

木质素纳米颗粒/茶多酚/海藻酸钠复合膜性能及其在辣椒保鲜中的应用

陈炳洁^{1,2}, 刘思思², 李力², 刘汝宽^{2,3*}, 肖志红^{2,4}, 易有金^{1,5*}

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128) (2. 湖南省林业科学院木本油料资源利用全国重点实验室, 湖南长沙 410004) (3. 南方木本油料利用科学国家林草局重点实验室, 湖南长沙 410004) (4. 油脂分子构效湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004) (5. 湖南农业大学长沙现代食品创新研究院, 湖南长沙 410128)

摘要: 采用共混法将自组制备而成的木质素纳米颗粒 (Lignin Nanoparticles, LNPs) 以及茶多酚 (Tea Polyphenol, TP) 掺入海藻酸钠 (Sodium Alginate, SA) 多糖膜液, 采用流延法制备 SA/TP/LNPs 复合膜。研究了 LNPs 添加量对 SA/TP/LNPs 复合膜性能影响及复合膜在辣椒保鲜中的应用。实验显示制备的 LNPs 粒径最小约为 98.33 nm。SA 薄膜可作为 LNPs 和 TP 的优良载体。随着 LNPs 添加量的提高, 复合膜颜色逐渐加深, 透光率逐渐降低。与 SA 薄膜相比, SA/TP/LNPs-5 复合薄膜 (LNPs 质量分数为 5%) 整体性能较好, 其拉伸强度提高了 114.67%, 断裂伸长率降低了 47.81%, 水蒸气透过率降低了 72.04%。SA/TP/LNPs-5 复合薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别为 91.28%、89.20%、DPPH 自由基清除率为 88.75%, ABTS 自由基清除率为 87.21%。保鲜实验显示, 与 CK 组和 PE 薄膜组相比, SA/TP/LNPs-5 复合膜能有效降低辣椒的失重率, 延缓辣椒 Vc 含量的消耗, 贮藏第 10 天时, 其失重率分别降低了 49.93%、39.12%, ($P<0.05$), 贮藏 10 d 后, SA/TP/LNPs-5 复合膜组辣椒 Vc (维生素 C) 含量最高为 54.17 mg/100 g。综上, 该实验制备出一种具有抗菌和抗氧化的环境友好型复合膜, 为木质素的应用提供了新思路, 同时该复合膜在食品保鲜领域具有良好的应用前景。

关键词: 木质素; 茶多酚; 海藻酸钠; 复合膜; 理化性能; 辣椒保鲜

文章编号: 1673-9078(2025)12-89-99

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1386

Lignin Nanoparticle/Tea Polyphenol/Sodium Alginate Composite Membrane Properties and Applications in Pepper Preservation

CHEN Bingjie^{1,2}, LIU Sisi², LI Li², LIU Rukuan^{2,3*}, XIAO Zhihong^{2,4}, YI Youjin^{1,5*}

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)
(2. National Key Laboratory of Woody Oil Resource Utilization, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China)
(3. Key Laboratory of Utilization of Woody Oil in South China, National Forestry and Grassland Administration, Changsha

引文格式:

陈炳洁, 刘思思, 李力, 等. 木质素纳米颗粒/茶多酚/海藻酸钠复合膜性能及其在辣椒保鲜中的应用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 89-99.

CHEN Bingjie, LIU Sisi, LI Li, et al. Lignin nanoparticle/tea polyphenol/sodium alginate composite membrane properties and applications in pepper preservation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 89-99.

收稿日期: 2024-09-15; 修回日期: 2024-12-15; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2024JK2142); 湖南省科技创新领军人才 (2020RC4026); 湖南省重大科技创新平台 (2023PT1001); 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项 (2022sfq53); 国家自然科学基金青年项目 (32201509)

作者简介: 陈炳洁 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 15593669579@163.com

通讯作者: 易有金 (1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 微生物资源开发与利用, E-mail: yiyoujin@163.com; 共同通讯作者: 刘汝宽 (1981-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 木本油料资源利用, E-mail: liurukuan@hnlky.cn

410004, China)(4.Hunan Provincial Key Laboratory of Oils & Fats Molecular Structure and Function, Changsha 410004, China)(5.Changsha Institute of Modern Food Innovation, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Lignin nanoparticles (LNPs) and tea polyphenol (TP) were prepared through self-assembly and infused with a sodium alginate (SA) polysaccharide membrane solution using a blending technique. SA/TP/LNPs composite films were prepared using a casting method. The effects of the LNPs content on the properties of the SA/TP/LNPs composite film and its application in pepper preservation were studied. The prepared LNPs were approximately 98.33 nm thick. The SA film is an excellent carrier for LNPs and TP. With increasing levels of the LNPs, the color of the film gradually deepened, and the light transmittance gradually decreased. The overall performance of the SA/TP/LNPs-5 composite film (LNP mass fraction of 5%) was improved compared with that of the SA film, as the tensile strength increased by 114.67% and the elongation at break and water vapor transmission rate were reduced by 47.81% and 72.04%, respectively. The composite film exhibited inhibition rates of 91.28% against *Escherichia coli* and 89.20% *Staphylococcus aureus*. The free radical scavenging rates of DPPH and ABTS were 88.75% and 87.21%, respectively. A preservation experiment demonstrated that the SA/TP/LNPs-5 composite film effectively reduced the weight loss rate of pepper and delayed the consumption of Vc content in pepper compared to the CK and PE film groups. On the 10th day of storage, the weight loss rates were reduced by 49.93% and 39.12%, respectively ($P<0.05$). The highest Vc content in the SA/TP/LNPs-5 composite membrane group was 54.17 mg/100 g. In summary, this study introduced an environmentally friendly composite film with antibacterial and antioxidant properties, providing novel insights for the application of lignin. The composite film has promising application prospects in food preservation.

Key words: lignin; tea polyphenol; sodium alginate; composite membrane; physicochemical performance index; pepper preservation

辣椒因其富含维生素和矿物质元素等多种营养物质而受欢迎。然而，高水分含量和缺乏果皮保护使得辣椒在收获、运输和储存过程中极易因微生物污染而腐烂变质^[1]。因此，必须采取有效措施保证其新鲜度。在目前流行的辣椒保鲜技术中，食品包装技术因其多功能性和易于处理而被广泛使用，其阻隔性和抗菌性决定了食品质量恶化的速度和保质期^[2]。然而，目前的食品包装膜大部分是由石油基产品制成的，由于其不易降解，大量使用造成了严重的环境污染。生物质聚合物由于其生物相容性、生物可降解性、低成本以及环境友好性^[3]，在食品包装行业具有广阔的应用前景。木质素是一种天然高分子聚合物，具有丰富、环保、生物相容性和可生物降解性等优点，将其用于制备复合膜材料，可以改善材料的强度和功能性，同时加入木质素的薄膜具有增值特性，如紫外线屏蔽性能和抗氧化性能。Ji等^[4]采用浇铸法制备了一种含有苧麻纤维和木质素的生物降解壳聚糖基薄膜。当木质素添加量为20 wt.%时，复合薄膜的抗氧化活性提高了288%，吸水率降低了41.2%。同时，复合薄膜对鸡胸肉的保鲜效果较好，其生长微生物数量远少于PE膜包装的鸡胸肉。制备的木质素/壳聚糖复合膜在食品包装领域显示出了巨大的应用潜力。然而，木质素较差的分散性，制约着其在复合功能材料中的应用，将其制成木质素纳米颗粒(Lignin Nanoparticles, LNPs)后，不仅成功地掩盖了木质素的异质性，同时

赋予了木质素纳米特性，再将其复配到功能材料中制备成木质素纳米复合薄膜，在改善膜的机械强度的同时还可以提高其阻隔性能^[2]使其在食品保鲜包装工业有很高的应用潜力^[5]。Zhang等^[6]采用超声-辅助反溶剂沉淀法合成了木质素纳米颗粒(LNPs)，并制备了果胶-LNPs复合膜。其具有优异的抗拉强度、耐水性、高可见光透明度、强紫外吸收、抗氧化和抗菌活性。

目前木质素在食品包装中的应用多是与金属纳米颗粒结合，然而金属纳米粒子的安全性能研究不足，阻碍了其在食品包装中的进一步应用。茶多酚(Tea Polyphenol, TP)因其天然安全，易溶于水且具有良好的抑菌及抗氧化活性，已被广泛用于食品中^[7]。TP的加入不仅赋予了薄膜优异的抗氧化和抗菌性能，而且还可以与大多数生物大分子聚合物形成相互作用力，增强活性膜的其他物理化学性能，优化其整体性能^[8]。Feng等^[9]成功研制了以淀粉和TP为基材的活性膜。结果表明，TP通过氢键作用在淀粉基体中具有良好的分散性，对膜的表面和屏障性能影响较小。TP掺入淀粉膜显著提高了淀粉膜的抗氧化和抗菌活性。Chen等^[10]制备了由茶多酚与黄原胶(Xanthan Gum, XG)、羟丙基甲基纤维素(Hydroxypropyl Methyl Cellulose, HPMC)制备的复合膜并将其应用到鲜切辣椒保鲜。结果表明TP的添加提高了复合膜的抗氧化、抗菌性能，同时复合膜能有效延缓辣椒的成熟过程。

课题组前期研究表明使用植物提取物复合涂膜剂，

可减少辣椒采后病害进而延长其贮藏期^[11,12]。目前鲜见将 LNP 与 TP 相结合制备成食品包装的应用。据此,本文将木质素制备成 LNP,进一步研究了 LNP 的添加量对 SA/TP/LNP 复合膜性能的影响,并验证复合膜在辣椒中的保鲜效果,以期 SA/TP/LNP 复合膜作为高性能生物基食品包装的潜在应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 菌株、材料与试剂

金黄色葡萄球菌 (*S.aureus*) 和大肠杆菌 (*E.coli*) 均为实验室保藏菌种;木质素(碱性),购于梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;四氢呋喃(AR)、海藻酸钠(化学纯)、甘油(AR)、甲醇(AR)等分析纯均购于国药集团化学试剂有限公司;茶多酚(99%)购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;色谱纯纯度的 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH),购于杭州惠普化工有限公司;2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、无水氯化钙、实验用水为去离子水;樟树港辣椒。

1.2 仪器与设备

Nano ZS90 型马尔文激光粒度仪,英国 Malvern 公司;Evolution201 型紫外-可见分光光度计,赛默飞世尔科技有限公司;Discovery TGA 550 热重分析仪,美国热分析仪器公司;Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪,美国尼高利公司;ZEISS Sigma300 扫描电镜,德国卡尔蔡司股份公司;MTS CMT6103 电子万能试验机,深圳世纪天源仪器有限公司;鼓风干燥箱,苏州瑞之峰烘箱制造有限公司;磁力加热搅拌器,国华电器有限公司;JA2003 型电子天平,上海恒平科学仪器有限公司;GZ-280-S 型生化培养箱,韶关市广智科技设备有限公司;BBS-SDC 超净工作台,济南鑫贝西生物有限公司;数字千分尺,东莞市三量五金器械有限公司;PAL-BX/ACID1 糖度计,日本 ATAGO 有限公司。

1.3 方法

1.3.1 木质素纳米颗粒制备方法

称取适量木质素,以水为反溶剂,采用溶剂转移法制备 LNP。将适量木质素溶解于 H₂O-四氢呋喃共溶剂(V/V, 3/7)并加入圆形底烧瓶中,通过磁力搅拌充分溶解木质素,得到质量分数为 1%、3% 和 5% 的木质素溶液。然后用滴落漏斗将 40 mL 去离子水以约 2 mL/min 的速率滴入木质素溶液中形成木质素纳米颗粒。将含木质素纳米颗粒的悬浮液连续搅拌 4 h 蒸

发四氢呋喃。形成的 LNP 分别记为 1-LNP、3-LNP、5-LNP。将悬浮液放入透析袋,然后将透析袋浸入过量去离子水中以除去四氢呋喃(去离子水需定期更换)。

1.3.2 木质素纳米颗粒形貌表征

将 LNP 溶液调整到适当浓度后使用电子显微镜(ZEISS Sigma300)观察其形貌特征。

1.3.3 木质素纳米颗粒粒径测定

木质素纳米颗粒的粒径使用纳米粒度分析仪进行测量,约 1 mL 样品加入到样品池中,测量结果为 3 次收集数据的平均数。

1.3.4 成膜溶液和复合薄膜的制备

SA/TP 成膜液的制备:首先称取 2 g 的 SA 溶解至 100 mL 去离子水中,60 ℃ 搅拌 2 h 至溶液透明无气泡,配制成 2 wt.% 的 SA 溶液。然后再称取 2 g TP 溶解至 SA 溶液中混合均匀,再向其中加入质量分数为 1% 的甘油,搅拌均匀后得到 SA/TP 混合膜液备用。

SA/TP/LNP 成膜液的制备:将 SA/TP 混合膜液与一定量的质量分数为 1% LNP 混合,将其混合均匀。最后,将成膜液浇注至丙烯酸板上,铺平,60 ℃ 干燥 48 h 成膜。根据 LNP 加入量(相对于 SA/TP 的质量分数),分别为质量分数 1%、3% 和 5%,将复合膜命名为:SA/TP/LNP-1、SA/TP/LNP-3 和 SA/TP/LNP-5。

1.3.5 复合膜测试及表征

1.3.5.1 复合膜的 SEM 表征

将复合膜裁剪成适当大小的样条,喷金处理后,采用扫描电镜(ZEISS Sigma300)对膜的表面形貌进行检测。

1.3.5.2 复合膜的透光率测试

将复合膜的尺寸裁剪为 10 mm×40 mm 的矩形,用紫外-可见分光光度计在 200~800 nm 波长范围内测量其透射光谱,空白比色皿作对照。

1.3.5.3 热重分析

称取适量复合膜样品,在氮气气氛下,以 10 ℃/min 的升温速率从室温升至 600 ℃,测定复合膜的热稳定性。

1.3.5.4 红外分析

用红外光谱仪测量了薄膜的红外光谱,分析了 LNP、TP 与 SA 基质之间的相互作用,扫描范围为 4 000~500 cm⁻¹。

1.3.6 复合膜理化检测指标测定

1.3.6.1 厚度

使用数字测微计在薄膜样品上随机选取 10 个位置,测量膜的厚度。

1.3.6.2 水分含量、水溶性测定

根据 Chen 等^[13]的方法, 稍作修改。将薄膜分成 20 mm×20 mm 的正方形, 然后称初始质量, 在 105 ℃ 条件下干燥得到的薄膜, 直到得到恒定的质量, 参照式 (1) 计算含水率。将薄膜完全干燥, 然后在室温下用 50 mL 蒸馏水浸泡 24 h。然后将溶胀的薄膜从溶液中取出, 在 105 ℃ 条件下干燥, 直到获得恒定的质量, 并使用式 (2) 计算水溶性 (%) :

$$B_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B_1 ——水分含量 (WC), %;

B_2 ——水溶性 (WS), %;

m_0 ——初始薄膜的质量, g;

m_1 ——干燥后薄膜的干质量, g;

m_2 ——溶胀后薄膜的干质量, g。

1.3.6.3 力学性能

将薄膜切成 100 mm×10 mm 的矩形, 用自动拉伸试验机测定其抗拉强度 (TS, MPa)、断裂伸长率 (EB, %)。初始夹紧距离为 50 mm, 夹紧速度为 1 mm/s。

1.3.6.4 水蒸气透过率

将含无水氯化钙 (粒径小于 2 mm) 的薄膜 (60 mm×60 mm) 固定在试验杯口, 氯化钙与杯口的距离小于 6 mm。称重试验杯放入饱和氯化钠溶液 (25 ℃, 75% 相对湿度) 干燥器中, 保持膜内外一定的蒸汽压差。取下试验杯, 定期称重, 直到质量变化小于 0.001 g。每个实验重复 3 次。WVP 计算公式如下:

$$B_3 = \frac{m \times L}{A \times t \times (p_2 - p_1)} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

B_3 ——水蒸气透过率 (WVP), %;

m ——测试过程中水的质量变化, g;

L ——薄膜样品厚度, mm;

A ——称量瓶口面积 m^2 ;

t ——测试时间, s;

p_2 ——水在 20 ℃ 下的水蒸气分压 2.337 kPa;

p_1 ——硅胶干燥器中的水蒸气分压 0.028 kPa。

1.3.7 复合膜防雾性能测定

根据杨龙^[14]的方法并稍作修改测定复合膜防雾性能。

热防雾试验: 在盛有 50 ℃ 水 (约 60 mL) 的烧杯上覆盖复合膜, 置于 50 ℃ 水浴中, 分别在 0、60 和

120 min 时观察膜表面的起雾情况, 评价其热防雾性能。

冷防雾试验: 在烧杯上盖上复合膜, 于 -20 ℃ 下放置 2 h, 后在室温 (25 ℃) 下放置 30 s, 观察薄膜表面的起雾情况, 评价其冷防雾性能。

1.3.8 复合膜的抗菌性能测定

将适量复合膜浸入液体培养基 (20 mL) 中, 接种 500 μL 的 *E. coli* 或 *S. aureus* 悬浮液 (10^8 CFU/mL), 在恒温摇床 (150 r/min, 37 ℃) 中培养 12 h, 取样, 稀释至适当浓度后均匀涂于培养基中, 计数。按式 (4) 计算抑菌率。

$$D = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

D ——抑菌率 (AR), %;

N_0 ——对照组平板上的菌落数, 个;

N_1 ——添加复合膜样品组平板上的菌落数, 个。

1.3.9 复合薄膜的抗氧化性能测定

为了提高实验的可靠性, 同时测定了复合膜的 ABTS⁺ 和 DPPH 自由基清除率。称取 0.1 g 复合膜样品加入装有蒸馏水的锥形瓶中, 在 25 ℃ 磁力搅拌 (150 r/min) 24 h, 直至完全溶解备用。将浓度为 1 mmol/L 的 1 mL DPPH 甲醇溶液与 3 mL 复合膜液充分混合, 室温下避光保存 30 min, 进行抗氧化活性测试。然后用紫外分光光度计在 517 nm 处测定混合物的吸光度。以甲醇作为空白对照测定吸光度。DPPH 自由基清除率按式 (5) 计算。

$$R_{\text{DPPH}} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

R_{DPPH} ——DPPH 自由基清除率, %;

A_{sample} ——样品的吸光度;

A_{control} ——对照组的吸光度。

ABTS⁺ 自由基清除率测定根据 Yuan 等^[15]方法并稍作修改。将 1.0 mL 洗脱液和 2.0 mL ABTS 反应溶液混合, 以 50% (ϕ) 乙醇作为空白对照, 室温避光反应 1 h。用紫外-可见分光光度计测定混合溶液在 734 nm 波长处的吸光度。按式 (6) 计算 ABTS⁺ 自由基清除率。

$$R_{\text{ABTS}} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

R_{ABTS} ——ABTS⁺ 自由基清除率, %;

A_{sample} ——样品的吸光度;

A_{control} ——对照组的吸光度。

1.3.10 辣椒样品处理

将挑选的成熟度一致、颜色均一大小均匀、无病虫害、无腐烂变质和机械损伤的樟树港辣椒用去离子水洗净沥干后,在 75% (φ) 酒精溶液中浸泡 5 min,消毒。去除表面的土壤和微生物。浸泡后,用超纯水冲洗辣椒,擦去表面多余的水分。然后将所有辣椒随机分为 5 组,将其分别置于食品级聚丙烯保鲜容器中,分别为空白对照 (CK)、PE 膜、SA 膜、SA/TP 膜和 SA/TP/LNPs-5 复合膜,每组 20 个。其中,对照组没有接受任何处理,而其余组则用不同的薄膜包装辣椒于室温 ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) 下贮藏 10 d,每 2 d 从每组中随机抽取 3 个辣椒进行各种指标的测定。

1.3.11 失重率的测定

失重率按照公式 (7) 进行计算

$$X = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

X ——失重率, %;

m_0 ——辣椒处理前的初始质量, g;

m_1 ——辣椒浸泡并放置数日后的质量, g。

1.3.12 可溶性固形物测定

使用 PAL-BX/ACID1 糖度计测定果实可溶性固形物含量,可溶性固形物用 % 表示。

取不同处理组的辣椒榨取成汁,随后转入 10 mL 离心管中,在 4°C 、 $7\,000\times g$ 转速下离心 5 min 准确吸取 20 μL 上清液进行测定。

1.3.13 维生素C的含量测定

维生素 C 的含量采用 2,6-二氯吲哚酚滴定法测定。

1.4 数据统计与分析

所有实验重复 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析,Origin 8.5 作图。

2 结果与讨论

2.1 木质素纳米颗粒的结构形态

为了研究所制备的 LNPs 的形貌和尺寸,采用 SEM 和纳米粒径测定仪分别对 LNPs 形貌和粒径尺寸进行表征,其结果如图 1 所示。SEM 图像显示,制备的木质素产物为纳米级颗粒,呈现为球型和颗粒状的结构特征。Liu 等^[16]使用该方法制备的木质素纳米颗粒也为球型纳米颗粒,本实验与其研究结果一致。其中 1-LNPs 的平均粒径最小为 98.33 nm, 5-LNPs 的平均粒径最大为 150 nm。

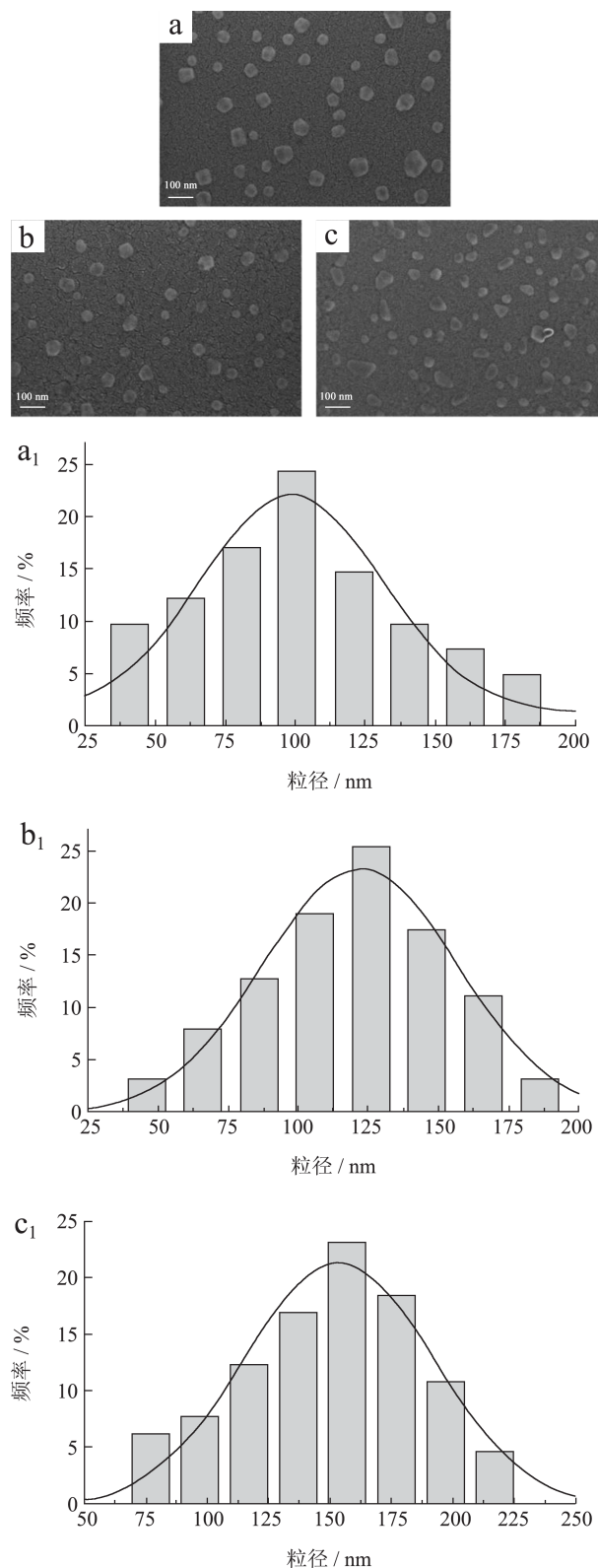


图 1 不同质量分数的 LNPs 的微观形貌和粒径分布

Fig.1 Microscopic morphology and particle size distributions of different concentration of LNPs

注: a~c 分别为 1-LNPs、2-LNPs、3-LNPs。

2.2 复合膜形貌表征结果

由于 LNPs 以及 TP 呈棕色,因此,由 LNPs 和

TP 材料制备而成的复合膜也呈现棕色。由图 2 可知，随着 LNP_s 含量的增加，复合膜的外观也从浅棕色变为深棕色，其透明度也随之降低。图 3 是 SA/TP/LNP_s 复合膜的 SEM 图。由图可以看出：SA 膜具有光滑且连续的表面，添加 LNP_s 和 TP 后，SA/TP/LNP_s 复合膜表现出较为均匀且连续的表面，没有大规模的团聚现象，表明 LNP_s 和 TP 在 SA 中具有良好的分散性，没有发生相分离。LNP_s 和 SA 之间没有出现孔隙和裂缝，表明良好的界面连接可以作为载荷传递的桥梁，减少应变下的应力集中，从而提高了抗菌复合膜的韧性和延展性^[17]。

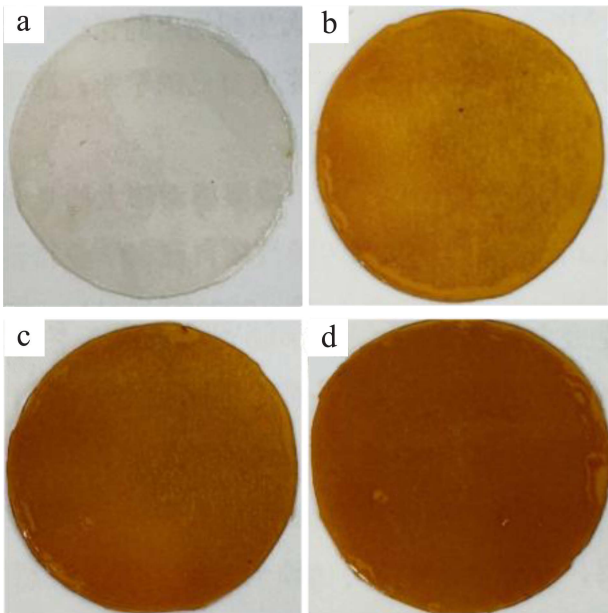


图 2 SA/TP/LNP_s 复合膜外观照片

Fig.2 Appearance of SA/TP/LNP_s composite films

注：a 为对照组薄膜，b~d 木质素纳米颗粒的添加量分别为 1%、3%、5%。

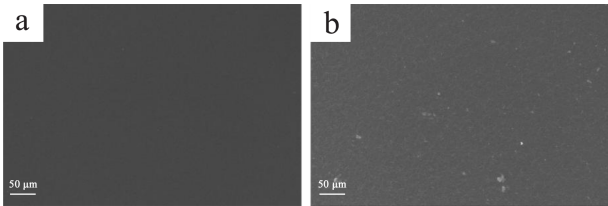


图 3 SA/TP/LNP_s 复合膜的表面图

Fig.3 Surface diagram of SA/TP/LNP_s composite films

注：a 为对照组薄膜；b 为木质素纳米颗粒添加量 5%。

2.3 复合膜的透光率测试

为了防止在运输或储存过程中因紫外线照射而造成营养物质的损失和食品的变质，制备具有防紫外线性能的薄膜是食品包装的一个关键考虑因素。不同薄膜的紫外可见光谱如图 4 所示。SA 薄膜和 PE 薄膜对

可见光和紫外光的阻隔性能都较差，可见光透过率在 80% 以上。与 SA 薄膜相比，SA/TP/LNP_s 复合膜几乎完全屏蔽了 UVB (320~275 nm) 和 UVC (275~200 nm) 以及大部分 UVA (400~320 nm) 的光谱。即使是 LNP_s 的添加量较少，也能显著增强复合膜的紫外线屏蔽性能。Aadil 等^[18] 也发现掺入木质素的薄膜在 280 和 350 nm 的波长下表现出更高的紫外光吸收能力，这种优异的紫外阻隔性能主要归因于 LNP_s 结构中苯丙烷侧链的羰基或苯环共轭双键对紫外线良好的吸收作用^[19,20]。

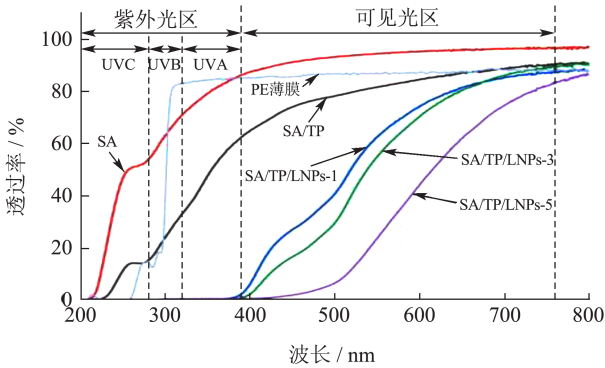


图 4 SA/TP/LNP_s 复合膜的透光率

Fig.4 Light transmittance of SA/TP/LNP_s composite films

2.4 复合膜热稳定性分析

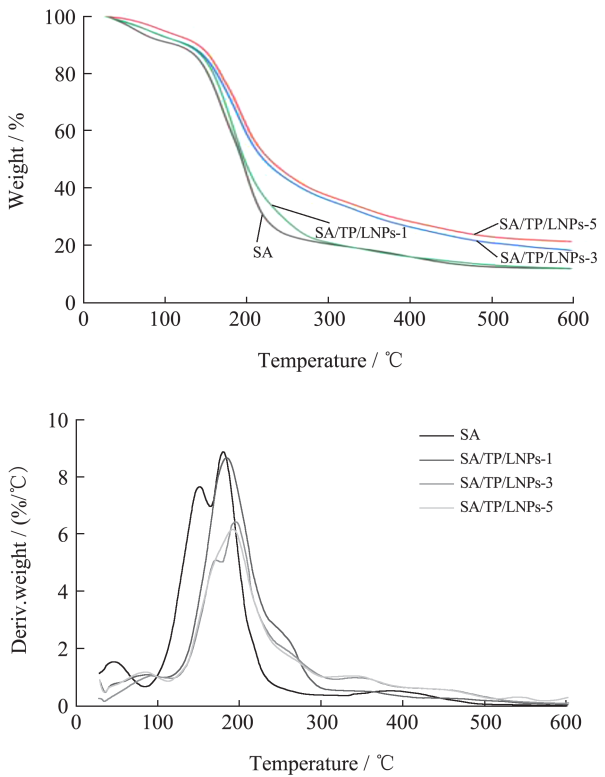


图 5 SA/TP/LNP_s 的 TG 和 DTG 曲线图

Fig.5 TG and DTG curves of SA/TP/LNP_s composite films

热稳定性对于包装应用中使用的材料非常重要^[21]。因此,对几种薄膜的热稳定性进行了研究。薄膜的TG-DTG曲线如图5所示。大约在温度60~150℃时观察到第一次失重,可能是由于薄膜中存在水分。第二阶段的失重约150~300℃,这可能与甘油和SA的分解有关^[21]。在300~450℃温度下观察到的第三阶段失重归因于木质素分子的降解。SA薄膜的最大热分解温度为179.5℃,随着LNPs和TP的加入,复合膜的最大热分解温度被提高,分别为183.2、190.3和193.4℃。结果表明TP和LNPs的加入具有提高复合薄膜热稳定性的能力。

2.5 复合膜红外光谱分析

图6为几种薄膜的红外吸收光谱。SA的特征峰分别位于3300、1596 cm⁻¹分别归因于O-H的对称和不对称振动,及-COOH的不对称与对称伸缩振动峰,与SA相比,随着TP的加入,SA/TP复合膜的吸收峰强弱不同并发生偏移,原因为TP与SA中的-COOH发生了结合或分子间氢键作用,导致吸收峰出现不同程度减弱并偏移^[1]。氢键的存在使膜基质间保持良好的相容性^[22]。Pinzon等^[23]也发现,多糖与酚类物质间形成的强氢键能够改变多糖之间的原始化学键力,从而将吸收频率转移到较低的波数。同时氢键的存在对复配体系起到了非常重要的增容作用,使膜基质间保持良好的相容性。随着LNPs的引入,复合膜O-H振动峰从3430 cm⁻¹逐渐转移到3254 cm⁻¹,而C-H的伸缩振动峰从2925 cm⁻¹移至2938 cm⁻¹ C-O的伸缩振动峰则从1033 cm⁻¹偏移到了1027 cm⁻¹这表明LNPs与SA以及TP之间发生相互作用形成了新的分子键或分子内氢键。1033 cm⁻¹归属于LNPs中的C-O拉伸震动,SA/TP/LNPs中此处峰的强度变弱,可能是因为复合膜中氢键的增强(如木质素、SA、TP之间的氢键)或者木质素中芳香环和非极性烃的疏水作用的增加而导致的^[24]。

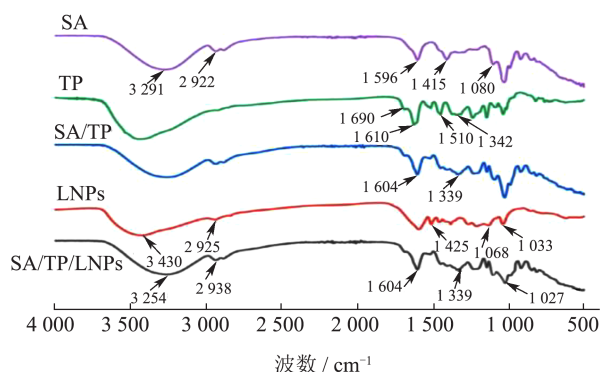


图6 SA/TP/LNPs复合膜及其单体物质的FT-IR

Fig.6 FT-IR of SA/TP/LNPs composite films and its monomer

2.6 膜的物理性能分析

薄膜的厚度直接影响膜的理化性能,同时对薄膜的TS、EB也有直接影响。表1显示制备的不同配比的SA/TP/LNPs复合膜的厚度无显著性差异($P>0.05$),在0.090~0.093 mm之间。与SA薄膜相比,随着TP以及LNPs的加入,复合膜的厚度会增加。PE薄膜的厚度为0.089 mm,不同配比的SA/TP/LNPs复合膜的厚度与PE薄膜无显著性差异($P>0.05$)。

如表1所示,SA薄膜的含水率显著高于其他复合膜,随着TP的加入,SA/TP复合膜的含水率下降至47.20%,其原因为:水分子与SA基体之间的连接键被TP与SA基体之间新的氢键相互作用破坏,从而使水分子离开基体,共混膜的含水率减少^[18],当引入LNPs后,SA/TP/LNPs复合膜的含水率大大降低,SA/TP/LNPs-5的含水率最低为31.06%,其次是SA/TP/LNPs-3(34.72%)和SA/TP/LNPs-1(36.81%)。可能是因为,LNPs的加入占据了一定的SA分子链间的空体积,使得水分子难以进入。同时加入的LNPs与SA形成了氢键网络,使得与其结合的水分子量减少,同时,这种强相互作用拉近了分子间的距离,从而进一步限制了水分子在薄膜中的溶解与扩散^[25,26]。整体而言,复合膜的含水率随着LNPs含量的增加呈逐渐降低趋势。Aadil^[18]等也发现,不含木质素的海藻酸盐膜的含水率显著高于添加木质素的海藻酸盐膜($P<0.05$)。

如表1所示,在所有制备的膜中,SA薄膜在室温下的溶解性最高(79.62%),这是由于SA和甘油的亲水性所导致。添加LNPs以及TP后,复合膜的水溶性显著降低($P<0.05$)。SA/TP/LNPs-5的溶解度最低为44.54%,其次是SA/TP/LNPs-3(54.29%)和SA/TP/LNPs-1(62.42%)。复合膜较高耐水性表明木质素的酚类化合物与亲水部分海藻酸钠的交联和混溶。

水蒸气透过率是环境大气水汽向薄膜另一侧转移的重要指标,会影响包装产品的保质期。复合膜的WVP数据如表1所示,SA薄膜的水蒸气透过率最高为0.10%,SA的亲水性使得复合膜的阻隔性变差,SA/TP/LNPs复合膜的WVP显著低于SA薄膜以及PE薄膜($P<0.05$),其中SA/TP/LNPs-5的WVP最低为0.03%。主要原因为LNPs的加入产生了疏水膜表面,从而减少了水蒸气在膜上的吸附与穿透。LNPs与SA之间的强相互作用形成了紧密纠缠的致密薄膜结构,也增加了薄膜网络的空隙扭曲度,使得水蒸气难以在薄膜中扩散。其次TP存在大量酚羟基等活性基团,削弱了海藻酸钠膜溶液分子间的氢键,降低膜对水蒸气的亲和性^[27],所以LNPs的加入显著降低了基础膜的WVP。

表 1 7种膜材料的物理性能
Table 1 Physical properties of 7 kinds of membrane materials

膜材料	厚度/mm	水分含量/%	水溶性/%	WVP/%	TS/MPa	EB/%
SA	0.085 0 ± 0.002 ^b	54.83±1.3 ^a	79.62±1.44 ^a	0.10 ± 0.003 ^a	3.00 ± 0.49 ^a	252.35 ± 5.48 ^a
SA/TP	0.087 0 ± 0.005 ^{ab}	47.20±1.7 ^b	72.00±1.12 ^b	0.084 ± 0.005 ^b	3.55 ± 0.06 ^b	221.63 ± 19.05 ^b
SA/TP/LNPs-1	0.090 0 ± 0.003 ^{ab}	36.81±1.13 ^c	62.43±1.66 ^c	0.05 ± 0.004 ^c	3.91 ± 0.15 ^b	178.39 ± 3.78 ^c
SA/TP/LNPs-3	0.092 7 ± 0.001 ^a	34.72±0.98 ^d	54.29±1.321	0.04 ± 0.003 ^c	5.33 ± 0.48 ^c	152.35 ± 5.48 ^d
SA/TP/LNPs-5	0.093 0 ± 0.001 ^a	31.06±1.28 ^e	44.54±1.91 ^e	0.03 ± 0.002 ^c	6.44 ± 0.29 ^d	131.69 ± 4.97 ^e
PE 薄膜	0.089 7 ± 0.001 ^{ab}	0.95±0.01 ^f	0.77±0.01 ^f	0.06 ± 0.02 ^d	13.80 ± 1.43 ^e	380.00 ± 20.66 ^e

注：同列数据后小写字母完全不同的，表示各组间差异显著（ $P<0.05$ ），有任何相同小写字母的表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。

食品包装材料应具有良好的机械性能以适应食品包装的要求，机械性能是确定活性包装膜结构完整性的一个不可或缺的参数。如表 1 所示，SA 薄膜具有较高的断裂伸长率（EB）和较低的拉伸强度（TS），随着 TP 的加入，复合膜 SA/TP 的拉伸强度有所提高，Chen 等^[28]制备的普鲁兰 / 羧化纤维素纳米晶 / 茶多酚生物纳米复合膜发现，随着 TP 的加入，复合膜的拉伸强度从 25.28 MPa 增加到 39.07 MPa。断裂伸长率降低。这可能是由于 TP 诱导的交联效应影响了 SA 的网络结构^[29]。这导致在 TP 作用下多糖分子之间的空隙减少，因此 TP/SA 网络结构更加紧密，膜的刚度得到了提高，而韧性则相应减弱。当引入 LNPs 后，复合膜 SA/TP/LNPs-3 和 SA/TP/LNPs-5 的 TS 远大于海藻酸钠及其他复合膜，分别为 5.33、6.44 MPa，说明 LNPs 的加入显著提高 SA 基薄膜的拉伸强度，降低断裂伸长率，可能是因为随着木质素纳米颗粒含量的继续增加，发生团聚，使得力学性能有所下降，但聚集在一起的分子间产生了较强的结合力，使得分子间的刚性增加，弹性减小，从而增强了复合膜的拉伸强度。

2.7 复合膜防雾性能分析

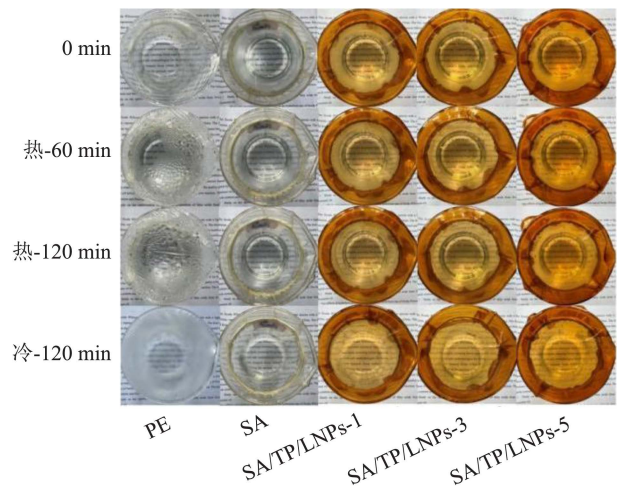


图 7 SA/TP/LNPs 复合膜防雾性能
Fig.7 Anti-fog performance of SA/TP/LNPs composite films

由于环境温度的变化，包装材料表面会发生雾化，水分子会在材料表面凝结形成水滴。雾滴的形成会引起微生物的生长，因此要求包装材料具有良好的抗雾性能^[30,31]。如图 7 所示，水浴 60 和 120 min 时，液滴在 PE 薄膜表面聚集，背景文字变得模糊，然而，SA/TP/LNPs 复合膜表面没有形成水滴，表明其具有良好的疏水性、吸水性和抗雾性。在相同水浴时间下，SA/TP/LNPs 复合膜的透明度高于 SA 薄膜。对于低温防雾，PE 薄膜表面从 -20 ℃ 转移到室温时迅速雾化。复合薄膜表面未形成雾滴，具有良好的抗冷雾性能。

2.8 复合膜的抗菌性能结果分析

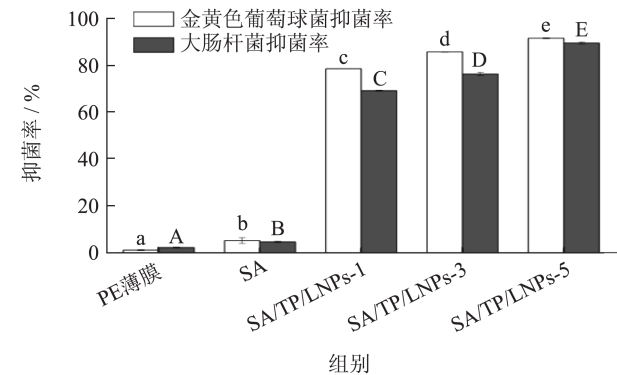


图 8 SA/TP/LNPs 复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌性能

Fig.8 Antibacterial activity of SA/TP/LNPs composite membrane against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*

注：小写字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下图同。

图 8 显示了 SA/TP/LNPs 复合膜对 *S. aureus* 和 *E. coli* 抗菌活性。与 SA 薄膜和 PE 薄膜相比，SA/TP/LNPs 复合膜的有较好的抑菌效果，其中，复合膜 SA/TP/LNPs-5 的抑菌效率最好，其对 *S. aureus* 的抑菌率为 91.28%、对 *E. coli* 的抑菌率为 89.20%，一方面是因为 TP 通过破坏菌体细胞膜结构，干扰菌体 DNA 的正常功能，阻碍菌体蛋白质的合成和表达，另一方面是因为 LNPs 的酚羟基，可导致细胞膜周围形成低 pH 环境，干扰并破坏细胞膜的质子运动，致使细胞膜

破裂和溶解^[32]。Zhang 等^[6]也报道了类似结果,发现果胶-LNP 复合膜显著降低了细菌的生长速度,并与 LNP 含量呈一定的依赖关系,表明 LNP 的添加增强了复合膜的抗菌活性。将 LNP 和 TP 添加到薄膜中提高了复合膜的抗菌活性,使其具有显著的抑菌效果,可应用于食品包装材料。

2.9 复合薄膜的抗氧化性能结果分析

测定了七种薄膜的 DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力,结果如图 9 所示可以看出,SA/TP/LNPs 复合膜对自由基清除能力及总抗氧化能力均好于 SA 薄膜、SA/TP 薄膜和 PE 薄膜,随着复合薄膜中 LNPs 含量的提高复合薄膜对自由基的清除能力逐渐增强其原因一是由于木质素中存在大量的酚类结构,它们可以作为抗氧化剂,阻止或延缓自由基等氧化物诱导的氧化过程^[33]。二是由于 TP 与天然抗氧化物质以一定比例复配,自由基清除能力存在协同增效作用^[22]。DPPH 自由基清除能力与 ABTS⁺ 自由基清除能力数据遵循相同趋势,二者可相互验证。

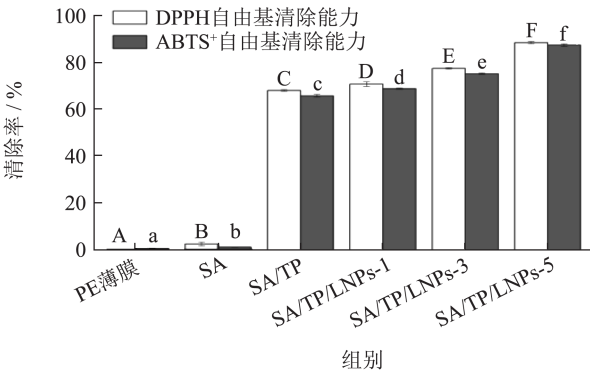


图 9 SA/TP/LNPs 复合膜的抗氧化活性

Fig.9 Antioxidant activity of SA/TP/LNPs composite membrane

2.10 复合膜对辣椒外观影响

在 10 d 的贮藏期内,每隔两天拍摄每组辣椒,记录其外观随贮藏时间的增加而发生的变化,如图 10 所示,CK 组的辣椒在第 6 天时开始出现腐烂情况,第 10 天时腐烂情况严重并伴有转红现象,这与叶绿素的损失有关,薄膜组中,PE 薄膜组的辣椒在第 8 天出现褶皱,第 10 天部分出现了腐烂情况,相比之下,SA/TP/LNPs-5 复合膜组辣椒颜色变化不明显,表现出良好的保鲜性能。与 Lan 等^[34]评价的聚乙烯醇 / 茶多酚复合膜类似,他们发现含 TP 的包装材料可以作为物理屏障,保持草莓周围的水分和蒸汽压,防止水分流失和质量损失。此外,TP 的抗菌特性可以抑制草莓霉害,延缓草莓的病理性脱水。

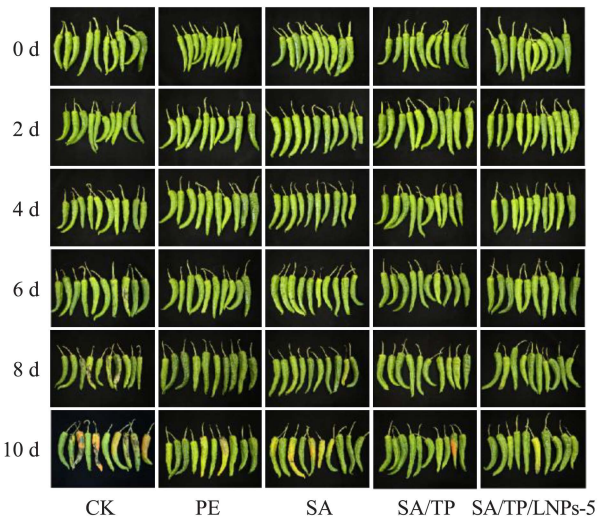


图 10 不同处理组对辣椒外观的影响

Fig.10 Effect of different treatment groups on the appearance of papper

2.11 复合膜对辣椒失重率的影响

失重率是评价辣椒保鲜应用效果的重要指标之一。随着贮藏时间的延长,辣椒失重率与腐烂率逐渐升高。在整个贮藏期间,SA/TP/LNPs 复合薄膜组和 SA/TP 复合薄膜组失重率上升幅度均低于 CK 和 PE 组。果蔬在采收后由于蒸腾作用和呼吸作用不断消耗体内营养成分,因此随着贮藏期时间的增加,会出现失水萎蔫的现象,导致辣椒质量下降^[12,35]。由图 11 可知,第 10 天时,SA/TP/LNPs-5 复合膜组辣椒失重率为 10.35%,与 PE 薄膜 (17.00%)、CK (20.67%)、SA/TP 复合膜 (14.83%) 组相比分别降低了 39.12%、49.93% 和 30.88%,均呈显著性差异 ($P<0.05$)。可能由于能抑制果实的呼吸作用和失水,从而降低其失重率。

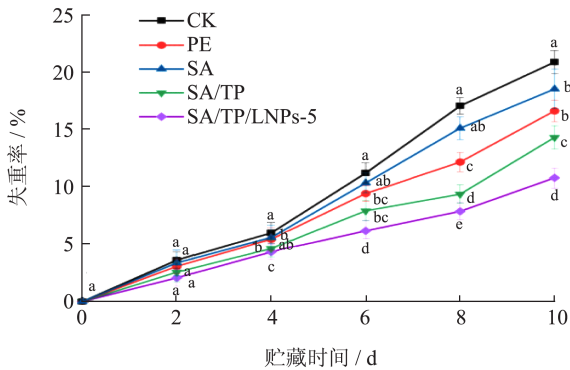


图 11 辣椒贮藏过程中失重率变化

Fig.11 Change of weight loss rate of pepper during storage

2.12 复合膜对辣椒可溶性固形物的影响

果蔬在贮藏过程中会消耗可溶性固形物,其含量高低可直接反映果蔬的贮藏性^[36]。如图 12 所示,贮藏

过程中各组辣椒可溶性固形物含量均持续降低。其中, CK 组辣椒可溶性固形物含量下降速度最快, PE 薄膜组辣椒可溶性固形物其在整个贮藏过程中均低于 SA/TP/LNPs-5 复合膜组和 SA/TP 复合膜组。同其他薄膜组相比, SA/TP/LNPs-5 复合薄膜组可溶性固形物含量维持在较高左右, 在贮藏第 10 天时含量为 5.0%, 较贮藏前降低了 16.67%。

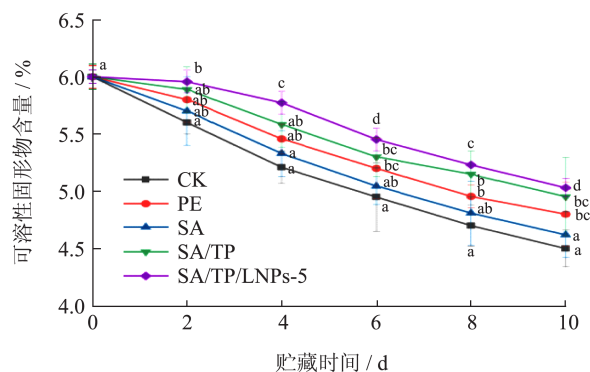


图 12 辣椒贮藏过程中可溶性固形物含量变化

Fig.12 Change of soluble solid content in pepper during storage

2.13 复合膜对辣椒Vc的影响

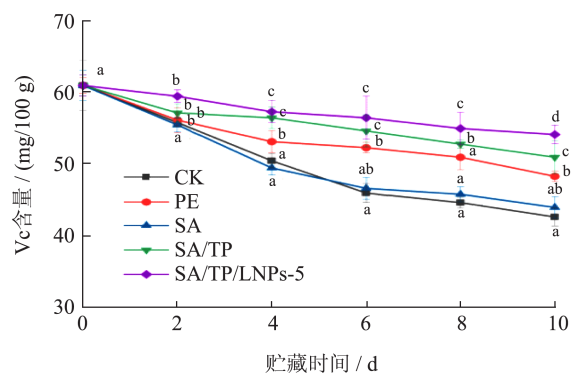


图 13 辣椒贮藏过程中 Vc 含量变化

Fig.13 Changes of Vc content in pepper during storage

Vc 含量是评价辣椒贮藏品质的重要指标之一。在贮藏期间, 辣椒的 Vc 含量总体呈下降趋势。由图 13 可知, 在贮藏过程中如果不进行保鲜处理 (CK 组), 辣椒的 Vc 含量从 61 mg/100 g 下降到 42.67 mg/100 g。PE 薄膜和复合薄膜组均能减缓辣椒 Vc 含量的下降。贮藏第 2 天时, SA/TP/LNPs-5 复合膜组 (59.50 mg/100 g)、SA/TP 复合膜组 (57.17 mg/100 g) 与 PE 组 (56.17 mg/100 g) 的 Vc 含量相差不大 ($P>0.05$)。贮藏到第 10 天时, SA/TP/LNPs-5 复合膜组和 SA/TP 复合膜组两组辣椒的 Vc 含量分别达到了 54.17 mg/100 g 和 51.17 mg/100 g, 比 PE 薄膜组 (48.50 mg/100 g) 辣椒的 Vc 含量高 10.47% 和 5.21%, 并呈显著性差异 ($P<0.05$)。TP 和 LNPs 均有良好的抗氧化性能, 二者相结合制备的

SA/TP/LNPs-5 复合膜抗氧化能力更加优异, 能延缓辣椒中 Vc 的消耗, 有效延长辣椒的贮藏期。Ye 等^[37]也报道了类似的结果, 他们发现含有 TP 的聚乳酸/壳聚糖/茶多酚复合膜可以显著降低樱桃的腐烂率和品质损失率。此外, 因为抗氧化物质 TP 能够清除水果中的自由基, 从而减少 Vc 的消耗保持了樱桃的质量, 延长了保质期。

3 结论

本文研究了 LNPs 浓度对复合膜的理化特性、抑菌和抗氧化性的影响并将复合膜应用于辣椒保鲜。LNPs 的掺入有效降低多糖膜的 WVP、溶解性及含水量, 其对复合膜的机械性能有明显改善作用同时也增加了复合膜的热稳定性能, 与 SA 薄膜相比复合膜 SA/TP/LNPs-5 的水溶性及含水率显著降低 ($P<0.05$) 分别从 79.62%、54.83% 降低到 31.06% 和 44.54% 同时, 复合膜的拉伸性能有着显著提升 ($P<0.05$) 其拉伸强度从 3.00 MPa 提高到 6.44 MPa。与 PE 薄膜相比, SA/TP/LNPs 复合膜具有良好的紫外吸收能力、防雾性能、抑菌性能和抗氧化性能, 保鲜实验表明, 与 CK 组和 PE 薄膜组相比, SA/TP/LNPs-5 复合膜包装的辣椒在贮藏 10 d 后仍保持新鲜, 其 Vc 含量保持在较好水平 (54.17 mg/100 g), 贮藏第 10 天时, 其失重率分别降低了 49.93%、39.12%, ($P<0.05$)。因此本实验制备的 SA/TP/LNPs 复合薄膜有望应用于食品保鲜。

参考文献

- [1] LU M, LIU D, SHI Z, et al. Nutritional quality and health risk of pepper fruit as affected by magnesium fertilization [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(2): 582-592.
- [2] DENG Y, HUANG G, ZHAO W, et al. A self-matching, ultra-fast film forming and washable removal bio-crosslinked hydrogel films for perishable fruits [J]. Carbohydr Polym, 2021, 267: 118177.
- [3] 曾士义. 木质素纳米颗粒的绿色制备及其在活性包装中的应用研究[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2023.
- [4] JI M C, LI J Y, LI F Y, et al. A biodegradable chitosan-based composite film reinforced by ramie fibre and lignin for food packaging [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 281: 119078.
- [5] 何琪, 陈凯, 万周原野, 等. 纳米木质素颗粒-海藻酸钠复合膜的制备[J]. 大连工业大学学报, 2022, 10(20): 6002-6008.
- [6] ZHANG S, CHENG X, FU Q, et al. Pectin-nanolignin composite films with water resistance, UV resistance, and antibacterial activity [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108783.
- [7] 王玥, 王建川, 朱贵萍, 等. 茶多酚可降解复合膜在食品保鲜中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 97-103.
- [8] ZHANG W, JIANG W. Antioxidant and antibacterial chitosan film with tea polyphenols-mediated green synthesis silver nanoparticle via a novel one-pot method [J]. International Journal of Biological

- Macromolecules, 2020, 155: 1252-1261.
- [9] FENG M, YU L, ZHU P, et al. Development and preparation of active starch films carrying tea polyphenol [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 162-167.
- [10] CHEN J, ZHENG M, TAN K B, et al. Development of xanthan gum/hydroxypropyl methyl cellulose composite films incorporating tea polyphenol and its application on fresh-cut green bell peppers preservation [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 211: 198-206.
- [11] 胡光耀,李滨丞,罗程印,等.植物提取液对辣椒采后病原菌抑制及对根霉病抗性诱导作用[J].食品科学,2019,40(9):234-240.
- [12] 易有金,何心,罗程印,等.丁香-肉桂提取液复合涂膜剂对辣椒的采后保鲜作用[J].现代食品科技,2022,38(10):141-147.
- [13] CHEN F, LI S, ZHONG G, et al. Properties of novel chitosan incorporated with hexahydro- β -acids edible films and its effect on shelf life of pork [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 947-955.
- [14] 杨龙.具有防雾、遮光功能的PET复合膜的制备与性能研究[D].天津:天津工业大学,2021.
- [15] YUAN B, AO Y X, TANG Q, et al. Enhanced performance and functionality of active edible films by incorporating tea polyphenols into thin calcium alginate hydrogels [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105197.
- [16] LIU X, XIE M, HU Y, et al. Facile preparation of lignin nanoparticles from waste *Camellia oleifera* shell: The solvent effect on the structural characteristic of lignin nanoparticles [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 183: 114943.
- [17] BONG S S, JIAN Z, JAN E, et al. Multiparameter structural optimization of single-walled carbon nanotube composites toward record strength, stiffness, and toughness [J]. Acsnano, 2009, 16(19): 1711-1722.
- [18] AADIL K R, PRAJAPATI D, JHA H. Improvement of physico-chemical and functional properties of alginate film by Acacia lignin [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2016, 10: 25-33.
- [19] QIAN Y, QIU X, ZHU S. Sunscreen performance of lignin from different technical resources and their general synergistic effect with synthetic sunscreens [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(7): 4029-4035.
- [20] QIU X, YU J, YANG D, et al. Whitening sulfonated alkali lignin via H_2O_2 /UV radiation and its application as dye dispersant [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 6(1): 1055-1060.
- [21] PATHAK T S, YUN J H, LEE J, et al. Effect of calcium ion (cross-linker) concentration on porosity, surface morphology and thermal behavior of calcium alginates prepared from algae (*Undaria pinnatifida*) [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(3): 633-639.
- [22] 蒋雨心,范方宇,杨晓玲,等.葡萄籽提取物-茶多酚对海藻酸钠纳米复合膜性能的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(13):108-115.
- [23] PINZON M I, GARCIA O R, VILLA C C. The influence of Aloe vera gel incorporation on the physicochemical and mechanical properties of banana starch-chitosan edible films [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(11): 4042-4049.
- [24] ZHANG S, HE Z, XU F, et al. Enhancing the performance of konjac glucomannan films through incorporating zein-pectin nanoparticle- stabilized oregano essential oil Pickering emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107222.
- [25] 周小燕.负载茶多酚脂质体的壳聚糖/细菌纤维素缓释包装膜的构建与应用[D].无锡:江南大学,2023.
- [26] HOU X, XUE Z, XIA Y, et al. Effect of SiO_2 nanoparticle on the physical and chemical properties of eco-friendly agar/sodium alginate nanocomposite film [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 125: 1289-1298.
- [27] 刘佳禾,王晨曦,张晟宝,等.茶多酚-壳聚糖活性保鲜膜的制备及其稳定性研究[J].农业技术与装备,2023,5(4):93-96.
- [28] CHEN F, CHI C. Development of pullulan/carboxylated cellulose nanocrystal/tea polyphenol bionanocomposite films for active food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 405-413.
- [29] WU H, LEI Y, ZHU R, et al. Preparation and characterization of bioactive edible packaging films based on pomelo peel flours incorporating tea polyphenol [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 41-49.
- [30] NIAN L, WANG M, WANG F, et al. Multifunctional material Cer@MHKUST-1 with efficient preservation capability [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 433: 133267.
- [31] RAZALI Z, SOMASUNDRAM C, NURULAIN S Z, et al. Postharvest quality of cherry tomatoes coated with mucilage from dragon fruit and irradiated with UV-C [J]. Polymers, 2021, 13(17): 2-13.
- [32] XU Y H, ZENG P, LI M F, et al. γ -Valerolactone/water system for lignin fractionation to enhance antibacterial and antioxidant capacities [J]. Separation and Purification Technology, 2021: 279: 119780.
- [33] ESPINOSA E, BASCÓN-VILLEGAS I, ROSAL A, et al. PVA/(ligno) nanocellulose biocomposite films. Effect of residual lignin content on structural, mechanical, barrier and antioxidant properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 141: 197-206.
- [34] LAN W, ZHANG R, AHMED S, et al. Effects of various antimicrobial polyvinyl alcohol/tea polyphenol composite films on the shelf life of packaged strawberries [J]. Lwt, 2019, 113: 108297.
- [35] HUNG D V, TONG S, TANAKA F, et al. Controlling the weight loss of fresh produce during postharvest storage under a nano-size mist environment [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 325-330.
- [36] WANG J, SUN X, ZHANG H, et al. Dual-functional intelligent gelatin based packaging film for maintaining and monitoring the shrimp freshness [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107258.
- [37] YE J, WANG S, LAN W, et al. Preparation and properties of polylactic acid-tea polyphenol-chitosan composite membranes [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 117: 632-639.