

节肢动物体内的总汞和甲基汞含量研究

郑冬梅^{1,2}, 王起超^{1*}, 张仲胜^{1,2}, 郑娜^{1,2}, 张秀武^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 分析了汞污染区河流沿岸草本植物及节肢动物样品中的汞含量. 结果表明, 节肢动物飞蝗、中华蚱蜢总汞含量分别为 $0.032 \sim 0.402 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.023 \sim 0.362 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于非污染区 1 个数量级. 飞蝗、中华蚱蜢甲基汞含量分别为 $0.003 \sim 0.031 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.004 \sim 0.015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占总汞比例分别为 3.5% ~ 49.7% 和 2.0% ~ 44.4%. 飞蝗、中华蚱蜢体内(一级消费者)汞含量低于其食物草本植物, 与未受污染地区不同; 螳螂体内(二级消费者)汞明显累积. 飞蝗体内总汞含量随着个体长度增长呈下降的趋势, 在中华蚱蜢体内则先增长后下降, 甲基汞随着个体长度增长呈上升趋势; 节肢动物个体不同部位中汞含量明显不同, 腹 > 胸 > 头. 节肢动物体内汞和甲基汞可能导致野生鸟类、家禽、两栖类生态风险.

关键词: 节肢动物; 汞; 甲基汞; 食物链; 葫芦岛

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2586-05

Total and Methyl Mercury Contents in Arthropods

ZHENG Dong-mei^{1,2}, WANG Qi-chao¹, ZHANG Zhong-sheng^{1,2}, ZHENG Na^{1,2}, ZHANG Xiu-wu^{1,2}

(1. Northeast Institution of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We researched mercury contents in plants and arthropods collected from the river banks in mercury polluted areas. The results show that total mercury (T-Hg) and methyl mercury (Me-Hg) in *Locusta migratoria manilensis* and *Acrida chinensis* are $0.032 \sim 0.402 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.023 \sim 0.362 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.003 \sim 0.031 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.004 \sim 0.015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ while the proportion of Me-Hg to T-Hg are 3.5% ~ 49.7% and 2.0% ~ 44.4%. T-Hg in arthropods is higher than that a magnitude in non-polluted areas. As primary consumers, mercury contents in *Locusta migratoria manilensis* and *Acrida chinensis* are lower than plants they eat. That is not consistent with the non-polluted areas. *Paratenodera sinensis* is the second consumer and there is an obvious mercury accumulation in it. For *Locusta migratoria manilensis*, T-Hg decreased with the body length while for *Acrida chinensis* that increased following a decreasing. But Me-Hg in both increased with body length. Mercury contents in tissues of arthropods are significantly different. The order is abdomen > thorax > head. Mercury and methyl mercury contents in arthropods would lead wild birds, fowls and amphibians in the ecologic risk condition.

Key words: arthropod; mercury; methyl mercury (Me-Hg); food chain; Huludao

自然界中各种形态的汞都能在微生物的作用下转化为毒性更大的有机汞, 有机汞通过食物链传递能够危害野生动物以及人类的健康. 人类和野生动物摄食汞和甲基汞污染的鱼类是主要的暴露途径, 人们进行了大量的研究^[1-4]. 近年来, 由陆生食物链导致汞累积的研究越来越受到重视. Horvat 等^[3]报道了贵州稻米中总汞的含量可达 $569 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Me-Hg 浓度为 $145 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 认为稻米摄入也是人类一条重要的汞暴露途径. 王宁等^[5]报道了金矿地区两栖类动物林蛙体内汞和甲基汞的累积. Pennuto 等^[6]研究了河滨带蚊蠓-蜘蛛食物链中汞的迁移和累积^[6]. Tremblay 等^[7]报道了水库中羽化昆虫体内总汞和甲基汞含量分别为 $140 \sim 1500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $35 \sim 800 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 昆虫能向鱼体输送甲基汞, 对鱼体甲基汞含量有重要贡献. 飞蝗、中华蚱蜢、螳螂是草地生态系统中常见的节肢动物, 飞蝗、中华蚱蜢以草本植物叶、茎为食物, 喜食稗草、芦苇、狗尾草等, 可以被

其他食虫的脊椎动物和节肢动物所捕食; 螳螂属于肉食性动物, 主要以飞蝗、蚱蜢、蜘蛛等各种昆虫和小动物为食. 因此, 汞和甲基汞可以沿着这一食物链传递, 导致其在两栖类、鸟类等野生动物和家禽体内传递, 进而影响人类健康. Devkota 等^[8]研究了 Taifetos 山中的飞蝗体内的汞富集, 但有关汞污染地区节肢动物体内汞含量以及食物及捕食者关系的资料鲜见报道. 本实验研究了有色冶金-化工复合污染区节肢动物对于有毒重金属汞的累积特征, 探讨了草本植物-节肢动物-捕食者食物链之间汞的迁移.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

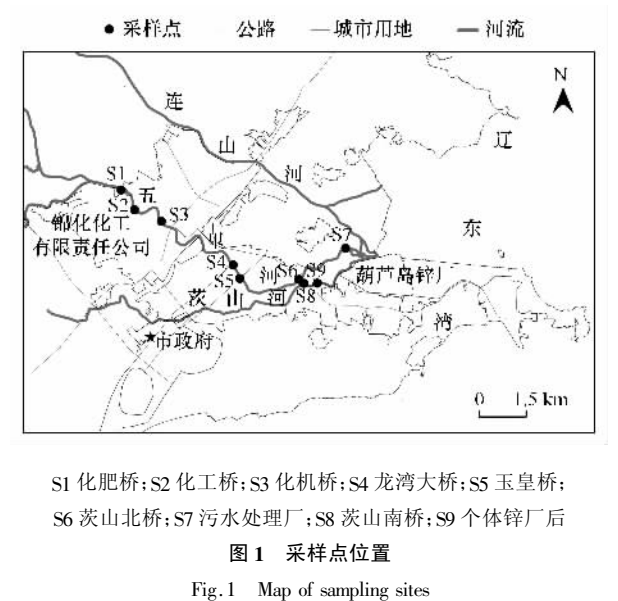
收稿日期: 2006-12-25; 修订日期: 2007-03-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-437)

作者简介: 郑冬梅(1977~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污染物环境行为及其控制, E-mail: zhengdm126@163.com

* 通讯联系人, wangqichao@neigae.ac.cn

选择汞污染严重的葫芦岛市五里河、茨山河河道湿草地为研究区,沿五里河设置化肥桥、化工桥、化机桥、龙湾大桥、玉皇桥、茨山北桥、污水处理厂等 7 个采样点,沿着茨山河的茨山南桥、个体锌厂设置后 2 个采样点(图 1).选择节肢动物飞蝗(*Locusta migratoria manilensis*)、中华蚱蜢(*Acrida chinensis*)、中华绿螳螂(*Paraten odera sinensis*)作为研究对象.采集到的节肢动物用酒精麻醉,带回实验室.样品保存在 4℃ 冰箱内,直至样品消解.由于节肢动物中华蚱蜢、飞蝗主要以植物叶为食物,分别同时采集同一地点的稗草(*Echinochloa crusgall*)、芦苇(*Phragmites australis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等植物叶片以及植物根部土壤样品,植物、土壤样品在室内阴干,粉碎,以备测定.选择长春市经济开发区城市绿地作为对照点,采集飞蝗、植物、土壤样品.另外,由于螳螂种群数量少,所以在实验分析中仅有 2 个样品.所有动物样品采用湿样进行分析测定,同时测定样品中的水分含量,并以此来计算干物质中的汞含量,文中动物汞含量为动物干物质中的汞含量.



1.2 试验方法

(1)总汞的测定 动物总汞的测定采用 $V_2O_5-HNO_3-H_2SO_4$ 法消解,在称完的动物样品中加入 8 mL HNO_3 和 2 mL H_2SO_4 在沙浴上加热、消解,消化液用 Tekram 2600 测定,仪器最低检出限为 $0.005\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 植物叶汞的测定采用 $V_2O_5-HNO_3-H_2SO_4$ 法消解, F732-V 智能型冷原子吸收测汞仪测定,土壤测定方法及仪器与植物相同.

(2)甲基汞的测定 称取一定量的样品,分 2 次

加入 $50\text{ mL } 2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$,加入 $1\text{ mL } 1\%$ 的 CuSO_4 溶液,摇匀,过滤,用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液和 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 调节溶液的 pH 为 $3\sim 4$,巯基棉吸附,用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液 3 mL ,分 3 次加入巯基棉管中,洗脱甲基汞,用 1 mL 苯萃取,用 GC-2010 气相色谱仪测定.

1.3 质量控制

测定节肢动物总汞含量,采用人发标准参考物质(GBW-07601)进行验证,标样的汞含量为 $(0.36\pm 0.05)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,验证的结果为 $(0.40\pm 0.01)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;甲基汞采用 IAEA-443 进行验证,标样的汞含量为 $(0.17\pm 0.07)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,验证结果在标样范围内.植物标样采用国家植物标准样品(GBW-07604)进行检验,植物标样的汞含量为 $(0.026\pm 0.003)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,检测标准样品汞含量为 $(0.027\pm 0.001)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

原始数据利用 SPSS、Excel 进行统计分析,用 ArcMap9.0 制图.

2 结果与讨论

2.1 节肢动物体内的总汞、甲基汞

节肢动物飞蝗汞含量为 $0.032\sim 0.402\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $0.107\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中华蚱蜢汞含量为 $0.023\sim 0.362\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $0.095\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.从图 2 可以看出,飞蝗体内汞含量略高于中华蚱蜢体内汞含量.而作为二级消费者的螳螂汞含量高于一级消费者(飞蝗、中华蚱蜢).

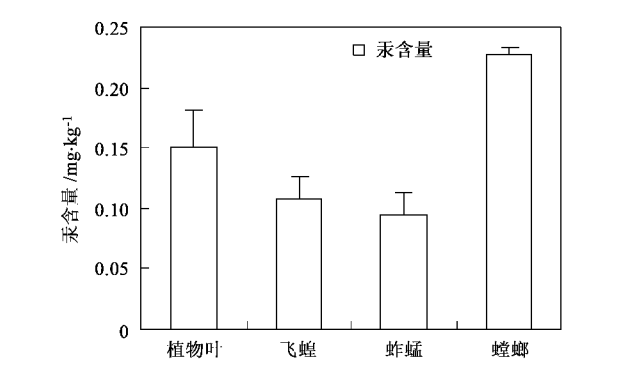


图 2 有色冶金-化工区植物、节肢动物中的汞

Fig.2 Mercury contents in plants and arthropods in non-ferrous and chemic industry zones

飞蝗体内甲基汞含量为 $0.003\sim 0.031\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $0.017\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占总汞的比例为 $3.5\%\sim 49.7\%$;中华蚱蜢甲基汞含量为 $0.004\sim 0.015\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $0.007\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占总汞的比例为 $2.0\%\sim 44.4\%$ (表 1).有色冶金-化工区飞蝗体内

的汞含量高于对照点长春开发区绿地飞蝗体内汞含量($0.007\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),为长春开发区绿地飞蝗体内汞含量的 14 倍,甲基汞含量同样高于对照点.可见,有色冶金-化工区节肢动物汞污染严重.从表 1 可以看

出,不同地点节肢动物总汞、甲基汞含量也不同.五里河沿岸,从化肥桥到茨山北桥,飞蝗、中华蚱蜢体内汞含量增加.在茨山河,茨山南桥飞蝗、中华蚱蜢汞含量略高于个体锌厂后.与不同地点总汞含量相

表 1 节肢动物体内总汞、甲基汞含量

Table 1 Mercury and methyl-mercury contents in arthropods						
采样点	动物种类	总汞 样品数	总汞 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	甲基汞 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	甲基汞 样品数	甲基汞: 总汞/%
化肥桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	8	0.053	0.018	8	34.0
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	4	0.053	0.014	4	26.4
化工桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	9	0.067	0.018	5	26.9
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	5	0.043	0.005	2	11.6
	中华绿螳螂 <i>Paraten-odera sinensis</i>	2	0.148			
化机桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	4	0.082	0.006	2	7.3
龙湾大桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	12	0.087	0.015	6	17.2
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	11	0.119	0.006	4	5.0
	中华绿螳螂 <i>Paraten-odera sinensis</i>	2	0.305			
玉皇桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	4	0.139	0.029	2	20.7
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	5	0.320	0.006	2	1.9
茨山北桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	12	0.211	0.004	2	1.9
污水厂	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	12	0.103			
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	16	0.084	0.009	4	10.7
茨山南桥	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	2	0.097			
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	3	0.060	0.005	2	8.3
个体锌厂后	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	2	0.064			
	中华蚱蜢 <i>Acrida chinensis</i>	23	0.058	0.004	7	6.9
对照点	飞蝗 <i>Locusta migratoria manilensis</i>	9	0.007	未检出	6	

比,甲基汞含量变化没有明显的规律.

2.2 动物汞含量与动物个体长度关系

从飞蝗和中华蚱蜢的个体长度研究发现,飞蝗体内总汞含量随着个体长度增长呈下降的趋势,在中华蚱蜢体内总汞则先增长而后下降,说明随着个体的发育对汞的吸收逐渐减少或者飞蝗、中华蚱蜢体内已趋于代谢平衡.而甲基汞随着个体长度增长呈上升趋势,表明其作为有机物在节肢动物体内有较强的累积能力(图 3、4).总汞与甲基汞随着个体长度增加而具有不同的变化趋势,可能同二者生物体内的半衰期有关.蝗虫的生命周期大约为 75 d.甲

级汞的生物半衰期比无机汞的生物半衰期长^[9],而且甲基汞更容易为生物体所吸收.

蝗虫的发育经过卵、若虫、成虫 3 个时期,若虫与成虫的形态结构、生活习性相似.本试验于 9 月末、10 月初采集的蝗虫,蝗虫为 5 龄蛹(若虫)、成虫.5 龄蛹体长大约为 2.5 ~ 4.0 cm,成虫 > 4.0 cm.从蝗虫的发育时期也可以看出,若虫期汞含量比成虫期汞含量较高.

2.3 节肢动物个体不同器官中汞含量关系

从图 3、4 可以看出,不同长度的节肢动物汞含量有一定的差异,试验中把不同地点 38 个飞蝗样品

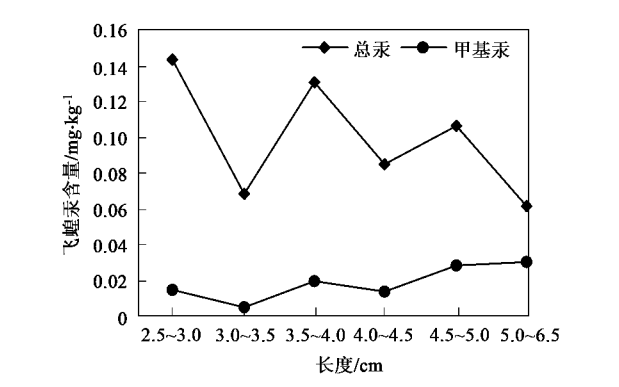


图 3 飞蝗个体长度与汞含量关系

Fig.3 Relation of *Locusta* body length and mercury contents

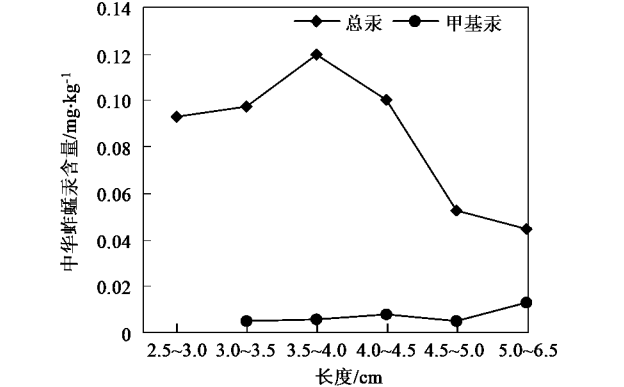


图 4 中华蚱蜢个体长度与汞含量关系

Fig.4 Relation of *Aorida* body length and mercury contents

按器官进行了简单的划分,分为头、胸、腹^[10]. 节肢动物头、胸、腹汞含量具有明显的不同,腹>胸>头(图 5). 由于生物体内不同脏器、组织新陈代谢过程、途径不同,因此,同种元素在动物体内的分布也不可能相同. 飞蝗腹部富集汞的能力最强,是由于消化道位于腹部,而飞蝗在取食和食物消化过程中 Hg 可以富集在消化道内,因此,导致腹部高浓度的 Hg 富集. 这与李丽君等^[11]报道的 Cd 在中华稻蝗腹部含量最高相一致. 刘雪梅等^[12]对中华稻蝗不同体段镉的累积研究也认为,消化道的累积浓度最高. 另外,方展强等^[13]对鱼类的研究中认为, Hg²⁺ 离子进入机体后,与生物分子中的巯基有很强的亲和性,引起蛋白质空间构象发生变化,从而抑制了正常酶的活性,导致鱼类中毒. 但不同种类动物的生活习性,器官组成等各不相同,因此,这方面有待于进一步研究.

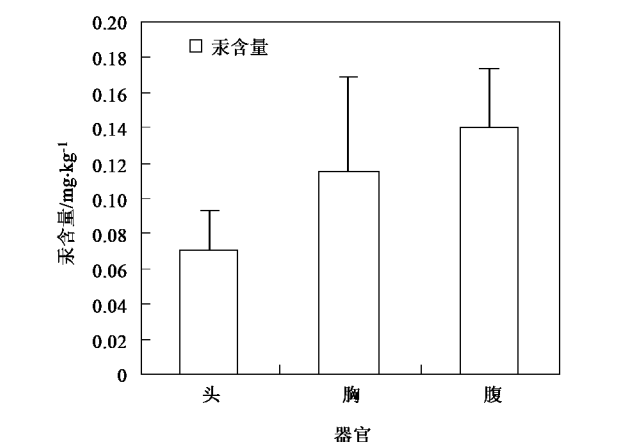


图 5 飞蝗不同器官汞含量

Fig. 5 Mercury contents in different tissues of *Locusta*

不同长度飞蝗个体胸、腹总汞含量具有显著性相关关系($p < 0.05$),头与胸、腹没有相关关系,这与飞蝗的内部构造有关(表 2),飞蝗小部分消化器官位于胸部,大部分消化器官均位于腹部. 例如飞蝗的嗦囊、胃、消化道、肠分别位于胸部、腹部,消化器官汞含量高,这表明节肢动物体内汞主要经由食物吸收获得.

表 2 飞蝗不同器官汞含量的相关关系¹⁾

Table 2 Relation of mercury contents in different tissues of <i>Locusta</i>			
器官	头	胸	腹
头	1.000	0.134	0.322
胸	0.132	1.000	0.702*
腹	0.322	0.697*	1.000

1)* 表示在 $p < 0.05$ 水平上具有显著性意义的相关关系

2.4 汞在节肢动物食物链中的传递

葫芦岛市有色冶金-化工复合区汞污染比较严重^[14~16],历史上受纳氯碱厂废水的五里河表层沉积物汞含量为 0.254 ~ 86.303 mg·kg⁻¹,平均为 13.846 mg·kg⁻¹,受纳锌冶炼厂废水的茨山河表层沉积物汞含量为 0.077 ~ 132.521 mg·kg⁻¹,平均汞含量为 28.709 mg·kg⁻¹. 不同采样点土壤、草本植物汞含量如表 3. 草本植物叶汞含量为 0.057 ~ 0.494 mg·kg⁻¹,平均 0.164 mg·kg⁻¹. 草本植物叶汞含量明显高于飞蝗、中华蚱蜢体内汞含量(图 2). 茨山北桥、茨山南桥、污水处理厂、个体锌厂这些地点土壤、草本植物汞含量比较高,节肢动物体内的汞含量虽然在这些地点含量也在升高,但低于植物叶汞含量(表 3).

表 3 采样点土壤、植物汞含量

Table 3 Mercury contents of soil and plant samples								
项目	化肥桥	化工桥	化机桥	龙湾大桥	茨山北桥	污水处理厂	茨山南桥	个体锌厂
土壤汞含量/mg·kg ⁻¹	0.556	2.332	25.404	13.389	18.82	11.867	9.482	12.218
草本植物汞含量/mg·kg ⁻¹	0.057	0.091	0.184	0.100	0.176	0.073	0.494	0.138

从表 4 可以看出,汞能在飞蝗、中华蚱蜢体内累积,在氯碱污染河流下游的茨山北桥、污水处理厂的飞蝗,龙湾大桥、污水处理厂的中华蚱蜢汞含量高于其食物-草本植物,表现富集的特征. Devkota 等^[8]报道德国 Taifetos 山中节肢动物与植物汞含量比 > 1.0,对照点属于这种情况. Taigetos 山地处偏僻,草中的汞含量比较低的. 对照点地区无大型工业污染源,主要为冬季燃煤汞沉降,植物汞含量亦相对较低. 茨山南桥、个体锌厂后飞蝗、中华蚱蜢体内汞含量相对高,但汞的富集系数却低于 1.0,其体内汞含量随着食物汞含量升高而增加,但是有一定限度. 表

表 4 不同地点汞富集因子

Table 4 Mercury accumulation coefficient in different sites				
地点	植物叶 /土壤	飞蝗 /植物	中华蚱蜢 /植物	螳螂 /飞蝗或蚱蜢
化肥桥	0.126	0.930	0.930	
化工桥	0.039	0.736	0.473	2.690
化机桥	0.007	0.446		
龙湾大桥	0.007	0.870	1.190	2.960
茨山北桥	0.009	1.199		
污水处理厂	0.006	1.410	1.151	
茨山南桥	0.052	0.196	0.121	
个体锌厂后	0.011	0.464	0.420	
对照点	0.021	3.5		

明汞在其体内的累积低于植物叶汞的累积,这与总汞含量随个体长度增加而降低是一致的(图 3、4)。但杂食性螳螂汞的富集系数高于 1.0,存在明显的富集现象,说明螳螂对汞有很强的富集能力。从甲基汞与总汞的比值也可以看出(表 1),在化肥桥、化工桥、玉皇桥的飞蝗和化肥桥、化工桥、污水处理厂的中华蚱蜢体内甲基汞含量较高,在化机桥、龙湾大桥、茨山北桥甲基汞含量较低,节肢动物体内甲基汞与总汞的比值远高于土壤^[17]、沉积物^[18]中甲基汞与总汞的比值,说明生物体内对甲基汞有明显的累积作用。因此,从食物链角度来看,有色冶金-化工复合区节肢动物汞污染还是相对严重的,它可以通过鸟类、家禽等进入其他的食物链,并最终影响人类的健康,也可以通过人类的直接食用进入人体。

3 结论

(1)有色冶金-化工复合污染区节肢动物飞蝗汞含量为 0.032 ~ 0.402 mg•kg⁻¹,中华蚱蜢汞含量为 0.023 ~ 0.362 mg•kg⁻¹。有色冶金-化工区飞蝗体内的汞含量高于对照点长春开发区绿地飞蝗体内汞含量(0.007 mg•kg⁻¹),为长春开发区绿地飞蝗体内汞含量的 14 倍,甲基汞含量同样高于对照点。

(2)节肢动物头、胸、腹汞含量具有明显的不同,腹 > 胸 > 头;胸部、腹部具有一定的相关关系,头与胸部、腹部没有相关关系。

(3)汞在东亚飞蝗、中华蚱蜢(一级消费者)体内有一定的累积,在螳螂(二级消费者)体内达到高累积。从上述研究可以看出,有色冶金-化工复合污染区节肢动物汞含量无论与对照点相比,还是从食物链角度来看,汞污染还是相对严重的。

参考文献:

[1] 王起超,刘汝海,吕宪国,等.湿地汞环境过程研究进展[J]. 地球科学进展,2002,17(6):881 ~ 885.
[2] 张磊,王起超,邵志国.第二松花江鱼及蚌汞含量现状及演变规律[J].生态环境,2005,14(2):190 ~ 194.
[3] Horvat M, Nolde N, Fajon V, et al. Total mercury, methylmercury

and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China[J]. Science of the Total Environment, 2003, 304: 231 ~ 256.
[4] 章佩群,陈春英,赵九江,等.不同汞暴露水平地区鱼组织中汞和硒及其它元素的相关性[J].环境科学,2004,25(4):149 ~ 154.
[5] 王宁,朱颜明,盛连喜,等.松花江上游苇沙河河段中国林蛙的汞污染[J].科学通报,2005,50(15):1589 ~ 1593.
[6] Pennuto C, Smith M. Riparian zone spiders as mercury sentinels[A]. In: The 8th conference on mercury as a global pollutant[C]. 2006. M-58.
[7] Tremblay A, Cloutier L, Lucotte M. Total mercury and methylmercury fluxes via emerging insects in recently flooded hydroelectric reservoirs and a natral lade[J]. Science of the Total Environment, 1998, 219: 209 ~ 221.
[8] Devkota B, Schmidt G H. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment 2000, 78: 85 ~ 91.
[9] 刘永懋,王稔华,翟平阳.中国松花江甲基汞污染防治与标准研究[M].北京:科学出版社,1998.
[10] 武汉大学,南京大学,北京师范大学合编.普通动物学[M].北京:人民教育出版社,1978.
[11] 李丽君,席玉英,张峰,等.Cd 在中华稻蝗体内的分布[J].农业环境科学学报,2004,23(2):246 ~ 249.
[12] 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.
[13] 方展强,王春风,卫焕荣.汞和硒对剑尾鱼 Na⁺/K⁺-ATPase 活性的影响[J].应用与环境生物学报,2006,12(2):220 ~ 223.
[14] Wang Q C, Yan B X, Zhang S Q, et al. Distribution characteristics of mercury in the region contaminated by Zic smelting and chlor-alkali production. Expanded Abstract X III [A]. In: International conference on heavy metals in environment[C]. 2005. 492 ~ 295.
[15] 赵连娣,彦惠芬,葫芦岛市五里河沿岸土壤汞污染状况及评价[J].土壤通报,1997,28(2):68 ~ 70.
[16] 郑冬梅,王起超,郑娜.锌冶炼-氯碱复合污染区木本植物中的汞[J].环境科学,2007,28(1):189 ~ 193.
[17] 仇广乐,冯新斌,王少锋,等.贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J].环境科学,2006,27(3):550 ~ 555.
[18] Shi J B, Liang L N, Yuan C G, et al. Methylmercury and total mercury in sediments collected from the East China sea [J]. Environmental contamination and Toxicology, 2005, 74: 980 ~ 987.