

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                |                                                       |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 .....                                 | 刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)                         |
| 南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 .....                                     | 梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)               |
| 广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 .....                                  | 高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)                      |
| 神农架大九湖大气中的多环芳烃 .....                                           | 金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)   |
| 沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 .....                                       | 段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)                   |
| 北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 .....                                      | 梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)                        |
| 生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 .....                              | 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)               |
| 低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 .....                                    | 姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)                     |
| 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 .....                                       | 武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)            |
| 高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例 .....                               | 姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)                        |
| 上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 .....                                  | 董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)                |
| DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 .....                                 | 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)                             |
| 我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 .....                                      | 张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)                           |
| 基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 .....                     | 王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)                          |
| 北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 .....                                 | 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)      |
| 长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 .....                          | 孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)                              |
| 垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 .....                                       | 肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)            |
| 3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 .....                                | 李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)                         |
| 三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 .....                                     | 陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)                          |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 ..... | 姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)                               |
| 湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 .....                      | 李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)                              |
| 阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 .....                          | 丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)                              |
| 臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 .....                                       | 刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)                        |
| 紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用 .....     | 徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)                         |
| 不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 .....                          | 王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)               |
| 树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 .....                                 | 陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)                         |
| 灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 .....                                    | 朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)                                  |
| 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 .....                                        | 桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)                          |
| 11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 .....                                  | 周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)                         |
| 反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 .....                                          | 金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)                          |
| Fe <sup>(0)</sup> -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 .....                     | 吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)                       |
| 两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 .....                                   | 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)                      |
| 基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 .....                                  | 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)           |
| 温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 .....                        | 范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)                   |
| SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 .....                              | 杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)                       |
| 嗜碱降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 .....     | 徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)                         |
| 锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 .....           | 万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)                             |
| 温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 .....                                       | 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)                          |
| 包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 .....                                    | 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)                         |
| 强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 .....                                     | 曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)            |
| 三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 .....                                | 秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)                              |
| 川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 .....                              | 田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)                  |
| 双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N <sub>2</sub> O 排放的影响 .....                      | 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)                |
| 生物炭介导的不同地表条件下土壤 N <sub>2</sub> O 的排放特征 .....                   | 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)             |
| 垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 .....                                 | 熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)                       |
| 广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 .....                                        | 孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)                  |
| 宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 .....                                   | 张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)                     |
| 腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 .....                        | 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)                              |
| 紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 .....                                      | 李秋言, 赵秀兰 (2146)                                       |
| 生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 .....                                       | 吴志娟, 毕二平 (2154)                                       |
| 两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 .....                                     | 王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)                    |
| 牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb <sup>2+</sup> 、Cd <sup>2+</sup> 的吸附特性 .....     | 杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172) |
| C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 .....   | 鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)                    |
| 《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)      |                                                       |

## 两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较

李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 为研究如何控制部分亚硝化系统的稳定性, 在高氨氮负荷 [ $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ] 和不同的双重抑制策略下启动并连续运行两个序批式反应器 (sequencing batch reactors, SBRs)。结果表明在温度  $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 进水氨氮负荷为  $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  的条件下, FA 和 DO 的双重抑制和 FNA 和 DO 的双重抑制均可成功实现高氨氮废水稳定的部分亚硝化, 出水  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  接近 1,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度接近于零, 满足 ANAMMOX 反应的进水基质要求。R1 反应器在 DO 和 FA 的控制策略下, 亚硝氮氧化速率从  $28.16 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  减小到  $0.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (以  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  计, 下同), 而氨氧化速率减小 43.60%, 最终稳定在  $20 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (以  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  计, 下同) 左右。R2 反应器在 DO 和 FNA 的控制策略下, 亚硝氮氧化速率从  $12.37 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  降至  $0.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ , 而氨氧化速率仍维持在较高水平 [ $45 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ]。DO 和 FNA 双重抑制的系统与 DO 和高 FA 双重抑制的系统相比, 具有富集时间短, AOB 活性高, 运行稳定性强等优点, 更适用于启动部分亚硝化系统及维持系统稳定性。

**关键词:** 双重抑制; 部分亚硝化; 高氨氮; 序批式反应器; 游离氨; 游离亚硝酸

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1997-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201611128

## Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies

LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, WANG Bo, YAO Qian, ZHUO Yang

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

**Abstract:** Two SBRs which were under high ammonia loading [ $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ] and different dual inhibition with feed-batch were employed to study how to control the stability of partial nitrification system. The experimental result showed that the dual inhibition of FNA and DO or FA and DO could implement partial nitrification process at  $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and the ammonia concentration of  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The effluent  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  ratio was about 1, and the effluent  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  concentration was close to 0, which was suitable for the appropriate influent for the ANAMMOX. In R1, under the dual inhibition of high FA and low DO concentration, the nitrite oxidizing rate was reduced from  $28.16 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  to  $0.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (calculated as  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ , the same as below). The ammonia oxidizing rate decreased by 43.60%, which was stable at about  $20 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (calculated as  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , the same as below). In R2, under the dual inhibition of high FNA and low DO concentration, the nitrite oxidizing rate reduced from  $12.37 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  to  $0.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ . But the ammonia oxidizing rate remained at a higher level [ $45 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ]. Comparing the nitrification performance of the two SBRs under different control strategies, the dual inhibition of high FNA and low DO concentration had the advantages of short cultivation period, high biological activity and stable operation. It is therefore more suitable for the achievement of the partial nitrification.

**Key words:** dual inhibition; partial nitrification; high ammonia nitrogen; sequencing batch reactor (SBR); free ammonia (FA); free nitrous acid (FNA)

近年来随着厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 工艺的发展, 基于厌氧氨氧化反应的各种组合工艺日益受到研究者的关注。亚硝化作为厌氧氨氧化的前置反应, 与全程硝化相比, 亚硝化可减少 25% 的硝化需氧量和 40% 的反硝化碳源, 污泥产量低, 并且可减少反硝化池容积<sup>[1~4]</sup>, 成为近几年新型生物脱氮工艺的研究热点。硝化过程由氨氧化菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 共同作用完成, 可通过不同控制因素促进 AOB 的增长抑制 NOB 生长来实现亚硝化反应的稳定运行<sup>[5,6]</sup>。

目前研究发现控制 pH<sup>[7~9]</sup>、溶解氧 (DO)<sup>[10~13]</sup>、温度<sup>[14~16]</sup>、游离氨 (free ammonia,

FA)<sup>[17]</sup>、污泥龄<sup>[18,19]</sup>、水力停留时间<sup>[20]</sup>等因素可实现部分亚硝化。虽然关于部分亚硝化启动的研究很多, 但除 SHARON 工艺外, 单因素控制很难长久地维持亚硝化系统的稳定性<sup>[21~26]</sup>。因此探究如何维持亚硝化系统的稳定性及控制其出水氨氮与亚硝氮的比值满足 ANAMMOX 反应的基质要求具有重要意义。

本试验分别通过控制 DO、FA 和控制 DO、游

收稿日期: 2016-11-16; 修订日期: 2016-12-21

基金项目: 陕西省住房城乡科技开发项目 (2015-K65)

作者简介: 李惠娟 (1986 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为废水的生物处理理论与技术, E-mail: lhj270836125@163.com

离亚硝酸(free nitrous acid, FNA)两种不同抑制策略对实现部分亚硝化系统稳定运行的可行性及优缺点进行研究,以期为部分亚硝化系统稳定运行的工艺参数提供参考. 并采用荧光原位杂交技术对接种污泥及反应器活性污泥中硝化菌的数量进行检测, 依此判断不同运行条件下部分亚硝化系统污泥中微生物的生态特征,从微生物角度佐证两种不同抑制策略均可实现淘汰 NOB,富集 AOB 的目的.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与运行

试验采用两个相同的 SBR 反应器,分别命名为 R1、R2,反应器由普通玻璃制成,内径 18.0 cm,高 30.0 cm,有效容积 4.5 L. R1 采用低 DO 和高 FA 控制反应系统运行,R2 采用低 DO 和高 FNA 控制反应系统运行. 反应温度为  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,水力停留时间(HRT)24 h,污泥停留时间(SRT)10~15 d,运行周期为 8 h,稳定运行时进水、沉淀、排水、闲置时间分别为 360、30、10、5 min. 通过气体流量计控制曝气量继而控制 DO.

### 1.2 试验用水及接种污泥

反应器运行期间采用人工配制进水,R1 进水组分见表 1,微量元素溶液组成见表 2. R2 进水中不添加 COD,并根据其出水 pH 值确定进水中  $\text{NaHCO}_3$  的浓度,其余组分与 R1 相同. 接种污泥均取自西安市第四污水处理厂好氧区末端.

表 1 试验废水组分

Table 1 Wastewater composition

| 组分                                                       | 数值                                     |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 葡萄糖                                                      | 0~200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$    |
| $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )      | 25~1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ |
| $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) | 5~200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$    |
| $\text{Ca}^{2+}$                                         | 7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$        |
| $\text{Mg}^{2+}$                                         | 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$        |
| $\text{NaHCO}_3$                                         | $\text{NH}_4^+:\text{HCO}_3^-$ 为 1:2   |
| 微量元素溶液                                                   | 0.05 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$     |

表 2 微量元素组分

Table 2 Microelement composition

| 组分                                       | 浓度<br>/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 组分                                                     | 浓度<br>/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ |
|------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 0.035                                 | $\text{CoCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$               | 0.88                                  |
| $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 0.036                                 | $\text{H}_3\text{BO}_3$                                | 0.1                                   |
| EDTA                                     | 0.05                                  | $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$               | 0.1                                   |
| $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 5                                     | $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$               | 0.5                                   |
| $\text{FeCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 6                                     | $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 0.64                                  |

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 常规指标分析

本研究中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用  $N$ -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法;DO:梅特勒便携式溶氧仪;pH:雷磁 PHS-3C 型 pH 计;MLSS 和 MLVSS 采用重量法;FA 和 FNA 浓度按式(1)~(2)计算<sup>[26]</sup>:

$$\text{FA} = \frac{17}{14} \frac{10^{\text{pH}}}{e^{\left(\frac{6.334}{273+T}\right)} + 10^{\text{pH}}} \times [\text{NH}_4^+\text{-N}] \quad (1)$$

$$\text{FNA} = \frac{47}{14} \frac{1}{e^{\left(\frac{2.300}{273+T}\right)} \times 10^{\text{pH}}} \times [\text{NO}_2^-\text{-N}] \quad (2)$$

#### 1.3.2 硝化菌的活性测定

用氧吸收速率(OUR)法表征硝化菌的活性<sup>[27]</sup>. 硝化菌的 OUR 由基质氧化和内源呼吸的耗氧两部分组成. 测定方法如下:取 1 L 污泥混合液,在  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  条件下充分曝气(2 h). 曝气结束后,将其分别置于两个 500 mL 广口瓶中搅拌,记录一定时间内 DO 随时间的变化情况,由此测得微生物内源氧消耗速率(OUR). 其中一份加入  $\text{NaNO}_2$  溶液( $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度为  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),记录 DO 变化,测得亚硝酸盐吸收速率(NUR). 另一份污泥样品中加入  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  溶液( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和  $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{NaClO}_3$  (抑制 NOB 参与  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的氧化过程),记录 DO 变化,测得氨吸收速率(AUR). 试验结束后,分别测量 MLVSS,计算硝化菌的活性.

#### 1.3.3 荧光原位杂交 (fluorescent *in situ* hybridization, FISH)

样品预处理:取反应器活性污泥 2 mL,离心 ( $10\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 5 min,去上清液,加入  $1 \times \text{PBS}$  缓冲溶液 1 mL 重悬,重复操作两次后,加入 1 mL 的 4% 多聚甲醛溶液重悬,放置  $4^{\circ}\text{C}$  下固定 3 h,使细胞形态固定. 然后离心,倾去上清液,加入  $1 \times \text{PBS}$  缓冲溶液 1 mL 离心 5 min,洗去多余的多聚甲醛溶液重复操作 3 次. 最后,分别加入体积比为 1:1 的  $1 \times \text{PBS}$  缓冲溶液和无水乙醇,摇匀置于  $-20^{\circ}\text{C}$  保存.

脱水和杂交:取由 4% 多聚甲醛固定后的污泥样品,均匀涂抹于经酒精清洗过的载玻片上,至少取 3 个平行样,干燥后的样品依次用 50%、80%、95% 的乙醇溶液各浸泡 3 min 对细胞进行脱水,取出后风干. 配 2 mL 杂交缓冲液 (SDS 10%, Tris-HCl  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , NaCl  $5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去离子甲酰胺,  $\text{ddH}_2\text{O}$ ). 将无菌水配置成的  $25 \text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$  的探针与杂交缓冲液

按体积比 1:8 混合成探针使用液,用锡箔纸包好放入 46℃ 中预热 5 min. 将剩余的杂交缓冲液遍布在杂交管内折好的吸水纸上,目的是让样品在杂交过程中始终处于杂交缓冲液的潮湿环境中,将固定好样品的载玻片放入杂交管中,在 46℃ 中放置数分钟. 取 9 μL 均匀滴入载玻片上的污泥试样中,然后将载玻片迅速移回杂交管中在 46℃ 中避光杂交 2~3 h. 杂交结束后,将载玻片快速放入预热后的淋洗缓冲液 (SDS 10%, Tris-HCl 1 mol·L<sup>-1</sup>, NaCl 5 mol·L<sup>-1</sup>, ddH<sub>2</sub>O) 中,46℃ 水浴 10 min 后用 4℃ 冰水冲洗样品,于黑暗

中自然风干. 经过风干的样品封片后使用激光共聚焦显微镜 (Leica TCS SP8) 进行观察.

试验所用探针:总细菌、总 AOB 和总 NOB 分别采用 EUBmix、AOBmix 和 NOBmix;氨氧化菌和亚硝酸氧化菌优势菌群采用 Nsm156、Nsv443、Nit3、Ntspa662,可分别探测亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas*)、亚硝化螺旋菌 (*Nitrospira*)、硝化杆菌 (*Nitrobacter*) 和硝化螺旋菌 (*Nitrospira*),以上 4 种细菌为目前已知的城市污水生物硝化可能的优势种群. 各种探针的详细信息见表 3.

表 3 荧光原位杂交试验中检测硝化菌所用的探针

| Table 3 Probes for nitrifying bacteria in FISH |                      |                                                           |         |
|------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------|---------|
| 探针名称                                           | RNA 序列 (5'-3')       | 标记细菌种属                                                    | 文献      |
| Eub338                                         | GCTGCCTCCCGTAGGAGT   | Real bacteria                                             | [28,29] |
| Eub338 II                                      | GCAGCCACCCGTAGGTGT   |                                                           |         |
| Eub338 III                                     | GCTGCCACCCGTAGGTGT   |                                                           |         |
| Nso1225                                        | CGCCATTGTATTACGTGTGA | Betaproteobacterial ammonia-oxidizing bacteria            | [30]    |
| NEU                                            | CCCCTCTGCTGCACTCTA   | Most halophilic and halotolerant <i>Nitrosomonas</i> spp. | [31]    |
| NmV                                            | TCCTCAGAGACTACGCGG   | <i>Nitrosococcus mobilis</i>                              | [32]    |
| Cluster6a 192                                  | CTTTCGATCCCTACTTTCC  | <i>Nitrosomonas oligotropha</i> lineage                   | [33]    |
| Ntspa662                                       | GGAATTCCGCGCTCCTCT   | <i>Nitrospira</i>                                         | [34]    |
| Nit3                                           | CCTGTGCTCCATGCTCCG   | <i>Nitrobacter</i>                                        | [35]    |
| Nsm156                                         | TATTAGCACATCTTTTCGAT | <i>Nitrosomonas</i> spp., <i>Nitrosococcus mobilis</i>    | [30]    |
| Nsv443                                         | CCGTGACCGTTTCGTTCCG  | <i>Nitroso-spira</i> , <i>-lobus</i> , <i>-vibrio</i>     | [30]    |

2 结果与讨论

反应器 R1 共运行了 200 d,分为富集培养 (72 d) 和抑制 (128 d) 两个阶段. 反应器 R2 运行 208 d,富集培养 71 d,选择抑制 137 d. 富集培养是为了提高污泥中 AOB 和 NOB 的浓度,以保证在抑制阶段也能获得较高的氨氧化速率. 选择抑制阶段的目的则是采用多重抑制手段达到淘汰 NOB,使 AOB 成为优势菌属.

在富集培养阶段,通过逐步延长进水时间的方式提高进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度,进水时间随进水浓度变化见表 4. 当进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度逐渐提高时,采用瞬时进水会导致进水结束时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度过高,如果此时反应器内混合液的 pH 较高,将引起 FA 对硝化菌的抑制<sup>[26,36]</sup>. 因此,为控制进水结束点 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度为 30 mg·L<sup>-1</sup> 左右,根据进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度逐渐延长进水时间,最终采用连续进水 (Feed-batch) 的方式. R2 采用与 R1 相同的进水方式,以避免硝化菌受基质抑制,为硝化菌提供良好的生长环境,达到快速富

集硝化菌的目的. 不同之处在于富集培养过程中, R1 需同时保证出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度处于较低水平,而 R2 在仅保证出水氨氮浓度处于较低水平的条件下,快速将进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度提升至 1 000 mg·L<sup>-1</sup>,并在此高氨氮浓度下连续运行.

表 4 反应器进水时间变化

| Table 4 Feeding time changes of the two reactors |            |         |                            |
|--------------------------------------------------|------------|---------|----------------------------|
| R1 运行时间 /d                                       | R2 运行时间 /d | 进水时间 /h | 进水氨氮浓度 /mg·L <sup>-1</sup> |
| 1~8                                              | 1~6        | 0.25    | 25~100                     |
| 9~25                                             | 7~8        | 1       | 100~200                    |
| 16~26                                            | 9~12       | 2       | 200~400                    |
| 27~56                                            | 13~28      | 4       | 400~800                    |
| 57~200                                           | 29~208     | 6       | 800~1 000                  |

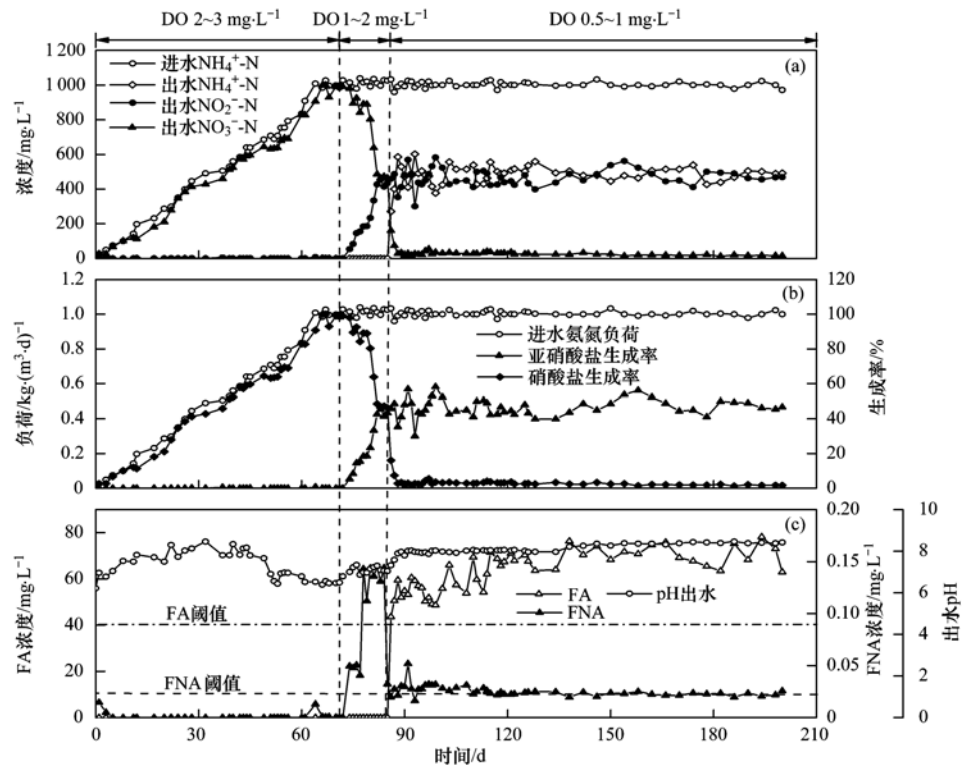
2.1 反应器运行及处理效果

在富集培养阶段,进水氨氮浓度从 25 mg·L<sup>-1</sup> 逐步提高到 1 000 mg·L<sup>-1</sup>,同时控制 DO 为 2~3 mg·L<sup>-1</sup>,SRT 为 15 d. 图 1 和图 2 为反应器 R1 及 R2 连续运行效果. 由图 1(a)、图 1(b) 可知随着进水氨氮浓度的增加 AOB、NOB 同时增长,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及

$\text{NO}_2^-$ -N 的去除率可达到 99% 以上,出水  $\text{NH}_4^+$ -N 及  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度分别稳定在  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,反应器进行完全硝化反应,此过程共持续 72 d. 反应器 R2 启动初期,进水氨氮浓度较低而溶解氧浓度较高,  $\text{NH}_4^+$ -N 及  $\text{NO}_2^-$ -N 的去除率达 98% 以上,出水  $\text{NH}_4^+$ -N 及  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度分别稳定在  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,反应器处于完全硝化, AOB 和 NOB 均呈优势生长. 随着进水氨氮负荷的快速提高,从第 9 d 开始,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 开始积累,到第 22 d 时,进水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为  $750 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度达  $415 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,此时 FNA 浓度达到  $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,远远超过 FNA 对 NOB 的抑制阈值( $0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>[37]</sup>. 由于 FNA 对 NOB 的抑制作用,导致 NOB 的活性持续降低,出水中的  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度进一步升高,反应器平均  $\text{NO}_2^-$ -N 积累率达 60% 以上[如图 2(b)]. 此时较高浓度的 FNA 是造成  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的主要因素,在其他条件不变的情况下,系统在 FNA 的抑制作用下实现了稳定的  $\text{NO}_2^-$ -N 积累.

在抑制阶段,在保证其他条件不变的条件下,减小反应器 R1 的曝气量,控制 DO 为  $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 由于 AOB 对氧的亲和力大于 NOB<sup>[38,39]</sup>,溶解氧优

先被 AOB 利用,出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度基本维持不变,而  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度逐渐升高,至 78 d 时,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度为  $184.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,对应的 FNA 浓度达到  $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,超过 FNA 对 NOB 抑制的阈值<sup>[29]</sup>,此时反应器中的 NOB 受 DO 和 FNA 的双重抑制,导致 NOB 的活性持续降低,出水中  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度积累. 85 d 后,继续减小曝气量,控制 DO 在  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,此时, AOB 受到 DO 的限制,活性减小,出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度逐渐升高、pH 值升高,对应的 FNA 浓度大幅降低,而 FA 浓度快速升高,至 90 d 时,FA 浓度已远远超过 FA 对 NOB 抑制阈值( $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>[40]</sup>,而 FNA 的浓度则在其相应的抑制浓度附近[图 1(c)],此时, NOB 主要受到 DO 和 FA 的双重抑制[图 1(a)],出水中  $\text{NH}_4^+$ -N/ $\text{NO}_2^-$ -N 接近 1,部分亚硝化过程实现. 对于反应器 R2,随着系统的运行,  $\text{NO}_2^-$ -N 积累率开始下降,出水  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度降低,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度升高,第 69 d 时  $\text{NO}_2^-$ -N 积累率下降至 44%,这说明 NOB 对 FNA 所产生的抑制作用具有适应性. 为保证稳定的  $\text{NO}_2^-$ -N 积累,在其他条件不变的情况下,反应器运行至 71 d 时,减小曝气量,控制 DO. 此时,虽然 AOB 对氧的亲和力大于 NOB,但在较低溶解氧



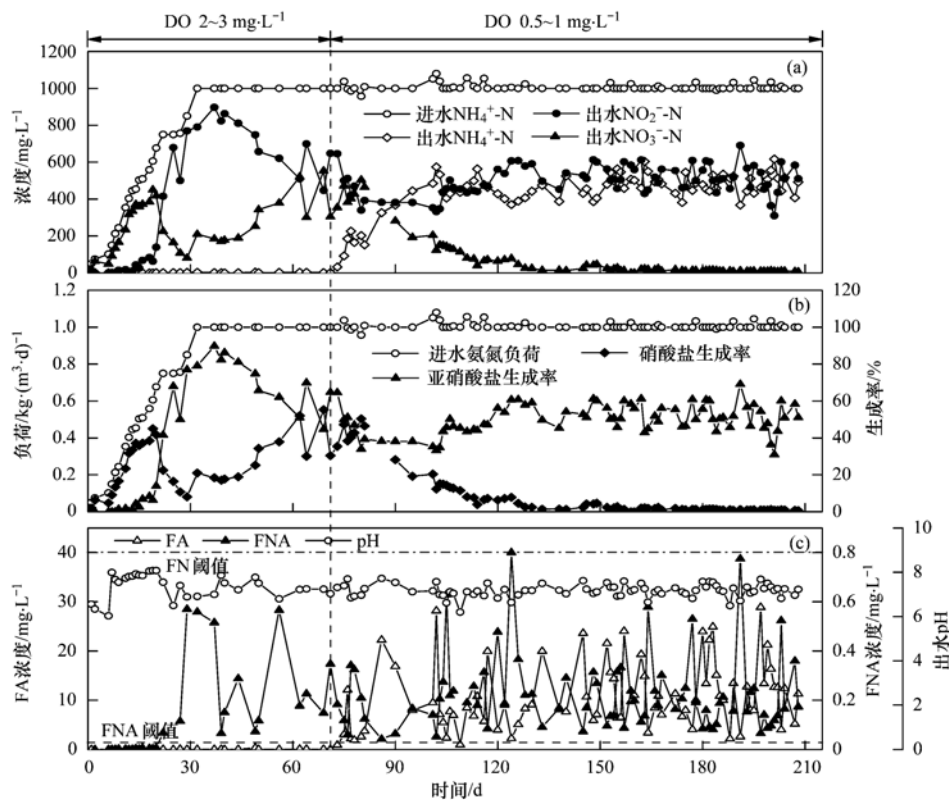
(a) 进、出水  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 历时变化; (b) 进水氨氮负荷、亚硝氮生成率、硝氮生成率历时变化; (c) 反应器内 FA 和 FNA 浓度及出水 pH 历时变化

图 1 R1 反应器运行效果

Fig. 1 Performance of R1

的条件下, AOB 的增长也受到限制, 氨氮的氧化速率减小, 导致出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度逐渐增大、pH 值升高. 为防止 pH 升高诱发 FA 对 AOB 的抑制, 改变进水  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{HCO}_3^-$  比例, 以保证系统 pH 维持在 7.0 左右. 此时, 在 FNA 和 DO 的双重抑制作用下[图 2

(c)], NOB 活性受到抑制, 系统  $\text{NO}_3^-$ -N 生成率逐渐下降,  $\text{NO}_2^-$ -N 积累率升高. 运行至 128 d 时, 系统出水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为  $406.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度为  $578.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为  $25.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 2(a)], 部分亚硝化过程实现.



(a) 进、出水  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 历时变化;

(b) 进水氨氮负荷、亚硝氮生成率、硝氮生成率历时变化; (c) 反应器内 FA 和 FNA 浓度及出水 pH 历时变化

图 2 R2 反应器运行效果

Fig. 2 Performance of R2

## 2.2 部分亚硝化系统中微生物活性

图 3 为试验期间两个反应器中污泥的 SAUR 与 SNUR 变化情况. 反应器 R1 接种污泥的 SAUR 及 SNUR 相对较低, 分别为  $3.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (以  $\text{NH}_4^+$ -N 计, 下同) 和  $4.88 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (以  $\text{NO}_2^-$ -N 计, 下同). 随着富集培养的进行, 硝化菌的活性逐渐增加, 至 72 d 时, SAUR 和 SNUR 均达到了最高值, 较接种污泥分别提高了 12.10 和 5.77 倍. 从 72 d 开始, 随着 DO 的降低, AOB 及 NOB 的活性均受到抑制, 但 AOB 对氧的亲和力大于 NOB<sup>[38,39]</sup>, 因此, NOB 的活性受到显著抑制, NOB 氧化亚硝氮的速率明显小于 AOB 氧化氨氮的速率, 从而出现了亚硝氮的逐步积累. 当 DO 降低到  $0.5 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 同时缩短 SRT 为 10 d, 加速淘汰 NOB, 系统 NOB 的活性进一步降低, 到 105 d 时, SNUR 降低至  $0.94$

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ , 减小 96.66%; 而 SAUR 则较系统最大活性减少 45.33%, 维持在  $20 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  左右.

反应器 R2 运行 9 d 后, SAUR 和 SNUR 从接种时的  $5.35 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  和  $5.30 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  增加到  $12.37 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  和  $13.40 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ . 由于亚硝氮的积累, 使得 NOB 的活性受到 FNA 的抑制作用, 降至  $0.58 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ , 而 AOB 的活性由于没有受到抑制作用仍呈增长趋势. 随后, 由于 NOB 对 FNA 抑制的适应, 其活性逐渐恢复, 最大增加到  $10.08 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ , 而此时 AOB 的氨氧化活性为  $46.04 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ . 从 71 d 开始, 随着 DO 的降低, AOB 及 NOB 的活性均受到抑制, 但由于 AOB 对氧的亲和力大于 NOB, NOB 的活性受到显著抑制, NOB 氧化亚硝氮的速率明显小于 AOB 氧化氨氮的速率, 从而出现了亚硝氮的再次积累, 与此同时, 减



少 SRT 加速对 NOB 的淘汰,系统 NOB 的活性进一步降低,到 100 d 时,SNUR 已降低至  $1.51 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ,较最大活性减小 88.71%;而 SAUR 则维持在  $45 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  左右,到 138 d 时 NOB 活性

降至  $0.32 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ .

由此可见,经过抑制和淘汰,保留下来的几乎全是氨氧化菌,在反应器内获得了较高活性亚硝化污泥,实现了稳定的部分亚硝化.

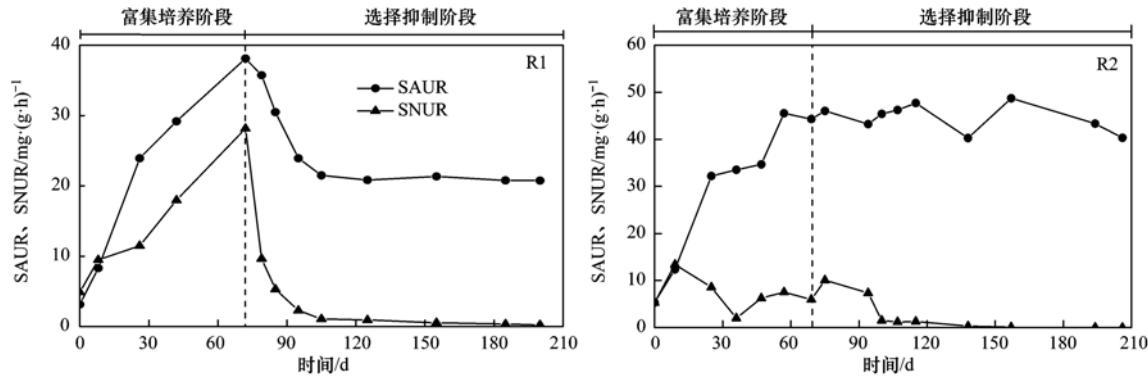


图 3 两个反应器中 AOB 和 NOB 的活性变化

Fig. 3 Changes in the activities of AOB and NOB in two reactors

2.3 部分亚硝化系统中 AOB 和 NOB 数量变化

反应器运行期间采用 FISH 技术对活性污泥中 AOB 和 NOB 数量变化进行测定. 两个反应器在启动初期、富集培养期、抑制后期活性污泥中硝化菌占总细菌数的百分比如表 5 所示. R1、R2 接种同一污水厂好氧区末端活性污泥,接种污泥中硝化菌总量约占总细菌数的 4%. 随着富集培养的进行,R1 在 72 d 时硝化菌活性最大,对应的硝化菌数量也达到峰值,AOB 的数量达到总细菌数的

$65.2\% \pm 1.23\%$ ,NOB 达到  $16.77\% \pm 0.78\%$ . R2 在 20 d 时 NOB 数量最大,约占总细菌数的  $8.3\% \pm 0.88\%$ ,而 AOB 在 136 d 时数量最大,约占总细菌数的  $73.71\% \pm 1.58\%$ . 在抑制阶段,随着 DO 浓度的降低,NOB 的增长受到抑制,其数量出现大幅下降. 在抑制阶段后期,FISH 检测结果显示几乎观察不到 NOB 的荧光信号,说明两个反应器中 NOB 几乎被完全淘汰,AOB 成为优势菌群.

表 5 污泥中硝化菌占总细菌数的百分比

Table 5 Percentage of nitrifying bacteria in total bacteria count of the sludge

| 反应器 |           | 启动初期/%          | 富集培养期/%          | 抑制后期/%           |
|-----|-----------|-----------------|------------------|------------------|
| R1  | AOB       | $1.73 \pm 0.83$ | $65.2 \pm 1.23$  | $40.20 \pm 1.58$ |
|     | NOB       | $2.94 \pm 1.15$ | $16.77 \pm 0.78$ | —                |
|     | AOB + NOB | $4.69 \pm 1.08$ | $81.97 \pm 1.61$ | $40.20 \pm 1.58$ |
| R2  | AOB       | $1.82 \pm 0.67$ | $73.71 \pm 1.58$ | $70.21 \pm 1.08$ |
|     | NOB       | $2.45 \pm 1.09$ | $8.3 \pm 0.88$   | —                |
|     | AOB + NOB | $4.27 \pm 1.98$ | $82.01 \pm 1.46$ | $70.21 \pm 1.08$ |

2.4 两种控制策略结果比较分析

以上试验结果表明,两种不同控制策略下都能实现部分亚硝化,出水水质均可满足厌氧氨氧化反应的进水要求. 但由于两个反应器采用抑制策略不同,使得部分亚硝化实现过程中反应器的运行特性及系统中微生物活性均存在差异.

2.4.1 培养方式的异同分析

由于硝化细菌的比增长速率小、世代周期长,因此,其在常规脱氮除磷污水处理厂活性污泥中所占份额较低(4% ~ 6%). R1 采用的富集培养方式是在保证 AOB 和 NOB 生长均不受抑制的条件下,

同时富集 AOB 和 NOB. 经过 72 d 的培养,AOB 和 NOB 的数量和活性达到最大. 而 R2 则是在仅保证出水氨氮较低条件下,实现目标微生物(AOB)的富集. 此过程中,逐渐积累的亚硝氮在较低 pH 的作用下形成大量 FNA,对 NOB 产生抑制. 因此,在富集培养阶段,AOB 活性及数量的不断提高,NOB 的活性及数量一直处于较低水平.

试验结果表明,尽管培养方式不同,但两个反应器中 AOB 数量和活性的最大值基本一致. 这是因为两个反应器的进水氨氮负荷及运行方式相同,所以消耗等量基质所产生的细胞物质相同. 且在两个



反应器的富集培养阶段, AOB 生长均未受到严重抑制, 因此最大活性基本相同。然而, R1 的富集培养期较 R2 长, 究其原因可能是虽然两个反应器接种污泥中 AOB 和 NOB 数量基本相同, 但 R2 的培养过程中仅考虑氨氮的去除情况, 不断供给 AOB 生长所需的氨氮, AOB 基本处于对数增长模式; 而 R1 同时考虑氨氮和亚硝氮的去除效果, 在氨氮优先利用氧得到降解后 AOB 要经历一段时间的饥饿时期, 增长速度缓慢, 因此在进水氨氮浓度从  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  提至  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的过程中 R1 历时较长。

#### 2.4.2 微生物活性的差异

由于培养方式及抑制方式的不同, 在部分亚硝化实现过程中, 硝化菌的活性存在较大差异。R1 和 R2 中 AOB、NOB 活性的初始值、最大值及稳定值, 如图 4 所示。从中可知, R1 和 R2 的接种污泥均取自同一污水处理厂, 二者初始硝化活性基本一致。经过富集培养, 在进水氨氮负荷和运行参数相同的条件下, 两个反应器中 AOB 活性均达到最大, 且最大值接近。但由于 R2 在富集培养过程中 FNA 对 NOB 的抑制, 其活性一直处于较低水平。因此, 与未受到任何抑制的 R1 中的 NOB 相比, R2 中的 NOB 的最大活性仅为 R1 中的 47.59%。最后, 当部分亚硝化实现并稳定运行时, 两个反应器中 NOB 均受到抑制、淘汰, 活性几乎为零。但由于 R1 采用低 DO 及高 FA 的双重抑制, 使得 AOB 在高 FA 的作用下, 活性也受到抑制, 其活性最终稳定在  $20 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$  (以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  计) 左右, 较最大氨氧化速率减少 50%; 而 R2 的抑制过程中, FNA 的浓度多数情况下低于其对 AOB 的抑制浓度  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , AOB 活性未受到抑制, 因此其氨氧化速率仍维持较高水平, 与最大氨氧化活性基本保持一致。综上所述, 通过两种不同的控制策略, R1 及 R2 中 NOB 的活性均受到完全抑制, R1 中 AOB 的活性减少约 50% 而 R2

中 AOB 仍具有较高的生物活性。

#### 2.4.3 实现部分亚硝化系统稳定性比较

经过前期适宜条件下的富集培养, 两个反应器进水氨氮浓度达到  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , AOB 的活性均达到最大值; 随后采取不同的双重控制策略后两个反应器在实现部分亚硝化后稳定运行的过程中, 在稳定性方面存在较大差异, 原因主要是在高氨氮负荷下运行的部分亚硝化反应, 系统将同时出现高浓度的氨氮和亚硝氮, 进而形成的高 FA 或高 FNA 会对 AOB 和 NOB 的活性产生不同的抑制作用。

R1 反应器是在低 DO 和高 FA 的双重抑制作用下实现稳定的部分亚硝化, 但当系统稳定运行时, AOB 活性较低、FA 浓度较高, 系统存在 AOB 活性完全受抑制的隐患。当进水水质发生变化或曝气量减少等情况发生时, 系统的稳定性很容易受到影响。一旦 FA 的浓度过高系统中 AOB 的活性将受到严重抑制, 若不及时处理系统运行数天后将会出现 AOB 失活的现象。其次 NOB 对 FA 的抑制具有适应性, 反应器长期运行后短程硝化会被破坏<sup>[41]</sup>。试验后期, 当 R1 运行至第 201 d, 由于系统曝气设备的故障, 供氧量减小, 使得反应器内氨氮氧化过程减弱, 系统 pH 升高, FA 浓度也随之升高。此时, 在较高的 FA 下, AOB 活性完全受到抑制, 细菌受到毒害作用明显, 仅在 3 d 时间内系统氨氧化活性急剧下降, 镜检发现细菌菌落呈现黑色的斑点, 细菌活性丧失, 原有的平衡被打破, 系统崩溃。FISH 检测发现细菌形态突变, 已无明显的菌落形态, 可见这样的抑制过程难以恢复。

然而, 在 R2 反应器中, 由于采用的是低 DO 和高 FNA 的双重抑制方式, 在部分亚硝化实现过程中 AOB 的活性并未受到抑制, 即使出现系统水质变化或曝气量减少等情况, 在较低 pH 条件下系统内的 FA 浓度不至太高, 仅仅会限制氨氮的转化过程而不会对 AOB 的活性造成毒害作用, 及时发现调整后反应系统恢复较快。另外, 在部分亚硝化稳定运行期间, R2 反应器中 AOB 的活性远高于 R1 反应器, 较高的 AOB 活性使得系统能够承受一定范围内的进水水质变化和供氧不足造成的系统短暂的紊乱。最后, 由于 FNA 浓度对 AOB 活性的抑制作用较低, 即使系统内出现较高的 FNA 浓度也不会对目标微生物 AOB 造成太大的影响, 系统运行较 R1 更稳定。

张昭等<sup>[42]</sup>在常温条件通过高 FA ( $11.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、FNA ( $0.033 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 及低 DO ( $< 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 联合抑制实现了部分亚硝化, 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  /

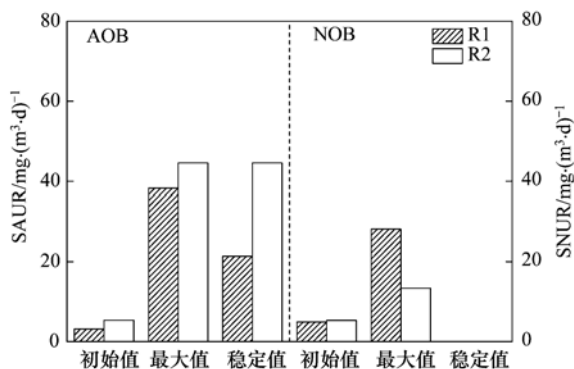


图 4 R1 和 R2 中 AOB、NOB 活性变化对比

Fig. 4 Comparison of the activities of AOB and NOB in two reactors

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为 1.32, 可为作为 ANAMMOX 反应进水, 但其进水氨氮浓度较低. 其次田智勇<sup>[10]</sup>在常温低氧条件下采用 SBR 反应器研究了部分亚硝化的运行特性, 其研究发现通过控制 DO、碱度与氨氮浓度的比值, 可使反应器出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  接近 ANAMMOX 反应基质要求. 碱度及 pH 控制部分亚硝化的实质是通过 FN 或 FNA 对 AOB 和 NOB 不同抑制作用来实现亚硝化. 通过对比不同研究结果发现, 高 FA、FNA 及低 DO 可在短时间内实现部分亚硝化. 通过本试验对比发现低 DO 和高 FNA 双重抑制更有利于启动部分亚硝化系统及维持系统稳定性.

### 3 结论

采用 Feed-batch 方式进水的两个 SBR 反应器, 在 DO 为  $2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 温度为  $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  的条件下富集培养硝化菌, 当进水氨氮浓度高达  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 维持进水期间反应器内的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度始终在  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 氨氮氧化率均可达到 99% 以上, 无  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  积累. 在进水氨氮负荷为  $1 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  的条件下, 维持 R1 的 pH 为 8.0 左右、DO 为  $0.5 \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 通过 FA 和 DO 的双重抑制, 反应器出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  平均浓度为  $466.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  接近 1. R2 在进水氨氮负荷为  $1 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  时, 在 pH 为 7.0 左右、DO 为  $0.5 \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件, 通过 FNA 和 DO 的双重抑制实现了稳定的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  积累, 反应器出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  平均浓度为  $519.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  接近 1.07. FISH 结果显示两种抑制策略均可淘汰 NOB, 富集 AOB. 虽然不同控制策略下实现的稳定亚硝化反应系统, 通过合适的条件控制均能实现出水满足 ANAMMOX 进水基质所要求的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  比值. 但在微生物活性及系统稳定性方面存在较大差异. 相比而言, 低 DO 和高 FNA 双重抑制具有富集时间短, AOB 活性高, 运行稳定性强等优点, 更有利于启动部分亚硝化系统及维持系统稳定性.

致谢: 感谢现场采样期间西安市第四污水处理厂工作人员的协助.

#### 参考文献:

- [1] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 延时曝气对常温低氨氮 SBR 亚硝化影响及恢复[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(8): 1998-2002.
- [2] Zhang G L, Li D, Zhang X J, *et al.* Research on the recovery strategy for nitrosation at room temperature [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(8): 1998-2002.
- [3] Nittami T, Ootake H, Imai Y, *et al.* Partial nitrification in a continuous pre-denitrification submerged membrane bioreactor and its nitrifying bacterial activity and community dynamics[J]. Biochemical Engineering Journal, 2011, **55**(2): 101-107.
- [4] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1152-1158.
- [5] Su D X, Li D, Zhang X J, *et al.* Effects of different ratios of aeration time and anaerobic time on shortcut nitrification in the intermittent aeration SBR [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(5): 1152-1158.
- [6] Beccari M, Passino R, Ramadori R, *et al.* Kinetics of dissimilatory nitrate and Nitrite reduction in suspended growth culture [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1983, **55**(1): 58-64.
- [7] Turk O, Mavinic D S. Benefits of using selective inhibition to remove nitrogen from highly nitrogenous wastes [J]. Environmental Technology Letters, 1987, **8**(1-12): 419-426.
- [8] 邓斌, 李小明, 杨麒, 等. pH 控制生物膜移动床反应器完全亚硝化的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1720-1725.
- [9] Deng B, Li X M, Yang Q, *et al.* Complete nitrification process in an biofilm moving bed system by controlling pH [J]. Environmental Science, 2007, **28**(8): 1720-1725.
- [10] Ciudad G, González R, Bornhardt C, *et al.* Modes of operation and pH control as enhancement factors for partial nitrification with oxygen transport limitation [J]. Water Research, 2007, **41**(20): 4621-4629.
- [11] Li H S, Zhou S Q, Huang G T, *et al.* Achieving stable partial nitrification using endpoint pH control in an SBR treating landfill leachate [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, **92**(3): 199-205.
- [12] 田智勇, 李冬, 曹相生, 等. 常温限氧条件下 SBR 反应器中的部分亚硝化研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 931-936.
- [13] Tian Z Y, Li D, Cao X S, *et al.* Partial nitrification in SBR under normal temperature and limited oxygen condition [J]. Environmental Science, 2008, **29**(4): 931-936.
- [14] 钱光磊, 邵强, 陆彩霞, 等. 基于 DO 控制实现 SBR 短程硝化过程[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(6): 2864-2868.
- [15] Qian G L, Shao Q, Lu C X, *et al.* Shortcut nitrification process controlled by dissolved oxygen in a sequencing batch reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(6): 2864-2868.
- [16] Blackburne R, Yuan Z G, Keller J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor [J]. Biodegradation, 2008, **19**(2): 303-312.
- [17] Hwang J H, Cicek N, Oleszkiewicz J. Effect of loading rate and oxygen supply on nitrification in a non-porous membrane biofilm reactor [J]. Water Research, 2002, **43**(13): 3301-3307.
- [18] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 温度对短程硝化反硝化的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(3): 516-520.
- [19] Shang H L, Peng Y Z, Zhang J R, *et al.* The effect of temperature on short-cut nitrification and denitrification [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(3): 516-520.
- [20] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(3): 610-616.
- [21] Zhang G L, Li D, Zhang X J, *et al.* Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia allow temperature [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(3): 610-616.

- [16] van Dongen U, Jetten M S, van Loosdrecht M C. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(1): 153-160.
- [17] 韩晓宇, 张树军, 甘一萍, 等. 以 FA 与 FNA 为控制因子的短程硝化启动与维持[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 809-814.  
Hang X Y, Zhang S J, Gan Y P, *et al.* Start up and maintain of nitrification by the inhibition of FA and FNA [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 809-814.
- [18] 范建华, 张朝升, 方茜, 等. 通过控制泥龄实现亚硝酸盐型同步硝化反硝化[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(3): 102-105.  
Fan J H, Zhang C S, Fang Q, *et al.* Realization of simultaneous nitrification and denitrification via nitrite by controlling sludge age [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, **23**(3): 102-105.
- [19] 魏琛, 罗固源. 长泥龄 SBR 亚硝化系统的污泥适应性[J]. *重庆大学学报*, 2004, **27**(4): 111-113.  
Wei C, Luo G Y. Acclimation in partial nitrification process of long MCRT [J]. *Journal of Chongqing University*, 2004, **27**(4): 111-113.
- [20] 李红岩, 张昱, 高峰, 等. 水力停留时间对活性污泥系统的硝化性能及其生物结构的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1862-1865.  
Li H Y, Zhang Y, Gao F, *et al.* Effects of hydraulic retention time (HRT) on nitrification performance and microbial community of conventional activated sludge (CAS) [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(9): 1862-1865.
- [21] Villaverde S, García-Encina P A, Fdz-Polanco F. Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters [J]. *Water Research*, 1997, **31**(5): 1180-1186.
- [22] Surmacz-Górska J, Cichon A, Miksch K. Nitrogen removal from wastewater with high ammonia nitrogen concentration via shorter nitrification and denitrification [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(10): 73-78.
- [23] Münch E V, Lant P, Keller J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors [J]. *Water Research*, 1996, **30**(2): 277-284.
- [24] 王志盈, 刘超翔, 彭党聪, 等. 高氨浓度下生物流化床内亚硝化过程的选择特性研究[J]. *西安建筑科技大学学报*, 2000, **32**(1): 1-3, 7.  
Wang Z Y, Liu C X, Peng D C, *et al.* Study on the selection process of nitrification in biological fluidized bed under high concentration of ammonia [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2000, **32**(1): 1-3, 7.
- [25] Turk O, Mavinic D C. Maintaining nitrite build-up in a system acclimated to free ammonia [J]. *Water Research*, 1989, **23**(11): 1383-1388.
- [26] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [27] 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.
- [28] Amann R I, Binder B J, Olson R J, *et al.* Combination of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes with flow cytometry for analyzing mixed microbial populations [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1990, **56**(6): 1919-1925.
- [29] Daims H, Brühl A, Amann R, *et al.* The domain-specific probe EUB338 is insufficient for the detection of all bacteria; development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 434-444.
- [30] Mobarry B K, Wagner M, Urbain V, *et al.* Phylogenetic probes for analyzing abundance and spatial organization of nitrifying bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(2): 815.
- [31] Wagner M, Rath G, Amann R I, *et al.* *In situ* identification of ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1995, **18**(2): 251-264.
- [32] Juretschko S, Timmermann G, Schmid M, *et al.* Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: nitrosococcus mobilis and Nitrospira-like bacteria as dominant populations [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1998, **64**(8): 3042-3051.
- [33] Adamczyk J, Hesselsoe M, Iversen N, *et al.* The isotope array, a new tool that employs substrate-mediated labeling of rRNA for determination of microbial community structure and function [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(11): 6875-6887.
- [34] Daims H, Nielsen J L, Nielsen P H, *et al.* *In situ* characterization of Nitrospira-like nitrite-oxidizing bacteria active in wastewater treatment plants [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(11): 5273-5284.
- [35] Wagner M, Rath G, Koops H P, *et al.* *In situ* analysis of nitrifying bacteria in sewage treatment plants [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(1-2): 237-244.
- [36] 吴永明, 万金保, 熊继海, 等. 游离氨在高含氮废水生物法处理中的作用及其研究进展 [J]. *工业水处理*, 2010, **30**(9): 1-4.  
Wu Y M, Wan J B, Xiong J H, *et al.* Research progress and effect of free ammonia on the biological treatment of ammonium-containing wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, **30**(9): 1-4.
- [37] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched nitrobacter culture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [38] Schramm A, de Beer D, van den Heuvel J C, *et al.* Microscale distribution of populations and activities of nitrospira and nitrospira spp. along a macroscale gradient in a nitrifying bioreactor: quantification by *in situ* hybridization and the use of microensors [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(8): 3690-3696.
- [39] Schramm A, de Beer D, Gieseke A, *et al.* Microenvironments and distribution of nitrifying bacteria in a membrane-bound biofilm [J]. *Environmental Microbiology*, 2000, **2**(6): 680-686.
- [40] Cho S, Fujii N, Lee T, *et al.* Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 652-659.
- [41] Groeneweg J, Sellner B, Tappe W. Ammonia oxidation in nitrosomonas at NH<sub>3</sub> concentrations near K<sub>m</sub>: effects of pH and temperature [J]. *Water Research*, 1994, **28**(12): 2561-2565.
- [42] 张昭, 李冬, 曾辉平, 等. 常温下部分亚硝化的启动中试研究[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(17): 21-25.  
Zhang Z, Li D, Zeng H P, *et al.* Start-up of pilot-scale partial nitrification reactor under room temperature and reduced DO conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(17): 21-25.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                             |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District .....                                                       | LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)        |
| Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing .....                                                                                                                    | LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)    |
| Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province .....                                                        | GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)       |
| Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China .....                                                                                                                    | JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)       |
| Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City .....                                                                                                                              | DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769) |
| Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing .....                                                                                                                           | LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)     |
| Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant .....                                                                                          | SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)    |
| Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma .....                                                                                                                                  | JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)        |
| Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng .....                                                                                                                               | WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)            |
| Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou .....                                                                                               | YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)        |
| Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai .....                                                                                                         | DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)   |
| Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle .....                                                                                                                        | ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)     |
| Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China .....                                                                                                              | ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)         |
| Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method .....                                                                                                    | WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)      |
| Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China .....                                                                        | ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852) |
| Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas ..... | SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)            |
| Complexation Between Copper( II ) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill .....                                                                                            | XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)          |
| Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater .....                                                                                                      | LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)              |
| Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area .....                                                                                   | CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)        |
| Effects of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...                                       | JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)            |
| Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production .....                                   | LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)        |
| Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells .....                                                                                     | DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)          |
| Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters .....                                                                                                            | LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)     |
| Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus .....                                                                                               | XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928) |
| Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values .....                                                                                         | WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)   |
| Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water .....                                                         | CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)     |
| Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms .....                                                                                              | ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)                      |
| Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network .....                                                                                                                                       | SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)          |
| Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System .....                                                                                                                                | ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)            |
| Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process .....                                                                                                                                | JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)        |
| Enhanced Short-cut Denitrification by Fe <sup>(0)</sup> -activated Carbon and Its Influencing Factors .....                                                                                                 | LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)          |
| Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies .....                                                                                         | LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)    |
| Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR .....                                                                                                                           | LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)         |
| Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe .....                                                                                 | FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)       |
| Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater .....                                                                  | YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)               |
| Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater .....                                                            | XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)       |
| Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 .....                                                                          | WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)       |
| Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....                                                                                                 | ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)              |
| Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization .....                                                                                                      | XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)         |
| Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge .....                                                                                                    | CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)            |
| Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....                                       | QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)       |
| Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin .....                                             | TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)               |
| Effect of Dicyandiamide on N <sub>2</sub> O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping .....                                                                                                          | WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084) |
| Characteristics of Biochar-mediated N <sub>2</sub> O Emissions from Soils of Different Surface Conditions .....                                                                                             | ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)         |
| Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China .....                                                           | XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)         |
| Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China .....                                                                                                                     | SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)              |
| Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake .....                                                                                               | ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)        |
| Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil .....                                                 | WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)     |
| Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil .....                                                                                                         | LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)                                    |
| Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar .....                                                                                                                                 | WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)                                     |
| Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch .....                                                                           | WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)         |
| Adsorption of Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar .....                                                                  | DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)        |
| Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr Composite Photocatalyst .....                                                                                  | BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)           |