

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

# 中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化

付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航

(北京建筑大学环境与能源工程学院, 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

**摘要:** 采用 150 L 的移动床生物膜 (MBBR) 反应器, 控制温度为 28℃, 以无机高氨氮 (平均浓度 350 mg·L<sup>-1</sup>) 废水为原水, 启动全程自养脱氮 (CANON) 工艺, 同时, 取其中絮状污泥至 5L 的 SBR 反应器中, 维持进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度为 90~200 mg·L<sup>-1</sup>, 共同进行短程硝化恢复研究. 结果表明, MBBR 反应器中, HRT 平均为 12 h 时, 短程硝化与 TN 去除率互相制约, TN 去除率平均为 38.2%, δNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/TN 值平均为 0.274, 当 HRT 降至 6h 后, δNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/TN 值由 0.347 下降至 0.146; SBR 反应器通过间歇曝气, 分别维持曝气与停曝时间为 30 min 与 20 min, 好氧过程中 DO 浓度为 0.5~0.6 mg·L<sup>-1</sup>, 且每周期末 FNA 浓度高于 0.18 mg·L<sup>-1</sup> 时, 12 d 后系统内 NAR 由 0 增长至 99.2%, NUR 从 24.8 mg·(g·h)<sup>-1</sup> 降至 0, TN 去除率则由 13% 降至 3%, 成功由全程硝化转变为短程硝化; 高通量测序结果显示: MBBR 反应器中 *Candidatus Kuenenia* 在絮状污泥和生物膜中的相对丰度分别为 7.91% 及 17.38%, *Nitrosomonas* 在二者中分别占 27.43% 和 2.55%, *Nitrospira* 则在二者中占 0.30% 和 0.28%; SBR 反应器恢复短程硝化后, AOB 与 ANAMMOX 丰度分别下降至 1.18% 和 0.01%, *Nitrospira* 的相对丰度则上升至 1.39%.

**关键词:** 全程自养脱氮 (CANON); 短程硝化; 间歇曝气; 移动床生物膜反应器 (MBBR); 游离氨

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1393-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201909220

## Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor

FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, JIN Yi-ran, ZHANG Xiao-hang

(Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, Sino-Dutch R&D Center for Future Wastewater Treatment Technologies, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Using a 150 L moving bed biofilm reactor (MBBR), with the temperature controlled at 28℃ and high NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration (average concentration 350 mg·L<sup>-1</sup>), inorganic wastewater was used as an influent to start the completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process. Meanwhile, the flocculent sludge was taken into a 5 L sequencing batch reactor, and the influent NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration was maintained at 90-200 mg·L<sup>-1</sup> for the recovery of short-cut nitrification. The results showed that in the MBBR reactor, when the average hydraulic retention time (HRT) was 12 h, short-cut nitrification and total nitrogen (TN) removal rate were mutually constrained, the average TN removal rate was 38.2%, and the average δNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/TN value was 0.274; when the HRT dropped to 6 h, the δNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/TN value decreased from 0.347 to 0.146. The sequencing batch reactor (SBR) maintained aeration and anoxic time for 30 min and 20 min, respectively, by intermittent aeration, while the dissolved oxygen concentration during the aerobic process was 0.5 mg·L<sup>-1</sup> to 0.6 mg·L<sup>-1</sup>, the free nitrous acid concentration was higher than 0.18 mg·L<sup>-1</sup> at the end of each cycle, NAR increased from 0 to 99.2% after 12 days, NUR decreased to 0 from an initial 24.8 mg·(g·h)<sup>-1</sup>, and the TN removal rate decreased from 13% to 3%; the system successfully converted to short-range nitrification. High-throughput sequencing results showed that the abundance of *Candidatus Kuenenia* in the flocculent sludge and biofilm in the MBBR reactor were 7.91% and 17.38% respectively, *Nitrosomonas* accounted for 27.43% and 2.55%, respectively, while *Nitrospira* accounted for 0.30% and 0.28%, respectively. After the recovery of short-cut nitrification in the SBR, the abundance of ammonia-oxidizing bacteria and anaerobic ammonia oxidation decreased to 1.18% and 0.01%, respectively, and the abundance of *Nitrospira* increased to 1.39%.

**Key words:** completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); short-cut nitrification; intermittent aeration; moving bed biofilm reactor (MBBR); free ammonia

全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 新型工艺, 即短程硝化和厌氧氨氧化的结合, 相对于传统生物脱氮技术可以节省 60% 的曝气量、且几乎不需要有机碳源<sup>[1]</sup>, 同时污泥产量相对较低, 因此可降低运行费用. 应用自养脱氮工艺需要解决以下关键问题: 首先, ANAMMOX 菌生长速率缓慢, 倍增时间长达 11 d<sup>[2]</sup>, 且对温度<sup>[3]</sup>、溶解氧 (dissolved oxygen, DO)<sup>[4]</sup>、碱

度<sup>[5]</sup>、pH 以及有机物<sup>[6]</sup> 较为敏感, 难以形成竞争优势; 同时, 反应全过程建立在短程硝化稳定的基础之上, 由于氨氧化菌 (ammonium oxidizing bacteria,

收稿日期: 2019-09-24; 修订日期: 2019-10-16

基金项目: 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项基金项目 (X18214)

作者简介: 付昆明 (1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水自养脱氮技术、N<sub>2</sub>O 释放控制技术以及农村污水治理技术, E-mail: fukunming@163.com

AOB)可为亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)提供 $\text{NO}_2^-$ -N,需要对反应条件精确控制,防止NOB 过量增殖,破坏短程硝化。

有学者指出,维持适量游离氨(free ammonia, FA)浓度有利于NOB 活性的抑制<sup>[7,8]</sup>,这也是实现短程硝化的重要控制手段之一。然而NOB 可对FA 逐渐适应,在较高FA 浓度环境下NOB 的活性可逐渐恢复,从而导致硝酸盐产量增加<sup>[9]</sup>。很多研究者已利用FA 实现了稳定的短程硝化效果,但对于NOB 对FA 产生适应性后短程硝化恢复过程的研究较少。为研究在此条件下NOB 的活性抑制策略,本试验以150L的MBBR型CANON反应器为研究对象,其菌群中的NOB 经过长时间的运行已对FA 产生了适应性,此时采用间歇曝气法尝试对NOB 活性加以抑制,结合抑制效果讨论NOB 活性变化规律。同时结合高通量测序,对微生物群落结构进行分析,对不同运行环境下相关功能菌丰度变化规律进行讨论,以期为研究者提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本试验装置为柱状MBBR型有机玻璃反应器,如图1(a)所示。其直径为30 cm,高度2.5 m,有效

容积为150 L,反应器外用锡箔纸遮盖避光。反应器当中投加填料,填充比为50%。反应器中心设置挡板,在顶部以及底部留有空隙以循环填料;采用空气泵压缩曝气,玻璃转子流量计控制气量,曝气头位于挡板一侧,填料可在曝气一侧随曝气向上流动,达到最高点后,填料在不曝气一侧随水流往下流动,形成内循环;设置三相分离器以强化絮状污泥的持留性能。通过加热棒维持水温为 $(28 \pm 3)^\circ\text{C}$ ,并利用便携式水质监测仪监测DO 以及pH 变化。对MBBR 反应器中的絮状污泥进行研究时,本试验同时采用序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR),其直径与高度分别为20 cm 和27 cm,有效容积为5 L,如图1(b)所示。其运行周期时长240 min,其中进水10 min,反应200 min,沉淀20 min,排水10 min,排水比为50%,每日运行6个周期,通过加热棒维持水温为 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 试验用水与试验污泥

本试验全部采用人工配制的无机废水,水质参数如表1所示。采用 $\text{NaHCO}_3$  调节碱度。同时添加微量元素,体积分数为 $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[10]</sup>。MBBR 反应器选用课题组已有的CANON 工艺生物膜<sup>[11]</sup>,SBR 反应器采用运行稳定后的MBBR 中的絮状污泥接种,进行NOB 活性抑制试验。

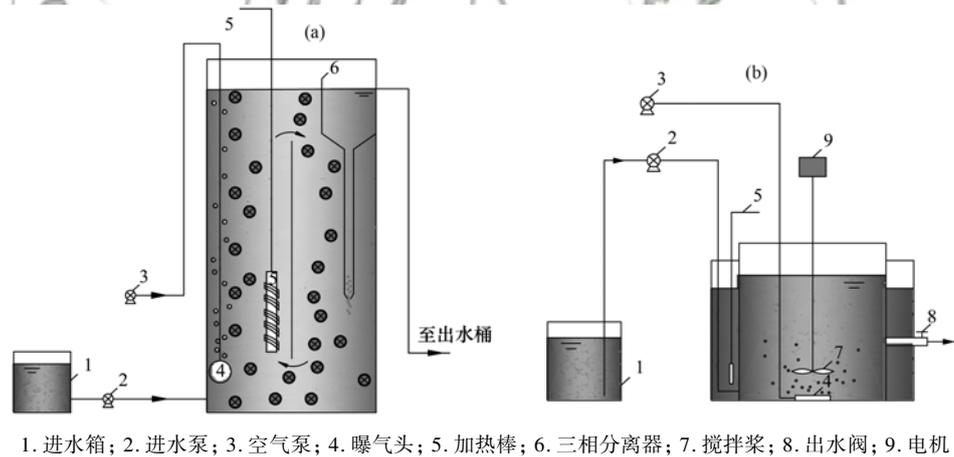


图1 MBBR 和 SBR 反应器

Fig. 1 Experimental apparatus of MBBR and SBR

表1 MBBR 与 SBR 反应器的进水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Influent water quality of MBBR and SBR/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

组名	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{PO}_4^{3-}$ -P	碱度	pH
MBBR 反应器	400	0	0 ~ 10	10	1 500	$7.8 \pm 0.2$
SBR 反应器	90 ~ 200	0	0 ~ 10	10	1 500	$7.8 \pm 0.2$

### 1.3 水质监测方法

$\text{NH}_4^+$ -N:纳氏试剂比色法<sup>[12]</sup>;  $\text{NO}_2^-$ -N:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法<sup>[12]</sup>;  $\text{NO}_3^-$ -N:紫外分光光度法<sup>[12]</sup>; pH 值:采用梅特勒-托利多F2 型pH 计;溶

解氧:采用Multi 3620 WTW 型DO 仪;  $\text{TN} = \text{NH}_4^+$ -N +  $\text{NO}_2^-$ -N +  $\text{NO}_3^-$ -N; 氨氧化速率(ammonia uptake rate, AUR)与亚硝酸盐氧化速率(nitrite uptake rate, NUR);氧吸收速率法<sup>[13]</sup>; FA 与FNA 的计算方法如

式(1)和式(2)所示<sup>[14]</sup>:

$$FA = \frac{17}{14} \times \frac{[\text{NH}_4^+ - \text{N}] \times 10^{\text{pH}}}{e^{6.344/(273+t)} + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

$$FNA = \frac{47}{14} \times \frac{[\text{NO}_2^- - \text{N}]}{e^{-2.300/(273+t)} + 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中,  $[\text{NH}_4^+ - \text{N}]$  指混合液  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $[\text{NO}_2^- - \text{N}]$  指混合液  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $t$  指混合液温度 ( $^\circ\text{C}$ ).

亚硝酸盐积累率 (nitrite accumulating rate, NAR) 的计算方法如式(3)所示:

$$\text{NAR} = \frac{\delta\text{NO}_2^- - \text{N}}{\delta\text{NO}_2^- - \text{N} + \delta\text{NO}_3^- - \text{N}} \quad (3)$$

式中,  $\delta\text{NO}_2^- - \text{N}$  指进出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度差 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}$  指进出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度差 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

#### 1.4 高通量测序

将所提取的污泥样品进行高通量测序. 高通量测序 PCR 所用的扩增引物 V3-V4 区域融合了 MiSeq 测序平台的通用引物, 避免了后续的建库流程, 采用 Nobar\_341F (CCTACGGGNGGCWGCAG) 和 Nobar\_805R (GACTACHVGGGTATCTAATCC)<sup>[15]</sup>. PCR 体系按照如下进行: 10 ng 的 DNA 模板, 5  $\mu\text{L}$  的 10  $\times$  Buffer, 0.5  $\mu\text{L}$  的 dNTPs (10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 0.5  $\mu\text{L}$  的正向引物和反向引物 (50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 0.5  $\mu\text{L}$  的 Plantium *Taq* (5 U  $\cdot \mu\text{L}^{-1}$ ), 无菌水补至 50  $\mu\text{L}$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 MBBR 的启动与运行

MBBR 反应器共运行 441 d, 结果如图 2 所示.

#### (1) 1 ~ 130 d

在 1 ~ 4 d 期间, 维持 HRT 为 8 h, TN 去除率平均为 59.3%, 如图 2(a) 所示, TN 去除率 1 d 时最高, 达到 70.5%. 由于运行初期并未安装三相分离器, 随着反应器的运行, 其中的 ANAMMOX 污泥不断流失, TN 去除率随之下降, 第 58 d 时, TN 去除率仅为 9.4%. 第 90 d 增设三相分离器后, TN 去除率最低值提高至 93 d 时的 25.3%, 说明 ANAMMOX 污泥持留性能得到一定改善, 但 TN 去除率难于进一步提高. 在运行期间, TN 去除率很不稳定, 介于 9.4% ~ 78.8% 之间波动, TN 去除负荷平均为 0.32  $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ .

由图 2(c) 中可以看出, 本阶段 TN 去除率低的主要原因在于, 出水中经常存在大量  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 出水浓度最高为 350.7  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率平均为 47.4%. 由于出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度不稳定, 混合液中 FA 浓度间歇性维持在较高水平, 图 2(b) 显示, 在此期间 FA 最高值为 37.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最低为 0.3  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

研究显示, FA 浓度高于 0.85  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 可观察到 NOB 活性受到抑制<sup>[16]</sup>. 鉴于此, 本阶段  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值为 0.151, 该值与理论值 0.127<sup>[17]</sup> 较为接近, 说明除去 ANAMMOX 反应伴有硝酸盐生成, 经 NOB 氧化生成的硝酸盐量低, 短程硝化较为稳定.

#### (2) 131 ~ 204 d

为降低出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度, 且进一步强化 ANAMMOX 菌的持留性能, 反应器于 146 ~ 204 d 将进水泵流量调整为上一阶段的三分之二, 即 HRT 由上一阶段的 8 h 调整为本阶段的 12 h. 此时 TN 去除率更加稳定, 平均为 42.2%, TN 去除负荷基本维持不变. 然而, 较长的 HRT 并未明显改善反应器的 TN 去除率, 反之解除了 NOB 活性抑制, 导致出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度升高,  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值处于 0.219 ~ 0.541 范围内, 严重偏离理论值, 短程硝化被破坏, 成为了制约 CANON 工艺脱氮性能的重要因素. 作者曾采用片状海绵作为填料, 得出了与本试验相似的结论, 即 HRT 的延长不利于短程硝化的稳定<sup>[18]</sup>. 作者注意到, 提高 DO 浓度虽可以提高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与 TN 去除率, 但  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值也随之上升. 由图 2(d) 中可看出, 在 133 d 与 139 d 时分别将 DO 浓度由平均值 0.58  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  提升至 1.22 和 0.91  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 此时  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率增至 99.5% 和 98.7%, TN 去除率增至 64.7% 和 69.5%, 而  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值分别增至 0.477 和 0.387, 为防止 NOB 活性进一步增强, DO 在该水平下仅维持 1 d, 之后继续维持于平均值.

由于 ANAMMOX 菌适宜在厌氧环境下生长, 其更多地生长在生物膜里层, 而 AOB 和 NOB 等好氧菌则倾向于生物膜表层, 或以絮体形式存在于混合液中, 以对 DO 充分利用. 且在中温环境下, AOB 的比增长速率相对 NOB 有优势, 因此在较短水力停留时间下, NOB 更易被淘汰出反应器. 此阶段过程中, FA 浓度处于 0.13 ~ 7.97  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围内, 平均值为 4.89  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 说明 FA 在此浓度时, 其对 NOB 活性的抑制效果无法弥补 HRT 由 8 h 延长至 12 h 带来的负面影响.

#### (3) 205 ~ 398 d

为重建短程硝化, 系统 205 ~ 398 d 采用间歇式曝气, 曝气与停曝时间均为 1 h, 曝气期间维持 DO 平均浓度为 0.74  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 虽然反应器调整为间歇曝气, 但并未对 NOB 活性产生明显抑制效果,  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值平均为 0.347,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率与 TN 去除率平均为 54.3% 和 39.3%.

#### (4) 399 ~ 441 d

本阶段将 HRT 由 12 h 降低至 6 h,  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值下降至 0.146, 逐渐向理论值恢复, 且 TN 去除率

仍保持稳定. 此阶段 FA 平均浓度为  $3.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 并未显著增加, 而本阶段 DO 平均浓度增长至  $2.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N 去除率与 TN 去除率与上一阶段相比无显著变化, 平均为 51.6% 和 42.4%. DO 浓度的增加并未大幅提升  $\text{NH}_4^+$ -N 去除率, 说明系统内 AOB 活性较低, 同时在 DO 浓度增加时, 通过降低 HRT 仍可逐渐恢复短程硝化.

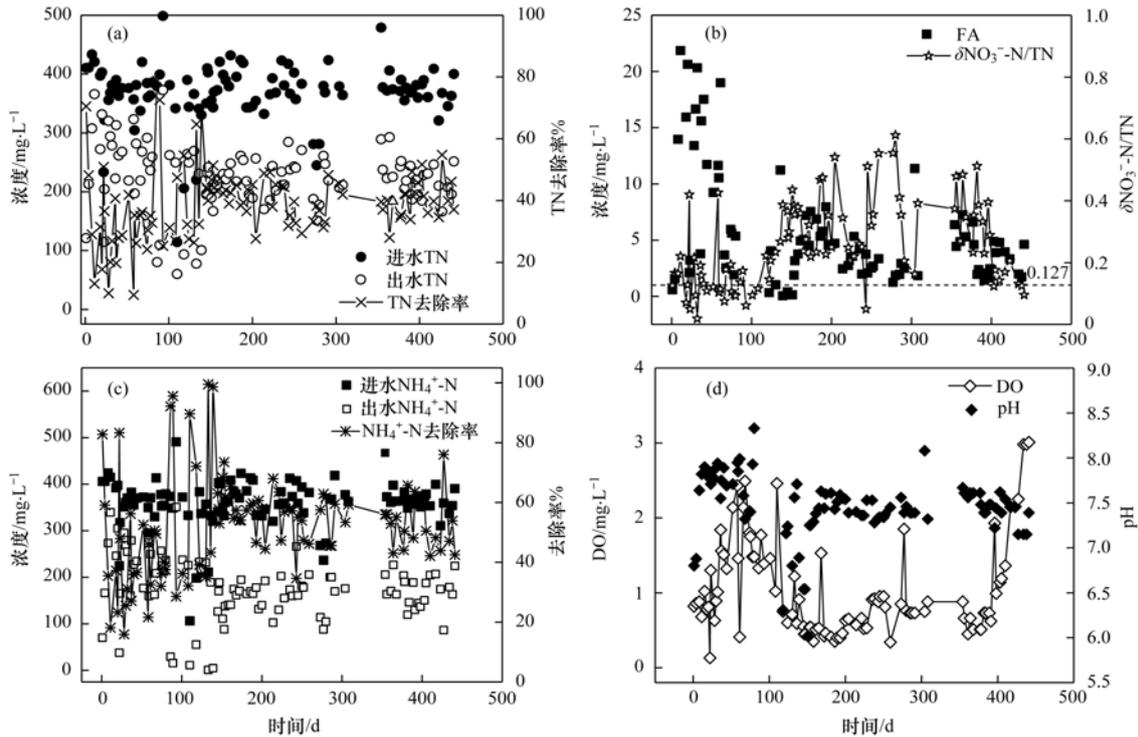


图2 MBBR 反应器运行参数及脱氮性能

Fig. 2 Operating parameters and nitrogen removal performance of the MBBR reactor

## 2.2 SBR 反应器絮状污泥研究

为进一步研究 NOB 已适应 FA 时的短程硝化恢复过程, 于 MBBR 反应器运行至第 250 d 时, 取 MBBR 反应器中的絮状污泥至 SBR 反应器进行短程硝化恢复研究.

SBR 反应器的整体运行过程可分为 2 个阶段: 其中 1~34 d 为适应阶段, 此时采用连续曝气, 反应器内 DO 维持在  $1.00 \sim 1.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 之后 35~57 d 的  $\text{NO}_2^-$ -N 积累阶段则改为间歇曝气, 控制曝气与停曝时间分别为 30 min 和 20 min, 曝气期间 DO 浓度控制在  $0.50 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 同时, pH 全程控制在  $8.50 \pm 0.10$ . 试验结果如图 3 所示.

图 3(a) 反映了运行过程中  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除性能, 在适应阶段, 1~7 d 进水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度平均为  $99.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度平均为  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 然而在图 3(b) 中可以看出, 反应产物  $\text{NO}_2^-$ -N 被 NOB 迅速利用, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 平均为  $65.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 亚硝酸盐积累率为零, 说明有 NOB 处于絮状污泥当中, 且具

整体而言, 出水  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度平均为  $7.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 并未产生亚硝酸盐积累现象, 这表明 ANAMMOX 菌以及少量 NOB 具有较高的活性. 而  $\text{NH}_4^+$ -N 平均去除率仅为 52.2%, 甚至在运行末期增加 DO 浓度时仍未有明显改善, 严重制约了反应器整体脱氮性能. 因此, 针对 AOB 活性进行强化也是 CANON 工艺不可忽略的重要部分.

有较高的活性.

9~34 d, 初始  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度提高至  $149.9 \sim 182.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 初始 FA 浓度平均提高至  $28.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 尝试以高 FA 浓度达到 NOB 活性的抑制效果. 相较 1~7 d 时而言, 9~21 d 的 TN 去除率基本不变, 平均值为 15.1%, 而 22~34 d 时, TN 平均去除率下降至 6.83%. TN 去除率出现下降, 可能是 ANAMMOX 菌活性下降导致的. 分析其原因可能是, ANAMMOX 菌竞争  $\text{NO}_2^-$ -N 的能力较 NOB 弱, 以及在高浓度 FA 的影响下, 其活性受到抑制. Jaroszynski 等<sup>[19]</sup> 的研究结果也表明, 当 FA 浓度大于  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 会对 ANAMMOX 菌的活性存在一定的抑制作用. 在此过程中, 虽然  $\text{NH}_4^+$ -N 去除率下降至 67.6%, 但  $\text{NH}_4^+$ -N 去除负荷仍维持在  $0.03 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , AOB 活性保持稳定. 同时, NAR 仍接近于零, 虽然本阶段初始 FA 浓度相对升高, 但随着反应的进行  $\text{NH}_4^+$ -N 被逐渐消耗, 因此 FA 的效果也逐渐下降, 未能对 NOB 活性起到充分的抑制作用. 另一方面, 说明 NOB 已对

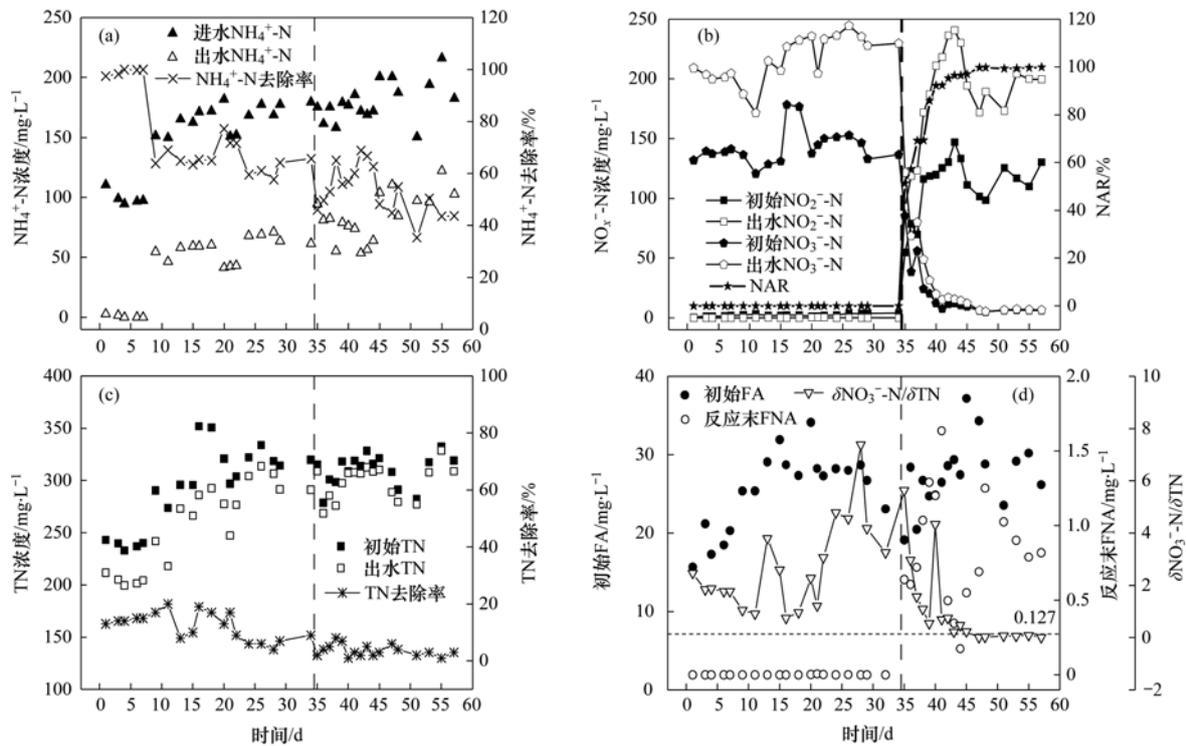


图3 SBR 反应器运行参数及脱氮性能

Fig. 3 Operating parameters and nitrogen removal performance of the SBR reactor

FA 产生了适应性,这也与 MBBR 反应器的运行结果相吻合。

35 ~ 57 d, 反应器由连续曝气改为间歇曝气,并将曝气量下调至 50%,即曝气过程中 DO 浓度由  $1.0 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降至  $0.5 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。调整后 10 d 内,出水  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度由 0 平均增长至  $189.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , NAR 由 0 平均增长至 82.0%。同时,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的浓度增长量由 35 d 时的  $36.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低至 45 d 时的  $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 反应器出现亚硝酸盐积累现象, NOB 活性逐渐降低。此后 12 d 内, NAR 稳定于 99.2%, 这表明 NOB 活性得到了有效抑制, 反应器由最初的全程硝化转变为短程硝化。

TN 去除率的变化过程如图 3(c) 所示, 1 ~ 21 d 过程中, TN 去除率平均为 14.8%, 而在 22 ~ 57 d 过程中, TN 去除率逐渐下降, 平均降至 4.4%。说明由 22 d 起, ANAMMOX 菌活性逐步下降, 反应器运行环境不利于 ANAMMOX 菌生长。

### 3 讨论

#### 3.1 MBBR 反应器短程硝化不佳原因分析

MBBR 在整个反应器启动与运行过程中, 短程硝化与 TN 去除率总是处于互相矛盾之中, 亚硝酸盐是 ANAMMOX 菌的电子受体, 因此短程硝化是实现自养脱氮的必备条件。为了实现短程硝化, 在试验中, 尽管系统维持了非常好的短程硝化控制条件,

例如中温, 高游离氨, 低 DO 等, 尤其是高浓度的游离氨, 最高可达到  $21.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 但是系统始终没有能够完全抑制住 NOB 的生长。不仅如此, 为了维持短程硝化, 系统牺牲了  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  与 TN 的去除率, 运行全过程中, TN 去除率平均仅为 38.6%。且中试 MBBR 反应器总是处于要么 TN 去除率不理想, 要么短程硝化不理想的循环之中。中试 MBBR 反应器污泥源自课题组已有的小试 MBBR 反应器, 小试期间 TN 去除率平均为 87.9%, 去除负荷平均为  $0.53 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ <sup>[11]</sup>, 而在反应器从小试放大至中试反应器过程中, 并没有实现较好的自养脱氮功能。

事实上, 有研究表明, DO 浓度由  $0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低至  $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  后, 每 g 污泥中 *Nitrospira* 的量由  $2.61 \times 10^8$  升高至  $1.67 \times 10^{10}$  个<sup>[20]</sup>。由于不同的 NOB 菌属对 DO 的亲性和具有差异, 当 DO 长期维持在低浓度下时, 会针对性地富集出氧亲和性较好的 NOB 菌属, 如新加坡樟宜回用水厂将 DO 浓度从  $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低至  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 历经 2 a 运行之后, NAR 平均下降 47%, 且 NOB 优势菌属由 *Nitrobacter* 转变为 *Nitrospira*<sup>[21]</sup>。本试验维持 HRT 为 12 h 的过程中, DO 平均浓度为  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在此条件下运行 70 d 后, 仍具备 NOB 过量增殖的可能性。且低 DO 环境可能引发丝状菌过量生长, 污泥沉降性能恶化, 这将不利于 ANAMMOX 菌在系统中维持稳定的丰度。

### 3.2 SBR 污泥短程硝化良好原因

在 SBR 反应器当中,尽管 NOB 已对 FA 形成适应性,最终却得以实现稳定的亚硝酸盐积累,通过监测并计算氨氧化速率与亚硝酸盐氧化速率,得到结果如图 4 所示。

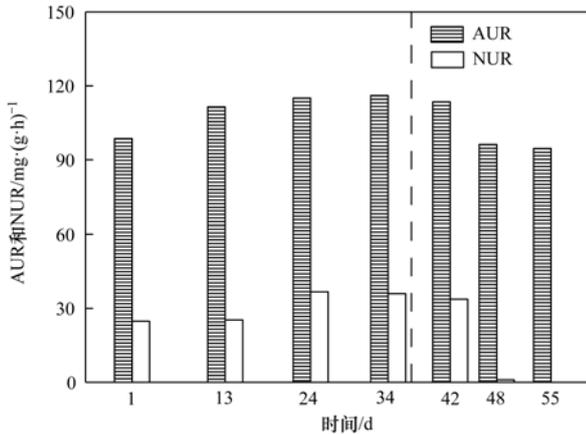


图 4 SBR 反应器 AOB 及 NOB 活性变化

Fig. 4 AOB and NOB activity of the SBR reactor

本试验过程中,AUR 由  $98.6 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  降低至  $94.6 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ,NUR 则从  $24.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  降至 0,说明采用 SBR 反应器,采用间歇曝气形式,结合 FA 与 DO 的控制,可以实现稳定的短程硝化.由图 2(d)可见,在运行过程中,由于氨氧化过程消耗碱度,pH 值随着反应的进行不断下降,FNA 浓度逐渐升高,在 40~57 d 由于亚硝酸盐稳定积累,反应末 FNA 浓度平均为  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,杨宏等<sup>[22]</sup>的研究结果表明,FNA 浓度为  $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,可逐渐将 NOB 的活性完全抑制住,AOB 则仍可维持 56% 以上的活性,说明在 SBR 反应器中,FNA 可能也发挥了作用.此外,1 d 时反应器 TN 去除率为 13%,而运行至 57 d 时,TN 去除率下降至 3%,其原因是 ANAMMOX 菌丰度不足,无法及时利用  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ,受

到基质性抑制<sup>[23]</sup>.

### 3.3 微生物分析

为研究 MBBR 反应器以及 SBR 反应器运行过程中微生物群落结构变化,于第 210 d 取 MBBR 反应器中的絮状污泥以及生物膜分别进行高通量测序,结果如图 5 所示。

其中,*Candidatus Kuenenia* 为主要的 ANAMMOX 菌属,在絮状污泥以及生物膜当中,分别占比 7.91% 及 17.38%,不难看出生物膜更适合 ANAMMOX 菌的成长.生物膜当中存在 DO 浓度梯度,多数 ANAMMOX 菌生长于其内层的缺氧区<sup>[24]</sup>,同时外层生物膜也可针对滞留性能加以强化,因此生物膜中 ANAMMOX 菌丰度高于絮状污泥.同时,反应器中存在少量 *Candidatus Brocadia*,在絮状污泥以及生物膜中分别占比 0.87% 及 0.62%.有研究认为 *Candidatus Kuenenia* 易于在人工配水环境下生存,而 *Candidatus Brocadia* 倾向生长于自然环境中<sup>[25]</sup>,且亦有试验表明,由侧流改为主流后,*Candidatus Kuenenia* 取代成为优势<sup>[26]</sup>.*Candidatus Kuenenia* 底物亲和性能相对较强, $\text{NO}_2^- \text{-N}$  半速率系数为  $0.2 \sim 3 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[27]</sup>,*Candidatus Brocadia* 则为  $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[28]</sup>,由于 MBBR 反应器为一体式,短程硝化及厌氧氨氧化于同一反应器内全部完成,反应生成的  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  被 ANAMMOX 菌以及少量的 NOB 即时利用,亚硝酸盐积累率较低,驯化过程中检测到的  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度平均低于  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,说明 *Candidatus Kuenenia* 具有在较低  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度环境下生存的能力。

本试验中,主要的 AOB 菌属为 *Nitrosomonas*,分别在絮状污泥以及生物膜中占比 27.43% 以及 2.55%,AOB 与不同污泥性状之中的丰度具有较大

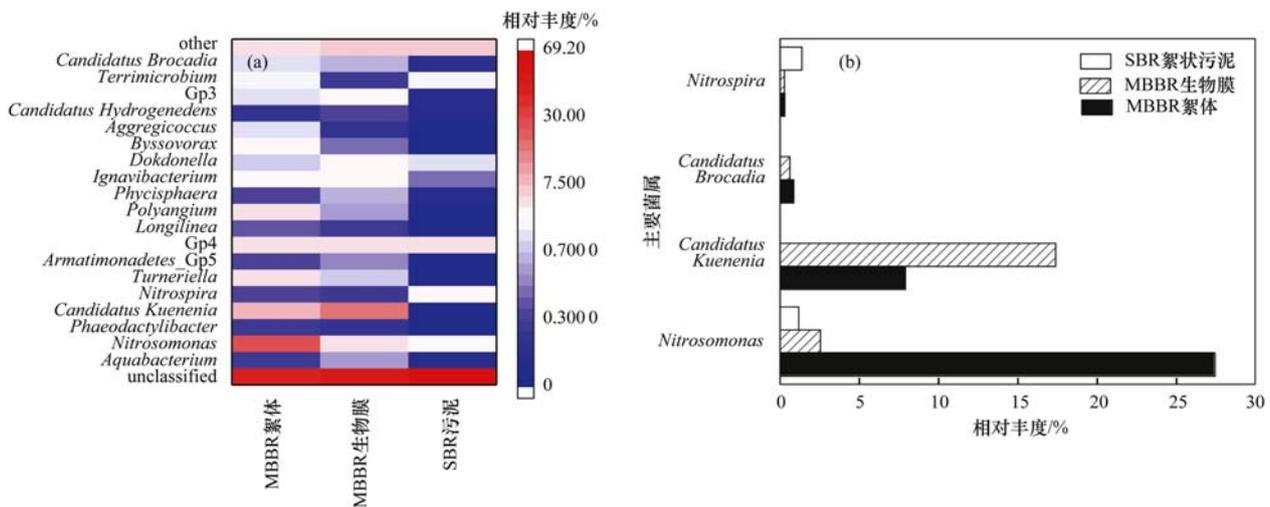


图 5 高通量测序结果

Fig. 5 High-throughput sequencing results

差异,说明絮状污泥与生物膜于 MBBR 反应器中各司其职,强化絮状污泥的持留性能可以将系统中 AOB 维持在较高的丰度,提高氨氧化效率.同时,*Nitrospira* 为主要的 NOB 菌属,占比分别为 0.30% 以及 0.28%. 不论是絮状污泥或是生物膜中,NOB 丰度均低于 AOB,这与部分学者的研究结果,即 CANON 工艺中,微生物絮体当中 NOB 丰度相对较高具有差异<sup>[29]</sup>. 同时,也说明 MBBR 反应器中 NOB 活性较高,虽然系统当中 NOB 丰度较为有限,且运行过程中 FA 与 DO 的平均浓度分别为  $5.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,但仅存的 NOB 仍可导致  $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值失衡,破坏短程硝化稳定.

SBR 反应器运行至第 60 d 时,取其中絮状污泥进行高通量测序,结果如图 5 所示. 试验建立并维持稳定的短程硝化后,相较于试验初期,絮状污泥当中 AOB 的丰度由最初 27.43% 降低至 1.18%,同时  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率由 1 d 时的 97.5% 降至 57 d 时的 43.7%; ANAMMOX 菌的相对丰度则由 1 d 时的 7.91% 降至 57 d 时的 0.01%,TN 去除率对应地由 13% 降至 3%,说明在短程硝化恢复过程当中,AOB 以及 ANAMMOX 菌丰度下降导致了系统  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  以及 TN 去除率下降.*Nitrospira* 仍是 NOB 中的优势菌属,且其相对丰度由 1 d 时的 0.3% 升高至 57 d 时的 1.39%. 试验过程中,DO 均保持在较低水平,以及试验过程中较高浓度的初始 FA,均会对 AOB 活性产生一定的影响. 同时,每周期末高浓度的 FNA 也会一定程度上降低 ANAMMOX 菌活性<sup>[30]</sup>. 尽管在试验过程中 NOB 逐渐失去活性,但由于各周期末  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度相对较高,充足的底物浓度为其在不利条件下生存提供了可能性. 同时也说明了在短程硝化稳定的反应器中,NOB 仍有机会进行增殖,其在此条件下的生命活动规律仍需进一步研究.

虽然通过高通量测序表明,SBR 反应器的短程硝化效果历经 55 d 的恢复后,AOB 的丰度明显下降,但是 AUR 的测定结果显示,短程硝化建立后,AUR 由 1 d 时  $98.6 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$  降至 55 d 时  $94.6 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ,NUR 则由 1 d 时  $24.8 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$  降至 0,但 NOB 丰度从 0.3% 增至 1.39%. 不论是 AOB 还是 NOB,其高通量测序结果均与活性测定试验结果相互矛盾,说明很可能有未知的 AOB、NOB 菌群未被高通量检出,或是二者在不同环境条件下有截然不同的代谢方式.

比较 MBBR 反应器与 SBR 反应器,中试 MBBR 反应器难以获得稳定并高效的短程硝化的原因有:首先,反应器从小至大,加大了控制难度;其次,在 MBBR 反应器中,NOB 容易获得隐蔽的空间,而

SBR 的活性污泥中,由于近乎均质的基质浓度,使得控制条件一旦不利于 NOB 的生长,NOB 很难获得栖息之地,并且随着不断的冲洗,絮状的 NOB 更容易被淘洗出系统,而 MBBR 系统中,NOB 很可能粘附中填料上并最终导致短程硝化的失败. 需要说明的是,本试验是在进水中无有机物的条件下得到的结论,在有机物进入系统后,其对于短程硝化与厌氧氨氧化都将产生影响,其进行短程硝化的控制还需要进一步研究.

#### 4 结论

(1) 采用 150 L 的 MBBR 反应器启动 CANON 工艺,维持温度于  $(28 \pm 3)^\circ\text{C}$ , DO 平均为  $1.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度平均为  $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,HRT 平均为 12 h 时,短程硝化与 TN 去除率互相制约,TN 去除率平均为 38.2%, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值平均为 0.274,反应器未实现良好的短程硝化效果. 当 HRT 降至 6 h 后, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$  值由 0.347 下降至 0.146,短程硝化逐渐恢复.

(2) 采用 SBR 反应器,分别维持曝气与停曝时间为 30 min 与 20 min,好氧过程中 DO 浓度为  $0.5 \sim 0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且每周期末 FNA 浓度高于  $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,12 d 后 NAR 由 0 升至 99.2%. TN 去除率则由 13% 降至 3%.

(3) 高通量测序显示,MBBR 反应器中,ANAMMOX 菌主要存在于生物膜中,优势菌属为 *Candidatus Kuenenia*; AOB 则于絮状污泥中占有较高的丰度,优势菌属为 *Nitrosomonas*; NOB 的优势菌属为 *Nitrospira*,于此两种污泥形态中的丰度无明显差异.

(4) SBR 反应器恢复短程硝化后,AOB 活性保持稳定的同时其丰度显著下降;NOB 虽检测不到活性,但其相对丰度呈上升趋势.

#### 参考文献:

- [1] Sliemers A O, Derwort N, Gomez J L C, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Water Research, 2002, 36(10): 2475-2482.
- [2] López H, Puig S, Ganigué R, et al. Start-up and enrichment of a granular anammox SBR to treat high nitrogen load wastewaters [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2008, 83(3): 233-241.
- [3] Vázquez-Padín J R, Fernández I, Morales N, et al. Autotrophic nitrogen removal at low temperature [J]. Water Science & Technology, 2011, 63(6): 1282-1288.
- [4] Strous M, Van Gerven E, Kuenen J G, et al. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(6): 2446-2448.
- [5] Liu C L, Yamamoto T, Nishiyama T, et al. Effect of salt concentration in anammox treatment using non woven biomass

- carrier[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2009, **107**(5): 519-523.
- [6] Jenni S, Vlaeminck S E, Morgenroth E, *et al.* Successful application of nitrification/anammox to wastewater with elevated organic carbon to ammonia ratios[J]. *Water Research*, 2014, **49**: 316-326.
- [7] Kim D J, Lee D I, Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH[J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(3): 459-468.
- [8] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrospira* culture[J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 826-834.
- [9] Turk O, Mavinic D S. Maintaining nitrite build-up in a system acclimated to free ammonia[J]. *Water Research*, 1989, **23**(11): 1383-1388.
- [10] Van De Graaf A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [11] 付昆明, 李慧, 周厚田, 等. 生物膜 CANON 反应器性能的优化: 从 FBBR 到 MBBR[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2256-2264.
- Fu K M, Li H, Zhou H T, *et al.* Optimization of the nitrogen removal performance on the CANON process in a biofilm reactor: from FBBR to MBBR[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2256-2264.
- [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. 258-285.
- [13] 王建龙, 吴立波, 齐星, 等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. *环境科学学报*, 1999, **19**(3): 225-229.
- Wang J L, Wu L B, Qi X, *et al.* Characterization of nitrification activity of activated sludge by Oxygen Uptake Rate (OUR)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, **19**(3): 225-229.
- [14] Zekker I, Rikmann E, Tenno T, *et al.* Modification of nitrifying biofilm into nitrating one by combination of increased free ammonia concentrations, lowered HRT and dissolved oxygen concentration[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(7): 1113-1121.
- [15] Herlemann D P R, Labrenz M, Jürgens K, *et al.* Transitions in bacterial communities along the 2 000 km salinity gradient of the Baltic Sea[J]. *ISME Journal*, 2011, **5**(10): 1571-1579.
- [16] Ushiki N, Jinno M, Fujitani H, *et al.* Nitrite oxidation kinetics of two *Nitrospira* strains: the quest for competition and ecological niche differentiation [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, **123**(5): 581-589.
- [17] 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.
- [18] 付昆明, 周厚田, 左早荣, 等. 水力停留时间对海绵填料 CANON 反应器性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(7): 1-5.
- Fu K M, Zhou H T, Zuo Z R, *et al.* Effect of hydraulic retention time on performance of CANON reactor with sponge as carrier [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(7): 1-5.
- [19] Jaroszynski L W, Cicek N, Sparling R, *et al.* Impact of free ammonia on anammox rates (anoxic ammonium oxidation) in a moving bed biofilm reactor[J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(2): 188-195.
- [20] Miao Y Y, Zhang L, Yang Y D, *et al.* Start-up of single-stage partial nitrification-anammox process treating low-strength swage and its restoration from nitrate accumulation [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 771-779.
- [21] Cao Y S, Kwok B H, Van Loosdrecht M C M, *et al.* The influence of dissolved oxygen on partial nitrification/anammox performance and microbial community of the 200, 000 m<sup>3</sup>/d activated sludge process at the Changi water reclamation plant (2011 to 2016) [J]. *Water Science & Technology*, 2018, **78**(3): 634-643.
- [22] 杨宏, 张帆, 王少伦, 等. 游离亚硝酸对高效硝化菌的抑制影响[J]. *北京工业大学学报*, 2019, **45**(10): 1017-1024.
- Yang H, Zhang F, Wang S L, *et al.* Effect of free nitrous acid inhibition on high-efficiency nitrifying bacteria[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, **45**(10): 1017-1024.
- [23] Lotti T, Van Der Star W R L, Kleerebezem R, *et al.* The effect of nitrite inhibition on the anammox process [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2559-2569.
- [24] Abzazou T, Araujo R M, Auset M, *et al.* Tracking and quantification of nitrifying bacteria in biofilm and mixed liquor of a partial nitrification MBBR pilot plant using fluorescence *in situ* hybridization[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 1115-1123.
- [25] Li X J, Sun S, Yuan H Y, *et al.* Mainstream upflow nitrification-anammox system with hybrid anaerobic pretreatment: long-term performance and microbial community dynamics [J]. *Water Research*, 2017, **125**: 298-308.
- [26] Yang Y D, Zhang L, Cheng J, *et al.* Microbial community evolution in partial nitrification/anammox process: from sidestream to mainstream [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **251**: 327-333.
- [27] Schmid M, Schmitz-Esser S, Jetten M, *et al.* 16S-23S rDNA intergenic spacer and 23S rDNA of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: implications for phylogeny and *in situ* detection[J]. *Environmental Microbiology*, 2001, **3**(7): 450-459.
- [28] Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, *et al.* Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors[J]. *Water Research*, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [29] 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 等. 颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 672-678.
- Sun Y F, Han X Y, Zhang S J, *et al.* Start-up of combined flocculant CANON process and the effects of SRT on reactor performance[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 672-678.
- [30] 魏彩莹, 张静, 任露露, 等. 厌氧氨氧化活性抑制、恢复与强化及工艺应用研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, **24**(3): 671-680.
- Wei C Y, Zhang J, Ren L L, *et al.* Recent advances in activity inhibition, recovery and enhancement, and application of the anaerobic ammonium oxidation process [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2018, **24**(3): 671-680.

## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)