

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

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

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

生物滴滤塔净化多组分废气的研究

张定丰¹, 房俊逸², 叶杰旭², 邱松凯², 钱东升³, 戴启洲², 陈东之^{2*}

(1. 浙江医药股份有限公司新昌制药厂, 绍兴 312500; 2. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 3. 浙江蓝天求是环保集团有限公司, 杭州 310012)

摘要: 通过生物滴滤塔(biotrickling filter, BTF)净化硫化氢(H_2S)、四氢呋喃(THF)、二氯甲烷(DCM)混合废气, 研究其挂膜启动和稳定运行条件下的降解性能。结果表明, 混合废气 H_2S 、THF、DCM 浓度分别为 200、100 和 100 $mg \cdot m^{-3}$, 空床停留时间(empty bed retention time, EBRT)50 ~ 20 s 的条件下, H_2S 和 THF 的去除率分别能够维持在 99% 和 60% 左右, 而 DCM 的去除率随 EBRT 的缩短从 90% 逐渐降低至 37% 左右。利用 Michaelis-Menten 动力学模型分析得到, 理论降解效果为 $H_2S > THF > DCM$ 。

关键词: 生物滴滤塔; H_2S ; THF; DCM; 动力学

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2116-05

Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter

ZHANG Ding-feng¹, FANG Jun-yi², YE Jie-xu², QIU Song-kai², QIAN Dong-sheng³, DAI Qi-zhou², CHEN Dong-zhi²

(1. Xinchang Pharmaceutical Factory, Zhejiang Medicine Co., Ltd., Shaoxing 312500, China; 2. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 3. Zhejiang Atmosphere Environmental Protection Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: A biotrickling filter (BTF) was designed for treating mixed waste gases, which contained hydrogen sulfide (H_2S), tetrahydrofuran (THF) and dichloromethane (DCM) at the start-up and steady states. The removal efficiency of H_2S and DCM could maintain about 99% and 60%, respectively, and the removal efficiency of DCM was reduced from 90% to 37% with the shortening empty bed retention time (EBRT) from 50 to 20 seconds when the inlet concentrations were 200, 100, 100 $mg \cdot m^{-3}$ of H_2S , THF, DCM, respectively. In the theoretical study, the biodegradation efficiency of contaminants was $H_2S > THF > DCM$ by analyzing the Michaelis-Menten Dynamic model.

Key words: biotrickling filter; H_2S ; tetrahydrofuran (THF); dichloromethane (DCM); dynamics

工业排放的气态污染物是大气污染的重要来源, 其中制药工业的有毒有害废气排放亦随着该行业的发展而日趋增多, 其组分繁杂多样, 且大多数属于恶臭污染物和挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)。目前对该行业产生的 H_2S 和 VOCs 混合废气常见的处理方法有吸附法、吸收法、氧化法、中和法、催化燃烧法和生物法, 其中生物法凭借其投资少、处理效果好、二次污染少等优点逐渐成为近年来主要的废气治理方法^[1-5]。目前国内外对采用生物技术处理单一的 H_2S 废气或 VOCs 废气开展了大量的研究^[6], 但是针对 H_2S 和 VOCs 混合废气处理的生物技术在国内外外的研究还十分稀少^[7-9]。与此同时, 目前由于该类混合废气而造成的环境污染问题已较为严重。此外, 现有的生物技术仍然存在去除率低、稳定性差等问题。大部分微生物的最适生长 pH 范围偏中性, 所以降解 H_2S 废气时产生大量的酸性物质会严重

影响 VOCs 的去除效率。因此, 探索一种能够适应实际工业应用的废气处理方法的任务迫在眉睫。

针对上述问题, 本研究结合某制药厂污水站混合废气成分特征, 采用自主研发的 BTF 系统处理 H_2S 、THF、DCM 混合废气, 控制 BTF 系统中的 pH 为 6.0。通过研究混合废气挂膜及稳定运行性能和降解动力学, 以期在实际工业废气的处理奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验装置与工艺流程

BTF 系统净化 H_2S 、THF、DCM 混合废气的工艺流程由图 1 所示。BTF 主体部分由总高为 1 360

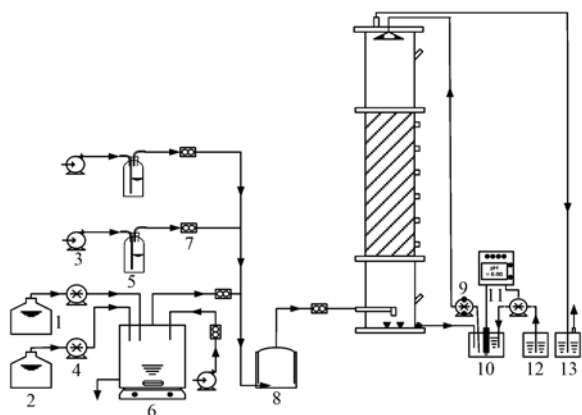
收稿日期: 2012-09-11; 修订日期: 2012-10-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063102); 浙江省科技厅创新团队项目(2011R09048-04)

作者简介: 张定丰(1970~), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为生物化工, E-mail: zhangdf@xcpharma.com

* 通讯联系人, E-mail: cdz@zjut.edu.cn

mm、内径为 140 mm 的有机玻璃制成, 沿塔体径向设置 2 个气体采样口和 6 个填料取样口, 塔体内部装填聚氨酯小球作为填料, 填料层总高 600 mm, 填料支撑板采用直径 140 mm, 开孔孔径 6 mm, 孔间距 4 mm 的有机玻璃板, 这种结构可使气液的径向分布良好. H_2S 气体采用 Na_2S 和 H_2SO_4 反应生成, THF 和 DCM 均采用空气吹脱, 生成的混合气体经空气充分混合稀释后从塔底进入反应器, 而营养液从塔顶向下喷淋, 气液两相呈逆流式接触.



1. Na_2S 储罐; 2. H_2SO_4 储罐; 3. 空气泵; 4. 蠕动泵; 5. 吹脱瓶; 6. H_2S 反应槽; 7. 玻璃转子流量计; 8. 混合瓶; 9. 电磁计量泵; 10. 营养液储罐; 11. pH 自动控制系统; 12. NaOH 储罐; 13. 尾气吸收瓶

图 1 BTF 系统工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the biotrickling filter

1.2 微生物挂膜及营养液成分

本实验中填料来源于生物滴滤塔净化单一 H_2S 废气实验^[10], 故对于降解 H_2S 的菌种基本不需要进行重新挂膜, 而降解 THF 的菌株 *Pseudomonas* DT4 (GQ387664)^[11] 和降解 DCM 的菌株 *M. rhodesianum* H13 (M2010121) 均为所在实验室筛菌得到的高效降解菌株. 菌株 DT4 及 H13 均以纯菌挂膜方式, 通过营养液循环的途径在反应器中进行挂膜. 挂膜期间, 控制 H_2S 、THF、DCM 进气浓度分别为 200、100 和 100 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 空床停留时间 (EBRT) 为 50s, 温度为 30℃. Cox 等^[12] 研究显示, 在同一装置中净化 H_2S 和 VOCs 混合废气时, 降解 H_2S 的最适 pH 为 1.5~3.0, 净化氯代烃的最适 pH 为 6.5, 净化其他大部分 VOCs 的最适 pH 多偏中性. 根据降解混合废气菌种的适宜 pH 范围并结合菌株 DT4 和 H13 的适宜生长条件将运行 pH 设定为 6.0^[13,14].

营养液组成成分如下 (1L): $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$

4.5 g, KH_2PO_4 2.5 g, NH_4HCO_3 1.0 g, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g, $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{FeCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, 1 mL 微量元素母液 (1.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.02 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.014 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ H_3BO_3 , 0.10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.02 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.02 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

1.3 分析方法

H_2S 浓度: 采用 PTM 便携式 H_2S 检测仪, 量程 0~1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

THF 和 DCM 浓度: 均采用安捷伦 6890 气相色谱 (HP-Innowax 硅胶毛细管柱, 30 m×0.32 mm×0.5 μm) 测定. THF 测定条件: 汽化室温度 250℃, 检测器 (FID) 温度 250℃, 采用程序升温 (90℃ 保留 4 min, 升温至 260℃, 保留 1 min), 载气为氮气, 柱流速 18.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 分流比为 15:1, 进样体积为 800 μL . DCM 测定条件: 汽化室温度 250℃, 检测器 (FID) 温度 300℃, 采用程序升温 (70℃ 保留 2 min, 升温至 260℃, 保留 3 min), 载气为氮气, 柱流速 20 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 分流比为 21:1, 进样体积为 800 μL .

混合废气各组份动力学分析: 采用 Michaelis-Menten 动力学模型^[15], 该动力学模型是基于以下 2 个假设: ① 不存在氧气限制; ② 降解是处于反应控制范围 (即生物活性处于较活跃状态). 此时, 微生物生长速率等于自身消亡速率, 可认为整个反应体系处于生物平衡状态, 其动力学参数趋于定值.

$$\frac{(V/Q)}{c_{gi} - c_{go}} = \frac{K_s}{r_{max}} \times \frac{1}{c_{ln}} + \frac{1}{r_{max}}$$

式中, V 为生物滴滤塔体积, m^3 ; Q 为气体流量, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; c_{gi} 为进气浓度, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; c_{go} 为出气浓度, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; c_{ln} 为 $(c_{gi} - c_{go})/\ln(c_{gi}/c_{go})$, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; r_{max} 为最大表观降解速率, $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$; K_s 为表观饱和常数, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2 结果与讨论

2.1 BTF 系统的挂膜启动阶段

挂膜启动阶段是该工艺的关键阶段, 填料层内生物膜挂膜的好坏直接影响其稳定运行及净化废气的效果^[16], 挂膜启动阶段持续时间长短也是该工艺运行的主要经济指标^[17], 这些都是衡量挂膜启动阶段是否完成的关键指标^[18]. 本实验所用填料取自净化单一 H_2S 废气的生物处理系统, 因此在挂

膜阶段主要考察原有微生物降解 H_2S 的效果及菌株 DT4 和 H13 的挂膜效果。

挂膜启动阶段的净化性能如图 2 所示,混合废气浓度在 5 d 内升高至预设浓度, H_2S 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、THF 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、DCM 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,EBRT 为 50 s,温度为 30°C ,喷淋量为 $6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在该运行条件下,BTF 系统对于 H_2S 去除效果十分理想,可在第 4 d 达到 90% 并逐渐升高至 99% 左右。相对于 H_2S 而言,降解 THF 和 DCM 的菌株 DT4 和 H13 则是一个完整的纯菌在生物滴滤塔中挂膜的过程,王丽萍等^[19]报道了在生物滴滤系统净化甲苯废气快速启动过程中,在一定进口浓度和 EBRT 条件下,当去除率和去除负荷不再发生显著变化时,认为系统挂膜启动完成。其中 DT4 在 BTF 中经过 28 d 后去除率达到 65% 以上,且其去除率一直稳定在 60% ~ 70% 之间,可认为该菌株挂膜完成,H13 在 BTF 中的去除率经过 20 d 后达到 90% 左右,可认为该菌株完成挂膜。对于整个 BTF 系统而言,挂膜启动阶段需要将近 30 d 左右,其各项检测指标也趋于稳定,详见表 1。相比较而言,单一废气种类的挂膜时间比混合废气要短很多,一般能够在 10 d 左右完成挂膜阶段^[20],但是不同种类废气的挂膜时间还是存在很大差异,Ergas 等^[21]

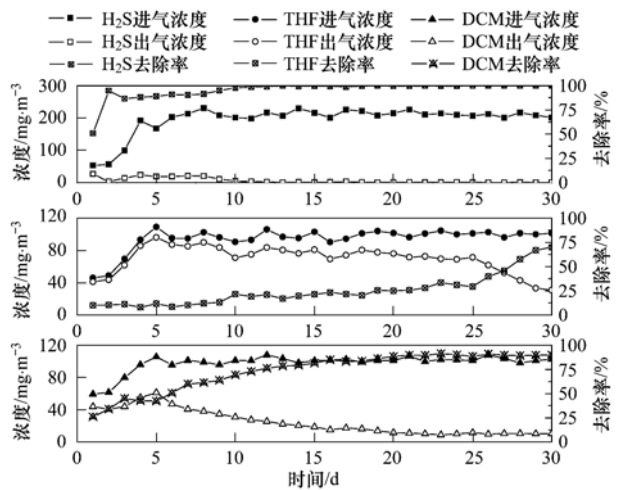


图 2 挂膜启动阶段 BTF 的净化性能

Fig. 2 Performance of BTF during start-up stages of operation

表 1 挂膜阶段完成时 BTF 的运行参数

Table 1 Parameters of BTF after start-up stages

混合废气	进气浓度 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	BTF 去除率 /%	BTF 去除负荷 / $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$
H_2S	200 ± 20	100	17 ± 1
THF	100 ± 10	65 ± 5	5 ± 0.5
DCM	100 ± 10	89 ± 2	7.5 ± 0.5

利用生物滤池驯化降解甲苯的微生物只需要两周,但是驯化降解 DCM 的微生物则要超过 10 周。

2.2 EBRT 对运行性能的影响

BTF 系统挂膜完成后,在 H_2S 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、THF 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、DCM 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,温度为 30°C ,喷淋量为 $6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下,考察其在不同的 EBRT 条件下的稳定运行情况,对于 H_2S 、THF、DCM 混合废气的净化效果分别如图 3 ~ 5 所示。

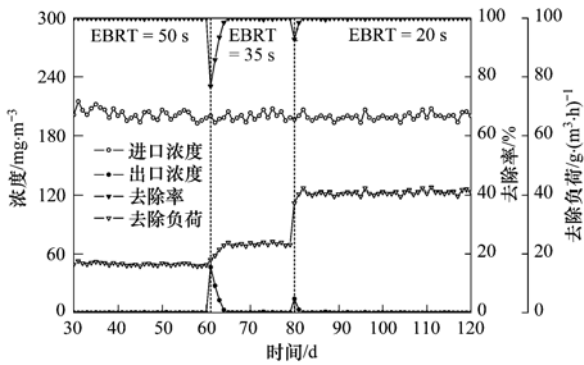


图 3 BTF 系统中 H_2S 的浓度变化

Fig. 3 Concentration changes of H_2S in BTF

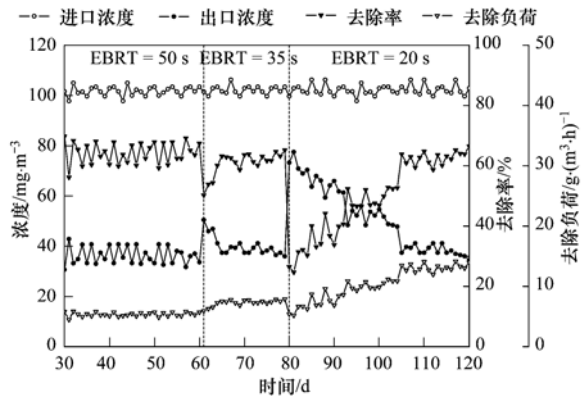


图 4 BTF 系统中 THF 的浓度变化

Fig. 4 Concentration changes of THF in BTF

由图 3 可知, H_2S 浓度在 $192.7 \sim 214.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内,EBRT 从 50 s 缩短至 20 s,其去除率都能维持在 99% 左右,而其去除负荷随着 EBRT 的缩短而增加并未达到最大去除负荷,这说明 BTF 系统对于 H_2S 的去除效果还能得到进一步的提升,可以进一步提高进气浓度或者缩短 EBRT。Gabriel 等^[22,23]用生物滴滤床处理污水厂 H_2S 废气的最大去除负荷为 $30 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$;褚淑祎等^[24]利用生物法处理高浓度 H_2S 废气的现场实验,其去除负荷为 $205 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 。

由图 4 可知, THF 浓度在 $97.9 \sim 106.3$

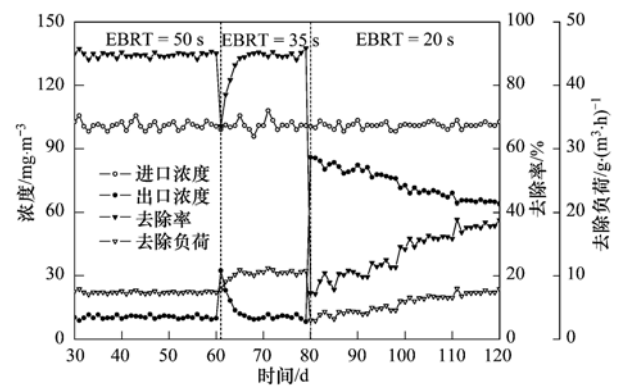


图5 BTF系统中DCM的浓度变化
Fig. 5 Concentration changes of DCM in BTF

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内,当EBRT为50 s时(即挂膜完成后),THF的去除率和去除负荷分别维持在65%和 $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右.随着EBRT缩短为35 s后,其去除率出现短暂下降,之后能继续恢复至60%左右.但是当EBRT缩短为20 s后,其去除效果出现明显下降,需要较长时间才能恢复至较高的去除率.这说明BTF系统对于THF的去除效果已经接近饱和,对于THF的高效净化需要较长的EBRT.

由图5可知,DCM浓度在 $95.8\sim107.9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内,当EBRT为50 s和35 s时,其去除率都能稳定在90%左右.但是当EBRT缩短为20 s后,其运行效果如THF一样出现急剧的下降,经过较长时间后仍无法恢复到原有去除率,只能维持在35%左右.这说明BTF系统对于DCM的去除效果也已经接近饱和,其去除负荷在EBRT为20 s时小于EBRT为35 s时,说明还有其他外在因素影响其去除效果.

上述结果表明,BTF系统对于 H_2S 、THF、DCM混合废气在EBRT较长的条件下具有较好且较稳定的去除效果.在EBRT较短的条件下, H_2S 的去除效果仍能维持在99%左右;而THF只能维持在60%左右并且由于EBRT导致的去除率降低幅度较大且恢复较慢;而DCM的去除率则是无法恢复到原有去除效果.在进气浓度一定的条件下,去除负荷只与去除率和EBRT有关,比较混合废气在不同EBRT条件下的去除负荷变化可知,单纯的缩短EBRT对于DCM去除效果影响最大,说明DCM的生物降解过程相对于 H_2S 和THF而言较缓慢.

2.3 降解混合废气的动力学研究

混合废气的去除效果与许多因素有关,如填料性质、混合废气各组分自身性质、微生物活性等.利用Michaelis-Menten动力学模型对混合废气各组

分BTF中的去除特性进行动力学分析,结果如图6所示,拟合所得到的动力学参数如表2所示.

实验数据与Michaelis-Menten动力学模型符合程度较好,拟合曲线的相关系数均能够达到0.96以上.表观饱和常数 K_s 是表征污染物在滴滤塔内传质性能的动力学常数之一, K_s 值越大表明污染物的传质性能越好^[25].由于混合废气各组分的水溶性有差异,若生物滴滤塔内湿度较大,则填料表面将形成较厚的液膜层,会抑制混合废气从气相扩散进入液相.同时各组分在传质时也存在一定的竞争机制,进而影响后续生物降解过程.混合废气中,表观饱和常数 K_s 及最大表观降解速率 r_{max} 从大到小均为 $\text{H}_2\text{S}>\text{THF}>\text{DCM}$.根据亨利定律可知, H_2S 、THF和DCM在常温下的亨利系数分别为864.5、7.1和328.3 k_p,由于 H_2S 在该实验条件下易溶于水而不符合亨利定律,THF和DCM在气相分压接近时,THF的液相分压明显高于DCM.这说明,在BTF系统净化 H_2S 、THF和DCM混合废气的过程中, H_2S 在气液传质方面表现出明显优势,因此其降解效果明显优于THF和DCM;而THF和DCM之间,THF则具有较好的气液传质性能和较大的去除负荷.

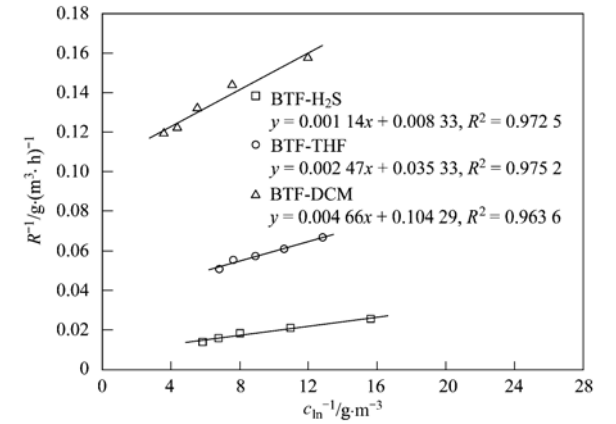


图6 混合废气的Michaelis-Menten模型拟合图
Fig. 6 Fitting curves of mixed waste gases by the Michaelis-Menten model

表2 混合废气的Michaelis-Menten动力学常数

Table 2 Michaelis-Menten dynamics constant of mixed waste gases		
处理单元	$r_{\text{max}}/\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$	$K_s/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
BTF- H_2S	120.5	0.133
BTF-THF	28.3	0.071
BTF-DCM	9.4	0.042

3 结论

(1) 本实验针对 H_2S 、THF和DCM混合废气设计的BTF系统,采用纯菌挂膜方式,能够在30 d

左右完成挂膜,实验表明混合废气的挂膜时间比单一废气的挂膜时间长。

(2) BTF 对于 H_2S 、THF 和 DCM 混合废气具有良好的去除效果,在 H_2S 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、THF 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、DCM 为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, EBRT 为 50 s,温度为 30°C , pH 为 6.0,喷淋量为 $6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下, H_2S 、THF 和 DCM 的去除率分别能达到 99%、65% 和 90% 左右。EBRT 的缩短会使 H_2S 、THF 和 DCM 混合废气的去除率下降,根据实际情况合理选择 EBRT 对于实际工程应用具有重要的意义。

(3) 通过对 H_2S 、THF 和 DCM 混合废气动力学研究,结果表明 BTF 对于混合废气的去除效果为 $\text{H}_2\text{S} > \text{THF} > \text{DCM}$ 。根据稳定期实际运行情况显示,在 EBRT(35 s) 较长时,去除效果为 $\text{H}_2\text{S} > \text{DCM} > \text{THF}$,而在 EBRT(20 s) 较短时,去除效果为 $\text{H}_2\text{S} > \text{THF} > \text{DCM}$,符合动力学情况。

参考文献:

- [1] Basu S, Gu Z C A, Shilinsky K A. Application of packed scrubbers for air emissions control in municipal wastewater treatment plants[J]. *Environmental Progress*, 1998, **17**(1): 9-18.
- [2] Gero L, Arthur M W. Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1991, **41**(8): 1045-1054.
- [3] Malhautier L, Khammar N, Bayle S, *et al.* Biofiltration of volatile organic compounds [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **68**(1): 16-22.
- [4] Syed M, Soreanu G, Falletta P, *et al.* Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes-A review[J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2006, **48**(2): 1-14.
- [5] 邵立明,何晶晶,傅钟,等. 固定化微生物处理含 H_2S 气体的实验研究[J]. *环境科学*, 1999, **20**(1): 19-22.
- [6] 陈建孟,王家德,唐翔宇. 生物技术在有机废气处理中的研究进展[J]. *环境科学进展*, 1998, **6**(3): 30-36.
- [7] Iranpour R, Cox H H J, Deshusses M A, *et al.* Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal [J]. *Environmental Progress*, 2005, **24**(3): 254-267.
- [8] 孙珮石,王洁,吴献花,等. 生物法净化处理低浓度挥发性有机及恶臭气体[J]. *环境工程*, 2006, **24**(3): 38-41.
- [9] Manconi I, Lens P N L. Removal of H_2S and volatile organic sulfur compounds by silicone membrane extraction[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, **84**(1): 69-77.
- [10] 钱东升,房俊逸,陈东之,等. 板式生物滴滤塔高效净化硫化氢废气的研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2786-2793.
- [11] Chen J M, Zhou Y Y, Chen D Z, *et al.* A newly isolated strain capable of effectively degrading tetrahydrofuran and its performance in a continuous flow system [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(16): 6461-6467.
- [12] Cox H H, Deshusses M A, Converse B M, *et al.* Odor and volatile organic compound treatment by biotrickling filters Pilot-scale studies at Hyperion treatment plant[J]. *Water Environment Research*, 2002, **74**(6): 557-563.
- [13] 周玉央,陈东之,金小君,等. 食油假单胞菌 DT4 菌株对四氢呋喃(THF)的降解特性[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 266-271.
- [14] Wu S J, Zhang L L, Chen J M, *et al.* *Bacillus circulans* WZ-12-a newly discovered aerobic dichloromethane degrading methylotrophic bacterium [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **76**(6): 1289-1296.
- [15] Mathur A K, Majumder C B. Biofiltration and kinetic aspects of a biotrickling filter for the removal of paint solvent mixture laden air stream[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 1027-1036.
- [16] Michaud S, Bernet N, Buere P, *et al.* Methane yield as a monitoring parameter for the start-up of anaerobic fixed film reactors[J]. *Water Research*, 2002, **36**(5): 1385-1391.
- [17] 田鑫,廖强,朱恂,等. 陶瓷球填料生物膜滴滤塔挂膜启动工艺及对甲苯废气的净化性能实验研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 834-840.
- [18] 倪建国,吴成强,朱润晔,等. 生物滴滤塔反硝化净化 NO 废气的启动[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(5): 444-448.
- [19] 王丽萍,吴光前,何士龙,等. 高效生物滴滤系统净化甲苯废气快速启动研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, **36**(4): 446-449.
- [20] 尚巍,王启山,石磊,等. 生物滤塔处理 VOCs 的挂膜启动方法研究[J]. *城市环境与城市生态*, 2002, **15**(2): 41-43.
- [21] Ergas S J, Veir J, Kinney K. Control of dichloromethane emissions using biofiltration [J]. *Journal of Environmental Science*, 1996, **31**(7): 1741-1754.
- [22] Gabriel D, Deshusses M A. Retrofitting existing chemical scrubbers to biotrickling filters for H_2S emission control [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2003, **100**(11): 6308-6312.
- [23] Gabriel D, Deshusses M A. Performance of a full-scale biotrickling filter treating H_2S at a gas contact time of 1. 6-2. 2seconds[J]. *Environmental Progress*, 2003, **22**(2): 111-118.
- [24] 褚淑祎,陈建孟,沙昊雷,等. 生物法处理高浓度 H_2S 废气的现场试验[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 431-436.
- [25] Mathur A K, Sundaramurthy J, Balomajumder C. Kinetics of the removal of mono-chlorobenzene vapour from waste gases using a trickle bed air biofilter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **137**(3): 1560-1568.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 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