

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

李家河水库春季分层期 *nirS* 型反硝化菌群特征分析

梁伟光^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 张海涵^{1,2}, 杨尚业^{1,2}, 刘凯文^{1,2}, 李程遥^{1,2}, 温成成^{1,2}, 李伟涛³, 蔡晓春³

(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. 李家河水库管理有限公司, 西安 710016)

摘要: 为探究水源水库春季分层期(3~5月) *nirS* 型反硝化细菌群落结构组成及其与水质的关系, 以李家河水库为例, 采用原位监测耦合 Illumina 高通量测序技术, 分析了水体水质及反硝化细菌群落相对丰度及结构特征。结果表明: ① 通过高通量测序, 鉴定为 4 门 13 属, 优势菌门为变形菌门(Proteobacteria), 相对丰度在 52.5%~70.6%, 时间尺度总体呈降低趋势($P < 0.05$), 空间尺度上表层和中层高于底层($P < 0.05$), 表层与中层无差异($P > 0.05$); 识别出具有反硝化功能细菌 8 属, 其中优势菌属(相对丰度 > 1%) 为脱氯单胞菌属(*Dechloromonas*) 和假单胞菌属(*Pseudomonas*), 脱氯单胞菌属相对丰度在时间上呈先降低后升高的趋势, 假单胞菌属在时间上呈先升高后降低的趋势, 此 2 属在空间上无差异($P > 0.05$); 细菌多样性及丰富度变化基本一致, 时间上呈先升高后减低的趋势, 空间上随深度逐渐升高; ② 本研究期间水库水体 ρ (总氮) 为 2.35~2.91 mg·L⁻¹, 氮素污染较为严重, 3 月和 4 月垂向水体总氮基本一致且呈降低趋势, 5 月 ρ (总氮) 高于 3 月和 4 月且表层最高; ③ 冗余分析(RDA) 表明, 主要驱动因素为水温、溶解氧、硝氮和氨氮, 且氨氮与脱氯单胞菌属呈明显负相关。综上, 通过对水源水库 *nirS* 型反硝化群落以及其影响因素的研究, 有助于解析微污染源水库反硝化细菌的群落变化特征, 可对未来水源水体氮污染生物修复提供理论研究依据。

关键词: 李家河水库; 氮污染; *nirS* 型反硝化细菌; Illumina 高通量测序; RDA 分析

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0306-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104037

Characteristic Analysis of *nirS* Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification

LIANG Wei-guang^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, ZHANG Hai-han^{1,2}, YANG Shang-ye^{1,2}, LIU Kai-wen^{1,2}, LI Cheng-yao^{1,2}, WEN Cheng-cheng^{1,2}, LI Wei-tao³, CAI Xiao-chun³

(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. Lijiahe Reservoir Management Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: To explore the composition of the *nirS* denitrifying bacterial community during stratification in spring (March to May) in a drinking water reservoir and its relationship with water quality, the water quality and relative abundance and structure of the denitrifying bacterial community were analyzed using in-situ monitoring coupled with Illumina high-throughput sequencing technology in the Lijiahe Reservoir. The results showed that: ① through high-throughput sequencing, 4 phyla and 13 genera were identified. The dominant bacterial phylum was Proteobacteria, and its relative abundance was between 52.5% and 70.6%. The overall trend of the relative abundance of Proteobacteria decreased on the time scale ($P < 0.05$), and its relative abundance in the surface and middle layers was higher than that of the bottom layer on the spatial scale ($P < 0.05$). There was no difference in the proportion of Proteobacteria between the surface and middle layers ($P > 0.05$), and the abundance of its bottom layer was relatively stable; eight genera of bacteria with denitrification function were identified, among which the dominant bacterial genera (relative abundance > 1%) were *Dechloromonas* and *Pseudomonas*. The relative abundance of *Dechloromonas* showed a trend of first decreasing and then increasing on the time scale, whereas the relative abundance of *Pseudomonas* showed a trend of increasing first and then decreasing on the time scale. There were no differences on the spatial scale between these two genera ($P > 0.05$); the changes in bacterial diversity and abundance were basically similar, with a trend of first increasing and then decreasing on the time scale. The highest diversity and abundance of the bacterial community gradually increased with increasing depth on the spatial scale. ② ρ (TN) of the reservoir during stratification was 2.35-2.91 mg·L⁻¹, and the nitrogen pollution was more serious. In March and April, ρ (TN) on the vertical scale was basically similar and showed a decreasing trend. In May, the content of total nitrogen was higher than that in March and April, and the highest value of total nitrogen content occurred in the surface layer. ③ Redundancy analysis showed that water temperature, dissolved oxygen, nitrate, and ammonia nitrogen were the main driving factors, and ammonia nitrogen showed a significantly negative correlation with *Dechloromonas*. In summary, the study of *nirS*-type denitrification communities and related influencing factors will contribute to analyzing the characteristics of denitrifying bacterial community changes in a micro-polluted drinking water reservoir and provide a theoretical research basis for the biological remediation of nitrogen pollution in such reservoirs in the future.

Key words: Lijiahe Reservoir; nitrogen pollution; *nirS* denitrifying bacteria; Illumina high-throughput sequencing; RDA analysis

收稿日期: 2021-04-05; 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100101); 国家自然科学基金项目(51979217); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-01, 2019ZDLSF06-02)

作者简介: 梁伟光(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水源水环境修复与水质改善, E-mail: liangweiguang@xauat.edu.cn

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

鉴于地下水污染的日趋严重,水库水体已取代地下水成为我国的主供水水源^[1]. 然而,在点源污染得到控制的背景下,面源污染引起的水体富营养化问题依然突出,尤其是水库高氮现象普遍^[2]. 水体高氮可能诱发藻类水华及微生物活性降低,引发水体生态恶化^[3]. 因此,水体水质变化及其相关脱氮反硝化微生物的研究,对于解析水源水库水体氮代谢相关过程及原位控制具有重要价值.

近年来,随着高通量测序技术的快速发展及应用,该研究领域取得了部分进展^[4,5],主要的研究方向为反硝化微生物的筛选、反硝化基因的识别、反硝化微生物群落的演替特征及驱动因素分析^[6~8]. Zhou 等^[9]采用高通量测序研究了周村水库人工强制混合期总氮削减过程中微生物群落结构变化,结果表明研究期水体细菌多样性显著增强,识别出反硝化细菌(含 *nirS* 基因),其种群结构主要受温度、总氮和溶解氧等影响. 康鹏亮等^[10]对西安典型景观水体 *nirS* 型反硝化菌种群结构进行了研究,结果表明不同水体反硝化细菌种属差异显著,其种群结构受不同水质指标综合调控. 杨文焕等^[11]对南海湖沉积物 *nirS* 型反硝化微生物的群落进行研究,结果发现优势菌属红杆菌属(*Rhodobacter*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)主要受硝氮和亚硝氮影响. 综上,水体反硝化细菌群落的研究主要集中于景观水体及沉积物,该领域针对水源水库研究较少,尤其是分层过程该菌群演替及驱动机制鲜见报道. 此外,水源水体菌群演替机制的研究尽管可解析其核心驱动因子,但菌群功能的识别对于源水型水体水质污染形态转化,解构水体污染及自净成因显得更为重要,遗憾的是,细菌功能分析主要局限于实验室尺度,原位水体细菌功能的分析报道有限.

李家河水库属于峡谷深水分层型水库,该水库布设扬水曝气水质改善系统,属人工干预型水库,11月~翌年3月为完全混合状态,6~10月为人工强制混合状态(系统运行),3~5月为分层形成期,作为完全混合状态与人工强制混合状态的中间过渡,该时期由于桃花汛短时高氮输入和水体升温,可能诱发反硝化菌群的代谢活性发生巨变,具有重要研究价值. 因此,本文对李家河水库分层期垂向水体水质及微生物开展连续监测,基于 Illumina 高通量测序技术识别好氧反硝化菌群,探究其结构和多样性变化,通过网络图分析(Network)及冗余分析(RDA)探究菌群间及菌群与环境因子间的关系,以期为进一步水源水库水体高效反硝化脱氮菌群驯化及原位脱氮提供实验

材料和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与水样采集

李家河水库坐落于西安市蓝田县境内,是西安市重要的供水水源之一,兼具发电和防洪等功能. 总库容为5 690万 m^3 ,年平均供水量为 $7.7 \times 10^7 \text{ m}^3$,最大水深 77 m,平均水深 56 m,供水设计流量 $3.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[12].

本研究取样点设置在坝前 S1 点(图 1),S1 采样点为水库最深处且存在明显的季节分层特征(温跃层识别梯度为 $0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[12]),本研究期间,3~5月温跃层分别为 3.82~8.54、3.17~12.2 和 4.04~1.65 m),可反映主库区水质及微生物变化,具有研究代表性.

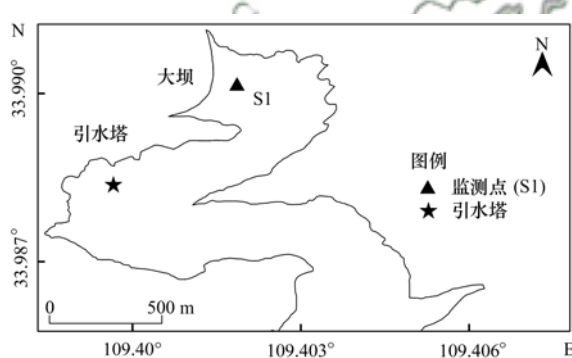


图1 李家河水库采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling site in Lijiahe Reservoir

1.2 水样采集及测定

本研究于2019年3~5月中旬对李家河水库进行采集,采用2.5 L有机玻璃采样器获得不同深度水样,即表层(水下0.5 m)、中层(斜温层)和底层(沉积物以上0.5 m)装入经过稀盐酸浸泡且超纯水预清洗的聚乙烯瓶中,采集完成后立即送回实验室,测定水质及细菌指标.

现场测定水温、pH、溶解氧(DO)和浊度(Turbidity)等指标(DS5X便携式分析仪,美国HACH公司)^[13],总氮(TN)、硝氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、高锰酸盐指数、总磷(TP)、铁(Fe)和锰(Mn)的测定均参照文献[14]的方法,溶解性有机碳(DOC)采用日本岛津TOC分析仪测定. 此外,水体取1 000 mL的水样用 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,滤后样品置于无菌离心管,保存于 -20°C 冰箱,便于后续高通量测序.

1.3 水体反硝化细菌群落结构测定

1.3.1 微生物总DNA提取

采用 E. Z. N. A.® soil 基因组提取试剂盒(Water DNA Kit, Omega, USA)提取滤膜中DNA. 利

用 1% 琼脂糖凝胶电泳对抽取的 DNA 进行检测,并用 Nano Drop 2000(美国)测定 DNA 的浓度,保存在 -20°C 冰箱待用^[15].

1.3.2 Illumina 高通量测序

本研究采用 Illumina MiSeq 测序技术分析了对李家河水库 *nirS* 型反硝化细菌群落种群结构的时空分布特征,将样品送至上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量 DNA 测序.反硝化细菌的 *nirS* 功能基因扩增引物为 Cd3a F/R3cdR. PCR 扩增体系(20 μL)为:DNA 模板 10 ng、FastPfu 缓冲液 4 μL 、dNTPs 2 μL (2.5 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$)、FastPfu 聚合酶 0.4 μL 、Forward Primer 引物 0.8 μL (5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、Reverse Primer 引物 0.8 μL (5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、用 ddH₂O 补充至 20 μL . 扩增条件如下:预变性 3 min (95 $^{\circ}\text{C}$),变性 30 s (95 $^{\circ}\text{C}$),退火 30 s (55 $^{\circ}\text{C}$),延伸 45 s (72 $^{\circ}\text{C}$),循环 30 次,终延伸 10 min (72 $^{\circ}\text{C}$)^[16]. 全部样本按照上述实验条件进行,每个样本 3 个重复 ($n=3$).

1.4 数据处理

高通量测序完成后,用 Fast QC 软件对 *nirS* 功能基因测序的原始数据进行质量控制,去除低质量序列.通过 QIIME 进行处理得到优质序列的 *nirS* 功能基因序列扩增长度^[16].将高质量的扩增序列数据通过 (Sequence Read Archive, SRA) 数据库对所得数据进行比对,根据分类注释结果对物种组成分类,去除丰度小于 0.001 的数值,在 97% 相似水平下归类为操作分类单元 (OTUs).然后通过 Mothur 软件对 OTU 聚类分析结果解析 *nirS* 型反硝

化细菌种群多样性指数,进而进行物种组成和结构分析^[16].

采用 Excel 2016 进行数据处理,Origin8.0 软件进行图形绘制与分析,利用 R 语言(4.0.2)和 Gephi 软件通过共生网络 (Network) 评估不同菌属间的共生关系及其与环境因子之间的相关性^[13],利用 Canoco5.0 软件进行冗余分析 (RDA) 解析反硝化细菌群落结构与李家河水库不同月份水源水体水质参数之间的相关性^[9].

2 结果与分析

2.1 水体水质参数

表 1 为李家河水库水质参数时空变化.从中可知,李家河水库不同月份水体水质均存在差异,3、4 和 5 月采样期间,水温逐渐升高,垂向呈现差异,水体分层出现,总体在 4.28 ~ 16.08 $^{\circ}\text{C}$ 之间; $\rho(\text{DO})$ 呈降低趋势,在 7.08 ~ 12.85 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,未出现厌氧现象;pH 值变化范围在 7.32 ~ 8.46 之间,水体基本呈中性.水体 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 在研究期间呈先降低后增加的趋势,3 ~ 4 月垂向基本一致,5 月为:中层 > 底层 > 表层.3 ~ 5 月每月平均 $\rho(\text{TN})$ 分别为 (2.40 $\pm$ 0.03)、(2.38 $\pm$ 0.17) 和 (2.44 $\pm$ 0.07) mg $\cdot\text{L}^{-1}$. $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 ρ (高锰酸盐指数)、 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{DOC})$ 在研究期呈降低趋势,垂向差异不大. $\rho(\text{Fe})$ 和 $\rho(\text{Mn})$ 受降雨径流及分层双重影响,时空差异大,浊度变化对此有所印证.综上所述,李家河水库在 3 ~ 5 月水质均较差,尤其总氮超过 2.0 mg $\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 李家河水库水质参数时空变化

Table 1 Spatial and temporal variation in water quality parameters in Lijiahe Reservoir

水质参数	3 月			4 月			5 月		
	表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	中层	底层
水温/ $^{\circ}\text{C}$	7.00 $\pm$ 0.78	4.59 $\pm$ 0.43	4.28 $\pm$ 0.08	13.76 $\pm$ 1.41	5.69 $\pm$ 1.40	5.13 $\pm$ 0.04	16.08 $\pm$ 1.82	5.84 $\pm$ 1.22	5.41 $\pm$ 2.14
$\rho(\text{DO})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	12.85 $\pm$ 0.24	11.27 $\pm$ 0.87	9.26 $\pm$ 0.74	12.52 $\pm$ 0.72	9.87 $\pm$ 0.21	9.30 $\pm$ 0.25	10.13 $\pm$ 2.06	7.08 $\pm$ 0.48	7.09 $\pm$ 1.48
pH	8.03 $\pm$ 0.30	7.47 $\pm$ 0.07	7.32 $\pm$ 0.04	8.27 $\pm$ 0.12	7.90 $\pm$ 0.11	7.77 $\pm$ 0.01	8.46 $\pm$ 0.54	7.73 $\pm$ 0.14	7.74 $\pm$ 0.01
$\rho(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.42 $\pm$ 0.07	2.40 $\pm$ 0.09	2.37 $\pm$ 0.06	2.40 $\pm$ 0.08	2.38 $\pm$ 0.13	2.35 $\pm$ 0.09	2.91 $\pm$ 0.08	2.52 $\pm$ 0.012	2.42 $\pm$ 0.09
$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.27 $\pm$ 0.00	2.27 $\pm$ 0.01	2.27 $\pm$ 0.00	2.17 $\pm$ 0.01	2.16 $\pm$ 0.02	2.14 $\pm$ 0.00	2.71 $\pm$ 0.02	2.42 $\pm$ 0.08	2.3 $\pm$ 0.07
$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.04 $\pm$ 0.00	0.05 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.00	0.05 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.01
ρ (高锰酸盐指数)/mg $\cdot\text{L}^{-1}$	2.74 $\pm$ 0.18	2.21 $\pm$ 0.11	2.86 $\pm$ 0.09	2.47 $\pm$ 0.17	2.56 $\pm$ 0.04	2.72 $\pm$ 0.08	2.12 $\pm$ 0.16	2.04 $\pm$ 0.14	2.20 $\pm$ 0.12
$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.06 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.03	0.03 $\pm$ 0.01	0.03 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.00	0.05 $\pm$ 0.01
$\rho(\text{DOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.02 $\pm$ 0.15	3.19 $\pm$ 0.09	2.84 $\pm$ 0.00	2.79 $\pm$ 0.08	3.15 $\pm$ 0.13	2.9 $\pm$ 0.06	1.16 $\pm$ 0.04	1.17 $\pm$ 0.15	1.34 $\pm$ 0.09
浊度/NTU	11.90 $\pm$ 0.26	10.79 $\pm$ 0.49	12.45 $\pm$ 0.35	3.88 $\pm$ 0.13	4.16 $\pm$ 0.36	7.10 $\pm$ 0.85	2.67 $\pm$ 0.12	4.36 $\pm$ 1.52	8.65 $\pm$ 0.00
$\rho(\text{Fe})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.07	0.04 $\pm$ 0.08	0.04 $\pm$ 0.09
$\rho(\text{Mn})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.08	0.01 $\pm$ 0.09	0.05 $\pm$ 0.10

2.2 水体反硝化细菌群落多样性及结构变化

2.2.1 水体反硝化细菌群落多样性

表 2 为李家河水库水体反硝化菌群多样性指数变化.从中可知,高通量覆盖率高 99%,可有效反映反硝化菌群测序深度.春季分层期间,OTUs 数目时间尺度上变化较明显,呈先升高后降低的

趋势(4 月 > 5 月 > 3 月),垂向上底层最高,表层最低;多样性指数 (Shannon 指数和 Simpson 指数) 时空变化趋势同 OTUs 一致,即:4 月 > 5 月 > 3 月,垂向底层 > 中层 > 表层;丰富度指数 (Ace 指数和 Chao1 指数) 进一步印证了 OTUs 及多样性研究结果.

表 2 李家河水库水体反硝化菌群多样性指数解析¹⁾

Table 2 Analysis of the denitrifying community diversity index in Lijiahe Reservoir

月份	水深	OTUs	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Chao1 指数	覆盖率/%
3	表层	617	4.42(4.42, 4.39, 4.45)	0.24(0.24, 0.24, 0.24)	653(650, 637, 671)	664(659, 640, 696)	99.64
	中层	748	4.64(4.64, 4.61, 4.67)	0.19(0.19, 0.19, 0.19)	783(781, 768, 801)	781(777, 763, 802)	99.67
	底层	953	5.72(5.72, 5.70, 5.74)	0.11(0.11, 0.11, 0.11)	1 009(989, 1 006, 1 032)	1 021(1 016, 992, 1 055)	99.39
4	表层	922	5.76(5.76, 5.74, 5.78)	0.12(0.12, 0.12, 0.12)	986 (983, 964, 1 011)	991(987, 963, 1 025)	99.17
	中层	923	5.78(5.78, 5.76, 5.81)	0.12(0.12, 0.12, 0.12)	1 002(999, 977, 1 031)	1 024(1 019, 985, 1 070)	99.11
	底层	1012	5.84(5.84, 5.82, 5.86)	0.08(0.08, 0.08, 0.08)	1 080(1 078, 1 058, 1 106)	1 093(1 088, 1 060, 1 131)	99.29
5	表层	640	5.58(5.58, 5.56, 5.60)	0.23(0.23, 0.23, 0.22)	666(663, 653, 681)	680(675, 657, 709)	99.65
	中层	1020	5.92(5.92, 5.90, 5.94)	0.08(0.08, 0.08, 0.09)	1 073(1 071, 1 054, 1 095)	1 077(1 073, 1 052, 1 106)	99.43
	底层	1015	5.75(5.75, 5.73, 5.78)	0.08(0.07, 0.08, 0.08)	1 214(1 210, 1 166, 1 266)	1 230(1 266, 1 223, 1 165)	99.05

1) 括号内为平行样数据(n=3)

2.2.2 李家河水库水体 nirS 型反硝化细菌群落组成

图 2 为李家河水库水体门水平 nirS 型反硝化群落组成. 从中可知, 共获得 4 门, 除未分类菌门 (unclassified) 外, 主要为变形菌门 (Proteobacteria), 不同月份水体的 nirS 型反硝化细菌种群结构具有相似性. 本研究期间, 变形菌门占绝对优势, 表层水体随着时间变化优势作用逐渐降低, 在 3 月和 5 月分别占 70.57% 和 52.06%, 中层呈先降低后缓慢上升趋势, 底部变化平缓.

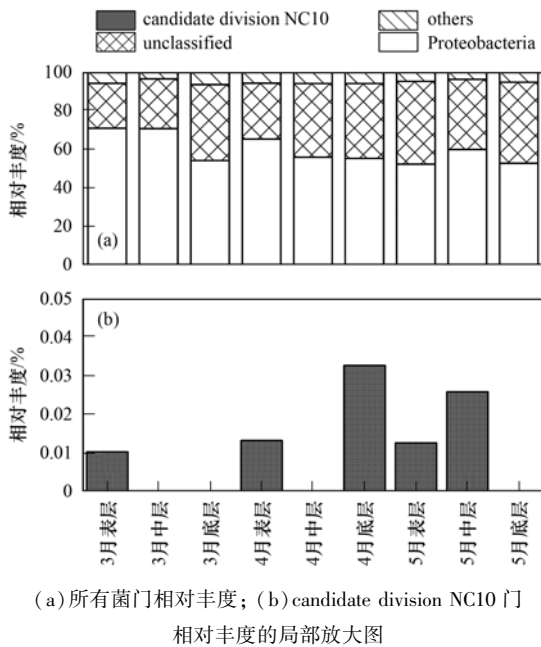


图 2 李家河水库水体 nirS 型反硝化群落门水平结构组成

Fig. 2 Composition of nirS denitrifying community at the phylum level in Lijiahe Reservoir

热图 (Heatmap) 反映出不同月份水体 nirS 型反硝化细菌群落属水平细菌的组成和差异, 如图 3 所示, 反硝化细菌主要归为 13 个属, 除未分类菌属 (unclassified) 外, 主要包括脱氯单胞菌属 (Dechloromonas) 和假单胞菌属 (Pseudomonas) 等. 3 月和 4 月脱氯单胞菌属 (Dechloromonas) 均在表层水

体占优势, 分别为 10.70% 和 5.75%, 于 5 月中层水体占比最高, 为 7.74%, 不同月份丰度变化较为明显, 但不同月份各层水体其丰度均较高. 4 月假单胞菌属 (Pseudomonas) 丰度 [(1.69 ± 0.27)%] 较 3 月 [(0.21 ± 0.15)%] 显著升高.

此外, 春季分层期李家河水库不同深度水体的反硝化细菌种群结构存在显著差异. 3、4 和 5 月在水体中分别发现了红杆菌属 (Rhodobacter)、陶厄氏菌属 (Thauera) 和红长命菌属 (Rubrivivax) 的存在. 另外, unclassified 占比较高, 可能具有反硝化功能, 需进一步研究.

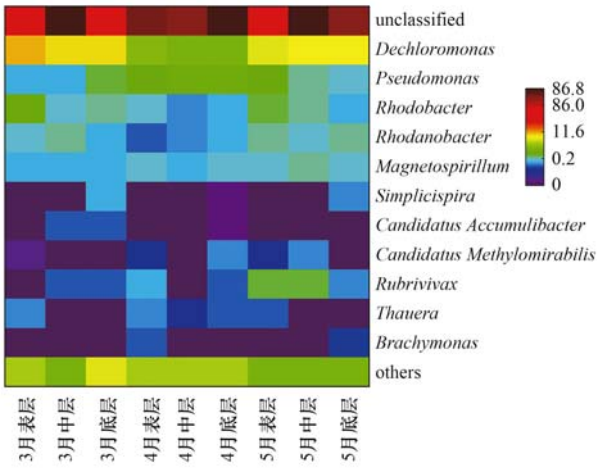


图 3 李家河水库水体优势反硝化菌群热图

Fig. 3 Heatmap of dominant denitrifying communities in Lijiahe Reservoir

为评估水库水体中的反硝化群落属水平细菌间直接或间接作用, 通过共生网络分析推断微生物共生模式, 表 3 为共生网络分析计算参数, 图 4 为共生网络分析. 通过共生网络关系发现, 水库 3~5 月的群落组成网络分析共 11 点 (属), 被划分为 4 个模块, 由 4 种不同的颜色表示. 模块 II、模块 III 和模块 IV 中各菌属之间均呈正相关; 模块 I 中脱氯单胞菌属 (Dechloromonas) 与假单胞菌属 (Pseudomonas) 有

很强的负相关,其他菌属均呈较强的正相关. 以上结果表明,李家河水库水体 *nirS* 型反硝化落群存在不同层次上的共生现象.

表 3 水体反硝化细菌菌属网络分析参数

Table 3 Network analysis calculation parameters of the denitrifying bacterial genera in Lijiahe Reservoir	
项目	数值
节点	11
边界	8
平均度	1.455
平均加权重	1.078
网络直径	2
图密度	0.145
模块化	0.658
连接部件	4
平均聚类系数	0.583
平均路径长度	1.273

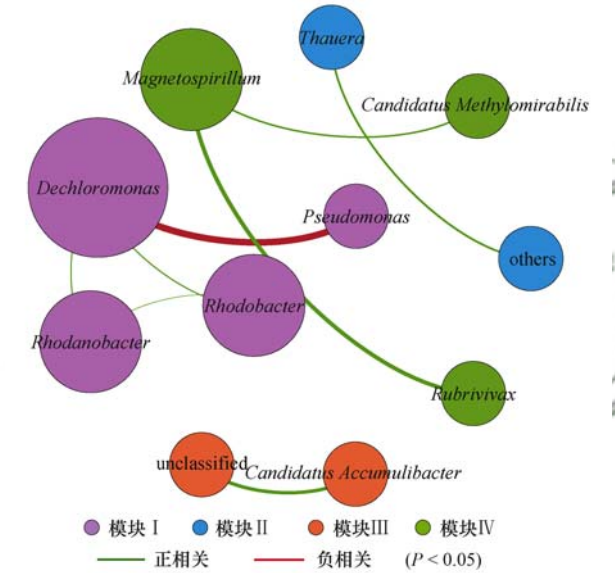


图 4 基于 Spearman 相关显著性分析反硝化菌属共生网络分析
Fig. 4 Network of co-occurring denitrifying bacterial genera based on Spearman's correlation significance analysis

2.3 菌属与环境因子关系分析

如图 5 所示,选取反硝化细菌群落与主要水质参数开展 RDA 分析,前两主轴可以解释李家河水库反硝化细菌群落总变异的 89.08%,轴 1 (RDA1) 和轴 2 (RDA2) 解释率分别为 68.90% 和 20.18%,该模型有效反映水质与好氧反硝化菌群的关系. 从中可知,水温、DO、DOC 和 pH 是驱动 *nirS* 型反硝化菌群演替的主要环境因子,其次为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 等. 此外,脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*) 与 TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈负相关,与 TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈正相关; 水温、pH 和 DO 是红杆菌属 (*Rhodobacter*) 及假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 的主影响因子. 3 月中层和底层反硝化种群结构相似度较高,主要受浊度和 TP 的调控,与表层反硝化种群结构差异较大. 4 月表层和中层

反硝化种群结构受水温、pH 和 DO 的显著影响. 另外,TN、水温和 pH 对 5 月表层反硝化种群结构影响较大.

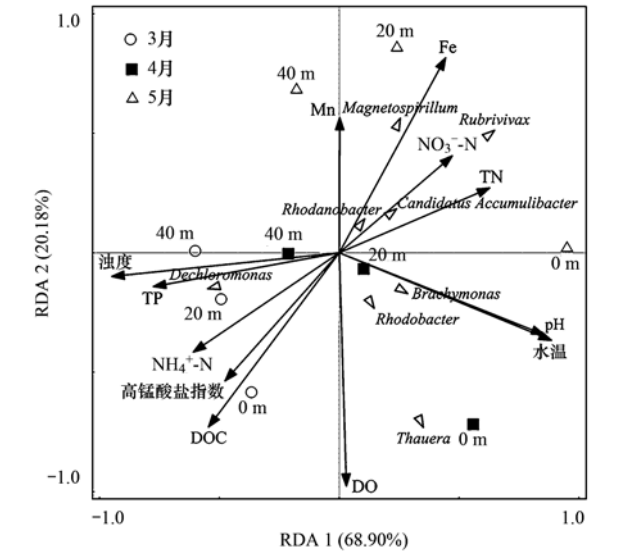


图 5 李家河水库反硝化细菌种群的 RDA 分析
Fig. 5 RDA analysis of denitrifying bacterial communities in Lijiahe Reservoir

3 讨论

3.1 反硝化菌群的识别及功能分析

目前,对好氧硝化菌群的研究多集中于实验室的筛选. Zhang 等^[17]的研究分离筛选出 1 株好氧反硝化菌 *Paracoccus versutus* KS293,对 TN 的去除率为 82%,无亚硝氮的积累. 李思琦等^[18]的研究在垃圾渗滤液中成功分离筛选出好氧反硝化菌 *Achromobacter* sp. L16 属,在碳氮比为 20:1 条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别为 61.94% 和 98.40%. 目前被识别的好氧反硝化菌有 50 余属,130 余种,其中包括普遍存在的假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和副球菌属 (*Paracoccus*) 等^[19].

本研究对属水平下细菌进行功能性分析,结果见表 4. 从中可知,已知具有反硝化功能细菌共 8 属,优势菌属脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*, 隶属变形菌门) 和红杆菌属 (*Rhodobacter*, 隶属变形菌门) 呈先降低后升高的趋势,假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 呈先升高后降低的趋势. 好氧反硝化菌属通过亚硝酸盐还原酶基因 (*nirS*) 实现亚硝酸盐的还原(好氧反硝化过程的制约步骤),有效提高了好氧反硝化脱氮效率^[10]. 假单胞菌属 (*Pseudomonas*)^[11]、红杆菌属 (*Rhodobacter*)^[20] 和红长命菌属 (*Rubrivivax*)^[10] 是典型的反硝化脱氮细菌,其余菌属占比虽然不高,对水体反硝化脱氮也发挥着不可替代的作用^[21],但其驱动机制需进一步分析.

表 4 水体 *nirS* 型细菌功能性分析
Table 4 Functional analysis of *nirS* bacteria in Lijiahe Reservoir

菌属	主要功能	所占比例/%								
		3 月			4 月			5 月		
		表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	中层	底层
<i>Dechloromonas</i> (脱氯单胞菌属)	反硝化和有机物降解 ^[22]	10.72±0.75	8.96±0.96	8.99±0.82	5.83±1.23	5.76±1.14	4.53±0.81	6.96±1.29	7.74±1.03	7.64±0.58
<i>Pseudomonas</i> (假单胞菌属)	反硝化 ^[11]	0.07±0.03	0.06±0.03	0.51±0.11	1.44±0.57	1.63±0.48	1.99±0.82	1.22±0.73	0.19±0.05	0.12±0.04
<i>Rhodobacter</i> (红杆菌属)	反硝化和有机物降解 ^[20]	0.74±0.05	0.15±0.07	0.25±0.14	0.17±0.09	0.04±0.02	0.08±0.04	0.66±0.11	0.34±0.07	0.08±0.03
<i>Rhodanobacter</i> (产黄杆菌属)	有机物降解 ^[23]	0.17±0.04	0.21±0.08	0.08±0.02	0.02±0.01	0.03±0.01	0.06±0.01	0.32±0.11	0.13±0.03	0.19±0.06
<i>Magnetospirillum</i> (磁螺菌属)	有机物降解 ^[24]	0.05±0.03	0.06±0.01	0.06±0.01	0.11±0.05	0.06±0.01	0.16±0.13	0.11±0.01	0.26±0.10	0.09±0.02
<i>Simplicispira</i> (简单螺旋菌属)	反硝化 ^[25]	0.00±0.00	0.00±0.00	0.05±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00	0.01±0.02	0.00±0.00	0.00±0.00	0.02±0.01
<i>Candidatus Accumulibacter</i> 属	反硝化除磷 ^[26]	0.00±0.00	0.02±0.01	0.02±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.01±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
<i>Candidatus Methylobacter</i> 属	厌氧氨氧化 ^[27]	0.01±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.01±0.00	0.00±0.00	0.03±0.01	0.01±0.01	0.03±0.01	0.00±0.00
<i>Rubrivivax</i> (红长命菌属)	反硝化 ^[10]	0.00±0.00	0.02±0.01	0.02±0.01	0.05±0.02	0.00±0.00	0.02±0.01	0.54±0.16	0.49±0.11	0.04±0.01
<i>Thauera</i> (陶厄氏属)	反硝化 ^[28]	0.03±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00	0.03±0.01	0.01±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00
<i>Brachymonas</i> (短单胞杆菌属)	反硝化 ^[25]	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.02±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.02±0.01

3.2 反硝化菌群的演替机制

好氧反硝化菌群演替的驱动因子主要包括温度、DO、氮类营养盐和有机质等^[29]。温度主要通过影响微生物酶的活性控制微生物生长和代谢； $\rho(\text{DO})$ 主要通过 3 个方面影响反硝化细菌的脱氮：①和硝酸盐竞争电子；②抑制反硝化过程酶的合成；③抑制硝酸盐的还原^[30]。现有的研究中，Liu 等^[31]的研究发现中性或偏碱性条件有利于反硝化细菌的增值。鲍林林等^[32]的研究发现北运河沉积物中温度、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 pH 是反硝化菌群的主要影响因素。Zhou 等^[2]对周村水库春季好氧反硝化菌群的研究发现，温度、DO 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 是氮循环细菌组成的重要影响因素。与上述研究基本一致，本研究发现温度、DO 和氮类营养盐（尤其是 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ）塑造了好氧反硝化菌群结构及多样性。

本研究中，优势菌门为变形菌门，含脱氯单胞菌属（*Dechloromonas*）、红杆菌属（*Rhodobacter*）和红长命菌属（*Rubrivivax*）等，均具有好氧反硝化功能。水温是变形菌门变化的首要驱动因子^[33]，本研究对此有所印证，即随表层水温的增加，变形菌门优势作用降低；因底部水温变化缓慢，其相对丰度基本无差异（图 2），RDA 显示了水温对红长命菌属（*Rubrivivax*）的重要影响（图 5），同样的现象在北海湖微生物群落演替特征研究中得到证实^[33]。DO 是好氧反硝化过程重要的电子供体，表层 DO 高于中下层，红杆菌属（*Rhodobacter*）相对丰度与其变化趋势基本一致，RDA 分析证实了 DO 与红杆菌属（*Rhodobacter*）呈现高的相关性（图 5），这与钊珍芳^[34]的研究结果一致。其次，李家河水库 TN 主要来源于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ，其为好氧反硝化菌属代谢生长提供了氮类营养盐，如脱氯单胞菌属（*Dechloromonas*）总体上表层高于底层，随时间呈降

低趋势，其与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化趋势一致，呈现正相关（图 5）；红长命菌属（*Rubrivivax*）与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈负相关，与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 呈正相关关系（图 5），康鹏亮等^[10]和张艺冉等^[16]对水体 *nirS* 型反硝化菌群结构报道证实了以上分析。

多样性是菌群结构演替的映射，本研究发现底层水体好氧反硝化多样性高于表层水体，Yang 等^[35]对金盆水库微生物菌群结构研究中发现，等温层水体反硝化细菌多样性明显高于变温层，底部 $\rho(\text{DO})$ 低于表层，这是因为低 $\rho(\text{DO})$ 更有利于反硝化的进行。3~5 月，菌群多样性呈升高趋势（表 2），暗示该时期水温的升高是多样性的主要驱动因素，Zhang 等^[15]的研究也报道了水温对反硝化菌群多样性的重要影响。

综上所述，李家河水库分层形成期不同深度水体好氧反硝化菌群有明显差异，菌群演替特征与水温、DO 和氮类营养盐等因素紧密相关，本研究仅讨论了已识别功能菌属与环境因子的重要关系，遗憾的是，尚有诸多未分类菌属，其功能有待研究，这可能为解析水体氮类变化和丰富好氧反硝化研究提供重要思路，有待深化。

4 结论

- (1) 春季分层期间，李家河水库不同月份水体水质均存在显著性差异，水温逐渐升高，水体分层出现； $\rho(\text{TN})$ 呈先降低后增加的趋势； $\rho(\text{DOC})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 在研究期总体呈降低趋势，垂向差异不大。
- (2) 通过高通量测序，本研究共获得 4 门 13 属细菌，优势菌门为变形菌门；已识别 8 属具有好氧反硝化功能，主要含脱氯单胞菌属（*Dechloromonas*）、假单胞菌属（*Pseudomonas*）和红杆菌属

(*Rhodobacter*)等,且多隶属变形菌门;菌群多样性呈现时空变化,即随分层过程持续,时间尺度上多样性呈升高趋势,空间上底层高于表层。

(3) 水温、DO 和氮类营养盐(NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)是好氧反硝化菌属结构和多样性塑造的主要驱动因子。反硝化菌群多样性和红杆菌属(*Rhodobacter*)的时空变化主要受 DO 影响,脱氯单胞菌属(*Dechloromonas*)与 NH_4^+ -N呈正相关;水温、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N对红长命菌属(*Rubrivivax*)影响显著。

参考文献:

- [1] 孙祥,朱广伟,笄文怡,等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2632-2640.
Sun X, Zhu G W, Da W Y, et al. Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2632-2640.
- [2] Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, et al. Microbial aerobic denitrification dominates nitrogen losses from reservoir ecosystem in the spring of Zhoucun reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 998-1010.
- [3] 李衍庆,黄廷林,张海涵,等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2158-2165.
Li Y Q, Huang T L, Zhang H H, et al. Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2158-2165.
- [4] Xue J L, Shi K, Chen C, et al. Evaluation of response of dynamics change in bioaugmentation process in diesel-polluted seawater via high-throughput sequencing: Degradation characteristic, community structure, functional genes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123569.
- [5] Han X K, Wang F W, Zhang D J, et al. Nitrate-assisted biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the water-level-fluctuation zone of the three Gorges Reservoir, China: insights from in situ microbial interaction analyses and a microcosmic experiment [J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115693.
- [6] 文刚,王彤,黄廷林,等. 贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2339-2348.
Wen G, Wang T, Huang T L, et al. Nitrogen removal performance and nitrogen/carbon balance of oligotrophic aerobic denitrifiers[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2339-2348.
- [7] 邵汝英,蔡凯,王镔,等. 高效脱氮菌的分离、鉴定及功能分析[J]. 环境保护科学, 2019, **45**(5): 58-62.
Shao R Y, Cai K, Wang B, et al. Isolation, identification and characteristics of a high-efficiency bacterial strain for ammonia nitrogen removal[J]. Environmental Protection Science, 2019, **45**(5): 58-62.
- [8] 康鹏亮,陈胜男,黄廷林,等. 好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3789-3796.
Kang P L, Chen S N, Huang T L, et al. Denitrification characteristics and functional genes of denitrifying bacteria under aerobic or anaerobic conditions [J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3789-3796.
- [9] Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, et al. Variations in microbial community during nitrogen removal by in situ oxygen-enhanced indigenous nitrogen-removal bacteria [J]. Water Science and Engineering, 2018, **11**(4): 276-287.
- [10] 康鹏亮,黄廷林,张海涵,等. 西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5174-5183.
Kang P L, Huang T L, Zhang H H, et al. Water quality and diversity of denitrifier community structure of typical scenic water bodies in Xi'an [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5174-5183.
- [11] 杨文焕,石大钧,张元,等. 高原湖泊沉积物中反硝化微生物的群落特征——以包头南海湖为例[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 431-438.
Yang W H, Shi D J, Zhang Y, et al. Community characteristics of denitrifying microorganisms in plateau lake sediments——taking Nanhaihu lake as example [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(1): 431-438.
- [12] 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.
- [13] 张海涵,王燕,黄廷林,等. 分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2188-2197.
Zhang H H, Wang Y, Huang T L, et al. Spatial and temporal succession characteristics of aerobic anoxygenic photosynthesis bacteria in a stratified reservoir [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2188-2197.
- [14] 林子深,黄廷林,李凯,等. 李家河水库上游水体溶解性有机物组分与来源[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1275-1283.
Lin Z S, Huang T L, Li K, et al. Dissolved organic matter components and sources in upstream of Lijiahe Reservoir [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 1275-1283.
- [15] Zhang H H, Liu K W, Huang T L, et al. Effect of thermal stratification on denitrifying bacterial community in a deep drinking water reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2021, **569**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126090.
- [16] 张艺冉,李再兴,孙悦,等. 石家庄市春季景观水体 *nirS* 型反硝化细菌群落特征分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3295-3303.
Zhang Y R, Li Z Y, Sun Y, et al. Community structure characteristics of *nirS* denitrifying bacteria of spring typical parkland waterbodies in Shijiazhuang City [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3295-3303.
- [17] Zhang H H, Zhao Z F, Chen S N, et al. *Paracoccus versutus* KS293 adaptation to aerobic and anaerobic denitrification: insights from nitrogen removal, functional gene abundance, and proteomic profiling analysis [J]. Bioresource Technology, 2018, **260**: 321-328.
- [18] 李思琦,杨静丹,刘琳,等. 好氧反硝化菌 *Achromobacter* sp. L16 的脱氮特性[J]. 生物技术通报, 2020, **36**(6): 93-101.
Li S Q, Yang J D, Liu L, et al. Denitrification characteristics of aerobic denitrifying bacteria *Achromobacter* sp. L16 [J]. Biotechnology Bulletin, 2020, **36**(6): 93-101.
- [19] 王慎,张思思,许尤,等. 不同水温分层水库沉积物间隙水

- 营养盐垂直分布与细菌群落结构的关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2753-2763.
- Wang S, Zhang S S, Xu Y, *et al.* Relationship between the vertical distribution of nutrients and bacterial community structures in sediment interstitial waters of stratified reservoirs with different water temperatures [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2753-2763.
- [20] 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.
- [21] Hou L F, Zhou Q, Wu Q P, *et al.* Spatiotemporal changes in bacterial community and microbial activity in a full-scale drinking water treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2018, **625**: 449-459.
- [22] Huang L P, Ye J Y, Xiang H W, *et al.* Enhanced nitrogen removal from low C/N wastewater using biodegradable and inert carriers: performance and microbial shift [J]. Bioresource Technology, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122658.
- [23] 邢志林, 袁山林, 郭江枫, 等. 重庆工业园区土壤微生物群落结构及功能分析——以焦化厂土壤为例[J]. 环境影响评价, 2020, **42**(2): 74-78.
- Xing Z L, Yuan S L, Guo J F, *et al.* Evaluation of microbial community structure and functional characteristics in industrial park soil—a case study of coking plant soil [J]. Environmental Impact Assessment, 2020, **42**(2): 74-78.
- [24] 周石磊, 孙悦, 岳哥丞, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2177-2187.
- Zhou S L, Sun Y, Yue G C, *et al.* Spatial distribution characteristics and driving factors of aerobic denitrification bacterial community structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area during the winter freezing period [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2177-2187.
- [25] Peng C, Gao Y L, Fan X, *et al.* Enhanced biofilm formation and denitrification in biofilters for advanced nitrogen removal by rhamnolipid addition [J]. Bioresource Technology, 2019, **287**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121387.
- [26] Rubio-Rincón F J, Weissbrodt D G, Lopez-Vazquez C M, *et al.* “*Candidatus Accumulibacter delftensis*”: a clade IC novel polyphosphate-accumulating organism without denitrifying activity on nitrate [J]. Water Research, 2019, **161**: 136-151.
- [27] Graf J S, Mayr M J, Marchant H K, *et al.* Bloom of a denitrifying methanotroph, ‘*Candidatus Methyloirabilis limnetica*’, in a deep stratified lake [J]. Environmental Microbiology, 2018, **20**(7): 2598-2614.
- [28] Wang Q K, He J Z. Complete nitrogen removal via simultaneous nitrification and denitrification by a novel phosphate accumulating *Thauera* sp. strain SND5 [J]. Water Research, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116300.
- [29] 周石磊. 混合充氧强化水源水库贫营养好氧反硝化菌的脱氮特性及技术应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017. 8-11.
- Zhou S L. Nitrogen removal characteristics of indigenous-oligotrophic aerobic denitrifiers via in situ oxygen enhancement and technology application research [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. 8-11.
- [30] Hu B, Quan J N, Huang K, *et al.* Effects of C/N ratio and dissolved oxygen on aerobic denitrification process: a mathematical modeling study [J]. Chemosphere, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129521.
- [31] Liu Y X, Hu T T, Song Y J, *et al.* Heterotrophic nitrogen removal by *Acinetobacter* sp. Y1 isolated from coke plant wastewater [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2015, **120**(5): 549-554.
- [32] 鲍林林, 王晓燕, 陈永娟, 等. 北运河沉积物中主要脱氮功能微生物的群落特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1520-1529.
- Bao L L, Wang X Y, Chen Y J, *et al.* Diversity, abundance and distribution of *nirS*-type denitrifiers and Anammox bacteria in sediments of Beiyun River [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1520-1529.
- [33] 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.
- [34] 钊珍芳. 典型水体中 *nirS* 型反硝化菌群结构与脱氮特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019. 25-26.
- Zhao Z F. Community structure and denitrification characteristics of *nirS*-Type denitrifiers in typical water bodies [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. 25-26.
- [35] Yang X, Huang T L, Zhang H H. Effects of seasonal thermal stratification on the functional diversity and composition of the microbial community in a drinking water reservoir [J]. Water, 2015, **7**(10): 5525-5546.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)