

构皮滩电站沉积物分布与磷赋存形态的研究

周 思^{1 2} 刘永霞^{1 2*} 郭建阳³ 黄绍洁¹

(1. 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550081; 2. 贵州省水污染控制重点实验室, 贵阳 550081;
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081)

摘 要: 乌江渡水库-构皮滩电站江段汇水区域内磷矿开采及化工行业分布密集, 大量含磷废水通过地下水及地表径流进入乌江。构皮滩电站为这些含磷废水的主要受纳水体。为掌握构皮滩电站沉积物空间分布情况及沉积物总磷(TP)、磷的赋存形态等特征, 于2016年10月在乌江渡水库、构皮滩电站设置8个采样点进行采样, 并研究了4个沉积物柱芯磷的赋存形态。结果显示, 构皮滩电站沉积物分布呈大坝至库尾逐渐变薄趋势, 电站坝前沉积物柱芯长度均为10 cm, 库底沉积物开始出现在距离大坝30~60 km之间。乌江渡水库沉积物TP含量在970.52~3626.22 mg/kg, 构皮滩电站沉积物TP含量范围在1587.88~6346.10 mg/kg。乌江渡水库沉积物中的磷赋存形态以NaOH-P及HCl-P为主, 其中又以NaOH-P居多, 其占沉积物TP含量的平均占比为33.91%~49.51%。构皮滩电站沉积物中磷的主要赋存形态以HCl-P、NaOH-P为主。对比国内其他水库、湖泊, 构皮滩电站钙结合态磷(HCl-P)占比明显高于乌江渡水库及其他水库、湖泊的HCl-P占比。

关键词: 构皮滩电站; 沉积物; 空间分布; 磷赋存形态

中图分类号: X824 文献标志码: A

Spatial distribution of sediments and phosphorus forms of sediments Goupitan Reservoir

Zhou Si^{1 2}, Liu Yongxia^{1 2}, Guo Jianyang³, Huang Shaojie¹

(1. Guizhou Environmental Science Research and Design;

2. Key Laboratory of water pollution control and resource utilization research, Guiyang 550081;

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Phosphate mining and chemical industry are densely distributed in the catchment of the Wujiangdu reservoir - Goupitan Reservoir segment in Wujiang River. Large amounts of phosphorus wastewater directly enter Wujiang River through groundwater and surface runoff. To study the characteristic of spatial distribution of sediments and the amounts of total phosphorus (TP) and phosphorus forms in sediments of Goupitan Reservoir, 8 sediment samples are observed and analyzed from Wujiangdu Reservoir and Goupitan Reservoir in October 2016. The results indicated that the sediment distribution tends to be thinner from the dam to the rear of the reservoir. The length of sediment core in the dam is about 10cm. Sediments at the bottom of the reservoir began to appear between 30-60 km to the dam. The total phosphorus in Wujiangdu Reservoir sediment ranged from 970.52-3626.22mg/kg. The total phosphorus in Goupitan Reservoir sediment ranged from 1587.88-6346.10 mg/kg. NaOH-P

基金项目: 乌江流域水体达标方案。

收稿日期: 2017-06-12; 2017-07-20 修回

作者简介: 周思(1984-), 女, 工程师, 从事生态环境保护、环境规划、饮用水保护等研究。E-mail: 52723765@qq.com

通讯作者: 刘永霞(1976-), 女, 研究员, 从事水生态环境保护、环境规划、饮用水保护等研究。E-mail: 38066168@qq.com

and HCl - P were the main forms of phosphorus in Wujiangdu reservoir sediments ,and the amounts of NaOH - P are more than HCl - P. NaOH - P and HCl - P were the main forms of phosphorus in Goupitan reservoir sediments. Compared with the sediments of several lakes and reservoirs in different areas , the percentages of HCl - P are significantly higher than Wujiangdu reservoir's sediments and others.

Keywords: Goupitan reservoir; sediments; spatial distribution; Phosphorus forms

乌江是三峡库区上游南岸最大的支流,是贵州省的第一大河流,在保障全省生态安全、调节气候环境、保障饮水、灌溉、发电、航运等方面起到重要作用。乌江干流水能丰富,目前已建成并投入使用10个大型梯级电站,包括普定水库、引子渡水库、洪家渡水库、东风水库、索风营水库、乌江渡水库、构皮滩水库、思林水库、沙陀水库和彭水水库。乌江同时也是长江上游营养元素的主要来源之一^[1]。贵州省已查明的磷矿资源储量居全国第二位,保有资源储量集中在开阳-息烽、瓮安及福泉片区,三者的累计占全省总量的98%。磷化工及磷矿开采企业分布与贵州省磷矿资源分布呈高度一致性。乌江中游乌江渡水库-构皮滩电站江段南岸的开阳-息烽、瓮安及福泉等区域矿产资源高度集中,流域范围内有磷矿实际在开采点28处,磷肥化工在生产企业24家,大型磷石膏渣场5座。磷矿开采及磷肥生产等工业活动使得乌江中游以下TP超标问题突出,严重影响了乌江干流水质。乌江渡水库、构皮滩电站为这些区域内含磷废水的最终受纳水体。因人工筑坝蓄水人为降低了水的流速,水库对磷的滞留率可达30%~80%^[2]。乌江渡水库及构皮滩电站在长期接纳流域内的大量含磷工业废水后,由于水库对磷的滞留效应,大量非溶解态的磷沉淀到水库底泥中。

近年来,贵州省各级人民政府对乌江内主要TP超标河流洋水河、瓮安河流域开展了磷污染流域综合治理,对贾家堰渣场及34号泉眼等重点污染源进行了分期治理,乌江干流及各入河支流的TP浓度呈逐年降低趋势。湖、库中主要磷的来源包括内源性磷和外源性磷,在外源性磷得到有效的控制后,湖、库沉积物中的内源性磷释放会成为水体中磷的主要来源^[3]。沉积物中磷的赋存形态是了解沉积物内源磷释放机制和影响因素的重要途径,也是湖泊沉积物-水界面营养盐生物地球化学循环研究的重要内容。本文旨在通过对构皮滩水库沉积物分布、TP含量及磷的赋存形式的研究,在构皮滩电站外源输入大幅降低后,对乌江流域磷污染的内源控制提供科学依据。

1 材料与方法

• 42 •

1.1 研究区域概况

构皮滩电站位于贵州省余庆县境内,是乌江流域梯级滚动开发的第五级,距乌江渡水库137 km,控制流域面积43250 km²,占全流域的49%,坝址多年平均流量717 m³/s,坝址多年平均径流量226亿 m³。构皮滩水电站坝顶高程为640.5 m,正常蓄水位630 m,总库容64.54亿 m³,正常蓄水位相对应的水面面积为96.46 km²。电站于2003年11月8日正式开工,2004年11月16日大江截流,2009年7月31日首台机组(5#)投产发电。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 底泥样品采集

本次对乌江干流乌江渡水库-构皮滩电站江段设置8个采样点(表1及图1),其中对照样本乌江渡水库1个,构皮滩电站回水范围34号泉眼下游1个,支流洋水河汇入口下游1个,构皮滩电站干流库区3个间隔为30 km采样点,电站坝址前靠泄洪口

表1 乌江干流梯级电站底泥采样点分布表

编号	点位名称	位置	经纬度(°)
1	乌江渡水库 (对照点)	水库泄洪口附近	106.758976 27.319660
2	34号泉眼	34号泉眼下游	106.770573 27.315545
3	洋水河汇入口	洋水河入河口下游	106.895942 27.264103
4	构皮滩水库 1号点	构皮滩水库乌江干流库区上游	107.079168 27.326068
5	构皮滩水库 2号点	构皮滩水库库区1号点下游30km	107.152792 27.233250
6	构皮滩水库 3号点	构皮滩水库库区2号点下游30km	107.414257 27.332021
7	构皮滩水库 4号点	构皮滩水库大坝泄洪口附近	107.631928 27.374708
8	构皮滩水库 5号点	构皮滩水库大坝离泄洪口较远侧	107.633358 27.375862

侧及离泄洪口较远侧点位各1个,利用无扰动沉积物采样装置采集沉积物柱芯。对所采集到的沉积物柱芯,乌江渡水库按底泥实际淤积厚度上、中、下3层进行分割,按2 cm进行分样;构皮滩电站所采集到的3个柱芯按1 cm进行分割。

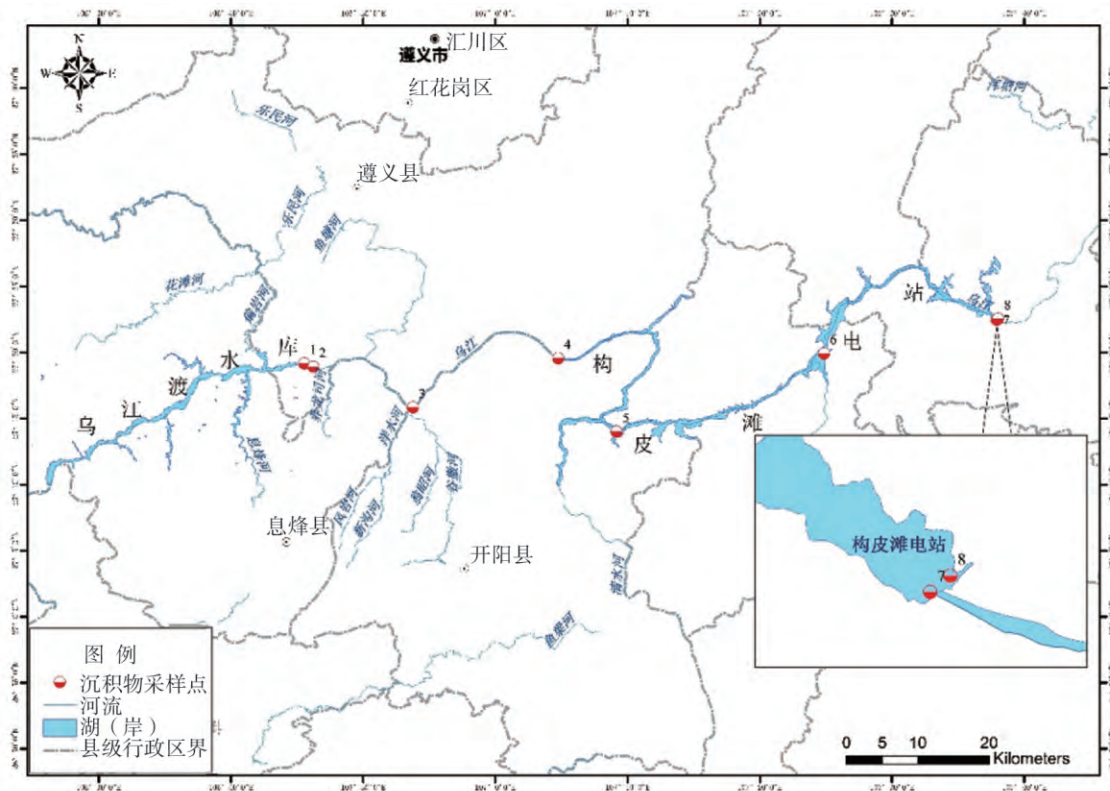


图1 乌江渡水库-构皮滩电站沉积物采样点位分布图

1.2.2 样品的分析方法

(1) 底泥 TP 的测定

称取0.2 g 沉积物样品置于坩埚内,在500℃下灰化2h,待至室温,转移至50ml离心管内,加入3.5 mol/L的HCl 20 ml,震荡16 h后,3600 r/min,离心15 min,取1 ml上清液至25 ml比色管内,用4 mol/L NaOH调节pH至中性,定容至25 ml,加1 ml抗坏血酸,2ml钼酸盐,摇匀,显色15 min,用紫外分光光度计700 nm波长测定吸光度,根据工作曲线获得TP。

(2) 磷形态提取及测定

磷形态提取及测定采用Hupffer等发展研究的沉积物磷形态化学连续提取法^[4],将沉积物中磷分为五种形态,具体方法为:(1) 1mol/L NH₄Cl在pH = 7条件下震荡0.5 h,提取NH₄Cl - P;(2) 0.11 mol/L NaHCO₃/0.11 mol/L Na₂S₂O₄,即BD溶液,震荡1 h,提取BD - P;(3) 1 mol/L NaOH,震荡16 h,提取NaOH - SRP;(4) 上个步骤中的提取液利用过硫酸钾溶液消解后测定其TP含量,此值与NaOH - SRP的差值为NaOH - NRP;(5) 0.5 mol/L HCl震荡16 h,提取HCl - P;(6) 残渣在500℃条件下灰化2 h,3.5 mol/L HCl震荡16 h,提取Rest - P。磷形态分类方法是根据不同提取剂和提取条件进行的分类,上述方法中各种磷形态的具体含义为: NH₄Cl - P: 孔隙水中松散吸附在物质表

面的(如铁和CaCO₃表面)立即可用的磷; BD - P (SPR): 氧化还原敏感的P,主要指被铁的氢氧化物和锰的化合物约束的磷; BD - P (NRP): 有机磷; NaOH - P (SRP): 可与OH⁻离子进行交换的铁、铝金属氧化物约束的磷,无机磷化合物; NaOH - P (NRP): 微生物磷,包括碎屑中有机磷和聚磷,以及腐殖酸化合物结合的磷; HCl - P (SRP): 碳酸盐结合的磷和磷灰石磷,微量的水解有机磷; HCl - P (NRP): 有机磷; Rest - P: 有机磷和其他耐火物质中的磷。

2 结果与分析

2.1 构皮滩电站底泥空间分布情况

根据采样结果,乌江渡水库坝前底泥深度为60 cm。34号泉眼、洋水河汇入点属于构皮滩电站回水范围,但水深小于2 m,水流急缓,河床以乱石与沙砾为主,无沉积物。构皮滩电站1号点属电站库区,水深为12 m,河床为乱石,无沉积物。构皮滩电站2号点水深为60 m,河床为乱石,无沉积物。构皮滩电站3号点距大坝31.75 km,水深为120 m,采集到沉积物柱芯5 cm。构皮滩电站4号点、5号点水深分别为150 m、180 m,采集到沉积物柱芯均为10 cm。8个采样点所采集沉积物水深及柱芯长度见表2。根据采集结果分析,构皮滩电站沉积物

分布呈大坝至库尾逐渐变薄趋势,库底沉积物开始出现在距离大坝 30 ~ 60 km 处。构皮滩电站自 2009 年蓄水发电至 2016 年采样时共 8 年时间,电站坝前沉积物柱芯长度均为 10 cm,沉积物柱芯长度基本符合相邻地区深水湖库沉积速率的研究结果。根据中国科学院地球化学研究所对红枫湖、百花湖底泥沉积速率的研究,红枫湖的平均沉积速率 1.05 cm/a、百花湖的平均沉积速率 1.25 cm/a^[5],乌江渡水库的几何沉积速率变化的范围可能在 0.46 ~ 1.00 cm/a 之间^[6]。构皮滩电站坝前的沉积物累积速率与前期研究的乌江渡水库沉积速率范围基本一致。

表 2 采样点水深及采集柱芯长度

编号	点位名称	水深/m	所采沉积物深度/cm
1	乌江渡水库(对照点)	72	60
2	34号泉眼	<2	0
3	洋水河汇入点	<2	0
4	构皮滩水库1号点	12	0
5	构皮滩水库2号点	60	0
6	构皮滩水库3号点	120	5
7	构皮滩水库4号点	150	10
8	构皮滩水库5号点	180	10

2.2 构皮滩电站底泥 TP 含量

根据对乌江渡水库及构皮滩电站所采集底泥 TP 含量的测定结果,乌江渡水库沉积物 TP 含量在 970.52 ~ 3626.22 mg/kg,构皮滩电站沉积物 TP 含量范围在 1587.88 ~ 6346.10 mg/kg。乌江渡水库沉积物中表层的 TP 含量明显高于底层 TP 含量,上部沉积物 TP 含量均值为 3097.57 mg/kg,中部沉积物 TP 含量均值为 2198.01 mg/kg,下部沉积物 TP 含量均值为 1431.05 mg/kg。构皮滩 3 号点 TP 含量在 1587.88 ~ 5222.26 mg/kg 之间,TP 含量随沉积物深度逐层下降。构皮滩电站 4 号点沉积物 TP 含量在 2108.68 ~ 6346.10 mg/kg,表层沉积物 TP 含量均值为 5621.79 mg/kg,中层沉积物 TP 含量均值为 2614.99 mg/kg,底层沉积物 TP 含量均值为 4733.65 mg/kg,TP 含量表层 > 底层 > 中层。构皮滩电站 5 号点沉积物 TP 含量在 1837.06 ~ 4109.02 mg/kg,表层沉积物 TP 含量均值为 3476.30 mg/kg,中层沉积物 TP 含量均值为 2550.42 mg/kg,底层沉积物 TP 含量均值为 3506.20 mg/kg,TP 含量底层 > 表层 > 中层。

乌江渡水库及构皮滩电站沉积物的主要磷污

染来源分为 2 类:一类是工业污染源,包括受大型磷石膏渣场高浓度含磷渗滤液污染的地下水及磷化工企业生产废水;另一类为网箱养殖产生的饵料残渣及鱼类粪便。乌江渡水库入库河流息烽河支流大干沟河、桂花泉等曾经受到开磷矿业集团贾家堰渣场渗滤液渗漏污染,2001 年对大干沟河的监测数据显示 TP 浓度高达 112 mg/L^[7],近年来开磷矿业集团针对大干沟河、桂花泉及贾家堰渣场进行了污水回用及渣场防渗等治理措施,到 2016 年息烽河口 TP 年均浓度能够达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类标准,乌江渡水库沉积物来源的工业污染源得到大幅减少。另一主要污染来源于网箱养殖业所产生的磷,据 2016 年渔业养殖现状调查数据显示,乌江渡水库的网箱养殖面积为 76.03 万 km²,年产量为 26962 t,据估算每年有 350.07 t 磷进入水体。构皮滩电站磷污染的主要工业污染源为位于乌江渡水库坝下右岸 1 km 处 34 号泉眼及洋水河、瓮安河等磷矿、磷化工企业分布密集的入库支流。34 号泉眼受开磷矿业集团交椅山渣场渗漏污染,自 2009 年 2 月开始排放高浓度含磷废水至乌江干流,污染初期监测得到的 TP 浓度为 878.99 ~ 8344.77 mg/L^[8],2013-2016 年枯水期 TP 平均浓度为 328.96 mg/L,平水期 249.34 mg/L,丰水期 170.94 mg/L。根据 2014 年乌江渡(三)水文站所测水文数据与 34 号泉眼下游 TP 浓度计算得出 34 号泉眼下游年 TP 通量 13148.17t,开磷矿业集团虽然先后实施了 34 号泉眼一期、二期、三期治理工程,但目前 34 号泉眼污染并未完全消除。洋水河、瓮安河两条主要入库支流由于流域内磷矿、磷化工企业分布较多,洋水河、瓮安河监测断面的 TP 浓度一直超过《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类标准。乌江渡水库的网箱养殖面积为 18.83 万 km²,年产量为 1.05 万 t,每年产生 136.96t 磷直接进入库区进入水体。

本次研究结果与国内及相邻地区水库、湖泊沉积物 TP 含量相比,乌江渡水库、构皮滩电站 TP 含量远高于表 3 中其他水库、湖泊^[9-14],构皮滩电站 TP 含量又高于乌江渡水库。相较其他水库、湖泊污染源以生活源及网箱养殖等来源为主,乌江渡水库及构皮滩电站长期受到高浓度含磷地下水及地表水污染,非溶解态大颗粒磷逐渐沉降到水库底泥中,使乌江渡水库、构皮滩电站 TP 含量处于较高水平。

表3 国内水库基本信息及沉积物 TP 含量对照表

水库名称	所在地区	水面面积 (m ²)	水深 (m)	TP 含量 (mg/kg)	参考文献
构皮滩电站	贵州省遵义市	96.46	-	1587.88 ~ 6346.10	本研究
乌江渡水库	贵州省遵义市、贵阳市	48	154	970.52 ~ 3626.22	本研究
密云水库	北京市	188	30	760.00 ~ 910.00	[9]
密云水库	同上	同上	同上	505.11 ~ 829.56	[10]
红枫湖	贵州省贵阳市、安顺市	57.2	10.5	293.1 ~ 2299.9	[11]
百花湖	贵州省贵阳市	14.5	12.5	1010 ~ 1780	[12]
山仔水库	福建省福州市	-	30	521.23 ± 7.60 ~ 1255.54 ± 11.03	[13]
三峡水库	重庆市、湖北省宜昌市等	1084	70	361.6 ~ 1033.5	[14]

2.3 构皮滩电站底泥赋存形态

乌江渡水库沉积物中的磷赋存形态以 NaOH - P 及 HCl - P 为主,其占比分别为 33.91% ~ 49.51%、16.07% ~ 29.16%, NH₄Cl - P 平均占比为 0.34%,为所有磷赋存形态中占比最低的形态。在 NaOH - P 中,以 NaOH - SRP 磷为主,其平均占比占 TP 含量的 32.77%,上部沉积物 NaOH - P 均值为 1276.26 mg/kg,中部沉积物 NaOH - P 均值为 960.12 mg/kg,下部沉积物 NaOH - P 均值为 502.78 mg/kg,上、中、下部 NaOH - P 含量与 TP 含量变化趋势一致,呈逐级下降趋势。以 HCl - P 赋存形态的磷占比呈随沉积物深度的下降而升高的趋势,上部沉积物 HCl - P 平均占比为 18.80%,HCl - P 均值为 584.61 mg/kg,中部沉积物 HCl - P 的平均占比为 19.89%,HCl - P 均值 437.13 mg/kg,下部沉积物 HCl - P 的平均占比为 28.05%,HCl - P 均值为 398.53 mg/kg。所有乌江渡水库沉积物磷赋存形态中,NaOH - P > HCl - P > BD - P > Rest - P > NH₄Cl - P,以 NH₄Cl - P 形态赋存的磷占比最低,平均占比为 0.34%。

构皮滩电站 3 号点、4 号点及 5 号点沉积物中,磷的主要赋存形态均以 HCl - P、NaOH - P 为主。构皮滩电站 3 号点所采沉积物中,NaOH - P 占 TP 含量的平均占比为 15.57% ~ 35.84%,HCl - P 的平均占比为 27.80% ~ 37.32%。表层 HCl - P 含量明显高于底层 HCl - P 含量,呈逐级降低趋势;NaOH - P 含量分布趋势与 HCl - P 分布趋势相反,由表层到底层逐渐升高。在磷的赋存形态中,HCl - P > NaOH - P > BD - P > Rest - P > NH₄Cl - P。

构皮滩电站 4 号点所采沉积物磷赋存形态中,HCl - P 的平均占比为 30.05% ~ 43.64%,NaOH - P 占 TP 含量的平均占比为 30.13% ~ 39.81%,NH₄Cl - P 占比最低,为 4.07%。上部沉积物中,HCl - P 含量均值为 2009.42 mg/kg,NaOH - P 均值为 1782.85 mg/kg,TP 含量平均占比上 HCl - P 为 35.83%,高

于 NaOH - P 的 33.36%;中部与底部沉积物中 NaOH - P 与 TP 含量平均占比高于 HCl - P,NaOH - P 均值分别为 1980.34 mg/kg、1870 mg/kg。所有赋存形态中,HCl - P > NaOH - P > BD - P > Rest - P > NH₄Cl - P。

在构皮滩 5 号点所采集的沉积物中,磷的赋存形态以 NaOH - P 为首位,占沉积物 TP 的 26.77% ~ 40.22%;其次为 HCl - P,其沉积物 TP 占比为 28.75% ~ 42.86%。上部沉积物中 NaOH - P 含量均值为 1194.39 mg/kg,HCl - P 含量均值为 1131.07 mg/kg,中部沉积物中 NaOH - P 含量均值为 1126.42 mg/kg,HCl - P 含量均值为 887.35 mg/kg,底部沉积物中 NaOH - P 含量均值为 1450.24 mg/kg,HCl - P 含量均值为 1133.27 mg/kg。除中部沉积物中 HCl - P 平均占比高于 NaOH - P 平均占比,上部与底部沉积物 NaOH - P 平均占比高于 HCl - P 平均占比。所有赋存形态中,NaOH - P > HCl - P > BD - P > Rest - P > NH₄Cl - P,以 NH₄Cl - P 形态赋存的磷占比最低,平均占比为 6.73%。

从磷赋存形态来看,对比国内其他水库、湖泊,构皮滩电站钙结合态磷(HCl - P)占比明显高于乌江渡水库及其他水库、湖泊的 HCl - P 占比。在对鄱阳湖、东湖、红枫湖等沉积物赋存形式的研究中^[11,15,16],发现以 NaOH - P 形态赋存的磷占比均高于 HCl - P 占比。构皮滩电站 HCl - P 含量较多的原因可能直接与磷污染物来源相关,上述研究中的湖、库污染来源主要为生活源及网箱养殖等,NaOH - P 是上述湖、库沉积物磷的主要形态。HCl - P 为钙结合态磷,主要包括难溶性碳酸钙矿物,包括羟基磷灰石、过磷酸钙等^[17]。HCl - P 是沉积物中较为惰性的磷形态,稳定性较高,难以被生物利用,一般情况下被看作是永久性磷汇,赋存形态受到 pH 值影响,在弱酸性条件下会有少量的释放。构皮滩电站磷污染的主要来源为 34 号泉眼、瓮安河流域的工业源,根据对乌江渡水库至楠木渡磷迁

移转化的机制研究^[8] 34 号泉眼中主要污染物质为大颗粒含磷物质,并逐渐沉淀成为底泥,这可能是构皮滩电站沉积物中 HCl-P 占比高于其他湖、库

的主要原因。易于释放的 NH₄Cl-P 在构皮滩水库沉积物中比重最小,在三个点位中 NH₄Cl-P 的平均占比为 1.67%、4.07% 及 6.73%。

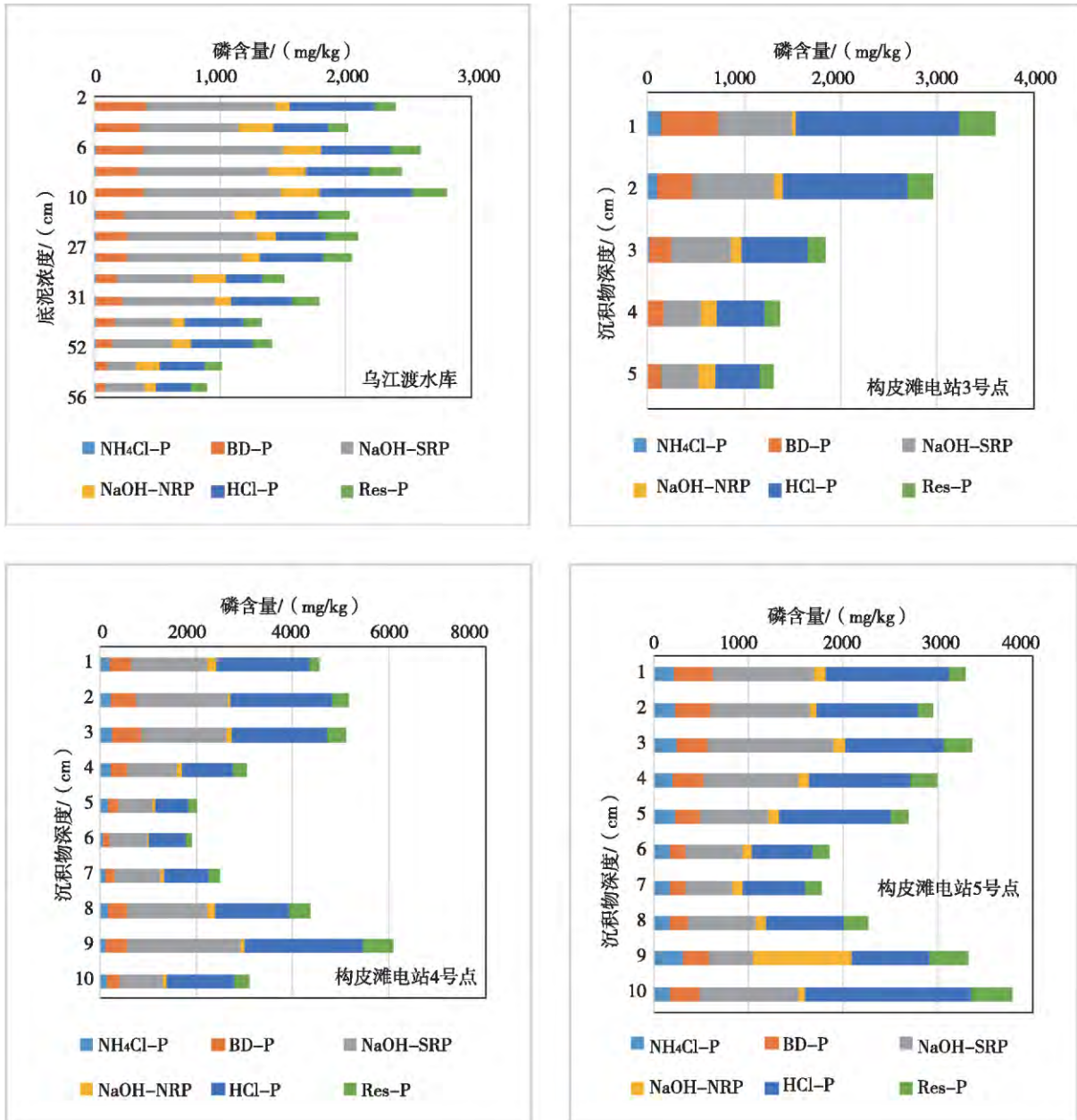


图 2 乌江渡水库、构皮滩电站沉积物磷赋存形态分布图

3 结论

(1) 构皮滩电站自 2009 年蓄水发电至 2016 年采样时共 8 年时间,构皮滩电站沉积物分布呈大坝至库尾逐渐变薄趋势,库底沉积物开始出现在距离大坝 30~60 km 处。电站坝前沉积物柱芯长度均为 10 cm,沉积物柱芯长度基本符合相邻地区深水湖、库沉积速率的研究结果。

(2) 乌江渡水库沉积物 TP 含量在 970.52~3626.22 mg/kg,构皮滩电站沉积物 TP 含量范围在

1587.88~6346.10 mg/kg。乌江渡水库沉积物中表层的 TP 含量明显高于底层 TP 含量。构皮滩 3 号点 TP 含量在 1587.88~5222.26 mg/kg 之间,TP 含量随沉积物深度逐层下降。构皮滩电站 4 号点沉积物 TP 含量在 2108.68~6346.10 mg/kg,TP 含量表层>底层>中层。构皮滩电站 5 号点沉积物 TP 含量在 1837.06~4109.02 mg/kg,TP 含量底层>表层>中层。相较其他水库、湖泊污染源以生活源及网箱养殖等来源为主,乌江渡水库及构皮滩电站长期受到高浓度含磷地下水及地表水污染,非溶解态

磷大颗粒磷逐渐沉降到水库底泥中,使乌江渡水库、构皮滩电站 TP 含量处于较高水平。

(3) 乌江渡水库沉积物中的磷赋存形态以 NaOH-P 及 HCl-P 为主,其中又以 NaOH-P 居多,其占 TP 含量的平均占比为 33.91%~49.51%。构皮滩电站 3 号点、4 号点、5 号点沉积物中,磷的主要赋存形态均为 HCl-P、NaOH-P 为主。对比国内其他水库、湖泊,构皮滩电站钙结合态磷(HCl-P)占比明显高于乌江渡水库及其他水库、湖泊的 HCl-P 占比。构皮滩电站磷污染的主要来源为 34 号泉眼、洋水河及瓮安河流域的工业源,34 号泉眼中主要污染物质为大颗粒含磷物质,并逐渐沉淀成为底泥,这可能是构皮滩电站沉积物中 HCl-P 占比高于其他湖、库的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 向鹏,王仕禄,卢玮琦,等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. 地球与环境,2016,44(5):492-591.
- [2] Billen G, Lancelot C, Meybeck M, et al. N, P and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean [C]// Mantoura RFC, Martin J M, Wollast R. Ocean Margin Processes in Global Change. Berlin: John Wiley&Sons, 1991: 19-44.
- [3] 胡鹏,姚义鸣,胡智强,等. 盐碱地区沉积物磷释放特性及影响因素[J]. 环境工程学报,2013,7(9):327-332.
- [4] Hupfer M, Gfichtler R, Giovano R, et al. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis [J]. Aquatic Sciences, 1995, 57(4): 305-324.
- [5] 王雨春. 贵州红枫湖、百花湖沉积物-水界面营养元素(磷、氮、碳)的生物地球化学作用[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所,2001.
- [6] 杨玉雪,向鹏,卢玮琦,等. 贵州乌江渡水库沉积速率及碳氮埋藏通量估算[J]. 地球与环境,2017,45(1):66-73.
- [7] 丁坚平,毛健全,杨先寿,等. 大干沟岩溶地下水磷污染评价[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2001,30(1):16-19.
- [8] 林少华,丁坚平,刘杰,等. 贵州乌江渡水电站至楠木渡磷迁移转化机制分析[J]. 地下水,2011,33(2):17-19.
- [9] 刘浏,刘晓端,徐清,等. 密云水库沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 岩矿测试,2003,22(2):81-85.
- [10] 秦丽欢,曾庆慧,李叙,等. 密云水库沉积物磷形态分布特征[J]. 生态学杂志,2017,36(3):774-781.
- [11] 王敬富,陈敬安,曾艳,等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征[J]. 湖泊科学,2012,24(5):789-796.
- [12] 方志青,李存雄,张明时,等. 百花湖、阿哈水库底泥及营养盐蓄积量的估算[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2009,27(4):30-33.
- [13] 翁圆,苏玉萍,张玉珍,等. 福建山仔水库不同季节表层沉积物内源磷负荷分析[J]. 湖泊科学,2014,26(6):871-878.
- [14] 张琳,毕永红,胡征宇,等. 三峡水库湖北段沉积物磷形态及其分布特征[J]. 环境科学与技术,2011,32(6):6-9.
- [15] 向速林,周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征[J]. 湖泊科学,2010,22(5):649-654.
- [16] 孟春红,赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. 环境科学,2008,29(7):1831-1837.
- [17] 骆伙仁. 湖库沉积物中磷的化学形态研究综述[J]. 广州环境科学,2012,27(1):6-9.

(上接第30页)

- 国发[2010]46。(2010-12-21)[2017-06-23]. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content_1879180.htm.
- [2] 财政部. 2016年中央对地方国家重点生态功能区转移支付办法[Z/OL]. 财预(2016)117号。(2016-09-09)[2017-05-24]. http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengwengao/wg2016/wg201610/201703/t20170317_2559986.html.
- [3] 环境保护部环境监测司,中国环境监测总站. 国家重点生态功能区县域生态环境质量监测评价与考核技术指南[M]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [4] 环境保护部,财政部. 国家重点生态功能区县域生态环境质量监测评价与考核指标体系[Z]. 环发[2014]32号,2014.
- [5] 环境保护部. 国家重点生态功能区县域生态环境质量监测评价与考核体系实施细则(试行)[Z]. 环办[2014]96号,2014.
- [6] 徐永明. 内蒙古自治区国家重点生态功能区县域生态环境质量考核工作现状与存在问题[J]. 环境与发展,2014,26(1):9-11.
- [7] 钱震,蒋火华,刘海江. 关于国家重点生态功能区县域生态环境质量考核中现场核查的思考[J]. 环境与可持续发展,2012,37(5):34-36.
- [8] 王之明,母国宏. 遥感技术在贵州省生态环境质量评价体系中的应用[J]. 环保科技,2011,17(2):23-27.
- [9] 江川,王之明,黄文琥. 贵州省生态文明建设现状与对策[J]. 中国环境监测,2014,30(3):13-17.