

重金属在浮游生物与鳙鱼中的蓄积和迁移规律

Accumulation and migration regularity of heavy metals in plankton and aristichthys nobilis

陆维亚¹ 李 节¹ 薛敏敏² 杨梦昕¹ 刘佳玉³

LU Wei-ya¹ LI Jie¹ XUE Min-min² YANG Meng-xin¹ LIU Jia-yu³

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省产商品质量监督检验院, 湖南 长沙 410007; 3. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

(1. School of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 2. Institute of Product Quality Supervision and Inspection of Hunan Province, Changsha, Hunan 410007, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

摘要:矿产资源的开发可能导致水体环境遭受重金属污染, 重金属又可从环境中迁移进入生物体, 从而造成安全威胁。通过对 7 种重金属在水体、沉积物、浮游生物和鳙鱼中的污染情况和迁移规律进行研究, 结果表明: 7 种重金属在水体中的含量均低于中国地表水环境质量 I 类标准限量值; 沉积物中重金属的污染程度排序为 Cd>Zn>Pb>Cu>Cr>As>Hg, 综合污染分级已达到了重度污染程度; 浮游生物中重金属含量的排序为 Zn>Cu>Pb>Cr>As>Hg>Cd; 鳙鱼中的含量排序为 Zn>Cu>Pb>Cr>As>Hg>Cd, 所有重金属的含量均低于中国国家和行业标准限量; 浮游生物中重金属主要取决于水体, 同时受到沉积物的影响。Cd 和 Pb 更倾向于从环境中迁移进入鳙鱼, 而 Zn 和 Hg 更倾向于从食物链中迁移进入鳙鱼。

关键词: 重金属; 迁移; 污染指数; 浮游生物; 鳙鱼

Abstract: Development of mineral resources along Xiang River has brought serious pollution of heavy metals. What's more, heavy metals migrate from environment into organism which bring a consequence of security threat. Studied the pollution situation and migration regularity of 7 kinds of heavy metals in water, sediment, plankton and aristichthys nobilis. The results showed that: The concentration of heavy metals in water were below the first class standard limit value of the national surface water environment quality; The pollution degree of heavy metals in sediments were found with the order: Cd>

Zn>Pb>Cu>Cr>As>Hg, and the comprehensive pollution grading had reached high levels of pollution degree; The concentration of heavy metals in plankton were found with the order: Zn>Cu>Pb>Cr>As>Hg>Cd; The concentration of heavy metals in aristichthys nobilis were found with the order: Zn>Cu>Pb>Cr>As>Hg>Cd, and all the concentration of heavy metals were below the national and industry standards limited; The concentration of heavy metals in plankton mainly depend on the concentration of heavy metals in water, partly depend on the sediment; Cd and Pb are more inclined to migrate from environment into aristichthys nobilis, while Zn and Hg are more inclined to migrate from food into aristichthys nobilis.

Keywords: heavy metal; food chain; migration regularity; plankton; aristichthys nobilis

湘江被称之为湖南的“母亲河”, 近年来, 随着工农业的飞速发展以及城市人口的迅猛增长, 工厂、农田和居民生活区产生的废气废水量也呈上涨的趋势, 导致湘江流域的环境受污染程度愈发严重^[1]。重金属是最严重的污染物之一, 主要来源于矿山矿石、有色金属冶炼和城市生活排放。从 1966 年至今, 湘江重金属含量超标的现象时有发生, 包括砷、铬、镉、锰、汞、锌、铅等^[2]。

重金属污染使湘江流域的食物链受到了安全威胁, 其途径: ① 灌溉水和土壤中的重金属迁移至蔬菜和粮食作物; ② 水体和沉积物中重金属迁移至水生生物中, 不同营养级间通过摄食又可将重金属从较低营养级迁移至较高营养级水生生物中^[3]。重金属的迁移受多种因素的影响, 包括重金属和生物体相关因素(如重金属种类、含量, 生物体种类、数量、吸收排出率)、环境因素(如水体、土壤和沉积物的理化特

基金项目: 国家科技支撑计划课题(编号: 2012BAD29B05)

作者简介: 陆维亚, 女, 中南林业科技大学在读硕士研究生。

通讯作者: 李节(1985—), 女, 中南林业科技大学讲师。

E-mail: lijie@0733.com

收稿日期: 2015-12-11

性)等^[4]。一般而言,蔬菜(如卷心菜、小白菜、芥菜、莴苣、大蒜、辣椒、豌豆等)和粮食作物(如小麦、稻谷和玉米)都更易从土壤中富集 Cd、Zn、Cu 和 Hg,而不易富集 Cr、As 和 Pb^[5-11]。但也有例外,如南瓜对 Cr 的富集能力更强于 Cd^[12]。浮游植物也可以迅速地从水体中富集重金属,对 Zn、Hg、Cd 和 Pb 都有很强的富集能力^[4]。对环境到农产品中重金属迁移的研究较多,对高营养级水生生物中重金属迁移规律的探讨尚不多见。Zdenka Mazej 等^[13]发现鱼类通过摄食浮游生物,可以大量富集 Zn 和 Hg,而极少吸收 Pb 和 Cd。Chen Y M 等^[14]研究发现牡蛎对浮游植物中的 Cd 和 Zn 都有很高的吸收率。Saleh Tabari 等^[15]发现鲤鱼对于环境中的 Pb 和 Cd 有较强的富集能力。这些研究中重金属的种类相对较少,忽略了一些对人体产生危害的重金属如 As、Cr 和 Cu;而且研究内容较单一,没有综合考虑环境和食物到水生生物的重金属迁移规律。本研究拟针对鳙鱼这一生物体,通过分析水体、沉积物、浮游生物和鳙鱼中重金属的相关性,探讨重金属的迁移规律。丰富了重金属种类的同时,比较环境和食物两种因素对鱼类富集重金属的影响,使鱼类中重金属的迁移规律更加全面。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 水样采集 样品均于2014年10月至11月分3次取自湘江长沙段。每次用500 mL的聚乙烯塑料瓶于水面下50 cm处取水样一瓶,取样前先用江水润洗瓶子两次,贴上标签。样品于4℃冷藏保存^[16]。

1.1.2 沉积物采集 沉积物样品取水底0~10 cm深度处,每次取500 mL塑料瓶一瓶,贴上标签。剔除碎石和砂砾后的样品于50℃恒温干燥箱干燥48 h,用2 mm筛孔(或20目筛)的筛子将干燥的沉积物均质。4℃冷藏备用^[16]。

1.1.3 浮游生物的采集 将浮游生物采集网系在竹竿上,在表层水中以“8”字形来回反复拖捞数分钟,提出水面滤干,打开网头活塞,将网头中富集了浮游生物的水样装入塑料瓶中,采集5瓶,贴上标签^[17]。将富集了浮游生物的水样用滤纸过滤后,滤纸于28℃烘干至表面无水分,收集样品于密封袋中,-18℃保存备用。

1.1.4 鳙鱼的采集 鳙鱼样品采集自三叉矶大桥附近流域,由渔船撒网捕获,每次购入重量相近的鳙鱼3条。鳙鱼样品重量均在500 g左右。将鳙鱼去鳞,用超纯水清洗并擦干表面水分,鱼肉剔骨,混合匀浆,放入密封袋中-18℃保存备用^[18]。

1.2 试验方法

1.2.1 样品处理 参考SN/T 2208—2008,称取0.300 0 g左右经过前处理的样品(浮游生物、鳙鱼)于石英管中,加硝酸3 mL,盖上盖子。将石英管按顺序排列于架子上放入加有5 mL H₂O₂和110 mL超纯水的微波消解罐中,于超级微

波消解仪消解。消解结束后,将石英管中消解液倒入比色管中,并用超纯水洗涤石英管,洗液并入比色管。将比色管放入电热装置,130℃加热30 min使硝酸挥发。取出,用超纯水定容至25 mL,待测。同时做试样空白。

参考GB/T 17141—1997,称取0.5 g左右均质后的沉积物于聚四氟乙烯坩埚中,加水湿润,加10 mL盐酸,于120℃电炉加热蒸发至约5 mL。加15 mL硝酸于240℃加盖蒸发至约5 mL后,取下稍冷。另加10 mL硝酸,10 mL氢氟酸和5 mL高氯酸240℃加热,经常摇动坩埚,蒸发至约2 mL。加少量水冲洗坩埚并蒸发赶酸3次。将坩埚中样液转移至25 mL容量瓶,定容。同时做试样空白。置于4℃冰箱冷藏待测。

1.2.2 样品测定 将待测样品过0.45 μm的膜,用Agilent 7700x ICP—MS测定样品中重金属Pb、Cr、Cd、Zn、Cu、As和Se的浓度。每个样平行测定3次。

1.2.3 数据处理与分析 采用单项污染指数法和内梅罗(Nemerow)综合污染指数法评价沉积物中的重金属的污染情况。污染分级见表3。单项污染指数和综合污染指数按式(1)、(2)计算:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}, \quad (1)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + P_{\max}^2}{2}}, \quad (2)$$

式中:

P_i —— i 重金属元素的污染指数;

C_i —— i 重金属含量实测平均值;

S_i ——样品中 i 重金属含量的标准值(湘江沉积物背景值,见表4);

P_N ——样品的综合污染指数;

\bar{P} ——样品的各单项污染指数的算术平均值;

P_{\max} ——样品单项污染指数中的最大值^[19-22]。

用SPSS17.0处理数据以分析水体、沉积物、浮游生物和鳙鱼中重金属的相关性。

2 结果与分析

2.1 水体和沉积物中重金属的富集情况

由表1可知,水体中Zn和Cu的含量相对较高,Cr、As和Pb有微量检出,Cd和Hg则未检出。水体中重金属含量均符合中国I类地表水环境质量标准。沉积物中重金属含量远高于水体,各重金属含量高低排序为Zn>Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg。

根据表2中的单项污染指数可知:重金属Hg和As表现为清洁,Cr为轻度污染,Cu为中度污染,Pb、Zn和Cd为重度污染。不同于含量排序,各重金属按污染程度排序为Cd>Zn>Pb>Cu>Cr>As>Hg。根据综合污染指数的等级划分标准(表3),湘江长沙段沉积物中重金属已达到了重度污染程度。

表 1 湘江长沙段采样点水样、沉积物、浮游生物和鳙鱼中重金属的含量[†]

Table 1 Contents of heavy metals in water, sediment, plankton and aristichthys nobilis from Changsha section of Xiang River

采样时间	样品	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
10月8日	水样	0.003±0.002	0.008±0.002	0.010±0.005	0.002±0.001	nd	0.002±0.001	nd
	沉积物	77.029±4.003	31.043±2.414	395.941±9.116	12.618±0.873	6.073±0.774	73.642±4.556	0.171±0.011
	浮游生物	0.062±0.013	0.239±0.010	0.364±0.037	0.011±0.003	0.002±0.001	0.101±0.022	0.008±0.004
	鳙鱼	0.112±0.004	1.230±0.132	30.131±0.317	0.040±0.013	0.016±0.007	0.234±0.013	0.024±0.008
10月20日	水样	0.003±0.001	0.007±0.003	0.020±0.006	0.003±0.001	nd	0.001±0.000	nd
	沉积物	72.575±3.297	28.957±2.109	402.939±9.323	11.204±0.983	4.795±0.625	55.645±3.010	0.137±0.014
	浮游生物	0.048±0.011	0.256±0.033	0.351±0.027	0.008±0.002	0.003±0.001	0.082±0.015	0.013±0.003
	鳙鱼	0.118±0.001	0.945±0.123	25.644±2.999	0.034±0.006	0.007±0.001	0.198±0.006	0.035±0.011
11月3日	水样	0.004±0.002	0.008±0.003	0.015±0.005	0.003±0.002	nd	0.003±0.001	nd
	沉积物	86.092±3.106	33.348±2.573	387.126±9.016	17.915±1.026	14.150±1.288	91.747±4.893	0.123±0.014
	浮游生物	0.076±0.028	0.293±0.052	0.347±0.022	0.013±0.007	0.006±0.003	0.123±0.029	0.006±0.003
	鳙鱼	0.119±0.001	1.065±0.189	28.511±2.196	0.038±0.002	0.016±0.010	0.215±0.004	0.020±0.011

† 采样时间均为 2014 年;nd 表示未检出。

表 2 湘江长沙段沉积物中重金属污染评价指数

Table 2 Pollution appraisal indexes of heavy metal in sediment from Changsha section of Xiang River

重金属	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
湘江沉积物中背景值/(mg·kg ⁻¹)	62.0	16.7	73.0	20.5	0.5	22.5	0.25
单项污染指数	1.267	2.053	5.416	0.679	16.678	3.275	0.576
综合污染指数	12.175						

表 3 沉积物中重金属污染分级标准^[19]

Table 3 Criteria for classification of heavy metal pollution in sediment

等级	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
I	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	沉积物开始受到污染
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	沉积物受中度污染
V	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重污染	沉积物受污染已相当严重

2.2 浮游生物中重金属的富集情况

Neetu 等^[23-24]在对淡水库重金属的污染评价的研究中提出,浮游生物作为水生生物的一种,处于食物链最底层,是软体动物和鱼类等的食物来源。Mohamed Bahnasawy 等^[25]也在研究中指出浮游生物中的重金属含量主要取决于水体中重金属含量。因此浮游生物可以作为水质评价的指标,用来反映水质的平均生态条件。

湘江长沙段中的浮游生物种类主要是浮游植物中的硅藻、蓝藻和绿藻,原生动物的冠砂壳虫和结节鳞壳虫,轮虫样中的萼花臂尾轮虫、螺形龟甲轮虫、前节气囊轮虫和长三肢轮虫,枝角类中的象鼻溘和桡足类中的广布中剑水蚤和无节幼体^[26]。表 1 中列出了浮游生物中 7 种重金属的含量,其

中 Cr 的富集范围是 0.041~0.083 mg/kg, Cu 为 0.220~0.307 mg/kg, Zn 为 0.276~0.405 mg/kg, As 为 0.006~0.016 mg/kg, Cd 为 0.001~0.007 mg/kg, Pb 为 0.065~0.137 mg/kg, Hg 为 0.004~0.015 mg/kg。各重金属的含量从大到小排序为 Zn>Cu>Pb>Cr>As>Hg>Cd。

长沙段采样点浮游生物中重金属 Zn、Cu、Pb、Cr 的含量较高,其中 Zn、Cu 和 Pb 可能主要来源于株洲清水塘工业区的有色金属冶炼、化工和火力发电等工业活动^[27], Cr 的污染主要是由于附近的三汊矶老工业区曾有中国最大的铬盐厂,堆放的铬渣、排放的工业废水以及重金属的难降解性都是污染存在的原因^[28]。As、Hg、Cd 的含量较低, As 和 Cd 的污染源自长沙段上游的重金属采、选、冶行业,包括郴州三十六湾、衡阳水口山、株洲霞湾港、湘潭竹埠港等^[2]; Hg 污染主要来源于电子工业废水废气排放、汞制品垃圾乱弃^[29]。

2.3 鳙鱼中重金属的富集情况

表 1 中列出了鳙鱼中重金属的平均含量,其中 Cr 含量为 0.101~0.151 mg/kg, Cu 为 0.829~0.901 mg/kg, Zn 为 27.287~27.453 mg/kg, As 为 0.029~0.047 mg/kg, Cd 为 0.004~0.010 mg/kg, Pb 为 0.184~0.268 mg/kg, Hg 为 0.017~0.041 mg/kg。对比表 4 中国国家标准规定的鱼类中重金属限量,鳙鱼中重金属含量都低于限定值,但是所测得的结果是整条鱼的量,由于重金属在鱼体内分布的不均匀性,不排除鱼的某些组织中存在重金属含量超标的现象。另外,本试验所用鳙鱼样品的重量均在 500 g 左右,鱼龄较小,而重金属的生物半衰期都很长,可能随着鱼龄的增长,重金属的蓄积浓度增大^[30]。刘芳芳等^[18]在对洞庭湖水箱养殖鲤鱼不同部位 Pb、Zn、Cd 和 Cu 含量的检测中,也得出所测鱼肉样品中重金属含量均低于 GB 2762—2012 标准限量,属于安全食用的范围;但是,部分鳃和肝脏样品中 Zn 超标,部分肝脏样品中 Cd 超标。同时,在分析鲤鱼生长期内重金属的富集特征时,发现在 6 个月内 Cu 和 Pb 随着鲤鱼的生长而

表4 鱼类中重金属限量

Table 4 Limited contents of heavy metals in fish

标准	Pb	Cr	Cd	As	Se	Zn	Cu
GB 2762—2012	0.5	2.0	0.1	0.1	1.0	—	—
GB 13106—1991	—	—	—	—	—	—	50
NY 5073—2006	—	—	—	—	—	50	—

增加,Zn和Cd在4月龄时达到最大。

鳙鱼中重金属按含量高低排序为 $Zn > Cu > Pb > Cr > As > Hg > Cd$ 。除了受环境和食物中重金属含量的影响外,还有很多因素会对重金属的富集产生影响。其中,Zn和Cu作为鱼类的必需微量元素,在鱼体的新陈代谢和生长中起着重要的生物学作用,因此易于被吸收富集^[25];Pb可通过饱饮或内吞作用富集于体内,但鱼体对其排出速率较高^[31];Cr也是一种必需的微量元素,参与核酸代谢等,但是它的颗粒活性较强,一般颗粒活性越强,金属的同化率越低^[4];As能参与某些酶反应,如以砷酸盐取代磷酸盐作为酶的激活剂,以亚砷酸盐与巯基结合作为酶抑制剂^[32];甲基汞与鱼肉蛋白有很高的亲和力^[13];Cd能与细胞内蛋白质上的巯基形成化合作为酶抑制剂^[33]。可见,重金属是否为鱼体所需、重金属的颗粒活性和鱼体内重金属的排出速率等都会影响鱼类对重金属的富集。

2.4 浮游生物和鳙鱼中重金属的迁移规律

由表1可知,重金属在沉积物中含量最高,其次是鳙鱼和浮游动物,水体中重金属含量最低。水体和沉积物作为浮游生物和鳙鱼接触的环境元素,是生物体中重金属的主要来源;浮游生物作为鱼类的主要食物来源,在重金属迁移至鱼体中起着至关重要的作用^[23]。如表5所示,通过比较水体、沉积物和浮游生物间的相关系数可知,浮游生物和水体间的相关性比与沉积物间的强,表明浮游生物中重金属的含量主要取决于水体,同时受到沉积物的影响。对比水体、沉积物、浮游植物和鳙鱼间重金属的相关性,可以发现Cu表现为水体和鳙鱼间、浮游生物和鳙鱼间显著相关,Cd和Pb表现为沉积物和鳙鱼间显著相关,Zn和Hg表现为浮游生物和鳙鱼间显著相关,Cr和As表现为水体、沉积物、浮游生物和鳙鱼间都存在一定的相关性,但不显著。由此可推断,Cd和Pb更倾向于从环境中迁移至鳙鱼,而Zn和Hg更倾向于从食物中迁移至鳙鱼。

Zdenka Mazej等^[13]研究指出环境中的重金属主要通过鳃呼吸和体表接触的形式迁移进入鱼体,食物中的重金属通过在消化道内与蛋白结合,经由血液首先迁移进入肝脏,而后进入鱼肉组织。Cd和Pb在食物链中随着营养级的升高而减少,极少从食物中吸收,Zn易与蛋白结合,随血液运载至各组织中,Hg极易以甲基化的形式与鱼肉中的蛋白结合。Maria S. P. Vilhena等^[34]也指出Zn和Cu易于从水生植物中迁移进入蟹中。这些研究结论均与本研究结果一致。

表5 湘江长沙段采样点水样、微型浮游生物、枝角类、桡足类浮游生物和鳙鱼中重金属的相关系数[†]

Table 5 Correlations of heavy metals in water, phytoplankton, zooplankton and aristichthys nobilis from Changsha section of Xiang River

样品	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
水体—浮游生物	0.756*	0.732*	0.703*	0.746*	—	0.823*	—
沉积物—浮游生物	0.892**	0.598	0.669	0.683	0.715*	0.712*	0.406
水体—鳙鱼	0.708	0.809*	0.344	0.584	—	0.672	—
沉积物—鳙鱼	0.549	0.647	0.495	0.618	0.740*	0.754*	0.512
浮游生物—鳙鱼	0.621	0.735*	0.748*	0.655	0.609	0.504	0.921**

† **在0.01水平(双侧)显著相关;*在0.05水平(双侧)时显著相关。

3 结论

湘江长沙段重金属污染主要来源于上游矿产工业废渣堆放和废水废气的排放。湘江水体中重金属含量都低于中国地表水环境质量Ⅰ类标准限量值。沉积物中重金属按污染程度排序为 $Cd > Zn > Pb > Cu > Cr > As > Hg$,其综合污染分级已达到重度污染程度。浮游生物中重金属按含量高低排序为 $Zn > Cu > Pb > Cr > As > Hg > Cd$ 。鳙鱼中重金属按含量高低排序为 $Zn > Cu > Pb > Cr > As > Hg > Cd$,所有重金属的含量均低于中国国家和行业标准限量。浮游生物中重金属主要取决于水体,同时受到沉积物的影响。Cd和Pb更倾向于从环境中迁移至鳙鱼,而Zn和Hg更倾向于从食物中迁移至鳙鱼。

食物链的错综复杂以及生物体各异的代谢机制使重金属迁移规律的研究需要细分不同的食物链、不同的物种来进一步展开。土壤植物、水生植物、草食性动物、杂食性动物、肉食性动物等是处于食物链不同营养级的生物,由它们组成的不同食物链,及对重金属的迁移富集形式都有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 雷鸣,秦普丰,铁柏清. 湖南湘江流域重金属污染的现状与分析[J]. 农业环境与发展,2010(2): 62-65.
- [2] 刘耀驰,高栗,李志光,等. 湘江重金属污染现状、污染原因分析与对策探讨[J]. 环境保护科学,2010,36(4): 26-29.
- [3] 杨梦昕,付湘晋,李忠海,等. 湘江流域重金属污染情况及其对食物链的影响[J]. 食品与机械,2014,30(5): 103-106.
- [4] 王文雄,潘进芬. 重金属在海洋食物链中的传递[J]. 生态学报,2004,24(3): 599-604.
- [5] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated

- potential health risks in the pearl river delta, south China[J]. *Environ Monit Assess*, 2014(186): 1 547-1 560.
- [6] Pei Dong-hui, Xie Han, Song Hai-hai, et al. Bioconcentration factors and potential human health risks of heavy metals in cultivated lentinus edodes in Chengdu, people's republic of China [J]. *Journal of Food Protection*, 2015, 78(2): 390-395.
- [7] Bao Zhe, Wu Wen-yong Liu Hong-lu, et al. Impact of long-term irrigation with sewage on heavy metals in soils, crops, and groundwater-a case study in Beijing[J]. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2014, 23(2): 309-318.
- [8] Wang Zu-wei, Zeng Xiang-feng, Geng Ming-shuo, et al. Health risks of heavy metals uptake by crops grown in a sewage irrigation area in China[J]. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2015, 24(3): 1 379-1 386.
- [9] 王大州, 林剑, 王大霞, 等. 根际土—辣椒系统中重金属的分布及食品安全风险评价[J]. *地球与环境*, 2014, 42(4): 546-549.
- [10] 余忠, 胡学玉, 刘伟, 等. 武汉市城郊蔬菜种植区重金属积累特征及健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(8): 881-877.
- [11] 袁列江, 杨梦昕, 李萌立, 等. 湘江长沙段叶菜类蔬菜重金属富集规律及污染评价[J]. *食品与机械*, 2015, 31(1): 59-63.
- [12] Ashfaq A, Khan Z I, Bibi Z, et al. Heavy metals uptake by cucurbita maxima grown in soil contaminated with sewage water and its human health implications in peri-urban areas of sargodha city[J]. *Pakistan J. Zool*, 2015, 47(4): 1 051-1 058.
- [13] Mazej Z, Sayegh-Petkovsek S A, Pokornj B. Heavy metal concentrations in food chain of lake velenjsko jezero, slovenia: an artificial lake from mining[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2010(58): 998-1 007.
- [14] Chen Yueh-min, Li Hong-chun, Tsao Tsung-ming, et al. Some selected heavy metal concentrations in water, sediment, and oysters in the Er-Ren estuary, Taiwan; chemical fractions and the implications for biomonitoring[J]. *Environ Monit Assess*, 2014(186): 7 023-7 033.
- [15] Tabari S, Saravi S S S, Bandany G A, et al. Heavy metals (Zn, Pb, Cd and Cr) in fish, water and sediments sampled form Southern Caspian Sea, Iran [J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2010, 26(10): 649-656.
- [16] 曾龄颐, 李文丽, 黎璞. 湘江流域长沙段鱼类重金属污染情况分析与评价[J]. *轻工科技*, 2012(9): 94-95.
- [17] 张婷, 马行厚, 王桂苹, 等. 鄱阳湖国家级自然保护区浮游生物群落结构及空间分布[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(1): 158-165.
- [18] 刘芳芳, 李忠海, 付湘晋, 等. 东洞庭湖网箱养殖鲤鱼生长期重金属的富集特征[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(2): 166-172.
- [19] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1 561-1 567.
- [20] 秦延文, 韩超南, 张雷, 等. 湘江衡阳段重金属在水体、悬浮颗粒物及表层沉积物中的分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11): 2 836-2 844.
- [21] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2 599-2 606.
- [22] 秦隆兵, 李祖祥, 杨玉荣, 等. 三峡库区根茎类蔬菜中重金属含量分析及评价[J]. *食品与机械*, 2015, 31(3): 70-73.
- [23] Malik N, Biswas A K, Raju C B, et al. Plankton as an indicator of heavy metal pollution in a freshwater reservoir of madhya pradesh, India[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2013(90): 725-729.
- [24] 曾艳艺, 黄小平. 重金属对海洋桡足类的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1 042-1 049.
- [25] Bahnasawy M, Khidr A A, Dheina N. Assessment of heavy metal concentrations in water, plankton, and fish of Lake Manzala, Egypt[J]. *Turk J. Zool*, 2011, 35(2): 271-280.
- [26] 王晓清, 曾亚英, 吴含含, 等. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析[J]. *水生生物学报*, 2013(3): 488-494.
- [27] 张坤, 杨霞, 吴雅霁, 等. 湘江株洲—湘潭—长沙段河床沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(1): 60-65.
- [28] 张祥, 黄坚, 马慧雪, 等. 湘江长沙段沉积物中重金属污染评价[J]. *广州化工*, 2012, 40(23): 120-123.
- [29] 李艳芳, 陈智国, 唐志平, 等. 湘江源头重金属污染及其生态环境风险评估[J]. *作物研究*, 2014, 28(8): 901-904.
- [30] 沈盎绿, 马继臻, 平仙隐, 等. 厚壳贻贝对重金属的生物积累及释放规律研究[J]. *应用海洋学学报*, 2009, 28(1): 52-59.
- [31] Baines S B, Fisher N S. Assimilation and retention of selenium and other trace elements from crustacean food by juvenile striped bass (*Morone saxatilis*) [J]. *Limnol. Oceanogr*, 2002(47): 646-655.
- [32] Pan J F, Wang W X. Comparison of the bioavailability of crand febound with natural colloids of different origins and sizes to two marine bivalves[J]. *Mar. Biol.*, 2002(141): 915-924.
- [33] Ruelas-Inzunza J, Paez-Osuna F. Trophic distribution of Cd, Pb, and Zn in a food web from Altata-Ensenada del Pabellon-subtropical lagoon, SE Gulf of California. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2008, 54(4): 584-596.
- [34] Vilhena M S P, Costa M L, Berredo J F. Accumulation and transfer of Hg, As, Se, and other metals in the sediment-vegetation-crab-human food chain in the coastal zone of the northern Brazilian state of Para (Amazonia) [J]. *Environ Geochem Health*, 2013(35): 477-494.