

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙,彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤,李金香,杨妍研,程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅,李洁,肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚,朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎,孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡,毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161)	《环境科学》征订启事 (4365)
信息 (4123,4132,4409)	

中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响

袁砚^{1,2}, 朱亮^{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: 通过接种成熟的亚硝化膜和厌氧氨氧化污泥, 研究了中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮速率的影响及微生物群落的变化。结果表明, 常温下能够实现 PN-ANAMMOX 联合脱氮, 并且脱氮速率达到 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。但是 PN 过程亚硝化速率下降, ANAMMOX 菌活性未得到充分发挥, 导致 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮速率远低于中温条件下的 $1.75 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 出水水质较差。温度的上升易导致 NOB 的快速生长, PN 过程失稳, 但是通过增加回流量可对 NOB 的活性进行有效地控制。QPCR 分析结果进一步表明接种中温环境下的 AOB 和 ANAMMOX 微生物在常温条件下不利于生长, 出现部分死亡; 当恢复到中温的环境时, 相应的功能微生物出现了快速地生长。因此, 在 PN-ANAMMOX 联合工艺的运行过程中应尽可能地满足功能微生物适宜的温度。

关键词: 厌氧氨氧化; 部分亚硝化; 联合工艺; 温度; 生物群落

中图分类号: X703.5; TQ028.8 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4289-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201605011

Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process

YUAN Yan^{1,2}, ZHU Liang^{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 moderate and room temperature on nitrogen removal rate and microbial community was studied in PN-ANAMMOX process by inoculating mature nitrification membrane and ANAMMOX sludge. The results showed that the PN-ANAMMOX combined process was achieved at room temperature, and the nitrogen removal rate reached $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. But the activity of ANAMMOX did not reach its maximum due to the decreased NO_2^- -N production rate, resulting in far lower nitrogen removal rate of PN-ANAMMOX than that at moderate temperature which reached $1.75 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the effluent had poor water quality. When the temperature rose, the NOB grew rapidly, the PN process became unstable, but the activity of NOB could be effectively controlled by increasing the return flow. The results of QPCR analysis showed that the inoculation of AOB and ANAMMOX was not conducive to the growth at room temperature, and part of the microorganisms died. When the environment was recovered to moderate temperature, the corresponding functional microorganisms appeared to grow rapidly. Therefore, suitable temperature should be provided for the microorganisms during the operation of the PN-ANAMMOX combined process.

Key words: ANAMMOX; partial nitrification; combined process; temperature; microbial community

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 技术因具有无需有机碳源及氧的供给等优势得到了人们的一致认可, 并且被认为是最经济高效的脱氮工艺^[1,2]。ANAMMOX 反应需要 NO_2^- -N 作为电子受体, 因此绝大部分联合工艺均采用短程硝化 (partial nitrification, PN) 作为 ANAMMOX 的前置工艺^[3,4]。目前, PN-ANAMMOX 工艺已成功运用于半导体废水^[5]、养猪废水^[6]、污泥消化液^[7]等含氨废水的脱氮处理。

亚硝化菌 (ammonia oxidizing bacteria, AOB) 和 ANAMMOX 菌的最适宜温度在 $30 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间^[8,9]。为了保证 PN-ANAMMOX 联合工艺高效稳定的运行, 一般采用加热的方式保证反应器内的最适温度。

因此, 温度不仅是 PN 和 ANAMMOX 过程的重要控制参数, 也是联合工艺运行过程中耗能最大的因素之一^[10]。为了降低能耗, 使得 PN-ANAMMOX 联合工艺能够运用于气候比较低的寒冷地区, 一些研究者也在常温甚至低温的环境下成功地驯化出 PN、ANAMMOX 功能微生物, 实现 PN-ANAMMOX 工艺联合脱氮^[11,12]。

然而, 中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺

收稿日期: 2016-05-03; 修订日期: 2016-06-29

基金项目: 江苏省特色优势学科二期立项项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州市分离净化材料与技术重点实验室 (SZS201512)

作者简介: 袁砚 (1983 ~), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为废水生物脱氮理论与应用, E-mail: crystal_331@163.com

到底有多大影响,主要对哪个过程产生影响,对微生物群落的影响如何,目前鲜见报道. 同时,针对我国南北气候的差异,在选取 PN-ANAMMOX 联合处理含氮废水时,常温乃至低温运行是否可取,如何解决低温对联合工艺的影响是需要解决问题. 为此,本文选取中温(32℃)和常温(22℃),研究了2个温度变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮能力及微生物群落的影响,并进一步分析了其对氮素转化过程主要影响,旨在为联合工艺运用于不同区域时提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置由有机玻璃制成(图1),总有效体积12.95 L,包括好氧区、厌氧区和沉淀区,体积分别为9.25、2.1、1.6 L. 运行过程中,初始 HRT 设定为4.52 h;将沉淀区出水回流至好氧区,回流比设定为8;连续流进水,流量由蠕动泵控制;通过微孔曝气盘提供溶解氧,曝气量由转子气体流量计控制;温度由水浴箱调控. 好氧区的 ORP 值控制在120~150 mV,厌氧区 ORP 值在(−150±50) mV 区间波动,由 WTW 在线监控.

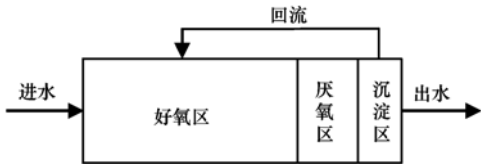


图1 PN-ANAMMOX 联合工艺流程示意
Fig. 1 Schematic of the PN-ANAMMOX process

1.2 接种污泥

好氧区接种的 PN 生物膜取自本实验室中温中试亚硝化反应器,亚硝化速率(ammonia conversion rate, ACR)0.2 kg·(m³·d)^{−1}左右,亚硝化率60%左右. 经过半个月的快速启动,出水NO₂[−]-N/NH₄⁺-N达到1左右. 满足 ANAMMOX 菌对基质利用要求,

ACR 稳定在1 kg·(m³·d)^{−1}左右,亚硝氮积累率95%以上. 厌氧区接种 ANAMMOX 颗粒污泥取自本实验室长期运行的中温 ANAMMOX 反应器,主要细菌种类为 *Candidatus Brocadia sinica* (KP721346-KP721365),污泥呈现砖红色, VSS/SS: 0.22, 氮负荷(nitrogen loading rate, NLR)5 kg·(m³·d)^{−1}左右, TN 去除率稳定维持在80%以上.

1.3 试验用水

本试验采用人工配水,其中NH₄⁺-N由 NH₄HCO₃ 提供,无机碳源由 NaHCO₃ 提供. 矿物质元素组成^[13]为: MgSO₄·7H₂O 0.3 g·L^{−1}、KH₂PO₄ 0.027 g·L^{−1}、CaCl₂ 0.136 g·L^{−1}、NaHCO₃ 按需投加. 微量元素 I、II 浓度分别为: 1.0 mL·L^{−1}、1.25 mL·L^{−1}. 微量元素 I 成分(g·L^{−1})为: FeSO₄ 5、EDTA 5; 微量元素 II 成分(g·L^{−1})为: EDTA 5、CuSO₄·5H₂O 0.25、ZnSO₄·7H₂O 0.043、MnCl₂·4H₂O 0.99、CoCl₂·6H₂O 0.24、H₃BO₄ 0.014、NaMoO₄·2H₂O 0.22、NaSeO₄·10H₂O 0.2. 进水 pH 值为7.8~8.2, 1 mol·L^{−1} HCl 或投加 NaHCO₃ 调节.

1.4 分析项目与测定方法

1.4.1 常规项目

指标测定方法均按照文献[14]. NH₄⁺-N: 钠氏试剂分光光度法; NO₂[−]-N、NO₃[−]-N: 离子色谱法; pH、ORP 和 T: WTW 在线监测仪; 悬浮质 SS、挥发性悬浮质 VSS: 重量法.

1.4.2 实时荧光定量 PCR 分析

本研究采用基于 SYBR Green II 法的实时荧光定量 PCR 对反应器启动前后功能微生物群落进行了定量分析,主要功能菌包括AOB、亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)及 ANAMMOX 菌. 定量 PCR 所采用的引物如表1所示. 采用 Eppendorf 扩增仪对上述功能菌群进行定量扩增. 扩增体系为10 μL,包括5 μL 2xSYBR Green ExTaq

表1 AOB、NOB、ANAMMOX 菌和全菌 PCR 扩增中采用的引物
Table 1 PCR primers targeting at AOB, NOB, ANAMMOX and the total bacteria

目标基因	引物	序列(5'-3')	退火温度/℃
全菌(16S rRNA)	341f	CCTACGGGAGGCAGCAG	60
	518r	ATTACCGCGGCTGCTGG	
ANAMMOX(16S rRNA)	Amx809f	GCCGTAAACGATGGGCACT	60
	Amx1066r	AACGTCTCAGCAGACGAGCTG	
AOB(<i>amoA</i>)	amoAf	GGGGTTTCTACTGCTGCT	57
	amoAr	CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC	
NOB(<i>nxrA</i>)	F1norA	CAGACCGACGTGTGCGAAAG	57
	R1norA	TCYACAAGGAACGGAAGGTC	

Mix, 0.25 μL 正反向引物 ($20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、1 μL DNA 模板、3.5 μL ddH₂O. 试验步骤及操作均参照文献[15,16]. 为了确保数据的可靠性,每个污泥样品设置3组平行. 目标菌种的定量标准曲线 R^2 均大于0.99,扩增效率处于90%~110%.

1.5 试验方法

采用模拟高氨废水,在稳定运行的 PN 基础上接种 ANAMMOX 颗粒污泥,实现联合脱氮. 试验主要分为2个阶段. 阶段1 温度控制在 22°C 左右,阶段2 控制在 32°C 左右. 考察 PN 的稳定情况以及 ANAMMOX 的氮素去除情况.

本研究所涉及到的氮素转化计算公式如下,进水氨氮负荷、去除速率均以容积负荷表示.

$$\Delta N = [\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{inf}} - \{[\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{eff}} + [\text{NO}_2^--\text{N}]_{\text{eff}} + [\text{NO}_3^--\text{N}]_{\text{eff}}\} \quad (1)$$

$$\text{ACR}_a = \{[\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{inf}} - [\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{eff}} - \Delta N/2.3 - [\text{NO}_3^--\text{N}]_{\text{eff}} + 0.26\Delta N/2.3\}/\text{HRT}_a \quad (2)$$

$$\text{NRR}_{\text{ana}} = \Delta N/\text{HRT}_{\text{ana}} \quad (3)$$

$$\text{NRR}_T = \Delta N/\text{HRT}_T \quad (4)$$

FA 浓度(以 N 计)按如下公式计算^[17]:

$$[\text{FA}] = \frac{[\text{NH}_4^+-\text{N}] \times 10^{\text{pH}}}{\exp[6334/(273 + T)] + 10^{\text{pH}}} \quad (5)$$

式中, ΔN 为进出水 TN 差值,单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $[\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{inf}}$ 、 $[\text{NH}_4^+-\text{N}]_{\text{eff}}$ 表示进出水 NH_4^+-N 浓度 ACR_a 表示亚硝化速率、 NRR_{ana} 表示 ANAMMOX 区氮素去除速率、 NRR_T 表示整体的氮素去除速率,单

位均为 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; HRT_a 、 HRT_{ana} 、 HRT_T 表示好氧区、ANAMMOX 区以及整体的水力停留时间,单位 d; T 为温度,单位 $^\circ\text{C}$.

2 结果与讨论

2.1 中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺的影响

由于直接接种相应的功能微生物,所以试验初期 PN-ANAMMOX 联合工艺就实现了高效的脱氮. 由图2可知,阶段1,运行至第2 d, TN 去除率上升较为明显,出水 NH_4^+-N 浓度降低到 $18.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 随后进水 NH_4^+-N 浓度经历了2次提升,当浓度提高至 $330 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,出水 NH_4^+-N 浓度升高至 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, TN 去除率呈现下降趋势;当浓度提高至 $380 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,出水 NH_4^+-N 浓度高达 $140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, TN 去除率降低至 55% 左右. 为了避免 FA 浓度过高对 ANAMMOX 菌产生影响^[18], 随后将 HRT 由 4.52 h 延长至 5.43 h, 出水 NH_4^+-N 浓度仍然较高,从第 19 d 开始降低进水 NH_4^+-N 浓度至 $280 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,出水 NH_4^+-N 浓度有所下降,但是仍然达到 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 继续降低进水 NH_4^+-N 浓度至 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,出水 NH_4^+-N 浓度稳定在 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, TN 去除率维持在 65% 左右. 此阶段联合工艺的 NRR 由初期的 $1 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐下降,最终稳定在 $0.5 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右. Vázquez-Padín 等^[19] 在 20°C 的条件下启动 PN-ANAMMOX 联合工艺,最大脱氮速率 $0.7 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. Lotti 等^[11] 在 15°C 下启动 PN-ANAMMOX 联合工艺,最大

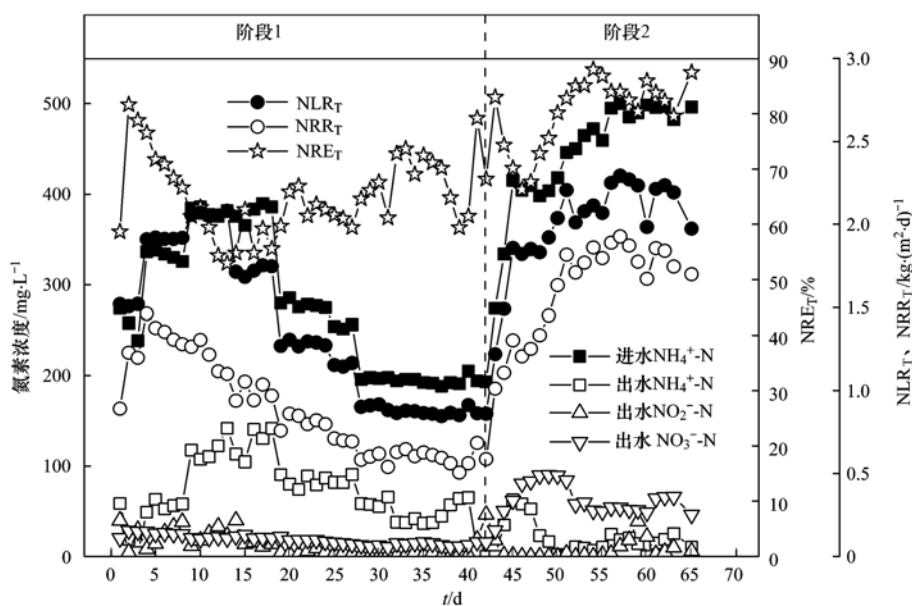


图2 PN-ANAMMOX 联合工艺氮素去除

Fig. 2 Nitrogen removal performance of the PN-ANAMMOX process

脱氮速率仅 $0.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 因此, 常温虽然能够实现 PN-ANAMMOX 工艺的联合脱氮, 但是脱氮速率均比较低, 还易导致出水水质恶化.

阶段 2, 从 41 ~ 65 d, 将温度提高至 32°C 左右, PN-ANAMMOX 脱氮能力增强, 第 41 d 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度下降至 $6.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后不断提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度. 运行至第 50 d, 当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度提升至 $450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度仍处于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, TN 去除率上升趋势较为明显, 高达 87.98%, 运行较为良好. 随后进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度维持在 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 运行较为稳定, TN 去除率达到 80% 以上. 整体 NRR 得到了恢复, 并超过初期水平, 达到 $1.75 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右, 是常温下稳定运行时最低脱氮速率的 3.5 倍. Qiao 等^[20] 在 35°C 下启动 PN-ANAMMOX 联合工艺, 其最大脱氮速率达到 $1.69 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Slikers 等^[21] 在 32°C 下启动的部分 PN-ANAMMOX 联合工艺, 其最大脱氮速率达到 $1.42 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 说明在中温的条件下, AOB 和 ANAMMOX 菌的活性比较高, 更有利于

PN-ANAMMOX 脱氮速率的发挥.

2.2 中常温度变化对亚硝化区的影响及控制

温度对亚硝化区的影响主要表现在影响 AOB、NOB 比生长速率. 温度高于 15°C , AOB 的生长速率大于 NOB, 一般建议 PN 过程温度控制在 25°C 以上^[22].

在阶段 1, 由于温度维持在 22°C 时, AOB 活性出现明显下降, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高, $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比例下降, 最终稳定在 0.8 左右 (图 3). ACR 由启动初期的 $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右逐渐下降, 最终维持在 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右, 下降幅度达到 50%. 但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率一直维持在 99% 以上, 说明 NOB 未获得富集, PN 过程较为稳定. 阶段 2 将温度控制在 32°C 左右, 是 AOB 较为适宜的温度范围. 亚硝化能力快速增强, 与此同时采用提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的方式进行氮负荷提升, ACR 上升较为明显. 当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度提高到 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右 ACR 达到 $1.75 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右. 与此同时出水 $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 1.3 左右, 满足 ANAMMOX 反应配比.

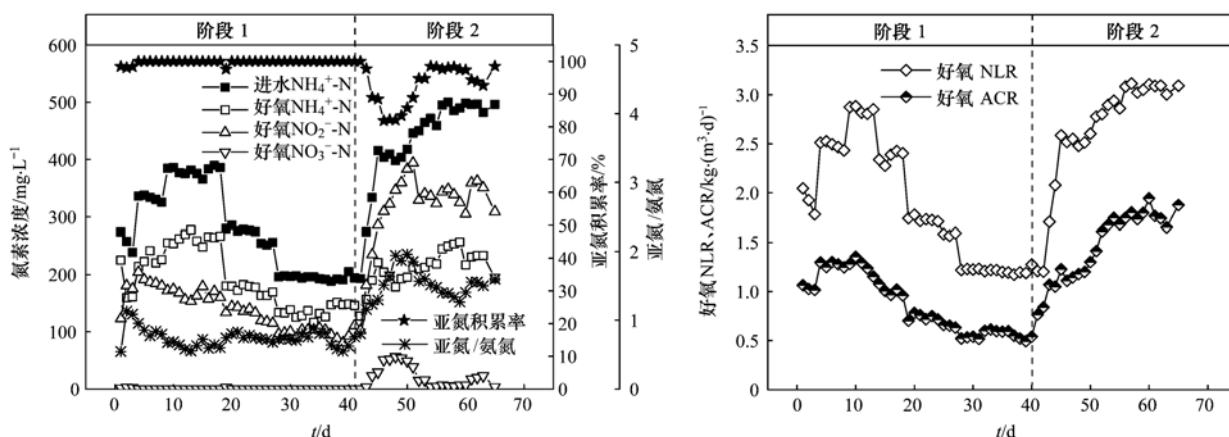


图 3 氮素浓度、负荷、去除速率以及亚硝氮积累率的变化

Fig. 3 Variations of nitrogen compounds concentration, NLR, NRR and nitrite accumulation rate

当反应器温度调到 32°C 后, 虽然 ACR 能力获得快速提升, 但发现出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度出现了急剧升高的现象. 亚硝氮积累率下降, 低至 81.85%, 根据 PN-ANAMMOX 反应化学计量关系, 产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除比的理论值为 11%. 由图 4 可知, 从 43 d 开始, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的占比升高, 高达 30%, PN 出现了失稳现象. 分析其原因主要有两方面: 一是在负荷提升过程中随着 ACR 能力增强, 曝气量不断加大, 同时出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度降低, FA 对 NOB 的抑制能力减弱, 因此 NOB 有充足的氧和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为营养基质; 另一方面, 温度的上升, 也有利于 NOB 的快速

的生长. 从第 45 d 开始, 通过加大回流量来抑制 NOB 的活性. 本研究采用的联合工艺加大回流量具有以下作用: 回流量加快有利于 PN 过程中产生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 及时被输送至厌氧区被 ANAMMOX 菌消耗, 从而避免好氧区出现的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累, NOB 因缺乏基质而被抑制; 好氧区 PN 过程 pH 下降, 厌氧区 ANAMMOX 反应 pH 上升, 加大回流量可以加速厌氧区与好氧区的 pH 调节, 维持好氧区 pH, 维持一定的 FA 浓度来抑制 NOB^[23]. 与此同时, 通过提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度进行氮负荷提升, Yusof 等^[24] 报道提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷, AOB 将有更多的底物利用,

其生长速率加快. 在此阶段, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高更有利于短程硝化的稳定^[25].

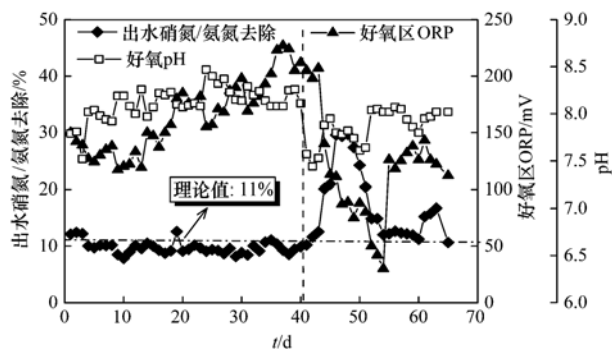


图4 pH、ORP 以及出水硝氮与氨氮去除占比的变化

Fig. 4 Changes of pH, ORP and $\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{produced}} / \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{consumed}}$ ratio

在 PN 失稳过程中, 由于硝化作用的发生, 碱度出现过度消耗, 不足以维持厌氧区的酸碱环境, 好氧区 pH 值也出现了波动, 下降至 7.5 以下. 本研究采用 ORP 作为好氧区 DO 的控制参数. 在 PN 失稳期间, 由于硝化过程耗氧量增大, 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 升高, ORP 从 200 mV 急剧下降至 50 mV 以下. 与 Kocamemi 等^[26]的研究结果一致. 实践表明, 在运行过程中关注 ORP 的变化, 可以直观地反映 PN 过程的运行情况. 在运行过程中维持其稳定即可, 避免大幅波动.

2.3 中常温度变化对 ANAMMOX 反应的影响

厌氧区脱氮速率的变化如图 5 所示. 在阶段 1, 温度 22℃ 左右, AOB 活性较 PN 启动阶段相比有所下降, ACR_a 的降低导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的供给不足使得 ANAMMOX 菌处于饥饿状态, ANAMMOX 菌脱氮能力下降, 最终稳定在 $3.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右. 据报道 ANAMMOX 反应最为适宜的温度在中温条件, 最佳控制在 35℃ 左右^[18]. 阶段 2, 将温度提高至 32℃ 左右, 亚硝化能力恢复, ANAMMOX 菌的 NRR 也随之上升, NRR_{ana} 最高达到 $11 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右.

另外从图 2 可知, 在阶段 1 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 并未出现积累的现象, 说明在短期内 ANAMMOX 菌 NRR 的降低主要是因为基质供给不足所导致的. PN 作为 ANAMMOX 反应的限制性步骤, PN 过程亚硝化能力大小对整体的脱氮速率起到决定性作用. 温度作为 PN 过程重要控制因子, 温度的变化容易对其稳定性以及转化速率产生影响, 进而影响整个联合工艺的脱氮速率.

在实际运行过程中, 低温虽然能够实现 PN-

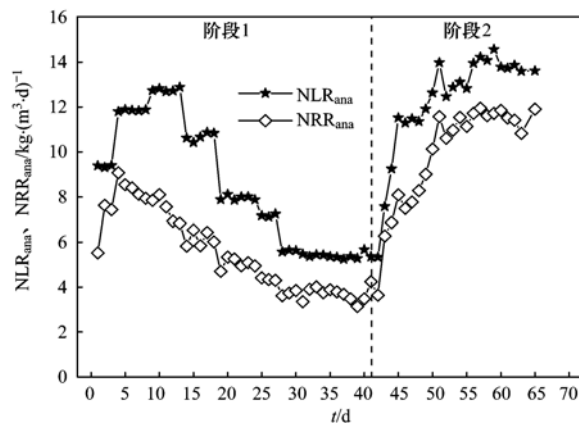


图5 厌氧区氮素负荷和去除速率的变化

Fig. 5 Variations of NLR_{ana} and NRR_{ana}

ANAMMOX 联合脱氮, 但是并不能使得 PN-ANAMMOX 工艺的微生物充分发挥氮素转化能力. 在气候比较低的地区, 采用联合工艺进行废水脱氮时应尽可能地保证适宜的温度. 在无法满足最适宜温度的地区, 为了保证 ANAMMOX 微生物的脱氮速率, 在好氧区与厌氧区的体积配比上应尽可能地扩大, 以保证厌氧区有充足的基质供应.

2.4 各区域功能微生物的定量分析

取 PN-ANAMMOX 联合运行第 1、40 和 56 d 的污泥样品, 污泥均取自反应器中部区域, 对其中的 AOB、NOB 和 ANAMMOX 菌进行定量分析, 结果图 6 所示.

由于接种的污泥为成熟的 PN 和 ANAMMOX 污泥, 所以不同污泥中的主要微生物基本是相应的功能微生物. 亚硝化区的微生物基本以 AOB 为主, 同时含有部分 NOB 和 ANAMMOX 菌. ANAMMOX 污泥中的微生物基本为 ANAMMOX 菌, 同时也含有部分 AOB 和 NOB, 说明所接种的污泥为混培物, 只是相应的功能菌占主导地位, 因此后续运行条件控制不好可能会引起非功能菌的快速生长, 从而导致反应器脱氮速率失稳.

在常温的条件下, 运行至 40 d, 联合工艺的脱氮速率下降了 50%, 由 QPCR 分析发现, 此时好氧区的所有微生物也出现了大量的死亡, 其中功能菌 AOB 菌的基因拷贝数由接种初期的 $6.03 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $3.03 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, 而厌氧区的 ANAMMOX 菌基因拷贝数也由 $1.76 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $1.26 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, 进一步说明接种的 PN 和 ANAMMOX 污泥中的微生物在常温下不适应环境, 出现死亡.

将反应器运行至中温时, 好氧区的主导功能菌

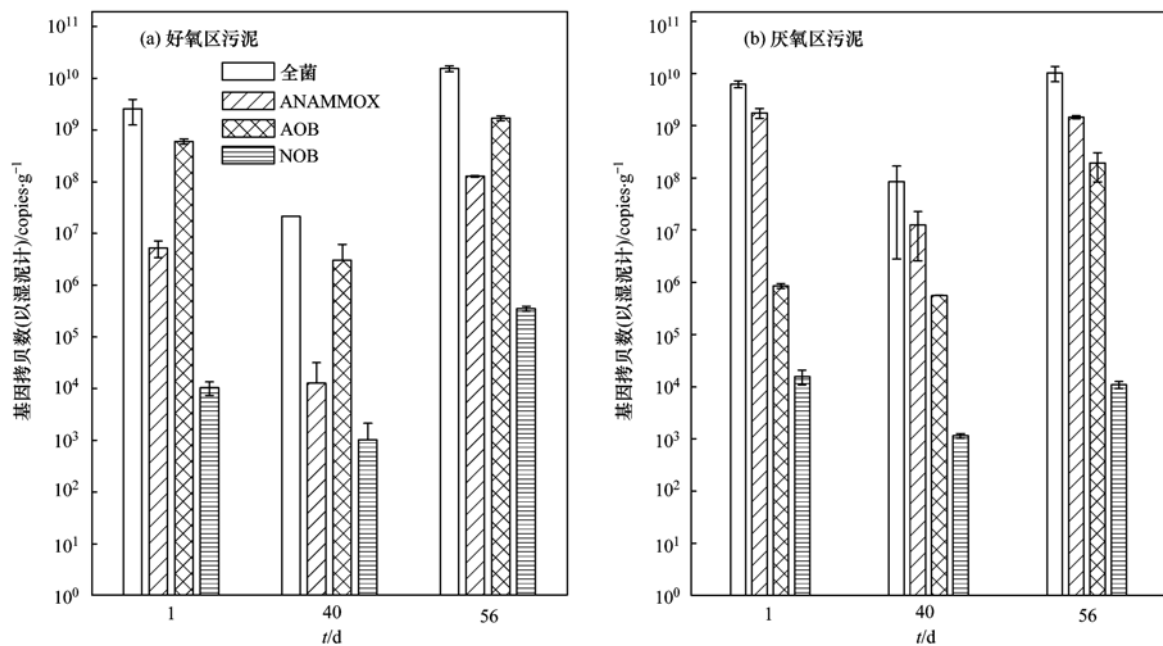


图6 各区域功能菌的定量结果

Fig. 6 Quantification of the functional bacteria in each area

AOB 出现快速生长,增长量达到接种时的 3 倍,基因拷贝数达到 10^9 数量级,占据主导地位. 虽然 NOB 也出现一定量的增长,但是与 AOB 相比基因拷贝数仍然相差 4 个数量级,说明在运行过程中仍受到较好的抑制. 由于本研究 PN 采用的是生物膜法,膜内部厌氧环境有利于 ANAMMOX 菌的增殖,同时,在好氧区污泥中 ANAMMOX 菌基因拷贝数也达到了 10^8 数量级. 较厌氧区 ANAMMOX 菌基因拷贝数 10^9 数量级仍相差 10 倍之多. 即在好氧区主导功能菌仍然是 AOB. 厌氧区颗粒污泥系统中,ANAMMOX 菌的基因拷贝数恢复到 10^9 数量级,仍占据主导功能菌的地位. 但是 AOB 的数量增长了 2 个数量级,出现此现象可能是因为:一方面好氧区的生物膜脱落随水流入厌氧区,从而包裹在 ANAMMOX 颗粒污泥表面,使得 AOB 数量上升;另一方面好氧区的微氧环境,会带入部分 DO 进入厌氧区,导致厌氧区部分 AOB 增殖. 但是在厌氧区仍然以 ANAMMOX 菌占据主导功能菌的地位.

3 结论

(1) 在常温 (22°C) 的条件下能够实现 PN-ANAMMOX 工艺联合脱氮,但是因温度未达到 AOB 和 ANAMMOX 菌的最适需求,联合工艺的脱氮速率由 $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 下降到 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; 当温

度恢复到中温 (32°C) 后,联合工艺的脱氮速率迅速升高到 $1.75 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 由 QPCR 分析控制,常温 (22°C) 的条件下不利于 AOB 和 ANAMMOX 微生物生长,中温环境的功能微生物在常温条件下会出现大量死亡. 中温条件下,AOB 和 ANAMMOX 微生物的基因拷贝数在好氧和厌氧环境分别出现快速增多,说明微生物出现快速增长.

(3) 温度升高后,NOB 的活性会迅速提高,导致 PN 过程失稳. 通过提高出水回流量的方式可以有效地控制 NOB 的增殖.

参考文献:

- [1] 唐崇俭,郑平,陈建伟,等. 基于基质浓度的厌氧氨氧化工艺运行策略[J]. 化工学报, 2009, **60**(3): 718-725.
Tang C J, Zheng P, Chen J W, *et al.* Performance of ANAMMOX process with different operation strategies based on substrate concentration [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, **60**(3): 718-725.
- [2] Strous M, Van Gerven E, Zheng P, *et al.* Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations [J]. Water Research, 1997, **31**(8): 1955-1962.
- [3] Shalini S S, Joseph K. Start-up of the SHARON and ANAMMOX process in landfill bioreactors using aerobic and anaerobic ammonium oxidising biomass [J]. Bioresource Technology, 2013, **149**: 474-485.
- [4] Hwang I S, Min K S, Choi E, *et al.* Nitrogen removal from piggery waste using the combined SHARON and ANAMMOX process [J]. Water Science and Technology, 2005, **52** (10-11): 487-494.

- [5] Takaaki T, Yamauchi H, Nishimura S, *et al.* Application of the nitrification and anammox process into inorganic nitrogenous wastewater from semiconductor factory [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, **137**(2): 146-154.
- [6] Yamamoto T, Takaki K, Koyama T, *et al.* Long-term stability of partial nitrification of swine wastewater digester liquor and its subsequent treatment by Anammox[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(14): 6419-6425.
- [7] Van Der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [8] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, *et al.* Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **126**: 283-289.
- [9] Daverey A, Chei P C, Dutta K, *et al.* Statistical analysis to evaluate the effects of temperature and pH on anammox activity [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, **102**: 89-93.
- [10] 崔劍虹, 李祥, 黃勇. 部分亞硝化-厭氧氨氧化工藝聯合形式、應用及脫氮效能評析[J]. *化工進展*, 2015, **34**(8): 3142-3146.
- Cui J H, Li X, Huang Y. Evaluation of combination, application and nitrogen removal efficiency of partial nitrification-anammox process[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, **34**(8): 3142-3146.
- [11] Lotti T, Kleerebezem R, Hu Z, *et al.* Simultaneous partial nitrification and anammox at low temperature with granular sludge [J]. *Water Research*, 2014, **66**: 111-121.
- [12] Winkler M K H, Kleerebezem R, van Loosdrecht M C M. Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures [J]. *Water Research*, 2012, **46**(1): 136-144.
- [13] van De Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [14] 楊朋兵, 李祥, 黃勇, 等. 苯酚對厭氧氨氧化污泥脫氮效能長短期影响[J]. *環境科學*, 2015, **36**(10): 3771-3777.
- Yang P B, Li X, Huang Y, *et al.* Short or long term influence of phenol on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX sludge[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3771-3777.
- [15] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Metagenomic insights into the effects of volatile fatty acids on microbial community structures and functional genes in organotrophic anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **196**: 621-633.
- [16] 儲昭瑞. 厭氧氨氧化反應器啟動及微生物群落結構解析 [D]. 哈爾濱: 哈爾濱工業大學, 2012.
- Chu Z R. Study on the start-up of anammox reactor and microbial community analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] 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.
- [18] Jaroszynski L W, Cicek N, Sparling R, *et al.* Impact of free ammonia on anammox rates (anoxic ammonium oxidation) in a moving bed biofilm reactor [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(2): 188-195.
- [19] Vázquez-Padín J R, Fernández I, Morales N, *et al.* Autotrophic nitrogen removal at low temperature [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **63**(6): 1282-1288.
- [20] Qiao S, Tian T, Duan X M, *et al.* Novel single-stage autotrophic nitrogen removal via co-immobilizing partial nitrifying and anammox biomass [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **230**: 19-26.
- [21] Sliemers A O, Third K A, Abma W, *et al.* CANON and anammox in a gas-lift reactor [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2003, **218**(2): 339-344.
- [22] Paredes D, Kusch P, Mbewette T S A, *et al.* New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment-a review[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2007, **7**(1): 13-25.
- [23] 李祥, 崔劍虹, 袁硯, 等. 高氨氮對具有回流的 PN-ANAMMOX 串聯工藝的脫氮影响[J]. *環境科學*, 2015, **36**(10): 3749-3755.
- Li X, Cui J H, Yuan Y, *et al.* Effect of high ammonium on nitrogen removal in an partial nitrification-ANAMMOX Process with reflux system [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3749-3755.
- [24] Yusof N, Hassan M A, Phang L Y, *et al.* Nitrification of ammonium-rich sanitary landfill leachate [J]. *Waste Management*, 2010, **30**(1): 100-109.
- [25] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant [J]. *Water Research*, 2009, **43**(3): 563-572.
- [26] Kocamemi B A, Dityapak D, Semerci N. Evaluation of pH, ORP and conductivity profiles in an Anammox reactor started-up using municipal activated sludge seed [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2011, **22**(S1): S38.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行