

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究

梅瑜¹, 成卓韦², 王家德^{2*}, 陆胤¹

(1. 浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310005; 2. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032)

摘要: 建立了生物滴滤中试装置, 并将前期研发的纹翼多面球和空心多面柱作为组合填料, 以甲苯和乙醇混合气为废气, 研究了组合填料生物滴滤塔的污染物去除性能。结果表明, 装有组合填料的生物滴滤塔能在 8 d 内完成挂膜, 稳定运行时对甲苯和乙醇的去除负荷分别为 $97.14 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $113.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。空床停留时间(EBRT)和进气浓度对甲苯去除效果影响明显, 当 EBRT 为 21.11 s, 甲苯和乙醇最大去除负荷分别为 $123.34 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $206.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$; 受营养液喷淋量影响不明显, 本系统最佳液气比为 $6.82 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ 。模拟了不稳定工况对系统处理效果的影响, 用 NaOH 溶液减轻填料层堵塞效果明显, 并可以 3 d 内恢复对甲苯和乙醇的去除效果; 停运 10 d 后继续运行, 净化性能可迅速恢复。

关键词: 生物滴滤塔; 组合填料; 混合废气; 净化性能; 非正常工况

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4389-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.009

Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material

MEI Yu¹, CHENG Zhuo-wei², WANG Jia-de^{2*}, LU Yin¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310005, China; 2. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A pilot biotrickling filter (BTF) was set up for removal of a mixed waste gas containing toluene and ethanol. The packing material was composed of polyhedral sphere and polyhedral hollow column previously designed by our group. The results showed this BTF could successfully start up within only 8 d and the average eliminate capacities for toluene and ethanol were 97.14 and $113.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. Empty bed residence time (EBRT) and the inlet concentration had effects on the removal of toluene. The maximum elimination capacity of toluene and ethanol was 123.34 and $206.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ under EBRT of 21.11 s, respectively. However, the effect of spray liquid density was not obvious, and the optimal value of solution and gas ratio was $6.82 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$. The influence of unstable processing condition on its performance was also investigated. NaOH solution could effectively reduce the plugging of the filler layer, and the removal capability of pollutant could be recovered within 3 days. After the running was stopped for 10 d, the removal performance of this BTF could be quickly recovered.

Key words: biotrickling filter; combined packing; mixed waste gas; elimination capacity; abnormal conditions

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是工业废气的主要成分^[1], 已被我国列为优先控制的四类气态污染物之一。目前, 我国大气污染总体呈现复合型的特点, 对于该现状的产生, VOCs 具有不可忽视的作用。此外, 部分 VOCs 还具有“三致”效应, 危害人类身体健康。因此, 研发经济、高效的 VOCs 治理技术, 具有重要的环境、经济和社会效益。

生物净化是一种绿色治理技术, 利用微生物以废气中的有机组分作为其生命活动的能源, 经代谢后转化为无机物(CO_2 、水等)及细胞组成物质, 具有处理费用低、无二次污染等特点^[2, 3]。填料作为微生物的载体, 是废气生物处理装置的核心组件, 它既是微生物生长的支撑载体, 又是气液两相的传质介质, 因此其性能直接影响污染物的去除效果^[4~6]。

根据净化工艺, 传统的生物填料分为天然过滤

填料^[6~9]和人工合成的滴滤填料^[4, 10]。由于滴滤填料应用较为广泛, 因此对其的研发较为活跃。通过人为增加填料比表面积、强度、孔隙率等, 可在传统滴滤填料的基础上改良或设计出新型生物滴滤填料, 如聚氨酯泡沫(PU-foam)、聚乙烯等^[11~14]。

然而, 研究者发现, 采用单一填料的生物反应器随着运行时间的延长, 大量污染负荷集中在反应器底部, 引起微生物差异性分布, 底部易堵塞而上部生物量不多, 从而使得压降分布不均, 不利于长期稳定运行。为解决单一填料存在的问题, 研究者提出了采用组合填料的研究思路。伍永钢等^[14]

收稿日期: 2015-04-18; 修订日期: 2015-08-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063102); 浙江省自然科学基金项目(LY14C030004); 浙江树人大学中青年学术团队项目

作者简介: 梅瑜(1983~), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: imy1220@zjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jdwang@zjut.edu.cn

采用大小规格不一的聚乙烯改良型拉西环分别填充于生物滴滤床的顶层和底层,处理含硫化氢废气. 126 d 长期运行试验结果表明,这种装填方式具有压降低、负荷沿塔高分布均匀等优点,且对外界环境波动适应性较强. 不同填料间的优化组合能弥补各自缺陷,这将是今后填料研发的一种新思路.

本文将前期自行研发的纹翼多面球和空心多面柱作为组合填料,建立生物滴滤中试装置,并以甲苯和乙醇混合气为废气源,通过改变运行工艺参数来研究组合填料的性能. 此外,本研究还模拟了不稳工况(如冲击负荷、系统停运等)对装置处理效果的影响,以期在实际工程应用提供技术支撑.

1 材料与方 法

1.1 填料和试验装置

本研究选择了两种生物滴滤填料,分别为纹翼多面球和空心多面柱. 填料主体材质均为聚丙烯,

纹翼多面球填料规格为 $\Phi 50$ mm (比表面积 $193 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$,堆积密度 $46.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),空心多面柱规格为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (比表面积 $257 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$,堆积密度 $119.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). 生物滴滤塔(biotrickling filter, BTF)内径为 780 mm,塔体分为三段,每段高 800 mm,自上而下第一段装载空心多面柱、第二段装载纹翼多面球,第三段用于贮存循环液. 塔体第一、二段相对方向设填料取样口,进出气管设气体采样口. 填料和工艺流程可参考文献[10].

BTF 运行时,喷淋强度保持 $30 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 不变,循环液更新速率为 $30 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$. 模拟废气风量为 $60 \sim 128 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,进行气液逆流操作,空床停留时间(empty bed residence time, EBRT)为 $14.51 \sim 30.96 \text{ s}$. 采用的接种物为某医药股份有限公司好氧池活性污泥,经甲苯、乙醇驯化一个月所得. 采用气液联合挂膜法对生物滴滤塔进行挂膜. 试验分 4 个阶段,阶段 I 为挂膜启动期,II 为稳定运行期,III 为参数考察期,IV 工程应用模拟期(表 1).

表 1 BTF 各阶段运行参数

Table 1 Operation parameters of biotrickling filter at different stages

运行阶段	时间/d	进气流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	停留时间/s	进气浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
I	0 ~ 15	60 ~ 88	21.11 ~ 30.96	乙醇 603.21 ~ 658.53 甲苯 501.22 ~ 598.60
II	16 ~ 40	88 ~ 128	14.51 ~ 21.11	乙醇 502.62 ~ 791.78 甲苯 545.74 ~ 878.81
III	41 ~ 90	60 ~ 128	14.51 ~ 30.96	乙醇 354.99 ~ 2 699.88 甲苯 88.12 ~ 2 267.03
IV	91 ~ 130	88	21.11	乙醇 811.47 ~ 1 015.93 甲苯 662.76 ~ 926.50

1.2 分析方法

压力降 ΔP :采用上海宏宇环保应用研究所 DP-2000 数字压力计测定,该压力计量程为 $0 \sim 1 999 \text{ Pa}$,分辨力为 1 Pa .

填料生物量:将覆盖生物膜的填料、 $103 \sim 105^\circ\text{C}$ 烘干至恒重后的填料以及生物膜完全剥离后的填料分别进行称重,计算可得.

甲苯、乙醇浓度测定:甲苯和乙醇质量浓度均采用气相色谱法测定,气相色谱仪为日本岛津 GC-2014,色谱柱为 RTX-1 毛细管柱,毛细柱、汽化室和检测器温度分别为 60 、 150 、 160°C ,流速 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 运行性能研究

BTF 挂膜阶段,甲苯和乙醇进气浓度分别为

$501.22 \sim 598.60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $603.21 \sim 658.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,第 8d 开始,BTF 对甲苯去除率达 75% 以上并维持稳定,对乙醇去除率可维持在 95% 以上. 综上,组合填料完成挂膜时间为 8 d.

BTF 进入稳定运行阶段后的首日记为第 1 d,考察了接下来 16 d 的去除效果. 其中甲苯进气浓度为 $545.74 \sim 878.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (平均为 $694.84 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$);乙醇进气浓度为 $502.62 \sim 791.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (平均为 $650.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). 系统对甲苯和乙醇的去除情况可见图 1.

由图 1 可知,BTF 在正常运行的 16 d 内,对甲苯和乙醇均保持稳定的去除效果,对甲苯的平均去除率为 80.29%,平均去除负荷为 $97.14 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$;对乙醇的平均去除率为 99.01%,平均去除负荷为 $113.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 由此表明,采用组合填料的 BTF 对甲苯和乙醇去除效果明显. 试验

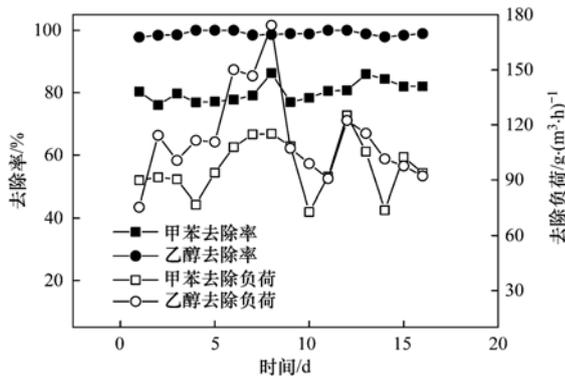


图1 稳定运行阶段 BTF 对甲苯和乙醇的去除率和去除负荷

Fig. 1 Removal rate and elimination capacity of toluene and ethanol by the BTF at the stable operation phase

同时监测了压力降的变化趋势,空塔气速为 $0.051 \sim 0.074 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,选取了正常运行后的 25 d 阻力数据,填料层压力降介于 $54 \sim 59 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$,平均为 $55.4 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$,没有发现堵塞迹象。

文献[10]中对装载纹翼多面球和空心多面柱的 BTF 进行了研究,在严格控制其他变量相同的前提下,选择了进气负荷大致与本文相同的情况进行比较.发现单一纹翼多面球未发生堵塞,去

除效果稳定,甲苯平均去除负荷为 $87.49 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.单一空心多面柱 BTF 虽然对于甲苯的去除负荷达到了 $106.52 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,但在稳定运行中后期填料层压力降达到 $120 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ 左右,出现堵塞现象,对于甲苯和乙醇的去除负荷分别下降至 $30.82 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $72.08 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.

本试验通过填料优化组合,解决了单一填料 BTF 存在的弊端,如空心多面柱填料易堵塞、纹翼多面球去除负荷有限等.为了进一步明确两种填料在运行过程中的特点,表 2 比较了上层填料段和下层填料分别对于甲苯和乙醇的去除负荷及相应的压力降.可以发现,下层填料(纹翼多面球)对于甲苯和乙醇的去除负荷要小于上层填料(空心多面柱),分别为后者的 80.23%和 80.81%,说明了空心多面柱填料在表面生物膜形成后对于污染物的去除负荷更高.此外,下层填料采用了纹翼多面球,在运行后期压力降变化也不明显,而上层填料在较低进气负荷下运行[甲苯 $75.26 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,乙醇 $60.38 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$],生物量生长有限,其压力降的增长也有限。

表 2 不同填料去除性能和压力降比较

Table 2 Comparison of elimination capacity and pressure drop with different packing materials

项目	类型	组合填料		单一填料	
		上层	下层	空心多面柱	纹翼多面球
每米去除负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$	甲苯	89.83	72.07	88.76	72.91
	乙醇	104.25	84.25	123.16	101.82
单层压力降/Pa		17.5	15.8	33.4	15.5

通过优质填料相互组合实现了填料优势特性互补,既实现了较高的去除负荷,也实现了控制压力降的目的,并且使上下层填料对污染物的去除达到一个相对平衡的状态.结果表明,填料优势组合能实现较高、较稳定的去除效果。

2.2 工艺参数对去除率的影响

2.2.1 EBRT

考察 EBRT 对 BTF 系统的去除能力的影响,选取了 EBRT 分别为 30.96、21.11 和 14.51 s,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知,污染物去除率受 EBRT 变化影响明显.以甲苯为例,当进气浓度基本一致时,去除率随着 EBRT 的增加而上升,这种影响在进气浓度较高时尤为明显,当进气浓度 $1225.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、EBRT 14.51 s 时,去除率为 30.32%;而当进气浓度 $1228.83 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、EBRT 30.96 s 时,去除率为 66.72%,为前者的 2.20 倍.乙醇的去除率受 EBRT

的影响趋势与甲苯一致,区别在于受 EBRT 影响相对缓和。

考察了污染物去除负荷(elimination capacity, EC)受 EBRT 的影响.当 EBRT 30.96 s、甲苯进气浓度 $983.52 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,去除率和去除负荷分别为 78.07%和 $89.27 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$;当 EBRT 21.11 s、进气浓度 $1014.65 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,去除率下降至 69.40%,但去除负荷达到 $120.08 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$;当 EBRT 14.51 s、进气浓度 $1008.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,去除率仅为 47.45%,去除负荷为 $118.64 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.由此说明,较长的 EBRT 虽然能获得较高的去除率,但却没有从根本上提高系统的去除能力.实际应用中应采取合适的 EBRT,既使系统拥有较高的去除率,又使其去除性能处于最佳状态.在本试验中,合适的 EBRT 应为 21.11 s。

对于不同污染物,当入口浓度保持不变时,去除率受到 EBRT 的影响程度不同.对于难溶于水的有

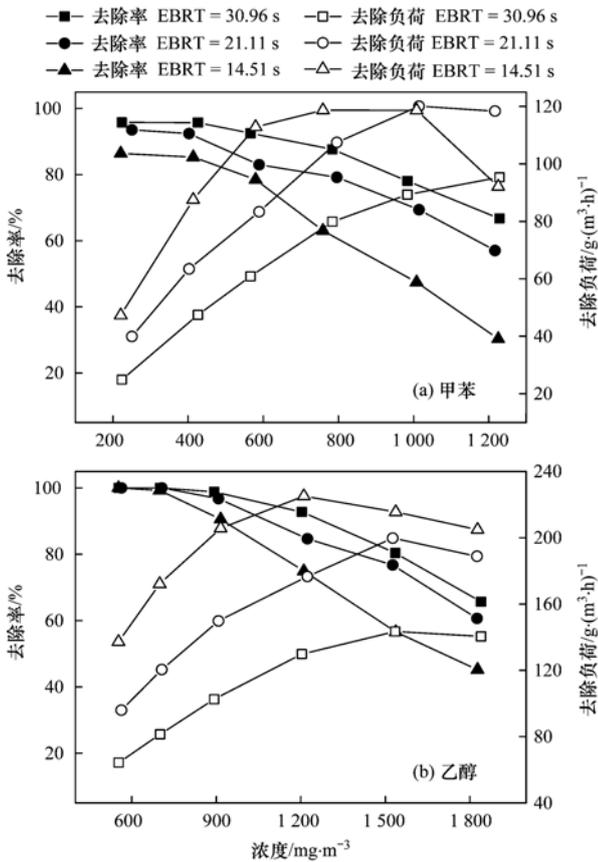


图2 EBRT对甲苯和乙醇的去除率和去除负荷的影响

Fig. 2 Effect of the EBRT on the removal rate and elimination capacity of toluene and ethanol

机物,水膜传质阻力较大,通过增加EBRT来强化去除效果更为明显;而对于易溶于水、传质相对容易的有机物,如本试验中的乙醇,由于传质阻力较甲苯小,因此去除效果受EBRT影响较小,进气浓度较高时,受微生物反应速率控制,EBRT影响稍明显^[15]。

2.2.2 进气负荷

按照2.2.1节所得结论,选择EBRT 21.11 s,甲苯进气浓度 $88.12 \sim 2\,267.03 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,乙醇进气浓度 $354.99 \sim 2\,699.88 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,循环液喷淋强度为 $30 \text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$,考察了甲苯、乙醇进气负荷和去除负荷的关系(图3)。

当甲苯进气负荷 $103.87 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 时,去除负荷达到 $86.77 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,去除率依然处于80%~100%的范围之内;随着进气负荷上升,去除负荷也随之上升,进气负荷为 $263.25 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 时达到最大去除负荷,为 $123.34 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,但此时去除率仅处于40%~60%。乙醇去除负荷明显高于甲苯,随着进气负荷的不断提高,去除负荷也呈上升趋势,当进气负荷为 $311.24 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 时达到最大

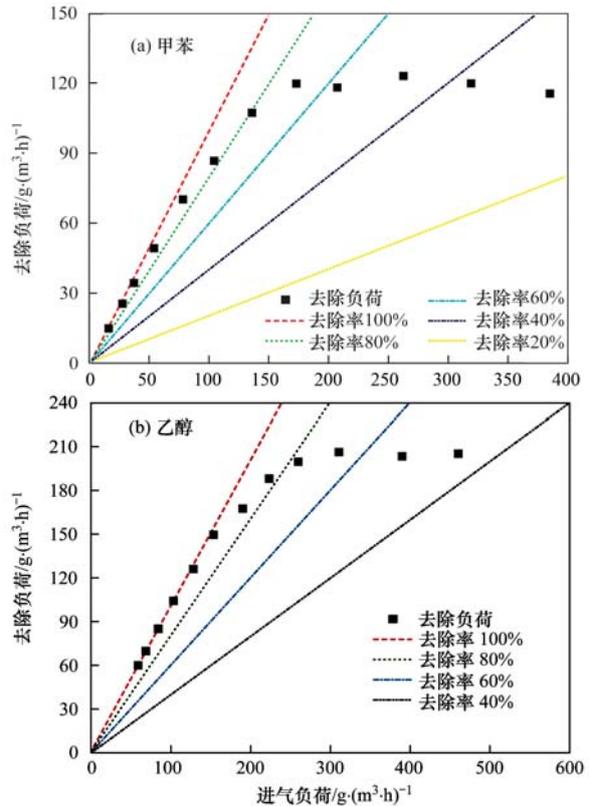


图3 甲苯和乙醇进气负荷与去除负荷关系

Fig. 3 Effect of the inlet load on the elimination capacity of toluene and ethanol

去除负荷,为 $206.36 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 。

2.2.3 喷淋强度

根据荷兰学者 Ottengraf 的生物膜理论^[16],微生物的代谢作用难以在气相中完成,废气中的有机污染物要从气相转移至液相或固相表面的液膜中,才能被悬浮在液相中或附着在固相表面的微生物降解。循环液流量太小,会导致微生物缺乏生长代谢所必要的水分和营养物质,最终导致系统的去除效果下降;循环液流量过大,则可能使填料持水量增大而形成气流通过阻力增加,最终影响污染物去除性能。

试验分别考察了喷淋量为 300、600、860、1 300、1 700 和 2 200 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,BTF 的去除效果(图4),对应的喷淋强度分别为 10.5、20.9、30.0、45.4、59.3 和 76.8 $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 。其他试验条件甲苯平均进气浓度为 $484.87 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,乙醇平均进气浓度为 $1\,260.65 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,EBRT 为 21.11 s。

污染物去除率受喷淋量影响不大,当喷淋量逐渐增加时,去除率略有下降;在喷淋强度为 20.9 $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 时,甲苯去除率最高为 90.55%,随后下降为最低(78.18%);乙醇亦由最高的去除率

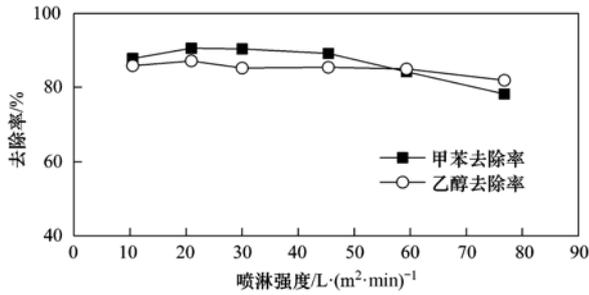


图4 喷淋强度对污染物去除率的影响

Fig. 4 Effect of spray liquid density on the removal efficiency of the BTF

87.11% 降为最低的 81.88%, 下降趋势较甲苯要平缓。

张雄军^[17]在研究采用生物滴滤塔处理 H₂S 废气时发现, 在喷淋密度小于 0.19 m³·(m²·h)⁻¹, 污染物去除率随喷淋密度增大的增幅很大, 大于 0.24 m³·(m²·h)⁻¹后, 去除率基本稳定. 而 Li 等^[18]采用 BTF 系统去除氯苯发现当喷淋量为 27.6 mL·min⁻¹、EBRT 为 45 s 且进气负荷为 103 g·(m³·h)⁻¹时, 可达 97.7% 的去除率, 去除负荷为 97 g·(m³·h)⁻¹. 对于 BTF, 选择合适液气比可将系统运行状态调整到最佳. 本试验进气风量为 88 m³·h⁻¹, 去除效果最好的循环液流量为 600 L·h⁻¹, 由此最佳液气比为 6.82 L·m⁻³.

2.3 工程应用试验

2.3.1 系统生物量控制及防堵

填料层堵塞是 BTF 系统处理有机废气常见现象^[19], 一旦发生堵塞, 将导致系统对污染物的去除效果剧烈下降甚至被迫中断运行. 控制合理的生物量、避免填料堵塞是废气生物净化技术的一个关键^[20].

目前的生物量控制方法中, 化学冲洗应用广泛, 并且实际运用中也较易实现, 文献^[21~23]均采用了碱液去除过量的微生物. 本试验在 BTF 运行近 4 个月, 发现填料层堵塞迹象后, 采用了 NaOH 溶液冲洗填料层, 以达到控制生物量的目的. 以 0.1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液强力冲洗 [喷淋强度 52.3 L·(m²·min)⁻¹] 填料层 5 h 后, 排出碱液, 重新注入新鲜循环液, 系统重新运行, EBRT 为 21.11 s. 冲洗时, 观察到有大块生物膜剥落, 并且剥落的生物膜主要来自于填料外表层, 填料内层的生物膜变化甚微, 且主要以上段填料层为主. 这可能是由于填料外表层生物膜所受到循环液剪切力较大所引起的. 由于生物膜的部分剥落, 填料层压力降有所下降, 冲洗前

填料层在空塔气速为 0.0512 m·s⁻¹ 时阻力为 136.0 Pa·m⁻¹, 而冲洗后相同气速时阻力下降为 55.5 Pa·m⁻¹. 为了证实填料层的生物膜剥落, 试验测定了冲洗前后不同填料层生物量 (见表 3). 显然, 上层填料的生物量去除较下层填料更为明显, 干、湿生物量分别减少了 22.7% 和 16.8% (下层填料仅为 6% 和 13.4%), 这可能是由于上层填料接触的碱液量更多.

表3 冲洗前后生物量变化

项目	填料段位置	冲洗前/kg·m ⁻³	冲洗后/kg·m ⁻³
干填料生物量	上	16.80	12.98
	下	14.32	13.46
湿填料生物量	上	382.89	318.52
	下	395.23	342.26

甲苯和乙醇平均进气浓度分别为 824.58 mg·m⁻³ 和 923.93 mg·m⁻³. 由于填料层堵塞, 冲洗前甲苯和乙醇去除率分别 54.31% 和 83.25%; 冲洗当天, 去除率分别下降为 24.76% 和 65.99%, 3 d 后即可分别恢复到 75% 和 95% 左右, 与冲洗前堵塞下相比, 均有一定程度的提高, 基本可达到稳定时良好的运行状态 (图 5).

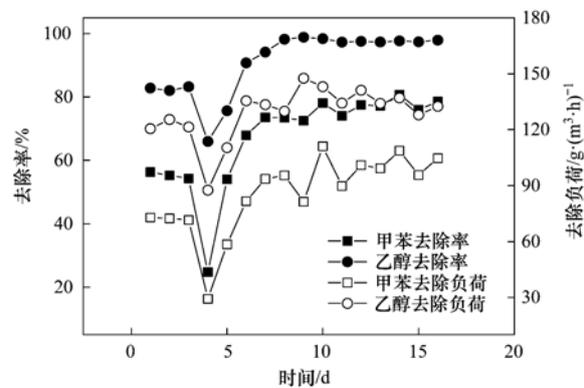


图5 冲洗前后污染物去除效果变化趋势

Fig. 5 Variation of pollutant removal performance before and after washing

正常运行时, 循环液 pH 基本维持中性, 表明降解甲苯和乙醇的混合菌群适宜在 pH 中性条件下生长, 而冲洗溶液强碱性对微生物是不利的: 一方面, 由于 pH 值改变, 引起微生物体表面的电荷改变, 影响了微生物对营养物的吸收; 另一方面, 酶只有在适宜的 pH 值时才能发挥其活性, 不适宜的 pH 值使酶的活性降低, 进而影响微生物细胞内的生化反应. 由于强碱冲洗后, 生物膜表面亦残留有微量的碱液, 并且部分新鲜生物膜在冲洗的过程中被洗刷到碱液

中去,即使未被洗刷仍附着在填料表面的新鲜生物膜也因为较高的 pH 值而影响了活性. 综合上述原因,冲洗当天 BTF 系统对甲苯和乙醇的去除率骤然下降. 随着运行恢复,微生物生长加快,微生物活性和数量得到恢复,宏观上表现出去除率和去除负荷的重新升高并维持稳定.

2.3.2 系统停运恢复情况

试验所采取的停运指停止供给污染废气,为了确保填料上微生物能得到水分,以 $20.9 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 的喷淋强度增湿. 停运恢复后,甲苯和乙醇平均进气浓度分别为 $808.24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $921.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,EBRT 为 21.11 s. 系统停运前后污染物去除率结果见图 6.

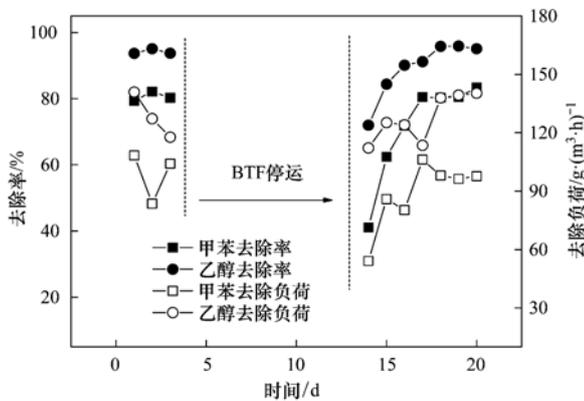


图 6 BTF 系统停运对污染物去除效果的影响

Fig. 6 Effect of starvation on the pollutant removal performance

结果表明,BTF 系统在停止运行 10 d 后,恢复运行可迅速恢复到原有水平. 甲苯去除率运行恢复当天仅为 41.14%,第 4 d 即可达到 80.51%,乙醇去除率亦可在第 3 d 即达 90% 以上. 微生物在 BTF 停运闲置时一方面缺少维持其生命活动的有机碳源和能源,另一方面也缺乏氧气^[24]. 观察发现,在停运的过程中,填料层微生物表面颜色局部变黑,伴随有生物膜呈块状剥落. 恢复运行后,有机碳源和能源立即得到补充,原有的微生物生长环境得到恢复,生物活性也随之恢复,表现为净化效率逐步回升,并且效率的恢复均经历一个由快到缓的过程,停运恢复后净化效率基本上能达到停运前的水平.

樊奇^[25]采用生物滴滤塔处理 2-丁酮时考察喷淋营养液和不喷淋营养液的停运方式时恢复效果,结果发现不喷淋的条件下恢复第 1 d 对 2-丁酮的去除率仅为 6%;而在停运期间维持喷淋,恢复后第 4 d 去除率即可稳定在 92.6%. 由此说明,通过喷淋营养液可以保证塔内微生物对湿度的要求,使微生物保持一定的活性,减缓生物膜的老化,减少停运对

于系统的危害. 实际工程运用中,亦可采用上述方法(即在停运过程中维持供给水分)来实现闲置后快速重启.

3 结论

(1) BTF 在 8 d 内完成挂膜. 对甲苯的平均去除率为 80.29%,平均去除负荷为 $97.14 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$;对乙醇的平均去除率为 99.01%,平均去除负荷为 $113.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 在运行的 25 d 内,平均压力降为 $55.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$,没有发现堵塞迹象;不同性质填料相互组合实现了优势特性互补,既实现了较高的去除负荷,也实现了控制压力降的目的.

(2) 当甲苯进气浓度为 $1543.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,系统对甲苯的去除率为 46.85%,去除负荷达到最大值,为 $123.34 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$;乙醇去除负荷明显高于甲苯,当进气负荷为 $311.24 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时达到最大去除负荷,为 $206.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 随着进气负荷的上升,污染物去除负荷也随之上升,去除率相对应有所下降.

(3) 污染物去除率受喷淋量影响不大,当喷淋量逐渐增加时,去除率略有下降:在喷淋强度为 $20.9 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 时,甲苯去除率最高为 90.55%,乙醇去除率最高为 87.11%. 由此计算的最佳液气比为 $6.82 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$.

(4) 采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液冲洗有堵塞迹象的填料层,在相同风速下,填料层的压力降由冲洗前的 $136.0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 下降为 $55.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$,且上层填料的生物量和压力降减少的尤为明显. 冲洗当天,去除率急剧下降,3 d 后甲苯和乙醇即可分别恢复到 75% 和 95% 左右.

(5) BTF 系统在停止运行 10 d 后继续运行,可以迅速恢复到原来的水平.

参考文献:

- [1] 席劲琪,武俊良,胡洪营,等. 工业 VOCs 排放源废气排放特征调查与分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(11): 1558-1562.
- [2] 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [3] Anet B, Couriol C, Lendormi T, et al. Characterization and selection of packing materials for biofiltration of rendering odourous emissions[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, 224: 1622.
- [4] Sun D F, Li J J, An T C, et al. Bacterial community diversity and functional gene abundance of structured mixed packing and inert packing materials based biotrickling filters [J].

- Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2012, **17**(3): 643-653.
- [5] 王家德, 金顺利, 陈建孟, 等. 一种缓释复合生物填料性能评价[J]. 中国科学: 化学, 2010, **40**(12): 1874-1879.
- [6] Dumont E, Andrès Y. Evaluation of innovative packing materials for the biodegradation of H₂S: a comparative study[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, **85**(3): 429-434.
- [7] Cabeza I O, López R, Giraldez I, *et al.* Biofiltration of α -pinene vapours using municipal solid waste (MSW)-Pruning residues (P) composts as packing materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **233**: 149-158.
- [8] 吴丹, 朱琳, 王俭, 等. 低温下间歇式生物过滤系统去除高负荷 H₂S 的效能[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(6): 994-1000.
- [9] 陶佳, 朱润晔, 王家德, 等. 棕纤维复合生物填料床净化三甲胺和臭气的研究[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(2): 111-115.
- [10] 梅瑜, 成卓韦, 王家德, 等. 新型生物滴滤填料性能评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4661-4668.
- [11] 成卓韦, 林雯雯, 蒋轶锋, 等. 利用紫外预处理加强氯苯的生物滴滤净化[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1160-1166.
- [12] Sakuma T, Hattori T, Deshusses M A. Comparison of different packing materials for the biofiltration of air toxics[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, **56**(11): 1567-1575.
- [13] 唐音. 生物过滤处理三氯乙烯的性能研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.
- [14] 伍永钢, 任洪强, 丁丽丽. 新型聚乙烯填料生物滴滤床净化硫化氢气体运行特性[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1451-1456.
- [15] Chen R, Liao Q, Tian X, *et al.* Characterization of the start-up behavior and steady-state performance of biotrickling filter removing low concentration toluene waste gas[J]. Science China Technological Sciences, 2012, **55**(6): 1701-1710.
- [16] 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.
- [17] 张雄军. 生物滴滤塔处理挥发性含硫异味物质实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [18] Li Z X, Yang B R, Jin J X, *et al.* The operating performance of a biotrickling filter with *Lysinibacillus fusiformis* for the removal of high-loading gaseous chlorobenzene[J]. Biotechnology Letters, 2014, **36**(10): 1971-1979.
- [19] Iliuta I, Larachi F. Modeling simultaneous biological clogging and physical plugging in trickle-bed bioreactors for wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Science, 2005, **60**(5): 1477-1489.
- [20] 张超, 赵梦升, 张丽丽, 等. 微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4669-4674.
- [21] Mendoza J A, Prado J, Veiga M C, *et al.* Hydrodynamic behaviour and comparison of technologies for the removal of excess biomass in gas-phase biofilters[J]. Water Research, 2004, **38**(2): 404-413.
- [22] 於建明, 沙昊雷, 褚淑祎, 等. 生物滴滤床净化含 H₂S 废气的实验研究[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(4): 31-34.
- [23] 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.
- [24] Xi J Y, Saingam P, Gu F, *et al.* Effect of continuous ozone injection on performance and biomass accumulation of biofilters treating gaseous toluene [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(1): 33-42.
- [25] 樊奇. 生物滴滤法净化 MEK 废气[D]. 上海: 同济大学, 2006.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人