

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析

秦延文¹, 韩超南^{1,2}, 郑丙辉^{1*}, 马迎群¹, 杨晨晨¹, 刘志超¹, 张雷¹, 赵艳民¹

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012; 2. 清华大学环境学院, 北京 100091)

摘要: 根据河流上、下游断面间水、沙和磷的输运系数差异, 建立了一种分析河流水体磷的输移转化特征的判定方法. 基于2015年1月(枯水期)和7月(丰水期)三峡水库的径流量、输沙量和水体磷形态数据, 应用该方法分析了三峡水库水体磷的输移转化特征. 结果表明, 两个水期三峡水库水体均以TDP为主要磷形态, TDP通量占总磷(TP)通量的51%~96%; 枯水期, 三峡水库TDP表现为移出作用, 主要由三峡拦坝蓄水促进泥沙颗粒吸附TDP引起, 丰水期则表现为添加作用, 与外源性含高浓度TDP的水量输入有关. 在两个水期, 三峡全库区泥沙和TPP均呈明显的沉降滞留特征, 且TPP相对于沙量呈添加作用, 一定程度上说明TDP被泥沙颗粒吸附而转化为TPP作用相对更强. 三峡水库清溪场至万州段为水、沙和磷的主要滞留区域, 与该区段泥沙颗粒粒径细化、颗粒吸附磷能力增强有关.

关键词: 颗粒磷; 溶解磷; 输移; 转化; 水体; 三峡水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2152-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201808146

Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir

QIN Yan-wen¹, HAN Chao-nan^{1,2}, ZHENG Bing-hui^{1*}, MA Ying-qun¹, YANG Chen-chen¹, LIU Zhi-chao¹, ZHANG Lei¹, ZHAO Yan-min¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100091, China)

Abstract: To understand the difference between transport coefficients of water runoff, sand discharge, and phosphorus flux in each subsection of a river, a judgement method for analyzing the characteristics of phosphorus transport and transformation in water of rivers was established in this study. Based on the measured data of water runoff, sand discharge, and phosphorus fraction concentrations in the water of the Three Gorges Reservoir (TGR) in January and July 2015, characteristics of phosphorus transport and transformation in the water were analyzed by using the conceptual method. The results showed that the predominant phosphorus fraction in water of the TGR was total dissolved phosphorus (TDP), which accounted for 51%-96% of total phosphorus in water. The TDP flux relative to runoff in the TGR decreased in January 2015. That was caused by the adsorption of TDP by suspended particles in the dry season. In contrast, TDP flux showed additive effect relative to water runoff in July 2015 due to exogenous water inputs with high TDP concentrations in the wet season. Both sand and total particulate phosphorus (TPP) presence in the water showed obvious sediment and retention characteristics during the two periods. The TPP flux presented an additive effect relative to sand discharge, meaning that the major transformation direction of phosphorus fractions was from TDP to TPP. The subsection between Qingxichang and Wanzhou was the main retention area of water, sand, and phosphorus in the TGR, which can be associated with the enhancement of phosphorus adsorption capacity caused by particle size reduction of suspended particles in the subsection.

Key words: particulate phosphorus; dissolved phosphorus; transport; transformation; water; Three Gorges Reservoir

氮和磷均是水环境中重要的生源要素, 是生物生长和繁殖必须的营养成分, 直接影响着水体初级生产力的水平高低. 与氮营养盐不同, 水环境中磷具有“颗粒吸附属性”, 即磷容易与泥沙表面或内部所附着的金属氧化物、小分子有机质及钙离子等发生吸附、络合或沉淀反应等, 形成不溶于水的含磷化合物, 进而伴随着悬浮泥沙颗粒沿水流方向进行输移^[1~3]. 然而, 当水环境中溶解磷(total dissolved phosphorus, TDP)含量较低或其不足以供给水生生物吸收利用时, 部分颗粒物表面所含的不稳定结合态磷会发生脱附、还原或解离反应等, 转化为TDP进入水体扩散输移^[4]. 除此之外, 水环境中水生生物也会参与水体TDP与颗粒磷(total particulate

phosphorus, TPP)的形态转化过程, 如水生生物吸收TDP而合成自身物质本身即属于TPP, 水生生物死亡分解又会释放TDP进行水体^[5]. 所以, 水环境中TDP与TPP的输移转化过程涉及物理作用、化学作用和生物作用而极其复杂^[6]. 目前, 研究学者可通过野外采样调查和室内模拟实验等获知流域尺度上的河流或湖库水体磷的来源、分布和输移情况^[7~11]. 然而, 河流或湖库水体中TDP与TPP的

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404702); 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-EW-STS-010)

作者简介: 秦延文(1973~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为流域水环境风险评估预警技术, E-mail: qinyw@craes.org.cn

* 通信作者, E-mail: zhengbinghui@craes.org.cn

转化过程仍不清楚, 通过何种手段认识和何种方法判定水体磷输移过程中 TDP 与 TPP 的转化行为仍然是科研工作者需要深入探索的课题。

三峡工程是我国乃至世界最大的水利工程, 其拦坝蓄水所形成的三峡水库总库容达 $3.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 占全国水库总库容的 4.6%。三峡水库蓄水运行在防洪、发电、航运和供水等方面产生很大的经济效益, 但同时也对长江水生态环境产生一些负面影响, 尤其以三峡水库泥沙滞留及支流水体富营养化问题最为突出^[12]。水、沙是磷的重要输运载体, 三峡水库泥沙滞留效应直接影响着水体磷的输移路径、转化行为及输送通量。本研究基于河流监测断面的径流量、输沙量和水体不同形态磷的质量浓度数据, 从水、沙和磷的物质输运系数的差异性角度出发, 建立一种河流或河道型水库水体 TDP 与 TPP 输移转化特征的概念性判定方法, 并在三峡水库磷输移转化研究中进行应用。本研究结果可加深对河流水环境中磷循环过程的认识, 以期对流域水污染防治和水生态安全保护提供科学参考。

1 区域概况与调查

1.1 研究区域与采样设计

三峡水库属于河道型水库, 位于长江上游干流重庆江津至湖北宜昌段 ($105^{\circ}44' \sim 111^{\circ}39' \text{ E}$, $28^{\circ}32' \sim 31^{\circ}44' \text{ N}$), 水库全长 667 km, 水域面积 1080 km^2 , 控制流域面积 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。2003 年 6 月, 三峡水库首次蓄水运行, 坝前水位 135 m; 2006 年 9 月, 三峡水库坝前水位又提升至 156 m; 2008 年 10 月, 三峡水库坝前水位提升至 175 m, 之后每年三峡水库蓄水位在 145 ~ 175 m 范围内周期性调动, 呈“枯水期高水位, 丰水期低水位”的反季节调

度特征。

三峡水库水体磷主要来源于上游入库河流的磷输入, 即长江上游、嘉陵江和乌江的磷输入^[13]。本研究在三峡上游入库河流及水库干流设置 6 个监测断面: 朱沱、北碚、武隆、清溪场、万州、黄陵庙, 如图 1 所示。朱沱、北碚和武隆断面分别为上游河流长江、嘉陵江和乌江的入库断面, 分别距离干、支流交汇点约 149 km、56 km 和 65 km; 清溪场代表接收上游河流长江、嘉陵江和乌江三方来水的三峡入库断面, 万州为库区中部断面, 分别距离大坝前约 470 km、270 km; 黄陵庙为三峡水库的出库断面, 距离大坝后约 30 km。2015 年 1 月和同年 7 月, 在三峡水库开展两次也野外采样调查, 在 6 个监测断面采集表层水体样品, 每个断面采集 3 个平行水样, 其中 2015 年 1 月作为流域枯水期、TGR 高水位期的时期代表, 2015 年 7 月作为流域丰水期、TGR 低水位期的时期代表。

1.2 样品采集与分析测定

使用卡盖式采水器采集表层水样, 一部分水样装于聚乙烯瓶中, 加入 $\text{H}_2\text{SO}_4 (1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})$, -4°C 保存, 备用以测定水体总磷 (total phosphorus, TP) 的质量浓度; 另一部分现场经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤头过滤, 滤液装于聚乙烯瓶中, -4°C 保存, 备用以测定水体总溶解磷 (total dissolved phosphorus, TDP) 的质量浓度。

水体 TP 质量浓度是采用原水样经过硫酸钾氧化后再使用磷钼蓝显色法测定得到, 水体 TDP 质量浓度是采用过滤水样经过硫酸钾氧化后使用磷钼蓝显色法测定得到^[14]。水体 TPP 质量浓度为水体 TP 与 TDP 质量浓度的差值。

为保证实验质量, 水体样品进行磷形态分析



图 1 三峡上游入库河流及水库干流监测断面分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the Three Gorges Reservoir and its upstream rivers

时,设置空白样品和3次平行样.实验前进行回收率实验,即取5份加入定量的磷标准物质的标准水样,按照上述方法进行预处理和测定,结果显示回收率均在90%~110%范围内.

1.3 监测断面磷通量计算

收集2015年1月和同年7月三峡水库各监测断面的径流量和输沙量水文数据^[15],结合同期同断面水体TP、TDP、TPP的实测质量浓度数据,根据式(1)计算各断面水体磷通量.

$$F = Q \times c \quad (1)$$

式中, F 为监测断面水体磷通量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), Q 为监测断面径流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), c 为监测断面水体磷的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2 研究方法

2.1 河流水体TDP与TPP输移转化的简化路径

河流(含河道型水库)水体磷输移过程中,TDP主要沿水流方向扩散迁移,TPP主要伴随悬浮泥沙颗粒的输移路径进行输移,即部分TPP沿水流方向沉降至水底,部分TPP输移更远的距离至下游河道^[16,17].其中,TPP输移过程与水体泥沙输移过程的区别是,TPP在输移的同时也可能与水体TDP发生相互转化作用.水体TPP与TDP相互转化主要包含两种反应:一是悬浮泥沙颗粒表面吸附或解吸TDP^[1~3],二是水体浮游生物生长吸收TDP转化为TPP(藻体本身所贡献),浮游生物死亡分解释放TDP^[5].

除了水体TDP与TDP的自然性输移转化作用下,外源性磷输入作用也会对河流水体磷形态分布产生重要影响.在无外源性磷输入环境下,河流水体TDP和TPP通量通常受到泥沙颗粒的吸附后沉降作用而沿水流方向逐渐降低.在外源性磷输入作用下(低浓度或高浓度),河流两断面间水体TDP和TPP通量或可受水量稀释作用而降低,或可受磷源添加作用而升高.在不考虑河流沉积物内源释放作用下,河流两断面间磷在水体和泥沙两种环境介质中的输移转化路径如图2所示.

2.2 河流水体TDP与TPP输移转化特征的判定方法建立

输运系数是指某种物质通过一个系统后,输出物质通量与输入物质通量的比值^[18].从河流系统输入断面至输出断面,当固定时段某物质的输运系数为1时,该物质在此系统内输送过程中通量未发生变化;当固定时段该物质的输运系数大于1时,说明了系统表现为该物质的添加作用;相反,当固定时段该物质的输运系数小于1时,说明了系统表现为该

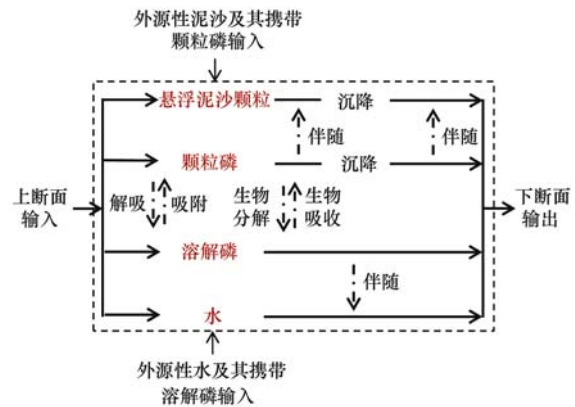


图2 河流水体溶解磷与颗粒磷的输移转化路径示意

Fig. 2 Schematic diagram of transport and transformation path of dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the river

物质的移出作用.河流物质输运系数考虑了径流量变化对河流物质输送通量的影响,避免了因径流量差异而错误判断系统中物质添加或移出作用^[9].

基于河流物质输运系数的概念,通过对比河流上游至下游两控制断面间水、沙和磷的物质输运系数的差异性,初步建立一种概念性判定方法,可用以辨析水体TDP与TPP的输移转化特征.该方法从水量与TDP输运系数、输沙量与TPP输运系数的差异性出发,认为产生这种差异的主要原因是水体介质中的TDP与悬浮泥沙颗粒介质中的TPP在输移过程中通过物理、化学或生物作用发生了形态转化.

本研究将河流上游断面的径流量、TDP通量分别标记为 F_{W1} 、 F_{TDP1} ,下游断面的径流量、TDP通量分别为 F_{W2} 、 F_{TDP2} ,则从上断面至下断面的水量输运系数(记为 T_W)、TDP输运系数(记为 T_{TDP})以及两者比值(记为 T_{TDP}/T_W)分别由式(2)~(4)计算得到.河流水环境中TDP随水团扩散而进行输移.假如从河流上断面至下断面之间无外源性水、沙和磷的输入,TDP与TPP不发生相互转化,那么在理论上,两断面之间 T_W 应等于 T_{TDP} ,即 T_{TDP}/T_W 比值为1.然而,在实际情况下,两断面间不可避免受到外源输入和TDP与TPP相互转化的影响,所以 T_W 并不等于 T_{TDP} ,具体有6种情景模式,如表1所示.

$$T_W = F_{W2}/F_{W1} \quad (2)$$

$$T_{TDP} = F_{TDP2}/F_{TDP1} \quad (3)$$

$$T_{TDP}/T_W = (F_{TDP2} \times F_{W1}) / (F_{TDP1} \times F_{W2}) \quad (4)$$

相应地,河流水环境中TPP主要伴随悬浮泥沙颗粒的输移路径进行输移.本研究将河流上游断面的输沙量、TPP通量分别标记为 F_{S1} 、 F_{TPP1} ,下游断面的输沙量、TPP通量分别为 F_{S2} 、 F_{TPP2} ,则从上断

面至下断面的泥沙输运系数(记为 T_s)、TPP 输运系数(记为 T_{TPP})以及两者比值(记为 T_{TPP}/T_s)分别由式(5)~(7)计算得到. 假如从河流上断面至下断面之间无外源性水、沙和磷输入, TDP 与 TPP 不发生相互转化, 河流两断面间水体 TPP 通量仅伴随着泥沙颗粒的重力沉降而减少, 则两断面间的 T_s 与 T_{TPP} 相等且均小于1, T_{TPP}/T_s 比值为1. 在实际情况

下, T_s 和 T_{TPP} 可能大于1, 且 T_{TPP}/T_s 比值并不等于1, 这主要受到河流两断面间的外源性磷输入和水体 TDP 与 TPP 相互转化的影响, 具体有6种情景模式, 如表2所示.

$$T_s = F_{S2}/F_{S1}$$

(5)

$$T_{TPP} = F_{TPP2}/F_{TPP1}$$

(6)

$$T_{TPP}/T_s = (F_{TPP2} \times F_{S1})/(F_{TPP1} \times F_{S2})$$

(7)

表1 河流上下游控制断面间水量和 TDP 输运系数的变化情景模式及其指示情况
Table 1 Changing scenarios of transport coefficients of water runoff and TDP between upper and lower reaches of a river and their designation

情景模式	指示情况
(1)若 $T_w < 1$, $T_{TDP} < 1$, 且 $T_{TDP}/T_w > 1$	此区段水量、TDP 通量均有损耗, 且存在 TPP 通过颗粒脱附、生物分解作用转化为 TDP 的行为
(2)若 $T_w < 1$, $T_{TDP} < 1$, 且 $T_{TDP}/T_w < 1$	此区段水量、TDP 通量均有损耗, 且存在 TDP 通过颗粒吸附、生物吸收作用转化为 TPP 的行为
(3)若 $T_w > 1$, $T_{TDP} > 1$, 且 $T_{TDP}/T_w > 1$	此区段水量、TDP 通量均有外源性输入, 且属于外源性含高浓度 TDP 的水量输入
(4)若 $T_w > 1$, $T_{TDP} > 1$, 且 $T_{TDP}/T_w < 1$	此区段水量、TDP 通量均有外源性输入, 且属于外源性含低浓度 TDP 的水量输入, 对水体 TDP 浓度起稀释作用
(5)若 $T_w > 1$, $T_{TDP} < 1$	此区段有水量输入, 但 TDP 通量损耗, 应该存在 TDP 通过颗粒吸附、生物吸收作用转化为 TPP 的行为
(6)若 $T_w < 1$, $T_{TDP} > 1$	此区段有水量损耗, 但 TDP 通量输入, 应该存在 TPP 通过颗粒脱附、生物分解作用转化为 TDP 的行为

表2 河流上下游控制断面间输沙量和 TPP 输运系数的变化情景模式及其指示情况
Table 2 Changing scenarios of transport coefficients of sand discharge and TPP between upper and lower reaches of a river and their designation

情景模式	指示情况
(1)若 $T_s < 1$, $T_{TPP} < 1$, 且 $T_{TPP}/T_s > 1$	此区段输沙量、TPP 通量均因颗粒重力沉降而损耗, 且 TDP 通过颗粒吸附、生物吸收作用转化为 TPP 的行为
(2)若 $T_s < 1$, $T_{TPP} < 1$, 且 $T_{TPP}/T_s < 1$	此区段输沙量、TPP 通量均因泥沙沉降而损耗, 且存在 TPP 通过颗粒脱附、生物分解作用转化为 TDP 的行为
(3)若 $T_s > 1$, $T_{TPP} > 1$, 且 $T_{TPP}/T_s > 1$	此区段具有携带有高浓度磷含量的外源性泥沙颗粒输入, 也可能存在部分 TDP 通过颗粒吸附、生物吸收作用转化为 TPP 的行为
(4)若 $T_s > 1$, $T_{TPP} > 1$, 且 $T_{TPP}/T_s < 1$	此区段具有携带有低浓度磷含量的外源性泥沙颗粒输入, 也可能存在部分 TPP 通过颗粒脱附、生物分解作用转化为 TDP 的行为
(5)若 $T_s > 1$, $T_{TPP} < 1$	此区段有泥沙输入, 但 TPP 通量损耗, 应该存在 TPP 通过颗粒脱附、生物分解作用转化为 TDP 的行为
(6)若 $T_s < 1$, $T_{TPP} > 1$	此区段有泥沙沉降而损耗, 但 TPP 通量输入, 应该存在 TDP 通过颗粒吸附、生物吸收作用转化为 TPP 的行为

3 结果与分析

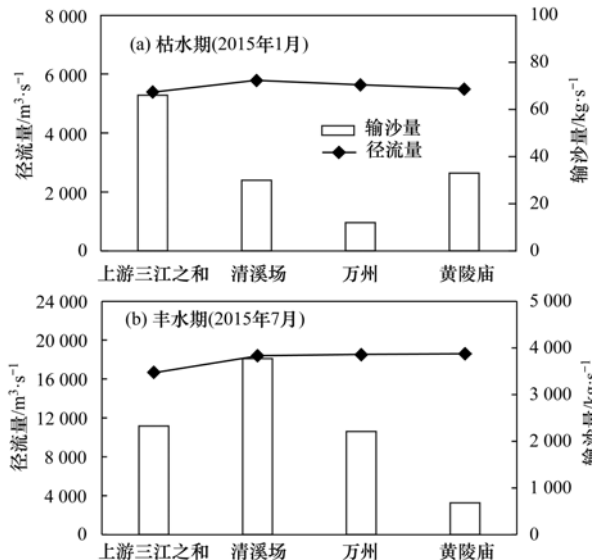
3.1 三峡水库径流量和输沙量的时空分布特征

2015 年1月(枯水期)和7月(丰水期), 三峡上游河流及水库干流各断面的径流量和输沙量的分布情况如图3所示. 在枯水期和丰水期, 上游三江入库至出库黄陵庙断面的径流量范围分别为 $5\,391 \sim 5\,780 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $16\,690 \sim 18\,597 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 可以看出, 三峡库区清溪场断面均相比上游三江入库径流量略高, 枯水期上游三江入库径流量占清溪场断面径流量的93%, 丰水期则占91%. 这说明三峡水库90%以上水量均来源于三条上游入库河流的水量输入, 仅有不足10%的水量是来源于三峡库区支流补给和大气降水补给. 此外, 枯水期正处于三峡拦坝

蓄水时期, 出库黄陵庙断面的径流量相比入库清溪场断面减少了5.07%; 丰水期处于三峡开闸泄水时期, 出库黄陵庙断面的径流量相比入库清溪场断面增加了1.07%.

在枯水期, 上游三江入库输沙量之和为 $66 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 输入至库区清溪场和万州断面下降至 $30 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $12 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 再至出库黄陵庙断面升高至 $33 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. 在丰水期, 上游三江入库输沙量之和为 $2\,328 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 输入至库区清溪场断面升高至 $3\,770 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 再至库区万州和出库黄陵庙断面分别下降至 $2\,210 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $681 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. 由此可见, 上游入库河流泥沙输入也是三峡库区泥沙的主要来源, 且从上游三江入库至出库黄陵庙断面的输沙量显著下降. 枯水期正处于三峡拦坝蓄水时期, 上游三江入

库至出库黄陵庙断面的输沙量减少了 50%；丰水期输沙量减少了 71%，这主要是因为丰水期雨水冲刷和水土流失作用增强，导致三峡上游河流水、沙输入量大幅增加，从而丰水期三峡水库各断面输沙量及其入、出库减少率高于枯水期。对比径流量和输沙量，可以看出三峡水库对泥沙的滞留作用强于对水体的滞留作用。



上游三江径流量、输沙量之和分别由长江朱沱、嘉陵江北碛和乌江武隆断面的径流量、输沙量加和得到

图3 三峡水库各监测断面径流量与输沙量的分布

Fig. 3 Distribution of water runoff and sand discharge at sampling sites of the Three Gorges Reservoir

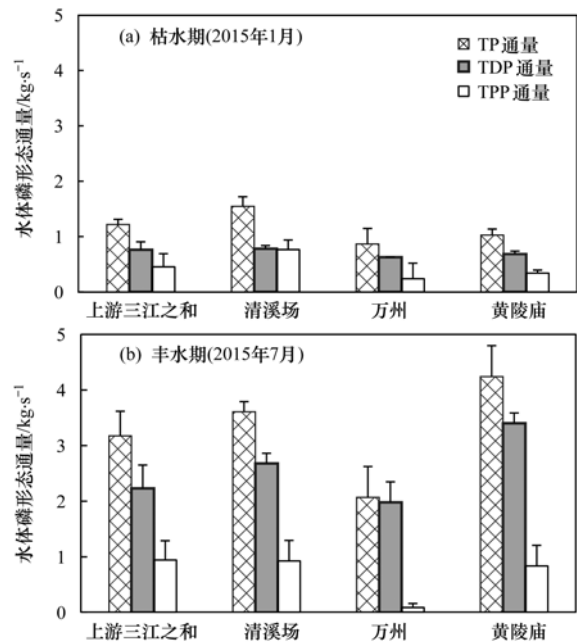
3.2 三峡水库水体不同磷形态通量的时空分布特征

2015年1月(枯水期)和7月(丰水期),三峡上游河流及水库干流各监测断面的水体TP、TDP和TPP通量的分布情况,如图4所示。在枯水期和丰水期,三峡上游三江入库至出库黄陵庙断面的水体TP通量范围分别为 $0.87 \sim 1.55 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.07 \sim 4.24 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在两时期,水体TP通量的空间分布均表现为:从上游三江入库至库区清溪场断面升高,至万州断面大幅降低,再至出库黄陵庙断面又有所升高。由于丰、枯水期长江流域雨量分布不均,径流量差异较大,所以丰水期三峡水库水体TP通量明显高于枯水期。

在枯水期,三峡上游三江入库至出库黄陵庙断面的水体TDP和TPP通量范围分别为 $0.63 \sim 0.78 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.24 \sim 0.77 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,TDP通量占TP通量的51%~72%;在丰水期,三峡上游三江入库至出库黄陵庙断面水体TDP和TPP通量范围分别为 $1.98 \sim 3.40 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.09 \sim 0.94 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,TDP通量占TP通量的70%~96%。从图4可以看出,三峡

水库水体TDP、TPP通量的空间分布特征与TP通量相似,基本表现为:从上游三江入库至万州断面含量呈降低趋势,再至出库黄陵庙断面又呈升高趋势。

在两时期,三峡水库水体均以TDP为主要磷形态。本团队发表的前期研究工作表明,枯水期(2015年1月)三峡水库水体含沙量较低($0.002 \sim 0.016 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),而丰水期(2015年7月)含沙量大幅升高($0.032 \sim 0.205 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)^[15],但丰水期单位质量悬浮泥沙颗粒所含磷的质量相对枯水期较低^[19],因此两时期三峡水库水体TPP质量浓度均低于TDP质量浓度,水体主要磷形态均为TDP。



上游三江磷通量之和分别由长江朱沱、嘉陵江北碛和乌江武隆断面的磷通量加和得到

图4 三峡水库各监测断面水体不同磷形态通量的分布

Fig. 4 Distributions of fluxes of phosphorus fractions in water at sampling sites of the Three Gorges Reservoir

4 讨论

4.1 三峡水库水、沙和磷的转运系数差异及其输移转化特征

将上游三江入库~黄陵庙段作为三峡全库区,同时根据监测断面设置将三峡水库分成三个区段,包括上游三江入库~清溪场段、清溪场~万州段和万州~黄陵庙段。基于调查区间三峡水库各断面径流量、输沙量、TDP通量和TPP通量数据,利用式(2)~(7)计算三峡水库各区段水量转运系数(T_w)、泥沙转运系数(T_s)、TDP转运系数(T_{TDP})和TPP转运系数(T_{TPP})及 T_{TDP}/T_w 、 T_{TPP}/T_s 比值(图5),并对照表1和表2的情景模式对三峡水库TDP与TPP的输移转化特征进行分析。

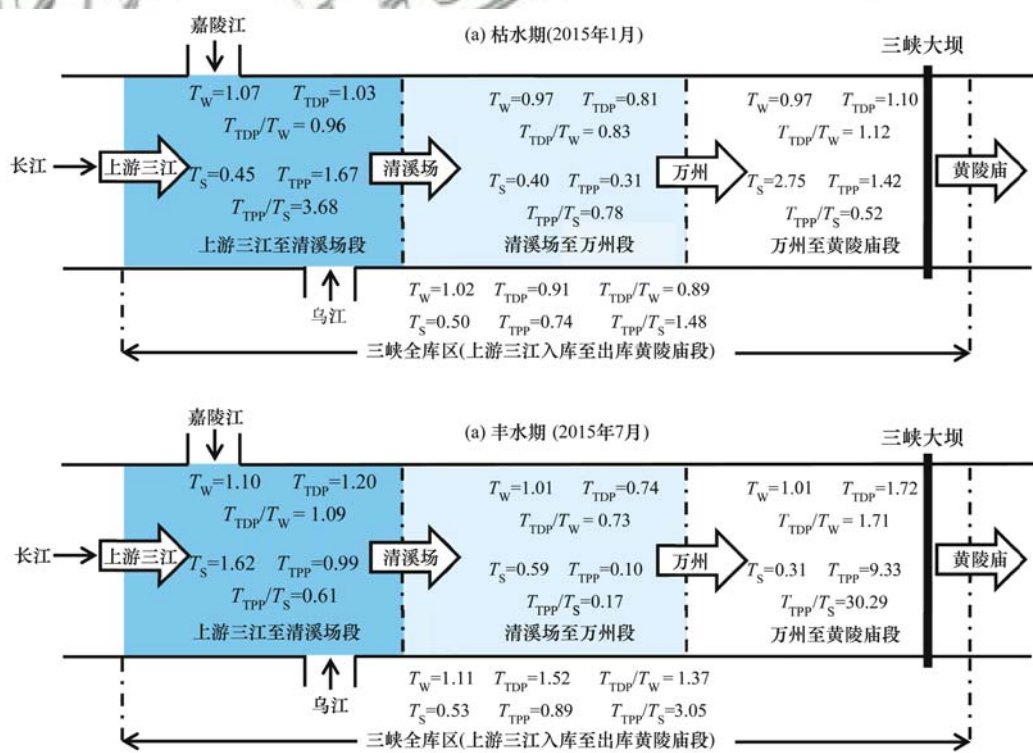
从三峡全库区(上游三江入库~黄陵庙段)来看,枯水期 T_W 略大于1, T_{TDP} 略小于1,说明枯水期全库区水量外源性输入作用很小,TDP相对于水量表现为一定的移出作用,主要由三峡水库拦坝蓄水促进泥沙颗粒吸附TDP后沉降所造成.相反,丰水期,三峡全库区 T_W 、 T_{TDP} 和 T_{TDP}/T_W 均大于1,说明丰水期全库区表现为明显的外源性含高浓度TDP的水量输入特征.枯水期和丰水期,三峡全库区 T_S 、 T_{TPP} 均小于1, T_{TPP}/T_S 大于1,意味着两时期全库区泥沙和TPP的沉降滞留作用明显,但TPP相对于沙量表现为添加作用,也一定程度上说明两时期库区TDP被泥沙颗粒吸附而转化为TPP的作用相比TPP转化为TDP的作用均相对更强.

从三峡水库分区分段(上游三江入库~清溪场段、清溪场~万州段和万州~黄陵庙段)来看,在枯水期,上游三江入库~清溪场段 T_W 、 T_{TDP} 均大于1, T_{TDP}/T_W 小于1,意味着此区段具有外源性含低浓度TDP的水量输入;同时此区段 T_S 小于1,但 T_{TPP} 大于1,也一定程度说明此区段水体TDP被泥沙颗粒吸附或生物吸收而转化为TPP的作用较强.对于清溪场~万州段,枯水期 T_W 、 T_{TDP} 、 T_S 、 T_{TPP} 均小于1, T_{TDP}/T_W 和 T_{TPP}/T_S 均小于1,这说明此区段水、沙和磷量均因滞留而减少,其中TDP相对于水量以及TPP相对于输沙量均表现为移出作用,可能与此区段泥沙颗粒大幅沉降,粒径明显细化,单

位质量颗粒吸附磷能力增强有关^[19].对于万州~黄陵庙段,枯水期 T_W 略小于1,但 T_{TDP} 大于1,一定程度上说明此区段水体TPP从泥沙颗粒上脱附而转化为TDP的作用较强;同时此区段 T_S 、 T_{TPP} 均大于1, T_{TPP}/T_S 小于1,意味着此区段存在着携带有低浓度磷含量的泥沙颗粒输入来源及部分TPP转化为TDP的行为,可能与枯水期(处于三峡水库高水位期)坝后河道水体匮乏、河床冲刷有关.

在丰水期,上游三江入库~清溪场段 T_W 、 T_{TDP} 均大于1, T_{TDP}/T_W 大于1,意味着此区段具有外源性含高浓度TDP的水量输入;此区段 T_S 大于1,但 T_{TPP} 略小于1,也一定程度说明此区段水体TPP从泥沙颗粒上脱附而转化为TDP的作用较强.对于清溪场~万州段,丰水期 T_W 略大于1,但 T_{TDP} 、 T_S 、 T_{TPP} 、 T_{TDP}/T_W 和 T_{TPP}/T_S 均小于1,说明丰水期此区段泥沙和磷量也均因滞留而减少,TDP相对于水量以及TPP相对于沙量也均表现为移出作用.对于万州~黄陵庙段,丰水期 T_W 、 T_{TDP} 和 T_{TDP}/T_W 均大于1,说明此区段存在外源性含高浓度TDP的水量输入;同时此区段 T_S 小于1,但 T_{TPP} 远大于1,说明此区段存在着携带有高浓度磷含量的泥沙颗粒输入来源及部分TDP转化为TPP的行为,可能与丰水期(处于三峡水库低水位期)三峡大坝开闸泄水排沙有关.

通过以上分析可以得到:在枯水期和丰水期,



T_W 、 T_S 、 T_{TDP} 和 T_{TPP} 分别为两断面间(某一区段)水量、输沙量、TDP通量和TPP通量的运输系数

图5 三峡水库各区段水量、输沙量、溶解磷与颗粒磷通量的运输系数

Fig. 5 Transport coefficients of water runoff, sand discharge, TDP flux and TPP flux in each subsection of the Three Gorges Reservoir

三峡上游三江入库~清溪场段均具有部分外源性水量及溶解磷的输入作用;清溪场~万州段为三峡入库的水、沙和磷量的主要滞留区域,TDP、TPP 相比于水量、沙量的移出作用明显,可能与该区段泥沙颗粒粒径细化从而吸附磷能力增强有关;万州~黄陵庙段存在较大的外源性泥沙及其携带磷的输入来源,枯水期、丰水期可能分别来源于坝后河床冲刷作用、坝前排沙作用。

4.2 不确定性分析

从上述判定方法在三峡水库的应用可以发现,该判定方法侧重于从水体悬浮泥沙颗粒吸附/解吸磷以及浮游生物生长代谢活动吸收/释放磷两方面来解释水体 TDP 与 TPP 的转化过程,而忽略了水底沉积物内源磷释放作用。沉积物内源磷释放仍然是河流水体磷的一个潜在来源^[20],对水体磷营养盐水平具有一定的调节作用。但是,前人研究学者开展三峡水库沉积物内源负荷调查结果表明,三峡水库沉积物磷释放对上覆水体影响程度较小,沉积物磷释放对上覆水体磷的贡献率仅有 $-0.011\% \sim 0.098\%$ ^[21]。因此,本研究在三峡水库应用上述判定方法时忽略沉积物内源磷释放作用。

除沉积物内源磷释放之外,还存在一些其他不确定因素可能影响分析结果。首先,由于三峡水库水域面积大、水文水动力条件复杂以及周边存在一定的人类活动干扰,各区段外源性水、沙及其携带磷(包含 TDP 和 TPP)输入数量众多,且输入水源所含 TDP 和沙源所含颗粒磷浓度高低混杂,给进一步解析水库各区段磷输移转化过程带来一定的困难。其次,水环境理化特征和水动力条件影响着悬浮泥沙颗粒理化性质,进而影响着三峡水库各区段悬浮泥沙颗粒吸附解吸磷能力的空间分异特征^[16, 22]。由于未获得三峡库区各区段泥沙对磷吸附解吸的动力学资料,所以本研究只能假设库区各区段泥沙颗粒对磷的吸附解吸能力相同,这会带来一定的分析误差。

另外,河流水体含沙量浓度也是控制水体 TPP 与 TDP 吸附/解吸的关键因素。Pan 等^[23]的研究表明:当含沙量低于 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,黄河悬浮泥沙颗粒物吸附而去除水体 TDP 的总量非常低,即水体磷以 TDP 形态大量存在而可能引起黄河水体富营养化。在三峡水库干流,丰水期间水体含沙量最高值才约达 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,其它时期含沙量远远低于 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从图 3 可以看出,从上游河流至库区万州断面输沙量逐渐降低,径流量变化较小,所以含沙量也沿程降低。因此,即使假设三峡库区各区段悬浮泥沙颗粒对磷的吸附能力相同,但因其含沙量在空

间上沿程降低,单位体积水体所含的悬浮颗粒对磷的总吸附量也应呈沿程降低特征。

然后,水体浮游生物生长代谢活动也参与着水体磷的输移转化过程。前人研究表明:三峡水库上游河流输入的 TDP 在一定程度上被浮游生物的光合固碳过程所固定^[24];嘉陵江重庆段水体藻类对磷限制因子的耐受限度为 $0.005 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25],三峡水库水体 TDP 质量浓度约为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19],不会对藻类生长形成限制。整体上,三峡水库浮游生物密度不高,且呈春、夏、秋、冬依次递减特征,主要由三峡水库流量、流速和浊度的季节变化所造成^[26]。因此,三峡水库不同区段不同季节的浮游生物密度并非固定不变的,从而浮游生物吸收磷的数量以及其死亡分解释放磷的数量也呈一定的时空差异性,而这种差异对三峡水库各区段是水体浮游生物吸收或释放磷情况差异也会造成一定的分析误差。

尽管如此,相比以磷浓度、背景浓度或相关水质标准为评价数据的传统河流水质评价方法^[27],该概念性分析方法加入各断面径流量、输沙量,从磷通量与磷贮存载体数量的差异去分析三峡水库磷的添加与移出作用,可定性地判定水体 TDP 与 TPP 相互转化作用的主流方向。

5 结论

(1)根据河流上、下游两控制断面间水、沙和磷的输运系数差异,建立了一种河流水体 TDP 与 TPP 输移转化特征的判定方法,可定性分析水体 TDP 相对于水介质、TPP 相对于泥沙介质的添加或移出作用,并判定水体 TDP 与 TPP 相互转化的主流方向。

(2)三峡水库水体主要磷形态为 TDP, TDP 占 TP 的 $51\% \sim 96\%$ 。对于三峡全库区,枯水期 TDP 相对于水介质呈移出作用,与三峡拦坝蓄水促进泥沙颗粒吸附 TDP 有关,丰水期 TDP 相对于水介质呈添加作用,与外源性含高浓度 TDP 的水量输入有关。

(3)在两时期,三峡全库区泥沙和 TPP 均以沉降滞留作用为主,TPP 相对于沙量呈添加作用,进一步说明 TDP 被泥沙颗粒吸附而转化为 TPP 作用相对更强。清溪场~万州段是水、沙和磷的主要滞留区域,万州~黄陵庙段存在较大的外源性泥沙及其携带磷的输入来源。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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, 2019, **145**: 321-331.
- [4] Dorich R A, Nelson D W, Sommers L E. Estimating algal available phosphorus in suspended sediments by chemical extraction[J]. Journal of Environmental Quality, 1985, **14**(3): 400-405.
- [5] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems[J]. Earth-Science Reviews, 2000, **51**(1-4): 109-135.
- [6] 张潇元. 三峡库区泥沙对磷的吸附解吸特性研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2017.
- [7] Yao Q Z, Yu Z G, Chen H T, et al. Phosphorus transport and speciation in the Changjiang (Yangtze River) system[J]. Applied Geochemistry, 2009, **24**(11): 2186-2194.
- [8] 秦延文, 马迎群, 王丽娟, 等. 长江流域总磷污染: 分布特征·来源解析·控制对策[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(1): 9-14.
- Qin Y W, Ma Y Q, Wang L J, et al. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(1): 9-14.
- [9] 冉祥滨. 三峡水库营养盐分布特征与滞留效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- Ran X B. Nutrient distributions and retention of the Three Gorges Reservoir[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [10] 沈志良. 长江磷和硅的输送通量[J]. 地理学报, 2006, **61**(7): 741-751.
- Shen Z L. Phosphorus and silicate fluxes in the Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **61**(7): 741-751.
- [11] 孙阳, 王里奥, 袁辉. 三峡水库氮磷污染贡献率估算[J]. 重庆大学学报, 2004, **27**(10): 138-141.
- Sun Y, Wang L A, Yuan H. Estimation of the N and P contributions to the water quality of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Chongqing University, 2004, **27**(10): 138-141.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2002-2016.
- [13] 冉祥滨, 姚庆祯, 巩瑶, 等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J]. 水生态学杂志, 2009, **2**(2): 1-8.
- Ran X B, Yao Q Z, Gong Y, et al. Nutrient budget of Three Gorges Reservoir pre-and-post impoundment[J]. Journal of Hydroecology, 2009, **2**(2): 1-8.
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴-长江流域水文资料-长江上游干流区(第6卷, 第3册)[M]. 北京: 中华人民共和国水利部水文局, 2010-2016.
- [16] Yao Q Z, Du J T, Chen H T, et al. Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(4): 3385-3398.
- [17] 黄磊, 方红卫, 王靖宇, 等. 河流泥沙磷迁移过程的数学模型研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(4): 394-402.
- Huang L, Fang H W, Wang J Y, et al. Mathematical model of phosphorus transport with river sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(4): 394-402.
- [18] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach[J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [19] 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.
- [20] 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 等. 三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2615-2623.
- Pan C J, Li R, Tang X Q, et al. Assessment of physico-chemical properties and phosphorus fraction distribution characteristics in sediments after impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2615-2623.
- [21] 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.
- [22] 王圣瑞, 金相灿, 庞燕. 不同营养水平沉积物在不同 pH 下对磷酸盐的等温吸附特征[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(1): 53-57.
- Wang S R, Jin X C, Pan Y. The sorption isotherms of phosphate to different nutrient levels of sediments in different pH[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, **18**(1): 53-57.
- [23] 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.
- [24] 张恩仁, 张经. 三峡水库对长江 N、P 营养盐截留效应的模型分析[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 41-48.
- Zhang E R, Zhang J. Analysis of the Three-Gorge Reservoir impacts on the retention of N and P in the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, **15**(1): 41-48.
- [25] 郑敏. 嘉陵江重庆主城段藻类营养盐限制因子生态幅研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [26] 王英才, 邱光胜, 陈水松, 等. 三峡库区试验性蓄水期间浮游生物群落特点研究[J]. 人民长江, 2012, **43**(12): 4-9.
- Wang Y C, Qiu G S, Chen S S, et al. Research on plankton community in Three Gorges Reservoir during its trial impoundment[J]. Yangtze River, 2012, **43**(12): 4-9.
- [27] 陆卫军, 张涛. 几种河流水质评价方法的比较分析[J]. 环境科学与管理, 2009, **34**(6): 174-176.
- Lu W J, Zhang T. Comparison and analysis of several appraisal methods for river water quality[J]. Environmental Science and Management, 2009, **34**(6): 174-176.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoides</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)