

白腐真菌在环境保护中应用的研究进展

邵梅香¹, 朱炳根², 李敏¹, 李辉信¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 金陵科技学院园艺学院, 江苏 南京 210038)

摘要:白腐真菌是生物界中一类引起木质白色腐烂的丝状真菌的总称。其菌丝能够进入树木或木材的木质细胞腔内获取营养,同时释放出酶类物质。重点介绍了:1)白腐真菌与细菌相比在降解环境污染物方面的优势:广谱性、低营养及高适应性;2)白腐真菌降解环境污染物的酶解方式;3)白腐真菌在大气、污水和土壤污染物治理中的广泛应用;4)白腐真菌在食品工业和食品检测等相关生物技术方面的使用情况;5)白腐真菌今后的研究方向。

关键词:白腐真菌;降解;大气污染;工业污水;土壤污染

中图分类号:Q939;X172 文献标志码:A 文章编号:1672-755X(2015)01-0088-05

The Application of White Rot Fungi in Environmental Protection

SHAO Mei-xiang¹, ZHU Bing-gen², LI Min¹, LI Hui-xin¹

(1. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, China)

Abstract: White rot fungi are the general name of the filamentous fungi and can cause the wood white rot in the living nature. Their hyphae can stretch into trees or timber wood cell cavity to absorb nutrients, and then release enzymes. Degrading pollutants by white rot fungi is an effective method with advantages of universality, low nutrition and high adaptability compared with bacteria. This paper mainly introduces the mode of enzyme degradation and extensive application in environmental protection such as in the pollution of the atmosphere, sewage and soil. In addition, the white rot fungi also has a wide range of applications in food testing and other biological technology. The ending in this paper points out that research direction on the white rot fungi in the future.

Key words: white rot fungi; degradation; atmosphere pollution; sewage pollution; soil pollution

白腐真菌(White rot fungi)是一类木质素降解菌的总称,其分泌的降解性酶系可导致木材腐烂而成淡白色的海绵状,由此而得名。白腐真菌菌丝为多核,少有隔膜,无锁状联合,多核菌丝产生的分生孢子常为异核;担孢子却是同核体,存在同宗配合和异宗配合两种交配方式。在形态分类上属于担子菌纲(Basidiomycetes),主要分布在革盖菌属(*Coriolus*)、卧孔菌属(*Poria*)、侧耳属(*Pleurotus*)和多孔菌属(*Polyporus*)^[1]。

收稿日期:2014-12-22

作者简介:邵梅香(1977—),女,南京高淳人,博士研究生,主要从事土壤生物与生物化学的研究。

近年来环境污染物治理中,白腐真菌得到越来越广泛的应用。1985 年 Bumpus 等首次发现白腐真菌能降解芳香族污染物^[2]。此后白腐真菌降解有机污染物一直是微生物学、环境科学、酶学及环境毒理学等学科研究的重点。早期研究集中在有机废水的处理方面,白腐真菌独特的降解性能与降解机制决定了它的底物范围广泛。本文重点介绍白腐真菌在大气、污水及土壤中降解有毒有机污染物等方面的研究和应用进展。

1 白腐真菌降解污染物的优点

白腐真菌可在次生代谢过程中产生非专一性的胞外酶,用于环境污染物降解时具有耗能低、效率高、广谱性、适应性强、二次污染少等特点,因此其在污染环境生物修复研究中引起广泛关注,与细菌相比具有下列优点:

1) 对被降解的污染物无浓度要求。细菌只能将高浓度的污染物降解至一定水平,并且不能使其完全矿化。白腐真菌降解污染物与其浓度无关,它依靠营养限制(主要是 C、N、S)时分泌产生的酶类启动降解过程,不仅能降解环境中的低浓度污染物,而且能使其完全矿化^[3-5]。

2) 降解方式不同。通常白腐真菌通过分泌的胞外降解酶系产生高氧化还原电位来氧化有机污染物;而细菌依赖胞内酶处理污染物,它们先被吸收,再发生降解,污染物浓度较高时会影响细菌的降解作用。

3) 降解底物的广谱性。白腐真菌的降解是以自由基为基础的链式反应过程。它对降解污染物无专一性,具有非特异性,一种白腐真菌可降解多种或混合污染物,而且一种污染物也可被多种白腐真菌降解,这与它独特的降解机制密切相关。

4) 适应固、液两种体系。白腐真菌适合在固体、液体基质中优势生长,而细菌在固态基质中生长较差;而且真菌的基因组较细菌复杂的多,导致细菌处理固体污染物的能力远不及真菌。

5) 营养要求的广泛性。白腐真菌生长对营养物要求不高,木屑、木片、农业废弃物等均可作原料进行大量培养,而细菌对培养液的营养条件较为苛刻。

2 白腐真菌在大气污染治理方面应用的研究进展

大气污染物主要包括燃煤产生的 SO_2 、粉尘以及各种挥发性有机化合物,种类多,范围广,严重危害人类的身体健康^[6]。白腐真菌净化有毒废气不需要高温、高压、催化剂,设备要求简单。近年来已成为大气污染控制技术领域的研究热点之一。王娟等^[7]选用驯化的污泥和白腐真菌作为菌源,研究了 2 类菌对苯、甲苯、二甲苯等有毒有机气体的生物降解规律。研究表明,污泥和白腐真菌混合菌对苯的降解效率远高于驯化污泥,混合菌最大降解率为 100%。王灿等^[8]构建了一种新型的白腐真菌生物过滤塔,对氯苯表现出良好的去除效果,在进口浓度为 $200 \sim 1\,500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、维持 122 s 后,污染物最大去除率接近 80%,平均去除率为 50%。徐复铭等^[9]将自行分离的白腐真菌应用于煤炭脱硫,通过优化白腐真菌脱硫的最佳实验条件,发现利用白腐真菌煤炭脱硫速度较快,2 d 内脱除 55.30% 的无机硫和 44.5% 的全硫。

3 白腐真菌在工业污水治理方面应用的研究进展

工业生产排放的有毒废水含有多种有机污染物,其浓度高、排放量大,对环境造成很大影响,一般很难用单一方法对其降解。白腐真菌具有降解底物广谱性,可对多种有机污染物彻底矿化,从而大大提高工业废水治理的效率。

Glenn 等^[10]1983 年首次报道了白腐菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 对染料废水有良好的脱色效果。目前对皂素废水的处理大多采用中和 UASB-SBR 法及 UASB-生物接触氧化-絮凝沉淀^[11]、内电解法^[12]、物化与生化预处理相组合^[13]、酵母菌生化预处理^[14]、活性污泥的吸收-消化^[15]等,但处理效果并不理想,达不到国家排放标准。刘建党等^[16]利用驯化后的白腐菌 (*P. chrysosporium*) 对皂素废水进行降解,研究发现 *P. chrysosporium* 的 COD_{Cr} 耐受负荷较传统活性污泥处理高 2~3 倍,对 COD_{Cr} 、色度的去

除率为80%,同时操作简单,实用性很强。

高毒性、难降解的含酚废水主要包括苯酚、氯酚及对硝基酚,它们是原型质毒物,对一切生物个体均有毒害作用^[17],利用白腐真菌降解含酚废水成本低、效果好、无二次污染^[18]。二硝基重氮酚(DDNP)在工业雷管中应用较为普遍,其产生的废水对环境有严重污染,而且治理难度很大。陈寿兵等^[19]将培养4 d的白腐真菌菌种投入经预处理的DDNP废水中,投入量为20%~25%,结果表明,苯胺类、硝基类废水的去除率达到99.19%以上,出水达到国家二级排放标准。樊鹏跃等^[20]采用从腐烂树枝上分离到的白腐真菌,以木屑为载体固定化后,发现对含苯酚的废水去除率可达76.56%。张晓晴等^[21]用 *Pleurotus ostreatus* 吸附,24 h内耐晒翠兰的脱色率超过90%。丁绍兰等^[22]应用固定化白腐真菌进行染料废水脱色实验,结果表明,最佳条件下对希力毛皮蓝、捷力毛皮蓝的脱色率分别为92.5%和92.62%。Nor Atikah Husna等^[23]采用PVA-海藻酸钠-硫酸法固定化 *P. chrysosporium* 处理纺织废水,发现脱色率提高至47.14%,COD去除率超过了60%。何德文等^[24]应用自行分离的白腐真菌进行TNT模拟废水降解实验,TNT含量由初始的59.66 mg·L⁻¹降至3.68 mg·L⁻¹,降解率高达90%以上,大分子TNT经氧化后,生成易被重铬酸钾氧化的其它有机物质。王庆生等^[25]利用白腐真菌处理硝基苯类化工废水时,发现常温下、pH值为7、初始COD_{Cr}浓度2000 mg·L⁻¹、硝基苯类化合物初始浓度为100 mg·L⁻¹、运行60 h后废水的COD_{Cr}去除率达到99%,硝基苯残余质量浓度几乎为0。邹世春等^[26]研究白腐真菌对水中不同氯代农药降解实验,发现在葡萄糖0.02%、酒石酸铵0.03%及无机盐适量的培养液中,35℃静置培养条件5~7 d后氯代农药的降解率可达90%以上。Joyce等^[27]以 *P. chrysosporium* 为菌源,采用生物反应器处理造纸厂漂白废水,优化条件下能去除2000色素单位,同时去除COD和BOD,并使氯化木素脱氯。Marwaha等^[28]在厌氧条件下应用 *P. chrysosporium* 降解造纸黑液,发现以黄麻绳为载体,温度40℃,pH=5.5、葡萄糖1%、持续72 h条件下,脱色效果和COD去除率最佳。Swamy等^[29]研究了3种白腐真菌(*Bjerkandera* sp.、*P. chrysosporium*和*Trametes versicolor*)对苋红、Remazol黑B、Remazol橙、Remazol亮蓝、金莲橙O的脱色效果,发现*Bjerkandera* sp.只降解苋红、Remazol黑B和Remazol橙,而*P. chrysosporium*和*T. versicolor*能降解所有染料,*T. versicolor*的降解速度是*P. chrysosporium*的数倍,*T. versicolor*间歇培养后,还能迅速降解重复加入的染料和混合染料。Miyata等^[30]发现在缺氮源的培养基中白腐真菌*Coriolus hirsutus*降解类黑精,添加氨态氮和硝态氮后对降解没有明显影响,添加Mn²⁺则提高降解效率,添加蛋白胨反而降低降解效果。Bhaumik等^[31]在好氧、厌氧条件下采用固定床生物反应器降解硝化甘油,研究表明,好氧条件下采用混合菌种与黄孢原毛平革菌(*P. chrysosporium*)能将三硝酸甘油降解为二硝酸甘油、一硝酸甘油,且降解效果与酶活有较好的相关性。任大军等^[32]比较了不同培养基中白腐真菌对2种浓度焦化废水中吡啶的降解过程,结果显示,不同培养基中白腐真菌在酶活最高时可去除99%以上的吡啶。

4 白腐真菌在土壤污染治理方面应用的研究进展

与大气和水污染治理相比,我国的土壤污染治理研究较为薄弱,如果处理不当,常可引起大气和水的二次污染。1983年我国已全面禁止DDT的使用,但土壤中已有大量残留。DDT的化学性质稳定,在环境中残留时间长,极难分解。Zhao等^[33]利用白腐真菌产生的漆酶来降解DDT,结果发现,DDT的降解率最高可达76.5%,而且与土壤中的含氧量成正相关。氯丹是一种广谱性有机氯杀虫剂,自然降解速度缓慢。肖鹏飞等^[34]采用2株白腐菌(*P. lindtneri*与*P. brevispora*)降解反式氯丹,采用Kirk及PDB培养基培养6周后,发现两种菌均能降解超过50%的反式氯丹。肖鹏飞等^[35]采用液体培养法研究白腐真菌*Phlebia acanthocystis*对狄氏剂的降解性能及机理,结果表明,接种菌体后异狄氏剂在10 d培养期间的降解率达到57%左右,同时该菌株在异狄氏剂的初始浓度为20 μmol·L⁻¹时具最大降解速率。原油是一种复杂的混合物,不同原油其成分有较大的差异,环境自然净化过程一般都比较缓慢。付辉等^[36]采用复合菌剂青顶拟多孔菌(*Polyporellus picipes*)、糙皮侧耳菌(*Pleurotus ostreatus*)和偏肿拟栓菌(*Pseudotrametes gibbosa*)降解原油污染土壤,结果显示,原油的降解率与复合菌剂的添加量成正比,复合菌剂投加

后 20 d 内降解效果极其显著,保持一定的土壤湿度有利于复合菌剂对原油的降解。

Bending 等^[37]采用 9 种白腐真菌降解莠去津,研究发现采绒革盖菌(*Coriolus versicolor*)、簇生黄韧伞(*Hypholoma fasciculare*)和毛革盖菌(*Stereum hirsutum*)对莠去津的降解率均超 86%。Gaitan 等^[38]利用绒毛栓菌(*Trametes pubescens*)在优化条件下产生的漆酶粗提物,对土壤中含有的单氯苯酚、双氯苯酚、三氯苯酚的降解率分别为 100%、99.0%和 82.1%。Acevedo 等^[39]选用在 Kirk 培养基上接种 *Anthracophyllum discolor* 研究 PAHS 混合物的降解,研究显示,当菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(α)芘以混合物形式存在时,降解率显著提高,污染土壤灭菌后降解率分别达到 62%、73%、54%、60%和 75%。

5 白腐真菌在其他方面应用的研究进展

废物堆肥处理时的过程一般较慢,有机物降解不够彻底,严重影响了肥料在农业上的应用。近几十年来,大量研究发现白腐真菌可以明显加速堆肥过程。有研究人员利用白腐真菌对含重金属的垃圾进行堆肥处理,发现在含高浓度 Pb 的垃圾堆肥中,白腐真菌可提高微生物活性,减轻铅的危害,且无需添加额外有机物质,可大大节约堆肥成本。

白腐真菌产生的漆酶具有催化特异性和底物宽泛性,在许多生物技术应用方面得以应用。20 世纪 90 年代初,漆酶首次用于生物免疫检测和食品工业中。以漆酶为标记酶,其抗灵敏度有很大提高,同时对培养基中低浓度变价金属离子具有敏感性。

白腐真菌能将多酚类物质氧化生成多酚氧化物,聚合形成的大颗粒可被滤膜截留,其催化反应专一性强,污染少,可以解决果汁加工中的饮料澄清与色泽控制。此外,漆酶可用来测定抗坏血酸在食品中的含量。漆酶将邻苯二胺氧化成 2,3-二氨基吩嗪,而 L-抗坏血酸可抑制 2,3-二氨基吩嗪的生成,漆酶酶活与抗坏血酸含量呈反比,该方法已应用在食品检测中。漆酶甚至可以催化氧化一些无机化合物,例如:碘、 $\text{Mo}(\text{CN})_8^{4-}$ 和 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ 。杨秀清等最近发现,白腐真菌 *Trametes* sp. 产生的漆酶作用 9 min 后可以完全转化 2-羟基-6 氧-6-苯基-2,4-己二烯酸,它是联苯降解过程中的代谢产物,不容易降解。

6 结 语

白腐真菌广谱的生物降解性,可降解和净化环境中的多种有机污染物,但白腐真菌也存在一些缺陷,如何最大程度发挥白腐真菌的优势,为环境保护作更大贡献,可从以下几方面作研究:针对不同有毒有机污染物的降解能力,如何补充适当的营养成分和选择最佳降解方法提高生物降解能力是今后工作的重点;如何利用基因工程方法获得高降解率的菌株以及酶的固定化研究使酶能够反复利用,以降低酶制剂成本,以及生物降解机制的揭示等。随着学者们研究的深入,它们必将在环境保护中显现出更好的应用前景。

参考文献:

- [1] 董亮,谢冰,黄民生,等.白腐真菌酶学与分子生物学研究进展[J].环境科学与技术,2005,28(5):102-104
- [2] BUMPUS J A, TIEN M, WRIGHT D, et al. Oxidation of Persistent Environmental Pollutants by a White Rot Fungus [J]. Science, 1985, 228: 1434-1436
- [3] MICHAEL G, GOLD M H. Molecular Biology of the Lignin Degrading Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Microbiological Reviews, 1993, 57(3): 605-622
- [4] 郭梅,蒲军,路福平,等.白腐菌漆酶特性及其应用前景[J].天津农学院学报,2004,11(3):44-47
- [5] 李慧蓉.白腐真菌在碳素循环中的地位和作用[J].微生物学通报,1996,23(2):105-109
- [6] 伦世仪,陈坚,曲音波.环境生物工程[M].北京:化学工业出版社,2002:18
- [7] 王娟,钟秦,郑曼曼.石化污泥混合菌和白腐真菌对气相苯系物的降解能力比较[J].安全与环境学报,2005,5(2):14-17
- [8] 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):28-32
- [9] 徐复铭,杨凌霄,周申范.用白腐菌脱除重庆高硫煤中硫的研究[J].煤炭学报,1999,4(4):424-428
- [10] GLENN J K, GOLD M H. Decolorization of Several Polymeric dyes by the Lignin Degrading Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Appl Environ Microbiol, 1983, 45: 1741-1747

- [11] 张志扬,李江华,贾丽云,等. UASB-生物接触氧化-絮凝沉淀法处理皂素废水[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(1):32-34
- [12] 但锦锋,祁王景,陆晓华. 内电解法预处理皂素废水[J]. 中国给水排水,2003,19(12):43-44
- [13] 刘礼祥,解清洁,吴晓辉,等. 水解-激波厌氧-好氧工艺处理皂素废水研究[J]. 化学与生物工程,2004(1):49-51
- [14] 宋凤敏,呼世斌,刘音. 酵母菌处理皂素生产废水的研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2004,5(4):66-69
- [15] 王惠丰,呼世斌. 吸收-消化法处理薯蓣皂素废水的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(5):89-91
- [16] 刘建党,呼世斌,冯贵颖,等. 白腐真菌处理皂素生产废水的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(12):152-158
- [17] 李许斌,张明亮,王鹏. 含酚废水处理技术的研究与进展[G]. 辽宁省环境科学学会2012年学术年会,2012
- [18] 赵长军. 白腐真菌处理难生物降解的有机废水的初步研究[J]. 城市建设,2010(25):54
- [19] 陈寿兵,张学才,徐灏龙,等. 白腐真菌降解经微电解预处理二硝基重氮酚废水的研究[J]. 环境污染与防治,2006,28(2):143-146
- [20] 樊鹏跃,崔建国,贾贺. 固定化白腐真菌处理含酚废水[J]. 环境工程学报,2014,8(5):1977-1981
- [21] 张晓晴. 白腐真菌处理染料废水的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2010
- [22] 丁绍兰,陈旭婷,白雄艳. 固定化白腐真菌处理染料废水的研究[J]. 陕西科技大学学报,2014,32(5):16-20
- [23] HUSNA N A, NASIR A. Textile Effluent Discoloration by Immobilized *Phanerochaete chrysosporium* into PVA-alginate-sulfate beads[J]. Journal Teknologi,2013,62(2):1-5
- [24] 何德文,黄俊,周申范. 白腐真菌生化降解 TNT 废水的效果研究[J]. 环境卫生工程,1999,7(1):35-37
- [25] 王庆生,李捍东,席北斗. 利用白腐菌处理含硝基苯类化工废水的研究[J]. 环境学研究,2002,15(2):19-21
- [26] 邹世春,张展霞. 白腐菌降解氯代农药的机理[J]. 中山大学学报:自然科学版,1998,37(5):112-115
- [27] JOYCE T W, CHANG H M, Campbell A G, et al. Continuous Biological Process to Decolorize Bleach Plant Effluents [J]. Biotechnology Advances,1984,2(2):301-308
- [28] MARWAHA S S, GROVER R, PRAKASH C, et al. Continuous Biobleaching of Black Liquor from the Pulp and Paper Industry Using an Immobilized Cell System[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology,1998,73(3):292-296
- [29] SWAMY J, RRMSAY J A. The Evaluation of White Rot Fungi in the Decoloration of Textile Dyes[J]. Enzyme & Microbial Technology,1999,24(3):130-137
- [30] MIYATA N, MORI T, IWAHORI K, et al. Microbial Decolorization of Melanoidin Containing Wastewater: Combined Use of Activated Sludge and the Fungus *Coriolus Hirsutus*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering,2000,89(2):145-150
- [31] BHAUMIK S, CHRISTODOULATOS C, G P KORFIATIS, et al. Aerobic and Anaerobic Biodegradation of Nitroglycerin in Batch and Packed Bed Bioreactors [J]. Water Science and Technology,1996,36(2):16-18
- [32] 任大军,张晓翌,颜克亮,等. 白腐菌对焦化废水中吡啶的降解及其机理[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(5):121-124
- [33] ZHAO Yunchun, YI Xiaoyun. Effects of Soil Oxygen Conditions and Soil pH on Remediation of DD-contaminated Soil by Laccase from White Rot Fungi[J]. Int. J. of Environ. Res. and Public Health,2010,7(4):1612-1621
- [34] 肖鹏飞,程国玲,宋玉珍,等. 白腐菌对氯丹的降解性能及降解途径研究[J]. 中国环境科学,2011,31:39-45
- [35] 肖鹏飞,近藤隆一郎. 白腐真菌对异狄氏剂的降解特性及降解机理[J]. 应用与环境生物学报,2013,19(1):19-25
- [36] 付辉,孟瑶,梁红,等. 复合白腐真菌菌剂修复原油污染土壤[J]. 森林工程,2012,28(4):17-20
- [37] BENDING G D, FRILOUX M, WALKER A. Degradation of Contrasting Pesticides by White Rot Fungi and its Relationship with Ligninolytic[J]. Fems Microbiol. Lett.,2002,212(1):59-63
- [38] GAITAN I J, MEDINA S C, GONZALEZ J C, et al. Evaluation of Toxicity and Degradation of a Chlorophenol Mixture by the Laccase Produced by *Trametes Pubescens*[J]. Bioresource Technology,2010,102(11):3632-3635
- [39] ACEVEDO F, PIZZUL L, CASTILLO M P, et al. Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by the Chilean White Rot Fungus *Anthracozyllum Discolor*[J]. Journal of Hazardous Materials,2011,185(1):212-219

(责任编辑:湛江)