

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 ..... 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)

2015年北京大气VOCs时空分布及反应活性特征 ..... 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)

北京市建筑类涂料VOCs排放清单编制技术方法及应用 ..... 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)

基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征 ..... 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)

2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 ..... 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)

北京市大气环境PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>及其碳质组分季节变化特征及来源分析 ..... 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)

南京春季北郊地区大气PM<sub>2.5</sub>中主要化学组分及碳同位素特征 ..... 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)

热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 ..... 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)

杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 ..... 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)

基于远程通讯技术的混动公交车SCR系统运行及NO<sub>x</sub>排放特征 ..... 杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)

基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 ..... 李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)

重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 ..... 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)

黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 ..... 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)

脱甲河水系N<sub>2</sub>O关键产生过程及氮素来源探讨 ..... 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)

生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 ..... 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)

黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 ..... 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)

城市黑臭水体的吸收特性分析 ..... 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)

岷江上游水体中DOM光谱特征的季节变化 ..... 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)

防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 ..... 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)

基于δ<sup>15</sup>N和δ<sup>18</sup>O的农业区地下水河硝酸盐污染来源 ..... 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)

垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 ..... 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)

铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 ..... 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)

基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 ..... 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)

AAO工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 ..... 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)

抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 ..... 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)

磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 ..... 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)

海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 ..... 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)

低温下A<sup>2</sup>/O-BAF反硝化除磷脱氮特性 ..... 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)

O<sub>3</sub>-BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 ..... 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)

基于MBR不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 ..... 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)

3种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 ..... 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)

硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 ..... 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)

包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 ..... 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)

中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 ..... 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)

典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 ..... 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)

秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 ..... 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)

不同肥料施用对设施蔬菜地NH<sub>3</sub>挥发和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 山楂, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)

施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 ..... 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)

长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 ..... 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)

典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 ..... 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)

凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 ..... 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)

天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 ..... 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)

水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 ..... 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)

窖水中微生物降解污染物的关键细菌 ..... 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)

砷氧化菌对胡敏酸络合As(III)的氧化作用 ..... 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)

海域高温油田1株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 ..... 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)

1株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌Zobellella sp. B307的分离及脱氮特性 ..... 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岩然 (4793)

1株镰刀菌属KY123915的分离及其对17β-雌二醇的降解特性 ..... 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)

氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 ..... 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)

林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 ..... 任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)

DEP对蚯蚓抗氧化酶系的影响及DNA损伤 ..... 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)

生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 ..... 李建陶, 曾鸣 (4834)

《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)

# 基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析

吴鹏<sup>1,2,3,4</sup>, 陈亚<sup>1</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 沈耀良<sup>1,2,3,4\*</sup>, 徐乐中<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 4. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

**摘要:** 为明确膜生物反应器(MBR)接种不同污泥启动短程硝化前后微生物群落结构变化特征, 采用 MBR 反应器分别接种硝化污泥(R1)、厌氧亚硝化污泥(R2)和 1:1 混合接种厌氧亚硝化污泥和反硝化污泥(R3), 获取有利于实现快速短程硝化的污泥源. 结果表明, 结合间歇曝气和缩短水力停留时间(HRT), R1、R2 与 R3 反应器分别耗时 46 d、8 d 和 30 d 成功启动短程硝化, R2 反应器启动周期最短. 稳定运行期内, R1、R2 和 R3 反应器亚硝累积率平均为 92%、93% 和 94%, R3 反应器表现出更稳定的短程硝化性能. ACE、Chao、Shannon 和 Simpson 指数结果表明, 稳定运行后, R1 和 R2 反应器微生物丰度和多样性水平均大幅低于接种污泥, R3 反应器物种丰度略有减少而多样性水平变化不大. 短程硝化成功启动后, 3 个反应器内的主要菌群为变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes), 且主要脱氮功能菌变形菌门丰度相较于接种污泥均有提高.  $\beta$ -变形菌纲为 3 个反应器短程硝化系统的优势菌群, 分别占比 59.6%、63.6% 和 69.3%. R1、R2 和 R3 反应器内的优势菌属均为亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*), 所占比例分别达 12.8%、20.2% 和 19.7%. 相比 R1 反应器, R2 和 R3 反应器接种污泥内存在一定比例的亚硝化细菌, 更有利于系统短程硝化的实现.

**关键词:** 短程硝化; 膜生物反应器; 接种污泥; 启动; 微生物群落结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4636-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802040

## Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges

WU Peng<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Ya<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>, SHEN Yao-liang<sup>1,2,3,4\*</sup>, XU Yue-zhong<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** In order to clarify the microbial community characteristics of the shortcut nitrification start-up with different inoculated sludges in the membrane bioreactor (MBR), the MBR was inoculated with nitrification sludge (R1), anaerobic nitrification sludge (R2) and 1:1 mixed inoculated anaerobic nitrification and denitrification sludge (R3). The results showed that the combination of intermittent aeration and shortened hydraulic retention time (HRT) successfully achieved the shortcut nitrification by R1, R2 and R3 reactors after 46 d, 8 d and 30 d respectively, with the R2 reactor exhibiting the shortest start-up period. During stable operations, the average nitrite accumulation rates of R1, R2 and R3 reactors were 92%, 93% and 94% respectively, and the R3 reactor showed a more stable shortcut nitrification. The results of analyses using ACE, Chao, Shannon, and Simpson diversity indices showed that the microbial abundance and diversity levels of R1 and R2 were significantly lower than that of the inoculant during the stable operation period, while the species abundance in the R3 reactor was slightly reduced and the diversity level was slightly changed. The main bacteria in the three reactors were Proteobacteria and Bacteroidetes after the successful start-up of shortcut nitrification, and the relative abundance of Proteobacteria was increased compared with the inoculated sludge. Proteobacteria were the main denitrifying bacteria, with  $\beta$ -Proteobacteria being the dominant bacteria of the shortcut nitrification system in the three reactors, accounting for 59.6%, 63.6% and 69.3% respectively. Through further analysis, the next dominant bacteria in R1, R2 and R3 were all *Nitrosomonas*, with 12.8%, 20.2% and 19.7% respectively. Compared with the R1 reactor, there was a certain proportion of shortcut nitrification bacteria in the sludge of the R2 and R3 reactors, which was more favorable to the operation of the shortcut nitrification system.

**Key words:** shortcut nitrification; membrane bioreactor (MBR); inoculated sludge; start-up; microbial community

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578353); 江苏省自然科学基金项目(BK20160356); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目; 江苏省高校自然科学研究项目(16KJB610013)

作者简介: 吴鹏(1985~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为污水处理与回用, E-mail: wupengniu@126.com

\* 通信作者, E-mail: ylsheiniu@126.com

厌氧氨氧化是目前公认最为经济的生物脱氮技术<sup>[1,2]</sup>, 短程硝化作为其前置工艺, 一直是国内外学者研究的对象<sup>[3,4]</sup>. 实现短程硝化的关键是富集氨氧化细菌(AOB), 抑制亚硝酸盐氧化细菌(NO<sub>2</sub>-N), 而 AOB 生长速率缓慢、自固定能力弱和对外界环境敏感<sup>[5]</sup>, 增大了短程硝化快速启动的难度. 众多学者针对此难题进行了大量的研究, 结果表明采用高温、高 FA、低 DO、间歇曝气和实时控制<sup>[6-8]</sup>等方法均可启动短程硝化, 但关于接种不同泥源启动短程硝化的研究鲜有报道. 而且多数研究都是从启动时间、亚硝化率等宏观角度分析短程硝化启动性能的优劣, 对于启动前后微生物群落结构的变化特征研究较少, 因此将宏观与微观结合起来考察不同泥源条件下短程硝化启动性能差异显得十分必要.

高通量测序技术作为新型微生物种群鉴定技术, 具有分析结果准确、高速、高灵敏度和高自动化等特点, 在环境微生物鉴定领域应用广泛<sup>[9,10]</sup>. 同时, 该技术也越来越多地被应用于短程硝化工艺的微生物群落结构检测中<sup>[11]</sup>, 有助于短程硝化工艺的进一步调控与实施. 膜生物反应器(MBR)较之传统生物反应器具有占地面积小、容积负荷高和剩余污泥量低等优势<sup>[12]</sup>, 且膜过滤出水的运行方式可实现系统污泥的高效截留, 有利于富集生长缓慢的 AOB, 减少短程硝化的启动时间. 本研究选用 MBR 反应器, 分别接种硝化污泥、厌氧亚硝化污泥和 1:1 混合接种厌氧亚硝化污泥和反硝化污泥, 考察不同接种污泥的短程硝化启动特征及启动前后菌群结构变化, 以期快速启动短程硝化反应器的污泥源选择提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本实验采用的 MBR(图 1)反应器由有机玻璃制成, 长 10 cm, 宽 8 cm, 有效高度 24 cm, 有效容积为 1.9 L. MBR 采用中空纤维微滤膜组件, 膜孔径 0.1  $\mu\text{m}$ , 膜面积为 0.2  $\text{m}^2$ . 反应器由蠕动泵连续进水, 经膜组件抽吸连续出水. 反应器底部采用曝气砂头供气, DO 控制为 0.6 ~ 1.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 通过定时插座控制停曝时间. 整个运行过程中, 反应器放置于水浴缸中, 保持运行温度在  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

### 1.2 接种污泥

本实验采用 3 种污泥, 反应器 1(R1): 取自苏州市某污水厂 A<sup>2</sup>/O 工艺的好氧硝化污泥; 反应器

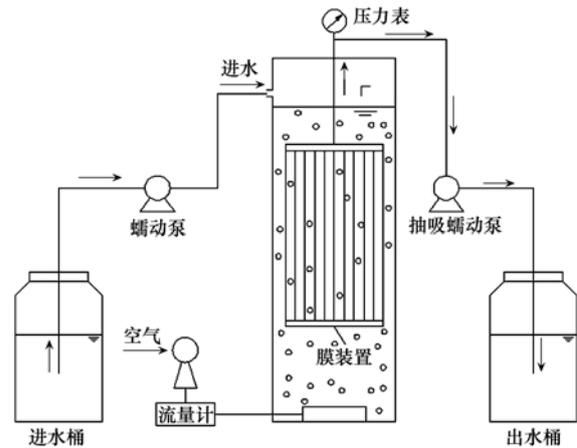


图 1 MBR 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic of membrane bio-reactor

2(R2): 取自实验室长期放置 1 a 以上的厌氧亚硝化污泥; 反应器 3(R3): 1:1 混合接种上述的厌氧亚硝化污泥和反硝化污泥, 反硝化污泥取自苏州市某污水厂 A<sup>2</sup>/O 工艺的缺氧池. 初期接种污泥性质如表 1 所示.

表 1 接种污泥性质

Table 1 Characteristics of inoculum

反应器	R1	R2	R3
SVI/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	62	69	73
MLSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	3.5	3.5	3.5
MLVSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.1	2.7	2.3
MLVSS/MLSS/%	60	77	66

### 1.3 实验进水及运行条件

反应器实验进水相同, 均采用人工配水. 以乙酸钠作为有机碳源, 氯化铵作为氮源, 磷酸二氢钾作为磷源, 碳酸氢钠提供碱度, 调节进水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 浓度和 pH 值, 并添加硫酸镁、氯化钙等生物所需营养元素及其他微量元素, 具体含量见表 2. 整个实验运行过程中, 3 个反应器 pH 值均控制在 7.5 ~ 8.0. 反应器的具体运行条件见表 3.

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 水质指标的检测和方法

实验过程中每隔 1 d 取水样测定, 测定项目主要包括<sup>[13]</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 纳氏试剂分光光度法; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 紫外分光光度法; COD: 密闭消解-分光光度法; MLSS、MLVSS: 标准重量法; SVI: 30 min 沉降法; pH: pHS-9V 数显酸度计; 溶解氧: YSI550A 溶氧仪.

#### 1.4.2 微生物多样性的检测和方法

样品采集: 为研究不同泥源短程硝化启动前后

表 2 人工配水的水质特征

Table 2 Characteristics of synthetic wastewater

组分	质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	组分	质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
COD	140 ~ 160	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
$\text{NH}_4^+-\text{N}$	140 ~ 160	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12
TP	4 ~ 6	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{MgSO}_4$	10	$\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{CaCl}_2$	10	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.5	KI	0.03
$\text{H}_3\text{BO}_3$	0.1	$\text{NaHCO}_3$	根据实际情况添加

表 3 反应器具体运行情况

Table 3 Stable operation of reactors

阶段	HRT/h	缺氧/好氧比	进水氨氮平均负荷 $/\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$
I	5	0:1	0.72
II	5	1:3	0.72
III	4	1:3	0.90
IV	3	1:3	1.20

微生物群落结构的差异, 分别将 R1、R2 和 R3 反应器的接种污泥和启动成功稳定运行第 56 d 的污泥采集送样, 污泥样品对应编号为 A0、B0、C0 和 A1、B1、C1。

总 DNA 的提取与 PCR 扩增: 采用 FastPrep DNA 提取试剂盒法 (QBIOSYSTEMS, USA) DNA, 完成基因组 DNA 抽提, 并利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA。PCR 扩增测序区域为 338F\_806R, 扩增引物采用 16S rRNA 基因 V3-V4 区通用引物 (338F/806R)。引物名称和引物序列分别是 338F (ACTCTACGGGAGGCAGCAG) 和 806R (GGACTACHVGGGTWTCTAAT)。PCR 正式实验采用 TransGen AP221-02; TransStart Fastpfu DNA Polymerase, 20 $\mu\text{L}$  反应体系。全部样本按照正式实验条件进行, 每个样本 3 个重复, 将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测, 使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物, Tris\_HCl 洗脱; 2% 琼脂糖电泳检测。参照电泳初步定量结果, 将 PCR 产物用 QuantiFluor<sup>TM</sup>-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 进行检测定量, 之后按照每个样本的测序量要求, 进行相应比例的混合。

MiSeq 文库构建与测序: ①MiSeq 文库构建, 通过 PCR 将 Illumina 官方接头序列添加至目标区域外端并回收 PCR 产物; Tris-HCl 缓冲液洗脱, 2% 琼脂糖电泳检测; 氢氧化钠变性, 产生单链 DNA 片段。②MiSeq 测序, 按照高通量测序平台的操作说明对形成的 cDNA 文库进行 MiSeq 高通量测序, 将

测序得到的 DNA 序列进行拼接, 同时进行质量控制, 对区分样品后得到的有效数据进行操作分类单元 (OUT) 分类。

生物多样性和分类学分析: 将序列按照彼此的相似性归为操作分类单元 (OTU), 按照 97% 相似性对非重复序列 (不含单序列) 进行 OTU 聚类, 在聚类过程中去除嵌合体, 得到 OTU 的代表序列。为了得到每个 OTU 对应的物种分类信息, 采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析, 并分别在各个分类水平: domain (域)、kingdom (界)、phylum (门)、class (纲)、order (目)、family (科)、genus (属)、species (种) 统计各样本的群落组成。通过单样本的多样性 ( $\alpha$  多样性) 分析反映微生物群落的丰度和多样性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MBR 短程硝化的启动分析

3 个反应器控制进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 COD 负荷在 0.72 ~ 1.20  $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , pH 为 7.5 ~ 8.0, DO 浓度为 0.6 ~ 1.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 采用间歇曝气和逐步缩短 HRT 的运行方式, 历经 56 d 均获得了稳定的短程硝化。本实验以亚硝累积率连续 7 d 稳定在 85% 以上作为短程硝化启动成功的标志, R1、R2 和 R3 分别运行 46、8 和 30 d 实现短程硝化。启动期间各反应器进出水水质、氨氮去除率和亚硝累积率变化情况如图 2 所示, 整个运行过程分为 4 个阶段。

阶段 I 采用连续曝气的方式, 逐步活化、增强 AOB 的活性, 3 个反应器内的氨氮去除率均逐步增加到 95% 以上。此阶段内, R1、R2 和 R3 反应器各自耗时 16、10 和 12 d, 这与接种污泥中所含 AOB 数量密切相关。运行至该阶段末期, R1 和 R3 反应器内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度均呈现上升趋势, 这是因为随着出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的减少, 游离氨对 NOB 的抑制作用减弱, 使  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  较多的转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。值得一提的是, R2 反应器出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度稳定在 13  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,

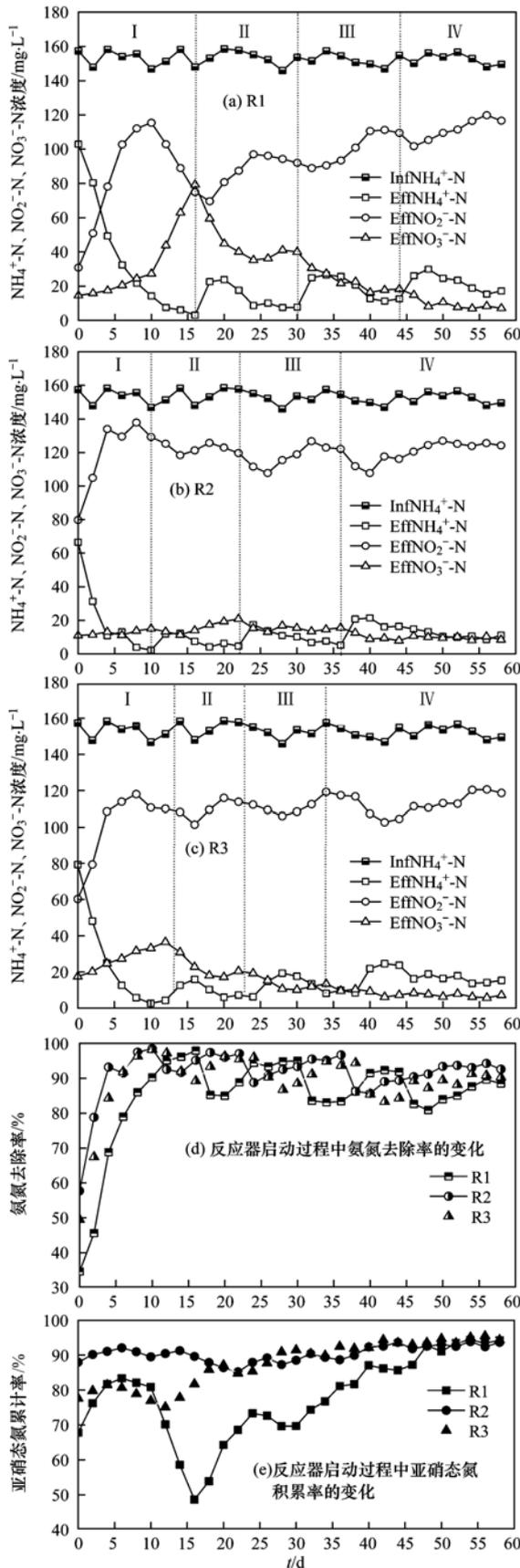


图2 短程硝化启动过程中反应器性能

Fig. 2 Reactor performances during start-up of the shortcut nitrification process

亚硝累积率平均达 90%，成功启动了短程硝化。分析表明：一方面 MBR 反应器的截留作用有效避免了 AOB 的流失，稳定的膜环境十分利于 AOB 的富集增殖；另一方面接种的厌氧亚硝化污泥中，含有较高数量级的 AOB 和较低数量级的 NOB 细菌，加之外界环境的有效调控，即高温、低 DO 和适宜的 pH 条件下成功抑制 NOB，快速实现短程硝化。

阶段 II 在保持 HRT 不变的条件下，采用缺氧/好氧比 1:3 (15 min:45 min) 间歇曝气的运行方式。R1 和 R3 反应器内  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度整体呈下降趋势，说明缺氧/好氧交替的运行方式有效抑制了硝态氮的产生，有利于短程硝化的实现<sup>[14]</sup>。这是由于在缺氧环境下 AOB 的活性受到抑制，氨氧化过程受阻，而一旦恢复曝气，经历长期“饥饿”的 AOB 可以更多地利用氨产能，使其自身大量增殖，此即 AOB 的“饱食饥饿”特性，而 NOB 不具有此种特性<sup>[15]</sup>。R2 反应器出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度呈现出先下降后上升的趋势，最高达到  $21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，相应地亚硝累积率降至 85%。分析前期  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的下降与缺氧/好氧交替运行方式有关，后期  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的上升是因为一方面随着反应器内 AOB 富集程度越来越高，进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  基质不能满足 AOB 的生长，AOB 活性受到抑制；另一方面 HRT 过长，反应器内存在的 NOB 导致积累的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  进一步氧化成  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

阶段 III 和阶段 IV 分别在保持缺氧/好氧比 1:3 (15 min:45 min) 不变的条件下，缩短 HRT 至 4 h 和 3 h。随着 HRT 的缩短，R1、R2 和 R3 反应器 III、IV 阶段的氨氮去除率均值分别降至 87%、93%、91% 和 85%、91%、88%。表明随着 HRT 的缩短，氨氮去除率逐渐降低。阶段 IV 稳定运行期间，R1、R2 和 R3 反应器氨氮平均去除负荷分别为  $1.04$ 、 $1.10$  和  $1.07 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ ，R2 反应器表现出较高的氨氮去除负荷，说明 R2 反应器内 AOB 活性较好。同时，R1、R2 和 R3 反应器出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  均值分别为 9、9 和  $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，亚硝累积率平均为 92%、93% 和 94%，表明 3 个反应器均成功启动短程硝化，且 R3 反应器表现出更稳定的短程硝化。

## 2.2 MiSeq 高通量测序结果分析

### 2.2.1 MBR 反应器微生物丰度及多样性分析

利用 MiSeq 高通量测序平台对 R1、R2 和 R3 反应器的接种污泥和启动成功稳定运行第 56 d 的污泥进行测序，通过单样本的多样性分析 ( $\alpha$  多样性) 反映微生物群落的丰度和多样性，具体情况如表 4 所示。此次测序的 6 个样品的覆盖度均大于

99%，表明本次测序结果能够代表样本中微生物的真实情况。ACE 和 Chao 指数可以估算群落中含 OTU 数目的指数，表征微生物种群的丰富度，在生态学中常用来估计物种总数，其值越大表明物种总数越多<sup>[16]</sup>。由表 4 可知，3 个反应器接种污泥的 ACE、Chao 指数表现为 A0 > C0 > B0，说明 R1 反应器内微生物种群的丰度最高，R3 反应器其次，R2 反应器最少。分析 R1 反应器接种的污水厂 A<sup>2</sup>/O 好氧硝化污泥，具有一定的脱氮除碳功能，微生物种群的丰富度相对较高；而 R2 反应器接种的实验室放置 1 a 以上的厌氧亚硝化污泥，经过长期的内源呼吸和厌氧消化作用，微生物种群的丰度下降；R3 反应器 1:1 混合接种厌氧亚硝化污泥和反硝化污泥，微生物种群的丰度较之两者适中。此外，R1、R2 和 R3 反应器启动成功后，ACE 和 Chao 指数均下降，表明物种总数减少，其降幅分别为 45.4%、30%、36% 和 45.3%、28.5%、38.3%，且上述两个指数的变化规律与 OTU 数变化一致。Shannon 和 Simpson 指数是用来估算样本中微生物的多样性，Shannon 值越大，说明微生物种群多样性越高，Simpson 指数值越大，说明微生物种群多样性越低，

同时也说明优势微生物占总生物量的比例越大<sup>[17]</sup>。表 4 显示，R1、R2 和 R3 反应器中 Shannon 指数的变化趋势与 ACE、Chao 指数变化趋势一致，均呈现下降趋势。且 R1 和 R2 反应器降幅较大，分别为 42.3% 和 16.1%，R3 反应器降幅仅为 5.1%。相应地，R1 和 R2 反应器 Simpson 指数增幅较大，R3 反应器 Simpson 指数保持不变。表明 R1 和 R2 反应器在短程硝化启动前后微生物种群多样性明显降低，而 R3 反应器内微生物多样性变化不大。短程硝化的启动过程实质上是氨氧化细菌的富集，劣势菌种的淘汰。在这个过程中，随着系统内优势微生物占比逐渐增大，通常会使得微生物种群多样性降低。从这方面来看，R1 和 R2 反应器短程硝化启动前后的微生物群落结构变化符合这一趋势。相比于 R2 反应器，R3 反应器启动时间略长但亚硝化稳定性较强，这可能与反应器内微生物群落的多样性有关。通常认为<sup>[18]</sup>多样性影响群落对胁迫的响应，研究表明<sup>[19]</sup>群落的多样性越高，则可能包含越多适应某胁迫的互补性单元，从而使得在经受胁迫后群落的快速修复能力越强，提高群落的恢复力，确保群落的稳定性。

表 4 MBR 反应器微生物丰度和多样性情况

Table 4 Species abundance and diversity for microbial communities in the MBR

样品	序列数	OTU 数	ACE 指数	Chao 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度/%
A0	35585	663	694	698	5.340	0.012	99.81
A1	39961	333	379	382	3.082	0.082	99.84
B0	30265	359	410	403	4.026	0.039	99.78
B1	36962	254	287	288	3.378	0.071	99.87
C0	34670	576	677	687	3.896	0.060	99.56
C1	32746	335	433	424	3.697	0.060	99.70

## 2.2.2 MBR 反应器在门分类层面的分布规律

图 3 为 6 个样本在门水平下微生物群落结构的分布情况，从中可以看出，主要包括变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、放线菌门 (Actinobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes) 和酸杆菌门 (Acidobacteria) 等，并以变形菌门和拟杆菌门为主，所占比例分别可达 20.6% ~ 58.9% 和 3.9% ~ 35%。此外，6 个样本还检测到浮霉菌门 (Planctomycetes) 和硝化螺旋菌门 (Nitrospirae)，所占比例相对较小。

在启动成功的 3 个反应器污泥样品中均检测到较少比例的浮霉菌门，浮霉菌门是一类重要的环境微生物，对于全球氮循环具有重要意义。赵志瑞<sup>[20]</sup>等认为在低氨氮和低溶解氧条件下会导致浮霉菌门的出现，可能是因为随着氨氮浓度和 DO 的降低，污泥停留时间增加，污泥群落发生改变<sup>[21]</sup>。本实验

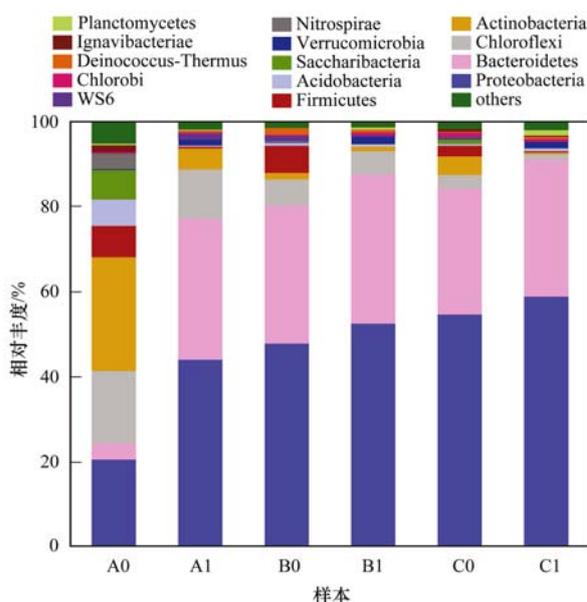


图 3 MBR 反应器在门水平下微生物群落结构

Fig. 3 Microbial community structure at a phylum level in the MBR

采用的膜生物反应器存在 DO 浓度梯度，导致好氧、缺氧和厌氧共存在一个系统内，加之间歇曝气的运行方式，停曝条件下为缺氧状态，为该细菌的生长提供了有利条件。另外，硝化螺旋菌门包含硝化螺菌属 (*Nitrospira*)，*Nitrospira* 是绝大多数已有报道中在生物脱氮过程中占主导地位的亚硝酸盐氧化菌 (NOB) [22,23]。

为了进一步探究 MBR 反应器接种不同泥源短程硝化启动前后脱氮微生物所在的变形菌门分布特征的变化，对 6 个样品在纲分类水平下变形菌门的群落结构进行分析，结果见表 5。从中可知，R1 和 R2 反应器接种污泥中  $\alpha$ -变形菌纲 ( $\alpha$ -

Proteobacteria) 是变形菌门丰度最大的菌群，分别占 59.4% 和 43.7%。而 R3 反应器接种污泥中变形菌门丰度最大的菌群是  $\beta$ -变形菌纲 ( $\beta$ -Proteobacteria)，所占比例达 41%，大于 R1、R2 反应器接种污泥的 11.7% 和 38.2%。 $\beta$ -变形菌纲几乎囊括了所有类型的 AOB，故接种污泥中存在较大比例的  $\beta$ -变形菌纲更有利于短程硝化的实现。其次，3 个反应器短程硝化启动成功的样品中  $\beta$ -变形菌纲是系统的优势菌群，这与钱飞跃等 [24] 的研究相吻合。同时对比接种污泥，R1、R2 和 R3 反应器启动成功的活性污泥中  $\gamma$ -变形菌纲 ( $\gamma$ -Proteobacteria) 均呈降低趋势，分别为 4.6%、4.9% 和 12%。

表 5 MBR 反应器中变形菌门(纲水平)的群落组成相对百分比/%

Table 5 Class-level percentages of Proteobacteria microbial communities in the MBR/%

项目	A0	A1	B0	B1	C0	C1
$\beta$ -Proteobacteria	11.7	59.6	38.2	63.6	41.0	69.3
$\gamma$ -Proteobacteria	22.3	4.6	12.5	4.9	17.4	12.0
$\delta$ -Proteobacteria	6.6	9.2	5.6	6.7	4.2	9.5
$\alpha$ -Proteobacteria	59.4	26.6	43.7	24.8	37.4	9.2

2.2.3 MBR 反应器在属分类层面的分布规律

为进一步阐明 MBR 反应器接种不同泥源在短程硝化启动前后微生物种群分布的变化情况，对属水平下 6 个样品的功能微生物及优势菌群进行分析。

如图 4 所示，在属分类水平上，3 个反应器接种污泥中占优势的菌群略有不同。R1 反应器接种污泥中优势菌群主要为 *norank\_p\_Saccharibacteria* 和

分支杆菌 (*Mycobacterium*)，而 R2 和 R3 反应器主要为陶厄氏菌属 (*Thauera*) 和副球菌属 (*Paracoccus*)，分别达到 10.1%、21.7% 和 9.2%、20.4%。陶厄氏菌属和副球菌属均属于好氧反硝化细菌，是以有机碳作为能源的异养菌。短程硝化启动成功后，R1、R2 和 R3 反应器内的优势菌属均为亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*)，所占比例分别达 12.8%、20.2% 和 19.7%。AOB 主要属于亚硝化单胞菌属

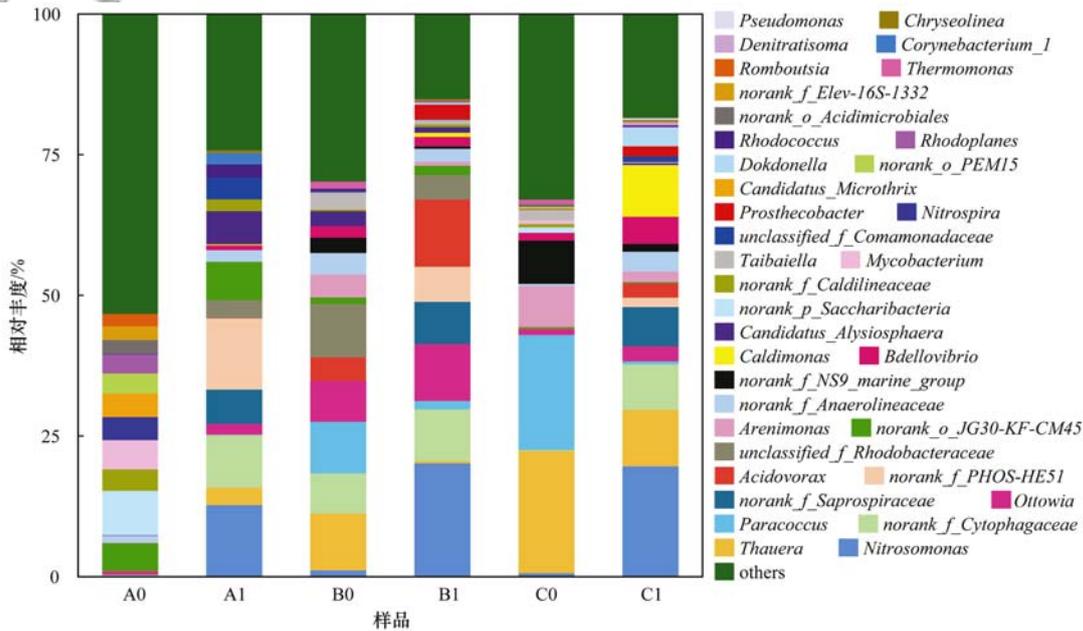


图 4 MBR 反应器在属水平下微生物群落结构

Fig. 4 Microbial community structure at a genus level in the MBR

和亚硝化螺菌属(*Nitrosospira*), 系统中未检测到亚硝化螺菌属, 因此推断该系统中 AOB 属于亚硝化单胞菌属. 这与大多数研究结果一致, 即污水处理系统中占优势的 AOB 多为亚硝化单胞菌属<sup>[25]</sup>.

表 6 是 MBR 反应器接种不同泥源在短程硝化启动前后脱氮菌属的分布特征, 从中可以看出, 3 个反应器启动短程硝化后亚硝化单胞菌属均处于优势地位, 未检测出亚硝化螺菌属. 侯爱月等<sup>[26]</sup>的研究表明, 在有机短程硝化系统中的脱氮菌属主要为反硝化细菌和亚硝化单胞菌属, 未发现硝化螺菌属, 这与本实验结果相一致. 分析表明, 在一定量的碳源条件下, AOB 和 NOB 产生 DO 竞争机制, 且 AOB 对 DO 的亲和能力高于 NOB, 使得 AOB 处于有利地位. 加之本实验采用间歇曝气和缩短 HRT

的方式, 逐步抑制、淘洗反应器内的 NOB. 同时, 仅在 R3 反应器启动成功的样品中检测到少量的反硝化菌(*Denitratisoma*)和反硝化菌(*Pseudomonas*)属, 具体原因仍需进一步研究, 此处不予解释. 此外, 对比接种污泥, R2 和 R3 反应器内的陶厄氏菌属、副球菌属和热单胞菌属(*Thermomonas*)呈减少趋势. 分析三者均为异养菌, 随着反应器内优势菌种亚硝化单胞菌属的富集, 劣势菌属丰度逐渐减少. 值得一提的是, 刘燕<sup>[27]</sup>等利用副球菌属进行脱氮特性研究, 发现以乙酸钠为碳源, 无论好氧或者厌氧条件都有亚硝酸盐的累积, 这是因为反硝化菌以乙酸钠为碳源, 以硝态氮为电子受体进行反硝化, 从而导致了亚硝酸盐的积累, 故笔者认为反应器内反硝化菌属的存在促进了短程硝化的实现.

表 6 MBR 反应器主要脱氮菌属(属水平)群落组成相对百分比<sup>1)</sup>/%

Table 6 Relative abundance of the dominant denitrifying bacterial communities at a genus level in the MBR/%

脱氮功能	菌属	A0	A1	B0	B1	C0	C1
硝化	<i>Nitrosomonas</i>	—	12.8	1.2	20.2	0.7	19.7
	<i>Nitrosospira</i>	4.1	—	0.4	—	0.1	—
	<i>Thauera</i>	—	3.1	10.1	0.4	21.7	10
	<i>Paracoccus</i>	0.1	0.1	9.2	1.5	20.4	0.5
反硝化	<i>Thermomonas</i>	—	—	1.2	0.2	0.8	0.1
	<i>Denitratisoma</i>	—	—	—	—	—	0.5
	<i>Pseudomonas</i>	—	—	—	—	—	0.3

1) “—”表示未检测出

### 3 结论

(1) R1、R2 与 R3 反应器分别耗时 46 d、8 d 和 30 d 均成功启动短程硝化, R2 反应器启动时间最短. 稳定运行期内, R1、R2 和 R3 反应器亚硝累积率均稳定在 90% 以上, 且 R3 反应器表现出更稳定的短程硝化性能.

(2) ACE、Chao、Shannon 和 Simpson 指数结果表明, 对比接种污泥, 稳定运行期内, R1 和 R2 反应器微生物丰度和多样性水平均大幅低于接种启动水平, R3 反应器物种丰度略有减少而多样性水平变化不大.

(3) 稳定运行后, 3 个反应器内的主要菌群为变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes), 且主要脱氮功能菌变形菌门丰度相较于接种污泥均有提高. 其次, 3 个反应器短程硝化启动成功后  $\beta$ -变形菌纲为系统的优势菌群.

(4) 短程硝化启动成功后, R1、R2 和 R3 反应器内的优势菌属均为亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*), 所占比例分别达 12.8%、20.2%

和 19.7%. 相比 R1 反应器, R2 和 R3 反应器接种污泥内存在一定比例的反硝化细菌, 更有利于系统短程硝化的实现.

### 参考文献:

- [1] Volcke E I, Van Hulle S W, Donckels B M, et al. Coupling the Sharon process with anammox: model-based scenario analysis with focus on operating costs [J]. Water Science and Technology, 2005, 52(4): 107-115.
- [2] 于英翠, 高大文, 陶彧, 等. 利用序批式生物膜反应器启动厌氧氨氧化研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 843-849.  
Yu Y C, Gao D W, Tao Y, et al. Start-up of anammox in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) [J]. China Environmental Science, 2012, 32(5): 843-849.
- [3] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences--an application survey [J]. Water Research, 2014, 55: 292-303.
- [4] 张亮. 高氨氮污泥消化液生物脱氮工艺与优化控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 42-43.  
Zhang L. Development and optimization of the nitrogen removal of high ammonium sludge dewatering water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 42-43.
- [5] Tan N C G, Kampschreur M J, Wanders W, et al. Physiological and phylogenetic study of an ammonium-oxidizing culture at high nitrite concentrations[J]. Systematic and Applied Microbiology,

- 2008, **31**(2): 114-125.
- [6] Wang L, Zheng P, Abbas G, *et al.* A start-up strategy for high-rate partial nitrification based on DO-HRT control [J]. *Process Biochemistry*, 2016, **51**(1): 95-104.
- [7] 吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 等. 连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1472-1477.  
Wu P, Zhang S Y, Song Y L, *et al.* Quick start-up and sustaining of shortcut nitrification in continuous flow reactor[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1472-1477.
- [8] 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 等. 生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1536-1543.  
Fu K M, Zhou H T, Su X Y, *et al.* Short-cut nitrification recovery and its transformation into CANON process in a biofilm reactor[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1536-1543.
- [9] 唐霁旭, 王志伟, 马金星, 等. 454 高通量焦磷酸测序法鉴定膜生物反应器膜污染优势菌种[J]. *微生物学通报*, 2014, **41**(2): 391-398.  
Tang J X, Wang Z W, Ma J X, *et al.* Identifying predominant strains causing membrane biofouling by using 454 high-throughput pyrosequencing[J]. *Microbiology China*, 2014, **41**(2): 391-398.
- [10] 夏围围, 贾仲君. 高通量测序和 DGGE 分析土壤微生物群落的技术评价[J]. *微生物学报*, 2014, **54**(12): 1489-1499.  
Xia W W, Jia Z J. Comparative analysis of soil microbial communities by pyrosequencing and DGGE [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2014, **54**(12): 1489-1499.
- [11] 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 等. 快速启动厌氧氨氧化工艺[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1116-1121.  
Lü G, Xu L Z, Shen Y L, *et al.* Quick start-up of anaerobic ammonium oxidation process[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1116-1121.
- [12] Huang X W, Urata K, Wei Q Y, *et al.* Fast start-up of partial nitrification as pre-treatment for anammox in membrane bioreactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 371-378.
- [13] 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.
- [14] 高春娣, 李浩, 焦二龙, 等. 交替好氧缺氧短程硝化及其特性[J]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(1): 116-122.  
Gao C D, Li H, Jiao E L, *et al.* Alternate oxic-anoxic mode realizing nitrification and its characterization[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(1): 116-122.
- [15] 李亚峰, 秦亚敏, 谢新立, 等. 间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1518-1521.  
Li Y F, Qin Y M, Xie X L, *et al.* Study on achievement and influencing factors of shortcut nitrification in intermittent aeration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(7): 1518-1521.
- [16] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Metagenomic insights into the effects of volatile fatty acids on microbial community structures and functional genes in organotrophic anammox process [J]. *Bioresour Technol*, 2015, **196**: 621-633.
- [17] 王智, 张志勇, 张君倩, 等. 水葫芦修复富营养化湖泊水体区域内外底栖动物群落特征[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 142-149.  
Wang Z, Zhang Z Y, Zhang J Q, *et al.* The fauna structure of benthic macro-invertebrates for environmental restoration in a eutrophic lake using water hyacinths[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 142-149.
- [18] Tilman D, Reich P B, Knops J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment [J]. *Nature*, 2006, **441**(7093): 629-632.
- [19] Yachi S, Loreau M. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, **96**(4): 1463-1468.
- [20] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1448-1456.  
Zhao Z R, Ma B, Zhang S J, *et al.* Comparing microbial community of high ammonia wastewater and municipal sewage in a partial nitrification system[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [21] Teske A, Alm E, Regan J M, *et al.* Evolutionary relationships among ammonia- and nitrite-oxidizing bacteria [J]. *Journal of Bacteriology*, 1994, **176**(21): 6623-6630.
- [22] Park H D, Noguera D R. Nitrospira community composition in nitrifying reactors operated with two different dissolved oxygen levels[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2008, **18**(8): 1470-1474.
- [23] Burrell P, Keller J, Blackall L L. Characterisation of the bacterial consortium involved in nitrite oxidation in activated sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(6): 45-52.
- [24] 钱飞跃, 王琰, 王建芳, 等. 长期储存亚硝化颗粒污泥的活化及菌群结构变化[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1052-1058.  
Qian F Y, Wang Y, Wang J F, *et al.* Reactivation performance of nitrosation granular sludge after long-term storage and microbial community variation [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1052-1058.
- [25] Hill V R, Kahler A M, Jothikumar N, *et al.* Multistate evaluation of an ultrafiltration-based procedure for simultaneous recovery of enteric microbes in 100-liter tap water samples [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(13): 4218-4225.
- [26] 侯爱月, 李军, 卞伟, 等. 不同短程硝化系统中微生物群落结构的对比分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 428-436.  
Hou A Y, Li J, Bian W, *et al.* Analysis of microbial community structure in different partial nitrification system [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 428-436.
- [27] 刘燕, 甘莉, 黄哲强, 等. 脱氮副球菌 YF1 的反硝化特性研究[J]. *水处理技术*, 2010, **36**(10): 61-65.  
Liu Y, Gan L, Huang Z Q, *et al.* Study on denitrification characteristics of paracoccus YF1 [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, **36**(10): 61-65.

## CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China .....	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015 .....	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing .....	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement .....	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016 .....	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> and Their Carbonaceous Components in Beijing .....	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM <sub>2.5</sub> in the Northern Suburb of Nanjing in Spring .....	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM <sub>2.5</sub> by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS .....	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou .....	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO <sub>x</sub> Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology .....	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology .....	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City .....	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve .....	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River .....	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland .....	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects .....	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water .....	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River .....	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells .....	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using <sup>15</sup> N and <sup>18</sup> O Isotope Technique .....	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater .....	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment .....	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis .....	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments .....	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants .....	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feammox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater .....	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater .....	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A <sup>2</sup> /O-BAF at Low Temperatures .....	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O <sub>3</sub> -BAC and Analysis of Consortium Structure .....	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges .....	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes .....	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge .....	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis .....	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China .....	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas .....	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field .....	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers .....	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil .....	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria( <i>Comammox Nitrospira</i> ) in a Neutral Paddy Soil .....	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis .....	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil .....	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters .....	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization .....	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water .....	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria .....	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China; Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition .....	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307 .....	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17β-estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915 .....	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland .....	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Composting of Lincomycin Mycelia Dreg with Manure .....	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms .....	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash .....	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)