

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                            |                                                                   |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 .....                                   | 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)                           |
| 上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 .....                           | 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)                                     |
| 京津冀地区主要排放源减排对 PM <sub>2.5</sub> 污染改善贡献评估 .....             | 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)                                       |
| 北京冬季 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素浓度特征和来源分析 .....                | 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)                       |
| 2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 .....                       | 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)                               |
| 利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源 .....                       | 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)                      |
| 南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 .....                                 | 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)                             |
| 喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 .....                                     | 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)                                           |
| 生物滴滤塔净化含硫混合废气 .....                                        | 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)                      |
| 西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 .....                             | 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)                                        |
| 城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 .....                         | 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)                                          |
| 三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 .....                        | 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)                                    |
| 隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 .....                                 | 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)                                           |
| 白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 .....                            | 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)                                      |
| 唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 .....                                | 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)                      |
| 三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 .....                               | 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)                                        |
| 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 .....                              | 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)                            |
| 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 .....                                 | 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)                                          |
| 厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 .....                              | 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)                                     |
| 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 .....                            | 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)                                 |
| 碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制 .....                         | 孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)                              |
| 高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 .....                             | 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)                                       |
| 预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 .....                             | 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)                        |
| Cu-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 ..... | 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)                                               |
| 过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) <sub>2</sub> 中的氰污染物 .....                  | 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)                    |
| 微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 .....                      | 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)                                              |
| 桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 .....                    | 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)                                   |
| 基于 A <sup>2</sup> /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 .....              | 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)                                          |
| 污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 .....                                   | 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)                          |
| 全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 .....                                 | 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)                                     |
| 饥饿对疏自养反硝化反应器生物群落结构的影响 .....                                | 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)                                    |
| 快速启动厌氧氨氧化工艺 .....                                          | 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)                                  |
| 一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 .....                               | 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)                                           |
| 侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 .....                              | 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)                                      |
| 厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 .....                               | 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)                                         |
| 有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 .....                                   | 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)                                      |
| 过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 .....                                | 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)                                          |
| 不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 .....                                   | 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)                                              |
| 全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 .....                                   | 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)                                       |
| 纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 .....                             | 衣俊, 程金平 (1173)                                                    |
| 血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 .....                                | 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)                  |
| 纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 .....                          | 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189) |
| 利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响 .....              | 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)                          |
| 不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 .....                     | 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)                                          |
| 施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 .....                            | 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)                            |
| 施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 .....                          | 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)                 |
| 模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 .....                                 | 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)                                           |
| 土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO <sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应 .....       | 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)                                          |
| 岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 .....                       | 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)                                         |
| 板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 .....                           | 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)                             |
| 酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 .....                                | 姜继超, 尧倩 (1272)                                                    |
| 《环境科学》征稿简则 (1092)                                          |                                                                   |
| 《环境科学》征订启事 (1158)                                          |                                                                   |
| 信息 (1166, 1261, 1271)                                      |                                                                   |

# 生物滴滤塔净化含硫混合废气

叶杰旭<sup>1</sup>, 缪孝平<sup>2</sup>, 诸葛蕾<sup>1</sup>, 赵翔宇<sup>1</sup>, 江宁馨<sup>1</sup>, 章晶晓<sup>3</sup>, 陈东之<sup>1\*</sup>, 陈建孟<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014; 2. 浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007; 3. 浙江省台州市玉环县环境保护局, 玉环 317600)

**摘要:** 利用甲硫醚(DMS)降解菌 *Alcaligenes* sp. SY1 和丙硫醇(PT)降解菌 *Pseudomonas putida*. S-1 强化生物滴滤塔(BTF)处理 DMS 和 PT 的混合废气, 研究了其挂膜启动及稳定运行阶段的降解性能, 并考察了该系统同时去除 H<sub>2</sub>S 的能力. 结果表明, BTF 在 DMS 和 PT 进口浓度均为 50 mg·m<sup>-3</sup>, EBRT 为 30 s 的条件下, 运行 11 d 即可完成挂膜启动, 填料上的生物量明显增加, DMS、PT 的去除率分别可达到 90% 和 100%. 系统稳定运行时, DMS 和 PT 的最大去除负荷分别为 8.7 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup> 和 12.4 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>, PT 的去除效果更佳. DMS 和 PT 混合废气在降解过程中, PT 对 DMS 的降解有较明显的抑制作用, 当 PT 进气浓度大于 51 mg·m<sup>-3</sup> 时, DMS 的去除效率下降. BTF 还能同时有效去除 H<sub>2</sub>S, 当混合废气中 H<sub>2</sub>S 浓度达到 230 mg·m<sup>-3</sup> 时, H<sub>2</sub>S 去除率仍能高达 98%, 但是 115 mg·m<sup>-3</sup> 以上的 H<sub>2</sub>S 会对 DMS 的降解产生不利影响.

**关键词:** 生物滴滤塔; 混合废气; 甲硫醚; 丙硫醇; H<sub>2</sub>S

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0918-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201603055

## Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter

YE Jie-xu<sup>1</sup>, MIAO Xiao-ping<sup>2</sup>, ZHUGE Lei<sup>1</sup>, ZHAO Xiang-yu<sup>1</sup>, JIANG Ning-xin<sup>1</sup>, ZHANG Jing-xiao<sup>3</sup>, CHEN Dong-zhi<sup>1\*</sup>, CHEN Jian-meng<sup>1</sup>

(1. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Environmental Science Research & Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China; 3. Environmental Protection Bureau of Yuhuan County in Taizhou City, Yuhuan 317600, China)

**Abstract:** The biodegradation of gas-phase mixture of dimethyl sulfide (DMS) and 1-propanethiol (PT) was examined in a biotrickling filter (BTF), inoculated with a microbial consortium composed of activated sewage sludge, and pure strains of *Alcaligenes* sp. SY1 and *Pseudomonas putida*. S-1. BTF could be successfully started up within only 11 days when the inlet concentrations of DMS and PT were both 50 mg·m<sup>-3</sup> and EBRT was 30 s, with 90% removal efficiency (RE) of DMS and 100% RE of PT. In the steady state, the maximum elimination capacities of DMS and PT were 8.7 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup> and 12.4 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>, respectively. The presence of PT with a concentration up to 51 mg·m<sup>-3</sup> showed an antagonistic removal pattern for DMS, but the opposite did not occur. Meanwhile, the BTF showed high efficiency in the biodegradation of H<sub>2</sub>S. When the concentration of H<sub>2</sub>S was as high as 230 mg·m<sup>-3</sup>, the RE of H<sub>2</sub>S could reach 98%. However, H<sub>2</sub>S showed a declining effect on the removal of DMS when the concentration exceeded 115 mg·m<sup>-3</sup>.

**Key words:** biotrickling filter (BTF); mixed waste gas; dimethyl sulfide (DMS); 1-propanethiol (PT); H<sub>2</sub>S

恶臭污染是世界七大典型公害之一, 已引起全球各国的广泛关注. 含硫化合物大多伴有令人不愉快的气味, 是恶臭污染的主要来源之一. 在《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-93) 规定的 8 种限制排放物质中, 含硫化合物就占了 5 种<sup>[1]</sup>. 在含硫混合废气处理的过程中, 硫醇、硫醚等挥发性有机硫化物 (volatile organic sulfur compounds, VOSCs) 因具有一定的毒性, 且嗅阈值极低而成为处理的热点和难点<sup>[2]</sup>. 目前, VOSCs 的去除方法主要有物理法、化学法和生物法这 3 种<sup>[3-5]</sup>.

生物除臭是利用微生物的新陈代谢将目标污染物转化为 CO<sub>2</sub>、水等无机质, 具有工艺简单、无二次污染、运行成本低、环境负荷低和维护管理方便等优点<sup>[3,6]</sup>. 近年来, 生物法被越来越多地用于含硫废

气的处理, 尤其是中低浓度 H<sub>2</sub>S 废气的处理<sup>[7,8]</sup>. 然而, 当废气组分中同时存在硫醇、硫醚等 VOSCs 时, 传统生物处理方法的净化效果仍不够理想. 生物滴滤 (biotrickling filter, BTF) 是对生物过滤工艺的一种改进, 它的反应条件更易控制, 且单位体积内生物量高, 因此在含硫废气的处理中备受研究者的关注<sup>[9-12]</sup>. 本研究以甲硫醚 (dimethyl sulfide, DMS) 和丙硫醇 (1-propanethiol, PT) 为模型污染物, 利用本实验室筛选出的 DMS 降解菌 *Alcaligenes* sp.

收稿日期: 2016-03-07; 修订日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308502, 51178430); 浙江省环保科研计划项目 (2014A003); 浙江省公益性应用研究计划项目 (2014C33029)

作者简介: 叶杰旭 (1982~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: yejiexu@zjut.edu.cn

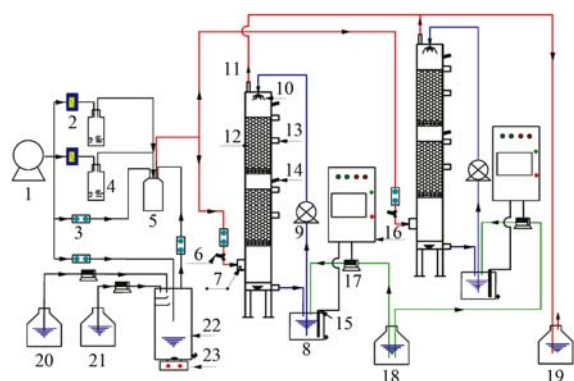
\* 通信作者, E-mail: cdz@zjut.edu.cn

SY1 和 PT 降解菌 *Pseudomonas putida*. S-1 强化 BTF 启动挂膜<sup>[13,14]</sup>, 考察 BTF 降解 DMS 和 PT 混合废气的性能, 同时考察了不同运行阶段生物量的变化情况. 实验后期还分析了该反应体系同时去除  $\text{H}_2\text{S}$  的能力, 对混合废气各组分的相互作用规律也进行了探讨.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置及流程

实验装置主要由两套 BTF (一套用作平行实验)、空气压缩机、玻璃转子流量计、质量流量计、磁力搅拌器、pH 自动控制系统、计量泵、蠕动泵、不锈钢吹脱瓶、混气瓶等组成, 具体如图 1 所示. 模拟废气中, 有机硫混合废气采用动态吹脱法配制, 少量空气经泵、质量流量计进入装有液态 DMS (或 PT) 的吹脱瓶 (因为 DMS、PT 的强挥发性, 采用液面吹脱即可); 而  $\text{H}_2\text{S}$  由  $\text{Na}_2\text{S}$  溶液和稀  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液反应生成, 利用蠕动泵精确控制其生成速率. 产生的 DMS、PT 或  $\text{H}_2\text{S}$  经胶管到达混气瓶, 与空气充分混合, 经玻璃转子流量计调节流量后从塔底进入 BTF. 实验初期和中期模拟混合废气中仅含有 DMS 和 PT 实验, 后期增加  $\text{H}_2\text{S}$ , 以考察 BTF 同时降解 DMS、PT 和  $\text{H}_2\text{S}$  的能力.



1. 泵; 2. 质量流量计; 3. 转子流量计; 4. 吹脱瓶; 5. 混合瓶; 6. 进气采气阀; 7. 进气口; 8. 营养液储液罐; 9. 计量泵; 10. 喷淋头; 11. 净化气出气; 12. 填料; 13. 填料取样口; 14. 采气口; 15. pH 计探头; 16. pH 自控系统; 17. 蠕动泵; 18. NaOH 储液罐; 19. NaOH 尾气吸收罐; 20. 稀  $\text{H}_2\text{SO}_4$  储液罐; 21.  $\text{Na}_2\text{S}$  储液罐; 22.  $\text{H}_2\text{S}$  生产罐; 23. 磁力搅拌器

图 1 BTF 工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the biotrickling filter

BTF 由总高 750 mm、内径 100 mm 的有机玻璃管制成, 内含两层填料层. 每层装有 1.5 L 的填料, 填料层高度为 192 mm, 填料层高度与塔径比为 1.92:1. 各填料层之间由开孔隔板隔开. 沿塔高方

向设置 2 个气体采样口 (每层一个采气口) 和 4 个填料取样口. 实验采用气液逆流操作, 气体自塔底由下而上进入, 营养液经计量泵从储液瓶提升至塔顶向下喷淋, 喷淋速度为  $6 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ , 最后流回至储液瓶. 挂膜完成后, 每 10 d 更换一次营养液. 装置设有 pH 自动控制系统, pH 维持在 6.68 ~ 7.20.

### 1.2 菌种来源

降解菌菌种来源于本实验室分离和保藏的 DMS 降解菌 *Alcaligenes* sp. SY1 (菌株 SY1) (GenBank 登录号: KP162176), 和 PT 降解菌 *Pseudomonas putida*. S-1 (菌株 S-1) (GenBank 登录号: KF640247). 降解性能和研究结果表明, 这两株菌分别对 DMS 和 PT 有高效的降解性能<sup>[13,14]</sup>.

活性污泥取自浙江某制药厂的曝气池, 经测试 SVI 值为  $1.625 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , SV 为 75%, MLSS 为  $4568 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , MLVSS 为  $3580 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 1.3 填料与营养液配制

BTF 中的填料选用具有较大比表面积, 有一定机械强度、空隙率较大、压降小、抗老化力强的聚氨酯小球. 聚氨酯小球平均直径约为 15 mm, 孔隙率为 62.7%, 动态持水量 (体积分数) 为 6.8%, 具体特性参数可参见文献[15].

BTF 营养液采用连续喷淋, 营养液组成如下:  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$   $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgCl}_2$   $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2$   $0.023 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 微量元素母液 1 mL.

微量元素母液组成为:  $\text{FeCl}_2$   $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$   $0.014 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2$   $0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnCl}_2$   $0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $0.02 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $0.02 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 1.4 分析方法

DMS、PT 和  $\text{H}_2\text{S}$  的质量浓度均采用岛津 GC-2014 气相色谱仪进行检测. 检测条件: RTX-1 色谱柱 ( $30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 25 \mu\text{m}$ ); 汽化室、柱温和 FPD 检测器温度分别为 230、40 和 230℃; 载气为氮气, 总流量  $16.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 柱流量  $0.79 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 氢气压和空气压分别为 80 kPa 和 40 kPa; 进样量为 500  $\mu\text{L}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 BTF 的挂膜启动

利用 DMS 降解菌 SY1 和 PT 降解菌 S-1 混合活性污泥的方式强化启动 BTF 装置. 为避免因填料吸附作用造成的实验误差, 反应器在接种前预先通入



$50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的 DMS 和 PT 混合模拟废气,运行一周后,发现反应器进出口的 DMS 和 PT 质量浓度基本一致,认为填料已吸附饱和. 此时,加入一定量的降解菌 SY1 和 S-1,并以 1:3 加入活性污泥和营养液,进行循环喷淋挂膜, BTF 停留时间 (EBRT) 控制为 30 s, DMS、PT 进气浓度均为  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

目标污染物的去除效率是衡量生物反应器是否启动成功的关键指标. 考察了 BTF 启动阶段 DMS 和 PT 的去除情况,结果如图 2 所示. BTF 挂膜 3 d 以后,PT 去除率就接近 100%, DMS 去除率则在挂膜 11 d 后也达到了 90% 以上,并能持续保持高效去除. BTF 挂膜启动成功. Luvsanjamba 等<sup>[16]</sup>采用 BTF 净化 DMS 废气,以单一的活性污泥进行接种,17 d 后才完成挂膜. 因此,用高效降解菌使 BTF 在短时间内获得稳定的去除效果,缩短启动时间,但不同的菌株对不同的底物所需的时间会有所差异,这可能与各自的降解性能和菌株生长特性有关.

## 2.2 BTF 的稳定运行

停留时间和进气浓度会影响 BTF 的降解性能<sup>[2,3,17,18]</sup>. VOCs 污染的一大特点是浓度低但气量大,净化这类气体的停留时间不宜过长. 因此,考察了停留时间为 30、20 以及 15 s 时,进气浓度对去除率及去除负荷的影响,结果见图 3. 从中可知,控制

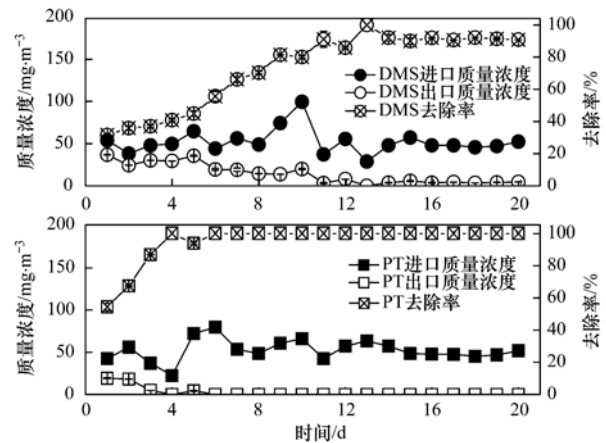


图 2 启动阶段 BTF 的净化性能

Fig. 2 Performance of BTF during the start-up stage of operation

EBRT = 30 s, 当混合废气中 DMS 质量浓度为  $38.85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,去除率可达 100%; 进一步提高 DMS 质量浓度到  $94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,去除率下降到 66%; 而 PT 即使质量浓度提高到  $110 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其去除率仍可达到 91%, 此时去除负荷为  $11.51 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ . EBRT = 20 s 时,当 DMS 质量浓度低于  $24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时可 100% 去除; 当 DMS 质量浓度提高到  $52 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,去除率下降到 70%; 而 PT 当其质量浓度达到  $64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,去除率仍保持在 98%. EBRT = 15 s 时,在调节 DMS 质量浓度从  $11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  提高到  $49 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的过程中, DMS 去除率下降了 50%; 而 PT

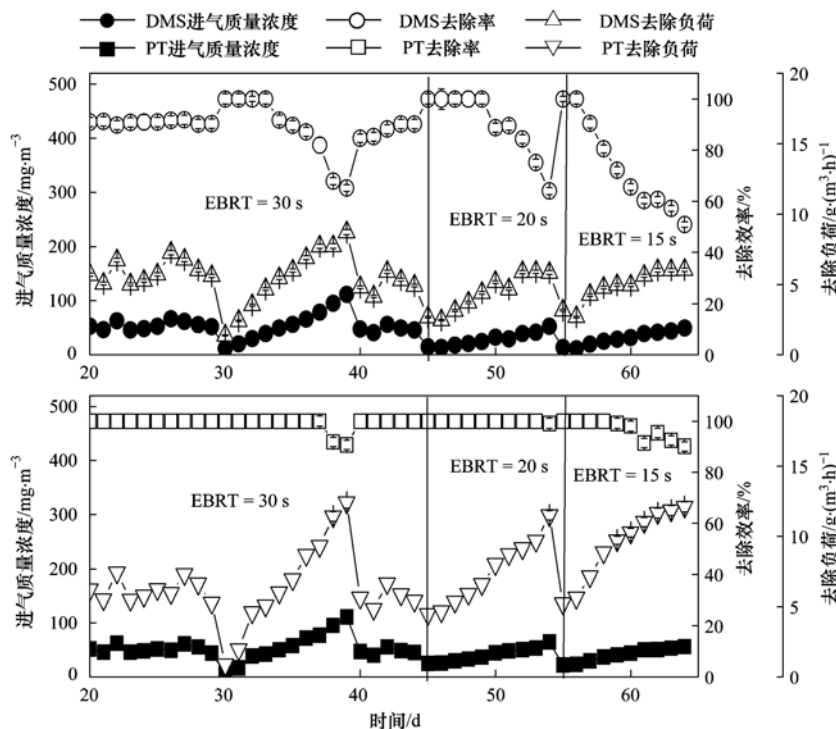


图 3 不同停留时间和进气质量浓度下 DMS 和 PT 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency and elimination capacity of DMS and PT at different EBRTs and different inlet concentrations

在质量浓度提高至  $53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时去除率仍可达 90% 以上。

上述结果表明, BTF 可有效净化 DMS 和 PT 混合废气, 两者的最大去除负荷分别为  $8.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $12.4 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。相同条件下 PT 的去除效果优于 DMS。此外, 进气负荷较低时, 进气负荷的提高能增加 PT 和 DMS 的去除负荷; 而在相对高的进气负荷条件下, 由于受系统内有效生物量和气液传质的限制影响, 单位生物量的底物转化能力接近最大值, 进一步增加进气质量浓度或缩短 EBRT, 系统内生物活性可能会受到抑制, 从而使得混合废气的去除效率降低<sup>[15,19]</sup>。

### 2.3 混合废气的相互作用

利用生物滴滤塔处理多组分废气时, 气体之间往往会存在相互竞争或抑制作用<sup>[20,21]</sup>。因此, 考察了 PT 和 DMS 在反应器中的相互作用。实验过程中, 混合废气中某一组分浓度由低到高变化, 另一组分的浓度则保持稳定, 结果见图 4 和图 5。

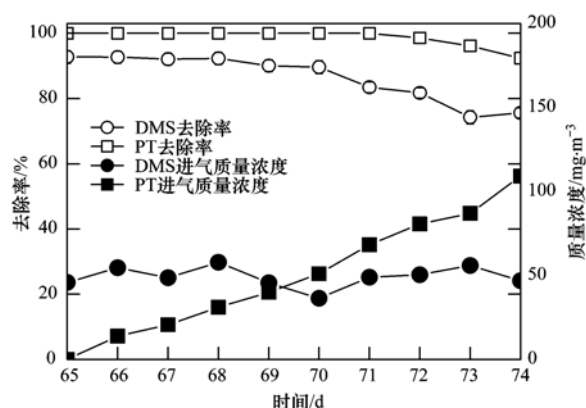


图 4 PT 质量浓度变化对 DMS 的去除性能的影响

Fig. 4 Effects of concentration changes of PT on removal of DMS

如图 4 所示, 维持 DMS 的质量浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  不变, PT 的质量浓度从  $0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  逐渐增加至  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。当 PT 质量浓度小于  $51 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, DMS 的去除率基本都在 90% 以上; 但进一步提高 PT 的浓度, DMS 的去除率开始下降, PT 质量浓度为  $68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, DMS 去除率分别下降到 83% 和 74%。由此可知, 在反应体系中, PT 质量浓度低于  $51 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 不会对 DMS 的降解产生抑制效应, 但高于  $51 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, PT 会对 DMS 的降解产生一定的竞争或抑制效应。Cáceres 等<sup>[21]</sup> 利用生物滴滤塔净化含 DMS、甲硫醇、 $\text{H}_2\text{S}$  以及二甲基二硫醚的混合气体时发现, 甲硫醇的存在也会降低 DMS 的去除效率。

由图 5 则可知, 当保持 PT 的质量浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, DMS 的质量浓度从  $0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  逐渐增加至  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, PT 的去除效果并未受影响, 去除率始终为 100%。因此, 用 BTF 去除含 DMS 和 PT 的混合废气时, 在 DMS 质量浓度小于  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, DMS 浓度的提高对 PT 的降解无影响。

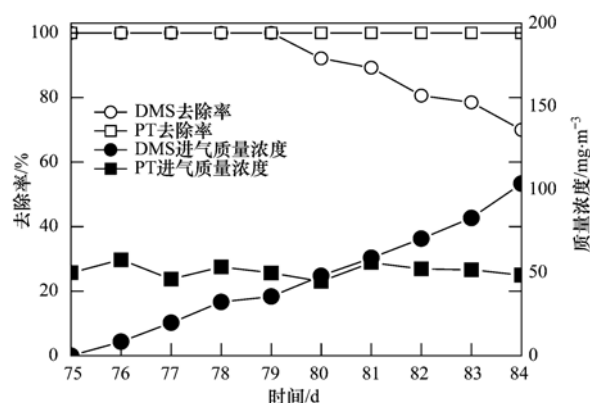


图 5 DMS 质量浓度变化对 PT 的去除性能的影响

Fig. 5 Effects of concentration changes of DMS on removal of PT

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , DMS 的质量浓度从  $0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  逐渐增加至  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, PT 的去除效果并未受影响, 去除率始终为 100%。因此, 用 BTF 去除含 DMS 和 PT 的混合废气时, 在 DMS 质量浓度小于  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, DMS 浓度的提高对 PT 的降解无影响。

### 2.4 BTF 同时去除 $\text{H}_2\text{S}$ 的能力

很多工厂排放的恶臭废气中, VOCs 和  $\text{H}_2\text{S}$  往往共存, 如  $\text{H}_2\text{S}$  和硫醇就是磷肥厂的主要臭气来源<sup>[22]</sup>。因此研究 BTF 同时去除  $\text{H}_2\text{S}$ 、DMS 和 PT 的性能是很有意义的。在 BTF 运行至第 85 d,  $\text{EBRT} = 30 \text{ s}$ , DMS 和 PT 质量浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 通入  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的  $\text{H}_2\text{S}$ , 考察反应器同时去除  $\text{H}_2\text{S}$  的能力, 结果如图 6 所示。从中可知,  $\text{H}_2\text{S}$  初始去除率只有 56%, 但在此后的几天内去除效率有显著的提高, 4 d 后  $\text{H}_2\text{S}$  的去除率就达到了 100%。通入  $\text{H}_2\text{S}$  的第 15 d,  $\text{H}_2\text{S}$  质量浓度提高到了  $230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其去除效果还能达到 98%。从实验结果还可看出  $\text{H}_2\text{S}$  对 DMS 的降解有一定的抑制作用。当  $\text{H}_2\text{S}$  质量浓度高于  $115 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, BTF 对 DMS 的去除效果开始下降,  $\text{H}_2\text{S}$  质量浓度为  $230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, DMS 去除率

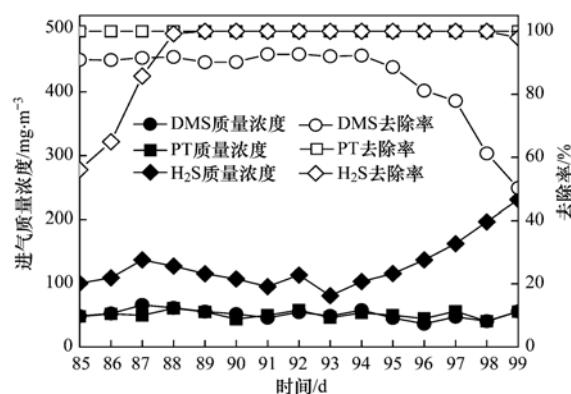


图 6 BTF 对  $\text{H}_2\text{S}$ 、DMS 和 PT 的去除效果

Fig. 6 Removal efficiencies of  $\text{H}_2\text{S}$ , DMS and PT in the BTF

下降到 50%, 而 PT 的去除效果并未受到影响. Ramírez 等<sup>[23]</sup>也证实了  $\text{H}_2\text{S}$  对 DMS 的生物降解具有很强的抑制作用.

### 2.5 微生物相分析

BTF 填料中所含的生物量可用于评价反应器的性能<sup>[24]</sup>. 由于 BTF 内的生物量难以准确测定, 所以多采用蛋白质含量来表征 BTF 内生物量的变化<sup>[25,26]</sup>. 在 BTF 运行过程中, 对启动期和稳定期的各层填料进行取样, 采用 Folin-酚法测定其中的蛋白质含量, 结果如图 7 所示. BTF 启动成功后, 上、下层的蛋白质含量(以填料计, 下同)较挂膜初期均有显著增加, 15 d 后 BTF 上层由  $0.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增加到  $0.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 下层由  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增加到  $1.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 然而, 当反应器的运行进入到稳定阶段后, BTF 中的生物量基本保持不变, 最终上层和下层的蛋白质含量分别稳定在  $1.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  左右, 说明生物膜的脱落和更新速率达到平衡, 有利于微生物维持良好的降解能力. 由图 7 还可以看出, BTF 中下层填料上的生物量始终高于上层, 这是由于实验采用了气液气流的运行方式, 气体自 BTF 底部进入, 因此下层的微生物会优先接触并

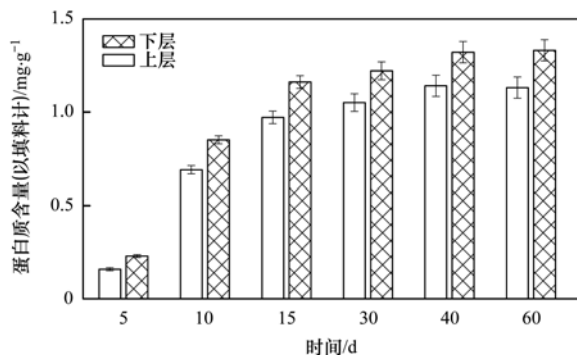


图 7 不同运行时期蛋白质含量的变化

Fig. 7 Protein quantity versus operation time

去除大部分底物.

为观察填料层中微生物的形态及分布情况, 在 BTF 完成挂膜 30 d 后, 取下层填料进行扫描电镜 (SEM) 分析, 结果如图 8 所示. 从中可知, 填料上附着有大量的生物膜. 从微生物形态来看, 微生物有丝状菌但以球菌和杆菌居多. 前期研究表明, BTF 所接种的高效降解菌 SY1 和 S-1 分别就是球状和杆状的<sup>[13,14]</sup>, 这在一定程度上说明了所接种的高效降解菌具有较强的环境适应能力和竞争性, 有利于保证目标污染物的高效降解.

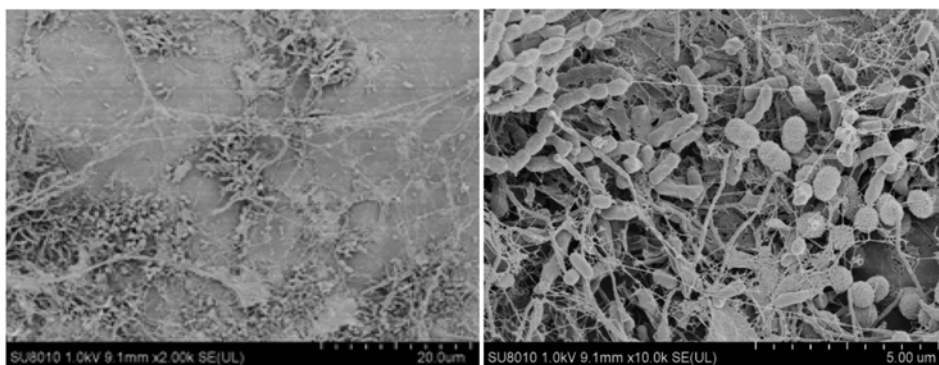


图 8 挂膜后填料表面微生物形态 SEM 图

Fig. 8 SEM images of carriers after biofilm formation of BTF

## 3 结论

(1) DMS 降解菌 *Alcaligenessp.* SY1 和 PT 降解菌 *Pseudomonas putida*. S-1 的添加可有效缩短 BTF 的启动时间, 在 DMS 和 PT 进口浓度均为  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , EBRT 为 30s 的条件下, 运行 11 d 即可完成挂膜启动.

(2) 利用高效菌强化的 BTF 能有效净化 DMS 和 PT 混合废气, 且对其中的 PT 去除效率更高. 当混合废气中 DMS 和 PT 质量浓度均低于  $38.85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , EBRT = 30 s 时, 两者去除率均可达到 100%; 而当 EBRT 缩短至 15 s, DMS 和 PT 质量浓

度均提高至  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  左右时, DMS 去除率下降, PT 去除率则仍可达到 90% 以上. DMS 和 PT 的最大去除负荷分别为  $8.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $12.4 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ .

(3) 反应体系中 PT 质量浓度低于  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 不会对 DMS 的降解产生抑制作用, 但高于  $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时会对其降解产生不利影响, 而 DMS 质量浓度在低于  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的范围内, 都不会对 PT 的降解产生抑制作用.

(4) BTF 不仅对 DMS 和 PT 混合废气有较好的去除效果, 还能同时有效去除  $\text{H}_2\text{S}$ . 当混合废气中  $\text{H}_2\text{S}$  质量浓度达到  $230 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 其去除率仍能高

达 98%。但是  $115 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  以上的  $\text{H}_2\text{S}$  会对 DMS 的降解产生抑制作用。

#### 参考文献:

- [1] 郑理慎, 陈志平, 林培真, 等. 关于恶臭污染物排放标准的探讨[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(18): 74-75, 85.  
Zheng L S, Chen Z P, Lin P Z, *et al.* Discussion on emission standards for odor pollutants[J]. China Water & Wastewater, 2014, **30**(18): 74-75, 85.
- [2] Wei Z S, Li H Q, He J C, *et al.* Removal of dimethyl sulfide by the combination of non-thermal plasma and biological process[J]. Bioresource Technology, 2013, **146**: 451-456.
- [3] Lebrero R, Rodríguez E, Estrada J M, *et al.* Odor abatement in biotrickling filters: effect of the EBRT on methyl mercaptan and hydrophobic VOCs removal[J]. Bioresource Technology, 2012, **109**: 38-45.
- [4] Qiao L P, Chen J M, Yang X. Potential particulate pollution derived from UV-induced degradation of odorous dimethyl sulfide[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(1): 51-59.
- [5] Chen S P, Zhang Y H, Wu M, *et al.* Study on methanethiol synthesis from  $\text{H}_2\text{S}$  and dimethyl sulfide over  $\text{Al}_2\text{O}_3$  catalysts promoted with phosphorus[J]. Applied Catalysis A: General, 2012, **431-432**: 151-156.
- [6] Chen X G, Geng A L, Yan R, *et al.* Isolation and characterization of sulphur-oxidizing *Thiomonas* sp. and its potential application in biological deodorization[J]. Letters in Applied Microbiology, 2004, **39**(6): 495-503.
- [7] Chen Y W, Wang X J, He S, *et al.* The performance of a two-layer biotrickling filter filled with new mixed packing materials for the removal of  $\text{H}_2\text{S}$  from air[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **165**: 11-16.
- [8] Rattanapan C, Boonsawang P, Kantachote D. Removal of  $\text{H}_2\text{S}$  in down-flow GAC biofiltration using sulfide oxidizing bacteria from concentrated latex wastewater[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(1): 125-130.
- [9] Hort C, Gracy S, Platel V, *et al.* Evaluation of sewage sludge and yard waste compost as a biofilter media for the removal of ammonia and volatile organic sulfur compounds (VOSCs)[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **152**(1): 44-53.
- [10] 刘小红. 生物法处理有机恶臭气体的研究[D]. 广州: 中山大学, 2010. 39-40.  
Liu X H. Research on biological treatment for removal of organic odor[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010. 39-40.
- [11] Liu D Z, Andreasen R R, Poulsen T G, *et al.* A comparative study of mass transfer coefficients of reduced volatile sulfur compounds for biotrickling filter packing materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **260**: 209-221.
- [12] Sun D F, Li J J, Xu M Y, *et al.* Toluene removal efficiency, process robustness, and bacterial diversity of a biotrickling filter inoculated with *Burkholderia* sp. Strain T3[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2013, **18**(1): 125-134.
- [13] Sun Y M, Qiu J G, Chen D Z, *et al.* Characterization of the novel dimethyl sulfide-degrading bacterium *Alcaligenes* sp. SY1 and its biochemical degradation pathway[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **304**: 543-552.
- [14] Chen D Z, Sun Y M, Han L M, *et al.* A newly isolated *Pseudomonas putida* S-1 strain for batch-mode-propanethiol degradation and continuous treatment of propanethiol-containing waste gas[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **302**: 232-240.
- [15] 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 等. 生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3168-3174.  
Chen D Z, Miao X P, Ouyang D J, *et al.* Removal of waste gas containing mixed chlorinated hydrocarbons by the biotrickling filter[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3168-3174.
- [16] Luvsanjamba M, Sercu B, Van Peteghem J, *et al.* Long-term operation of a thermophilic biotrickling filter for removal of dimethyl sulfide[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **142**(3): 248-255.
- [17] Wan S G, Li G Y, An T C, *et al.* Co-treatment of single, binary and ternary mixture gas of ethanethiol, dimethyl disulfide and thioanisole in a biotrickling filter seeded with *Lysinibacillus sphaericus* RG-1[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 1050-1057.
- [18] Popat S C, Zhao K, Deshusses M A. Bioaugmentation of an anaerobic biotrickling filter for enhanced conversion of trichloroethene to ethene[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **183**: 98-103.
- [19] 王家德, 陈建孟, 庄利. 生物滴滤池处理二氯甲烷废气研究[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(3): 214-217.  
Wang J D, Chen J M, Zhuang L. Studies on treatment of waste gas containing dichloromethane using biotrickling filter[J]. China Environmental Science, 2002, **22**(3): 214-217.
- [20] Jiang X, Yan R, Tay J H. Simultaneous autotrophic biodegradation of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{NH}_3$  in a biotrickling filter[J]. Chemosphere, 2009, **75**(10): 1350-1355.
- [21] Cáceres M, Silva J, Morales M, *et al.* Kinetics of the bio-oxidation of volatile reduced sulphur compounds in a biotrickling filter[J]. Bioresource Technology, 2012, **118**: 243-248.
- [22] Chebbi A, Mnif S, Mhiri N, *et al.* A moderately thermophilic and mercaptan-degrading *Bacillus licheniformis* strain CAN55 isolated from gas-washing wastewaters of the phosphate industry, Tunisia[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, **94**: 207-213.
- [23] Ramírez M, Fernández M, Granada C, *et al.* Biofiltration of reduced sulphur compounds and community analysis of sulphur-oxidizing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(5): 4047-4053.
- [24] 胡俊, 郑江玲, 吴越新, 等. 生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2979-2986.  
Hu J, Zheng J L, Wu Y X, *et al.* Characteristics of biofilm phase during the long-term degradation of a toluene-contaminated gas stream using BTF[J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 2979-2986.
- [25] Jiang X, Tay J H. Operational characteristics of efficient co-removal of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{NH}_3$  in a horizontal biotrickling filter using exhausted carbon[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 638-643.
- [26] 郑江玲, 朱润晔, 於建明, 等. 生物滴滤塔同步降解多组分挥发性有机物的实验研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 1971-1978.  
Zheng J L, Zhu R Y, Yu J M, *et al.* Performance of BTF simultaneously treating a mixture of volatile organic compounds[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(11): 1971-1978.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                               |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China .....                                                                                                                         | LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> ( 845 )   |
| Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter .....                                                                       | GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> ( 855 )                 |
| Assessment of PM <sub>2.5</sub> Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                           | WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> ( 867 )               |
| Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Beijing .....                                                                             | QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> ( 876 )                 |
| Online Source Analysis of Particulate Matter (PM <sub>2.5</sub> ) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015 .....                                       | LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> ( 884 )                 |
| Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning .....                                                        | LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> ( 894 )       |
| Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere .....                                                                               | CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> ( 903 )        |
| Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain .....                                                                                                      | ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> ( 911 )       |
| Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter .....                                                                                                                              | YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> ( 918 )            |
| Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City .....                                                                | FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> ( 924 )                |
| Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe .....                                                | QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> ( 936 )              |
| Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events .....                                      | WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> ( 946 )                 |
| Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China .....                                           | ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> ( 954 )           |
| Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake .....                     | WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> ( 964 )           |
| Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City .....                                                                                   | WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> ( 979 )      |
| Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....                                      | DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 987 )              |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories .....                                                                | YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 993 )       |
| Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River .....                                                                                                  | LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> ( 1002 )         |
| Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen .....                                                                       | YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 1010 )          |
| Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City .....                                                 | LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> ( 1018 )            |
| Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria .....     | SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 1028 )               |
| Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation .....                                                             | ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> ( 1038 )                   |
| Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study .....                                                                  | YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> ( 1046 )          |
| Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                                                       | XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen ( 1054 )                               |
| Oxidation Destruction of Cu(CN) <sub>2</sub> <sup>2-</sup> by Persulfate .....                                                                                                                | WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> ( 1061 )         |
| Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells .....                                                                  | QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian ( 1067 )                 |
| Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template .....                                                           | LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> ( 1074 )            |
| Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A <sup>2</sup> /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays .....                                                       | ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> ( 1084 )     |
| Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i> .....                                                                               | MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> ( 1093 )      |
| Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater .....                                                                                                        | QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 1102 )              |
| Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor .....                                                                         | LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> ( 1109 )         |
| Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process .....                                                                                                                                  | LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> ( 1116 )           |
| A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process .....                                                                                                       | WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> ( 1122 )              |
| Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition .....                                                                       | MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 1130 )                  |
| Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process .....                                                                                                  | CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> ( 1137 )         |
| Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues .....                                                                                     | DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> ( 1144 )             |
| Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge .....                                                                             | BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> ( 1151 )         |
| Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions .....                                                                                                     | DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao ( 1159 )                       |
| Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i> .....                                                                                                       | YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> ( 1167 )                  |
| Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions .....                                                  | YI Jun, CHENG Jin-ping ( 1173 )                                        |
| Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence .....                                                                 | LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> ( 1182 )          |
| Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage .....                                                     | QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> ( 1189 )         |
| Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods .....                                                                                     | ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> ( 1201 ) |
| Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization ..... | WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> ( 1209 )         |
| Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index .....                                                       | LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> ( 1218 )               |
| Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization .....                                                           | WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> ( 1227 )       |
| Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest .....                                                                                  | CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> ( 1235 )                 |
| Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration and Temperature .....                                                 | LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> ( 1245 )          |
| Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem .....                           | LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> ( 1253 )        |
| Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area .....                  | SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 1262 )               |
| Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw .....                                                                                | JIANG Ji-shao, YAO Qian ( 1272 )                                       |