

环境科学

(HUANJING KEXUE)

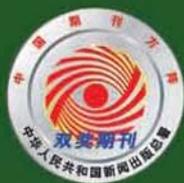
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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

2015年北京市两次红色预警期间PM_{2.5}浓度特征 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM_{2.5}变化特征对气象因素的响应 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO₂交换通量变化过程及其环境影响 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 王振翔, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co₃O₄活化过一硫酸盐降解金橙G 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX₂的筛选及脱氮特性 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N₂O排放及其影响因素 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N₂O排放研究 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe₂O₃及其NH₃-SCR活性探究 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究

汪龙眠¹, 仇皓雨^{1,2}, 车昱晓^{3,4}, 张松贺², 郭照冰³, 张毅敏^{1*}

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 河海大学环境学院, 南京 210098; 3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 4. 临沂市环境保护科学研究所有限公司, 临沂 276000)

摘要: 构建小型酸中和残渣 (neutralized-used acid residue, NUA) 和脱水铝污泥 (dewatered alum sludge, DAS) 联合生态滤池, 研究了 NUA-DAS 生态滤池的脱氮效果和反硝化菌特征. 系统运行稳定后, 装置总出水中 COD、TN、NO₃⁻-N 的平均去除率达到 60%、70% 和 95%, 出水中 NO₃⁻-N 的浓度范围只有 0.02~0.55 mg·L⁻¹. 采用 PCR-DGGE 分子生物学技术检测系统运行 30d 和 60d 各滤料层中含 3 类基因 (*nirS*、*nirK* 和 *nosZ*) 的反硝化菌群落特征, 包括丰富度及相似度. 结果表明, 系统运行 30 d 和 60 d 里, *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因反硝化菌丰富度均有明显增加, 且处在各个滤料层中的反硝化菌丰富度基本相同. NUA 和 DAS 滤料中检测到 3 类基因丰富度指数大小均为 *nosZ* > *nirK* > *nirS*. 运行时间对反硝化菌的群落结构影响并不明显, 但空间位置有一定影响. 反硝化菌在 NUA 中的适应能力优于 DAS, 3 类基因中 *nirK* 基因对滤料环境的适应能力最强.

关键词: 酸中和残渣; 脱水铝污泥; 反硝化; *nirS*; *nirK*; *nosZ*

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2659-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.032

Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter

WANG Long-mian¹, QIU Hao-yu^{1,2}, CHE Yu-xiao^{3,4}, ZHANG Song-he², GUO Zhao-bing³, ZHANG Yi-min^{1*}

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Linyi City Environmental Protection Science Research Institute Co., Ltd., Linyi 276000, China)

Abstract: A small-scale combined ecofilter was constructed using neutralized-used acid residue (NUA) and dewatered alum sludge (DAS), and the nitrogen removal for wastewater treatment and characteristics of denitrification bacteria using the NUA-DAS ecofilter were studied. After the system was stabilized, the average removal rates of COD, TN, NO₃⁻-N in the final effluents were 60%, 70% and 95%, respectively, and the range of NO₃⁻-N concentration in the effluents was only 0.02-0.55 mg·L⁻¹. Furthermore, the richness and similarity of three types of functional genes (*nirS*, *nirK* and *nosZ*) for denitrification in different substrates during the operation period were analyzed using PCR-DGGE method. These results showed that the richness of all denitrification bacteria at NUA and DAS increased remarkably after operation for 30 and 60 days compared to that in fresh substrate, and the richness was basically the same for the same kind of gene at the identical substrate regardless of depth gradient and operation period. The richness of *nirS*, *nirK* and *nosZ* detected in the NUA and DAS followed the order of *nosZ* > *nirK* > *nirS*. It was also revealed that spatial location had an apparent influence on the community structure of denitrifying bacteria (*nirS*, *nirK* and *nosZ*) but operation time had no obvious effect. Finally, *nirK* might be the most suitable for the environment in the system, and the adaptive capacity of denitrification bacteria (*nirS*, *nirK* and *nosZ*) in NUA could be superior to that in DAS.

Key words: neutralized-used acid residue (NUA); dewatered alum sludge (DAS); denitrification; *nirS*; *nirK*; *nosZ*

酸中和残渣 (NUA) 和脱水铝污泥 (DAS) 分别来自于生产金红石过程中产生的残渣和自来水厂净水过程中的副产物. NUA 和 DAS 成分相似, 含有丰富的铝、铁和钙等物质, 目前大部分也被视为废弃物填弃^[1]. 上述两种副产物都有较大的比表面积, 对污水中的污染物有一定的吸附能力^[2~5], 已被用作人工湿地滤料去除污水中污染物^[6,7], 并被证明该滤料几乎不存在有毒物质和重金属释放的风险^[8]. 氮素是污水污染物中受关注度最高、转化最复杂的成分之一. 从除氮方式上来说, 利用微生物

进行生物脱氮是重要途径之一, 即通过硝化反硝化等脱氮菌的联合作用使污水中的含氮污染物转化为氮气的过程, 此过程是防止氮素污染的最好手段之一^[9,10]. 在整个脱氮过程中, 反硝化作用是其中重要环节, 是一种微生物异化氧化还原过程, 它以氮氧

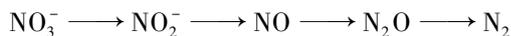
收稿日期: 2015-12-28; 修订日期: 2016-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308247); 苏州市环境保护局项目 (C201103)

作者简介: 汪龙眠 (1981~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水污染控制与固体资源化利用, E-mail: wlm@nies.org

* 通讯联系人, E-mail: zym@nies.org

化物作为电子受体,将硝酸盐或亚硝酸盐逐步还原为氧化亚氮或者氮气^[11]. 具体过程如下:



该过程由 4 种金属酶催化完成,编码这些金属酶的基因主要是:硝酸盐还原酶编码基因 *narG* 和 *napA* (nitrate reductases),亚硝酸盐还原酶编码基因 *nirS* 和 *nirK* (nitrite reductases),一氧化氮还原酶编码基因 *norB* 和 *norC* (nitric oxide reductases),氧化亚氮还原酶编码基因 *nosZ* (nitrous oxide reductases). 其中亚硝酸盐还原酶是反硝化作用的关键限速反应酶,氧化亚氮还原酶能催化温室 N_2O 生成无害的 N_2 ,因而对亚硝酸盐还原酶和氧化亚氮还原酶编码基因 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 的研究具有重要意义.

本研究将 NUA 和 DAS 作为人工湿地滤料对模拟畜禽养殖废水进行脱氮效果分析,重点探究含 3 类基因 (*nirS*、*nirK* 和 *nosZ*) 反硝化菌在 NUA-DAS 生态滤池系统中群落特征,以期为该系统中反硝化脱氮过程提供更加微观的理论支持.

1 材料与方法

1.1 实验滤料

实验所采用的两种滤料 NUA 和 DAS 分别取自江苏连云港市某金红石厂和南京市某自来水厂,取来之后晾干,去除部分水分,再对 NUA 和 DAS 进行烘干、研磨,用筛网过筛 (NUA 的粒径 $< 63 \mu\text{m}$, DAS 粒径 $< 0.25 \text{ mm}$) 后用于 NUA-DAS 生态滤池装置系统中. 实验分别称取 100 mg NUA 及 100 mg DAS,将其放入 105°C 的烘箱中烘干恒重进行测定,然后用王水进行消解至溶解,消解后的样品利用原子吸收分光光谱 (ICP-MS)、扫描电子显微镜 (SEM)、比表面积分析仪 (BET)、X 射线能量色散谱仪 (EDS)、电子能谱仪 (XPS) 和红外光谱仪 (FTIR) 进行测定^[12],得出其比表面积和化学组分.

其中 NUA 的测定比表面积为 $720 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,化学组分中含有 29.8% SiO_2 、11.8% Al_2O_3 、15.5% Fe_2O_3 和 8.03% CaO ; DAS 的测定比表面积为 $1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,化学组分中含有 55.91% SiO_2 、18.96% Al_2O_3 、5.11% Fe_2O_3 和 4.05% CaO .

1.2 NUA-DAS 生态滤池装置构建

该装置主要包括储水池、NUA 一级滤池和 DAS 二级滤池,该滤池采用有机玻璃材料制备,呈现圆柱形,直径 12 cm,每个滤池高度 90 cm. 两装置自上而下均为 10 cm 布水区、70 cm 反应层、10

cm 鹅卵石承托层,每个装置布置下端各有一个出水口,分别为出水口 1 和总出水口,各装置有效反应容积均为 7.5 L. 实验装置见图 1. 实验进水采用模拟含氮废水,具体指标见表 1.

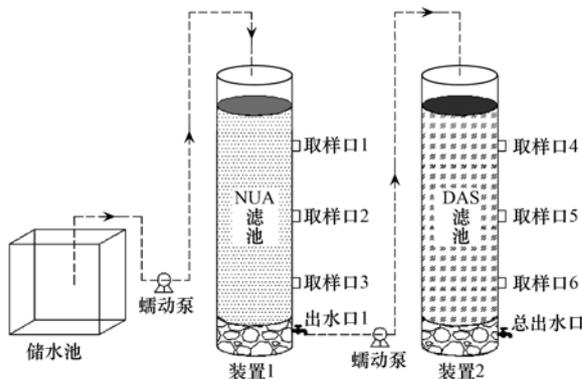


图 1 酸中和残渣-脱水铝污泥生态滤池结构

Fig. 1 Structure of NUA-DAS ecofilter

表 1 模拟含氮废水进水水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Influent water quality of simulated nitrogen-containing wastewater/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	参数 ¹⁾	范围
COD	174.38 ± 59.90	75.42 ~ 263.57
TP	6.32 ± 3.09	0.98 ~ 9.79
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	116.95 ± 48.90	50.47 ~ 199.50
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	4.46 ± 0.68	2.27 ~ 6.39
TN	131.08 ± 26.89	90.71 ~ 158.76
pH	7.97 ± 0.18	7.72 ~ 8.19

1) 指标平均值 \pm 标准差范围

1.3 运行方法

进水采用分析纯氯化铵 (NH_4Cl)、磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)、硝酸钠 (NaNO_3)、亚硝酸钠 (NaNO_2)、葡萄糖 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) 试剂配制成模拟含氮废水,通过蠕动泵控制进水流量,水力负荷为 $1 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,定时控制器控制进水时间,NUA 滤池和 DAS 滤池为串联式均由蠕动泵加压后重力自流式布水;一个运行周期为 24 h,首先关闭 NUA 装置阀门对 NUA 滤池进行布水,布水 6 h 完毕,在 NUA 滤池停留 6 h 后打开 NUA 装置阀门,再对 DAS 滤池进行布水同样用时 6 h,最后在 DAS 滤池中停留 6 h 完成一个周期运行;整个装置运行过程中溶解氧控制在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; pH 在 6.5 ~ 8.0 之间;整个系统连续运行 60 d,运行期间温度范围是 15 ~ 25°C .

1.4 取样与数据分析

运行周期内每隔 3 d 从出水口 1 和总出水口取样分析,监测两种滤料协同作用下各自装置出水中

COD、 NO_3^- -N、TN 的浓度变化,计算有机物及氮素去除效果. 依据文献[13],本实验 COD、 NO_3^- -N、TN 浓度分别采用重铬酸盐法、紫外分光光度法和凯氏消煮法测定. 每个样品分为 3 个平行样,每个指标测定 3 次,取平均值.

系统运行 60 d 期间,以初始、运行 30 d 和 60 d 共计 3 个取样时间点,运行周期内从两装置不同滤料层中提取少量基质,其中取样点 1 为 0~20 cm 处理层,取样点 2 为 20~40 cm 处理层,取样点 3 为 40~60 cm 处理层,共计 3 个取样点. 对各个样品预处理后,在无菌条件下称取 5 g 的样品,采用试剂盒(MO BIO Laboratories, Loker Ave West, Carlsbad, CA, USA)进行 DNA 提取,提出的 DNA 作为 PCR 的模板进行反硝化菌(*nirS*、*nirK* 和 *nosZ*)扩增,选用的引物分别是 Cd3aF-R3cd (*nirS* 基因)、FlaCu-R3Cu (*nirK* 基因)、*nosZ*-F-*NosZ*1622R (*nosZ* 基因),后续利用基因系统(Bio-Rad 公司,美国)开展 DGGE 技术分析. 最后根据 DGGE 凝胶电泳图得到的各条带数算出丰富度指数,并通过 Quantity One 软件计算得到戴斯系数(CS)^[14],评价样品之间微生物种群的相似性. 计算公式为:

$$CS = 2j/(a + b) \times 100\% \quad (1)$$

式中, j 为泳道 A 和泳道 B 的共有条带, a 和 b 分别为样品 A 和 B 中各自的条带数.

表 2 NUA 装置及总系统对污水中 COD 去除率

Table 2 Removal rates of COD from sewage via apparatus 1 and the whole system

项目	时间/d																			
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58
NUA 装置去除率/%	16	26	37	38	51	46	54	48	52	55	52	50	55	54	42	43	40	46	44	45
总去除率/%	17	36	75	80	72	68	72	82	79	76	77	72	69	64	62	58	55	52	53	56

率由 15% 增长至 55% 左右,系统 COD 总去除率由 17% 增长至 81% 左右,并稳定运行. 由于温度对厌氧微生物的影响比对好氧微生物的影响大得多,随着温度的降低,微生物活性下降,对 COD 的去除效率随之下降^[18]. 实验后期,随着天气的温度降低,微生物活性下降,有机物去除效果下降,COD 总去除率维持在 60% 左右.

2.1.2 TN

NUA-DAS 生态滤池系统中 TN 的去除需要经

表 3 NUA 装置及总系统对污水中 TN 去除率

Table 3 Removal rates of TN from sewage via apparatus 1 and the whole system

项目	时间/d																			
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58
NUA 装置去除率/%	26	32	44	48	43	41	49	36	40	46	46	41	30	38	36	40	44	39	38	35
总去除率/%	44	61	60	64	74	68	70	76	71	71	65	69	66	64	65	66	59	60	58	59

2 结果与讨论

2.1 COD、TN 及 NO_3^- -N 的去除效果

2.1.1 COD

NUA-DAS 系统生态滤池对污水中 COD 去除如表 2 所示,NUA 装置处理后 COD 去除率范围是 15%~55%,经两个滤料层后 COD 总去除率为 17%~81%. 该生态滤池对有机物的高效去除是物理、化学以及微生物共同作用的结果,这个过程包括对细小颗粒状、胶质有机物的吸附,有机物的氧化还原和微生物的作用. NUA 和 DAS 发挥主要作用是由于两种滤料具有较高的孔隙率和比表面积,NUA 和 DAS 的比表面积分别为 $720 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,利于有机污染物通过沉淀和吸附截留在滤料空隙中,其中 DAS 较 NUA 比表面积更大,相比更利于废水中污染物的吸附和截流. 通过 XRF 分析得出两种滤料的主要化学成分均为铝、铁、硅、钙、镁、钾、钠、锰等元素,使得其吸附扩散速率较大,吸附点位较多,有利于吸附反应的进行^[15]. 同时加上微生物的硝化反硝化作用,可提高有机物的去除效果^[16].

系统运行前 10~15 d 为微生物挂膜阶段,在此期间微生物开始生长繁殖,新陈代谢不稳定,对有机物去除率较低;随着微生物不断生长繁殖,对有机物的去除效果逐渐增加^[17],NUA 装置中 COD 去除

过氨化作用、硝化作用和反硝化作用,大部分总氮以氨氮的形式表现,大量的氨氮和有机态氮通过硝化反应转化为 NO_3^- -N,后续通过反硝化转化为氮气. 如表 3 所示,NUA 装置中 TN 去除率范围是 31%~49%,系统总去除率范围是 44%~77%,其中 NUA 装置的 TN 去除贡献率在 50% 左右,DAS 装置的 TN 去除贡献率也为 50% 左右.

2.1.3 NO_3^- -N

本实验硝态氮在 NUA 装置和总出水中的浓度

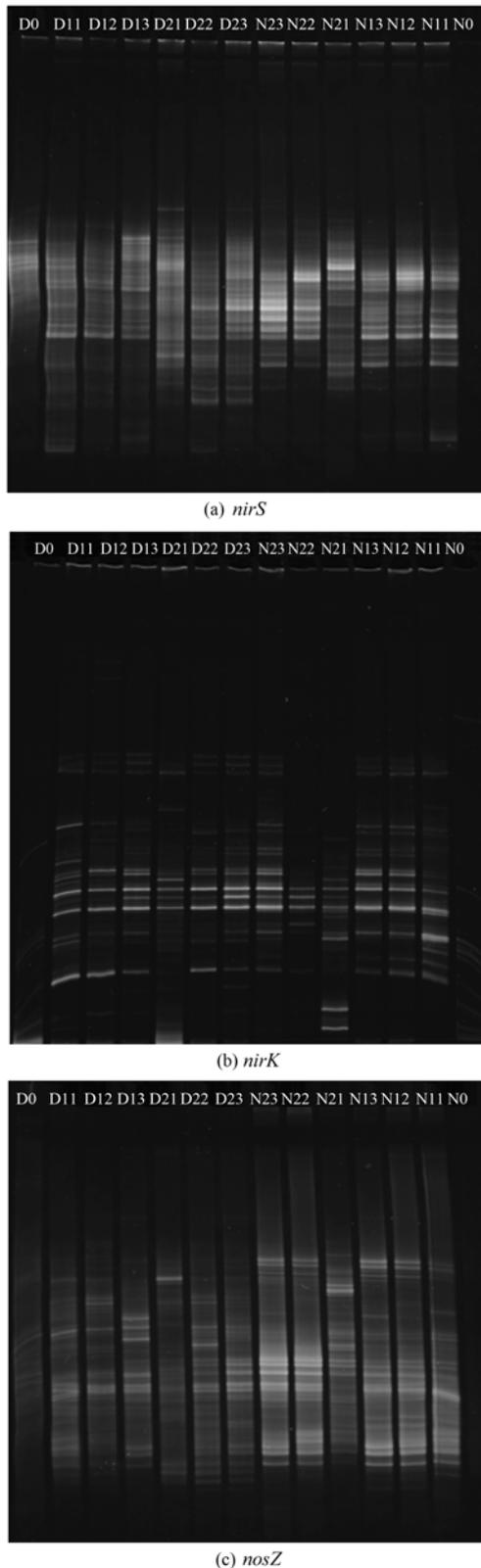


图2 *nirS*、*nirK*、*nosZ* 基因组 DGGE 凝胶电泳图
Fig. 2 DGGE gel electrophoresis of *nirS*, *nirK*, *nosZ*

除初始样,其他各个样品泳道中检测出 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 所对应的丰富度指数分别为 15 ~ 29、15 ~ 31、22 ~ 43 不等,这表明在系统运行 30 d 和 60 d 滤

料层中,*nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因反硝化菌的丰富度均有明显增加.对两种滤料进行比较分析,无论是 30 d 还是 60 d,两种滤料里的反硝化菌丰富度基本保持一致;从上、中、下这 3 个滤料层之间进行丰富度对比分析,在 30 d 和 60 d 的各滤料层中反硝化菌丰富度同样变化不大,这说明在系统运行 30 d 和 60 d 过程里,各个滤料层中反硝化菌的丰富度基本相同.亚硝酸盐还原酶 *nir* 是催化亚硝酸盐还原为氧化氮这一反硝化反应的关键酶,经常被应用于反硝化微生物多样性研究^[24,25],*nirS* 和 *nirK* 这两个基因编码是具有相同功能的亚硝酸盐还原酶,因此它们也经常用于相互比较.在胡春晓等^[26]和 Maeda 等^[27]的实验中,对两种亚硝酸盐还原酶数量的检测结果均为 *nirK* 编码的反硝化菌数量大于 *nirS* 反硝化菌.作者对丰富度的研究中发现,在 *nirS* 条带图谱中共识别出 46 类不同条带,除初始样各个样品中 *nirS* 丰富度指数从 15 ~ 29 不等;在 *nirK* 条带图谱中共识别出 52 类不同条带,除初始样各个样品中 *nirK* 丰富度指数从 15 ~ 31 条不等.实验样品中 *nirK* 的丰富度要大于 *nirS*,尤其是在系统运行 60 d 的样品中,该结果更为明显,这一结果与前人的研究一致.与此同时,实验样品中检测出大量一氧化二氮还原酶 *nosZ*.以往研究表明,并不是所有已鉴定的反硝化细菌中都含有完整的反硝化酶编码基因,约 1/3 的菌种不含有 *nosZ*^[28,29],而作者在实验运行 30 d 和 60 d 的样品中检测到的 *nosZ* 条带数较 *nirS*、*nirK* 更为丰富.这种差异可能与滤料所处的环境和营养物浓度有关^[30].

2.2.2 群落相似性分析

表 6、7、8 分别为 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因反硝化菌的戴斯相似性系数,各样品间的细菌群落相似性系数不尽相同,相似系数越大,说明反硝化菌的群落结构越相近,反硝化菌对滤料的适应能力越强.这里以同一滤料在系统运行 30 d 和运行 60 d 的戴斯相似性系数为研究对象,从表 6 ~ 8 中可以发现,同一运行时间里样品的戴斯相似性系数与不同运行时间里样品的戴斯相似性系数并无太大差别,说明运行时间对反硝化菌的群落结构影响并不明显;同一种滤料的不同层级之间的戴斯相似性系数大部分小于 50,说明空间位置对反硝化菌的群落结构有一定影响.让位置空间不变,比较 3 类基因运行 30 d 和 60 d 的戴斯相似性系数,*nirS* 在 DAS 滤料上、中、下 3 层中的戴斯相似性系数分别为 27.4、32.1、37.3,在 NUA 滤料上、中、下 3 层中的戴斯

表 7 *nirK* 戴斯相似性系数Table 7 Dice Coefficient of *nirK*

	D0	D11	D12	D13	D21	D22	D23	N23	N22	N21	N13	N12	N11	N0
D0	100	14.4	18.9	10.6	41.1	11.8	9.1	4.3	3.9	6.7	6	6.7	1.1	35
D11		100	69.2	51.2	39.6	58.7	43.5	47.1	36.8	22.7	49.1	55.4	45.6	11.7
D12			100	70.2	38.4	73.6	58.9	61.9	50.3	30	65.5	64.9	45.7	13.5
D13				100	36	73.5	76.5	79.8	60.2	30.3	78.6	75.9	49.3	13.2
D21					100	37.3	35.2	32.7	26.3	31.1	30.9	34.5	27.2	31.4
D22						100	73.9	65.6	54.5	27.9	64.4	66.7	46.9	16
D23							100	75.6	70.5	31.7	69.3	69.4	43.1	18.8
N23								100	64.1	36.2	84.8	79.7	49.2	9.8
N22									100	33.7	55.8	55.1	41.4	4.8
N21										100	31.5	31.2	30.5	16.4
N13											100	82.4	54	13
N12												100	58.2	11.5
N11													100	28
N0														100

表 8 *nosZ* 戴斯相似性系数Table 8 Dice Coefficient of *nosZ*

	D0	D11	D12	D13	D21	D22	D23	N23	N22	N21	N13	N12	N11
D0	100	10.8	3.6	7.5	43.4	4.3	8.3	6.8	5.6	8.2	5.9	3.3	4.6
D11		100	45.2	47.1	21	39.5	43.1	32.3	25.4	28.2	39.2	30.1	26.4
D12			100	31.5	16.6	42.9	30.7	14.9	18.4	20.4	24.7	23.9	22.6
D13				100	19.3	40.9	45.7	36.9	25.6	24.5	43.7	36.6	26
D21					100	15.7	19.2	26.6	21.6	23.4	23	19.8	15.4
D22						100	56.3	41.4	29	40.5	39.3	41.4	24.5
D23							100	51.1	44.5	36	50.7	49.5	30.4
N23								100	66.9	35.8	64.6	70	44.7
N22									100	28.4	56.1	59.4	46.2
N21										100	29.9	27.7	22.9
N13											100	77.3	47.8
N12												100	47.1
N11													100

相似性系数分别为 32.2、59.5、56.5；*nirK* 在 DAS 滤料上、中、下 3 层中的戴斯相似性系数分别为 39.6、73.6、76.5，在 NUA 滤料上、中、下 3 层中的戴斯相似性系数分别为 30.5、55.1、84.8；*nosZ* 在 DAS 滤料上、中、下 3 层中的戴斯相似性系数分别为 21、42.9、45.7，在 NUA 滤料上、中、下 3 层中的戴斯相似性系数分别为 22.9、59.4、64.6。比较得出，3 类基因中 *nirK* 基因反硝化菌对滤料环境的适应能力最强。两种滤料 (NUA 和 DAS) 比较发现反硝化菌在 NUA 中的适应能力优于 DAS。

3 结论

(1) 采用以脱水铝污泥和酸中和残渣为填料的生态滤池对含氮废水有很好的去除效果，装置出水中 COD、TN 的平均去除率分别达到 60% 和 70%， NO_3^- -N 去除率高达 95% 以上。

(2) 系统运行 30 d 和 60 d 时，*nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因反硝化菌丰富度均有明显增加，且各个滤料层中反硝化菌的丰富度基本相同。NUA 和 DAS 滤料中检测出的 3 类基因丰富度指数大小均为 $\text{nosZ} > \text{nirK} > \text{nirS}$ 。

(3) 运行时间对反硝化菌的群落结构影响并不明显，但空间位置对群落结构有一定影响。反硝化菌在 NUA 中的适应能力优于在 DAS 中，且 3 类基因中 *nirK* 基因反硝化菌对滤料环境的适应能力最强。

参考文献:

- [1] 胡静, 董仁杰, 吴树彪, 等. 脱水铝污泥对水溶液中磷的吸附作用研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(5): 42-45.
- [2] Yang Y, Zhao Y Q, Wang S P, et al. A promising approach of reject water treatment using a tidal flow constructed wetland system employing alum sludge as main substrate [J]. Water Science & Technology, 2011, 63(10): 2367-2373.

- [3] Zhao Y Q, Zhao X H, Babatunde A O. Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: long-term trial [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(2): 644-648.
- [4] Douglas G, Adeney J, Johnston K, *et al.* Major element, trace element, nutrient, and radionuclide mobility in a mining by-product-amended soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(6): 1818-1834.
- [5] Oliver D P, Pan Y F, Anderson J S, *et al.* Sorption of pesticides by a mineral sand mining by-product, neutralised used acid (NUA) [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **442**: 255-262.
- [6] Hu Y S, Zhao Y Q, Zhao X H, *et al.* Comprehensive analysis of step-feeding strategy to enhance biological nitrogen removal in alum sludge-based tidal flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **111**: 27-35.
- [7] Hu Y S, Zhao Y Q, Zhao X H, *et al.* High rate nitrogen removal in an alum sludge-based intermittent aeration constructed wetland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(8): 4583-4590.
- [8] Zhao X H, Zhao Y Q, Wang W K, *et al.* Key issues to consider when using alum sludge as substrate in constructed wetland [J]. *Water Science & Technology*, 2015, **71**(12): 1775-1782.
- [9] 范俊楠, 赵建伟, 朱端卫. 湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(15): 4924-4931.
- [10] 吕娟, 陈银广, 顾国维. 厌氧、缺氧、好氧多级交替 SBR 脱氮除磷试验研究 [J]. *环境污染与防治*, 2007, **29**(9): 648-651.
- [11] Wolsing M, Priemé A. Observation of high seasonal variation in community structure of denitrifying bacteria in arable soil receiving artificial fertilizer and cattle manure by determining T-RFLP of *nir* gene fragments [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **48**(2): 261-271.
- [12] 杨斌武. 水处理滤料的表面性质及其过滤除油性能研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2008.
- [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.
- [14] 刘新春, 吴成强, 张昱, 等. PCR-DGGE 法用于活性污泥系统中微生物群落结构变化的解析 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(4): 842-847.
- [15] 申世峰. UASB-固定化活性污泥处理焦化废水研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [16] 张立东, 冯丽娟. 同步硝化反硝化技术研究进展 [J]. *工业安全与环保*, 2006, **32**(3): 22-25.
- [17] 刘秀红, 王淑莹, 高大文, 等. 短程硝化的实现、维持与过程控制的研究现状 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(12): 7-10.
- [18] 高志永, 韦道领, 陈鸿汉. IC 反应器对生活污水中 COD 的去除效果及影响因素 [J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(17): 44-50.
- [19] Bai L L, Wang C H, Pei Y S. Nitrogen and phosphorus removal from secondary effluent using drinking water treatment residuals fixed-bed column with intermittent operation [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2014, **14**(5): 812-819.
- [20] Wendling L A, Douglas G B, Coleman S, *et al.* Nutrient and dissolved organic carbon removal from water using mining and metallurgical by-products [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2705-2717.
- [21] LaMontagne M G, Michel Jr F C, Holden P A, *et al.* Evaluation of extraction and purification methods for obtaining PCR-amplifiable DNA from compost for microbial community analysis [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2002, **49**(3): 255-264.
- [22] 高平平, 赵立平. 可用于微生物群落分子生态研究的活性污泥总 DNA 提取方法研究 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(11): 2015-2019.
- [23] McBain A J, Bartolo R G, Catrenich C E, *et al.* Microbial characterization of biofilms in domestic drains and the establishment of stable biofilm microcosms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(1): 177-185.
- [24] Taroncher-Oldenburg G, Griner E M, Francis C A, *et al.* Oligonucleotide microarray for the study of functional gene diversity in the nitrogen cycle in the environment [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(2): 1159-1171.
- [25] 罗希茜, 陈哲, 胡荣桂, 等. 长期施用氮肥对水稻土亚硝酸还原酶基因多样性的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 423-430.
- [26] 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 等. 农业废物好氧堆肥中环境因子对 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 数量的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1196-1203.
- [27] Maeda K, Morioka R, Hanajima D, *et al.* The impact of using mature compost on nitrous oxide emission and the denitrifier community in the cattle manure composting process [J]. *Microbial Ecology*, 2010, **59**(1): 25-36.
- [28] Jones C M, Stres B, Rosenquist M, *et al.* Phylogenetic analysis of nitrite, nitric oxide, and nitrous oxide respiratory enzymes reveal a complex evolutionary history for denitrification [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2008, **25**(9): 1955-1966.
- [29] García-Lledó A, Vilar-Sanz A, Trias R, *et al.* Genetic potential for N₂O emissions from the sediment of a free water surface constructed wetland [J]. *Water Research*, 2011, **45**(17): 5621-5632.
- [30] 王晓君, 陈少华, 张兆基, 等. 利用氧化亚氮还原酶基因 (*nosZ*) 评价人工湿地系统中的反硝化菌 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1306-1312.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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