

# 乌江洪家渡水库鱼体汞含量<sup>\*</sup>

姚珩<sup>1,2</sup> 冯新斌<sup>1\*\*</sup> 闫海鱼<sup>1</sup> 仇广乐<sup>1</sup> 商立海<sup>1</sup> 侍文芳<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; <sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 测定了贵州省乌江流域新建的洪家渡水库中的 8 种 124 尾鱼类的总汞和甲基汞含量, 探讨其变化趋势及可能产生的生态风险。总汞采用混合酸消解用冷原子荧光 (CVAFS) 测定, 甲基汞的测定采用碱消解水相乙基化结合气相色谱 (GC) 冷原子荧光 (CVAFS) 测定。结果表明, 总汞和甲基汞含量均为肉食性鱼类 > 杂食性鱼类, 鱼体汞含量与它们的生态学特性 (食物来源和生活习性) 有关, 与体重和体长无显著相关关系; 鱼体总汞和甲基汞含量均值分别为  $0.063 \pm 0.046$  和  $0.028 \pm 0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均远低于大部分研究报道的新建水库中鱼体汞含量 ( $> 0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。洪家渡水库鱼类由于在低汞环境中, 导致甲基汞不易富集, 其鱼体甲基汞和总汞含量并未急剧增加, 显著不同于北美和欧洲等地区新建水库中鱼体汞含量升高的现象, 但随着水库演化导致水库有机质增加可能使鱼体汞逐步上升。

**关键词** 鱼; 总汞; 甲基汞; 洪家渡水库

**中图分类号** S965 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)6-1155-06

Mercury concentration in fish body in Hongjiadu Reservoir of Guizhou Province. YAO Heng<sup>2</sup>, FENG Xinbin<sup>1</sup>, YAN Haiyu<sup>1</sup>, QIU Guangle<sup>1</sup>, SHANG Lihai<sup>1</sup>, SHI Wenfang<sup>2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). Chinese Journal of Ecology 2010 29(6): 1155-1160

**Abstract** Aimed to approach the possible ecological risk of fish mercury from Hongjiadu Reservoir, a newly built reservoir located in Wujiang River Basin of Guizhou Province, a total of 124 fishes belonging to 8 species were collected, with their total mercury (THG) and total methylmercury (TMtHg) concentrations measured. The THG was measured with cold vapor atomic fluorescence spectrometry (CVAFS), and the TMtHg was analyzed by digesting the samples with 20% KOH, GC separation, and CVAFS detection. The results showed that carnivorous species had higher THG and TMtHg concentrations than omnivorous species. The average concentrations of THG and TMtHg in the fishes were  $0.063 \pm 0.046 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $0.028 \pm 0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. There were no significant linear relationships between the THG and TMtHg concentrations and fish body length or weight. The Hg concentrations in fish body were related to the feeding habits and habitat preference of the fishes. The Hg concentrations in Hongjiadu Reservoir were lower than those in the newly built reservoirs in North America and Europe. Our results suggested that the TMtHg and THG concentrations in the fishes in Hongjiadu Reservoir did not have a dramatic increase, but with the evolution of the newly built reservoir, the TMtHg concentrations in the fishes could be increased gradually due to the increase of organic matter concentration in the reservoir.

**Key words** fish; total mercury; methylmercury; Hongjiadu Reservoir

\* 国家自然科学基金项目 (40532014) 和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX3 SW-443)。

\*\* 通讯作者 E-mail: fengxinbin@vip.skl.ecg.cn

收稿日期: 2009-11-30; 接受日期: 2010-02-06

环境中的汞及其化合物对人类和动物都具有极强的毒性,尤其甲基汞通过血脑屏障和胎盘,引起中枢神经系统的永久性损伤和胎儿水俣病(WHQ 1990, ATSDR 1997)。大量研究证实,甲基汞可通过水生食物链富集放大,最终通过水产品的摄入对人类健康造成威胁。除了职业汞暴露外,食用水产品是非职业人群汞暴露的主要方式之一。目前,鱼类被认为是人类汞(特别是甲基汞)暴露的主要途径(USEPA 1997b)。20世纪50年代日本“水俣病”事件(Eto 1997)、70年代我国第二松花江食鱼引起汞中毒事件(刘永懋等,1998)、以及20世纪80年代以来欧洲和北美偏远地区数千湖泊鱼体甲基汞浓度远远超过了世界卫生组织建议的食用水产品汞含量标准( $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的现象(Verdon et al., 1991; Driscoll et al., 1994; Porvari 1998; Schetagne et al., 1999)引起了各国科学工作者对水生生态系统中汞的生物地球化学循环研究的高度重视。

研究显示,在新修建的水库中鱼体汞含量会在水库修建后的3年内急速上升,有的甚至会持续20年(Kelly et al., 1997; Lucotte et al., 1999; St. Louis et al., 2004)。对乌江流域多个老水库中鱼体汞含量的研究发现,无论是受汞污染的,还是未受汞污染的水库,鱼体汞含量均未超过 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (蒋红梅, 2005; 何天容, 2007; 闫海鱼等, 2008)。而徐小清等(1999)的研究显示,长江三峡存在着鱼体汞升高的可能性。目前,我国已修建了数千座大型水库,随着清洁能源的推广使用,新建的水库仍然会增加,这对区域或更大尺度范围内的环境可能产生巨大的影响。但国内对新建水库鱼体汞变化及其生态风险的研究尚未见报导。

乌江是长江上游南岸最大的支流,洪家渡水库是乌江干流梯级电站中第一级的龙头水库,地理位

置特殊,污染物来源少,能够充分体现新建水库演化的特点。本文测定了洪家渡水库鱼体的总汞和甲基汞含量,以了解乌江流域新建水库鱼类汞的变化趋势及存在的生态风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

洪家渡水电站是乌江干流梯级电站中第一级的多年调节水库,建于2004年,水库总库容49.47亿 $\text{m}^3$ ,最高水位1140 m,最低水位1076 m。水库属于高坝峡谷型水库,周边没有直接的工业污染或地方性汞来源。

于2008年6月对洪家渡水库进行鱼样采集,鱼类为自然放养或野生类,共计8种124个样本,所采集的鱼种类、食性、采集数量和体重量体长如表1所示。

样品采集后立即带回实验室,记录每条鱼样的体长和体重,同时用解剖刀将鱼除鳞、洗净后,取背脊侧线上方肌肉10~20 g装入袋中冰冻保存( $-18^\circ\text{C}$ )备用。

### 1.2 样品处理

总汞测定时称取0.5000~1.000 g鲜鱼样品(TORT-2标准鱼样取0.1000~0.2000 g)于25 ml硼硅玻璃比色管中,同时带5%的空白样品,加入优级纯 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 和浓 $\text{HNO}_3$ 的混合酸10 ml( $v/v=3:7$ ),比色管口盖上玻璃球,然后在水浴锅中加热到 $95^\circ\text{C}$ 消解2~3 h,冷却后加入0.5% BCl<sub>3</sub>溶液,约24 h后再加2~3滴25%  $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 溶液还原残余的BCl<sub>3</sub>并用超纯水定容(阎海鱼等,2005a)。样品的预富集和测定方法如下:取0.06 ml 40%  $\text{SnCl}_2$ 溶液和鱼样消解液1.0 ml,加入到气泡瓶金管预富集系统,以300~400  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 流速通纯氮气30 min,将反应产生的汞吹捕富集到金管,然后连

表 1 洪家渡水库各种鱼类的基本参数

Tab 1 Basic Parameters of fish Species in Hongjiadu Reservoir

名称	数量 (尾)	体重 ( $\text{kg}$ )		体长 ( $\text{cm}$ )		食性
		范围	平均值	范围	平均值	
鲶鱼 ( <i>Pangasius asotus</i> )	5	0.63~19.00	9.1±6.8	45~95	71±18	肉食性
马口鱼 ( <i>Opsariichthys bidens</i> )	7	0.020~0.090	0.048±0.027	13~18	15±2.1	肉食性
鲈鱼 ( <i>Lateolabrax japonicus</i> )	9	0.28~0.93	0.47±0.19	25~40	30±4.3	肉食性
鲤鱼 ( <i>Cyprinus carpio</i> )	55	0.44~3.60	1.20±0.61	26~50	34±5.2	杂食性
鲫鱼 ( <i>Carassius auratus</i> )	28	0.08~0.38	0.21±0.08	14~23	29±18	杂食性
餐鲦 ( <i>Hemiculter leuciculis</i> )	13	0.07~0.13	0.10±0.02	15~19	17±1.2	杂食性
小口白甲鱼 ( <i>Varicorhinus luhii</i> )	4	0.40~0.66	0.56±0.12	25~33	29±3.7	杂食性
泥鳅 ( <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> )	3	0.003~0.014	0.0077±0.003	9.0~14.0	12.0±4.8	杂食性

体重和体长数据为平均值±标准差。

接金管至热解系统 CVAFS(Tekran2500 加拿大)测定 (阎海鱼等, 2005 a)。

鱼体甲基汞的测定采用碱消解 水相乙基化结合气相色谱 (GC)冷原子荧光 (CVAFS)测定, 操作如下: 准确称量 0.5000 ~1.000 鲜鱼样品 (TORT-2 标准鱼样取 0.1000 ~0.2000 g)到 25 ml 的 Teflon 消化罐中, 加 5 ml 浓度为 20 g·L<sup>-1</sup> 的 KOH 溶液, 在水浴锅中 75 °C 加热约 3 h 然后用超纯水定容到 25 ml, 摇匀后采用气相色谱分离冷原子荧光光谱法 (GC-CVAFS)测定 (阎海鱼等, 2005 b)。

1.3 质量控制

以加拿大国家研究委员会 (NRCC) 研制的标准参考物质干鱼样 (NRCC-TORT-2), 作为分析方法的质量控制, 同时样品测定时分别带 5% 空白样品及 10% 的平行样品。总汞测定方法的最低检出限为 0.013 ng·g<sup>-1</sup>, 甲基汞测定方法的最低检出限为 0.002 ng·g<sup>-1</sup> (阎海鱼等, 2005 a, 2005 b)。参考物质 TORT-2 实验测量值与标准值吻合很好, 结果见表 2。

1.4 数据处理

数据经 Microsoft Excel 2003 进行平均值和标准差计算处理后, 使用 Origin 8.0 软件绘图。采用 SPSS 13.0 软件进行 Pearson 相关分析, 以及对不同鱼种总汞进行多因素方差分析 (way ANOVA), 显著性检验水平为 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 不同鱼种的总汞分布特征

洪家渡水库采集鱼种类型相对较少, 鲤鱼为优势鱼种。对 3 尾以上的鱼种进行分析发现, 鱼种的生态学特性明显影响其总汞含量 (图 1)。肉食性鱼 (鲢鱼、鲈鱼、马口鱼) 中的总汞含量为 0.029 ~

0.190 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均为 0.130 ± 0.049 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中鲢鱼的总汞含量平均为 0.150 ± 0.025 mg·kg<sup>-1</sup>, 鲈鱼平均含量为 0.140 ± 0.042 mg·kg<sup>-1</sup>, 马口鱼平均含量为 0.089 ± 0.053 mg·kg<sup>-1</sup>。杂食性鱼 (鲫鱼、餐鲦、小口白甲鱼、鲤鱼、泥鳅) 的总汞含量介于 0.011 ~ 0.190 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均为 0.054 ± 0.039 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中鲫鱼总汞含量平均为 0.100 ± 0.039 mg·kg<sup>-1</sup>, 鲤鱼总汞含量平均为 0.032 ± 0.012 mg·kg<sup>-1</sup>, 泥鳅的总汞平均值为 0.025 ± 0.013 mg·kg<sup>-1</sup>。以上结果显示, 肉食性鱼类汞含量高于杂食性 (P < 0.05)。

由表 3 可见, 洪家渡水库鱼体总汞除马口鱼和小口白甲鱼和体长、鲤鱼与体重有相关关系, 多数鱼类和体长、体重无相关关系, 暗示了鱼的体长和体重可能不是影响乌江流域鱼体汞含量的主要因素。

2.2 不同鱼种的甲基汞分布特征及生态风险

由图 2 可见, 甲基汞含量为 0.001 ~ 0.090 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.028 ± 0.019 mg·kg<sup>-1</sup>; 数据表现为总汞高, 甲基汞含量也高, 呈极显著正相关关系 (r = 0.87, P < 0.0001)。洪家渡水库鱼体甲基汞含

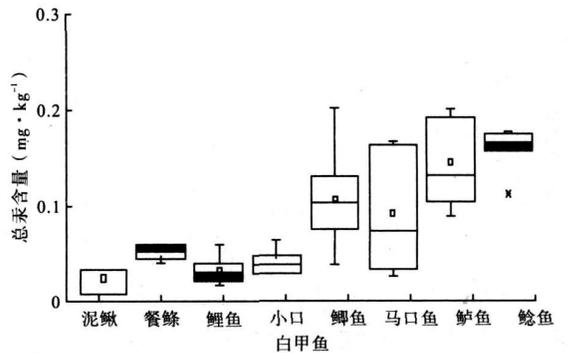


图 1 洪家渡水库不同鱼类总汞含量  
Fig 1 Total Hg concentrations in different fish tissue from Hongjiadu Reservoir

表 2 标准参考物质和空白测定结果统计  
Tab 2 Results of standard reference materials and blank samples determined

平行	总汞		甲基汞	
	TORT-2 (μg·g <sup>-1</sup> )	空白 (pg)	TORT-2 (μg·g <sup>-1</sup> )	空白 (pg)
1	0.276	3.4	0.147	0
2	0.268	3.6	0.153	0
3	0.281	3.8	0.156	0
4	0.274	4.0	0.149	0
5	0.283	4.3	0.140	0
标准值	0.27 ± 0.06		0.152 ± 0.013	
标准偏差	0.006	0.24	0.006	0

表 3 鱼体总汞与体长、体重之间的 Pearson 相关系数  
Tab 3 Pearson's correlation coefficients between the total Hg content in fish and body length weight

鱼种	n	体长	体重
鲢鱼	5	-0.628	-0.692
马口鱼	7	0.906**	0.500
鲈鱼	9	0.518	0.557
鲤鱼	55	-0.251	-0.283*
鲫鱼	28	-0.102	0.034
餐鲦	13	0.002	-0.210
小口白甲鱼	4	0.951*	0.889

\* P < 0.05 \*\* P < 0.01

量远低于世界卫生组织规定的食用鱼甲基汞含量 ( $0.500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和我国食品中污染物限量标准 (GB 2762-2005) 规定的汞含量安全限值 (肉食鱼为  $1.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (WHO 1990)。另外, 分析发现洪家渡鱼体甲基汞占总汞比例较低, 为  $19.9\% \sim 62.7\%$ , 平均值为  $37.6\% \pm 11.2\%$ ; 对不同类型的鱼而言, 鱼体甲基汞占总汞的比例差异明显 (图 3)。

许多国家和国际组织对甲基汞毒性与人体健康效应之间的关系开展了深入的研究, 并设立了甲基汞暴露健康风险评价指标, 本文采用世界卫生组织 (WHO) 和联合国粮食与农业组织 (FAO) 联合制定的甲基汞临时性每周可承受摄入量 (Provisional tolerable weekly intake PTWI) 作为甲基汞暴露定量衡量指标, 按照人的平均体重  $60 \text{ kg}$  即每周可承受的甲基汞摄入量为  $1.6 \mu \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (JECFA 2004), 对洪家渡水库鱼体甲基汞对人体的暴露风险进行了初步评估。洪家渡水库各种鱼体甲基汞含量变化范围为  $0.001 \sim 0.090 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 每人每天食鱼量为  $120 \text{ g}$

计算出每周甲基汞摄入量为  $0.010 \sim 1.300 \mu \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在每周可承受摄入量的安全范围内。

### 3 讨论

本研究中, 肉食性鱼类平均总汞含量为 ( $0.130 \pm 0.049$ )  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比水体汞含量 ( $1.400 \pm 1.100$ )  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$  高出近 10 万倍 (姚珩等, 2008), 说明了肉食性鱼类在低汞水生环境中对汞的高富集能力的现象。与同一流域的其他老水库中鱼类的总汞含量相比, 洪家渡水库和老水库鱼类总汞含量偏低。蒋红梅等 (2005) 分析了库龄较长的乌江渡水库 (建于 1979 年) 鱼体汞, 发现鱼样总汞平均含量为  $0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (变化范围在  $0.010 \sim 0.140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 闫海鱼等 (2008) 测定了百花湖鱼样, 总汞平均含量为  $0.028 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (变化范围在  $0.004 \sim 0.140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 何天容等 (2007) 对红枫湖水库鱼体总汞进行分析, 含量为  $0.032 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (变化范围在  $0.0032 \sim 0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。这是由于所采集的新老水库优势种多为草食性和杂食性鱼类, 生长速度快, 鱼龄较小, 对汞的富集较少。

将乌江流域鱼体汞的研究结果与北美和欧洲等地区的研究结果相比, 如: 加拿大魁北克北部水库水体总汞含量为 ( $1.510 \pm 0.060$ )  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 鱼汞含量高达  $0.300 \sim 1.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Lucotte et al., 1999; Bodař et al., 2007); 芬兰北部水库的鱼汞含量为  $0.030 \sim 2.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Lodenius et al., 1983); 美国一些远离汞污染源的偏远湖泊中, 某些鱼汞含量也远远超过了世界卫生组织建议的食用水产品汞含量标准  $0.500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Driscoll et al., 1994), 发现, 在水体汞含量很低的情况下, 北美和欧洲鱼汞的含量普遍偏高, 与贵州乌江流域鱼体汞含量偏低明显不同, 新建水库并没有导致库内鱼体汞的迅速上升。首先可能与所处的水体环境有关, 在北美和欧洲新建水库水体 pH 值偏酸性 (变化范围为  $5.2 \sim 7.6$ ) 建库时淹没了大量的原始森林导致土壤有机质含量较高 ( $30\% \sim 50\%$ ), 其有机质分解促进了汞的甲基化, 使鱼体汞含量迅速上升 (Therriault & Schneider 1998; Lucotte et al., 1999)。而贵州乌江流域洪家渡水库与此刚好相反, 水体呈中性偏碱性 ( $6.8 \sim 8.9$ ) 建库时主要淹没了大量的农业土壤, 有机质含量极低 ( $2.6\% \sim 3.3\%$ ), 不利于汞的甲基化 (姚珩等, 2008)。其次, 大量研究表明 (Evans et al., 2005; Kinghorn et al., 2007; Tuomola et al.,

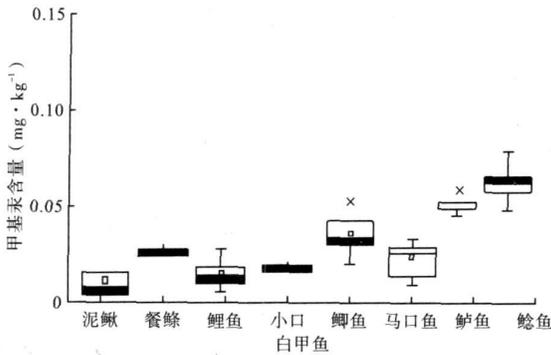


图 2 洪家渡水库不同鱼类甲基汞含量  
Fig. 2 Total MeHg concentrations in different fish tissue from Hongjiadu Reservoir

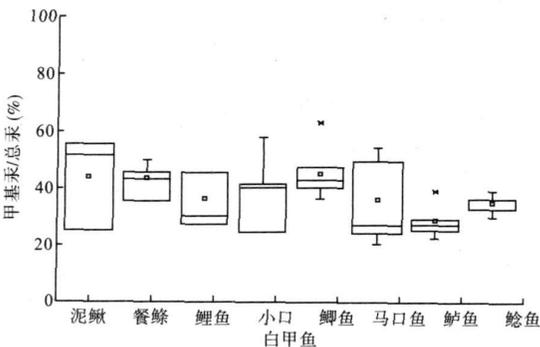


图 3 洪家渡水库不同鱼类甲基汞占总汞的百分比  
Fig. 3 Percentage of TMeHg to THg in different fish tissue from Hongjiadu Reservoir

2008) 鱼体的汞含量及分布特征主要与其种类、年龄、大小、长度等有关。将本研究中的洪家渡水库不同类型鱼汞含量, 分别与对应重量和长度进行相关分析发现, 所采集样本鱼体汞含量与鱼的重量和长度之间没有相关关系(表 3) 与 L 等(2009) 对同一流域鱼体汞的研究结果相同。路永正等(2008) 认为, 当鱼类生活的水体环境汞含量相同时, 它们的生态学特性可能是造成不同鱼种汞含量差异性的主要影响因素。由于洪家渡水库鱼体对汞的积累主要来源于食物, 因此与鱼类的食物来源和生活习性有关, 导致了鱼汞含量很低。

洪家渡鱼体甲基汞占总汞的比例较低的现象, 与大多数研究结果不同, 一般国外鱼体甲基汞占总汞比例在 90% 以上 (Khaniki et al., 2005; Scheuhammer et al., 2007), 造成鱼体甲基汞比率低的原因可能有以下几种情况: 1) 研究区位于喀斯特地区 (朱俊, 2005), 使洪家渡水体呈中性偏碱性, 而很多研究表明鱼体中汞含量和酸度成负相关关系 (Wren & MacCrimmon, 1983), 不利于汞的甲基化; 2) 洪家渡水库处于中营养状态, 总氮平均含量为  $5.200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 总磷平均含量为  $0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (喻元秀, 2008), 叶绿素平均含量为  $2.240 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 水体甲基汞含量为  $0.050 \sim 0.320 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 水体中 DOC 平均含量仅为  $1.200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (姚珩等, 2008)。以上这些环境条件使洪家渡水库水体环境不利于甲基汞富集, 导致鱼体汞浓度偏低, 相对甲基汞占总汞比例也偏低。而 Feng 等(2009) 对乌江流域研究发现高生产力的老水库沉积物有机质含量高, 使沉积物甲基化作用增强。因此, 随着水库的演化导致水库有机质增加可能使鱼体汞逐步上升。

## 参考文献

- 何天容. 2007. 贵州红枫湖汞的生物地球化学循环 (博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 蒋红梅. 2005. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响 (博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 刘永懋, 王稔华, 翟平阳. 1998. 中国松花江甲基汞污染防治与标准研究. 北京: 中国科学出版社.
- 路永正, 阎百兴, 李宏伟, 等. 2008. 松花江鱼类中汞含量的演变趋势及其生态风险评价. 农业环境科学学报, 27(6): 2430—2433.
- 徐小清, 张晓华, 靳立军, 等. 1999. 三峡水库汞活化效应对鱼汞含量影响的预测. 长江流域资源与环境, 8(2): 198—204.

- 闫海鱼, 冯新斌, 刘 霆, 等. 2008. 贵州百花湖鱼体汞污染现状. 生态学杂志, 27(8): 1357—1361.
- 阎海鱼, 冯新斌, 李仲根, 等. 2005<sup>a</sup>. 半封闭溶样冷原子荧光测定鱼体中总汞分析方法的建立. 地球与环境, 33(1): 89—92.
- 阎海鱼, 冯新斌, LIANG Lian 等. 2005<sup>b</sup>. GC-CVAFS 法测定鱼体内甲基汞的分析方法研究. 分析测试学报, 24(6): 78—80.
- 姚 珩, 冯新斌, 郭艳娜, 等. 2008. 乌江中上游新建水库水体甲基汞的时空分布. 长江流域资源与环境, 18(4): 344—349.
- 喻元秀. 2008. 乌江中上游梯级水电开发对河流碳循环的影响 (博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 朱 俊. 2005. 水坝拦截对乌江生源要素生物地球化学循环的影响 (博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances & Disease Registry). 1997. Toxicological Profile for Tetrachloroethylene (Update). Agency for Toxic Substance and Disease Registry.
- Bodaly RA, Jansen WA, Majewski AR, et al. 2007. Postimpoundment time course of increased mercury concentrations in fish in hydroelectric reservoirs of northern Manitoba, Canada. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 53: 379—389.
- Driscoll CT, Yan C, Scofield CL, et al. 1994. The mercury cycle and fish in Adirondack lakes. Environmental Science & Technology, 28: 136—143.
- Eto K. 1997. Pathology of Minamata disease. Toxicologic Pathology, 25: 614—623.
- Evans MS, Lockhart WL, Doetzel L, et al. 2005. Elevated mercury concentrations in fish in lakes in the Mackenzie River Basin: The role of physical, chemical and biological factors. Science of the Total Environment, 351—352: 479—500.
- Feng XB, Jiang HM, Qiu GL, et al. 2009. Geochemical processes of mercury in Wujiangdu and Dongfeng reservoirs, Guizhou, China. Environment Pollution, 157: 2970—2984.
- JECFA. 2004. Methylmercury // Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Report of the 61st Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Geneva: World Health Organization. International Programme on Chemical Safety. WHO Technical Report Series, 922: 132—139. [http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO\\_TRS\\_922.Pdf](http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_922.Pdf)
- Kelly CA, Rudd JWM, Bodaly RA, et al. 1997. Increases in fluxes of greenhouse gases and methylmercury following flooding of an experimental reservoir. Environmental Science & Technology, 31: 1334—1344.

- Khaniki GRJ, Alli J, Nowrozi E et al 2005 Mercury contamination in fish and public health aspects: A review. *Pakistan Journal of Nutrition* **4**: 276—281
- Kinghom A, Solomon P, Chan HM 2007 Temporal and spatial trends of mercury in fish collected in the English-Wabigoon river system in Ontario, Canada. *Science of the Total Environment* **372**: 615—623
- Li SX, Zhou IF, Wang HJ et al 2009 Feeding habits and habitats preferences affecting mercury bioaccumulation in 37 subtropical fish species from Wujiang River, China. *Ecotoxicology* **18**: 204—210
- Lodenius M, Seppänen A, Herranen M 1983 Accumulation of mercury in fish and man from reservoirs in Northern Finland. *Water, Air, and Soil Pollution* **19**: 237—246
- Lucotte M, Schetagne R, Therien N et al 1999 Mercury in the Biogeochemical Cycle. *Natural Environments and Hydroelectric Reservoirs of Northern Québec (Canada)*. New York: Springer
- Porvari P 1998 Development of fish mercury concentrations in Finnish reservoirs from 1979 to 1994. *Science of the Total Environment* **213**: 279—290
- Schetagne R 1999 Duration of post impoundment increases in fish mercury levels at the La Grande Complex, Quebec, Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **2293**: 46—47
- Scheuhammer AM, Meyer MW, Sandheinrich MB et al 2007 Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals and fish. *Ambio* **36**: 12—18
- St Louis VL, Rudd JW, Kelly CA et al 2004 The rise and fall of mercury methylation in an experimental reservoir. *Environmental Science & Technology* **38**: 1348—1358
- Therrien TW, Schneider DC 1998 Predicting change in fish mercury concentrations following reservoir impoundment. *Environmental Pollution* **101**: 33—42
- Tuomola L, Niklasson T, Silva EDE et al 2008 Fish mercury development in relation to abiotic characteristics and carbon sources in a 6-year-old Brazilian reservoir. *Science of the Total Environment* **390**: 177—187
- USEPA 1997b Mercury study report to Congress. Vol. III. Fate and transport of mercury in the environment. U.S. Environmental Protection Agency. EPA-452/R-97-005
- Verdon R, Brouard D, Demers C et al 1991 Mercury evolution (1978—1988) in fishes of the La Grande hydroelectric complex, Québec, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution* **56**: 405—417
- WHO 1990 Methylmercury in Environmental Health Criteria 101. Geneva: World Health Organization
- Wren CD, MacCrinnon HR 1983 Mercury levels in the sunfish relative to pH and other environmental variables of Precambrian shield lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **40**: 1737—1744

---

作者简介 姚珩, 女, 1982年生, 博士研究生, 主要从事环境地球化学研究。Email: yaoheng28@gmail.com  
责任编辑 魏中青

---