

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析

赵晓松^{1,2}, 蔚建军^{1,2}, 付莉^{1,2}, 姜伟^{1,2}, 周川^{1,2}, 李波³, Douglas Haffner^{1,4}, Christopher Weisener⁴, 张磊^{1,2,4*}

(1. 三峡库区水环境监测与模拟国际科技合作基地, 重庆 400716; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 3. 重庆北碚区环境保护局, 重庆 400711; 4. 加拿大温莎大学大湖环境研究中心, 温莎, N9B 3P4)

摘要: 以三峡库区北岸最大支流澎溪河的高阳平湖段为例, 探讨随着调水方式导致的水位变化, 三峡库区支流金属离子 Ca、Zn、Fe、Cr、Pb、Cu 和 Hg 等在时间、水平和垂直空间维度上的分布和动态。在 2013 年 6 月 5 日~2014 年 5 月 29 日为期 1 a 的采样周期内于澎溪河长年回水区高阳平湖的 4 个采样点采样共 21 次, 平均每 17.3 d 采集一次。水体样品分别采自水体表层(0~0.5 m)、中层和底层(底泥以上 0.5 m)。冬季水体不分层期间, 中层样品采自水深 1/2 处, 分层时则采自温跃层。应用 RBR-80220 型水质自动分析仪监测各样点水温、电导率、水深等数据。水样采用冷原子吸收法和电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定各金属质量浓度。运用 Excel、SPSS 软件进行数据统计分析; 以 Hg 离子为例, 利用 Matlab 软件构建各水位时期金属离子质量浓度分布三维柱状图。结果表明: ①从水体可溶性金属离子质量浓度角度, 澎溪河水质总体较好, Cr、Pb、Cu、Zn 和 Hg 等离子均低于地表水环境质量标准(GB3838-2002) III 类水质标准相应离子质量浓度; ②在来源上, Cr、Pb 和 Cu 等离子来源于干流回水; Fe 和 Zn 离子来源于澎溪河内源; Hg 离子来源受干流回水和内源影响。金属离子随着温度分层出现质量浓度分层现象; ③影响高阳平湖电导率的主要物质是非金属离子。

关键词: 三峡库区; 澎溪河; 回水区; 金属离子; 时空分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2117-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201704050

Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir

ZHAO Xiao-song^{1,2}, YU Jian-jun^{1,2}, FU Li^{1,2}, JIANG Wei^{1,2}, ZHOU Chuan^{1,2}, LI Bo³, Douglas Haffner^{1,4}, Christopher Weisener⁴, ZHANG Lei^{1,2,4*}

(1. International Base for S&T Collaboration on Water Environmental Monitoring and Simulation in TGR Region (WEMST), Chongqing 400716, China; 2. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3. Beibei District Environmental Protection Bureau, Chongqing 400711, China; 4. Great Lakes Institute for Environmental Research, University of Windsor, Windsor, N9B 3P4, Canada)

Abstract: This study uses the Gaoyang Lake section of the Pengxi River, the largest tributary on the northern bank of the Three Gorges Reservoir (TGR), as an example for exploring the distributions and dynamics of Ca, Zn, Fe, Cr, Pb, Cu, and Hg ions in the tributaries of TGR where the water level fluctuates due to dam regulation. Samples were taken 21 times, once every 17.3 days, at four sampling sites in Gaoyang Lake, which is in a perennial backwater zone of the Pengxi River, during one year from June 5, 2013 to May 29, 2014. At each sampling site, water samples were taken from the surface layer (0-0.5 m), middle layer, and bottom layer (0.5 m above the bed mud). During winter when the water was not stratified, the middle layer samples were taken at 1/2 depth, and when water was stratified in other seasons, the middle layer samples were taken from the thermal layer. Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) and cold-vapor atomic absorption methods were adopted to determine the concentrations of the metals. Excel and SPSS were used for data analysis and Matlab for building 3-D prisms displaying concentration distributions of Hg ions in the high water level period (175 m, November-April in the ensuing year), sluicing period (May-middle June), low water level in the flooding season (145 m, June-August), and the storage period (September-November). The results provided the following observations: ① Concentrations of Cr, Pb, Cu, Zn, and Hg ions were lower than those in Class III of the water environment quality standard (GB 3838-2002). ② Cr, Pb, and Cu had high peak values during the storage and sluicing period, and the lowest values during the high water level period. Cr, Pb, and Cu were derived from the main stream of Yangtze, while Fe and Zn were from the Pengxi River locally. The concentration of Hg ions was affected by both the main stream and endogenous sources. As the water column

收稿日期: 2017-04-06; 修订日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671291)

作者简介: 赵晓松(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态学和土地资源学, E-mail: 858165247@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhanglei5401@163.com

stratified, metal ions did not mix among the stratified layers in Gaoyang Lake. ③ The conductivity was significantly lower during the high water level period than during other water level periods. The main material that affects the conductivity of Gaoyang Lake could be nonmetallic ions.

Key words: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; backwater area; metal ions; spatial and temporal distribution

为了腾出库容防汛,三峡大坝在每年夏季雨季到来前放水,人为将坝前水位降至海拔 145 m;在秋季枯水期前,重新蓄水至海拔 175 m,形成独特的调水系统.三峡大坝蓄水后,由于 30 m 水位的升降,形成大面积反复落干-淹水的消落带,改变了河床底泥原有氧化还原条件,增加了包括痕量金属元素在内的多数金属元素的移动性,使积累的金属元素从土壤和底泥中的溶出而进入水体^[1-2].在三峡水库未完全蓄水前,有模型预测在水库完全蓄水后,库区干流和 40 条主要流水域汞的活化效应将增强 0.35~1.5 倍^[3],大坝蓄水后,有研究验证了这一结论^[4].

支流回水区作为干流与支流交汇区,存在着 2 种生境的物理、化学和生物等方面的交换和相互影响^[5].另外,污水排放和农业面源等因素导致三峡库区小流域、支流库湾污染物累积,成为水体中金属离子重要来源^[6].因此,有必要对库区回水区水体金属含量及水体中金属离子的来源和空间分布进行分析,以便采取治理措施.

本文从 2013 年 6 月初至 2014 年 5 月底,选取三峡库区支流澎溪河的高阳平湖段为研究对象,定点高频地在整个断面采集水样,测定水体溶解态 Ca、Fe、Zn、Cr、Pb、Cu 和 Hg 等金属离子的浓度,分析水体中金属离子在时间、空间上的浓度分布特征,以期为库区水质研究和管理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

澎溪河是三峡库区长江北岸最大支流[图 1(a)],主河道长 182.4 km,流域面积 5 172.5 km²,年平均径流量达 34.1 亿 m³^[7].在澎溪河中游[图 1(b)],由于三峡大坝蓄水,澎溪河河道拓宽形成面积为 5~6 km² 的永久回水区,支流库湾由原来的河流型变为湖泊型,形成三峡库区内与长江干流直接相连的最大湖面,即高阳平湖^[8-9].三峡库区独特的调水制度使库区的全年水位依时期不同而变动,分为高水位期(175 m,11 月至第二年 4 月)、泄水期(5~6 月中旬)、汛期低水位期(145 m,6~8 月)、蓄水期(9~11 月)^[10],澎溪河水位随库区

调水也出现同样的变动.

研究区域丰水期为 6~9 月,平水期为 4、5、10 和 11 月,枯水期为 12 月和 1~3 月.每年 3 月下旬开始,随着降雨量增加,径流量也相应增大,5~10 月径流量占全年径流量的 80% 以上^[11].

1.2 采样点设置

本研究采样点分布如下:

样点 1 (N31°5.908', E108°39.9')、样点 2 (N31°5.282', E108°40.416')、样点 3 (N31°4.537', E108°40.168')、样点 4 (N31°4.179', E108°41.125') 共 4 个采样点,沿水流方向自上游向下游设置,样点 3 位于高阳平湖的支流洞溪河至高阳平湖的交汇处附近,如图 1(b) 所示.采样点位于长年回水区范围内,即使在三峡大坝的泄水期,依然会受到来自干流回水的影响^[9].

1.3 水样采集预处理及分析

自 2013 年 6 月 5 日至 2014 年 5 月 29 日,共采样 21 次,平均每隔 17.3 d 采集一次.采样前,为排除纯净硅玻璃瓶中金属离子的干扰,用硝酸与溶液的体积比为 50% 的硝酸溶液浸泡硅玻璃瓶,清洗硝酸后将硅玻璃瓶置于马弗炉中烘干.每个采样点采集 3 个水样:表层、中层和底层.其中,表层水样采自距离水面约 0.5 m 水层;水体分层时,中层水样采自温跃层中间位置.当水体不分层时,采自水柱中间深度;底层水样采自距离河底 0.5 m 位置处.样品采集后立即通过 0.45 μm 滤膜过滤,加入硝酸调节 pH < 2,带回实验室待测;用 RBR-80220 型水质自动分析仪现场测定样点水体垂直方向水温、水深、电导率等.具体操作方法是启动仪器后,将仪器缓慢匀速垂直沉入水底至仪器触到河底.仪器每隔 3 s 自动记录一次数据.

水样金属离子测定委托重庆市北碚区环境监测站完成. Ca、Cr、Cu、Fe、Pb 和 Zn 离子的测试采用电感耦合等离子体原子发射光谱法 (inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, ICP-AES),使用仪器及型号为等离子发射光谱仪 iCAP6300DUO.测试中使用的试剂均为优级纯.检测依据文献[12]进行操作.检出限分别为 0.000 3、0.000 6、0.000 6、0.000 3、0.002 2 和 0.000 3 mg·L⁻¹. Hg 离子测定采用冷原子吸收法,所用试

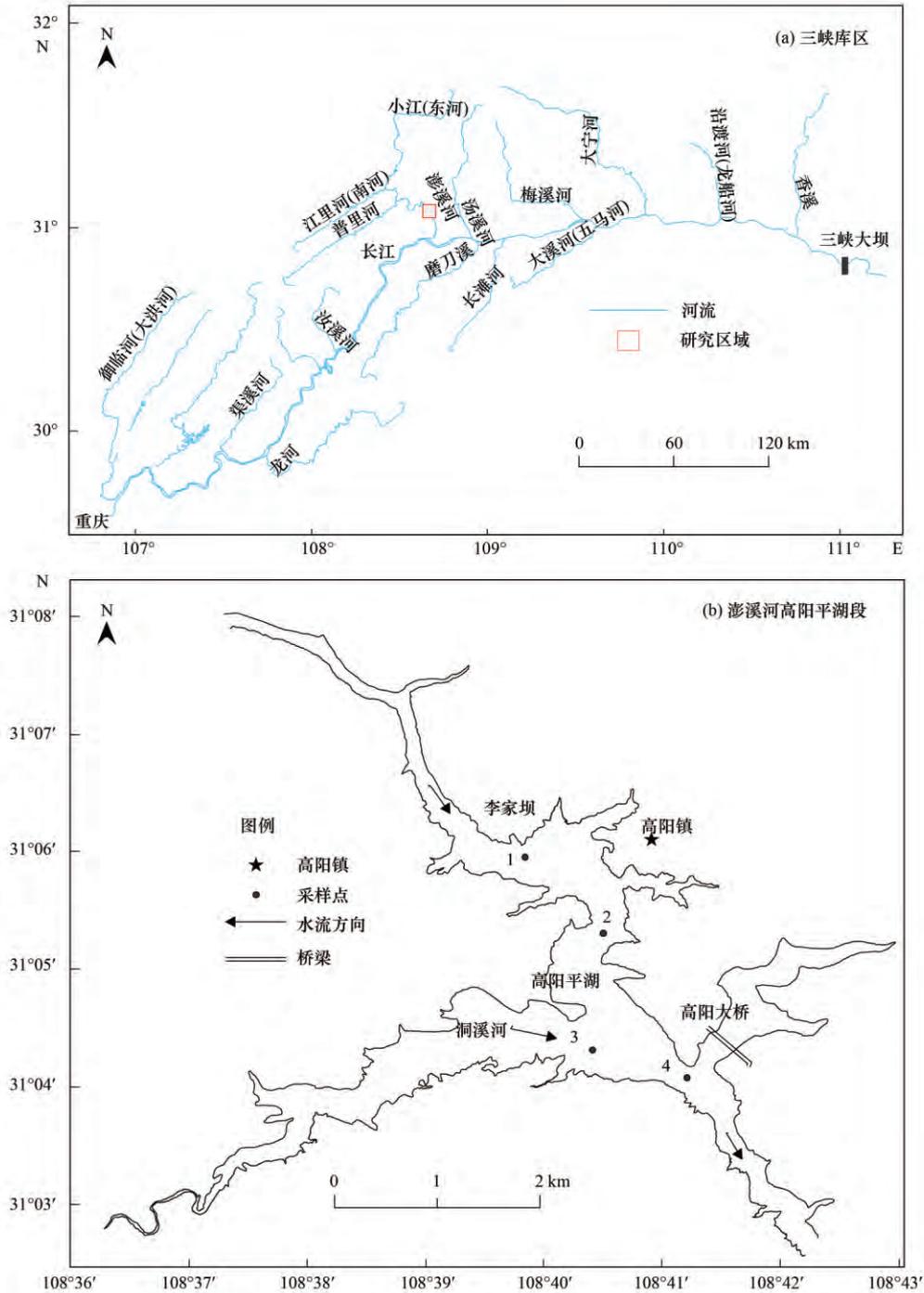


图 1 三峡库区澎溪河区位概况及采样点

Fig. 1 Location of Pengxi River and sampling sites in Three Gorges Reservoir area

剂均为优级纯，严格按照文献[12]操作.

1.4 数据处理及研究方法

用 SPSS 22、Excel 2010 和 Origin 8 对所研究的金属离子浓度进行相关统计分析; 用 Matlab R2014b 将 Hg 离子在 4 个水位时期不同采样点的浓度数据生成三维柱状图, 直观展示金属离子在水平和垂直方向上的空间分布.

2 结果与分析

2.1 溶解态金属离子质量浓度间相关性分析

相关性分析结果(表 1)表明, Cr 离子与除 Ca 离子以外其它离子均显著正相关. Cr 离子污染来源广, Cr 离子污染伴随其它金属离子污染而产生; Ca 离子与其它 6 种金属离子相关性均不显著, 说明 Ca 离子的

来源单一。考虑到彭溪河属于山地河流,岩石可能是 Ca 离子的主要来源,而河床岩石中不含有或含有微量其它 6 种金属元素; Cr、Zn、Cu 和 Pb 这 4 种离子相互

之间相关性极显著 ($P < 0.01$), 该 4 种离子极可能有同源性; Hg 与 Cr、Cu 离子均极显著相关 ($P < 0.01$); Hg 离子与 Fe 离子显著正相关性 ($P < 0.05$)。

表 1 高阳平湖水体溶解态金属离子浓度相关性分析

Table 1 Correlation analysis among the soluble metal ion concentrations in Gaoyang Lake

	Cr	Pb	Cu	Fe	Ca	Zn	Hg
Cr	1.00	0.216**	0.903**	0.252**	-0.02	0.276**	0.315**
Pb		1.00	0.361**	0.01	0.05	0.328**	0.13
Cu			1.00	0.244**	-0.01	0.307**	0.315**
Fe				1.00	0.08	0.08	0.173*
Ca					1.00	0.10	-0.06
Zn						1.00	0.10
Hg							1.00

1) * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的; ** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是极显著的

2.2 金属离子在各个水位时期的浓度特征

根据文献[13]对彭溪河水质进行评价。由于篇

幅限制,本文仅列出不同水位时期所研究 7 种金属离子在 4 个采样点的质量浓度范围和特征(表 2)。

表 2 高阳平湖金属离子在各水位时期质量浓度范围和特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Concentrations range and properties of metal ions for each water level period in Gaoyang Lake/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水位时期	项目	Cr	Pb	Cu	Zn	Ca	Hg	Fe
低水位期	最高值	0.003 7	0.015 3	0.004 7	0.026 6	82.6	9.42E-04	0.23
	最低值	0.000 9	0.002 2	0.001 0	0.003 9	63.6	3.74E-05	0.15
	均值	0.002 3	0.008 8	0.002 9	0.015 3	72.5	2.80E-04	0.19
	F	1.7	2.5	1.4	4.3	6.1	7.3	2.6
蓄水期	最高值	0.008 2	0.038 0*	0.009 1	0.040 8	69.7	3.35E-04	0.623
	最低值	0.000 6	0.002 2*	0.002 3	0.000 2	41.3	3.00E-06	0.008 6
	均值	0.000 9	0.020 5*	0.005 6	0.004 3	57.2	3.54E-05	0.12
	F	5.1	2.0*	2.8	2.0	5.0	3.0	3.2
高水位期	最高值	0.026 0	0.027 0*	0.006 9**	0.019 8	61.1	8.38E-05	0.49*
	最低值	0.000 6	0.001 7*	0.001 7**	0.000 4	35.2	3.80E-05	0.13*
	均值	0.001 6	0.014 0*	0.004 3**	0.010 1	48.0	6.42E-05	0.31*
	F	2.2	3.2*	7.2**	5.6	1.6	1.7	3.0*
泄水期	最高值	0.026 8	0.038 0	0.065 0	0.049 1	76.7	6.88E-05	0.053 3*
	最低值	0.000 6	0.000 9	0.000 6	0.0023	43.1	5.14E-06	0.023*
	均值	0.013 9	0.011 6	0.024 3	0.013 8	53.5	6.01E-05	0.17*
	F	3.1	2.4	4.2	1.9	3.4	6.3	3.1*

1) 按照采样点分组, F 值为组间均方与组内均方的比值; 样点使用单因素方差分析, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

按照文献[13],低水位时期,Cu、Zn、Cr 和 Pb 离子质量浓度均低于我国地表水标准(GB 3838-2002,下同) I 类水相应离子质量浓度,Hg 离子质量浓度低于 III 类水 Hg 离子质量浓度,各金属离子在采样点上分布差异不显著;蓄水期,Cu、Zn 和 Cr 离子质量浓度均低于 I 类水标准中相应离子质量浓度,Hg、Pb 离子质量浓度低于 III 类水相应离子质量浓度,各金属离子在采样点上分布差异不显著.高水位时期,Cu、Zn 离子质量浓度低于 I 类水相应离子质量浓度,Cr、Pb 离子质量浓度低于 II 类水 Cr、Pb 离子质量浓度,Hg 离子质量浓度低于 III 类水 Hg 离子质量浓度. Pb 离子分布差异显著($P <$

0.05),Cu 离子分布差异极显著($P < 0.01$);泄水期,Cu 离子质量浓度低于 II 类水 Cu 离子质量浓度,Zn 离子质量浓度低于 I 类水 Zn 离子质量浓度,Hg、Cr 和 Pb 离子质量浓度低于 III 类水相应离子质量浓度,只有 Fe 离子浓度在 4 个采样点上分布显著(ANOVA, $F = 3.1, P < 0.05$);总体上,在高水位和泄水期,即库区干流和支流的缓流时期^[9],部分金属离子,如 Pb、Cu 和 Fe 离子等,在采样点间的质量浓度存在显著差异,而在低水位和重新蓄水期,即库区支流和干流水体流速较快的时期,水质较好,所研究金属离子浓度在采样点间差异不显著;在各水位时期,Zn 离子质量浓度始终低

于 I 类水标准.

2.3 溶解态金属离子与水位时期的关系和来源分析

图 2 显示各金属离子与水位在全部采样周期内

质量浓度随时间的变化. 金属离子数据为各个采样点质量浓度的平均值, Ca 和 Hg 离子的数据部分缺失. 每次采样均使用 GPS 获取当日水位数据.

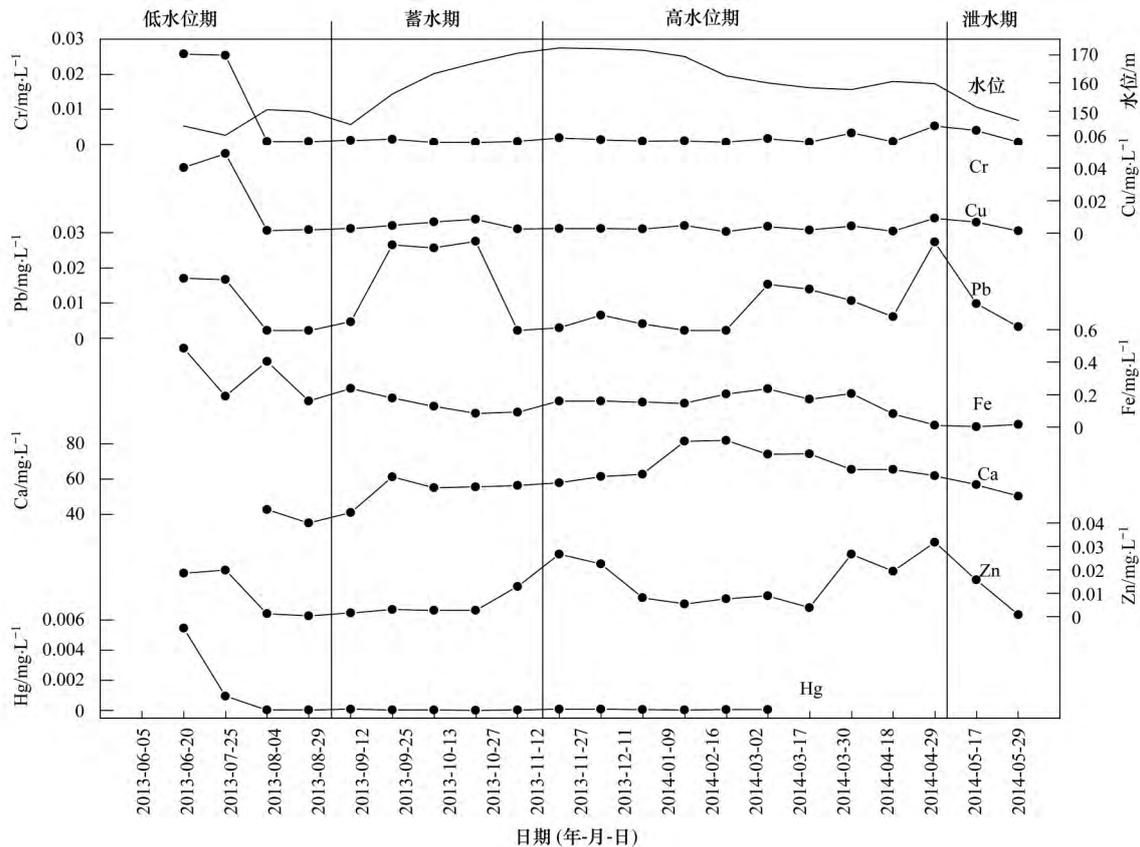


图 2 高阳平湖金属离子质量浓度时间维度上的分布

Fig. 2 Temporal distribution of metal ions in Gaoyang Lake

图 2 中, 从低水位期开始到结束, 各金属离子质量浓度呈逐步降低的趋势; 进入蓄水期, Cr、Zn 和 Hg 离子质量浓度随时间变化不显著, 且低于其它水位时期. Cu、Pb 和 Ca 离子质量浓度随着水位升高而呈上升趋势. Fe 离子随水位升高, 质量浓度逐渐降低; 高水位期, Zn 和 Ca 离子质量浓度出现明显的高峰值. Pb 离子呈现先降低后逐渐升高的趋势. 其它金属离子均没有明显的变化幅度; 泄水期时, 各金属离子质量浓度均呈显著降低趋势, 这可能是由于随着水位降低, 干流倒灌进入澎溪河水量越来越小, 所接收的外源离子变少. 对比各金属离子质量浓度变化趋势, 发现 Cr、Cu 和 Fe 离子质量浓度变化趋势相似度较高, 该 3 种金属元素最有可能有同一来源.

2.4 高阳平湖水体温度垂直变化

垂直方向的水体温度直接或间接影响水环境中各种物理、化学、生物过程, 是湖库研究的重要参数之一^[14]. 高阳平湖段在各水位期垂向水温变化

曲线如图 3 所示.

低水位时期, 水温较其它时期高, 水体最高温度约为 31.4℃, 最低温度约为 26℃, 并出现了明显的分层现象, 混合层范围约为水面至水下 2.6 m 内, 温跃层出现在约 2.6 ~ 6.5 m 范围内; 蓄水期, 水温较低水位时期低, 最高温度约为 25℃, 最低温度约为 23℃, 分层现象逐渐消失. 在冬季高水位时期, 水温较其它时期低, 最高温度约为 18.5℃, 最低温度约为 17.5℃, 垂向水温变化不大, 水体没有出现温度分层, 各水层密度相似. 此时, 各层水中物质可自由交换; 进入春季泄水期, 水体最高温度约为 25℃, 最低温度约为 17.1℃, 水温开始升高, 水体开始出现层化现象, 但混合层不明显.

2.5 溶解态金属离子不同时期垂向分布

以 Hg 离子为例, 分别在低水位期、蓄水期、高水位期、泄水期, 分析离子的空间分布. 图 4 为在各水位时期, 溶解态 Hg 在 4 个采样点表层、中层和底层的分布情况.

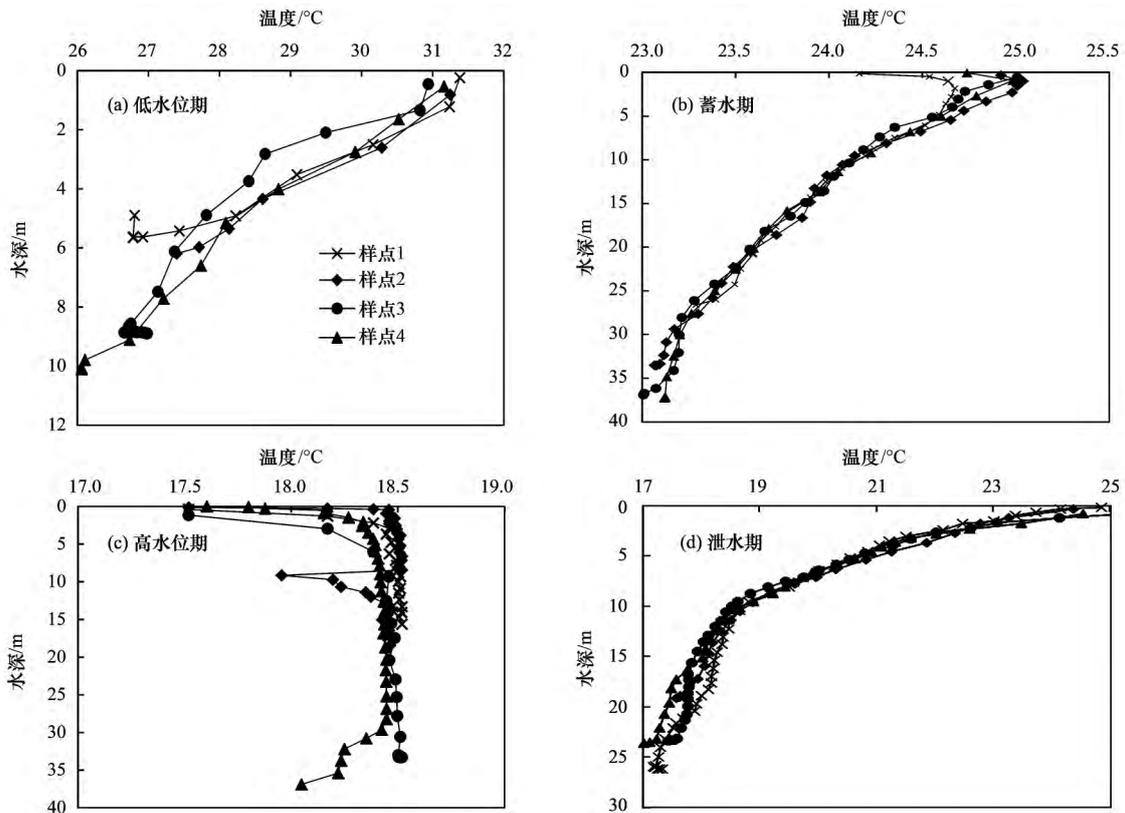


图3 高阳平湖水深-水温变化曲线

Fig. 3 Depth-Temperature curves in Gaoyang Lake

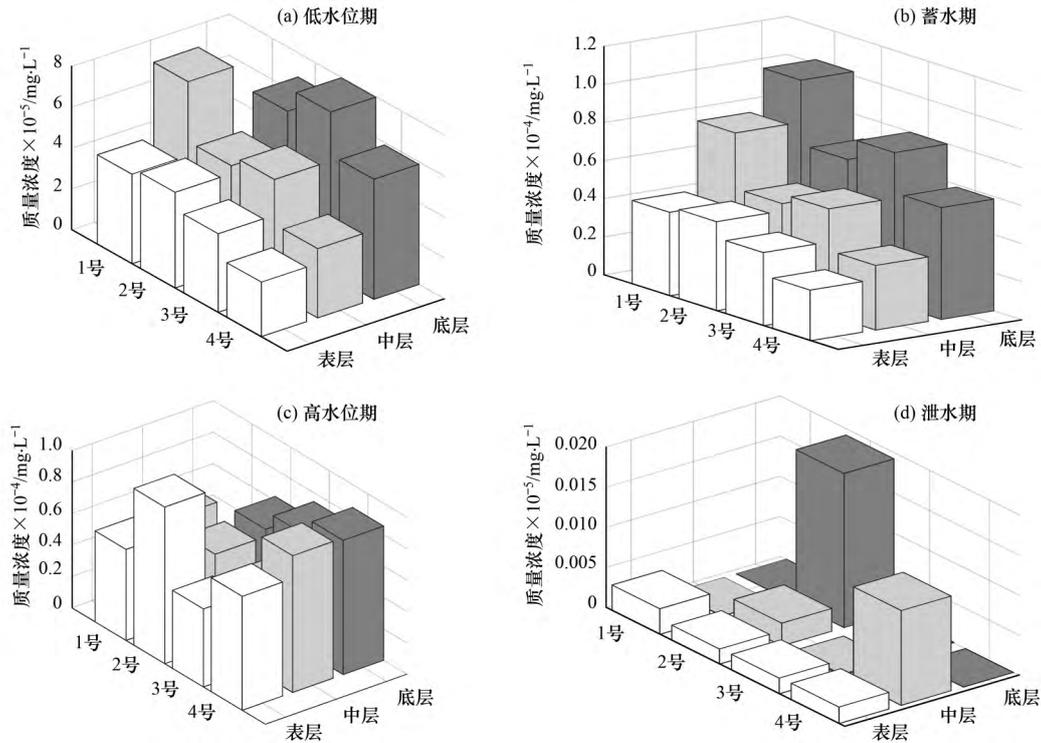


图4 高阳平湖水体溶解态 Hg 在各水位期空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of dissolved Hg for different water levels in in Gaoyang Lake

在不同水位时期, Hg 离子分布特征区别较大。图4中, 低水位时, Hg 离子质量浓度呈现由表层到

底层浓度递增, 以及上游到下游浓度递增的规律, 表示 Hg 离子来源于干流回水和底层; 蓄水期时, 1

号点底层质量浓度显著高于同时期的其它位置的质量浓度, Hg 离子质量浓度出现分层现象, 质量浓度分布情况类似低水位时期; 高水位期, 各层次 Hg 离子质量浓度相似, 没有出现分层现象; 泄水期时, 2 号点底层水中 Hg 质量浓度显著高于同时期其它位置的质量浓度.

低水位、蓄水期和泄水期底层较高的 Hg 离子质量浓度标志着 Hg 离子的内源性污染源; 高水位 4 号点的分布特征表明此时干流是 Hg 离子来源.

Hg 离子的垂直分布受水体分层影响. 夏季低水位时期, 在 4 个采样点均出现了质量浓度分层现象; 冬季高水位期, 水体温度分层消失, 相应地, Hg 离子质量浓度分层也消失.

2.6 高阳平湖电导率与金属离子的关系

电导率表征溶液的导电能力, 与溶解于水中的离子浓度以及离子运动速度有关^[15]. 电导率的变化可以反映水体各离子的变化. 各时期电导率剖面显示(图 5), 高阳平湖水体电导率具有鲜明的季节性特征.

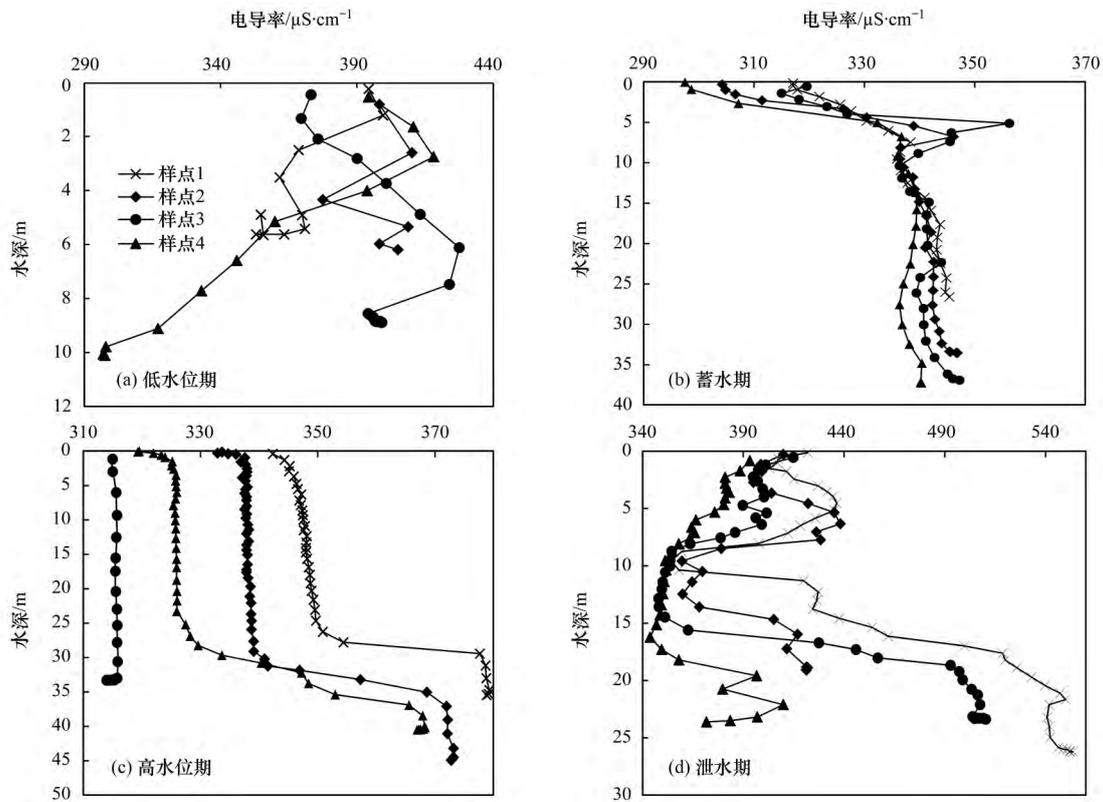


图 5 高阳平湖水深-电导率变化曲线

Fig. 5 Depth-Conductivity curves in Gaoyang Lake

低水位时期, 电导率变化范围为 297.01 ~ 427.57 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 样点 1、2、4 的电导率由表层到底层呈降低趋势, 3 号点呈增加趋势; 蓄水期时电导率范围为 297.50 ~ 346.98 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 从上游至下游, 电导率有降低趋势, 从水体表层至底层电导率增加, 上游来水潜入原有水体导致 2、3 号点电导率在水下 5 ~ 7.3 m 范围突增. 高水位时期, 水体电导率显著低于其它时期低, 电导率范围为 314.40 ~ 378.75 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 垂直方向上电导率趋于均匀, 变化幅度不大; 泄水期时, 电导率升高, 范围为 343.82 ~ 550.70 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 垂直方向上, 电导率变化明显, 底层高于表层, 且底层电导率由上游到下游明显降低.

因为泄水期正值春季, 气温回升, 上游来水温度低于高阳平湖水体, 因而密度较大, 来水潜入平湖中层, 导致平湖中-底层水体电导率升高.

如表 3 所示, 对低水位和泄水期这两个水体垂向电导率变化较大的时期的各金属离子与电导率进

表 3 低水位与泄水期溶解态金属离子浓度与电导率相关性分析

Table 3 Correlation analysis between the soluble metal ion concentration and conductivity during the low water period and sluicing period

项目	Cr	Pb	Cu	Zn	Ca	Fe	Hg
低水位	0.56	-0.1	-0.89	-0.7	0.98	-0.81	0.995
泄水期	-0.75	0.99	0.22	-0.6	0.99	-0.56	0.54

行 Pearson 相关分析,结果 Cr、Pb 和 Cu 离子在两个水位时期与电导率相关性方向相反,Ca 离子浓度始终与电导率呈正相关,Fe 离子与电导率呈负相关.同时还发现所有研究的溶解态金属离子与电导率没有显著相关性.

3 讨论

在三峡库区其它支流的研究上,有研究发现香溪河 Hg 离子污染严重,而 Cr、Pb 和 Cu 离子优于 I 类水标准,且低水位时期浓度大于高水位时期^[16]. 澎溪河水体与香溪河相似.

在研究方法上,前人采用了多种方法对水体金属离子进行研究.有研究通过采集鱼类样品,分析富集在水生生物中的重金属元素来分析水体金属水平^[4,17];也有研究运用同位素示踪技术分析水体重金属的迁移,并认为同位素技术具有应用广泛精度灵敏的优点,但是随着环境变化的复杂性,其重金属污染源也会随之复杂,单一同位素技术不能满足研究需要^[18,19].本研究采用长期高频定点采样的方法研究高阳平湖水体溶解态金属,具有灵活动态的优点,在小范围的水域具有可操作性.

已有研究表明,三峡库区沉积物中 Hg 元素与其它重金属之间无显著相关性^[20],而本文发现澎溪河水体 Hg 离子与 Cr、Cu 和 Fe 离子均呈显著相关,且本文结果显示 Hg 离子主要来源于干流回水.

每年 4~6 月即泄水期与低水位时期,澎溪河高阳平湖出现浅薄混合层(0.5~2 m)、10 m 水深以内的温跃层和河床以上 10~30 m 不等的滞温层,各分层水体温度、密度不同,导致物质在不同分层间难以交换^[21].大量关于高阳平湖的文章探讨了水体营养盐与水体分层的关系,没有对水体分层与金属离子的关系进行讨论^[9,10,22].本文以 Hg 离子为例,发现金属离子的垂直分布受水体分层影响,夏季低水位时期,在 4 个采样点均出现了浓度分层现象,冬季高水位期,水体温度分层消失,相应地,离子浓度分层也消失,在作为过渡时期的泄水期和蓄水期,高阳平湖中心区域金属离子有明显的分层现象,平湖入水口与出水口分层不明显.高阳平湖流速缓慢,具有类似湖泊的地貌环境及水文水力特征^[23].平湖缓慢的水流为水体分层提供了必要的水文条件.

有研究认为,营养盐是水体电导率的主要影响因素^[24],也有研究认为在春夏季,澎溪河电导率与 N、P 等营养盐并无明显相关性^[25],本文结果支持

了前一种观点.将人类活动与河流金属元素结合是当下研究水域金属的新的热点,多篇文章将土地利用情况作为影响水体金属的一个重要因素^[26~28].由于缺乏相关数据,本文未能将人类活动与水体金属离子结合,在今后的研究中,引入土地利用数据做进一步分析.

4 结论

(1) 高阳平湖水质在各水位时期,Cr、Pb、Cu、Zn 和 Hg 均优于地表水 III 类标准,能满足高阳平湖水产养殖需求.

(2) Cr、Pb 和 Cu 离子质量浓度在蓄水期和泄水期显著高于高水位时期质量浓度.

(3) Cr、Pb 和 Cu 来源于干流回水;Fe、Zn 离子主要来源于澎溪河内源;Hg 离子主要来源于干流,同时受内源影响.

(4) 高阳平湖电导率与金属离子没有显著相关性,水体电解质主要由非金属离子组成,如 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等.

参考文献:

- [1] Du Laing G, Rinklebe J, Vandecasteele B, *et al.* Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(13): 3972-3985.
- [2] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, *et al.* Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1-3): 366-372.
- [3] 徐小清,丘昌强,邓冠强,等.三峡库区汞污染的化学生态效应[J].*水生生物学报*,1999,**23**(3): 197-203.
Xu X Q, Qiu C Q, Deng G Q, *et al.* Chemical-ecological effects of mercury pollution in the Three Gorge Reservoir area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(3): 197-203.
- [4] 韦丽丽,周琼,谢从新,等.三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J].*环境科学*,2016,**37**(1): 325-334.
Wei L L, Zhou Q, Xie C X, *et al.* Bioaccumulation and Biomagnification of heavy metals in Three Gorges Reservoir and effect of biological factors [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 325-334.
- [5] Richardson J S, Mackay R J. Lake outlets and the distribution of filter feeders: an assessment of hypotheses [J]. *Oikos*, 1991, **62**(3): 370-380.
- [6] 封丽,李崇明,胡必琴,等.三峡水库正常蓄水后支流沉积物的污染特征[J].*环境科学研究*,2016,**29**(3): 353-359.
Feng L, Li C M, Hu B Q, *et al.* Analysis of pollution characteristics of surface sediments in Three Gorges Reservoir after normal impoundment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(3): 353-359.
- [7] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院.三峡库区小江(澎溪河)流域生态环境综合整治工程可行性研究报告[R].武汉:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院,2004.

- [8] 郭劲松, 李伟, 李哲, 等. 三峡水库小江回水区春季初级生产力[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 591-596.
Guo J S, Li W, Li Z, *et al.* Spring primary productivity in Xiaojiang River backwater area in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 591-596.
- [9] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水动力特征分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5): 143-150.
Li Z, Guo J S, Fang F, *et al.* 1D hydrodynamic model on Pengxi (Xiaojiang) River backwater area in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(5): 143-150.
- [10] 蔚建军. 澎溪河回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [11] 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 1-6.
Lv Y B, Gong Z Y, Lian J, *et al.* Status of water quality in the Three Gorges after the water storage period [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(1): 1-6.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [14] 张玉超, 钱新, 石川忠晴, 等. 浅水型湖泊水温日成层现象的初步探讨——以太湖为例[J]. 四川环境, 2008, 27(3): 45-48.
Zhang Y C, Qian X, Ishikawa T, *et al.* Study on diurnal stratification in a typical shallow lake——Taihu Lake [J]. Sichuan Environment, 2008, 27(3): 45-48.
- [15] 王丽, 延克军, 敬双怡, 等. 交变电磁场对 PFS 溶解液电导率的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(9): 1872-1875.
Wang L, Yan K J, Jing S Y, *et al.* Effect of alternating electromagnetic field on the conductivity of PFS solution [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(9): 1872-1875.
- [16] 张晓华, 肖邦定, 陈珠金, 等. 三峡库区香溪河中重金属元素的分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 269-273.
Zhang X H, Xiao B D, Chen Z J, *et al.* Characteristics of the distribution of Cu, Pb, Cd, Cr, Zn in Xiangxi River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(3): 269-273.
- [17] 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 等. 三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2592-2598.
An L H, Zhang Y Q, Zheng B H, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir areas [J]. Environmental Science, 2012, 33(8): 2592-2598.
- [18] 郝红, 高博, 陆瑾, 等. 铅同位素示踪技术在水环境中的应用研究综述[A]. 见: 2013 年水资源生态保护与水污染控制研讨会论文集[C]. 哈尔滨: 中国环境科学学会, 2013. 194-200.
- [19] 孔慧敏, 王金生, 宋柳霆, 等. 铅同位素在示踪包气带和水环境污染中的应用进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(5): 523-528.
Kong H M, Wang J S, Song L T, *et al.* Advances of lead isotope in tracking Pb pollution sources in aeration zone and water environment [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(5): 523-528.
- [20] 卓海华, 孙志伟, 谭凌智, 等. 三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4633-4643.
Zhuo H H, Sun Z W, Tan L Z, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of the heavy metals content in the surface sediment and the potential ecological risk trends in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4633-4643.
- [21] 付莉, 张磊, 蔚建军, 等. 三峡库区支流回水区水体分层与藻类生长[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2265-2271.
Fu L, Zhang L, Yu J J, *et al.* Water stratification and its relevance to growth of algal community at backwater area in Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2265-2271.
- [22] 周川, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 873-883.
Zhou C, Yu J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 873-883.
- [23] 赫斌, 李哲, 冯婧, 等. 三峡澎溪河回水区高水位期间高阳平湖总磷模型[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 295-302.
He B, Li Z, Feng J, *et al.* Total phosphorus model in Lake Gaoyang during the period of high water level in Pengxi River backwater zone, Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2): 295-302.
- [24] 李秋华, 林秋奇, 韩博平. 广东大中型水库电导率分布特征及其受 N、P 营养盐的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 16-20.
Li Q H, Lin Q Q, Han B P. Conductivity distribution of water supply reservoirs in Guangdong province [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(1): 16-20.
- [25] 姜伟, 周川, 纪道斌, 等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2326-2335.
Jiang W, Zhou C, Ji D B, *et al.* Comparison of relationship between conduction and algal bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2326-2335.
- [26] 江英辉, 谢正磊, 张华, 等. 赣江流域土地利用结构及社会经济对河流可溶性重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(7): 2531-2542.
Jiang Y H, Xie Z L, Zhang H, *et al.* Effect of land use structure and social economy on concentrations of dissolved heavy metal in Ganjiang River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2531-2542.
- [27] 余成, 陈爽, 张路. 坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 499-506.
Yu C, Chen S, Zhang L. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of inflow rivers to northeastern lake Tanganyika [J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 499-506.
- [28] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 72-79.
Yu S, Sun P A, Du W Y, *et al.* Effect of hydrochemistry characteristics under impact of human activity: a case study in the upper reaches of the Xijiang River basin [J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 72-79.