

重金属镉和铬在中华稻蝗(*Oxya chinensis*)体内的组织分布

张育平¹, 孙 鸽^{1,2}, 王 跃¹, 杨慧敏¹, 李丽君³, 马恩波¹, 郭亚平^{1*}

(1.山西大学应用生物研究所,太原 030006 2.中国辐射防护研究院,太原 030006 3.山西省农业科学院土壤与肥料研究所,太原 030031)

摘 要:为研究重金属在中华稻蝗(*Oxya chinensis*)自然种群体内的累积分布,以山西省代县水稻田中华稻蝗为研究对象,用火焰原子吸收法测定中华稻蝗不同组织部位的镉和铬含量。研究结果表明:镉和铬在中华稻蝗自然种群不同组织部位的富集量不同,且雌雄间存在一定的差异。镉在雌虫体内的富集顺序为中肠>后肠>前肠>翅>头>卵巢>足>体壁,在雄虫体内为中肠>前肠>后肠>足>头>体壁。镉在雌雄中华稻蝗消化道内均有较高的富集并以中肠的累积量最高,雌虫为 $6.7984 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,雄虫为 $3.3477 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且与其他组织部位间存在显著差异($P < 0.001$)。中华稻蝗雌虫各组织部位对铬的累积浓度依次为:中肠>足>体壁>头>卵巢>前肠>翅>后肠,中华稻蝗雄虫体内铬浓度的分布依次为:足>体壁>中肠>头>前肠>精巢>后肠。多因素方差分析结果表明,自然条件下雌雄中华稻蝗对重金属镉和铬的累积具有组织特异性,两种重金属在中华稻蝗体内的累积规律有所不同。

关键词:中华稻蝗;镉;铬;富集;组织部位

中图分类号:X503.223 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)12-2440-06

Cadmium and Chromium Accumulation in the Tissues of the Chinese Rice Grasshopper, *Oxya chinensis*

ZHANG Yu-ping¹, SUN Ge^{1,2}, WANG Yue¹, YANG Hui-min¹, LI Li-jun³, MA En-bo¹, GUO Ya-ping^{1*}

(1. Institute of Applied Biology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 3. Institution of Soil Science and Fertilizer, Shanxi Academy of Agriculture Science, Taiyuan 030031, China)

Abstract In order to study the accumulation pattern of heavy metal in the Chinese rice grasshopper, *Oxya chinensis*, the grasshoppers were collected from Daixian County, Shanxi Province, China. The cadmium(Cd) and chromium(Cr) concentrations in their bodys were determined using atomic absorption spectrometry. The results showed that accumulation of Cd in *O. chinensis* were different in various parts of the insect. The order of Cd concentration in the female grasshoppers was midgut>hindgut>foregut>wings>head>ovary>legs>body wall; for males, the order was midgut>foregut>hindgut>legs>head>body wall and the accumulation of Cd in the wings and testis were not detected. The results indicated that the accumulation of Cd in the gut of *O. chinensis* were higher, and that in midgut was the highest, which showed significant difference compared to that of the other parts($P < 0.001$). The Cd concentration in the midgut was $6.7984 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $3.3477 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for female and male, respectively. The order of Cr concentration in the grasshoppers was midgut>legs>body wall>head>ovary>foregut>wings>hindgut for females and legs>body wall>midgut>head>foregut>testis>wings>hindgut for males. The results of the tests of between-subjects effect showed that the Cd and Cr accumulation in the rice grasshopper *O. chinensis* was tissue-specific, and the accumulation characteristics between Cd and Cr were different.

Keywords *Oxya chinensis*; cadmium; chromium; accumulation; tissues

镉(Cadmium, Cd)是一种毒性极强的环境污染

物,能对人体健康造成不良影响^[1]。美国毒物管理委员会(ATSDR)将其列为第六位危及人类健康的有害物质。进入生物体内的镉难以被降解,在食物链中的生物器官内富集,引起慢性中毒^[2-3]。镉进入人体后,主要损害肾小管,干扰肾脏对蛋白质的排除和再吸收作用,引起蛋白尿、糖尿等的增加,镉对肾功能的损害还

收稿日期:2011-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(31071980);国家公益性行业(农业)科研专项(200903021)

作者简介:张育平(1977—),女,山西阳城人,在读博士,讲师,研究方向为重金属毒理学。E-mail: zyps@wshy@yahoo.cn

* 通讯作者:郭亚平 E-mail: guoyip1955@163.com

会抑制维生素D的活化,影响维生素D₃的合成,从而影响肠对钙的吸收及钙在骨质中的沉着,引起骨软化症。长期生活于镉含量较低的环境中或经常食用含低浓度镉的食物,会引起肾、肺、肝等内脏器官的病理变化,诱发骨质疏松、骨软化和肾结石等疾病,甚至有死亡的风险。发生在日本的“痛痛病”就是因为长期食用被矿山和冶炼厂废弃物所污染的稻米而引起的,2009年7月发生在湖南省浏阳市的镉污染事件也曾引起社会的广泛关注。

铬(Chromium, Cr)是广泛存在于自然界中的一种元素,它是生物体内不可缺少的微量元素,铬虽然对人和动物具有一定的生物学功能,但又是广泛存在于环境中的“五毒”元素之一。铬的化学形态不同毒性也不相同:一般认为金属铬和+2价铬化合物是无毒的;+3价铬化合物被消化道吸收较少,毒性不大;+6价铬化合物毒性大。铬缺乏时会对人体健康造成不良影响,但环境中的高浓度铬对人体和动物都会产生严重危害^[1]。铬被人体吸收后,可影响体内氧化、还原和水解过程,并可使蛋白质变性,使核酸、核蛋白沉淀,干扰酶系统。大量铬盐进入人体消化道后,可刺激和腐蚀消化道,引起头晕、恶心、呼吸急促、肌肉痉挛、血便以及脱水等严重的中毒症状。随着现代工业的发展,铬及其化合物的应用日益增多,如印染、电镀和化工等行业,都有含铬废水废渣排出,致使土壤、水体和生物遭到不同程度的污染,而且这些铬还可以随食物链进入人体,对人体健康造成危害^[1]。

中华稻蝗(*Oxya chinensiss*)属于直翅目(Orthoptera),斑腿蝗科(Catantopidae),在国内分布广泛。中华稻蝗主要以禾本科植物为食,属食物链中的初级消费者^[4]。在我国南方地区,由于人们常食用中华稻蝗成虫,生活于污染区域的昆虫体内含有较高浓度的重金属也可能富集于体内而影响健康。本文通过研究重金属镉和铬在中华稻蝗自然种群体内的累积分布,探讨镉和铬在中华稻蝗体内分布的组织特异性,旨在为将其作为环境重金属污染的指示生物提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样本的采集

中华稻蝗于2009年8月采自山西省代县(E112° 97', N39°07')。采集地为6.67 hm²的水稻田,水稻田周围的禾本科植物主要是芦苇。采集到的中华稻蝗带回实验室置于养虫笼中常规喂养24 h后进行解剖。在同一水稻田取土样(土壤pH8.14,全氮0.163%,全磷

0.062%,有机质1.94%)6个,每个土样约0.5 kg;同时取水稻叶片样本6个,每个样本取水稻10株。

1.2 样本的处理

土样在室温下晾干后混匀并过筛,摊成平面后用对角线法进行取样,称重后待测。水稻样本剪碎,于65℃恒温烘干后称取定量的样本待测。

挑选大小均匀的中华稻蝗雌、雄虫各15头分别作为一个样本,每样本做3个重复。进行活体解剖时,先用医用镊子和剪刀将中华稻蝗的头、足及翅剪掉收集,后将虫体沿腹部剪开,取出消化道、生殖腺和表皮,并将消化道分为前肠、中肠(包括胃盲囊)和后肠3部分。

各组织样本于65℃恒温烘干后称重,置于消化杯中编号备用。土壤样本于HNO₃+HCl+HClO₄体系中进行消化,在经过消化的土样中加入一定量的三蒸水,待样本溶解后过滤至50 mL的容量瓶中,稀释至刻度待测;昆虫样本和植物样本用HNO₃+HClO₄体系消化后定容至10 mL比色杯中待测。

1.3 重金属含量测定

待测样本镉和铬含量用原子吸收分光光度计(SHIMADZU AA-6300 Japan)进行测定。每个样本的镉含量用标准曲线计算得出,单位为mg·kg⁻¹干重。

1.4 统计分析

利用Excel软件对数据进行计算和处理,结果以平均数±标准误(Mean±S.E.)表示;采用SPSS11.5软件对数据进行多因素方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 土壤样本和水稻样本镉含量

表1为中华稻蝗生态系统各营养级的镉与铬含量。土壤中镉和铬的浓度均未超出国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)。由表1可以看出,水稻叶片中镉和铬的浓度都低于土壤中的浓度,而中华稻蝗体

表1 土壤、水稻叶片及中华稻蝗的镉和铬含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Cd and Cr concentration in soil, rice leaf and *O. chinensis*(mg·kg⁻¹)

重金属 Heavy metal	土壤 Soil	水稻叶片 Rice leaf	中华稻蝗 <i>O. chinensis</i>
Cd	0.08±0.02	0.03±0.01	0.13±0.04
Cr	43.26±2.86	4.91±1.14	7.32±0.93

注:表中各值以6次重复测定结果的平均值±标准误表示。

Note: Each value of insects is the mean of six replicate ±S.E.(n=6).

内的重金属浓度明显高于叶片。

2.2 镉在中华稻蝗体内的累积分布

镉在中华稻蝗体内的累积分布情况见表 2。中华稻蝗雌虫消化道的累积浓度显著高于其他几个部位,其次是头部和翅,卵巢和足中镉的累积浓度最低。LSD 多重比较结果表明,中肠与前后肠镉的累积浓度之间差异极显著($P<0.001$),前、中和后肠与其他 5 个组织部位之间存在着极显著差异($P<0.001$),而前肠和后肠镉累积浓度无显著差异($P=0.584$)。中华稻蝗雌虫各组织部位对镉的累积浓度依次为中肠>后肠>前肠>翅>头>卵巢>足>体壁,其中中肠的镉浓度高达 $6.798\ 4\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。镉在雄虫体内的富集浓度依次为中肠>前肠>后肠>足>头>体壁,而翅和精巢中的镉均未检出。LSD 多重比较结果与雌虫相似,雄虫中肠镉含量与其他几个组织部位间都存在极显著差异($P<0.001$),中肠镉含量为 $3.347\ 7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与前、后肠之间差异显著($P<0.001$),前、后肠镉含量之间差异不显著($P=0.843$),头部和体壁的镉含量最低,且差异不显著($P=0.064$)。

表 2 结果表明,镉在雌雄中华稻蝗体内的累积分布具有相似的规律:消化道累积量显著,其中中肠含量最高,其他组织部位含量较低,生殖器官的累积浓度均为最低。但雌雄虫相同部位的镉含量之间具有一定的差异,雌虫前、中和后肠的镉含量明显高于

雄虫,且存在显著性差异($P=0.001\ 0.014$ 和 0.006)。

2.3 铬在中华稻蝗体内的累积分布

由表 3 可知,中华稻蝗雌虫中肠、体壁和足的铬累积浓度显著高于其他几个部位,其次是头部、前肠和卵巢,翅和后肠铬的累积浓度最低。多重比较结果表明,前肠、中肠与后肠铬的累积浓度之间差异极显著($P<0.001$)。中华稻蝗雌虫各组织部位对铬的累积浓度依次为中肠>足>体壁>头>卵巢>前肠>翅>后肠,其中中肠的铬累积浓度高达 $7.798\ 4\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。中华稻蝗雄虫体内铬浓度的分布状况依次为足>体壁>中肠>头>前肠>精巢>翅>后肠。多重比较结果还表明,除头、足和体壁外,中华稻蝗不同组织部位铬含量在雌雄虫间存在显著差异($P<0.05$),其中前肠和生殖器官间的差异极显著($P<0.001$)。

2.4 镉和铬累积的多因素方差分析

中华稻蝗镉和铬含量的多因素方差分析结果见表 4。不同种类的重金属在中华稻蝗自然种群体内的累积差异显著($P<0.001$),且雌雄之间及不同组织部位间的累积也存在显著差异($P<0.001$),重金属种类、雌雄性别和组织部位之间具有明显的交互作用($P=0.022$)。

3 讨论

3.1 镉在中华稻蝗体内的累积分布状况

中华稻蝗对重金属镉具有较强的富集能力,虽然其栖息地土壤和水稻中的镉浓度较低,但中华稻蝗体内还是累积了较高浓度的镉。前期研究表明,环境中镉浓度较低时,由于重金属积累的生物放大作用,生活于此环境中的昆虫仍可富集一定量的镉^[3],本文研究证实了这一结果。

中华稻蝗是典型的植食性昆虫。由于昆虫对食物

表 2 镉在中华稻蝗各组织部位的累积浓度 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 The concentration of Cd in different parts of the rice grasshopper *O.chinensis*($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

部位 Part	雌虫 Female	雄虫 Male
头 Head	0.302 1±0.014 6c	0.218 9±0.070 7d
足 Legs	0.144 7±0.024 3c	0.458 1±0.345 7c
翅 Wings	0.306 8±0.050 9c	—
体壁 Body wall	0.131 0±0.030 8c	0.161 8±0.026 0d
前肠 Foregut	3.415 4±0.195 2b	1.578 8±0.082 8b*
中肠 Midgut	6.798 4±0.662 0a	3.347 7±0.486 6a**
后肠 Hindgut	3.657 7±0.518 9b	0.948 4±0.033 7bc*
精巢/卵巢 Testis/Ovary	0.198 2±0.011 8c	—

注:表中各值以 3 次重复测定结果的平均值±标准误表示,小写字母代表同一性别不同组织部位之间的差异显著性($P<0.05\ n=3$)。* 和 ** 分别表示雌雄虫之间的差异显著水平($P<0.05$ 和 $P<0.01$)。下同。

Note: Each value of insects is the mean of three replicate ±S.E.; Small letters after data within a column represent significant differences between the parts of the same sex($P<0.05\ n=3$). The asterisk (*) and (**) represent significant difference between females and males at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

表 3 铬在中华稻蝗各组织部位的累积浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 The concentration of Cr in different parts of the rice grasshopper *O.chinensis*($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

部位 Part	雌虫 Female	雄虫 Male
头 Head	4.958 1±0.253 0c	3.958 1±0.575 8c
足 Legs	6.633 3±0.408 1ab	5.666 6±0.453 8a
翅 Wings	1.321 4±0.132 2e	0.321 4±0.132 2d*
体壁 Body wall	6.300 0±0.174 1b	5.300 0±0.550 7ab
前肠 Foregut	3.148 7±0.347 4d	1.148 7±0.245 5d**
中肠 Midgut	7.798 4±0.880 3a	4.265 1±0.591 2bc*
后肠 Hindgut	1.255 5±0.187 3e	0.255 5±0.187 3d*
精巢/卵巢 Testis/Ovary	3.415 4±0.195 2d	1.348 7±0.236 3d**

表 4 中华稻蝗体内重金属含量的多因素方差分析结果

Table 4 ANOVA results of heavy metals concentration in the grasshopper *O.chinensis*

方差来源	型的平方和	自由度	均方	F 值	Sig.
修正模型	548.297a	31	17.687	50.219	0.000
截距	585.084	1	585.084	1 661.245	0.000
重金属种类	116.096	1	116.096	329.633	0.000
性别	39.671	1	39.671	112.639	0.000
部位	197.817	7	28.260	80.238	0.000
重金属种类×性别	1.952	1	1.952	5.541	0.022
重金属种类×部位	161.704	7	23.101	65.590	0.000
性别×部位	24.749	7	3.536	10.039	0.000
重金属种类×性别×部位	6.309	7	0.901	2.559	0.022
误差	22.541	64	0.352		
总离差	1 155.922	96			
校正总离差	570.838	95			

Note :R Squared=0.961(Adjusted R Squared=0.941)

消化吸收的部位主要是在消化道,导致镉和铬在消化道的高累积量^[5]。Pedersen 等在对黄粉虫 *Tenebrio molitor* 对镉累积研究中发现镉在消化道的累积最为显著^[6]。类似的报道还包括对棕尾别麻蝇 *Boettcherisca peregrina* 等昆虫的研究^[7-8]。这是由于食物是中华稻蝗体内镉摄入的主要来源,消化道是磨碎、贮存和消化食物的场所,中肠是食物被消化吸收的主要部位,镉离子进入虫体消化道后被肠壁细胞所吸收^[5]。本文结果显示中肠镉累积量最高,反映出镉的代谢累积机理,中华稻蝗前、后肠镉含量间无显著的统计学差异,这与前、后肠均来源于外胚层,其结构相似有关^[9]。

本研究结果表明,自然条件下雌雄中华稻蝗的头部和体壁等组织器官也不同程度地积累重金属镉。这是由于镉离子进入昆虫体内,能通过中肠上皮细胞基底膜进入血淋巴,随着血淋巴循环被转运到机体的其他组织器官。本研究结果虽然表明中华稻蝗的头、体壁和足等组织器官能积累一定量的镉,但其累积量远远低于消化道,且相互之间无显著性差异($P>0.05$)。无论是雌虫还是雄虫,镉在中华稻蝗的头部都有较高的累积。孙鸽等研究认为,昆虫头部对镉累积量较高可能是由于昆虫是开管式循环系统,不存在类似哺乳动物的血脑屏障,因而导致头部镉的高累积量^[9-10]。镉在中华稻蝗足中的累积浓度较低是由于肌肉累积镉的能力较低,这一结果与镉在东亚飞蝗足中的累积状况相同^[11]。

雄虫的翅和精巢中镉含量未检出,可能是因为取样量的原因,虽然本文解剖了 15 头中华稻蝗雌雄虫,

但由于雄虫个体明显小于雌虫,造成雌雄虫最终取样量的差异。由表 2 结果可知,雌虫翅中虽然积累了一定量的镉,但累积浓度显著低于消化道,且与其他组织器官间没有显著性差异。昆虫的翅是由中、后胸背部体壁向外扩展而形成的,是外骨骼的衍生物,结构简单,所以镉在翅与体壁间的累积不存在显著差异^[9]。卵巢和精巢是昆虫的生殖器官,其中镉的累积量极低,可能是由于生殖保护机制的作用。孙鸽等在研究慢性染毒后中华稻蝗体内镉的累积分布时也发现,处理组中华稻蝗生殖器官中的镉浓度均为最低,与本研究结果相一致^[9]。而李丽君等在研究东亚飞蝗自然种群对镉的累积时发现镉在精巢中的浓度高于消化道^[11-12],这可能与所研究的昆虫种类或栖息环境等因素有关,有待进一步探讨。国内外的大量报道均表明镉在昆虫体内主要累积在消化道而不是生殖器官,与本文研究结果一致^[8]。

3.2 铬在中华稻蝗体内的累积分布状况

铬在中华稻蝗不同组织部位的富集规律不同,足、体壁和中肠的铬累积量高于其他组织部位。铬在雌雄中华稻蝗消化道的中肠部位都具有较高的累积,这一结果与镉及其他重金属在昆虫中肠内的累积状况相同^[8]。此外,本文研究结果表明,中华稻蝗雌虫前肠铬的累积浓度显著高于后肠,这可能是由于前肠为外胚层内陷而成,后肠是消化道的最后一段,铬在消化道内先经过前肠和中肠才能到达后肠,在此过程中大部分铬已经被肠壁细胞吸收,且后肠在排除食物残渣和代谢废物过程中,排泄出一部分铬,因此铬在后

肠的累积较前肠低,这一点有待进一步证实。铬在中华稻蝗的体壁、足和生殖器中也有较高的富集,这可能是昆虫对不同重金属亲和力的差异所造成。孟紫强等^[1]认为,化学物在体内组织器官的起始分布取决于血流量,而最终的分布取决于化学物与各组织器官的亲和力。铬在卵巢和精巢中的累积浓度低于中肠和体壁等高累积部位,但高于其他组织,这一结果表明重金属铬可能会影响中华稻蝗的生殖及后代的正常发育,严重时可能会对其后代的生长发育产生不利影响。

王跃等的研究表明,中华稻蝗在取食不同浓度铬溶液培育的小麦后,其体内铬的累积量随着小麦中铬含量的增加而提高,说明中华稻蝗能够耐受一定的重金属铬污染^[13]。正常人的血液中铬含量甚微,但组织中的铬比血液高10~100倍^[14-15]。国内外相关文献对铬在昆虫体内的组织分布研究相对较少。本文通过研究铬在中华稻蝗体内分布的组织特异性,为进一步研究铬对昆虫的毒性机理提供一定的理论基础。

3.3 镉、铬的联合作用

重金属镉和铬在土壤和水体中通常是同时存在的^[16]。David认为,对于哺乳动物,铬是调节糖类代谢的必需元素,铬还能够消除镉对大鼠以及钒对鸡的有害影响^[17]。有关镉或铬在中华稻蝗体内的累积规律已有一些研究,但对于镉铬复合污染条件下对中华稻蝗的联合作用尚未见报道。游植麟在研究复合污染对小白菜(*Brassica chinensis*)体内的生物累积时,指出镉和铬在小白菜体内的累积量具有显著的正相关关系($r=0.875$)^[18]。赵守城的研究结果表明,镉和铬离子对大型水蚤(*Daphnia magna*)毒性具有协同作用^[19]。贾秀英等对鲫鱼(*Carassius auratus*)的研究也得出了相同的结论^[16]。赵志刚对金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)的研究表明,一定浓度范围内的镉和铬对金鱼藻叶绿素含量具有拮抗作用^[20]。在本研究中,相关分析结果表明,中华稻蝗自然种群中的镉与铬含量之间并没有显著的相关关系($P>0.05$),可能的原因是土壤中还有其他重金属的存在,它们可能与镉或铬产生协同或拮抗作用,且水稻叶片中镉和铬含量都较低,还未显示出协同或拮抗作用,有待于在今后进行系统研究。

4 结论

本文通过研究重金属镉和铬在中华稻蝗自然种群体内的生物累积,得出如下结论:

(1)由多因素方差分析结果可知,中华稻蝗自然种群体内镉的累积分布在雌雄性别和不同组织部位有显著差异($P<0.001$),且交互作用显著($P<0.001$)。此结果提示我们研究重金属镉在昆虫体内的累积分布时要充分考虑雌雄性别和各组织部位等因素。

(2)不同种类的重金属在同一昆虫体内的组织分布规律不同。重金属镉在消化道累积量最高,在其他组织部位较低,而铬在中肠、体壁、足、生殖器等都有明显较高的累积。

(3)镉和铬污染属于复合污染型,本实验通过对中华稻蝗自然种群的镉和铬含量的研究,结果并未显示明显的联合毒性,重金属镉和铬之间的相互作用是协同还是拮抗,有待于进一步的研究。

(4)自然界中的重金属进入土壤后,会随着物质的循环过程沿着食物链的方向,从植物到各级消费者之间传递累积。本研究中虽然土壤和生产者(水稻植株)中镉的含量较低,但是作为初级消费者的中华稻蝗体内却积累了较高浓度的镉,这一结论验证了镉传递过程中的生物放大效应。

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: 135-145.
MENG Zi-qiang. Environmental toxicology[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2000: 135-145.
- [2] Bernard A. Cadmium and its adverse effects on human health[J]. *Indian Journal of Medical Research*, 2008, 128(4): 557-564.
- [3] Devkota B, Schmidt G H. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece[J]. *Agri Ecos Environ*, 2000, 78: 85-91.
- [4] 陈永林. 蝗虫灾害的特点、成因和生态学治理[J]. *生物学通报*, 2000, 35(7): 1-5.
CHEN Yong-lin. Characteristics, causes and ecological management of the grasshopper disaster[J]. *Bulletin of Biology*, 2000, 35(7): 1-5.
- [5] 吴海花, 闫会平, 孙 鸽, 等. 中华稻蝗不同体段镉与铅含量及抗氧化酶的比较[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 471-475.
WU Hai-hua, YAN Hui-ping, SUN Ge, et al. Comparisons of cadmium and lead concentrations and antioxidant enzyme activities in different body segments of *Oxya chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 471-475.
- [6] 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.
- [7] 吴国星, 高 熹, 叶恭银. Cd²⁺对棕尾别麻蝇幼虫中肠及马氏管超微结构的影响[J]. *云南大学学报*, 2008(Suppl 1): 411-420.
WU Guo-xing, GAO Xi, YE Gong-yin. Morphological and ultra structural alternations in the midgut and malpighian tubules of *Boettcherisca*

- peregrina* after the Cd²⁺ and Cu²⁺ exposure[J]. *Journal of Yunnan University*, 2008(Suppl 1) :411–420.
- [8] 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. Effect of heavy metal pollutions on insects[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2007, 50(2) :178–185.
- [9] 孙鸽, 吴海花, 席玉英, 等. 长期取食染镉小麦后中华稻蝗体内镉的累积分布[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9) :1812–1817.
- SUN Ge, WU Hai-hua, XI Yu-ying, et al. Accumulation and distribution of cadmium in *Oxya chinensis* after feeding on wheat seedlings contaminated with Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9) :1812–1817.
- [10] 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.
- [11] 李丽君, 郭亚平, 席玉英, 等. 重金属镉、铜在东亚飞蝗自然种群体内的富集规律[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1) :179–182.
- LI Li-jun, GUO Ya-ping, XI Yu-ying, et al. Cadmium and copper accumulation in *Locust migratoria manilensis*(Meyen)-Orthoptera:Acrididae[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1) :179–182.
- [12] LI Li-jun, LIU Xue-mei, DUAN Yi-hao, et al. Accumulation of cadmium and copper by female *Oxya chinensis*(Orthoptera:Acrididae) in soil-plant-insect system[J]. *J Environ Sci*, 2006, 18(2) :341–346.
- [13] 王跃, 李丽君, 张育平, 等. 镉在中华稻蝗(*Oxya chinensis*)体内的累积及对抗氧化系统的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12) :2281–2286.
- WANG Yue, LI Li-jun, ZHANG Yu-ping, et al. Accumulation of chromium in *Oxya chinensis* and its effects on the antioxidant system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12) :2281–2286.
- [14] O'Brien T J, Ceryak S, Patierno S R. Complexities of chromium carcinogenesis: role of cellular response, repair and recovery mechanisms[J]. *Mutation Research*, 2003, 533(1–2) :3–36.
- [15] 考庆君, 吴坤. 铬的生物学作用及毒性研究进展[J]. *中国公共卫生*, 2004, 20(11) :1398–1400.
- KAO Qing-jun, WU Kun. The research progress for biological effects and toxicity of chromium[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2004, 20(11) :1398–1400.
- [16] 贾秀英, 董爱华. Cd、Cr(Ⅵ)及复合污染对鲫鱼组织脂质过氧化的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 29(3) :325–328.
- JIA Xiu-ying, Dong Ai-hua. Effects of Cd、Cr(Ⅵ) single and combined pollution on lipid per oxidation in *Crucia carpio*[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2003, 29(3) :325–328.
- [17] David A W, Pamela Welbourn. 朱琳, 译. 环境毒理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007 :308–310.
- [18] 游植麟. 土壤受镉铬铅复合污染的生物效应研究[J]. *农业环境保护*, 1997, 16(3) :131–132.
- YOU Zhi-lin. Study on the biological effect of combined pollution of Cd, Cr and Pb[J]. *Agro-Environmental Pollution*, 1997, 16(3) :131–132.
- [19] 赵守城. 镉、铬离子对大型水蚤(*Daphnia magna*)毒性的协同作用[J]. *中国公共卫生*, 2000, 16(5) :414.
- ZHAO Shou-cheng. Combined toxic effects of cadmium and chromium on the water fleas (*Daphnia magna*) [J]. *China Public Health*, 2000, 16(5) :414.
- [20] 赵志刚. 铜、铬、镉单一和联合作用对金鱼藻的毒性影响研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2010 :59–61.
- ZHAO Zhi-gang. Study on single and combined toxic effects of Cu, Cr and Cd on *Ceratophyllum demersum* [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2010 :59–61.