

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭聪, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征稿简则 (4050)
信息 (4085, 4104, 4337)	

蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算

刘心愿¹, 宋林旭^{1*}, 纪道斌^{1*}, 刘德富², 李欣¹, 黄佳维¹, 赵冲¹, 唐咏春¹, 平明明¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 三峡库区汛末蓄水过程改变了支流库湾沉积物赋存环境, 继而影响沉积物磷形态的分布特征和沉积物-水界面过程。本文通过对2016年8月(蓄水前)和10月(蓄水后)香溪河库湾沉积物和上覆水样品的采集分析, 分析了蓄水前后库区干流和支流库湾底部沉积物磷形态分布特征及赋存的环境条件, 估算了沉积物-水界面 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 交换通量。结果表明: 蓄水后沉积物上覆水 pH 增加, 碱性增强; Eh 减少, 还原性增强。沉积物中各形态磷相对含量由 $\text{NaOH-P} > \text{HCl-P} > \text{OP}$ 转变为 $\text{HCl-P} > \text{OP} > \text{NaOH-P}$, 沉积环境的改变是磷形态变化的根本原因。沉积物中 TP 增加了 1.3 倍, 上覆水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 3.7 倍, 间隙水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 8.3 倍, 增加了香溪河库湾沉积物营养盐释放风险。蓄水前后香溪河沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总体均表现为“源”, 但 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 扩散通量由蓄水前的 $-0.0029 \sim 0.0059 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 增加为蓄水后的 $0.0067 \sim 0.1071 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 蓄水后香溪河库湾底部沉积物磷释放量增加。

关键词: 三峡库区; 香溪河; 沉积物; 磷; 释放通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4169-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711189

Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment

LIU Xin-yuan¹, SONG Lin-xu^{1*}, JI Dao-bin^{1*}, LIU De-fu², LI Xin¹, HUANG Jia-wei¹, ZHAO Chong¹, TANG Yong-chun¹, PING Ming-ming¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The sediment storage environment in tributaries has been altered by impoundment of water in the Three Gorges Reservoir area, affecting the distribution of phosphorus forms in sediment and processes at the sediment-water interface. Through collection of sediment and overlying water samples in Xiangxi Bay in August 2016 (before impoundment) and October (after impoundment), the distribution characteristics of sedimentary phosphorus and the environmental conditions of storage before and after impoundment were analyzed. Fluxes of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at the sediment-water interface were also estimated. Results show that pH increased, alkalinity and reducibility were enhanced, and Eh in sediments decreased after impoundment. The relative content of phosphorus in sediments changed as follows: $\text{NaOH-P} > \text{HCl-P} > \text{OP}$ to $\text{HCl-P} > \text{OP} > \text{NaOH-P}$; this could be attributed to changes in the depositional environment. Compared to pre-impoundment values, TP values after impoundment in sediment, overlying water $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$, and interstitial water $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ were 1.3 times, 3.7 times, and 8.3 times higher, increasing the risk of nutrient release in sediments of Xiangxi Bay. The manifestation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in sediments of Xiangxi River generally is “source” pre-impoundment and post-impoundment, but the $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ diffusive flux increased from $-0.0029 \sim 0.0059 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ pre-impoundment to $0.0067 \sim 0.1071 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ post-impoundment. The release of phosphorus from sediments at the bottom of Xiangxi Bay increased after impoundment.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; sediment; phosphorus; diffusive flux

三峡水库蓄水后, 库区水位升高, 水流减缓^[1,2], 水动力条件由典型的河流水体转变为类似湖泊型缓流水体^[3], 使得库湾和支流水体的滞留时间延长^[4], 有利于泥沙沉降, 沉降到底部的泥沙富集了大量氮、磷、重金属等污染物以及生物残体等有机物^[5]。有研究发现沉积物性质、磷赋存形态和环境因子的改变(水温、pH 值等)对沉积物磷吸附-释放均有影响^[6,7]。在三峡水库运行过程中上覆水

环境条件发生改变, 导致沉积物-水界面环境梯度

收稿日期: 2017-11-20; 修订日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(91647207); 国际科技合作与交流专项项目(2014DFE70070); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51509086); 国家自然科学基金项目(51779128, 41501297); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-02)

作者简介: 刘心愿(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物迁移转化过程, E-mail: 848144686@qq.com

* 通信作者, E-mail: 280825327@qq.com; 394816707@qq.com

变化, 沉积物源-汇过程复杂. 目前对三峡水库蓄水过程支流库湾底泥内源释放问题的研究较少, 杨正健等^[8]仅对三峡水库蓄水过程水库干流与支流库湾间水温、pH 值、营养盐等因子的差异进行了比较分析; 牛凤霞等^[9]对三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量进行了估算; 王颖等^[10]在蓄水期对三峡水库主要支流沉积物的磷吸附-释放特性进行了分析; 李欣等^[11]在泄水期对香溪河沉积物磷形态及吸附-释放特性进行了研究. 但未对三峡库区蓄水前后沉积物磷吸附-释放特性进行对比研究. 本文以三峡水库典型支流香溪河库湾为研究对象, 通过对比分析蓄水前后香溪河库湾沉积物-水界面不同磷形态营养盐浓度的分布特征, 并利用一维孔隙水扩散模型 (Fick 定律) 估算蓄水前后香溪河库湾内源磷扩散通量, 分析蓄水前后香溪河沉积物磷释放特性, 以期为沉积物内源磷负荷的计算及控制提供理论基础, 并为三峡库区的富营养化风险防治提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 香溪河概况

香溪河是三峡库区内距三峡大坝最近的第一大支流, 位于湖北省西部 110°25' ~ 111°06'E、30°57' ~ 31°34'N, 发源于神农架林区, 干流长 94 km, 流域总面积 3 099 km²^[12]. 香溪河流域属亚热带大陆性季风气候, 多年平均气温 16.6℃, 年均降雨量为 1 015.6 mm, 多年平均流量为 40.18 m³·s⁻¹^[13, 14]. 河口距三峡大坝 34.5 km, 河流由北向南, 在秭归香溪汇入水库干流.

1.2 样点布设

根据三峡水库 145 m 蓄水的回水范围和香溪河的地形地貌特征、水体的富营养化时空特性, 从香溪河河口至高阳镇沿河道中泓线每间隔约 6km 布设 1 个采样点, 共 4 个, 采样点编号依次为 1、2、3、4, 另外在水库干支流交汇处设置一个采样点 CJ, 具体见表 1 和图 1.

表 1 采样点坐标及距河口的距离

Table 1 Coordinates and distance to the mouth of the estuary from sampling sites

采样点	距河口的距离 /km	纬度(N)	经度(E)
1	2.80	30°59'24.0"	110°45'46.7"
2	12.70	31°04'55.6"	110°46'03.9"
3	19.20	31°08'02.7"	110°46'42.2"
4	27.60	31°11'57.6"	110°45'10.8"
CJ	/	30°57'32.0"	110°44'55.0"



图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of sites

1.3 样品采集与处理

于 2016 年 8 月 (蓄水前) 和 10 月 (蓄水后) 采集香溪河库湾沉积物及上覆水样品, 先利用柱状采样器 (Φ60 × 1 000 mm) 将上覆水和沉积物一同采集上来, 随后以 2 cm 的间隔将采泥器沉积物-水界面向上 20 cm 以内的水逐一吸出, 并分别倒入 300 mL 聚乙烯水样瓶中储存; 沉积物-水界面向下以 2 cm 的间隔切取沉积物样品并分装入聚乙烯离心管中. 每个采样点的上覆水和沉积物样品均采集 3 次, 且将 3 次样品混合作为该采样点最终样品, 随后水样和沉积物样品均放入冷藏箱中保存, 带回实验室后在 24 h 内完成处理.

1.4 分析指标与方法

温度 (T) 利用美国 Hydrolab DS5 多参仪测定; pH、Eh 采用 ST300 便携式 pH/ORP 计测定; 沉积物不同磷形态含量采用 SMT (standards measurements and testing)^[15]连续提取法进行分析; 沉积物间隙水的获取: 在室温条件下, 采用 DL-5M 型低速冷冻离心机在 2 000 r·min⁻¹下离心 30 min, 将离心出的上清液倒入 50 mL 离心管中, 放入冰箱冷藏; 上覆水和沉积物间隙水样品需经孔径为 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤, 并在 24 h 之内按文献^[16]完成 ρ (PO₄³⁻-P) 的测定. 数据采用 Origin 9.0 插图制作.

2 结果与分析

2.1 上覆水温度(T)、pH 和 Eh 的空间分布特征

2.1.1 温度(T)

香溪河 2016 年蓄水前后上覆水中的温度空间分布如图 2 所示。从中可知, 自上游到河口下游蓄水前温度沿程呈逐渐升高的变化趋势, 最低温度为 20.9℃, 最高温度为 26.8℃; 蓄水后香溪河上覆水温度分布特征与蓄水前一致, 变化范围为 17.8 ~ 20.5℃。受上游来水影响, 库湾上游上覆水温度蓄水前后均最低。

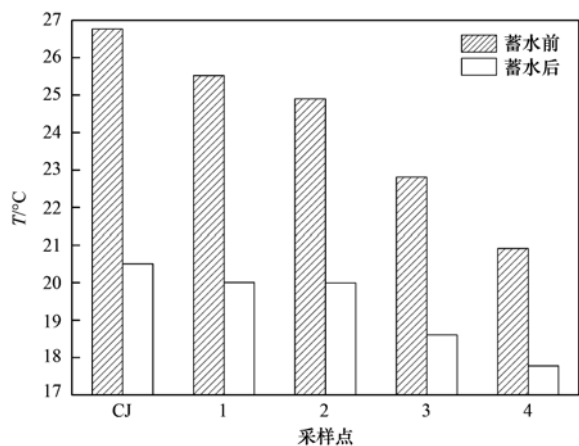


图 2 蓄水前后上覆水中温度的空间变化

Fig. 2 Spatial changes in temperature of overlying water before and after impoundment

2.1.2 pH

图 3 表示的是香溪河蓄水前后上覆水和沉积物间隙水 pH 的空间变化, 从中可知, 蓄水前上覆水 pH 从上游到河口下游总体上缓慢降低, CJ 采样点与库湾中游 pH 值接近, 上覆水 pH 变化范围为 6.94 ~ 7.53, 平均值为 7.27, 呈弱碱性; 蓄水前沉积物间隙水 pH 中上游低于河口处, 沉积物间隙水 pH 变化范围为 6.4 ~ 6.75, 平均值为 6.57, 呈弱酸性; 蓄水前上覆水 pH 从上游到河口下游均大于沉积物间隙水 pH。蓄水后上覆水 pH 从上游到河口下游逐渐升高, CJ 采样点 pH 达到最大值 8.37, 上覆水 pH 变化范围为 7.43 ~ 8.37, 平均值为 7.77, 呈弱碱性; 蓄水后沉积物间隙水 pH 从上游到河口下游总体上缓慢升高, 在 1 号采样点达到最大值 7.34, 沉积物间隙水在河口下游段呈弱碱性, 中上游段呈弱酸性, 整个库湾沉积物间隙水 pH 变化范围为 6.58 ~ 7.34, 平均值为 6.93; 蓄水后上覆水 pH 从上游到河口下游均大于沉积物间隙水 pH。蓄水后上覆水和沉积物间隙水 pH 从上游到河口下游总

体上均大于蓄水前上覆水和沉积物间隙水 pH, 在河口下游段受蓄水过程干流水体倒灌影响, 上覆水 pH 较蓄水前平均增加 1.09, 沉积物间隙水 pH 较蓄水前平均增加 0.62; 在中上游段受上游来水影响, 蓄水后上覆水和沉积物间隙水 pH 较蓄水前变化较小。

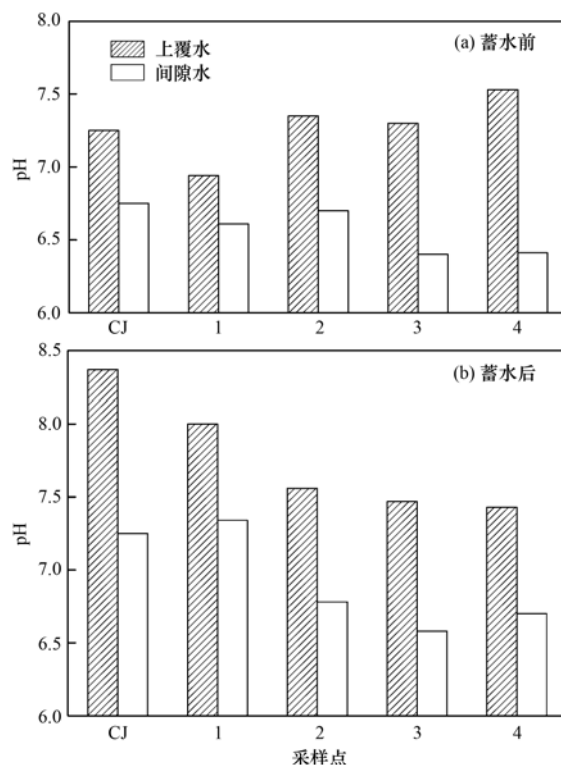


图 3 蓄水前后上覆水和沉积物间隙水 pH 的空间变化

Fig. 3 Spatial changes in pH of interstitial water, overlying water, and sediments before and after impoundment

2.1.3 Eh

图 4 表示的是香溪河蓄水前后上覆水 Eh 的空间变化, 从中可知, 蓄水前上覆水 Eh 呈现中间高

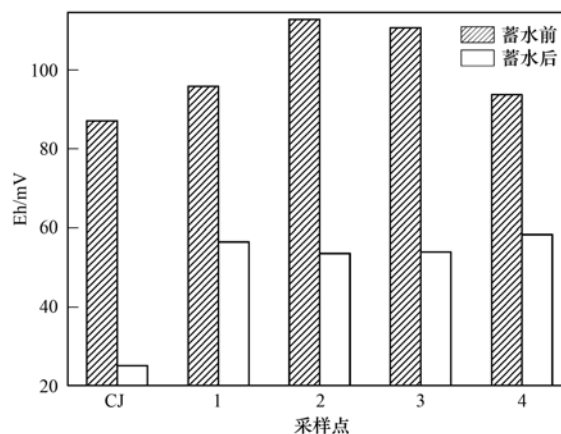


图 4 蓄水前后上覆水中 Eh 的空间变化

Fig. 4 Spatial changes in Eh of overlying water before and after impoundment

两头低的分布特征,而蓄水后 Eh 从河口到库湾上游总体呈现逐渐升高的趋势.蓄水前 CJ 采样点与库湾下游 Eh 值接近,上覆水 Eh 变化范围为 87.15 ~ 112.90 mV,平均值为 100.11 mV,呈弱还原性;蓄水后库湾 CJ 点位 Eh 取得最小值 25.33 mV,其他各采样点 Eh 相差不大,上覆水 Eh 变化范围为 25.33 ~ 58.50 mV,平均值为 49.66 mV,呈弱还原性.蓄水后库湾上覆水 Eh 明显低于蓄水前,平均降低了 50.45 mV.

2.2 沉积物磷形态的空间分布特征

图 5 表示的是蓄水前后香溪河沉积物不同磷形态的空间变化,从中可知,蓄水前香溪河库湾沉积物中 $\rho(\text{NaOH-P})$ 范围为 60.28 ~ 754.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 339.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{HCl-P})$ 范围为 90.99 ~ 790.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 304.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{OP})$ 范围为 78.49 ~ 282.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 166.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.沉积物中 $\rho(\text{NaOH-P})$ 较 $\rho(\text{HCl-P})$ 相当,但高出 $\rho(\text{OP})$ 一个数量级.蓄水后香溪河库湾沉积物中 $\rho(\text{NaOH-P})$ 范围为 81.31 ~ 678.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 234.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{HCl-P})$ 范围为 540.20 ~ 3484.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 1234.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{OP})$ 范围为 124.17 ~ 824.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 366.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.沉积物中 $\rho(\text{HCl-P})$ 较 $\rho(\text{NaOH-P})$ 和 $\rho(\text{OP})$ 高出数个数量级,沉积物磷主要以 HCl-P 的形态存在.蓄水后香溪河沉积物 $\rho(\text{NaOH-P})$ 平均值较蓄水前减少了 104.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,沉积物 $\rho(\text{HCl-P})$ 平均值较蓄水前增加了 4 倍,沉积物 $\rho(\text{OP})$ 平均值较蓄水前增加了 200.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,蓄水后香溪河库湾沉积物磷形态从 NaOH-P 和 HCl-P 为主的磷形态存在形式变成了仅以 HCl-P 为主的磷形态存在形式.

从沿程上看,蓄水前沉积物 $\rho(\text{NaOH-P})$ 从干支流交汇处到上游表现为中间低两头高的分布特征,在 2 号采样点存在最小值 275.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,沉积物 $\rho(\text{HCl-P})$ 和 $\rho(\text{OP})$ 均表现为从干支流交汇处到上游整体上呈现逐渐升高的分布特征,在 4 号采样点分别达到最大值 556.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 197.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.CJ 采样点沉积物除 $\rho(\text{NaOH-P})$ 的平均值高于香溪河沉积物 $\rho(\text{NaOH-P})$ 的平均值外, $\rho(\text{HCl-P})$ 和 $\rho(\text{OP})$ 的平均值均低于香溪河沉积物 $\rho(\text{HCl-P})$ 和 $\rho(\text{OP})$ 的平均值;从垂向上看,CJ、1 号和 2 号采样点 $\rho(\text{NaOH-P})$ 整体上呈现随深度的增加先升高后降低的趋势;2 号和 4 号采样点 $\rho(\text{HCl-P})$ 呈现随深度的增加先升高后降低的趋势;各采样点

$\rho(\text{OP})$ 沿垂向差异不大.蓄水后沉积物 $\rho(\text{NaOH-P})$ 和 $\rho(\text{HCl-P})$ 除 CJ 采样点外整体表现为先升高后降低的分布特征,分别在 3 号采样点达到最大值 318.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1793.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,沉积物 $\rho(\text{OP})$ 表现为中间高两头低的分布特征,在 2 号采样点存在最大值 493.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.CJ 采样点沉积物除 $\rho(\text{NaOH-P})$ 的平均值高于香溪河沉积物 $\rho(\text{NaOH-P})$ 的平均值外, $\rho(\text{HCl-P})$ 和 $\rho(\text{OP})$ 的平均值均低于香溪河沉积物 $\rho(\text{HCl-P})$ 和 $\rho(\text{OP})$ 的平均值;从垂向上看,CJ 和 1 号采样点 $\rho(\text{NaOH-P})$ 整体上呈现随深度的增加逐渐降低的趋势,3 号采样点呈现随深度增加先升高后降低的变化趋势,2 号和 4 号采样点沿垂向差异不大;CJ、1 号和 4 号采样点 $\rho(\text{HCl-P})$ 呈现随深度的增加逐渐降低的趋势,2 号和 3 号采样点呈现随深度增加逐渐升高的变化趋势;CJ 和 1 号采样点 $\rho(\text{OP})$ 沿垂向差异不大,2 号和 3 号采样点呈现随深度增加逐渐升高的变化趋势,4 号采样点呈现随深度的增加逐渐降低的趋势.蓄水后较蓄水前香溪河沉积物 $\rho(\text{NaOH-P})$ 差值从干支流交汇处到上游整体呈逐渐降低的趋势,最大差值为 154.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;沉积物 $\rho(\text{HCl-P})$ 的差值从干支流交汇处到上游整体呈逐渐升高的趋势,最大差值为 1236.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;沉积物 $\rho(\text{OP})$ 的差值呈现为中间大两边小的分布特征,最大差值为 317.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.3 沉积物-水系统 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 空间分布特征

由图 6 可见,蓄水前各采样点上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 在垂向上呈上下波动的趋势,各采样点之间差距不明显,整体上 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 在 0.01 ~ 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动.从沉积物-水界面垂直向下,整体上 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 在 0.01 ~ 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动.

蓄水后各采样点上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 在垂向上没有明显的变化趋势,呈上下波动的趋势,整体上 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 在 0.05 ~ 0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动.从沉积物-水界面垂直向下,各采样点之间差距显著,整体上 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 在 0.07 ~ 0.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动.从上覆水至沉积物间隙水整个垂向上来看,各采样点的 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 呈现逐渐增大的分布特征.各采样点的上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 的平均值 0.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 低于沉积物间隙水的平均值 0.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此,上覆水中较低的 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 有利于沉积物间隙水中 P 的释放.

蓄水前各采样点上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 平均值为

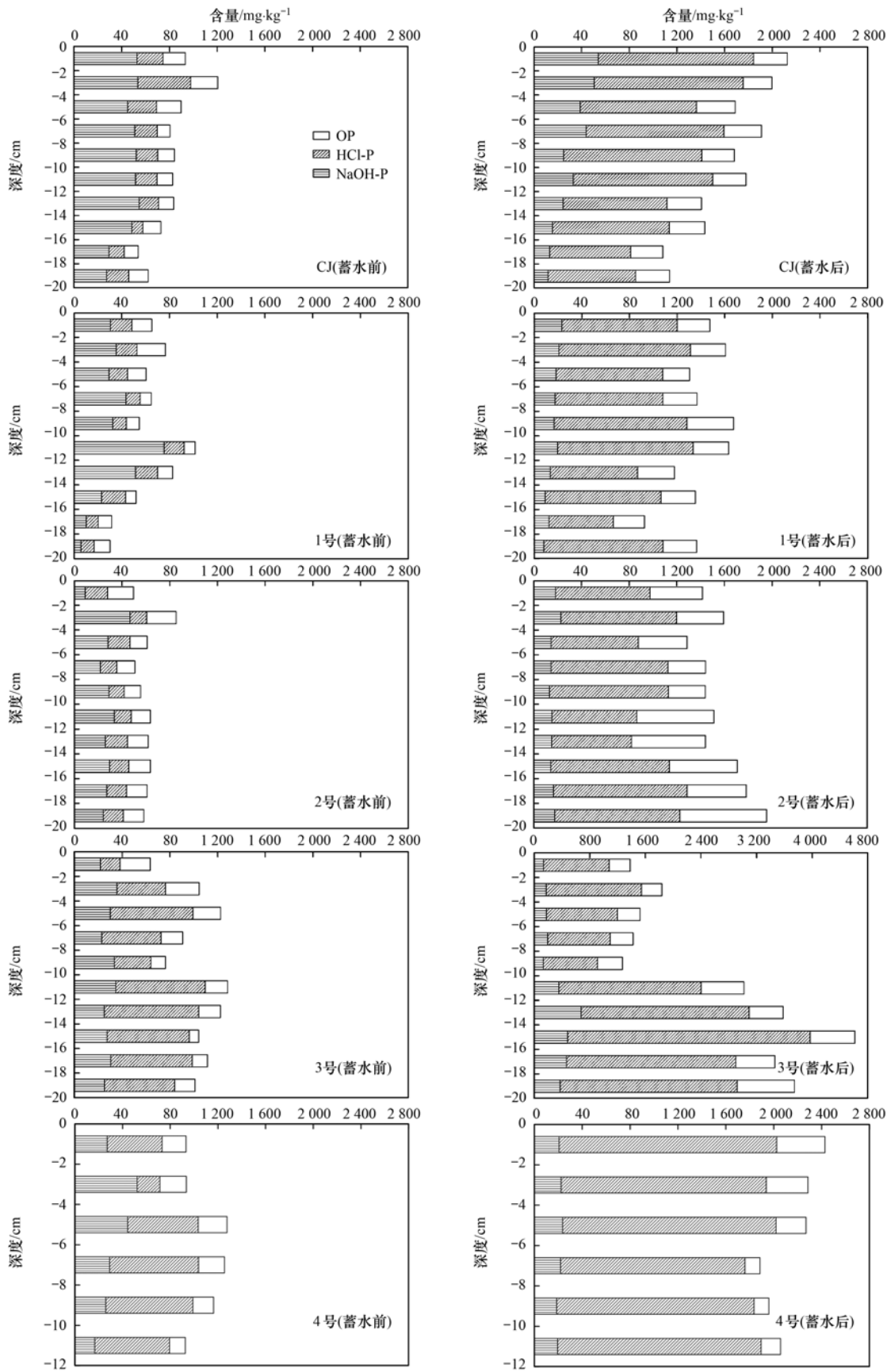


图5 蓄水前后香溪河沉积物不同磷形态的空间变化

Fig. 5 Spatial changes in different phosphorus forms in sediments of Xiangxi River before and after impoundment

$0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 小于蓄水后上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 的平均值 $0.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 蓄水前各采样点沉积物间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 平均值 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 远小于蓄水后沉积物间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 的平均值 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此, 蓄水后香溪河上覆水和沉积物间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 均高于蓄水前, 但沉积物间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 比上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 增加显著.

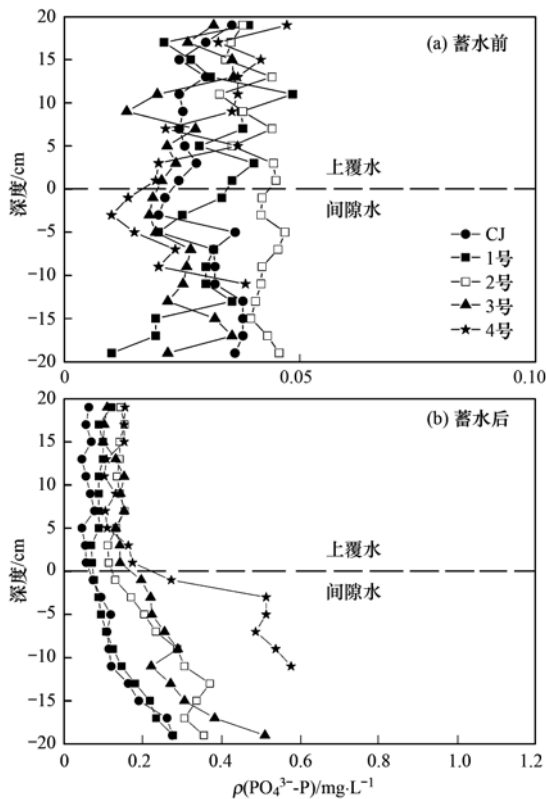


图6 蓄水前后香溪河上覆水、沉积物间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 的空间变化

Fig. 6 Spatial changes in $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ in interstitial water, overlying water, and sediments of Xiangxi River before and after impoundment

2.4 沉积物-水界面磷营养盐的交换特征

分子扩散是沉积物营养元素迁移到水体的主要途径^[17]. 由于上覆水和沉积物间隙水中营养盐存在浓度差, 必然存在一个由高浓度向低浓度进行的分子扩散作用. 分子在孔隙水中的扩散服从 Fick^[18]第一定律, 将表层沉积物(0~4 cm) 间隙水与界面向上覆水 4 cm 左右处的营养盐浓度对深度进行指数拟合, 根据拟合所得表达式对深度(x) 求导, 进而求出沉积物-水界面 $\partial c/\partial x$ 的值, 并运用 Fick 第一定律计算出相应点位 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量 J_s . 根据 Fick 第一扩散定律改进公式^[11]:

$$J_s = -\varphi \cdot D_s \cdot (\partial c/\partial x)_{x=0}$$

式中, J_s 为分子扩散通量, $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; φ 为表层沉积物的孔隙度, %; D_s 为表层沉积物中物质的扩散系数, $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; $\partial c/\partial x$ 为沉积物-水界面的营养盐浓度梯度, $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{cm})^{-1}$. 当 $\varphi \leq 0.7$ 时, $D_s = \varphi \cdot D_0$; 当 $\varphi > 0.7$ 时, $D_s = \varphi^2 \cdot D_0$ ^[19]. 本次孔隙度 φ 根据称量沉积物样品的干质量进行计算; D_0 为无限稀释溶液中溶质的扩散系数, $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; $(\partial c/\partial x)_{x=0}$ 为沉积物上覆水界面的营养盐浓度梯度. 该研究取样在 8 月和 10 月进行, 库湾平均水温分别约为 25.5°C 和 22°C , 为进一步校准温度和孔隙度差异造成的误差, 根据扩散系数(D_0) 和温度(T , 上覆水) 的经验公式^[20], 算出 PO_4^{3-} 无限稀释溶液中溶质的扩散系数分别为 $7.42 \times 10^{-6}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $6.86 \times 10^{-6}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

2.4.1 蓄水前 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量

由表 2 可以看出, 各采样点的相关系数 $R^2 > 0.84$, 指数拟合效果较理想. 由于上覆水和沉积物间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 存在浓度差, 香溪河 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 是由沉积物间隙水向上覆水体扩散, 扩散通量范围为

表 2 蓄水前 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量¹⁾

Table 2 Diffusion flux of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ before impoundment

采样点	拟合曲线	相关系数	$\partial c/\partial x$ $/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{cm})^{-1}$	扩散系数 D_s $\times 10^{-6}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	扩散通量 J_s $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
CJ	$y = 0.0232\exp(0.0402x)$	0.9689	0.0009	4.2099	-0.0029
1 号	$y = 0.0331\exp(-0.051x)$	0.8421	-0.0017	4.5024	0.0059
2 号	$y = 0.0432\exp(-0.009x)$	0.8535	-0.0004	4.3588	0.0013
3 号	$y = 0.0202\exp(-0.032x)$	0.9323	-0.0006	3.9319	0.0019
4 号	$y = 0.0152\exp(-0.087x)$	0.9427	-0.0013	4.8386	0.0043

1) 表中交换通量的负值表示沉积物吸收, 正值则表示沉积物释放, 下同

$-0.0029 \sim 0.0059\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 除 CJ 采样点表现为“汇”外, 香溪河库湾其他采样点的沉积物均表现为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的“源”.

2.4.2 蓄水后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量

由表 3 可以看出, 各采样点的相关系数 $R^2 > 0.84$, 指数拟合效果较理想. 由于上覆水和沉积物

间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 存在浓度差, 香溪河 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 是由沉积物间隙水向上覆水体扩散, 香溪河库湾的沉积物总体上表现为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的“源”. 扩散通量范围为 $0.006\ 7\sim0.107\ 1\ \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

表 3 蓄水后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量

Table 3 Diffusion flux of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ after impoundment					
采样点	拟合曲线	相关系数	$\frac{\partial c}{\partial x}$ / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{cm})^{-1}$	扩散系数 D_s $\times 10^{-6}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	扩散通量 J_s / $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
CJ	$y=0.067\ 7\exp(-0.069x)$	0.949 3	-0.004 6	3.794 9	0.013 2
1 号	$y=0.075\ 4\exp(-0.027x)$	0.882 7	-0.002 0	4.189 7	0.006 7
2 号	$y=0.129\ 2\exp(-0.05x)$	0.843 5	-0.006 5	4.075 6	0.020 2
3 号	$y=0.171\ 5\exp(-0.061x)$	0.956 0	-0.010 5	3.699 4	0.028 4
4 号	$y=0.250\ 9\exp(-0.137x)$	0.895 3	-0.034 4	4.611 6	0.107 1

3 讨论

3.1 沉积物中磷形态分布特征及其影响因素

香溪河库湾沉积物磷形态分析结果表明, 蓄水后库湾沉积物中 TP 增加 1.3 倍, 各磷形态含量变化较大, 上游较下游变化更大, 蓄水前后库湾沉积物磷形态均主要以无机磷形式存在, 蓄水前沉积物中各形态磷相对含量顺序为: NaOH-P ($0.32\times10^3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HCl-P ($0.28\times10^3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > OP ($0.27\times10^3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 蓄水后为: HCl-P ($1.14\times10^3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > OP ($0.57\times10^3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > NaOH-P ($0.22\times10^3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 三峡水库蓄水过程, 含有较多泥沙、营养盐的干流水体以异重流的形式进入支流, 增大了支流库湾水体的泥沙含量以及营养盐浓度^[8]; 在蓄水后流速重新变缓, 由于泥沙具有较强的吸附及沉积特性^[21], 能够吸附水体中颗粒态磷等细颗粒物并沉积^[22], 故蓄水后库湾沉积物 TP 增加; 蓄水后库湾上覆水 pH 增大, 在碱性条件下 HCl-P 更加稳定^[23~26], 故在 TP 增加的情况下, 沉积物中 $\rho(\text{HCl-P})$ 显著增加; 沉积物 Eh ($0\sim200\ \text{mV}$) 性质呈弱还原性, $\text{Fe}(\text{OOH})_3$ 中的 $\text{Fe}(\text{III})$ 还原为 $\text{Fe}(\text{II})$ 释放出 $\text{P}^{[10]}$, 蓄水后库湾上覆水 Eh ($25.33\sim58.50\ \text{mV}$) 减少, 致使沉积物中 $\rho(\text{NaOH-P})$ 降低, 以致在 TP 增加的情况下, $\rho(\text{NaOH-P})$ 保持不变甚至降低; 与牛凤霞^[27]研究相一致, 蓄水后香溪河库湾水位抬升, 两岸消落带被水淹没, 入流水携带的有机颗粒和水体生物死亡残体(浮游动物和植物、细菌等)下沉堆积腐烂分解形成有机沉机物, 使库湾沉积物中 $\rho(\text{OP})$ 增加. 一般来说, 上覆水体的酸碱性会影响磷的赋存形态, 而温度的增加有助于磷的吸附^[28~30]. 蓄水后低温干流水体倒灌进入香溪河库湾, 降低了水库干流与支流库湾间水温之间的差异^[8](见图 2); 库湾上覆水由中性变为弱碱性, 从河口至上游 pH 逐渐减少, 沉积物中 ρ

(HCl-P) 的增加量与之呈现相同的变化趋势; 还原性增强, 从河口至上游 Eh 逐渐升高, 这也是河口处 $\rho(\text{NaOH-P})$ 减少量最多, 中上游段 $\rho(\text{NaOH-P})$ 基本保持不变的主要原因.

3.2 沉积物-水系统中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分布特征及其影响因素

蓄水后香溪河库湾各点沉积物间隙水和上覆水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 较蓄水前均增加, 蓄水后上覆水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 3.7 倍, 间隙水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 8.3 倍. 在蓄水过程中, 水库干流磷营养向支流补给并沉降, 在水库水位稳定或泄水期, 沉积物再悬浮并重新释放到水体中^[31], 是库湾沉积物上覆水和间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 均增加的根本原因. 库湾上游点位 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 较河口处点位增加显著, 蓄水后库湾上游来水动力条件变缓, 导致大量磷营养盐在上游处沉积, $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 增加; CJ 点位流速常年较大, 水体停滞时间较短^[8, 32], 故 CJ 点位蓄水后上覆水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 较蓄水前增加量仅为 $0.02\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 有研究表明铁/铝氧化物结合的 P 对体系中的氧化还原状态较为敏感^[33], 蓄水后上覆水 pH 增加, Eh 降低, 在碱性和弱还原性条件下, 铁/铝氧化物表面对于磷酸根的亲和力降低, 此时较多的 OH^- 离子更易占据矿物表面的吸附位, 从而导致磷酸根离子的释放量增加^[34, 35], 以致蓄水后间隙水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 8.3 倍. 蓄水后沉积物间隙水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 与上覆水存在较大浓度差, 表现为“源”, 上覆水体 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 得到沉积物间隙水的扩散补给, 是蓄水前的 3.7 倍. 与文献^[36, 37]所指出的香溪河沉积物中富集的磷已经成为香溪河水体富营养化的主要来源之一相佐证.

3.3 沉积物-水系统中通量释放的影响机制

沉积物中的营养盐可能会在浓度梯度作用下, 由间隙水向上覆水扩散, 蓄水前香溪河库湾沉积物

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量范围是 $-0.0029 \sim 0.0059 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 除 CJ 采样点表现为“汇”, 其他采样点均表现为“源”; 蓄水后香溪河库湾沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量范围是 $0.0067 \sim 0.1071 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 整个香溪河库湾均表现为“源”, 且扩散通量远大于蓄水前. 而影响营养盐扩散通量的因素包括水温度、沉积物与上覆水磷浓度、pH 值、沉积物性质等^[38, 39]. 王颖^[9]等发现香溪沉积物吸附 P 过程对 pH 值更敏感, 蓄水后上覆水 pH 从上游至河口方向逐渐增加, 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量呈现相反分布规律, 说明此次蓄水后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 扩散通量的增加在一定程度上不受 pH 变化的影响; 蓄水后沉积环境改变, 上覆水还原性增强, 沉积物中铁/铝氧化物与 OH^- 离子结合, 导致 PO_4^{3-} 的释放量增加; 沉积物间隙水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 与上覆水浓度差较蓄水前增加, 也是蓄水后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 扩散通量增大的原因之一.

4 结论

(1) 蓄水前香溪河沉积物中 NaOH-P 和 HCl-P 各占 TP 的 42% 和 38%, 各形态磷相对含量顺序为: NaOH-P > HCl-P > OP. 蓄水后香溪河沉积物中 TP 较蓄水前增加了 1.3 倍, HCl-P 占 TP 的 67%, 各形态磷相对含量顺序为: HCl-P > OP > NaOH-P. 蓄水后上覆水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 3.7 倍, 间隙水 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 是蓄水前 8.3 倍.

(2) 蓄水后香溪河库湾沉积物间隙水和上覆水较蓄水前 pH 分别增加了 0.36 和 0.5, 碱性增强; 上覆水 Eh 减少了 50.45 mV, 还原性增加. 增加了沉积物磷的释放风险.

(3) 蓄水前后香溪河沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总体均表现为“源”, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 扩散通量由蓄水前的 $-0.0029 \sim 0.0059 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 增加为蓄水后的 $0.0067 \sim 0.1071 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 这主要与蓄水后香溪河库湾上覆水还原性的增加和沉积物的性质有关.

致谢: 崔玉洁在文章的修改和润色中给予了极大帮助, 生态水工学课题组的阮洲、桑文璐等在野外采样及试验分析中给予了大力支持, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 等. 三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 23-26.
Zhang Y, Zheng B H, Liu H L, et al. Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Gorges Reservoir after impounding[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(6): 23-26.
- [2] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454.
Liu D F, Yang Z J, Ji D B, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 443-454.
- [3] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1022-1030.
Zheng B H, Zhang Y, Fu G, et al. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6): 1022-1030.
- [4] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生态机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
Yang Z J. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [5] Dong L M, Yang Z F, Liu X H. Factors affecting the internal loading of phosphorus from calcareous sediments of Baiyangdian Lake in North China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(6): 1617-1624.
- [6] 徐进, 徐力刚, 龚然, 等. 鄱阳湖沉积物中磷吸附释放特性及影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 630-635.
Xu J, Xu L G, Gong R, et al. Adsorption and release characteristic of phosphorus and influential factors in Poyang Lake sediment[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 630-635.
- [7] 黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 199-206.
Huang Q H, Wang L, Wang Z J. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(3): 199-206.
- [8] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(4): 358-369.
Yang Z J, Liu D F, Ji D B, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1114-1125.
- [9] 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1308-1314.
Niu F X, Xiao S B, Wang Y C, et al. Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorus in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1308-1314.
- [10] 王颖, 沈珍瑶, 呼丽娟, 等. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1654-1661.
Wang Y, Shen Z Y, Hu L J, et al. Adsorption and release of phosphorus from sediments from the main branches of the Three-Gorges Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(8): 1654-1661.
- [11] 李欣, 纪道斌, 宋林旭, 等. 香溪河沉积物-水界面的营养盐交换特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(8): 1212-1220.
Li X, Ji D B, Song L X, et al. Characteristics of nutrient

- exchange at the sediment-water interface in Xiangxi Bay [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(8): 1212-1220.
- [12] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华与生态调度 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [13] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 141-144.
Tang T, Li D F, Pan W B, *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 141-144.
- [14] 雒文生, 谈戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测 [J]. *水电能源科学*, 2000, **18**(4): 46-48.
Luo W S, Tan G. Three gorges reservoir Xiangxihe Bay water quality prognosis [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2000, **18**(4): 46-48.
- [15] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程: 基本理论与常用测定方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [16] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [17] 汪嘉宁, 赵亮, 魏皓. 潮滩动力过程影响下扩散边界层和沉积物-水界面扩散通量的变化 [J]. *科学通报*, 2012, **57**(8): 656-665.
Wang J N, Zhao L, Wei H. Variable diffusion boundary layer and diffusion flux at sediment-water interface in response to dynamic forcing over an intertidal mudflat [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(13): 1568-1577.
- [18] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学 [J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(6): 590.
- [19] Urban N R, Dinkel C, Wehrli B. Solute transfer across the sediment surface of a eutrophic lake: I. Porewater profiles from dialysis samplers [J]. *Aquatic Sciences*, 1997, **59**(1): 1-25.
- [20] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1974, **38**(5): 703-714.
- [21] 周志德. 20 世纪的泥沙运动力学 [J]. *水利学报*, 2002, **33**(11): 74-77, 83.
Zhou Z D. Advancement of sediment transport mechanics in the 20th Century [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, **33**(11): 74-77, 83.
- [22] 方涛, 张晓华, 肖邦定, 等. 水体悬移质对重金属吸附规律研究——以长江宜昌段为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2001, **10**(2): 185-192.
Fang T, Zhang X H, Xiao B D, *et al.* Adsorption of heavy metals on suspended particulate matter—Taking Yichang section of Changjiang River as an example [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, **10**(2): 185-192.
- [23] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, **254**(1-3): 241-248.
- [24] Golterman H L. The labyrinth of nutrient cycles and buffers in wetlands: results based on research in the Camargue (southern France) [J]. *Hydrobiologia*, 1995, **315**(1): 39-58.
- [25] Dong L M, Yang Z F, Liu X H. Phosphorus fractions, sorption characteristics, and its release in the sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **179**(1-4): 335-345.
- [26] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [27] 牛凤霞. 三峡水库香溪河库湾内源磷负荷研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
Niu F X. Phosphorus characteristics of sediments in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013.
- [28] 张斌亮, 张昱, 杨敏, 等. 长江中下游平原三个湖泊表层沉积物对磷的吸附特征 [J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(4): 595-600.
Zhang B L, Zhang Y, Yang M, *et al.* Characteristics of phosphorus sorption on surface sediments in three shallow lakes in the Yangtze River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(4): 595-600.
- [29] 熊汉锋, 陈治平, 黄世宽, 等. 梁子湖水体 P 的季节变化与沉积物 P 释放初步研究 [J]. *湿地科学*, 2006, **4**(3): 174-178.
Xiong H F, Chen Z P, Huang S K, *et al.* Seasonal dynamics of phosphorus in water and release of phosphorus from sediment in the Liangzi Lake [J]. *Wetland Science*, 2006, **4**(3): 174-178.
- [30] 王圣瑞, 金相灿, 庞燕. 湖泊沉积物对磷的吸附特征及其吸附热力学参数 [J]. *地理研究*, 2006, **25**(1): 19-26.
Wang S R, Jin X C, Pang Y. The adsorption characteristics and adsorption thermodynamics parameter of phosphate on lake sediments [J]. *Geographical Research*, 2006, **25**(1): 19-26.
- [31] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 221-225.
- [32] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响 [J]. *水利学报*, 2010, **41**(6): 691-696, 702.
Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Adverse slope density flow and its ecological effect on the algae bloom in Xiangxi Bay of TGR during the reservoir impounding at the end of flood season [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **41**(6): 691-696, 702.
- [33] Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂ and loading influence [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2437-2447.
- [34] Koski-Vähälä J, Hartikainen H, Tallberg P. Phosphorus mobilization from various sediment pools in response to increased pH and silicate concentration [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(2): 546-552.
- [35] Lijklema L. Interaction of orthophosphate with iron (III) and aluminum hydroxides [J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, **14**(5): 537-541.
- [36] 付长营, 陶敏, 方涛, 等. 三峡水库香溪河库湾沉积物对磷的吸附特征研究 [J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 31-36.
Fu C Y, Tao M, Fang T, *et al.* Characters of phosphorus sorption in sediment of Three Gorges Reservoir Xiangxi Bay [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 31-36.
- [37] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2345-2354.
Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux

- estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- [38] Ospina-Alvarez N, Caetano M, Vale C, *et al.* Exchange of nutrients across the sediment-water interface in intertidal ria systems (SW Europe)[J]. *Journal of Sea Research*, 2014, **85**: 349-358.
- [39] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 溶解无机氮在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量研究[J]. *海洋科学*, 2004, **28**(4): 13-18, 24.
- Jiang F H, Wang X L, Shi X Y, *et al.* Benthic exchange rates and fluxes of dissolved inorganic nitrogen at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2004, **28**(4): 13-18, 24.

环 境 科 学

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	 XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	 LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	 WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	 XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	 HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	 LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	 NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	 CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	 WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	 HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	 HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	 ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	 YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	 WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	 HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	 WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	 YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	 ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	 CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	 SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	 AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	 LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	 SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	 LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	 LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	 ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	 HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	 JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)