

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响

吕心涛^{1,2,3}, 周桐^{1,2,3}, 田夏迪^{1,2,3}, 谷鹏超^{1,2,3}, 杨岸明^{1,2,3}, 王佳伟^{1,2,3}, 张树军^{1,2,3*}

(1. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 3. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100124)

摘要: 为了考察不同污泥浓度 (MLSS) 下缺氧游离亚硝酸 (FNA) 对氨氧化菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 活性的抑制影响, 采用序批式反应器 (SBR), 基于 4 种 MLSS (8 398、11 254、15 998 和 19 637 mg·L⁻¹) 的全程硝化污泥条件下, 通过批次试验深入研究 4 种 MLSS 下的全程硝化活性污泥经过缺氧 FNA (初始浓度为 1.3 mg·L⁻¹) 处理 48 h 后, AOB 和 NOB 活性的变化情况。结果表明, 缺氧 FNA 处理活性污泥 48 h 后, pH 值升高 0.9 左右, NO₂⁻-N 浓度并未明显下降; 过曝气下, NH₄⁺-N 浓度逐渐降解至 0 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 去除速率逐渐升高至 4.4~6.8 mg·(L·h)⁻¹, 并随着抑制 MLSS 的升高, 其所用时越短; 抑制 MLSS 为 8 398、11 254、15 998 和 19 637 mg·L⁻¹ 时, 分别过曝气 0~396、0~396、0~372 和 0~168 h 内, 亚硝酸盐累积率 (NAR) 均大于 92%, 当分别曝气至 468、468、444 和 264 h 时, NO₂⁻-N 浓度和 NAR 分别降为 0 mg·L⁻¹ 和 0%, NO₃⁻-N 浓度均升高至最高, 其值分别为 42.6、49.9、42.9 和 47.9 mg·L⁻¹。

关键词: 游离亚硝酸; 缺氧; 污泥浓度; 亚硝酸盐累积率; 去除速率; 硝化菌活性

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)07-3195-06 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201812079

Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions

LÜ Xin-tao^{1,2,3}, ZHOU Tong^{1,2,3}, TIAN Xia-di^{1,2,3}, GU Peng-chao^{1,2,3}, YANG An-ming^{1,2,3}, WANG Jia-wei^{1,2,3}, ZHANG Shun-jun^{1,2,3*}

(1. Beijing Wastewater Resourceful Engineering Technology Research Center, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 3. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This study investigated the inhibitory effect of free nitrous acid (FNA) on the activity of ammonia oxidizing bacteria (AOB) and nitrite oxidizing bacteria (NOB) under anoxic conditions with different mixed liquid suspended solids (MLSS). Sequencing batch reactors were used to study the changes in the activity of AOB and NOB in nitrifying activated sludge based on four different MLSS (8 398, 11 254, 15 998, and 19 637 mg·L⁻¹), after treatment, under anoxic conditions with FNA (at an initial concentration of 1.3 mg·L⁻¹) for 48 h. The results showed that the pH increased by approximately 0.9, but the concentration of NO₂⁻-N did not decrease significantly. With over-aeration, the concentration of NH₄⁺-N gradually degraded to 0 mg·L⁻¹, and the removal rate of NH₄⁺-N gradually increased to a maximum of 4.4~6.8 mg·(L·h)⁻¹ which time used was shorter with the increase of the inhibition MLSS. The nitrite accumulation rate was more than 92% when the sludge concentration was 8 398, 11 254, 15 998, and 19 637 mg·L⁻¹ and with over-aeration for 0~396 h, 0~396 h, 0~372 h, and 0~168 h, respectively. When aerated for 468 h, 468 h, 444 h, and 264 h, the NO₂⁻-N concentration and NAR decreased to 0, and NO₃⁻-N concentrations increased to their highest with the values of 42.6, 49.9, 42.9, and 47.9 mg·L⁻¹ respectively.

Key words: free nitrous acid; anoxic; sludge concentration; nitrite accumulation ratio; removal rate; activity of nitrifying bacteria

厌氧氨氧化工艺在理念和技术上都大大突破了传统硝化-反硝化的工艺框架^[1], 厌氧氨氧化菌利用亚硝酸盐为电子受体氧化氨氮, 生成 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N、利用无机碳为碳源, 无须有机物为碳源, 从而实现自养生物脱氮^[2]。与传统生物脱氮相比, 短程硝化/厌氧氨氧化自养脱氮, 可减少 60% 曝气量, 100% 碳源投加量^[2~4], 基于厌氧氨氧化城市污水处理技术自养脱氮比例可达 70% 以上, 脱氮效率将大幅提升, 污水中的碳源将被有效用于生物除磷与厌氧硝化, 提高城市污水厂除磷效率与沼气产量。稳定短程硝化是遏制实现城市污水厌氧氨氧化的技术瓶颈^[5, 6], 短程生物脱氮实质是利用氨氧化

菌 (AOB) 体内的氨单加氧酶 (ammonia monooxygenase, amoA) 和羟胺氧化酶 (hydroxylamine oxidoreductase, HAO) 将氨氮 (NH₄⁺-N) 氧化为亚硝态氮 (NO₂⁻-N) 的过程^[7], 为厌氧氨氧化菌提供 NO₂⁻-N。

从微生物菌属种群变化角度看, 短程硝化过程是使亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 成为劣势菌属并逐渐

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 北京市科技计划项目 (D171100001017001, Z181100005518003); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401103)

作者简介: 吕心涛 (1988~), 男, 硕士研究生, 研发工程师, 主要研究方向为污水脱氮除磷与能源回收, E-mail: 411813017@qq.com

* 通信作者, E-mail: 13810812776@163.com

被淘汰出系统,而 AOB 菌属成为硝化菌群中的优势菌种^[8~11].从 DO 角度来说,AOB 的氧饱和常数为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,NOB 的氧饱和常数为 $1.2 \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此认为在低 DO 下易于实现短程硝化^[12],DO 浓度控制在 $0.4 \sim 0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,系统中 NAR 达到 95%,实现短程硝化^[13].此外,通过间歇曝气,在城市污水中实现了 90%~95% 的 NAR^[14].利用耗氧呼吸速率(OUR)来控制硝化时间,避免出现曝气现象,进而实现 NAR 达到 80%^[15].研究发现,FNA 才是 NOB 真正的基质底物, NO_2^- -N 并不是其基质底物,当 FNA 浓度为 $0.702 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,NOB 活性被完全抑制^[16].在好氧条件下 FNA 对 NOB 和 AOB 增殖的抑制浓度分别为 0.02 和 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[17],而在缺氧条件下 FNA 浓度为 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,NOB 已停止活动,而 AOB 活性为原来的 70%^[18],当在缺氧条件下 FNA 浓度达到 $0.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,AOB 活性降至 64%,而 NOB 活性降至 10%^[19].

现有报道文献资料,对硝化菌活性的影响多集中在 FA、DO、曝气时间、温度等因素上,鲜见关于缺氧条件下 FNA 对硝化菌活性影响的文献报道,且在缺氧和不同 MLSS 下 FNA 对硝化菌活性影响的研究还未见报道,若在高 MLSS 下,

通过缺氧 FNA 的抑制可以实现短程硝化,则在通过旁侧抑制实现城市污水短程硝化-厌氧氨氧化具有重要的理论指导意义.基于上述背景,本试验采用 4 个平行的 SBR 反应器,考察在不同 MLSS 和缺氧条件下,FNA 对硝化菌(AOB 和 NOB)活性的抑制作用.

1 材料与方法

1.1 试验装置、废水特性及接种污泥

本试验采用 SBR 反应器,有机玻璃构成,有效容积为 1.8 L.整个试验过程 DO 值、pH 值和温度值均通过 WTW 便携式探头进行实时测定.缺氧条件抑制时,控制 DO 值均小于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,过曝气试验时,DO 值在 $2.0 \sim 5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内.

本试验用水取自北京市高碑店污水处理厂初沉池出水,其水质情况见表 1.通过投加 NH_4HCO_3 溶液($100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和 NaNO_2 ($100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)分别调节 NH_4^+ -N 浓度和 NO_2^- -N 浓度,pH 值通过 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 和 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 来调节,通过水浴来控制反应器的运行温度.接种污泥取自北京市高碑店污水处理厂二沉回流污泥,具有良好的全程脱氮和去除有机物能力,其回流污泥 MLSS 维持在 $5\,400 \sim 6\,500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内.

表 1 试验用水水质特性

Table 1 Characteristics of real domestic wastewater used in this study

项目	pH	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_x^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PO_4^{3-} -P/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
范围	7.2~7.5	128.4~530.2	33.9~65.4	0.0~0.7	34.2~65.5	1.6~7.1
平均值	7.4	315.4	47.1	0.01	47.7	3.7

1.2 试验方案

抑制试验:本试验所用污泥取自北京市高碑店污水处理厂二沉池回流污泥,控制 4 个 SBR 反应器中 MLSS 分别为 8 000、10 000、15 000 和 20 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其对应编号分别为 A1、A2、A3 和 A4,其

余试验条件均相同.在 4 个 SBR 反应器中,温度为 $16.5 \sim 20.5^\circ\text{C}$,pH 值均为 6.0 ± 0.1 ,DO 浓度均小于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,抑制时间为 48 h,整个抑制过程中并未有 NO_3^- -N 投加和生成,抑制过程中各指标变化情况见表 2.

表 2 抑制过程中各指标变化值

Table 2 Variation in each indicator during the suppression process

MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH 值			$t/^\circ\text{C}$			NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
8 398	6.02	6.24	6.92	16.5	16.7	20.3	36.9	39	46
11 254	6.02	6.27	7.01	16.5	16.5	20.3	42.6	53	66.3
15 998	6.02	6.25	6.82	16.5	16.7	20.3	41.1	52	70.2
19 637	6.02	6.28	6.92	16.5	16.7	20.2	33.8	52	76.6
MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_2^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			FA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			FNA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h	0 h	24 h	48 h
8 398	487.4	473.2	444.8	0.015	0.03	0.2	1.31	0.76	0.14
11 254	473.9	461.5	424	0.017	0.04	0.34	1.28	0.7	0.11
15 998	481.2	467.6	442.2	0.016	0.04	0.23	1.3	0.74	0.17
19 637	480	464.3	451.4	0.014	0.04	0.32	1.3	0.68	0.14

过曝气试验:对上述抑制完成后的污泥用自来水进行清洗,直至污泥中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被清洗完全,分别取清洗后的污泥,对应编号为 O1、O2、O3 和 O4,均控制 MLSS 为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均瞬时进满污水,调节每个反应器中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,控制 DO 浓度为 $2.0\sim5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, t 在 $16.1\sim22.1^\circ\text{C}$,进行过曝气试验.

1.3 分析项目及检测方法

整个试验过程中 MLSS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均采用标准方法进行检测^[20],pH 值、DO 值和 t 值均采用便携式 WTW-Multi 3420 测定仪进行测定.

FNA 和 FA 浓度计算公式分别见式(1)和式(2):

$$\text{FNA} = \frac{[\text{NO}_2^-\text{-N}]}{\exp\left(\frac{-2\,300}{273+t}\right) \times 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中,FNA 表示游离亚硝酸浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $[\text{NO}_2^-\text{-N}]$ 表示亚硝酸盐氮浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; t 表示温度值, $^\circ\text{C}$; pH 表示混合液酸碱度.

$$\text{FA} = \frac{17}{14} \frac{[\text{NH}_4^+\text{-N}] \times 10^{\text{pH}}}{\exp\left(\frac{6\,334}{273+t}\right) + 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中,FA 表示游离氨浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $[\text{NH}_4^+\text{-N}]$ 表示氨氮浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; t 表示温度值, $^\circ\text{C}$; pH 表示

混合液酸碱度.

2 结果与分析

2.1 抑制过程中指标变化特性

图 1 显示了在抑制过程中不同 MLSS 下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度、FA 浓度和 FNA 浓度的变化情况.在相同的抑制时间内,随着 MLSS 的升高($8\,398 \rightarrow 11\,254 \rightarrow 15\,998 \rightarrow 19\,637\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐升高,抑制时间至 48 h 时,其值分别升高至 46、66.3、70.2 和 $76.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其升高值分别为 9.1、23.7、29.1 和 $42.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这是由于在抑制过程中,DO 浓度维持在 $0.01\sim0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其平均值为 $0.09\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水解发酵导致系统中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度升高.在同一污泥浓度下,随着抑制时间的增加, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度逐渐下降.当 MLSS 为 $8\,398\sim19\,637\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,在相同的抑制时段内,随着 MLSS 的升高, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度下降值呈先升高后降低趋势,在 MLSS 为 $11\,254\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度下降值最大为 $49.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.结合表 2 可以看出,随着抑制时间的增加,pH 值均呈现逐渐升高的趋势,抑制 24 h 时,pH 值均增加 0.2 左右,而抑制 48 h 时,pH 值均增加 0.9 左右,在整个抑制过程中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度并未出现明显地下降,而 pH 值也并未出现明显升高,这是由于在缺氧条件下,FNA 浓度为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可完全抑制反硝化菌活性,同时发现该种抑制是可逆的^[18].由于整个抑制过程中并

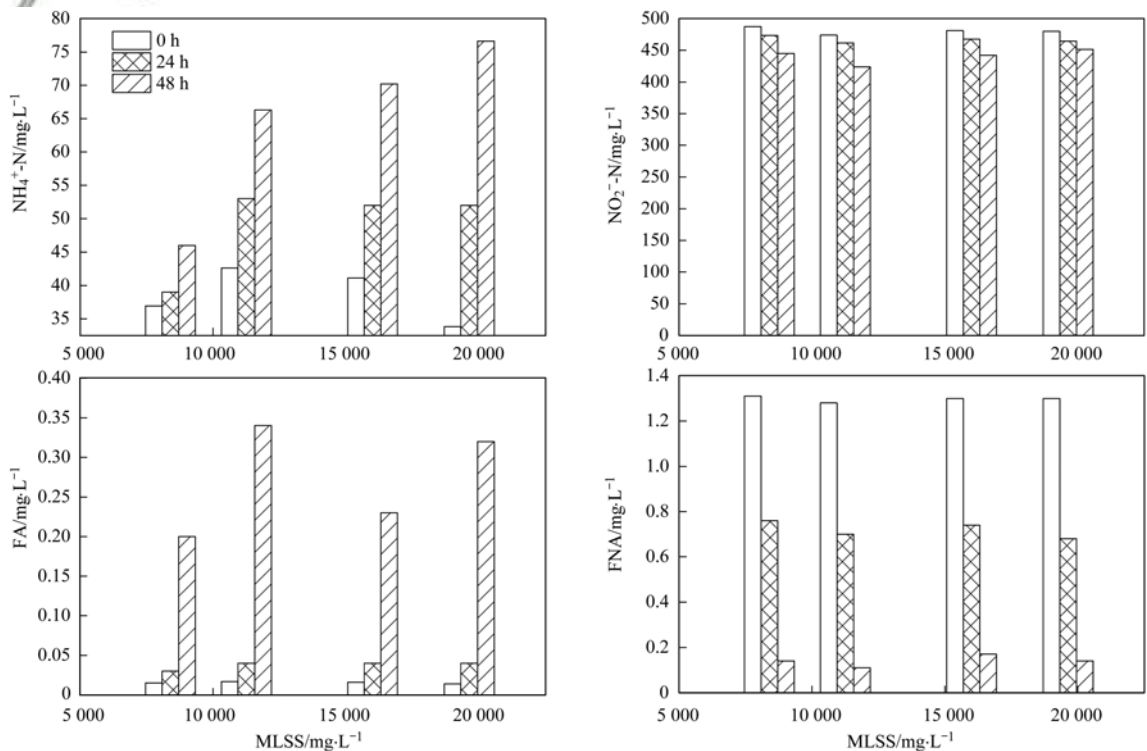


图 1 不同 MLSS 下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、FA 和 FNA 的变化特性

Fig. 1 Evolution of ammonia, nitrite, nitrate, FA, and FNA in the system under different sludge concentrations

未对温度进行控制,因此温度处于不规则变化。

在整个抑制过程中,FA 浓度始终小于 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Qian 等^[21]的研究认为在缺氧条件下,经过 FA 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的抑制, NAR 仅为 10%,因此本试验条件下的 FA 浓度并未参与对硝化菌的抑制过程。而在抑制初始阶段 FNA 浓度均控制在 $1.28 \sim 1.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,抑制 24 h 时, FNA 浓度也均在 $0.68 \sim 0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,在缺氧条件下, FNA 浓度为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对 NOB 产生明显抑制,在好氧条件下 FNA 浓度为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NOB 活性被完全抑制^[2, 22],因此本试验至少在 24 h 内 FNA 是对 NOB 具有强烈抑制作用。

2.2 过曝气 NH_4^+ -N去除特性

图 2 为经过相同 FNA 浓度抑制后的活性污泥,在过曝气下的 NH_4^+ -N去除特性,在整个过曝气过程中 MLSS 维持在 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可以看出,随着曝气时间的增加, NH_4^+ -N 浓度均呈逐渐下降趋势, NH_4^+ -N 去除速率均逐渐升高,其最高值均达到 $4.4 \sim 6.8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,曝气时间越长, NH_4^+ -N 浓度下降趋势和 NH_4^+ -N 去除速率升高趋势愈加明显,说明在缺氧条件下, FNA 对不同 MLSS 下的 AOB 活性均有抑制作用,但在曝气条件下 AOB 活性又逐渐恢复,表明在缺氧条件下, FNA 对 AOB 活性的抑制具有可逆性,这与 Ma 等^[19]的研究结果相似。

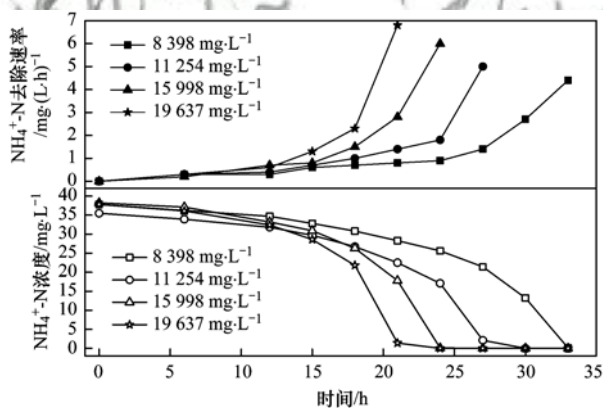


图 2 过曝气下 NH_4^+ -N去除特性

Fig. 2 Ammonia removal characteristics with aeration

在相同曝气时间内, NH_4^+ -N降解量和 NH_4^+ -N去除速率均与抑制时 MLSS 呈正相关性,即随着抑制 MLSS 的升高, NH_4^+ -N降解量和 NH_4^+ -N去除速率均逐渐增加。抑制 MLSS 为 8398 、 11254 、 15998 和 $19637 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,分别曝气至 33、27、24 和 21 h 时, NH_4^+ -N 去除速率分别升高至 4.4 、 5.0 、 6.0 和 $6.8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,说明随着抑制 MLSS 的升高, AOB 活性受抑制程度逐渐降低,这是由于 MLSS 过高会影响传质效果,导致部分微生物并未有效接触

到抑制剂。

2.3 过曝气硝化反应类型变化规律

图 3 描述了不同 MLSS 抑制下,过曝气时系统内 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NAR 变化规律,在 0、168 和 312 h 时静置、排水、进水。

在 MLSS 分别为 8398 、 11254 、 15998 和 $19637 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 抑制后,过曝气至 168 h 时, NH_4^+ -N 均逐渐降解, NO_2^- -N 逐渐累积, NAR 均在 95% 以上, NO_3^- -N 虽处于升高趋势,但趋势并不明显,其最高值分别为 1.9 、 2.1 、 2.4 和 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明在缺氧条件下, FNA 对不同 MLSS ($8000 \sim 20000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下的 NOB 均具有抑制作用。Wang 等^[23]的研究发现通过缺氧 FNA ($\text{FNA} = 1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 旁侧抑制 24 h,实现主流城市污水短程硝化 + 厌氧氨氧化。

在 MLSS 为 8398 、 11254 、 15998 和 $19637 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 抑制后,在分别过曝气 0 ~ 396、0 ~ 396、0 ~ 372 和 0 ~ 168 h 内, NO_2^- -N 浓度均未出现明显降解, NO_3^- -N 浓度均未出现明显升高,其值均小于 $3.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NAR 均大于 92%,说明 NOB 活性并未恢复。当分别过曝气至 420、420、396 和 192 h 时, NO_2^- -N 浓度开始出现明显降解, NO_3^- -N 浓度开始明显升高,其值分别升高至 6.1 、 12.4 、 18.7 和 $6.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NAR 分别下降至 86.1%、74.7%、57.5% 和 86.9%,说明 NOB 活性已开始恢复,随着曝气时间的进一步增加, NO_2^- -N 浓度均迅速下降, NO_3^- -N 浓度均迅速升高,当分别曝气至 468、468、444 和 264 h 时, NO_2^- -N 浓度和 NAR 均降为 0%, NO_3^- -N 浓度均升高至最高,其值分别为 42.6 、 49.9 、 42.9 和 $47.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明在 NO_3^- -N 浓度开始升高后的很短时间内, NO_3^- -N 浓度增长速率迅速升高, NAR 迅速降低。以上现象表明,在缺氧条件下, MLSS 为 $8398 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11254 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 FNA 对 NOB 抑制效果最优,随着抑制 MLSS 的升高, FNA 对 NOB 活性的抑制强度逐渐减弱, Wang 等^[18]的研究认为在缺氧条件下 FNA ($\text{MLSS} = 12000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对 NOB 活性具有强烈抑制作用,这与本试验的结果一致。

3 讨论

本试验研究结果表明在缺氧条件下,控制初始 FNA 浓度为 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MLSS 为 $8000 \sim 20000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,连续抑制 48 h 后,均可以实现短程硝化,在 MLSS 为 $8398 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的抑制,过曝气时间高达 396 h 时, NAR 还高达 93.6%,即使 MLSS 为

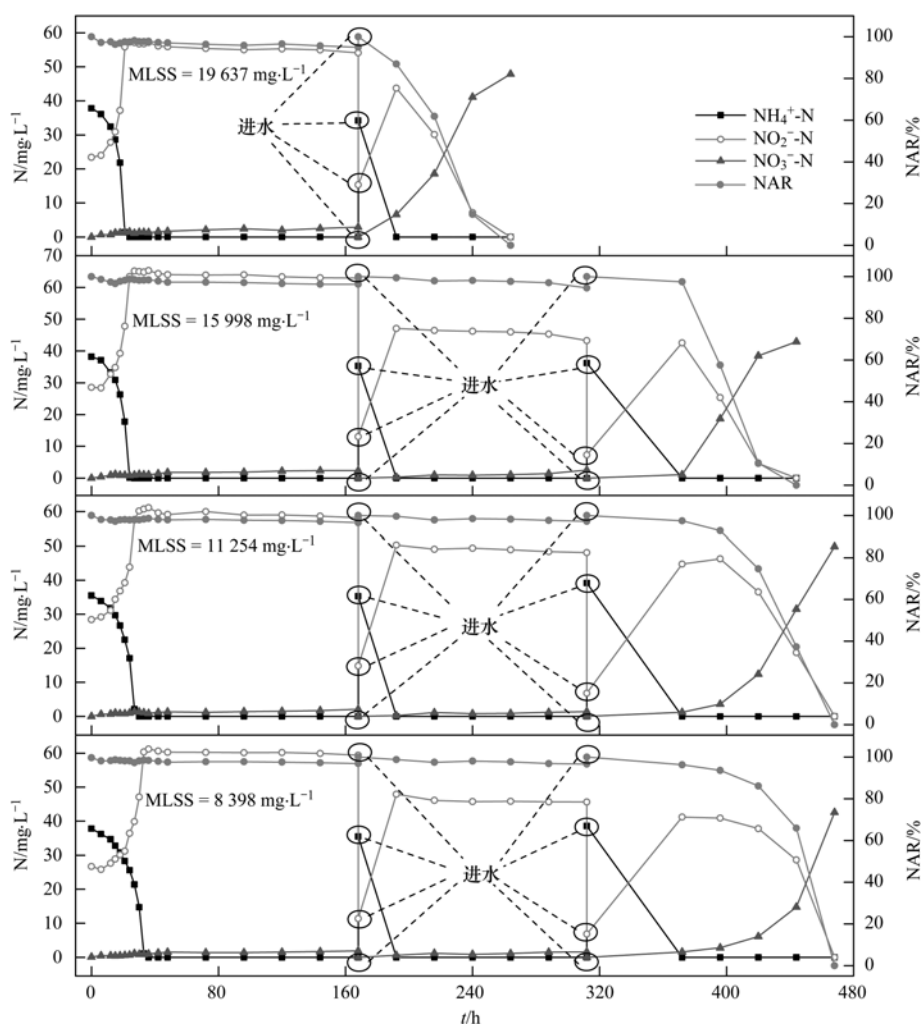


图3 过曝气下, 系统内 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N和NAR变化规律

Fig. 3 Evolution of ammonia, nitrite, nitrate, and NAR in the system with aeration

19 637 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的抑制, 过曝气还可持续 144 h 短程硝化不被破坏. 虽 AOB 活性也受到一定的抑制, 但经过 35 h 的曝气基本完全恢复. 缺氧条件下, FNA 对 AOB 和 NOB 均产生抑制作用, 分析认为可能是由于 FNA 使微生物 DNA 碱基配对发生紊乱, 破坏 DNA 合成, 最终导致微生物致死^[21], 还有可能是由于在缺氧、酸性条件下, FNA 抑制过程中产生了对微生物具有毒害作用的中间或衍生产物, 主要包括^[2]: 亚硝酐(N_2O_3)、二氧化氮(NO_2)、一氧化氮(NO)等小分子物质与还原态硫醇反应形成亚硝基硫醇, 而亚硝基硫醇对微生物具有灭活效应^[24, 25]; N_2O_3 能够引起蛋白质变性^[24]; NO_2 的脂质过氧化作用会导致细胞膜的破坏^[26]; 而随着抑制 MLSS 的升高, FNA 对 AOB 和 NOB 活性的抑制均减弱, 这可能是由于抑制物浓度一定, MLSS 过高, 导致抑制物传质效率降低, 使得部分微生物并未接触到抑制物, 也有可能是由于 MLSS 升高, 必然导致微生物数量增多, 而抑制物浓度并未变化, 使得单位数量的微生物接触

的抑制物量减少, 造成抑制效果不佳, 具体原因还需进一步研究确定.

同时本试验研究只考察最高 MLSS 约为 20 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, FNA 对硝化菌活性的影响, 进一步对更高 MLSS 下, FNA 对硝化菌活性的影响具有实际意义, 若在更高 MLSS 下, 经过缺氧 FNA 抑制后可以稳定实现短程硝化, 将会大大降低城市污水实现短程硝化费用, 为实现城市污水厌氧氨氧化技术提供有力理论依据和支撑.

4 结论

(1) 缺氧条件下 FNA (初始 $\text{FNA} = 1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对反硝化菌活性具有明显抑制作用.

(2) 缺氧 FNA (初始 $\text{FNA} = 1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 抑制 48 h) 对 NOB 活性的抑制作用强于对 AOB 活性的抑制, 且对 AOB 活性的抑制具有可逆性.

(3) 缺氧条件下, 随着抑制 MLSS 的升高 (8 000 ~ 20 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), FNA 对 NOB 活性的抑制效果逐渐减弱, 在抑制 MLSS 最高 (19 637 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

时,过曝气 168 h 内, NAR 大于 92%.

参考文献:

- [1] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 4145-4149.
- [2] 委燕, 王淑莹, 马斌, 等. 缺氧 FNA 对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的选择性抑菌效应[J]. 化工学报, 2014, **65**(10): 4145-4149.
- Wei Y, Wang S Y, Ma B, *et al.* Selective inhibition effect of free nitrous acid on ammonium oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria under anoxic condition[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(10): 4145-4149.
- [3] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal[J]. Water Science & Technology, 2008, **57**(3): 383-388.
- [4] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances[J]. Bioresource Technology, 2016, **200**: 981-990.
- [5] Yang Y D, Zhang L, Shao H D, *et al.* Enhanced nutrients removal from municipal wastewater through biological phosphorus removal followed by partial nitrification/anammox[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, **11**(2): 8.
- [6] 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.
- [7] 孙洪伟, 于雪, 李维维, 等. 游离氨抑制 *Nitrobacter* 活性动力学试验[J]. 化工学报, 2018, **69**(10): 4386-4393.
- Sun H W, Yu X, Li W W, *et al.* Inhibitory kinetics of free ammonia on *Nitrobacter*[J]. CIESC Journal, 2018, **69**(10): 4386-4393.
- [8] 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 等. 游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1075-1081.
- Sun H W, Lü X T, Wei X F, *et al.* Synergetic inhibitory effect of free ammonia and aeration phase length control on the activity of nitrifying bacteria[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1075-1081.
- [9] 王凡, 陆明羽, 殷记强, 等. 反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3782-3788.
- Wang F, Lu M Y, Yin J Q, *et al.* Treatment of old landfill leachate via a denitrification-partial nitrification-ANAMMOX process[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3782-3788.
- [10] Zeng W, Zhang Y, Li L, *et al.* Control and optimization of nitrifying communities for nitrification from domestic wastewater at room temperatures[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, **45**(3): 226-232.
- [11] Zhang T, Wang B, Li X Y, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **335**: 330-337.
- [12] Tokutomi T. Operation of a nitrite-type airlift reactor at low DO concentration[J]. Water Science & Technology, 2004, **49**(5-6): 81-88.
- [13] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. Water Research, 2009, **43**(3): 563-572.
- [14] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effective and robust partial nitrification to nitrite by real-time aeration duration control in an SBR treating domestic wastewater[J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(9): 979-985.
- [15] Blackburne R, Yuan Z G, Keller J. Demonstration of nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater[J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 2166-2176.
- [16] 吕心涛. 游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)对亚硝酸盐氧化菌(NO₂-氧化菌)活性的影响试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017. 47-48.
- Lv X T. Research on the effect of free ammonia (FA) and free nitrous acid (FNA) on the nitrite-oxidizing bacteria (NO₂-oxidizing bacteria) activity[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017. 47-48.
- [17] 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.
- [18] Wang Q L, Ye L, Jiang G M, *et al.* Side-stream sludge treatment using free nitrous acid selectively eliminates nitrite oxidizing bacteria and achieves the nitrite pathway[J]. Water Research, 2014, **55**: 245-255.
- [19] Ma B, Yang L, Wang Q L, *et al.* Inactivation and adaptation of ammonia-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria when exposed to free nitrous acid[J]. Bioresource Technology, 2017, **245**: 1266-1270.
- [20] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [21] Qian W T, Peng Y Z, Li X Y, *et al.* The inhibitory effects of free ammonia on ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria under anaerobic condition[J]. Bioresource Technology, 2017, **243**: 1247-1250.
- [22] 孙洪伟, 于雪, 李维维, 等. 游离亚硝酸抑制硝化杆菌属(*Nitrobacter*)活性动力学研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(11): 4246-4254.
- Sun H W, Yu X, Li W W, *et al.* Inhibitory kinetics of free nitrous acid on *Nitrobacter*[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(11): 4246-4254.
- [23] Wang Z B, Zhang S J, Zhang L, *et al.* Restoration of real sewage partial nitrification-anammox process from nitrate accumulation using free nitrous acid treatment[J]. Bioresource Technology, 2018, **251**: 341-349.
- [24] Yoon S S, Coakley R, Lau G W, *et al.* Anaerobic killing of mucoid pseudomonas aeruginosa by acidified nitrite derivatives under cystic fibrosis airway conditions[J]. Journal of Clinical Investigation, 2006, **116**(2): 436-446.
- [25] Heaselgrave W, Andrew P W, Kilvington S. Acidified nitrite enhances hydrogen peroxide disinfection of *Acanthamoeba*, bacteria and fungi[J]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2010, **65**(6): 1207-1214.
- [26] Halliwell B, Hu M L, Louie S, *et al.* Interaction of nitrogen dioxide with human plasma antioxidant depletion and oxidative damage[J]. FEBS Letters, 1992, **313**(1): 62-66.

CONTENTS

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