

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210024

## 褐腐初期南方松木材微观形貌与化学成分分析

王玉娇 彭尧 曹金珍

(木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

**摘要:**【目的】探究褐腐初期, 腐朽菌定植对木材颜色、微观形貌以及化学成分的影响, 为进一步探究木材褐腐初期降解机理提供理论基础。【方法】对南方松边材进行不同时间的密黏褶菌腐朽处理, 利用场发射扫描电子显微镜对腐朽材的微观结构进行表征, 探究褐腐菌进入木材内部的通道。同时, 利用色差仪、傅里叶红外光谱、X 射线能谱表征木材在不同腐朽阶段的质量损失、颜色变化、化学成分、官能团变化和结晶度变化等。【结果】腐朽过程中木材明度降低, 总色差增加, 整体上有偏红褐色的趋势。菌丝通过射线薄壁细胞、纹孔和管胞等细胞结构进入木材内部, 并于褐腐 20 d 内基本完成初期定植。褐腐初期质量损失主要是由半纤维素降解导致, 而纤维素降解缓慢。此时, 纤维素结晶区的晶格间距降低 (3.962 Å), 相对结晶度增至最大 (47.02%), 阻碍了对褐腐菌的降解, 因而此后木材质量损失增速减缓。【结论】在南方松木材的褐腐初期, 菌丝通过纹孔、射线薄壁细胞和管胞等结构进入木材, 细胞壁中的半纤维素优先严重降解, 结晶纤维素的晶格间距减小且相对结晶度增加, 这一理论研究有助于进一步探究木材的初期褐腐降解机理, 同时为木材防腐保护提供理论基础。

**关键词:** 南方松; 褐腐; 初期定植; 微观形貌; 化学成分

中图分类号: S781 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2021)03-0138-07

引文格式: 王玉娇, 彭尧, 曹金珍. 褐腐初期南方松木材微观形貌与化学成分分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 138-144. Wang Yujiao, Peng Yao, Cao Jinzhen. Analysis of microstructure and chemical components of southern pine during initial brown-rot decay [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 138-144.

### Analysis of microstructure and chemical components of southern pine during initial brown-rot decay

Wang Yujiao Peng Yao Cao Jinzhen

(Key Laboratory of Wooden Material Science and Application of Ministry of Education, School of Materials and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to investigate the effects of brown-rot decay on color, microstructure, and chemical components of wood at the early stage of decay test, as well as provide a theoretical basis for the further explanation of wood degradation mechanism. [Method] The sapwood of southern pine was decayed by *Gloeophyllum trabeum* for different durations. The microstructure of decayed wood was characterized by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), in order to elucidate the access pathways of brown-rot fungi into wood. Meanwhile, colorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction were used to characterize the mass loss, color change, chemical component, functional group change, and crystallinity change of wood after different decay stages. [Result] The lightness of wood decreased and the total color difference increased during the decay test, with a trend toward rufous surface color. Mycelium entered into the wood through cell structures such as ray parenchyma

收稿日期: 2021-01-23 修回日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (31901245)。

第一作者: 王玉娇。主要研究方向: 木材保护与改性。Email: wyj1996@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。

责任作者: 彭尧, 博士, 讲师。主要研究方向: 木材保护与改性。Email: pengy@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

cells, pits and tracheids, and basically completed the initial colonization after 20 d. The mass loss of wood at the early stage of brown-rot decay was mainly caused by the degradation of hemicellulose, while the degradation of cellulose was less pronounced. At the same time, the distance between crystal planes of cellulose decreased to the minimum value (3.962 Å) while the relative crystallinity increased significantly (47.02%), which prohibited the degradation of cellulose. Therefore, the mass loss rate of wood slowed down after that. **[Conclusion]** At the early stage of brown-rot decay on southern pine wood, hyphae entered into wood by pits, ray parenchyma cells and tracheids. Hemicellulose in cell wall was preferentially degraded and the lattice distance of crystalline cellulose reduced while the relative crystallinity increased. This research could provide a theoretical basis for the further exploration of brown-rot degradation mechanism of wood, as well as wood preservation.

**Key words:** southern pine; brown-rot; initial colonization; microstructure; chemical component

近年来,木材被广泛应用于室外领域,如木结构建筑、木栈道、木围栏等。然而在室外应用时,木材会不可避免地受到自然环境因素的影响,产生腐朽等生物劣化现象<sup>[1]</sup>,不仅缩短了其使用寿命,还会造成安全隐患。目前,户外木材主要采用南方松(*Pinus spp.*)和欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)等松木为原料。并且有研究表明:相比于采绒革盖菌(*Coriolus versicolor*)等白腐菌,松木等针叶材更易受密黏褶菌(*Gloeophyllum trabeum*)和绵腐卧孔菌(*Poria vaporaria*)等褐腐菌侵害,且褐腐菌能够在较短时间内快速降解木材,在质量损失较低的情况下导致木材力学强度急剧下降<sup>[2]</sup>,严重影响其使用价值。因此,阐明木材在褐腐初期的微观结构和化学成分变化对于木材防腐保护具有重要意义。

在褐腐过程中,轴向排列的细胞有利于真菌沿木材的顺纹方向蔓延生长,但实际应用中,木材通常要经过封端处理以防止端裂、腐朽等劣化发生。而对于花纹美观且直接暴露的弦切面与径切面,菌丝进入木材内部的通道主要为射线薄壁组织、细胞壁纹孔等<sup>[3-5]</sup>。随着褐腐的进行,木材中的纤维素和半纤维素被陆续降解,而木质素基本不被破坏<sup>[6]</sup>,因此残留的木质素使得木材在宏观上通常呈现出红褐色<sup>[7]</sup>。研究表明:在褐腐过程中半纤维素首先发生降解,其降解速度比纤维素更快<sup>[8-9]</sup>。此外,腐朽材中纤维素的结晶度也明显降低,有研究显示:褐腐15周后的马尾松(*Pinus massoniana*)相对结晶度下降了60.05%<sup>[10]</sup>,这表明结晶纤维素在褐腐过程中遭到破坏,原本排列有序的分子链被打乱,分子间作用力减小,进而导致分子间间隙增加。褐腐初期对于木材性能的影响非常显著。Witomski等<sup>[11]</sup>利用粉孢革菌(*Coniophora puteana*)对欧洲赤松进行腐朽试验,发现褐腐初期纤维素的聚合度由6000降至1800,而此时的质量损失仅为7%。尽管褐腐初期木材的质量损失较低(通常不超过10%<sup>[12]</sup>),但会使木材力学强度急剧下降<sup>[13]</sup>。

综上所述,以往研究的褐腐周期一般较长(12周),且大多关注腐朽带来的最终结果。对腐朽各阶段,尤其是褐腐初期,木材组分及宏、微观变化的研究并不深入。因此,本研究对户外常用的南方松边材进行不同时间的褐腐处理,重点关注腐朽初期木材的各项变化,揭示褐腐菌进入木材内部的通道,并阐明其对木材微观结构和化学成分变化的影响,为深入探究木材褐腐机理奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

南方松边材,试件尺寸为10 mm(轴向)×20 mm(弦向)×20 mm(径向);阔木选用南方松边材,尺寸为3 mm(轴向)×20 mm(弦向)×20 mm(径向)。褐腐菌采用密黏褶菌,购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。

### 1.2 褐腐试验

参照GB/T 13942.1—2009《木材耐久性第一部分:天然耐腐性实验室试验方法》<sup>[14]</sup>进行土壤木块法测试,腐朽时长分别为0、10、20、40 d。试件在腐朽过程中的质量损失率( $L$ )按公式(1)计算:

$$L = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $L$ 为试件质量损失率,%; $m_0$ 为试件腐朽前的绝干质量,g; $m_1$ 为试件腐朽后的绝干质量,g。

### 1.3 颜色测定

利用色差仪(三恩施NH310,中国)对木材腐朽前后弦切面的颜色进行表征,测得CIE色度系统中的参数 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 。 $L^*$ 为明度值(白色为100,黑色为0), $a^*$ 为红绿色品指数( $a^*$ 值越大,颜色越偏红,反之偏绿), $b^*$ 为黄蓝色品指数( $b^*$ 值越大,颜色越偏黄,反之偏蓝)。每块试件选取5个点位进行测试,并计算平均值。腐朽过程中的总色差( $\Delta E$ )按式(2)计算:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

式中:  $\Delta E$  为腐朽前后木材的总色差;  $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$  分别为不同腐朽时间后腐朽材与健康材的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  差值。

#### 1.4 化学成分测定

试件的苯-乙醇抽提物、酸不溶木质素、综纤维素、纤维素含量, 分别根据 GB/T 2677.6—94《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》<sup>[15]</sup>、ASTM D 1106—96 “Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood”<sup>[16]</sup>、Browning(1967)的综纤维素改进测定法<sup>[17]</sup>、硝酸-乙醇纤维素测定法<sup>[18]</sup>进行测试。半纤维素含量由综纤维素与纤维素含量之差得到。

#### 1.5 微观形貌表征

收集不同腐朽时长的试件, 并在其弦切面与横切面上分别制取  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  薄片, 利用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, 日立 SU8010, 日本)进行观察。同时, 使用 ImageJ 软件测量木材在腐朽过程中细胞壁厚度的变化。

#### 1.6 红外光谱表征

利用傅里叶红外光谱仪(FTIR, Nicolet IS 10, 美国), 通过 KBr 法测定试件的红外光谱, 扫描范围为  $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数为 64 次, 分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ 。

#### 1.7 相对结晶度测定

利用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 ADVANCE, 德国)、Jade 6.0 软件对试件进行测试与分析。扫描角度范围为  $5^\circ \sim 40^\circ(2\theta)$ , 扫描速率为  $2.0^\circ/\text{min}$ , 步

长  $0.02^\circ$ 。

根据 Scherrer 公式计算微晶尺寸<sup>[19]</sup>:

$$C_s = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

式中:  $C_s$  为微晶尺寸,  $\text{\AA}$ ;  $K$  为校正系数, 取 0.90;  $\lambda$  为 X 射线衍射波长, 取  $1.54\text{ \AA}$ ;  $\beta$  为衍射峰的半高宽,  $^\circ$ ;  $\theta$  为布拉格角,  $^\circ$ 。

根据 Segal 公式计算相对结晶度<sup>[20]</sup>:

$$C_r = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $C_r$  为相对结晶度, %;  $I_{200}$  为(200)晶格衍射角的总强度,  $2\theta = 22.4^\circ$ , 即结晶区的衍射强度;  $I_{am}$  为(110)与(200)晶格之间最小强度, 即非结晶区衍射的散射强度,  $2\theta = 18.4^\circ$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观颜色变化分析

由图 1 可知: 经褐腐菌侵染后, 木材的表面(弦切面)颜色发生明显变化, 从原来的偏黄色变为灰褐色。随着腐朽的进行, 木材表面的  $\Delta L^*$  值持续降低, 表明木材颜色变暗(图 1b)。同时,  $\Delta a^*$  与  $\Delta b^*$  值总体呈增加趋势, 表明腐朽后木材表面更偏向红褐色。随着腐朽程度的深入, 木材中的综纤维素被大量脱离, 残留的木质素使木材呈现为红褐色, 色差值进一步增大。

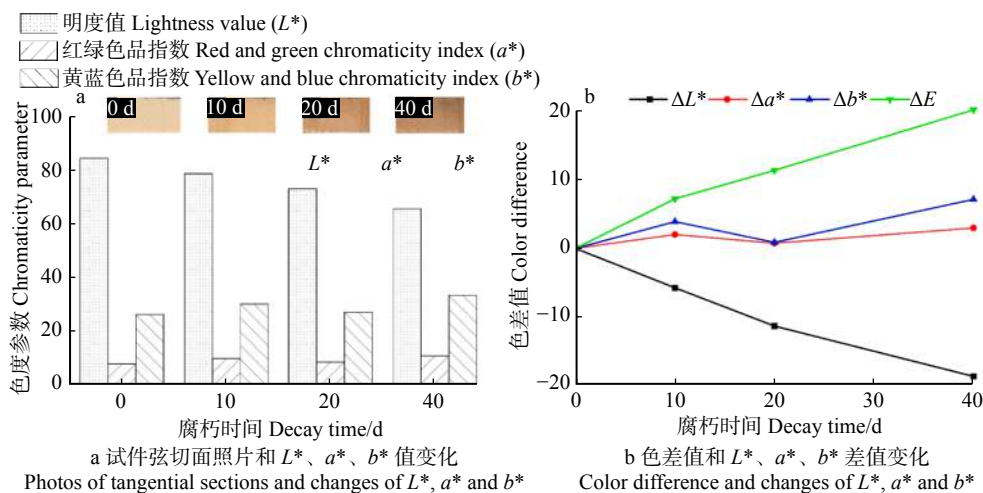


图 1 不同腐朽时间后木材的颜色变化

Fig. 1 Color changes of wood samples at different decay times

### 2.2 微观形貌变化分析

图 2 和图 3 分别为南方松边材在腐朽不同时长后的弦切面和横切面电镜照片。在此过程中, 木材的质量变化和细胞壁厚度变化情况如图 4 所示。由图 2 可知: 未经腐朽的试件显示出较为光滑平整的弦切面(图 2a), 然而其横切面表面(图 3a)还残留着

一些破碎的木材组织, 这主要由试件的锯切加工过程导致。腐朽 10 d 后, 这些残留的木材组织被逐步降解, 在横切面上裸露出木材的细胞腔与细胞壁(图 3b)。同时, 对于径向排列的射线薄壁细胞, 可以观察到其内部菌丝已经穿透细胞壁(矩形框线内的截取图像), 并横穿细胞腔, 有延伸到下一个细胞的

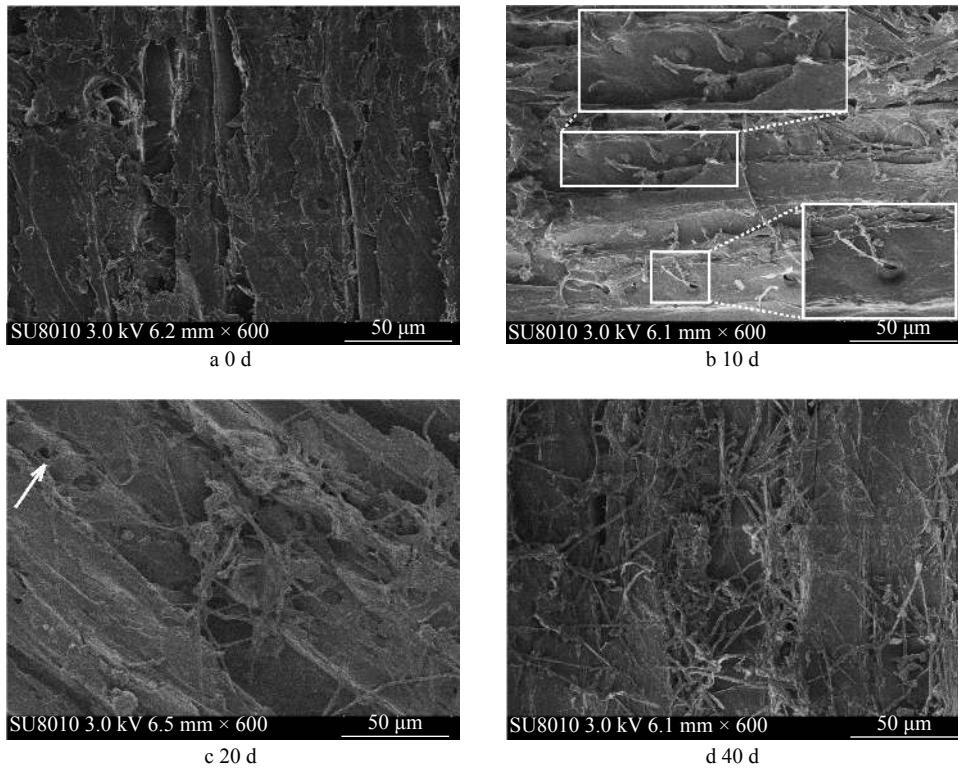


图 2 不同腐朽时间后木材的弦切面微观结构图片

Fig. 2 FE-SEM images of samples at tangential section at different decay times

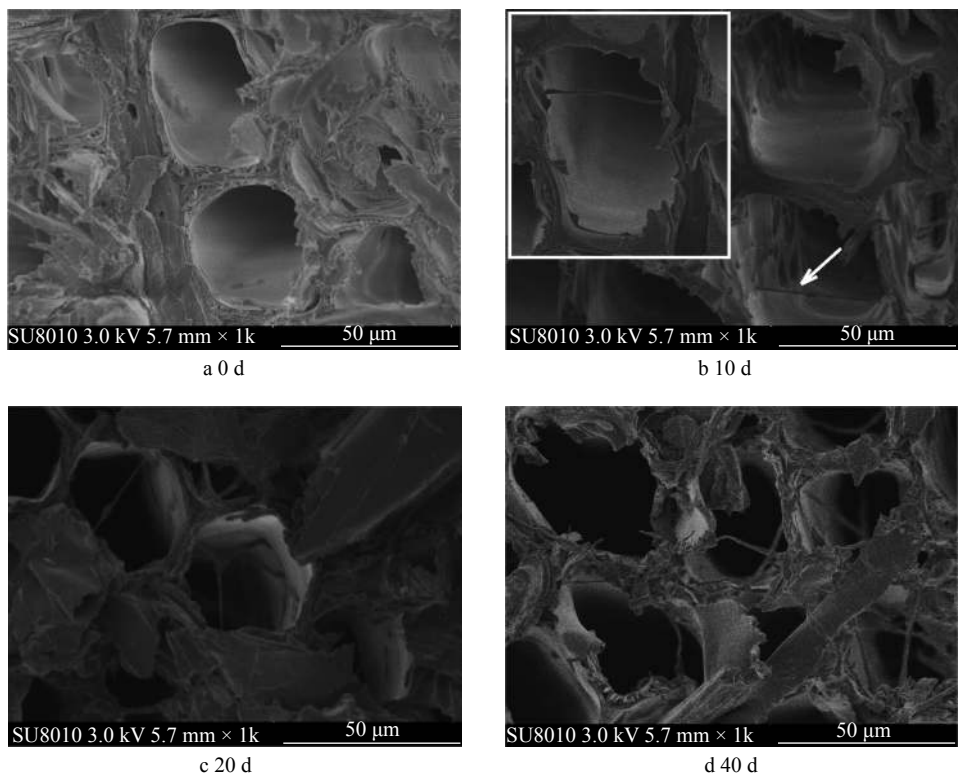


图 3 不同腐朽时间后木材的横切面微观结构图片

Fig. 3 FE-SEM images of samples at cross section at different decay times

趋势。此外，在弦切面上(图 2b)可以发现，木材表面被菌丝附着，同时细胞壁上部分具缘纹孔的纹孔膜被降解并发生破裂(矩形框内的放大图像)，菌丝穿透纹孔进入木材细胞腔。研究表明，纹孔膜的主要

成分为半纤维素与少量纤维素<sup>[21]</sup>，为褐腐菌降解木材的主要成分。褐腐 10 d 后，木材内部残留的菌丝较少，结合图 4 可知，此时的木材质量损失率较低，仅为 2.77%。腐朽 20 d 后，木材的质量损失率增大

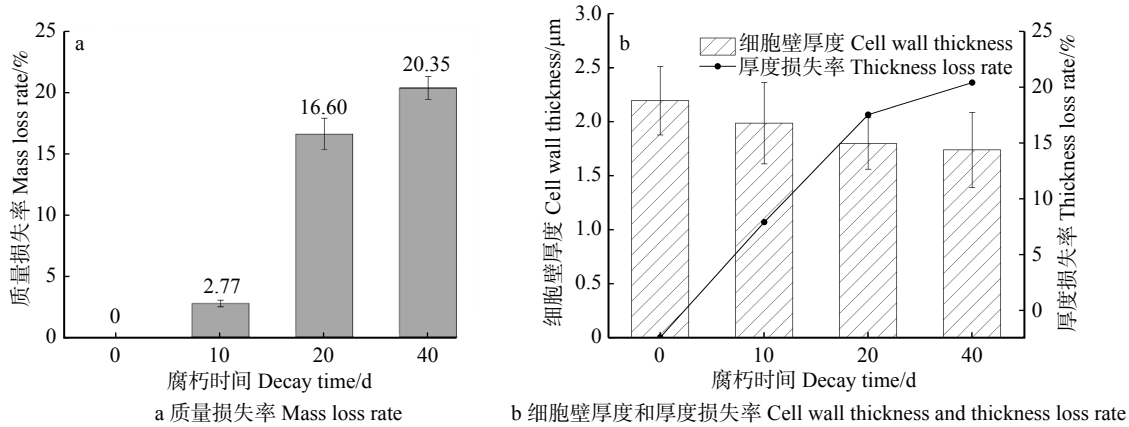


图4 不同腐朽时间后木材的质量损失率和细胞壁厚度变化

Fig. 4 Changes in mass loss rate and cell wall thickness of wood samples at different decay times

为 16.60%，表明褐腐菌的生长迅速，对营养物质的代谢更剧烈，加快了对木材的降解进程。此时，在木材的管胞内(图 2c、图 3c)观察到大量交叉缠绕的菌丝，部分菌丝正从纹孔处进入细胞腔(图 2c 箭头位置)，并在细胞腔内蔓延生长，表明褐腐菌逐步完成初期定植。此外，从横切面上可以观察到，木材的 S2 层被严重降解，细胞壁厚度损失率高达 18.24% (图 4b)。随着腐朽天数的延长，菌丝的数量不断增加，木材的质量和细胞壁厚度进一步降低。腐朽 40 d 后，木材的弦切面基本被菌丝覆盖(图 2d)，而横切面上的木材细胞壁也不再完整，由于纤维素的降解，细胞壁结构逐渐失去支撑作用，出现溃烂瓦解的现象(图 3d)。此时，木材的质量损失率和细胞壁厚度损失率分别为 20.35% 和 20.86%(图 4)，相比于之前，木材的降解速度有所减缓，据此推测腐朽 20 d 时菌丝已基本完成初期定植。

### 2.3 化学成分变化分析

腐朽过程中，木材中各组分的变化如表 1 所示，其对应的 FTIR 谱图如图 5 所示。由图 5 可知：相比于健康材，腐朽 10 d 后，木材中各特征峰的强度变化较小，质量损失率较低(仅为 2.77%)，表明褐腐初期木材的降解速度缓慢。由表 1 可知：此时的质量损失主要来源于抽提物和半纤维素含量的减少，两者的质量损失率分别为 47.55% 和 49.19%。木材中抽

提物的绝对含量很少，且成分复杂，除能够被腐朽菌利用外，部分还具有抑菌作用<sup>[22]</sup>，因此其在褐腐初期的变化还有待进一步探讨。由此推测，在腐朽初期，褐腐菌主要降解木材中的半纤维素。随着腐朽时间的延长，木材中综纤维素相对质量分数不断降低，而木质素的相对质量分数有所增加。褐腐 20 d 时，腐朽材在  $1736\text{ cm}^{-1}$ (半纤维素中的乙酰基和羰基的 C=O 伸缩振动)、 $1372\text{ cm}^{-1}$ (纤维素中的 C—H 变形振动)、 $897\text{ cm}^{-1}$ (纤维素中的 C—H 变形振动)和  $810\text{ cm}^{-1}$ (半纤维素中的葡甘露聚糖)<sup>[23-26]</sup> 处的峰强开始明显降低，表明木材中的碳水化合物发生了严重的降解。碳源作为营养物质被真菌代谢，以及大分子解聚导致  $3342\text{ cm}^{-1}$ (纤维素中的 O—H 伸缩振动)和  $2860\text{ cm}^{-1}$ (对称 CH<sub>2</sub> 的伸缩振动)<sup>[27]</sup> 处的峰强增加。此时，半纤维素的质量损失率高达 85.88%，而纤维素质量分数仅下降了 3.54%。相反，木质素特征峰的强度显著增加，如  $1510\text{ cm}^{-1}$ (芳环的 C=C 骨架振动)、 $1225\text{ cm}^{-1}$ (C—O 伸缩振动)处<sup>[23-26]</sup>，此时木质素相对质量分数增加了 16.07%。

综上所述，腐朽 10~20 d 内是褐腐菌定植木材的重要阶段，此时木材的质量急剧降低，其中的半纤维素和纤维素被迅速降解，细胞壁和纹孔的结构发生破坏，为褐腐菌深入木材进行后续降解奠定了基础。

表 1 不同腐朽时间后木材的质量损失及化学成分变化

Tab. 1 Mass loss and chemical composition of wood samples at different decay times

腐朽时间 Decay time/d	质量损失率 Mass loss rate/%	抽提物质量分数 Extract mass fraction/%	木质素质量分数 Lignin mass fraction/%	综纤维素质量分数 Holocellulose mass fraction/%	纤维素质量分数 Cellulose mass fraction/%	半纤维素质量分数 Hemicellulose mass fraction/%
0	0	3.26	28.07	68.67	50.05	18.62
10	2.77	1.71	28.11	60.12	50.66	9.46
20	16.60	2.77	31.29	50.91	48.28	2.63
40	20.35	3.04	32.58	48.91	46.68	2.23

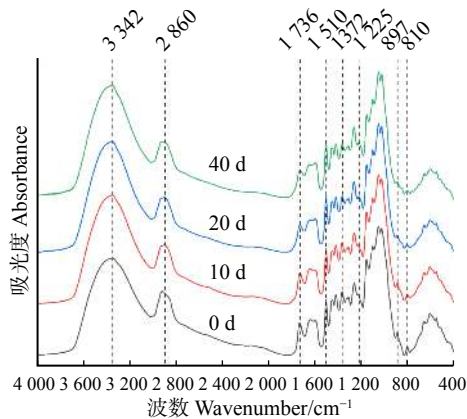


图 5 不同腐朽时间后木材的 FTIR 图谱

Fig. 5 FTIR spectra of samples at different decay times

#### 2.4 相对结晶度分析

由化学成分变化分析可知,褐腐初期半纤维素的降解优先于纤维素,且降解程度更加剧烈。尽管纤维素在这一过程中的损失较少,但其结构也发生了不同程度的变化。本研究对腐朽不同时长后,木材中纤维素的晶格间距  $d_{200}$ 、微晶尺寸  $C_s$ 、相对结晶度  $C_r$  变化进行了表征,结果如表 2 所示。总体而言,各阶段的腐朽材的 (200) 晶面均位于  $22.4^\circ$  附近(介于  $22.30^\circ \sim 22.45^\circ$  之间),说明腐朽过程对纤维素结晶区的影响相对较小。相比于健康材,腐朽材的晶格间距减小,这主要是因为纤维素结晶区外部松散的非晶区域或不完全结晶的物质被脱除,导致剩余的结晶区更加有序地排列<sup>[28]</sup>。褐腐 20 d 后,由于半纤维素含量急剧降低,结晶区在氢键作用下紧密靠拢,因而此时晶格间距  $d_{200}$  最小(3.962 Å),相对结晶度  $C_r$  从原来的 38.63% 增加到 47.02%。结晶度的增加及晶格间距的减小将阻碍褐腐菌的代谢产物渗透进入纤维素结晶区,因此 20 d 后木材的腐朽降解速率变缓。然而,随着半纤维素的大量脱除,木材中的孔隙结构增多,褐腐菌将以酶降解的方式进一步对木材细胞壁进行破坏<sup>[29]</sup>。因此,腐朽 40 d 后,褐腐菌对半纤维素的降解速度减缓,逐步开始降解纤维

表 2 不同腐朽时间后木材的微晶尺寸和相对结晶度变化

Tab. 2 Changes in crystallite sizes and relative crystallinity of wood samples at different decay times

腐朽时间 Decay time/d	$2\theta/^\circ$	晶格间距 Lattice distance ( $d_{200}$ )/Å	微晶尺寸 Crystallite size ( $C_s$ )/Å	相对结晶度 Relative crystallinity ( $C_r$ )/%
0	22.31	3.982	75.29	38.63
10	22.33	3.979	78.97	39.61
20	22.42	3.962	80.79	47.02
40	22.37	3.972	81.93	44.21

素,因而导致其相对结晶度有所降低(降低为 44.21%),晶格间距逐渐变大(3.972 Å)。此外,在腐朽过程中,由于微纤丝的不断聚集,使得其微晶尺寸逐渐增加。

### 3 结 论

本研究主要聚焦于褐腐初期阶段,通过表征南方松边材内部的化学成分变化及宏观、微观结构变化等,阐明褐腐菌进入木材内部的路径及初步降解进程,得出以下结论:

(1)木材腐朽后表面颜色有偏红褐色的趋势。

(2)菌丝通过横向排列的射线薄壁细胞和轴向排列的管胞进入木材,并穿透细胞壁上的纹孔膜,从而抵达木材内部的细胞腔,并于 20 d 时基本完成初期定植;此时木材的质量损失速率增速最大,同时细胞壁 S2 层发生严重降解,细胞壁厚度损失率达到 18.24%。

(3)腐朽初期,木材细胞壁中的半纤维素最先发生降解,木质素的相对含量增加。对于褐腐初期尚未发生显著降解的纤维素而言,其结晶结构发生变化;褐腐 20 d 时,纤维素的晶格间距最小,相对结晶度最大,可能会阻碍褐腐菌代谢产物对纤维素的分解。

#### 参 考 文 献

- [1] 戴玉成,徐梅卿,杨忠,等.中国储木及建筑木材腐朽菌(I)[J].林业科学研究,2008,21(1):49-54.  
Dai Y C, Xu M Q, Yang Z, et al. Wood-decaying fungi on timber or wooden constructions in China[J]. Forest Research, 2008, 21(1): 49-54.
- [2] Curling S F, Clausen C A, Windandy J E. Relationships between mechanical properties, weight loss, and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay (solid wood products)[J]. Forest Products Journal, 2002, 52(7): 34-37.
- [3] Schwarze F W M R, Mattheck C, Engels J. Fungal strategies of wood decay in trees[M]. Heidelberg: Springer, 2000.
- [4] Schwarze F W M R. Wood decay under the microscope[J]. Fungal Biology Reviews, 2007, 21(4): 133-170.
- [5] 葛晓雯,王立海,侯捷建,等.褐腐杨木微观结构,力学性能与化学成分的关系研究[J].北京林业大学学报,2016,38(10):112-122.  
Ge X W, Wang L H, Hou J J, et al. Relationship among microstructure, mechanical properties and chemical compositions in *Populus cathayana* sapwood during brown-rot decay[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 112-122.
- [6] Huang X, Kocaefe D, Kocaefe Y, et al. Combined effect of acetylation and heat treatment on the physical, mechanical and biological behavior of Jack pine (*Pinus banksiana*) wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(2): 525-540.

- [7] 程献宝. 初期褐腐对杉木宏观和组织力学性能的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.  
Cheng X B. The influence of incipient brown rot on the properties of Chinese fir at macroscopic and tissue level[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [8] Kirk T K, Highley T L. Quantitative changes in structural components of conifer woods during decay by white-and brown-rot fungi[J]. *Phytopathology*, 1973, 63(11): 1338.
- [9] Highley T L. Changes in chemical-components of hardwood and softwood by brown-rot fungi[J]. *Material and Organismen*, 1987, 22(1): 39-45.
- [10] 李改云, 江泽慧, 任海青, 等. 木材褐腐过程中化学组成对其液化的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 113-119.  
Li G Y, Jiang Z H, Ren H Q, et al. Relation of chemical components of brown-rotted wood and its liquefaction characteristics[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(1): 113-119.
- [11] Witomski P, Radomski A, Zawadzki J, et al. Variation in cellulose properties in the common pine (*Pinus sylvestris* L.) wood during white- and brown-rot decay induced by *Coniophora puteana* and *Trametes versicolor* fungi[J]. *Wood Research*, 2013, 58(2): 165-172.
- [12] Wilcox W W. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength[J]. *Wood and Fiber*, 1978, 9(4): 252-257.
- [13] Janzen S, Nicholas D D. Relation of transverse compression properties and the degree of brown rot biodeterioration of *Pinus glabra* in the soil block test[J]. *Holzforschung*, 2016, 70(11): 1067-1071.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 木材耐久性能第一部分: 天然耐腐性实验室试验方法: GB/T 13942.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
AQSIQ, SAC. Durability of wood (part 1): method for laboratory test of natural decay resistance: GB/T 13942.1—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [15] 国家技术监督局. 造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定: GB/T 2677.6—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.  
SQSB. Fibrous raw material-determination of solvent extractives: GB/T 2677.6—1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [16] ASTM Standards. Standard test method for acid-insoluble lignin in wood: D 1106—96[S]. West Conshohocken PA: ASTM International, 1996.
- [17] Browning B L. Methods of wood chemistry [M]. Vol. II. New York: Wiley InterScience, 1967.
- [18] 任世学, 姜贵全, 屈红军. 植物纤维化学实验教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2008: 53-54.  
Ren S X, Jiang G Q, Qu H J. Plant fiber chemistry experiment tutorial[M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2008: 53-54.
- [19] Nam S, French A D, Condon B D, et al. Segal crystallinity index revisited by the simulation of X-ray diffraction patterns of cotton cellulose I $\beta$  and cellulose II[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 135: 1-9.
- [20] Segal L, Creely J J, Martin A E, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. *Textile Research Journal*, 1959, 29: 786-794.
- [21] 李坚. 木材科学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 434-439.  
Li J. Wood science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 434-439.
- [22] 金重为, 邵颀生, 尤纪雪. 天然耐腐木材的抗腐力及其在腐朽过程中化学成分的变化[J]. 林业科学, 1989, 25(5): 447-452.  
Jin Z W, Tai D S, You J X. Decay resistance of natural durable species and the changes in amounts of major components during decay of wood by *Coriolus versicolor* and *Gloeophyllum trabeum*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1989, 25(5): 447-452.
- [23] Popescu C M, Popescu M C, Vasile C. Characterization of fungal degraded lime wood by FT-IR and 2D IR correlation spectroscopy[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 95(2): 377-387.
- [24] Li G Y, Huang L H, Hse C Y, et al. Chemical compositions, infrared spectroscopy, and X-ray diffractometry study on brown-rotted woods[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 85(3): 560-564.
- [25] Rowell R M. Handbook of wood chemistry and wood composites[M]. Florida: CRC Press, 2012.
- [26] Fackler K, Stevanic J S, Ters T, et al. Localisation and characterisation of incipient brown-rot decay within spruce wood cell walls using FT-IR imaging microscopy[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2010, 47(6): 257-267.
- [27] Popescu C M, Popescu M C, Vasile C. Structural analysis of photodegraded lime wood by means of FT-IR and 2D IR correlation spectroscopy[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 48(4): 667-675.
- [28] Howell C, Hastrup A C S, Jara R, et al. Effects of hot water extraction and fungal decay on wood crystalline cellulose structure[J]. *Cellulose*, 2011, 18: 1179-1190.
- [29] Zhu Y, Mahaney J, Jellison J, et al. Fungal variegatic acid and extracellular polysaccharides promote the site-specific generation of reactive oxygen species[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2017, 44(3): 329-338.

(责任编辑 吴娟  
责任编辑 赵广杰)