

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.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
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	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

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

刘静思¹, 朱晓声¹, 胡子龙¹, 张思思², 杨正健^{1*}, 纪道斌¹, 刘德富^{1,2}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 为分析不同分层水库沉积物间隙水氮营养盐垂向分布差异的原因, 通过监测香溪河库湾、长江干流和小湾水库 3 种水域上覆水-间隙水环境特征, 分析了不同分层水域沉积物间隙水氮营养盐垂向分布特征, 并探讨了造成 3 种水域沉积物间隙水氮营养盐分布差异的原因. 结果表明: ① 长江干流与香溪河库湾沉积物间隙水 $\rho(\text{TN})$ 随深度逐渐升高, 而小湾水库 $\rho(\text{TN})$ 在 12 cm 处达到最大, 底层呈“C”型分布; 长江干流和香溪河库湾沉积物间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 随深度呈升高趋势, 小湾水库底层含量略高于表层, 整体上无显著变化, 且长江干流与香溪河库湾 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 整体上高于小湾水库, 浓度变化范围分别为: 0.512 ~ 8.289、0.968 ~ 9.307 和 0.950 ~ 1.500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 3 个水域沉积物间隙水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 垂向分布特征均与 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 相反, 且香溪河库湾与长江干流 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 高于小湾水库, 浓度变化范围分别为: 0.143 ~ 0.674、0.107 ~ 0.647 和 0.050 ~ 0.051 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; ② 3 种水体理化指标垂向分布特征也存在明显差异. 长江干流水温垂向无明显变化, 垂向稳定系数 $N^2 < 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 水体混合均匀, 溶解氧垂向变化范围为: 6.180 ~ 6.318 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 香溪河库湾中上游水温垂向上呈降低趋势, 下游水温呈阶梯状分布, N^2 均大于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 处于稳定分层状态, 溶解氧呈“C”型分布特征; 小湾水库在水深 5 ~ 15 m 和 54 ~ 70 m 出现明显分层, 溶解氧在水温梯度较大处显著降低, 80 m 后, 沿水深无明显变化; ③ 上覆水水动力、溶解氧分布以及沉积物环境差异是造成 3 种水域间隙水氮营养盐垂向分布差异的主要原因, 且香溪河库湾间隙水氨氮和硝氮含量较高, 可能提高反硝化速率, 进而有助于水域脱氮, 减少水域氮负荷.

关键词: 分层水库; 沉积物-间隙水; 氮营养盐; 垂向分布; 脱氮

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3601-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912135

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

LIU Jing-si¹, ZHU Xiao-sheng¹, HU Zi-long¹, ZHANG Si-si², YANG Zheng-jian^{1*}, JI Dao-bin¹, LIU De-fu^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lake and Algal Utilization, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To determine the reasons for the variation in the vertical distribution of nitrogen in sediment interstitial waters between different stratified reservoirs, the characteristics of overlying water-interstitial water in Xiangxi Bay, Yangtze River mainstream, and Xiaowan Reservoir were monitored. The vertical distribution of nitrogen in sediment interstitial waters in these different stratified waters were then analyzed, and the reasons for the variation in this distribution were assessed. The results showed: ① the $\rho(\text{TN})$ in the sediment interstitial waters of the Yangtze River mainstream and Xiangxi Bay gradually increased with depth, while that of Xiaowan Reservoir reached its maximum at 12 cm and the bottom layer presented a “C” distribution. The $\rho(\text{NH}_4^+)$ in the sediment interstitial waters of the Yangtze River mainstream and Xiangxi Bay exhibited an increasing trend with depth, while that of Xiaowan Reservoir was slightly higher in the bottom layer than in the surface layer, although the change with depth was not significant. Overall, the $\rho(\text{NH}_4^+)$ in the sediment interstitial waters of the Yangtze River mainstream and Xiangxi Bay was higher than that of Xiaowan Reservoir, and the concentration ranges were as follows: 0.512-8.289 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.968-9.307 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and 0.950-1.450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The vertical distribution of the $\rho(\text{NO}_3^-)$ in the sediment interstitial waters of all three waterbodies were opposite to that of $\rho(\text{NH}_4^+)$. Moreover, the $\rho(\text{NO}_3^-)$ in the sediment interstitial waters of Xiangxi Bay and the Yangtze River mainstream was higher than that of Xiaowan Reservoir. The concentration ranges were as follows: 0.143-0.674 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.107-0.647 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and 0.050-0.051 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. ② There were also significant differences in the vertical distribution of physical and chemical indices in the three water bodies. There was no significant change in the vertical distribution of the water temperature in the Yangtze River mainstream and the N^2 value was $< 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$; hence, the water was well mixed, and the vertical range of the dissolved oxygen content was 6.180-6.318 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The

收稿日期: 2019-12-18; 修订日期: 2020-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879099, 91647207, 51779128)

作者简介: 刘静思(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: 2659889380@qq.com

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

water temperature in the upper and middle reaches of Xiangxi Bay decreased vertically, while the water temperature in the lower reach presented a ladder-like distribution and the N^2 values were all $>5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$; thus, the water was in a stable stratified state and the dissolved oxygen content presented a “C” distribution. There was obvious stratification at the depths of 5–15 m and 54–70 m in Xiaowan Reservoir. The dissolved oxygen content decreased significantly at higher water temperature gradients, and there was no significant change along the water depth below 80 m. ③ The main reasons for the variation in the vertical distribution of nitrogen in the sediment interstitial waters of the three waterbodies were the differences in the overlying water hydrodynamics, dissolved oxygen distribution, and sediment environment. The $\rho(\text{NH}_4^+)$ and $\rho(\text{NO}_3^-)$ were higher in Xiangxi Bay, which may have increased the denitrification rate and subsequently have helped to remove nitrogen and reduce the nitrogen load in these waters.

Key words: stratified reservoir; sediment-interstitial water; nitrogen; vertical distribution; denitrification

水生态系统氮污染是一个世界性的环境问题^[1],生态系统中溶解态氮含量过高会破坏生态系统平衡,从而引发一系列环境问题,因此弄清氮的去除和循环途径对理解全球生物地球化学循环至关重要^[2]. 目前中国几乎每个流域均建有大小不同的水库,而水库因影响水体循环过程,必然对流域氮磷迁移转化产生重要影响^[3]. 且水库的修建也会对沉积物理化性质、有机质的分布特征等造成影响^[4],进而影响水库的脱氮效率. 脱氮是指流域内的有机或无机氮最终转化为气体释放到大气的过程^[5],且氮气常温下比较稳定且无害,因此氮气的脱氮过程被看作是最有效的氮负荷削减过程.

通常认为脱氮过程主要发生在沉积物-水界面处^[6],且该界面对流域物质传递和能量循环也起着重要的作用^[7]. 决定水体脱氮过程及效率的主要因素包括溶解氧、碳氮比、硝酸盐浓度、温度和 pH 值等. 其中溶解氧一般被认为是决定脱氮是否发生的关键环境因子^[8]. 有研究表明,当溶解氧降到某一阈值时,会急剧增大反硝化脱氮活性^[9],而溶解氧的分布特征又受水温影响. Şebnem^[10]对土耳其 Tahtali 水库的研究发现,水体热分层会导致底部水体溶解氧较低进而造成水质恶化. 且水温也会影响反硝化菌的活性进而影响反硝化速率. 王弘宇等^[11]的研究发现,反硝化菌适宜的温度范围为 25 ~ 35℃,在该温度范围内反硝化速率较大. Herrman 等^[12]指出在沉积物环境中, 25℃ 下的反硝化速率是 8℃ 下的 2 倍. 脱氮的发生离不开氮盐,而硝酸盐是脱氮的基础物质,其浓度也会对脱氮效率产生一定影响. Hasegawa 等^[13]指出硝酸盐浓度与反硝化速率成正比,且也有许多研究表明反硝化速率随硝氮的增加而增加^[12,14]. 因此不同水库沉积物间隙水中氮营养盐含量、分布特征以及所处的环境状态均会对水库脱氮效率产生不同程度的影响.

水库沉积物间隙水中氮营养盐分布状态受多方面因素影响. 例如:水库分层情况、上覆水水动力特征和溶解氧分布状态等. 有研究表明,水库热分层会造成水体严重缺氧,使得浮游动植物增多,水体营养盐负荷发生变化,从而影响水体生产力^[15]. 当水体

热分层被破坏时,由于上下水体发生对流,使得底部营养物质和悬浮物进入到上层水体^[16],从而导致水体短暂缺氧,进而影响上覆水溶解氧分布情况. 水动力扰动会使沉积物和水体产生垂向掺混^[17],进而影响沉积物营养盐释放、形态转换以及沉积物-水界面物质交换活跃层的物理和生化特征. 有研究表明,风浪作用会影响水-沉积物界面氮素的分布特征,也会使水体产生悬浮泥沙,而悬浮泥沙颗粒会影响硝化速率^[18,19]. 综上所述,水库沉积物间隙水氮形态垂向分布特征会受到多方面因素影响,而间隙水中氮盐浓度会影响水库的脱氮效率,对水库脱氮的意义深远.

本文选取 3 个分层状态不同、水动力差异的水库进行研究,通过监测香溪库湾、长江干流和小湾水库水体-沉积物环境,分别计算了 3 个水库水体垂向稳定系数,结合水体水温垂向分布,判断水库的分层类型. 从水库分层状态、溶解氧垂向分布特征以及水动力特征,探讨了不同分层水库对底层溶解氧的补给过程以及沉积物间隙水氮营养垂向分布差异的原因,以期探明水库脱氮除污功能和指定科学的流域污染治理措施等提供理论基础与支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样点分布

三峡库区地处东经 105°44' ~ 111°39', 北纬 28°32' ~ 31°44', 地跨湖北省西部和重庆市中东部. 北邻大巴山,南靠云贵高原,整体处于西高东低,库区面积约 5.8 万 km². 库区年均湿度相对稳定,多云多雾^[20]. 香溪河是库区内最大的支流,干流长 94 km,流域总面积 3 099 km²,东面多为中高山区,西面为低山区,年降雨量 900 ~ 1 200 mm,且分配不均匀. 由于地势较为复杂,加之特殊的河口走势,为水体进入库湾提供了充足的水动力. 年均气温 16.6℃,春季冷暖多变,夏季雨量较为丰富,秋季阴雨较多,冬季雨雪较多,常年刮东南和西南风^[21]. 香溪河的具体采样点如图 1(a) 所示.

小湾水库位于中国云南临沧市与大理白族自治州和保山市交界处,是澜沧江中下游河段规划的 8

个梯级电站的第二级, 其主要以发电为主, 是澜沧江中下游河段的“龙头水库”, 水库正常蓄水位 1 240 m, 正常蓄水时水库面积 189.1 km², 总库容 1.51×10^{10} m³ [22]. 所处区域日照充足, 雨水丰富, 年

降雨量 770 ~ 1 330 mm, 雨季为 5 ~ 10 月, 旱季为 11 月至次年的 4 月, 年均气温 14.3 ~ 19℃, 库区干湿分明, 是澜沧江流域梯级水库中典型的大型水库. 小湾水库的具体采样点如图 1(b) 所示.

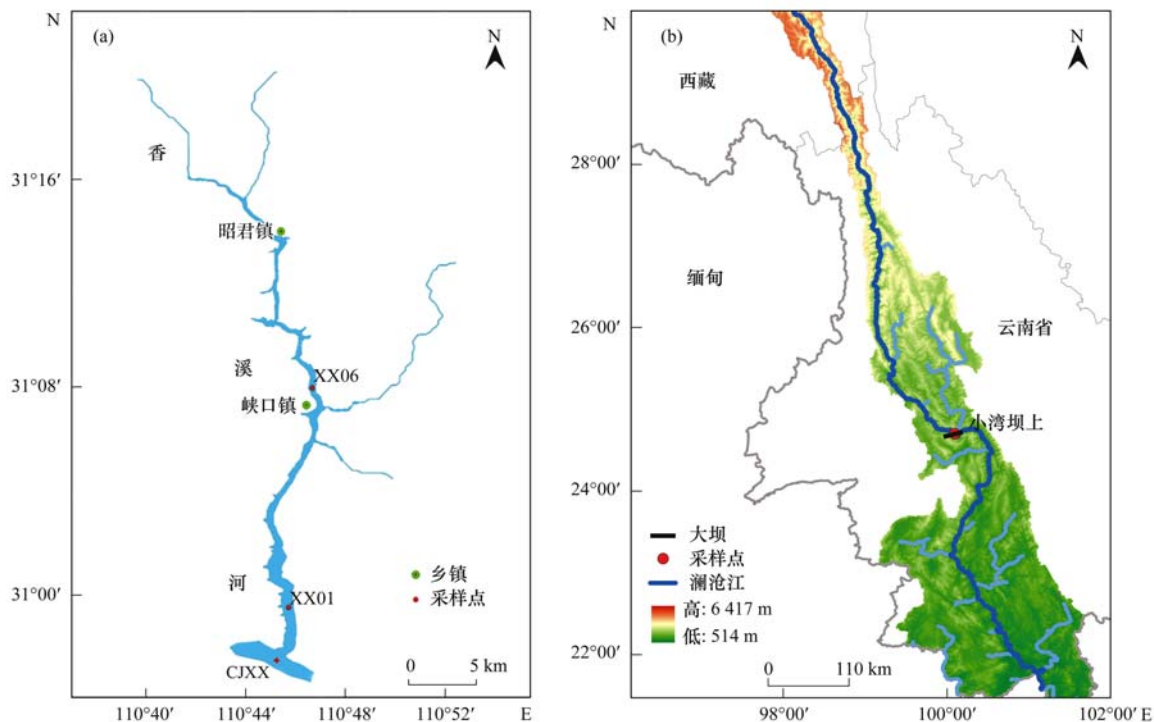


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

1.2 现场监测与分析测试

利用中国水利水电科学研究院研制的柱状采样器($\phi 60$ mm $\times$ 1 000 mm)在 6 月对澜沧江小湾水库和长江干流及香溪库湾中上游、下游采集了 0 ~ 20 cm 上覆水和 0 ~ 25 cm 沉积物样品. 长江干流与香溪河库湾上覆水样品, 如图 2(a) 所示分别以 2 cm 的间隔进行现场采集, 并装入 300 mL 聚乙烯采样瓶中, 用活塞缓慢地、均匀地将底泥推出, 分别以 2 cm 的间隔采集沉积物并装入干净的聚乙烯自封袋密封保存, 排尽袋中的空气. 小湾水库上覆水和沉积物样品, 如图 2(b) 所示, 上覆水分别以 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 15 和 15 ~ 20 cm 进行现场采集, 并将上覆水装入 300 mL 聚乙烯采样瓶中, 将沉积物装入聚乙烯自封袋并排尽空气, 放入冷藏箱 4℃ 密封保存, 带回实验室. 采样点流速使用 Vector 点式流速仪现场测定, 保存数据回室内分析.

水温、溶解氧、pH 值和电导率等水体环境因子利用 TIS-EXO 多参数水质分析仪测定. 沉积物样品利用 TDZ5-WS 台式多管架自动平衡离心机, 在 $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 得到泥样和间隙水. 上覆水和间隙水样品经孔径为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的玻璃纤维滤膜过滤, 在 24 h 内按照文献[23]中紫外分光光度

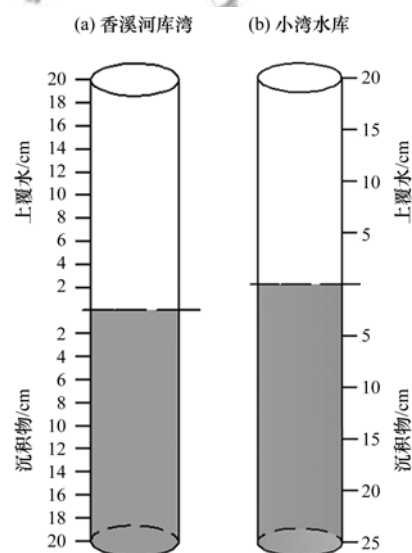


图 2 沉积物分层示意

Fig. 2 Sediment stratification diagram

法, 完成总氮(TN)、硝氮(NO_3^- -N)和氨氮(NH_4^+ -N)的测定.

1.3 数据处理

水体稳定系数及水体分层类型判定: 利用水体浮力频率平方值(N^2 , 单位: s^{-2})作为评价水体稳定性的指标[24,25]. 它是指密度层化时, 流体质点由于

浮力而产生垂直振荡的频率, N^2 随着密度梯度的增大而增大. 浮力频率 (N^2) 计算公式如下:

$$N^2 = \left(\frac{g}{\rho} \right) \frac{d\rho}{dz}$$

式中, ρ 为水体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; z 为水深, m ; 以水体表面为起始液面, 沿水深方向为正方向. 当 $N^2 < 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ 时, 认为水体为混合水体; 当 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2} < N^2 < 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 时, 认为水体为弱分层水体; 当 $N^2 > 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 时, 认为水体为分层水体^[26].

水体紊动强度: 利用流速仪测量得到笛卡尔坐标系下的流速矢量 $\mathbf{u} = (u, v, w)$, 该流速可以分解为平均速度和脉动流速 $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$, 然后利用分解后的速度求得湍流强度 I 和湍流动能 TKE. 湍流强度定义为脉动流速 u' 、 v' 和 w' 的均方根^[27], 是用来描述湍流的强弱. 对于某一方向的流速脉动分量 u' , 湍流强度计算公式如下:

$$I = \sqrt{\overline{u'^2}}$$

湍流动能用 TKE (turbulence kinetic energy) 来表示湍流的混合强度, 湍流动能越小, 湍流程度越弱. 用平方根速度公式表达如下^[28,29]:

$$\text{TKE} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

式中, u' 、 v' 和 w' 分别为水平向、切向和垂向的脉动流速.

2 结果与分析

2.1 不同水库沉积物间隙水氮营养盐分布特征

不同水库沉积物间隙水氮盐分布特征如图 3 所

示. 如图 3(a) 所示, 长江干流 (CJXX) 与香溪河库湾 (XX01 和 XX06) 沉积物间隙水氮营养盐垂向分布一致, 上覆水 $\rho(\text{TN})$ 随深度无明显变化, $\rho(\text{TN})$ 变化范围分别为 1.961 ~ 2.689、1.539 ~ 3.453 和 1.965 ~ 2.951 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 间隙水 $\rho(\text{TN})$ 随深度呈增大的趋势, $\rho(\text{TN})$ 变化范围分别为 2.873 ~ 10.618、2.666 ~ 11.661 和 3.423 ~ 11.427 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 小湾水库 (XWBS) 上覆水 $\rho(\text{TN})$ 垂向上也无明显变化, $\rho(\text{TN})$ 变化范围: 0.550 ~ 0.870 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 间隙水 $\rho(\text{TN})$ 变化范围为: 5.000 ~ 6.800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且 $\rho(\text{TN})$ 在 12 cm 达到最大值, 底层呈“C”型分布特征. 如图 3(b) 所示, CJXX、XX01 和 XX06 上覆水中 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 垂向无明显变化, 且浓度较低, 整体浓度低于 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 随深度均呈升高的趋势, 各点浓度变化范围分别为: 0.512 ~ 8.289、0.969 ~ 8.960 和 1.278 ~ 9.307 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 小湾水库 (XWBS) 上覆水和间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 变化范围分别为: 0.001 ~ 0.150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.950 ~ 1.500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 上覆水中 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 垂向无明显变化, 间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 在表层略有增加, 底层浓度无显著变化. 长江干流、XX01、XX06 和小湾水库间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 均远高于上覆水, 氨氮存在从间隙水向上覆水释放的趋势, 可能是潜在的内源氮负荷. 如图 3(c) 所示, 长江干流、XX01 和 XX06 上覆水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 随深度呈降低趋势, 整体浓度变化范围为: 0.800 ~ 1.530 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 随深度呈缓慢降低趋势, 且硝酸盐浓度在沉积物表层相对较高. 长江干流、XX01、XX06 和小湾水库间隙水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 范围分别为: 0.143 ~ 0.674、0.107 ~ 0.467、0.109 ~ 0.647

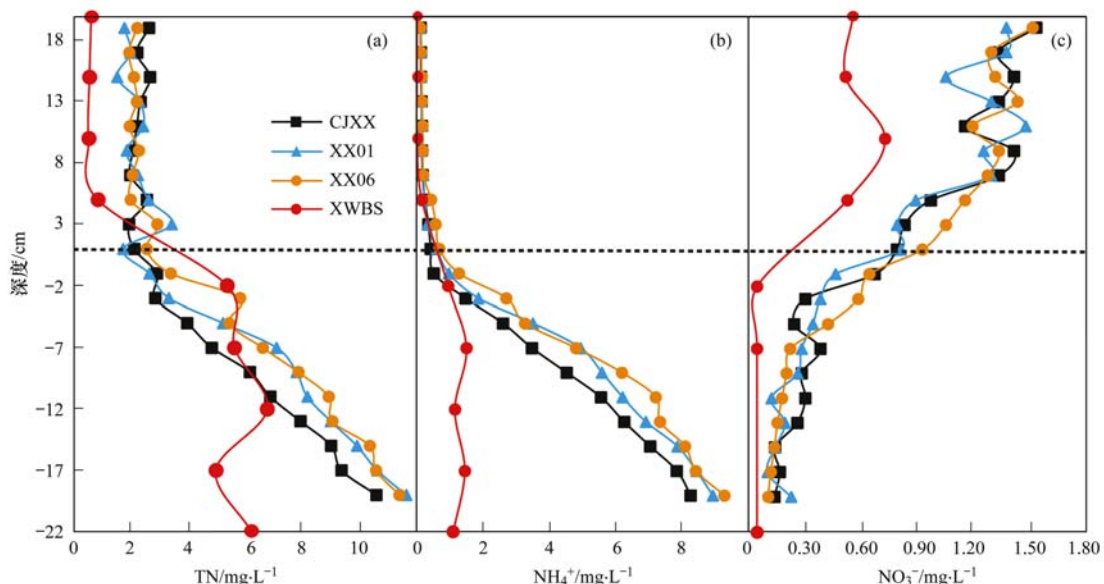


图 3 不同水库氮营养盐垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of nitrogen nutrients in different reservoirs

和 $0.050 \sim 0.051 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 3 个水库沉积物间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 远远低于上覆水, 此分布特征与氨氮垂向分布相反.

2.2 不同水库垂向分层特征及类型分析

如图 4(a) 所示, 小湾水库 (XWBS) 表层水温垂向无明显变化, $5 \sim 15 \text{ m}$ 和 $54 \sim 70 \text{ m}$ 水深范围内, 水温随水深显著降低, 最大温度铅直梯度均大于 $0.2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 水体处于斜温层状态. $15 \sim 54 \text{ m}$ 水深范围内, 水温垂向略有降低, 变化范围为: $20.7 \sim 19.1 \text{ } ^\circ\text{C}$. 80 m 以下, 水温随水深无明显变化, 小湾水库水温整体变化范围为: $25.1 \sim 14.1 \text{ } ^\circ\text{C}$. 长江干流水体 (CJXX) 水温从表层至底层无明显变化, 水体混合均匀, 基本处于同温层, 水温处于 $23.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右. 香溪河库湾下游 (XX01) 在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 水深范围内, 水温随水深呈降低趋势, 水温变化范围为: $23.4 \sim 24.7 \text{ } ^\circ\text{C}$; $10 \sim 25 \text{ m}$ 水深范围内水温随水深无明显变化, 水温处于 $23.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右; 25 m 以下, 水温随水深呈降低趋势. 而香溪河库湾中上游 (XX06) 水温随水深呈降低趋势, 温度变化范围为: $19.5 \sim 25.1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

目前评价水库水温分层的方法有: α 法、密度佛汝德数法和宽深比法等, 这些方法都是将水动力概化为一维模型来估算水库分层状态, 本文采用 N^2 法来评价水体分层状态, 该方法考虑了水体垂向密度梯度^[30]. 图 4(b) 中分为 3 个区间, 长江干流 (CJXX) 水体 $N^2 < 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 水体处于混合状态; 香溪河库湾下游 XX01 水体 N^2 处于 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times$

10^{-4} s^{-2} 之间, 水体为弱分层状态; 而香溪河库湾中上游 (XX06) $N^2 > 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 水体处于稳定分层状态; 小湾水库由于水深较深, N^2 处于 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ 之间, 水体为弱分层状态, 但局部水深范围内, 水体出现明显分层现象.

2.3 不同类型水库水动力及溶解氧垂向分布

流速是水动力的一个最基本元素, 流速大小、波动情况和分布状态等对水体营养盐的分布情况、水温结构分布和物质迁移转化等都会产生影响. 如图 5(a) 是香溪河流速纵向剖面, 根据图 (3) 所示水温垂向分布可知, 长江干流水温在水深 10 m 以内低于库湾水温, 干流水体密度较库湾水体大, 干流水体从中上层倒灌进入库湾, 上游低温水体从底部顺坡流出库湾注入长江, 且库湾底部流速较大, 最大流速为 $0.374 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 靠近库湾中上游底部流速较大. 图 5(b) 是小湾水库流速垂向分布, 可以看出, 小湾水库上层水体流速相对较大, 且在水深 40 m 附近流速最大, 流速最大值为 $0.116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 底层流速均小于 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 近底平均流速为 $0.003 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

溶解氧反映了水体和沉积物所处的氧化-还原状态, 并且影响水界面-沉积物氮、磷的交换和释放^[31, 32]. 如图 6(a) 为长江干流与香溪河库湾水体溶解氧垂向分布, 可以看出长江干流溶解氧沿水深方向呈微弱降低趋势, 溶解氧浓度变化范围为: $6.180 \sim 6.318 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 香溪河库湾下游 (XX01), 水深 $0 \sim 9 \text{ cm}$ 范围内, 溶解氧浓度随水深呈降低趋势,

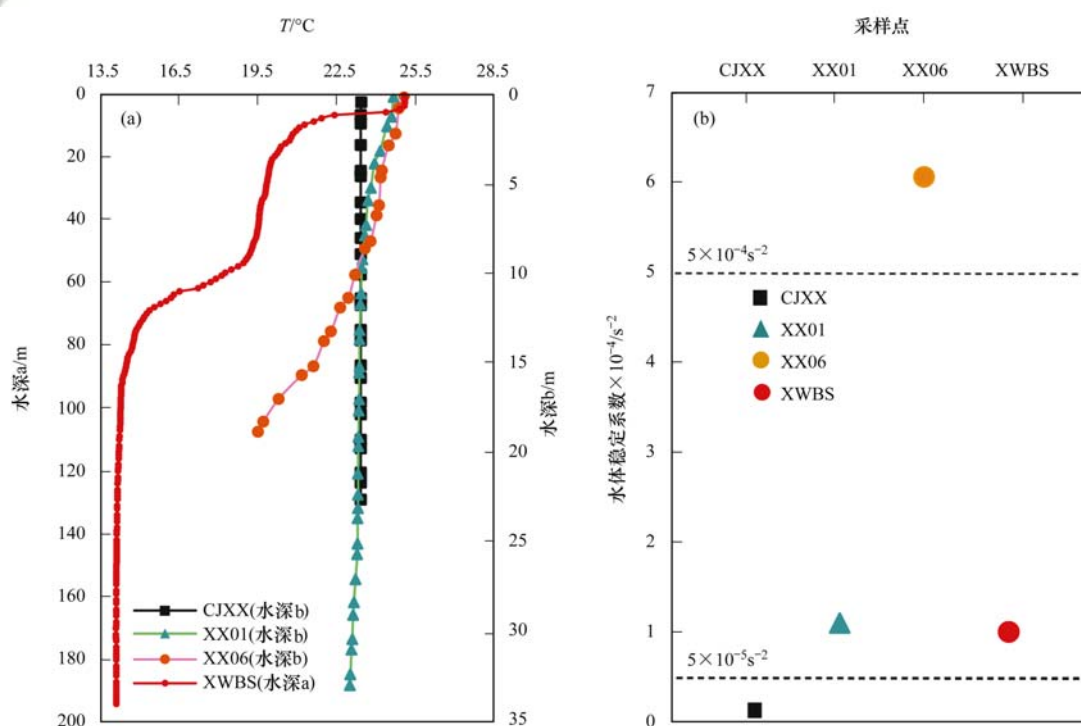
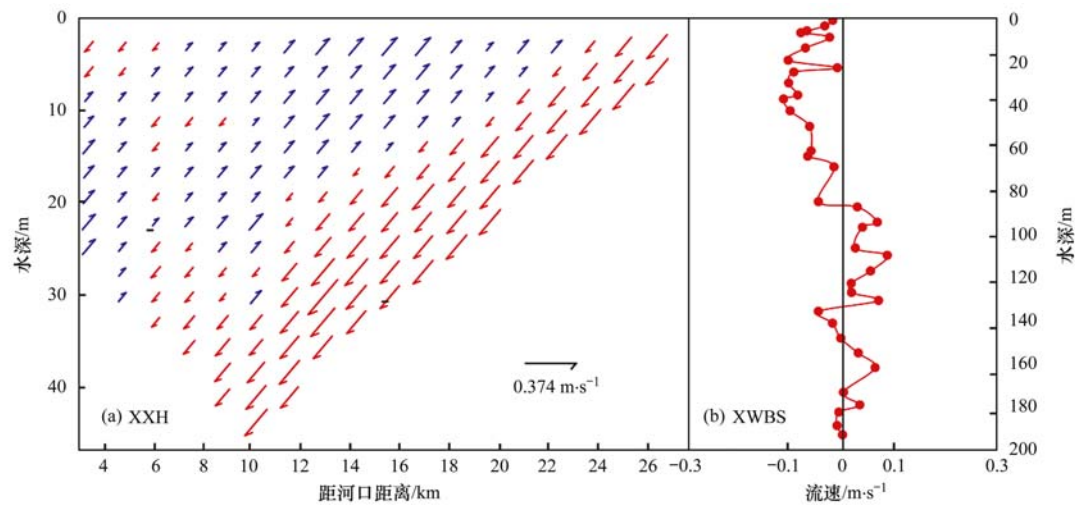


图 4 不同水库水温垂向分布及水体稳定系数

Fig. 4 Vertical distribution of water temperature and water stability coefficient for different reservoirs



红色矢量表示由支流流向河口,蓝色矢量表示由河口流向支流,矢量长度表示流速大小;
图(b)中横坐标负值表示流速方向为南方向

图5 不同类型水库流速垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of velocity in different types of reservoirs

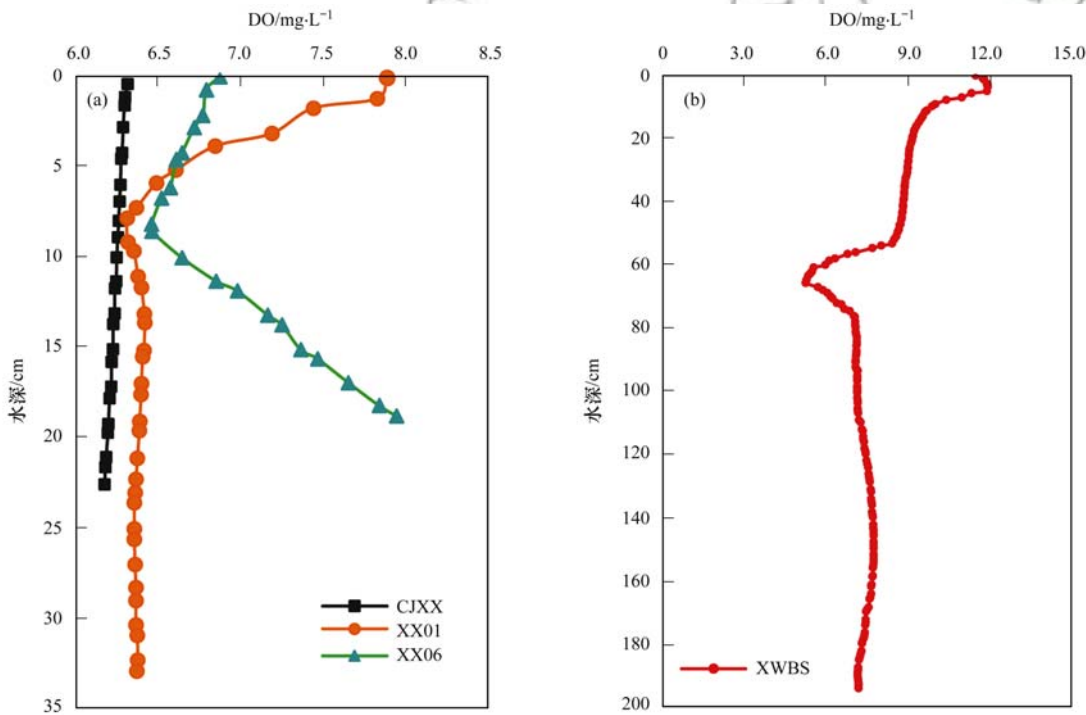


图6 不同类型水库溶解氧垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of dissolved oxygen in different types of reservoirs

浓度变化范围为:6.317 ~ 7.889 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 水深约 9 m 以下,溶解氧浓度开始略有升高,之后随水深无明显变化,浓度处于 6.370 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右;香溪河库湾中上游(XX06)沿水深方向呈现“C”型分布特征,0 ~ 9 m 范围内,溶解氧随水深增加呈降低趋势,浓度变化范围:6.464 ~ 6.877 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 9 m 以下,又出现回升,浓度升高至 7.943 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 整体上,长江干流与香溪河库湾底部溶解氧较为充足. 图 6(b) 为小湾水库溶解氧垂向分布,结合图 4(a) 所示的水温,在水温呈明显梯度水深处,溶解氧显著降低,且在 63

m 水深处达到最小值,最小值为:5.300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 80 m 后溶解氧随水深略有升高,整体无明显变化,溶解氧变化范围:7.200 ~ 7.740 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,小湾水库水体垂向上溶解氧浓度整体变化范围为:5.300 ~ 11.900 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

3 讨论

3.1 不同分层水库底层溶解氧补给过程分析
水体热分层是湖泊系统中常见的物理过程,该过程对水体溶解氧垂向分布,藻类的垂向迁移,有机

质的分解过程, 沉积物营养盐的释放等都会产生显著影响^[33,34]. 而水库是一类特殊的湖泊, 与湖泊有类似的特征. 在季节性物理热分层状态下, 水体自上而下分为变温层、温跃层(斜温层)和等温层(均温层)^[35]. 而斜温层会阻碍上下层水体物质交换及增强表层大气富氧对底部水体的氧传质阻力, 从而导致底部水体缺氧. 如图 4(a) 所示, 小湾水库、长江干流和香溪河库湾呈现出 3 种不同水温结构. 长江干流水体垂向水温无明显变化, 水体混合均匀, 如图 7(b) 所示, 长江干流水体仅在表层 N^2 处于 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 之间, 存在微弱分层现象, 其他水深 N^2 均小于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 水体混合均匀. 此时处于夏季, 水温适宜浮游植物生长, 且水温越高, 微生物多样性也会增加^[36], 浮游植物的光合作用可以为水体提供氧气, 但由于表层存在微弱分层, 且随水深光照强度减弱, 光合作用减弱, 加之微生物对有机物分解耗氧以及水体生物呼吸作用需氧等, 使得长江干流水体溶解氧随水深呈现微弱降低. 香溪河库湾下游 (XX01), 溶解氧在 0~9 m 水深范围内呈现降低趋势. 根据图 7(c) 所示, 在 0~10 m 水深范围内, N^2 均大于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 且在 0~4.6 m 处 N^2 大于 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 因此 0~10 m 范围内水体处于明显分层状态, 溶解氧受到水体垂向层结阻碍, 无法补给 9 m 处的水体, 且在生物和化学耗氧共同作用下造成水体

溶解氧沿水深呈降低趋势^[37]. 而 10 m 以下, N^2 几乎均小于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 由于干流水倒灌进入库湾, 水体分层消失, 层化作用减弱, 水深 10 m 以下, 溶解氧随水深增加无明显变化. 而香溪河库湾中上游 (XX06) 水深 10 m 以下, 图 7(d) N^2 随水深几乎均大于 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 水体处于明显分层状态, 但此时溶解氧出现回升, 说明此时水温分层并非是影响溶解氧垂向分布的主导因素. 由于越靠近上游, 水深越浅, 溶氧含量较高, 且上游来自神农架的低温水, 从底部顺坡流出库湾注入长江, 从而使底部溶解氧浓度出现回升趋势. 小湾水库在 5~10 m 水深处溶解氧呈显著降低趋势, 根据图 4(a) 和 7(a) 可知, 该水深范围内水体处于斜温层, 且此时水体 $N^2 > 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 水体呈明显分层状态, 表层溶解氧受水体垂向层结阻碍, 对下层水体补给强度降低, 加之一些生物耗氧, 使得该水层溶解氧沿水深显著降低. 15~53 m 水层, $N^2 < 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 水体无明显分层, 且水温垂向变化较小, 溶解氧沿水深无显著变化. 54~70 m 水深范围内, 溶解氧出现极小值, 这与 Nix^[38]、Kreling 等^[39] 和 Wentzky 等^[40] 研究 MOM (metalimnetic oxygen minimum) 现象类似, 他们认为温跃层对氧气垂向传递产生阻碍, 一些浮游植物、动物的呼吸作用及微生物对该层有机物质的分解, 以及外部输入高浓度可降解有机碳或还原物质进入该

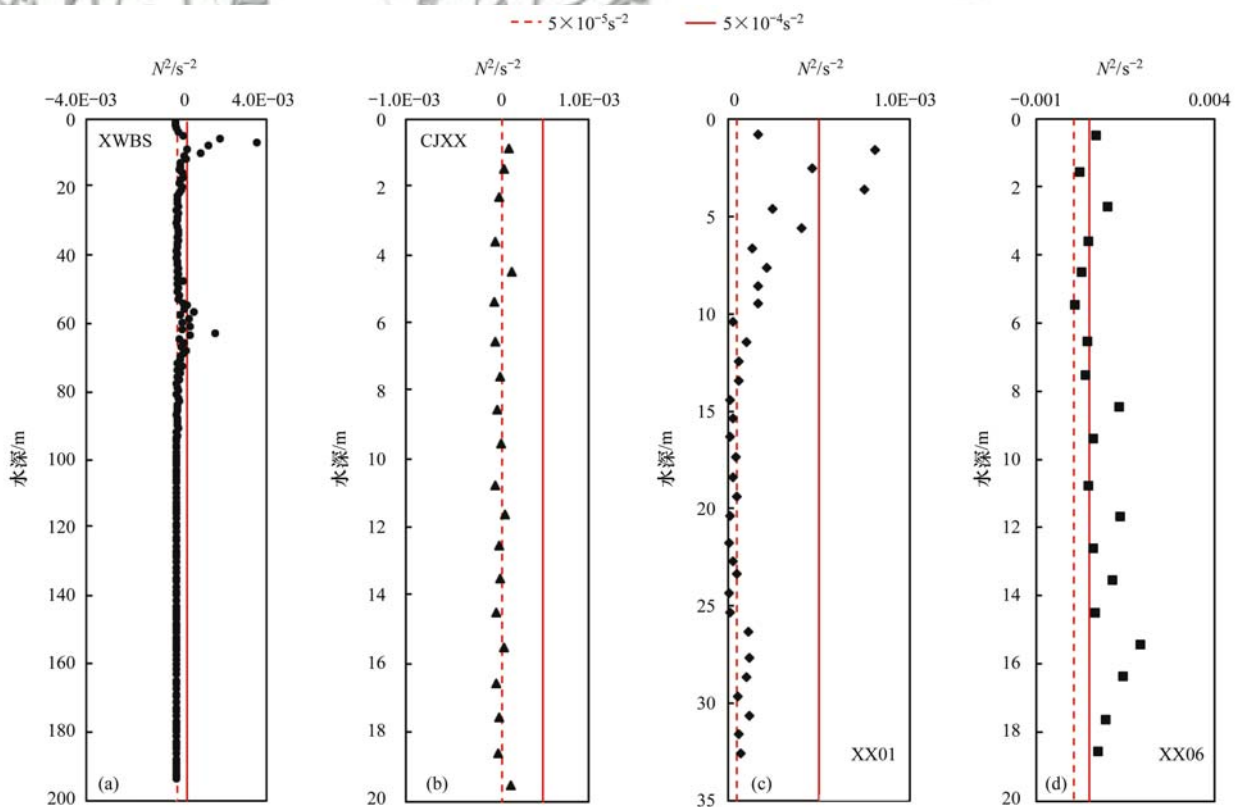


图 7 不同类型水库 N^2 垂向分布

Fig. 7 Vertical distribution of N^2 in different types of reservoirs

水层等都会在温跃层内产生溶解氧极小值. 澜沧江水库段水体水质受有机污染和氮污染严重, 以及小湾水库受农业面源污染严重^[41], 从而为一些微生物提供了充足的碳源和氮营养物质, 促进了微生物繁殖, 而微生物在分解有机物质时需要消耗大量氧气, 上层水体沉降下来的浮游植物残体在该水层氧化矿化, 以及此时水温处于斜温层, 在 63 m 处 $N^2 > 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 水体层结作用加强, 溶解氧和一些化学元素在水层之间的传递阻力增强, 且许多浮游生物通常将自身定位在强密度梯度中的温跃层中^[25], 加之该水层光照强度较弱, 使得水体中的溶解氧进一步降低. 80 m 后, N^2 均小于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, 水体分层消失, 水温垂向无明显变化, 水层溶氧恢复正常状态, 水体溶解氧较上层水体高, 且沿水深无明显变化.

3.2 不同分层水库沉积物间隙水氮营养盐差异分析

小湾水库间隙水总氮浓度在 12 cm 处达到最大, 底层呈“C”型分布, 而香溪河库湾则随深度逐渐升高. 可能由于小湾水库属于深水水库, 底部水动力较小, 大量微生物存在于沉积物表层^[42], 且随着深度增加微生物的丰度和数量可能会逐渐减少^[43,44], 沉积物环境会变得相对还原, 微生物的分解作用减少, 使得表层间隙水中总氮含量相对较低. 而香溪河有研究表明, 库湾沉积物有机质含量均超过污染临界点, 垂向分布上表层含量要低于底层, 且随深度有增大趋势^[45]. 随着沉积物有机质被降解, 沉积物间隙水总氮浓度升高.

小湾水库间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 在 0~7 cm 随深度略有增加, 之后随深度无显著变化, 而香溪河间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 则随深度呈升高趋势. 小湾水库间隙水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 较香溪河库湾低, 随深度均呈降低趋势. 根据图 5 可以看出香溪河库湾和长江干流底部流速较大, 而小湾水库底部流速较小. 通过计算香溪河库湾下游 (XX01)、中上游 (XX06)、长江干流和小湾水库底部水体湍流强度 ($I, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和湍动能 (TKE, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), 分别为 0.019 和 3.88×10^{-4} 、0.216 和 1.24×10^{-3} 、0.015 和 3.65×10^{-4} 、0.003 和 1.12×10^{-5} , 湍动能越大, 湍流程度越大. 小湾水库底部水体湍流强度和湍动能均小于长江干流和香溪河库湾, 长江干流与 XX01 相近. 而较强的水体扰动会使沉积物再悬浮, 增强上覆水与间隙水之间物质交换. 有研究表明, 当再悬浮发生时, 该现象会持续到沉积物-水界面破坏为止, 从而降低沉积物-水界面传质阻力, 增大界面扩散通量, 增大界面物质浓度梯度, 提高物质扩散释放能力^[46~48]. 在沉积物与上覆水之间存在扩散边界层, 而扩散边界层对沉积物盐分释

放具有阻碍作用, 且阻碍作用与边界层厚度有明显的正相关^[49]. 流速大小、水体紊动强度等对边界层厚度也会产生较大影响. 水流速度较大会明显降低扩散边界层厚度, 水体紊动越强, 会使沉积物介质中产生较大的压力波, 促进水-沉积界面发生营养盐交换^[50,51]. 小湾水库、XX01 和 XX06 沉积物氧化还原电位变化范围分别为: $-151.0 \sim -258$ 、 $-56 \sim -181$ 和 $95 \sim -29 \text{ mV}$. 在不同程度水动力作用下, 由于小湾水库底部水动力较小, 上覆水对间隙水补给较小, 使得沉积物整体处于较强还原环境, 还原强度垂向上缓慢增大, 使得间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 随深度无显著升高. 长江干流和香溪河库湾沉积物还原环境较小湾水库弱, 且底部湍动能相对较大, 以及上覆水存在较高的硝酸盐和溶解氧, 这也解释了小湾水库间隙水表层硝酸盐浓度远低于香溪河库湾和长江干流. 由于香溪河库湾和长江干流底部流速较大, 湍流强度和湍动能均较大, 界面处水体扰动相对强烈, 减弱了沉积物-水界面传质阻力, 促进了上覆水-间隙水之间物质交换, 使得香溪河库湾和长江干流上覆水一部分硝氮对间隙水产生补给, 也促进上覆水高浓度溶解氧进入间隙水, 使得库湾沉积物还原强度要弱于小湾水库, 加强了间隙水中硝化-反硝化耦合作用. 随着深度增加, 氧气被大量消耗, 还原强度增大, 该环境不利于硝化作用但适宜氨化作用, 有机氮在微生物作用下氨化转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 且在厌氧环境下以离子状态储存于间隙水中, 随着深度增加受水动力影响也会减弱, 氨氮会大量在间隙水中富集蓄

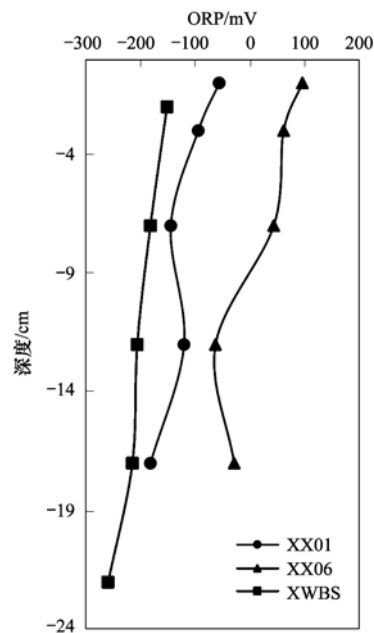


图 8 不同水库沉积物 ORP 垂向分布

Fig. 8 Vertical distribution of ORP in sediments from different reservoirs

积^[52,53],且反硝化和厌氧氨氧化等过程也会被加强,该过程都是利用 NO_3^- 或 NO_2^- 作为电子受体,最终被转化为 N_2 释放到大气中,使得间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 随深度增加呈现降低趋势.有研究表明,在硝酸盐较低的环境中反硝化速率会受到抑制,且反硝化速率会随着硝氮的增加而增加^[12,14,54].而高浓度 NH_4^+ 也能够通过硝化耦合间接刺激反硝化^[55].因此香溪河库湾沉积物间隙水中较高水平的硝酸盐和氨盐可能会促进反硝化作用,从而会增强流域的脱氮能力,削弱流域的氮负荷.

4 结论

(1)长江干流水体溶解氧随水深呈微弱降低,香溪河库湾垂向上呈“C”分布特征,且两个水库水体底层溶解氧处于充足状态,而小湾水库水体溶解氧,在水温梯度较大处,显著降低.水体热分层和分层异重流是造成3个水域溶解氧垂向分布差异的重要因素.

(2)由于上覆水水动力、溶解氧分布特征以及沉积物组成差异,使得3个水库沉积物间隙水氮营养盐垂向分布存在差异.小湾水库间隙水总氮在12 cm处达到最大,底层呈“C”型分布,而长江干流和香溪河库湾间隙水总氮含量随深度的增加而增加.长江干流和香溪河库湾间隙水氨氮和硝氮浓度均高于小湾水库,间隙水底层氨氮浓度较表层高,硝氮则相反.

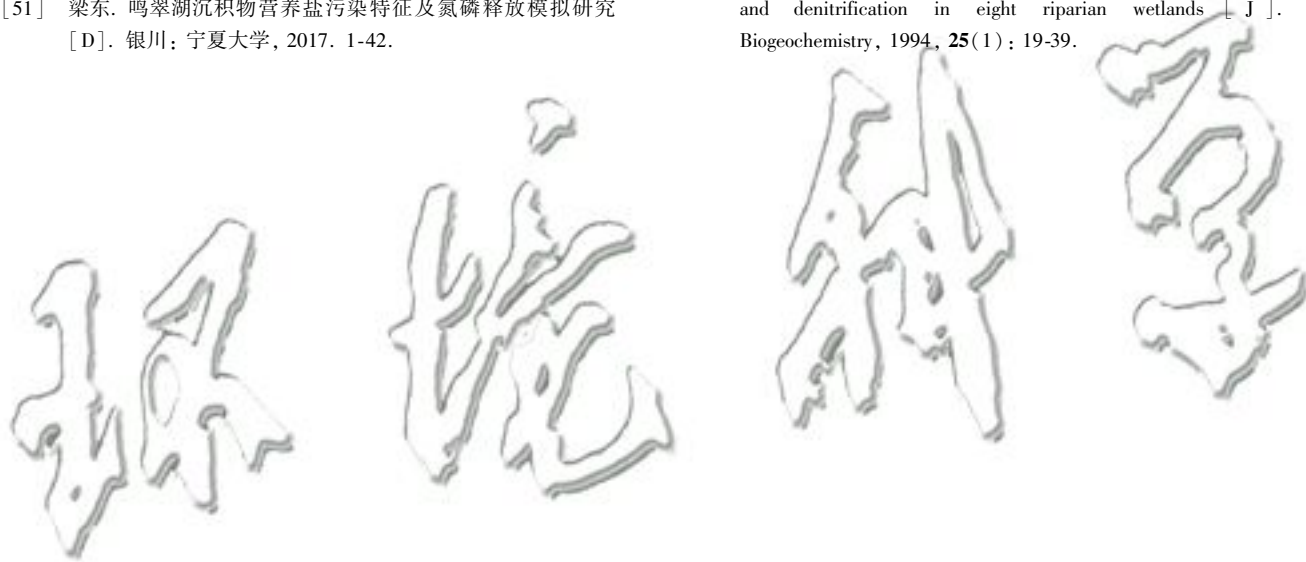
(3)长江干流和香溪河库湾沉积物间隙水硝酸盐及铵盐含量较高,可能会促进反硝化速率,进而增强流域脱氮能力,削弱流域的氮负荷.由于监测数据还有待完善,后期应加强对不同水库沉积物氨化,反硝化、厌氧氨氧化、厌氧甲烷氧化等的研究,已确定不同水库对氮迁移转化及脱氮效率的影响.

参考文献:

- [1] Seitzinger S. Nitrogen cycle: out of reach[J]. *Nature*, 2008, **452**(7184): 162-163.
- [2] McQuig N D, Gardner W S, Dunton K H, *et al.* Biotic and abiotic controls on co-occurring nitrogen cycling processes in shallow Arctic shelf sediments[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 13145.
- [3] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, *et al.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure[J]. *Nature*, 1997, **386**(6623): 385-388.
- [4] 王静, 刘洪杰, 雷禹, 等. 三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 946-953.
Wang J, Liu H J, Lei Y, *et al.* Nitrification and denitrification rates in a small tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir during water collection and release events[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 946-953.
- [5] Dalsgaard T, Canfield D E, Petersen J, *et al.* N_2 production by the anammox reaction in the anoxic water column of Golfo Dulce, Costa Rica[J]. *Nature*, 2003, **422**(6932): 606-608.
- [6] Liikanen A, Martikainen P J. Effect of ammonium and oxygen on methane and nitrous oxide fluxes across sediment-water interface in a eutrophic lake[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(8): 1287-1293.
- [7] 张立通, 孙耀, 陈爱玲, 等. 对虾养殖中后期虾塘沉积物的硝化与反硝化作用[J]. *渔业科学进展*, 2011, **32**(1): 67-74.
Zhang L T, Sun Y, Chen A L, *et al.* Nitrification and denitrification in sediment of shrimp ponds in the late culture period[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, **32**(1): 67-74.
- [8] 梁书诚, 赵敏, 卢磊, 等. 好氧反硝化菌脱氮特性研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(6): 1581-1588.
Liang S C, Zhao M, Lu L, *et al.* Research advances in denitrogenation characteristics of aerobic denitrifiers[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(6): 1581-1588.
- [9] 魏巍. 微污染水源扬水曝气强化原位生物脱氮特性与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. 6-7.
Wei W. Properties and Experiments of Enhanced in-situ biological nitrogen removal by lifting water and aeration for micro-polluted raw water[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. 6-7.
- [10] Şebnem E. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. *Limnology*, 2008, **9**(2): 135-142.
- [11] 王弘宇, 马放, 苏俊峰, 等. 不同碳源和碳氮比对一株好氧反硝化细菌脱氮性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 968-972.
Wang H Y, Ma F, Su J F, *et al.* Influence of carbon source and C/N ratio on nitrogen removal of aerobic denitrifier[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 968-972.
- [12] Herrman K S, Bouchard V, Moore R H. Factors affecting denitrification in agricultural headwater streams in Northeast Ohio, USA[J]. *Hydrobiologia*, 2008, **598**(1): 305-314.
- [13] Hasegawa T, Okino T. Seasonal variation of denitrification rate in Lake Suwa sediment[J]. *Limnology*, 2004, **5**(1): 33-39.
- [14] Mulholland P J, Helton A M, Poole G C, *et al.* Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading[J]. *Nature*, 2008, **452**(7184): 202-205.
- [15] Kraemer B M, Anneville O, Chandra S, *et al.* Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(12): 4981-4988.
- [16] 王敬富, 陈敬安, 杨永琼, 等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(8): 845-851.
Wang J F, Chen J A, Yang Y Q, *et al.* Physical and chemical characteristics of water in lake Hongfeng during the disappearance of seasonal stratification[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(8): 845-851.
- [17] Anderson J M. Nitrogen and phosphorus budgets and the role of sediments in six shallow Danish Lakes[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1974, **74**: 527-550.
- [18] Wu T F, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Flume simulation of wave-induced release of internal dissolved nitrogen in Taihu Lake, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, **30**(5): 796-805.
- [19] Richey J S, McDowell W H, Likens G E. Nitrogen transformations in a small mountain stream[J]. *Hydrobiologia*, 1985, **124**(2): 129-139.

- [20] 陆佑楣, 曹广品. 长江三峡工程 技术篇[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [21] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 141-144.
Tang T, Li D F, Pan W B, *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(1): 141-144.
- [22] 王慎, 张思思, 许尤, 等. 不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2753-2763.
Wang S, Zhang S S, Xu Y, *et al.* Relationship between the vertical distribution of nutrients and bacterial community structures in sediment interstitial waters of stratified reservoirs with different water temperatures[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2753-2763.
- [23] 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.
- [24] Lueck R G, Mudge T D. Topographically induced mixing around a shallow seamount[J]. Science, 1997, **276**(5320): 1831-1833.
- [25] Boehrer B, Schultze M. Stratification of lakes[J]. Reviews of Geophysics, 2008, **46**(2): RG2005.
- [26] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流华生消机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. 22-23.
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. 22-23.
- [27] 刘欢, 吴超羽, 许伟铭, 等. 珠江河口底边界层湍流特征量研究[J]. 海洋工程, 2009, **27**(1): 62-69, 76.
Liu H, Wu C Y, Xu W M, *et al.* Research on turbulent features of the bottom boundary layer in the pearl river[J]. The Ocean Engineering, 2009, **27**(1): 62-69, 76.
- [28] 邵宇阳, 朱正雷, 张健玮, 等. 波浪作用下太湖梅梁湾口近底部湍流特征[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2016, **52**(1): 125-132.
Shao Y Y, Zhu Z L, Zhang J W, *et al.* Wave induced turbulence characteristics at Meiliang Bay, Taihu lake[J]. Journal of Nanjing University (Natural sciences), 2016, **52**(1): 125-132.
- [29] 王莎. 方形搅拌槽单颗粒临界悬浮时槽底湍流特性[D]. 北京: 北京化工大学, 2014. 16-17.
Wang S. Turbulence characteristics of off-bottom solids suspension in bottom of solid-liquid square stirred tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. 16-17.
- [30] Hammache M, Gharib M. A novel method to promote parallel vortex shedding in the wake of circular cylinders[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1989, **1**(10): 1611-1614.
- [31] Asaeda T, Trung V K, Manatunge J. Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes[J]. Aquatic Botany, 2000, **68**(3): 211-237.
- [32] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(2): 288-295.
- [33] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China[J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(4): 1193-1202.
- [34] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1337-1344.
Zeng M Z, Hang T L, Qiu X P, *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir-Zhoucun Reservoir in North of China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [35] Ma W X, Huang T L, Li X, *et al.* Impact of short-term climate variation and hydrology change on thermal structure and water quality of a canyon-shaped, stratified reservoir[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(23): 18372-18380.
- [36] Fuhrman J A, Steele J A, Hewson I, *et al.* A latitudinal diversity gradient in planktonic marine bacteria[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(22): 7774-7778.
- [37] 李兆钦, 李欣, 孙利元, 等. 刘公岛海洋牧场底层海水溶解氧浓度的变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2019, **50**(1): 86-99.
Li Z Q, Li L, Sun L Y, *et al.* Analysis of the temporal variations of dissolved oxygen concentration in seawater in the bottom of the Liugong island marine pasture[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, **50**(1): 86-99.
- [38] Nix J. Contribution of hypolimnetic water on metalimnetic dissolved oxygen minima in a reservoir[J]. Water Resources Research, 1981, **17**(2): 329-332.
- [39] Kreling J, Bravidor J, Engelhardt C, *et al.* The importance of physical transport and oxygen consumption for the development of a metalimnetic oxygen minimum in a lake[J]. Limnology and Oceanography, 2017, **62**(1): 348-363.
- [40] Wentzky V C, Frassl M A, Rinke K, *et al.* Metalimnetic oxygen minimum and the presence of *Planktothrix rubescens* in a low-nutrient drinking water reservoir[J]. Water research, 2019, **148**: 208-218.
- [41] 朱春灵. 澜沧江小湾水库水环境和氮磷营养盐的时空分异特征初步研究[D]. 昆明: 云南大学, 2013. 1-66.
- [42] 卢少勇, 金相灿, 郭建宁, 等. 沉积物-水系统中氮磷变化与上覆水对藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2169-2173.
Lu S Y, Jin X C, Guo J N, *et al.* Variation of nitrogen and phosphorus concentration in water-sediment system and influence of overlying water on the algae growth[J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2169-2173.
- [43] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨[J]. 环境科学, 2005, **26**(2): 195-199.
Yue W Z, Huang X P. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from pearl river estuary[J]. Environmental Science, 2005, **26**(2): 195-199.
- [44] 向燕, 吴于澄, 刘国锋, 等. 太湖竺山湾沉积物中氨氧化原核生物的垂直分布与多样性[J]. 生态学报, 2010, **30**(6): 1423-1430.
Xiang Y, Wu Y C, Liu G F, *et al.* Vertical distribution and diversity of ammonia-oxidizing prokaryotes in a sediment core from Zhushan Bay, lake Taihu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(6): 1423-1430.
- [45] 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 等. 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2135-2144.
Su Q Q, Liu D F, Ji D B, *et al.* Nutrient distribution characteristics of the sediment-water system in the Xiangxi River during the impoundment of TGR[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2135-2144.
- [46] Gundersen J K, Jorgensen B B. Microstructure of diffusive boundary layers and the oxygen uptake of the sea floor[J].

- Nature, 1990, **345**(6276): 604-607.
- [47] Cheng P D, Zhu H W, Fan J Y, *et al.* Numerical research for contaminant release from un-suspended bottom sediment under different hydrodynamic conditions [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2013, **25**(4): 620-627.
- [48] Zhu H W, Cheng P D, Zhong B C, *et al.* Hydrodynamic effects on contaminants release due to resuspension and diffusion from sediments[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, **25**(5): 731-736.
- [49] 雷沛, 张洪, 王超, 等. 沉积物-水界面污染物迁移扩散的研究进展[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1489-1508.
Lei P, Zhang H, Wang C, *et al.* Migration and diffusion for pollutants across the sediment-water interface in lakes: a review [J]. Journal of Lake Science, 2018, **30**(6): 1489-1508.
- [50] 李邵龙. 水体垂向扰动条件下溶质在沉积介质中的迁移研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. 1-69.
Li S L. Solute transport in porous sediment under a vertical water disturbance[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. 1-69.
- [51] 梁东. 鸣翠湖沉积物营养盐污染特征及氮磷释放模拟研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017. 1-42.
- Liang D. Pollution characteristics of sediment nutrients and simulation study of nitrogen and phosphorus release in Mingcui Lake[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017. 1-42.
- [52] 王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2336-2344.
Wang Y R, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2336-2344.
- [53] 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 等. 沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1423-1430.
Jin Z F, Gong J L, Shi Y L, *et al.* Nitrate source identification and nitrification-denitrification at the sediment-water interface [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1423-1430.
- [54] Smith M S, Tiedje J M. The effect of roots on soil denitrification [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, **43**(5): 951-955.
- [55] Seitzinger S P. Linkages between organic matter mineralization and denitrification in eight riparian wetlands [J]. Biogeochemistry, 1994, **25**(1): 19-39.



CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
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	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)