

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



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铎鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系	李敏, 唐剑峰, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧彬, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马蛟蛟, 徐颂军 (2496)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析

唐小娅^{1,2}, 童思陈², 黄国鲜^{1*}, 许光祥², 李丹³

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 磷是水域重要的营养或污染物质之一, 主要随河川径流循环, 河流大型水库建设和运行将对磷的输运和转化产生重要影响. 基于三峡水库 2008~2016 年实测水文和水质资料, 建立了总磷 (TP) 通量和泥沙通量的统计模型, 利用模型插补 TP 的日过程浓度后建立了 TP 通量计算公式, 分析了三峡水库 TP 浓度时空变化特征、通量变化及滞留效应. 结果表明, 不考虑区间小支流 TP 入汇影响, 2008~2012 年, 三峡入库 TP 浓度年际变化为 $0.196 \sim 0.290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年内 TP 浓度变化趋势呈“M”型, 具有明显的双峰特性, 三峡干流上游至下游 TP 浓度基本表现为沿程减小, 部分年份清溪场断面 TP 浓度高于寸滩, 该时段三峡年均入库 TP 通量和滞留率分别为 8.23 万 t 和 49.76%. 2013~2016 年, 三峡年均入库 TP 通量和滞留率明显减小, 分别为 4.79 万 t 和 12.03%.

关键词: 三峡水库 (TGR); 总磷 (TP); 时空变化特征; 通量变化; 滞留效应

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2096-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911073

Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir

TANG Xiao-ya^{1,2}, TONG Si-chen², HUANG Guo-xian^{1*}, XU Guang-xiang², LI Dan³

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Phosphorus, as a limiting and vital macronutrient in water, circulates mainly with sediment through rivers. The construction and operation of large reservoirs can have a profound impact on the characteristics of phosphorus transportation and transformation. Based on measured hydrological and water quality data during 2008-2016 in the Three Gorges Reservoir (TGR), a statistical model of total phosphorus (TP) flux and sediment load in different periods was established. The formula of TP flux was established by analyzing the interpolation of unmeasured TP concentration, tempo-spatial characteristics, flux variation, and the retention effect of TP in the TGR. The results indicated that taking no account of the effects of TP inflows of tributaries, annual TP concentration in the TGR varied between $0.196 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during 2008-2012, and inner-annual changes in TP concentration presented an “M” type with two obvious peaks. TP concentration decreased slowly from upstream to downstream of the TGR, and increased significantly from Cuntan to Qingxichang in some years. The average annual TP flux and retention rate of the TGR were 82 300 t and 49.76% during 2008-2012, respectively. During 2013-2016, the average annual TP flux and retention rate decreased significantly, to about 47 900 t and 12.03%, respectively.

Key words: Three Gorges Reservoir (TGR); total phosphorus (TP); tempo-spatial characteristics; flux variation; retention effect

河流是全球生物地球化学循环中“陆-海”营养物质输移的重要通道^[1]. 初步估计, 全球每年经河流输入海洋的陆源营养物质约 200 亿 t^[2]. 随着社会经济对水资源和能源的迫切需求, 大规模筑坝拦截水量 (发电、防洪、灌溉和供水等), 已成为人类开发河流的主要活动之一, 也是全球河流普遍面临的趋势^[3]. 河流筑坝在提高水资源利用率和促进水利工程建设领域发展的同时, 极大地改变了河流的水动力学条件, 干扰了营养物质的输移和限制了河流向下游的营养物质输出^[4], 导致库区和下游营养物质浓度和通量等发生剧烈变化^[5], 从而改变河流生态系统的结构和功能^[6], 甚至可能带来严重的生态问题, 如改变生态系统关键营养盐限制^[7]、引起下游河湖和河口湿地快速变化^[8]、

库区水体富营养化和缺氧^[9]等不良生态效应. 因此研究大坝干扰下河流营养物质的通量变化和滞留效应, 有助于深入认识人类活动对河流营养盐循环和生态环境变化的影响, 成果可为河流水环境管理以及生态保护与修复提供一定的参考.

国内外学者针对水库磷营养盐的浓度和通量变化、空间分布以及滞留效应等开展了大量研究工作. Molisani 等^[10]的研究发现巴西 Castanhão 水

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2019-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1600400); 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室重点开放基金项目 (2016-KF-01); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (cstc2018jcyjAX0534); 重庆市研究生科研创新项目 (CYB18169)

作者简介: 唐小娅 (1990~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水环境与河流动力学, E-mail: txy_say@126.com

* 通信作者, E-mail: huanggx@cracs.org.cn

库对总磷(TP)具有强烈的滞留效应,平均滞留率为98%。Maavara等^[11]预测至2030年全球河流约17%的TP负荷将被水库拦截,其中亚洲长江、湄公河流域和南美洲亚马逊流域的TP滞留量增幅最大。我国黄河流域由于大规模梯级水库开发,水质恶化现象日益严重,TP输出通量减少了约84%^[12]。金沙江下游梯级水库运行使得出库TP浓度与通量较蓄水前明显降低,梯级水库出库控制站向家坝站蓄水前后TP浓度变化范围分别为 $0.030 \sim 0.420 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.010 \sim 0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP浓度较蓄水前降低约75%,TP出库年通量在蓄水前后分别为 $0.89 \sim 1.86 \text{ 万 t}$ 和 $0.31 \sim 0.73 \text{ 万 t}$,蓄水后通量远低于蓄水前^[13]。向家坝水库在2015~2016年期间平均TP浓度为 $0.034 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水库对TP的滞留效应使TP浓度在水库纵向上(顺水流方向)沿程减小,垂向上TP浓度随水深增加而增大^[14]。三峡水库香溪河库湾表层水体中TP浓度为 $0.200 \sim 0.510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且TP浓度在空间上呈现从河口向库尾逐渐升高的分布特点,库湾沉积物中TP含量为 $642 \sim 1\,189 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,沉积物TP含量表现为上游高下游低^[15]。三峡工程是治理长江水患和开发长江水资源的关键性骨干工程,这一巨型工程的建成运行,在防洪、发电、航运、灌溉等方面带来巨大经济效益的同时,对库区水环境质量也造成了一定影响^[16]。三峡水库蓄水运行使得库区流速变缓,水体滞留时间延长,颗粒态磷(PP)伴随泥沙在库区大量沉积滞留,从而导致向下游输移的TP通量减少约77%^[17]。三峡水库泥沙颗粒吸附磷素形成的内源释放威胁,加剧了库区水体富营养化风险^[18]。高浓度和大量的磷滞留在库区对支流水质也造成了强烈影响,目前部分支流水体正面临恶化趋势^[19~21]。据不完全统计,三峡库区支流在2011~2015年发生大规模水华现象约99次,暴发水华河流占监测河流的比例为60%^[22]。此外,由于长江中下游河段超过50%的磷来自三峡上游,因此三峡水库对磷的滞留效应也将在一定程度上改变长江中下游的营养结构^[23]。三峡水库对库区和流域中下游生态环境演变具有重要调控作用,因此开展三峡水库磷时空分布特征、通量变化及滞留效应研究是十分必要的。故本文基于三峡水库2008~2016年实测流量、含沙浓度以及TP浓度资料,分时段建立了TP通量和泥沙通量的统计模型,并利用该模型插补TP的日过程浓度后建立了TP年通量的计算公式,分析了三峡水库TP浓度的时空变化特征、通量变化及滞留效应。

1 材料与方法

1.1 材料

本文涉及的基础数据包括三峡库区朱沱、北碚、寸滩、武隆、清溪场、万县和宜昌等主要控制站(图1),2008~2016年实测日平均过程流量、含沙浓度以及在上述测站的逐月TP浓度资料。水沙及水质资料均来源于长江水利委员会水文局。本次研究仅考虑长江及两大主要支流嘉陵江和乌江对三峡入库TP的贡献,忽略区间小支流的TP汇入影响。朱沱、北碚和武隆分别作为长江、嘉陵江和乌江的入库TP控制站,考虑到三峡出口三斗坪站建站较晚,观测资料较为短缺,本文将宜昌作为三峡水库TP的出库控制站。长江磷与泥沙关系密切,泥沙通量变化是TP通量变化的根本原因之一^[24]。随着长江上游向家坝、溪洛渡等梯级水库陆续运行,三峡入库泥沙通量在2013年以后具有明显的减少趋势^[25],TP通量伴随入库沙量的变化而变化。为便于对比上游梯级水库蓄水前后三峡水库TP浓度和通量的变化,将三峡出入库TP浓度和通量进行划时段分析,包括2008~2012年和2013~2016年两个时段。此外,将年内6~9月划分为丰水期,12月~次年3月为枯水期,4~5月及10~11月为平水期。考虑到乌江磷污染治理前后TP浓度的较大变化,因此将乌江TP浓度的年内和季节变化也分时段分析,包括2008~2011年和2012~2016年两个时段。

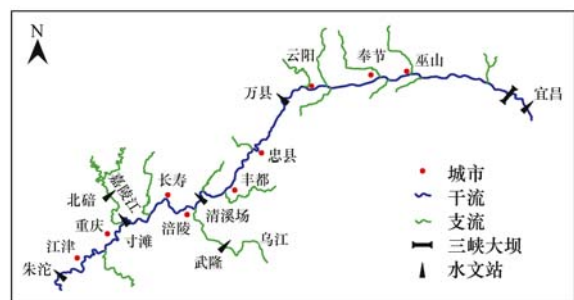


图1 三峡库区主要水文监测站示意

Fig. 1 Map of main hydrological stations in the TGR area

1.2 方法

基于三峡水库2008~2016年逐月实测水质资料,从年际年内、沿程及季节变化分析三峡水库TP浓度的时空变化特征。结合该时段内三峡水库水沙资料,分析逐月TP浓度与对应月份月均流量、月均含沙浓度的关系。借鉴周建军等^[24]提出的模型基本框架,在延长三峡水库水质与水沙资料的基础上,同时考虑长江上游梯级水库运行影响,分时段建立TP通量与泥沙通量的统计模型[式(1)~(3)],包括2008~2012年和2013~2016年两时段。该模型可

直接反映泥沙输移对 TP 通量的影响,也间接体现了流量、含沙浓度对 TP 通量的综合影响,即水流稀释效应和泥沙吸附解吸效应影响.

$$L_{TP} = aQ_s^b \quad (1)$$

$$cQ = a(QS)^b \quad (2)$$

$$c = aQ^{b-1}S^b \quad (3)$$

式中, L_{TP} 为 TP 通量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); Q_s 为泥沙通量,即输沙率 ($\text{t} \cdot \text{s}^{-1}$); c 为 TP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q 为流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); S 为含沙浓度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); a 和 b 分别为公式系数和指数.

建立三峡水库 TP 通量与泥沙通量统计模型时,需计算三峡水库 2008 ~ 2016 年出入库逐月月均流量和含沙浓度、逐月泥沙通量、月均 TP 浓度和逐月 TP 通量:

$$\left. \begin{aligned} Q_{jin} &= Q_{jz} + Q_{jb} + Q_{jw}, \\ Q_{jout} &= Q_{jy}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$S_{jin} = \frac{S_{jz}Q_{jz} + S_{jb}Q_{jb} + S_{jw}Q_{jw}}{(Q_{jz} + Q_{jb} + Q_{jw})},$$

$$S_{jout} = S_{jy},$$

$$Q_{s(jin)} = Q_{jin}S_{jin},$$

$$Q_{s(jout)} = Q_{jout}S_{jout}.$$

$$c_{jin} = \frac{c_{jz}Q_{jz} + c_{jb}Q_{jb} + c_{jw}Q_{jw}}{(Q_{jz} + Q_{jb} + Q_{jw})},$$

$$c_{jout} = c_{jy},$$

$$L_{TP(jin)} = Q_{jin}c_{jin},$$

$$L_{TP(jout)} = Q_{jout}c_{jout}.$$

式中, j 为年内月份序列号 ($j=1, 2, 3, \dots, 12$); Q_{jin} 、 S_{jin} 、 $Q_{s(jin)}$ 、 c_{jin} 和 $L_{TP(jin)}$ 分别为三峡水库年内月的月均入库流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、月均入库含沙浓度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、月入库泥沙通量 ($\text{t} \cdot \text{s}^{-1}$)、月均入库 TP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和月入库 TP 通量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); Q_{jout} 、

S_{jout} 、 $Q_{s(jout)}$ 、 c_{jout} 和 $L_{TP(jout)}$ 分别为三峡水库年内月的月均出库流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、月均出库含沙浓度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、月出库泥沙通量 ($\text{t} \cdot \text{s}^{-1}$)、月均出库 TP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和月出库 TP 通量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); Q_{jz} 、 Q_{jb} 、 Q_{jw} 和 Q_{jy} 分别为三峡水库年内 j 月朱沱、北碚、武隆和宜昌控制断面的月均流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); S_{jz} 、 S_{jb} 、 S_{jw} 和 S_{jy} 分别为三峡水库年内 j 月朱沱、北碚、武隆和宜昌控制断面的月均含沙浓度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_{jz} 、 c_{jb} 、 c_{jw} 和 c_{jy} 分别为三峡水库年内月朱沱、北碚、武隆和宜昌控制断面的月均 TP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

经统计分析后,可得三峡水库在 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年两时段的逐月 TP 通量与逐月泥沙通量的关系(表 1). 从中可知,磷与泥沙在上游梯级水库蓄水前后均遵循较好的指数关系,公式相关系数均大于 0.6,主要区别在于上游梯级水库蓄水前后公式系数 a 和指数 b 存在一定差异. 系数 a 和指数 b 间接反映了 TP 通量与泥沙通量的相关程度. 系数 a 和指数 b 越接近 1,表明 TP 通量与泥沙通量关系越密切,TP 通量受泥沙通量影响越大;系数 a 越大于 1 指数 b 越小于 1,说明 TP 通量受泥沙通量影响越小,两者相关性越弱. 上游梯级水库蓄水前,TP 通量公式系数 a 和指数 b 更接近 1,表明该时段内泥沙通量对 TP 通量的影响更显著,两者相关性更好. 上游梯级水库运行后,系数 a 升高指数 b 降低,说明该时段内 TP 通量与泥沙通量的相关性降低,可能的原因是三峡水库因受梯级水库运行影响,入库沙量明显减少,入库水量却无明显变化,入库水沙关系一致性发生改变^[25],建立 TP 通量与泥沙通量的关系[式(1)],经变换后,实质是建立 TP 浓度与流量、含沙浓度的综合关系[式(3)],式(3)的相关程度因三峡水库水沙关系一致性的改变而受到削弱.

表 1 三峡水库 TP 通量与泥沙通量的关系

Table 1 Relation between TP flux and sediment load of the TGR

出入库	控制断面	2008 ~ 2012 年(上游梯级蓄水前)				2013 ~ 2016 年(上游梯级蓄水后)			
		关系式	系数 a	指数 b	R^2	关系式	系数 a	指数 b	R^2
入库	朱沱、北碚、武隆	$L_{TP} = 0.881Q_s^{0.70}$	0.881	0.70	0.778	$L_{TP} = 1.586Q_s^{0.42}$	1.586	0.42	0.769
		$c = 0.881Q^{-0.30}S^{0.70}$	—	—		$c = 1.586Q^{-0.58}S^{0.42}$	—	—	
出库	宜昌	$L_{TP} = 1.974Q_s^{0.40}$	1.974	0.40	0.674	$L_{TP} = 2.732Q_s^{0.32}$	2.732	0.32	0.633
		$c = 1.974Q^{-0.60}S^{0.40}$	—	—		$c = 2.732Q^{-0.68}S^{0.32}$	—	—	

理论上,TP 在时段 T 内通过河流某一控制断面的通量为:

$$M = \int_0^T Q \cdot c \cdot dt \quad (7)$$

式中, M 为时段 T 内通过控制断面的 TP 通量 (t). 由于控制断面一般无连续的 TP 浓度实测资料,但

有逐月月均流量资料,因此 TP 年通量可采用 Webb 等^[26]建立的 5 种时段通量估算法中“方法 B”进行计算:

$$M = K \sum_{j=1}^{12} \left(\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{n} \cdot Q_m \right) \quad (8)$$

式中, c_i 为每月一次监测中第 i 个样品的 TP 瞬时浓

度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); n 为样品总数; Q_m 为月均流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); K 为综合换算系数, $K = 24 \times 3\,600 \times d_j \times 1\,000 \times 10^{-9} = 0.0864d_j$, d_j 为年内第 j 月的天数. Webb 公式计算结果在一定程度上受采样频率的影响, 考虑到三峡出入库 TP 浓度与流量、含沙浓度的综合相关性较好, 且出入库有连续实测的逐日流量、逐日含沙浓度资料, 因此采用式 (3) 来插补 TP 的日过程浓度不失为一种可行的方法. 按日差分式 (7), 可得 TP 年通量计算公式为:

$$M = f \sum_{k=1}^{365} (Q_k \cdot c_k) \quad (9)$$

式中, Q_k 为年内第 k 日的流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); c_k 为年内第 k 日的 TP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); f 为换算系数, $f = 24 \times 3\,600 \times 1\,000 \times 10^{-9} = 0.0864$.

将式 (3) 代入式 (9), 即得 TP 年通量计算公式为:

$$M = f \cdot a \sum_{k=1}^{365} (Q_k \cdot S_k)^b \quad (10)$$

式中, S_k 为年内第 k 日的含沙浓度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

三峡水库对 TP 通量的滞留率采用下式计算

$$\text{TE} = \frac{M_{\text{in}} - M_{\text{out}}}{M_{\text{in}}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, TE 为 TP 通量滞留率 (%); M_{in} 和 M_{out} 分别为三峡入库和出库 TP 通量 (t).

2 结果与分析

2.1 三峡水库 TP 浓度变化

2.1.1 出入库水沙变化

三峡水库入库水沙过程具有一定阶段性特征 (图 2). 在 2008 ~ 2012 年, 入库水沙变化趋势一致, 呈现“大水带大沙, 少水带少沙”的特点. 在 2013 ~ 2016 年, 由于上游向家坝、溪洛渡水库陆续蓄水运行, 三峡入库水沙情势发生了较大改变, 入库沙量具有明显的减少趋势, 而入库水量变化较小. 金沙江是三峡入库泥沙的重要来源, 位于其下游的向家坝和溪洛渡水库对上游泥沙的拦截, 在一定程度上控制着三峡入库泥沙的变化. 2013 年是受长江上游梯级水库蓄水影响的第一年, 三峡入库沙量由 2012 年的 21 900 万 t 减少至 12 700 万 t. 向家坝站 2008 ~ 2012 年年均输沙量为 13 654 万 t, 2013 ~ 2016 年年均输沙量仅为 175 万 t, 减少约 98.7%^[27]. 三峡水库 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年年均入库沙量分别为 19 016 万 t 和 6 415 万 t, 减少约 66.3%. 向家坝站输沙量骤减主要与向家坝、溪洛渡水库蓄水拦沙有关^[15], 是控制三峡水库 2013 ~ 2016 年入库沙量明显减少的主要因素. 伴随三峡入库沙量的减少,

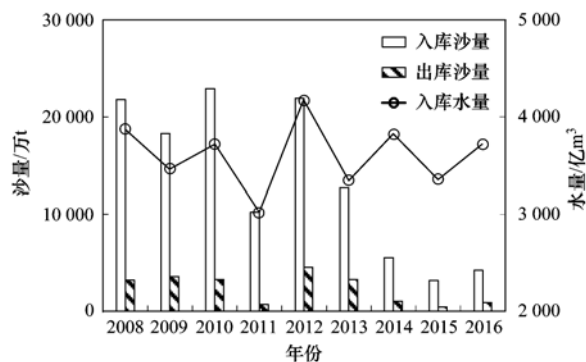


图2 三峡水库 2008 ~ 2016 年逐年出入库水沙变化

Fig. 2 Changes in annual water and sediment of the TGR from 2008 to 2016

2013 ~ 2016 年年均出库沙量由 2008 ~ 2012 年的 3 064 万 t 减少为 1 410 万 t, 减少约 54.0%.

2.1.2 TP 浓度年际和年内变化

三峡水库 2008 ~ 2016 年逐年 TP 浓度为对应年份内三峡逐月入库 TP 浓度的流量加权平均值, 三峡逐月入库 TP 浓度为朱沱、北碚及武隆控制断面对应月份 TP 浓度的流量加权平均值, 按式 (6) 计算. 嘉陵江和乌江逐年 TP 浓度分别为对应年份内北碚和武隆控制断面逐月 TP 浓度的流量加权平均值. 2008 ~ 2012 年, 三峡入库 TP 浓度年际间呈现先减后增的趋势, 年际间 TP 浓度波动相对较小, 变化范围为 $0.196 \sim 0.290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 3). 2013 ~ 2016 年, 三峡入库 TP 浓度逐年减少, 变化范围为 $0.103 \sim 0.194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 2013 年三峡入库 TP 浓度较 2012 年出现明显的减小, 可能原因是长江上游梯级水库蓄水导致三峡入库沙量减少, 从而入库 TP 通量也随之减少, 根据 Webb 方法 B 统计, 三峡水库 2012 年和 2013 年入库 TP 通量分别为 12.079 万 t 和 6.497 万 t, TP 通量较 2012 年减少约 46.2%, 2012 年和 2013 年入库水量分别为 $4\,166 \text{ 亿 m}^3$ 和 $3\,345 \text{ 亿 m}^3$.

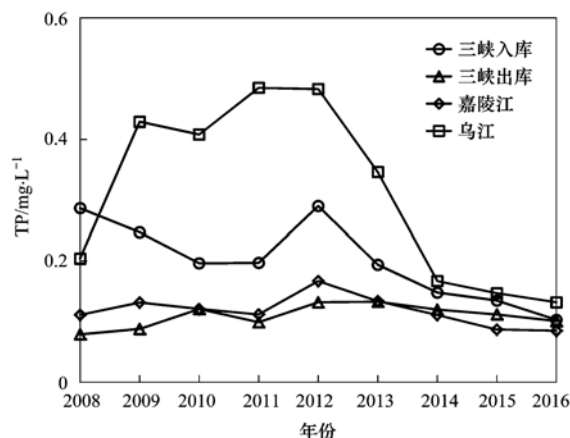


图3 三峡水库、嘉陵江和乌江 2008 ~ 2016 年逐年 TP 浓度变化

Fig. 3 Annual changes in TP concentrations of the TGR, Jialing River, and Wu River from 2008 to 2016

m^3 , 水量较 2012 年减少约 19.7%, 可见 2013 年三峡入库 TP 通量的减小幅度大于入库水量的减小幅度, 故 2013 年入库 TP 浓度较 2012 年明显减小. 三峡出库 TP 浓度年际间较为稳定, 在 $0.079 \sim 0.133 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化, 2011 ~ 2013 年期间略有增加. 乌江 TP 浓度年际间整体变化趋势为先增后减, 且年际间 TP 浓度波动较大, 变化范围为 $0.132 \sim 0.485 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 2011 年乌江渡水库及其支流息烽河暴发“乌江水污染事件”, 主要污染源为开磷化工 34 号泉眼^[28], 该年乌江 TP 浓度达到历史峰值 $0.485 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于 2011 年后开始加大对乌江流域磷矿企业的污染整治力度, 乌江 TP 浓度从 2012 年开始逐年减少, 2014 年 TP 浓度从 2012 年的 $0.483 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少为 $0.167 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 嘉陵江 TP 浓度水平相对较低, 且年际间变化较小, 基本稳定在 $0.085 \sim 0.167 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

三峡水库、嘉陵江和乌江年内逐月 TP 浓度变化过程如图 4. 三峡水库年内逐月入库和出库 TP 浓度分别为对应时段内对应月份入库和出库 TP 浓度的流量加权平均值, 嘉陵江和乌江年内逐月 TP 浓度按类似方法计算. 在 2008 ~ 2012 年, 三峡入库 TP 浓度年内变化范围为 $0.127 \sim 0.325 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变化趋势线呈现“M”形, 1 ~ 4 月 TP 浓度逐渐增加, 至 4 月达到峰值后逐步回落, 6 ~ 8 月又逐渐增加, 至 8 月再次形成一个明显的浓度波峰后迅速减小. 三峡出库 TP 浓度年内变化总体呈先增加后减小的趋势, TP 浓度变化范围为 $0.064 \sim 0.125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 汛期 6 ~ 9 月 TP 浓度明显高于年内其他月份, 其中 7 月

达到浓度波峰. 在 2013 ~ 2016 年, 三峡入库 TP 浓度年内波动较小, 变化范围为 $0.114 \sim 0.204 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 出库 TP 浓度年内表现为先增加后缓慢减小的趋势, 3 月达到年内出库 TP 浓度峰值. 长江上游梯级水库蓄水运行后, 三峡水库年内入库 TP 浓度较运行前明显减小, 而年内出库 TP 浓度多数月份大于运行前[图 4(a) ~ 4(b)].

嘉陵江年内逐月 TP 浓度水平较低, 年内 TP 浓度变化不明显, 变化范围为 $0.057 \sim 0.172 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 1 ~ 5 月稳定在 $0.057 \sim 0.076 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 汛期 6 ~ 9 月 TP 浓度高于年内其他月份[图 4(c)]. 乌江从 2009 年开始频繁暴发磷矿污染事件^[28], 在磷污染治理前, 年内逐月 TP 浓度水平较高[图 4(d)], 变化范围为 $0.150 \sim 0.696 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年内多个月份 TP 浓度大于 $0.400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此外, 年内 TP 浓度变化趋势线呈“M”形, 4 月和 8 月均达到浓度波峰. 乌江磷污染治理后, 年内逐月 TP 浓度水平明显减小, 变化范围为 $0.141 \sim 0.410 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 长江上游梯级水库运行前和乌江磷污染治理前, 三峡入库和乌江年内 TP 浓度变化趋势线均呈现“M”型, 表现出明显的双峰特性, 这是三峡水库和乌江 2008 年之后 TP 浓度变化的一个新特点.

2.1.3 TP 浓度沿程和季节性变化

三峡水库干流 2008 ~ 2016 年年均 TP 浓度沿程变化如图 5. 三峡水库 2008 年干流断面 TP 浓度呈现沿程减小的趋势. 2009 ~ 2012 年, 各年沿程断面 TP 浓度表现为先减后增又逐渐减小的趋势, 同一年内朱沱断面和清溪场断面 TP 浓度水平相对较高,

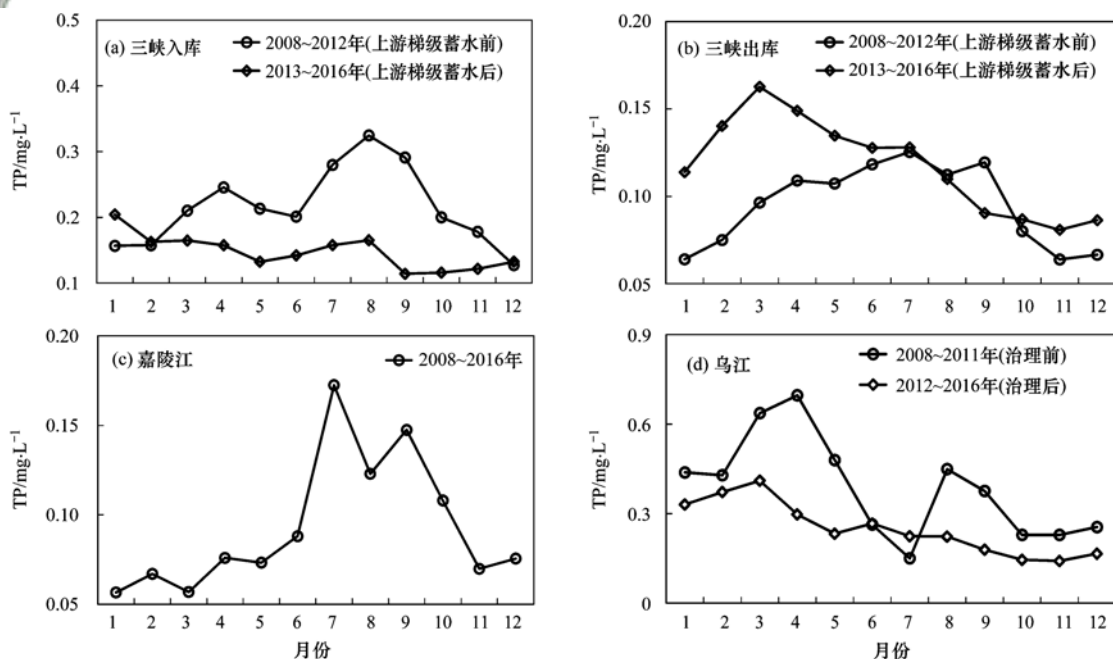


图 4 三峡水库、嘉陵江和乌江 TP 浓度年内变化

Fig. 4 Monthly changes in TP concentrations of the TGR, Jialing River, and Wu River

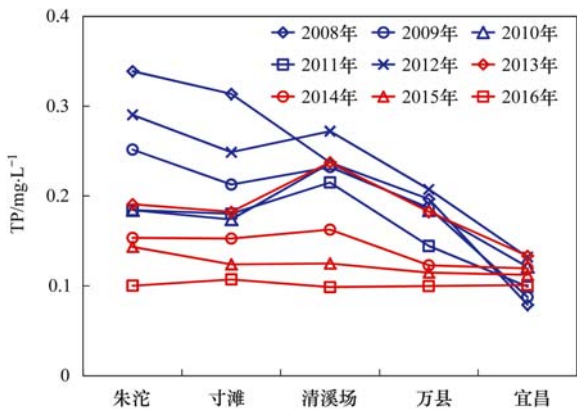


图5 三峡水库干流 TP 浓度沿程变化

Fig. 5 Change in TP concentration in the main stream of the TGR

而宜昌断面 TP 浓度水平相对较低. 2013 ~ 2016 年, 三峡水库干流各断面 TP 浓度逐渐减小, 至 2016 年三峡干流沿程各断面 TP 浓度无明显差异, 基本稳定在 $0.099 \sim 0.107 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此外, 2013 ~ 2016 年清溪场断面 TP 浓度呈逐年减小的趋势, 主要的原因是该断面距乌江入库武隆断面较近, 其 TP 浓度受乌江 TP 输入影响较大, 乌江 TP 浓度随着该流域磷污染控制的加强而逐渐减小, 清溪场断面因受其影响 TP 浓度也随之减小.

三峡水库干流及支流嘉陵江、乌江 TP 浓度季节变化如图 6. 2008 ~ 2012 年, 三峡水库干流 TP 浓度季节变化特征表现为丰水期 > 平水期 > 枯水期. 2013 ~ 2016 年, 三峡干流 TP 浓度季节特征发生变化, 平水期 TP 浓度水平最小, 沿程断面丰、枯水期

的 TP 浓度交替变化. 嘉陵江 TP 浓度表现为丰水期 > 平水期 > 枯水期, 乌江磷污染治理前 TP 浓度季节变化表现为枯水期 > 平水期 > 丰水期, 治理后表现为枯水期 > 丰水期 > 平水期, 此外, 乌江治理后各水期 TP 浓度明显小于治理前, 丰水期与平水期 TP 浓度水平接近. 乌江在治理前后枯水期 TP 浓度均大于丰水期和平水期, 如乌江治理后, 根据实测资料统计, 枯水期 TP 通量分别为丰水期和平水期的 43.5% 和 71.4%, 枯水期流量分别为丰水期和平水期的 31.0% 和 50.0%, 可见枯水期流量占丰水期和平水期的权重小于 TP 通量, 故乌江枯水期较小的流量是导致该季节 TP 浓度水平较高的一个因素. 综合分析可知, 不同河流 TP 浓度的季节变化特征具有一定的差异, 此外, 同一河流在不同时段 TP 浓度季节变化也呈现出不同的特点.

2.2 三峡水库 TP 通量变化及滞留效应

2.2.1 TP 通量影响因素分析

河流中营养盐浓度变化主要受流域入河排污量、理化特性、河道流量大小、水流迁移稀释效应、泥沙吸附解吸作用等因素影响. 泥沙对污染物的吸附解吸作用影响着水体中污染物的浓度. 泥沙吸附污染物, 降低水体中污染物浓度, 对水环境起到一定的净化作用; 当河流水动力条件发生变化, 泥沙易发生解吸作用, 吸附在泥沙颗粒表面的污染物将再次进入水体, 导致二次污染. 泥沙对污染物的吸附解吸作用受含沙浓度影响, 故分析了三峡水库 TP 浓度与流量、

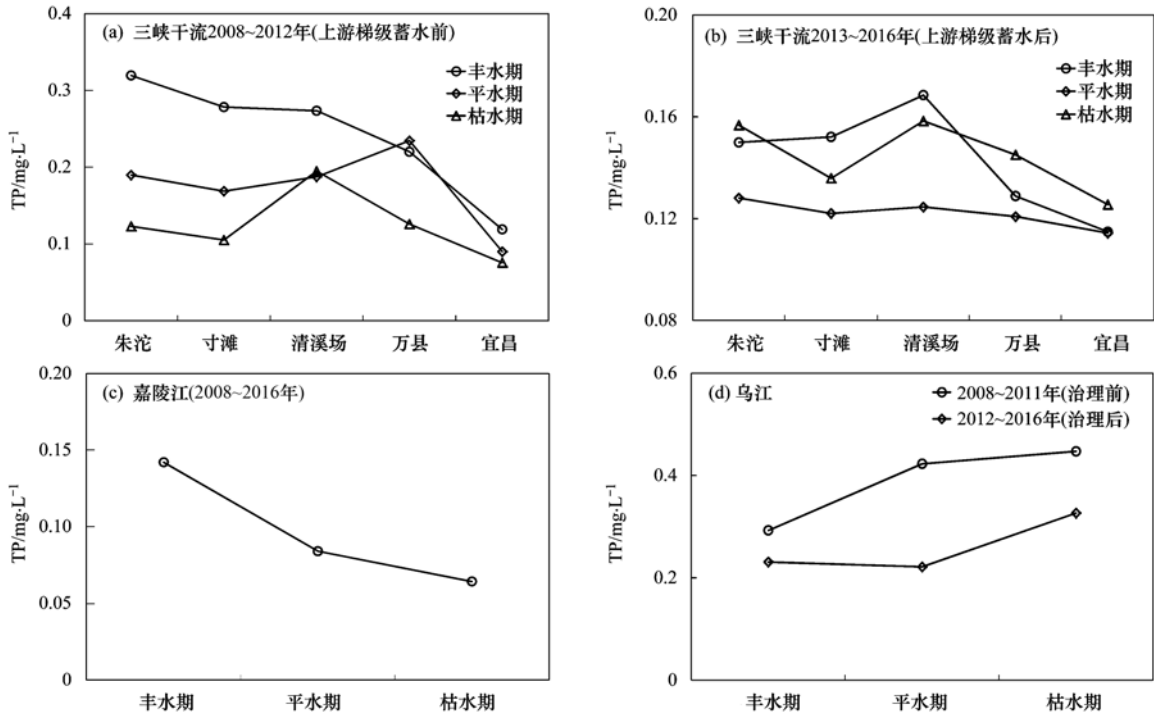


图6 三峡水库干流、嘉陵江和乌江 TP 浓度季节性变化

Fig. 6 Changes in seasonal TP concentrations in the main stream of the TGR, Jialing River, and Wu River

含沙浓度的关系. 图 7 和图 8 分别为三峡水库 2008 ~ 2016 年逐月 TP 浓度与月均流量和月均含沙浓度的关系, 可见研究时段内三峡水库 TP 浓度与流量、含沙浓度的相关性较差, TP 浓度受流量、含沙浓度单因素的影响不明显. 此外, 三峡水库水质与水沙的监测频率、监测时间均具有一定的差异, 水质与水沙数据在时间上难免出现相位差, 因此在一定程度上削弱了 TP 浓度与流量、含沙浓度单因素的相关性.

磷与泥沙之间具有强烈亲和力, 磷离子极易与泥沙结合形成 PP, 因此河流磷迁移主要以泥沙为载体^[29]. 泥沙运动在很大程度上决定了磷的去向和迁

移路径, 主要体现为泥沙对 PP 迁移的影响. 全球多数河流中磷主要以颗粒态的形式存在, 如长江、黄河、尼罗河、亚马逊河等 PP/TP 超过 80%^[30~33]. 三峡水库 TP 浓度受流量、含沙浓度单因素影响不明显, 但其磷通量与泥沙通量高度相关, PP 和 TP 输送主要由上游来沙量决定^[24]. 金沙江向家坝、溪洛渡水库蓄水前后, 三峡水库入库泥沙通量发生了较大变化(图 2), 因此对三峡水库 TP 通量与泥沙通量的关系进行划时段建立, 图 9 为三峡水库 2008 ~ 2016 年逐月 TP 通量与逐月泥沙通量的关系, 可见, TP 通量与泥沙通量呈较好的正相关关系. TP 通量与泥沙

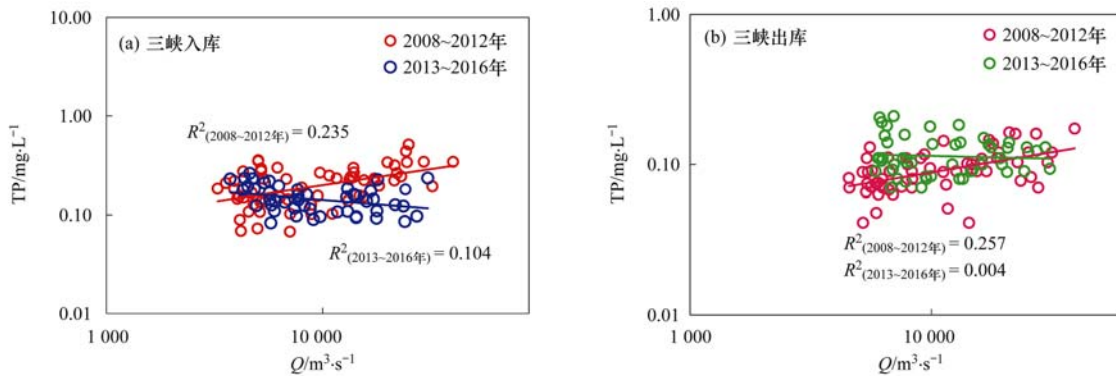


图 7 三峡水库逐月 TP 浓度与月均流量的关系

Fig. 7 Relation between TP concentration and flow discharge of the TGR

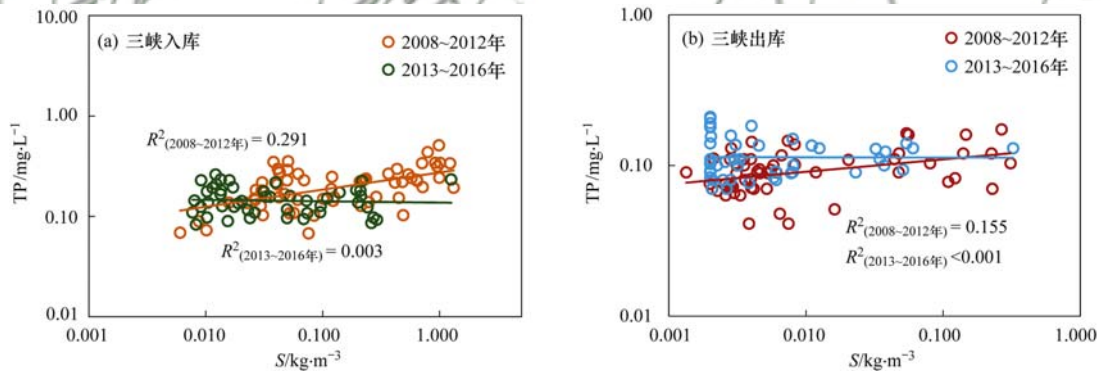


图 8 三峡水库逐月 TP 浓度与月均含沙浓度的关系

Fig. 8 Relation of TP concentration and sediment concentration of the TGR

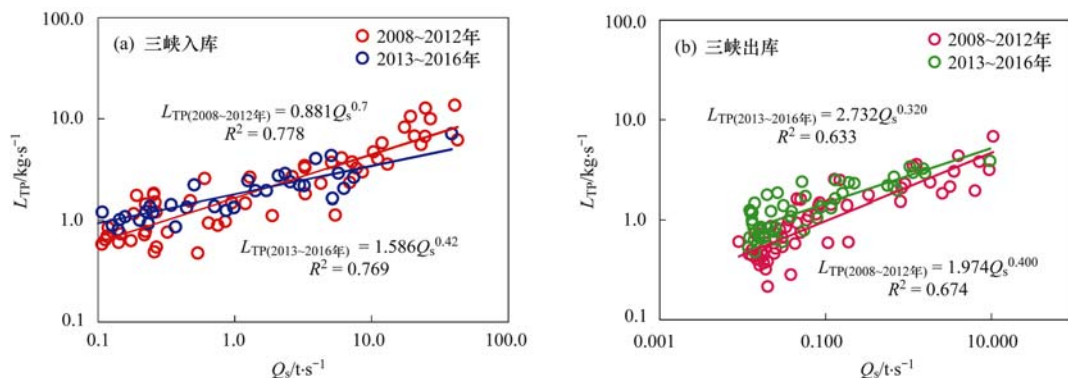


图 9 三峡水库逐月 TP 通量与逐月泥沙通量的关系

Fig. 9 Relation between TP flux and sediment discharge of the TGR

通量关系式经变换后可得到包含流量、含沙浓度多因子的 TP 浓度关系式[式(3)],该公式相关性较 TP 浓度与单独的流量或含沙浓度高.由表 1 可知,三峡入库 TP 浓度与含沙浓度呈正相关关系,表明河流泥沙输入增多,TP 浓度也相应升高.

2.2.2 TP 通量变化及滞留效应分析

利用公式(10)估算了三峡水库 2008~2016 年逐年的 TP 出入库通量(表 2).为检验本方法计算结果的合理性,采用 Webb 等^[26]提出的 5 种时段通量估算法中的“方法 B”重新估算了三峡水库 2008~2016 年 TP 的出入库年通量,与本文估算结果进行对比,如图 10,两种方法估算的 TP 通量变化趋势基

本一致,无显著性差异.此外,计算了采用本文方法估算三峡水库 TP 出入库年通量的绝对误差和相对误差,2008~2016 年年入库 TP 通量绝对误差为 0.03~1.52 万 t,相对误差为 0.84%~17.74%,其中约 70% 的年份相对误差小于 10%.年出库 TP 通量绝对误差为 0.002~0.64 万 t,相对误差为 0.05%~19.26%,其中约 60% 的年份相对误差小于 10%.部分年份相对误差较大可能的原因是三峡水库水质和水沙监测在时间上存在一定的相位差,通过日均流量、含沙浓度插值 TP 的日过程浓度难免引起一定程度的误差.通过 Webb 方法检验可知,本文提出的三峡水库 TP 通量计算方法是合理的.

表 2 三峡水库历年 TP 通量

Table 2 Annual TP flux of the TGR

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
入库通量/万 t	9.50	7.06	7.97	5.10	11.50	5.90	5.20	4.20	3.87
出库通量/万 t	3.91	3.56	4.50	3.20	5.50	4.50	5.00	3.53	3.84

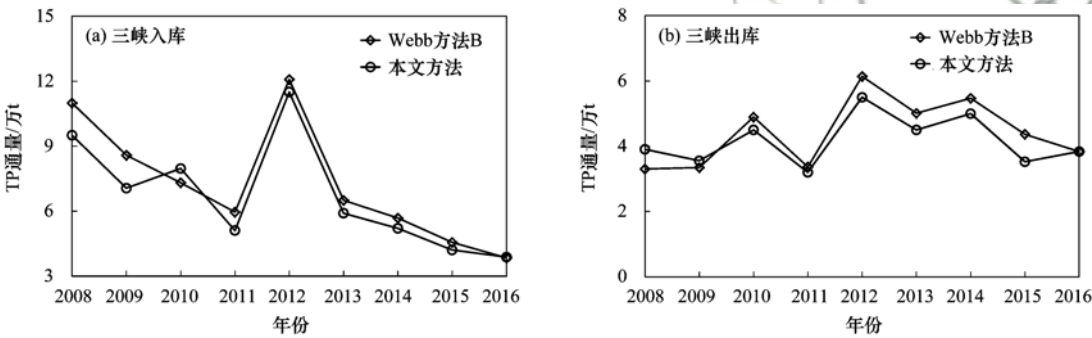


图 10 两种方法估算的三峡水库出入库 TP 通量比较

Fig. 10 Comparison between TP fluxes of the TGR estimated by two methods

2008~2012 年,三峡入库 TP 通量在 5.10~11.50 万 t 之间变化,波动较大,年均入库通量为 8.23 万 t;2013~2016 年,三峡入库 TP 通量明显减小,年均入库通量为 4.79 万 t,减少约 41.8% (表 2).根据已有研究,溪洛渡和向家坝水库蓄水后,金沙江向下游输出的泥沙通量和 TP 通量分别减少了 98.7% 和 59.4%^[13].金沙江是三峡入库泥沙的主要来源,溪洛渡、向家坝水库对金沙江泥沙的拦截情况决定了三峡入库泥沙通量的变化^[34].三峡入库 TP 通量与泥沙通量具有较好的正相关关系(图 11),两者呈同增同减的趋势,入库 TP 通量在较大程度上受入库泥沙通量的影响.将表 2 中三峡水库 2008~2016 年历年出入库 TP 通量代入式(11),可得历年 TP 通量滞留率(图 12).2008~2016 年三峡水库 TP 通量年均滞留率为 37.76%,其中 2008~2012 年为 49.76%,2013~2016 年为 12.03%.三峡水库 2008~2012 年年均入库沙量为 19 016 万 t,而年均出库沙量为 3 064 万 t,约 84% 的泥沙滞留在库区,长江中磷

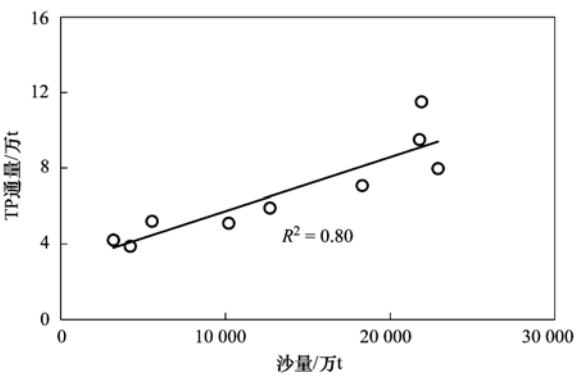


图 11 三峡水库入库 TP 通量与泥沙通量的关系 (2008~2016 年)

Fig. 11 Relation between annual TP flux and sediment load of the TGR from 2008 to 2016

主要以颗粒态存在,三峡水库蓄水使得库区水深增加,流速变缓,水体滞留时间延长,PP 伴随泥沙发生沉降,因此 2008~2012 年库区泥沙淤积是导致该时段三峡水库磷大量滞留的主要原因.此外,水生物对磷酸盐的吸收与转化也会在一定程度上加剧库区水

体对磷的滞留. 2013 ~ 2016 年三峡水库 TP 滞留率明显减少,可能的原因包括上游梯级水库对泥沙和磷的拦截,流域磷污染源的控制,沙峰排沙调度试验促进水库排沙排磷^[35].



图 12 三峡水库 2008 ~ 2016 年逐年 TP 通量滞留率
Fig. 12 Annual retention rate of TP flux of the TGR from 2008 to 2016

基于 Webb 方法 B 估算了长江、嘉陵江和乌江历年入库 TP 通量及占总入库通量的比例(表 3). 2008 ~ 2012 年,长江、嘉陵江和乌江多年平均入库 TP 通量分别为 6.443、0.918 和 1.620 万 t. 2013 ~

2016 年,长江、嘉陵江和乌江多年平均入库 TP 通量分别为 3.653、0.614 和 0.874 万 t,可见, 2013 ~ 2016 年长江、嘉陵江和乌江入库 TP 通量均出现了不同程度的减小. 长江上游梯级水库运行前后,长江对三峡水库入库 TP 通量的贡献率无明显变化,均约为 71%. 乌江由于磷污染治理对三峡水库入库 TP 通量的贡献率有所减小,由 2008 ~ 2012 年的 18.04% 减小为 2013 ~ 2016 年的 16.99%. 嘉陵江贡献率由 2008 ~ 2012 年的 10.22% 增加为 2013 ~ 2016 年的 11.94%. 2008 ~ 2016 年,嘉陵江和乌江对三峡入库 TP 通量的多年平均贡献率为 28.47%,不能忽略嘉陵江和乌江对三峡入库 TP 通量的影响,因此三峡入库 TP 通量变化受长江、嘉陵江和乌江入库 TP 通量变化的共同影响,由于长江干流对入库 TP 通量的贡献率最大,因此长江干流入库 TP 通量变化对三峡入库 TP 通量变化具有主导影响. 受上游梯级水库拦沙影响, 2013 ~ 2016 年长江入库泥沙通量减少,长江入库 TP 通量则随之减少,从而该时段三峡水库入库 TP 通量也减少,因此上游梯级水库运行是引起三峡入库 TP 通量减少的主要因素.

表 3 长江、嘉陵江和乌江历年入库 TP 通量及占总入库通量的比例
Table 3 Annual TP flux and percentage of the Yangtze River, Jialing River, and Wu River

年份	入库 TP 通量/万 t			入库 TP 通量比例/%		
	长江朱沱站	嘉陵江北碛站	乌江武隆站	长江朱沱站	嘉陵江北碛站	乌江武隆站
2008	9.334	0.651	1.004	84.93	5.93	9.14
2009	6.147	0.884	1.549	71.64	10.31	18.06
2010	4.702	0.920	1.686	64.33	12.59	23.07
2011	3.570	0.857	1.522	60.00	14.41	25.59
2012	8.465	1.276	2.339	70.07	10.57	19.36
2013	4.392	0.963	1.141	67.61	14.82	17.57
2014	4.054	0.705	0.916	71.43	12.42	16.14
2015	3.424	0.440	0.688	75.23	9.66	15.11
2016	2.742	0.347	0.749	71.44	9.04	19.52
2008 ~ 2012 年平均	6.443	0.918	1.620	71.74	10.22	18.04
2013 ~ 2016 年平均	3.653	0.614	0.874	71.07	11.94	16.99
2008 ~ 2016 年平均	5.203	0.783	1.288	71.53	10.76	17.71

3 讨论

在三峡水库新的水沙情势下,分时段建立的统计模型考虑了水流和泥沙对磷迁移的影响,但三峡水库运行年限较短,实测数据系列有限,有待于日后搜集更长系列的水质和水沙监测资料对本文模型进行验证和完善. 三峡水库 TP 浓度时空变化特征可能因研究年限和数据系列长短存在一定差异,更详细更完善的分析将随着数据系列的延长进一步开展.

冉祥滨等^[36]考虑三峡区间小支流 TP 入汇影响,结果发现三峡水库蓄水前(1997 ~ 2002 年) TP

入库通量和出库通量基本相等,而蓄水后(2004 ~ 2006 年)年均约 15.4% 的 TP 滞留于水库中^[36]. 本文得出三峡水库在 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年对 TP 的年平均滞留率分别约为 49.76% 和 12.03%,可见三峡水库运行对 TP 的滞留效应较为明显,且不同时段滞留率变化较大. 此外,本文估算三峡水库 TP 滞留率时暂未考虑区间小支流 TP 入汇的影响,因此所得滞留率可能偏小. 根据已有研究,三峡水库 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年区间各小支流年入库沙量占年总入库沙量的比例范围分别约为 5% ~ 18% 和 13% ~ 36%,两时段平均比例分别约为 8% 和 24%^[37]. 鉴于 TP 通量和泥沙通量较好的正相关关

系,初步估计三峡水库在 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年区间支流入库 TP 通量占年总入库通量的平均比例可能与区间入库泥沙的比例数量级相同,分别为 5% ~ 18% 和 13% ~ 36%,考虑区间小支流 TP 入汇影响,可得三峡水库在 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年的 TP 平均滞留率分别为 52% ~ 57% 和 22% ~ 35%。然而,两时段的平均滞留率只是粗略范围,可能具有较大的不确定性,其准确性有待采用区间各支流控制站的流量和 TP 测量数据进行进一步验证,后续研究工作将进一步考虑区间小支流 TP 入汇影响,对三峡水库 TP 滞留率开展更加可靠和准确的分析,以此减少分析结果的不确定性范围。

4 结论

(1) 2008 ~ 2016 年,三峡入库 TP 浓度年际间呈现先减后增再减的变化趋势,变化范围为 $0.103 \sim 0.290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。三峡出库 TP 浓度年际间变化较小,稳定在 $0.079 \sim 0.133 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。乌江 TP 浓度年际变化表现为先增后减,变化范围为 $0.132 \sim 0.485 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,乌江磷污染治理效果明显,其 TP 浓度由 2012 年的 $0.483 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐年减小至 2016 年的 $0.132 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。嘉陵江 TP 浓度水平相对较低,基本稳定在 $0.085 \sim 0.167 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2) 长江上游梯级水库运行前和乌江磷污染治理前,三峡入库和乌江年内 TP 浓度变化趋势均呈“M”型,表现出明显的双峰特性。2008 ~ 2012 年,三峡干流上游至下游 TP 浓度总体表现为沿程减小,但部分年份清溪场断面因受乌江高浓度 TP 入汇影响,其浓度较寸滩断面明显升高;2013 ~ 2016 年,三峡干流多数断面 TP 浓度逐年减小,至 2016 年三峡干流沿程断面 TP 浓度水平无明显差异,约为 $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3) 建立了三峡水库 TP 通量与泥沙通量的统计模型,以此展开得到了 TP 浓度与流量、含沙浓度的综合关系,用以插补 TP 的日过程浓度后建立了 TP 年通量的计算公式,通过验证发现将该公式用于估算三峡水库 TP 通量是合理的,故在一定程度上缓解了水质监测测次偏少给 TP 通量估算带来的困难。

(4) 三峡入库 TP 通量受长江、嘉陵江和乌江入库 TP 通量共同影响,其中长江入库 TP 通量具有主导影响。不考虑区间小支流 TP 入汇影响,2008 ~ 2012 年,年均入库通量为 8.23 万 t,库区泥沙淤积使得 TP 通量年均滞留率达到 49.76%;2013 ~ 2016 年,年均入库通量和年均滞留率明显减小,分别为 4.79 万 t 和 12.03%,上游梯级水库拦沙、流域磷污

染治理等因素使得入库 TP 通量减少约 41.8%。

参考文献:

- [1] Ding S, Chen P P, Liu S M, *et al.* Nutrient dynamics in the Changjiang and retention effect in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **574**: 96-109.
- [2] 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.
- [3] Guo L C, Su N, Zhu C Y, *et al.* How have the river discharges and sediment loads changed in the Changjiang River basin downstream of the Three Gorges Dam? [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **560**: 259-274.
- [4] Miller M P. The influence of reservoirs, climate, land use and hydrologic conditions on loads and chemical quality of dissolved organic carbon in the Colorado River [J]. *Water Resources Research*, 2012, **48**(12): W00M02.
- [5] Gao L, Li D J, Zhang Y W. Nutrients and particulate organic matter discharged by the Changjiang (Yangtze River): seasonal variations and temporal trends [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**(G4): G04001.
- [6] Zhang W Q, Jin X, Cao H M, *et al.* Water quality in representative tuojiang River network in southwest China [J]. *Water*, 2018, **10**(7): 864.
- [7] Taube N, Ryan M C, He J X, *et al.* Phosphorus and nitrogen storage, partitioning, and export in a large gravel bed river [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 717-730.
- [8] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise [J]. *Nature*, 2013, **504**(7478): 53-60.
- [9] Rabalais N N, Diaz R J, Levin L A, *et al.* Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia [J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(2): 585-619.
- [10] Molisani M M, Becker H, Barroso H S, *et al.* The influence of castanhão reservoir on nutrient and suspended matter transport during rainy season in the ephemeral Jaguaribe River (CE, Brazil) [J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2013, **73**(1): 115-123.
- [11] Maavara T, Parsons C T, Ridenour C, *et al.* Global phosphorus retention by river damming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(51): 15603-15608.
- [12] Ouyang W, Skidmore A K, Toxopeus A G, *et al.* Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **389**(3-4): 373-380.
- [13] 刘尚武, 张小峰, 吕平毓, 等. 金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(3): 656-666.
Liu S W, Zhang X F, Lv P Y, *et al.* Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 656-666.
- [14] 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 等. 向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3530-3538.
Wang Y Y, Lü L P, Ji D B, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and the retention effects of nutrients in Xiangjiaba Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3530-3538.
- [15] 郑飞燕, 谭路, 陈星, 等. 三峡水库香溪河库湾氮磷分布状况及沉积物污染评价 [J]. *生态毒理学报*, 2018, **13**(4): 49-59.

- Zheng F Y, Tan L, Chen X, *et al.* Spatial distribution of nitrogen and phosphorus, and pollution evaluation for sediment in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(4): 49-59.
- [16] Stone R. China's environmental challenges. Three Gorges Dam: into the unknown [J]. *Science*, 2008, **321**(5889): 628-632.
- [17] Zhou J J, Zhang M, Lu P Y. The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtze River [J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(6): 3659-3669.
- [18] 黎睿, 潘娟娟, 汤显强, 等. 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[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2160-2169.
- Li R, Pan C J, Tang X Q, *et al.* Vertical distribution profiles and release potential of mainstream column sediments in the Three Gorges Reservoir after impoundment to 175 m [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2160-2169.
- [19] 杨中华, 杨水草, 李丹, 等. 三峡水库支流小江富营养化模型构建及在水量调度控藻中的应用[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(4): 755-764.
- Yang Z H, Yang S C, Li D, *et al.* Numerical simulation of eutrophication and its test of ecological operation schedule in Xiaojiang River, the tributary of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(4): 755-764.
- [20] 吴兴华, 李翀, 陈磊, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻 (*Peridiniopsis*) 水华对环境中的磷的响应机制[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(5): 1054-1060.
- Wu X H, Li C, Chen L, *et al.* Response mechanism of *Peridiniopsis* bloom to phosphorus in Xiangxi River Bay of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(5): 1054-1060.
- [21] 吕平毓, 王平义, 陈静. 重庆主城区两江水质近年变化评价[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, **31**(5): 1053-1057.
- Lv P Y, Wang P Y, Chen J. Analysis of variation of water quality in Yangtze River and Jialing River of Chongqing urban city [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2012, **31**(5): 1053-1057.
- [22] 陈瑶. 干-支流相互作用下三峡水库典型支流物质输运及水华生消过程研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- Chen Y. Research on the algae bloom and mass transport of typical tributary in the Three Gorges Reservoir under the interactions of mainstream and tributary [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018.
- [23] Zhou J J, Zhang M, Lin B L, *et al.* Lowland fluvial phosphorus altered by dams [J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**(4): 2211-2226.
- [24] 周建军, 张曼, 李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(4): 865-880.
- Zhou J J, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(4): 865-880.
- [25] 唐小娅, 童思陈, 许光祥, 等. 三峡水库汛期泥沙淤积对坝前水位的滞后响应[J]. *水科学进展*, 2019, **30**(4): 528-536.
- Tang X Y, Tong S C, Xu G X, *et al.* Delayed response of sedimentation in the flood seasons to the pool level of the Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(4): 528-536.
- [26] Webb B W, Phillips J M, Walling D E, *et al.* Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS(R) [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **194-195**: 379-389.
- [27] 胡小庆, 杨胜发, 肖毅, 等. 三峡库区航道泥沙原型观测分析报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- Hu X Q, Yang S F, Xiao Y, *et al.* Analysis report of prototype observation of sediment in the Three Gorges navigation channel [R]. Chongqing: Chongqing JiaoTong University, 2017.
- [28] 尹真真. 三峡库区干流总磷浓度变化趋势分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, **41**(9): 56-59.
- Yin Z Z. Changing trends of total P concentrations in main streams of Three Gorges Dam [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, **41**(9): 56-59.
- [29] Müller B, Finger D, Sturm M, *et al.* Present and past bio-available phosphorus budget in the ultra-oligotrophic Lake Brienz [J]. *Aquatic Sciences*, 2007, **69**(2): 227-239.
- [30] Duan S W, Liang T, Zhang S, *et al.* Seasonal changes in nitrogen and phosphorus transport in the lower Changjiang River before the construction of the Three Gorges Dam [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **79**(2): 239-250.
- [31] 张晓晓, 姚庆祯, 陈洪涛, 等. 黄河下游营养盐浓度季节变化及其入海通量研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, **40**(7): 82-88.
- Zhang X X, Yao Q Z, Chen H T, *et al.* Seasonal variation and fluxes of nutrients in the lower reaches of the Yellow River [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, **40**(7): 82-88.
- [32] Nixon S W. Replacing the Nile: are anthropogenic nutrients providing the fertility once brought to the mediterranean by a great river? [J]. *Ambio*, 2003, **32**(1): 30-39.
- [33] Forsberg B R, Devol A H, Richey J E, *et al.* Factors controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(1): 41-56.
- [34] 朱玲玲, 董先勇, 陈泽方. 金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, **34**(3): 1-7.
- Zhu L L, Dong X Y, Chen Z F. Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and its impact on Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, **34**(3): 1-7.
- [35] 董炳江, 乔伟, 许全喜. 三峡水库汛期沙峰排沙调度研究与初步实践[J]. *人民长江*, 2014, **45**(3): 7-11.
- Dong B J, Qiao W, Xu Q X. Study on sediment peak regulation of Three Gorges Reservoir in flood season and preliminary practice [J]. *Yangtze River*, 2014, **45**(3): 7-11.
- [36] 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.
- [37] 刘尚武, 张小峰, 许全喜, 等. 三峡水库区间来沙量估算及水库排沙效果分析[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 28-38.
- Liu S W, Zhang X F, Xu Q X, *et al.* Estimation of sediment amount from ungauged area and analysis of sediment delivery ratio of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(1): 28-38.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Staw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yang, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)