

间歇运行式生物滴滤池处理油漆废气中试研究

陈子平^{1 2 3 4} 李建军^{1 3 4} 安太成⁵ 孙端方^{1 3 4} 许玫英^{1 3 4} 孙国萍^{1 2 3 4*}

(1. 广东省微生物研究所, 广州 510070; 2. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006;
3. 省部共建华南应用微生物国家重点实验室, 广州 510070; 4. 广东省菌种保藏与应用重点实验室,
广州 510070; 5. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要 为研究间歇运行式生物滴滤池对油漆生产厂废气净化能力, 建立一座中试规模生物滴滤池(BTF), 接种降解菌群, 采用8 h/d运行方式净化某油漆厂包装车间废气, 并用PCR-DGGE技术揭示BTF细菌群落结构与工艺运行条件间的联系。油漆厂包装车间废气中挥发性有机物(VOCs)主要为甲苯、乙苯、混合二甲苯(间、对和邻二甲苯), BTF对甲苯、乙苯、混合二甲苯最大去除率分别为88.8%、83.7%和86.3%。DGGE分析显示, BTF稳定运行时, 主要优势菌相对丰度较为稳定($F/P > 0.05$), 其细菌多样性显著低于启动期($F/P > 0.05$); 同时, 下层填料细菌多样性高于上层填料, 其细菌结构变化也较上层明显; 另外, 提升培养液浓度至2倍和4倍对菌群结构亦无显著影响。

关键词 生物滴滤池 废气 降解菌群 PCR-DGGE 群落结构

中图分类号 X701 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)12-4929-06

Pilot-scale study of performance of a intermittent running-biotrickling filter on treatment of waste gas from paint manufacturing process

Chen Ziping^{1 2 3 4} Li Jianjun^{1 3 4} An Taicheng⁵ Sun Duanfang^{1 3 4} Xu Meiyang^{1 3 4} Sun Guoping^{1 2 3 4}

(1. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. State Key Laboratory of Applied Microbiology South China (The Ministry-Province Joint Development), Guangzhou 510070, China; 4. Provincial key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangzhou 510070, China; 5. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract To evaluate the performance of biofiltration on removal of volatile organic compound (VOC) in waste gases from a paint manufacture plant, a pilot-scale biotrickling filter (BTF) with intermittent running model was designed, and was inoculated with a microbial consortium. The changes of the bacterial community structure of the BTF were also analyzed by polymerase chain reaction (PCR)-denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) technique. The major pollutants in waste gases were identified to be toluene, ethylbenzene and mixed xylenes (*m*-*p*- and *o*-xylene). The maximum removal efficiencies (RE_{max}) for above pollutants obtained by BTF were 88.8%, 83.7% and 86.3%, respectively. DGGE analysis indicated that the relative abundances of dominant bacteria did not increase with operating times ($F/P > 0.05$). The bacterial diversity under steady operating phase was significantly lower than that of the start-up phase ($F/P < 0.05$). The bacterial community of the bottom packing in BTF exhibited the higher diversity and variance than those in the upper packing. The increase of nutrient concentration from two times to four times has no significant influence on the bacterial community structure.

Key words biotrickling-filter; waste gas; degrading consortium; PCR-DGGE; community structure

油漆生产过程所排放废气中VOCs(volatile organic compounds, VOCs)的主要成分为酮类和苯系物, 该类物质可经皮肤、呼吸道、消化道进入人体, 引起皮肤过敏并损伤肝肾, 导致头痛、咽痛、贫血及各种癌症^[1]。该类废气排放显著威胁到生产工人及周围群众的身体健康, 亟待高效环保技术予以净化。

当前, 在生物法净化油漆废气研究领域, 生物滴

滤池(biotrickling filter, BTF)已取得良好的处理效

基金项目: 广东省自然科学基金项目(10151007002000010); 广东省科技计划项目(2009B030400001, 2011A030700002); 广州市科技项目(2011J4200074)

收稿日期: 2012-10-30; 修订日期: 2012-12-14

作者简介: 陈子平(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生物滴滤池净化废气。E-mail: czp200808@126.com

* 通讯联系人, E-mail: guopingsun@163.com

果,但相对于酮类和酯类物质,苯系物仍较难于去除^[2-6]。Mathur等^[7]通过规模为1.76 L填料的BTF净化主要污染物为丁酮、甲苯、乙酸丁酯、邻二甲苯的人工模拟油漆废气,在气体滤床停留时间为42.4 s,对丁酮、乙酸丁酯去除率较高(79%,73%),但对甲苯和邻二甲苯的去除率较低(69%,62%)。Li等^[8]用以市政废水的活性污泥为接种源的BTF净化主要成分为酮类和苯系物的油漆废气,虽然酮类物质(丙酮、丁酮)得到良好去除,但苯系物没得到很好的降解($F_p < 0.05$)。目前已报道的BTF系统对甲苯、乙苯、二甲苯的去除率都不理想,基于此本文采用了新富集成功的对甲苯、乙苯、二甲苯、都有降解功能的菌群作为生物强化接种源,通过实验室实验已证明,该菌群对苯系物有良好的去除效率,本实验实地研究该菌群对油漆厂废气的处理效果。

Muyzer等^[9]在1993年首次利用变性梯度凝胶电泳(denatured gradient gel electrophoresis, DGGE)技术研究微生物菌苔和生物膜系统的群落多样性。该技术可将仅有一个碱基差别的核酸序列在梯度凝胶泳动中分离,可用于生物滴滤池中菌群的结构分析^[10]。Ding等^[11]通过PCR-DGGE技术分析净化三甲胺废气的污泥生物滤池和堆肥生物滤池的细菌群落结构,污泥生物滤池与堆肥生物滤池相比,其填料上缺乏氨氧化细菌,与实验结果相符;污泥生物滤池降解过程中产生大量氨气,而堆肥生物滤池则可完全降解三甲胺。国内运用PCR-DGGE技术分析生物滴滤池菌群变化的文献还较少。

用生物滴滤池降解苯系物的研究大多处于实验室规模,废气来源是人工配气,实验规模小,气量一般少于 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[2-4,6,7],工艺条件较稳定、理想;而实际生产中,工厂废气具有排放时间固定、组分与浓度波动大和污染物负荷低等特点,废气处理难度大,对微生物的要求较高,所以研究生物滴滤池处理工厂废气的文献也较少^[1,8]。本实验的BTF安装在油漆厂区,与油漆生产时间同步运行,为8 h/d间歇式运行,以研究间歇性运行模式对生物滴滤池运行效果的影响为基础,为工程设备设计提供理论依据;接种在实验室长期驯化得到的菌群,考察该菌群对苯系物的降解效果,并采用PCR-DGGE技术追踪BTF填料上细菌群落变化过程,揭示微生物种群变化与工艺条件之间的联系。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验装置

BTF滤床规格为 $1.6 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 3.25 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),总体积约为 10 m^3 ,填料有陶粒(6.0~8.0 mm)、拉西环(12 mm \times 12 mm \times 3 mm)和中空塑料球(35 mm)(1:1:1, $v:v:v$),均匀混合,总体积为 6 m^3 ,循环喷淋营养液体积600 L。接种VOCs降解菌群(TSS=1 g/L)循环8 h后,采用气液逆流方式从滴滤池下部接入废气至BTF。废气为某油漆厂包装车间所排放废气,通入实验BTF的风量为 $528.5 \text{ m}^3/\text{h}$,气体滤床停留时间为40.9 s。BTF运行时间与该工厂生产时间同步,为8 h/d。

1.1.2 培养液

1倍浓度培养液配方为 KNO_3 2 g/L, Na_2HPO_4 0.7 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g/L, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.08 mg/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.12 mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.29 mg/L, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 mg/L, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.12 mg/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.05 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.68 mg/L, pH 6.5。连续喷淋速度为 $3.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,营养液更换频率为1次/周。第32天后营养液浓度提升至2倍,即2倍浓度;第108天后营养液浓度提升至4倍浓度。

1.1.3 接种物来源

本实验接种的降解菌群是用石油污染的土壤在干燥器中用甲苯、乙苯、二甲苯为惟一碳源富集传代而来的。

1.2 实验方法

1.2.1 废气污染物定量定性分析方法

用大气采样仪以 $0.2 \text{ L}/\text{min}$ 流速采集气体样品10 min至活性炭吸附柱(溶剂解析型,北京市劳保所科技发展公司),通过 CS_2 萃取活性炭吸附柱吸附的气体污染物,处理好后用GC-MS(Thermo Finnigan Trace DSQ, Thermo)进行定性定量分析。

进样体积为 $10 \mu\text{L}$,色谱柱采用DB-5($30 \text{ m} \times 0.25 \mu\text{m} \times 0.25 \text{ mm}$, Agilent Technology),载气为氦气,流速为 $1.0 \text{ mL}/\text{min}$;升温程序为 35°C 起温,保留3 min,以 $11^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 200°C ,保留5 min,再以 $11^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 250°C ,保留2 min。质谱离子源温度 200°C , m/z 扫描范围为35~270 amu。

1.2.2 微生物群落分析方法

在BTF运行32、108和143 d后,从采样口采集

上层(离表层距离 10 cm)、下层(离底部距离 10 cm) 填料,依次编号为 1、2、3、4、5、6。

生物膜总 DNA 提取步骤参考文献^[11]。以该总 DNA 作模板,以通用引物对 27f 和 1492r 扩增 16S rDNA,再用 968f 和 1401r-GC 引物对扩增 16S rDNA V6 区,采用 D-Code 突变检测系统(Bio-Rad, USA)对 PCR 产物进行 DGGE 分析,电泳所用聚丙烯酰胺凝胶浓度为 8%,变性梯度为 45%~75%,60℃,80 V 电泳 12.5 h; Goldview 染料染色 30 min 后,以紫外凝胶成像系统(GE, USA)成像。通过 Quantity One 4.6.2 (Bio-Rad, USA) 软件进行条带分析。

按照文献进行 Shannon index(H') 计算^[12,13](式 1) 和样品间相似系数 C_s 分析^[14](式 2)。

$$\text{Shannon index } (H') = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

式中: n_i 为 Quantity One 4.6.2 软件分析 DGGE 胶中各条带光密度; i 为条带数; N 为样方总光密度值。

$$C_s = \frac{2j}{a+b} \times 100\% \quad (2)$$

式中: a 、 b 表示 2 个比较对象中的 DNA 条带数; j 表示 a 、 b 中相同的条带数量; C_s 值为 100% 时表示不存在差异。

2 结果与讨论

2.1 油漆废气成分

BTF 气源收集自包装车间,进气风量为 528.5 m³/h,气体滤床停留时间为 40.9 s。集气罩安装在某个包装位点上方,该位点每天包装约 1~3 t 产品,主要产品包括氨基烘干磁漆、醇酸磁漆、丙烯酸烘干清漆等。油漆的生产流程为:投料→研磨→调漆→过滤→包装,生产过程中添加的芳烃类有机溶剂在包装过程与空气接触,挥发为污染物。由于该位点包装产品种类相对固定,所以废气主要污染物种类不变(表 1);废气污染物浓度随生产数量的增加而递增。

表 1 废气中甲苯、乙苯、混合二甲苯浓度及质量比
Table 1 Toluene, ethyl benzene, and mixed xylenes concentration and mass ratio in waste gas

苯系物	甲苯	乙苯	混合二甲苯
浓度(mg/m ³)	1.0~14.8	1.1~21.5	1.0~26.7
质量比(%)	16.0~33.5	26.0~41.2	23.5~39.6

2.2 生物滴滤池去除效果

BTF 对甲苯、乙苯和二甲苯去除率(图 1 和表 2):对甲苯的去除率较高,也较为稳定,平均去除率为 68.3%;乙苯和混合二甲苯的去除效果次之,平均去除率分别为 60.8% 和 61.1%。在整个实验流程中,当进气浓度(C_{in})增大时,去除率(RE)亦升高,反映去除能力(EC)与进气负荷(IL)呈正相关联系(图 1)。

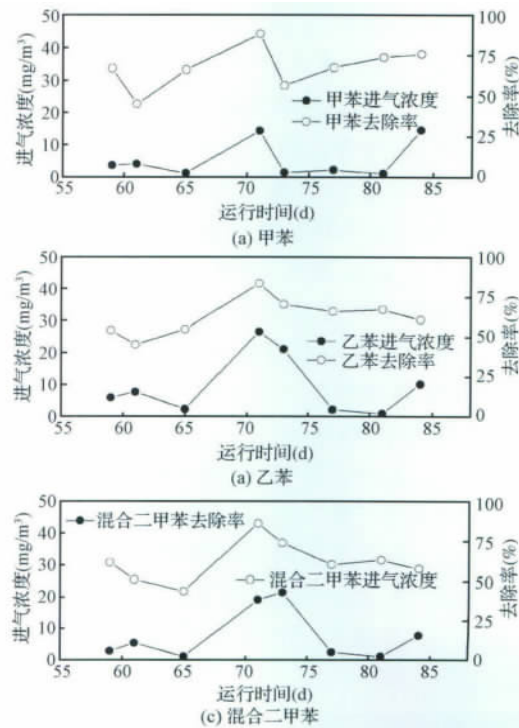


图 1 BTF 对 VOCs 的去除率
Fig. 1 VOC removal performance of BTF

表 2 BTF 的 C_{in} 和 IL 对应的 RE 和 EC

Table 2 RE and EC as well as their C_{in} and IL in BTF

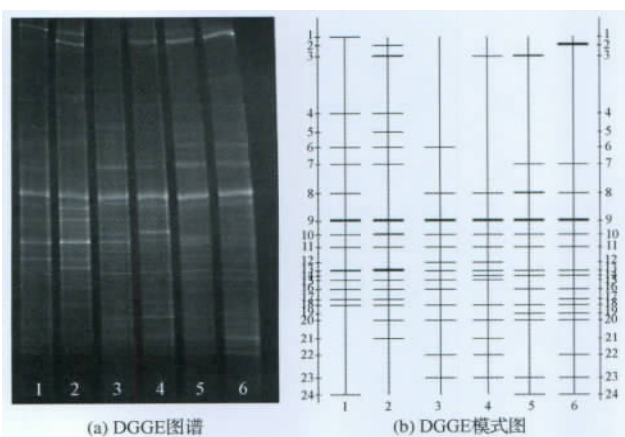
项目	进气浓度 C_{in} (mg/m ³)	进气负荷 IL (g/(m ³ ·h))	去除能力 EC (g/(m ³ ·h))	去除率 RE (%)
甲苯	14.4	1.3	1.2	88.8
乙苯	19.1	1.7	1.5	86.3
混合二甲苯	26.7	2.4	2.0	83.7

实践中,由于生产数量及时间的限制(如 8 h/d 工作制),与稳定的实验室条件相比,有机废气具有限时排放和浓度波动等特点,其去除率较低^[15]。Qi 等^[16]研究发现,间歇运行的生物滤池运行 2 个月后,其去除率尚未稳定。其原因可能为:VOC 浓度过低时,微生物缺乏营养基质,靠内源呼吸维持活性,难于形成生物膜;较高浓度 VOCs 有机

废气可使生物膜中微生物获得更多碳源,利于其增长繁殖及提高活性,从而使去除率升高^[17,18]。研究表明^[15,19],当反应器通入稳定的高负荷废气时,生物量可能会过量生长,并产生堵塞;当通入间歇性低负荷废气时,反应器不能积累充足生物量并形成稳定的生物膜结构,导致去除率较低。Webster等^[15]通过对比研究发现,苯乙烯生物滤池初始去除能力为 $20 \sim 24 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (进气负荷 $=33 \sim 35 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$),人为增加负荷后(进气负荷 $=55 \sim 65 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$),滤池中生物量显著提升,导致去除能力升高至 $45 \sim 50 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,去除率提升至 $77\% \sim 82\%$ 。进一步研究表明,处理限时排放和浓度波动的工业废气,可在生物滤池中添加合适比例的有机填料:无VOCs排放时,有机填料的营养物质可适当维持微生物活性^[20]。除此而外,可选择培养耐饥性好的降解菌种或菌群来处理该类废气。有研究发现,某些真菌净化该类废气可取得较好效果^[16]。

2.3 微生物群落分析

通过生物滴滤池填料表面的生物膜菌群 16S rDNA V6 区 DGGE 图谱来揭示细菌群落与污染物间的相互联系(图2)。基于图谱中各条带的相对丰度(表3),条带9所对应的细菌在各运行阶段的相对丰度在 $17.3\% \sim 32.4\%$ 之间,且比较稳定,可确定其为优势菌种,或与苯系物降解过程有重要联系。



注:泳道1~6依次代表32 d上层、32 d下层、108 d上层、108 d下层、143 d上层、143 d下层填料样品

图2 填料样品生物膜的DGGE图谱分析

Fig. 2 DGGE analysis in biofilm of packing samples; b. Model of DGGE profile

为确定N、P对微生物生长的影响因素,32 d后提升培养液浓度至2倍浓度;108 d后提升培养液浓

表3 DGGE图谱中条带相对丰度

Table 3	Bacterial relative abundance in DGGE profile					
相对丰度 (%)	泳道 1	泳道 2	泳道 3	泳道 4	泳道 5	泳道 6
条带 1	5.04	0	0	0	0	0
条带 2	0	3.53	0	0	0	15.60
条带 3	0	6.20	0	6.42	12.70	0
条带 4	1.12	4.68	0	0	0	0
条带 5	0	1.44	0	0	0	0
条带 6	1.87	1.40	3.19	0	0	0
条带 7	2.11	3.33	0	0	2.90	2.79
条带 8	6.26	0	8.29	3.50	9.66	6.19
条带 9	26.90	17.30	28.30	32.40	23.80	21.90
条带 10	3.97	8.26	3.92	7.54	2.59	4.84
条带 11	3.13	5.57	1.86	1.81	0.61	1.15
条带 12	0	0	3.66	8.79	0	0
条带 13	13.60	17.50	8.91	2.98	6.48	2.69
条带 14	0	0	0	1.86	4.47	3.12
条带 15	1.75	1.23	1.80	1.12	0	0
条带 16	7.47	5.23	1.95	0	2.04	0.67
条带 17	1.41	5.42	0	0	0	1.52
条带 18	3.50	1.10	3.65	3.85	3.32	1.76
条带 19	0	0	0	0	0.82	1.27
条带 20	0	1.20	0.91	0.84	1.74	1.04
条带 21	0	2.09	0	2.24	0	0
条带 22	0	0	2.75	3.56	0	1.61
条带 23	0	0	1.93	3.28	2.55	5.55
条带 24	3.28	0	0	0	1.04	2.14

度至4倍浓度。菌群结构表明,各优势菌相对丰度并未因营养浓度的递增而提升,如条带9在上下层相对丰度从 26.9% 和 17.3% 分别增加到 28.3% 和 32.4% 后,又分别减少到 23.8% 和 21.9% (表3)。与此同时,相应时间内去除率及去除能力亦无明显升高(图1),反映C源(TVOC浓度)是降解效率主要限制因素($F_p > 0.05$)。

随着培养液浓度的提升,菌群出现细微变化。条带8在上、下层的相对丰度在逐渐增加,32 d相对丰度 6.26% 、 0% ,108 d相对丰度 8.29% 、 3.50% ,143 d相对丰度 9.66% 、 6.19% ;条带23在上、下层的相对丰度也逐渐增加,32 d相对丰度 0% 、 0% ,108 d相对丰度 1.93% 、 3.28% ,143 d相对丰度 2.55% 、 5.55% 。而条带13在上、下层的相对丰度在逐渐减弱,32 d相对 13.6% 、 17.5% ,108 d相对丰度 8.91% 、 2.98% ,143 d相对丰度 6.48% 、 2.69% 。但依据降解结果(图1),该类菌群变化对去除效率无显著影响($F_p > 0.05$)。

对各时期填料样品的 H' 计算结果表明(图 3), 下层填料的细菌多样性显著高于上层填料 ($t, p < 0.05$)。因 BTF 采用气液逆流方式运行, 底部填料处污染物浓度相对较高, 利于菌群生长, 其细菌多样性亦相应提升。

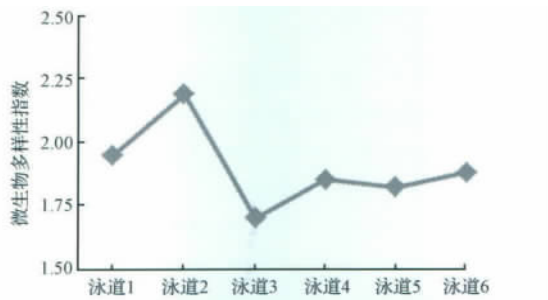


图 3 填料样品的生物膜细菌多样性指数

Fig. 3 Bacterial diversity in biofilm of packing sample

不同填料样品间相似性分析表明(表 4), 空间维度上, 上层菌群与下层菌群相似度最高; 时间维度上, 相同位置的菌群在不同时期有差异。样品 1 与样品 2 相似性为 60.8%, 样品 3 与样品 4 相似性为 74.9%, 样品 5 与样品 6 相似性为 66.0%。

表 4 DGGE 泳道相似系数(C_s)

Table 4 Coefficient of similarity (C_s) among lanes in DGGE profile

泳道	1	2	3	4	5	6
1	100	60.8	75.2	56.6	64.2	59.2
2	60.8	100	49.1	47.8	52.0	46.6
3	75.2	49.1	100	74.9	70.7	63.9
4	56.6	47.8	74.9	100	65.4	62
5	64.2	52.0	70.7	65.4	100	66.0
6	59.2	46.6	63.9	62.0	66.0	100

表明在不同运行时期内, VOC 浓度的变化对菌群结构有一定影响。同时, 上层菌群在时间维度上稳定性较高: 样品 1 与样品 3 为 75.2%, 样品 5 与样品 3 为 70.7%。其原因可能为, 下层 VOC 浓度较高且波动明显, 菌群结构易受其影响。有研究表明, 生物滤池内微生物群落结构分布与污染物浓度有关^[21-22]。

3 结论

(1) 此油漆废气主要污染物为甲苯、乙苯和混合二甲苯(间、对和邻二甲苯)。

(2) 结合生产实际的间歇运行式生物滴滤池

(BTF) 对油漆废气中甲苯、乙苯、混合二甲苯最高去除率分别为 88.8%、86.3% 和 83.7%; 最大去除能力分别为 $1.13 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 、 $1.46 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $1.97 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (进气负荷分别为 $1.27 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 、 $1.69 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $2.36 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$)。说明所接入的富集菌群在实际应用上能适应间歇通气的运行方式并发挥作用。

(3) 反应器运行过程中, TVOC 浓度(C 源)相对于 N 源、P 源为去除效率主要限制因素($F, p < 0.05$)。细菌群落分析表明, 空间维度上, 上层菌群与下层菌群相似度最高; 时间维度上, 相同位置的菌群在不同时期有差异。反映 BTF 内细菌群落结构与通入污染物浓度有关。

参考文献

- [1] 陈江耀, 张德林, 李建军, 等. 光催化与生物技术联用工艺处理油漆废气中试研究. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1390-1393
Chen J. Y., Zhang D. J., Li J. J., et al. Pilot-scale study of removal of paint waste gas by combined technique of photocatalysis with biotechnology. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(6): 1390-1393 (in Chinese)
- [2] Mathur A. K., Majumder C. B., Chatterjee S. Combined removal of btx in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(1-2): 64-74
- [3] Kim D., Cai Z., Sorial G. A. Impact of interchanging vocs on the performance of trickle bed air biofilter. Chemical Engineering Journal, 2005, 113(2-3): 153-160
- [4] Cai Z., Sorial G. A. Treatment of dynamic voc mixture in a trickling-bed air biofilter integrated with cyclic adsorption/desorption beds. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1-3): 105-112
- [5] Arulneyam D., Swaminathan T. Biodegradation of mixture of VOCs in a biofilter. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(1): 30-33
- [6] Yoon I. K., Park C. H. Effects of gas flow rate, inlet concentration and temperature on biofiltration of volatile organic compounds in a peat-packed biofilter. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2002, 93(2): 165-169
- [7] Mathur A. K., Majumder C. Biofiltration and kinetic aspects of a biotrickling filter for the removal of paint solvent mixture laden air stream. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 1027-1036
- [8] Li J. J., Ye G. Y., Sun D. F., et al. Performance of a biotrickling filter in the removal of waste gases containing

- low concentrations of mixed VOCs from a paint and coating plant. *Biodegradation* **2012** ,23(1) : 1-11
- [9] Muyzer G. ,De Waal E. C. ,Uitterlinden A. G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Applied and Environmental Microbiology* **1993** ,59(3) : 695-700
- [10] Myers R. M. ,Fischer S. G. ,Lerman L. S. ,et al. Nearly all single base substitutions in DNA fragments joined to a GC-clamp can be detected by denaturing gradient gel electrophoresis. *Nucleic Acids Research* ,**1985** ,13 (9) : 3131-3145
- [11] Ding Y. ,Wu W. ,Han Z. ,et al. Correlation of reactor performance and bacterial community composition during the removal of trimethylamine in three-stage biofilters. *Biochemical Engineering Journal* **2008** ,38(2) : 248-258
- [12] Cox H. H. J. ,Deshusses M. A. Effect of starvation on the performance and re-acclimation of biotrickling filters for air pollution control. *Environmental Science and Technology* **2002** ,36(14) : 3069-3073
- [13] Martin Jr R. W. ,Li H. ,Mihelcic J. R. ,et al. Optimization of biofiltration for odor control: Model calibration ,validation ,and applications. *Water Environment Research* ,**2002** ,74(1) : 17-27
- [14] Zijngje V. ,Harmsen H. J. M. ,Kleinfelder J. W. ,et al. Denaturing gradient gel electrophoresis analysis to study bacterial community structure in pockets of periodontitis patients. *Oral Microbiology and Immunology* ,**2003** ,18 (1) : 59-65
- [15] Webster T. S. ,Cox H. H. J. ,Deshusses M. A. Resolving operational and performance problems encountered in the use of a pilot/full-scale biotrickling filter reactor. *Environmental Progress* **1999** ,18(3) : 162-172
- [16] Qi B. ,Moe W. M. Performance of low pH biofilters treating a paint solvent mixture: Continuous and intermittent loading. *Journal of Hazardous Materials* **2006** ,135(1) : 303-310
- [17] Eitzer B. D. Emissions of volatile organic chemicals from municipal solid waste composting facilities. *Environmental Science and Technology* **1995** ,29(4) : 896-902
- [18] Pagans E. ,Font X. ,Sanchez A. Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. *Journal of Hazardous Materials* **2006** ,131(1-3) : 179-186
- [19] Sorial G. ,Smith F. L. ,Suidan T. ,et al. Evaluation of trickle bed biofilter media for toluene removal. *Journal of the Air and Waste Management Association* ,**1995** ,45 (10) : 801-810
- [20] Sun D. ,Li J. ,An T. ,et al. Evaluation of the performance of structured mixed packing and inert packing materials in toluene biotrickle-filtration. *Biotechnology and Bioengineering* **2011** ,16(5) : 1009-1018
- [21] Li C. ,Moe W. Assessment of microbial populations in methyl ethyl ketone degrading biofilters by denaturing gradient gel electrophoresis. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2004** ,64(4) : 568-575
- [22] Babbitt C. W. ,Pacheco A. ,Lindner A. S. Methanol removal efficiency and bacterial diversity of an activated carbon biofilter. *Bioresource Technology* ,**2009** ,100(24) : 6207-6216