

The Research Progress on Mechanism and Application of Biopurifying Formaldehyde Pollutants

Ming Zhang¹, Jie Wang^{2*}, Peishi Sun², Genlin Zhang³, Ping Zou², Xiaoyi Bi², Yanping Shen⁴

¹School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

²School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming Yunnan

³School of Materials Science and Engineering, Yunnan University, Kunming Yunnan

⁴Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming Yunnan

Email: *2002207188@163.com

Received: Sep. 30th, 2016; accepted: Oct. 16th, 2016; published: Oct. 19th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In recent years, a series of exploration and research have been carried out on purifying formaldehyde pollutants by scholars around the world, and good results are achieved. Among them, biopurification of formaldehyde pollutants is a good developing treatment method in recent years. The review will summarize the mechanism and progress of biopurification of industrial wastewater/waste gas containing formaldehyde and indoor formaldehyde pollution. Hoping it provides a reference for further study, and the application foreground of biopurifying formaldehyde is also prospected.

Keywords

Formaldehyde Pollutants, Biological Method, Mechanism Research, Prospect

生物法净化甲醛污染物机理及应用研究进展

张明¹, 王洁^{2*}, 孙珮石², 张艮林³, 邹平², 毕晓伊², 申艳萍⁴

¹云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

²云南大学生态学与环境学院, 云南 昆明

*通讯作者。

文章引用: 张明, 王洁, 孙珮石, 张艮林, 邹平, 毕晓伊, 申艳萍. 生物法净化甲醛污染物机理及应用研究进展[J]. 环境保护前沿, 2016, 6(5): 92-101. <http://dx.doi.org/10.12677/aep.2016.65013>

³云南大学材料科学与工程学院, 云南 昆明

⁴云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明

Email: *2002207188@163.com

收稿日期: 2016年9月30日; 录用日期: 2016年10月16日; 发布日期: 2016年10月19日

摘要

近年来, 国内外学者对甲醛污染物的净化处理开展了一系列的探索研究, 而且取得了不错的成效。其中, 生物法净化甲醛污染物是近年来发展较好的一种处理方法。本综述对含有甲醛的工业废水、含甲醛废气及室内甲醛污染的生物净化机理及进展研究进行概述, 为今后生物法净化甲醛进一步研究提供参考, 并对其应用前景进行了展望。

关键词

甲醛污染物, 生物法, 机理研究, 展望

1. 引言

甲醛(HCHO)是一种常见的极易挥发性有机物(VOCs), 是一种无色, 毒性很强且具有刺激性气味的原浆毒物质, 沸点为 -19°C , 易燃烧, 能溶于水及醇, 微溶于苯、丙酮和醚。35%~40%甲醛水溶液被称为福尔马林, 常用于医用防腐, 甲醛还具有强还原作用, 特别是在碱性溶液中。甲醛的水溶液若长期露置于空气中, 很容易被氧化成甲酸。

人们所熟悉的甲醛污染物来源有工业生产使用过程中产生的甲醛废水、废气污染和装修材料所带来的室内甲醛污染。甲醛是一种应用广泛的基础化工原料, 在树脂、塑料、皮革、油漆、涂料、农药、医药等领域均有应用, 因此在工业生产过程中, 就会产生大量的甲醛废水、废气[1]。研究报道称随着室内建材和家具制造业的发展, 装修和家具材料中越来越多地使用有机原料配制的胶粘剂和涂料, 而这些有机原料中对室内空气污染影响最大的就是甲醛[2]。为了了解室内甲醛污染的现状, 许多学者进行了室内监测和调查, 包括北京市、上海市、兰州市、江西省等省市, 结果显示室内甲醛浓度基本上均高于国家标准限值(0.1 mg/m^3) [3]。

甲醛是较高毒性的物质, 最主要的是甲醛具有致癌性, 它能引起结肠癌、鼻咽癌、脑瘤、新生儿白血病等疾病, 甲醛已经被世界卫生组织确定为 I 类致癌物(即对人类及动物均致癌) [4]。在我国, 对含有甲醛污染物的排放都有严格的标准。根据《GB 8978-1996 污水综合排放标准》中规定第二类污水最高允许排放浓度中二级标准甲醛为 2.0 mg/L [5]; 根据中华人民共和国国家标准《GB/T 16127-1995 居室空气中甲醛的卫生标准》规定: 居室空气中甲醛的最高容许浓度为 0.08 mg/m^3 [6]。为了尽量免受甲醛的侵害, 近年来, 国内外学者一直在寻找能够有效降解甲醛污染物的方法, 而生物法净化甲醛是利用具有降解甲醛能力的微生物来处理甲醛, 经过多年的实验和应用证明, 这是一种可行的净化甲醛方法。微生物净化甲醛污染的机理研究也已经成为我们当前所面临的热点研究课题, 所以本文对微生物代谢甲醛机理及应用进展进行综述, 旨在为今后进一步研究微生物代谢甲醛机理及生物法净化甲醛技术应用提供参考。

2. 生物法净化甲醛污染物机理及应用进展

通过查阅大量国内外相关文献, 对生物净化甲醛污染物技术方法进行总结和对比, 见表 1。

Table 1. Technology methods comparison of biopurifying formaldehyde pollutants**表 1.** 生物净化甲醛污染物技术方法对比

处理对象	处理方法	优缺点
工业甲醛废水	活性污泥法	处理低浓度工业甲醛废水可直接运用 SBR 法；在中高浓度工业甲醛废水中，可先进行预处理后进行生物净化处理。 优点：该法对废水中的甲醛去除效果好；出水稳定；灵活性大。 缺点：易受水量、水质变化影响；甲醛初始浓度、反应温度对 SBR 工艺均有一定影响。
	生物膜法	优点：固着在固体表面的生物量丰富，对水质、水量变化适应性强；该法在引入高效复合菌群处理甲醛废水，比物理化学预处理技术与 SBR 相结合工艺，其运行成本上有不可比拟的优势[7]。 缺点：生物膜出现问题后不容易被发现，运行管理不方便；单个生物膜处理工艺易受甲醛废水浓度变化影响。
甲醛废气	主要以生物膜填料塔为实验装置	优点：该工艺在处理甲醛废气方面与生物膜法处理甲醛废水上原理相似，但在处理工艺上，该装置简单、挂膜时间短，可连续净化甲醛废气，对甲醛废气处理效果好；与曝气及液相生物装置组合系统，能够提高对液相甲醛的去除效果。 缺点：因甲醛气体易溶于水，处理过程中大量的甲醛气体都进入到液相中，易造成液相甲醛积累，影响正常的生物净化系统。
室内甲醛污染物	主要是生物膜反应器和生物过滤器	优点：相对于物理、化学技术处理废气，生物法净化室内有机废气投资及运营费用少，与净化工业甲醛废气不同的是处理对象浓度低，这为微生物净化有害气体提供有利条件，设备也更加智能化、系统化，应用前景广阔。 缺点：如反应器设计不当，会产生二次污染；产生的废弃物不及时处理，会对设备造成堵塞、腐蚀[8]；生化反应时间还需提高。

2.1. 生物法处理工业甲醛废水

甲醛广泛应用于工业生产中，是油漆、粘合剂、合成树脂、人造纤维的主要原料。在工业生产、运输、储存、使用和废弃物处置过程中发生甲醛挥发、泄漏等事件及废水排放都可导致甲醛的污染。另外，甲醛在农药生产及其中间体合成领域都有着举足轻重的作用，我国有使用甲醛作为生产原料的农药厂和化工厂达上千家，由于没有有效的工业甲醛废水处理工艺，这些企业每年向外排放的含甲醛有毒废水不计其数。据了解，每家这样的农药厂每年的甲醛废水排放量在 3 万吨~20 万吨不等，倘若这些含甲醛废水不及时处理掉，这部分废水进入到自然水体中对生态平衡和人类健康将是无法估量的后果，因此这类废水必须经企业内部和污水处理厂对含甲醛工业废水来进行处理。目前工业甲醛废水处理方法有：石灰法、芬顿法、吹脱法、二氧化氯法、生物法等。而在工业甲醛废水的生物处理方法中，主要采用的是活性污泥法和生物膜法。

2.1.1. 活性污泥法处理甲醛废水机理

在活性污泥法处理甲醛废水系统中，甲醛在废水中被大量去除的实质就是活性污泥中的微生物将废水中的甲醛作为营养物质进行捕捉摄取、代谢与利用的过程，这一微生物生长过程的结果就是使污水得到了净化，微生物又通过摄取能量及物质后合成新的细胞，活性污泥得以继续更新生长。活性污泥是悬浮好氧微生物，并在其自身生长繁殖中形成大量的絮凝体，在捕捉降解过程中，废水中的甲醛与活性污泥接触，由内源代谢分泌的聚合物形成的絮凝体迅速捕捉到小分子的甲醛，同时快速进入微生物细胞内由胞内酶将甲醛降解和转化。甲醛被一部分酶的氧化作用分解代谢为二氧化碳和水，并获得合成新细胞所需的能量；另外甲醛又在酶的作用下参与了合成代谢，形成新的细胞物质。

2.1.2. 活性污泥法处理甲醛废水进展状况

在低浓度工业甲醛废水处理研究中，张伶等[9]考察了 SBR 工艺对低浓度甲醛废水的处理效果，经该

工艺处理后废水中甲醛和 COD 的去除率分别达到 99.5% 和 95%。北京化工大学徐仲均等[10]研究污泥对废水中低浓度甲醛的净化性能,并分析了相关影响因素,甲醛初始浓度、PH、曝气时间对活性污泥法处理甲醛废水的效果均有一定的影响,结论为下一步设计甲醛废水的活性污泥处理工艺提供理论基础。

由于甲醛能与微生物体内的蛋白质直接起反应,会抑制生物活性甚至导致微生物死亡。因此,在处理高含量甲醛废水一般不直接用生物处理法的,都会采用物理、化学技术与后续的生物处理相结合工艺,经处理后的废水达到一般工业企业甲醛的排放标准。浙江工业大学谢咏梅[11]采用 Fenton 氧化—SBR 生化处理工艺处理高浓度甲醛废水,与传统 SBR 工艺比较,该工艺操作简单、运行灵活,对高浓度甲醛废水处理效果好。伊朗 Gholamreza Moussavi 等[12]采用催化高级氧化工艺与 SBR 集成系统来处理高浓度甲醛废水。江南大学刘艳等[13]提出了催化转化—生物降解法处理高浓度甲醛废水的新方法,具有较高的实际应用价值。

2.1.3. 生物膜法处理甲醛废水机理

生物膜法依靠将微生物细胞固定在载体填料上来实现降解有机物,生物膜是高度亲水物质,其外侧是一层附着水层,膜上及内部繁殖着大量的微生物及微型动物,并且形成了有机污染物→细菌→微型动物组成的食物链。载体填料的存在,对水流起到强制紊动的作用,同时可促进水中污染物质与微生物细胞的充分接触,从实质上强化了传质过程[14]。生物膜表层生长的是好氧和兼氧微生物,而在生物膜的内层微生物则往往处于厌氧状态,生物膜逐渐增厚,厌氧层的厚度超过好氧层时,会导致生物膜的脱落,而新的生物膜又会在载体表面重新生成。污水中甲醛等有机污染物作为营养物质,为生物膜上微生物所摄取,微生物自身也得到繁衍增殖。图 1 所示生物膜构造及各种物质传递、交换示意。

2.1.4. 生物膜法处理甲醛废水进展状况

有研究发现,废水中甲醛浓度超过 200 mg/L,生物膜处理废水能力就会受到抑制,甚至会丧失处理废水能力。为此,许多学者正开展研究工作,以寻求合适的含甲醛废水尤其高浓度甲醛废水的处理方法。

Chalor Jarusuthirak 等[15]利用膜生物反应器(MBR)进行高浓度甲醛废水去除研究。研究结果表明,通过污泥驯化技术形成的生物膜可以使甲醛废水的去除效率达到 99.73%左右,该反应器能够有效降解甲醛说明了膜生物反应器在去除甲醛废水中具有良好的应用前景。徐灏龙等[16]采用强碱还原预处理与含生物膜的生物流化床组合处理高含量甲醛废水,考察了逐步用强碱还原后的实际甲醛废水,分析了不同

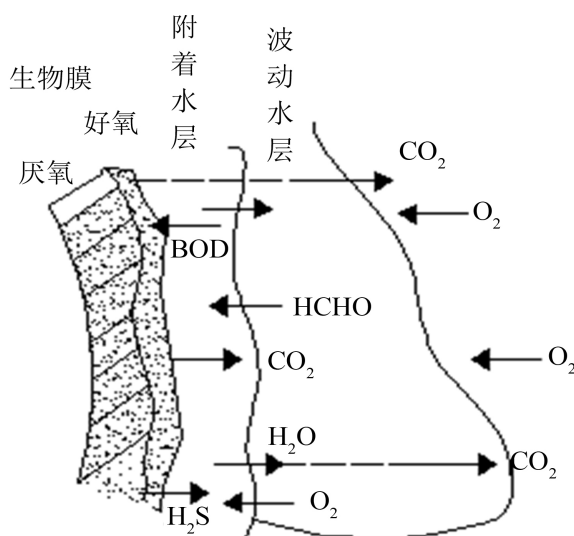


Figure 1. Structure of biofilm on the carrier filler

图 1. 载体填料上的生物膜构造

甲醛含量下对生物流化床生化处理效果的抑制情况。他们发现, 氢氧化钙投加量增大能够有效地去除废水中甲醛含量, 消除高含量甲醛废水的生物毒性, 该工艺与普通生物流化床工艺相比, 在处理高浓度甲醛废水上更具处理效果好, 作用时间快的优势。高峰等[7]在接触氧化工艺处理含较高甲醛废水下引入高效复合微生物菌群, 最终处理后的出水也达到理想的效果。

2.2. 生物法净化工业甲醛废气

近年来国内外对于生物法处理甲醛废气系统研究还不多, 大部分实验都是针对 VOCs 进行。目前生物法处理甲醛废气已有实验室进行了相关研究, 在研究生物法净化甲醛废气机理方面的同时也在不断探索去除液相中甲醛积累的难题。

2.2.1. 生物法净化甲醛废气机理

甲醛在微生物体内的新陈代谢, 第一步是从对甲基营养菌的了解开始的[17]。甲基营养菌在以甲醇或甲胺作为碳源和能源生长时, 甲醇和甲胺首先被氧化为甲醛[18]。甲醛在微生物中的代谢途径分为同化途径和异化途径两大类[19]。同化作用主要包括丝氨酸途径和核酮糖单磷酸途径(RuMP), 而甲醛被同化的丝氨酸途径最早是 Quayle 和他的同事们提出来, 他们采用 ^{14}C 示踪标记甲醇来培养兼性甲基营养菌(Pseudomonas AM1), 最后在丝氨酸中检测到了带有 ^{14}C 标记的碳原子。丝氨酸是甲醛丝氨酸代谢途径的重要中间体之一[20], 甲醛首先通过和四氢叶酸(TEF- C_1 载体)结合生成 5, 10-亚甲基四氢叶酸, 经丝氨酸转羟甲基酶(SHMT)的催化, 然后再通过四氢叶酸转移到 1-碳化合物受体甘氨酸上从而生成丝氨酸, 其同化甲醛的丝氨酸途径如图 2 [21]所示。

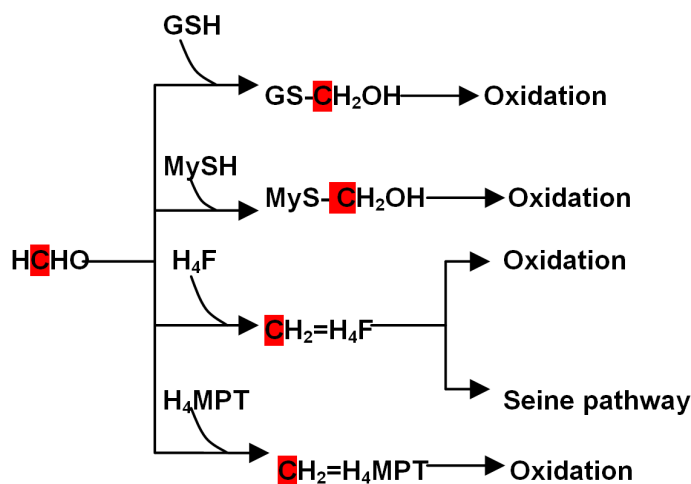
同化的另一个途径——核酮糖单磷酸途径(RuMP), 开始于甲醛和 5-磷酸核酮糖(RuMP)的缩合反应, 最终生成磷酸二氢丙酮(DHAP)。核酮糖单磷酸途径如图 3 [22]作为高效捕捉游离甲醛的一个系统, 在极低的甲醛浓度下还能发挥其作用, 该途径存在于多种甲基营养菌和非甲基营养菌中, 同时由于 RuMP 途径的所有反应均是放能的, 所以它同化甲醛的效率比丝氨酸途径高得多[23]。

甲醛异化途径可分为非环化氧化途径如图 4 [22]和环化氧化途径如图 5 [19], 甲醛非环化氧化途径是辅因子依赖型氧化途径, 再通过特定酶将甲醛氧化成相应产物; 甲醛的环化氧化途径就是甲醛与 C_5 受体分子结合形成 C_6 化合物进入生物代谢循环。

2.2.2. 生物法处理甲醛废气进展状况

在净化甲醛废气研究中, 实验者大多采用的实验装置是生物膜填料塔, 也称生物滴滤塔。因为装置的关键参数和运行条件对净化甲醛废气效果影响较大, 因此需要对这些因素进行实验探究。Amirreza 等[24]对生物滴滤床(BTFR)的优化进行研究, 对影响 BTFR 的甲醛去除效果的不同因素(pH 值、氮、磷、甲醛浓度)测试。结果表明 PH 值对 BTFR 净化甲醛的效率影响最大, 通过在最佳优化条件下运行 BTFR, 甲醛去除率可提高到 98%。西班牙学者 Prado, Veiga 等[25]对甲醛和甲醇混合物的生物降解进行了研究, 同样对气相生物填料塔关键参数进行测试, 为塔内去除甲醛实验条件优化提供科学经验。在运行条件上, 云南大学孙珮石、王洁等[26]在生物膜基础上增加液相生物处理的气液相组合系统进行实验, 研究发现该组合系统在甲醛净化效果明显好于单独的生物膜填料塔, 甲醛净化效率提高了 35%以上, 甲醛生化去除量增大 50%以上。雷艳梅, 王洁, 孙珮石[27]采用生物膜填料塔和曝气组合系统来考察气体流量和进口浓度改变对复合生物反应器净化甲醛性能的改变。

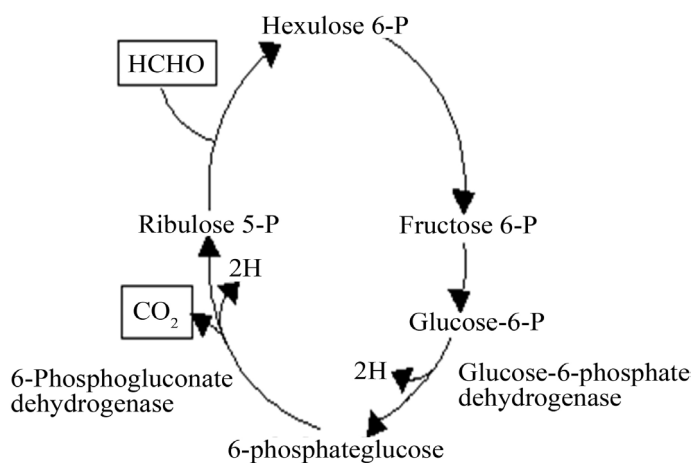
研究者还发现合适的化学促进剂能够与液相中的甲醛结合成更易被微生物捕捉、降解的物质, 因此选择高效化学促进剂对液相累积甲醛去除能力的影响也是其研究的热点。有研究发现, 亚硫酸钠与甲醛会生成甲醛亚硫酸氢钠, 这是一种容易被微生物降解的物质[28]。南华大学贺锋等[29]采用亚硫酸氢钠为喷



GSH: 还原型谷胱甘肽; MySH: 真菌硫醇; H₄F: 四氢叶酸; H₄MPT: 四氢甲烷碟呤

Figure 4. Cofactor-dependent pathway of formaldehyde oxidation

图 4. HCHO 的辅因子依赖型氧化途径



6-Phosphogluconate dehydrogenase: 6-磷酸葡萄糖酸脱氢酶; Glucose-6-phosphate dehydrogenase: 葡萄糖-6-磷酸脱酶

Figure 5. Cyclic pathway of formaldehyde oxidation

图 5. HCHO 的环化氧化途径

尤为突出，给人类健康带来了巨大威胁。近年来国内外对于净化室内甲醛污染的方法有：空气负离子技术、材料封闭技术、物理吸附、植物净化、通风换气等，但这些技术方法都存在一定的局限性，作用时间较长、净化效率低，往往适用于甲醛污染较轻的场合。而微生物降解甲醛具有性能稳定、适用性强、效率高等优点，因此拥有良好的应用前景。虽然室内气体污染物温和、稳定的处理环境，都给微生物净化室内空气污染创造了有利的条件。然而它与生物法净化工业废气所不同的是：室内空气所释放的甲醛浓度较低，多以微量和衡量的形式存在；室内环境的特殊性，应保证不发生二次污染；还应考虑室内空间有限，所需的装置要以相对较小的体积可持续性净化室内空气。在净化室内气体研究中，研究者大多采用固定化生物技术和微生物膜反应器来对室内甲醛污染物的净化进行试验探究。

2.3.1. 生物法净化室内甲醛机理

对生物法净化易溶于水的甲醛废气机理，在世界上公认影响最大的是荷兰学者 Ottengraf 依据的传统

的双膜理论所提出的生物膜理论,其净化机理是:1)室内甲醛污染物首先与反应器中微生物表面水膜接触,并溶于其中,完成由气膜到液膜的传质;2)甲醛溶于水后,在液膜中正在浓度差的推动下进一步扩散到生物膜,迅速被反应器内微生物捕获;3)微生物利用有机物进行分解、合成代谢;生成的代谢物一部分进入液相中,另外一部分合成细胞物质,并产生二氧化碳和水。

2.3.2. 生物法净化室内甲醛进展状况

天津大学齐瑞颖[34]采用海藻酸钙凝胶小球包埋恶臭假单胞菌与填料结合的方式制成了生物过滤器,对固定化生物过滤器净化室内低浓度甲醛气体进行实验探究。实验用固定化生物过滤器可在 9 h 内将实验舱内超出国家标准 10 倍的甲醛浓度净化到室内空气要求限度以内。齐枝花等[35]用固定化微生物吸附柱为室内甲醛净化核心,考察在不同实验条件下净化装置对降解室内甲醛效率的影响。研究发现随着甲醛浓度升高,该装置对甲醛去除率增大,去除负荷升高;气体空床停留时间 5~6 s 时,装置对甲醛去除负荷最高,能达到 $561 \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

生物膜反应器,该技术方法就是以采集活性污泥中微生物作为优良菌种,通过驯化分离筛选得到能够以甲醛为唯一碳源的高效降解菌,然后采用生物膜反应器进行挂膜研究,并通过控制生物膜反应器工作条件来实现净化室内甲醛。巴塞罗那 prado 等[36]采用串联的两级膜生物反应器去除含甲醛的混合废气,对甲醛最大平均去除率达到 100%。重庆大学苗峻赫[37]对膜生物反应器(HMBR)处理有机废气进行了实验研究和传质过程分析,筛选假单胞菌作为高效降解菌种在平板式复合膜生物反应器内进行挂膜。该膜生物反应装置初步取得了不错的成效,对有机废气去除效率达到 87.55%,生化降解量达到 $10.61 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$,说明 HMBR 装置系统在净化室内有机污染气体中具有较好的应用前景。

3. 总结与展望

生物法是一种安全、高效、可行的净化甲醛技术,相信今后这类技术会得到更多人的重视。微生物净化含甲醛废水、废气的机理,从广义来看都是依据传统的双膜理论所提出的“吸收-生物膜”理论。处理废水中的甲醛就是生活在水体中的微生物将废水中的甲醛作为营养物质进行生长代谢的过程;而在净化甲醛废气中,首先甲醛完成从气膜到液膜的传质过程,之后在生物膜上被微生物生化降解。而从狭义来看微生物降解甲醛机理,许多微生物都具有脱毒作用,例如:甲基营养菌属、假单胞菌属等;而特定的甲醛降解菌又对甲醛有特定的代谢途径,这就需要后期更为深入的研究。研究学者以生物法净化甲醛为核心来处理工业甲醛废水、废气和室内甲醛的污染,这些技术方法都是利用微生物以甲醛为碳源进行生长代谢进而降解甲醛的,但在实际应用中,各个技术方法又各具优缺点。在高浓度甲醛废水处理中,往往需要进行预处理但这也带来成本高和二次污染的问题,通过引入高效复合微生物菌群,在运行成本上优势明显;在净化甲醛气体污染中添加化学促进剂[38]虽比组合工艺操作简单,但还只是在实验研究阶段,要想投入到工业运用中去,将来还需要更多的实验去验证;室内微生物净化甲醛设备与传统的空气净化器相比,应该考虑到在保证处理效率不变的情况下尽可能地缩小其尺寸,研发出设备的智能化和标准化,这样才能得到更多消费者的青睐。

未来对生物法净化甲醛污染物的研究仍需要不断地深入和完善。运用高新技术会对微生物净化甲醛污染物的机理变得越来越明晰,例如 ^{14}C 示踪法能够准确定位甲醛代谢途径,高通量技术来分析微生物在生物膜填料塔中的群落演变结构,GC-MS 联用仪可以用来分析甲醛被代谢过程中的产物;微生物生长环境诱导其产生能够降解特定目标污染物的关键酶的研究;优化并筛选出高效降解甲醛工程菌并运用到工业处理废水中等等。只有不断地深入研究和技术进步,才能推动生物法降解甲醛未来的发展,才能使得该技术方法在净化甲醛污染物方面更具广阔的前景。

基金项目

国家自然科学基金项目(51268058)。

参考文献 (References)

- [1] 王志宏. 低浓度甲醛的处理方法综述[J]. 四川化工, 2012, 15(4): 16-17.
- [2] 梁红, 高红武, 苏锡南, 等. 室内甲醛污染影响因素及控制措施研究[J]. 云南冶金, 2011, 40(4): 77-81.
- [3] 江浩芝, 赵婉君. 室内甲醛的危害及其污染现状[J]. 广东化工, 2016, 43(11): 189.
- [4] 苏海涛, 阎丽娜, 董杨. 室内空气甲醛污染现状及原因分析[J]. 中国卫生工程学, 2012, 11(6): 512-514.
- [5] 刘娟利. 废水中甲醛含量分析过程中反应时间对测定结果准确度影响的实验探究[J]. 化工管理, 2016(2): 73-75.
- [6] 国家技术监督局, 中华人民共和国卫生部. GB/T 16127-1995 居室空气中甲醛的卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995. <http://www.bzxw.com/downloadhtml/05/596328.html>
- [7] 高峰, 朱伟, 王伟, 等. 甲醛废水生物强化处理研究[J]. 广东化工, 2015, 42(19): 125-126.
- [8] 霍亚欣, 王敏, 李阳阳. 微生物法治理室内空气污染的可行性探讨[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(5): 80-82.
- [9] 张伶, 李兴波, 刘雷, 等. SBR 工艺处理甲醛废水的试验研究[J]. 山东化工, 2014, 43(12): 189-190.
- [10] 徐仲均, 程足芬, 林爱军, 等. 活性污泥对甲醛废水的净化性能[J]. 环境工程学报, 2008, 2(9): 1173-1176.
- [11] 谢咏梅. 甲醛废水处理工艺与设计研究[D]: [硕士学位论文]. 浙江: 浙江工业大学生物与环境工程学院, 2012.
- [12] Moussavi, G., Heidarizad, M. and Yazdanbakhsh, A. (2009) The Removal of Formaldehyde from Concentrated Synthetic Wastewater Using O₃/MgO/H₂O₂ Process Integrated with the Biological Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, **171**, 907-913. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.090>
- [13] 刘艳, 朱振中, 周良. 催化转化——生物降解法处理高浓度甲醛废水[J]. 应用化工, 2010, 39(9): 1438-1442.
- [14] 蒙晓斌. 生物膜法净化污水机理及其工艺特点探析[J]. 科技视界, 2012(27): 358-359.
- [15] Jarusutthirak, C., Sangsawang, K., Mattaraj, S., et al. (2012) Treatment of Formaldehyde-Containing Wastewater Using Membrane Bioreactor. *Journal of Environmental Engineering*, **138**, 265-271. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000430](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000430)
- [16] 徐灏龙, 王长智, 章一丹. 强碱还原和生物流化床组合处理高含量甲醛废水[J]. 水处理技术, 2009, 35(7): 75-79.
- [17] Mason, R.P. and Sanders, J.K.M. (1989) *In Vivo* Enzymology: A Deuterium NMR Study of Formaldehyde Dismutase in Pseudo-Mnasputida F61a and *Staphylococcus aureus*. *Biochemistry*, **28**, 2160-2168. <http://dx.doi.org/10.1021/bi00431a030>
- [18] Yurimoto, H., Oku, H. and Saka, Y. (2011) Yeast Methylo-trophy: Metabolism, Gene Regulation and Peroxisome Homeostasis. *International Journal of Microbiology*, **2011**, Article ID: 101298. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/101298>
- [19] 金晶, 吴婉欣, 陈雯雯, 等. 微生物甲醛代谢途径的研究进展[J]. 吉林农业, 2011(4): 70-72.
- [20] Qi, C.J. and Chen, L.M. (2012) The Research on the Ability of Detached Banana Leaves to Absorb and Metabolize Aqueous Form—Aldehyde. *Journal of Yangzhou University*, **33**, 74-80.
- [21] Arps, P.J., Fulton, G.F., Minnich, E.C., et al. (1993) Genetics of Serine Pathway Enzymes in *Metylobacterium Exorquens* AM 1: Phosp Hoenolpyruvate Carboxylase and MalyI Coenzyme Alyase. *Journal of Bacteriology*, **175**, 3775-3783.
- [22] Kato, Y.H. and Sakai Yi, N. (2005) Assimilation, Dissimilation, and Detoxification of Formaldehyde, a Central Metabolic Intermediate of Methylo-trophic Metabolism. *Chemical Record*, **5**, 367-375. <http://dx.doi.org/10.1002/tcr.20056>
- [23] 张韦, 宋中邦, 陈丽梅. 甲基营养微生物的甲醛代谢途径及其在环境生物技术中的应用[J]. 生命科学, 2012, 24(3): 265-273.
- [24] Talaiekhazani, A., Fulazzaky, M.A., Ponraj, M., et al. (2014) Removal of Formaldehyde from Polluted Air in a Bio-trickling Filter Reactor. *Desalination and Water Treatment*, **52**, 3663-3671. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2013.854002>
- [25] Prado, O.J., Veiga, M.C. and Kennes, C. (2006) Effect of Key Parameters on the Removal of Formaldehyde and Methanol in Gas Phase Biotrickling Filters. *Journal of Hazardous Materials*, **138**, 543-548. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.093>

- [26] 孙珮石, 王洁, 李晓梅, 等. 气液相组合生物法净化低浓度甲醛废气研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(5): 70-73.
- [27] 雷艳梅, 王洁, 孙珮石. 复合生物反应器对甲醛废气净化性能最大化研究[J]. 化学工程与技术, 2015, 5(4): 88-93.
- [28] Lotfy, H.R. and Rashed, I.G. (2002) A Method for Treating Wastewater Containing Formaldehyde. *Water Research*, **36**, 633-637. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00255-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00255-X)
- [29] 贺锋, 詹丽君. 以亚硫酸氢钠为喷淋液生物膜填料塔净化甲醛废气的基础研究[J]. 高校实验室工作研究, 2016(1): 150-152.
- [30] Li, X.M., Liu, M.J., Mo, Y.T., et al. (2011) Experimental Study on Improving the Purification Efficiency of Formaldehyde Waste Gas with Bio-Trickling Filter. *International Conference on Electric Technology & Civil Engineering*, **201**, 6593-6596.
- [31] Li, X.M., Liu, M.J., Zhang, L., et al. (2010) Removal of Formaldehyde from Trickling Liquid in a Biotrickling Filter. *International Conference on Electric Technology & Civil Engineering*, Henan, 7-9 November 2010, 1-3. <http://dx.doi.org/10.1109/iceee.2010.5660970>
- [32] 李晓梅, 李杰男, 刘菲, 张航, 等. 添加含硫化合物促进废水中甲醛的生物降解[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2232-2238.
- [33] 高小红, 刘玉华, 吴春姍, 等. 室内空气中甲醛的危害及其净化技术[J]. 科技创业月刊, 2013, 26(5): 186-189.
- [34] 齐瑞颖. 微生物降解室内甲醛污染物的理论与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学环境科学与工程学院, 2008.
- [35] 齐枝花, 张晓虎, 张胜华. 微生物反应器处理空气甲醛的影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 109-114.
- [36] Prado, O.J., Veiga, M.C. and Kennes, C. (2008) Removal of Formaldehyde, Methanol, Dimethylether and Carbonmonoxide from Waste Gases of Synthetic Resin Producing Industries. *Chemosphere*, **70**, 1357-1365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.09.039>
- [37] 苗峻赫. 膜生物反应器净化低浓度有机废气中生物膜生长与传输特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学动力工程学院, 2012.
- [38] 李晓梅. 生物 - 化学法净化甲醛废气应用基础研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学环境科学与工程学院, 2014.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org