

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                             |                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 .....                                         | 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)                              |
| 基于重庆本地碳成分谱的 PM <sub>2.5</sub> 碳组分来源分析 .....                                 | 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)          |
| 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 .....                                                | 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)           |
| 基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 .....                                                | 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)                 |
| 基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 .....                                              | 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)                          |
| 典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 .....                                              | 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)                     |
| 火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 .....                                               | 王占山, 潘丽波 (853)                                       |
| 国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 .....                                                  | 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)                                    |
| 稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 .....                                                      | 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)                                |
| 河口湿地近地面大气 CO <sub>2</sub> 浓度日变化和季节变化 .....                                  | 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)                                   |
| 三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 .....                                            | 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)             |
| 施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O 和 NH <sub>3</sub> 排放特征 ..... | 万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892) |
| 干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 .....                                            | 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)                      |
| 长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 .....                                                  | 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)                               |
| 汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析 .....                                                     | 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)                                   |
| 基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 .....                                        | 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)                             |
| 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 .....                               | 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)             |
| 黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 .....                                                   | 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)                        |
| 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 .....                                                 | 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)                        |
| 黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 .....                                       | 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)                          |
| 纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 .....                                        | 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)                    |
| 铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 .....                                                     | 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)                              |
| 磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 .....                                              | 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)                                |
| 预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 .....                                                 | 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)                          |
| 陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 .....                                                  | 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)                                  |
| 冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 .....                                          | 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)                             |
| 烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 .....                                                       | 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)                         |
| 高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 .....                                              | 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)                        |
| 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 .....                                                 | 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)                             |
| 珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 .....                                                 | 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)                 |
| 海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 .....                                                 | 李飞, 徐敏 (1035)                                        |
| 再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 .....                                                 | 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)                         |
| 瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 .....                                               | 李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)                             |
| 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价 .....                                                   | 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)                         |
| 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 .....                                                  | 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)                        |
| 干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 .....                                                    | 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)                             |
| 缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 .....                                                 | 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)                    |
| 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 .....                                           | 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)                   |
| 黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 .....                               | 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)                       |
| 天然林土壤有机碳及矿化特征研究 .....                                                       | 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)                      |
| 不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 .....                                               | 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)                                  |
| 硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 .....                                               | 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)                              |
| 6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 .....                                               | 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)                       |
| 基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 .....                                            | 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)                             |
| 人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 .....                                                  | 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)                   |
| 农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 .....                                        | 陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)     |
| 中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 .....                                            | 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)                   |
| 苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 .....                                      | 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)          |
| UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 .....                                    | 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)                                 |
| Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 .....                                | 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)                         |
| 对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 .....                                                | 宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)                              |
| 克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 .....                                     | 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)                   |
| 铅元素人为循环环境释放物形态分析 .....                                                      | 梁静, 毛建素 (1191)                                       |
| 污染排放与环境质量关系模型构建与应用 .....                                                    | 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)                             |
| 微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 .....                                                 | 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)               |
| 《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)                 |                                                      |

# 冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征

黄菲, 梅晓洁, 王志伟\*, 吴志超

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 研究了在冬季低温条件下, 膜生物反应器 (MBR) 与传统活性污泥法 (CAS) 工艺运行效果及微生物群落特征, 对工艺出水水质和微生物活性进行了分析, 并借助 454 焦磷酸高通量测序法对微生物群落组成和结构进行了解析。结果表明, 三套对比工艺 (MBR 两套: 高污泥浓度  $R_1$  和低污泥浓度  $R_2$ , CAS 工艺  $R_3$ ) 的出水总氮平均去除率分别为 85.2%、56.1%、58.8%;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的平均去除率分别为 99.7%、99.7%、59.7%, 比硝化速率由大到小依次为  $R_2$ 、 $R_1$ 、 $R_3$ , 比反硝化速率由大到小依次为  $R_3$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ , 高浓度 MBR 污泥具有较好的耐寒特性和氨氮去除效果; 从 454 焦磷酸测序结果看, 相似性为 97% 时, 菌群丰富度:  $R_2 > R_3 > R_1$ , 多样性:  $R_2 > R_1 > R_3$ ; MBR 污泥微生物菌群的组成和丰度与 CAS 系统有较大不同;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  中主要的硝化菌为 *Nitrospira* 菌属, 总相对度依次为: 1.22%、1.64%、0.15%, 主要的反硝化菌为 *Zoogloea* 菌属、*Thauera* 菌属、*Comamonadaceae* 菌属及 *Comamonas* 菌属, 总相对丰度依次为: 5.8%、4.52%、15.21%; 低温环境下, 泥龄长、污泥浓度高、TN 负荷低的 MBR 系统有利于硝化、反硝化细菌累积, 提升生物脱氮效果。

**关键词:** 冬季低温; 膜生物反应器; 传统活性污泥法; 454 焦磷酸测序; 微生物群落结构; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1002-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.026

## Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature

HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, WU Zhi-chao

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper, the performance of membrane bioreactors (MBR) and conventional activated sludge (CAS) processes at low temperature was investigated by analyzing their effluent quality and microbial viability. 454 high-throughput pyrosequencing was also applied to study the microbial community structures. The results of three systems (two MBRs:  $R_1$  with high sludge concentration,  $R_2$  with low sludge concentration, and one CAS:  $R_3$ ) showed that the average removal rate of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  was 99.7%, 99.7% and 59.7%, respectively, and the average removal rate of TN was 85.2%, 56.1% and 58.8%, respectively.  $R_2$  showed the highest specific ammonium uptake rate (SAUR), followed by  $R_1$  and  $R_3$ ;  $R_1$  showed the highest specific nitrate uptake rate (SNUR), followed by  $R_2$  and  $R_3$ . It could be concluded that MBRs with high sludge concentration had a better performance of nitrogen removal under low temperature operation. 454 high-throughput pyrosequencing analysis revealed that the microbial richness was  $R_2 > R_3 > R_1$ , and the microbial diversity was  $R_2 > R_1 > R_3$  at 97% sequence identity. The microbial structure and bacterial abundance were quite different between MBR and CAS systems. The dominant nitrifier in this research was *Nitrospira*, and the total relative abundance of nitrifiers in  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  was 1.22%, 1.64% and 0.15%, respectively. The *Zoogloea*, *Thauera*, *Comamonadaceae* and *Comamonas* might be the dominant denitrifiers in this study, and the total relative abundance of denitrifier in  $R_1$ ,  $R_2$ , and  $R_3$  was 5.8%, 4.52% and 15.21%, respectively. MBR's characteristics of long solid retention time, high sludge concentration and low total nitrogen loading well supported the accumulation of nitrifiers and denitrifiers, and improved the performance of biological nitrogen removal at low temperature.

**Key words:** low temperature; membrane bioreactor; conventional activated sludge process; 454 high-throughput pyrosequencing; microbial community structures; nitrogen removal

近年来, 水体富营养化日趋严重, 因此国家在“十二五节能减排规划”中, 又新增了氨氮减排指标, 全国的氨氮总量减排目标是 10%<sup>[1]</sup>。城市污水处理厂作为减排的主要载体之一, 却面临着冬季低水温 (<12℃) 条件下, 微生物活性受抑制, 生物硝化、反硝化效果不佳, 出水水质不能稳定达标等问题。

膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR) 作为一种新型高效的污水处理技术, 与传统活性污

泥法 (conventional activated sludge, CAS) 相比, 具有出水水质好、污泥产率低、占地面积小、有机物容积负荷高等优点。由于 MBR 实现了水力停留时间

收稿日期: 2013-07-24; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 上海市科委项目 (11231200402); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA063403)

作者简介: 黄菲 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术与理论, E-mail: 1226feya\_huang@tongji.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: zwwang@tongji.edu.cn

(HRT) 和污泥龄 (SRT) 的完全分离, 其较长的泥龄有利于世代生长周期长的生物菌群生长和累积, 从而有较好的脱氮效果. 因此, 在“十二五”污水厂升级改造的提案中, MBR 工艺得到了广泛关注<sup>[2]</sup>. 有研究表明<sup>[3]</sup>, 在常温条件下, MBR 比 CAS 有更好的有机物和氨氮去除效果; 此外, 胡怡杉等<sup>[4]</sup>在贫营养条件下对比了 MBR 和 CAS 污泥微生物群落结构, 发现 MBR 污泥中菌群的多样性、物种丰度和均匀度更高, 在贫氧环境下能够保持长期稳定的状态, 可见 MBR 工艺抗环境因素变化能力更强. 而在冬季低温条件下, MBR 工艺中微生物群落特征的变化以及微生物耐寒性能的提升却少有研究.

近年来, 越来越多的分子生物学手段被应用于研究污水处理过程中微生物群落结构的特性, 如变性梯度凝胶电泳 (DGGE)、克隆文库、高通量测序技术等<sup>[5~7]</sup>. 454 焦磷酸高通量测序法是一种以 DNA 扩增的乳胶系统和皮升大小焦磷酸为基础的高通量测序技术, 具有分析结果准确、高速、读长

长等特点<sup>[8]</sup>, 被广泛应用于污水处理过程中微生物群落结构和多样性的研究<sup>[9,10]</sup>. 本研究以冬季低温条件为背景, 结合工艺的运行情况及出水水质, 利用 454 焦磷酸高通量测序对 MBR 系统和传统活性污泥系统中的微生物群落结构进行了解析, 并对系统中生物脱氮相关微生物的类群进行了鉴定.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验对比了冬季低温下 (2012-12-01 ~ 2013-02-20, 平均水温:  $5.9^{\circ}\text{C} \pm 2.7^{\circ}\text{C}$ ) 3 套生物污水处理工艺 ( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ), 其中  $R_1$ 、 $R_2$  为小试规模的 AO-MBR 工艺, 均已稳定运行一年以上. 好氧段放置聚偏氟乙烯平板膜, 平均孔径为  $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_3$  为上海市某水质净化厂推流式  $A^2/O$  工艺. 3 套工艺的进水均为城市生活污水 (旋流沉砂池出水), 平均进水水质: 化学需氧量 ( $463 \pm 167$ )  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 总氮 ( $47.05 \pm 11.62$ )  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氨氮 ( $35.95 \pm 9.21$ )  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 3 套工艺的主要运行参数见表 1.

表 1 主要运行参数表<sup>1)</sup>  
Table 1 Operating conditions of  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

| 工艺参数                                                          | $R_1$             | $R_2$             | $R_3$             |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 工艺构型                                                          | AO-MBR            | AO-MBR            | AAO               |
| HRT/h                                                         | 13                | 21                | 12 ~ 13           |
| SRT/d                                                         | 100               | 30                | 8 ~ 10            |
| 总悬浮固体浓度 (MLSS)/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$                  | $14.89 \pm 0.64$  | $7.18 \pm 0.30$   | $3.08 \pm 1.51$   |
| 挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$               | $10.97 \pm 0.47$  | $5.45 \pm 0.27$   | $2.34 \pm 1.16$   |
| 污泥氮负荷 (TN/VSS)/ $\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ | $0.009 \pm 0.002$ | $0.012 \pm 0.002$ | $0.041 \pm 0.014$ |

1) MLSS, MLVSS 测定次数  $n=10$

1.2 分析指标与方法

1.2.1 常规分析项目

常规分析项目为化学需氧量 (COD)、总氮 (TN)、氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝酸盐氮 ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、亚硝酸盐氮 ( $\text{NO}_2^--\text{N}$ )、总悬浮固体 (MLSS)、挥发性悬浮固体 (MLVSS). 均采用国标<sup>[11]</sup>方法测定.

1.2.2 比硝化速率和比反硝化速率的测定<sup>[12,13]</sup>

比硝化速率 (SAUR) 的测定: 将污泥加入到 1 L 的广口瓶中, 加入适量的氯化铵使混合液初始  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度为  $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 投加适当的碱度 (本实验用  $\text{NaHCO}_3$ ) 调节 pH 在 7 ~ 8. 采用微孔曝气机控制溶解氧 (DO) 为  $5 \sim 6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 每隔 20 ~ 30 min 从广口瓶中取混合液并过滤, 连续取样 3 h 以上. 测定滤液的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , 将  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的值与时间作直线, 直线斜率的绝对值即是污泥的硝化速率值 (AUR). 该值与测定使用的 MLVSS 的比值即是比硝化速率 (SAUR).

比反硝化速率 (SNUR) 的测定: 将污泥加入到密闭容器中, 加入适量的碳源和氮源 (本实验用乙酸钠和硝酸钾), 使混合液溶解性 COD 和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度分别为  $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 实验开始前用氮气吹脱 5 min 去除水中的溶解氧, 然后封闭瓶口. 每隔 20 ~ 30 min 从容器中取混合液并过滤, 连续取样 3 h 以上. 测定滤液的 ( $\text{NO}_2^--\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$ ), 将 ( $\text{NO}_2^--\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$ ) 与时间作直线, 由直线斜率的绝对值得到反硝化速率值 (NUR). 该值与测定使用的 MLVSS 的比值即是比反硝化速率 (SNUR).

1.2.3 微生物多样性的测定

DNA 的提取与 PCR 扩增: 分别取  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  好氧段污泥混合液 (取样时间与比硝化速率和比反硝化速率的时间同步, 为 1 月下旬). 使用 E. Z. N. A Soil DNA 试剂盒 (美国 OMEGA Biotek 公司) 抽提

基因组 DNA, DNA 的抽提和含量测定参见文献[14]. 提取的基因组 DNA 用 1% 琼脂糖凝胶电泳进行检测. PCR 扩增区域为细菌 16S rRNA 的 V1-V3 区, 合成带有“5'454A、B 接头-特异引物 3'”的融合引物, 其中 A 为测序端需加标签, B 端引物可共用. 细菌 16S rRNA 的引物名称及引物序列分别是: 533R: 5'-TTACCGCGGCTGCTGGCAC-3' (测序端); 27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'. PCR 采用 TransGen AP221-02: TransStart FastPu DNA Polymerase (中国 TansGen 公司), 20  $\mu\text{L}$  反应体系: 5  $\times$  FastPfu Buffer, 4  $\mu\text{L}$ ; 2.5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  dNTPs, 2  $\mu\text{L}$ ; 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  533R, 0.8  $\mu\text{L}$ ; 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  27F, 0.8  $\mu\text{L}$ ; FastPu Polymerase, 0.4  $\mu\text{L}$ ; 模板 DNA, 10 ng. 用 GeneAmp® 9700 型 (美国 ABI 公司) PCR 扩增仪扩增, 反应程序: 先 95 $^{\circ}\text{C}$  预变性 2 min; 然后进行 25 个循环 (95 $^{\circ}\text{C}$  变性 30 s, 55 $^{\circ}\text{C}$  退火 30 s, 72 $^{\circ}\text{C}$  延伸 30 s), 最后 72 $^{\circ}\text{C}$  延伸 5 min. 用 AxyPreDNA 凝胶回收试剂盒 (美国 AXYGEN 公司) 回收 PCR 产物, 经 Tris-HCl 洗脱后, 用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测. 根据电泳结果, 将 PCR 产物用 QuantiFlour™-ST 蓝色荧光定量系统 (美国 Promega 公司) 进行定量, 按照每个样品的测序量要求, 进行相应比例的混合.

454 文库构建与测序: 应用高通量测序平台 454 GS FLX Titanium (美国 Roche454 公司) 对扩增产物进行焦磷酸测序. 测序结束后将测序接头及引物序列去除, 并对处理后的有效序列进行数据及长度分布统计. 为提高后续生物信息分析的准确性, 对有效序列进行优化, 包括: ① 利用特异性引物信息将非特异性扩增片段序列去除; ② 丢弃长度短于 150 bp、含有模糊碱基 (Ns)、引物碱基含 2 个以上错配、单碱基重复超过 6 个的序列.

生物多样性与分类学分析: 首先将序列按照彼此的相似性归为操作分类单元 (OTU). 为了降低 OTU 错分的概率, 将优化序列截齐 (截取长度: 150 bp), 与 SILVA106 库比对后, 对序列进行聚类. OTU 聚类利用 MOTHUR 软件 ([http://www.mothur.org/wiki/Main\\_Page](http://www.mothur.org/wiki/Main_Page)), 聚类相似性为 97% 与 95%. 对优化序列采用随机抽样的方法, 以抽到的序列数与它们所能代表 OTU 的数目构建稀释性曲线. 利用 MOTHUR 软件对样本 Chao 丰度指数 (<http://www.mothur.org/wiki/Chao>), Shannon 多样性指数 (<http://www.mothur.org/wiki/Shannon>) 及测序深度指数 Good's coverage (<http://www.mothur.org/wiki/Coverage>) 进行计算. 在进行分类学分析时, 为

了提高比对速率与质量, 同时保证分类学分析的高可信性, 将优化序列截取前 400 bp 的序列, 再根据 SILVA106 库中的参考序列对 OTU 进行种属鉴定, 种属比对的可信度阈值设定为 80%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 出水水质和生物活性分析

工艺  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  在冬季低温条件下对氮 ( $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) 的去除效果如图 1 所示. 从中可知,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  工艺系统出水  $\text{TN}$  的平均去除率分别为 85.24%、56.05%、58.75%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的平均去除率分别为 99.7%、99.7%、59.7%. 对比 MBR 工艺 ( $R_1$ 、 $R_2$ ) 和传统工艺 ( $R_3$ ) 可知, 传统活性污泥法的硝化效果较差, 出水  $\text{TN}$  主要以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的形式累积, 说明冬季低温运行时该工艺系统内的硝化菌对温度较为敏感, 而在 MBR 系统中, 对比  $R_1$  和  $R_2$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  均有很好的去除, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  均小于 0.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 可见 MBR 工艺在冬季低温下仍能保持较好的硝化效果, 而  $R_1$  和  $R_2$  的出水  $\text{TN}$  却有显著差异, 主要体现在  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  上, 工艺  $R_1$  的污泥龄较长, 有利于反硝化菌的世代生长, 此外工艺  $R_1$  的污泥浓度较高, 使得  $\text{TN}$  的污泥负荷降低, 由于微生物群聚效应, 出水  $\text{TN}$  有较好的去除. 将 3 套工艺进行整体对比, 只有工艺  $R_1$  能稳定达到一级 A 排放标准, 由此可见, 在冬季低温条件下, 生物脱氮受温度、污泥龄、污泥负荷的共同影响, 而高浓度的 MBR 污泥有较好的耐寒特性和有机物去除效果. 以下结合微生物活性 (包括 SAUR 和 SNUR) 作进一步分析.

由表 2 可知, 3 套工艺低温条件下的 SAUR 为:  $R_2 > R_1 > R_3$ , 这与工艺出水水质的结果是相吻合的, 即 MBR 工艺的硝化效果优于传统活性污泥法.

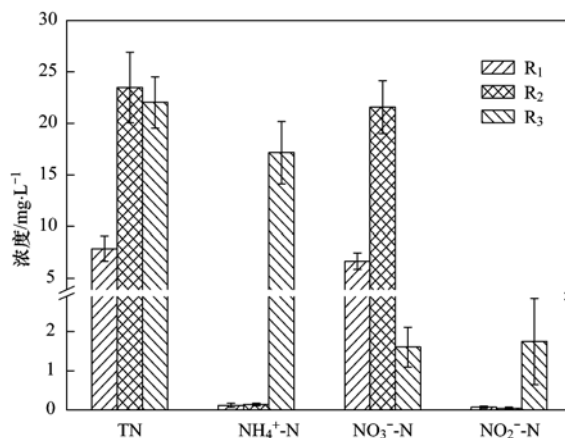


图 1 工艺  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  出水水质对比

Fig. 1 Effluent quality of  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

MBR 工艺在夏季时微生物的比硝化速率分别为  $0.073\ 7\ \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $0.071\ 5\ \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 可见 MBR 污泥在冬季低温条件下仍能保持较高的硝化速率, 而在低温条件下, 传统活性污泥的硝化速率 [ $0.034\ 7\ \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ] 却远远低于夏季的硝化速率 [ $0.111\ 0\ \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ], 由此可知, 传统活性污泥法的硝化菌活性受温度的影响较大, 这与刘长青等<sup>[15]</sup>研究低温对倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  脱氮除磷系统影响的结果是一致的, 即温度下降到  $13\ ^\circ\text{C}$  以下时硝化效果明显变差. 此外, 从比反硝化速率来看:  $R_3 > R_1 > R_2$ , 这与工艺出水水质并不相符, 主要是由于 3 套工

艺的污泥龄和污泥负荷不同所致, 通过计算得到 3 种工艺的反硝化速率,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别为:  $0.780\ 0$ 、 $0.282\ 5$ 、 $0.274\ 2\ \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 这一结果与工艺出水水质吻合, 可见 MBR 的长泥龄、高污泥浓度以及微生物的群聚效应能有效提升生物脱氮效果. 此外, 基于笔者此前的研究结果, 夏季 3 套工艺的 SNUR 分别为:  $0.062\ 5$ 、 $0.058\ 8$ 、 $0.122\ 5\ \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 与冬季低温相比反硝化速率并没有明显的差异, 可见比反硝化速率受温度和季节的影响较小, 而延长污泥龄、降低污泥氮负荷是提升生物反硝化效果的关键.

表 2 工艺  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  系统中微生物活性分析  
Table 2 Microbial viability of  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

| 季节 | 项目                                                                                           | $R_1$   | $R_2$   | $R_3$   |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| 冬季 | $\text{SAUR}(\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{VSS})/\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ | 0.059 2 | 0.067 3 | 0.034 7 |
|    | $\text{SNUR}(\text{NO}_3^--\text{N}/\text{VSS})/\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ | 0.071 1 | 0.051 8 | 0.117 2 |
| 夏季 | $\text{SAUR}(\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{VSS})/\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ | 0.073 7 | 0.071 5 | 0.111 0 |
|    | $\text{SNUR}(\text{NO}_3^--\text{N}/\text{VSS})/\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ | 0.062 5 | 0.058 8 | 0.122 5 |

综合系统出水水质和微生物活性分析可以得出, 冬季低温运行状况下, MBR 具有优于传统活性污泥法的硝化效率, 且 MBR 具有泥龄长、污泥浓度高、抗冲击能力强的特点, 因此更能适应低温环境, 此外 MBR 较高的污泥浓度补偿了低温条件下污泥活性的下降, 从而保证了出水水质的相对稳定.

2.2 微生物多样性和分类学分析

通过对 3 组样品 16S rRNA 基因文库进行焦磷酸测序, 经修剪去杂后,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别获得 9 334、8 687、9 505 条优化序列, 序列平均长度 473 bp. 将优化序列截齐后与 SILVA106 库比对后进行聚类, 在 97% 的相似性下分别获得了 2 610、2 595、2 281 个 OTU,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的稀释性曲线如图 2 所示, 可见当测序序列数量大于 6 000 时仍有新的 OTU 被测出, 利用焦磷酸测序法可以获得丰富的生物信息;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的稀释曲线均随测序序列增加趋向平坦, 说明本研究中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  样本取样量合理. 表 3 列出了 Alpha-diversity 分析中各样品的多样性指数. Chao 指数是估计群落中含 OTU 数目的指数, 用于计算菌群的丰度, 可表明当测序序列趋向无穷时获得的 OTU 数量, 可见在相似性为 97% 时, 有 Chao 指数:  $R_2 > R_3 > R_1$ , Chao 指数的大小与实际获得的 OTU 数目并不完全对应, 可能的原因是样品间测序深度的差异. Shannon 多样性指数常用来表征微生物群落的物种多样性, 微生物多样性由大到小依次

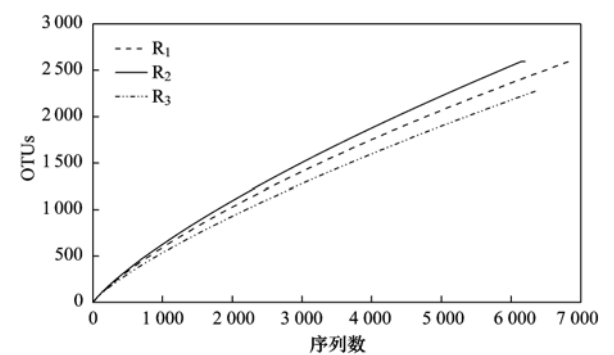


图 2  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  样品的稀释性曲线

Fig. 2 Rarefaction curve of sample  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

表 3  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的物种丰富度和多样性评价  
Table 3 Richness and diversity estimators of the bacteria in sample  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

| 样品    | OTU   | Chao 指数 | Shannon 指数 | 盖度   |
|-------|-------|---------|------------|------|
| $R_1$ | 2 610 | 7 437   | 6.68       | 0.73 |
| $R_2$ | 2 595 | 8 959   | 6.84       | 0.69 |
| $R_3$ | 2 281 | 7 873   | 6.42       | 0.73 |

是:  $R_2$ 、 $R_1$ 、 $R_3$ .

相似性为 97% 时样品 OTU 分类学结果如图 3 所示,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  聚类后分别包含 19、17、18 个已知菌门, 在 3 组样品中, Proteobacteria 菌门均是最主要的菌门, Bacteroidetes 菌门次之. 此外  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  中分别有 266、253、140 条序列不能被分入已知菌门, 说明这些细菌可能是未知菌种, 相比传统活性污

泥法,MBR 样品中微生物种群的未知性更高. 在当前分类水平下,两组 MBR 污泥样品( $R_1$ 、 $R_2$ ) 在生物群落的结构和丰度上具有比较明显的相似性,而传统的  $A^2/O$  污泥样品( $R_3$ ) 与它们有较大的差异,如在  $R_1$ 、 $R_2$  中,Acidobacteria 菌门、Chloroflexi 菌门、Nitrospirae 菌门、Planctomycetes 菌门等均是主要的菌门,但在  $R_3$  中上述细菌的相对丰度很低(小于 1%). Nitrospirae 菌门被认为与活性污泥硝化作用密切相关<sup>[16]</sup>,Proteobacteria 菌门、Firmicutes 菌门可能与污泥反硝化作用有关<sup>[17]</sup>. 为了得到更详细的微生物群落组成并获得样品中对生物脱氮起作用的细菌种类,下文将对微生物进行更深入的细分.

### 2.3 主要硝化菌、反硝化菌解析

根据 SILVA106 库中的参考序列对进行菌属鉴定,对比可信度阈值设定为 80%,将相对丰度小于 1% 的菌属合并到其他,分析结果如图 4(a) 所示. 通过比对共鉴定出 434 个已知微生物菌属,其中主要菌属共 24 个. 从图 4(a) 可以看出, $R_1$ 、 $R_2$  菌群的多样性和未知性均高于  $R_3$ . 对比  $R_1$ 、 $R_2$  可以发现采用同一工艺的污水处理装置中微生物群落组成

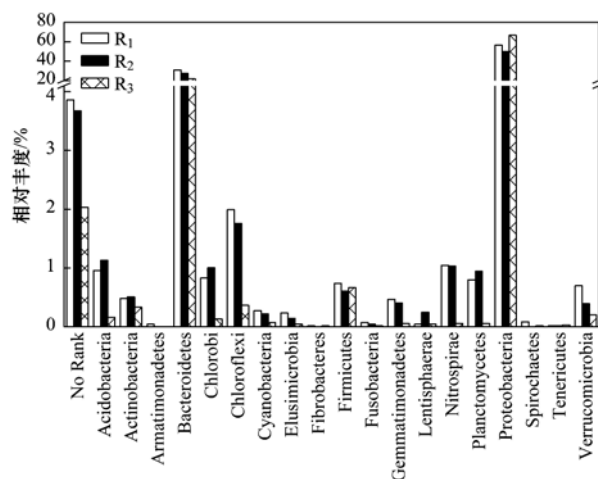


图 3  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  群落结构分析图(分类到门)

Fig. 3 Bacterial communities at phylum level of sample  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$

具有一定的共性,但由于污泥负荷、泥龄等操作条件不同, $R_1$ 、 $R_2$  菌群的微生物种类及分布仍存在差异. 硝化过程是由氨氧化细菌(AOB)将氨氮转化为亚硝酸盐氮,再由亚硝酸盐氧化细菌(NO<sub>2</sub>)将亚硝酸盐氮氧化为硝酸盐氮实现的. AOB 主要包括 *Nitrosomonas*、*Nitrosopira*; NO<sub>2</sub> 主要包括 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira*<sup>[18]</sup>. 本研究中主要的硝化细菌为

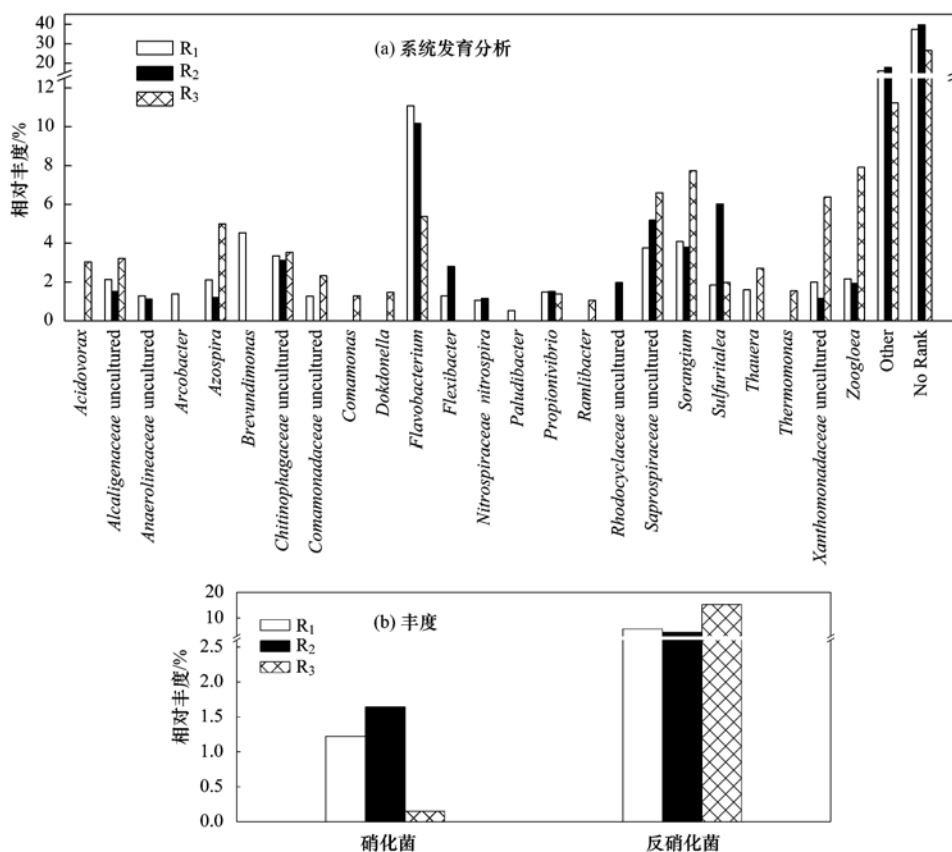


图 4  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的系统发育分析及硝化菌、反硝化菌丰度

Fig. 4 Phylogenetic analysis of sample  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  and the relative abundance of dominant nitrifier and denitrifier

*Nitrospira* 菌属, 在  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  中的相对丰度依次为: 1.05%、1.15%、0.06%。相对 NOB, AOB 的丰度非常低, *Nitrosococcus* (0.01%、0%、0%), *Nitrosomonadaceae* uncultured (0.16%、0.46%、0.09%), *Nitrosomonas* (0%、0.03%、0%)。Ye 等<sup>[16]</sup>在研究硝化反应器和污水处理厂的微生物群落时也出现了这一现象, 他们发现采用 RDP 算法进行分类学分析时约有 15% 的 *Nitrosomonadales* 被错分到与之序列非常接近的 *Burholderiales* 中, 在本研究中造成 AOB 低丰度的原因尚不明确。有研究表明, 活性污泥中与反硝化作用有关的主要菌属包括: *Azoarcus* 菌属、*Thauera* 菌属、*Zoogloea* 菌属、*Rhodocyclus* 菌属、*Dechloromonas* 菌属、*Rhodobacter* 菌属、*Comamonas* 菌属等<sup>[19~21]</sup>。在本研究中, 也发现了 *Zoogloea* (2.16%、1.93%、7.91%)、*Thauera* (1.6%、0.96%、2.7%)、*Comamonadaceae* uncultured (1.26%、0.99%、2.32%) 以及 *Comamonas* (0.23%、0.2%、0.29%) 等可能参与反硝化作用的细菌类群。此外,  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  中还包括丰度较低的 *Rhodobacter* (0.04%、0.05%、0.05%) 和 *Dechloromonas* (0.51%、0.39%、0.94%)。

图 4(b) 是本研究中获得的硝化细菌和反硝化细菌的丰度图, 除了丰度较大的硝化菌 (*Nitrospira*) 和反硝化菌 (如 *Zoogloea*、*Thauera*), 丰度较小的 AOB (如 *Nitrosococcus*、*Nitrosomonadaceae* uncultured) 和反硝化菌 (如 *Rhodobacter*、*Dechloromonas*) 也各自合并到硝化细菌和反硝化细菌中。硝化菌总丰度依次为: 1.22%、1.64%、0.15%。硝化细菌的生长受到温度、pH、溶解氧等环境因素的限制, 由于 MBR 污泥具有泥龄长, 生物群落结构变化快等特点, 这使其生物群落具有更好的适应环境因素变化的能力<sup>[3]</sup>, 从而有可能为生长周期长、对环境敏感的反硝化细菌存活生长提供有力的保证。MBR 中较高的污泥浓度和硝化菌丰度确保体系中较高的硝化菌数量, 从而使 MBR 在低温环境硝化菌活性下降时仍具有较好的硝化效果。反硝化菌总丰度依次为: 5.8%、4.52%、15.21%, 这与  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的 SNUR 大小相吻合。反硝化过程受碳源、硝酸盐浓度、温度、溶解氧等因素共同影响,  $R_3$  反硝化菌总丰度远大于  $R_1$ 、 $R_2$ , 但由于  $R_3$  污泥浓度低、氮负荷高, 且  $R_3$  硝化效果较差使得体系中缺少足够的  $\text{NO}_3^-$ -N 为反硝化提供电子受体, 从而限制了反硝化过程, 因此  $R_3$  的 TN 去除效果较差。相反由于  $R_1$  泥龄长, 较高的污泥浓度补偿了反硝化菌丰

度的不足, 保证出水水质良好。

### 3 结论

(1) 低温条件下,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  工艺系统出水 TN 的平均去除率分别为 85.24%、56.05%、58.75%,  $\text{NH}_4^+$ -N 的平均去除率分别为 99.7%、99.7%、59.7%。比硝化速率:  $R_2 > R_1 > R_3$ , 比反硝化速率:  $R_3 > R_1 > R_2$ , 表明高浓度 MBR 污泥具有更好的耐寒特性和氨氮去除效果, 保证出水水质的稳定。

(2) 焦磷酸测序的结果表明, 相似性为 97% 时, 丰富度:  $R_2 > R_3 > R_1$ , 多样性:  $R_2 > R_1 > R_3$ ; MBR 污泥的未知性高, 微生物群落的组成和丰度与 CAS 系统有较大不同;

(3) 对微生物群落的系统发育细化分析表明, 本研究中主要的硝化菌属为 *Nitrospira*, 总相对度依次为: 1.22%、1.64%、0.15%; 主要的反硝化菌属为 *Zoogloea*、*Thauera*、*Comamonadaceae* 及 *Comamonas*, 总相对丰度依次为: 5.8%、4.52%、15.21%。

(4) 低温环境下, 泥龄长、污泥浓度高、TN 负荷低的 MBR 系统有利于硝化、反硝化细菌累积, 提升生物脱氮效果。

### 参考文献:

- [1] 国务院. 节能减排“十二五”规划[Z]. 国发(2012)40号, 2012.
- [2] 董良飞, 刘珊, 周铭威, 等. MBR 工艺在无锡三座城市污水处理厂中的应用分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(4): 20-23.
- [3] 欧阳科, 刘俊新. 膜生物反应器与传统活性污泥反应器内生物群落特征[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 499-503.
- [4] 胡怡杉, 孙宝盛, 王盛勇. MBR 和 CAS 工艺污泥在贫营养培养条件下的微生物群落结构研究[J]. 环境科学学报, 2013, 31(9): 1900-1907.
- [5] Stamper D M, Walch M, Jacobs R N, et al. Bacterial population changes in a membrane bioreactor for greywater treatment monitored by denaturing gradient gel electrophoretic analysis of 16S rRNA gene fragments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(2): 852-860.
- [6] Figuerola E L, Erijman L. Bacterial taxa abundance pattern in an industrial wastewater treatment system determined by the full rRNA cycle approach[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(7): 1780-1789.
- [7] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants[J]. The ISME Journal, 2012, 6(6): 1137-1147.
- [8] 秦楠, 栗东芳, 杨瑞霞. 高通量测序技术及其在微生物学研究中的应用[J]. 微生物学报, 2011, 51(4): 445-457.
- [9] Sanapareddy N, Hamp T J, Gonzalez L C, et al. Molecular diversity of a North Carolina wastewater treatment plant as

- revealed by pyrosequencing [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(6): 1688-1696.
- [10] Liang Z H, Das A, Beerman D, *et al.* Biomass characteristics of two types of submerged membrane bioreactors for nitrogen removal from wastewater[J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3313-3320.
- [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. 254-284.
- [12] 梅晓洁, 王志伟, 马金星, 等. 膜-生物反应器污泥缺氧反硝化过程中 SMP 的形成[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1784-1791.
- [13] Kristensen H G, Jørgensen P E, Henze M. Characterization of functional microorganism groups and substrate in activated sludge and wastewater by AUR, NUR and OUR[J]. *Water Science & Technology*, 1992, **25**(6): 43-57.
- [14] Ma J X, Wang Z W, Yang Y, *et al.* Correlating microbial community structure and composition with aeration intensity in submerged membrane bioreactors by 454 high-throughput pyrosequencing [J]. *Water Research*, 2013, **47**(2): 859-869.
- [15] 刘长青, 毕学军, 张峰, 等. 低温对生物脱氮除磷系统影响的试验研究[J]. *水处理技术*, 2006, **32**(8): 18-21.
- [16] Ye L, Shao M F, Zhang T. Analysis of the bacterial community in a laboratory-scale nitrification reactor and a wastewater treatment plant by 454-pyrosequencing [J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4390-4398.
- [17] Knowles R. Denitrification[J]. *Microbiological Review*, 1982, **46**(1): 43-70.
- [18] Sliekers A O, Derwort N, Gomez J L, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [19] Osaka T, Yoshie S, Tsuneda S, *et al.* Identification of acetate-or methanol-assimilating bacteria under nitrate-reducing conditions by stable-isotope probing[J]. *Microbial Ecology*, 2006, **52**(2): 253-266.
- [20] Thomsen T R, Kong Y, Nielsen P H. Ecophysiology of abundant denitrifying bacteria in activated sludge[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **60**(3): 370-382.
- [21] Seviour R. *Microbial ecology of activated sludge* [M]. London: IWA Publishing, 2010. 259-280.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                               |                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region .....                                                                                          | QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> ( 801 )        |
| Carbon Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Based on Local Carbon Profiles .....                                                                                            | ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> ( 810 )       |
| Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....                                                                                                   | XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> ( 820 )          |
| A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties .....                                                                                             | WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> ( 830 )       |
| Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves .....                                            | LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> ( 839 )     |
| Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise .....                                      | XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> ( 847 )        |
| Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation .....                                                                         | WANG Zhan-shan, PAN Li-bo ( 853 )                                   |
| On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus .....                                                                                                         | LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian ( 864 )                           |
| Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion .....                                                                                               | LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> ( 870 )                 |
| Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in the River Estuarine Marsh .....                                                                       | ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng ( 879 )                  |
| Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer .....                                         | LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> ( 885 )             |
| Emission of CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O and NH <sub>3</sub> from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts .....                                                             | WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> ( 892 )       |
| Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles .....                                                                                  | ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> ( 901 )         |
| Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea .....                                                                                             | WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> ( 908 )                |
| Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River .....                                                                        | WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian ( 915 )                          |
| Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis .....                                                                       | CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> ( 924 )      |
| Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas ..... | LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> ( 933 )            |
| Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland .....                                                                                                   | YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> ( 942 )        |
| Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun .....                                                                               | CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> ( 951 )  |
| Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River .....                                                                               | DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> ( 958 )        |
| Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway .....                                                       | YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> ( 964 )         |
| Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron .....                                                                                                  | TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> ( 972 )      |
| Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System .....                                                            | ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> ( 979 )          |
| Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification .....                                                                                                         | ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> ( 987 )             |
| Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier .....                                                                                                    | FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo ( 995 )                       |
| Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature .....                                                                      | HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 1002 )       |
| Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides .....                                                                                                 | CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 1009 )          |
| Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion .....                                                                           | CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> ( 1016 )       |
| Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou .....                                                                                  | LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 1021 )          |
| Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary .....                                                                                  | GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> ( 1029 )          |
| Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay .....                                                                             | LI Fei, XU Min ( 1035 )                                             |
| Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater .....                                                                    | WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> ( 1041 )         |
| Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin .....                                                                 | LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 1051 )         |
| Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....                                                           | ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 1060 )      |
| Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields .....                                                                                             | CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> ( 1068 )         |
| Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil .....                                                                                               | XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> ( 1075 )          |
| Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain .....                                                                                                         | SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> ( 1081 )         |
| Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China .....                                           | HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> ( 1091 )     |
| Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province .....                   | SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> ( 1098 )      |
| Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil .....                                                                                                        | YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> ( 1105 )            |
| Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate .....                                                                                               | ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao ( 1111 )                        |
| Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil .....                                                                                                               | YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> ( 1119 )             |
| Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil .....                                                                                  | SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> ( 1125 ) |
| Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry .....                                                                                      | ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> ( 1131 )    |
| Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil .....                                                                            | WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> ( 1138 )          |
| Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils .....                                                  | CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> ( 1144 )      |
| Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area .....                                                        | SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> ( 1151 )         |
| Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor ( <i>Cinnamomum camphora</i> ) Tree Bark from Southern Jiangsu, China .....                                        | ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> ( 1159 )       |
| Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable .....                                                                    | LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua ( 1164 )                  |
| Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress .....                                     | ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> ( 1169 )  |
| Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8 .....                                                                                             | SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> ( 1176 )        |
| Optimized Cultivation of a Biofloculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering .....                                                         | LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> ( 1183 )      |
| Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China .....                                                                                                                     | LIANG Jing, MAO Jian-su ( 1191 )                                    |
| Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model .....                                                                                                          | LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 1198 )     |
| Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins .....                                                                                                  | YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> ( 1205 )        |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行