

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清 (2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾璐杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧 (2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌 (2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩 (2948)
污泥四要素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)
《环境科学》征订启事 (2929) 《环境科学》征稿简则 (2947) 信息 (2646, 2656, 2857)	

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系

王慎¹, 张思思¹, 许尤¹, 官卓宇¹, 杨正健^{2*}, 刘德富^{1,2}, 马骏¹

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 为探究不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布规律及其与细菌群落结构的关系, 运用 16S rRNA 高通量测序技术, 分析了 2018 年 1 月澜沧江小湾、漫湾水库建库后沉积物细菌群落结构特征, 并采用 Cannoco 软件对细菌群落与环境因子关系进行了冗余分析。结果表明, 调查期间小湾水库水体表底温差 3.3℃, 最大温度梯度为 0.2℃·m⁻¹ 属于分层水体, 漫湾表底温差 0.1℃ 属于混合水体。小湾间隙水 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 平均质量浓度分别为 2.233 mg·L⁻¹ 和 0.030 mg·L⁻¹, 漫湾分别为 2.569 mg·L⁻¹ 和 0.016 mg·L⁻¹。间隙水 NH₄⁺-N 在两个水库沉积物中均表现垂向向下增大的趋势, 而 NO₃⁻-N 垂向变化则不明显但均在深层质量浓度最低, 库区间比较来看, 只有 NO₃⁻-N 具有极显著性差异, 其中小湾明显高于漫湾。菌群分类发现, 小湾与漫湾沉积物细菌群落具有相同的优势菌门和优势菌属, 水温分层对间隙水营养盐及细菌群落结构无显著影响。而漫湾相比小湾沉积物中反硝化菌相对丰度更高, 硝化菌和厌氧氨氧化菌相对丰度更低, 同一库区沉积物深层中反硝化菌相对丰度较高, 有机物降解菌、硝化菌、厌氧氨氧化菌和溶磷菌相对丰度较低, 是造成沉积物营养盐库间差异和垂向差异的原因。

关键词: 澜沧江; 分层沉积物; 间隙水; 营养盐; 细菌群落

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2753-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811116

Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures

WANG Shen¹, ZHANG Si-si¹, XU You¹, GUAN Zhuo-yu¹, YANG Zheng-jian^{2*}, LIU De-fu^{1,2}, MA Jun¹

(1. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to study the relationship between the vertical distribution of nutrients and bacterial community structures in sediment interstitial waters of stratified reservoirs with different water temperatures, MiSeq high-throughput sequencing was used to analyze and compare the structural characteristics of sediment bacterial communities after reservoirs were built. Additionally, redundancy analysis (RDA) was used to assess the bacterial communities and environmental factors with Cannoco software. The results showed that the temperature difference between the surface and bottom layer of the Xiaowan Reservoir was 3.3℃, and the maximum thermal gradient was 0.2℃·m⁻¹; thus, it was a typical stratified reservoir. The temperature difference between the surface and bottom layer of the Manwan Reservoir was 0.1℃; thus, it was a typical mixed reservoir. The average concentrations of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in sediment interstitial waters of the Xiaowan Reservoir were 2.233 mg·L⁻¹ and 0.030 mg·L⁻¹, while those of Manwan were 2.569 mg·L⁻¹ and 0.016 mg·L⁻¹, respectively. In the different reservoirs, the concentrations of NH₄⁺-N showed upward trends, and while variation of NO₃⁻-N was not obvious, the content of NO₃⁻-N reached a minimum value in the deep layer. In comparisons between reservoirs, only NO₃⁻-N showed a significant difference, in which Xiaowan had obviously higher concentrations than Manwan. The bacterial community structures in the Xiaowan and Manwan reservoir sediments had the same dominant bacteria at the phylum, class, and genus levels. The differences of water temperature stratification had no significant effect on nutrients and microorganisms in the sediments. Under the influence of other factors, the denitrifying bacteria in the Manwan Reservoir sediments were more abundant than those in the Xiaowan Reservoir, and the nitrifying bacteria and anammox bacteria in the Xiaowan Reservoir sediments were more abundant than those in the Manwan Reservoir. In the same reservoir, the denitrifying bacteria in the bottom of the sediments were more abundant, and the organic degradation bacteria, nitrifying bacteria, anammox bacteria, and phosphate-solubilizing bacteria were less abundant in this zone. These trends contributed to the differences of nutrients vertically in the different reservoirs.

Key words: Lancang River; stratified sediment; interstitial water; nutrient; bacterial community

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709096, 51879099, 91647207, 51779128); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204)

作者简介: 王慎(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水利, E-mail: 511032980@qq.com

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

水库是人类调节和利用水资源的主要工程措施,具有防洪、发电、航运、拦沙等综合效益,但因水库改变了河流原来的水文过程,会对河流水体的水温、溶解氧、营养盐等诸多环境因子产生影响^[1].董世魁等^[2]的研究表明,水坝建设会促进沉积物中细颗粒和有机质质量浓度明显上升,使沉积物组分发生改变.沉积物作为微生物附着的主要介质,是营养物质代谢的重要场所,以往的研究主要集中在沉积物不同类型和空间位置对细菌群落差异的比较,这种差异受气候及地理位置影响较大^[3],其中环境因子对沉积物细菌群落多样性具有显著影响,但对土著菌群落的影响不大^[4].

目前对小湾和漫湾水库的研究主要为水环境和营养盐的分布规律,对沉积物和微生物群落以及两者之间影响关系的研究非常少.朱春灵^[5]的研究发现小湾水库夏季水位 20 m 以上水体温度具有明显分层,营养盐时空分布季节差异明显.李晋鹏等^[6]的研究发现,水坝运行对漫湾库区底栖动物优势组成由群落寡毛纲向昆虫纲发生了转变.本研究选取两种不同水温分层下的水库,通过对采样点沉积物的分层监测和调查,揭示澜沧江干流小湾和漫湾水库建库后沉积物微生物群落结构分布特征,结合间隙水营养盐实测数据分析两者之间的内在联系,并探讨不同分层水库沉积物生化特征及差异,以期日后水库监测和管理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

于 2018 年 1 月在澜沧江流域小湾和漫湾水库进行样品采集,采样点位置如图 1 所示.小湾水库位于中国云南临沧市与大理白族自治州、保山市交界处,水坝建于 2002 年,2010 年投入使用,上游至功果桥水坝,下游至漫湾水坝,系澜沧江中下游河段规划 8 个梯级中的第二级,是澜沧江中下游河段的“龙头水库”,水库正常蓄水位 1 240 m,总库容 $1.51 \times 10^{10} \text{ m}^3$,有效库容 $9.895 \times 10^9 \text{ m}^3$,正常蓄水时水库面积 189.1 km^2 ,为多年调节水库.漫湾水坝位于中国云南省西部云县和景东县交界处的漫湾河口下游 1 km 的澜沧江中游河段上,建于 1986 年,2007 年投入使用,上游至小湾水坝,下游至大朝山水坝,系澜沧江中下游八个梯级水电开发中的第三级,为径流式水坝,水库正常蓄水位 994 m,总库容 $9.2 \times 10^9 \text{ m}^3$,有效库容 $2.57 \times 10^8 \text{ m}^3$,水库面积 23.9 km^2 ,为季调节水库.相比之下,小湾水库具有面积大,容量大等特征,是澜沧江流域梯级水库中典型的大型水库.



图 1 采样点示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

1.2 样品采集与分析

现场采用 TSI-EXO 多参数水质分析仪 (USA) 测定库区水体垂向温度 (WT) 和溶解氧 (DO), 并采用中国水利水电科学研究院水环境研究所研发的柱状采泥器 ($\phi 60 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$) 采集库区沉积物和上覆水样品. 沉积物上方 0 ~ 5 cm 水体作为上覆水样品, 并使用注射器吸取装入 50 mL 聚乙烯瓶. 剩余沉积物按照 0 ~ 2、2 ~ 5、5 ~ 10 和 10 ~ 15 cm 进行分层 (图 2), 装入干净聚乙烯自封袋, 并采用中科院南京土壤研究所研发的 QX-6530 便携式氧化还原电位仪测得分层沉积物氧化还原电位 (ORP).

采样结束后, 于当晚对样品进行预处理. 采用 TDZ5-WS 台式多管架自动平衡离心机, 对沉积物以 $3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 分离间隙水装入 50 mL 聚乙烯采样瓶, 剩余沉积物保存待用; 上覆水经 $3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 后, 取上清液装入 300 mL 聚乙烯瓶. 所有样品使用干冰低温保存带回实验室.

上覆水和间隙水中总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、总磷 (TP) 和正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$) 的质量浓度, 采用文献 [7] 的方法测定, 沉积物总有机碳 (TOC) 质量比采用燃烧氧化-非分散红外吸收法 [8] 测定.

1.3 DNA 提取与测序

使用 E. Z. N. A. Soil DNA 试剂盒 (Omega, USA), 按照试剂盒说明书对沉积物进行总 DNA 提取, 1% 的琼脂糖电泳检测 DNA 是否有降解和杂质. 采用细菌引物序列 CCTACGGGNGGCWGCAG 和 GACTACHVGGG TATCTAATC 对 16S rRNA 基因

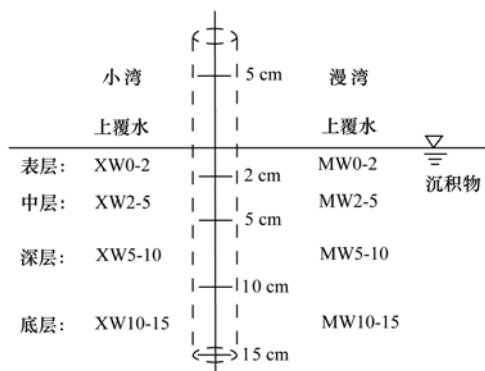


图2 沉积物分层示意

Fig. 2 Sediment stratification diagram

中 V3 ~ V4 区片段进行 PCR 扩增, 条件: 95℃ 预变性 3 min, 然后进行 95℃ 变性 30 s, 45℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s, 共 5 个循环, 接着进行 95℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s, 共 20 个循环, 最后 72℃ 延伸 5 min, 结束后以 2% 的琼脂糖电泳检测 PCR 产物. 委托生工生物工程(上海)股份有限公司于 Illumina MiSeq 平台进行高通量测序分析, 使用 Mothur 对原始序列校正以获得优化序列, 并在 Qiime 中运用 Uclust 方法对优化序列进行相似度为 0.97 的聚类, 以最长序列作为代表序列, 最后 Qiime 中运用 Blast 方法进行数据库比对, 获得 OTU 代表序列分类学信息.

1.4 数据统计与分析

使用 SPSS 13.0 软件, 对不同库区间隙水理化指标采用 *t*-test 进行显著性差异分析; 使用 R 语言和 Mothur 软件, 对细菌群落多样性指标进行统计分析; 使用 Canoco 4.5 软件, 进行细菌群落结构与环境因子的冗余分析 (redundancy, RDA); 功能细菌的筛选统计, 则是基于大量文献的整理归纳与本文 RDA 结果分析相结合的方式获得.

2 结果与分析

2.1 沉积物间隙水营养盐垂向分布特征

图 3 所示, 小湾和漫湾的间隙水 TN 平均质量浓度分别为 $4.805 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.590 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表层均为最高 ($7.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.609 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 且随深度增加具有减小趋势; $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 平均质量浓度分别为 $2.233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.569 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 除漫湾表层较大以外, 其余均表现随深度增加而增大趋势, $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 平均质量浓度分别只有 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 深层均为最低 ($0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

间隙水的 TP 平均质量浓度分别为 $0.044 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.074 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均随深度增加具有减小趋势, 中层以下变化逐渐趋于平缓. $\text{PO}_4^{3-} \cdot \text{P}$ 受 TP

分布的影响具有相似分布规律, 表层均为最大 ($0.034 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.079 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 垂向变化幅度平缓并表现垂向向下减小趋势.

小湾沉积物 TOC 质量比范围为 $19.500 \sim 24.000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $22.600 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表现垂向向下递减趋势; 漫湾为 $2.300 \sim 2.500 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $2.410 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 垂向变化趋势不显著.

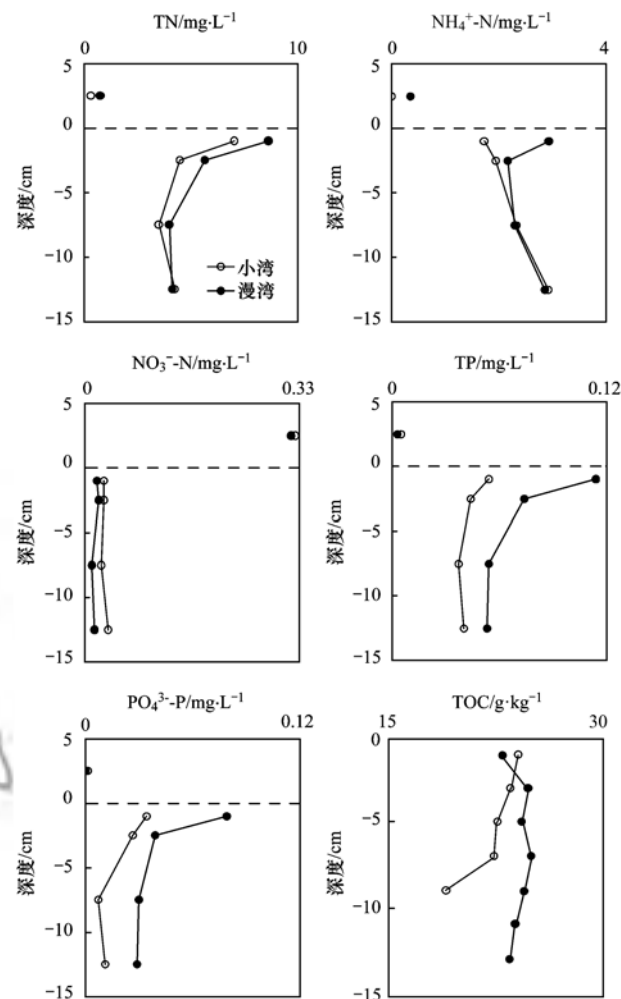


图3 分层沉积物理化因子分布状况

Fig. 3 Distribution of physicochemical factors in the stratified sediments

对不同水库间隙水营养盐采用 *t*-test 进行显著性差异分析 (表 1), 除了库区间 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 存在极显著性差异外 ($P < 0.01$), 其余均没有显著性差异.

2.2 沉积物微生物优势群落垂向分布

沉积物细菌 α 多样性指数如图 4. 本文主要分析 Simpson、Shannon 和 Ace 指数, 其中 Simpson 指数越小说明群落均匀度越高, Shannon 指数越大说明群落多样性越高, Ace 指数越大说明群落丰度越高. 小湾和漫湾沉积物垂向上 Simpson 指数和 Shannon 指数变化趋势均相同, 说明在库区垂向上, 群落均匀度和多样性先增大后减小再增大的垂向趋势特征, 而 Ace 指数变化趋势相反. 库区比较来

表 1 不同库区营养盐差异性分析

Table 1 Analysis of nutrient differences in different reservoir areas

指标	TN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	TOC
P 值	0.574	0.340	0.006	0.088	0.119	0.079

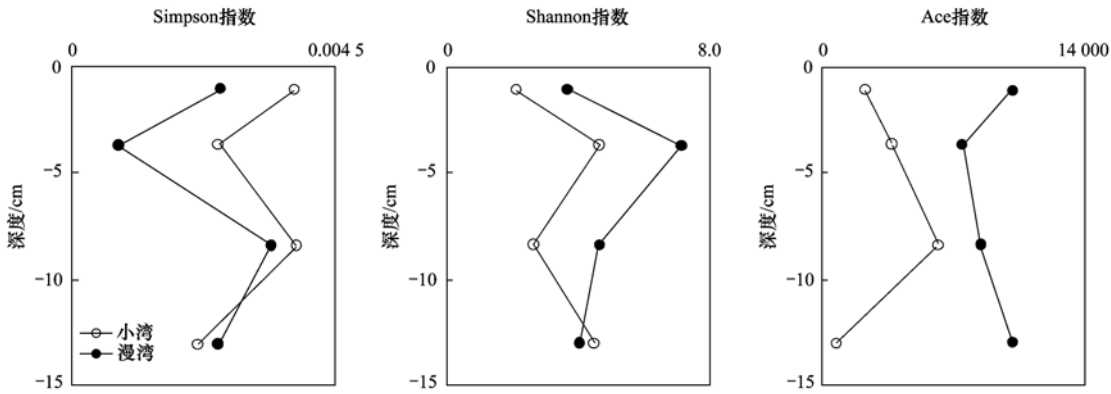


图 4 沉积物细菌 α 多样性指数

Fig. 4 Bacterial α diversity index in the sediments

看,漫湾沉积物细菌群落多样性、群落均匀度和群落丰度整体高于小湾。

小湾水库沉积物细菌群落检测出 42 门, 413 属,漫湾检测出 43 门, 435 属,且具有相同的优势菌门(至少一层相对丰度 > 10%)及优势菌纲组成(图 5)。其中变形菌门(Proteobacteria)主要以 α -变形菌纲(α -Proteobacteria)、 β -变形菌纲(β -Proteobacteria)、 γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria)和 δ -变形菌纲(δ -Proteobacteria)为主;浮霉菌门(Planctomycetes)大部分以浮霉菌纲(Planctomycetacia)为主;疣微菌门

(Verrucomicrobia)以疣微菌纲(Verrucomicrobiae)和 Spartobacteria 为主;厚壁菌门(Firmicutes)以梭菌纲(Clostridia)为主;酸杆菌门(Acidobacteria)中以 Acidobacteria_Gp6 和 Acidobacteria_Gp16 为主;绿弯菌门(Chloroflexi)以厌氧绳菌纲(Anaerolineae)为主。进一步在属水平分析,图 6 列出了相对丰度排名前 20 的菌属,小湾和漫湾沉积物优势种属(至少一层相对丰度 > 2%)相同,均为 *Clostridium sensu stricto*、*Thermogutta*、Gp6、黄杆菌属(*Luteolibacter*)、*Spartobacteria_genera_incertae_sedis*、孢子丝菌属(*Sporacetigenium*)、鞘氨醇单胞菌属

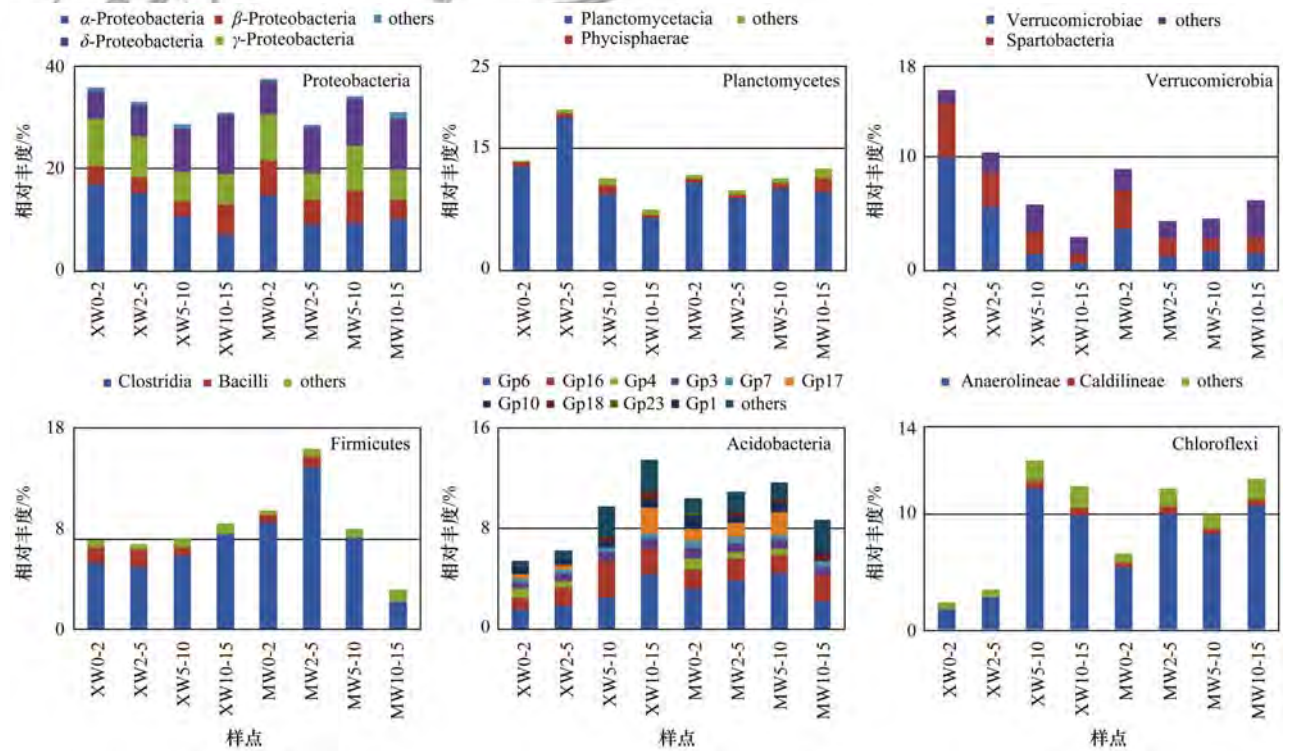


图 5 优势菌门群落结构及分布

Fig. 5 Community structure and distribution of the dominant species at the class level

(*Sphingomonas*) 和 *Gp16*。

2.3 功能群落分布

进一步对沉积物在属级别进行功能菌属的统计

分析(表 2)，发现 23 种具有降解有机物和脱氮除磷功能的细菌，且大部分细菌在库区间和垂向上表现一定的相对丰度差异。

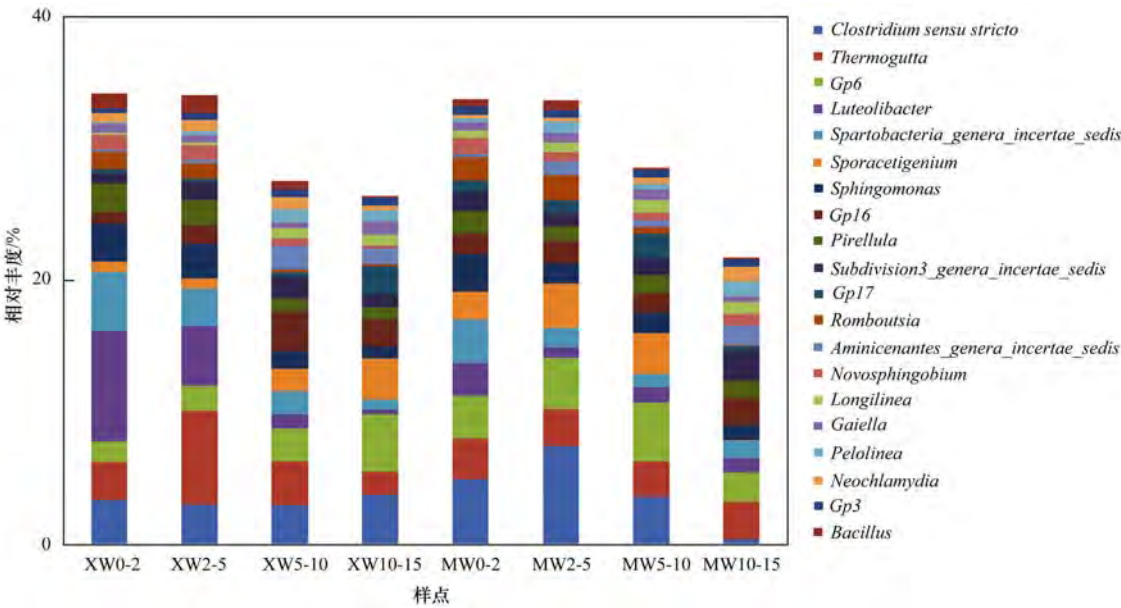


图 6 细菌群落属水平群落结构及分布

Fig. 6 Community structure and distribution of species at the genus level

表 2 沉积物功能菌垂向分布

Table 2 Vertical distribution of functional bacteria in sediments

菌属	主要功能	相对丰度/%							
		XW0-2	XW2-5	XW5-10	XW10-15	MW0-2	MW2-5	MW5-10	MW10-15
<i>Sphingomonas</i>	有机物降解 ^[9]	2.89	2.60	1.39	0.94	2.86	1.53	1.57	1.17
<i>Nitrospira</i>	好氧氨氧化 ^[10]	0.04	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01	0.04	0.13
<i>Nitrosomonas</i>	好氧氨氧化 ^[10]	0.00	0.01	0.07	0.01	0.03	0.02	0.01	0.07
<i>Nitrospira</i>	亚硝酸盐氧化 ^[11]	0.00	0.14	0.38	0.37	0.20	0.18	0.33	0.73
<i>Nitrolancea</i>	亚硝酸盐氧化 ^[11]	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01
<i>Nitrobacter</i>	亚硝酸盐氧化 ^[12]	0.01	0.16	0.04	0.07	0.08	0.08	0.06	0.18
<i>Pirellula</i>	厌氧氨氧化 ^[13]	2.18	1.96	1.01	0.84	1.72	1.06	1.40	1.30
<i>Gemmata</i>	厌氧氨氧化 ^[13]	1.10	0.68	0.19	0.22	0.47	0.38	0.34	0.24
<i>Candidatus Brocadia</i>	厌氧氨氧化 ^[13]	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
<i>Candidatus Kuenenia</i>	厌氧氨氧化 ^[13]	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06
<i>Acinetobacter</i>	硝化、聚磷 ^[14] 、氨化 ^[15]	0.38	0.25	0.06	0.04	0.06	0.12	0.02	0.17
<i>Bacillus</i>	反硝化 ^[16-18] 、氨化 ^[19] 、硝化 ^[20, 21]	1.12	1.34	0.56	0.15	0.53	0.73	0.16	0.12
<i>Pseudomonas</i>	异养硝化-好氧反硝化 ^[22] 、有机物降解、氨化 ^[9, 23]	0.23	0.05	0.17	0.09	0.07	0.04	0.05	0.20
<i>Clostridium sensu stricto</i>	反硝化、聚磷 ^[14, 24]	3.32	2.98	2.94	3.69	4.88	7.43	3.61	0.34
<i>Ornatilinea</i>	反硝化 ^[16]	0.10	0.15	1.34	0.45	0.38	0.57	0.39	0.95
<i>Gemmobacter</i>	反硝化 ^[16]	0.80	0.44	0.11	0.19	0.76	0.25	0.08	0.06
<i>Rhodobacter</i>	异养硝化-好氧反硝化、有机物降解 ^[25]	0.19	0.12	0.04	0.03	0.38	0.06	0.13	0.11
<i>Dechloromonas</i>	异养硝化-好氧反硝化、有机物降解 ^[25]	0.01	0.02	0.00	0.16	0.32	0.19	0.15	0.03
<i>Longilinea</i>	反硝化 ^[16] 、有机物降解 ^[26]	0.16	0.23	0.79	0.87	0.58	0.75	1.01	0.91
<i>Defluviimonas</i>	反硝化 ^[16, 27]	0.15	0.20	0.13	0.09	0.58	0.08	0.12	0.09
<i>Exiguobacterium</i>	反硝化 ^[16] 、氨化 ^[15] 、有机物降解、溶磷 ^[28, 29]	0.05	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00
<i>Steroidobacter</i>	反硝化 ^[30]	0.12	0.10	0.10	0.61	1.00	0.50	0.77	0.14
<i>Thauera</i>	反硝化 ^[31]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
<i>Thermomonas</i>	反硝化 ^[32]	0.04	0.02	0.01	0.03	0.24	0.14	0.03	0.03
<i>Thiobacillus</i>	反硝化 ^[33]	0.01	0.00	0.01	0.20	0.03	0.10	0.13	0.06

根据库区优势菌属和功能菌与环境因子 RDA 分析 (图 7), 小湾沉积物中, 微小杆菌属 (*Exiguobacterium*)、*Defluviimonas*、芽殖杆菌属 (*Gemmobacter*)、鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、红细菌属 (*Rhodobacter*)、小梨形菌属 (*Pirellula*)、出芽菌属 (*Gemmata*)、不动细菌属 (*Acinetobacter*) 和 *Candidatus Brocadia* 与 TN 、 TP 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 TOC 有较好的正相关性, 而与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈负相关; 漫湾中, 微小杆菌属 (*Exiguobacterium*)、*Defluviimonas*、芽殖杆菌属 (*Gemmobacter*)、鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、红细菌属 (*Rhodobacter*)、小梨形菌属 (*Pirellula*)、出芽菌属 (*Gemmata*)、*Steroidobacter*、脱氮单胞菌属 (*Dechloromonas*) 和热单胞菌属 (*Thermomonas*) 与 TN 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 TP 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 有较好的正相关性, 而与 TOC 呈负相关。

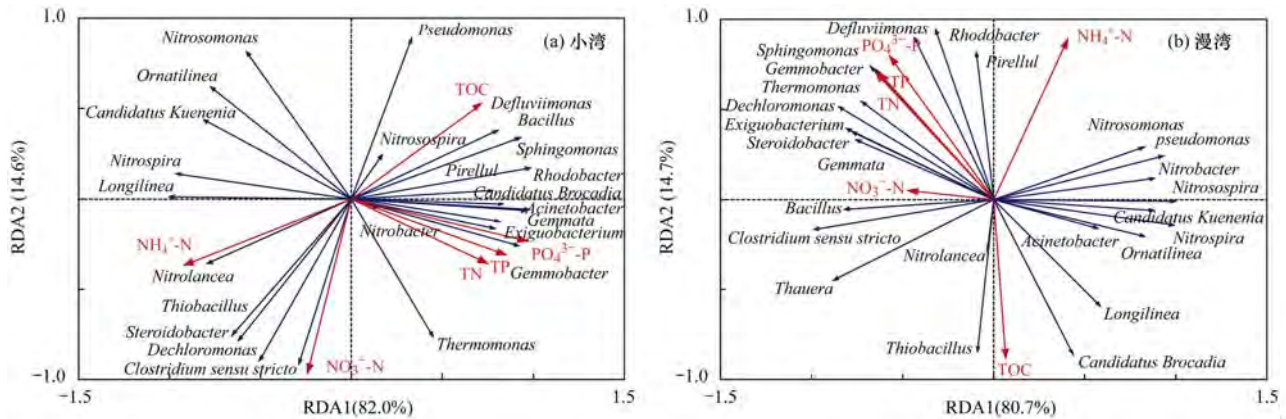


图 7 部分菌属与环境因子的 RDA 分析

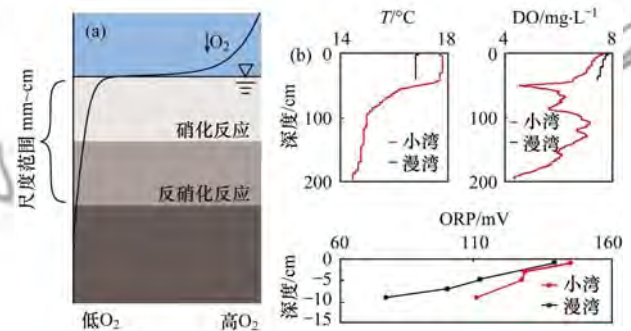
Fig. 7 RDA analysis of environmental factors and part of bacteria

3 讨论

3.1 水库沉积物溶解氧垂向补给模式分析

沉积物中发挥着复杂的硝化反硝化作用, 溶解氧水平降低对异养硝化菌生长具有抑制作用, 通过这种对脱氮功能菌落数量的影响, 进而影响环境脱氮效率^[34]. 沉积物相比水体处于厌氧环境, 固氮功能藻类等生物较少, 且底栖藻类的光合作用也只对表层 1 mm 沉积物营养盐产生显著影响^[35]. 国外有关沉积物-水界面溶解氧交换模式研究发现, 这种溶解氧交换过程主要存在于沉积物厘米以下甚至更小的尺度范围内[图 8(a)], 因此沉积物中硝化和反硝化过程在时空上是紧密结合的^[36]. 受热分层影响后的不同水体中, 其上覆水溶解氧受到影响表现不同的质量浓度, 但这种溶解氧的差异只对表面浅层沉积物有较大的影响。

图 8(b) 所示, 小湾水库最大水深 193 m, 表底温差较大 (3.3℃), 斜温层 (43 ~ 93 m) 温度变化剧烈, 最大水温垂向梯度 $0.2\text{℃}\cdot\text{m}^{-1}$, 具有明显的水温分层; 漫湾水库最大水深只有 40 m, 表底温差较小 (0.1℃), 水温近似均匀分布, 是典型的混合水体. 受水温分层影响, 小湾水库表底水体溶解氧差异较大, 底层溶解氧最低为 $4.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而漫湾则差异较小, 底层质量浓度最低为 $7.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 沉积物上覆水溶解氧数据以多参数水质分析仪测得底层



(a) 沉积物溶解氧交换模式^[36]; (b) 小湾和漫湾水库水温、溶解氧及沉积物氧化还原电位垂向特征

图 8 沉积物溶解氧补给模式及水库环境因子垂向分布特征

Fig. 8 Dissolved oxygen exchange model in sediments and distribution of environmental factors in sediments

水体溶解氧值为准, 从不同水库来看, 受水温分层影响下沉积物上覆水溶解氧差异较大, 漫湾明显高于小湾。

ORP 用来表征介质氧化性或还原性的相对程度, 小湾沉积物 ORP 变化范围 130 ~ 148 mV, 平均值 136 mV, 其中表层 ORP 最大, 表层以下随深度增加逐渐减小; 漫湾变化范围 99 ~ 142 mV, 平均值 114 mV, 同样表层以下逐渐减小, 中层变化幅度较缓. 小湾、漫湾沉积物表层 ORP 值差异较小, 说明其受上覆水溶解氧差异影响较小. 通过以上分析可以看出, 水温分层对小湾、漫湾沉积物上覆水溶解氧影响较大, 但对沉积物并无显著影响。

3.2 水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与微生物群落的关系

通过 16S rRNA 基因 Illumina MiSeq 高通量测序结果来看, 小湾、漫湾沉积物具有相同的优势菌门和优势菌属, 其中优势菌门占据细菌群落总数 77%, 优势菌属占据细菌群落总数 34%, 其余为大量稀有或未识别种类, 这符合人们对微生物中少数常见菌占比高大量稀有菌占比少的分布模式认识^[37].

从 TN 来看(图 3), 不同库区沉积物表层均最大, 这可能是受到外源氮污染物的沉积和微生物的矿化分解作用所致^[38]. 从微生物角度来看, 厌氧氨氧化菌表层丰度较高但底层较低, 反硝化菌丰度表层较低但底层较高, 两者总量在垂向上并没有较大变化. 而大分子有机物降解功能菌在表层表现较高丰度, 对其进行具体分析, 鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)在不同库区间丰度均最大, 为共同的优势菌属, 且垂向方向向下丰度递减, 与 TN 垂向质量浓度变化趋势相似, 且与 ORP 表征的垂向氧化性减弱趋势一致. 据研究表明, 鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)生命力强耐受贫营养, 对多环芳烃等高分子有机物有良好的降解作用, 并且广泛存在于自然界^[39], 推测在小湾、漫湾库区沉积物中鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)是主要发挥大分子有机物降解功能的细菌属(图 9), 这和 RDA 分析结果中鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)与 TN 具有很好的正相关关系一致.

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 TN 垂向分布特征相反, 影响其垂向分布的微生物过程包括氨化作用、硝化作用、厌氧氨氧化作用.

其中氨化作用是指好氧条件下含氮有机物分解为氨氮的微生物过程, 如芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)和微小杆菌属(*Exiguobacterium*)都发现氨化功能存在. RDA 分析中, 这些功能菌与氨氮相关性较差, 但这并不足以否定这些菌属的氨化作用, 分析可能是由于这些功能菌在沉积物中同时发挥着其他复杂的生物化学作用所致^[14, 16-18, 20-22].

另外硝化作用包括氨氧化作用和亚硝酸盐氧化作用两部分组成, 氨氧化作用作为硝化反应的限速步骤, 主要由氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)驱动完成^[40], 实际检测结果中, 绝大多数以 AOB 为主, 如亚硝化螺菌属(*Nitrosospira*)和亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*). 亚硝酸盐氧化功能菌, 如硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)、*Nitrolancea* 和硝化杆菌属(*Nitrobacter*), 这些与氨氧化菌共同参与完成整个硝

化过程. 其他如芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)同样也是已知的硝化菌属^[20-22, 41, 42]. 从各自丰度及 RDA 结果来看, 小湾库区中, 只有芽孢杆菌属(*Bacillus*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)在表、中层具有较高丰度, 垂向上均表现减小趋势, 且与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有较好的负相关性. 漫湾库区中只有芽孢杆菌属(*Bacillus*)在硝化菌中有较高丰度, 垂向上均表现减小趋势, 且与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有较好的负相关性. 推测小湾沉积物主要硝化菌属为芽孢杆菌属(*Bacillus*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*), 漫湾库区沉积物主要硝化菌属为芽孢杆菌属(*Bacillus*)(图 9).

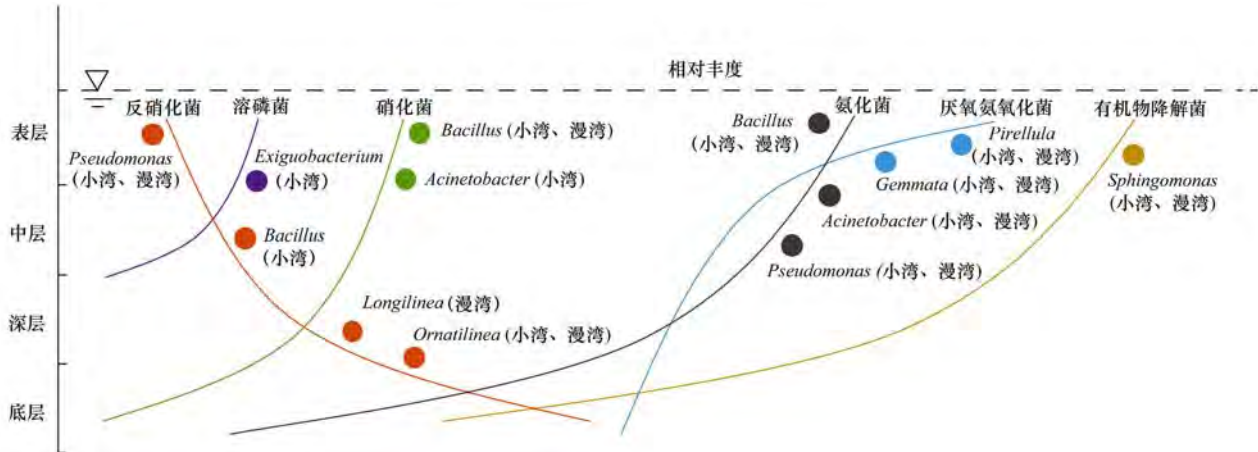
其次厌氧氨氧化有别于传统硝化-反硝化, 虽然对其认识较晚, 但对脱氮过程具有重要意义, 至今发现的厌氧氨氧化菌均属于浮霉状菌门(Planctomycetes)^[43]. 本次检测结果中小梨形菌属(*Pirellula*)、出芽菌属(*Gemmata*)、*Candidatus Brocadia* 和 *Candidatus Kuenenia* 是常见的厌氧氨氧化菌属^[13]. 其中小梨形菌属(*Pirellula*)和出芽菌属(*Gemmata*)在小湾、漫湾沉积物中丰度较高, 垂向上表层均具有最高丰度, 是主要厌氧氨氧化菌(图 9).

以上这些被发现的优势氨化菌、硝化菌和厌氧氨氧化菌丰度均表层较高而底层较低, 这与 ORP 表征的垂向还原性增强趋势一致, 表层 ORP 较高氧化性较强, 使得硝化作用更好进行, 促使 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降低, 表层以下 ORP 较低还原性较强, 且垂向上逐渐增大, 氨化作用、硝化作用受到抑制, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 发生累积效应且逐渐增加^[44], 这和董慧等^[45]的研究结果较为一致.

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 垂向深层均表现质量浓度最低, 这和深层较强反硝化作用有关, 而反硝化作用受溶解氧、硝态氮、有机物质量浓度和 pH 等因素间接影响^[46-48], 但最终归因于微生物群落差异. 从功能群落分析来看, 反硝化功能菌有芽孢杆菌属(*Bacillus*)、*Clostridium sensu stricto*、*Ornatilinea*、芽殖杆菌属(*Gemmobacter*)、长绳菌属(*Longilinea*)、*Deftuuiimonas*、微小杆菌属(*Exiguobacterium*)、*Steroidobacter*、陶厄氏菌属(*Thauera*)、热单胞菌属(*Thermomonas*)和硫杆菌属(*Thiobacillus*)^[16-18, 30-32, 49, 50]. 对芽孢杆菌属(*Bacillus*)的研究发现, 它是厚壁菌门(Firmicutes)中功能较为复杂的一类菌属, 能够与大多数具有反硝化功能的厌氧绳菌纲(*Anaerolineaceae*)、变形菌纲(*Proteobacteria*)、放线菌纲(*Actinobacteria*)和浮霉状菌纲(*Planctomycetacia*)等稳定共存, 同时还会

促进其他反硝化菌的生长, 并且 *Ornatilinea*、芽孢杆菌属 (*Gemmobacter*)、长绳菌属 (*Longilinea*)、*Defluviimonas* 和微小杆菌属 (*Exiguobacterium*) 的协同作用会使芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 反硝化能力有显著的提高^[16, 17]. 值得注意的是, 假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、红细菌属 (*Rhodobacter*) 和脱氮单胞菌属 (*Dechloromonas*) 相比传统厌氧反硝化不同, 是一类具有好氧反硝化功能的菌属, 大多数菌种能够在溶解氧较高的环境下同时具有硝化、反硝化、

降解有机物多种功能^[22, 25], 在沉积物表、中层存在较高的丰度可以得到印证, 但受表、中层较强硝化作用影响, 表、中层 NO_3^- -N 并未受较大影响. 由 RDA 分析结果可知, *Ornatilinea*、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 具有相对较高垂向丰度, 与 NO_3^- -N 具有较好的负相关性, 推测可能是小湾沉积物主要的反硝化菌, 而漫湾中, *Ornatilinea*、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和长绳菌属 (*Longilinea*) 可能是主要的反硝化菌 (图 9).



曲线表示功能菌属垂向分布趋势(小湾和漫湾趋势相似, 以小湾和漫湾平均值为参考);

圆点表示优势菌属分布库区及主要垂向分布位置

图 9 沉积物功能菌垂向分布示意

Fig. 9 Vertical distribution of functional bacteria in sediments

库区比较来看, 小湾沉积物 ORP 整体较高, 反硝化菌总数较低, NO_3^- -N 平均质量浓度 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而漫湾沉积物 ORP 较低, 反硝化菌总数较高, NO_3^- -N 平均质量浓度仅 $0.016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这与显著性差异分析结果(小湾、漫湾沉积物间隙水 NO_3^- -N 具有极显著性差异关系)一致, 而大部分优势反硝化菌属与 TOC 呈正相关性, 说明小湾、漫湾沉积物反硝化菌数量差异受沉积物 TOC 影响较大.

沉积物中磷主要以铁铝结合态磷 (Fe/Al-P)、钙结合态磷 (Ca-P)、无机磷 (IP) 和有机磷 (OP) 几种形态存在^[51]. Fe/Al-P 和 OP 是对水体富营养化具有较大影响的磷形态, 其中 Fe/Al-P 在相对还原条件下, Fe^{3+} 易被还原为 Fe^{2+} , 同时伴随磷酸根离子的释放, 部分 OP 在微生物的降解作用下易被分解利用, 且两种不同形态的有效磷来源均受人类活动影响较大, 被认为是沉积物中的可释放磷^[52, 53].

不同库区沉积物 TP 和 PO_4^{3-} -P 均表现表层最高且垂向向下减小趋势, 中层以下质量浓度变化趋于平缓, 可能由于沉积物的累积效应造成了表层 TP 明显高于其他层^[54], 表层以下 ORP 有明显的降低, 还原性相对增强, Fe/Al-P 易被分解并释放磷酸根离子, 但受 TP 质量浓度的减小, 垂向上 TP 和

PO_4^{3-} -P 整体质量浓度均表现垂向向下减小趋势. 微生物中微小杆菌属 (*Exiguobacterium*) 是一类革兰氏阳性、兼性厌氧菌, 分布广泛, 多数具有嗜极性, 具有较强的降解机污染物及溶磷能力^[28, 29], 不同库区中均与 PO_4^{3-} -P 具有很好的正相关关系, 主要分布在小湾、漫湾沉积物表、中层 (图 9). 而不同库区比较下, 漫湾沉积物中磷明显高于小湾, 但溶磷菌丰度差异较小, 分析可能是由于漫湾建库时间长, 底泥沉降更久所致, 以及附近人类活动干扰等因素影响.

4 结论

(1) 小湾、漫湾是两种不同水温分层的水库, 其中小湾水库表底温差 3.3°C , 最大温度梯度为 $0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 属于分层水体, 漫湾水库表底温差 0.1°C , 属于混合水体.

(2) 小湾水库沉积物间隙水 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 平均质量浓度分别为 $2.233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 漫湾水库分别为 $2.569 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 在间隙水中均表现垂向向下增大的趋势, 而 NO_3^- -N 垂向变化不明显但均在深层最底.

(3) 小湾与漫湾水库沉积物细菌群落结构具有

相同的优势菌门、纲、属, 水库水体分层差异对沉积物营养盐及微生物垂向分布无显著影响。其中, 漫湾相比小湾沉积物反硝化菌更丰富, 小湾硝化菌和厌氧氨氧化菌相比漫湾更为丰富, 同一库区沉积物底层反硝化菌丰度表现较高, 有机物降解菌、硝化菌、厌氧氨氧化菌和溶磷菌丰度表现较低, 是造成沉积物营养盐库间差异和垂向差异的原因。

参考文献:

- [1] 纪道斌, 龙良红, 徐慧, 等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, **37**(3): 7-14.
- Ji D B, Long L H, Xu H, *et al.* Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, **37**(3): 7-14.
- [2] 董世魁, 赵晨, 刘世梁, 等. 水坝建设影响下澜沧江中游沉积物重金属形态分析及污染指数研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 466-474.
- Dong S K, Zhao C, Liu S L, *et al.* Speciation and pollution of heavy metals in sediment from middle Lancang-Mekong River influenced by dams[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 466-474.
- [3] Zwirgmaier K, Keiz K, Engel M, *et al.* Seasonal and spatial patterns of microbial diversity along a trophic gradient in the interconnected lakes of the Osterseen Lake District, Bavaria[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, **6**: 1168.
- [4] 宋洪宁, 杜秉海, 张明岩, 等. 环境因素对东平湖沉积物细菌群落结构的影响[J]. 微生物学报, 2010, **50**(8): 1065-1071.
- Song H N, Du B H, Zhang M Y, *et al.* Effect of environmental factors on bacterial community in Lake Dongping sediment[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2010, **50**(8): 1065-1071.
- [5] 朱春灵. 澜沧江小湾水库水环境和氮磷营养盐的时空分异特征初步研究[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
- [6] 李晋鹏, 董世魁, 彭明春, 等. 梯级水坝运行对漫湾库区底栖动物群落结构及分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(12): 4101-4108.
- Li J P, Dong S K, Peng M C, *et al.* Effects of cascading hydropower dams operation on the structure and distribution pattern of benthic macroinvertebrate assemblages in Manwan Reservoir, Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(12): 4101-4108.
- [7] 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. 525-644.
- [8] HJ 501-2009, 水质 总有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外吸收法[S].
- [9] Baraniecki C A, Aislabie J, Foght J M. Characterization of *Sphingomonas* sp. Ant 17, an aromatic hydrocarbon-degrading bacterium isolated from antarctic soil[J]. Microbial Ecology, 2002, **43**(1): 44-54.
- [10] 李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 等. 序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 342-349.
- Li W H, Sun Y J, Liu Z L, *et al.* Analysis on diversity of denitrifying microorganisms in sequential batch bioreactor landfill [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 342-349.
- [11] 张晶, 孙照勇, 钟小忠, 等. 奶牛粪条垛式模拟堆肥腐熟度及微生物群落结构变化[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(3): 423-429.
- Zhang J, Sun Z Y, Zhong X Z, *et al.* Maturity and microbial community structure dynamics during simulated windrow composting of solid fraction of dairy manure[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, **22**(3): 423-429.
- [12] Zhu X B, Tian J P, Liu C, *et al.* Composition and dynamics of microbial community in a zeolite biofilter-membrane bioreactor treating coking wastewater [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(19): 8767-8775.
- [13] 王静, 郝建安, 张爱君, 等. 厌氧氨氧化反应研究进展[J]. 水处理技术, 2014, **40**(3): 1-4.
- [14] 姚源, 竺建荣, 唐敏, 等. 好氧颗粒污泥技术处理乡镇污水应用[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(2): 379-388.
- Yao Y, Zhu J R, Tang M, *et al.* Application of aerobic granular sludge technology on treatment of villages and towns sewage[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(2): 379-388.
- [15] 韩晓阳, 李智, 汪强强, 等. 茶园土壤高活性氨化菌的筛选鉴定及特性研究[J]. 茶叶科学, 2013, **33**(1): 91-98.
- Han X Y, Li Z, Wang Q Q, *et al.* Research on screening and identification of ammonifying bacterium and characteristic of strains from the soils of tea garden[J]. Journal of Tea Science, 2013, **33**(1): 91-98.
- [16] 王思宇, 李军, 王秀杰, 等. 添加芽孢杆菌污泥反硝化特性及菌群结构分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4649-4656.
- Wang S Y, Li J, Wang X J, *et al.* Denitrification characteristics of *Bacillus subtilis* sludge and analysis of microbial community structure[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(12): 4649-4656.
- [17] 张小平. 枯草芽孢杆菌 SC02 和施氏假单胞菌 F1M 对草鱼养殖水体水质的影响及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [18] Kumar M, Ou Y L, Lin J G. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio[J]. Waste Management, 2010, **30**(4): 602-609.
- [19] 李辉, 徐新阳, 李培军, 等. 人工湿地中氨化细菌去除有机氮的效果[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(8): 1044-1047.
- Li H, Xu X Y, Li P J, *et al.* Research on ammonibacteria removing organic nitrogen in construction wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, **2**(8): 1044-1047.
- [20] 何霞, 赵彬, 吕剑, 等. 异养硝化细菌 *Bacillus* sp. LY 脱氮性能研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1404-1408.
- He X, Zhao B, Lv J, *et al.* Nitrogen removal by *Bacillus* sp. LY with heterotrophic nitrification ability [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1404-1408.
- [21] Ha Y M, Park Y H, Kim Y J. A taxonomic study of *Bacillus* sp. isolated from korean salt-fermented anchovy [J]. Molecular Biology Today, 2001, **3**(1): 25-29.
- [22] 张培玉, 曲洋, 于德爽, 等. 菌株 qy37 的异养硝化/好氧反硝化机制比较及氨氮加速降解特性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1819-1826.
- Zhang P Y, Qu Y, Yu D S, *et al.* Comparison of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification system by strain qy37 and its accelerating removal characteristic of NH_4^+-N [J]. Environmental Science, 2010, **31**(8): 1819-1826.
- [23] 李军冲, 齐树亭, 石玉新, 等. 一株假单胞菌降解溶解有机氮条件探讨[J]. 食品研究与开发, 2010, **31**(5): 151-153.
- Li J C, Qi S T, Shi Y X, *et al.* Research on conditions of degrading dissolved organic nitrogen by a *Pseudomonas* [J]. Food Research and Development, 2010, **31**(5): 151-153.
- [24] 常玉梅, 杨琦, 郝春博, 等. 城市污水厂活性污泥强化自养反硝化菌研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- Chang Y M, Yang Q, Hao C B, *et al.* Experimental study of autotrophic denitrification bacteria through bioaugmentation of

- activated sludge from municipal wastewater plant [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- [25] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1704-1716.
- Yang H, Zhang G Z, Yang X N, *et al.* Microbial community structure and diversity in cellar water by 16S rRNA high-throughput sequencing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1704-1716.
- [26] 李慧星, 杜风光, 薛刚. 高通量测序研究酒精废水治理中厌氧活性污泥的微生物菌群[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(11): 4112-4119.
- Li H X, Du F G, Xue G. Microbial community analysis of anaerobic activated sludge in the process of alcohol wastewater treatment using high throughput sequencing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(11): 4112-4119.
- [27] Foesel B U, Drake H L, Schramm A. *Defluviomonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., and *Pararhodobacter aggregans* gen. nov., sp. nov., non-phototrophic *Rhodobacteraceae* from the biofilter of a marine aquaculture [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2011, **34**(7): 498-502.
- [28] Selvakumar G, Kundu S, Joshi P, *et al.* Growth promotion of wheat seedlings by *Exiguobacterium acetylicum* 1P (MTCC 8707) a cold tolerant bacterial strain from the Uttarakhand Himalayas [J]. Indian Journal of Microbiology, 2010, **50**(1): 50-56.
- [29] Vishnivetskaya T A, Kathariou S, Tiedje J M. The *Exiguobacterium* genus: Biodiversity and biogeography [J]. Extremophiles, 2009, **13**(3): 541-555.
- [30] Wang P H, Leu Y L, Ismail W, *et al.* Anaerobic and aerobic cleavage of the steroid core ring structure by *Steroidobacter denitrificans* [J]. Journal of Lipid Research, 2013, **54**(5): 1493-1504.
- [31] Mao Y P, Xia Y, Zhang T. Characterization of *Thauera*-dominated hydrogen-oxidizing autotrophic denitrifying microbial communities by using high-throughput sequencing [J]. Bioresource Technology, 2013, **128**: 703-710.
- [32] Mergaert J, Cnockaert M C, Swings J. *Thermomonas fusca* sp. nov. and *Thermomonas brevis* sp. nov., two mesophilic species isolated from a denitrification reactor with poly(ϵ -caprolactone) plastic granules as fixed bed, and emended description of the genus *Thermomonas* [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2003, **53**(6): 1961-1966.
- [33] Ma Q, Qu Y Y, Shen W L, *et al.* Bacterial community compositions of coking wastewater treatment plants in steel industry revealed by Illumina high-throughput sequencing [J]. Bioresource Technology, 2015, **179**: 436-443.
- [34] 魏小涵, 毕学军, 尹志轩, 等. 温度和 DO 对 MBBR 系统硝化和反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 612-618.
- Wei X H, Bi X J, Yin Z X, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 612-618.
- [35] 王永平, 谢瑞, 晁建颖, 等. 蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3179-3186.
- Wang Y P, Xie R, Chao J Y, *et al.* Effects of algal blooms and their degradation on the sediment-water micro-interface [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3179-3186.
- [36] Seitzinger S, Harrison J A, Böhlke J K, *et al.* Denitrification across landscapes and waterscapes: A synthesis [J]. Ecological Applications, 2006, **16**(6): 2064-2090.
- [37] McGill B J, Etienne R S, Gray J S, *et al.* Species abundance distributions: Moving beyond single prediction theories to integration within an ecological framework [J]. Ecology Letters, 2007, **10**(10): 995-1015.
- [38] 刘霞, 徐青, 史森森, 等. 沱江流域沉积物中氮赋存状态及其垂向分布特征[J]. 岩矿测试, 2018, **37**(3): 320-326.
- Liu X, Xue Q, Shi M S, *et al.* Nitrogen species and vertical distribution characteristics in the sediment of the Tuo River [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, **37**(3): 320-326.
- [39] 胡杰, 何晓红, 李大平, 等. 鞘氨醇单胞菌研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13**(3): 431-437.
- Hu J, He X H, Li D P, *et al.* Progress in research of sphingomonas [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2007, **13**(3): 431-437.
- [40] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: A model for molecular microbial ecology [J]. Annual Review of Microbiology, 2001, **55**: 485-529.
- [41] 王弘宇, 马放, 杨开, 等. 两株异养硝化细菌的氨氮去除特性[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(1): 47-52.
- Wang H Y, Ma F, Yang K, *et al.* Ammonia removal by two strains of heterotrophic nitrifying bacteria [J]. China Environmental Science, 2009, **29**(1): 47-52.
- [42] Takahashi R, Ohishi M, Ohshima M, *et al.* Characteristics of an ammonia-oxidizing bacterium with a plasmid isolated from alkaline soils and its phylogenetic relationship [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2001, **92**(3): 232-236.
- [43] 白刃, 贺纪正, 沈菊培, 等. 厌氧氨氧化过程中关键酶及相关分子标记在生态学研究中的应用进展[J]. 生态学报, 2016, **36**(13): 3871-3881.
- Bai R, He J Z, Shen J P, *et al.* Review of the key enzymes in the anammox process and ecological inferences derived from related molecular markers [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(13): 3871-3881.
- [44] 赵兴青, 杨柳燕, 于振洋, 等. 太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 698-704.
- Zhao X Q, Yang L Y, Yu Z Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of physicochemical characteristics and nutrients in sediments of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(6): 698-704.
- [45] 董慧, 郑西来, 张健. 河口沉积物孔隙水营养盐分布特征及扩散通量[J]. 水科学进展, 2012, **23**(6): 815-821.
- Dong H, Zheng X L, Zhang J, *et al.* Distribution of nutrients in interstitial water and diffusion flux in estuary [J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(6): 815-821.
- [46] Barnard R, Leadley P W, Hungate B A. Global change, nitrification, and denitrification: A review [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2015, **19**(1): GB1007.
- [47] Senbayram M, Chen R, Budai A, *et al.* N₂O emission and the N₂O/(N₂O + N₂) product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **147**: 4-12.
- [48] Wyman M, Hodgson S, Bird C. Denitrifying alphaproteobacteria from the Arabian sea that express *nosZ*, the gene encoding nitrous oxide reductase, in oxic and suboxic waters [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, **79**(8): 2670-2681.
- [49] 孔庆鑫, 李君文, 王新为, 等. 一种新的好氧反硝化菌筛选方法的建立及新菌株的发现[J]. 应用与环境生物学报, 2005, **11**(2): 222-225.
- Kong Q X, Li J W, Wang X W, *et al.* A new screening method for aerobic denitrification bacteria and isolation of a novel strain [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology,

- 2005, **11**(2): 222-225.
- [50] 张小玲, 梁运祥. 一株反硝化细菌的筛选及其反硝化特性的研究[J]. 淡水渔业, 2006, **36**(5): 28-32.
- Zhang X L, Liang Y X. Screening of a strain denitrobacteria and its denitrification characteristic[J]. Freshwater Fisheries, 2006, **36**(5): 28-32.
- [51] 曹微微, 肖海丰, 臧淑英. 连环湖敖包泡沉积物磷形态垂向分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 279-286, 292.
- Cao W W, Xiao H F, Zang S Y. Vertical distribution characteristics of phosphorus fractions in the sediments from Aobao in Lianhuan Lake [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2): 279-286, 292.
- [52] Ni Z K, Wang S R. Economic development influences on sediment-bound nitrogen and phosphorus accumulation of lakes in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(23): 18561-18573.
- [53] 潘婷婷, 赵雪, 袁铁君, 等. 三峡水库沉积物不同赋存形态磷的时空分布[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- Pan T T, Zhao X, Yuan Y J, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in sediments from the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- [54] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 等. 南四湖及主要入湖河流沉积物中磷的赋存形态研究[J]. 地球化学, 2008, **37**(3): 290-296.
- Liu E F, Shen J, Yang L Y, *et al.* Occurrence of phosphorus in sediments of Nansihu Lake and its main inflow rivers [J]. Geochimica, 2008, **37**(3): 290-296.



CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)