

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

高氨氮对具有回流的 PN-ANAMMOX 串联工艺的脱氮影响

李祥^{1,2}, 崔剑虹^{1,2}, 袁砚^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 袁怡^{1,2}, 刘忻^{1,2}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 苏州 215011)

摘要: 采用具有气升回流的部分亚硝化-厌氧氨氧化串联工艺研究了进水氨氮浓度对其氮素转化特性和微生物群落的影响。结果表明,在恒定氮容积负荷 $2.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下,当进水氨氮浓度上升到 $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,好氧区和厌氧区的 pH 值波动很小,FA 浓度分别维持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,未对功能微生物产生抑制。好氧区的亚硝酸盐生成速率稳定在 $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,厌氧区的氮去除速率稳定在 $31.49 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,联合工艺的总氮去除速率稳定在 $1.67 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。当进水氨氮浓度上升到 $900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,各区域 FA 和 FNA 浓度才出现上升,联合工艺的总氮去除速率稳定在 $1.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。厌氧区出现亚硝酸盐的积累,厌氧氨氧化细菌的活性未出现明显的抑制现象。说明在联合工艺运行过程中,回流可有效地缓解各区域 pH 值的大幅波动,同时稀释了高氨氮浓度所形成的 FA 对功能微生物的毒性作用。

关键词: 厌氧氨氧化; 部分亚硝化; 回流系统; 脱氮效能; 基质浓度

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3749-07 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2015. 10. 025

Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System

LI Xiang^{1,2}, CUI Jian-hong^{1,2}, YUAN Yan^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, YUAN Yi^{1,2}, LIU Xin^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The effect of influent ammonia on nitrogen transformation characteristics and microbial communities in partial nitrification-anaerobic ammonia oxidation (PN-ANAMMOX) process was studied by using a series of partial nitrification and ANAMMOX process with air-lift reflux device. The results showed that when the influent ammonia concentration was increased to $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the nitrogen volume load was stabled at $2.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the fluctuation of pH value was very small in aerobic and anaerobic zone. In the aerobic and anaerobic zone, FA concentrations were maintained at $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, which did not inhibit the growth of microorganisms. Nitrite produce rate was stabled at $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in the aerobic zone, and nitrogen removal rate was stabled at $31.49 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in anaerobic zone, the total nitrogen removal rate was stabled at $1.67 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in combined process. When the influent ammonia concentration was increased to $900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the FA and FNA concentration were increased in each areas, total nitrogen removal rate was decreased and stabled at $1.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. The nitrite was accumulated in the anaerobic zone, and there was no significant inhibition of ANAMMOX bacteria. Our findings indicated that the reflux can effectively alleviate the fluctuation of pH in each area, and dilute FA concentration which is toxic to microorganisms.

Key words: ANAMMOX; partial nitrification; reflux system; nitrogen removal efficiency; substrate concentration

随着厌氧氨氧化微生物筛选及富集培养控制参数研究的不断深入,厌氧氨氧化菌脱氮效能高的特性逐步被研究者所共识^[1]。基于厌氧氨氧化的部分亚硝化-厌氧氨氧化联合自养生物脱氮工艺也因脱氮效能高,无需有机物参与的优势而受到废水处理行业的青睐,正在逐步运用于不同行业的高氨氮低碳废水的处理中^[2~4]。

考虑到部分亚硝化和厌氧氨氧化的酸碱互补、控制过程简便以及占地面积小的优势,很多研究者利用单一反应器仅通过限氧实现两个反应的耦合^[5,6]。但是,在这种情况下低溶解氧限制着亚硝化菌的亚硝化效能,而过高溶解氧又会对厌氧氨氧化

菌的脱氮效能产生抑制,制约着联合工艺的整体脱氮效能提高。虽然串联工艺可有效地规避溶解氧的问题,但又体现不出单一反应器所具有的类似酸碱互补的一些优势。但是很少有研究者考虑在串联工艺中设置回流,将厌氧区出水回流至好氧区,实现两个反应的酸碱互补。

同时,进水氨氮或者亚硝氮产生的游离物[游

收稿日期: 2015-03-31; 修订日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008202); 江苏省环境保护厅重大项目(201104); 江苏省环境科学与工程重点专业项目; 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省企业研究生工作站合作项目

作者简介: 李祥(1984~),男,硕士,实验师,主要研究方向为废水脱氮处理理论及工艺, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

离氨(FA)和游离亚硝酸盐(FNA)]易对厌氧氨氧化菌和亚硝化菌活性产生抑制,从而影响功能微生物的氮素转化效能^[7~9]。然而,很多行业的高氨氮低碳废水中氨氮浓度达到上万 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即使利用物化法对其进行资源回收,废水中氨氮浓度仍很高。主要是因为随着废水中氨氮浓度的降低,其回收成本不断上升。考虑到经济效益,一般回收后废水中的氨氮浓度为 $500\sim 10\,00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10,11]。因此,在运用联合工艺处理高氨氮工业废水时需要防止其形成的游离物对微生物的抑制。回流是有效缓解基质浓度对微生物抑制的有效方法^[12,13]。但是在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的运行过程中,有关回流是否可以缓解所有功能菌的抑制,还是需要重点监控哪个敏感功能菌的问题研究较少。

因此,本研究利用具有内回流的部分亚硝化和厌氧氨氧化串联反应器,通过进水基质浓度的改变,观察基质浓度变化对部分亚硝化和厌氧氨氧化反应过程氮素转化的影响,探究回流是否可有效缓解高基质浓度对联合工艺脱氮效能的影响及对微生物群落的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

实验装置由有机玻璃制成(如图1),总有效体积 3.5 L ,主要包括部分好氧区 2.8 L ,厌氧区 0.23 L 和沉淀区 0.47 L 。在联合工艺的运行过程中,利用亚硝化过程的曝气尾气将沉淀区出水回流至部分好氧区。进水运行方式为连续流,流量由蠕动泵控制。气体流量由气体流量计控制。联合工艺的温度控制在 30°C ,由气浴加热器控制。亚硝化区的ORP控制在 $(140\pm 20)\text{ mV}$ (溶解氧约 $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),厌氧氨氧化区的ORP检测值一般在 $(-300\pm 50)\text{ mV}$,由WTW在线监测仪监控。

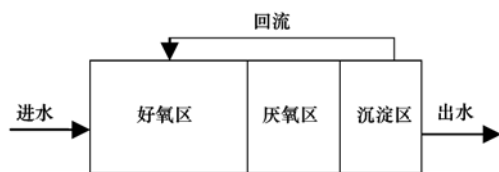


图1 部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺流程示意

Fig. 1 Schematic of the partial nitrification-ANAMMOX process

1.2 接种污泥

好氧区接种的亚硝化生物膜来源于经过 150 d 驯化的亚硝化反应器,接种量 1 L 。厌氧区接种的厌氧氨氧化颗粒污泥来源于实验室长期运行的厌氧氨

氧化种泥反应器,接种量 0.3 L 。

1.3 废水组成

采用人工配制废水,主要由 NH_4Cl (按需配制), NaHCO_3 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $136\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,微量元素I $1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和微量元素II $1.25\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。微量元素浓缩液组分为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组分为: EDTA $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_3 $14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 测定方法

水质指标测定方法如下^[14]: NH_4^+-N 采用纳氏分光光度法(哈希2800,美国); $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 采用离子色谱法(戴安IS-9001,美国); pH、ORP和温度采用WTW在线监测仪(德国)。

1.5 荧光原位杂交(FISH)分析

依照Isaka等^[15]的FISH步骤对好氧区生物膜和厌氧区污泥进行固定。首先将取出的生物样品放置在新鲜的4%多聚甲醛溶液中固定,放置在 4°C 的冰箱中过夜。然后将取出的样品用磷酸缓冲液进行冲洗,接着放置相同体积的乙醇+PBS(1:1,质量比)溶液中。再分别利用不同浓度梯度(20%、40%、60%、80%和100%)的乙醇对保藏样品进行脱水,最后将样品放置在 -20°C 冰箱中保藏。

杂交过程中运用到AMX368、NSO190和EUB(338、338-II和338-III)这3种探针。所有的杂交条件、冲洗条件和荧光标记均列在表1中。所有样品杂交程序依照Manz等^[16]介绍的实验步骤进行。将所有样品加上杂交液和探针(浓度 $5\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)并将其放置在杂交仪(ThermoBrite, USA)中进行杂交,杂交温度 46°C ,杂交时间 4 h 。杂交后分别利用4倍的冲洗液(含有 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris缓冲液,0.01% SDS,NaCl浓度见表1)和无菌水对其进行冲洗,然后在室温下晾干。最后利用对其进行镜检。

1.6 实验方法

首先通过配置人工模拟废水对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的脱氮效能进行恢复。确定启动成功并达到稳定脱氮效能后,在恒定氮容积负荷的条件下,通过延长水力停留时间,增加进水氨氮浓度的方式,研究进水氨氮浓度变化对联合工艺脱氮效能及微生物群落的影响。

表 1 FISH 过程杂交探针、杂交液及清洗液浓度

Table 1 Probes used for the FISH and the corresponding hybridization and washing conditions

探针	基因序列(5'-3')	杂交生物	染料	浓度		文献
				甲酰胺 /%	NaCl /mol·L ⁻¹	
EUB338	GCTGCCTCCCTAGGACT	大部分微生物				
EUB338-II	GCAGCCACCCGTAGGTGT	含 EUB 338 未包含微生物	FITC	40	50	[17,18]
EUB338-III	GCTGCCACCCGTAGGTGT	含 EUB 338 未包含微生物				
NSO190	CGATCCCGTGCTTTCTCC	亚硝化菌	Cy3	55	20	[19]
AMX368	CCTTCGGCGATTGCGAA	ANAMMOX 菌	AMCA	15	338	[20]

因联合工艺具有回流特征,所涉及到的亚硝化菌和厌氧氨氧化菌的氮素转化效能计算公式如下:

$$\Delta N = NH_4^+ - N_{inf} - (NH_4^+ - N_{eff} + NO_2^- - N_{eff} + NO_3^- - N_{eff}) \quad (1)$$

$$NPR_a = (NH_4^+ - N_{inf} - NH_4^+ - N_{eff} - \Delta N/2.3 - NO_3^- - N_{eff} + 0.26\Delta N/2.3)/HRT_a \quad (2)$$

$$NRR_{ana} = \Delta N/HRT_{ana} \quad (3)$$

$$NRR_T = \Delta N/HRT_T \quad (4)$$

式中, ΔN 表示进出水总氮的差值, $mg \cdot L^{-1}$; $NH_4^+ - N_{inf}$ 表示进水 $NH_4^+ - N$ 浓度, $mg \cdot L^{-1}$; $NH_4^+ - N_{eff}$ 、 $NO_2^- - N_{eff}$ 、 $NO_3^- - N_{eff}$ 表示出水 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_2^- - N$ 和 $NO_3^- - N$ 浓度, $mg \cdot L^{-1}$; HRT_a 、 HRT_{ana} 和 HRT_T 表示好氧区、厌氧区和联合工艺总的 HRT, d; NPR_a 表示好氧区 $NO_2^- - N$ 生成速率, $kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$; NRR_{ana} 和 NRR_T 表示厌氧区 ANAMMOX 脱氮速率和联合工艺整体的脱氮效能, $kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 氨氮浓度变化对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的氮素转化影响

依据联合工艺前期的运行状况,在运行初期设定进水氨氮浓度 $147.5 mg \cdot L^{-1}$ 左右(图 2), HRT 设定为 1.32 h, 氮容积负荷为 $2.7 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$ 左右. 经过 76 d 的运行,最终出水的氨氮、亚硝氮和硝态氮浓度分别稳定在 32.18、2.5 和 $17.16 mg \cdot L^{-1}$ 左右,联合工艺的整体氮去除速率大约 $1.63 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$. 从反应器运行的 77 d 开始,逐步提高进水氨氮浓度,同时为了恒定联合工艺氮容积负荷在 $2.8 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$ 左右,逐步延长 HRT. 当联合工艺运行至 108 d 时,进水氨氮浓度逐步上升到 $750 mg \cdot L^{-1}$ 左右, HTR 延长至 6.34 h. 虽然最终出水氨氮、亚硝氮和硝氮浓度因进水浓度的升高而逐步升高,分别稳定在 224.2、11.02 和 $60.68 mg \cdot L^{-1}$ 左右,但是联合工艺的整体氮去除速率基本没有发

生变化,维持在 $1.67 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$ 左右. 联合工艺各区内未出现亚硝氮的积累,硝态氮浓度逐步增加,说明联合工艺的厌氧区厌氧氨氧化菌的活性未受到抑制,同时也说明此时好氧区的亚硝化效能一直制约着联合工艺的整体脱氮效能的提高.

当联合工艺运行至 119 d 时,进水氨氮浓度上升到 $900 mg \cdot L^{-1}$ 左右, HTR 延长至 7.53 h. 随着进水氨氮浓度的提高,出水含氮化合物的浓度也在逐渐上升. 当联合工艺运行至 130 d 时,出水氨氮、亚硝氮和硝态氮浓度分别稳定在 317.12、31.82 和 $80.45 mg \cdot L^{-1}$ 左右,联合工艺的氮去除速率大约 $1.52 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$. 联合工艺的脱氮效能出现略微下滑,下降幅度为 9%. 同时,最终出水的亚硝酸盐出现积累,最高达到 $106 mg \cdot L^{-1}$,说明厌氧区部分厌氧氨氧化菌活性开始受到抑制. Daverey 等^[21]运用部分亚硝化-厌氧氨氧化联合的 CANON 反应器处理光电半导体废水,为了缓解高氨氮的抑制,将 HRT 延长至 4 d, pH 下降到 7.6 以内,经过 500 d 的运行,其氮去除速率[最高 $0.9 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$]也很难升高. Qiao 等^[22]运用无回流的部分亚硝化-厌氧氨氧化串联装置处理高氨氮垃圾渗滤液时,虽然好氧区获得 $2.1 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$ 的亚硝酸盐转化速率,但是厌氧区氮去除速率很难提升,只有 $3.1 kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$,导致联合工艺的整体脱氮效能很低. 而在具有回流的部分亚硝化-厌氧氨氧化反应内当氨氮浓度达到 $900 mg \cdot L^{-1}$ 时也未出现严重的抑制现象,说明回流装置具有缓解进水高氨氮对微生物的影响的功能,特别是对厌氧区的厌氧氨氧化菌影响.

2.2 联合工艺运行过程中,回流对 pH 稳定性的影响

部分亚硝化-厌氧氨氧化的联合工艺的亚硝化过程是一个产生 H^+ 的过程,氧化 1 mol 的氨氮大约会产生 2 mol 的 H^+ ; 而厌氧氨氧化过程是一个消耗 H^+ 的过程,氧化 1 mol 的氨氮需要消耗掉 0.13 mol 的 H^+ . 在无足够缓冲物质的条件下,各个反应的 pH 值会发生巨大变化. 即使在进水氨氮浓度不

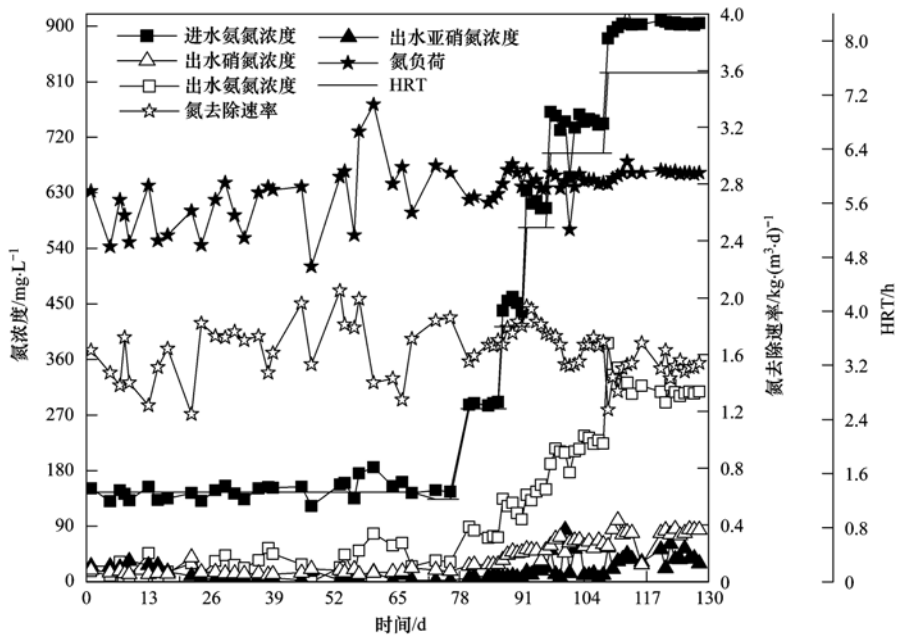


图2 联合工艺氮素变化及脱氮效能的影响

Fig. 2 Change of nitrogen concentrations and nitrogen removal efficiency in PN-ANAMMOX process

变的情况下,pH 值变化会使得 FA、FNA 浓度发生百倍乃至上千倍的变化^[23]. 因此,在运用联合工艺处理高氨氮废水的过程中,避免两个反应过程 pH 值的波动尤为重要^[24]. 若将两个反应产生的酸碱度混合可有效缓解各个区域 pH 值的波动,同时减少缓冲物质的投加量. 在本研究的亚硝化-厌氧氨氧化串联装置中,将厌氧区出水 pH 值回流至好氧区,同样实现了单一反应器内两个反应的酸碱互补. 由图 3 可知,亚硝化区的 pH 值随着单位体积内氨氮浓度转化量的增加而逐渐降低,而厌氧区的 pH 值基本随着好氧区的 pH 值变化而变化,差异很小(基本在 0.5 以内). 说明在串联装置中增加回流可以有效缓解各个反应区域 pH 值的大幅波动. 因此,仅通过进水 pH 值调控就可将联合工艺各区域的 pH 控制在适宜的范围之内.

2.3 氨氮浓度变化对联合工艺各区域氮素转化效能的影响

基质浓度对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的影响主要是其所形成的 FA、FNA 浓度对部分亚硝化菌和厌氧氨氧化菌活性的影响. 有效避免高 FA、FNA 浓度对功能微生物的毒性作用是联合工艺处理高氨废水需要解决的问题. 因此,将各个功能区域的氮素转化效能及 FA、FNA 浓度进行对比分析,如图 4 所示. 在联合工艺运行的前 76 d 中,进水 FA 浓度维持在 $18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,好氧区的 FA 和 FNA 浓度基本在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内[图 4

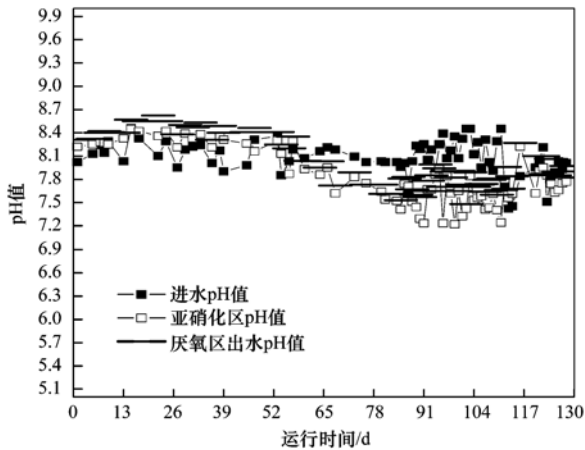


图3 好氧区和厌氧区 pH 值变化

Fig. 3 Change of pH values in the aerobic zone the anaerobic zone

(b)], 亚硝酸盐生成速率基本维持在 $1.2\sim2.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 之间[图 4(a)]. 厌氧区的 FA 和 FNA 浓度基本 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内. 厌氧区的厌氧氨氧化氮去除速率出现一些波动,最高达到 $43.02\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,基本维持在 $31.49\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右. 随着进水氨氮浓度的提高,联合工艺各区域的 FA 和 FNA 浓度有明显的提高. 当进水氨氮浓度达到 $700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,进水 FA 浓度达到 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因 pH 的波动,最高达到 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而好氧区的 FA 浓度仍维持在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未受进水 FA 浓度的影响. FNA 浓度略有上升,最高上升到 $9.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐生成速率未出现明显的上升,

基本维持在 $1.3 \sim 1.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间. 厌氧区的 FA 浓度有明显的提高, 逐步上升并稳定到 $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 FNA 浓度没有明显的提高. 说明在具有回流的联合工艺中, 即使进水 FA 浓度增大到 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各功能区域的 FA 都处于较低水平, 微生物活性未受到任何影响.

当进水氨氮浓度达到 $902 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 联合工艺各区域的 FA 和 FNA 浓度出现快速的上升. 好氧区的 FA 浓度最高上升到 $33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 FNA 浓度基本维持在 $4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 亚硝酸盐产生速率未出现明显的上升, 基本维持在 $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 厌氧区的 FA 浓度维持在 $10 \sim 28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 最高上升到

$36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 FNA 浓度下降到 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 厌氧氨氧化菌的氮去除速率出现了小幅, 最终稳定在 $24.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Qiao 等^[25] 发现在单一亚硝化系统中即使 FA 达到 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时也未对亚硝化菌活性产生抑制. Fernández 等^[26] 在研究 FA 对厌氧氨氧化活性影响时发现, 当环境中 FA 浓度突然达到 $38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 厌氧氨氧化菌活性被抑制 50%. 说明当进水氨氮浓度达到 $900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时联合工艺厌氧区所产生的抑制是因为高浓度 FA 所致, 也进一步说明好氧区的亚硝化菌对 FA 毒性的耐受限明显高于厌氧氨氧化菌. 因此, 在联合工艺的运行过程中首先要考虑高氨氮对厌氧氨氧化菌的抑制.

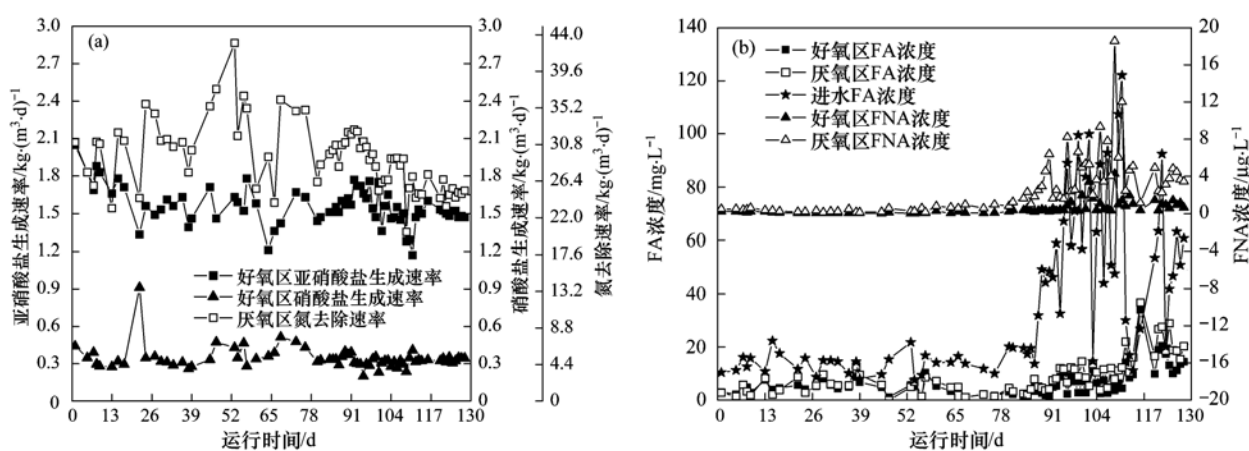


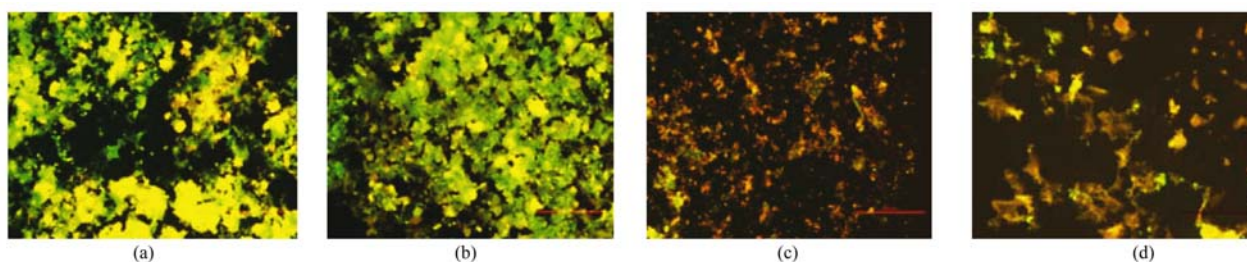
图4 联合工艺各区域氮素转化效能及 FA、FNA 的变化

Fig. 4 Change of FA, FNA and nitrogen transformation efficiency in PN-ANAMMOX process

2.4 联合工艺各区域微生物群落的变化

将经过 76 d 和 130 d 运行后的好氧区生物膜和厌氧区厌氧氨氧化污泥进行 FISH 分析, 如图 5 所示. 经过 76 d 运行后, 好氧区的亚硝化生物膜中微生物基本以亚硝化菌为主[图 5(a)], 而厌氧区的厌氧氨氧化污泥中微生物基本以厌氧氨氧化菌为主[图 5(c)], 说明在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的各个区域相应的功能微生物获得高效的富集.

在高基质浓度下经过约 60 d 运行后, 联合工艺的各区域的微生物仍以相应功能菌为主[图 5(b)], 好氧区的微生物基本没有什么变化. 虽然厌氧区的厌氧氨氧化菌脱氮效能出现小部分下降, 但是厌氧区的厌氧氨氧化菌相对数量未出现明显的下降[图 5(d)]. 进一步说明回流稀释了进水氨氮浓度, 同时缓解了 pH 的波动, 有效缓解厌氧区的 FA 对厌氧氨氧化菌的影响.



绿色为全菌不含目标菌, 黄色为目标菌种

图5 好氧区亚硝化菌和厌氧区厌氧氨氧化菌 FISH 分析

Fig. 5 FISH analyses of nitrification bacteria in the aerobic zone biofilm and ANAMMOX bacteria in the anaerobic zone granular sludge

3 结论

(1) 具有回流的部分亚硝化-厌氧氨氧化串联工艺能够耐受较高的含氮废水, 在恒定氮容积负荷 $2.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下, 当进水氨氮浓度上升到 $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 好氧区和厌氧区的 pH 值波动很小, FA 浓度分别维持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 未对功能微生物产生抑制. 联合工艺的总氮去除速率稳定在 $1.67 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 当进水氨氮浓度上升到 $900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 各区域 FA 和 FNA 浓度才出现上升, 联合工艺的总氮去除速率稳定在 $1.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 厌氧区出现亚硝酸盐的积累, 厌氧氨氧化细菌的活性未出现严重的抑制现象. 联合工艺处理高氨氮废水时首先注意 FA 对厌氧氨氧化菌活性的影响.

(3) 在具有回流的部分亚硝化-厌氧氨氧化串联工艺中, 回流可有效缓解各区域的 pH 值波动, 从而也进一步缓解 FA、FNA 浓度的波动.

参考文献:

- [1] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences—An application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [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] Liu J, Zuo J E, Yang Y, *et al.* An autotrophic nitrogen removal process: Short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(5): 777-783.
- [4] 陈旭良, 郑平, 金仁村, 等. 味精废水厌氧氨氧化生物脱氮的研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 747-752.
- [5] Gilmore K R, Terada A, Smets B F, *et al.* Autotrophic nitrogen removal in a membrane-aerated biofilm reactor under continuous aeration: A demonstration [J]. *Environmental Engineering Science*, 2013, **30**(1): 38-45.
- [6] 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.
- [7] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture [J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 826-834.
- [8] Jung J Y, Kang S H, Chung Y C, *et al.* Factors affecting the activity of anammox bacteria during start up in the continuous culture reactor [J]. *Water Science & Technology*, 2007, **55**(1-2): 459-468.
- [9] Anthonisen A C, Loehr 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.
- [10] 杨晓明, 耿长君, 苗磊. 高氨氮及高浓度难降解化工废水处理技术进展[J]. *化工进展*, 2011, **30**(S): 825-827.
- [11] 崔树军, 谷立坤, 张建云, 等. 高氨氮废水的处理技术及研究应用现状[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(14): 26-29.
- [12] 李祥, 黄勇, 周呈, 等. 增设回流提高厌氧氨氧化反应器脱氮效能[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(9): 178-183.
- [13] 张赓, 刘敏, 陈滢, 等. 外循环对 IC 反应器运行效果的影响[J]. *化工学报*, 2014, **65**(6): 2329-2334.
- [14] 李祥, 张大林, 黄勇, 等. 气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3449-3454.
- [15] Isaka K, Date Y, Sumino T, *et al.* Ammonium removal performance of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria immobilized in polyethylene glycol gel carrier [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **76**(6): 1457-1465.
- [16] Manz W, Amann R, Ludwig W, *et al.* Phylogenetic oligodeoxynucleotide probes for the major subclasses of proteobacteria: Problems and solutions [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1992, **15**(4): 593-600.
- [17] Amann R I, Binder B J, Olson R J, *et al.* Combination of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes with flow cytometry for analyzing mixed microbial populations [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1990, **56**(6): 1919-1925.
- [18] Daims H, Brühl A, Amann R, *et al.* The domain-specific probe EUB338 is insufficient for the detection of all *Bacteria*: Development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 434-444.
- [19] Mobarry B K, Wagner M, Urbain V, *et al.* Phylogenetic probes for analyzing abundance and spatial organization of nitrifying bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(6): 2156-2162.
- [20] Egli K, Langer C, Siegrist H R, *et al.* Community analysis of ammonia and nitrite oxidizers during start-up of nitrification reactors [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(6): 3213-3222.
- [21] Daverey A, Su S H, Huang Y T, *et al.* Partial nitrification and anammox process: A method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2013, **47**(9): 2929-2937.
- [22] Qiao S, Yamamoto T, Misaka M, *et al.* High-rate nitrogen removal from livestock manure digester liquor by combined partial nitrification-anammox process[J]. *Biodegradation*, 2010, **21**(1): 11-20.
- [23] Zhang C, Zhang S, Zhang L, *et al.* Effects of constant pH and unsteady pH at different free ammonia concentrations on shortcut nitrification for landfill leachate treatment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(8): 3707-3713.
- [24] He Y L, Tao W D, Wang Z Y, *et al.* Effects of pH and seasonal temperature variation on simultaneous partial nitrification and anammox in free-water surface wetlands [J]. *Journal of*

- Environmental Management, 2012, **110**: 103-109.
- [25] Qiao S, Kanda R, Nishiyama T, *et al.* Partial nitrification treatment for high ammonium wastewater from magnesium ammonium phosphate process of methane fermentation digester liquor [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, **109** (2): 124-129.
- [26] Fernández I, Dosta J, Fajardo C, *et al.* Short-and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process [J]. Journal of Environmental Management, 2012, **95** (5): S170-S174.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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