

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

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

序	郝郑平 (4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳, 朱彬, 李用宇 (4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 王亘, 翟友存 (4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉, 朱彬, 高晋徽, 李用宇, 夏丽 (4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄 (4529)
四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响	韩丽, 王幸锐, 何敏, 郭卫广 (4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷 (4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春, 彭艳春, 谭吉华, 郝吉明, 柴发合 (4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷, 李红, 王学中, 张新民, 温冲 (4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银, 王秀艳, 高爽 (4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究	王浙明, 徐志荣, 叶红玉, 许明珠, 王晓星 (4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰, 王铁宇, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征	崔如, 马永亮 (4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源, 李建军, 廖东奇, 涂翔, 许玫英, 孙国萍 (4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开, 程赫明, 罗会龙 (4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清, 聂磊, 田刚, 李靖, 邵霞, 王敏燕 (4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强, 甘平, 杨乐, 戴子瑜, 祁世鸿, 贾建丽, 何绪文 (4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平, 杨乐巍, 房增强, 郭淑倩, 于妍, 贾建丽 (4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平, 王世杰, 赵欢欢, 伍斌, 韩春媚, 房吉敦, 李慧颖, 细见正明, 李发生 (4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林, 邱兆富, 何龙, 宴颖, 吕树光, 隋倩, 林匡飞 (4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超, 罗茜, 陈虎, 魏孜, 王子健, 许科文 (4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰, 徐建芬, 唐访良, 张明, 阮东德 (4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌, 律国黎, 任爱玲, 杜昭, 邢志贤, 韩鹏, 高博, 刘淑娅 (4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜, 成卓韦, 王家德, 活泼 (4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超, 赵梦升, 张丽丽, 陈建孟 (4669)
BF 和 BTf 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙, 於建明, 成卓韦, 蔡文吉 (4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德, 郑亮巍, 朱润晔, 俞云锋 (4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔, 郑亮巍, 毛玉波, 王家德 (4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞, 黄维秋, 王丹莉, 张琳, 杨光 (4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷, 杨国靖, 夏静芬 (4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟, 栾志强, 解强, 叶平伟, 李凯, 王喜芹 (4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章, 黄维秋, 杨光, 赵晨露, 王英霞, 蔡道飞 (4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖, 王敏燕, 张健, 何万清, 聂磊, 邵霞 (4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟, 于艳科, 陈进生, 何焜 (4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁, 刘玉海, 韦连梅, 叶招莲, 张善端 (4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春, 刘杰民, 付慧婷, 孙媛, 林文辉 (4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅, 张国宁, 任春, 邹兰, 魏玉霞 (4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅, 张国宁, 邹兰, 魏玉霞, 张明慧 (4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇, 李奇锋, 吕永龙 (4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强, 周刚, 钟琪, 赵金宝, 杨凯 (4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹, 隋立华, 郭亚逢, 马传军, 杨文玉, 高阳 (4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞, 李延明 (4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新, 王宇飞, 郝郑平, 王铮 (4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事 (4717) 《环境科学》征稿简则 (4742) 信息 (4528, 4626, 4693, 4700)	

微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究

张超^{1,2}, 赵梦升³, 张丽丽^{1*}, 陈建孟²

(1. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 2. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 3. 北京排水集团高碑店污水处理厂, 北京 100022)

摘要: 生物滴滤(BTF)是目前废气生物处理研究和应用最多的工艺,其长期运行填料层堵塞和运行性能恶化是该技术工程应用面临的共性科学技术难题. 本研究提出利用微量臭氧调控生物膜相,进而强化反应体系长期稳定运行. 结果表明,生物滴滤塔间歇通入 $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的微量臭氧,可延长反应体系的运行周期(本实验运行 180 d),并保证甲苯去除率维持在 80% 以上,最大去除负荷达到 $95 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,矿化率达到 87.1%. O_3 -BTF 的上、下段最大 AWCD 值分别为 0.90、1.08,明显高于 BTF 体系,表明微量臭氧在运行后期可明显改善生物膜的代谢活性. 床层特性与平均生物量表明,BTF 和 O_3 -BTF 运行后期,平均生物量分别为 $36.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $29.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,床层孔隙率分别为 55% 和 60%,压降分别为 103.2 Pa 和 44.1 Pa. 上述实验结果表明,生物滴滤降解甲苯长期运行过程中,微量臭氧能有效控制填料层堵塞和运行性能恶化,维持生物滴滤塔长期高效运行,并且对甲苯的去除和矿化具有一定的强化作用.

关键词: 生物滴滤; 挥发性有机物; 臭氧; 床层堵塞; 强化作用

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4669-06

Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation

ZHANG Chao^{1,2}, ZHAO Meng-sheng³, ZHANG Li-li¹, CHEN Jian-meng²

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 3. Beijing Gaobeidian Sewage Treatment Plant, Beijing 100022, China)

Abstract: Biological Trickling Filter(BTF) is the most widely applied bioreactor for waste gas purification. However, the biological clogging and performance deterioration during the long-term operation are considered to be common hurdles in its application. In this study, ozonation as a new control strategy was proposed for regulating biofilm thereby strengthening the long-term operation of BTF, which demonstrated significance from both engineering and science standpoints. BTF introduced with intermittent trace ozone ($40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) could achieve a longer duration of stable performance comparing with the conventional BTF. In this study, the O_3 -BTF was continuously operated for over 180 days. The removal efficiency, mineralization extent and the maximum elimination capacity (r_{max}) of O_3 -BTF was over 80%, 87.1% and $95 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The maximum AWCD values of the upper and lower sections in the O_3 -BTF were higher than those of the control BTF, illustrating the trace ozone could improve the metabolic activity of the biofilm. In the later period, the porosities of the control BTF and O_3 -BTF were 55% and 60%, respectively, pressure drops of the control BTF and O_3 -BTF were 103.2 Pa and 44.1 Pa, respectively, and the average biomass contents were $36.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $29.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in the respective reactors. Based on the above results, the trace ozone could effectively prevent the clogging of the medium and performance deterioration, thus keep BTF continuously operating for a longer period. Besides, ozonation could enhance the long-term operation efficiency, toluene elimination capacity and mineralization rate of the BTF.

Key words: biotrickling filter; VOCs; ozone; clogging; augmentation

挥发性有机物(VOCs)和恶臭废气等的大量排放引起了城市灰霾、光化学烟雾等区域大气环境问题,严重威胁人类健康与生态安全. 生物法已成为中低浓度 VOCs 废气排放控制的主流技术之一,而生物滴滤工艺是目前废气生物处理最常见,也是应用最多的工艺^[1-3]. 随着反应器的启动和运行,微生物体逐渐聚集并黏附在填料表面形成生物膜,废气组分从气相传递到生物膜相,被微生物降解和利用,而同时菌体也会不断繁殖并积累在填料层中.

大量研究表明^[4-8],生物膜的过度生长和非均匀性分布是导致反应体系填料层堵塞、发生短流和沟流、压降增加和运行性能恶化等的根本原因. 因此,研究调控生物滴滤反应体系生物膜相生长和分布的有效技术方法,有望从本质上解决反应体系长

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177116)

作者简介: 张超(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为废气生物处理技术, E-mail: 936347601@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangll@mail.buct.edu.cn

期运行所面临的填料层堵塞和运行性能恶化等共性技术难题,进而保证反应体系的持续高效稳定运行,这也是目前该技术在其应用基础领域的研究热点。

生物滴滤塔中关于生物量控制技术的研究相对较少,已报道的方法主要包括物理法、化学法和生物法(微型动物捕食)等。物理法主要是利用机械和水力剪切力从填料层去除额外的生物量。例如,Rupert 等^[9]在生物滴滤塔内安装可旋转的水平圆柱管控制填料表面生物量。物理方法能够有效控制填料层表面的生物量,但其所导致投资和运行费用的增加制约了其在工业应用中的推广。化学法主要包括碳、氮等营养源的控制和采用含有化学试剂的水溶液反冲洗等^[10~12],其可控制生物量的过度生长,但反应器的重新启动需要较长的驯化周期。生物法主要是基于食物链的生态规则,利用原生和后生微型动物的捕食控制生物量^[13],但其应用于废气净化反应器控制填料层生物量尚处于探索的初级阶段^[2]。

臭氧氧化首先被应用于难降解工业废水的预处理,也有研究者将其用于污水深度处理和消毒;在废气治理领域,有采用臭氧氧化 VOCs 废气的相关报道^[14~16]。近年来,也有研究者提出利用臭氧调控膜生物反应器中活性污泥表面特性进而控制膜污染的思路^[17];Moussavia 等^[18]和 Wang 等^[19]在应用紫外-生物联合工艺处理难降解 VOCs 研究中,发现低浓度的 O_3 ($\leq 120 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 对 VOCs 净化具有促进作用。

然而,目前鲜见利用微量臭氧氧化技术调控生物膜相生长和分布,进而控制生物滴滤反应体系填料层堵塞的相关报道。因此,本研究尝试利用微量臭氧氧化技术调控生物膜相的生长和分布,控制反应体系填料层堵塞,分析微量臭氧作用于生物滴滤反应体系的作用效应,以期利用该技术强化生物滴滤持续高效运行奠定理论基础。

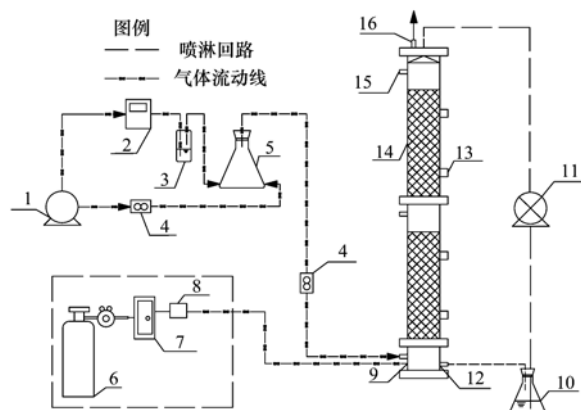
1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验同时建立了微量臭氧氧化强化生物滴滤工艺(O_3 -BTF)和单一生物滴滤工艺(BTF)各1套(图1)。 O_3 -BTF 反应体系主要由 O_3 发生单元、生物滴滤塔、空气压缩机、质量流量计、玻璃转子流量计、计量泵等组成,BTF 为对照体系,未添加 O_3 发生单元。臭氧由纯氧通过臭氧发生器(杭州荣欣电子设备有限公司,CFY-3)产生,从滴滤塔底部由下向上

通过填料层。 O_3 -BTF 反应体系启动 45 d 后,每天定时通 2 h 的臭氧,其浓度维持在 $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

生物滴滤塔中循环营养液组成: $0.11 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{K}_2\text{HPO}_4$, $0.04 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{KH}_2\text{PO}_4$, $0.545 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{Cl}$, $0.067 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{MgSO}_4$, $0.036 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$, $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{FeCl}_3$, $0.0339 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{MnSO}_4$, $0.0428 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ZnSO}_4$, $0.0347 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} (\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, pH 7.0~8.0。



1. 空气压缩机; 2. 玻璃转子流量计; 3. 吹脱瓶; 4. 转子流量计; 5. 混合瓶; 6. 氧气瓶; 7. 臭氧发生器; 8. 质量流量计; 9. 进气口; 10. 储液瓶; 11. 蠕动泵; 12. 出水口; 13. 填料取样口; 14. 生物滴滤塔; 15. 气体采样口; 16. 尾气排放口; 图中虚线内装置为 O_3 -BTF 臭氧发生装置, BTF 对照体系不含该部分

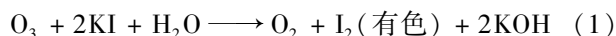
图1 生物滴滤塔工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of BTF system

1.2 分析项目与方法

(1) 甲苯与二氧化碳采用 Agilent 6890 气相色谱仪进行定量分析。测定甲苯浓度参数: FID 检测器, 色谱柱采用 HP-Innowax 毛细管柱 ($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.5 \mu\text{m}$), 色谱检测条件为进样口温度 210°C , 柱温 90°C , 检测器温度为 200°C , 以氮气为载气; 测定 CO_2 参数: TCD 检测器, 色谱柱为 HP-Plot-Q 毛细管柱 ($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 20 \mu\text{m}$)。色谱检测条件为进样口、检测器和柱子温度分别为 90°C 、 100°C 、 40°C , 氮气为尾吹气。

(2) 臭氧浓度分析采用碘量法。水中臭氧浓度测定: 将 KI 溶液滴入从反应器内取出的水样中, 采用稀硫酸酸化, 以淀粉溶液作为指示剂, 用硫代硫酸钠标准液滴定测量; 气体中臭氧浓度测定: 将反应器内气体通入碘化钾吸收瓶中, 采用湿式气体流量计计量, 停止取样后加入稀硫酸酸化, 以淀粉溶液作为指示剂, 用硫代硫酸钠标准液滴定测量。根据硫代硫酸钠标准液的消耗量计算臭氧浓度, 反应式:



(3) 生物量测定采用 MLSS 作为生物膜干重,通过振荡将生物膜与滤料分离,称量生物膜干重代表生物量^[20];生物滴滤塔内生物膜的平均代谢活性采用 Biolog ECO 板的平均吸光度(AWCD)来定量描述^[21]。床层压降采用 U 型管压差计测定;孔隙率采用测得填料的空隙体积比上填料在滴滤塔中堆积体积表示^[22]。

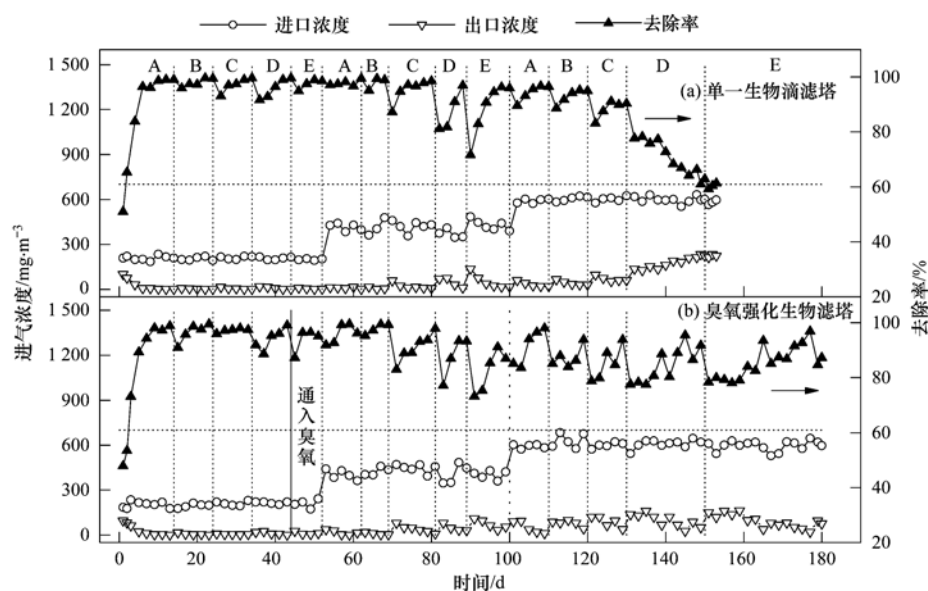
2 结果与讨论

2.1 滴滤塔体系长期运行性能

图 2 为生物滴滤体系长期运行甲苯去除率的变化情况。两套反应体系一周内可完成挂膜,甲苯的去除率维持在 90% 以上。在反应器运行后期,单一 BTF 中甲苯去除率呈明显下降趋势,130 d 后甲苯去

除率逐渐降低至约 60%,该反应体系并在运行至 150 d 时,因运行性能恶化而停止运行;O₃-BTF 反应体系持续稳定运行超过 180 d,甲苯的去除效率持续维持在 80% 以上。可见,微量臭氧的定期通入,可使 BTF 反应体系持续高效运行,有效延长 BTF 的运行周期。

图 3 为 BTF 和 O₃-BTF 中甲苯去除负荷随进气负荷的变化情况。在停留时间(EBRT)90、60、45、30 和 20 s 时,当进气负荷小于 40 g·(m³·h)⁻¹时,去除率维持在 95% 以上,去除负荷随进气负荷的增加成正比相关。在最大进气负荷 120 g·(m³·h)⁻¹时,BTF 甲苯去除负荷稳定在 70 g·(m³·h)⁻¹,而 O₃-BTF 对甲苯的去除负荷可达到 95 g·(m³·h)⁻¹,表明 O₃-BTF 较单一 BTF 体系能够处理更高负荷的甲苯废气,微量臭氧能够强化 BTF 反应体系去除甲苯运行性能。



A. 90 s; B. 60 s; C. 45 s; D. 30 s; E. 20 s

图 2 生物滴滤塔运行周期对甲苯去除率

Fig. 2 Toluene removal efficiency of BTF and O₃-BTF

图 4 是二氧化碳生成量随甲苯去除负荷的变化情况。CO₂ 生成负荷与甲苯去除负荷成正向相关,表明微生物对甲苯的降解主要是通过矿化作用,O₃-BTF 在甲苯最大去除负荷时,所对应的 CO₂ 最大生成负荷为 337.5 g·(m³·h)⁻¹。矿化率较高,达到 79.3%~87.1%。结果表明该体系对甲苯降解较完全。O₃-BTF 与 BTF 去除单位甲苯所对应的二氧化碳生成量分别为 2.91 和 2.55,理论值为 3.34。O₃-BTF 对甲苯矿化率高于 BTF,表明 O₃-BTF 对甲苯的矿化更彻底。但 CO₂ 实际的生成量与计算理论值仍

存在差别,可能由于微生物的同化作用将部分甲苯转化为自身物质,而另一部分则转化为 H₂CO₃, HCO₃⁻ 或 CO₃²⁻ 存在于液相中,其它部分可能生成某些难生物降解的中间产物。

2.2 微生物平均代谢活性

Biolog ECO 微平板技术已广泛应用于微生物种群分布及活性研究^[21,23,24]。本实验利用逻辑斯蒂^[25]公式(3),对 Biolog ECO 板的平均吸光度(average well color development, AWCD)随时间变化进行分析,实现微生物群落功能多样性定量描述:

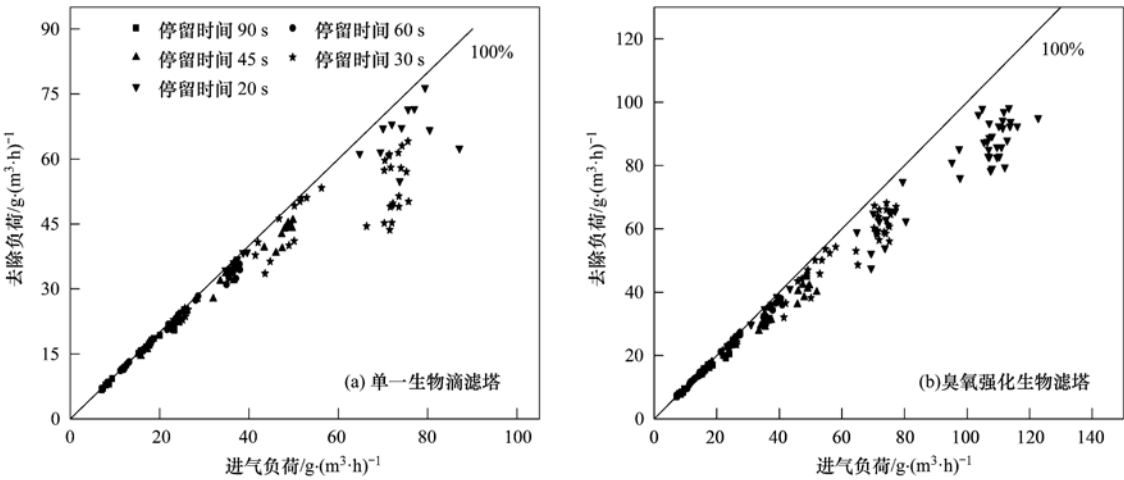


图3 甲苯去除负荷及去除率随进气负荷的变化

Fig. 3 Elimination capacity of toluene and removal efficiency versus inlet loading rate

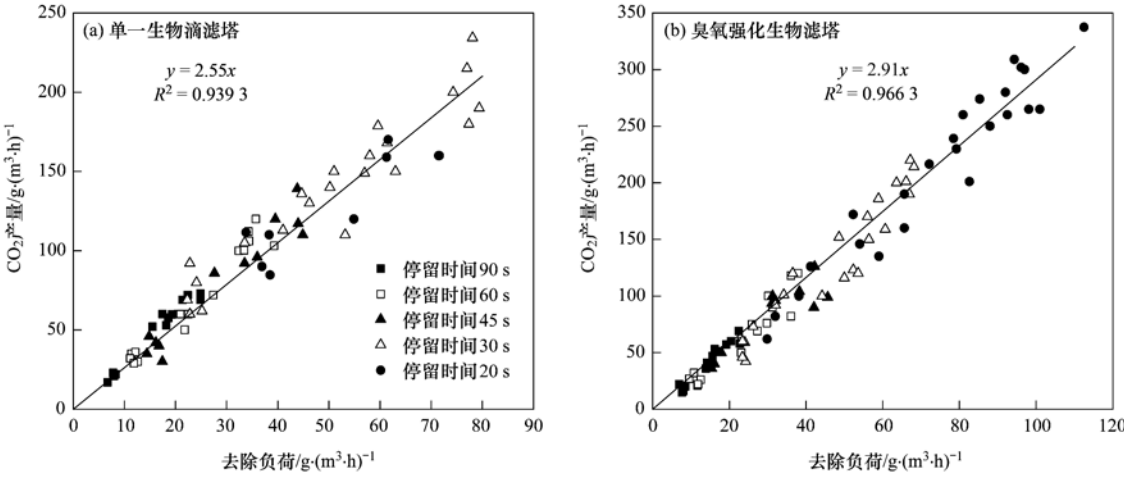


图4 CO₂生成量随甲苯去除负荷的变化关系

Fig. 4 Relationship between the CO₂ production rate and toluene elimination capacity

$$y = \frac{a}{1 + e^{\left(\frac{b-t}{c}\right)}} \quad (3)$$

式中, a 为培养过程中的最大平均吸光度; b 为达到最大平均吸光度值一半时的时间; $1/c$ 为吸光度值的变化指数; t 和 y 分别为培养时间和相对应的平均吸光度.

分别取两套反应器运行至 120 d 时微生物进行分析测试,以考察两套反应器上、下段内部微生物的代谢活性,见图 5. 由拟合参数可知, O_3 -BTF 和 BTF 上段平均吸光度值分别为 0.9 和 1.17,其下段最大平均吸光度值分别为 1.08 和 1.02. 由此可见,BTF 中微生物群落代谢活性上段高于下段,这可能由于下段生物膜过度累积导致其微生物代谢活性降低^[1];而 O_3 -BTF 中下段的微生物代谢活性高于

BTF 体系微生物的代谢活性. 说明在长期运行的生物滴滤塔中,微量臭氧对微生物活性有一定的促进作用.

2.3 微量臭氧强化生物滴滤的作用效应

2.3.1 生物量沿径向分布模式

图 6 是滴滤塔内甲苯浓度与生物量沿径向分布的线性组合. 拟合直线的斜率大小,反映了滴滤塔内沿径向生物量的递减率. 反应器未通入臭氧时(45 d),BTF 与 O_3 -BTF 拟合直线斜率分别为 0.378 和 0.419,说明这两套反应器中生物量沿径向变化率基本一致;反应器运行 120 d 时, O_3 -BTF 和 BTF 内生物量递减率分别是 0.377 和 0.711. 在运行周期内, O_3 -BTF 生物递减率未发生较大变化,而 BTF 中生物量递减率增大近一倍. 由此可知, O_3 能够有

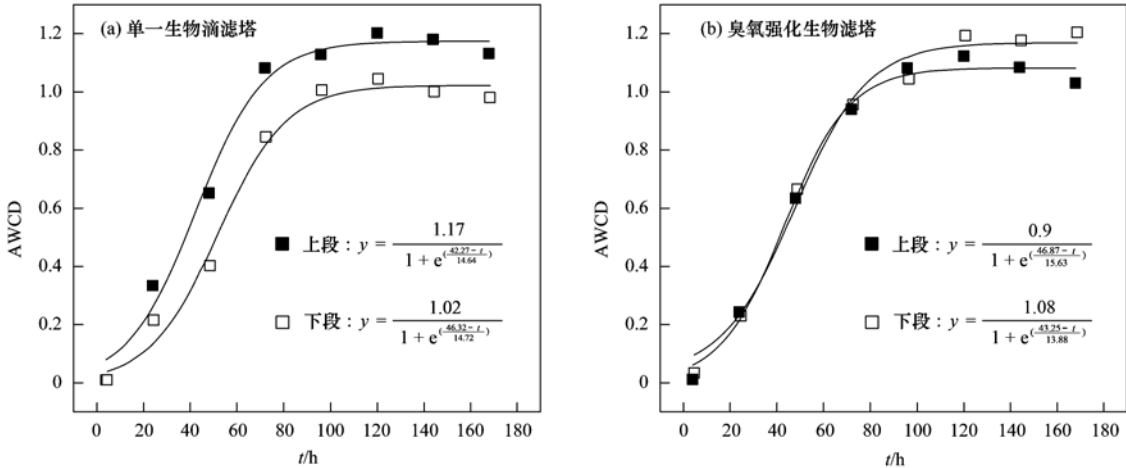


图5 微生物群落功能代谢剖面动态变化

Fig. 5 Kinetics of average well color of development for biofilm samples

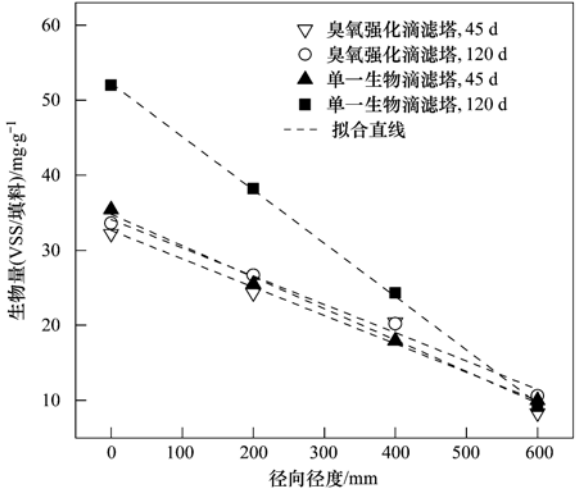


图6 滴滤塔体系中生物量沿径向变化情况

Fig. 6 Change of biomass in the biological trickling filter

效减小滴滤塔中生物量沿径向的变化,使生物量沿径向分布更均匀.

2.3.2 床层特性与平均生物量

生物滴滤反应器内生物膜相的变化会引起床层表观参数及填料床层性质的改变,而二者的变化又会直接影响生物滴滤的运行性能和稳定性. 因此,有必要对生物滴滤反应器床层特性与生物膜相的关系进行分析.

图7分别表示BTF和O₃-BTF平均生物量、床层孔隙率和压降随时间变化. 从中可知,单一BTF随着反应体系的运行,生物膜逐渐形成并累积在填料上,导致床层孔隙率逐渐下降,使床层气体压降增加,进而造成短流和沟流,最终导致体系运行性能恶化. 运行中后期,BTF平均生物量达到36.59 mg·g⁻¹,床层孔隙率低于55%,床层压降为103.2

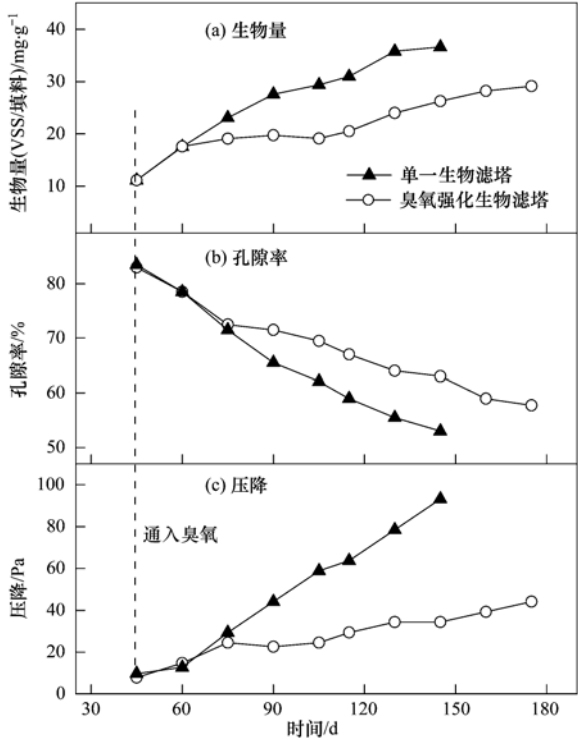


图7 生物滴滤塔孔隙率、压降和平均生物量变化

Fig. 7 Change of average biomass, porosity and pressure drop in BTF and O₃-BTF

Pa. O₃-BTF在通入微量臭氧(45 d)后,有效地抑制了生物量的过度增长,床层孔隙率下降趋于缓和,床层压降维持在较低水平. 运行中后期平均生物量29.12 mg·g⁻¹,床层孔隙率维持在60%,床层压降44.1 Pa.

3 结论

(1) BTF和O₃-BTF反应体系长期运行性能的

实验结果表明,通入微量臭氧(浓度控制为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)可有效延长 BTF 的运行周期,且可提高 BTF 体系对甲苯的去除负荷和矿化率,这对改善 BTF 体系长期运行过程中运行性能恶化具有一定的意义。

(2)反应体系内长期运行过程中, O_3 -BTF 内生物膜的平均代谢活性高于单一 BTF 体系,表明微量臭氧对 BTF 体系内微生物的代谢活性具有明显的强化效应。

(3)BTF 和 O_3 -BTF 体系长期运行过程中,床层特性和生物量变化结果表明,微量臭氧通过对滴滤反应体系内生物量的控制,可减缓填料床层孔隙率减小;生物量沿 BTF 径向分布变化表明, O_3 能够减小 BTF 中生物量沿径向分布的变化幅度,使生物量沿 BTF 径向分布相对均匀,进而有效抑制填料层堵塞,延长反应体系长期稳定运行周期。

参考文献:

- [1] Ralebitso-Senior T K, Senior E, Felice R D, *et al.* Waste gas biofiltration: advances and limitations of current approaches in microbiology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8542-8573.
- [2] Yang C P, Chen H, Zeng G M, *et al.* Biomass accumulation and control strategies in gas biofiltration [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(4): 531-540.
- [3] Chen J M, Zhu R Y, Yang W B, *et al.* Treatment of a BT *o*-X-contaminated gas stream with a biotrickling filter inoculated with microbes bound to a wheat bran/red wood powder/diatomaceous earth carrier[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8067-8073.
- [4] Song J, Kinney K A. A model to predict long-term performance of vapor-phase bioreactors: a cellular automaton approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(11): 2498-2507.
- [5] Yang C P, Chen H, Zeng G M, *et al.* Modeling variations of medium porosity in rotating drum biofilter[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(2): 245-249.
- [6] Wang C, Xi J Y, Hu H Y, *et al.* Stimulative effects of ozone on a biofilter treating gaseous chlorobenzene [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9407-9412.
- [7] 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.
- [8] Xi J Y, Hu H Y, Qian Y. Effect of operating conditions on long-term performance of a biofilter treating gaseous toluene: biomass accumulation and stable-run time estimation [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **31**(2): 165-172.
- [9] Rupert R. Rotary biofilter[P]. United States Patent: 5413936. 1995-05-09.
- [10] Cox H H J, Deshusses M A. Effect of starvation on the performance and re-acclimation of biotrickling filters for air pollution control [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(14): 3069-3073.
- [11] Kim D, Cai Z L, Sorial G A. Behavior of trickle-bed air biofilter for toluene removal: effect of non-use periods[J]. *Environmental Progress*, 2005, **24**(2): 155-161.
- [12] 席劲瑛, 胡洪营, 张炯, 等. 化学洗脱法去除生物过滤塔中菌体的研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 300-303.
- [13] Wei Y S, Van Houten R T, Borger A R, *et al.* Comparison performance of membrane bioreactor and conventional activated sludge processes on sludge reduction induced by *Oligochaete*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(14): 3171-3180.
- [14] Bijan L, Mohseni M. Integrated ozone and biotreatment of pulp mill effluent and changes in biodegradability and molecular weight distribution of organic compounds[J]. *Water Research*, 2005, **39**(16): 3763-3772.
- [15] Zimmermann S G, Wittenwiler M, Hollender J, *et al.* Kinetic assessment and modeling of an ozonation step for full-scale municipal wastewater treatment: micropollutant oxidation, by-product formation and disinfection[J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 605-617.
- [16] Domeno C, Rodriguez-Lafuente A, Martos J M, *et al.* VOC removal and deodorization of effluent gases from an industrial plant by photo-oxidation, chemical oxidation, and ozonation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2585-2591.
- [17] Wu J L, Huang X. Use of ozonation to mitigate fouling in a long-term membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **101**(15): 6019-6027.
- [18] Moussavia G, Mohseni M. Using UV pretreatment to enhance biofiltration of mixtures of aromatic VOCs [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **144**(1-2): 59-66.
- [19] Wang C, Xi J Y, Hu H Y. A novel integrated UV-biofilter system to treat high concentration of gaseous chlorobenzene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(17): 1120-1125.
- [20] Arbuckle W B, Griggs A A. Determination of biomass MLVSS in PACT sludges[J]. *Water Pollution Control Federation*, 1982, **54**(12): 1553-1557.
- [21] Preston M J, Boddy L, Randerson P F. Analysis of microbial community functional diversity using sole-carbon-source utilization profiles-A critique [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, **42**(1): 1-14.
- [22] Kim D, Sorial G A. Nitrogen utilization and biomass yield in trickle bed air biofilters [J]. *Journal of Hazardous Material*, 2010, **182**(1-3): 358-362.
- [23] 王灿, 席劲瑛, 胡洪营. 紫外-生物过滤联合工艺和单一生物过滤工艺中微生物代谢特性的比较[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(8): 1587-1592.
- [24] 向红, 吕锡武, 杨飞, 等. 水质净化生物滤池工艺的微生物群落特征及运行效果研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1194-1201.
- [25] 吕镇梅. 除草剂二氯喹啉酸对水稻田土壤微生物生态的影响及其降解特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. 74-77.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr [*] Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《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12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 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