

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)	

微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究

曹晓强¹, 张浩², 黄学敏³

(1. 山东科技大学化学与环境工程学院, 青岛 266590; 2. 山东省环境保护科学研究设计院, 济南 250013; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 以甲苯为目标污染物, 采用活性炭做吸附剂对含甲苯废气进行吸附; 吸附完成后利用微波辐照进行解吸; 另外采用浸渍法制备 Cu-Mn 复合氧化物催化剂并对微波解吸后的废气进行催化燃烧处理从而达到对污染物进行彻底净化的目的. 实验中甲苯的浓度由气相色谱 (GC) 测定. 结果表明, 采用微波解吸后, 在以氮气为载气的解吸气体中加入空气来提供氧气从而实现催化燃烧是可行的, 解吸气与空气配比为 1:1 (体积比) 时效果最好, 此时对应的催化空速为 2.67 s^{-1} . 解吸温度会影响解吸气体中的甲苯浓度进而影响催化燃烧效率, 实验结果表明 400°C 解吸比较理想. 当催化燃烧温度保持在 300°C 时, 系统对甲苯的最终净化效率可以维持在 90% 以上, 其中大部分时间是在 95% 以上.

关键词: 微波; 解吸; 催化燃烧; 活性炭; 挥发性有机化合物 (VOCs); 甲苯

中图分类号: X701.7 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2546-06

Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment

CAO Xiao-qiang¹, ZHANG Hao², HUANG Xue-min³

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Academy of Environmental Science, Ji'nan 250013, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Using activated carbon as adsorbent, toluene waste gas was treated by adsorption process. After the adsorption process was completed, the adsorbent was desorbed by microwave irradiation; then Cu-Mn oxide composite catalysts were prepared by impregnation and the desorbed toluene gas was treated by catalytic combustion so as to completely purify the pollutant. The concentration of toluene was measured by gas chromatography (GC). The results indicated that it is feasible to add air to provide oxygen to the desorbed gas after the completion of the desorption process, in order to achieve the catalytic combustion; the ratio of desorbed gas and air was 1:1 (volume ratio), and the corresponding catalytic space velocity was 2.67 s^{-1} . Desorption temperature could affect the concentration of toluene in the desorption gas thereby affecting the catalytic combustion efficiency; the results indicated that 400°C was an appropriate temperature for desorbing the activated carbon. When the catalytic combustion was kept at 300°C , the final toluene treatment efficiency was higher than 90%, which was higher than 95% during the most time of the treatment process.

Key words: microwave; desorption; catalytic combustion; activated carbon; volatile organic compounds (VOCs); toluene

挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 对环境危害极大, 许多 VOCs 即使浓度较低, 但依然具有很强的致癌性^[1]. 活性炭吸附法处理挥发性有机化合物具有净化效率高、适应性强等特点. 为了降低净化成本以及避免造成二次污染, 在完成吸附后对吸附剂进行再生是值得研究的问题. 已报导的解吸再生技术包括: 电加热解吸^[2~6], 高温惰性气体解吸^[7,8], 超临界流体解吸^[9~11], 微波解吸^[12~16]等.

在各种解吸方法中, 微波加热解吸是一种相对新颖的解吸方法. 由于微波加热具有内外同热、加热效率高、节约能源等优点^[17], 因此可以提高解吸速率和解吸效率.

微波解吸过程会产生高浓度的含 VOCs 废气.

为了避免二次污染, 采取措施将废气中的 VOCs 分解掉是一种经济、技术均具有可行性的方案. 现阶段消除法净化 VOCs 的技术中, 研究最多的是催化燃烧技术^[18~25]. 大量的研究报导及工程实例均证明了该技术的有效性.

针对常见 VOCs 的性质以及现有技术的特点, 本研究将吸附、微波解吸、催化燃烧 3 种技术进行结合. 以甲苯作为目标污染物, 首先通过活性炭吸附将 VOCs 进行富集, 然后利用微波辐照使吸附剂在较短的时间解吸, 最后将解吸气体送入催化燃烧

收稿日期: 2012-10-29; 修订日期: 2012-12-16

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2006E210); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (06JK269); 山东省博士后创新项目专项资金项目 (201202028)

作者简介: 曹晓强 (1980 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境吸附材料、气态污染物控制, E-mail: xiaoqiangcao@126.com

装置进行催化净化。

本研究属于一种多方法的技术集成,通过研究可以提高常规低浓度 VOCs 的净化效率并且能够避免环境的二次污染,从而丰富现有的 VOCs 控制理论。

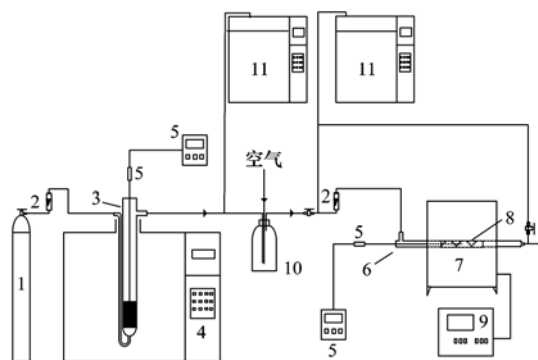
1 材料与方法

1.1 实验材料

本次实验所采用的活性炭是椰壳基颗粒活性炭(GAC),相关参数为:粒径 0.6~2.0 mm;比表面积 $\geq 800 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;孔容积 $\geq 0.95 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。其他试剂包括:甲苯(分析纯); N_2 (99.99%)。根据课题组研究结果,催化剂选用以 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为载体的铜锰复合氧化物催化剂(催化剂负载量为 8%,催化剂中 Cu、Mn 原子比例为 1:2)^[19]。

1.2 实验装置及实验流程

实验装置如图 1 所示。可以将整个装置分为解吸单元、气体混合单元、催化燃烧单元 3 个主要单元以及温度测量及甲苯浓度测定 2 个辅助单元。以下分别对这几个单元的运行情况进行说明。



1. 高纯氮气; 2. 流量计; 3. 活性炭解吸管; 4. 微波实验仪;
5. 测温装置; 6. 催化反应管; 7. 管式电炉; 8. 催化剂;
9. 温度控制器; 10. 气体混合、缓冲瓶; 11. 气相色谱

图 1 微波解吸-催化燃烧处理含甲苯废气实验装置示意

Fig. 1 Schematics of microwave desorption-catalytic combustion system for toluene treatment

1.2.1 解吸单元

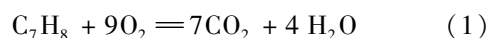
将吸附(甲苯)饱和后的活性炭(原始活性炭质量 = 2.0 g)置于石英管中,在高纯氮气气氛(载气线速 $7.34 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)下进行微波加热解吸,解吸装置为 MCL-2 型微波化学实验仪(四川大学)。

1.2.2 气体混合单元

由于微波解吸采用氮气作为载气,因此在进行催化燃烧前需要在解吸气体中加入氧气。综合考虑

后,实验决定直接采用空气来提供催化燃烧所需的氧气。具体分析如下。

根据甲苯完全氧化分解的反应方程式:



即使解吸装置出口气体中甲苯的浓度达到并维持在 $50\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,理论上完全氧化 1 m^3 解吸气体中的甲苯所需要的氧气也仅为 109.6 L(标准状况)左右,也就是 0.5 m^3 的空气就可以满足要求。根据本研究中微波解吸的实验结果可知,高浓度甲苯只会在很短的时间内出现,按照本实验采用的解吸温度,解吸过程中甲苯平均浓度不会超过 $6\,600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由于实验中存在气体缓冲瓶,因此会使甲苯与外加空气均匀混合从而降低催化燃烧装置入口处的甲苯浓度。本实验中解吸用氮气与配给空气的体积流量比最大拟选为 $Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}}=1:0.5$,另外两个配比拟分别选为 1:1 和 1:1.5,根据以上分析再考虑到催化燃烧过程中部分甲苯存在不完全分解,实验配给的空气是能够保证催化燃烧过程顺利进行的。

1.2.3 催化燃烧单元

解吸后的尾气在缓冲瓶中与空气混合完全后进入催化燃烧装置。催化反应器(圆柱形)内径 17 mm,催化温度 300°C ,催化剂装填量为 7 cm^3 。

1.2.4 温度测量及甲苯浓度测定单元

实验采用 TFMA 型数字温度计对解吸温度进行测定^[26]。解吸装置出口、催化装置入口和出口处的甲苯浓度采用气相色谱(Agilent 6890N)进行测定。

2 结果与讨论

2.1 微波解吸载甲苯活性炭研究

实验首先测定了不同解吸温度下载甲苯活性炭在微波辐照下的解吸曲线,实验结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,微波解吸的特点是解吸初期

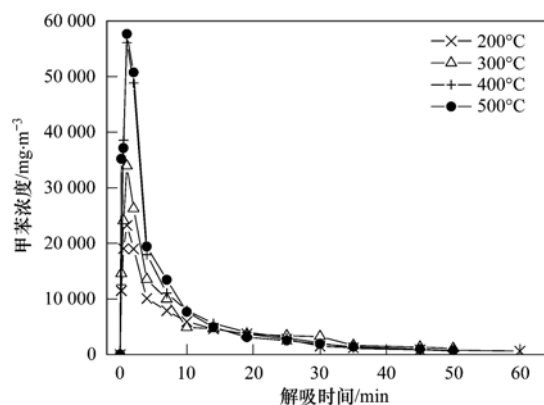


图 2 不同解吸温度下的解吸曲线对比

Fig. 2 Toluene desorption curve at different temperature

甲苯浓度迅速上升,解吸气体中甲苯最高浓度达到了 $58\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右;随着解吸的进行,甲苯浓度快速下降,在解吸时间超过 $30\ \text{min}$ 后甲苯浓度已经趋于稳定,后续解吸过程中甲苯浓度呈缓慢下降趋势。不同解吸温度下的解吸效果总体可以分成2种情况,温度超过 400°C 时,解吸效果较好, 400°C 和 500°C 对应解吸效果差别不大, $50\ \text{min}$ 后两者对应的解吸效率分别为 90.4% 和 92.2% ;温度低于 300°C 时,解吸气体中甲苯的浓度明显低于 400°C 和 500°C 的情况, $50\ \text{min}$ 后的解吸效率最高仅为 71.9% ,解吸效果较差。

2.2 空气配给量对催化燃烧效率的影响

由2.1节可知,整个解吸过程中甲苯浓度的波动幅度很大,不利于后续催化燃烧实验。因此本实验通过增加气体缓冲瓶的措施加以解决,气体缓冲瓶的另一个重要作用是引入外部空气从而为催化燃烧提供氧气。含甲苯废气与空气在缓冲瓶中均匀混合后,形成甲苯浓度基本稳定的混合气体,有利于后续催化燃烧过程的稳定运行。

由于空气是解吸完成后引入的,因此空气配给量除了直接影响混合气体中氧气的含量还会影响体系中总气流量大小进而影响催化燃烧的空速,这些都会影响催化燃烧效率,因此有必要进行研究考察。通过1.2.2节分析可知,实验中解吸用氮气与配给空气的体积流量比 $Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}}$ 最大值选为 $1:0.5$,在此基础上另外选择2个稍小的流量比 $1:1$ 和 $1:1.5$ (3种配比对应的催化燃烧空速分别为 2.0 、 2.67 和 $3.34\ \text{s}^{-1}$)。通过对以上3种不同的气体配比进行研究,考察空气配给量对催化燃烧效率的影响。本节首先采用 300°C 进行解吸,避免高温解吸导致的甲苯浓度过大影响实验。实验结果如图3~6所示。

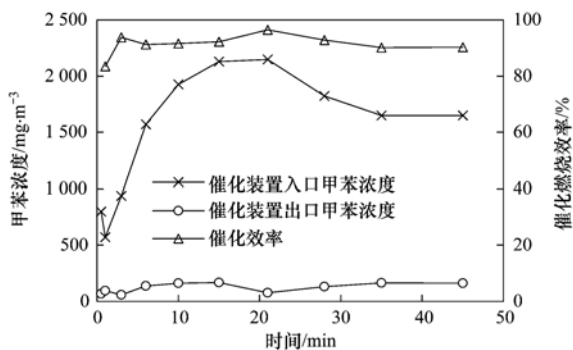


图3 空气配比对微波解吸-催化燃烧处理过程的影响 ($Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}} = 1:0.5$)

Fig. 3 Influence of air and effluent gas ratio on the microwave desorption-catalytic combustion process ($Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}} = 1:0.5$)

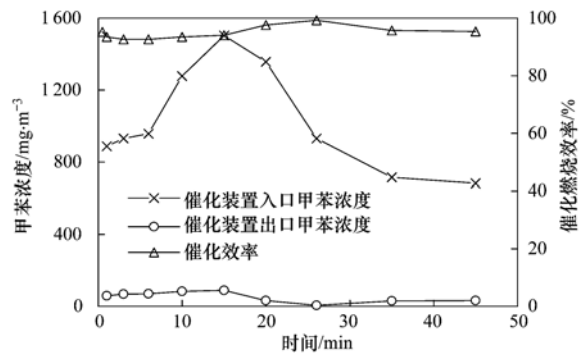


图4 空气配比对微波解吸-催化燃烧处理过程的影响 ($Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}} = 1:1$)

Fig. 4 Influence of air and effluent gas ratio on the microwave desorption-catalytic combustion process ($Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}} = 1:1$)

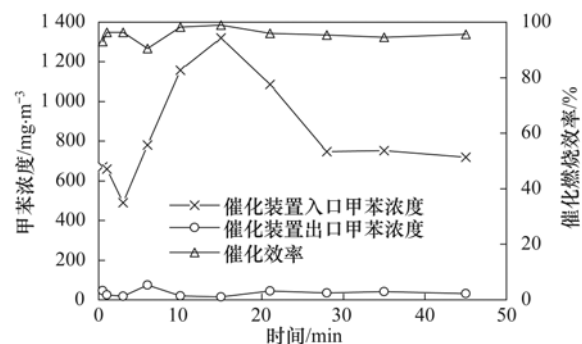


图5 空气配比对微波解吸-催化燃烧处理过程的影响 ($Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}} = 1:1.5$)

Fig. 5 Influence of air and effluent gas ratio on the microwave desorption-catalytic combustion process ($Q_{\text{N}_2}:Q_{\text{air}} = 1:1.5$)

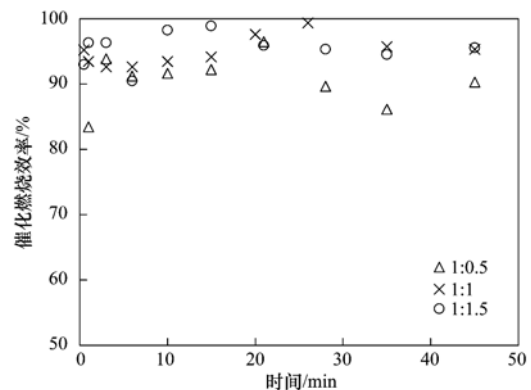


图6 不同气体配比下甲苯催化燃烧效率对比

Fig. 6 Influence of air and effluent gas ratio on the toluene catalytic combustion process

通过图3~5可以看出,催化装置入口的甲苯浓度在实验初始阶段有一定的波动,实验中后期则相对平稳;催化燃烧效率曲线的变化情况也符合这一规律,说明缓冲瓶的存在起到了相应的作用,能够促进催化燃烧过程的稳定运行。因此即使不考虑外加

空气的混合问题,缓冲装置的存在也是十分必要的。在不同空气配给量的情况下,进入催化反应器的气体中甲苯的浓度也有一定差别。空气配给量越低,甲苯浓度越高同时整个过程中甲苯浓度的变化幅度也越大,随着空气量的加大,甲苯浓度逐渐降低,浓度变化的幅度也逐渐减小同时催化效率的变化幅度也相应减少。出现这个问题的原因主要是空气量太小导致两种气体的混合不够均匀,从而导致了氧气在整个混合气体中分布的不均匀。同时,空气量过低也导致混合体系中氧的过剩系数较低。这些都会影响到催化燃烧效率。

通过图 6 可以看出,总体是空气量越小,催化燃烧效率越低。但是对于 $Q_{N_2}:Q_{air}$ 为 1:1 和 1:1.5 这两种情况来说,两者的差别并不大。这是由于 1:1.5 的情况下可以提供更多的氧气并且能够降低催化装置入口处的甲苯浓度,因此催化效率有所提高;但是大气量也会导致催化燃烧空速的增加,同时甲苯浓度降低也使得单位体积气体催化放热量有所减少,两相抵消使得最终的效率相比 1:1 的情况并没有太大变化。对于本次实验来说,继续增加空气的配给量是没有好处的,这样不但增大了空速,而且降低了甲苯的浓度,降低了催化剂床层的温度;而催化燃烧反应并不像吸附那样浓度越低效率越高,由于催化燃烧反应一般要求有机废气的浓度在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上^[27],因此根据实验结果分析,再加大空气配给是不合适的。通过对图 3~6 的综合分析后认为,解吸 N_2 与外加空气的配比在 1:1 左右是合适的。

2.3 不同解吸温度对催化燃烧效率的影响

由 2.1 节的结果可知,解吸温度对于解吸气体中的甲苯浓度影响很大。因此,经过分析后本实验选取了 400°C 和 300°C 这两个具有代表性的温度,研究不同解吸温度对催化燃烧过程的影响。实验选用 $Q_{N_2}:Q_{air}=1:1$, 实验结果如图 7~9 所示,其中 300°C 下的实验结果参见图 4。

通过图 7~9 并结合图 4 可以看出,提高解吸温度以后,由于解吸气体中甲苯浓度的上升导致了催化反应装置入口处甲苯浓度的提高,最高浓度超过了 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。实际上保持一定的浓度可以提高催化燃烧放热量,对于催化燃烧具有促进作用;在整个 400°C 解吸过程中,催化反应器入口的甲苯浓度基本都保持在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,因此该温度更加具有优势。对比发现,虽然 400°C 解吸时催化装置入口处甲苯浓度有所提高,但催化燃烧效率并没有

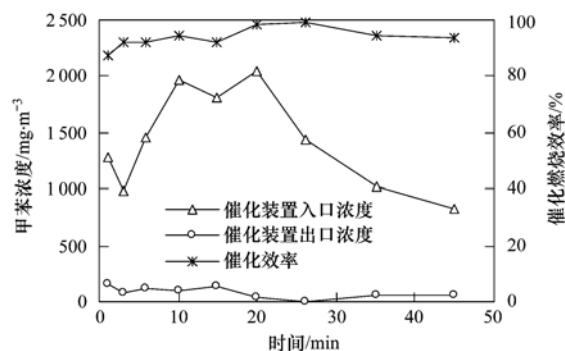


图 7 400°C 解吸时甲苯的催化燃烧过程曲线 ($Q_{N_2}:Q_{air}=1:1$)

Fig. 7 Toluene catalytic combustion process curve at desorption temperature of 400°C ($Q_{N_2}:Q_{air}=1:1$)

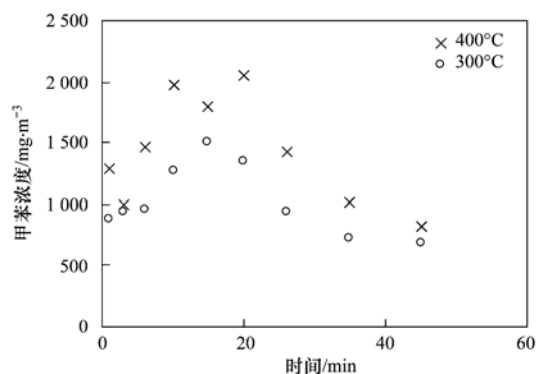


图 8 解吸温度对催化反应器入口甲苯浓度的影响

Fig. 8 Influence of desorption temperature on the toluene concentration of reactor inlet

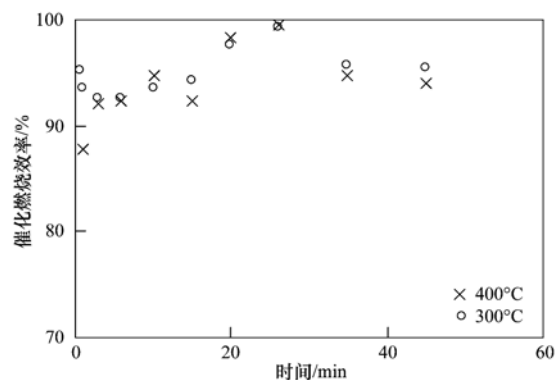


图 9 不同解吸温度下甲苯催化燃烧效率对比

Fig. 9 Comparison of catalytic combustion efficiency for toluene treatment at different desorption temperature

明显下降,表明反应装置具有一定的抗冲击负荷能力。考虑到 2.1 节中 2 种解吸温度对应的解吸效果差别较大,因此认为实验采用 400°C 解吸是合理的。在系统的整个运行过程中,甲苯的最终净化效率都维持在 90% 以上,其中大部分时间是在 95% 以上,说明系统具有较高的甲苯去除能力及运行稳定性。

由于微波解吸具有解吸迅速、催化效率高、运行稳定的优点,并且该技术不需要采用水蒸气作为解吸气,因此解吸后的气体可以直接进行催化燃烧;另外,由于解吸气体本身有一定的温度,对于预热装置的要求也有所降低从而降低了解吸-催化燃烧工艺的复杂程度,这也是本研究所采用的微波解吸-催化燃烧技术所具备的最鲜明特点。

3 结论

(1)微波解吸后的含甲苯废气可以先与外部空气混合后再进行催化燃烧,解吸气体与外部空气的体积流量比 1:1 较合理。

(2)解吸温度的提高会提高催化燃烧装置入口甲苯的浓度,实验结果表明解吸温度设定为 400℃ 较合理。

(3)解吸温度 400℃、催化燃烧温度 300℃、空速为 2.67 s^{-1} 时,实验系统对甲苯的净化效率大于 90%,其中大部分时间可以维持在 95% 以上。

参考文献:

- [1] Mudliar S, Giri B, Padoley K, *et al.* Bioreactors for treatment of VOCs and odours-A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(5): 1039-1054.
- [2] Yu F D, Lin G L, Grevillot G. Electrothermal swing adsorption of toluene on an activated carbon monolith: Experiments and parametric theoretical study [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, **46**(1): 70-81.
- [3] Cloirec P L. Adsorption onto activated carbon fiber cloth and electrothermal desorption of volatile organic compound (VOCs): A specific review[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, **20**(3): 461-468.
- [4] Zhang W W, Qu Z P, Li X Y, *et al.* Comparison of dynamic adsorption/desorption characteristics of toluene on different porous materials[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 520-528.
- [5] Conti-Ramsden M G, Brown N W, Roberts E P L. The combination of adsorbent slurry sorption with adsorbent electrochemical regeneration for VOC removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **198-199**(1): 130-137.
- [6] Carratalá-Abril J, Lillo-Ródenas M A, Linares-Solano A, *et al.* Regeneration of activated carbons saturated with benzene or toluene using an oxygen-containing atmosphere [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, **65**(6): 2190-2198.
- [7] Hwang K S, Choi D K, Gong S Y, *et al.* Adsorption and thermal regeneration of methylene chloride vapor on an activated carbon bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, **52**(7): 1111-1123.
- [8] Lee D G, Kim J H, Lee C H. Adsorption and thermal regeneration of acetone and toluene vapors in dealuminated Y-zeolite bed[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, **77**(3): 312-324.
- [9] Riviera C J, Ferro Garcia M A, Bautista T I, *et al.* Regeneration of *ortho*-chlorophenol-exhausted activated carbons with liquid water at high pressure and temperature [J]. *Water Research*, 2003, **37**(8): 1905-1911.
- [10] Tan C S, Lee P L. Supercritical CO₂ desorption of toluene from activated carbon in rotating packed bed [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2008, **46**(2): 99-104.
- [11] Cristancho D E, Guzman J D, Taylor C, *et al.* Supercritical extraction of volatile organic components from polyethylene pellets [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2012, **69**(1): 124-130.
- [12] 曹利, 庄剑恒, 黄学敏, 等. 活性炭吸附-微波解吸处理含甲苯废气研究[J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2008, **40**(4): 499-503.
- [13] Kim K J, Kim Y H, Jeong W J, *et al.* Adsorption-characteristics of volatile organic compounds over various zeolites and their regeneration by microwave irradiation [J]. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2007, **165**(1): 223-226.
- [14] Cherbański R, Molga E. Intensification of desorption processes by use of microwaves-An overview of possible applications and industrial perspectives [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, **48**(1): 48-58.
- [15] Polaert I, Estel L, Huyghe R, *et al.* Adsorbents regeneration under microwave irradiation for dehydration and volatile organic compounds gas treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(3): 941-948.
- [16] Kim K J, Ahn H G. The effect of pore structure of zeolite on the adsorption of VOCs and their desorption properties by microwave heating [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, **152**(1): 78-83.
- [17] 金钦汉, 戴树珊, 黄卡玛. 微波化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 15-18.
- [18] Azalim S, Franco M, Brahmi R, *et al.* Removal of oxygenated volatile organic compounds by catalytic oxidation over Zr-Ce-Mn catalysts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 422-427.
- [19] 赵圣伟, 黄学敏, 曹晓强, 等. CuMnO₄/γ-Al₂O₃ 对含甲苯废气催化燃烧的性能研究 [J]. *环境工程*, 2008, **26**(5): 13-15.
- [20] Hosseini M, Barakat T, Cousin R, *et al.* Catalytic performance of core-shell and alloy Pd-Au nanoparticles for total oxidation of VOC: The effect of metal deposition [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2012, **111-112**: 218-224.
- [21] Ludvikova J, Jiratova K, Klempa J, *et al.* Titania supported Co-Mn-Al oxide catalysts in total oxidation of ethanol [J]. *Catalysis Today*, 2012, **179**(1): 164-169.
- [22] Ma C, Mu Z, He C, *et al.* Catalytic oxidation of benzene over nanostructured porous Co₃O₄-CeO₂ composite catalysts [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(12): 2078-2086.
- [23] Perez A, Lamonier J F, Giraudon J M, *et al.* Catalytic activity of Co-Mg mixed oxides in the VOC oxidation: Effects of ultrasonic

- assisted in the synthesis[J]. *Catalysis Today*, 2011, **176**(1): 286-291.
- [24] Saqr S M, Kondarides D I, Verykios X E. Catalytic oxidation of toluene over binary mixtures of copper, manganese and cerium oxides supported on γ - Al_2O_3 [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2011, **103**(3-4): 275-286.
- [25] Morales-Torres S, Maldonado-Hodar F J, Pérez-Cadenas A F, *et al.* Design of low-temperature Pt-carbon combustion catalysts for VOC's treatments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 814-822.
- [26] 曹晓强, 黄学敏, 刘胜荣, 等. 2 种改性活性炭对甲苯吸附性能的对比研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2868-2873.
- [27] 田森林, 宁平. 有机废气治理技术及其新进展[J]. *环境科学动态*, 2000, (1): 23-26.

第二届挥发性有机污染物(VOCs)检测分析、减排控制、环境政策研究专辑征稿通知

挥发性有机物污染对生态、环境、健康产生了重要的影响,从国家层面上 VOCs 已经被列为重点控制的污染物,对挥发性有机污染物的减排与控制有着迫切的需求,有关挥发性有机污染的研究已经引起政府、地方、企业和科研人员密切的关注。

为了支持国家挥发性有机污染减排与控制,更好地促进与提高有关我国挥发性有机污染的科学研究的科学研究,《环境科学》2011 年出版“挥发性有机污染物(VOCs)检测分析、减排控制、环境政策研究”专辑(中国科学院生态环境研究中心郝郑平研究员为专辑的特邀主编)。专辑出版后,引起了极大地反响和关注。

这一年多以来,我国挥发性有机污染的科学研究的科学研究取得了一定进步与发展,不断有作者和相关部门希望能继续此专辑的编辑。为了继续支持我国未来 VOCs 减排和控制,进一步促进我国挥发性有机污染 VOCs 研究的发展和深入,《环境科学》计划 2013 年出版第二届挥发性有机污染物(VOCs)检测分析、减排控制、环境政策研究专辑(非增刊),邀请中国科学院生态环境研究中心郝郑平研究员为本专辑特邀主编,并开展挥发性有机污染 VOCs 研究优秀论文评选。现诚挚邀请国内外挥发性有机污染 VOCs 研究领域的专家、学者、技术人员踊跃投稿。

征文范围

- 1) 挥发性有机污染(VOCs)的监测与分析
- 2) 挥发性有机污染(VOCs)的排放与特征
- 3) 挥发性有机污染(VOCs)的控制与过程
- 4) 挥发性有机污染(VOCs)的控制技术与设备
- 5) 挥发性有机污染(VOCs)的反应与转化
- 6) 挥发性有机污染(VOCs)的减排模式与政策
- 7) 挥发性有机污染(VOCs)的其它研究内容

征文要求

- 1) 稿件参考《环境科学》已发表论文格式,文章以 Word 文档为附件发送至:hjkk@rcees.ac.cn,电子邮件主题为“VOCs 专辑+文章题目”。《环境科学》已发表文章范文可在网站 www.hjkk.ac.cn 首页点击下载。
- 2) 稿件参考文献后须注明通讯联系人和第一作者详细邮政地址,邮编,电话,手机,电子信箱等。
- 3) 只接受中文投稿文章;综述类文章,导师应为第一作者,不接受第一作者为学生的综述类投稿。
- 4) 特别说明:本专辑不是增刊,而是在《环境科学》2013 年下半年正刊上刊出。

重要日期

论文投稿截止日期:2013 年 7 月 1 日

联系方式

联系人:李老師

地址:北京市海淀区双清路 18 号生态中心《环境科学》编辑部

邮编:100085

电话:010-62941102

传真:010-62849343

E-mail:hjkk@rcees.ac.cn

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, LU 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