

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)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究

董宝刚^{1,2}, 宋小燕², 刘锐^{2*}, 川岸朋树³, 张永明¹, 陈吕军^{2,4*}

(1. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 3. 三菱丽阳水处理研发中心, 日本丰桥 4408601; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 采用间歇曝气序批式反应器 (intermittently aerated sequencing batch reactor, IASBR) 和传统序批式反应器 (SBR) 处理养猪沼液, 研究进水中化学需氧量 (COD) 与总氮 (TN) 比值 (COD/TN) 和运行负荷对污染物去除效果的影响。结果表明, 在进水 COD/TN 约为 2.2、氨氮负荷为 $(0.12 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, IASBR 中的氨氮、TN 和有机物去除率分别为 $97.2\% \pm 4.4\%$ 、 $81.5\% \pm 7.5\%$ 、 $88.5\% \pm 2.4\%$, 优于 SBR 的 $78.3\% \pm 19.6\%$ 、 $79.8\% \pm 4.9\%$ 、 $86.6\% \pm 3.2\%$; 当氨氮负荷提高至 $(0.18 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, IASBR 中的氨氮、TN 和有机物去除率略有降低, 分别为 $92.4\% \pm 7.3\%$ 、 $77.5\% \pm 5.3\%$ 、 $86.4\% \pm 2.2\%$, 但仍然优于 SBR 中的相应去除率 $78.1\% \pm 15.4\%$ 、 $61.8\% \pm 11.2\%$ 、 $81.8\% \pm 5.6\%$ 。在氨氮负荷为 $(0.20 \pm 0.01) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 下, 提高进水 COD/TN 至约 3.0, 则 IASBR 和 SBR 的污染物去除能力较进水 COD/TN 为 2.2 时有显著提升, IASBR 中氨氮、TN 和有机物去除率分别达到 $99.6\% \pm 0.2\%$ 、 $91.5\% \pm 2.9\%$ 和 $92.0\% \pm 0.9\%$, 仍然高于 SBR 的 $90.2\% \pm 1.4\%$ 、 $83.0\% \pm 1.9\%$ 、 $90.2\% \pm 0.5\%$ 。总体而言, 相较 SBR, IASBR 对 TN 和氨氮的去除更高效、耐冲击负荷能力更强, 因此对养猪沼液等低碳氮比的废水更为适用。

关键词: 间歇曝气序批式活性污泥法 (IASBR); 养猪沼液; 总氮; 氨氮; 碳氮比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4309-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201603028

A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater

DONG Bao-gang^{1,2}, SONG Xiao-yan², LIU Rui^{2*}, KAWAGISHI Tomoki³, ZHANG Yong-ming¹, CHEN Lü-jun^{2,4*}

(1. College of Life and Environmental Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Jiaying 314006, China; 3. Aqua Development Center, Mitsubishi Rayon Co., Ltd., Toyohashi 4408601, Japan; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An intermittently aerated sequencing batch reactor (IASBR) and a traditional sequencing batch reactor (SBR) were respectively used for treating digested piggery wastewater, and the pollutant removal performance was studied at different ratios of chemical oxygen demand (COD) to total nitrogen (TN) in the influent and different loading rates. The results showed that the pollutant removal rates in the IASBR were much higher than those in the SBR. Under influent COD/TN of about 2.2 and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ loading of $(0.12 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the removal rates of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, TN and TOC in the IASBR were $97.2\% \pm 4.4\%$, $81.5\% \pm 7.5\%$ and $88.5\% \pm 2.4\%$, respectively, higher than the corresponding rates of $78.3\% \pm 19.6\%$, $79.8\% \pm 4.9\%$ and $86.6\% \pm 3.2\%$ in the SBR. As the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ loading was increased to $(0.18 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the removal rates of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, TN and TOC in the IASBR were slightly decreased to $92.4\% \pm 7.3\%$, $77.5\% \pm 5.3\%$ and $86.4\% \pm 2.2\%$, but still higher than the corresponding values of $78.1\% \pm 15.4\%$, $61.8\% \pm 11.2\%$ and $81.8\% \pm 5.6\%$ in the SBR. As the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ loading was remained at $(0.20 \pm 0.01) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, but the influent COD/TN ratio was increased to about 3.0, the pollutant removal rates in both IASBR and SBR were increased, compared to those at influent COD/TN ratio of 2.2. The removal rates of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, TN and TOC in the IASBR were $99.6\% \pm 0.2\%$, $91.5\% \pm 2.9\%$ and $92.0\% \pm 0.9\%$, respectively, higher than the corresponding rates of $90.2\% \pm 1.4\%$, $83.0\% \pm 1.9\%$ and $90.2\% \pm 0.5\%$ in the SBR. Based on the above, the IASBR was more efficient in TN and ammonium removal and more shocking load resistant, and therefore was more feasible than SBR for treating low COD/TN ratio wastewaters such as the digested piggery wastewater.

Key words: intermittently aerated sequencing batch reactor (IASBR); digested piggery wastewater; total nitrogen; ammonia nitrogen; COD/TN

收稿日期: 2016-03-03; 修订日期: 2016-06-02

基金项目: 浙江省重大科技专项(2014C03022); MRC 合作项目; 嘉兴市科技计划项目(2014AY21014)

作者简介: 董宝刚(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: dbg1990@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com; chenlj@mail.tsinghua.edu.cn

规模化养猪废水属于典型的高氨废水,对我国地表水环境质量具有重要影响.我国规模化养猪场大多配备了厌氧发酵装置,但厌氧技术只能去除有机物而对氨氮基本没有去除能力^[1,2],反而造成了排出沼液的氨氮浓度高、COD/TN低、可生化性差、生物处理难度大的问题.我国现行畜禽养殖废水执行的是《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001),其中只有COD和氨氮的要求,对于TN去除没有要求.随着农村污染源普查的展开,规模化养殖废水对环境污染的影响在“十二五”期间得到前所未有的重视,2014年3月,国家环境保护部公布了《畜禽养殖业水污染物排放标准》(二次征求意见稿),提升了氨氮的排放标准并提出了总氮的排放标准.沼液排放标准的提升将对现行沼液生物处理技术提出更严峻挑战.

厌氧氨氧化工艺不需要外加碳源,在处理低碳高氮废水方面确实具有很大的优势.但养猪沼液废水中基本不含亚硝酸盐,仍然需要前置短程硝化使氨氮和亚硝氮的比例控制在1:1左右,对于目前的农村废水运维水平来说难度很大.同时厌氧氨氧化菌对环境要求严格,增殖速率低,启动时间长,养猪废水的水质水量又波动很大,使运行管理难度进一步增加.序批式活性污泥法(sequencing batch reactor, SBR)是养猪沼液的常用生物处理技术之一,具有工艺简单、运行方式灵活、自动化程度高等优点.但利用传统SBR处理沼液,普遍存在TN去除效果不理想、硝化过程易导致系统酸化、系统不稳定等问题^[3-5].

间歇曝气SBR(intermittently aerated SBR, IASBR)是传统SBR的一种变型,其主要优势在于通过间歇曝气,在同一反应器内形成缺氧和好氧交替的环境,更易于实现高效的短程硝化和反硝化^[6-8],从而在硝化阶段节省40%的氧气消耗,在反硝化阶段节省25%的有机碳源消耗.同时,利用缺氧反硝化过程产生的碱度及时补充好氧硝化过程中消耗的碱度^[9],节省调碱药剂消耗.目前关于IASBR已有一些研究报道.例如,Zhang等^[10]利用IASBR处理养猪沼液,在进水COD/TN为3.0, TN容积负荷为 $0.38 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下,实现COD和TN的去除率分别为89.8%和76.5%.Pan等^[11]在11℃的低温下使用IASBR处理屠宰废水,发现当进水COD/TN为10.5,曝气量为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,COD和TN的去除率可分别达到98.2%和97.7%,并且实现了稳定的短程硝化反硝化.宋小

燕等^[12]发现进水COD/TN对脱氮性能影响很大,当进水COD/TN为 0.8 ± 0.2 时,反应器对TN和氨氮的去除率仅分别为 $18.3\% \pm 12.2\%$ 和 $84.2\% \pm 10.3\%$;而当进水COD/TN提高到 2.4 ± 0.5 后,TN和氨氮的去除率则分别上升至90%和95%以上.

本文在宋小燕等^[12]研究的基础上,同时采用IASBR和SBR两套系统处理养猪沼液,比较分析了不同COD/TN和运行负荷下两套反应器的污染物去除效果,通过进一步挖掘IASBR在处理养猪沼液方面的优势,以期推广应用奠定技术基础.

1 材料与方法

1.1 试验原水

试验原水取自嘉兴市某规模化养猪场沼气池出水,采集后 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 下储存.水中总氮(TN)浓度很高,为 $(1\ 000 \pm 315) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)浓度为 $(523 \pm 165) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)和硝氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)浓度之和低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其余为有机氮;COD浓度为 $(950 \pm 278) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,碳氮比(COD/TN)极低,仅为0.95;TOC浓度为 $(354 \pm 56) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷(TP)浓度为 $(33.5 \pm 11.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,pH值为 $7.5 \sim 8.2$,碱度 $5\ 000 \sim 8\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 CaCO_3 计).

1.2 试验装置和运行条件

IASBR试验装置结构与SBR相同,二者有效容积皆为 10 L ($\Phi 25 \text{ cm} \times H 30 \text{ cm}$),完全混合式反应器内设置曝气和螺旋桨搅拌.每8 h为一个运行周期,其中IASBR的运行模式为:进水10 min → 无曝气40 min,曝气60 min,交替循环4次 → 静置沉淀60 min → 排水10 min;SBR的运行模式为:进水10 min → 无曝气160 min,曝气240 min → 静置沉淀60 min → 排水10 min.曝气阶段采用微孔曝气,通过转子流量计控制曝气量,第一个曝气段的溶解氧(DO)控制在 $0.5 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;非曝气段启动螺旋桨搅拌使混合液均匀,DO低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.非控温运行,试验期间水温为 $25 \sim 32^\circ\text{C}$.试验接种污泥取自城市污水处理厂A²/O工艺的好氧池,初始混合液悬浮固体(MLSS)浓度为 $4\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SV₃₀为25%.

两反应器共连续运行136 d.其中1~12 d为启动阶段,HRT为5 d;此后按照HRT和进水COD/TN分为3个工况,如表1所示.由于原水中COD/TN极低,因此3个工况均在进水中添加无水乙酸钠调节进水.其中:工况1(13~61 d),进水COD/TN

为 2.3 ± 0.5 , HRT 为 5 d, 污泥 COD 负荷约为 $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 此阶段污泥浓度增长缓慢, 故全程未排泥, 38 d 开始稳定于约 $6300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 污泥性状较差, 泥水分离效果差. 工况 2 (62 ~ 107 d), 碳源添加量不变, COD/TN 为 2.2 ± 0.2 , 缩短 HRT 至 3 d, 初始污泥 COD 负荷提高至 $0.12 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 污泥浓度迅速增长至约 $7500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 泥水分离较差; 而后自 85 d 开始间歇排泥 (平均 SRT 为 77 d), 最终

IASBR 和 SBR 中的 MLSS 分别稳定在 $6100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 污泥性状改善, 泥水分离性能显著提高. 工况 3 (108 ~ 136 d), 提高进水 COD/TN 至 3.0 ± 0.2 , 保持 HRT 为 3 d, 未进行排泥, IASBR 和 SBR 的污泥浓度分别达到 $7800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相应的污泥 COD 负荷分别为 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.17 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 泥水分离好, 污泥沉降性佳.

表 1 试验设计与运行条件

Table 1 Experimental design and operational conditions

项目	工况 1	工况 2	工况 3
运行天数/d	13 ~ 61	62 ~ 107	108 ~ 136
HRT/d	5	3	3
进水 COD/TN	2.3 ± 0.5	2.2 ± 0.2	3.0 ± 0.2
进水 COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2853 ± 640	2496 ± 205	3568 ± 261
进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	619 ± 212	540 ± 55	624 ± 40
进水 TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1247 ± 188	1232 ± 148	1206 ± 104
COD 容积负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	0.57 ± 0.13	0.83 ± 0.07	1.19 ± 0.09
氨氮容积负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	0.12 ± 0.04	0.18 ± 0.02	0.20 ± 0.01
TN 容积负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	0.25 ± 0.04	0.41 ± 0.05	0.40 ± 0.03
IASBR COD 污泥负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	0.10 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.15 ± 0.01
SBR COD 污泥负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	0.10 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.17 ± 0.01

1.3 分析项目和方法

COD、氨氮、亚硝态氮、硝态氮、TN、TP、碱度的分析依据标准方法^[13]. MLSS 依据重量法测定. 总有机碳 (TOC) 采用 TOC 仪 [SHIMADZU CORPORATION, TOC-V_{CSN}] 测定. pH、DO 采用便携式仪器 (DKK-TOA CORPORATION, HM-30P、DO-31P) 测定. 活性污泥的氨氧化速率 (AUR) 和亚硝酸氧化速率 (NUR) 的测定参照文献^[14], 比氨氧化速率 (SAUR) 和比亚硝酸盐氧化速率 (SNUR) 分别为 AUR 和 NUR 与污泥浓度 (MLSS) 的比值. 另外, 亚硝态氮积累率 (NAR) 用公式 (1) 计算^[15]. 游离氨 (FA) 的质量浓度采用公式 (2) 计算^[16]:

$$\text{NAR} = \frac{c_{\text{NO}_2^- \text{-N}}}{c_{\text{NO}_2^- \text{-N}} + c_{\text{NO}_3^- \text{-N}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{FA} = \frac{1.214 \times c_{\text{NH}_4^+ \text{-N}} \times 10^{\text{pH}}}{e^{6.344/(273+T)} + 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中, $c_{\text{NH}_4^+ \text{-N}}$ 、 $c_{\text{NO}_2^- \text{-N}}$ 、 $c_{\text{NO}_3^- \text{-N}}$ 分别为氨氮、亚硝态氮和硝态氮质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$.

三维荧光光谱使用荧光分光光度计 (HITACHI F-2500) 测定, 配备光程为 0.1 cm 的四面光石英比色皿. 激发光源采用 150 W 氙弧灯, PTM 电压为 750 V. 激发和发射波长范围分别为 220 ~ 400 nm、280 ~ 550 nm. 激发和发射波长扫描间隔均为 5 nm. 以超纯水作空白校正拉曼散射.

2 结果与讨论

2.1 氮素的浓度变化

2.1.1 TN

两反应器对 TN 的去除情况如图 1 所示. 工况 1 (13 ~ 61 d), 进水 COD/TN 为 2.3 ± 0.5 , 进水 TN 浓度为 $(1247 \pm 188) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 容积负荷为 $(0.25 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, IASBR 和 SBR 的出水 TN 浓度分别为 $(231 \pm 88) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(256 \pm 81) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 两组反应器对 TN 的去除率接近, 分别为 $81.5\% \pm 7.5\%$ 和 $79.8\% \pm 4.9\%$. 工况 2 (62 ~ 107 d), 保持进水 COD/TN 为 2.2 ± 0.2 , 进水 TN 浓度为 $(1232 \pm 148) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缩短 HRT 至 3 d, 使 TN 容积负荷提高至 $(0.41 \pm 0.05) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 两组反应器的 TN 去除率均有所下降. IASBR 对 TN 去除率先迅速下降至 66.1%, 而后很快得到恢复, 第 75 d 对 TN 的去除率稳定在 80% 左右; 与之相比, SBR 受负荷冲击影响较大, TN 去除率最低下降至 40% 且波动大, 直到第 92 d 才逐渐稳定至 70% 左右. 工况 2 时 IASBR 和 SBR 的出水 TN 浓度分别为 $(270 \pm 40) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(470 \pm 149) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率分别为 $77.5\% \pm 5.3\%$ 、 $61.8\% \pm 11.2\%$. 为提高 TN 去除效率, 工况 3 (108 ~ 136 d) 提高进水 COD/TN 至 3.0 ± 0.2 , 进水 TN 浓度为 $(1206 \pm 104) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 保持

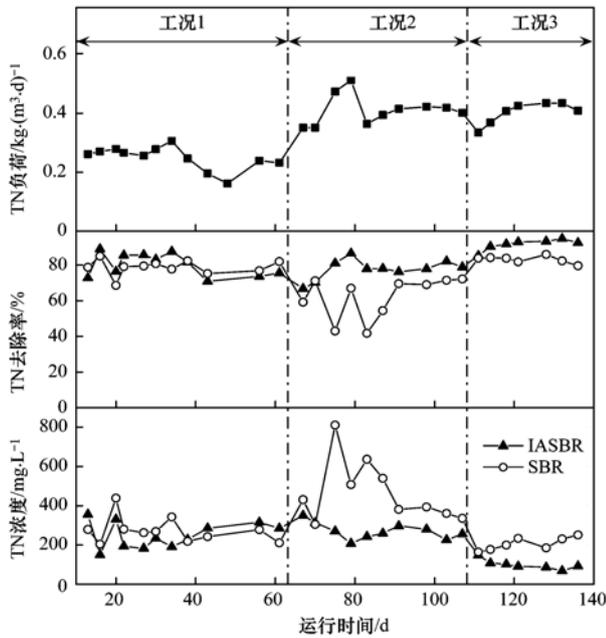


图1 IASBR和SBR的TN负荷和TN去除效率

Fig. 1 TN loading and TN removal in IASBR and SBR

TN 负荷为 $(0.4 \pm 0.03) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, IASBR 和 SBR 的出水 TN 浓度分别下降到 $(99 \pm 23) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(205 \pm 31) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率分别提高到 $91.5\% \pm 2.8\%$ 、 $83.0\% \pm 1.9\%$ 。

进水 COD/TN 从 2.2 ± 0.2 提高至 3.0 ± 0.2 后,两套反应器的 TN 去除率和稳定性均得到大幅度提升. 上述结果与宋小燕等^[12]的研究结果相一致,也在很多其它报道中得到验证,方炳南等^[17]利用 SBR 处理养猪沼液时发现,当 COD/TN 从 5.5 提高到 9.9 时,系统 TN 去除率从 59.6% 提高到 75.9%. Kuba 等^[18]认为要实现良好的脱氮效果, COD/TN 应大于 3.4. 而本研究中当进水 COD/TN 为 3.0 左右时,IASBR 和 SBR 即实现对 TN 的去除率分别高达 90% 和 80% 以上,继续提高 COD/TN, 去除效果有望进一步提升. 一般的养猪沼液 COD/TN 可以达到 2~3,高的可以达到 4 左右^[19],所以不需要像本研究这样投加很多碳源. 本研究所使用的养猪沼液与一般沼液相比,碳氮比偏低,属于较难处理的情况. 碳源投加量越大,意味着运行费用越高,在经济效益本来就不是很好的养猪场内推广应用的阻力也就越大. 因此,今后研究中有必要探讨使用未沼气发酵的原水或通过优化碳源投加位置等方式减少外加碳源用量的方法.

工况 1~3, IASBR 的 TN 去除效果均优于 SBR, 且抗负荷冲击能力也更强. Pan 等^[20]比较研究了 IASBR 和 SBR 对模拟配水的去除效果,发现当配水

COD、TN 浓度分别为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, IASBR 对 TN 的去除率高达 91%, 明显高于 SBR 的 79%, 吕娟等^[21]在利用 IASBR 处理人工配水时也发现,随着间歇曝气次数的增加, TN 的去除效率也随之提高. 间歇曝气形成多次缺氧段, 导致 IASBR 反应器内多次出现缺氧段, 而在缺氧段碳源被用于因前一个好氧段产生的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的反硝化反应, 从而使得 IASBR 表现出更高的脱氮效率.

2.1.2 氨氮

两反应器对氨氮的去除效果如图 2 所示. 工况 1 (13 ~ 61 d), 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $(619 \pm 212) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮负荷为 $(0.12 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. IASBR 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 $98.8\% \pm 0.7\%$, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度稳定在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 而 SBR 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仅为 $78.3\% \pm 19.6\%$, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $(126.0 \pm 93.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 波动很大, 最高达 $330 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 工况 2 (62 ~ 107 d), 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $(540 \pm 55) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缩短 HRT 为 3 d, 氨氮负荷提高至 $(0.18 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, IASBR 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度受负荷升高影响先升高至 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后逐步降低, 87 d 稳定于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 而 SBR 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的升高与波动幅度较大, 最高时浓度达 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 直到第 98 d 后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度才逐渐稳定在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 工况 3 (108 ~ 136 d), 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 $(624 \pm 40) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮负荷为 $(0.20 \pm 0.01) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 提高进水 COD/TN 至 3.0 ± 0.2 , IASBR 和 SBR 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 $99.6\% \pm 0.2\%$ 和 $90.2\% \pm 1.4\%$, IASBR 的出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度保持在 $(2.7 \pm 1.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 明显低于 SBR 的 $(61.0 \pm 6.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

相比于 SBR, IASBR 表现出更高的氨氮去除效率. 这是因为 IASBR 的间歇曝气模式会在缺氧和好氧环境交替的过程中形成一定时间的低 DO 段, 低 DO 环境虽然会引起氨氧化速率下降, 但氨氧化菌 (AOB) 在低 DO 环境下可以获得更高的产率系数^[22]. 蒋轶峰等^[23]通过对硝化菌的生长动力学分析表明, 在间歇曝气系统中, AOB 可以通过产率系数的增加来提高自身在反应器中的绝对生物量, 补偿因间歇曝气引起的比底物利用速率下降, 最终表现出更高的氨氮氧化速率. 此外, IASBR 的间歇曝气模式产生的缺氧段发生反硝化反应, 能够及时补充因好氧消耗的部分碱度, 这也有利于系统的氨氮去除. 整个运行期间, IASBR 均显示出对氨氮稳定

而高效的去除效果,出水氨氮浓度不仅满足既有的中华人民共和国《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001) (氨氮 $\leq 80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),还可达到2014年《畜禽养殖业水污染物排放标准》(征求意见稿)的新氨氮排放标准(氨氮 $\leq 25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).而相比之下,SBR对氨氮的去除受负荷影响较大,出水氨氮浓度与波动幅度均明显高于IASBR.

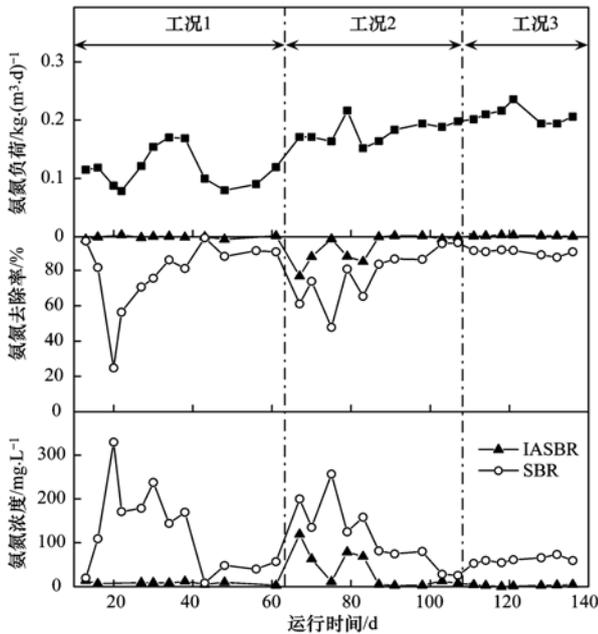


图2 IASBR和SBR的氨氮负荷和氨氮去除效率

Fig. 2 NH_4^+-N loading and NH_4^+-N removal in IASBR and SBR

2.1.3 亚硝态氮积累

高浓度的FA会抑制AOB和亚硝酸盐氧化菌(NO_B)的活性,Anthonisen等^[24]认为FA对AOB和NO_B的抑制浓度分别为 $10 \sim 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 1$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.张宇坤等^[25]发现当FA浓度在 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近时,NO_B的活性仅为FA=0时的50%.Vadivelu等^[26]认为当FA浓度达到 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可完全抑制NO_B的生长.而吴莉娜等^[27]发现FA浓度在 $40 \sim 70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内可实现稳定的短程硝化,当FA浓度在 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时则会抑制全部硝化反应.

本研究使用出水亚硝酸盐浓度和亚硝化率(NAR)来反映亚硝态氮积累,计算得到不同工况下IASBR和SBR反应器内FA浓度和对应的亚硝态氮积累情况如表2所示.工况1~3,IASBR的亚硝态氮浓度分别为 (114 ± 86) 、 (103 ± 64) 、 $(73 \pm 28) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对应的NAR分别为 $65.7\% \pm 26.8\%$ 、 $60.6\% \pm 27.9\%$ 、 $86.1\% \pm 4.2\%$;SBR的亚硝态氮积累浓度分别为 (78 ± 72) 、 (76 ± 81) 、 $(96 \pm 22) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对应的NAR分别为 $82.7\% \pm 11.6\%$ 、 $73.7\% \pm 14.6\%$ 、 $86.8\% \pm 4.7\%$.

各工况下IASBR中FA浓度均较低,只有SBR的一半左右.工况1~2,IASBR出水的亚硝氮浓度始终高于SBR,NAR低于SBR,说明IASBR系统中生成的亚硝酸盐和硝酸盐浓度都相对较高,这与IASBR内FA浓度相对较低,对AOB和NO_B的抑制作用都相对较小,氨氧化过程和亚硝化盐氧化过程都进展较好有关.工况3由于COD/TN提高,反硝化作用加强,导致两反应器中出水亚硝氮浓度均下降,不利于亚硝态氮积累^[28].相比于传统SBR,IASBR的间歇曝气模式更有利于亚硝态氮的积累^[29],而亚硝态氮的积累是实现短程脱氮的关键,这与相关的报道一致^[21,30],也可以进一步解释2.1.1节的结论.

表2 IASBR和SBR中的FA、亚硝氮和NAR

Table 2 FA, the nitrate nitrogen and NAR in IASBR and SBR

项目	IASBR			SBR		
	FA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO ₂ ⁻ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NAR/%	FA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO ₂ ⁻ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NAR/%
工况1	8.5 ± 5.3	114 ± 86	65.7 ± 26.8	19.9 ± 10.9	78 ± 72	82.7 ± 11.6
工况2	18.7 ± 5.3	103 ± 64	60.6 ± 27.9	33.7 ± 18.8	76 ± 81	73.7 ± 14.6
工况3	20.7 ± 7.1	73 ± 28	86.1 ± 4.2	37.9 ± 13.8	96 ± 22	86.8 ± 4.7

2.1.4 有机氮

废水中TN减去氨氮、亚硝态氮和硝态氮,剩下的即为有机氮.沼液中含有丰富的氨基酸、蛋白质等大分子有机物^[31],这些大分子有机物是有机氮的重要来源.有机氮的存在给系统脱氮造成很大困难,是限制TN去除的关键因素之一.

本研究沼气发酵效果不好,进水沼液中有机氮占TN的比例为40%~65%,工况1~3进水有机氮

的浓度分别为 (621 ± 194) 、 (690 ± 122) 和 $(583 \pm 110) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.经过IASBR处理后,工况1~3出水有机氮浓度大幅降低至 (33 ± 52) 、 (51 ± 67) 和 $(11 \pm 13) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有机氮的去除率分别达到 $96.0\% \pm 6.9\%$ 、 $92.8\% \pm 10.0\%$ 和 $98.5\% \pm 1.9\%$;而SBR的出水有机氮浓度分别为 (34 ± 49) 、 (214 ± 114) 和 $(35 \pm 16) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有机氮的去除率分别为 $95.6\% \pm 8.2\%$ 、 $62.1\% \pm 18.7\%$ 和

93.9% ± 3.0%。工况 1 时, IASBR 出水的有机氮浓度与 SBR 相当, 但工况 2 ~ 3 进水有机氮负荷提高后, IASBR 出水的有机氮浓度明显低于 SBR。孙剑辉等^[32]认为间歇曝气模式提供了缺氧、好氧和厌氧的微环境, 部分兼性微生物在厌氧或缺氧条件下能将大分子有机物分解成小分子物质。Chen 等^[33]研究了缺氧好氧环境对异养菌的影响时, 发现在经历了缺氧后再好氧, 异养菌表现出更大的活性, 能够更快地利用有机物。

2.1.5 污泥硝化活性

检测第 92 d 两套反应器内活性污泥的硝化活性, 发现 IASBR 反应器内的污泥比氨氧化速率 (SAUR) 和比亚硝酸盐氧化速率 (SNUR, 以 $O_2/MLSS$ 计) 分别为 $0.033 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $0.038 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 明显高于 SBR 的 $0.021 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $0.010 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。这一结果间接验证了 2.1.3 节 IASBR 中 FA 浓度低, 对 AOB 与 NOB 抑制作用小的推论。

2.2 有机物去除特性

因反应器内亚硝态氮积累干扰 COD 测定, 故采用 TOC 表征有机物去除情况。工况 1 ~ 3, 进水 TOC 浓度分别为 (646 ± 126) 、 (585 ± 72) 、 $(890 \pm 43) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, IASBR 的出水 TOC 浓度分别为 (71.5 ± 7.5) 、 (78.6 ± 9.3) 、 $(71.4 \pm 8.7) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对应的去除率分别为 $88.5\% \pm 2.3\%$ 、 $86.4\% \pm 2.2\%$ 、 $92.0\% \pm 0.9\%$; 而 SBR 的出水 TOC 分别为 (83.4 ± 10.5) 、 (105.4 ± 33.7) 、 $(86.8 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对应的去除率分别为 $86.6\% \pm 3.2\%$ 、 $81.8\% \pm 5.6\%$ 、 $90.2\% \pm 0.5\%$ 。

两反应器均保持了较为稳定的有机物去除效果, IASBR 出水 TOC 浓度略低于 SBR, 但二者相差不大。苏东霞等^[29]对比连续曝气 SBR 和 IASBR 处理生活污水时发现了相同的现象。分析认为是间歇曝气出现的低 DO 环境存在反硝化作用, 使其相比于传统 SBR 的有机物去除率略高。工况 3 虽然进一步提升了有机负荷, 但两套反应器出水 TOC 浓度反而进一步降低, 王丽等^[34]认为进水 COD/TN 越高, 系统对有机物的去除率越高。这可能是因为提高进水 COD/TN 后, 反应器内污泥生长状况变好, 供异养菌生长可利用的底物增多, 提高了系统对有机物的去除效果和稳定性。

2.3 三维荧光光谱分析

废水中所含有机物质一般都具有荧光特性, 当这些物质受到一定波长的激发光照射时, 会发射具

有特征波长的发射波^[35]。不同的荧光物质在光谱中有不同的位置, 而且物质的浓度与荧光强度呈现正相关关系, 因而可以通过测定养猪沼液进出水的三维荧光光谱, 进一步分析其有机物组成。本研究在第 61 d 采样, 分析了原水和两反应器出水的三维荧光光谱, 结果如图 3 所示。依据发射波长 (E_m) 和激发波长 (E_x) 的不同, 可以将三维荧光光谱图分为 5 个区域, 分别是 I 区和 II 区芳香族蛋白质类似物, III 区的富里酸类、IV 区的溶解性微生物代谢产物和 V 区的类腐殖酸^[36]。结果发现, 养猪沼液进水的荧

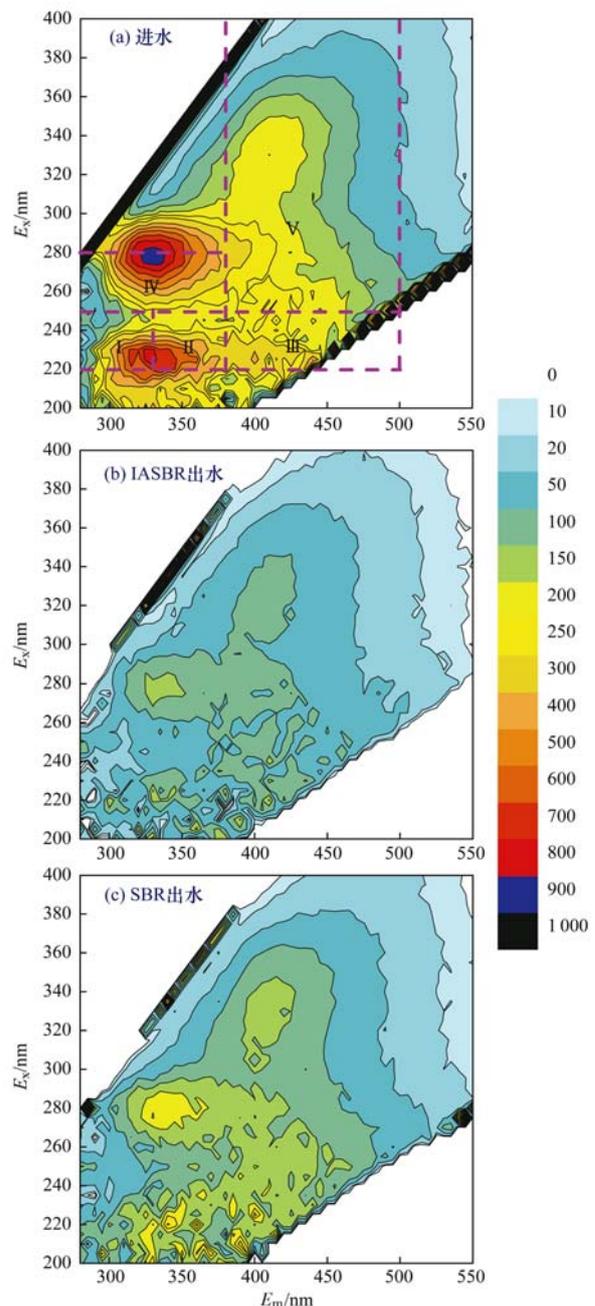


图 3 养猪沼液与 IASBR、SBR 出水的三维荧光光谱

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectra of digested piggery wastewater and the effluent of IASBR and SBR

光区域主要集中在 I 区和 II 区的芳香族蛋白质类似物以及 IV 区的溶解性微生物副产物,三者占总荧光强度的比例分别为 33.8%、33.6%、16.9%,而富里酸类和腐殖酸类占比较小,分别为 6.3% 和 9.4%。相较进水,IASBR 和 SBR 的出水中 I 区的芳香族蛋白质类似物的荧光强度占总荧光强度分别下降到 23.0%、24.5%,而类腐殖酸则分别上升到 17.1%、16.2%。II 区的芳香族蛋白质类似物和类富里酸则几乎没有变化,这说明微生物在降解 I 区的芳香族蛋白质类似物的同时产生了类腐殖酸。相比于进水,经过反应器处理后,IASBR 出水的荧光区域总强度下降约 70%,有机物浓度下降 91.9%,均优于 SBR 的 55% 和 88.3%,且经过 IASBR 处理, I 区和 II 区的芳香族蛋白质类似物的荧光强度下降 66%、52%,明显好于 SBR 的 41%、17%,进一步验证了关于有机氮去除效果差异的试验结果。

3 结论

(1) 在不同进水碳氮比和容积负荷下,IASBR 都显示出比 SBR 更好的氨氮与 TN 去除效果,而 TOC 的去除效果相差不大。

(2) IASBR 对氨氮和总氮去除效果好且稳定,可能与反应器中 FA 浓度相对较低,对 AOB 和 NOB 的抑制作用小,氨氮氧化效率和亚硝酸盐氧化效率较高有关。另外,IASBR 反应器内污泥比氨氧化速率(SAUR)和比亚硝酸盐氧化速率(SNUR)明显高于 SBR,从生物相的角度解释了 IASBR 的高效硝化与脱氮的原因。

(3) 在不同进水碳氮比和容积负荷下,IASBR 对总有机氮的去除率高,工况 1~3 分别为 96.0% ± 6.9%、92.8% ± 10.0% 和 98.5% ± 1.9%,在工况 2~3 进水有机氮负荷提高后,明显高于 SBR。三维荧光光谱的分析结果表明 IASBR 对 I 区和 II 区的芳香族蛋白质类似物的荧光强度比 SBR 具有更好的去除效果,由此间接证明了 IASBR 对总有机氮去除能力更强的说法。

参考文献:

- [1] 徐森. UASB 反应器处理猪场废水的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2011. 44-47.
Xu S. Applied research on treatment of piggery wastewater by UASB reactor [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011. 44-47.
- [2] Song M, Shin S G, Hwang S. Methanogenic population dynamics assessed by real-time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): S23-S28.
- [3] Yang D, Deng L W, Zheng D, *et al.* Separation of swine wastewater into different concentration fractions and its contribution to combined anaerobic-aerobic process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **168**: 87-93.
- [4] 邓良伟, 郑平, 李淑兰, 等. 添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. *环境科学*, 2005, **26**(6): 105-109.
Deng L W, Zhen P, Li S L, *et al.* Performance improvement of sequencing batch reactor (SBR) treating digested piggery wastewater by addition of raw wastewater [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(6): 105-109.
- [5] Deng L W, Zheng P, Chen Z A. Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC-SBR process with bypass of raw wastewater [J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(4): 965-969.
- [6] Li J P, Elliott D, Nielsen M, *et al.* Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **55**(3): 215-222.
- [7] 李亚峰, 秦亚敏, 谢新立, 等. 间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1518-1521.
Li Y F, Qin Y M, Xie X L, *et al.* Study on achievement and influencing factors of shortcut nitrification in intermittent aeration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(7): 1518-1521.
- [8] Yoo H, Ahn K H, Lee H J, *et al.* Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor[J]. *Water Research*, 1999, **33**(1): 145-154.
- [9] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3506-3512.
- [10] Zhang M C, Lawlor P G, Wu G X, *et al.* Partial nitrification and nutrient removal in intermittently aerated sequencing batch reactors treating separated digestate liquid after anaerobic digestion of pig manure [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2011, **34**(9): 1049-1056.
- [11] Pan M. Assessment of slaughterhouse wastewater treatment by using intermittently-aerated sequencing batch reactors (IASBRs) [D]. Galway: Civil Engineering, College of Engineering and Informatics, National University of Ireland, 2013. 85-91.
- [12] 宋小燕, 刘锐, 税勇, 等. 间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1873-1879.
Song X Y, Liu R, Shui Y, *et al.* Stability of short-cut nitrification nitrogen removal in digested piggery wastewater with an intermittently aerated sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1873-1879.
- [13] 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. 120-124, 211-213, 246-250, 254-261, 271-274, 279-281.
Ministry of Environmental Protection of China. Standard methods for water and wastewater monitoring and analysis (4th ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 120-124,

- 211-213, 246-250, 254-261, 271-274, 279-281.
- [14] 王建龙, 吴立波, 齐星, 等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 225-229.
Wang J L, Wu L B, Qi X, *et al.* Characterization of nitrification activity of activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, **19**(3): 225-229.
- [15] 李建政, 孟佳, 赵博玮, 等. 养猪废水厌氧消化液 SBR 短程硝化系统影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, **46**(8): 27-33.
Li J Z, Meng J, Zhao B W, *et al.* Main influence factors for shortcut nitrification in a SBR treating anaerobic digested piggery wastewater[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, **46**(8): 27-33.
- [16] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 85-98.
- [17] 方炳南, 王志荣, 黄武, 等. SBR 处理猪场沼液运行工况优化研究[J]. 中国沼气, 2011, **29**(5): 47-50.
Fang B N, Wang Z R, Huang W, *et al.* Optimization of operation conditions treating biogas slurry with SBR reactor[J]. *China Biogas*, 2011, **29**(5): 47-50.
- [18] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. *Water Research*, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [19] 卫丹, 万梅, 刘锐, 等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2650-2655.
Wei D, Wan M, Liu R, *et al.* Study on the quality of digested piggery wastewater in large-scale farms in Jiaxing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2650-2655.
- [20] Pan M, Chen T H, Hu Z H, *et al.* Assessment of nitrogen and phosphorus removal in an intermittently aerated sequencing batch reactor (IASBR) and a sequencing batch reactor (SBR) [J]. *Water Science and Technology*, 2013, **68**(2): 400-405.
- [21] 吕娟, 陈银广, 顾国维. 间歇曝气 SBR 工艺脱氮除磷试验研究[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(8): 608-611.
Lv J, Chen Y G, Gu G W. Study of nitrogen and phosphorus removal by a sequencing batch reactor with intermittent aeration [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, **29**(8): 608-611.
- [22] Carlucci A F, McNally P M. Nitrification by marine bacteria in low concentrations of substrate and oxygen[J]. *Limnology and Oceanography*, 1969, **14**(5): 736-739.
- [23] 蒋轶锋, 陈浚, 王宝贞, 等. 间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及 NO_2^- 积累机制[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 85-90.
Jiang Y F, Chen J, Wang B Z, *et al.* Effect of intermittent aeration on growth kinetics of nitrifiers and mechanism for NO_2^- accumulation[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 85-90.
- [24] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [25] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1242-1247.
Zhang Y K, Wang S Y, Dong Y J, *et al.* Effect of FA and FNA on activity of nitrite-oxidising bacteria[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- [26] 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.
- [27] 吴莉娜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 游离氨对城市生活垃圾渗滤液短程硝化的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3428-3432.
Wu L N, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of free ammonia on the short-cut nitrification of the municipal landfill leachate [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3428-3432.
- [28] Im J, Gil K. Effect of anaerobic digestion on the high rate of nitrification, treating piggery wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(11): 1787-1793.
- [29] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 不同曝气方式 SBR 短程硝化试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(6): 2120-2129.
Su D X, Li D, Zhang X J, *et al.* Study on partial nitrification with different aeration modes in sequencing batch reactor [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, **45**(6): 2120-2129.
- [30] Khanitcheidecha W, Nakamura T, Sumino T, *et al.* Performance of intermittent aeration reactor on $\text{NH}_4\text{-N}$ removal from groundwater resources [J]. *Water Science and Technology*, 2010, **61**(12): 3061-3069.
- [31] 沈其林, 单胜道, 周健驹, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气, 2014, **32**(3): 83-86.
Shen Q L, Shan S D, Zhou J J, *et al.* Determination and analysis of compositions in biogas slurry produced by swine manure digestion [J]. *China Biogas*, 2014, **32**(3): 83-86.
- [32] 孙剑辉, 魏瑞霞, 杨明耀. 缺氧/好氧 SBR 工艺去除亚铵法造纸废水中有机物的研究[J]. 水处理技术, 2005, **31**(1): 53-56.
Sun J H, Wei R X, Yang M Y. Paper-making wastewater treatment by treatment anoxic/aerobic SBR [J]. *Technology of Water Treatment*, 2005, **31**(1): 53-56.
- [33] Chen G H, Yip W K, Mo H K, *et al.* Effect of sludge fasting/feasting on growth of activated sludge cultures [J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 1029-1037.
- [34] 王丽, 彭永臻, 马娟, 等. 碳氮比及 HRT_s 对交替缺氧/好氧 CAST 去除营养物的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2370-2375.
Wang L, Peng Y Z, Ma J, *et al.* Effects of COD/TN and HRT_s on nutrients removal by an alternating anoxic/oxic CAST [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(10): 2370-2375.
- [35] 许金钩, 王尊本. 荧光分析法[M]. (第三版). 北京: 科学出版社, 2006. 7-13.
- [36] Guo L, Lu M M, Li Q Q, *et al.* Three-dimensional fluorescence excitation-emission matrix (EEM) spectroscopy with regional integration analysis for assessing waste sludge hydrolysis treated with multi-enzyme and thermophilic bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 22-28.

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