

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘巍巍, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山铈矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究

彭晓兰¹, 刘聪¹, 陈吕军^{1,2*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 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)

摘要: 比较了两组不同填料组合的前置反硝化曝气生物滤池(biological aeration filter, BAF)脱氮工艺: 陶粒-沸石 BAF 工艺(C-Z BAF)和沸石-陶粒 BAF 工艺(Z-C BAF), 在不同 C/N 条件下的脱氮效果及滤料表面的反硝化细菌群落结构特征。结果表明, Z-C BAF 对 TN 的平均去除效率高于 C-Z BAF, 且在低 C/N 条件下 Z-C BAF 的优势更加明显, 当 C/N 为 3.3 时 Z-C BAF 的 TN 平均去除率比 C-Z BAF 高出 20%。测定 2 种组合在不同 C/N 条件下的反硝化细菌群落结构发现, 随着 C/N 的降低, 2 种组合反硝化细菌的物种丰度和多样性显著下降。低 C/N 条件下, Z-C BAF 整个好氧滤池的 *nosZ* 基因优势 T-RFs 相对丰度 > 20%, 而 C-Z BAF 好氧滤池顶端样品不能有效扩增到 *nosZ* 基因, 可推断 Z-C BAF 的同步硝化反硝化功能优于 C-Z BAF。在低 C/N 条件下 Z-C BAF 的脱氮效率明显高于 C-Z BAF, 因此 Z-C BAF 在低 C/N 且低浓度的有机废水处理方面更有潜力。

关键词: 曝气生物滤池; 前置反硝化脱氮工艺; C/N; T-RFLP; 反硝化细菌群落结构

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2701-08

Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter

PENG Xiao-lan¹, LIU Cong¹, CHEN Lü-jun^{1,2}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Water Science and Technology of Zhejiang Province, Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

Abstract: The nitrogen removal performance and the denitrification bacterial community structure of two pre-denitrification biological aeration filter (BAF) processes with different media combinations, the ceramic-zeolite BAF process (C-Z BAF) and the zeolite-ceramic BAF process (Z-C BAF), were compared at different C/N ratios. The results showed that the average TN removal efficiency of Z-C BAF was higher than that of C-Z BAF, and the advantage was more notable at low C/N ratio. When the C/N ratio decreased to 3.3, the average TN removal efficiency of Z-C BAF was 20% higher than that of C-Z BAF. Comparing the microbial community structure of the two combinations at different C/N ratios, it was found that the richness and diversity of denitrification bacterial community decreased significantly with the decrease of C/N ratio. At low C/N ratio, within the whole oxic filter of Z-C BAF, *nosZ* genetic T-RFs were detected with more than 20% relative abundance, whereas no *nosZ* genetic T-RFs were detected at the upper oxic filter of C-Z BAF by PCR amplification. The results indicated that the simultaneous nitrification and denitrification function of Z-C BAF was better than that of C-Z BAF. At low C/N ratio, the nitrogen removal efficiency of Z-C BAF was obviously higher than that of C-Z BAF. Thus, compared to C-Z BAF, Z-C BAF had greater potential on the treatment of wastewater with low organic concentration and low C/N ratio.

Key words: biological aerated filter (BAF); pre-denitrification process; C/N; T-RFLP; denitrification bacterial community structure

曝气生物滤池(biological aerated filter, BAF)具有有机负荷高、占地面积小且处理效率高等优点^[1, 2], 已被广泛地应用于生活污水及工业废水的处理中^[3~5]。而填料是 BAF 的核心构件, 其性质直接影响到 BAF 的处理效果, 同时还决定了工艺的初期建设与运行成本^[2, 6]。相比目前国内 BAF 工艺中应用较多的陶粒填料, 沸石具有孔隙率高、对铵离子有选择性吸附作用且价格低廉的优点, 但同时也存在密度大、耐磨性差的缺陷。为了使沸石和陶粒的优缺点形成优势互补, 已有研究者将沸石和陶粒

组合在同一 BAF 工艺并应用于饮用水的预处理^[7], 但在污水脱氮方面的研究尚鲜见报道。

废水的 C/N 是影响生物脱氮的一个关键参数^[8], 由于沸石对铵离子具有选择性的吸附作用, 能有效地缓冲废水的氮冲击。因而以沸石为填料的 BAF 可能会提高低 C/N 废水的脱氮效率。

收稿日期: 2011-10-10; 修订日期: 2011-11-24

基金项目: 北京市城市节约用水办公室项目(041504015)

作者简介: 彭晓兰(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为中水深度处理工艺的开发, E-mail: pengxiaolan08@126.com

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

本研究将陶粒和沸石分别组合成陶粒-沸石前置反硝化 BAF 工艺(C-Z BAF)和沸石-陶粒前置反硝化 BAF 工艺(Z-C BAF);比较二者在不同的 C/N 条件下的脱氮特性,并采用末端限制性片段长度多态性分析(T-RFLP)技术初步探索二者的反硝化细菌群落结构特征,从而确定 2 种填料的最佳组合方式,以期为其推广应用提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验装置及工艺流程

本研究构建的 C-Z BAF 和 Z-C BAF 其反应装置相同,但填料的装填顺序不同,C-Z BAF 的缺氧滤池装填陶粒,好氧滤池装填沸石,而 Z-C BAF 的缺

氧滤池装填沸石,好氧滤池装填陶粒. 陶粒和沸石的基本特性如表 1 所示.

C-Z BAF 和 Z-C BAF 均采用分置式 A/O-BAF 工艺,由缺氧滤池和好氧滤池二级构成,如图 1 所示.

缺氧滤池和好氧滤池分别由高为 1.3 m 和 2.1 m,内径为 0.08 m 的有机玻璃柱制成,中间由法兰连接.底部设有进水缓冲区,内设曝气管,兼做反冲洗进气管.承托板上装填直径为 10 ~ 30 mm 的鹅卵石承托层,装填高度为 0.1 m.承托层以上装填粒径为 4 ~ 6 mm 的填料层,缺氧滤池和好氧滤池填料装填高度分别为 0.3 m 和 0.9 m.自承托层顶端起,在 BAF 两侧每隔 0.3 m 分设取水口和取填料口(编号为 1 ~ 6 号).

表 1 填料基本特性

Table 1 Characteristics of the packing media

项目	粒径/mm	真密度/kg·m ⁻³	堆积密度/kg·m ⁻³	总孔隙率/%	氨氮吸附容量/mg·g ⁻¹
天然沸石	4~6	2 137.4	1 932.9	9.74	2.05
烧结陶粒	4~6	1 820.6	1 668.4	8.49	0.19

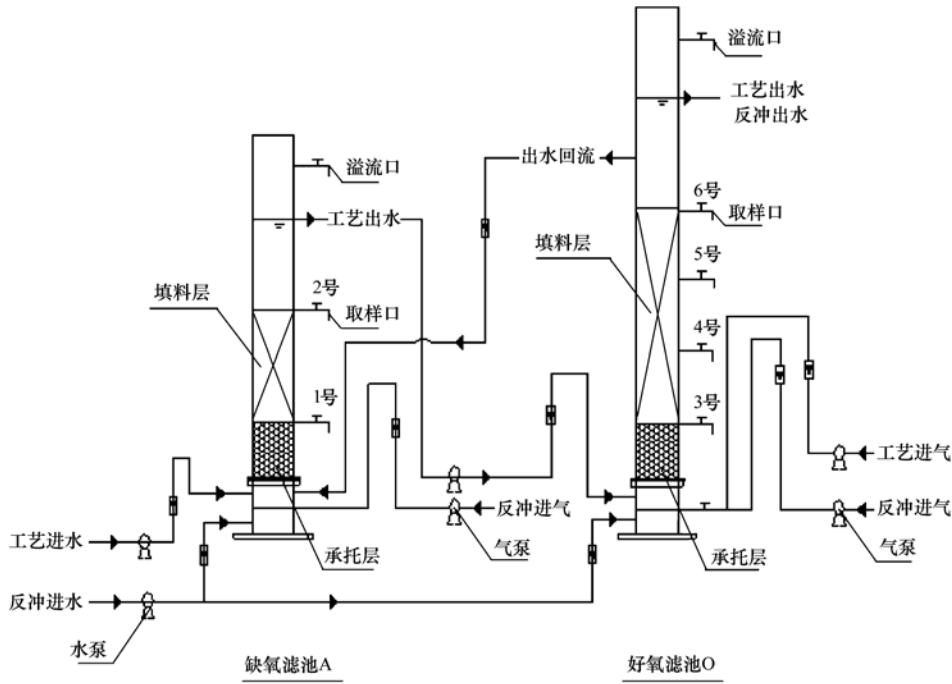


图 1 分置式 A/O-BAF 工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of the separated anoxic/oxic biological aerated filter process

试验系统采用上向流方式运行,原水首先进入缺氧池,再经过二级进水泵进入好氧池,好氧池的硝化液按一定比例回流至缺氧池进行反硝化.反冲洗时,反冲洗水和气均从底部进入滤池,反冲洗出水从溢流口排出.

1.2 原水水质及分析方法

本试验用水取自清华大学中水处理站的调节

池,来水主要为学生公寓排放的洗浴污水.原水 COD 为 44 ~ 254 mg·L⁻¹,氨氮为 7.2 ~ 36.1 mg·L⁻¹,TN 为 9.2 ~ 36.5 mg·L⁻¹,pH 为 6.6 ~ 8.2.试验通过投加乙醇和 NH₄Cl 调节 C/N 比,具体运行工况参数如表 2 所示,每个工况运行稳定后,再测定相关指标.各项指标采用国标法^[9]测定:COD 采用快速消解分光光度法(HJ/T 399-2007);氨氮采用

水杨酸-次氯酸钠法; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(岛津 UV-2450 型分光光度计); pH 采用 pH 计(pH0.00-14.00-0.01-5900 梅特勒,瑞士)。

表 2 运行工况参数

Table 2 Operation conditions and parameters					
试验工况	稳定运行时间 /d	C/N	水力停留时间 /h	回流比	气水比
1	1~7	10	1.5	2:1	5:1
2	8~14	8.4	1.5	2:1	5:1
3	15~21	5.9	1.5	2:1	5:1
4	22~28	3.3	1.5	2:1	5:1

1.3 微生物群落结构分析方法

1.3.1 样品采集

为了探索 C-Z BAF 和 Z-C BAF 在不同 C/N 条件下的反硝化微生物群落结构特征,在工况 2 和工况 4 结束时,分别从 C-Z BAF 和 Z-C BAF 的 1~6 号取样口取样,进行末端限制性片段长度多态性分析(T-RFLP)。取样时需要先取一定量的填料,通过超声波振荡剥离填料表面的生物膜,6 000 r·min⁻¹离心 2 min 后取 0.2 g 污泥提取总 DNA。不同工况条件下,C-Z BAF 和 Z-C BAF 沿程生物样品编号与取样口的对应关系如表 3 所示。

表 3 取样口与样品编号对应关系

Table 3 Relationship between the sample site and sample number							
项目	填料组合	取样口					
		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
工况 2	C-Z BAF	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
	Z-C BAF	2-1'	2-2'	2-3'	2-4'	2-5'	2-6'
工况 4	C-Z BAF	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
	Z-C BAF	4-1'	4-2'	4-3'	4-4'	4-5'	4-6'

1.3.2 T-RFLP 的基本步骤

(1) 总 DNA 提取

采用环境样本总 DNA 提取试剂盒 V212(上海博彩,K717)提取各样品的总 DNA,并采用质量浓度为 0.1% 琼脂糖凝胶电泳分离鉴定。提取的 DNA 放置在 -20℃ 下保存。

(2) PCR 扩增

对反硝化功能基因 *nosZ* 基因进行 PCR 扩增,选用的引物序列为^[10]:

nosZ-F:5'CGYTGTTCMTCGACAGCCAG3';

nosZ-R:5'CATGTGCAGNGCRTGCCAGAA3';

粗体部分代表兼并碱基:M = A + C; N = A + C + G + T; R = A + G; Y = C + T。

其中 *nosZ*-F 的 5'端用 FAM 荧光素标记。引物由上海生工生物工程有限公司合成。PCR 为 50 μL

的反应体系,其中有 25 μLTaq HS 酶(TaKaRa,日本),22 μL ddH₂O,1 μL 引物 *nosZ*-F,1 μL 引物 *nosZ*-R 和 1 μL DNA 模板。反应在 0.2 mL PCR 管(AXYGEN,美国)中进行。将上述试剂依次加入试管,混匀后立即将 PCR 管放入 PCR 热循环仪(Thermo P×2,美国)中。PCR 扩增程序为^[11]:94℃ 预变性 3 min;94℃ 变性 20 s,65℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 30 s,1 个循环;94℃ 变性 20 s,62℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 35 s,2 个循环;94℃ 变性 20 s,59℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 40 s,3 个循环;94℃ 变性 20 s,56℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 45 s,4 个循环;94℃ 变性 20 s,53℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 50 s,5 个循环;94℃ 变性 20 s,50℃ 退火 45 s,72℃ 延伸 60 s,25 个循环;72℃ 延伸 10 min。PCR 扩增产物用质量浓度为 1% 琼脂糖凝胶电泳进行分离。

(3) PCR 扩增产物的纯化、酶切与测序

PCR 扩增产物用纯化试剂盒 QIA quick PCR Purification Kit(Qiagen,德国)进行纯化。采用 *Sau*96 I 限制性内切酶(Fermentas,加拿大)对纯化后的 PCR 产物进行酶切。在 37℃ 下温浴 6 h。然后在 65℃ 条件下温浴 20 min 使酶失活。酶切产物送至北京诺赛基因组研究中心进行基因扫描(GeneScan),得到 T-RFLP 图谱。

(4) 数据分析方法

T-RFLP 谱图用 GeneMap 3.7(美国 ABI 公司)程序进行分析,取荧光强度 50RFU 为基线,选择的 GS500lize 作为内标,并舍去 <50 bp 和 >500 bp 的片段。将处理后的数据运用 T-REX 在线软件^[12]和 SPSS 等软件进行综合分析。

2 结果与分析

2.1 不同 C/N 条件下的工艺特性

不同 C/N 条件下 C-Z BAF 和 Z-C BAF 对 COD 的去除效果如图 2 所示。从中可见 2 种组合在 C/N >3.3 的 3 个工况下,其 COD 去除率均稳定在 80% 以上,平均出水 COD 浓度 <16 mg·L⁻¹。当 C/N = 3.3 时,虽然 C-Z BAF 和 Z-C BAF 的 COD 去除率均有所下降,平均去除率分别为 72% 和 76%,但出水 COD 平均浓度均小于 14 mg·L⁻¹。

不同 C/N 条件下 C-Z BAF 和 Z-C BAF 对 NH₄⁺-N 的去除效果如图 3 所示。从中可见随着 C/N 的不断增加,2 种组合对 NH₄⁺-N 的去除率始终稳定在 95% 以上,出水 NH₄⁺-N 浓度均小于 0.4 mg·L⁻¹。然而,与 C-Z BAF 相比,Z-C BAF 对 NH₄⁺-N 的去除率

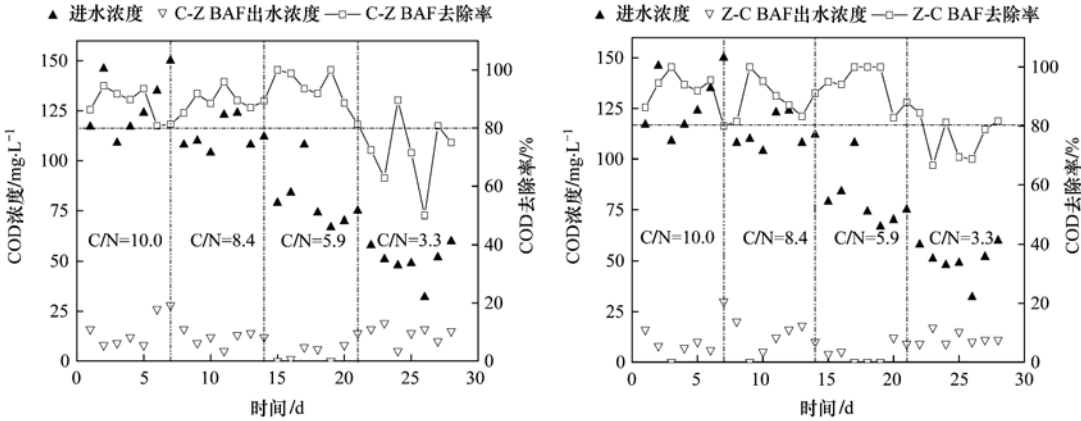


图2 C/N对C-Z BAF和Z-C BAF的COD去除效果的影响

Fig. 2 Influence of C/N ratio on the COD removal rate of C-Z BAF and Z-C BAF

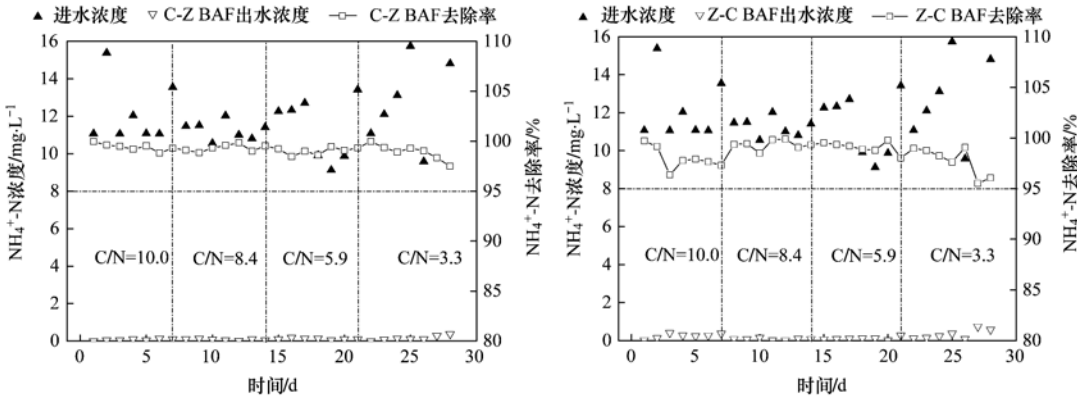


图3 C/N对C-Z BAF和Z-C BAF的NH₄⁺-N去除效果的影响

Fig. 3 Influence of C/N ratio on the NH₄⁺-N removal rate of C-Z BAF and Z-C BAF

波动性更大。

不同C/N条件下,C-Z BAF和Z-C BAF对TN的去除特性如图4所示。可见在不同C/N条件下,2种组合对TN的去除规律相似。即当C/N>5.9时,2种组合的总氮去除率均能达到回流比为2:1条件下TN的理论去除率66.7%^[13],且波动幅度小,出水

TN浓度维持在5 mg·L⁻¹以下。当C/N为5.9时,2种组合的TN去除率开始下降,且去除率不稳定,出水TN浓度波动在4~8 mg·L⁻¹范围内。当C/N为3.3时,2种组合的TN去除率出现大幅度下降,与Z-C BAF相比,C-Z BAF的对TN的去除效果更差。通过单因素方差分析数据得到C-Z BAF和Z-C BAF

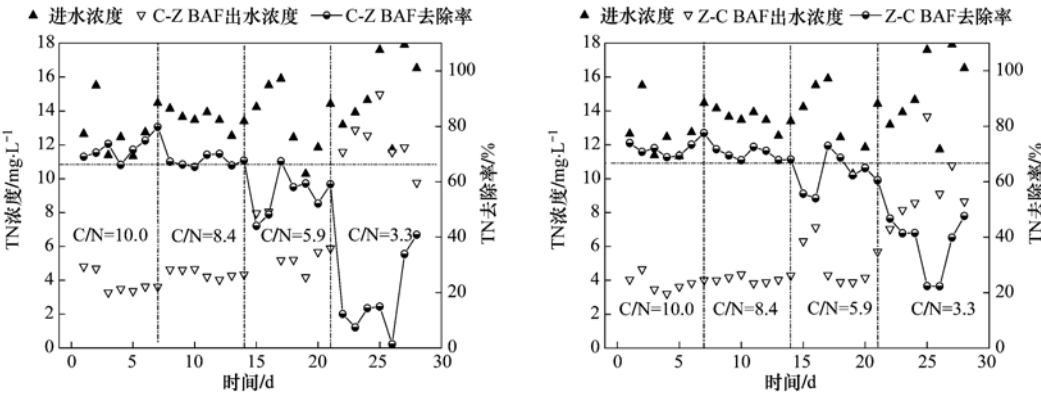


图4 C/N对C-Z BAF和Z-C BAF的TN去除效果的影响

Fig. 4 Influence of C/N ratio on the TN removal rate of C-Z BAF and Z-C BAF

的 F 值分别为 57.28 和 39.77 ($P < 0.05$), 说明 C/N 对 2 种组合的脱氮效率都存在显著性的影响。

图 5 总结了不同 C/N 条件下, 2 种组合对 TN 的平均去除率。由图 5 可见, 随着 C/N 的增加, 2 种组合对 TN 的去除率逐渐上升, 但是当 C/N 超过 8.4 后, 其 TN 的去除率上升幅度很小。同时, 在 4 个工况中 Z-C BAF 对 TN 的平均去除率均高于 C-Z BAF, 并且 C/N 越低 Z-C BAF 的优势越显著, 当 C/N 为 3.3 时二者的平均去除率相差约 20%。不同 C/N 条件下, 两种组合好氧段对 TN 去除效果的贡献率如表 4 所示。

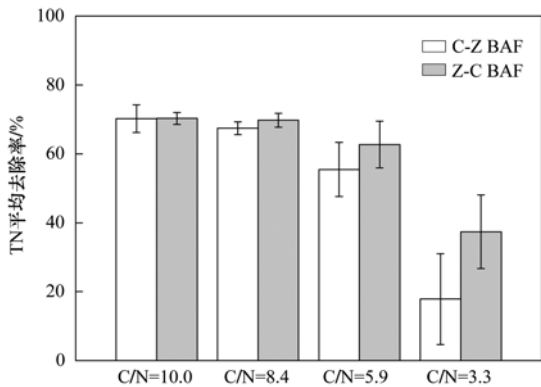


图 5 不同 C/N 条件下 2 种组合对 TN 的平均去除效果
Fig. 5 Average TN removal rate of C-Z BAF and Z-C BAF at various C/N ratios

表 4 好氧滤池对 TN 去除的贡献率

填料组合	C/N			
	3.3	5.9	8.4	10.0
C-Z BAF	7.55	29.61	10.32	14.22
Z-C BAF	32.15	14.61	24.52	19.86

2.2 不同 C/N 条件下的微生物群落特征

2.2.1 群落结构动态变化

在工况 2 和工况 4 条件下, 针对 C-Z BAF 和 Z-C BAF 沿程生物膜样品的反硝化细菌功能基因 *nosZ* 基因进行 T-RFLP 分析, 得到 2 种组合在不同工况条件下的沿程反硝化细菌群落结构的动态变化情况, 如图 6 所示。从整体结果来看, 各样品的 *nosZ* 基因 T-RFs 片段主要集中在 2 个不同长度的片段区域, 且片段长度几乎都小于 300 bp。2 个工况条件下, 2 种组合反硝化细菌的主要优势片段有 113、189、192、211 和 212 bp。

在相同工况条件下, C-Z BAF 和 Z-C BAF 的好氧滤池表现出显著的差异。工况 2 条件下, C-Z BAF 好氧滤池顶端样品的 113 bp 片段的相对丰度不到

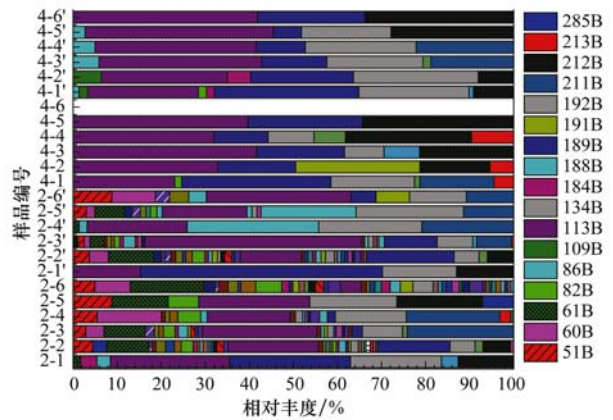


图 6 不同工况条件下 2 种组合沿程反硝化细菌 T-RF 动态变化柱状图

Fig. 6 Histograms of T-RFs relative abundances in C-Z BAF and Z-C BAF under different operation conditions

5% 而在 Z-C BAF 对应的样品中其相对丰度达到 33%。此外, 在 C-Z BAF 中片段长度为 61 bp 的 T-RF 丰度显著高于 Z-C BAF。在工况 4 条件下二者的差异更加显著, Z-C BAF 片段长度为 192 bp 的 T-RFs 丰度显著高于 C-Z BAF。同时, Z-C BAF 好氧滤池的顶端仍然能检测到相对丰度均大于 20%、片段长度为 113、189 和 212 bp 的优势 T-RFs, 而 C-Z BAF 好氧滤池顶端生物膜样品中的 *nosZ* 基因却不能得到有效的扩增。可见, 在工况 4 条件下 Z-C BAF 的整个好氧滤池中均存在同步硝化反硝化功能, 而 C-Z BAF 仅在滤池的中下部存在。

不同的工况条件下, 2 种组合的反硝化细菌群落结构也表现出明显的不同。由图 6 可见, 工况 2 条件下 2 种组合的总片段数明显高于工况 4, 并且多数优势片段的相对丰度也低于工况 4。可见, 不同的 C/N 条件可能对 2 种组合的反硝化细菌群落结构的分布及相对丰度均存在一定的影响。

2.2.2 反硝化细菌物种丰度及多样性分析

不同工况条件下, C-Z BAF 和 Z-C BAF 沿程生物膜样品的反硝化细菌物种丰度及多样性指数如表 5 所示。

由表 5 可知, 从整体趋势来看, 工况 2 条件下, 2 种组合的物种丰度和 Shannon-Weiner 指数显著高于工况 4 条件下的对应值。然而, 不同工况条件的物种均匀度却没有明显的规律性。此外, 不同的填料组合对反硝化细菌的物种丰度及多样性分布的影响没有明显的规律性。可见, 随着 C/N 的降低, 2 种组合反硝化细菌的物种丰度和多样性呈下降趋势。

2.2.3 反硝化细菌聚类分析

为了更加清晰地反映不同的工况条件对 2 种组

表 4 不同工况条件下 2 种组合的反硝化细菌物种丰度及多样性分析

Table 4 Abundance and diversity of denitrification bacteria in C-Z BAF and Z-C BAF under different operation conditions							
样品编号	物种丰度	Shannon-Weiner 指数	物种均匀度	样品编号	物种丰度	Shannon-Weiner 指数	物种均匀度
2-1	10	1.8	0.78	4-1	9	1.65	0.75
2-2	48	3.08	0.80	4-2	7	1.57	0.81
2-3	33	2.55	0.73	4-3	7	1.66	0.85
2-4	25	2.45	0.76	4-4	9	1.88	0.86
2-5	10	2.14	0.93	4-5	5	1.56	0.97
2-6	50	3.45	0.88	4-6	3	1.1	1.00
2-1'	6	1.45	0.81	4-1'	11	1.65	0.69
2-2'	45	3.11	0.82	4-2'	9	1.75	0.80
2-3'	30	2.1	0.62	4-3'	8	1.6	0.77
2-4'	6	1.61	0.90	4-4'	7	1.5	0.77
2-5'	20	2.22	0.74	4-5'	8	1.53	0.74
2-6'	15	2.39	0.88	4-6'	6	1.63	0.91

合的反硝化细菌群落分布特征的影响,选取各个滤池顶端及底部的样品的 T-RFLP 图谱进行聚类分析,结果如图 7 所示.

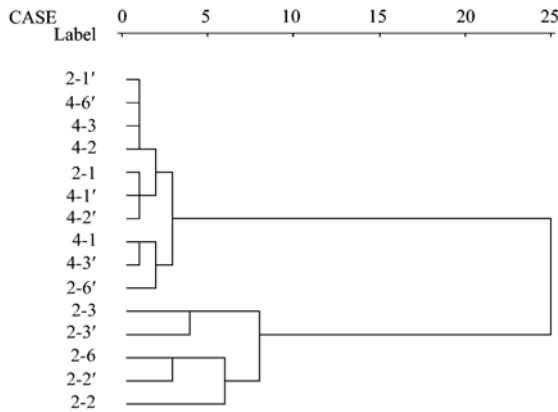


图 7 基于 T-RFs 的有/无的聚类分析

Fig. 7 Cluster Analysis based on the presence of T-RFs

由图 7 可见,不同工况条件下的 15 个样品大致按不同的 C/N 聚集为两大类.尽管在第一类中也有工况 2 条件下的样品,但是其与工况 4 条件下对应样品的相似度较低.整体来看,工况 4 条件下各个样品的相似度更高.由此说明,不同的 C/N 条件对 2 种组合的反硝化细菌的种群分布存在显著的影响.

2.2.4 AMMI 分析

不同工况条件下,2 种组合 15 个样品的反硝化细菌的 AMMI(additive main effects and multiplicative interaction)分析结果如图 8 所示.

从图 8 中可以看出,在互作第一主成分方向工况 4 条件下的样品全部聚集成一簇,除了 2-1 和 2-1'外,不同工况条件下的样品均被完全区分开来.在互作第二主成分方向,虽然工况 2 条件下的各个样品比较分散,但是同一采样点不同填料组合的样品

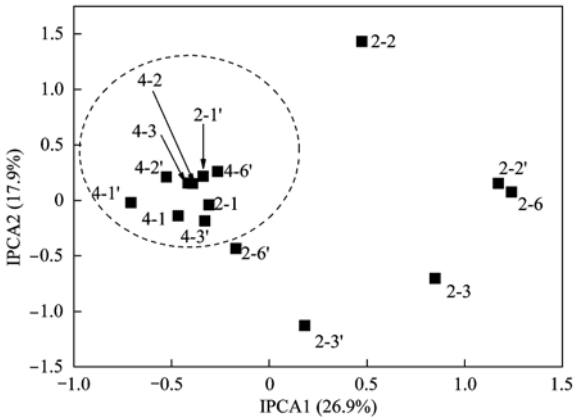


图 8 基于 T-RFs 的有/无的 AMMI 分析

Fig. 8 AMMI analysis based on the presence of T-RFs

的得分系数有明显的差别.可见,不同的 C/N 对反硝化细菌(尤其是好氧滤池内的)的种群分布特征有明显的影响,而不同的填料组合对其影响较小.

3 讨论

为了比较不同 C/N 条件对不同填料组合的 BAF 脱氮特性的影响,本研究分别比较了 C-Z BAF 和 Z-C BAF 组合在 4 个 C/N 条件下的工艺特性.

C/N 对 2 种组合的 COD 去除效果影响较小,且 2 种组合的 COD 去除规律没有显著的差异.王翠^[14]在活性污泥系统中研究不同 C/N 对 COD 的去除规律,其研究结果也得到了相似的结论.C/N 对 2 种组合的NH₄⁺-N去除效果影响也较小,但因为 C-Z BAF 沸石滤料多且好氧条件有利于硝化反应从而促进富集铵的沸石再生,缓冲NH₄⁺-N的冲击负荷能力更强.据报道,C/N 对氨氮的硝化作用具有很大的影响,由于异养菌与自养硝化菌对溶解氧的竞争作用,C/N 过高会抑制硝化速率^[15].但本研究中采用前置

反硝化脱氮工艺,大部分的有机物已经在缺氧段被降解,进入好氧滤池的有机物很少,因此对硝化菌的抑制作用较弱。

而 C/N 对 2 种组合 TN 去除效果存在显著的影响。随着 C/N 的增加,2 种组合对 TN 的去除率逐渐上升,但是当 C/N 超过 8.4 后,其 TN 的去除率上升幅度很小。赵冰怡等^[16]研究表明当 C/N > 8 时,反硝化所需要的碳源充足,继续提高 C/N 总氮的去除率几乎不变。同时, Sun 等^[17]也将 C/N < 8 的废水定义为低 C/N 废水。

在 4 个工况中 Z-C BAF 对 TN 的平均去除率均高于 C-Z BAF,并且 C/N 越低 Z-C BAF 的优势越显著,当 C/N 为 3.3 时二者的平均去除率相差约 20%。在各个 C/N 条件下,2 种组合的氨氮硝化作用都很充分,说明造成 2 种组合 TN 去除率差异的是其反硝化效率。可见,低 C/N 条件下,Z-C BAF 的脱氮功能优于 C-Z BAF,推测 Z-C BAF 系统具有更好的同步硝化反硝化性能。由此说明在长期运行条件下,沸石的选择性吸附作用并不能提高低 C/N 废水的 TN 去除效率。然而陶粒表面的孔隙是平板搭成的毛细孔和细口宽躯的毛细孔,微生物不仅可以在填料表面生长还可以在大孔中生长;而沸石的孔隙是平行或倾斜的平板构成的狭缝毛细孔,其孔径即为沸石骨架之间的间隙,孔径较小,微生物主要在其表面生长^[18]。生长在孔隙内部的微生物因为氧的传质效率或表面微生物对 DO 的消耗,常处于缺氧状态,因而陶粒更有利于同步硝化反硝化。

为了探索 2 种组合在不同 C/N 条件下(尤其是低 C/N)的反硝化微生物群落结构特征,本研究应用 T-RFLP 技术解析了不同 C/N 条件下的反硝化细菌群落特征。结果表明,随着 C/N 的降低,2 种组合反硝化细菌的物种丰度和多样性呈明显的下降趋势;并且通过聚类分析和 AMMI 分析也能有效的将不同 C/N 条件下的各个样品区分开(此时进水 COD 浓度较低)。低 C/N 条件下 Z-C BAF 好氧滤池的顶端均能检测到相对丰度 > 20% 的多个优势 T-RFs 片段,而 C-Z BAF 好氧滤池顶端生物膜样品中的 *nosZ* 基因却不能得到有效的扩增。计算两种组合好氧段对 TN 去除的贡献率(如表 4),可知在低 C/N 条件下 Z-C BAF 好氧段的脱氮贡献率达到 32%,而 C-Z BAF 不足 8%。综上可以推测,Z-C BAF 系统具有更好的同步硝化反硝化性能。

4 结论

(1)不同的 C/N 比对 C-Z BAF 和 Z-C BAF 的

COD 和 NH_4^+ -N 去除效果影响较小,对 TN 的去除效果影响显著。随着 C/N 的增加,2 种组合对 TN 的去除率逐渐上升,但是当 C/N > 8.35 后,其 TN 的去除率上升幅度很小。同时,不同 C/N 条件下 Z-C BAF 对 TN 的去除率均高于 C-Z BAF,并且 C/N 越小 Z-C BAF 的优势越显著。

(2)随着 C/N 的降低,2 种组合的反硝化细菌的物种丰度和多样性显著性下降。低 C/N 条件下,Z-C BAF 的整个好氧滤池均能检测到相对丰度 > 20% 的 *nosZ* 基因优势 T-RFs,而 C-Z BAF 好氧滤池顶端样品却不能有效地扩增到 *nosZ* 基因,可推测 Z-C BAF 的同步硝化反硝化功能优于 C-Z BAF。

(3)与 C-Z BAF 相比,Z-C BAF 在低 C/N 且低浓度的有机废水处理方面具有更大的潜力。

参考文献:

- [1] Mann A, Mendoza-Espinosa L, Stephenson T. A comparison of floating and sunken media biological aerated filters for nitrification [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1998, **72**(3): 273-279.
- [2] Han S X, Yue Q Y, Yue M, *et al.* Effect of sludge-fly ash ceramic particles (SFCP) on synthetic wastewater treatment in an A/O combined biological aerated filter [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3): 1149-1155.
- [3] Farabegoli G, Chiavola A, Rolle E. The biological aerated filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **171**(1-3): 1126-1132.
- [4] Yan D D, Liu B, Wang Q, *et al.* Electroplating wastewater treatment with a two-double biological aerated filter (T-DBAF) for reuse [A]. In: Wang L, Ni Y, Hou Q, *et al.* (eds.). *Second International Papermaking and Environment Conference, Proceeding, Books A and B* [C]. Tianjin, 2008. 1150-1153, 1193.
- [5] Zhang C H, Zhu S Q, He L N, *et al.* Removal of organic pollutants in landfill leachate by ozone oxidation-UBAF [A]. In: *Progress in Environmental Science and Technology*, Vol II, Pts a and B, 2009. 1349-1353, 2523.
- [6] Qiu L P, Zhang S B, Wang G W, *et al.* Performances and nitrification properties of biological aerated filters with zeolite, ceramic particle and carbonate media [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19): 7245-7251.
- [7] 刘金香, 娄金生, 陈春宁. 沸石-陶粒曝气生物滤池处理微污染源水试验 [J]. *工业用水与废水*, 2005, **36**(4): 10-14.
- [8] 郑兰香, 鞠兴华. 温度和 C/N 比对生物膜反硝化速率的影响 [J]. *工业安全与环保*, 2006, **32**(10): 13-15.
- [9] 国家环境保护总局. *水和废水监测分析方法* [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-284.
- [10] Rosch C, Mergel A, Bothe H. Biodiversity of denitrifying and

- dinitrogen-fixing bacteria in an acid forest soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(8): 3818-3829.
- [11] 柏耀辉. 吡啶、喹啉微生物降解及生物强化去除特性与机理研究[D]. 北京: 北京大学, 2009.
- [12] Culman S W, Bukowski R, Gauch H G, *et al.* T-REX: software for the processing and analysis of T-RFLP data [J]. *BMC Bioinformatics*, 2009, **10**: 171.
- [13] U S EPA. Process design manual for nitrogen control [M]. Washington DC: Office of Technology, 1993. 33-61.
- [14] 王翠. 不同 C/N 比低浓度污水的 A/O/N 脱氮研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [15] Jiang T, He J G, Yang X N, *et al.* Effects of operation parameters on nitrification in up-flow biological aerated filter coupled with zeolite media at low temperature[A]. In: ICEET: 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, Vol 2, Proceedings [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. 524-526.
- [16] 赵冰怡, 陈英文, 沈树宝. C/N 比和曝气量影响 MBR 同步硝化反硝化的研究[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(3): 400-403.
- [17] Sun S P, Nacher C P I, Merkey B, *et al.* Effective biological nitrogen removal treatment processes for domestic wastewaters with low C/N ratios: A review[J]. *Environmental Engineering and Science*, 2010, **27**(2): 111-126.
- [18] 王浩. 不同滤料的两个曝气生物滤池的氮氮转化机理的比较研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行