

综述与专论

# 生物强化技术在废气净化中的应用

章晶晓<sup>1</sup>,赵翔宇<sup>2</sup>,褚其英<sup>2</sup>,罗珍<sup>1</sup>,胡建锋<sup>1</sup>

(1.玉环县环境保护局,浙江 玉环 317600; 2.浙江工业大学 生物与环境工程学院 浙江 杭州 310032)

**摘要:** 生物强化技术是通过向生物处理系统中添加高效菌和优势菌来提高系统对特定污染物的降解能力,从而有效去除难降解污染物的有效方法。该文介绍了生物强化技术的研究进展及其在含硫废气,VOCs 废气和氨氮类废气方面的应用。

**关键词:** 生物强化;废气;生物处理;高效菌

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2016)03-04

## BIOAUGMENTATION AND ITS APPLICATION IN WASTE GAS TREATMENT

ZHANG Jing-xiao<sup>1</sup>,ZHAO Xiang-yu<sup>2</sup>,CHU Qi-ying<sup>2</sup>,LUO Zhen<sup>1</sup>,HU Jian-feng<sup>1</sup>

(1.Yuhuan County Environmental Protection Bureau, Yuhuan 317600, China; 2.School of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** Bioaugmentation technology is an effective technology to remove biodegradable pollutants, which can enhance the removal efficiency in the Biological treatment system by adding high-efficiency bacteria and dominant bacteria to the system. This paper introduces the research progress of bioaugmentation technology and the applications in biological waste gas treatment for removing sulfur gas, VOCs and ammonia gas.

**Key words:** Bioaugmentation; Waste gas; Biological treatment; High-efficiency bacteria

### 1 生物强化技术

生物法处理污染物是一种低成本、高效率、操作方便、基本无二次污染的方法,在如今的土壤、废水和废气领域中得到了广泛的应用。可是随着工业的发展,更多有毒有害且难降解的物质被排放到了环境中,而对于传统的生物处理系统而言,这些物质对于微生物有一定的毒性和抑制,对于这些物质,微生物很难降解,

或者需要很长一段时间适应才能有降解效果,对于这种情况,生物法较为低效,不能达到处理要求。于是,便产生了生物强化技术来应对这种情况。

生物强化技术(bioaugmentation),又称为生物增强技术,是通过向传统的生物处理系统中添加从自然界中筛选的优势菌或者由基因组合技术得到的高效菌,提高系统对特定污染物的降解能力,从而有效去除难降解污染物的方法<sup>[1]</sup>。通过向土著微生物群中添加具有特定降解效果的微生物便能有效地除去难降解物质并提高生物处理系统的稳定性,因此,生物强化技术愈来愈受到国内外学者的重视。

根据用于生物强化的菌株筛选或构建途径不同,生物强化技术主要可分为以下 3 种<sup>[2]</sup>:(1)含有代谢功能的可移动基因组分的菌株强化;(2)通过基因工程手段改造得到具有特定功能的微生物强化;(3)利用常规的微生物学手段,通过长期驯化得到具有一定降解能力的微生物菌群或从特定环

境中分离纯化得到某些具有特定降解性能的微生物强化。

生物强化技术的作用机制主要分为直接作用、共代谢作用和基因水平转移作用<sup>[3]</sup>。(1)直接作用:微生物直接将污染物分解为底物。(2)共代谢作用:一些有毒有害物质由于不能直接被微生物降解,但在有其他底物的条件下,微生物可以改变这些有毒有害物质的结构,来达到降解目标污染物的目的。(3)基因水平转移作用:通过引入含有特定特征代谢基因的微生物,使其在基因水平上加速与自然基因的交流 and 代谢途径的构建,从而提高降解有机污染物的能力。

生物强化技术的强化效果<sup>[4]</sup>主要可以分为以下四种:(1)提高对目标污染物的去除率;(2)改善污泥性能和减少污泥总量;(3)增强系统的抗冲击负荷和稳定性;(4)加快生物处理系统的启动速度。

生物强化技术要想成功应用<sup>[5]</sup>,需要达到以下几方面的要求。(1)选育到对目标污染物有明显降解作用的高效菌;(2)明确高效菌的投加方式、投加量以及投加次数;(3)投加到生物处理系统中的高效菌能适应投放的环境,融入土著微生物中并成为优势菌。

## 2 生物强化技术在废气方面应用

### 2.1 处理含硫废气

含硫气体一般为恶臭气体,这类废气对环境和人体健康具有较大的危害,并且污染源及污染范围广泛,引起了人们的广泛关注。

张雅旋等<sup>[6]</sup>利用生化污泥接种驯化的方法培养出了去除硫化物的优势菌,将其固定在生物滴滤塔中强化处理乙硫醇恶臭气体。在气体流量低于  $3 \times 10^{-3}$  m/s 时,该生物滴滤塔对乙硫醇的净化效率可达 90% 以上。当进气流量为 0.05 m<sup>3</sup>/h 和 0.1 m<sup>3</sup>/h 时,乙硫醇的净化效率分别保持在 99.9% 和 95% 以上。液气比在 12.5 L/m<sup>3</sup> 和 20 L/m<sup>3</sup> 之间变化时,乙硫醇的净化效率基本可以稳定在 90% 左右。相比较而言,对照组赤泥生物滴滤塔连续运行稳定性明显不如固定优势菌的生物滴滤塔,乙硫醇净化效率在 80% 上下波动,而且出气浓度较高。

刘春敬等<sup>[7]</sup>从稳定运行的分期布液式生物滴滤塔中筛选出两株真菌 *Penicillium* sp. FLC-1 和

*Cephalosporium* sp. FLC-2 和 1 株名为 *Thiobacillus thioparus* BLC-1 的细菌,以生物强化的方式将细菌和真菌挂膜到立式生物滴滤塔上进行对 H<sub>2</sub>S 的去除研究。研究发现,生物滴滤塔中的接种微生物能和土著微生物共存,对 H<sub>2</sub>S 的去除率能达到 85% 以上。对比原来未进行生物强化的生物滴滤塔,强化后的生物滴滤塔的最佳去除负荷由最开始的 110 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup> 提高到 129 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>,最大去除负荷由最初的 152 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup> 提高到 170 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>。并且对系统进行饥饿实验后,发现其净化性能能够快速恢复。

Sercu 等<sup>[8]</sup>以接种 *Thiobacillus thioparus* TK-m (THIO 组),污泥 (HANDS 组) 和同时接种了 *Thiobacillus thioparus* TK-m, *Hyphomicrobium* VS 和污泥 (HANDS++ 组) 的三组生物滴滤塔来研究其对二甲基硫醚的去除效果。综合全部测试结果, HANDS++ 反应器表现出了最好的性能。

Giri 等<sup>[9]</sup>在小型生物过滤器中加入 DMS (二甲基硫) 去除菌来试验其对 DMS 的去除能力,实验结果表明,当 DMS 负荷在 0.242~0.496 g/m<sup>3</sup>/h 时,去除效率能达到 67~74%。总微生物数在  $0.3 \sim 10.2 \times 10^8$ , DMS 去除菌的数在  $5.6 \sim 9.9 \times 10^5$ 。

### 2.2 处理 VOCs 废气

随着工业飞速发展,挥发性有机气体 (VOCs) 排放量迅速增大,石油化工、制药等行业所排放出来的挥发性气体的污染已成为当今环境领域的研究热点之一。

吕阳等<sup>[10]</sup>分离出 4 株降解挥发性有机物的高效菌株,菌株 L1 为 *Pseudomonas*.sp, 菌株 L2 为 *Kocuria*.sp, 菌株 L3 为 *Arthrobacter*.sp, 菌株 L4 为 *Bacillus*.sp。将筛选出的高效菌扩大培养并投入反应器进行接种,在浸泡填料 2 d 之后排尽,正常运行反应器,考察在进气温度 30 °C, 进气流量为 600 L/h, 表面液体速度为 3.14~3.93 m/h, pH 为 6~7 条件下对苯、甲苯、二甲苯、甲醛的混合挥发性有机化合物的去除效果。实验表明,苯的入口浓度在 2.07~43.22 mg/m<sup>3</sup> 时,生物滴滤塔对苯的去除效率为 86.2%~88.4%; 甲苯的入口浓度在 0.76~31.61 mg/m<sup>3</sup> 时,生物滴滤塔对甲苯的去除效率为 93.2%~94%; 二甲苯的入口浓度在 3~55.20 mg/m<sup>3</sup> 时,生物滴滤塔对二甲苯的去除效率为 90%~91.6%; 甲醛的入口浓度小于 30.86 mg/m<sup>3</sup> 时,生物滴

滤塔对甲醛的去除效率保持在 100%。并且与投菌前做对比,挥发性有机物的净化效率得到大幅的提升,特别是对苯和二甲苯的净化效果。

Jeong 等<sup>[11]</sup>从污水处理厂提取到的菌株 *Rhodococcus* sp. BTO62, 将其用于邻二甲苯废气的净化。实验表明,无菌条件下,菌株 *Rhodococcus* sp. BTO62 在邻二甲苯的负荷为 41 g/m<sup>3</sup>/h 下,去除率达到 90%,而在未灭菌的条件下,该负荷可以提高到 160 g/m<sup>3</sup>/h。其中,无菌下检测到 BTO62 量为 5.8×10<sup>7</sup> cfu/g, 未灭菌下其量为 3.6×10<sup>7</sup> cfu/g, 占总菌数量的 2.3%。而且在 10 到 30 天的饥饿期后,系统能很快恢复到之前的对邻二甲苯的去除效果。

张书景等<sup>[12]</sup>以中国科学院微生物保藏中心的恶臭假单胞菌 (*Pseudomonas putida*) 作为高效菌源接种在生物滴滤塔中处理甲苯废气,在挂膜稳定运行后,滤塔具有较强的抗负荷变化能力,进气浓度与停留时间的变化均不会引起处理性能的明显下降。在停留时间为 54 s 和 43.2 s,进气甲苯浓度为 544~1 044 mg/m<sup>3</sup>,环境温度为 17~26 ℃ 的操作条件下,能够将污染物全部去除,最大去除负荷为 105.35 g·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>。

冷守琴<sup>[13]</sup>选育出一株具有降解氯苯能力的新菌株 *Ralstonia pickettii* L2, 将其分组为 L2 组,“L2+活性污泥”组和污泥组,并接种到生物滴滤塔中进行运行性能测试,结果显示三组的氯苯降解率  $r_{max}$  分别为 76.3 g/m<sup>3</sup>·h, 83.6 g/m<sup>3</sup>·h 和 35.6 g/m<sup>3</sup>·h, 并且含 L2 的反应器启动较快,表明菌株 L2 的引入显著强化了系统对氯苯的生物降解能力且能强化反应器的启动。

Aldric 等<sup>[14]</sup>将菌株 *Rhodococcus erythropolis* T902.1 加入两相生物反应器中来去除异丙苯。实验表明,该系统能成功去除高浓度的异丙苯,在进口浓度为 390 g/m<sup>3</sup>/h 的情况下,去除速率达到了 240 g/m<sup>3</sup>/h。

徐淑敏<sup>[15]</sup>在污水处理厂的活性污泥中筛选分离出了一株降解甲醛的细菌 *Pseudomonas putida* BRJCl, 该菌株在甲醛浓度为 1.7 g/L 时仍有 22.5% 的降解率。该菌株在生物滴滤塔上挂膜完成后,保持滴滤塔进气量为 400 L/h,当进气浓度从 10 mg/m<sup>3</sup> 提高至 800 mg/m<sup>3</sup> 时,甲醛去除率随浓度增加而有所减小,但能够保持在 91% 以上,其

去除负荷从 0.49 mg·(L·h)<sup>-1</sup> 增加到 35.8 mg·(L·h)<sup>-1</sup>; 当进气浓度为 400 mg/m<sup>3</sup> 不变时,随进气流量增加去除率有小幅降低,但当气体流量为 800 L/h 的时候,甲醛的去除效率仍然可以达到 90.05%, 去除负荷从 4.87 mg·(L·h)<sup>-1</sup> 增加到 35.14 mg·(L·h)<sup>-1</sup>。该菌性能稳定,在生物滴滤塔中始终是优势菌株,能在闲置期后快速恢复到运行状态。

Garcia-Pena 等<sup>[16]</sup>将菌株 TB1 加入生物反应器中去除甲苯废气,发现系统中 TB1 的数量达到了 3.33×10<sup>8</sup> cfu/g, 其对甲苯的去除效率保持在 258 g/m<sup>3</sup>·h, 达到了 98% 的去除率。结果表明,该菌株的加入有效的提高了生物反应器中甲苯的去除效率,提高了反应器的抗负荷冲击能力。

### 2.3 氨氮类废气

氨氮类废气也是污染环境主要污染物,如何高效的处理氨氮类废气也是需要关注的问题之一。

Kim 等<sup>[17]</sup>从海水中提取了一种名为 *Vibrio alginolyticus* 的菌株,将其接种在生物过滤塔的无机填料来去除高浓度的氨气。实验过程中,氨气的浓

表 1 生物强化优势菌、去除气体类型和去除效率

优势菌名称	气体类型	去除效率	引自文献
乙硫醇降解菌	乙硫醇	>90%	[6]
<i>Penicillium</i> sp. FLC-1, <i>Cephalosporium</i> sp. FLC-2, <i>Thiobacillus thioparus</i> BLC-1	硫化氢	85%	[7]
<i>Thiobacillus thioparus</i> TK-m,	二甲基硫醚	>99%	[8]
<i>Hyphomicrobium</i> VS DMS 去除菌	二甲基硫醚	67~74%	[9]
<i>Pseudomonas</i> .sp., <i>Kocuria</i> .sp., <i>Arthrobacter</i> .sp., <i>Bacillus</i> .sp.	苯 甲苯 二甲苯 甲醛	苯 86.2%~88.4% 甲苯 93.2%~94% 二甲苯 90%~91.6% 甲醛 100%	[10]
<i>Rhodococcus</i> sp. BTO62	邻二甲苯	90%	[11]
恶臭假单胞菌	甲苯	100%	[12]
<i>Ralstonia pickettii</i> L2	氯苯	99%	[13]
<i>Rhodococcus erythropolis</i> T902.1	异丙苯	61.5%	[14]
<i>Pseudomonas putida</i> BRJCl	甲醛	91%	[15]
Fungus <i>Scedosporium apiospermum</i> TB1	甲苯	98%	[16]
<i>Vibrio alginolyticus</i>	氨气	85%	[17]
<i>Nitrosomonas europaea</i>	氨气	92.67%	[18]



度从 120 ppm (v/v)逐步提升到 2 000 ppm (v/v),都能被该菌完全净化,在之后通入高浓度氨气的 61 天内,平均去除率达到了 85 %,最大去除能力和平均去除能力为 22.8 g-N/kg 干填料/d 和 18.6 g-N/kg 干填料/d。实验期间,Vibrio alginolyticus 菌株的量最多达到了  $3 \times 10^{11}$  cfu/g 干填料,平均量在  $5 \times 10^9$  到  $1 \times 10^{10}$  cfu/g 干填料。

Bin Alam 等<sup>[8]</sup>将菌株 Nitrosomonas europaea 加入生物过滤器中用以除去氨气。实验结果表明,Nitrosomonas europaea 的最大生长率达到了  $0.0565 \text{ h}^{-1}$ ,氨气的去除率达到了 92.67 %,提高了反应器的恢复能力。

文中出现的生物废气优势菌及其强化效果如表 1 所示。

### 3 结论

生物强化技术在废气方面的应用还基本停留在实验阶段,我们还需要在该领域进行更多的研究。大量的研究表明,生物强化技术能有效降解一些难降解的有毒有害物质,改善污泥性能,加快反应器的启动速度,并且能够有效的提高生物反应器的稳定性,因此逐渐受到国内外学者的关注。生物强化技术无疑为生物处理废气提供了一种新的思路。文献中经常会出现将生物强化技术与其他生物固定技术,微生物刺激等技术灵活结合的案例。说明生物强化技术应用于废气处理方面也有各种各样的方法和方向。我们应当开拓我们的思维,更加善于将生物强化技术灵活应用于废气处理中,更快更好推进实验废气处理设施工业化,为有效治理日益严峻的废气污染做出贡献。

### 参考文献

- [1] Ma F, Guo JB, Zhao LJ et al. Application of bioaugmentation to improve the activated sludge system into the contact oxidation system treating petrochemical wastewater. *Bioresour Technol*[J]. 2009,100(2): 597-602.
- [2] 王建芳, 赵庆良, 林佳侃等. 生物强化技术及其在废水生物处理

中的应用. *环境工程学报*[J]. 2007,(09):40-45.

- [3] 熊贵琳, 陈瑾, 叶文衍. 生物强化技术及其在水污染治理中的应用. *环境科学与管理*[J]. 2013,(04):82-86.
- [4] 徐军祥, 杨翔华, 姚秀清等. 生物强化技术处理难降解有机污染物的研究进展. *化工环保*[J]. 2007,(02):129-134.
- [5] 肖晶晶, 牛奕娜, 刘洋等. 生物强化技术优势及环保菌剂研究应用现状. *环境科学导刊*[J]. 2013,(S1):1-4.
- [6] 张雅旋. 生物滴滤塔处理乙硫醇恶臭气体的研究: [硕士]. 北京: 北京化工大学, 2007.
- [7] 刘春敬. 高效生物除臭滴滤塔的构建及微生物生态学分析: [博士]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [8] Sercu B, Boon N, Beken SV et al. Performance and microbial analysis of defined and non-defined inocula for the removal of dimethyl sulfide in a biotrickling filter. *Biotechnol Bioeng* [J]. 2007,96(4):661-672.
- [9] Giri BS, Juwarkar AA, Satpute DB et al. Isolation and characterization of dimethyl sulfide (DMS)-degrading bacteria from soil and biofilter treating waste gas containing DMS from the laboratory and pulp and paper industry. *Appl Biochem Biotechnol* [J]. 2012,167(6): 1744-1752.
- [10] 吕阳, 吕炳南, 刘京等. 室内装修烘烤气体的生物强化技术. *哈尔滨工业大学学报*[J]. 2008,(08):1261-1264.
- [11] Jeong E, Hirai M, Shoda M. Removal of o-xylene using biofilter inoculated with *Rhodococcus* sp. BTO62. *J Hazard Mater* [J]. 2008,152(1):140-147.
- [12] 张书景, 李坚, 李依丽等. 恶臭假单胞菌生物滴滤塔净化甲苯废气的研究. *环境科学*[J]. 2007,(08):1866-1872.
- [13] 冷守琴. 氯苯高效降解菌选育及应用其强化生物滴滤运行性能研究: [硕士]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
- [14] Aldric J-M, Thonart P. Performance evaluation of a water/silicone oil two-phase partitioning bioreactor using *Rhodococcus erythropolis*T902.1 to remove volatile organic compounds from gaseous effluents. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*[J]. 2008,83(10):1401-1408.
- [15] 徐淑敏. 生物滴滤法降解甲醛废气研究: [硕士]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [16] Garcia-Pena EI, Hernandez S, Favela-Torres E et al. Toluene biofiltration by the fungus *Scedosporium apiospermum* TB1. *Biotechnol Bioeng*[J]. 2001,76(1):61-69.
- [17] Kim NJ, Sugano Y, Hirai M et al. Removal of a high load of ammonia gas by a marine bacterium, *Vibrio alginolyticus*. *Journal Of Bioscience And Bioengineering*[J]. 2000,90(4):410-415.
- [18] Bin Alam J, Hasan A, Pathan AH et al. Study on the kinetics of NH<sub>3</sub> removal from air by *Nitrosomonas europaea*. *International Journal Of Environment And Pollution*[J]. 2010,43(1-3):42-51.

(上接第 26 页)

效果。建议结合安溪县社会经济发展规划及周边景区发展充分开发利用地热水清洁能源。

### 参考文献

- [1] 黄田中. 福建省安溪县佛仔格地热勘查[M]. 2014.06;

- [2] 黄田中. 福建省安溪县汤浦地热勘查[M]. 2014.06;
- [3] 福建省地质局区域地质测量队. 区域地质调查报告, 泉州幅, 厦门幅(矿产部分)[M]. 1977.10;
- [4] 安溪县南翼新城建设有限公司. 榜寨地下水采矿权[M]. 2011;
- [5] 庄庆祥. 福建地热研究与实践[M]. 2010.23;
- [6] 陈墨香, 汪集旻, 邓孝等. 中国地热资源[M]. 1994.12, 11.