

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫酸脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响

谭冲¹, 刘颖杰¹, 王薇¹, 邱珊², 马放²

(1. 哈尔滨商业大学生命科学与环境科学研究中心, 哈尔滨 150076; 2. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 研究了聚氨酯生物膜反应器在短程硝化反硝化工艺中的应用, 考察碳氮比 (15:1、10:1、5:1 和 1.8:1) 对聚氨酯脱氮系统脱氮性能和微生物群落结构的影响, 以及微生物群落结构与其处理效果的对应关系。结果表明, 经过 100 d 的运行, 当进水碳氮比从 15 依次下降到 10、5 和 1.8, 亚硝酸盐累积率由 56.1% 逐次上升到 62.3%、72.3% 和 83.2%。在进水碳氮比为 10 时, 系统取得最佳处理效果, 氨氮和总氮去除率分别为 99.1% 和 91.0%。进水碳氮比在 15、10、5 和 1.8 时, 硝化反应和反硝化反应均同时发生在聚氨酯生物膜系统内, 随着进水碳氮比的降低, 同时硝化反硝化效率逐渐降低。生物膜的功能微生物分析表明, 在碳氮比 15 时, 生物膜的微生物多样性要显著高于其他工况。生物膜上的优势亚硝酸菌和硝酸菌分别以亚硝化单胞菌 (*Nitrosospira* sp.) 和硝化螺旋菌 (*Nitrospira* sp.) 为主, 而反硝化细菌则以假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.) 占据优势。

关键词: 碳氮比; 短程硝化反硝化; 聚氨酯; 群落分析; 同时硝化反硝化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3807-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.024

Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor

TAN Chong¹, LIU Ying-jie¹, WANG Wei¹, QIU Shan², MA Fang²

(1. Research Center on Life Sciences and Environmental Sciences, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The short-cut nitrification and denitrification process of a polyurethane biofilm reactor was studied at four different carbon to nitrogen ratios (C/N ratios) (C/N = 15:1, 10:1, 5:1 and 1.8:1) with focus on reactor performance and microbial community composition. Results showed that when the influent carbon/nitrogen ratio decreased from 15 to 10, 5 and 1.8, the nitrite accumulation rate was increased from 56.1% to 62.3%, 72.3% and 83.2% after 100 d operation. System achieved the optimal removal efficiency at an influent carbon/nitrogen ratio of 10 with 99.1% of ammonia removal and 91.0% of total nitrogen removal. Simultaneous nitrification and denitrification occurred in the polyurethane biofilm system at different influent carbon/nitrogen ratio. As the influent carbon/nitrogen ratio decreased from 15 to 10, 5 and 1.8, the efficiency of simultaneous nitrification and denitrification was gradually reduced. The microbial biofilm analysis indicated that the microbial diversity of biofilm with an influent carbon/nitrogen ratio of 15 was significantly higher than that in other conditions. The predominant ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria were *Nitrosospira* sp. and *Nitrospira* sp., respectively, and the predominant denitrifying bacteria were *Pseudomonas* sp..

Key words: carbon nitrogen ratio; short-cut nitrification and denitrification; polyurethane; community analysis; simultaneous nitrification and denitrification

相对于传统的生物脱氮过程, 短程生物脱氮可节省约 25% 的曝气量, 40% 的碳源, 同时减少 50% 的污泥生成量, 缩短脱氮反应时间, 因此受到了人们的广泛关注^[1-4]。将生物膜技术引入到短程硝化工艺中, 一方面可以增大反应器内的生物量, 保证世代较长的硝化细菌^[5-7]; 另一方面溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 在生物膜上存在浓度梯度, 导致好氧区、缺氧区和厌氧区共存在一个反应系统, 这又为直接脱氮提供了良好的环境。聚氨酯填料是一种理想的多孔填料, 其具有易于微生物的固定, 机械强度高优点, 普遍应用于各种有机废水处理中^[8-10]。因此本试验以聚氨酯填料作为微生物载体, 研究其在短程脱氮工艺中的脱氮性能。通过改变进水碳氮

比 (carbon nitrogen ratio, C/N), 掌握硝酸氮和亚硝酸氮的转化过程, 并同时考察 DO 和 pH 作为该过程自动控制参数的可行性, 以期对聚氨酯短程脱氮系统的设计及应用提供理论及技术依据。

1 材料与方法

1.1 反应装置及试验进水

本试验装置如图 1 所示。装置的主体为有机玻璃, 内径 20 cm, 高 150 cm, 内装聚氨酯载体填料, 填

收稿日期: 2014-03-19; 修订日期: 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目 (51121062); 哈尔滨商业大学博士科研启动项目 (14LG14)

作者简介: 谭冲 (1980 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为生物脱氮除磷, E-mail: tanchong@hrbcu.edu.cn

1) 括号内为标准偏差, $COD_{\text{进水}}$ 和 $总氮_{\text{进水}}$ 表示进水 COD 和总氮浓度

2 结果与讨论

2.1 聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的启动和运行

在进行本试验之前,该系统处于良好的硝化反硝化运行状态,DO 控制在 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 进水氨氮 $40 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水氨氮在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 进水 COD $350 \sim 450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下^[12]. 在反应器短程硝化反硝化启动后, 根据亚硝酸菌和硝酸菌对氧的饱和常数^[13], 将反应器内 DO 控制在 $0.5 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 水力停留时间为 $6 \sim 10 \text{ h}$. 试验用水采用第一阶段配制的人工废水, 即进水 C/N 15.

图 2 为反应器在试验期间进出水氮的浓度变化曲线. 在第 I 阶段前期, 反应器采用连续进水和连续曝气的方式运行. 反应器运行前 5 d, 出水氨氮浓度上升到 $28.1 \sim 31.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 原因可能是由于限制性供氧对硝化细菌产生抑制作用, 即氨氮氧化为硝酸氮过程受阻, 同时脱落的生物膜带走了大量的硝化细菌. 在第 6 d 开始, 出水氨氮逐渐降低. 到第 20 d, 氨氮去除率达到 89.8%, 此时亚硝酸氮累积率达到 72.5%, 这标志着系统内完成了短程硝化反应. 此时将连续进水改为间歇进水, 运行周期为 8 h, 进水 0.2 h, 连续曝气 5 h, 静沉 2.5 h, 排水 0.3 h. 在第 21 ~ 30 d, 氨氮去除率稳定在 87.5% ~ 98.6%, 总氮去除率稳定在 81.8% ~ 90.0%, 亚硝酸氮累积率维持在 62.8% ~ 68.1%. 在第 31 d, 通过减少进水 COD, 增加进水氨氮, 将进水 C/N 降低到 10. 在第 II 阶段, 氨氮去除率仍维持在非常高的水平(大于 95%). 在第 47 d 天将进水 C/N 继续降低到 5, 此时出水氨氮浓度上升到 $18.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率下降到 74.3%, 总氮去除率下降到 59.1%, 而亚硝酸氮累积率没有受到影响, 达到 68.2%. 在第 48 ~ 62 d, 出水氨氮浓度逐渐降低, 最终稳定在 $7.6 \sim 9.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮去除率维持在 84.0% ~ 88.1%, 亚硝酸氮累积率在 69.6% ~ 75.9%. 在第 72 d, 将进水氨氮浓度增大到 $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 减少至 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即进水 C/N 1.8, 出水氨氮浓度上升到 $75.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率下降到 58.5%. 在第 73 ~ 91 d, 出水氨氮逐渐降低至 $53.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮去除率上升到 70.6%. 在第 92 ~ 99 d, 氨氮去除率维持在 67.8% ~ 69.7%, 总氮去除率在 42.2% ~ 49.7%, 亚硝酸氮累积率在 83.6% ~ 90.3%. 在反应器运行的 4 个阶段里, 硝酸氮都维持在较低水平,

同时发现系统内无法得到完全是亚硝酸氮的硝化产物.

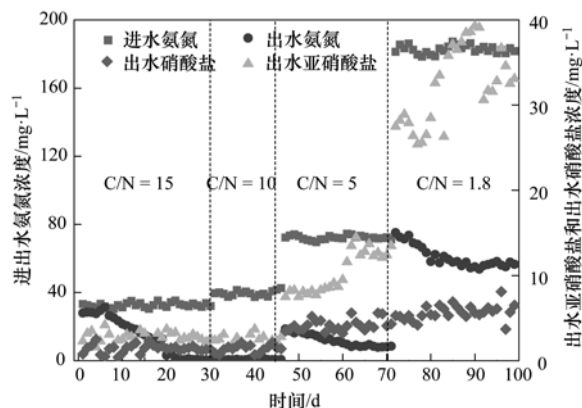


图 2 聚氨酯生物膜反应器氮转化关系

Fig. 2 Conversion of nitrogen in the polyurethane biofilm reactor

2.2 每个周期内氮的去除过程

图 3 为每个阶段稳定运行期间系统内氨氮、硝酸氮和亚硝酸氮浓度的变化曲线. 在每个周期的曝气阶段, 伴随氨氮浓度的降低亚硝酸氮浓度和硝酸氮浓度逐渐增加. 在接下来的厌氧阶段, 亚硝酸氮、硝酸氮和氨氮均降低, 但由于进水 C/N 的降低, 亚硝酸氮、硝酸氮和氨氮降低程度不同. 氨氮在进水 C/N 在 15 和 10 时, 氨氮浓度在曝气阶段已降到 0.5 以下, 因此在厌氧阶段基本没有发生变化, 仍然维持在 0.5 以下. 氨氮在进水 C/N 5 和 1.8 时, 氨氮浓度在厌氧阶段继续降低, 但降解速率很低, 分别为 $0.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $1.92 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 亚硝酸氮浓度和硝酸氮浓度在厌氧阶段均逐渐降低. 曝气开始时由于二氧化碳的溢出, pH 值陡增. 在硝化反应阶段, 由于消耗碱度, 系统内 pH 值逐渐降低. 而在反硝化过程中, 由于产生碱度, 系统内 pH 值在厌氧段上升. pH 值曲线的拐点划分了硝化与反硝化反应过程. 随着进水氮负荷的增加, 氨氮的降解速率下降, 而亚硝酸氮累积率上升.

2.3 微生物多样性统计分析

图 4 所示为不同进水碳、氮负荷条件下生物膜样本的微生物群落 DGGE 分析结果. 从中可以看出, 在聚氨酯生物膜反应器不同条件下生物膜的 DGGE 谱带中同样既有一些普遍存在的微生物种群, 也有特异性的种属. 条带 12、13、14、20 和 24 在各个谱带中均有出现, 说明这些微生物群落具有很强的适应性和较为广泛的生态幅. 同时还可以发现, 对于同一物种, 它们在整个微生物种群中的功能和地位却不同, 如条带 14 和 24 的亮度始终较强, 在整个反应器运行过程中始终保持优势地位, 条带 13

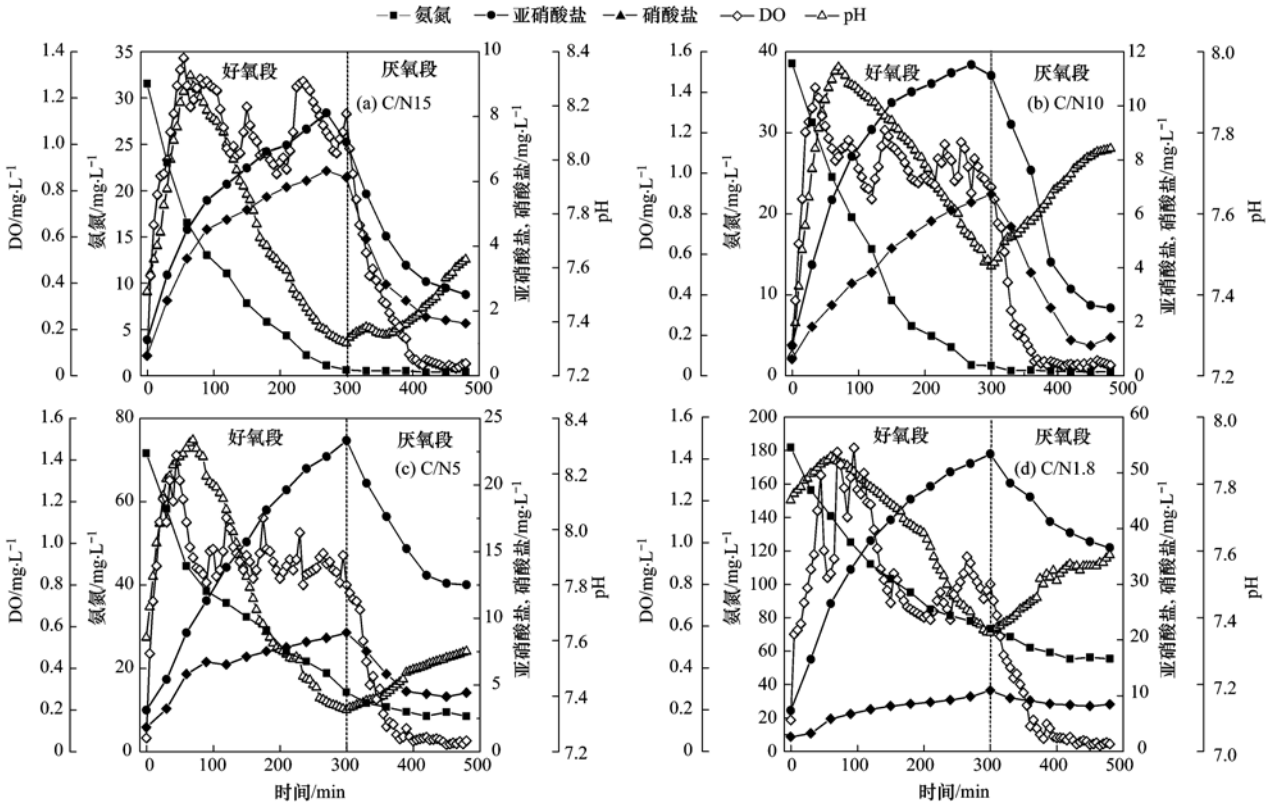


图 3 聚氨酯生物膜系统一个周期内氮的变化曲线

Fig. 3 Typical variations of nitrogen species in polyurethane biofilm system

随着氮负荷的降低逐渐减弱,而条带 5 在进水 C/N 5 时最强. 从整体来看,在不同进水负荷条件下,各生物膜样本条带数量相差不大,这可能由于聚氨酯生物膜系统微生物量大,抗负荷冲击能力强.

不同进水 C/N 条件下样品的 Shannon-wiener 指数(H')分布如表 3 所示. 从整体来看,随着进水

C/N 的提高,3 个样品中微生物的多样性出现较明显的变化. 但是这 4 个样品的均匀度指数(E)都较为接近,说明即使微生物群落多样性发生了较大的改变,但是微生物在这 3 种环境条件下的分布十分均匀. 聚氨酯生物膜反应器中微生物的多样性顺序为:进水 C/N 15 时的样品 > 进水 C/N 10 时的样品 > 进水 C/N 5 时的样品 > 进水 C/N 1.8 时的样品. 这说明随着进水 C/N 的降低,微生物的多样性是下降的. 具体表现为:当进水 C/N 变化时,微生物种群多样性变化明显,其中进水 C/N 1.8 时 H' (2.09) 最低,进水 C/N 提高到 15 时, H' 增加到 2.45. 本试验过程中聚氨酯生物膜系统始终处于低 DO 条件下,提高进水 C/N 有助于异养菌的生长,保证微生物的多样性.

表 3 不用 C/N 进水时微生物群落多样性分析

Table 3 Diversity analysis of bacteria community in influents with different C/N ratio

C/N	H'	E	Var H'
15	2.45	0.96	0.004 78
10	2.40	0.95	0.004 69
5	2.29	0.96	0.003 16
1.8	2.09	0.97	0.002 12

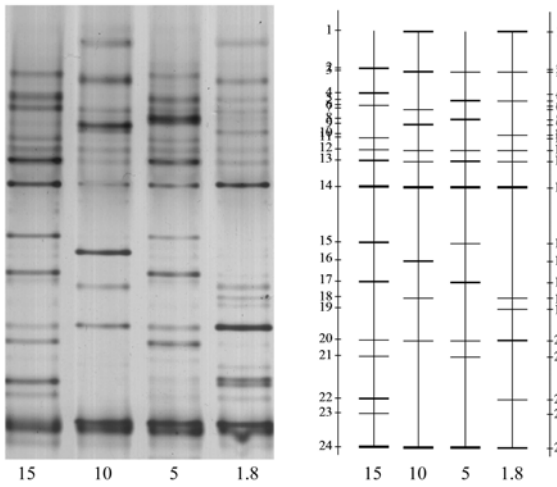


图 4 不同 C/N 进水脱氮系统生物膜样品 DGGE 测试结果

Fig. 4 Comparison of the DGGE patterns of biofilm samples taken from influents with different C/N ratio

2.4 微生物菌群多样性比较分析

对 DGGE 图谱上的条带进行分离、克隆,并对测序结果进行比对分析. 在 GenBank 上寻找与克隆序列具有最高相似性的菌种或克隆,结果见表 4. 从反应器运行过程中的微生物种群演替看,总体上 Uncultured γ -Proteobacterium (GQ249377.1) 和 *Acinetobacter* sp. Ld3 (HQ659186.1) 始终为聚氨酯生物膜反应器中的优势细菌. *Nitrosomonas* sp. (AF363292.1)、*Nitrospira* sp. (GU097367.1) 和 *Nitrospira* sp. (HM131833.1) 是系统内主要的硝化细菌. 从图 4 中发现这 3 类微生物存在于不同的条带里,根据系统的运行效果看,当进水 C/N 从 15 下降到 10,氨氮的去除效率基本没有发生变化;在进水 C/N 由 10 依次下降到 5 和 1.8 时,氨氮的去除效率分别下降到 90.6% 和 75.6%. 说明进水 C/N 对硝化作用的影响很大. 同时注意到每个条带都存在与硝酸菌相关的序列,但是系统内仍然发生了短程硝化. 说明低 DO 条件下硝酸菌生长受到抑制,虽然硝酸菌存在于系统中但不是主要的菌种. 在短程硝化过程中,由于硝酸菌对 DO 亲和力低于亚硝酸菌,硝酸菌的生长和活性容易受到低 DO 的影响. 在进水 C/N 15 时, *Pseudomonas fluorescens* (HQ123477.1)

是生物膜内主要反硝菌种. 当进水 C/N 降低到 5 和 1.8 时,系统内又增加了 *Pseudomonas butanovora* (EU024130.1)反硝酸菌种,说明系统内反硝酸菌种优势增加. *Pseudomonas* sp. 菌种广泛存在于市政污水处理厂和实验室反应器中,是重要的反硝酸菌种^[14].

3 讨论

3.1 C/N 对短程硝化反硝化的影响

C/N 对聚氨酯生物膜系统脱氮作用的如表 5 所示. 当进水 C/N 从 15 下降到 10,氨氮的去除效率没有发生明显变化,但是,这两个阶段的出水氨氮都小于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表现出非常好的硝化效果. 当进水 C/N 由 10 依次下降到 5 和 1.8 时,氨氮的去除效率从 99.1% 下降到 90.6% 和 75.6%,这与李锋民等^[15]的试验结果一致. 进水有机负荷高时有助于异养菌的增殖,在生物膜上形成优势,从而抑制硝化细菌的生长,影响硝化反应. 理论上在反硝化过程中去除 1 g 硝酸氮需要 2.86 g 有机碳源. 当进水 C/N 由 15 依次降到 10、5 和 1.8 时,对应的总氮去除率分别为 88.7%、91.0%、71.8% 和 55.9%. 即总氮的去除效率随着氮负荷的增加而减小,这与 Chiu 等的研究结果一致^[16]. 高 C/N 加速异养反硝化菌的生长,从而提高反硝化速率^[17,18]. 反硝化过程需要有机碳源作为电子供体,缺乏有机碳源将会抑制反硝化反应,因此影响氮的转化^[19]. 当进水 C/N 由 15 依次降到 10、5 和 1.8 时,对应的 NAR 分别为 56.1%、62.3%、72.3% 和 83.2%,即 NAR 随着氮负荷的增加而增加,这与赵永贵等^[20]的研究结果一致. 原因可能是氮负荷过高导致游离氨浓度增加,从而抑制硝化细菌的代谢,影响硝化反应. Anthonisen 等^[21]报道称亚硝酸菌和硝酸菌分别受到 $10\sim150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1\sim1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的游离氨抑制. 而 Furukawa 等^[22]研究发现 FA 在 $0\sim100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均对 NOB 产生抑制. Vadivelu 等^[23]发现当 FA 的浓度达到 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时就可完全抑制 NOB 的生长. 本试验中系统在曝气结束后,进水 C/N 为 15 时,游离氨浓度为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水 C/N 为 10 时,游离氨浓度为 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而进水 C/N 5 时,游离氨浓度上升至 $0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水 C/N 1.8 时,游离氨浓度为 $1.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 当进水 C/N 为 15 和 10 时,游离氨浓度值远远小于硝酸菌和亚硝酸菌抑制限制. 当进水 C/N 为 5 和 1.8 时,理论上游离氨浓度不在亚硝酸菌的抑制范围内,而却在抑制亚硝

表 4 DGGE 图谱中条带回收测序分析结果

Table 4 Sequence analysis of bands obtained from DGGE analysis		
条带	最近似细菌16S rRNA序列	相似度 /%
1	<i>Arcobacter</i> sp. HME6609 (HM584709)	100
2	Uncultured bacterium (DQ673368.1)	98
3	<i>Pseudomonas butanovora</i> (EU024130.1)	96
4	Uncultured <i>Actinomycete</i> (AF467341.1)	94
5	Uncultured <i>Desulfovibrio</i> sp. (AB522153)	97
6	Uncultured <i>Comamonas</i> sp. (GU257809.1)	97
7	Uncultured <i>Trichococcus</i> sp. (HQ183758.1)	100
8	Uncultured β -Proteobacterium (FM211753.1)	97
9	<i>Nitrosomonas</i> sp. DYS317 (AF363292.1)	99
10	<i>Ideonella</i> sp. IMCC1722 (DQ664241.1)	97
11	Uncultured β -Proteobacteria bacterium (CU926234.1)	99
12	<i>Pseudomonas fluorescens</i> (HQ123477.1)	100
13	Uncultured <i>Proteobacterium</i> (HM534369.1)	100
14	Uncultured γ -Proteobacterium (GQ249377.1)	100
15	<i>Acidovorax</i> sp. (FN794221.1)	98
16	<i>Bacillus licheniformis</i> (GU967444.1)	97
17	Uncultured <i>Novosphingobium</i> sp. (HM438567.1)	98
18	Uncultured β -Proteobacterium (EF562572)	96
19	uncultured <i>Lachnospiraceae</i> bacterium (EF707712)	99
20	Uncultured <i>Nitrospira</i> sp. (GU097367.1)	98
21	<i>Nitrospira</i> sp. (HM131833.1)	95
22	Uncultured <i>Firmicutes</i> bacterium (GU957444.1)	98
23	<i>Sphingomonas</i> sp. R114 (HQ219285.1)	100
24	<i>Acinetobacter</i> sp. Ld3 (HQ659186.1)	100

酸氮氧化菌的范围内,因此进水 C/N 1.8 时,NAR 最高. 然而进水 C/N 为 10 和 15 时,NAR 也分别达

到 62.3% 和 56.1%. 说明控制短程硝化过程的关键因素不止氮负荷或游离氨.

表 5 聚氨酯生物膜反应器各个阶段的脱氮效能

Table 5 Nitrogen removal of the polyurethane biofilm reactor at different stages

指标	C/N 15	C/N 10	C/N 5	C/N 1.8
氨氮去除率/%	99.0	99.1	90.6	75.6
总氮去除率/%	88.7	91.0	71.8	55.9
NAR/%	56.1	62.3	72.3	83.2
SND 效率/%	55.1	52.3	43.8	40.7
氮容积负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.086	0.108	0.153	0.274

3.2 C/N 对系统 SND 的影响

当脱氮系统内 DO 浓度高于 0.3 mg·L⁻¹时,阻止硝酸氮还原酶的形成,抑制反硝化反应. 然而在试验中发现反应器在好氧段降解的氨氮与生成的亚硝酸氮和硝酸氮不等量,说明系统内发生了 SND 反应. 本研究认为 SND 更符合微环境理论,Tan 等^[12]在对聚氨酯生物膜研究中发现,聚氨酯的多孔结构易于形成 DO 梯度,有助于 SND 反应. 当进水 C/N 由 15 依次降到 10、5 和 1.8 时,对应的 SND 效率分别为 55.1%、52.3%、43.8% 和 40.7%. 说明 SND 在本试验脱氮过程中扮演重要角色. 同时可以发现进水 C/N 直接影响 SND 反应. 降低进水有机物浓度,有机物扩散进入兼性环境的速率减慢,不能保证足够用于反硝化的碳源,同时由于低有机物浓度减少了好氧区异养细菌的氧气消耗速率,增强了氧气穿透进入兼性环境的能力,减弱了兼性环境的稳定性,仅少量有机物扩散进入生物膜的缺氧区,无法满足反硝化菌对有机碳源的要求,从而不利于反硝化的进行,这与贾艳萍的试验结果一致^[24]. 高景峰等^[25]对实际生活污水的 SND 处理表明:随着 C/N 的升高,好氧总氮去除率逐渐上升,但是当 C/N 超过 8.43(总氮去除率为 93.6%)后,总氮去除率提高并不明显. 因此,在 SND 体系中,需要维持恰当的 C/N. 本试验研究中发现亚硝酸氮随着氨氮的氧化逐渐增加,而硝酸氮浓度基本可以忽略. 说明由硝化作用产生的亚硝酸氮可能在原位直接参与反硝化反应.

4 结论

(1) 聚氨酯生物膜系统 DO 控制在 0.5 ~ 1.5 mg·L⁻¹、温度 20℃ ± 1℃、pH 值 7.5 ~ 8.5 和 HRT 为 6 ~ 10 h 的运行条件下,成功实现了亚硝化过程的启动. 降低进水 C/N,有助于亚硝酸氮的累积,进水 C/N 由 15 依次降到 10、5 和 1.8,系统内亚硝酸

氮的累积率由 56.1% 逐次上升到 62.3%、72.3% 和 83.2%.

(2) 系统在进水 C/N 为 10 时取得最佳的去除效果,氨氮和总氮的去除率分别为 99.1% 和 91.0%. 聚氨酯生物膜反应器在不同运行阶段均发生了 SND 反应,随着进水 C/N 的降低,系统的 SND 效率也逐渐降低.

(3) 生物膜的功能微生物分析表明,在 C/N 15 时,生物膜的微生物多样性要显著高于其他工况. 生物膜上的优势亚硝酸菌和硝酸菌分别以亚硝化单胞菌 (*Nitrosospira* sp.) 和硝化螺旋菌 (*Nitrospira* sp.) 为主,而反硝化细菌则以假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.) 占据优势.

致谢:感谢哈尔滨商业大学左金龙教授对本工作提供的帮助.

参考文献:

[1] 孙迎雪,徐栋,田媛,等. 短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3501-3506.

[2] 赵志瑞,马斌,张树军,等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1448-1456.

[3] 梁小玲,李平,吴锦华,等. 短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N₂O 释放特性[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1845-1850.

[4] Bai Y H, Sun Q H, Sun R H, et al. Bioaugmentation and adsorption treatment of coking wastewater containing pyridine and quinoline using zeolite-biological aerated filters [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**: 1940-1948.

[5] 张磊,刘平,马锦,等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2277-2282.

[6] 徐影,仇天雷,韩梅琳,等. PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3257-3263.

[7] 梅瑜,成卓韦,王家德,等. 新型生物滴滤填料性能评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4661-4668.

[8] Lim J W, Seng C E, Lim P E, et al. Nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactor using polyurethane foam cubes of various sizes as carrier materials[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(21): 9876-9883.

- [9] Lim J W, Lim P E, Seng C E, *et al.* Simultaneous 4-chlorophenol and nitrogen removal in moving bed sequencing batch reactors packed with polyurethane foam cubes of various sizes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **129**: 485-494.
- [10] 王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 等. 以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3489-3494.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] Tan C, Ma F, Li A. *et al.* Evaluating the effect of dissolved oxygen on simultaneous nitrification and denitrification in polyurethane foam contact oxidation reactors [J]. *Water Environment Research*, 2013, **85**(3): 195-202.
- [13] Liang Z W, Han Z Y, Yang S Y, *et al.* A control strategy of partial nitrification in a fixed bed biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 710-715.
- [14] Show K Y, Lee D J, Pan X L. Simultaneous biological removal of nitrogen-sulfur-carbon: Recent advances and challenges[J]. *Biotechnology Advances*, 2013, **31**(4): 409-420.
- [15] 李锋民, 单时, 李媛媛, 等. 好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 436-441.
- [16] Chiu Y C, Lee L L, Chang C N, *et al.* Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, **59**(1): 1-7.
- [17] Tan C, Ma F, Qiu S. Impact of carbon to nitrogen ratio on nitrogen removal at a low oxygen concentration in a sequencing batch biofilm reactor[J]. *Water Science & Technology*, 2013, **67**(3): 612-618.
- [18] Zhou M H, Fu W J, Gu H Y, *et al.* Nitrate removal from groundwater by a novel three-dimensional electrode biofilm reactor [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, **52**(19): 6052-6059.
- [19] Yu T, Qi R, Li D *et al.* Nitrifier characteristics in submerged membrane bioreactors under different sludge retention times[J]. *Water Research*, 2010, **44**(9): 2823-2830.
- [20] 赵永贵, 黄钧, 杨华. 高碳氮负荷下同时脱氮除碳好氧颗粒污泥研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3405-3411.
- [21] 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.
- [22] Furukawa K, Inatomi Y, Qiao S, *et al.* Innovative treatment system for digester liquor using anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(22): 5437-5443.
- [23] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z, *et al.* Free ammonia and free nitrous acid inhibition on the anabolic and catabolic processes of nitrosomonas and nitrobacter[J]. *Water Science & Technology*, 2007, **56**(7): 89-97.
- [24] 贾艳萍, 张兰河, 王山山. 碳氮比与氨氮负荷对序批式活性污泥法同步硝化反硝化的影响[J]. *化学工程*, 2012, **40**(5): 6-10.
- [25] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. 有机碳源对低碳氮比生活污水好氧脱氮的影响[J]. *安全与环境学报*, 2005, **5**(6): 11-15.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行