

## 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

田林锋<sup>1,2</sup>, 胡继伟<sup>1\*</sup>, 罗桂林<sup>3</sup>, 马建军<sup>2</sup>, 黄先飞<sup>1</sup>, 秦樊鑫<sup>1</sup>

- (1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州 贵阳 550001;
2. 宁夏石嘴山市环境监测站, 宁夏 石嘴山 753000;
3. 宁夏理工学院, 宁夏 石嘴山 753000)

**摘要:**通过对鳃、肝脏、肾脏、心脏、背肌、腹肌和尾肌等器官与肌肉中6种重金属(Pb、Cd、Cu、Cr、As和Hg)的调查,分析了百花湖野生鲢和鲤体内重金属含量水平、分布特征及其与水体重金属之间的相关性。在所测4种器官和3处肌肉组织中,鲢和鲤体内重金属平均含量由高到低的顺序为Cu>Pb>Cr>Cd>As>Hg;在鲢和鲤各器官中,Cr和Cu表现出较强的相关性,其相关系数分别为 $r=0.878(P<0.01)$ 和 $r=0.972(P<0.01)$ ,而Cr和Hg只在鲤体内表现出负的相关性 $r=-0.782(P<0.05)$ ;以6种重金属为依托的鱼体器官自身之间的相关性较强,但各器官与沉积物和水体中重金属平均含量之间的相关性较弱。聚类分析表明,在两种鱼体内,这6种重金属可以分为3类。研究结果表明,Pb主要蓄积在鲤的肝脏和心脏中,Cd主要存在于两种鱼的肾脏中,Cu主要在肝脏及心脏中蓄积,Cr主要蓄积在两种鱼体的肝脏和心脏中,As在鲤心脏中含量较为突出,但在鲢各器官中含量差异不大,Hg在整个鱼体器官及组织中的含量较为均匀,鱼体可食用的肌肉组织中这6种重金属含量普遍较低。沉积物中重金属主要以硫化物形态存在,生物可利用度低,可能是鱼体重金属元素平均含量普遍较低的主要原因。

**关键词:** 鲢; 鲤; 器官; 组织; 重金属; 百花湖

**中图分类号:** X 524; S 917

**文献标志码:** A

鱼类是湖泊生态系统中较高级的消费者,通过上行效应和下行效应与环境间存在着紧密的相互作用关系<sup>[1-2]</sup>。随着工业废水的大量排放,相应水域的重金属污染日趋严重,水生生物的生存环境面临极大隐患<sup>[3-4]</sup>。水生生物对重金属的富集和累积作用,超过它们的承受能力,从而给它们的繁殖、发育、生长、生理机能等方面带来毒性危害<sup>[5]</sup>;同时还造成遗传基因发生变异和突变,面临生存、物种多样性、免疫抵抗力等方面的挑战,也会对水产养殖业造成很大损失。研究表明,当水生生物暴露重金属的环境中,其可通过体表吸附、摄食饵

料、鳃呼吸等生理作用将重金属元素积累在体内,进而沿着食物链向更高一级的生物进行迁移,并在不同生物体之间相互转化,最终通过食物链传递给人类,给人们身体健康带来危害<sup>[6-8]</sup>。因此,研究水生生物体内重金属含量分布特征及迁移转化规律具有重要的理论价值和意义<sup>[9]</sup>。

百花湖是位于乌江一级支流猫跳河梯级水库中的二级水库,其以一级水库红枫湖的下泄水为主要补给水源,是我国西南酸沉降严重区的人工湖,距贵州省省会贵阳市约18 km,流域面积1 895 km<sup>2</sup>,是流域内生活饮用水、工农业生产用水和水产养殖

收稿日期: 2011-06-12 修回日期: 2012-01-12  
资助项目: 国家自然科学基金项目(20967003)  
通讯作者: 胡继伟, E-mail: jiwei.hu@yahoo.com

用水的水源地。百花湖流域内出露岩石主要为石灰岩, 岩溶地貌发育, 湖水呈中、偏碱性。百花湖周围遍布小型的煤矿、铁矿等工矿企业, 这些都成为重金属污染物的主要来源。部分学者对百花湖野生鱼体汞污染的状况进行过研究, 但对于鱼体不同器官所含重金属含量的研究较少, 水环境中重金属浓度对鱼体重金属含量的影响研究更少<sup>[10-12]</sup>。本实验对百花湖中不同水层野生优势鱼种不同器官及组织中常见 6 种重金属(Pb、Cd、Cu、Cr、As 和 Hg)含量进行测定, 并结合水体重金属含量数据进行分析, 以便查明百花湖野生优势鱼种体内重金属含量分布特征及影响因素, 进而为深入了解深水湖泊中重金属的生物地球化学行为和水生生物资源开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品的采集

2003 年, 百花湖已被禁止人工投放饵料进行水产养殖, 该水域水生生物基本为野生鱼或自然放养鱼, 本次样品采集于 2010 年 5 月份(图 1), 所采鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鲤(*Cyprinus carpio*)均由当地渔民协助, 在相应湖区 10 个采样点进行现场捕捞。样品采集后立即带回实验室, 记录鱼的体质量、长度, 取背部两侧鳞片确定其年龄, 最后将鱼除鳞、洗净, 分器官解剖后装入样品袋置于冰箱中冷冻保存(-20 °C)。分析取样工具和贮存样品容器等, 按重金属元素分析的质量控制要求进行清洗净化。现场测试水质理化因子, 水温平均值为 19 °C, pH 平均值为 8.7, 溶解氧平均值为 10.6 mg/L, 透明度为 1 m。

根据百花湖湖区地形确定 10 个水体样品及生物样品采样点, 在每个采样点采集 3 份水样, 混合均匀后装入预先用 HNO<sub>3</sub> 浸泡并清洗过的 500 mL 聚乙烯瓶中, 立即用 1:1 的 HNO<sub>3</sub> 酸化(pH<2)。采用抓斗式采样器采集湖泊表层沉积物样品, 将其混合均匀后放入聚乙烯袋中, 带回实验室, 在开放环境下以 4 000 r/min 的速度离心分离, 收集离心后样品, 然后自然风干。

### 1.2 样品处理及分析

**生物样品** 将每一种鱼同类的解剖器官及组织聚于一起, 不加水, 匀浆机匀浆(对于心脏等较小器官, 直接剪碎混匀)。为排除水分差异对各

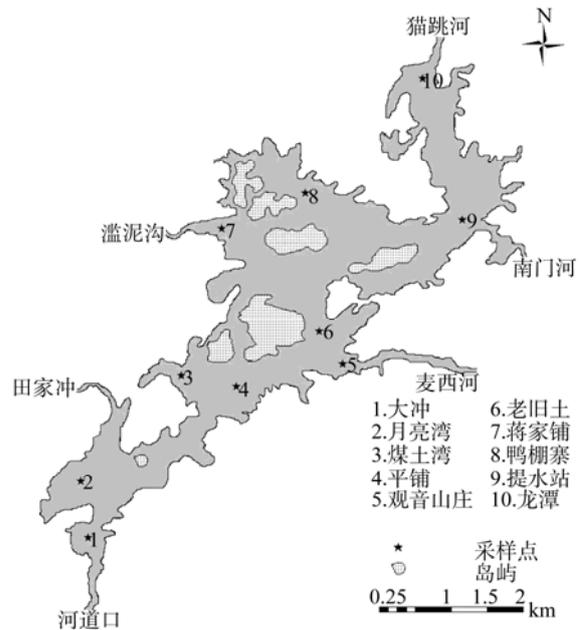


图 1 水体样品采样

Fig. 1 Location of sampling stations

器官组织中重金属含量的影响, 将匀浆样品平铺置于干净培养皿中, 在(60±5) °C 鼓风烘箱中连续烘 3~4 h 以上, 其间适当翻动, 直到干燥且恒重为止。称取烘干样品 0.4~0.5 g(精确至 0.0002 g)于聚四氟乙烯内罐中, 加浓 HNO<sub>3</sub> 5 mL, 盖上盖子并摇匀, 静置过夜后将内罐置于水浴锅上, 沸水浴 2 h 左右, 直到基本澄清, 取出冷却到室温后加入 3 mL 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 然后再将内罐加盖后放入不锈钢套筒中, 置于 120~140 °C 的烘箱中继续消解 3 h。取出后再将内罐沸水浴加热 1 h 左右, 赶酸, 后用去离子水定容至 50 mL 摇匀待测, 同时做试剂空白。

**水样** 分两次将 300 mL 待测水样置于 250 mL 锥形瓶中, 加入 10 mL 硝酸后置于电热板上浓缩至 2 mL 左右, 再用 0.5% 的硝酸定容至 25 mL, 冷藏待测。

**沉积物** 离心后的沉积物样品在室温下自然风干, 研细, 过 0.25 mm 的尼龙筛后储存于玻璃瓶中待测。取沉积物样品 0.1 g 于聚四氟乙烯烧杯中, 加入 15 mL 的 HNO<sub>3</sub>: HF: HClO<sub>4</sub> (2:1:2, 体积比) 混合液后置于电热板上加热至澄清后, 再继续加热至近干, 冷却后的残渣用 5 mL 10% 的 HNO<sub>3</sub> 溶解并用去离子水定容至 25 mL, 再转移到聚乙烯管中保存待测。

**重金属含量分析** Pb、Cd、Cu、Cr 用石墨炉/火焰原子吸收光谱仪测定(Perkin Elemer 公司,

AA800; YY3 横向加热石墨管), As 和 Hg 采用非色散原子荧光光谱仪测定(北京瑞利, AF640)。

### 1.3 质量控制

所有的样品均设置两个平行样, 数据自动读取 3 次取平均值, 仪器自动扣除试剂空白, 实验所用试剂药品均为优级纯。使用标准物质(GBW08573-生物成分分析-黄鱼成分分析标准物质)在与生物样品分析流程相同条件下作对照分析, 样品测定分别带 5% 左右的空白样品和标样, 双试剂空白及标准物质监控, 其中标准物 Pb、Cd、Hg、As、Cu 和 Cr 的平均回收率达 91% 以上。ESS-1 (GSBZ500013-87) 和 ESS-2 (GSBZ500012-87)对沉积物中重金属含量进行全程监测。

## 2 结果

### 2.1 生物体中重金属含量测定方法的适用性分析

为检验实验所用方法对百花湖鱼体器官中重金属分析的准确性和精确性, 抽取鲢和鲤肝脏样品进行精密度和加标回收率分析(因肝脏中重金属含量较高且样品量较大), 结果发现, 精密度的测定结果皆小于 10, 即上述所用的测定方法对百花湖鱼体器官中各元素的测定具有较高的精密度(表 1)。加标回收率实验加标量为样品中重金属含量的 80%、100%、120%, 最后结果取其平均值列于表 1。从表 1 可知, 肝脏中各重金属元素的回收率为 95.2%~102.6%, 说明上述测定方法对生物体中重金属含量分析具有较高的准确性。另外根据空白测定( $n=11$ )标准偏差 3 倍得出各金属元素的方法检出限, 并且在测定过程中同时进行 2 次空白分析, 空白平行样精密度均小于 10%, 说明试验使用试剂对生物体重金属元素测定没有影响。本研究采用

实验方法的准确性、精确性及检出限满足百花湖鱼体器官中重金属含量的测定。

### 2.2 鱼体各器官中重金属含量

百花湖野生鱼类主要是鲤科和鲢科, 本次所采样品鱼龄差别较小(表 2), 鱼体不同器官和组织中 Pb、Cd、Hg、As、Cu 和 Cr 的平均浓度分别为 3.59、0.75、0.12、0.45、10.0 和 2.26 mg/kg(表 3), 而鲤体内分别为 2.87、0.41、0.14、0.40、10.95 和 2.28 mg/kg。但整体而言, 在所测 4 种器官和 3 种肌肉组织中, 鲢和鲤体内 6 种重金属平均含量由高到低的顺序为 Cu > Pb > Cr > Cd > As > Hg, 其中鲢体内 6 种重金属总含量由高到低的顺序为心>肝>肾>鳃>尾肌>腹肌>背肌, 总含量在不同器官和组织中的变化范围为 6.25~34.2 mg/kg; 而鲤的顺序为肝>心>肾>鳃>腹肌>背肌>尾肌, 变化范围为 5.38~40.0 mg/kg, 鱼体器官中的重金属总含量远远高于肌肉组织中的含量。结合各重金属生态毒性系数<sup>[13-14]</sup>, 构造相对毒性含量( $C_r^i$ ), 从而消除生物体内重金属因自然丰度和毒性强度对其可比因素的影响, 进而增加数据的可比性和比较结果的可靠性。结果表明, 在鲢器官和组织中, 总毒性浓度( $\sum C_r^i$ )的变化顺序为心>肾~肝>鳃>尾肌>腹肌>背肌, 而鲤的高低趋势为肝>肾>心>鳃>腹肌>背肌>尾肌, 通过两种含量的结合比较可以发现, 6 种重金属在鱼体器官中的含量普遍高于可食用的肌肉组织, 百花湖两种鱼体各器官和组织中重金属含量存在较大差异。究其原因, 可能是因为重金属污染物在脊椎动物体内的分布, 主要是通过

表 1 试验方法的精密度及加标回收实验  
Tab. 1 The precision and recovery experiments of test method

肝脏 liver	精密度实验 precision experiments				回收率实验 recovery test		肝脏 liver	精密度实验 precision experiments				回收率实验 recovery test	
	1#	2#	3#	RSD /%	回收率/% recovery	1#		2#	3#	RSD /%	回收率/% recovery		
												mg/kg	
Pb	2.51	2.45	2.50	1.29	95.8	Pb	13.7	13.1	14.2	4.03	96.3		
Cd	1.06	1.03	0.98	3.95	90.2	Cd	0.96	1.03	0.92	5.74	91.5		
Hg	0.13	0.13	0.12	4.56	92.3	Hg	0.06	0.07	0.06	9.12	90.5		
As	0.51	0.52	0.57	6.03	97.3	As	0.23	0.21	0.20	7.16	96.4		
Cu	19.2	18.9	19.7	2.10	98.9	Cu	20.1	21.2	20.1	3.10	101.7		
Cr	6.40	6.38	6.52	1.18	103.5	Cr	4.51	4.66	4.49	2.04	102.4		

注: 检出限, Cd. 0.001 mg/kg; Pb. 0.01 mg/kg; Cu. 0.001 mg/kg; Cr. 0.1 mg/kg; As. 0.001 mg/kg; Hg. 0.001 mg/kg。

Notes: Detection limit, Cd. 0.001 mg/kg; Pb. 0.01 mg/kg; Cu. 0.001 mg/kg; Cr. 0.1 mg/kg; As. 0.001 mg/kg; Hg. 0.001 mg/kg

表2 百花湖两种鱼的基本参数  
Tab. 2 Basic parameters of the two fish species from Lake Baihua

种类 species	样品数量/尾 number	个体平均体质量/kg average quality of the individual	平均体长/cm average body length	年龄/a age
鲢 <i>H. molitrix</i>	10	0.8±0.02	20±0.5	3 <sup>+</sup> ~ 4 <sup>+</sup>
鲤 <i>C. carpio</i>	10	0.5±0.1	15±0.7	2 <sup>+</sup> ~ 3 <sup>+</sup>

表3 鱼体各器官、水柱及沉积物中重金属含量  
Tab. 3 Heavy metals in fish species, water column and sediments mg/kg

项目 item	组织器官 organs	Pb	Cd	Hg	As	Cu	Cr	∑M	∑C <sub>r</sub> <sup>i</sup>
鲢 <i>H. molitrix</i>	鳃 gills	1.31	0.10	0.03	0.76	8.82	1.05	12.1	65
	肝 liver	2.53	1.00	0.18	0.53	19.4	6.40	30.0	165
	肾 kidney	2.98	2.97	0.13	0.61	9.41	1.74	17.8	166
	心 heart	11.4	0.88	0.10	0.64	17.9	3.24	34.2	190
	背肌 back muscle	0.63	0.09	0.10	0.14	4.04	1.25	6.25	34
	腹肌 abdominal	0.21	0.05	0.11	0.29	7.08	1.21	8.95	48
	尾肌 tail muscle	6.06	0.19	0.17	0.19	3.35	0.91	10.9	63
	平均值 mean	3.59	0.75	0.12	0.45	10.0	2.26	17.2	104
鲤 <i>C. carpio</i>	鳃 gills	2.03	0.12	0.19	0.37	7.49	1.33	11.5	66
	肝 liver	13.7	0.96	0.06	0.22	20.50	4.56	40	213
	肾 kidney	1.07	1.68	0.18	0.17	15.15	2.53	20.8	143
	心 heart	1.65	0.06	0.07	1.00	19.10	4.77	26.7	128
	背肌 back muscle	0.52	0.02	0.13	0.16	5.18	0.84	6.85	38
	腹肌 abdominal	0.83	0.04	0.13	0.41	5.71	1.18	8.3	46
	尾肌 tail muscle	0.32	0.02	0.19	0.50	3.55	0.80	5.38	34
	平均值 mean	2.87	0.41	0.14	0.40	10.95	2.28	17.1	95
沉积物(平均值) sediment <sub>mean</sub>		39	1.0	7.1	47	68	66	228	—
表层水(平均值) surface water <sub>mean</sub>		0.36	0.04	0.26	1.12	1.5	13.0	16.3	—
重金属毒性系数( $T_r^i$ ) toxicity coefficient ( $T_r^i$ )		5	30	40	10	5	2	—	—

注:  $\sum M = C_{Pb} + C_{Cd} + C_{Hg} + C_{As} + C_{Cu} + C_{Cr}$ ;  $\sum$ 相对毒性浓度( $C_r^i$ )= $\sum$ (各重金属含量 $C^i \times$ 各毒性系数 $T_r^i$ ); 沉积物和表层水( $\mu\text{g/L}$ )中重金属含量取 10 个采样点的平均值。Notes:  $\sum M = C_{Pb} + C_{Cd} + C_{Hg} + C_{As} + C_{Cu} + C_{Cr}$ ;  $\sum$ the relative toxicity concentration= $\sum$ (the heavy metals content  $\times$  toxicity coefficient); Concentrations of heavy metals in sediments and surface water from ten sample points.

与血液中的有关成分相联系的循环而完成<sup>[15]</sup>, 对于鱼类, 其体内器官的功能特点及代谢变化可能也影响到重金属元素在生物体内的分布, 从而导致在鱼体各器官组织中分布的不均衡。

### 2.3 重金属在鱼体的分布特征

6 种重金属元素在鱼体各器官和肌肉组织中分布, 其中同种元素在不同鱼体内的不同器官组织中的含量分布并不相同。Pb 在鲤肝脏中的含量最高, 次之为鲢心脏; Cd 在鲢和鲤肾脏和肝脏中含量较高(图 2); Hg 在鱼体各器官和组织中的含量分布较为均匀, 含量相差较小, 除心脏和肝脏以外, 鲤各器官和组织中 Hg 的含量普遍高于鲢; As 在鲢各器官中含量较高, 在鲤心脏中含量最高; Cu 主

要集中在鲢和鲤的肝脏和心脏中, 且在鲤的这 3 种器官中的含量普遍高于鲢, 这与已有的研究成果相吻合, 即肝脏对 Cu 积累快、积累含量能够高达 19.363 mg/kg<sup>[16]</sup>; Cr 主要集中在两种鱼的肝脏和心脏中。究其原因, 可能和鱼体各器官、组织结构及生理功能有关, 但百花湖鱼体重金属含量相对于其它湖泊水体鱼体重金属含量普遍较低<sup>[17-18]</sup>。

鳃是鱼的呼吸器官, 主要承担气体交换、排泄氮代谢废物和参与渗透压调节的功能<sup>[19]</sup>。在鱼鳃表面覆有一层由葡糖胺聚糖(透明质酸和硫酸软骨素)组成的成分复杂的富氧、氮、硫等电子供体的粘液, 这层粘液是一层多阴离子的复杂介质, 具离子交换功能, 对不同金属有不同的亲和力, 这些粘液

能够将金属富集在非常接近膜转移位点的鳃表面;同时,粘液会不断分泌、脱落。鱼鳃表面的粘液层起到积累和去除具潜在毒性的重金属的作用<sup>[20-21]</sup>,所以鱼鳃中重金属浓度并不高。肝脏为腺体构造,其包括极多细胞索,为密集的网状结构。肝细胞系多角状,体积虽大小不同,但形态无变异。细胞索间有窦状隙,其中充满血细胞。由于其网状结构和充血作用的存在,给重金属提供了较多的结合位点和运输体附体,进而增强了重金属在该器官中的滞留和富集作用,所以各种重金属在肝脏中含量普遍较高。组织切片观察肾脏<sup>[22]</sup>,有圆囊状肾小体,其中包括肾小球,由血管缠绕形成,从切片中还可观察到连接小管、集合管,这些管道可能也是重金属结合位点和迁移转化的中转站。

鱼类主要生活在水域环境中,与陆生动物不同,其通过体表吸附、摄食饵料、鳃呼吸等在其体内积累重金属,同时通过血液循环到达不同器官<sup>[23]</sup>。然

而,水域环境由于土壤组成、水体中矿物质含量有很大的差异,而且不同种类鱼的食性不同,因此,不同鱼种直接从水域环境中吸收或通过食物所获得的金属元素的量就有很大的差异了<sup>[24-25]</sup>。除此之外,生物体对金属元素的吸收还取决于该元素在自然界的存在形态,而百花湖已处于富营养化,在这样的水体环境下,沉积物成为厌氧微生物(硫酸还原菌等)的主要载体。这些微生物使得沉积物长期且稳定地处于还原状态,特别是硫酸还原菌,其在进行氧化分解的过程中利用  $SO_4^{2-}$  作为电子受体,  $SO_4^{2-}$  被还原生成  $S^{2-}$ ,进而和金属离子结合形成较为稳定的金属硫化物,从而减弱了生物毒性作用(即影响水生生物的有效吸收与积累),正如红枫湖沉积物(SEM/AVS 的变化范围为 0.007~0.033)<sup>[26]</sup>,百花湖沉积物重金属元素以硫化物的形式存在,这可能是几种重金属元素平均含量在百花湖沉积物中较高而在鱼体中不高的主要原因。

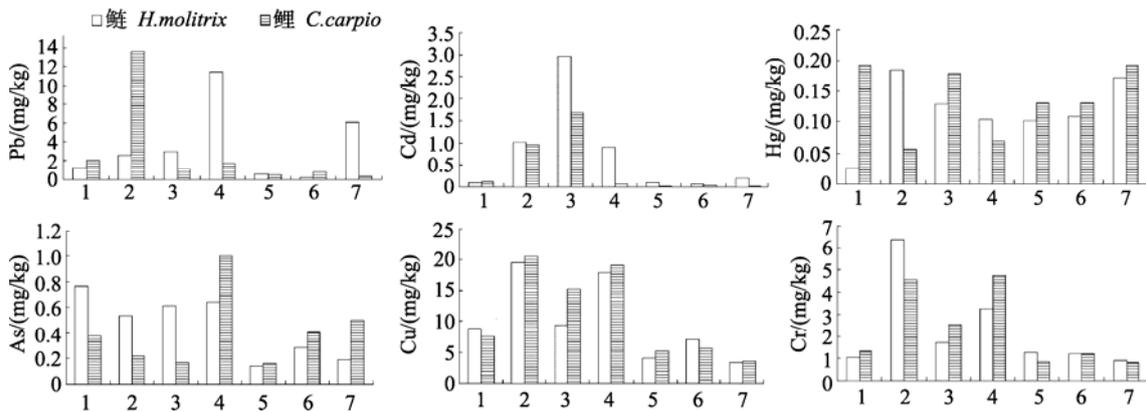


图 2 重金属元素在鱼体各器官中分布趋势

1. 鳃; 2. 肝; 3. 肾; 4. 心; 5. 背肌; 6. 腹肌; 7. 尾肌。

Fig. 2 The distribution of the heavy metals in tissues and organs of the two fishes

1. gills; 2. liver; 3. kidney; 4. heart; 5. back muscle; 6. abdominal; 7. tail muscle.

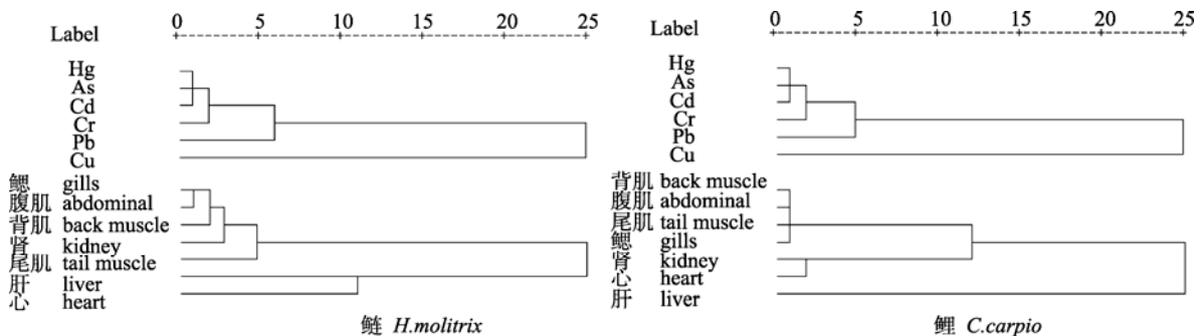


图 3 重金属及鱼体器官的平方欧氏距离聚类图

Fig. 3 Square euclidean distance dendrogram of heavy metals and fish organs

2.4 相关性分析

**鱼体不同器官中重金属之间的相关性分析** 鱼体不同器官中重金属之间的相关性见表 4, 从中可以看出, 除过 Cr 和 Cu 以外, 其余 4 种重金属在鱼体器官和组织中的相关性较弱。在鲢和鲤各器官中, Cr 和 Cu 表现出较强的相关性, 其 Pearson 相关系数分别为 0.878( $P < 0.01$ )和 0.972( $P < 0.01$ ), 而 Cr 和 Hg 只在鲤体内表现出一定的负相关性, 其  $r = -0.782$ ( $P < 0.05$ )。在已有的研究中, 关于重金属在生物体内的相互作用机理主要有以下 3 种: 金属硫蛋白的作用<sup>[27]</sup>、置换反应<sup>[28]</sup>、竞争点位理论<sup>[29-30]</sup>, 本研究中重金属相关性可能也存在这样的相互结合机理。其中铜在生物体内的主要作用是进行氧化还原反应, 在生物系统中起着独特的催化剂, 参与造血过程及铁的代谢, 同时参与一些酶的合成和黑色素合成, 对于脊椎动物在铁的代谢和氧的输送中, 铜是

必需元素<sup>[31]</sup>。在本试验中, Cr 和 Cu 的相关性可能主要是归结于其相似的外层电子结构, 即 Cr 为  $3d^6 4s^1$ , 而 Cu 为  $3d^{10} 4s^1$ , 这两种元素的络合能力都很强, 所以其在生物体内可能存在某种相互替代和相互伴生的生物生理作用。Hg 在生物体内主要是以有机结合态存在<sup>[32]</sup>, 但同时 Hg 的游离性较强, 生物转化作用影响着其在生物体内的含量分布, 所以 Hg 与 Cr 只在鲤体内体现负相关性, 且比较弱 ( $r = -0.782, P < 0.05$ )。

**以重金属含量为依托的鱼体不同器官之间的相关性分析** 以 Pb、Cd、Hg、As、Cu 和 Cr 6 种重金属含量为依托, 对鱼体不同器官之间的相关性进行分析(表 5), 结果表明, 生活在上层水中的鲢除尾肌以外, 鳃、肝脏、肾脏、心脏、背肌和腹肌自身之间的相关性都较强, 而生活在底层水域中的鲤, 其各器官及肌肉组织之间的相关性都

表 4 鱼体不同器官中重金属之间的相关性分析  
Tab. 4 Correlation between heavy metals in different organs of the fish samples

	Pb	Cd	Hg	As	Cu	Cr
Pb	1	0.152	0.164	0.245	0.438	0.202
Cd	0.371	1	0.269	0.430	0.313	0.234
Hg	-0.619	0.023	1	-0.416	0.169	0.493
As	-0.231	-0.472	-0.321	1	0.633	0.307
Cu	0.643	0.568	-0.686	0.233	1	0.878**
Cr	0.631	0.373	-0.782*	0.410	0.972**	1

注: 灰色部分为鲤各污染物含量相关系数, 无色部分为鲢各污染物含量相关系数; \*\*相关性显著水平 0.01 (双尾), \*相关性显著水平 0.05 (双尾)。

Notes: Correlation coefficients between the concentrations of heavy metals in the *H. molitrix* samples (marked with gray color) and in *C. carpio* samples (with no marking); \*\*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

表 5 以重金属含量为依托的鱼体不同器官之间的相关性分析  
Tab. 5 Correlation between different organs of fish on the basis of heavy metals

	鳃 gills	肝 liver	肾 kidney	心 heart	背肌 back muscle	腹肌 abdominal	尾肌 tail muscle	水 water	沉积物 sediment
鳃 gills	1	0.970**	0.944**	0.876*	0.977**	0.989**	0.411	-0.052	0.617
肝 liver	0.919**	1	0.924**	0.837*	0.998**	0.984**	0.358	0.173	0.684
肾 kidney	0.968**	0.809	1	0.889*	0.923**	0.924**	0.481	-0.114	0.469
心 heart	0.975**	0.821*	0.986**	1	0.856*	0.812*	0.797	-0.102	0.582
背肌 back muscle	0.985**	0.839*	0.992**	0.995**	1	0.986**	0.389	0.146	0.689
腹肌 abdominal	0.989**	0.853*	0.986**	0.996**	0.998**	1	0.298	0.035	0.615
尾肌 tail muscle	0.969**	0.797	0.979**	0.995**	0.993**	0.994**	1	-0.167	0.350
水 water	-0.022	-0.061	0.000	0.107	0.010	0.040	0.055	1	0.565
沉积物 sediment	0.635	0.591	0.555	0.674	0.615	0.657	0.669	0.565	1

注: 灰色部分为鲤各器官相关系数, 无色部分为鲢各器官相关系数; \*\*相关性显著水平 0.01 (双尾), \*相关性显著水平 0.05 (双尾)。

Notes: Correlation coefficients between the organs and muscle tissues in *H. molitrix* samples (marked with gray color) and in *C. carpio* samples (with no marking); \*\*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

比较强,而两种鱼各器官和肌肉组织与沉积物和水质之间的相关性较弱,这可能是因为水体重金属迁移和转化途径较多,水环境中重金属浓度并不是决定生物体重金属浓度的唯一因素;也可能因为所采样品数量较少。鱼类较陆生动物的主要差异之一就是生活在水域环境中,可以通过表面从水体中直接吸收矿物质元素供鱼体生长发育所需<sup>[23]</sup>,但由于生物体本身就是一个较为复杂的整体,所以各器官和组织之间的相互关系普遍较强。

## 2.5 聚类分析

实验通过采用组间类平均法(between-groups average linkage)进行变量标准化,距离测量采用平方欧氏距离(squared euclidean distance),最后得到图3的重金属聚类分析树形图,从图中可以清楚的看到这6种重金属的聚类过程,其横坐标为样点间的距离,距离越近,表明两者越相似,本研究选择25为组间距离标准,得到差异明显的3个组。聚类分析表明,在两种鱼体内,这6种重金属可以分为3类,Cd、As、Hg和Cr为一类,这可能与其毒性有关;Pb聚为一类,可能是因为它在水体背景中含量本身就高;Cu单独分为一类,可能是因为Cu本身是生物体所必须的元素,生物体会相应地有选择吸收。不同水层和不同鱼种体内重金属相似性分类保持相同特性,说明6种重金属在两种鱼体内的富集和迁移转化可能存在相同规律,同时进一步证明了百花湖鱼体肌肉组织与器官组织之间的差异性。

## 3 结论

通过本试验的结果分析可以看出,百花湖同种鱼不同器官中6种重金属含量存在较大的差异,研究结果如下:

(1)在所测4种器官和3种肌肉组织中,鲢和鲤体内6种重金属平均含量由高到低的顺序为Cu > Pb > Cr > Cd > As > Hg,其中鲢体内6种重金属总含量由高到低的顺序为心>肝>肾>鳃>尾肌>腹肌>背肌,总含量在不同器官和组织中的变化范围为6.25~34.2 mg/kg;而鲤的顺序为肝>心>肾>鳃>腹肌>背肌>尾肌,变化范围为5.38~40.00 mg/kg,鱼体器官中的总重金属含量远远高于肌肉组织中的含量。

(2)在6种重金属中,除过Cr和Cu以外,其

余4种重金属在鱼体器官和组织中的相关性较弱。在鲢和鲤各器官中,Cr和Cu表现出较强的相关性,其相关系数分别为0.878( $P < 0.01$ )和0.972( $P < 0.01$ ),而Cr和Hg只在鲤体内表现出一定的负相关性,其 $r = -0.782$ ( $P < 0.05$ )。以6种重金属为依托的鱼体器官自身之间的相关性较强,但各器官与沉积物和水质中重金属之间的相关性较弱。

(3)整体而言,Pb主要蓄积在鲤的肝脏和鲤的心脏中,Cd主要存在于两种鱼的肾脏中,Cu主要在肝脏及心脏中蓄积,Cr主要蓄积在两种鱼体的肝脏和心脏中,As在鲤心脏中含量较高,但在鲢各器官中含量差异不大,Hg在整个鱼体器官及组织中的含量较为均匀,但鱼体可食用的肌肉组织中这6种重金属含量普遍较低,可利用性较大。

## 参考文献:

- [1] 刘恩生. 鱼类与水环境间相互关系的研究回顾和设想[J]. 水产学报, 2007, 31(3): 391-399.
- [2] Kominkova D, Nabelkova J. Effect of urban drainage on bioavailability of heavy metals in recipient [J]. Water Science & Technology, 2007, 56(2): 43-50.
- [3] 吕振波, 李凡, 王波, 等. 黄海山东海域春、秋季鱼类群落结构[J]. 水产学报, 2011, 35(5): 692-698.
- [4] Irwandi J, Farida O. Mineral and heavy metal contents of marine fin fish in Langkawi island, Malaysia [J]. International Food Research Journal, 2009, 16(2): 105-112.
- [5] 陈中智, 朱琳, 姚琨, 等.  $Ca^{2+}$  与  $Pb^{2+}$  相互作用对斑马鱼胚胎毒性效应的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1205-1209.
- [6] Celia Y C, Richard S S, Bjorn K, *et al.* Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes [J]. Limnology & Oceanography, 2000, 45(7): 1525-1536.
- [7] Goldstein R M, Brigham M E, Stauffer J C. Comparison of mercury concentrations in liver, muscle, whole bodies, and composites of fish from the red river of the north [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, 53(2): 244-252.
- [8] Ubalua A O, Chijioke U C, Zeronye O U E. Determination and assessment of heavy metal content in fish and shellfish in ABA River, Abia state, Nigeria [J]. The Journal of Science & Technology, 2007, 7(1): 16-23.
- [9] Öztürk M, Özözen G, Minareci O, *et al.* Determination of heavy metals in fish, water and sediments of Avsar dam lake in Turkey [J]. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2009, 6(2): 73-80.
- [10] 张明时, 王爱民, 赵小毛, 等. 乌江上游水域水生生物甲基汞污染调研[J]. 贵州科学, 1991, 9(2): 155-159.

- [11] 瞿丽雅. 贵州有机化工厂的汞污染及对环境的影响[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 1999, 17(3): 25-29.
- [12] 闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1357-1361.
- [13] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [14] 张毓琪, 陈叙龙. 环境生物毒理学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993.
- [15] Monday S L, Frank K, Patrick D, *et al.* Heavy metals in Lake George, Uganda, with relation to metal concentrations in tissues of common fish species [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 499: 83-93.
- [16] 周云涛, 艾晓辉, 刘长征. 水体中铜在鲫鱼体内的积累[J]. 水产学报, 2004, 28(增刊): 157-161.
- [17] 王海涛, 战培荣. 乌苏里江几种水产品中 10 种金属元素的 ICP-MS 对比分析[J]. 分析实验室, 2010, 29: 114-117.
- [18] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1917-1923.
- [19] 吴志强. 鱼鳃的构造及其生理机能[J]. 生物学通报, 1993, 28(11): 6-7.
- [20] Meyer J S, Santore R C, Bobbitt J P, *et al.* Binding of nickel and copper to fish gills predicts toxicity when water hardness varies, but free-ion activity does not [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(6): 913-916.
- [21] Arillo A, Margiocco C, Melodia F. The gill sialic acid content as an index of environmental stress in rainbow trout, *Salmongai rdneri*, Richardson [J]. *Journal of Fish Biology*, 1979, 15: 405-410.
- [22] 关海红, 潘伟志, 蔺玉华, 等. 4 种重金属对松浦鲤生长及组织的影响[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(21): 68-73.
- [23] 雷志洪, 许小清. 鱼体微量元素的生态化学特征研究[J]. 水生生物学报, 1994, 18(4): 309-315.
- [24] 叶元土, 王友慧, 林仕梅, 等. 嘉陵江鱼器官组织中矿物质元素分析[J]. 水利渔业, 2005, 25(4): 23-24.
- [25] Abida B, Harikrishna S, Irfanulla K. Analysis of heavy metals in water, sediments and fish samples of Madivala Lakes of Bangalore, Karnataka [J]. *International Journal of Chemistry Technology Research*, 2009, 1(2): 245-249.
- [26] 刘峰, 秦樊鑫, 胡继伟, 等. 红枫湖沉积物中酸可挥发硫化物及重金属生物有效性[J]. 环境科学学报, 2009, 29(10): 2215-2223.
- [27] 侯丽萍, 马广智. 镉与锌对草鱼种的急性毒性和联合毒性研究[J]. 淡水渔业, 2002, 32(3): 44-46.
- [28] 山根靖弘. 环境物质与毒性[M]. 成都: 四川人民出版社, 1981: 47-48.
- [29] 张莲英, 何维敬. 锌、镉及金属硫蛋白在大鼠前列腺的定位研究[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(10): 23-26.
- [30] 刘清, 马梅, 童中华. Cu、Zn、Cd、Hg 对青海弧菌(Q67) 联合毒性作用的研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 301-303.
- [31] Dave G, Xiu R. Toxicity of mercury, copper, nickel, lead, and cobalt to embryos and larvae of zebrafish, *Brachydanio rerio* [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1991, 21(1): 126-134.
- [32] 张笑一, 潘渝生. 重金属致毒的化学机理[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2): 45-49.

## Heavy metals in muscle tissues and organs of fish species from Lake Baihua

TIAN Lin-feng<sup>1,2</sup>, HU Ji-wei<sup>1\*</sup>, LUO Gui-lin<sup>3</sup>, MA Jian-jun<sup>2</sup>, HUANG Xian-fei<sup>1</sup>, QIN Fan-xin<sup>1</sup>

(1. Guizhou Provincial Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Shizuishan Environmental Monitoring Station, Shizuishan 753000, China;

3. Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan 753000, China)

**Abstract:** Concentrations and distribution characteristics of six heavy metals (Pb, Cd, Cu, Cr, As and Hg) in *Hypophthalmichthys molitrix* and *Cyprinus carpio* sampled from Baihua Lake were studied by analysis of these heavy metals in their organs (gills, liver, kidney and heart) and muscle tissues (back muscle, abdominal muscle and tail muscle), and their associations with these heavy metals in the water were also examined. The results showed that the average levels of these heavy metals in *H. molitrix* and *C. carpio* decreased in the order of Cu > Pb > Cr > Cd > As > Hg; and Cr and Cu showed a significant correlation in the four organs of *H. molitrix* and *C. carpio* with the correlation coefficients of  $r = 0.878$  ( $P < 0.01$ ) and  $r = 0.972$  ( $P < 0.01$ ) respectively, while Cr and Hg in *C. carpio* presented only a negative correlation with the coefficient of  $r = -0.782$  ( $P < 0.05$ ). There were significant correlations between concentrations of the heavy metals in the organs of these fish species, but the average levels of these heavy metals in each organ presented low correlations with those in the sediment and overlying water samples. A cluster analysis showed that the six heavy metals in the two fish bodies could be divided into three categories. The content of as in the heart of *C. carpio* was relatively high, but the content of as in the different organs of *H. molitrix* had little difference. The level of Hg was relatively uniform in the organs and tissues of the two fish species, the content of these six heavy metals in edible muscle tissue of the fish was generally low. Since heavy metals in sediments from Baihua Lake mainly existed as sulfide compounds that were of low bioavailability, the fish species in this lake were not polluted severely with heavy metals.

**Key words:** *Hypophthalmichthys molitrix*; *Cyprinus carpio*; organs; tissues; heavy metals; Lake Baihua

**Corresponding author:** HU Ji-wei. E-mail: jiwei.hu@yahoo.com