

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构

康鹏亮, 黄廷林*, 张海涵*, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾竞宇

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 选取西安市区 6 个典型景观水体作为研究对象, 在分析景观水体水质指标的基础上, 运用 Illumina 高通量测序技术对景观水体中的 *nirS* 型反硝化细菌种群结构和多样性进行诊断, 以期探明景观微污染水体水质与反硝化细菌种群结构多样性的偶联机制. 结果表明, 丰庆公园和劳动公园水体属于劣 V 类水, 而曲江池、木塔寺生态遗址公园、新纪元公园水体符合 V 类水质标准, 永阳公园水体符合 IV 类水标准. 总氮从 1.21 ~ 6.50 mg·L⁻¹ ($P < 0.05$), 永阳公园水体总氮最低, 丰庆公园最高. 劳动公园水体总磷含量最高, 为 0.10 mg·L⁻¹, 曲江池总磷最低, 为 0.02 mg·L⁻¹ ($P < 0.05$). 劳动公园水体氨氮为曲江池和丰庆公园的 4.44 倍 ($P < 0.01$). Illumina 高通量测序结果表明 6 个景观水体中 *nirS* 型反硝化细菌优势种属差异显著, 副球菌属 (*Paracoccus* sp.)、假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)、红长命菌属 (*Rubrivivax* sp.) 为优势菌群. 主成分分析 (PCA) 表明来自新纪元公园和木塔寺公园水体的 *nirS* 型反硝化细菌种群结构主要受水体 NH₄⁺-N 和高锰酸盐指数含量的调控, 而 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN、TP 和 DO 对劳动公园和丰庆公园水体的 *nirS* 型反硝化细菌的种群结构影响显著; 水体 pH 对永阳公园的 *nirS* 型反硝化细菌的种群结构影响显著. 结果表明, 西安市典型景观水体 *nirS* 型反硝化细菌的种群结构受不同水质指标的综合调控.

关键词: 景观水体; 水质; *nirS* 型反硝化细菌; Illumina 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5174-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703179

Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an

KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin*, ZHANG Hai-han*, CHEN Sheng-nan, SHANG Pan-lu, FENG Ji, JIA Jing-yu

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Six micro-polluted landscape water bodies were selected to explore the relationship between water quality and the *nirS*-Type denitrifier community structure and diversity with an Illumina high-throughput sequencing technique. The results of a physico-chemical analysis of the water bodies showed that the Fengqing Park (FQ) and Laodong Park (LD) water bodies were classified as inferior V water quality, the Qujiang Park (QJ), Mutasi Park (MTS), and Xinjiyuan Park (XJY) water bodies were classified as V water quality, and the Yongyang Park (YY) water quality was classified as IV. The TN values varied from 1.21 mg·L⁻¹ to 6.50 mg·L⁻¹, with the lowest value found in YY and the highest in FQ ($P < 0.05$). TP was significantly higher in LD (0.10 mg·L⁻¹) and significantly lower in QJ [0.02 mg·L⁻¹ ($P < 0.05$)]. The NH₄⁺-N in LD was 4.44 times higher than that in QJ and FQ ($P < 0.01$). Illumina high-throughput sequencing revealed that the denitrifier community composition was significantly different among the six water bodies, and *Paracoccus* sp., *Pseudomonas* sp., and *Rubrivivax* sp. were the dominant genus species. A principle component analysis (PCA) indicated that the *nirS*-Type denitrifier communities of XJY and MTS were mainly regulated by NH₄⁺-N and the permanganate index, LD and FQ were significantly influenced by NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, TN, TP, and DO, and YY was significantly influenced by pH value. Our results showed that *nirS*-Type denitrifier communities were regulated by different water quality indicators.

Key words: scenic water; water quality; *nirS*-Type denitrifier community; Illumina high throughput sequence

随着城市化发展步伐不断加快, 生态城市建设被大力倡导, 城市景观水体的重要性越来越显著. 城市景观水体在美化城市环境中扮演着非常重要的角色. 由于城市景观水体水域面积一般较小, 流动性差, 水体自身的净化能力薄弱, 再加上外源性污染物的输入, 随着时间的推移, 必将造成水质恶化的现象^[1,2]. 景观水体中微生物群落结构与水质指标之间有着密切的关系, 而水体中的功能微生物在营养要素循环、转化和迁移的过程中扮演着“生源要素驱动泵”的角色^[3]. 同时, 水体水质演变也会

诱导水体功能微生物种群结构和代谢活性发生显著改变^[4]. 因此, 景观水体中功能微生物种群结构多样性可以作为水环境健康的重要指标之一.

在城市景观水体生态系统中, 内源氮素累积是

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400706); 国家自然科学基金项目(51408466); 陕西省青年科技新星项目(2015KJXX-32)

作者简介: 康鹏亮(1993~), 男, 硕士, 主要研究方向为水体微生物群落结构, E-mail: kangpengliang09@163.com

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

导致水质富营养化的主要原因之一, 在该系统存在大量功能微生物(如光合细菌、硝化细菌和反硝化细菌)。其中, 反硝化菌群代谢有益于改善景观水体水质。由于反硝化细菌种类繁多且多数不可培养, 因而通过传统的分离培养技术难于针对环境中的反硝化菌群结构与功能进行深入全面剖析。随着分子生物学和生物信息学的发展, 克隆文库法^[5]、变性梯度凝胶电泳技术^[6]、末端限制性片段分析技术^[7]、荧光原位杂交技术^[8]、微阵列技术^[9]和高通量 DNA 测序^[10]等技术为诊断水体微生物结构与功能注入了新鲜血液。黄廷林等^[11]运用巢式 PCR-DGGE 和克隆测序技术研究了典型景观水体细菌和真菌的群落结构多样性。张雅洁等^[12]运用高通量 DNA 测序技术研究了北京市北海公园景观湖水体细菌种群结构与水质的关系。目前, 关于反硝化菌群结构的研究主要集中在污染土壤^[13]、水源水库^[14]、河流沉积物^[15]、城市生活污水^[16]、人工湿地^[17]和海岸带^[18]等生态系统。然而, 有关城市典型景观水体反硝化菌群结构及其与水质关系的研究却鲜见报道。

在反硝化细菌细胞内, 基于硝酸还原酶、氧化

亚氮还原酶、氧化氮还原酶、亚硝酸还原酶的催化作用实现脱氮过程, 这些功能酶的编码基因分别为 *nar*、*nos*、*nor* 和 *nir*^[13]。其中, 将亚硝酸盐还原成气体的最初阶段是由 *nir* 基因表达驱动, 包括 *nirS* 编码含亚铁血红素酶和 *nirK* 编码的含铜酶^[14]。大部分反硝化细菌均含有 *nirS* 基因, 在不同生态系统中分布广泛, GenBank 数据库中 *nirS* 基因信息丰度最大^[13-18]。因此, 本文选取西安市 6 个典型景观水体作为研究对象, 在分析了景观水体的主要水质指标的基础上, 运用高通量 DNA 测序技术对景观水体中 *nirS* 型反硝化细菌种群结构和多样性进行分析, 探明西安市典型景观水体水质与反硝化细菌种群结构多样性的关系, 以期阐释城市景观水体功能菌群微生态结构及水体反硝化菌剂研制应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

本研究选取西安市具有代表性的城市典型景观水体, 包括西安市各区域内的旅游景区、市民休闲、科技办公园区具有不同功能的景观水体(表 1)。

表 1 景观水体描述

Table 1 Description of the six scenic water bodies

景观水体	湖面面积 A/m^2	景观水体简介
丰庆公园(FQ)	50 000	是现代生态景观与历史文化景观融为一体的皇家园林, 以污水厂再生水为补给水源
曲江池公园(QJ)	700 000	是集历史文化保护、生态园林、山水景观、休闲旅游为一体的开放式文化公园, 补给水源为地表水
新纪元公园(XJY)	18 000	是集体育锻炼、风景欣赏于一体的休闲公园, 补给水源为地表水
永阳公园(YY)	28 000	是一个高档次的具有人文气息的科技公园, 补给水源为地表
劳动公园(LD)	3 000	为融植物观赏、体育健身、娱乐休闲于一体的综合性公园, 富营养化程度严重
雁塔寺公园(MTS)	5 020	是一个具有高品质文化内涵的生态遗址公园, 补给水源为地表水

1.2 水样采集

2016 年 11 月在西安市 6 个典型城市景观水体采集水样, 每个景观水体选取 3 个采样点($n=3$), 采用无菌柱状取水器在每个采样点采集表层(50 cm)水样 2 L, 装入无菌塑料瓶中, 立即运回实验室, 用于各项水质指标的测定和反硝化细菌群落结构分析。

1.3 水质指标测定

现场测定景观水体温度、pH 和溶解氧(DO)(HQ30d 便携式分析仪, 美国 HACH 公司)。高锰酸盐指数、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、亚硝氮(NO_2^--N)、总磷(TP)等均参照文献^[19]测定(日本岛津, 紫外-可见分光光度计, UVmini-1240)。其中, TP 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫

外分光光度法, NO_3^--N 采用紫外分光光度法, NO_2^--N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法, NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定, Fe 采用火焰原子吸收法。

1.4 水体反硝化细菌群落结构测定

1.4.1 样品总 DNA 提取

在超净工作台, 分别取 1 L 的水样经 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤, 采用水体 DNA 提取试剂盒(Water DNA Kit, Omega, USA)提取水体微生物总 DNA。利用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提总的 DNA^[20], 测量 DNA 浓度(NanoDrop 2000), 保存在 -20°C 待用。

1.4.2 高通量测序

采用通用引物(Cd3Af/R3cd)反硝化细菌功能基因 *nirS* 进行 PCR 扩增^[21,22], 修饰后的通用引物 Cd3Af/R3cd 含有不同的标签从而区分不同样品。

PCR 反应体系为 20 μL : DNA 模板 10ng、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 0.8 μL (5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、Reverse Primer 0.8 μL (5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、用 ddH₂O 补足至 20 μL 。PCR 程序: 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 4 min, 95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 40 s, 56 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 40 s, 28 个循环, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 10 min。每个样品 3 次重复($n=3$), 将同一样品的 PCR 产物混合后用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳检测, 使用凝胶回收试剂盒(Axygen, USA)切胶回收 PCR 产物, Tris-HCl 洗脱、1.5% 琼脂糖电泳检测^[23]。参照电泳初步定量结果, 将 PCR 产物用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统(Promega, USA)进行定量, 之后按照每个样品的测量量要求, 进行相应比例的混合, 保存在 -80 $^{\circ}\text{C}$ 待测。高通量测序在上海美吉生物公司进行, 按标准流程 Illumina MiSeq 测序平台进行测序。

1.5 数据分析

1.5.1 方差分析

不同景观水体水质指标统计分析采用单因素方差分析(One way-ANOVA)进行(Tukey's test 检验, SPSS16.0)。

1.5.2 高通量数据分析

测序的原始数据经过 Fast QC 软件进行质量控制, Prinseq 软件过滤小于 250bp 序列。高通量测序所得优质序列通过 QIIME (<http://qiime.org/tutorials/index.html>) 进行处理, 区分样本后进行 OTU(operational taxonomic units) 聚类分析和物种分类学分析。基于 OTU 进行反硝化菌群多样性指数(Coverage、Chao 1、ACE、Shannon 和 Simpson 指数)分析^[24]。采用稀疏曲线(rarefaction curve)评价测序量是否代表原始反硝化菌群的多样性。

1.5.3 主成分分析和热图分析

采用主成分分析(principal component analysis, PCA)方法, 运用 CANOCO (Version 4.5) 软件解析水体反硝化细菌群落与水质之间的关系。在主轴 PC1 和主轴 PC2 构成的平面中, 箭头表示水质因子, 向量长短代表着相应水质指标在主轴中的作用, 箭头位于的象限表示水质因子与轴间相关性的正负, 并采用蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo permutation)统计水质与群落的相关性^[25]。采用 R 软件(Version 2.1.1)建立热图(heat map), 用颜色变化来反映二维矩阵数据信息, 通过颜色梯度反映不同景观水体反硝化菌群在属水平上群落组成的相似性和差异性^[25~27]。

2 结果与讨论

2.1 景观水体水质特征分析

6 个典型景观水体水质分析结果表明(表 2), 水温和 pH 差异不显著($P>0.05$), 都在水环境的正常范围内, 各景观水体的 pH 整体维持在较高的水平, 这可能是水体水生植物的光合作用吸收了水中的 CO₂, 从而导致了较高的 pH。景观水体总氮值变化范围为(1.21 \pm 0.04) ~ (6.50 \pm 0.08) mg $\cdot\text{L}^{-1}$ ($F=56.71$, $P<0.01$)。根据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002), 丰庆公园和劳动公园水体总氮含量都大于 2 mg $\cdot\text{L}^{-1}$, 属于劣 V 类水。而曲江池、木塔寺生态遗址公园、新纪元公园水体属于 V 类水, 永阳公园属于 IV 类水。劳动公园的总磷含量最高, 为(0.10 \pm 0.02) mg $\cdot\text{L}^{-1}$, 这可能与沉积物的磷释放有关。一方面由于劳动公园水体温度是 6 个景观水体中最高的, 因此水生生物快速繁殖导致水体及沉积物的氧气快速下降, 进而使得沉积物向水体释放磷, 另一方面可能与游客长期向水体中投加鱼饵有关; 曲江池的总磷含量最低, 为(0.02 \pm 0.00) mg $\cdot\text{L}^{-1}$ ($F=15.62$, $P<0.05$)。其中劳动公园的水体符合 V 类水标准, 永阳公园、木塔寺生态遗址公园、新纪元公园和丰庆公园水体符合 III 类水标准, 曲江池水体符合 II 类水标准。劳动公园水体氨氮为曲江池和丰庆公园水体氨氮含量的 4.44 倍($F=143.26$, $P<0.01$), 劳动公园水体符合 III 类水标准, 木塔寺生态遗址公园、新纪元公园水体符合 III 类水标准, 曲江池、永阳公园和丰庆公园水体符合 II 类水标准。木塔寺生态遗址公园水体高锰酸盐指数显著高于丰庆公园的。木塔寺生态遗址公园水体符合 V 类水标准, 永阳公园、新纪元公园和劳动公园水体符合 IV 类水标准, 丰庆公园和曲江池水体符合 II 类水标准。硝酸盐氮的含量从(0.13 \pm 0.05) ~ (5.88 \pm 0.03) mg $\cdot\text{L}^{-1}$, 其中丰庆公园最高, 永阳公园最低($F=62.56$, $P<0.01$)。永阳公园的铁含量相对较高, 但是差异不显著($P>0.05$)。由于丰庆公园的补给水源为污水厂再生水, 因此不可避免地会将污水厂的硝化细菌带入公园水体, 这样就会降低水体氨氮浓度, 增高硝酸盐氮浓度, 也就解释了 6 个景观水体中丰庆公园水体氨氮浓度最低, 硝氮浓度最高。水体水质情况与水体自身的条件相关, 水域面积大、流动性较好的丰庆公园和曲江池的高锰酸盐指数较低, 相反水域面积小、流动性差的新纪元公园、永阳公园、劳动公园

和木塔寺生态遗址公园的高锰酸盐指数较高. 与此同时水体的水质与入流量密切相关, 入流量相对较大的劳动公园的总氮含量比较高, 但是入流量并不是太高的丰庆公园的总氮含量却是 6 个景观水体中最高的, 这是由于该公园补给水源为含氮量高的污水厂再生水的缘故, 这与 Zhao 等^[28]的研究结果一致. 各水体氮、磷污染较严重, 丰庆公园、曲江池、新纪元公园、永阳公园、劳动公园和木塔寺生态遗址公园水体 TN/TP 比平均值分别为 162.5、95、59、30.25、45.3 和 52.67, 整体比北京^[29]城市湖泊氮磷浓度比高, 这可能是所处地理位置不同造成的. 基于 Guildford 等^[30]提出的水中营养物质限制标准,

表 2 不同景观水体水质指标分析¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Water quality parameters for the different scenic waters/mg·L⁻¹

景观水体	T/°C	pH	DO	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	高锰酸盐指数	Fe
FQ	6.80 ± 0.00	8.34 ± 0.02	12.69 ± 0.03	5.88 ± 0.03	0.08 ± 0.00	0.16 ± 0.01	6.50 ± 0.08	0.04 ± 0.00	3.50 ± 0.08	0.09 ± 0.01
QJ	7.63 ± 0.06	8.45 ± 0.02	10.24 ± 0.13	1.28 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.16 ± 0.01	1.90 ± 0.12	0.02 ± 0.00	3.80 ± 0.08	0.11 ± 0.07
XJY	6.73 ± 0.06	8.36 ± 0.02	10.49 ± 0.02	0.80 ± 0.03	0.02 ± 0.00	0.56 ± 0.01	1.77 ± 0.06	0.03 ± 0.00	8.14 ± 0.23	0.12 ± 0.00
YY	6.60 ± 0.20	8.44 ± 0.02	10.80 ± 0.22	0.13 ± 0.05	0.01 ± 0.00	0.32 ± 0.02	1.21 ± 0.04	0.04 ± 0.00	9.46 ± 0.08	0.16 ± 0.02
LD	7.97 ± 0.06	8.42 ± 0.01	14.30 ± 0.02	2.38 ± 0.03	0.05 ± 0.00	0.71 ± 0.01	4.53 ± 0.21	0.10 ± 0.02	8.89 ± 0.16	0.12 ± 0.01
MTS	3.83 ± 0.29	8.44 ± 0.02	9.80 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.01 ± 0.00	0.66 ± 0.01	1.58 ± 0.12	0.03 ± 0.00	13.12 ± 0.47	0.12 ± 0.02
ANOVA	NS ¹⁾	NS	P < 0.05	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.01	P < 0.05	P < 0.01	NS

1) NS 表示差异不显著, P > 0.05

2.2 反硝化细菌群落多样性分析

通过 Rank-abundance 曲线^[33], 考察 6 个景观水体中反硝化细菌的物种丰度和物种均匀度(图 1). 在水平方向, 物种的丰度由曲线的宽度来反映, 物种的丰度越高, 曲线在横轴上的范围越大; 曲线的形状(平滑程度)反映了样本中物种的均度, 曲线越平缓, 物种分布越均匀. 由图 1 可见, 曲江池的反硝化细菌种群的丰富度最大, 而木塔寺生态

可初步判断 6 个景观水体为磷限制性水体. 与国内其他城市的景观水体相比, 丰庆公园、劳动公园与合肥市的雨花塘公园水质相当^[1], 曲江池、新纪元公园、永阳公园和木塔寺生态遗址公园与成都簇锦湖水体水质相当^[31]. 从营养盐单因子考虑, 一般认为当水体总氮和总磷的浓度分别达到 0.2 mg·L⁻¹和 0.02 mg·L⁻¹时, 就有可能发生藻类疯长的现象^[32]. 由表 2 分析可见, 6 个景观水体的总氮和总磷浓度均超过这一标准, 其中丰庆公园总氮值为标准的 32.5 倍, 劳动公园总磷值为标准的 5 倍, 这就表明该景观水体都有可能发生藻类疯长的现象.

遗址公园的反硝化细菌种群的丰富度最小; 木塔寺生态遗址公园的 Rank-abundance 最陡峭, 表示物种均度变最不均匀; 而曲江池的物种均度最均匀(图 1).

由图 2 分析可见, 曲江池的 OTU 数最高, 为 774, 而木塔寺生态遗址公园的 OTU 数最低, 为 304, 这与不同景观水体的反硝化细菌群落的等级-多度曲线的结果相一致. 6 个景观水体共有 185 个相同的

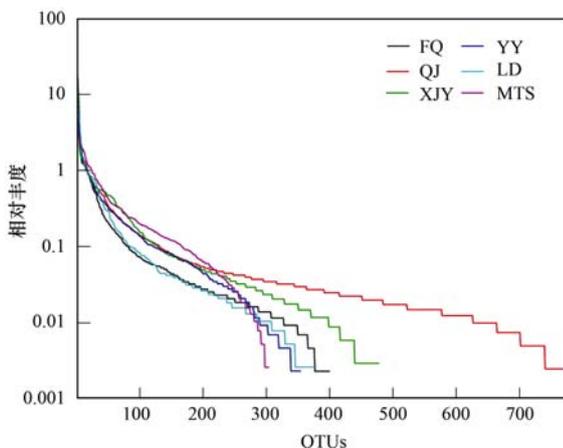


图 1 不同景观水体反硝化细菌群落等级-多度曲线

Fig. 1 Rank-abundance curves for denitrifier community in the different scenic water bodies

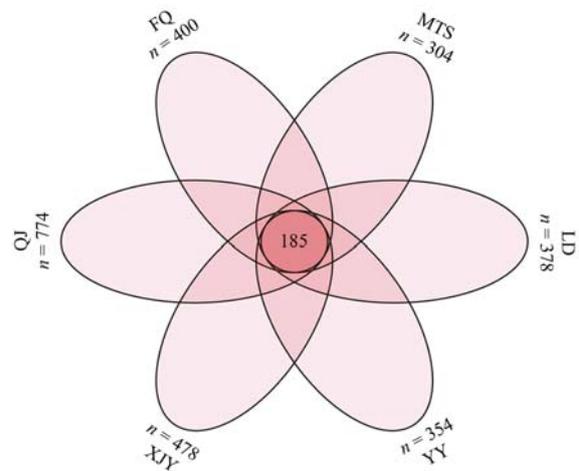


图 2 不同景观水体反硝化细菌群落 OTUs 韦恩图分析

Fig. 2 Venn diagram of the denitrifier community in the different scenic water bodies

OTU 样本, 占总数的 6.88%。6 个景观水体的 OTU 数普遍大于鄱阳湖表层水体细菌种群 OTU 数^[34]。

由表 3 可见, 6 个景观水体反硝化菌群的覆盖度均为 99%, 表明测序深度已达到较高水平, 数据可靠。由 ACE 丰富度指数可知, 曲江池水体反硝化菌群的丰富度较高, ACE 指数为 783, 而其他景观水体 ACE 均低于 495。Chao1 丰富度指数所表现的趋势和 ACE 指数大致相同。ACE 指数和 Chao1 丰富度指数普遍高于九龙江河口区 *nirS* 型反硝化细菌的^[35]。Shannon 多样性指数的变化范围为 3.59 ~ 4.83, 平均值为 4.21, 用来估算样本中微生物多样

性指数。Shannon 值越大, 说明群落多样性越高。Simpson 指数代表 OTUs 在文库中分布的均匀度, Simpson 指数越高, 表示文库中 OTUs 数分布越不均匀。6 个景观水体的 Simpson 指数变化范围为 0.02 ~ 0.08, 变幅较小, 说明各景观水体间 OTUs 数的分布差异较小。王鹏等^[36]基于高通量测序对鄱阳湖典型湿地土壤细菌多样性与丰度进行分析, 发现 Simpson 指数高于这 6 个景观水体的, 原因可能是不同生境具有不同的功能菌群结构。与武汉东湖水体中 *nirS* 基因克隆文库构建的菌群相比^[37], 西安市典型景观水体 *nirS* 基因克隆文库的多样性高。

表 3 不同景观水体反硝化菌群多样性指数分析

Table 3 Denitrifier community diversity index of the different scenic water bodies

景观水体	序列数	ACE	Chao1	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度/%
FQ	43644	408	423	3.59	0.08	99
QJ	40594	783	788	4.83	0.03	99
XJY	34291	495	509	4.36	0.06	99
YY	43480	362	360	4.08	0.06	99
LD	38514	392	409	3.76	0.07	99
MTS	38663	306	509	4.63	0.02	99

2.3 反硝化细菌群落结构组成分析

由图 3 可知, 6 个景观水体的反硝化细菌种群结构在门水平上相似, 主要为变形菌门 Proteobacteria^[38], 这一结果与近年来国内外有关反硝化细菌多样性的报道一致。6 个景观水体的反硝化细菌群落分析得出主要为 8 个门。丰庆公园、曲江池、新纪元、永阳公园、劳动公园和木塔寺生态遗址公园水体中变形菌门所占比例分别为 75.58%、84.64%、86.43%、91.31%、75.57% 和 76.39%。

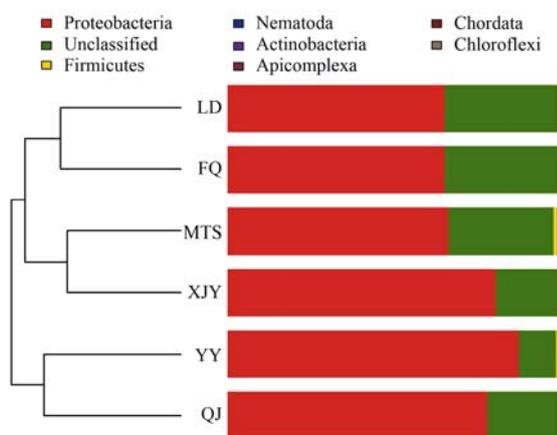


图 3 不同景观水体反硝化菌群结构聚类分析

Fig. 3 Denitrifier community barplot with cluster tree for the different scenic water bodies

对在 97% 的相似水平下的 OTU 进行生物信息

统计分析, 将 6 个景观水体样本, 共 1458 个 OTU 统计到属类别上形成柱状图 (图 4), 结果显示这 1458 个 OTU 主要属于 24 个属。丰庆公园水体中的主要类别如下, *Paracoccus* (30.49%)、Unclassified (24.23%)、*Ideonella* (7.32%)、*Sulfuritalea* (6.9%)、*Pseudomonas* (6.39%)、*Rubrivivax* (4.81%)、*Leptothrix* (3.91%)、*Thauera* (2.84%); 曲江池水体中的主要类别如下, *Pseudomonas* (24.37%)、Unclassified (15.09%)、*Ideonella* (11.93%)、*Sulfuritalea* (10.03%)、*Thauera* (8.40%)、*Dechloromonas* (4.68%)、*Dinoroseobacter* (4.02%)、*Rubrivivax* (3.84%); 新纪元公园水体中的主要类别如下, *Rubrivivax* (30.11%)、*Pseudomonas* (16.76%)、Unclassified (13.25%)、*Sulfuritalea* (7.26%)、*Azoarcus* (7.22%)、*Paracoccus* (3.42%)、*Halomonas* (2.96%)、*Leptothrix* (2.85%); 永阳公园水体中的主要类别如下, *Pseudomonas* (33.85%)、*Ideonella* (16.98%)、*Dechloromonas* (14.31%)、Unclassified (7.85%)、*Sulfuritalea* (4.46%)、*Rubrivivax* (3.95%)、*Azoarcus* (3.62%); 劳动公园水体中的主要类别如下, *Paracoccus* (25.60%)、Unclassified (24.06%)、*Sulfuritalea* (15.79%)、*Pseudomonas* (10.93%)、*Rubrivivax* (3.71%)、*Ideonella* (3.19%)、*Azoarcus* (2.69%); 木塔寺生态遗址公园水体中的主要类别

如下, Unclassified (22.25%)、*Rubrivivax* (16.93%)、*Pseudomonas* (13.14%)、*Azoarcus* (9.34%)、*Magnetospirillum* (4.72%)、*Sulfuritalea* (4.25%)、*Dechloromonas* (3.75%)、*Dechlorospirillum* (3.30%)、*Paracoccus* (2.74%) 和 *Thauera* (2.69%)。

测序结果表明, 6 个景观水体的反硝化细菌种类都很丰富, 但优势菌群和多样性存在差别。这可能是不同的环境支持不同的反硝化细菌生长的缘故。丰庆公园和劳动公园水体的优势菌属均为副球菌属 *Paracoccus* sp.。20 世纪 80 年代, 基于泛养硫球菌(现在被称为副球菌属 *Paracoccus* sp.^[39])好氧生长培养, Robertson 和 Kuenen 首先发现并证明存在好氧反硝化细菌^[40]。在呼吸试验中, 副球菌属能够同步硝化反硝化^[41]; 曲江池和永阳公园水体的最优势菌属均为假单胞菌属 *Pseudomonas* sp., 该属中的多个种已被作为研究反硝化过程的典型菌株。Huang 等^[42]从周村水源水库中分离出了 1 株好氧反硝化细菌, DNA 测序鉴定为施氏假单胞菌属, 可以去除 97% 的硝酸盐氮; 新纪元公园和木塔寺生态遗址公园水体的优势菌属均为红长命菌属 *Rubrivivax* sp., 这刷新了人们对于优势反硝化细菌的传统认识, 红长命菌属 *Rubrivivax* sp. 作为优势反硝化细菌属的报道很少, 但红长命菌属 *Rubrivivax* sp. 所对应的变形菌门 Proteobacteria 是门水平反硝化细菌群落中排名第一的优势菌^[38]; 这些优势菌属也许对公园水体的脱氮做出很大的贡献。副球菌属 *Paracoccus* sp. 通常生活在氮含量高的环境中^[43], 丰庆公园和劳动公园水体中高浓度的硝酸盐氮和总氮也为 *Paracoccus* sp. 的优势地位提供了合理解释, 而在氮浓度比较低的其他几个公园水体中 *Paracoccus* sp. 的占比非常小。假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. 普遍存在于各景观水体, 秦焯^[44]对鄱阳湖微生物多样性进行了研究, 发现假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. 和红长命菌属 *Rubrivivax* sp. 是优势菌属; 鲍林林等^[45]发现 *Pseudomonas* sp. 是北运河沉积物中的主要反硝化细菌。在本研究的 6 个景观水体中, 丰庆公园和劳动公园的碳氮比较低, 这可能是诱导反硝化群落多样性低的原因。于景丽等^[46]通过高通量技术解析锡林河底泥反硝化菌群组成及丰度发现河流底泥中只发现 2 种优势反硝化细菌, 分别是黄杆菌属 *Flavobacterium* sp. 和噬氢菌属 *Hydrogenophaga* sp. 这与本研究中的 6 个景观水体中的优势菌属不同, 可能是因为

所处的自然生态环境不同的缘故, 景观水体的主要优势反硝化菌属揭示了其在反硝化过程中所扮演的重要角色。

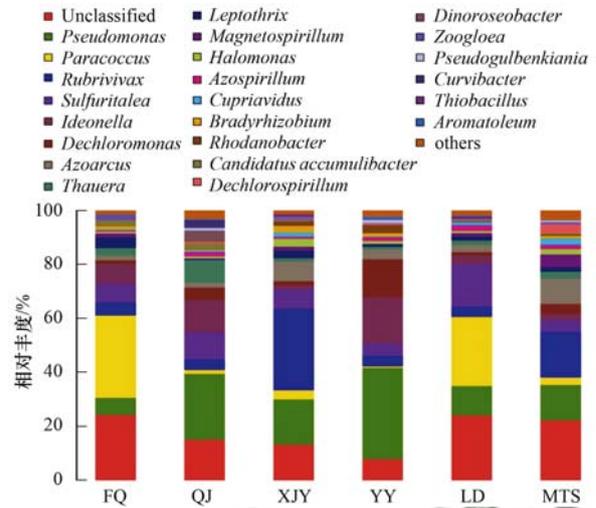


图 4 不同景观水体反硝化细菌群落结构组成

Fig. 4 Denitrifier community structure for the different scenic water bodies

热图 (Heat map) 可以直观地将数据值的大小以定义的颜色深浅表示出来。在属水平上对样品和 OTU 类型进行聚类, 对聚类后各样品中不同 OTU (不同菌属) 所含序列的丰度作为热图 (图 5), 能够反映出在菌属水平上各样品菌落结构的相似性和差异性。图 5 分析可见, 6 个景观水体中的反硝化细菌种群结构存在显著的差异。其中, 假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. 在 6 个景观水体中的丰度均很高, 这表明假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. 是优势菌属, 该菌属在景观水体中普遍存在, 在水体脱氮中发挥关键作用^[47, 48]。Unclassified 的反硝化细菌的占比也都比较大, 这表明景观水体中存在大量的未探明的反硝化细菌。相对于其他的景观水体, 陶厄氏菌属 *Thauera* sp. 在曲江公园水体中的相对丰度较高 (8.40%)。陶厄氏菌属 *Thauera* sp. 是 β -Proteobacteria 纲下的一类革兰氏阴性菌, 能够进行反硝化^[49], 洪璇等^[35]对九龙江河口区 *nirS* 型反硝化细菌多样性进行研究发现 *Thauera* sp. 是 *nirS* 基因克隆文库中丰度最高的菌属。脱氮单胞菌属 *Dechloromonas* sp. 在曲江池、永阳公园和木塔寺生态遗址公园中的相对丰度较高, 脱氮单胞菌属 *Dechloromonas* sp. 是一种具有反硝化除磷功能的细菌^[50]。郭小马等^[51]发现在序批式膜生物反应器与传统膜生物反应器中脱氮单胞菌属 *Dechloromonas* sp. 为系统中的高丰度功能菌群。

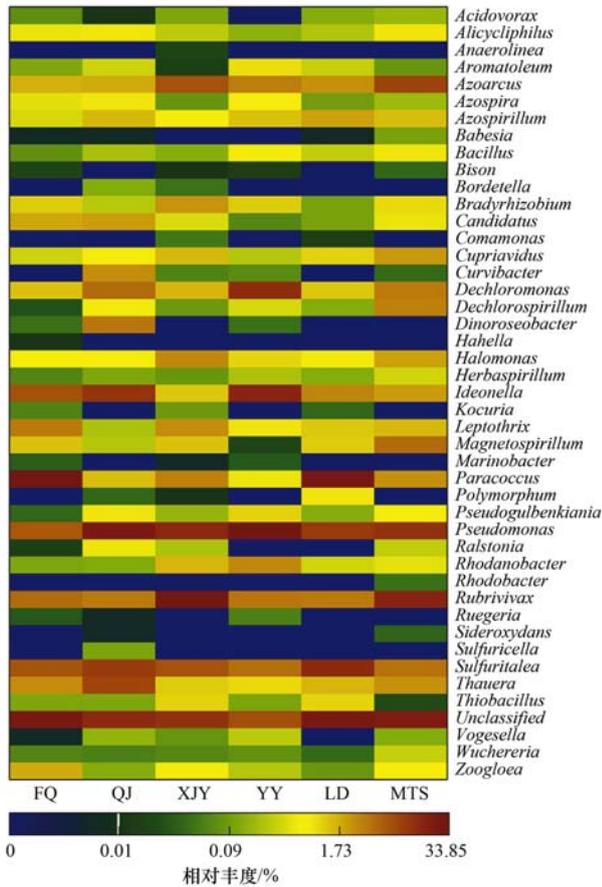


图 5 不同景观水体优势反硝化菌群热图

Fig. 5 Heat map of the denitrifier community for the different scenic water bodies

2.4 反硝化细菌群落与水质的偶联关系分析

本研究通过主成分分析可知,前两个主成分(PC1和PC2)可以解释总变异的68.9%,*nirS*型反硝化细菌种群结构的变异主要显示在PC1轴上,PC1解释总变异的43.8%,PC2解释总变异的25.1%。从图6分析可见,木塔寺生态遗址公园和新纪元公园水体反硝化细菌种群相似度高;曲江池和永阳公园水体反硝化细菌种群相似度高;劳动公园和丰庆公园水体反硝化细菌种群相似度高。水质指标对各公园水体反硝化细菌群落多样性分布影响分析显示,新纪元公园和木塔寺公园水体反硝化细菌种群结构主要受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高锰酸盐指数含量的调控;而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP和DO对劳动公园和丰庆公园反硝化细菌种群结构影响较为显著($P < 0.05$);pH对永阳公园反硝化细菌种群结构影响显著($P < 0.05$)。其中温度(T)与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高锰酸盐指数呈负相关关系, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN、TP和DO与高锰酸盐指数及pH呈负相关关系。副球菌属 *Paracoccus* sp. 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN、TP和DO

呈正相关关系。假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. 与pH呈正相关关系。红长命菌属 *Rubrivivax* sp. 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈正相关关系($r = 0.96, P < 0.05$),而与温度(T)呈负相关关系。主成分分析可得景观水体反硝化细菌群落结构特征受到不同水质指标的综合调控。Gao等^[51]对滨海湿地的反硝化菌群研究发现*nirS*型反硝化细菌种群结构与温度和氨氮浓度显著相关,其中温度是影响*nirS*型反硝化细菌种群结构的重要因子。Zheng等^[52]通过研究长江口潮间带沉积物中的*nirS*型反硝化细菌群发现*nirS*型反硝化细菌种群结构与盐度、氨氮浓度和硝氮浓度显著相关。Yang等^[53]通过研究东湖沉积物中的*nirS*型反硝化细菌发现TN、TP、TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响*nirS*型反硝化细菌分布的重要水质因子。后续将重点分析典型景观水体反硝化功能基因*nirK*、*narG*、*norB*数量表达和种群结构特征,并结合实时定量PCR和稳定性同位素示踪技术诊断反硝化菌群在景观水体营养盐迁移转化过程的分子微生态机制。

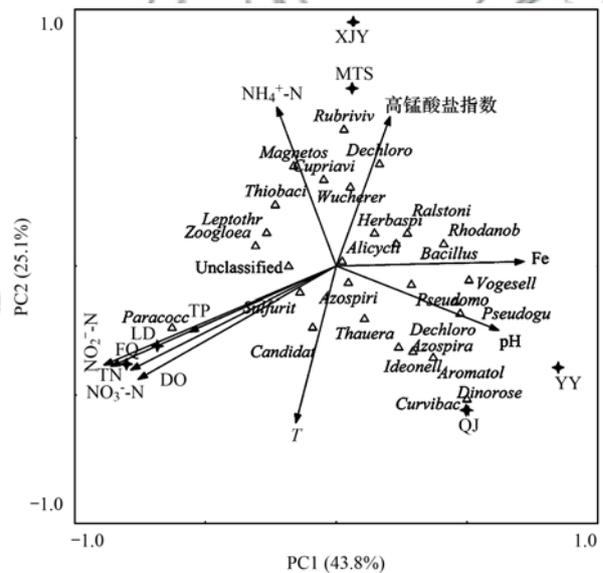


图 6 反硝化细菌种群的主成分分析

Fig. 6 Principle component analyses of the denitrifier communities

3 结论

(1) 丰庆公园和劳动公园水体属于劣V类水,而曲江池、木塔寺生态遗址公园、新纪元公园水体符合V类水质标准,永阳公园水体符合IV类水标准。

(2) 高通量测序结果显示6个典型景观水体*nirS*型反硝化细菌种群结构差异显著。丰庆公园和劳动公园水体反硝化细菌种群结构相似,优势菌属均为 *Paracoccus* sp.;曲江池和永阳公园水体反硝化

细菌种群结构相似, 优势菌属均为 *Pseudomonas* sp.; 新纪元公园和木塔寺生态遗址公园水体反硝化细菌种群结构相似, 优势菌属为 *Rubrivivax* sp.; 6 个景观水体均存在较大比例的未知菌属 Unclassified, 表明 6 个景观水体蕴藏着巨大的未知反硝化菌群。

(3) 由主成分分析 (PCA) 可知, 新纪元公园和木塔寺公园水体 *nirS* 型反硝化细菌种群结构主要受 NH_4^+ -N 和高锰酸盐指数含量的综合调控; 而 NO_3^- -N、TN、TP 和 DO 对劳动公园和丰庆公园 *nirS* 型反硝化细菌种群结构影响较为显著; pH 对永阳公园 *nirS* 型反硝化细菌种群结构影响显著。研究结果表明环境因子综合调控 *nirS* 型反硝化细菌种群的组成和分布。

参考文献:

- [1] 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 等. 合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1718-1726.
Li R Z, Liu K F, Qian J, et al. Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei city [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1718-1726.
- [2] 李飞鹏, 张海平, 陈玲. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3854-3861.
Li F P, Zhang H P, Chen L. Temporal and spatial distribution of environmental factors and chlorophyll-a and their correlation analysis in a small enclosed lake [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3854-3861.
- [3] Niu Y, Shen H, Chen J, et al. Phytoplankton community succession shaping bacterioplankton community composition in Lake Taihu, China [J]. Water Research, 2011, **45**(14): 4169-4182.
- [4] 任丽娟, 何聃, 邢鹏, 等. 湖泊水体细菌多样性及其生态功能研究进展[J]. 生物多样性, 2013, **21**(4): 421-432.
Ren L J, He D, Xing P, et al. Bacterial diversity and ecological function in lake water bodies [J]. Biodiversity Science, 2013, **21**(4): 421-432.
- [5] Gao J, Hou L J, Zheng Y L, et al. *nirS*-encoding denitrifier community composition, distribution, and abundance along the coastal wetlands of China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, **100**(19): 8573-8582.
- [6] Yasumoto J, Yasumoto-Hirose M, Kudaken T, et al. Microbial community analysis of groundwater related to the denitrification in Ryukyu limestone aquifer [J]. Journal of Groundwater Hydrology, 2015, **57**(2): 153-169.
- [7] 尹昌, 范分良, 李兆君, 等. 长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3967-3975.
Yin C, Fan F L, Li Z J, et al. Influences of long-term application of organic and inorganic fertilizers on the composition and abundance of *nirS*-type denitrifiers in black soil [J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3967-3975.
- [8] Bai Y, Zhang Y B, Quan X, et al. Nutrient removal performance and microbial characteristics of a full-scale IFAS-EBPR process treating municipal wastewater [J]. Water Science and Technology, 2016, **73**(6): 1261-1268.
- [9] Babbitt A R, Jayakumar A, Ward B B. Organic matter loading modifies the microbial community responsible for nitrogen loss in estuarine sediments [J]. Microbial Ecology, 2016, **71**(3): 555-565.
- [10] Wang Z, Zhang X X, Lu X, et al. Abundance and diversity of bacterial nitrifiers and denitrifiers and their functional genes in tannery wastewater treatment plants revealed by high-throughput sequencing [J]. PLoS One, 2014, **9**(11): e113603.
- [11] 黄廷林, 邸诗雨, 张海涵, 等. 西安市典型景观水体水质与微生物种群结构多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(4): 697-703.
Huang T L, Di S Y, Zhang H H, et al. Water quality and diversity of microbial community structure of Xi'an typical scenic water bodies [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, **20**(4): 697-703.
- [12] 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.
- [13] 姚炎红, 王明霞, 左小虎, 等. 典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4750-4759.
Yao Y H, Wang M X, Zuo X H, et al. Effects of PAHs pollution on the community structure of denitrifiers in a typical oilfield [J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4750-4759.
- [14] 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.
- [15] 程建华, 窦智勇, 孙庆业. 铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1362-1370.
Cheng J H, Dou Z Y, Sun Q Y. Distribution characteristics of nitrifiers and denitrifiers in the river sediments of Tongling City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1362-1370.
- [16] Wang L M, Zhang Y M, Luo X Z, et al. Effects of earthworms and substrate on diversity and abundance of denitrifying genes (*nirS* and *nirK*) and denitrifying rate during rural domestic wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2016, **212**: 174-181.
- [17] Wu H L, Wang X Z, He X J, et al. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2017, **598**: 697-703.
- [18] Lee J A, Francis C A. Spatiotemporal characterization of San Francisco Bay denitrifying communities; a comparison of *nirK* and *nirS* diversity and abundance [J]. Microbial Ecology, 2017, **73**(2): 271-284.
- [19] 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.

- [20] Zhang H H, Chen S N, Huang T L, *et al.* Vertical distribution of bacterial community diversity and water quality during the reservoir thermal stratification [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(6): 6933-6945.
- [21] Michotey V, Méjean V, Bonin P. Comparison of methods for quantification of cytochrome *cd₁*-denitrifying bacteria in environmental marine samples[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(4): 1564-1571.
- [22] Throbäck I N, Enwall K, Jarvis Å, *et al.* Reassessing PCR primers targeting *nirS*, *nirK* and *nosZ* genes for community surveys of denitrifying bacteria with DGGE [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **49**(3): 401-417.
- [23] Kim O S, Imhoff J F, Witzel K P, *et al.* Distribution of denitrifying bacterial communities in the stratified water column and sediment-water interface in two freshwater lakes and the Baltic Sea[J]. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(1): 99-112.
- [24] Caporaso J G, Lauber C L, Walters W A, *et al.* Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(S1): 4516-4522.
- [25] Zhang H H, Huang T L, Chen S N, *et al.* Abundance and diversity of bacteria in oxygen minimum drinking water reservoir sediments studied by quantitative PCR and pyrosequencing[J]. *Microbial Ecology*, 2015, **69**(3): 618-629.
- [26] Oberauer L, Zachow C, Lackner S, *et al.* The ignored diversity: complex bacterial communities in intensive care units revealed by 16S pyrosequencing[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 1413.
- [27] Jami E, Israel A, Kotser A, *et al.* Exploring the bovine rumen bacterial community from birth to adulthood [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(6): 1069-1079.
- [28] Zhao H J, Wang Y, Yang L L, *et al.* Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water supplemented with reclaimed water [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 113-121.
- [29] 荆红卫, 华蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 357-363.
Jing H W, Hua L, Sun C H, *et al.* Analysis on urban lakes' eutrophication status in Beijing [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(3): 357-363.
- [30] Guildford S J, Hecky R E. Total Nitrogen, Total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [31] 汪嘉杨, 郭倩, 余静, 等. 城市景观水体富营养化评价的升半Γ型分布指数公式[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 1162-1168.
Wang J Y, Guo Q, Yu J, *et al.* Eutrophication evaluation for urban landscape waters based on semi-Γ type distribution function [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 1162-1168.
- [32] 李跃飞, 夏永秋, 李晓波, 等. 秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 91-97.
Li Y F, Xia Y Q, Li X B, *et al.* Temporal and spatial variations of total nitrogen and total phosphorus in the typical reaches of Qinhuai River [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 91-97.
- [33] Bates S T, Clemente J C, Flores G E, *et al.* Global biogeography of highly diverse protistan communities in soil [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(3): 652-659.
- [34] 寇文伯, 黄正云, 张杰, 等. 鄱阳湖湖泊细菌群落组成及结构——以松门山为例[J]. *生态学报*, 2015, **35**(23): 7608-7614.
Kou W B, Huang Z Y, Zhang J, *et al.* Bacterial community structure and composition in Lake Poyang: a case study in the Songmenshan Region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(23): 7608-7614.
- [35] 洪璇, 洪有为, 陈仲巍, 等. 九龙江河口区 *nirS* 型反硝化细菌多样性及系统发育学分析[J]. *微生物学通报*, 2015, **42**(9): 1639-1650.
Hong X, Hong Y W, Chen Z W, *et al.* Phylogenetic diversity of *nirS*-type denitrifying bacteria in Jiulong River estuary [J]. *Microbiology China*, 2015, **42**(9): 1639-1650.
- [36] 王鹏, 陈波, 张华. 基于高通量测序的鄱阳湖典型湿地土壤细菌群落特征分析[J]. *生态学报*, 2017, **37**(5): 1650-1658.
Wang P, Chen B, Zhang H. High throughput sequencing analysis of bacterial communities in soils of a typical Poyang Lake wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(5): 1650-1658.
- [37] 程占冰, 杨江科, 李鹤, 等. 淡水富营养型湖泊沉积物亚硝酸还原酶基因 (*nirS*) 的多样性和系统发育[J]. *微生物学报*, 2011, **51**(5): 667-675.
Cheng Z B, Yang J K, Li H, *et al.* Phylogeny diversity of the nitrite reductase gene (*nirS*) in the sediments of the eutrophic East Lake, Wuhan [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2011, **51**(5): 667-675.
- [38] 王春香, 刘常敬, 郑林雪, 等. 厌氧氨氧化耦合脱氮系统中反硝化细菌研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1878-1883.
Wang C X, Liu C J, Zheng L X, *et al.* Denitrifying bacteria of anaerobic ammonium-oxidizing denitrifying system [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1878-1883.
- [39] Ludwig W, Mittenhuber G, Friedrich C G. Transfer of *Thiosphaera pantotropha* to *Paracoccus denitrificans* [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1993, **43**(2): 363-367.
- [40] Robertson L A, Kuenen J G. Aerobic denitrification-old wine in new bottles? [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1984, **50**(5-6): 525-544.
- [41] Robertson L A, van Niel E W, Torremans R A, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, **54**(11): 2812-2818.
- [42] Huang T L, Guo L, Zhang H H, *et al.* Nitrogen-removal efficiency of a novel aerobic denitrifying bacterium, *Pseudomonas stutzeri* strain ZF31, isolated from a drinking-water reservoir [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **196**: 209-216.
- [43] Medhi K, Singhal A, Chauhan D K, *et al.* Investigating the nitrification and denitrification kinetics under aerobic and anaerobic conditions by *Paracoccus denitrificans* ISTOD1 [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **242**: 334-343.
- [44] 秦焯. 基于高通量 DNA 测序的鄱阳湖微生物生态研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015. 29-33.
Qing X. Study on the microbial ecology of Poyang lake based on

- next-generation sequencing [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. 29-33.
- [45] 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.
- [46] 于景丽, 范雅慧, 高晓霞, 等. 高通量技术解析锡林河底泥反硝化菌群组成及丰度[J]. 微生物前沿, 2014, **3**(3): 70-78.
- Yu J L, Fan Y H, Gao X X, *et al.* Pyrosequencing analysis reveals abundance and community composition of denitrifying bacteria in Xilin river sludge[J]. Advances in Microbiology, 2014, **3**(3): 70-78.
- [47] Ji B, Wang H Y, Yang K. Nitrate and COD removal in an upflow biofilter under an aerobic atmosphere [J]. Bioresource Technology, 2014, **158**: 156-160.
- [48] Zhou M H, Ye H R, Zhao X W. Isolation and characterization of a novel heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas stutzeri* KTB for bioremediation of wastewater[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2014, **19**(2): 231-238.
- [49] Ma W J, Liu C S, Zhao D F, *et al.* Microbial characterization of denitrifying sulfide removal sludge using high-throughput amplicon sequencing method [J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2015, **17**(4): 89-95.
- [50] Gao L, Zhou W L, Huang J C, *et al.* Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent [J]. Bioresource Technology, 2017, **234**: 243-252.
- [51] 郭小马, 赵焱, 王开演, 等. MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1013-1020.
- Guo X M, Zhao Y, Wang K Y, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus removal and control of membrane fouling in MBR and SMBR[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1013-1020.
- [52] Zheng Y L, Hou L J, Liu M, *et al.* Diversity, Abundance, and distribution of *nirS*-Harboring denitrifiers in intertidal sediments of the Yangtze Estuary[J]. Microbial Ecology, 2015, **70**(1): 30-40.
- [53] Yang J K, Cheng Z B, Li J, *et al.* Community composition of NirS-Type denitrifier in a shallow eutrophic lake[J]. Microbial Ecology, 2013, **66**(4): 796-805.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)