

激光与光电子学进展

光纤传感器应用于木质文物霉菌检测的研究

郭萌萌¹, 陈焜¹, 石胜辉^{1*}, 覃丹^{1,2**}, 谭博文², 罗彬彬¹, 蒋上海¹, 赵明富¹, 唐欢²¹重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054;²馆藏文物有害生物控制研究国家文物局重点科研基地 (重庆中国三峡博物馆), 重庆 400060

摘要 为了实现木质文物表面霉菌生长过程的无损检测,提出了一种由 1 根发送光纤和 6 根倾斜面接收光纤构成的反射式光纤传感器。建立了光纤传感器检测理论模型,并对传感器结构参数对其灵敏度的影响进行了数值仿真,利用传感器对松木样品表面霉菌(桔青霉、长梗木霉)的生长过程进行了在线检测。研究表明,传感器能够准确获得松木表面培养的桔青霉和长梗木霉的识别特征峰,所在波长分别为 261 nm 和 272 nm,霉菌生长高度与其吸光度具有良好的线性关系,对应的检测灵敏度分别是 6.49×10^{-4} AU/ μm 和 6.85×10^{-4} AU/ μm (AU 为吸光度单位)。此外,采用相对质量分数为 8% 的氯化钠溶液处理木质文物后,可以抑制其表面霉菌的生长。所提出传感器能够对木质样品表面生长的霉菌进行准确识别,在木质文物霉菌防治领域有一定的应用前景。

关键词 反射式光纤传感器; 木质文物; 光纤光谱; 霉菌; 灵敏度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240726

Research on Application of Fiber Optic Sensor in Detection of Molds in Wooden Cultural Relics

Guo Mengmeng¹, Chen Kun¹, Shi Shenghui^{1*}, Qin Dan^{1,2**}, Tan Bowen², Luo Binbin¹, Jiang Shanghai¹, Zhao Mingfu¹, Tang Huan²¹Chongqing Key Laboratory of Optic Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;²Key Scientific Research Base of Pest and Mold Control of Heritage Collection State Administration of Cultural Heritage (Chongqing China Three Gorges Museum), Chongqing 400060, China

Abstract A reflective fiber optic sensor that consists of one transmitting optical fiber and six receiving optical fibers with an inclined surface is developed to realize the online, nondestructive monitoring of the growth processes of molds on the surfaces of wooden cultural relics. A theoretical model of this sensor detection measurement is established, and the influences of the sensor structural parameters on its sensitivity are numerically simulated. The growth processes of *Penicillium citrinum* and *Trichoderma longibrachiatum* on the surfaces of wooden cultural relics are monitored online by the sensor. Results indicate that the sensor can accurately obtain the characteristic absorption peaks of *Penicillium citrinum* and *Trichoderma longibrachiatum*, which are 261 nm and 272 nm, respectively. The corresponding detection sensitivities are 6.49×10^{-4} AU/ μm and 6.85×10^{-4} AU/ μm (AU is a unit of absorbance), respectively. A good linear relationship is found between the sensor's output signal and the mold height. In addition, the growth of molds on the surfaces of wooden cultural relics can be inhibited via treatment by a sodium chloride solution with an 8% relative mass fraction. The proposed sensor can accurately identify the mold growing on the surfaces of wooden samples, and it has application prospect in the field of mold control for wooden cultural relics.

Key words reflective fiber optic sensor; wooden cultural relic; fiber spectrum; mold; sensitivity

收稿日期: 2024-02-22; 修回日期: 2024-03-27; 录用日期: 2024-04-03; 网络首发日期: 2024-04-12

基金项目: 重庆英才青年拔尖人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0128)、重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K202201106)、重庆市自然科学基金创新与发展联合基金(CSTB2023NSCQ-LZX0008)、重庆理工大学科研创新团队培育计划(2023TDZ002)、重庆理工大学研究生创新计划(gzlcx20233079)、重庆中国三峡博物馆科研项目(3GM2022-KTZ07)

通信作者: *shshill@cqut.edu.cn; **qindan_cctgm@163.cn

1 引言

我国历史文化源远流长,文物种类繁多,其中木质文物约占文物总数的 1/3,具有十分重要的科学、艺术、历史和欣赏价值^[1-3]。木质文物存在于古时人们生活的方方面面^[4-5],是当前科学研究和生产活动的有益参考^[6]。木质文物的保存效果受到诸多环境因素(温度和湿度、酸碱盐环境、虫害侵袭和霉菌生长等)的影响,因此木质文物不可避免地遭受病害侵蚀^[7]。其中,霉菌^[8-9]对木质文物造成的损害相当严重。木质文物本身含有大量的有机物质,如纤维素、半纤维素和木质素,这些成分为桔青霉、长梗木霉等霉菌^[10-11]提供了生长所需的营养物质,为霉菌的生长繁殖提供了良好的环境^[12-14]。此外,盐分的存在会改变木材中水分子的扩散行为,影响木材的含水率和吸水性,使木质文物对环境湿度的变化更为敏感。因此,实现木质文物表面霉菌的实时无损检测,对于防控霉菌对木质文物的腐蚀和破坏有着重要的意义。

近年来,已有大量的无损分析检测技术被广泛应用于木质文物的病害检测研究中,主要包括核磁共振光谱、显微拉曼光谱、近红外光谱及反射式光纤传感器技术等:核磁共振光谱^[15]主要应用于结构鉴定和腐朽方式分析等方面,但是其分辨率相对有限,对细微结构或者表面特征的分析存在局限性;显微拉曼光谱^[16]主要利用激光与样品在相互作用时发生的一定程度的弹性散射效应进行检测,但是测量过程需对文物进行预处理,存在易损伤文物的高风险因素,易对文物的完整性造成破坏,且存在荧光干扰的风险;近红外光谱^[17]可对降解机制进行深入探讨,主要利用纤维光学探针或者积分球对木质文物表面或者磨碎的木材在漫反射模式下的信息进行采集,可以快速获取大量的数据,但该技术对样品表面特征的敏感性要求较高,样品表面的处理或者变化可能会对测试结果产生影响;反射式光纤传感器^[18-20]是一种利用光纤光谱仪采集反射光谱的分析方法,测量时无须接触样品,被认为是实现在线动态实时非接触式无损检测最有前景的一种新型检测器件,同时,该技术凭借其结构简单、设计灵活、体积小、抗电磁干扰、成本低、响应速度快、测量灵敏度高^[21-23]等优点已经被应用于文物检测中。Ferri 等^[24]采用光纤反射光谱(FORS)法对 15 世纪—18 世纪收藏的历史纺织品碎片的主要着色染料进行完全非侵入性识别,识别染料主要为靛蓝和蒽醌类化合物。Tournié 等^[25]收集彩色照片,再将这些照片印刷于纸张上,利用 FORS 法和统计分析方法在 1000~2500 nm 波长下对纸张进行鉴别,以建立反射光谱数据库。然而,目前还未见用于木质文物表面霉菌病害无损在线检测的光纤光谱传感器的报道。

基于以上问题,本文提出一种反射式光纤传感器,用于在线无损检测木质文物表面生长的霉菌(桔青霉、

长梗木霉)。同时,研究发送光纤半径、发送光纤数值孔径、接收光纤半径、光纤间距、接收光纤倾斜角度等因素对传感器灵敏度的影响,并对其进行数值仿真分析。另外,利用所制备的反射式光纤传感器对木质文物上的霉菌种类和霉菌的生长情况进行无损在线检测,并讨论不同含盐度对木质样品表面长梗木霉生长状况的影响。

2 传感器检测理论模型与仿真

单根接收光纤接收的光强有限,因此设计的反射式光纤传感器由 1 根发送光纤和 6 根端面为倾斜面的接收光纤构成,如图 1 所示。反射式光纤传感器以发送光纤为中心,6 根接收光纤紧密排列布置在外围。紧密的布置可减小光纤之间的间距,有助于提高灵敏度。同时,相比于传统接收光纤端面的平面结构,采用斜面可以增大光纤的受光面积,使经样品表面吸收、散射和发射的光能够更多地进入接收光纤中,从而提高传感器的测量灵敏度,实现高精度非接触式测量。

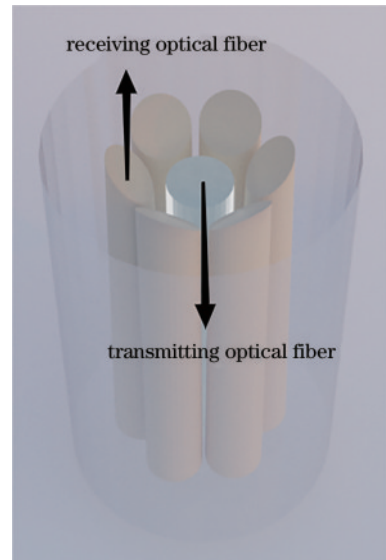


图 1 传感器探头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor probe

2.1 传感器检测理论模型

设计的光纤传感器探头中单光纤对光耦合原理示意图如图 2 所示。发送光纤与接收光纤相互平行,垂直于镜面反射面。光源发出的光经发送光纤照射至被测物表面,形成反射光锥,接收光纤接收其与反射光锥相交部分的光,两者相交的面积和在相交处反射光锥的光强随着被测物表面与光纤端面之间的距离的变化而变化,因此,通过测量接收光纤中光强的大小可以间接确定光纤端面与反射面间的距离。在对木质样品表面霉菌的检测中,霉菌的高度变化导致接收光强的变化,通过光纤光谱仪分析光强变化,即可以实现霉菌生长信息的测量。

发送光纤出射端光强分布采用高斯分布模型,该

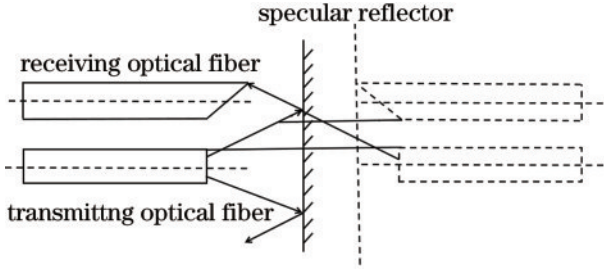


图 2 斜面接收光纤对光耦合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical coupling for inclined receiving optical fiber

模型被认为是与实际情况较为符合的一种光强分布。因此,发送光纤出射端面光强分布表达式为

$$I(\rho, d) = \frac{2(1-C)I_{in}}{\pi q^2(d)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{q^2(d)}\right), \quad (1)$$

式中: C 为菲涅耳界面反射系数,在玻璃和空气交界处, C 为 4%; d 为发送光纤到反射面的轴向距离; $q(d)$ 为经发送光纤后光束在距离光纤端面 d 处的光斑半径; I_{in} 为耦合到发送光纤的外部光源的光强度; ρ 为光纤径向到中轴线的距离。

由斯涅尔定律可知,接收光纤接收到的有效光强可等价在发送光纤的像与反射面 2 倍距离处发出的光强,其光斑半径也等价于发送光纤的像与反射面 2 倍距离时的光斑直径,其表达式为

$$I_{2d}(\rho, d) = I(\rho, 2d) = \frac{2(1-C)I_{in}}{\pi q^2(2d)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right). \quad (2)$$

根据斜面接收光纤对光耦合原理,光斑半径为

$$q(2d) = \frac{\left(2d - \frac{p}{\tan \alpha}\right) \sin \alpha}{\sin(180^\circ - \theta - \alpha)} \sin \theta + p + r_1, \quad (3)$$

式中: p 为接收光纤与发送光纤外表面之间的间距; r_1 为发送光纤半径; θ 为发送光纤最大出射角, $\theta = \arcsin NA$, 其中 NA 为发送光纤数值孔径; α 为接收光纤倾斜角度。

耦合到接收光纤的光功率(P_R)可由极坐标下微元积分求得,即

$$P_R(\rho, d) = \int_{S_R} I_{2d}(\rho, d) dS, \quad (4)$$

式中: S_R 为接收光纤光耦合面积; I_{2d} 为发送光纤的像与反射面 2 倍距离处发出的光强。有效接收的微元面积可以表示为 $dS = 2\rho\beta d\rho$ 。令 t 为接收光纤中心与发送光纤中心的轴间距, r_2 为接收光纤的半径, β 计算如下:

$$\beta = \arccos\left(\frac{t^2 + \rho^2 - r_2^2}{2t\rho}\right). \quad (5)$$

接收光纤的有效耦合面积分为 3 种情况。

1) 当有效接收区域不能覆盖接收光纤时,即

$q(2d) < t - r_2$, 此时反射光斑不能与接收光纤相交,没有有效耦合区域,接收光纤能接收的光功率为 0。

2) 当 $t - r_2 \leq q(2d) < t + r_2$ 时,随着距离 d 的增大,反射光斑半径也会增大,接收光纤接收到的光功率随着有效接收面积的增大而增大。当反射光斑边界恰好和接收光纤边界重合时,光强调制函数达到最大,传感器输出达到峰值。此时,接收光纤能够接收到的光功率为

$$P_R(\rho, d) = \int_{t-r_2}^{q(2d)} \frac{2\rho I_{in}(1-C)}{\pi q^2(2d)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right) \arccos\left(\frac{t^2 + \rho^2 - r_2^2}{2t\rho}\right) d\rho. \quad (6)$$

3) 当 $t + r_2 \leq q(2d)$ 时,随着距离 d 的进一步增大,反射光的强度随着距离增大而减小,而接收光面积保持不变,耦合到接收光纤的光功率为

$$P_R(\rho, d) = \int_{t-r_2}^{t+r_2} \frac{2\rho I_{in}(1-C)}{\pi q^2(2d)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right) \arccos\left(\frac{t^2 + \rho^2 - r_2^2}{2t\rho}\right) d\rho. \quad (7)$$

由式(6)、(7)可以看出,接收光强受到发送光纤半径(r_1)、发送光纤数值孔径(NA)、接收光纤半径(r_2)、光纤外表面间距(p)和接收光纤倾斜角度(α)等结构参数的影响。当传感器的结构参数确定后,接收光功率仅受到霉菌特征参数(霉菌种类和生长高度)的影响。因此,根据传感器输出光谱的变化信息(特征峰和吸光度),可实现对霉菌种类和生长高度的定性和定量分析。

2.2 传感器结构参数对其性能影响仿真

2.2.1 发送光纤半径对传感器性能的影响

设置仿真初始参数: $NA=0.22$, $r_2=150 \mu\text{m}$, $p=125 \mu\text{m}$, $\alpha=75^\circ$ 。图 3 给出了不同发送光纤半径下,传感器输出功率的变化。当发送光纤半径为 $200 \mu\text{m}$ 时,传

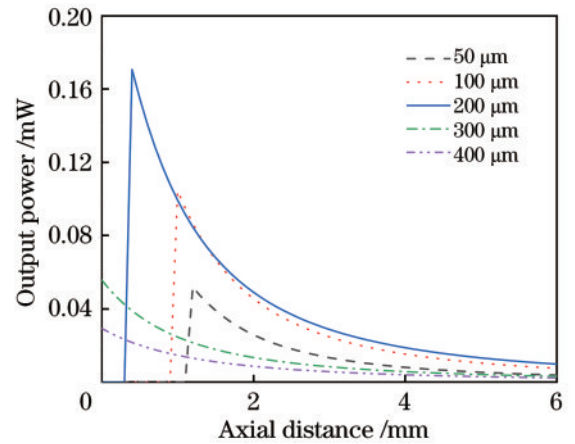


图 3 不同发送光纤半径下输出功率随轴向距离的变化

Fig. 3 Variation in output power with axial distance under different radii of transmitting optical fiber

传感器输出光功率达到最大。当发送光纤半径较小时,会增加光信号的传输损耗,外部光源耦合进入发送光纤内的光强较弱,减弱了发送光纤的输出光强,即传输至反射面的光强较弱,接收光强输出变化量小,影响了传感器的灵敏度和信噪比。过大的发送光纤半径将增大发送光纤与接收光纤的轴间距,减弱接收光纤接收的来自反射面的反射光强,导致接收光纤的输出光强变化量减小。因此,选择光纤半径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的发送光纤较为合适,此时光纤传感器有较大的测量范围与较高的测量灵敏度。值得注意的是,当 $t-r_2 \leq q(2d) < t+r_2$ 时,传感器输出达到峰值后,随着 d 进一步增大,发送光纤的像在接收光纤形成的光锥面积增大,而接收光纤的接收端面积不变,所以传感器输出功率反而逐渐减小。因此,在 d 的变化过程中,传感器的输出功率曲线中出现跳跃变化。

2.2.2 发送光纤数值孔径对传感器性能的影响

设置仿真初始参数: $r_1=200\text{ }\mu\text{m}$, $r_2=150\text{ }\mu\text{m}$, $p=125\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha=75^\circ$ 。改变发送光纤数值孔径(NA)分别为 0.18、0.22、0.27、0.32、0.37,传感器输出功率随发送光纤数值孔径的变化如图 4 所示。随着数值孔径的增大,传感器具有更高的耦合损耗,可以看出传感器的灵敏度呈降低的趋势。这是由于数值孔径越大,光纤吸收光的能力越强,这会导致光纤的带宽降低和信号衰减,影响传感器的分辨率和准确性。而发送光纤数值孔径为 0.18 时,传感器死区范围较大,故选择数值孔径为 0.22 较为合适,此时可以获得较大的测量范围与较高的测量灵敏度。

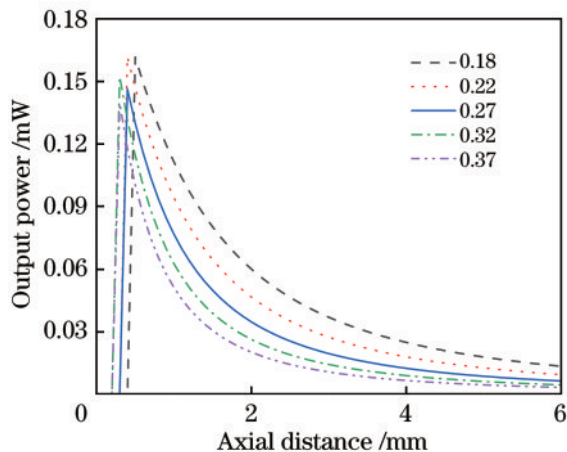


图 4 不同发送光纤数值孔径下输出功率随轴向距离的变化
Fig. 4 Variation in output power with axial distance under different numerical apertures of transmitting optical fiber

2.2.3 接收光纤半径对传感器性能的影响

设置仿真初始参数: $r_1=200\text{ }\mu\text{m}$, $NA=0.22$, $p=125\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha=75^\circ$ 。改变接收光纤半径(r_2)分别为 70、90、110、130、150 μm ,其仿真结果如图 5 所示。当接收光纤半径增大时,可以明显看到传感器的灵敏度提升,

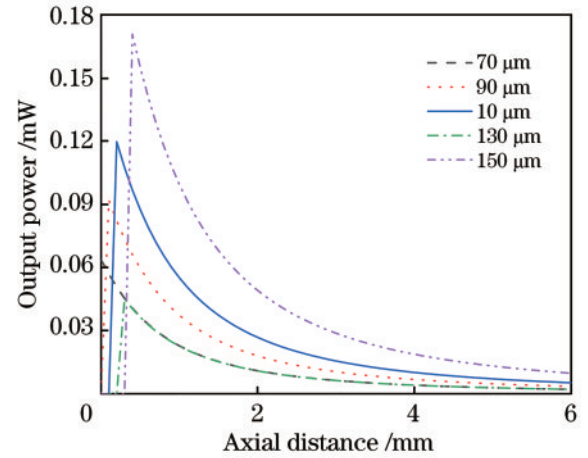


图 5 不同接收光纤半径下输出功率随轴向距离的变化
Fig. 5 Variation in output power with axial distance under different radiuses of receiving optical fiber

但是大半径的光纤会导致噪声和其他环境因素如环境光线对传感器检测结果的影响,导致信号混叠,干扰增加。并且较大的接收光纤半径不利于光纤的耦合,因此在测量过程中应选择半径合适的接收光纤。本文选择接收光纤半径为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2.4 光纤间距对传感器性能的影响

设置仿真初始参数: $r_1=200\text{ }\mu\text{m}$, $NA=0.22$, $r_2=150\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha=75^\circ$ 。改变光纤外表面间距(p)为 125、150、175、200、225 μm ,其仿真结果如图 6 所示。随着发送光纤和接收光纤之间的间距增大,传感器的灵敏度降低,测量区间变窄。光纤间距越小,传感器对光信号的捕获能力越强,灵敏度越高。传感器探头的发送光纤和接收光纤之间的间距对有效测量范围的影响相对来说最大。间距进一步减小时,理论上可以进一步提升输出功率,然而通过 3D 打印制作间距较小的光纤探头结构,实物出现孔与孔的粘连和贯通,无法满足探头的封装要求。所以,为了获得较高的测量灵敏度和比较

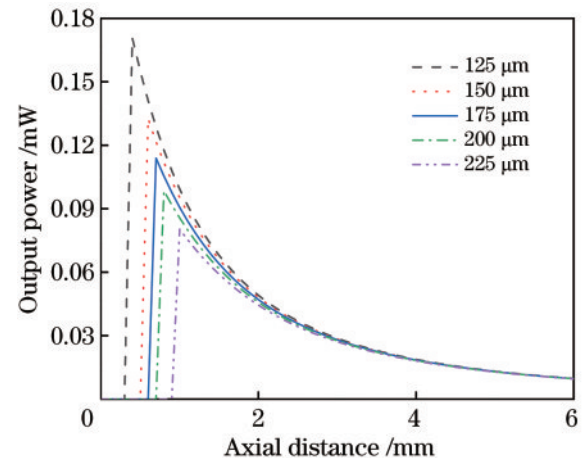


图 6 不同光纤间距下输出功率随轴向距离的变化
Fig. 6 Variation in output power with axial distance under different optical fiber spacings

理想的线性测量区间,在对木质文物表面生长霉菌进行检测时,尽可能地减小发送光纤与接收光纤之间的间距,最终确定两者间距为 125 μm 。

2.2.5 接收光纤倾斜角度对传感器性能的影响

设置仿真初始参数: $r_1=200\text{ }\mu\text{m}$, $NA=0.22$, $r_2=150\text{ }\mu\text{m}$, $p=125\text{ }\mu\text{m}$ 。改变接收光纤的端面倾斜角度(α), α 为 0° 时代表接收光纤的端面为平面,其仿真结果如图 7 所示。随着 α 增大,传感器的测量灵敏度明显提升,测量范围明显拓宽,这是因为斜面增大了接收光纤的接收面积(即接收光的能力提高),提高了光纤对光源的利用率。当倾斜角度超过 75° 时,倾斜角度过大

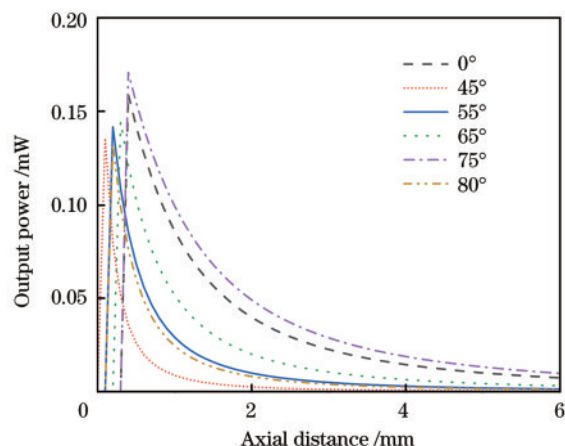


图 7 不同接收光纤倾斜角度下输出功率随轴向距离的变化
Fig. 7 Variation in output power with axial distance under different tilt angles of receiving optical fiber

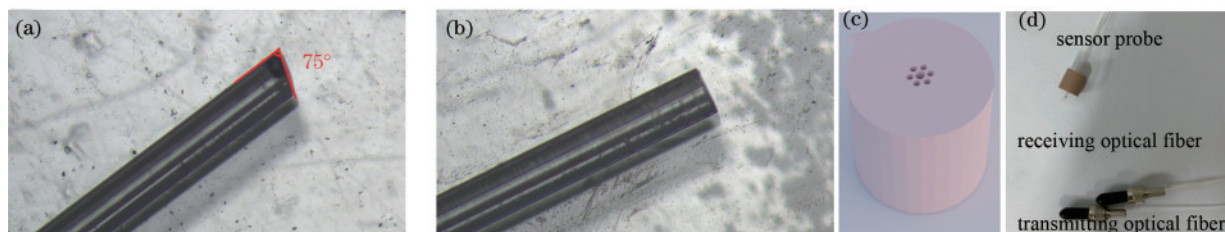


图 8 光纤传感器。(a) 接收光纤;(b) 发送光纤;(c) 3D 打印模型;(d) 传感器探头

Fig. 8 Fiber optic sensor. (a) Receiving optical fiber; (b) transmitting optical fiber; (c) 3D printing model; (d) sensor probe

3.2 木质文物表面霉菌样品培养制备

用于霉菌培养的文物样品的材质为松木(购自重庆某木材市场),根据国家标准《木材耐久性能 第1部分:天然耐腐性实验室试验方法》(GB/T 13942.1—2009),将其晾干到一定程度后,锯成尺寸为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的小片。桔青霉和长梗木霉由重庆馆藏文物有害生物控制研究国家文物局重点科研基地提供。木质样品表面霉菌的培养步骤如下:1)将木质文物分别在清水和不同相对质量分数(0.2%、4%、6%、8%)的氯化钠(NaCl)溶液中浸泡 24 h;2)将浸泡后的木质样品放入高压蒸汽灭菌锅[GR60DR,致微(厦门)仪器有限公司]中灭菌(设备温度为 $121\text{ }^\circ\text{C}$)20 min;3)用无菌去离子水对新鲜培养的 2 种带菌(桔青霉、长

将导致一部分光不能进入接收光纤,传感器性能明显降低。因此,在后续的实验中选择端面倾斜角度为 75° 的光纤作为接收光纤,使传感器可以获得较高的检测灵敏度。

3 传感器制备及检测系统

3.1 传感器制备

根据仿真结果,实验发送光纤选用半径为 200 μm 的石英光纤,接收光纤选用半径为 150 μm 的石英光纤,发送光纤数值孔径为 0.22 ± 0.02 ,传感器工作波段为 200~1200 nm,工作温度范围为 $-40\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 。

为获得端面倾斜角度为 75° 的接收光纤,首先截取 6 根半径为 150 μm 的石英光纤(长度约为 1 m),接着分别使用光纤研磨盘(SMA-905 接口)和不同粗糙度的光纤研磨纸(粒径为 1、3、5、9 μm)先后对光纤两头端面进行研磨直至端面倾斜角度达到 75° ,使用光纤抛光片对光纤进行抛光,如图 8(a)所示,将打磨好的光纤用乙醇擦拭干净。截取 1 根半径为 200 μm 的石英光纤(长度约为 1 m),发送光纤端面为平面结构,如图 8(b)所示。为有效地将发送光纤和接收光纤耦合,首先采用 3D 打印机(128S-3D 打印机,中山华煜远行电子科技有限公司)制作光纤耦合塑胶护套(材质为光固化树脂),固定光纤间距为 125 μm ,如图 8(c)所示,然后分别将发送光纤和接收光纤耦合镶嵌于塑胶护套内,最后采用 UV 无影胶固定和封装,即获得所提光纤传感器,如图 8(d)所示。

梗木霉)平板进行洗脱,并将悬液转移至经过灭菌处理的试剂瓶中,用血球计数法确定原液的孢子浓度;4)将试剂瓶中的悬浮液稀释为孢子浓度在 $1\times 10^5\sim 5\times 10^5\text{ CFU/mL}$ 的孢子悬浮液,并放入冰箱待用;5)在一次性无菌塑料培养皿中加入 10 μL 制备好的霉菌孢子悬液和 9.99 mL 的甘油营养液,将木质样品放入培养皿中均匀浸染,将其放入温度为 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 和相对湿度为 70% 的霉菌培养箱(MJPS-250Y,上海精宏实验设备有限公司)中培养;6)培养 7 d 后将染霉的木质样品取出,自然阴干。

3.3 检测系统

实验检测系统主要由光纤光谱仪(Maya 2000 pro, 美国 Ocean Optics 公司,光谱范围为 200~1100 nm,

分辨率为 0.07~6.7 nm)、紫外-可见光光源(DH-2000LL, 上海闻奕光电科技有限公司, 波长范围为 180~2500 nm)、计算机、反射式光纤传感器、精密级侧升降台以及染霉木质样品等组成, 如图 9 所示。在木质文物表面霉菌生长过程的检测中, 首先将木质样品放置在精密级侧升降台上以便控制传感器与样品间的检测距离, 光源发出的光经发送光纤传输至染霉木质样品表面, 光线被表面霉菌吸收、散射和反射后传输至接收光纤, 通过光纤光谱仪对特征吸收光谱进行读取。当光源发出的光照射到样品表面霉菌时, 不同霉菌会吸收特定

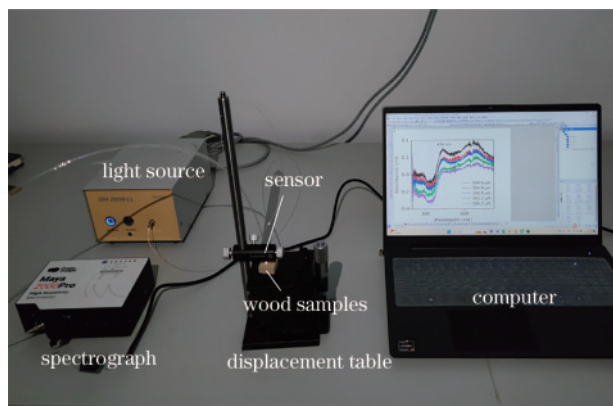


图 9 实验装置

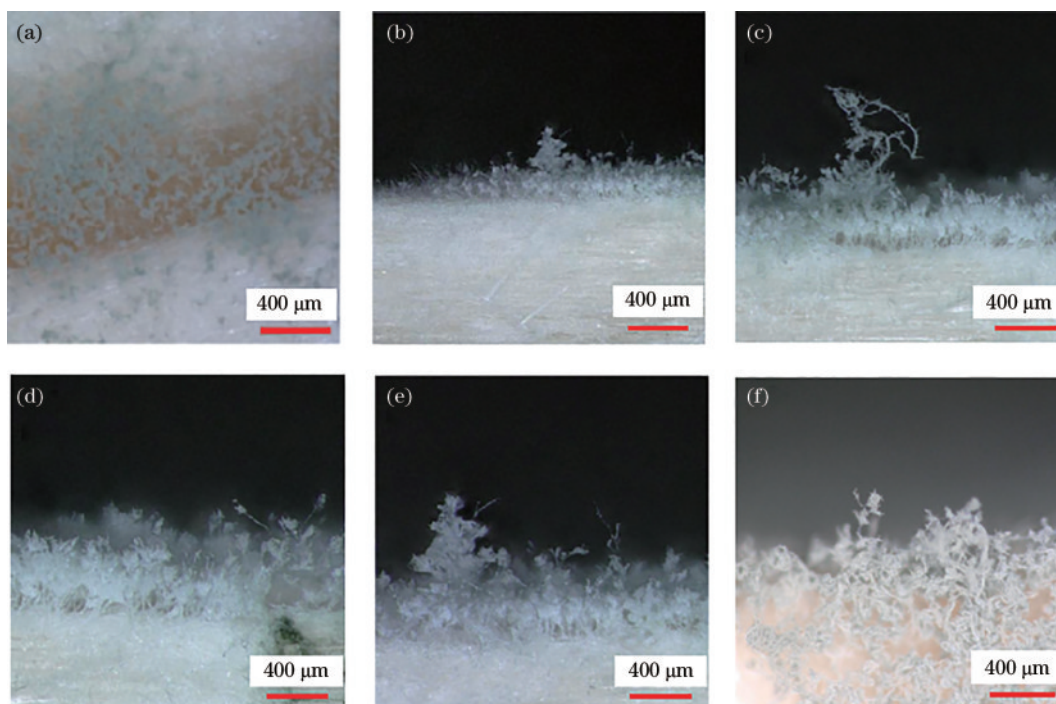
Fig. 9 Experimental setup

波长的光, 由于不同霉菌的能级不同, 可以通过分析霉菌的吸收光谱辨别霉菌的种类。同时, 通过光谱仪获取的数据, 可以获得木质文物表面不同霉菌的信息和在生长过程中霉菌生长高度的变化信息。需要注意的是, 长时间的光照会影响霉菌的生长, 破坏霉菌的内部生理结构, 导致霉菌细胞结构损伤和代谢受限, 甚至导致细胞的死亡, 因此, 整个实验需要在无外界环境光干扰下进行, 同时要在较短时间内完成对样品的检测。

4 结果与讨论

4.1 传感器对松木样品表面桔青霉的光谱响应特性

使用超景深三维显微镜(KEYENCE VHX-5000, 基恩士有限公司)对桔青霉表面进行拍摄, 采集不同生长高度的霉菌图片, 其生长高度在 196.3~406.1 μm (在实际检测阶段以同一区域内桔青霉生长高度的均值计算), 如图 10 所示。图 10(a)为桔青霉表面形貌图, 可以清楚看出桔青霉的菌落呈质地绒状, 具有放射式条纹, 霉菌为蓝绿色, 带有白色边缘。由图 10(b)~(f)可以看出, 随着培养时间的增加, 桔青霉的高度也不断增高, 同时, 菌丝在木质样品表面的密度增加, 分生孢子梗光滑, 呈现帚状枝非对称结构, 可具有 3~4 层分支、小梗 2~4 个轮生, 分生孢子呈现椭圆形, 孢子壁光滑, 聚集成链为明显的分散柱状。

图 10 桔青霉图。(a)松木桔青霉表面形貌;(b)196.3 μm ;(c)256.1 μm ;(d)292.5 μm ;(e)373.6 μm ;(f)406.1 μm Fig. 10 *Penicillium citrinum* images. (a) Surface morphology of *Penicillium citrinum* on pine wood; (b) 196.3 μm ; (c) 256.1 μm ; (d) 292.5 μm ; (e) 373.6 μm ; (f) 406.1 μm

为了表征传感器对木质样品表面的桔青霉测量的准确性, 利用图 9 所示的检测系统, 将不同生长高度的桔青霉分别放置在精密级侧升降台上进行在线检测,

得到桔青霉生长高度和吸光度之间的关系, 结果如图 11 所示。由图 11(a)可以看出, 桔青霉在 261 nm 处有一个特征识别峰。图 11(b)给出了 261 nm 处桔青霉

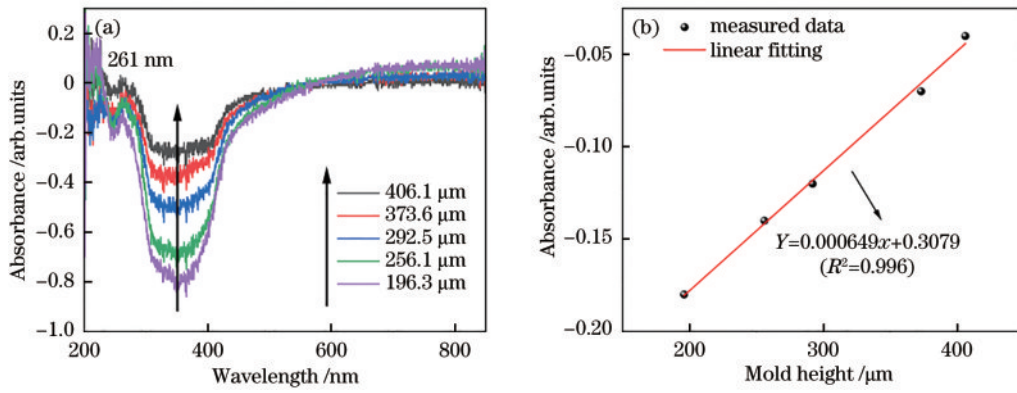


图 11 松木桔青霉光谱信息。(a)特征吸收光谱;(b)波长为 261 nm 处吸光度与霉菌高度的关系

Fig. 11 Spectral information of *Penicillium citrinum* on pine wood. (a) Characteristic absorption spectrum; (b) relationship between absorbance and mold height at wavelength of 261 nm

的生长高度与吸光度之间的关系,可看出两者具有良好的线性关系,拟合关系式为 $y=0.000649x+0.3079$,拟合系数(R^2)为 0.996。因此,该传感器灵敏度可达到 6.49×10^{-4} AU/ μm (AU 为吸光度单位)。研究结果表明该传感器可以实现对木质文物表面上桔青霉的在线实时检测。

4.2 传感器对松木表面长梗木霉的光谱响应特性

采用深度扫描显微镜对松木表面的长梗木霉表面进行拍摄,采集了不同生长高度(86.3~496.1 μm)的霉菌,如图 12 所示。图 12(a)为长梗木霉表面形貌图,长梗木霉属于半知菌门,其初始颜色为白色,生长过程中逐渐向四周扩展,一段时间后在菌落中央产生绿色孢子,中央变成绿色。

为进一步证明所制作的反射光纤传感器对霉菌的检测能力,将制作好的木质样品表面的长梗木霉分别放置在精密级侧升降台上,得到长梗木霉生长高度和吸光度之间的关系,实验结果如图 13 所示。由图 13(a)可看出长梗木霉特征识别峰位于 272 nm 波长处,且随着长梗木霉生长高度的增加,其吸光度也相应地增大。由图 13(b)可以看出,传感器检测到长梗木霉的吸光度与其生长高度之间存在着较好的线性关系,拟合关系式为 $y=0.000685x+0.1152$, $R^2=0.996$,检测灵敏度可以达到 6.85×10^{-4} AU/ μm ,较 Yu 等^[19]使用的平面结构的接收光纤,本文光纤的灵敏度提高了约 47.9%。因此,该传感器可以对木质文物上的霉菌生长过程信息(高度)进行在线实时检测。

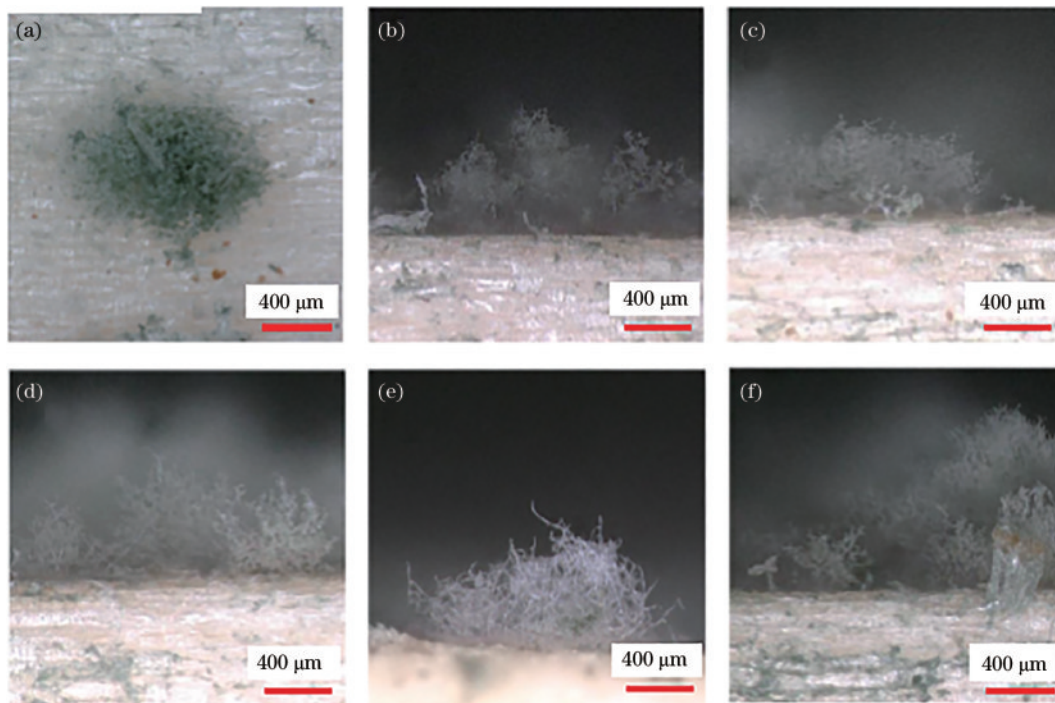


图 12 长梗木霉图。(a)松木长梗木霉表面形貌;(b) 86.3 μm ;(c) 136.2 μm ;(d) 221.6 μm ;(e) 281.2 μm ;(f) 496.1 μm

Fig. 12 *Trichoderma longibrachiatum* images. (a) Surface morphology of *Trichoderma longibrachiatum* on pine wood; (b) 86.3 μm ; (c) 136.2 μm ; (d) 221.6 μm ; (e) 281.2 μm ; (f) 496.1 μm

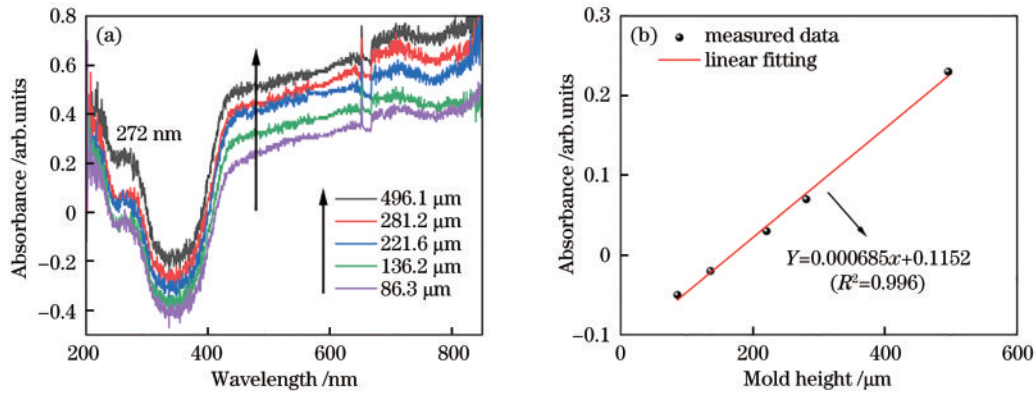


图 13 松木长梗木霉光谱信息。(a)特征吸收光谱;(b)波长为 272 nm 处吸光度与霉菌高度的关系

Fig. 13 Spectral information of *Trichoderma longibrachiatum* on pine wood. (a) Characteristic absorption spectrum; (b) relationship between absorbance and mold height at wavelength of 272 nm

4.3 传感器对含 NaCl 溶液松木表面长梗木霉的光谱响应

为证明含 NaCl 溶液对霉菌生长具有抑制作用,对经不同相对质量分数(0、2%、4%、6% 和 8%)的 NaCl 溶液浸泡 24 h 后的木质样品进行染霉。在霉菌培养箱培养 7 d 后,松木样品表面长梗木霉的生长情况如图 14 所示,其中图 14(a)是松木表面不染霉,仅加入营

养液的情况。由图 14(b)~(f)可以看出,随着松木样品表面含盐量的增加,样品表面的菌丝和孢子量都在逐渐减少,说明含盐溶液能够抑制霉菌的进一步生长。用相对质量分数为 8% 的 NaCl 溶液浸泡后的松木样品表面没有菌丝,表面仅析出了滴加的营养液和 NaCl 晶体,可以得出在 NaCl 溶液的相对质量分数为 8% 时,长梗木霉基本没有生长。

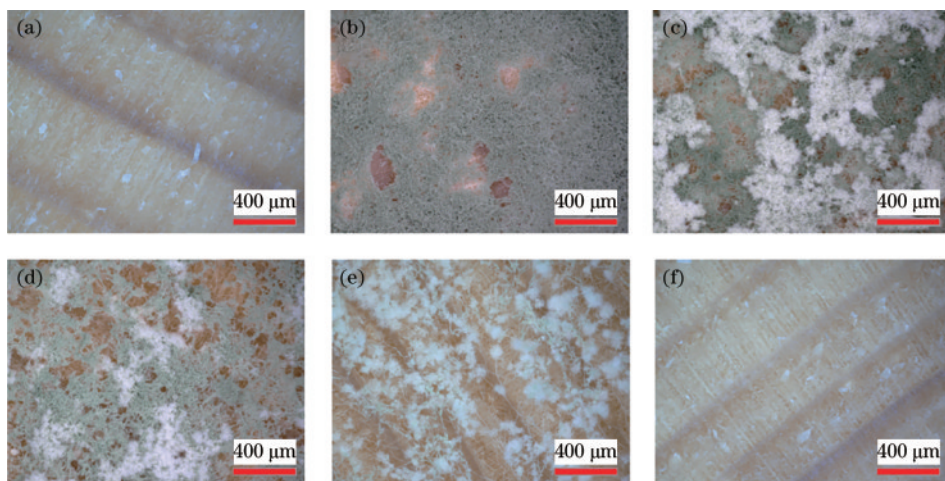


图 14 不同相对质量分数的 NaCl 溶液浸泡后松木长梗木霉生长情况。(a)无霉菌感染;(b) 0%;(c) 2%;(d) 4%;(e) 6%;(f) 8%

Fig. 14 Growth of *Trichoderma longibrachiatum* on pine wood after soaking in NaCl solution with different relative mass fractions. (a) No mold infection; (b) 0%; (c) 2%; (d) 4%; (e) 6%; (f) 8%

图 15 为不同相对质量分数的 NaCl 溶液浸泡后松木样品表面长梗木霉生长情况的光谱变化。在相同的生长周期下,随着盐浓度的增加,长梗木霉的生长逐渐受到抑制。在对经相对质量分数为 8% 的 NaCl 溶液浸泡后的木质样品表面霉菌的生长情况进行检测时,传感器没有响应,即长梗木霉基本没有生长。因此,该传感器对于部分未脱盐或含盐量较高的木质文物的霉变检测受限于霉菌生长的最高盐浓度耐受值。同时,对松木样品采用 8% 的 NaCl 溶液进行处理,可以抑制长梗木霉的进一步生长,对木质文物的保护具有一定的指导意义。

5 结 论

实验提出了由 1 根发送光纤和 6 根倾斜面接收光纤构成的反射式光纤传感器,建立了传感器检测理论模型,仿真了发送光纤半径、发送光纤数值孔径、接收光纤半径、光纤间距和接收光纤倾斜角度等参数对传感器灵敏度的影响。利用所制作的光纤传感器对木质样品表面的桔青霉和长梗木霉进行检测,发现其特征峰所在波长分别为 261 nm 和 272 nm,对它们的检测灵敏度分别为 $6.49 \times 10^{-4} \text{ AU}/\mu\text{m}$ 和 $6.85 \times 10^{-4} \text{ AU}/\mu\text{m}$ 。此外,该传感器对部分未脱盐或含盐量较高的木质文

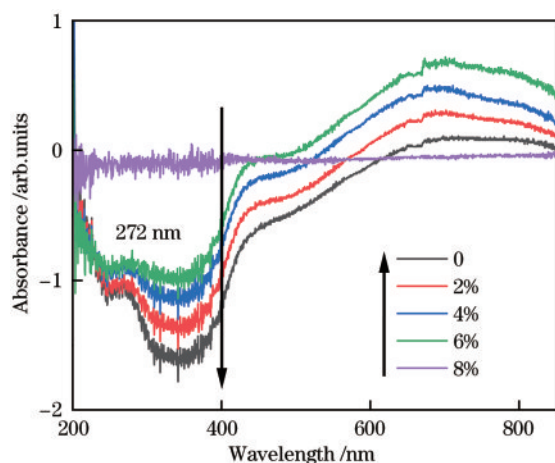


图 15 不同相对质量分数的 NaCl 溶液浸泡后长梗木霉的光谱信息
Fig. 15 Spectral information of *Trichoderma longibrachiatum* after soaking in NaCl solution with different relative mass fractions

物的霉变检测受限于霉菌生长的最高盐浓度耐受值。所提出光纤传感器能够对木质样品表面生长的霉菌进行准确检测,可推广应用于文物表面霉菌微生物的定性定量检测,为有效防控霉菌对木质文物的损坏提供重要保障。

参 考 文 献

- [1] Qiao G F, Li T Y, Chen Y F. [Assessment and retrofitting solutions for an historical wooden pavilion in China](#)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 435-447.
- [2] Li Q X, Cao L X, Wang W F, et al. [Analysis of the bacterial communities in the waterlogged wooden cultural relics of the Xiaobaijiao No.1 shipwreck via high-throughput sequencing technology](#)[J]. Holzforschung, 2018, 72(7): 609-619.
- [3] Fermé L C, Mineo M, Remolins G, et al. [Navigation during the early Neolithic in the Mediterranean area: study of wooden artifacts associated with dugout canoes at La marmotta \(Lago di Bracciano, Anguillara Sabazia, Lazio, Italy\)](#) [J]. Quaternary Science Reviews, 2023, 311: 108129.
- [4] Liu X Y, Tu X W, Ma W R, et al. [Consolidation and dehydration of waterlogged archaeological wood from site Huaguangjiao No.1](#)[J]. Forests, 2022, 13(11): 1919-1931.
- [5] Fuhr M J, Schubert M, Schwarze F W M R, et al. [Modelling the hyphal growth of the wood-decay fungus *Physisporinus vitreus*](#)[J]. Fungal Biology, 2011, 115(9): 919-932.
- [6] 覃丹, 马征, 谭博文, 等. 基于 ATP 生物发光法的文物霉变检测与应用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(3): 1-12.
Qin D, Ma Z, Tan B W, et al. Detection of mildew in cultural relics based on the ATP bioluminescence method and its application[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2023, 35(3): 1-12.
- [7] 覃丹, 陈美均, 唐欢. 馆藏文物表面常见微生物种类及生物劣化机理[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2023(3): 29-33.
Qin D, Chen M J, Tang H. Common microbial species and biological degradation mechanism on the surface of cultural relics in the collection[J]. Identification and Appreciation to Cultural Relics, 2023(3): 29-33.
- [8] Ryparová P, Kopecký P, Richter J, et al. [Mold growth on pine and spruce wood: dependence on moisture content, anatomical direction, and mold species](#)[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2413(1): 012012.
- [9] Preston J, Watts J E M, Jones M. [Novel bacterial community associated with 500-year-old unpreserved archaeological wood from King Henry VIII's Tudor Warship the Mary Rose](#)[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(24): 8822-8828.
- [10] 方旋, 马星霞, 温敬伟, 等. [出土木质文物中分离真菌的生长特性研究](#)[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 123-131.
Fang X, Ma X X, Wen J W, et al. [Growth characteristics of fungi isolated from unearthed wooden cultural relics](#)[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 123-131.
- [11] Gobakken L R, Lebow P K. [Modelling mould growth on coated modified and unmodified wood substrates exposed outdoors](#)[J]. Wood Science and Technology, 2010, 44(2): 315-333.
- [12] 费利华, 覃丹, 唐欢. 泉州湾宋代海船船体微生物群落结构多样性研究[J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(3): 8-18.
Fei L H, Qin D, Tang H. Microbial community structural diversity of the Quanzhou Bay Song Dynasty shipwreck[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(3): 8-18.
- [13] Imken A A P, Brischke C, Kögel S, et al. [Resistance of different wood-based materials against mould fungi: a comparison of methods](#)[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2020, 78(4): 661-671.
- [14] Pointing S, Jones E B G, Jones M. [Radiosensitivity of fungi isolated from waterlogged archaeological wood](#)[J]. Mycoscience, 1996, 37(4): 455-458.
- [15] Lu K, Li F, Pan J W, et al. [Using electrical resistivity tomography and surface nuclear magnetic resonance to investigate cultural relic preservation in Leitai, China](#)[J]. Engineering Geology, 2021, 285: 106042.
- [16] 司艺, 蒋洪恩, 王博, 等. [新疆阿斯塔那墓地出土唐代木质彩绘的显微激光拉曼分析](#)[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2607-2611.
Si Y, Jiang H E, Wang B, et al. [Raman microspectroscopic analysis of polychrome wooden artifact from the Astana tomb of the Tang dynasty, Xinjiang, China](#)[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2607-2611.
- [17] Tong L, Zhang W B. [Using Fourier transform near-infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of thermally modified southern pine wood](#)[J]. Applied Spectroscopy, 2016, 70(10): 1676-1684.
- [18] Xue Z D, Yu Q H, Zhong N B, et al. [Fiber optic sensor for nondestructive detection of microbial growth on a silk](#)

- surface[J]. Applied Optics, 2022, 61(15): 4463-4470.
- [19] Yu Q H, Xue Z D, Hu R, et al. Reflective fiber-optic sensor for on-line nondestructive monitoring of *Aspergillus* on the surface of cultural paper relics[J]. Biomedical Optics Express, 2022, 13(6): 3324-3338.
- [20] 余秋会, 解泉华, 王建旭, 等. 在线监测纸质文物表面杂色曲霉的光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 2306002.
- Yu Q H, Xie Q H, Wang J X, et al. Optical fiber sensor for online monitoring of *Aspergillus versicolor* on surfaces of paper cultural relics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(23): 2306002.
- [21] 陈彧芳, 万洪丹, 顾宇, 等. 基于光反射式耦合探针的高灵敏曲率与振动双参量传感器[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 2128001.
- Chen Y F, Wan H D, Gu Y, et al. Highly sensitive curvature and vibration dual-parameter sensor based on optical reflective coupler probe[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(21): 2128001.
- [22] 叶婷, 罗浩翔, 张克非, 等. 高灵敏双参量光子晶体光纤传感器的实现方法[J]. 光电子技术, 2023, 43(3): 248-254.
- Ye T, Luo H X, Zhang K F, et al. Implementation of a highly sensitive dual parametric photonic crystal fiber optic sensor[J]. Optoelectronic Technology, 2023, 43(3): 248-254.
- [23] 李玉洁, 罗彬彬, 邹雪, 等. 基于双螺旋微纳光纤耦合器的光学游标传感特性研究[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1406001.
- Li Y J, Luo B B, Zou X, et al. Sensing characteristics of optical vernier of double-helix micro-nano optical fiber coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 1406001.
- [24] de Ferri L, Tripodi R, Martignon A, et al. Non-invasive study of natural dyes on historical textiles from the collection of Michelangelo Guggenheim[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 204: 548-567.
- [25] Tournié A, Carré P, Andraud C, et al. Identification of chromogenic colour photographic print brand by fiber optical reflectance spectroscopy and statistical analysis[J]. Journal of Cultural Heritage, 2017, 26: 28-35.