

## 东洞庭湖鲢鱼和鳙鱼中重金属富集差异分析

Analysis of the differences of heavy metal enrichment between  
silver carp and aristichthys nobilis in east dongting lake

刘晓伟<sup>1</sup> 陆维亚<sup>2</sup> 薛敏敏<sup>3</sup> 李忠海<sup>2</sup>

LIU Xiao-wei<sup>1</sup> LU Wei-ya<sup>2</sup> XUE Min-min<sup>3</sup> LI Zhong-hai<sup>2</sup>

(1. 长垣烹饪职业技术学院, 河南 新乡 453400; 2. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004;

3. 湖南省产商品质量监督检验院, 湖南 长沙 410007)

(1. Changyuan Cuisine Vocational and Technical College, Xinxiang, Henan 453000, China; 2. School of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

3. Institute of Product Quality Supervision and Inspection of Hunan Province, Changsha, Hunan 410007, China)

**摘要:**为分析东洞庭湖水体中重金属污染情况以及鲢鳙鱼间重金属富集存在的差异性,测定东洞庭湖沉积物以及鲢鱼和鳙鱼不同组织中 5 种重金属(Cr、Cu、Cd、Pb 和 Hg)的含量。结果显示,沉积物中 Cr 的含量低于国家一级土壤标准限值,Cu、Pb 和 Hg 低于二级土壤标准限值,Cd 的含量是国家三级土壤环境标准限值的 6 倍;鲢鱼和鳙鱼中重金属的分布排序均为 Cr:鳃>肝>脑>肉,Cu:肝>脑>鳃>肉,Cd:肝>鳃>脑>肉,Pb:鳃>肝>肉>脑,Hg:肉>肝>脑>鳃;根据鱼类的生物-沉积物富集因子,相比 Cr 和 Pb,鲢鱼和鳙鱼都更易富集 Cu、Cd 和 Hg,而鲢鱼比鳙鱼更易富集 Cd,鳙鱼比鲢鱼更易富集 Hg;另外,鲢鱼和鳙鱼肝脏中 Cd 的含量超出行业标准限量,其它组织中重金属均未超标。表明东洞庭湖中 Cd 的污染最为严重;不同鱼类对重金属的富集确实存在差异性,不同组织对同一重金属的富集能力也存在显著差异;相比较鱼鳃和肝脏,鱼肉和鱼脑对重金属的亲和能力较弱。

**关键词:**东洞庭湖;重金属;鲢鱼;鳙鱼

**Abstract:** To evaluate the pollution of heavy metal in east Dongting Lake and analyze the differences of enrichment of heavy metal between silver carp and aristichthys nobilis, this experiment determined the concentration of five different heavy metals, including Cr, Cu, Cd, Pb and Hg, in sediment and tissues of silver carp and *Aristichthys nobilis*. Results show that the concentration of Cr in sediment belongs to the first state level in soil standard, the concentrations of Cu, Pb and Hg belong to the second state level in soil

standard, the concentration of Cd is 2 times of the third state level in soil standard; The sequence of tissues of silver carp and aristichthys nobilis arrayed by the concentration of heavy metal is consistent, the sequence arrayed by the concentration of Cr is gill > liver > brain > meat, Cu is liver > brain > gill > meat, Cd is liver > gill > brain > meat, Pb is gill > liver > meat > brain, Hg is meat > liver > brain > gill; According to the BSFAs of fish, compare to Cr and Pb, silver carp and *Aristichthys nobilis* are more likely to enrich Cu, Cd and Hg, and silver carp is easier to enrich Cd, while *Aristichthys nobilis* enriches Hg easier; Except the concentration of Cd in the liver of silver carp and aristichthys nobilis beyond the industry standard limited, the others are all below the limited. In conclusion, the pollution of Cd in east Dongting Lake is the most serious; Differences of enrichment of heavy metals in different fishes do exist, while the sequence of tissues of different fishes arrayed by the concentration of heavy metal is consistent due to the same physiological function; Compare to gill and liver, meat and brain have weaker affinity for heavy metals.

**Keywords:** the east Dongting Lake; heavy metals; silver carp; *Aristichthys nobilis*

洞庭湖由东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖 3 个主要的湖盆组成。其中东洞庭湖位于湖南省岳阳市境内,属于国家级自然保护区,得天独厚的生态环境孕育了极为丰富的物产<sup>[1]</sup>。同时也是中国重要的淡水养殖基地,经济鱼类有 113 种,包括鲢鱼、鳙鱼、鲤鱼、草鱼、鳊鱼、青鱼等<sup>[2]</sup>。2007 年之前,东洞庭湖水体中重金属砷和汞存在超标的情况<sup>[3]</sup>。自 2007 年以来,国家启动了一系列针对东洞庭湖生态恢复和保护的项目并开展水环境整治行动,但是这并不能完全杜绝

**基金项目:**国家科技支撑计划课题(编号:2012BAD29B05)

**作者简介:**刘晓伟,男,长垣烹饪职业技术学院讲师,硕士。

**通信作者:**李忠海(1960—),男,中南林业科技大学教授,博士。

E-mail: lizhl@163.com。

**收稿日期:**2017-09-08

工业污染的存在。污染物除了通过直接排放进入水环境以外,还可以通过降水从大气层进入湖水,包括一些重金属,如Pb、Hg、Cd、Cr、As等<sup>[4]</sup>。这些污染物又通过水体进入水生生物体内,进而对其生长发育产生负面影响。

刘芳芳等<sup>[5]</sup>研究了东洞庭湖网箱养殖鲤鱼在生长期重金属富集的变化规律,其中Pb和Cu随鲤鱼的生长而增加,Zn和Cd随着鲤鱼的生长先增长后下降;杨晨驰等<sup>[6]</sup>分析了鲫鱼不同组织中重金属的含量分布,不同组织的污染程度排序为性腺>鳃>肌肉;曾龄颐等<sup>[7]</sup>比较了不同活动水层的鱼类中重金属富集的差异性,底栖生活的鱼类重金属污染重于上层的。可见中国对鱼类中重金属富集的研究已经不少,研究方向也颇具多样化,但是以上研究都是针对同一种鱼类或者是两种不同生活习性的鱼类来展开的,相同生活习性的鱼类中重金属富集是否存在差异,差异产生原因的解释尚不多见。为此,本研究通过分析野生鲢鱼和鳙鱼中重金属富集情况,评价东洞庭湖中重金属的污染程度,并分析生活习性相似的不同鱼类对重金属富集差异产生的原因,以期更好地了解重金属的富集规律,为食物中重金属的吸附清除提供必要资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

硝酸、高氯酸:优级纯,国药集团化学试剂有限公司;

过氧化氢:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

氢氟酸:分析纯,长沙市湘科精细化工厂;

盐酸:优级纯,衡阳市凯信化工试剂有限公司;

超级微波仪:AS76型,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;

原子荧光光度计:AFS-933型,北京吉天仪器有限公司;

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS):7700x型,安捷伦科技(中国)有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 样品采集

(1) 水样采集:样品均于2014年11月采自东洞庭湖六门闸、君山公园和岳阳楼附近。在每个采样点用500 mL的聚乙烯塑料瓶于湖面下50 cm处取水样一瓶,取样前先用湖水润洗瓶子2次,贴上标签。样品于4℃冷藏保存<sup>[7]</sup>。

(2) 沉积物采集:沉积物样品取水底0~10 cm处,每个采样点取500 mL,贴上标签。剔除碎石和砂砾后的样品于50℃恒温干燥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<sup>[8]</sup>。

(3) 鱼样采集:鲢鱼和鳙鱼样品由渔船分别在3个采样点附近水域撒网捕获。两种鱼样各购入10条。样品重量均在500 g左右。放入装有冰袋的保温箱带回实验室。将鱼去鳞,用超纯水清洗并擦干表面水分,取出肝脏、鳃和脑,鱼肉剔骨,分别匀浆,放入密封袋中-18℃保存备用。

1.2.2 样品预处理 称取经过前处理的样品(鲢鱼、鳙鱼)0.300 0 g左右于石英管中,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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>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,4℃冷藏待测。同时做试样空白<sup>[9]</sup>。

称取均质的沉积物0.5 g左右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<sup>[10]</sup>。

1.2.3 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Cr、Cu、Cd和Pb的浓度。用原子荧光光谱仪测定重金属Hg。每个样平行测定3次。

### 1.3 数据处理与分析

用SPSS 17.0处理分析鲢鱼和鳙鱼组织间以及两种鱼类间重金属含量的差异显著性,用Origin 8.0作图比较所测鱼类中重金属含量是否超出标准限量值。

## 2 结果与分析

### 2.1 水样和沉积物中重金属分布及分析

由表1可知,东洞庭湖水体中重金属含量都不高。相对于水体,沉积物中重金属含量较高。经测定,沉积物样品的pH值均>6.5,根据国家标准中规定的土壤环境质量标准值(见表2),可以将东洞庭湖土壤中的重金属含量进行等级划分。其中Cr平均值低于国家一级土壤标准限值,Cu、Pb和Hg的平均值低于国家二级土壤标准限值,Cd的平均含量是国家三级土壤环境标准值的6倍。

姚志刚等<sup>[11]</sup>和万群等<sup>[1]</sup>分别在2006年和2011年对东洞庭湖沉积物中重金属进行了测定,结果见表1。经对比2006年和2011年测得的沉积物中重金属含量Cr和Cu的差别不大,Cd增加了近1倍,Pb和Hg则相应都减少了50%以上。本次试验测得的结果相比2006年,5种重金属污染都得到了一定的缓解;相比2011年,除Pb和Hg含量稍有增加外,其它3种重金属含量都更低。可见国家对东洞庭湖生态环境的治理取得了一定的成效,但是Cd的含量仍然高于国家三级土壤标准的限值。

### 2.2 重金属在鱼类不同组织中的分布及差异分析

2.2.1 重金属在鱼类不同组织中的分布 鱼类作为一种水生生物,其体内重金属含量的高低可用来评判水体中重金属的污染程度<sup>[12]</sup>。鲢鱼和鳙鱼是东洞庭湖中两种主要的经济鱼类,它们具有相似的生活习性,但是野生鲢鱼倾向于食用浮游植物,而野生鳙鱼更喜食浮游动物<sup>[13]</sup>。表3标明了两种鱼的肉、鳃、肝和脑中5种重金属含量的平均值以及组织间重金属含量的差异显著性。鲢鱼和鳙鱼的不同组织中各重金属含量的分布排序一致。Cr的排序为鳃>肝>脑>肉,Cu为肝>脑>鳃>肉,Cd为肝>鳃>脑>肉,Pb为鳃>肝>肉>脑,Hg为肉>肝>脑>鳃。除了Cr在鲢鱼肝和脑

表 1 本试验水样和沉积物以及往年沉积物中重金属含量的平均值<sup>†</sup>

Table 1 Mean concentration  $\pm$  S.D. of heavy metals in water and sediment of this experiment and in sediment of former years ( $n=3$ )

|     |        | mg/kg              |                    |                   |                    |                   |
|-----|--------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 样品  |        | Cr                 | Cu                 | Cd                | Pb                 | Hg                |
| 水   | 六门闸    | nd                 | 0.004 $\pm$ 0.003  | nd                | nd                 | nd                |
|     | 君山公园   | 0.001 $\pm$ 0.001  | 0.007 $\pm$ 0.000  | nd                | nd                 | nd                |
|     | 岳阳楼    | 0.001 $\pm$ 0.000  | 0.006 $\pm$ 0.003  | nd                | 0.001 $\pm$ 0.000  | nd                |
| 沉积物 | 六门闸    | 67.698 $\pm$ 3.376 | 57.799 $\pm$ 2.483 | 4.901 $\pm$ 0.561 | 43.762 $\pm$ 2.056 | 0.233 $\pm$ 0.026 |
|     | 君山公园   | 79.463 $\pm$ 4.295 | 58.349 $\pm$ 3.612 | 5.197 $\pm$ 0.523 | 67.597 $\pm$ 2.767 | 0.215 $\pm$ 0.033 |
|     | 岳阳楼    | 94.214 $\pm$ 4.866 | 75.799 $\pm$ 3.555 | 8.463 $\pm$ 0.644 | 84.262 $\pm$ 3.801 | 0.228 $\pm$ 0.038 |
|     | 平均值    | 80.458 $\pm$ 4.179 | 63.982 $\pm$ 3.217 | 6.187 $\pm$ 0.576 | 65.207 $\pm$ 2.875 | 0.225 $\pm$ 0.032 |
|     | 2006 年 | 96 $\pm$ 16        | 68 $\pm$ 16        | 7.3 $\pm$ 4.2     | 79 $\pm$ 23        | 0.32 $\pm$ 0.17   |
|     | 2011 年 | 100.97 $\pm$ 16.28 | 69.38 $\pm$ 72.38  | 15.20 $\pm$ 31.76 | 35.78 $\pm$ 21.66  | 0.11 $\pm$ 0.04   |

<sup>†</sup> nd 表示未检出。

表 2 土壤环境质量标准值 (pH>6.5)

Table 2 Standard value of quality of soil environment

| 等级 | mg/kg |     |      |     |      |
|----|-------|-----|------|-----|------|
|    | Cr    | Cu  | Cd   | Pb  | Hg   |
| 一级 | 90    | 35  | 0.20 | 35  | 0.15 |
| 二级 | 300   | 100 | 0.30 | 300 | 0.50 |
| 三级 | 400   | 400 | 1.00 | 500 | 1.50 |

中,Cu 在鲢鱼肉和鳃、肉和脑、鳃和脑,鳙鱼肉和鳃中,Cd 在鲢鱼肉和鳃、肉和脑、鳃和脑,鳙鱼肉和脑中,Pb 在鲢鱼肉和肝中,Hg 在鲢鱼肝和脑中含量差异不显著外,其它组织间含量的差异都为显著或极显著。

鲢鱼和鳙鱼间不仅各重金属在组织中的含量不同(除 Cr 在肝和脑,Cu 在鳃和肝,Pb 在鳃中差异不显著外,其它都具有极显著性差异),而且各重金属在组织间的离散程度也不同。其中,Cr 在鲢鱼鳃中的含量最高,在鲢鱼各组织中的离散程度,即标准差为 0.268,鳙鱼中的离散程度为 0.064;Cu 在鳙鱼肝中的含量最高,在鲢鱼各组织中的离散程度为 4.479,鳙鱼中的离散程度为 4.767;Cd 在鲢鱼肝中含量最高,鲢鱼中离散程度为 0.659,鳙鱼中为 0.051;Pb 在鳙鱼鳃中含量最高,在鲢鱼各组织中离散程度为 0.137,鳙鱼中为 0.189;Hg 在鳙鱼肉中含量最高,在鲢鱼中离散程度为 0.019,鳙鱼中为 0.044。Cr 和 Cd 在鲢鱼中有最高含量,而 Cu、Pb 和 Hg 在鳙鱼中有最高含量。重金属在某种鱼中有更高的含量,则其在这种鱼中偏向于有更高的离散程度。

2.2.2 重金属在鱼类不同组织中的分布差异分析 鱼肉对重金属的亲合力较弱,一般不会大量富集重金属。鱼鳃作为鱼的呼吸器官,承担了气体交换、排泄氮代谢废物和参与渗透压调节的功能。鱼鳃表面覆有一层由葡糖酸胺聚糖组成,富含阴离子的黏液。这使得黏液对重金属存在一定的亲和力而富集重金属<sup>[14]</sup>。肝脏是生物体一个重要的解毒器官,富含谷胱甘肽和金属硫蛋白(主要为 MT-I 和 MT-II),这两种物质又含有大量的半胱氨酸残基,残基上的巯基可结合

重金属(主要为 Cu、Cd 和 Zn)形成螯合物从而达到解毒的效果。鱼脑中也含有相当数量的金属硫蛋白(主要为 MT-III),可主要结合 Cu 和 Zn 而起到重要的神经生理和神经调节功能,也可结合非基本金属元素起到抑制和解毒的作用<sup>[15]</sup>。

Cr 在鲢鱼和鳙鱼不同组织中的排序为鳃>肝>脑>肉,可能是这两种鱼鳃表面的阴离子黏液对 Cr 的亲和能力更强于巯基。对于不同种类的鱼,Cr 在组织中的分布并不相同。方展强等<sup>[16]</sup>检测鲫鱼中 Cr 在组织中的分布则为肝>鳃>肉。NY 5073—2006 中规定 Cr 在鱼类中的限量为 2.0 mg/kg,由表 3 可知,鲢鱼和鳙鱼各组织中 Cr 的含量均较低,低于限量值。

Cu 的排序为肝>脑>鳃>肉。Mamdouh 等<sup>[17]</sup>在 Siganus rivulatus 和 Sargus sargus 这两种鱼中检出的 Cu 在不同组织中的分布排序也是肝>鳃>肉。因为 Cu 是机体进行生命活动的必需微量元素,参与多种酶的调控,所以相比较其它重金属 Cu 在鱼中的含量相对较高。这也使 Cu 在鱼类中的标准限量相对较高,达到了 50 mg/kg,所测鲢鱼和鳙鱼中 Cu 在各组织中的含量均远低于限量值。

Cd 的排序为肝>鳃>脑>肉,和刘芳芳等<sup>[5]</sup>在研究东洞庭湖网箱养殖鲤鱼不同组织中 Cd 的分布排序一致,测得鲤鱼的鳃、肝脏和肌肉中 Cd 的含量分别为 0.015~0.078,0.031~0.151,0.003~0.021 mg/kg,与本试验所得结果相近。行业标准中 Cd 在鱼类中的限量为 0.1 mg/kg,由表 3 得出,鲢鱼和鳙鱼肝脏中 Cd 的含量均超过了限量,而其它组织中含量并未达到限量值。

Pb 在鲢鱼和鳙鱼不同组织中的分布排序为鳃>肝>肉>脑。Farkas 等<sup>[18]</sup>在鳊鱼中也发现 Pb 的分布规律为鳃>肝>肉,但是这种分布会因为鱼的种类不同而有差异,鳊鱼中 Pb 的含量则为肝>鳃。行业标准中规定鱼类中 Pb 的限量为 0.5 mg/kg。由表 3 可知,Pb 在这两种鱼中的含量均低于标准限量,鱼鳃中的含量较高已接近限量,鱼肉中检出量很低,甚至在鳙鱼肉中并未检出。

Hg 在两种鱼中的分布排序为肉>肝>脑>鳃。与其它金属不同,Hg 在鱼肉中的含量高于其它组织中。Elizabeta

等<sup>[19]</sup>的研究也发现在 tench、pumpkinseed、prussian carp 和 eel 4 种鱼均是肉中检出量最高。可能是 Hg 除了易与含巯基的低分子化合物结合外,还倾向于与血液中的血红蛋白、血浆蛋白以及体液中的阴离子结合,使得鱼肉中 Hg 的含量偏高<sup>[20]</sup>。行业标准中 Hg 在鱼类中的限量为 0.5 mg/kg,由表 3 可知,即使在 Hg 含量最多的鱼肉中也远低于标准

限量。  
2.3 不同鱼类重金属富集差异分析  
2.3.1 鲢鱼和鳙鱼中重金属的富集差异显著性分析 由表 3 可知,除了 Cr 在肝脏和鱼脑、Cu 在鱼鳃和肝脏以及 Pb 在鱼鳃中不存在显著差异性外,其它均存在显著或极显著差异。

| Table 3 Analysis of the significant differences in the content and distribution of heavy metals in silver carp and aristichthys nobilis (n=3) mg/kg |     |                          |                           |                          |                          |                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 鱼类                                                                                                                                                  | 组织  | Cr                       | Cu                        | Cd                       | Pb                       | Hg                       |
| 鲢鱼                                                                                                                                                  | 肉   | 0.011±0.001 <sup>a</sup> | 0.363±0.034 <sup>a</sup>  | 0.007±0.002 <sup>a</sup> | 0.151±0.009 <sup>b</sup> | 0.052±0.006 <sup>c</sup> |
|                                                                                                                                                     | 腮   | 0.653±0.038 <sup>c</sup> | 0.426±0.027 <sup>a</sup>  | 0.054±0.006 <sup>a</sup> | 0.380±0.029 <sup>c</sup> | 0.004±0.000 <sup>a</sup> |
|                                                                                                                                                     | 肝   | 0.114±0.008 <sup>b</sup> | 10.418±0.776 <sup>b</sup> | 1.483±0.099 <sup>b</sup> | 0.176±0.013 <sup>b</sup> | 0.022±0.002 <sup>b</sup> |
|                                                                                                                                                     | 脑   | 0.084±0.005 <sup>b</sup> | 0.914±0.061 <sup>a</sup>  | 0.035±0.002 <sup>a</sup> | 0.017±0.004 <sup>a</sup> | 0.016±0.002 <sup>b</sup> |
|                                                                                                                                                     | 总含量 | 0.862±0.052              | 12.121±0.899              | 1.579±0.109              | 0.724±0.055              | 0.094±0.009              |
| 鳙鱼                                                                                                                                                  | 肉   | 0.042±0.003 <sup>a</sup> | 0.227±0.016 <sup>a</sup>  | 0.000±0.000 <sup>a</sup> | 0.032±0.003 <sup>b</sup> | 0.121±0.010 <sup>d</sup> |
|                                                                                                                                                     | 腮   | 0.203±0.016 <sup>d</sup> | 0.383±0.014 <sup>a</sup>  | 0.020±0.002 <sup>b</sup> | 0.446±0.023 <sup>d</sup> | 0.009±0.002 <sup>a</sup> |
|                                                                                                                                                     | 肝   | 0.119±0.019 <sup>c</sup> | 11.120±0.729 <sup>c</sup> | 0.118±0.007 <sup>c</sup> | 0.062±0.007 <sup>c</sup> | 0.055±0.004 <sup>c</sup> |
|                                                                                                                                                     | 脑   | 0.079±0.007 <sup>b</sup> | 1.385±0.091 <sup>b</sup>  | 0.002±0.002 <sup>a</sup> | 0.000±0.000 <sup>a</sup> | 0.036±0.002 <sup>b</sup> |
|                                                                                                                                                     | 总含量 | 0.443±0.045              | 13.115±0.851              | 0.140±0.011              | 0.540±0.033              | 0.221±0.018              |

† 同列数字后英文字母表示差异达到显著水平(P<0.05)。

鲢鱼和鳙鱼间各组织对重金属的富集浓度基本都存在差异性,说明即使是有同种生理功能的组织,不同鱼类对重金属诱导的代谢速度、组织内金属硫蛋白的合成速度以及其它相关因素也不尽相同<sup>[21]</sup>。另外,这种差异性并不是某一种鱼中重金属的含量处于绝对的优势,如 Cr 在鲢鱼鳃中含量高于鳙鱼鳃,但鲢鱼肉中的含量却低于鳙鱼肉。这 5 种重金属都表现出在某种鱼中有更高的含量,则在这种鱼中偏向于有更高的离散程度。可认为若鱼体某一组织有很强的富集重金属的能力,则这一组织倾向于先将鱼体内其它组织中的重金属迁移过去或是优先吸附重金属<sup>[22]</sup>。

2.3.2 生物-沉积物富集因子(BSAF)分析 生物-沉积物富集因子(BSAF)可用于评价生物对被测重金属富集的难易程度。BSAF 按式(1)计算。

$$B=C_t/C_s, \tag{1}$$

式中:

B——生物-沉积物富集因子;

C<sub>t</sub>——组织(鱼肝)中重金属含量,mg/kg;

C<sub>s</sub>——沉积物中重金属含量,mg/kg。

由表 4 可知,鲢鱼和鳙鱼中重金属 Cu、Cd 和 Hg 的 BSAF 都相较于另外 2 种重金属更大,可以认为这两种鱼都

更易于富集 Cu、Cd 和 Hg。

生物-沉积物富集因子越高代表鱼类越容易富集这种重金属。鲢鱼和鳙鱼中 Cu、Cd 和 Hg 的 BSAF 都相对 Cr 和 Pb 更高,这和 Shouta 等<sup>[20]</sup>的研究一致,他们指出在罗非鱼和红螯螯虾中 Cu、Zn 和 Cd 的 BSAF 值显著高于 Cr、Co 和 Pb。可能由于 Cd 易被植物吸收,所以以浮游植物为食的鲢鱼和杂食性的鳙鱼也易富集 Cd,且鲢鱼的 BSAF 显著高于鳙鱼的。Cu 作为生物体的一种必需金属元素,也必定相较于其它重金属更易被富集。鲢鱼和鳙鱼对于 Cu 的 BSAF 值相近,也表明这两种鱼对 Cu 的需求量相似。Hg 可与生物体内的巯基结合而被生物体富集<sup>[23]</sup>。鳙鱼中 Hg 的 BSAF 值显著大于鲢鱼的,可能是鳙鱼中的巯基总量大于鲢鱼的,或是鳙鱼中活性巯基的稳定性高于鲢鱼的<sup>[24]</sup>。

2.4 东洞庭湖鱼中重金属污染评价

曾龄颐等<sup>[7]</sup>检测出湘江流域长沙段鲢鱼肉中重金属 Cr、Cu、Cd、Pb 和 Hg 的平均含量分别为 1.05,3.18,0.06,0.20,0.01 mg/kg。与湘江流域长沙段鲢鱼中重金属含量相比,东洞庭湖鲢鱼中 Cr、Cu 和 Pb 的含量相对更低,其中,Cr 和 Cu 的含量仅是长沙段中的 1/10,Pb 的含量相近;而 Cd 和 Hg 的含量则相对更高,Hg 的含量是长沙段的 4 倍左右。由

| Table 4 Mean concentration±S.D. BSAFs for silver carp and aristichthys nobilis (n=3) mg/kg |             |             |             |             |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 种类                                                                                         | Cr          | Cu          | Cd          | Pb          | Hg          |
| 鲢鱼                                                                                         | 0.001±0.000 | 0.181±0.046 | 0.296±0.013 | 0.003±0.000 | 0.088±0.015 |
| 鳙鱼                                                                                         | 0.001±0.001 | 0.193±0.045 | 0.024±0.010 | 0.001±0.000 | 0.219±0.039 |

于鱼类中重金属含量可作为评价水体污染程度的指标,因此可以认为东洞庭湖水体中 Hg 和 Cd 比湘江流域长沙段的污染更为严重。分析表 3 中各重金属在鱼中的含量,发现除鱼肝脏中 Cd 超标外,Pb 在两种鱼的鱼鳃中含量也已接近限量值。因此,在东洞庭湖重金属的治理工作中,应当着重处理 Cd、Pb 和 Hg 的污染。

### 3 结论

鲢鱼和鳙鱼不同组织中各重金属含量的分布排序一致。一般鱼肉对重金属的亲合力较弱(除 Hg 外),鱼鳃和肝脏都易富集重金属,但对不同重金属的富集各有强弱,鱼脑对部分重金属(如 Cu、As、Zn)有相对较强的富集作用。除了鲢鱼和鳙鱼肝脏中的 Cd 超出行业标准限量外,其它组织中重金属均低于限量值。

不同鱼类的组织间重金属的富集基本都存在显著差异。根据鱼类的生物-沉积物富集因子,相比 Cr 和 Pb,鲢鱼和鳙鱼都更易富集 Cu、Cd 和 Hg。其中,鲢鱼比鳙鱼更易富集 Cd;而鳙鱼比鲢鱼更易富集 Hg。

东洞庭湖沉积物中重金属 Cd 污染严重。结合每周可耐受摄入量 PTWI(adult)以及鱼类中重金属含量,鲢鱼和鳙鱼中重金属的污染排序为 Cd>Cr>As>Pb>Hg>Zn>Cu,其中部分组织中 Cd 和 Cr 的含量超出了 PTWI(adult)。因此在重金属治理过程中需优先缓解 Cd 和 Cr 的污染。

### 参考文献

- [1] 万群,李飞,祝慧娜,等.东洞庭湖沉积物中重金属的分布特征、污染评价与来源辨析[J].环境科学研究,2011,24(12):1378-1384.
- [2] 祝云龙,姜加虎,黄群,等.东洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中 Cd Pb Hg As 的含量分布及相互关系[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1377-1384.
- [3] 王华,马宁,杨晓静,等.成都市雨水中的重金属特征[J].地球与环境,2010,38(1):49-53.
- [4] 徐思敏,王建辉,刘永乐,等.洞庭湖区淡水鱼中有毒有害物残留研究现状[J].食品与机械,2016,32(5):220-224.
- [5] 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.
- [6] 杨晨驰,黄亮亮,李建华,等.东苕溪下游鲫鱼不同组织重金属含量分析及食用安全性评价[J].食品科学,2013,34(19):317-320.
- [7] 曾龄颐,李文丽,黎璞,等.湘江流域长沙段鱼类重金属污染情况分析[J].轻工科技,2012(9):94-95.
- [8] BURCU Başıyigit, SELDA Tekin-Özan. Concentrations of some heavy metals in water, sediment, and tissues of pikeperch (*Sander lucioperca*) from Karataş lake related to physico-chemical parameters, fish size, and seasons[J]. Pol. J. Environ. Stud, 2013, 22(3): 633-644.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. SN/T 2208—2008 水产品中钠、镁、铝、钙、铬、铁、镍、铜、锌、砷、镉、钼、镧、汞、硒的测定 微波消解-电感耦合等离子体-质谱法[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-3.
- [10] 国家环境保护总局. GB/T 17141—1997 土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京:中国标准出版社,1997:1-4.
- [11] 姚志刚,鲍征宇,高璞.洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J].地球化学,2006,35(6):629-638.
- [12] SABULLAH M K, AHMAD S A, SHUKOR M Y, et al. Heavy metal biomarker: Fish behavior, cellular alteration, enzymatic reaction and proteomics approaches[J]. International Food Research Journal, 2015, 22(2): 435-454.
- [13] 刘恩生,刘正文,鲍传和,等.太湖鲢鱼和鳊、鳙鱼的食物组成及相互影响分析[J].湖泊科学,2007,19(4):451-456.
- [14] 田林锋,胡继伟,罗桂林,等.贵州百花湖鱼体器官及肌肉组织中重金属的分布特征及其与水体重金属污染水平的相关性[J].水产学报,2012,36(5):714-722.
- [15] 路浩,刘宗平,赵宝玉.金属硫蛋白生物学功能研究进展[J].动物医学进展,2009,30(1):62-65.
- [16] 方展强,杨丽华.重金属在鲫幼鱼组织中的积累与分布[J].水利渔业,2004,24(6):23-26.
- [17] MASOUD M S, EI-SAMRA M I, EI-SADAWY M M. Heavy-metal distribution and risk assessment of sediment and fish from El-Mex Bay, Alexandria, Egypt[J]. Chemistry and Ecology, 2007, 23(3): 201-216.
- [18] FARKAS A, SALANKI J, VARANKA I. Heavy metal concentrations in fish of Lake Balaton[J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2000, 5: 271-279.
- [19] HAS-SCHON E, BOGUT I, RAJKOVIC V, et al. Heavy Metal distribution in tissues of six fish species included in human diet, inhabiting freshwaters of the nature park "hutovo blato" (bosnia and herzegovina)[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2008, 54: 75-83.
- [20] NAKAYAMA S M M, IKENAKA Y, MUZANDU K, et al. Heavy metal accumulation in lake sediments, fish (*Oreochromis niloticus* and *Serranochromis thumbergi*), and crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in lake itezhi-tezhi and lake kariba, zambia[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2010, 59: 291-300.
- [21] 孔祥会,刘占才,郭彦玲,等.汞暴露对草鱼器官组织中碱性磷酸酶活性的影响[J].中国水产科学,2007,14(2):270-274.
- [22] 陆维亚,李节,薛敏敏,等.重金属在浮游生物与鳙鱼中的蓄积和迁移规律[J].食品与机械,2016,32(3):96-100.
- [23] 周启星.生态毒理学[M].北京:科学出版社,2004:298-392.
- [24] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle protein from some tropical fish during frozen storage[J]. Food Research International, 2003, 36(8): 787-795.