

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)

钢铁工业排放颗粒物中碳组成的特征 张进生,吴建会,马威,冯银厂(3102)

常州市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)

兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 尉媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)

基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)

基于 wavelet-SVM 的 PM₁₀ 浓度时序数据预测 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)

典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 芦会杰(3178)

杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)

黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)

漓江地表水体有机碳来源 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)

地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)

人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑悦(3235)

长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 陈成龙,高明,木志坚,倪九派,祁乐(3254)

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)

新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹,潘咏(3273)

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明(3281)

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 向蓉,李巧玉,喻毅,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)

石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽,陶益,张丽(3302)

不同湿地模型中根系微生物的多样性 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)

基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 孟婷,杨宏(3339)

基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王晓静(3369)

酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)

模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心(3385)

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 张婷,吴鹏,沈耀良,闫刚,徐乐中, Samwine Thomas(3399)

硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘沂,姚鹏程,张文静(3406)

不同 TOC/NH₄⁺-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)

盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)

胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛烷磺酸(PFOS)的影响 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)

不同施肥方式下紫色土 N₂O 与 NO_x 的排放特征 胡磊,刘韵,朱波(3442)

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)

模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺正(3463)

长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王扬扬,王伯勋(3483)

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 张彦军(3497)

西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)

小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd²⁺ 活性 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎(3519)

交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)

中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 刘巍,田金平,陈吕军(3544)

《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

不同 TOC/NH₄⁺-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

王凡^{1,2}, 刘凯^{1,2}, 林兴^{1,2}, 周正^{1,2}, 李祥^{1,2*}, 黄勇^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 采用 SBR 厌氧氨氧化反应器, 研究了不同 TOC 与 NH₄⁺-N 比值对厌氧氨氧化反应器的脱氮效能的长短期影响。结果表明, 在有机物短期影响时, 反应器所能承受的最大 TOC/NH₄⁺-N 为 1.4, 总氮去除速率可达 0.26 kg·(m³·d)⁻¹。长期影响下, 在 TOC/NH₄⁺-N 小于 0.4 时, 反应器可获得最高脱氮效能, 总氮去除率为 0.34 kg·(m³·d)⁻¹, TOC/NH₄⁺-N 大于 0.4 后, 反应器脱氮效能持续降低, 并且短期内厌氧氨氧化菌难以迅速恢复活性。利用 qPCR (定量 PCR) 技术对长期影响前后反应器内菌群落变化做定量分析, 结果表明随着有机物的增加, 反应器中的 ANAMMOX 菌数量从 2.9 × 10¹¹ copies·mL⁻¹ 减少至 3.15 × 10¹⁰ copies·mL⁻¹, 在 TOC/NH₄⁺-N 大于 1.6 的环境中, NH₄⁺-N 未能由厌氧氨氧化菌去除, 厌氧氨氧化菌不能表现出生物活性。此时测得反硝化菌数量为 3.0 × 10⁹ copies·mL⁻¹, 反应器中的 NO₂⁻-N 绝大部分由反硝化去除, 虽然反硝化菌数量远少于 ANAMMOX 菌, 但能表现出远超 ANAMMOX 菌的活性。

关键词: 厌氧氨氧化; 反硝化; 有机物; TOC/NH₄⁺-N; 定量 PCR

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3415-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201701185

Effect of Different TOC to NH₄⁺-N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process

WANG Fan^{1,2}, LIU Kai^{1,2}, LIN Xing^{1,2}, ZHOU Zheng^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}, HUANG Yong^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The effect of the TOC to NH₄⁺-N ratio on nitrogen removal rate in an ANAMMOX sequencing batch reactor was studied for the short term and long term. Short-term results showed the maximum TOC/NH₄⁺-N that ANAMMOX could afford was 1.4. At the same time, the rate of nitrogen removal was 0.26 kg·(m³·d)⁻¹. The maximum nitrogen removal rate of 0.34 kg·(m³·d)⁻¹ was obtained when TOC/NH₄⁺-N was less than 0.4 in the long-term experiment. Whereas the nitrogen removal rate of the reactor decreased continuously when TOC/NH₄⁺-N exceeded 0.4, and it was difficult to recover the activity of the ANAMMOX bacteria in the short term. qPCR results showed that the amount of ANAMMOX bacteria dropped from 2.9 × 10¹¹ copies·mL⁻¹ to 3.15 × 10¹⁰ copies·mL⁻¹ with the increase of organics. When TOC/NH₄⁺-N exceeded 1.6, NH₄⁺-N could hardly be removed by the ANAMMOX bacteria, which were severely inhibited. The number of denitrifying bacteria was 3.0 × 10⁹ copies·mL⁻¹; meanwhile, most of the NO₂⁻-N in the reactor was removed via denitrification.

Key words: ANAMMOX; denitrification; organic matter; TOC/NH₄⁺-N; quantitative PCR

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 是一种在厌氧条件下, 以 NH₄⁺-N 作为电子供体, 亚硝态氮作为电子受体将氮素转化为氮气的自养微生物反应。它具有不需曝气, 不需外加有机碳源, 污泥产量少的特点, 从而可以降低水厂运行费用, 适用于处理垃圾渗滤液、污泥消化液等低碳氮比废水, 具有广阔的应用前景^[1-3]。

然而实际中很少有废水完全不含有有机物, 有机物的存在会使环境中异养微生物大量繁殖, 作为自养型微生物的 ANAMMOX 菌生长缓慢, 倍增时间长达 11d^[4, 5], 异养菌的增殖势必会与 ANAMMOX 菌争夺底物, 从而影响 ANAMMOX 脱氮的效能。对于有机物的抑制浓度, 各学者的研究结果不尽相同,

Chamchoi 等^[6]发现在 COD > 300 mg·L⁻¹ 时会对 ANAMMOX 菌产生不可恢复的抑制。Molinuevo 等^[7]利用半连续流 USAB 反应器发现 ANAMMOX 与反硝化反应可以共存于同一反应器, 逐步提升有机物浓度后发现当 COD > 112 mg·L⁻¹ 时即会抑制 ANAMMOX 并使反硝化成为反应器内优势反应。吕绛^[8]在接种有反硝化菌和 ANAMMOX 菌的 UASB 反应器中, 进水葡萄糖浓度与总氮浓度比值为 1:1

收稿日期: 2017-01-21; 修订日期: 2017-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401103); 国家自然科学基金项目 (51478284, 51408387); 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目

作者简介: 王凡 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理理论与控制, E-mail: wangfan@post.usts.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lixiang68411364@163.com

时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与总氮的去除率分别可达 95.4%、99.3% 和 94.3%。多数研究均以 COD 作为有机物的衡量指标^[9-11], 而 TOC 作为一种测定更为便捷和准确的手段^[12], 更能直接反映出水体中有机物质的含量, 因此研究不同 TOC 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比, 对于探明 ANAMMOX 菌在不同有机物浓度下的脱氮效能具有重要意义。

本文采用序批式实验, 利用人工配水, 以乙酸钠作为有机碳源, 逐步提高进水 $m(\text{TOC})/m(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 下文简作 C/N, 分别研究了短期和长期运行下不同碳氮比对反应器脱氮效能的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

有机物对 ANAMMOX 效能短期影响的实验利用带盖螺纹玻璃血清瓶进行, 有效体积为 250 mL。长期实验使用有效体积为 800 mL 的带盖螺纹玻璃血清瓶。置于有温控的气浴振荡摇床中, 摇床盖有遮光布避光, 温度设为 35℃, 振荡频率为 100 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.2 接种污泥与废水水质

实验用的颗粒泥取自于本课题组长期稳定运行的 ANAMMOX 反应器, 外观呈橙红色, 平均粒径在 2.5 mm 左右, MLVSS/MLSS 为 0.58。实验用水采用人工模拟废水, 组成与浓度为 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$): NH_4Cl 100, NaNO_2 130, MgCl_2 300, CaCl_2 100, NaHCO_3 1 000, KH_2PO_4 50, KHCO_3 200。微量元素 I、II 浓度分别为: 1.0 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 、1.25 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。微量元素 I 组成 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 为: FeSO_4 5, EDTA 5, 微量元素 II 组成 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 为: EDTA 5, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.043, $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24, H_3BO_4 0.014, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.2。

1.3 分析项目及方法

各项指标测定方法均按照文献[13]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$: *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 紫外分光光度法; MLVSS/MLSS: 重量法; pH 值采用 pHS-3E 型酸度计测定; TOC 和 IC 采用德国耶拿 Multi N/C 3100 分析仪测定。

1.4 实验方法

1.4.1 短期实验

采用 4 个带盖螺纹血清瓶, 有效体积 250 mL, 每个瓶中等量接种湿重 0.75 g ANAMMOX 颗粒污

泥。使用人工 SBR 方式运行, 进出水体积均为 250 mL。一个运行周期 20 h, 包括: 进水 5 min; 振荡箱内反应 19.75 h; 静置沉淀 5 min; 排水 5 min。进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 控制在 1.3 左右, 1~4 号反应瓶内初始 C/N 分别为 0.8、1.2、1.6、2.4, 并逐渐提升 C/N。

1.4.2 长期影响实验

采用 2 个带盖螺纹血清瓶做平行实验, 有效体积 800 mL, 每个瓶中等量接种湿重 2 g ANAMMOX 颗粒污泥。使用人工 SBR 方式运行, 进出水体积均为 800 mL。一个运行周期 12 h, 包括: 进水 5 min; 振荡箱内反应 11.75 h; 静置沉淀 5 min; 排水 5 min。进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 控制在 1.3 左右, 在同一个反应瓶内, 不断提高投加有机物的量, 使 C/N 分别为 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0。

1.5 DNA 的提取

在长期影响的实验中, 分别在 C/N 为 0.8、1.2、2.0 阶段末期从反应瓶中取出少量泥样。按照土壤基因组 DNA 提取试剂盒说明书的操作方法对上述泥样进行 DNA 的提取。随后取提取好的 DNA 溶液 5 μL 用 1% 的琼脂进行凝胶电泳检测。其余样品置于 -20℃ 冰箱保存。

1.6 实时定量 PCR

为了准确定量菌群数量在实验中的变化, 在实验过程中分别提取了少量泥样, 对 ANAMMOX、AOB、DB、TB(全菌) 进行定量 PCR 测定, 各菌种的引物、基因序列和操作程序如表 1 所示。采用 20 μL 反应体系, 其中包括 0.8 μL 上游引物, 0.8 μL 下游引物, 2 μL 基因组 DNA, 0.4 μL ROX II, 2 μL Dntp, 10 μL SYBR Premix Ex Taq II, 6 μL 灭菌水。每个样品重复 3 次, 取其平均值。将提取好的基因组 DNA 采用 PCR 扩增后进行纯化回收, 提取的 DNA 样品用 0.8% 琼脂糖凝胶电泳进行检测, 然后送至上海生物工程有限公司进行测序, 制作标准品。将制作好的标准品梯度稀释后进行荧光定量 PCR (ABI7500, 美国) 检测, 得到标准曲线, 各标准曲线 R^2 均大于 0.995。

2 结果与讨论

2.1 有机物对厌氧氨氧化的短期影响

如图 1 所示, 在 1 号反应器中, 初始 C/N 为 0.8, 经过 5 个周期的运行, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度从 31.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度从 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进一步降

表 1 各菌种 Real-time PCR 引物及反应条件

Table 1 Primers and parameters of Real-time PCR

菌种	引物	序列	程序	文献
ANAMMOX	Amx809F	GCCGTAACGATGGGCACT	预变性 95℃, 2minutes; 变性 95℃, 15 s; 退火温度 58℃, 30 s, 延伸温度 72℃, 30 s, 40 个循环	[14]
	Amx1066R	AACGTCTCAGCACGAGCTG		
AOB	amoAF	GGGTTTCTACTGGTGGT	预变性 95℃, 5minutes; 变性 95℃, 30 s; 退火温度 58℃, 30 s, 延伸温度 72℃, 30 s, 40 个循环	[15]
	amoAR	CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC		
DB	NirsF	G TSAACG TSAAGGARACSGG	预变性 95℃, 2minutes; 变性 95℃, 15 s; 退火温度 62℃, 30 s, 延伸温度 72℃, 30 s, 40 个循环	[16]
	NirsR	GASTTCGGRTGSGTCTTGA		
TB	Bac16F	CCTACGGGAGGCAGCAG	预变性 95℃, 5minutes; 变性 95℃, 30 s; 退火温度 57℃, 30 s, 延伸温度 72℃, 30 s, 40 个循环	[17]
	Bac16R	TTACCGCGGCTGCTGGCAC		

为 0。由于产生的 NO₃⁻-N 只来自于 ANAMMOX 反应,这说明在少量有机物的作用下,ANAMMOX 活性有所增加。总氮去除速率 (NRR) 升至 0.24 kg·(m³·d)⁻¹ 左右。待有机物消耗完毕以后,提高 C/N 至 1.0,反应器脱氮效能与之前相当。2 号反应器中初始 C/N 为 1.2。在前 3 个周期内出水 NO₂⁻-N 浓度进一步降低至 0,而出水 NO₃⁻-N 浓度依旧升高,此时反应器中可能已有少量反硝化菌生长,并且有研究^[18,19]表明反硝化菌会优先利用 NO₂⁻-N。在第 6 个周期提升 C/N 至 1.4,出水 NH₄⁺-N 升高,达到 10 mg·L⁻¹ 左右,出水 NO₃⁻-N 浓度较 C/N 为 1.2 时有所降低,说明在此 C/N 下,添加的有机物对

ANAMMOX 反应产生了较弱的影响,而此时出水 NO₂⁻-N 依然为 0,表明添加有机物的情况下,反硝化菌优先于 ANAMMOX 菌将剩余的 NO₂⁻-N 利用完。在 C/N 由 1.6 提升至 2.0 的 3 号反应器中,随着有机物的增加,反硝化菌大量增殖,由于异养反硝化菌世代时间远远短于 ANAMMOX 菌^[11],后者在与反硝化菌争夺共同基质 NO₂⁻-N 时处于劣势, NH₄⁺-N 去除率从第 1 周期的 97.70% 降至第 7 周期的 73.84%, NRR 从 0.27 kg·(m³·d)⁻¹ 降低至 0.24 kg·(m³·d)⁻¹ 左右,继续提高 C/N 至 2.0, NRR 下降 22.46% 至 0.18 kg·(m³·d)⁻¹。在 C/N 为 2.4 的 4 号反应器中,可以明显观察到高浓度有机物对

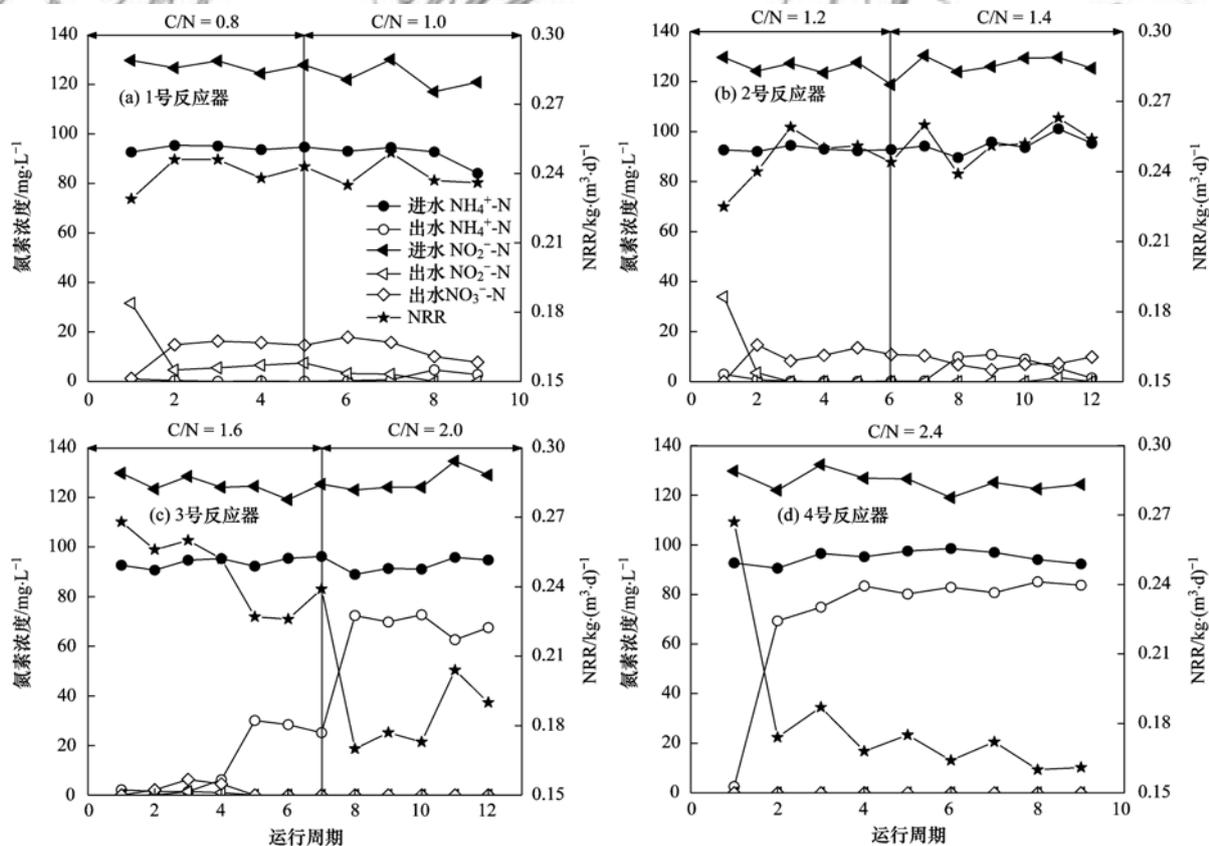


图 1 各反应器不同 C/N 下脱氮效能

Fig. 1 Nitrogen removal rates under different C to N ratios in the reactor

ANAMMOX 反应的迅速抑制,在前两个周期内, NH_4^+ -N去除率即从 97.72% 大幅下降至 23.45%,并且在随后的周期内继续缓慢降低,反硝化菌在反应器中占据主导地位,在第 2 周期至第 9 周期内平均对 TN 去除的贡献占到了 75%,ANAMMOX 反应被严重抑制.

从图 2 中可以看出在有机物的短期作用下,反应器的 TN 去除率呈先上升再下降的趋势,在 C/N 为 1.4 时, TN 去除率达到最大的 93.8%. 而 C/N 为 1.6 时, TN 去除率为 92.8%,超过 1.6 后 TN 去除率迅速下降,故认为 C/N 为 1.6 是有机物短期冲击下,ANAMMOX 反应器所能承受的最大 C/N,大于 1.6 的 C/N 将使 ANAMMOX 菌在与反硝化菌的竞争中无法获得足够的 NO_2^- -N 而被迅速抑制,反应器中的优势反应转变成反硝化反应,大量 NH_4^+ -N 无法被去除,从而导致 TN 去除率迅速下降.

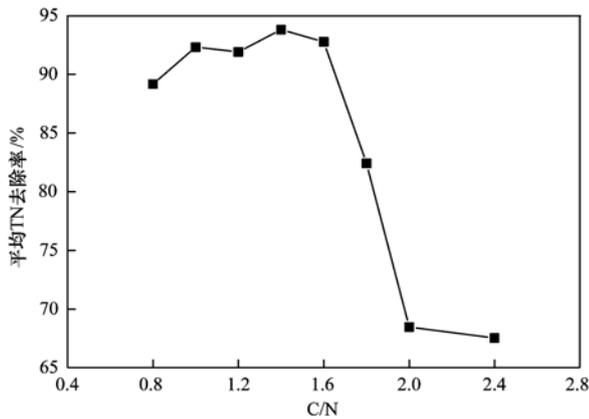


图 2 不同 C/N 下反应器平均 TN 去除率
Fig. 2 Total nitrogen removal efficiency for the different C to N ratios

2.2 有机物对厌氧氨氧化的长期影响

在长期实验中,首先不加入有机物,反应器的 NRR 稳定在 $0.25 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右,从第 9 周期起以乙酸钠作为碳源,投加 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TOC,使 C/N 达到 0.4. 如图 3 所示,此时反应器中出水的 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 都出现了同步下降的现象. 可以推测,ANAMMOX 反应得到强化,这与管勇杰等^[20]的研究结论一致,在乙酸钠浓度低于 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,即 TOC/NH_4^+ -N 小于 0.44 时,有机物对 ANAMMOX 有促进作用,李泽兵等^[21]发现适量的乙酸钠可以将 ANAMMOX 菌活性提高 27.05%. 此阶段 NO_3^- -N 的减少可能是由于其被反硝化菌作为底物消耗掉,此时反应器的 NRR 升至整个周期中的最高值 $0.34 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 继续提高 C/N 至 0.8,出水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度出现了上升, NO_2^- -N 浓度的上升有以下 3 种可能:一是由于 ANAMMOX 反应在此 C/N 下开始被抑制,消耗的 NO_2^- -N 减少. 二是由于反应器中少量 AOB 在微氧存在的条件下将 NH_4^+ -N 转化为 NO_2^- -N. 三是 ANAMMOX 反应产生的少量 NO_3^- -N 在有机物不足的情况下被不完全反硝化成 NO_2^- -N,导致出水 NO_2^- -N 浓度升高. 当 C/N 提高至 1.2 时,出水 NH_4^+ -N 浓度进一步升高,此 C/N 比下,ANAMMOX 反应仅提供了 5.9% 的 NH_4^+ -N 去除,反硝化菌成为反应器中的优势菌群. 在此阶段中,反应器出水 pH 由进水时的 7.1 ~ 7.5 升高至 8.3 ~ 8.7,已经超过了 ANAMMOX 菌的最佳生长 pH^[22],此时 FA (游离氨) 为 $26.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,也高于 Waki 等^[23]研究的 FA 抑制阈值,过高的 FA 对

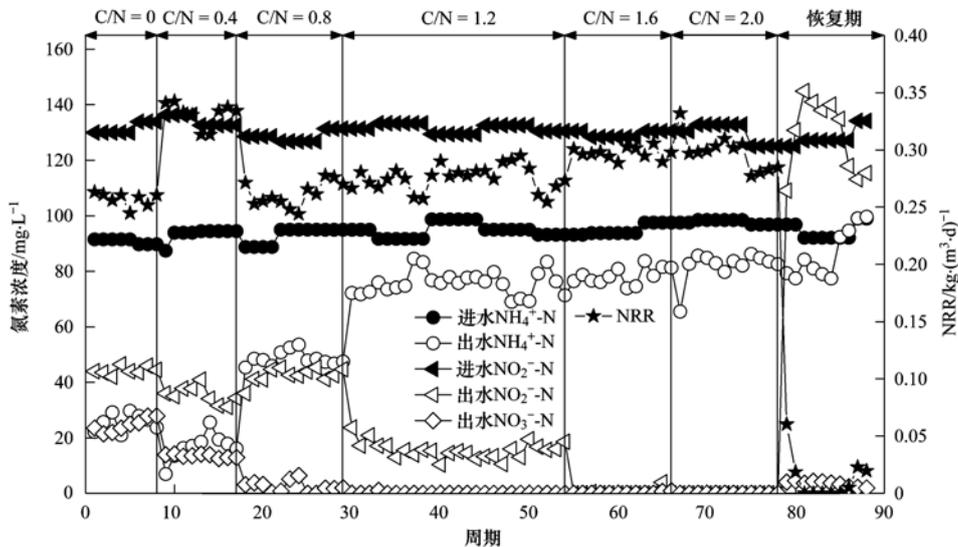


图 3 有机物长期影响下反应器脱氮效能

Fig. 3 Nitrogen removal rates of the reactor under the effect of organic matter in the long term

ANAMMOX 菌具有毒性,会产生不可逆的抑制^[24]. 在 C/N 为 1.6 和 2.0 时反应器的脱氮能力变化很小,由于出水 NO₂⁻-N 进一步被反硝化去除, NRR 略有提升至 0.30 kg·(m³·d)⁻¹ 左右,99.5% 的 NH₄⁺-N 减少由亚硝化贡献, ANAMMOX 完全失去活性,此时开始恢复实验. 在恢复期停止投加有机物,由于反应器中存在的少量 AOB 将 NH₄⁺-N 转化为 NO₂⁻-N, 出水 NO₂⁻-N 超过了进水 NO₂⁻-N 浓度. 第 83 周期后,不考虑 AOB 转换的 NH₄⁺-N, 则出水 NH₄⁺-N 浓度几乎没有发生变化,说明有机物长期抑制以后,在短期内 ANAMMOX 难以恢复生物活性.

2.3 长期实验前后污泥表观性状对比

从图 4 中可以明显地看出在 C/N 不断提高的过程中,污泥形态与颜色的变化. 图 4(a) 中污泥基本呈颗粒状,色泽红润. 图 4(b) 和 4(c) 可以看出在

C/N 为 0.8 时,反应器内已经出现了许多灰色的絮状反硝化污泥,与 ANAMMOX 菌争夺基质,故该 C/N 下反应器脱氮效能开始下降. 随着有机物浓度的增加,小的颗粒污泥裂解成更细碎的生物质,颜色发生了从红色—灰色—黑灰色再到黑色的转变. 直到 C/N 为 2.0 的末期,反应器内的污泥基本转变为细小的黑色反硝化污泥,原本稍大一些的颗粒污泥反而变得更大,呈土黄色. 对这些较大的颗粒污泥剖开并用微距相机进行拍摄,可以看到包裹分层现象,如图 5 所示,在原本红色的 ANAMMOX 污泥 a 外,包裹了一层黑色的 b 层,最外面为土黄色的 c 层. 推测 b 层可能是反硝化菌层,出现这种现象可能是由于在有机物加入的情况下,反硝化菌大量增殖,部分菌体附着在 ANAMMOX 颗粒污泥表面,形成黑色的 b 层.

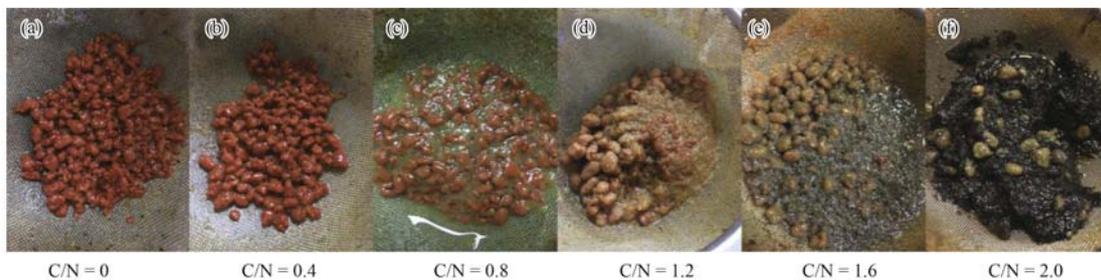


图 4 有机物长期影响下各 C/N 末期污泥表观性状

Fig. 4 Apparent character of sludge at the end of different C to N ratios under the effect of organic matter in the long term

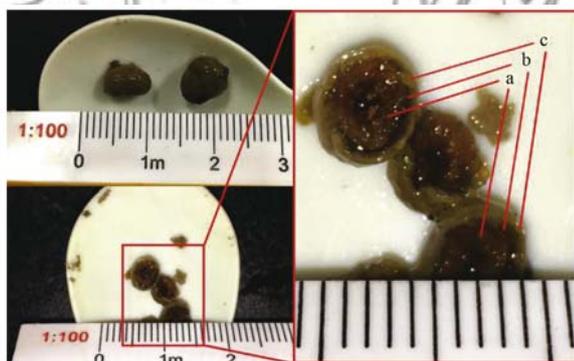


图 5 C/N 为 2.0 末期颗粒污泥剖面

Fig. 5 Sectional view of granular sludge at the end of C to N ratio of 2.0

2.4 功能菌群落变化分析

为了探究反应器中功能菌群的变化情况,在长期影响实验分别进行到 C/N 为 0.8、1.2、2.0 末期时取少量泥样进行 qPCR 定量分析. 在 C/N 为 2.0 末期时,观察到反应器内壁附着生长了一层绒状污泥,刮取了少量泥样进行 qPCR 分析. 从图 6 可以看出,ANAMMOX 菌基因拷贝数随着 C/N 的增加不断减少,在 C/N 为 2.0 末期的基因拷贝数为 3.15 ×

10¹⁰ copies·mL⁻¹, 仍远高于同期 DB 的 3.0 × 10⁹ copies·mL⁻¹, 此时反应器几乎没有 ANAMMOX 活性,却有强烈的反硝化活性,这与有些学者^[25, 26]认为 ANAMMOX 菌数量在 10⁸ ~ 10⁹ copies·mL⁻¹ 即可表现出 ANAMMOX 活性的结论不同. 说明高浓度 TOC 的环境对 ANAMMOX 菌活性有严重的影响,在 TOC 浓度为 200 mg·L⁻¹ 时, ANAMMOX 菌已被抑制失活,反硝化菌数量虽然远少于 ANAMMOX 菌,但活性很高. 从图 6 和图 7 中可知 C/N 为 0.8 末期时 ANAMMOX 菌基因拷贝数为 2.9 × 10¹¹ copies·mL⁻¹, 占全菌的 61.7%, 而在 1.2 末期和 2.0 末期迅速降至 23% 和 2.6%, 这也可以解释长期影响实验中反应器 ANAMMOX 能力迅速下降的原因. 随着 C/N 的增加 AOB 在全菌中的占比在下降,但在着壁生长的菌群中 AOB 却较多,说明其有易附着生长的特性,所以图 5 中的 c 层可能是亚硝化菌层. 在 C/N 为 2.0 的环境中 AOB 仍有一定的活性,而 ANAMMOX 菌几乎没有体现出活性,说明 AOB 在相同环境中对有机物的耐受力强于 ANAMMOX 菌,并且着壁生长的特性也有利于 AOB

持留在反应器中,不易随出水被带出反应器。

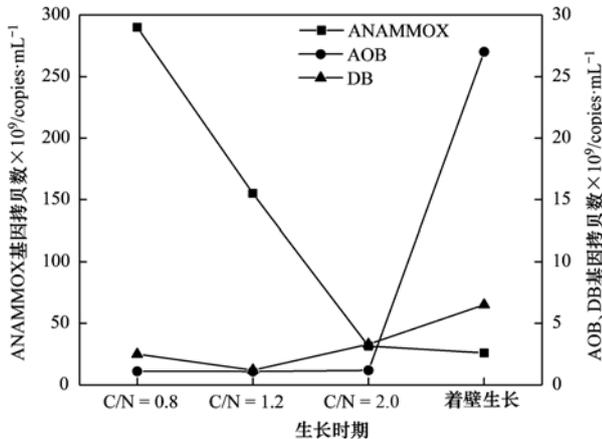


图 6 不同时期各菌种基因拷贝数变化

Fig. 6 Gene copy numbers for different bacteria at different times

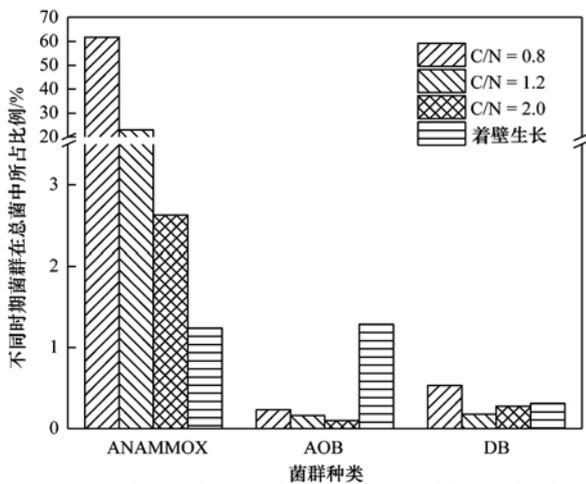


图 7 不同时期各菌种在全菌种占比

Fig. 7 Percentages of different bacteria in the total bacteria

3 结论

(1) 批次实验表明在有机物短期影响下, ANAMMOX 反应器在 C/N 为 1.4 时获得最大脱氮效能, NRR 为 $0.26 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。ANAMMOX 反应器难以承受 C/N 大于 1.6 的有机物冲击影响, 反应器脱氮效能由于异养反硝化菌大量增殖而迅速下降至 $0.17 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2) 长期实验表明 ANAMMOX 反应器在 C/N 为 0.4 时能与反硝化菌获得最大协同脱氮能力, NRR 可达 $0.34 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 并且在有机物长期抑制后, 难以迅速恢复。

(3) qPCR 结果表明随着有机物的增加, 反应器中的 ANAMMOX 菌数量急剧从 C/N 为 0.8 末期的 $2.9 \times 10^{11} \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$ 减少至 C/N 为 2.0 末期的 $3.15 \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$, 并且几乎未表现出生物活

性。反硝化菌虽然数量远少于 ANAMMOX 菌, 但在有大量有机物存在的环境中能表现出远超 ANAMMOX 菌的活性。

参考文献:

- [1] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1995, **16**(3): 177-183.
- [2] van Dongen U, Jetten M S M, van Loosdrecht M C M. The sharon[®]-anammox[®] process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. Water Science & Technology, 2001, **44**(1): 153-160.
- [3] Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, *et al.* Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors[J]. Water Research, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [4] 陈重军, 冯宇, 汪瑶琪, 等. 厌氧氨氧化反应影响因素研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(2): 346-352.
Chen C J, Feng Y, Wang Y Q, *et al.* Research progress in influence factor of anammox reaction [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(2): 346-352.
- [5] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **50**(5): 589-596.
- [6] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(9): 3331-3336.
- [7] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents; effect of organic matter content on process performance [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(7): 2171-2175.
- [8] 吕绛. ANAMMOX 与反硝化协同反应器运行特性及处理垃圾渗滤液研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [9] Lackner S, Horn H. comparing the performance and operation stability of an SBR and MBBR for single-stage nitrification-anammox treating wastewater with high organic load [J]. Environmental Technology, 2013, **34**(10): 1319-1328.
- [10] Jenni S, Vlaeminck S E, Morgenroth E, *et al.* Successful application of nitrification/anammox to wastewater with elevated organic carbon to ammonia ratios[J]. Water Research, 2014, **49**: 316-326.
- [11] 王欢, 裴伟征, 李旭东, 等. 低碳氮比猪场废水短程硝化反硝化-厌氧氨氧化脱氮[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 815-821.
Wang H, Pei W Z, Li X D, *et al.* Removing nitrogen from low-C/N-piggery-wastewater using shortcut nitrification/denitrification-ANAMMOX[J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 815-821.
- [12] 李捷, 张杰, 周少奇. TOC 与 IC 对厌氧氨氧化反应的影响研究[J]. 给水排水, 2008, **34**(11): 157-160.
Li J, Zhang J, Zhou S Q. Effects of TOC and IC on anammox process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, **34**(11): 157-160.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 258-282.

- [14] Ni B J, Hu B L, Fang F, *et al.* Microbial and physicochemical characteristics of compact anaerobic ammonium-oxidizing granules in an upflow anaerobic sludge blanket reactor[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(8): 2652-2656.
- [15] Hoshino T, Noda N, Tsuneda S, *et al.* Direct detection by in situ PCR of the *amoA* gene in biofilm resulting from a nitrogen removal process[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(11): 5261-5266.
- [16] Throbäck I N, Enwall K, Jarvis Å, *et al.* Reassessing PCR primers targeting *nirS*, *nirK* and *nosZ* genes for community surveys of denitrifying bacteria with DGGE [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **49**(3): 401-417.
- [17] Yu Y, Lee C, Kim J, *et al.* Group-specific primer and probe sets to detect methanogenic communities using quantitative real-time polymerase chain reaction [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **89**(6): 670-679.
- [18] 朱泽沅, 于德爽, 李津. C/N 比对 ANAMMOX 与反硝化协同脱氮性能影响及其动力学[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(6): 2813-2818.
Zhu Z Y, Yu D S, Li J. Influence of C/N on nitrogen removal performance and kinetics characteristics of ANAMMOX/denitrification synergistic interaction [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(6): 2813-2818.
- [19] 解英丽, 池福强, 龙韬. 亚硝酸盐反硝化与硝酸盐反硝化对比研究[J]. *工业安全与环保*, 2009, **35**(2): 11-13.
Xie Y L, Chi F Q, Long T. Nitrite and nitrate denitrification comparative study [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2009, **35**(2): 11-13.
- [20] 管勇杰, 于德爽, 李津, 等. 有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 654-664.
Guan Y J, Yu D S, Li J, *et al.* Nitrogen removal performance of ANAMMOX with different organic carbon sources [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 654-664.
- [21] 李泽兵, 刘常敬, 赵白航, 等. 多基质时厌氧氨氧化菌、异养反硝化污泥活性及抑制特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 648-654.
Li Z B, Liu C J, Zhao B H, *et al.* Activity and inhibition characteristics of anammox and heterotrophic denitrifier bacteria in a multi-substrate system [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 648-654.
- [22] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
Yang Y, Zuo J E, Shen P, *et al.* Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [23] Waki M, Tokutomi T, Yokoyama H, *et al.* Nitrogen removal from animal waste treatment water by anammox enrichment [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(14): 2775-2780.
- [24] 袁砚, 朱亮. 中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4289-4295.
Yuan Y, Zhu L. Effect of moderate and room temperature on nitrogen removal in PN-ANAMMOX process [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4289-4295.
- [25] 刘涛, 李冬, 曾辉平, 等. 氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 773-780.
Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Assessment of the effect of influent NH₄⁺-N concentration on the abundance and community structure of functional bacteria in CANON process [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 773-780.
- [26] Strous M, Fuerst J A, Kramer E H M, *et al.* Missing lithotroph identified as new planctomycete [J]. *Nature*, 1999, **400**(6743): 446-449.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl ₂ Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric PM _{2.5} in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-bao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM ₁₀ Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH ₄ ⁺ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N ₂ O and NO _x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of CaCO ₃ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)