

# 白囊耙齿菌的代谢特性、生物活性及多领域应用研究综述

张雅惠<sup>1,2</sup> 左盼盼<sup>2</sup> 刘正学<sup>1,\*</sup>

1 重庆三峡学院环境与化学工程学院

2 山东大学微生物改造技术全国重点实验室

DOI:10.32629/eep.v9i1.3017

**[摘要]** 白囊耙齿菌兼具药用价值与工业应用潜力,其代谢产物与酶系统多样且功能优异。本文综述其次生代谢产物、提取物活性及酶学应用研究进展:代谢产物涵盖倍半萜类、三萜类等,具细胞毒性、抗炎、抗菌等活性;提取物富含多糖、蛋白质等,具有肾脏保护、抗疲劳等功效,且肾脏保护作用已实现临床转化;其漆酶、锰过氧化物酶等在生物质转化、环境修复等领域前景广阔。文末分析研究不足并展望未来,为该菌深度开发提供参考。

**[关键词]** 白囊耙齿菌; 次生代谢产物; 生物活性; 生物转化; 环境治理

中图分类号: TQ450.2+1 文献标识码: A

## A Review on Metabolic Characteristics, Biological Activities, and Multi-Field Applications of *Irpex lacteus*

Yahui Zhang<sup>1,2</sup> Panpan Zuo<sup>2</sup> Zhengxue Liu<sup>1,\*</sup>

1 College of Environment and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University

2 National Key Laboratory of Microbial Engineering and Modification Technology, Shandong University

**[Abstract]** *Irpex lacteus* exhibits both medicinal value and industrial application potential, with diverse and highly functional metabolites and enzyme systems. This paper reviews the research progress regarding its secondary metabolites, extract bioactivities, and enzymatic applications. Secondary metabolites include sesquiterpenoids, triterpenoids, etc., which possess multiple bioactivities such as cytotoxicity, anti-inflammation, and antibacterial properties. Extracts are rich in active components like polysaccharides and proteins, exerting effects including renal protection, anti-fatigue, etc., among which renal protection has achieved clinical translation. Its laccase, manganese peroxidase and other enzymes show broad application prospects in biomass conversion, environmental remediation and other fields. Finally, the current research limitations are analyzed and future development directions are prospected, providing a reference for the in-depth development and utilization of *Irpex lacteus*.

**[Key words]** *Irpex lacteus*; secondary metabolites; biological activities; bioconversion; environmental governance

### 引言

白囊耙齿菌(*Irpex lacteus*)担子菌门、多孔菌目的一种白腐真菌<sup>[1]</sup>。白囊耙齿菌分布在中国的各省(区),如吉林、黑龙江、河北、江西、山西、四川、云南、西藏等地<sup>[2]</sup>,作为一种药用真菌,其用途广泛。目前,已被开发为临床药物用于治疗慢性肾小球肾炎<sup>[3]</sup>。

近年来,随着研究手段的不断进步,白囊耙齿菌的药用价值与工业应用潜力逐渐被发掘。在药用领域,其提取物中的多糖等成分已被证实具有显著的肾脏保护作用,成功开发为治疗慢性肾小球肾炎的临床药物;在生物活性研究方面,其次生代谢产物展现出抗炎、抗菌、抗肿瘤等多种功效,为新型天然药物的研发提供了候选化合物<sup>[4]</sup>。白囊耙齿菌的木质纤维素降解酶在生物

质资源化、污染物治理中优势显著。本文梳理其在次生代谢产物、生物活性及酶学应用的研究成果,分析瓶颈,为其多维度开发与产业化提供理论支撑。

### 1 白囊耙齿菌的次生代谢产物及其生物活性

次生代谢产物是真菌在生长发育过程中产生的非生长必需的小分子化合物,是真菌适应环境的重要物质基础,也是天然活性产物的重要来源。白囊耙齿菌的次生代谢产物种类丰富,结构多样,主要包括倍半萜类、三萜类、呋喃和环戊烷衍生物等化合物,这些产物展现出抗炎、抗菌等多种优异的生物活性,具有重要的药物开发潜力。

#### 1.1 倍半萜类化合物

倍半萜类是白囊耙齿菌次生代谢产物中研究最为深入的一

类化合物,尤其是tremulane型倍半萜及其衍生物,结构新颖且活性显著。Ding et al. (2018)从白囊耙齿菌培养物中成功分离得到5个新的tremulane型倍半萜化合物并且借助波谱学分析技术,明确解析了这些化合物的化学结构及相对构型。他们对其生物活性进行测定,发现这5种化合物对多种人源癌细胞系表现出中等强度的细胞毒性<sup>[5]</sup>。

### 1.2 三萜类化合物

三萜类化合物是白囊耙齿菌中一类具有重要生理活性的次生代谢产物。Tang et al. (2019)对白囊耙齿菌中三萜类化合物进行了分离和初步生物活性筛选,发现部分三萜类化合物被证实对多种人类癌细胞系具有弱细胞毒性<sup>[6]</sup>。他们从白囊耙齿菌子实体中成功分离并鉴定出5个新的三萜。结合波谱技术、计算分析及科顿效应测定,明确了其绝对构型,并且这些化合物对细胞中NO生成均有显著抑制作用,显示出作为抗炎药物先导化合物的开发潜力<sup>[7]</sup>。

### 1.3 其他类型化合物

Sadahiro Y et al. (2020)从白囊耙齿菌与稻暗球腔菌这两株内生真菌的共培养体系中,分离得到1个新的异吡啶酮生物碱以及1个已知绿色色素(hyposxyxylone)。研究发现,异吡啶酮生物碱是白囊耙齿菌与稻暗球腔菌共培养时新产生的代谢产物;而hyposxyxylone虽能在白囊耙齿菌纯培养体系中生成,但共培养可显著提高其产量。生物活性测试结果显示,异吡啶酮生物碱对人宫颈癌细胞(HeLa)具有中等细胞毒性,对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌表现出微弱抗菌活性<sup>[8]</sup>。

## 2 白囊耙齿菌提取物的生物活性

白囊耙齿菌提取物是多种活性成分的混合物,根据提取溶剂的不同主要分为水提取物、醇提取物等,这些提取物继承了单一活性成分的部分功能,同时可能因成分间的协同作用而表现出更优异的综合生物活性。其有效成分主要有蛋白质、多糖、腺苷和甘露醇等<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1 肾脏保护活性

肾脏保护是白囊耙齿菌提取物最经典、最成熟的生物活性。Wu et al. (2010)利用体外大鼠肾小球系膜细胞模型及响应面试验法证明了白囊耙齿菌中的多糖对系膜细胞增殖有明显的抑制作用<sup>[11]</sup>。狼疮肾炎(LN)是系统性红斑狼疮(SLE)的严重并发症。研究发现,从白囊耙齿菌中提取的多糖(PCP),能通过抑制PI3K/AKT/NF- $\kappa$ B通路,减轻炎症、调节免疫反应和保护肾功能,在低剂量注射小鼠中发挥肾脏保护作用,从而有效治疗狼疮性肾炎<sup>[12]</sup>。

### 2.2 抗疲劳活性

随着现代社会生活节奏的加快,疲劳已成为影响人类健康的重要问题,其与多种慢性疾病的发展和生活质量的下降密切相关,开发天然、高效的抗疲劳产品具有广阔的市场前景<sup>[13]</sup>。Wang et al. (2019)评估白囊耙齿菌提取物(ILE)对昆明小鼠的抗疲劳活性,经多项运动试验发现,ILE显著延长小鼠运动持续时间。同时,ILE提升血清相关激素水平,调节抗氧化指标,兼具

抗疲劳与抗氧化作用<sup>[14]</sup>。

### 2.3 抗纤维化活性

多囊卵巢综合征(PCOS)是一种多方面内分泌疾病,育龄妇女中最常见的内分泌病变之一<sup>[15]</sup>。白囊耙齿菌多糖(ILP)可靶向TGF- $\beta$ 1/Smad信号通路,干预多囊卵巢综合征(PCOS)大鼠卵巢纤维化。其通过抗炎抗氧化减少TGF- $\beta$ 1上游激活,抑制Smad2/Smad3磷酸化、上调Smad7表达阻断通路传导,下调促纤维化基因表达以逆转纤维化,同时改善大鼠代谢与激素失衡,具有多重治疗潜力<sup>[16]</sup>。

## 3 白囊耙齿菌的酶及其应用

白囊耙齿菌作为典型的木腐真菌,能够产生多种胞外酶,尤其是木质纤维素降解相关酶类,如漆酶、锰过氧化物酶、木质素过氧化物酶、纤维素酶等。这些酶类具有催化效率高、特异性强、环境友好等优点,在环境治理、生物能源、染料脱色等多个领域具有广泛的应用前景。

### 3.1 生物质转化

为了满足社会的需求,农业生产和食品工业不断扩张,从而导致每年产生大量农用工业废物<sup>[17]</sup>。一般来说,大多数农用工业废物被丢弃在垃圾填埋场或焚烧,从而导致各种环境问题,并对人类和野生动物的健康构成潜在危害<sup>[18-19]</sup>。木质纤维素,是一种由纤维素、半纤维素和木质素组成的复杂基质,含量分别为33-40%、20-25%和15-20%(w/w)<sup>[20]</sup>。在木质纤维素中,这三种组分形成的紧密网络阻碍了降解。因此,木质纤维素酶的水解需要纤维素酶、半纤维素酶和木质素分解酶的协同作用。丰富的多糖含量使木质纤维素成为发酵和生物燃料生产的诱人原料<sup>[21]</sup>。对木质纤维素进行预处理,可以去除木质纤维生物质中的半纤维素和木质素,提高其有效酶糖化的可及性。

已有研究表明,白囊耙齿菌是一种具有很强的木质纤维素降解能力的白腐担子菌,在处理玉米秸秆时可以优先降解木质素,随后在晚期急剧增加纤维素的降解率。通过微观结构的分析,发现经处理后,样品的孔洞和裂缝明显增大,解释了预处理后酶解效率提升的原因<sup>[22]</sup>。García-Torreiro M et al. (2016)利用白囊耙齿菌对四种农业废弃物(玉米秸秆、大麦秸秆、玉米芯和小麦秸秆)进行了处理。发现在预处理后,玉米秸秆的木质素显著降低45.8 $\pm$ 3.5%,糖耗最低11.5 $\pm$ 1.4%。此外,除玉米芯外,所有底物生物预处理后,全纤维素总消化率均显著提高37-103%<sup>[23]</sup>。

### 3.2 生物修复

白囊耙齿菌多样的木质素降解酶系、强劲的生长能力、土壤定殖能力,以及对土壤细菌抑制作用的耐受性,均表明该菌株是一种适用于生物修复的优良真菌。Baborová P et al. (2006)选取菲、蒽、荧蒽及芘四种多环芳烃作为代表底物,对锰过氧化物酶的体外降解能力进行验证,结果证实该酶可有效降解上述四种物质。此外,研究还鉴定出了蒽降解的主要产物<sup>[24]</sup>。Song et al. (2012)发现白囊耙齿菌可将浓度为100 mg/L的辛基酚、壬基酚及苯基酚完全降解。在氮限制的柯克基础盐培养基中,白囊耙齿菌仅需1小时,即可降解近100%的100 mg/L辛基酚与壬基酚,

且在此过程中,菌株的锰过氧化物酶(MnP)活性高达1790U/L<sup>[25]</sup>。Li et al. (2022)开发了一套原位PFAS修复系统,该系统可作为底物与污染物载体,为白囊耙齿菌的原位生物修复过程提供支持,进而促进全氟和多氟烷基物质的解毒转化<sup>[26]</sup>。

### 3. 3染料脱色与漂白

微生物酶制剂在造纸工业中应用广泛,这类酶制剂不仅能够提升纸浆品质,还可减少漂白过程中氯及其他化学物质的使用量。Choi et al. (2013)发现白囊耙齿菌KUC8958对刚果红(CR)、橙黄II(OII)和活性蓝4(RB4)三种合成染料表现出较高的脱色率。且振荡培养条件下的染料脱色率,相较静置条件高出约20%至60%<sup>[27]</sup>。Qin et al. (2014)从白囊耙齿菌中分离纯化出一种新型锰过氧化物酶,并将其命名为CD2-MnP。研究结果显示,CD2-MnP对多种金属离子和有机溶剂具有较强的耐受性,并且可高效降解多种类型的染料,包括偶氮染料、蒽醌染料、靛蓝染料等,同时对模拟纺织印染废水也具有良好的脱色效果。值得注意的是,即便在金属离子与有机溶剂共存的体系中,CD2-MnP仍能保持优异的染料脱色能力<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

首先白囊耙齿菌因丰富的次生代谢产物、多样生物活性及高效酶学系统,成为医药、环境、工业等领域研究热点。其次生代谢产物为天然药物研发提供物质基础,提取物具有肾脏保护等药用价值,木质纤维素降解酶则在生物质转化与生物修复中彰显环境和经济价值。但当前研究存在短板:次生代谢产物合成调控机制不明、活性成分产量低;酶制剂工业化应用受限于活性不稳定、成本高等。未来需依托多组学技术解析合成通路,优化酶生产工艺,加强多领域协同创新,推动其产业化应用,实现资源价值最大化。

### [参考文献]

- [1] Dong XiaoMing D X M, Song XinHua S X H, Liu KuanBo L K B, et al. Prospect and current research status of medicinal fungus *Irpex lacteus*[J]. 2017.
- [2] 刘亚亚,张秀丽,秦一统,等.子午岭林区野生白囊耙齿菌分离与ITS分子鉴定[J].现代农业科技,2022,(16):43-46.
- [3] Dong X, Song X, Dong C. Nutritional requirements for mycelial growth of milk-white toothed mushroom, *Irpex lacteus* (Agaricomycetes), in submerged culture[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2017, 19(9).
- [4] 董晓明,宋新华,刘宽博,等.药用真菌白囊耙齿菌的研究现状及展望[J].菌物学报,2017,36(01):28-34.
- [5] Ding J H, Li Z H, Feng T, et al. Tremulane sesquiterpenes from cultures of the basidiomycete *Irpex lacteus*[J]. Fitoterapia, 2018, 125:245-248.
- [6] Tang Y, Zhao Z Z, Feng T, et al. Triterpenes with unusual modifications from the fruiting bodies of the medicinal fungus *Irpex lacteus*[J]. Phytochemistry, 2019, 162:21-28.
- [7] Tang Y, Zhao Z Z, Yao J N, et al. Irpeksins A-E, 1, 10-seco

-eburicane-type triterpenoids from the medicinal fungus *Irpex lacteus* and their anti-NO activity[J]. Journal of Natural Products, 2018, 81(10):2163-2168.

[8] Sadahiro Y, Kato H, Williams R M, et al. Irpexine, an isoin dolinone alkaloid produced by coculture of endophytic fungi, *Irpex lacteus* and *Phaeosphaeria oryzae*[J]. Journal of Natural Products, 2020, 83(5):1368-1373.

[9] 杨真威,姜瑞芝,陈英红,等.耙齿菌糖蛋白的提取分离、理化性质及抗炎活性[J].天然产物研究与开发,2005,(03):280-282.

[10] 石陶圣,吴凌,赵兴红,等.响应面法优化白囊耙齿菌多糖提取条件[J].中国医药工业杂志,2009,40(10):743-746.

[11] Wu L, Zhang X G, Shi T S, et al. Optimization of extraction for *Irpex lacteus* polysaccharides and its bioactivity[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2010, 21(12):3094-3096.

[12] Ji G, Yao Z, Zhao Y, et al. Systems Pharmacology and Multi-Omics Elucidation of *Irpex lacteus* Polysaccharides in the Treatment of Lupus Nephritis Through PI3K/AKT/NF- $\kappa$ B Pathway Inhibition[J]. Pharmaceuticals, 2025, 18(11):1619.

[13] 潘静怡,杨悦,王方.核桃粕酶解多肽的抗氧化与抗疲劳活性研究[J].食品安全质量检测学报,2026,17(01):305-315.

[14] Wang J, Li C, Hu W, et al. Studies on the anti-fatigue activities of *Irpex lacteus* polysaccharide-enriched extract in mouse model[J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019, 32(3).

[15] Yuan J, Li Z, Yu Y, et al. Natural compounds in the management of polycystic ovary syndrome: a comprehensive review of hormonal regulation and therapeutic potential[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12:1520695.

[16] Zhou Y Y, Wu Y Q, Chong C J, et al. *Irpex lacteus* polysaccharide exhibits therapeutic potential for ovarian fibrosis in PCOS rats via the TGF- $\beta$ 1/smad pathway[J]. Heliyon, 2023, 9(8).

[17] Mirabella, N.; Castellani, V.; Sala, S. Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. J. Clean. Prod. 2014, 65, 28-41.

[18] Anwar, Z.; Gulfranz, M.; Irshad, M. Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. J. Radiat. Res. Appl. Sc. 2014, 7, 163-173.

[19] Cherubin, M.R.; Oliveira, D.M.D.S.; Feigl, B.J.; Pimentel, L.G.; Lisboa, I.P.; Gmach, M.R.; Varanda, L.L.; Morais, M.C.; Satiro, L.S.; Popin, G.V.; et al. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. Sci. Agricola 2018, 75, 255-272.

[20] Prasad, S., Singh, A., Joshi, H.C., 2007. Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. Resources Conservation and Recycling 50, 1-39.

[21] Song L, Liu B, Zhu Q, et al. Genomic and Transcriptomic Insights into Carbon-Source and Temporal Induction of a Diverse Set of Lignocellulolytic Enzymes in *Irpex lacteus* QJ[J]. *Journal of Fungi*, 2025, 11(12):882.

[22] Xu C, Ma F, Zhang X, et al. Biological pretreatment of corn stover by *Irpex lacteus* for enzymatic hydrolysis[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2010, 58(20):10893-10898.

[23] García-Torreiro M, López-Abelairas M, Lu-Chau T A, et al. Fungal pretreatment of agricultural residues for bioethanol production[J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 89: 486-492. 2017, 36, 28-34.

[24] Baborová P, Möder M, Baldrian P, et al. Purification of a new manganese peroxidase of the white-rot fungus *Irpex lacteus*, and degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by the enzyme[J]. *Research in Microbiology*, 2006, 157(3):248-253.

[25] Moon D S, Song H G. Degradation of alkylphenols by

white rot fungus *Irpex lacteus* and its manganese peroxidase [J]. *Applied biochemistry and biotechnology*, 2012, 168(3):542-549.

[26] Li J, Li X, Da Y, et al. Sustainable environmental remediation via biomimetic multifunctional lignocellulosic nano-framework[J]. *Nature communications*, 2022, 13(1):4368.

[27] Choi Y S, Long Y, Kim M J, et al. Decolorization and degradation of synthetic dyes by *Irpex lacteus* KUC8958[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2013, 48(5):501-508.

[28] Qin X, Zhang J, Zhang X, et al. Induction, purification and characterization of a novel manganese peroxidase from *Irpex lacteus* CD2 and its application in the decolorization of different types of dye[J]. *PLoS One*, 2014, 9(11):e113282.

#### 作者简介:

张雅惠(2000--),女,汉族,内蒙古巴彦淖尔市人,硕士研究生,研究方向:环境微生物。