

生物滤池净化城市生活垃圾 BMT 发酵恶臭气体的研究

刘强¹, 陈荣¹, 张晓岚¹, 刘军², 张沛君³, 钱光人¹

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200072; 2. 上海浦东美商生物科技有限公司, 上海 200135; 3. 上海浦东新区环保局, 上海 200135)

摘要: 针对城市生活垃圾 BMT 过程中的恶臭气体, 以堆肥为填料, 在现场进行了生物滤池处理研究, 分别测定了臭气的成分、臭气中 TVOC 浓度变化的规律、滤池的净化效率、填料中有机质、全氮、全碳、全磷和 pH 等特征, 以及填料菌落数的变化. SPME-GC-MS 的分析结果表明, 恶臭气体中的主要有机污染物包括苯系物、萜烯和烷烃; 臭气中 TVOC 浓度在发酵初期较大, 而后逐渐减少, 变化范围为 $68.3 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ (体积分数), 滤池净化效率范围为 31.5% ~ 84.8%; 在 4 个月的运行过程中, 填料中有机质、总氮、总碳、总磷的含量基本上保持在比较稳定的数值, 而水溶性总氮增加了 53.7%, 水溶性总磷减少了 19.6%, 填料的 pH 值在初始经历了一个升高阶段后稳定在 7.8 左右; 填料中细菌和霉菌的数量呈上升趋势, 而酵母菌和放线菌的数量呈下降趋势, 分别为初始填料的 3.1、3.4、0.04、0.07 倍.

关键词: BMT; 堆肥填料; 生物滤池; 恶臭气体

中图分类号: X512 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1441-05

Removal of Odors from Fermentation Process of MSW Biological Mechanical Treatment Using Compost Biofilter

LIU Qiang¹, CHEN Rong¹, ZHANG Xiao-lan¹, LIU Jun², ZHANG Pei-jun³, QIAN Guang-ren¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Pudong Meishang MSW Biochemical Treatment Company, Shanghai 200135, China; 3. Pudong New Area Environmental Protection Bureau, Shanghai 200135, China)

Abstract: For the odour from fermentation processing of municipal solid waste biological mechanical treatment, a compost biofilter was established to investigate its performance and the characteristics change of compost. The component and TVOC concentration in odors, removal efficiency of biofilter, and total carbon (TC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), organic matter (OM), pH value and bacterial colony in compost media were measured respectively. SPME-GC-MS analysis showed that the main components of odors were BTEX, terpenes and alkane. The range of TVOC concentrations in odors during a fermentation process period and removal efficiencies of biofilter were $68.3 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ (volume fraction), 31.5%~84.8% respectively. After about 4 months operation, TN, TC, TP and OM in compost were kept almost stably, but the dissolved N experienced an increase of 53.7%, and the dissolved P decreased 19.6%. The pH value experienced an increase in the former period and kept stable finally at about 7.8, which excursion was from 7.49 to 7.86. Analytical results for bacterial colony in packing material indicated that bacteria and mould colony counts increased, but yeasts and actinomycetes decreased along with biofilter operation, which were 3.1, 3.4, 0.04, 0.07 times of their initial values respectively.

Key words: biological mechanical treatment (BMT); compost material; biofilter; odour

生物稳定机械预处理 (biological mechanical treatment, BMT) 是在欧洲得到快速发展的除填埋、焚烧、堆肥以外的生活垃圾综合预处理工艺, 能快速减少垃圾的容积, 并有效回收垃圾中的各种资源. 该工艺包括 (生物) 发酵和机械分选 2 个阶段, 在发酵阶段会产生大量的恶臭气体, 气体的成分、浓度与垃圾成分和发酵周期等因素有关^[1,2]. 应用生物滤池处理恶臭气体, 如丁酸^[3]、 NH_3 ^[4] 等和挥发性有机物, 如苯^[5]、甲苯^[6] 等方面已经有了大量的研究. 但对组成复杂的实际气体研究并不多见. 本研究以上海浦东某城市生活垃圾生化处理厂 BMT 预处理恶臭气体

为研究对象, 采用生物滤池净化, 考察了滤池对恶臭气体的净化效果. 同时, 由于生物滤池中填料的特性对污染物的去除性能有较大的影响, 因此本实验重点对生物滤池的填料特征随着系统运行变化的情况进行了研究.

收稿日期: 2007-05-25; 修订日期: 2007-07-09

基金项目: 上海市科委世博科技重大攻关项目 (05d05825); 上海市重点学科第二期建设项目 (T105)

作者简介: 刘强 (1978 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为空气污染控制, E-mail: qliu@staff.shu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置和流程见图 1, 其中生物滤池由有机玻璃加工而成, 长 0.6 m, 宽 0.6 m, 高 0.8 m, 体积为 288 L; 填料高度 0.5 m, 填料体积为 180 L. 垃圾发酵恶臭气体通过放置在发酵反应堆上的集气罩(罩口面积 0.325 m²)收集后经过长 40 m 的 PVC 管道(内径 32 mm), 由风机输送进入生物滤池. 气体流量为 16 m³/h, 滤池空塔停留时间为 40.5 s. 填料取样口分别距填料底部 0.1、0.25 和 0.4 m.

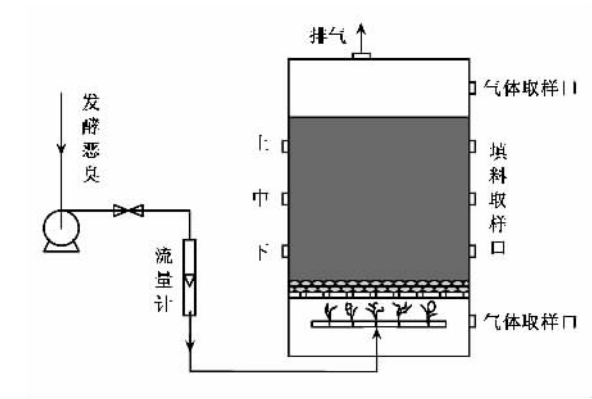


图 1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the compost biofilter

1.2 实验填料

滤池使用的填料为上海浦东某城市生活垃圾生化处理厂的成品堆肥, 经 3 mm 筛后得到. 填料的初始特征见表 1 所示.

表 1 生物滤池堆肥填料初始特征值

Table 1 Initial characteristics of compost media

特征参数	初始值
全碳 ¹⁾ /g•kg ⁻¹	204
全磷 ¹⁾ /g•kg ⁻¹	5.5
全氮 ¹⁾ /g•kg ⁻¹	14.1
有机质 ¹⁾ /g•kg ⁻¹	210
pH 值	7.16
湿度/%	31.2
粒径大小/mm	> 3
空隙率/%	32.7
堆积密度/g•cm ⁻³	0.572

1) 以干填料计

1.3 分析项目及测试方法

气体中的主要成分采用 SPME-GC-MS 进行测定, 固相微萃取头型号为 DVB/CAR/PDM, 气相色谱型号为 HP5890, 采用 AT-5MS 弱极性毛细管色谱柱,

质谱仪型号为 HP5972. 微萃取头萃取 15 min 后进样分析, 分析条件为: 进样口温度 250℃, 接口温度 280℃, 升温程序为 35℃保持 2 min, 然后以 6℃/min 速率升温到达 220℃, 保持 3 min. 气体中的有机污染物的浓度采用便携式 TVOC 检测仪(美国华瑞)测定. 滤池的压降采用 U 形压力计测量.

填料中的总氮、总碳含量采用 EuroEA3000 元素分析仪测定; 总磷含量采用氢氟酸和高氯酸消解, 消解后使用钼锑抗分光光度法测定; 有机质含量采用土壤有机质测定方法: 重铬酸钾氧化, 硫酸亚铁铵滴定; pH 值测定方法如下: 取 5 g 填料于 45 mL 无 CO₂ 水中, 充分振荡, 静置 0.5 h 后过滤用 pHS-3C 精密 pH 计测定. 填料中的菌落数量采用平板计数法, 使用 4 种不同的培养基分离纯化菌落, 牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌, 淀粉琼脂培养基(高氏培养基)培养放线菌, 马铃薯糖琼脂培养基培养酵母菌, 查氏培养基(蔗糖酸钠培养基)培养霉菌.

2 结果与分析

实验所在生活垃圾处理厂的 BMT 发酵方式为好氧发酵, 发酵温度为 50~60℃. 通风方式微强制通风, 空气从底部进入自然堆放的垃圾发酵堆, 每立方米垃圾的通风量为 0.2 m³/min, 1 个发酵周期为 20 d.

2.1 恶臭成分定性分析

发酵恶臭 SPME-GC-MS 分析结果见图 2. 定性出的有机污染物包括低分子醇、甲苯、乙苯、二甲苯、柠檬酸、桉烯、十二烷、十四烷和十七烷等. 其中柠檬酸对应的峰面积最大, 主要是由于城市生活垃圾夹带着大量的来自家厨、饭店等食物垃圾, 在微生物分解作用下产生大量的萜烯化合物^[7].

恶臭气体中的主要污染物与生活垃圾组成有较

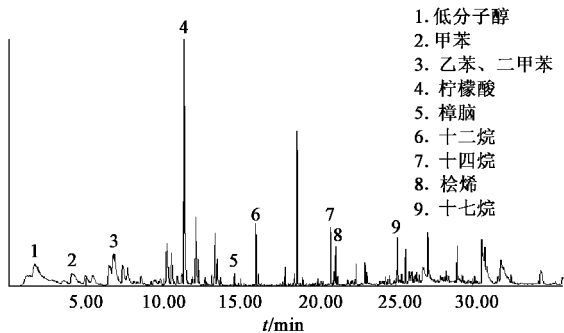


图 2 垃圾发酵恶臭 SPME-GC-MS 分析谱图

Fig.2 SPME-GC-MS chromatogram of odor from MSW BMT treatment fermentation process

大关系^[8]. Eitzer^[2]对 8 座城市垃圾堆肥厂所释放的 VOC 成分调查,主要包括氯化物、苯系物、多种萜烯等. Pierucci 等^[9]研究发现烷烃、萜烯、苯系物以及卤化物为城市固体垃圾好氧发酵释放的主要化合物,与实验结果较为相似.

2.2 发酵周期内污染物浓度影响

垃圾发酵期间产生的污染物浓度并不是稳定的^[2,9]. 挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOC) 是一类比较典型的恶臭气体,因此本实验以总挥发性有机物(TVOC)为考察对象,测定了 2 个 BMT 发酵周期内臭气的浓度变化及生物滤池的净化效率,实验结果如图 3 所示.

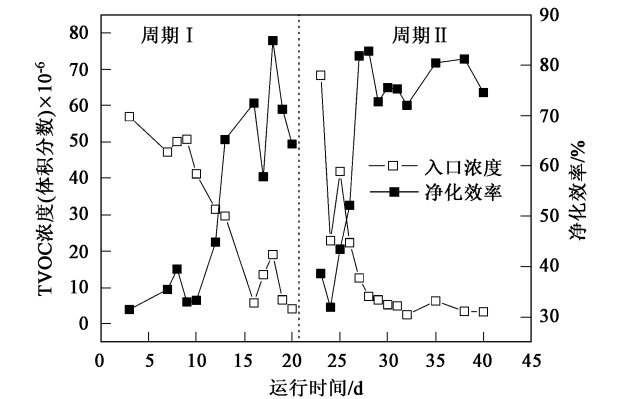


图 3 TVOC 浓度变化对生物滤池净化效率的影响

Fig.3 Change of TVOC concentration in odors and the performance of compost biofilter

从图 3 可以看出,臭气中 TVOC 浓度在发酵周期内变化范围很大,为 $68.3 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ (体积分数),总体上呈浓度逐渐下降的趋势,这与 Pagans 等^[1]对城市固体垃圾堆肥释放 VOC 的浓度变化分析结果类似.但 2 个发酵周期中臭气的 TVOC 浓度下降的速率并不是很一致,推测可能与生活垃圾成分的变化有关. Komilis 等^[10]的研究结果表明生活垃圾中不同组分释放 VOC 的种类和持续时间都有较大差异.

臭气中 TVOC 的浓度影响着堆肥滤池的净化效率.本实验测得的滤池净化效率为 31.5% ~ 84.8%. 当 TVOC 浓度较高时 [$> 30 \times 10^{-6}$ (体积分数)],滤池平均净化效率为 44.2%;而当浓度较低时 [$< 30 \times 10^{-6}$ (体积分数)],平均净化效率达到 71.5%.

生活垃圾发酵产生的恶臭气体在不同发酵期内气体成分与浓度都发生变化. Eitzer^[2]发现在发酵早期难生物降解物质成分(三氯氟甲烷、1,1,1-三氯乙

烷等)所占比例较大,而在后期则易生物降解物质(丙酮、2-丁酮等)占多数.因此,可以推测 TVOC 浓度对生物滤池净化性能的影响可能包括 2 个方面:一方面是由于发酵周期内所释放污染物的可生物降解程度不同,从而导致了滤池处理效率不同;另一方面可能由于高浓度 TVOC 的物质或者微生物降解反应生成的代谢产物对微生物活性产生了抑制作用.此外滤池空塔停留时间^[11]以及污染物之间相互作用^[12~14]也将影响着滤池的去除效率.

2.3 填料特征分析

碳、氮、磷等元素对微生物的生命活动具有重要影响.在气体生物净化中,这些元素必须由滤池的填料来提供,某些元素的缺乏将对微生物生长代谢产生影响,从而导致生物滤池效率降低.本实验分别测定了生物滤池上、中、下 3 层堆肥填料的全碳、全磷、全氮、有机质、pH、水溶性全氮和全磷的变化,探讨其对滤池净化效果的影响.

图 4 为滤池填料中总氮、总碳、总磷和有机碳的含量随滤池运行时间的变化.从图 4 可以看出,填料中总氮、总碳、总磷和有机质含量的测定结果有一定的波动,但基本保持稳定,总碳平均含量为 $(206.3 \pm 14.4) \text{ g/kg}$ (以干填料计,下同),总氮平均含量为 $(14.87 \pm 1.42) \text{ g/kg}$,总磷平均含量为 $(5.3 \pm 0.4) \text{ g/kg}$,有机质平均含量为 $(208.2 \pm 30.3) \text{ g/kg}$.填料中有机质含量基本保持稳定表明滤池中的微生物在降解气相污染物的同时,并没有降解填料中的有机物.比较图 3 和图 4 可知实验中没有出现因某些营养缺乏而造成净化效率下降现象^[15].

为了进一步考察填料中微生物可利用的氮、磷等营养元素对滤池性能的潜在影响,本研究也对滤池填料中的水溶性总氮和水溶性总磷进行了测定,结果见表 2.

从表 2 可以看出,在滤池运行 120 d 后,填料中的水溶性总氮增加了 53.7%,而水溶性总磷损失了 19.6%.水溶性总氮的增加可能是由于恶臭气体中氨气和含氮有机物经过微生物降解生成了水溶性氮,并且超过了微生物能够利用的量,从而使得水溶性总氮在填料中不断的积累.水溶性总磷的减少可以理解为微生物利用其合成细胞物质形成新细胞,即水溶性磷转变为非水溶性磷. Park 等^[16]使用堆肥滤池处理氨气,结果显示填料总碳无明显变化,总氮的增加是由于吸附了一定量的氨气.

图 5 为填料的 pH 值随滤池运行时间的变化.从图 5 可以看出,填料的 pH 在滤池运行初期经历了逐

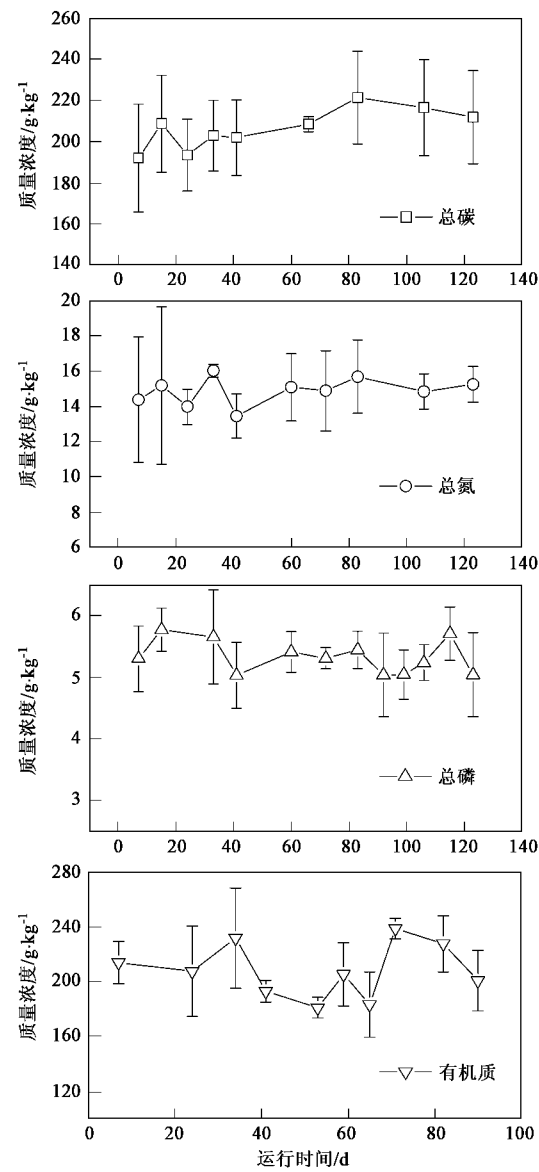


图 4 生物滤池堆肥填料中总碳、总氮、总磷和有机质含量随运行时间的变化

Fig.4 Change of total carbon, total nitrogen, total phosphorus and organic matter in compost media

渐升高的过程,然后基本稳定在 7.8 左右.填料的 pH 值变化主要受到气体成分、浓度,微生物降解产物以及填料的缓冲能力等因素影响,pH 值升高推测可能是由于填料吸附了恶臭气体中氨气所致.

表 2 填料水溶性总氮、总磷变化

Table 2 Changes of soluble total nitrogen and total phosphorus in compost media

填料状态	水溶性总氮含量	水溶性总磷含量
	$/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
初始	966.6	36.3
运行 120 d	1 485.3	29.2
损失率/%	- 53.7	19.6

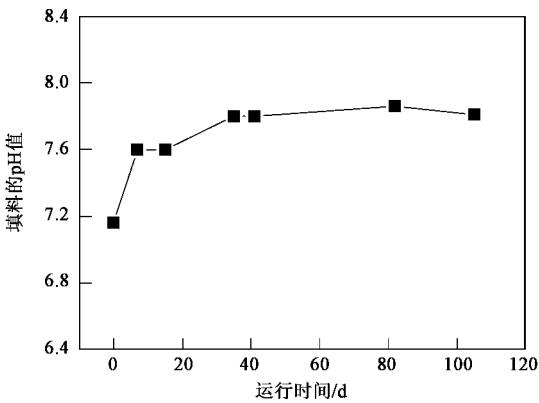


图 5 生物滤池堆肥填料的 pH 值随运行时间的变化

Fig.5 Change of compost media pH along with biofilter operation

2.4 生物滤床压降分析

图 6 为滤池压降随运行时间的变化曲线.在 120 d 的实验期内,滤床压降的波动范围为 147 ~ 196 Pa,变化并不明显,表明生物滤池在运行期间内并没有发生填料堵塞现象^[17].

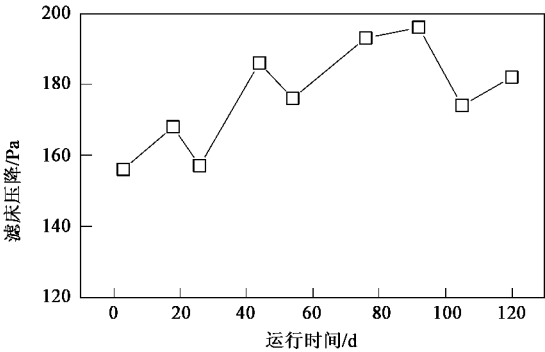


图 6 生物滤池运行的压降变化

Fig.6 Pressure drop of compost biofilter

2.5 填料菌落数分析

图 7 为堆肥填料中微生物菌落总数在系统运行过程的变化.从图 7 可以看出,填料中细菌和霉菌的总数有增加的趋势,120 d 后分别为初始填料的 3.1 倍和 3.4 倍;而酵母菌和放线菌却出现相反的趋势,120 d 后分别为初始填料 0.04 倍和 0.07 倍.放线菌的变化尤为明显,可能是由于放线菌繁殖缓慢,在养分比较充足时,比起细菌和真菌竞争力弱;或者由于污染物的毒性不利于放线菌的生长、繁殖,同时填料环境改变包括湿度、pH 等也会产生影响.

填料中细菌和霉菌的不断增加表明在利用恶臭气体中的污染物为碳源和能源,吸附并降解发酵气体的填料环境有利于细菌和霉菌的生长.但是增加

的倍数并不是很大,比孙玉梅等^[18]得出的结果小,尤其是霉菌的增加量,分析原因可能由于填料介质以及气体成分不同.

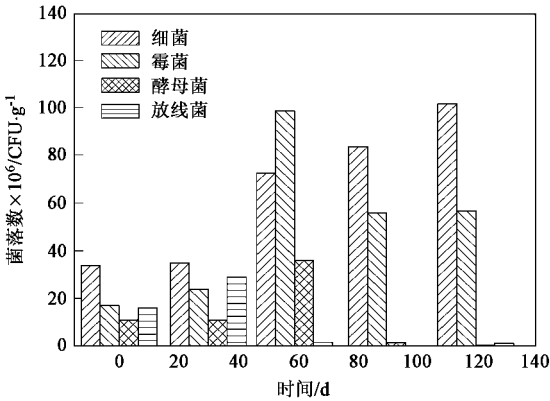


图 7 堆肥填料微生物菌落总数变化

Fig.7 Change of microbial communities in compost media along with biofilter operation

3 结论

(1)生活垃圾 BMT 生物稳定处理过程中散发的恶臭气体成分复杂,本实验中定性的主要有机污染物包括低分子醇、甲苯、乙苯、二甲苯、柠檬酸、桉烯、十二烷、十四烷和十七烷等.

(2)生活垃圾 BMT 生物稳定处理中释放的恶臭气体的 TVOC 浓度在发酵周期内的变化存在一定的规律性,在发酵初期浓度最高,随着处理时间的增加而逐渐降低,波动范围为 $68.3 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ (体积分数).

(3)周期内 TVOC 浓度变化对堆肥生物滤池净化效率产生一定的影响,前期释放的 TVOC 浓度 $> 30 \times 10^{-6}$ (体积分数)时,净化效率较低,平均只有 44.2%;而后期当浓度 $< 30 \times 10^{-6}$ (体积分数)时,平均净化效率达到 71.5%,最高可达 84.8%.

(4)经过 120 d 的运行,滤池填料中的总氮、总磷、总碳以及有机质含量没有发生明显的变化,而填料中水溶性总氮的含量增加 53.7%,水溶性总磷减少 19.6%,考虑到滤池的长期运行,需要定期添加少量的水溶性含磷化合物.

(5)在滤池运行期间,堆肥填料中的细菌和霉菌的数量分别增加到初始的 3.1 倍和 3.4 倍,放线菌和酵母菌的数量减少为初始的 7%和 4%,表明细菌和霉菌是恶臭气体污染物质的主要降解菌.

参考文献:

[1] Pagans E, Font X, Sánchez A. Emission of volatile organic

compounds from composting of different solid wastes: abatement by biofiltration [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 131(1-3): 179-186.

[2] Eitzer B D. Emission of volatile organic chemicals from municipal solid waste composting facilities[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(4): 896-902.

[3] Otten L, Afzal M, Mainville D. Biofiltration of odours: laboratory studies using butyric acid[J]. Advances in Environmental Research, 2004, 8(3-4): 397-409.

[4] Chen Y X, Yin J, Wang K X. Long-term operation of biofilters for biological removal of ammonia [J]. Chemosphere, 2005, 58(8): 1023-1030.

[5] Zilli M, Guarino C, Daffonchio D, et al. Laboratory-scale experiments with a powdered compost biofilter treating benzene-polluted air [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(6): 2035-2043.

[6] Rene E R, Murthy D V S, Swaminathan T. Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapors [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(8): 2771-2779.

[7] Defoer N, De B I, Van L H. Gas chromatography-mass spectrometry as a tool for estimating odor concentrations of biofilter effluents at aerobic composting and rendering plants [J]. Journal of Chromatography A, 2002, 970(1-2): 259-273.

[8] Komilis D P, Ham R K, Park J K. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes[J]. Water Research, 2004, 38(7): 1707-1714.

[9] Pierucci P, Porazzi E, Martinez M P, et al. Volatile organic compounds produced during the aerobic biological processing of municipal solid waste in a pilot plant[J]. Chemosphere, 2005, 59(3): 423-430.

[10] Komilis P M, Ham K R, Park K J. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes[J]. Water Research, 2004, 38(7): 1707-1714.

[11] 汪群慧,田书磊,谢维民,等.生物滴滤塔处理药厂含醋酸丁酯、正丁醇和苯乙酸的挥发性混合废气[J].环境科学,2005, 26(2): 55-59.

[12] Shim E H, Kim J, Cho K S, et al. Biofiltration and inhibitory interactions of gaseous benzene, toluene, xylene, and methyl tert-butyl ether[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(9): 3089-3094.

[13] Moe W M, Qi B. Biofilter treatment of volatile organic compound emissions from reformulated paint: complex mixtures intermittent operation, and start up[J]. Air & Waste Management Association, 2005, 55(7): 950-960.

[14] Namkoong W, Park J S, VanderGheynst J S. Biofiltration of gasoline vapor by compost media[J]. Environmental Pollution, 2003, 121(2): 181-187.

[15] Hwang J W, Jang S J, Lee E Y, et al. Evaluation of composts as biofilter packing material for treatment of gaseous p-xylene[J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, 35(2): 142-149.

[16] Park K J, Choi M H, Hong J H. Control of composting odor using biofiltration[J]. Compost Science and Utilization, 2002, 10(4): 356-362.

[17] Bibeau L, Kiared K, Leroux A, et al. Biological purification of exhaust air containing toluene vapor in a filter bed reactor[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1997, 75(5): 921-929.

[18] 孙玉梅,全燮,杨凤林,等.气态有机物组成对生物过滤及菌体密度的影响[J].应用与环境生物学报,2005,11(1): 82-85.