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

三嗪化木碳点赋能木纹无损可视紫外屏蔽耐光PVA膜

宋纪元 吕少一 张龙飞 周兆兵 彭立民

Triazine wood-derived carbon dots deliver photostable PVA films with visible wood grain and UV shielding

Song Jiyuan, L ü Shaoyi, Zhang Longfei, Zhou Zhaobing, Peng Limin

引用本文:
宋纪元, 吕少一, 张龙飞, 周兆兵, 彭立民. 三嗪化木碳点赋能木纹无损可视紫外屏蔽耐光PVA膜[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):159–169. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250315
Song Jiyuan, L ü Shaoyi, Zhang Longfei, Zhou Zhaobing, Peng Limin. Triazine wood–derived carbon dots deliver photostable PVA films with visible wood grain and UV shielding[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):159–169. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250315

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250315

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

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

碳量子点复合TiO_2木材涂层制备及其净化甲醛气体的研究
Preparation of wood functional coatings with carbon dots grafted TiO_2 for its photocatalytic degradation of formaldehyde gas
北京林业大学学报, 2022, 44(1): 113–122. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210331

制备具有荧光示踪功能的硼掺杂银杏叶碳量子点木材防腐剂
Developing a wood preservative based on boron doping *Ginkgo biloba* leaf carbon quantum dots with fluorescent tracer function
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 116–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240329

以木材为模板的$BiVO_4$–CdS光催化性能研究
Photocatalytic performance of $BiVO_4$–CdS based on wood templates
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 132–139. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220421

Janus氧化纤维素壳聚糖功能膜的制备及其性能
Preparation and performance of Janus oxidized cellulose–chitosan functional films
北京林业大学学报, 2025, 47(8): 173–181. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250169

基于可见光植被指数的乌海市矿山排土场坡面植被覆盖信息提取研究
Vegetation coverage information extraction of mine dump slope in Wuhai City of Inner Mongolia based on visible vegetation index
北京林业大学学报, 2020, 42(6): 102–112. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190252

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250315

三嗪化木碳点赋能木纹无损可视紫外屏蔽耐光 PVA 膜

宋纪元[1,2] 吕少一[2] 张龙飞[2] 周兆兵[1] 彭立民[2]
（1. 南京林业大学材料科学与工程学院，江苏 南京 210037；2. 中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091）

摘要:【目的】紫外光（200～400 nm）辐照下，木材表面木质素及抽提物降解生成醌类发色基团，导致不可逆的变色反应与力学性能劣化，此问题已成为制约木材高端化应用的瓶颈。现行防护策略常以牺牲木纹美感为代价，或因分散性差、透明性不足而难以兼顾审美与长效屏蔽，亟需开发“高紫外屏蔽−高可见透明”的一体化新材料。为此，本研究提出以三嗪功能化木源碳点（CDs）为核心构建聚乙烯醇（PVA）复合薄膜，旨在保持木材天然纹理的同时，提升其耐光变色的稳定性。**【方法】**以富含萜类抽提物、耐腐抗虫的速生杉木粉为碳源，150 ℃ 水热预抽提富集碳水化合物后，加富氮三肼三嗪（THT）为表面修饰剂，高温水热碳化制得 THT-CDs；再与 PVA 共混，流延成 PVA@THT-CDs 复合薄膜。TEM、FTIR、XPS、XRD、荧光光谱和 UV-Vis 分光光度计联合表征 THT-CDs 的形貌、化学结构及光学性能，并量化复合薄膜的紫外屏蔽效率，以无机 ZnO 和有机 UV-384 涂层为参照。随后，将薄膜覆于薄木表面，在高功率紫外灯下加速老化，定期测定 CIE Lab 色度参数，评估其抑色性能。借助光纤光谱仪采集薄膜在 370 nm 单波长及模拟日光下的透射光谱，对比两束光透过后的谱图差异，解析木材表面的光传输行为及黄变机制。**【结果】**THT-CDs 呈类石墨球形，平均粒径 5.53 nm，在水中分散性优异；在 372 nm 激发下，THT-CDs 发出 445 nm 明亮蓝光，荧光量子产率达 21.4%，显示出高效的光致发光性能。当添加量仅为 2% 时，PVA@THT-CDs 复合薄膜可屏蔽 90.3% 以上的紫外光，380 nm 与 400 nm 处透过率分别降至 0.3% 和 9.7%，而 800 nm 可见光透过率仍保持 82.4%，其紫外−可见选择性分离效率显著优于 ZnO 和 UV-384 对照膜。CIE 色度轨迹进一步证实，该复合薄膜在加速紫外老化过程中能有效抑制基材色差增大，展现出卓越的光学稳定性。**【结论】**本研究通过三嗪功能化木材衍生碳点，成功解决了传统材料的紫外吸收弱、屏蔽效率低、透明性不足的技术瓶颈；借助 THT-CDs 的广谱紫外吸收−可见光转换机制，实现了“高紫外屏蔽与高透明”的协同效应，在木材表面构筑了一层透明、长效且保留天然木纹的耐光老化薄膜。该策略不仅突破了传统屏蔽材料透明性不足的局限，也为速生杉木的高值化利用开辟了新路径，对推动木质家居、展陈制品及室外景观材的绿色升级具有现实可行性。

关键词：木材衍生碳点 (W-CDs)；三嗪功能化碳点；PVA 基复合薄膜；高效紫外线屏蔽；可见光高透过率；光谱选择性；耐光色牢度；光老化稳定性

中图分类号：TQ127.1；TB34；TQ317 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0159−11

引文格式：宋纪元，吕少一，张龙飞，等. 三嗪化木碳点赋能木纹无损可视紫外屏蔽耐光 PVA 膜［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：159−169. Song Jiyuan, Lü Shaoyi, Zhang Longfei, et al. Triazine wood-derived carbon dots deliver photostable PVA films with visible wood grain and UV shielding［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 159−169.

Triazine wood-derived carbon dots deliver photostable PVA films with visible wood grain and UV shielding

Song Jiyuan[1,2] Lü Shaoyi[2] Zhang Longfei[2] Zhou Zhaobing[1] Peng Limin[2]
(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: ［**Purpose**］ UV light (200−400 nm) converts wood lignin and extractives into quinone chromophores, causing irreversible discoloration and strength loss that limit high-end applications. Existing

收稿日期: 2025−08−20 **修回日期:** 2025−10−21

基金项目: 中国林业科学研究院“青年英才工程”优秀青年创新人才培育计划（CAFYBB2023QA005）。

第一作者: 宋纪元。主要研究方向：木质纳米功能材料。Email：caisemogu@njfu.edu.cn 地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院木材工业研究所。

责任作者: 张龙飞，副研究员。主要研究方向：木质纳米功能材料。Email：zhanglongfei@caf.ac.cn 地址：同上。

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

coatings either hide the grain or lack transparency and long-term UV protection. Here, we report a transparent poly(vinyl alcohol) (PVA) film armed with triazine-functionalized wood-derived carbon dots (CDs) that blocks UV while keeping the natural texture visible. [**Method**] Fast-growing, terpene-rich and decay-resistant *Cunninghamia lanceolata* sawdust was used as the carbon source. After pre-extraction at 150 ℃ to enrich carbohydrates, nitrogen-rich triaminotriazine (THT) was added as a surface modifier and the mixture was subjected to high-temperature hydrothermal carbonization to yield THT-CDs. The dots were then blended with PVA and cast into PVA@THT-CDs composite films. TEM, FTIR, XPS, XRD, fluorescence and UV-Vis spectroscopy were combined to image the morphology, chemistry and optical response of THT-CDs, and to quantify the UV-shielding efficiency of the composite film, using inorganic ZnO and organic UV-384 coatings as comparison. The film was laid over veneer and aged under high-power UV light. CIE *La*b* values were recorded at intervals to rate color suppression. A fiber-optic spectrometer collected the transmission spectra of the film under 370 nm monochromatic light and simulated solar irradiation; comparison of the two spectra revealed the light-transport behavior at the wood surface and the mechanism of UV-induced yellowing. [**Results**] THT-CDs exhibit a graphitic spherical morphology with an average diameter of 5.53 nm and excellent dispersibility in water. Upon excitation at 372 nm, they emit bright blue light at 445 nm with a photoluminescence quantum yield of 21.4%, indicating highly efficient light emission. When incorporated at only 2 wt%, the PVA@THT-CDs composite film blocks over 90.3% of UV radiation; transmittance drops to 0.3% at 380 nm and 9.7% at 400 nm, while 82.4% of visible light at 800 nm is still transmitted. This UV-vis selective separation efficiency is markedly superior to that of ZnO and UV-384 reference coatings. CIE color trajectory analysis further confirms that the composite film effectively suppresses color change of the underlying wood during accelerated UV ageing, demonstrating outstanding optical stability. [**Conclusion**] Triazine-functionalized, wood-derived carbon dots were used to overcome the weak UV absorption, low shielding efficiency, and poor transparency of conventional additives. The broad-spectrum UV-vis conversion of THT-CDs delivers high UV blocking without sacrificing transparency. A clear, durable, grain-preserving anti-aging film was formed on wood. The approach bypasses the poor clarity of conventional UV blockers and upgrades fast-grown fir into a high-value material, offering a green route for furniture, displays and outdoor timber.

Key words: wood-derived carbon dots (W-CDs); triazine-functionalized CDs; PVA-based composite film; high-efficiency UV shielding; high visible-light transmittance; spectral selectivity; lightfastness; photostability

木材作为天然可再生的绿色资源，兼具亲和性、低碳环保、可降解与可再生等优点，已广泛应用于木结构建筑、家具和室内装饰等领域[1]。然而，木材中的木质素和多酚类物质对紫外光（200 ~ 400 nm）高度敏感，易被转化为醌类等深色发色体[2]。此外，环境因子（如湿度、温度、氧气）与木材自身特性（如密度、树种、抽提物）协同或拮抗，进一步加剧表面变色，导致美学价值下降，并伴随力学性能与耐久性的不可逆劣化[3]。长期暴露在日光或经玻璃透射的室内高光环境下，木材表面会产生累积性的不可逆变色缺陷，以及力学性能的衰减[4]，已成为制约其户外与室内高光环境应用的核心瓶颈之一。

传统耐光变色防护主要依赖化学浸渍[5]与表面油漆化[6]。化学浸渍通过将小分子化合物或无机纳米粒子注入细胞孔隙，以填充或交联方式与细胞壁结合，实现整体防护，但存在助剂迁移、纳米团聚等缺陷[7]。表面深色油漆虽可形成封闭屏障提高耐光性，却牺牲了木材天然纹理与色泽，难以满足高端装饰对木纹审美的需求[8]。目前商业化应用广泛的紫外吸收剂苯并三唑[9]和紫外屏蔽剂纳米 ZnO[10]虽然具有良好的紫外屏蔽性能，但其水分散体系透明性不足，一定程度上限制了其在高端装饰木材中的应用。因此，理想的木材耐光变色策略需同时满足两个条件：一是高效屏蔽紫外能量，阻断木质素、抽提物等组分中发色/助色基团（酚羟基、羰基、共轭双键等）的光氧化途径[11]；二是在可见光波段保持高透明性，较好地呈现木材的天然纹理与质感。这要求在微观尺度精准调控紫外吸收/散射行为，在宏观尺度维持可见光的高透过率。开发兼顾“紫外屏蔽效率”与“纹理透明性”的一体化新方法，已成为提升木材耐

光老化性能、拓展其高附加值应用的核心课题。

碳量子点（carbon dots，CDs）是近年来新兴的直径 < 10 nm 的类球形碳基纳米材料，具有光致发光性、低毒环保性、生物相容性[12]、成本低且官能团易修饰等优良特性，已在耐光老化、光催化、生物传感等领域广泛应用[13]。水热法以生物质为原料制备 CDs，兼具原料来源广、工艺简单、水分散性好及易表面功能化等优势，已成为主流路线[14]。然而，传统木质衍生的 CDs 存在荧光强度低、紫外吸收范围窄、吸光度不足等缺陷[15]。研究表明，在水热过程中引入氮元素掺杂，可调控 CDs 表面缺陷、光转换性质及紫外屏蔽功能[16]。三肼三嗪（trihydrazine triazine，THT）是一种淡黄色的富氮化工中间体，广泛用于高含氮物质的合成[17]。研究证实，通过氮、磷、硫等元素掺杂，可赋予 CDs 更优异的光学性能[18]；其量子尺寸效应使可见光波段保持高透明[19]，同时吸收高能量紫外光波，将其转化为蓝光等波长较长、能量较低的可见光，同时散失部分热量，从而实现高效的紫外屏蔽[20]。这一特性为构建兼具高紫外屏蔽效率与高透明性的功能材料奠定了理论基础，并在木材耐光变色防护领域展现出巨大潜力。

为了探索木材表面耐光变色防护方法，本研究选用分布广、生长快、富含萜类抽提物且具耐腐抗虫优点[21]的杉木（*Cunninghamia lanceolata*）粉为原料，通过水热预处理获得富含碳水化合物的抽提液；以 THT 为表面功能化修饰剂，采用高温水热碳化法制备具有优异紫外光吸收性能的 THT-CDs 功能助剂，并以聚乙烯醇（polyvinyl alcohol，PVA）为成膜基质，制备 PVA@THT-CDs 复合薄膜。将该复合薄膜涂覆于薄木表面，系统研究功能化碳点的化学结构、形貌，以及复合薄膜的抗紫外和耐光老化性能，探究 PVA@THT-CDs 的紫外光抑制机理，旨在开发一种兼顾“紫外屏蔽效率”与“纹理透明性”的木材耐光变色新材料，为高端装饰木材提供绿色、透明、长效的防护策略。

1　材料与方法

1.1　材　料

杉木粉，含水率 4.5%，粒径 95 ~ 425 μm（40 ~ 160 目），质量占比约 90%，来自中国林科院木工所实验中心；三肼三嗪 THT，浅黄色粉末，质量分数 98%，来自阿拉丁试剂公司；聚乙烯醇 PVA，型号 1750，白色颗粒，来自阿拉丁试剂公司；杨木（*Populus tomentosa*）薄木，旋切厚度 0.8 mm，干燥后含水率 6% ~ 8%，木材呈浅黄色，裁切成 300 mm × 300 mm 幅面备用，由山东凯源木业有限公司提供；无机氧化锌紫外屏蔽剂，质量分数 ≥ 99.9%，粒径 20 ~ 40 nm，来自阿拉丁试剂公司；有机紫外光屏蔽剂 UV-384，水分散乳液，质量分数 30%，粒径 200 ~ 500 nm，来自盖德化工服务平台。

1.2　样品制备

1.2.1　水热制备 THT-CDs

杉木粉与水的质量比对于水热抽提效率具有重要影响，杉木粉占比较高会导致混合物流动性差，水占比偏高会导致水热抽提液中的碳源偏低。参考文献 [7] 中的制备方法，为了保持杉木粉/水混合物良好的流动性和相对较高的抽提效率，杉木粉与去离子水按照 1∶12.5 的质量比加入 150 g 水中，然后将这些混合物转移到 250 mL 密封容器，于 150 ℃ 下加热抽提 1 h，这个过程为杉木粉的水热预抽提。随后，将预抽提获得的混合悬浮液经砂芯过滤（0.45 μm 聚酯膜）分离得到浅棕色的预抽提液，取 35 g 预抽提液为碳源，加入氮掺杂助剂 THT 0.05 g（按照溶液质量 0.15% 计）并搅拌均匀，为确保水热过程获得较高荧光量子产率的碳点，调节溶液 pH 值至 6.0 ~ 7.0 后将混合液置于 50 mL 水热合成反应釜中，并在 210 ℃ 下加热反应 6 h，冷却后的溶液经 8 000 r/min 高速离心处理 8 min，获得淡黄色上清液，记为三肼三嗪掺杂碳点（THT-CDs）。作为对比，直接将相同质量的预抽提液置于 210 ℃ 反应釜中加热 6 h 获得未改性杉木衍生碳点（CDs）。随后，CDs 与 THT-CDs 溶液置于 40 ℃ 烘箱干燥至质量恒定，研细后备用。

1.2.2　复合薄膜的制备

称取定量 PVA 颗粒，加入去离子水，90 ℃ 水浴恒温磁力搅拌至完全溶解，配制成质量分数 5% 的透明 PVA 溶液。保持室温，向该溶液中分别掺入 0、0.1%、0.3%、0.6%、1.2%、2.0%（以 PVA 溶液质量计）的 THT-CDs，继续磁力搅拌至分散均匀，得到系列均质成膜液。

取定量成膜液倾入水平托盘，40 ℃ 鼓风干燥至质量恒定，制得厚度约 30 μm 的 PVA@THT-CDs 复合薄膜，依次标记为 PVA、PVA@THT-CDs（0.1）、PVA@THT-CDs（0.3）、PVA@THT-CDs（0.6）、PVA@THT-CDs（1.2）和 PVA@THT-CDs（2.0）。为评价 THT-CDs 用量对紫外屏蔽性能的影响，所有样品厚度均控制在 30 μm。另以市售无机 ZnO 和有机 UV-384 为对照，按相同工艺制备同厚度薄膜，对比其紫外屏蔽效率与可见光透明性，复合薄膜覆盖于薄木上方并进行紫外灯辐照试验（图 1）。

1.3　测试与表征

1.3.1　化学组成与官能团

借助傅里叶红外光谱仪（FTIR，Nicolet IS-10，美

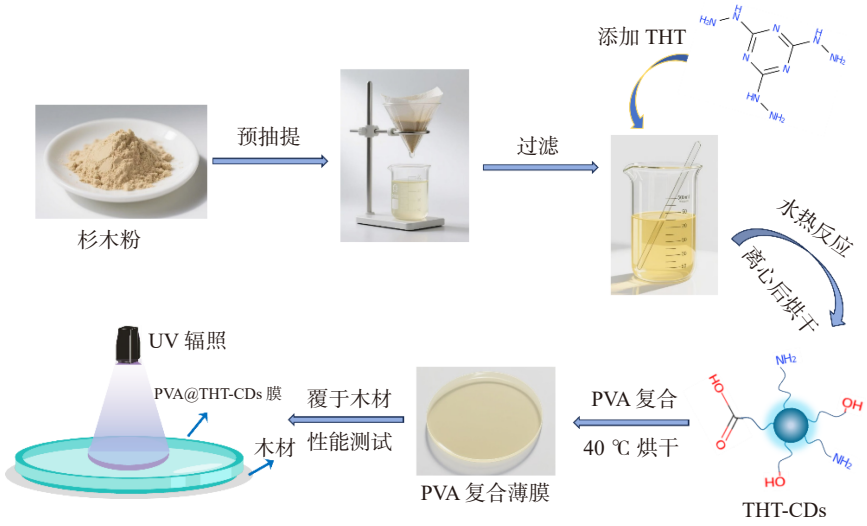


图 1 PVA@THT-CDs 复合薄膜的制备和应用示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the preparation and application of PVA@THT-CDs composite film

国)及 X 射线光电子能谱仪(XPS, Thermo Electron Scientific Instruments Co. Ltd., Massachusetts, Waltham, MA, 美国)测试水热 CDs 的化学组成与表面官能团。

1.3.2 微观结构

为了表征水热 CDs 的微观形貌和晶格条纹情况,采用 TEM 观察碳点的粒径和形貌,采用高分辨率 TEM(HRTEM, FEI Tecnai G2-F30, 美国)观察碳点的晶格条纹情况;通过 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku, 日本)测定 CDs 的相结构特征;利用激光粒度仪(Zeta, Nano ZS, Malvern Instruments Ltd., Malvern, 英国)对碳点水分散体系进行表面电位测试。

1.3.3 光学性能表征

借助荧光光谱仪(Hitachi F-4500, Tokyo,日本)测定碳点溶液的激发与发射光谱。采用 0.1 mol/L 硫酸奎宁的标准样品为参照测定碳点荧光量子产率。采用紫外−可见光分光光度计(UV-Vis, Lengguang, 中国)的吸收模式,测试 CDs 溶液、含 THT-CDs 的 PVA 溶液、ZnO 水分散液和 UV-384 水分散液的吸光度。采用 UV-Vis 的透过率模式,测试不同功能体的复合薄膜在 200 ~ 800 nm 的光透过率。通过光纤光谱仪(S5000-UV-NIR, 日本)评估复合薄膜对日光及 370 nm 紫外光的屏蔽特性,具体操作是将复合薄膜紧贴光谱仪探针,置于光源与探针间,采集不同光源透射后的光谱数据。

1.3.4 耐光变色评估

为了进一步评价 PVA@THT-CDs 复合薄膜在薄木表面紫外光屏蔽性能的效果,将 PVA@THT-CDs(2.0)复合薄膜覆盖在薄木表面,复合薄膜的上表面设置大功率紫外光辐照装置,以 120 W 大功率紫外灯(370 nm)对薄木进行不同时长(0 ~ 360 min)辐照处理,随后利用表面色差计测定薄木表面色度参数,并基于 CIE 色度坐标分析薄木在紫外光辐照下的光致变色机理。

2 结果与讨论

2.1 THT-CDs 的化学表征

杉木衍生 CDs 在 3 338 cm^{-1} 的峰对应—OH 的伸缩振动,在 2 927 cm^{-1} 处的峰对应于甲基 C—H 的伸缩振动,在 1 024 cm^{-1} 处的峰归属于 C—O—C 伸缩振动[22], 1 603 和 1 372 cm^{-1} 处分别为 COOH 反对称和对称伸缩振动,表明杉木衍生 CDs 表面含有大量羧基官能团。THT-CDs 在 2 946 cm^{-1} 处的峰归属于甲基 C—H 的伸缩振动,在 1 026 cm^{-1} 处的峰对应于 C—O—C 的伸缩振动,1 713 cm^{-1} 处的峰归属于羧基 C═O 的伸缩振动特征峰,并且发现在 3 000 ~ 3 240 cm^{-1} 处有关于—OH 和 N—H 的强烈伸缩振动峰。除此之外,在 1 397 cm^{-1} 处的峰对应于甲基 C—H 的变形振动,在 1 596 cm^{-1} 处的峰归属于酰胺的伸缩振动[23],在 1 508 cm^{-1} 处明显的峰对应仲酰胺 N—H 的变形振动,1 254 cm^{-1} 处归属于仲酰胺 C—N 的伸缩振动峰,768 cm^{-1} 为三嗪环结构的伸缩振动,表明 THT 与杉木抽提液中的含碳物质在高温水热作用下发生了部分缩合反应[24],使得 THT-CDs 表面富含氨基和三嗪等含氮官能团,有助于 THT-CDs 与成膜基质 PVA 中的羟基之间形成较好的氢键结合,进一步提高 THT-CDs 功能助剂在复合薄膜中的分散性和结合稳定性(图 2)。

对照组 CDs(图 3a)主要含有 C、O 元素以及少量源于薄木本身的 N 元素,而 THT-CDs(图 3b)富含 C、N、O 元素,N 原子相对占比高达 10.63%,证明通过掺杂 THT 处理后,在 CDs 表面成功形成了含

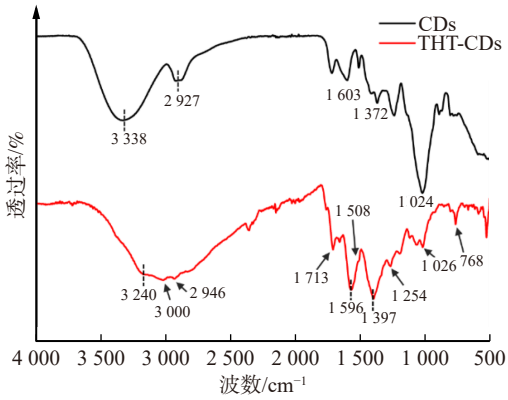


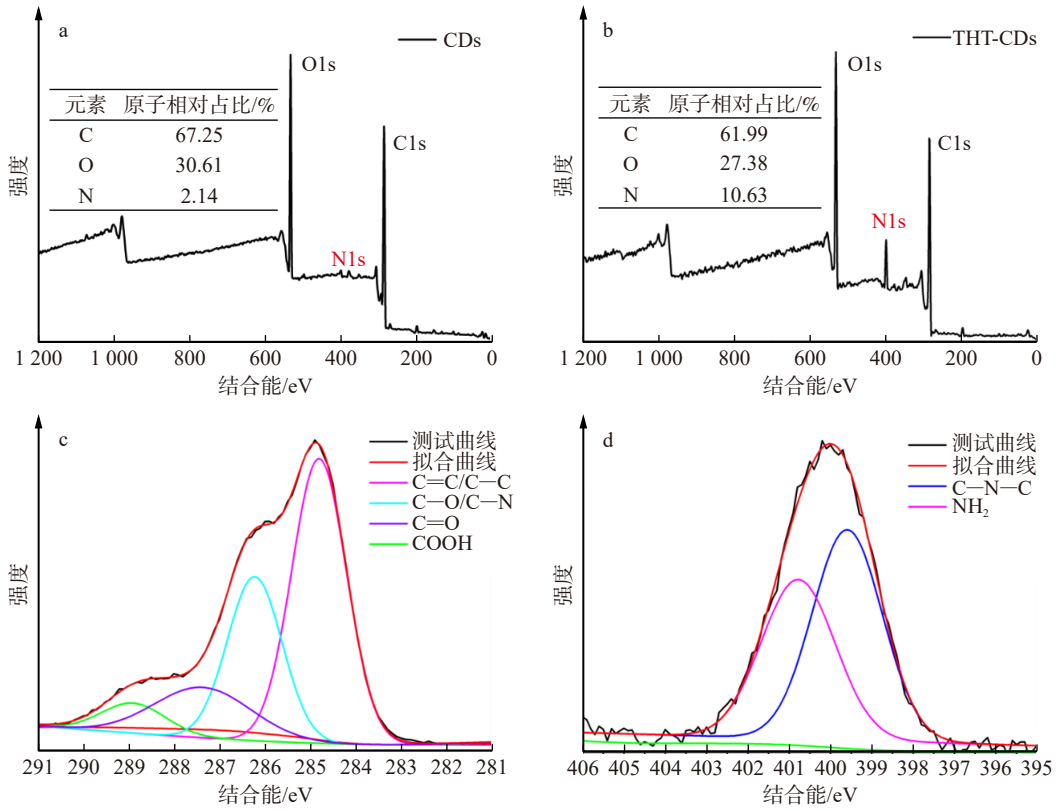
图 2　碳点掺杂 THT 前后的红外吸收光谱

Fig. 2　FTIR spectra of CDs before and after THT-doping modification

氮官能团，并且具有较高的含氮量。在 THT-CDs 的高分辨 C1s 图（图 3c）中发现，284.8、286.3、287.4、288.9 eV 处的 4 个峰分别与 C═C/C—C 键、C—O/C—N 键、C═O 键、羧基官能团相对应[25]；在 N1s 谱图中（图 3d）发现，399.6 和 400.8 eV 的两个峰，分别与 C—N—C 和—NH_2 相对应[26]，这些官能团证明 THT-CDs 的表面含有丰富的—OH 和—NH_2 官能团，这使得 THT 功能化碳点在水中具有较好的分散性，有助于提升 THT-CDs 在成膜基质 PVA 中的分散性，进而获得均质的复合薄膜。

2.2　THT-CDs 的结构表征

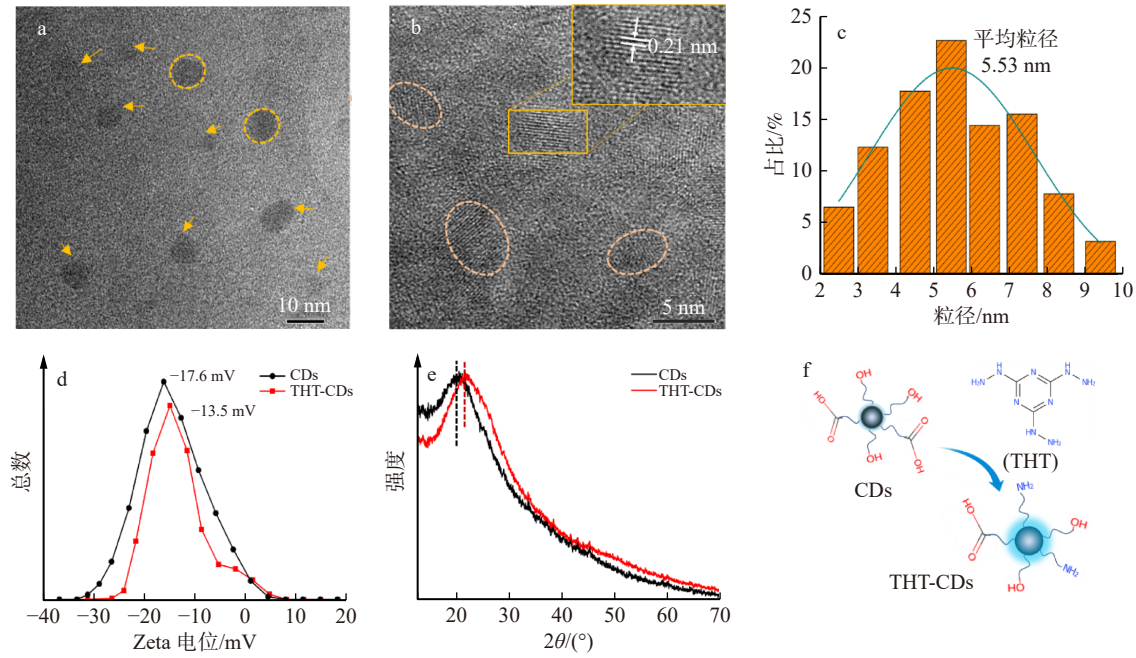
THT-CDs 呈类球形结构（图 4a），颗粒分布较为均匀，平均粒径 5.53 nm（图 4c），证明得到的 THT 掺杂功能碳点具有良好的水分散性。HRTEM 表征（图 4b）确定 THT 掺杂的功能碳点晶格条纹间距为 0.21 nm，这与石墨碳（100）晶面或石墨烯 sp^2（1120）石墨晶相对应[27]，证明 THT 掺杂的功能碳点在高温水热碳化过程中伴随生成微量石墨化碳。CDs 和 THT-CDs 水溶液中的表面电位分别为−17.6 和−13.5 mV（图 4d），THT-CDs 表面电位绝对值降低，这是由于 CDs 经 THT 功能化掺杂后表面形成部分氨基官能团，氨基基团表面带正电荷，使得 THT-CDs 负电性变弱[28]。进一步分析 THT-CDs 的 XRD 衍射图（图 4e），样品在 2θ 为 20° ~ 25°时显示出典型的衍射宽峰，这与前期东北林业大学刘守新团队以纤维素为原料水热制备的荧光碳点研究结果[29]一致，说明 THT 与杉木抽提液经水热合成的 THT-CDs 主要为无定型碳结构，推测利用 THT 掺杂杉木抽提液在高温水热作用下可能获得了一定石墨化的碳纳米材料，这一点与图 4b 的分析结果一致。THT-CDs 形成机制（图 4f）为：THT-CDs 是杉木粉抽提液中纤维素、半纤维素等含碳生物质在高温高压水热环境中发生脱水、缩合等反应，自上而下从大分子剥离为粒径均



a 和 b 为 XPS 光谱图，c 为 THT-CDs 的 C1s 光谱图，d 为 THT-CDs 的 N1s 光谱图。

图 3　CDs 和 THT-CDs 的 XPS 光谱图

Fig. 3　XPS spectra of CDs and THT-CDs



a. THT-CDs 的 TEM 图；b. THT-CDs 高分辨率 TEM 图(插图为晶格条纹)；c. 粒径分布；d. Zeta 表面电位；e. XRD 衍射图谱；f. THT-CDs 形成机制

图 4 THT-CDs 的微观形貌、电荷特性及 XRD 衍射图谱

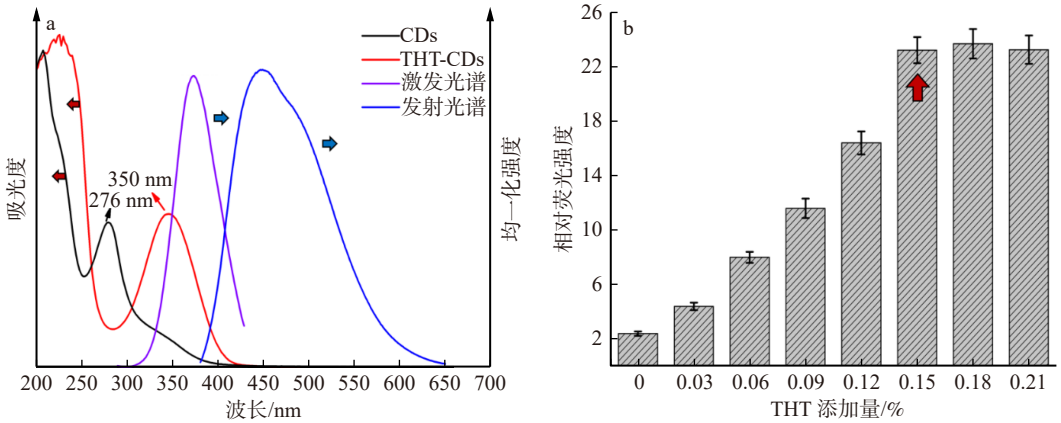
Fig. 4 Microscopic morphology, charge characteristics and XRD diffraction pattern of THT-CDs

一，且表面含有羧基、羟基等活性官能团的碳纳米材料[30]。虽然 THT 掺杂形成的功能碳点表面负电性变弱，但仍具有良好的负电性，水分散性能优异，为后续制备均质的复合薄膜奠定基础。

2.3 THT-CDs 的光学特征

在图 5a 中 276 nm 处的吸收峰为 CDs 的本征吸收峰[31]，这主要源于 C═C 键 sp^2 的 π-π*跃迁[32]，CDs 在紫外灯照射下荧光亮度很弱，荧光光谱仪测得其荧光量子产率仅为 3.7%。而通过 THT 进行功能化掺杂处理后，THT-CDs 在 200 ~ 400 nm 的紫外光波段表现出优异的吸光特性，其中 350 nm 处出现的显著吸收峰较为突出(图 5)，该吸收峰归因于 THT-CDs 表面的 *n*-π*电子跃迁[33]，这一特征吸收主要源于表面氮元素掺杂和氨基官能团功能化。具体而言，氨基作为供电子基团能够提升碳点共轭体系的电子云密度，从而降低电子跃迁所需的能量阈值。因此，THT-CDs 在同等紫外光激发下能发出肉眼可见的明亮蓝光，荧光光谱仪测得其荧光量子产率高达 21.4%，表明通过 THT 功能化修饰后，THT-CDs 不仅拓展了紫外光吸收范围，同时显著增强了其对紫外光(波长 < 400 nm)的吸收能力。

此外，THT-CDs 在可见光区域(≥400 nm)基本



a. THT-CDs 和 CDs 紫外−可见光吸收光谱与 THT-CDs 的激发和发射光谱；b. THT-CDs 相对荧光强度。激发光谱波长(λ_{ex})、发射光谱波长(λ_{em})分别为 372、445 nm。红箭头代表优选条件。

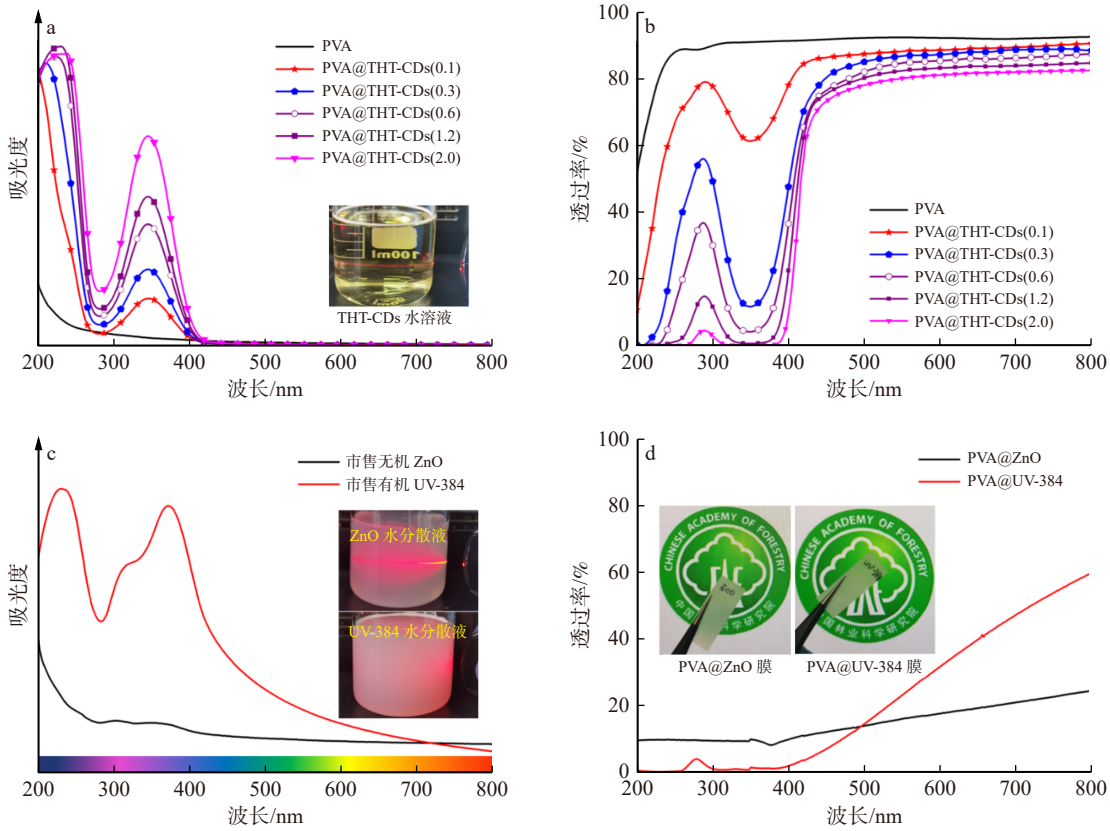
图 5 THT-CDs 的光学特性

Fig. 5 Optical properties of THT-CDs

无明显吸光度，说明应用 THT-CDs 可以保障体系的可见光高透过率，避免传统紫外光吸收剂处理薄木使其表面颜色发生显著变化的缺陷。THT-CDs 的较优激发波长（以满足峰强度 50% 计）位于 348 ~ 405 nm 区域，且最大激发波长位于 372 nm；由 THT-CDs 的发射光谱可知，当激发 372 nm 波长的紫外光照射 THT-CDs 溶液时，可释放出最大发射波长为 445 nm 的蓝光（图 5a）。基于量子表面缺陷态的发光机制，THT-CDs 表面的电子受紫外光激发形成电子–空穴对后，迁移中的电子会被表面缺陷位点迅速俘获，产生荧光发射现象[34]。当 THT 掺杂量增加时，材料荧光发射强度呈现逐步上升趋势（图 5b）。这一现象归因于 THT 修饰过程促进了表面含氮官能团的形成，既提升了共轭体系的电子云密度，又减少了非辐射复合中心羧基等基团的数量，从而有效提升了荧光强度[35]。当 THT 添加量高于 0.15% 时，THT-CDs 的荧光发射强度增幅趋缓并趋于稳定（图 5b）。该现象源于 THT 的氨基空间位阻有限，与杉木抽提液在高温水热条件下的缩合反应已达饱和[36]。

2.4　PVA@THT-CDs 复合薄膜的紫外光屏蔽功能

纯 PVA 溶液在紫外光（< 400 nm）和可见光（400 ~ 800 nm）区域均无明显吸光度，而随着 THT-CDs 添加量的增加，PVA@THT-CDs 混合溶液在紫外光区域的吸光度显著提高（图 6a），这是由于 THT-CDs 表层电子受到紫外光激发后容易产生荧光效应[37]，并且随着 PVA 溶液中 THT-CDs 功能助剂增加，PVA@THT-CDs 溶液对紫外光吸收强度逐渐提高。当未添加荧光功能助剂 THT-CDs 时，PVA 薄膜在紫外光和可见光区域具有较高的透过率（图 6b），在 350 nm（紫外光波长）和 800 nm（可见光波长）波长处的透过率分别为 90.9% 和 92.5%，表明纯 PVA 薄膜无紫外光屏蔽功能，且在可见光范围保持高透明度。当 THT-CDs 添加到 PVA 薄膜体系时，PVA@THT-CDs 复合薄膜在 200 ~ 400 nm 紫外光区域内呈现良好的紫外光屏蔽性能，并且随着 THT-CDs 添加量的增加，紫外屏蔽效果越好。当 THT-CDs 添加量为 2.0% 时，PVA@THT-CDs(2.0)复合薄膜在 290 nm 处的透过率仅为 4.5%，在 315、350、380、400 nm 波长处的透过率分别为 0.5%、0.1%、0.3% 和 9.7%，基本屏蔽了 400 nm 以内的紫外光，而且在可见光 800 nm 处保持 82.4% 的高透过率。因此，以 THT-CDs 为主要添加物制备的 PVA 复合薄膜不仅对紫外光有较好的屏蔽功能，而且该复合薄膜在可见光区域中具有较高的透明度。



a. 吸光度（插图为 THT-CDs 水溶液）；b. 透过率；c. 吸光度（插图为激光散射图）；d. 透过率（插图为不透明薄膜展示）

图 6　PVA@THT-CDs 溶液及其复合薄膜紫外–可见光的透过率和吸光度

Fig. 6　UV-Vis transmittance and absorbance of PVA@THT-CDs solutions and composite films

本研究制得的 THT-CDs 兼具高效紫外屏蔽与可见光高透明性；相比之下，市售无机 ZnO 与有机 UV-384 的水分散液透光性较差（图 6c 插图）。图 6c 显示，二者在紫外及可见区均呈明显吸光：ZnO 纳米颗粒主要借助表面散射屏蔽紫外线，入射光在水分散液中被强烈散射；UV-384 为苯并三氮唑类乳液，粒径 200 ~ 500 nm，虽在 < 400 nm 处吸光性能优异，但在 400 ~ 600 nm 可见区因粒子散射产生额外吸收。将两者分别引入 PVA 成膜液并制成约 30 μm 复合薄膜（图 6d），PVA@ZnO 复合薄膜在 200 ~ 400 nm 处 的平均透过率仅约 10%，800 nm 处进一步降至 24.7%，呈高度不透明；PVA@UV-384 复合薄膜的紫外屏蔽能力虽优于 PVA@ZnO，但 800 nm 处透过率仍仅为 59.8%，透明性明显低于 PVA@THT-CDs（2.0）。

2.5 PVA@THT-CDs 复合薄膜对薄木表面紫外光屏蔽性能影响

随辐照时长的增加，X'与 Y'色度坐标值呈递增趋势，PVA@THT-CDs 复合薄膜覆盖的薄木 Y'值增长幅度较缓，而无复合薄膜防护的薄木 Y'值发生了较大的增长（表 1）。在图 7a 中有一条从左至右并向下弯曲的舌状曲线（定义为黑体色温轨迹线[38]），色温值越小，色彩越偏向红色呈现暖调；色温值越大，色彩越偏向蓝色呈现冷调[39]。其中，3 300 ~ 6 500 K 区间被定义为中性色温范围。经 PVA@THT-CDs 改性处理的薄木色温主要集中于 3 700 ~ 4 300 K 区间（图 7a），处于中性色温范围。CIE 色度图显示处理后薄木的表面色度坐标表现出向黄色区域的偏移倾向，这说明在紫外光照射的过程中，薄木表面产生了黄变现象。

薄木黄变过程中色度坐标与紫外（ultraviolet，UV）辐照时长呈现显著线性相关性（图 7b），随着辐照时长增加，X'与 Y'色度坐标值呈递增趋势。在 UV 辐照的光老化过程中，薄木表面色度坐标的变化路径呈现显著的线性黄变趋势，与前文所述坐标随辐照时间的演变规律一致。表面色差测试结果进一步佐证，延长辐照时间会加速薄木表面颜色的劣变（图 7c），而经 PVA@THT-CDs 复合薄膜覆盖的薄木表面颜色变化则显著不同，无复合薄膜防护的薄木表面经辐照 30 min 后发生明显变色（表面色差达到 5.3），而且随着辐照时间延长，变色加剧，大功率辐照 360 min 时，薄木表面色差值高达 13.9。然而，经 PVA@THT-CDs 复合薄膜防护的薄木表面颜色经大功率紫外辐照 30 min 时，表面色差仅为 2.4，优于张龙飞等[7]利用氮掺杂碳点浸渍薄木研究中的表面光稳定性。这主要是归因于 PVA 与 THT-CDs 混合均匀，避免了功能化碳点的聚集淬灭。随着辐照时间延长至 360 min，PVA@THT-CDs 复合薄膜防护的薄木表面色差为 4.9，相对应的无复合薄膜处理薄木色差为 13.9。UV 辐照结果表明，经 PVA@THT-CDs 功能化改性的薄木试样，其表面色差增量显著低于未处理的对照薄木。这一结果验证了 PVA@THT-CDs 处理能够有效抑制薄木在 UV 辐照环境下的光变色。

2.6 PVA@THT-CDs 复合薄膜对薄木表面的紫外光屏蔽机制

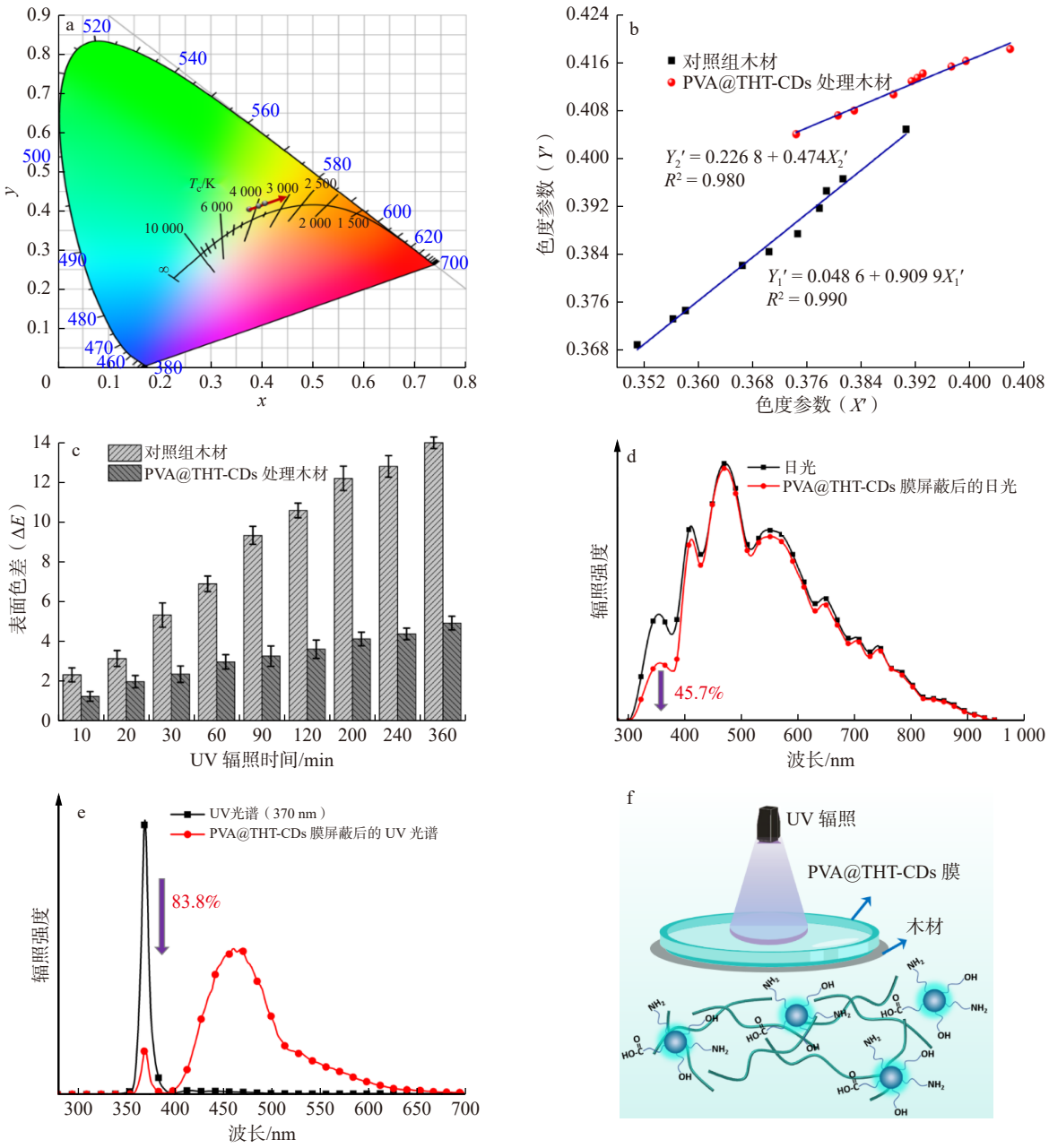
图 7d 显示：日光经 PVA@THT-CDs 复合薄膜透射后，紫外波段（< 400 nm）能量大幅衰减，其中 365 nm 处紫外光强度衰减率达 45.7%，而可见光区域的光谱强度维持稳定。这一现象表明，PVA@THT-CDs 复合薄膜不仅具备优异的紫外光吸收能力，同时对可见光的透射率影响极小，有利于维持 PVA@THT-CDs 复合薄膜改性后薄木表面的颜色稳定性。

表 1 薄木经紫外光辐照不同时间后的表面颜色参数和色度坐标

Tab. 1 Surface color parameters and chromaticity coordinates of wood after ultraviolet irradiation for different times

时间/min	木材（对照组）					PVA@THT-CDs复合薄膜覆盖的薄木（实验组）				
	三刺激值			色度坐标		三刺激值			色度坐标	
	X_1	Y_1	Z_1	X'_1	Y'_1	X_2	Y_2	Z_2	X'_2	Y'_2
0	64.59	67.86	51.55	0.351	0.369	62.04	66.94	36.72	0.374	0.404
10	59.12	61.92	44.90	0.356	0.373	52.21	55.85	29.12	0.381	0.407
20	56.78	59.38	42.39	0.358	0.375	50.64	53.94	27.64	0.383	0.408
30	54.20	56.50	37.19	0.366	0.382	49.63	52.42	25.61	0.389	0.411
60	50.86	52.77	33.67	0.370	0.384	48.24	50.88	24.12	0.391	0.413
90	48.43	50.07	30.77	0.375	0.387	47.34	49.89	23.45	0.392	0.413
120	46.94	48.65	28.64	0.378	0.392	46.31	48.79	22.71	0.393	0.414
200	44.38	46.21	26.54	0.379	0.395	45.26	47.31	21.35	0.397	0.415
240	41.85	43.52	24.38	0.381	0.397	44.03	45.88	20.32	0.399	0.416
360	39.21	41.04	21.13	0.387	0.405	42.62	43.91	18.46	0.406	0.418

注：$X' = X/(X+Y+Z)$，$Y' = Y/(X+Y+Z)$。



a. PVA@THT-CDs 处理薄木在 UV 光照变色过程的 CIE 图像；b. 色度坐标演变路径；c. 薄木表面处理前后的色差差异；d. 复合薄膜对日光的屏蔽效果；e. 复合薄膜对 UV 的屏蔽效果；f. 复合薄膜紫外光屏蔽机制

图 7　UV 辐照下薄木表面色度参数和紫外光屏蔽效果

Fig. 7　Surface chromaticity parameters and UV shielding effect of wood under UV radiation

PVA@THT-CDs 复合薄膜对大功率紫外光的屏蔽性能（图 7e）表明，370 nm 紫外波段的入射光强度衰减率达 83.8%，这一数值优于 PVA@THT-CDs 复合薄膜在日光辐照下的屏蔽表现。其核心机制在于，PVA@THT-CDs 的荧光转化效率与紫外激发光强度呈现显著正相关关系[40]，当 UV 激发光强度增大时，荧光量子产率的提升促使更多紫外光子通过跃迁转化为可见光发射，从而增强了紫外屏蔽性能。图 7f 则揭示了 PVA@THT-CDs 复合薄膜对薄木的紫外屏蔽机制：THT-CDs 材料表面大量的羟基、羧基与氨基等官能团，可与 PVA 成膜基质的羟基基团形成稳定的氢键作用[41]，这是 THT-CDs 保持优异分散性和形成稳定 PVA@THT-CDs 复合薄膜的关键。在光致发光行为中，PVA@THT-CDs 可有效吸收紫外波段的高能光子，将其转化为蓝光等长波长、低能量可见光，并释放部分热能。由于紫外光辐照降解木质素是木材应用中光致变色缺陷的关键诱因，在高强度紫外辐照实验中，PVA@THT-CDs 复合薄膜可将照射于薄木表面的 83.8% 紫外光转化为蓝光辐射（图 7e），其性能优于先前哌啶胺功能化碳点薄膜[7]。PVA@THT-CDs 复合薄膜的应用显著抑制了紫外光对薄木的氧化损伤，延缓了木质素中的酚羟基向苯

醌等较深发色基团的变化过程，有效抑制了薄木的光致黄变现象。

3 结　　论

为了解决传统抗老化材料紫外屏蔽效率低、透明性不足的问题，本研究以富含菇类抽提物且具耐腐抗虫优势的速生杉木粉为碳源，三肼三嗪（THT）为氮掺杂功能体，经高温水热碳化法制备了具有优异紫外光屏蔽性能的 THT-CDs 功能助剂，并以聚乙烯醇（PVA）为成膜基质，制备了 PVA@THT-CDs 薄膜。THT 的引入提升了木材衍生碳点的紫外吸收和紫外光屏蔽效率，开发的 PVA@THT-CDs 具有优异的紫外屏蔽效率和可见光高透明性，其应用可有效抑制薄木在紫外灯照射时的光致黄变。研究主要结论有以下 3 点。

（1）经水热预抽提、高温水热形成的 THT-CDs 具有类石墨的球形结构，平均粒径约为 5.53 nm，荧光量子产率高达 21.4%，其水溶液具有较好的紫外光吸收性能。与传统木质衍生 CDs 相比，具有量子尺寸和高荧光量子产率的 THT-CDs，可有效吸收 200 ~ 400 nm 高能量紫外光，具有优异的广谱紫外吸收转换性能。

（2）随着 THT-CDs 在 PVA 成膜基质中的添加量增加，复合薄膜 PVA@THT-CDs 在紫外光谱区（200 ~ 400 nm）的屏蔽效率呈现显著增强趋势，当 THT-CDs 在 PVA 中的添加量达到 2% 时，复合薄膜 PVA@THT-CDs（2.0）可以屏蔽 90.3% 的紫外光，并且在可见光区域保持 80% 以上的透光率，展现出优异的紫外光屏蔽性和高可见光透明性。

（3）UV 辐照曲线进一步揭示了 PVA@THT-CDs 复合薄膜抑制木材光致黄变机制：PVA@THT-CDs 可有效吸收紫外波段的高能光子，将其转化为蓝光等长波长、低能量的可见光。

PVA@THT-CDs 复合薄膜虽已实现广谱紫外屏蔽与高可见透明协同，且具备工艺简便、成本可控、环境友好等优势，但目前研究仅针对天然薄木进行了验证。未来的研究可以在碳点载量、表面化学及成膜工艺上持续优化，并拓展秸秆、竹粉等不同生物质碳点体系，以开发高透明、强屏蔽、耐光变色且形式多样的薄膜与水性涂饰通用防护方案，满足科技木、重组装饰单板及染色木材等差异化应用需求，为木质基材提供通用型抗老化解决方案。

参 考 文 献

[1] 李坚, 甘文涛, 陈志俊, 等. 向新出发, 木材科学前沿发展 [J]. 森林工程, 2025, 41(1): 1−39.
Li J, Gan W T, Chen Z J, et al. Frontier advances in wood science towards a new departure[J]. Forest Engineering, 2025, 41(1): 1−39.

[2] Liu R, Zhu H W, Li K, et al. Comparison on the aging of woods exposed to natural sunlight and artificial xenon light[J]. Polymers, 2019, 11(4): 709.

[3] Liu X Y, Timar M C, Varodi A M, et al. Colour and surface chemistry changes of wood surfaces coated with two types of waxes after seven years exposure to natural light in indoor conditions[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1689.

[4] Zhang Y, Naebe M. A review on structure, properties, and applications as a light-colored UV absorber[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9: 1427−1442.

[5] Lahtela V, Kärki T. Improving the UV and water-resistance properties of scots pine (*Pinus sylvestris*) with impregnation modifiers[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2014, 72: 445−452.

[6] Robinson S C, Tudor D, Mansourian Y, et al. The effects of several commercial wood coatings on the deterioration of biological pigments in wood exposed to UV light[J]. Wood Science and Technology, 2013, 47: 457−466.

[7] 张龙飞, 杨博涵, 彭立民, 等. 功能化碳纳米点在木材表面耐光老化的应用研究 [J]. 木材科学与技术, 2024, 38(5): 21−31.
Zhang L F, Yang B H, Peng L M, et al. Application of functionalized carbon nanodots in light aging resistance of wood surface[J]. Wood Science and Technology, 2024, 38(5): 21−31.

[8] 陶鑫, 田东雪, 梁善庆, 等. 微波膨化木基金属复合材料的涂饰性能及耐光老化研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 140−148.
Tao X, Tian D X, Liang S Q, et al. Study on the coating performance and light aging resistance of microwave expanded wood based metal composite materials[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 140−148.

[9] Xu J C, Zhang T, Zhang X Y, et al. Preparation of polymeric material containing UV absorber for application in paper-based relics protection[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2020, 59(5): 536−545.

[10] Soumya S, Sheemol V N, Amba P, et al. Sn and Ag doped ZnO quantum dots with PMMA by in situ polymerization for UV/IR protective, photochromic multifunctional hybrid coatings[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 174: 554−565.

[11] 朱亮亮, 陈太安, 郑永军, 等. TiO_2@SiO_2-脱木素木材的制备及其耐光性增强 [J]. 林业科学, 2022, 58(3): 129−138.
Zhu L L, Chen T A, Zheng Y J, et al. TiO_2@SiO_2- preparation of delignified wood and enhancement of its light resistance[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(3): 129−138.

[12] Zhu L L, Shen D K, Liu Q, et al. Mild acidolysis-assisted hydrothermal carbonization of lignin for simultaneous preparation of green and blue fluorescent carbon quantum dots[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(30): 9888−9898.

[13] Zhou N Y, Long S F, Song D S, et al. Fabrication of carbon dots-embedded luminescent transparent wood with ultraviolet blocking and thermal insulating capacities towards smart window application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129358.

[14] Gao S Y, Zhang P P, Xu L, et al. Hydrothermal formation mechanism of lignocellulose-derived carbon dots: from sawdust to

carbon nanomaterials with blue fluorescence[J]. Bioresource Technology, 2025, 429: 132493.

[15] 王颖, 安邦, 徐明聪, 等. 水热−硝酸氧化合成发蓝光和绿光木质素基碳点的研究 [J]. 林产化学与工业, 2022, 42(4): 33−39.
Wang Y, An B, Xu M C, et al. Study on the synthesis of blue and green light emitting lignin based carbon dots by hydrothermal nitric acid oxidation[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2022, 42(4): 33−39.

[16] Ogi T, Aishima K, Permatasari F A, et al. Kinetics of nitrogen-doped carbon dot formation via hydrothermal synthesis [J]. New Journal of Chemistry, 2016, 40(6): 5555−5561.

[17] 康富春, 刘海明, 唐增花. 1, 3, 5-三嗪-2, 4, 6-三肼的合成及应用 [J]. 热固性树脂, 2016, 31(6): 46−48.
Kang F C, Liu H M, Tang Z H. Synthesis and application of 1, 3, 5-triazine-2, 4, 6-trihydrazine[J]. Thermosets, 2016, 31(6): 46−48.

[18] 张龙飞, 汪腾, 王雅梅, 等. 异元素掺杂碳量子点制备及对木材阻燃性能的影响 [J]. 林业工程学报, 2022, 7(3): 31−39.
Zhang L F, Wang T, Wang Y M, et al. Preparation of carbon quantum dots doped with different elements and its effect on flame retardancy of wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(3): 31−39.

[19] Wang L, Liu X D, Qi P, et al. Enhancing the thermostability, UV shielding and antimicrobial activity of transparent chitosan film by carbon quantum dots containing N/P[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118957.

[20] Ponte C, Grosche L C, Kolenko Y V, et al. Efficient UV-shielding coatings with carbon quantum dots[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2025, 43: e01301.

[21] 崔永志, 徐子才, 李坚. 人工林杉木材性变异规律 [J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(5): 35−39.
Cui Y Z, Xu Z C, Li J. Variation patterns of wood properties in artificial fir forests[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1999, 27(5): 35−39.

[22] 张龙飞, 海日汗, 王思群, 等. 碳量子点复合 TiO_2 木材涂层制备及其净化甲醛气体的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 113−122.
Zhang L F, Hai R H, Wang S Q, et al. Preparation of carbon quantum dots composite TiO_2 wood coating and its purification of formaldehyde gas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 113−122.

[23] Atchudan R, Edison T N J I, Lee Y R. Nitrogen-doped carbon dots originating from unripe peach for fluorescent bioimaging and electrocatalytic oxygen reduction reaction[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 482: 8−18.

[24] Zhang S N, He J H. In situ wrapping carbon dots towards robust, durable and transparent tri-layer films with precise spectral conversion and excellent self-cleaning properties[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12(4): 2070−2080.

[25] Wang H Y, Lu Q J, Hou Y X, et al. High fluorescence S, N co-doped carbon dots as an ultra-sensitive fluorescent probe for the determination of uric acid[J]. Talanta, 2016, 155: 62−69.

[26] Atchudan R, Edison T N J I, Aseer K R, et al. Hydrothermal conversion of magnolia liliiflora into nitrogen-doped carbon dots as an effective turn-off fluorescence sensing, multi-colour cell imaging and fluorescent ink[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2018, 169: 321−328.

[27] Li L C, Li Y, Zhang T, et al. Green-emissive carbon dots with a high quantum yield applied for photoconversion film to prevent from blue light damage[J]. Advanced Physics Research, 2024, 3(7): 2400032.

[28] Shi N N, Sun K Y, Zhang Z D, et al. Amino-modified carbon dots as a functional platform for drug delivery: load-release mechanism and cytotoxicity[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 101: 372−378.

[29] Li W, Wang S C, Li Y, et al. One-step hydrothermal synthesis of fluorescent nanocrystalline cellulose/carbon dot hydrogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 7−17.

[30] Meng W X, Bai X, Wang B Y, et al. Biomass-derived carbon dots and their applications[J]. Energy & Environmental Materials, 2019, 2(3): 172−192.

[31] Yang Y M, Kong W Q, Li H, et al. Fluorescent N-doped carbon dots as in vitro and in vivo nanothermometer[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(49): 27324−27330.

[32] Zhang L F, Wang Y, Peng L M, et al. Self-luminous wood coatings with carbon dots/TiO_2 grafted afterglow $SrAl_2O_4$: Eu, Dy core-shell phosphors for long-lasting formaldehyde removal[J]. Polymers, 2023, 15(9): 2077.

[33] Barman B K, Nagao T, Nanda K K. Dual roles of a transparent polymer film containing dispersed N-doped carbon dots: a high-efficiency blue light converter and UV screen[J]. Applied Surface Science, 2020, 510: 145405.

[34] Hu S L, Tian R X, Dong Y G, et al. Modulation and effects of surface groups on photoluminescence and photocatalytic activity of carbon dots[J]. Nanoscale, 2013, 5(23): 11665−11671.

[35] Wang C N, Liu F Z, Du M J, et al. Graphitic nitrogen induced identical fluorescent emission of carbon dots for scalable anti-counterfeiting applications[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(2): 1460−1469.

[36] Li Z Y, Wang L, Li Y, et al. Frontiers in carbon dots: design, properties and applications[J]. Materials Chemistry Frontiers, 2019, 3(12): 2571−2601.

[37] Yan F Y, Sun Z H, Zhang H, et al. The fluorescence mechanism of carbon dots, and methods for tuning their emission color: a review[J]. Microchimica Acta, 2019, 186(8): 583.

[38] Abe S, Joos J J, Martin L I, et al. Hybrid remote quantum dot/powder phosphor designs for display backlights[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(6): e16271-e16271.

[39] Zhu J Y, Shao H, Bai X, et al. Modulation of the photoluminescence in carbon dots through surface modification: from mechanism to white light-emitting diodes[J]. Nanotechnology, 2018, 29(24): 245702.

[40] Jiang L, Ding H Z, Lu S Y, et al. Photoactivated fluorescence enhancement in F, N-doped carbon dots with piezochromic behavior[J]. Angewandte Chemie, 2020, 132(25): 10072−10077.

[41] Xu X K, Hu G Q, Mo L Q, et al. Red, orange, yellow and green luminescence by carbon dots: hydrogen-bond-induced solvation effects[J]. Nanoscale, 2021, 13(14): 6846−6855.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　于志明）