



刘孟莹,薛佳琳,槐笠翔,等. 板栗壳色素基活性包装膜的制备及其在草莓保鲜中的应用[J]. 轻工学报, 2026, 41(4): 44-56.
LIU M Y, XUE J L, HUAI L X, et al. Preparation of chestnut shell pigment-based active packaging films and their application in strawberry preservation[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(4): 44-56.
DOI: 10. 12187/2026. 04. 004

板栗壳色素基活性包装膜的制备及其在草莓保鲜中的应用

刘孟莹^{1,2}, 薛佳琳¹, 槐笠翔¹, 肖雨婷¹, 郭刚¹, 崔亚杰³, 王浩燃^{1,4}, 宋丽军^{4,5}

1. 河北科技师范学院 食品科技学院, 河北 秦皇岛 066600;
2. 商丘市产品质量检验检测中心, 河南 商丘 476000;
3. 河北科技师范学院 海洋学院, 河北 秦皇岛 066600;
4. 河北科技师范学院 板栗产业技术教育部工程研究中心, 河北 秦皇岛 066600;
5. 河北省天然产物活性成分与功能重点实验室, 河北 秦皇岛 066600

摘要:【目的】研究板栗壳色素(CSP)添加量对海藻酸钠/羧甲基纤维素(SA/CMC)包装膜理化特性、功能特性及草莓保鲜效果的影响。【方法】以CSP、SA、CMC为基质,采用流延干燥法制备活性包装膜,测定其理化特性、光学特性、抗氧化活性相关指标,对其结构进行表征,并将其应用于草莓保鲜。【结果】负载不同质量分数CSP包装膜的理化特性、光学特性和抗氧化活性存在显著差异。CSP与膜基质间相容性良好,它们之间主要通过分子间氢键和范德华力形成紧密的三维网络结构,从而提高膜的厚度、不透明度、拉伸强度和水蒸气透过率,并改善CO₂/O₂透过比。其中,添加3% CSP的包装膜(SA/CMC/CSP-3)综合性能最佳,其拉伸强度为32.79 MPa,断裂伸长率为31.40%,O₂透过率为 $18.79 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{Pa})$,CO₂透过率为 $1.51 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{Pa})$,CO₂/O₂透过比为8.04:1,更适合用于高呼吸强度的果蔬包装。此外,CSP的引入显著增强了膜的紫外线阻隔性能和抗氧化能力,SA/CMC/CSP-3和SA/CMC/CSP-5的DPPH自由基清除率分别为90.17%和93.67%,ABTS⁺自由基清除率分别为81.40%和98.58%。与SA/CMC包装的草莓相比,SA/CMC/CSP-3包装的草莓在贮藏第7 d的失重率和腐烂率分别降低了2.0%和17.0%。【结论】SA/CMC/CSP-3包装膜具有较好的理化特性、光学特性和抗氧化活性,能有效延缓草莓水分散失和腐败变质,表现出良好的保鲜效果。

关键词:板栗壳色素;海藻酸钠;活性包装膜;理化特性;功能特性;草莓保鲜

中图分类号:TS206.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)04-0044-13

0 引言

果蔬在采摘后的储运过程中,极易受机械损

伤、微生物侵袭、温度波动等外界因素的影响,发生其品质劣变和腐烂损耗,进而造成严重的经济损失,并带来食源性疾病风险^[1]。随着石油资源日渐

收稿日期:2025-10-23;修回日期:2025-12-15;出版日期:2026-08-15

基金项目:河北省重点研发计划项目(21326304D)

作者简介:刘孟莹(1989—),女,河南省商丘市人,河北科技师范学院硕士研究生,主要研究方向为食品加工及保鲜。E-mail: 1197518851@qq.com

通信作者:宋丽军(1982—),男,河北省保定市人,河北科技师范学院教授,博士,主要研究方向为农产品精深加工。E-mail: slj176@163.com

匮乏和白色污染加剧,可再生、可降解、功能型的生物活性包装膜已成为食品保鲜行业发展的新趋势^[2]。活性包装膜通过在基材中引入生物活性物质,赋予其抗氧化、抗菌等功能特性,从而有效延长食品货架期^[3]。例如,余冬青^[4]研究发现,负载橙皮苷的抗氧化活性包装膜能有效抑制鲜切石榴籽褐变,可延长货架期至 6 d。闵甜甜^[5]研究发现,负载百里香酚的普鲁兰多糖/聚乙烯醇抗菌纳米纤维膜可有效延缓草莓和葡萄的腐烂。于鑫森^[6]将负载玫瑰花色素与黑枸杞色素的活性包装膜分别应用于多浪羊肉、牛肉和鱼肉的保鲜,均表现出良好效果。这些生物基活性包装膜通常以生物聚合物为基质,常用材料包括蛋白质、多糖、脂质或其混合物。其中,基于多糖的可食用包装膜因具备更好的成膜性、机械性能及阻隔性能,已成为一种创新且可持续的食品包装解决方案^[3]。海藻酸钠(Sodium Alginate, SA)是一种从海藻中提取的线性天然高分子多糖,其结构和化学性质与细胞外基质相似,具有良好的分散性、保湿性、抗菌性、成膜性、降解性、透气性等,是制备活性包装膜的理想基质之一^[7]。羧甲基纤维素(Carboxymethyl Cellulose, CMC)是纤维素经醚化改性形成的一种阴离子型水溶性多糖,其价格低廉、无毒、可生物降解,已广泛应用于食品、医药、包装等领域。CMC 膜具有良好的透明度和柔韧性,但在高湿度环境中易吸湿膨胀,导致其阻隔性和稳定性降低^[8]。研究^[9]发现,SA 与 CMC 组成的二元共混膜相较于单一组分膜,具有更优越的物理性能。目前,已有研究将 SA、CMC 与其他大分子聚合物混合,以进一步增强包装膜的功能性。例如,Z. X. Gao 等^[10]制备了负载自组装橙皮苷纳米棒的 SA/CMC 膜,该膜具有优异的机械性能、抗氧化性能和抗菌性能,可有效延长红提葡萄的货架期。W. W. Tan 等^[11]研究发现,在 SA/CMC 膜中添加 6% 包埋肉桂醛的碳酸钙纳米粒子后,薄膜仍保持良好的光学性能、耐水性、水蒸气阻隔性和机械性能,并能有效抑制猪肉贮藏过程中的水分流失和微生物生长,使其货架期延长 2~4 d。

我国板栗产量位居世界前列,而板栗壳作为板栗深加工过程中的主要副产物,大多被直接废弃,

未能得到有效利用,也造成了严重的资源浪费和环境污染。板栗壳色素(Chestnut Shell Pigment, CSP)是从板栗壳中提取的一种天然棕色色素,水溶性和极性较强,对光、热、酸和碱的稳定性较好^[12]。本课题组前期研究^[13]发现,CSP 中含有多种多酚类物质,主要包括二氢山奈酚、儿茶素、原花青素 B2、原花青素 A2、鞣花酸、异鼠李素-3-O-葡萄糖苷等,具有良好的抗氧化性能。孙聪聪^[14]研究发现,CSP 可用于绿色合成银纳米材料,并能协同增强对大肠杆菌、白色念珠菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果。已有研究^[4-6]表明,将植物提取物添加到成膜基质中制备活性包装膜,可以显著改善包装膜的理化特性,并提升其抗氧化和抗菌活性,这已成为食品包装领域的研究热点。

鉴于此,本文以 CSP、SA 和 CMC 为基质,采用流延干燥法制备活性包装膜,考查添加不同质量分数(1%、3%和 5%)CSP 对活性包装膜的理化特性、光学特性、抗氧化性能及结构的影响,并进一步研究其对草莓的保鲜效果,以期绿色、安全、高效的生物活性包装材料的研发和应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

草莓,品种为丰香,于早上 5:00~6:00 手工采摘于河南省商丘市睢阳区双八镇草莓基地,均为果形端正、花梗完好、成熟度一致、无视觉缺陷和机械损伤的果实,采集后立即运往实验室开展实验;燕宝板栗壳,采集于秦皇岛市青龙县板栗产业技术教育部工程研究中心资源圃;SA(纯度 90%)、CMC(黏度 1000~1400 mPa·s)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH,纯度 96%)、2,2-偶氮-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(ABTS,纯度 98%)、甘油(纯度 99%)、K₂S₂O₈(纯度 99.5%),上海麦克林生化有限公司;甲醇、无水乙醇,天津市科密欧化学试剂有限公司。如无特别标注,上述试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

Z-S010 型超声波破碎仪,北京博创恒宇科技有限责任公司;RE52-99 型旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;SN-HWS-50R 型恒温恒湿箱,上海尚普

仪器设备有限公司;SL-MH-4型磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;CHY-CA型测厚仪、XLW(PC)型智能电子拉力试验机、WGT-S型透光率/雾度计,济南兰光机电技术有限公司;W401 L型水蒸气透过率测试仪、N500 L型压差法气体透过率测定仪,广州标记包装设备有限公司;DS-700C-2型分光测色仪,杭州彩谱科技有限公司;TU-1901型紫外分光光度计,北京普析仪器有限公司;ALPHA II紧凑型傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪,布鲁克(北京)科技有限公司;SU8010型扫描电子显微镜(SEM),日本日立有限公司;D/max-2500VK/PC型X射线衍射(XRD)仪,日本理学公司。

1.3 实验方法

1.3.1 CSP提取 参考Z. X. Li等^[13]的方法。将板栗壳烘干粉碎后过80目筛,称取5.0 g板栗壳粉末置于圆底烧瓶中,加入100 mL体积分数为50%的乙醇溶液,使用超声波破碎仪(600 W)于60℃条件下提取60 min,冷却至室温后,于5000 r/min条件下离心10 min,取上清液转移至另一圆底烧瓶中,经真空减压旋转蒸发后得到色素浓缩液,最后经冷冻干燥得到CSP,密封后于4℃保存,备用。

1.3.2 活性包装膜制备 1)SA/CMC包装膜制备。参考Z. X. Gao等^[10]的方法,并稍作修改。称取1.0 g SA和0.5 g CMC置于含有100 mL去离子水的锥形瓶中,密封后于50℃、800 r/min条件下磁力搅拌2 h,随后加入0.9 g甘油,继续搅拌0.5 h即得成膜溶液。取30 mL成膜溶液匀速浇筑到直径为100 mm的培养皿中,轻微振荡使其均匀且无气泡,然后置于35℃烘箱中干燥12 h,即得SA/CMC包装膜。

2)SA/CMC/CSP包装膜制备。参考Z. X. Gao等^[10]的方法,并稍作修改。分别称取1.0 g SA和0.5 g CMC,置于3个含有100 mL去离子水的锥形瓶中,密封后于50℃、800 r/min条件下磁力搅拌2 h。随后,在3个锥形瓶中分别加入相对于SA质量分数为1%、3%和5%的CSP并持续搅拌至CSP充分溶解后,加入0.9 g甘油,继续搅拌0.5 h即得成膜溶液。取30 mL成膜溶液匀速浇筑到直径为100 mm的培养皿中,轻微振荡使其均匀且无气泡,然后置于35℃烘箱中干燥12 h,即得SA/CMC/CSP

包装膜,分别命名为SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3和SA/CMC/CSP-5。

1.3.3 理化特性测定 1)厚度测定。参考M. Moghadam等^[15]的方法。首先将包装膜在23℃、相对湿度50%的恒温恒湿箱中静置24 h,随后使用精度为0.1 μm的测厚仪在膜表面随机选取10个点进行厚度测定,结果以平均值表示。

2)含水率测定。采用M. Moghadam等^[15]的方法。首先将包装膜裁剪成20 mm×20 mm的正方形,称量其初始质量并记为 m_1 (g),然后在105℃烘箱中干燥至恒重,此时质量记为 m_2 (g)。按下式计算含水率。

$$\text{含水率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

3)拉伸强度和断裂伸长率测定。参考M. Moghadam等^[15]的方法。首先将包装膜在23℃、相对湿度50%的恒温恒湿箱中静置24 h,随后将包装膜裁剪成100 mm×15 mm的长方形,使用0.5级精度的智能电子拉力试验机进行测定,测定速度为300 mm/min,夹具间距为50 mm。按下式计算拉伸强度和断裂伸长率。

$$\text{拉伸强度} = \frac{F}{b \times d}$$

$$\text{断裂伸长率} = \frac{L}{L_0} \times 100\%$$

式中, F 是包装膜断裂时承受的最大拉力/N, b 是包装膜的宽度/mm, d 是包装膜的厚度/mm, L 是包装膜断裂时的拉伸长度/mm, L_0 是初始夹距/mm。

4)水蒸气透过率测定。参考《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 红外检测器法》(GB/T 26253—2010)^[16],使用水蒸气透过率测试仪进行测定。实验条件为温度38℃、相对湿度90%、测试面积50.24 cm²。水蒸气透过率(Water Vapor Transmission Rate, WVTR)是在达到平衡状态的特定实验条件下,单位时间内透过包装膜单位面积的水蒸气量/(g·(m²·24 h)⁻¹),按下式计算。

$$\text{WVTR} = \frac{S \times (E_s - E_0)}{(E_R - E_0)} \times \frac{A_R}{A_s}$$

式中, S 是参考膜水蒸气透过率/(g·(m²·24 h)⁻¹), E_s 是包装膜测试稳定时电压/V, E_0 是零点漂移值

电压/V, E_R 是参考膜测试稳定时电压/V, A_R 是参考膜测试面积/ m^2 , A_S 是包装膜测试面积/ m^2 。

5) 气体透过率测定。参考《塑料制品 薄膜和薄片 气体透过性试验方法 第1部分:差压法》(GB/T 1038.1—2022)^[17],使用压差法气体透过率测定仪进行测定,测试面积为 50.24 cm^2 ,测试压力为 0.1 MPa 。气体透过率(Gas Transmission Rate, GTR)是指在包装膜两侧单位压差下,单位时间内透过包装膜单位面积的气体体积/($\text{cm}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot 24\text{ h} \cdot \text{Pa})^{-1}$),分为 O_2 透过率和 CO_2 透过率,均按下式计算。

$$GTR = \frac{\Delta p}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{T_0}{p_0 T} \times \frac{24}{p_1 - p_2}$$

式中, $\Delta p/\Delta t$ 是在稳定透过时单位时间内低压腔气体变化的算术平均值/($\text{Pa} \cdot \text{h}^{-1}$); V 是低压腔体积/ cm^3 ; A 是包装膜的渗透面积/ m^2 ; T_0 是标准状态下的温度,为 273.15 K ; p_0 是标准状态下的压力,为 $1.013 \times 10^5\text{ Pa}$; T 是实验温度/ K ; $p_1 - p_2$ 是包装膜两侧压差/ Pa 。

1.3.4 光学特性测定 1) 透光率和雾度测定。参考《透明塑料透光率和雾度的测定》(GB/T 2410—2008)^[18],首先将包装膜在 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 50% 的恒温恒湿箱中静置 24 h ,随后使用透光率/雾度计进行测定,测试光源为标准 C 光源,球体旋转角为 8° 。

2) 色泽测定。采用分光测色仪测定包装膜的 L^* (明度值)、 a^* (红蓝值) 和 b^* (黄绿值)^[15]。使用标准白色卡利校准板 ($L = 94.87$ 、 $a = -0.27$ 、 $b = 0.54$) 作为校准背景,记录包装膜的 L^* 、 a^* 和 b^* 。总色差 (ΔE) 计算公式如下。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2}$$

3) 透射率和不透明度测定。采用紫外分光光度计测定包装膜的透射率和不透明度^[15]。将包装膜裁切成 $40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的长方形条带,在 $200 \sim 800\text{ nm}$ 波长范围内扫描并绘制透射率曲线。不透明度以包装膜在 600 nm 波长处的吸光度进行表征,按下式计算。

$$\text{不透明度} = \frac{A_{600}}{d}$$

式中, A_{600} 指薄膜在 600 nm 处的吸光度, d 指薄膜的

厚度/ mm 。

1.3.5 抗氧化活性测定 1) DPPH 自由基清除率测定。参照于鑫淼^[6]的方法,并稍作修改。称取 0.0059 g DPPH,用体积分数为 50% 的甲醇溶液溶解并定容至 100 mL ,得到 $150\text{ }\mu\text{mol/L}$ 的 DPPH-甲醇溶液。将 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 包装膜剪碎后置于试管中,加入 4.0 mL 体积分数为 50% 的甲醇溶液,于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下避光静置 2 h 。取 3.0 mL 浸泡液与 1.0 mL $150\text{ }\mu\text{mol/L}$ DPPH-甲醇溶液混合均匀,室温避光反应 30 min 后,于 517 nm 波长处测定吸光度,以体积分数为 50% 的甲醇溶液作为对照。按下式计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中, A_1 是浸泡液和 DPPH-甲醇溶液混合液的吸光度, A_0 是对照组的吸光度。

2) ABTS⁺自由基清除率测定。参照于鑫淼^[6]的方法,并稍作修改。称取 0.066 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$,用蒸馏水溶解并定容至 100 mL ,配制浓度为 2.45 mmol/L 的 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液。将 10 mL 7.00 mmol/L ABTS 溶液与 10 mL 2.45 mmol/L $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液按照 $1:1$ 的体积比充分混合,室温避光反应 16 h ,制备 ABTS⁺工作液。使用前用蒸馏水稀释 ABTS⁺工作液 $40 \sim 50$ 倍使其在 734 nm 波长处的吸光度为 0.7 ± 0.02 。将 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 包装膜剪碎后置于试管中,加入 5 mL 蒸馏水,于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下避光静置 2 h 。吸取 1.0 mL 浸泡液与 9.0 mL 稀释过的 ABTS⁺工作液混合均匀,室温避光反应 10 min ,于 734 nm 波长处测定吸光度,以蒸馏水为对照。按下式计算 ABTS⁺自由基清除率。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率} = \frac{B_0 - B_1}{B_0} \times 100\%$$

式中, B_1 为浸泡液和 ABTS⁺工作液混合液的吸光度, B_0 为对照组的吸光度。

1.3.6 结构表征 1) FTIR 检测。将包装膜裁剪成 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的正方形,平铺于 FTIR 仪样品架上进行检测。设定参数为:分辨率 4 cm^{-1} ,扫描波数 $4000 \sim 450\text{ cm}^{-1}$,扫描次数 32 次^[15]。

2) SEM 观察。将包装膜裁剪成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的

正方形,进行溅射喷金后,使用 SEM 观察包装膜的微观结构。设定参数为:加速电压 15.0 kV,放大倍数 500 倍^[15]。

3)XRD 检测。使用 XRD 仪检测包装膜的结晶度。设定参数为:Cu Kα 射线扫描,辐射角范围 5°~50°,工作速率 3 (°)/min^[15]。

1.3.7 包装膜在草莓保鲜中的应用 1)外观观察。将新鲜草莓随机分为 5 组,每组 30 颗,分别置于 15 个直径为 90 mm 的灭菌培养皿中。各组分别用 SA/CMC、SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3、SA/CMC/CSP-5 包装膜覆盖草莓,并用 Parafilm 封口膜封口,以未包装的草莓为对照组。所有样品均在 23 ℃ 下贮藏 7 d,贮藏期间每隔 2 d 观察草莓的外观变化,并测定相关品质指标^[19]。

2)失重率测定。参考谢巧玲等^[19]的方法测定,草莓采摘后立即进行逐一称重并记录,作为各组草莓的贮藏初始质量(0 d)。随后分别在贮藏第 1 d、3 d、5 d 和 7 d 测量各组草莓的质量并记录。按下式计算失重率。

$$\text{失重率} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\%$$

式中, W_0 代表第 0 d 草莓的质量/g, W_t 是第 1 d、3 d、5 d 和 7 d 草莓的质量/g。

3)腐烂率测定。参考谷芳等^[20]的方法测定,采用计数法对经不同包装膜覆盖的草莓在贮藏期间的腐烂率进行测定。分别在贮藏第 1 d、3 d、5 d 和 7 d 对各组腐烂草莓计数。按下式计算腐烂率。

$$\text{腐烂率} = \frac{n_1}{n_0} \times 100\%$$

式中, n_1 为腐烂果数量/个, n_0 为总果数量/个。

1.4 数据处理与分析

所有实验均重复测定 3 次,结果以(平均值±标准差)表示。采用 SPSS 27 进行统计学分析, $P<0.05$ 表示存在显著性差异。利用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 活性包装膜理化特性分析

2.1.1 厚度和含水率分析 不同活性包装膜的理化特性参数见表 1。由表 1 可知,不同活性包装膜的厚度存在显著差异($P<0.05$)。SA/CMC 的厚度为 42.68 μm。与 SA/CMC 相比,SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的厚度分别增加了 5.72 μm、8.52 μm 和 12.15 μm。孙左玲等^[21]的研究也发现,添加板栗提取物会导致纤维素液态地膜厚度增加。这可能是因为 CSP 的加入提高了体系中可溶性固形物含量,进而增加了膜的厚度^[19]。

不同活性包装膜的含水率存在显著差异($P<0.05$)。SA/CMC、SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的含水率分别为 23.85%、25.45%、24.06%和 21.76%。随着 CSP 质量分数的增加,SA/CMC 膜的含水率先升高后降低。这与 S. Roy 等^[22]的研究结果一致,该研究发现随着鱿鱼墨黑色素添加量的增加,卡拉胶基包装膜水分含量呈相似变化。这可能是由于 CSP 中含有的亲水官能团既可以增加水分子的结合位点,又可以结合膜基质中其他组分中的亲水官能团,从而增强了膜对水分的结合能力^[23]。

2.1.2 拉伸强度和断裂伸长率分析 优良的机械性能是包装膜在食品储运过程中保障品质安全的关键^[24]。由表 1 可知,包装膜的机械性能存在显著

表 1 不同活性包装膜的理化特性参数
Table 1 Physicochemical properties of different active packaging films

包装膜	厚度/μm	含水率/%	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	水蒸气透过率/(g·(m ² ·24 h) ⁻¹)	O ₂ 透过率/(cm ³ ·(m ² ·24 h·Pa) ⁻¹)	CO ₂ 透过率/(cm ³ ·(m ² ·24 h·Pa) ⁻¹)	CO ₂ /O ₂ 透过比
SA/CMC	42.68±0.32 ^d	23.85±0.74 ^b	19.01±2.11 ^c	25.73±0.70 ^b	218.35±0.26 ^c	(40.27±0.05)×10 ^{-7a}	(7.84±0.05)×10 ^{-5a}	19.47:1
SA/CMC/CSP-1	48.40±0.43 ^c	25.45±0.08 ^a	33.78±1.74 ^a	24.43±0.66 ^b	276.91±0.14 ^b	(14.57±0.01)×10 ^{-7c}	(2.76±0.04)×10 ^{-5b}	18.94:1
SA/CMC/CSP-3	51.20±0.30 ^b	24.06±0.87 ^b	32.79±1.89 ^a	31.40±0.20 ^a	276.77±0.31 ^b	(18.79±0.02)×10 ^{-7c}	(1.51±0.12)×10 ^{-5c}	8.04:1
SA/CMC/CSP-5	54.83±0.20 ^a	21.76±0.44 ^c	29.65±0.58 ^b	17.87±1.70 ^c	284.76±1.46 ^a	(25.41±0.01)×10 ^{-7b}	(1.44±0.16)×10 ^{-5c}	5.67:1

注:同列中不同肩标小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

差异($P<0.05$)。SA/CMC 的拉伸强度为 19.01 MPa。与 SA/CMC 相比,SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的拉伸强度分别增加了 14.77 MPa、13.78 MPa 和 10.64 MPa。这可能是因为 CSP 在膜基质中的均匀分布能促进 CSP 与基质之间界面结合,从而增强了膜的拉伸强度^[21]。随着 CSP 质量分数的增加,包装膜的断裂伸长率呈先升高后降低的趋势。这可能是因为当 CSP 添加量较高时,会破坏膜基质结构的完整性,阻碍聚合物链的延展与流动,降低基质组分之间的自由体积及交联程度,导致断裂伸长率下降^[21]。

2.1.3 WVTR 分析 WVTR 是食品包装膜开发中的一个关键参数,影响包装膜调节食品与周围环境之间水蒸气交换的能力,并最终影响食品的质量和货架期^[15]。包装内果蔬因呼吸和蒸腾作用产生大量水分,若不及时排出,会导致内部湿度过高,微生物容易滋生繁殖且可能在包装内形成结露,加速果蔬腐败;反之,若包装膜的水蒸气透过率过高,则会造成大量水分散失,也不利于果蔬保鲜^[25]。由表 1 可知,不同活性包装膜的 WVTR 存在显著差异($P<0.05$)。随着 CSP 质量分数的增加,包装膜的 WVTR 从 218.35 g/(m²·24 h) 显著增加到 284.76 g/(m²·24 h)。这可能是由于 CSP 的多孔结构和纤维成分有助于提高包装膜的水蒸气透过能力^[15]。这与程萌等^[26]的研究结果较一致,该研究发现加入香芹酚的 SA 基复合膜的 WVTR 也呈上升趋势。此外,WVTR 的变化趋势与含水率基本一致。

2.1.4 GTR 分析 GTR 和气体透过比是评价包装材料气体阻隔性能的重要指标,是食品包装膜开发中的关键参数。对于生鲜果蔬的包装材料来说,适宜的 CO₂/O₂ 透过比可以调节包装内环境的气体组成,有助于降低生鲜果蔬的呼吸速率,从而延长其货架期^[25]。在贮藏过程中,若包装内部 O₂ 浓度过

高,会导致果蔬呼吸作用增强,加速营养物质消耗;若 CO₂ 浓度过高,果实易发生 CO₂ 毒害,启动糖酵解途径,造成有害物质累积^[27]。研究^[28]表明,CO₂/O₂ 透过比在 (8~10):1 的范围内较适宜果蔬保鲜。由表 1 可知,不同活性包装膜的 GTR 存在显著差异($P<0.05$)。SA/CMC 的 CO₂/O₂ 透过比为 19.47:1,而 SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的 CO₂/O₂ 透过比分别为 18.94:1、8.04:1 和 5.67:1。气体透过性的变化与膜的孔隙度、气体分子在基质中扩散路径的复杂程度及自由体积的减少相关^[29]。聚合物的非晶区分子排列不规则,自由体积较大,有利于气体分子的扩散与渗透;而结晶区分子链密度高、排列规整,气体分子难以透过^[30]。CSP 的加入增大了非晶区聚合物分子链的纠缠程度,使分子排列更紧密,自由体积减小,这不仅增加了气体分子的扩散难度,也延长了其扩散路径,导致 GTR 降低^[30]。此外,CO₂ 和 O₂ 气体分子在聚合物中的溶解与扩散能力存在差异,因此即便在相同孔隙度下,二者的透过比也会有所不同。综上,SA/CMC/CSP-3 的气体透过比最优,最适合用于高呼吸强度果蔬的包装。

2.2 活性包装膜光学特性分析

2.2.1 透光率和雾度分析 不同活性包装膜的光学特性参数见表 2。透光率指透过试样的光通量与射到试样上的光通量之比,雾度指透过试样后偏离入射方向的散射光通量与透射光通量之比^[18]。由表 2 可知,SA/CMC 的透光率为 92.70%。与 SA/CMC 相比,SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的透光率均显著下降($P<0.05$),但各 CSP 组之间的差异不显著($P>0.05$)。不同活性包装膜的雾度随着 CSP 质量分数的增加而显著增加($P<0.05$)。这可能是由于 CSP 作为不透明组分加入后,膜内部相分离加剧,分散相尺寸增大,导致光

表 2 不同活性包装膜的光学特性参数
Table 2 Optical properties of different active packaging films

包装膜	透光率/%	雾度/%	L^*	a^*	b^*	ΔE	不透明度
SA/CMC	92.70±0.30 ^a	3.06±1.13 ^c	89.23±0.16 ^a	-1.08±0.04 ^d	-2.45±0.21 ^d	6.43±0.05 ^d	1.06±0.08 ^d
SA/CMC/CSP-1	90.60±0.10 ^b	6.41±1.26 ^b	82.30±0.50 ^b	0.42±0.16 ^e	2.91±0.20 ^c	12.32±0.52 ^c	2.58±0.02 ^e
SA/CMC/CSP-3	90.90±0.10 ^b	29.51±0.92 ^a	81.97±0.34 ^b	1.14±1.18 ^b	5.82±0.40 ^b	14.01±0.47 ^b	6.81±0.35 ^b
SA/CMC/CSP-5	89.30±0.20 ^b	30.22±0.46 ^a	76.58±0.79 ^c	3.13±0.34 ^a	12.86±0.69 ^a	22.31±1.08 ^a	9.94±0.53 ^a

在不同相内和相界面间产生折射,从而引起透光率降低和雾度升高^[30]。

2.2.2 色度分析 包装膜的颜色直接影响消费者对食品包装的直观印象^[31]。由表 2 可知,不同活性包装膜的颜色存在显著差异 ($P<0.05$)。SA/CMC 为无色透明包装膜, ΔE 为 6.43。与 SA/CMC 相比, SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的 ΔE 分别为 12.32、14.01 和 22.31,膜表面颜色逐渐加深。这与加入板栗苞提取物的壳聚糖包装膜外观颜色加深、呈深棕色的研究结果一致^[19]。综上,CSP 的加入显著提高了 SA/CMC 膜的暗度、黄色度和红色度。

2.2.3 透射率和不透明度分析 紫外线照射易导致包装内容物发生品质劣变,因此,在保证良好的可见光透过率的同时,包装膜还需具备一定的紫外屏蔽性能^[15]。不同活性包装膜的透射率如图 1 所示。由图 1 可知,不同活性包装膜的透射率存在显著差异 ($P<0.05$)。SA/CMC 具有较高的透射率,随着 CSP 质量分数的增加,包装膜的透射率显著降低 ($P<0.05$)。这种现象源于 CSP 的加入引发了光的散射与反射,从而降低了膜的透射率^[6]。这与包装膜雾度的变化趋势一致。

不透明度可以评价包装膜的紫外线阻隔性能。由表 2 可知,随着 CSP 质量分数的增加,包装膜的不透明度显著增加 ($P<0.05$)。SA/CMC 的不透明度为 1.06。与 SA/CMC 相比,SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的不透明度分别增加了 1.52、5.75 和 8.88。这与负载花青素能显著

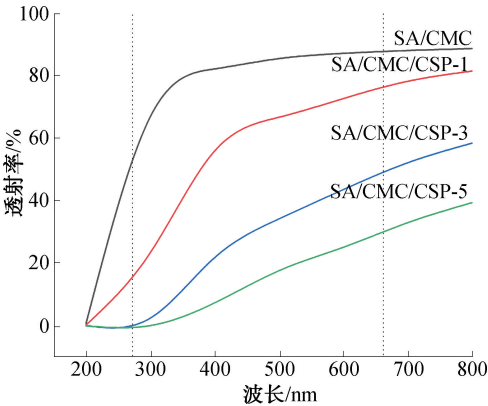


图 1 不同活性包装膜的透射率

Fig. 1 Transmittance of different active packaging films

增加壳聚糖/聚乙烯醇包装膜的不透明度,并提高其紫外线阻隔性能的研究结论一致^[6],也与包装膜 ΔE 的变化趋势一致。

综上,SA/CMC/CSP-3 包装膜在保持适宜可见光透过的同时,具有较强的紫外线屏蔽性能,表现出更优的综合适用性。

2.3 活性包装膜抗氧化活性分析

自由基是引起食品氧化变质、营养损失和有害物质产生的主要因素之一^[15]。具有良好抗氧化能力的包装膜可显著降低食品的氧化速率,抑制食品腐败变质,有效延长货架期。不同活性包装膜的抗氧化活性如图 2 所示,其中不同小写字母表示组间有显著性差异 ($P<0.05$),下同。由图 2 可知,不同活性包装膜的抗氧化活性差异显著 ($P<0.05$)。SA/CMC 的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率分别为 53.50% 和 38.20%。添加 CSP 后,包装膜的抗氧化活性显著增加 ($P<0.05$)。SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 的 DPPH 自由基清除率分别为 89.67%、90.17% 和 93.67%, ABTS⁺ 自由基清除率分别为 49.60%、81.40% 和 98.58%。CSP 中含有的二氢山奈酚、儿茶素、原花青素 B2、原花青素 A2 等化合物均富含酚羟基,它们可与自由基中电子结合发挥抗氧化作用,这是 CSP 具备抗氧化活性的主要机制^[13]。研究^[10]表明,橙皮苷结构中的酚羟基具有较强的自由基清除能力,将其负

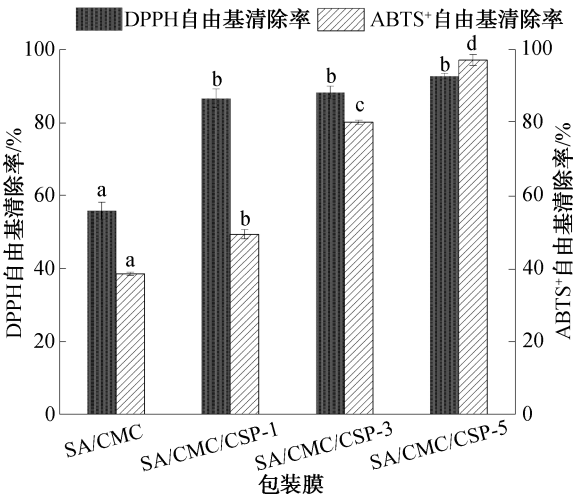


图 2 不同活性包装膜的抗氧化活性

Fig. 2 Antioxidant activity of different active packaging films

载于 SA/CMC 膜中可显著提升膜的抗氧化活性。因此,将 CSP 作为天然抗氧化剂添加到包装材料中,是延长食品货架期的有效方法。

2.4 活性包装膜结构分析

2.4.1 SEM 分析 不同活性包装膜的 SEM 图如图 3 所示。由图 3 可知,SA/CMC 表面光滑、均匀,无明显孔洞和裂纹。而添加 CSP 的包装膜均呈现褶皱表面,表明其具有更大的比表面积。随着 CSP 质量分数的增加,包装膜表面和横截面的粗糙度有所下降,这可能是由于 SA、CMC 与 CSP 的酚羟基之间通过氢键和疏水相互作用形成了更加紧密的三维网络结构,这种紧密的网络结构也有助于提高包装膜的厚度和机械强度^[29]。这与 SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 表现出较好的拉伸强度的结果一致。

2.4.2 FTIR 分析 不同活性包装膜的 FTIR 图如图

4a)所示。由图 4a)可知,SA/CMC 在 $3\,259.5\text{ cm}^{-1}$ 处出现 N—H 和—OH 的伸缩振动峰,在 $2\,926.5\text{ cm}^{-1}$ 处出现 C—H 的伸缩振动峰,在 $1\,639.0\text{ cm}^{-1}$ 处出现 C=O 的伸缩振动峰,在 $1\,408.1\text{ cm}^{-1}$ 处出现 N—H 的弯曲振动和 C—H 的伸缩振动峰,在 $1\,022.3\text{ cm}^{-1}$ 处出现 C—O 的伸缩振动峰^[32]。添加 CSP 后,FTIR 光谱中未出现新的吸收峰,但包装膜的—OH 特征峰先向高波数移动,随后又向低波数偏移。这些结果表明,少量 CSP 的添加不会改变包装膜的化学结构,CSP 与膜基质之间未发生化学相互作用,它们之间主要通过氢键和范德华力进行结合^[33]。

2.4.3 XRD 分析 不同活性包装膜的 XRD 图如图 4b)所示。由图 4b)可知,所有包装膜样品在 20° 处均出现明显的宽衍射峰,这主要源于 SA、CMC 的无定形结构^[15]。而加入 CSP 后,SA/CMC 的无定形

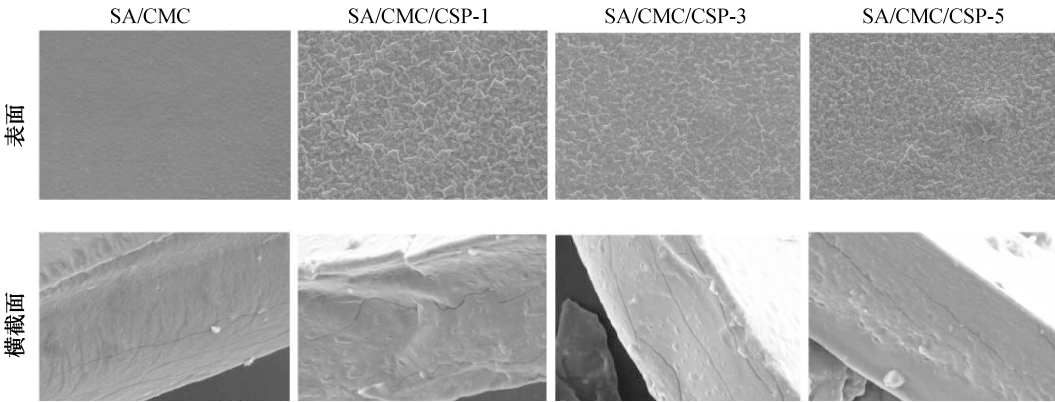


图 3 不同活性包装膜的 SEM 图
Fig. 3 SEM images of different active packaging films

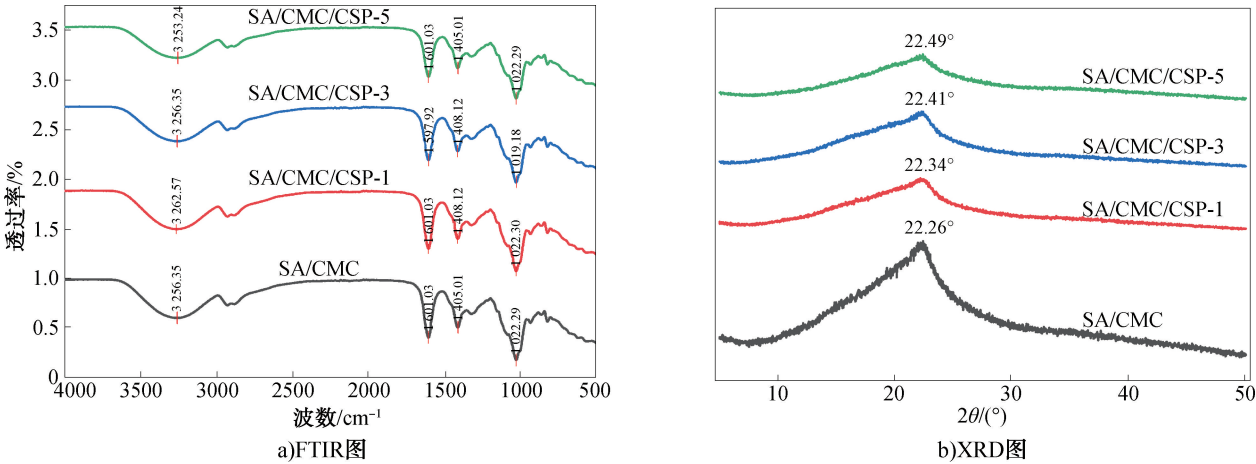


图 4 不同活性包装膜的 FTIR 图和 XRD 图
Fig. 4 FTIR spectra and XRD patterns of different active packaging films

特征未被改变,这表明 SA、CMC 与 CSP 之间的相互作用主要发生在非晶区域,也反映出各组分之间具有良好的相容性^[31]。该结果与已有研究中石榴皮提取物对绿豆蛋白膜结晶结构无显著影响的结果一致^[15]。CSP 的引入导致 20° 处的衍射峰向右偏移,表明 CSP 与 SA、CMC 分子间存在氢键、静电作用、范德华力等相互作用^[19]。随着 CSP 质量分数的增加,20° 处的衍射峰强度显著下降,表明 CSP 与 SA、CMC 之间形成了较好的交联作用,使包装膜内部形成了稳定的三维网络结构^[34]。这一结果与 SEM 分析结果相符。

2.5 活性包装膜保鲜效果分析

2.5.1 草莓外观分析 花青素是赋予草莓红色的主要色素,主要存在于果实外层,是最重要的酚类化合物之一,其中,天竺葵素 3-O-葡萄糖苷、天竺葵素 3-O-芸香糖苷和花青素 3-O-葡萄糖苷在草莓果实中含量最高^[28]。不同活性包装膜 6 包装的草莓外观变化如图 5 所示。由图 5 可知,对照组和 SA/CMC 包装的草莓在贮藏第 5 d 开始出现部分果实色泽变暗现象;而 SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 包装的草莓在第 5 d 仍保

持良好的鲜红色泽。贮藏至第 7 d,由于持续受到空气氧化,对照组草莓出现严重的变色现象,SA/CMC 组草莓色泽明显加深,整体呈现更暗的状态,而 CSP 组包装的草莓仍保持鲜红色泽,其中 SA/CMC/CSP-3 的保鲜效果最好。这可能是因为添加 CSP 的包装膜具有良好的抗氧化性、紫外线阻隔性及适宜的 CO₂/O₂ 透气比,在贮藏过程中降低了草莓的氧化褐变程度,减轻了紫外线损伤,减缓了呼吸速率,并抑制了降解酶对糖类、有机酸及色素的分解,从而有助于维持草莓的良好色泽。有研究^[35]报道,负载百里香酚的壳聚糖膜能够延缓草莓的生理代谢过程及花青素分解,保持其贮藏期间的色泽与营养价值。

2.5.2 草莓失重率和腐烂率分析 失重率和腐烂率是评价果品贮藏品质和商品价值的重要指标^[35]。经不同活性包装膜包装后草莓的失重率和腐烂率如图 6 所示。由图 6a) 可知,在贮藏期间,所有草莓的失重率均呈上升趋势,表明草莓因呼吸和蒸腾作用不断散失水分。贮藏第 7 d,对照组草莓的失重率达到 11.0%,SA/CMC 包装草莓的失重率为 5.9%,而 SA/CMC/CSP-1、SA/CMC/CSP-3 和 SA/CMC/CSP-5 包装草莓的失重率分别为 4.4%、3.9% 和

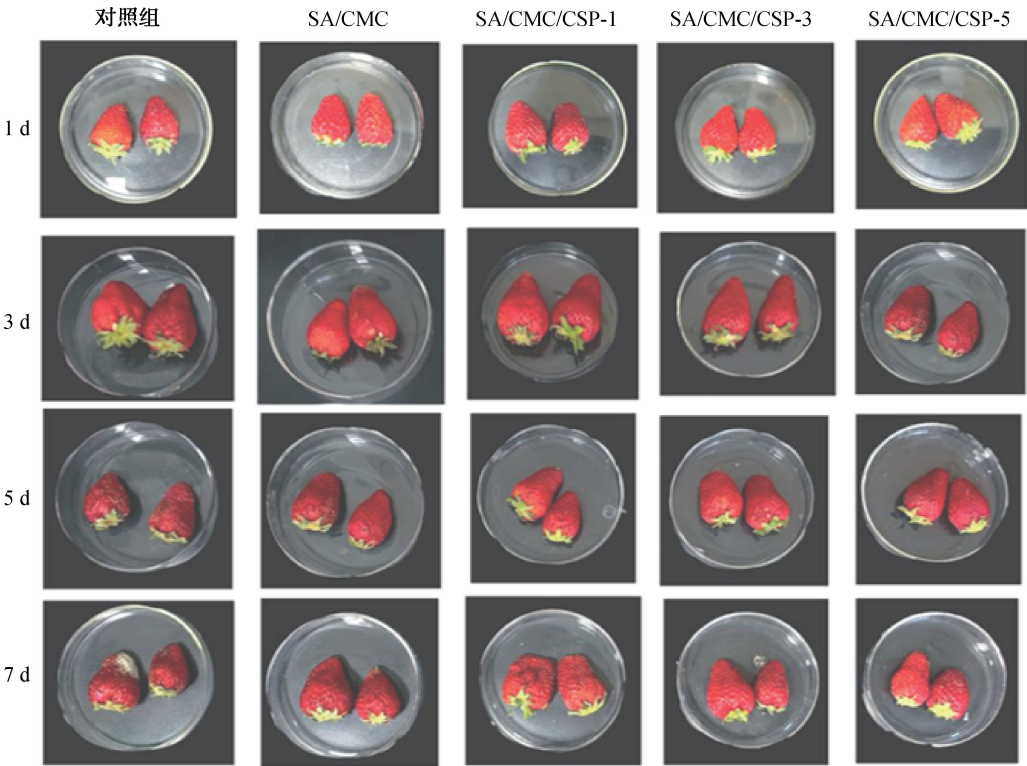


图 5 不同活性包装膜包装的草莓外观变化
Fig. 5 Appearance changes of strawberries packaged with different active packaging films

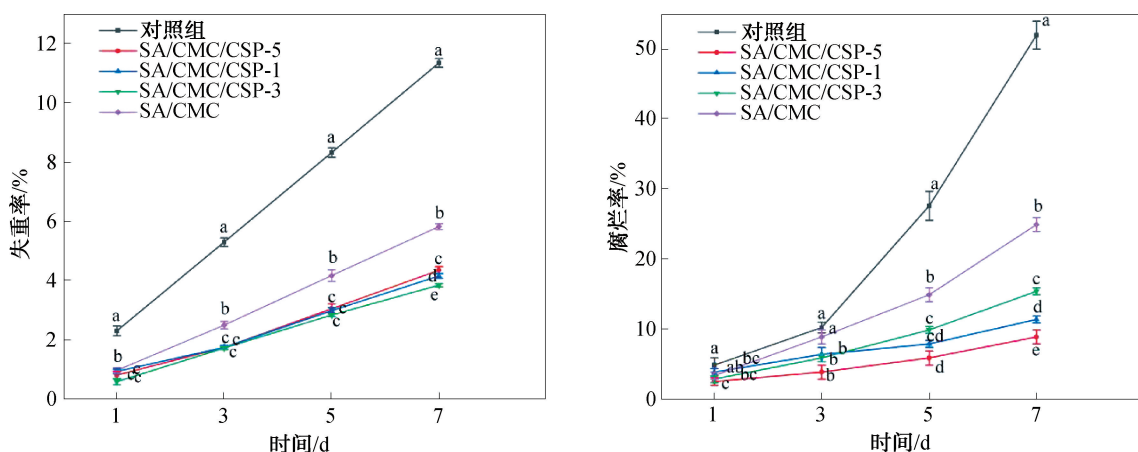


图6 不同活性包装膜包装草莓的失重率和腐烂率

Fig. 6 Weight loss and decay rates of strawberries packaged with different active packaging films

4.2%。这可能是因为随着呼吸和蒸腾作用的持续进行,草莓释放水分至包装膜表面,SA/CMC/CSP-3因具备较适宜的水蒸气透过率,能在一定程度上抑制果实的水分蒸发和呼吸作用,从而减少了失重^[36];而SA/CMC/CSP-5的水蒸气透过率过高,会导致水分快速流失,故失重率略有回升。

新鲜草莓因含水量高、含糖量丰富,极易受到微生物的侵染而腐败变质^[27]。由图6b)可知,随着贮藏时间的延长,各组草莓的腐烂率均不断增加,但不同活性膜包装的草莓腐烂率差异显著($P < 0.05$)。贮藏第7 d,对照组草莓的腐烂率为52.0%,SA/CMC组草莓的腐烂率为25.0%,CSP组包装草莓的腐烂率均低于20.0%,其中SA/CMC/CSP-3组的腐烂率最低,为8.0%。这可能是因为SA/CMC/CSP-3具有良好的气体阻隔性和抗氧化活性,提高了对各种气体分子穿透的阻力,抑制了果实的呼吸代谢及内源乙烯和脱落酸的生成,同时有效隔绝外界细菌并抑制微生物的生长和繁殖,进而减缓了草莓的腐烂和氧化速度^[37]。因此,将CSP作为生物活性成分制备食品包装膜以提高草莓的保鲜效果具有良好的应用前景。

草莓的贮藏品质受贮运条件、气体环境、微生物活性等多种因素影响^[36]。SA/CMC/CSP包装膜各组分之间通过分子间氢键和范德华力相互作用形成了更为紧密的三维网络结构,从而赋予包装膜良好的机械性能,有助于减轻果品储运过程中的物理损伤^[24]。该包装膜具有良好的WVTR和 CO_2/O_2 透过比,能有效减少水分散失、抑制微生物生长,同时降低草莓的呼吸速率,抑制果实内源乙烯及脱落

酸的生成,并抑制降解酶对糖类、有机酸和色素的分解,从而延缓草莓采摘后的变色、软化、腐败现象^[37]。多数水果在紫外线照射下易发生光氧化反应,导致品质下降,而具备良好紫外线阻隔能力的包装膜能有效抑制此类光氧化反应^[19]。SA/CMC/CSP包装膜具有显著的紫外线阻隔性能,这也是延长草莓货架期的重要原因之一。此外,膜中添加的CSP富含多酚类化合物,能与自由基中电子结合,提升膜的抗氧化活性,从而降低草莓氧化速率,抑制腐败变质进程。上述因素的综合作用可能是SA/CMC/CSP包装膜有效延长草莓货架期的主要机制。

3 结论

本研究以CSP、SA和CMC为基质,采用流延干燥法制备了活性包装膜,并研究了其理化特性、光学特性、抗氧化活性、结构及其对草莓的保鲜效果,得到如下结论:SA/CMC/CSP包装膜各组分之间通过分子间氢键和范德华力相互作用形成了更为紧密的三维网络结构,显著提高了包装膜的拉伸强度。与SA/CMC相比,CSP的加入提高了包装膜的厚度、WVTR、不透明度、抗氧化活性和紫外线阻隔性能。其中,SA/CMC/CSP-3的综合性能最佳,其拉伸强度为32.79 MPa,断裂伸长率为31.40%,DPPH和 ABTS^+ 自由基清除率分别为90.17%和81.40%, CO_2/O_2 透过比为8.04:1,更适合高呼吸强度的果蔬包装。此外,SA/CMC/CSP包装膜可显著改善草莓的贮藏品质,降低其失重率和腐烂率,延长货架期2~3 d。该研究为负载CSP活性食品包装的开发与应用提供了参考。未来将进一步解析包装膜的

作用机制,优化其功能特性,拓展应用场景并评估工业化可行性,以充分挖掘此类包装膜的应用潜力,为果蔬保鲜领域提供更全面的解决方案。

参考文献:

- [1] 杜海屿. 果蔬智能响应型活性包装的设计与应用[D]. 北京:北京科技大学,2025.
DU H Y. Design and application of intelligent responsive active packaging for fruits and vegetables [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2025.
- [2] BAI R Y,ZHANG X,YONG H M,et al. Development and characterization of antioxidant active packaging and intelligent Al^{3+} -sensing films based on carboxymethyl chitosan and quercetin [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,126:1074–1084.
- [3] ATTA O M, MANAN S, SHAHZAD A, et al. Biobased materials for active food packaging: A review [J]. Food Hydrocolloids,2022,125:107419.
- [4] 余冬青. 橙皮苷抗氧化活性包装膜制备及鲜切果蔬应用[D]. 天津:天津科技大学,2024.
YU D Q. Preparation of antioxidant active packaging films with naringin and their application in fresh-cut fruits and vegetables [D]. Tianjin:Tianjin University of Science and Technology,2024.
- [5] 闵甜甜. 多功能抗菌活性包装材料的设计及其在果蔬保鲜中的应用[D]. 北京:北京科技大学,2022.
MIN T T. Design of multifunctional antibacterial active packaging materials and their application in fruit and vegetable preservation [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2022.
- [6] 于鑫淼. pH敏感型智能活性包装薄膜的制备与应用[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2022.
YU X M. Preparation and application of pH-sensitive intelligent active packaging films [D]. Aral: Tarim University,2022.
- [7] KÖHN C R, DA ROSA FAGUNDES L, FLÔRES S H, et al. Biodegradable sodium alginate films enriched with oils: a review [J]. Packaging Technology and Science, 2025,38(7):587–609.
- [8] ESTEGHLAL S, NIAKOUSARI M, HOSSEINI S M H. Physical and mechanical properties of gelatin-CMC composite films under the influence of electrostatic interactions [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2018,114:1–9.
- [9] ZHANG K, LI Z H, ZHAO W Y, et al. Aerogel colorimetric label sensors based on carboxymethyl cellulose/sodium alginate with black goji anthocyanin for monitoring fish freshness [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,265(Pt 1):130466.
- [10] GAO Z X, XIE S T, CHANG L, et al. Antioxidant and antimicrobial sodium alginate/sodium carboxymethyl cellulose films loaded with self-assembled hesperidin nanorods for fruits preservation [J]. Food Chemistry, 2025,474:143183.
- [11] TAN W W, MCCLEMENTS D J, CHEN J, et al. Novel biopolymer-based active packaging material for food applications: cinnamaldehyde-loaded calcium nanoparticles incorporated into alginate-carboxymethyl cellulose films [J]. Food Packaging and Shelf Life,2024,45:101351.
- [12] 陈思佳. 板栗壳色素的提取工艺优化及稳定性研究[D]. 北京:北京农学院,2019.
CHEN S J. Optimization of extraction process and stability study of chestnut shell pigments [D]. Beijing: Beijing University of Agriculture,2019.
- [13] LI Z X, CHENG C H, ZHANG L, et al. Extraction of pigments from chestnut (*Castanea mollissima*) shells using green deep eutectic solvents: optimization, HPLC-MS identification, stability, and antioxidant activities [J]. Food Chemistry,2025,488:144916.
- [14] 孙聪聪. 板栗壳色素的提取及其银纳米复合材料制备和抑菌活性研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2022.
SUN C C. Extraction of chestnut shell pigment and the preparation and antibacterial activity study of its silver nanocomposite [D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2022.
- [15] MOGHADAM M, SALAMI M, MOHAMMADIAN M, et al. Development of antioxidant edible films based on mung bean protein enriched with pomegranate peel [J]. Food Hydrocolloids,2020,104:105735.
- [16] GB/T 26253—2010 塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定 红外检测器法[S].
GB/T 26253—2010 Determination of water vapor transmission rate for plastics-film and sheeting—Infrared detection sensor method[S].
- [17] GB/T 1038.1—2022 塑料制品 薄膜和薄片 气体透过性试验方法 第1部分:差压法[S].
GB/T 1038.1—2022 Plastics—Film and sheeting—Determination of gas-transmission—Part 1: differential-pressure method[S].
- [18] GB/T 2410—2008 透明塑料透光率和雾度的测定[S].
GB/T 2410—2008 Determination of the luminous transmittance and haze of transparent plastics[S].
- [19] 谢巧玲,陈丽楠,杜彬,等. 板栗苞提取物/壳聚糖复合膜的表征及在草莓保鲜中的应用[J]. 核农学报, 2025,39(8):1699–1708.
XIE Q L, CHEN L N, DU B, et al. Characterisation of chestnut bract extract/chitosan composite film and its application in strawberry preservation [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2025,39(8):1699–1708.

- [20] 谷芳,马嘉欣,车春波,等.低成本羧甲基纤维素保鲜膜的制备及性能[J].食品研究与开发,2023,44(12):122-128.
- GU F, MA J X, CHE C B, et al. Preparation and properties of low-cost carboxymethyl cellulose preservative film[J]. Food Research and Development, 2023, 44 (12): 122-128.
- [21] 孙左玲,姚先富,何照云,等.添加板栗壳色素对纤维素液态地膜性能的影响[J].塑料科技,2024,52(2):78-83.
- SUN Z L, YAO X F, HE Z Y, et al. Effects of chestnut shell pigment addition on performance of cellulose-based liquid mulching film[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(2):78-83.
- [22] ROY S, RHIM J W. Carrageenan-based antimicrobial bionanocomposite films incorporated with ZnO nanoparticles stabilized by melanin[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 500-507.
- [23] YANG M L, LI L, YU S G, et al. High performance of alginate/polyvinyl alcohol composite film based on natural original melanin nanoparticles used as food thermal insulating and UV-vis block[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 233:115884.
- [24] 于鑫淼,王琼琼,王平,等. pH 敏感型智能包装薄膜的制备及其理化特性研究[J].轻工学报,2022,37(3):26-35.
- YU X M, WANG Q Q, WANG P, et al. Preparation and physicochemical properties of pH-sensitivity intelligent packaging films [J]. Journal of Light Industry, 2022, 37 (3):26-35.
- [25] 樊涛.不同气体渗透性薄膜对草莓采后常温贮藏品质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2024.
- FAN T. Effects of different gas-permeable films on the postharvest quality of strawberries stored at room temperature [D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University, 2024.
- [26] 程萌,张荣飞,逯文倩,等.香芹酚/海藻酸钠生物复合膜的制备及性能[J].精细化工,2019,36(9):1896-1902,1955.
- CHENG M, ZHANG R F, LU W Q, et al. Preparation and properties of carvacrol/sodium alginate composite films [J]. Fine Chemicals, 2019, 36(9):1896-1902, 1955.
- [27] 周紫怡.基于草莓呼吸代谢特征的气调包装材料的制备与保鲜效果的探究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- ZHOU Z Y. Study on the preparation of modified atmosphere packaging materials based on the respiratory metabolism characteristics of strawberries and their preservation effects[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [28] PRIYADARSHI R, EL-ARABY A, RHIM J W. Chitosan-based sustainable packaging and coating technologies for strawberry preservation: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278 (Pt 2):134859.
- [29] LI G, ZHANG X C, LI D, et al. Cellulose cryogel microparticles increase gas permeation of carnauba wax-based edible coating for jujube preservation application [J]. Food Chemistry, 2025, 495 (Pt 2):146450.
- [30] 弓雪峰. PLA/PBAT/PPC 可生物降解基控释抗菌抗氧化活性膜的制备与性能研究[D].无锡:江南大学,2022.
- GONG X F. Preparation and performance study of biodegradable sustained-release antioxidant and antibacterial active films based on PLA/PBAT/PPC [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [31] 刘晓丽,郭曹羽,林锴立,等.壳聚糖基抑菌抗氧化活性复合膜的制备及其性能研究[J].轻工学报,2023,38(4):27-36.
- LIU X L, GUO C Y, LIN K L, et al. Preparation and properties of chitosan-based antibacterial and antioxidative composite films [J]. Journal of Light Industry, 2023, 38 (4):27-36.
- [32] CHEN H Y, WANG Q Q, DENG Y P, et al. Experimental and theoretical studies on antioxidant and antibacterial properties of chitosan-gelatin functional composite films loaded with flavonoids [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282 (Pt 6):137449.
- [33] ZHAO R N, CHEN J, YU S F, et al. Active chitosan/gum Arabic-based emulsion films reinforced with thyme oil encapsulating blood orange anthocyanins: improving multifunctionality[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134:108094.
- [34] FANG F, LI H F, CAI Z B, et al. Preparation and characterization of edible gelatin-chitosan films incorporated with finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and its application in pork [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307 (Pt 3):142178.
- [35] LI H Y, LIU M Z, HAN S Y, et al. Edible chitosan-based Pickering emulsion coatings: preparation, characteristics, and application in strawberry preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264 (Pt 2):130672.
- [36] KTENIOUDAKI A, O'DONNELL C P, DO NASCIMENTO NUNES M C. Modelling the biochemical and sensory changes of strawberries during storage under diverse relative humidity conditions [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154:148-158.
- [37] 罗阳,郑一丹,肖益东.壳聚糖-银纳米粒子复合物的抗氧化活性及其对草莓保鲜效果的研究[J].农产品加工,2025(15):17-23.
- LUO Y, ZHENG Y D, XIAO Y D. Antioxidant activity of chitosan-silver nanoparticle complexes and its effect on strawberry preservation [J]. Agricultural Products Processing, 2025(15):17-23.

Preparation of chestnut shell pigment-based active packaging films
and their application in strawberry preservation

LIU Mengying^{1,2}, XUE Jialin¹, HUAI Lixiang¹, XIAO Yuting¹, GUO Gang¹,
CUI Yajie³, WANG Haoran^{1,4}, SONG Lijun^{4,5}

- 1. College of Food Science and Technology, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China;
- 2. Shangqiu Product Quality Inspection and Testing Center, Shangqiu 476000, China;
- 3. College of Ocean, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China;
- 4. Engineering Research Center of Chestnut Industry Technology Ministry of Education, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China;
- 5. Key Laboratory of Active Ingredients and Functions of Natural Products in Hebei Province, Qinhuangdao 066600, China

Abstract: **[Objective]** To investigate the effects of chestnut shell pigment (CSP) content on the physicochemical and functional properties of sodium alginate/carboxymethyl cellulose (SA/CMC) films and on their strawberry preservation performance. **[Methods]** Active packaging films were prepared via solution casting using CSP, SA, and CMC as the matrix. Their physicochemical properties, optical properties, antioxidant activity, and structure were characterized, and their preservation performance on strawberries was evaluated. **[Results]** The films loaded with different mass fractions of CSP exhibited significant differences in their physicochemical properties, optical properties, and antioxidant activity. CSP exhibited good compatibility with the film matrix, forming a compact three-dimensional network structure mainly through intermolecular hydrogen bonding and van der Waals forces, which in turn increased the film thickness, opacity, tensile strength, and water vapor transmission rate, and improved the CO₂/O₂ transmission ratio. Among them, the film containing 3% CSP (SA/CMC/CSP-3) exhibited the best overall performance, with a tensile strength of 32.79 MPa, an elongation at break of 31.40%, an oxygen transmission rate of 18.79×10⁻⁷ cm³/(m²·24 h·Pa), a carbon dioxide transmission rate of 1.51×10⁻⁵ cm³/(m²·24 h·Pa), and a CO₂/O₂ transmission ratio of 8.04 : 1, making it more suitable for packaging fruits and vegetables with high respiration rates. In addition, the incorporation of CSP significantly enhanced the UV-blocking ability and antioxidant capacity of the films. The DPPH radical scavenging rates of SA/CMC/CSP-3 and SA/CMC/CSP-5 were 90.17% and 93.67%, respectively, and the ABTS⁺ radical scavenging rates were 81.40% and 98.58%, respectively. Compared with strawberries packaged with the SA/CMC film, those packaged with SA/CMC/CSP-3 showed reductions in weight loss and decay rate of 2.0% and 17.0%, respectively, on the 7th day of storage. **[Conclusion]** The SA/CMC/CSP-3 film exhibited good physicochemical and optical properties and antioxidant activity, effectively delaying moisture loss and spoilage in strawberries and demonstrating a good preservation effect.

Key words: chestnut shell pigment; sodium alginate; active packaging film; physicochemical property; functional property; strawberry preservation

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]