

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,李迎春,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 Co₃O₄ 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 N₂O 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非和 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)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响

付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田

(北京建筑大学环境与能源工程学院,城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,北京 100044)

摘要: 在温度为 30℃ ± 1℃ 条件下,采用陶粒为填料的序批式 CANON 反应器,以人工配置无机高氨氮废水为进水,研究不同初始 pH 值对 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响。试验过程中,控制进水氨氮浓度相同, HRT = 5 h,曝气量为 6 m³ · (m³ · h)⁻¹ 时,调节进水 pH 值分别为 6.64、6.98、7.15、7.88 和 7.95,研究发现,初始 pH 值在 6.64 ~ 7.95 之间时, CANON 工艺脱氮效果基本保持稳定, TN 去除率分别为 81.38%、87.32%、92.12%、88.21% 和 86.84%, TN 去除负荷均在 1.56 kg · (m³ · d)⁻¹ 以上; 各周期初始 N₂O 释放速率基本相同,先升高后降低,且初始 pH 值越低 N₂O 释放速率峰值越高,而 N₂O 释放量和释放率也均随初始 pH 增加而减少。初始 pH 值在 6.64 ~ 7.95 之间对总氮去除影响不大,但对 N₂O 释放有较大影响。要同步实现 CANON 工艺高效脱氮和 N₂O 释放减量化,应将进水 pH 调节在 7.90 附近。

关键词: pH; CANON; 氧化亚氮; 脱氮; 序批式生物膜反应器

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4261-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201604221

Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N₂O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor

FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, ZHOU Hou-tian

(Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: A completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) reactor with haydite as carrier was operated in a sequencing batch biofilm reactor. The effect of different initial pH on nitrogen removal performance and N₂O emission was investigated using synthetic inorganic ammonia-rich wastewater as influent at 30℃ ± 1℃. During the experiment, the pH of influent was controlled at 6.64, 6.98, 7.15, 7.88 and 7.95 under the same influent ammonia concentration condition, with hydraulic retention time of 5 hours and aeration rate of 6 m³ · (m³ · h)⁻¹. The results showed that, when the initial pH was between 6.64 and 7.95, the performance of autotrophic nitrogen removal over nitrite was basically stable. The total nitrogen removal efficiencies were 81.38%, 87.32%, 92.12%, 88.21% and 86.84%, respectively. And the total nitrogen removal loads were all higher than 1.56 kg · (m³ · d)⁻¹. Initial N₂O emission rates were basically equal and decreased after rising to a peak value. Besides, the lower the initial pH was, the higher the maximum N₂O emission rate was. In addition, N₂O emissions and ratios decreased with rising initial pH. Initial pH between 6.64 and 7.95 had little influence on nitrogen removal but N₂O emissions. Initial pH should be kept at about 7.90 to achieve high efficient nitrogen removal and reduction of N₂O emission synchronously.

Key words: pH; CANON; N₂O; nitrogen removal; sequencing batch biofilm reactor

全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process, CANON) 工艺通过氨氧化细菌 (ammonium oxidation bacteria, AOB) 和厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 细菌协同作用实现自养脱氮^[1], 在污水脱氮方面具有不需有机碳源、节省曝气量和剩余污泥少^[1] 等优点, 目前主要应用于垃圾渗滤液^[2]、污泥消化液^[3] 等高氨氮废水的处理。但是, CANON 工艺在实现高效脱氮的同时, 还会产生一种强温室气体——氧化亚氮 (N₂O)^[4]。N₂O 是除 CO₂、CH₄ 以外的第 3 大温室气体, 全球增温潜势 (global warming potential, GWP)^[5] 远高于前两者, 此外, 它还会与平流层中

的臭氧反应, 破坏臭氧层^[6], 或经一系列化学反应生成硝酸, 伴随雨水形成酸性降水^[7], 影响人类的生存健康。因此, 为了防止氮素污染问题由水环境转向大气环境^[8], 控制 N₂O 的释放尤其重要。pH 值能影响微生物的生长, 要保证 CANON 工艺的稳定运行, 就必须保证 pH 值适合 AOB 和 ANAMMOX 细菌的生长^[9]。此外, pH 值还会对污水中游离氨 (free ammonia, FA) 和游离亚硝酸 (free

收稿日期: 2016-04-26; 修订日期: 2016-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308025); 北京市科研基地建设项目 (2016)

作者简介: 付昆明 (1981 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: fukunming@163.com

nitrous acid, FNA) 浓度产生影响, 而无论 FA 还是 FNA 都会对硝化细菌的活性产生影响, 导致亚硝酸盐积累或 N_2O 还原酶 (Nos) 失活, 进而影响 N_2O 的产生^[10]. 目前硝化过程和反硝化过程中 pH 值对于 N_2O 释放的影响报道较多, 而 CANON 过程中 pH 对于 N_2O 释放的影响还没有清晰的认识. 本文主要研究不同进水 pH 值对 CANON 工艺中脱氮效果和 N_2O 释放的影响, 以期为实现 N_2O 减量化提供指导性建议.

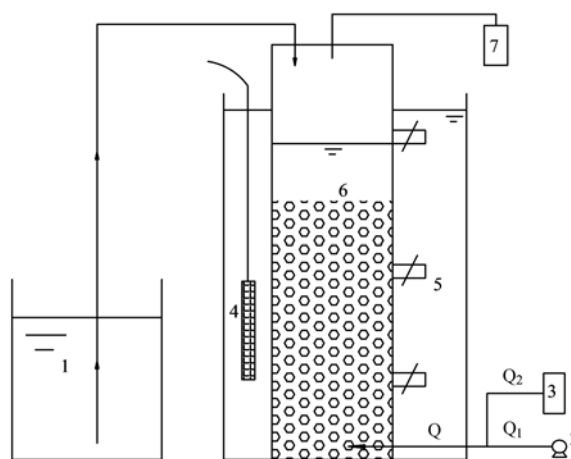
1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为序批式生物膜反应器 (sequencing batch biofilm reactor, SBBR) 反应器, 如图 1 所示. 反应器由有机玻璃制成, 内径为 9 cm, 高 30 cm, 有效容积为 1.50 L. 原水由上部瞬时进入, 由侧面出水口排出. 使用空气泵由反应器底部圆盘状气泡石向反应器曝入空气, 并用转子流量计控制曝气量. 反应器内温度通过水浴调节控持在 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. 反应器以陶粒为填料, 陶粒的规格为 $\Phi 2 \sim 4$ mm, 湿密度为 $1.00 \sim 1.20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 孔隙率为 40%.

1.2 试验用水

试验用水采取人工配水 (表 1). 即向自来水中添加 NH_4Cl 、 HCO_3^- (由 NaHCO_3 提供)、 KH_2PO_4 10



1. 原水水箱; 2. 空气泵; 3. 气体采样袋;
4. 恒温加热棒; 5. 出水口; 6. 陶粒; 7. 气体采样袋
图 1 SBBR 反应器试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart of SBBR

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和微量元素浓缩液 I $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 、微量元素浓缩液 II $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中, 微量元素浓缩液 I: EDTA $5\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, FeSO_4 $5\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素浓缩液 II: EDTA $15\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_3 $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 反应器进水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Water quality of influent for reactor/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	碱度	Ca^{2+}	Mg^{2+}	pH (无量纲)
400	10	2 000	185 ~ 220	140 ~ 160	6.50 ~ 8.00

1.3 试验方法

反应器在好氧条件下运行. 每周期包括: 瞬时进水 \rightarrow 曝气 (300 min) \rightarrow 排水 (1 min), 排水比为 100%, 进水 pH 值依次调节为 6.64、6.98、7.15、7.88、7.95, 并在温度为 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 曝气量为 $6 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下运行. 试验过程中, 每隔 1 h 取水样, 每隔 30 min 取气体样品, 并检测 pH 值和 DO. 每个试验 pH 值运行 1 个周期后, 再次恢复正常状态运行以维持生物膜活性. 为保证试验结果的可靠性, 各试验 pH 值均运行 3 个周期左右, 并选取其中一个典型周期进行分析.

1.4 分析项目及检测方法

试验过程中, 按照需求, 分别检测水样和气样.

1.4.1 水质分析及计算方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂比色法^[11]; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: N-(1-萘基)-乙二胺光度法^[11]; $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 紫外分光光度法^[11]; pH 值: 实验室 pH 计 FE20 (梅特勒-托利多, 瑞士); 溶解氧: Multi 350i 溶解氧仪 (WTW, 德国); TN 按下式计算: $\text{TN} = [\text{NH}_4^+ - \text{N}] + [\text{NO}_2^- - \text{N}] + [\text{NO}_3^- - \text{N}]$; FA: 通过式 (1) 计算^[12]; FNA: 通过式 (2) 计算^[12]; SS 和 VSS: 重量法^[11]; 温度: 水银温度计.

FA 的计算公式:

$$\text{FA} = \frac{17}{14} \times \frac{[\text{NH}_4^+ - \text{N}] \times 10^{\text{pH}}}{e^{\frac{6344}{273+T}} + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中, $[\text{NH}_4^+ - \text{N}]$ 为污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); T 为反应温度 ($^\circ\text{C}$).

FNA 的计算公式:

$$FNA = \frac{47}{14} \times \frac{[\text{NO}_2^- - \text{N}]}{e^{\frac{-2.300}{273+T}} \times 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中, $[\text{NO}_2^- - \text{N}]$ 为污水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); T 为反应温度 ($^{\circ}\text{C}$).

1.4.2 N₂O 采样分析及计算方法

N₂O 产生量包括 N₂O 的释放量和溶解性 N₂O, 本文主要研究释放的 N₂O. 气体通过密闭性气体采样袋收集, 使用岛津气相色谱仪 GC-2014 (日本) 进行检测, 所用色谱柱为 Porapak Q 填充柱, 检测器为电子捕获检测器 (ECD), 所用载气为 30 mL·min⁻¹ 高纯 N₂, 进样口、柱温箱、检测器的温度分别为 50、80、150 $^{\circ}\text{C}$, 检测时间为 1 min. 每个气体样品各检测 3 次左右, 取舍后求其平均值.

N₂O 的释放速率公式:

$$\omega_{\text{N}_2\text{O-N}} = Q \cdot c_{\text{N}_2\text{O}} \cdot M_{\text{N}_2\text{O-N}} \cdot P / (R \cdot T \cdot V_L) \quad (3)$$

式中, $\omega_{\text{N}_2\text{O-N}}$ 为 N₂O 的释放速率 ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$); Q 为空气流速 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); $c_{\text{N}_2\text{O}}$ 为释放气体中 N₂O 的比例; $M_{\text{N}_2\text{O-N}}$ 为 N₂O-N 的摩尔质量 ($14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$); P 为大气压 ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$); R 为气体常数 ($8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$); T 为热力学温度 (K); V_L 为 SBBR 反应器的工作容积 (1.50 L).

N₂O 的释放量公式:

$$m_{\text{N}_2\text{O-N}} = \sum_{n=2}^n \left[\frac{(\omega_{\text{N}_2\text{O-N}, n-1} + \omega_{\text{N}_2\text{O-N}, n})}{2} \cdot \Delta t \cdot V_L \right] \quad (4)$$

式中, $m_{\text{N}_2\text{O-N}}$ 为 N₂O 的总释放量 (g); n 为取样次数; $\omega_{\text{N}_2\text{O-N}, n}$ 为第 n 次取样时 N₂O 的释放速率 [$\text{g} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$]; Δt 为每次取样的间隔时间 (30 min); V_L 为 SBBR 反应器的工作容积 (1.50 L).

N₂O-N 的释放率 = 释放 N₂O-N 总量 / TN 去除量

2 结果与讨论

2.1 初始 pH 值对脱氮效果的影响

试验过程中, 为了解不同初始 pH 值对 CANON 工艺的脱氮效果的影响, 对周期内氮元素、pH 和

DO 的变化情况进行监测分析, 试验结果如图 2 所示.

2.1.1 反应器内氮素的变化规律

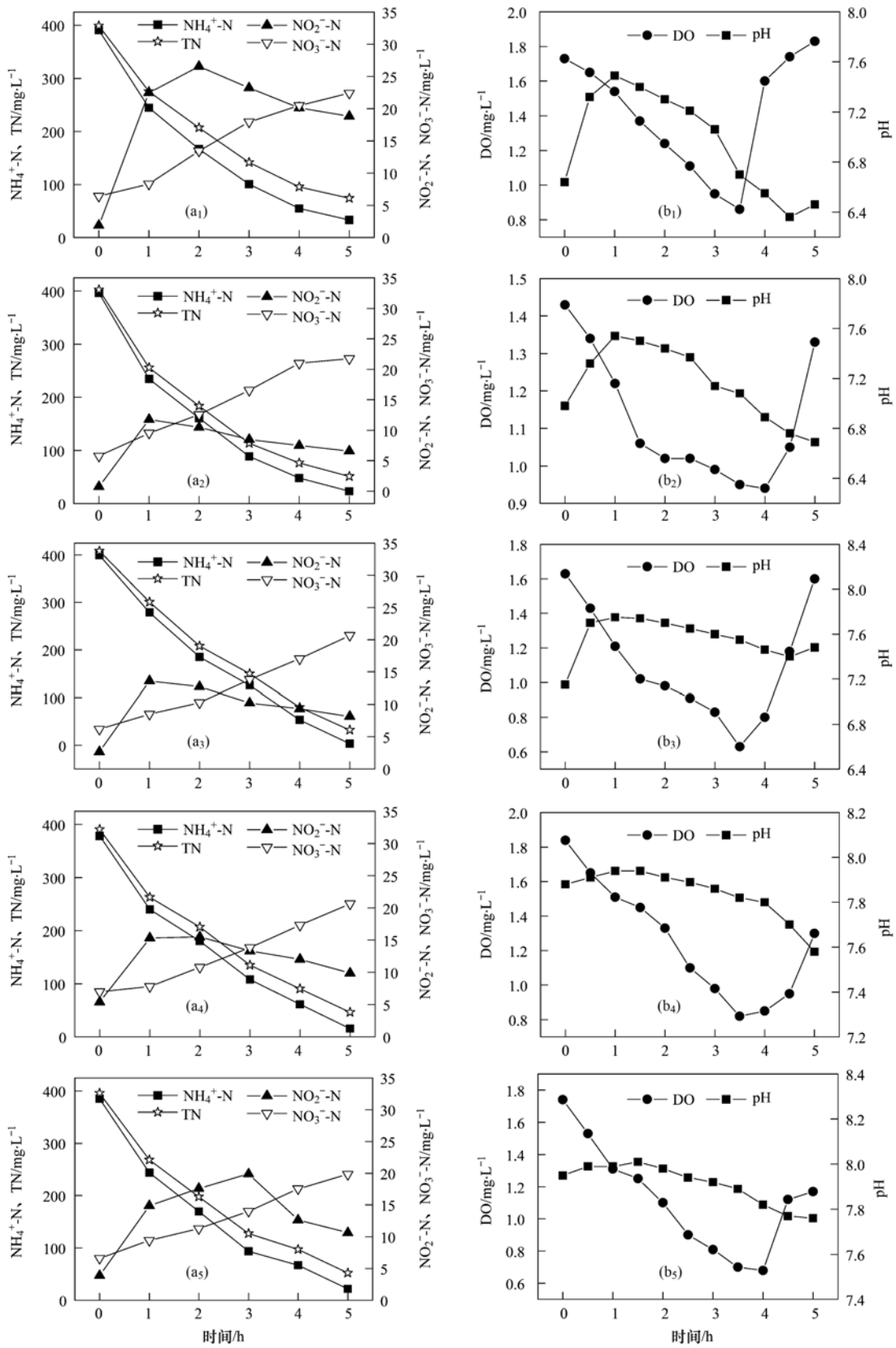
如图 2(a₁) ~ 2(a₅) 所示, 不同初始 pH 值条件下, HRT = 5 h 时, 各周期的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 均有良好的去除效果, 去除速率均在第 1h 内达到最大, 并随着曝气时间的延长而逐渐降低. 由表 2 可知, 各周期的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均在 90.00% 以上, TN 去除率均在 80.00% 以上, TN 去除负荷也都在 $1.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 以上. TN 去除负荷高于笔者在 35°C 下启动的海绵 CANON 反应器 $1.22 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ [13], 亦高于 Sliemers 等 [14] 使用气提式反应器启动的 CANON 反应器得到的氮容积去除负荷 $1.50 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 这可能是因为在系统中参与脱氮作用的 ANAMMOX 菌较多 (折合 MLSS 为 $5100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 有关, 可迅速将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 N₂. TN 去除负荷在不同初始 pH 值时变化不大, 原因是碱度作为缓冲剂来调节反应器内 pH [15], 使反应器的 pH 值在反应开始时能迅速调节到 7.50 左右, 适宜 AOB 和 ANAMMOX 细菌的生长. AOB 的最适 pH 值为 7.50 ~ 8.00, 而 ANAMMOX 菌在 pH 值为 6.70 ~ 8.30 时能保持较高活性 [16]. 由此可知, 当初始 pH 值处于 6.64 ~ 7.95 之间时, CANON 工艺的脱氮效果基本能够维持稳定, 且 pH 值为 7.15 时 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果最好, 这与李冬等 [9] 在 pH 值为 8.00 得到总氮最高去除率 82.94% 不同.

如图 2(a₁) ~ 2(a₅) 所示, 各周期运行过程中, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均呈现先上升后下降的变化规律, 原因是反应初期, ANAMMOX 细菌受 DO 突变的影响, 活性受到抑制, 厌氧氨氧化速率较低 [17], 而 AOB 氨氧化速率随 DO 增加而提高 [18], $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 生成速率大于消耗速率, 导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累; 随着反应进行, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的增加刺激 ANAMMOX 细菌活性的增强 [19], 厌氧氨氧化速率逐渐提高, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 消耗速率接近其产生速率, 浓度逐渐下降. 由于各周期反应时, AOB、ANAMMOX 菌相对反应速率的差别,

表 2 不同初始 pH 值时反应器的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率

Table 2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN removal efficiencies of reactor at different initial pH

初始 pH 值	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率 /%	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷 / $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	TN 去除率 /%	TN 去除负荷 / $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$
6.64	91.53	1.75	81.38	1.65
6.98	94.26	1.74	87.32	1.65
7.15	99.17	1.90	92.12	1.80
7.88	95.88	1.79	88.21	1.69
7.95	94.39	1.72	86.84	1.56



(a₁、b₁)、(a₂、b₂)…(a₅、b₅)依次对应 pH 为 6.64、6.98、7.15、7.88、7.95

图 2 初始 pH 为 6.64、6.98、7.15、7.88 和 7.95 时反应器内各指标的变化

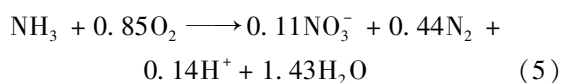
Fig. 2 Variations of indexes in reactor at initial pH of 6.64, 6.98, 7.15, 7.88, 7.95

NO_2^- -N 浓度峰值出现在不同的时刻, 其中, 初始 pH 值为 6.64 时, NO_2^- -N 浓度在 2 h 达到最大; 初始 pH 值为 6.98 ~ 7.88 时, NO_2^- -N 浓度在第 1 h 左右达到最大; 而初始 pH 值为 7.95 时, NO_2^- -N 浓度在第 3 h 达到最大. 原因是, pH 值为 6.64 时, FA 的浓度只有 $1.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 AOB 和 ANAMMOX 细菌代谢的真正底物是 NH_3 , 底物浓度较低导致氨氧化速率较慢, 同时 ANAMMOX 细菌由于缺乏足够的底物 (NH_3) 无法顺利进行^[20], 导致系统中 NO_2^- -N 积累较长时间; pH 为 7.95 时则由于 NO_2^- -N 浓度较低而限制 ANAMMOX 反应的进行^[21], NO_2^- -N 浓度峰值滞后; pH 为 6.98 ~ 7.88 之间时 NO_2^- -N 浓度较快达到峰值, 说明系统内亚硝化反应和厌氧氨氧化反应很快达到平衡^[20], 尤其 pH 为 7.15 时更有利于提高 CANON 系统的脱氮性能. 另外, 各周期运行过程中, NO_3^- -N 浓度逐渐增加, 并且 δNO_3^- -N/ δTN 小于理论值 0.127^[16], 这表明反应器中亚硝酸氧化反应较弱, CANON 工艺的短程硝化维持稳定^[22].

2.1.2 pH 和 DO 的变化

从图 2(b₁) ~ 2(b₅) 可以看出, 各周期的 DO 先降低后升高, 这是因为反应初期, 突然开始曝气造成 DO 浓度迅速升高, 随着反应进行, 曝气系统持续向反应器供氧, AOB 氨氧化过程耗氧速率逐渐增加, 表现出 DO 浓度逐渐下降, 当 NH_4^+ -N 耗尽时, 反应器内耗氧能力最弱, DO 迅速上升, 表观上形成突变过程, 这有助于指示反应终点^[23].

各周期反应过程中, pH 均呈现先增加后下降的趋势. 反应初期碱度调节使反应器内 pH 维持在 7.50 ~ 8.00 之间, 为系统内微生物提供合适的环境, 且初始 pH 值越低, 曝气反应初期的突变值相对越大. 随着反应进行, pH 值逐渐下降, 主要是 AOB 和 ANAMMOX 细菌共同作用的结果. AOB 氨氧化过程产生 H^+ 使 pH 下降, 而厌氧氨氧化过程消耗 H^+ 使 pH 值上升, 二者共同作用仍表现 pH 下降, 如式(5)^[24]. 当 NH_4^+ -N 消耗完时, 亚硝酸化作用和厌氧氨氧化作用均也停止, 而亚硝酸氧化过程也不会引起 pH 值的变化, 此时 pH 的小幅度上升是曝气吹脱的作用, 微生物代谢产生的 CO_2 被吹脱出反应器, 使系统 pH 值上升^[25].



2.2 初始 pH 值对 N_2O 释放的影响

2.2.1 各周期 N_2O 释放速率的变化

反应器运行过程中, 各周期每隔 30 min 采集气

体样品, 检测 N_2O 的含量, 分析和比较各周期 N_2O 释放速率的变化, 试验结果如图 3 所示.

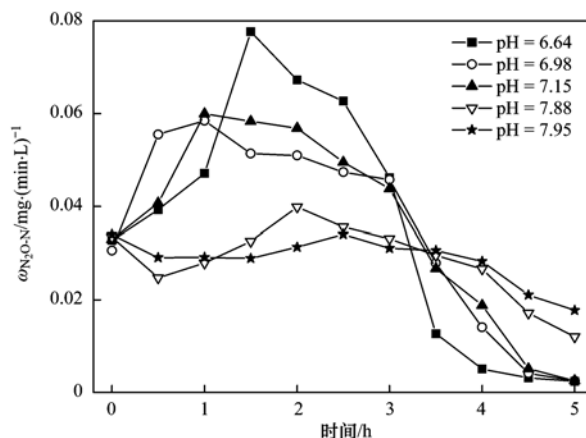


图 3 不同初始 pH 值时反应器的 ω_{N_2O-N} 的变化

Fig. 3 Variations of ω_{N_2O-N} in reactor at different initial pH

由图 3 可知, 曝气反应开始时, 各周期 N_2O 的释放速率 ω_{N_2O-N} 基本相同, 约为 $0.033 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$. 随着反应的进行, 初始 pH 值为 6.64 ~ 7.15 时, ω_{N_2O-N} 逐渐升高, 并分别于第 1.5 h、第 1 h、第 1 h 达到顶峰, 依次为 0.078 、 0.058 、 $0.060 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$, 而初始 pH 值为 7.88 和 7.95 时, ω_{N_2O-N} 并未直接升高, 而是先下降, 后又升高至最大值, 分别为 $0.040 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$ 、 $0.034 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$. 曝气反应初期, N_2O 产生的主要原因是系统中 NH_4^+ -N 浓度较高, NH_4^+ -N 氧化过程的第一个中间产物羟氨 (NH_2OH) 容易发生积累, 而积累的 NH_2OH 可能在羟氨氧化还原酶 (HAO) 的作用下产生 N_2O ^[26]. 反应初期, 初始 pH 为 6.64 ~ 7.15 之间的 ω_{N_2O-N} 逐渐升高, 可能是低 pH 值能够对微生物起到一定的筛选作用, 也就是说低 pH 值条件有利于以 N_2O 为最终产物的微生物菌种的生长^[26], 而初始 pH 为 6.64 时的 ω_{N_2O-N} 最低可能是由于底物 NH_3 的浓度限制作用. 初始 pH 值为 7.88 和 7.95 时, ω_{N_2O-N} 先下降, 可能原因是初期 pH 为 7.88 和 7.95 的反应器中 FA 浓度分别为 $28.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $32.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FA 的存在抑制了 AOB 细菌的活性, 导致 N_2O 释放速率下降.

N_2O 释放速率达到峰值是各周期 NO_2^- -N 在不同时刻积累的结果. 这期间 N_2O 产生的主要原因是 AOB 的自养反硝化作用^[27], 其在异构亚硝酸盐还原酶 (isoNir) 的催化下可将 NO_2^- -N 还原成 N_2O . 结合图 2(a₁) ~ 2(a₅) 发现, 初始 pH 为 6.64 ~ 7.15 之间时, NO_2^- -N 积累浓度越高, N_2O 释放速率峰值越高.

另一方面, pH 值越低, 所形成的 FNA 浓度越高, 而 FNA 非常容易进入细胞膜, 抑制 ATP 酶而导致 ATP 无法生成, 进而影响微生物的代谢活性^[28], 并且, FNA 还能和 Nos 酶的活性部位发生反应, 致使 Nos 酶失活, 抑制 N₂O 的还原. 初始 pH 值为 7.88 的 N₂O 释放速率峰值大于 pH 值为 7.95 的 N₂O 释放速率, 可能是因为初始 pH 值为 7.88 时的反应器内 DO 浓度更高, 对 Nos 酶的抑制作用更强, N₂O 释放速率随 DO 增大而增大^[26].

各周期的 ω_{N_2O-N} 达到顶峰后, 均随着时间而迅速下降, 且周期反应末期, 初始 pH 值越低, N₂O 释放速率越低. 这是因为随着曝气时间的延长, 各周期的 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 等基质浓度逐渐下降, 可转化为 N₂O 的氮元素减少; 另外, 一方面, pH 值越低, FA 浓度越低, AOB 自养反硝化需要的电子供体越少, N₂O 释放速率越低, 另一方面, pH 值越低, FNA 浓度越高, 对 AOB 活性的抑制作用越强, 两者共同作用导致低 pH 值 N₂O 释放速率低.

2.2.2 各周期 N₂O 释放量和释放率的变化

如图 4 所示, 随着初始 pH 值的升高, 各周期的 N₂O 释放总量依次为 17.04、16.75、16.99、13.04、13.02 mg, 其中, 初始 pH 值为 6.98 与初始 pH 值为 7.15 相比, 后者的 N₂O 释放总量略高于前者, 这可能是因为, 在两者初始 pH 值相差不大的情况下, 由于人为操作原因, 后者的初始 NO₂⁻-N 浓度比前者略高 2 mg, 导致其 N₂O 释放总量略高. 各周期 N₂O 释放率均大于 5%, 而 Sliemers 等^[24]对 CANON 反应器处理人工配水的小试研究表明, N₂O 排放量非常小, 低于总氮负荷的 0.1%, 张强^[29]也在 SBBR 单级自养脱氮系统中得到最高 3.33% 的 N₂O 转化率. 原因可能是, 反应器内 DO 浓度较高, 最高达到 1.85 mg·L⁻¹,

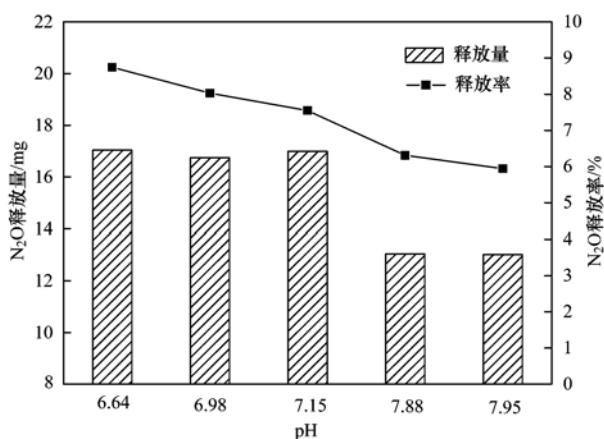


图 4 不同初始 pH 值时反应器的 N₂O 释放量的变化

Fig. 4 Variations of N₂O emissions in reactor at different initial pH

一定程度上抑制了 ANAMMOX 菌的活性^[17], 导致 NO₂⁻-N 积累, 同时 DO 的存在还会对 Nos 酶产生抑制作用^[30], 阻碍 N₂O 的还原. 各周期的 N₂O 释放比例随着初始 pH 值的升高而降低, 初始 pH 值为 6.64 时 N₂O 释放率高达 8.75%, 而初始 pH 值为 7.95 时 N₂O 释放率低至 5.94%. 这是因为低 pH 值会抑制 Nos 酶的活性, 抑制作用主要是通过 FNA 实现的^[10], pH 值越低, 同样浓度的 NO₂⁻-N 会产生更多的 FNA, 而 FNA 超过 0.004 mg·L⁻¹ 时, 即可完全抑制 N₂O 的还原^[31].

因此, CANON 工艺中, 初始 pH 值对 N₂O 的影响较大, 其越接近 7.95, N₂O 释放量越少; 反之, 低 pH 下, 由于菌种的筛选作用和 FNA 的抑制作用, N₂O 的释放量较多. 所以, 为了减少 N₂O 的释放, 建议将 pH 值控制在 7.90 左右.

3 结论

(1) 初始 pH 在 6.64 ~ 7.95 之间, CANON 工艺均能保持稳定的脱氮效果, 且在 pH 为 7.15 时去除效果最好, TN 去除率达到 92.12%, TN 去除负荷为 1.80 kg·(m³·d)⁻¹.

(2) 序批反应过程中, N₂O 释放速率整体上均呈现先升高至最大值, 再下降的趋势, 且初始 pH 在 6.64 ~ 7.95 之间, pH 值越高, 释放速率峰值越低, N₂O 释放量和释放率越低, pH 值为 7.95 时 N₂O 释放量占 TN 去除量 5.94%.

(3) CANON 工艺同步实现高效脱氮和 N₂O 减量应应将 pH 控制在 7.90 附近.

参考文献:

- [1] Fux C, Boehler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant[J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(3): 295-306.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 耿军军, 王亚宜, 张兆祥, 等. 污水生物脱氮革新工艺中强温室气体 N₂O 的产生及微观机理[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(9): 1729-1738.
Geng J J, Wang Y Y, Zhang Z X, *et al.* N₂O production and mechanism in recently developed biological nitrogen removal processes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(9): 1729-1738.

- [5] 王长科, 罗新正, 张华. 全球增温潜势和全球温变潜势对主要国家温室气体排放贡献估算的差异[J]. 气候变化研究进展, 2013, **9**(1): 49-54.
Wang C K, Luo X Z, Zhang H. Differences between the shares of greenhouse gas emissions calculated with GTP and GWP for major countries [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2013, **9**(1): 49-54.
- [6] Conrad R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO) [J]. Microbiological Reviews, 1996, **60**(4): 609-640.
- [7] 王少彬. 大气中氧化亚氮的源、汇和环境效应[J]. 环境保护, 1994, (4): 23-27.
- [8] 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.
- [9] 李冬, 苏庆岭, 梁瑜海, 等. 碱度和 pH 值对 CANON 工艺脱氮效果的影响[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(3): 13-18.
Li D, Su Q L, Liang Y H, et al. Effect of alkalinity and pH value on performance of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process[J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(3): 13-18.
- [10] Zhou Y, Oehmen A, Lim M, et al. The role of nitrite and free nitrous acid (FNA) in wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2011, **45**(15): 4672-4682.
- [11] 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. 258-415.
- [12] Anthonisen A C, Loeh R C, Prakasam T B, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1976, **48**(5): 835-852.
- [13] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1689-1694.
Fu K M, Zhang J, Cao X S, et al. Study of CANON process start-up under aerobic conditions [J]. Environmental Science, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- [14] Sliemers O A, Third K A, Abma W, et al. CANON and Anammox in a gas-lift reactor[J]. FEMS Microbiology Letters, 2003, **218**(2): 339-344.
- [15] Gut L, Plaza E, Hultman B. Assessment of a two-step partial nitrification/Anammox system with implementation of multivariate data analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2007, **86**(1): 26-34.
- [16] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [17] Strous M, van Gerven E, Kuenen J G, et al. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(6): 2446-2448.
- [18] Guisasaola A, Jubany I, Baeza J A, et al. Respiriometric estimation of the oxygen affinity constants for biological ammonium and nitrite oxidation [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2005, **80**(4): 388-396.
- [19] 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.
Fu K M. Start-up and performance of nitrogen removal of CANON reactor[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [20] 郭劲松, 杨国红, 方芳, 等. 温度和 pH 值对 CANON 工艺的影响试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(1): 22-26.
Guo J S, Yang G H, Fang F, et al. Study of the influence of temperature and pH value on CANON process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(1): 22-26.
- [21] 秦宇, 方芳, 郭劲松. pH 值对 SBBR 自养脱氮系统效能及功能菌数量的影响[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(17): 36-39.
Qin Y, Fang F, Guo J S. Effect of pH on SBBR autotrophic nitrogen removal process[J]. China Water & Wastewater, 2012, **28**(17): 36-39.
- [22] 付昆明, 左早荣, 仇付国. 陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 995-1001.
Fu K M, Zuo Z R, Qiu F G. Start-up by inoculation and operation of a CANON reactor with haydite as the carrier [J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 995-1001.
- [23] Kartal B, Kuypers M M M, Lavik G, et al. Anammox bacteria disguised as denitrifiers: nitrate reduction to dinitrogen gas via nitrite and ammonium[J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(3): 635-642.
- [24] Sliemers A O, Derwort N, Gomez J L C, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Water Research, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [25] 张杰, 付昆明, 曹相生, 等. 序批式生物膜 CANON 工艺的运行与温度的影响[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(8): 850-855.
Zhang J, Fu K M, Cao X S, et al. Performance of CANON process in a sequencing batch biofilm reactor and influence of temperature[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(8): 850-855.
- [26] Hanaki K, Hong Z, Matsuo T. Production of nitrous oxide gas during denitrification of wastewater [J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(5-6): 1027-1036.
- [27] Poth M, Focht D D. ¹⁵N Kinetic analysis of N₂O production by *Nitrosomonas europaea*: an examination of nitrifier denitrification [J]. Applied & Environmental Microbiology, 1985, **49**(5): 1134-1141.
- [28] 李权斌, 荣宏伟, 张朝升, 等. pH 对生物膜同步硝化反硝化脱氮及其 N₂O 产量的影响[J]. 水处理技术, 2016, **42**(1): 121-124, 135.
Li Q B, Rong H W, Zhang C S, et al. Effects of pH on SND and the N₂O production in biofilm reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2016, **42**(1): 121-124, 135.
- [29] 张强. SBBR 单级自养脱氮系统 N₂O 排放特征及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Zhang Q. The N₂O emission characteristics and influence factors on N₂O emission in single SBBR completely autotrophic nitrogen removal system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [30] Otte S, Grobber N G, Robertson L A, et al. Nitrous oxide production by *Alcaligenes faecalis* under transient and dynamic aerobic and anaerobic conditions[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(7): 2421-2426.
- [31] Zhou Y, Pijuan M, Zeng R J, et al. Free nitrous acid inhibition on nitrous oxide reduction by a denitrifying - enhanced biological phosphorus removal sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(22): 8260-8265.

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	LU 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-rui, 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 Piggyery 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