

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2013.11.004

小浪底水库鱼体汞的污染现状*

索乾善 毛宇翔** 张飞鹏 崔莹

(河南理工大学资源环境学院, 焦作, 454000)

摘要 采用混酸消解-冷原子荧光(CVAFS)方法和氢氧化钾甲醇溶液消解-水相乙基化衍生-气相色谱-冷原子荧光方法(GC-CVAFS)分别测定了小浪底水库中常见的6种鱼类肌肉组织中的总汞和甲基汞含量. 结果表明,小浪底水库鱼体总汞平均含量为 $(99.2 \pm 42.6) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,变化范围为 $31.6\text{--}210 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 甲基汞的平均含量为 $(83.6 \pm 42.1) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,变化范围为 $20.0\text{--}194 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 甲基汞占总汞比例平均值为 $(82.5 \pm 9.3)\%$. 鱼体汞含量表现为肉食性鱼、杂食性鱼高于植食性鱼的趋势. 只有鳙鱼体内总汞、甲基汞含量与其体长体重呈显著的正相关关系,其他几种鱼总汞、甲基汞含量与其体长体重的相关性不显著. 本研究鱼肌肉样品中甲基汞含量均低于国家相关标准,但与国内相关研究相比,小浪底水库鱼肉组织中汞含量处于较高水平. 敏感人群应该限制小浪底水库中鳙鱼、黄颡鱼、鲤鱼这些甲基汞含量较高的水产品的食用量和食用频率.

关键词 小浪底水库, 鱼, 汞, 甲基汞, 健康风险.

汞是一种对人体有害的高毒性重金属,特别是脂溶性的甲基汞,易于在生物体内积累,并通过食物链富集放大,进而对人类健康造成极大的危害. 甲基汞进入人体后,可以通过血脑屏障和胎盘屏障,引起中枢神经系统的永久损伤^[1-3],而食用水产品是人类汞暴露的主要途径^[4-5],据统计,过高的甲基汞暴露导致美国每年约有6万新生儿患有先天性神经疾病^[6].

国外有研究表明,水库的修建会导致水体甲基汞含量显著增加,具有18年库龄的水库水体中溶解态甲基汞仍为自然湖泊中的5倍,直到69年后水体中溶解态甲基汞才会恢复至本底水平^[7-8]. 建国以来我国修建了上千座大型水库,伴随着水力发电的日益推广,新建水库将不断增加. 国内水库的兴建是否会诱发与西方类似的甲基汞含量升高的问题,尚无明确答案. 目前见于报道的国内研究主要集中于乌江流域,对该流域多个水库的研究表明,鱼体汞含量在 $3.20\text{--}190 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[9-11]之间,未超过 $500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,符合我国食品中污染物限量标准^[12].

小浪底水库建成于2001年,位于黄河中游最后一段峡谷的出口处,设计蓄水深度270 m,蓄水量89.34亿立方米,主要用于防洪、防凌、减淤,兼顾供水、灌溉和发电,渔业资源丰富,以野生为主,仅在临近水库大坝的一条支流上有少量网箱养殖,水库中常见鱼类主要有白鲢、武昌鱼、鳙鱼、鲤鱼、黄颡鱼、银鱼等.

本文对小浪底水库常见的6种鱼类肌肉组织中的总汞和甲基汞含量进行了测定,在此基础上评价了食用鱼类带来的健康风险. 研究结果有助于了解小浪底水库汞和甲基汞的污染现状,为后续汞的环境化学行为和污染控制研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

于2012年5月和2012年9月分两次在小浪底水库购买渔民设置迷魂阵捕获到的鱼,共6种,包括白鲢、武昌鱼、鳙鱼、鲤鱼、银鱼、黄颡鱼,样品信息如表1所示. 鱼的样品使用双层自封袋包装后,放在装

2013年2月18日收稿.

* 国家自然科学基金项目(21177035, 21377035);环境化学与生态毒理学国家重点实验室开放基金项目(KF2010-10);河南省教育厅自然科学研究计划项目(2011A10009);河南理工大学博士资金(B2011-041)资助.

** 通讯联系人, Tel:13782761630;E-mail:yuxiangmao@hpu.edu.cn

有冰块的保温箱里运回实验室. 在实验室测定鱼样长度、体重,将鱼去鳞去皮并用蒸馏水清洗后,取背脊侧上方肌肉粉碎成浆,转入聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)样品瓶,放入冰箱冷冻保存备用. 由于银鱼、黄颡鱼个体较小(银鱼体长约2—4 cm,黄颡鱼体长约5—8 cm),故采取混合样品方式,即取多条银鱼(全鱼)和黄颡鱼(肌肉组织)分别粉碎成浆作为混合样品,装瓶后冷冻保存,银鱼和黄颡鱼均获得2个组合样品.

表1 小浪底水库各种鱼样的基本信息

Table 1 Basic parameters of fish species in Xiaolangdi Reservoir

名称	体长范围/cm	体长平均值/cm	体重范围/kg	体重平均值/kg	数量/尾
白鲢	50—65	57	1.70—4.60	2.89	5
武昌鱼	12—35	21	0.02—0.60	0.18	20
鳊鱼	27—54	39	0.21—3.20	1.13	20
鲤鱼	14—48	24	0.05—1.70	0.33	15

1.2 仪器与试剂

仪器:总汞和甲基汞测试系统(美国 Brooks Rand)、电热恒温干燥箱、恒温水浴锅、去离子水机.

试剂:氯化甲基汞标准溶液, Hg^{2+} 标准液, 电子级(MOS)盐酸和硝酸、优级纯硫酸、氯化亚锡、盐酸羟胺、氢氧化钾, 甲醇(色谱纯).

SnCl_2 溶液的配制:把50 mL浓HCl(MOS级)和100 g $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (优级纯)加入去离子水中,溶解并定容至500 mL,用 N_2 通气过夜以除去其中的元素汞.

缓冲溶液的配制:称取38.4 g 柠檬酸(含1个结晶水,优级纯)和93.2 g 柠檬酸钠(2个结晶水,优级纯),转入500 mL聚丙烯(PP)瓶中,加去离子水溶解并定容至500 mL.

BrCl溶液的配制:取一个干净的磨口具塞试剂瓶,加入250 mL浓HCl(MOS级);称取2.7 g KBr,加入试剂瓶中,用磁力搅拌子搅拌1 h. 称取3.8 g KBrO_3 ,缓慢加入继续搅拌1 h后,塞上塞子.

四乙基硼化钠的配制:取1 g NaBEt_4 溶解在100 mL 2%(M/V)的NaOH冷溶液中,充分溶解后分装入容量为5 mL的玻璃试剂瓶中,放在冰箱中冷冻备用.

KOH 甲醇溶液的配制:取100 g KOH 溶解于400 mL 甲醇中.

标准物质:加拿大国家研究委员会研制的干鱼标准样品 DORM-4,其总汞、甲基汞标定值分别为 $(410 \pm 55) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(354 \pm 31) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.

1.3 分析方法

总汞 使用不锈钢高压消解罐消解样品,该消解罐分2层,外层为不锈钢质,内罐为全聚四氟乙烯(PTFE)材质,内罐容量为10 mL. 准确称取约0.3 g 鲜样(精确到0.001 g)于PTFE内罐中,加入3 mL 浓硝酸和浓硫酸的混合物($V/V=7:3$),盖上PTFE盖子后置于电热板上(65°C),预消解2 h后,将PTFE内罐套入不锈钢质外罐中,拧紧后放入恒温箱, 120°C 温度下消解3 h. 冷却后取出PTFE消解内罐,向内罐消解液中加入1 mL $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的BrCl溶液,盖上PTFE内盖混匀并静置过夜,然后转移至聚丙烯(PP)材质离心管中. 测定时取500 μL SnCl_2 加入盛有100 mL 去离子水的气泡瓶,加入1 mL 鱼样总汞消解液并摇匀,以 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通入氮气30 min,将反应产生的汞富集到镀金石英砂吸附管,使用冷原子荧光测汞仪测定吸附管上的汞含量.

甲基汞 准确称取约0.3 g 鲜样(精确到0.001 g)于50 mL PP材质离心管中,加入15 mL KOH 甲醇溶液,在水浴锅中 95°C 恒温下消解3 h,冷却后使用甲醇定容至15 mL. 测定时在盛有100 mL 去离子水的气泡瓶中加入2 mL 缓冲溶液和50 μL 消解液,最后加入100 μL 四乙基硼化钠溶液,反应30 min后,以 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通入氮气15 min,将气泡瓶中挥发的汞化合物富集在Tenax吸附管上,然后把Tenax管从气泡瓶取下,直接连接到氮气流量计,通气5 min 将管内水汽带出. 取下Tenax管在气相色谱-冷原子荧光(GC-CVAFS)测汞仪上进行测定.

1.4 质量控制

采用加拿大国家研究委员会研制的标准物质干鱼样(DORM-4)作为方法的质量控制,总汞与甲基

汞标定值分别为 $(410 \pm 55) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(354 \pm 31) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 实验测量值分别为 $(386 \pm 19) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $358.75 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 测得总汞、甲基汞值与标定值相对误差分别为 5.8%、1.3%。样品测定时每个样品均做 3 个平行样, 每批样品均设置 10% 的空白样品。每批实验均设置 3 个鱼样进行加标回收实验, 回收率介于 83%—126% 之间。总汞和甲基汞测定方法的检出限分别为 $0.25 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.034 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 空白样品的总汞甲基汞测定值均低于检出限。

2 结果与讨论

2.1 小浪底水库鱼体肌肉的总汞含量

图 1 给出了本次研究的 4 种体型较大的鱼类肌肉组织中的总汞含量。从图 1 可以看出, 白鲢肌肉总汞浓度在 $46.9\text{—}101 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $70.1 \pm 19.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 鳊鱼肌肉总汞浓度为 $69.8\text{—}210 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $(121 \pm 39.2) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 武昌鱼肌肉总汞浓度为 $31.6\text{—}149 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $(80.4 \pm 35.2) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 鲤鱼肌肉总汞浓度为 $48.5\text{—}200 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $(105 \pm 47.7) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由于体型较小的黄颡鱼和银鱼采用了混合样品的形式, 分别获得了 2 个样品, 故未在图 1 中显示。黄颡鱼肌肉的总汞含量为 $116\text{—}144 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $(130 \pm 19.7) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 银鱼总汞含量则为 $50.2\text{—}63.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $(57.3 \pm 6.8) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。总体来看, 小浪底水库鱼体肌肉组织总汞变化范围为 $31.6\text{—}210 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $(99.2 \pm 42.6) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。一般认为, 鱼体肌肉汞含量与鱼的食性关系明显, 这也可以从上述数据中得到验证。黄颡鱼属肉食性鱼类, 主要以小鱼、虾以及水生无脊椎动物为食, 其体内总汞含量显著高于植食性的白鲢、武昌鱼 ($P < 0.05$)。以浮游动物为食的鳊鱼肌肉组织中总汞含量略低于黄颡鱼, 显著高于以浮游植物为食的白鲢和武昌鱼 ($P < 0.05$)。杂食性的鲤鱼肌肉总汞含量则介于鳊鱼和白鲢之间。杂食性的银鱼总汞含量并不高, 可能与其个体小、生长周期短有关。另外, 银鱼采取的是全鱼粉碎的形式, 所测总汞含量为全鱼总汞含量。前人研究发现, 汞主要富集于鱼体肌肉组织, 而在其他组织中含量较低^[13], 据此推断, 银鱼肌肉组织中总汞含量应该高于所测得的全鱼总汞含量。

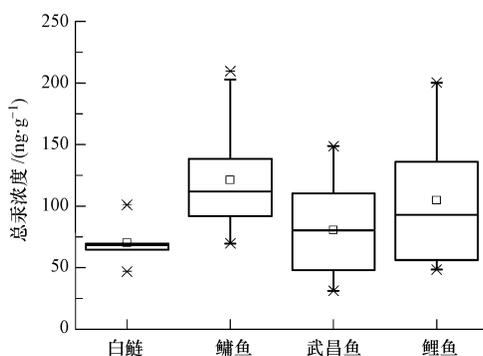


图 1 小浪底水库 4 种鱼肌肉组织中的总汞含量

Fig. 1 Total mercury concentrations in the muscle tissue of fish species in Xiaolangdi Reservoir

表 2 列出了国内外的相关研究成果。与我国其他地区相比, 小浪底水库鱼体中汞含量与三峡库区及其蓄水前重庆段、松花江流域鱼体汞含量较为接近, 明显高于洪家渡水库、红枫湖、百花湖、太湖和武汉市内湖泊中鱼体汞含量。小浪底水库鱼体中汞含量与国外湖泊、河流中非肉食性鱼类汞含量接近, 而远低于这些地区肉食性鱼体汞的含量。一般认为, 鱼体汞含量随营养级的提高而显著增加, 肉食性鱼体内的汞含量高于非肉食性鱼, 这种差别可能达到 3 倍^[14], 表 2 所列数据也说明了这一点。本次研究仅采集到了 1 种肉食性鱼——黄颡鱼, 但是由于其个体较小, 其体内汞含量不能代表库区肉食性鱼汞污染的普遍情况。小浪底水库非肉食性鱼肌肉组织总汞含量已经接近于美国、加拿大地区非肉食性鱼的汞含量, 预示着小浪底水库肉食性鱼可能含有更高的总汞含量, 食用肉食性鱼带来的汞暴露的健康风险不容忽视。

表 2 国内外不同地区鱼类汞含量比较

Table 2 Comparison of mercury contents in fish from various geographic regions

地区(种类)	总汞/(ng·g ⁻¹)	甲基汞/(ng·g ⁻¹)	(甲基汞/总汞)/%
洪家渡水库 ^[9]	63.0	28.0	37.6
百花湖 ^[10]	28.0	10.9	29.8
红枫湖 ^[11]	32.0	12.0	43.0
三峡库区 ^[15]	99.5	73.3	70.1
三峡水库蓄水前重庆段 ^[16]	116.9		
太湖 ^[17]	34.0		
武汉市湖泊 ^[18]	69.7		
松花江流域 ^[19]	134.0		
第二松花江 ^[20]	148.6		
巴西 Cupu 湖非肉食性鱼 ^[21]	111.0		
巴西 Cupu 湖肉食性鱼 ^[21]	450.0		
巴西 Pereira 湖非肉食性鱼 ^[21]	99.0		
巴西 Pereira 湖肉食性鱼 ^[21]	479.0		
美国西部河流的非肉食性鱼 ^[14]	90.0		
美国西部河流的肉食性鱼 ^[14]	260.0		
美国水库、湖泊非肉食性鱼 ^[22]	96.0		
美国水库、湖泊肉食性鱼 ^[22]	352.0		
瓦比贡河流域 ^[23]	687.5		

2.2 小浪底水库鱼体肌肉的甲基汞含量

图 2 给出了本次研究的 4 种体型较大的鱼类肌肉组织的甲基汞含量. 白鲢鱼肌肉甲基汞浓度为 40.3—98.4 ng·g⁻¹, 平均值为 (62.8 ± 23.1) ng·g⁻¹; 鳊鱼肌肉甲基汞浓度为 52.5—177 ng·g⁻¹, 平均值为 (100 ± 63) ng·g⁻¹; 武昌鱼肌肉甲基汞浓度为 20.0—130 ng·g⁻¹, 平均值为 (60.1 ± 35.3) ng·g⁻¹; 鲤鱼肌肉甲基汞浓度为 46.9—194 ng·g⁻¹, 平均值为 (105 ± 61) ng·g⁻¹. 银鱼甲基汞平均值为 (45.5 ± 8.1) ng·g⁻¹; 黄颡鱼甲基汞浓度平均值为 (91.6 ± 17.4) ng·g⁻¹. 总体来看, 小浪底水库鱼体肌肉组织甲基汞含量的变化范围为 20.0—194 ng·g⁻¹, 平均含量为 (83.6 ± 42.1) ng·g⁻¹. 本研究所测得的鱼类肌肉组织中甲基汞浓度均低于世界卫生组织规定的食用鱼甲基汞含量限值 (500 ng·g⁻¹^[24]), 也低于我国食品中污染物限量标准 (GB2762—2012) 中所规定的鱼体甲基汞浓度限值 (非肉食性鱼 500 ng·g⁻¹, 肉食性鱼 1000 ng·g⁻¹), 符合国家食用安全标准.

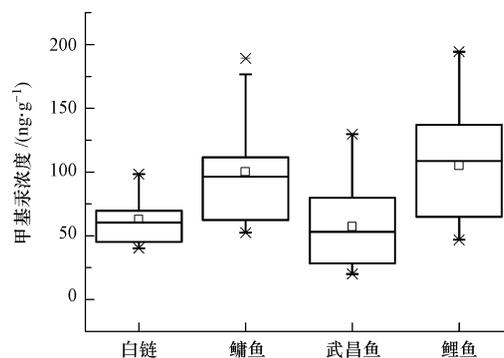


图 2 小浪底水库各种鱼体甲基汞含量

Fig. 2 Methylmercury concentrations in the muscle tissue of fish species in Xiaolangdi Reservoir

对比国内相关研究(表 2)可知,小浪底水库中鱼体甲基汞浓度明显高于贵州地区水库、湖泊鱼体的甲基汞浓度. 贵州地区水库湖泊偏碱性的环境条件和较低的有机质含量被认为可能是造成该区域水库低甲基汞含量的原因^[9-10]. 这些环境条件对于小浪底水库汞的甲基化和生物富集有何影响,尚有待进一步的研究.

2.3 总汞与甲基汞含量的关系

本研究中,鱼体甲基汞占总汞比例的平均值为 $(82.5 \pm 9.3)\%$ (表 3),其中武昌鱼比例最低,为 $(71.4 \pm 20.0)\%$,鲤鱼比例最高,为 $(94.8 \pm 13.9)\%$,与国外的研究结果(该比例为 90% 左右^[25-26])一致.对总汞和甲基汞浓度的相关性(相关性由 Pearson 值表示,该值的绝对值小于等于 1,绝对值越接近 1 相关性越大,正值代表正相关,负值表示负相关)分析发现,鱼体总汞浓度与甲基汞浓度存在显著的正相关性(其中白鲢在 $P < 0.05$ 情况下 Pearson 相关系数为 0.883,鳊鱼、武昌鱼、鲤鱼在 $P < 0.01$ 情况下 Pearson 相关系数分别为 0.806、0.836、0.922),可以使用鱼体总汞浓度来对甲基汞的浓度进行估算.

表 3 小浪底水库各种鱼甲基汞总汞质量比

Table 3 Ratios of methylmercury / total mercury in muscle tissues of fish species in Xiaolangdi Reservoir						
	白鲢	武昌鱼	鳊鱼	鲤鱼	银鱼	黄颡鱼
(甲基汞/总汞)/%	89.0 ± 15.9	71.4 ± 20.0	86.3 ± 20.2	94.8 ± 13.9	80.8 ± 19.7	72.4 ± 24.4

2.4 总汞、甲基汞与鱼体尺寸和体重的关系

利用 SPSS 软件对每种鱼的总汞、甲基汞与鱼体体长、体重进行了相关性分析.结果表明,只有鳊鱼肌肉组织的总汞、甲基汞含量与其体长、体重呈显著的正相关性(图 3),其他几种鱼肌肉组织的总汞、甲基汞含量与其体长、体重的相关性不显著($P > 0.05$).

Peterson 等^[14]对美国整个西部地区河流、溪流鱼体汞含量与鱼体长度的统计分析发现,鱼体汞含量一般随鱼体长度增加而升高,对于不同种类的鱼而言,这种相关性有所不同,肉食性鱼汞含量与体长的相关性高于非肉食性鱼,对于部分非肉食性鱼而言,这种相关性极弱.本研究所获样品主要为野生鱼类,也不能排除个别来自于库区养殖网箱的漏网之鱼,养殖鱼较野生鱼具有更高的生长速度,由此产生的“生长稀释”^[27-30]现象或许对上述鱼体尺寸与汞含量的相关性造成了干扰.

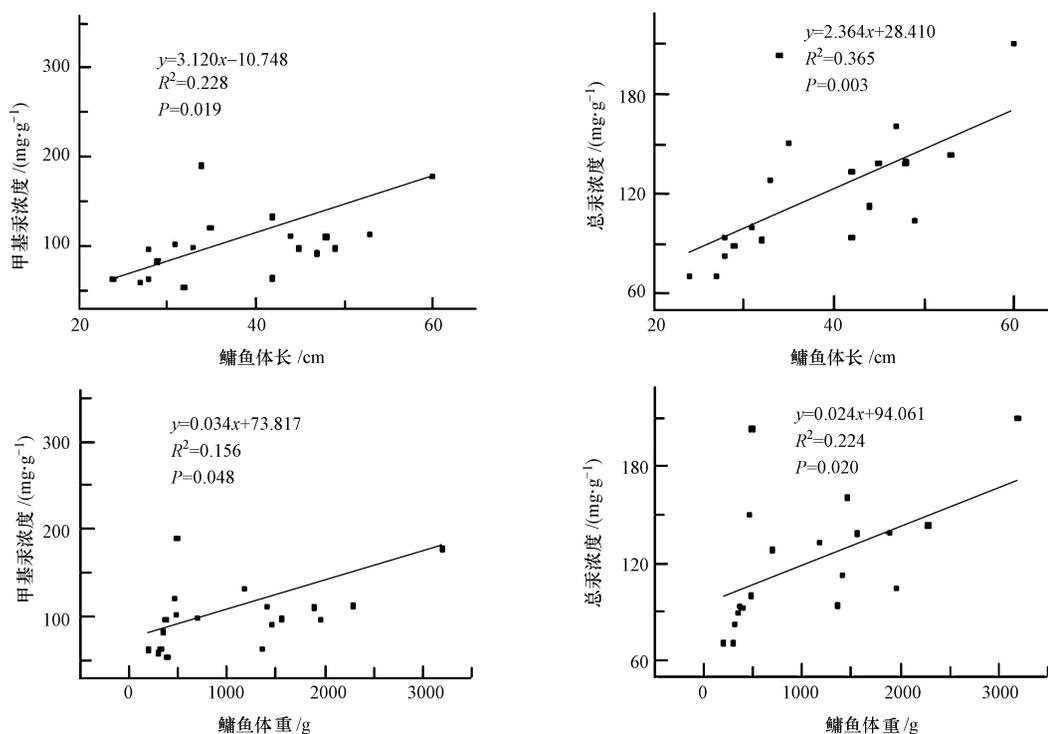


图 3 鳊鱼肌肉组织总汞、甲基汞浓度与其体长、体重的相关性

Fig. 3 Correlation of fish length/weight and concentration of THg/MeHg in the muscle tissue of bighead carp

2.5 食用风险评价

许多国家和组织都进行了甲基汞摄入限值研究,其中常用的有两个,一是世界卫生组织(WHO)和联合国粮食与农业组织(FAO)联合建立的甲基汞周可摄入量(PTWI),另一个是美国环境保护署

(USEPA)建立的甲基汞参考摄入量(RfD). 本文参考 USEPA 建立的甲基汞参考摄入量(RfD): $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[5],以人体平均体重 60 kg 计算,小浪底常见鱼类每人每天的食用限值分别为:白鲢 96 g,鳙鱼 60 g,武昌鱼 100 g,鲤鱼 57 g,银鱼 132 g,黄颡鱼 66 g. 建议敏感人群(孕妇、幼儿、哺乳期妇女等)限制小浪底水库中鳙鱼、鲤鱼和黄颡鱼的食用量和食用频率.

3 结论

本文分析了小浪底水库常见 6 种鱼肌肉组织总汞、甲基汞的浓度,小浪底水库鱼体总汞平均含量为 $(99.2 \pm 42.6) \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,变化范围为 31.6—210 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 甲基汞的平均含量为 $(83.6 \pm 42.1) \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,变化范围为 20.0—194 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$;甲基汞占总汞比例平均值为 $(82.5 \pm 9.3)\%$,鱼体肌肉总汞、甲基汞含量均低于我国食品中污染物限量标准.

肉食性的黄颡鱼和以浮游动物为食的鳙鱼总汞含量显著高于植食性的白鲢和武昌鱼,杂食性的鲤鱼肌肉组织中总汞则介于二者之间. 除鳙鱼肌肉组织中总汞、甲基汞含量与体长、体重呈显著的正相关外,其他鱼的总汞、甲基汞与体长、体重的相关性均不显著. 参考 USEPA 建立的甲基汞参考摄入量,小浪底水库鱼体肌肉日可食用限值在 57—132 g 之间. 建议敏感人群限制小浪底水库中鳙鱼、鲤鱼和黄颡鱼的食用量和食用频率.

参 考 文 献

- [1] Myers G J, Davidson P W, Cox C, et al. Prenatal methylmercury exposure from ocean fish consumption in the Seychelles child development study[J]. *The Lancet*, 2003: 1686-1692
- [2] 王夔. 生命科学中的微量元素(第 2 版)[M]. 北京:中国计量出版社,1996: 894-921
- [3] Câmara V M, Tavares L M B, Filhote M I F, et al. A program for the control of indoor pollution by metallic mercury[J]. *Environmental Research*, 2000, 83 (2): 110-116
- [4] US EPA. Water Quality Criterion for the Protection of Human Health: Methylmercury [R]. US: Environmental Protection Agency, Washington, 2001
- [5] Schober S E, Sinks T H, Jones R L, et al. Blood mercury levels in US children and women of childbearing age, 1990—2000[J]. *Journal of The American Medical Association*, 2003, 289 (13): 1667-1674
- [6] National Research Council(NRC). Toxicological Effects of Methylmercury[M]. Washington: National Academy Press, 2000
- [7] Brigham M E, Krabbenhoft D P, Olson M L, et al. Methylmercury in flood-control impoundments and natural waters of northwestern Minnesota, 1997-99[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 138 (1/4): 61-78
- [8] Montgomery S, Lucotte M, Rheault I. Temporal and spatial influences of flooding on dissolved mercury in boreal reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 260 (1/3): 147-157
- [9] 姚珩,冯新斌,闫海鱼,等. 乌江洪家渡水库鱼体汞含量[J]. *生态学杂志*, 2010, 29 (6): 1155-1160
- [10] 闫海鱼,冯新斌,商立海,等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1357-1361
- [11] 何天容. 贵州红枫湖汞的生物地球化学循环[D]. 贵州:中国科学院研究生院(地球化学研究所)博士学位论文,2007
- [12] 中华人民共和国标准 GB2762—2012. 食品中污染物限量[S]. 2012
- [13] Bloom N S. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, 49 (5): 1010-1017
- [14] Peterson S A, Van Sickle J, Herlihy A T, et al. Mercury concentration in fish from streams and rivers throughout the western United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (1): 58-65
- [15] 靳立军,徐小清. 三峡库区地表水和鱼体中甲基汞含量的分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 1997, 6 (4): 324-328
- [16] 王文义. 三峡库区蓄水前重庆段鱼类中重金属含量水平调查[J]. *水资源保护*, 2008, 24 (5): 34-37
- [17] 范丽丽,傅春玲,丁薇薇. 苏州地产水生蔬菜和太湖水产品总汞含量分析[J]. *食品科学*, 2012, 33(12): 273-275
- [18] 苏秋克,祈士华,蒋敬业. 武汉市城市湖泊汞的迁移与富集[J]. *水资源保护*, 2007, 23(3): 44-47
- [19] 谭东立,牟振波,赵吉伟,等. 松花江流域渔业生态环境汞污染现状评价[J]. *环境保护科学*, 2011, 37(1): 66-69
- [20] 张磊,王超起,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
- [21] Da Silva D S, Lucotte M, Roulet M, et al. Trophic structure and bioaccumulation of mercury in fish of three natural lakes of the Brazilian Amazon[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 165 (1/4): 77-94
- [22] Stahl L L, Snyder B D, Olsen A R, et al. Contaminants in fish tissue from US lakes and reservoirs: A national probabilistic study[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 150 (1/4): 3-19

- [23] Kinghorn A, Solomon P, Chan H M. Temporal and spatial trends of mercury in fish collected in the English-Wabigoon river system in Ontario, Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 372 (2): 615-623
- [24] WHO. Guideline levels for methylmercury in fish[S]. CAC/GL7-1991, 1991
- [25] Allen-Gil S M, Gilroy D J, Curtis L R. An ecoregion approach to mercury bioaccumulation by fish in reservoirs[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1995, 28 (1): 61-68
- [26] Grieb T M, Bowie G L, Driscoll C T, et al. Factors affecting mercury accumulation in fish in the upper Michigan peninsula[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, 9 (7): 919-930
- [27] Cheng H and Hu Y. Understanding the paradox of mercury pollution in China: High concentrations in environmental matrix yet low levels in fish on the market[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46 (9): 4695-4696
- [28] Desta Z, Borgström R, Rosseland B O, et al. Lower than expected mercury concentration in piscivorous African sharptooth catfish *Clarias gariepinus* (Burchell) [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 376 (1): 134-142
- [29] Evans M S, Lockhart W L, Doetzel L, et al. Elevated mercury concentrations in fish in lakes in the Mackenzie River Basin: The role of physical, chemical, and biological factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 351: 479-500
- [30] Luoma S N, Rainbow P S. Why is metal bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39 (7): 1921-1931

Mercury contents in the muscle tissue of fish species in Xiaolangdi Reservoir

SUO Qianshan MAO Yuxiang* ZHANG Feipeng CUI Ying

(Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454000, China)

ABSTRACT

Six fish species were sampled from Xiaolangdi Reservoir, a newly built reservoir located in Henan Province. Total mercury (THg) and methylmercury (MeHg) contents in the fish muscle tissues were determined using acid digestion-purge and trap-cold vapor atomic fluorescence spectrometry (CVAFS) and KOH/methanol digestion-aqueous phase ethylation-purge and trap-gas chromatography-CVAFS methods, respectively. THg in the fish muscle tissues varied from 31.6 ng·g⁻¹ to 210 ng·g⁻¹ (average (99.2 ± 42.6) ng·g⁻¹), and MeHg varied from 20.0 ng·g⁻¹ to 194 ng·g⁻¹ (average (83.6 ± 42.1) ng·g⁻¹). Piscivores and omnivores had higher Hg contents than herbivores. Mercury contents in bighead carp significantly correlated with fish size, however, this correlation was not significant for all the other fish species ($P > 0.05$). Mercury contents in the muscle tissue of fish samples met the requirement of Chinese National Standard-Maximum Levels of Contaminants in Foods (GB2762—2012). However, they were relatively high in comparison to previously studies in other geographic regions. Thus it was suggested that sensitive populations should pay attention to the consumption amount of fish species including bighead, carp and yellow-head catfish.

Keywords: Xiaolangdi Reservoir, fish, mercury, methylmercury, health risk.