

梯级水库修建对乌江甲基汞分布的影响

郭艳娜^{1,2}, 冯新斌^{1*}, 闫海鱼¹, 何天容^{1,2}, 孟博^{1,2}, 张军方^{1,2}, 姚珩^{1,2}, 钱晓莉³

1. 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, 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 贵州大学资源与环境学院, 贵州 贵阳 550003

摘要: 采用蒸馏-乙基化结合(GC-CVAFS)法,测定了2006年乌江流域梯级水库系统入、出库河流甲基汞的含量,探讨了其分布特征和时空变化规律以及梯级水库修建对河流甲基汞分布的影响。结果表明:乌江流域梯级水库系统入库河流水体中 ρ (总甲基汞)和 ρ (溶解态甲基汞)分别为0.07~0.70和0.03~0.16 ng/L;出库河流水体中 ρ (总甲基汞)和 ρ (溶解态甲基汞)分别为0.10~0.34和0.04~0.26 ng/L。入库河流水体中 ρ (总甲基汞)与 ρ (悬浮物)有显著的正相关关系,并且丰水期高于枯水期;出库河流水体中 ρ (总甲基汞)在夏秋季节显著高于冬春季节。梯级水库的修建使乌江在多个河段的 ρ (甲基汞)升高,并且随着水库生态系统的不断演化,下游河流水体中 ρ (甲基汞)有升高的可能。

关键词: 乌江流域; 梯级水库; 甲基汞; 时空分布

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1001-6929(2008)02-0029-06

Effect of Construction of Cascade Reservoirs on the Distribution of Methylmercury in Wujiang River

GUO Yan-na^{1,2}, FENG Xin-bin¹, YAN Hai-yu¹, HE Tian-rong^{1,2}, MENG Bo^{1,2}, ZHANG Jun-fang^{1,2}, YAO Heng^{1,2}, QIAN Xiao-li³

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. College of Resources & Environment, Guizhou University, Guiyang 550003, China

Abstract: Methylmercury concentrations of inflows and outflows in cascade reservoirs in Wujiang River were determined by distillation-ethylation (GC-CVAFS) technique in 2006. The distribution and temporal and spatial variation of methylmercury were discussed. The results were as follows: ρ (total methylmercury) ranged from 0.07 to 0.70 ng/L and ρ (dissolved methylmercury) from 0.03 to 0.16 ng/L in inflows. In outflows ρ (total methylmercury) ranged from 0.10 to 0.34 ng/L and ρ (dissolved methylmercury) from 0.04 to 0.26 ng/L. The obvious positive relationship between ρ (total methylmercury) and ρ (total suspended matter) was found in inflows, and ρ (total methylmercury) in high flow was higher than that in low flow. ρ (total methylmercury) in outflows collected in summer and fall were significantly higher than those sampled in winter and spring. The ρ (methylmercury) increased at several sites below reservoir because of the construction of cascade reservoirs, therefore, it is possible that ρ (methylmercury) would increase dramatically with the development of reservoir.

Key words: Wujiang River; cascade reservoirs; methylmercury; temporal and spatial distribution

从 20 世纪 50 年代日本发生的水俣病到 80 年代北美和北欧偏远地区湖泊中鱼汞含量严重超标,具有强神经毒性的甲基汞受到了科学家们的高度重

视^[1-3]。已有的研究表明,水库是典型的“汞敏感生态系统”^[4-8],由于水库特殊的泄水方式(底层泄水),水库底部厌氧滞水层中的甲基汞会被释放到下游水体,从而影响下游河流甲基汞的分布^[9-10],但由于水库调蓄过程涉及到水文、物理沉积、生物吸持同化、氧化还原、沉积后活化更新等诸多因素,水库在河流物质输送过程中扮演的角色相当复杂,在不同的环境条件下对河流甲基汞输送的影响也不同^[11-12]。

能源的需求使我国水电开发迅猛发展,截至 2005 年底,我国在建的 30 m 以上坝高的水电站有

收稿日期: 2007-06-17 修订日期: 2007-09-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40532014); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3SW-443)

作者简介: 郭艳娜(1980-),女,山西孝义人,博士研究生,

ynguo@163.com.

* 责任作者, fengxinbin@vip.skleg.cn

173座^[13], 因此在我国研究水库对河流甲基汞分布的影响迫在眉睫. 乌江是长江上游南岸最大的支流, 按照西电东送工程的计划, 乌江干流将建成11个梯级水电站, 目前已蓄水的水库有6个, 是我国梯级水库系统的典型代表^[14]. 受测试分析技术的限制, 我国在天然水体中对甲基汞含量的研究起步较晚, 关于梯级水库修建对河流甲基汞传输影响的研究鲜见报道. 笔者研究了乌江流域不同演化阶段水库入、出库河流甲基汞的分布, 分析了总甲基汞、溶解态甲基汞的分布及时空变化规律, 探讨梯级水库修建对河流甲基汞分布的影响, 以更好地了解水库等大型水利设施建设对河流甲基汞分布、迁移的影响以及水库甲基汞的质量平衡.

1 材料与方法

1.1 乌江流域自然环境概况

乌江主要位于贵州喀斯特地区, 是我国沉积岩发育良好的地区之一, 流域内石灰土分布广泛, 土壤发育在碳酸盐岩母质上, 土壤类型有黄壤、黄棕壤、红壤、石灰岩土、紫色土和水稻土等. 上游植被以常绿阔叶林和旱地作物为主, 植被覆盖率为10%~14%; 中游植被以常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林

及落叶林为主, 植被覆盖率为5%~14%; 下游为典型的亚热带常绿栲林, 经济林以油桐和油茶为主, 植被覆盖率为14.5%~29.9%. 该地区属亚热带湿润季风气候, 气候温和, 雨量充沛.

1.2 采样点的布设及样品的采集

选取乌江流域已建成的6个梯级水库作为研究对象, 并根据库龄将这些水库划分为3个演化阶段. 位于乌江流域的中上游水库, 属典型的高坝、深水、峡谷型, 其基本特征见表1. 在各水库的入、出库河流(下泄水)布设采样点, 采样点的分布如图1所示. 2006年1—12月, 每月采集距水面20 cm深的表层水样, 为避免受到污染, 水样均在河流主流的逆流方向上采集. 将水样装在100 mL的硼硅玻璃瓶中, 现场加入400 μ L的超纯盐酸, 用于测定 ρ (总甲基汞); 用于测定 ρ (溶解态甲基汞)和 ρ (溶解有机碳)的样品装于800 mL的硼硅玻璃瓶中, 并在24 h内经0.45 μ m低空白微孔滤膜(Millipore)过滤后分装、保存. 所用硼硅玻璃瓶均经过严格的除汞程序处理. 用于测定 ρ (悬浮物)的水样装于1500 mL的塑料瓶中, 装样前所有采样瓶用样品水润洗3次. 样品带回实验室低温(0~4 $^{\circ}$ C)保存, 2周内测定完毕.

表1 水库的基本特征参数

Table 1 The basic parameters of each reservoir

参数	水库					
	洪家渡	引子渡	索风营	普定	东风	乌江渡
所在河流	六冲河	三岔河	乌江	三岔河	乌江	乌江
所在河流中的位置	上游	上游	中游	上游	上、中游	中游
总库容/ 10^8 m ³	49.47	4.55	2.01	4.2	10.25	23.00
正常蓄水位时水库面积/km ²	80.50	14.97	5.70	19.25	19.06	47.80
库龄/a	3	4	2	14	13	28
演化阶段	初级	初级	初级	中级	中级	高级

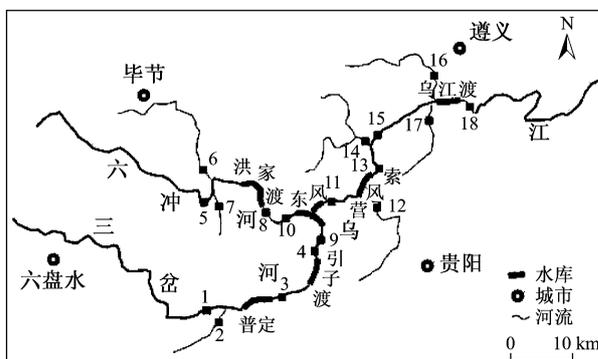


图1 采样点分布

Fig. 1 Location of the sampling sites

1.3 样品的分析

pH, ρ (溶解氧), 水温和电导率用便携式多参数水质仪(plONneer 65, 法国)现场测定; ρ (溶解有机碳)用高温催化氧化法测定, 所用仪器为德国生产的总有机碳分析仪(Elementar, High TOC \oplus), 检测限为0.2 mg/L; ρ (悬浮物)用重量法测定; ρ (总甲基汞)和 ρ (溶解态甲基汞)用蒸馏-乙基化结合(GC-CVAFS)法测定^[15], 该方法最低检出限为0.009 ng/L, ρ (颗粒态甲基汞)为 ρ (总甲基汞)与 ρ (溶解态甲基汞)的差值. 所有实验数据均在SPSS

2 结果与讨论

2.1 主要水质参数的分布

各采样点基本理化参数的分布见表 2。从表 2 可以看出, 乌江水体呈碱性, pH 年均值为 8.15 ± 0.36 , 全年无明显变化。ρ(溶解有机碳) 较低, 年均值为 $(0.91 \pm 0.42) \text{ mg/L}$, 低于我国长江及世界大多

数河流的平均水平^[16], 这与乌江所在的喀斯特环境有关^[17]。表层水温年均值为 $(18.30 \pm 5.12) \text{ }^\circ\text{C}$, 变化范围为 $8.3 \sim 30.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。ρ(溶解氧) 均在 8.0 mg/L 以上, 说明乌江流域河流水体含氧丰富, 复氧能力强。ρ(悬浮物) 年均值为 $(2.55 \pm 1.59) \text{ mg/L}$, 且丰水期高于枯水期。

表 2 基本理化参数的月分布状况

Table 2 Monthly variation of physical and chemical parameters

月份	pH	温度/ $^\circ\text{C}$	ρ(溶解氧)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ(溶解有机碳)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ(悬浮物)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	8.13 ± 0.16	11.60 ± 1.35	8.85 ± 0.54	0.77 ± 0.21	1.93 ± 0.79
2	8.32 ± 0.23	11.60 ± 0.81	8.68 ± 0.41	0.74 ± 0.29	1.71 ± 0.70
3	8.25 ± 0.23	14.10 ± 0.94	8.31 ± 0.41	0.82 ± 0.31	1.91 ± 0.92
4	8.59 ± 0.16	16.80 ± 3.32	8.46 ± 0.38	0.84 ± 0.32	2.44 ± 1.30
5	8.42 ± 0.27	19.50 ± 3.29	9.67 ± 1.08	1.13 ± 0.46	3.51 ± 2.05
6	8.08 ± 0.14	20.40 ± 2.92	9.18 ± 1.19	1.36 ± 0.57	3.71 ± 1.89
7	8.04 ± 0.36	25.20 ± 3.77	9.47 ± 1.13	1.25 ± 0.34	3.01 ± 1.32
8	8.10 ± 0.50	25.90 ± 3.13	9.06 ± 0.89	1.04 ± 0.42	1.71 ± 0.83
9	7.83 ± 0.29	21.40 ± 1.96	8.65 ± 0.84	0.90 ± 0.25	2.87 ± 1.51
10	8.05 ± 0.35	20.50 ± 1.64	8.23 ± 1.03	0.87 ± 0.31	3.54 ± 2.48
11	7.91 ± 0.32	18.00 ± 1.58	8.75 ± 0.92	0.78 ± 0.33	2.11 ± 1.06
12	8.08 ± 0.36	14.70 ± 1.63	8.93 ± 1.13	0.72 ± 0.43	2.20 ± 1.39
年均值	8.15 ± 0.36	18.30 ± 5.12	8.85 ± 0.96	0.91 ± 0.42	2.55 ± 1.59

2.2 梯级水库入、出库河流甲基汞的分布及季节变化

2.2.1 分布

2006 年全年的检测数据显示: 乌江流域 6 个梯级水库系统中, 入库河流水体中 ρ(总甲基汞) 的年均值为 $(0.14 \pm 0.06) \text{ ng/L}$, 变化范围为 $0.07 \sim 0.70 \text{ ng/L}$; 出库河流水体中 ρ(总甲基汞) 的年均值为 $(0.17 \pm 0.06) \text{ ng/L}$, 变化范围为 $0.10 \sim 0.34 \text{ ng/L}$ 。入、出库河流水体中 ρ(溶解态甲基汞) 的年均值分别为 (0.07 ± 0.03) 和 $(0.09 \pm 0.04) \text{ ng/L}$, 变化范围分

别为 $0.03 \sim 0.16$ 和 $0.04 \sim 0.26 \text{ ng/L}$, 分别占 ρ(总甲基汞) 的 48.4% 和 54.3%。从入库到出库, ρ(溶解态甲基汞) 所占比例有所增加。Schetagne 等^[11]的研究也认为, 从水库输出的甲基汞以溶解态为主(占 64%)。将乌江流域表层水中的 ρ(总甲基汞) 和 ρ(溶解态甲基汞) 与其他河流进行比较(见表 3), 总体来看, 乌江流域河流水体中 ρ(甲基汞) 与世界其他未受污染的河流基本相当, 只有局部略高, 且明显低于受污染的河流。

表 3 乌江流域表层水中 ρ(总甲基汞) 和 ρ(溶解态甲基汞) 与其他河流的比较

Table 3 Comparison of total and dissolved methylmercury mass concentrations in surface waters of Wujiang River with other values reported in recent literatures

河流, 国家	ρ(总甲基汞)/($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ(溶解态甲基汞)/($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)	研究时间	污染源状况
乌江流域, 中国	0.07~ 0.70	0.03~ 0.26	2006 年	无
Minnesota River, USA ^[18]	0.20~ 0.25	—	2001 年	无
Mississippi River, USA ^[18]	0.24~ 0.35	—	2002—2003 年	无
Savannah River, USA ^[19]	0.085	—	2000—2002 年	无
Pra River, Ghana ^[20]	枯水期	0.420	2002—2003 年	土法炼金
	丰水期	2.378		
Sacramento River, USA ^[21]	0.1	—	1995 年	汞矿开采
Carson River, USA ^[22]	尾矿上游	0.3~ 0.5	1994 年	汞矿开采
	尾矿下游	1.8~ 7.2		

2.2.2 季节变化

不同演化阶段水库入、出库河流水体中 ρ (总甲基汞) 的月变化如图 2 所示。图 2 表明, 4—10 月, 随着降雨量、降雨强度的增加, 更多的甲基汞随地表径流进入河流中, 使入库河流水体中的 ρ (总甲基汞) 高于其他月份。入库河流水体中 ρ (总甲基汞) 与 ρ (悬浮物) 呈正相关关系, Pearson 相关系数 $R = 0.470$ ($P < 0.001, n = 168$), 而且 ρ (总甲基汞) 和 ρ (颗粒态甲基汞) 之间存在显著正相关关系, Pearson 相关系数 $R = 0.932$ ($P < 0.001, n = 168$), 这表明河流侵蚀和地表径流带入水体的颗粒物是入库河流甲基汞的主要来源。出库河流的

总甲基汞主要来自水库底部泄水排出的甲基汞, 在夏秋季节(尤其是 7—9 月)显著高于冬春季节($P < 0.01, n = 18$), 主要是由于夏季和初秋季节水体温度升高, 水库水体发生热分层, 同时春季繁殖的藻类等浮游生物死亡下沉到水库底层并逐渐降解, 二者使底层水体严重缺氧, 形成了厌氧还原环境^[23]。这一方面为好氧—厌氧层界面无机汞的甲基化提供了有利条件^[22]; 另一方面使沉积物及其间隙水中的甲基汞向上覆水体扩散, 并使这些汞积聚在水库底层^[24], 当电站发电放水时, 底层富含甲基汞的水体就会流入到下游河流, 使出库河流水体中的 ρ (甲基汞) 在夏季明显升高。

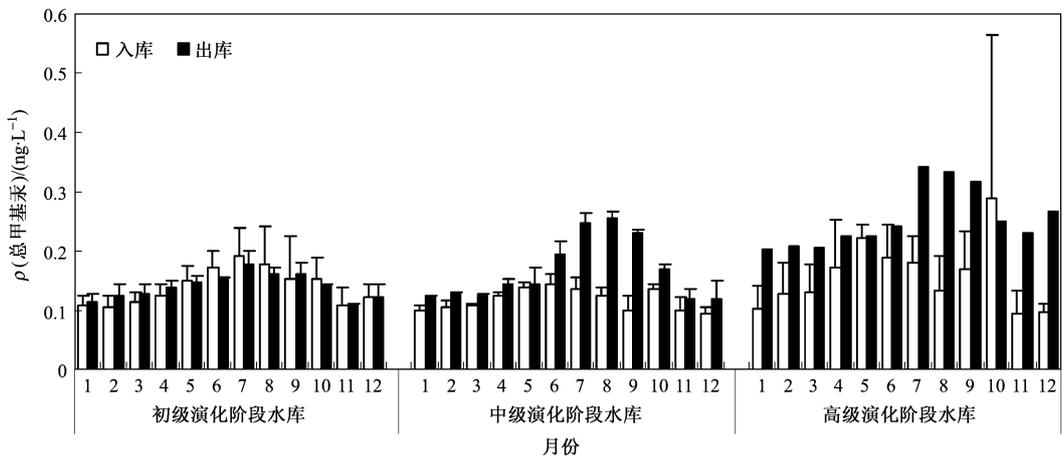


图 2 梯级水库入、出库河流 ρ (总甲基汞) 的月变化

Fig. 2 Monthly variation of total methylmercury mass concentrations of inflows and outflows in cascade reservoirs

不同演化阶段水库入、出库河流水体中 ρ (溶解态甲基汞) 的月变化如图 3 所示。从图 3 可以看出, 入库河流水体中 ρ (溶解态甲基汞) 的季节变化不明显, 而出库河流水体中 ρ (溶解态甲基汞)

的季节变化趋势与 ρ (总甲基汞) 一致, 表现为夏秋季节高于其他季节, 可能是由于在水库底层的厌氧还原环境中, 氧化还原敏感物质(如铁、锰氧化物)的还原溶解及有机物的降解使底层有机胶体态物质增

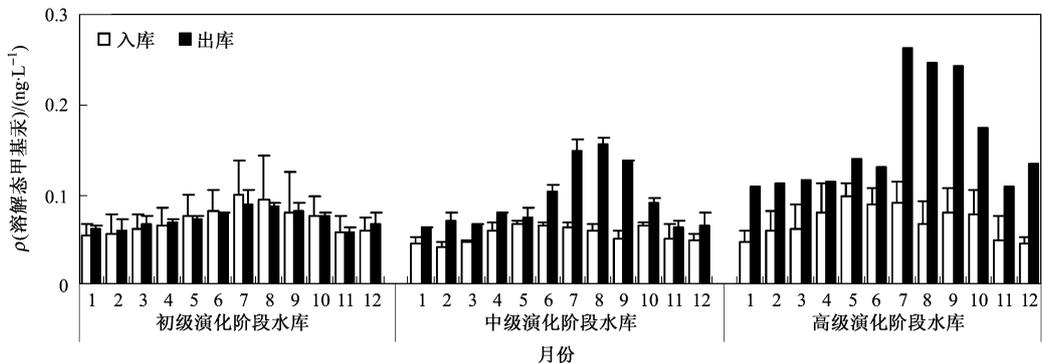


图 3 梯级水库入、出库河流 ρ (溶解态甲基汞) 的月变化

Fig. 3 Monthly variation of dissolved methylmercury mass concentrations of inflows and outflows

加. Choe 等^[25]的研究表明, 甲基汞容易与有机胶体物质结合, 而这些胶体物质的粒径大多小于 0.45 μm , 在用 0.45 μm 的滤膜过滤时进入溶解相中.

2.3 水库对乌江甲基汞分布的影响

从图 2, 3 可以看出, 对于不同演化阶段的水库, 随着库龄的增加, 出库河流水体中 ρ (总甲基汞) 和 ρ (溶解态甲基汞) 呈递增趋势. 方差分析与多重比较结果显示, 高级演化阶段水库出库河流水体中的 ρ (总甲基汞) 和 ρ (溶解态甲基汞) 显著高于初、中级演化阶段水库出库河流 ($P < 0.01, n = 18$), 说明随着水库生态系统的不断演化, 水库输出的甲基汞将增加, 水库的甲基化作用增强.

水库的修建改变了河流甲基汞的分布, 使下游

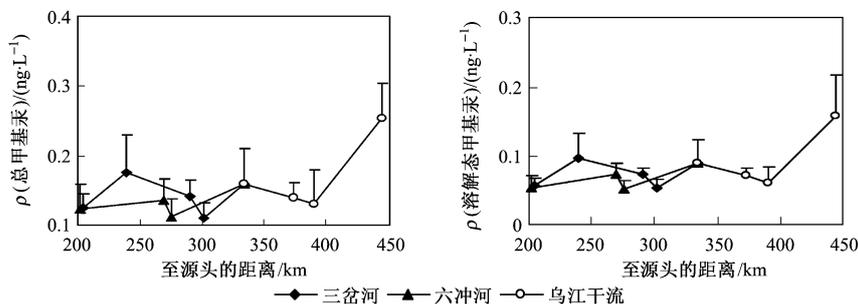


图 4 乌江 ρ (总甲基汞) 和 ρ (溶解态甲基汞) 的沿程分布

Fig. 4 The distribution of total and dissolved methylmercury mass concentrations along the Wujiang River

3 结论

a. 乌江流域梯级水库系统入库河流水体中 ρ (总甲基汞) 的年均值为 (0.14 ± 0.06) ng/L , 变化范围为 $0.07 \sim 0.70$ ng/L ; 出库河流水体中 ρ (总甲基汞) 的年均值为 (0.17 ± 0.06) ng/L , 变化范围为 $0.10 \sim 0.34$ ng/L . ρ (溶解态甲基汞) 在入、出库河流水体中的年均值分别为 (0.07 ± 0.03) 和 (0.09 ± 0.04) ng/L , 变化范围分别为 $0.03 \sim 0.16$ 和 $0.04 \sim 0.26$ ng/L .

b. 入库河流水体的 ρ (总甲基汞) 与 ρ (悬浮物) 有显著的正相关关系, 并且丰水期高于枯水期. 出库河流水体的 ρ (总甲基汞) 和 ρ (溶解态甲基汞) 在夏秋季节 (尤其是 7—9 月) 显著高于冬春季节, 入库河流水体的 ρ (溶解态甲基汞) 季节变化不明显.

c. 梯级水库的修建使乌江在多个河段的 ρ (甲基汞) 升高, 并且随着水库生态系统的不断演化, 水库输出的甲基汞将增加, 下游河流水体中 ρ (甲基汞) 有升高的可能.

一定范围内水体中的 ρ (甲基汞) 升高^[10, 26]. Canavan 等^[10]的研究发现, 在水库下游 22 km 的河流水体中 ρ (甲基汞) 依然很高. 乌江流域河流水体中 ρ (甲基汞) 年均值的沿程分布如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 梯级水库的修建使乌江在多个河段 ρ (甲基汞) 升高, 在乌江渡水库的下游 (距源头 445 km 处) ρ (总甲基汞) 和 ρ (溶解态甲基汞) 最高. 乌江流域水体的高 pH, 低含量的溶解有机碳 (DOC), 不利于汞的甲基化. 研究表明, 由于被淹没土壤有机质含量较低, 喀斯特地区水库无机汞甲基化的驱动力主要是内源性输入有机质^[27]. 因此, 在乌江流域随着水库生态系统的不断演化, 水库初级生产力水平不断提高, 下游河流水体中 ρ (甲基汞) 有升高的可能.

参考文献 (References):

- [1] Hecky R E, Ramsey D J, Bodily R A, *et al.* Increased methylmercury contamination in fish in newly formed freshwater reservoirs [C]// Suzuki T. Advances in mercury toxicology. New York: Plenum Press, 1991.
- [2] Heyes A, Moore T R, Rudd J W M, *et al.* Methylmercury in pristine and impounded boreal peatlands, experimental lakes area, Ontario [J]. Canada Journal of Fish Aquatic Science, 2000, 57 (11): 2211-2222.
- [3] 张磊, 王起超, 邵志国. 第二松花江下游居民发汞水平及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6): 113-115.
- [4] Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A, *et al.* Increases in fluxes of greenhouse gases and methylmercury following flooding of an experimental reservoir [J]. Environ Sci Technol, 1997, 31: 1334-1344.
- [5] Tremblay A, Lucotte M, Schetagne R. Total mercury and methylmercury accumulation in zooplankton of hydroelectric reservoirs in northern Quebec (Canada) [J]. Sci Total Environ, 1998, 213: 307-315.
- [6] Tremblay A, Cloutier L, Lucotte M. Total mercury and methylmercury fluxes via emerging insects in recently flooded hydroelectric reservoirs and a natural lake [J]. Sci Total Environ, 1998, 219: 209-221.

- [7] Tremblay A, Lucotte M. Accumulation of total mercury and methylmercury in insect larvae of hydroelectric reservoirs [J]. Canada Journal of Fish Aquatic Science, 1997, 54: 832-841.
- [8] Yingcharoen D, Bodaly R A. Elevated mercury levels in fish resulting from reservoir flooding in Thailand [J]. Asian Fisheries Science, 1993(6): 73-80.
- [9] St. Louis V L, Rudd J W M, Kelly C A, *et al.* The rise and fall of mercury methylation in an experimental reservoir [J]. Environ Sci Technol, 2004, 38: 1348-1358.
- [10] Canavan C M, Caldwell C A, Bloom N S. Discharge of methylmercury-enriched hypolimnetic water from a stratified reservoir [J]. Sci Total Environ, 2000, 260: 159-170.
- [11] Schetagne R, Doyon J F, Fournier J J. Export of mercury downstream from reservoirs [J]. Sci Total Environ, 2000, 260: 135-145.
- [12] Montgomery S, Lucotte M, Rheault I. Temporal and spatial influences of flooding on dissolved mercury in boreal reservoirs [J]. Sci Total Environ, 2000, 260: 147-157.
- [13] 人民网. 把长江污染归咎于三峡工程没有科学依据 [EB/OL]. [2007-06-05]. <http://news.tom.com/2007-06-05/07A/85163279.html>.
- [14] 庞峰. 乌江梯级水电站在贵州西电东送中的作用 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(9): 11-13.
- [15] 蒋红梅, 冯新斌, 梁琏, 等. 蒸馏-乙基化结合 GC-CVAFS 测定天然水体中的甲基汞 [J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 568-571.
- [16] 段水旺. 长江营养元素输送的规律和来源 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源科学研究所, 2000.
- [17] 朱俊. 水坝拦截对乌江生源要素生物地球化学循环的影响 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.
- [18] Balogh S J, Nollet Y H, Offeman H J. A comparison of total mercury and methylmercury export from various Minnesota watersheds [J]. Sci Total Environ, 2005, 340: 261-270.
- [19] Paller M H, Jagoe C H, Bennett H, *et al.* Influence of methylmercury from tributary streams on mercury levels in Savannah River Asiatic clams [J]. Sci Total Environ, 2004, 325: 209-219.
- [20] Donkor A K, Bonzongo C J, Nartey V K, *et al.* Mercury in different environmental compartments of the Pra River Basin, Ghana [J]. Sci Total Environ, 2006, 368: 164-176.
- [21] Domagalski J. Occurrence and transport of total mercury and methylmercury in the Sacramento River Basin, California [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 64: 277-291.
- [22] Bonzongo J C, Heim K J, Warwick J J, *et al.* Mercury levels in surface waters of the Carson River-Lahontan Reservoir system, Nevada: influence of historic mining activity [J]. Environ Pollut, 1996, 92(2): 193-201.
- [23] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化 [J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 54-60.
- [24] Eckley C S, Hintelmann H. Determination of mercury methylation potentials in the water column of lakes across Canada [J]. Sci Total Environ, 2006, 368: 111-125.
- [25] Choe K-Y, Gill G A. Distribution of particulate, colloidal, and dissolved mercury in San Francisco Bay estuary: 2. monomethyl mercury [J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48: 1547-1556.
- [26] 何天容, 冯新斌, 李仲根, 等. 季节性缺氧水库甲基汞的产生及其对下游水体的影响 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(6): 565-571.
- [27] 蒋红梅. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.

(责任编辑: 潘风云)