

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性

纪道斌^{1,2}, 方娇¹, 龙良红^{1,2*}, 杨正健¹, 赵星星¹, 杨霞³, 郭亚丽^{4,5}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 宜昌 443002; 3. 中国三峡集团流域枢纽运行管理中心, 宜昌 443133; 4. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 5. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 上海 200335)

摘要: 以三峡水库典型支流库湾小江和香溪河为例, 通过 2020 年蓄水期不同阶段的野外监测, 对比分析了两条支流库湾的水动力过程、热分层、溶解氧时空差异及其对蓄水过程的响应. 结果表明: ①蓄水初期, 小江库湾表层受大气复氧和浮游植物影响溶解氧较高 ($7.00 \sim 13.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其氧跃层出现在水深 $3 \sim 5 \text{ m}$ 处, 5 m 以下水域出现大面积缺氧 ($\text{DO} < 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 甚至无氧现象. 香溪河库湾溶解氧在垂向上大致可以分为 3 层: 表层富氧水体 ($8.00 \sim 12.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、中层水体 ($6.00 \sim 8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和底层低氧水体 ($4.00 \sim 6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). ②稳定的热分层为底层厌氧的形成提供了稳定的物理环境, 而小江上游来流以及消落带植被分解增加了水体有机质的含量, 可能是造成小江水体耗氧量增大、形成厌氧的内因; 而香溪河因为长期存在的顺坡异重流补给, 底层水体缺氧的风险较低. ③持续的跟踪监测发现水库蓄水对支流库湾溶解氧起到了显著的补给作用, 促使小江库湾厌氧现象在短期内得到有效改善. 针对三峡水库, 通过水库调度来改善支流库湾的缺氧和厌氧等水生态问题是可行的. 结果进一步加深了对三峡水库不同支流库湾溶解氧分层特征及其差异的理解, 从而为水库生态调度提供理论及技术支撑.

关键词: 溶解氧 (DO); 厌氧; 热分层; 水动力; 三峡水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3543-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109244

Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period

Ji Dao-bin^{1,2}, Fang Jiao¹, Long Liang-hong^{1,2*}, Yang Zheng-jian¹, Zhao Xing-xing¹, Yang Xia³, Guo Ya-li^{4,5}

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, Yichang 443002, China; 3. CTG Operation and Administration Center for River Basin Hydro Complex, Yichang 443133, China; 4. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 5. Yangtze River Ecological Environmental Engineering Research Center of China Three Gorges Corporation, Shanghai 200335, China)

Abstract: Taking the Xiaojiang and Xiangxi Rivers, two typical tributaries of the Three Gorges Reservoir, as examples, this study analyzed and compared the hydrodynamic, thermal stratification, and temporal and spatial differences in dissolved oxygen (DO) and their responses to the water storage process in the two tributaries through field monitoring at different stages of the 2020 impoundment period. The results showed that: ① at the initial stage of water storage, the DO in the surface layer of the Xiaojiang River was higher ($7.00 \sim 13.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) due to atmospheric reoxygenation and phytoplankton photosynthesis, and the oxycline appeared in the water depth of $3 \sim 5 \text{ m}$. A large area of anoxia ($\text{DO} < 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) or even an anaerobic sublayer occurred in the water below 5 m . The DO in the Xiangxi River could be divided into three layers vertically: oxygen-rich surface water ($8.00 \sim 12.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), middle water ($6.00 \sim 8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and low-oxygen bottom water ($4.00 \sim 6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). ② Thermal stratification provided a stable physical environment, whereas the upstream inflow and vegetation decomposition in the water-level fluctuation zone increased the content of organic matter, which likely increased the oxygen consumption which was conducive to the formation of an anaerobic bottom layer. In the Xiangxi River, the risk of hypoxia in the bottom water body was low because of the oxygen replenishment from the long-term downslope-bottom density current. ③ Continuous monitoring also showed that the storage of the reservoir played a significant role in the replenishment of DO in tributaries, which effectively and rapidly improved the anaerobic phenomenon in the Xiaojiang River. In the Three Gorges Reservoir, it is feasible to ameliorate the water ecological problems such as anoxia and anaerobic conditions in the tributaries via reservoir operation. This study aids understanding of the characteristics and differences of DO stratification in different tributaries of the Three Gorges Reservoir, which can provide theoretical and technical support for reservoir ecological operation.

Key words: dissolved oxygen (DO); anaerobic; thermal stratification; hydrodynamics; Three Gorges Reservoir

溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 是水生生态系统中的敏感指标^[1-4], 在湖库物理、化学和生物过程中起着关键作用. 湖库水体 DO 的健康状态, 对于维持良好的水生生态环境和保证城市供水安全有着重要的指导意义. 随着流域污染负荷的增加和水体富营养化的加剧, 水体缺氧已成为严重的全球性湖库生态环境问题. 前期, 学者们从 DO 补给-消耗的角度探讨了水体缺氧-厌氧的原因. 有研究表明: 氮、磷

和有机物等污染负荷的增加是造成 DO 下降和甚至缺氧的主要化学因素^[5]; 而密度分层是影响水体 DO 垂向传输和补给的直接物理因素. 在热分层湖

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2021-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2040220, 52079069, 51909135, 52009066, 52179065); 中国长江三峡集团有限公司科研项目 (202003082)

作者简介: 纪道斌 (1981 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水库富营养化和生态修复, E-mail: dlj01101@163.com

* 通信作者, E-mail: 893310859@qq.com

库中,水温分层在一定程度上阻碍了水团的上下混合,从而限制了 DO 的垂向传输和补给^[6,7]. 其次,水温也影响着水生生物的生命活动,间接决定了 DO 的消耗速率^[2]. 余晓等^[8]综合众多研究结果,分析了湖库 DO 分层演化的一般模式和规律,表明了湖库缺氧是水动力、热分层和外源污染负荷等物理-生物-化学因素的综合作用结果^[9]. 但目前这些机制的认识多集中于浅水湖泊,而在深水水库的认识多集中于观测性的规律分析^[10],机制性的认识较为薄弱. 相比于浅水湖库,深水水库具有出众的人为调节能力(水位波动和下泄方式),其水动力过程更为复杂^[11]. 深水水库溶 DO 的补给-消耗往往与运行调度过程密切相关^[6],通过水库调度可以控制水体 DO 的分层和演化特性.

三峡水库作为最大的战略性淡水资源宝库,其水质^[12]状态一直备受社会关注. 针对三峡水库生态环境的调查研究,大部分监测结果表明^[13,14]: 其干流水体 DO 普遍高于 $6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,处于富氧状态,支流库湾也并未出现缺氧和厌氧问题. 因此,三峡水库蓄水以来针对其 DO 分层特性的研究相对较少. 但是,随着全球气温变暖,当前大部分湖库水体 DO 整体表现出下降的趋势^[15]. 近期的现场监测也表明^[16]: 相比于蓄水初期,部分支流库湾 DO 也表现出一定的下降趋势,且在春夏季垂向分层日益明显. 通过对小江、磨刀溪、神农溪和香溪河等代表性支流的对比^[14,17],其结果表明: 支流库湾 DO 垂向分布与其水温结构、浮游植物和异重流特性演化密切相关,但同一时期造成不同支流库湾 DO 空间异质性的差异并不明确. 三峡水库具有其独特的水动力特征^[11,18],不同支流库湾水动力的差异是否是造成 DO 空间差异的主要原因有待探讨.

本文选取三峡水库中游河段的小江和近坝段的香溪河库湾为研究对象,通过开展两条支流库湾 2020 年蓄水期间的水质巡测,对比分析蓄水过程中不同支流库湾的热分层和 DO 时空特征,以及主要环境因子的差异,探讨影响不同支流库湾 DO 垂向差异的主要因素,并进一步揭示水库蓄水调度对不同支流库湾水动力过程和 DO 的影响,加深对三峡水库特殊水动力背景下 DO 分层特征及其形成机制的理解,以期为水库生态调度提供理论及技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

香溪河位于三峡水库库首,发源于神农架,是流

经湖北省兴山县与秭归县的最大河流. 河流全长 97.3 km,河口距离三峡大坝 34.5 km,流域面积为 $3\,183 \text{ km}^2$,呈现正南-北走向,河道整体较为顺直狭长,呈现河道型环境特征.

小江(彭溪河)位于三峡水库中游,是三峡库区长江北岸流域面积最大的一级支流,全长 182.4 km,河口距离大坝 247 km,流域面积 $5\,172.5 \text{ km}^2$,年均流量 $116 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 河面形态呈现宽窄相间的变化,部分河道水面宽阔,且库湾河道弯曲度较大,呈现出湖泊型环境特征.

1.2 样点布设

从香溪河河口向上游回水末端沿程布设 10 个监测点,依次为 CJXX 和 XX01 ~ XX09; 从小江河口至库湾回水末端沿程布设 9 个监测点,依次为 CJXJ 和 XJ01 ~ XJ08,具体位置如图 1 所示.

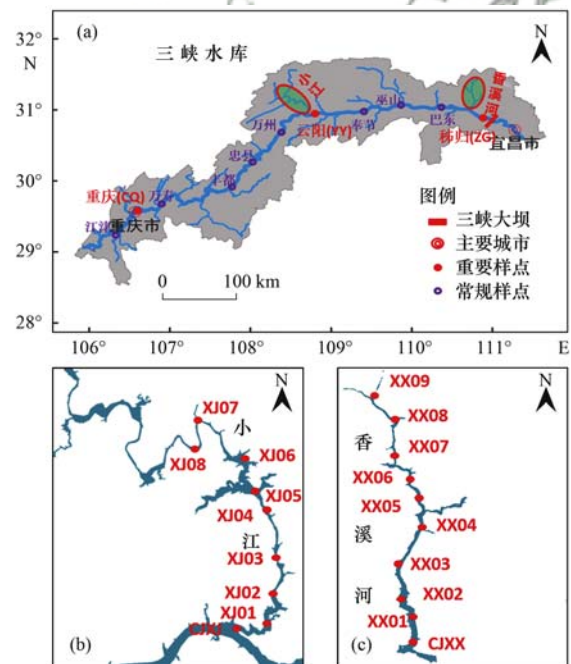


图 1 三峡水库小江和香溪河的地理位置

Fig. 1 Locations of the sampling sites in the Xiaojiang River and Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir

1.3 监测指标与方法

于 2020 年 9 月 10 日、9 月 26 日和 10 月 10 日开展两条支流库湾的水质监测. 溶解氧(DO)、水温(WT)、水深(Depth)和电导率(Spcond)由 YSI-EXO 多参数水质分析仪(美国)从各监测点的表层至底层均匀地进行测定. 混合层深度定义为与表层水温相差 0.50°C 以内的水深.

1.4 数据处理

原始数据采用 Excel 进行处理分析, ArcGIS 10.3 绘制研究区域的监测断面, Origin 18.0 绘制各指标垂向分布, Matlab 2016a 绘制各指标的空间分布,相关性采用 SPSS 21.0 进行分析.

2 结果与分析

2.1 水位-流量过程

三峡水库 2020 年坝前水位波动及出库流量过程如图 2 所示. 为满足防洪要求, 2020 年汛期水位经历了两次较大的涨-泄过程, 波动达到了近 20.00 m. 集中蓄水前期(9 月初), 水库水位降至 155.00 m

左右, 按照文献[19], 9 月 10 日 00:00, 汛末 175.00 m 试验性蓄水正式启动, 本次起蓄水位为 155.00 m, 待蓄水量 166.12 亿 m^3 , 集中蓄水持续至 10 月初, 10 月中旬至 10 月底缓慢蓄水至 175.00 m. 整个蓄水期的监测过程分 3 个时段: 蓄水初期(9 月 10 日)、蓄水中期(9 月 26 日)和蓄水末期(10 月 10 日).

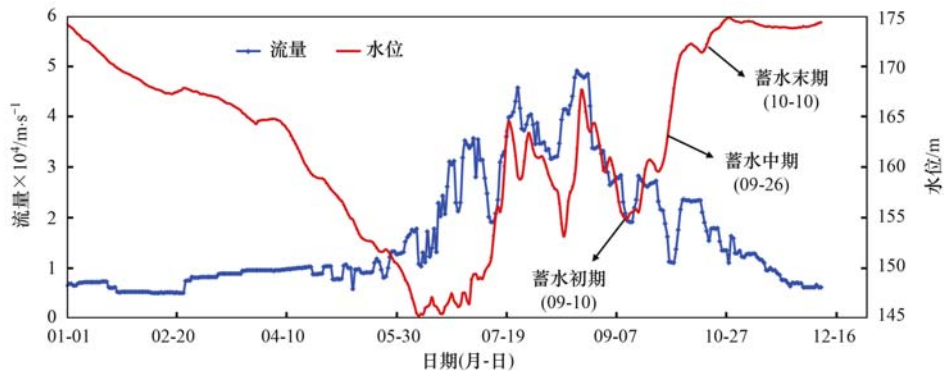


图 2 2020 年三峡水库出库流量和坝前水位变化

Fig. 2 Discharge variations and water level in the Three Gorges Reservoir in 2020

2.2 热分层特征

图 3 分别显示了三峡水库小江和香溪河库湾在整个蓄水期间热分层的时空变化过程. 蓄水期间, 小江和香溪河库湾均表现出降温趋势, 小江库湾平均水温从 25.03℃ 降低至 23.16℃, 香溪河库湾平均水温从 24.64℃ 降低至 21.30℃. 在整个蓄水过程中, 长江干流水温处于混合状态, 小江河口水温始终低于库湾回水区的水温, 而在香溪河河口, 长江干流水温则始终介于库湾表底水温之间. 这种干支流水温的相对差异可能造成不同支流库湾倒灌异重流潜入深度和强度的区别^[11], 进而形成不同的库湾热分层状态^[13,21].

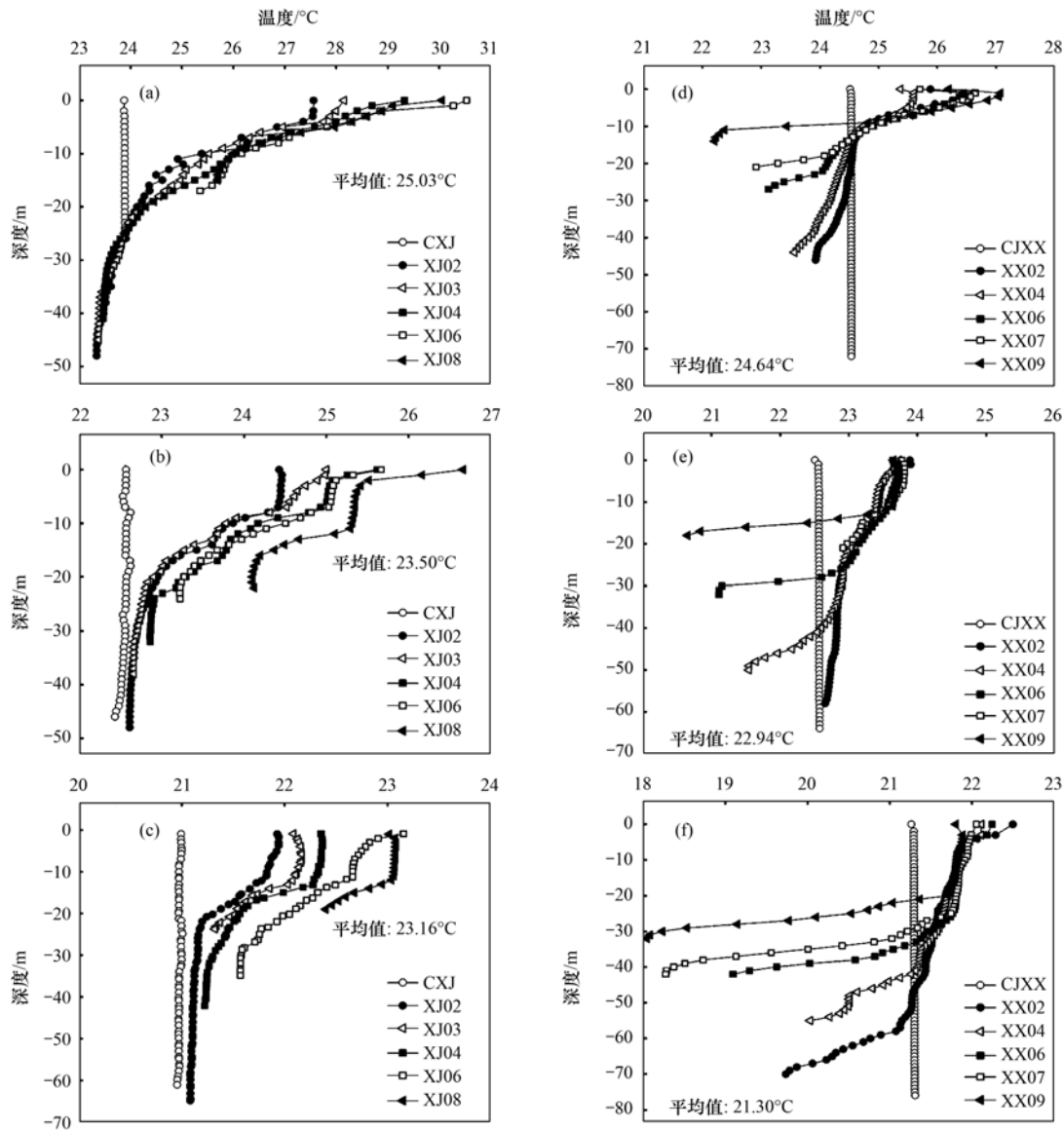
如图 3 所示, 蓄水过程中两条支流库湾垂向热分层存在显著差异. 蓄水初期, 小江库湾的热分层更为显著(最大表底温差为 6.86℃, 最大垂向温度梯度为 0.30℃·m⁻¹), 没有明显的混合层, 随水深增加水温持续降低; 而香溪河库湾呈现特殊的“双混斜型”水温分层结构[图 3(d)], 自上而下分别为“混合层-斜温层-混合层-斜温层”. 蓄水中期, 两条支流库湾的垂向水温结构均发生了显著改变. 小江库湾下游河段上层水体(0~10 m)受倒灌的影响, 斜温层完全被打破, 处于混合状态, 此时垂向水温可概化为 3 层结构(表层混合层、中间斜温层和底层冷水层), 而上游河段表层(0~3 m)多为斜温层; 而香溪河库湾中上层水体受蓄水的影响较大, 混合层更深(15~60 m), 但与小江不同的是底层始终存在一层较薄的冷水层(厚度在 10 m 左右). 蓄水末

期, 小江库湾上游河段表层斜温层消失; 香溪河库湾也呈现持续降温趋势, 垂向水温结构与蓄水中期基本一致, 混合层深度进一步增大.

2.3 电导率时空特征

电导率作为水质评价的一个重要指标, 通过电导率的测定可以间接推测水中离子成分的总浓度, 可被用于不同性质水体交换过程的示踪. 由于长江干流和支流库湾以及上游来流水体电导率的显著差异, 电导率可用作表征三峡水库支流库湾水体的来源. 小江和香溪河库湾在蓄水期电导率时空变化如图 4 所示. 整体上, 小江电导率的变化范围为 255.00~387.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 香溪河电导率略高, 变化范围为 280.00~421.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 两条支流库湾水体的电导率均存在显著的时空差异.

蓄水初期, 小江库湾上游出现了梯度较大的楔形区, 代表来自上游的高电导率水体, 潜入深度在 5~20 m; 河口水深 3~30 m 处有来自长江干流的高电导率水体, 潜入距离在 5 km 左右. 蓄水中期, 随着干流倒灌水量的增大, 低电导率水体范围缩小, 出现在距河口 15~20 km 的河段, 上游末端则表现出表层高和底层低. 蓄水末期, 整个库湾中下层水体电导率基本趋于一致, 表层略低. 相比于小江, 香溪河库湾也受到长江干流倒灌水体的显著影响. 蓄水初期, 库湾中下游形成一个较大的潜入楔形水体; 上游底层电导率略低, 代表着上游的顺坡异重流, 而库湾表层水体(10 m 以内)的电导率最低. 蓄水中期, 库湾中下游河段电导率变化较小. 在库湾底层形成一层



(a) ~ (c) 为小江, (d) ~ (f) 为香溪河

图3 小江和香溪河库湾蓄水过程中的热分层变化

Fig. 3 Changes in thermal stratification during water storage in Xiaojiang River and Xiangxi River

约 10 m 厚的低电导率水层. 蓄水末期, 香溪河库湾中上层水体电导率的垂向差异进一步减小, 仅在底层存在一层较低电导率水体, 并在整个河段可见.

2.4 DO 时空特征

三峡水库蓄水过程中小江和香溪河库湾水体 DO 的时空特征如图 5 所示, 观测期内两支流库湾 DO 在时空分布上存在显著的区别. 如图 5(a) 所示, 蓄水初期, 小江库湾已出现大面积的缺氧水体 ($DO < 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 中上游底层甚至出现无氧水体, 在水深 5 m 的区域出现溶氧跃层 (最大梯度达到 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). 表层 3 m 内水体受大气复氧影响, 维持在 $7.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上. 蓄水中期, 随着长江干流高溶氧水体的潜入, 高阳以下河段的底层 DO 显著上升, 但库湾上游 (养鹿) 底层水体仍处于缺氧状态.

此时, 支流库湾中游河段 DO 形成了类似于 MOM (温跃层 DO 最小值) 的垂向分布, 水深 10 m 左右的区域 DO 最低, 对应于此时的温跃层 [图 3(b)]. 随着三峡水库持续蓄水, 大量富氧水体的潜入最终导致库湾水体 DO 趋于一致. 相比之下, 香溪河库湾在整个蓄水期并未出现厌氧水体, DO 始终大于 $4.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 蓄水初期, 库湾中下游河段 DO 在垂向上大致可以分为 3 层: 表层富氧水体 ($8.00 \sim 12.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、中层水体 ($6.00 \sim 8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和底层低氧水体 ($4.00 \sim 6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而上游河段中层水体的 DO 最低 ($4.00 \sim 6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 由于上游底层入流 DO 略高于库湾水体, 因此形成中间略低-表底偏高的垂向分布. 蓄水中期和末期, 整个库湾水体 DO 趋于一致, DO 范围处于 $7.00 \sim 8.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

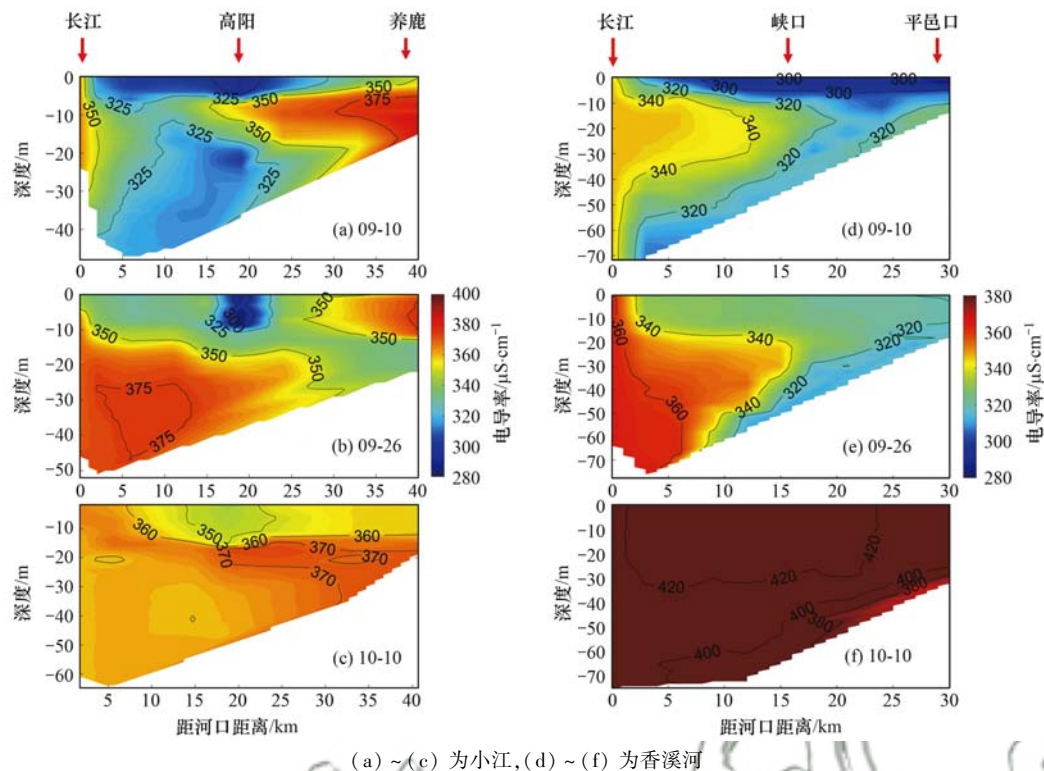


图 4 小江和香溪河库湾蓄水过程中电导率的时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial variations in electrical conductivity during water storage in Xiaojiang River and Xiangxi River

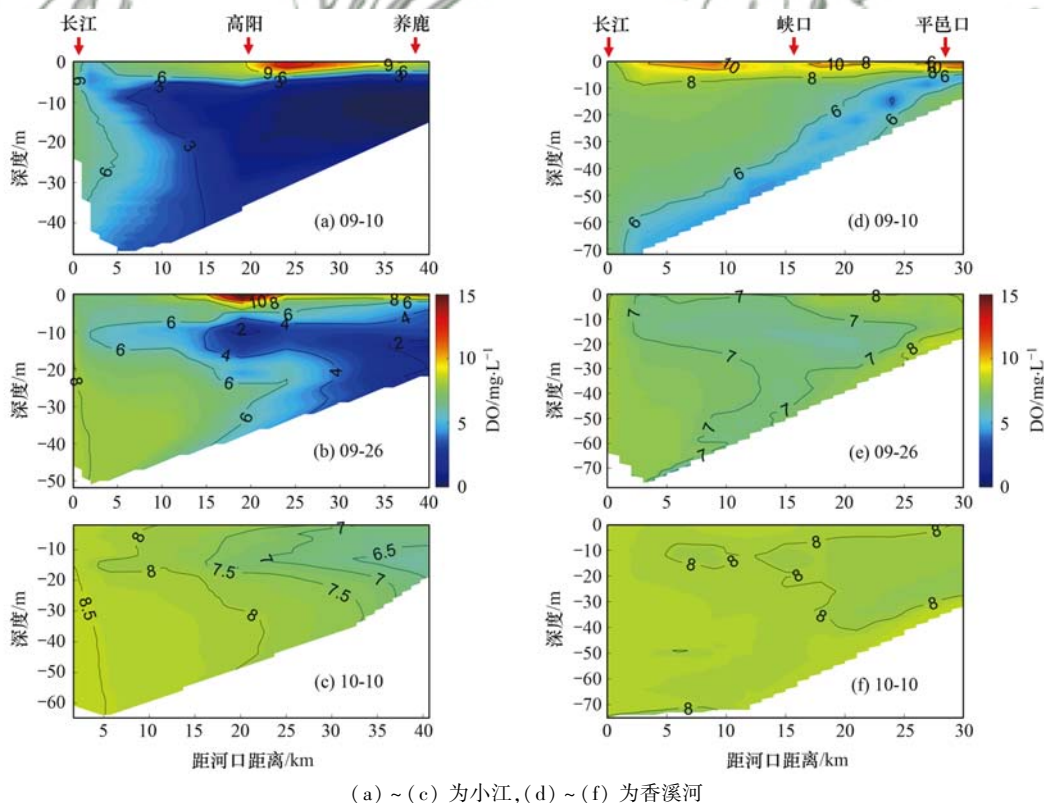


图 5 小江和香溪河库湾蓄水过程中的 DO 时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial changes in DO in the process of water storage in Xiaojiang River and Xiangxi River

3 讨论

3.1 蓄水初期不同支流库湾 DO 差异的影响因素

溶解氧(DO)是维系水生态安全的重要要素之

一,是河湖水质管理的顶级评价指标^[6]. 湖库 DO 的补给来源主要有表层大气复氧和水生植物光合作用以及上游入流水体携带;消耗过程主要有动植物的呼吸作用和有机物的分解氧化以及还原性物质的氧

化等^[2,22].在深水湖库系统中,表层水体在大气复氧和浮游植物光合作用下 DO 往往较高.春夏季,水温分层导致的密度分层限制了水体的垂向交换,限制了氧的垂向传递^[23],因此,随水深增加其浓度逐渐降低^[24];但秋冬季节之后,随着水体垂向分层被打破和垂向混合加强,表层富氧通道被打开,促进底层水体补氧,垂向分层差异逐渐减小.可见,热分层强弱和持续时间在一定程度上决定了 DO 分层的年内变化.近年来,三峡水库野外监测结果表明:部分支流库湾出现了 DO 分层^[14,16],但支流库湾出现厌氧和甚至无氧的现象鲜见报道.本研究监测首次发现了小江库湾在蓄水初期出现了大面积中下层水体缺氧和甚至厌氧现象,而香溪河库湾底层水体始终处于高溶氧状态.对比两条典型支流库湾,其 DO 显著差异的主要原因如下.

(1)浮游植物的差异 叶绿素 a 浓度与浮游植物生物量之间有着紧密联系,可用叶绿素 a 浓度表征生态系统中浮游植物的生长及分布特征^[25].一般而言,表层浮游植物生物量与 DO 含量呈正相关,浮游植物越多,光合作用产氧量越大.如表 1 所示,在纵向上,小江表层 DO 和叶绿素 a 呈正相关($R = 0.77, P < 0.05$);在 XJ06 ~ XJ08,混合层仅 0.50 ~ 1.00 m,水温分层更为显著,稳定的分层有利于浮游植物生长,故该河段的叶绿素 a 和 DO 都普遍高于其他河段.相比于小江,香溪河库湾表层叶绿素 a 普遍高于小江库湾,除了 XJ06 和 XJ07.这也导致整个库湾表层水体 DO 较高,除了 XX03 和 XX04,其他河段都维持在 10.00 mg·L⁻¹ 左右.但香溪河库湾表层 DO 和叶绿素 a 的空间相关性却不显著,而与混

合层深度显著负相关($R = -0.81, P < 0.01$).

表 1 三峡库区支流叶绿素 a 与环境因子的相关性¹⁾

Table 1 Correlation between chlorophyll a and environmental factors in tributaries of the Three Gorges Reservoir area					
点位	点位	叶绿素 a	水温	电导率	混合层深度
表层	小江	0.77 *	0.89 **	-0.12	-0.09
	香溪河	0.57	0.76 *	-0.49	-0.81 **
垂向	XJ08	0.98 **	0.85 **	-0.82 **	—
	XX09	0.89 **	0.37	-0.61 **	—

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

(2)热分层的差异 如图 6 所示,小江库湾表层混合层相对较浅,平均值为(2.10 ± 1.70) m,稳定的密度分层阻碍了上下水团的交换,表层 DO 无法向下层水体传输,随着下层水体耗氧量的增大,逐渐形成氧跃层,其深度在 5 m 左右.相比而言,香溪河库湾垂向水温表现为“双混斜型”结构,表层水体平均混合层深度为(4.70 ± 1.90) m,复氧通道相对更深,这也导致了香溪河表层高浓度溶氧层厚度比小江更深.而香溪河库湾中层水体受倒灌的影响,水体混合均匀,水温趋于一致,DO 也较高;底层受顺坡异重流的影响,形成一层水温和 DO 都偏低的冷水层,其垂向水温分层与 DO 分层保持一致.

(3)上游来流差异 垂向上,两条支流库湾 DO 与电导率均呈现显著负相关($R = -0.82, P < 0.01$; $R = -0.61, P < 0.01$).高电导率预示着水体污染严重^[26],其携带的溶解性盐类和矿物质含量较高^[27].如图 4 所示,小江上游较高电导率水体从中层潜入库湾,形成了中上游河段大面积的楔形高电解质水体,该层水体的耗氧量增大,DO 较低.而香

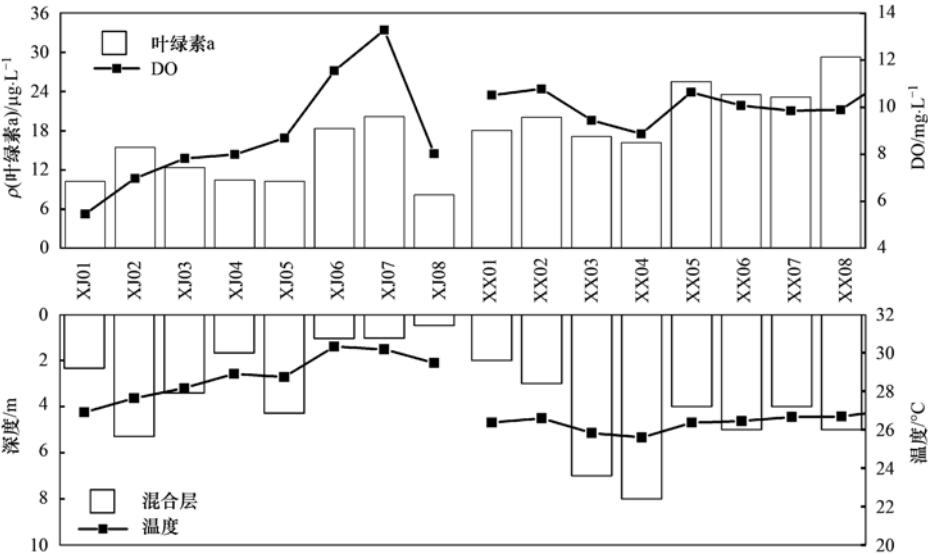


图 6 小江和香溪河表层 DO、叶绿素 a、水温和混合层深度空间变化

Fig. 6 Spatial variation in surface dissolved oxygen, chlorophyll a, water temperature, and mixed layer depth in Xiaojiang River and Xiangxi River

溪河库湾上游来流以顺坡异重流形式进入库湾^[28], 低电导率和高溶氧入流水体补充了库湾底层水体的 DO 含量, 形成了上游河段表底 DO 高和中间层低的结构。顺坡异重流补给使香溪河库湾 DO 处于健康状态, 这与赵星星的相关研究基本一致^[17]。

(4) 水体有机质差异 小江库湾河段蜿蜒, 但高阳和养鹿河段地势平坦, 岸边消落带植被葱郁, 汛末蓄水导致消落带大面积植被覆盖和分解, 增加了水体的有机质含量。其次, 近年来城镇化也加剧了小江上游汉丰湖水水质恶化和富营养化的加剧, 导致了小江入流水体有机质含量的增加^[29]。有研究已表明小江高阳断面水体 $\rho(\text{DOC})$ 平均值在 $4.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[30], 较高的有机质增加了底层水体耗氧, 增加了缺氧的风险^[31]。而香溪河库湾消落带地质多以岩石和碎石为主, 蓄水期水体 $\rho(\text{DOC})$ 平均值仅在 $2.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[32], 其有机质含量相对较低, 耗氧量也相对较低。水体有机质的差异也可能是造成两条支流 DO 差异的内在因素。

通过对比两条支流的 DO 分层特性, 可见浮游植物和混合层差异是造成表层 DO 空间差异的主要原因, 热分层结构也是造成支流库湾垂向 DO 结构差异的外在驱动因素。其次上游来流及其水体携带的有机质和库湾消落带底质和植被的差异是造成库湾下层水体耗氧量增大直至缺氧的内在原因。

3.2 水库蓄水对支流库湾溶解氧的补给作用

随着流域污染负荷的增加和水体富营养化的加剧, 水体缺氧已成为严重的全球性湖库生态环境问题^[1,33]。长期以来湖库管理重视外源污染, 普遍认为控制流域氮磷等负荷是缓解水库缺氧的有利措施^[34], 但这一认识没有考虑水质对 DO 的积极效应。在缺氧和厌氧水体中, 通过加入^[34]硝酸盐等氧化剂也能有效抑制湖库缺氧, 这也逐渐发展成为湖库水质修复的重要化学方法^[35,36]。但添加试剂等化学方法往往见效慢和成本高, 并可能存在未知风险。近年来, 国内部分学者也开始尝试各种物理方法, 通过工程措施进行人为干预。在小型浅水和水源地水库运用扬水曝气技术^[37~40]。通过向水库底层高效充氧可有效控制缺氧和厌氧, 已发展成为较成熟的原位控制手段。但在大型深水水库中, 扬水曝气技术往往成本较高。因此, 水库生态调度是一种更经济和更生态的工程手段。Besma 等^[41]对地中海南部 Sejnane 水库的研究表明, 水库不同深度的泄水方案对水质影响较大, 底孔下泄使夏季热分层时期库底水温增加和温跃层梯度减弱, 有助于垂向能量和物质的交换, 减缓水库缺氧。余晓^[8]在潘家口水库的研究中也发现: 大流量下泄和高频率的抽水蓄能调度都可

以增加水体的垂向混合, 有效补给水库中底层 DO。在本研究中, 蓄水期的观测结果同样可表明: 随着库湾水位的抬升, 干流水体对小江水体 DO 起到了显著的补给作用, 使小江库湾缺氧现象在短期内得到有效改善。

前期也有研究证实^[42,43]: 通过改变三峡水库的水位, 控制河口异重流的潜入深度和强度, 进而影响库湾的水动力和热分层状态, 可以有效改善支流库湾的水质状态。长江干流水体掺混剧烈, 水体常年处于富氧状态^[13,21], 通过倒灌异重流作用, 其可作为支流库湾水体 DO 的重要补给来源。从图 4 可以看出, 蓄水初期小江库湾水体受倒灌异重流的影响较小(距河口 5 km 左右), 干流水体交换缓慢, 可能有利于底层水体缺氧和厌氧的形成; 而香溪河库湾受倒灌的影响更为显著(距河口 20 km 左右), 干流水体交换更为频繁。而在蓄水期间, 干流水体从底层潜入小江库湾, 底层水体得到有效补给, DO 升高, 在中游河段形成表底 DO 较高, 中层较低的特征; 香溪河库湾表层水体受大气复氧补给和中层受长江倒灌水体补给和底层受上游顺坡异重流补给, 库湾整体 DO 水平较高。可见, 河口倒灌异重流的潜入方式和强度将对库湾 DO 的垂向结构产生显著影响, 通过调控水位和营造有利的倒灌方式可有效地改善库湾的缺氧现状。与其他措施相比, 水库生态调度可能是最易实现的可持续方案, 且生态风险小^[44,45]。本研究也进一步证实了抬升水位可有效和快速缓解小江厌氧等水生态问题。但由于本监测研究仅局限于蓄水期, 蓄水前期小江和其他支流库湾缺氧/厌氧的形成机制以及年际演替过程并不明确。其次, 如何建立精准的调度过程和水动力过程, 以及耗氧-补给过程三者之间的内在联系, 同时探讨三峡水库和上游汉丰湖调节坝水库的联合调度策略, 有效地改善小江库湾水质状态等问题仍值得后续进一步研究。

4 结论

(1) 蓄水初期, 小江库湾出现大面积的缺氧水体($\text{DO} < 2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表层 3 m 以内水体受大气复氧影响, 维持在 $6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上; 在水深 3 ~ 5 m 的区域溶解氧快速降低(最大梯度达到 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), 中上游河段 5 m 以下水域出现严重缺氧甚至无氧, 而香溪河库湾并未出现厌氧问题。

(2) 叶绿素 a 的含量和混合层差异是决定表层水体 DO 空间差异的主要原因, 热分层是决定 DO 垂向分层的重要物理因素。

(3) 随着库湾水位的抬升, 倒灌异重流对小江水体 DO 起到了显著的补给作用, 使小江库湾厌氧问题

在短期内得到有效改善. 在三峡水库, 可通过开展生态调度来改善支流库湾的缺氧和厌氧等水生态问题.

参考文献:

- [1] Foley B, Jones I D, Maberly S C, *et al.* Long - term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication [J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57** (2): 278-289.
- [2] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. *Water Research*, 2015, **75**: 249-258.
- [3] 曾康, 黄廷林, 马卫星, 等. 金盆水库汛期高浊水径流的潜入及热分层水体水质响应 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35** (9): 2778-2786.
- Zeng K, Huang T L, Ma W X, *et al.* Water-quality responses of the intrusion of high-turbidity runoff to the thermal stratified Jinpen Reservoir during flood season [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35** (9): 2778-2786.
- [4] 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (4): 1393-1402.
- Yu Y, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in thousand-island lake and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (4): 1393-1402.
- [5] Kalff J. 湖泊学: 内陆水生生态系统 [M]. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [6] 杜彦良, 彭文启, 刘畅. 分层湖泊溶解氧时空特性研究进展 [J]. *水利学报*, 2019, **50** (8): 990-998.
- Du Y L, Peng W Q, Liu C. A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50** (8): 990-998.
- [7] 胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究 [J]. *水利学报*, 2019, **50** (6): 679-686.
- Hu P, Yang Q, Yang Z F, *et al.* Experimental study on dissolved oxygen content in water and its physical influence factors [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50** (6): 679-686.
- [8] 余晓, 诸葛亦斯, 刘晓波, 等. 大型深水水库溶解氧层化结构演化机制 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32** (5): 1496-1507.
- Yu X, Zhuge Y S, Liu X B, *et al.* Evolution mechanism of dissolved oxygen stratification in a large deep reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32** (5): 1496-1507.
- [9] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323** (5917): 1014-1015.
- [10] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (7): 2574-2581.
- Dong C Y, Yu Z M, Wu Z X, *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (7): 2574-2581.
- [11] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, **40** (1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir [J]. *Science Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40** (1): 101-112.
- [12] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展 [J]. *水利学报*, 2016, **47** (3): 443-454.
- Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47** (3): 443-454.
- [13] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例 [J]. *湖泊科学*, 2014, **26** (5): 698-706.
- Lu J S, Li Z L. Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: a case study of Heihe Reservoir, Xi'an City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26** (5): 698-706.
- [14] 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (5): 2107-2115.
- Yang F, Ji D B, Wang L J, *et al.* Vertical distribution characteristics of dissolved oxygen and chlorophyll a in typical tributaries during the impoundment period of the three gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (5): 2107-2115.
- [15] Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, *et al.* Widespread deoxygenation of temperate lakes [J]. *Nature*, 2021, **594** (7861): 66-70.
- [16] 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 等. 三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 [J]. *环境科学*, 2022, **43** (1): 295-305.
- Tian P, Li Y L, Li Y J, *et al.* Effects of Three Gorges Reservoir operation on vertical distribution of chlorophyll a and environmental factors in tributaries [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (1): 295-305.
- [17] 赵星星, 纪道斌, 龙良红, 等. 汛期水位波动对香溪河库湾热分层特性及水质的影响 [J]. *水力发电学报*, 2021, **40** (2): 31-41.
- Zhao X X, Ji D B, Long L H, *et al.* Effect of water level fluctuation in flood season on thermal stratification and water quality in Xiangxi Bay [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40** (2): 31-41.
- [18] Long L H, Ji D B, Yang Z J, *et al.* Density-driven water circulation in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *River Research and Applications*, 2019, **35** (7): 833-843.
- [19] 黎睿, 潘婵娟, 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.
- [20] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征 [J]. *水利学报*, 2013, **44** (4): 406-415.
- Ma Y, Guo Q L, Huang T L, *et al.* Response characteristics of water quality to the seasonal thermal stratification in Jin-pen reservoir along the Heihe river, Xi'an city in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44** (4): 406-415.
- [21] 刘畅, 刘晓波, 周怀东, 等. 水库缺氧区时空演化特征及驱动因素分析 [J]. *水利学报*, 2019, **50** (12): 1479-1490.
- Liu C, Liu X B, Zhou H D, *et al.* Temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of reservoir anoxic zone [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50** (12): 1479-1490.
- [22] Rahman A K M, Bakri D A, Ford P, *et al.* Limnological characteristics, eutrophication and cyanobacterial blooms in an inland reservoir, Australia [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2005, **10** (4): 211-220.
- [23] Yoshimizu C, Yoshiyama K, Tayasu I, *et al.* Vulnerability of a large monomictic lake (Lake Biwa) to warm winter event [J]. *Limnology*, 2010, **11** (3): 233-239.

- [24] 崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6309-6316.
- Cui Y P, Wang B D, Chen Q W. The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(21): 6309-6316.
- [25] 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3519-3529.
- Yu M L, Hong G X, Zhu G W, *et al.* Wind field influences on the spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in meiliang bay of Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3519-3529.
- [26] 姜伟, 周川, 纪道斌, 等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2326-2335.
- Jiang W, Zhou C, Ji D B, *et al.* Comparison of relationship between conduction and algal bloom in pengxi river and Modao river in Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2326-2335.
- [27] Weerasinghe V P A, Handapangoda K. Surface water quality analysis of an urban lake; East Beira, Colombo, Sri Lanka[J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2019, **12**, doi: 10.1016/j.enmm.2019.100249.
- [28] 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 等. 不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3601-3611.
- Liu J S, Zhu X S, Hu Z L, *et al.* Effects of different water stratification on the vertical distribution of nitrogen in sediment interstitial waters: a case study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3601-3611.
- [29] 刘双爽, 袁兴中, 王晓锋, 等. 不同水位期汉丰湖和高阳湖上覆水时空分异特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(11): 4965-4973.
- Liu S S, Yuan X Z, Wang X F, *et al.* Spatial-temporal differentiation of water quality under different water level conditions of Hanfeng and Gaoyang Lakes in Three Gorges Reservoir[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(11): 4965-4973.
- [30] 牛晓旭. 基于水华发生程度的三峡库区澎溪河与磨刀溪水环境比较[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Niu X X. Comparison of environmental difference between Pengxi and Modao River in the Three Gorges Reservoir based on severity of algal blooms[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [31] 周红. 三峡水库小江回水区水体光学特征与溶解性有机物的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- Zhou H. Research on optical properties of water body and dissolved organic matters in Xiaojiang River backwater area, Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [32] 王凯. 三峡水库香溪河库湾溶解有机质动态过程及控制因素[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Wang K. Dynamic process and control factors of dissolved organic matter in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [33] LaBounty J F, Burns N M. Long-term increases in oxygen depletion in the bottom waters of boulder basin, lake mead, nevada-arizona, USA[J]. Lake and Reservoir Management, 2007, **23**(1): 69-82.
- [34] Nakashima Y, Shimizu A, Maruo M, *et al.* Trace elements influenced by environmental changes in Lake Biwa: (I) Seasonal variations under suboxic hypolimnion conditions during 2007 and 2009[J]. Limnology, 2016, **17**(2): 151-162.
- [35] Beutel M W, Duval R, Cubas F J, *et al.* A review of managed nitrate addition to enhance surface water quality[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2016, **46**(7): 673-700.
- [36] Goldyn R, Podsiadłowski S, Dondajewska R, *et al.* The sustainable restoration of lakes—towards the challenges of the Water Framework Directive[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014, **14**(1): 68-74.
- [37] 黄廷林, 谭欣林, 李扬, 等. 金盆水库热分层特性及扬水曝气系统运行效果研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, **50**(2): 270-276, 284.
- Huang T L, Tan X L, Li Y, *et al.* Study of the thermal regime characteristics and effect of water-lifting aerators operation on the Jinpen reservoir[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, **50**(2): 270-276, 284.
- [38] 李璇. 分层型富营养化水源水库水质演变机制与水质污染控制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- Li X. Study on the evolution mechanism of water quality and its pollution control in a stratified and eutrophic reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [39] 李扬. 分层型水源水库水温模拟及扬水曝气系统运行优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- Li Y. Water temperature simulation of a stratified source water reservoir and optimal operation of water-lifting aerator system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [40] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 扬水曝气器的水质改善功能及提水、充氧性能研究[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(1): 7-13.
- Cong H B, Huang T L, Miao J G, *et al.* Study on water improvement function, capacity of lifting water and oxygenation of a water-lifting aerator[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, **1**(1): 7-13.
- [41] Besma Z A, Adelana S M, Gueddari M. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea: a simulation approach[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(5), doi: 10.1007/s10661-015-4509-3.
- [42] Beckmann M C, Schöll F, Matthaei C D. Effects of increased flow in the main stem of the River Rhine on the invertebrate communities of its tributaries[J]. Freshwater Biology, 2005, **50**(1): 10-26.
- [43] 张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- Zhang Y, Liu D F, Ji D B, *et al.* Effects of intrusions from Three Gorges Reservoir on nutrient supply to Xiangxi Bay[J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- [44] 卜英. 不同调度方案下三峡库区垂向二维水动力模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- Bu Y. Study on a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic model to Three-gorges Reservoir under the different scheduling mode[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [45] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流库湾水华生消机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- Yang Z J. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)