

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析

李建军^{1,2,3,4}, 廖东奇^{1,2,3,4}, 许玫英^{1,2,3,4}, 孙国萍^{1,2,3,4}

(1. 广东省微生物研究所, 广州 510070; 2. 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广州 510070; 3. 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广州 510070; 4. 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 广州 510070)

摘要: 以预先驯化的菌群和活性污泥作为起始接种物用于生物滴滤池(BTF)中, 研究评估了 BTF 去除苯、甲苯、乙苯和二甲苯混合气体(BTEX)的性能, 并利用变性梯度凝胶电泳(DGGE)技术分析了微生物群落结构的变化. 结果表明, BTF 能在短时间内得到驯化, 填料附着的生物量从第 10 d 的 $5.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 迅速增加至第 30 d 的 $112 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. BTF 能同时有效去除混合 BTEX 中的各组分, 在进气负荷和停留时间分别为 $269.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 39 s 时, 可获得的最大去除能力为 $216.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. DGGE 图谱表明, BTF 中优势微生物种群主要来源于富集菌群, 微生物群落结构随着运行时间发生变化, 但在 BTF 上下空间分布较为均匀.

关键词: 生物滴滤池; BTEX; DGGE; 群落结构; 菌群

中图分类号: X172; X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2552-08

Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities

LI Jian-jun^{1,2,3,4}, LIAO Dong-qi^{1,2,3,4}, XU Mei-ying^{1,2,3,4}, SUN Guo-ping^{1,2,3,4}

(1. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangzhou 510070, China; 3. Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China; 4. State Key Laboratory of Applied Microbiology (Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base), South China, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The pre-acclimated microbial consortium and the activated sludge were used as start inoculums of a bench-scale biotrickling filter (BTF). The performance of the biotrickling filter on the removal of BTEX mixture was evaluated, and the changes in the bacterial community structure of the BTF were analyzed by PCR-DGGE technique. The results showed that the BTF could be acclimated within a short time, the biomass that adhered to the surface of packing materials increased rapidly from $5.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ at 10th day to $112 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ at 30th day. BTF could simultaneously remove all components of the BTEX mixture efficiently. The maximum removal capacity of the BTF was $216.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, which was achieved with an inlet loading rate of $269.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ and an empty bed retention time (EBRT) of 39 s. DGGE analysis indicated that the dominant microorganisms may be derived from the pre-acclimated microbial consortiums rather than the activated sludge. Although the bacterial community changed with run time, the spatial distribution was very uniform.

Key words: biotrickling filter(BTF); BTEX; DGGE; community structure; microbial consortium

苯、甲苯、乙苯和二甲苯合称为 BTEX, 是一类工业废气中常见的有机污染物, 对人体健康和生态环境具有危害作用. 生物过滤是一种高效率、低成本、容易管理和环境友好的处理方法. 在生物过滤反应器中接种活性污泥是一种常见的选择^[1]. 污泥中含有丰富多样的微生物, 能降解广泛的微生物. 尽管有学者认为活性污泥足以用来启动生物反应器, 无需特定的富集微生物^[2]. 但对于难降解物质, 已证明利用相应的降解菌种能有效提高去除能力, 缩短微生物的驯化时间, 提高生物过滤设备的去除性能和稳定性^[3~7].

生物过滤方法已经广泛应用于各种废气污染物的去除, 但有关系统中微生物群落结构的研究很少,

仅有少数生物过滤过程中的微生物群落结构得到了研究^[8~10]. 微生物在生物过滤过程中扮演着关键的角色, 研究证实利用筛选的降解菌种能提高污染去除负荷, 但有关降解菌种能否在与土著微生物的竞争中发育为优势种群的研究有限. 因此, 有必要通过微生物群落结构的研究, 分析降解菌种在生物过滤过程中的变化规律, 为工程应用提供参考.

本实验中, 生物滴滤池同时接种降解菌群和活性污泥, 经短期驯化后逐步增加进气负荷. 本研究的首

收稿日期: 2012-10-19; 修订日期: 2012-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270169); 广东省科技计划项目(2010A030200021, 2011A030700002)

作者简介: 李建军(1971~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为废气污染控制, E-mail: lijianjun716@yahoo.com.cn

要目的是考察混合 BTEX 进气负荷对生物滴滤池去除效能的影响,分析生物滴滤池能否有效地同时去除 BTEX; 其次利用 PCR-DGGE 技术分析了生物滴滤池运行过程中的细菌群落结构的变化,重点考察降解菌群能否在生物滴滤池中成长为优势微生物.

1 材料与方法

1.1 生物滴滤池及运行条件

生物滴滤池 (BTF) 呈圆柱形,内径 8 cm,高度 80 cm. 柱体由三部分构成,顶部为液体喷淋区域,底部为液体存储池,中间两段为填料柱,用多孔板隔开. 所用填料为聚氨酯泡沫 (PU),立方体,边长为 1 cm. 填料高度为 40 cm,有效填料体积为 2 L. 填料

的孔隙率、堆积密度和持水力分别为:96.0%、 $17\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $-1.64\%\cdot\text{h}^{-1}$. 生物滴滤池运行模式为上流式,环境温度在 $20\sim37^{\circ}\text{C}$ 之间. 废气由苯、甲苯、乙苯和二甲苯这 4 种物质人工合成,4 种苯系物的液体预先按照一定比例均匀混合,用微量注射泵注入风管,由空气吹脱. 空气由空压机产生,污染物浓度通过调节气体流速和微量注射泵的注射速率实现.

实验分 4 个阶段 (表 1). 第一阶段为驯化阶段,生物滴滤池连续运行,此后以每周运行 5 d,每天运行 8 h 的间歇性模式运行. 每个阶段均持续至生物滴滤池达到拟稳定状态,即连续监测约 3 次的去除率波动范围小于 5%.

表 1 实验程序

运行参数	运行阶段			
	I (1~7 d)	II (8~42 d)	III (43~84 d)	IV (85~114 d)
苯进气浓度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.09~0.11	0.21~0.33	0.32~0.68	0.24~0.49
甲苯进气浓度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.13~0.17	0.30~0.46	0.39~0.74	0.39~0.72
乙苯进气浓度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.23~0.29	0.45~0.57	0.35~0.74	0.66~0.96
二甲苯进气浓度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.17~0.22	0.24~0.37	0.35~0.71	0.48~0.72
停留时间 EBRT/s	72	72	54	39
总进气负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$	32~39.6	66.1~94.2	120~212.8	160.9~269.9
运行模式	连续	间歇	间歇	间歇

1.2 微生物与培养基

BTF 接种所用菌群的驯化过程简述如下,两份 1 g 石油污染的土壤分别加入到两份 100 mL 灭菌的 M9 无机盐培养基中,分别置于 1 L 的干燥器中,加入 50 μL 的甲苯和二甲苯溶液,密封后于 30°C 培养,10 d 后转接一次至新鲜培养基中,传代 20 次后分别获得以甲苯和二甲苯为唯一碳源生长的菌群. BTF 启动前,两份新鲜培养菌群等量混合,离心浓缩细胞至湿重 $2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 活性污泥为市政污水厂一沉池新鲜污泥,污泥浓度 (MLSS) 调整为 $2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 菌群和污泥接种量各为 200 mL,加入 1.6 L 的无机盐培养基,从顶部均匀倒入填料柱. 渗滤液用蠕动泵重新滴洒回填料柱,循环 6 h 后,通入人工合成的含 BTEX 的废气开始驯化. 无机盐培养基每升含有: KNO_3 2 g, $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot12\text{ H}_2\text{O}$ 0.6 g, NaH_2PO_4 0.05 g, $\text{FeSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 50 mg, $\text{MgSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 120 mg, $\text{CaCl}_2\cdot2\text{H}_2\text{O}$ 10 mg. 培养基浓度根据进气负荷及时调整,每 3 d 更换一次,排液中污泥量 (MLSS) 为 $0.15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\pm0.02\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,始终维持培养基 C:N:P 比例为 100:20:1. 培养基储存于柱子底部的液体存储池,用蠕动泵以 $0.12\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 的速率回流至

填料柱顶部,液体通过设置在填料上部的多孔板后均匀滴洒至填料表面.

1.3 分析方法

BTEX 检测:生物滴滤池的进气和出气样品用 1 L 的 Tedlar 采样袋在固定时刻同时采集,每周采样约 3 次. 采样均在生物滴滤池启动后 2 h 时进行,8 h 内的进口浓度波动幅度调节至 5% 以内. 样品用气密性针取 100 μL 由气相色谱仪 (GC-2010Plus, SHIMADZU) 分析. 色谱仪具 FID 检测器,色谱柱为 HP1INNOWAX 型毛细管柱 ($30\text{ m}\times0.25\text{ mm}\times0.32\text{ }\mu\text{m}$). 柱温采用程序升温,初始温度为 35°C ,保持 3 min 后,以 $11^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 200°C ,保持 3 min,以 $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率再升温至 250°C ,保持 1 min. 气化室温度和检测器温度分别维持在 200°C 和 250°C . 以氮气为载气,流速为 $1.51\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 氢气流速: $40.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,空气流速: $400.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,尾吹气流速: $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 柱前压: 100 kPa.

填料压降用 U 型管连接填料床上下部空间测量.

生物量用重量法测量:定期采集的填料,用无菌

水冲洗并涡旋至少 30 min, 含生物膜液体用 0.2 μm 的滤纸过滤, 105℃ 烘干 4 h 后称重, 减去滤纸本身的重量即为生物量, 以每克干填料所含生物量表示。

1.4 细菌群落结构分析

填料采样孔距离底部 10 cm 和 30 cm 处, 采样日期分别为第 30、60 和 90 d, 填料样品储存于 -30℃ 冰箱, 于实验结束后一起抽提总 DNA。12 块聚氨酯泡沫填料与 20 mL 的磷酸缓冲液混合 (137 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl; 2.7 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl; 4.3 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2HPO_4 ; 1.4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 ; pH 7.3), 涡旋 30 min。总 DNA 用氯仿-苯酚法抽提。以总 DNA 为模板, 以 V3 区引物 341f (5'-CGC CCG CCG CGC CCC GCG CCC GGC CCG CCC CCG CCC TAC GGG AGG CAG CAG-3') 和 518r (5'-ATT ACC GCG GCT GCT GG-3') 扩增细菌 16S rDNA 基因片段。PCR 反应体积为 50 μL , 含 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 , 0.2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ dNTP, 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的引物和 2.5 U 的 DNA 酶, PCR 扩增用 Mastercycler gradient thermocycler (Eppendorf, Tiangen, 北京)。反应条件为 94℃ 5 min, 随后 94℃ 40 s, 55℃ 40 s, 72℃ 30 s, 30 个循环, 最后 72℃ 延伸 10 min。PCR 产物用 0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 Gold View (Applygen Technologies Inc., 北京) 染色后用 1.0% (质量分数) 的琼脂糖凝胶电泳和观察。

DGGE 分析用 D-code 通用突变检测系统 (Bio-Rad Laboratories Inc., USA), PCR 产物上样于 10% (质量分数) 的聚丙烯酰胺凝胶 (丙烯酰胺和双丙烯酰胺比例为 37.5:1), 线性变性剂梯度为 40% ~ 70% (100% 的变性剂定义为 7 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素加 40% 的甲醛)。DGGE 缓冲溶液为 1 倍的 TAE (40 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris, 20 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸, 1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA pH 7.4), 上样 50 μL 的 PCR 产物。DGGE 条件为 20 V 预电泳 20 min, 再 60℃、80 V 电泳 12 h。胶用 Goldview 染色后用 ImageQuant 350 (GE Healthcare, USA) 观察并拍照, 图谱用 Quantity one 4.4 (Bio-Rad, USA) 软件分析。用直径为 50 的滚环扣除背景值, 相对丰度用软件计算。不同阶段 DGGE 图谱的相似性系统树状图根据 Dice-coefficient 按照非加权组算数平均法 (unweighted pair-group method with arithmetic means, UPGMA) 绘制, 香农指数 (shannon-weiner index, SDI) 由下式计算:

$$\text{SDI} = - \sum P_i \times \ln P_i$$

式中, P_i 为 i 条带的亮度/所有条带的总亮度。

2 结果与分析

2.1 BTF 对混合 BTEX 的去除性能

生物滴滤池运行 114 d, 分为 4 个阶段, 通过改变气体流量和 BTEX 浓度以获得相应的进气负荷。从第二阶段开始, 生物滴滤池间歇性运行以模拟实际工业废气的排放模式 (即 8 h/d、5 d/周), 晚上和周末停止 BTEX 供应, 但不中断空气和培养液的供应。

图 1 显示了 BTF 在不同进气负荷状态下去除气体中 BTEX 的性能, 前 7 d 是生物滴滤池驯化阶段。气体中 BTEX 进气负荷维持在 39.6 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 以下, 停留时间 72 s。结果表明, BTF 所需要的驯化期很短, 在 7 d 内, 对 BTEX 各成分的去除率均接近 100%, 但对不同成分的去除行为略有差异。第 1 d, BTF 对苯、甲苯和乙苯的去除率即可达到 81.0%、94.1% 和 94.7%, 但对二甲苯的去除率仅为 73.6%。

第二阶段, 气体停留时间不变, 按比例增加各组分浓度, 进气负荷介于 66 ~ 94 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 之间。进气负荷增加后, BTF 对 BTEX 的去除率随即出现明显的下降, 对苯、甲苯、乙苯和二甲苯的去除率分别下降至 89.1%、94.4%、91.2% 和 89.8%, 随后逐步上升。第 26 d 可恢复至拟稳定状态, 对苯、甲苯和乙苯的去除率接近 99%。二甲苯的去除率恢复较慢, 于第 40 d 恢复至 95.9%。

第三阶段缩短停留时间至 54 s, 同时增加进气浓度, 总进气负荷在 120 ~ 213 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 之间。与第二阶段类似, 各组分的去除率先下降后上升。第 78 d 达到拟稳定状态, BTF 对苯、甲苯和乙苯的去除率约为 96%、96% 和 95%, 而二甲苯的去除率约为 85%, 在 82 d 时可达 87.3%。

第四阶段, 停留时间缩短为 39 s, 乙苯和二甲苯的负荷有较大幅度的增加, 而苯和甲苯的负荷变化不大, 总进气负荷从 205 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 逐步增加至 270 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, 再逐步降低至 161 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, 接近第三阶段末期的进气负荷。进气负荷的增加同样引起各组分去除率的剧烈下降, 乙苯和二甲苯的去除率分别从 95.1% 和 87.3% 下降至 72.8% 和 62.9%。值得注意的是, 虽然苯和甲苯的进气负荷并没有明显增加, 但去除率同样从 96% 分别下降至 62.2% 和 66.9%。这种下降可能意味着乙苯和二甲苯的负荷增加可能抑制了苯和甲苯的降解。不管怎

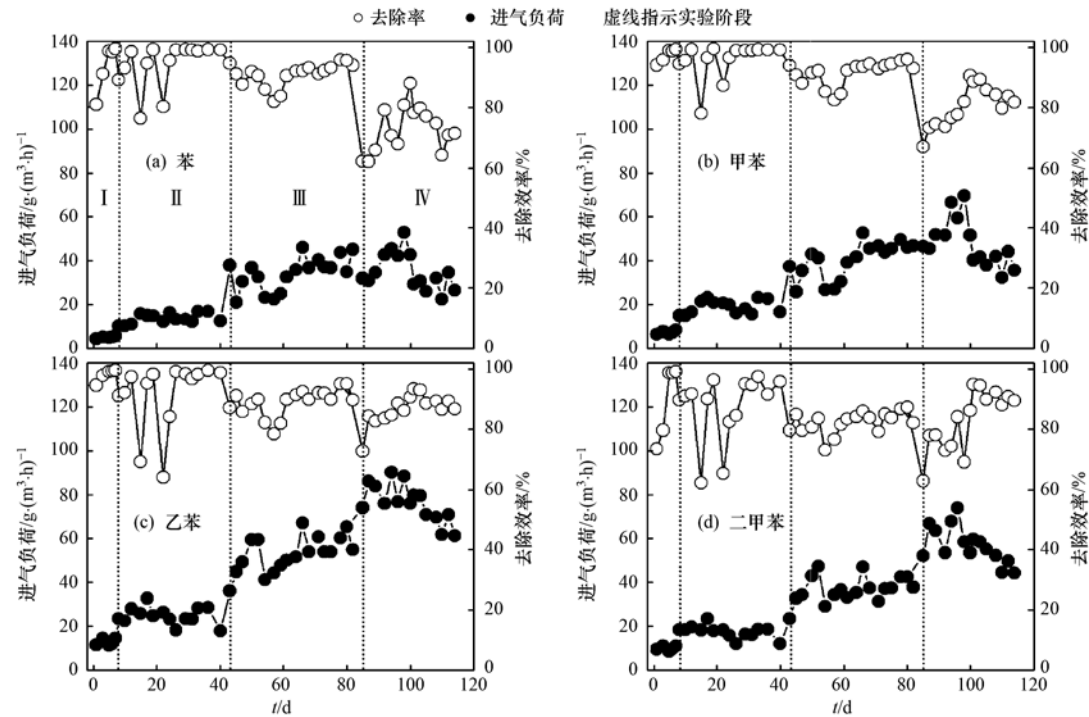


图 1 BTF 对混合 BTEX 各成分的去除效果

Fig. 1 Overall performance of the BTF in the removal of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene

样,BTF 运行至 103 d 时,苯、甲苯、乙苯和二甲苯的去除率分别为 79.7%、89.3%、93.5% 和 94.5%. 随后尽管进气负荷逐步降低,但各组分的去除率呈现下降,至 113 d,分别下降至约 70%、82%、88% 和 89% 左右. 此时的下降很可能与温度有关,环境温度从实验开始时的 37℃ 下降至 20℃ 左右,温度的下降影响了微生物活性和降解速率.

2.2 BTF 的去除负荷

BTF 对混合 BTEX 的最大去除能力如图 2 所示,去除能力与进气负荷在一定范围内几乎呈直线相关,当进气负荷超过 $190\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 后,去除能力虽然仍在增加,但幅度降低. 在整个实验过程中,BTF 所获得的最大去除能力为 $216.6\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ [进气负荷和停留时间分别为 $269.7\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 39 s],但去除率仅为 80%. 而去除率为 95% 的去除能力为 $176.6\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ [进气负荷和停留时间为 $188.5\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 54 s]. 对于混合气体中每一种组分而言,BTF 所获得的关键去除能力(即去除率为 95%) 分别为 33.4、44.3、62.0 和 56.6 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$. 总体而言,BTF 的去除能力随着进气负荷的增加而增加,但到一定程度后虽然去除能力仍然增加,去除率却出现下降,表明进气负荷的增加超过了相应生物量应有的降解能力.

2.3 生物滴滤池运行过程中的细菌群落结构变化

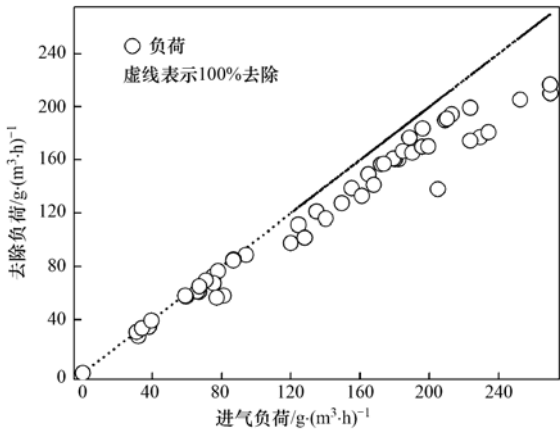


图 2 生物滴滤池去除能力与进气负荷的关系

Fig. 2 Variation in removal capacity of the BTF with changes of inlet loading rates

为了解微生物在 BTEX 的生物过滤中的作用,利用 PCR-DGGE 技术分析了 BTF 中细菌群落结构在不同运行阶段中的变化规律. 图 3 显示了起始接种物以及 BTF 分别在 30、60 和 90 d 时的细菌群落结构的 DGGE 指纹图谱,其中,第一(A)和第二(C)泳道分别为活性污泥和降解菌群的细菌群落指纹图谱. 结果表明,细菌群落结构随着时间的迁移而发生了明显的变化. 在活性污泥中,只有条带 1、2 和 10 在 BTF 整个运行过程中出现,第 90 d 的下层填料中的丰度分别为 3.7%、5.6% 和 5.1%. 条带 4

则在第 90 d 时消失,条带 7 和 8 仅出现在第 30 d,但这 3 个条带也在菌群的图谱中出现. 在菌群的图谱中,最为明显的是条带 5 和 9,虽然在前期运行过程中亮度较弱,但在 90 d 后显著增强,成为 BTF 中的优势细菌种群,第 90 d 在 BTF 下层填料中的丰度分别为 10.8% 和 23.1%,远高于由污泥发育而来的种群丰度. 由此可见,BTF 的优势菌种主要来源于富集的菌群,尽管 BTEX 进气负荷的变化影响了 BTF 的微生物群落结构,但起始接种菌群的优势种群能够很好地在 BTF 中生长繁殖. 因此,可以认为富集的菌群更有利于功能性微生物群落结构的形成.

分析生物多样性指数发现,活性污泥和菌群的香农指数分别为 3.23 和 2.42(表 2),与活性污泥的多样性指数相比,BTF 中的多样性指数呈现逐步减低的趋势. 这一结果表明,尽管活性污泥中含有丰富的微生物,但在 BTF 接受混合 BTEX 后,许多不能快速利用 BTEX 的微生物死亡. 已有很多类似的报道,如 Fu 等用驯化 20 d 的活性污泥接种沸石生物滤池,香农指数也随着时间而减低^[11]. 另外,上

表 2 BTF 随时间变化的生物多样性指数

Table 2 Bio-diversities of the BTF at different operating times							
A	C	30t	30b	60t	60b	90t	90b
3.23	2.42	2.61	2.58	3.00	2.68	2.62	2.58

3 讨论

一般来讲,常见工业废气中 BTEX 往往以多组分而非单一组分的形式存在. 多组分废气污染物的生物降解过程中经常可以观察到促进、抑制或毒性作用等现象^[12, 13]. BTEX 具有相似的化学结构、代谢酶系和代谢途径,因而在共同生物降解过程中以竞争性抑制作用为主^[14]. 如 Du Plessis 等^[15]发现,用甲苯驯化菌群接种的生物滤池中,甲苯竞争性抑制了苯、乙苯、*m*-二甲苯和 *o*-二甲苯的去除,但却增强了 *p*-二甲苯的降解率,原因是 *p*-二甲苯与其它两种异构体降解过程中需要不同的酶系,*p*-二甲苯的降解需要通过共代谢途径实现. 因此,为同时去除 BTEX,选择合适的菌群是必要的,尤其对于二甲苯而言,去除效果将会因相互抑制作用的存在而降低. 本实验中,BTF 除了实验室预先驯化的菌群,另外接种了活性污泥. 多样的微生物组合可以在一定程度上减轻多组分废气中不同成分间的相互抑制作用,因而获得了理想的混合 BTEX 的同时去除效果

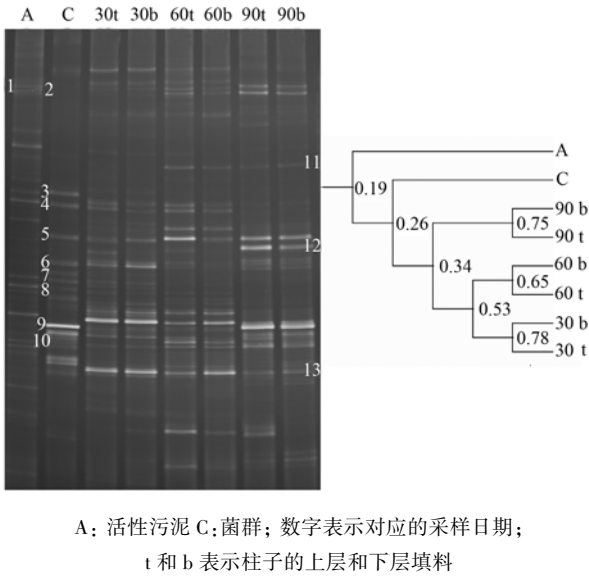


图 3 BTF 不同运行阶段和位置的 DGGE 图谱和 UPGMA 树状图
Fig. 3 DGGE profile and UPGMA dendrogram of the biofilm samples from the top and bottom of the BTF

层填料的生物多样性指数均高于下层填料,原因在于 BTF 从底部进气,下层填料接受的更高浓度的混合 BTEX 对微生物有胁迫作用.

和去除能力,至少在试验段前三阶段,没有发现明显的相互抑制作用. 组分间的相互抑制作用程度不仅取决于污染物种类,也与其浓度有关. 在第四阶段起始时,虽然苯和甲苯的进气负荷没有明显增加,但其去除率则因乙苯和二甲苯负荷的增加而降低. 经过短暂的适应后,尽管进气负荷继续增加,但苯和甲苯去除率逐步回升,显示抑制作用减弱. 原因可能在于生物膜中驯化菌群中的微生物种类占据了优势,促进了生物降解速率. 在含有混合 BTEX 的工业废气的生物过滤过程中,经常以活性污泥来接种生物反应器,活性污泥中含有丰富的微生物. 而富集菌群或纯化的菌种也是生物过滤反应器的一个重要来源,利用驯化的微生物,不仅可以缩短驯化时间,也能有效提高去除能力. Klapková 等^[16]比较了接种甲苯、二甲苯驯化的菌种和填料土著微生物对堆肥生物滤池去除性能的影响,发现接种驯化菌种的生物滤池的长期去除性能明显好于土著微生物.

BTF 能在短时间内(小于 7 d)完成驯化过程,这种快速的驯化应归功于合适的接种物. 连续供应

含 BTEX 的混合气体后,预先经甲苯和二甲苯驯化的菌群无需适应即可在 BTF 中增殖并开始生物降解. 图 4 显示了 BTF 实验期间上/下层填料生物量的变化,第 10 d 下层填料的生物量仅为 $5.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,第 30 d 生物量显著增加至 $112 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,生物量的迅速增加表明 BTF 所接种的微生物具有以 BTEX 为碳源快速增殖的能力,也说明填料和运行条件适合微生物的生长. 而上下层填料的生物量差异较小,上层填料第 10 d 和 30 d 的生物量分别为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $99.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,60 d 时,两部分生物量无显著差异,预示着微生物均匀分布在整个填料柱.

尽管生物量增加迅速,但填料床压降的增加并不明显(小于 100 Pa). 本实验所用填料为 PU,是一种 BTF 常用的有效填料,具有良好的物理化学特性. 已有研究证明 PU 因具有大量开放的孔室使得其持水力、孔隙率和比表面积较高,能负载相对较高的生物量^[17~19]. Ryu 等^[20]评估了不同生物量时的 PU-BTF 去除性能,维持有效和稳定去除效率的生物量为 $2.0 \sim 2.5 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,而每 m 填料层的压降仅为 300 Pa. 实际上,间歇性运行方式也是一种控制填料堵塞的有效方法. 间歇期,污染负荷为零,意味着没有碳源或能源供应,微生物细胞进入内源呼吸状态. 因此,间歇施加污染负荷的生物滴滤池可降低因生物量过度积累而堵塞填料的可能.

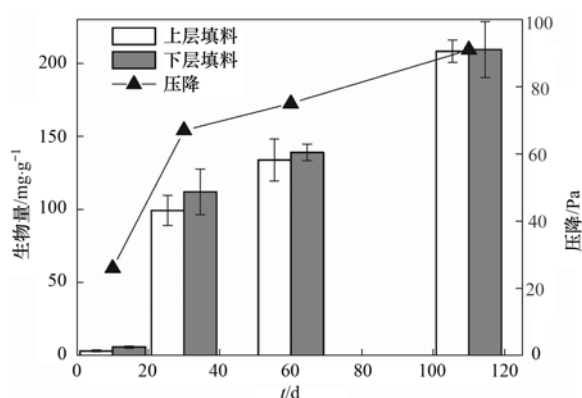


图 4 实验期间生物量和压降的变化

Fig. 4 Variation in biomass and pressure drop of the BTF during the experiment

本试验中,BTF 所获得的去除负荷高于多数类似的报道. 例如,Mathur 等^[21]报道了当 BTEX 进气负荷低于 $68 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,几乎可以达到 100% 的去除,而当进气负荷为 $126.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,仅获得 $83.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 的最大去除负荷. Lu 等^[22]报道了接种活性污泥的 BTF 可以去除超过 80% 的进

气负荷为 $143 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 的 BTEX. 研究表明,单一组分的去除负荷一般高于混合 BTEX. 例如 Cho 等^[4]研究了乙苯、*o*-二甲苯和 BTEX 的生物过滤性能,当 EBRT 为 48 s 时,乙苯和 *o*-二甲苯的最大去除负荷分别为 $34.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $38.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,相应的去除率分别为 61.8% 和 67.0%. 而去除 90.7% 的混合 BTEX 的最大负荷仅为 $32.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. PCR-DGGE 的分析结果表明,本实验虽然同时接种了活性污泥和预驯化的菌群,但在后期稳定阶段,主要功能微生物来源于甲苯、二甲苯富集菌群. 菌群由多种微生物组成,不仅能有效去除甲苯和二甲苯,而且能获得理想的苯和乙苯的去除效果,显示出利用预驯化菌群相对于单一菌种的优越性. 多菌种培养物的降解能力优于单一菌种已得到其他学者的证实,如 Jang 等^[23]的研究显示出多菌种对生物过滤效率的增强作用,接种 3 个苯乙烯降解菌对苯乙烯的去除能力是单一菌株的 2 倍. 接种苯甲酸降解菌,能移除苯乙烯降解中积累的苯甲酸,生物滤池的去除性能得以维持,利用降解菌还可以缩短驯化时间. Choi 等^[24]提出利用代谢功能互补的菌株组成的菌群处理 BTX 混合废气的思路,虽然单菌株不能利用全部的苯系物,但组合为菌群时不仅能有效去除全部的 BTX,去除速率也高于单菌株.

废气中污染物的组成和浓度往往影响着微生物群落结构的时空分布^[25, 26]. Yasuda 等^[10]分析了取自火山岩生物滤池中两个填料层的氨氧化微生物的空间分布,每层填料设 3 个采样点,结果发现,有两个点在不同填料层的氨氧化微生物群落结构相似,但另外一个差异较大,笔者认为这是由氨气浓度的空间分布不同造成的. Omri 等^[27]曾经用 PCR-SSCP 技术研究了处理 H_2S 污染气体的泥炭土生物滤池中微生物群落结构的变化,结果发现上、中、下层填料中的微生物群落显著不同,物种多样性从下层到上层逐渐降低,这种变化与废气浓度的垂直分布对应. 而在本研究中,BTF 上下层的群落结构非常接近,相似性分析表明(表 3),不同阶段的条带模式的差异远大于同一阶段不同填料位置的条带模式. 同一阶段不同位置的微生物群落结构的相似度较高. 原因应该可以归因于填料的特性,聚氨酯泡沫是 BTF 所采用的填料,具有较大的孔隙率,营养物质和气体污染物在其中的传输阻力小,垂直分布较为均匀,可能是细菌群落结构在不同垂直高度相似的原因. 同一阶段上下层填料间生物量的微小差异也表明微生物实际上均匀分

表 3 BTF 各运行阶段微生物群落结构的相似性

Table 3 Similarity of the microbial communities of the BTF during different operating stages

	A	C	30t	30b	60t	60b	90t	90b
A	100	15.8	21.0	18.5	21.7	20.5	16.9	20.0
C		100	26.2	22.0	22.9	21.9	33.8	30.9
30t			100	77.9	49.1	62.1	27.8	30.0
30b				100	42.7	58.2	26.4	27.8
60t					100	64.8	47.9	42.5
60b						100	31.9	37.0
90t							100	75.1
90b								100

布在填料柱. 微生物群落结构在不同时间的差异则是因为进气负荷的不断增加.

4 结论

(1)BTF 能在很短时间完成驯化过程并获得理想的对 BTEX 的去除效果,生物量的增长迅速,但未引起填料床压降的明显上升,说明实验所选择的聚氨酯泡沫是一种合适的填料.

(2)起始接种物有助于 BTF 对混合 BTEX 各组分的同时去除,最大去除能力可达到 $216.6\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.

(3)DGGE 指纹图谱表明,BTF 中的优势微生物主要来源于富集菌群,BTF 上下层填料的细菌群落结构相似性程度高,表明 BTF 微生物的空间分布均匀.

参考文献:

[1] Arulneyam D, Swaminathan T. Biodegradation of ethanol vapour in a biofilter[J]. Bioprocess Engineering, 2000, **22**(1): 63-67.

[2] Fortuny M, Gamisans X, Deshusses M A, *et al.* Operational aspects of the desulfurization process of energy gases mimics in biotrickling filters[J]. Water Research, 2011, **45**(17): 5665-5674.

[3] Hwang J W, Choi C Y, Park S, *et al.* Biodegradation of gaseous styrene by *Brevibacillus* sp. using a novel agitating biotrickling filter[J]. Biotechnology Letters, 2008, **30**(7): 1207-1212.

[4] Cho E, Galera M M, Lorenzana A, *et al.* Ethylbenzene, o-Xylene, and BTEX removal by *Sphingomonas* sp. D3K1 in rock wool-compost biofilters[J]. Environmental Engineering Science, 2009, **26**(1): 45-52.

[5] Reij M W, Hartmans S. Propene removal from synthetic waste gas using a hollow-fibre membrane bioreactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1996, **45**(6): 730-736.

[6] Pielech-Przybylska K, Ziemiński K, Szopa J S. Acetone biodegradation in a trickle-bed biofilter [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2006, **57**(4): 200-206.

[7] Elsgaard L. Ethylene removal by a biofilter with immobilized bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**

(11): 4168-4173.

[8] Chung Y C, Cheng C Y, Chen T Y, *et al.* Structure of the bacterial community in a biofilter during dimethyl sulfide (DMS) removal processes [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(18): 7176-7179.

[9] Kristiansen A, Pedersen K H, Nielsen P H, *et al.* Bacterial community structure of a full-scale biofilter treating pig house exhaust air[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2011, **34**(5): 344-352.

[10] Yasuda T, Kuroda K, Hanajima D, *et al.* Characteristics of the microbial community associated with ammonia oxidation in a full-scale rockwool biofilter treating malodors from livestock manure composting[J]. Microbes and Environments, 2010, **25**(2): 111-119.

[11] Fu Y M, Shao L Z, Tong L, *et al.* Ethylene removal efficiency and bacterial community diversity of a natural zeolite biofilter [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 576-584.

[12] Trigueros D E G, Módenes A N, Kroumov A D, *et al.* Modeling of biodegradation process of BTEX compounds: Kinetic parameters estimation by using Particle Swarm Global Optimizer [J]. Process Biochemistry, 2010, **45**(8): 1355-1361.

[13] Jo M S, Rene E R, Kim S H, *et al.* Removal of BTEX compounds by industrial sludge microbes in batch systems: statistical analysis of main and interaction effects [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2008, **24**(1): 73-78.

[14] Smith M R. The biodegradation of aromatic hydrocarbons by bacteria[J]. Biodegradation, 1990, **1**(2-3): 191-206.

[15] Du Plessis C A, Strauss J M, Riedel K H J. BTEX catabolism interactions in a toluene-acclimatized biofilter [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, **55**(1): 122-128.

[16] Klapková E, Halecky M, Fitch M, *et al.* Impact of biocatalyst and moisture content on toluene/xylene mixture biofiltration[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2006, **49**(2): 347-352.

[17] Ryu H W, Cho K S, Lee T H. Reduction of ammonia and volatile organic compounds from food waste-composting facilities using a novel anti-clogging biofilter system [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(7): 4654-4660.

[18] Singh R S, Rai B N, Upadhyay S N. Removal of toluene vapour from air stream using a biofilter packed with polyurethane foam

- [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010, **88** (5): 366-371.
- [19] Ryu H W, Kim S J, Cho K S. Comparative studies on toluene removal and pressure drop in biofilters using different packing materials[J]. Journal of Environmental Biology, 2010, **31**(3): 315-318.
- [20] Ryu H W, Cho K S, Chung D J. Relationships between biomass, pressure drop, and performance in a polyurethane biofilter[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(6): 1745-1751.
- [21] Mathur A K, Majumder C B, Chatterjee S. Combined removal of BTEX in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **148**(1-2): 64-74.
- [22] Lu C S, Lin M R, Chu C H. Effects of pH, moisture, and flow pattern on trickle-bed air biofilter performance for BTEX removal [J]. Advances in Environmental Research, 2002, **6**(2): 99-106.
- [23] Jang J H, Hirai M, Shoda M. Enhancement of styrene removal efficiency in biofilter by mixed cultures of *Pseudomonas* sp. SR-5 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, **102**(1): 53-59.
- [24] Choi S C, Oh Y S. Simultaneous removal of benzene, toluene and xylenes mixture by a constructed microbial consortium during biofiltration[J]. Biotechnology Letters, 2002, **24**(15): 1269-1275.
- [25] Ramírez M, Fernández M, Granada C, *et al.* Biofiltration of reduced sulphur compounds and community analysis of sulphur-oxidizing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(5): 4047-4053.
- [26] Gao M, Li L, Liu J X. Simultaneous removal of hydrogen sulfide and toluene in a bioreactor: Performance and characteristics of microbial community [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(3): 353-359.
- [27] Omri I, Bouallagui H, Aouidi F, *et al.* H₂S gas biological removal efficiency and bacterial community diversity in biofilter treating wastewater odor[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(22): 10202-10209.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LÜ Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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