

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析

孙事昊^{1,2}, 贾体沛^{1,2}, 陈凯琦^{1,2}, 彭永臻^{1,2*}, 张亮^{1,2}

(1. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 2. 北京市污水脱氮除磷理论与过程控制技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 在非稳态条件下, 采用 AAO 剩余污泥为种泥、聚丙烯环为填料启动生物滴滤塔, 处理实际市政污水厂细格栅 H_2S 恶臭气体。研究了生物滴滤塔的启动、稳定阶段的运行模式, 在空床停留时间为 14 s, 进气浓度 $2.02 \sim 319.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 环境温度为 $7.8 \sim 32.5^\circ\text{C}$ 条件下, 平均出气浓度为 $13.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均去除率达到 91.8%, 最高去除负荷达到 $78.37 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。在 247 d 运行中, 监测到生物滴滤塔压降在长期运行中维持稳定在 $96 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。高通量测序表明, 生物滴滤塔内的微生物群落发生了改变, Shannon 指数由 4.99 降低至 3.75, 但 *Pseudomonas* 和 *Thiobacillus* 等功能菌的存在解释了生物滴滤塔较好的去除性能。结果表明, 在非稳态条件下, 以 AAO 剩余污泥为种泥的生物滴滤塔可实现 H_2S 的高效去除; 聚丙烯环作为填料可以在长期运行中维持稳定的压降; 微生物群落在长期高浓度的 H_2S 环境中, 多样性降低, 但降解性能可以得到提高。

关键词: 生物滴滤塔; 生物除臭; 硫化氢; 恶臭; 压降; 填料

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4585-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903010

Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis

SUN Shi-hao^{1,2}, JIA Ti-pei^{1,2}, CHEN Kai-qi^{1,2}, PENG Yong-zhen^{1,2*}, ZHANG Liang^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Engineering Research Center of Beijing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Under transient conditions, a biotrickling filter was developed to treat gaseous H_2S produced from the fine-grid reservoir of a municipal wastewater treatment plant (WWTP) with AAO excess sludge as the inoculum and polypropylene rings as the packing material. The start-up process and steady-state operation of the biotrickling filter were studied. With an empty bed retention time of 14 s, an ambient temperature of $7.8 \sim 32.5^\circ\text{C}$, and an inlet concentration of $2.02 \sim 319.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, an average removal efficiency of 91.8% was achieved with a maximum H_2S elimination capacity of $78.37 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. Over a 247-day period, the pressure drop across the biotrickling filter was maintained at $96 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$. Microbial analysis using high-throughput sequencing technology showed a variation in the microbial community during the experiment; the Shannon index dropped from 4.99 to 3.75, and the functional genera *Pseudomonas* and *Thiobacillus* were identified as good performers in the biotrickling filter system. These results indicate that the application of AAO excess sludge as an inoculum for biotrickling filters is feasible for effective H_2S removal. A steady pressure drop was achieved using polypropylene rings as the packing material. The diversity of the microbial community showed a downward trend when exposed to H_2S , but the elimination capacity could be increased.

Key words: biotrickling filter; biological odor abatement; hydrogen sulfide; odor; pressure drop; packing

市政污水处理厂在处理污水过程中会产生恶臭, 对污水厂工作人员、周边居民造成危害和困扰, 已成为现在市政污水处理厂面临的又一大难题^[1]。已有的研究显示, 市政污水处理厂的恶臭源头主要在前处理阶段(粗格栅、细格栅等)以及污泥处理阶段(浓缩池、脱水间等), 主要恶臭物质包括硫化氢(H_2S)、氨气(NH_3)、可挥发性含硫有机物(VOSC)以及其他可挥发性有机物(VOC)等。Gostelow 等^[2]曾报道, 某污水处理厂的恶臭稀释倍数(OU)与 H_2S 浓度呈明显的幂律关系, 相关性系数 R^2 为 0.69。这说明, H_2S 是污水处理厂恶臭气体中的重要组成成分。

生物滴滤塔是一种针对 H_2S 恶臭问题的生物处理技术, 具有反应条件(pH 值、滴滤速度等)易于控制、去除效率稳定、环境友好和适合去除低浓度气体污染物的特点^[3]。近年来, 生物滴滤塔成为国内外的一个研究热点^[4,5], 已有的研究普遍针对生物滴滤塔不同的填料^[6~9]、反应参数优化^[10]、反应

收稿日期: 2019-03-02; 修订日期: 2019-04-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-003); 北京市教委资助项目(D16003)

作者简介: 孙事昊(1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水处理、水厂恶臭气体处理方面, E-mail: ssh_fire@163.com

* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

机制^[11,12]和微生物菌种^[13~15]等方向. 填料是生物滴滤塔的核心部件, 一种理想的填料应该具有为微生物提供稳定附着场所、足够的持水性、较大的空隙率、较大的比表面以及机械强度^[16]. Vikrant 等^[17]总结了 9 种常见的 H_2S 降解微生物, 最适 pH 为 3~8 之间, 因此循环液 pH 成为了生物滴滤塔的一个重要参数. 而 Ramírez 等^[7]通过接种纯菌 *T. thioparus* 并以聚氨酯泡沫 (PUF) 为填料启动生物滴滤塔处理 H_2S 气体, 在进气负荷为 $11.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 、空床停留时间为 90 s、pH 控制为 6.0~8.2 的条件下实现了 99% 的去除率. 同时, 国外已经有较多产业化应用的研究, Gabriel 等^[18]早在 2002 年即将水厂内的化学洗涤除臭塔改造为生物滴滤塔并取得了针对 H_2S 稳定高效的去除率. 然而, 制约生物滴滤塔发展的另一大矛盾是由过量微生物引起的压降过高问题, 当压降过高时会影响到去除负荷, 并对进气风机造成过高的压力^[19~22]. 针对过量微生物生长的问题, 国内外研究者做了大量的研究. Cox 等^[23]发明了一种在滴滤塔内培养部分原生动物控制生物量的方法, 实现了稳定的生物量. Farmer 等^[24]在实际运行生物滴滤塔时, 通过外部搅动填料, 也同样实现了防止过量微生物的目的. Won 等^[25]发明了一种环境友好的方式, 即利用苍蝇幼虫去除过量微生物. 但这些方法存在着不利于操作、并且可能造成新的污染源等问题, 在大规模地工业化应用中不具有优势. 本试验以聚丙烯环作为填料, 以 AAO 剩余污泥为种泥驯化, 探究其在非稳态试验条件下去除实际市政污水厂细格栅集水池 H_2S 的性能以及长期运行时压降的变化规律. 生物滴滤塔运行 247 d, 探究了其启动、稳定阶段的运行模式, 监测了压降和生物量变化, 并运用高通量技术探究了其接种前后的微生物群落变化, 以期生物滴滤塔的工程应用提供有效的借鉴和经验.

1 材料与方法

1.1 试验装置

生物滴滤塔去除实际市政污水厂 H_2S 的试验装置如图 1 所示. 生物滴滤塔由直径为 $D = 0.2 \text{ m}$ 的有机玻璃柱制成, 有效高度为 $H = 0.8 \text{ m}$, 则有效体积为 25.12 L. 在垂直高度 0.26 m 和 0.52 m 上平均设置 2 个取气口, 将有效高度等分为 3 个部分: 底段、中段和高段. 气体来源为北京市某市政污水厂一期细格栅加盖集水池, H_2S 气体由一台轴流离心气泵打入反应器底部, 气体流量由气泵后转子流量计控制在 $6.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (对应的空床停留时间为 14 s), 气体由下而上流出. 生物滴滤塔设置循环液水箱, 循环液由

蠕动泵 (BT100N-YZ1515x, 中国申辰, 保定) 打入反应器顶部滴漏装置, 由上至下滴滤, 沥出液由底部液封装置排入循环液水箱. 由此, 形成气液逆流方式运行生物滴滤塔. 在反应器启动初期循环液为种泥, 驯化成功后循环液为营养液, 营养液成分为: KH_2PO_4 , $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; NH_4Cl , $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; CaCl_2 , $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 微量元素液 SL-6^[6]. 循环液中积累的 H_2S 降解产物会影响降解速率^[26], 本试验中采取每 4 d 更换循环液的方式排除不利影响, 循环液流速设置为 $400 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$. 循环液由 pH/DO 计 (WTW 3420, WTW 公司, 德国) 测定其溶液的 pH 和 DO 值.

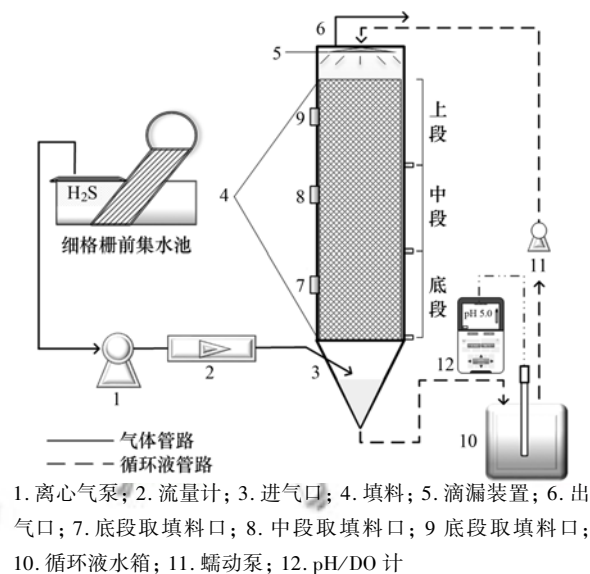


图1 生物滴滤塔装置示意

Fig. 1 Schematic representation of the biotrickling filter

1.2 挂膜及运行模式

聚丙烯环 (polypropylene ring) 作为一种塑料填料, 具有良好的挂膜特性, 可以维持较合适的生物量, 在污水处理行业已被广泛利用^[27]. 本试验以聚丙烯环作为填料, 其物理性能参数见表 1.

在试验开始前, 25.12 L 空白填料放入 50 L 反应器内, 加入 AAO-BAF 中试^[28]二沉池剩余污泥进行挂膜, 反应器进水为污水厂进水, 并按照厌氧/缺氧/好氧 (1:4:8) 的 SBR 模式运行. 14 d 后, 填料上明显可以看到生物膜, 将填料移入生物滴滤塔内.

本试验从 2016 年 4 月 19 日开始, 至 2016 年 12 月 22 日结束, 共计运行 247 d. 在此运行时间内, 按照不同运行模式、进气浓度和运行温度等因素分为 5 个阶段, 具体运行模式见表 2.

1.3 分析及计算方法

硫化氢浓度依照 GB/T 11742-1989《居住区大气中硫化氢卫生检验标准方法亚甲蓝分光光度法》测定.

表 1 聚丙烯环填料的物理特性

Table 1 Physical characteristics of the packing material

项目	直径 /mm	高度 /mm	空隙率 /%	堆积密度 /g·L ⁻¹	比表面积 /m ² ·m ⁻³
参数值	25	10	90	124.43	950~1 000

表 2 生物滴滤塔的运行模式

Table 2 Operation of the BTF in different phases

试验阶段	天数/d	日期/月-日	运行模式
I	1~9	04-19~04-28	空床停留时间=14 s 循环液流量=400 mL·h ⁻¹ 循环液为种泥
II	10~55	04-29~06-13	空床停留时间=14 s 循环液流量=400 mL·h ⁻¹ 循环液为营养液
III	56~90	06-14~07-18	空床停留时间=28 s 循环液流量=400 mL·h ⁻¹ 循环液为种泥
IV	91~196	07-19~11-02	空床停留时间=14 s 循环液流量=400 mL·h ⁻¹ 循环液为营养液
V	197~247	11-03~12-22	空床停留时间=14 s 循环液流量=400 mL·h ⁻¹ 循环液为营养液,并利用 NaOH 调整 pH 为 8.5±0.5 利用加热棒调整循环液温度为 10℃

测定压降时,调整进气流量为 1.0、3.2、6.5、8.0、10.0 和 12.0 m³·h⁻¹,使用压降仪(AS510,希玛,中国)测定进气、出气口之间压力差值,压降仪读数为压降。在试验第 1、20、40、80、120、180 和 240 d 测定压降,每次测定压降 3 次,取平均数为最终值。同时,在相同的天数,由反应器底段、中段、高段分别取出 10 个填料,由标准方法^[29]测定其 VSS 生物量。

在挂膜成功第 1 d,以及稳定运行阶段的第 100 d 分别取反应器内 5 个聚丙烯填料,用刀片刮取生物膜后,采用冷冻干燥机(FreeZone 1L, Labconco 公司,美国)冻干 48 h。采用 FastDNA(FastDNA SPIN Kit for Soil, QBiogene 公司,美国)提取 DNA,并在超微量分光光度计(NanoDrop1000, Thermo Scientific 公司,美国)检测 OD_{260/280} 为 1.82,冷冻样品至 -20℃ 冰箱。设计 PCR 扩增引物及 tag 序列如下: 515F (5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3'); 907R (5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3')。PCR 采用 ABI GeneAmp 9700 PCR 系统完成,并使用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测其扩增结果。之后,扩增产物利用 Illumina MiSeq PE250 平台测定其微生物群落组成^[27]。MiSeq 测定得到的 PE reads 根据 overlap 关系将成对的 reads 拼接成一条序列,根据 Barcode 与引物序列区分各样品,并分别出不同的 OTU。选择 97% 相似度的 OTU,利用 mothur 计算不同随机抽样下的 Alpha 多样性指数。同时,为了得到每个 OTU

对应的物种分类信息,采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析,与 Silva 数据库比对,并在属(genus)水平上统计各样本的群落组成。

在生物滴滤塔实际运行中,采用负荷[load rate, LR, g·(m³·h)⁻¹]、去除率(removal efficiency, RE, %)和去除负荷[elimination capacity, EC, g·(m³·h)⁻¹]来反映处理能力,以单位高度压降(pressure drop, Δ*p*, Pa·m⁻¹)来表征压降变化。其计算方法如下:

$$LR = \frac{Q}{V} \times c_{in}$$

(1)

$$RE = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{in}} \times 100\%$$

(2)

$$EC = \frac{Q}{V} \times (c_{in} - c_{out})$$

(3)

$$\Delta p = \frac{P}{H}$$

(4)

式中,*Q* 为进气流量,mg·m⁻³; *V* 为反应器有效体积,m³; *c_{in}* 和 *c_{out}* 分别为进气和出气 H₂S 浓度,mg·m⁻³; Δ*p* 为进出口间压降,Pa; *H* 为反应器有效高度,m。

2 结果及讨论

2.1 启动及高负荷冲击

如图 2 所示,1~9 d 为生物滴滤塔的启动阶段。

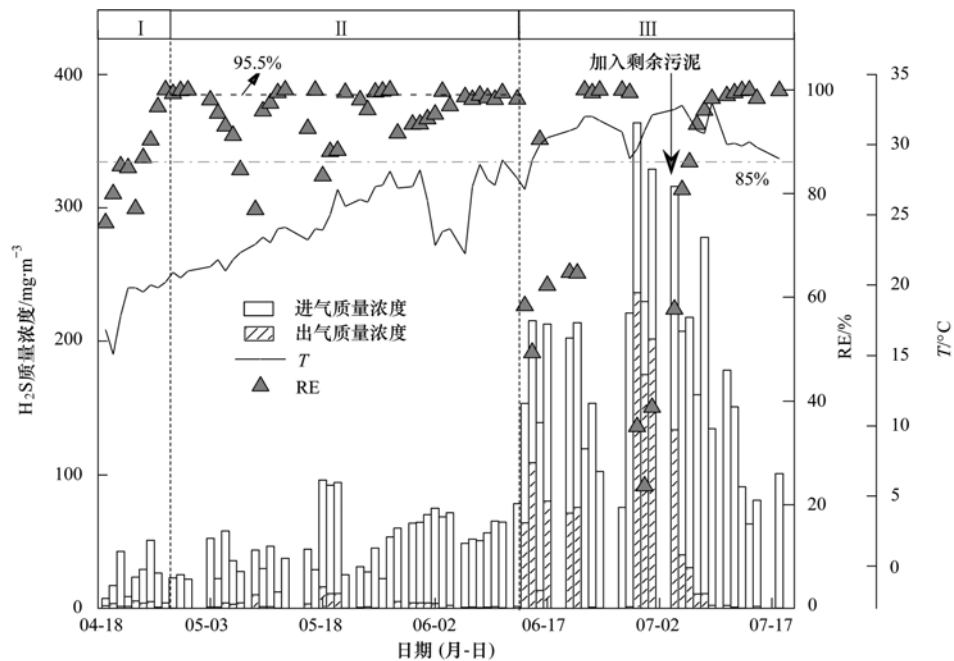


图2 生物滴滤塔的启动阶段及负荷冲击表现

Fig. 2 Start-up process of the BTF and its performance during load shock

在进气浓度为 $4.02 \sim 50.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [对应进气负荷 $1.03 \sim 13.11 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$] 条件下,反应器内生物膜逐渐适应环境,从第1 d 去除率为 74.3% 上升至第5 d 时 85% 以上,并在第9 d 达到 99% 去除率,实现成功挂膜。

在9 d 的启动时间内,生物滴滤塔运行进气负荷为非稳定状态,在较大范围内(变化幅度最大 12.7 倍)浮动,尤其生物滴滤塔所在的外部环境昼夜存在较大温度差,这些工业化应用条件为生物滴滤塔的启动制造了难度。结果说明,9 d 内以 AAO 剩余污泥为种泥,也可以实现去除 H_2S 功能菌的驯化和富集。

阶段Ⅱ为第10~55 d,生物滴滤塔进入稳定运行阶段,在进气浓度为 $12.19 \sim 96.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [对应进气负荷 $3.13 \sim 24.75 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$] 条件下,生物滴滤塔的平均去除率为 95.5%。Kim 等发现^[10],在将 H_2S 进气负荷从 $0.1 \sim 6.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 不断提高的过程中,反应器均能在 5 d 内实现去除率高于 90%,这证明了在一定范围内,硫氧化细菌(sulfur oxidation bacteria, SOB)具有较快的适应能力。

在阶段Ⅲ内,第56 d 进气浓度为 $153.73 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [进气负荷 $39.53 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$],这一数值相较于前1 d ($78.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 提高 2 倍,生物滴滤塔去除率降低至 58.3%。在第71 d, H_2S 浓度升高至 $363.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [进气负荷 $93.53 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$],去除率降低至 35.1%。这一现象在 Kim 等^[10]的研究中同样出现,当负荷突然由 $0.1 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 升至 $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,反应器去除率由 100% 降低至 64%,

最终升高至 76%,在降低负荷至 $0.1 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 后恢复到 90% 以上。同样的现象在文献[30,31]中均有报道,这说明了硫氧化细菌在面临突然提高的负荷冲击时,难以快速适应并恢复,小试研究中只能以降低负荷实现提高去除率的目标。然而,这在工业化实际应用中,负荷突然提高至较高值并保持较长时间为生物滴滤塔的运行提出了较大的难题。

本研究在第72 d 采取应对高负荷冲击策略,首先提高空床停留时间至 28 s,开始重新向循环液水箱内打入 AAO 剩余污泥,并用 NaOH 调整循环液 pH 至 8.5 ± 0.5 。从第72至76 d,生物滴滤塔去除率从 57.6% 提高至 96.0%,恢复活性。

2.2 稳定运行

如图3所示,生物滴滤塔在第91~196 d 为稳定运行阶段,在进气浓度为 $2.02 \sim 208.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [进气负荷 $0.52 \sim 53.63 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$] 范围内,实现了平均去除率 95.4%。这一阶段相较于阶段Ⅱ的稳定运行,在进气浓度由 96.23 提高至 $208.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情况下,仍然实现了较高的去除率。可见,在长期去除 H_2S 的生物滴滤塔内,富集的微生物去除能力得到了提高。Tu 等发现^[32],在反应器内的微生物群落,在长期低 pH 及高 H_2S 负荷条件下会导致反应器内微生物群落复杂程度降低,但同时拥有更高的去除负荷。

在第197 d,进气浓度再次升高至 $229.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,此时开始按照 2.1 节的调整生物滴滤塔运行模式,即向循环液水箱内打入 AAO 剩余污泥,并用 NaOH 调整循环液 pH 至 8.5 ± 0.5 。在阶段Ⅴ内,

进气浓度 $8.64 \sim 319.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [进气负荷 $2.22 \sim 82.08 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$], 生物滴滤塔去除率平均为 92.8% . 这证明了此方法适用于负荷变化幅度较大的实际工程应用中, 可以有效减弱高浓度、高负荷 H_2S 的毒性和抑制作用.

在生物滴滤塔的运行中, 循环液的 pH 做实时监测(数据未列出), 结果显示, 循环液 pH 在更新时

为 7.2 , 而在 4 d 运行周期中变化范围为 $3.6 \sim 5.1$.

综上, 在 $4 \text{ 月 } 19 \text{ 日}$ 至 $12 \text{ 月 } 22 \text{ 日}$ 共计 247 d 的运行中, 生物滴滤塔在进气 H_2S 浓度 $2.02 \sim 319.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 外部环境 $7.8 \sim 32.5^\circ\text{C}$, 循环液 pH 为 $3.6 \sim 5.1$ 的条件下, 实现了平均出气浓度 $13.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均去除率 91.8% , 最大去除负荷为 $78.37 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$.

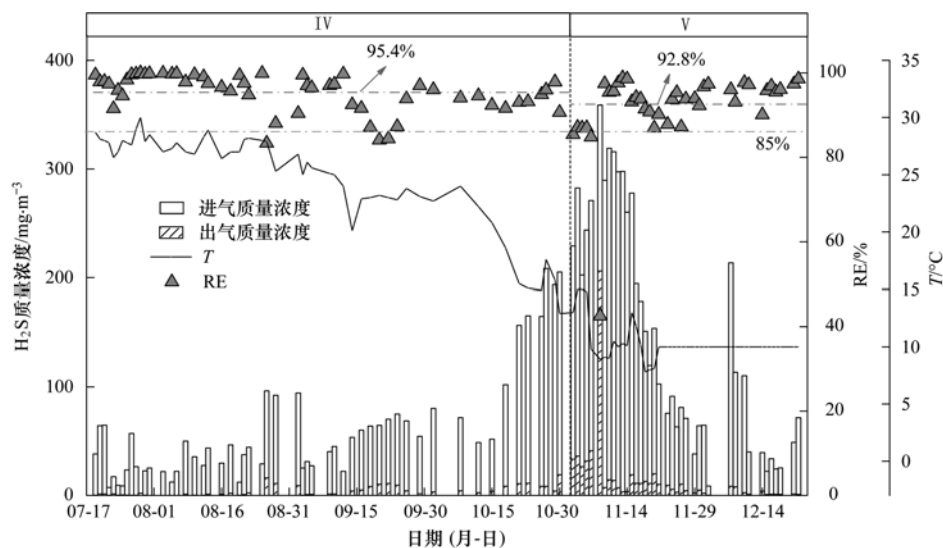


图3 稳定运行时生物滴滤塔的性能及抵抗冲击负荷策略的表现

Fig. 3 Performance of the BTf under steady state and load shock resistance strategies

2.3 压降及微生物量变化

在工业化的应用中, 生物滴滤塔的压降过高会影响去除率, 并造成进气泵的压力过大、功率过大、使用寿命变短等问题, 因而压降成为评价生物滴滤塔稳定性的因素之一^[33].

普遍认为, 生物滴滤塔的单位高度压降 Δp 与气体表观流速 V 的关系符合 Forcheimer 方程:

$$\Delta p = a \cdot V + b \cdot V^2 \quad (5)$$

式中, a 和 b 为常数; V 是气体表观流速 [$V = \frac{Q}{(D/2)^2 \times 3.14}$], $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$].

由图4可知, 本研究中生物滴滤塔的 Δp 与气体表观流速的关系符合 Forcheimer 方程. 在第 1 d , 当表观气体流速由 $31.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 升高至 $382.2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, Δp 由 $13.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 升高至 $177.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$. Yang 等^[34] 的报道指出, 利用堆肥做填料的生物滤塔在启动时, Δp 为 $500 \sim 1000 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ (V 为 $72 \sim 1000 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$). Dumont 等^[35] 利用松树皮作填料的生物滤塔启动时, Δp 为 $15 \sim 370 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ (V 为 $72 \sim 504 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$). Ben Jaber 等^[36] 利用膨胀片岩和 UP20 作混合填料的生物滴滤塔启动时, Δp 为 $3 \sim 94 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ (V 为 $56 \sim 565 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$). 可以看到, 本研究以聚丙烯环为填料的生物滴滤塔, 在启动时的压降明

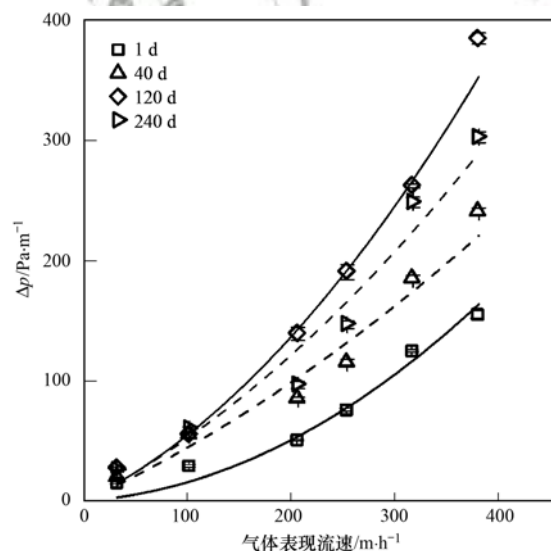


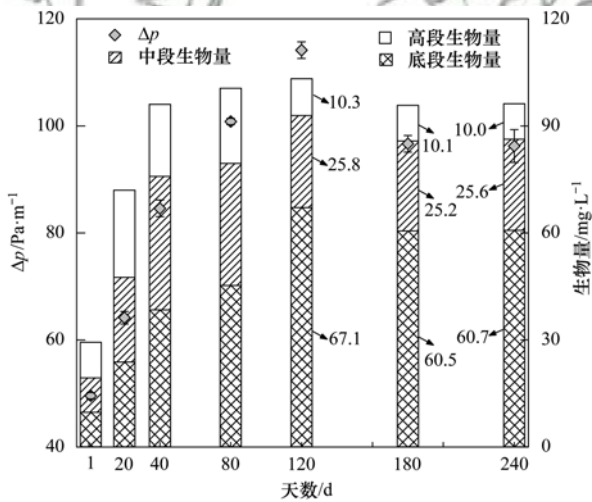
图4 生物滴滤塔 Δp 与表观气体流速 V 的关系曲线

Fig. 4 The Δp - V observed across the BTf

显低于以有机质作为填料的生物滤塔, 而与其他无机质做填料的生物滴滤塔相当.

Andreasen 等发现^[21], Δp 与生物滴滤塔内 DBM (dust and biomass, 粉尘和微生物量) 呈正相关关系, DBM 的增长会导致 Δp 增长, 且 Δp 与 DBM 占据填料的空隙比例成正比. 这一发现解释了生物滴滤塔长期运行时压降不断提高的本质原因. 在本试验中, 监测

循环液发现其 DO 均在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,因此 H_2S 的氧化产物以硫酸根为主,单质硫可以忽略不计^[37],即 Δp 与微生物量占据填料的孔隙比例成正比. 在本试验中,由于反应器内不断供应营养液,微生物量生长不受营养物不足的制约;再加上进气负荷较大,为生物滴滤塔内的微生物提供了充足的底物,微生物生长较快. 由图 5 可知,反应器内生物量由第 1 d 时 $29.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增长至第 120 d 时 $103.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由于生物滴滤塔底段靠近进气口,获得的底物最充足^[38],因而底段生物量 $67.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 远高于中段、高段生物量. 其结果是,底段填料空隙被微生物过多占据而逐渐变小,导致了此处的压力和气体表观流速逐渐变大. 由于聚丙烯环附着生物膜的外部结构较为松散,在第 120 d 时,过高的压力及过快的气体使得附着在聚丙烯环上的微生物膜松散部分脱落,导致了生物滴滤塔内底段微生物量逐渐减少,在第 180 d 时减少至 $60.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 进一步地,压降由 $114.2\text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ 降低至 $96.7\text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$. 其后,此状态维持了稳定,当生物滴滤塔底段微生物过多生长,压力即增大;当压力过大时即会导致生物膜松散部分脱落,压降恢复正常. 至 240 d 时,压降依然维持在 $96.3\text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$.



当气体表观流速 $V=207.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$

图 5 生物滴滤塔压降及微生物量的变化

Fig. 5 Variations in pressure drops and biomass density in the BTF

由上可知,聚丙烯环作为填料,得益于其较大的空隙率和附着生物膜的稳定性,可以在生物滴滤塔内保持稳定的压降,这为生物滴滤塔的长期稳定运行提供了帮助.

2.4 微生物群落结构变化

实验室中生物滴滤塔的研究一般以富集的菌群作为种泥,这样的模式在大规模的工业化应用中较难实现. 本试验以二沉池剩余污泥为种泥,实现了 H_2S 功能菌的驯化和富集. 为观察 AAO 剩余污泥到生物滴滤塔的种群结构变化,利用高通量测序对微生物群落进行检测. 由表 3 可知,AAO 剩余污泥和生物滴滤塔两个样品分别测出 13078 和 22012 序列,且覆盖度指数分别为 0.998 和 1.000,证明测序序列足够,可以表征微生物群落的真实情况^[39].

AAO 剩余污泥测得 OTU 为 460 组, Shannon 指数为 4.99, 而生物滴滤塔 OTU 则只有 187 组, Shannon 指数为 3.75. 这说明 AAO 二沉池剩余污泥在适应生物滴滤塔后,群落多样性出现了明显的降低. Tu 等^[40]的研究认为,长期的低 pH 和高负荷 H_2S 环境会对生物群落进行筛选,其多样性会减小.

由图 6 可知,微生物群落由 AAO 剩余污泥至生物滴滤塔驯化 100 d 后发生了巨大的变化. 其中,在 AAO 剩余污泥微生物群落中丰度最高的 *Comamonadaceae* 一般被认为是反硝化菌^[41],它由 8.5% 下降到 1.6%. *Dechloromonas* 由 6.82% 下降到 $<0.5\%$; *Nitrospira* 由 6.57% 下降到 $<0.5\%$. 这 3 种菌属是 AAO 剩余污泥中的主要菌属,当在生物滴滤塔驯化 100 d 后均成为了次要菌属.

在生物滴滤塔微生物群落中,丰度最高的 3 种菌属是 *Lactococcus*、*Geobacillus* 和 *Bacteroides*,这 3 种菌属的共同点是它们均拥有抵抗外部极端条件的生存方式^[42]. 在已有的报道中,多数认为 H_2S 的降解主要由专性自养型微生物完成,例如 *Thiobacillus*,其碳源由空气中 CO_2 溶解至循环液中的 HCO_3^- 提供. 然而在本试验中,即使营养液中未提供有机碳源,生物滴滤塔内微生物的种类依然非常丰富,存在着大量异养菌. 这说明,细格栅恶臭气体中除 H_2S 外同时存在着其他 VOC. 另外,生物滴滤塔内长泥龄的生物膜为一些厌氧及发酵类的微生物提供了生存空间,这也解释了生物滴滤塔内部分厌氧型微生物的存在. 生物滴滤塔的微生物种群中发现了 *Pseudomonas*^[15,43] (4.2%)、*Thiobacillus*^[13,44,45] (1.2%) 和 *Xanthomonadoles*^[14] (0.5%) 菌属,他们均被证明可以参与 H_2S 降解. 这些菌种的出现和富集,解释了生物滴滤塔去除负荷的提高.

表 3 群落丰富性及多样性

Table 3 Richness and diversity of the microbial community

样品	序列	0.97 相似度					
		OTU	ACE 指数	Chao 指数	覆盖度指数	Shannon 指数	Simpson 指数
AAO 剩余污泥	13078	460	467	472	0.998	4.99	0.016 7
生物滴滤塔	22012	187	187	187	1.000	3.75	0.064 6

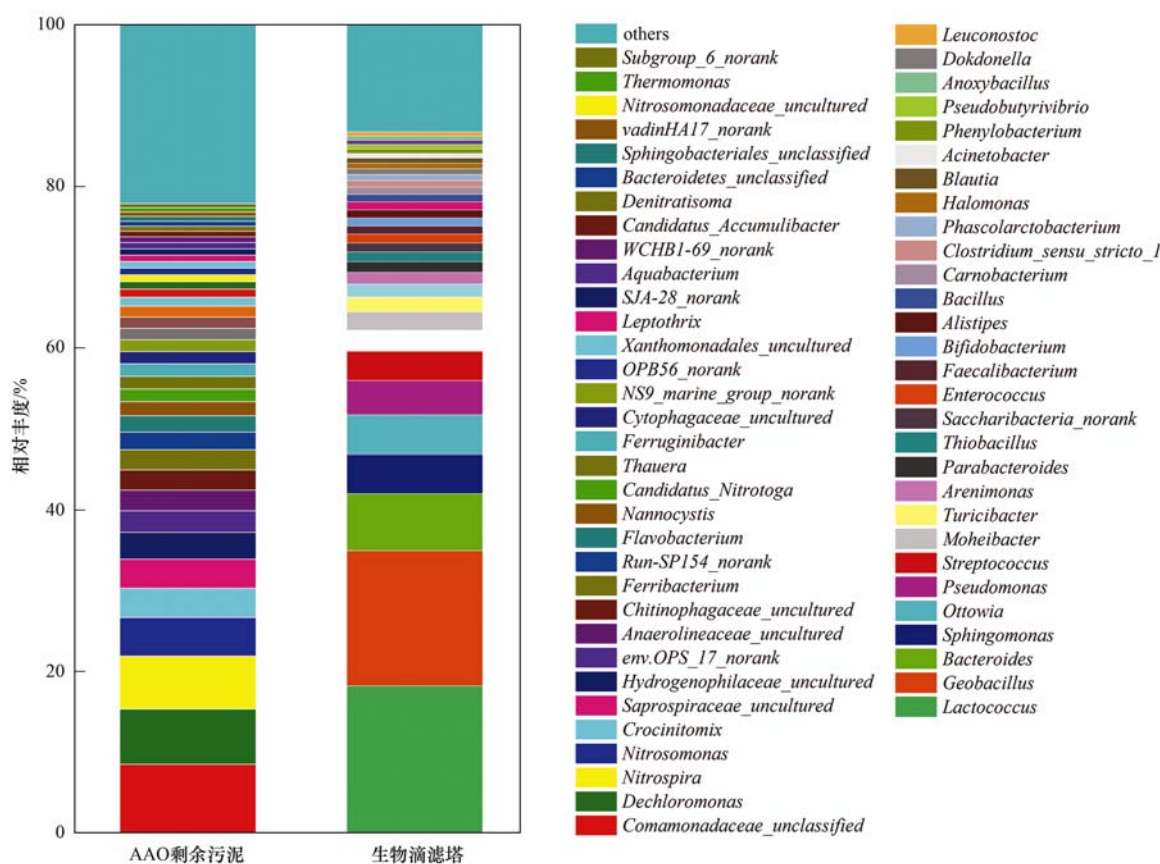


图 6 群落结构的分类组成(属)

Fig. 6 Taxonomic composition of the microbial community structure at the genus level

以上均说明, AAO 剩余污泥可以驯化出去除 H_2S 的生物群落. 虽然微生物的多样性在驯化后减小, 但微生物群落体现出对 H_2S 更高的去除负荷. 这证明, 由 AAO 剩余污泥作为种泥启动生物滴滤塔是可行的, 这为大规模的工业化应用提出了新的思路.

3 结论

(1) 在工业化应用非稳态、无纯菌培养的条件下, 以 AAO 剩余污泥为种泥的生物滴滤塔可以驯化成为具有 H_2S 降解能力的生物种群, 驯化周期 9 d. 微生物群落复杂性降低, 但去除性能在长期驯化中可以得到提高.

(2) 当出现较高浓度的 H_2S 负荷冲击, 导致生物滴滤塔微生物遭受不可逆损害时, 采用重新打入 AAO 剩余污泥、调整循环液 pH 至 8.5 的方法可以实现快速恢复, 实现工业化应用中的稳定过渡.

(3) 以聚丙烯环为填料的生物滴滤塔, 在长期的运行中可以维持压降稳定在 $96 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$, 有效避免工业化应用中因生物滴滤塔压降过大造成的去除负荷下降、进气风机压力过大等问题.

参考文献:

[1] 林坚, 李琳, 刘俊新, 等. 城市污水厂主要处理单元恶臭及

挥发性有机物的逸散[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2329-2334.

Lin J, Li L, Liu J X, et al. Odors and volatile organic compounds emission from main processing units of wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2329-2334.

[2] Gostelow P, Parsons S A. Sewage treatment works odour measurement[J]. Water Science & Technology, 2000, 41(6): 33-40.

[3] 李建军, 廖东奇, 许玫英, 等. 生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2552-2559.

Li J J, Liao D Q, Xu M Y, et al. Removal of BTEX by a biotrickling filter and analysis of corresponding bacterial communities[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2552-2559.

[4] 刘波, 姜安玺, 程养学, 等. 两级滴滤去除硫化氢和甲硫醇混合恶臭气体[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 618-621.

Liu B, Jiang A X, Cheng Y X, et al. Removal of mixed H_2S -MT stench by trickled-bed biofilters connected in series[J]. China Environmental Science, 2003, 23(6): 618-621.

[5] 陈建孟, 王家德, 庄利, 等. 生物滴滤池净化二氯甲烷废气的实验研究[J]. 环境科学, 2002, 23(4): 8-12.

Chen J M, Wang J D, Zhuang L, et al. Purification of dichloromethane waste gas in a biotrickling filter [J]. Environmental Science, 2002, 23(4): 8-12.

[6] Fernández M, Ramírez M, Pérez R M, et al. Hydrogen sulphide removal from biogas by an anoxic biotrickling filter packed with Pall rings[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 225: 456-463.

- [7] Ramírez M, Gómez J M, Aroca G, *et al.* Removal of hydrogen sulfide by immobilized *Thiobacillus thioarans* in a biotrickling filter packed with polyurethane foam [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(21): 4989-4995.
- [8] Hernández J, Lafuente J, Prado Ó J, *et al.* Simultaneous removal of H₂S, NH₃, and ethyl mercaptan in biotrickling filters packed with poplar wood and polyurethane foam: impact of pH during startup and crossed effects evaluation[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, **223**(6): 3485-3497.
- [9] 羌宁, 季学李, 顾国维. 气体生物滴滤池载体性能比较实验研究[J]. *环境科学*, 2000, **21**(1): 45-48.
Qiang N, Ji X L, Gu G W. Experimental evaluation of the packing media for biotrickling filters [J]. *Environmental Science*, 2000, **21**(1): 45-48.
- [10] Kim J H, Rene E R, Park H S. Biological oxidation of hydrogen sulfide under steady and transient state conditions in an immobilized cell biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(3): 583-588.
- [11] San-Valero P, Gabaldón C, Peña-Roja J, *et al.* Study of mass oxygen transfer in a biotrickling filter for air pollution control[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **42**: 1726-1730.
- [12] Arellano-García L, Dorado A D, Morales-Guadarrama A, *et al.* Modeling the effects of biomass accumulation on the performance of a biotrickling filter packed with PUF support for the alkaline biotreatment of dimethyl disulfide vapors in air[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(1): 97-107.
- [13] Vikromvarasiri N, Pisutpaisal N. Hydrogen sulfide removal in biotrickling filter system by *Halothiobacillus neapolitanus* [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(35): 15682-15687.
- [14] Chouari R, Dardouri W, Sallami F, *et al.* Microbial analysis and efficiency of biofiltration packing systems for hydrogen sulfide removal from wastewater off gas[J]. *Environmental Engineering Science*, 2015, **32**(2): 121-128.
- [15] Zhang L, Kuniyoshi I, Hirai M, *et al.* Oxidation of dimethyl sulfide by *Pseudomonas acidovorans* DMR-11 isolated from peat biofilter[J]. *Biotechnology Letters*, 1991, **13**(3): 223-228.
- [16] Dumont E, Woudberg S, Van Jaarsveld J. Assessment of porosity and biofilm thickness in packed beds using porous media models [J]. *Powder Technology*, 2016, **303**: 76-89.
- [17] Vikrant K, Kailasa S K, Tsang D C W, *et al.* Biofiltration of hydrogen sulfide: trends and challenges[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **187**: 131-147.
- [18] Gabriel D, Deshusses M A. Retrofitting existing chemical scrubbers to biotrickling filters for H₂S emission control [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, **100**(11): 6308-6312.
- [19] Weber F J, Hartmans S. Prevention of clogging in a biological trickle-bed reactor removing toluene from contaminated air[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, **50**(1): 91-97.
- [20] Yang C P, Chen H, Zeng G M, *et al.* Biomass accumulation and control strategies in gas biofiltration [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(4): 531-540.
- [21] Andreasen R R, Nicolai R E, Poulsen T G. Pressure drop in biofilters as related to dust and biomass accumulation [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2012, **87**(6): 806-816.
- [22] 张书景, 李坚, 李依丽, 等. 恶臭假单胞菌生物滴滤塔净化甲苯废气的研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1866-1872.
Zhang S J, Li J, Li Y L, *et al.* Removal of toluene waste gas by *Pseudomonas putida* with a bio-trickling filter[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(8): 1866-1872.
- [23] Cox H H J, Deshusses M A. Biomass control in waste air biotrickling filters by protozoan predation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1999, **62**(2): 216-224.
- [24] Farmer R W, Chen J S, Kopchynski D M, *et al.* Reactor switching: proposed biomass control strategy for the biofiltration process[A]. In: Hincsee R E, Sayles G D, Skeen R S (Eds.). *Biological Unit Processes for Hazardous Waste Treatment*[M]. Columbus, Ohio, United States: Battelle Press, 1995. 243-248.
- [25] Won Y S, Lee T J, Wu Y P G, *et al.* An environmentally friendly method for controlling biomass in biotrickling filters for air pollution control[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2004, **10**(1): 60-65.
- [26] Yang Y H, Allen E R. Biofiltration control of hydrogen sulfide 2. Kinetics, biofilter performance, and maintenance[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(11): 1315-1321.
- [27] Zhang M, Yang Q, Zhang J H, *et al.* Enhancement of denitrifying phosphorus removal and microbial community of long-term operation in an anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation system[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2016, **122**(4): 456-466.
- [28] 张勇, 王淑莹, 赵伟华, 等. 中试规模 AAO-曝气生物滤池双污泥系统的启动运行[J]. *化工学报*, 2015, **66**(10): 4228-4235.
Zhang Y, Wang S Y, Zhao W H, *et al.* Start-up of pilot-scale AAO-BAF two-sludge system[J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(10): 4228-4235.
- [29] Eaton A D. *Standard methods for the examination of water & wastewater* (21st ed.) [M]. Washington DC, USA: American Public Health Association, 2005.
- [30] Rene E R, Estefania López M, Veiga M C, *et al.* Steady- and transient-state operation of a two-stage bioreactor for the treatment of a gaseous mixture of hydrogen sulphide, methanol and α -pinene[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, **85**(3): 336-348.
- [31] Barona A, Elías A, Arias R, *et al.* Biofilter response to gradual and sudden variations in operating conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, **22**(1): 25-31.
- [32] Tu X, Guo J, Yang Y G, *et al.* Biofilms formed within the acidic and the neutral biotrickling filters for treating H₂S-containing waste gases [J]. *RSC Advances*, 2017, **7**(41): 25475-25482.
- [33] Mudliar S, Giri B, Padoley K, *et al.* Bioreactors for treatment of VOCs and odours - a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(5): 1039-1054.
- [34] Yang Y H, Allen E R. Biofiltration control of hydrogen sulfide 1. Design and operational parameters[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 863-868.
- [35] Dumont E, Andrès Y, Le Cloirec P, *et al.* Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, **42**(2): 120-127.
- [36] Ben Jaber M, Couvert A, Amrane A, *et al.* Biofiltration of high concentration of H₂S in waste air under extreme acidic conditions [J]. *New Biotechnology*, 2016, **33**(1): 136-143.
- [37] Annachatre A P, Suktrakoolvatt S. Biological sulfide oxidation in a fluidized bed reactor[J]. *Environmental Technology*, 2001, **22**(6): 661-672.
- [38] Morgan-Sagastume F, Sleep B E, Allen D G. Effects of biomass growth on gas pressure drop in biofilters [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, **127**(5): 388-396.

- [39] Schloss P D, Gevers D, Westcott S L. Reducing the effects of PCR amplification and sequencing artifacts on 16S rRNA-based studies[J]. PLoS One, 2011, **6**(12): e27310.
- [40] Tu X, Li J J, Feng R F, *et al.* Comparison of removal behavior of two biotrickling filters under transient condition and effect of pH on the bacterial communities[J]. PLoS One, 2016, **11**(5): e0155593.
- [41] Khan S T, Horiba Y, Yamamoto M, *et al.* Members of the family Comamonadaceae as primary poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)-degrading denitrifiers in activated sludge as revealed by a polyphasic approach [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(7): 3206-3214.
- [42] Garrity G, Brenner D J, Krieg N R, *et al.* Bergey's manual of systematic bacteriology: volume two: the proteobacteria (part C) (2nd ed.) [M]. New York: Springer-Verlag Inc., 2005. 240-243.
- [43] Chung Y C, Lin Y Y, Tseng C P. Removal of high concentration of NH₃ and coexistent H₂S by biological activated carbon (BAC) biotrickling filter[J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(16): 1812-1820.
- [44] Oyarzún P, Arancibia F, Canales C, *et al.* Biofiltration of high concentration of hydrogen sulphide using *Thiobacillus thioparus* [J]. Process Biochemistry, 2003, **39**(2): 165-170.
- [45] Tóth G, Nemestóthy N, Bélafi-Bakó K, *et al.* Degradation of hydrogen sulfide by immobilized *Thiobacillus thioparus* in continuous biotrickling reactor fed with synthetic gas mixture[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, **105**: 185-191.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2018年11月1日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续17次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)