

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N_2O 释放的冲击影响

付昆明¹, 姜姗¹, 苏雪莹^{1,2}, 廖敏辉¹, 仇付国¹, 曹秀芹¹

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044; 2. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100044)

摘要: 本文以无机氮废水为进水, 乙酸钠为有机碳源, 研究颗粒污泥 CANON 反应器中不同 C/N 水质条件下, 反应器内的脱氮性能和 N_2O 释放情况, 为探索合适的 C/N 比在高效脱氮的同时实现 N_2O 释放减量化提供理论依据. 结果表明, C/N 在 0~2.0 范围内, 随 C/N 的提高, TN 去除率和去除负荷基本呈现逐渐升高的趋势, C/N=0 时 TN 在 7h 内去除量为 56.50 mg·L⁻¹, 去除率达到 49.00%, C/N=2.0 时, TN 在 7h 内去除量最高为 71.42 mg·L⁻¹, TN 去除率最高为 59.52%, 但是其中 CANON 对于脱氮的贡献逐渐下降, 反硝化作用对于系统脱氮的贡献逐渐上升. 当 C/N=2.0 时, $\Delta NO_3^- - N / \Delta TN = 0.086$, CANON 对于系统脱氮的贡献仅为 51.48%, 反硝化对系统脱氮的贡献为 48.52%. C/N 在 0~2.0 范围内, N_2O 释放量和释放比例随进水 C/N 增加而降低, C/N=0 时, N_2O 释放量和释放比例最高, 分别为 3.60 mg 和 2.13%; C/N=2.0 时 N_2O 释放量和释放比例最低且分别为 1.61 mg 和 0.75%.

关键词: 全程自养脱氮 (CANON) 工艺; 颗粒污泥; 脱氮性能; N_2O ; C/N

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5101-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804233

Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N_2O Release of Granular Sludge CANON Reactor

FU Kun-ming¹, JIANG Shan¹, SU Xue-ying^{1,2}, LIAO Min-hui¹, QIU Fu-guo¹, CAO Xiu-qin¹

(1. Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, Sino-Dutch R&D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Drainage Group Technology Research and Development Center, Beijing 100044, China)

Abstract: To Explore a suitable C/N ratio for efficient nitrogen removal and simultaneously achieving N_2O release reduction, ammonia-rich wastewater with sodium acetate as an organic carbon source in a granular sludge completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) reactor under different C/N water conditions were studied to determine the reactor's nitrogen removal performance and N_2O release. The results showed that the total nitrogen (TN) removal rate and the removal load tended to increase gradually with the increase of C/N, ranging from 0 to 2.0. When C/N=0, the TN removal rate was 56.50 mg·L⁻¹ in 7 h; the highest TN removal efficiency was 49%. When C/N=2.0, the highest TN removal rate was 71.42 mg·L⁻¹ in 7 h; the highest TN removal efficiency was 59.52%, and the contribution of CANON to nitrogen removal gradually decreased, whereas the denitrification contribution gradually increased. When $\Delta NO_3^- - N / \Delta TN = 0.086$, the contribution of CANON nitrogen removal was only 51.48% and that of denitrification was 48.52%. The N_2O release volume and release ratio decreased with increasing C/N. When C/N=0, the N_2O release volume and rate were the highest, namely 3.60 mg and 2.13%, respectively. The lowest N_2O release volume and rate were 1.61 mg and 0.75%, respectively, when C/N=2.0.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process; granular sludge; nitrogen removal performance; N_2O ; C/N

生物脱氮新技术 CANON 工艺^[1]以短程硝化反硝化 (short-cut nitrification) 与厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 为基础的全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 工艺, 将 ANAMMOX 与短程硝化结合在一起, 协同脱氮^[2], 相比于传统的生物脱氮技术来说, CANON 工艺不仅脱氮性能良好, 同时还能大大节省曝气能耗^[3]; 剩余污泥量比传统生物

脱氮工艺低^[4], 因此有利于节能减排和可持续发展; 但是, 研究人员发现, CANON 工艺在处理高氨氮废水 (如污泥消化液^[5]、垃圾渗滤液^[6]等) 会产

收稿日期: 2018-04-28; 修订日期: 2018-05-16

基金项目: 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项 (X18182, X18214); 北京市教育委员会科技发展计划项目 (SQKM201710016006)

作者简介: 付昆明 (1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水自养脱氮技术与 N_2O 释放控制技术, E-mail: fukunming@163.com

生强温室气体 N_2O ，且高于传统生物脱氮工艺^[7, 8]。因此，为防止碳素污染由水环境转向大气^[9]，保留 CANON 工艺脱氮性能优势的同时，研究控制 N_2O 的释放至关重要。在 CANON 工艺中， NH_4^+-N 首先被好氧氨氧化菌 (ammonium oxidation bacteria, AOB) 氧化为羟胺 (NH_2OH)，参与这一反应相应的酶为氨单加氧酶 (ammonia mono-oxygenase, AMO)，之后在羟胺氧化还原酶 (hydroxylamine oxidoreductase, HAO) 的作用下，将羟胺氧化为 NO_2^--N ^[10]；缺氧条件下， NO_3^- 被反硝化菌 (denitrifying bacteria) 在硝酸盐还原酶 (nitrate reductase, Nar) 的作用下还原为 NO_2^- ，随后在亚硝酸盐还原酶 (nitrite reductase, Nir) 作用下还原为 NO ，继而被一氧化氮还原酶 (nitric oxide reductase, Nor) 还原为 N_2O ^[11]，最终 N_2O 在氧化亚氮还原酶 (nitrous oxide reductase, Nos) 作用下还原为 N_2 ^[12]。

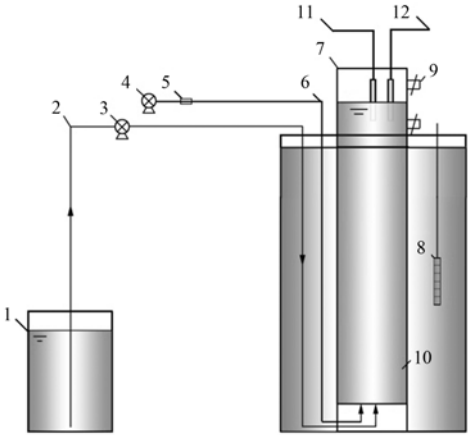
CANON 工艺在处理实际污水时，必须面对污水中有机物带来的挑战。Li 等^[13]在序批式脱氮系统中发现添加乙酸钠不仅可以提升脱氮效率并且可以减少 N_2O 的排放。反硝化过程是 N_2O 排放的主要过程^[13]，且随 C/N 比的升高，反硝化对于系统脱氮的贡献逐渐增加^[14]。当外加碳源不足时，系统内的反硝化菌利用内碳源为电子供体进行反硝化，其反硝化终产物将有可能是 N_2O ^[15]。因此碳源不足时，反硝化过程会大大增加 CANON 系统脱氮过程中的 N_2O 释放量。另外，有学者发现在反硝化过程的 4 种酶中^[16]，Nos 酶对电子供体竞争能力最弱，低 C/N 使 Nos 合成受到限制，导致 N_2O 排放。综上所述，控制合适的 C/N 是减少反硝化过程 N_2O 释放的关键措施。颗粒污泥是目前应用 CANON 工艺的主要应用形式之一。本系统中采用颗粒污泥反应器，研究了进水中不同 C/N 的水质条件下对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能及 N_2O 释放的影响，

以期探索合适的 C/N 比并实现 N_2O 释放减量化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

采用内径为 7 cm，高度为 1 m，有效容积为 3.0 L 的有机玻璃反应器，如图 1 所示，装置内有 5 cm 高度的砾石作为承托层，防止污泥堵塞进水口。原水通过反应器底部进入，由上部出水口排出；采用 SBR 方式运行，通过水循环混合；使用空气泵向反应器通入空气，利用在线溶解氧仪监测 DO 浓度变化。反应器内温度通过水浴调节控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。



1. 进水箱; 2. 进水管; 3. 进水泵; 4. 空气泵; 5. 空气流量计; 6. 曝气管; 7. 颗粒污泥 CANON 反应器; 8. 恒温加热棒; 9. 出水口; 10. 颗粒污泥; 11. pH 仪; 12. DO 仪
图 1 SBR 反应器的实验装置和工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart of SBR reactor

1.2 运行方式与进水水质

反应器接种污泥为前期培养的 ANAMMOX 颗粒污泥 200 mL。实验时，反应器中进水为人工配制无机氮氮废水 (表 1)，内回流提供混合。其工作过程分为“进水 (5 min)→反应 (7 h)→沉淀 (5 min)→排水 (1 min)” 5 个阶段，每天运行一个周期。

表 1 CANON 反应器的进水水质

Table 1 Influent water quality of CANON reactor

项目	NH_4^+-N /mg·L ⁻¹	NO_2^--N /mg·L ⁻¹	NO_3^--N /mg·L ⁻¹	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ /mg·L ⁻¹	pH	微量元素 I ^[17] /mL·L ⁻¹	微量元素 II ^[18] /mL·L ⁻¹
数值	50 ~ 340	0 ~ 10	0 ~ 20	10	7.5 ~ 8.0	1	1

稳定后，CANON 反应器中 TN 去除率达到 64%，TN 去除负荷稳定在 $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ，最高可达 $0.45 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

1.3 实验方法

采用前期启动成功的颗粒污泥 CANON 反应

器。进水 NH_4^+-N 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，有机物为乙酸钠，进入反应器前，通过盐酸与氢氧化钠将 pH 调节为 8.0 左右，并预热到实验温度。运行时，控制曝气量为 $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。实验期间每隔 1h 取水样和气体样品，并检测 pH 和 DO 等指标。

1.4 分析及计算方法

NH_4^+-N : 纳氏试剂比色法; $NO_2^- -N$: N -(1-萘基)-乙二胺光度法; $NO_3^- -N$: 紫外分光光度法; pH 值: 梅特勒-托利多 Five Go 型 pH 计; 溶解氧: Multi 3620IDS 型溶解氧仪; TN: 紫外分光光度法^[19].

污水生物脱氮产生的 N_2O 以两种形式存在: 溶解性 N_2O 和气态 N_2O , 由于 N_2O 在水中的溶解性甚微, 故溶解态 N_2O 忽略不计, 因此本实验主要研究释放出来的气态 N_2O ^[20]. 分析及计算方法参照文献[17].

2 结果与讨论

2.1 不同 C/N 时颗粒污泥 CANON 反应器的脱氮性能

本实验过程中, 为深入了解不同 C/N 对 CANON 工艺的脱氮效果的影响, 检测运行周期内的氮元素的变化情况, 控制进水 C/N 分别为 0、0.5、1.0、1.5、2.0 的情况下, 研究出水 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$ 和 TN 变化情况.

2.1.1 C/N = 0 时 CANON 工艺的脱氮效果

本实验过程中, 不添加有机物时, 各氮素的浓度变化如图 2 所示. 随着反应进行, NH_4^+-N 浓度逐渐降低, 平均降解速率为 $11.11 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 7 h 内 NH_4^+-N 去除率达到 74.03%. 此时好氧氨氧化速率大于厌氧氨氧化速率, AOB 活性较高, 产生的 $NO_2^- -N$ 积累在反应器中未能及时消耗, $NO_3^- -N$ 浓度也随反应进行逐渐增加. 随着反应的进行, TN 浓度逐渐降低, TN 在 7 h 内去除量为 $56.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率达到 49.00%, $\Delta NO_3^- -N / \Delta TN = 0.109 < 0.127$ ^[21], 说明 TN 的去除不完全是 ANAMMOX 菌的作用, 还有部分反硝化菌的作用. 此时的反硝化菌利用菌体内部碳源进行内源反硝化, 因此比值偏

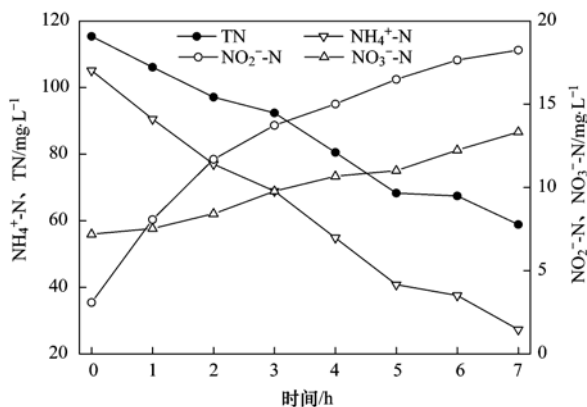


图 2 C/N = 0 时 CANON 反应器中氮素浓度变化

Fig. 2 Variations in nitrogen in CANON reactor at C/N = 0

离 0.127.

2.1.2 C/N = 0.5 时 CANON 工艺的脱氮效果

本实验过程中, C/N = 0.5 时, 各氮素的浓度变化如图 3 所示. 进水中添加有机物后, NH_4^+-N 降解速率降低为 $10.06 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 7 h 内 NH_4^+-N 去除率达到 68.04%. 原因是进水 NH_4^+-N 浓度相同的情况下, 有机碳源的存在促进异养菌的快速增值. 而在反应过程中, 异养菌与自养菌 AOB 争夺 DO, 此时异养菌快速增值从而对 AOB 的生长有所限制, 因此 NH_4^+-N 降解速率降低. 0 ~ 3 h, $NO_2^- -N$ 生成速率逐渐变缓, 可能是由于起初有机物促进异养菌快速增值, 与自养菌 AOB 竞争反应基质, 3 h 后 $NO_2^- -N$ 生成速率升高, 表示进水中的有机碳源被消耗后浓度降低, 解除对 AOB 的抑制作用使得 $NO_2^- -N$ 迅速升高. $NO_3^- -N$ 浓度呈现先降低后增加的趋势, 说明反应初期 $NO_3^- -N$ 在有机物存在下被还原, 反应后期由于碳源不足, 产生的 $NO_3^- -N$ 未能及时消耗出现积累的现象. 综上所述, 由于 AOB 生长受限, 同时有机物不足而造成反硝化作用弱, 因此 TN 降解缓慢, 在 7 h 内去除量为 $50.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率降低为 43.90%.

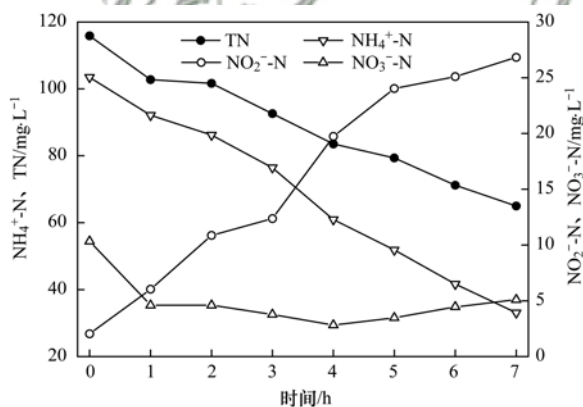


图 3 C/N = 0.5 时 CANON 反应器中氮素浓度变化

Fig. 3 Variations in nitrogen in CANON reactor at C/N = 0.5

2.1.3 C/N = 1.0 时 CANON 工艺的脱氮效果

本实验过程中, C/N = 1.0 时, 各氮素的浓度变化如图 4 所示. 随着 C/N 的增加, NH_4^+-N 降解速率增加为 $10.27 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 7 h 内 NH_4^+-N 去除率达到 67%. $NO_2^- -N$ 随反应进行逐渐增多, 因此可推断 $NO_2^- -N$ 逐渐增多的原因为进水中碳源增加对 ANAMMOX 菌产生冲击从而活性降低, 导致 $NO_2^- -N$ 未能及时消耗而造成 $NO_2^- -N$ 积累. 反应器中的 $NO_3^- -N$ 浓度与 C/N = 0.5 时规律相同, 均呈现先降低后增加的趋势, 说明反应初期 $NO_3^- -N$ 在有机物存

在下被还原,反应后期由于碳源不足,产生的 NO_3^- -N未能及时消耗出现积累的现象。

TN 在 7 h 内去除量为 $65.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 53.58%, 比 $\text{C/N} = 0.5$ 时提高了 9.68%。分析 TN 去除率提高的原因, 可见 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN} = 0.049 < 0.127^{[21]}$, 此时数值严重偏离了 0.127, 可见进水中有机物的增加增强了反硝化脱氮的贡献。Jia 等^[22] 采用 SBBR 反应器研究有机碳源对氮素转化的影响时发现, $\text{C/N} = 1.2$ 时, 短程硝化-厌氧氨氧化过程的脱氮贡献下降到 50.78%, 而反硝化过程的脱氮贡献升高到 49.22%。此时反应器中 CANON 工艺对于脱氮的贡献为 69.45%, 反硝化对于脱氮的贡献为 30.55%。

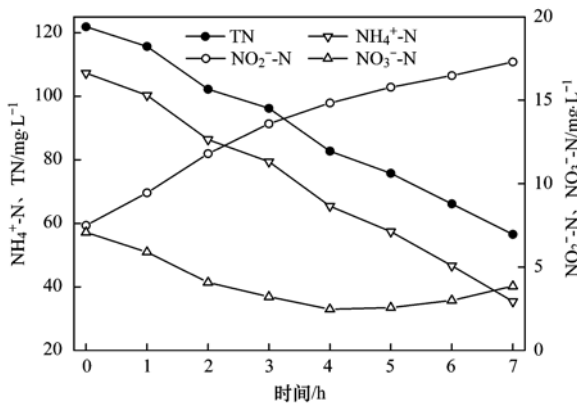


图 4 $\text{C/N} = 1.0$ 时 CANON 反应器中氮素浓度变化
Fig. 4 Variations in nitrogen in CANON reactor at $\text{C/N} = 1.0$

2.1.4 $\text{C/N} = 1.5$ 时 CANON 工艺的脱氮效果

本实验过程中, $\text{C/N} = 1.5$ 时, 各氮素的浓度变化如图 5 所示。 NH_4^+ -N 降解速率为 $10.42 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, NH_4^+ -N 去除率为 66.50%。随着 C/N 比的提高, NH_4^+ -N 去除率进一步降低, 可见有机物持续影响着 AOB 以及 ANAMMOX 的活性。而 NO_2^- -N 浓度随反应进行先增加后减少, 因为此时有有机物冲击影响 ANAMMOX 菌活性, 未能及时消耗 NO_2^- -N。同时付昆明等^[23] 的研究发现, 反硝化过程中 NO_2^- -N 浓度随着 NO_3^- -N 的还原逐渐增加, 在 NO_3^- -N 基本消耗完毕时, 亚硝酸盐浓度达到最大值。因此, NO_2^- -N 积累有一部分来自 NO_3^- -N 反硝化过程的生成而造成的积累。因此由于 C/N 的提高使得反硝化菌拥有充足的碳源, 还原 NO_2^- -N 而不会出现反硝化不彻底, 因此后期 NO_2^- -N 浓度逐渐减少。 NO_3^- -N 浓度随反应进行逐渐降低, 说明有机物能将生成的 NO_3^- -N 不断还原, 不会造成浓度积累。

TN 在 7 h 内去除量为 $69.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除

率进一步提升至 56.82%, 较 $\text{C/N} = 1.0$ 时提升了 3.24%, $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN} = 0.065 < 0.127^{[21]}$ 说明反硝化作用为 TN 的去除有很大的贡献。计算可知, 反应器中 CANON 工艺对于脱氮的贡献为 66.21%, 反硝化对于脱氮的贡献为 33.79%。

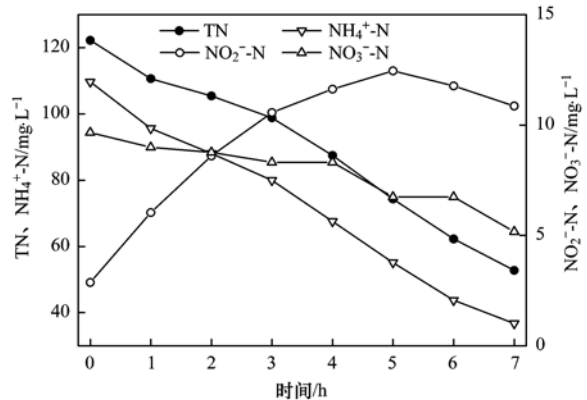


图 5 $\text{C/N} = 1.5$ 时 CANON 反应器中氮素浓度变化
Fig. 5 Variations in nitrogen in CANON reactor at $\text{C/N} = 1.5$

2.1.5 $\text{C/N} = 2.0$ 时 CANON 工艺的脱氮效果

本实验过程中, $\text{C/N} = 2.0$ 时, 各氮素的浓度变化如图 6 所示。 NH_4^+ -N 降解速率最低为 $9.88 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, NH_4^+ -N 去除率为 63.32%。可见, 当进水中添加过多有机物后, NH_4^+ -N 降解速率和去除率均有所降低。其原因是, 异养菌活性增强限制 AOB 生长, 使得在进水 NH_4^+ -N 浓度相同的情况下, NH_4^+ -N 降解速率有所降低。 NO_2^- -N 浓度随反应进行先增加后减少, 说明 $\text{C/N} = 2.0$ 时与 $\text{C/N} = 1.5$ 时类似, 反硝化菌拥有充足的碳源, 用于还原 NO_2^- -N 使得反应器内不会出现 NO_2^- -N 浓度积累。 NO_3^- -N 在 3 h 后甚至出现了浓度为 0 的情况, 表明此时有机碳源充足, 产生的 NO_3^- -N 完全被反硝化菌还原。

TN 在 7 h 内去除量为 $71.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率进一步提升至 59.52%, 较 $\text{C/N} = 1.5$ 时提升了

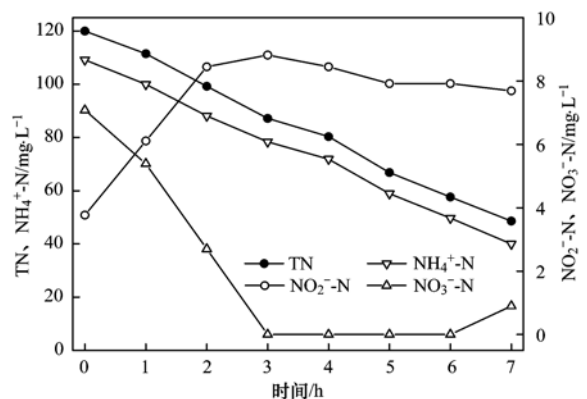


图 6 $\text{C/N} = 2.0$ 时 CANON 反应器中氮素浓度变化
Fig. 6 Variations in nitrogen in CANON reactor at $\text{C/N} = 2.0$

2.70%, $\Delta NO_3^- - N / \Delta TN = 0.086 < 0.127^{[21]}$, 数值渐渐偏离 0.127, 可见, TN 去除率的提升并不是因为厌氧氨氧化过程. 有学者研究 COD 对 CANON 工艺脱氮性能影响时也发现^[24], 随着 C/N 的提高, 反硝化作用促进系统脱氮性能也会提高. 因此, 此时 TN 去除率的提升是由于反硝化作用的提升. 系统的 TN 去除负荷较现有其他文献中较低, 仅为 $10.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 主要是由于有机物的冲击抑制了 AOB 的活性, 使得硝化不足导致. 此时反应器中厌氧氨氧化工艺对于脱氮的贡献为 51.48%, 反硝化对于脱氮的贡献为 48.52%.

本实验过程中, 随着 C/N 的不断提升, CANON 过程中厌氧氨氧化对于脱氮的贡献由 69.45% 降到 51.48%, 而反硝化过程对于脱氮的贡献则由 30.55% 上升到了 48.52%. 不同研究者得出的关于影响 CANON 工艺脱氮性能的 C/N 值不同, Jia 等^[22]采用 SBBR 反应器时发现, C/N = 1.20 时, 短程硝化-厌氧氨氧化对于脱氮的贡献下降到了 50.78%, 而反硝化对于脱氮的贡献上升至 49.22%. 张肖静^[25]利用 MBR 反应器研究时发现, C/N 为 1.0 ~ 2.0 时反硝化对系统脱氮有促进作用, 但 C/N > 2.0 时, 系统中的 AOB 以及 ANAMMOX 菌活性受到抑制.

综上所述, 随着反应的进行, 进水中添加适量有机物, 有利于脱氮性能的提升, 但当 COD 浓度过高时, 会影响系统自养脱氮性能. 本系统中 TN 去除量与去除率基本呈现上升趋势, 但 CANON 中厌氧氨氧化作用对于系统脱氮的贡献值逐渐下降, 而反硝化对于系统脱氮的贡献逐渐上升.

2.2 不同 C/N 下颗粒污泥 CANON 反应器中 N_2O 的释放

生物脱氮过程中 N_2O 主要作为亚硝化过程^[26]和反硝化过程^[27]中的副产物或中间产物. 其主要的产生途径包括硝化细菌的硝化阶段、反硝化作用的不彻底以及 NH_2OH 的氧化作用等. 对于进水中含有有机物的 CANON 工艺来说, 脱氮过程不仅有短程硝化-厌氧氨氧化过程, 还存在反硝化过程, 这就使得 N_2O 产生的可能性增大. 较低的 C/N 和低 DO 条件使得 CANON 工艺 N_2O 排放风险高; C/N 过高时, ANAMMOX 菌在与反硝化菌竞争基质 $NO_2^- - N$ 和生存空间方面处于劣势地位, 长期处于高浓度有机物的环境下还会抑制 ANAMMOX 菌活性^[28], 弱化了 CANON 工艺自养脱氮的优势.

由图 7 所示, 随着 C/N 增加, TN 去除率先降

低后升高, 其中在 C/N = 0.5 时 TN 去除率最低为 43.90%. C/N = 2.0 时 TN 去除率最高, 为 59.52%. 系统开始曝气时, 由于系统内部从缺氧状态突然转为好氧状态, $NH_4^+ - N$ 迅速被氧化为 NH_2OH , 相对于 $NH_4^+ - N$ 的氧化来说 NH_2OH 的氧化不易进行, 导致反应初期 NH_2OH 的积累, 然后在 HAO 的催化作用下生成 N_2O ^[29, 30]; 同时系统运行初期氧气突然增多, Nos 相对于其他脱氮酶和氧气来说竞争电子供体能力弱^[31], 因此造成 N_2O 积累, 这是反应初期 N_2O 释放速率较高的主要原因. N_2O 作为反硝化中间产物, 在合适条件下可被 Nos 还原为 N_2 . 但在某些情况下, 会导致 N_2O 的积累, 并从反应器中释放出来: ①一些反硝化菌中不存在 Nos, 只能将 $NO_3^- - N$ 还原至 N_2O ^[32]. Poth 等^[33]还通过实验发现, AOB 中不存在 Nos, 这就导致其反硝化作用的终产物只能为 N_2O ; ②相比其他还原酶, Nos 更易受外界环境影响且竞争电子能力最弱^[16].

进水中不添加有机物的系统中 N_2O 释放量和释放比例最高, 分别为 3.60 mg 和 2.13%. 主要原因是进水中不含有有机物时, 低 DO^[34]和较高的 $NO_2^- - N$ 浓度^[32, 36]的条件下, AOB 容易发生反硝化过程, 导致 N_2O 的释放. 相对于颗粒污泥系统来说, 生物膜系统内部基质传质效果较好, 生物膜外层的 AOB 将 $NH_4^+ - N$ 氧化为 $NO_2^- - N$ 后, 生成的 $NO_2^- - N$ 迅速被内层 ANAMMOX 菌消耗, 没有在反应器中积累, 从而促使 AOB 反硝化释放 N_2O 量少. 还有关于生物膜的研究表明, 生物膜系统营造了一个 N_2O 产生和消耗同时发生的环境, 产生的 N_2O 在释放到大气之前就已经被捕获, 因而降低 N_2O 的释放量^[32]. 尹倩婷等^[35]在研究污泥聚集状态对 N_2O 释放影响中也发现, 维持粒径较小、致密程度适中的污泥聚集体有利于减少 N_2O 释放.

本系统中, 颗粒污泥粒径较大, 粒径为 1 ~ 5 mm, 结构很致密, 对于此类系统的研究较少. 污泥颗粒粒径增大导致基质传质距离增加, 越致密的污泥聚集体传质阻力就越大, 因此 $NO_2^- - N$ 在由颗粒污泥外层的好氧层向内部缺氧层传递的过程受阻较大, 造成 $NO_2^- - N$ 积累, 高浓度的 $NO_2^- - N$ 积累刺激 AOB 发生反硝化反应产生大量 N_2O .

本实验中, C/N 在 0.5 ~ 2.0 范围内, N_2O 释放量和释放比例随 C/N 的升高而降低, C/N 为 0.5 时, N_2O 释放量为 2.37 mg, C/N = 2.0 时 N_2O 释放量为 1.61 mg. 低 C/N 条件下, N_2O 释放量较多的

原因可能有:①低 C/N 时,有机碳源提供的电子供体不足,各种反硝化酶竞争还原电子, Nos 对电子亲和力最弱,一定程度上抑制 Nos 的还原;且亚硝酸盐积累也会对 Nos 产生抑制作用,限制 N_2O 的进一步还原,从而导致 N_2O 排放量增多;②Zeng 等认为^[36],碳源不足时,反硝化菌还有可能利用自身体内的聚- β -羟丁酸(PHB)为碳源进行反硝化,此时反硝化的最终产物为 N_2O ,进而导致 N_2O 释放;③低 C/N 下,反硝化过程难以彻底进行,一些如 NO_2^- -N 的中间产物就会在系统中积累, NO_2^- -N 的存在刺激 AOB 发生自养反硝化释放出 N_2O 。随着 C/N 的提高, NO_2^- -N 进一步被还原为 N_2O 和 N_2 ,有机碳源充足的情况下, N_2O 在 Nos 的催化作用下还原成 N_2 。因此, CANON 系统中,提高进水 C/N 有利于减少 N_2O 排放量。

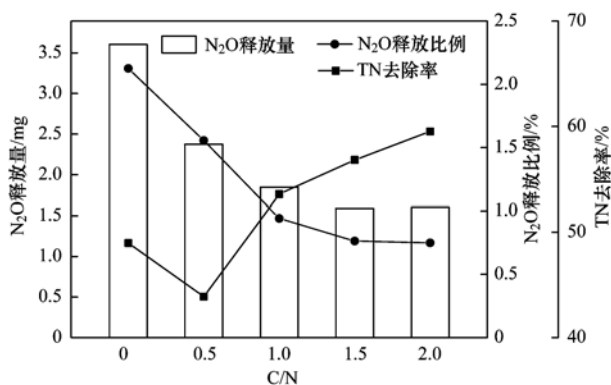


图7 不同 C/N 下 N_2O 排放量、释放比例和 TN 去除率

Fig. 7 N_2O emissions, emissions rates, and TN removal efficiency at different C/N ratios

本实验研究的是短时间改变进水 C/N 对大颗粒且结构致密的颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N_2O 释放的影响,长期处于进水含有机碳源的环境中,可能会影响颗粒污泥 CANON 内微生物种群结构和颗粒污泥形态结构,进而影响脱氮性能和 N_2O 释放情况,进水 C/N 对颗粒污泥 CANON 反应器的长期影响需要进一步研究。

3 结论

(1)颗粒污泥 CANON 反应器中, C/N = 0.5 ~ 2.0 时,随着 C/N 比的升高, TN 的去除率和去除负荷逐渐升高, C/N = 2.0 时, TN 在 7h 内去除量最高为 $71.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率最高为 59.52%。

(2)随 C/N 比的升高 CANON 对于脱氮的贡献逐渐下降,反硝化脱氮的贡献逐渐上升,当 C/N = 2.0 时, CANON 对于系统脱氮的贡献仅为

51.48%,反硝化对系统脱氮的贡献为 48.52%。

(3)颗粒污泥 CANON 反应器中,随 C/N 比的升高 N_2O 释放量和释放比例逐渐降低, C/N = 0 时, N_2O 释放量和释放比例最高,分别为 3.60 mg 和 2.13%; C/N = 2.0 时 N_2O 释放量和释放比例最低,分别为 1.61 mg 和 0.75%。可见, C/N = 2.0 可有效降低颗粒污泥 CANON 反应器中 N_2O 的释放。

参考文献:

- [1] Third K A, Sliekers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (Completely Autotrophic Nitrogen-removal Over Nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, **24**(4): 588-596.
- [2] 付昆明. 全程自养脱氮(CANON)反应器的启动及其脱氮性能[D]. 北京:北京工业大学, 2010.
- [3] 程盼. 高氨氮废水短程硝化影响因素的研究[D]. 郑州:郑州大学, 2016.
- [4] 徐鹏. SBR 短程硝化反硝化处理模拟氨氮废水实验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2011.
- [5] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(14): 5301-5306.
- [6] Liang Z, Liu J X. Landfill leachate treatment with a novel process: anaerobic ammonium oxidation (Anammox) combined with soil infiltration system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **151**(1): 202-212.
- [7] Xiao P Y, Cai Q, Zhang D J, *et al.* Characteristics of nitrogen removal and nitrous oxide production in CANON process[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, **89**(4): 552-558.
- [8] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, *et al.* Nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [9] Kampschreur M J, Van Der Star W R L, Wielders H A, *et al.* Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment[J]. *Water Research*, 2008, **42**(3): 812-826.
- [10] 刘越, 彭轶, 李鹏章, 等. 短程硝化过程中 NO_2^- 对 NH_4^+ 及 NH_2OH 氧化产生 N_2O 的影响[J]. *化工学报*, 2015, **66**(3): 1134-1141.
- [11] Liu Y, Peng Y, Li P Z, *et al.* Effect of NO_2^- on N_2O production by NH_4^+ and NH_2OH oxidation during nitrification process[J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(3): 1134-1141.
- [12] Arp D J, Stein L Y. Metabolism of inorganic N compounds by ammonia-oxidizing bacteria[J]. *Critical Reviews in Biochemistry*

- and Molecular Biology, 2003, **38**(6): 471-495.
- [12] Wragge N, Velthof G L, Van Beusichem M L, *et al.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(12-13): 1723-1732.
- [13] Li Q H, Li P, Zhu P P, *et al.* Effects of exogenous organic carbon substrates on nitrous oxide emissions during the denitrification process of sequence batch reactors [J]. Environmental Engineering Science, 2008, **25**(8): 1221-1228.
- [14] 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.
- [15] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z, *et al.* A novel wastewater treatment process: simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal[J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(10): 163-170.
- [16] Schalk-Otte S, Seviour R J, Kuenen J G, *et al.* Nitrous oxide (N_2O) production by *Alcaligenes faecalis* during feast and famine regimes[J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2080-2088.
- [17] 付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 等. 初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N_2O 释放的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4261-4267.
- Fu K M, Wang H F, Su X Y, *et al.* Effect of initial pH on nitrogen removal performance and N_2O emission of a sequencing batch CANON reactor [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4261-4267.
- [18] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. Microbiology, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [19] 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.
- [20] 王会芳. 全程自养脱氮(CANON)工艺中 N_2O 释放研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- Wang H F. Research on N_2O emission during completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [21] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Performance stability of CANON reactor and temperature impact [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- [22] Jia L, Guo J S, Fang F, *et al.* Effect of organic carbon on nitrogen conversion and microbial communities in the completely autotrophic nitrogen removal process [J]. Environmental Technology, 2012, **33**(10): 1141-1149.
- [23] 付昆明, 曹相生, 孟雪征, 等. 污水反硝化过程中亚硝酸盐的积累规律[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1660-1664.
- Fu K M, Cao X S, Meng X Z, *et al.* Characteristics of nitrite accumulation during wastewater denitrification [J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1660-1664.
- [24] 吕永涛, 陈祯, 吴红亚, 等. 有机物浓度对厌氧氨氧化脱氮性能影响试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(7): 1189-1192.
- Lü Y T, Chen Z, Wu H Y, *et al.* Effect of organic substrate on nitrogen removal of ANAMMOX [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(7): 1189-1192.
- [25] 张肖静. 基于 MBR 的全程自养脱氮工艺(CANON)性能及微生物特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Zhang X J. Performance and microbial characteristics of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) in membrane bioreactor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [26] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Suppression of anaerobic ammonium oxidizers under high organic content in high-rate Anammox UASB reactor [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(6): 1762-1768.
- [27] 孙世昌. 城市污水处理典型工艺 N_2O 的释放特征及减排策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [28] 张雪玲. 高氨废水自养半亚硝化系统中强温室气体 N_2O 的释放特性与影响因素[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- Zhang X L. Characteristics and influential factors of the strong greenhouse gas N_2O emission in autotrophic partial nitrification system treating high-ammonium wastewater [D]. Xian: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [29] 曾庆武. 反硝化细菌的分离筛选及应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- Zeng Q W. Isolation, screening of denitrifying bacteria and study on its application [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [30] Rogers J E, Whitman W B. Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides, and halomethanes [M]. Washington, DC: American Society of Microbiology, 1991.
- [31] Casciotti K L, Sigman D M, Ward B B. Linking diversity and stable isotope fractionation in ammonia-oxidizing bacteria [J]. Geomicrobiology Journal, 2003, **20**(4): 335-353.
- [32] Park K Y, Inamori Y, Mizuochi M, *et al.* Emission and control of nitrous oxide from a biological wastewater treatment system with intermittent aeration [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, **90**(3): 247-252.
- [33] Poth M, Focht D D. ^{15}N Kinetic analysis of N_2O production by *Nitrosomonas europaea*: an examination of nitrifier denitrification [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1985, **49**(5): 1134-1141.
- [34] 曾巍. SBR 法好氧颗粒污泥脱氮过程中 N_2O 的产生研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- Zeng W. The SBR method of aerobic granular sludge nitrogen N_2O produced in the process of research [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [35] 尹倩婷, 李平, 吴锦华, 等. 同步硝化反硝化(SND)过程污泥聚集状态对 N_2O 释放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2056-2061.
- Yin Q T, Li P, Wu J H, *et al.* Effect of microbial aggregation state on nitrous oxide emission in simultaneous nitrification and denitrification nitrogen removal process [J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 2056-2061.
- [36] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, **84**(2): 170-178.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)