

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.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应

王耀耀¹, 吕林鹏², 纪道斌^{1*}, 方海涛¹, 朱晓声¹, 张庆文¹, 霍静¹, 何金艳¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 宜昌市财政经济开发投资有限公司, 宜昌 443002)

摘要: 向家坝建库后改变了河流原有的水动力、营养盐分布及输移条件。为研究向家坝水库营养盐分布特征及滞留效应, 通过 2015~2016 年分季度水库水质监测结果, 分析向家坝水库水体总氮(TN)、总磷(TP)和溶解性硅(SiO_3^{2-} -Si)营养盐时空分布特征、滞留量、滞留效率。研究发现, 向家坝水库 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 营养盐质量浓度均值分别为 0.905、0.034 和 7.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中, TN 质量浓度在城镇人口密集区偏大, 分布主要受点源影响; 磷营养盐以颗粒态磷为主, TP 质量浓度在水库中自上而下沿程降低, SiO_3^{2-} -Si 质量浓度分布在时空上差异较小。向家坝对 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 营养盐滞留量为 2.30×10^4 、 0.146×10^4 和 $-2.4 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在不同季度, TN 和 SiO_3^{2-} -Si 滞留量有正有负, 而 TP 则始终表现为正滞留。TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 月平均滞留效率分别为 17.5%、32.8% 和 -2.14%。整体上实际滞留效率表现为丰水期高于枯水期, 并且 TP 的滞留作用更为显著。TN 滞留量主要受反硝化作用, 以及外源负荷输入影响; SiO_3^{2-} -Si 输送通量主要受径流量影响; 水库运行周期以及磷的颗粒形态则是 TP 滞留的主要因素。向家坝水库对营养盐的滞留效应与 TN 和 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度变化无明显相关性, 而水库对 TP 的滞留效应使 TP 质量浓度在水库纵向上沿程减小, 在各监测样点垂向水深上 TP 质量浓度则有增大的趋势。

关键词: 向家坝水库; 营养盐; 滞留效应; 反硝化作用; 水库运行周期

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3530-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811138

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir

WANG Yao-yao¹, LÜ Lin-peng², JI Dao-bin^{1*}, FANG Hai-tao¹, ZHU Xiao-sheng¹, ZHANG Qing-wen¹, HUO Jing¹, HE Jin-yan¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Investment in Fiscal and Economic Development Corporation Limited in Yichang, Yichang 443002, China)

Abstract: After the construction of the Xiangjiaba Dam, the hydrodynamic conditions, nutrient distributions, and transport conditions of the Jinsha River were changed. Here, the nutrient distribution characteristics and retention effects of Xiangjiaba Reservoir were investigated according to the results of water quality monitoring from 2015 to 2016. Spatial and temporal variations in TN, TP, SiO_3^{2-} -Si, and other nutrients, and retention flux and retention rate were analyzed. The results showed that the nutrient mass concentration of TN, TP, and SiO_3^{2-} -Si was 0.905 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.034 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 7.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The distribution of TN was affected by point sources and the concentration of TN was large in urban areas. This distribution of TP was mainly granular and the mass concentrations decreased along the river path. The mass concentration of SiO_3^{2-} -Si did not significantly vary over time and space. Furthermore, Xiangjiaba Reservoir had a persistent effect on nutrient salts; the average annual retention of TN, TP, and SiO_3^{2-} -Si was $2.30 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, $0.146 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, and $-2.4 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. During different seasons, the retention of TN and SiO_3^{2-} -Si varied between positive or negative; however, TP appeared to be consistent. The average monthly retention efficiency of TN, TP, and SiO_3^{2-} -Si was 17.5%, 32.8%, and -2.14%, respectively. Overall, retention efficiencies were higher during the dry season than that wet season, and phosphorus retention was most pronounced. The retention of TN in the reservoir may be related to denitrification and the input of external load; the flux of SiO_3^{2-} -Si was mainly affected by runoff; and the particle morphology of phosphorus, as well as reservoir period, were the main factors affecting TP retention. There were no clear correlations between nutrient retention and the mass concentrations of TN and SiO_3^{2-} -Si, but the nutrient retention effect of Xiangjiaba Reservoir reduced TP concentrations along the river path and increased TP concentration with vertical depth.

Key words: Xiangjiaba Reservoir; nutrient; retention efficiency; denitrification; reservoir operating period

在河流上筑坝拦水形成水库, 流域原有的水文特征、物质转化条件和输送通量特征将产生一系列复杂变化, 水库通过物理、生物、化学等作用去除或滞留大量营养盐^[1,2], 改变对下游营养盐的输出通量, 对整个流域生源要素迁移转化过程、水库下游湖库环境演化及生态系统演变过程都将产生深刻影响, 因此, 研究梯级水库营养盐滞留累积效应意义重大, 一直是梯级水库生态环境效应的研究

热点。

目前, 国内外关于水库营养盐滞留效应的研究

收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204); 国家自然科学基金重大计划项目(91647207); 国家自然科学基金项目(51779128, 51509086, 41501297); 国家国际科技合作项目(2014DFE70070); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-02)

作者简介: 王耀耀(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: 1456853186@qq.com

* 通信作者, E-mail: dbji01101@163.com

已有很多. 营养盐之间滞留机制不同, 氮滞留的主导机制是底部表层沉积物的脱氮反应^[3, 4], 此外, 不同水生植物组合形式^[5] 和 水体滞留时间^[6, 7] 也能影响水体中氮的去除; 磷滞留主要以颗粒磷沉降为主^[8], 此外, 水库运行方式^[9] 以及水库对泥沙的沉降、生物吸收转化也是磷滞留的影响因素^[10, 11]; 而硅滞留主要以生物消耗为主^[12, 13]. 营养盐之间滞留效率不同, 在不同时期亦有差异, Stenback 等^[14] 研究发现水库对水库中氮营养盐表现为正滞留, 滞留率变化范围为 5% ~ 90%, 而 Burford 等^[15] 的研究认为, 水库氮营养盐滞留率在不同时期有正负差异, 上游来流流量小时表现为负滞留, 水库表现为氮源; 磷营养盐滞留率变化范围一般为 30% ~ 80%, 水库对磷有汇的作用^[16, 17]; 硅营养盐滞留率范围一般在 40% ~ 90%^[18]. 向家坝是金沙江最后一级梯级水库, 对上游来流营养盐的拦截以及下游三峡水库的入流条件均有重大影响, 而向家坝建成蓄水以后, 对其水生态环境影响方面的研究较少. 本研究着重研究向家坝营养盐的分布特征及其滞留效应, 初探向家坝水库营养盐的来源、分布特征及滞留情况, 以期为进一步研究上游梯级水库群建设对三峡水库及下游生态环境的滞留累积效应提供依据.

1 材料与方法

1.1 向家坝水库概况

向家坝水库位于云南水富县与四川省宜宾县交界的金沙江下游峡谷出口段河段上, 是金沙江流域梯级水库的最后一级, 为典型的高深狭长型水库, 坝高 162 m, 距上游溪洛渡水库坝址 157 km, 向家坝库区控制流域面积 $45.88 \times 10^4 \text{ km}^2$, 多年平均径流量 $3\,810 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 水库总库容 $51.63 \times 10^8 \text{ m}^3$, 调节库容 $99 \times 10^8 \text{ m}^3$, 回水长度 156.6 km. 向家坝地区属亚热带季风气候, 年平均气温 18.3°C , 最高气温 38.3°C , 最低气温 -1.0°C . 年平均降水量为 908.1 mm, 其中丰水期多年平均降水量占全年降水量的 91.8%.

1.2 样点布设

根据向家坝水库地形及污染源分布特征, 从向家坝前沿中泓线向回水区上游共设置 7 个样点, 如图 1 所示, 依次记为 XJB01 ~ XJB05, 在溪洛渡大坝下游设置一控制样点, 记为 XLDX, 在向家坝大坝下游设置一个控制样点, 记为 XJBX. 各监测样点设置如图 1 所示.

1.3 样品采集与分析

2015 年 4 月至 2016 年 10 月对向家坝水库 7 个

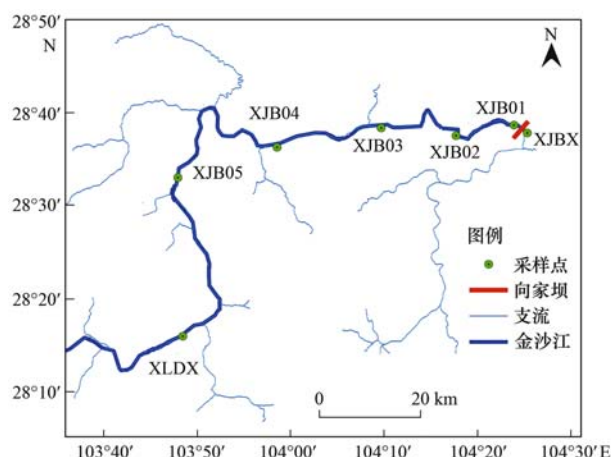


图 1 监测点位布设示意

Fig. 1 Sketch map of the monitored river section

监测样点进行逐季度监测, 水温、水深、浊度和叶绿素 a 等参数由维赛 YSI 多参(美国)水质监测仪现场测得, 精度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.01 \text{ m}$ 、 0.01 NTU 和 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 垂向上 1 m 实时测定一组数据, 从表层到水底进行连续均匀地监测, 为避免仪器感应误差, 放置时先在表层停留 30 s 再下放, 读数每 1 s 更新一次; 其中 2016 年 1 月至 2016 年 11 月对各监测样点利用 5 L 卡盖式采水器按照 0.5、5、10、20 和 40 m 至底层分层采集水样. 由于上下游控制样点处于自然水流状态, 水流湍急, 水体充分掺混, 均只采集表层水体. 水样采集后储存于 350 mL 样瓶中进行室内实验.

营养盐监测指标: 总氮(TN)、硝氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$)和溶解性硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-} \text{-Si}$)主要方法参考文献[19]测定, 其中溶解性硅酸盐浓度用硅钼黄分光光度法测定, 总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(监测下限为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对标准偏差小于 7%), 总磷采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定(检测下限为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对标准偏差小于 1.3%).

1.4 滞留效应估算方法

根据冉祥滨三峡水库营养盐的收支平衡算法^[20], 向家坝水库入库和出库营养盐瞬时通量计算公式为:

$$F = Kc \times Q$$

水库滞留量计算公式为:

$$L = [(1 + q) F_{\text{in}}] - F_{\text{out}}$$

水库滞留效率 RET_f 计算公式为:

$$\text{RET}_f = L / [(1 + q) F_{\text{in}}]$$

式中, F 为营养盐入库 F_{in} 和出库 F_{out} 的通量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; c 为营养盐的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q 为入库 Q_{in} 和出库 Q_{out} 径流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; K 为单位转化系数,

$K=1$; q 为支流贡献率, 其值为 0.002, 具体计算公式为: $q = (Q_{in} - Q_{out}) / Q_{in}$; L 为水库滞留量, kg.

2 结果与分析

2.1 向家坝水库营养盐时空分布特征

2.1.1 营养盐浓度纵向分布特征

监测期内向家坝水库各监测点营养盐质量浓度如图 2 所示. 由图 2(a)可知, 水库 TN 质量浓度波动范围为 $0.603 \sim 1.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $0.961 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 质量浓度处于高水平, 据富营养化阈值国际标准^[21], 水库水体处于富营养化状态. TN 最小值出现在 2016 年 8 月 XJBX, 为 $0.603 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值出现在 2015 年 4 月 XJB05, 为 $1.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由图 2(b)可知, 水库 NO_3^- -N 质量浓度上升趋势明显, 波动范围为 $0.138 \sim 1.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $0.452 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NO_3^- -N 质量浓度处于较高水平, 最小值出现在 2016 年 8 月 XJB05 为 $0.138 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 最大值出现在 2015 年 4 月 XJBX 为 $1.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由图 2(a)和 2(b)可知, 水库 NO_3^- -N 质量浓度在 TN 质量浓度中占比较高, NO_3^- -N 是 TN 的主要组成部分. 监测期间向家坝水库各监测样点磷质量浓度分布图如图 2(c)所示, 从时间上看, 向家坝水库 TP 质量浓度整体呈现出与 TN 相同的变化趋势, 总体趋势平稳, 波动范围在 $0.001 \sim 0.076 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整个水库 TP 质量浓度变化趋势一致, 从空间上看, TP 质量浓度表现为上游来流质量浓度高, 下游质量浓度低, 总体上差别不大, 其中 2016 年 4 月 XLDX 出现峰值 $0.340 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即上游来流质量浓度处于高水平. 由图 2(d)可知, PO_4^{3-} -P 质量浓度在 $0 \sim 0.032 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内波动, 监测初期, PO_4^{3-} -P 质量浓度在水库内均匀分布, 其值均为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其后上升至平均质量浓度 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2016 年 4 月回落至 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各监测样点质量浓度相差不大, 空间差异不明显. 监测期间向家坝水库各监测样点 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度分布如图 2(e)所示, 从中可知, 监测期内水库 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度略有上升趋势, 其均值由前期的 $7.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至后期的 $8.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 波动范围在 $6.53 \sim 9.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处于较高水平.

2.1.2 营养盐浓度垂向分布特征

不同季度向家坝水库各监测样点垂向营养盐质量浓度分布如 3 所示. 由图 3(a)可知, 不同季节 TN 分布规律不同, 夏冬季 TN 质量浓度偏高, 春秋季节较低, 均值分别为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.778 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 空间上, XJB01 和 XJB02 质量浓度偏高, 均值分别为 $0.991 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其它 3

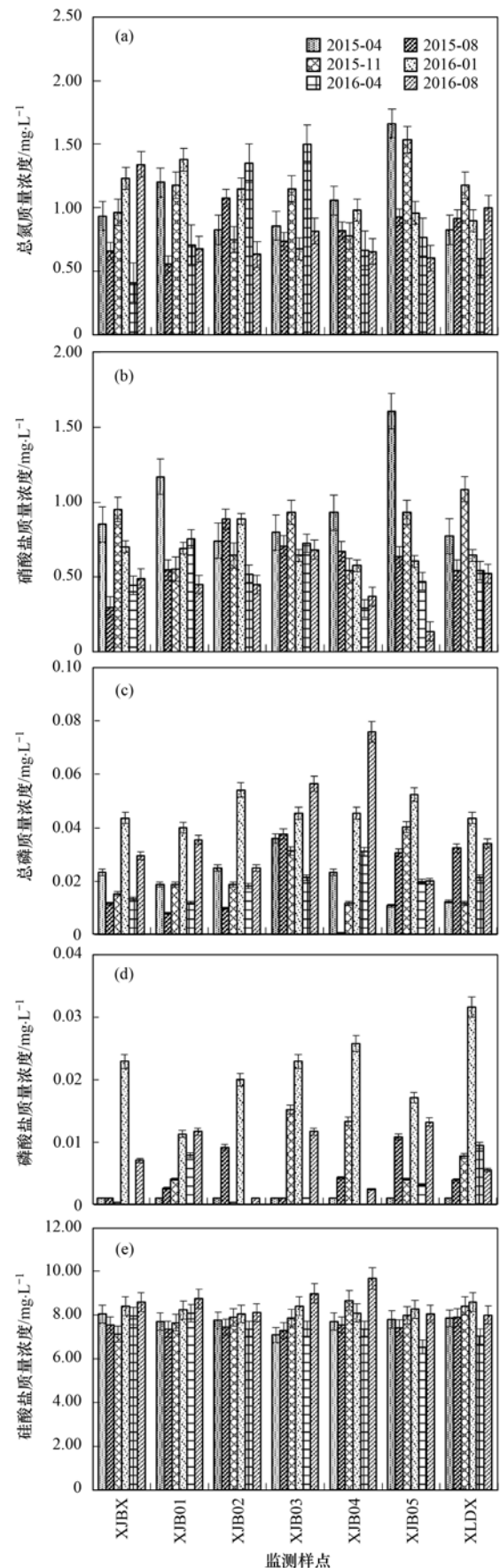


图 2 营养盐时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of nutrients

个样点质量浓度较低, 均值为 $0.822 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 河流

空间走向上, 下游 TN 质量浓度高于上游. 垂向上, XJB02 夏季 TN 质量浓度变化最大, 表层为 $2.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 底层为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差值为 $1.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 冬季水库 TN 质量浓度均值为 $0.871 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 垂向质量浓度变幅相对较小, 这种质量浓度稳定性可能与水库蓄水有关. 由图 3(b) 可知, 不同季节 TP 质量浓度与 TN 质量浓度分布规律相似, 夏冬季 TP 质量浓度偏高, 春秋季节则较低, 均值分别为 $0.054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 空间上, TP 质量浓度沿程有下降的趋势, XJB04 质量浓度最高, 均值为 $0.051 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 坝前 XJB01 质量浓度则较低, 均值为 $0.033 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 垂向上各监测点位 TP

质量浓度表、底层均值分别为 $0.033 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.047 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 底层 TP 质量浓度大于表层, 表、底层 TP 质量浓度差异情况进一步解释了向家坝水库颗粒态磷的主要存在形式及磷质量浓度沿程降低的分布规律. 由图 3(c) 可知, 不同季节 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度分布规律与 TN 和 TP 相似, 夏冬季 TP 浓度偏高, 均值为 $8.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 春秋季节 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度则较低, 均值为 $7.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 空间上 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度沿程变化较小. 垂向上各监测点位 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度表、中和底层均值分别为 7.96 、 7.92 和 $7.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 垂向上, SiO_3^{2-} -Si 质量浓度均值有降低的趋势, 总体上看 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度垂向相差不大.

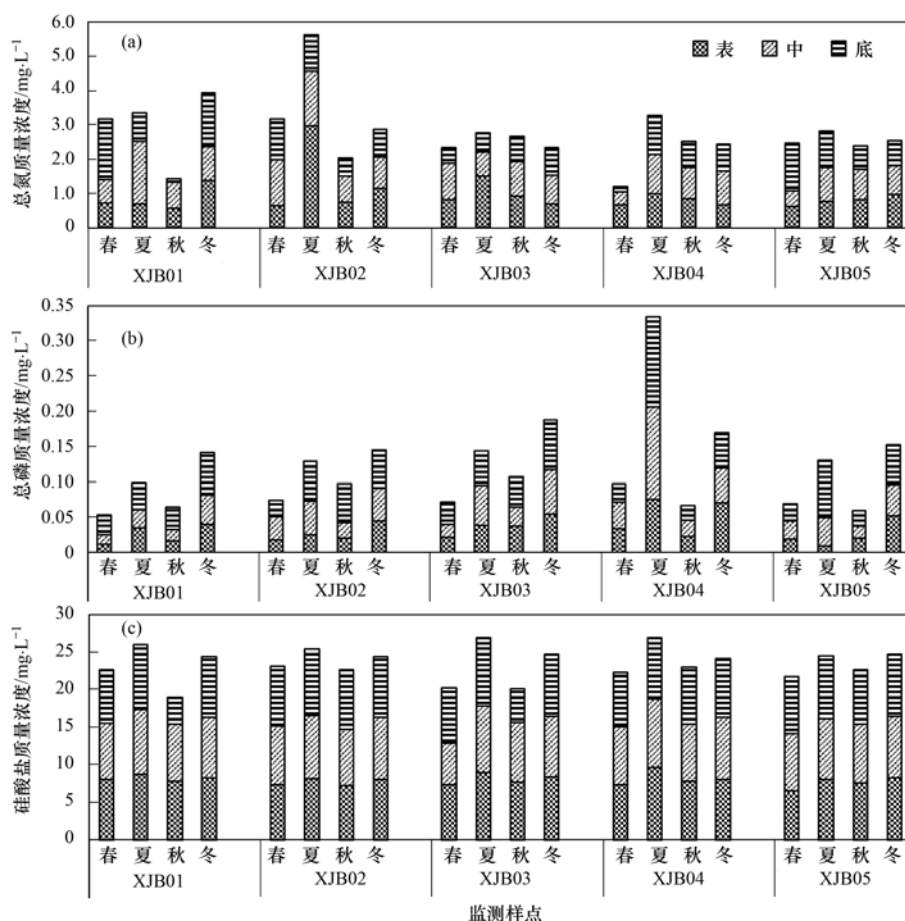


图 3 营养盐垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of nutrients

向家坝水库各监测样点营养盐质量浓度统计如图 4 所示. 由图 4(a) 可知, 水库纵向上, XJBX、XJB02 和 XLDX 这 3 个点位 TN 质量浓度较高, 均值分别为 0.920 、 0.981 和 $0.902 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中这 3 个采样点附近均有村镇, 点源输入偏大. 由图 4(b) 可知, TP 质量浓度沿程降低, XJBX 和 XJB01 质量浓度均值分别为 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.033 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, XJB05 处于回水末端, 夏季低水位时该样点水体为河流状态, 冬季蓄水时该样点在回水区范围内呈湖泊状态,

该样点 TP 质量浓度均值为 $0.035 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 质量浓度低于下游样点. 由图 4(c) 可知, SiO_3^{2-} -Si 质量浓度沿程差异较小, 各监测样点 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度均值为 $7.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值在 XJB03, 为 $8.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最小值在 XJBX, 为 $7.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 营养盐的输送规律

向家坝水库流量变化如图 5 所示, 月均径流量变化范围为 $2\,215 \sim 7\,126 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 流量受季节性降雨影响明显, 丰水期的月均流量约为枯水期月均流

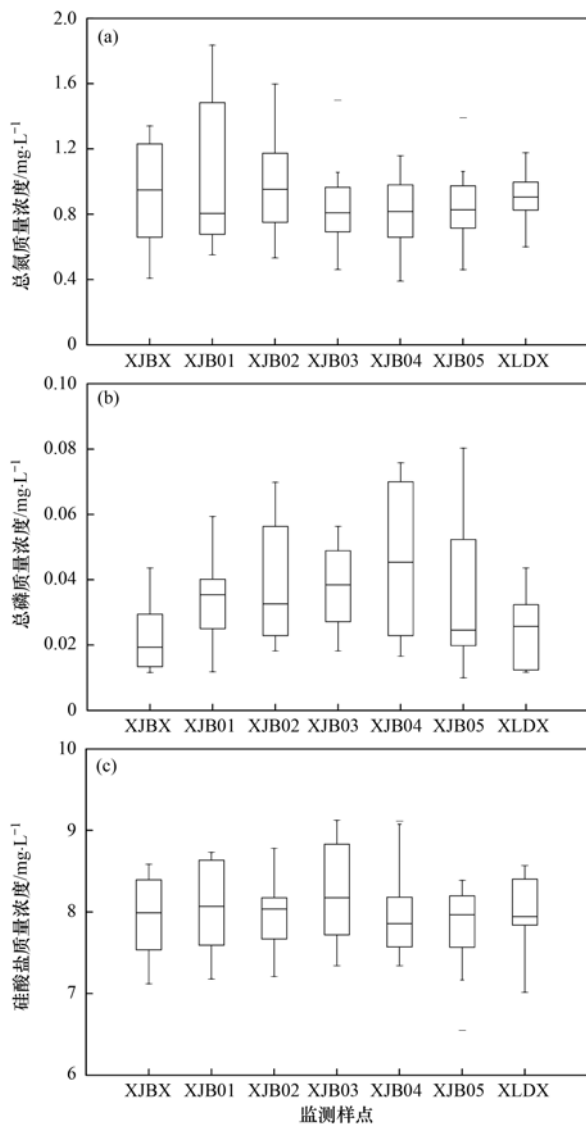


图4 营养盐空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of nutrients

量的2~3倍。年际间,2016年流量相对2015年较高,年内丰水期流量相对较大,丰水期流量变化范围为5 413~7 126 m³·s⁻¹。

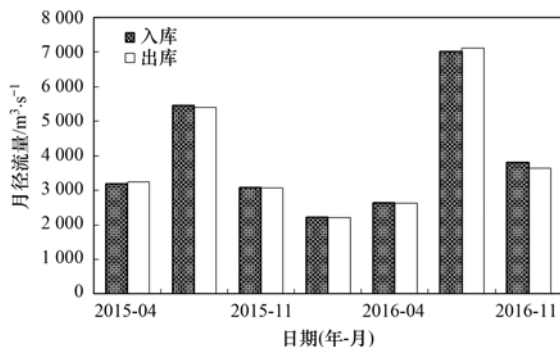


图5 2015~2016年向家坝水库入库、出库月均径流量

Fig. 5 Monthly runoff for Xiangjiaba Reservoir during 2015-2016

向家坝水库 TN、TP 和 SiO₃²⁻-Si 营养盐的月输送通量如图6所示,2015年 TN 月输送通量总体表现为入库大于出库,入库通量分别为 1.37 × 10⁴、

1.31 × 10⁴ 和 1.22 × 10⁴ t, 出库通量分别为 1.01 × 10⁴、0.779 × 10⁴ 和 0.939 × 10⁴ t, 总体表现为正滞留;2016 年月输送通量有所变化,1 月表现为出库大于入库为负滞留,入库通量分别为 0.554 × 10⁴ t, 出库通量分别为 0.791 × 10⁴ t, 4、8 和 11 月表现为入库大于出库,入库通量分别为 0.522 × 10⁴、1.81 × 10⁴ 和 0.808 × 10⁴ t, 出库通量分别为 0.484 × 10⁴、1.24 × 10⁴ 和 0.524 × 10⁴ t, 表现为正滞留。TP 入库通量变化范围为 171~735 t, 出库通量变化范围为 81~654 t, 监测期间,TP 入库通量始终均大于出库通量,TP 表现为正滞留。SiO₃²⁻-Si 入库通量变化范围为 4.47 × 10⁴~14.6 × 10⁴ t, 出库通量变化范围为 4.71 × 10⁴~16.1 × 10⁴ t。SiO₃²⁻-Si 的通量随流量的波动关系较为明显,不同时期入库、出库通量相差不大,总体来看, SiO₃²⁻-Si 的滞留不明显。

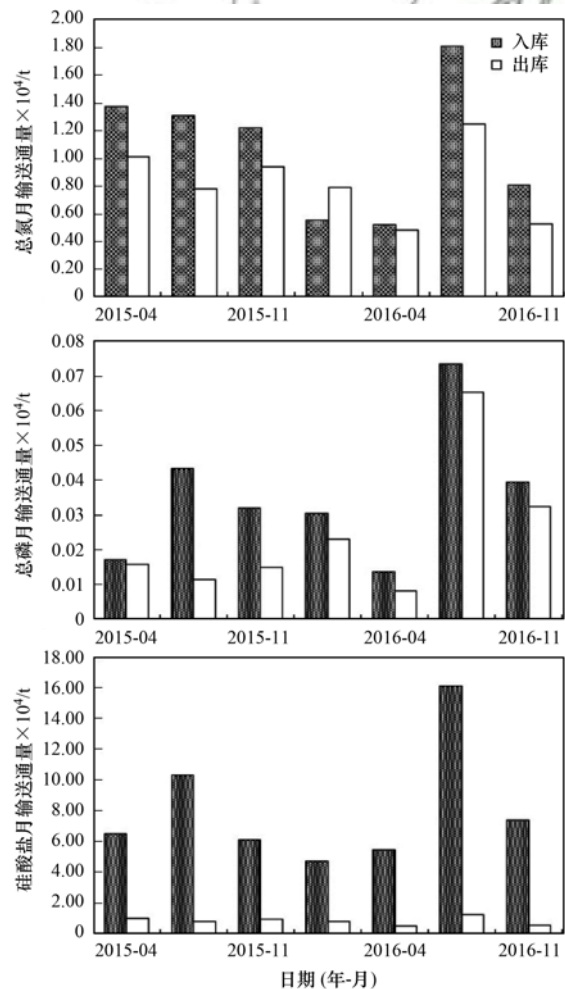


图6 向家坝水库不同时期入库、出库的氮、磷和硅的月通量

Fig. 6 Monthly fluxes of TN, TP, and SiO₃²⁻-Si at the inflows and outflows of Xiangjiaba Reservoir during different periods

2.3 营养盐的滞留特征

向家坝水库 TN、TP 和 SiO₃²⁻-Si 的滞留效率如表1所示,连续2年 TN 和 TP 均表现为正滞留, TN 滞留量分别为 4.89 × 10⁴ t 和 0.704 × 10⁴ t; TP 滞留

量分别为 0.191×10^4 t 和 0.101×10^4 t. 2015 年水库对 SiO_3^{2-} -Si 表现为正滞留, 滞留量为 1.98×10^4 t, 表现为“汇”, 2016 年则表现为负滞留, 滞留量为 -6.78×10^4 t, 表现为“源”.

表 1 2015 ~ 2016 向家坝水库氮、磷、硅营养盐的年输送通量

Table 1 Annual fluxes of TN, TP, and SiO_3^{2-} -Si in Xiangjiaba Reservoir during different periods of 2015-2016											
年份	年均径流量 $\times 10^8/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		$\text{TN} \times 10^4/\text{t}$			$\text{TP} \times 10^4/\text{t}$			$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si} \times 10^4/\text{t}$		
	入库	出库	入库	出库	滞留	入库	出库	滞留	入库	出库	滞留
2015	1 233	1 233	16.9	12.1	4.89	0.382	0.191	0.191	95.2	93.2	1.98
2016	1 359	1 366	12	11.3	0.704	0.522	0.416	0.101	105	112	-6.78

向家坝水库 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 的滞留效率如图 7 所示, 2015 年向家坝水库对 TN, TP 的滞留效率均表现出正滞留, 对 SiO_3^{2-} -Si 可能为正滞留, TN 的滞留效率变化范围在 23.1% ~ 40.5%, 月平均滞留效率为 30%, TP 的滞留效率变化范围为 8.4% ~ 53.0%, 月平均效率为 45.1%, SiO_3^{2-} -Si 的滞留效率变化范围为 -0.9% ~ 4.0%, 月平均效率为 1.6%, 2016 年 TP 依然表现为正滞留, 滞留效率变化范围为 11.1% ~ 40.5%, 月平均滞留效率为 23.3%, TN、 SiO_3^{2-} -Si 可能表现为负滞留, TN 滞留效率变化范围为 -42.8% ~ 35.2%, 月平均效率为 7.98%, SiO_3^{2-} -Si 滞留效率变化范围为 -12.8% ~ 1.2%, 月平均效率为 -5.06%.

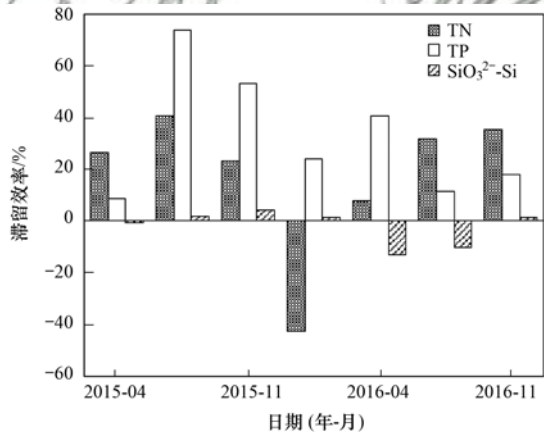


图 7 向家坝水库不同时期 DTN、TP 以及 SiO_3^{2-} -Si 的滞留效率 (RET_r)

Fig. 7 TN, TP, and SiO_3^{2-} -Si retention efficiency (RET_r) of the Xiangjiaba Reservoir during different periods

3 讨论

向家坝水库水体中营养盐平均浓度处于中等水平, 符合国家Ⅲ类水质标准. 水体中 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 的平均质量浓度分别为 0.905、0.034 和 $7.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 从时间上看, 枯水期相较于丰水期, TN 和 TP 质量浓度偏高, 丰水期雨量充沛, 出、入库的营养盐通量均增大, 营养盐浓度增减趋势受流量的变化趋势影响不明显, 这与李正阳的研究结果相反^[22], 这可能是因为向家坝水库两岸多高山, 人口稀少, 农业耕地、农田化肥使用相对较少, 生活

垃圾污染影响较小的结果. 消落带是营养盐的重要储存库^[23], 枯水期由于向家坝水库蓄水, 水库水位大幅抬升, 消落带大量营养盐进入水体, 这种周期性营养盐的输入使向家坝水库水体营养盐浓度呈现周期性波动特征. 从空间上看, 不同监测样点营养盐浓度变化趋势各有不同, TN 质量浓度主要受点源影响较大, XJB02 和 XJB03 所属村镇是人口集中区域, 生活污水导致该样点的 TN 浓度相对其它样点较高. 各监测样点 TP 质量浓度顺河流走向沿程下降, 上游地区富含磷矿^[24]导致来流 TP 质量浓度偏高, 而水库水体中磷的存在形式以颗粒态为主, 水体由河流形态向水库形态转变, 流速沿程降低, 水体中悬浮物迅速下沉, 悬浮物所吸附的颗粒态磷酸盐同时沉降^[25~27], 磷的沉降造成 TP 质量浓度的沿程差异. SiO_3^{2-} -Si 质量浓度多与岩石风化有关, 蓄水后流域风化率降低导致输入量减少^[28], 硅藻也会影响 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度. 在丰水期 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度有增大的趋势, 这可能与丰水期流量增大外源输入增加有关.

本次研究营养盐滞留采用冉祥滨三峡水库滞留效应计算方法进行估算, 其估值的准确性与选择的河段是否有点源和非点源营养盐输入、上下游的监测样点流量、水位差异、水体滞留时间等相关^[29]. 夏季换水周期较短的情况下, 营养盐过程并未平衡, 估算滞留量存在一定的误差. 监测周期为季度监测, 时间尺度为两年, 在垂向上考虑水体营养盐的分层特性, 整体来看, 本研究估算较为合理, 可作为研究向家坝水库营养盐滞留效应的参考. 通过计算可知, 向家坝水库 2015 ~ 2016 年氮平均滞留量为 2.30×10^4 t, 滞留效率为 17.5%; 磷平均滞留量为 0.146×10^4 t, 滞留效率为 32.8%; 对硅酸盐整体表现为负滞留. 可见, 水库对磷的滞留作用比氮更为显著, 这与大多数水库滞留效应研究相同^[30~32]. 氮、磷滞留效率年内差异巨大的原因与其滞留机制不同有关, 氮滞留主要机制包括反硝化作用以及沉积物临时埋藏, 泥沙吸附、输运以及沉降作用对磷滞留显著影响, 而硅主要被生物生长消耗而产生滞留.

从年内看,水库对氮营养盐的滞留效应在不同时期各有差异,但整体上丰水期氮滞留率相对枯水期较高.丰水期,水库氮营养盐表观上为正滞留,水库扮演“汇”的角色.氮营养盐的滞留与反硝化作用密切相关,有研究表明水温与反硝化速率呈正相关关系^[33].丰水期入库流量大,入库氮通量增加,适宜的水温条件加快反硝化速率,氮去除能力高,氮营养盐表观上表现为正滞留,滞留率相对较高.枯水期则相反,尤其冬季水库表现为负滞留.枯水期入库流量小,输入氮营养盐量随之减少,可滞留量减少,此时期水库处于高水位运行,消落带高浓度营养盐向水体扩散,加之冬季水温降低,硝化作用增强,水体氮营养盐含量增高,滞留率降低,冬季甚至表现为负滞留,这与胡春华等^[34]的研究结果一致.从年内看,磷营养盐表现为正滞留.水体磷含量从上游至下游呈现减小的趋势,这与水体中的磷颗粒沉降有关^[8],颗粒态磷是水体中磷存在的主要形式,该形式导致水库对磷营养盐表现出拦截作用,水库扮演“源”的角色.枯水期水库处于高水位运行,消落带大量磷营养盐释放进入水体,一部分由于水库效应沉降,另一部分溶于水中,使水库磷浓度升高,由于沿程消落带磷营养盐的输入,使得计算的磷表观滞留率低,这与乌江渡水库由于人为氮输入,导致计算的总氮的表观滞留率较低的情况相符^[35].此外,生物对磷的转化吸收也会使水库表现为对磷的拦截作用,但总体上来说,磷的沉降在滞留过程中占主导作用,并且高水位运行时,沿程消落带磷输入,使磷表观滞留率低.硅营养盐滞留量的变化趋势与流量变化趋势相似,这与水库的营养盐以外源性为主,依靠水库上游来流输入一致^[36].丰水期硅营养盐表现为负滞留,枯水期则表现为较小的正滞留,总体上出入库硅营养盐通量差别不大.

从年际间看,水库对氮营养盐并不是单纯的正滞留,2015年不同时期均表现为正滞留,2016年总体上则表现为均衡效应,氮营养盐总体呈现正滞留效应.年际间的差异可能与监测水文年限长短有关,导致年际间的总体趋势不明显,这也反映出氮营养盐的滞留可能是一个周期性不明显的过程,滞留机制较为复杂.而磷在年际间始终表现为正滞留,这与其在水中的主要存在形式和上游来流的水中磷含量有关.硅的滞留量在年际间差别较大,出入库硅营养盐通量与流量相似性明显,滞留量逐年增加,这可能与硅的生物吸收转化作用有关.蓄水后,藻类优势种群随着原始河流态转化为湖库态相应发生变化,优势藻种的变化过程可能会导致藻种

对营养盐的选择吸收发生改变,其生消过程对硅营养盐的滞留也尤为关键.对向家坝水库硅营养盐的滞留还有待进一步探究.

4 结论

(1)监测期间,向家坝水库 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 营养盐质量浓度均值分别为 0.905、0.034 和 7.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.水库水质达到国家 III 类水质标准.其中 TN、TP 质量浓度随时间波动较小, SiO_3^{2-} -Si 质量浓度在丰水期略有增大.空间上, TN 质量浓度受点源输入影响较大, TP 质量浓度则顺水流流向沿程减小, SiO_3^{2-} -Si 质量浓度波动较小.

(2)不同营养盐滞留量在时间上存在较大差异.向家坝水库 2015~2016 年 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 营养盐年均滞留量分别为 2.80×10^4 、 0.146×10^4 和 -2.4×10^4 t, TN 和 TP 表现为正滞留, SiO_3^{2-} -Si 表现为负滞留.2015 年 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 营养盐月均滞留效率分别为 30.1%、45.2% 和 1.75%, 2016 年 TN、TP 和 SiO_3^{2-} -Si 营养盐月均滞留效率分别为 7.98%、23.5% 和 -5.06%.

(3)整体上, TN 和 TP 实际滞留效率丰水期高于枯水期, TP 的滞留作用比 TN 的滞留作用更显著,主要因为不同营养盐的滞留机制不同. TN 滞留效应主要受反硝化作用、以及外源负荷输入影响; TP 主要受水库运行方式以及沉降作用影响; SiO_3^{2-} -Si 滞留量随流量变化关系显著.

(4)向家坝水库对营养盐的滞留效应在不同时期影响了下泄水体中营养盐的输出通量,短期内, TN 和 SiO_3^{2-} -Si 的输出通量会减少, TP 输出通量则会在较长时间内持续减少,滞留效应对下游水体富营养化“控源”产生积极影响.

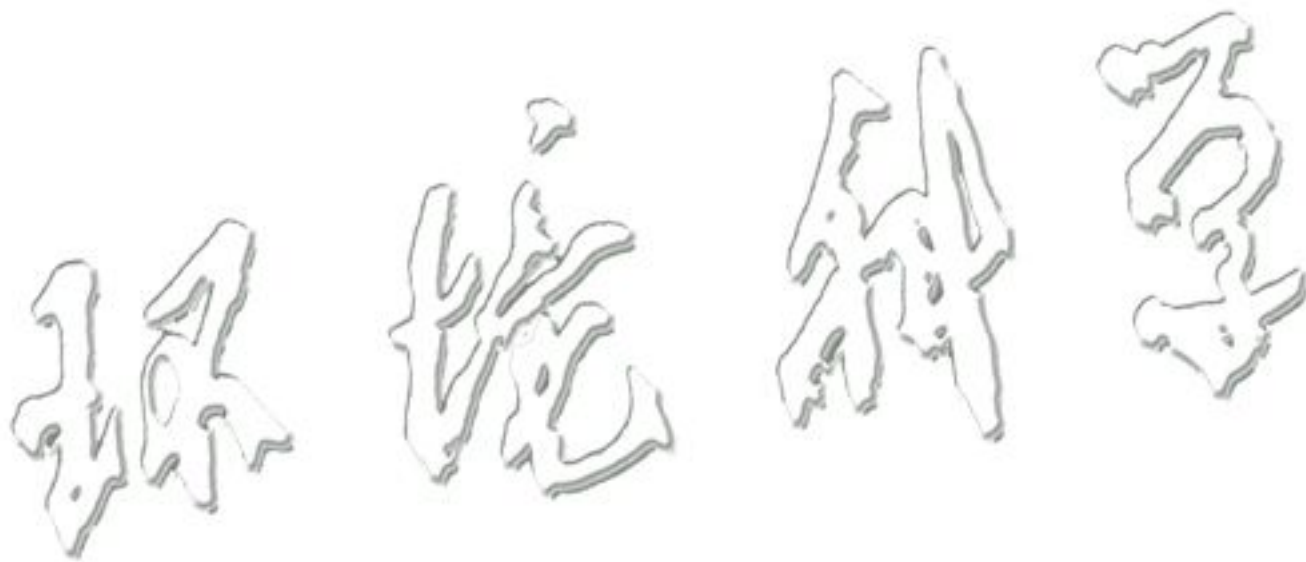
致谢:感谢三峡大学生态水利课题组同学在野外监测和实验工作上的支持和帮助.

参考文献:

- [1] López-Tarazón J A, López P, Lobera G, *et al.* Suspended sediment, carbon and nitrogen transport in a regulated Pyrenean river[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **540**: 133-143.
- [2] Brown J B, Sprague L A, Dupree J A. Nutrient sources and transport in the missouri river basin, with emphasis on the effects of irrigation and reservoirs[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, **47**(5): 1034-1060.
- [3] David M B, Wall L G, Royer T V, *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape[J]. *Ecological Applications*, 2006, **16**(6): 2177-2190.
- [4] 刘志迎, 许海, 詹旭, 等. 蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1261-1269.
Liu Z Y, Xu H, Zhan X, *et al.* Influence of Cyanobacterial blooms on denitrification rate in shallow lake Taihu, China[J].

- Environmental Science, 2019, **40**(3): 1261-1269.
- [5] Choudhury M I, McKie B G, Hallin S, *et al.* Mixtures of macrophyte growth forms promote nitrogen cycling in wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 1436-1443.
- [6] Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influences [J]. Biogeochemistry, 1996, **35**(1): 75-139.
- [7] Grantz E M, Haggard B E, Scott J T. Stoichiometric imbalance in rates of nitrogen and phosphorus retention, storage, and recycling can perpetuate nitrogen deficiency in highly-productive reservoirs [J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(6): 2203-2216.
- [8] 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.
- [9] 徐雅倩, 徐飘, 杨正健, 等. 河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 [J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 765-773.
- Xu Y Q, Xu P, Yang Z J, *et al.* Dynamic replenishment process of nutrients in tributary of channel reservoir [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 765-773.
- [10] Beusen A H W, Dekkers A L M, Bouwman A F, *et al.* Estimation of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**(4): GB4S05.
- [11] Seitzinger S P, Kroeze C, Bouwman A F, *et al.* Global patterns of dissolved inorganic and particulate nitrogen inputs to coastal systems: recent conditions and future projections [J]. Estuaries, 2002, **25**(4): 640-655.
- [12] Turner R E, Rabalais N N. Linking landscape and water quality in the mississippi river basin for 200 years [J]. Bioscience, 2003, **53**(6): 563-572.
- [13] 王晓彤, 罗光富, 操满, 等. 库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响: 以草堂河为例 [J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2957-2963.
- Wang X T, Luo G F, Cao M, *et al.* Effect of nutrient cycles in tributaries on the transport of nutrient in the Three Gorge Reservoirs: a case study of caotang river [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2957-2963.
- [14] Stenback G A, Crumpton W G, Schilling K E. Nitrate loss in Saylorville Lake reservoir in Iowa [J]. Journal of Hydrology, 2014, **513**: 1-6.
- [15] Burford M A, Green S A, Cook A J, *et al.* Sources and fate of nutrients in a subtropical reservoir [J]. Aquatic Sciences, 2012, **74**(1): 179-190.
- [16] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [17] 张路, 范成新, 朱广伟, 等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 36-42.
- Zhang L, Fan C X, Zhu G W, *et al.* Distribution of bioavailable phosphorus (BAP) in lake sediments of the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(1): 36-42.
- [18] Frings P J, Clymans W, Jeppesen E, *et al.* Lack of steady-state in the global biogeochemical Si cycle: emerging evidence from lake Si sequestration [J]. Biogeochemistry, 2014, **117**(2-3): 255-277.
- [19] 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.
- [20] 冉祥滨, 刘军, 于志刚, 等. 典型枯水年长江干流硅的分布、输送与滞留 [J]. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 740-752.
- Ran X B, Liu J, Yu Z G, *et al.* Distribution, transport and retention of silica in the main channels of the Yangtze River in exceptionally low water discharge year [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(3): 740-752.
- [21] Miller J M, Stewart P M. Past, present, and future nutrient quality of a small southeastern river: a pre-dam assessment [J]. Water, 2013, **5**(3): 988-1005.
- [22] 李正阳, 袁旭音, 王欢, 等. 西苕溪干流水体、悬浮物和表层沉积物中营养盐分布特征与水质评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(7): 1150-1156.
- Li Z Y, Yuan X Y, Wang H, *et al.* Distribution and evaluation of nutrients from water, suspended sediment and surface sediment in the main stream of the Xitiao river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, **24**(7): 1150-1156.
- [23] 秦丽欢, 曾庆慧, 李叙勇, 等. 北京密云水库内湖消落带有机质、营养盐(氮/磷)含量分布特征 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 794-801.
- Qin L H, Zeng Q H, Li X Y, *et al.* Distribution of organic matter and nutrient content in water-level-fluctuating zone of Miyun Reservoir inner lake, Beijing [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(4): 794-801.
- [24] 汪家铭. 四川雷波建设西南最大磷化工产业基地 [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2011, (1): 48.
- [25] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析 [J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
- Zheng B H, Cao C J, Qin Y W, *et al.* Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 1-6.
- [26] 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, Pang 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.
- [27] 周济福, 曹文洪, 杨淑慧, 等. 河口泥沙研究的进展 [J]. 泥沙研究, 2003, (6): 75-80.
- Zhou J F, Cao W H, Yang S H, *et al.* Advances of sediment research in estuaries [J]. Journal of Sediment Research, 2003, (6): 75-80.
- [28] Humborg C, Blomqvist S, Avsan E, *et al.* Hydrological alterations with river damming in northern Sweden: implications for weathering and river biogeochemistry [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16**(3): 1039.
- [29] 蔡林颖, 杨丽标, 雷坤, 等. 河流氮、磷滞留研究方法综述 [J]. 中国农学通报, 2013, **29**(26): 106-111.
- Cai L Y, Yang L B, Lei K, *et al.* Review on measurements of nitrogen and phosphorus retention in riverine ecosystem [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, **29**(26): 106-111.
- [30] 刘梅冰, 陈兴伟, 陈莹. 山美水库氮营养盐滞留特征及其影响因素的多时间尺度分析 [J]. 应用生态学报, 2016, **27**(7): 2348-2356.
- Liu M B, Chen X W, Chen Y. Multiple time-scale analysis of nitrogen retention characteristics and influencing factors in Shanmei Reservoir, Fujian, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(7): 2348-2356.
- [31] 周涛, 程天雨, 虞宁晓, 等. 乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应 [J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 707-713.

- Zhou T, Cheng T Y, Yu N X, *et al.* Nitrogen and phosphorus retention in cascade reservoirs along the upper reaches of Wujiang River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 707-713.
- [32] 胡春华, 楼倩, 丁文军, 等. 鄱阳湖氮、磷营养盐的滞留效应研究[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(9): 1-4.
- Hu C H, Lou Q, Ding W J, *et al.* Study on the retention effect of nitrogen and phosphate nutrients in Poyang Lake [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, **34**(9): 1-4.
- [33] 马培, 李新艳, 王华新, 等. 河流反硝化过程及其在河流氮循环与氮去除中的作用[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(4): 623-633.
- Ma P, Li X Y, Wang H X, *et al.* Denitrification and its role in cycling and removal of nitrogen in river[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(4): 623-633.
- [34] 胡春华, 周文斌, 钟夏莲, 等. 江西省万安水库对氮、磷营养盐的滞留效应[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(1): 35-39.
- Hu C H, Zhou W B, Zhong X L, *et al.* Retention of nitrogen and phosphorus in Wan'an Reservoir, Jiangxi Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 35-39.
- [35] 向鹏, 王仕禄, 卢玮琦, 等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(5): 492-501.
- Xiang P, Wang S L, Lu W Q, *et al.* Distribution and retention efficiency of nitrogen and phosphorus in cascade reservoirs in Wujiang River Basin [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(5): 492-501.
- [36] Bachmann R W. Reservoir limnology: ecological perspectives by Kent W. Thornton; Bruce L. Kimmel; Forest E. Payne [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1990, **10**(1): 85-86.



CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)