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

竹青层增强竹材耐候性的作用机制

车皓莹 王玉娇 孔令凤 彭尧

Mechanism of green outer layer in enhancing weathering resistance of bamboo

Che Haoying, Wang Yujiao, Kong Lingfeng, Peng Yao

引用本文:
车皓莹, 王玉娇, 孔令凤, 彭尧. 竹青层增强竹材耐候性的作用机制[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9):153–161. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250153
Che Haoying, Wang Yujiao, Kong Lingfeng, Peng Yao. Mechanism of green outer layer in enhancing weathering resistance of bamboo[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9):153–161. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250153

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250153

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

基于红外热成像的古建筑望板腐朽状况无损检测研究
Nondestructive testing of the decay condition of ancient building roof boarding based on infrared thermal imaging
北京林业大学学报, 2023, 45(7): 139–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220516

金中都水关遗址木结构无损检测与评估
Nondestructive testing and condition assessment of the wooden structures of Jinzhongdu Watergate Site
北京林业大学学报, 2022, 44(11): 140–151. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220251

故宫养心殿墙体木柱缺陷状况无损检测研究
Nondestructive testing of defect condition of wall wood columns in Yangxin Hall of the Palace Museum, Beijing
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 127–139. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210028

微波膨化木基金属复合材料的涂饰性能及耐光老化研究
Painting properties and lightfastness of microwave puffed wood–based metal composites
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 140–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230190

竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响
Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 168–176. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240360

竹榫旋转焊接工艺参数及机理探究
Study on process parameters and mechanism of bamboo dowel rotation welding
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 141–150. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210288

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250153

竹青层增强竹材耐候性的作用机制

车皓莹　王玉娇　孔令凤　彭　尧
（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】圆竹与竹质复合材料已广泛用作户外建筑结构材，二者耐候性能差异的核心在于竹青层的存留与否。现有研究多聚焦于去青竹材，对竹青层在自然劣化中的真实作用与机制缺乏系统认知。本研究旨在探索竹青层在光老化、霉变和腐朽劣化过程中的作用及其机制。**【方法】**以去青和带青竹材为对象，在实验室模拟自然劣化环境，分别对两种竹材进行人工紫外加速光老化、霉变和腐朽处理。用色度仪、光泽度仪和接触角仪记录表面性能变化，并以扫描电镜和红外光谱表征微观形貌与化学结构，以解析竹青层在劣化过程中的真实作用及其机制。**【结果】**在光老化后，带青竹材的表面总色差和接触角较去青竹材分别减少了 60.18% 和 51%。经苯−醇抽提后，去青竹材表面酸性增强，而带青竹材酸性略有下降。去青竹材表面开裂严重，细胞壁结构溃散，壁层间分离；带青竹材表面仅出现细小裂纹，劣化程度较轻。化学分析进一步证实，带青竹材表面的光降解程度较低，表明竹青层具有一定的耐光老化能力。在霉变与腐朽实验中，带青竹材的质量损失率分别为 4.89% 和 16.39%，均低于去青竹材的 6.33% 和 27.11%，表明竹青层还具有一定的抗微生物劣化性。**【结论】**研究表明竹青层对竹材的光老化、霉变和腐朽具有一定的防护作用。竹青层的蜡质层和硅质层作为物理屏障，能够削减紫外辐射和水分渗透，并可阻挡真菌孢子及菌丝侵入，从而隔离竹材内部细胞与外部劣化因子，进而提高竹材整体的耐候性。

关键词：竹青层；光老化；霉变；腐朽；耐候性
中图分类号：S781.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)09−0153−09
引文格式：车皓莹，王玉娇，孔令凤，等. 竹青层增强竹材耐候性的作用机制［J］. 北京林业大学学报，2025，47(9)：153−161.
Che Haoying, Wang Yujiao, Kong Lingfeng, et al. Mechanism of green outer layer in enhancing weathering resistance of bamboo［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 153−161.

Mechanism of green outer layer in enhancing weathering resistance of bamboo

Che Haoying　Wang Yujiao　Kong Lingfeng　Peng Yao
(Key Laboratory of Wood Material Science and Application of Ministry of Education, School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］Round bamboo and bamboo-based composites have been widely used as outdoor building structural materials. The fundamental difference in their weathering resistance lies in the presence or absence of the green outer layer of bamboo. However, current research mainly focuses on the bamboo with the green outer layer removed, leaving the real function and mechanisms of the green outer layer of bamboo in natural degradation unclear. This study aims to explore the role and mechanism of the green outer layer of bamboo in the processes of photodegradation, mildew and decay.［**Method**］Two types of bamboo (with/without the green outer layer) were selected as test materials. In the laboratory, both types were subjected to artificial accelerated UV photodegradation, mildew and fungal decay to simulate natural weathering. Surface performance during the deterioration process was quantified through colorimeter, gloss

收稿日期: 2025−04−29　**修回日期:** 2025−08−24
基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目（32471974）。
第一作者: 车皓莹。主要研究方向：木竹材保护与改性。Email：cailiaochehy@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学院与技术学院。
责任作者: 彭尧，副教授。主要研究方向：木竹材保护与改性。Email：pengy@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

meter, and contact angle measuring instrument. Microstructure and chemical changes were characterized using SEM and FTIR. These data were then used to clarify the real role and mechanism of green outer layer during degradation. [**Result**] After photodegradation, the samples with the green outer layer showed reductions in total color difference (ΔE) and contact angle of 60.18% and 51%, respectively, relative to the samples without green outer layer. After benzene-alcohol extraction, the surface acidity of samples without green outer layer increased, while the samples with green outer layer declined slightly. The samples without green outer layer exhibited severe surface cracking and cell-wall disintegration with delamination. In contrast, the samples with green outer layer maintained structural integrity with only fine micro-cracks observed on the surface. Chemical analyses confirmed a lower degree of surface photodegradation in the latter, indicating certain UV resistance conferred by green outer layer. During mildew and decay trials, mass losses for the latter were 4.89% and 16.3%, respectively, both significantly lower than 6.33% and 27.11% recorded for the former, demonstrating additional resistance to microbial deterioration. [**Conclusion**] Consequently, the green outer layer protects bamboo against photodegradation, mildew, and decay. Its waxy and siliceous films act as a physical barrier that attenuates UV radiation and moisture ingress while blocking fungal spores and hyphae, thereby isolating internal cells from external degradative agents and enhancing overall weathering resistance of bamboo.

Key words: green outer layer of bamboo; photodegradation; mildew; decay; weathering resistance

竹材是重要的非木质森林资源之一。我国竹资源丰富，竹林面积和竹材产量均居世界首位[1]。近年来，随着“以竹代塑”等倡议的提出[2]，竹材已成为一种具有环境保护和经济增长潜力的战略材料。凭借固碳、可再生、短生长周期以及高转化效率，竹材正快速成为替代传统建筑材料的绿色选择[3]，在室外工程中尤为突出。竹材本身具有较高的韧性和力学强度，仅需简单的锯切、打磨、防虫即可直接用于竹结构[4]。此外，将天然竹材去青去黄后再经胶合、重组等工艺，则可衍生层压竹材、平行竹原材、重组竹、胶合竹等高性能工程竹制品[5]。

无论天然圆竹还是竹质复合材料，在户外环境中都会受到自然因素的影响，如太阳辐射、雨水冲蚀、温湿度变化、微生物侵蚀等发生劣化[6]，进而缩短竹制品的使用寿命，成为制约其大规模室外应用的核心瓶颈[7]。现有耐候性研究大多以“去青”后的竹质复合材料为对象，天然圆竹则因保留竹青层而呈现明显不同的劣化行为。天然竹材表面致密光滑，且覆盖蜡质和矿物沉积，通常被认为是防止水分流失和阻碍真菌侵染的屏障[8]。研究证实，竹青表皮的蜡质层主要为碳氢化合物和含氧化合物，具有植物蜡的典型成分，由超长链脂肪酸及其衍生物组成，且具有一定的抗氧化活性[9]。此外，蜡质层内部还具有硅质层，且主要以 SiO_2 的形式存在[10]。Zhu 等[11]在对圆竹的贮存试验中发现，竹材表面的蜡质层会随着外界环境的改变而发生变化；在高温高湿条件下，竹青层表面会沉积更多的蜡质，以限制竹表水分的蒸发和吸湿引起的尺寸变化，表明竹青层在应对外界温湿度环境变化时具有一定的调控作用。然而，该调控作用在光老化、真菌侵染等劣化情景下如何变化、与去青竹材相比能否提供持续保护，尚缺乏系统对比与机制解析，竹青层的真实防护贡献仍属未解之题。

鉴于此，本研究以带青和去青两种竹材为原料，通过实验室模拟户外光老化、霉变和腐朽环境，考察这两种竹材在不同劣化过程中的表面性能、微观形貌与化学结构变化，明确其耐候性差异，并重点探究竹青层在此过程中的作用与变化，进而阐明其保护机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

市场采购 3～5 年生毛竹（*Phyllostachys pubescens*），产地湖南衡山，一批保留竹青层（简称“带青竹材”），另一批去除竹青层（简称“去青竹材”）。将毛竹条加工成不同的尺寸规格，光老化试样的尺寸为 75 mm（纵向，L）× 20 mm（切向，T）× 5 mm（径向，R），霉变试样的尺寸为 50 mm（L）× 20 mm（T）× 5 mm（R），腐朽试样的尺寸为 20 mm（L）× 20 mm（T）× 5 mm（R）。所有样品均不含竹节。

抗生物劣化试验中霉菌选用黑曲霉（*Aspergillus niger*），腐朽菌采用变色栓菌（*Trametes versicola*），两种真菌均购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。

1.2 户外劣化环境的模拟

1.2.1 户外光老化模拟

为了探究带青和去青竹材在光老化过程中的变化差异，参照标准 ASTM G154-2023《Standard practice for operating fluorescent light apparatus for

UV exposure of nonmetallic materials》[12]，利用紫外光老化加速试验箱（Q-LAB，QUV，美国）模拟户外太阳光照射条件，对竹材进行人工紫外加速老化处理。老化条件为紫外灯照射（0.89 W/m^2，340 nm，60 ℃）8 h 和冷凝（50 ℃）4 h，其中带青竹材竹青层面朝紫外灯管，去青竹材竹肉面朝紫外灯管，老化周期分别为 10、20、30、40 d。每组各设置 8 个重复试样。

1.2.2　户外霉变模拟

黑曲霉在自然界中分布广泛，天然竹材在潮湿环境中极易滋生黑曲霉从而发生霉变[13]。在人工培养环境中，黑曲霉易于保存且生长迅速，同时其代谢产物会致使竹材表面变色，便于观察到竹材的霉变过程[14]。因此，研究选用黑曲霉作为试验菌种，参照 GB/T 18261—2013《防霉剂对木材霉菌及变色菌防治效力的试验方法》[15]，在黑曲霉马铃薯葡萄糖琼脂培养基中模拟竹材的霉变过程。其中，带青竹材将竹青层一面朝上放置，霉变周期分别为 2、4、8 周，培养温度为 30 ℃，相对湿度 85%，每组各设置 12 个重复试样。试件在霉变过程中的质量损失率（M）按下式计算。

$$M = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中：m_0 为试件霉变前的绝干质量，g；m_1 为试件霉变后的绝干质量，g。

1.2.3　户外腐朽模拟

相比于褐腐菌，白腐菌具有更完备的木质素降解酶体系，且竹材中的木质素含量较高，因而白腐菌对竹材的破坏比褐腐菌更加显著[16]。其中，变色栓菌的生长速率和孢子活性稳定，是实验室条件下的常用腐朽测试菌种[17]。因此，本研究选用变色栓菌作为试验菌种，参照 GB/T 13942.1—2009《木材耐久性能第一部分：天然耐腐性实验室试验方法》[18]，在变色栓菌土壤培养基中模拟竹材的自然腐朽。其中，带青竹材将竹青层一面朝上放置，腐朽周期分别为 4、8、12 周，培养温度为 27 ℃，相对湿度 85%，每组各设置 12 个重复试样。试件在腐朽过程中的质量损失率参照式（1）计算。

1.3　光老化试件的测试与表征

1.3.1　表面颜色测定

竹材在光老化过程中的表面颜色变化采用色差仪（三恩施 NH310，中国）进行测定，记录在 CIE 色度系统中的参数值 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，颜色越红；a^*值越小，颜色越绿），b^*为黄蓝色品指数（b^*值越大，颜色越黄；b^*值越小，颜色越蓝）。每个试样选取 5 个点位进行测试，并计算平均值。试样在光老化过程中的总色差值（ΔE）按下式计算。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \tag{2}$$

式中：ΔE 为试样光老化前后的总色差；ΔL^*、Δa^*、Δb^* 分别为不同老化周期后老化竹材和未处理材的 L^*、a^*、b^*差值。

1.3.2　表面光泽度测定

光泽度是材料表面重要的性能参数。在光老化过程中，紫外线和水分会破坏竹材表面构造，从而造成其光泽度的降低。利用光泽度仪（爱斯普乐 KGZ-60，中国）测试不同老化时长后竹材表面的光泽度值。入射角度为 60°。每个试样选取 5 个点位，取测定值的平均值。

1.3.3　表面接触角测定

光老化会导致竹材表面物理与化学结构的变化，从而影响其表面润湿性。采用接触角测量仪（科诺 SL200KS，美国）对不同光老化时长后竹材的表面水接触角进行测定。测试液滴大小为 3 μL，每秒拍摄 3 帧，取初始接触角。每个试样表面测试 5 个不同位置，并计算其平均值。

1.3.4　微观形貌表征

光老化会造成竹材表面微观结构的破坏。利用切片机（ZD2205，中国）在竹材表面制取 5 mm × 5 mm 薄片，并进行抽真空喷金处理，喷镀电流为 30 mA，镀金层厚度约 20 nm。利用场发射扫描电子显微镜（FE-SEM，日立 SU8010，日本）对竹材的微观形貌进行观察。

1.3.5　化学结构表征

采用红外光谱测试表征竹材光老化前后的表面化学结构变化。在竹材表面刮取一层粉末（100 ~ 200 目），采用 KBr 压片法，利用傅里叶红外光谱仪（FTIR，Nicolet IS 10，美国）测定试件的红外光谱，扫描范围为 400 ~ 4 000 cm^{-1}，扫描次数为 64 次，分辨率为 4 cm^{-1}。

1.3.6　竹材光降解产物的 pH 值测定

光老化后，竹材表面的化学结构变化势必会造成其酸碱度环境的变化，而 pH 值是影响霉菌和腐朽菌定殖的重要环境因素。为测定光老化后竹材表面降解产物的 pH 值，参照 GB/T 2677.6—94《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》[19]，对不同光老化时长的竹材试样进行苯–醇抽提处理，待抽提液冷却至室温后，用 pH 计测定其酸碱度，并记录各组试样的 pH 值。

2　结果与讨论

2.1　光老化竹材的表面颜色变化

由图 1 可知，光老化后，竹材的表面颜色发生显

著变化，且去青和带青竹材呈现不同的变化趋势。其中，去青竹材由黄色变为红褐色，逐渐变暗；而带青竹材则由青绿色逐渐变黄。从图 2 进一步得知，去青和带青竹材的 Δa^*值变化基本一致，均逐渐增大，但去青竹材的变化更加显著，在老化 40 d 后相比于带青竹材增大了 34.76。去青竹材的 Δb^*值在老化 10 d 内急剧增加 31.3，然后逐渐减小，但始终大于初始值；而带青竹材的 Δb^*值前期基本保持不变，在老化 20 d 时开始增加，随后基本保持稳定。值得注意的是，两种竹材的明度差（ΔL^*）表现出完全相反的变化趋势，即去青竹材的 ΔL^*值持续减小，而带青竹材的 ΔL^*值则不断增大。同时，去青竹材的 ΔL^*值变化更为剧烈，在光老化 40 d 后下降了 64.50，而带青竹材仅增加了 17.45。总色差值（ΔE）也呈现出类似的变化幅度。老化 40 d 后，带青竹材的 ΔE 为 17.25，而去青竹材 ΔE 为 77.43，表明带青竹材颜色稳定性更好。这可能与竹青层中的蜡质层和硅质层有关，蜡质层具有一定的疏水作用，抑制了竹材的吸水；硅质层中的 SiO_2 对紫外光具有屏蔽和反射作用，从而减少了光老化过程对内部竹材的破坏[20]。同时，综合各项色度参数变化可知，两种竹材均在光老化 10 d 内的颜色变化较快，随后变化幅度变缓，这表明光老化初期对竹材表面的颜色影响最显著。

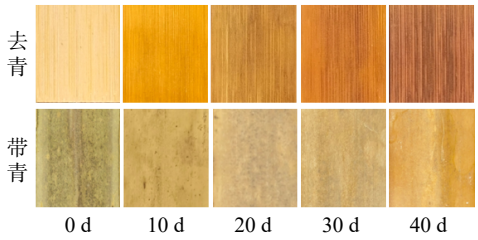
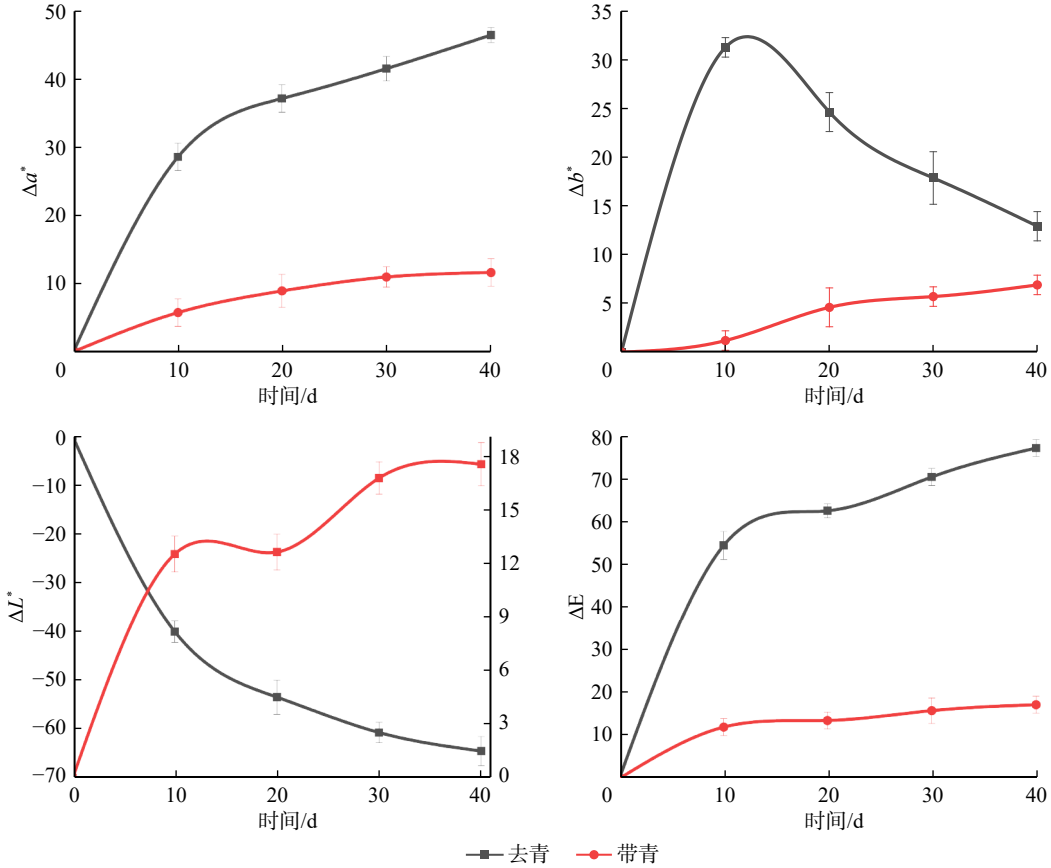


图 1 光老化过程中竹材的表面照片

Fig. 1 Images of the surface of bamboo during photoaging process

2.2 光老化竹材的表面光泽度和润湿性

从 2.1 可知，去青和带青竹材在光老化后的表面颜色变化不同，可以推测其表面的光降解程度也存在较大差异，进而影响其他表面性能的变化。图 3a 显示：光老化前，带青竹材的表面光泽度为 11.93，显著高于去青竹材（4.72），这可能与其表面光滑的蜡质层有关。在光老化 10 d 后，去青竹材的表面光泽度下降至 3.11，随后基本趋于稳定。相比而言，带青竹材表面光泽度的变化更为显著，在光老化 10 d 和 20 d 后，其光泽度分别为 8.31 和 5.02，相比于老化前分别降低了 30.34% 和 57.92%，这可能与表面蜡质层的破坏有关。在光老化 20 d 后，带青竹材的光泽度降低幅度明显减缓，并在老化 40 d 后达到 3.38，



Δa^*、Δb^*、ΔL^*分别为不同老化周期后老化竹材和未处理材的红绿色品指数 a^*、黄蓝色品指数 b^*、明度值 L^*差值，ΔE 为竹材光老化前后的总色差。

图 2 光老化过程中竹材表面色度变化

Fig. 2 Changes in chromaticity of bamboo surface during photodegradation

下降了 71.67%。

竹材表面的润湿性与其表面的化学和物理结构密切相关，光泽度的变化势必会引起接触角的变化。光老化前，去青和带青竹材的接触角分别为 82.28°和 87.68°（图 3b），进一步证明了竹青表面蜡质层的疏水性。随着光老化时间的延长，去青竹材的接触角持续下降，光老化 0～20 d 的降幅最大，达到 40.37%。随后，接触角数值缓慢降低，并于光老化 40 d 后降至 30.58。相比而言，带青竹材在光老化过程中的表面接触角变化较小，最大仅下降约 11%，表明其表面润湿性较为稳定。

综上，光老化会造成竹材表面光泽度的降低和润湿性的增大。带青竹材凭借其表面特殊的蜡质层构造，在光老化过程中蜡质层虽遭一定破坏，仍能较好地维持竹材的表面性能，再次印证了该层对光老化的防护作用。

2.3　光老化竹材的微观形貌

光老化前，去青竹材细胞壁结构完整，相邻细胞间排列紧密整齐，细胞腔内可观察到淀粉、糖类等物质。光老化 30 d 后，淀粉颗粒表面变得粗糙且不规则，细胞壁的不同壁层间也出现了分离现象，且胞间层的间隙增大。同时，随着光老化时间的延长，这种趋势进一步加剧。在光老化 40 d 后，竹材细胞壁层结构基本瓦解（图 4a）。这种变化主要受木质素分布差异[21]和多层结构的共同影响[22]。竹材胞间层和细胞壁窄层中的木质素含量较高，而木质素的光稳定性较差，相比于纤维素和半纤维素最先受到光降解[23]。因此，导致不同壁层的降解程度出现差异[24]，最终造成光老化后竹材次生壁出现明显的同心裂纹。竹材微观结构的破坏使其宏观上的粗糙度增大，从而增加了光线的散射，导致光泽度下降。同时，表面结构的破坏还会增加毛细管效应，导致表面吸水作用增强，从而润湿性增加。这与上述光泽度和接触角的变化结果一致。

从图 4b 中可以看出，光老化前，由于表面竹青层的存在，带青竹材的表面光滑平整，未见明显裂隙或凸起。光老化 20 d 时，竹青层表面变得褶皱不平，这可能是由于在紫外光的照射下，蜡质层发生了熔融，并在冷凝过程中由于水分的冷却作用发生凝结，从而改变了原有蜡质层的外观形貌。然而，随着光老化时间的延长（30 d），表层蜡质在不断熔融和凝结的过程中发生流失，并逐渐暴露出表皮硅质层，从而表面又变得较为平整，但出现了一些沿径向发展的细小裂纹。光老化 40 d 时，由于光降解和流失作

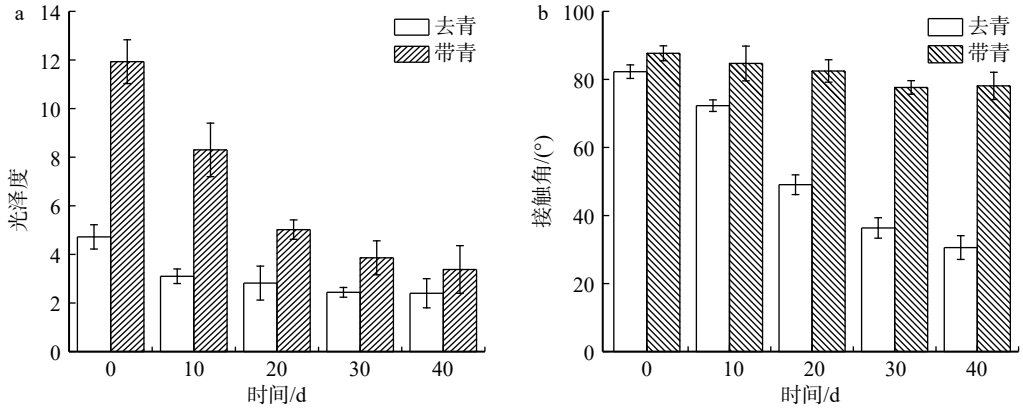


图 3　光老化过程中竹材的光泽度（a）和接触角变化（b）

Fig. 3　Changes in glossiness (a) and contact angle (b) of bamboo during photodegradation

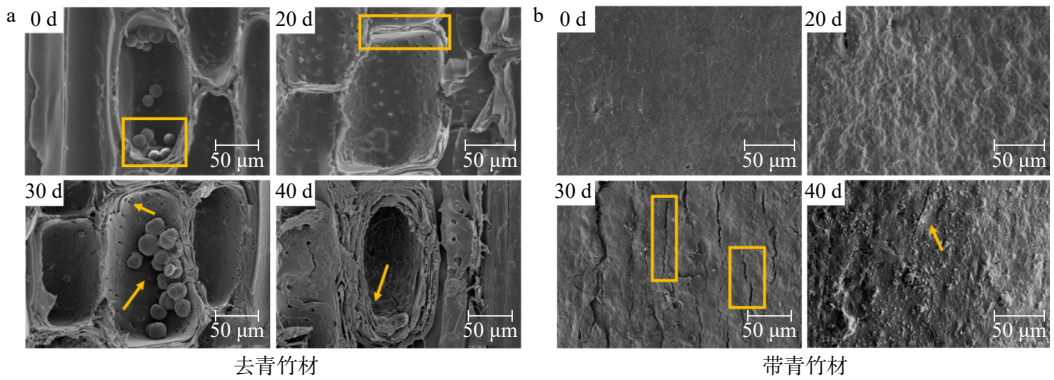


图 4　光老化过程中去青竹材（a）和带青竹材（b）的径切面微观构造

Fig. 4　Microstructure of radial cross-section of bamboo without green outer layer (a) and with green outer layer (b) during photodegradation

用，硅质层也出现了破坏，变得粗糙，且出现了凸起的颗粒物（图 4b），可能为其中的 SiO_2 颗粒。然而，即便如此，其表面的竹青层依然存在，未暴露出下面的竹材细胞，因此仍能起到一定的保护作用，这也是带青竹材在光老化过程中具有较为稳定的颜色、光泽度和润湿性的主要原因。

2.4 光老化竹材的化学结构

光老化 40 d 后，去青竹材在 1 605 cm^{-1}（木质素骨架 C═C）、1 512 cm^{-1}（木质素骨架 C═C）和 1 462 cm^{-1}（木质素骨架 C—H）处[25]表征木质素芳环结构的吸收峰强度减弱，同时，位于 1 423 cm^{-1}（木质素 C—H）、1 331 cm^{-1}（紫丁香基 O—H）和 833 cm^{-1}（愈创木基 C—H）处的吸收峰也出现一定降低，而在 1 736 cm^{-1} 处的非共轭羰基 C═O 伸缩振动吸收增强。这些结果表明，在光老化过程中，木质素中化学键断裂发生光化学反应，并生成新的非共轭羰基。此外，位于 1 159 cm^{-1}（C—O—C）、1 049 cm^{-1}（C—O）和 897 cm^{-1}（C—H）处[26]的多糖吸收峰强度变化不明显（图 5a），表明竹材中的纤维素和半纤维素受紫外光照的劣化影响较小。由此可知，光老化后木质素的降解不仅导致竹材内部发色基团和助色基团种类与含量的改变，最终在宏观上表现为竹材的表面光变色[27]，同时暴露出更多的亲水性纤维素，使竹材表面吸湿性增强，这也印证了 2.1 的竹材颜色变化与 2.2 的竹材表面接触角下降。

带青竹材光老化后，位于 720 cm^{-1}（长链亚甲基—CH_2）[28] 处的吸收峰降低，说明竹青蜡质层中的长链烷烃在紫外线照射下受到破坏流失，1 737 cm^{-1}（C═O）和 1 716 cm^{-1}（C═O）[28]峰值的下降可能是由于蜡质层中的蜡酯和酚酸的降解，同时，1 025 ~ 1 125 cm^{-1} 处[10]SiO_2 的不对称伸缩振动峰在老化过程中出现一定降低，表明竹青表皮中的硅质层在紫外线辐射下发生破坏。而代表木质素的 1 605 cm^{-1}（木质素骨架 C═C）、1 512 cm^{-1}（木质素骨架 C═C）和 1 462 cm^{-1}（木质素骨架 C—H）[25] 处的峰值变化并不明显（图 5b）。综上可知，带青竹材在光老化过程中主要表现为表面蜡质和硅质层的破坏，而表面竹青层则能够阻止紫外光穿透竹材，减缓对内部化学成分（如木质素）的光降解，从而降低竹材表面物理性能和微观形貌的破坏。

2.5 光老化竹材的表面酸碱性变化

由 FTIR（图 5）分析可知，光老化后竹材表面的化学结构发生了较大变化，生成了不同的光降解产物，这势必会影响其表面酸碱环境。由图 6 可知，未处理竹材的抽提液呈弱酸性，其中去青竹材的酸性略强于带青竹材。随着光老化时间的增加，去青竹材表面酸性逐渐增强，并在光老化 10 d 后变化显著，从 5.07 下降至 4.36，表明竹材光降解产生了更多的酸性产物。在光老化 10 ~ 30 d 过程中，抽提液的 pH 值变化较为平缓，表明光降解过程稳步进行。在光老化 40 d 后，抽提液的 pH 值出现一定回升，这可能与部分光降解产物的流失有关[27]。对比可知，带青竹材抽提液的 pH 值在光老化 10 d 后则从 5.24 增加至 5.97，之后则随着老化时间的延长逐渐减小，即酸性先减弱后又持续增强，但始终低于光老化前的抽提液 pH 值，总体变化较为平缓。研究表明，自然界中霉腐真菌在酸性条件下更适宜生长定殖[29]，由此可以推测，相比于去青竹材，带青竹材光降解后不易被真菌侵染，即在户外复杂多因子环境中具备一定的保护作用，能够减缓竹材的劣化破坏。

2.6 竹材防霉性能

随着霉变时间的增加，去青竹材表面的黑曲霉孢子团逐渐聚集，在培养 8 周后基本长满霉菌。而带青竹材表面的霉菌侵染面积随培养时间的增加并不明显，仅能观察到零星孢子团的聚集（图 7a）。用刮刀去除孢子，并用流水稍加冲洗后，竹材表面无明显颜色变化。这说明黑曲霉仅附着在竹材表皮，无法通过竹青层进入竹材内部。结合质量损失率可知，

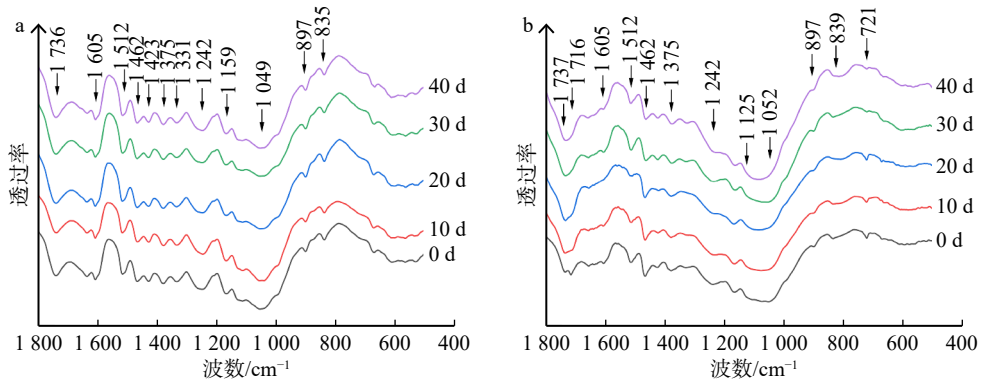


图 5 光老化过程中去青竹材（a）和带青竹材（b）的 FTIR 图谱

Fig. 5 FTIR spectra of bamboo without green outer layer (a) and with green outer layer (b) during photodegradation

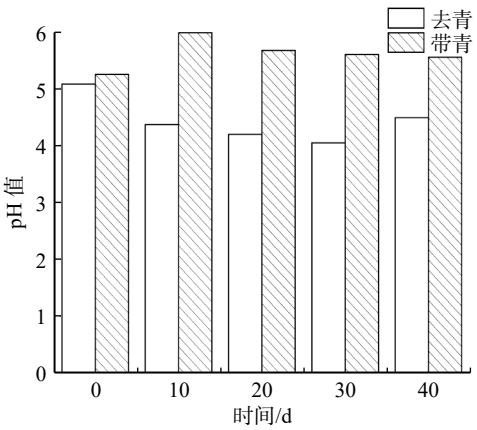


图 6　光老化过程中竹材苯−醇抽提液的 pH 值变化

Fig. 6　Changes of benzyl-alcohol extractives pH of bamboo during photodegradation

霉菌对竹材的质量影响较小。去青竹材在霉变 8 周后的质量最高下降约 6.33%，这主要与霉菌消耗表层薄壁细胞内的大颗粒内溶物（如淀粉、糖类等）有关[30]。对比发现，在相同培养时间下，带青竹材的质量损失率始终低于去青竹材，且培养时间越长，这种差异越明显。霉变 8 周后，带青竹材质量损失率为 4.89%，低于去青竹材的质量损失率（图 7b），说明竹青层对于霉菌孢子的定殖具有一定的抑制作用。

2.7　竹材耐腐性能

腐朽 12 周后，腐朽菌菌丝完全均匀布满去青竹材表面；而对于带青竹材而言，菌丝在竹青表皮并没有呈现出扩散成片的生长趋势，主要聚集在横切面和切向切面（图 8a），这说明竹青层在一定程度上能够阻止腐朽菌的生长定殖。腐朽 12 周后，去青竹材质量损失率为 27.11%，说明腐朽菌对竹材的主要成分造成了降解；而带青竹材的质量损失率仅为 16.39%，显著低于去青竹材，且质量变化较慢（图 8b），进一步证明了带青竹材优良的耐腐能力。

2.8　竹青层的保护机制

天然竹材从外至内分别由竹青、竹肉和竹黄 3 部分组成（图 9）。其中，竹青包括表皮层、皮层和皮下层，表皮层是最外面的一层细胞，由长形细胞、短细胞（栓质细胞和硅质细胞）和气孔器组成，排列紧密均匀[31]。同时，表皮层的表面通常附着一层植物蜡质，主要由长链脂肪酸及其衍生物如烷烃、醛类、酮类、脂类等组成，通过表皮细胞分泌并沉积，是覆盖在竹材表面的一层天然保护性物质[11]。

当竹青在受到环境刺激时，如紫外线照射、温湿度增加，表皮蜡质沉积增多，形成一层物理屏障。同

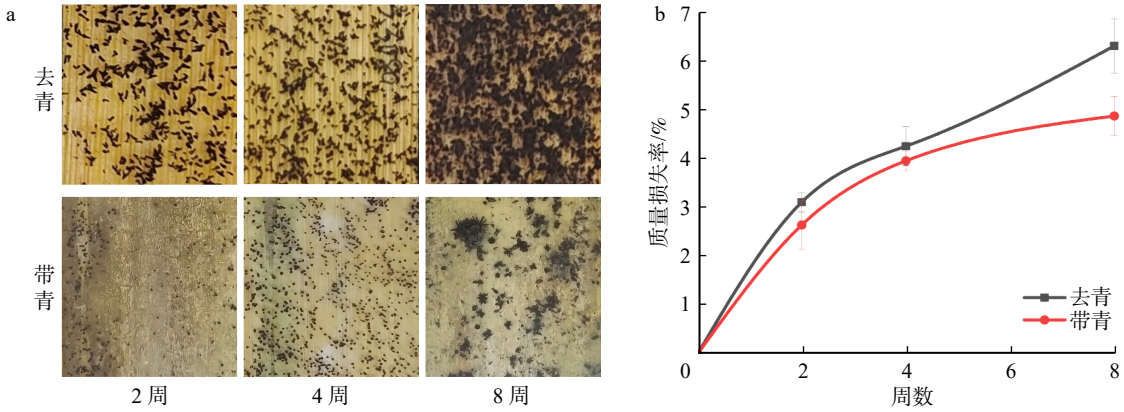


图 7　霉变过程中竹材表面照片（a）和质量损失率变化（b）

Fig. 7　Images of bamboo surface (a) and mass loss rate (b) during mildew

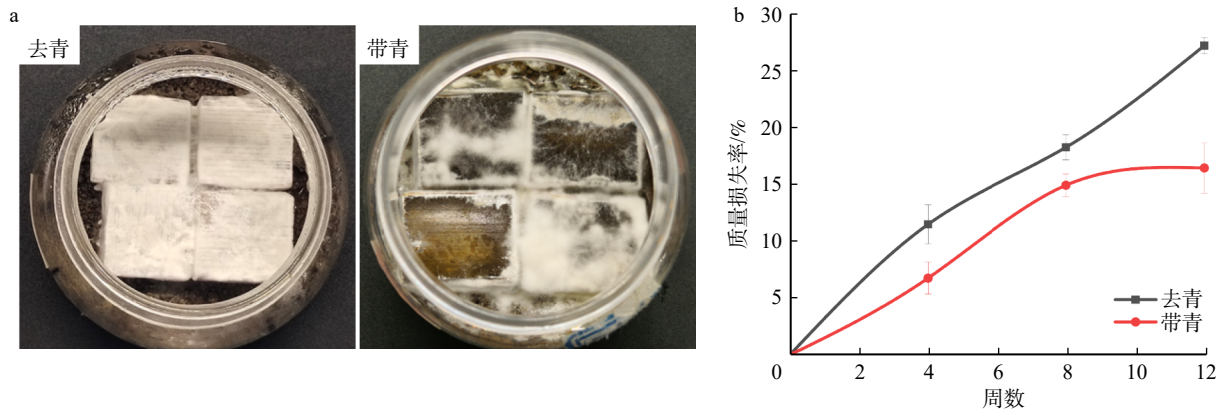


图 8　腐朽 12 周后竹材的照片（a）和不同腐朽时长后的质量损失率变化（b）

Fig. 8　Images of bamboo after 12 weeks of decay (a) and changes in mass loss rate after different decay times (b)

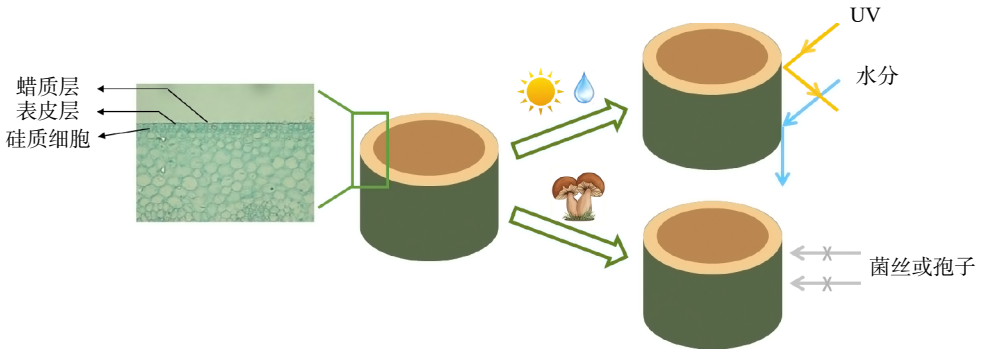


图 9 竹青层的微观结构及其保护作用机制

Fig. 9 Microstructure and protective mechanism of green outer layer of bamboo

时，蜡质层的天然光泽度较高，结构致密光滑，不仅能够反射部分紫外线，还能够阻止水分渗透进竹材表面。此外，硅质细胞中含有 SiO_2（这是工业中常用的紫外屏蔽剂），进而也阻挡了光线的进一步透入。因此，由于蜡质层的疏水性和硅质层紫外屏蔽的双重作用，竹青层能够有效延缓竹材内部的光降解。对于抗微生物劣化而言，一方面，竹青层具有致密的物理结构，使得真菌的菌丝和孢子无法穿透进入竹材内部，同时，由于竹青层物理屏障的作用，阻碍了微生物定殖生长所需的营养物质和水分条件，从而赋予了竹材一定的防霉性和耐腐性；另一方面，带青竹材经光老化后表面酸性降低，从而减缓真菌的定殖，以上多种原因共同赋予竹材一定的防霉性和耐腐性（图 9）。

3 结　　论

本研究针对去青和带青两种竹材，通过对比其在光老化、霉变和腐朽过程中的表面性能、微观结构和化学成分变化的差异，阐明了竹青层对竹材的保护作用机制。研究主要结论有以下 3 点。

（1）光老化过程中，带青竹材的表面颜色和接触角变化均显著低于去青竹材，其在光老化 40 d 后的 ΔE 仅为 17.25，比去青竹材低了 60.18%；接触角则从 87.68°下降至 78.1°，减小约 11%，比去青竹材降低了 51.82%。同时，微观结构和表面化学成分进一步证实了带青竹材的光降解程度较小，说明竹青层具有一定的耐光老化作用。

（2）光老化后，带青竹材表面的酸性减弱，且明显低于去青竹材，改变了大多数真菌喜好的酸性环境。同时，带青竹材在霉变和腐朽过程中的质量损失率分别为 4.89% 和 16.39%，相较于去青竹材的 6.33% 和 27.11%，均出现显著下降，显示出较好的抗微生物劣化性能。

（3）竹青层的保护作用机制源于其内部致密的蜡质层和硅质层，能够作为一层物理屏障，减少紫外光的入射和水分的渗透，同时也能抵御真菌孢子和菌丝的侵入，从而提高了竹材的耐光老化性和抗微生物劣化性。

综上所述，竹青层对于保持竹材的耐候性具有积极的作用。因此，在竹材的生产加工中，一方面可以选择性保留竹青层，尤其在应用于户外环境时，可以减少化学保护剂的使用，从而降低成本和对环境的负面影响。另一方面，在去青去黄处理后，可以收集竹青部分，并提取其中可利用的成分，制备天然保护剂，增加竹材的附加值。

参 考 文 献

[1] 何忠伟, 高宇, 彭尧. 深共晶溶剂 (DES) 预处理协同聚乙烯醇 (PVA) 浸渍处理增强增韧竹材 [J/OL]. 北京林业大学学报, 2025. [2025−08−24]. http://j.bjfu.edu.cn/cn/article/doi/10.12171/j.1000-1522.20250146.
He Z W, Gao Y, Peng Y. Deep eutectic solvent (DES) pretreatment combined with polyvinyl alcohol (PVA) impregnation treatment enhances strength and toughness of bamboo[J/OL]. Journal of Beijing Forestry University, 2025. [2025−08−24]. http://j.bjfu.edu.cn/cn/article/doi/10.12171/j.1000-1522.20250146.

[2] 连文绮, 薛泽茜, 黄安胜, 等. “以竹代塑”倡议影响竹企新质生产力的机制研究: 以南平市 52 家规上竹企为例 [J]. 林产工业, 2025, 62(2): 85−92.
Lian W Q, Xue Z X, Huang A S, et al. Study on the mechanisms of the “Bamboo as a Substitute for Plastic” initiative affecting the new quality productivity of bamboo enterprises: taking 52 bamboo enterprises above designed scale in Nanping city as an Example[J]. China Forest Products Industry, 2025, 62(2): 85−92.

[3] 李喆喆, 施江靖, 陈红, 等. 竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4): 168−176.
Li Z Z, Shi J J, Chen H, et al. Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 168−176.

[4] 王力行. 绿色生态理念下现代建筑设计中竹材的应用研究 [J]. 建筑与文化, 2024(12): 35−37.
Wang L X. Research on the application of bamboo in modern architectural design under the green ecological concept[J]. Architecture and Culture, 2024(12): 35−37.

[5] Lou Z C, Zeng Z Y, Yan N, et al. Modification and application of

bamboo-based materials: a review (part II): application of bamboo-based materials[J]. Forests, 2023, 14(11): 1−25.

[6] Wang Y J, Zhang R H, Kong L F, et al. Bamboo durability: understanding the combined effect of weathering and mildew infection[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119612.

[7] 车皓莹, 孔令凤, 李晨曦, 等. 竹材户外劣化的主要形式及研究展望 [J]. 世界林业研究, 2024, 37(3): 67−73.
Che H Y, Kong L F, Li C X, et al. The main forms of outdoor deterioration of bamboo and research prospects[J]. World Forestry Research, 2024, 37(3): 67−73.

[8] Lux A, Luxová M, Hattori T, et al. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 115(1): 87−92.

[9] Maffei M. Chemotaxonomic significance of leaf wax alkanes in the Gramineae[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 1996, 24(1): 53−64.

[10] He L, Chen L, Shao H J, et al. Microstructure and physicochemical properties of the anisotropic Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) surface[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021, 80(2): 1−12.

[11] Zhu Y, Guan M, Jia Q, et al. Degradation mechanism of cuticular wax composition and surface properties of bamboo culm during storage[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 214: 118558.

[12] ASTM International. Standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials: ASTM G154-23[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

[13] Schmidt O, Wei D S, Liese W, et al. Fungal degradation of bamboo samples[J]. Holzforschung, 2011, 65(6): 883−888.

[14] Sinclair J B, Dhingra O D. Basic plant pathology methods[M]. 2nd ed. Oxfordshire: CRC Press, 2017.

[15] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 防霉剂对木材霉菌及变色菌防治效力的试验方法: GB/T 18261—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
AQSIQ, SAC. Test method for anti-mildew agents in controlling wood mould and stain fungi: GB/T 18261−2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

[16] 方旋, 张景朋, 熊怡心, 等. 自然老化杉木梁的分区可处理性 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 124−132.
Fang X, Zhang J P, Xiong Y X, et al. Sub-regional treatability of a naturally aging Chinese fir beam[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 124−132.

[17] 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 Y J, Peng Y, Cao J Z. 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.

[18] 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.

[19] 全国造纸工业标准化技术委员会. 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.
AQSIQ, SAC. Fibrous raw material-determination of solvent extractives: GB/T 2677.6−1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.

[20] 李能, 陈玉和, 包永洁, 等. 竹木材料耐紫外光老化性能研究进展 [J]. 浙江林业科技, 2011, 31(6): 70−73.
Li N, Chen Y H, Bao Y J, et al. Review on research of bamboo and wood anti-UV aging[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2011, 31(6): 70−73.

[21] 杨淑敏, 任海青, 费本华, 等. 竹材木质素在细胞壁中的微区分布 [J]. 林产化学与工业, 2010, 30(5): 19−24.
Yang S M, Ren H Q, Fei B H, et al. Lignin distribution in cell wall of bamboo culms (*Phyllostachys pubescens* and *Pseudosasa amabilis*)[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2010, 30(5): 19−24.

[22] Lian C, An X, Lü H, et al. Use of atomic force microscopy to view ultrastructure of the fiber cell wall in *Phyllostachys edulis* culms[J]. Cellulose, 2023, 30(4): 1999−2006.

[23] Yu H X, Pan X, Xu M P, et al. Surface chemical changes analysis of UV-light irradiated Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel)[J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(6): 180110.

[24] Kim Y S, Lee K H, Kim J S. Weathering characteristics of bamboo (*Phyllostachys puberscence*) exposed to outdoors for one year[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62(4): 332−338.

[25] Rowell R M. Handbook of wood chemistry and wood composites[M]. Florida: CRC Press, 2012.

[26] Jelle B P, Rüther P, Hovde P J. Investigations of accelerated climate aged wood substrates by Fourier transform infrared material characterization[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2012(1): 1−6.

[27] Yu H, He S, Zhang W, et al. Discoloration and degradation of bamboo under ultraviolet radiation[J]. International Journal of Polymer Science, 2021(1): 1−10.

[28] Dubey P, Sharma P, Kumar V. FTIR and GC-MS spectral datasets of wax from *Pinus roxburghii* Sarg. needles biomass[J]. Data in Brief, 2017, 15: 615−622.

[29] Xu G, Wang L, Liu J, et al. FTIR and XPS analysis of the changes in bamboo chemical structure decayed by white-rot and brown-rot fungi[J]. Applied Surface Science, 2013, 280: 799−805.

[30] 马星霞, 蒋明亮, 吕文华, 等. 竹材主要变色菌霉菌的生长特性研究 [J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 819−823.
Ma X X, Jiang M L, Lü W H, et al. Study on the biological characteristics of stain fungi and mould fungi on bamboo wood[J]. Forest Research, 2009, 22(6): 819−823.

[31] 何蕊, 邱坚, 罗蓓, 等. 2 种丛生竹生长季竹秆表皮解剖特性研究 [J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(1): 170−175.
He R, Qiu J, Luo B, et al. The research on anatomical characteristics of stem epidermis of 2 sympodial bamboos during the growing season[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, 37(1): 170−175.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　于志明）