

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

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

(河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007)

摘要:以连续运行的生物活性炭(biological activated carbon, BAC)填料反应器为研究对象, 与序批式活性污泥反应器(sequencing batch reactor, SBR)对比, 考察了 BAC 的加入对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化(simultaneous nitrification and denitrification, SND)脱氮效果的影响。在室温(15~27℃), 初始溶解氧(dissolved oxygen, DO)质量浓度 2~3 mg·L⁻¹条件下, 以甲醇做外加碳源, 分别设置进水 C/N 比为 3、5、8 和 10 运行 120 个周期, 比较两反应器的脱氮效果及稳定性。结果表明, C/N 比由 3 依次升至 5 和 8 时 BAC 填料反应器脱氮效果优于 SBR, TN 平均去除率分别达 44.88%、58.07% 和 66.64%。继续增大进水 C/N 至 10, SBR 发生污泥膨胀, 而 BAC 反应器仍能保持 63.65% 的 TN 去除率。实验证明 BAC 在单一反应器内创造了多样的溶解氧环境, 为 SND 创造了适宜的条件。BAC 的加入减小了过量有机碳对硝化系统带来的影响, 扩大了反应器的 C/N 比适用范围, 增加了运行的稳定性, 提高了有机物的脱氮容量, 为高效脱氮提供了可能。

关键词:生物活性炭; C/N 比; 同步硝化反硝化; 溶解氧; 生物脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4296-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201601020

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, WANG Qi, WU Qing, SUN Jian-hui

(Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory of Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Influence of biological activated carbon (BAC) on simultaneous nitrification and denitrification (SND) in inflow with different C/N ratios was investigated with continuous operation of BAC reactor and SBR. Methanol was added as carbon source and the inflow C/N ratio was set to 3, 5, 8 and 10 to run for about 120 cycles, under conditions of indoor temperature (15~27℃), initial DO 2~3 mg·L⁻¹. The TN removal efficiency and stability of two reactors were compared. The results showed that, BAC reactor had a higher TN removal efficiency than SBR at different C/N ratios. TN removal rate of BAC reactor was 44.88%, 58.07% and 66.64%, when the C/N ratio was 3, 5 and 8 respectively. After increasing the C/N ratio to 10, the BAC reactor could maintain TN removal rate of 63.65%, but the SBR showed sludge bulking. BAC provided various DO environments for microorganisms in a vessel, which was beneficial to SND. BAC could reduce the influence of excessive carbon source on the nitrification system, enlarge the application range and improve the stability of reactor at different C/N ratios, and increase the nitrogen removal capacity of organic matter. BAC provided condition for efficient nitrogen removal.

Key words: biological activated carbon (BAC); C/N; simultaneous nitrification and denitrification (SND); DO; biological nitrogen removal

同步硝化反硝化脱氮因具有工艺简单, 基建费用低, 碱度消耗较少等优点^[1,2], 越来越受到人们的青睐, 但该工艺存在微环境调控困难, 对进水碳源要求较高的弊端^[3,4]。在实际运行中, 废水的 C/N 比差异较大^[5,6], 在单一反应器同步生物脱氮工艺中, C/N 比过高会增加异养好氧菌的活性及其对水中 DO 的竞争, 抑制硝化细菌活性, 影响硝化效果^[7,8], 甚至引起污泥膨胀^[9,10]。过低的 C/N 比又会导致反硝化不完全, 脱氮效果受到限制^[11]。频繁调整 C/N 比会增加运行费用和操作难度。如何增大反应器的 C/N 比适用范围, 在不调整碳源的条件下, 实现低

C/N 比废水高效脱氮和高 C/N 比废水稳定脱氮, 是目前同步脱氮在应用中面临的难题。BAC 以活性炭作生物载体, 利用活性炭的多孔结构创造不同的溶解氧条件, 为生物多样性提供可能。本研究拟采用 BAC 填料反应器处理不同 C/N 比废水, 与 SBR 反应器运行效果比较, 考察 BAC 对废水同步脱氮效果的影响, 以期为推动废水同步脱氮的应用提供理论支撑。

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B610005)

作者简介: 崔延瑞(1972~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yanruicui@yeah.net

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验采用人工配制废水,向自来水中加入 NH_4Cl , 配制进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $100 \sim 120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 添加 KH_2PO_4 补充微生物生长必须的 P 元素, 用 NaHCO_3 调节 pH 至 8.0 ± 0.1 , 以甲醇做外加碳源, 通过调整碳源加入量分别配制进水 C/N 比为 3、5、8 和 10。

实验所用污泥经驯化后对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均达到 90% 以上。BAC 培养阶段活性污泥由悬浮状态逐渐与活性炭接触附着生长, 经过 20 d 左右 BAC 填料反应器对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 的去除率趋于稳定, 均达到 90% 以上, BAC 培养完成。初始污泥 MLSS 为 $3\ 367 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SV_{30} 为 20%。使用柱状活性炭 (granular activated carbon, GAC), 碳粒直径 4 mm, 堆积密度 $600 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 实验装置及运行工艺

实验在室温条件 (4 月 1 日 ~ 7 月 6 日) ($15 \sim 27^\circ\text{C}$) 下运行, 两反应器分别编号 SBR 反应器和 BAC 反应器, 活性污泥投加量均为 1 L, BAC 反应器另投加活性炭 300 g, 两反应器同步运行, 操作条件相同。

反应器用有机玻璃制作, 见图 1。两个反应器外形和体积完全相同, 高 50 cm, 内径 9 cm, 有效容积 3 L。BAC 反应器下部安装孔径 1 mm, 间距 3 mm 的圆形筛板用来承托活性炭。两反应器均通过安装在底部的曝气装置进行曝气, 以空气流量计控制曝气量为 $0.009 \text{ m}^3\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 各反应器初始平均 DO 质量浓度为 $2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 并在底部设排水口。实验采取序批式运行方式, 单周期 12 h, 进水 0.25 h, 曝气 8 h, 沉淀 0.5 h, 排水 0.25 h, 闲置 3 h。

1.3 分析方法

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用 N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用麝香草酚分光光度法; COD 采用快速消解法; pH 由 pH-2603 酸度计测定; MLSS 按国家环境保护局发布的标准方法测定^[12]。

反应器内 DO 由 JPB-607A 溶解氧仪测定, 在单周期运行开始前, 将 DO 测定仪探头分别埋入各个监测点, 读取同一时间不同监测点的 DO 质量浓度。

有机物脱氮容量按照以下公式计算^[13~15]:

$$\text{有机物脱氮容量} = \frac{\text{氮的去除量}}{\text{有机物消耗量}} \quad (1)$$

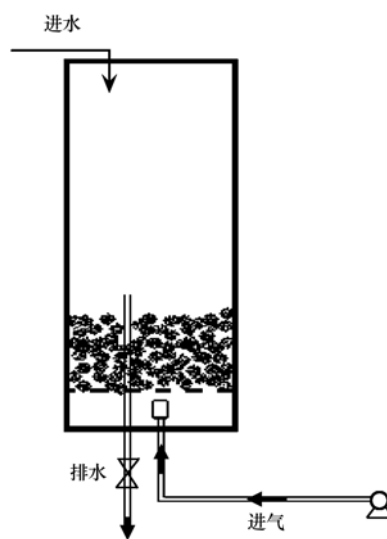


图 1 BAC 填料反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of BAC reactor

式中, 有机物脱氮容量为反应器中消耗单位量有机物能够去除氮素的量 (N/COD), $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$; 氮的去除量为 TN 去除量, mg ; 有机物消耗量为 COD 表示的有机物去除量, mg 。

2 结果与讨论

2.1 BAC 对不同 C/N 比废水脱氮效果的影响

为探究 BAC 对不同进水 C/N 比废水同步脱氮带来的影响, 设计进水 C/N 比分别为 3、5、8 和 10 这 4 个阶段的实验, 每天两个周期, 连续运行 120 个周期, COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果如图 2 所示。

2.1.1 BAC 对低 C/N 比废水脱氮效果的影响

由图 2 可知, 当进水 C/N 比为 3 时 (第 1 ~ 20 周期), BAC 反应器 TN 平均去除率达 44.88%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 平均去除率分别保持在 96.17% 和 92.88%; SBR 反应器 TN 平均去除率为 23.50%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 平均去除率分别为 95.81% 和 92.27%。增加进水 C/N 比为 5 时 (第 21 ~ 60 周期), BAC 反应器 TN 平均去除率达 58.07%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 平均去除率分别保持在 93.70% 和 95.98%; SBR 反应器 TN 平均去除率为 34.80%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 平均去除率分别为 95.18% 和 91.17%。可以看出, C/N 比为 3 和 5 时, 两反应器 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD 去除率基本相同, 但是, BAC 反应器 TN 去除效果较 SBR 反应器有明显提高。为了分析这一现象产生的原因, 监测了 C/N 比为 5 且运行稳定时 BAC 反应器和 SBR 反应器单周期内有机物和氮素的转化过程, 如图 3 所示。

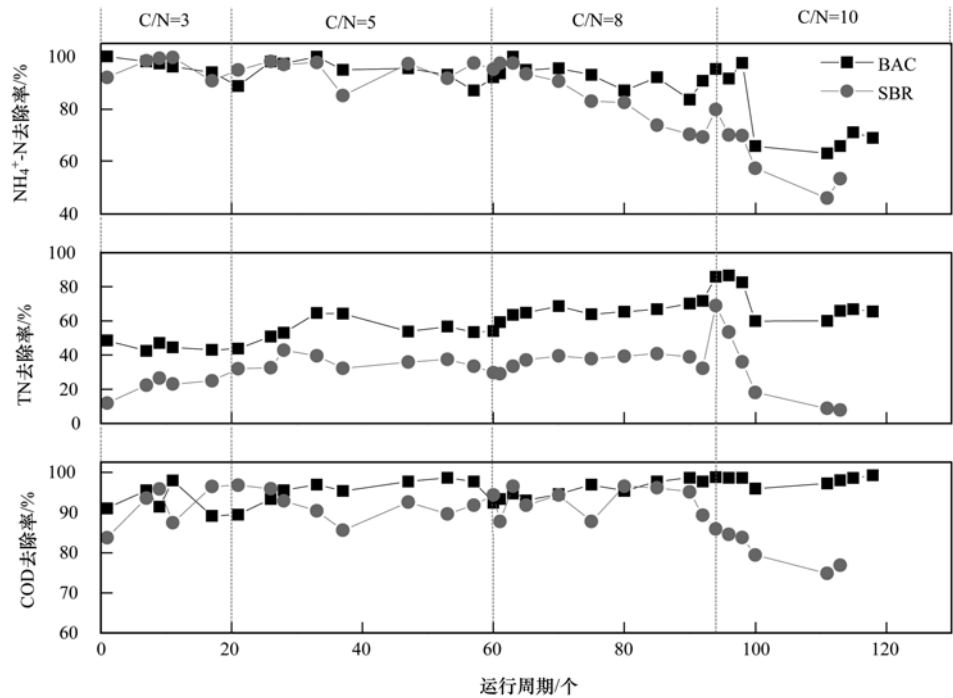


图 2 不同进水 C/N 条件下各反应器污染物去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of pollutants under different inflow C/N conditions in two reactors

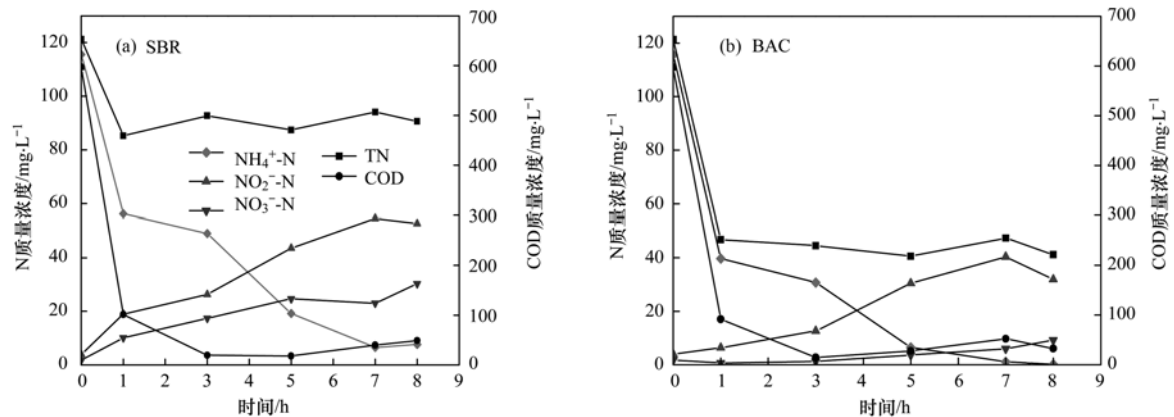


图 3 SBR 和 BAC 反应器单周期 COD 及氮素随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of nitrogen and COD vs time in one cycle of SBR and BAC reactors

由图 3 可知,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $115.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 质量浓度为 $121.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 经过 1h 曝气后, SBR 和 BAC 反应器 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度分别降至 $56.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $39.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 质量浓度分别降至 $85.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $46.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. BAC 反应器内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的含量明显低于 SBR 反应器. 分析原因, BAC 反应器内活性炭的微孔结构创造了缺氧环境, 且活性炭对进水有机物具有吸附作用, 这两点抑制了 BAC 反应器内异养好氧菌的生长繁殖及其活性, 减少了其对 DO 的竞争, 同时, BAC 填料促使气水接触更加充分, 因此 BAC 反应器氨氧化更加彻底; 反硝化过程中, 反硝化菌利用 BAC 吸附的碳源

和氧化生成的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在缺氧区反应完成脱氮. 而在 SBR 反应器中, 由于 DO 在污泥絮体中的扩散较 BAC 容易, 所以反应器处在较高的 DO 条件下, 好氧异养菌占据优势地位, 在消耗有机物的同时还与硝化菌争夺氧, 致使 SBR 反应器硝化和反硝化反应均受到抑制. 因此曝气初期 BAC 反应器脱氮效果优于 SBR. 从反应的第 2 h 开始至反应结束, SBR 内 TN 质量浓度基本保持不变, BAC 反应器 TN 质量浓度由 $44.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 缓慢降至 $41.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应结束时 SBR 和 BAC 反应器出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度均非常低, 去除率分别为 99.89% 和 99.22%, TN 去除率分别为 19.61% 和 52.95%, 说明两反应器均

硝化完全,但由于 SBR 反应器缺乏有机碳源导致反硝化受阻,而 BAC 反应器中反硝化反应进行得较为顺利,推测原因是活性炭对有机物的吸附解吸为反硝化提供了部分碳源. 综上,BAC 的加入提高了低 C/N 比条件下的脱氮效果.

2.1.2 BAC 对高 C/N 比废水脱氮效果的影响

同步脱氮过程中,通常在一定范围内 C/N 比越高脱氮效果越显著^[16],但是碳源加入量过多不仅会对 TN 的去除产生不利影响,而且在可溶解性有机物含量较高的情况下还容易发生污泥膨胀^[10].

如图 2,当进水 C/N 比继续提升至 8 时(第 61~94 周期),BAC 反应器 TN 平均去除率达 66.90%, NH_4^+ -N 和 COD 平均去除率分别保持在 89.27% 和 95.86%;SBR 反应器 TN 平均去除率为 37.45%, NH_4^+ -N 和 COD 平均去除率分别为 82.56% 和 93.41%. 此阶段,BAC 反应器 TN 去除效果显著高于 SBR 反应器, NH_4^+ -N 去除效果也略高于 SBR 反应器,而 COD 去除率基本与 SBR 反应器持平. 分析原因,随着碳源的增加 SBR 反应器中好氧异养菌活性增大并占据优势地位,消耗了大量的有机碳,并与硝化菌争夺氧,抑制了脱氮的顺利进行;BAC 反应器中活性炭内部的空隙结构阻碍了氧的传递,抑制了好氧异养菌的生长繁殖,对硝化系统起到了保护作用. 继续提升进水 C/N 比至 10 时(第 95~120 周期),BAC 反应器 TN 平均去除率呈现先升高后降低的趋势,并逐渐稳定在 63.65%, NH_4^+ -N 去除率降低至 67% 左右,COD 去除率仍保持在 95.86%. 而 SBR 反应器在进水 C/N 比增加的第 3 个周期时便出现了严重的污泥膨胀,SV₃₀ 由 20% 增至 80%,出水水质变差, NH_4^+ -N、TN 和 COD 去除

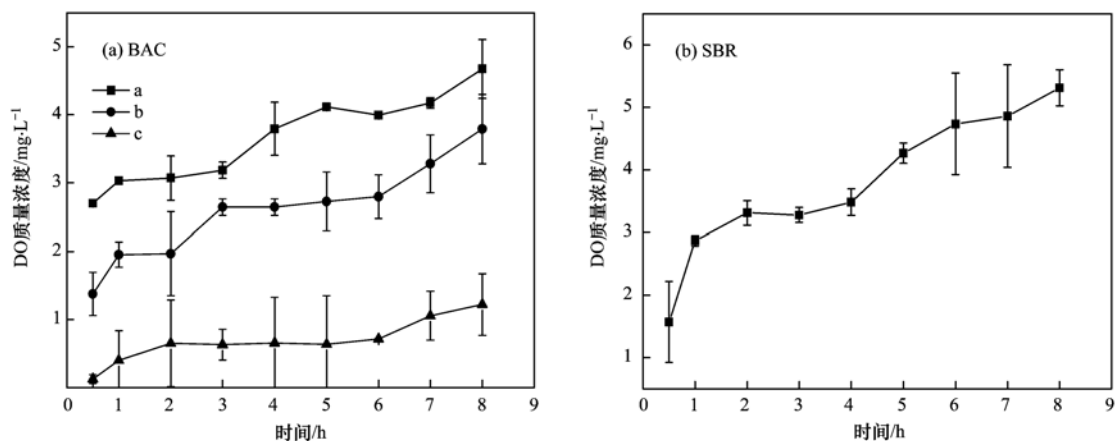
率均出现明显下降. 这与已报道的,污水中悬浮固体少,溶解性和易降解的有机物组分较多时容易发生非丝状菌性污泥膨胀的研究结果相符^[17]. 引起这一现象的原因是过高的污泥负荷使细菌摄取了大量营养物,高粘性多糖类物质大量积累,污泥中结合水异常增多,从而引起污泥膨胀. 取消进水碳源运行数天后 SBR 反应器脱氮能力逐渐恢复,污泥膨胀得到解决. 而 BAC 反应器中活性炭对有机物的吸附减少了细菌对营养物质的摄取,另外活性炭的加入避免了微生物的粘黏,因此 BAC 反应器在高 C/N 比高 DO 条件下仍可以保持脱氮的稳定运行.

2.2 废水脱氮过程中 BAC 作用分析

综上,BAC 反应器不仅在低 C/N 条件下(C/N=3、C/N=5)可以实现较好的脱氮效果,而且,在高 C/N 比条件下(C/N=8、C/N=10)BAC 反应器还能有效避免碳源过多引起的污泥膨胀,实现了脱氮的稳定运行. 前面的分析认为,BAC 的加入对同步脱氮的影响主要有两个方面:①BAC 为微生物提供了多样的 DO 环境;②BAC 对进水中有机物的吸附/解吸作用为脱氮提供了稳定的碳源条件. 为了验证以上推论,开展了以下实验研究.

2.2.1 BAC 反应器 DO 分布测定

为了验证分析①,测定了 C/N 比为 5 时两反应器单周期内 DO 分布情况,见图 4. 经测定,BAC 反应器上部水体中平均 DO 为 $3.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,活性炭填料层与水体接触面平均 DO 为 $2.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,活性炭填料层内部平均 DO 为 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;SBR 由于混合均匀,因此选取 SBR 反应器中部为监测点,结果显示该监测点平均 DO 质量浓度为 $3.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 与 BAC 反应器上部水体中(图 4 中曲线 a)DO 质量



曲线 a: BAC 反应器水体中 DO 质量浓度; 曲线 b: 活性炭填料层与水体接触面 DO 质量浓度; 曲线 c: 活性炭填料层内部 DO 质量浓度

图 4 BAC 反应器和 SBR 内 DO 分布

Fig. 4 Distribution of DO in BAC reactor and SBR

浓度基本相同. 其原因是: BAC 反应器中活性炭的堆积,共生微生物的附着,以及活性炭丰富的微孔结构,使 DO 由水体扩散至活性炭填料层内时形成氧质量浓度梯度,为硝化和反硝化的实现提供了各自所需要的场所;而 SBR 反应器中 DO 在活性污泥混合液中扩散较容易,张可方等^[18]研究表明反应器内部 DO 环境整体处于较高的水平,缺氧环境受限,反硝化受到抑制.

由此说明,活性炭的加入在同一反应器中创造了不同的 DO 环境,为同步硝化反硝化脱氮提供了更加适宜的条件.

2.2.2 BAC 吸附/解吸有机物

为了验证分析②,设计以下实验:实验结束后(120 周期),从 BAC 反应器中取出 100 g 活性炭,加入 1 L 自来水中,加以搅拌,间隔取样,测定水体中 COD 的质量浓度,确定 BAC 反应器中有机物是否发生了解吸,监测结果如图 5 所示. 从中可知,在进水无外加碳源的情况下,随着搅拌的进行,水中 COD 质量浓度缓慢上升后达到平衡,平衡时水中 COD 质量浓度达 $127.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此说明 BAC 对水中有机物存在吸附作用,且吸附的有机物在水中碳源缺乏的情况下会得到解吸.

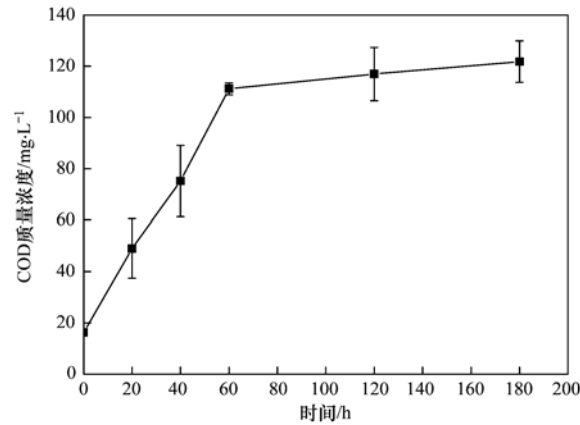


图5 BAC 有机物解吸

Fig. 5 Desorption of organic matter on BAC

由以上实验结果,BAC 在同步脱氮的过程中,不仅为硝化菌、反硝化菌提供了好氧、缺氧环境,而且其对碳源的吸附/解吸作用保证了反应器的脱氮效果. 低 C/N 比条件下,BAC 吸附的有机物得到解吸,有利于反硝化的进行,为同步脱氮提供了保障;当进水 C/N 比过高时,BAC 对有机碳源的吸附减轻了微生物的有机负荷,保证了系统的稳定运行.

2.3 有机物脱氮容量比较

有机物脱氮容量指生物脱氮反应结束时,氮的

去除量与反应器中有机物的消耗量之比^[13-15]. 碳源在生物脱氮系统中的作用有 3 点:其一为反硝化脱氮的电子供体;其二用于微生物的生长;其三用于脱氧. 由于理论上单位质量有机物可去除的氮素为定值^[19],因此在反应器中碳源用于脱氮的比重越大,有机物脱氮容量越大,表明反应器脱氮能力越强. 通过对有机物脱氮容量的分析,可以更加直观地了解反应器脱氮能力.

SBR 反应器与 BAC 反应器各阶段进水水质相同,根据公式(1)计算不同 C/N 比条件下两反应器的有机物脱氮容量,计算结果见表 1.

表 1 有机物脱氮容量

反应器类型	有机物脱氮容量(N/COD)/ $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$			
	C/N = 3	C/N = 5	C/N = 8	C/N = 10
SBR	0.085	0.076	0.050	—
BAC	0.161	0.121	0.087	0.066

由表 1,随着进水 C/N 比的提高,SBR 与 BAC 反应器有机物脱氮容量均有所减小,说明碳源加入量越大,反应器去除的有机物中用于脱氮的比重越小. 其原因是:增加进水有机物质量浓度只能增加有机物去除量,去除一定量氮素所消耗的有机物量是一个定值,有机物用于脱氮的比重必定随之减小;另外,在曝气条件下随着进水 C/N 的增加,异养好氧菌活性逐渐增大,有机物更容易被好氧异养菌消耗,进一步减小了有机物用于脱氮的比重. 比较不同 C/N 比条件下,SBR 与 BAC 两反应器的有机物脱氮容量可知,BAC 反应器有机物脱氮容量远高于 SBR 反应器,说明 BAC 反应器提高了有机物用于脱氮的比重,其原因是活性炭对有机物的吸附解吸作用为反硝化提供了部分碳源,且 BAC 内部存在好氧和厌氧区,异养好氧菌生长及活性受到抑制,从而减少了异养好氧菌消耗的有机物量,更多的有机物被用于生物脱氮. BAC 反应器较高的有机物脱氮容量表明 BAC 的加入提高了有机物用于脱氮的比重,BAC 反应器可以更有效地利用已有碳源充分进行脱氮.

3 结论

(1) 在低 C/N 比条件下,BAC 反应器中活性炭对有机物的吸附解吸作用,为反硝化提供了部分碳源,提高了低 C/N 比条件下的脱氮效果.

(2) 进水 C/N 比较高的情况下,BAC 反应器中活性炭的加入抑制了好氧异养菌的生长繁殖,对硝

化系统起到保护作用。

(3) BAC 在废水同步脱氮的过程中, 不仅为硝化菌、反硝化菌提供了好氧、缺氧环境, 而且为反硝化反应提供了碳源的贮存场所, 有助于同步脱氮的进行。

(4) BAC 的加入提高了有机物的脱氮容量, 扩大了反应器同步硝化反硝化脱氮的废水 C/N 比适用范围。

参考文献:

- [1] Lochmatter S, Maillard J, Holliger C. Nitrogen removal over nitrite by aeration control in aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, **11**(7): 6955-6978.
- [2] Yang S, Yang F L. Nitrogen removal via short-cut simultaneous nitrification and denitrification in an intermittently aerated moving bed membrane bioreactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 318-323.
- [3] 魏海娟, 张永祥, 张黎. 移动床生物膜系统 SND 影响因素研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2342-2346.
- Wei H J, Zhang Y X, Zhang C. Study on affecting factors of simultaneous nitrification and denitrification in moving-bed biofilm system [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(8): 2342-2346.
- [4] 张岩, 郭岩, 白玉华, 等. 附积床生物膜反应器同步硝化反硝化脱氮特性 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 134-139.
- Zhang Y, Guo Y, Bai Y H, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification by catching bed biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 134-139.
- [5] 魏臻, 胡勇有, 方平. 陶粒移动床处理低浓度生活污水的性能 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 46-53.
- Wei Z, Hu Y Y, Fang P. Performance of a ceramic moving bed biofilm reactor for treatment of low strength sewage [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(1): 46-53.
- [6] 李欣, 彭永臻, 王建华, 等. A²O-BAF 与 A²O 工艺处理较高 C/N 比生活污水时的污泥沉降性对比分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, **43**(3): 1198-1203.
- Li X, Peng Y Z, Wang J H, *et al.* Comparative analysis of sludge settleability of A²O-BAF process and A²O process treating higher C/N ratio domestic sewage [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, **43**(3): 1198-1203.
- [7] Xia S Q, Li J Y, Wang R C. Nitrogen removal performance and microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor [J]. *Ecological Engineering*, 2008, **32**(3): 256-262.
- [8] Zhang P, Zhou Q. Simultaneous nitrification and denitrification in activated sludge system under low oxygen concentration [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2007, **1**(1): 49-52.
- [9] Tanaka H, Kurano N, Ueda S, *et al.* Model system of bulking and flocculation in mixed culture of *Sphaerotilus* sp. and *Pseudomonas* sp. for dissolved oxygen deficiency and high loading [J]. *Water Research*, 1985, **19**(5): 563-571.
- [10] 陈滢, 彭永臻, 刘敏, 等. SBR 法处理生活污水时非丝状菌污泥膨胀的发生与控制 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(1): 105-108.
- Chen Y, Peng Y Z, Liu M, *et al.* Non-filamentous activated sludge bulking in SBR treating the domestic wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(1): 105-108.
- [11] 曾薇, 彭永臻, 王淑莹, 等. 两段 SBR 法去除有机物及短程硝化反硝化 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(2): 50-54.
- Zeng W, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Using a two-stage SBR process for removal of organics and nitrification-denitrification via nitrite [J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(2): 50-54.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 107.
- [13] 金春姬, 余宗莲, 高京淑, 等. 低 C/N 比污水生物脱氮所需外加碳源量的确定 [J]. *环境科学研究*, 2003, **16**(5): 37-40.
- Jin C J, She Z L, Ko K S, *et al.* Determination of demand of external carbon source for biological nitrogen removal of wastewater with low C/N ratio [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, **16**(5): 37-40.
- [14] Nyberg U, Aspegren H, Andersson B, *et al.* Full-scale application of nitrogen removal with methanol as carbon source [J]. *Water Science and Technology*, 1992, **26**(5-6): 1077-1086.
- [15] Henze M, Grady Jr C P L, Gujer W, *et al.* A general model for single-sludge wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 1987, **21**(5): 505-515.
- [16] Zhu R L, Wang S Y, Li J, *et al.* Effect of influent C/N ratio on nitrogen removal using PHB as electron donor in a post-denitrification SBR [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2013, **88**(10): 1898-1905.
- [17] 陈安稳, 时翔云, 于鲁冀, 等. 污泥膨胀的原因及其控制方法 [J]. *中国农学通报*, 2006, **22**(12): 296-299.
- Chen A W, Shi X Y, Yu L J, *et al.* Study on activated sludge bulking and control [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **22**(12): 296-299.
- [18] 张可方, 杜馨, 张朝升, 等. DO C/N 对同步硝化反硝化影响的试验研究 [J]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(6): 3-5.
- Zhang K F, Du X, Zhang C S, *et al.* Influences of DO and C/N on simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **30**(6): 3-5.
- [19] 张树德. 厌氧氨氧化生物滤池脱氮工艺特性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2008. 9.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行