

生物基防腐技术的研究进展及其在木包装中的应用展望

刘于菡, 王小燕, 云虹

(华南农业大学 材料与能源学院, 广州 510642)

摘要: **目的** 为满足木包装材料的使用要求和防疫要求, 需将木材进行防腐处理, 但传统的防腐处理方式易对环境和物品造成污染, 存在安全隐患, 生物基防腐技术可解决上述问题。**方法** 介绍当前木包装材料的使用现状, 阐述国内外生物基防腐技术的研究进展, 并分析和讨论木包装材料在使用中存在的问题。**结果** 生物基防腐技术是一种绿色、高效的木材防腐技术, 目前已取得了一定的研究成果。**结论** 生物基防腐技术可以满足木包装材料在运输和存储中的各种需求, 并且具有环保无毒的优点, 因而具有非常广阔的开发和应用前景。

关键词: 木包装; 木材防腐剂; 生物基防腐; 抑菌性

中图分类号: TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)03-0008-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.03.002

Research Progress of Bio-based Preservative Technology and Its Application Prospect in Wood Packaging

LIU Yu-you, WANG Xiao-yan, YUN Hong

(College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct preservative treatment on wood to meet the use requirements and epidemic prevention requirements of wood packaging materials. However, the traditional preservative treatment is easy to cause pollution to the environment and goods. Bio-based preservative technology can solve the above problems. The current situation of the use of wood packaging materials was introduced. The research progress of bio-based preservative at home and abroad was expounded. The problems existing in the use of wood packaging materials were analyzed and discussed. Bio-based preservative technology was a green and efficient wood preservative technology, which had achieved certain research results. The bio-based preservative technology can meet various needs of wood packaging materials in transportation and storage, and has the advantages of environmental protection and non-toxic property, so it has a very broad development and application prospects.

KEY WORDS: wood packaging; wood preservatives; bio-based preservatives; antimicrobial property

木材作为一种天然、可再生、可降解材料, 具有坚固耐用、加工简易等优点, 广泛用于包装领域。木包装具有悠久的历史, 早在 3 800 年前, 我国甲骨文上就有记载使用木箱来装衣物, 在欧洲使用木桶装载

和运输葡萄酒也有近 2 000 年的历史。日常生活中常见的木质包装制品指用于保护、包装、承载、运输和储存货物的各种木箱、木桶、木托盘等。木包装既可用于机电产品、仪表五金器件等商品的大型贸易运

收稿日期: 2022-10-15

基金项目: 广东省林学会科技计划 (2020-GDFS-KJ-04); 广东省林业科技创新项目 (2022KJCX016)

作者简介: 刘于菡 (1998—), 女, 硕士生, 主攻木材防腐技术。

通信作者: 云虹 (1978—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为木质复合材料及改性。

输,也可作为食物和食品接触用的轻质包装储运。从微观结构和化学成分来看,木材是一种天然纤维基复合材料,具有较高的机械强度和各向异性^[1]。作为一种传统包装材料,木材具有诸多优点:抗压、抗拉和抗弯强度高,可承受较大的堆垛载荷;材质天然无害,可循环使用,生态环境友好;取材广泛,制作容易等。木材也有很多缺点:表面粗糙多孔,吸湿性强,直接用于装运货物可使金属生锈或使食品变质;易腐朽,易发霉,易受到虫蛀的影响^[2]。

与其他包装材料不同,木包装是一种生物质材料,不但易发生腐朽和霉变,还会寄生各种生物害虫,造成生物侵害。如在 1982 年中国发生的松材线虫入侵事件,给我国造成了巨大的经济损失。为了满足木包装材料的使用要求和检疫要求,大多数木材在使用前都会进行加工处理。常用的处理技术包括熏蒸处理、防腐浸渍处理和热处理。其中,经防腐浸渍处理后,药剂会在木材的一定深度处形成保护层,达到长久防腐杀虫的效果,使用寿命可达 20 年。美国国防部将水基环烷酸锌、环烷酸铜和 8-喹诺酮酸铜这 3 种防腐剂纳入使用规范^[3]。国内常用的防腐剂有铜铬砷(CCA)、砷酸铜(ACA)、季铵铜(ACQ)等。这些防腐剂均含有重金属离子,给木材的后续回收利用造成了较大的困难。同时,金属离子的流失也会对周围环境造成污染,目前常用的防腐剂不但限制了木包装的使用范围,也会对环境造成威胁。由此可见,木包装领域迫切需要一种低(无)毒、对人畜环境无公害的木材防腐剂。

生物基防腐剂是从自然界的生物中提取和分离有效成分而制备的一类防腐剂,具有抑制和杀灭微生物的作用,同时具有绿色环保性和牲畜无害性,如常见的木材提取物、植物提取物、壳聚糖及其衍生物等^[4]。文中介绍了国内外木包装的应用现状,阐述了生物基防腐技术的研究进展,并分析了生物基防腐技术在木材包装领域的可行性,旨在为我国木包装行业的技术进步和行业规范提供理论和技术支撑。

1 木包装的应用及研究现状

1.1 木包装的种类

木包装种类繁多,应用场所也各不相同。根据材

质的类型,可将木制包装分为实木包装、人造板材包装和代木包装。在包装运输过程中,人造板材和代木材料受到虫害、微生物侵害的风险较低,一般无需加工处理。虽然二者在取代实木包装上具有一定的优势,但鉴于使用性能有一定缺陷、标准不统一等问题^[5],使其不能完全取代实木包装。实木包装主要指以木材为原料制造的用于产品包装的容器,包括普通木箱、滑木箱、框架、木箱、底盘和钢丝捆扎箱等^[6],见图 1。根据木包装的用途,实木包装大致分为大型运输用木包装和轻质食品用木包装。大型运输木包装主要指运输机电产品、仪表五金器件等商品的木箱、木桶、木托盘等。轻质食品木包装常用于海鲜、水果、蔬菜和奶酪等物品的包装,木材的吸湿性可实现运输过程中的水分平衡,从而起到食品保鲜的效果。针对食品安全问题,食品木包装材料通常采用未经加工处理的原木制成,因此存在发霉、腐朽等风险。

1.2 木包装的使用要求

随着全球贸易的飞速发展,来源广泛、价格低廉的木质包装在国际贸易中被大量使用^[7]。联合国粮食与农业组织(FAO)资料显示,在全球进出口贸易活动中,各国间进出口货物的运输包装中有 70%左右使用木质包装^[8]。庞大的使用量和广泛的使用范围,要求木包装具有力学性能稳定、防疫性合格、食品安全性好等特性。

首先,作为大型运输包装材料时,木包装材料需要选用强度较大的材种,如落叶松、桦木、榆木等,以满足运输需求。在 GB/T 12464—2002 中针对普通木箱,规定其抗弯、抗压、抗拉的许用强度分别需达到 11.0、7.0、14.0 MPa。由此可见,大型运输木材木包装材料需具有一定的强度,并保证其在运输和存储过程中不被寄生虫和微生物腐蚀和损害,从而保证其强度不受损失。

其次,木包装需满足各国的检验检疫要求。由于木质包装在贸易过程中不能体现商品价值,各国多采用未经干燥、热压等深加工处理的原木。如果这些木材存在有害生物,并在抵达国内后繁殖,将对当地的林木生态构成严重威胁。1998 年,美国将光肩星天牛生物入侵事件归因于中国出口的木制包装箱。在“天牛”事件后,美国、加拿大相继颁布法令,要求所



图 1 常见实木包装类型
Fig.1 Common types of wood packaging

有来自中国的木材包装材料及木质铺垫物都必须进行熏蒸处理、热处理或者防腐处理,并需附中国官方检疫机构出具的检疫证明^[9]。这使得实木在包装工业中的发展受到了限制。为了保证各国植物生态系统免受外来入侵生物危害,对进出境的木质包装实施检疫处理是保障进出口贸易顺利进行的重要措施^[10]。

与大型运输木包装不同,食品用木包装的形式和功能多样,它对强度要求较低,但更注重环保和无毒性。欧洲共同体(EC)第 2023/2006 号法规规定,食品包装应该符合 3 个规范:不会危害人体健康;不会导致食品成分发生不可逆的变化;不会导致食品感官特性恶化。法国的法规对食品用木质包装有着更进一步的要求,规定能与所有食品接触的木材只有橡木、栲木、栎木、白蜡木、合欢木,而与固体食品接触的木材有胡桃木、榆木和杨木^[11]。由于木材的结构为多孔结构,具有独特的吸湿性,同时水分也是微生物赖以生存的主要条件之一,如何在高含水率的状态下保持抑菌性是食品木包装材料需要解决的主要问题。

1.3 木包装的处理技术

针对上述木包装的使用要求,目前木质包装材料常采用的处理技术手段有熏蒸、热处理、药剂浸渍和微波处理等^[12],见表 1。熏蒸处理是我国目前普遍使用的化学处理方法,溴甲烷是出口货物木质包装中使用最多的熏蒸剂^[6]。现有研究发现,溴甲烷不但会破坏臭氧层,还会对人或动物造成严重的神经系统及呼吸系统损害,因此 2012 年欧盟在新的法规中^[13]禁止使用溴甲烷,取而代之的是对木包装的热处理工艺(60 ℃/60 min)。热处理和微波处理不但会降低木包装的强度,还会增加成本。关于这一问题,国际植物保护委员会(IPPC)通过了《关于替代或减少甲基溴作为植物检疫措施的建议》,目前正在寻求更环保的替代方法^[14]。

当前,采用木材防腐处理对于解决木包装问题是一种最有效的措施。使用传统的防腐剂处理木材可以杀灭木腐菌及木材害虫,延长木材的使用寿命,是一种低成本保护木材、提高木材利用效率最有效的技术。

此外,防腐剂处理是永久性的处理措施,木包装一经处理后可以循环使用,所以 IPPC 也积极推荐将防腐剂处理作为木质包装国际标准的一种方法。王跃进等^[15]采用低毒铜唑基防腐剂(CuAz 和 CY)处理松木,研究表明,质量分数为 2.86% 的 CuAz 和 2.22% 的 CY 对松材线虫具有明显的杀灭作用,杀灭率随着处理后放置时间的延长而增高。结果表明,木材对药剂的吸收及渗透性是影响害虫杀灭效果的主要原因。张斌等^[16]制备了一种具有防腐、防霉、防虫、防水等多功能的新型复合制剂,通过筛选有效成分,制得由质量分数为 0.20% 的苯醚甲环唑、0.20% 的碘丙炔醇丁基氨甲酸酯、0.02% 的高效氯氟氰菊酯和 40.00% 的液体石蜡组成的木材保护复合制剂。该复合制剂在室内耐腐测试中使得木材的质量损失率低于 1.0%,达到了 I 级强耐腐等级,白蚁蛀蚀完好值为 9.2,质量损失率为 2.6%。目前,使用和研究的防腐剂仍以金属离子和有机农药为主要有效成分,因此在安全、环保方面存在隐患,使其在木包装中的应用受到限制。

相较于运输用大型木包装,可用于食品の木包装种类受到了更严格的限制。如前所述,高含水率是食品木包装材料起到食品保鲜作用的主要因素,但同时它也是引起木材霉变和腐朽的主要原因。为了防止食品木包装发生霉变和腐朽,需要使用具有防腐性的木材。天然耐腐的木材种类非常有限,如果可以使用绿色无毒的木材防腐剂处理食品木包装,则对扩大木包装的使用范围具有重要意义。

2 生物基防腐技术的应用研究

传统的防腐剂在安全、环保方面存在风险,因而限制了它在木包装中的应用。由于木包装的需求量巨大,因而研发新型环保无毒的天然木材防腐剂势在必行。当前的研究表明,部分来源于植物和动物的天然化合物具有优良的杀菌性能(见表 2),包括植物精油、单宁类化合物、木材提取物、蜂胶和壳聚糖等,这充分显示了生物基防腐技术在木材保护方面的巨大潜力。

表 1 不同木包装处理技术的优缺点及应用前景

Tab.1 Advantages and disadvantages of different wood packaging treatment technologies and application prospects

处理方法	优点	缺点	应用前景
药物熏蒸	高效、广谱地杀害各种有害生物	破坏臭氧层,损害生物神经和呼吸系统	应用受限,需研制出新型药物或逐步被替代
热处理	木材含水率降低,提高包装耐候性	削弱木材力学性能	有实际应用,但木包装易发生再次感染
微波处理	穿透力强,处理速度快	成本较高	有应用前景,但设备投入、使用面窄
防腐剂浸渍	处理成本低,木包装可循环使用	含有重金属的药剂会污染环境,木材的渗透性影响效果	有应用潜力,需要进一步研制新型环保药剂

表 2 生物基木材防腐剂的分类与抑菌性
Tab.2 Classification and antimicrobial properties of bio-based wood preservatives

生物基防腐剂来源		抑菌有效成分	抑制微生物
植物源	中草药	黄连中的盐酸小檗碱、盐酸药根碱和四氢巴马; 青蒿素 ^[17]	白腐菌、褐腐菌、金黄色葡萄球菌
	植物次生代谢物	多元酚型: 茶多酚 ^[18] 、香芹酚、地榆多酚、葡萄籽多酚 ^[19] ; 芳香型: 云杉精油	白腐菌、褐腐菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和铜绿假单胞菌
	特殊植物抽提物	咖啡银皮中的绿原酸和咖啡因; 魔芋飞粉中的水杨酸和肉桂醛等	白腐菌、褐腐菌
动物源	甲鱼、贝类的壳	壳聚糖	白腐菌、褐腐菌、金黄色葡萄球菌
	蜂巢	蜂胶	白腐菌、褐腐菌
微生物源	拮抗菌	柱顶孢霉 ^[20]	白腐菌、粉孢革菌

2.1 植物源提取物

植物富含各种抑菌化合物, 包括生物碱、黄酮、类黄酮、酚类、萜烯、单宁或醌。它们作为次生代谢物, 可占植物干质量的 30%, 在抵御微生物病原体、食草动物和各种非生物威胁方面发挥着重要作用^[21]。植物源防腐剂克服了传统防腐剂的缺点, 具有可再生、安全环保、靶标性强等特点, 还可以充分利用各种植物加工剩余物, 既环保又经济。

近年来, 我国在植物源提取物制备木材防腐剂方面有了新的研究进展。我国中药资源丰富, 很多研究表明中药具有抗真菌的功能。李斌辉^[22]提取了黄连中的有效防腐成分盐酸小檗碱、盐酸药根碱和四氢巴马, 将其以一定比例与壳聚糖混合压制成复合片剂。用蒸馏水溶解复合片剂后处理木材, 进行 12 周的防腐实验。结果表明, 处理后木材的质量损失率降低, 说明复合片剂对白腐菌褐腐菌的生长起到了强烈的抑制作用。

在大量的植物提取物中, 多酚类物质在数量上占主导地位, 它在植物维管组织中是仅次于纤维素、半纤维素和木质素的第四大类化合物^[23], 植物多酚含量可达到其干质量的 20%, 常见的有茶多酚、单宁酸和没食子

酸等。植物多酚含有丰富的酚羟基 (见图 2), 这种多元酚结构赋予其独特的化学性质, 如抗氧化性、络合作用等。此外, 研究表明, 植物多酚对细菌和真菌均有较强的抑制作用^[24-25], 是用于木材防腐的良好原料。Liu 等^[26]筛选了 88 种植物的水和乙醇提取物, 并分别对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和铜绿假单胞菌的抗菌活性进行了评价。结果表明, 芋螺、荞麦、黄花菜、虎杖、地榆等 8 种粗提物对 4 种菌均有抗菌活性, 除虎杖外, 植物中的单宁物质对上述细菌的生长抑制起到了主要作用。庞久寅等^[27]以地榆根为原料, 探讨了提取物地榆多酚对木材耐腐性能的改善情况。结果表明, 随着地榆多酚提取物溶液质量分数的增加, 白腐菌侵蚀试件的质量损失率降低, 试件的质量损失率保持在 1.3%~7.5%, 耐腐性得到明显提高。植物精油的主要成分为萜类, 具有抗氧化、杀虫、抗真菌等生物活性。Zhang 等^[28]测试了 41 种来源于植物精油的单萜类化合物的抗真菌性, 结果表明, β -香茅醇、香叶醇、香芹酚、麝香草酚、丁香酚和柠檬醛对受试菌均有抗性, 其中香芹酚的抗菌性最强。Canillac 等^[29]研究了云杉精油对几种食品致病菌的抑菌效果, 实验结果表明, 对于稳定生长期中的革兰氏阳性菌, 采用质量分数为 0.07% 的云杉精油可抑制 10⁵ CFU/mL 的菌落。

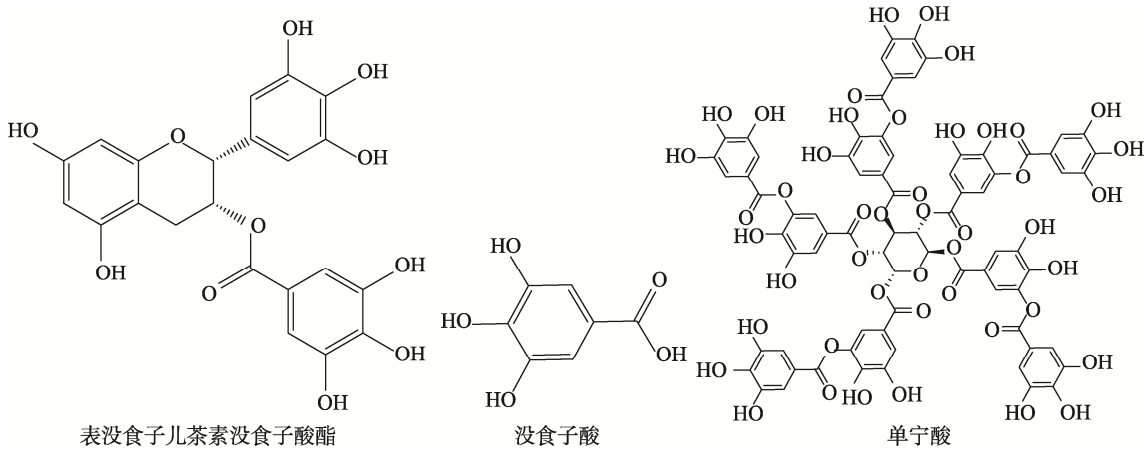


图 2 3 种植物多酚的化学结构
Fig.2 Chemical structures of three plant polyphenols

国外在植物源防腐剂研究领域也取得了一定的进展。Barbero-Lopez 等^[30]采用工业废物咖啡银皮作为木材防腐剂配方中的抗真菌原料,对其体外抗木真菌的作用进行了分析。实验结果表明,采用质量分数为 5% 的银皮提取物处理边材的质量损失率约为 9.5%, 比对照组降低了约 5%, 表明银皮提取物具有真菌抑制作用,但是其效果明显低于商用的铜基防腐剂。银皮中的酚类化合物(如绿原酸及其衍生物和咖啡因衍生物)是抑制真菌的主要物质。虽然银皮不能直接作为木材防腐剂,但它仍然可以成为木材防腐剂配方中抗真菌化学物质的潜在来源。Yildiz 等^[31]研究发现,地衣和槲寄生的提取物也是潜在天然木材防腐剂,木材防腐实验结果表明,随着地衣和槲寄生提取物处理浓度的升高,木材的质量损失率减小。这表明 2 种天然提取物均能有效防止木材的腐烂,具有优良的木材保护功能。

2.2 动物源提取物

壳聚糖是甲壳素的 N-脱乙酰衍生物,其主要来源为甲壳类动物的壳,具有价格便宜、可再生、可生物降解、生物相容性良好和无毒性等优点。近年来,壳聚糖作为潜在天然多糖资源而备受关注,它被证明具有杀菌和抑菌活性^[32-33]。琼脂平板实验表明,霉菌、白腐菌和褐腐菌的生长速度随着壳聚糖浓度和分子量的增加而降低^[34]。壳聚糖涂膜还能显著抑制物体表面微生物数量的增长。马捷等^[35]采用壳聚糖处理鲜切哈密瓜,观察了其冷藏期间的菌落总数。结果表明,壳聚糖处理组在冷藏第 9 天后菌落数才开始缓慢增加,而未涂膜的对照组在第 6 天后菌落数就迅速增加。云虹等^[36]研究了纳米壳聚糖对 ACQ 防腐剂中铜离子固着性的改善效果,结果表明,采用纳米壳聚糖-ACQ 复合处理木材后,铜的抗流失性得到明显改善,木材的热稳定性和疏水性能均得到显著提升。这说明壳聚糖是一种非常具有潜力的生物基防腐剂。

蜂胶是一种天然的树脂物质,是蜜蜂从自然界不同树种采集的花粉与唾液、蜜蜂酶、蜂蜡混合而成的生物基产品。蜂胶具有抗真菌细菌、抗氧化和抗癌特性,可用于木材保护^[37]。Akca 等^[38]将不同浓度的蜂胶溶液加压浸渍到苏格兰松和泡桐木块的深处,并对样品进行了 12 周的真菌腐朽试验。结果表明,未处理的泡桐木材和苏格兰松的平均质量损失率为 47.2% 和 27.2%, 而经质量分数为 7% 蜂胶处理后的泡桐木材和苏格兰松的平均质量损失率仅为 11.6% 和 2.5%。Casado 等^[39]研究了蜂胶乙醇提取物对白腐菌的抗真菌活性。结果表明,16 周后,经 40 mg/mL 蜂胶处理后木块的质量损失率为 17.11%, 比对照样品的质量损失率降低了约 10%。这表明蜂胶可作为木材防腐剂的优质来源。

虽然植物和动物源天然防腐剂具有优良的抑菌

效果,但作为木材防腐剂的潜在来源,它们也存在各自的缺陷和不足,因此需要对其防腐性能进行增效。

2.3 生物基防腐剂增效技术

将单纯的植物或动物提取物直接作为木材防腐剂使用时,存在作用范围窄、易流失、有效期短等缺点,因此研究人员采用各种方法提升生物基木材防腐剂的防腐效果。如与化学药剂复配、微胶囊技术和纳米技术等^[40]。Ramírez 等^[41]利用从椰子皮中提取的单宁与铜复合制备防腐剂。防腐实验结果表明,与只浸渍单宁的木材相比,浸渍单宁-铜复合物的木材具有更强的抗真菌性。将植物源提取剂微胶囊化是实现木材防腐剂渗入木材内并固着的有效途径。微胶囊化是利用成膜材料将固体和液体包裹成微小颗粒的技术。常璐璐^[42]将印楝种仁提取物微胶囊化,并加压浸渍入木材中进行防腐实验。采用扫描电子显微镜观察发现,微胶囊可以均匀分布于木材导管,少量附着于纹孔中。在防腐实验中,经过微胶囊处理后木材的质量损失率比采用提取物处理的降低了 5% 左右,说明微胶囊处理提高了提取物的防腐效果。由此可见,增效技术可大大提高生物基防腐剂的效果,扩大其使用范围。

3 结语

目前,生物基防腐技术在木材防腐中已取得了一定的进展,它具有无毒、环保、高效的特点,成为木材防腐剂最具发展潜力的方向。由于木包装的特殊性,使得生物基防腐技术在木材包装中具有得天独厚的优势,因此有望在木包装领域中得到广泛应用和推广,以改善目前木包装存在的问题。由于研究的深度和广度不足,多数研究尚处于实验室阶段,离实践应用还有一定距离。

1) 需要改进生物基防腐剂的提纯技术,采用更加安全高效、操作简单的提纯方法,使得生物基防腐剂能够得到更广泛的应用。

2) 由于生物基防腐剂源于各种生物,在水分、光照和温湿度变化等环境因素作用下其性能的稳定性尚需进一步研究,以提高应用产品的使用寿命。

3) 加强对生物基防腐剂防腐效力的研究。目前,大多研究只针对 1 种生物或单一提取物质的防腐性能进行研究。由于木包装应用中的微生物是多样的,采用成分单一的药剂处理防治效果并不显著,因此需进一步研究生物基防腐剂与其他化合物的结合改性,或者药剂之间的复配,使其具有持续、广谱的防治效果。

4) 建立规范的检验检疫制度,加强标准化建设,使生物基防腐技术的使用合理合法化,扩大生物基防腐技术的使用范围,使其能够合理合法地应用于木包装产品。

随着人们环保意识和生态可持续意识的增强,传统的木包装材料需要一种更加绿色和安全的处理技术,生物基防腐技术可以满足人们对木包装材料的各种需求,因而具有非常广阔的市场应用前景。

参考文献:

- [1] CHEN Chao-ji, KUANG Yu-di, ZHU Shu-ze, et al. Structure-Property-Function Relationships of Natural and Engineered Wood[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 642-666.
- [2] 张书彬, 杨明伦. 我国木包装材料的现状与发展[J]. *中国包装工业*, 2002(10): 29-30.
ZHANG Shu-bin, YANG Ming-lun. Present Situation and Development of Wood Packaging Materials in China[J]. *China Packaging Industry*, 2002(10): 29-30.
- [3] LEBOW S, ARANGO R, WOODWARD B, et al. Efficacy of Alternatives to Zinc Naphthenate for Dip Treatment of Wood Packaging Materials[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 104: 371-376.
- [4] 蒋世一. 中草药水提取物对木材腐朽菌抑菌防腐性能的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014: 2-5.
JIANG Shi-yi. Study on Antibacterial Action of Chinese Herbal Medicine for Wood-rotting Fungi[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014: 2-5.
- [5] 赵彬. 基于木材包装存在的主要问题及对策研究[J]. *包装工程*, 2016, 37(23): 196-202.
ZHAO Bin. Main Problems Existing in Wooden Packaging and Solution[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(23): 196-202.
- [6] 张方文, 于文吉. 木质包装材料的发展现状和前景展望[J]. *包装工程*, 2007, 28(2): 27-30.
ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji. Current Status and Development of Wood-Based Packaging Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2007, 28(2): 27-30.
- [7] 乐海洋, 张建军, 彭仁, 等. 进境货物木质包装检疫风险分级处置研究[J]. *植物检疫*, 2017, 31(5): 9-14.
YUE Hai-yang, ZHANG Jian-jun, PENG Ren, et al. Study on Quarantine Risk Rating and Administrative Measures for Wooding Packing Materials of Imported Goods[J]. *Plant Quarantine*, 2017, 31(5): 9-14.
- [8] 张方文, 于文吉, 哈密提, 等. 入境木质包装材料检疫除害处理现状与分析[J]. *包装工程*, 2007, 28(10): 20-23.
ZHANG Fang-wen, YU Wen-ji, HA Mi-ti, et al. Current Status and Analysis of the Entry Quarantine Treatments of Wood Packaging Materials[J]. *Packaging Engineer-*
- ing, 2007, 28(10): 20-23.
- [9] 李海龙. “天牛”事件——慎重对待输往美、加产品的木质包装[J]. *包装世界*, 1999(1): 6.
LI Hai-long. "Monochamus Longicorn" Incident—Treat Wood Packaging of Products Exported to America and Canada with Caution[J]. *Packing World*, 1999(1): 6.
- [10] 李雄亚, 刘波, 李天秀, 等. 进出境原木及木质包装溴甲烷替代的化学处理技术现状与展望[J]. *植物检疫*, 2019, 33(2): 8-13.
LI Xiong-ya, LIU Bo, LI Tian-xiu, et al. Current Status and Prospect of Chemical Treatment Alternative Technologies of MB in Import-Export Logs and Wood Packaging Materials[J]. *Plant Quarantine*, 2019, 33(2): 8-13.
- [11] AVIAT F, GERHARDS C, RODRIGUEZ-JEREZ J J, et al. Microbial Safety of Wood in Contact with Food: A Review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(3): 491-505.
- [12] 李德山, 段刚, 赵汗青. 植物检疫除害处理研究现状及方向[J]. *植物检疫*, 2003, 17(5): 289-292.
LI De-shan, DUAN Gang, ZHAO Han-qing. Research Status and Direction of Plant Quarantine Treatment[J]. *Plant Quarantine*, 2003, 17(5): 289-292.
- [13] European Food Safety Authority. Statement on a Heat Treatment to control *Agrilus Planipennis*[J]. *EFSA Journal*, 2012, 10(4): 2646.
- [14] IPPC. ISPM 15: Regulation of Wood Packaging Material in International Trade[EB/OL]. (2022-11-03)[2022-11-03]. <https://www.ippc.int/zh/publications/regulation-wood-packaging-material-international-trade-0/>.
- [15] 王跃进, SZEHOW L, 刘波, 等. 新型防腐剂处理木质包装防治松材线虫的初步研究[J]. *植物检疫*, 2004, 18(5): 258-261.
WANG Yue-jin, SZEHOW L, LIU Bo, et al. The Preliminary Study of Pressure Treated Wood Packaging Materials with New Preservatives Against *Bursaphelenchus Xylophilus*[J]. *Plant Quarantine*, 2004, 18(5): 258-261.
- [16] 张斌, 马星霞, 张景朋, 等. 含石蜡水基型有机木材保护复合制剂的性能研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(2): 423-429.
ZHANG Bin, MA Xing-xia, ZHANG Jing-peng, et al. Preparation and Properties of Containing Paraffin Water Based Organic Wood Protective Agent[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2022, 39(2): 423-429.
- [17] 华夏. 青蒿素纳米铜的制备及其抗菌活性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020: 30-37.
HUA Xia. Preparation of Artemisinin Nano-copper and

- Its Antibacterial Activity Research[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020: 30-37.
- [18] 董金甫, 李瑶卿, 洪绍梅. 茶多酚(TPP)对 8 种致病菌最低抑制浓度的研究[J]. 食品科学, 1995, 16(1): 6-12.
DONG Jin-fu, LI Yao-qing, HONG Shao-mei. Study on the Minimum Inhibitory Concentration of Tea Polyphenols (TPP) to Eight Pathogens[J]. Food Science, 1995, 16(1): 6-12.
- [19] 李建慧, 马会勤, 陈尚武. 葡萄多酚抑菌效果的研究[J]. 中国食品学报, 2008, 8(2): 100-107.
LI Jian-hui, MA Hui-qin, CHEN Shang-wu. Studies on Antimicrobial Effect of Grape-Polyphenols[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008, 8(2): 100-107.
- [20] 邢嘉琪. 木材生物防腐研究的现状与展望[J]. 世界林业研究, 2004, 17(3): 32-35.
XING Jia-qi. Biological Protection of Wood: Status and Prospects[J]. World Forestry Research, 2004, 17(3): 32-35.
- [21] VASCONSUELO A, BOLAND R. Molecular Aspects of the Early Stages of Elicitation of Secondary Metabolites in Plants[J]. Plant Science, 2007, 172(5): 861-875.
- [22] 李斌辉. 黄连成分的分离鉴定及木材防腐性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016: 34-41.
LI Bin-hui. Study on Wood Corrosion Resistance and Isolation and Identification of Coptis Composition[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016: 34-41.
- [23] KRAUS T E C, DAHLGREN R A, ZASOSKI R J. Tannins in Nutrient Dynamics of Forest Ecosystems-A Review[J]. Plant and Soil, 2003, 256(1): 41-66.
- [24] 李典典, 郝晓庆, 张培培, 等. 植物多酚抑菌性及其复合保鲜技术在水产品中的应用进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(2): 210-217.
LI Dian-dian, HAO Xiao-qing, ZHANG Pei-pei, et al. Advances in the Antibacterial Activity of Plant Polyphenols and Their Combined Fresh-Keeping Technology in Aquatic Products[J]. China Food Additives, 2022, 33(2): 210-217.
- [25] 徐颖, 樊明涛, 程拯良, 等. 7 种苹果叶多酚的抗氧化性及抗菌性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 90-94.
XU Ying, FAN Ming-tao, CHENG Zheng-gen, et al. Study on Antioxidant and Antibacterial Activity of Apple Leaf Polyphenols of Seven Cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(10): 90-94.
- [26] LIU Yue-qiu, NIELSEN M, STAERK D, et al. High-Resolution Bacterial Growth Inhibition Profiling Combined with HPLC-HRMS-SPE-NMR for Identification of Antibacterial Constituents in Chinese Plants Used to Treat Snakebites[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2014, 155(2): 1276-1283.
- [27] 庞久寅, 闫运开, 刘思琪, 等. 地榆多酚处理杨木防腐性能研究[J]. 林产工业, 2020, 57(6): 18-22.
PANG Jiu-yin, YAN Yun-kai, LIU Si-qi, et al. Study on the Preservation Properties of Preservative-Treated Poplar by Extracted Sanguisorba Officinalis Polyphenol[J]. China Forest Products Industry, 2020, 57(6): 18-22.
- [28] ZHANG Zhi-lin, YANG Ting, MI Na, et al. Antifungal Activity of Monoterpenes Against Wood White-Rot Fungi[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 106: 157-160.
- [29] CANILLAC N, MOUREY A. Antibacterial Activity of the Essential Oil of *Picea Excelsa* on *Listeria*, *Staphylococcus Aureus* and Coliform Bacteria[J]. Food Microbiology, 2001, 18(3): 261-268.
- [30] BARBERO-LÓPEZ A, MONZÓ-BELTRÁN J, VIRJAMO V, et al. Revalorization of Coffee Silverskin as a Potential Feedstock for Antifungal Chemicals in Wood Preservation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, 152: 105011.
- [31] YILDIZ Ü C, KILIC C, GÜRGEN A, et al. Possibility of Using Lichen and Mistletoe Extracts as Potential Natural Wood Preservative[J]. Maderas Ciencia y Tecnología, 2020, 22(2): 179-188.
- [32] 唐丽丽. MFC/壳聚糖薄膜包装性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 7-9.
TANG Li-li. Study on the Packaging Properties of MFC/chitosan Films[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017: 7-9.
- [33] 马胜亮, 刘文良, 胡亮. 可食性绿色包装膜的研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 90-97.
MA Sheng-liang, LIU Wen-liang, HU Liang. Research Progress on Edible Green Packaging Film[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(23): 90-97.
- [34] EIKENES M, ALFREDSEN G, CHRISTENSEN B E, et al. Comparison of Chitosans with Different Molecular Weights as Possible Wood Preservatives[J]. Journal of Wood Science, 2005, 51(4): 387-394.
- [35] 马捷, 胡慧敏, 孙琰, 等. 壳聚糖涂膜对鲜切哈密瓜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(24): 346-349.
MA Jie, HU Hui-min, SUN Yan, et al. Effect of Chitosan Coating on Quality of Fresh-Cut Hami Melons[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(24): 346-349.

- [36] 云虹, 韩一琳, 刘于菡, 等. 纳米壳聚糖-ACQ 复合处理木材中铜的抗流失性研究[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 61-65.
YUN Hong, HAN Yi-lin, LIU Yu-you, et al. Anti-Loss of Copper in Wood Treated with Nano-Chitosan-ACQ[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 61-65.
- [37] AKCAY C, AYATA U, BIRINCI E, et al. Some Physical, Biological, Hardness, and Color Properties of Wood Impregnated with Propolis[J]. Forestist, 2022, 72(3): 283-293.
- [38] AKCAY C, BIRINCI E, BIRINCI C, et al. Durability of Wood Treated with Propolis[J]. BioResources, 2020, 15(1): 1547-1562.
- [39] CASADO S, SILVA C, PONCE H, et al. White-Rot Fungi Control on Populus SPP. Wood by Pressure Treatments with Silver Nanoparticles, Chitosan Oligomers and Propolis[J]. Forests, 2019, 10(10): 885.
- [40] 罗忠友, 余丽萍, 李利芬, 等. 植物源木材防腐剂增效技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(4): 54-60.
LUO Zhong-you, YU Li-ping, LI Li-fen, et al. Synergistic Technology of Plant-Derived Wood Preservatives[J]. World Forestry Research, 2021, 34(4): 54-60.
- [41] RAMÍREZ M G L, RUIZ H G O, ARZATE F N, et al. Evaluation of Fungi Toxic Activity of Tannins and a Tannin-Copper Complex from the Mesocarp of Cocos Nucifera Linn[J]. Wood and Fiber Science, 2012, 44(4): 357-364.
- [42] 常璐璐. 基于印楝种仁的木材防腐微胶囊制备及其抑菌研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019: 51-60.
CHANG Lu-lu. Study on the preparation of Microcapsules Applied to Wood Preservation and Its Antifungal Action Based on Neem Seed Extract[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019: 51-60.

责任编辑: 彭颀