

## 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5

目次

|                                                                                                                          |                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 北京城区 PM <sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 .....                                                                                | 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)                        |
| 基于时空混合效应模型的京津冀 PM <sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 .....                                                                            | 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)                 |
| 2000~2018 年京津冀城市群 PM <sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 .....                                                                 | 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)                                    |
| 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 .....                                                                       | 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284) |
| 硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 .....                                                                           | 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)        |
| 省会城市不同功能区大气 PM <sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 .....                                                                        | 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)                              |
| 太原市冬季不同污染程度下 PM <sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 .....                                                                     | 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)                            |
| 郑州市冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评价 .....                                                                            | 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)                            |
| 淄博市冬季 PM <sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析 .....                                                                     | 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)                  |
| 承德市 PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价 .....                                                                     | 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)             |
| 珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 .....                                                                                                 | 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)  |
| 华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 .....                                                                                               | 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)                          |
| 基于模式过程分析技术天津地区 PM <sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 .....                                                                          | 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)                        |
| 基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 .....                                                                                         | 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)                                       |
| 基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 .....                                                                                                    | 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)                                  |
| 基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 .....                                                                                        | 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)                |
| 基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 .....                                                                                        | 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)                   |
| 基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 .....                                                                                             | 石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)                     |
| 重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 .....                                                                                     | 曾景海, 王灿 (2436)                                               |
| 黄河流域水污染风险分区 .....                                                                                                        | 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)                                |
| 黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 .....                                                                                              | 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)                         |
| 黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 .....                                                                                                  | 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)                            |
| APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 .....                                                                               | 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)                       |
| 河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 .....                                                                                        | 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)                                         |
| 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 .....                                                                                          | 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)                                |
| 洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 .....                                                                                                | 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)                                |
| 富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 .....                                                                                                 | 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)                            |
| 基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 .....                                                                                    | 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)           |
| 暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 .....                                                                                            | 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)                         |
| 鄱阳湖流域水葫芦 ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) 对水体微塑料的吸附截留效应 .....                                                             | 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)                          |
| 太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价 .....                                                                                                 | 刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)                            |
| 骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 .....                                                                                               | 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)                        |
| 太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 .....                                                                                                | 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)                                      |
| 辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 .....                                                                                          | 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)                           |
| 面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 .....                                                                                           | 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)                       |
| 微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 .....                                                                                               | 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)                               |
| 白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 .....                                                                                          | 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)            |
| 人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 .....                                                                                      | 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)                              |
| 鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 .....                                                                                                | 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)                                |
| 负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A .....                                                                 | 符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)                               |
| 磁性 Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 催化 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... | 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)                                 |
| 两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 .....                                                                                                 | 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)                            |
| AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 .....                                                                                       | 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)                   |
| 三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 .....                                                                              | 卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)                                    |
| 污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 .....                                                                                       | 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)                                         |
| 基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 .....                                                                                       | 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)                                          |
| 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 .....                                                                                             | 陈航, 王颖, 王澍 (2719)                                            |
| 典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 .....                                                                                             | 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)                            |
| 两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 .....                                                                                            | 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)                           |
| 基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 .....                                                                                               | 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)                            |
| 紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 .....                                                                                           | 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)                              |
| 不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 .....                                                                                        | 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)                   |
| 木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氮挥发的影响 .....                                                                                       | 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)                                    |
| 生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 .....                                                                                     | 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)                                 |
| 戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 .....                                                                                        | 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)         |
| 模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 .....                                                                                      | 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)       |
| 中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 .....                                                                                                 | 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)                                     |
| 《环境科学》征订启事 (2293)                                                                                                        |                                                              |
| 《环境科学》征稿简则 (2426)                                                                                                        |                                                              |
| 信息 (2585, 2672, 2708)                                                                                                    |                                                              |

# 人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响

高悦<sup>1,2</sup>, 黄廷林<sup>1,2\*</sup>, 李楠<sup>1,2</sup>, 齐允之<sup>3</sup>, 司凡<sup>1,2</sup>, 杨斌<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 3. 西安水务集团黑河金盆水库管理公司, 西安 710401)

**摘要:** 水库水体分层是导致底层水体厌氧, 产生内源污染的重要原因, 人工强制混合充氧可以使分层水体提前实现完全混合, 当秋冬季气温低于混合水温时, 停止混合充氧系统水体仍可自发地持续进行混合, 极大地延长了底层水体及沉积物的好氧周期。上述阶段中, 人工强制混合期底层水体温度逐渐升高直至完全混合, 自然混合期混合水体温度持续下降, 溶解氧保持在  $7.84 \sim 9.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。为研究人工诱导水体提前混合对水源菌群及有机污染物代谢的影响, 以西安金盆水库为研究对象, 在原位监测水质指标的基础上, 采用高通量 DNA 测序技术和 Biolog 技术分析细菌群落组成及其代谢活性。结果表明, 持续自然混合期金盆水库优势菌门为放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria), 二者相对丰度之和占细菌群落的 60.9% ~ 66.2%。放线菌门 (Actinobacteria) 中的优势菌为 *CL500-29\_marine\_group* (15.96%), 其次为 *hgcl\_clade* (9.25%)。水库水体在完全混合初期, 受温度和溶解氧升高影响, 细菌活性相对较高, 有机污染物指标高锰酸盐指数和溶解性有机碳 (DOC) 去除效果显著; 混合后期, 水温逐渐由  $14.04^\circ\text{C}$  下降至  $6.77^\circ\text{C}$ , 细菌代谢活性逐渐降低。冗余分析表明, 影响细菌群落组成和代谢活性的主要因素为水温和溶解氧。

**关键词:** 金盆水库; 诱导混合; 细菌代谢活性; 群落组成; 影响因素

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2624-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108200

## Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir

GAO Yue<sup>1,2</sup>, HUANG Ting-lin<sup>1,2\*</sup>, LI Nan<sup>1,2</sup>, QI Yun-zhi<sup>3</sup>, SI Fan<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Xi'an Water Group Heihe Jinpen Reservoir Management Company, Xi'an 710401, China)

**Abstract:** The stratification of reservoir water is an important cause of anaerobic bottom water and endogenous pollution. Artificial destratification can induce the water of deep reservoirs to enter the mixing stage in advance. When the temperature in autumn and winter is lower than that of the mixed water, the water can continue to mix spontaneously after the system is stopped, which greatly extends the aerobic cycle of the bottom water and sediment. In the above stage, the temperature of the bottom water in the artificial mixing period gradually increases until it is completely mixed. In the natural mixing period, the temperature of the mixed water continues to drop, and the dissolved oxygen level continues to be maintained at  $7.84 \sim 9.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . In order to study the influence of the artificially-induced mixing process of reservoir water on bacteria and the metabolism of organic pollutants, samples were taken in the Xi'an Jinpen Reservoir. On the basis of in-situ monitoring of water quality indexes, we used high-throughput DNA sequencing technology and Biolog technology to analyze the bacterial metabolic activity and community composition. The results showed that the dominant phyla were Actinobacteria and Proteobacteria, and the sum of their relative abundances accounted for 60.9% - 66.2% of the bacterial community. The dominant bacterial genus in Actinobacteria was *CL500-29\_marine\_group* (15.96%), followed by *hgcl\_clade* (9.25%). In the early stage of the mixing period, affected by high temperature and dissolved oxygen, the bacterial activity was relatively high, and the removal effect of the permanganate index and dissolved organic carbon was significant. In the late stage of mixing, the temperature of the mixed water gradually dropped from  $14.04^\circ\text{C}$  to  $6.77^\circ\text{C}$ , and the bacterial metabolic activity gradually decreased. Redundancy analysis showed that the main factors affecting community composition were water temperature and dissolved oxygen.

**Key words:** Jinpen Reservoir; induced mixing; bacterial community metabolism; community structure; influence factors

细菌群落是水生态系统中的重要组成部分, 作为有机化合物的主要分解者和矿化者, 菌群可以将有机污染物 (如碳、氮、磷、硫等有机营养物质) 降解和矿化成无机盐, 对水体的净化起到关键作用<sup>[1-3]</sup>。细菌对外界环境条件的改变较为敏感, 水体的温度、溶解氧 (DO)、营养盐水平等理化因子的改变均能影响细菌的活性和结构<sup>[4-6]</sup>。例如, 水体 DO 环境可以通过改变细菌的代谢途径来影响细菌

的生长, 温度的增加会显著加快细胞中生物化学反应的速率和生长速率<sup>[7]</sup>。水体大多数细菌的最佳生存温度为  $15 \sim 20^\circ\text{C}$ , 而对于北方深水型水库, 底部

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979217); 陕西省重点研发计划项目 (2019ZDLSF06-03)

作者简介: 高悦 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水源水库细菌群落演替及水质改善, E-mail: gaoyue@xauat.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

水体温度常年维持在  $8^{\circ}\text{C}$  以下, 因此适当提高底部水体温度可以强化细菌活性, 进而加强对有机污染物的削减作用<sup>[8]</sup>.

扬水曝气系统 (water-lifting aerators, WLAs) 通过底部直接曝气和气弹提升的形式, 强制上下层水体进行热交换, 致使下层水体温度不断上升, 上层水体温度不断降低, 最终实现整个水体达到完全混合 ( $\Delta T < 1^{\circ}\text{C}$ ) 的持续好氧状态<sup>[9,10]</sup>. 人工诱导水库水体提前混合使得底层水体温度和溶解氧均得到提高, 生物群落结构和功能对环境变化进行快速响应, 因而该技术在破坏水体分层的同时对水体菌群具有一定的调节作用, 这对保障良好的水质和健康的生态系统至关重要<sup>[11]</sup>. 目前对水体自然演变过程中细菌群落结构特征已有较多研究, 王禹冰等<sup>[12]</sup>研究了密云水库水体细菌群落的垂直分布特征, 表明水体热分层在一定程度上会影响细菌丰度和多样性. Morrison 等<sup>[13]</sup>对美国格兰德湖的水体微生物研究表明, 整个库区在混合期细菌群落组成相似, 而分层期在垂向上演变成两种不同类型的群落分布. 相较于自然演变过程菌群的研究, 人工干预混合过程菌群及其对有机污染物代谢情况的影响鲜见报道, 有必要展开进一步研究加以阐明.

随着现代分子生物学技术的发展, 高通量测序技术被广泛应用于土壤、水体和沉积物等不同生境中的细菌多样性的研究<sup>[14,15]</sup>. 这种技术通过对微生物群落的 DNA 进行测序, 对比数据库中已有的序列从而获得微生物的多样性数据<sup>[16]</sup>. 同时 Biolog 技术能够鉴别水环境中细菌群落结构时空变化, 为水体微生物群落的多样化研究提供更多样化的信息<sup>[17,18]</sup>. 本文以金盆水库为例, 采用高通量 DNA 测序技术和 Biolog 技术探究细菌群落组成和代谢活性的演替过程及其驱动因子, 分析人工诱导自然混合过程对水质的改善, 以期对饮用水水源水库水质改善和水库管理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

黑河金盆水库位于陕西省西安市周至县内, 黑河峪口以上约 1.5 km 处, 距西安市 86 km. 水库流域面积  $1481\text{ km}^2$ , 总库容  $2.0\text{ 亿 m}^3$ , 有效库容  $1.77\text{ 亿 m}^3$ . 最大水深 90~105 m, 平均水深 60~95 m. 水库库区共布置了 8 台扬水曝气器 (WLAs), 在水库大坝前 1000 m 内呈梅花形分布, 各台设备间距约为 250~300 m (图 1).

自然条件下, 温度引起的密度分层通常从 3 月持续至 12 月, 直至第二年 1 月才发生完全混合<sup>[19]</sup>.

而人工强制混合通过降低表层水温且缩小上下层水体温差, 诱发水体 11 月就进入混合期. 2020 年金盆水库于 5 月 18 日至 11 月 12 日间歇运行 WLAs. 2020 年 11 月 4 日, 水体表底温差  $0.65^{\circ}\text{C}$ , 提前诱导水体混合, 直至 2021 年 1 月下旬与自然混合相衔接, 延长了水体混合时间.

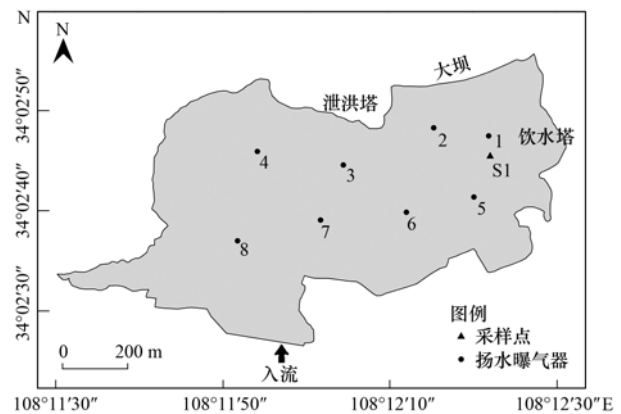


图 1 金盆水库扬水曝气器布置点及采样点分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of the layout and sampling sites of the water-lifting aerators of Jinpen Reservoir

### 1.2 水样采集与水质参数测定

本研究对金盆水库诱导混合期 (2020 年 11 月~2021 年 2 月) 进行水样采集, 用于水体理化因子与细菌群落结构的测定. 在主库区选取靠近 1 号扬水曝气器 50 m 处的采样点, 该采样点位于引水塔取水口前, 能够很好地反映主库区供水水质情况. 采用有机玻璃采样器垂向间隔 10 m 采集水样装入聚乙烯瓶密封及时带回实验室进行溶解性有机碳 (DOC) 和高锰酸盐指数的测定, 具体方法参照文献<sup>[20]</sup>. 在现场采用 HACH Hydrolab-DS5X 型多参数水质测定仪垂向间隔 2~5 m 进行水温、DO 和 pH 值的测定, 频率每周 1 次. 于每月中旬对水库底部细菌群落结构进行取样测定, 频率每月 1 次, 其中混合期初期和混合期末期 (11 月和次年 2 月) 频率为每月 2 次.

### 1.3 水体细菌群落代谢活性分析

细菌群落代谢活性采用 Biolog-Eco 平板法测定 (ECO Microplate, 美国 Matrix Technologies 公司). 在超净工作台中, 将 20 mL 原水倒入已灭菌的 V 型加液槽中, 用 8 排电子移液枪 (Bio-Rad, 美国) 向 Biolog Eco 微平板的每个微孔接入 150  $\mu\text{L}$  水样. 随后将 ECO 板置于聚乙烯盒中, 置于  $(28 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  的恒温培养箱中培养 240 h, 每隔 24 h 测定一次各微孔在 590 nm 波长处的吸光度值. 采样孔平均颜色变化率 (AWCD<sub>590nm</sub>)、McIntosh 指数 ( $U$ ) 和 Shannon 指数 ( $H'$ ) 来表征细菌群落功能多样性, 选取各样本 AWCD 曲线“拐点”处 120 h 育温时间下的吸光度数据进行计算. 其计算方法为: 采样孔平均颜色变化率

(AWCD<sub>590 nm</sub>)计算公式<sup>[21]</sup>.

$$AWCD_{590\text{ nm}} = \sum (A_i - R)/31 \quad (1)$$

式中,  $A_i$  为 ECO 微平板每一组中各孔在波长 590 nm 下的吸光度值,  $R$  为对照空白在波长 590 nm 下的吸光度,若  $A_i - R \leq 0$  则记为 0. 香农多样性指数 ( $H'$ )<sup>[21]</sup>:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中,  $P_i = (A_i - R) / \sum (A_i - R)$ , 即第  $i$  孔的相对光密度与每组总的相对光密度比值. McIntosh 多样性指数 ( $U$ )<sup>[21]</sup>:

$$U = \sqrt{\sum (A_i - R)^2} \quad (3)$$

式中,  $A_i$  和  $R$  含义同上.

1.4 水体细菌群落结构分析

将 1 L 水样过 0.22 μm 的滤膜,滤膜装入 10 mL 灭菌的离心管中于 -80℃ 保存. 高通量测序采用 E. Z. N. A.® Soil DNA Kit(Omega Bio-tek, Norcross, GA, U. S.) 提取基因组 DNA,使用 NanoDrop2000 测定 DNA 浓度. 对 16S rRNA 基因的 V3-V4 高变区片段进行 PCR 扩增,引物序列为 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'). 测序在上海美吉生物医药科技有限公司的 Illumina MiSeq PE300 平台进行.

1.5 数据处理

使用 UPARSE 软件 (<http://drive5.com/>

uparse/, version 7.1),根据 97% 的相似度对序列进行 OTU 聚类并剔除嵌合体. 利用 RDP classifier (<http://rdp.cme.msu.edu/>, version 2.2)对每条序列进行物种分类注释,比对 Silva 16S rRNA 数据库 (v138),设置比对阈值为 70%. 采用软件 Mothur (version v. 1.30.1)进行细菌群落多样性指数的计算,包括 ACE 指数、Chao 1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数以及覆盖率. 采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 分析细菌种群与环境因子之间的相关性. 采用 OriginPro (Version 8.5.1) 进行柱状图和热图的绘制.

2 结果与分析

2.1 水质评估

WLAs 运行结束时水体表底垂向温差 < 1℃, 水体进入持续自然混合期,混合水体温度受气温变化影响,水体温度由 14.04℃ 持续降低至 6.77℃,共持续 106 d. 期间,水体 DO 变化范围为 7.84 ~ 9.86 mg·L<sup>-1</sup>, pH 值变化范围为 7.60 ~ 8.48,呈弱碱性. 较高的 DO 及温度有利于微生物对水体有机质的降解,持续自然混合过程中混合水体高锰酸盐指数和 DOC 显著降低(表 1),其中,高锰酸盐指数由 (3.98 ± 0.18) mg·L<sup>-1</sup> 降至 (2.94 ± 0.07) mg·L<sup>-1</sup>, 削减率为 26.13%, ρ(DOC) 由 (2.82 ± 0.14) mg·L<sup>-1</sup> 降至 (1.24 ± 0.25) mg·L<sup>-1</sup>, 削减率为 50.03%.

表 1 取样点水体理化指标范围<sup>1)</sup>

Table 1 Range of physical and chemical indexes of water at sampling point

| 指标                        | 日期(年-月)            |                   |                 |                 |
|---------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                           | 2020-11            | 2020-12           | 2021-01         | 2021-02         |
| 水温/℃                      | 13.83(13.11~14.04) | 10.20(9.37~11.35) | 7.68(7.06~8.57) | 6.85(6.77~6.94) |
| DO/mg·L <sup>-1</sup>     | 8.46(8.14~8.72)    | 8.09(7.84~8.56)   | 9.18(8.57~9.78) | 9.72(9.48~9.86) |
| 高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup> | 3.66(3.05~3.98)    | 3.36(3.12~3.53)   | 3.19(2.92~3.54) | 2.72(2.50~2.99) |
| ρ(DOC)/mg·L <sup>-1</sup> | 2.48(2.16~2.82)    | 1.50(1.35~1.62)   | 1.18(1.02~1.33) | 1.40(1.06~1.57) |
| pH 值                      | 7.83(7.60~8.07)    | 8.05(7.78~8.48)   | 7.96(7.82~8.19) | 7.98(7.88~8.11) |

1) 括号外表示平均值,括号内为(最小值~最大值)

2.2 细菌代谢活性及其碳源利用率

微生物对单一碳源的利用强度可由培养 120 h 的 Biolog Eco 板平均每孔颜色变化率(AWCD<sub>590nm</sub>)来表征,即 Biolog-Eco 测试板孔溶液吸光值平均变化率,可有效反映微生物的代谢活性<sup>[22]</sup>. 功能多样性指数如表 2 所示. 持续自然混合初期 AWCD 值为 1.43 ± 0.08. 伴随着持续混合,细菌代谢活性开始降低,进入 1 月后,AWCD 值降至 1 以下(0.94 ± 0.25). Mc Intosh 多样性指数、Shannon 指数和 AWCD 值呈现出相同的波动变化趋势. 为进一步明晰诱导混合期金盆水库细菌群落功能多样性变化,

对各采样时期进行单一碳源热图分析. 图 2 为不同时期水体微生物对碳源的利用. 结果表明,混合状态下细菌群落对 B4(L-天冬酰胺酸)、E3(γ-羟基丁酸)、B3(D-半乳糖醛酸)、D2(D-甘露醇)、D1(吐温 80)、C1(吐温 40)、G1(D-纤维二糖)和 E1(α-环状糊精)的利用较高,对 C3(2-羟苯甲酸)、H2(D, L-α-甘油)、C2(I-赤藻糖醇)、B2(D-木糖)和 G2(葡萄糖-1-磷酸盐)的利用一直较低. 总体来说,整个诱导混合期水体细菌对碳源的偏好一致,表现为对氨基酸类、酯类和酸类的利用程度较高,对多糖类和胺类的利用程度较低.

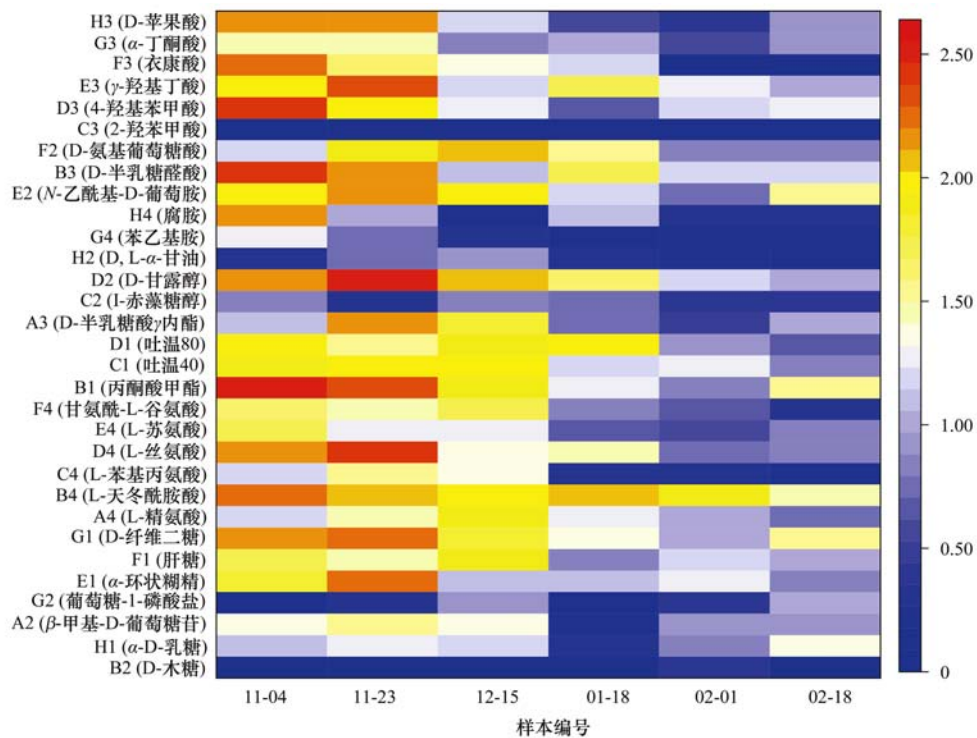


图2 Biolog-ECO板120 h碳源代谢各样本单个碳源利用情况热图分析

Fig. 2 Biolog-ECO board 120 h carbon source metabolism heat map analysis of individual carbon source utilization of each sample

表2 细菌群落功能多样性指数<sup>1)</sup>

| Table 2 Functional diversity indices of bacterial communities |             |             |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 样本编号                                                          | AWCD        | <i>U</i>    | <i>H'</i>   |
| 11-04                                                         | 1.43 ± 0.08 | 9.26 ± 0.15 | 3.34 ± 0.05 |
| 11-23                                                         | 1.36 ± 0.04 | 9.18 ± 0.06 | 3.29 ± 0.03 |
| 12-15                                                         | 1.32 ± 0.10 | 8.07 ± 0.11 | 3.27 ± 0.07 |
| 01-18                                                         | 1.10 ± 0.12 | 7.08 ± 0.08 | 3.23 ± 0.12 |
| 02-01                                                         | 0.94 ± 0.25 | 6.13 ± 0.55 | 3.21 ± 0.07 |
| 02-18                                                         | 0.81 ± 0.09 | 5.18 ± 0.43 | 3.18 ± 0.25 |

1) 表中值为平均值 ± 标准偏差 (*n* = 3)

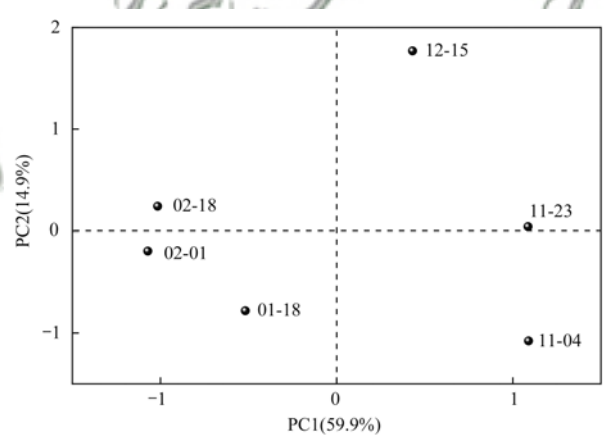


图3 碳源代谢主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of carbon source metabolism

图3为对120 h碳源利用情况进行主成分分析结果,前两个分量解释了总数据变异的74.8%,其中PC1和PC2的方差贡献率分别为59.9%和14.9%。混合初期样本分布较离散,细菌代谢特征差异较大;1月后样本间离散度逐渐减小,细菌代谢特征具有相似性。总体来说,随着水体由诱导混合衔接至自然混合,细菌群落对碳源的利用能力存在差异,且呈现逐步降低的趋势。

2.3 人工诱导混合期细菌群落丰度与多样性

高通量测序结果共得到总序列数306 710,测序的结果覆盖度均大于99%。表3为样品的OTUs数量和α多样性指数。ACE和Chao 1反映样本之间的丰富度,其值越大,则表明细菌群落丰富度越高<sup>[23]</sup>。WLAs刚结束运行时Ace指数和Chao1指数最高,1月下旬后逐渐降低,这表明完全混合初期具有更丰富的细菌群落。Shannon指数和Simpson指数通常被用来评价物种多样性,Shannon指数越高,物种多样

性越好,稳定性越强;Simpson指数越高,群落多样性越低,稳定性越差<sup>[24]</sup>。如表3所示,11月Shannon指数最高且Simpson指数最小,此时水体细菌群落多样性最高。随着时间推移Shannon指数和Simpson指数分别略有减少和增加,整个混合期多样性指数无显著差别。细菌群落的功能多样性指数与结构多样性指数之间也具有相似的变化趋势。

2.4 人工诱导自然混合期细菌群落结构

高通量分析得到的1 462条OTUs,分属于41个门、114个纲、257个目、384个科、594个属和995个种。图4为门水平上的细菌分类,水体中丰度>1%的细菌门共有13类,放线菌门(Actinobacteria)占细菌群落的28.52%~40.34%,为最主要的细菌

表 3 金盆水库混合期底部水体细菌群落多样性指数变化

Table 3 Temporal and spatial variation in bacterial community diversity index during water mixing in the bottom water of Jinpen Reservoir

| 样本编号  | OTUs | 97% 相似度水平  |            |        |           |       |
|-------|------|------------|------------|--------|-----------|-------|
|       |      | Shannon 指数 | Simpson 指数 | ACE 指数 | Chao 1 指数 | 覆盖率/% |
| 11-04 | 725  | 4.70       | 0.022 2    | 1 110  | 1 121     | 99    |
| 11-23 | 692  | 4.52       | 0.026 8    | 1 084  | 1 073     | 99    |
| 12-15 | 678  | 4.21       | 0.029 5    | 1 014  | 974       | 99    |
| 01-18 | 512  | 4.47       | 0.023 4    | 776    | 772       | 99    |
| 02-01 | 467  | 4.07       | 0.036 3    | 714    | 715       | 99    |
| 02-18 | 414  | 4.01       | 0.036 7    | 928    | 720       | 99    |

类群. 其次为变形菌门 (Proteobacteria), 占总细菌群落的 22.76% ~ 33.48%. 整个混合期间, 放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria) 的占比基本保持稳定. 蓝细菌门 (Cyanobacteria) 的占比进入 2 月后逐渐升高, 增至 15.51%, 而硝化螺旋菌门 (Nitrospirae) 的占比有所下降, 由 1.59% 降至 0.01%. 同时, 酸杆菌门 (Acidobacteria) 的占比由 15.51% 下降至 1.52%. 其他被检测到的菌门包括拟杆菌门 (Bacteroidetes)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、厚壁菌门 (Firmicutes)、疣微菌门 (Verrucomicrobia)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、异常球菌-栖热菌门 (Deinococcus-Thermus)、Patescibacteria 和弧菌 (Bdellovibrionota).

(15.96%), 其次为 *hgcl\_clade* (9.25%). 变形菌门 (Proteobacteria) 主要以甲基杆菌属 (*Methylobacter*, 3.01%) 和甲基孢囊菌属 (*Methylocystis*, 2.19%) 为主. 硝化螺旋菌门 (Nitrospirae) 下的 *Nitrospira* 丰度由 1.58% 降至 0.01%. 蓝细菌门 (Cyanobacteria) 下的真核藻类的叶绿体 (*Chloroplast*) 丰度从 4.61% 升高到 12.83%, *Cyanobium\_PCC-6307* 从 0.70% 升高到 2.46%.

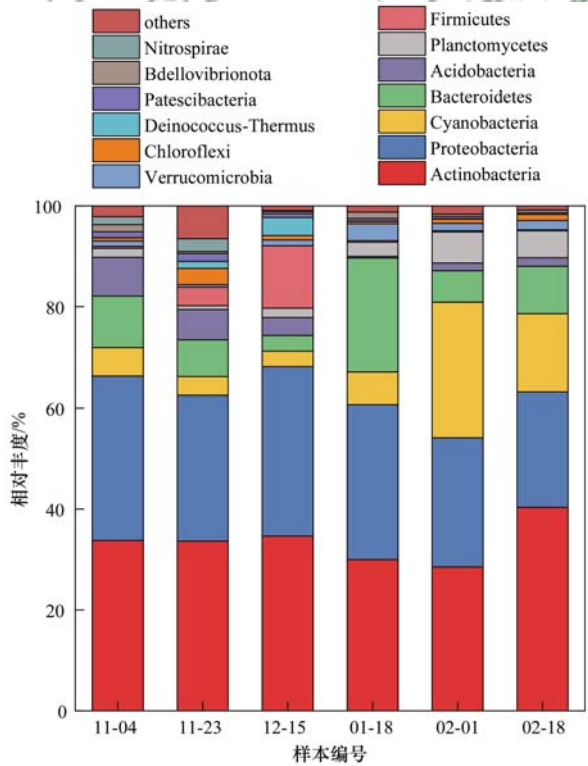


图 4 金盆水库混合期底部细菌群落结构变化

Fig. 4 Changes in bacterial community structure during water mixing in the bottom water of Jinpen Reservoir

对属水平细菌群落组成进一步分析, 分析结果如图 5. 相对丰度最高的是放线菌门 (Actinobacteria) 中的 *CL500-29\_marine\_group*

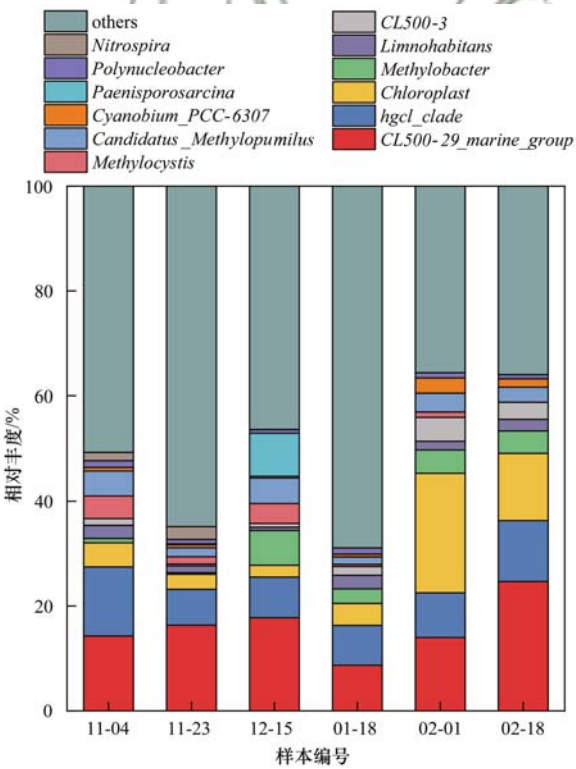


图 5 属水平细菌群落结构变化

Fig. 5 Changes in bacterial community structure at genus level

2.5 细菌群落与环境因子关系

为明确细菌与环境因子的关系, 将属水平与环境因子进行 RDA 分析. 如图 6 所示, 第一主轴 (RDA1) 的贡献率为 43.94%, 第二主轴 (RDA2) 的贡献率为 31.75%. 混合期不同时段细菌的群落结构受不同水质指标调控. 在混合期前期细菌群落结构与 *T*、高锰酸盐指数和 DOC 显著相关, 且 *T* 和 DOC 对 *CL500-29\_marine\_group* 和 *hgcl\_clade* 及

*Nitrospira* 具有较大影响, 对上述细菌具有促进作用. 而混合期后期, DO 和 pH 对细菌群落结构影响显著, 其中 *Polynucleobacter* 与其呈正相关. *Chloroplast* 和 *Cyanobium\_PCC\_6307* 与 DOC 呈正相关. 可见, 高锰酸盐指数、DOC、*T*、DO 和 pH 值均对诱导混合期水体中细菌群落有一定影响, 其中 *T*、DO 和 pH 对其影响最大.

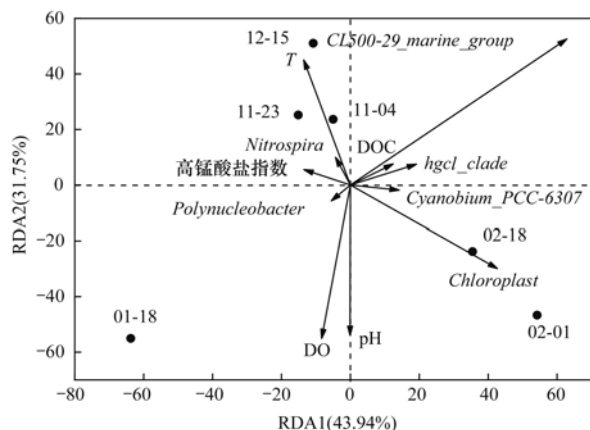


图6 底部水体细菌群落结构与水质参数之间的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of bacterial community structure and water quality parameters in bottled water

### 3 讨论

#### 3.1 细菌群落结构分析

放线菌门 (*Actinobacteria*) 和变形菌门 (*Proteobacteria*) 是金盆水库人工诱导水体混合过程中的主要菌门, 这与大量研究水体细菌群落结构相似<sup>[25, 26]</sup>. 放线菌门 (*Actinobacteria*) 是水体中主要的微生物, 承担水体基本功能, 通过分解有机碳来维持水体水质<sup>[27]</sup>. 其中 *CL500-29\_marine\_group* 在属水平占比最高 (14% ~ 24.69%), 其次为 *hgcl\_clade* (7.61% ~ 13.18%), 与薛银刚等<sup>[28]</sup> 对太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构研究相一致, 说明这两种菌属广泛存在于湖库水体中. *CL500-29\_marine\_group* 可以在有氧条件下利用 DOC<sup>[29]</sup>, *hgcl\_clade* 具有较强的吸收碳水化合物和富氮化合物的遗传能力, 能利用溶解性有机碳, 在碳循环中发挥着重要作用<sup>[30]</sup>, 这与本研究中 DOC 的去除有很大关系. 蓝细菌门 (*Cyanobacteria*) 的占比进入 2 月后逐渐升高, 放线菌门 (*Actinobacteria*) 占比有所下降, Kolmonen 等<sup>[31]</sup> 的研究表明, 蓝藻的大量生长会使得放线菌的数量减少并使其代谢减弱.

冗余分析表明, DO 是细菌群落结构的影响因素之一, 充足的 DO 对维持良好水质和健康的生态系统至关重要<sup>[32, 33]</sup>, 在自然条件下底部水体处于低温低溶解氧状态, 变形菌门 (*Proteobacteria*) 中的优势菌群主要以 *Limnohabitans* 等厌氧菌和微小杆菌

属 (*Exiguobacterium*) 等嗜冷型细菌为主<sup>[34]</sup>, WLAs 运行后, 较高的溶解氧状态为甲基杆菌属 (*Methylobacter*)、甲基孢囊菌属 (*Methylocystis*) 和 *Polynucleobacter* 等好氧型细菌提供了良好的生存环境. 同时扬水曝气系统的持续运行能够促进参与氮元素循环的菌群生长增殖, 硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*) 在诱导混合期维持在同一水平, 进入自然混合期后显著降低, 硝化细菌代谢产生的硝氮和好氧环境为好氧反硝化细菌的生长创造了条件, 在一定程度上促进了水体氮的循环<sup>[35]</sup>. 上述结果表明, 金盆水库细菌群落结构受环境因子调控特征明显. 有研究表明, 金盆水库自然分层期水库垂向水体温度、DO 都表现为“上高下低”的分布规律<sup>[36]</sup>, 扬水曝气技术通过改变水体热分层状态, 对水体环境造成改变, 随之引发细菌群落的响应. 在特定的条件下对环境有最大适应力的物种则会成为优势种<sup>[37]</sup>, 而优势种群又会通过自身的功能与特性去影响水质, 因此扬水曝气技术通过物理及生物双重作用对水质进行改善.

#### 3.2 细菌代谢活性分析

温度是影响细菌生长的重要环境因子. 细菌的新陈代谢能力主要取决于酶的活性, 在一定温度范围内, 酶的活性与温度成正比<sup>[38]</sup>. 水温同时影响水体的初级生产力, 致使溶解性有机质 (DOM) 含量发生改变, 从而对细菌生产力产生间接影响. WLAs 的运行提高了水库底部水体温度和 DO, 增强了水中细菌活性, 促进了细菌对有机物的代谢分解, 从而高锰酸盐指数和 DOC 去除率较高. 人工诱导水体提前混合初期, 细菌总代谢活性保持在相对较高的水平. 后期逐步与自然混合相衔接, 虽然水体溶解氧浓度略有升高, 但是水体水温进一步下降, 细菌代谢活性开始降低. 如图 7 所示随着温度的降低,  $AWCD_{590nm}$  也逐渐降低. 王涵玥<sup>[39]</sup> 的研究表明虽然 WLAs 停止

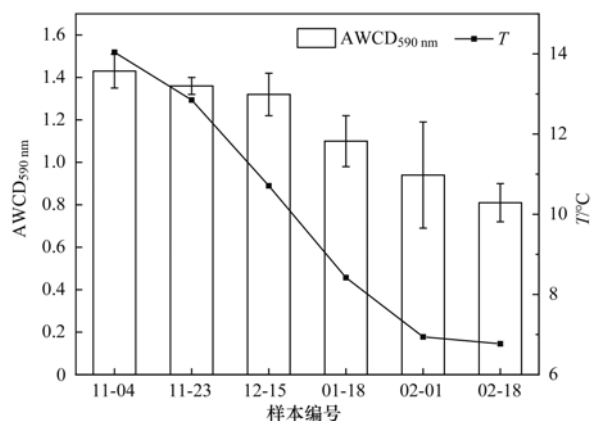


图7  $AWCD_{590nm}$  与水温关系

Fig. 7 Relationship between  $AWCD_{590nm}$  and water temperature

运行后细菌代谢活性稍有回落但仍高于系统运行前. 杨霄<sup>[40]</sup>对周村水库 2015 年 10 月扬水曝气运行后与 2014 年同期细菌群落功能多样性进行对比, 表明扬水曝气作用后的水体细菌群落对 31 种碳源的利用程度比往年同期显著增强. 以上研究结果进一步说明, 通过运行扬水曝气器适当地提升水体底部温度, 对强化细菌活性有着重要意义.

### 3.3 诱导水库水体自然完全混合提前的意义

分层型水库由于底部长期处于厌氧状态, 当底部水中的溶解氧低于  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 沉积物中的氮磷、铁、锰等物质会向水体大量释放, 严重影响水库供水安全<sup>[41, 42]</sup>. 当冬季气温骤降导致热分层结构在短期内失稳时, 会使积聚在底部水体的污染物在水库翻混的过程中造成全层水体污染<sup>[43]</sup>. 因此在分层期通过运行 WLAs, 诱导水体自然完全混合提前, 维持了水体高溶解氧状态, 可以有效抑制沉积物因厌氧导致的污染物释放<sup>[44]</sup>. Zhou 等<sup>[45]</sup>在对金盆水库沉积物中微生物的代谢活性研究发现, 微生物代谢活性不仅随 DO 浓度的增加而增加, 温度的升高同样会提高细菌的代谢活性. 同时天然有机质 (NOM) 的降解和矿化以微生物为主, 温度通过控制酶的活性来影响微生物的代谢活性, 进而加强对 NOM 的降解<sup>[46]</sup>. 因此人工强制诱导混合过程的相对高温和高 DO 状态促进了有机污染物的矿化作用. 同时, 人工诱导混合过程 WLAs 的运行改变了细菌群落的生存环境, 进而使参与各种元素循环的细菌积极发挥作用, 最终实现水库水体生态自我修复功能的恢复及水质的改善<sup>[47]</sup>. 以上结果表明人工诱导自然混合对细菌活性产生影响, 进而对水质改善起到了积极作用.

## 4 结论

(1) WLAs 的运行使底部水温提高了  $7 \sim 8^\circ\text{C}$ , DO 维持在  $7.84 \sim 9.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 水体自然混合提前且持续至翌年 2 月下旬, 混合作用时效延长. 自然混合过程中水库水质得到了持续改善, 混合初期延续了较高的细菌代谢活性, 促进了细菌对水体污染物的降解功能, 高锰酸盐指数和 DOC 削减率分别达 26.13% 和 50.03%.

(2) 人工诱导自然混合过程水体优势类群为放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria), 其相对丰度之和达 60% 以上. 属分类水平上, 相对丰度最高的为 *CL500-29\_marine\_group* 和 *hgcl\_clade*, 变形菌门 (Proteobacteria) 转变为以好氧型细菌甲基杆菌属 (*Methylobacter*) 和甲基孢囊菌属 (*Methylocystis*) 为主.

(3) 扬水曝气的运行使得混合期初期细菌群落的丰度指数 ACE 和 Chao1 以及多样性指数 Shannon 较高, 与自然混合期衔接后逐渐减小. 随着水体水温的进一步降低, 细菌对碳源的利用也逐步降低. 但整个过程中水体细菌对碳源的偏好一致, 对氨基酸类、脂类以及酸类的利用程度较高.

(4) 由冗余分析可知, 在混合期, DO、水温和 pH 等环境因子与细菌群落演替紧密相关. 其中, 混合期前期细菌群落结构与水温、高锰酸盐指数和 DOC 显著相关, 后期主要受到 DO 和 pH 的调控.

### 参考文献:

- [1] Mao Y F, Liu Y, Li H, *et al.* Distinct responses of planktonic and sedimentary bacterial communities to anthropogenic activities: case study of a tributary of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **682**: 324-332.
- [2] Xie G J, Tang X M, Shao K Q, *et al.* Bacterial diversity, community composition and metabolic function in Lake Tianmuhu and its dammed river: effects of domestic wastewater and damming[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112069.
- [3] 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 等. 冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2276-2286.
- [4] Li W B, Yang X, Tian Y N, *et al.* Changes in the bacterioplankton community between "ice" and "water" in the frozen Dali Lake[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2276-2286.
- [4] 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 等. 汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 831-841.
- [5] Han X M, Gong Z L, Yang X M, *et al.* Diversity and function prediction of bacterioplankton under human disturbance in the main stream of the Laoguan River before and after the flood season[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 831-841.
- [5] Yang N, Li Y, Zhang W L, *et al.* Cascade dam impoundments restrain the trophic transfer efficiencies in benthic microbial food web[J]. *Water Research*, 2020, **170**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115351.
- [6] Garcia S L, Salka I, Grossart H P, *et al.* Depth-discrete profiles of bacterial communities reveal pronounced spatio-temporal dynamics related to lake stratification[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2013, **5**(4): 549-555.
- [7] 沈烽, 赵大勇, 黄睿, 等. 南京玄武湖浮游细菌群落结构的季节变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(3): 662-669.
- [8] Shen F, Zhao D Y, Huang R, *et al.* Seasonal variation of bacterioplankton community structure in Xuanwu Lake (Nanjing) and its relationship with environmental factors[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(3): 662-669.
- [8] Zhao L Y, Li N, Huang T L, *et al.* Effects of artificially induced complete mixing on dissolved organic matter in a stratified source water reservoir[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **111**, doi: 10.1016/J.jes.2021.03.024.
- [9] Li N, Huang T L, Li Y, *et al.* Inducing an extended naturally complete mixing period in a stratified reservoir via artificial destratification[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,

- 745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140958.
- [10] Shi J C, Huang T L, Wen G, *et al.* The variation characteristic of sulfides and VOSC in a source water reservoir and its control using a water-lifting aerator [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(4), doi: 10.3390/ijerph13040427.
- [11] 温成成, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- Wen C C, Huang T L, Li N, *et al.* Effects of artificial destratification and induced-natural mixing on water quality improvement in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- [12] 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 等. 水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2745-2752.
- Wang Y B, Wang X Y, Pang S J, *et al.* Water quality characteristics and distribution of bacterial communities during thermal stratification in the Miyun Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2745-2752.
- [13] Morrison J M, Baker K D, Zamor R M, *et al.* Spatiotemporal analysis of microbial community dynamics during seasonal stratification events in a freshwater lake (Grand Lake, OK, USA) [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0177488.
- [14] Zhuang M, Sanganyado E, Xu L, *et al.* High throughput sediment DNA sequencing reveals azo dye degrading bacteria inhabit nearshore sediments[J]. *Microorganisms*, 2020, **8**(2), doi: 10.3390/microorganisms8020233.
- [15] 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 等. 西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3249-3256.
- Liu X D, Huang Y, Wang Y H, *et al.* Structural characteristics of microbial communities in the sediments of the Niyang River in Tibet[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3249-3256.
- [16] 张雅洁, 李珂, 朱浩然, 等. 北海湖微生物群落结构随季节变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3319-3329.
- Zhang Y J, Li K, Zhu H R, *et al.* Community structure of microorganisms and its seasonal variation in Beihai Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3319-3329.
- [17] Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Pollutant removal performance and microbial enhancement mechanism by water-lifting and aeration technology in a drinking water reservoir ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135848.
- [18] Kou L Q, Huang T L, Zhang H H, *et al.* Mix-cultured aerobic denitrifying bacterial communities reduce nitrate: novel insights in micro-polluted water treatment at lower temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **796**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148910.
- [19] Huang T L, Ma Y, Cong H B, *et al.* Application of the technology of water lifting and aeration on improving water quality in a deep canyon reservoir - a case study from northern China [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**(7-9): 1636-1646.
- [20] 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.
- [21] 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 等. 分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3285-3296.
- Yan M M, Chen S N, Huang T L, *et al.* Water quality and bacterial population driving mechanism of algae vertical succession in stratified reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3285-3296.
- [22] Zhang H H, Huang T L, Chen S N, *et al.* Microbial community functional diversity and enzymatic activity in the sediments of drinking water reservoirs, Northwest China[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**(7-9): 1608-1614.
- [23] 杜宛璐, 孙金辉, 麦永湛, 等. 珠江下游浮游细菌群落结构的时空分布特征[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(2): 380-394.
- Du W L, Sun J H, Mai J Z, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of bacterioplankton community structure in the downstream of Pearl River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(2): 380-394.
- [24] 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 等. 深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1141-1150.
- Shang P L, Chen S N, Huang T L, *et al.* Vertical distribution of fungal community composition and water quality during the deep reservoir thermal stratification [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1141-1150.
- [25] Hu Y, Bai C R, Cai J, *et al.* Co-occurrence network reveals the higher fragmentation of the bacterial community in Kaidu River than its tributaries in northwestern China [J]. *Microbes and Environments*, 2018, **33**(2): 127-134.
- [26] Wang X J, Gu J, Gao H, *et al.* Abundances of clinically relevant antibiotic resistance genes and bacterial community diversity in the Weihe River, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(4), doi: 10.3390/ijerph15040708.
- [27] Ghai R, Mizuno C M, Picazo A, *et al.* Key roles for freshwater actinobacteria revealed by deep metagenomic sequencing [J]. *Molecular Ecology*, 2014, **23**(24): 6073-6090.
- [28] 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 等. 太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1151-1158.
- Xue Y G, Liu F, Sun M, *et al.* Community structure and influencing factors of bacterioplankton in spring in Zhushan Bay, Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1151-1158.
- [29] Mohapatra M, Behera P, Kim J Y, *et al.* Seasonal and spatial dynamics of bacterioplankton communities in a brackish water coastal lagoon [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134729.
- [30] dos Reis M C, Bagatini I L, de Oliveira Vidal L, *et al.* Correction: spatial heterogeneity and hydrological fluctuations drive bacterioplankton community composition in an Amazon floodplain system[J]. *PLoS One*, 2020, **15**(1), doi: 10.1371/journal.pone.0228721.
- [31] Kolmonen E, Sivonen K, Rapala J, *et al.* Diversity of cyanobacteria and heterotrophic bacteria in cyanobacterial blooms in Lake Joutikas, Finland [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2004, **36**(3): 201-211.
- [32] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China)[J]. *Water Research*, 2015, **75**: 249-258.
- [33] Wang J T, Fan H B, He X J, *et al.* Response of bacterial communities to variation in water quality and physicochemical conditions in a river-reservoir system[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, **27**, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01541.
- [34] 张晗, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合充氧对分层型水库细菌群落演替的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1732-1739.
- Zhang H, Huang T L, Li N, *et al.* The effect of artificial forced

- mixing and oxygenating on the bacterial community succession in the stratified reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1732-1739.
- [35] Zhou S L, Sun Y, Huang T L, *et al.* Reservoir water stratification and mixing affects microbial community structure and functional community composition in a stratified drinking reservoir[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110456.
- [36] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 819-828.
- Ju T, Huang T L, Ma W X, *et al.* Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 819-828.
- [37] 陈祯, 何聃, 任丽娟. 温度和营养盐水平对淡水浮游细菌群落结构的潜在影响[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2016, **52**(4): 590-600.
- Chen Z, He D, Ren L J. The potential impacts of temperature and nutrient levels on freshwater bacterioplankton community structure[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, **52**(4): 590-600.
- [38] 姜发军, 胡章立, 胡超群. 大鹏湾浮游细菌时空分布与环境因子的关系[J]. *热带海洋学报*, 2011, **30**(1): 96-100.
- Jiang F J, Hu Z L, Hu C Q. Correlation between spatial-temporal distribution of bacterioplankton and environmental factors in the Dapeng Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, **30**(1): 96-100.
- [39] 王涵玥. 扬水曝气系统对分层型水库浮游细菌的调节作用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- Wang H Y. Study on the regulating effect of water-lifting aeration system on planktonic bacteria community in stratified reservoirs[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [40] 杨霄. 分层型水库水体细菌群落演变机制与扬水曝气强化作用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- Yang X. Study on the evolution mechanism of aquatic bacteria community and its enhanced effect by water-lifting aerator in stratified reservoirs[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [41] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征[J]. *水利学报*, 2013, **44**(4): 406-415.
- Ma Y, Guo Q L, Huang T L, *et al.* Response characteristics of water quality to the seasonal thermal stratification in Jin-pen reservoir along the Heihe river, Xi'an city in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(4): 406-415.
- [42] Li N, Huang T L, Mao X J, *et al.* Controlling reduced iron and manganese in a drinking water reservoir by hypolimnetic aeration and artificial destratification[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 497-507.
- [43] 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正. 溶解氧对湖库热分层和富营养化的响应——以枣庄周村水库为例[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1547-1553.
- Qiu X P, Huang T L, Zeng M Z. Responses of dissolved oxygen on thermal stratification and eutrophication in lakes and reservoirs—An example in Zhoucun Reservoir in Zaozhuang City[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1547-1553.
- [44] Ma W X, Huang T L, Li X. Study of the application of the water-lifting aerators to improve the water quality of a stratified, eutrophicated reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **83**: 281-290.
- [45] Zhou Z Z, Huang T L, Gong W J, *et al.* Field research on mixing aeration in a drinking water reservoir: performance and microbial community structure[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(21), doi: 10.3390/ijerph16214221.
- [46] Lindell M J, Graneli W, Tranvik L J. Enhanced bacterial growth in response to photochemical transformation of dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(1): 195-199.
- [47] 周子振. 混合充氧对分层水库水质改善及微生物种群结构调控研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- Zhou Z Z. Study of water quality improvement and microbial community structure regulation of a stratified reservoir by mixing and oxygenation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....                                                                                                         | AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)               |
| Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....                                                                          | FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)    |
| Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....                                            | ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274) |
| Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....                                                                       | TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)         |
| Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....                                                                                                | ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)   |
| Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....                                                         | SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)               |
| Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....                                                  | REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)          |
| Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....                                                                               | YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)             |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....                                                              | BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)                |
| Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....                                                                              | HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)            |
| Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....                                                                                                          | FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)  |
| Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....                                                                                                        | ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)       |
| Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....                                                                                                       | HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)            |
| Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....                                                             | CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)               |
| Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....                                                                                                                                           | YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)              |
| Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....                                                                                    | CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)          |
| Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....                                                                                                               | CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)         |
| Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....                                                                                  | SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)       |
| Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....                                                                                | ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)                                     |
| Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....                                                                                                                                                | ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)           |
| Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....                                                                                                      | LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)                |
| Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....                                                                                                 | WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)             |
| APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....                                                                                  | SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)            |
| Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....                                                                                | XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)                    |
| Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....                                                                           | HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)          |
| Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....                                                                                                                     | HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)         |
| Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....                                                                                                        | ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)         |
| Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....                                                                   | MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)        |
| Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....                                                                      | ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)            |
| Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....                                                                                   | LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)          |
| Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....                                                                                                           | LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)     |
| Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....                                                                                                  | YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)          |
| Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....                                                                                                | CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)          |
| Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....                                                                                          | LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)        |
| Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....                                                                    | XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)               |
| Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....                                                                                                                  | LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)      |
| Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....                           | ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)  |
| Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....                                                                                                           | GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)              |
| Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....                                                                                             | JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)        |
| Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....                                                                        | FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)       |
| Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.4</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> ..... | XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)                |
| Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....                                                                                                                      | JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)        |
| Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....                                                                                                                      | ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)          |
| Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....                       | LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)   |
| Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....                                                                    | LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)                       |
| Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....                                                                  | ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)                   |
| Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....                                                                                                   | CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)                              |
| Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....                                                                                                | ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)          |
| Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....                                               | MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)   |
| Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....                                                                                                                              | WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)         |
| Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....                                                                                       | XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)                     |
| Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....                                      | XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)       |
| Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....                                                             | SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)     |
| Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....                                                                     | GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)           |
| Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....                                                  | HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)        |
| Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....                                                       | WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)        |
| Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....                                                                                                                                  | LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)          |