

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, 刘杰, 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, 殷司佳, 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, 邹磊, 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 ..... 阚可聪, 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)

# 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\*

(北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为探究剩余污泥碱性发酵产物作为碳源对硝化过程及性能的影响,建立了以污泥碱性发酵混合物作为碳源的生物脱氮(BNR)系统.投加初期,氨氧化菌(AOB)和亚硝态氮氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)活性均受到抑制;16 d后AOB活性开始迅速恢复,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>活性仍受到抑制,比硝态氮积累速率(SNaPR,以N/VSS计)由初始的0.179 1 g·(g·d)<sup>-1</sup>下降至0.007 8 g·(g·d)<sup>-1</sup>,系统内亚硝积累率由8.12%上升至91.42%并维持稳定.将污泥发酵混合物分离为污泥发酵液和污泥发酵底泥,考察添加3种不同类型的发酵产物对硝化效果良好的全程硝化污泥硝化活性的影响.结果表明,投加污泥碱性发酵混合物和投加碱性发酵液的实验组,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>活性皆有所下降,SNaPR由初始的0.179 3 g·(g·d)<sup>-1</sup>分别下降至0.151 0 g·(g·d)<sup>-1</sup>和0.161 7 g·(g·d)<sup>-1</sup>;投加发酵底泥的实验组,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的活性有所上升,SNaPR由0.179 3 g·(g·d)<sup>-1</sup>上升至0.186 4 g·(g·d)<sup>-1</sup>.因此,当利用污泥发酵混合物和发酵液作为碳源时,在硝化过程中,能抑制系统内NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的活性,实现短程硝化过程,有利于加速硝化速率及节省该类型碳源的投加.

**关键词:** 污泥发酵混合物; 污泥发酵液; 城市生活污水; 硝化细菌活性; 短程硝化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1418-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201909017

## Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance

QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, PENG Yong-zhen\*

(National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The aim of the present study was to investigate the effect of alkaline sludge fermentation products as a carbon source on the nitrification process and performance. During the operation of a biological nitrogen removal (BNR) system with sludge fermentation mixture as the carbon source, the activities of ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and nitrite-oxidizing bacteria (NOB) were inhibited at the beginning. After 16 days, the activity of AOB began to recover rapidly, but the activity of NOB was still inhibited. The specific nitrate production rate (SNaPR, N/VSS) decreased from 0.179 1 g·(g·d)<sup>-1</sup> to 0.007 8 g·(g·d)<sup>-1</sup>. At the same time, the nitrite accumulation rate increased from 8.12% to 91.42% and remained stable. The sludge fermentation mixture was separated into sludge fermentation liquid and sludge fermentation sediment. The changes in nitrification activity by adding different types of fermentation products were investigated. The results showed that the activity of NOB decreased in the experimental group fed with the sludge fermentation mixture and the fermentation liquid. The SNaPR decreased from an initial 0.179 3 g·(g·d)<sup>-1</sup> to 0.151 0 g·(g·d)<sup>-1</sup> and 0.161 7 g·(g·d)<sup>-1</sup>, respectively. In the experimental group fed with fermentation sediment, the activity of NOB increased. SNaPR rose from 0.179 3 g·(g·d)<sup>-1</sup> to 0.186 4 g·(g·d)<sup>-1</sup>. Therefore, the activity of the NOB can be inhibited when the sludge fermentation mixture and the fermentation liquid are used as a carbon source in the nitrification process. In addition, the short-range nitrification process can be realized, which is beneficial to accelerating the reaction speed and saving investment in this type of carbon source.

**Key words:** sludge fermentation mixture; sludge fermentation liquid; municipal wastewater; nitrifying bacteria activity; short-cut nitrification

目前城市生活污水脱氮除磷主要依靠生物法,而生物法所面临的两个主要问题:一为原水碳源不足,无法满足脱氮除磷的需求;二是剩余污泥产量大,大量的剩余污泥需要得到妥善的处理处置.污泥发酵是污泥减量化和稳定化的有效技术之一,通过控制污泥龄使得污泥发酵维持在水解酸化阶段可以积累短链脂肪酸(SCFAs),SCFAs为生物脱氮除磷的优势碳源<sup>[1,2]</sup>,而之前的研究证明了碱性污泥发酵可以强化SCFAs的生成量<sup>[2,3]</sup>.

传统的生物脱氮过程中生活污水中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

由AOB转化为NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,再由NOB转化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,之后由反硝化菌以NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N或者NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为电子受体,利用碳源转化为N<sub>2</sub>完成生物脱氮过程.通常所说的短程硝化是将硝化过程控制在亚硝化阶段,能够节约40%的碳源和25%的氧气消耗并提高反硝化效率<sup>[4-6]</sup>,也可以为自养生物脱氮方式厌氧氨氧化提

收稿日期: 2019-09-03; 修订日期: 2019-10-13

基金项目: 北京市科技计划项目(Z181100005518006)

作者简介: 邱圣杰(1995~),男,硕士,主要研究方向为污泥发酵与城镇污水深度处理, E-mail: 783976155@qq.com

\* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

供底物<sup>[7, 8]</sup>. 短程硝化的实现关键是如何在硝化过程中抑制系统中 NOB 的活性, 目前已有的控制条件有温度<sup>[5]</sup>、pH<sup>[9, 10]</sup>、溶解氧<sup>[11]</sup>、游离氨 (FA)<sup>[12]</sup>、游离亚硝酸 (FNA)<sup>[13]</sup>、低污泥龄<sup>[14, 15]</sup>和过程控制<sup>[16~18]</sup>等.

本实验室之前的研究, 将污泥发酵混合物作为碳源, 不需要采用离心的方式获取发酵液, 也不需要去除发酵液中的氮和磷, 且能够满足系统内脱氮除磷的需要<sup>[19~21]</sup>. 已有的研究在使用碱性污泥发酵产物(污泥发酵液和污泥发酵混合物)作为碳源时, 反应器内都出现了亚硝积累的现象<sup>[19~22]</sup>. 本文建立投加污泥发酵混合物作为碳源的 BNR 系统, 在运行过程中系统内逐步出现亚硝积累现象并在 23 d 后维持稳定, 为进一步探究剩余污泥碱性发酵产物对硝化细菌的影响, 采用批次实验, 将剩余污泥碱性发酵物分离为发酵混合物、发酵液和发酵底泥, 分别研究其对 AOB 和 NOB 的影响, 探究系统内短程硝化出现的原因.

## 1 材料与方法

### 1.1 投加污泥发酵混合物作为碳源的 BNR 系统

投加污泥发酵混合物作为碳源的 BNR 系统(F-SBR)如图 1 所示, 剩余污泥碱性发酵罐和 F-SBR 为两个有效体积为 10 L 的 SBR. 剩余污泥碱性发酵罐为半连续式反应器, 体积为 10 L, 污泥停留时间 SRT 为 6~8 d, pH 控制在  $10 \pm 0.2$ , 温度为 30℃, 通过控制污泥发酵在水解酸化阶段积累 SCFAs, 根据 SRT 每周期排放剩余污泥发酵混合物至储泥罐并加入等体积新鲜的剩余污泥. F-SBR 利用污泥发酵混合物作为碳源, 每周期 12 h, 采用厌氧-好氧-缺氧的运行方式, 缺氧段投加污泥发酵混合物作为碳源进行反硝化, 排水比为 50%. 反应器内装有 pH 探头和 DO 探头, 好氧段维持溶解氧在  $1.5 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 反应器 MLSS 维持在  $(4\,930 \pm 124) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

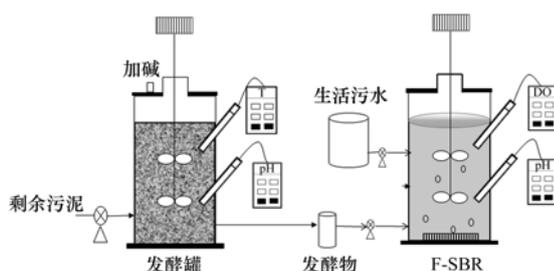


图 1 投加污泥发酵物作为碳源的 BNR 系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the BNR system with sludge fermentation mixture as the carbon source

### 1.2 实验用水及污泥来源

发酵所用的剩余污泥为北京高碑店污水处理厂

的回流污泥, 发酵前进行浓缩, MLSS 为  $(10\,512 \pm 1\,219) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , MLVSS 为  $(5\,604 \pm 5\,000) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 实验所使用的种泥取自高碑店污水处理厂硝化活性良好的活性污泥, 具有良好的全程硝化效果, 污泥浓度为  $(4\,930 \pm 396) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , MLVSS 为  $(3\,300 \pm 124) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 实验用水为实际生活污水, 来自北京工业大学家属区化粪池, 实验所使用的污泥发酵混合物取自运行稳定的碱性剩余污泥发酵罐, 具体参数如表 1 所示.

表 1 生活污水与污泥发酵物基本特性

Table 1 Characteristics of the municipal wastewater and WAS fermentation products

参数	生活污水	污泥发酵混合物
pH	7.3	9.8
COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	164	2\,998.7
SCFAs/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	42.4	1\,284.6
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	59.4	257
$\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	0
$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.3	0.6

### 1.3 批次实验方法

批次实验所采用的装置为有效体积为 1.5 L 的锥形瓶, 瓶内装有连接流量计的曝气头, 使用气泵向锥形瓶内提供充足的曝气量, 保证整个实验过程中处于氧饱和状态 ( $\text{DO} > 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 批次实验的种泥均采用来自高碑店污水处理厂的硝化效果良好的全程硝化污泥, 用蒸馏水离心 ( $4\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 5 min), 清洗 3 遍, 温度维持在 25℃. 对剩余污泥碱性发酵物进行初步的分离, 使用低速离心机对污泥发酵混合物在  $4\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的转速下进行分离, 得到发酵液与发酵底泥, 取出发酵液的发酵底泥离心洗泥 3 次, 用蒸馏水稀释至原本体积, 并涡旋混合均匀得到与污泥发酵混合物等污泥浓度的发酵底泥. 实验共设置 4 组反应器, 1 组为空白对照组, 2 组加入体积比为 3% 的污泥发酵混合物, 3 组加入体积比为 3% 的污泥发酵液, 4 组加入体积比为 3% 的稀释后的发酵底泥. 首先模拟反应器内运行进行厌氧搅拌 3 h, 加入配置的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液 ( $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{NaNO}_2$  溶液 ( $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液调节碱度, 在饱和溶解氧 ( $\text{DO} > 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 下分别对 AOB 和 NOB 进行活性的检测.

### 1.4 分析方法

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  均采用国家规定的标准方法测定<sup>[23]</sup>; pH 值、DO 和温度采用 Multi340i-WTW 测定; MLSS、MLVSS 采用重量法测定; SCFAs 采用 Agilent 6890N 气相色谱仪测定, 采用 Agilent DB-WAXetr ( $30 \text{ m} \times 0.53 \text{ mm} \times 0.001 \text{ mm}$ ) 色谱柱, 氮气做载气, 流速为  $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 检测器

为氢火焰检测器(FID);活性污泥系统中的AOB、NOB(nitrospira和nitrobacter)采用qPCR技术(SYBR Green法)进行检测,采用土壤DNA快速试剂盒(MP Biomedicals, OH, USA)对泥样中的DNA

进行提取,使用MX3000P实时定量PCR仪(Stratagene, La Jolla, CA)进行测量,利用不同特异性引物和扩增程序进行PCR测试,具体各菌所用的特异性引物和退火温度如表2所示.

表2 qPCR中所采用的的引物和退火温度

Table 2 The qPCR primers and annealing temperatures

菌种	引物	序列	退火温度/°C	文献
AOB	amoA-1F	GGGGTTTCTACTGGTGGT	55	[24]
Nitrospira	NSR 1113F	CCTGCTTTCAGTTGCTACCG	53	[25]
Nitrobacter	FGPS872f	CTAAACTCAAAGGAATTGA	51	[26]

### 1.5 计算方法

(1) 氨氮氧化率(AOR)的计算方法

$$AOR = \frac{[NH_4^+-N]_{始} - [NH_4^+-N]_{末}}{[NH_4^+-N]_{始}} \times 100\%$$

式中, $[NH_4^+-N]_{始}$ 为硝化开始时反应器内的 $NH_4^+-N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $[NH_4^+-N]_{末}$ 为硝化结束时反应器内的 $NH_4^+-N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ).

(2) 硝态氮积累率(NAR)的计算方法

$$NAR = \frac{[NO_3^- - N]_{末}}{[NH_4^+-N]_{始} + [NO_2^- - N]_{始}} \times 100\%$$

式中, $[NO_3^- - N]_{末}$ 为硝化结束后反应器内的 $NO_3^- - N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $[NH_4^+-N]_{始}$ 为硝化开始时反应器内的 $NH_4^+-N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $[NO_2^- - N]_{始}$ 为硝化开始时反应器内的 $NO_2^- - N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ).

(3) 比氨氧化速率(SAOR)的计算方法

$$SAOR = \frac{([NH_4^+-N]_{始} - [NH_4^+-N]_{末}) \times 1440}{NLVSS \times t_N}$$

式中, $[NH_4^+-N]_{始}$ 为硝化开始时反应器内的 $NH_4^+-N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $[NH_4^+-N]_{末}$ 为硝化结束时反应器内的 $NH_4^+-N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ );MLVSS为反应器内的污泥质量浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $t_N$ 为硝化反应时间(min).

(4) 比硝态氮积累速率(SNaPR)的计算方法

$$SNaPR = \frac{([NO_3^- - N]_{末} - [NO_3^- - N]_{始}) \times 1440}{NLVSS \times t_N}$$

式中, $[NO_3^- - N]_{末}$ 为硝化结束后反应器内的 $NO_3^- - N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $[NO_3^- - N]_{始}$ 为硝化开始时反应器内的 $NO_3^- - N$ 浓度( $mg \cdot L^{-1}$ );MLVSS为反应器内的污泥质量浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ); $t_N$ 为硝化反应时间(min).

(5) FA 计算方法

$$FA = \frac{1.214 \times [NH_4^+-N] \times 10^{pH}}{e^{6344/(273+T)} + 10^{pH}}$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 投加污泥发酵混合物作为碳源的BNR系统硝化过程中的短程硝化现象

为解决城市生活污水处理厂普遍存在的碳源不足而外加碳源和剩余污泥处理处置的问题,本课题组建立了污泥厌氧发酵物强化低碳氮比生活污水脱氮除磷的BNR系统,碱性污泥发酵产物不经过离心分离过程直接作为碳源进行反硝化.

图2所示为硝化过程中添加剩余污泥碱性发酵混合物作为碳源的SBR反应器(F-SBR)在长期运行过程中好氧末氮转化途径,系统在投加污泥发酵混合物作为碳源后,硝化性能下降,好氧末有 $NH_4^+-N$ 剩余.在15d后系统开始逐渐适应污泥发酵混合物的投加,硝化活性开始逐渐恢复,并且反应器内开始出现亚硝积累现象并维持稳定,稳定后反应器内好氧末的平均亚硝积累率维持在87.4%.图3为反应器初始阶段(Day1)、恢复阶段(Day15)与短程硝化稳定维持阶段(Day43)的AOB和NOB活性进行对比,可以发现AOB的活性已经得到了一定的恢复,NOB的活性则受到了明显的抑制,硝化过程

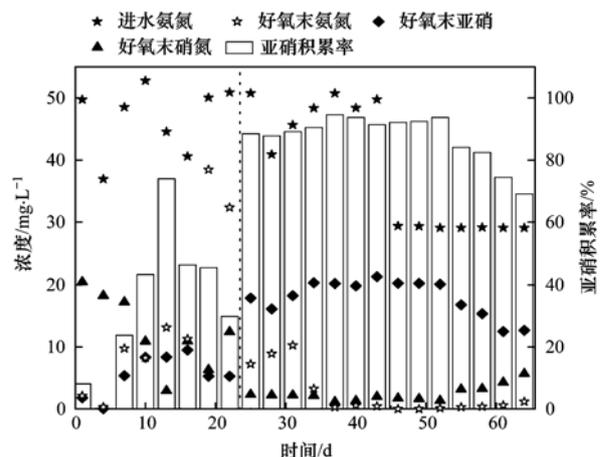


图2 F-SBR中的亚硝积累情况

Fig. 2 Accumulation of nitrite in F-SBR

中硝态氮积累率 (NAR) 由初始的 73.03% 降低至 8.89%, 比硝态氮积累速率 (SNaPR) 由初始的  $0.1791 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  下降至  $0.0078 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ . 图 4 为反应器内长期 AOB 和 NOB 种群丰度情况 (以干污泥计), 反应器内投加污泥发酵物后 AOB 和 NOB 的丰度均呈现先下降后上升的趋势, 反应器在适应污泥发酵物的投加后, AOB 由  $6.08 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  增长至  $9.15 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ , 种群丰度上升; Nitrospria 由  $1 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  下降至  $4.79 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ , Nitrobacter 由  $1.3 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  下降至  $3.94 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ , NOB 的基因拷贝数均下降一个数量级, 种群丰度下降. 这也与反应器内的反应情况吻合, 系统在适应污泥发酵物的投加后 AOB 活性恢复且快速富集, 而 NOB 的活性则长期受到抑制, 种群丰度明显下降.

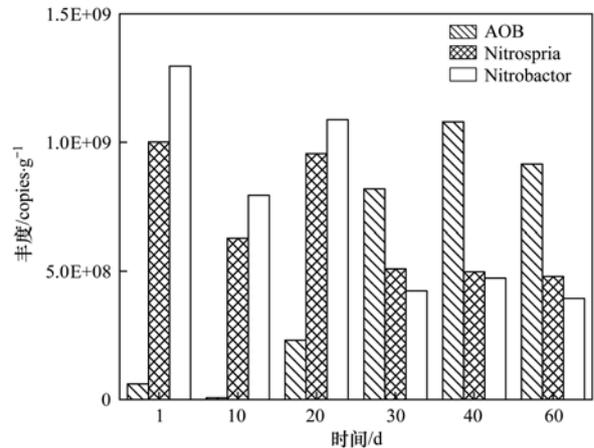


图 4 F-SBR 中 AOB 和 NOB 种群丰度

Fig. 4 Bacterial abundance of AOB and NOB in F-SBR

### 2.2 不同污泥发酵产物对硝化细菌硝化活性的影响

通过对剩余污泥发酵产物进行分离, 探究了不同类型产物对活性污泥硝化细菌硝化活性的影响. 4 组批次实验在硝化过程中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度随时间的变化情况如图 5 所示. 可以看出, 投加污泥发酵混合物和污泥发酵液后, 由于发酵物和发酵液中的氨氮没有进行预处理去除, 1 组和 2 组在投加发酵产物后氨氮的浓度和 pH 值均有所上升. 由于硝化反应需要碱度, 硝化细菌适宜生长在 pH 7.2 ~ 8.0 的弱碱性环境当中, AOB 和 NOB 对碱度环境的要求不同, 其最适范围分别为 7.9 ~ 8.2 和 7.2 ~ 7.6, 在 pH 值升高到 8.0 以上时会出现亚硝酸盐积累现象<sup>[27]</sup>, 同时 pH 值会对系统内的 FA 和 FNA 的浓度产生显著影响. 本研究中 1 ~ 4 实验组的 pH 值分别为 7.33、7.60、7.59 和 7.35, pH 值范围相差不大. 有报道指出 FA 能对系统内的 AOB 和 NOB 造成选择性抑制, 实现短程硝化<sup>[28]</sup>, 但经过计算, 1 组和 2 组内的 FA 浓度仅为  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 并没有达到 FA 抑制的浓度. 硝化活性良好的活性污泥在硝化结束后并未直接产生亚硝态氮积累现象, 但 1 组 (空白) 与 4 组 (投加发酵底泥) 的氨氮降解率要高于 2 组 (投加污泥发酵混合物) 和 3 组 (投加

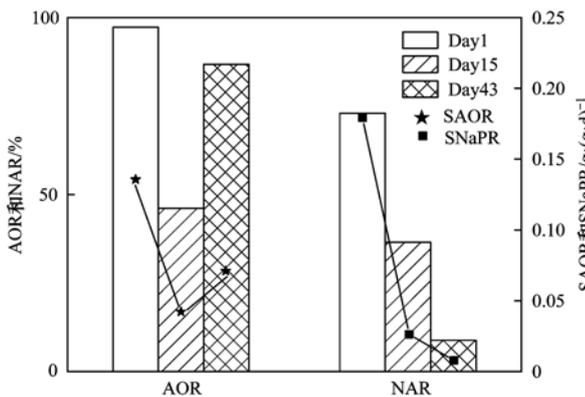


图 3 F-SBR 中 Day1、Day15 及 Day43 的 AOB 和 NOB 活性对比

Fig. 3 Comparison of AOB and NOB activity in Day 1, Day 15, and Day 43 in F-SBR

在之前的研究中, Yuan 等<sup>[20]</sup> 利用污泥厌氧发酵物强化低碳氮比生活污水脱氮除磷, 运行过程中在好氧段出现了 40% 的亚硝积累现象; Liu 等<sup>[19]</sup> 投加污泥发酵混合物为碳源在以 A-O-A 运行的 SBR 反应器中达到 90% 以上的亚硝积累率并维持稳定. 在利用剩余污泥碱性发酵产物作为碳源的长期实验过程中均产生了亚硝态氮积累的现象, 因此有必要探究不同类型的污泥发酵产物的投加对 AOB 和 NOB 活性的具体影响.

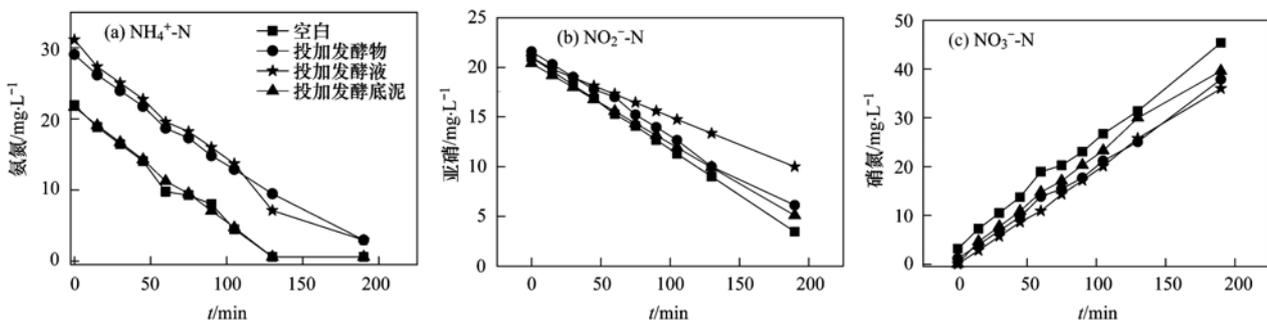


图 5 投加不同污泥发酵产物下污泥  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的变化

Fig. 5 Changes of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ , and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in sludge fed with different sludge fermentation products

污泥发酵液),而1组(空白)的硝氮生成量要高于剩余3组投加污泥发酵产物的实验组。

进一步考察不同污泥发酵产物对活性污泥系统硝化性能的影响,分别考察系统内的氨氮氧化率、硝态氮积累率、比氨氧化速率、比硝态氮生成速率的变化情况(图6)。1组在未投加污泥发酵产物的情况下,原始的AOR和SAOR(以N/VSS计)分别为97.29%和 $0.1357 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,NAR和SNaPR分别为73.03%和 $0.1793 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,AOB和NOB活性良好。2~4实验组污泥的AOR分别为67.34%、77.14%和97.26%,SAOR分别为0.1236、0.1510

和 $0.1310 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,可以看出2组(投加发酵混合物)AOB的活性有所下降;3组(投加发酵液)AOB的活性反而有所上升;4组(投加发酵底泥)AOB的活性相较于原始污泥则没有太大变化。污泥的NAR分别为49.47%、49.43%和71.34%,SNaPR分别为 $0.1510$ 、 $0.1617$ 和 $0.1864 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ ,可以看出2组(投加发酵混合物)和3组(投加发酵液)的实验组中,硝态氮积累率和比硝态氮积累速率都有了明显的下降,NOB的活性受到了抑制,而4组(投加发酵底泥)比硝态氮积累速率反而有所上升,证明NOB的活性相比于其他实验组有所提高。

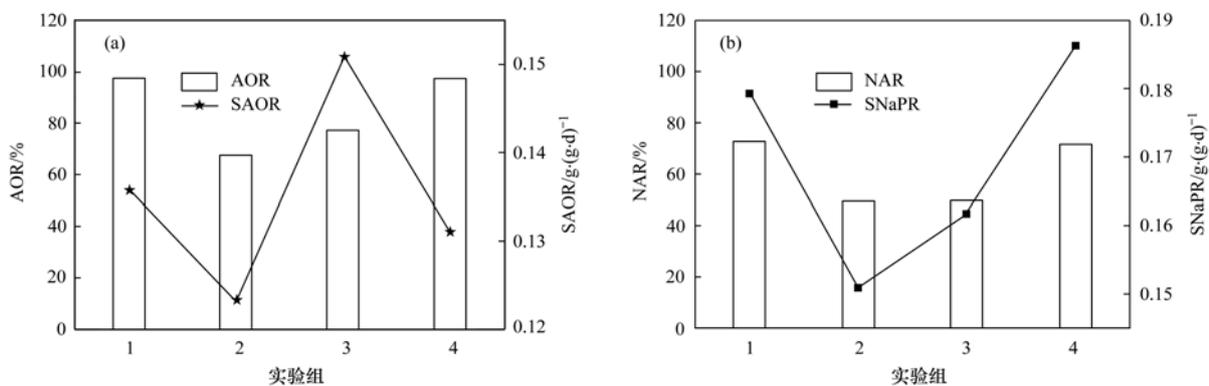


图6 投加不同污泥发酵产物下污泥反应速率的变化

Fig. 6 Changes of reaction rate in sludge fed with different sludge fermentation products

硝化效果良好的全程污泥在投加不同剩余污泥碱性发酵产物后,投加污泥发酵混合物的实验组中AOB和NOB的活性均有所下降,投加污泥发酵液的实验组中AOB的活性提高而NOB的活性下降,投加污泥发酵底泥的实验组AOB活性略有下降,NOB的活性反而有所提高。

### 2.3 投加污泥发酵混合物作为碳源的BNR系统的短程硝化现象分析

Ji等<sup>[29]</sup>的研究指出,其预处理去除氮和磷的污泥发酵液中乙酸、丙酸、蛋白质和碳水化合物是主要的有机成分,发酵液中同时含有 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{7+}$ 等金属离子并分别进行了测定,发现其对硝化细菌都几乎无影响,不是实验中产生亚硝态氮积累的主要原因,而其在批次实验中发现投加腐殖酸能够得到更高的亚硝积累率,所以提出腐殖酸是实验中短程硝化的主要原因。但刘瑾瑾等<sup>[30]</sup>进行了用腐殖酸对活性污泥进行短期预处理,实验发现腐殖酸预处理在短程期内对AOB的活性基本没有影响,在NOB活性较高时不会影响NOB的活性。

Yuan等<sup>[20]</sup>的研究指出,污泥发酵混合物的投加促进了厌氧释磷的过程,导致在好氧段聚磷菌过量利用溶解氧进行吸磷与NOB竞争溶解氧,使得NOB一直处于抑制状态。但在本实验中,污泥发酵

混合物作为碳源仅在好氧段结束后投加,并未促进厌氧释磷的过程,因此这并不是反应器内产生短程硝化现象的原因。

在本实验中,并未对氮和磷进行预处理去除也未对发酵混合物进行离心分离,pH值范围始终维持在7.32~7.6,亦不是导致系统内AOB和NOB活性差异的主要因素,通过计算得出FA的浓度远没有达到NOB的抑制浓度。发酵底泥中所含有的主要菌种为水解酸化菌<sup>[3]</sup>,投加至反应器内会引起反应器中出现污泥发酵现象,3组的实验结果证明,发酵底泥的投加并未抑制NOB的活性,反而其活性还有所升高。污泥发酵混合物和污泥发酵液的投加则确实抑制了NOB的活性,区别是污泥发酵混合物的初期投加会对AOB也造成抑制,而发酵液由于去除了污泥发酵混合物中的底泥,AOB的活性反而有所上升而抑制了NOB的活性。因此在本实验投加污泥发酵混合物作为碳源的BNR系统中污泥发酵混合物的初期投加使得系统的硝化活性恶化,而系统逐渐驯化适应后AOB能够更快地恢复并得到富集,而NOB在系统内一直受到抑制,因此系统中能够实现稳定的短程硝化。

### 3 结论

(1)用污泥发酵混合物和发酵液作为碳源在其

硝化过程中, SNaPR 由初始的  $0.1791 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  下降至  $0.0078 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ , 系统内 NOB 的活性受到抑制, 能够实现短程硝化过程 (NAR = 87.4%), 有利于加速硝化速率及节省该类型碳源的投加。

(2) 以剩余污泥碱性发酵物为碳源的 BNR 系统在投加污泥发酵混合物初期会导致硝化活性恶化, 在系统逐步适应后 (16 d) AOB 活性恢复而 NOB 的活性受到抑制从而实现系统内稳定的短程硝化效果。

(3) 投加污泥发酵混合物和发酵液后在硝化过程中 NOB 活性下降, SNaPR 由初始的  $0.1793 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  分别下降至  $0.1510 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  和  $0.1617 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ , 而投加污泥发酵混合物同时会降低 AOB 的活性, SAOR 由初始的  $0.1357 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  下降至  $0.1236 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ , 发酵液则对 AOB 活性没有显著影响。

(4) 投加发酵底泥后在硝化过程中对 AOB 活性没有显著影响, 但系统内的 SNaPR 由初始的  $0.1793 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  上升至  $0.1864 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ , NOB 的活性反而有所提高。

(5) 系统内短程硝化产生的原因主要为剩余污泥碱性发酵过程中产生物质对 AOB 和 NOB 造成的选择性抑制。

#### 参考文献:

- [1] Li X, Chen H, Hu L F, *et al.* Pilot-scale waste activated sludge alkaline fermentation, fermentation liquid separation, and application of fermentation liquid to improve biological nutrient removal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45** (5): 1834-1839.
- [2] Ahn Y H, Speece R E. Elutriated acid fermentation of municipal primary sludge[J]. *Water Research*, 2006, **40** (11): 2210-2220.
- [3] Yuan Y, Wang S Y, Liu Y, *et al.* Long-term effect of pH on short-chain fatty acids accumulation and microbial community in sludge fermentation systems[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **197**: 56-63.
- [4] Gu S B, Wang S Y, Yang Q, *et al.* Start up partial nitrification at low temperature with a real-time control strategy based on blower frequency and pH[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **112**: 34-41.
- [5] Guo J H, Peng Y Z, Huang H J, *et al.* Short-and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 471-479.
- [6] Yang Q, Peng Y Z, Liu X H, *et al.* Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(23): 8159-8164.
- [7] 马斌. 城市污水连续流短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺与技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
Ma B. Nitrification and anammox achieved in continuous reactors treating sewage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [8] Li J W, Li J L, Gao R T, *et al.* A critical review of one-stage anammox processes for treating industrial wastewater: optimization strategies based on key functional microorganisms[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **265**: 498-505.
- [9] 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.
- [10] Zhang D C, Su H, Antwi P, *et al.* High-rate partial-nitrification and efficient nitrifying bacteria enrichment/out-selection via pH-DO controls: efficiency, kinetics, and microbial community dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **692**: 741-755.
- [11] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Long-term effect of dissolved oxygen on partial nitrification performance and microbial community structure[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (11): 2796-2802.
- [12] 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 等. 游离氨(FA)对氨氧化菌(AOB)活性抑制动力学试验[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4294-4301.  
Sun H W, Yu X, Gao Y X, *et al.* Inhibitory kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB)[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4294-4301.
- [13] Zhou Y, Oehmen A, Lim M, *et al.* The role of nitrite and Free Nitrous Acid (FNA) in wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4672-4682.
- [14] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 85-98.
- [15] Pollice A, Tandoi V, Lestingi C. Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2541-2546.
- [16] Guo J H, Yang Q, Peng Y Z, *et al.* Biological nitrogen removal with real-time control using step-feed SBR technology[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **40**(6): 1564-1569.
- [17] 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.
- [18] 高春娣, 孙大阳, 安冉, 等. 间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3271-3278.  
Gao C D, Sun D Y, An R, *et al.* Stability of nitrification combined with limited filamentous bulking under intermittent aeration[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3271-3278.
- [19] Liu J J, Yuan Y, Li B K, *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor with sludge fermentation products as carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **244**: 1158-1165.
- [20] Yuan Y, Liu J J, Ma B, *et al.* Improving municipal wastewater nitrogen and phosphorus removal by feeding sludge fermentation products to Sequencing Batch Reactor (SBR)[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **222**: 326-334.
- [21] 袁悦, 刘瑾瑾, 彭永臻. 污泥厌氧发酵物强化低碳氮比生活污水脱氮除磷[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, **51**(8): 14-19.  
Yuan Y, Liu J J, Peng Y Z. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal from municipal waste water by sludge anaerobic fermentation products[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(8): 14-19.
- [22] Zheng X, Zhou W N, Wan R, *et al.* Increasing municipal

- wastewater BNR by using the preferred carbon source derived from kitchen wastewater to enhance phosphorus uptake and short-cut nitrification-denitrification [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **344**: 556-564.
- [23] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [ D ]. American Public Health Association Washington, DC, 1995.
- [24] Wang S Y, Wang Y, Feng X J, *et al.* Quantitative analyses of ammonia-oxidizing Archaea and bacteria in the sediments of four nitrogen-rich wetlands in China [ J ]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(2): 779-787.
- [25] Geets J, De Cooman M, Wittebolle L, *et al.* Real-time PCR assay for the simultaneous quantification of nitrifying and denitrifying bacteria in activated sludge [ J ]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **75**(1): 211-221.
- [26] Degrange V, Bardin R. Detection and counting of nitrobacter populations in soil by PCR [ J ]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(6): 2093-2098.
- [27] Cho K H, Kim J O, Kang S, *et al.* Achieving enhanced nitrification in communities of nitrifying bacteria in full-scale wastewater treatment plants via optimal temperature and pH [ J ]. *Separation and Purification Technology*, 2014, **132**: 697-703.
- [28] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 335-342.
- [29] Ji Z Y, Chen Y G. Using sludge fermentation liquid to improve wastewater short-cut nitrification-denitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 8957-8963.
- [30] 刘瑾瑾, 袁悦, 李夕耀, 等. 腐殖酸预处理对活性污泥中硝化菌活性的影响 [ J ]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, **49**(8): 15-19.
- Liu J J, Yuan Y, Li X Y, *et al.* Effect of pre-treatment with humic acids on the activity of nitrifying bacteria in activated sludge [ J ]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, **49**(8): 15-19.



## 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)