

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

基于厌氧氨氧化的含氨废气原位处理

林兴^{1,2}, 王凡^{1,2}, 袁砚^{1,2}, 李祥^{1,2*}, 黄勇^{1,2}, 顾澄伟^{1,2}

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

摘要: 采用部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器研究了含氨废气原位脱氮处理的可行性。结果表明, 在控制低溶解氧($0.2 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), pH 为 $7.9 \sim 8.2$, 中温($30 \sim 35^\circ\text{C}$) 条件下, 经过 60 d 的运行, 成功地实现部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器的启动, 总氮去除率达到 88%, 氮去除速率由 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升并稳定在 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。在含氨废气处理研究中, 当含氨废气浓度低于 2.59%, 废气中原有的氧过量, 导致硝态氮大量累积; 当含氨废气体积分数为 2.59% ~ 4.2% 时, 废气中氧满足反应器脱氮的需求; 当含氨废气体积分数高于 4.2%, 需要额外通入空气, 补充反应器内的氧需求。经过 60 d 的运行, 氨气的去除率达 100%, 总氮去除率达 90.06%, 总氮去除负荷为 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。说明基于厌氧氨氧化反应的一体化反应器可实现含氨废气稳定去除。

关键词: 含氨废气; 部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺; 原位处理; 氧含量; 脱氮速率

中图分类号: X701.7 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2947-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201612154

Ammoniac Waste Gas *in-situ* Treatment Based on ANAMMOX Process

LIN Xing^{1,2}, WANG Fan^{1,2}, YUAN Yan^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}, HUANG Yong^{1,2}, GU Cheng-wei^{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 feasibility of ammoniac waste gas *in-situ* treatment by partial nitrification (PN) - anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) reactor was studied. The PN-ANAMMOX reactor was successfully started up after 60 d operation in conditions of low dissolved oxygen control ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), pH 7.9-8.2 and temperature ($30 \sim 35^\circ\text{C}$). The total nitrogen removal efficiency reached 88% and the nitrogen removal rate increased from $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ to $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. In the treatment of ammoniac waste gas, the excess oxygen in it would lead to massive growth of nitrifying bacteria, when the ammonia concentration was lower than 2.59%. The ammonia and oxygen in waste gas met the requirement of the reactor for nitrogen removal, when the ammonia concentration stayed between 2.59% and 4.2%. Extra air flow was required for reactor oxygen supplement when the ammonia concentration was higher than 4.2%. The ammonia removal efficiency reached 100%, the total nitrogen removal efficiency reached 90.06%, while the total nitrogen removal rate was $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ after 60 day operation for ammoniac waste gas purification. It is indicated that the integrated reactor based on PN-ANAMMOX process can achieve stable removal of ammonia waste gas.

Key words: ammonia-containing waste gas; PN-ANAMMOX; *in-situ* treatment; oxygen content; ammonia nitrogen removal efficiency

目前, 我国的养殖业迅速发展, 包括家禽养殖^[1]、蛋白质生物养殖^[2]。而养殖行业产生的废水、废气也成为迫切需要解决的问题。氨气作为家禽养殖行业废气中主要的污染物之一, 不仅影响动物的生长, 同时还严重污染周边环境。例如, 氨气是肉鸡生产排放的主要污染气体之一, 每 500 kg 肉鸡每小时产生的氨气量为 $1 \sim 10 \text{ g}^{[3]}$ 。目前, 有关氨气的处理, 一般采用物理吸附、化学吸收、光催化氧化、生物法和等离子体催化氧化法等^[4]。生物脱氮一直被认为是最廉价的处理方法。养殖行业的废气中氨气浓度较低, 而传统的生物法氨气处理工序复杂, 脱氮能力较低, 同时产生二次污染。对于利润较低的养殖行业而言, 传统的生物脱氮技术会影响企业的利润。

近年来, 随着新型生物脱氮反应的发现, 一些新的生物脱氮技术逐步得到研究者的青睐。例如厌氧

氨氧化技术, 由于脱氮效能高的特点, 被广泛运用于低碳高氨废水(垃圾渗滤液^[5]、味精废水^[6]、污泥消化上清液^[7]等)的处理, 并且得到较好地处理效果。氨气是一种极易溶于水的气体, 1L 的水中可以溶解 700 L 的氨气, 溶于水后与水反应生成氨水。若用部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺对其进行原位处理, 同时将处理后的废液返回, 持续吸收氨气再处理, 可实现处理过程废水的零排放。

为此, 本研究设计一套用于含氨废气处理的一

收稿日期: 2016-12-16; 修订日期: 2016-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103); 国家自然科学基金项目(51478284, 51408387); 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州市分离净化材料与技术重点实验室项目(SZS201512)

作者简介: 林兴(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理理论与控制, E-mail: 799070517@qq.com

* 通信作者, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

体化工艺,启动部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化工艺,通过模拟含氨废气,研究其除氨的可行性及关键控制参数,以期为养殖行业含氨废气的处理提供一个新的脱氨技术。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用容积为 6 L,有效容积为 2 L 的上流式连续流反应器[如图 1(a)],内置 0.6 m 直径 10 cm 的纳米纤维膜,用于微生物附着。通过蠕动泵控制进水流量。反应器的底部设有微孔曝气装置,采用气泵供气,通过转子流量计控制进气量。反应器内部设有恒温加热装置,控制反应器内部温度为 $32^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。反应器启动成功后进行废气处理,对反应器进行部分改进[如图 1(b)]:将三相分离器收集的气体进行测定;将出水流入收集池,通过投加药剂控制 pH 值为 7.8 ± 0.5 ,进气泵作为含氨废气泵入的动力源。

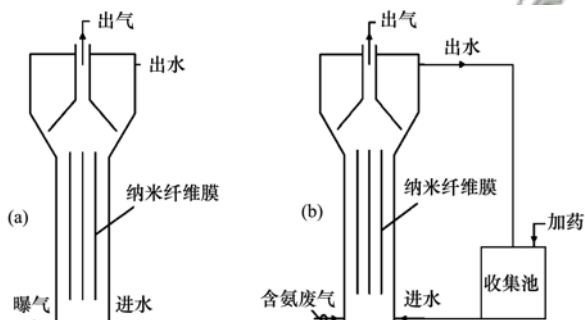


图 1 部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the PN-ANAMMOX reactor

1.2 接种泥源

反应器内的纤维填料来自于厌氧氨氧化反应器,上面附着大量厌氧氨氧化菌,已经形成厌氧氨氧化膜。亚硝化菌接种来自实验室培养的亚硝化絮状污泥,接种量 0.5 L。

1.3 模拟废水与废气

实验所用的营养液均由人工配置,矿物质元素组成^[8]: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 $0.027 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 CaCl_2 $0.136 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NaHCO_3 按需投加。微量元素 I、II 浓度分别为: $1.0 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。微量元素 I 成分 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 为: FeSO_4 5、EDTA 5;微量元素 II 成分 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 为: EDTA 5、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.043 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24 、 H_3BO_4 0.014 、 $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22 、 $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.2 。营养液

pH 值为 $7.8 \sim 8.2$,通过 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$ 或者 NaHCO_3 调节。部分亚硝化-厌氧氨氧化的启动期,向营养液中添加 NH_4HCO_3 提供 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。含氨废气处理期间,投加 NaHCO_3 代替维持碱度,同时向收集池中投加乙酸钠 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为反硝化碳源,去除循环液中厌氧氨氧化产生的硝酸盐。

模拟废气为人工模拟制取,利用浓度为 $25\% \sim 28\%$ 的氨水的强挥发特性,将足量氨水注入 100 mL 若干小烧杯中,并将烧杯置于 100 L 密闭圆桶内,利用气泵在圆桶上部抽取圆桶内混合气体。通过改变烧杯数目,即蒸发面来模拟不同浓度的含氨废气。

1.4 测定方法

常规液体指标测定方法均按照文献[9]。氨氮: 纳氏试剂分光光度法;亚硝酸盐、硝酸盐: 离子色谱法;pH、ORP 和 T : WTW 在线监测仪。

含氨废水浓度测定,将进气管和出气管通入盛有偏酸性吸收液的烧杯中。调整转子流量计控制流量,累计吸收 5 min 后,根据测得烧杯中的氨氮数据计算出废气含氨浓度。

1.5 实验方法

1.5.1 部分亚硝化-厌氧氨氧化联合脱氮反应器的启动

在反应器启动阶段,将反应器设计成连续流,未对出水进行收集。通过提高进水氨氮浓度和缩短水力停留时间(HRT)交替的方式提高反应器的氮容积负荷。营养液中氨氮的浓度从 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐提升到 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。HRT 由 1 d 逐步缩短至 0.25 d。保持反应器中合适的 pH 7.8 ± 0.5 , DO $0.1 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,温度 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}$,进水控制合适的溶解氧 DO 浓度 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,通过测定进出水氮素指标的变化,评估部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的运行状况。

1.5.2 不同浓度含氨废气处理实验

在部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器启动成功后,将进气源由空气改为含氨废气,通过改变烧杯数目改变废气中氨气的浓度。通过气体流量计将进气量控制在 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。将反应器出水进行收集,并通过蠕动泵回流至反应器。通过向收集的出水中定期添加 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$ 或者 NaHCO_3 调节反应器中的 pH 和提供碳源。将反应器的 pH 控制在 7.8 ± 0.5 , DO 浓度 $0.2 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,温度 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 。通过测定进出气及水中氮素指标的变化,评估部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器对含氨废气的处理状况。

2 结果与讨论

2.1 部分亚硝化-厌氧氨氧化联合脱氮反应器的启动

成熟的厌氧氨氧化生物膜和絮状污泥接种反应器后,同时采用提高进水氨氮浓度和缩短 HRT 的方式提高反应器的总氮负荷,出水氨氮、亚硝氮、硝态氮浓度变化如图 2 所示. 在反应器启动初期,设定进水氨氮浓度 $105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 1 d, 氮容积负荷 $0.105 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 此时出水氨氮、亚硝氮、硝态氮浓度分别为 28 、 2.11 、 $15.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氮去除速率为 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 总氮去除率 56.41% . 从运行的第 7 d 开始,通过逐步提高进水氨氮浓度的方式提高反应器氮容积负荷. 当反应器运行至 22 d 时,进水氨氮浓度提高到 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此阶段出水氨氮浓度基本维持在 $20.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,亚硝酸盐氮和硝酸盐氮浓度基本低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氮去除速率稳定上升达到 $0.12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 秦永丽等^[10]和 Casagrande 等^[11]研究表明通过缩短 HRT 比提高基质浓度更有利于厌氧氨氧化反应器脱氮效能的提高. 为了快速提升反应器得脱氮效能,当反应器运行至 23 d,采用缩短 HRT 的方式提升反应器氮容积负荷. 当反应器运行至 60 d 时, HRT 缩短至 0.25 d , 进水氨氮浓度提升至 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 最终出水氨氮和亚硝酸盐氮浓度稳定在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,硝酸盐氮浓度稳定在 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,总氮去除速率迅速提升至 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 说明在部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器中,缩短 HRT 也同样有利于联合工艺氮素转化效能的提高.

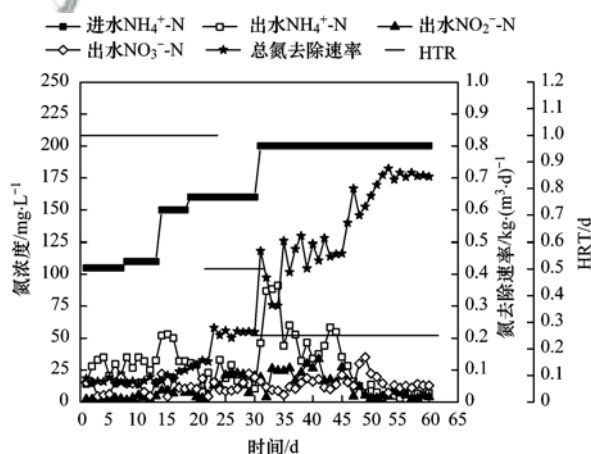


图2 部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器启动过程中氮素的变化

Fig. 2 Variations of nitrogen concentration during startup in the PN-ANAMMOX reactor

Slickers 等^[12]在启动 CANON 反应器时,首先通过接种 ANAMMOX 污泥,运行 35 d 后实现厌氧氨氧

化的稳定,随后接种亚硝化污泥启动 PN-ANAMMOX 联合脱氮,运行 70 d 后总氮容积负荷达到 $0.064 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,实现一体化全程自养脱氮. Vázquez-Padín 等^[13]先接种硝化污泥通过逐渐降低溶解氧实现亚硝酸盐的积累,最后再接种 ANAMMOX 污泥启动 PN-ANAMMOX,运行 35 d 后,氮去除速率达到 $0.25 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 而本实验同时接种成熟的亚硝化污泥和厌氧氨氧化生物膜,经过 60 的运行,成功地启动部分硝化-厌氧氨氧化一体化工艺反应器,总氮去除率达到 88% ,氮去除速率由 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升到稳定期的 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,脱氮效果显著.

2.2 含氨废气的部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮处理

在部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器启动成功后,将进气源由空气改为含氨废气,同时对反应器出水进行收集并回流,通过改变进气氨浓度调整反应器总氮负荷,进气 NH_3 浓度及出水氮素浓度变化如图 3 所示. 处理废气初期,设定废气中氨气的体积分数为 0.75% ,出水氨氮浓度基本稳定,处于 $1.5 \sim 6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间. 因水中氨氮浓度不足,出水的亚硝氮和硝氮波动较大,硝氮一直处于较高浓度,最高达到 $30.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 随后不断提高氨气浓度提高反应器总氮负荷,出水亚硝氮和硝氮开始逐步降低,反应器整体脱氮能力稳定上升. 当反应器运行至 86 d 时,反应器总氮去除速率由初始的 $0.07 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 增长至 $0.44 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

第 87 d 后,进一步提升氨氮体积分数至 4.2% ,此时出水氨氮浓度增至 $58.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝酸盐浓度快速下降至 $6.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明由于废气中氨气的浓度过高,氧含量不能满足部分亚硝化的需求,限制厌氧氨氧化对电子供体的需求,阻碍了反应器整体脱氮能力的进一步上升. 为此,在反应器运行的 93 d,通过增加额外曝气系统以补充废水亚硝化需氧量. 随后出水氨氮逐步降低至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 当反应器运行至 120 d 时,反应器内总氮浓度稳定在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内,总氮去除率达到 90.06% ,反应器总氮去除速率稳定在 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右. 整个含氨废气处理阶段出气中氨氮浓度几乎为 0. 说明采用基于厌氧氨氧化的部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器能够用于含氨废气的脱氮处理.

杨自伟等^[14]以兰石和活性炭体积比为 $1:1$ 的混合物作为填料利用膨胀床生物除臭方法对含氨废气进行处理,当停留时间为 28.6 s ,进气氨浓度低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,以硝化反应为主,氨气的去除率在 98% 以

上. 梁永坤等^[15]利用生物过滤法处理含氨废气表明, 反应器中进气氨浓度为 $152.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 反应器对氨的脱除速率最高 $0.099 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 而本研究设计采用部分亚-硝化厌氧氨氧化一体化反应器处理含氨废气, 随着氨浓度不断升高, 反应器总氮去除速率

也得到明显提高. 在进气氨体积分数达到 4.2% ($54.306 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 后, 通过向反应器内鼓入额外空气以补充亚硝化需氧量, 稳定后反应器总氮去除速率高达 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 进一步说明利用该工艺可以实现废气中氨的高效转化.

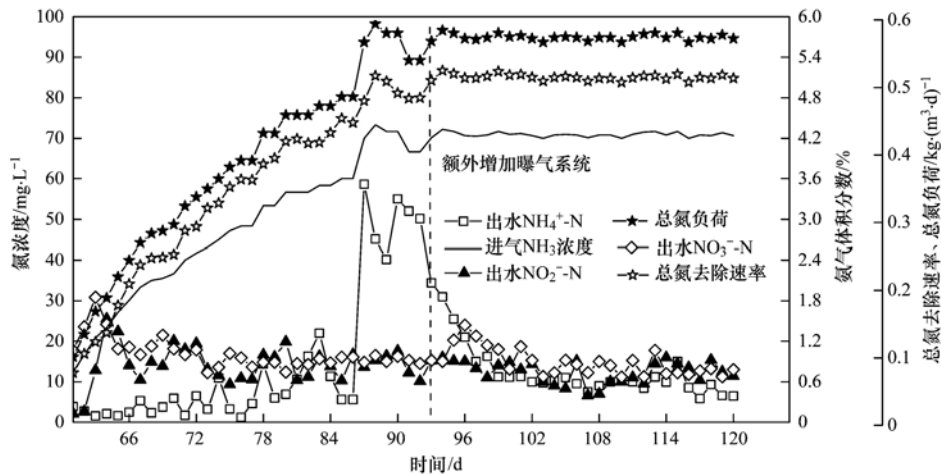


图3 含氨废气的部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮处理过程中氮素的变化

Fig. 3 Variations of nitrogen concentration during ammoniac waste gas treatment in PN-ANAMMOX reactor

2.3 废气中氨气浓度变化对脱氮速率的影响

养殖行业不同于工业废气, 废气中存在氧气, 其浓度一般与正常空气中的浓度相当, 因此本实验在模拟废气配置过程中采用正常空气作为流动相载体. 空气中的氧气是 PN-ANAMMOX 反应器中亚硝化的电子受体, 因此废气中氨气浓度的变化对反应器内溶氧环境及脱氮速率会产生严重的影响. 由本实验可知, 控制进气流量 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 在不断提高氨浓度的同时连续监测了反应器内溶解氧浓度变化 (图4). 初始进气氨体积分数 0.75% ($9.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 时, 废气中氧气十分富余, 导致反应器内 DO 浓度维持在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐出现过量的氧化^[16], 出水硝酸盐一直处于较高浓度, 最高时达到了 $30.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时总氮去除率为 76.66% , 总氮去除速率为 $0.07 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 随着进气 NH_3 浓度的提高, DO 浓度逐步下降, 运行至 73 d , 进气氨体积分数为 2.59% ($33.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), DO 逐步降至 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮去除率得到明显提升, 达到 87.02% . 说明此时废气中氨与氧的浓度达到该联合工艺进行脱氮的平衡点. 曾薇等^[17]在 SBR 反应器启动短程硝化过程时发现, 随着 NH_3 浓度提高, 体系中 DO 减少, 硝化菌受到抑制, 出水硝酸盐浓度逐步降低, 总氮去除率稳定上升. 而本实验中也出现随着进水氨氮浓度的提高, 硝化细菌活性受到抑制现象. 当氨气体积分数达到 4.2% ($54.31 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), 此时 DO 浓度降至

$0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水氨氮大幅增高, 反应器内的 DO 量不足, 不能满足部分亚硝化氧化氨的需求, 总氮去除率略微下降. 随后向体系中额外增加曝气系统, 维持 DO 在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 总氮去除率提高至 90.06% , 之后一直处于稳定.

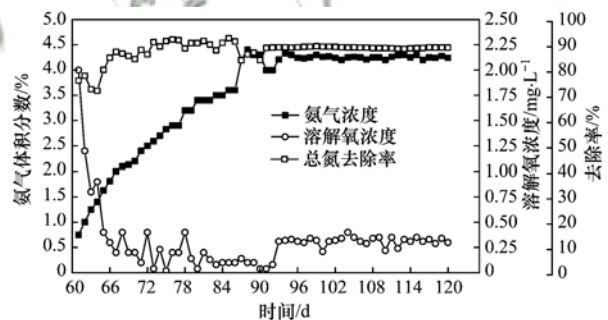


图4 含氨废气浓度变化对部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮效能和溶解氧环境的变化

Fig. 4 Effect of variations of ammonia concentration on nitrogen removal efficiency and dissolved oxygen environment in PN-ANAMMOX reactor

因此在使用部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器处理含氨废气时, 当废气氨浓度低于 2.59% 时, 为了避免过高溶解氧对微生物群落组成的影响, 可考虑采用吸收液进行氨气吸收, 然后再将吸收液泵入反应器进行脱氮处理; 如果当废气氨体积分数低于 $2.59\% \sim 4.2\%$ 时, 可将废气直接通入反应器进行处理; 当废气氨体积分数低于 4.2% 时, 废气中原有的

氧不能满足部分亚硝化的需求,需要额外泵入空气增加亚硝化效能。

3 基于厌氧氨氧化反应的含氨废气处理的评价与展望

相比物理法、化学法,废气的生物处理法是一种廉价的处理技术,具有投资和运行费用低、净化效率高、无二次污染等优点^[18~20]。传统的生物处理法主要包括生物洗涤法^[21]、生物过滤法^[22]、生物滴滤法^[23]、膜生物反应器法^[24]等。而厌氧氨氧化是近年来受到学界广泛关注的一种新型脱氮工艺,它是以氨氮为电子供体,在厌氧条件下将亚氮转化为氮气的新型生物脱氮过程。相比于传统生物脱氮,厌氧氨氧化工艺具有无需外加有机碳源、脱氮负荷高等优点^[25,26]。基于此,本课题组开辟了一条含氨废气处理的新思路,利用亚硝化-厌氧氨氧化一体化反应器处理含氨废气,并将处理后的废液持续吸收氨气再处理,可实现氨气的原位处理,同时实现废液的零排放。徐晓军等^[27]利用生物滴滤池对氨氮臭气进行处理时表明,进气氨浓度为 $240 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,硝化率及硝化速率分别为 34.7% 和 $0.197 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。王爱杰等^[28]采用滴滤塔对含氨废气进行处理,最高脱氮效能为 $0.25 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。梁永坤等^[15]采用生物过滤法处理含氨废气,氨气的去除率为 95%,去除速率为 $0.156 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。而本实验中后期氨气浓度达到 $54.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,反应器总氮去除速率高达 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,并长期稳定。相比于传统的生物处理法,基于厌氧氨氧化反应的含氨废气处理效果更加显著,且经济效益明显,因此,该方法在处理含氨废气方面具有广泛的应用前景。

4 结论

(1)同时接种成熟的亚硝化污泥和厌氧氨氧化生物膜,经过 60 d 的运行,成功地启动部分亚硝化-厌氧氨氧化一体化工艺反应器,总氮去除率达到 88%,氮去除速率由 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升到稳态期 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2)在含氨废气处理研究中,当含氨废气体积分数低于 2.59%,废气中原有的氧过量,导致硝化菌大量生长;当含氨废气体积分数位于 2.59% ~ 4.2% 之间,废水中氧气满足反应器需求;当含氨废气体积分数高于 4.2%,需要额外通入空气,补充反应器内的氧需求。

(3)采用部分硝化-厌氧氨氧化一体化工艺反应

器处理含氨废气,运行 60 d 后,总氮去除率达到 90.06%,总氮去除负荷为 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。说明基于厌氧氨氧化反应的一体化反应器可实现含氨废气稳定脱氮。

参考文献:

- [1] 耿爱莲. 家禽养殖模式的创新研究与发展趋势[J]. 中国家禽, 2010, 32(2): 8-11.
Geng A L. Innovation and development trend of feeding mode in poultry[J]. China Poultry, 2010, 32(2): 8-11.
- [2] 曾东柱, 田径军, 彭朝阳, 等. 蝇蛆养殖在农业中的应用初探[J]. 湖北畜牧兽医, 2015, 36(2): 15-17.
- [3] Worley J W, Czarick M, Cathey A M. Ammonia emissions from a commercial broiler house[A]. In: 2002 ASAE Annual Meeting [C]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2002.
- [4] 李梁萌. 含氨废气处理技术探讨[J]. 中氮肥, 2015, (3): 14-16.
- [5] Wang Z, Peng Y Z, Miao L, et al. Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 514-519.
- [6] 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.
Chen X L, Zheng P, Jin R C, et al. Biological nitrogen removal from monosodium glutamate-containing industrial wastewater with the Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 747-752.
- [7] Fux C, Huang D, Monti A, et al. Difficulties in maintaining long-term partial nitrification of ammonium-rich sludge digester liquids in a moving-bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Water Science & Technology, 2004, 49(11-12): 53-60.
- [8] 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 等. 高氨氮对具有回流的 PN-ANAMMOX 串联工艺的脱氮影响[J]. 环境科学, 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.
- [9] 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.
- [10] 秦永丽, 蒋永荣, 刘成良, 等. Anammox 启动过程中脱氮性能及污泥特性研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 122-127.
Qin Y L, Jiang Y R, Liu C L, et al. Study of nitrogen removal performance and sludge characteristics during start-up of Anammox[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 122-127.
- [11] Casagrande C G, Kunz A, De Prá M C, et al. High nitrogen removal rate using ANAMMOX process at short hydraulic retention time[J]. Water Science and Technology, 2013, 67(5): 968-975.
- [12] Slijkers 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.
- [13] Vázquez-Padín J R, Pozo M J, Jarpa M, et al. Treatment of anaerobic sludge digester effluents by the CANON process in an

- air pulsing SBR[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(1): 336-341.
- [14] 杨自伟, 李顺义, 王岩. 生物膨胀床技术处理含氨臭气研究[J]. *四川环境*, 2007, **26**(3): 15-17, 24.
Yang Z Z, Li S Y, Wang Y. Study on ammonia treatment by biological expanded bed[J]. *Sichuan Environment*, 2007, **26**(3): 15-17, 24.
- [15] 梁永坤, 全燮, 陈景文, 等. 生物过滤法处理含氨废气研究[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(5): 518-522.
Liang Y K, Quan X, Chen J W, *et al.* Biofiltration of ammonia-contaminated gas streams[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(5): 518-522.
- [16] Guisasola 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.
- [17] 曾薇, 张悦, 李磊, 等. 生活污水常温处理系统中 AOB 与 NOB 竞争优势的调控[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1430-1436.
Zeng W, Zhang Y, Li L, *et al.* Competition and optimization of AOB and NOB for domestic wastewater treatment at normal temperatures[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1430-1436.
- [18] 胡和平, 罗刚, 刘军, 等. 生物技术在恶臭气体处理中的应用研究[J]. *能源环境保护*, 2006, **20**(5): 1-4.
Hu H P, Luo G, Liu J, *et al.* Study of biological techniques to the deodorization of odor[J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, **20**(5): 1-4.
- [19] 高云超, 邝哲师, 潘木水, 等. 猪场恶臭的生物技术综合处理[J]. *生态科学*, 2004, **23**(3): 227-230, 235.
Gao Y C, Kuang Z S, Pan M S, *et al.* Biological controlling of odor and its pollutants in pig farm[J]. *Ecologic Science*, 2004, **23**(3): 227-230, 235.
- [20] 马红, 李国建. 固定化微生物处理含氨臭气的研究[J]. *中国环境科学*, 1995, **15**(4): 302-306.
Ma H, Li G J. Deodorization of NH_3 gas by use of immobilized biocatalyst beads[J]. *Chinese Environmental Science*, 1995, **15**(4): 302-306.
- [21] 杨汉祥, 杜凌君, 唐文清, 等. 生物洗涤器处理挥发性有机废气的应用研究[J]. *衡阳师范学院学报*, 2008, **29**(3): 76-79.
Yang H X, Du L J, Tang W Q, *et al.* Research for removing volatile organic compounds from bio-washing reactor[J]. *Journal of Hengyang Normal University*, 2008, **29**(3): 76-79.
- [22] 李顺义, 杨松波, 李红丽, 等. 玉米芯填料生物过滤法净化含氨废气研究[J]. *高校化学工程学报*, 2011, **25**(2): 351-355.
Li S Y, Yang S B, Li H L, *et al.* Study on the treatment of ammonia-contaminated gas by biofiltration with corn-cob packing[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2011, **25**(2): 351-355.
- [23] 裴冰, 羌宁, 郭小品. 生活垃圾堆肥恶臭气体的生物滴滤净化性能研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(1): 179-182.
Pei B, Qiang N, Guo X P. Study on the performance of a biotrickling filter in purifying odor gases released from municipal solid waste compost[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(1): 179-182.
- [24] Ntwampe S K O, Sheldon M S, Volschenk H. Oxygen mass transfer for an immobilised biofilm of *Phanerochaete chrysosporium* in a membrane gradostat reactor[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2008, **25**(4): 649-664.
- [25] Kallistova A Y, Dorofeev A G, Nikolaev Y A, *et al.* Role of anammox bacteria in removal of nitrogen compounds from wastewater[J]. *Microbiology*, 2016, **85**(2): 140-156.
- [26] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320-326.
- [27] 徐晓军, 史本章, 张娇, 等. 生物滴滤池净化氨氮和味精厂废气的研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2005, **26**(6): 10-14.
Xu X J, Shi B Z, Zhang J, *et al.* Practical research of the odor purification of ammonia and the waste gas in monosodium glutamate plants using a trickle-bed air biofilter[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2005, **26**(6): 10-14.
- [28] 王爱杰, 徐潇文, 任南琪, 等. 改进型生物脱臭滴滤塔对硫化氢和氨气的处理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(2): 203-206.
Wang A J, Xu X W, Ren N Q, *et al.* Efficiency of improved bio-trickling reactor for hydrogen sulfide and ammonia removal[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(2): 203-206.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)