

大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平及其生态评价*

祝云龙^{1,2}, 姜加虎^{1**}, 黄 群¹, 孙占东¹, 王红娟^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 于 2005 年 11 月采集了大通湖及东洞庭湖区湖水和水生生物样品, 并测定了水和水生生物样品中重金属 (Cd、Pb、Hg、As) 的含量, 并对湖区生物体重金属进行了污染评价。研究结果表明, 大通湖及东洞庭湖区湖水中重金属含量较小, 绝大部分采样点水质都属于国家 I 类水标准; 水生生物体内 Cd、Pb 含量为虾 > 螺 > 鱼, Hg 的含量为鱼 > 螺 > 虾, As 的含量为螺 > 虾 > 鱼; 而鱼类重金属含量则为底栖鱼类 > 中上层鱼类, 肉食性鱼类 > 植食性鱼类。大通湖及东洞庭湖区生物体中 Cd、Pb 的污染指数为虾 > 螺 > 鱼, Hg 的污染指数则为鱼 > 螺 > 虾, As 的污染指数则为螺 > 虾 > 鱼。

关键词: 水生生物; 重金属含量; 生态评价; 洞庭湖

The heavy metal content in organisms at Lake Dongting and its ecological assessment

ZHU Yunlong^{1,2}, JIANG Jiahu¹, HUANG Qun¹, SUN Zhandong¹ & WANG Hongjuan^{1,2}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Based on the monitoring data obtained from Lake Dongting in November 2005, the concentrations of the heavy metals in water and organisms were analyzed, and the pollution assessment of heavy metals in organisms was made. The results showed that the concentrations of heavy metals in water were lower than Type I of the People's Republic of China, the concentrations of heavy metals in *Penaeus vannamei* Booen were higher than in *Bellamyia quadrata* and in fish, and the concentrations of heavy metals in demersal fish were higher than that in pelagic fish, and the concentrations of heavy metals in predatory fish were higher than that in herbivorous fishes. In Lake Dongting, the pollution indexes of Cd, Pb, As in *Penaeus vannamei* were higher than that in *Bellamyia quadrata*, and higher than that in fishes; the pollution indexes of Hg in fish were higher than that in *Bellamyia quadrata*, and in *Penaeus vannamei*.

Keywords: Aquatic organisms; heavy metals' content; ecological assessment; Lake Dongting

重金属由于具有持久性、生物富集和放大作用而一直受国内外环境学家的关注^[1-4]。同时, 水体和土壤中重金属含量的升高, 将严重影响着人类及其它生物的健康与生存, 如汞、砷、铬能引起神经系统疾病和有致癌作用^[5]。Rainbow 指出, 海洋生物对重金属的积累实际上取决于生物体对金属的吸收和排泄速率。相对的速率变化决定了生物对特定金属的积累程度, 并认为生物对重金属的积累可以从调节型一直排列到强的净积累型, 各类型之间都有过渡形式^[6]。Paulami-Maiti 等认为水生生物体内的重金属主要是通过食物网逐级积累而形成的^[7]。Deb 等^[8]和 Emile Asuquo^[9]等分别研究了不同鱼样各组织中重金属的分布, 结果表明不同鱼类的重金属含量差别高达 100 倍, 这也是有些鱼类可作为污染物生物指示剂的原因。重金属元素对生物的毒性受非生境因素 (如 pH、温度、硬度、游离态离子浓度、有机物的络合作用等) 和生境因素 (如大小、重量、生长期、竞争和演替能力等) 的制约^[10], 因此不同种类的生物之间重金属含量差别较大。

* 国土资源部中国地质调查局及湖南省环境保护局项目 (200314200021) 资助。2006-11-28 收稿; 2007-01-25 收修改稿。祝云龙, 男, 1978 年生, 博士研究生; E-mail: zhylong78@sohu.com.

** 通讯作者; E-mail: jiangjh@niglas.ac.cn.

洞庭湖区现有工业排污口 82 个,其中位于湖边、污水直接排入湖体的排污口 27 个,且排污口相对集中于东、南洞庭湖及其入湖水系——湘、资、沅、澧^[11]。洞庭湖流域水污染现象严重,水体重金属浓度达国家地表水环境质量Ⅱ类标准^[12];洞庭湖区畜禽副产品中重金属 Cr、Cd、Pb 的含量则普遍超标^[13];洞庭湖流域内的西洞庭湖生态风险较高,而东洞庭湖和南洞庭湖的生态风险也较高,外界风险源对其生态系统的影响不容忽视^[14]。因此,对洞庭湖水域的水质及水产品的重金属含量进行调查显得尤为必要,于 2005 年 11 月在大通湖及东洞庭湖水域采集和分析了水体 30 个水样点及 9 种水产品 61 个采样点生物体中 Cd、Pb、Hg、As 的含量,并对大通湖及东洞庭湖水域湖水及生物体中的重金属污染程度进行了分析评价。

1 材料与方法

1.1 水样和生物样的采集

根据湖泊的水深在较浅处只取表层水样(水面下 0.5 m),水深超过 1 m 时,分两层采样(只有 15、22、25 号三个采样点分两层采集),生物样品分区采样,分别为岳阳、鹿角、五门、六门、团洲、大通湖(图 1)。

采集的生物样品为鳊鱼(*Aristichthys nobilis*)、黄颡(*Pseudobagrus fulvidraco*)、鲢鱼(*Silurus asotus*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、草鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、黑鱼(乌鳢)(*Ophicephalus argus*)、南美白对虾(*Penaeus vannamei*)和方形环棱螺(*Bellamya quadrata*)等,用渔网捕获,将生物样品于低温下冷冻保存带回实验室分析。在实验室内,鱼样在室温下解冻后,用不锈钢刀取背部肌肉,用 A-88 捣碎机捣碎,然后取一定量的样品测定生物体中重金属的含量。鳊鱼和黄颡在大通湖采集,鲤鱼、鲢鱼、草鱼和黑鱼在东洞庭湖(岳阳、鹿角、六门、五门、团洲)采集,在每个采样点每一种鱼都随机选取 2-3 龄、体重和体长无明显差异的 3 个个体(表 1)。

分别取每个样品的背部肌肉混合后,捣碎、制备成混合样品;螺和虾的采集地点为岳阳、鹿角、六门、五门、团洲,采集的螺和虾样品较多,分别为 250g 左右,挑选体长和重量无明显差异的个体,分别取虾肉和螺肉制成混合样品。所有的样品都做三个平行样。

1.2 水样和生物样的测定

水样重金属镉(Cd)、铅(Pb)的测定按照 GB7475-87 的规定,采用石墨炉-无火焰原子吸收分光光度法;总汞(Hg)的测定按照 GB7468-87,采用冷原子无色散原子荧光法;总砷(As)的测定按照 GB/T17134-1997,采用氢化物-非色散原子荧光法。水产品中镉(Cd)、铅(Pb)的测定分别按照 GB/T5009.15-2003、GB/T5009.12-2003 的规定,采用石墨炉原子吸收分光光度法;水产品中总汞的含量按照 GB/T5009.17-2003 的规定采用碱消解冷原子无色散原子荧光法测定;总砷的含量按照 GB/T5009.11-2003 的规定采用酸消解氢化物-非色散原子荧光法测定。测定 Cd、Pb 所用的仪器为 220FS 200Z 型原子吸收分光光度计,检测限分别为 0.01 μg/L、0.2 μg/L;测定 Hg、As 的仪器为 AF-610A-2500 型原子荧光光谱仪,检测限分别为 0.001 μg/L、0.02 μg/L。分析过程以人发为质控标样(表 2)。

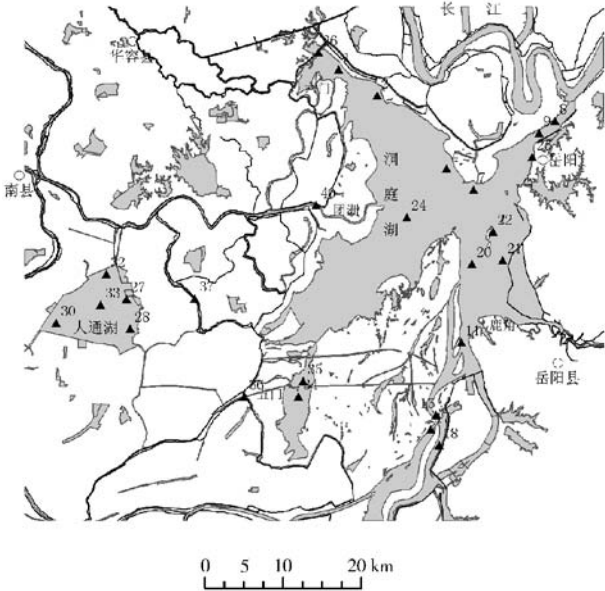


图 1 东洞庭湖及大通湖采样点分布
Fig. 1 Disbriution of sampling sites in
East Lake Dongting and Lake Datong

表 1 鱼体长与体重
Tab. 1 Statistic table of fish's length and weight

	条数	平均体长 (cm)	平均体重 (g)
鳊鱼	6	31.5 ± 4.8	1061.8 ± 4.3
黄颡	6	18.6 ± 2.7	131.6 ± 20.5
鲤鱼	15	35.1 ± 5.2	1317.6 ± 36.4
鲢鱼	15	32.6 ± 3.4	983.5 ± 19.4
草鱼	9	32.9 ± 2.7	1280.2 ± 35.7
黑鱼	6	38.2 ± 3.9	986.1 ± 28.8

表 2 标准物质测定结果 (n = 4)
Tab. 2 Concentration of metals in Standard Reference Material GSH1

标准物质 (人发)	Cd	Pb	Hg	As
标准值 (mg/kg)	0.11	8.8	0.2	0.4
测定值 (mg/kg)	0.11 ± 0.003	8.8 ± 0.11	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.013
变异系数 (%)	2.7	1.25	5	3.25

2 结果与讨论

2.1 大通湖及东洞庭湖湖水中重金属的含量与评价

选择 Cd、Pb、Hg 和 As 作为评价因子,采用单项质量污染指数法进行评价. 在大通湖和东洞庭湖采集的 30 个水样点中除了 36 号采样点 Pb 含量为 (18.32μg/L) 超出了地表水一类标准外,其它采样点水体重金属含量都未超过国家 I 类水的标准 (GB3838 - 2002) ^[15] (Cd ≤ 1μg/L, Pb ≤ 10μg/L, Hg ≤ 0.05μg/L, As ≤ 50μg/L), 且 Cd、Pb、Hg 的含量也小于洞庭湖水环境背景值. 大通湖及东洞庭湖湖水中 Cd、Pb、Hg 和 As 的水平分布和垂直分布都比较均匀,除 36 号采样点外,经方差分析表明,各采样点之间均没有显著差异. 对 Cd、Pb、Hg 和 As 的单项质量污染指数进行比较发现, Pb > As > Cd > Hg, 但都远小于 0.2 (表 3). 由此可见,大通湖及东洞庭湖湖区除 36 号采样点 Pb 含量属于地表水 III 类标准外,其它采样点水体中有毒有害物质 Cd、Pb、Hg 和 As 的含量都低于国家 I 类水标准.

表 3 大通湖及东洞庭湖湖水中重金属含量及水质标准
Tab. 3 Content of heavy metals in water of Lake Datong and East Dongting and standard of water quality

	Cd	Pb	Hg	As
含量范围 (μg/L)	0.01 * - 0.1	0.2 * - 18.32	0.001 *	0.74 - 8.61
平均值 (μg/L)	0.02 ± 0.032	0.86 ± 3.30	0.001 *	4.17 ± 2.50
洞庭湖水环境背景值 (μg/L)	0.06	1.00	0.025	0.9
单项质量污染指数 **	0.02	0.086	0	0.083
渔业水质标准 (μg/L)	5	50	0.50	50
地表水 I 类标准 (μg/L)	1	10	0.05	50

* 检测方法的检测限, ** 以地表水水质 I 类标准进行评价.

2.2 大通湖及东洞庭湖水产品重金属的含量

2.2.1 大通湖及东洞庭湖鱼肉中重金属的含量 所有采集的鱼都是 2 龄鱼,除黄颡以外,鳊鱼、鲤鱼、鲢鱼、草鱼、黑鱼之间的体长与体重均没有显著差异. 大通湖和东洞庭湖中鱼类重金属含量顺序为: Cd 的含量为 鲢鱼 > 鲤鱼 > 鳊鱼 > 黄颡 > 黑鱼 > 草鱼; Pb 的含量为 黑鱼 > 鲢鱼 > 鲤鱼 > 黄颡 > 草鱼 > 鳊鱼; Hg 的含量为 鲢鱼 > 黑鱼 > 鲤鱼 > 黄颡 > 鳊鱼 > 草鱼; As 的含量为 鲤鱼 > 黄颡 > 草鱼 > 黑鱼 > 鳊鱼. 在所有的鱼类

中,以鳙鱼(底栖、肉食性鱼类)重金属含量最高,草鱼(中上层,植食性)重金属含量最低(图2). 这与重金属能在食物网中逐级累积的结论是相一致的^[7]. 总的来说,底层鱼类重金属含量较高,滤食性鱼类鳙鱼和植食性鱼类草鱼重金属含量都较低. 这与聂湘平^[16]等得出的重金属含量顺序为中下层鱼类>中上层鱼类,肉食性鱼类>植食性鱼类相一致.

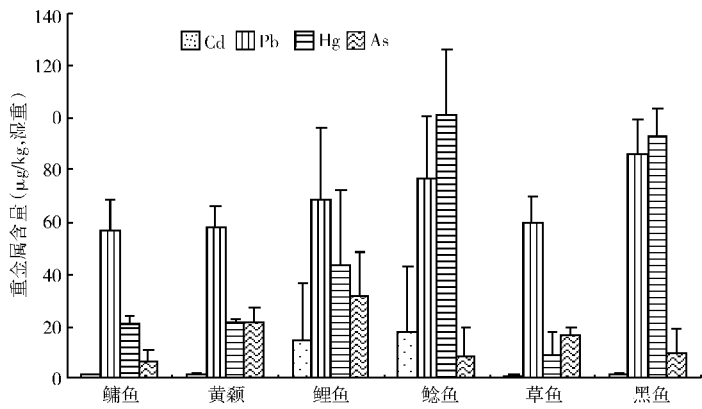


图2 洞庭湖区不同鱼类中重金属的含量

Fig. 2 Heavy metal concentrations in different fishes in Lake Dongting

2.2.2 大通湖及东洞庭湖中不同采样点虾肉中重金属的含量 不同采样点的虾肉中 Cd 含量的大小顺序为鹿角>岳阳港>团洲>六门>五门;虾肉中 Pb 含量的顺序为岳阳港>鹿角>五门>六门>团洲;Hg 含量的顺序为团洲>鹿角>岳阳>五门、六门;As 含量的顺序为鹿角>岳阳港>五门>六门>团洲(图3). 鹿角和岳阳港采集的虾中 Cd 含量分别超过了无公害水产品的限量要求(500 μg/kg)的 1.07 倍和 0.43 倍,受到了重金属 Cd 的污染,其它采样点都远低于 500 μg/kg 的限量要求;岳阳港和鹿角虾中 Pb 的含量分别超过了无公害水产品的限量要求(500 μg/kg)的 1.3 倍和 0.4 倍,重金属 Pb 的污染较严重,其它采样点也较接近 500 μg/kg 的限量要求;所有采样点虾肉中 Hg 和 As 的含量都没有超过无公害水产品的限量要求(500 μg/kg). 因此,总的来说虾肉中重金属的含量以鹿角和岳阳港为重,其它采样点重金属污染都不超标.

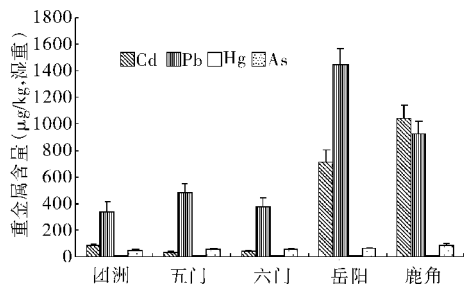


图3 不同采样点虾肉中重金属含量

Fig. 3 Heavy metal concentrations of *Penaeus vannamei* Booen in different sample sites

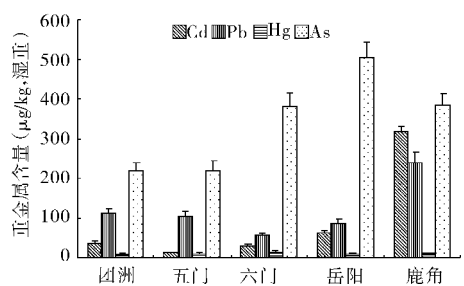


图4 不同采样点螺肉中重金属含量

Fig. 4 Heavy metal concentrations of *Bellamya quadrata* in different sample sites

2.2.3 大通湖及东洞庭湖中不同采样点螺肉中重金属的含量 不同采样点的螺肉中 Cd 含量的顺序为鹿角>岳阳港>团洲>六门>五门;Pb 含量的顺序为鹿角>团洲>五门>岳阳港>六门;Hg 含量的顺序为六门>鹿角>岳阳港>团洲、五门;As 含量的顺序为岳阳港>鹿角>六门>五门>团洲(图4). 螺肉中 Cd、Pb 和 Hg 的含量都低于国家标准(500 μg/kg);As 的含量除了岳阳略高于国家标准外,其余各采样点都低于国家标准(500 μg/kg). 因此,从总体上来说,螺肉中的重金属的含量基本没有超过国家标准,但应该重点

检测 As 的含量,防止其进一步增加.

2.2.4 大通湖及东洞庭湖不同生物体对重金属的富集能力 水产品中的重金属含量既能反映出水生动物的生活习性、生存水层和摄食习惯,也能反映出不同的重金属对水产品的毒害程度. 研究表明,水生生物对重金属的累积量与其环境水中重金属含量具有指数相关^[17,18]. 因此,用水产品的富集系数来反映水产品生存环境的优劣和水产品种类对重金属离子的富集能力,富集能力强的水生生物可以作为水环境的指示生物.

生物具游动性,特别是鱼类,因此采样点的生物体中重金属含量并不能代表具体地点水和底泥中的重金属含量,但能代表水体整体的污染水平,因此,把各个采样点的鱼、虾、螺中的重金属含量进行加权平均,求其加权平均值并进行比较(表4).

表4 大通湖和东洞庭湖生物体中重金属的平均含量(μg/kg,湿重)及其富集系数
Tab.4 Heavy metal concentrations in the samples of Lake Datong and East Lake Dongting
and bioaccumulation coefficient

	Cd(BCF)	Pb(BCF)	Hg(BCF)	As(BCF)
水体	0.02	0.25	未检出	4.17
鱼类	9.95(497.5)	70.11(280.44)	57.52(57520)	17.42(4.17)
虾	381.28(19064)	610.4(2441.6)	5.76(5760)	61.56(14.76)
螺	92.38(4619)	120.38(481.52)	11.24(11240)	341.6(81.92)

表5 不同水域水产品重金属含量的比较(μg/kg,湿重)
Tab.5 Comparisons of heavy metal concentration in organisms between Lake Datong
and East Lake Dongting water and other waters (μg/kg,FW)

水域	种类	Cd	Pb	Hg	As
洪泽湖 ^[21]	螺蛳	225	340		
珠江口 ^[22]	鱼类	30	510		190
	虾类	40	500		230
广西近海 ^[23]	鱼类	19	180	24	96
	甲壳类	246	150	38	90
	软体动物	548	280	5	130
大亚湾 ^[24]	鱼类	69	240	51	1240
	甲壳类	145	240	52	3150
	软体动物	970	280	71	2270
大通湖及东洞庭湖(本文)	鱼类	10	70	58	17
	虾类	381	610	6	62
	螺类	92	120	11	342

虾中重金属 Cd、Pb 的含量明显大于螺和鱼的重金属 Cd 和 Pb 的含量,且虾对重金属 Cd 和 Pb 的富集系数分别为 19064 和 2441.6,远大于螺和鱼对 Cd 和 Pb 的富集系数,说明虾对重金属 Cd 和 Pb 的富集能力远大于螺和鱼(表4);因此,生物体中 Cd 和 Pb 的含量及富集系数是虾>螺>鱼,也即是生物体对 Cd 和 Pb 的富集能力是虾>螺>鱼. 由于水体中 Hg 的含量未检测出来,因此用水体 Hg 仪器检出限 0.001 μg/kg 为水体浓度计算生物体对 Hg 的富集系数,鱼体中 Hg 的含量为 57.52 μg/kg,大于螺和虾中 Hg 的含量,同时也以鱼对 Hg 的富集系数最大为 57520,因此生物体对 Hg 的富集能力是鱼>螺>虾. 螺肉中 As 的含量大于虾和鱼体内 As 的含量,且其富集系数为 81.92,也远大于虾的富集系数 14.76 和鱼的富集系数 4.17,说明螺对 As 的富集能力远大于虾和鱼;因此,生物体对 As 的富集能力是螺>虾>鱼. 正如 Rainbow^[6] 指出的

生物对重金属的积累实际上取决于重金属进生物体的速率,而相对速率的变化才最终决定了生物体对特定重金属的积累程度,并认为生物对重金属的积累可以从调节型一直排列到强的净积累型,各类型之间都有过渡形式^[19]. 由于生物的食性、生存环境和对特定重金属积累能力的不同导致了重金属在不同水生动物中残留量也各异. 因为重金属元素对生物的毒性受非生境因素(如 pH、温度、硬度、游离态离子浓度、有机物的络合作用等)和生境因素(如大小、重量、生长期、竞争和演替能力等)的制约^[20].

2.3 不同地区生物体中重金属含量的比较

大通湖及东洞庭湖水域中鱼类重金属 Cd、Pb 和 As 的含量远小于洪泽湖^[21]、珠江口^[22]、广西近海^[23]、大亚湾^[24]水域中鱼类重金属 Cd、Pb 和 As 的含量,但 Hg 的含量高于上述水域. 大通湖及东洞庭湖水域中虾类属于甲壳类,其重金属 Cd、Pb 含量大于珠江口水域、广西近海水域和大亚湾水域,重金属 Cd、Pb 对虾类的污染比较严重,但虾类中 Hg、As 的含量显著小于珠江口水域、广西近海水域和大亚湾水域中甲壳类的含量. 大通湖及东洞庭湖水域中螺类重金属 Cd、Pb 的含量比洪泽湖水域中螺类重金属 Cd、Pb 小的多(表 5). 通过比较不难发现,在淡水水域中甲壳类动物重金属 Cd 和 Pb 的含量显著大于海水水域中甲壳类动物重金属 Cd 和 Pb 的含量,这与金属离子在淡水水体的渗透压和水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量有关^[25].

3 大通湖及东洞庭湖生物体重金属基本评价

3.1 评价因子及评价标准

为评价该湖区生物体的重金属含量、玷污程度,本文用洞庭湖水系水生生物体中元素背景值作标准^[26]评价水生生物体重金属含量和玷污程度,在确定水产品中重金属元素含量高于其背景值的基础上,用《中华人民共和国农业行业标准》(NY5073-2001)中规定的水产品中有毒有害物质的限量标准^[27]进行水产品质量的评价. 水产品中有毒有害物质限量标准如表 6.

表 6 水产品中有毒有害物质限量标准(mg/kg,湿重)
Tab. 6 Limited standards of dangerous mattes in organisms

项目	指标
镉(Cd)	<0.1,鱼类; <0.5,甲壳类
铅(Pb)	≤1.0,软体动物; ≤0.5,其它水产品
汞(Hg)	≤0.5
砷(As)	≤1.0,贝类甲壳类及其它海产品; ≤0.5,海水鱼及淡水鱼

3.2 评价模式

评价水产品质量的方法采用均值型综合污染指数法. 采用单因子评价模式^[10],其关系式为: $P_i = \frac{C_i}{S_i}$, 其中 P_i 为污染因子的质量分指数, C_i 为污染因子的检测数据(mg/kg), S_i 为污染物的质量评价标准(mg/kg).

3.3 评价结果

将受测生物按鱼类、虾类、螺类划分,按单因子评价法与洞庭湖生物体中重金属元素背景值进行比较(表 7). 鱼体中 Cd、Hg、As 的含量都显著低于洞庭湖鲤鱼元素背景值,而 Pb 的含量则显著高于洞庭湖鲤鱼元素背景值,已经形成了污染,但低于《中华人民共和国农业行业标准》(NY5073-2001)中规定的水产品中有毒有害物质的限量标准,对人类的影响不大. 而虾和螺中重金属元素的含量都显著低于洞庭湖螺元素背景值,但虾肉中 Pb 的含量高于 NY5073-2001 的限量标准,其它都低于 NY5073-2001 的标准.

采用均值型污染指数法计算洞庭湖水产品中重金属的污染质量指数如表 8. 结果表明,东洞庭湖和大通湖区水域生物体中重金属 Cd 的污染指数都小于 1,但虾的污染指数为 0.76,较高,应该警惕其含量的进一步增加;鱼和螺的污染指数都小于 0.2,属于正常水平;生物体中 Cd 污染因子的质量分数大小顺序为虾 > 螺 > 鱼. 生物体中重金属 Pb 的污染指数以虾最高为 1.22,大于 1,说明虾受到了铅的污染,鱼和螺中 Pb

的污染指数都属正常水平,远小于1;因此生物体中 Pb 污染因子的质量分数大小顺序为虾 > 螺 > 鱼. 虾、螺和鱼体中 Hg 的污染指数都小于1,属正常水平,生物体中 Hg 污染因子的质量分数大小顺序为鱼 > 螺 > 螺、虾和鱼中 As 的污染指数都小于1,属正常水平;因此 As 污染因子质量分数大小顺序为螺 > 虾 > 鱼.

表 7 水产品中重金属的含量 (μg/kg,湿重) 及玷污程度
Tab. 7 Concentration and degree of heavy metals in organisms

生物类群	Cd(污染程度)	Pb(污染程度)	Hg(污染程度)	As(污染程度)
鱼类	9.95(正常)	70.11(污染)	57.52(正常)	17.42(正常)
虾类*	381.28(正常)	610.4(正常)	5.76(正常)	61.56(正常)
螺类	92.38(正常)	120.38(正常)	11.24(正常)	341.6(正常)
洞庭湖鲤鱼元素背景值	13	56	94	480
洞庭湖螺元素背景值	508	1656	41	3440

* 虾类重金属的污染程度以底栖动物螺为标准.

表 8 水产品中重金属的质量分数
Tab. 8 Content of heavy metals, pollutant gradient and integrated pollutant index

生物类群	Cd(污染等级)	Pb(污染等级)	Hg(污染等级)	As(污染等级)
鱼类	0.10(正常)	0.14(正常)	0.12(正常)	0.035(正常)
虾类	0.76(正常)	1.22(污染)	0.012(正常)	0.062(正常)
螺类	0.18(正常)	0.12(正常)	0.022(正常)	0.34(正常)

4 结论

大通湖及东洞庭湖区重金属含量绝大部分水域都属于国家 I 类水标准,仅有极个别采样点属于国家三类水标准,重金属污染对水质的影响极小.

水生生物体中重金属的含量不但与周围环境中重金属的含量有关,也与生物体自身对重金属的吸收、积累和富集能力有关. 水生生物体内 Cd、Pb 含量为虾 > 螺 > 鱼, Hg 的含量为鱼 > 螺 > 虾, As 的含量为螺 > 虾 > 鱼.

不同水层、不同食性的鱼类之间对重金属的富集能力也不同,底层鱼类对重金属的富集能力大于中上层鱼类,而肉食性鱼类对重金属的富集能力大于植食性鱼类.

大通湖及东洞庭湖区的主要污染元素是 Pb,大通湖及东洞庭湖区鱼类生物体中 Pb 的含量高于洞庭湖鲤鱼元素背景值,但小于国家标准,其污染程度较小;虾中 Pb 的含量小于洞庭湖螺元素背景值,但大于国家标准,其危害程度较大.

5 参考文献

[1] Tessier A, Tumer D R. Metal speciation and bioavailability in aquatic systems. Chichester, UK: John Wiley Sons, 1995:670.

[2] Bocher P, Caurant F, Miramand P *et al.* Influence of the diet on the bioaccumulation of heavy metals in zoo-plankton-eating petrels at Kerguelen archipelago, Southern Indian Ocean. *Polar Biol*, 2003, **26**: 759 – 767.

[3] 陆超华,周国君,谢文造. 近江牡蛎作为海洋重金属铜污染监测生物的研究. *海洋环境科学*, 1998, **17**(2):17 – 23.

[4] Kalay A M, Canli M. Copper and lead accumulation in tissues of a freshwater fish *Tilapia Zilli* and its effects in the Branchia Na, KATPase activity. *Bull Environ Contain Toxicol*, 1999, **62**: 160 – 168.

- [5] 陈怀满. 土壤—植物系统中的重金属污染. 北京:科学出版社,1986:185—192.
- [6] Rainbow P S. The signification of trace metal concentration in marine invertebrates. In: Dallinger R, Rainbow P S eds. *Ecotoxicology of metals in Invertebrates*. Boca Raton: Lewis Publisher, 1993: 4—23.
- [7] Maiti P, Banerjee S. Accumulation of heavy metals in different tissues of the fish *Oreochromis nilotica* exposed to waste water. *Environment and Ecology*, 1999, **17**(4): 895—898.
- [8] Deb S C, Santra S C. Bioaccumulation of metals in fishes: An in vivo experimental study of a sewage fed ecosystem. *Environmentalist*, 1997, **17**(1): 27—32.
- [9] Emile A F, Ita Ewa-Oboho, Ekaete F A *et al.* Fish species used as biomarker for heavy metal and hydrocarbon contamination for cross river, Nigeria. *Environmentalist*, 2004, **24**(1): 29—37.
- [10] Gerhardt A. Introductory Paper. Lund University, 1990, **58**:33.
- [11] 窦鸿身,姜加虎. 洞庭湖. 合肥:中国科学技术大学出版社,2000:218—220.
- [12] 卢宏伟,曾光明,何理. 洞庭湖流域水体污染物变化趋势及风险分析. 水土保持通报,2004,**24**(2): 12—16.
- [13] 谭支良,潘亚飞,王久荣等. 洞庭湖退田还湖区畜产品质量与畜牧业发展对策. 中国生态农业学报, 2006,**14**(1):230—232.
- [14] 卢宏伟,曾光明,谢更新等. 洞庭湖流域区域生态风险评价. 生态学报. 2003,**23**(12):2520—2530.
- [15] GB3838—2002. 地表水环境质量标准,2002.
- [16] Paulami-Maiti, Samir-Banerjee, Maiti-P *et al.* Accumulation of heavy metals in different tissues of the fish *Oreochromis nilotica* exposed to waste water. *Environment and Ecology*, 1999, **17**:4.
- [17] 聂湘平,蓝紫钰,魏泰莉. 珠江入海口经济鱼类重金属含量分析. 上海环境科学,2000,**19**(10):485—488.
- [18] Schulz-Baldas M. Lead uptake from seawater and food and lead loss in the common mussel *mytilus edulis*. *Mar Biod Cd*, 1974, **25**:177—193.
- [19] Hodson P V. Aminolevulinic acid dehydroatass activity of blood as an indicator of a harmful exposure to lead. *Res B d Can*, 1976, **33**: 268—271.
- [20] Demirak A, Yilmaz F, Tuna A *et al.* Heavy metal in water sediment and tissue of *Leuciscus cephalus* from a stream in southern Turkey. *Chemosphere*, 2006, **63**: 1451—1458.
- [21] 潘海燕,蔡文阳. 洪泽湖水产品中重金属含量调查. 仪器仪表与分析监测,2006,**3**:36—37.
- [22] 魏泰莉,杨婉玲,赖子尼等. 珠江口水域鱼虾类重金属残留的调查. 中国水产科学,2002,**9**(2): 172—176.
- [23] 廉雪琼,王运芳,陈群英. 广西近岸海域海水和沉积物及生物体中的重金属. 海洋环境科学,2001,**20**(2): 59—62.
- [24] 丘耀文,颜文,王肇鼎等. 大亚湾海水、沉积物和生物体中重金属分布及其生态危害. 热带海洋学报,2005,**24**(5):69—76.
- [25] 吴益春,赵元凤,吕景才等. 水生生物对重金属吸收和积累研究进展. 生物技术通报,2006,(增刊): 133—137.
- [26] 李健,郑春江. 环境背景值数据手册. 北京:中国环境科学出版社,1989:377—378.
- [27] NY5073—2001. 水产品中有毒有害物质限量标准,2001.