

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2021.0006.001

# 生物滴滤工艺处理疏水性 VOCs 的研究进展\*

李艳萍, 姜岩\*\*

(重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067)

**摘要:**针对疏水性挥发有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)在生物处理过程中传质性能差的问题,剖析了疏水性 VOCs 在生物滴滤器(Biotrickling Filters, BTFs)中的传质理论和净化机制,综述了甲苯、苯乙烯等疏水性 VOCs 在不同 BTFs 中的传质特性;同时,指出添加表面活性剂、升级 BTFs 结构和工艺、优化影响传质的工艺参数等最新研究进展,将成为解决 VOCs,特别是疏水性 VOCs 传质问题的有效手段;通过解决 VOCs 的传质问题,可以提高 BTFs 的工作性能,从而促进 BTFs 传质理论及核心技术的发展,推动该技术向应用型转化,解决多门类疏水性 VOCs 的无害化处置难题。

**关键词:**生物滴滤法;传质;疏水性挥发性有机物;表面活性剂

**中图分类号:**X511;Q 819

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-058X(2021)06-0001-07

## 0 引言

疏水性 VOCs 通过各种工业活动释放到大气中,工业上对于商用疏水化合物的大量使用增加了 VOCs 的总排放量<sup>[1]</sup>。烷烃、环烷烃、苯系物等疏水性 VOCs 主要来自石化和有机精细化工等加工工业,据统计,仅 2015 年我国工业源 VOCs 的总产生量就达到  $1.075 \times 10^7 \text{t}^{[2-3]}$ 。在欧盟,每年向空气中排放的苯和甲苯分别为 79 kt 和 976 kt,约占非甲烷 VOCs 总排放量的 0.02% 和 3%<sup>[4]</sup>。早在 20 世纪 90 年代初,欧美国家就开始限制 VOCs 的人为排放<sup>[2]</sup>。2002 年, Klimont 等<sup>[5]</sup>在我国建立了省级水平的全国分布 VOCs 人为源排放清单。之后我国对于工业废气的排放也制定了《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015)、《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571-2015)等标准<sup>[6]</sup>。可见,各

类工业废气,尤其是疏水性 VOCs 的回收与处置在国内外受到越来越多的关注,亟待开发行之有效的处理技术。

目前,生物法用于处理低浓度 VOCs 被认为是最具潜力的处理方法<sup>[7]</sup>,主要有生物洗涤、生物过滤及 BTFs。其中,生物洗涤法处理水溶性 VOCs 的效果较好,但其应用范围窄;BTFs 则是在生物过滤法基础上发展起来的当前主流技术,规避了生物洗涤和生物过滤的不足,使处理工艺更易实现受控,如反应温度和酸碱控制等。而且,由于流动液相的存在,使 BTFs 内沿线的压降更低,在疏水性 VOCs 的生物处置中展现出良好的应用前景。近年来,利用 BTFs 处理疏水性 VOCs 的研究已经成为发展趋势,但该技术也暴露出明显不足<sup>[6]</sup>:其一,疏水性 VOCs 与生物膜间的传质;其二,溶氧伴随着 VOCs 与生物膜的传质。这两方面制约了高浓度或难溶性 VOCs 的处置效果。因此,BTFs 工艺不断创新,如 San-

收稿日期:2021-01-04;修回日期:2021-03-01.

\* 基金项目:重庆市科技创新与应用发展专项(CSTC2019JSCX-MSXMX0275);重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K201900804);国家自然科学基金项目(21376285);重庆工商大学开放课题(FYKFX201901).

作者简介:李艳萍(1994—),女,四川眉山人,硕士研究生,从事环境生物处理技术研究.

\*\* 通讯作者:姜岩(1971—),男,山东烟台人,教授,博士,从事环境生物处理技术研究. Email:jiangyan@ctbu.edu.cn.

Valero 等<sup>[8]</sup>将 BTFs 与两相分离生物反应器(TPPB)联用,与传统的 BTFs 相比,TPPB-BTFs 对苯乙烯的去除率高且稳定性明显更好。与此同时,各类表面活性剂也在不断被开发应用<sup>[9-11]</sup>。

以传质特性为切入,论述了 BTFs 内的主流传质理论,针对影响 VOCs 传质的两大关键问题,提出了 BTFs 结构优化与升级以及表面活性剂等助剂的应用,将成为促进传质、提高 BTFs 工作性能的有效手段,也是推动该技术向实用化发展的有效途径。

## 1 BTFs 处理 VOCs 的主流理论

在 BTFs 中,疏水性 VOCs 和氧气通过浓度梯度差直接进入水相,再与氮、磷等生长因子一起供给生物膜,最后在生物膜上实现污染物的吸收和降解,转化为  $\text{CO}_2$  或其他具有简单化学结构的中间体<sup>[12-13]</sup>;同时,细胞代谢生成的生物质与释放的能量再次形成新的生物膜。可见,VOCs 从气相经过水相到达生物膜的这一传质过程成为研究 BTFs 作用机制的关键问题。实际工业废气门类繁多,不乏乙烷、戊烷、己烷、环己烷等各类疏水性组分,更有一些疏水性极强的组分广泛存在,如三氯乙烯、氯苯、BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)及苯乙烯等,由于传质限制,致使这些污染物的生物利用度较低。当前,围绕不同疏水特性 VOCs 及氧气在 BTFs 内的传质和降解机制提出了多种模型。Moreno-Casas 等<sup>[14]</sup>针对气液对流传质建立了模型并用于预测 VOCs 的传质系数。Estrada 等<sup>[15]</sup>基于标准化的动态分析方法建立了可表征 BTFs 中氧传质的数学模型。Dumont 等<sup>[16]</sup>和 Dupnock 等<sup>[17]</sup>建立的模型都是用于阐述传质等作用机制。但这些模型都具有较强的针对性,应用并不多。当前,围绕 BTFs 内的传质问题主要存在两种较为成熟的主流理论。

一种是由荷兰学者 Ottengraf 等<sup>[18]</sup>提出的“吸收-生物膜”理论,另一种则是由中国学者孙佩石等<sup>[19]</sup>提出的“吸附-生物膜”理论。二者的主要差别在于,水在 BTFs 中是作为反应物质参与生化反应,还是仅作为溶剂<sup>[20]</sup>。前者认为 VOCs 首先由气膜扩散溶于液膜中,然后在浓度梯度差的推动作用下进入生物膜;后者则认为,由于大多数的 VOCs 是疏水特性的,其与微生物接触的方式是通过气膜直接吸附于湿润的生物膜表面。如图 1 所示,污染物

主要通过溶解吸收或接触吸附两种途径到达生物膜表面,被微生物降解生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,部分转化或合成新的生物膜,部分则被厌氧发酵成一些低分子量的脂肪酸而导致 PH 下降<sup>[9-10]</sup>。可见,无论哪一种理论,均证实 VOCs 的亲水性直接影响着多相体系间气相的传质速率,特别是对于疏水性组分的去除,传质效率直接影响着 BTFs 的工作性能;同时,BTFs 的关键工艺控制也对 VOCs 的传质产生重要影响。

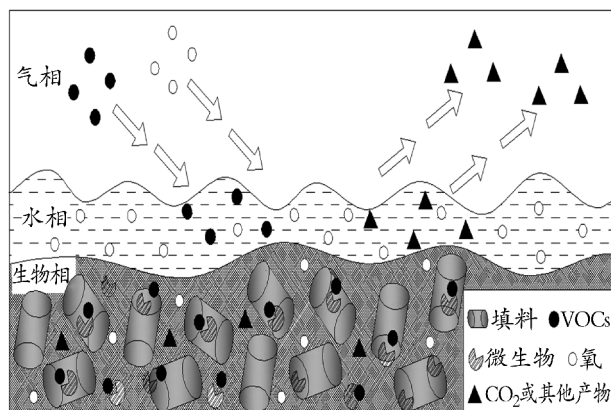


图 1 生物法净化 VOCs 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of biological VOCs purification

## 2 BTFs 处理疏水性 VOCs 的核心工艺发展

BTFs 的结构特点影响了气、液、固三相在滴滤塔内的传质行为以及生化降解反应过程。在有限的研究报道中,BTFs 的设计受到高度关注。从早期的单塔滴滤系统到后来双塔滴滤系统,再到转鼓生物滴滤系统(RDBF)等不断升级,有效提高了 VOCs 在塔内的传质效率。常用的生物滴滤工艺如表 1 所示。对于 RDBF, Lim 等<sup>[24]</sup>的研究具有代表性。这种优异的性能不仅归功于 RDBF 系统中气液十字流交叉式接触,在转鼓过程中也有利于气液传质和适当的营养液供应,显著提高了气液传质效率并保证了微生物的均匀生长。近年来,随着 TPPBs 的不断成熟,促进了 BTFs 技术的不断发展。Groenestijn 等<sup>[27]</sup>将 TPPBs 应用于 BTFs 中,系统运行 8 个月未发生堵塞现象,高浓度己烷的去除率达到了 89%。该技术在 BTFs 中的应用有效克服了传统 BTFs 存在的 VOCs 传质、高浓度 VOCs 或有毒代谢物对微生

物的抑制作用等问题。

课题组也在探索开发新型反应器,自主设计委托加工了一套可串并联转换的 BTFs 系统,如图2所示,该套系统主体单元塔高为 120 cm、塔径 15 cm,由于部分单元设置了加热保温系统,可以在环境温度较低时开展相关研究,利用该套系统可同时研究不同的 VOCs 和填料等的处理效果,也可采用串联

的方式研究某种难降解 VOCs 的处理。BTFs 结构的不断创新在一定程度上改善了疏水性 VOCs 的传质特性。图2中序号标注如下:1为空气泵;2为增湿器;3为气体流量计;4为挥发瓶;5为混合罐;6为滴滤床;7为进气采样口;8为出气采样口;9为压差;10为液体流量计;11为 pH 探头;12为营养桶;13为循环泵。

表1 常用的生物滴滤工艺

Table 1 Commonly used biological drip filtration process

BTFs 类型	处理效果	优缺点
立式 <sup>[21]</sup>	BTFs 对混合废气中苯的降解效率为 47%,对总烃去除率为 53%	微生物生长不均匀,这种现象导致反应堆内的局部压力增加,扰乱了液体或气体的均匀流动
卧式 <sup>[22]</sup>	一定条件下,甲苯的去除率接近 100%,短期停机实验恢复较快	与立式 BTF 相比,强化了气液传质及生物降解能力,单位体积填料的负荷能力提高
板式 <sup>[23]</sup>	与传统 BTFs 相比,净化硫化氢、四氢呋喃和二氯甲烷混合废气挂膜时间缩短了 6 d,且去除率提高了 5%~10%	实现“板内”污染负荷和生物量均匀分布,“板间”生物填料和菌种的差异化分布
转鼓式 <sup>[24]</sup>	苯乙烯的去除率达到 95%且稳定	微生物生长均匀,具有较高的传质速率
TPPB-BTFs <sup>[25]</sup>	传质性能是传统 BTFs 的 1.6 倍	改善传统 BTFs 降解疏水性 VOCs 的传质性能
UV-BTFs <sup>[26]</sup>	紫外预处理增强了苯乙烯矿化,矿化率从 74.7% 提高到 86.2%。减少了 BTFs 的启动时间	该技术在处理高污染物负荷时更有效,且没有不稳定迹象
低温等离子体-BTFs <sup>[21]</sup>	比单独生物滴滤的效率 8% 左右	大大减小了浓度的变化对 BTFs 的冲击作用

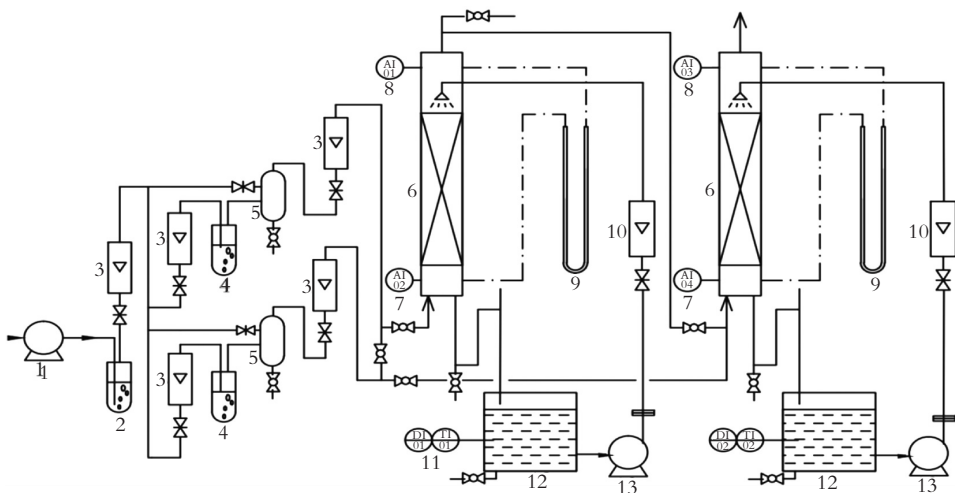


图2 新型串并联双系统生物滴滤床工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of a novel series-parallel dual-system biological drip bed

### 3 表面活性剂的开发推动 BTFs 发展

针对疏水性 VOCs,还出现了添加表面活性剂和 NAP、使用真菌生物反应器、预处理等手段促进传质

的研究<sup>[1,12]</sup>,尤其是表面活性剂的使用得到了高度关注。表面活性剂的作用主要体现在促进疏水性 VOCs 的传质,提高其生物利用度以及为微生物提供共代谢碳源两个方面。如图3所示,亲水基伸向水中,憎水基伸向空气,通过在水表面形成一层碳氢

链来降低气液两相间的传质阻力,当表面活性剂浓度到达临界胶束浓度(CMC)时,便开始形成胶束,进而增大其传质效率<sup>[9]</sup>。

一些研究报道了阴离子型表面活性剂 SDS,但 SDS 毒性大,使用不慎会严重降低生化体系的性能;因此,低毒性且易被生物降解的 Tween 系列、Triton X-100 等非离子型表面活性剂成为助剂研发的重点<sup>[9,28]</sup>。此外,生物表面活性剂因具有较低的毒性或无毒性、较高的生物降解性等优势而具有一定发展潜力,其中鼠李糖脂的应用最为广泛。常用的表面活性剂如表 2 所示。

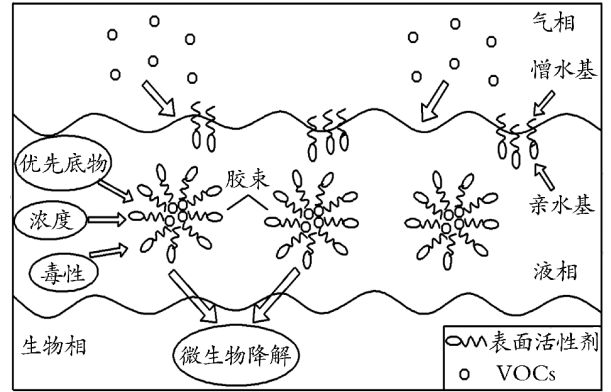


图 3 表面活性剂促进传质的机制

Fig. 3 Surfactant promotes mass transfer mechanism

表 2 常用表面活性剂及其特点

Table 2 Common surfactants and their characteristics

类型	表面活性剂	处理结果	优缺点
生物表面活性剂	紫苏酸(由荧光假单胞菌 PT 产生) <sup>[29]</sup>	对正己烷的乳化指数达到 40% ~ 60%,对菲、萘、蒽在水中溶解度分别提高了 2.65%、6.07% 和 10.0%	乳化性能好,能乳化不同类别的疏水性物质
	鼠李糖脂(主要由铜绿假单胞菌产生) <sup>[15]</sup>	对于乙苯废气的去除,生物膜表面疏水性从 68.2% 上升为 89.7%	亲水亲油平衡值较高,具有很好的增溶效果及使用潜力,种类多、功能广
	浅褐色疏松状固体(由地衣芽孢杆菌产生) <sup>[30]</sup>	正己烷浓度为 132 mg/L 时,正己烷两天去除率达到 60%	表面活性强,高度下该生物表面活性剂也能降低表面张力,促进菌株对正己烷的利用
	皂角苷 <sup>[31]</sup>	对正己烷的最大去除容提高了 20 g/(m <sup>3</sup> ·h)	来源广、性能优、价格低廉、无污染
非离子表面活性剂	Alfonic <sup>®</sup> 810-60 <sup>[32]</sup>	在一定条件下,三氯乙烯和四氯乙烯的去除率分别可达 100%	对 VOCs 的去除有一定的促进作用,但不易回收
	Tween-20 <sup>[9]</sup>	Tween-20 的最佳浓度位于 7.368 mg/L,乙苯的最高去除率达 85%	产量大,价格低廉,毒性相对较小,比其他吐温系列更温和
	Triton X-100 <sup>[28]</sup>	对不同浓度苯乙烯的去除率都有相应的提高,最大去除率达 97%	生产量较大、价格低廉且毒性较小
	Tween-80 <sup>[33]</sup>	加入表面活性剂后,对间二甲苯的去除率提高了 20%	能更大程度地降低气液阻力,优于 SDS,且毒性小于 SDS
	脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO) <sup>[34]</sup>	对正己烷的去除率高达 90%	能促进正己烷的降解,同时还能限制生物量,保证气流顺畅
阴离子表面活性剂	十二烷基磺酸钠(SDS) <sup>[14]</sup>	对正己烷的去除率 43% 提高到 60%	促进挂膜速度,可被生物降解,一定浓度内毒性可忽略不计
	十二烷基硫酸钠(SDS) <sup>[35]</sup>	添加后对氯苯的去除率提高了 21%,高达 97%	有效提高了 BTF 的工作性能,有一定的毒性
阳离子表面活性剂	十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB) <sup>[36]</sup>	未检测到实验瓶中的细菌数,抑制了细菌的生长	对微生物产生了抑制作用且不易被降解,同时还会干扰细菌同碳源氯苯的接触并抑制了其氯苯的降解能力



## 4 结束语

BTFs 在处理低浓度疏水性 VOCs 方面具有发展潜力。除了菌种这一核心要素外,主要限制因素是传质问题,滴滤塔的结构、表面活性剂等都会对 VOCs 和溶氧的传质特性产生重要影响。首先,BTFs 结构不断创新,从最初简单的单塔结构到后来的双塔结构、RDBF 以及 TPPB-BTFs 系统,无论是 BTFs 系统外部还是内部结构的改变,都对传质特性及去除效率起到一定作用。其次,表面活性剂可以起到增溶促传质的功效,对疏水性 VOCs 的传质特性有明显改善。对于表面活性剂,非离子型及生物型表面活性剂得到关注,不仅能有效提高传质性能且对环境危害极小,但生物表面活性剂成本较高限制其应用,开发能够降解疏水性 VOCs,同时又可以代谢产生表面活性剂的菌株,是切实可行的发展策略。总体而言,围绕这几个方面强化 VOCs 在 BTFs 内的传质已经成为共识。

## 参考文献 (References):

- [1] CHENG Y, HH H, YANG C, et al. Challenges and Solutions for Biofiltration of Hydrophobic Volatile Organic Compounds[J]. *Biotechnology Advances*, 2016:1091—1102
- [2] 刘鑫,徐丽,王灏瀚. 关于 VOCs 有机废气处理技术研究进展[J]. *四川化工*, 2016, 19(4): 12—16  
LIU X, XU L, WANG H H. About the Research Progress of VOCs Organic Waste Gas Treatment Technology[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2016, 19(4): 12—16(in Chinese)
- [3] PARNIAN P, ZAMIR S M, SHOJAOSADATI S A. Styrene Vapor Mass Transfer in a Biotrickling Filter: Effects of Silicone Oil Volume Fraction, Gas-to-Liquid Flow Ratio, and Operating Temperature [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 926—933
- [4] RENE E R, KAR S, KRISHNAN J, et al. Start-up, Performance and Optimization of a Compost Biofilter Treating Gas-Phase Mixture of Benzene and Toluene[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190: 529—535
- [5] KLIMONT Z, STREETS D G, GUPTA S, et al. Anthropogenic Emissions of Non-Methane Volatile Organic Compounds in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(8): 1309—1322
- [6] 袁波,马宵慧,喻干. 中美炼化行业大气污染物排放标准比较研究[J]. *世界石油工业*, 2019, 26(3): 12—18  
YUAN B, MA X H, YU G. Comparative Study on Emission Standards of Air Pollutants in Refining and Chemical Industry between China and U. S. [J]. *World Oil Industry*, 2019, 26(3): 12—18(in Chinese)
- [7] 郟凌翔,王莉宁,陈建孟,等. 生物滴滤塔对疏水性 VOCs 气体的去除及其生物膜特性研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(7): 2417—2426  
HAO L X, WANG L N, CHEN J M, et al. Study on the Removal of Hydrophobic VOCs Gas and Its Biofilm Characteristics by Biofiltration Tower [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 40(7): 2417—2426(in Chinese)
- [8] SAN-VALERO P, GABALDON C, PENYAROJA J M, et al. Enhanced Styrene Removal in a Two-phase Partitioning Bioreactor Operated as a Biotrickling Filter: Towards Full-scale Applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 588—595
- [9] 王璐. 表面活性剂 Tween-20 及 Zn(II) 强化生物滴滤器处理有机废气的性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014  
WANG L. Enhanced Removal of Organic Waste Gases in Biotrickling Filters by Surfactants and Zn(II) [D]. Changsha: Hunan University, 2014(in Chinese)
- [10] CHENG Y, HH H J, YANG C P, et al. Effects of Anionic Surfactant on N-hexane Removal in Biofilters [J]. *Chemosphere*, 2016, 150: 248—253
- [11] 苏俊朋. 鼠李糖脂强化生物滴滤塔去除 VOCs 效能及其机理研究[D]. 广州:广东工业大学, 2018  
SU J P. Study on the Efficiency and Mechanism of the Removal of VOCs by Rhamnolipid Enhanced Biotrickling Filter[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018(in Chinese)
- [12] WU H, YAN H Y, QUAN Y, et al. Recent Progress and Perspectives in Biotrickling Filters for VOCs and Odorous Gases Treatment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 409—419
- [13] FERDOWSI M, RAMIREZ A A, JONES J P, et al. Elimination of Mass Transfer and Kinetic Limited Organic Pollutants in Biofilters: A Review [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 336—348
- [14] MORENO-CASAS P A, SCOTT F, DELPIANO J, et al. Mechanistic Description of Convective Gas-Liquid Mass Transfer in Biotrickling Filters Using CFD Modeling[J].

- Environmental Science and Technology, 2020, 54(1): 419—426
- [15] ESTRADA J M, DUDEK A, MUNOZ R, et al. Fundamental Study on Gas-liquid Mass Transfer in a Biotrickling Filter Packed with Polyurethane Foam[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2014, 89(9): 1419—1424
- [16] DUMONT E. Mass Transport Phenomena in Multiphase Gas/Water/NAP Systems [J]. Advances in Chemical Engineering, 2019, 54: 1—51
- [17] DUPNOCK T L, DESHUSSES M A. Detailed Investigations of Dissolved Hydrogen and Hydrogen Mass Transfer in a Biotrickling Filter for Upgrading Biogas[J]. Bioresource Technology, 2019, 290
- [18] OTTENGRAF S P, VAN DEN OEVER A H. Kinetics of Organic Compound Removal from Waste Gases with a Biological Filter[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1983, 25(12): 3089—3102
- [19] 孙珮石, 杨显万, 谢蕴国, 等. 生化法净化低浓度挥发性有机废气的动力学模式研究[J]. 上海环境科学, 1997(8): 13—17
- SUN P S, YANG X W, XIE Y G, et al. Study on the Kinetic Model of Biochemical Purification of Low Concentration Volatile Organic Waste Gas[J]. Shanghai Environmental Science, 1997, 16(8): 13—17 (in Chinese)
- [20] 姜岩, 张哲. 不同亲水特性 VOCs 在生物滴滤工艺中的作用规律[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 2973—2982
- JIANG Y, ZHANG Z. Interaction of VOCs with Different Hydrophilic Properties in Biotrickling Filters[J]. Journal of Chemical Industry, 2020, 71(7): 2973—2982 (in Chinese)
- [21] 孙彪. 低温等离子体联合生物滴滤降解挥发性有机物研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017
- SUN B. Degradation of Volatile Organic Compounds by Low Temperature Plasma Combined with Biofiltration [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017 (in Chinese)
- [22] 秦怡伟. 卧式生物滴滤床去除甲苯性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018
- QING Y W. Study on Removal of Toluene by Horizontal Biotrickling Filter[D]. Beijing: Beijing Industry University, 2018 (in Chinese)
- [23] 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 等. 生物滴滤塔净化多组分废气的研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2116—2120
- ZHANG D F, FANG J Y, YE J X, et al. Study on Purification of Multi-Component Waste Gas by Biological Drop Filter Tower[J]. Environmental Sciences, 2013, 34(6): 2116—2120 (in Chinese)
- [24] LIM J S, HWANG J W, CHOI C Y, et al. A Pilot-Scale Rotating Drum Biotrickling Filter for Removing Gaseous Styrene [J]. Key Engineering Materials, 2004, 508: 517—522
- [25] SAN-VALERO P, DORADO A D, QUIJANO G, et al. Biotrickling Filter Modeling for Styrene Abatement. Part 2: Simulating a Two-Phase Partitioning Bioreactor[J]. Chemosphere, 2018, 191: 1075—1082
- [26] RUNYE Z, CHRISTIAN K, ZHUO W C, et al. Styrene Removal in a Biotrickling Filter and a Combined UV-biotrickling Filter: Steady-and Transient-state Performance and Microbial Analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 275: 168—178
- [27] GROENESTIJN J W V, LAKE M E. Elimination of Alkanes from Off-gases Using Biotrickling Filters Containing Two Liquid Phases[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2010, 18(3): 151—155
- [28] SONG T T, YANG C P, ZENG G M, et al. Effect of Surfactant on Styrene Removal from Waste Gas Streams in Biotrickling Filters[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2012, 87(6): 785—790
- [29] 成卓韦, 冯力, 蒋轶锋, 等. 荧光假单胞菌代谢  $\alpha$ -蒎烯过程中表面活性物质的定向积累及其性状分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 682—690
- CHENG Z W, FENG L, JIANG Y F, et al. The Accumulation and Characterization of Surface Active Substances during the Metabolism of  $\alpha$ -Pinene by *Pseudomonas Fluorescens* [J]. Journal of Environmental Science, 2013, 33(3): 682—690 (in Chinese)
- [30] 倪瑶琪. 自产表面活性剂正己烷降解菌的筛选、优化及降解性能研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019
- NI Y Q. Isolation and Optimization of Strain Producing Surfactants and the Study on Its Degradation on N-hexane [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019 (in Chinese)
- [31] 涂燕红. 表面活性剂强化生物滴滤器处理正己烷废气的净化效果及机理[D]. 长沙: 湖南大学, 2015
- TU Y H. Purification Effect and Mechanism of Treating N-hexane Waste Gas with Surfactant Enhanced Biological Drip Filter [D]. Changsha: Hunan University, 2015 (in Chinese)

- [32] KIM J O, TERKONDA P K, LEE S D. Gaseous CAH Removal by Biofiltration in Presence and Absence of a Nonionic Surfactant[J]. *Bioprocess Engineering*, 1998, 19(4): 253—259
- [33] WANG L P, XU R W, YANG B R, et al. Nonionic Surfactant Enhanced Biodegradation of M-xylene by Mixed Bacteria and Its Application in Biotrickling Filter [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, 68(10): 1065—1076
- [34] HASSAN A A, SORIAL G A. A Comparative Study for Destruction of N-hexane in Trickle Bed Air Biofilters [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162(1): 227—233
- [35] LIU Q, DDENG Y H, AROWOLO E B. Improvement of Trickling Biofilter Purification Performance on Treating Chlorobenzene in Waste Gases Using Surfactant [J]. 2007, 11(6): 607—612
- [36] 刘雪锦, 张智锋, 李敏, 等. 表面活性剂提高滤塔净化氯苯废气性能的研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4): 175—180
- LIU X J, ZHANG Z F, LI M, et al. Study on the Surfactant Improving the Purification Performance of Chlorobenzene Waste Gas in Filter Tower[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(4): 175—180(in Chinese)

## Research Progress in the Treatment of Hydrophobic VOCs by Biological Trickling Filter

LI Yan-ping, JIANG Yan

(Engineering Research Center for Waste Oil Recovery Technology and Equipment of Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Biotrickling filters (BTFs) for the treatment of hydrophobic volatile organic compounds (VOCs) have long been a research hotspot. For the removal of hydrophobic VOCs, mass transfer has become a core issue, which plays a decisive role in the treatment effect of BTFs. At present, there are few studies on the effect of mass transfer on the removal efficiency of VOCs and lack of systemicity. Aiming at the problem of poor mass transfer performance of hydrophobic VOCs in the biological treatment process, the mass transfer theory and purification mechanism of hydrophobic VOCs in BTFs are analyzed, and the mass transfer characteristics of hydrophobic VOCs such as toluene and styrene in different BTFs are reviewed. At the same time, it points out that the latest research progress such as adding surfactants, upgrading the structure and process of BTFs, and optimizing the process parameters that affect mass transfer will become effective means to solve the mass transfer problems of VOCs, especially hydrophobic VOCs. By solving the mass transfer problem of VOCs, the performance of BTFs can be improved, thereby promoting the development of BTFs mass transfer theory and core technology, promoting the transformation of this technology to application, and solving the problem of harmless disposal of multiple categories of hydrophobic VOCs.

**Key words:** biological tricklings; mass transfer; hydrophobic volatile organic compounds; surfactants

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

李艳萍,姜岩. 生物滴滤工艺处理疏水性 VOCs 的研究进展[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(6): 1—7

LI Y P, JIANG Y. Research Progress in the Treatment of Hydrophobic VOCs by Biological Trickling Filter [J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(6): 1—7