

纳米纤维素基可食用膜的制备与表征 及其对香蕉的保鲜效果

田 欢¹ 宋 振² 李则均³ 孙亚文³

(1. 山西旅游职业学院,山西 太原 030000; 2. 武汉轻工大学食品科学与工程学院,湖北 武汉 430023;
3. 三亚城市职业学院,海南 三亚 572022)

摘要: [目的] 防止采后水果腐烂及延长水果的保质期,提出一种强韧、耐水和自愈的多功能可食用保鲜涂膜。[方法] 通过扫描电子显微镜、傅里叶红外变换光谱、X-射线粉末衍射仪、质构仪和流变仪等仪器测定了可食用保鲜涂膜的微观形貌、化学结构、理化性质、机械性能及其对香蕉保质期的影响。[结果] 可食用涂膜内部单体之间以氢键、酯键和静电相互作用交联,表面呈不规则网状结构,断裂伸长率为 71.73%,机械强度为 51.48 MPa,且具有良好的疏水性、水蒸气和氧气阻隔性。采后香蕉保鲜试验表明,可食用膜不仅能有效减缓香蕉失重和软化,延缓香蕉果肉成熟,并且将香蕉的货架期延长至 8 d。[结论] 该多功能可食用涂膜可用于食品包装以延长采后水果的保质期。

关键词: 纳米纤维素; 可食用膜; 机械性能; 香蕉保鲜

Preparation and characterization of nanocellulose-based edible films and their fresh-keeping effects on bananas

TIAN Huan¹ SONG Zhen² LI Zejun³ SUN Yawen³

(1. Tourism College of Shanxi, Taiyuan, Shanxi 030000, China; 2. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China; 3. Sanya City College, Sanya, Hainan 572022, China)

Abstract: [Objective] To prevent postharvest fruit decay and extend shelf life, a robust, water-resistant, and self-healing multifunctional edible fresh-keeping film was proposed. [Methods] The edible fresh-keeping film's microstructure, chemical structure, physicochemical properties, mechanical properties, and its effects on the shelf life of bananas were characterized using scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray powder diffractometer (XRD), texture analyzer, and rheometer. [Results] The monomers within the edible film are cross-linked via hydrogen bonds, ester bonds, and electrostatic interactions, forming an irregular network structure on the surface. The film exhibits an elongation at break of 71.73% and a mechanical strength of 51.48 MPa, as well as good hydrophobicity and water vapor and oxygen barrier properties. Postharvest banana fresh-keeping experiments indicate that the edible film effectively reduces weight loss and softening, delays pulp ripening, and extends the shelf life of bananas to eight days. [Conclusion] The multifunctional edible film can be used in food packaging to extend the shelf life of postharvest fruits.

Keywords: nanocellulose; edible film; mechanical property; banana fresh-keeping

水果因具有独特的风味和丰富的营养物质而受到全世界的喜爱^[1]。然而,水果在采后贮藏期间会因水分流失、呼吸作用和微生物生长而腐烂^[2],造成严重的经济损失和食物浪费。因此,开发一种安全、高效的采后水果保

基金项目:国家自然科学基金(编号:31801577)

通信作者:宋振(1988—),男,武汉轻工大学讲师,博士。E-mail:19072155095@163.com

收稿日期:2025-02-08 **改回日期:**2025-09-28

引用格式:田欢,宋振,李则均,等. 纳米纤维素基可食用膜的制备与表征及其对香蕉的保鲜效果[J]. 食品与机械,2026,42(1):230-237.

Citation:TIAN Huan, SONG Zhen, LI Zejun, et al. Preparation and characterization of nanocellulose-based edible films and their fresh-keeping effects on bananas[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 230-237.

鲜技术, 延长水果的货架期, 已成为食品保鲜领域中亟待解决的热点问题。

可食用膜是近几年发展迅速的一种绿色、安全的采后水果保鲜技术。可食用膜是由一些可食用的生物聚合物(包括纤维素、多糖和蛋白质等)组成^[3], 这些可食用生物聚合物具有良好的成膜性^[4], 通过多种方式(喷涂和浸泡)在水果表面形成一层透明保鲜膜^[5]。可食用膜不仅可以防止水果在运输过程中的机械损伤^[6], 还能抑制水果的呼吸速率、水分流失和微生物污染^[7], 从而延长采后水果的货架期。目前, 研究人员已经研究了多种生物聚合物可食用膜用于采后水果保鲜^[8]。但这些可食用膜的疏水性、自愈能力和机械强度不佳^[9], 难以满足复杂环境下对采后水果的保鲜能力。

纳米纤维素是一种通过化学、物理或生物方法从富含纤维素原料中提取的纳米材料^[10], 具有优异的机械强度、高活性表面和良好的生物相容性。纳米纤维素作为填料不仅可以增强食用涂膜的机械强度, 还可以增强单体之间的交联密度^[11]。大豆种皮纳米纤维素(soybean hull nanocellulose, SHNC)是从废弃的大豆种皮中提取的阴离子线性纳米纤维素, 含有多种亲水性基团(羟基和羧基), 可以与其他聚合物单体相互交联形成高分子聚合物。海藻酸钠(sodium alginate, SA)是由 β -d-甘露醛酸和 α -l-古醛酸盐组成的阴离子线性多糖, 具有良好的生物相容性和成膜能力, 被广泛用于食品保鲜^[12]。然而, SA含有大量的亲水性基团(羟基和羧基), 易与水结合, 导致耐水性差^[13], 且机械强度也较差^[14]。因此, 提高SA基膜的耐水性和机械强度增强薄膜的保鲜能力。小麦面筋(wheat gluten, WG)含有大量的氨基, 具有良好的可降解性和成膜能力。但其与阴离子聚合物交联程度不高^[15]。因此, 利用葡萄糖酸内酯使其内部氨基质子化, 使WG带有大量的正电荷, 提升其与阴离子聚合物的交联程度^[16]。假设聚合物单体在加热过程中, 带正电荷的单体与带负电荷的单体以强静电相互作用交联。同时, 聚合物单体之间形成多种相互作用力。使得制备的可食用膜具有良好的耐水性、自愈能力和机械强度。

研究拟利用葡萄糖酸内酯(gluconolactone, GDL)使WG内部的氨基质子化, 增强WG与SA和纳米纤维素之间的静电相互作用。通过一锅法制备一种多功能的可食用膜(SHNC/SA/WG/GDL)并用于香蕉保鲜, 探究可食用膜的微观形貌、化学结构、机械强度、疏水性和自愈性能, 分析可食用膜对香蕉保鲜过程中的外观、质量、硬度和总酚含量的影响, 评价可食用膜对采后香蕉的保鲜效果。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

大豆种皮: 食品级, 山东禹王实业有限公司;

海藻酸钠: 食品级, 山东青岛海藻明月集团有限公司;

小麦面筋: 食品级, 中粮集团有限公司;

葡萄糖酸内酯: 食品级, 安琪酵母股份有限公司;

3,4,5-三羟基苯甲酸: 分析纯, 上海阿拉丁生化股份有限公司;

盐酸、氢氧化钠、乙醇: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

数显恒温加热磁力搅拌器: SH-3ABE型, 常州市春秋电子仪器有限公司;

质构分析仪: TA-3000型, 济南赛成电子科技有限公司;

X-射线粉末衍射仪: ARL EQUINOX Pro型, 美国默赛飞公司;

智能型低温超声波萃取仪: JRA-20CQ型, 无锡杰瑞安仪器设备有限公司;

场发射扫描电子显微镜: Apreo 2型, 美国默赛飞公司;

傅里叶红外变换光谱仪: VERTEX80/80v型, 美国布鲁克公司;

热分析仪: TGA-601型, 南京汇城仪器仪表有限公司;

视频光学接触角仪: CA100型, 广州北斗精密仪器有限公司;

真空冷冻干燥机: SCIENTZ-10N/A型, 新芝生物科技股份有限公司。

1.2 纳米纤维素的提取

称取50 g大豆种皮放入45 °C烘箱中烘干, 粉碎过60目筛。称取30 g大豆种皮粉末放入含有100 mL去离子水的烧杯中, 加入10 mL 20% HCl进行酸解, 120 °C, 800 r/min搅拌3 h。搅拌结束后, 加入500 mL去离子水终止反应, 待溶液冷却至室温, 3 500 r/min离心5 min。将上清液置于25 °C, 200 W超声仪中超声90 min, 3 500 r/min离心10 min, 取上清液, 加入NaOH调节溶液pH至中性, 放入透析袋透析7 d。缓慢加入乙醇溶液, 以1:2的比例稀释浓缩液, 不断搅拌, 沉淀溶液。混合溶液在4 °C下沉淀24 h, 3 500 r/min离心5 min, 将离心管底部沉淀放入真空冷冻干燥机中预冷冻8 h(−45 °C), −45 °C干燥24 h, 即可得到大豆种皮纳米纤维素。

1.3 纳米纤维素基可食用膜的制备

参照 Al-Hilifi 等^[17]的方法并稍作修改。称取 1 g SA 溶解于 40 mL 去离子水, 将烧杯置于 60 °C, 400 r/min 的磁力搅拌器上搅拌 90 min 形成溶液 A。向溶液 A 中加入 0.2 g WG 和 0.02 g GDL, 60 °C, 400 r/min 搅拌 0.5 min, 形成复合溶液 B。之后, 向复合溶液 B 中加入一定量的纳米纤维素(0, 0.5, 1.0 g), 60 °C, 400 r/min 搅拌 60 min, 形成复合溶液 C。然后, 将复合溶液 C 倒入平板中, 置于 60 °C 烘箱中干燥 24 h, 即可得到纳米纤维素基可食用膜。最后, 根据纳米纤维素的添加量(0, 0.5, 1.0 g)将可食用膜分别命名为 SWG-1、SWG-2、SWG-3。

1.4 扫描电子显微镜观察(SEM)

将可食用薄膜剪切 2 cm×2 cm 的正方形, 用导电胶将其粘贴至载物台表面, 薄膜表面喷涂一层金。利用扫描电子显微镜在 5 000 倍下观察薄膜表面微观结构。

1.5 傅里叶红外变换光谱分析(FT-IR)

利用傅里叶红外变换光谱测定可食用膜的化学结构。称取 0.001 g 冻干后可食用膜粉末与 0.1 g KBr 研磨后充分混合, 利用压片机将混合粉末压片, 测试前以空白 KBr 消除仪器内空气和二氧化碳等因素干扰, 测试范围为 4 000~400 cm⁻¹。

1.6 X-射线粉末衍射分析(XRD)

利用 X-射线粉末衍射仪测定可食用膜的结晶度。称取一定冻干粉末于测试玻璃槽内, 利用钥匙将粉末涂抹均匀, 且与玻璃槽齐平。测试范围为 5°~80°。

1.7 水接触角分析(WAC)

利用视频光学接触角仪测定可食用膜的疏水性。将可食用薄膜剪切成 1 cm×1 cm 的正方形, 用注射器将 5 μm 去离子水滴在可食用膜表面, 测定其表面的水接触角值。

1.8 气体透过率分析

1.8.1 水蒸气透过率(WVP) 参照 Jung 等^[6]的方法计算薄膜的水蒸气透过率。将可食用膜(4 cm×4 cm)放于含有 8 g 硅胶的玻璃瓶口上并密封。将玻璃小瓶置于恒温恒湿培养箱(25 °C, 50% RH)中, 每 12 h 称重一次, 直至 72 h。

1.8.2 氧气透过率(OP) 参考 GB/T 1038—2022。采用 GTR-V1 型气体渗透性测试仪测定, 测试面积为 120 mm², 试验气体为 99% 的氧气, 每个样品重复测试 3 次。

1.9 机械性能分析

将可食用薄膜剪切成 2 cm×5 cm 的长方形, 利用质构仪测定薄膜的机械性能。测试参数: 试验前速度为 2 mm/s, 试验速度为 2 mm/s, 试验后速度为 2 mm/s, 距离为 30 mm, 触发力为 0.098 N。

1.10 自愈性分析

参照 Cui 等^[18]的方法并稍作修改。利用旋转流变仪测定可食用薄膜的自愈性能。将可食用薄膜剪切成直径

为 40 mm 的圆形。在应变为 1%(60 s)~100%(120 s)范围内进行自愈性扫描。

1.11 香蕉保鲜试验

从当地农贸市场购买大小、颜色和成熟度基本一致的香蕉, 随机分为 3 组: 对照组(未包装)、商用保鲜膜组(plastic film)和 SWG-3 组。将香蕉浸泡于可食用膜液中 30 s, 取出, 悬挂自然晾干, 在 25 °C、50% RH 条件下进行保鲜试验。

1.11.1 失重率(WL) 在保鲜试验期间, 每天上午 10:00 利用万分之一电子天平对香蕉进行称重。参照 Yu 等^[11]的方法计算香蕉的失重率。

1.11.2 硬度 利用质构仪对保鲜试验期间的香蕉进行硬度测试。将香蕉果肉剪切成高度为 3 cm 的圆柱体, 利用 P50 探头对香蕉进行测试。测试参数: 试验前速度为 1 mm/s, 试验速度为 1 mm/s, 试验后速度为 1 mm/s, 距离为 100 mm, 触发力为 0.098 N。

1.11.3 pH 值 称取 30 g 香蕉果肉置于 100 mL 去离子水中, 捣碎, 均质, 过滤。取滤液于烧杯中, 用 pH 计测定滤液的 pH 值。

1.11.4 总酚含量 采用 Folin-Ciocalteu 法, 以没食子酸为标准品。将 15 g 香蕉果肉置于 50 mL 去离子水中, 捣碎, 均质, 过滤。取 1 mL 滤液与 Folin-Ciocalteu 溶液(0.5 mL)和碳酸钠溶液(10%, 1 mL)混合, 35 °C 振荡培养 30 min。测定混合溶液在 750 nm 处的吸光度。

1.12 数据处理与分析

利用 Origin 2021 Pro 和 SPSS 26.0 软件对试验数据进行绘图、单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较检验, $P < 0.05$ 表示具有统计学意义。每个试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 纳米纤维素基可食用膜的构建及微观结构

GDL 溶解于去离子水中, 分解产生葡萄糖酸, 诱导 WG 表面氨基质子化, 使 WG 带正电。正电荷的 WG 与负电荷的 SHNC 和 SA 之间形成强静电相互作用^[19]。同时, 聚合物单体之间发生原位氧化聚合^[20], 形成多种分子间相互作用, 诱导溶液凝胶化。经过干燥后, 即可得到纳米纤维素基可食用膜。可食用膜的表面微观结构如图 1 所示。SWG-1 膜表面平整, 且无任何颗粒。引入 SHNC 后, 可食用膜表面开始出现细小颗粒, 且有明显的凹凸部分, 呈鱼鳞结构, 表明 SHNC 可以提升可食用膜的表面粗糙度。继续加入 SHNC 后, 可食用膜表面呈不规则网状结构, 可食用膜的粗糙度进一步提升, 表明 SHNC 有利于提升单体之间的交联密度, 使单体之间交联更为紧密。

2.2 纳米纤维素基可食用膜的化学结构

利用 FT-IR 对 3 种可食用膜的非共价相互作用进行表征, 结果如图 2 所示。引入 SHNC 后, 可食用膜在 3 600~

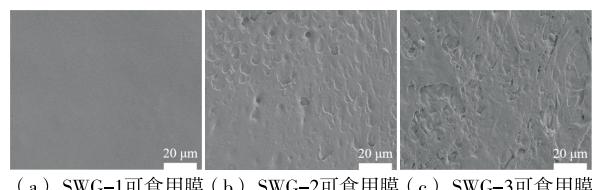


图 1 纳米纤维素基可食用膜的微观结构

Figure 1 Microstructure of edible nanocellulose-based films

3 100 cm^{-1} 处峰强度与半峰宽逐渐增加, 表明 SHNC 与其他单体之间形成了更多的氢键^[21]。同时, 此处的吸收峰向左移动, 表明 SHNC 与 WG 和 SA 单体之间形成强静电相互作用。可食用在 1 630 cm^{-1} 处吸收峰对应于羧基或酯基的拉伸振动^[22]。该吸收峰的峰强度随着 SHNC 添加量的增加呈逐渐增加的趋势, 表明 SHNC 和 SA 形成了酯键^[21]。此外, 2 903 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 C—H 拉伸振动, 表明单体之间形成的高分子聚合物中存在较多的烷基。1 409 cm^{-1} 处的吸收峰表示 C—O 的弯曲振动^[22], SHNC 的加入使吸收峰向左移动, 表明 SHNC 可以改变聚合物内部的环结构。1 100~800 cm^{-1} 处的吸收峰对应于苯环结构中 C—C、C—O 和 C—H 的弯曲振动^[22]。综上所述, SHNC 与 SA、WG 之间以静电相互作用、氢键和酯键交联形成可食用膜。

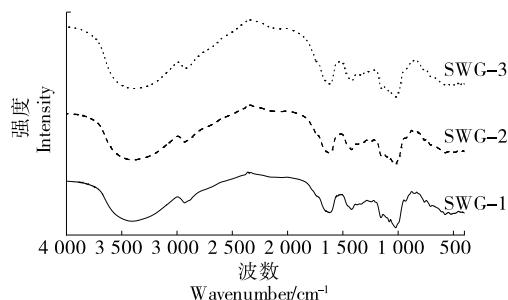


图 2 纳米纤维素基可食用膜的 FT-IR

Figure 2 FT-IR of edible nanocellulose-based films

利用 XRD 探究了 3 种可食用膜的结晶度, 结果如图 3 所示。可食用膜在 $2\theta=19.18^\circ$ 处具有较宽的衍射峰, 表明食用膜内部存在非晶体结构。 $2\theta=19.18^\circ$ 处的衍射峰对应于内部单体之间的三螺旋结构, 刺激 H 氢键形成^[23], 在可食用膜内部形成半晶域。引入 SHNC 后, SWG-3 复合膜出现大量的衍射峰, 表明 SHNC 在一定程度上增加了复合膜的结晶度, 可食用膜具有较高的结晶度有利于提升其机械强度和气体阻隔性。

2.3 纳米纤维素基可食用膜的物理性能

利用水接触角探究了可食用膜的疏水性, 结果如图 4 所示。随着 SHNC 添加量的增加, 可食用膜的水接触角逐渐增大。其中, SWG-3 可食用膜的水接触角是 SWG-1

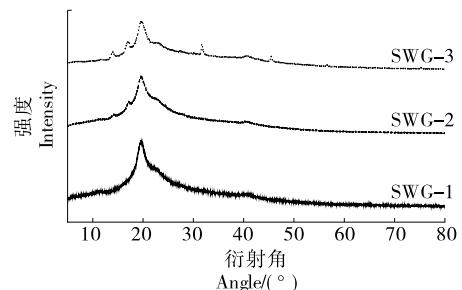


图 3 纳米纤维素基可食用膜的 XRD

Figure 3 XRD of edible nanocellulose-based films

可食用膜的 2.51 倍, 表明 SHNC 能显著增加可食用膜的疏水性 ($P<0.05$)。这是由于各单体之间形成强静电相互作用和多种化学键, 且单体之间相互纠缠, 提升了可食用膜表面的粗糙度, 进一步提升了可食用膜的疏水性。该结果与 Yu 等^[24]的研究结果相一致。Yu 等^[24]利用纳米纤维素作为填料添加到水凝胶内部, 以增强水凝胶的疏水性, 从而制备具有一定疏水性能的食品新鲜度检测材料。综上所述, 具有优异疏水性的可食用膜能有效避免采后水果因呼吸作用产生的水滴对膜结构的破坏, 延长采后水果的货架期^[25]。

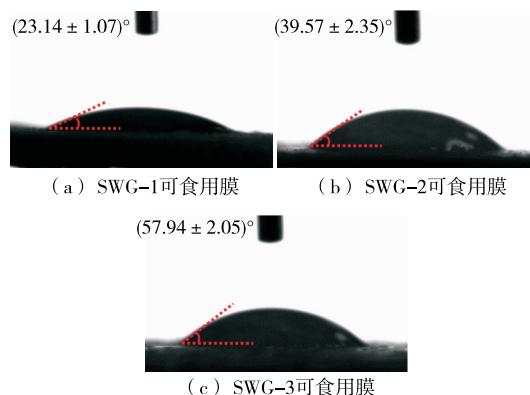


图 4 纳米纤维素基可食用膜的水接触角

Figure 4 Water contact angle of edible nanocellulose-based films

具有良好气体阻隔性的可食用膜可以显著降低采后水果的呼吸和代谢速率^[26], 可食用膜对水蒸气和氧气的阻隔性如图 5 所示。SWG-1 可食用膜的水蒸气透过率和氧气透过率分别为 $0.256 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $0.697 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa})$ 。引入 SHNC 后, 可食用膜的水蒸气透过率显著降低 ($P<0.05$), 其中, SWG-3 可食用膜的水蒸气和氧气透过率仅为 $0.131 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 和 $0.415 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$ 。这是由于各组分单体之间的交联密度增加, 形成致密的网络结构, 从而使可食用膜的孔径减小^[27]。也可能是纳米填料使得气体分子产生扭

曲,阻碍气体分子运动,并改变聚合物基体的界面区域,从而降低气体透过率。例如,Zhang 等^[28]利用纳米纤维素作为复合薄膜填料,以提升薄膜的气体阻隔性。结果表明,纳米纤维素将复合薄膜的气体阻隔性降低了 50% 以

上。因此,纳米纤维素可以有效提升食品包装材料的气体阻隔性。同时,可食用膜具有优异的水蒸气和氧气阻隔性能,可有效减少水果中的水分流失,抑制果实的呼吸和代谢过程。

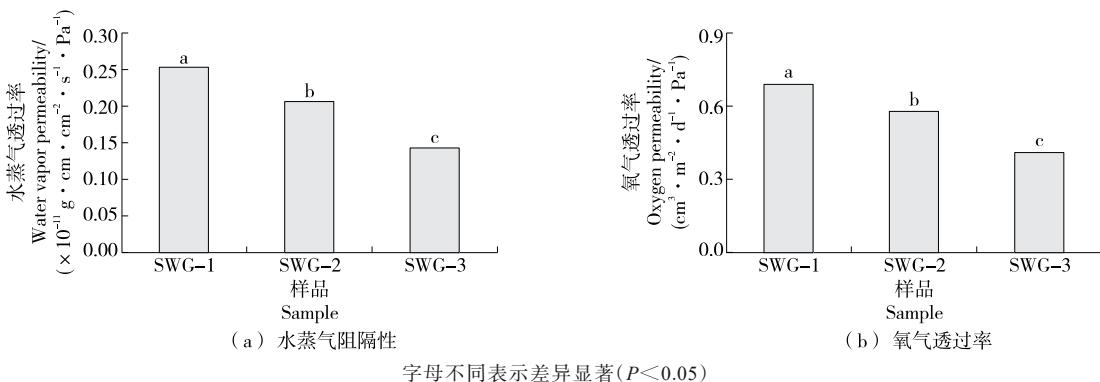


Figure 5 Gas barrier properties of edible nanocellulose-based films

2.4 纳米纤维素基可食用膜的机械性能

具有优异机械性能的可食用膜不仅能防止采后水果在运输和销售过程中免受机械损伤,还能避免采后水果由于机械损伤而缩短其货架期^[29]。如图 6 所示,引入 SHNC 后,可食用膜的断裂伸长率和拉伸强度显著增加 ($P<0.05$)。其中,SWG-3 的断裂伸长率和拉伸强度分别为 71.73% 和 51.48 MPa, 分别是 SWG-1 可食用膜 (33.52%, 13.94 MPa) 的 2.14 倍和 3.69 倍。这是由于 SA 与 SHNC 之间形成氢键和酯键。同时,SHNC 与 WG、SAC 之间形成强静电相互作用,增加了单体之间的交联密度,使各单体之间结合更为紧密,从而改善了可食用膜的拉伸强度。此外,WG 还可以作为单体之间的润滑剂,增加单体之间的交联密度,从而提升可食用膜的断裂伸长率。该结果与 Rahman 等^[30]的结果相类似。Rahman 等^[30]从植物中提取纳米纤维素,并制备食用油的包装材料。结果表明,随着纳米纤维素添加量逐渐增加,复合膜的断裂伸长率和拉伸强度逐渐增加,并在添加量为 4% 时,复合薄膜机械性能达到最大(断裂伸长率为 25.48%, 拉伸强度为 40.40 MPa)。综上所述,纳米纤维素可以增强复合薄膜的机械性能,从而防止水果受到机械损伤而变质。

2.5 纳米纤维素基可食用膜的自愈性能

通过流变行为来探究可食用膜的自愈性能,结果如图 7 所示。当 $\gamma=0.1\%$ 时, $G'>G''$, 可食用膜处于凝胶状态。当 $\gamma=100\%$ 时, $G'<G''$, 可食用膜受到外力挤压发生过量形变,导致内部网络结构被破坏,开始向溶液态转变^[31]。当应变由 0.1% 增加到 100% 时,SWG-1 可食用膜的 G' 变化较小,表明 SWG-1 可食用膜基本没有自愈性。而引入 SHNC 后,可食用膜的 G' 有显著变化 ($P<0.05$)。

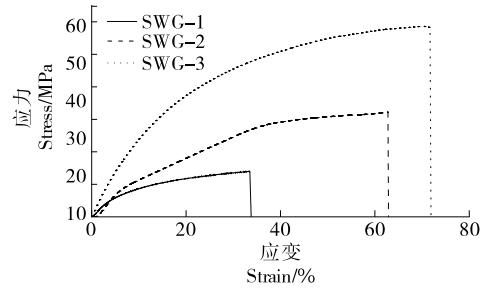


Figure 6 Mechanical properties of edible nanocellulose-based films

其中,SWG-3 可食用膜的 G' 由 693 kPa 降到 487 kPa。当应变由 100% 降到 0.1% 时, G' 又迅速恢复。此外,经过多次高低应变循环扫描后,可食用膜的 G' 基本不变,表明可食用膜具有优异的自愈性能。这可能是由于可食用膜通过物理作用形成交联网络,具有优异的可逆性,其可防止可食用膜受到外力挤压时水果表皮损坏而引起的变质。同时,该结果与 Yu 等^[32]的结果相类似,表明纳米纤维素可以提升食品包装材料的自愈性能。

2.6 香蕉保鲜试验

上述试验结果表明,SWG-3 具有较好的力学性能、自愈性、水蒸气和氧气的阻隔性能。因此,探究 SWG-3 对香蕉货架期的影响。通过在香蕉表面均匀喷涂复合溶液,一段时间后,复合溶液在香蕉表面形成一层可食用膜。这种可食用膜可以被清水洗掉,且对香蕉表面不会造成任何影响。在贮藏期内分别测定香蕉的失重率、硬度、pH 值和总酚含量。

如图 8 所示,对照组和 plastic film 组的香蕉分别于贮

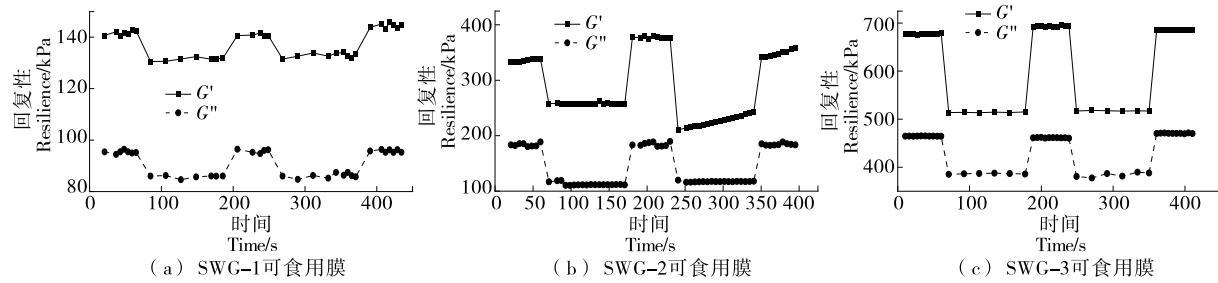


图7 纳米纤维素基可食用膜的自愈性能

Figure 7 Self-healing properties of edible nanocellulose-based films

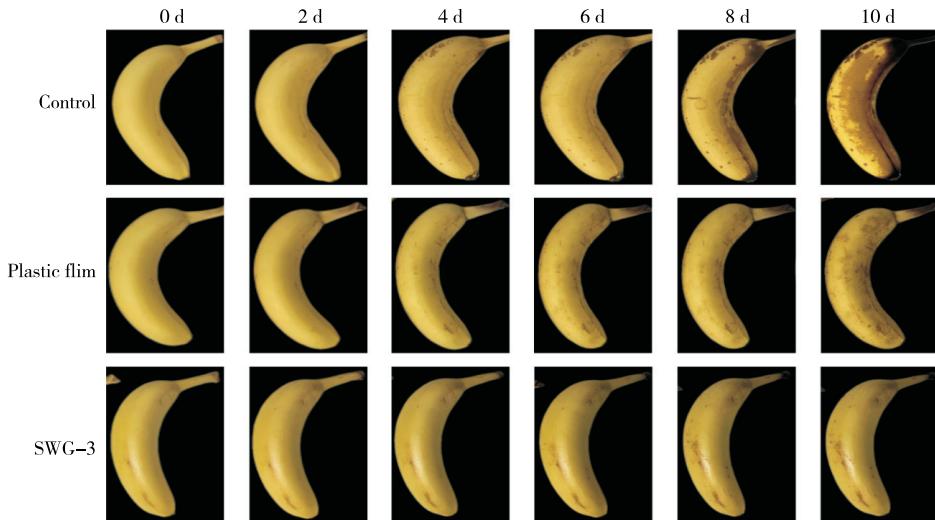


图8 纳米纤维素基可食用薄膜对香蕉的保鲜效果

Figure 8 Fresh-keeping effects of edible nanocellulose-based films on bananas

第2,4天开始褐变,对照组的香蕉在贮藏第10天后完全变成褐色。而SWG-3组的香蕉在贮藏第10天才出现明显的褐变。证明SWG-3可食用膜能显著抑制香蕉褐变($P<0.05$),延长采后香蕉的货架期至8 d以上。

2.6.1 失重率 如图9所示,各组的香蕉质量随着贮藏时间的延长而逐渐降低。贮藏10 d后,SWG-3组香蕉的质量损失率仅为对照组的38.7%,证明SWG-3可食用膜有效减缓了香蕉在贮藏期内水分流失。这可能是由于可食

用膜的水蒸气透过率低,减少了香蕉在贮藏期内的水分损失。

2.6.2 硬度 如图10所示,随着贮藏时间的延长,各组香蕉的硬度呈逐渐降低的趋势。贮藏10 d后,SWG-3组香蕉的硬度是对照组的2.86倍。证明SWG-3可食用膜能显著延缓香蕉的成熟过程。这是由于SWG-3可食用膜的气体透过率低,减少了香蕉在贮藏期内的气体交换速率,抑制了香蕉内部乙烯的释放,降低了香蕉内部果胶的分

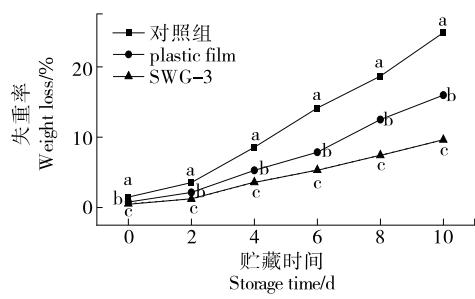
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图9 贮藏期间香蕉的失重率

Figure 9 Weight loss rates of bananas during storage

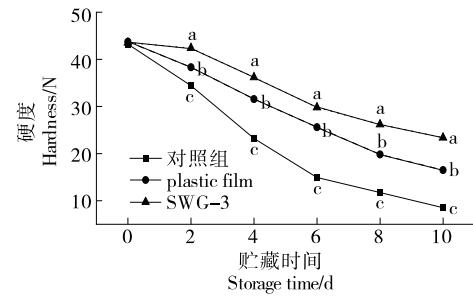
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图10 贮藏期间香蕉的硬度

Figure 10 Hardness of bananas during storage

解^[7],从而延长了香蕉软化时间。

2.6.3 pH 值 采后香蕉的成熟过程中,果肉中的有机酸可以通过碱性中和或酯化反应被消耗,导致香蕉果肉的酸度降低,pH 值逐渐升高^[33]。如图 11 所示,随着贮藏时间的延长,香蕉果肉的 pH 值逐渐升高。同时,在相同贮藏时间内,各组的 pH 值逐渐降低,进一步证明可食用膜能有效延缓采后香蕉成熟度,延长采后香蕉的货架期。

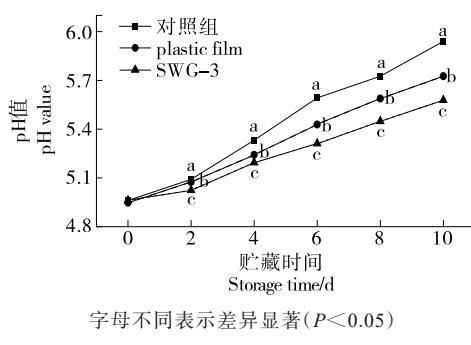


图 11 贮藏期间香蕉的 pH 值

Figure 11 pH value of bananas during storage

2.6.4 总酚含量 总酚是由酚类化合物介导的抗氧化活性的指示物,具有氧化还原和自由基清除特性^[34]。这些天然抗氧化剂通过谷胱甘肽途径发挥作用,可被氧化成醌类物质,进一步与氨基酸和蛋白质反应形成棕色色素,导致水果褐变和营养成分流失^[34]。如图 12 所示,随着贮藏时间的延长,香蕉果肉的总酚含量逐渐降低。同时,在相同贮藏时间内,各组的总酚含量逐渐升高,表明 SWG-3 可食用膜有效地延缓了采后香蕉内部酚类物质氧化,进一步表明可食用膜可以延缓采后香蕉的成熟,从而延长采后香蕉的货架期。

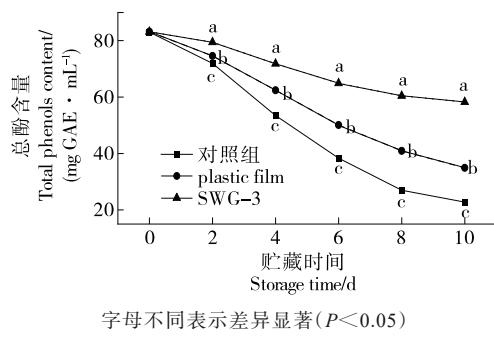


图 12 贮藏期间香蕉的总酚含量

Figure 12 Total phenol content of bananas during storage

3 结论

该研究利用大豆种皮纳米纤维素、海藻酸钠、小麦面筋和葡萄糖酸内酯之间的强静电相互作用、氢键和酯键制备了具有良好的机械强度、疏水性和自愈性的可食用

膜。引入大豆种皮纳米纤维素显著提升了可食用膜的机械强度、表面疏水性。同时,可食用膜具有优异的机械强度,以及对水蒸气具有优异的阻隔性能。采后香蕉保鲜试验表明,添加 1.0 g 纳米纤维素的多功能可食用膜能有效延缓香蕉失重和软化,抑制总酚氧化、延缓香蕉果实成熟,并且能将香蕉的货架期延长至 8 d 以上。

参考文献

- [1] DENG P P, ZHANG Y X, DENG Q X, et al. Multifunctional sodium alginate-based self-healing edible cross-linked coating for banana preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109753.
- [2] NIAN L Y, WANG M J, WANG F F, et al. Multifunctional material Cer@ MHKUST-1 with efficient preservation capability[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 433: 133267.
- [3] ZHANG W L, CAO J K, JIANG W B. Analysis of film-forming properties of chitosan with different molecular weights and its adhesion properties with different postharvest fruit surfaces[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133605.
- [4] KOCIRAK A, KOZLOWICZ K, PANASIEWICZ K, et al. Polysaccharides as edible films and coatings: characteristics and influence on fruit and vegetable quality: a review[J]. Agronomy, 2021, 11(5): 813.
- [5] MARINGGAL B, HASHIM N, MOHAMED AMIN TAWAKKAL I S, et al. Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 253-267.
- [6] JUNG S, CUI Y F, BARNES M, et al. Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits[J]. Advanced Materials, 2020, 32(26): 1908291.
- [7] XIE J W, WANG R, LI Y Y, et al. A novel $\text{Ag}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{Bi}_2\text{WO}_6$ /polyvinyl alcohol composite film with ethylene photocatalytic degradation performance towards banana preservation[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131708.
- [8] KHAN O A, ZAIDI S, ISLAM R U, et al. Enhanced shelf-life of peach fruit in alginate based edible coating loaded with TiO_2 nanoparticles[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 182: 107688.
- [9] ZHANG W L, LI X X, JIANG W B. Development of antioxidant chitosan film with banana peels extract and its application as coating in maintaining the storage quality of apple [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 1 205-1 214.
- [10] ZHUO X, LIU C, PAN R T, et al. Nanocellulose mechanically isolated from *amorpha fruticosa* linn[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(5): 4 414-4 420.
- [11] YU K J, YANG L N, ZHANG S Y, et al. Soy hull nanocellulose enhances the stretchability, transparency and ionic conductance of sodium alginate hydrogels and

- application in beef preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 152: 109938.
- [12] CHEN J X, WU A K, YANG M L, et al. Characterization of sodium alginate-based films incorporated with thymol for fresh-cut apple packaging[J]. *Food Control*, 2021, 126: 108063.
- [13] WANG M J, NIAN L Y, WU J Y, et al. Visible light-responsive chitosan/sodium alginate/QDs@ ZIF-8 nanocomposite films with antibacterial and ethylene scavenging performance for kiwifruit preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109073.
- [14] CAMPOS C A, GERSCHENSON L N, FLORES S K. Development of edible films and coatings with antimicrobial activity[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(6): 849-875.
- [15] LAGRAIN B, THEWISSEN B G, BRIJS K, et al. Mechanism of gliadin-glutenin cross-linking during hydrothermal treatment [J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(2): 753-760.
- [16] CHEN Y A, LI Y H, QIN S L, et al. Antimicrobial, UV blocking, water-resistant and degradable coatings and packaging films based on wheat gluten and lignocellulose for food preservation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 238: 109868.
- [17] AL-HILIFI S A, AL-ALI R M, DINH L N M, et al. Development of hyaluronic acid based polysaccharide-protein composite edible coatings for preservation of strawberry fruit [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 259: 128932.
- [18] CUI F C, XI L Q, WANG D F, et al. High-release, residue-free polysaccharide hydrogel for refrigerated food preservation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(4): 6 035-6 046.
- [19] ZHAO Y L, LI C, XIA X D, et al. Eco-friendly and intelligent cellulosic fibers-based packaging system for real-time visual detection of food freshness[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 146013.
- [20] DU Y N, XU S Q, WANG Y Q, et al. Fabrication and characterization of cold-set large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) roe protein isolate gels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 158: 113135.
- [21] ZHANG W L, ZHANG Y Q, CAO J K, et al. Improving the performance of edible food packaging films by using nanocellulose as an additive[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 166: 288-296.
- [22] XIAO Q, GU X H, TAN S. Drying process of sodium alginate films studied by two-dimensional correlation ATR-FTIR spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2014, 164: 179-184.
- [23] CHANG H B, XU J, MACQUEEN L A, et al. High-throughput coating with biodegradable antimicrobial pullulan fibres extends shelf life and reduces weight loss in an avocado model[J]. *Nature Food*, 2022, 3(6): 428-436.
- [24] YU K J, YANG L N, ZHANG S Y, et al. Stretchable, antifatigue, and intelligent nanocellulose hydrogel colorimetric film for real-time visual detection of beef freshness[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 268: 131602.
- [25] VIANA R M, SÁ N M S M, BARROS M O, et al. Nanofibrillated bacterial cellulose and pectin edible films added with fruit purees[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 196: 27-32.
- [26] ZHOU Z Q, MA J J, LI K, et al. A plant leaf-mimetic membrane with controllable gas permeation for efficient preservation of perishable products[J]. *ACS Nano*, 2021, 15 (5): 8 742-8 752.
- [27] LIANG J, XIA Q Y, WANG S, et al. Influence of glycerol on the molecular mobility, oxygen permeability and microstructure of amorphous zein films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 94-100.
- [28] ZHANG X C, JIAN J H, LUO Z S, et al. Fabrication of edible nanocellulose chitosan bi-component film based on a novel "swell-permeate" approach[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 346: 122632.
- [29] FAN X, RONG L S, LI Y X, et al. Fabrication of bio-based hierarchically structured ethylene scavenger films via electrospraying for fruit preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107837.
- [30] RAHMAN S, BATSH C, GURUMAYAM S, et al. Sodium alginate-nanocellulose-based active composite film for edible oils packaging applications[J]. *Materials Advances*, 2024, 5 (23): 9 314-9 329.
- [31] WANG S H, YU L, WANG S S, et al. Strong, tough, ionic conductive, and freezing-tolerant all-natural hydrogel enabled by cellulose-bentonite coordination interactions[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3 408.
- [32] YU K J, YANG L N, ZHANG S Y, et al. Strong, tough, high-release, and antibacterial nanocellulose hydrogel for refrigerated chicken preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 264: 130727.
- [33] NGUYEN T T, HUTNH NGUYEN T T, TRAN PHAM B T, et al. Development of poly (vinyl alcohol)/agar/maltodextrin coating containing silver nanoparticles for banana (*Musa acuminata*) preservation[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100740.
- [34] TINELLO F, LANTE A. Recent advances in controlling polyphenol oxidase activity of fruit and vegetable products[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 73-83.