

农产品保鲜与食品包装

改性纳米纤维素/玉米醇溶蛋白可食膜的制备及性能研究

赵恩靓^a, 贾文倩^a, 王一宁^a, 钱方^b, 吕艳娜^{a*}

(大连工业大学 a.轻工与化学工程学院 b.食品学院, 辽宁 大连 116034)

摘要: **目的** 赋予纳米纤维素抗菌性, 提高其在食品保鲜中的应用价值。**方法** 以 2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧基 (TEMPO) 氧化的纤维素纳米纤丝 (TOCNF) 为原料, 利用没食子酸 (GA) 对 TOCNF 进行改性, 获得改性后的纤维素纳米纤丝 (GA-TOCNF), 并将其与玉米醇溶蛋白 (Zein) 共混制备可食性薄膜, 探究 GA-TOCNF 和 Zein 不同比例对所制薄膜性能的影响。**结果** 当 GA-TOCNF 与 Zein 溶液的体积比为 1:2 时, 制备的没食子酸改性纳米纤维素/玉米醇溶蛋白复合膜 (GA-TOCNF/Zein) 的拉伸强度为 9.04 MPa, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别为 11.95 mm 和 13.1 mm。与不添加 GA-TOCNF 的薄膜相比, GA-TOCNF/Zein 的拉伸强度提高了 1.89 倍。**结论** 综合评价圣女果质量损失率、可溶性固形物和感官评价等指标可得, 玉米醇溶蛋白基复合膜对圣女果的涂膜保藏效果优于不涂膜对照组的保藏效果。

关键词: 纳米纤维素; 玉米醇溶蛋白; 酯化反应; 可食性膜; 涂膜保鲜

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)17-0001-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.001

Preparation and Properties of Edible Film from Modified Nanocellulose and Zein

ZHAO En-liang^a, JIA Wen-qian^a, WANG Yi-ning^a, QIAN Fang^b, LYU Yan-na^{a*}

(a. School of Light Industry and Chemical Engineering b. School of Food Science and Technology,
Dalian Polytechnic University, Liaoning Dalian 116034, China)

ABSTRACT: The work aims to endow nanocellulose with antibacterial property and improve its application in food preservation. Modified cellulose nanofiber (GA-TOCNF) was produced from TEMPO-oxidized cellulose nanofibril (TOCNF) and gallic acid (GA), and then the obtained GA-TOCNF solution and zein solution were mixed to prepare edible films. The effects of volume ratio of GA-TOCNF and zein on the properties of the films were investigated. When the volume ratio of GA-TOCNF to zein solution was 1:2, the tensile strength of the prepared gallic acid-modified nanocellulose/zein composite film (GA-TOCNF/Zein) was 9.04 MPa, and the diameters of the inhibition circles against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* were 11.95 mm and 13.1 mm, respectively. Compared with that of the films without GA-TOCNF, its tensile strength was increased by 1.89 times. A comprehensive evaluation of the weight loss, soluble solids and sensory evaluation of the cherry fruit shows that the zein-based composite film is better than the non-coated control group in preserving the cherry fruit by coating.

KEY WORDS: nanocellulose; zein; esterification reaction; edible film; coating preservation

可食性膜是主要由天然可食性生物大分子制备的薄膜。可食性膜通过浸渍、包裹、喷洒等方式在食

品表面提供了一个半封闭环境, 并通过添加一些抗菌、抗氧化的功能化合物, 抵抗菌类生长, 从而达到

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室开放基金资助项目 (2021KF21)

保鲜效果^[1]。玉米醇溶蛋白(Zein)是玉米蛋白粉中的主要蛋白质,约占总蛋白质量的70%。玉米醇溶蛋白的分子中存在大量的疏水性氨基酸和含硫氨基酸,分子间形成的氢键和疏水键是其成膜基础^[2]。同时,玉米醇溶蛋白作为可食用涂膜剂,在食品保鲜领域中具有广阔的应用前景。刘校男等^[3]制备了那他霉素玉米醇溶蛋白可食用膜,并对苹果进行了涂膜处理,发现可显著减少苹果贮存过程中V_C含量等指标的损失。但是天然玉米醇溶蛋白作为单一成膜基质时力学强度低、柔韧性差^[4],若能通过添加其他的天然生物大分子,改善玉米醇溶蛋白膜的力学性能的同时,赋予其抗菌性,将进一步扩大玉米醇溶蛋白在食品保鲜领域中的应用。

纳米纤维素是以天然纤维素为原料,通过化学、物理、生物或者几者相结合的手段得到的纤维素晶体,根据制备的尺寸和形态可以分为两大类:纤维素纳米晶和纤维素纳米纤丝^[5]。但由于纳米纤维素本身并不具有抗菌性,因此国内外的研究常将纳米纤维素与抗菌性物质共混来制备复合材料以达到食品保鲜的作用。李保祥等^[6]用壳聚糖/纳米纤维素(CNC)对砂糖橘进行涂膜处理,发现添加纳米纤维素可改善涂膜的结构与性能,显著提高了涂膜液对砂糖橘的保鲜效果。Andrade等^[7]将明胶/甘油/纤维素纳米纤维(CNF)涂料涂覆于香蕉和茄子外果皮上,发现其能提高果皮的润湿度,从而达到保鲜的目的。

没食子酸(Gallic Acid, GA)是自然界存在的一种多酚类化合物,在食品、生物、医药、化工等领域有着广泛的应用^[8]。张雅丽等^[9]对没食子酸抑制食源性病菌的能力做了探讨,结果表明,没食子酸对单增李斯特菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌等都有良好的抑菌作用。许多研究都提到GA可以赋予薄膜抑菌性,例如Yoon等^[10]以壳聚糖-没食子酸和聚乙烯醇为原料制备了共混薄膜,其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等4种细菌的抑菌圈直径为0.9~1.4 mm;Du等^[11]以魔芋葡甘聚糖和结冷胶为基质、甘油为增塑剂、CaCl₂为交联剂、没食子酸为天然抗菌剂,制备的抗菌膜在金黄色葡萄球菌周围有2~3 mm宽的抑制带。通过利用没食子酸对纳米纤维素进行改性,从而使纳米纤维素具有抗菌性的研究较少。

本研究以玉米醇溶蛋白为成膜基质,添加没食子酸酯化改性的纳米纤维素(GA-TOCNF),采用流延法制备具有抑菌性能的薄膜,探讨玉米醇溶蛋白与改性纳米纤维素溶液体积比对可食膜性能的影响,并对可食膜进行红外分析和微观形貌分析。将涂膜液涂覆于圣女果上,通过质量损失率、硬度、可溶性固形物、感官评价等指标,探究涂膜液对圣女果的保鲜效果。

1 实验

1.1 原料

主要材料:新鲜圣女果、食品保鲜膜,分析纯,购于大连市仟和农贸市场;纳米纤维素(TEMPO法),分析纯,北方世纪纤维素材料有限公司;没食子酸、玉米醇溶蛋白、1-乙基-(3-二甲基氨基丙基)碳二亚胺盐酸盐(EDC)、N-羟基琥珀酰亚胺(NHS)、甘油,分析纯,上海麦克林生化试剂科技有限公司;无水乙醇,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;LB琼脂、LB肉汤,北京陆桥技术有限责任公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备:DHG-9070A电热恒温鼓风干燥箱,上海飞越实验仪器有限公司;SJ-CJ-2FD超净工作台,苏洁医疗器械(苏州)有限公司;DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限公司;LRH-70生化培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;7230G紫外-可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;GY-2硬度计,浙江托普仪器有限公司;TD45数显甜度计,浙江托普云农科技股份有限公司;5965型万能拉力试验机,美国英斯特朗;Spectro Eye分光光度计,爱色丽(上海)色彩科技有限公司;Spectrum two傅里叶变换红外光谱仪,铂金埃尔默仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 GA-TOCNF的制备

称0.25 g纳米纤维素(TOCNF)分散在75 mL的乙醇溶液(体积分数为30%)中,在温度为40℃、速度为800 r/min的磁力搅拌器上,分散均匀;加入0.16 g EDC和0.05 g NHS活化羧基,活化1 h,然后加入0.02 g没食子酸进行接枝反应24 h,透析至溶液无色。

1.3.2 GA-TOCNF的表征

用KBr压片法测定TOCNF、GA-TOCNF的红外光谱特征吸收峰值,扫描范围为400~4 000 cm⁻¹。

1.3.3 GA-TOCNF/Zein复合膜的制备

对照组:称取1.5 g玉米醇溶蛋白溶于15 mL的体积分数为80%的乙醇溶液中,在60℃下搅拌15 min,然后加入质量分数为20%(以Zein干质量为基准)的甘油,继续搅拌105 min;采用流延法制备薄膜,将溶液倒入直径为10 cm的玻璃培养皿中,放入鼓风干燥箱中在60℃下烘烤2 h,得到G0/Z薄膜。

实验组:GA-TOCNF溶液和Zein溶液分别以1:3、1:2.5、1:2、1:1.5、1:1的体积比进行混合,获得15 mL的成膜溶液。其中Zein溶液的料液

比 (g/mL) 为 1:10, 60 °C 下搅拌 15 min 后, 加入质量分数为 20% (以 Zein 干质量为基准) 的甘油, 继续搅拌 15 min。然后添加 GA-TOCNF 溶液, 继续搅拌 90 min。依据对照组 G0/Z 的成膜方法, 按上述 Zein 溶液和 GA-TOCNF 溶液的比例顺序依次制备 G1/Z、G2/Z、G3/Z、G4/Z、G5/Z 薄膜。

1.3.4 GA-TOCNF/Zein 复合膜的表征

1.3.4.1 傅里叶变换红外光谱 (ATR-FTIR) 分析

薄膜采用傅里叶变换衰减全反射红外光谱法测定峰值。扫描范围为 400~4 000 cm⁻¹。

1.3.4.2 厚度

使用千分尺 (精确度为 0.01 mm) 测量薄膜厚度, 随机选取 3 个测量点, 取平均值^[12]。

1.3.4.3 拉伸强度和断裂伸长率

参考 Wang 等^[13]的方法并略有修改。将薄膜裁剪成 70 mm×20 mm 的长条, 使用万能拉力试验机测试薄膜的力学性能 3 次, 取平均值。夹具间距为 50 mm, 拉伸速度为 5 mm/min。

拉伸强度的计算见式 (1), 断裂伸长率的计算见式 (2)。

$$T_s = \frac{F_{\max}}{S} \tag{1}$$

式中: $F_{\max}$ 为薄膜断裂时的最大载荷, N; S 为薄膜的横截面积 (厚度×宽度), mm²。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中: L_0 为膜的原始距离, mm; ΔL 为薄膜断裂时的长度差, mm。

1.3.4.4 颜色和透明度

参考刘校男等^[14]的方法并略有修改。以白板为测定参比, 测量薄膜样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 计算 ΔE 值。使用紫外-可见分光光度计测量薄膜样品在波长为 600 nm 时的透光率^[4]。

色差值 ΔE 计算式见式 (3)。

$$\Delta E = \sqrt{(L_x - L_1)^2 + (a_x - a_1)^2 + (b_x - b_1)^2} \tag{3}$$

式中: ΔE 为 G0/Z 薄膜与 Gx/Z 薄膜的色差值; L_x 、 a_x 、 b_x 分别为 Gx/Z 薄膜的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 其中 x 对应于添加 GA-TOCNF 后 1.3.3 节中实验组的薄膜编号; L_1 、 a_1 、 b_1 分别为 G0/Z 薄膜的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.3.4.5 抑菌能力

参考司婉芳等^[15]的方法并略有修改。在无菌操作环境下, 利用打孔器将薄膜切成直径为 6 mm 的圆形试样, 并设置圆形滤纸片作为空白对照。将活化后的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌菌液涂布于 LB 琼脂培养基, 并将薄膜样品贴于培养基上, 在 37 °C 的培养箱中培养 24 h 后, 用游标卡尺测量抑菌圈的直径。测量 3 次, 结果取平均值。

1.3.4.6 微观形貌特征分析

将干燥好的薄膜裁切成适应大小, 用导电胶带固定于样品台上, 喷金 3 min, 使用扫描电镜 (SEM) 观察薄膜样品的表面形貌。

1.3.5 圣女果保鲜实验

筛选出大小均匀、表皮完好的圣女果 27 个, 用去离子水洗净, 分为空白对照组、聚乙烯保鲜膜组、GA-TOCNF/Zein 成膜液处理组, 每组 9 个圣女果样品。在常温下贮存 7 d, 分别在第 1 天、第 4 天、第 7 天测定圣女果的质量损失率、可溶性固形物含量和硬度, 并对其进行感官评价。空白组不做任何处理; 保鲜膜组的圣女果用 PE 膜包裹; 成膜液处理组将圣女果浸在 GA-TOCNF/Zein 膜液中 1 min, 取出后在室温下自然晾干。

1) 质量损失率按式 (4) 计算。

$$W = \frac{m - m_i}{m} \times 100\% \tag{4}$$

式中: m 为圣女果初始质量, g; m_i 为圣女果第 i 天的质量, g。

2) 可溶性固形物含量的测定: 将圣女果汁液滴入到数显甜度计中, READ 读数。

3) 硬度的测定: 使用手持式硬度计测量硬度。

4) 感官评价: 随机选取 5 名同学, 依据表 1 对各个实验组的圣女果进行评分。

表 1 圣女果感官评价
Tab.1 Sensory evaluation of cherry fruit

评价指标	评价分值	评价
外观完好, 表皮规整, 色泽鲜艳, 有光泽, 有浓烈的果味香气	[10, 8]	乐意购买
外观基本完好, 表皮稍有褶皱, 色泽稍微暗淡, 有果味香气	[5, 8]	愿意购买
外观一般, 表皮有褶皱, 色泽暗淡, 有果味	[3, 5]	可以购买
外观差, 表面失水, 有菌落出现, 有腐败气味	[0, 3]	不愿购买

1.4 数据处理与分析

实验数据采用 Origin 8.0 和 SPSS 24.0 软件进行处理, 采用 Duncan 多重比较进行显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 TOCNF、GA-TOCNF 的 FT-IR 分析

FT-IR 可用于分析 TOCNF 接枝前后特征基团的变化情况, 结果如图 1 所示。TOCNF 的 FT-IR 光谱显示了在

3 432、2 923、1 410 和 1 116 cm^{-1} 处的纳米纤维素的特征谱带,它们分别与 TOCNF 的—OH (3 000~3 700 cm^{-1})、—CH₂ (2 850~2 980 cm^{-1})、C—H 的对称变形(1 250~1 460 cm^{-1})和 C—O—C 伸缩振动 (1 170~1 050 cm^{-1}) 有关^[16]。1 600 cm^{-1} 处对应的是 TOCNF 中存在的—COO[−]^[17]。GA 的 1 030 cm^{-1} 处和 GA-TOCNF 的 1 033 cm^{-1} 处对应的是酚羟基的吸收峰^[18]。GA-TOCNF 与 TOCNF 相比,1 728 cm^{-1} 处出现了新峰,这对应了酯键在 1 750~1 725 cm^{-1} 处的 C=O 伸缩振动,同时在 1 264 cm^{-1} 和 1 093 cm^{-1} 处伴随着 C—O—C 的伸缩振动 (1 300~1 050 cm^{-1}) 吸收谱带^[19]。

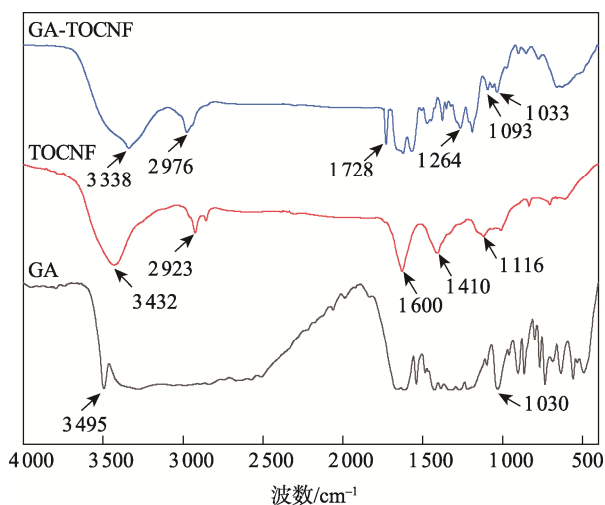


图 1 GA-TOCNF、TOCNF、GA 的 FT-IR 谱图
Fig.1 FT-IR spectra of GA-TOCNF, TOCNF and GA

2.2 GA-TOCNF/Zein 复合膜的 ATR-FTIR 分析

ATR-FTIR 可用于分析不同 GA-TOCNF 添加量对 Zein 膜特征基团的影响。图 2 中的 1 538、1 647 和 3 289 cm^{-1} 分别代表分子结构中的酰胺 II 带处 N—H 的弯曲振动和 C—N 的拉伸振动 (1 600~1 500 cm^{-1})、酰胺 I 带处 C=O 的拉伸振动 (1 700~1 600 cm^{-1})、

酰胺 A 带处 O—H 的拉伸振动 (3 600~3 100 cm^{-1})^[20]。GA-TOCNF/Zein 薄膜主峰相似,薄膜较多地保留了 Zein 的化学结构。与 G0/Z 薄膜相比,添加了 GA-TOCNF 的 Zein 膜也出现了 1 728 cm^{-1} 处的酯基特征峰。同时,酰胺 A、酰胺 I 和酰胺 II 的能带也略有增宽,这可能是由于 GA-TOCNF 上的羟基与玉米醇溶蛋白之间有氢键形成。

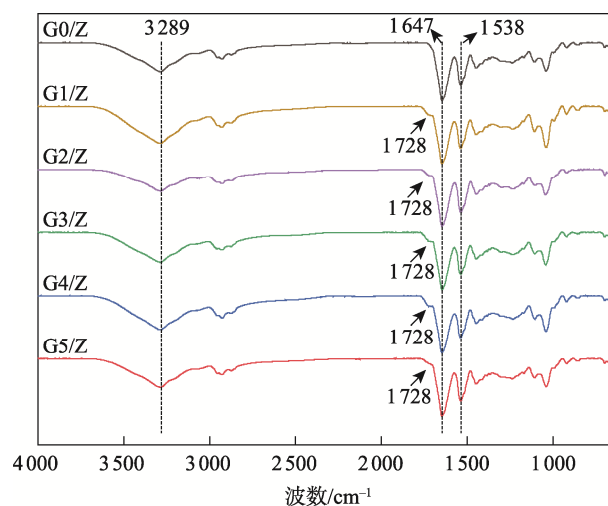


图 2 GA-TOCNF/Zein 薄膜的 ATR-FTIR 谱图
Fig.2 ATR-FTIR spectra of GA-TOCNF/Zein films

2.3 GA-TOCNF/Zein 复合膜的色度值及透明度

薄膜的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、透明度如表 2 所示。与 G0/Z 薄膜相比,GA-TOCNF 的含量与薄膜的 L^* 、 b^* 值呈正相关,与 a^* 值呈负相关。添加了 GA-TOCNF 的薄膜的色差 ΔE 随着 GA-TOCNF 含量的增加而增大。薄膜的透明度与 GA-TOCNF 含量呈正相关。这可能主要因为 GA-TOCNF 的加入使 Zein 在整个溶剂体系下固液比降低。同时因为 GA-TOCNF 溶液是无色透明的液体,所以添加量最高的 G5/Z 薄膜的透明度最高。

表 2 薄膜的色度值及透明度
Tab.2 Chromaticity value and transparency of composite films

名称	L^* (白度)	a^* (黄)	b^* (红)	ΔE	透明度/%
G0/Z	76.81±0.03 ^f	14.35±0.07 ^a	97.99±0.16 ^b		15.36±0.09 ^f
G1/Z	77.80±0.01 ^e	11.07±0.04 ^b	96.02±0.03 ^c	3.95±0.01 ^e	17.70±0.03 ^e
G2/Z	79.61±0.03 ^c	8.92±0.06 ^c	99.71±0.10 ^a	6.35±0.09 ^d	20.73±0.04 ^d
G3/Z	79.47±0.04 ^d	5.38±0.10 ^d	89.12±0.03 ^d	12.89±0.04 ^c	23.41±0.04 ^c
G4/Z	82.73±0.03 ^b	5.38±0.01 ^d	83.47±0.06 ^e	18.06±0.06 ^b	25.52±0.03 ^b
G5/Z	86.82±0.03 ^a	1.99±0.10 ^e	67.23±0.16 ^f	34.63±0.11 ^a	28.85±0.07 ^a

注:上标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

Fig.4 SEM of the films

GA-TOCNF/Zein 膜液后,其表面会形成保护层,可以有效阻止水果与外部环境的物质交换,增加水果中水分向环境中流失的难度^[25]。由图 5b 可知,贮藏期间,空白对照组和保鲜膜组的可溶性固形物含量的下降速度极快,分别下降了 1.3%和 1.2%,而成膜液组抑制圣女果可溶性固形物降低效果更明显,可溶性固形物含量仅下降了 0.68%。由图 5c 可知,在第 7 天

时,经 GA-TOCNF/Zein 成膜液处理过的圣女果硬度最大。由图 5d 可知,成膜液组处理的圣女果的感官评价也明显高于其他 2 组的,这都表明了 GA-TOCNF/Zein 膜液对圣女果有保鲜效果。

图 6 为圣女果的贮藏期间变化图,其外观与上述分析一致。随着贮藏时间的延长,圣女果的质量逐渐下降,果实变软。在第 7 天的时候,空白对照组与其他 2 组相

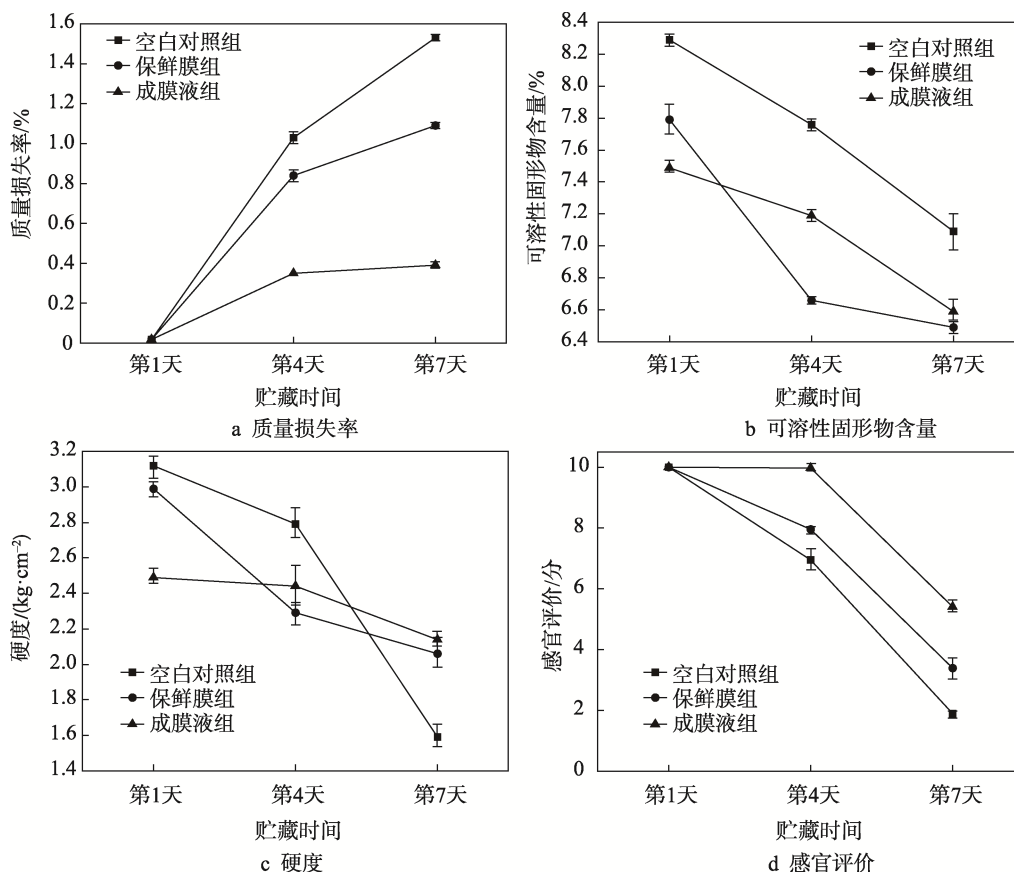


图 5 GA-TOCNF/Zein 成膜液对圣女果贮藏期间生理指标的影响
Fig.5 Effects of GA-TOCNF/zein film forming solution on physiological indexes of cherry fruit during storage

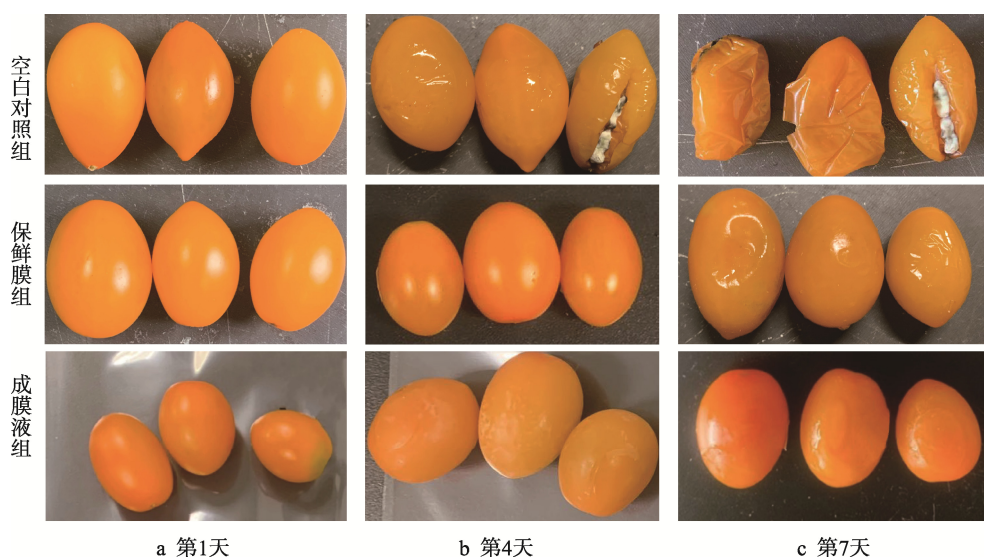


图 6 贮藏期间圣女果的外观变化
Fig.6 Appearance change of cherry fruit during storage

比, 品质已经明显变差, 果实腐烂, 并有菌落出现; 保鲜膜组在第7天的时候已经完全没有果疏香气, 果皮表面已经起皱不再饱满, 果实变软, 汁液渗出; 成膜液组在第7天的品质虽然与第1天相比有所下降, 但还带有果疏香气, 表皮完好。这些现象进一步表明, GA-TOCNF/Zein膜液的抗菌性可以延长果蔬的保鲜时间。

3 结语

利用没食子酸改性纤维素纳米纤丝, FTIR 分析确定了没食子酸(GA)和TEMPO氧化的纤维素纳米纤丝(TOCNF)之间是通过酯键连接的。以玉米醇溶蛋白为基质, 没食子酸改性的纳米纤维素为抗菌剂和增强剂, 甘油为增塑剂, 通过流延法制备可食性膜。结果表明, 当GA-TOCNF与Zein溶液的体积比为1:2时, 薄膜的拉伸强度为9.04 MPa, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别为11.95 mm和13.1 mm, 抑菌效果最好。与不添加GA-TOCNF的薄膜相比, 添加后的薄膜的拉伸强度提高了1.89倍。将GA-TOCNF/Zein膜液涂布于圣女果上, 可有效抑制圣女果质量减小、硬度下降、可溶性固形物含量减少, 对圣女果起到一定的保鲜效果。本研究为探索纳米纤维素在玉米醇溶蛋白膜中的作用机制及其在食品保鲜包装中的应用奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] HASSAN B, CHATHA S A S, HUSSAIN A I, et al. Recent Advances on Polysaccharides, Lipids and Protein Based Edible Films and Coatings: A Review[J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2018, 109: 1095-1107.
- [2] 王晓敏, 刘战丽, 孙阳, 等. 负载茶多酚的三元共混膜的制备及性能[J]. 精细化工, 2021, 38(6): 1212-1219.
WANG Xiao-min, LIU Zhan-li, SUN Yang, et al. Preparation and Properties of Tea Polyphenol Loaded Ternary Blend Films[J]. Fine Chemicals, 2021, 38(6): 1212-1219.
- [3] 刘校男, 唐文婷, 刘瑞琦, 等. 高阻断性那他霉素玉米醇溶蛋白可食用膜的制备及对苹果的保鲜效果[J]. 中国食品添加剂, 2017(9): 188-193.
LIU Xiao-nan, TANG Wen-ting, LIU Rui-qi, et al. Preparation of High Blocking Natamycin Loaded Zein Edible Film and Its Preservation Effect on Apple[J]. China Food Additives, 2017(9): 188-193.
- [4] 董爽, 宋昱珠, 吕莹, 等. 玉米醇溶蛋白/纳米TiO₂抗菌复合膜的制备及性质研究[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 25-30.
DONG Shuang, SONG Yu-zhu, LYU Ying, et al. Preparation and Properties of Zein/Nano-TiO₂ Antibacterial Composite Membrane[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(6): 25-30.
- [5] 卞辉洋, 李关莲, 朱玉连, 等. 纳米纤维制备过程中酶处理对分散性能的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(3): 342-348.
BIAN Hui-yang, LI Guan-lian, ZHU Yu-lian, et al. Effect of Enzymatic Treatment on Fiber Dispersion Characteristics during Nanofiber Preparation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2016, 45(3): 342-348.
- [6] 李保祥, 余易琳, 何悦, 等. 壳聚糖-纳米纤维素复合涂膜对砂糖橘贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 185-192.
LI Bao-xiang, YU Yi-lin, HE Yue, et al. Effect of Chitosan-Nanocrystal Cellulose Composite Coating on the Preservation of Shatangju Mandarin[J]. Food Science, 2021, 42(13): 185-192.
- [7] ANDRADE R, SKURTYS O, OSORIO F, et al. Wettability of Gelatin Coating Formulations Containing Cellulose Nanofibers on Banana and Eggplant Epicarps[J]. LWT, 2014, 58(1): 158-165.
- [8] 柯发敏, 张开莲. 没食子酸的研究进展[J]. 泸州医学院学报, 2011, 34(4): 440-442.
KE Fa-min, ZHANG Kai-lian. Research Progress of Gallic Acid[J]. Journal of Luzhou Medical College, 2011, 34(4): 440-442.
- [9] 张雅丽, 李建科, 刘柳. 没食子酸的体外抑菌作用研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 81-84.
ZHANG Ya-li, LI Jian-ke, LIU Liu. Antimicrobial Activities of Gallic Acid in Vitro[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(11): 81-84.
- [10] YOON S D, KIM Y M, KIM B I, et al. Preparation and Antibacterial Activities of Chitosan-Gallic Acid/Polyvinyl Alcohol Blend Film by LED-UV Irradiation[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B, Biology, 2017, 176: 145-149.
- [11] DU Yu, SUN Ji-shuai, WANG Lin, et al. Development of Antimicrobial Packaging Materials by Incorporation of Gallic Acid into Ca²⁺ Crosslinking Konjac Glucomannan/Gellan Gum Films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137: 1076-1085.
- [12] 刘新新, 刘钟栋. 海藻酸钠/玉米醇溶蛋白抗菌复合膜的制备及其性能[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 113-118.
LIU Xin-xin, LIU Zhong-dong. Preparation of Edible Antimicrobial Packaging Film with Sodium Alginate as Matrix and Its Property Identification[J]. The Food In-

- dustry, 2020, 41(4): 113-118.
- [13] WANG Yi-ning, GUO Xin, LI Jin-hui, et al. Synergistic Effects of (3-Mercaptopropyl)Trimethoxysilane and Citric Acid on the Improvement of Water Vapor Barrier Performance of Polyvinyl Alcohol/Xylan Packaging Films[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 171(1): 113822.
- [14] 刘校男, 唐文婷, 张再美, 等. 负载丁香酚/纳他霉素的玉米醇溶蛋白膜的制备、性能及其应用[J]. 中国食品添加剂, 2018(9): 142-148.
- LIU Xiao-nan, TANG Wen-ting, ZHANG Zai-mei, et al. Preparation, Properties and Application of Zein Film with Natamycin and Eugenol[J]. China Food Additives, 2018(9): 142-148.
- [15] 司婉芳, 杨福馨, 王金鑫. 改性 CA-CP 抑菌薄膜的制备与性能表征[J]. 功能材料, 2019, 50(2): 179-183.
- SI Wan-fang, YANG Fu-xin, WANG Jin-xin. Preparation and Characterization of Modified CA-CP Antibacterial Film[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(2): 179-183.
- [16] AL-AHMED Z, HASSAN A, EL-KHOULY S, et al. TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibers/TiO₂ Nanocomposite as New Adsorbent for Brilliant Blue Dye Removal[J]. Polymer Bulletin, 2020, 77(12): 6213-6226.
- [17] SAINI S, QUINOT D, LAVOINE N, et al.. Beta-Cyclodextrin-Grafted TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibers for Sustained Release of Essential Oil[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(7): 3849-3861.
- [18] 胡可欣, 李国英. 没食子酸对胶原蛋白膜的改性研究[J]. 皮革科学与工程, 2020, 30(4): 1-6.
- HU Ke-xin, LI Guo-ying. Modification of Collagen Membrane by Gallic Acid[J]. Leather Science and Engineering, 2020, 30(4): 1-6.
- [19] 王一宁. 木聚糖类半纤维素衍生物的制备及其在包装中的应用研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2021: 29.
- WANG Yi-ning. Study on the Preparation of Xylan-Hemicellulose Derivatives and Their Application in Packaging[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2021:29.
- [20] 蒋龙伟. 儿茶素/ β -环糊精包合物的制备及其在玉米醇溶蛋白膜中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 100-102.
- JIANG Long-wei. Preparation of Catechin/ β -Cyclodextrin Inclusion Complex and Its Application in Zein Film[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 100-102.
- [21] 李颖畅, 师丹华, 张馨元, 等. 超声波辅助没食子酸改善海鲈鱼肌原纤维蛋白的凝胶性能[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 82-91.
- LI Ying-chang, SHI Dan-hua, ZHANG Xin-yuan, et al. Gallic Acid Combined with Ultrasound Treatment Improves the Gel Properties of Lateolabrax Japonicus Myofibrillar Protein[J]. Food Science, 2022, 43(11): 82-91.
- [22] 王欣卉, 程红, 陈佳鹏, 等. 玉米醇溶蛋白/多糖基复合抗菌膜的制备及性能表征[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 212-220.
- WANG Xin-hui, CHENG Hong, CHEN Jia-peng, et al. Preparation and Performance Characterization of Zein/Polysaccharide Group Compound Antimicrobial Film[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 212-220.
- [23] 葛思彤, 李琦, 贾睿, 等. 基于玉米醇溶蛋白/没食子酸复合纳米颗粒提升玉米油 Pickering 乳液的氧化稳定性[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 78-85.
- GE Si-tong, LI Qi, JIA Rui, et al. Zein/Gallic Acid Composite Nanoparticles to Improve the Oxidation Stability of Corn Oil Pickering Emulsion[J]. Food Science, 2022, 43(20): 78-85.
- [24] 张莹丽, 张妍, 戚家慧. 壳聚糖—柑橘精油复合保鲜剂对圣女果保鲜效果的研究[J]. 许昌学院学报, 2021, 40(5): 75-78.
- ZHANG Ying-li, ZHANG Yan, QI Jia-hui. Study on the Preservation Effect of Chitosan-Citrus Essential Oil Compound Preservative on Cherry Tomatoes[J]. Journal of Xuchang University, 2021, 40(5): 75-78.
- [25] 陈蔚燕, 穆燕, 朱爱芳, 等. 玉米醇溶蛋白膜的制备及其保鲜效果评价[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 141-147.
- CHEN Wei-yan, MU Yan, ZHU Ai-fang, et al. Evaluation of the Preparation and Preservation Effects of Zein Film[J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(11): 141-147.

责任编辑: 曾钰婷