

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素

周石磊¹, 孙悦¹, 张艺冉¹, 黄廷林^{2*}, 张春华², 方凯开², 曾明正², 李再兴¹, 崔建升¹

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 结合现场水质调查和 *nirS* 反硝化功能基因的高通量测序技术, 对周村水库春季热分层形成过程中的反硝化群落演变特征以及影响因素进行解析. 结果表明, 该时期水体分层逐渐形成, 水体硝氮 (NO_3^-)、氨氮 (NH_4^+)、总氮 (TN)、总有机碳 (TOC)、五日生化需氧量 (BOD_5)、高锰酸盐指数、总磷 (TP)、铁 (Fe) 和锰 (Mn) 均呈现显著差异 ($P < 0.01$), 氮素呈现明显下降趋势; 高通量测序得到 8703 个 OTU, 共归属于 3 个门、8 个主要的属, 其中变形菌门占比最大, 达到 45.27%~78.90%; α -多样性指数计算显示除辛普森指数 (Simpson 指数) 外, ACE 指数、Chao 指数、香农指数 (Shannon 指数) 以及覆盖率指数 (coverage 指数) 呈现显著差异 ($P < 0.05$); 主坐标分析春季 3~5 月间水体反硝化群落存在显著差异, 与置换多因素方差分析的结果相一致 ($P < 0.001$); 物种间网络分析显示, 该时期共有 7 个主要的模块, 包含 131 个节点 316 个边, 正向相关的边所占比例高达 95.25%; 物种-环境因子网络分析显示, 该时期共有 5 个模块, 包含 140 个节点 329 个边, 正向相关的边所占比例高达 51.98%; 指示物种分析得到 62 个指示 OTU, 关键物种分析得到 28 个关键物种 OTU; RDA 以及 mantel test 分析发现温度 (T)、溶解氧 (DO)、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 和 TP 是驱动水库春季水体反硝化菌群落结构以及关键反硝化物种演变的主要环境因素. 综上, 通过对该时期水体反硝化群落演变特征以及影响因素进行研究, 可以为水库水体氮素的迁移转化以及污染控制提供技术支持.

关键词: 反硝化群落; 水源水库; 春季; 网络分析; 驱动因素

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1666-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908189

Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir

ZHOU Shi-lei¹, SUN Yue¹, ZHANG Yi-ran¹, HUANG Ting-lin^{2*}, ZHANG Chun-hua², FANG Kai-kai², ZENG Ming-zheng², LI Zai-xing¹, CUI Jian-sheng¹

(1. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Combined with on-site water quality investigation and *nirS* gene high-throughput sequencing technology, the evolution characteristics and influencing factors of the denitrification community during the formation of spring thermal stratification in Zhoucun Reservoir were analyzed. The results show that the water body stratification gradually formed during this period, and the environmental factors (NO_3^- , NH_4^+ , TN, TOC, BOD_5 , permanganate index, TP, Fe, and Mn) showed significant differences ($P < 0.01$); nitrogen showed a significant decline process. High-throughput sequencing provided 8703 OTU, which were divided into three phyla and eight major genera, proteobacteria accounted for the largest proportion with 45.27%~78.90%. The α -diversity except for the Simpson index showed that the ACE index, Chao index, Shannon index, and coverage index showed significant differences ($P < 0.05$). The principal coordinate analysis showed the denitrification community exhibited significant differences in the spring, which was consistent with adonis result ($P < 0.001$); network analysis (OTU-OTU) showed that there were seven main modules in this period, including 316 edges of 131 nodes, and the proportion of positive correlation edges was 95.25%. Network analysis (OTU-environmental factors) showed that there were five modules in this period, including 329 edges of 140 nodes, and the proportion of positive correlation edges was 51.98%. Sixty-two indicator OTU and 28 keystone OTU were obtained based on the indicator OTU analysis and network analysis. RDA and mantel test analysis indicated that T , DO, NO_3^- , TN, TOC, BOD_5 , and TP were the main environmental factors driving the denitrifying bacterial community structure and the key denitrifying OTU evolution in spring. Our results will provide technical support for the migration and transformation of nitrogen in reservoir water and pollution control.

Key words: denitrification community; drinking water reservoir; spring; network analysis; driving factor

收稿日期: 2019-08-22; 修订日期: 2019-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51909056, 51478378)

作者简介: 周石磊 (1987~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为好氧反硝化菌脱氮机制与调控机制, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

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

水库水体作为重要的淡水水体,近年来,大多城市将水库作为重要的饮用水水源地. 因此,水体水质的健康与否直接关系着城市居民的用水安全. 我国大多数水库存在总氮超标、不同程度富营养化的问题,威胁城市供水安全^[1]. 目前,关于水源水库的研究主要着眼于特定时期水质特征^[2]、富营养化^[3]以及生态评价^[4]. 反硝化作为氮素演变过程的重要阶段,在氮素循环中扮演重要角色;然而,针对水源水库水体反硝化微生物群落演变特征及其环境驱动机制的研究还鲜见报道.

春季是周村水库的一个特殊时期,在这一时期水库水体环境(温度和溶解氧等)改变剧烈,水体氮素存在一个降低的过程^[5];为了更好地控制氮素污染、保护水库水体,系统性地深入分析该时期水体反硝化群落演变以及影响因素非常必要. 微生物网络分析作为解析微生物群落演变以及环境驱动因子的有力工具被广泛应用. 比如:Deng 等^[6]研究了用乳化植物油修复铀污染地下水中微生物群落应对环境扰动机制;Feng 等^[7]应用网络分析研究了关键功能类群基于底物资源和空间竞争对生物膜群落恢复力的影响机制;Xue 等^[8]研究了在水库蓝藻水华发生和消退后浮游生物群落中优势和稀有真核生物间的互作机制;Liu 等^[9]证实了微型真核浮游生物共存网络的模块与蓝藻生物量的关系以及生物间显著共存关系是变化而非固定的;Yu 等^[10]通过网络分析得到生物炭的添加可能导致由于环境扰动而产生更高的抵抗变化能力,从而提高系统的可持续性.

因此,本文针对周村水库春季水体氮素降低的特定时期,基于反硝化过程中典型功能基因 *nirS* 的高通量测序和微生物网络分析对水体反硝化微生物群落结构的演变特征以及驱动因子进行分析,通过揭示该时期微生物参与的氮元素生物地球化学循环过程的关键物种以及驱动因子,以期为周村水库水体氮污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集及测定

周村水库位于山东省枣庄市,建于 1960 年、总库容 8 400 万 m^3 ,是枣庄市重要的水源水库. 于 2019 年春季 3~5 月的每月 15 日采集主库区 1、2 和 3 号采样点的表层水体(0.5 m)、中层水体(7.5 m)和底层水体(15 m),分析该时期的水体水质和微生物群落特征,研究区域及采样点如图 1 所示. 现场应用 DS5(美国哈希公司)测定水体的深度、 T 、 DO 、电导率(EC)、氧化还原电位(ORP)、 pH 值和叶绿素(Chl-a)等环境指标;采集的水样依据文献^[11]完

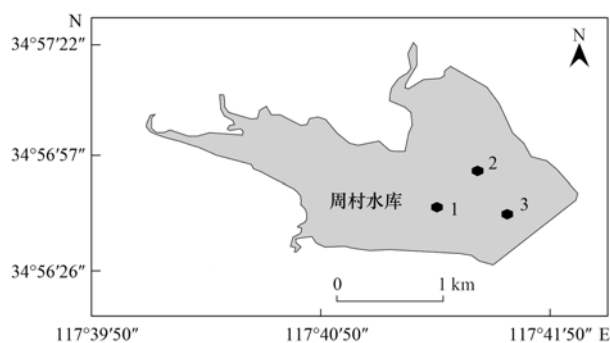


图 1 周村水库春季采样点分布示意

Fig. 1 Map of the sampling sites in the spring of Zhoucun Reservoir

成 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 TN 、 TOC 、高锰酸盐指数、 TP 、 Fe 和 Mn 的测定,并尽快完成 BOD_5 的测定^[11].

1.2 水体 DNA 提取及测序

分别取各个采样点表中底 1 L 的水样,并用 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤截留水体微生物,将滤膜寄送到上海美吉生物公司进行 DNA 提取;采用引物(Cd3Af/R3cd)反硝化细菌功能基因 *nirS* 进行 PCR 扩增^[12],PCR 反应体系以及 PCR 反应参数设置同文献^[13].

1.3 测序数据处理及分析

1.3.1 测序数据处理

采用 QIIME 对原始数据进行拼接、过滤和去除嵌合体,得到有效数据^[14]. 将有效序列按照 97% 的一致性聚类成为 OTU^[14],并采用 SILVA 数据库对 OTU 进行注释^[15].

1.3.2 α 多样性分析

α 多样性分析^[16]采用 Chao 指数和 ACE 指数作为菌群丰度估计量(community richness)、Shannon 指数和 Simpson 指数来表征菌群的多样性,用覆盖率指数来表征测序深度.

1.3.3 β 多样性分析

采用 R 语言进行 PCoA(principal co-ordinates analysis)分析,来研究样本群落组成的相似性和差异性^[17];利用置换多因素方差分析(Adonis 分析)研究不同分组间在统计学上的差异^[18].

1.3.4 指示物种分析

采用 indicpecies 包在 R3.4.3 中(<http://www.r-project.org/>)分析春季水体反硝化群落中的指示物种,并基于 RDA 和 mantel test 分析环境因子的影响程度.

1.3.5 物种与环境因子关系分析

结合方差膨胀因子分析(variance inflation factor, $\text{VIF} < 10$)和前向选择(R 软件中 adespatial 包)^[19],来筛选主要环境因子;通过 RDA 分析来研究物种和环境因子间的关系^[20]. 采用 R 语言进行 mantel test 分析,来检验微生物群落与环境因子两个矩阵的相关

性,从而分析环境因子对微生物群落的影响程度^[21].

1.4 网络分析

利用 Cephii 软件进行网络可视化分析^[22],选择“度 (degree) > 5”以及“中介中心值 (betweenness centrality value) < 1000”的节点作为关键物种^[23]. 分析水源水库在该时期反硝化群落以及关键物种演变特征;并基于 RDA 和 mantel test 分析环境因子对物种以及网络模块的影响. 参照前人的研究^[22,24],本文以各个模块群落主坐标分析的第一主成分来代表各个模块;然后通过计算各模块第一主成分与环境因子的斯皮尔曼相关性来分析微生物网络模块和环境因子的关系.

1.5 统计分析

本文中绘图和数据统计分析所需的软件为 SPSS、R 和 Origin 完成. 其中 $P < 0.05$ 表示存在显著差异, $0.001 < P < 0.01$ 表示存在极显著差异, $P <$

0.001 表示存在极其显著差异.

2 结果与讨论

2.1 春季水体水质特征

周村水库春季水体的水质如图 2 所示,该时期水体 T 从 3 月的 $(6.09 \pm 0.70)^\circ\text{C}$ 上升到 5 月的 $(16.24 \pm 4.01)^\circ\text{C}$; DO 从 3 月的 $(11.48 \pm 0.59) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 5 月的 $(4.51 \pm 6.05) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ORP 维持在 $114 \sim 226 \text{ mV}$; TOC、BOD₅ 以及高锰酸盐指数都有个升高的变化,分别从 3 月的 (3.30 ± 0.20) 、 (2.91 ± 0.16) 和 $(3.35 \pm 0.44) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 上升到 5 月的 (4.74 ± 0.35) 、 (6.06 ± 0.97) 和 $(4.44 \pm 0.58) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO_3^- 有一个明显地下降过程,从 3 月的 $(0.92 \pm 0.05) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 5 月的 $(0.08 \pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4^+ 维持在 $(0.1 \sim 0.3) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TN 的变化过程与 NO_3^- 类似,从 3 月的 $(1.25 \pm$

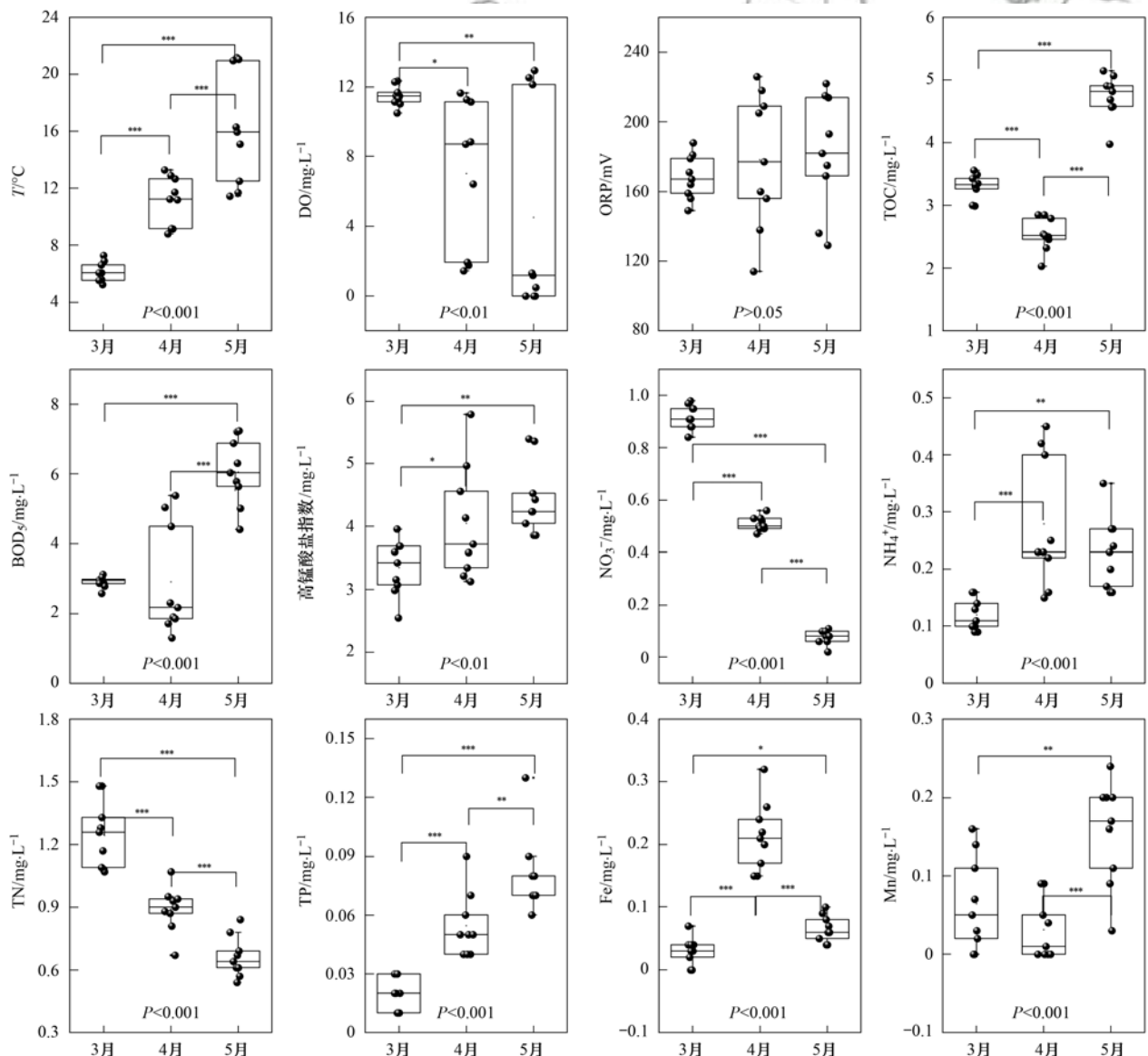


图 2 周村水库春季水体水质情况

Fig. 2 Changes in the environmental factors in the spring of Zhoucun Reservoir

0.16) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 5 月的 $(0.66 \pm 0.10) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TP 从 3 月的 $(0.02 \pm 0.01) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 5 月的 $(0.08 \pm 0.02) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Fe 有个先上升后下降的变化过程; Mn 从 3 月的 $(0.06 \pm 0.05) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 5 月的 $(0.16 \pm 0.07) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 通过单因素方差分析, 可知各个水质指标 (除 ORP 外) 在春季 3~5 月存在显著的差异 ($P < 0.01$); 各个月份间也大多存在显著差异 ($P < 0.01$). 与此同时, 随着水体分层的形成, 各个水质指标在水库垂向间差异逐渐增大.

2.2 反硝化细菌群落结构

2.2.1 α 多样性分析

如图 3 所示, 菌群丰度估计量参数 ACE 指数和 Chao 指数呈现了先上升后下降的过程, 从 3 月的 $1\,044.76 \pm 139.68$ 和 $1\,060.78 \pm 140.47$ 上升到 4 月的 $1\,299.10 \pm 343.79$ 和 $1\,272.83 \pm 257.20$, 下降到 5 月的 984.27 ± 168.23 和 993.67 ± 165.87 . 表征菌群

多样性的 Shannon 指数呈现下降过程, 从 3 月的 5.48 ± 0.40 下降到 5 月的 4.53 ± 0.62 , 表明反硝化细菌的多样性减小; Simpson 指数在春季没有显著差异 ($P > 0.05$), 维持在 $0.02 \sim 0.06$; 春季菌群覆盖率指数为 0.99 ± 0.01 , 足以满足测序深度要求. 与此同时, α 多样性分析除 Simpson 指数外都呈现显著差异 ($P < 0.05$).

2.2.2 反硝化细菌群落组成和结构

通过物种注释, 春季水库水体共得到 8703 个 OTU. 分为 3 个主要的门类, 主要为变形菌门 (Proteobacteria), 其余为未分类细菌 (unclassified_Bacteria) 和环境样本 (environmental_samples). 其中, 变形菌门为第一大门类, 所占比例为 $45.27\% \sim 78.90\%$, 从 3 月的 $(68.86 \pm 9.71)\%$ 下降到 5 月的 $(58.78 \pm 11.48)\%$; 未分类细菌为第二大门类, 所占比例为 $18.46\% \sim 53.81\%$, 从 3 月的 $(28.24 \pm 10.32)\%$ 上升到 5 月的 $(37.35 \pm 10.59)\%$.

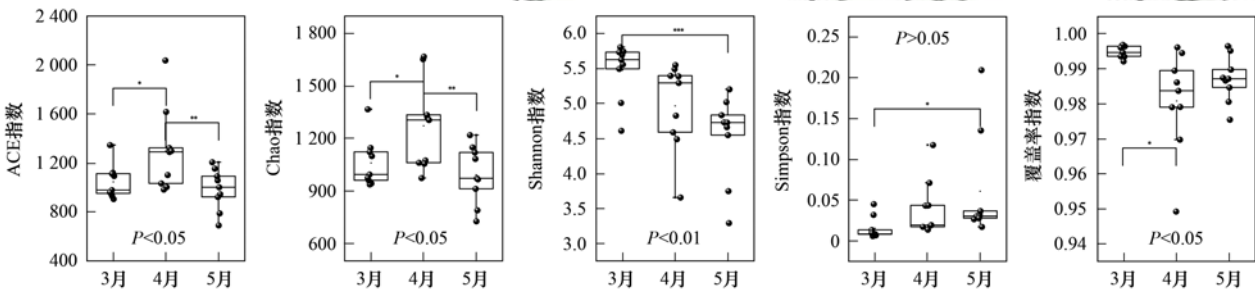


图 3 周村水库春季水体反硝化细菌群落多样性指数

Fig. 3 Denitrifying bacteria community diversity index in the spring of Zhoucun Reservoir

而在属水平上 (图 4), 图 4 中 1、2、3 表示 3 个采样点, S、M、B 表示表层水体、中层水体以及底层水体; 春季水体的微生物群落组成出现了很大差异. 主要的属为: unclassified_Bacteria、unclassified_B

Proteobacteria、unclassified_β-Proteobacteria、Dechloromonas、unclassified_Rhodocyclaceae、unclassified_Burkholderiales 和 environmental_samples. 其中未分类的占主体, 所占比例高达 $78.27\% \sim$

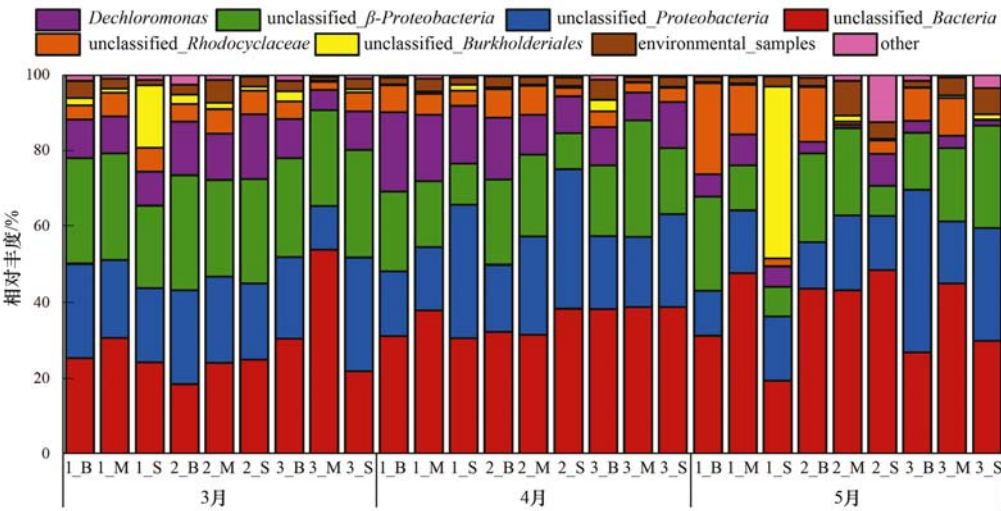


图 4 周村水库春季水体反硝化细菌属水平上的群落结构组成

Fig. 4 Microbial community composition of different genus samples in the spring of Zhoucun Reservoir

97.60%,可能与关于水源水库环境的反硝化菌研究较少有关。*Dechloromonas* 是水库春季水体的主要反硝化菌,从3月的 $(10.90 \pm 3.33)\%$ 先上升到4月的 $(13.31 \pm 4.42)\%$,再下降到5月的 $(4.42 \pm 2.77)\%$; *unclassified_Rhodocyclaceae* 从3月的 $(5.05 \pm 1.45)\%$ 先上升到5月的 $(8.52 \pm 7.90)\%$; *unclassified_Burkholderiales* 从3月的 $(3.20 \pm 5.05)\%$ 先上升到5月的 $(5.62 \pm 14.91)\%$. 有研究表明 *Dechloromonas* 能促进有机质和氮磷的去除^[25, 26];与此同时, *Dechloromonas* 作为主要反硝化菌广泛存在于湿地^[27]、反硝化反应器^[28]和水库^[29]. 另外, Zhang 等^[30]的研究发现 *Rhodocyclaceae* 是在处理低 C/N 污水的连续反硝化反应器中除氮的关键

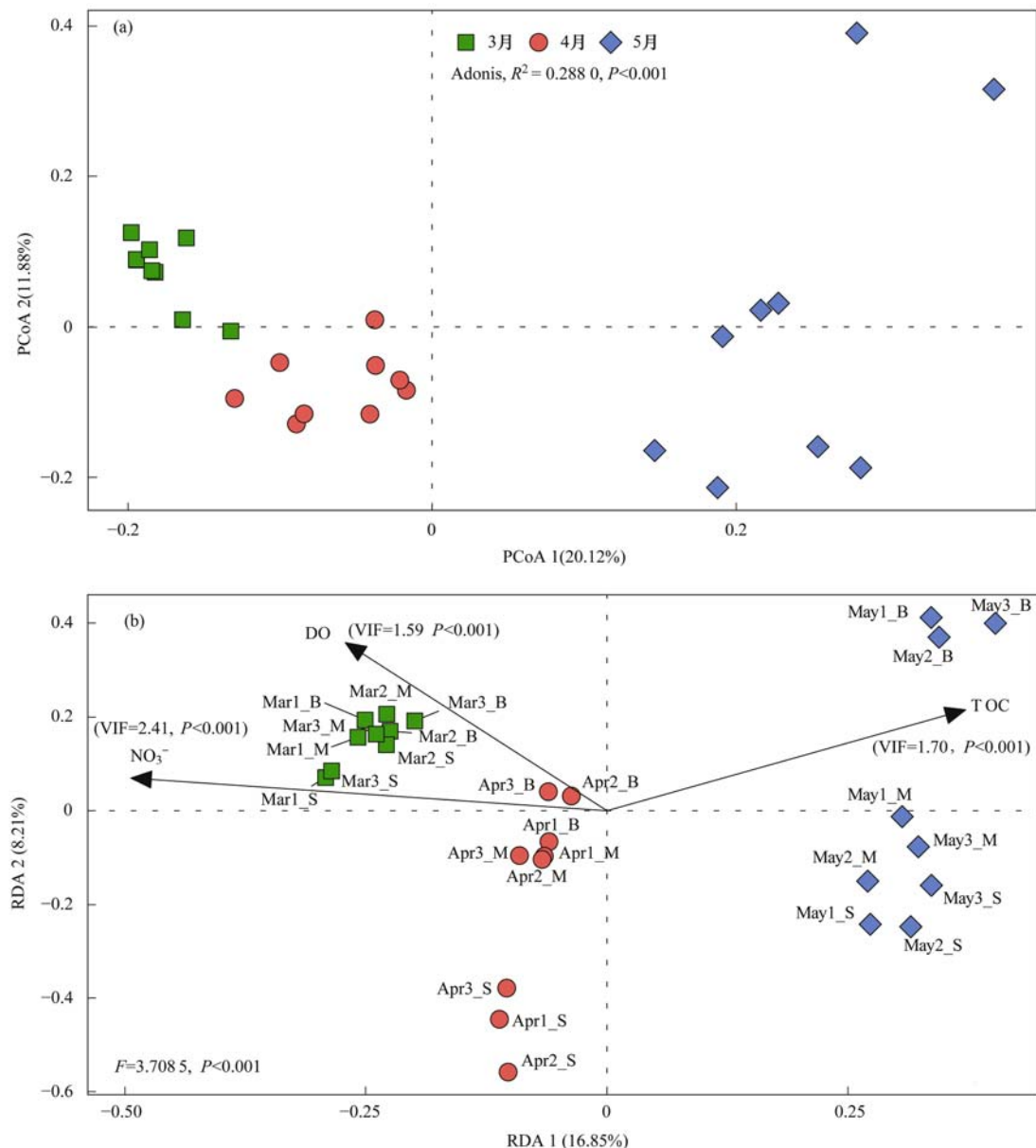
物种; Zhang 等^[31]的研究发现 *Burkholderiales* 是反硝化生物膜反应器中主要的反硝化菌株.

2.2.3 β 多样性分析

图5(a)为春季水库水体反硝化群落的分布情况. 结果表明, PCoA1 和 PCoA2 共解释了整体变化的32%; PCoA 显示不同月份的采样点分布较分散, 随着水体分层的形成同一时期的样品点变得更分散, 表明水体反硝化菌群落结构存在差异. 与此同时, 基于 Adonis 分析不同月份反硝化群落结构的差异性, 结果 $P < 0.001$, 表明春季不同月份水体反硝化群落结构存在显著差异.

2.2.4 指示物种分析

通过对春季水体反硝化群落进行分析, 得到 62



Mar1_B 表示 3 月 1 号采样点底层水体样本, 以此类推, 下同

图 5 周村水库春季水体反硝化细菌群落主坐标分析和冗余分析

Fig. 5 PCoA and RDA for the denitrifying bacterial populations in the spring of Zhoucun Reservoir

个指示 OTU, 隶属于 *Dechloromonas* (7 个 OTU)、*environmental_samples* (4 个 OTU)、*Pseudomonas* (1 个 OTU)、*unclassified_β-Proteobacteria* (6 个 OTU)、*unclassified_Rhodocyclaceae* (3 个 OTU)、*unclassified_Burkholderiales* (2 个 OTU)、*unclassified_Bacteria* (27 个 OTU) 和 *unclassified_Proteobacteria* (12 个 OTU). 与此同时, 通过对指示物种的群落结构进行主坐标分析(图 6), 结果显示: PCoA1 和

PCoA2 共解释了整体变化的 43.85%; 3、4 以及 5 月的样本分布在图 6 中不同区域, 3 月样本分布在第四象限、4 月样本分布在第一象限、5 月样本主要分布在 PCoA 的负半轴; 并且 5 月样本分布较分散与该时期水体分层相一致. 与此同时, 基于 Adonis 分析不同月份反硝化菌指示物种群落结构的差异性, 结果 $P < 0.001$, 表明春季不同月份水体反硝化菌指示物种群落结构存在显著差异.

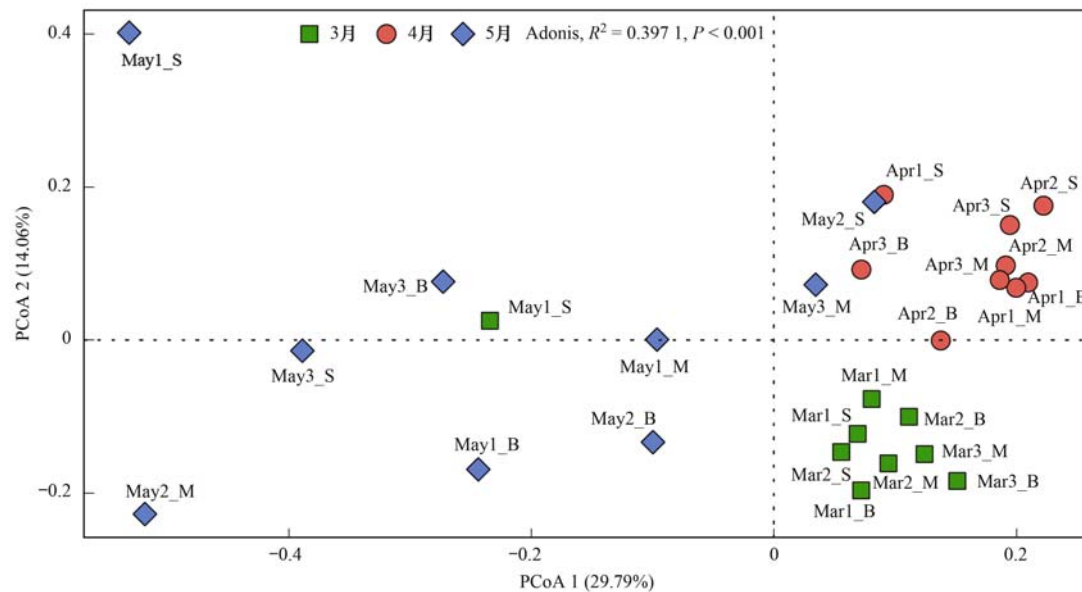


图 6 周村水库春季水体反硝化细菌指示物种群落主坐标分析

Fig. 6 PCoA for the indicator denitrifying bacterial population in the spring of Zhoucun Reservoir

2.2.5 物种与环境因子关系分析

为了研究春季水体反硝化菌与环境因子的关系, 本研究基于反硝化菌与环境因子进行了 RDA 分析[图 5(b)]. 通过前向选择, 本研究得到 3 个主要的环境因子为 NO_3^- ($\text{VIF} = 2.41$, $P < 0.001$)、DO ($\text{VIF} = 1.59$, $P < 0.001$) 以及 TOC ($\text{VIF} = 1.70$, $P < 0.001$), 分别解释了总体变化的 16.63%、8.05% 和 7.92%. RDA 分析得到前两个轴分别解释了总体的 16.85% 和 8.21%, 总共解释了 25.06%; NO_3^- 与 RDA1 的相关性为 -0.99 ($P < 0.001$)、DO 与 RDA1 的相关性为 -0.62 ($P < 0.001$)、TOC 与 RDA1 的相关性为 0.87 ($P < 0.001$); NO_3^- 和 TOC 是驱动反硝化菌演变的主要因素.

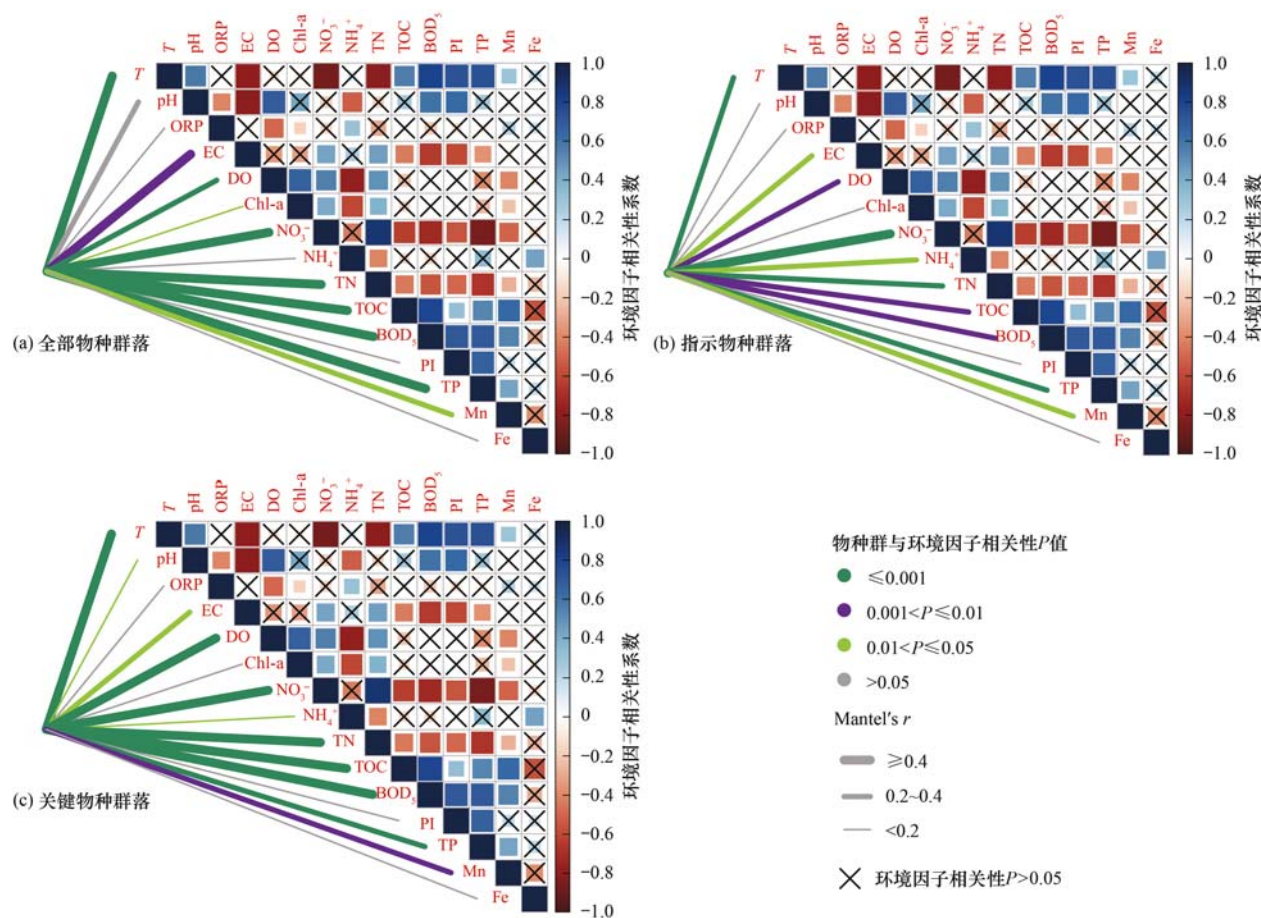
与此同时, 本研究基于 Mantel test 分析环境因子对春季水体反硝化群落的影响. 如图 7 所示, 分别为全部物种群落[图 7(a)]、指示物种群落[图 7(b)]以及关键物种群落[图 7(c)]与环境因子的关系. 图 7(a) 中显示环境因子 T 、EC、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 、TP 和 Mn 是影响全部反硝化物种群落的主要因素. 其中 T 、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 以及 TP 与物种群落的相关系数为 0.49 ($P < 0.001$)、 0.57

($P < 0.001$)、 0.41 ($P < 0.001$)、 0.45 ($P < 0.001$)、 0.42 ($P < 0.001$) 和 0.42 ($P < 0.001$). 图 7(b) 中显示环境因子 T 、EC、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 、TP 和 Mn 是影响指示反硝化物种群落的主要因素. 其与指示物种群落的相关系数为 0.40 ($P < 0.001$)、 0.29 ($P < 0.05$)、 0.22 ($P < 0.01$)、 0.43 ($P < 0.001$)、 0.33 ($P < 0.001$)、 0.30 ($P < 0.01$)、 0.30 ($P < 0.01$)、 0.39 ($P < 0.001$) 和 0.21 ($P < 0.05$). 与此同时, 物种群落结构的演变与该时期水体水质演变过程相一致, 该时期水体 T 与 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 以及 TP 呈现显著相关. 综上可知, T 、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 和 TP 是影响群落演变的关键因素.

2.3 网络分析

2.3.1 网络特性分析

选取物种 (OTU 水平) 间的斯皮尔曼相关性 $|r| > 0.8$, 显著性 $P < 0.001$ 的物种; 以及物种与环境因子的斯皮尔曼相关性 $|r| > 0.6$, 显著性 $P < 0.01$ 的物种-环境因子; 来构建微生物 OTU-OTU 网络和 OTU-环境因子网络, 研究春季水体反硝化菌物种间[图 8(a)]以及物种与环境因子的关系[图 8(b)]. 图中节点大小与网络节点的度成比例, 节点间边的



PI 为高锰酸盐指数,下同
图7 周村水库春季水体反硝化细菌群落环境驱动因子分析

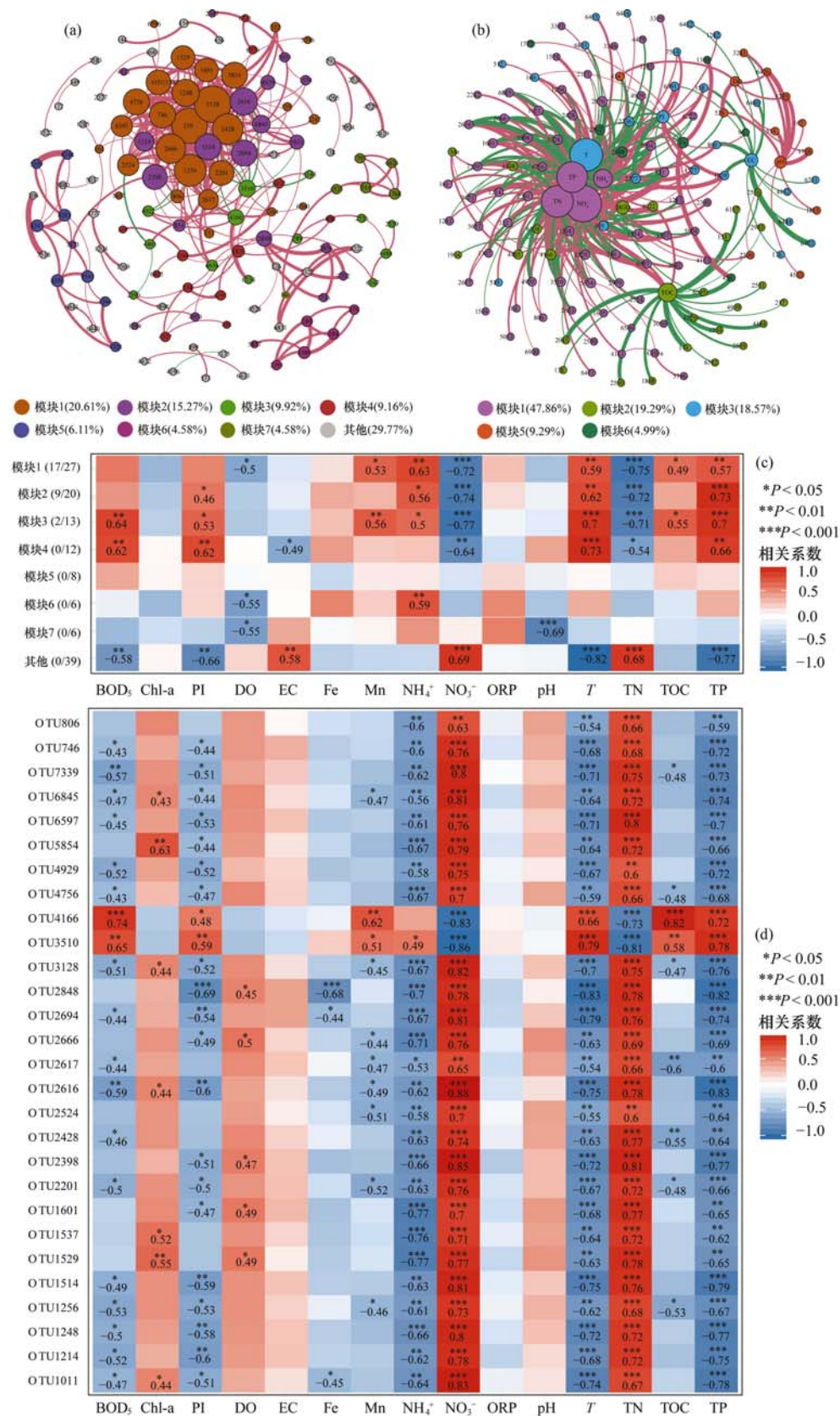
Fig. 7 Environmental drivers of the denitrifying bacterial populations in the spring of Zhoucun Reservoir

颜色显示物种间的相关关系,红色为正向关系、绿色为负向关系,边的宽度与相关系数 $|r|$ 成比例。

微生物 OTU-OTU 网络结果表明:该网络共得到 131 个节点 316 个边,正向相关的边所占比例高达 95.25%、负向相关的边所占比例为 4.75%;网络的平均度为 4.824、网络直径为 10、图密度为 0.037、平均加权度为 8.118、平均聚类系数为 0.559 和模块性为 $0.499 > 0.4$ 、表明网络具有模块结构^[32];得到 26 个模块,表示微生物网络中共有 26 个功能相近的关系紧密的一组微生物^[33],其中模块 1 占比 20.61%、模块 2 占比 15.27%、模块 3 占比 9.92%、模块 4 占比 9.16%、模块 5 占比 6.11%、模块 6 占比 4.58%、模块 7 占比 4.58% 和模块 8 ~ 26 占比 29.77%。基于节点度大于 6 和中介中心值小于 1 000 的标准,得到 28 个关键物种 OTU,分布在模块 1 中的有 17 个 OTU、分布在模块 2 中的有 9 个 OTU、分布在模块 3 中的有 13 个 OTU[图 8(d)]。关键物种 OTU 如下:1 011、1 214、1 248、1 256、1 514、1 529、1 537、1 601、2 201、2 398、2 428、2 524、2 616、2 617、2 666、2 694、2 848、3 128、3 510、4 166、4 756、4 929、5 854、6 597、6 845、

7 339、746 和 806。

微生物 OTU-环境因子网络结果表明:该网络共得到 140 个节点 329 个边,正向相关的边所占比例高达 51.98%、负向相关的边所占比例为 48.02%;网络的平均度为 4.7,网络直径为 6,图密度为 0.034,平均加权度为 3.327,模块性为 0.345;5 个模块中模块 1 占比 47.86%、模块 2 占比 19.29%、模块 3 占比 18.57%、模块 4 占比 9.29%、模块 5 占比 4.99%;模块 1 中的物种与环境因子 NO_3^- 、TN、 NH_4^+ 和 TP 有关,模块 2 中的物种与环境因子 TOC 和 BOD_5 有关,模块 3 中的物种与环境因子 EC、pH 和 DO 有关,模块 4 中的物种与环境因子 T 和高锰酸盐指数有关,模块 5 中的物种与环境因子 Fe 有关。特别地,与 NO_3^- 有关的 OTU 有 61 个,具体如下:1 011、1 214、1 243、1 248、1 256、1 283、1 307、1 514、1 529、1 537、1 574、1 601、1 605、2 201、2 242、2 377、2 390、2 398、2 428、2 524、2 616、2 617、2 633、2 666、2 694、2 702、2 736、2 848、2 876、2 979、3 050、3 092、3 128、322、3 336、3 339、3 510、4 022、4 111、4 148、4 166、434、4 405、4 756、4 929、495、4 950、5 033、5 657、



(a) 和 (b) 中数字为对应的 OTU

图 8 周村水库春季水体反硝化细菌群落的网络分析

Fig. 8 Network analysis for the denitrifying bacterial populations in the spring of Zhoucun Reservoir

5 854、5 904、6 471、6 538、6 596、6 597、6 845、7 339、746、7 473、806 和 851.

2.3.2 网络模块与环境因子相关分析

为了进一步研究环境因子对春季水体反硝化菌

以及群落结构演变地影响,本文分析了环境因子对微生物模块的相关性[图 8(c)]和关键物种 OTU 的相关性[图 8(d)]. 参照前人的研究^[22, 24],本文计算了各个模块的第一主成分来代表各个模块;然后通过计算各模块第一主成分与环境因子的斯皮尔曼相关性来分析微生物网络模块和环境因子的关系. 如图 8(c)可知, NO_3^- 对模块 1、模块 2、模块 3 以及模块 4 呈现显著负相关,相关系数为 $-0.72 (P < 0.001)$ 、 $-0.74 (P < 0.001)$ 、 $-0.77 (P < 0.001)$ 和 $-0.64 (P < 0.001)$,表明 NO_3^- 对该反硝化菌模块群落演变呈负向作用;TN 也与模块 1、模块 2、模块 3 以及模块 4 呈现显著负相关,相关系数为 $-0.75 (P < 0.001)$ 、 $-0.72 (P < 0.001)$ 、 $-0.71 (P < 0.001)$ 和 $-0.54 (P < 0.001)$;T 和 TP 对模块 1、模块 2、模块 3 以及模块 4 呈现显著正相关,相关系数为 0.59 和 $0.57 (P < 0.001)$ 、 0.62 和 $0.73 (P < 0.001)$ 、 0.7 和 $0.7 (P < 0.001)$ 以及 0.73 和 $0.66 (P < 0.001)$,表明 T 和 TP 对这些反硝化菌模块群落演变呈正向作用;环境因子 BOD_5 、高锰酸盐指数、T 以及 TP 对其他模块呈显著负相关,EC、 NO_3^- 以及 TN 对其他模块呈显著正相关.

关键物种 OTU 与环境因子的相关性如图[图 8(d)]所示,结果显示:关键物种 OTU3510 以及 OTU4166 与 NO_3^- 和 TN 呈现显著负相关,相关性系数为 $-0.86 (P < 0.001)$ 和 $-0.83 (P < 0.001)$ 以及 $-0.81 (P < 0.001)$ 和 $-0.73 (P < 0.001)$;OTU3510 以及 OTU4166 与 BOD_5 、高锰酸盐指数、Mn、T、TOC 和 TP 呈现显著正相关,相关性系数为 $0.65 (P < 0.01)$ 和 $0.74 (P < 0.001)$ 、 $0.59 (P < 0.01)$ 和 $0.48 (P < 0.05)$ 、 $0.51 (P < 0.05)$ 和 $0.62 (P < 0.01)$ 、 $0.79 (P < 0.001)$ 和 $0.66 (P < 0.001)$ 、 $0.58 (P < 0.01)$ 和 $0.82 (P < 0.001)$ 、 $0.78 (P < 0.001)$ 和 $0.72 (P < 0.001)$;大多数关键物种 OTU 与 NO_3^- 和 TN 呈显著正相关,相关系数为 $0.60 \sim 0.88 (P < 0.001)$,与 BOD_5 、高锰酸盐指数、 NH_4^+ 、T 和 TP 呈显著负相关,相关系数为 $0.43 \sim 0.83 (P < 0.05)$. 与此同时,基于关键物种的反硝化群落与环境因子的 mantel test 分析可知,T、EC、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 、TP 和 Mn 是影响关键物种反硝化物种群落的主要因素. 其与物种群落的相关系数为 $0.43 (P < 0.001)$ 、 $0.24 (P < 0.05)$ 、 $0.41 (P < 0.001)$ 、 $0.71 (P < 0.001)$ 、 $0.42 (P < 0.001)$ 、 $0.66 (P < 0.001)$ 、 $0.55 (P < 0.001)$ 、 $0.40 (P < 0.001)$ 和 $0.32 (P < 0.01)$. 表明,春季水库水体的环境因子 T、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 和 TP 是驱动该时期水体反硝化菌群落结构以及关键反硝化物种演变的主要

因素.

3 结论

(1) 春季水体水质 T、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 、高锰酸盐指数、TP、Fe 以及 Mn 呈现显著差异,其中 NO_3^- 和 TN 呈现明显的下降过程.

(2) 反硝化细菌主要隶属于变形菌 (Proteobacteria),所占比例为 $45.27\% \sim 78.90\%$; Adonis 分析显示 3~5 月间水体反硝化群落呈现显著差异 ($P < 0.001$).

(3) 网络分析显示该时期水体反硝化群落物种主体呈正向作用关系, Mantel test、RDA 以及相关性分析得出 T、DO、 NO_3^- 、TN、TOC、 BOD_5 和 TP 是驱动该时期水体反硝化菌群落结构以及关键反硝化物种演变的因素.

参考文献:

- [1] Huang T L. Water pollution and water quality control of selected chinese reservoir basins[M]. Cham: Springer, 2016.
- [2] 吕晓龙, 黄廷林, 李楠, 等. 暴雨径流潜流过程及其对分层水库水质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 3064-3072.
- [3] Lü X L, Huang T L, Li N, et al. Impact of stormwater inflow on water quality of stratified source reservoir [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(7): 3064-3072.
- [4] 苟婷, 马千里, 王振兴, 等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4141-4150.
- [5] Gou T, Ma Q L, Wang Z X, et al. Eutrophication and characteristics of cyanobacteria bloom in the summer in Guishi reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4141-4150.
- [6] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 89-98.
- [7] Yu C C, Zhao W T, Gao X F, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of metals in drinking water sources from the Luhun reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 89-98.
- [8] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- [9] Zhang C H, Huang T L, Fang K K, et al. Analysis of driving factors on the nitrogen decrease in the early stage of the thermal stratification in main area of Zhoucun Reservoir [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- [10] Deng Y, Zhang P, Qin Y J, et al. Network succession reveals the importance of competition in response to emulsified vegetable oil amendment for uranium bioremediation [J]. Environmental Microbiology, 2016, **18**(1): 205-218.
- [11] Feng K, Zhang Z J, Cai W W, et al. Biodiversity and species competition regulate the resilience of microbial biofilm community [J]. Molecular Ecology, 2017, **26**(21): 6170-6182.
- [12] Xue Y Y, Chen H H, Yang J R, et al. Distinct patterns and processes of abundant and rare eukaryotic plankton communities following a reservoir cyanobacterial bloom [J]. The ISME

- Journal, 2018, **12**(9): 2263-2277.
- [9] Liu L M, Chen H H, Liu M, *et al.* Response of the eukaryotic plankton community to the cyanobacterial biomass cycle over 6 years in two subtropical reservoirs[J]. The ISME Journal, 2019, **13**(9): 2196-2208.
- [10] Yu J L, Deem L M, Crow S E, *et al.* Biochar application influences microbial assemblage complexity and composition due to soil and bioenergy crop type interactions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **117**: 97-107.
- [11] 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.
- [12] Zhou S L, Huang T L, Zhang C H, *et al.* Illumina MiSeq sequencing reveals the community composition of NirS-Type and NirK-Type denitrifiers in Zhoucun reservoir-a large shallow eutrophic reservoir in northern China[J]. RSC Advances, 2016, **6**(94): 91517-91528.
- [13] 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 X, 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.
- [14] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. Nature Methods, 2010, **7**(5): 335-336.
- [15] Wang Q, Garrity G M, Tiedje J M, *et al.* Naïve Bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(16): 5261-5267.
- [16] 滕泽栋, 李敏, 朱静, 等. 野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4589-4597.
- Teng Z D, Li M, Zhu J, *et al.* Effects of soil microbial diversity on the phosphate fraction in the Rhizosphere of *Phragmites communis* in the Yeyahu wetland in Beijing, China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4589-4597.
- [17] Calderón K, Spor A, Breuil M C, *et al.* Effectiveness of ecological rescue for altered soil microbial communities and functions[J]. The ISME Journal, 2017, **11**(1): 272-283.
- [18] Anderson M J, Ellingsen K E, Mcardle B H. Multivariate dispersion as a measure of beta diversity[J]. Ecology Letters, 2006, **9**(6): 683-693.
- [19] Guo Y Q, Chen X T, Wu Y Y, *et al.* Natural revegetation of a semiarid habitat alters taxonomic and functional diversity of soil microbial communities[J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 598-606.
- [20] Huhe, Chen X J, Hou F J, *et al.* Bacterial and fungal community structures in loess plateau grasslands with different grazing intensities[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, **8**: 606.
- [21] Groussin M, Mazel F, Sanders J G, *et al.* Unraveling the processes shaping mammalian gut microbiomes over evolutionary time[J]. Nature Communications, 2017, **8**(1): 14319.
- [22] Zhang B G, Zhang J, Liu Y, *et al.* Co-occurrence patterns of soybean rhizosphere microbiome at a continental scale[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **118**: 178-186.
- [23] Li Y, Wu H N, Shen Y, *et al.* Statistical determination of crucial taxa indicative of pollution gradients in sediments of Lake Taihu, China[J]. Environmental Pollution, 2019, **246**: 753-762.
- [24] De Menezes A B, Prendergast-Miller M T, Richardson A E, *et al.* Network analysis reveals that bacteria and fungi form modules that correlate independently with soil parameters [J]. Environmental Microbiology, 2015, **17**(8): 2677-2689.
- [25] Zhang X, Fu W J, Yin Y X, *et al.* Adsorption-reduction removal of Cr (VI) by tobacco petiole pyrolytic biochar: Batch experiment, kinetic and mechanism studies [J]. Bioresource Technology, 2018, **268**: 149-157.
- [26] Kong X X, Jiang J L, Qiao B, *et al.* The biodegradation of cefuroxime, cefotaxime and cefpirome by the synthetic consortium with probiotic *Bacillus clausii* and investigation of their potential biodegradation pathways[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 271-280.
- [27] Chen D Y, Gu X S, Zhu W Y, *et al.* Denitrification- and anammox-dominant simultaneous nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in subsurface flow constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2019, **271**: 298-305.
- [28] Qian W T, Ma B, Li X Y, *et al.* Long-term effect of pH on denitrification: High pH benefits achieving partial-denitrification [J]. Bioresource Technology, 2019, **278**: 444-449.
- [29] 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.
- [30] Zhang T, Wang B, Li X Y, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **335**: 330-337.
- [31] Zhang Y M, Wang L M, Han W, *et al.* Nitrate removal, spatiotemporal communities of denitrifiers and the importance of their genetic potential for denitrification in novel denitrifying bioreactors [J]. Bioresource Technology, 2017, **241**: 552-562.
- [32] 沈烽, 黄睿, 曾巾, 等. 分子生态网络分析研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(S1): 94-98.
- Shen F, Huang R, Zeng J, *et al.* Progress of the molecular ecology network analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(S1): 94-98.
- [33] Zhou J Z, Deng Y, Luo F, *et al.* Phylogenetic molecular ecological network of soil microbial communities in response to elevated CO₂ [J]. mBio, 2011, **2**(4), doi: 10.1128/mBio.00122-11.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)