

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5  
第41卷 第5期



# 目次

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

# 我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律

朱雅<sup>1</sup>, 李一平<sup>1\*</sup>, 罗凡<sup>2</sup>, 李荣辉<sup>3</sup>, 黄列<sup>3</sup>, 程一鑫<sup>1</sup>, 蒋裕丰<sup>4</sup>

(1. 河海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 3. 广西水利科学研究院, 南宁 530023; 4. 南京河海科技有限公司, 南京 210016)

**摘要:** 桉树人工林区水库水体大面积泛黑引发的水质安全问题是目前关注的热点问题之一,我国南方地区尤其是广西南宁市90%以上的饮用水源水库周边都大量种植桉树,且很多都出现不同程度的水体泛黑现象。已有研究表明水库沉积物对上覆水 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$ 和DOC的迁移转化过程起着重要作用,探究水体污染物在沉积物-水界面附近的分布特征与迁移规律对揭示库区泛黑机制具有重要意义。本研究利用柱状泥样分层分析方法和高分辨率原位被动采样技术,于2018年7~12月在我国南方典型泛黑水库天雹水库开展3次实验,分析沉积物中铁、锰、硫化物和有机质的分布特征及季节性变化规律,并重点研究泛黑期沉积物间隙水 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$ 和DOC的剖面分布规律及迁移方向。结果表明:①桉树人工林区水库沉积物中铁和锰含量丰富,远超过全国土壤背景值。表层沉积物中铁、锰和TOC含量随季节同步增加,主要来源于水库周边桉树林区物质(残落物、腐解液和土壤颗粒)的输入与沉降;②桉树人工林区水库泛黑期沉积物间隙水中 $\text{Fe}^{2+}$ ( $16.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )和DOC(36.80%)含量显著高于湖泛体系沉积物( $12.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和10.78%), $\text{Fe}^{2+}/\text{S}^{2-}$ 与 $\text{Mn}^{2+}/\text{S}^{2-}$ 比值均大于300,缺氧条件下沉积物中以铁锰氧化物的还原反应为主;③桉树人工林区水库沉积物中 $\text{Fe}^{2+}$ 扩散通量[ $27.4 \sim 33.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ]分别是太湖、阿哈水库和红枫湖的32.6、4.9和30.8倍,具有更强的 $\text{Fe}^{2+}$ 内源释放能力,且间隙水中 $\text{Fe}^{2+}$ 与DOC( $r > 0.904$ ,  $P < 0.01$ )显著正相关,沉积物中铁还原产物与有机质的络合反应是水库突发性泛黑的重要成因之一。

**关键词:** 南方地区; 桉树; 水库; 泛黑; 沉积物; 扩散通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2247-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.201909255

## Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with *Eucalyptus* Plantation, Southern China

ZHU Ya<sup>1</sup>, LI Yi-ping<sup>1\*</sup>, LUO Fan<sup>2</sup>, LI Rong-hui<sup>3</sup>, HUANG Lie<sup>3</sup>, CHENG Yi-xin<sup>1</sup>, JIANG Yu-feng<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 3. Guangxi Institute of Water Resources Research, Nanning 530023, China; 4. Nanjing Hohai Technology Corporation, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The safety of water quantity and quality caused by large-scale blackwater in reservoirs with *Eucalyptus* plantation is currently a point of great interest. *Eucalyptus* is largely planted in southern China, especially in Nanning, Guangxi, where more than 90% of the drinking water source reservoirs are surrounded by *Eucalyptus*, and different degrees of blackwater often occur in many reservoirs. Recent research has demonstrated that reservoir sediments play an important role in the migration and transformation of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{S}^{2-}$ , and dissolved organic carbon (DOC) in the overlying water. It is of great significance to explore the distribution characteristics and migration rules of pollutants in the sediment-water interface to reveal the mechanism of blackwater in reservoirs. Experiments were carried out three times in a typical blackwater reservoir (Tianbao Reservoir) in southern China from July to December 2018. The distribution characteristics and seasonal variations of iron, manganese, sulfide, and organic matter in sediments were analyzed, focusing mainly on the profile distribution and migration direction of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{S}^{2-}$  and DOC in pore water during blackwater periods. The results showed that: ① The content of iron and manganese in sediments of reservoirs with *Eucalyptus* plantation is high, far exceeding the background value of soil content in China. The content of iron, manganese, and total organic carbon (TOC) in the surface sediments increases simultaneously, mainly caused by the input and settlement of the material (litter, decomposed liquids, and soil particles) in the *Eucalyptus* forest around the reservoir. ② The concentration of  $\text{Fe}^{2+}$  ( $16.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) and the content of DOC (36.80%) in pore water during the blackwater period are significantly higher than those in Taihu Lake during the black bloom ( $12.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 10.78%). The mean concentrations of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  are more than 300 times higher than that of  $\text{S}^{2-}$ , and the reduction conditions in the sediments are dominated by iron and manganese oxides. ③ The diffusion flux of  $\text{Fe}^{2+}$  is  $27.4 \sim 33.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , which is 32.6, 4.9, and 30.8 times higher than those of Taihu Lake, Aha Reservoir, and Hongfeng Lake, respectively. This implies

收稿日期: 2019-09-27; 修订日期: 2019-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779072, 51579071, 51569006, 51809102); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405203, 2016YFC0401703)

作者简介: 朱雅(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为湖库富营养化机制,E-mail: 836674553@qq.com

\* 通信作者,E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

strong  $\text{Fe}^{2+}$  release ability from sediments to the overlying water. As a positive correction exists between  $\text{Fe}^{2+}$  and DOC, the complex reaction between  $\text{Fe}^{2+}$  and organic matter is one of the most important causes of blackwater in reservoirs with *Eucalyptus* plantation.

**Key words:** southern China; *Eucalyptus*; reservoir; blackwater; sediment; diffusion flux

桉树原产于澳洲,是全球生长速度最快、轮伐周期短和经济效益最高(最快 2~3 a 成材)的树种之一,已被 120 多个国家或地区大规模引种,其种植面积已超过全球人工林总面积的 1/3<sup>[1]</sup>,是世界人工林的重要组成部分,但近些年来,桉树种植带来的生态环境问题日益突显,人工林区水库水体大面积泛黑引发的水质安全问题更是目前关注的重要问题之一<sup>[2]</sup>. 广西壮族自治区地处我国南部,是国内最早引种桉树的省(区)之一,也是目前桉树覆盖面积和种植数量最大的省(区),种植区域涵盖南宁和北海等十余座城市. 我国南方尤其是广西地区水库众多,南宁市 90% 以上的饮用水源水库周边都大量种植桉树,且很多都出现不同程度的水体泛黑现象<sup>[3]</sup>,水库水体呈现黑褐色或棕黄色且有异味,对水库周边居民的生活饮用水安全构成了严重的威胁<sup>[4]</sup>.

水质恶化现象在我国水域频发<sup>[5]</sup>,其中城市河渠黑臭<sup>[6]</sup>、河湖富营养化<sup>[7]</sup>和海洋赤潮<sup>[8]</sup>较为常见. 水体颜色变化通常是判断水质恶化现象的主要标志之一<sup>[7]</sup>. 桉树人工林区发生的黑水现象一般表现为林区地表径流及洼地等小型水体变黑. 桉树残落物中有机质(尤其是单宁酸)含量高,在降雨的冲刷下首先聚集在林区低洼处,南方地区高温、多雨和湿润气候加速洼地中黑水的形成<sup>[9]</sup>,随着降雨量及林区径流的增加,洼地黑水及桉树凋落物被携入林区周边水库,分解消耗大量溶解氧使得水体水质下降. 杨钙仁<sup>[9]</sup>的研究发现桉树林内洼地和河道等水体的黑水常常暴发在夏季高温多雨时期,而我国南方深水水库水体泛黑却发生在冬季降温时期<sup>[10]</sup>.

美国和澳大利亚等国家地域广阔、水资源开发率较低,周边种植桉树人工林的水库有限,所以已有研究仅关注了洼地、溪水及河道等水体泛黑事件<sup>[11~13]</sup>,而对桉树人工林周边水库泛黑的研究仍不足. 李一平等<sup>[10]</sup>在对桉树林区水库泛黑成因的研究中发现水库泛黑现象是水体铁、锰、硫化物和有机质(单宁酸)之间的一系列反应造成的,胡玲玲等<sup>[14]</sup>通过室内模拟实验发现桉树种植区水库沉积物对水体中铁、锰和 DOM 含量影响显著,且水体硫化物主要源于沉积物. 沉积物是水库水体中各种污染物的“储存空间”,当上覆水溶解氧和温度等环境条件动态变化时,表层沉积物中的大量活性污染物极易在沉积物-水界面间进行不间断地迁移扩散<sup>[15, 16]</sup>. 已有研究表明,水库泛黑演变过程中,受水温分层和氧

化还原环境的影响,沉积物中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{S}^{2-}$  有着不断累积和向上覆水扩散的风险<sup>[10]</sup>. 然而早期主动采样方式(分层切样)对沉积物的破坏性较大,桉树人工林区水库泛黑期沉积物-水界面处  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{S}^{2-}$  的扩散方向未得到实验数据加以证明,沉积物-水界面处  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{S}^{2-}$  的扩散方向及其对水库水体泛黑的贡献方式需要进一步研究.

本文以广西南宁市天雹水库为研究对象,监测其沉积物中铁、锰、硫化物和有机质(TOC)含量的分布特征及季节性变化规律,采用高分辨率原位被动采样技术(DGT 和 Peeper)获取沉积物间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$  和有机质(DOC)的剖面分布规律,并计算各离子在沉积物-水界面处的扩散通量,通过揭示桉树人工林区水库沉积物  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$  和 DOC 的释放规律及其对泛黑现象的贡献途径,以期对桉树人工林周边水库泛黑机制提供一定的科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

天雹水库(TB, 22° 52' 15.84" ~ 22° 53' 16.51" N, 108° 13' 31.33" ~ 108° 14' 9.37" E)是广西壮族自治区南宁市可利江的源头(图 1),属城市供水潜在功能区,水面面积 0.733 km<sup>2</sup>,最大水深 19.2 m,集雨面积 50.8 km<sup>2</sup>,总库容 1 360 万 m<sup>3</sup>. 天雹水库处于湿润的亚热带季风气候带,夏季高温持续时间长,雨量充沛,年均气温 21.6℃,降雨集中于 5~9 月,年

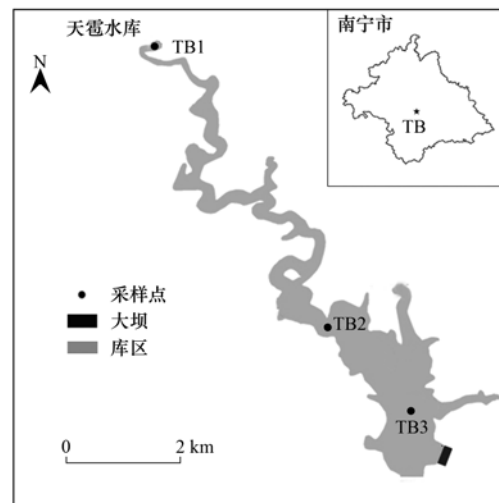


图 1 南宁市天雹水库及采集点示意

Fig. 1 Locations of Tianbao Reservoir in Nanning City and sampling sites in the reservoir



平均降雨量1 304.2 mm,入库流量主要来源于降雨.该水库属单次混合型热分层水库,热分层持续时间长(3~11月),混合时间短.水库集雨区内桉树种植面积高达72%,砍伐历史超过10年.近4年来,天雹水库均在冬季出现突发性“泛黑”现象,主库区“泛黑”现象最为明显.

1.2 样品采集

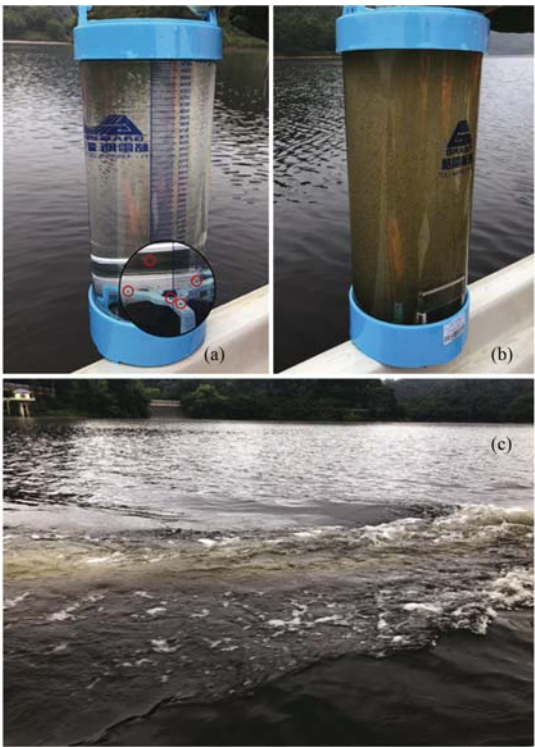
本研究于2018年7月(夏季)、11月(秋季)和12月(冬季)这3个时期进行采样,结合库区桉树种植密度和自然地理特点,选取位于水库库首的TB1采样点(22°52′53.87″N,108°13′4″E,水深为3 m)、位于主库区入口的TB2采样点(22°52′40.36″N,108°13′41.73″E,水深为14 m)和位于库尾坝前的TB3采样点(22°52′12″N,108°14′22.46″E,水深为18 m)(图1),利用重力式采泥器(奥地利,UWITEC)采集沉积物样柱,采集的样柱高度均大于20 cm,同时期用多参数水质分析仪(美国,YSI EXO2)现场检测水体水温( $T$ )和溶解氧( $DO$ ).由于TB1处水深较浅且周围桉树种植较少,水体未发生黑水现象,设为对照组.采样点断面均远离取水口,受取水口出流和入库径流的影响小,理化性质较为稳定.

夏季与秋季采集的沉积物样柱,按照0~1、1~2、2~3、3~4、4~6和6~10 cm的切样方法对其进行分层后,分别装入密封袋中,贴好标签,低温保存,带回实验室分析.冬季采集的沉积物样柱,立即用橡胶塞塞紧泥柱管底和用保鲜膜密封泥柱管两端,防止样品与空气接触而发生氧化或水分蒸发.

冬季采样时,气温骤降11.4℃,主库区已出现“泛黑”现象,此时水体呈黑褐色、透明度极低[图2(c)].为减小采样对沉积物-水界面的扰动,用采水器采集沉积物以上0.5 m处的底层水样[图2(a)],水样中有较多的黑色颗粒状悬浮物,根据目视比色法<sup>[17]</sup>可以将其划分为Ⅱ级(水体略呈土黄色、略浑浊).用采水器对沉积物进行扰动时,水体颜色加深且悬浮物含量显著增加[图2(b)],处于Ⅳ级浅黑阶段.

1.3 样品分析

冬季沉积物采集后低温保存运回实验室,实验室温度设置为与库底相同的15℃,为避免发生扰动将其固定于泥柱架上并保证其垂直放置.泥柱静置2 d后,将已去氧的HR-Peeper插入沉积物后立即密封管口,次日再将AgI DGT(原理与准备过程参照文献<sup>[18]</sup>)插入沉积物中并密封,实验过程记录装置投放时间和每4 h泥柱上覆水温度.待AgI DGT装置投放24 h后,同时取出DGT和HR-Peeper并用去离子水迅速冲洗,然后将DGT装置装入湿润的自封



(a)无扰动;(b)重扰动;(c)水面  
图2 天雹水库泛黑期水体和施加外力扰动的底层水样(TB3)  
Fig. 2 Blackwater and bottom water samples disturbed by external force in Tianbao Reservoir(TB3)

袋并将Peeper间隙水样转移至离心管,密封冷藏保存待分析.放置结束后,采集表层0~2 cm的沉积物,利用烘干法测定沉积物含水率.沉积物样品检测指标和方法见表1,间隙水样品检测指标和方法见表2.

| Table 1 Detection methods of sediment samples |                  |             |
|-----------------------------------------------|------------------|-------------|
| 检测指标                                          | 检测方法             | 文献或规范       |
| 铁                                             | 原子吸收光度法          | [19]        |
| 锰                                             | 王水提取-电感耦合等离子体质谱法 | HJ 803-2016 |
| 硫化物                                           | 亚甲基蓝分光光度法        | HJ 833-2017 |
| TOC                                           | 重铬酸钾氧化-分光光度法     | HJ 615-2011 |

| Table 2 Detection methods of pore-water samples |                    |      |
|-------------------------------------------------|--------------------|------|
| 检测指标                                            | 检测方法               | 文献   |
| Fe <sup>2+</sup>                                | 邻菲罗啉微孔板分光光度计法      | [20] |
| Mn <sup>2+</sup>                                | 电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS | [21] |
| S <sup>2-</sup>                                 | 电脑密度成像计量(CID)技术    | [18] |
| DOC                                             | 顺序注射-紫外线在线氧化分光光度法  | [22] |

1.4 数据处理

各离子在沉积物-水界面的扩散通量 $F_0$  [ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ]计算公式<sup>[23]</sup>如下:

$$F_0 = F_w + F_s = -D_w(\partial c/\partial x_w)_{x=0} - \Phi D_s(\partial c/\partial x_s)_{x=0} \tag{1}$$

式中, $F_w$ 表示离子从沉积物到上覆水的扩散通量,

$F_s$  表示离子从上覆水到沉积物的扩散通量,  $(\partial c / \partial x_w)_{x=0}$  和  $(\partial c / \partial X_s)_{X=0}$  分别表示上覆水和沉积物中各离子在沉积物-水界面处的浓度梯度, 本文选用沉积物-水界面上和下 10 mm 范围内进行线性拟合求导而得,  $D_w$  和  $D_s$  分别表示离子在上覆水和沉积物中的扩散系数.  $D_w$  是利用 Stokes-Einstein 方程对稀溶液中溶质扩散系数  $D_0$  进行温度校正而得,  $D_s$  是利用  $D_w$  和孔隙度推导得出<sup>[23]</sup>, 在 18℃ 时,  $D_0$  ( $\text{Fe}^{2+}$ )、 $D_0$  ( $\text{Mn}^{2+}$ ) 和  $D_0$  ( $\text{S}^{2-}$ ) 别取  $5.82 \times 10^{-6}$ 、 $5.75 \times 10^{-6}$  和  $6.95 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[24]</sup>.  $\Phi$  是沉积物孔隙度, 换算公式<sup>[25]</sup> 如下:

$$\Phi = W\rho_s / [(1 - W)\rho_w + W\rho_s] \quad (2)$$

式中,  $W$  是沉积物含水率,  $\rho_w$  和  $\rho_s$  分别是上覆水和沉积物的平均密度.

图形的绘制和曲线拟合使用 Origin 2018 软件, 数据相关性分析使用 SPSS 23 软件.

## 2 结果与分析

### 2.1 水体和沉积物基本理化性质

天雹水库库首 TB1 水深仅 3m, 全年未出现水温分层现象, 而深水区 (TB2 和 TB3) 水温和溶解氧垂向的季节性变化明显, 且 2 个采样点  $T$  和 DO 变化趋势具有相似性. 以 TB3 采样点为例 (图 3), 夏季水体 7 ~ 16 m 形成稳定的“温跃层”, 表层水温为 30.2℃, 底层水温波动较小并维持在 15℃ 附近, 此时底层 DO 小于  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 处于严重缺氧环境, 秋季“温跃层”下移至 10 ~ 15 m, 底层水体 DO 为  $0.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 仍然处于缺氧条件. 冬季因气温骤降, 表层水温由 25.0℃ 降至 17.4℃, 水体热分层结构失稳, 同时中上层水体 DO 浓度显著降低而底层 DO 浓度由  $0.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上升至  $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 说明水体已发生垂向混合.

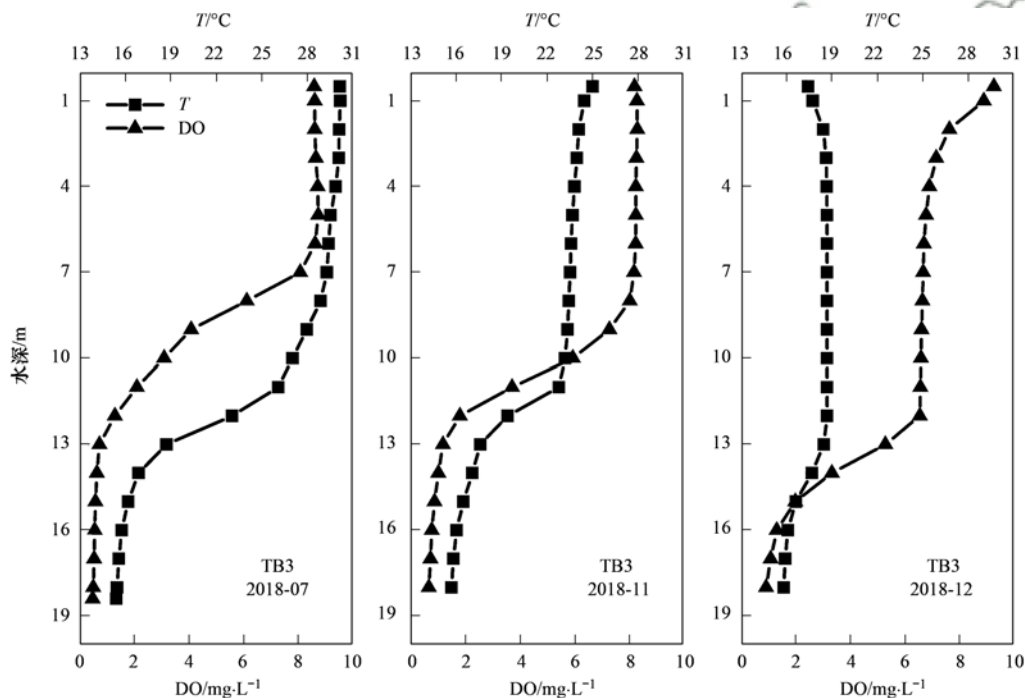


图3 天雹水库水温和溶解氧垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of  $T$  and DO in Tianbao Reservoir

天雹水库沉积物的物质含量随深度和季节不断变化, 3 个采样点沉积物铁、锰和 TOC 均表现为表层高于底层、秋季累积量大于夏季的趋势. 以 TB3 采样点为例 (图 4), 沉积物中铁和锰含量最高, 分别为  $34\,500 \sim 64\,200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $650 \sim 1\,870 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中锰含量远超过全国土壤背景值 ( $603 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[26]</sup>. 秋季沉积物 TOC 平均含量 (质量分数) 为 3.26%, 是夏季 (2.59%) 的 1.25 倍, 可能原因是秋季降雨量丰富, 携大量桉树凋落物进入库底<sup>[10]</sup>, 导致表层沉积物 TOC 含量增加. 两个季节沉积物硫化物含量差异显著, 夏季硫化物含量在深层

沉积物中达到最大值 ( $9.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 而秋季表层含量远大于深层, 最大值为  $26.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 约为深层沉积物的 3.1 倍, 可能是秋季有机物大量输入导致沉积物表层厌氧还原条件增强, 加快了  $\text{SO}_4^{2-}$  的还原反应, 更易释放大量的  $\text{S}^{2-}$ , 从而使得表层沉积物中硫化物含量升高. Pearson 相关性分析表明: 夏季 (秋季) 铁与锰、TOC 均呈显著正相关, 相关系数分别为 0.64 (0.84) 和 0.67 (0.76), 说明水库热分层期沉积物中铁与锰、TOC 累积具有同步性, 而硫化物与铁、锰、TOC 的相关系数分别为  $-0.095$  (0.501)、 $0.542$  ( $-0.017$ ) 和  $0.039$  (0.673), 秋季



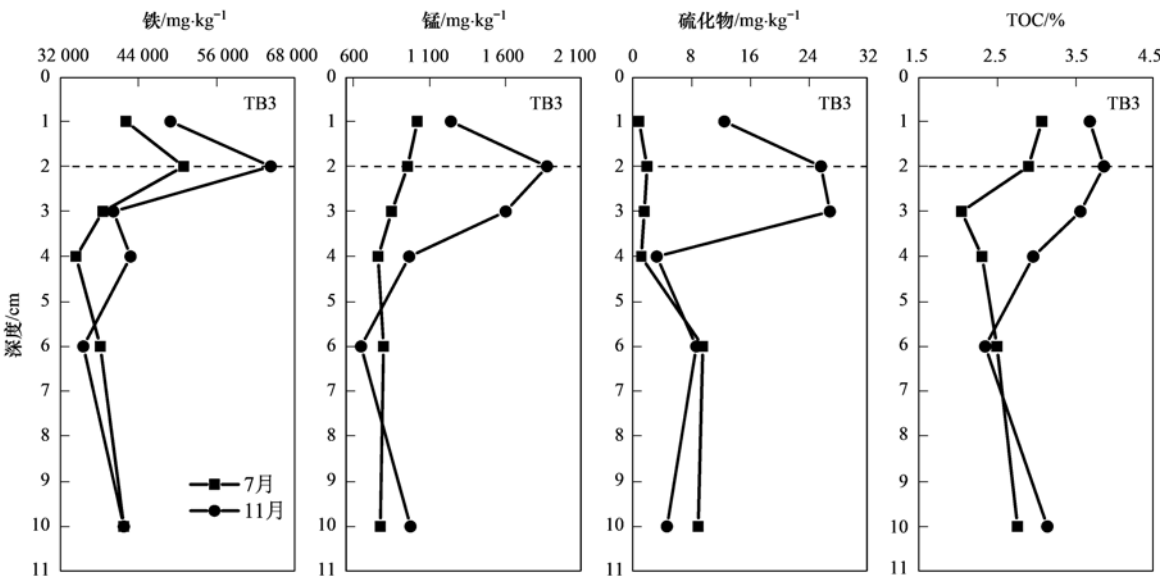


图 4 沉积物铁、锰、硫化物和 TOC 垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of iron, manganese, sulfide, and TOC in sediment

沉积物硫化物和 TOC 相关性较夏季增强,但铁、锰和硫化物的垂直分布一直未出现高度的相关性。

2.2 间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  剖面分布规律及其沉积物-水界面处扩散规律

天雹水库泛黑期沉积物间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  浓度剖面分布如图 5 (a) 和 5 (b) 所示. TB1、TB2 和 TB3 采样点的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度均在沉积物-水界面处突增,分别在 -15、-25 和 -25 mm 处达到第一个峰值点,且不同采样点间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  峰值浓度不一,其中 TB2 和 TB3 处浓度较高,分别为  $18.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $16.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,较太湖湖泛期沉积物  $\text{Fe}^{2+}$  释放情况 ( $12.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 更为强烈<sup>[27]</sup>. TB2 和 TB3 采样点沉

积物间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度整体高于 TB1,说明缺氧还原条件下库区沉积物中  $\text{Fe}^{2+}$  向上覆水释放的风险较大。

TB1、TB2 和 TB3 采样点上覆水  $\text{Mn}^{2+}$  平均浓度分别为 0.33、4.77 和  $5.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,间隙水中的平均浓度分别为 4.48、7.24 和  $7.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,TB1 采样点  $\text{Mn}^{2+}$  浓度从上至下逐渐增加,与  $\text{Fe}^{2+}$  的变化趋势差异较大,尤其在界面以下 35 ~ 130 mm 范围内. TB2 和 TB3 间隙水-上覆水剖面的  $\text{Mn}^{2+}$  浓度波动较小,在沉积物较深处 (-65 mm 和 -40 mm) 达到最大值,这与阿哈水库沉积物中铁锰还原分带顺序不一致<sup>[28]</sup>,可能原因是泛黑期水库热分层失稳引

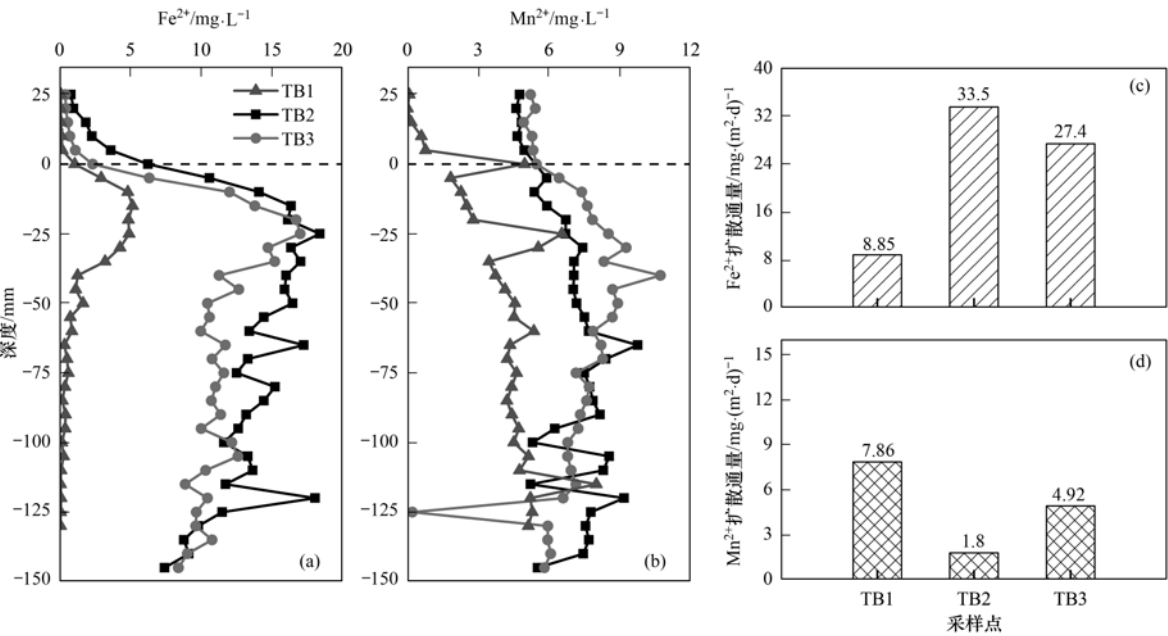


图 5 泛黑期沉积物间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  浓度剖面分布及扩散通量

Fig. 5 Vertical distribution and diffusion flux of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  in pore water during blackwater

起间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  向上迁移,  $\text{Fe}^{2+}$  迅速被氧化沉淀而  $\text{Mn}^{2+}$  可以继续向上层扩散<sup>[29]</sup>, 导致沉积物-水界面附近  $\text{Mn}^{2+}$  浓度梯度消失。

利用 Fick 第一定律[公式(1)]对 3 个采样点  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  的扩散通量进行计算, 计算结果如图 5 (c) 和 5(d) 所示.  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  在各采样点均具有由沉积物向上覆水中释放的潜力, TB2 和 TB3 沉积物  $\text{Fe}^{2+}$  释放过程强烈, 分别为  $\text{Mn}^{2+}$  扩散通量的 18.6 倍和 5.6 倍, 而 TB1 沉积物  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  扩散通量差异不大, 分别为  $8.85 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $7.86 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ .

2.3 间隙水  $\text{S}^{2-}$  剖面分布规律及其沉积物-水界面处扩散规律

天甯水库泛黑期沉积物间隙水  $\text{S}^{2-}$  浓度剖面分布如图 6(a) 所示. 3 个采样点沉积物  $\text{S}^{2-}$  浓度剖面分布趋势存在显著差异, TB2 和 TB3 间隙水中  $\text{S}^{2-}$  浓度随深度下移而缓慢上升, 在沉积物 25 ~ 120 mm 范围内波动较小. 对于 TB1 处沉积物, 间隙水  $\text{S}^{2-}$  浓度的剖面趋势是随深度下移先快速增加, 达到峰值后逐渐减少, 该点在沉积物 15 ~ 60 mm 范围内达到  $0.032 \sim 0.0427 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 超过 TB2 和 TB3 对应深度的浓度。

沉积物-水界面处  $\text{S}^{2-}$  扩散通量结果表明[图 6 (c)], 各点  $\text{S}^{2-}$  均呈现自沉积物向上覆水释放的趋势, 其中 TB1 处  $\text{S}^{2-}$  扩散通量更高 [ $0.038 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ], 可能原因是 TB1 采样点水深较浅 (3 m), 在沉积物较深处达到缺氧条件且  $\text{Fe}^{2+}$  浓度极低, 使其间隙水中  $\text{S}^{2-}$  浓度较高. TB2 和 TB3 采样点界面处  $\text{S}^{2-}$  扩散通量与  $\text{Fe}^{2+}$  情况不一致, 可能原因是 TB2 和 TB3 处间隙水  $\text{Fe}^{2+}/\text{S}^{2-}$  和  $\text{Mn}^{2+}/\text{S}^{2-}$  平均浓度比值均大于 300, 间隙水中  $\text{S}^{2-}$  的释放受到抑制<sup>[30]</sup>, 水库底层缺氧环境下沉积物中铁锰氧化物的还原反应占主导作用。

2.4 间隙水 DOC 剖面分布规律

DOC 含量可用于表征溶解性有机质 (DOM) 含量<sup>[31]</sup>. 沉积物间隙水 DOC 含量剖面分布表明[图 6 (b)], TB1、TB2 和 TB3 处沉积物 DOC 含量均呈现出界面以上较低, 界面以下逐渐增加的趋势, 分别在

沉积物 -15、-35 和 -35 mm 处出现峰值点, 峰值含量分别为 16.30%、42.80% 和 36.80%. 3 个采样点界面以下间隙水 DOC 平均含量依次为 10.30%、33.97% 和 30.86%, 其中 TB2 和 TB3 大于太湖湖区表层沉积物有机质的平均含量 (10.78%)<sup>[32]</sup>. 同时 TB2 和 TB3 间隙水 DOC 含量是 TB1 对应深度的 2 倍以上, 且在沉积物界面附近有明显的突变点, 说明主库区沉积物 (TB2 和 TB3) 较源头点有更多的外源有机质输入和沉降。

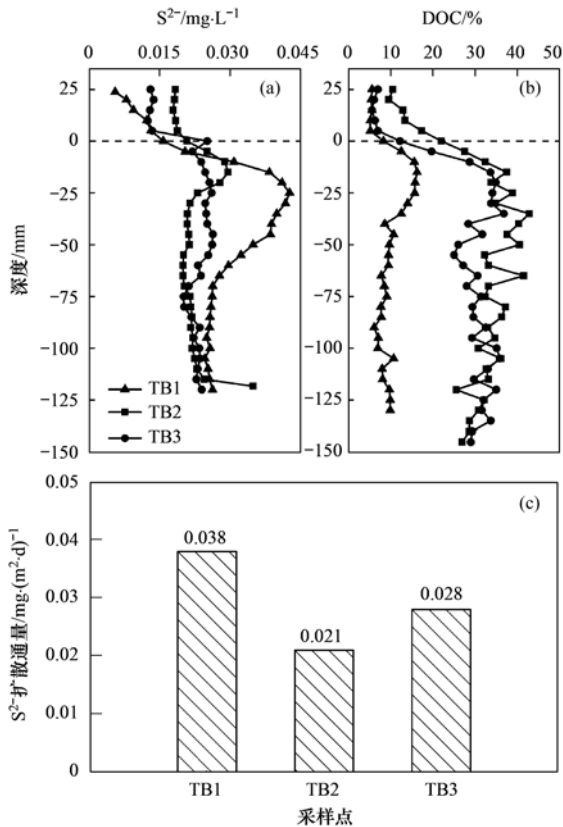


图 6 泛黑期沉积物间隙水  $\text{S}^{2-}$  和 DOC 剖面分布及扩散通量  
Fig. 6 Vertical distribution and diffusion flux of  $\text{S}^{2-}$  and DOC in pore water during the blackwater

对各采样点沉积物间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$  和 DOC 进行相关性分析 (表 3), 结果表明 3 个采样点间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  与 DOC ( $r > 0.904$ ,  $P < 0.01$ ) 和  $\text{S}^{2-}$  ( $r > 0.526$ ,  $P < 0.01$ ) 均呈显著正相关, 说明间隙水  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$  和 DOC 的扩散具有同步性. TB1 处  $\text{Mn}^{2+}$  与  $\text{S}^{2-}$  浓度之间的相关性较强, 与 DOC 含量之间相

表 3 沉积物间隙水  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$  和 DOC 的相关性分析<sup>1)</sup>

| Table 3 Correlation analysis of $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{S}^{2-}$ , and DOC in pore water |                  |                  |                 |     |                  |                  |                 |     |                  |                  |                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----|------------------|------------------|-----------------|-----|------------------|------------------|-----------------|-----|
| 点位和指标                                                                                                         | TB1              |                  |                 |     | TB2              |                  |                 |     | TB3              |                  |                 |     |
|                                                                                                               | $\text{Fe}^{2+}$ | $\text{Mn}^{2+}$ | $\text{S}^{2-}$ | DOC | $\text{Fe}^{2+}$ | $\text{Mn}^{2+}$ | $\text{S}^{2-}$ | DOC | $\text{Fe}^{2+}$ | $\text{Mn}^{2+}$ | $\text{S}^{2-}$ | DOC |
| $\text{Fe}^{2+}$                                                                                              | 1                |                  |                 |     | 1                |                  |                 |     | 1                |                  |                 |     |
| $\text{Mn}^{2+}$                                                                                              | -0.007           | 1                |                 |     | 0.643 **         | 1                |                 |     | 0.553 **         | 1                |                 |     |
| $\text{S}^{2-}$                                                                                               | 0.650 **         | 0.573 **         | 1               |     | 0.526 **         | 0.215            | 1               |     | 0.830 **         | 0.746 **         | 1               |     |
| DOC                                                                                                           | 0.904 **         | 0.257            | 0.759 **        | 1   | 0.919 **         | 0.595 **         | 0.286           | 1   | 0.936 **         | 0.501 **         | 0.824 **        | 1   |

1) \* 表示在 0.05 水平 (双尾) 相关性显著, \*\* 表示在 0.01 水平 (双尾) 相关性显著



关性极弱( $r=0.257$ ), TB2 和 TB3 间隙水中  $\text{Mn}^{2+}$  与 DOC 呈正相关, 相关系数分别为 0.595 和 0.501。

### 3 讨论

#### 3.1 热分层期

水库水温分层效应使库底 DO 传输受阻, 加之底栖生物呼吸和有机物降解耗氧, 底层水体迅速转变为缺氧环境并持续, 进而对沉积物中物质转化过程有着显著影响<sup>[33]</sup>。铁、锰和硫是沉积物氧化-还原体系的敏感元素, 桉树人工林区水库沉积物中铁和锰含量丰富, 其铁含量约为太湖沉积物的 1.6 倍<sup>[34]</sup>。在水库热分层引起的库底缺氧环境下[图 7(a)], 沉积物铁锰被还原溶解并向表层和间隙水中迁移, 随着季节的变化, 秋季 0~2 cm 沉积物 Fe 和 Mn 含量较夏季显著增加, 且秋季表层 TOC 含量为夏季的 1.5 倍, 但深层沉积物中 Fe、Mn 和 TOC 含量波动较小, 这是由于库区周边桉树的砍伐期通常在降雨丰沛的秋季<sup>[9]</sup>, 降雨径流携大量桉树残落物和富含铁锰的土壤颗粒输入水库<sup>[10]</sup>, 导致表层沉积物铁和锰含量进一步增加, 此外桉树叶浸泡分解过程释放出大量有机物(如单宁酸)使得沉积物表层 TOC 含量增加<sup>[35]</sup>。同时夏季和秋季沉积物铁与锰、TOC 均呈显著正相关, 说明库区沉积物 Fe、Mn 和 TOC 都主要源于桉树人工林区物质(残落物、腐解液和土壤颗粒)的输入及沉降。沉积物硫化物含量较少但波动大, 夏季深层硫化物含量高于表层, 而秋季表层硫化物是深层的 3.1 倍, 可能原因是秋季有机物大量输入导致沉积物表层厌氧还原条件增强, 促进了  $\text{SO}_4^{2-}$  的还原反应<sup>[30]</sup>, 从而使得表层沉积物中硫化物含量升高, 且秋季沉积物硫化物与 TOC 的相关性较夏季增强( $r=0.673 > 0.039$ ), 说明桉树残落物的输入对硫化物的生成起到促进作用。

#### 3.2 混合期

深水水库热分层结构的改变, 对水体环境和沉

积物中污染物迁移过程的影响显著<sup>[33]</sup>。冬季桉树人工林区水库分层结构被破坏, 温跃层消失触发“泛黑”现象, 采集的底层水样[图 2(b)]常温有氧放置 2 h 后, 黑色悬浮物变成黄褐色, 但仍有微量黑色颗粒存在。水库深水区沉积物间隙水中 DOC 与  $\text{Fe}^{2+}$  ( $r > 0.919$ )、 $\text{Mn}^{2+}$  ( $r > 0.501$ ) 之间相关性极强,  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{S}^{2-}$  呈正相关( $r > 0.526$ ), 同时沉积物间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{S}^{2-}$  均表现为自沉积物向上覆水释放的趋势, 由此可推测黑色悬浮物可能是  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  与有机质(单宁酸)络合形成的<sup>[36]</sup>, 或是  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{S}^{2-}$  结合形成黑色 FeS 后被悬浮颗粒吸附造成的<sup>[30]</sup>。由于主库区沉积物间隙水中  $\text{Fe}^{2+}/\text{S}^{2-}$  浓度比值大于 300,  $\text{S}^{2-}$  的释放过程受到抑制<sup>[30]</sup>, 且  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  与有机质络合形成的黑色悬浮物不稳定, 在有氧条件下变成黄褐色沉淀<sup>[36]</sup>, 说明黑色悬浮物可能是铁锰还原产物与有机质络合形成的, 伴有少量 FeS 颗粒物生成并稳定存在。

桉树人工林区水库突发性泛黑的形成机制如下[图 7(b)]: 泛黑初期水温分层失稳, 但库底仍处于严重缺氧( $\text{DO} = 0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 且沉积物-水界面处  $\text{Fe}^{2+}$  扩散通量极高, 促使  $\text{Fe}^{2+}$  不断向上覆水补给, 在进入有氧环境后快速被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ , 高浓度的  $\text{Fe}^{3+}$  通过络合作用被 DOC 吸附使得水体呈现棕黄色<sup>[37]</sup>, 且与桉树叶浸泡释放的单宁酸反应生成深色单宁酸铁沉淀<sup>[10, 35]</sup>, 这些深色物质由于垂向混合被传输至上层水体, 使得水体色度增加, 此外沉积物受到水体扰动后, 表层黑色颗粒(FeS)再悬浮将增加水体“泛黑”程度。另一方面水库沉积物中  $\text{Mn}^{2+}$  浓度较高且存在自沉积物向上覆水扩散的趋势, 但  $\text{Mn}^{2+}$  不易被氧化沉淀而具有较强迁移性<sup>[14, 29]</sup>, 随着库区泛黑现象的持续,  $\text{Mn}^{2+}$  在向上迁移过程被氧化成黑色  $\text{MnO}_2$  或与 DOC 反应生成络合物是可能的致黑途径<sup>[38]</sup>, 由于泛黑期监测数据的不足,  $\text{Mn}^{2+}$  的具体致黑过程有待进一步验证。

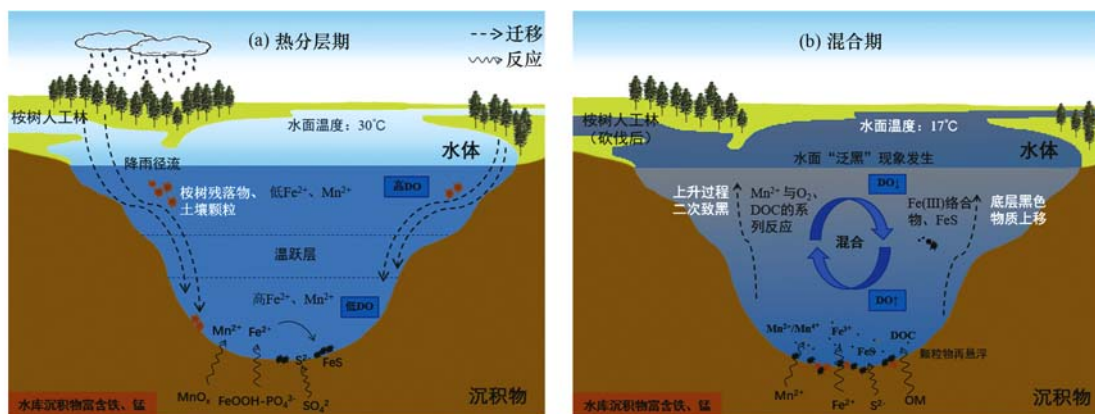


图7 桉树人工林区水库突发性泛黑形成机制

Fig. 7 Mechanism of “blackwater” occurrence in the reservoirs with *Eucalyptus* plantation

与其他泛黑湖库(太湖、红枫湖和阿哈水库)相比(表4),桉树人工林区水库沉积物具有更高的 $\text{Fe}^{2+}$ 扩散通量,分别是太湖、阿哈水库和红枫湖的32.6、4.9和30.8倍,而间隙水中 $\text{S}^{2-}$ 的扩散通量小于太湖,且剖面浓度垂向波动不大,前人研究发现太湖沉积物界面附近 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{S}^{2-}$ 在垂向分布上呈现高度一致性<sup>[18, 39]</sup>,天雹水库没有呈现相似的规律,这与天雹水库沉积物中极高 $\text{Fe}/\text{S}$ 比值抑制 $\text{S}^{2-}$ 的释放有关。桉树人工林区泛黑与太湖“湖泛”不同的是,太湖因藻类聚集而产生的有机质使 $\text{Fe}^{2+}$ 增加,并与厌氧还原状态下生成的 $\text{S}^{2-}$ 结合形成致黑物质<sup>[27]</sup>,而桉树人工林区水库桉树凋落物的大量输入增加了沉积物中有机质(尤其是单宁酸),这类有机质本身能影响水体色度<sup>[35]</sup>,在厌氧还原条件下不仅会加快铁锰氧化物的还原,还会与 $\text{Fe}^{2+}$ 发生络合反应产生黑色络合物,且桉树人工林区水库沉积物 $\text{S}^{2-}$ 浓度较低,缺氧环境生成的金属硫化物并不是水体泛黑的主因。桉树人工林区水库与其他水质恶化湖库相比最显著的特点是沉积物污染物来源和组成较为复杂,一方面是采伐迹地黑色有机颗粒物随降雨径流冲刷入库,另一方面是已沉积在库底的桉树残落物腐解释放新物质,在厌氧还原条件下与 $\text{Fe}^{2+}$ 络合进一步致黑。由于受桉树人工林区水库泛黑突发性和滞后性的影响及野外实验和技术的限制,沉积物污染物入库转化过程有待进一步研究。

表4 天雹水库与其他湖库沉积物-水界面处扩散通量对比

Table 4 Contraction of diffusion fluxes at the sediment-water interface in Tianbao Reservoir and other reservoirs

| 湖库                   | 扩散通量/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ |                  |                 |
|----------------------|----------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
|                      | $\text{Fe}^{2+}$                                         | $\text{Mn}^{2+}$ | $\text{S}^{2-}$ |
| 天雹水库                 | 27.4 ~ 33.5                                              | 1.8 ~ 4.92       | 0.021 ~ 0.028   |
| 太湖 <sup>[27]</sup>   | 0.87                                                     | — <sup>1)</sup>  | -0.034          |
| 阿哈水库 <sup>[40]</sup> | 5.58                                                     | 44.31            | —               |
| 红枫湖 <sup>[40]</sup>  | 0.89                                                     | 14.49            | —               |

1) “—”表示文章中没有相关数据

## 4 结论

(1)桉树人工林区水库沉积物中铁和锰含量丰富,远超过全国土壤背景值。表层沉积物中铁、锰和TOC含量随季节同步增加,主要来源于水库周边桉树林区物质(残落物、腐解液和土壤颗粒)的输入与沉降。

(2)桉树人工林区水库沉积物间隙水中 $\text{Fe}^{2+}$ ( $16.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )和DOC(36.80%)所占质量分数显著高于湖泛体系沉积物( $12.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和10.78%),且 $\text{Fe}^{2+}/\text{S}^{2-}$ 和 $\text{Mn}^{2+}/\text{S}^{2-}$ 浓度比均大于300,在库底缺氧条件下沉积物以铁锰氧化物的还原反应为主。

(3)桉树人工林区水库沉积物中 $\text{Fe}^{2+}$ 扩散通量为 $27.4 \sim 33.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ,分别是太湖、阿哈水库和红枫湖的32.6倍、4.9倍和30.8倍,具有更强 $\text{Fe}^{2+}$ 内源释放能力,为库区水体泛黑提供了重要的物质基础。

(4)桉树人工林区水库沉积物间隙水中 $\text{Fe}^{2+}$ 与DOC( $r > 0.904, P < 0.01$ )和 $\text{S}^{2-}$ 浓度( $r > 0.526, P < 0.01$ )均呈显著正相关,但 $\text{S}^{2-}$ 的释放能力较弱,沉积物中铁还原产物与有机质络合反应则是水库突发性泛黑的重要成因之一。

## 参考文献:

- [1] 黄承标. 桉树生态环境问题的研究现状及其可持续发展对策[J]. 桉树科技, 2012, 29(3): 44-47.  
Huang C B. The research status and sustainable development countermeasures of *Eucalyptus* ecological environment problems [J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2012, 29(3): 44-47.
- [2] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5142-5152.  
Huang G Q, Zhao Q G. The history, status quo, ecological problems and countermeasures of *Eucalyptus* plantations in Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5142-5152.
- [3] 王贺亚. 基于3S技术的广西典型水库集水区桉树人工林及其生态系统服务功能的时空动态格局研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.  
Wang H Y. Temporal and spatial dynamic pattern of *Eucalyptus* plantation and its ecosystem service in Guangxi typical reservoir watershed [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [4] 杨静学, 黄本胜, 洪昌红, 等. 水库库区桉树轮伐对水土流失的影响研究——以广州水库库区为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 120-126.  
Yang J X, Huang B S, Hong C H, et al. Effects of reservoir area on soil erosion in a *Eucalyptus* rotation: a case study in two reservoirs of Guangzhou [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 47(3): 120-126.
- [5] 李昆, 王玲, 李兆华, 等. 丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1285-1292.  
Li K, Wang L, Li Z H, et al. Spatial variability characteristics of water quality and its driving forces in Honghu Lake during high water-level period [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1285-1292.
- [6] 欧媛, 韩睿明, 李强, 等. 城市河道黑臭底泥对挺水植物光合荧光特性的影响[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 643-648.  
Ou Y, Han R M, Li Q, et al. Impact of black odor sediment on photosynthetic fluorescence of three emergent plant species [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(4): 643-648.
- [7] 范成新. 太湖湖泛形成研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 553-566.  
Fan C X. Progress and prospect in formation of black bloom in Lake Taihu: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(4): 553-566.
- [8] Kirkpatrick B, Kohler K, Byrne M M, et al. Florida red tide knowledge and risk perception: Is there a need for tailored messaging [J]. *Harmful Algae*, 2014, 32: 27-32.
- [9] 杨钙仁. 桉树人工林对林区地表水的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2012.  
Yang G R. Impact of *Eucalyptus* plantation on water yield and



- water quality in the forest catchments [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [10] 李一平, 罗凡, 郭晋川, 等. 我国南方桉树 (*Eucalyptus*) 人工林区水库突发性泛黑形成机理初探 [J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 15-24.
- Li Y P, Luo F, Guo J C, *et al.* Mechanism of "black-water" occurrence in the reservoirs with *Eucalyptus* plantation, southern China [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 15-24.
- [11] Cook R L, Binkley D, Stape J L. *Eucalyptus* plantation effects on soil carbon after 20 years and three rotations in Brazil [J]. Forest Ecology and Management, 2016, **359**: 92-98.
- [12] Whitworth K L, Baldwin D S, Kerr J L. Drought, floods and water quality: drivers of a severe hypoxic blackwater event in a major river system (the southern Murray-Darling Basin, Australia) [J]. Journal of Hydrology, 2012, **450-451**: 190-198.
- [13] Pereira G H A, Jordao H C K, Silva V F V, *et al.* Litter and nutrient flows in tropical upland forest flooded by a hydropower plant in the Amazonian Basin [J]. Science of the Total Environment, 2016, **572**: 157-168.
- [14] 胡玲玲, 倪利晓, 荣诗怡, 等. 广西速生桉种植区水库翻黑水形成原因初步探究 [J]. 环境科技, 2018, **31**(6): 18-24, 48.
- Hu L L, Ni L X, Rong S Y, *et al.* A preliminary study on the formation of black-odor water in Guangxi's reservoirs with *Eucalyptus* plantation [J]. Environmental Science and Technology, 2018, **31**(6): 18-24, 48.
- [15] 范成新. 湖泊沉积物—水界面研究进展与展望 [J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1191-1218.
- Fan C X. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes: a review [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1191-1218.
- [16] 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 Sciences, 2018, **30**(6): 1489-1508.
- [17] 邵世光, 薛联青, 刘成, 等. 藻源性湖泛发生过程的季节差异 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2511-2516.
- Shao S G, Xue L Q, Liu C, *et al.* Seasonal differences in the process of algae-induced black bloom [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2511-2516.
- [18] Ding S M, Sun Q, Xu D, *et al.* High-resolution simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved sulfide: The first observation of their simultaneous release in sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(15): 8297-8304.
- [19] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [20] Xu D, Wu W, Ding S M, *et al.* A high-resolution dialysis technique for rapid determination of dissolved reactive phosphate and ferrous iron in pore water of sediments [J]. Science of the Total Environment, 2012, **421-422**: 245-252.
- [21] Teasdale P R, Batley G E, Apte S C, *et al.* Pore water sampling with sediment peepers [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1995, **14**(6): 250-256.
- [22] Tue-Ngeun O, Sandford R C, Jakmunee J, *et al.* Determination of dissolved inorganic carbon (DIC) and dissolved organic carbon (DOC) in freshwaters by sequential injection spectrophotometry with on-line UV photo-oxidation [J]. Analytica Chimica Acta, 2005, **554**(1-2): 17-24.
- [23] Han C, Ding S M, Yao L, *et al.* Dynamics of phosphorus-iron-sulfur at the sediment-water interface influenced by algae blooms decomposition [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **300**: 329-337.
- [24] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学 [M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [25] Murray L G, Mudge S M, Newton A, *et al.* The effect of benthic sediments on dissolved nutrient concentrations and fluxes [J]. Biogeochemistry, 2006, **81**(2): 159-178.
- [26] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值 [J]. 地学前缘, 2014, **21**(3): 265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(3): 265-306.
- [27] 申秋实, 范成新, 王兆德, 等. 湖泛水体沉积物—水界面  $\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{S}^{2-}$  迁移特征及其意义 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1175-1184.
- Shen Q S, Fan C X, Wang Z D, *et al.* Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\Sigma\text{S}^{2-}$  transportation at sediment-water interface to the black bloom formation [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(6): 1175-1184.
- [28] 康亨, 宋柳霆, 郑晓笛, 等. 阿哈湖和红枫湖沉积物铁锰循环及重金属垂向分布特征 [J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 751-762.
- Kang T, Song L T, Zheng X D, *et al.* Iron and manganese cycling and vertical distribution of heavy metals in sediments of Aha Lake and Hongfeng Lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 751-762.
- [29] 姜欣, 朱林, 许士国, 等. 水源水库季节性分层及悬浮物行为对铁锰迁移的影响——以辽宁省碧流河水库为例 [J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 375-385.
- Jiang X, Zhu L, Xu S G, *et al.* Effects of seasonal stratification and suspended sediment behaviors on the mobilization of manganese and iron in a drinking water reservoir—a case of Biliuhe Reservoir, Liaoning Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(2): 375-385.
- [30] 尹洪斌, 范成新, 李宝, 等. 太湖北部沉积物中铁硫的地球化学特征研究 [J]. 地球化学, 2008, **37**(6): 595-601.
- Yin H B, Fan C X, Li B, *et al.* Geochemical characteristics of iron and sulfur in sediments of northern Lake Taihu [J]. Geochimica, 2008, **37**(6): 595-601.
- [31] 闻丽. 白洋淀植物腐解 DOM 特性及其与重金属相互作用的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- Wen L. The properties and complexation with metals of dissolved organic matter from macrophyte decomposition in Lake Baiyangdian [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [32] 申秋实, 周麒麟, 邵世光, 等. 太湖藻源性“湖泛”水域沉积物营养盐释放估算 [J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 177-184.
- Shen Q S, Zhou Q L, Shao S G, *et al.* Estimation of in-situ sediment nutrients release at the submerged plant induced black bloom area in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(2): 177-184.
- [33] 刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 等. 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2258-2264.
- Liu X Q, Huang T L, Li N, *et al.* Algal bloom and mechanism of hypoxia in the metalimnion of the Lijiahe Reservoir during thermal stratification [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2258-2264.
- [34] 杨文斌, 唐皓, 韩超, 等. 太湖沉积物铁形态分布特征及磷铁相关性分析 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1145-1156.

- Yang W B, Tang H, Han C, *et al.* Distribution of iron forms and their correlations analysis with phosphorus forms in the sedimentary profiles of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1145-1156.
- [35] 伍琪, 任世奇, 项东云, 等. 四种南方常见速生树种凋落叶浸泡实验研究[J]. *生态科学*, 2018, **37**(6): 60-66.
- Wu Q, Ren S Q, Xiang D Y, *et al.* Comparative study on soak characteristic of litters in four different southern fast-growing tree species[J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(6): 60-66.
- [36] 连成叶. 蓝黑墨水字迹褪变机理探讨[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(2): 47-49.
- Lian C Y. Study on color fading mechanism in blue-black ink handwriting[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2008, **24**(2): 47-49.
- [37] Kalff J. 湖沼学——内陆水生态系统[M]. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [38] 陈蕾. 水库沉积物—水界面锰迁移与转化行为研究——以青岛王圈水库为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Chen L. Study on migration and transformation behaviors of manganese across the sediment-water interface of a reservoir: a case study of Wangjuan Reservoir, Qingdao [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [39] Xu D, Chen Y F, Ding S M, *et al.* Diffusive gradients in thin films technique equipped with a mixed binding gel for simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved iron[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(18): 10477-10484.
- [40] 汪福顺, 刘丛强, 灌瑾, 等. 贵州阿哈水库沉积物中重金属二次污染的趋势分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 379-383.
- Wang F S, Liu C Q, Guan J, *et al.* Trend analysis of the recycling of heavy metals in sediments of Aha Lake, Guizhou Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 379-383.





## CONTENTS

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