

夜郎湖水库水体不同形态汞的时空分布^{*}

张军方^{1,2*} 冯新斌³ 闫海鱼³ 郭艳娜³ 孟博³ 姚珩³

(¹贵州省水污染控制与资源化技术研究重点实验室, 贵阳 550081; ²贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550081;

³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)

摘要 于2006年7月(夏季)、2007年1月(冬季)和3月(春季)采集了贵州省夜郎湖水库水样,研究了不同形态汞(总汞、溶解态汞、颗粒态汞)的时空分布特征及其影响因素。结果表明,夏季水体总汞、溶解态汞、颗粒态汞平均含量分别为 4.48 ± 2.59 、 2.37 ± 1.40 、 2.11 ± 1.86 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,均显著高于冬季和春季 ($P < 0.001$),而冬春2季不同形态汞含量无明显差异。水质参数悬浮颗粒物(SPM)和硝酸盐(NO_3^-)与不同形态汞之间均存在显著的正相关关系,表明这些参数对于不同形态汞的季节分布起着重要作用。夏季农业耕作活动相对活跃,表层土壤的扰动增加,雨水冲刷农田土壤,带进大量的外源颗粒物,致使夜郎湖水体夏季总汞水平较高。空间分布表明,夜郎湖水库夏季总汞平均浓度从水库入库河流至大坝方向、出库河流呈现总体下降的分布趋势,但水体各采样剖面没有明显的分布规律。

关键词 夜郎湖水库; 总汞; 时空分布; 控制因素

中图分类号 S63 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)5-0969-07

Spatial and temporal distribution of mercury species in water in Ye Langhu Reservoir
ZHANG Junfang^{2**}, FENG Xinbin³, YAN Haiyu³, GUO Yanna³, MENG Bo³, YAO Heng³ (¹ Guizhou Provincial Key Laboratory of Water Pollution Control & Resource Reuse, Guiyang 550081, China; ² Guizhou Institute of Environmental Science and Designing, Guiyang 550081, China; ³ State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China). Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 969-975.

Abstract A study was conducted during July 2006, January 2007 and March 2007 to determine the distribution of mercury species (total Hg (THg), dissolved Hg (DHg), particulate Hg (PHg)) and the impacts of some major controlling factors in the Ye Langhu Reservoir, Guizhou, China. By comparison, the average concentrations of THg (4.48 ± 2.59 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$), DHg (2.37 ± 1.40 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$), PHg (2.11 ± 1.86 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$) in the summer campaign are significantly higher ($P < 0.001$) than those in the winter and spring campaigns, while no significant differences of concentrations of different mercury species are found between the latter two campaigns. Our investigation revealed that SPM and NO_3^- may play an important role in controlling the seasonal distribution of mercury species in the reservoir. It is assumed that higher concentrations of mercury species in the summer could be a result of runoff impact. High runoff volume due to abundant precipitation in the summer carried Hg-containing particulates eroded from the agriculture dominated watershed into the reservoir. Spatial distribution reveals that mercury concentrations generally decreased from the reservoir inlet to the outlet, while no notable vertical trends were found at each sampling site.

Key words Ye Langhu Reservoir; total mercury; spatial and temporal distribution; controlling factors

*国家自然科学基金重点项目(40532014)和贵州省2008年度科学技术基金项目(黔科合·字[2008]2032号)资助。

**通讯作者 Email: z_junfang@126.com

收稿日期: 2010-10-28; 接受日期: 2011-02-25

汞是一种可生物累积的有毒持久性污染物质 (USEPA 1997; UNEP 2002)。自 20 世纪 60 年代发生在日本的“水俣病”被证实是由于人为污染引起的汞中毒以来,水生生态系统中汞的环境地球化学及生态风险问题引起了研究人员的广泛关注。在流域范围内,河流等地表径流输送了来源于自然和人为的陆地源的汞,但是汞的环境地球化学循环的复杂性使流域集水水体中汞的分布、迁移转化机制等仍然了解甚少。

水体的水质理化性质不仅和其所在流域的地质条件、植被类型和气候等有关,而且还和流域内的人为活动的点源或非点源输入有着紧密联系 (Lyons et al., 2006)。有研究表明,水体非点源汞的输入可以由人为活动改变地貌的农田耕作、城镇化等引起,并且这些改变地貌的人为活动对于汞的输入显得相当重要 (Balogh et al., 1998; Mason & Sullivan, 1998; Wamer et al., 2005)。夜郎湖流域处于乌江流域的上游区域,该区域系亚高原生态环境脆弱区,其主要的陆生地貌为农业用地,主要污染源来自于流域内的农业面源污染 (石庆和夏晓树, 2007)。由于该区域陡坡开荒面积大,耕作方式粗放,加上典型的石漠化问题,导致水土流失问题严重,土壤贫瘠 (朱俊, 2005)。因此,相比其他地区,该区域的农业活动可能需要使用更多的化肥来平衡水土流失所带走的作物营养物质 (张军方, 2009)。这种特殊的区域环境以及农业主导的区域经济为揭示夜郎湖水库水体汞的分布特征及其控制因素提供了新的思路。本文通过对不同季节夜郎湖水库水样的不同形态汞进行分析,研究了夜郎湖水库中汞的分布模式及控制因素,并首次在亚高原生态环境脆弱区探讨了农业活动与水体汞的分布模式之间的关系。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

夜郎湖水库 (图 1) 位于贵州省普定县境内 ($26^{\circ}23'N$, $105^{\circ}48'E$), 又称普定水库, 是 1994 年蓄水人工湖库, 其上游入湖支流主要有三岔河和波玉河, 湖库运行以来主要用以发电、防洪、旅游和供水。夜郎湖水库基本参数如表 1 所示。

1.2 样品采集和处理

于 2006 年 7 月 (夏季)、2007 年 1 月 (冬季) 和 3 月 (春季) 进行采样。设 4 个采样剖面 (图 1): 1) 入库支流三岔河与波玉河的混合处 (YLRH), 代表

表 1 夜郎湖水库及所在流域基本特征参数

Table 1 Hydrological characteristics of the Yelanghu Reservoir and land use of the catchment area

参数	数值	引用文献
正常蓄水位时水面面积 (km^2)	19.25	郭艳娜, 2008
流域面积 (km^2)	5871	
正常蓄水位时库容 (10^6 m^3)	420	
平均库容 (10^6 m^3)	248	
最大深度 (m)	45	
平均深度 (m)	13	
理论水力停留时间 (d)	27	
流域耕地垦殖指数 (%)	35.9	刘继文和
旱地占耕地面积比例 (%)	80.0	陈安宁, 2006
森林覆盖率 (%)	21.7	
> 8° 的坡耕地占耕地面积比例 (%)	> 80	
> 25° 的陡坡耕地占流域面积比例 (%)	11.6	
水土流失率 (%)	48.0	

水库的上游区; 2) 大桥上游方向约 500 m 处 (YLDQ) 及沙湾 (YLSW) 代表水库中部; 3) 水库大坝上游约 500 m 处 (YIDB) 代表水库下游区域。采样点 YIDB 靠近大坝, 该处水深的季节性波动较大, 7 月水深达 45 m 而在春季, 降水较少, 水深 28 m。

采用 Van Donk 采样器对采样剖面 (水库两岸中间位置) 的不同深度进行采样, 间隔根据采样点的水深情况设定, 一般为 5~20 m, 其中表层为水面下 20 m 处取样。河流水样在水面下 10 m 处取样。汞采样瓶使用前均经过严格的前处理过程 (Baeyens, 1992; Montgomery et al., 1995) 确保没有汞污染。每个采样点取未过滤和过滤两种水样分别用于测定总汞 (THg) 和溶解态汞 (DHg), 颗粒态汞 (PHg) 定义为总汞与溶解态汞的差值。过滤水样用 0.45 μm 的微孔滤膜 (Millipore) 现场过滤, 水样用 0.5% 盐酸酸化存于经过超净技术处理过的硼硅玻璃瓶中, 然后

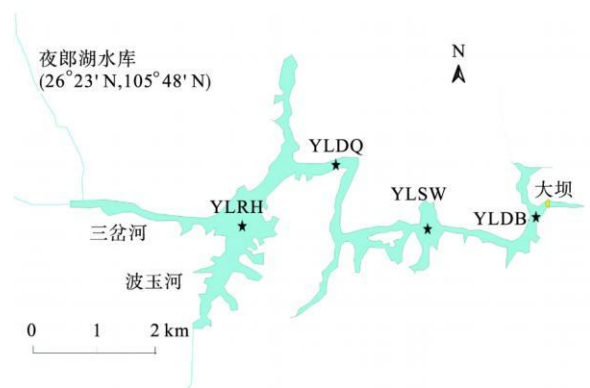


图 1 采样布点示意图

Fig. 1 Location of sampling sites

放在冰箱中冷藏避光保存。溶解有机碳 (DOC)、悬浮颗粒物 (SPM) 及硝酸根离子 (NO_3^-) 按相应分析方法进行采样。

1.3 样品测定

样品总汞的测定采用 CVAFS 法 (蒋红梅等, 2004), 使用 Tekran 2500 CVAFS 测汞仪 (加拿大多伦多 Tekran 公司生产)。水样加入 BCl_3 氧化后成 Hg^{2+} , 加入 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 将其中游离态的卤素除掉, 然后加入氯化亚锡将 Hg^{2+} 还原成 Hg^0 , 经氮气吹扫捕集于金管 (样品管), 然后对样品管采用冷原子荧光汞仪进行检测。该方法的加标回收率为 88.1% ~ 111.0%, 最低检测限为 $0.02 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水样的温度 (T)、溶解氧 (DO)、pH 在采样时现场测定 (Pioneer 65 便携式多参数仪), 溶解有机碳 (DOC) 用高温燃烧法进行测定 (Cosovic et al, 2000), 悬浮颗粒物 (SPM) 重量法测定, 硝酸根离子 (NO_3^-) 采用

离子色谱法 (Dionex) 测定。分析过程的质量保证和质量控制采用现场空白、系统空白及平行样控制。

2 结果与分析

2.1 夜郎湖基本水质参数季节变化

各采样点夏季 pH 从表层至底层呈下降趋势, 春季除大坝位置 pH 呈下降趋势, 其他样点均无明显变化趋势 (表 2 图 2)。冬季水温从表层至底层无显著变化, 呈现充分混匀的状态, 春季随着气温的增加, 水温开始增加, 表层温度增加幅度大于底层, 呈现从表层至底层下降的趋势, 而到了夏季, 这种趋势演变为 5 或 10 m 处有一个明显的温度跳跃, 表明水体在夏季存在着明显的分层, 在 5 或 10 m 以下为均温层。春季和夏季 DO 总体呈现出下降的趋势, 冬季水体处于混匀状态, 各采样点除在表层与空气接触 DO 较高外, 在剖面上无显著变化。

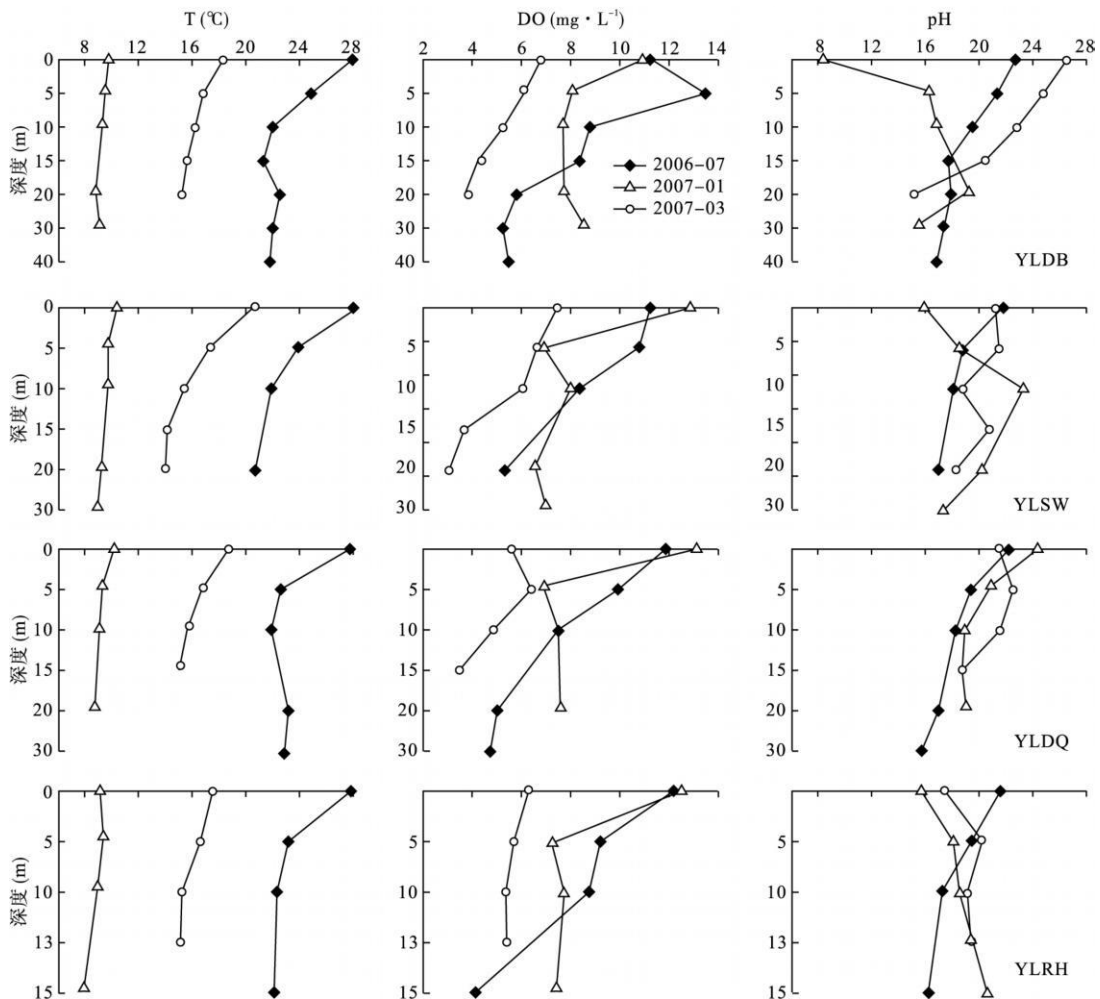


图 2 夜郎湖水库温度、pH、溶解氧季节变化

Fig 2 Seasonal distribution of DO, pH and water temperature (T) in the Yelanghu Reservoir

A B C D 分别表示 YLDB YLSW YLDQ YLRH 采样点。

2.2 夜郎湖水体不同形态汞的分布

THg浓度范围为 1.00 ~ 11.74 ng·L⁻¹, 平均值为 2.74 ± 2.07 ng·L⁻¹, 与已报道的北美水库总汞浓度 (Brigham et al., 2002) 相当。从图 3和图 4可以看出, 夏季夜郎湖水库水体 THg、PHg、DHg浓度显著高于冬季和春季 (P < 0.001), 其中夏季 THg平均值 (4.48 ng·L⁻¹) 是其他两季平均的 2.53倍 (表

2), 波动范围也显著大于冬季和春季, 冬季和春季各总汞浓度则没有明显差异。此外, 从水体剖面分布来看, 也没有明显的剖面分布特征。

图 4显示, THg、PHg最高平均浓度分别出现在夏季丰水期水库中游区的 YLDQ与 YLSW采样点, 分别为 6.01和 3.06 ng·L⁻¹, 而此时较高的 SPM平均浓度值也出现在水库中游区的 YLDQ和 YLSW采

表 2 夜郎湖水库不同形态汞浓度与水质参数

Table 2 Concentrations of different total mercury species and the ancillary parameters for the Yelanghu Reservoir

时间	THg (ng·L ⁻¹)	DHg (ng·L ⁻¹)	PHg (ng·L ⁻¹)	SPM (mg·L ⁻¹)	DOC (mg·L ⁻¹)	T (°C)	DO (mg·L ⁻¹)	pH	NO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)
2006年 7月 (n=20)	4.48±2.59 (1.91~11.74)	2.37±1.40 (1.17~7.11)	2.11±1.86 (0.43~7.27)	5.45±1.84 (1.43~8.75)	1.86±1.83 (0.38~8.15)	23.7±2.5 (20.7~28.7)	8.38±2.86 (4.14~13.5)	7.83±0.26 (7.45~8.31)	13.8±1.17 (12.3~17.6)
2007年 1月 (n=18)	1.60±0.62 (1.00~3.34)	0.97±0.43 (0.61~2.52)	0.62±0.50 (0.09~2.12)	3.74±1.15 (1.23~5.90)	1.12±0.41 (0.65~2.05)	9.3±0.6 (7.90~10.30)	8.58±2.17 (6.57~13.06)	7.76±0.43 (6.53~8.53)	11.1±0.58 (9.43~12.2)
2007年 3月 (n=18)	1.94±0.58 (1.01~3.17)	1.23±0.21 (0.92~1.73)	0.70±0.52 (0.09~1.80)	3.38±0.86 (2.08~4.85)	0.90±0.06 (0.81~1.01)	16.3±1.7 (14.0~20.6)	5.34±1.26 (3.07~7.47)	8.05±0.33 (7.37~8.78)	6.16±2.42 (2.53~8.68)

数据为平均值 ±标准差, 括号内为范围。

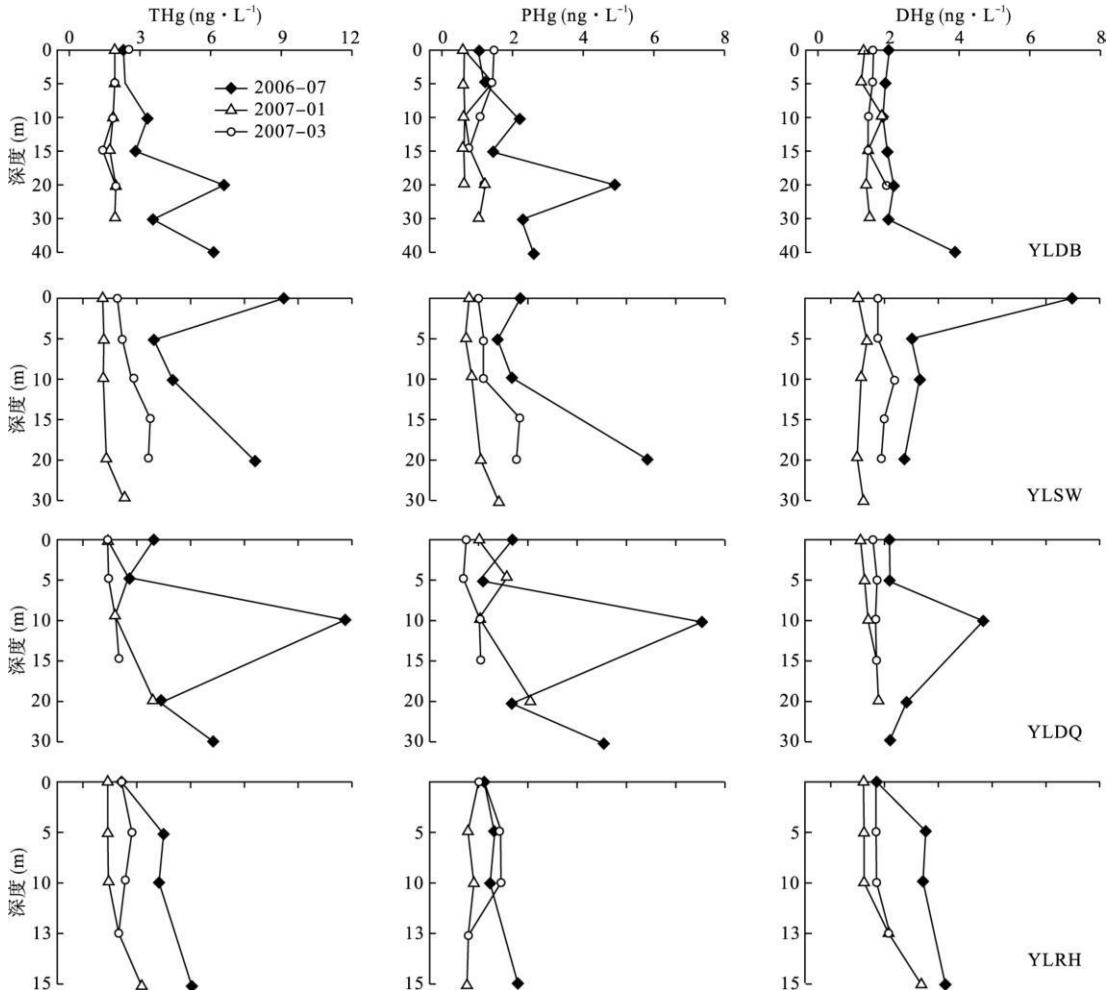


图 3 夜郎湖水库总汞、颗粒态汞、溶解态汞浓度
Fig 3 Concentrations of THg, PHg and DHg in the Yelanghu Reservoir

A、B、C、D分别表示 YLDB、YLSW、YLDQ、YLRH采样点。

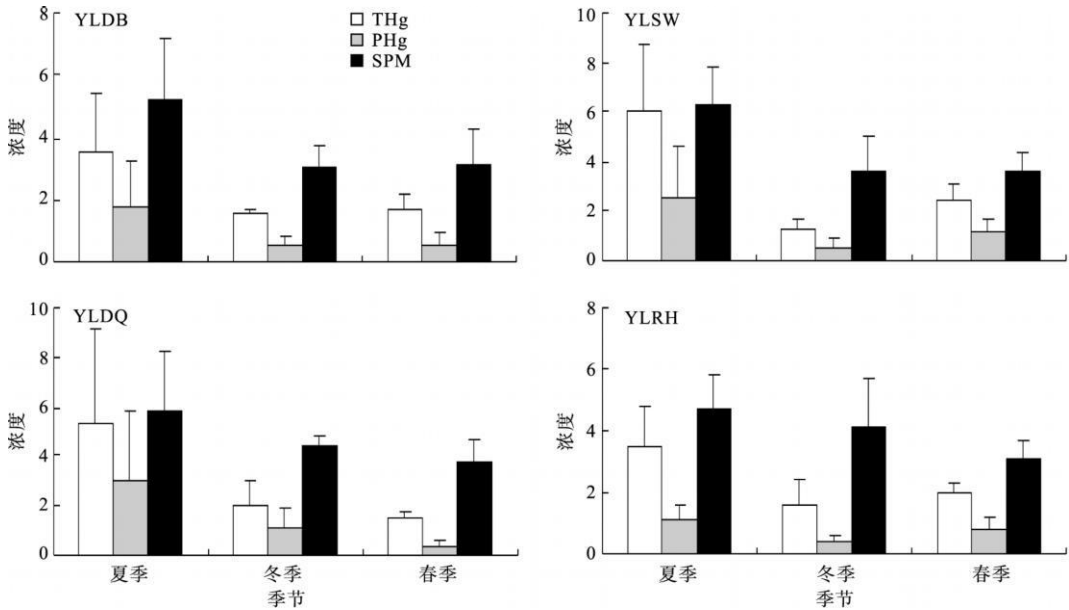


图 4 THg、PHg 和 SPM 平均浓度的季节对比关系
 Fig. 4 Seasonal comparison of the average concentrations of THg, PHg and SPM
 THg、PHg 的单位是 $ng \cdot L^{-1}$, SPM 的单位是 $mg \cdot L^{-1}$.

样点, 分别为 6.26 和 $5.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。THg、PHg 最低平均浓度 (分别为 1.26 和 $0.38 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 则分别出现在冬季 YLSW 和春季 YLDQ 采样点, 与此对应的较低的 SPM 平均浓度仅为 3.64 和 $3.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这种季节性的总汞分布模式可能与地表径流冲刷有关。夏季, 丰水期降雨带来的丰富的地表径流的冲刷携带了大量含汞颗粒物, 最终流入水库, 而同为枯水期的冬春两季, 由于降水减少, 颗粒物输入减少。THg 和 SPM ($r=0.47, P<0.01$) 以及 PHg 和 SPM ($r=0.49, P<0.001$) 的正相关关系 (表 3) 表明, SPM 对于水库水体 THg 和 PHg 的季节分布起着重要作用。THg、PHg 和 SPM 的最高浓度值均出现在水库中游区, 这与其水库中段两岸坡度较大的地形有关, 陡坡地形加上人为农业活动可以加速水土流失, 使得库区中段颗粒物较高。

DHg 浓度范围为 $0.61 \sim 7.11 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 与 THg 浓度具有极显著相关关系 ($r=0.80, P<0.001$)。DHg 和 SPM 存在较弱的显著相关关系 ($r=0.31, P<0.05$), 但不认为 SPM 是 DHg 的控制因素。夏季平均 DHg/THg 百分比为 56.9% , 而此比例在枯水期分别达到了 63.1% (冬季) 和 67.5% (春季)。此比例与同为乌江流域的红枫湖水库相近 (He et al., 2008)。冬春两季 DHg/THg 的比例较夏季的增高, 与冬春两季地表径流冲刷作用减小、输入颗粒物 (SPM) 减少有关。

在全年的水库水量输送量中, 夏季由于丰富的降水, 是全年水量输送的重要季节。因此, 夏季水量输送过程中的总汞输入输出的浓度特征决定着水库全年的输入输出水平。利用同期的入库、出库研究数据 (郭艳娜等, 2009), 结合本研究的数据, 对夏季入库河流至水库大坝方向及出库河流 THg 的平均浓度作图 (图 5), 表明, 夏季水体 THg 平均值总体上呈现下降趋势, 入库河流比出库河流下降了 50% 。有研究表明, 水库的修建会降低河流中汞的浓度 (Bonzonogo & Lyons, 2004), 这主要是由于水库的修建使得河流中颗粒态汞随颗粒物沉降到水库底部造成的。本研究提供了库体内的上下游水平分布的总汞浓度, 这与郭艳娜等 (2009) 的研究一致。

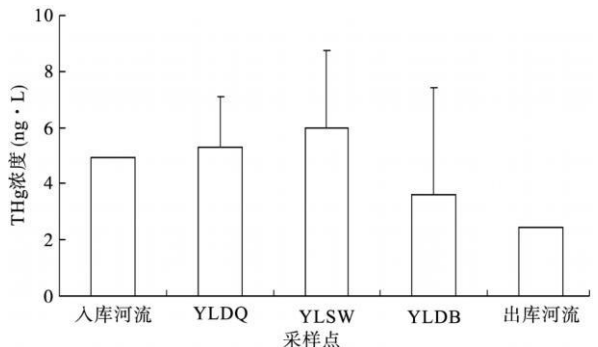


图 5 夜郎湖水库夏季 THg 在库体及河流的空间分布
 Fig. 5 Spatial distribution of THg in the Yelanghu Reservoir and rivers in summer

表 3 不同参数间的 Pearson 相关矩阵表

Table 3 Pearson's correlation matrix giving the linear correlation coefficients between the variables

	THg	DHg	PHg	SPM	DOC	DO	PH	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
THg	1								
DHg	0.81***	1							
PHg	0.89***	0.45***	1						
SPM	0.47**	0.31*	0.49***	1					
DOC	0.04	0.15	-0.05	0.10	1				
DO	-0.08	0.06	-0.18	0.18	0.32*	1			
PH	-0.13	-0.04	-0.17	0.05	0.07	0.06	1		
NO ₃ ⁻	0.39**	0.36**	0.32*	0.25*	0.20	0.33**	-0.28*	1	
Cl ⁻	-0.31*	-0.23	-0.30*	-0.24*	-0.17	0.03	0.07	0.21	1

* P < 0.05, ** P < 0.01, *** P < 0.001

2.3 不同形态汞与水质参数的相关性

水环境中汞的分布被某些水质参数所主导 (Bloom & Etfler 1990, Gill & Buland 1990)。为了揭示夜郎湖水库中的各形态汞的影响因子, 将 3 个季节的各形态汞与 6 个主要水质参数 (SPM, DOC, DO, PH, NO₃⁻, Cl⁻) 进行 Pearson 相关矩阵分析, 相关矩阵表 (表 3) 显示, SPM, NO₃⁻ 和各形态汞之间存在着显著的相关关系, 表明 SPM 和 NO₃⁻ 对于各形态汞的分布起着重要作用; 而 DOC, DO, PH 和 Cl⁻ 在本研究中对各形态汞的分布影响并不重要, 没有显示统计意义上的显著相关性。

NO₃⁻ 是表征水体是否受面源污染的良好指标。本研究夜郎湖水库中 NO₃⁻ 的浓度范围为 2.53 ~ 17.6 mg·L⁻¹, 其中, 最大值出现在夏季。Lyon 等 (2006) 研究了美国的 Scioto 河中由于农业活动和城镇化导致水体总汞水平的增加, 其中 NO₃⁻ 最大为 11 mg·L⁻¹。从表 3 可以看出, NO₃⁻ 浓度和不同形态汞均存在着显著的正相关关系。这种相关性绝不是偶然的, 而是和当地的农业活动有着紧密的联系。夏季夜郎湖流域相对活跃的农业活动大大增加了化肥使用量, 在当地硝酸铵是普遍使用的化肥, 同时, 夏季增强的农业活动带来表层土壤的扰动增加, 丰水期大量的地表径流极易冲刷含汞颗粒物及硝酸盐物质至流域的接纳水体夜郎湖, 导致了夏季夜郎湖水体中各形态汞和 NO₃⁻ 物质的含量的显著增加。而在其他两季, 各形态汞浓度和硝酸盐物质降到了较低的水平, 而此时降水强度和农业活动也相对较弱。

SPM 对水库汞的分布的影响是非常明显的 (前文已有详述), 主要表现为夏季高降水量带来剧烈的含汞颗粒物的地表径流冲刷引起水库汞浓度增加, 表明 SPM 是控制 THg 及 PHg 在水库中分配的

重要控制因素。结合 NO₃⁻ 指标对水体汞的影响, 表明夏季增强的地表径流和相对活跃的农业活动可引起夜郎湖水库水体汞水平的增加。

DOC 浓度范围为 0.38 ~ 8.15 mg·L⁻¹, 与溶解态汞没有统计意义的相关关系 (表 3), 这表明, 少量的 DHg 被键合到溶解有机物中 (Bonzongo et al., 1996), 因此, 研究水库水体内大部分的 DHg 活性较大, 可供形态转化或被水生生物吸收利用。

3 结 论

本文对夜郎湖水库各形态汞的时空分布及其控制因素进行了调查研究, 主要得出以下结论:

1) 夏季水体所有形态汞 (THg, DHg, PHg) 均显著高于其他两季 (P < 0.001), 而冬春 2 季浓度没有明显差异。

2) 空间分布表明, 夏季 THg 平均浓度从水库入库河流至大坝方向、出库河流呈现总体下降的分布趋势, 这说明河流经水库蓄水后, 可使 THg 得到部分“清除”, 印证了同期研究工作。

3) 水质参数 SPM, NO₃⁻ 与各形态汞之间存在显著的正相关关系, 表明 SPM 和 NO₃⁻ 对于各形态汞的季节分布起着重要作用。夏季丰水期, 河流由于雨水带进大量的农田和土壤颗粒, 而成为夜郎湖水体汞的一个重要输入源, 同时夏季相对活跃的农业耕作活动可能引起夜郎湖水体汞水平的升高。

参考文献

- 郭艳娜, 冯新斌, 闫海鱼, 等. 2009 乌江流域梯级水库入库河流中总汞和甲基汞的时空分布. 长江流域资源与环境, 18(4): 356-360
- 郭艳娜. 2008 乌江流域不同演化阶段水库汞的输入输出通量研究 (博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.

- 蒋红梅, 冯新斌, 梁 琰, 等. 2004 蒸馏乙基化 GC-CVAFS法测定天然水体中的甲基汞. *中国环境科学*, **24**(5): 568—571.
- 刘继文, 陈安宁. 2006 三岔河流域生态现状及污染防治的探索. *环境污染与防治* (网络版), (3): 1—8
- 石 庆, 夏晓树. 2007 农业面源污染对贵州省水库影响的初步分析. *贵州水力发电*, **21**(5): 15—18
- 张军方. 2009 乌江流域普定、东风水库汞的分布与质量平衡研究 (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.
- Baeyens W. 1992 Speciation of mercury in different compartments of the environment. *Trends in Analytical Chemistry*, **11**: 245—254
- Bağcı S J, Meyer M L, Johnson D K. 1998 Transport of mercury in three contrasting river basins. *Environmental Science & Technology*, **32**: 456—462
- Bloom N S, Etfler S W. 1990 Seasonal variability in mercury speciation of Onondaga Lake (New York). *Water, Air and Soil Pollution*, **53**: 251—265
- Bonzongo J C, Heim K J, Warwick J J et al. 1996 Mercury levels in surface waters of the Carson river Lahontan Reservoir system, Nevada. Influence of historic mining activities. *Environmental Pollution*, **92**: 193—201.
- Bonzongo J C, Lyons W B. 2004 Impact of land use and physicochemical settings on aqueous methylmercury levels in the Mobile Alabama River System. *Ambio*, **33**: 328—333
- Braham M E, Krabbenhoft D P, Olson M L, et al. 2002 Methylmercury in flood control impoundments and natural waters of Northwestern Minnesota, 1997—1999. *Water, Air and Soil Pollution*, **138**: 61—78
- Cosovic B, Ciglenecki J, Vilicic D, et al. 2000 Distribution and seasonal variability of organic matter in a small eutrophic salt lake. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **51**: 705—715.
- Gill G A, Bruland K W. 1990 Mercury speciation in surface freshwater systems in California and other areas. *Environmental Science & Technology*, **24**: 1392—1400
- He T R, Feng X B, Guo Y N, et al. 2008 The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: A case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China. *Environmental Pollution*, **154**: 56—67.
- Lyons W B, Fitzgibbon T Q, Welch K A, et al. 2006 Mercury geochemistry of the Sebop River, Ohio: Impact of agriculture and urbanization. *Applied Geochemistry*, **21**: 1880—1888
- Mason R P, Sullivan K A. 1998 Mercury and methylmercury transport through an urban watershed. *Water Research*, **32**: 321—330
- Montgomery S, Mucci A, Lucotte M, et al. 1995 Total dissolved mercury in the water column of several natural and artificial aquatic systems of northern Quebec (Canada). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **52**: 2483—2492
- USEPA. 1997 Mercury Study Report to Congress [EB/OL] [2010-11-12]. <http://www.epa.gov/mercury/report.htm>
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2002 Global Mercury Assessment Report. UNEP Chemicals, Geneva, Switzerland. <http://www.chem.unep.ch/MERCURY>
- Wamer K A, Bonzongo J C, Riden E E, et al. 2005 Effect of watershed parameters on mercury distribution in different environmental compartments in the Mobile Alabama River Basin, USA. *Science of the Total Environment*, **347**: 187—207.

作者简介 张军方,男,1979年生,博士,高级工程师。研究方向为污染物环境行为及其控制研究,发表论文 10 余篇。
E-mail: z_junfang@126.com

责任编辑 魏中青