

木质素微生物降解机制研究进展

李晓茜 周盛楠 王海鹏 王伟东*

东北林业大学生命科学学院东北盐碱地植被生态恢复教育部重点实验室

DOI:10.32629/eep.v9i5.3223

[摘要] 木质素是木质纤维素的核心组分,因其异构性和难降解性,使得秸秆等农业废弃物资源化利用被严重制约,而且秸秆焚烧会造成资源浪费与环境污染。生物降解因绿色温和的特性,已经成为木质素资源化主要研究方向。系统综述了木质素降解微生物的种类与单菌降解机制,对真菌分泌的木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶、漆酶等氧化酶,及细菌分泌的脱甲基酶、芳环裂解酶等辅助酶的核心功能进行探究;重点阐述复合菌系通过氧化-辅助酶协同配合、菌群调控微环境等实现了高效降解的多酶协同机制。为开发高效低成本木质素生物降解技术、推动秸秆资源化与污染治理提供了理论支撑。

[关键词] 木质素; 微生物降解; 降解酶系; 复合菌系; 协同机制

中图分类号: Q93 文献标识码: A

Advances in the Study of Microbial Degradation Mechanisms of Lignin

Xiaohan Li Shengnan Zhou Haipeng Wang Weidong Wang*

Key Laboratory of Vegetation Ecology Restoration in Northeast Saline-Alkali Land, College of Life Sciences, Northeast Forestry University

[Abstract] Lignin, as the core component of lignocellulose, exhibits structural heterogeneity and recalcitrance, which severely limits the resource utilization of straw. Straw burning also results in resource waste and environmental pollution. Biodegradation represents a promising green strategy for lignin valorization. This review summarizes lignin-degrading microorganisms and the degradation mechanisms of single strains, focusing on fungal oxidative enzymes and bacterial auxiliary enzymes. It further highlights the multi-enzyme synergistic mechanism in complex microbial consortia, providing theoretical support for developing efficient, low-cost lignin biodegradation technologies and advancing straw resource utilization and pollution abatement.

[Key words] Lignin; Microbial degradation; enzyme system; Complex microbial consortium; Synergistic mechanism

引言

木质素是木质纤维素的核心组成部分,结构复杂、难降解^[1],是限制秸秆等农业废弃物资源化利用的关键瓶颈^[2]。我国每年产生大量秸秆类农业废弃物,因木质素难以高效分解,大量秸秆被直接焚烧,不仅造成可再生生物资源浪费,还引发严重的环境污染。

木质纤维素在自然界中属于储量最为庞大的可再生生物物质资源,实现其高效降解对农业废弃物资源化、生态环境保护均具有重要意义。生物降解是木质素资源化利用的主要研究方向,通过了解木质素降解过程中微生物间的协同作用,分析其降解过程中的酶促机制,可为开发高效、低成本的木质素生物降解技术提供理论依据,对推动秸秆资源化、缓解环境污染具有重要的作用。

1 木质素降解微生物的简述

自然界中,细菌和真菌均能对木质素进行降解。单一菌株的木质素代谢途径相对明确,但降解效率普遍较低。木质素的高效降解,往往依赖多种微生物的协同代谢。田佳慧等在含木质素的废水中混合培养雨生红球藻与细菌TD18(*Gordonia terra*)。实验结果表明:混合培养过程中木质素的降解速率分别提高了3.49倍和1.02倍^[3]。卢肖肖等探讨了烟草秸秆的降解过程,并通过复合菌剂有效提高其降解效率,将其应用于田间试验^[4]。

2 单一菌株木质素降解体系及机制

单一菌株依靠自身合成的专属酶系完成木质素降解,酶系组成简单且分工明确,主要分为氧化降解酶与辅助水解酶两大类。

真菌以氧化降解为核心代谢方式,如图1所示,其可分泌三类关键氧化酶:一是木质素过氧化物酶(LiP),该酶可依托过氧化氢介导氧化反应,直接攻击木质素非酚型芳香环,断裂稳定

C-C键与 β -O-4醚键,破坏木质素大分子骨架;二是锰过氧化物酶(MnP),以 Mn^{2+} 为介质,生成强氧化性的 Mn^{3+} ,氧化分解酚类木质素结构,去除甲基、羟基等侧链基团,为LiP降解提供反应位点;三是漆酶(Lac),以氧气为电子受体,专一催化酚型化合物氧化,生成自由基并断裂侧链与芳香环。

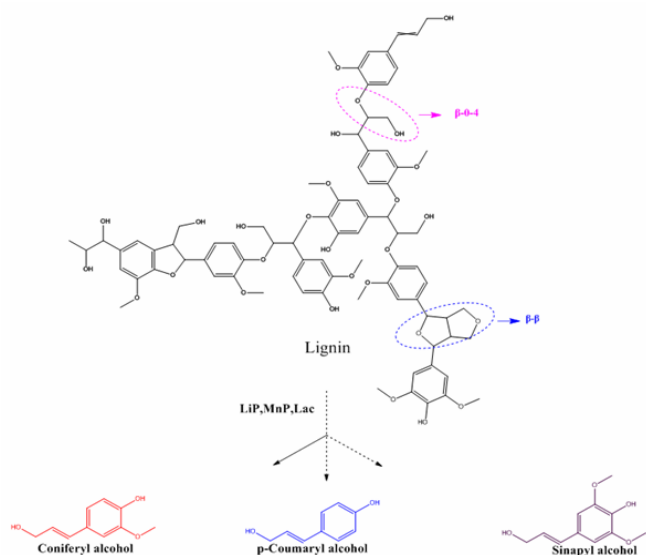


图1 真菌分泌的氧化酶类在木质素降解过程中的作用

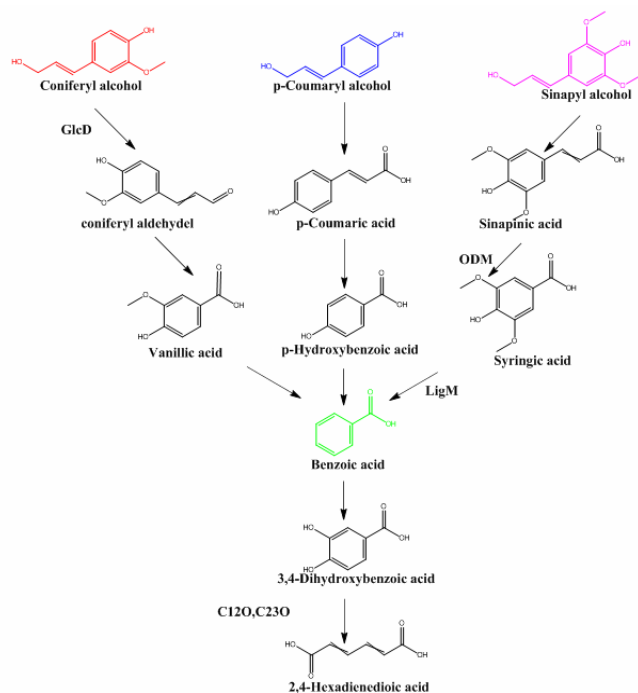


图2 细菌分泌的辅助酶类在木质素降解过程中的作用

细菌难以直接降解大分子木质素,主要分泌辅助功能酶:脱甲基酶可以使木质素甲氧基断裂,实现侧链改性;酯酶水解木质素内部酯键,拆解小分子连接结构;芳环裂解酶可开环降解芳香族中间产物,完成下游小分子代谢。图2可直观的展现出细菌分泌的辅助酶系统在木质素降解过程中的作用,真菌将大分子木

质素解聚为单体后,松柏醇在香草醇氧化酶催化下依次氧化为松柏醛、香草酸;对香豆醇经侧链断裂反应生成对香豆酸,再进一步转化为对羟基苯甲酸;芥子醇降解为芥子酸和丁香酸,其中O-脱甲基酶介导紫丁香基结构的脱甲基过程,脱甲基酶LigM参与了香草酸和丁香酸向苯甲酸的转化过程,三条路径最终汇聚为苯甲酸,再转化为3,4-二羟基苯甲酸(原儿茶酸);最终由邻苯二酚1,2-双加氧酶或邻苯二酚2,3-双加氧酶催化芳环开环。开环后的产物则会通过三羧酸循环进入碳的中心代谢过程。

3 复合菌系协同降解体系及互作机制

复合菌系是将两种及以上功能互补的微生物人工组合,构建结构稳定、降解能力更强的体系。将真菌作为优势降解菌,负责大分子木质素氧化裂解;细菌作为辅助菌,分解中间产物、优化微环境。常见组合包括白腐真菌-芽孢杆菌、真菌-假单胞菌等。真菌会先分泌氧化酶破坏木质素的致密三维结构,断裂顽固的化学键,将大分子木质素拆解为芳香类小分子中间体;细菌可以利用中间产物,通过水解、开环反应完成小分子代谢。此外,菌群代谢过程中可能存在交叉喂养现象,一类微生物代谢产物可作为另一类微生物的营养底物。*P. aeruginosa* PAOI的DypB与醌还原酶可以协同氧化木质素^[5],群体感应调控芳香族代谢,适合与解聚菌共培养解除产物抑制;如Bayer等利用放线菌*Actinotalea fermentans*,在其分泌的产纤维素酶的作用下,将纤维素先转化为乙酸盐和乙醇,随后在工程菌株酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)的协同下,将其进一步转化为甲基卤化物^[6]。Minty等构建了一个微生物菌群,由*Escherichia coli*和产纤维素酶的真菌*Trichoderma reesei*组成^[7],*E. coli*自身无法产生纤维素酶但却可以借用*T. reesei*水解后的产物。因此,复合菌系中不同微生物间如何利用交换代谢产物实现协同降解木质素的机理值得研究。

4 复合菌系间的多酶协同机制

复合菌系中LiP、MnP、Lac三类氧化酶协同催化,实现木质素全结构氧化裂解。漆酶首先氧化表层酚型结构,断裂木质素外围连接键;锰过氧化物酶介导锰离子氧化,修饰侧链基团,暴露内部难降解位点;木质素过氧化物酶进一步作用于非酚型芳香环,断裂核心醚键与碳碳键。三类氧化酶协同配合,弥补单一氧化酶作用位点单一的缺陷,提升了大分子解聚效率。真菌氧化酶完成大分子裂解后,细菌分泌的脱甲基酶、芳环裂解酶继续进行降解。辅助酶对氧化产物进行侧链改性芳香环开环等,将复杂芳香中间体转化为简单有机酸、醇类物质,形成了层级式的酶促降解体系。

与此同时,复合菌系还可以通过代谢活动调节反应体系中的pH、溶氧量等,使整个反应体系可以一直维持在各类酶的最适反应条件下。相比单菌酶体系稳定性更强、降解持续性更好。

5 结论与展望

当前木质素降解研究多集中于单菌纯培养、简单共培养或天然富集菌系,单菌降解效率低,天然菌群虽降解能力强,但菌种组成模糊、互作机制复杂,难以解析具体降解机理。因此,构

建一个组分明确、遗传稳定、降解高效的人工模式复合菌群,用于解析天然菌群协同降解机理;后续应结合多组学技术,深入揭示菌群互作、酶系协同的分子机制;可以为开发高效低成本木质素生物降解技术、推动秸秆等农业废弃物资源化利用提供理论支撑。

[参考文献]

[1]Huang M,Wu W,Gao J,et al.Effects of lignin compositions on the antioxidative and rheological properties of asphalt[J].Construction and Building Materials,2025,498:143592.

[2]Yan D,Bux H,Meghwar LM,et al.Study on the domestication of bamboo lignin-degrading microbial consortium to enhance lignin degradation capacity[J].Industrial Crops & Products,2026,242:123020.

[3]田佳慧,邢向英,董庆霖,等.雨生红球藻与细菌TD18混合培养降解木质素[J].化学工程,2025,53(11):20-25.

[4]卢肖肖,刘京,苟剑渝,等.优势复合菌对烟草秸秆的降解

特性及应用潜力[J].微生物学通报,2025,52(07):3156-3164.

[5]KatholM, Chowdhury N B,Immethun C,et al.High enzyme promiscuity in lignin degradation mechanisms in *Rhodospseudomonas palustris* CGA009[R].bioRxiv,2025.

[6]Bayer TS,Widmaier DM,Temme K,Mirsky EA,Santi DV, Voigt CA.Synthesis of methyl halides from biomass using engineered microbes[J].Journal of the American Chemical Society.2009,131(18):6508-6515.

[7]Minty JJ,Singer ME,Scholz SA,Bae CH,Ahn JH,Foster CE,Liao JC,Lin XN. Design and characterization of synthetic fungal-bacterial consortia for direct production of isobutanol from cellulosic biomass[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2013,110(36):14592-14597.

作者简介:

李晓茜(2001--),女,汉族,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,东北林业大学,研究方向:微生物学。