

松材线虫疫木处理及炭化资源化利用研究进展

邱煦洋¹, 陈双扣², 王 猛², 邱会东^{2*}

¹中南林业科技大学班戈学院, 湖南 长沙

²重庆科技大学化学化工学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月15日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月14日

摘 要

松材线虫病作为我国最严重的森林疫病之一, 对林业生态安全和木材资源造成了巨大损失。本文介绍了松材线虫疫木的传统焚烧、熏蒸、机械粉碎、热处理、生物转化等主要处理方法, 重点综述了木材炭化技术的基本原理、制备工艺与性能演变规律, 阐述了炭化木在环保型防腐材料、环境功能材料以及能源转化等领域的高值化应用进展。研究表明, 疫木处置正从传统的焚烧向“无害化-资源化-高值化”的绿色循环模式转变, 炭化技术因其环保性和产品高附加值, 成为连接疫木处理与资源循环的关键桥梁。

关键词

松材线虫, 疫木处理, 炭化木, 资源化利用

Research Progress on the Infected Wood Treatment for Pine Wood Nematode and Its Resource Utilization through Carbonization

Xuyang Qiu¹, Shuangkou Chen², Meng Wang², Huidong Qiu^{2*}

¹Bangor College, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan

²School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 15, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 14, 2026

*通讯作者。

文章引用: 邱煦洋, 陈双扣, 王猛, 邱会东. 松材线虫疫木处理及炭化资源化利用研究进展[J]. 林业世界, 2026, 15(3): 554-560. DOI: 10.12677/wjf.2026.153067

Abstract

As one of the most severe forest diseases in China, pine wood nematode has caused immense losses to forest ecological security and wood resources. This paper introduces the main treatment methods for pine wood nematode-infested wood, including traditional burning, fumigation, mechanical crushing, heat treatment, and biotransformation. It focuses on reviewing the fundamental principles, preparation processes, and property evolution patterns of wood carbonization technology. Furthermore, it elaborates on the high-value application progress of carbonized wood in fields such as environmentally friendly anti-corrosion materials, environmental functional materials, and energy conversion. Research indicates that the disposal of infected wood is transitioning from traditional burning towards a green circular model of "harmless treatment-resource utilization-high-value application". Carbonization technology, due to its environmental friendliness and high product added value, serves as a key bridge connecting the treatment of infected wood with resource recycling.

Keywords

Pine Wood Nematode, Infected Wood Treatment, Carbonized Wood, Resource Utilization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

松材线虫病俗称“松树癌症”，是由松材线虫寄生引起的一种毁灭性森林病害，具有极强的传染性和致死性。自1982年我国在南京首次发现该病以来，已扩散至全国18个省(区、市)的600余个县级行政区，发生面积超过2000万亩，累计造成6亿多株松树死亡，直接经济损失达数千亿元[1]。

长期以来，疫木处理主要采用就地焚烧、熏蒸等传统方式，但这些方法面临着火灾风险高、环境污染大、资源浪费严重等问题。与此同时，疫木本身作为一种生物质资源，其潜在价值亟待挖掘。木材炭化(高温热处理)技术作为一种不添加化学药剂的物理改性方法，在改善木材尺寸稳定性、防腐性的同时，还能赋予材料导电性、多孔性等新功能，为疫木的高值化利用开辟了新途径[2]。

本文旨在系统梳理松材线虫疫木处置方法，深入分析木材炭化技术的原理与工艺，全面综述炭化木在防腐材料、环境功能材料、能源转化等领域的资源化利用进展，以期对疫木综合治理和林业可持续发展提供理论参考。

2. 松材线虫疫木处理方法

2.1. 传统处理方法

在松材线虫病防控初期，疫木处理以就地焚烧和药剂熏蒸为主。焚烧能彻底杀灭病原，但如董昌平等[3]研究指出，焚烧面临山场立地条件差导致除治不彻底、极易引发森林火灾、且将可用木材化为灰烬造成巨大的资源浪费。据估算，仅重庆市每年焚烧50万株疫木，相当于损失木材价值1675万元。卢龙勋等[4]进一步指出，单株疫木在焚烧过程中难以烧透，存在松材线虫未被全部杀死的隐患。熏蒸处理主要针对伐桩和集中堆放的疫木。对伐桩采用磷化铝熏蒸后覆膜密封，对集中疫木可采用帐幕熏蒸或库房

熏蒸。国内科技工作者[5]-[7]同时研究表明,熏蒸效果受环境温度影响较大,冬季低温时难以有效杀灭线虫,且塑料薄膜易老化破损导致天牛逃逸,此外,化学药剂本身存在毒性和环境污染问题。

2.2. 物理处理技术

机械粉碎处理是将疫木加工成规定粒径的木屑或碎片。粉碎物短粒径不超过 1 厘米,削片厚度不超过 0.6 厘米[4]。粉碎后的物料可用于火力发电、制浆造纸或作为菌类栽培基质。该方法的核心优势在于通过物理破坏杀死天牛幼虫和线虫,同时为后续资源化利用奠定基础。

旋切制板技术是兼顾病虫害防治和疫木价值的重要途径。董昌平等[3]详细介绍了将疫木旋切成 1~3 mm 薄片,再经蒸汽热处理后制成胶合板的安全利用措施。该技术要求木材中心温度达到 65℃ 以上并持续处理 4 小时以上,线虫灭杀率达 100%。生产出的胶合板可用于制作木质包装、家具等,实现了疫木变废为宝。

热处理技术近年来发展迅速。卢龙勋等[4]报道了采用热风型干燥窑或木材专用热风(蒸汽)烘干箱对疫木进行加热处理的方法。中国林科院研发的蒸汽式疫木处理器采用移动式设计,可在林区就地处理疫木,首次实现了疫木从采伐点到处理点的全程机械化作业。

2.3. 生物转化技术

菌虫复合生物转化是一项创新性的技术。吴云忠[8]等研究了利用松材线虫病疫木种植茯苓,研究发现疫木种植茯苓第 63 天,样本中的松材线虫全部死亡;第 77 天,松褐天牛全部死亡。该方法不仅能杀灭病原,每立方米疫木还可收益高价值的茯苓。进一步的研究表明,疫木中松材线虫和松褐天牛的死亡与茯苓菌丝生长过程中分泌的酶类和有机酸有关。此外,陈慧玲等[9]研究在铁皮石斛人工种植中使用经过无害化处理后的松材线虫病疫木作为栽培基质切实可行。陈斌等[10]通过筛选获得对疫木木屑具有高效降解活性的微生物菌株,再利用白星花金龟幼虫的腐食性取食腐解后的疫木,最终将疫木转化为高价值的昆虫蛋白和优质有机肥。

2.4. 不同处理方式的比较分析

结合松材疫木当前处理技术的现状,对松材疫木传统焚烧、熏蒸、粉碎,以及生物转化和炭化五种疫木处理方法在环境影响、经济成本、处理效率和资源利用率四个维度的简要对比分析,如下表 1 所示。

Table 1. Comprehensive comparative analysis of different methods of infected wood treatment for pine wood nematode
表 1. 松材线虫疫木不同处理方法的综合比较分析

处理方法	环境影响	经济成本	处理效率	资源利用率
焚烧	差:产生大量烟尘和 CO ₂ ;易引发森林火灾(重庆 2012~2013 年因焚烧引发多起);资源完全浪费。	低(直接成本低),但隐性成本高:每立方米疫木损失;需专人看管,增加人力成本。	较高:单株烧透需数小时,但枝丫易烧不透,残留病原风险。	无:木材转化为灰分,无任何产品回收。
熏蒸	较差:化学药剂有毒,对人体和环境有害;塑料薄膜易破损导致天牛逃逸。	中等:药剂成本约 10~30 元/m ³ ,人工覆膜、密封费用;需环境温度 > 10℃,冬季效果差。	较好:对密闭空间内疫木可杀灭线虫和天牛,但受温度影响大,低温下效果不达标。	低:处理后疫木仍需后续利用(如制板),但化学残留可能限制用途;直接回收率低。
机械粉碎	较好:无化学污染;粉碎物可用于发电、造纸、基质,减少焚烧污染;但设备运行能耗较高。	中等偏高:需专用粉碎设备(移动式粉碎机)及动力;每吨处理成本约 100 元以上。	高:粒径 < 1 cm 可机械破坏天牛和线虫;连续作业,每小时数吨。	中等:粉碎物可作为生物质燃料、造纸浆料、菌棒基质,回收率可达 70%以上。

续表

生物转化	优良：零化学添加；如茯苓/白星花金龟转化过程固定碳、生产有机肥；无二次污染。	低负(盈利)：种植茯苓或白星花金龟转化产出昆虫蛋白和虫砂，具有较高经济回报。	较高：茯苓种植 63 天线虫全死，77 天天牛全死；白星花金龟幼虫 12 天转化，效率较高。	高：茯苓(药材)或昆虫蛋白 + 虫砂(优质有机肥)，资源回收率高，可达 90%以上。
炭化处理	优良：无化学添加；封闭系统可回收木醋液、可燃气体；CO ₂ 排放低于焚烧；产品可长期固碳。	中等：需炭化设备投资；运行能耗成本约 200~300 元/t 木；但产品售价高可覆盖成本。	高：温度 > 220℃数小时即可杀灭线虫和天牛；连续化作业，处理周期短(4~8 小时/批)。	极高：炭化木可制成高性能材料，全组分利用，附加值提升 10 倍以上。

3. 炭化木制备工艺研究

3.1. 疫木炭化工艺流程

木材炭化(高温热处理)是指在无氧或低氧环境中，在 160℃~240℃温度范围内对木材进行热处理的物理改性技术。该过程不添加任何化学药剂，是环境友好型木材改性方法。松材疫木从源头采集与管控、无害化预处理、深加工转化及生产高值化终端产品流程示意图如图 1 所示。

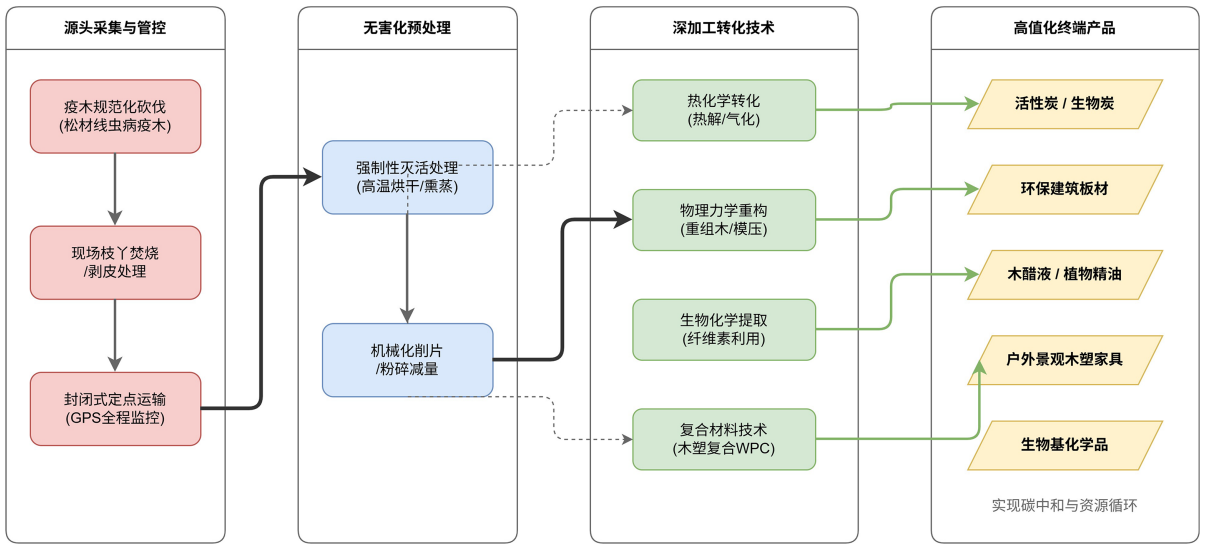


Figure 1. Schematic diagram of high-value treatment process of pine infected wood
图 1. 松材疫木高值化处理流程示意图

3.2. 疫木炭化过程中主成分的降解及结构演变

疫木木材主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。炭化过程中，在 180℃~300℃时半纤维素首先发生热降解释放乙酸等有机酸，有机酸进一步催化其他组分水解。吴帅等[11]指出，由于半纤维素的降解降低了木材的吸湿性，从而提高炭化木尺寸稳定性。李家宁等[12]对橡胶木的热改性研究表明，随着处理温度从 185℃升至 200℃，处理时间延长，木材释放的有机酸浓度增大。随有机酸浓度增加，炭化木的尺寸稳定性、耐腐蚀性改善，同时颜色加深、抗弯强度减小。

纤维素的热解温度为 200℃~400℃，其聚合度降低，羟基(-OH)数量显著减少。范慧青[13]的研究证实，炭化后杨木和樟子松的纤维素含量明显降低，且随着炭化温度升高和时间延长呈现降低趋势。杨木

纤维素含量由 47.31% 降至 32.80% (220℃, 6 h), 樟子松由 44.02% 降至 36.65% (220℃, 6 h)。纤维素非结晶区的减少是炭化木吸湿性降低的重要原因。木质素热稳定性最高(280℃~550℃), 在常规炭化温度下基本不降解, 其含量相对增加[11][13]。木质素的热解反应发生在较广的温度范围内, 部分热解产物与纤维素降解产物发生缩聚反应, 形成更稳定的结构。

炭化过程中, 木材的天然多孔结构得以保留并优化。扫描电镜观察显示, 炭化后木材的细胞壁结构基本完好, 但表面变得粗糙, 生成大量纳米碳球。艾陆辰[14]以松木为原料, 通过盐酸刻蚀水热—煅烧两步法制备的三维多孔碳化木, 比表面积达 447.6 m²/g, 孔隙中生成大量尺寸约 200~500 nm 的纳米碳球。X 射线衍射分析表明, 炭化木保留了纤维素 I 型晶型, 但衍射峰变宽, 表明晶粒尺寸减小。高铭晨[15]采用 CO₂活化制备的多孔碳化木, 比表面积达到 511 m²/g, 形成大量介孔结构, 孔径 3.89 nm 的孔体积最高。拉曼光谱分析显示, 炭化木在 1350 cm⁻¹ (D 带)和 1580 cm⁻¹ (G 带)处出现特征峰。李宇薇[16]的研究表明, 随着炭化温度从 600℃ 升至 900℃, 石墨化程度提高, 导电性增强。XPS 分析证实炭化木表面存在 C-O、C=O 等含氧官能团, 赋予材料良好的亲水性。

3.3. 木材炭化过程的影响因素

3.3.1. 温度对炭化工艺影响

杨柳等[17]对水杉、杨木的研究表明, 温度对木材失重率、含水率、吸水率、湿胀率的影响均为显著。随着炭化温度从 160℃ 升至 210℃, 木材颜色逐渐加深(由黄白至深褐), 平衡含水率显著降低(约为素材的 1/3), 密度减小, 抗弯强度下降(水杉下降 42.39%, 杨木下降 46.30%), 而尺寸稳定性大幅提高。袁佳等[18]对杉木的研究发现, 当处理温度从 160℃ 升至 220℃ 时, 杉木的明度值 L 和黄蓝指数 b 均降低, 颜色从黄白色向橙黄色至黑褐色变化。红外光谱分析显示, 随着温度升高, 羟基吸收峰(3411~3423 cm⁻¹)强度显著降低, 亲水基团减少, 这是炭化木吸水能力减弱的直接原因。

3.3.2. 加热时间对炭化工艺影响

马淑玲[19]对杨木和樟子松的真空炭化处理研究表明, 在相同温度下, 随着处理时间从 2 h 延长至 6 h, 木材的平衡含水率、吸水率、体积湿胀率均呈现下降趋势。例如, 220℃ 处理 6 h 的杨木吸水率由未处理材的 245.23% 降至 161.22%, 体积湿胀率降至未处理材的 54%。纤维素结晶度在不同温度水平下随处理时间变化呈现不同趋势。

3.3.3. 处理介质对炭化工艺影响

马淑玲[19]系统对比了真空炭化和油浴炭化两种不同处理介质对杨木和樟子松的影响。油浴炭化处理材的吸水率下降更明显(杨木降至 68.97%, 为未处理材的 28%), 但力学强度损失也更大(杨木抗弯强度损失率达 50.59%); 真空炭化在提高耐腐蚀性方面效果更优(杨木在 220℃, 4~6 h 处理下达到强耐腐等级)。范慧青[13]等研究表明, 油浴炭化对木材化学成分(如氨基酸含量)的影响大于真空炭化。在相同炭化条件下, 油浴炭化处理的杨木氨基酸含量(0.023~0.180 mg/100mg)低于真空炭化处理(0.157~0.291 mg/100mg)。

4. 炭化木资源化利用途径

4.1. 环保型防腐材料

炭化木最传统的应用是作为防腐木用于园林景观和户外建筑。其防腐机理与微生物生存条件的破坏密切相关。范慧青[13]的系统研究表明, 炭化处理后木材的纤维素含量降低(杨木从 47.31% 降至 32.80%)、氨基酸含量减少(从 0.559% 降至 0.023%)、灰分含量降低(杨木从 1.84% 降至 0.51%), 同时含水率(从 5.38% 降至 2.04%)和 pH 值(杨木从 5.64 降至 4.06)也明显下降。这些变化从食物链和环境条件上抑制了微生物

的生长繁殖,从而达到防腐效果。姚德权[20]指出,炭化木通过在高温($160^{\circ}\text{C}\sim 220^{\circ}\text{C}$)下切断腐朽菌的营养链达到防腐目的,与化学防腐剂对木材处理相比,炭化木全程无化学添加,具有颜色内外一致、尺寸稳定性好、安全环保等优点,是一种环境友好型材料。国内生产木地板企业已实现炭化木的规模化生产,年产量达 $15,000\text{ m}^3$,产品广泛应用于室外装修、户外家具、园林建筑等领域[21]。

4.2. 环境功能材料

在吸附剂应用研究领域,艾陆辰[14]制备的三维多孔碳化木对罗丹明 B 的吸附容量达 39.47 mg/g ,吸附动力学符合准二级动力学模型,表明以化学吸附为主。进一步负载 WO_3 、 TiO_2 等半导体材料后, $\text{WO}_3/\text{TiO}_2\text{-CW}$ 复合材料的吸附容量提升至 138.14 mg/g ,同时兼具光催化性能,在 90 分钟内对罗丹明 B 的去除率达 82%。高铭晨[15]制备的 CO_2 活化多孔碳化木对苯并三唑、甲基橙和环丙沙星的吸附容量分别达 175.12 mg/g 、 132.47 mg/g 和 144.87 mg/g ,且吸附后污染物不易脱附,显示出良好的应用潜力。

在催化剂载体应用研究领域,李宇薇[16]以泡桐木为原料,制备了负载氧化铁纳米片的炭化木催化剂(FeOx@WC),用于活化过一硫酸盐降解环丙沙星。该催化剂在 10 分钟内对环丙沙星的去除率达 86.6%,且在 2.0~11.0 的宽 pH 范围内维持良好性能。利用该催化剂组装的流动水处理装置,450 mL 污染溶液在 17 分钟内去除率达 75.4%。其高效性得益于炭化木的多孔结构促进了活性位点暴露和物质传输,以及 FeOx 纳米片提供了丰富的反应界面。

为进一步减少金属浸出,李宇薇[16]还制备了非金属氮掺杂的木质纤维素碳基催化剂(NWCC-700)。该催化剂在 60 分钟内对环丙沙星的去除率达 97.5%,经过 4 次循环后仍可维持 79.6%的去除率。EPR 测试和淬灭实验表明,单线态氧($^1\text{O}_2$)和电子转移在降解过程中起主导作用。

在微生物燃料电池电极应用研究领域,郭佳琪等[22][23]将炭化木用作微生物燃料电池阳极。与传统碳布相比,炭化木阳极具有更大的比表面积($69.05\text{ m}^2/\text{g}$ vs $0.21\text{ m}^2/\text{g}$)、更好的生物相容性和导电性。以 CW-900 为阳极的微生物燃料电池最大输出电压达 350 mV,最大功率密度 $169\text{ mW}/\text{m}^2$,分别是碳布的 5.4 倍和 19.4 倍。通过铁金属掺杂制备的 Fe@CW 电极性能进一步提升,最大输出电压达 455 mV,最大功率密度 $333.79\text{ mW}/\text{m}^2$,分别是未修饰 CW 电极的 1.5 倍和 2.5 倍。在处理造纸废水时, Fe@CW 阳极的化学需氧量去除率达 77%,库仑效率 11.22%,显著优于碳布。

4.3. 能源转化材料

炭化木在太阳能界面蒸发领域展现出重要潜力。李艳等[24]通过水热法制备了碳化木,利用其亲水性和光热转换性能,在太阳光照下蒸发速率达 $1.48\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,能量转化效率 66.2%。该研究通过调节碳化程度(200°C , 8 h)和供水高度(15 mm),实现了蒸发界面的热湿平衡。XPS 分析表明,碳化后亲水基团-OH 的比例增加了 10.6%,毛细水芯吸高度从 4.2 mm 增至 22.3 mm (120 s),这是蒸发性能提升的重要原因。

在生物质能源利用方面,周建斌等[25]研究表明,杉木炭化后密度由 $0.368\text{ g}/\text{cm}^3$ 降至 $0.326\text{ g}/\text{cm}^3$,静曲强度下降约 25%,但作为生物质燃料的热值显著提高,炭化木可直接作为固体燃料,其热值高于原木。另外,炭化过程中产生的木醋液等副产物可作为植物生长调节剂或病虫害防控辅助剂。

5. 结论与展望

(1) 疫木处理技术已形成多元化体系。从传统的焚烧、熏蒸,发展到旋切制板、粉碎利用、菌虫复合转化等多种安全模式。炭化工艺参数决定产品性能。炭化温度、处理时间和处理介质同样显著影响炭化效果,需根据应用目标进行工艺优化。炭化木应用除传统防腐木外,炭化木凭借其高比表面积、多孔结构和导电性,在吸附剂、催化剂载体、微生物燃料电池电极和太阳能蒸发器等环境与能源领域展现出广

阔前景。

(2) 针对松材线虫疫木的特性, 建立炭化温度、时间、介质与线虫灭杀效果、材料性能之间的定量关系模型, 探索其在电催化、能源存储等高端领域的应用潜力, 开发兼顾防疫效果与产品性能的优化工艺。同时可对炭化木及其改性产物在全生命周期中的环境影响进行系统评估与碳汇评估, 实现松材线虫病防控与林业经济绿色发展的双赢。

参考文献

- [1] 从被动扑杀到主动防御、从单一处置到多元调控, 从化学依赖到绿色精准持续——我国松材线虫病实现可防可控[N]. 中国绿色时报, 2026-01-14(02).
- [2] 移动式松材线虫病疫木炭化及增值利用关键技术通过成果鉴定[EB/OL]. 湖南省林业局. https://lyj.hunan.gov.cn/xxgk_71167/gzdt/gndt/202107/t20210730_20020235.html, 2021-07-30.
- [3] 董昌平, 唐艳梅, 邹桃龙. 重庆市松材线虫病疫木安全利用措施[J]. 农业灾害研究, 2015, 5(11): 9-10, 12.
- [4] 卢龙勋, 吴网君, 林雪艳, 等. 松材线虫病疫木木材综合利用现状及机械化需求分析[J]. 浙江林业科技, 2025, 45(1): 139-146.
- [5] Yang, H., Hua, Y., Liu, T., Fang, S., Gu, W. and Shi, J. (2025) Alternative Fumigation Technologies for *Bursaphelenchus xylophilus*-Infected Woods: Reducing Reliance on Methyl Bromide. *Pest Management Science*, **81**, 4611-4620. <https://doi.org/10.1002/ps.8821>
- [6] Eisenback, J.D., Chen, Z. and White, M. (2024) Evaluating Vacuum and Steam Heat to Eliminate Pinewood Nematodes in Naturally Infested Whole Pine Logs. *Journal of Nematology*, **56**, Article ID: 20240038. <https://doi.org/10.2478/jofnem-2024-0038>
- [7] Gao, R., Liu, L., Fan, S., Zheng, W., Liu, R., Zhang, Z., et al. (2024) Occurrence and Potential Diffusion of Pine Wilt Disease Mediated by Insect Vectors in China under Climate Change. *Pest Management Science*, **80**, 6068-6081. <https://doi.org/10.1002/ps.8335>
- [8] 吴云忠. 松材线虫病疫木种植茯苓试验[J]. 福建林业科技, 2013, 40(4): 51-55.
- [9] 陈慧玲, 张玲, 马林江, 等. 松材线虫病疫木在药用石斛人工栽培中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(2): 152-157.
- [10] 陈斌, 杨世璋, 刘玉升, 等. 松材线虫病疫木的环境昆虫转化处理[Z]. 重庆师范大学, 2019.
- [11] 吴帅, 于志明. 木材炭化技术的发展趋势[J]. 木材工业, 2008, 22(5): 3-6.
- [12] 李家宁, 李民, 秦韶山, 等. 蒸汽介质热改性橡胶木有机酸释放量与炭化木性能分析[J]. 林产工业, 2010, 37(6): 18-21.
- [13] 范慧青. 木材炭化防腐处理对微生物生存条件的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [14] 艾陆辰. 三维多孔碳化木对水体中罗丹明 B 的去除研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [15] 高铭晨. 多孔碳化木用于生物滞留设施高效去除有机污染物研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2024.
- [16] 李宇薇. 木材衍生碳材料的制备及催化过硫酸盐降解环丙沙星研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2024.
- [17] 杨柳, 李晖, 杨志斌, 等. 木材炭化及其物理力学性能的研究[J]. 湖北林业科技, 2011(5): 32-35, 60.
- [18] 袁佳. 杉木高温炭化改性技术的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [19] 马淑玲. 炭化防腐木材的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [20] 姚德权. 木材防腐技术在园林景观工程中的应用研究[J]. 林产工业, 2019, 46(12): 87-89.
- [21] 奥地利木业协会. 碳化木, 一种新型的基材[J]. 国际木业, 2008, 38(S1): 88-89.
- [22] 郭佳琪, 刘雪, 王睿文, 等. 炭化木作为微生物燃料电池阳极处理造纸废水的特性[J]. 林业工程学报, 2025, 10(5): 104-112.
- [23] 郭佳琪. 炭化木基电极的制备及其在微生物燃料电池中的应用[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025.
- [24] 李艳, 彭贤汉, 洪文鹏, 等. 碳化木的水热制备及其光热水蒸发性能强化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 222-228.
- [25] 周建斌, 邓丛静, 蒋身学, 等. 炭化木物理力学性能的研究[J]. 林产工业, 2008, 35(6): 28-31.