

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH₄浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳(2917)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙(2924)

2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海(2932)

厦门市冬春季灰霾期间大气PM₁₀中多环芳烃的污染特征及来源分析 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红(2939)

气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J(2946)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超(2953)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基(2960)

印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 马英歌(2967)

烹调油烟中挥发性有机物的排放初探 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕(2973)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟(2979)

分期布液生物滴滤床净化H₂S废气性能研究 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪(2987)

粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究 孟阳,王书肖(2993)

太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁(3000)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究 张燕,高翔,张洪(3009)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性 李如忠,李峰,周爱佳(3014)

巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉(3024)

巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼(3031)

丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 雷沛,张洪,单保庆(3038)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤(3046)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波(3051)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功(3057)

太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩(3064)

南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 刘静,路风,杨延钊,徐娜,王田妮(3070)

珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红(3076)

东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 王若师,许秋瑾,张娴,魏群山,颜昌宙(3083)

深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉(3089)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒(3097)

渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 蔡文倩,刘录三,乔飞,林尚璇,周娟(3104)

地下水污染防治区划体系构建研究 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(3110)

北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(3117)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO₃⁻的存储和运移 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风(3124)

改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 董锡臻,石宝友,解岳,王东升(3132)

水溶液中臭氧和溴离子的反应研究 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇(3139)

HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布 张晗,董秉直(3144)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC_s)产生机制研究 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才(3152)

不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响 况焯,周琰,王清萍,陈祖亮(3160)

多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶(3167)

三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮(3172)

改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 龙腾,易筱筠,党志(3177)

硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军(3182)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰(3189)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩(3197)

生物表面活性剂强化污泥水解的研究 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平(3202)

厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波(3208)

阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究 李绍峰,朱静,李铁晶(3214)

农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明(3220)

糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云(3228)

餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕(3236)

共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳(3241)

*Geobacter sulfurreducens*对汞的甲基化及其影响因素研究 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳(3247)

单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷(3253)

金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新(3261)

环境激素氧氟菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵(3266)

地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳(3272)

焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征 刘敬勇,孙水裕(3279)

城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞(3288)

NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析 连静,刘俊新(3295)

《环境科学》征订启事(3037) 《环境科学》征稿简则(3151) 信息(2999,3030,3096,3227)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究

胡俊¹, 郑江玲¹, 吴越新¹, 张丽丽^{1,2*}, 陈建孟¹

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 分析生物滴滤(BTF)长期运行过程生物量积累和分布规律、生物膜相特性变化,旨在探讨生物膜相特性变化与体系运行性能恶化的相关作用效应。结果表明,生物滴滤塔运行 130 d 后呈现出降解性能恶化的趋势,生物膜厚度和床层压降逐渐增加,且生物膜呈现出非均匀性分布,填料层上、下半段孔隙率已从启动期的 85% 和 82% 分别降低至 65% 和 40%,表征生物膜平均代谢活性的 AWCD 值也明显降低,表明生物膜出现老化现象。生物膜胞外多聚物(EPS)总分泌量和蛋白质含量运行后期分别约为前期的 2 倍。蛋白质与多糖比值(PN/PS)逐渐从 0.3 增至 0.95;生物膜表面疏水性 with PN/PS 值呈正相关,也相应从 33% 增为 73%;EPS 的平均分子量呈现减小的趋势;FTIR 分析结果进一步表明,EPS 的主要化学成分发生了变化。EPS 分泌量和主要成分的变化可能是导致反应体系运行性能恶化的本质原因之一。上述结果可为从本质上解决生物滴滤体系长期运行面临的填料层堵塞和运行性能恶化等共性技术难题奠定基础。

关键词: 生物滴滤; 甲苯; 运行性能; 生物膜; 胞外多聚物

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-2979-08

Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF

HU Jun¹, ZHENG Jiang-ling¹, WU Yue-xin¹, ZHANG Li-li^{1,2}, CHEN Jian-meng¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: This study analyzes the accumulation and distribution of biomass and changes in properties of biofilm in a long-term biotrickling filter (BTF) system in order to investigate the correlation between the biofilm phase properties and the performance. After a long-term operation of 130 days, the BTF showed a deterioration in degradation performance and an increase in pressure drop with a gradual increase of biofilm thickness and uneven distribution of biomass. Meanwhile, the porosity of the upper and lower layers decreased from 85% and 82% in the start-up period to 65% and 40%, respectively, as a result of the excessive accumulation of biomass and its non-uniform distribution. The AWCD values showed a decreasing trend indicating that the biological activity decreased with the aging of biofilm in the long-term BTF. The contents of total extracellular polymeric substances (EPS) and protein in the later period were twice as much as those in the start-up period. The value of protein to polysaccharide (PN/PS) ratio increased from 0.3 to 0.95, and showed positive correlation with the surface hydrophobicity of the biofilm, which increased from 33% to 73% accordingly. The mean molecular weight of EPS decreased during the operation of BTF. The result of FTIR further showed that the main chemical composition of EPS changed in the long-term BTF accordingly, possibly resulting in the deterioration of performance in the long-term BTF. The above experimental results could be very helpful for reducing the clogging and performance deterioration in long-term BTF.

Key words: biofiltration; toluene; performance; biofilm; EPS

近年来,挥发性有机物(VOCs)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^[1]。生物法废气净化技术应用微生物代谢活动,将废气转化为细胞代谢的能源、细胞组成物质及无害的小分子物质(如水、二氧化碳等),具有高效、低耗、反应条件温和、二次污染小等优点^[2~4],已成为中低浓度 VOCs 废气排放控制的主流技术之一。生物过滤和生物滴滤是目前废气生物处理最为常见的工艺。生物滴滤是生物过滤工艺的改进,由于连续流动的液体通过填充层,使得反应条件(如 pH、营养物质浓度)易于控制,单位体积填料的生物量高,是目前处理工业源 VOCs 废气应用最多的工艺^[5]。

然而,生物滴滤反应体系长期运行过程中的填料层堵塞和运行性能恶化一直是该工艺应用中所面临的和需要不断解决的共性科学技术难题^[6]。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,从而实现净化,而同时菌体也会不断繁殖并积累在填料层中。随着反应体

收稿日期: 2011-11-10; 修订日期: 2012-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908210, 21177116); 浙江省重大科技专项(2011C13023)

作者简介: 胡俊(1986~),男,硕士研究生,主要方向为废气生物处理技术, E-mail: gasinghj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: misslyli0127@hotmail.com

系的长期运行,生物膜的过度生长和非均匀性分布常导致填料层堵塞,发生短流和沟流,并致使压降增加和运行性能恶化^[7~11]. 前人的研究多集中于采用一些物理和化学技术控制反应体系生物膜过度生长,进而探讨保证废气生物滴滤体系长期运行的可行性^[9,10,12,13]. 但对生物滴滤降解 VOCs 废气长期运行过程中生物膜相特性变化及其与填料层堵塞和运行性能恶化的相关作用效应,却鲜见报道.

本研究分析了生物滴滤反应体系长期运行过程中生物量积累和分布规律,探讨生物膜相组成及表面特性变化,尝试阐明导致反应体系填料层堵塞和运行性能恶化的根本原因,以期为进一步采取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,从本质上为解决反应体系长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奠定基础.

1 材料与方 法

1.1 实验装置

实验装置主要由生物滴滤塔装置、空压机、玻璃转子流量计、计量泵、吹脱瓶、混合瓶等组成. 滤塔由总高 950 cm、内径 8 cm 的有机玻璃制成,填料层总高度 60 cm(2 × 30 cm/层),沿塔高方向设置 3 个气体采样口和 4 个填料取样口. 气泵吹出的空气分为 2 路,一路进入装有液态甲苯的吹脱瓶,携带气体与另一路空气混合后配制成不同浓度的模拟废气,气体流量均由玻璃转子流量计控制. 实验过程中采用气液逆流操作,气体从塔底进入,由下至上流动,营养液由计量泵从储液瓶提升至塔顶向下喷淋,最后由塔底流回至储液瓶. 实验装置如图 1 所示.

1.2 活性污泥来源

活性污泥取自中石化镇海炼化污水处理厂曝气池. SVI 值为 151.39 mL·g⁻¹, MLSS 为 9 924 mg·L⁻¹. 混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)为 7 839 mg·L⁻¹.

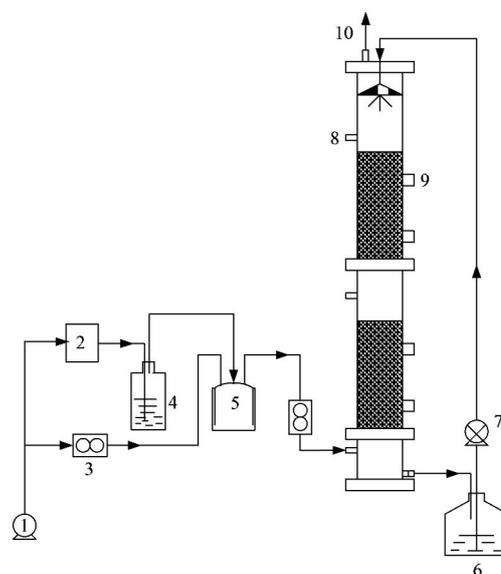
1.3 生物填料

生物滴滤塔采用聚氨酯小球作为填料^[14],其直径 14 ~ 18 mm,堆积密度 155 kg·m⁻³,孔隙率 90.8%. 塔内填料分为 2 层,每层高为 30 cm.

1.4 分析项目和方 法

(1) 甲苯浓度

采用气相色谱法. 采用 Agilent 6890 分析甲苯气相浓度,色谱柱为 HP-Innowax 毛细管柱(30 m × 0.32 mm × 0.5 μm). 汽化室、检测器(FID)和柱子



1. 空气泵; 2. 玻璃转子流量计; 3. 转子流量计;
4. 吹脱瓶; 5. 混合瓶; 6. 储液瓶; 7. 蠕动泵;
8. 气体采样口; 9. 填料取样口; 10. 尾气排放口

图 1 生物滴滤塔工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of biotrickling filter

温度分别为 200、180、90℃,柱流量 1 mL·min⁻¹,进样量 800 μL. N₂ 为载气,总流量为 33.4 mL·min⁻¹,分流比为 30:1. 氢气流量和空气流量分别为 40 mL·min⁻¹和 450 mL·min⁻¹.

(2) 床层压降、孔隙率和生物膜厚度

床层压降采用 U 型管压差计测定;孔隙率为测得填料的空隙体积比上填料在滴滤塔中所占体积^[13]. 将带有生物膜的填料放入一个 50 mL 量筒中,取另一个量筒装满 50 mL 蒸馏水,将水倒入前一个量筒至 50 mL 刻度处,剩余水的体积即为带有生物膜的填料的体积 V_1 ,该填料在滴滤塔中的体积测得为 V , $(V - V_1)/V$ 即为孔隙率;生物膜厚度通过下列公式计算^[15]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - 6\zeta(1 - \varepsilon)/(d_0 + \zeta)$$

式中, ε 为孔隙率, ε_0 为初始填料孔隙率, d_0 为填料初始直径, ζ 即为生物膜厚度.

(3) 采用 MLSS 作为生物膜干重,用生物膜干重代表生物量,用标准方法测定.

(4) 生物膜胞外多聚物(EPS)的提取方法

本实验采用加热法^[16]提取生物滴滤塔内生物膜表面的 EPS. 该方法对 EPS 的提取率较高,且操作简便. 取几颗填料,漩涡振荡 10 min,洗下填料上的生物膜,3 000 r·min⁻¹、4℃ 离心 5 min,弃去上清液,加入 PBS (2 mmol·L⁻¹ Na₃PO₄, 4 mmol·L⁻¹ NaH₂PO₄, 9 mmol·L⁻¹ NaCl, 1 mmol·L⁻¹ KCl, pH 值

为 7) 缓冲溶液, 放入 80℃ 水浴 1 h, 15 000 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 、4℃ 离心 20 min, 将上清液用 0.45 μm 滤膜过滤, 收集的滤液即为含 EPS 提取液。

(5) 多糖与蛋白质浓度测定

多糖 (polysaccharide, PS) 的含量采用苯酚-硫酸法进行测定, 蛋白质 (proteins, PN) 采用 Folin-酚法测定。

(6) 细胞疏水性 (relative hydrophobicity, RH) 测定

将准备好的生物膜加入 40 mL Tris-HCl 缓冲溶液 ($\text{pH} = 7$), 取其中的 20 mL 直接测生物量 (MLSS), 在另外 20 mL 中加入 10 mL 十六烷, 一并装入分液漏斗, 均匀搅拌 5 min, 静置 30 min, 使油水两相分开, 将水相转移到另一个容器中, 测定 MLSS. 相对疏水性按照公式 $\text{RH} = (1 - \text{MLSS}_e / \text{MLSS}_i) \times 100\%$ [17] 计算, MLSS_e 为乳化后水相中的 MLSS 含量, MLSS_i 为乳化前 MLSS 总量。

(7) 所提取的 EPS 的 Zeta 电位采用 Malvern nano zetasizer 90 进行测量。

(8) 本研究采用 FTIR 分析生物膜 EPS 中所存在的各基团类别。在测定前采用冷冻干燥对 EPS 进

行预处理 [18]。

(9) 本研究采用凝胶渗透色谱 (GPC) 分析 EPS 平均分子量的分布, 选用的标准品为聚乙二醇。仪器型号为 Lc-10ADVP, 所选用柱子为 TSK 4000, 分子量测试范围为百万以下。

2 结果与讨论

2.1 滴滤塔运行性能与生物量累积

图 2 为滴滤塔长期运行过程中甲苯去除率、去除负荷以及塔中生物量和压降的变化。图 2(a) 表明体系运行过程中甲苯去除率的变化。甲苯进气浓度维持在 200 ~ 600 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在较低的进气浓度下, 生物膜在短时间内便适应了停留时间的改变, 甲苯的去除效率很稳定, 维持在 95% 以上。而当进气浓度较高时, 甲苯的去除效率在改变停留时间的初期变得较低, 经过一段时间的适应后也可稳定到 90% 左右。可见, 当甲苯浓度不变时, 停留时间越长, 生物膜与液膜间的传质时间也越长, 去除率越高, 停留时间短时则相反。但在反应器运行的后期 (130 d 以后), 在没改变停留时间的情况下, 甲苯总去除率呈明显降低趋势, 降低至 60% ~ 70%, 且与上半段相

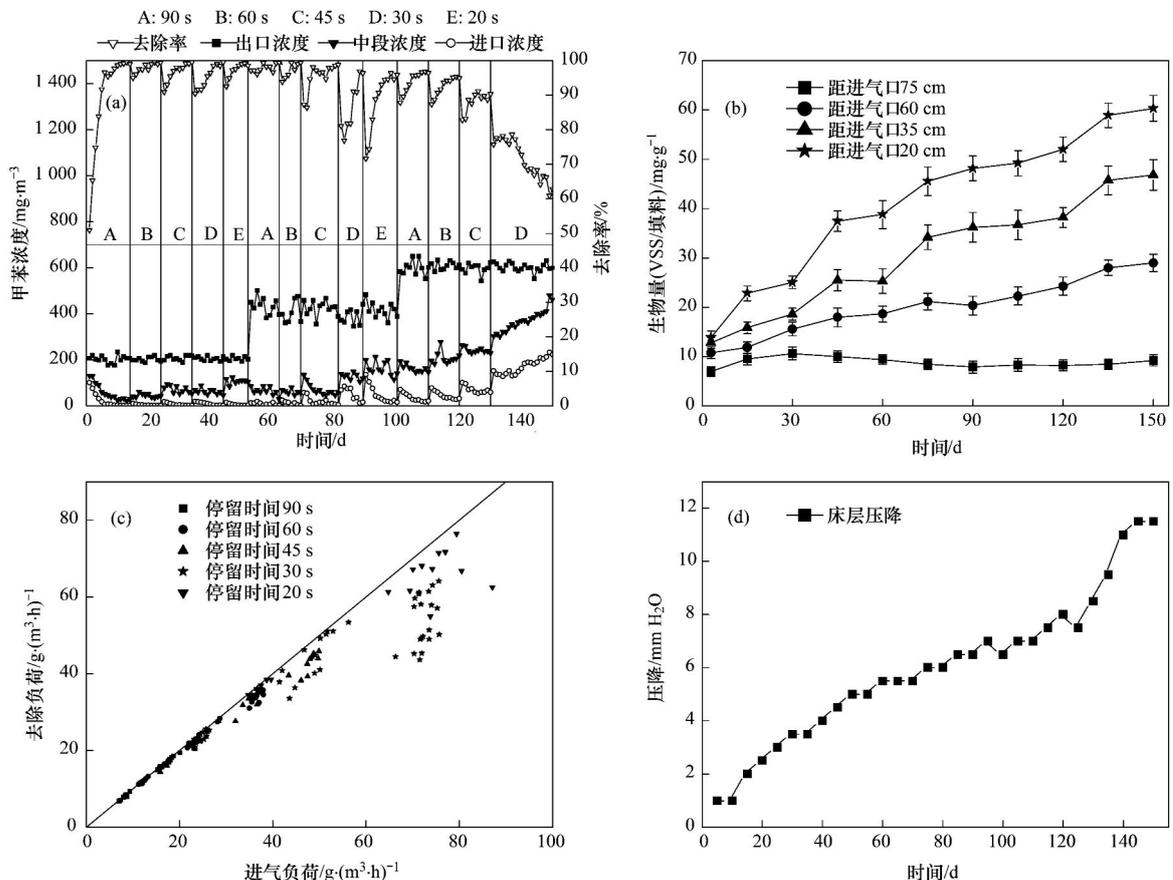


图 2 BTFT 长期运行过程中甲苯的去除率、去除负荷以及滴滤塔中生物量和压降

Fig. 2 Removal efficiency and elimination capacity of toluene, biomass accumulation and pressure drop in long-term BTFT

比,下半段的去除效率下降得尤为明显. 图 2(b) 表明甲苯去除负荷随进气负荷的变化. 在 EBRT 90、60、45、30 和 20 s 下,去除负荷与进气负荷的变化趋势基本一致:当进气负荷较低时,去除负荷随进气负荷增加基本呈线性增加,去除率维持在 95% 以上,当进气负荷 $> 80 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,去除负荷趋于稳定,为 $70 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,此时去除效果最佳. 但反应器运行至 130 d 后,去除负荷呈下降趋势,150 d 时降低为 $45 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 图 2(a) 和 2(b) 均表明,生物滴滤体系长期运行过程中,反应体系呈现出降解性能恶化的趋势.

图 2(c) 表明该体系长期运行过程中滴滤塔生物量积累和分布情况. 随着离进气端距离的增大,塔内生物量逐渐减小. 由于甲苯废气沿反应器径向的降解,其在近出气端的浓度已非常低,即在近出气端的微生物没有足够的碳源提供,而进气端则有充足的碳源提供,因此,生物量累积较严重,随反应体系的运行,填料层沿反应器径向的生物量呈现出明显的差异性,反应器运行后期(120 d 后),填料层下半部生物量的累积严重,在距进气口 20 cm 处填料上超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,而距离出气口 60 cm 处填料上仅为 $25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 图 2(d) 表明随着反应器的运行,压降逐渐增加,反应器运行后期压降攀升速度增大,运行至 150 d 时压降达 12 mm H_2O 柱.

在滴滤塔运行的整个过程中,前 120 d 的运行较为稳定,运行性能较好. 但 120 d 后,生物量过量积累和非均匀性分布越发显著,压降显著上升,运行性能也明显下降. 由此可推断,生物滴滤体系长期运行后,生物量的过量积累和非均匀性分布是导致压降上升、去除性能下降的重要因素之一.

2.2 生物膜厚度和床层孔隙率

生物膜厚度和床层孔隙率是反映填料床特性的重要参数. 图 3 表明生物滴滤塔运行过程中,填料层生物膜厚度随运行时间不断增长,反应体系运行至 140 d 时,上、下半段平均生物膜厚度已分别增至 2.0 mm 和 2.8 mm,且下半段生物膜厚度是上半段的 1.3 ~ 1.5 倍. 相对于生物膜厚度的变化,孔隙率则呈现出逐渐降低的趋势,反应器运行至 140 d 时,填料层上、下半段孔隙率已从启动初期的 85% 和 82% 降低至 65% 和 40%,且下半段孔隙率明显低于上半段,这很可能是导致反应器运行后期下半段去除效率快速下降的原因之一.

生物膜厚度和床层孔隙率的变化能较好解释反应体系长期运行过程中压降逐渐增加的变化趋势.

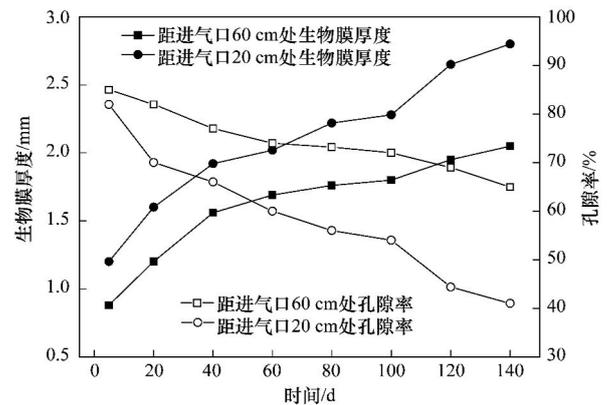


图 3 滴滤塔中生物膜厚度与床层孔隙率的变化

Fig. 3 Evolution of biofilm thickness and porosity in long-term BTF

图 4 表明了生物滴滤塔长期运行过程中生物量与压降变化相关关系. 生物量的累积与压降增加基本呈线性相关,相关系数高达 95%,这有力证明了生物量的增加是床层压降增大的最主要原因. 生物量及生物膜厚度的增加,致使滴滤塔床层间的孔隙率会减少,因此,滴滤塔内部的气体压降就会增加,进而造成短流和沟流.

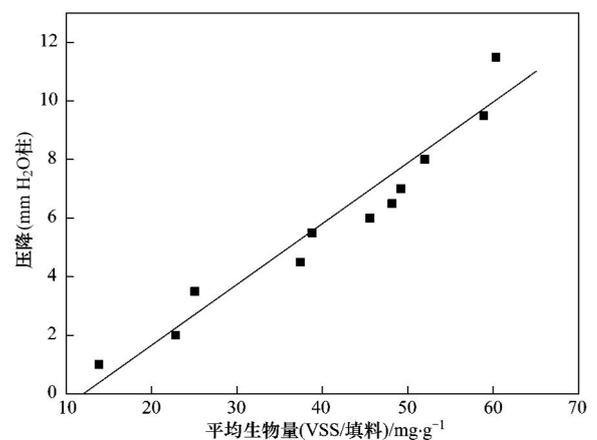


图 4 滴滤塔中平均生物量与压降的关系

Fig. 4 Relationship between biomass and pressure drop in long-term BTF

2.3 微生物平均代谢活性

目前, BiologECO 微平板技术已被应用于微生物种群、分布以及活性的研究,并建立了微生物代谢活动与处理效率之间的关系^[19,20]. 本实验通过分析 BiologECO 板的平均吸光度(AWCD)来定量描述生物滴滤塔内生物膜的平均代谢活性. 图 5 为生物滴滤塔运行至 30、90、140 d 时生物膜样品(从生物滴滤塔不同高度取得的生物膜样品的混合)平均吸光度(AWCD)随测试时间的变化曲线. 结果表明,各变化曲线基本都具有微生物生长的 3 个典型阶段,即适应期、对数生长期和稳定期. 从图 5 中 3 条线的分布可

以判断,反应器运行中期(90 d)生物膜的平均代谢活性最高;而初期(40 d)和后期(140 d)生物膜的平均代谢活性则较低。反应体系运行 30、90 和 140 d 生物膜 AWCD 的最大值分别为 2.24、2.51 和 2.18,这说明了生物滴滤塔整个运行过程中,生物膜平均代谢活性呈现出先增加再降低的变化过程,初期到中期的生物膜活性增大可能是由于生物膜对滴滤塔环境的逐步适应,而后期的降低则表明在滴滤塔运行后期生物膜出现了老化现象。

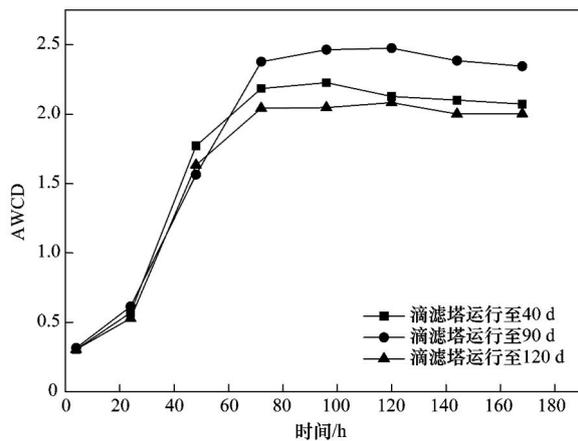


图5 AWCD变化曲线

Fig. 5 Variation curves of AWCD

2.4 生物膜 EPS

2.4.1 EPS 主要成分和含量变化

大量关于生物膜形成的研究认为^[18],EPS 是微

生物间相互粘附及微生物在固体表面附着的重要介质,促进了生物膜的形成,也是构成生物膜的主要成分之一。EPS 分布于细胞表面,其含量和成分变化必将改变生物膜相的特性。蛋白质和多糖是生物膜 EPS 中最主要的两大成分^[21]。在生物滴滤塔运行过程中,生物膜 EPS 的分泌量及主要成分的变化如图 6 所示。随着滴滤塔的运行,胞外蛋白分泌量逐渐增加[图 6(a)],距进气口 20 cm 处的蛋白分泌量增加较多,并且在反应器运行到 120 d 后增长速度加快,反应体系运行至第 140 d,其分泌量达 $16.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,是运行初期(20 d)的 2.5 倍。距进气口 60 cm 处的蛋白质分泌量增加相对缓慢。图 6(b)表明生物膜中多糖分泌量在滴滤塔运行过程中未出现明显增加的趋势。TOC 含量可在一定程度上反映微生物分泌的 EPS 总量。从滴滤塔运行过程中提取的生物膜 EPS 的 TOC 值变化可见,EPS 总分泌量随反应体系运行呈逐渐增加的趋势[图 6(d)],运行后期约为前期的 2 倍。蛋白质与多糖比值(PN/PS)在滴滤塔运行过程中不断增大,在距进气口 20 cm 处,该比值由生物膜形成初期的 0.3 增加至反应体系运行后期(140 d)的 0.95。

上述实验结果表明,EPS 总量和胞外蛋白质含量的增加可能促进反应体系运行初期填料床生物膜的形成,前人的相关研究也认为,胞外蛋白质在生物膜的形成和保持结构稳定性中可能发挥重要作用。

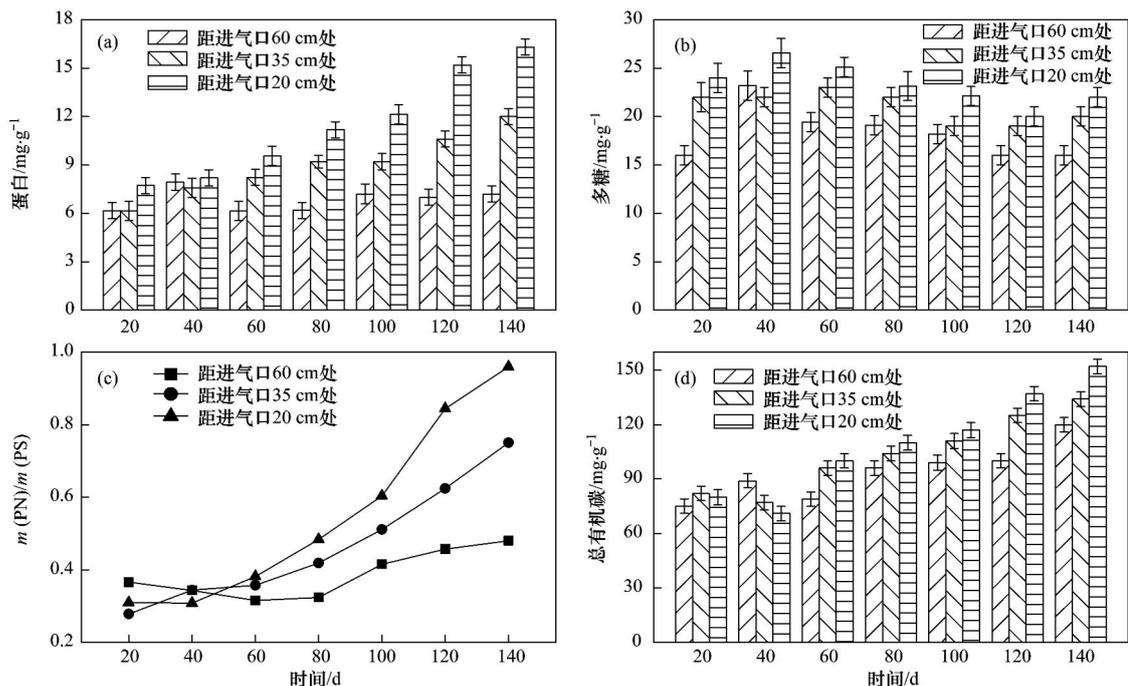


图6 生物滴滤塔运行过程生物膜 EPS 中 TOC、蛋白质、多糖及蛋白/多糖比值的变化

Fig. 6 Changes of TOC, protein, polysaccharide and PN/PS values in EPS of the biofilm during the operation of BTFF

用^[22]. 有研究表明,蛋白质分子比多糖更容易与金属离子通过静电作用而键合^[22,23],从而成为影响生物膜等微生物聚集体形成的关键因素. 但图 6 的实验结果也表明,反应体系运行后期,EPS 和胞外蛋白质分泌量的进一步增加可能也是导致床层压降升高、运行性能下降的主要原因之一.

2.4.2 生物膜表面特性变化

生物膜及 EPS 的表面相对疏水性的变化用其对碳氢化合物(十六烷)的附着程度来表示. 图 7 表明,生物膜形成及反应体系运行过程伴随着生物膜表面相对疏水性的增加,且距进气口 20 cm 处的增加幅度远大于距进气口 60 cm 处,生物膜形成初期(20 d),其表面相对疏水性约为 33%,运行后期,特别是距进气口 20 cm 处的生物膜表面相对疏水性增加至 73% 左右. 这表明,滴滤塔生物量累积和生物膜表面相对疏水性的增加密切相关.

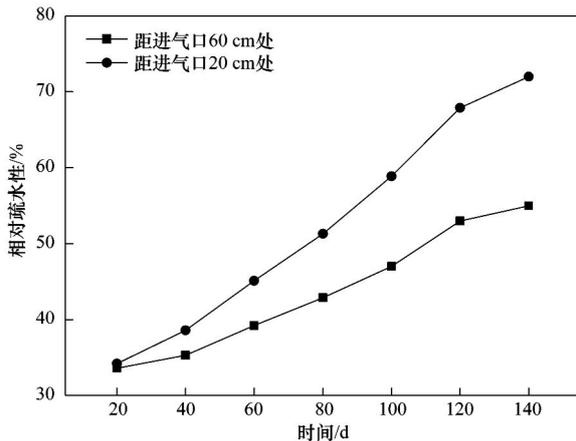


图 7 生物膜相对疏水性的变化

Fig. 7 Evolution in the relative hydrophobicity of the biofilm

图 8 也分析了 PN/PS 比值变化与生物膜表面相对疏水性的相关关系. 反应器运行过程中,生物膜表面相对疏水性与 EPS 中 PN/PS 比值变化密切相关,在距进气口 20 cm 处、60 cm 处的相关系数均达 95% 以上;生物膜表面的相对疏水性随 PN/PS

比值的增加而增加,表明生物膜表面相对疏水性的增加主要取决于 EPS 中蛋白质含量的增加,蛋白质中氨基酸多为疏水性氨基酸,胞外蛋白含量的增加可增加生物膜表面细胞表面相对疏水性.

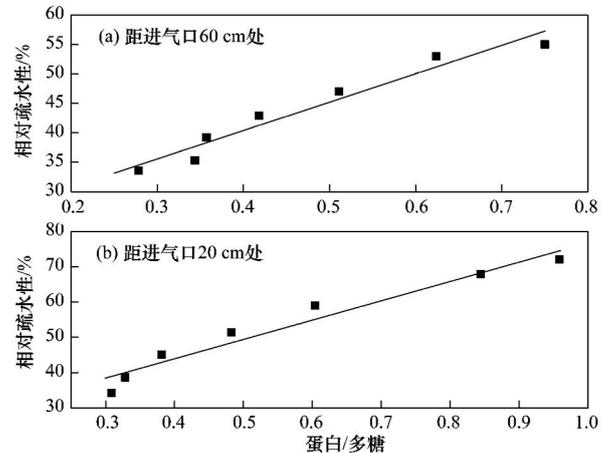


图 8 生物膜相对疏水性与 EPS 中 PN/PS 比值的相关关系

Fig. 8 Relationship between the relative hydrophobicity of the biofilm and PN/PS ratios in EPS

除了分析生物膜表面相对疏水性变化外,也分析不同运行阶段生物膜及 EPS 的表面电负性. 表 1 给出了反应器运行到 40、80、120、150 d 时生物膜表面和 EPS 的 Zeta 电位值. 生物膜及 EPS 的电负性均随反应器的运行逐渐减小,且距进气口 20 cm 处生物膜的电负性均低于距进气口 60 cm 处的. 一般情况下,微生物个体表面带负电,按照 DLVO 理论,微生物个体细胞间存在静电斥力,不易相互聚合^[24],因此,生物膜形成过程伴随其表面电负性的降低,这可能与 EPS 中蛋白质分泌量的增加有关. 由于蛋白质中的氨基带正电,能中和一些源于羧基和磷酸根基团的负电荷,从而降低生物膜表面的电负性. 生物滴滤塔整个运行过程中微生物细胞表面电负性的逐渐降低使得微生物之间更易聚合,形成生物膜,也致使生物量不断累积.

表 1 生物膜与 EPS 的 Zeta 电位变化/mV

Table 1 Zeta potentials of the biofilm and EPS/mV

时间/d	EPS		生物膜	
	距进气口 20 cm	距进气口 60 cm	距进气口 20 cm	距进气口 60 cm
40	-25.8	-26.8	-15.9	-18.3
80	-24.6	-25.3	-15.5	-17.9
120	-17.2	-22.2	-14.5	-16.2
150	-15.3	-20.6	-12.8	-15.7

2.4.3 EPS 化学成分分析

表 2 为运用凝胶渗透色谱(GPC)对 EPS 平均

分子量的测定结果. 可见,生物膜 EPS 平均分子量随滴滤塔的运行逐渐变小,且同一运行时间段,距进

气口 60 cm 处生物膜 EPS 平均分子量略高于距进气口 20 cm 处。可见,随着生物滴滤塔的运行,生物膜 EPS 的分子量也呈现出一定的变化,这说明,反应体系运行过程中,生物膜 EPS 中的化学成分可能也发生一些规律性的变化,而这种变化也可能影响生物膜的宏观运行性能。

表 2 反应体系不同运行阶段生物膜 EPS 的平均分子量

时间/d	EPS 平均分子量	
	距进气口 60 cm	距进气口 20 cm
40	37 246	32 057
80	20 502	19 447
120	15 304	14 082
150	12 963	11 250

除了分析 EPS 分子量变化外,本实验也采用 FTIR 研究 EPS 的化学成分变化。FTIR 的范围选定在 $500 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$,这个范围囊括了蛋白质、多糖、核酸、膜脂及脂肪酸的吸收峰,对于 EPS 化学结构的分析较为合适^[18,25]。图 9(a)和 9(b)分别是反应器运行到 40 d 和 120 d 时距进气口 20 cm 和 60 cm 处的生物膜 EPS 的 FTIR 光谱图。根据报道^[21], $1640 \sim 1540 \text{ cm}^{-1}$ 为酰胺中—CONH—的特征振动峰,而在 1400 cm^{-1} 处为羧酸基团里 C=O 的伸缩振动,因此,在这个范围内的吸收峰可判断为蛋白质;在 1200 cm^{-1} 处有个微弱的吸收峰,此峰代表了 EPS 中的核酸;在 $1000 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 处可观察到一个大而密集的吸收峰, 1125 cm^{-1} 及 1080 cm^{-1} 处分别为糖类结构中 C—O—C 和—OH 的伸缩振动,因此可判定此范围内位多糖类物质的吸收峰。

从图 9 可见,FTIR 分析获得的距进气口 20 cm 和 60 cm 处生物膜 EPS 的功能基团相类似,但其相

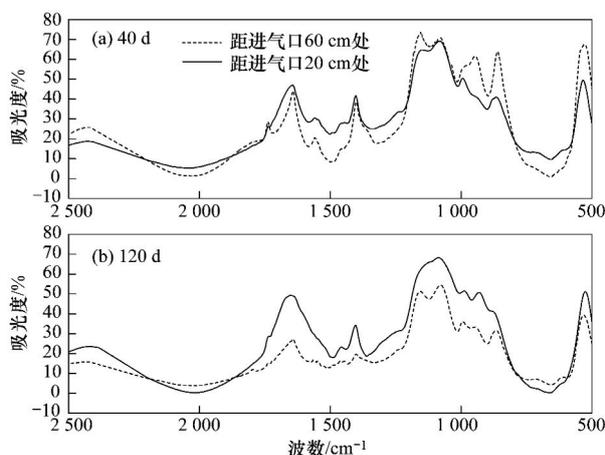


图 9 EPS 的 FTIR 光谱分析图

Fig. 9 FTIR spectra of EPS

对含量不同。在生物滴滤塔运行到 40 d 时[图 9(a)],距进气口 20 cm 和 60 cm 处生物膜 EPS 中蛋白质和多糖的含量没有太大区别,而当生物滴滤塔运行到 120 d 时[图 9(b)],距进气口 20 cm 处生物膜 EPS 中的蛋白质和多糖含量明显高于距进气口 60 cm 处的生物膜,且蛋白质的相对含量差距尤为明显,这同上文 EPS 中蛋白质和多糖含量变化结果相一致。

3 结论

(1)生物滴滤体系长期运行过程中,反应体系呈现出降解性能恶化的现象,填料床生物量累积和生物膜厚度呈逐渐增加趋势,生物量呈非均匀性分布,床层孔隙率逐渐减小,而床层压降则逐渐增加。运行后期,微生物代谢活性明显降低,反映出在滴滤塔运行后期生物膜出现了老化。生物量的过量累积、非均匀性分布及生物膜活性降低是导致反应体系压降上升、去除率下降的主要宏观因素。

(2)EPS 是生物膜的重要组成部分。生物膜胞外蛋白质分泌量在反应体系长期运行过程中呈逐渐增加的趋势,但多糖含量无明显变化,EPS 总分泌量呈增加趋势。EPS 总量和胞外蛋白质含量的增加可能促进反应体系运行初期填料层生物膜的形成,但反应体系运行至后期,EPS 和胞外蛋白质分泌量的进一步增加可能也是导致床层孔隙率下降、压降升高以及运行性能下降的本质原因之一。

(3)生物膜在反应体系长期运行过程中,其表面相对疏水性增加,而电负性逐渐降低;EPS 的平均分子量呈现减小的趋势;FTIR 分析表明 EPS 的主要化学成分也发生了变化,这进一步揭示反应体系长期运行过程中,生物膜中 EPS 的主要成分和结构均可能发生一些规律性的变化,而这可能影响生物膜相的宏观性能。

参考文献:

- [1] Wang S B, Ang H M, Tade M O. Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: state of the art [J]. *Environment International*, 2007, **33**(5): 694-705.
- [2] Deshusses M A, Webster T S. Construction and economics of a pilot/full-scale biological trickling filter reactor for the removal of volatile organic compounds from polluted air [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2000, **50**(11): 1947-1956.
- [3] Iranpour R, Cox H H J, Deshusses M A, et al. Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal [J]. *Environmental Progress*, 2005, **24**(3): 254-267.

- [4] Littlejohns J V, Daugulis A J. A two-phase partitioning airlift bioreactor for the treatment of BTEX contaminated gases [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **103**(6): 1077-1086.
- [5] Chen J M, Zhu R Y, Yang W B, *et al.* Treatment of a BTo-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.
- [6] 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.
- [7] Song J H, Kinney K A. A model to predict long-term performance of vapor-phase bioreactors; a cellular automaton approach [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(11): 2498-2507.
- [8] 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.
- [9] Wang C, Xi J Y, Hu H Y, *et al.* Stimulative effects of ozone on a biofilter treating gaseous chlorobenzene [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(24): 9407-9412.
- [10] Ryu H W, Cho K S, Chung D J. Relationship between biomass, pressure drop and performance in a polyurethane biofilter [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(6): 1745-1751.
- [11] 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.
- [12] Hassan A A, Sorial G A. A comparative study for destruction of n-hexane in trickle bed air biofilters [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 227-233.
- [13] Kim D, Sorial G A. Nitrogen utilization and biomass yield in trickle bed air biofilters [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1-3): 358-362.
- [14] Kim S Y, Deshusses M A. Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 1. Experimental results [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**(4): 841-855.
- [15] Delhom nie M C, Bibeau L, Gendron J, *et al.* A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2003, **94**(3): 211-222.
- [16] Comtem S, Guibaud G, Baudu M. Relation between extraction protocols for activated sludge extracellular polymeric substances (EPS) and EPS complexation properties; Part 1. Comparison of efficiency of eight EPS extraction methods [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **38**(1-2): 237-345.
- [17] Rosenberg M, Gutnick D, Rosenberg E. Adherence of bacteria to hydrocarbons; a simple method for measuring cell-surface hydrophobicity [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1980, **9**(1): 29-33.
- [18] Liu X M, Sheng G P, Luo H W, *et al.* Contribution of extracellular polymeric substances (EPS) to the sludge aggregation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(11): 4355-4360.
- [19] Preston-Mafham 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.
- [20] Olsen G J, Lane D J, Giovannoni S J, *et al.* Microbial ecology and evolution; a ribosomal RNA approach [J]. *Annual Review of Microbiology*, 1986, **40**(1): 337-365.
- [21] Yuan S J, Sun M, Sheng G P, *et al.* Identification of key constituents and structure of the extracellular polymeric substances excreted by bacillus megaterium TF10 for their flocculation capacity [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(3): 1152-1157.
- [22] 张丽丽,陈效,陈建孟,等.胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 795-799.
- [23] Digance M F, Urbain V, Rybacki D, *et al.* Chemical description of extracellular polymers; implication on activated sludge floc structure [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(8-9): 45-53.
- [24] Rouxhet P G, Mozes N. Physical chemistry of the interaction between attached microorganisms and their support [J]. *Water Science and Technology*, 1990, **22**: 1-16.
- [25] Sheng G P, Yu H Q, Wang C M. FTIR-spectral analysis of two photosynthetic H²-producing strains and their extracellular polymeric substances [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **73**(1): 204-210.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊