北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

不同成分脱除对欧洲赤松褐腐初期降解机制的影响

李燕 黄晨璞 毛亚茹 袁丁玲 朱愿

Effects of different component removals on initial degradation mechanism of brown rot in *Pinus sylvestris*

Li Yan, Huang Chenpu, Mao Yaru, Yuan Dingling, Zhu Yuan

引用本文:
李燕, 黄晨璞, 毛亚茹, 袁丁玲, 朱愿. 不同成分脱除对欧洲赤松褐腐初期降解机制的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):156–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250015
Li Yan, Huang Chenpu, Mao Yaru, Yuan Dingling, Zhu Yuan. Effects of different component removals on initial degradation mechanism of brown rot in *Pinus sylvestris*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):156–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250015

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250015

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

褐腐初期南方松木材微观形貌与化学成分分析
Analysis of microstructure and chemical components of southern pine during initial brown–rot decay
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 138–144. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210024

甲氧基丙烯酸酯类制剂的木材防腐性能研究
Wood decay performance of strobilurins preservatives
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 131–137. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210010

牛蒡叶活性成分快速提取及对木腐菌抑制效果
from *Arctium lappa* leaves and its anti–fungal properties of wood rot fungi
北京林业大学学报, 2017, 39(5): 109–116. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170010

印楝提取物制备的微囊防腐剂在木材中的固化规律
Curing rule of microcapsules preservatives prepared from neem extracts in wood
北京林业大学学报, 2018, 40(4): 117–124. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170447

纳米CuO/硅溶胶制剂处理杨木性能的研究
Research on the performance of poplar wood treated by nano–CuO/silica sol formulations
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 109–117. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210299

转*BpCCR*1正义链及反义链对7年生盆栽白桦木质素的影响及优良株系选择
Effects of transgenic sense and antisense of *BpCCR*1 on 7–year–old potted birch and selection of excellent lines
北京林业大学学报, 2019, 41(6): 86–95. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180412

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250015

不同成分脱除对欧洲赤松褐腐初期降解机制的影响

李 燕 黄晨璞 毛亚茹 袁丁玲 朱 愿
（中南林业科技大学材料与能源学院，湖南 长沙 410004）

摘要:【目的】褐腐菌致腐机制的研究集中于其对木材细胞壁组分的降解，但木材的物理、化学特性对其初期降解的影响尚不明确。因此，本研究通过解析木材结构特征对褐腐初期降解机制的影响，深入理解褐腐菌的致腐机制，为木材防腐和生物质高效利用提供科学指导。**【方法】**以欧洲赤松为研究对象，采用乙醇抽提（EE）、乙醇−亚氯酸钠处理（EE-SC）和水热处理（HT），分别制备低抽提物、低木质素和低半纤维素特征的木材试件。选用密黏褶菌开展褐腐测试，结合 SEM、FTIR、XRD 等表征技术，研究不同腐朽阶段欧洲赤松试件外观形貌、表面菌丝生长情况、质量损失率以及主要组分（纤维素、半纤维素和木质素）含量的变化，深入解析不同特征木材褐腐初期的降解机制。**【结果】**通过乙醇抽提、乙醇−亚氯酸钠处理和水热处理，分别构建了具有低抽提物、低木质素及低半纤维素特征的木材试件。由质量损失率、宏微观结构、化学组分等结果可知，在褐腐测试过程中，不同处理组木材试件均发生了一定程度的降解，其中低抽提物木材试件的降解程度与对照组相近，而低木质素和低半纤维素木材试件的菌丝生长量及细胞壁降解程度显著高于对照组。在褐腐 15 d 时，所有处理组试件中半纤维素相对含量增加，表明此阶段半纤维素的相对保留度高于其他组分，由此推测半纤维素可能并非褐腐菌的最优碳源，其降解作用主要是破坏细胞壁结构完整性。**【结论】**抽提物的脱除对褐腐初期木材降解速率无显著影响，而木质素或半纤维素的选择性脱除则显著加速了木材褐腐初期降解进程。在褐腐菌降解初期，半纤维素降解破坏细胞壁结构屏障，为纤维素降解提供通道。这揭示了褐腐菌利用木材资源的策略，为理解其降解机制提供了新思路。本研究从木材结构−降解响应关联新视角，深入解析木材腐朽机制，为开发细胞壁靶向调控的绿色防腐技术和生物质高效转化提供理论依据。

关键词：木材腐朽；木材防腐；褐腐菌；降解；木材成分脱除；半纤维素；木质素
中图分类号：S781 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)05−0156−10
引文格式：李燕，黄晨璞，毛亚茹，等. 不同成分脱除对欧洲赤松褐腐初期降解机制的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：156−165. Li Yan, Huang Chenpu, Mao Yaru, et al. Effects of different component removals on initial degradation mechanism of brown rot in *Pinus sylvestris*［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 156−165.

Effects of different component removals on initial degradation mechanism of brown rot in *Pinus sylvestris*

Li Yan Huang Chenpu Mao Yaru Yuan Dingling Zhu Yuan
(College of Materials and Energy, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: ［**Objective**］ Research on brown-rot fungi decay mechanisms has primarily focused on the degradation of wood cell wall components. However, the influence of wood's physical and chemical properties on initial decay process remains unclear. This study aims to investigate the impact of wood structural characteristics on initial brown-rot mechanism, thereby deepening the understanding of brown-rot

收稿日期: 2025−01−15 **修回日期:** 2025−02−24
基金项目: 国家自然科学基金项目（32201484）。
第一作者: 李燕。主要研究方向：木材腐朽。Email: 17872642850@163.com 地址：410004 湖南省长沙市韶山南路 498 号中南林业科技大学材料与能源学院。
责任作者: 朱愿，副教授。主要研究方向：绿色功能涂层复合材料、生物质复合材料、木质材料生物降解与功能改良。Email: zhuyuan19890722@163.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

fungi decay mechanisms and providing scientific guidance for wood preservation and efficient biomass utilization. [**Method**] *Pinus sylvestris* was used as the research subject. Ethanol extraction (EE), ethanol-sodium chlorite treatment (EE-SC) and hydrothermal treatment (HT) were employed to prepare wood specimens with low extractives, low lignin, and low hemicellulose content, respectively. The brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum* was selected for decay testing. SEM, FTIR, and XRD characterization techniques were used to study the appearance, fungal mycelial growth, mass loss rate, and changes in main components (cellulose, hemicellulose, and lignin) of *P. sylvestris* specimens at different decay stages. The initial brown-rot degradation mechanisms of wood specimens with different structural characteristics were thoroughly analyzed. [**Result**] Wood specimens with low extractives, low lignin, and low hemicellulose content were successfully prepared by ethanol extraction, ethanol-sodium chlorite treatment, and hydrothermal treatment. Mass loss rate, macro- and micro-structural analysis, and chemical composition results indicated that all treated wood specimens underwent degradation during the brown-rot test. The degradation degree of low-extractive wood specimens was similar to control, while the mycelial growth and cell wall degradation of low-lignin and low-hemicellulose wood specimens were significantly higher than those control. After 15 days of brown-rot, the relative content of hemicellulose increased in all treated specimens. This indicated that hemicellulose was relatively more preserved than other components at this stage. It is therefore inferred that hemicellulose may not be the optimal carbon source for brown-rot fungi. The degradation of hemicellulose primarily serves to disrupt the integrity of cell wall structure. [**Conclusion**] Removal of extractives has no significant impact on the initial decay rate of wood, while selective removal of lignin or hemicellulose can significantly accelerate the initial brown-rot degradation process. At the initial stage of wood decay by brown-rot fungi, the degradation of hemicellulose disrupts the structural barrier of cell wall, providing a pathway for cellulose degradation. This reveals the strategy of brown-rot fungi in utilizing wood resources and offers new insights into understanding the decay mechanisms. This study, from the new perspective of correlation between wood structure and degradation response, deeply analyzes the wood decay mechanism. It also provides a theoretical basis for the development of green wood protection technologies based on cell wall-targeted regulation and the efficient conversion of biomass resources.

Key words: wood decay; wood preservation; brown-rot fungi; degradation; wood component removal; hemicellulose; lignin

木材腐朽是制约其高效综合利用的关键因素之一。在各类木材腐朽中，褐腐因其独特的破坏机制以及对针叶材等重要结构用材造成的快速破坏而备受关注[1]。木材褐腐降解的特点在于：腐朽初期褐腐菌主要通过非酶降解途径选择性地破坏木材组分，从而导致木材力学强度的急剧下降[2]。具体而言，褐腐菌通过铁离子（Fe^{2+}/Fe^{3+}）、还原性物质与过氧化氢（H_2O_2）的协同作用形成类芬顿反应体系，产生大量羟基自由基等活性氧物质[3]。这些活性氧物质导致木材中半纤维素与纤维素分子链的选择性降解，同时木质素的化学结构也受到一定程度的修饰[4]。这一化学层面的破坏是木材结构快速失效及力学强度骤降的核心原因。然而，目前对于这一降解机制的理解仍不完善，仍有许多问题有待进一步阐明。因此，深入研究木材褐腐初期降解机制，对于开发新型木材防腐技术和木材资源的高效利用具有重要意义。

目前，木材褐腐研究主要集中在褐腐菌对木材细胞壁各组分的降解机制上，而木材自身的物理与化学特性如何影响褐腐菌的初期降解活动仍缺乏深入研究，导致对褐腐菌早期降解木材组分的作用机制缺乏系统性理解。木材预处理技术为解析木质材料结构与生物降解机制的关联性提供了重要研究手段。现有研究表明，乙醇抽提能够选择性脱除酚类、萜类等脂溶性抽提物，同时最大程度地保留木材纤维素/半纤维素−木质素的三维网络结构[5]，有助于揭示抽提物组分对褐腐过程的调控机制。酸性亚氯酸钠处理可选择性脱除木质素[6]，增加木材孔隙率[7]，并降低其细胞壁结构密实度[8]，为研究选择性脱除木质素对褐腐菌降解行为的影响提供理想模型。水热处理则优先水解半纤维素，破坏木质素−多糖界面结合[9]，适用于探究脱除半纤维素对褐腐菌降解行为的影响。上述预处理方法可选择性脱除木材组分，为

揭示不同成分脱除处理下木材褐腐初期降解机制提供技术支撑。

因此，本研究选取欧洲赤松（*Pinus sylvestris*）为研究对象，通过乙醇抽提、乙醇−亚氯酸钠联合处理和水热处理，分别构建呈现低抽提物、低木质素和低半纤维素特征的欧洲赤松木材试件，并选用密黏褶菌（*Gloeophyllum trabeum*）开展褐腐测试。前期研究结果表明，褐腐测试 15 d 后木材已出现显著质量损失[10]；而另有观点认为，以非酶降解活动为主的褐腐初期中木材的质量损失相对有限[11]。鉴于本研究聚焦于非酶降解引发的木材初期腐朽机制，我们认为 15 d 的时间足以捕捉到这一关键阶段的降解特征。因此，本研究选取 6 d 和 15 d 作为关键时间点，通过表征木材的质量损失、微观形貌、化学组分和晶体结构的变化，深入解析褐腐初期木材各组分降解的作用机制。本研究旨在进一步完善木材褐腐降解理论，并为新型木材防腐技术的开发和生物质资源的高效利用提供坚实的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材 料

褐腐测试木材试件选用欧洲赤松边材。将气干试材制备成尺寸为 10 mm（纵向）× 20 mm（弦向）× 20 mm（径向）的试件，在 103 ℃ 条件下干燥至质量恒定，记为 m_0。饲木选用马尾松边材试件，尺寸为 3 mm（纵向）× 25 mm（弦向）× 25 mm（径向）。褐腐真菌选用密黏褶菌（No. 5.98，中国微生物菌种保藏中心）。

1.2 不同特征木材试件的制备

1.2.1 低抽提物特征木材试件

通过乙醇抽提处理，制备具有低抽提物特征的木材，并将其标识为 EE 组木材。将欧洲赤松木块置于 95%（质量分数）乙醇溶液中，并采用循环多用真空泵（SHZ-D（Ⅲ），邦西仪器科技（上海）有限公司）在−0.1 MPa 下真空处理 10 min，待其沉底后转移至烧瓶中，在 80 ℃ 条件下热浴处理 6 h[12]，抽提结束后将木块取出，用去离子水冲洗表面，气干后转移至 103 ℃ 烘箱中干燥至质量恒定状态。

1.2.2 低木质素特征木材试件

通过乙醇与亚氯酸钠联合处理，制备具有低木质素特征的木材，并将其标识为 EE-SC 组木材。首先，将 1.2.1 中制备的欧洲赤松木块放入 1 L 圆底烧瓶中。接着，依次加入 650 mL 去离子水、6 g 亚氯酸钠和 5 mL 冰醋酸，充分摇匀后，将烧瓶置于 75 ℃ 的水浴中进行加热处理[13]。隔 1.5 h 后，再次加入 6 g 亚氯酸钠和 5 mL 冰醋酸，继续摇匀，并保持在 75 ℃ 的水浴中，使整个第一次脱木素过程持续 3 h。随后，待反应体系自然冷却至室温，在−0.1 MPa 的负压条件下对木块进行真空处理，每次处理 20 s，重复操作 2～3 次，直至无明显气泡产生。然后，维持 5 min 的真空状态，直至木块完全下沉。之后，再次加入 6 g 亚氯酸钠和 5 mL 冰醋酸，将烧瓶重新置于 75 ℃ 的水浴中，按照上述步骤进行第 2 次脱木素处理，持续 4.5 h。待反应完成，取出木块，用去离子水反复冲洗其表面，气干后转移至 103 ℃ 烘箱中干燥至质量恒定状态。

1.2.3 低半纤维素特征木材试件

通过水热处理，制备具有低半纤维素特征的木材，并将其标识为 HT 组木材。将 10 块试件放入抽滤瓶中，加入约 200 mL 去离子水，于−0.1 MPa 的真空条件下保持 5 min，直至试件完全被浸没，将每个试件转移至已加入 15 mL 去离子水的 25 mL 高硼硅无导口烧杯中，并置入密闭反应釜内衬，在 160 ℃ 水热处理 120 min[14]，待冷却后取出木块，用去离子水冲洗表面，气干后转移至 103 ℃ 烘箱中干燥至质量恒定状态。

1.3 性能表征

1.3.1 腐朽测试

据美国木材保护协会标准 E10-16 对未处理欧洲赤松（CK）和不同方法预处理欧洲赤松试件开展腐朽测试。接种前，采用 3 mL 的麦芽糖溶液（质量分数 8%）均匀喷洒于马尾松饲木表面及其边缘的土壤，接种密黏褶菌菌丝块后，置于 28 ℃、相对湿度 80% 的恒温培养箱中，待菌丝完全覆盖饲木表面后（约 14 d），再将待测试件放置于饲木上方进行腐朽测试，测试过程中保持温湿度条件不变。分别在培养 6 d 和 15 d 后进行试件取样，用于后续分析。轻轻刮除木块表面的菌丝，再将木块在 103 ℃ 下干燥至质量恒定，记为 m_1，并按式（1）计算腐朽试件质量损失率（R_{ML}）。

$$R_{ML} = (m_0 - m_1)/m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中：m_0 为腐朽测试前的绝干质量，g；m_1 为腐朽测试后的绝干质量，g。

1.3.2 微观形貌

在扫描电子显微镜（TESCAN MIRA，泰思肯（中国）有限公司）拍摄前，采用戊二醛与聚乙二醇将腐朽试件进行固定/包埋处理，使用轮转式切片机（HS 2205，金华市华速科技有限公司）切片，制备平整的横截面和弦切面。试样经冷冻干燥后，固定在观察板上，依次进行真空处理和喷金。加速电压为 15 kV。

1.3.3　化学组分

将待测木粉（40 目）用苯−乙醇溶液（体积比 2∶1）抽提 6 h，然后称取 2 g 抽提后的木粉，加入 65 mL 去离子水，置于 75 ℃ 水浴中进行热浴处理，每隔 1 h 依次加入 0.6 g 亚氯酸钠和 0.5 mL 冰醋酸，共添加 5 次，以获得综纤维素[15]。综纤维素在氢氧化钠溶液（质量分数 17.5%）中丝光化处理后得到 α-纤维素。半纤维素含量为综纤维素含量与 α-纤维素含量差值[16]。抽提后的木粉通过浸在硫酸溶液（体积分数 72%）中，稀释并煮沸 4 h，得到酸不溶性木质素[17]。在本研究中，纤维素指代 α-纤维素，木质素指代酸不溶木质素。

在采用傅里叶变换红外光谱仪（Nicolet iS20，赛默飞世尔科技公司）分析前，将尺寸大于 200 目的木粉与溴化钾粉末（质量分数 1%）混合，压成薄片。光谱范围为 400～4 000 cm^{-1}，扫描 32 次，分辨率为 4 cm^{-1}。

1.3.4　晶体结构

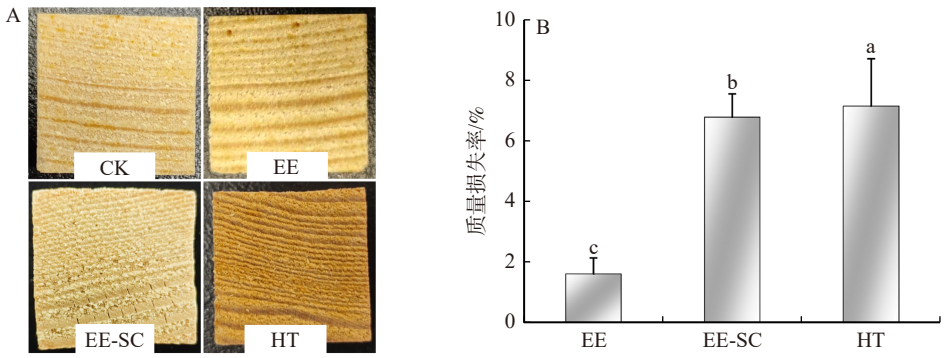
采用 X 射线衍射仪（Ultima IV，日本理学公司）对尺寸为 200 目的木粉进行扫描分析，扫描范围 2θ 为 5°～40°，扫描速度为 2.0 (°)/min，步长为 0.02°，依据 Segal 方法计算木材纤维素的相对结晶度。

2　结果与讨论

2.1　不同成分脱除处理对木材外观和化学组分的影响

与未处理欧洲赤松（CK）相比，乙醇抽提处理（EE）组木材的外观色泽变化甚微（图 1A），表明乙醇抽提主要萃取木材中脂溶性抽提物，而对欧洲赤松木材细胞壁主成分的影响较小。乙醇−亚氯酸钠联合处理（EE-SC）组木材的外观颜色变浅（图 1A），这与该处理方法选择性脱除具有生色基团的木质素有关[18]。水热处理（HT）组木材外观颜色显著加深（图 1A），这与半纤维素脱除导致的木质素相对含量增加有关。不同处理组试件的破坏程度依次为 HT > EE-SC > EE，其造成的木材质量损失率分别为 7.16%、6.79%、1.62%（图 1B）。由此得出，上述成分脱除处理方法对木材外观及质量产生了不同程度的影响，构建出具有差异化外观特征的欧洲赤松试件，其化学组成的差异化有待进一步分析。

在 CK 试件中，纤维素、半纤维素、木质素的相对含量分别为 28.04%、40.03%、23.13%（图 2A）。EE 组相较于 CK 组，其主要化学组分的变动幅度较小，表明乙醇抽提处理主要是脱除木材中多酚、萜类等抽提物[5]，对木材细胞壁主要成分未造成显著降解，这与以往研究结果[19]一致，表明 EE 组木材试件具有低抽提物特征。与 CK 组相比，EE-SC 组木材中木质素相对含量显著降低，由 28.04% 骤降至 18.73%，与此同时，半纤维素的相对比例有所增加，而纤维素的相对比例则略微下降，表明 EE-SC 组木材试件具有低木质素特征。与 CK 组相比，HT 组木材半纤维素相对含量明显降低，从 23.13% 降至 17.14%，且木质素的相对含量小幅度降低。由 FTIR（图 2B）结果可知，相较于 CK 组，EE-SC 组在 1 510 cm^{-1}（木质素中的芳香族骨架振动）和 1 600 cm^{-1}（木质素中的 C—O 振动）特征峰处峰强明显减弱，证实了木质素的选择性脱除；而 HT 组在 897 cm^{-1}（纤维素中的 C—H 变形）以及 1 510 cm^{-1} 处峰强度增加，表明纤维素和木质素的相对增加，间接验证了半纤维素的选择性脱除。上述研究发现与现有研究结果[6,14]一致，表明水热处理主要作用于半纤维素，而乙醇−亚氯酸钠联合处理主要作用于木质素，但不同成分脱除处理方法并非单一针对某一组分发挥作用。综上所述，EE、EE-EC 和 HT 处理方法可诱导木材组分发生选择性脱除，使欧洲赤松木材分别呈现出低抽提物、低木质素和低半纤维素特征，这为探究木材物理和化学特性对褐腐菌初期降解行为的影响提供了关键的技术支撑。



CK. 未处理；EE. 乙醇抽提处理；EE-SC. 乙醇−亚氯酸钠联合处理；HT. 水热处理。图 B 中不同字母表示不同组别之间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

图 1　不同成分脱除处理后欧洲赤松边材试件的外观形貌（A）和质量损失率（B）

Fig. 1　Morphological appearance (A) and mass loss rate (B) of *Pinus sylvestris* sapwood specimens after the removal of different components

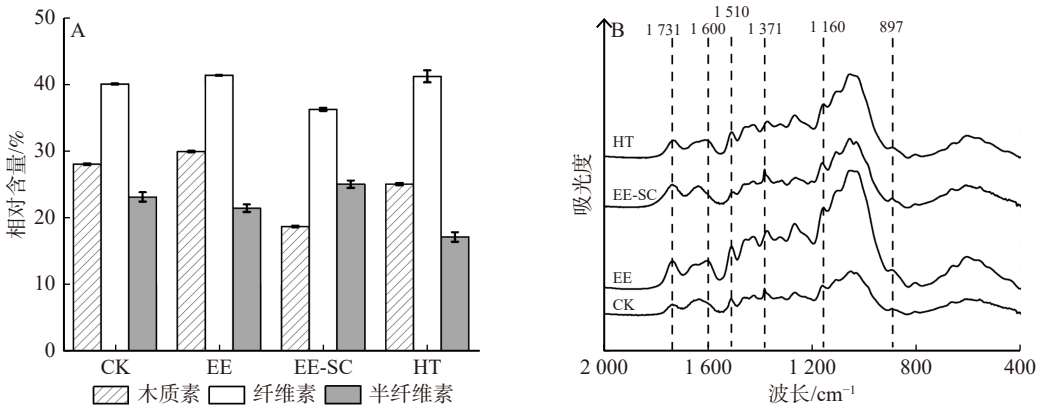


图 2 不同成分脱除处理后欧洲赤松边材试件的主成分相对含量(A)和傅里叶红外光谱图(B)

Fig. 2 Relative content of main components (A) and FTIR spectra (B) of *P. sylvestris* sapwood specimens after removal of different components

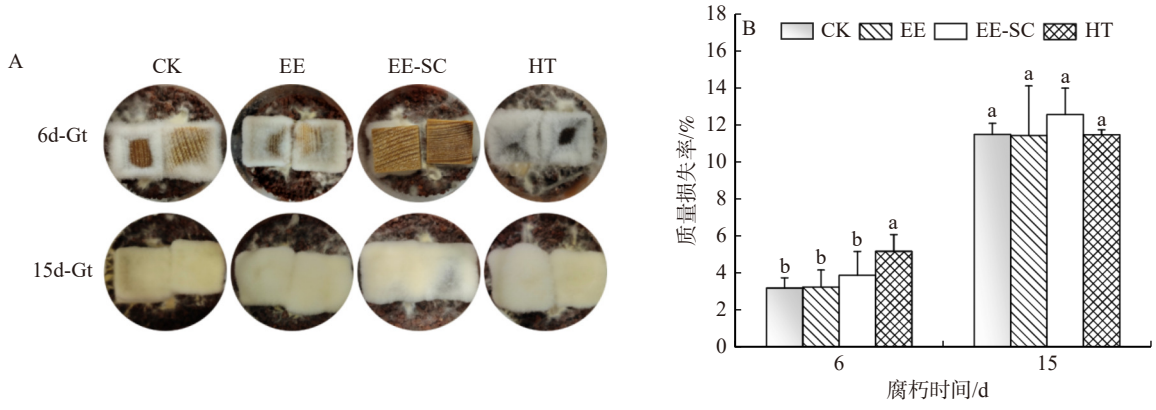
2.2 不同特征木材试件的褐腐降解特征

2.2.1 质量损失率和微观形貌

图 3A 显示:所有结构试件在腐朽 6 d 和 15 d 后均出现了不同程度的菌丝生长。腐朽初始阶段,褐腐菌菌丝呈白色,随着时间延长逐渐转变为淡黄色团簇状,直至覆盖整个试件表面。在腐朽 6 d 时,EE-SC 组试件表面未见明显菌丝生长,但其质量损失率却高达 3.88%,高于 CK 组(3.19%)。这可能是由于低木质素的木材具有更高的孔隙率[20],使得褐腐菌能更迅速地侵入木材内部,加速木材的降解过程,从而导致试件表面未出现明显菌丝,但质量损失率不低。

图 3B 显示欧洲赤松质量损失率随着腐朽时间的延长而增加,这与菌丝生长量变化趋势相符。EE 组与 CK 组试件的降解程度基本一致,表明对于低抽提物的木材而言,抽提物不会显著影响褐腐降解速率和程度。虽然 HT 组试件在腐朽 15 d 时的质量损失率(11.45%)与 CK 组(11.47%)相近,但考虑到 HT 处理选择性降解了部分半纤维素,这意味着在相近的质量损失率下,HT 组试件剩余组分的降解程度实则高于 CK 组,而 EE-SC 组腐朽 15 d 时的质量损失率(12.55%)高于 CK 组,共同表明了低木质素与低半纤维素欧洲赤松更易发生降解。综上所述,不同成分脱除处理均未抑制褐腐菌的降解行为,反而不同程度地促进了木材褐腐降解过程,这进一步印证了木材结构及其化学组分对其褐腐降解过程具有显著影响。

在腐朽测试前,EE 和 HT 组试件的微观形貌与 CK 组相比未见显著差异,而 EE-SC 组试件的细胞壁层间出现了孔洞(如图 4C 中白色圆圈所示),这与亚氯酸钠处理过程中木质素的脱除相关[21]。在腐朽过程中,SEM 图像(图 4)所反映的菌丝生长情况与宏观表现一致,即随着腐朽时间的延长,菌丝生长量逐渐增加。未腐朽的 CK 组木材细胞腔表面相对光滑,整体结构保持完整;在腐朽 6 d 时,细胞腔中开始出现少量菌丝,同时观察到细胞壁的次生壁层已出现破坏性孔洞;腐朽 15 d 时,大量菌丝通过纹孔侵入细胞腔,且细胞壁结构出现明显裂缝,遭受严重破坏(图 4A),这与现有研究结果[22]一致。低抽提物(EE 组)木材的降解程度与 CK 组相似(图 4B),而



d-Gt 代表腐朽天数,下同。

图 3 欧洲赤松边材试件腐朽后的外观形貌(A)和质量损失率(B)

Fig. 3 Morphological appearance (A) and mass loss rate (B) of decayed *P. sylvestris* sapwood specimens

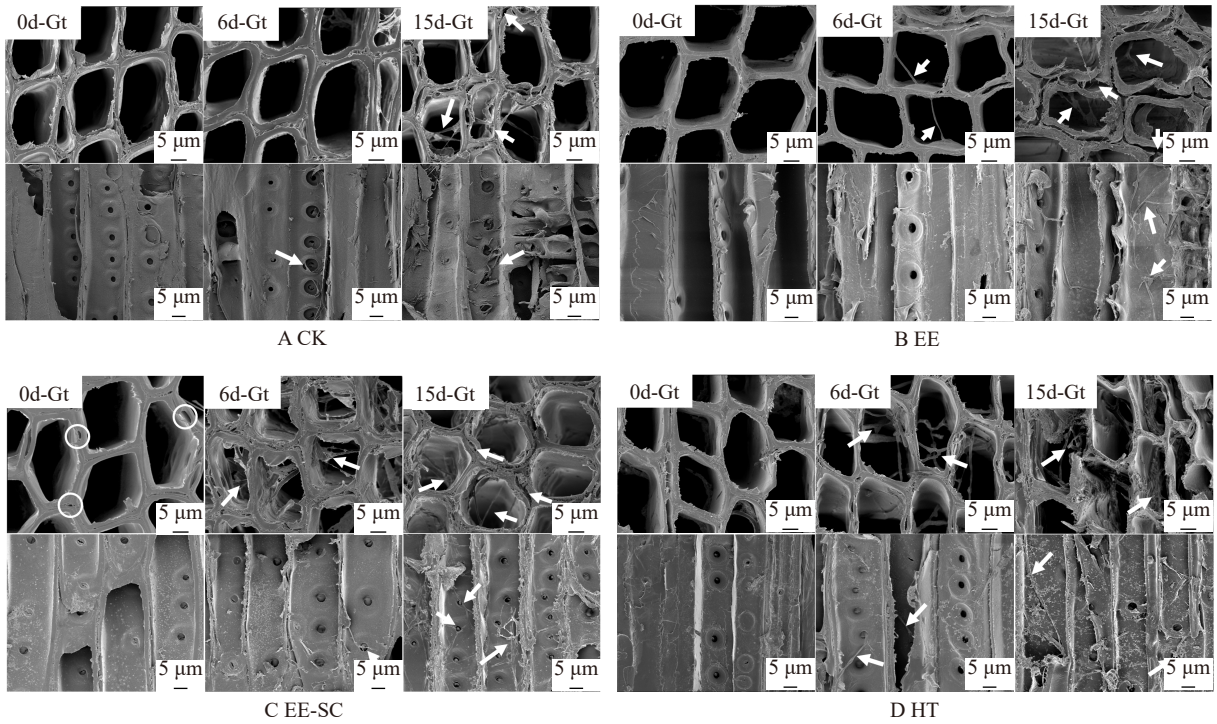


图 4　欧洲赤松边材试件腐朽后的 SEM 图

Fig. 4　SEM images of decayed *P. sylvestris* sapwood specimens

低木质素（EE-SC 组）和低半纤维素（HT 组）木材的细胞壁遭受了更为严重的破坏（图 4C, D），具体表现为细胞腔内率先出现大量贯穿生长的菌丝，并形成许多由腐朽造成的孔洞。上述观察结果表明，木质素与半纤维素的选择性脱除破坏了木材细胞壁的完整性，从而加速了褐腐菌对其他木材结构及组分的降解。

2.2.2　化学组成

由于褐腐菌对木质素的降解能力相对有限[23]，本研究将木质素含量作为定量指标，以分析不同成分脱除处理对木材化学组分的影响（图 5）。在腐朽过程中，CK 组与低抽提物（EE 组）木材试件的化学组分变化趋势一致，即纤维素相对含量持续下降，木质素相对含量持续上升，而半纤维素相对含量变化幅度较小且出现了轻微增加，这与典型的褐腐降解特征一致[10]。低木质素（EE-SC 组）木材试件在腐朽后木质素的相对含量呈现增加趋势，从 18.73%（腐朽 0 d）增至 22.30%（腐朽 15 d），表明褐腐菌加剧了对其碳水化合物组分的降解。结合其 SEM 图，可推断脱除木质素促使木材微观结构趋于疏松，为褐腐菌侵入和降解木材提供了便利通道，从而促进了纤维素和半纤维素的分解与利用。由此得出，木质素在褐腐菌侵染破坏过程中起到了一定的阻碍作用。低半纤维素（HT 组）木材试件在腐朽 15 d 后的质量损失率与 CK 组相近，但考虑到该处理已导致大量半纤维素损失，且褐腐菌难以高效利用木质素，可以推断该情况下褐腐菌降解的主要组分为纤维素，其纤维素相对含量从 41.17%（腐朽 0 d）降至 31.32%（腐朽 15 d），表明脱除半纤维素能使更多纤维素暴露并被降解。值得注意的是，在腐朽 15 d 时，这 3 种不同结构特征的木材，其半纤维素的相对含量均呈现增加趋势，这表明褐腐过程中半纤维素的保留度较高。半纤维素通常被当作褐腐菌的生长碳源[24]，而本研究中发现脱除半纤维素并未延缓褐腐降解进程，而是间接促进了褐腐菌对纤维素的降解。由此推测，半纤维素并非褐腐进程推进的必要碳源。褐腐初期半纤维素降解的潜在机制可能是：通过破坏细胞壁的完整性，使更多的纤维素暴露出来，进而促进纤维素的利用。

在腐朽过程中，以下特征峰的强度发生了显著变化：1 731 cm^{-1}（半纤维素中的 C═O 伸缩振动）、1 510 cm^{-1}（木质素中的芳香族骨架振动）、1 371 cm^{-1}（纤维素和半纤维素中的 C—H 变形）、1 160 cm^{-1}（纤维素和半纤维素中的 C—O—C 振动）和 897 cm^{-1}（纤维素中的 C—H 变形）[4]。在 CK 组中，1 160、1 731 cm^{-1} 处特征峰强度降低，而 1 510 cm^{-1} 处的吸收峰则保持相对稳定，这表明褐腐菌优先降解碳水化合物，且对木质素的降解能力相对有限，这与以往研究结果[25−26]一致。在褐腐过程中，低抽提物（EE 组）木材试件的 FTIR 分析结果显示，其各特征峰强度的变化趋势与对照组（CK 组）相近。这一结果证实了乙醇抽提物对褐腐菌初期降解木材细胞壁

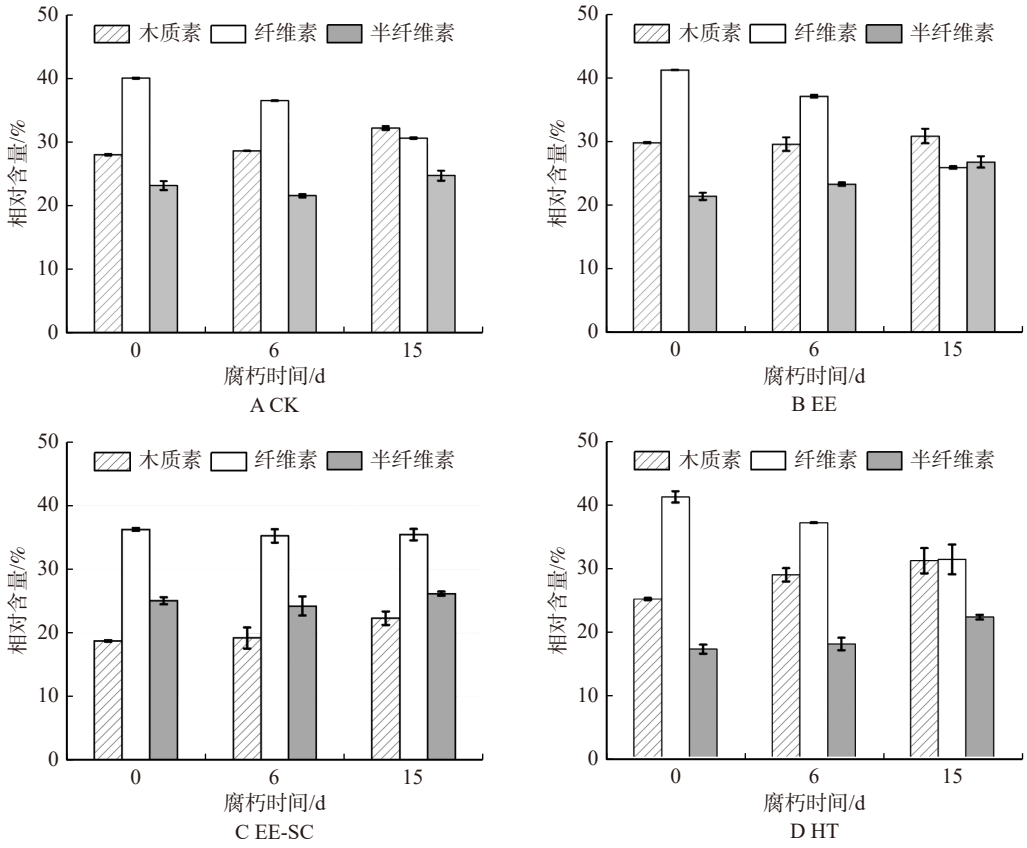


图 5 欧洲赤松边材试件腐朽后木质素、纤维素和半纤维素相对含量

Fig. 5 Relative contents of cellulose, hemicellulose, and lignin of decayed *P. sylvestris* sapwood specimens

组分的过程无显著影响。腐朽后，低木质素(EE-SC 组)木材试件的木质素特征峰(1 510 cm^{-1})强度增加，而 897 和 1 731 cm^{-1} 处的峰强减弱(图 6)。这一现象表明，脱除木质素促进了褐腐菌对纤维素和半纤维素的降解。与此同时，低半纤维素(HT 组)木材腐朽试件在 897 和 1 371 cm^{-1} 处的峰强明显降低，进一步证实了脱除半纤维素促进了褐腐菌对纤维素的解聚。上述研究结果与木材三大素(纤维素、半纤维素和木质素)组分的分析结果一致，证实了木材细胞壁无定形区组分的选择性脱除加速了褐腐菌的降解进程。

2.2.3 相对结晶度

在褐腐 6 d 时，CK 组的结晶度指数略有增加，且无定形区域的衍射强度减弱(图 7A)。这一现象表明，褐腐菌优先降解半纤维素等无定形组分从而导致结晶区的相对比例升高。然而，随着褐腐进程的进一步发展，相对结晶度呈现下降趋势，这主要是由于结晶纤维素的降解所致[4]。在腐朽过程中，低木质素(EE-SC 组)木材试件腐朽后其 002 晶面衍射峰强度呈现增加趋势，相对结晶度从 45.68%(腐朽 0 d)增至 49.38%(腐朽 15 d)，表明脱除木质素促进了褐腐菌对木材无定形组分的破坏；而低半纤维素(HT 组)木材试件腐朽后纤维素晶体峰强度持续下降，从 45.85%(腐朽 0 d)降至 40.66%(腐朽 15 d)，进一步证实了脱除半纤维素促进了褐腐菌对结晶区的降解。这一结果与 2.2.2 中化学组分的分析结果一致，表明脱除木质素促进了褐腐菌对半纤维素和纤维素的降解，而脱除半纤维素则促进了褐腐菌对纤维素的降解。

2.3 不同特征木材试件的褐腐降解机制

以往关于木材褐腐机理的研究表明，在褐腐过程中，木质素仅发生结构修饰，而半纤维素通常被视为褐腐菌可利用的营养物质来源之一[27]。从理论角度而言，木质素在褐腐过程中扮演着“屏障”的角色，其选择性脱除有利于褐腐进程的推进[28]，这与本研究结果一致，证实褐腐初期木质素的修饰旨在破坏细胞壁结构的完整性。对于半纤维素而言，其选择性脱除可能会抑制褐腐菌的降解行为。然而，在本研究中，低半纤维素欧洲赤松试件在褐腐过程中的质量损失率与未处理组相近，表明半纤维素的选择性脱除不仅未抑制褐腐菌的侵入，反而加速了其对纤维素的降解。综合上述实验结果，本研究推测半纤维素在整个褐腐过程中可能并非褐腐菌生长及降解活动所必需的碳源，褐腐初期半纤维素的降解可能主要用于破坏木材细胞壁结构的完整性，从而为褐腐菌降解纤维素提供渗透通道。这些发现不仅

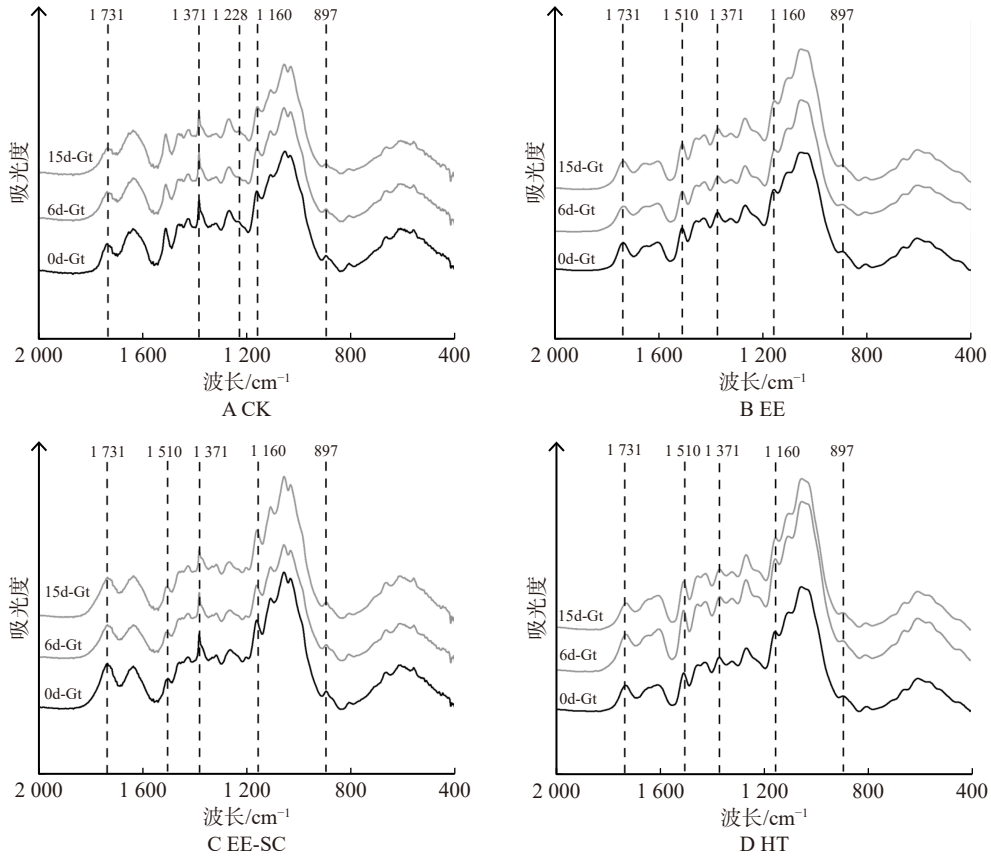


图 6　欧洲赤松边材试件腐朽后的傅里叶红外光谱图

Fig. 6　FTIR of decayed *P. sylvestris* sapwood specimens

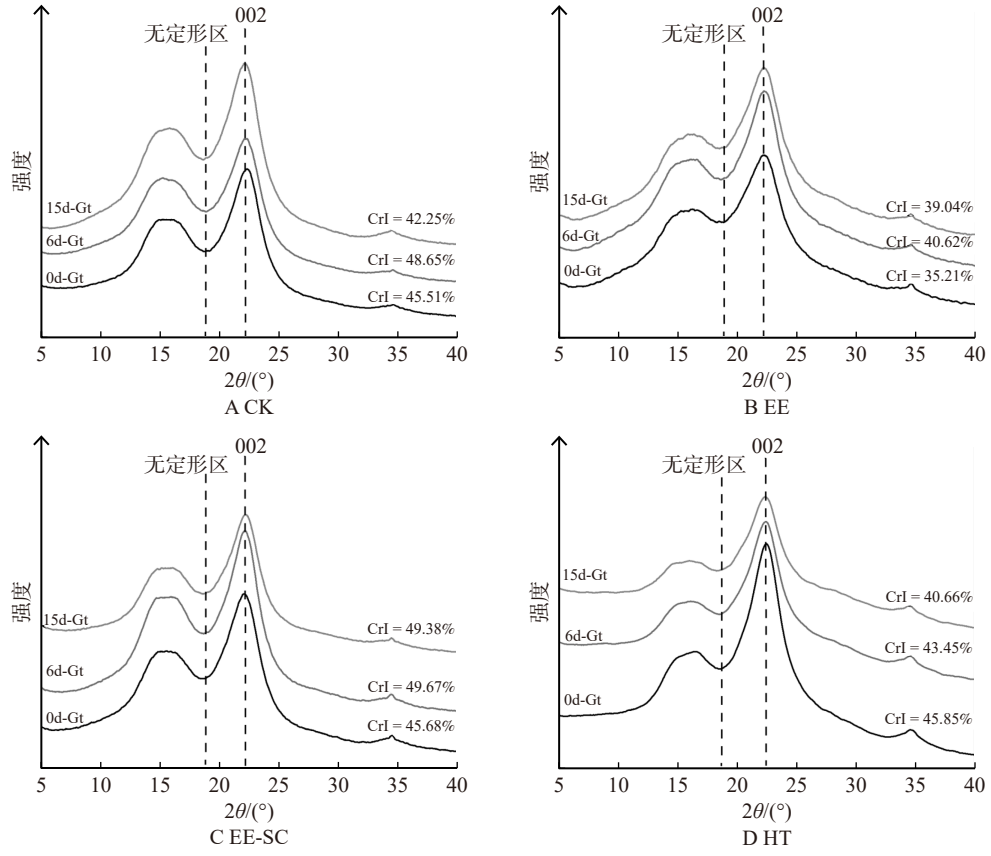


图 7　欧洲赤松边材试件腐朽后的 X 射线衍射图及相对结晶度（CrI）

Fig. 7　XRD and relative crystallinity (CrI) of decayed *P. sylvestris* sapwood specimens

深化了我们对褐腐菌降解木材微观机制的理解，也为未来开发基于细胞壁结构靶向调控的新型绿色防腐技术（例如，通过半纤维素稳定化延缓生物降解）以及生物质资源的高效转化（例如，通过选择性脱除细胞壁组分促进转化）提供了重要的理论指导。

3 结　　论

本研究通过乙醇抽提（EE）、乙醇−亚氯酸钠联合处理（EE-SC）和水热处理（HT），构建了具有差异化结构特征（低抽提物、低木质素和低半纤维素特征）的欧洲赤松木材试件，从木材结构与降解响应关联这一新视角揭示了不同成分脱除处理对木材褐腐初期降解规律的影响机制。主要研究结论有以下 3 点。

（1）本研究构建了具有差异化结构特征的欧洲赤松木材。通过乙醇抽提、乙醇−亚氯酸钠联合处理和水热处理，分别构建出具有低抽提物、低木质素和低半纤维素的欧洲赤松木材，为探究木材物理与化学特性对褐腐菌降解的影响机制提供了试验模拟手段。

（2）不同结构特征对褐腐菌初期降解的影响机制不同。在褐腐测试 15 d 时，EE 组试件的降解规律与对照组试件相近，而 EE-SC 与 HT 组试件的降解程度显著高于对照组。研究结果表明，脱除抽提物对褐腐初期木材降解速率无显著影响，而木质素或半纤维素的选择性脱除则显著加速了木材褐腐初期的降解进程。

（3）本研究揭示了褐腐菌在利用半纤维素过程中的策略性适应机制。在褐腐测试 15 d 时，所有处理组试件中半纤维素相对含量增加，由此推测半纤维素可能并非褐腐菌的最优碳源，半纤维素的主要降解作用可能是破坏细胞壁结构完整性，从而为后续纤维素的降解提供通道。这一“通道效应”表明褐腐菌在利用木材资源过程中具有明确的策略性，为深入理解褐腐降解机制提供了新的思路。

本研究揭示了不同成分脱除处理对木材褐腐初期降解规律的影响机制，深化了对褐腐菌选择性降解木材组分的理解。研究结果不仅为开发基于细胞壁结构靶向调控的新型环保木材防腐技术奠定了理论基础，还为优化褐腐菌对特定木材组分的降解效率，推动木材资源高效利用提供了新的研究方向。

参 考 文 献

[1] Goodell B, Zhu Y, Kim S, et al. Modification of the nanostructure of lignocellulose cell walls via a non-enzymatic lignocellulose deconstruction system in brown rot wood-decay fungi[J]. Biotechnology for Biofuels, 2017, 10(1): 179.

[2] Zhang L, Xie Q, Yang L, et al. Prediction model based on chemical composition change for the mechanical degradation of Korean pine (*Pinus koraiensis*) after brown-rot fungi (*Gloeophyllum trabeum*) invasion[J]. Holzforschung, 2021, 76(1): 68−76.

[3] Arantes V, Jellison J, Goodell B. Peculiarities of brown-rot fungi and biochemical Fenton reaction with regard to their potential as a model for bioprocessing biomass[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 94(2): 323−338.

[4] Zhu Y, Li W, Meng D, et al. Non-enzymatic modification of the crystalline structure and chemistry of Masson pine in brown-rot decay[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 286: 119242.

[5] Diouf P N, Stevanovic T, Boutin Y. The effect of extraction process on polyphenol content, triterpene composition and bioactivity of yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britton) extracts[J]. Industrial Crops and Products, 2009, 30(2): 297−303.

[6] Jin K, Liu X, Jiang Z, et al. Delignification kinetics and selectivity in poplar cell wall with acidified sodium chlorite[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 136: 87−92.

[7] 王瑜瑶, 马尔妮. 不同预处理方法对木材细胞壁孔隙结构影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(11): 140−151.
Wang Y Y, Ma E N. Effects of different pretreatment methods on the pore structure of wood cell wall[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(11): 140−151.

[8] Alam A, Wang Y, Liu F, et al. Modeling of optimal green liquor pretreatment for enhanced biomass saccharification and delignification by distinct alteration of wall polymer features and biomass porosity in *Miscanthus*[J]. Renewable Energy, 2020, 159: 1128−1138.

[9] Chen T, Li Z, Zhang X, et al. Effects of hydrothermal pretreatment on the structural characteristics of organosolv lignin from *Triarrhena lutarioriparia*[J]. Polymers, 2018, 10(10): 1157.

[10] Li Y, Huang C, Mao Y, et al. New insights for biomass utilization by brown-rot and white-rot fungi: the differing role of hemicellulose degradation in the incipient decay process[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(13): 5157−5167.

[11] Irbe I, Andersone I, Andersons B, et al. Characterisation of the initial degradation stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood after attack by brown-rot fungus *Coniophora puteana*[J]. Biodegradation, 2011, 22(4): 719−728.

[12] St-Pierre F, Achim A, Stevanovic T. Composition of ethanolic extracts of wood and bark from *Acer saccharum* and *Betula alleghaniensis* trees of different vigor classes[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 41: 179−187.

[13] Wen P, Zhang T, Xu Y, et al. Co-production of xylooligosaccharides and monosaccharides from poplar by a two-step acetic acid and sodium chlorite pretreatment[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 152: 112500.

[14] Giummarella N, Lawoko M. Structural insights on recalcitrance during hydrothermal hemicellulose extraction from wood[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(6): 5156−5165.

[15] Marynowski L, Bucha M, Lempart-Drozd M, et al. Preservation of hemicellulose remnants in sedimentary organic matter[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 310: 32−46.

[16] Ciftci D, Flores R A, Saldaña M D A. Cellulose fiber isolation and characterization from sweet blue lupin hull and canola straw[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(7): 2773−2781.

[17] Cui D, Xue J, Cao J. Dual-fungi competition and its influence on wood degradation[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 198: 116643.

[18] Cheng J, Zhou X, Huang C, et al. Low-chromophore lignin isolation from natural biomass with polyol-based deep eutectic solvents[J]. Green Chemistry, 2024, 26(14): 8298−8314.

[19] Hage R E, Brosse N, Sannigrahi P, et al. Effects of process severity on the chemical structure of *Miscanthus* ethanol organosolv lignin[J]. Polymer Degradation and Stability, 2010, 95(6): 997−1003.

[20] Vitas S, Segmehl J S, Burgert I, et al. Porosity and pore size distribution of native and delignified beech wood determined by mercury intrusion porosimetry[J]. Materials, 2019, 12(3): 416.

[21] Ouyang S, Shi J, Qiao H, et al. The key role of delignification in overcoming the inherent recalcitrance of Chinese fir for biorefining[J]. Bioresource Technology, 2021, 319: 124154.

[22] Kan Y, Miao Y, Zhai S, et al. New insight into cell wall pore structure in brown-rotted wood and its utilization as a new low-cost, sustainable adsorbent[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 208: 117843.

[23] Yelle D J, Wei D, Ralph J, et al. Multidimensional NMR analysis reveals truncated lignin structures in wood decayed by the brown rot basidiomycete *Postia placenta*[J]. Environmental Microbiology, 2011, 13(4): 1091.

[24] Liu S, Chen Y Y, Sun Y F, et al. Systematic classification and phylogenetic relationships of the brown-rot fungi within the polyporales[J]. Fungal Diversity, 2023, 118(1): 1−94.

[25] Ray M J, Leak D J, Spanu P D, et al. Brown rot fungal early stage decay mechanism as a biological pretreatment for softwood biomass in biofuel production[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(8): 1257−1262.

[26] Belt T, Awais M, Mäkelä M. Chemical characterization and visualization of progressive brown rot decay of wood by near infrared imaging and multivariate analysis[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 940745.

[27] Tewalt J, Schilling J. Assessment of saccharification efficacy in the cellulase system of the brown rot fungus *Gloeophyllum trabeum*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(6): 1785−1793.

[28] Huang C, Jiang X, Shen X, et al. Lignin-enzyme interaction: a roadblock for efficient enzymatic hydrolysis of lignocellulosics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 154: 111822.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　曹金珍）