

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CH ₄ 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PM ₁₀ 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H ₂ S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,杨廷钊,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,张炯,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,林岫璇,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NO ₃ ⁻ 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(VOCs)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	况烨,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)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 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)
环境激素氯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)

分期布液生物滴滤床净化 H_2S 废气性能研究

刘春敬, 李坚*, 刘佳, 彭淑婧, 李超, 陈英, 何洪

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 采用分期布液式生物滴滤床净化 H_2S 废气, 以实验室驯化的复合微生物菌群挂膜于滴滤床, 考察了挂膜启动及不同负荷运行对 H_2S 的降解性能。结果表明, 生物滴滤床在进气浓度 $110 \sim 230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 停留时间 30 s 的条件下, H_2S 去除率可达到 99%, 3 d 内即完成挂膜。进气负荷对于滴滤床降解性能和微生物种群都有影响。低进气负荷时, 净化效率 > 90%, 降解作用主要发生于反应器的前段, 占 85% 以上。前段各种类微生物数量上均多于后段, 尤其是硫化氢降解菌; 进气负荷较高时, 前段微生物数量没有明显变化; 后段去除负荷增加明显, 由 $0.04 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 增长到 $0.67 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。微生物数量由 $4.5 \times 10^7 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 增长到 $5.17 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 。采用扫描电镜观察填料表面, 稳定运行时优势菌主要为短杆菌, 高负荷状态下, 填料表面被大量的代谢产物覆盖。对运行产物分析发现, 大部分 H_2S 被氧化为 S, 只有小部分彻底氧化分解为 SO_4^{2-} 。

关键词: 分期布液; 生物滴滤; H_2S ; 净化效能; 种群; 负荷

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-2987-06

Performance of Cross Flow Trickling Filter for H_2S Gas Treatment

LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, PENG Shu-jing, LI Chao, CHEN Ying, HE Hong

(Department of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A grading cross bio-trickling filter was designed for H_2S removal. Mixed microorganisms domesticated from the former experiment were immobilized to start up the trickling filter. Removal performances during starting up period and different loadings were investigated. Results showed that the immobilization of the trickling filter was completed within 3 d. The removal efficiency was higher than 99% when the inlet concentration was in the range of $110 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (EBRT 30 s). At low inlet loadings, the front part of the trickling filter played a major role in H_2S degradation, accounting for about 85%. Microbial diversity and population of the front part were superior to the tail one. At higher loadings, microbial diversity and population of the tail part increased significantly, from $4.5 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$ to $5.17 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$, and the elimination capacity was also improved, from $0.04 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ to $0.67 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$. Rod-shaped bacteria were the dominant microorganisms on the surface of ceramics in the steady state as observed by SEM. The surfaces of ceramics were covered by a lot of microbial metabolites at high loadings. Analysis of the metabolites indicated that the majority of H_2S was oxidized to sulfur and only a small portion was converted to sulfate.

Key words: trickling in stages; bio-trickling filter; H_2S ; removal efficiency; microbial community; inlet loading

随着城市化进程的不断加剧, 污水处理厂、垃圾转运及处理(填埋、焚烧和堆肥)等市政设施离人们居住的环境越来越近, 由此带来的环境污染日益严重, 尤其是恶臭污染, H_2S 是其中最典型的一种。恶臭污染直接威胁周围居民身心健康, 近几年关于此类相关投诉案件逐年增多, 已成为社会发展的不稳定因素。因此, 恶臭污染物的控制已经迫在眉睫。

H_2S 治理方法主要有物理法、化学法和生物法 3 种。与前两者相比, 生物法因其低能耗、低运行成本及无二次污染等优点^[1], 受到研究者和工程技术人员青睐。生物法在德国、荷兰、美国和日本等国已经得到了广泛应用^[2,3], 其中生物滤池和滴滤塔技术已经非常成熟, 已有多套工业尺度的生物净化装置应用到各臭气产生场所。美国环境保护署于 2003 年制定了生物法治理废气的设计规范, 并系统比较了各种方法的经济性及优缺点^[4]。2010 年由

Daniel 公司设计制造的风量可达 180 000 CFM 的生物滴滤装置在美国加利福尼亚州的 Orange 污水处理厂成功运行^[5]。其他一些国家开展这项研究起步较晚^[6,7]。Ravi 等^[8]采用 3 种不同结构的生物反应器形式(生物滤池、生物滴滤塔和转鼓生物滴滤塔)进行了生物除臭的研究, 结果表明 3 种结构形式反应器在低进气负荷下没有明显区别, 但当负荷较高时, 转鼓滴滤塔净化性能最好。Jiang 等^[9]研究表明采用水平式生物滴滤床治理含 H_2S 和 NH_3 废气是可行的, 但出现生物膜阻塞问题。Ramirez 等^[10]接种 2 种微生物菌种 *Thiobacillus thioparus* ATCC 23645 和

收稿日期: 2011-12-16; 修订日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(21107004); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20101103120018)

作者简介: 刘春敬(1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: chunjingliu2008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: Ljian@bjut.edu.cn

Nitrosomonas europaea ATCC19718 进行了去除 H_2S 和 NH_3 的研究,在停留时间 60 s 时,效率能够达到 100%. Zhang 等^[11]研究在非稳态条件下生物滴滤塔降解 H_2S 的抗冲击性能. 传统生物滴滤塔有顺流和逆流两种操作方式^[12],国内外的研究中主要采用逆流操作方式,逆流操作有利于气液两相充分接触,提高气相到液相的传质速率,加速污染物的净化过程^[13,14]. 但在逆流生物滴滤塔中,气相从滴滤塔底部进入,底部污染物负荷相对于顶部较高,需要较多的生物量发挥降解作用,因此需要较多的营养物质. 然而,在立式生物滴滤塔中,液相从反应器顶部进入. 底部的营养物质浓度相对较低,而代谢产物浓度较高,导致在反应器中存在生物量与营养物质分布不均的问题.

错流式生物滴滤塔是一种新型的反应器结构,塔中气、液两相错流接触^[15],能够减少营养液的流经高度,有效调节反应器内的湿度,解决立式生物滴滤塔营养液分布不均的问题^[16]. 本实验采用自行设计的分期布液式生物滴滤床并接种复合除臭微生物菌群,进行了降解 H_2S 废气的研究. 在不同进气负荷状态下,系统研究了生物滴滤床的净化效率,去除负荷和微生物种群结构变化,并分析了微生物的代谢产物及降解机制.

1 材料与方法

1.1 实验装置

分期布液式生物滴滤床净化 H_2S 废气实验装置如图 1 所示,实验采用的分期布液式生物滴滤床由实验室自行设计. 由壁厚 8 mm 透明有机玻璃板制成,其中进口截面积为 $180 \times 100 \text{ mm}^2$,中间截面积为 $160 \times 100 \text{ mm}^2$,出口截面积为 $120 \times 100 \text{ mm}^2$,生物滴滤床分为两段,每段长度为 150 mm. 装填填料总体积为 7 L. H_2S 废气的配置采用化学配气法,配制的一定比

例浓度的 H_2SO_4 和 Na_2S 稀溶液依靠蠕动泵输送到反应瓶中,产生的 H_2S 经空气压缩机鼓入到混合瓶中, H_2S 浓度通过控制蠕动泵转速实现. 气体流量通过质量流量计控制, H_2S 废气从反应器左侧由水平方向通过填料,营养液通过由电磁阀和时间继电器构成的自动控制系统定时定量地由反应器顶部的布液装置滴下,气、液两相在反应器内错流接触,营养液经底部液封装置收集进入相应的储液槽,废气净化后从生物滴滤床出气口经抽气风机排出,为了防止 H_2S 废气泄露,本实验采用负压操作.

1.2 菌源与填料

微生物是生物滴滤塔的核心,对于恶臭污染物的净化效果起到关键作用. 传统的生物滤塔挂膜微生物主要分为两种,一种是直接将活性污泥挂膜于生物滴滤塔上^[17]. 这种操作方式会导致生物滴滤塔的挂膜启动时间较长;另外一种是在生物滴滤塔中挂膜对于某特定污染物有高效降解作用的微生物纯菌种^[18,19]. 这种操作方式对于单一成分废气有较高的净化效率,但实际工程中废气成分复杂,依靠单一的微生物难以对所有污染物产生高效的降解作用. 生物滴滤床挂膜菌源是采用前期实验驯化得到的微生物复合菌群. 选用优选后的高效挂膜生物陶粒作为填料,其外观呈球状,表面深灰色,多微孔,粒径为 2~3 mm,表面粗糙,有利于微生物的生长.

1.3 分析方法

H_2S 浓度测定采用亚甲基兰分光光度法^[20]. 细菌、真菌、放线菌、硫杆菌菌落总数采用平板计数法计数,分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、马丁-孟加拉红琼脂培养基、改良高氏 1 号培养基和硫杆菌琼脂培养基. 生物陶粒在表面涂金后,通过 SEM 进行生物相观察. 将生物陶粒浸泡于去离子水中,超声波振荡并将过滤,于 30℃ 烘干得生物硫粉. 生物硫粉采用激光粒度仪进行粒径分布测定,同时采用原子力显微镜观察其表面凹凸形貌.

2 结果与讨论

2.1 分期布液式生物滴滤床的挂膜启动

分期布液式生物滴滤床在成功接种微生物后,对其挂膜启动情况进行了考察. 运行条件如下:停留时间 30 s,进气量 $0.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,营养液喷淋量 $6 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,进气浓度 $110 \sim 230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

由图 2 可知,生物滴滤床在启动的第 1 d,对 H_2S 的净化效率就达到了 90%,这在其他生物滴滤塔的研究中是少见的. 在启动的前 3 d,进口浓度维

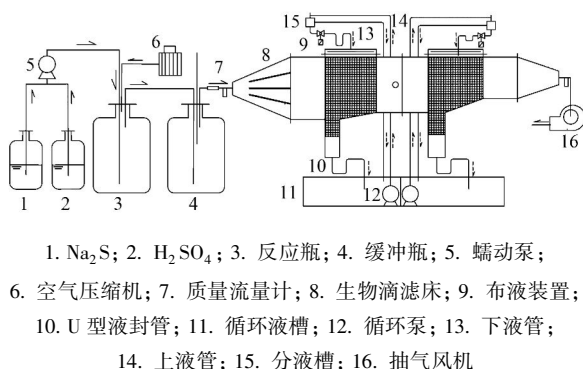


图 1 分期布液式生物滴滤床净化 H_2S 废气实验流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the cross-flow bio-trickling filter

持在 $110 \sim 140 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 反应器的净化效率保持稳定, 均超过了 95%, 出口浓度均小于 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 第 6 d 开始, 进气浓度开始大幅度提高, 从 $140 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 提高到 $230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 反应器连续运行 10 d 后, 净化效率依然保持在 98% 左右. 综合考察生物滴滤床在挂膜启动阶段的性能, 其净化效率能够稳定在 95% 以上, 出口浓度也在 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下, 并且净化效率不受进气浓度的变化影响. 因此, 认为本生物滴滤床在 3 d 内启动完成, 与传统生物滴滤塔 2 周挂膜启动时间相比, 缩短了大约 11 d^[21].

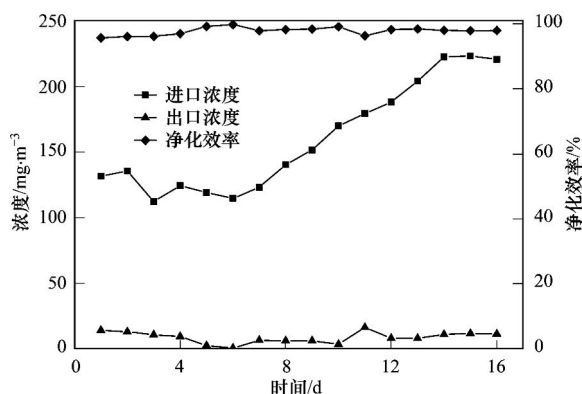


图2 启动期间 H_2S 浓度与去除率的关系

Fig. 2 Relations of inlet concentration and removal efficiency of H_2S during the start up period

2.2 进气负荷对分期布液式生物滴滤床净化效能的影响

本实验考察了单位体积进气负荷与单位体积去除负荷的变化关系, 以及不同部位对总去除量的贡献能力. 实验条件如下: 停留时间 30 s, 进气量 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 营养液喷淋量 $6 \sim 10 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 进气浓度范围 $140 \sim 2030 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

分期布液式生物滴滤床由前后两段组成. 去除负荷指的是单位时间内生物滴滤床去除的 H_2S 的量, 单位为 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$. 由图 3 可以看出, 反应器不同部位在不同进气负荷条件下的去除性能是不一样的. 当进气负荷 $< 0.83 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 前段反应器发挥主要净化作用, 占总去除负荷 85% 左右, 此时总净化效率在 90% 以上. 对生物滴滤床各段的菌群进行计数分布, 前段反应器的微生物数量 ($2.7 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$) 要远远高于后段反应器 ($1.4 \times 10^7 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$). 当进气负荷持续增加, 前段反应器去除负荷增长较为缓慢, 而后段去除负荷快速增长, 最终前后两段去除量持平, 分别达到了 $0.74 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.67 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, 折合成单位体积去除负荷, 则分别为 $185 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 167

$\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 前后两段反应器的微生物数量分别达到了 $6.5 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $5.4 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$. 综合考虑净化效率和去除负荷, 本生物滴滤床的最佳进口负荷为 $180 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 此时净化效率为 90%.

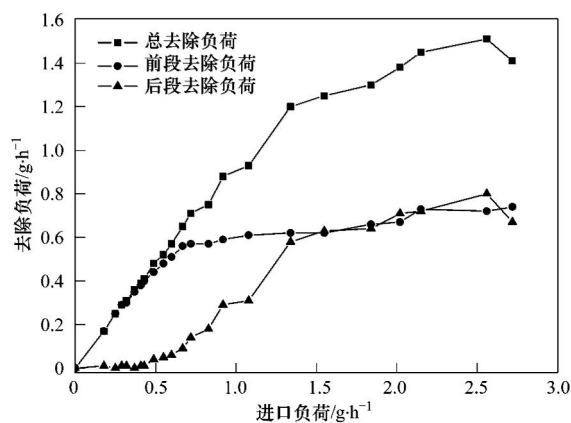


图3 反应器不同部位去除能力与进气负荷的关系

Fig. 3 Relations of inlet loadings and elimination capacity of different parts

本实验对于去除负荷的考察分为两个阶段, 低负荷阶段和高负荷阶段. 对于低负荷和高负荷的定义是依据本反应器各方面性能所展现的不同来定义的, 并不存在与其它同领域研究结果比较. 随着滴滤床进口浓度的增加, 生物滴滤床承载的进口负荷逐渐增加, 滴滤床整体体积去除负荷呈现先增加, 后变缓的趋势 (见图 4). 当单位体积进口负荷在 $191 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 净化效率仍能够达到 90%, 单位体积去除负荷达到 $171 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 之后, 滴滤床的去除负荷增长缓慢, 最高去除负荷为 $216 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 此时进气浓度为 $2027 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出口浓度为 $827 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 而净化效率只有 59%.

生物滴滤床的净化效率在初始阶段一直保持在 90% 左右, 未受到进口浓度的影响. 分析原因是生

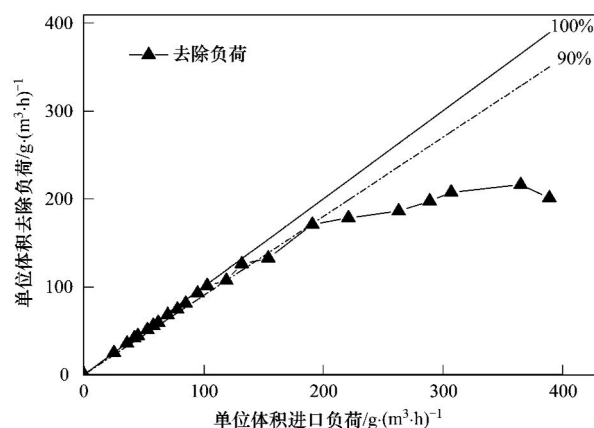


图4 单位体积去除负荷与进气负荷的关系

Fig. 4 Relations of inlet capacity and volumetric elimination capacity

物滴滤床中的活性微生物存在一个可以承受的最大去除负荷限值. 生物法对于气态污染物的降解可以看做是一个伴有生物化学反应的气液/固传质过程^[22]. 首先, 废气中的 H_2S 分子从气相主体通过气膜向气-生物膜相界面传递; 然后, H_2S 分子从相界面转移至生物膜; 最后被生物膜中的 H_2S 降解菌捕捉, 氧化分解. 当污染物扩散传递速率远远大于生物化学反应速率时, 整个降解过程速率取决于后者, 为动力学控制; 当生物化学反应速率远远大于气液传递速率时, 降解过程主要取决于传递速率, 为扩散控制^[23].

在本实验的低负荷运行阶段, 进气浓度相对较低, 即存在于气膜中的 H_2S 分子相对较少, 从气膜转移到生物膜的浓度梯度差也相对较小, 可能存在于一个扩散传质的限制^[24]. 但是, 在实验运行过程中, 净化效率一直保持在 99% 以上, 即证明 H_2S 能够快速转移到生物膜被微生物降解, 因此, 在低负荷运行阶段不存在扩散限制; 在高负荷运行阶段, 进气浓度比低负荷浓度高很多, 在低负荷不存在扩散限制的情况下, 高负荷依然不会存在这一限制因素. 而

这一阶段净化效率却降至 50%, 即证明扩散至生物膜的 H_2S 分子不能够被迅速分解, 生化反应速率小于扩散速率, 为动力学控制. 整个实验过程 H_2S 的降解主要取决于微生物氧化分解速度. 因此要提高污染物净化效率, 应着重培育具有高降解活性的微生物, 进一步解除动力学抑制阻力, 这为该课题后续的进一步开展指明了研究方向.

2.3 进气负荷对分期布液式生物滴滤床种群结构的影响

在停留时间 20 s, 进气量 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 调节 H_2S 进口浓度在 $875 \sim 1124 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围, 考察了高负荷运行时分期布液式生物滴滤床微生物菌群结构的变化.

由图 5 可以看出, 低负荷运行时, 陶粒表面覆盖有均匀的生物膜, 主要为杆状和球状, 杆状细菌居多. 高负荷运行一段时间后, 陶粒表面的空隙被生物膜不均匀覆盖, 杆状细菌数量明显减少, 而且覆盖了大量的不规则形状物质, 结合观察到的陶粒表面产生的黄色物质, 推测这些不规则形状的物质为微生物在高负荷运行状态下新陈代谢产物.

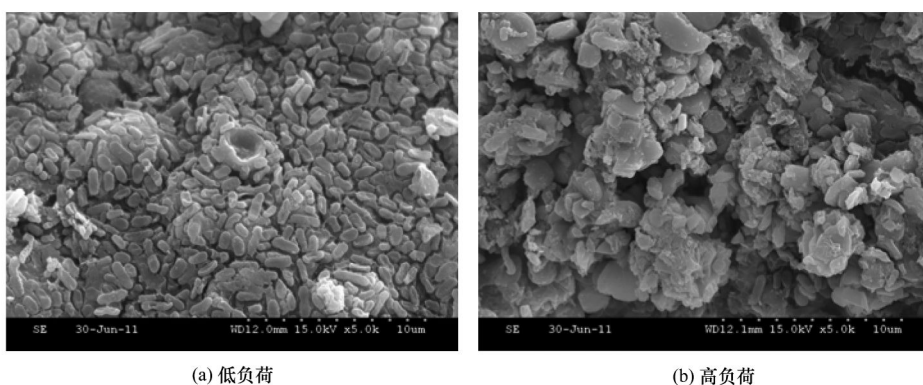


图 5 生物陶粒的 SEM 微生物相观察

Fig. 5 SEM micrographs of ceramic pellets in different periods

对不同时期陶粒进行菌落计数分析, 见表 1. 生物滴滤床微生物种群主要由细菌、真菌、放线菌组成. 能够氧化分解 H_2S 的硫细菌属于细菌的分类. 在高浓度进气选择压力下, 微生物种群结构发生明显变化. 虽然各类微生物在数量上都有所增加, 但是, 细菌和硫细菌增加非常明显, 放线菌和真菌的增长幅度相对较小. 这一变化趋势在后段反应器中表现最为明显, 细菌数目由最初的 4.5×10^7 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 5.17×10^8 个 $\cdot \text{g}^{-1}$, 硫细菌数目由 8.75×10^6 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 4.23×10^7 个 $\cdot \text{g}^{-1}$. 前段反应器的微生物数量在高负荷运行时增长不是很明显. 分析原因是稳态运行时, 净化作用主要发生在前段反应器,

当气流流经后段时, 大部分 H_2S 已经被降解, 后段的微生物菌群处于寡营养状态, 所以导致后段反应器细菌量较少. 当反应器处于高负荷运行时, 前段反应器的去除能力已经不能承担过高的进气负荷, 这导致后段反应器由寡营养状态转为富营养状态, 表现为微生物数量的急剧增加, 也间接印证了图 3 中反应器后段在高负荷时污染物去除负荷的急剧增加.

2.4 高负荷运行条件下微生物代谢产物及其特性研究

在高负荷运行条件下, 取分期布液式生物滴滤床部分填料进行观察, 发现陶粒表面被大量黄色的

物质覆盖(如图 6),经实验鉴定为硫磺。生物滴滤反应器微生物对于H₂S的降解过程复杂多样,可能存在多种不稳定中间代谢物。被广泛认知的主要降解过程如下:

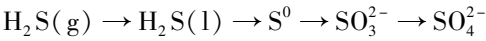


表 1 生物滴滤处理系统中细菌、真菌、放线菌、硫细菌种群分布对比/个·g⁻¹

微生物种类	Table 1 Microbial diversity in bio-trickling filter at different stages/cell·g ⁻¹			
	稳态		高负荷	
	前段	后段	前段	后段
细菌	2.1 × 10 ⁸	4.5 × 10 ⁷	5.95 × 10 ⁸	5.17 × 10 ⁸
真菌	5.1 × 10 ⁵	3.97 × 10 ⁵	1.28 × 10 ⁶	4.7 × 10 ⁵
放线菌	3.9 × 10 ⁵	3.24 × 10 ⁵	4.2 × 10 ⁵	3.56 × 10 ⁵
硫细菌	4.1 × 10 ⁷	8.75 × 10 ⁶	4.53 × 10 ⁷	4.23 × 10 ⁷



图 6 高负荷运行生物陶粒宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic micrographs of bio-ceramics under high loading

主要涉及以下两步骤:①H₂S失去两个电子,生成硫单质;②单质硫被进一步氧化成硫酸根。在低负荷运行时,微生物能够将H₂S彻底氧化分解,最终生成硫酸根,这由实验过程中循环营养液硫酸根浓度的不断增加可以验证,但在高负荷状态下,微生物来不及彻底氧化分解H₂S,导致中间产物硫的累积,因此表现为陶粒表面硫磺的覆盖。

葛洁等^[25]在H₂S进气浓度 875 ~ 1 124 mg·m⁻³时,发现在循环营养液槽中产生黄色硫颗粒。高负荷运行条件下,过高的污染物导致微生物快速生长繁殖,生物量迅速增长,从而使填料表面覆盖大量的代谢产物。代谢产物增多会影响到其空隙结构和传质效率。在生物滴滤塔中,营养液滴滤系统不仅能够提供给微生物必要的营养元素,还能够带走微生物的代谢产物,解除对传质的抑制。因此在高负荷实验过程中,笔者相应提高了营养液的喷淋量及营

养物质浓度,降低各因素对空隙结构和传质效率的影响。

通过对微生物代谢产生的硫磺用激光粒径分析仪进行粒径测定,发现生物硫磺粒径分布比较均匀,主要介于 960 ~ 1 500 nm 之间。原子力显微镜扫描硫粉表面,其形貌比较平滑(见图 7),出现的峰谷均在纳米级。

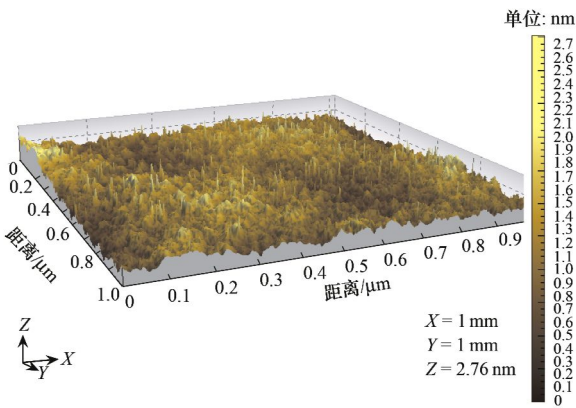


图 7 微生物代谢产物(硫粉)的 AFM 表征

Fig. 7 AFM characterization of microbial metabolites

3 结论

(1)以本实验室驯化的复合微生物菌群作为菌源挂膜于自行设计的分期布液式生物滴滤床降解H₂S废气可行,挂膜启动仅需要 3 d,挂膜速度很快且较为稳定。

(2)分期布液式生物滴滤床的最佳单位体积去除负荷达为 171 g·(m³·h)⁻¹,此时净化效率仍能够达到 90%。最高单位体积去除负荷为 216 g·(m³·h)⁻¹,净化效率为 59%。

(3)本实验生物降解过程中H₂S的分解主要取决于微生物的氧化分解速度,为动力学控制。要提高污染物的净化效率,应着重培育具有高速率降解活性的微生物。

(4)高负荷运行能够使微生物种群分布发生变化,其中细菌和硫细菌的数量增长最为明显。生物数量的变化和代谢产物的排放,进而会影响到床层空隙结构和传质。

(5)高负荷运行阶段微生物降解H₂S的代谢产物为硫单质和硫酸根。生物硫粉粒径介于 960 ~ 1 500 nm 之间,表面形貌比较平滑。

参考文献:

[1] Estrada J M, Bart-Kraakman N J R, Muñoz R, et al. A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants [J]. Environmental Science & Technology,

- 2011, **45**(3): 1100-1106.
- [2] 邹桂香, 刘煜竑. 生物法处理挥发性有机废气的研究概述 [J]. 科技资讯, 2007, (16): 245-246.
- [3] Dobslaw D, Woiski C, Engesser K H. Implementation of TA Luft 2002 in existing plants: a bioscrubber for combined waste air and waste water treatment[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, **82**(12): 2161-2170.
- [4] U. S. Environmental Protection Agency. Using bioreactors to control air pollution[EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttnca1/dirl/fbiorect.pdf>.
- [5] Lessmueller M D, Aviles C, Ngo B. Manufacture and design of an 180,000 CFM odor control biotrickling filter system [EB/OL]. <http://www.danielmechanical.com/PDF/Biofiltration2010DanielCo.pdf>.
- [6] Sempere F, Martínez-Soria V, Palau-Roja J M, *et al.* Control of VOC emissions from a flexographic printing facility using and industrial biotrickling filter[J]. Water Science and Technology, 2012, **65**(1): 177-182.
- [7] Wan S G, Li G Y, An T C. Treatment performance of volatile organic sulfide compounds by the immobilized microorganisms of B350 group in a biotrickling filter [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, **86**(9): 1166-1176.
- [8] Ravi R, Philip L, Swaminathan T. Comparison of biological reactors (biofilter, biotrickling filter and modified RBC) for treating dichloromethane vapors [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, **85**(5): 634-639.
- [9] Jiang X, Tay J H. Operational characteristics of efficient co-removal of H₂S and NH₃ in a horizontal biotrickling filter using exhausted carbon [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 638-643.
- [10] Ramirez M, Gómez J M, Aroca G, *et al.* Removal of hydrogen sulfide and ammonia from gas mixtures by co-immobilized cells using a new configuration of two biotrickling filters[J]. Water Science and Technology, 2009, **59**(7): 1353-1359.
- [11] Zhang L H, Meng X L, Wang Y, *et al.* Performance of biotrickling filters for hydrogen sulfide removal under starvation and shock loads conditions[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2009, **10**(8): 595-601.
- [12] Paca J, Halecky M, Misiaczek O, *et al.* Biofiltration of paint solvent mixtures in two reactor types: overloading by hydrophobic components [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2010, **37**(12): 1263-1270.
- [13] Rene E R, Montes M, Veiga M C, *et al.* Styrene removal from polluted air in one and two-liquid phase biotrickling filter: steady and transient-state performance and pressure drop control [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(13): 6791-6800.
- [14] Ding Y, Han Z Y, Wu W X, *et al.* Performance evaluation of biofilters and biotrickling filters in odor control of n-butyric acid [J]. Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2011, **46**(5): 441-452.
- [15] 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 Microbiology and Biotechnology, 2009, **81**(5): 969-975.
- [16] Fortuny M, Gamisans X, Deshusses M A, *et al.* Operational aspects of the desulfurization process of energy gases mimics in biotrickling filters[J]. Water Research, 2011, **45**(17): 5565-5674.
- [17] Mathur A K, Majumder C B. Biofiltration and kinetic aspects of a biotrickling filter for the removal of paint solvent mixture laden air stream[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **152**(3): 1027-1036.
- [18] García L A, Revah S, Ramírez M, *et al.* Dimethyl sulphide degradation using immobilized *Thiobacillus thiooparus* in a biotrickling filter [J]. Environmental Technology, 2009, **30**(12): 1273-1279.
- [19] He F, Zhou L X. Treatment for wool scouring effluent through bioacidification by *Acidithiobacillus thiooxidans*[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2010, **40**(4): 391-401.
- [20] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2003. 512-513.
- [21] 钱东升, 房俊逸, 陈东之, 等. 板式生物滴滤塔高效净化硫化氢废气的研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2786-2793.
- [22] 蒋文举, 赵君科, 尹华强, 等. 烟气脱硫脱硝技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 113-114.
- [23] Kraakman N J R, Rocha-Rios J, Van Loosdrecht M C M. Review of mass transfer aspects for biological gas treatment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, **91**(4): 873-886.
- [24] Dorado A D, Rodríguez G, Ribera G, *et al.* Evaluation of mass transfer coefficients in biotrickling filters: experimental determination and comparison to correlations [J]. Chemical Engineering & Technology, 2009, **32**(12): 1941-1950.
- [25] 葛洁, 张承中. 生物滴滤塔净化H₂S气体的菌种筛选、填料改性及反应动力学分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. 86-88.

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 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.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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发售