

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁夏山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评估 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究

陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭*, 陈建孟

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032)

摘要: 应用生物滴滤塔进行了二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷混合废气净化的研究, 使用制药厂活性污泥挂膜, 35 d 后挂膜完成, 对二者的去除率可分别维持在 80% 和 75% 以上. 对二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷的最大去除负荷分别为 $13 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. CO_2 的产生负荷与混合废气的去除负荷呈线性关系, 生物滴滤塔对混合废气的矿化率维持在 61.2%. 对混合废气中二氯甲烷和二氯乙烷相互作用考察发现两者存在一定的抑制作用, 同时考察了反应器运行过程中生物量的变化情况.

关键词: 生物滴滤塔; 活性污泥; 二氯甲烷; 二氯乙烷; 净化

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3168-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.09.007

Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter

CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, YE Jie-xu*, CHEN Jian-meng

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: An experimental investigation on purification of waste gas contaminated with a mixture of dichloromethane (DCM) and dichloroethane (1,2-DCA) was conducted in a biotrickling filter (BTF) inoculated with activated sludge of pharmaceuticals industry. Stable removal efficiency (RE) above 80% for DCM and above 75% for 1,2-DCA were achieved after 35 days, indicating that biofilm was developed. The best elimination capacity (EC) of DCM and 1,2-DCA were $13 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ and $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ respectively. And there was a linear relationship between the production of CO_2 and mixed gas EC, the maximum mineralization rate of mixed gas stabled at 61.2%. The interaction test indicated that DCM and 1,2-DCA would inhibit with each other. The changing of biomass of BTF during the operation process was also been studied.

Key words: biotrickling filter; activated sludge; dichloromethane; dichloroethane; purification

氯代烃多数具有“三致”效应而被美国环保署 (EPA) 列为优先控制污染物, 而其作为重要的化工原料、有机溶剂和中间体在化工、制药、制革等行业中广泛使用, 导致很多工业废水和废气中有机物严重超标. 所以寻求一种安全、高效地去除氯代烃的方法是十分必要的.

氯代烃作为常见的挥发性有机化合物的一种, 其传统处理方法有吸附法、吸收法、燃烧法、冷凝法等^[1-5], 但吸收法不适合于处理难溶于水或化学性质稳定的有机废气; 吸附法因为吸附剂价格昂贵、容易形成二次污染而受限制; 催化燃烧法的运行成本较高, 不适用于低浓度废气; 冷凝法也只适于高浓度有机废气的处理^[6]. 近年出现的电晕法、等离子体法、光氧化分解法等新技术, 在处理 VOCs 中也都取得了很好的成果, 但在操作上存在一定的安全风险^[7-12]. 相比于以上的物理化学方法, 生物法能利用微生物的代谢活动将 VOCs 完全转化成 CO_2 和水, 可用于不同性质废气的处理, 尤其适用于大气量、低浓度的有机废气的净化, 是一种经济、安全、高效的处理技术, 得到了国内外越来越多的学者的重视^[13-15]. 然而氯代

烃又因其极低的水溶性及可生物降解性使得传统的生物处理技术对氯代烃的降解速率和去除率均不高. 因此, 探索氯代烃混合废气的生物净化工艺具有重大的理论和实践意义.

生物滴滤法以填料塔由结合生物膜净化技术, 不仅操作简便、运行费用低, 而且处理效果好、不产生二次污染^[13,16,17]. 本实验以二氯甲烷 (DCM) 和 1,2-二氯乙烷 (1,2-DCA) 这两种使用较多的氯代烃作为研究对象, 利用生物滴滤塔对其进行净化, 考察了稳定期总负荷和两者之间的相互作用对去除效果的影响, 同时考察了反应器运行阶段生物量的变化情况.

1 材料与方法

1.1 实验装置及流程

本实验装置主要由生物滴滤塔装置、空气压

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2015-04-13

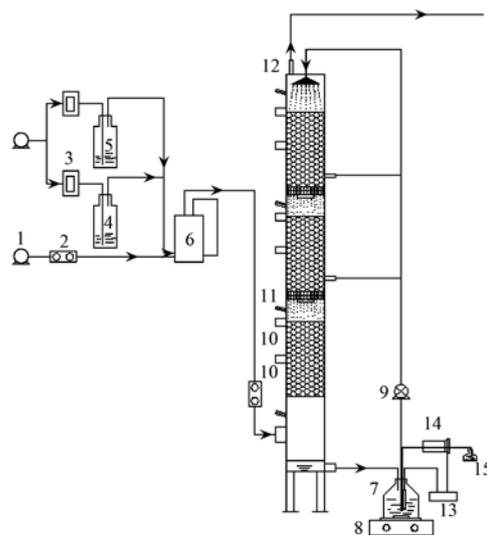
基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA063102); 国家自然科学基金项目 (51178430)

作者简介: 陈东之 (1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: cdz@zjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yejiexu@zjut.edu.cn

缩机、玻璃转子流量计、磁力搅拌器、pH 自动控制系统、质量流量计、计量泵、蠕动泵、不锈钢吹脱瓶、混气瓶等组成。实验采用逆流式操作,含氯烷烃混合废气采用动态鼓泡法配制,空气经泵、质量流量计进入装有液态 DCM(或 1,2-DCA)的鼓泡瓶中产生气泡,利用平衡分压产生的 DCM(或 1,2-DCA)废气经胶管到达混气瓶与空气充分混合,混合空气流量由玻璃转子控制。经流量计调节流量后,模拟废气从塔底进入生物滴滤塔,经滴滤塔中附着在填料上的生物膜降解、净化。实验装置如图 1 所示。

生物滴滤塔由总高 1 080 mm、内径 100 mm 的有机玻璃制成,填料层每层高度为 191 mm (3×191 mm),共由 3 层组成,沿塔高方向设置 4 个气体采样口(1 个进气口,3 个出气口)和 6 个填料取样口。每层的隔板上都装有填料,填料层高 191 mm,每层填料之间由隔板隔开,隔板开孔率在 70% 以上。实验采用气液逆流操作,气体由塔底进入,由下而上,营养液经计量泵从储液瓶提升至塔顶向下喷淋,储液瓶容积为 2 L。为了提高底层和中层的滴淋效果,避免上层营养液向下滴时出现分布不均匀的情况,本喷淋装置设置 3 条管线分层喷淋,控制管路流量上层 > 中层 > 下层,这样营养液在塔内横截面上就能



1. 空气泵; 2. 转子流量计; 3. 质量流量计; 4、5 吹脱瓶; 6. 混合瓶; 7. 营养液储液瓶; 8. 磁力搅拌器; 9. 计量泵; 10. 填料取样口; 11. 采气口; 12. 尾气排放口; 13. pH 自动控制系统; 14. 蠕动泵; 15. 氢氧化钠储液瓶

图 1 生物滴滤塔工艺流程图示意

Fig. 1 Schematic of biotrickling filter

更均匀地分布。营养液最后回流至储液瓶,回流速度为 $12 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,每 4 天更换一次营养液。装置设有 pH 自动控制系统,pH 维持在 7.0 ~ 7.2。

实验装置具体结构参数见表 1

表 1 生物滴滤塔的基本参数

Table 1 Characteristics of biotrickling filter

填料塔特性	塔高/mm	塔径/mm	层数	实际填料高度/mm	每段填料容积/L	塔体总容积/L	填料层高度与塔径比
参数值	1 080	100	3	191	1.5	5.181	1.91:1

1.2 填料与营养液配制

生物滴滤塔中的填料为聚氨酯小球,该填料的特征为较大的比表面积,一定的机械强度、空隙率较大、压降小、抗老化力强。具体参数见表 2。

表 2 填料特性参数

Table 2 Characteristics of packing carriers

参数	单位	聚氨酯小球
平均尺寸	mm	14 ~ 18
堆密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	154.36
真密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	414
孔隙率	%	62.7
堆积个数	$\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$	2.46×10^5
动态持水量	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.068
静态持水量	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	0.059

滴滤塔营养液采用连续喷淋,营养液组成如下 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 4.5、 KH_2PO_4 1.0、 NH_4Cl 2.5、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.023、

微量元素 1 mL,调节 pH 为 7.2。

微量元素配方 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.02、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.0、 H_3BO_3 0.014、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.10、 $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.10、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.02、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.02,pH 为 7.2,110℃ 高压灭菌 40 min。

1.3 分析方法

(1) 生物量的测定

采用 Folin-酚法测定蛋白质的含量。

(2) 气相色谱法(GC)

DCM 和 1,2-DCA 检测分析方法:采用 Agilent 6890 分析模拟废气浓度,色谱柱为 HP-Innowax 毛细管柱($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.5 \mu\text{m}$)。柱温采用升温程序:初始温度为 90℃,保持 4 min; $30 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度至 150℃,保持 0.5 min。检测器:FID,温度:200℃,柱流量: $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样量:800 μL 。载气:

氮气,总流量: $16.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,分流比为 15:1. 氢气流: $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,空气流量: $450 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

CO_2 定量检测:采用 Agilent6890 检测,色谱柱为 HP-Plot-Q 毛细管柱($30 \text{ m}\times 0.32 \text{ mm}\times 20 \mu\text{m}$). 进样口温度: 90°C ,检测器(TCD)温度: 100°C ,柱温: 40°C ,柱流量: $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量: $800 \mu\text{L}$,尾吹气:氮气.

2 结果与讨论

2.1 反应器启动阶段

活性污泥取自浙江某制药厂的曝气池,经测试污泥体积指数 SVI 值为 $1.624 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,污泥沉降比 SV 为 75%,混合液悬浮固体浓度 MLSS 为 $4468 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,混合液挥发性悬浮固体浓度 MLVSS 为 $3575 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

为了避免填料对混合废气的吸附作用,消除吸附作用对实验影响,启动反应器初期不添加活性污泥,通入 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 DCM 和 1,2-DCA 混合模拟废气,按实验条件正常喷淋营养液,运行一周. 通过气相检测 DCM 和 1,2-DCA 进出口浓度,直到进出口浓度一致时即可认为吸附饱和. 按照活性污泥:营养液 = 1:2 通过喷淋塔喷淋循环挂膜,通过测定运行参数分析反应器的运行性能.

对目标污染物的去除率是反映生物滴滤塔挂膜启动情况的重要参数. 在启动挂膜阶段停留时间(EBRT)设为 60 s,废气浓度均为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 在启动阶段,反应器对废气的去除率如图 2 所示. 其中 DCM 在挂膜 30 d 后去除率达 80% 以上. 在相同的运行条件下,1,2-DCA 启动 35 d 后,去除率达到 75% 以上,并能持续保持此去除性能.

实验结果表明,用活性污泥进行挂膜的生物滴滤塔启动时间为 35 d. 张定丰等^[18]利用高效降解菌加活性污泥对生物滴滤塔挂膜净化多组分废气,启动完成需要 30 d 左右. 本实验只用活性污泥挂膜,挂膜完成所需的时间与之相比较需要长一些,挂膜完成后对 DCM 和 1,2-DCA 的去除率分别达到 80% 和 75% 以上.

2.2 进气浓度对去除率和去除负荷影响

混合废气去除率和去除负荷随进气浓度的变化如图 3 所示,考察了 EBRT = 60 s 时进气浓度对去除效果的影响. 随着进气总浓度从 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 提高到 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,DCM 的去除率从 80% 降至 30%; 1,2-DCA 的去除率从 75% 降至 34%; 随着进气负荷的增加,DCM 的去除负荷从 $5 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 逐步上

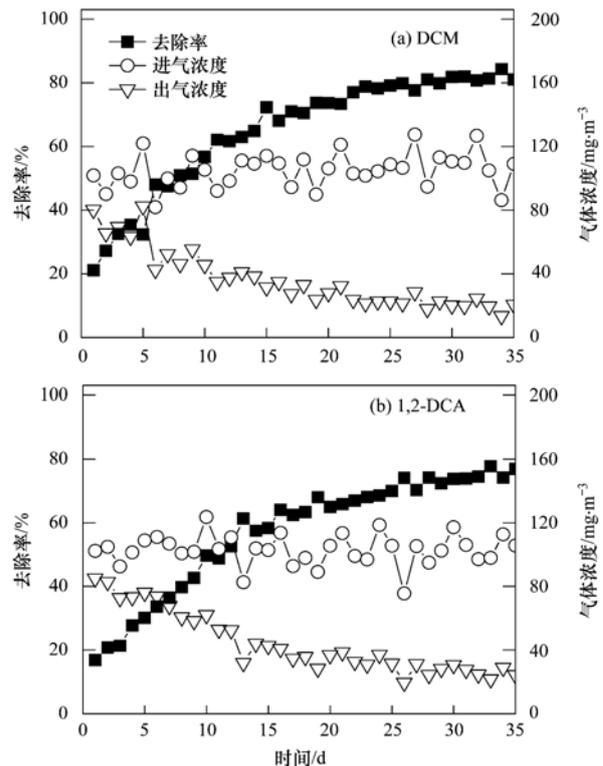


图 2 反应器挂膜阶段混合废气进出口浓度和去除率

Fig. 2 Concentration and removal efficiency of mixed waste gas during the startup phase of BTF

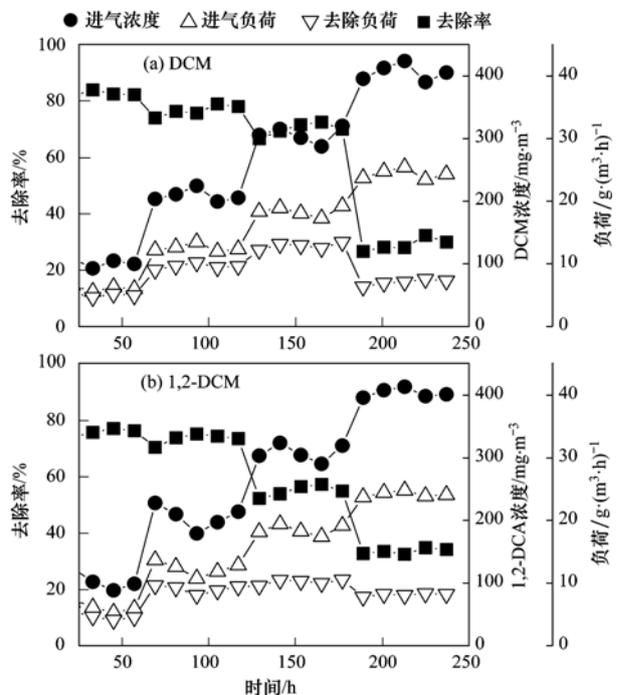


图 3 进气浓度对混合废气去除率影响

Fig. 3 Effects of inlet concentration on removal rate

升至 $13 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,当进气负荷进一步加大时,去除负荷下降至 $7 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,1,2-DCA 的去除负荷从 $5 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 逐步上升至 $10 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,但随

后下降至 $8 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 这与进气浓度的升高抑制了活性污泥的降解活性有关. 王家德^[19]等利用生物滴滤池处理 DCM 的研究中也显示了高浓度的 DCM 会降低生物滴滤池的去除效率. 这表明在较高进气负荷下, 由于受系统内有效生物量和气液传质的限制影响, 单位生物量的底物转化能力接近最大值. 若进一步增加进气负荷, 可能使系统内生物活性受到抑制, 从而使底物转化能力降低.

2.3 混合废气相互作用考察

利用滴滤塔处理多组分废气时, 气体之间往往会存在相互竞争或抑制作用, 所以研究混合废气的相互作用是很有必要的^[15,20,21]. 为了考察 1,2-DCA 和 DCM 在反应器中的相互作用, 在反应器运行至稳定运行阶段, 考察混合废气各组分浓度变化对于生物滴滤塔工艺去除效果的影响. 实验过程中, 混合废气中某一组分浓度由低到高变化, 另一组分的浓度则保持稳定, 即在保持 DCM 进气浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 1,2-DCA 的浓度从 $0 \sim 450 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 逐步提高; 保持 1,2-DCA 进气浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCM 的浓度从 $0 \sim 450 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 逐步提高, 检测不同进气浓度条件下各组分的去除率. 结果如图 4 和图 5 所示

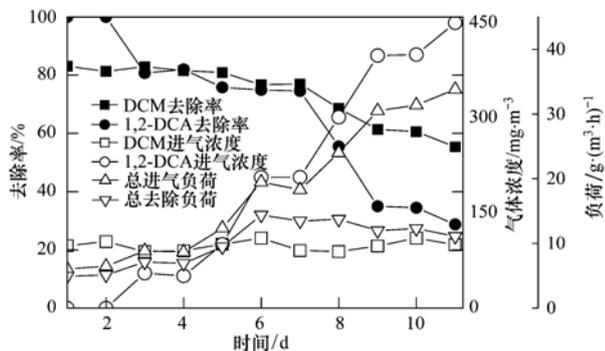


图 4 1,2-DCA 浓度变化对 DCM 的去除性能的影响

Fig. 4 Effects of concentration changes of 1,2-DCA on removal of DCM

如图 4 所示, 当 DCM 的进气浓度维持在 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 逐步提高 1,2-DCA 的进气浓度, 总进气负荷由 $6.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 提高到 $33.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 在只有单一组分 DCM 时, 生物滴滤塔对 DCM 的去除率为 83% 以上. 当 1,2-DCA 的浓度为 $55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCM 的去除率为 82%, 总去除负荷为 $7.1 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 提高 1,2-DCA 的进气浓度到 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCM 的去除率为 81%, 总去除负荷为 $9.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 当 1,2-DCA 的进气

浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCM 的去除率为 76% 和 68%, 且可取的最高去除负荷 $14 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 当 1,2-DCA 的进气浓度上升到 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCM 的去除率为 60%, 总去除负荷为 $12 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 当 1,2-DCA 的进气浓度为 $450 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCM 的去除率为 55%, 总去除负荷下降至 $11 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 由此可知, 在反应体系中, 低浓度 1,2-DCA (低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的存在不会对 DCM 的降解产生抑制效应, 但高浓度 1,2-DCA 的存在 (高于 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 会对 DCM 的降解产生一定的抑制效应.

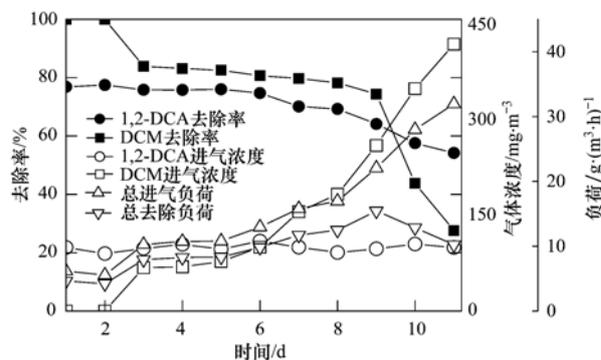


图 5 DCM 浓度变化对 1,2-DCA 的去除性能的影响

Fig. 5 Effects of concentration changes of DCM on removal of 1,2-DCA

如图 5 所示, 1,2-DCA 的进气浓度维持在 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 逐步提高 DCM 的进气浓度, 总进气负荷由 $6.2 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 上升到 $32 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 当组分中只存在 1,2-DCA 时, 反应体系对 1,2-DCA 的去除率为 77%. 当 DCM 的浓度为 $68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, DCA 的去除率为 76%, 总去除负荷为 $7.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 提高 DCM 的进气浓度到 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 1,2-DCA 的去除率为 75%, 总去除负荷为 $9.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 当 DCM 的进气浓度为 $184 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 1,2-DCA 的去除率为 69%, 总去除负荷为 $12 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 当 DCM 的进气浓度为 $261 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 1,2-DCA 的去除率为 64%, 具有最高总去除负荷 $15 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 当 DCM 的进气浓度上升至 $420 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 1,2-DCA 的去除率为 55%, 总去除负荷下降至 $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 由此可知, 在反应体系中, 低浓度 DCM (低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的存在不会对 1,2-DCA 的降解产生抑制效应, 但高浓度 DCM 的存在 (高于 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 会对 1,2-DCA 的降解产生一定的抑制效应.

结合图 4 和图 5 可知, 用生物滴滤塔去除含 DCM 和 1,2-DCA 的混合废气时, 当各组分的浓度低

于 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,不会对另一组分产生抑制效应,当进气浓度高于 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,对另一组分有轻微的抑制效应,当进气浓度高于 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,DCM 和 1,2-DCA 的去除率分别由 80% 和 75% 降低到 60% 和 55% 左右. 保持一组的浓度不变提高另一组分的浓度时,在一定范围内能提高反应器的总去除负荷,但当另一组分的浓度过高时,由于对两组分去除率的降低会导致总去除负荷的下降.

2.4 二氧化碳生成量分析

生物滴滤塔运行过程中,目标污染物 VOCs 在有氧条件下主要会被微生物降解成 CO_2 和水,也可被微生物利用合成自身物质. 因此,常用 CO_2 生成量来反映生物滴滤塔的去除性能. 有报道指出生物滴滤床降解苯的矿化率达 77% 左右^[22],而 CO_2 生成量与 BTEX 的去除负荷的比例为 2.50 ~ 2.93 之间^[23~26],有研究比较下流式和上流式生物过滤塔处理高负荷甲苯废气, CO_2 生成量随着甲苯进气浓度

的增大而增大,在 EBRT 为 3.1 min 时,甲苯转化 CO_2 的百分率分别为 81% 和 70%^[27].

CO_2 的理论生成量表示有机物降解过程中所含的碳能完全转化成 CO_2 时的 CO_2 生成量. 然而在混合废气组分中,因为各组分的含碳量是存在差异的,所以如果各组分的去除是不成比例的话,是难以计算出理论矿化率的,因此根据本反应器对 DCM 和 1,2-DCA 的去除情况,本实验尽可能地将 DCM 和 1,2-DCA 按 1:1 的浓度调整进气负荷, CO_2 随混合去除负荷的变化情况如图 6 所示. 实验过程中 DCM 和 1,2-DCA 的进气浓度分别由 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 逐渐提高到 $420 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,二者的去除负荷分别从 $1.28 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $1.04 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 上升到 $10.38 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $9.90 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,而后又分别下降到 $4.41 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $6.61 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$. 根据 CO_2 的实际产生量,结合 DCM 和 1,2-DCA 完全矿时 CO_2 的理论生成量,求出总 CO_2 理论生成量,从而求出反应器对混合废气的矿化率.

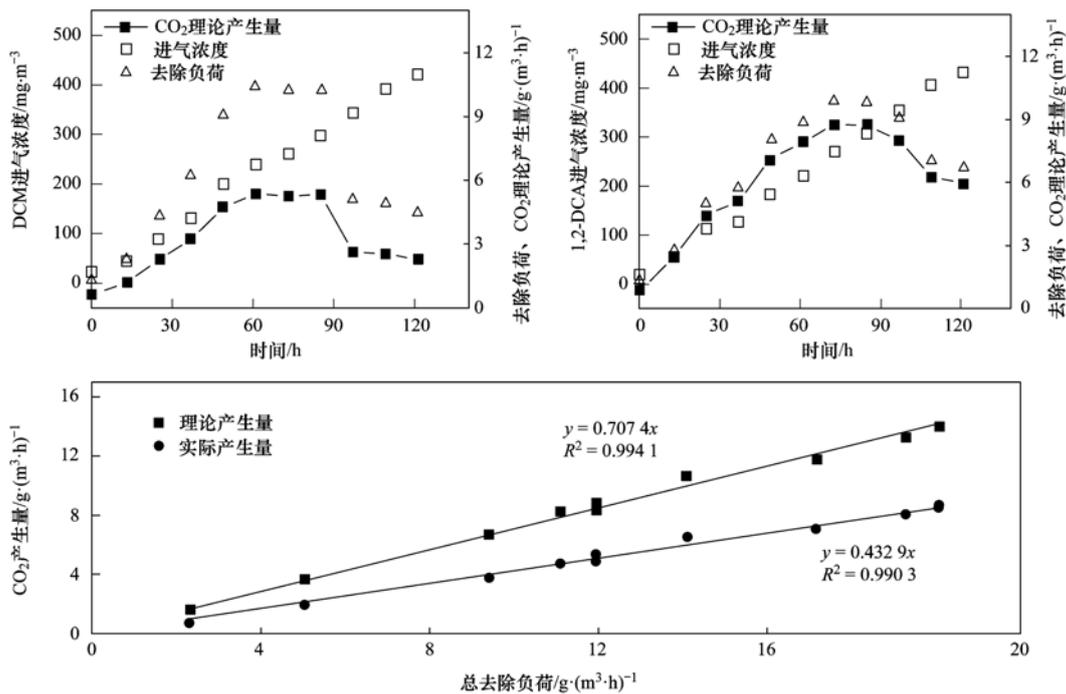


图 6 CO_2 生成量随去除负荷的变化关系

Fig. 6 Relationship between the CO_2 production rate and elimination capacity

结果显示,该实验下 CO_2 生成量与总去除负荷呈线性关系, $y = 0.4329x$, $R^2 = 0.9903$,而理论上 CO_2 生成量与混合废气总去除负荷拟合的结果可表示为 $y = 0.7074x$, $R^2 = 0.9941$. 表明生物滴滤塔对混合废气的矿化率为 61.2%. 与实际值有一定的差距,表明反应器中微生物菌群对混合降解除了转化

为 CO_2 以外,还有一部分转化为生物碳供微生物自身生长,还有一些以 HCO_3^- 、 H_2CO_3 或者 CO_3^{2-} 无机碳的形式存在于液相中,没有被检测到,另外的其他部分则可能是生成了难降解的中间产物.

2.5 反应器运行过程中生物量的变化

生物滴滤塔中填料中所含有的生物量是评价反

反应器性能的重要参数之一^[28]。由于反应器内生物量变化难以准确测定,有研究采用蛋白质含量来表征生物滴滤塔内的生物量变化,即将填料上的生物膜清洗下来,提取蛋白质,进而测定蛋白含量^[29,30]。

在生物滴滤塔工艺运行过程中,对启动器和稳定期的各层填料进行取样并测定其中生物量,在 DCM 和 1,2-DCA 浓度分别为 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 下测定各层的去除负荷,结果如表 3 所示。

表 3 不同时期蛋白量含量及去除负荷的变化

Table 3 Protein amount and elimination capacity during different phases of BTF

天数/d	蛋白质含量(以填料计)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$			去除负荷/ $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$		
	上层	中层	下层	上层	中层	下层
5	0.191	0.257	0.499	0.91	1.21	2.4
60	0.968	1.105	1.290	2.86	3.31	3.81
80	0.973	1.104	1.287	2.88	3.32	3.80

由表 3 可见生物滴滤塔上、中、下各层的生物量(以填料计,下同)在启动完成后较挂膜初期都有明显的增加,其中上层由 $0.191 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $0.968 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 中层由 $0.257 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $1.105 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 生物塔的下层由 $0.499 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $1.290 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。稳定运行期,填料上微生物的生长与脱落维持动态平衡,生物量基本维持不变,老化的生物膜随营养液的更换排出系统。不同运行时期,反应器各层的去除负荷规律为:下层 > 中层 > 上层,这与生物量的分布规律一致,表明生物量的多少会直接影响污染物的去除效果。

3 结论

(1) 采用制药厂活性污泥循环挂膜,可用于去除低浓度的 DCM 和 1,2-DCA 混合废气。挂膜所需的时间为 35 d,挂膜完成后二者可分别保持 80% 和 75% 的稳定去除率。

(2) 反应器运行过程中随进气负荷的增加去除负荷遵循先上升后下降的规律,对 DCM 和 1,2-DCA 的最大去除负荷分别为 $13 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $10 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 。当两组分的浓度低于 $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,无相互作用,当一组分的浓度高于 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,开始对另一组分出现抑制,影响另一组分的去除。

(3) 稳定运行期,当 DCM 和 1,2-DCA 的进气负荷为 1:1 时,生物滴滤塔对混合废气的矿化率为 61.2%。反应器各层的去除负荷规律为:下层 > 中层 > 上层。

参考文献:

[1] 马超,薛志钢,李树文,等. VOCs 排放、污染以及控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(2): 104-105.
 [2] 席劲瑛,武俊良,胡洪营,等. 工业 VOCs 气体处理技术应用状况调查分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 1955-1960.
 [3] Chiang C Y, Liu Y Y, Chen Y S, *et al.* Absorption of hydrophobic volatile organic compounds by a rotating packed bed

[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(27): 9441-9445.
 [4] Guihéneuf S, Castillo A S R, Paquin L, *et al.* Absorption of hydrophobic volatile organic compounds in ionic liquids and their biodegradation in multiphase systems[A]. In: Fang Z, Smith R L Jr, Qi X H (Eds.). *Production of Biofuels and Chemicals with Ionic Liquids*[M]. Netherlands: Springer, 2014.
 [5] Morozov G, Breus V, Nekludov S, *et al.* Sorption of volatile organic compounds and their mixtures on montmorillonite at different humidity [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 454: 159-171.
 [6] 王小军,徐校良,李兵,等. 生物法净化处理工业废气的研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(1): 213-218.
 [7] 任爱玲,赫环环,郭斌,等. 生物滴滤塔净化含低浓度苯乙烯废气的研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1840-1848.
 [8] Van Durme J, Dewulf J, Sysmans W, *et al.* Abatement and degradation pathways of toluene in indoor air by positive corona discharge[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(10): 1821-1829.
 [9] Demidiouk V, Moon S I, Chae J O. Toluene and butyl acetate removal from air by plasma-catalytic system [J]. *Catalysis Communications*, 2003, 4(2): 51-56.
 [10] Ko Y, Yang G, Chang D P Y, *et al.* Microwave plasma conversion of volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, 53(5): 580-585.
 [11] Urashima K, Chang J S. Removal of volatile organic compounds from air streams and industrial flue gases by non-thermal plasma technology[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, 7(5): 602-614.
 [12] 吴亚西,陈烈贤. 光催化氧化分解空气挥发性有机污染物的研究[J]. 卫生研究, 2002, 31(5): 384-385.
 [13] 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,等. 生物滴滤塔处理苯酚气体研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 521-525.
 [14] 李超,赵东风,张庆冬,等. 生物过滤法处理低浓度有机废气的研究进展[J]. 化工环保, 2013, 33(6): 503-508.
 [15] Wang X Q, Lu B H, Zhou X X, *et al.* Evaluation of o-xylene and other volatile organic compounds removal using a xylene-acclimated biotrickling filter. [J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(19): 2691-2699.

- [16] Liu D Z, Andreasen R R, Poulsen T G, *et al.* A comparative study of mass transfer coefficients of reduced volatile sulfur compounds for biotrickling filter packing materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **260**: 209-221.
- [17] Sun D F, Li J J, Xu M Y, *et al.* Toluene removal efficiency, process robustness, and bacterial diversity of a biotrickling filter inoculated with *Burkholderia* sp. Strain T3 [J]. *Biotechnology & Bioprocess Engineering*, 2013, **18**(1): 125-134.
- [18] 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 等. 生物滴滤塔净化多组分废气的研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2116-2120.
- [19] 王家德, 陈建孟, 庄利. 生物滴滤池处理二氯甲烷废气研究[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(3): 214-217.
- [20] Jiang X, Yan R, Tay J H. Simultaneous autotrophic biodegradation of H₂S and NH₃ in a biotrickling filter [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(10): 1350-1355.
- [21] 谢志荣, 魏在山, 曾贵华, 等. 生物法处理含氮硫无机有机恶臭气体研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(1): 136-139.
- [22] Jang J H, Hirai M, Shoda M. Enhancement of styrene removal efficiency in biofilter by mixed cultures of *Pseudomonas* sp. SR-5 [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, **102**(1): 53-59.
- [23] Jiang X, Yan R, Tay J H. Transient-state biodegradation behavior of a horizontal biotrickling filter in co-treating gaseous H₂S and NH₃ [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **81**(1): 969-975.
- [24] Jorio H, Bibeau L, Heitz M. Biofiltration of air contaminated by styrene: effect of nitrogen supply, gas flow rate, and inlet concentration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(9): 1764-1771.
- [25] Hassan A A, Sorial G. Biological treatment of benzene in a controlled trickle bed air biofilter [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(10): 1315-1321.
- [26] Mathur A K, Majumder C B, Chatterjee S. Combined removal of BTEX in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **148**(1-2): 64-74.
- [27] Znad H T, Katoh K, Kawase Y. High loading toluene treatment in a compost based biofilter using up-flow and down-flow swing operation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **141**(3): 745-752.
- [28] 胡俊, 郑江玲, 吴越新, 等. 生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 2979-2986.
- [29] American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [S]. Washington: APHA, 1998.
- [30] Steinle P, Stucki G, Stettler R, *et al.* Aerobic mineralization of 2,6-dichlorophenol by *Ralstonia* sp. strain RK1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(7): 2566-2571.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong	(3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, et al.	(3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, et al.	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, et al.	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, et al.	(3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li	(3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, et al.	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, et al.	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al.	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al.	(3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, et al.	(3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, et al.	(3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, et al.	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al.	(3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, et al.	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, et al.	(3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, et al.	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, et al.	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, et al.	(3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, et al.	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, et al.	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, et al.	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, et al.	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, et al.	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, et al.	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, et al.	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, et al.	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitro bacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, et al.	(3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, et al.	(3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, et al.	(3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, et al.	(3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, et al.	(3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, et al.	(3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, et al.	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, et al.	(3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, et al.	(3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, et al.	(3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, et al.	(3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, et al.	(3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, et al.	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, et al.	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, et al.	(3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, et al.	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, et al.	(3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, et al.	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, et al.	(3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, et al.	(3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, et al.	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, et al.	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, et al.	(3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan	(3533)

《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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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