

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 ..... 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 ..... 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 ..... 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM<sub>2.5</sub> 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 ..... 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 ..... 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 ..... 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 ..... 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM<sub>10</sub> 中有机碳和元素碳污染特征分析 ..... 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 ..... 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM<sub>2.5</sub> 排放危害度评价模型建立及案例分析 ..... 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 ..... 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 ..... 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 ..... 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 ..... 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 ..... 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 ..... 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 ..... 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 ..... 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 ..... 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr<sub>2</sub> 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 ..... 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 ..... 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 ..... 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 ..... 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 ..... 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 ..... 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 ..... 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 ..... 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 ..... 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 ..... 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 ..... 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 ..... 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 ..... 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 ..... 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 ..... 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 ..... 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 ..... 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 ..... 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 ..... 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 ..... 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 ..... 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 ..... 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 ..... 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 ..... 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 ..... 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 ..... 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 ..... 尹雪,陈家军,吕策 (733)

*Pseudomonas* sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 ..... 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$  对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 ..... 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 ..... 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 ..... 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 ..... 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 ..... 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 ..... 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究 ..... 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N<sub>2</sub>O 产生的关键微生物过程及减排措施 ..... 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

# 生物滴滤塔处理苯酚气体研究

何觉聪, 黄倩茹, 陈洲洋, 叶杞宏, 罗雨薇, 魏在山\*

(中山大学环境科学与工程学院, 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 采用生物滴滤塔处理苯酚气体, 考察了苯酚去除性能的影响因素. 结果表明, 生物滴滤塔能高效处理苯酚气体, 苯酚去除效率可达 99.5%, 长期运行平均去除效率在 98% 左右. 适宜的运行条件为: 停留时间 20.6 s, 循环液 pH 值 7.0, 喷淋密度  $1.67 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳 (PCR-DGGE) 技术研究处理苯酚气体的生物滴滤塔填料表面的微生物, 结果表明, 生物滴滤塔内有 5 种降解苯酚的优势菌种: *Polaromonas* sp.、*Acinetobacter* sp.、*Acidovorax* sp.、*Veillonella parvula* 和 *Corynebacterium* sp.. 采用 GC-MS 分析出口气样, 结果表明丙酮酸 ( $\text{CH}_3\text{COCO}_2\text{H}$ ) 为生物降解苯酚的中间产物, 并推测了苯酚生物降解的可能途径.

**关键词:** 苯酚; 生物滴滤塔; PCR-DGGE; GC-MS; 机制

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0520-06

## Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter

HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, YE Qi-hong, LUO Yu-wei, WEI Zai-shan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The performance of a bio-trickling filter (BTF) for treatment of phenol, a model pollutant, was presented. Influences of factors on phenol removal efficiency were studied. The BTF exhibited a high removal efficiency for phenol. The experimental results showed that the phenol efficiency reached 99.5% and kept 98% in the long-term run. The optimal residence time, pH value and spray density were 20.6 s, 7.0 and  $1.67 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , respectively. The microbial community structures in the bio-trickling filter for phenol removal were assessed by PCR-DGGE. Based on the 16S rDNA sequence data, results showed that the predominant bacteria for degradation of phenol were *Polaromonas* sp., *Acinetobacter* sp., *Acidovorax* sp., *Veillonella parvula* and *Corynebacterium* sp.. GC-MS was used to detect component of BTF's outlet gases and pyruvic acid ( $\text{CH}_3\text{COCO}_2\text{H}$ ) was found as one kind of intermediates of phenol degradation. Then one possible biodegradation pathway of phenol was inferred.

**Key words:** phenol; bio-trickling filter (BTF); PCR-DGGE; GC-MS; mechanism

苯酚是一种酚类挥发性有机物, 主要来源于炼钢、聚合树脂生产、陶瓷生产、污泥焚烧/烘干等过程, 并随污水和废气而排放到环境中<sup>[1, 2]</sup>. 苯酚常温下微溶于水, 有特殊的臭味, 还具有强烈的腐蚀性和毒性, 成年人如摄取 1~32 g 的苯酚可致死. 苯酚既可通过人的肺部吸收, 也由于其低挥发性和对水的强亲和力, 使得人饮用被苯酚污染的水而危害健康<sup>[3]</sup>. 因此, 苯酚被列入《环境优先控制有毒有机污染物》的名单<sup>[4]</sup>.

苯酚的传统处理方法是物理-化学法, 但其缺点是运行费用高、产生有毒中间产物以及不完全矿化<sup>[2, 5]</sup>. 生物法由于具有投资及运行费用低、无二次污染、易于管理操作等优点<sup>[6, 7]</sup>, 逐渐被运用于处理苯酚污染的土壤、水和空气中. 国外用聚合物微球异地生物修复被苯酚污染的土壤, 成功将土壤中苯酚的浓度由  $2.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  降到  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>; 采用布朗纤维藻和四尾栅藻处理橄榄油厂的苯酚废水, 苯酚的去除效率大于 70%<sup>[9]</sup>. 国内用好氧颗粒

污泥净化苯酚废气, 苯酚去除率达到 95% 以上<sup>[10]</sup>; 用生物洗涤法治理含苯酚废气, 消除负荷为  $30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$  左右<sup>[11]</sup>. 与生物洗涤法相比, 生物滴滤法填料能提供更大的传质面积和较好的微生物生长环境, 更适合于处理微溶 (如苯酚) 或难溶于水的气体. 生物滴滤法处理甲苯、二甲苯、苯乙烯等挥发性有机物已有大量研究<sup>[12~14]</sup>, 但是利用生物滴滤法处理苯酚气体的研究鲜见报道. 本研究采用生物滴滤塔对苯酚废气进行处理, 考察各影响因素对苯酚净化效率的影响, 推测苯酚生物降解的机制, 采用 PCR-DGGE 技术分析处理苯酚气体的生物滴滤塔中细菌的 16S rDNA 基因信息和多样性, 以确定其中的优势菌群, 以期对苯酚废气生物处理的高效稳定

收稿日期: 2013-03-11; 修订日期: 2013-05-06

基金项目: 广东省科技计划项目 (2011A030700010); 广州开发区科技计划重点科技攻关项目 (2010Q-P161); 企业委托项目 (7102651, 7101614)

作者简介: 何觉聪 (1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废气生物处理, E-mail: anniedam@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: wzs89@126.com

运行提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与方法

生物滴滤塔处理苯酚废气的实验流程如图 1 所示。生物滴滤塔为有机玻璃柱,内径为 90 mm,总高度为 1 000 mm,分为 3 层,每层装有填料 150 mm,填料总高度为 450 mm。填料为轻质陶粒,陶粒的比表面积为  $3\,900\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$ ,孔隙率 58%,堆积密度为  $0.36\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,真密度为  $1.2\sim 1.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。苯酚气体采用动态法配制,苯酚与压缩空气一起进入缓冲瓶混合,使苯酚浓度均匀,经流量计调节流量后从塔底进入生物滴滤塔,在上升的过程中与循环液及陶粒表面的生物膜接触,苯酚首先被循环液及生物膜吸附,然后进入微生物细胞被降解,净化后的气体从塔顶排出。循环液体从塔顶向下喷淋,在填料层中自上向下流动,由塔底排出至循环液槽,再由循环水泵抽回塔顶。定期向循环液槽投加氮磷营养液并设曝气头进行曝气,以维持微生物的好氧生长繁殖活动。实验所用微生物取自某生活污水处理厂,经使用苯酚驯化后直接加进循环液槽中,通过喷淋在陶粒上挂膜培养。

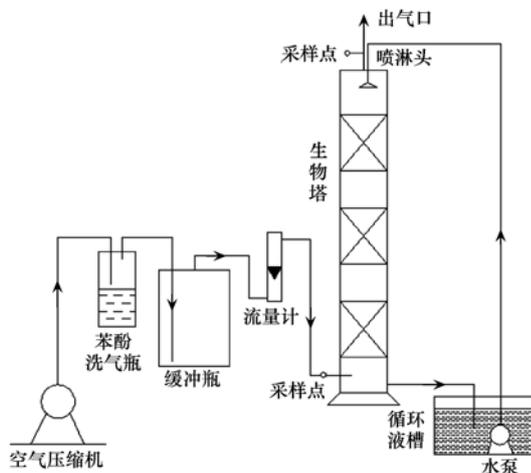


图 1 生物滴滤塔处理苯酚气体实验流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the bio-trickling filter (BTF) for phenol removal

### 1.2 分析方法

苯酚气体浓度采用美国 RAE Systems 的 PGM-7300 型挥发性有机物 (VOCs) 检测仪测定; 气体流量用 LZB 型玻璃转子流量计测定, 测量范围为  $0.1\sim 1.0\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。循环液 pH 值采用上海三信仪表厂的 pHB-3 型笔式 pH 计测定。

气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 分析方法: 对生

物滴滤塔出口气体的处理采用固体吸附-萃取解吸的方法。采用活性炭作为吸附剂, 采样流量为  $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 采样时间为 30 min。采样完毕后使用  $\text{CS}_2$  作为萃取剂, 对活性炭吸附的有机气体进行萃取解吸, 萃取液为待测样品。色谱柱为石英毛细管柱, 初始柱温为  $40^\circ\text{C}$ , 保持 5 min 后以  $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至  $250^\circ\text{C}$ , 保持 5 min。载气为高纯氮气, 柱流量为  $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 玻璃注射器为  $1\ \mu\text{L}$ , 进样量为  $0.2\ \mu\text{L}$ , 流比为 20:1。色谱-质谱接口温度  $230^\circ\text{C}$ ; EI 源, 电子能量: 70 eV; 离子源温度  $220^\circ\text{C}$ ; 全扫描 (Scan) 方式定性。

PCR-DGGE 分析方法: 首先提取样品的 DNA, 以提取到的 DNA 作为 PCR 模板, 所用引物为细菌 16S rDNA V3 高变区 F338 和 R534, 反应程序为:  $94^\circ\text{C}\ 5\text{ min}$  预变性; 20 cycles ( $94^\circ\text{C}\ 40\text{ s}$ ;  $65^\circ\text{C}\ 30\text{ s}$ ;  $72^\circ\text{C}\ 30\text{ s}$ ); 15 cycles ( $94^\circ\text{C}\ 40\text{ s}$ ;  $55^\circ\text{C}\ 30\text{ s}$ ;  $72^\circ\text{C}\ 30\text{ s}$ );  $72^\circ\text{C}$  延伸 10 min。接着采用 D-Code 突变检测系统对样品进行 DGGE 分析。所用的聚丙烯酰胺凝胶浓度为 8%, 变性剂浓度从 40% ~ 65%。在 70 V 电压下,  $60^\circ\text{C}$  恒温,  $1\times\text{TAE}$  中电泳 13 h。电泳完毕后, 用超纯水冲洗胶, 然后将胶放进含 5% Goldview 的染液中, 置于摇床上染色 30 min 后, 凝胶成像系统拍摄图谱。最后将 DGGE 电泳条带的切割回收、V3 区再扩增及测序。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物滴滤塔长期运行稳定性

在进气苯酚浓度为  $20\sim 400\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 循环液 pH 值为  $6.5\sim 7.2$ , 喷淋密度为  $1\sim 2\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ , 气体流量为  $0.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  的条件下, 生物滴滤塔处理苯酚的长期运行情况如图 2 所示。在长达 77 d 的运行时间内, 生物滴滤塔表现出良好的稳定性以及对苯酚的高效去除率。挂膜第 1 d, 生物滴滤塔对苯酚的去除效率为 61.0%, 由于开始挂膜, 生物膜未在陶粒上形成, 此时苯酚的部分溶解和陶粒对苯酚分子的吸附起主要作用。第 2 ~ 7 d, 去除效率不断增大并达到 96.3%, 同时可观察到陶粒表面逐渐形成生物膜; 第 8 ~ 11 d, 苯酚的去除效率上下有些浮动, 但基本保持在 96% 左右。第 13 d, 陶粒表面可看到有明显的生物膜, 同时向循环液槽中添加 N、P 营养物质, 第 15 d 效率提高到 99.4%。第 16 ~ 33 d, 苯酚浓度在  $80\sim 290\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  范围内缓慢变化, 去除效率可维持在 97% 以上, 此时可认为系统已挂膜完成, 填料塔内形成较厚的生物膜, 表现出对苯酚的高

效去除效率. 第 35 ~ 37 d, 以较快的速度将苯酚浓度从  $100.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  增大到  $403.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 效率下降到 90.2%, 但降低苯酚浓度后, 去除效率逐渐恢复到 98.1%, 第 46 ~ 51 d 重复此操作, 得到相似结果, 说明生物滴滤塔对于苯酚浓度的较大变化具有良好的稳定性. 第 61 ~ 62 d, 系统停止通入气体, 只保持循环液喷淋, 于第 63 d 恢复正常通气, 此时苯酚的去除效率为 92.5%, 并逐渐恢复到原来水平, 采用生物滴滤塔处理苯酚废气能较好地适应实际工业的间歇生产.

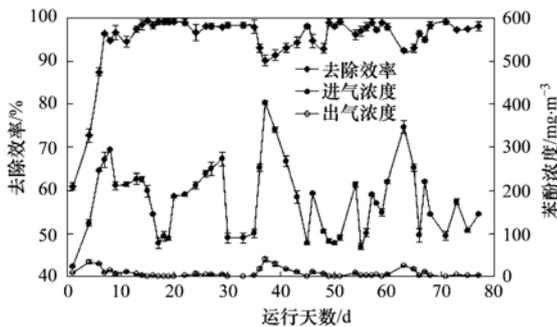


图 2 生物滴滤塔长时间运行曲线

Fig. 2 Long-term run curves of the BTB

## 2.2 苯酚浓度对去除效率的影响

在气体流量为  $0.5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , 循环液 pH 值为 7.0, 喷淋密度为  $1.67 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  的条件下, 苯酚去除效率随苯酚浓度的变化如图 3 所示. 苯酚浓度小于  $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 随苯酚浓度的增大, 去除效率变化较小, 当苯酚浓度为  $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 去除效率仍达到 98.0%. 但苯酚浓度超过  $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 去除效率下降较快, 苯酚浓度增大到  $359 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 去除效率降低到 91.3%. 但苯酚的去除量随着进口浓度的增加而逐渐增加, 由  $15.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$  增加到  $57.3 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ . 根据“吸附-生物膜”理论可知, 苯酚通过气膜扩散到湿润的生物膜表面进而被微生物所捕获降解<sup>[15]</sup>, 对于低浓度的苯酚废气, 填

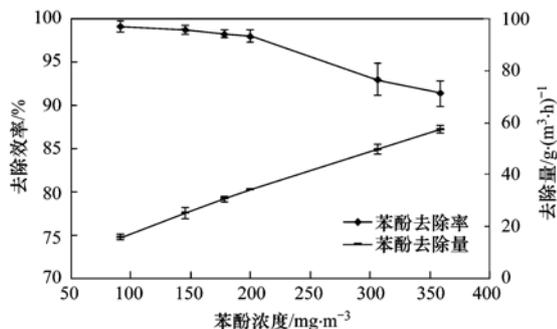


图 3 苯酚浓度对去除效率的影响曲线

Fig. 3 Influence of phenol concentration on its removal efficiency

料塔内的生物膜表面所吸附的苯酚分子仍处于不飽和状态, 其生化去除量随着进口浓度的增加而增大, 两者间基本呈线性关系, 这与图 3 的实验结果相吻合, 此时苯酚的降解反应为宏观动力学一级反应, 苯酚的去除速率随苯酚浓度增加而增大<sup>[16]</sup>.

## 2.3 停留时间对去除效率的影响

在苯酚浓度为  $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 循环液 pH 值为 7.0, 喷淋密度为  $1.67 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  的条件下, 苯酚去除效率随停留时间的变化如图 4 所示. 从中可知, 随着气体停留时间的增大, 苯酚去除效率呈现先增大后平稳的过程. 气体流量较小时, 气体在滴滤塔中的停留时间长, 苯酚气体与生物膜接触较充分, 易被生物膜吸附、降解, 因而去除率较高; 增大气体流量, 流速增加, 气体湍流程度增强, 会影响苯酚气体在生物膜表面吸收吸附以及生化降解, 同时气体在滴滤塔内的停留时间缩短, 部分苯酚污染物来不及降解就排出塔外, 导致去除效率降低. 在本实验研究范围内, 较适宜的停留时间为 20.6 s, 此时苯酚去除效率达到 98.0%.

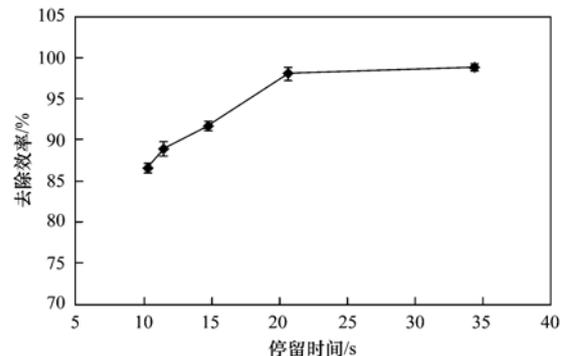


图 4 停留时间对去除效率的影响曲线

Fig. 4 Influence of residence time on phenol removal efficiency

## 2.4 循环液 pH 值对去除效率的影响

在苯酚浓度为  $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 气体流量为  $0.5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , 喷淋密度为  $1.67 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  的条件下, 苯酚去除效率随循环液 pH 值的变化如图 5 所示. 从中可知, 当循环液 pH 值在 4.5 ~ 8.5 范围内变化时, 苯酚的去除效率都在 88% 以上, 说明生物滴滤塔在较宽的酸碱范围内对苯酚有较好的降解. 其中 pH 为 7.0 时, 去除效率最高, 说明苯酚在中性介质中降解效果最好<sup>[17]</sup>. 长期不人工调节循环液 pH 值时, 循环液偏弱酸性, 原因其一可能是部分苯酚溶于循环液中, 苯酚是一种弱酸, 可使循环液 pH 降低; 其二可能是苯酚在生物降解的过程中生成其它的酸性物质转移到液相. 循环液弱酸性对苯酚去除效率影响不大, 因此可不用调节 pH 值.

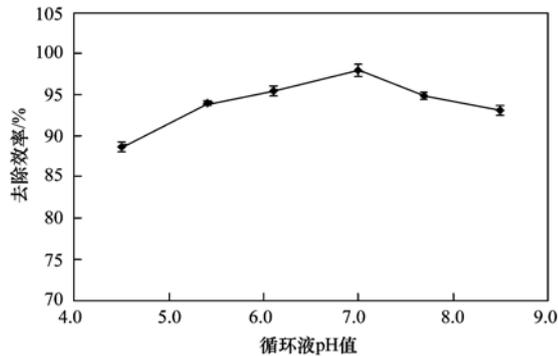


图5 循环液 pH 值对去除效率的影响曲线

Fig. 5 Influence of pH value on phenol removal efficiency

### 2.5 喷淋密度对去除效率的影响

在苯酚浓度为  $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 气体流量为  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 循环液 pH 值为 7.0 条件下, 苯酚去除效率随喷淋密度的变化如图 6 所示. 随着喷淋密度由  $0.31 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  增加到  $1.67 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 苯酚的去除效率相应从 89.7% 增大至 98%, 但继续增大喷淋密度, 去除效率变化很小. 循环液的喷淋为微生物提供湿润的环境和补充正常生长代谢所需营养, 同时带走老化脱落的生物膜, 促进新生物膜的生成, 维持整个系统的高效稳定<sup>[18]</sup>. 当喷淋密度较小时, 填料表面不利于微生物生存, 影响去除效果. Zhao 等<sup>[19]</sup> 提出, 循环液的喷淋以达到湿为润生物膜的目的为宜. 苯酚微溶于水, 室温下在水中溶解度为 9.3 g, 水吸收苯酚的能力是有限的, 在一定范围内适当增大喷淋密度, 能提高去除效率, 但喷淋密度继续增大, 对苯酚的去除效率没有明显的增加.

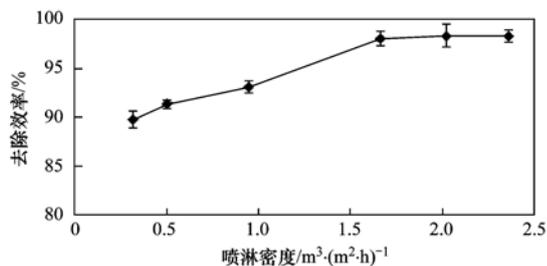


图6 喷淋密度对去除效率的影响曲线

Fig. 6 Influence of spray density on phenol removal efficiency

### 2.6 生物 SEM 和 PCR-DGGE 结果分析

在生物滴滤塔运行稳定时期, 从中取出陶粒, 并经过戊二醛溶液固化、磷酸缓冲液清洗、酒精脱水、叔丁醇置换和冷冻干燥等处理, 采用扫描电镜的方法观察陶粒表面微生物的分布及其形态, 观察结果如图 7 所示. 从中可以清晰看出, 在生物塔

陶粒表面覆盖着大量轮廓分明、表面光滑的微生物, 其中大部分为杆状, 长度  $1 \sim 4 \mu\text{m}$ , 也存在少量的球状和短棒状. 这些微生物是苯酚的高效降解菌, 其在陶粒表面的大量存在, 对苯酚的高效去除具有关键的作用.

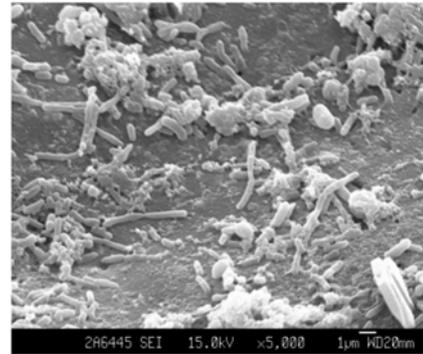


图7 SEM 结果

Fig. 7 SEM image

采用 PCR-DGGE 技术对生物滴滤塔内微生物样品进行测定分析. 经过检测可得出 5 条明亮的条带 1~5 (如图 8), 然后将条带切胶回收, 进行测序, 得到每种菌群的 16S rDNA 序列, 最后将得到的 16S rDNA 与 GenBank 中已知菌种的 16S rDNA 序列进行对比分析, 确定菌群所代表的微生物菌属, 得到的 5 种菌属分别属于 *Polaromonas* sp. (极胞菌属)、*Acinetobacter* sp. (不动杆菌属)、*Acidovorax* sp. (食酸菌属)、*Veillonella parvula* (小韦荣氏球菌) 和 *Corynebacterium* sp. (棒状杆菌属). 根据条带的明暗度分析该条带对应菌属的丰度, 结果显示 5 种菌属的丰度依次分别为 22.3%、7.2%、19.8%、10.1% 和 40.6%. 根据 5 种菌种的基因序列与 GenBank 中已知菌种的 16S rDNA 序列, 构建生成菌种的系统发育树, 如图 9 所示. 从中可以看出, 测序序列 1、5 分别与极胞菌属



图8 不同菌株的 DGGE 图谱

Fig. 8 DGGE pattern of different strains

(*Polaromonas*) 和棒状杆菌属 (*Corynebacterium*) 具有很近的亲缘关系. 李华等<sup>[20]</sup>证实了 *Acinetobacter* sp. 具有很强的苯酚生物降解能力, Mattes 等<sup>[21]</sup>研究表明

*Polaromonas* sp. 能够利用邻苯二酚作为生存所需的碳源. 以上优势菌群形态为杆状、球状和棒状, 与 SEM 观察所得结果相符.

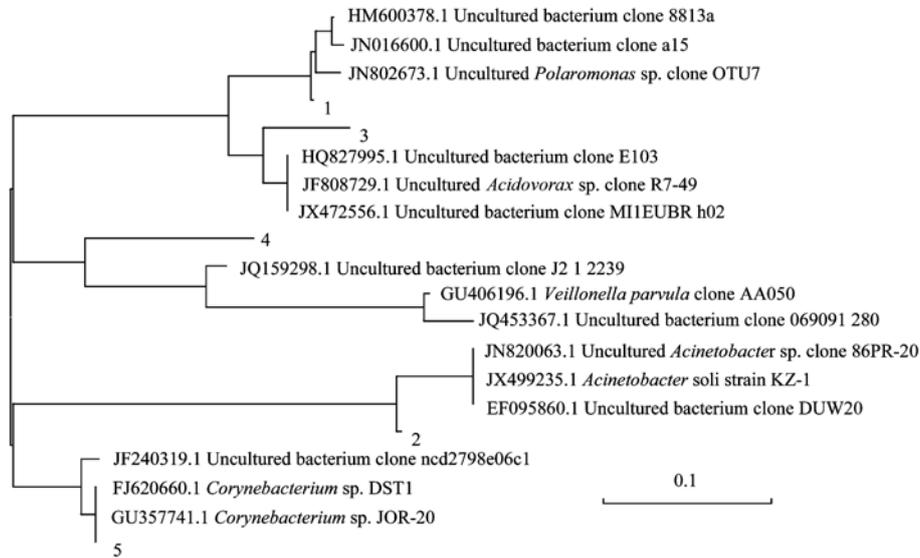


图 9 降解苯酚优势菌种基于部分长度的 16S rRNA 序列的系统发育树

Fig. 9 Phylogenetic tree based on the 16S rRNA sequences from the dominant bacteria for degrading phenol

### 3 苯酚生物降解机制

采用生物滴滤塔处理苯酚气体, 在系统稳定运行期采集出口气体样品, 运用气相色谱-质谱 (GC-MS) 联用仪分析, 除苯酚、二硫化碳外还可检测出丙酮酸 ( $\text{CH}_3\text{COCO}_2\text{H}$ ), 推测丙酮酸为苯酚生物降解的中间产物.

目前, 生物法处理有机废气的机理普遍采用荷兰学者 Ottengraf 提出的“吸收-生物膜”理论<sup>[22]</sup>, 但国内相关学者针对低浓度难溶于水或微溶于水的有机气体对该理论进行了修正和补充, 提出了“吸附-生物膜”理论<sup>[23]</sup>. 根据“吸附-生物膜”理论要点<sup>[24]</sup>和 GC-MS 检测结果, 结合国外的相关研究<sup>[25, 26]</sup>, 推测出苯酚生物降解的可能途径如图 10 所示. 苯酚

气体首先扩散通过气膜并被吸附在生物膜表面, 进而被微生物捕获吸收; 优势菌群间的协同作用使苯酚被转化为邻苯二酚, 邻苯二酚作为 *Polaromonas* sp. 的碳源并被降解为粘康酸半醛、2-酮-4-烯戊酸和 4-羟基-2-酮戊酸, 食酸菌属 *Acidovorax* sp. 继续将产生的酸性物质分解为分子量较小的丙酮酸, *Veillonella parvula* 和 *Corynebacterium* sp. 能通过氧化性或发酵性代谢将丙酮酸最终矿化为无害物质 ( $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ).

### 4 结论

(1) 生物滴滤塔能高效处理苯酚废气, 去除效率可达 99.5%, 长期运行平均去除效率在 98% 左右. 适宜的运行条件为: 停留时间 20.6 s, 循环液 pH 值 7.0, 喷淋密度  $1.67 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .

(2) 生物塔内陶粒表面覆盖着大量的微生物, 形态多数为杆状, 并伴有少量的球状和短棒状. 通过 PRC-DGGE 技术分析得出生物塔内存在 5 种降解苯酚的优势菌群, 分别属于极胞菌属、不动杆菌属、食酸菌属、小韦荣氏球菌和棒状杆菌属.

(3) 采用 GC-MS 检测出丙酮酸为生物滴滤塔处理苯酚的中间产物, 推测苯酚生物降解途径为: 苯酚气体首先被吸附在生物膜表面, 然后优势菌群通过一系列的代谢作用将苯酚分解为无害物质  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ .

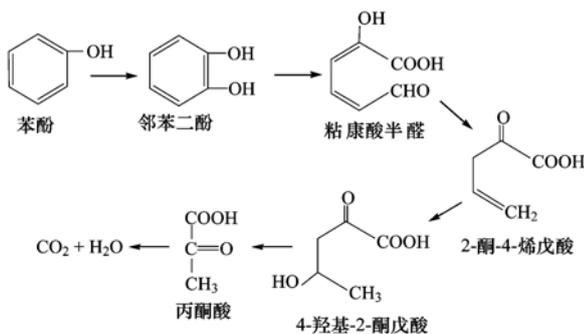


图 10 苯酚生物降解的可能降解途径

Fig. 10 Possible degradation process of biodegradation of phenol

## 参考文献:

- [ 1 ] Polymenakou P N, Stephanou E G. Effect of temperature and additional carbon sources on phenol degradation by an indigenous soil pseudomonad [ J ]. *Biodegradation*, 2005, **16** ( 5 ): 403-413.
- [ 2 ] Saravanan I P, Pakshirajan K, Saha P. Kinetics of phenol and *m*-cresol biodegradation by an indigenous mixed microbial culture isolated from a sewage treatment plant [ J ]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20** ( 12 ): 1508-1513.
- [ 3 ] Prpich G P, Daugulis A J. Enhanced biodegradation of phenol by a microbial consortium in a solid-liquid two phase partitioning bioreactor [ J ]. *Biodegradation*, 2005, **16** ( 4 ): 329-339.
- [ 4 ] Busca G, Berardinelli S, Resini C, *et al.* Technologies for the removal of phenol from fluid streams: a short review of recent developments [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **160** ( 2-3 ): 265-288.
- [ 5 ] Lob K C, Tar C P P. Effect of additional carbon sources on biodegradation of phenol [ J ]. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **64** ( 6 ): 756-763.
- [ 6 ] Burgess J E, Parsons S A, Stuetz R M. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review [ J ]. *Biotechnology Advances*, 2001, **19** ( 1 ): 36-63.
- [ 7 ] Attaway H, Gooding C H, Schmidt M G. Comparison of microporous and nonporous membrane bioreactor systems for the treatment of BTEX in vapor streams [ J ]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2002, **28** ( 5 ): 245-251.
- [ 8 ] Prpich G P, Adams R L, Daugulis A J. *Ex situ* bioremediation of phenol contaminated soil using polymer beads [ J ]. *Biotechnology Letters*, 2006, **28** ( 24 ): 2027-2031.
- [ 9 ] Pinto G, Pollio A, Previtera L, *et al.* Biodegradation of phenols by microalgae [ J ]. *Biotechnology Letters*, 2002, **24** ( 24 ): 2047-2051.
- [ 10 ] 曾萍, 宋永会, 刘风华, 等. 不同表观气速对好氧颗粒污泥净化苯酚废气的影 响 [ J ]. *环境科学学报*, 2011, **31** ( 5 ): 964-970.
- [ 11 ] 刘玉红, 羌宁, 都基峻, 等. 生物洗涤法治理含苯酚废气研究 [ J ]. *环境科学研究*, 2001, **17** ( 4 ): 51-53.
- [ 12 ] 张京, 李坚, 孙莉, 等. 错流式生物滴滤床净化甲苯废气 [ J ]. *环境工程学报*, 2008, **2** ( 1 ): 59-63.
- [ 13 ] 刘强, 汪凤诞, 王宝庆, 等. 高效生物滴滤床净化含二甲苯废气的实验研究 [ J ]. *环境污染与防治*, 2004, **26** ( 2 ): 101-103.
- [ 14 ] 陈波, 张耀斌, 吴丹, 等. 生物滴滤法去除低浓度苯乙烯 [ J ]. *环境工程学报*, 2010, **4** ( 3 ): 644-648.
- [ 15 ] 孙石, 王洁, 孙悦, 等. 吸附-生物膜理论对生物法净化气态污染物的研究 [ J ]. *武汉理工大学学报*, 2007, **29** ( 10 ): 42-46.
- [ 16 ] 王洁. 生物膜填料塔净化低浓度 CS<sub>2</sub> 废气的基础应用研究 [ D ]. 昆明: 昆明理工大学, 2005. 28-31.
- [ 17 ] 刘广金, 张袖丽. 苯酚高效降解菌的筛选及其降解特性的研究 [ J ]. *现代农业科技*, 2007, ( 11 ): 202, 205.
- [ 18 ] 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 等. 膜生物反应器处理甲苯性能及机制 [ J ]. *环境科学*, 2012, **33** ( 8 ): 2558-2562.
- [ 19 ] Zhao Y, Liu Z J, Liu F X, *et al.* Cometabolic degradation of trichloroethylene in a hollow fiber membrane reactor with toluene as a substrate [ J ]. *Journal of Membrane Science*, 2011, **372** ( 1-2 ): 322-330.
- [ 20 ] 李华, 刘永军, 刘金光. 固定化 *Acinetobacter* sp. XA05 和 *Sphingomonas* sp. FG03 降解苯酚 [ J ]. *化工环保*, 2010, **30** ( 1 ): 12-15.
- [ 21 ] Mattes T E, Alexander A K, Richardson P M, *et al.* The genome of *Polaromonas* sp. strain js666: insights into the evolution of a hydrocarbon-and xenobiotic-degrading bacterium, and features of relevance to biotechnology [ J ]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74** ( 20 ): 6405-6416.
- [ 22 ] 朱雅兰. 生物法处理低浓度有机废气 [ J ]. *甘肃科技*, 2008, **24** ( 2 ): 63-66.
- [ 23 ] 陆继来. 生物法净化再生胶脱硫废气的工业应用研究 [ D ]. 昆明: 昆明理工大学, 2003. 4-5.
- [ 24 ] 唐沙颖稼, 徐校良, 黄琼, 等. 生物法处理有机废气的研究进展 [ J ]. *现代化工*, 2012, **32** ( 10 ): 29-33.
- [ 25 ] Shingler V, Flankin F C H, Tsuda M, *et al.* Molecular analysis of a plasmid-encoded Phenol hydroxylase from *Pseudomonas* CF6QQ [ J ]. *Journal of General Microbiology*, 1989, **135** ( 5 ): 1083-1092.
- [ 26 ] Feist C F, Hengman G D. Phenol and benzoate metabolism by *Pseudomonas putida*: regulation of tangential pathways [ J ]. *Journal of Bacteriology*, 1969, **100** ( 2 ): 869-877.

## CONTENTS

|  |   |
|--|---|
| Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China .....  | WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> ( 401 )         |
| Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Source Analysis in Beijing .....  | TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> ( 411 )        |
| Temporal and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing ..... | ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> ( 418 )         |
| Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM <sub>5.0</sub> Inhalable Particulate in Beijing .....   | WANG Yan-hui, XIAO Yao ( 428 )  |
| Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring .....   | XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun ( 436 )                          |
| Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing .....  | WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> ( 442 )           |
| Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles .....   | WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> ( 451 )     |
| Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> in Xinzhou City .....   | SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 458 )          |
| Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou .....  | QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> ( 464 )                    |
| Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis .....  | SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> ( 470 )            |
| Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea .....   | XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> ( 475 )         |
| Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data .....   | LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> ( 481 )             |
| Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area .....   | HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> ( 490 )          |
| Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation .....   | JIA Long, XU Yong-fu ( 495 )  |
| Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China .....  | DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> ( 504 )             |
| Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area .....   | QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> ( 513 )          |
| Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter .....   | HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> ( 520 )     |
| Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends .....  | LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> ( 526 )              |
| Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting .....  | ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> ( 533 )     |
| Oxidation of Mercury by CuBr <sub>2</sub> Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition .....  | HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> ( 541 )             |
| Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian .....   | ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> ( 547 )   |
| Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study .....   | JIA Hai-feng, GUO Yu ( 555 )  |
| Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain .....   | GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> ( 562 )                  |
| Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary .....  | ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> ( 569 )        |
| Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary .....  | MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> ( 577 )       |
| Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area .....   | CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> ( 585 )             |
| Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....   | BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> ( 592 )       |
| Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i> .....   | ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> ( 597 )           |
| Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water .....  | TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> ( 605 )               |
| Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite .....   | LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 611 )             |
| Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride .....  | SONG Chen-yi, YIN Da-qiang ( 619 )                                    |
| Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System .....   | FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 626 )          |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety .....  | YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao ( 633 )                               |
| Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment .....   | LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> ( 643 )                  |
| Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter .....   | LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 651 )       |
| Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process .....   | CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> ( 657 )       |
| Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes .....  | ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe ( 663 )                          |
| Biosorption Characteristics of Cu <sup>2+</sup> by Spent Substrate of Pleurotus Oyster .....   | HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> ( 669 )      |
| Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition .....   | WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> ( 678 )                 |
| Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou .....  | GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> ( 684 )      |
| Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China .....  | ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> ( 692 ) |
| Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site .....   | ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> ( 704 )      |
| Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China .....   | ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> ( 711 )          |
| Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River .....   | TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> ( 719 )            |
| Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants .....   | ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> ( 727 )             |
| Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites .....  | YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce ( 733 )                                  |
| Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 .....  | ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 740 )        |
| Effects of the Ratio of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N to NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture .....                                    | CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> ( 746 )        |
| Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou .....  | GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> ( 753 )          |
| Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles .....  | ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> ( 759 )    |
| Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea .....   | ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> ( 764 )           |
| Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i> .....   | WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin ( 770 )                               |
| Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System .....   | LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> ( 780 )            |
| Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary .....  | LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> ( 786 )         |
| Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies .....  | ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> ( 792 )     |

# 《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

|         |  |                  |    |   |
|---------|--|------------------|----|---|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院  | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717  | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com   | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(北京399信箱)   | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China  |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行