

生物过滤法处理挥发性有机化合物研究进展

吴丹¹, 李法云¹, 陈晓阳², 刘永慧³, 李霞¹, 刘强¹

1. 辽宁大学环境学院; 辽宁省高校污染控制与环境修复重点实验室, 沈阳 110036

2. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021

3. 广州大学环境科学与工程学院, 广州 510006

摘要 随着现代工业的迅速发展,大量的挥发性有机化合物(VOCs)被排放到大气中。VOCs 以其来源广、危害大的特点而成为仅次于颗粒污染物的第二大大气污染物。大气中逐渐增加的 VOCs 已经成为当今关注的重要环境问题之一。传统处理 VOCs 废气方法主要有燃烧、冷凝、吸附、吸收等。生物过滤法是一个相对较新的处理大气量、可生化 VOCs 的废气处理技术。凭简单高效、费用低、无二次污染等特点,生物过滤法成为一简单、高效及具有前景的 VOCs 废气处理技术。本文对传统方法与生物过滤法进行了比较,并在综述生物过滤法处理 VOCs 废气的研究进展和目前存在的主要问题基础上,分别对影响生物过滤法处理 VOCs 废气的主要影响因素,包括底物 VOCs 性质、填料选择、填料湿度、pH 值、营养、温度、微生物等进行总结和评述,对今后生物过滤法处理 VOCs 的发展趋势进行展望并提出建议。

关键词 生物过滤; 生物降解; 挥发性有机化合物

中图分类号 X701.7

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0099-05

Evaluation of Influencing Factors of Biofiltration of Volatile Organic Compounds

WU Dan¹, LI Fayun¹, CHEN Xiaoyang², LIU Yonghui³,
LI Xia¹, LIU Qiang¹

1. Key Laboratory of Pollution Control and Environmental Remediation, Educational Committee of Liaoning Province; School of Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China

2. Institute of Environmental Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China

3. School of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract With the rapid industrial development, a large quantity

of Volatile Organic Compounds (VOCs) is released from various plants and industrial processes. VOCs have become the second most serious pollutants due to their serious harm and extensive source. The increasing presence of VOCs in the atmosphere has been one of today's considerable environmental problems. Conventional VOCs control technologies include incineration, condensation, adsorption, absorption technologies. Biofiltration of off-gases is a relatively new application of biological process in the waste management. Biofiltration used to be used to remove air streams contaminated with low concentrations of biologically degradable VOCs and is recognized as a cost-effective and promising technology with advantages of high efficiency, low cost and limited negative environmental effects. In this paper, a comparison between conventional technologies and biofiltration is made and the development of biofiltration of VOCs and main problems in removal of VOCs by biofilters are discussed. The main influencing factors, such as VOCs characteristics, packing media, water content, pH value, nutrients, bed temperature and microorganisms, are analyzed. Some suggestions on the prospect of biological removal of VOCs are made.

Keywords biofiltration; biodegradation; volatile organic compounds

收稿日期: 2009-06-29

基金项目: 辽宁大学青年基金项目; 国家自然科学基金项目(30570342); 辽宁省高校污染控制与环境修复重点实验室开放基金项目; 辽宁大学辽宁省重点学科与“211”工程重点学科经费项目

作者简介: 吴丹, 讲师, 研究方向为污染控制化学与技术, 电子信箱: danwu001@yahoo.cn

随着现代工业的迅速发展,大量有害物质被排放到大气中,其中,挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)以其来源广、危害大的特点而成为大气污染控制研究的热点领域之一。相较于传统的VOCs处理方法(如冷凝法、吸收法、吸附法、燃烧法等),生物法以其简单高效、能耗低、费用低、无二次污染等特点而越来越受到重视^[1]。

1 VOCs 废气主要处理方法

选择 VOCs 处理方法时主要根据挥发性有机污染物的来

源、种类、性质、浓度及具体的处理要求来确定。目前, VOCs 废气处理主要有物理与化学方法、生物法、物化法, 主要技术包括冷凝法、吸收法、吸附法、燃烧法(直接式/催化式燃烧)、膜分离法、光催化分解法、电晕法、等离子体分解法、臭氧分解法等。各种 VOCs 废气主要处理方法都具有其各自的适用范围和优缺点(表 1)。生物法主要工艺有生物过滤、生物滴滤、生物洗涤等, 其中生物过滤以其启动运行容易、操作简单、运行费用低、适用范围广、不会产生二次污染等特点成为普遍采用的 VOCs 处理工艺。

表 1 VOCs 废气处理方法比较

Table 1 Comparison of VOCs control technologies

处理技术	适用范围	优点	缺点
冷凝法	高浓度,高沸点,小气量,单组分	对高浓度单组分废气的处理费用低,回收率高	工艺复杂,复杂组分及中高挥发性组分回收率低,低浓度废气处理费用高
吸收法	大气量,高浓度,低温度,高压 VOCs	VOCs 处理效率高,处理气量大,工艺成熟	高温废气需降温,压力低时净化效率低;吸收剂需回收,易形成二次污染
吸附法	大气量,低浓度,净化要求高 VOCs	可处理复杂组分 VOCs 废气,应用范围广,净化率很高	运行费用高,吸附剂需再生,增加运行费用
燃烧法	成分复杂,高浓度,小气量 VOCs	能有效去除各种可燃 VOCs,工艺简单,效率高	设备易腐蚀,投资运行成本高,操作安全性差,产生二次污染
膜分离法	高浓度,小气量,有较高回收价值 VOCs	流程简单,回收率高,能耗低,无二次污染	设备投资费用高
臭氧分解法	低浓度,小气量 VOCs	对 VOCs 废气可氧化分解彻底,净化率高	能耗高,处理费用高,对人体和周围环境可造成危害;处于实验研究阶段
电晕法	低浓度广范围的 VOCs	处理效率高,运行费用低,特别对芳烃的去除效率高	对高浓度 VOCs 处理效率一般;还停留在实验室阶段
生物法	中低浓度,大气量可生物降解 VOCs	适用范围广,处理效率高,工艺简单,费用低,无二次污染	对高浓度、生物降解性差及难生物降解的 VOCs 去除率低

2 生物过滤法处理 VOCs 废气

最早提出采用微生物处理废气构想的是 Bach, 他于 1923 年曾利用土壤过滤床处理污水处理厂散发的含 H_2S 恶臭气体^[2]。使此想法得到进一步发展的是 Pomeroy, 他于 1957 年在美国申请了“开放式生物滤池”专利^[3], 并在欧洲 (主要是德国和荷兰) 运用生物过滤技术处理恶臭、有机和无机气态污染物^[4]。真正将生物过滤法应用到处理 VOCs 废气始于 20 世纪 80 年代。相对于国外, 中国生物过滤法处理废气的起步较晚, 于 20 世纪 90 年代初才开始这方面的研究。孙佩石等^[5]用生物法处理甲苯, 并尝试生物法处理工业废气。李国文等^[6-7]开展了生物过滤净化有机废气与动力学方面的研究。王灿等^[7]研究了白腐真菌生物过滤塔对氯苯气体的去除情况。刘永慧等^[8]开发设计分段式生物过滤床, 可成功净化甲苯和乙酸乙酯混合废气。对 NH_3 废气的生物处理, 陈英旭等^[9]取得了积极的成果。朱国营等^[10]对处理乙硫醇废气生物滤池中的微

生物进行了初步鉴定;席劲瑛等^[11]研究了微生物种群的代谢特性,而系统地对微生物菌落的分布及特性的研究极少。

目前,国内外有关生物过滤处理 VOCs 废气的研究主要集中于生物过滤法在实际应用中最佳参数系统的筛选与影响因素的评价、高浓度或难生物降解 VOCs 处理、微生物菌落特征、动力学等方面。

虽然生物过滤处理在处理既无回收价值又严重污染环境的中低浓度、生物降解性好的 VOCs 时具有良好的适用性和经济性,但其在处理 VOCs 仍存在较多的问题,如:对高浓度或难降解 VOCs 的去除效率差,填料使用寿命短、酸化、压实、营养缺乏等,从而影响 VOCs 生物处理性能。

3 生物过滤法处理 VOCs 废气的主要影响因素

3.1 底物 VOCs 性质

底物 VOCs 结构和性质是生物法处理 VOCs 中至关重要

的影响因素。VOCs 的结构性质决定了其是否能被微生物降解及其降解程度,同时也决定了 VOCs 中各化合物的生物降解优先顺序。Hartmans^[12]指出,VOCs 可生化降解强烈依赖于碳氢化合物上的杂原子取代基。Delhoménie 等^[13]指出,甲基化芳环化合物比卤化芳环化合物更易被生物所降解。而且在多种 VOCs 同时降解过程中有明显的竞争和抑制现象发生。这种抑制往往是亲水性污染物的存在对疏水性污染物的抑制,或者易降解污染物的存在对难降解污染物的抑制。目前对此限制机制还不是很明确。Deshusses 等^[14]采用生物过滤法处理乙酸乙酯和甲苯混合废气时,发现高负荷乙酸乙酯的存在抑制了甲苯的去除。相对于竞争和抑制现象,共代谢现象也存在于生物过滤法处理混合 VOCs 废气中。Den 等^[15]发现丙酮的存在抑制了三氯乙烯和甲苯的生物降解,而甲苯的存在促进了共代谢作用,提高了三氯乙烯的生物降解。

可见,底物的结构和性质是造成混合 VOCs 废气生物处理过程中的竞争和抑制的关键因素之一。所以应根据底物的性质,采取有效的方法合理地设计操作工艺和操作条件,从而改善在生物法处理混合 VOCs 废气中的竞争和抑制作用。

3.2 填料

3.2.1 填料的选择

填料是生物过滤器的主体部分,生物过滤器处理 VOCs 的成功主要依赖于填料,它可以为微生物提供最佳的生存环境以达到和维持高的生物降解速率。

生物过滤填料从性质可分为有机(活性)填料和无机(惰性)填料。有机活性填料本身具有丰富的微生物及微生物所需营养(氮、磷等),且具有较好的比表面积。一般常用有机填料作为主要填料,如土壤、堆肥、泥煤、树皮或其混合物。许多研究表明有机填料处理 VOCs 可取得很好成果^[16-18]。但有机填料也有不足,主要是由于有机填料的矿化,使填料床发生压实和堵塞,缩短填料使用寿命,也称为老化现象,从而减短了工程应用时填料的更换时间。针对这种情况,20 世纪 80 年代后期无机填料逐渐出现。常用的无机填料有珍珠岩、火山岩、蛭石、陶瓷、玻璃珠、聚亚胺酯泡沫、聚乙烯球等。无机(惰性)填料也可单独作为生物法处理 VOCs 的填料,但需额外添加营养。因此,无机(惰性)填料多用于生物滴滤法处理废气中,且它也没有丰富的生物相,需从外界接种微生物。

将有机填料与无机填料混合作为生物过滤填料,使其具有有机填料优点的同时,减少了压实,降低了床层压降,避免了沟流,填料使用寿命从原来 2~4 a 提高到 5 a 多^[19]。无机填料与有机填料混合时一般占体积比为 40%~60%。

3.2.2 填料湿度

填料湿度是生物过滤法处理 VOCs 的一个关键参数。Ranasinghe 等^[20]指出,填料湿度是最可能影响生物过滤器性能的参数。当湿度过高时,会产生高的床层压降、低的气体停留时间;同时由于减少了单位体积生物膜上气/液接触,氧气不能有效地传递到生物膜内,使填料局部形成厌氧区,从而降低了微生物对污染物的降解速率,可能产生恶臭气体。另

外,湿度过大还会将填料中的营养物质从填料中冲刷下来,降低了反应器性能。而湿度过小会引起降解微生物失活;填料会裂开,使气体产生沟流,减少气体与生物膜接触时间。一旦填料的湿度过低,重新增湿是很困难的,特别是对于有机填料。据有关报道^[21],生物过滤法处理废气过程中,75%的问题是由于湿度控制不当引起的。

对于生物过滤法,填料的适宜湿度要根据需要处理的底物和所选填料的性质来决定。一般在以有机填料为主体填料的生物过滤器中,填料湿度范围为 30%~80%(重量)是可行的,适宜范围在 40%~60%^[22]。为了维持生物过滤器良好的性能,废气进入过滤器前需增湿,使其相对湿度达到 95%以上,或者适当地向过滤器提供额外的水。目前添加水的方式主要是由过滤器顶部向填料喷洒水。

3.2.3 填料 pH 值

微生物在生物过滤反应器处理 VOCs 中起着主导作用,从而影响微生物生长的 pH 值成为生物过滤法处理 VOCs 废气的重要影响因素。由于大部分微生物在中性(pH=7~8)条件下生长良好,所以在生物过滤处理废气过程中要避免填料发生酸化现象。而有些 VOCs 物质由于其本身的结构使其在生物降解过程中必然产生酸性物质。这些物质在填料中累积,最终发生酸化现象,导致反应器性能下降。Smet 等^[23]采用生物过滤法处理甲基硫化物(甲基硫和二甲基硫)发现,随着填料 pH 值降低,甲基硫化物的去除负荷逐渐减少。而当填料 pH 值降到 4.7 时,二甲基硫的去除几乎大部分被限制。

防止填料酸化通常采用的方法有:①在填料中混合酸化缓冲物质,如石灰、石灰石粉末、火山岩、碎的牡蛎壳、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 Na_2HPO_4 、 NaHCO_3 和 NaOH 等;②在填料上部喷洒酸性缓冲营养盐。

尽管大多数研究认为中性条件是 VOCs 生物处理的适宜 pH 值条件,但是也有研究提出酸性条件下也可进行 VOCs 生物处理。此时一般是真菌在起主导作用。Arriaga 等^[24]在不同 pH 的生物反应器中处理正己烷,结果显示,在酸性条件下(pH=4)的最大去除负荷($150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)是在中性条件下(pH=7)的 2 倍。目前已发展出很多低 pH 值生物过滤器处理 VOCs。

3.2.4 填料营养

填料中的营养是生物反应器中微生物生长代谢和保持良好活性的重要条件。营养物质主要包括氮、磷和无机盐,对于有机填料来说,磷和无机盐一般不会产生严重缺乏。在生物过滤处理 VOCs 过程中,由于可溶性氮(主要为 NH_4^+ 和 NO_3^-)被利用消耗,并有部分可溶性氮通过沥滤液损失掉,而且有机氮的矿化速率小于可溶性氮被利用速率,因此常出现氮的限制。目前对填料营养的研究主要集中在氮的研究。

Dshusses 等^[25]指出,目前在生物过滤过程中营养的添加是一有争议的问题。Baltzis 等^[26]认为,尽管添加营养还处在研究阶段,但是没有足够的证据能明确地证明它能真正影响生物过滤过程。然而,一些研究报道了氮的添加对生物过滤器性能的影响。Son 等^[27]采用陶瓷鞍环和锯屑的混合物作为填

料,对甲基异戊基甲酮进行生物过滤处理,发现在营养限制条件下,甲基异戊基甲酮的去除率逐渐减少,但额外添加营养(KNO_3 和 KH_2PO_4)后,去除率从 55% 增加到 93%。

Jorio 等^[28]指出,采用氨作为氮源时,生物法处理苯乙烯的去除效果比硝酸盐作氮源时的效果好,但同时也产生微生物过量生长,引起填料堵塞。有报道指出,连续提供营养可能导致不良问题,如生物量过量生长,堵塞填料,而间歇提供营养可以补充缺乏的营养或暂时改善生物过滤器性能^[25]。

虽然很多研究^[29-32]指出,在生物过滤处理 VOCs 过程中额外氮营养的添加是必要的,但是对氮营养缺乏的临界浓度和需额外添加的最佳氮营养量还没有统一标准,这可能是由于不同的研究者在不同的研究过程中会产生不同的研究结果造成的。

3.3 温度

温度也影响生物过滤反应器的性能。一般可接受的生物过滤器床层温度为 10~42℃,最佳的微生物活性温度范围是 30~35℃。床层温度超出 10~45℃ 时,可能会导致对污染物的去除下降。低温废气需加热,而高温废气需冷却,这也增加了操作费用。个别地考虑到废气温度或气候条件,在高温或低温下运行生物过滤器也是可能的,甚至是必要的。Matteau 等^[33]采用堆肥生物过滤器嗜热阶段处理甲苯,发现在高废气浓度下,堆肥生物过滤器在嗜热阶段对甲苯具有较高的去除负荷。而 Darlington 等^[34]采用活植物填料的生物过滤器处理室内空气中甲苯、乙苯和二甲苯时,最佳去除温度低于 20℃。此低温下,微生物活性降低而去除率高说明 VOCs 去除效果不是受微生物活性限制,而是受底物扩散限制。

生物法处理 VOCs 时,适宜温度的选择和控制要根据所选填料及其中的微生物和 VOCs 性质决定。此外,微生物降解污染物是一放热过程,也会使床层温度升高。

3.4 氧气

氧气是否是生物过滤法处理 VOCs 废气的限制因素有不同的研究报道。Shareefdeen 等^[35]指出生物过滤器处理甲醇过程受氧气扩散和甲醇的降解动力学行为限制。Cox 等^[36]指出氧气在生物反应器处理高浓度苯乙烯时是限制因素。然而, Deshusses 等^[37]研究发现随着氧气浓度的增加,甲基乙基酮和甲基异丁基酮的生物降解并没有明显增加。由此看来,氧气的限制作用是在一定的条件下发生的。

目前,关于生物处理 VOCs 中氧气限制的报道很少,这因为生物过滤反应器一般是处理大气量低浓度 VOCs 废气,一般认为氧气是足够的。而从以上报道可经验地认为氧气限制一般发生在高浓度或高污染负荷下,或者发生在形成的生物膜厚的反应器中。此外,填料湿度过大会存在氧气限制而使填料产生厌氧区,使生物过滤反应器性能下降。所以,生物过滤反应器在实际操作中要避免出现厌氧区。

3.5 微生物

微生物是生物过滤处理 VOCs 的关键因素^[38]。处理 VOCs 菌群一般为混合菌群,有细菌、真菌和一些更高等生物体。在

反应器中占主体的多为异氧型微生物,以细菌为主,其次为真菌,还有放线菌和酵母。生物过滤器中微生物种群一般是由接种微生物、所处理的 VOCs 以及填料的性质决定的,其生长受营养、湿度、pH 值、温度、氧含量等影响。

生物过滤器中微生物在处理 VOCs 废气时一般要经过一个驯化期。驯化时间的长短与 VOCs 以及填料性质有关。一般,易降解的 VOCs 所需驯化时间短,较难降解 VOCs 的驯化期比较长。大部分 VOCs 在某种程度上都对微生物降解有抵制,因此在大部分情况下,微生物接种是必要的。为了更好的废气处理效果,在填料上接种专项菌或发展真菌来处理 VOCs 的技术逐渐发展起来。

Hoa 等^[39]采用接种 *Paracoccus* sp. CP2 和 *Arthrobacter* sp. CP1 的活性炭生物过滤器降解三甲胺、二甲胺和甲胺。在高负荷下,3 种污染物的去除率分别>93%、>90%、>85%。Arriaga 等^[40]通过加强反应器中真菌的生长改善正己烷的去除。结果发现,当入口浓度负荷增加时,酸性条件下的正己烷最大去除负荷是在中性条件下的 2 倍。从填料表面扫描电镜看出,中性条件下的填料表面微生物形态有细菌、酵母、孢子和菌丝体混合菌,而酸性条件下填料表面以真菌菌丝体和孢子占主导,并分离出 *cladosporium* 和 *Fusarium* spp. 两株真菌。由此可见,选择和培养合适的高效微生物对生物过滤处理 VOCs 起着至关重要的作用。

生物过滤器填料中微生物菌群的分布、特性、结构变化等等也有少量的研究。Beer 等^[41]评价了氧气在生物膜三维通道中的传递,指出大约占总氧量 50% 的氧是通过这样的孔道和空间传递到生物膜内的。这就可以解释污染物的主要降解是贯穿整个生物膜的,而不是只发生在气-液界面。

另外,由于直接研究生物过滤反应器中微生物特征和生物膜结构特征有困难,所以一些研究集中在间接测定或通过总体微生物参数,如蛋白质含量或呼吸速率来研究微生物膜的微观特征。总体来看,由于目前生物技术的限制,对反应器中微生物的分布、密度以及生物膜结构特征的研究还是有限的。

4 展望

生物过滤法已逐渐成为净化有机废气和恶臭物质的主要方法及具有前景的应用技术之一,越来越引起人们的关注。但仍有许多方面需要进一步深入研究,例如:

- 1) 多组分复杂 VOCs 混合废气的去除,特别是高负荷或难生物降解 VOCs 的处理;
- 2) 复杂的微生物生态研究,包括微生物菌落分布及特征、微观结构及特性、生物量定量等;
- 3) 污染物、营养物质(如氮)和氧气的利用与平衡循环;
- 4) 生物过滤法处理实际废气过程中填料的寿命(酸化、压实、营养缺乏等)、最佳工艺运行参数的筛选与确定;
- 5) 生物降解机制及动力学研究,尤其是微观动力学方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] Álvarez-Hornos F J, Gabaldón C, Martínez-Soria V, *et al.* Biofiltration of ethylbenzene vapours: Influence of the packing material [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(2): 269–276.
- [2] Bach H. Schwefel im abwasser [J]. *Gesundheits-Ingenieur*, 1923, 46, 370.
- [3] Pomeroy R D. De-odorizing of gas streams by the use of microbial growths: US, 2793096[P]. 1957.
- [4] Ottengraf S P P. Exhaust gas purification [J]. *Biotechnology*, 1986, 8: 427–452.
- [5] 孙佩石, 杨显万, 黄若华, 等. 生物膜填料塔净化有机废气研究 [J]. 中国环境科学, 1996, 16(2): 92–95.
Sun Peishi, Yang Xianwan, Huang Ruohua, *et al.* *China Environmental Science*, 1996, 16(2): 92–95.
- [6] 李国文, 胡洪营, 郝吉明, 等. 生物滴滤塔中挥发性有机物降解模型及应用[J]. 中国环境科学, 2001, 21(1): 81–84.
Li Guowen, Hu Hongying, Hao Jiming, *et al.* *China Environmental Science*, 2001, 21(1): 81–84.
- [7] 王灿, 席劲瑛, 胡洪营, 等. 白腐真菌生物过滤塔处理氯苯气体的研究 [J]. 环境科学, 2008, 29(2): 500–505.
Wang Can, Xi Jinying, Hu Hongying, *et al.* *Environmental Science*, 2008, 29(2): 500–505.
- [8] 刘永慧, 孙玉梅, 全雯. 生物过滤床处理甲苯和乙酸乙酯混合废气[J]. 化工学报, 2002, 53(8): 853–856.
Liu Yonghui, Sun Yumei, Quan Xie. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2002, 53(8): 853–856.
- [9] 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.
- [10] 朱国营, 刘俊新. 处理乙硫醇废气生物滤池中微生物的初步鉴定[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 333–337.
Zhu Guoying, Liu Junxin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2): 333–337.
- [11] 席劲瑛, 胡洪营, 姜健. 生物过滤塔中微生物菌落的代谢特性 [J]. 环境科学, 2005, 26(4): 165–170.
Xi Jinying, Hu Hongying, Jiang Jian. *Environmental Science*, 2005, 26(4): 165–170.
- [12] Hartmans S. Microbiological aspects of biological waste gas cleaning[C] //VDI Berichte–Verien Deutscher Ingenieure, 1994, 1104: 1–12.
- [13] Delhoménie M C, Heitz M. Elimination of chlorobenzene vapors from air in a compost-based biofilter [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003, 78(5): 588–595.
- [14] Deshusses M, Johnson C T. Biofiltration of high loads of ethyl acetate in the presence of toluene [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, 49(8): 973–979.
- [15] Den W, Ravindran V, Pirbazari M. Biofiltration of chlorinated volatile organic compounds: Laboratory scale and pilot-scale studies[EB/OL]. <http://aiche.confex.com/aiche/2005/techprogram/P32460.HTM>, 2005.
- [16] Jorio H, Kiarad K, Brzezinski R, *et al.* Treatment of air polluted with high concentrations of toluene and xylene in a pilot-scale biofilter[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1998, 73(3): 183–196.
- [17] Wu G, Chabot J C, Caron J J, *et al.* Biological elimination of volatiles organic compounds from waste gases in a biofilter [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1998, 101(1): 69–78.
- [18] Coutu C, Martineau G, Guy C. Characterization of an organic filter medium for the biofiltration treatment of air contaminated with 1,2-dichlorobenzene[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003, 78(8): 907–917.
- [19] Swanson W J, Loehr R C. Biofiltration: Fundamentals, design and operations principles and applications [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(6): 538–546.
- [20] Ranasinghe M A, Gostomski P A. A novel reactor for exploring the effect of water content on biofilter degradation rates [J]. *Environmental Progress*, 2003, 22(2): 103–109.
- [21] Heather J C, Connor M A. Practical experience with an industrial biofilter treating solvent vapor loads of varying magnitude and composition[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1997, 69(11): 2411–2424.
- [22] McNevin D, Barford J. Biofiltration as an odour abatement strategy[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2000, 5(2): 231–242.
- [23] Smet E, Chasaya G, van Langenhove H, *et al.* The effect of inoculation and the type of carrier material used on the biofiltration of methyl sulphides[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, 45(1–2): 293–298.
- [24] Arriaga S, Revah S. Improving hexane removal by enhancing fungal development in a microbial consortium biofilter [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 90(1): 107–115.
- [25] Deshusses M A. Biological waste air treatment in biofilters [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3):335–339.
- [26] Baltzis B C. Biofiltration of VOC vapors[C]//Lewandowski G A, DeFilippi L J. *Biological Treatment of Hazardous Wastes*. New York: John Wiley & Sons, 1998: 119–150.
- [27] Son H K, Striebig B A, Regan R W. Nutrient limitations during the biofiltration of methyl isoamyl ketone[J]. *Environmental Progress*, 2005, 24(1): 75–81.
- [28] Jorio H, Bibeau L, Heitz M. Biofiltration of air contaminated by styrene: Effect of nitrogen supply, gas flow rate, and inlet concentration [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(9): 1764–1771.
- [29] Delhoménie M C, Bibeau L, Roy S, *et al.* Influence of nitrogen on the degradation of toluene in a compost-based biofilter [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2001, 76(9): 997–1006.
- [30] De heyder B, Van Elst T, Van Langenhove H, *et al.* Enhancement of ethene removal from waste gas by stimulating nitrification [J]. *Biodegradation*, 1997, 8(1): 21–30.
- [31] Moe W, Irvine R L. Effect of nitrogen limitation on performance of toluene degrading biofilters[J]. *Wat. Res.*, 2001, 35(6): 1407–1414.
- [32] Song J, Ramirez J, Kinney K A. Nitrogen utilization in a vapor-phase biofilter[J]. *Water Research*, 2003, 37(18): 4497–4505.
- [33] Matteau Y, Ramsay B. Thermophilic toluene biofiltration [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, 49(3): 350–354.
- [34] Darlington A, Dat J F, Dixon M A. The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene, and xylene [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(1): 240–246.
- [35] Shareefdeen Z, Baltzis B C, Bartha R, *et al.* Biofiltration of methanol vapor[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1993, 41(5): 512–524.
- [36] Cox H H J, Moerman R E, Van Baalen S, *et al.* Performance of a styrene-degrading biofilter containing the yeast *exophiala jeanselmei*[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, 53(3): 259–266.
- [37] Deshusses M A, Hamer G, Dunn I J. Transient-state behavior of a biofilter removing mixtures of vapors of MEK and MIBK from air[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, 49(5): 587–598.
- [38] Chung Y C, Ho K L, Tseng C P. Two-stage biofilter for effective NH₃ removal from waste gases containing high concentrations of H₂S[J]. *J Air Waste Manage*, 2007, 57(3): 337–347.
- [39] Hoa K L, Chung Y C, Lin Y H, *et al.* Biofiltration of trimethylamine, dimethylamine, and methylamine by immobilized *Paracoccus* sp. CP2 and *Arthrobacter* sp. CP1[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(2): 250–256.
- [40] Arriaga S, Revah S. Improving hexane removal by enhancing fungal development in a microbial consortium biofilter [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 90(1): 107–115.
- [41] De Beer D, Stoodley P, Roe F, *et al.* Effect of biofilm structures on oxygen distribution and mass transport [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, 43(11): 1131–1138.

(责任编辑 吴晓丽)