 敏, 周 卫, 林 葆. 镉积累不同类型的小麦细胞镉的亚细胞和分子分布[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6):671-675.
- WAN Min, ZHOU Wei, LIN Bao. Subcellular and molecular distribution of cadmium in two wheat genotypes differing in shoot/root Cd partitioning[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(6):671-675.
- [13] Sasser L B, Jarboe G E. Intestinal absorption and retention of cadmium in neonatal rat[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1977, 41(2):423-431.
- [14] Pedersen S A, Kristiansen E, Andersen R A, et al. Cadmium is deposited in the gut content of larvae of the beetle *Tenebrio molitor* and involves a Cd-binding protein of the low cysteine type[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 2008(148):217-222.

- [15] Saavedra Y, Gonza L A, Blancoc J. Anatomical distribution of heavy metals in the scallop *Pecten maximus*[J]. *Food Additives and Contaminants*, 2008, 25(11): 1339–1344.
- [16] 王荫长. 昆虫生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 50–56.
WANG Yin-chang. Insect physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 50–56.
- [17] Tyra M, Leazer, LIU Ya-ping, et al. Cadmium absorption and its relationship to divalent metal transporter in the pregnant rat[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2002, 185(1): 18–24.
- [18] Everaarts J M. Uptake and release of cadmium in various organs of the common mussel, (*Mytilus edulis* L.)[J]. *Environmental Contamination and Toxicology*, 1990, 45: 560–567.
- [19] 顾晓军, 田素芬. 毒物兴奋效应概念及其生物学意义[J]. 毒理学杂志, 2007, 21(5): 425–427.
GU Xiao-jun, TIAN Su-fen. The concept of hormesis and its biological significance[J]. *Journal of Toxicology*, 2007, 21(5): 425–427.
- [20] 李来好, 杨贤庆, 郝淑贤等. 罗非鱼、南美白对虾对重金属富集的研究[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(4): 61–65.
LI Lai-hao, YANG Xian-qing, HAO Shu-xian, et al. A study of heavy metal enrichment in *Oreochromis niloticus* and *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(4): 61–65.
- [21] LI Li-jun, LIU Xue-mei, DUAN Yi-hao, et al. Accumulation of cadmium and copper by female *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidea) in soil-plant-insect system[J]. *Journal of Environment Science*, 2006, 18(2): 341–346.
- [22] 马登军, 孙汉文, 冯海燕, 等. 低毒饮水染毒小白鼠体内镉的分布[J]. 环境化学, 2008, 27(4): 523–526.
MA Deng-jun, SUN Han-wen, FENG Hai-yan, et al. Research of cadmium distributing in mice by low poison fed[J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(4): 523–526.
- [23] Stephen R Madigosky, Xavier Alvarez-Hernandez, et al. Lead, cadmium, and aluminum accumulation in the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* G. collected from roadside drainage ditches in Louisiana[J]. *Archives of Environmental Contamination*, 1991, 20: 253–258.
- [24] Brucka-Jastrzebska E, Protasowicki M. Changes of cadmium content in various organs of common carp (*Cyprinus carpio* L.) during the fast growth period following initial rearing in contaminated water [J]. *Archives of Polish Fisheries*, 2006, 14(2): 183–194.
- [25] Allen P. Accumulation profiles of lead and cadmium in the edible tissues of *Oreochromis aureus* during acute exposure[J]. *Journal of Fish Biology*, 1994, 47(4): 559–568.
- [26] Julshamn K, Duinker A, Frantzen S, et al. Organ distribution and food safety aspects of cadmium and lead in great scallops, *Pecten maximus* L. and horse mussels, *Modiolus modiolus* L. from Norwegian waters[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and toxicology*, 2008, 80(4): 385–389.