

 方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

石家庄市春季景观水体 *nirS* 型反硝化细菌群落特征分析

张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊*

(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)

摘要: 选取石家庄市主城区4个典型景观水体作为研究对象, 在对水体水质特征分析的基础上, 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测定, 探究春季景观水体水质与 *nirS* 型反硝化细菌群落的相互关系。结果表明, 4个景观水体中氮素含量为 4.43 ~ 13.83 mg·L⁻¹, 氮素污染较严重; 基于三维荧光光谱的特征指数分析, 4个景观水体均呈现出较强的自生源及弱腐殖质特征; Illumina 高通量测序结果表明, 不同景观水体中 *nirS* 型反硝化细菌大多为变形菌门, 在优势菌属上差异显著; unclassified_Bacteria (53.52%)、假单胞菌 (*Pseudomonas*) (60.48%) 和红杆菌属 (*Rhodobacter*) (46.94%) 分别为裕西、水上和长安公园水体中的优势菌属, unclassified_Bacteria (36.19%) 和 unclassified_Proteobacteria (23.44%) 为世纪公园水体中的优势菌属; 冗余分析 (RDA) 结果表明, 裕西公园反硝化细菌主要受硝氮、总氮和溶解氧的影响, 水上公园反硝化细菌受总磷的影响较大, 长安公园反硝化细菌主要受氨氮和亚硝氮的影响, 世纪公园反硝化受总磷、亚硝氮和氨氮的影响较大。综上表明, 春季不同景观水体的水质以及 *nirS* 型反硝化细菌的群落结构差异显著, 通过开展景观水体水质、反硝化群落以及影响因素的研究, 有助于对城市水系的水质特征以及反硝化群落结构的认识, 对基于该水质特征的高效反硝化菌剂的研发具有指导意义。

关键词: 景观水体; *nirS* 型反硝化细菌; Illumina 高通量测序; 群落结构; 冗余分析 (RDA)

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3295-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201810032

Community Structure Characteristics of *nirS* Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City

ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, HUO Ran, MENG Wen-ru, WANG Ling-xiao, SHEN Shao-heng, YANG Zi-cheng, ZHOU Shi-lei*

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Four typical park water bodies located in the main urban area of Shijiazhuang city were selected to study the relationships between water quality and the community structure and diversity of *nirS* denitrifying bacteria. The results showed that the nitrogen concentration ranged from 4.43 to 13.83 mg·L⁻¹ in four park water bodies, which exhibited notable nitrogen pollution characteristics. Based on the characteristic index analysis of three-dimensional fluorescence spectra, the four park water bodies all exhibited strong autochthonous components and low humus characteristics. The results of Illumina high-throughput sequencing indicated that most of the *nirS* denitrifying bacteria showed significant differences in dominant genus. The unclassified_Bacteria (53.52%), *Pseudomonas* (60.48%), and *Rhodobacter* (46.94%) were the dominant bacteria in Yuxi park, Shuishang park, and Chang'an park, respectively. In comparison, unclassified_Bacteria (36.19%) and unclassified_Proteobacteria (23.44%) were the dominant bacteria in Shiji park. Redundancy analysis showed that denitrification bacteria in Yuxi park were mainly affected by nitrate, total nitrogen, and dissolved oxygen; denitrification bacteria in Shuishang park were greatly affected by total phosphorus; denitrification bacteria in Chang'an park were mainly affected by ammonia and nitrous nitrogen; and denitrification in Shiji park were mainly affected by total phosphorus, nitrite, and ammonia. Overall, the water quality and the community structure of *nirS* denitrification bacteria exhibited significant differences in park water bodies. Further research could contribute to the understanding of water quality characteristics and the denitrifying community structure of urban water systems, and develop efficient denitrifying bacterial agents.

Key words: landscape water body; *nirS* denitrifying bacteria; Illumina high-throughput sequencing; community structure; redundancy analysis (RDA)

随着经济的不断发展和城市化进程的加快, 城市水系作为重要的生态屏障, 是城市的重要组成部分。因此, 景观水体作为城市水系的主要部分, 已成为我国城市规划建设的重要内容^[1]。由于景观水体具有自身面积小、流动缓慢、自净能力不强等特点, 很容易出现水体水质下降的现象^[2]; 加之周边环境大量的氮、磷和有机物等面源污染物输入水

体, 造成的水体富营养化, 甚至恶化为黑臭水体。其中, 氮素作为造成富营养化的主要因素, 成为人

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2019-01-21

基金项目: 河北省研究生创新项目 (CXZZSS2018084); 河北科技大学引进人才科研启动基金项目 (1181278)

作者简介: 张艺冉 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为好氧反硝化菌脱氮机制与调控机制, E-mail: sjzyszyr@163.com

* 通信作者, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

们研究的主要污染物^[3]. 比如李萍等^[4]研究的湿地景观水体, 春季水体中总氮约达 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 为劣 V 类水体; 于丹等^[5]研究的天津市某景观水体发现, 该水体为中-富营养化水平, 春季水体中总氮含量约为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 虽为 V 类水质, 但远超富营养水平阈值(TN 为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 杜奕衡等^[6]研究的白洋淀沉积物中大量的铵态氮释放至上覆水中导致富营养化. 同时, 国家已经把氨氮作为主要的污染指标列入黑臭水体的污染评价. 因此, 开展景观水体的水质特征分析, 尤其是氮素污染特征分析对富营养化控制愈加重要.

众所周知, 反硝化作为氮素去除的关键过程, 已成为研究者开发高效脱氮菌剂的研究热点. 其中同源二聚体细胞色素 cd_1 亚硝酸盐还原酶(*nirS*) 由于在反硝化细菌中广泛存在, 并且作为整个反硝化过程的限制步骤, 被众多研究者作为反硝化标识基因^[7-10], 比如, 程建华等^[9]研究了铜陵市河流沉积物菌群的反硝化群落结构, 结果表明反硝化功能基因以 *nirS* 为主, 其丰度平均值为 *nirK* 的 28.35 倍. Kim 等^[11]的研究表明, *nirS* 编码的亚硝酸盐还原酶较 *nirK* 更容易接收电子. 康鹏亮等^[10]基于 *nirS* 研究了湖库沉积物中细菌的反硝化群落结构, 混合菌群种群结构差异显著. 综上, 基于 *nirS* 基因研究水体中反硝化细菌群落结构, 对开发高效脱氮菌剂具有重要意义.

尤其是在春季, 水体处于温度急剧上升、水质变化较快、水体富营养化未发生的特定时期, 开展该时期的水质特征以及反硝化细菌群落组成的研究, 对日后分离适于该时期的高效脱氮菌提供技术支持. 因此, 本研究将从春季典型景观水体水质现状出发, 研究氮素和有机物组成, 并利用分子生物学技术对水体中 *nirS* 型反硝化细菌群落结构进行分析, 通过冗余分析(RDA)来探究反硝化细菌群落组成与环境因子的关系, 以期富集驯化适于春季特定景观水体水质特征的高效反硝化菌提供技术指导.

1 材料与方法

1.1 采样点概况

本研究选取石家庄市主城区具有代表性的 4 个城市景观水体, 景观水体中采样点设置如图 1, 桥西区的裕西公园(YX: 38.03°N , 114.41°E)位于石家庄市紧贴西二环的正西方向, 湖面面积 $60\,000 \text{ m}^2$; 新华区的水上公园(SS: 38.07°N , 114.45°E)位于城市二环内西北方向, 湖面面积 $113\,000 \text{ m}^2$; 长安区的长安公园(CA: 38.04°N , 114.51°E)位于城

市中心, 湖面面积 $60\,000 \text{ m}^2$; 裕华区的世纪公园(SJ: 38.01°N , 114.53°E)位于城市的东南方向, 湖面面积 $53\,000 \text{ m}^2$. 公园的补给水一部分为滹沱河流入城区的水, 另一部分为城市污水处理厂和自来水厂尾水.

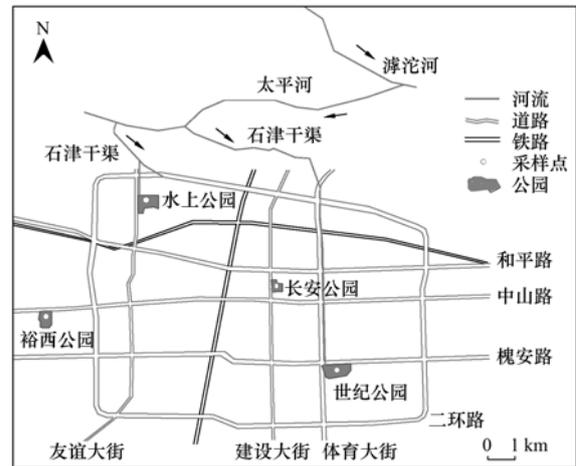


图 1 景观水体采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites in park water body

1.2 水样采集

2018 年 4 月在石家庄市 4 个典型城市景观水体采集水样, 将每个景观水体中心作为采样点, 采用有机玻璃取水器在每个采样点采集表层水样(水面以下 0.2 m) 2 L , 装入灭菌塑料瓶中, 置于放有冰袋的箱子中立即运回实验室, 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) (DS5X 便携式分析仪, 美国 HACH 公司). 高锰酸盐指数、总氮(TN)、溶解性总氮(TDN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、亚硝氮(NO_2^--N)、总磷(TP)、铁(Fe)和锰(Mn)等均参照文献[12]测定(紫外-可见分光光度计, UV-5100). 其中, TN 采用碱性过硫酸钾消解法, NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定, 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, TP 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定, Fe 采用邻菲罗啉分光光度法, Mn 采用高碘酸钾氧化分光光度法. NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 和 TDN 的水样预处理为经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤. 醋酸纤维滤膜经过 3 次超纯水煮沸, 每次沸腾 0.5 h 以去除杂质^[13]. 此外, 取 $1\,000 \text{ mL}$ 的各景观水体水样经 $0.22 \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜负压过滤, 收集滤膜, 置于 10 mL 的无菌离心管中, 于 -80°C 的超低温冰箱中保存至 DNA 提取.

1.4 三维荧光光谱分析

将所取景观水体水样过 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜

后保存, 待用. 荧光光谱测定仪器为日立公司生产的 Hitachi F-7000 型荧光光度计, 仪器基本设置参数如下: 150 W 氙灯为激发光源, 9PMT 电压设为 700 V; 激发和发射单色仪的狭缝宽度均设为 10 nm, 扫描速度为 $2\,400\text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$, 扫描光谱进行仪器自动校正. 激发波长 (E_x) 范围为 220 ~ 400 nm, 步长 5 nm; 发射波长 (E_m) 范围为 250 ~ 550 nm, 步长 1 nm. 以 Milli-Q 水作空白, 样品所测数据均扣除空白值.

荧光指数 (FI) 是指样品 $E_x = 370\text{ nm}$, E_m 在 470 nm 与 520 nm 波长处荧光强度的比值^[14], 作为衡量 CDOM 来源及降解程度的指标. 自生源指数 (BIX) 为 $E_x = 310\text{ nm}$, E_m 在 380 nm 与 430 nm 处荧光强度比值^[15], 是评价 CDOM 腐殖化程度的重要指标, 能一定程度上反映 CDOM 输入源特征. HIX 是 $E_x = 254\text{ nm}$, E_m 在 435 ~ 480 nm 荧光强度积分值除以 300 ~ 345 nm 与 435 ~ 480 nm 间荧光强度积分值之和^[16], HIX 指数越高则表示 DOM 腐殖化程度越高. 新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 为 $E_x = 310\text{ nm}$, $E_m = 380\text{ nm}$ 处荧光强度与 420 ~ 435 nm 区间最大荧光强度的比值^[15], 可为定量评估水体生物活性提供依据.

1.5 水体反硝化细菌群落结构测定

1.5.1 样品总 DNA 提取

在超净工作台, 分别取 1 L 的水样经 $0.22\ \mu\text{m}$ 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 DNA, 测量 DNA 浓度 (NanoDrop 2000), 保存在 -20°C 待用.

1.5.2 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, 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 $20\ \mu\text{L}$: DNA 模板 10 ng、FastPfu 缓

冲液 $4\ \mu\text{L}$ 、dNTPs $2\ \mu\text{L}$ ($2.5\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、FastPfu 聚合酶 $0.4\ \mu\text{L}$ 、Forward Primer $0.8\ \mu\text{L}$ ($5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、Reverse Primer $0.8\ \mu\text{L}$ ($5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、用 ddH₂O 补足至 $20\ \mu\text{L}$ ^[17]. PCR 反应参数: 95°C 预变性 3 min, 95°C 变性 30 s, 55°C 退火 30 s, 72°C 延伸 45 s, 35 个循环, 72°C 延伸 10 min (上海美吉生物公司).

1.5.3 生物信息处理

利用 Trimmomatic 质控软件和 FLASH 拼接软件, 将高通量测序得到的双端序列数据, 通过 PE reads 之间的 overlap 关系, 将成对的 reads 拼接 (merge) 成一条序列, 同时对 reads 的质量和 merge 的效果进行质控过滤, 根据序列首尾两端的 barcode 和引物序列区分样品得到有效序列, 并校正序列方向, 获得优化序列 196 167 条. 通过 Silva 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进行分类, 合并丰度小于 1% 的数值, 再通过 Mothur 按 97% 序列相似度划分成可操作分类单位 (OTU), 进而分析 α 多样性、物种组成、样本比较分析.

1.6 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理, Origin 8.0 软件进行图形绘制与分析, 利用 Canoco5.0 软件, 将统计的 OTU 数据和环境因子导入, 进行主成分分析 (PCA) 和冗余分析 (RDA).

2 结果与讨论

2.1 景观水体水质特征

不同景观水体的 pH 和 DO 均处于地表水 I 类水体, 其他理化指标具有一定的差异. 比如, 透明度是城市黑臭水体的特征指标之一, SS 的透明度要比其他 3 个公园的大, 但是还远低于黑臭水体的界定标准; 另外 SJ 中金属铁和锰的含量较其他要高, 结果如表 1 所示. 以下从营养盐成分、有机物和反硝化细菌群落结构进行具体分析.

表 1 不同景观水体物理化学指标

Table 1 Physicochemical parameters of park water bodies of different types

位置	pH	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SD/cm	Fe/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mn/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
裕西公园 (YX)	7.60	9.46	79	0.11	0.19
水上公园 (SS)	7.25	9.66	96	0.08	0.21
长安公园 (CA)	7.48	9.08	77	0.10	0.23
世纪公园 (SJ)	7.23	8.73	78	0.17	0.43

2.1.1 氮素组成分析

4 个景观水体总氮含量范围是 $4.43 \sim 13.83\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远超地表水 V 类水体阈值. 如图 2 所示, 其顺序为 $\text{YX} > \text{CA} > \text{SJ} > \text{SS}$. 其中 YX 主要氮素组

成为硝氮和有机氮; SS 和 CA 的氮素组成相似, 均以硝氮为主, 氨氮和有机氮含量相对较少; SJ 中氨氮和硝氮含量相当, 有机氮占小部分. Bronk 等^[18] 的研究表明, 有机氮是水体营养物质循环和生命过

程中的一个重要环节,对细菌的生物活动产生重要影响;水体中有 12%~72% 的溶解有机氮能迅速被生物所利用,而浮游植物吸收的无机氮中有 25%~41% 是以溶解有机氮的形式释放.从氮素占比结构上看,YX、SS 和 CA 的水质中硝氮含量较高,其中 YX 中硝氮含量最高,达 $7.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SJ 水质中氨氮和硝氮占比比较平衡.与国内其他一些城市的景观水体相比,YX 与合肥市的黑池坝水体水质相当,SS、CA 和 SJ 比银河和雨花塘污染稍严重^[19],YX 与东莞燕岭湿地春季景观水中的 TN 含量相当^[4],氮源含量完全可以满足藻类生长的需要,一旦物理条件合适,富营养化现象发生的概率大大升高.

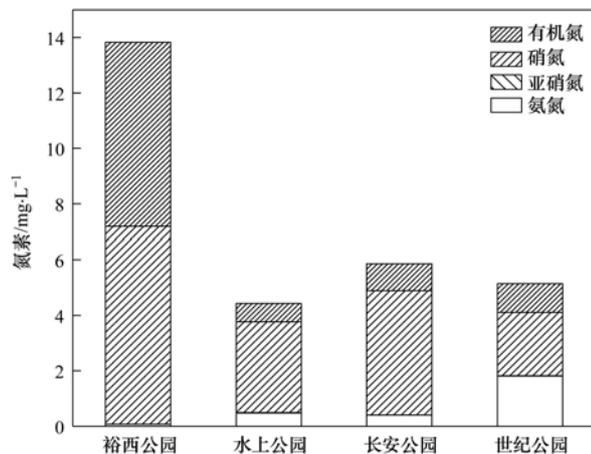


图 2 不同景观水体中氮素组成

Fig. 2 Nutrient salt content of the different park water bodies

2.1.2 有机物分析

(1) 三维荧光光谱特征分析

McKnight 等^[20]指出 $FI > 1.9$ 表示 CDOM(有色溶解性有机物)源于细菌和藻类的胞外释放以及渗出液,具有显著的内源产生特征^[21],4 个景观水体的 FI 范围为 2.41~3.06 之间(表 2),平均值为 2.64,说明各水体的 CDOM 为生物活动产生、具有很强的自生源特征.肖隆庚等^[22]指出,BIX 大于 1.0 为生物细菌活动产生,且有机质为新近产生.4 个景观水体的 BIX 均大于 1.0(表 2),平均值为 1.13,其自生源组分特征明显,生物细菌活动活跃,且水体中表现出一定的新生自生源 CDOM,与江俊武等^[23]研究夏季的太湖结果相似(BIX 为 1.16).Zhang 等^[24]指出当 $1.5 < HIX < 3$ 时,CDOM 呈微弱腐殖质特征及有重要的近期自生源.4 个景观水体的 HIX 范围在 1.53~2.74 之间(表 2),平均值为 2.06,YX 的 CDOM 腐殖化程度明显高于其他 3 个公园水体.总体来看,4 个公园 $1.5 < HIX < 3$,CDOM 由生物活动产生,呈弱腐殖质和自生源特征,说明水体中生物细菌活动较强.本研究中新颖度指数范围在 1.00~1.12 之间,均值为 1.04,与

周石磊等^[25]的研究结果相一致.综上得出,在不同的景观水体中,CDOM 呈现出低腐殖化,强自生源特征.

表 2 景观水体 CDOM 荧光参数特征

Table 2 Chromophoric dissolved organic matter and fluorescence parameter characteristics of park water bodies

位置	FI	BIX	HIX	$\beta:\alpha$
裕西公园 (YX)	3.06	1.24	2.74	1.12
水上公园 (SS)	2.52	1.13	1.53	1.03
长安公园 (CA)	2.56	1.08	1.73	1.01
世纪公园 (SJ)	2.41	1.07	2.24	1.00

(2) 有机物含量分析

高锰酸盐指数通常被作为直接表示水体中有机物相对含量的指标.4 个景观水体中高锰酸盐指数分别为 4.66、9.90、9.18 和 9.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 YX 为 III 类水,SS、CA 和 SJ 为 IV 类水水质,且 YX 较其他公园高锰酸盐指数含量低.高锰酸盐指数较高,水中溶解氧消耗速率较快,将会更易于造成水质恶化的现象.但与东莞燕岭湿地景观水体^[4]、合肥景观水体^[19]和济南市区的 10 个主要景观水体^[26]相比,本研究水体中高锰酸盐指数的含量较低.有研究表明^[27],在水体富营养化程度较低时,COD 对其贡献较大,而当富营养化程度加重时,来自营养盐的贡献更为突出.

通过对水体中有机物的分析得出,溶解性有机物主要来自水体微生物的贡献,4 个景观水体的溶解性有机物在性质上确定为强自生源、弱腐殖质特征,高锰酸盐指数主要反映有机物的含量,4 个景观水体的有机物特征和含量存在差别,因此有必要进一步解析环境对微生物群落的影响.

2.2 反硝化细菌群落分析

2.2.1 反硝化细菌群落多样性分析

采用对测序序列随机抽样的方法,4 个样品的稀释曲线在 97% 相似性水平下,以抽到的序列数与它们所能代表的数目构建稀释曲线,随着测序序列数量的进一步增大,各景观水体中 OTU 数目的增加趋于平缓(图 3),并且覆盖度达到 99%,测序量能够覆盖样本中的绝大部分物种,两者共同说明了对环境样本微生物群落的检测比率接近饱和,获取了绝大多数样本信息,基本能够反映景观水体的微生物群落组成.

通过 ACE、Chao1、Shannon 指数、Simpson 指数和覆盖度等 α 多样性指数分析微生物群落的丰富度和多样性.4 个景观水体中涵盖 36 个种和 1376 个 OTUs,由表 3 得出,ACE 和 Chao1 指数用来计算群落中 OTU 的数目,两种计算方法反映出

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 for the different landscape water bodies

位置	有效序列	ACE 指数	Chao1 指数数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度/%
裕西公园 (YX)	33209	782	793	4.66	0.023	99
水上公园 (SS)	43845	528	516	3.12	0.131	99
长安公园 (CA)	29750	693	701	3.28	0.209	99
世纪公园 (SJ)	52776	838	839	4.67	0.021	99

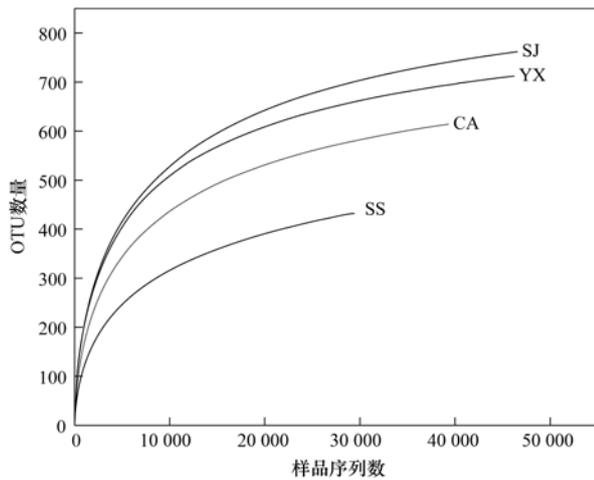


图 3 不同景观水体 OTU 稀释曲线

Fig. 3 OTU rarefaction curves for the different landscape water bodies

的变化趋势基本一致. Shannon 指数反映的 4 个公园水体变化顺序为: SJ > YX > CA > SS, 同 Simpson 指数结果相一致.

2.2.2 反硝化细菌群落组成及差异分析

本研究共获得景观水体细菌群落 4 门、7 纲、13 目、16 科和 23 属. 反硝化细菌门水平组成主要来自变形菌门, 还有部分未知细菌[图 4(a)], 变形菌门在诸多反硝化细菌多样性中占据着优势地位^[28-30]. 张雅洁等^[31]研究的北海湖微生物群落结构中, 变形菌门是冬季的第一优势菌门, 随温度升高, 到春季变形菌门的优势作用降低, 放线菌门和拟杆菌门的相对丰度明显升高, 表明温度在一定程度上影响着细菌多样性. 在纲水平上不同公园细菌组成不同[图 4(b)], YX 中未知细菌相对丰度较大; SS 中 γ -变形菌纲相对丰度较大; CA 中 α -变形菌纲相对丰度较大; SJ 中未知细菌、unclassified_Proteobacteria、 β -变形菌纲和 α -变形菌纲相对丰度较大. 这与郑林雪等^[29]的研究结果一致, 即绝大多数被确认的反硝化菌集中分布于 α -变形菌纲、 β -变形菌纲和 γ -变形菌纲. 通过对不同景观水体反硝化细菌群落属水平组成分析[图 4(c)], 4 个景观水体的细菌群落结构差异显著, 在属分类水平上主要有 15 个属, 包括 β -变形菌纲脱氯菌属 (*Dechloromonas*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、产黄

杆菌属 (*Rhodanobacter*)、红杆菌属 (*Rhodobacter*)、陶厄氏属 (*Thauera*), 此外, unclassified_Bacteria、unclassified_Proteobacteria、environmental_samples 均有较高丰度. 康鹏亮等^[32]研究西安市景观水体发现, 副球菌属、假单胞菌属和红长命菌属为优势菌属. 鲍林林等^[33]对北运河沉积物的研究发现假单胞菌、陶厄氏属和盐单胞菌属是主要的反硝化菌, 上述反硝化菌对氮素去除均有较大贡献^[34]. SS 的优势菌属为假单胞菌 (*Pseudomonas*) 60.48%. CA 的优势菌属为红杆菌属 (*Rhodobacter*) 46.94%, 杨浩等^[35]分析窖水中的微生物群落多样性时发现, *Rhodobacter* 是具有好氧反硝化功能的优势菌, 李小义等^[36]从污泥中分离出的菌株中也对 *Rhodobacter* 进行了相关报道. YX 的优势菌属为 unclassified_Bacteria 53.52%, SJ 的优势菌属为 unclassified_Bacteria 36.19%、unclassified_Proteobacteria 23.44%. 此外, 所研究景观水体中的变形菌门 (unclassified_Proteobacteria) 细菌和 unclassified_Bacteria 占有较大的比例, 变形菌门多具有好氧反硝化生态功能的细菌以及在未分类的细菌领域还有待探索^[13, 37].

通过韦恩图较直观地反映物种的差异及重叠情况[图 4(d)]. 其中, YX 独有 265 个 OTUs; SS 独有 71 个 OTUs; CA 独有 127 个 OTUs; SJ 独有 213 个 OTUs. 4 个公园都存在的 OTUs 为 126 个. 4 个公园所含 OTUs 数目关系为: SJ > YX > CA > SS, 这同 ACE 和 Chao1 指数分析的结果相一致. 寇文伯^[38]对于鄱阳湖细菌群落的研究得出, OTUs 的个数和细菌相对丰度之间具有显著相关性, 相对丰度高的细菌比相对丰度低的有更多的 OTU, 即优势菌群的基因型多样性更高. 很明显本研究中 4 个景观水体的 OTU 数目和多样性指数的关系符合该结论. 同时这也验证了 Cohan 等^[39]提出的细菌多样性是细菌在生境中生态成功的关键的假说.

通过 PCA 主成分分析发现[图 5(a)], 4 个景观水体中反硝化细菌组成具有明显差异, PC1 轴和 PC2 轴可以解释总变异的 81.24%, 能够很好地反映总体的变化. *nirS* 型反硝化细菌变异主要发生在 PC1 轴上, YX、SS 位于第 III 象限, SJ 位于第 IV 象

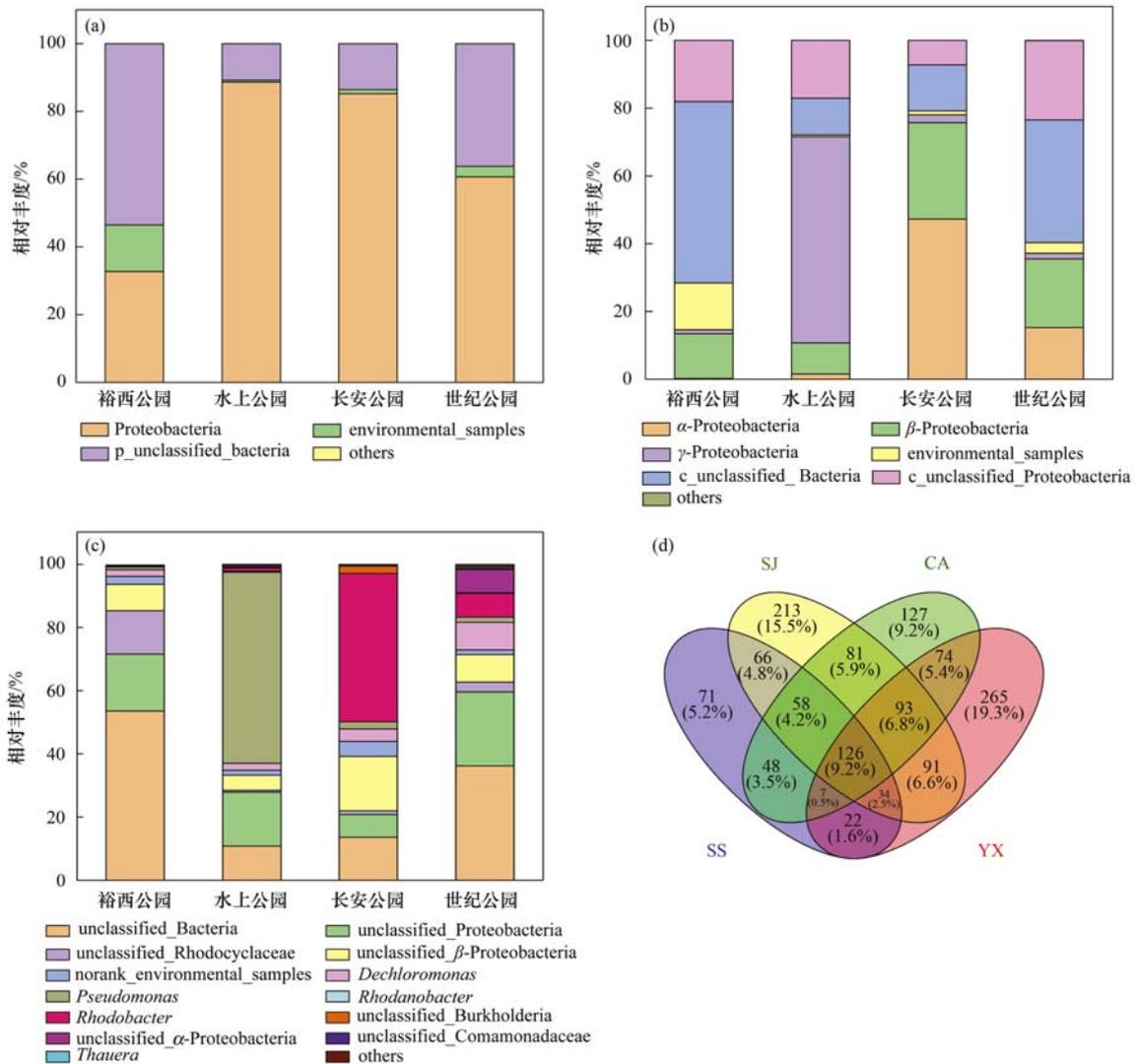


图 4 景观水体物种组成及比较分析

Fig. 4 Species composition and comparative analysis of the park water bodies

限, CA 位于第 II 象限, 通过 PCA 发现, YX 和 SS 差异较小, 而 CA 与其他公园水体具有明显差异. 再通过降趋对应分析(DCA), 计算得水体微生物群落中最大梯度长度值为 0.208, 因此选择冗余性分析(RDA)进一步开展环境因子与微生物群落的多元统计分析.

2.2.3 环境因子关联分析

微生物的群落结构和环境因子对其的影响密不可分, 根据微生物群落结构和环境因子的 RDA 分析结果指出[图 5(b)], 氨氮($r=0.9699$)、亚硝氮($r=0.8801$)和总磷($r=0.8573$)与轴 1 呈正相关, 硝氮($r=-0.8614$)和溶解氧($r=-0.8330$)与轴 1 呈负相关. 因此对体系中微生物群落结构影响最大的是氨氮, 其次是亚硝氮和硝氮, 总磷和溶解氧次之. β -变形菌纲脱氮菌属(*Dechloromonas*)、陶厄氏属(*Thauera*)、食酸菌属(*Acidovorax*)、unclassified

Rhodobacteraceae 和 unclassified_Bacteria 与高锰酸盐指数、氨氮、亚硝氮和总磷呈显著正相关, 与 pH、硝氮、总氮和溶解氧呈显著负相关. 康鹏亮等^[32]研究的西安景观水体中的优势菌属 *Dechloromonas* 和 *Thauera* 与总氮、硝氮和溶解氧等呈负相关, 这与本研究相一致. unclassified_Burkholderiales、unclassified_Betaproteobacteria、unclassified_Rhodocyclales 受环境因子的影响较小. 磁螺菌属(*Magnetospirillum*)、产黄杆菌属(*Rhodanobacter*)和 environmental_samples 与硝氮、总氮和溶解氧呈显著正相关, 假单胞菌属(*Pseudomonas*)、unclassified_Proteobacteria 与总磷正相关, 与 pH、高锰酸盐指数呈负相关.

总体来看, 氨氮、亚硝氮、总磷、硝氮和溶解氧对 4 个景观水体微生物多样性影响较大, 氮素的不同形态影响着脱氮微生物群落结构和功能^[40].

邵基轮等^[41]研究的好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 在反应器中的微生物群落结构也受不同形态的氮素的影响较大, 氨氮、亚硝氮促进 β -变形菌纲脱氯菌属 (*Dechloromonas*) 和陶厄氏属 (*Thauera*) 等细菌的相对丰度. Zhao 等^[42]的研究发现, 太湖流域沉积物反硝化速率随氨氮含量的增加而升高, 硝氮抑制磁螺菌属 (*Magnetospirillum*) 和产黄杆菌属 (*Rhodanobacter*) 等细菌的相对丰度, 总磷的含量促进优势菌属假单胞菌的丰度, 而其他优势菌属受环境因子的影响较小. 微生物群落结构与非生物因素的关系密不可分, 且响应更为复杂, 所以阐明其作用机制, 从而更好地为城市水系的治理和修复筛选好氧反硝化菌, 还需全面而深入地研究.

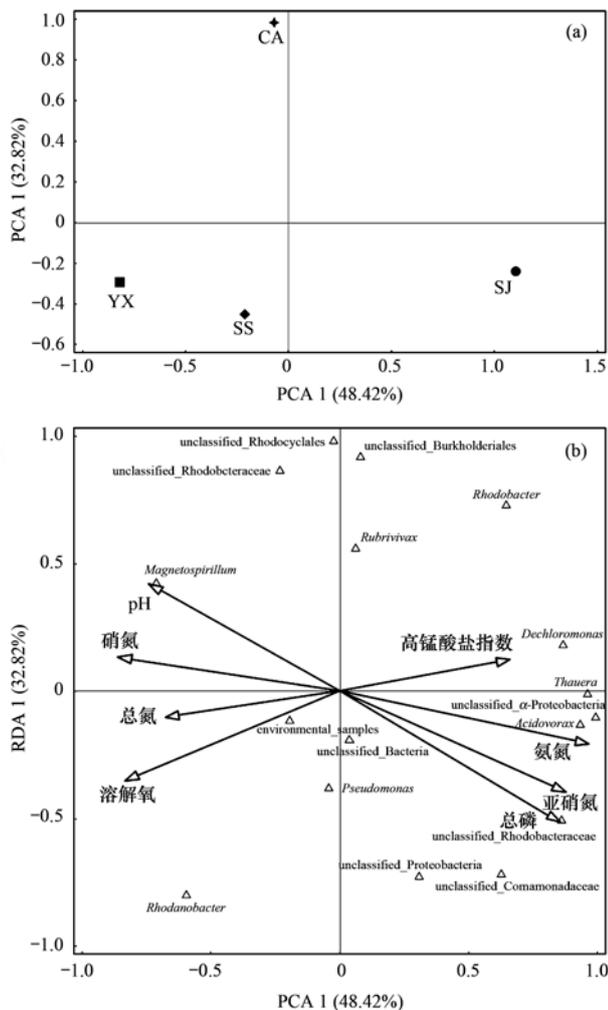


图5 景观水体中反硝化细菌菌群的 PCA 和 RDA 分析

Fig. 5 PCA and RDA analysis of the denitrifying bacteria communities in the landscape water bodies

3 结论

(1) 水质特征表明 4 个景观水体氮素含量较高, YX 主要由硝氮和有机氮组成; SS 和 CA 主要由硝氮组成; SJ 主要由氨氮和硝氮组成. 水体中 CDOM 均呈现强自生源、弱腐殖质特征.

(2) 高通量测序结果显示裕西公园水体的优势菌种为 (*unclassified_Bacteria*) 53.52%; 水上公园水体的优势菌种为假单胞菌 (*Pseudomonas*) 60.48%; 长安公园水体的优势菌种为红杆菌属 (*Rhodobacter*) 46.94%; 世纪公园水体的优势菌种为 (*unclassified_Bacteria*) 36.19%、(*unclassified_Proteobacteria*) 23.44%. PCA 分析表明 4 个典型景观水体中反硝化细菌种群结构存在显著差异.

(3) RDA 分析得出, 裕西公园中的细菌与硝氮、总氮和溶解氧正相关; 水上公园中的细菌与透明度和总磷正相关; 长安公园中的细菌与高锰酸盐指数、氨氮和亚硝氮正相关; 世纪公园中的细菌与 pH、硝氮、总氮和溶解氧呈显著负相关.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄雅娟, 蔡宇佳, 史嘉瑶, 等. 人工湿地处理景观水体富营养化的研究进展[A]. 见:《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册)[C]. 北京:《环境工程》编委会, 工业建筑杂志社有限公司, 2018, 302-306.
- [3] Padhi S K, Tripathy S, Mohanty S, et al. Aerobic and heterotrophic nitrogen removal by *Enterobacter cloacae* CF-S27 with efficient utilization of hydroxylamine [J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 285-296.
- [4] 李萍, 钟敏, 吴鹏举, 等. 东莞燕岭湿地景观水体富营养化的现状及机理分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 47-51.
Li P, Zhong M, Wu P J, et al. Eutrophication status and mechanism of landscape water body in Yanling Wetland in Dongguan[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 47-51.
- [5] 于丹, 刘红磊, 邵晓龙, 等. 北方大型居住区景观水体富营养化特征研究[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 53-57.
Yu D, Liu H L, Shao S L, et al. Eutrophication feature study in a landscape waterbody located in a large residential district, North China [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5): 53-57.
- [6] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1537-1551.
Du Y H, Liu C, Chen K N, et al. Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1537-1551.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- Chen 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.
- [10] 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 等. 湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2431-2437.
- Kang P L, Zhang H H, Huang T L, *et al.* Denitrification characteristics and community structure of aerobic denitrifiers from lake and reservoir sediments[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2431-2437.
- [11] Heylen K, Gevers D, Vanparys B, *et al.* The incidence of *nirS* and *nirK* and their genetic heterogeneity in cultivated denitrifiers [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(11): 2012-2021.
- [12] 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.
- [13] 周石磊, 黄廷林, 张春华, 等. 基于 Miseq 的好氧反硝化菌源水脱氮的种群演变[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1125-1135.
- Zhou S L, Huang T L, Zhang C H, *et al.* Bacterial community structures of aerobic denitrification bacteria nitrogen removal process in source water experiment by using Miseq high-throughput sequencing technique [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1125-1135.
- [14] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 172-184.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter with different relative molecular weight from rainwater from Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir based on UV-Vis and EEMs [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 172-184.
- [15] Parlanti E, Wörz K, Geoffroy L, *et al.* Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs[J]. Organic Geochemistry, 2000, **31**(12): 1765-1781.
- [16] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- Huang T L, Fang K K, Zhang C H, *et al.* Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter from Zhoucun reservoir in summer based on fluorescence spectroscopy and PARAFAC[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- [17] 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.
- [18] Bronk D A, Gilbert P M, Ward B B. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production [J]. Science, 1994, **265**(5180): 1843-1846.
- [19] 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.
- [20] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(1): 38-48.
- [21] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘琛, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 720-728.
- Liu Y Y, Qin J H, Liu C, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western sichuan plateau based on EEM-PARAFAC analysis [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 720-728.
- [22] 肖隆庚, 陈文松, 陈国丰, 等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 160-167.
- Xiao L G, Chen W S, Chen G F, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the South China sea [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(1): 160-167.
- [23] 江俊武, 李帅东, 沈胤胤, 等. 夏季太湖 CDOM 光学特性空间差异及其来源解析[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(7): 1020-1030.
- Jiang J W, Li S D, Shen Y Y, *et al.* Spatial differences of optical properties of CDOM and their source apportionment in Taihu lake in summer [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(7): 1020-1030.
- [24] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [25] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral evolution characteristics of DOM in sediment interstitial water during the formation stage of thermal stratification in the main reservoir area of the Zhoucun reservoir [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- [26] 李超, 刘毓, 刘红权. 济南市园林景观水体水质调查及富营养化评价[J]. 园林科技, 2016, (1): 6-10.
- [27] 张艳, 李秋芬, 赵俊, 等. 渤海中部 COD 的时空分布特征及其对富营养化的贡献分析[J]. 渔业科学进展, 2016, **37**(4): 43-48.
- Zhang Y, Li Q F, Zhao J, *et al.* Temporal and spatial distribution of COD and its source and contribution to eutrophication in the central Bohai sea [J]. Progress in Fishery Sciences, 2016, **37**(4): 43-48.
- [28] 王硕, 徐巧, 张光生, 等. 完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 665-671.
- Wang S, Xu Q, Zhang G S, *et al.* Operational performance and microbial community structure in a completely mixed aeration system [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 665-671.
- [29] 郑林雪, 李军, 胡家玮, 等. 同步硝化反硝化系统中反硝化细菌多样性研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 116-121.
- Zheng L X, Li J, Hu J W, *et al.* Analysis of denitrifying bacteria community composition in simultaneous nitrification and denitrification systems [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 116-121.

- [30] 唐婧, 徐小蓉, 商传禹, 等. 南明河城区河段细菌多样性与环境因子的关系[J]. 微生物学报, 2015, **55**(8): 1050-1059.
Tang J, Xu X R, Shang C Y, *et al.* Association of bacterial diversity in city area of Nanming river with environmental factors [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, **55**(8): 1050-1059.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] González-Domenech C M, Martínez-Checa F, Béjar V, *et al.* Denitrification as an important taxonomic marker within the genus *Halomonas* [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2010, **33**(2): 85-93.
- [35] 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.
- [36] 李小义, 王丽萍, 杜雅萍, 等. 好氧反硝化微生物多样性及其反硝化功能初步研究[J]. 氨基酸和生物资源, 2016, **38**(2): 37-45.
Li X Y, Wang L P, Du Y P, *et al.* Diversity of aerobic denitrifying microbes from various environment and analysis of their denitrification ability [J]. *Amino Acids & Biotic Resources*, 2016, **38**(2): 37-45.
- [37] Yu Z H, Liu J J, Li Y S, *et al.* Impact of land use, fertilization and seasonal variation on the abundance and diversity of *nirS*-type denitrifying bacterial communities in a mollisol in northeast China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, **85**: 4-11.
- [38] 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, Wang 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.
- [39] Cohan F M. What are bacterial species? [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2002, **56**: 457-487.
- [40] Abell G C, Ross D J, Keane J P, *et al.* Nitrifying and denitrifying microbial communities and their relationship to nutrient fluxes and sediment geochemistry in the Derwent Estuary Tasmania [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2013, **70**: 63-75.
- [41] 邵基伦, 曹刚, 李紫惠, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 630-637.
Shao J L, Cao G, Li Z H, *et al.* Analysis of the microbial community structure in continuous flow reactor enhanced by heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacterium *Burkholderia* sp. YX02 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 630-637.
- [42] Zhao Y Q, Xia Y Q, Li B L, *et al.* Influence of environmental factors on net N₂ and N₂O production in sediment of freshwater rivers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(16): 9973-9982.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)