

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事	(522)
《环境科学》征稿简则	(722)
信息	(748, 899, 924)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因

杨凡¹, 王丽婧^{2*}, 纪道斌^{1*}, 李虹², 李莹杰², 李鑫¹, 许杨¹, 田盼¹, 吴雅婷³

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 中国环境科学研究院长江经济带生态环境研究中心, 北京 100012; 3. 三峡大学外国语学院, 宜昌 443002)

摘要: 采用2018年三峡水库低水位期(6月)、蓄水期(9月)和高水位期(12月)对库区内的典型一级支流——香溪河与神农溪回水区水质、水动力及环境因子的监测数据, 对比分析了三峡水库内的典型支流在水库不同调度期时水体中磷素的存在形态及成因。结果表明, 香溪河与神农溪库湾水体总磷(TP)质量浓度变化范围分别为0.049~0.168 mg·L⁻¹和0.059~0.152 mg·L⁻¹, 均满足水华暴发0.02 mg·L⁻¹这一阈值。支流库湾水体中总磷(TP)质量浓度均表现为: 蓄水期>高水位期>低水位期, 正磷酸盐(DP)质量浓度表现为: 蓄水期>低水位期>高水位期, 颗粒态磷(PP)质量浓度表现为: 低水位期>高水位期>蓄水期, Pearson相关性分析显示, 支流库湾水体中的总磷和正磷酸盐与水体的温度和pH之间存在显著相关性, 温度与pH是影响沉积物及消落带土壤磷素释放的关键因素。三峡水库在低水位期与高水位期运行时, 支流库湾水体中总磷(TP)均以颗粒态磷(PP)为主要存在形态, 颗粒态磷(PP)所占总磷(TP)的质量分数分别均达到了75%和60%以上, 蓄水期时库湾水流流速减缓, 颗粒态磷(PP)的沉降作用增强, 总磷(TP)以溶解态磷(DTP)为主要存在形态。

关键词: 三峡水库; 低水位期; 蓄水期; 高水位期; 香溪河; 神农溪; 总磷; 正磷酸盐; 颗粒态磷

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0688-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007095

Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir

YANG Fan¹, WANG Li-jing^{2*}, JI Dao-bin^{1*}, LI Hong², LI Ying-jie², LI Xin¹, XU Yang¹, TIAN Pan¹, WU Ya-ting³

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Eco-Environment Research Center of Yangtze River Economic Belt, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Foreign Languages, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A comparative analysis of phosphate occurrence and its genesis during different dispatching periods of representative level I tributaries of the Three Gorges Reservoir was conducted. For this, water quality, hydrodynamic force, and environmental data were examined for backwater areas of the Xiangxi River and Shennong River during the low-water-level period (June), storage period (September) and high-water-level period (December) in 2018. The results suggest that the mass concentration of total phosphorus (TP) in the water body of the coves of Xiangxi River and Shennong River range from 0.049 mg·L⁻¹ to 0.168 mg·L⁻¹ and 0.059 mg·L⁻¹ to 0.152 mg·L⁻¹, respectively, surpassing the 0.02 mg·L⁻¹ threshold for algal blooms. The mass concentration of TP, DP (orthophosphate), and PP (particulate phosphorus) in the coves of the tributaries were ranked as follows: storage period > high-water-level period > low-water-level period for TP; storage period > low-water-level period > high-water-level period for DP; low-water-level period > high-water-level period > storage period for PP. Based on Pearson's correlation coefficients, TP and DP were significantly correlated as well as temperature and pH, which are the key factors influencing the phosphorus in soils and sediments in the water-level-fluctuation zone. During the low-water-level and high-water-level periods of the Three Gorges Reservoir, the TP in the coves of the tributaries mainly exists as PP, accounting for more than 75% and 60%, respectively. The flow in the coves of the tributaries slows during storage periods, meaning that settlement of PP is enhanced, changing the dominance of TP to dissolved total phosphorus (DTP).

Key words: Three Gorges Reservoir; low-water-level period; storage period; high-water-level period; Xiangxi River; Shennong River; total phosphorus; orthophosphate; particulate phosphorus

磷元素是构成生命有机体的重要元素, 是生物分子ATP和ADP组成的关键元素, 同时也是河流生态系统中不可或缺的生源要素^[1]。磷素是限制水环境中自养生物生长与繁殖的主要因子, 将会直接影响到水生态系统中初级生产力的水平^[2~4]。经济合作与发展组织的研究发现80%的湖泊富营养化现象受到磷素的制约^[5]。当水体中磷素浓度超过0.02 mg·L⁻¹时, 将会促进水体富营养化, 促使水华暴发,

导致水质恶化^[6]。水体中磷素的形态主要是颗粒态磷 (particle phosphorus, PP) 和溶解态磷 (dissolved

收稿日期: 2020-07-10; 修订日期: 2020-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404702); 三峡后续工作项目(2017HXXY-05); 国家自然科学基金重大计划项目(91647207); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51709096)

作者简介: 杨凡(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态环境修复, E-mail: 915246310@qq.com

* 通信作者, E-mail: wanglj@craes.org.cn; 394816707@qq.com

total phosphorus, DTP), 溶解态磷 (DTP) 最易被浮游生物进行利用, 颗粒态磷 (PP) 则很难被浮游生物所利用, 水体中溶解态磷含量越高, 则磷的生物可利用率越高, 从而水体富营养化程度越高^[7~13]. 因此研究水体中磷素赋存形态对于控制水体富营养化的发生具有实际指导意义.

河流由于筑坝而形成的“人工湖泊”将会显著改变河流系统中磷素的输送通量、利用方式和形态组成等^[14,15]. 人类活动现在已经逐渐成为影响河流磷素输移转化的主要因素^[16~18], 水库拦截调度对河流磷素的地球化学过程及水生态系统的影响正受到国内外科学家的重视, 调查发现, 世界 292 个大河水生态系统中的 172 个水生态系统受到水坝不同程度的影响^[19,20].

长江是世界上第三大河流, 中国第一大河流, 截止到上世纪末长江流域所建水坝数量已经超过 50 000 座, 总库容高达 $200 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[21]. 三峡大坝是世界上最大的水利工程, 在发挥其防洪、发电和通航等综合效益的同时, 也对三峡库区内的水动力、水质和水生态产生了巨大的影响^[22~25]. 三峡工程不同调度时期特殊的水文水动力条件决定了三峡库区水体磷素输移转换的多样性, 鉴于此, 本文选取三峡库区内的两条受三峡水库调度影响较大的一级支流——香溪河与神农溪, 在三峡水库不同调度期——低水位期、蓄水期和高水位期进行水文水质数据采集, 分析这两条典型支流在三峡工程不同调度期时水体中磷素赋存形态特征及成因, 以期对三峡库区内的支流磷素污染防治提供依据. 同时通过揭示三峡水库在不同调度期时, 库区支流水体中磷

素赋存形态特征的变化规律, 以期对大型水库支流水体中磷污染防治与水环境安全保护提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河是三峡水库湖北库区一级支流, 发源于神农架, 河流全长 97.3 km, 流域范围为 $110^{\circ}25' \sim 111^{\circ}06'E$ 、 $30^{\circ}57' \sim 31^{\circ}34'N$, 流域面积为 $3\,183 \text{ km}^2$, 河口距离三峡大坝约 34.5 km, 河道顺直狭长, 表现为河道型环境特征; 神农溪是三峡库区巴东段典型一级支流, 发源于神农架, 河流全长 60.6 km, 流域范围为 $110^{\circ}18' \sim 111^{\circ}19'E$ 、 $31^{\circ}03' \sim 31^{\circ}12'N$, 流域面积为 $1\,047 \text{ km}^2$, 河口距离三峡大坝约 69.9 km, 河道为葫芦连接状, 表现为过渡性环境特征.

1.2 样点布设

于 2018 年 6 月 (低水位期)、9 月 (蓄水期) 和 12 月 (高水位期) 对香溪河与神农溪整条河流现场进行水质监测. 在香溪河与神农溪流入长江干流的河口处分别布设两个采样点 CJXX 和 CJSN, 在香溪河与神农溪上游源头分别布设两个采样点 XXYT 与 SNYT, 香溪河从河口至河流末端布设 9 个监测点分别为 XX01、XX02、XX03、XX04、XX05、XX06、XX07、XX08 和 XX09. 神农溪从河口至河流末端布设 6 个监测点分别为 SN01、SN02、SN03、SN04、SN05 和 SN06. 具体位置如图 1 所示.

1.3 样品采集与处理

在水面以下 0.5 m 处使用 10 L 采水器采集水

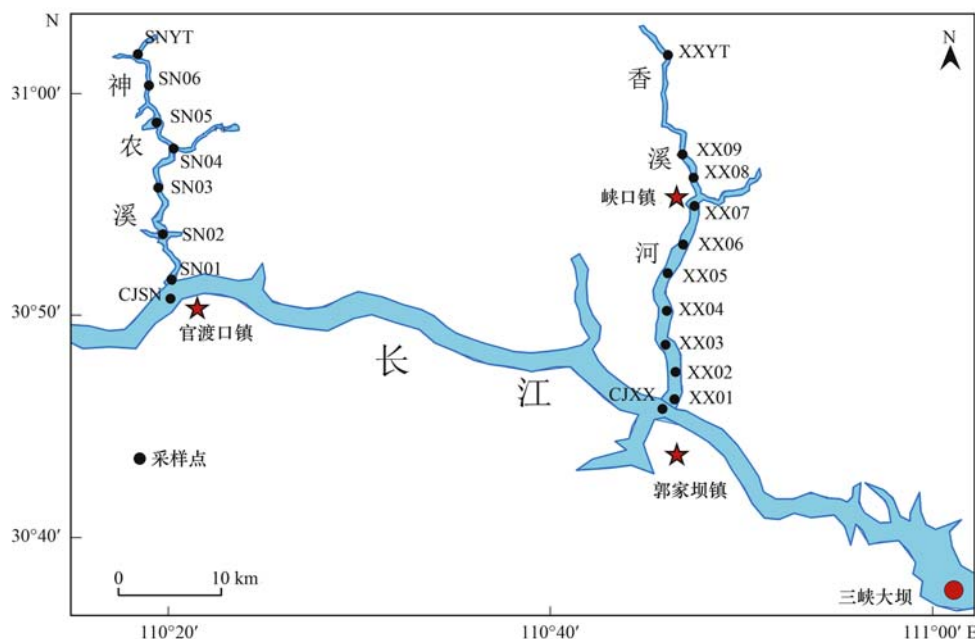


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites

样,水样保存于2个350 mL聚乙烯水样瓶中,其中1瓶水样加入H₂SO₄调节pH小于2,然后将水样置于冰箱低温保存带回实验室,加入H₂SO₄的水样用来测定总磷(TP).另一瓶水样使用GF/C滤膜过滤(孔径0.45 μm)后低温保存,用来测定正磷酸盐(DP)和溶解态总磷(DTP),使用90%丙酮于阴暗处提取过滤后的滤膜24 h,3 500 r·min⁻¹离心10 min,取上清液,利用分光光度法测定叶绿素a浓度(Chl-a).

使用柱状采泥器(φ60×1 000 mm)采集沉积物与上覆水样品[(0±20)cm],以2 cm为间隔收集上覆水于350 mL聚乙烯水样瓶中低温保存,以2 cm为间隔采取沉积物样品分别装入聚乙烯离心管中低温保存,每个采样点的上覆水和沉积物均采集3次,将3次样品进行混合作为该采样点样品.沉积物间隙水的获取:采用DL-5M型低速冷冻离心机在2 000 r·min⁻¹下离心30 min,然后将离心出的上清液使用GF/C滤膜过滤(孔径0.45 μm)后,用来测定正磷酸盐(DP).

总磷(TP)、正磷酸盐(DP)和溶解态总磷(DTP)于实验室依据文献[26]测定,总磷(TP)和溶

解态总磷(DTP)的差值(TP-DTP)认为是颗粒态磷(PP)^[27]水温(WT)、水深、pH和浊度(Turb)用YSI-EXO多参数水质分析仪(美国)现场测定,YSI-EXO多参数水质分析仪使用校准溶液进行校正^[28],流速使用Vector三维点式流速仪现场测定,在流速仪检定水槽中使用流速比测法校正三维点式流速仪,测量精度为±0.1 mm·s⁻¹,通过收集中华人民共和国长江海事局对长江水位的监测数据,绘制三峡库区2018年1~12月水位图.

1.4 数据处理方法

采用ArcGIS 10.3绘制研究区域的监测点位,Origin 9.0绘制磷素平面图与水位图,Surfer 11.0绘制流场矢量图,相关性采用SPSS 25.0进行分析.

2 结果与分析

2.1 总磷(TP)含量与水库调度变化

香溪河与神农溪在三峡水库低水位期、蓄水期和高水位期时,水体中TP质量浓度含量如表1所示,总磷评价标准以GB 3838-2002《地表水环境质量标准》中河流标准限制作为参考.

表1 香溪河及神农溪总磷质量浓度/mg·L⁻¹

Table 1 Concentrations of total phosphorus in the Xiangxi River and Shennong River/mg·L ⁻¹				
河流	理化指标	低水位期	蓄水期	高水位期
香溪河	TP变化范围	0.049~0.155	0.110~0.168	0.078~0.129
	TP平均值	0.099	0.145	0.105
	水质标准	II	III	III
神农溪	TP变化范围	0.059~0.098	0.103~0.152	0.062~0.112
	TP平均值	0.075	0.129	0.079
	水质标准	II	III	II

由表1可知香溪河与神农溪在三峡水库不同调度时期,TP浓度均表现为蓄水期>高水位期>低水位期.且这两条支流在三峡水库蓄水前后水体中的磷素浓度均超过了0.02 mg·L⁻¹这一阈值,水体中磷素浓度满足了水华暴发的条件^[6].单因素ANOVA分析香溪河与神农溪流域TP质量浓度在低水位期($P=0.134$)和蓄水期($P=0.174$)不存在显著差异,但在高水位期($P=0.019$)存在显著差异.两条支流在水库不同调度时期TP质量浓度变化规律如图2所示.

可知香溪河TP浓度从库湾河口位置处向河流上游整体上呈现出一个上升的趋势,TP质量浓度三期均值最大值为0.142 mg·L⁻¹出现在香溪河上游XX08点.而神农溪TP浓度从河口至库湾上游呈现出一个下降的趋势,TP质量浓度三期均值最大值为0.117 mg·L⁻¹出现在神农溪下游SN01点.

2.2 正磷酸盐(DP)含量与水库调度变化

香溪河与神农溪在三峡水库低水位期、蓄水期和高水位期水体中DP质量浓度含量如表2所示.

表2 香溪河及神农溪正磷酸盐质量浓度/mg·L⁻¹

Table 2 Concentrations of orthophosphate in the Xiangxi River and Shennong River/mg·L ⁻¹				
河流	理化指标	低水位期	蓄水期	高水位期
香溪河	DP变化范围	0.007~0.034	0.051~0.107	0.007~0.021
	DP平均值	0.017	0.088	0.012
神农溪	DP变化范围	0.006~0.015	0.066~0.091	0.001~0.013
	DP平均值	0.009	0.081	0.005

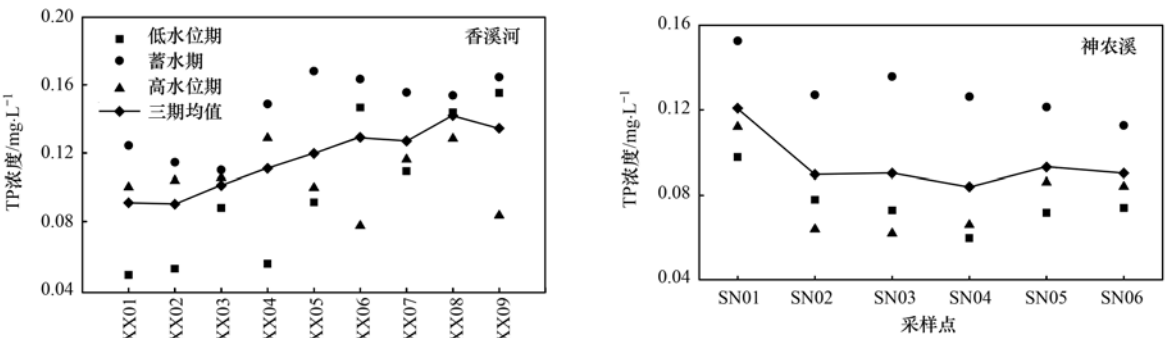


图2 香溪河及神农溪采样点及总磷浓度分布

Fig. 2 Sampling sites and concentrations of total phosphorus in the Xiangxi River and Shennong River

由表2可知香溪河与神农溪在三峡工程不同调度期时河流中的DP质量浓度有明显差异,但这两条支流DP质量浓度均表现为蓄水期>低水位期>高水位期,通过单因素ANOVA分析得出香溪河与神农溪流域DP质量浓度在低水位期($P=0.112$)和蓄水期($P=0.402$)不存在显著差异,但高水位期($P=0.01$)存在明显差异.两条支流在水库不同调度时期DP质量浓度变化规律如图3所示.香溪河DP质量浓度均值从河口向香溪河上游呈现出一个递增的规律,而神农溪DP质量浓度均值从河口至库湾末端无明显变化.

2.3 颗粒态磷(PP)含量与水库调度变化

香溪河与神农溪在三峡水库不同调度期时水体中PP质量浓度含量如表3所示.

由表3可知香溪河与神农溪水体中的PP浓度均表现为低水位期>高水位期>蓄水期.单因素ANOVA分析得出这两条河流颗粒态磷(PP)在低水位期($P=0.190$)、蓄水期($P=0.183$)和高水位期($P=0.119$)均不存在明显差异.这两条河流PP质

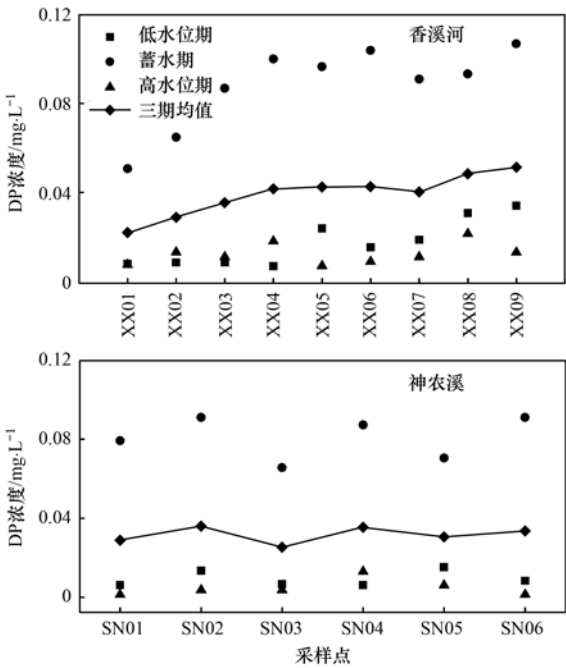


图3 香溪河及神农溪采样点及正磷酸盐浓度分布

Fig. 3 Sampling sites and concentrations of orthophosphate in the Xiangxi River and Shennong River

表3 香溪河及神农溪颗粒态磷质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Concentrations of particulate phosphorus in the Xiangxi River and Shennong River/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
河流	理化指标	低水位期	蓄水期	高水位期
香溪河	PP 变化范围	0.046 ~ 0.107	0.012 ~ 0.037	0.043 ~ 0.091
	PP 平均值	0.073	0.022	0.069
神农溪	PP 变化范围	0.043 ~ 0.078	0.025 ~ 0.045	0.032 ~ 0.066
	PP 平均值	0.057	0.035	0.048

量浓度在水库不同调度时期的变化规律如图4所示,香溪河PP质量浓度均值从河口至上游有一个增加的趋势,PP质量浓度均值最大值为 $0.065\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在香溪河上游XX08点.神农溪从河口至库湾末端PP质量浓度均值表现出一个逐渐减小的变化规律,PP质量浓度均值最大值为 $0.062\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在神农溪下游SN01点.

2.4 总磷(TP)形态百分含量与水库调度变化

三峡水库蓄水前后香溪河与神农溪水体中颗粒

态磷(PP)与溶解态总磷(DTP)占水体中总磷(TP)的质量分数如图5所示.

由图5可知香溪河与神农溪在低水位期和高水位期时水体中颗粒态磷(PP)所占总磷(TP)的质量分数分别均达到了75%和60%以上,此时两条河流水体中磷素形态主要以颗粒态磷(PP)形态存在,而三峡水库在蓄水期时,支流库湾水体中颗粒态磷(PP)占总磷(TP)的质量分数分别为27%和15%,此时两条河流水体中磷素主要以溶解态磷(DTP)形态存在.

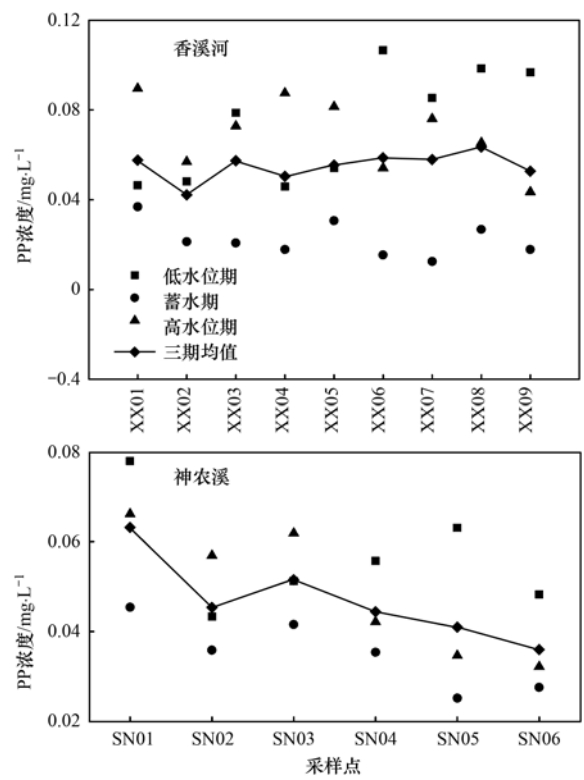


图 4 香溪河及神农溪采样点及颗粒态磷浓度分布

Fig. 4 Sampling sites and concentrations of particulate phosphorus in the Xiangxi River and Shennong River

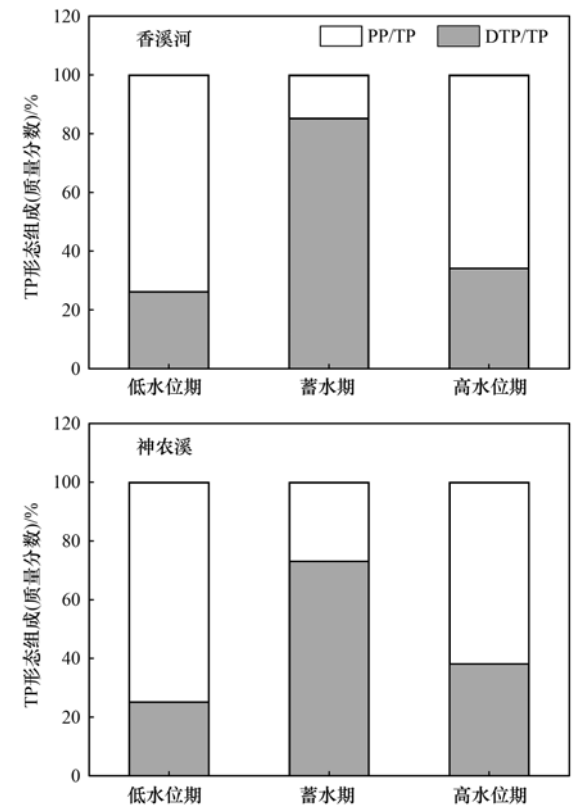


图 5 香溪河及神农溪磷素赋存形态的质量分数

Fig. 5 Percentage of phosphorus speciation in the Xiangxi River and Shennong River

2.5 长江干流磷素形态与水库调度变化
三峡水库蓄水前后香溪河与神农溪河口处长江

干流断面磷素浓度如图 6 所示。

由图 6 可知长江香溪与长江神农干流断面采样点总磷(TP)质量浓度均表现为蓄水期(9 月) > 高水位期(12 月) > 低水位期(6 月),其变化范围分别为 0.08 ~ 0.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.075 ~ 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 颗粒态磷(PP)质量浓度均表现为低水位期(6 月) > 高水位期(12 月) > 蓄水期(9 月),其变化范围分别为 0.025 ~ 0.058 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.031 ~ 0.062 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 正磷酸盐(DP)质量浓度均表现为蓄水期(9 月) > 低水位期(6 月) > 高水位期(12 月),其变化范围分别为 0.012 ~ 0.023 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.006 ~ 0.021 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 长江干流磷素浓度各水期的变化规律同支流香溪河与神农溪库湾一致。

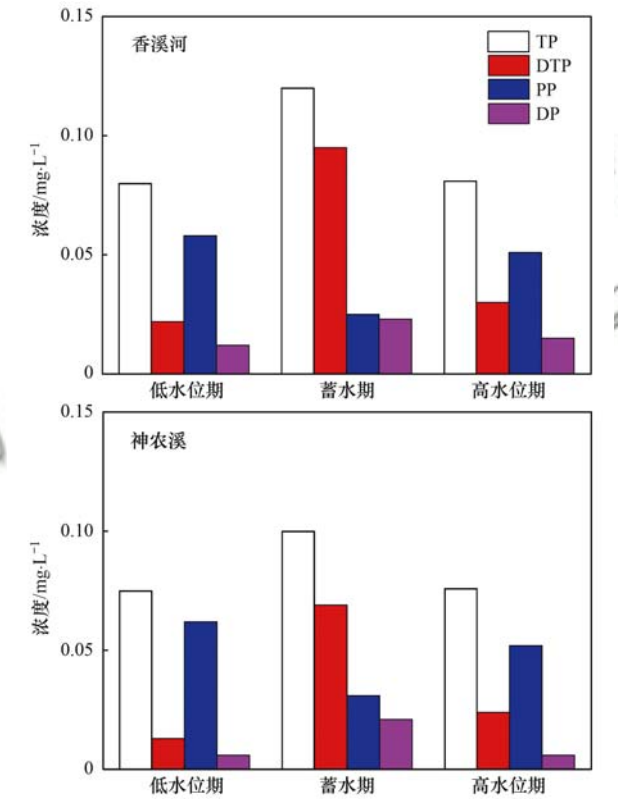


图 6 三峡水库不同水期干流磷素浓度

Fig. 6 Phosphorus concentrations in the main stream of the Three Gorges Reservoir during different water periods

2.6 磷素形态与水文因子的相关性分析
本研究期间香溪河与神农溪库湾水体中磷素与环境因子的相关性分析结果见表 4, 沉积物-水系统营养盐源/汇关系见表 5, 流速均值见表 6, 三峡大坝坝前水位跟踪结果如图 7 所示, 流速空间分布如图 8 所示, 这两条支流的长江干流断面与上游来水断面浊度见图 9。

由表 4 可以看出, 研究期间支流库湾水体中水温、pH 和浊度与磷素形态密切相关, 香溪河与神农溪库湾水体中总磷(TP)与 pH 呈现显著的正相关

表 4 香溪河及神农溪磷素与环境因子的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between phosphorus and environmental factors in the Xiangxi River and Shennong River							
香溪河	TP	DP	PP	神农溪	TP	DP	PP
TP	1			TP	1		
DP	0.683 **	1		DP	0.898 **	1	
PP	-0.102	-0.747 **	1	PP	0.038	-0.257	1
DP/TP	0.506 *	0.961 **	-0.818 **	DP/TP	0.764 **	0.963 **	-0.4
PP/TP	-0.748 **	-0.857 **	0.634 **	PP/TP	-0.731 **	-0.878 **	0.627 **
pH	0.591 **	0.579 **	-0.231	pH	0.868 **	0.795 **	-0.153
WT	0.448 *	0.439 *	-0.448 *	WT	0.810 **	0.840 **	-0.179
Turb	-0.541 *	-0.425 *	0.467 *	Turb	-0.516 *	-0.550 *	0.518 *
Chl-a	0.409 *	0.449 *	-0.149	Chl-a	0.614 **	0.550 *	-0.441

1) *表示在 0.05 水平(双侧)显著相关; **表示在 0.01 水平(双侧)显著相关

性,相关系数分别为 0.591($P<0.01$)和 0.868($P<0.01$),总磷(TP)与温度(WT)呈现显著的正相关性,相关系数分别为 0.448($P<0.05$)和 0.810($P<0.01$),张义等^[29]在杭州西湖的研究成果与本研究结果一致,颗粒态磷(PP)与浊度(Turb)呈显著正相关,正磷酸盐(DP)与浊度呈显著负相关,同时由表 4 也可看出这两条河流中总磷(TP)和正磷酸盐(DP)与叶绿素 a 之间也存在显著正相关,这与杨凡等^[30]在丰水期时对这两条河流的研究结果一致。

通过沉积物-水界面两侧磷素浓度的梯度差异,可得出沉积物-水界面系统磷素扩散趋势和交换方向,浓度梯度越高,迁移扩散发生的趋势越显著。表 5 表示的是沉积物-水系统磷营养盐源-汇趋势,从中可知三峡水库不同水期时,磷素在沉积物-水界面的扩散方向各不相同,三峡水库低水位期和蓄水期时,香溪河与神农溪库湾沉积物中间隙水(正磷酸盐)DP 浓度均高于上覆水体中磷素浓度,沉积物表现为“源”,而在高水位期时这两条支流库湾沉积物间隙水中磷素浓度低于上覆水体中磷素浓度,沉积物表现为“汇”。

三峡大坝坝前水位变化如图 7 所示,可知在研究期间三峡库区内的典型支流香溪河与神农溪水位变化规律与坝前水位变化一致,水位均表现为高水位期(12 月)>蓄水期(9 月)>低水位期(6 月)。

表 5 上覆水间隙水磷营养盐源-汇趋势¹⁾/mg·L⁻¹

Table 5 Trends in nutrient source-sinks between interstitial and overlying water/mg·L ⁻¹				
指标	研究对象	低水位期	蓄水期	高水位期
香溪河 DP	上覆水	0.052	0.074	0.136
	间隙水	0.087	0.079	0.101
		源	源	汇
神农溪 DP	上覆水	0.043	0.057	0.13
	间隙水	0.075	0.071	0.085
		源	源	汇

1) “汇”表示沉积物吸收上覆水中的磷营养盐物质,“源”表示沉积物中的间隙水释放磷营养盐到上覆水

由图 7 可知低水位期(6 月)三峡水库坝前水位在 145.3~145.9 m 内波动,蓄水期(9 月)坝前水位从 150.7 m 上升至 174.6 m 水位上升 23.9 m,三峡水库从 2018 年 9 月 10 日起蓄至 2018 年 10 月 31 日,三峡库区内 632 km² 的消落带土壤被水体淹没^[31,32],高水位期(12 月)三峡水库坝前水位在 174.1~174.5 m 内波动。

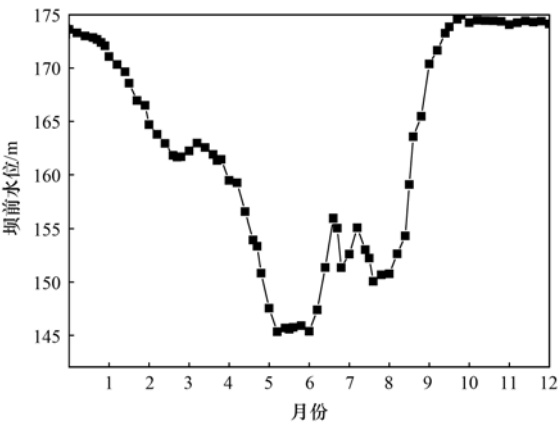
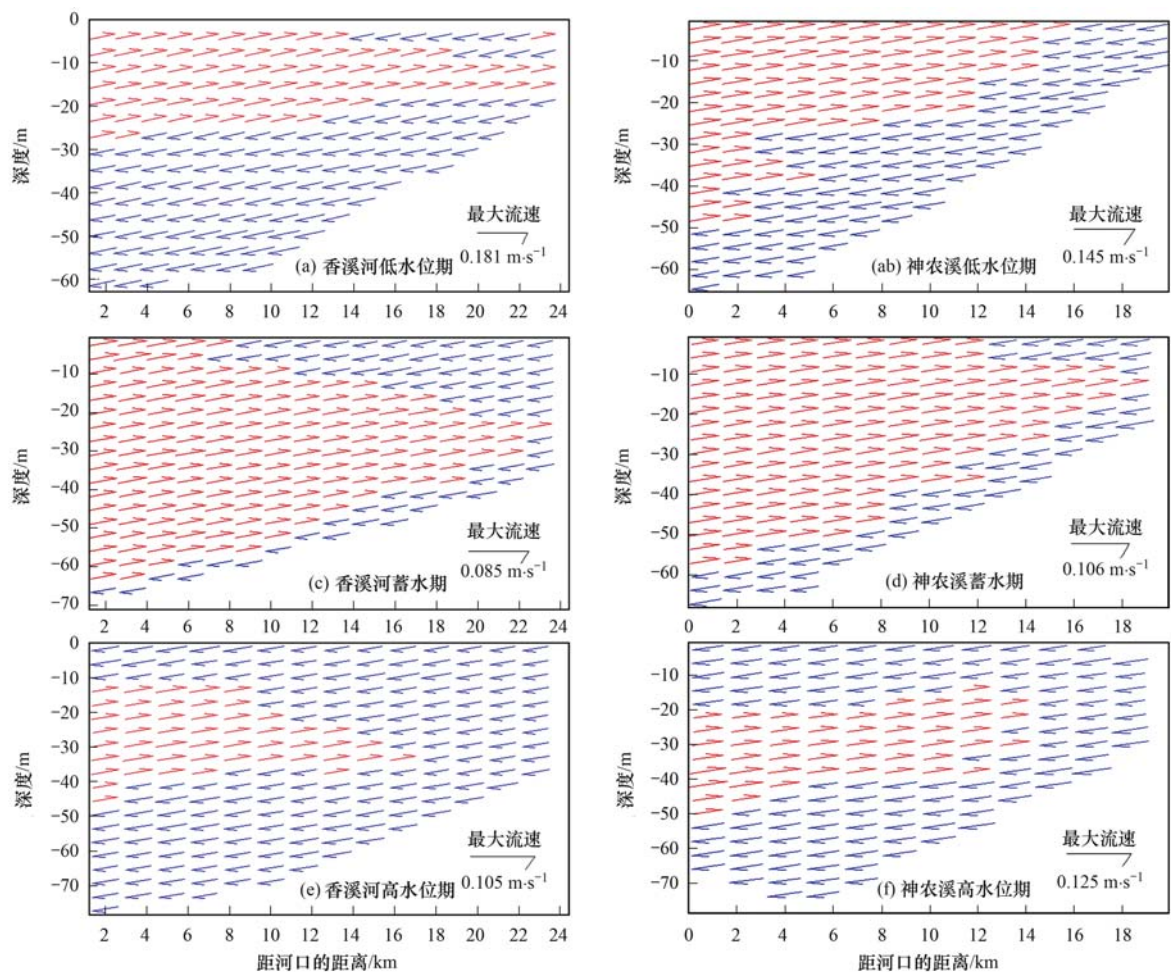


图 7 研究期间三峡大坝坝前水位变化过程

Fig. 7 Changes in water levels in front of the Three Gorges Dam during the study period

图 8 显示了三峡水库不同调度期时库区支流香溪河与神农溪库湾的流速空间分布。从中可见不同调度期时这两条支流均出现了明显的异重流现象。低水位期(6 月)长江干流水体均以表层异重流的形式倒灌进入香溪河和神农溪库湾,倒灌至河口距离分别为 24 km 和 15 km,且河口处倒灌深度从表层分别至 20 m 和 26 m;蓄水期(9 月)长江干流水体以表中层倒灌进入库区支流,倒灌至河口距离分别为 24 km 和 17 km,河口处倒灌深度从表层分别至 65 m 和 60 m;高水位期(12 月)长江干流水体以中层楔形倒灌进入支流库湾,倒灌至河口距离分别为 16 km 和 14 km,河口处倒灌深度分别为 10~48 m 和 20~52 m。由图 8 可知三峡水库在蓄水期时,三峡库区支流库湾受到长江干流



蓝色箭头表示支流水体由支流上游流向河口,红色箭头表示干流水体由河口流向支流上游

图8 香溪河及神农溪库湾流速沿程纵剖面

Fig. 8 Longitudinal profile of velocity in the coves of the Xiangxi River and Shennong River

强烈的倒灌作用。

图9显示了三峡水库不同调度期时长江干流对照断面与支流上游来水的浊度时间分布。由图可知三峡水库不同调度期时长江干流水体浊度均大于支流上游来水浊度,且长江干流水体与支流上游来水浊度均表现为低水位期(6月) >> 高水位期(12

月) > 蓄水期(9月)。

三峡水库不同调度期时香溪河与神农溪流速见表6,可知三峡水库蓄水期后的不同运行期,库区支流香溪河与神农溪水体整体流速均表现为低水位期 > 高水位期 > 蓄水期,这与刘德富等^[33]在香溪河多年持续监测所得出的结论一致。

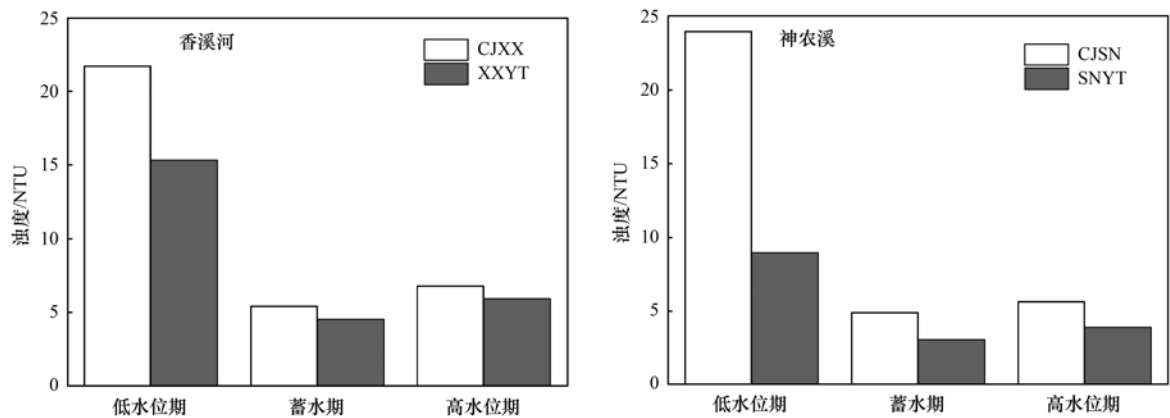


图9 长江干流与支流上游水体浊度分布

Fig. 9 Turbidity distribution in the upper reaches of the tributaries and the main stream of the Yangtze River

表 6 香溪河及神农溪库湾流速均值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Table 6 Average velocity in the coves of the Xiangxi
River and Shennong River/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

河流	低水位期	蓄水期	高水位期
香溪河	0.041	0.012	0.022
神农溪	0.032	0.017	0.029

3 讨论

3.1 环境因子对内源磷素释放的影响

水体中磷素可按来源分为外源磷和内源磷,外源磷素通过大气沉降和地表径流等途径进入河流后,经过吸附、络合和絮凝后沉降到沉积物中,成为潜在的污染源,当沉积物或上覆水中的理化因子发生变化时,内源磷素可能会通过溶解、解吸和泥沙再悬浮等过程再次进入上覆水^[34~36]。

由表 1 可知香溪河与神农溪水体中总磷质量浓度均表现为蓄水期大于高水位期和低水位期,且由表 2 可知蓄水期时这两条支流水体中正磷酸盐(DP)浓度远高于高水位期和低水位期。通过 Pearson 相关性分析得出香溪河与神农溪库湾水体中的 TP 和 DP 与环境因子 WT(温度)和 pH 呈显著正相关,香溪河与神农溪蓄水期时水温均值分别为 25.4℃ 和 26.9℃ 且均大于三峡水库蓄水前后水温。Liikanen 等^[37]的研究发现水体中磷素的释放受到水温的影响,且释放量随水温的升高而呈现出一个递增的趋势^[38,39],温度升高,增强微生物活性,有机质大量分解,消耗溶解氧,使氧化还原电位降低,促进沉积物中 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,使得与 Fe^{3+} 结合的 PO_4^{3-} 释放^[40],微生物活性增强还能促进沉积物中的有机磷转化为无机磷酸盐释放。温度升高会加强有机质矿化,释放大量的 CO_2 ,促进含 Ca 沉积物溶解,加快沉积物磷素释放。沉积物与水体组成的系统中,沉积物吸附的磷素同水体中磷素之间进行着动态的吸附与解吸平衡,磷素的解吸是一个吸热过程,温度升高,促进反应向沉积物磷素解吸方向移动,使得水体中磷素浓度升高,此外水体温度升高,使得水体中磷素溶解度升高,加速沉积物磷素向水体扩散。研究发现,香溪河与神农溪蓄水前后 pH 值变化范围分别为 8.15~9.09 和 8.14~9.92,呈现为弱碱性,这与刘德富等^[33]在长江支流监测多年的结果一致。这两条支流蓄水期时的 pH 均值分别为 8.9 和 9.7 且均大于三峡水库蓄水前后 pH 值,在碱性范围内,沉积物磷素释放主要以离子交换为主, Fe-P 与 Al-P 复合体中磷酸盐易与体系中的 OH^- 发生交换^[29],增强了磷酸盐的解吸,促进了沉积物磷酸盐释放。同时由表 5 可知三峡水库在低水位期与蓄水期时,库区支流库湾沉积物间隙水中磷素浓度高于

上覆水体中磷素浓度,沉积物-水界面磷零点吸附平衡浓度高于上覆水中相应的磷浓度,沉积物呈现出释放状态,沉积物间隙水中的磷素释放到上覆水中,香溪河与神农溪库湾沉积物中正磷酸盐(DP)扩散到上覆水体中,从而使得支流库湾水体中正磷酸盐(DP)质量浓度升高,而在高水位期时沉积物呈现出吸附状态,上覆水中的磷素向间隙水迁移,使得水体中磷素浓度降低。

3.2 水位变化对消落带磷素释放的影响

由图 7 可知三峡水库坝前水位表现为高水位期(12 月) > 蓄水期(9 月) > 低水位期(6 月),三峡库区内的典型一级支流香溪河与神农溪水位变化与三峡大坝坝前水位变化规律一致,低水位期时,出露的消落带土壤吸附来自香溪河与神农溪面源污染中的磷,蓄水期水位上升,支流两岸大量消落带土壤被淹没^[32],消落带土壤环境由好氧转变成为厌氧,溶解氧与氧化还原电位降低,与 Fe^{3+} 结合的难溶性磷酸盐转化成与 Fe^{2+} 结合的易溶性磷酸盐向上覆水溶解释放^[41],周驰等^[42]对巢湖流域消落带土壤植物淹水后发现淹水植物在微生物的作用下进行有机质分解作用生成大量低分子有机酸, Fe^{2+} 和 Al^{3+} 等金属离子会与低分子有机酸发生络合反应,使 Fe-P 与 Al-P 溶解进入上覆水,常超等^[43]和吴起鑫等^[44]在三峡水库蓄水期分别对忠县石宝寨消落带和兰陵溪消落带的淹水和未淹水土壤对比后发现,淹水后消落带土壤的 TP 含量均低于未淹水土壤,分别下降了 16.7% 和 45.8%,表明蓄水期消落带土壤被淹没,消落带土壤中的磷素溶解释放进入上覆水。

3.3 干流水体倒灌对磷素浓度的影响

由图 6 可知长江干流水体中总磷(TP)、溶解态总磷(DTP)和正磷酸盐(DP)质量浓度均表现为蓄水期(9 月) > 高水位期(12 月) > 低水位期(6 月),同时由图 8 可知三峡水库蓄水期,长江干流大量水体以中表层倒灌的形式进入库区内的支流香溪河与神农溪,由表 6 可知神农溪与香溪河水体流速表现为低水位期(6 月) > 高水位期(12 月) > 蓄水期(9 月),三峡水库蓄水期时,香溪河神农溪水流流速减缓同时大量长江干流水体倒灌进入支流,使得干流水体中的磷素在蓄水期时大量地向支流输入。支流库湾水体也从原先的河流型生态系统特征转变成成为类似湖泊的“河库型”生态系统特征^[45~47],支流库湾水体滞留时间延长,扩散能力减弱,自净能力降低^[48,49],从而使得蓄水期时由于环境因子变化而促进沉积物与消落带所释放的磷素在支流库湾上覆水体中大量富集,使得库湾水体中磷素质量浓度升高。

由图 5 可知三峡水库在低水位期和高水位期运

行时,香溪河与神农溪库湾水体均以颗粒态磷(PP)为主要磷形态,颗粒态磷(PP)所占总磷含量均表现为低水位期(6月) > 高水位期(12月),而在蓄水期这两条支流库湾水体均以溶解态磷(DTP)为主要磷形态. Pearson相关性分析得出香溪河与神农溪库湾水体中颗粒态磷(PP)与浊度(Turb)存在显著正相关,而正磷酸盐(DP)与浊度(Turb)存在显著负相关. 由图9可知研究期间发现这两条支流上游来水与长江干流断面水体浊度均表现为低水位期(6月) > 高水位期(12月) > 蓄水期(9月),低水位期(6月)降雨强度大,雨水冲刷造成大量泥沙进入支流库湾,使得部分颗粒态磷(PP)通过陆源输入水体^[50],同时使得库湾水体中浊度升高,输入库湾水体内的悬浮物由于其表面或者内部附着的小分子有机物、金属氧化物及其他金属离子等与水体中溶解态磷(DTP)发生吸附和络合反应,形成不易溶于水的颗粒态磷(PP)^[51~53],使得水体中颗粒态磷(PP)浓度升高.

由表6可知香溪河与神农溪库湾水体流速均值表现为低水位期(6月) > 高水位期(12月) > 蓄水期(9月),水库蓄水后流速减缓,由于泥沙具有较强的吸附及沉积特性^[54],能够吸附水体中的颗粒态磷(PP)等细颗粒态物质并发生沉降^[55~58],同时由图9可知蓄水期长江干流水体与支流上游来水水体浊度降低,输入支流库湾水体中的悬浮颗粒物浓度降低,从而使得颗粒态磷(PP)浓度在蓄水期降低.

4 结论

(1)本研究期间,香溪河与神农溪库湾回水区总磷(TP)质量浓度变化范围分别为0.049~0.168 mg·L⁻¹和0.059~0.152 mg·L⁻¹,水体中总磷质量浓度均超过了满足水华暴发0.02 mg·L⁻¹这一阈值,三峡水库低水位期香溪河与神农溪总磷质量浓度整体在Ⅱ类水标准下,蓄水期总磷质量浓度整体在Ⅲ类水标准下,高水位期香溪河总磷质量浓度整体在Ⅲ类水标准下,神农溪总磷质量浓度整体在Ⅱ类水标准下.

(2)三峡水库不同调度期时支流库湾水体中总磷(TP)质量浓度均表现为蓄水期 > 高水位期 > 低水位期,正磷酸盐(DP)质量浓度均表现为蓄水期 > 低水位期 > 高水位期,颗粒态磷(PP)质量浓度均表现为低水位期 > 高水位期 > 蓄水期.

(3)三峡水库在低水位期与高水位期运行时,香溪河与神农溪库湾水体中总磷(TP)均以颗粒态磷(PP)为主要存在形态,颗粒态磷(PP)所占总磷(TP)的质量分数分别均达到了75%和60%以上,

蓄水期时支流库湾水体中颗粒态磷(PP)所占总磷的质量分数分别为27%和15%,总磷(TP)以溶解态磷(DTP)为主要存在形态.

参考文献:

- [1] Wetzel R G. Limnology: lake and river ecosystems[M]. San Diego: Academic Press, 2001. 204-238.
- [2] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [3] Wang H J, Liang X M, Jiang P H, et al. TN: TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes[J]. Freshwater Biology, 2008, **53**(5): 935-944.
- [4] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. Science, 1977, **195**(4275): 260-262.
- [5] 谢平. 论蓝藻水华的发生机制—从生物进化、生物地球化学和生态学观点[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [7] Wu G F, Zhou X P. Characterization of phosphorus-releasing bacteria in a small eutrophic shallow lake, Eastern China[J]. Water Research, 2005, **39**(19): 4623-4632.
- [8] Boström B, Persson G, Broberg B. Bioavailability of different phosphorus forms in freshwater systems[J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 133-155.
- [9] Ran X B, Chen H T, Wei J F, et al. Phosphorus speciation, transformation and retention in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Marine and Freshwater Research, 2016, **67**(2): 173-186.
- [10] Fantin-Cruz I, Pedrollo O, Girard P, et al. Changes in river water quality caused by a diversion hydropower dam bordering the Pantanal floodplain[J]. Hydrobiologia, 2016, **768**(1): 223-238.
- [11] Lopes F B, De Andrade E M, Meireles A C M, et al. Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2014, **18**(4): 437-445.
- [12] Perbiche-Neves G, Ferreira R A R, Nogueira M G. Phytoplankton structure in two contrasting cascade reservoirs (Parapanema River, Southeast Brazil)[J]. Biologia, 2011, **66**(6), doi: 10.2478/s11756-011-0107-1.
- [13] Pan G, Krom M D, Zhang M Y, et al. Impact of suspended inorganic particles on phosphorus cycling in the Yellow River (China)[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(17): 9685-9692.
- [14] Van Bennekom A J, Salomons W. Pathways of nutrients and organic matter from land to ocean through rivers[A]. In: Marine J M, Burton J D, Eisma D (Eds.). River Inputs to Ocean Systems[C]. Rome: UNEP/UNESCO, 1981. 33-51.
- [15] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern Third of the World[J]. Science, 1994, **266**(5186): 753-762.
- [16] Zhang J, Zhang Z F, Liu S M, et al. Human impacts on the large world rivers: would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, **13**(4): 1099-1105.
- [17] Humborg C, Conley D J, Rahm L, et al. Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments[J]. AMBIO: A

- Journal of the Human Environment, 2000, **29**(1): 45-50.
- [18] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [19] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, **308**(5720): 405-408.
- [20] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, *et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. Science, 2005, **308**(5720): 376-380.
- [21] Yang S L, Zhang J, Zhu J, *et al.* Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2005, **110**, doi: 10.1029/2004JF000271.
- [22] Gong G C, Chang J, Chiang K P, *et al.* Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: effect of the Three Gorges Dam? [J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**(7), doi: 10.1029/2006GL025800.
- [23] Han C N, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Geochemistry of phosphorus release along transect of sediments from a tributary backwater zone in the Three Gorges Reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136964.
- [24] Zhang A Y, Zhang J, Liu S M. Spatial and temporal variations of dissolved silicon isotope compositions in a large dammed river system [J]. Chemical Geology, 2020, **545**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2020.119645.
- [25] Tao Y W, Wang Y K, Wang D, *et al.* A probabilistic modeling framework for assessing the impacts of large reservoirs on river thermal regimes-A case of the Yangtze River [J]. Environmental Research, 2020, **183**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109221.
- [26] 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. 525-644.
- [27] Allan J D, Castillo M M. Stream ecology: structure and function of running waters (2nd ed.) [M]. Dordrecht: Springer, 2007. 256-264.
- [28] 彭靖. YSI 多参数水质监测仪在不同河口咸潮监测中的应用 [J]. 水利科技与经济, 2013, **19**(4): 13-15.
- [29] 张义, 刘子森, 张奎磊, 等. 环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响 [J]. 水生生物学报, 2017, **41**(6): 1354-1361.
- Zhang Y, Liu Z S, Zhang Y L, *et al.* Effects of varying environmental conditions on release of sediment phosphorus in West Lake, Hang Zhou, China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, **41**(6): 1354-1361.
- [30] 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素 a 和营养盐的空间分布特征 [J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4944-4952.
- Yang F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* Spatial distribution characteristics of chlorophyll-a and nutrient salts in tributaries of different river sections in the Three Gorges reservoir area during the flood season [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4944-4952.
- [31] 由永飞, 杨春华, 雷波, 等. 水位调节对三峡水库消落带植被群落特征的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(6): 1103-1109.
- You Y F, Yang C H, Lei B, *et al.* Effect of water level regulation on vegetation characteristics in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, **23**(6): 1103-1109.
- [32] 李姗泽, 邓玥, 施凤宁, 等. 水库消落带研究进展 [J]. 湿地科学, 2019, **17**(6): 689-696.
- Li S Z, Deng Y, Shi F N, *et al.* Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: a review [J]. Wetland Science, 2019, **17**(6): 689-696.
- [33] 刘德富. 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.
- [34] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 207-217.
- Fan C X, Zhang L, Bao X M, *et al.* Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 207-217.
- [35] Chen M S, Ding S M, Chen X, *et al.* Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments [J]. Water Research, 2018, **133**: 153-164.
- [36] 吴桢, 吴思枫, 刘永, 等. 湖泊氮磷循环的关键过程与定量识别方法 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, **54**(1): 218-228.
- Wu Z, Wu S F, Liu Y, *et al.* Key processes and mechanisms of nitrogen and phosphorus cycling in lakes [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, **54**(1): 218-228.
- [37] Liikanen A, Murtoniemi T, Tanskanen H, *et al.* Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake [J]. Biogeochemistry, 2002, **59**(3): 269-286.
- [38] 琚泽文, 蒯枝沁, 邓泓. 水生植被恢复对城市景观水体磷浓度及沉积物磷形态的影响 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 234-242.
- Ju Z W, Yu Z Q, Deng H. Effects of aquatic vegetation rehabilitation on phosphorus in water and sediments of urban landscape waters [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(2): 234-242.
- [39] 王春玲. 富营养化水体沉积物中磷的迁移特征和稳定化研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- [40] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究 [J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 738-742.
- Wang J Q, Sun Y M, Qian J Z, *et al.* Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(6): 738-742.
- [41] 刘凯, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖不同高程沉积物中磷形态特征研究 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 856-861.
- Liu K, Ni Z K, Wang S R, *et al.* Distribution characteristics of phosphorus in sediments at different altitudes of Poyang Lake [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(3): 856-861.
- [42] 周驰, 李阳, 曹秀云, 等. 风干和淹水过程对巢湖流域土壤和沉积物磷吸附行为的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(S2): 10-17.
- Zhou C, Li Y, Cao X Y, *et al.* Effect of air-drying and flooding on phosphorus sorption behavior of soils and sediments along the aquatic-terrestrial ecotone of lake Chaohu [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(S2): 10-17.
- [43] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响 [J]. 自然资源学报, 2011, **26**(7): 1236-1244.
- Chang C, Xie Z Q, Xie G M, *et al.* The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the three gorges reservoir [J]. Journal of Natural Resources, 2011, **26**

- (7): 1236-1244.
- [44] 吴起鑫, 韩贵琳. 三峡库区兰陵溪消落带土壤磷分布特征及生物可利用性评价[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 779-785.
- Wu Q X, Han G L. Distribution and bio-availability of soil phosphorus at the riparian zone of Lanlingxi watershed in the Three Gorges[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 779-785.
- [45] 黄玥, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡水库蓄水运行后入出库断面水质评价与预测[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(2): 211-215, 239.
- Huang Y, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Water quality evaluation and prediction of the reservoir inflow and outflow after the Three Gorges Project operation[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, **41**(2): 211-215, 239.
- [46] 邹家祥, 翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, **32**(5): 136-140.
- Zou J X, Zhai H J. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures[J]. Water Resources Protection, 2016, **32**(5): 136-140.
- [47] 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.
- [48] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.
- Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 7-11.
- [49] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, **40**(1): 101-112.
- [50] 秦延文, 韩超南, 郑丙辉, 等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2152-2159.
- Qin Y W, Han C N, Zheng B H, *et al.* Analysis of transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2152-2159.
- [51] He H J, Chen H T, Yao Q Z, *et al.* Behavior of different phosphorus species in suspended particulate matter in the Changjiang estuary[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, **27**(4): 859-868.
- [52] Tang X Q, Wu M, Li R. Phosphorus distribution and bioavailability dynamics in the mainstream water and surface sediment of the Three Gorges Reservoir between 2003 and 2010[J]. Water Research, 2018, **145**: 321-331.
- [53] Pan G, Krom M D, Herut H. Adsorption-desorption of phosphate on airborne dust and riverborne particulates in east mediterranean seawater[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(16): 3519-3524.
- [54] 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.
- [55] 冉祥滨, 于志刚, 姚庆祯, 等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 614-622.
- Ran X B, Yu Z G, Yao Q Z, *et al.* Advances in nutrient retention of dams on river[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(5): 614-622.
- [56] 翟婉盈, 湛若云, 卓海华, 等. 三峡水库蓄水不同阶段总磷的变化特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(12): 5069-5078.
- Zhai W Y, Zhan R Y, Zhuo H H, *et al.* Variation characteristics of total phosphorus in different periods in the Three Gorges Reservoir after its impoundment[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(12): 5069-5078.
- [57] Han C N, Zheng B H, Qin Y W, *et al.* Impact of upstream river inputs and reservoir operation on phosphorus fractions in water-particulate phases in the Three Gorges Reservoir[J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**: 1546-1556.
- [58] 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.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)