



微生物生物技术处理气态污染物的研究进展

李远啸 郭斌* 刘烁

河北科技大学环境科学与工程学院 挥发性有机物与恶臭污染防治技术国家地方联合工程研究中心 河北省大气污染防治推广中心 河北 石家庄 050018

摘要: 近年来大气污染问题愈发突出, 工业生产过程是大气污染的一重要源头。微生物法治理制造工业生产中产生的挥发性有机物、恶臭气体、硫化物、氮氧化物等气态污染物以效率高、投资少、绿色且环境友好等优势逐渐在国内兴起, 广受关注。本文综述了微生物法的基本理论、技术分类及特点、应用范围, 以及国内外较新的研究方向与进展。微生物法净化低浓度污染物效率往往很高, 而处理难溶、高浓度、生物毒性、难降解的污染物时易受到局限。专家学者们对此进行了大量研究与实验, 创新出的高效技术进行总结。本文认为减少传质阻力方法的应用、与其他处理技术联用、清晰微生物降解机理与途径等是提高微生物法效率的重要方向。但提及的大部分强化手段仍处于实验研究阶段, 使其工业化仍需要进一步探索。

关键词: 生物法, 气态污染物, 挥发性有机物, 恶臭气体, 微生物

Recent progress and perspectives in biological treatment for gaseous pollutants

LI Yuan-Xiao GUO Bin* LIU Shuo

School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, National Joint Local Engineering Research Center for Volatile Organic Compounds Pollution Control Technology, Hebei Province Air Pollution and Control Promotion Center, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

Abstract: The problem of air pollution has of late years become increasingly sever, and industrial production is a momentous source. Biological treatments of gaseous pollutants including volatile organic compounds, odours, sulfides, nitrogen oxides and so forth in industrial production has gradually emerged in China and gained extensive attention with the advantages of high efficiency, low investment, green and environmental friendliness. This paper reviews fundamentals, technical classification and characteristics, applied range, state-of-the-art research directions and progress of biological treatments both here and abroad. Biological treatments tend to have high removal efficiency for the treatment of low concentration gaseous pollutants, while it is limited for treating hydrophobicity, high concentration, toxicity, and low bioavailability of these pollutants. To solve these problems, experts and scholars had done a great quantity of researches and experiments, and those efficient methods and means innovated were summarized. It is

Foundation items: Provincial Special Fund for Strategic Emerging Industries Development in 2018 (360102); Key Research and Development Program of Hebei Province (18273712D)

*Corresponding author: E-mail: gbin69@163.com

Received: 10-02-2019; **Accepted:** 28-05-2019; **Published online:** 10-06-2019

基金项目: 2018 年省级战略新兴产业发展专项资金(360102); 河北省重点研发计划项目(18273712D)

*通信作者: E-mail: gbin69@163.com

收稿日期: 2019-02-10; 接受日期: 2019-05-28; 网络首发日期: 2019-06-10

considered that the application of methods for reducing mass transfer resistance, combination with other treatment technologies, clarification of mechanisms and metabolic pathways of microbial degradation are significant research directions to improve the efficiency of biological treatments and expand its field of application. However, nearly all methods of intensification mentioned are still in the stage of experimental research, as an important goal, which still need to be continuously studied for industrialization.

Keywords: Biological treatment, Gaseous pollutants, VOCs, Odours, Microorganism

人类社会迅速发展,城镇化进程加快,膨胀的人口对物质需求迫切,对周围环境的影响也越来越明显。随着制造、合成、加工等一系列生产活动愈发频繁,排放出大量超出环境容量的气态污染物,它们或具有不同程度的毒性,或散发恶臭,引起酸雨、温室效应,破坏臭氧层,甚至产生二次污染引发硫酸烟雾或光化学烟雾,对人体健康以及生态环境造成持续性的长期危害^[1-2]。为应对这一问题而出现一系列末端治理技术,主要分为两大类型:回收技术和消除技术。当尾气中的成分不要求回收时,微生物法治理因其净化效率高、成本与运行费用低、安全性能好、二次污染小、易操作等特点从众多消除技术中脱颖而出。微生物法治理作为一种绿色的、环境友好的技术,将污染物转化为水、二氧化碳、无机盐和生物质等,符合当代社会对环保工艺的要求。

1 基本理论

荷兰学者 Ottengraf 等^[3]根据吸收操作的双膜理论提出了吸收-生物膜理论,即污染物从较高浓度的气膜扩散至液膜,液膜中的污染物在浓度差的推动下进入生物膜从而被微生物转化、降解。孙珮石等^[4]经实验完善并提出吸附-生物膜理论,认为不存在液膜传质过程,即污染物从气膜扩散直接被生物膜吸附降解。处理废气的微生物法主要用于气态污染物的净化,此类污染物作为微生物能源或营养物质被利用,降解为无害小分子物质、CO₂、H₂O,从而使废气得到净化。之后的研究过程中明确了微生物法处理的本质在于吸附和微生物降解。

2 技术分类

常用的微生物治理技术主要有 3 种方法,分别

是生物过滤、生物滴滤和生物洗涤,另有如生物转鼓过滤法等新技术兴起。目前,微生物法可处理的气态污染物种类广泛,主要包括挥发性有机化合物(Volatile organic compounds, VOCs); H₂S、NH₃和甲硫醇等恶臭气体;氯苯、氯代烃等含卤素有机物;温室气体 CH₄,酸性气体 SO₂、NO_x等,去除效率均在 90%以上^[5-8]。

2.1 生物过滤法

生物过滤反应器一般由调温调湿水槽和生物反应器主体组成,通常无喷淋系统。废气先进入水槽去除颗粒物和部分可溶成分等,同时对气体调温增湿,随后适宜温度的湿润废气进入附着微生物填料的反应器主体被吸附并降解,填料主要有土壤、泥炭、秸秆等。该方法投资运行成本低,操作简单;但占地较大,仅用于处理低浓度大气量的非代谢产酸型废气。由于生化反应均在填料上进行,没有外加营养物质与淋滤,使得代谢速率有限且代谢产物容易积累,特别是处理代谢产酸废气将使 pH 快速下降导致系统崩溃。

生物过滤反应器可以较好地处理苯系物以及含卤素的单环芳烃,还可用于处理氨气、硫化氢^[9-10]等恶臭气体,但其设备管路易腐蚀,需做好相应防护。为了克服生物过滤法自身的传质限制,有学者对其进行改进,发明 TLPB (Two-liquid phase biofilters)反应器^[11],即在生物过滤池顶端喷淋水与硅油,在气相与微生物相之间形成硅油-水膜,减小难溶废气的传质阻力,从而增强去除效果。实际上,TLPB 也是应用强化吸收方法的一个典例。

2.2 生物滴滤法

与生物过滤法同为微生物附着生长型的生物技术,生物滴滤法在前者的基础上取消了前端调温

调湿水槽,增加了滴滤系统投加营养液,调控微生物相 pH 与湿度,淋滤出难代谢产物。填料主要为微生物提供附着生存环境、增加气体停留时间使污染物被生物膜充分吸收,其种类繁多有火山岩、木屑、陶瓷颗粒、麦饭石、聚氨酯等等。填料选择十分重要,其材质需要具有一定的机械强度、生物亲和、易于挂膜等特点。因此填料创新也是一个重要领域,一些新型填料应运而生,一种利用菌丝体热解炭与木屑混合填料比单一木屑挂膜快,去除效率高,其本身具有一定吸附能力。不但增强生物滴滤性能,而且实现废弃菌渣再利用^[12]。

生物滴滤系统具有投资成本低、净化效率高、处理中低浓度的 VOCs 和恶臭气体效果良好。然而,生物滴滤在施工和运行中相对复杂,并且容易增殖积累过多生物质导致堵塞,这也是生物滴滤法一直存在较难解决的问题之一。国内外相关学者对生物滴滤法研究深刻,技术成熟应用广泛,对生物滴滤法适宜净化的物质、运行方法与参数、微生物的种类与种间关系等研究较为清晰^[13-15]。研究表明入口浓度、停留时间对净化效果影响最大^[16];因填料堵塞难以避免,因此修正 Michaelis-Menten 方程使之适用于存在塞流情况下的生物滴滤塔,并在共处理二、三元污染物时也达到理想效果^[17]。特别地,添加表面活性剂、金属离子等传质强化手段的应用,大大提升生物滴滤法的净化效率,扩大应用范围,并在一定程度上解决生物质过度积累导致的填料堵塞问题。

2.3 生物洗涤法

微生物悬浮生长型的生物洗涤法包括 2 个部分:接触吸收塔与生物反应单元。在接触吸收塔中,由塔底进入的废气与塔顶喷淋的洗涤液(通常为活性污泥,也有配制菌剂等)形成对流,其中的惰性填料意在增加气液传质的表面积,吸收了废气中污染物的洗涤液由塔底回流至生物反应器处理再生。生物洗涤法操作简便,可处理较高浓度废气,压降低,占地小;但投资运行费用较高,只能处理低亨利系数的可溶性气体,对于高浓度难溶废气处理效

果不理想,且产生的剩余污泥需要处理。缺、厌氧的生物洗涤技术报道逐渐增多,因其强抗冲击能力、高负荷容量和良好的去除效率而备受关注^[18-20];但因工业废气保持厌氧氛围较困难,且污染物厌氧降解途径复杂有待研究而使该技术仍处于实验阶段。另一方面,因需要生物洗涤剂如活性污泥等大量喷淋,所以生物洗涤法可用于废水废气的同时处理一举两得,节约占地面积,节省能源消耗。例如 Frutos 等^[21]用缺氧生物洗涤法同时进行 N₂O 的净化与生活污水的处理, N₂O 去除效率达到 92%,废水中有机碳的有效去除率 85%–95%,起作用的主要是拥有异养反硝化能力的黄色杆菌科 (*Xanthobacteraceae*) 细菌。

2.4 生物转鼓过滤法

生物转鼓过滤法仅处于实验阶段,类似于密闭的生物转盘,由反应槽和部分浸没于槽中营养液的旋转盘体组成,主要包括旋转圆盘(盘体)、接触反应槽、转轴及驱动装置等。废气进入密室后被转盘上附着生长的生物膜吸附降解,定时向密室内喷淋营养液并使槽内保持一定的液面高度,持续滋养生物膜。Padhi 等^[22]用海绵旋转盘附着生物膜对苯进行处理,净化效率达 95%。生物转鼓过滤法可避免生物膜累积堵塞,但存在污染物负荷、营养物质、生物膜等空间分布不均匀的问题,导致长期运行时净化效率不稳定。

3 研究进展

微生物法处理气态污染物在德国、荷兰、美国和日本等国家广泛应用,尤以生物过滤和生物滴滤最为普遍,技术十分成熟。微生物法虽有不同种类,但存在共同问题:(1) 均只适宜处理低浓度易溶废气,高浓度难溶废气去除率普遍偏低;(2) 在不同工况环境下同一种生物处理方法效率存在较大差异,宏观上与应用工况、地域环境有关,实则微观上与生物种类相关。因微生物群落组成与分布、物种差异等,对净化效率产生较大影响。因此,许多相关学者为解决这些突出问题进行了研究。总结主

要研究方向如下。

3.1 表面活性剂的运用

微生物法在处理高浓度 VOCs 时净化效率有限,源于大多 VOCs 都较难溶于水,而表面活性剂浓度超过临界胶束浓度(Critical micelle concentration, CMC)时可以大幅降低液膜表面张力,使 VOCs 分子进入与其自身极性相同的胶束内部,使之更易溶于水,起到乳化、分散、增溶、保湿等作用。表面活性剂吸附行为及机理^[23]主要为:离子交换吸附;氢键形成吸附;色散力吸附;憎水作用吸附。常用的表面活性剂主要有吐温-20 (Tween-20)、吐温-80 (Tween-80)、曲拉通(Triton X-100)、十二烷基苯磺酸钠、鼠李糖脂、皂角苷等等。部分表面活性剂不但对 VOCs 溶解度有明显的提升而且与之共降解,适宜浓度范围内加快 VOCs 降解速度,促进微生物增殖。苏俊朋等^[24]采用鼠李糖脂强化生物滴滤法去除乙苯废气,鼠李糖脂在 21.6 mg/L 时对生物量增长尤为明显,滴滤塔启动时间显著缩短,在处理高浓度乙苯废气时抗冲击能力强,去除率提升近 30%。表面活性剂混合使用也可大幅提升净化效果,涂燕红^[25]用生物表面活性剂皂角苷与 Tween-20 混合比 3:1 应用时,正己烷降解效率提高了 30.6%。此外,有人添加金属离子 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 等与表面活性剂共同作用^[26-27]处理难溶 VOCs,使净化效率提高且在不同程度上抑制生物膜过度积累而防止堵塞。表面活性剂的合理应用可为提升微生物法净化效率、促进系统快速启动、为微生物法处理高浓度废气提供一种思路。

3.2 联用技术的发展

微生物法与其他技术联用优势互补、可降低传质阻力、减少降解时间、增强处理效果。与微生物法联用技术种类较多,主要有物理化学-微生物法联用,微生物-微生物法联用等。物理化学-微生物法联用主要使用物理化学手段如等离子体、光催化、臭氧催化氧化等先将难溶难降解的污染物分解成小分子物质,再由微生物法高效处

理;或用生物塔、吸收塔的双塔系统各取所长,协同净化污染物^[28-30]。兰善红等^[31]利用催化吸收塔-生物滴滤塔处理难降解 VOCs,催化吸收塔利用电解臭氧发生器产生臭氧,催化氧化并部分降解复杂 VOCs 为小分子物质,随后进入生物滴滤塔吸收净化,去除率最高为 96%。微生物-微生物法联用,通常由 2 种微生物法组成;也有同种微生物法组成的二段式方法,旨在净化上步工艺剩余废气以及被微生物降解后的小分子物质,增强净化效果。生物洗涤法常为微生物-微生物法联用第一步工艺,其抗冲击能力强、负荷容量高、压损小、可去除部分颗粒污染物。生物洗涤后去除部分污染物并为气体增湿,适宜进入第二步低负荷生物滴滤或过滤工艺,高效净化生物洗涤法未吸收的剩余污染物以及吹脱出的代谢中间体,此时污染物浓度较低,可防止生物滴滤或过滤反应器中生物膜过量增长而导致的堵塞。齐国庆等^[32]采用生物洗涤+生物滴滤处理炼油污水厂恶臭气体,对 NH_3 去除率为 90.4%,对 H_2S 、 CH_3SH 、VOCs 去除率均在 99% 以上。可见微生物法与其他技术联用相得益彰,可用于更为复杂工况环境中,高效净化多组分废气,大大拓展其应用范围。

3.3 微生物群落研究

微生物的群落组成是微生物法的一个关键参数,微生物法的净化性能不仅受到气态污染物理化性质的影响,更受到微生物种类的影响。一般地,细菌在碱性或中性环境中生存,霉菌和酵母菌等真菌适合在偏酸或酸性环境中生存。拥有良好的群落组成可以快速高效地将污染物降解为 CO_2 和 H_2O ,提高净化效率,优化去除性能。研究表明,多环芳烃等高分子量污染物是以共代谢的方式生物降解^[33]。因此,研究分析系统中的微生物群落是增加微生物法应用范围与净化效率的重点^[34]。单一微生物降解较复杂化合物时,产生的中间代谢产物容易积累,降低反应速率且易对微生物产生毒害作用,而在一个驯化良好的微生物群落中,不同种群

之间代谢酶与代谢途径互补,减少中间产物的积累效应,使污染物矿化完全^[35]。驯化成熟的混合菌群往往比单一菌群抗冲击能力更强,长期运行处理效果更稳定。

关于微生物群落的调控除了人为控制接种量之外,还能通过控制某些信号分子浓度、外加电压等手段优化群落结构。如自诱导物质绿脓菌素作为铜绿假单胞杆菌种间交流的一种化学信号促使其种群在复杂环境中更好地存活并指示该菌群降解菲、萘的能力^[36]。绿脓菌素的合成受群体感应(Quorum-sensing, QS)系统调节,本身也作为信号分子调控很多基因表达,因此绿脓菌素也可对种群

结构形成反馈调节。所以可利用某些信号分子促进或抑制菌群生长,调控群落组成。有人发现生物滴滤池有自产电现象,外加电压会使自养型菌株及硝化、反硝化菌株占主导地位^[37],证明外加电压对生物滴滤池中生物膜物种组成有显著影响,但研究仍有待深入,以形成精细调控策略。微生物群落组成、种间关系与污染物代谢途径的研究从本质上揭示微生物法净化气态污染物的原理,为后续增强降解效果,阐明代谢机理,形成稳定工艺提供理论基础和技术依据,这是一项十分重要的工作。微生物法净化气态污染物的微生物群落部分研究总结于表1。

表1 当前微生物法净化气态污染物的微生物群落部分研究

Table 1 Current studies on microbial communities for the purification of gaseous pollutants by biological methods

污染物 Contaminants	最大去除率 Maximum removal rate (%)	优势菌 Dominant microbes	参考文献 References
BTEX	93.60	<i>Aspergillus versicolor</i> <i>Trametes hirsute</i>	[38]
	96.00	<i>Pseudomonas putida</i> <i>Rhodococcus erythropolis</i> <i>Cladosporium sphaerospermum</i> , etc.	[39]
甲苯 Toluene	98.00	<i>Acidobacterium</i> <i>Rhodococcus</i> <i>Burkholderia</i>	[40]
	80.00	<i>Acidovorax</i> <i>Rhodococcus</i> <i>Hydrogenophaga</i> <i>Brevundimonas</i>	[37]
二氯苯 Dichlorobenzene	98.90	<i>Brevibacillus agri</i>	[27]
丙烯酸甲酯 Methyl acrylate	100.00	<i>Desulfovibrio gigas</i> <i>Variovorax paradoxus</i> <i>Dokdonella koreensis</i> <i>Pseudoxanthomonas suwonensis</i> <i>Azorhizobium caulinodans</i> <i>Hyphomicrobium denitrificans</i> <i>Hyphomicrobium</i> sp. <i>Comamonas testosteroni</i>	[37]
H ₂ S	100.00	<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> NTV01	[41]
	95.00	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	[42]
	98.29	<i>Cellulosimicrobium cellulans</i>	[43]
NH ₃	100.00	<i>Sinorhizobium meliloti</i> , <i>Pseudomonas</i> sp.	[44]
N ₂ O	95.00	<i>Xanthomonadaceae</i> <i>Xanthobacteraceae</i> <i>Victivallaceae</i>	[21]
		<i>Lysinibacillus sphaericus</i> RG-1	[17]

4 总结与展望

自然界中具有巨大潜力基因宝库的微生物可用于处理多种多样的污染物,加以合理利用可解决部分当代环境难题。微生物生物法处理气态污染物以其效率高、费用低、操作简便、绿色安全和二次污染小等优势,广泛受到各国环保行业的关注。总体来讲,我国微生物生物法治理气态污染物仍处于发展阶段,实际应用范围有限,涉及到实际工况环境、传质阻力和微生物群落组成等繁多因素影响:(1) 相比物理、化学方法,基于微生物的生物处理技术应用范围局限,难以施用于如高温、高压、高辐射等较极端工况。(2) 传质效率很大程度上决定微生物技术的处理效率。因受传质阻力影响,微生物法只适用于低浓度废气,对于高浓度难溶难降解污染物净化能力低。(3) 传统微生物驯化无精细调控方案且驯化周期长,降解能力也不尽相同,微生物种间共代谢污染物机制研究较少,缺乏理论指导。因此该技术仍有待进一步提高。

从发展趋势来看,微生物生物法治理气态污染物的深入研究需注重:(1) 微生物法与其他物理、化学和生物技术相结合创新,优势互补,拓宽应用范围。(2) 微生物法虽处理中低浓度废气效率较高,但净化高浓度难溶性气态污染物仍有难度。积极探索降低传质阻力的手段也是重要方向之一,如从反应器自身结构和运行参数的优化、填料材质与形式的创新、表面活性剂应用的形式等方向着手。(3) 利用分子生物学手段研究群落组成,探究微生物对污染物的代谢机理与途径,明确污染物种间代谢过程,以优化微生物群落结构缩短启动时间并提高污染物的降解效率,形成稳定工艺,如筛选高效菌株、调制复配菌剂、精细调控群落结构等方法。

REFERENCES

- [1] Han DM, Wang Z, Cheng JP, et al. Volatile organic compounds (VOCs) during non-haze and haze days in Shanghai: characterization and secondary organic aerosol (SOA) formation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(22): 18619-18629
- [2] Sun J, Wu FK, Hu B, et al. VOC characteristics, emissions and contributions to SOA formation during hazy episodes[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 141: 560-570
- [3] Ottengraf SPP, van Den Oever AHC. Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1983, 25(12): 3089-3102
- [4] Sun PS, Yang XW, Xie YG. Study on kinetic model of purifying wastegase containing low concentrated volatile organic compounds by biological method[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1997, 16(8): 13-17 (in Chinese)
孙珮石, 杨显万, 谢蕴国. 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, 16(8): 13-17
- [5] Li XS. Current advances on the purification technology of the waste gas containing chlorobenzenes[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(5): 161-162 (in Chinese)
李祥生. 含氯苯类化合物废气生物净化技术的研究进展[J]. *广东化工*, 2018, 45(5): 161-162
- [6] Yang X, Xing ZL, Zhang LJ. Advances in transformation and regulation biodegradation of chlorinated hydrocarbons in landfill[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2017, 57(4): 468-479 (in Chinese)
杨旭, 邢志林, 张丽杰. 填埋场氯代烃生物降解过程的机制转化与调控研究及展望[J]. *微生物学报*, 2017, 57(4): 468-479
- [7] Liu F, Fiencke C, Guo JB, et al. Performance evaluation and optimization of field-scale bioscrubbers for intensive pig house exhaust air treatment in northern Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 694-701
- [8] Zheng CQ, Zhang GL, Sun PS, et al. Kinetics of simultaneous desulfurization (SO₂) and denitrification (NO_x) by biofilm-packing tower[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 40(2): 347-354 (in Chinese)
郑超群, 张良林, 孙珮石, 等. 生物膜填料塔同时脱硫(SO₂)脱氮(NO_x)动力学研究[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2018, 40(2): 347-354
- [9] Yang SB. Studies on the treatment and recovery of ammonia-contaminated gas by biofiltration[D]. Zhengzhou: Master's Thesis of Zhengzhou University, 2010 (in Chinese)
杨松波. 生物过滤法净化及回收含氨废气研究[D]. 郑州: 郑州大学硕士学位论文, 2010
- [10] Zhu L. Performance of biological removing hydrogen sulfide in intermittent state[D]. Shenyang: Master's Thesis of Liaoning University, 2012 (in Chinese)
朱琳. 间歇式生物净化H₂S的性能研究[D]. 沈阳: 辽宁大学硕士学位论文, 2012
- [11] Han MF, Wang C, Fu Y. Treatment of hydrophobic volatile organic compounds using two-liquid phase biofilters[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 1447-1454
- [12] Ren AL, He HH, Guo B, et al. Purification of styrene in low concentration by biotrickling filters[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(7): 1840-1848 (in Chinese)
任爱玲, 赫环环, 郭斌, 等. 生物滴滤塔净化含低浓度苯乙烯废气的研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(7): 1840-1848

- [13] Aguirre A, Bernal P, Maureira D, et al. Biofiltration of trimethylamine in biotrickling filter inoculated with *Aminobacter aminovorans*[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2018, 33: 63-67
- [14] Salamanca D, Dobsław D, Engesser KH. Removal of cyclohexane gaseous emissions using a biotrickling filter system[J]. Chemosphere, 2017, 176: 97-107
- [15] Akmirza I, Pascual C, Carvajal A, et al. Anoxic biodegradation of BTEX in a biotrickling filter[J]. Science of the Total Environment, 2017, 587-588: 457-465
- [16] An TC, Wan SG, Guo B, et al. Comparison of the removal of ethanethiol in twin-biotrickling filters inoculated with strain RG-1 and B350 mixed microorganisms[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1/3): 372-380
- [17] Wan SG, Li GY, An TC, et al. Co-treatment of single, binary and ternary mixture gas of ethanethiol, dimethyl disulfide and thioanisole in a biotrickling filter seeded with *Lysinibacillus sphaericus* RG-1[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3): 1050-1057
- [18] Bravo D, Ferrero P, Penya-Roja JM, et al. Control of VOCs from printing press air emissions by anaerobic bioscrubber: performance and microbial community of an on-site pilot unit[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197: 287-295
- [19] Bravo D, Álvarez-Hornos FJ, Penya-Roja JM, et al. Aspen plus process-simulation model: producing biogas from VOC emissions in an anaerobic bioscrubber[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 213: 530-540
- [20] Potvichayanon S, Pokethitiyook P, Kruatrachue M. Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(3): 708-715
- [21] Frutos OD, Quijano G, Pérez R, et al. Simultaneous biological nitrous oxide abatement and wastewater treatment in a denitrifying off-gas bioscrubber[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 288: 28-37
- [22] Padhi SK, Gokhale S. Benzene control from waste gas streams with a sponge-medium based rotating biological contactor[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 109: 96-103
- [23] Song TT. Effect of surfactant on styrene removal from waste gas streams in biotrickling filters[D]. Changsha: Master's Thesis of Hunan University, 2012 (in Chinese)
宋甜甜. 表面活性剂在生物滴滤器净化苯乙烯气体中的作用[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2012
- [24] Su JP, Du QP, Li YX, et al. Study on the ethylbenzene removal efficiency and microbial community of the rhamnolipid enhanced biotrickling filter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(9): 3514-3521 (in Chinese)
苏俊朋, 杜青平, 李彦旭, 等. 鼠李糖脂强化生物滴滤塔去除乙苯废气效能及菌群结构研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(9): 3514-3521
- [25] Tu YH. Enhancement and mechanisms of surfactants on n-hexane removal in biotrickling filters[D]. Changsha: Master's Thesis of Hunan University, 2015 (in Chinese)
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: 湖南大学硕士学位论文, 2015
- [26] Wang L, Yang CP, Cheng Y, et al. Effects of surfactant and Zn(II) at various concentrations on microbial activity and ethylbenzene removal in biotrickling filter[J]. Chemosphere, 2013, 93(11): 2909-2913
- [27] Sun ZQ. Study of removal of *m*-dichlorobenzene with enhancing biotrickling technology[D]. Zhenjiang: Master's Thesis of Jiangsu University, 2017 (in Chinese)
孙祝秋. 强化生物滴滤技术处理间二氯苯废气工艺研究[D]. 镇江: 江苏大学硕士学位论文, 2017
- [28] Du CM, Li ZM, Huang YN, et al. New technology of combined purification of organic waste gas by plasma and biofiltration[A]//Papers of the 2016 Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences (Volume 4)[C]. Haikou: Chinese Society of Environmental Sciences, 2016: 9 (in Chinese)
杜长明, 李子明, 黄娅妮, 等. 等离子体与生物过滤联合净化有机废气新技术[A]//2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷)[C]. 海口: 中国环境科学学会, 2016: 9
- [29] Jiang HY. The exploration of biological trickle filter combined with photocatalysis to degradation dimethylbenzene[D]. Xi'an: Master's Thesis of Xi'an University of Architecture and Technology, 2018 (in Chinese)
蒋昊羽. 生物滴滤法与光催化法联用对二甲苯降解的探究[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2018
- [30] Peng MJ, Wu JZ, He XC. Engineering research on bioscrubber and chemical absorption combined deodorization process in municipal sewage plant[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(12): 88-92 (in Chinese)
彭明江, 吴菊珍, 何小春. 生物洗涤和化学吸收组合工艺处理污水厂臭气工程试验研究[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 88-92
- [31] Lan SH, Wen ZL, Yang D, et al. Treatment of volatile organic waste gas by chemical oxidation-biological process[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2018, 26(3): 38-41,60 (in Chinese)
兰善红, 温志良, 杨达, 等. 化学氧化-生物法处理挥发性有机废气研究[J]. 化工科技, 2018, 26(3): 38-41,60
- [32] Qi GQ, Liu FQ, Liu GL. Design of project to treat odor gas in oil refinery wastewater field by bio-scrubbing + bio-trickling combined process[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(1): 56-58,76 (in Chinese)
齐国庆, 刘发强, 刘光利. 生物洗涤+生物滴滤组合工艺处理炼油污水场恶臭气体工程设计[J]. 环境工程, 2013, 31(1): 56-58,76
- [33] Seo JS, Keum YS, Li QX. Bacterial degradation of aromatic compounds[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2009, 6(1): 278-309
- [34] Schiavon M, Ragazzi M, Rada EC, et al. Air pollution control through biotrickling filters: a review considering operational aspects and expected performance[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2016, 36(6): 1143-1155

- [35] Zhang XF, Chen HL, Li Z, et al. Synergistic degradation characteristics of 17 β -estradiol by *Acinetobacter* and *Pseudomonas*[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2017, 55(6): 1631-1636 (in Chinese)
张秀芳, 陈翰琳, 李哲, 等. 不动杆菌与假单胞菌对 17 β -雌二醇的协同降解特性[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2017, 55(6): 1631-1636
- [36] Li ZG. Studies on the degradation of phenanthrene and naphthalene by *Pseudomonas aeruginosa* PAOI[D]. Xi'an: Master's Thesis of Northwest University, 2011 (in Chinese)
李兆格. 芽胞杆菌诱变育种铜绿假单胞菌 PAO1 菲萘降解相关研究[D]. 西安: 西北大学硕士学位论文, 2011
- [37] Wu H. Treatment of low-concentration VOCs waste gases by biotrickling filter: case study of methyl acrylate and toluene waste gases[D]. Yanji: Doctoral Dissertation of Yanbian University, 2018 (in Chinese)
吴昊. 低浓度 VOCs 废气的生物滴滤法处理研究——以丙烯酸甲酯及甲苯废气为例[D]. 延吉: 延边大学博士学位论文, 2018
- [38] Hu J. Isolation and identification of two BTEX degrading fungus and benzene biofiltration by fungus[D]. Chongqing: Master's Thesis of Chongqing University, 2011 (in Chinese)
胡江. 两株苯系物降解真菌的筛选鉴定及真菌过滤塔处理苯废气[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2011
- [39] Raboni M, Torretta V, Viotti P. Treatment of airborne BTEX by a two-stage biotrickling filter and biofilter, exploiting selected bacterial and fungal consortia[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, 14(1): 19-28
- [40] Sun DF, Li JJ, Xu MY, et al. Toluene removal efficiency, process robustness, and bacterial diversity of a biotrickling filter inoculated with *Burkholderia* sp. strain T3[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(1): 125-134
- [41] 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
- [42] Solcia RB, Ramírez M, Fernández M, et al. Hydrogen sulphide removal from air by biotrickling filter using open-pore polyurethane foam as a carrier[J]. Biochemical Engineering Journal, 2014, 84: 1-8
- [43] Lü X, Ren AL, Zhang J, et al. Isolation of H₂S degradation functional bacteria and its degradation characteristics[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(12): 6173-6178 (in Chinese)
吕溪, 任爱玲, 张瑾, 等. 降解 H₂S 功能菌的分离及降解特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 6173-6178
- [44] Cheng CY, Mei HC, Tsao CF, et al. Diversity of the bacterial community in a bioreactor during ammonia gas removal[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(1): 434-437