

静电纺丝玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜的制备及应用

范鑫, 杨婷, 王艺瑜, 黄峻榕

(陕西科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:我国果蔬腐烂率高达 20%~30%, 亟待通过构建生物基水果保鲜膜延长水果的货架期。该文利用静电纺丝技术制备具有高比表面积的生物基玉米醇溶蛋白-肉桂醛(zein-cinnamaldehyde, Z-CA)水果保鲜膜, 探究玉米醇溶蛋白和肉桂醛之间的互作关系, 以及不同肉桂醛浓度对 Z-CA 膜的微观形貌、疏水性、乙烯吸附性和抑菌性的影响, 评价 Z-CA 膜对香蕉的保鲜效果。研究结果表明, 玉米醇溶蛋白与肉桂醛之间存在氢键作用, 静电纺丝 Z-550CA 膜具有良好的纤维形貌、乙烯吸附效率 $[(7.73 \pm 1.57) \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})]$ 、疏水性 $(131.14 \pm 7.96)^\circ$ 和抑菌性能, 能够有效延长香蕉的货架期。

关键词:玉米醇溶蛋白; 肉桂醛; 静电纺丝; 乙烯吸附; 水果保鲜膜

Preparation and Application of Electrospun Zein-Cinnamaldehyde Fruit Preservation Film

FAN Xin, YANG Ting, WANG Yiyu, HUANG Junrong

(School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: The loss rate of fruit in China is as high as 20%–30%. Thus it is urgent to extend the shelf life of fruit by constructing bio-based fruit preservation film. A bio-based zein-cinnamaldehyde (Z-CA) fruit preservation film with high specific surface area was prepared by electrospinning, to explore the interaction between zein and cinnamaldehyde. The effects of different cinnamaldehyde concentrations on the microscopic morphology, hydrophobicity, ethylene adsorption, and bacterial inhibition of Z-CA film were also studied. The fresh-keeping performance of Z-CA film on bananas was evaluated. It was found that there was a hydrogen bonding between zein and cinnamaldehyde. The electrospun Z-550CA film had good fiber morphology, ethylene adsorption efficiency $[(7.73 \pm 1.57) \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})]$, hydrophobicity $(131.14 \pm 7.96)^\circ$, and antibacterial property, thereby effectively extending the shelf life of bananas.

Key words: zein; cinnamaldehyde; electrospinning; ethylene adsorption; fruit preservation

引文格式:

范鑫, 杨婷, 王艺瑜, 等. 静电纺丝玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜的制备及应用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(5): 1-7.

FAN Xin, YANG Ting, WANG Yiyu, et al. Preparation and Application of Electrospun Zein-Cinnamaldehyde Fruit Preservation Film[J]. Food Research and Development, 2024, 45(5): 1-7.

水果的损耗会造成巨大的经济损失^[1], 据统计, 我国果蔬的腐烂率高达 20%~30%^[2]。造成水果损耗的主要原因包括机械损伤^[3]、植物激素^[4]、微生物污染^[5]等。乙烯是促进水果后熟的重要植物激素, 可由呼吸

跃变型水果自发产生。乙烯吸附机理包括: (1) 利用高比表面能的物理吸附, 如纳米纤维^[6]或多孔材料等^[7-8]; (2) 利用活性官能团的化学吸附, 如高锰酸钾、 O_3 、 ClO_2 、 H_2O_2 等强氧化剂的氧化催化反应清除^[9], TiO_2 、金

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272380); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(22JC007); 陕西省科协青年人才托举计划项目(20230225)

作者简介: 范鑫(1989—), 女(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 蛋白基纳米纤维、食品包装材料。

属钼、铂等材料的光催化反应清除^[10-11]。但现有的乙烯吸附方法存在吸附容量小、易解吸、对环境有害等问题。因此,亟待开发一种高效绿色的乙烯吸附材料。

静电纺丝技术是一种方法简单、工艺可控的纳米纤维制备方法,其制备机理为电纺液滴在高静压的作用下被瞬时拉伸,并伴随溶剂挥发,最终形成纳米纤维。目前,已广泛应用于生物医药^[12]、能源^[13]和传感器^[14]等领域。玉米醇溶蛋白(zein)是生产玉米淀粉的副产物,因缺少赖氨酸、色氨酸等必需氨基酸而导致其营养价值和食用价值低。玉米醇溶蛋白含有大量的活性官能团,可作为吸附乙烯的潜在材料,并且其具有良好的成膜性和疏水性。然而,zein膜因其自身特性易受到微生物侵染,导致其功能性下降,使用寿命缩短。肉桂醛来源于中药桂枝和肉桂,是一种苯丙烯类含醛有机化合物,为无色或淡黄色黏稠状液体,已被研究证明具有抗菌作用,且抑菌作用稳定性良好^[15]。

基于上述研究背景,本研究选用玉米醇溶蛋白和肉桂醛作为静电纺丝电纺液,制备兼具良好乙烯吸附性和抑菌性的玉米醇溶蛋白-肉桂醛(zein-cinnamaldehyde,Z-CA)水果保鲜膜。通过荧光光谱仪、傅里叶变换红外光谱仪、水接触角测定仪、高分辨率扫描电子显微镜和气体检测仪等表征Z-CA膜的性能,考察Z-CA膜在水果保鲜应用中的应用价值,以期为开发水果抑菌保鲜膜提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

香蕉:产地为云南省红河州;玉米醇溶蛋白、肉桂醛(95%):上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇:天津市富宇精细化工有限公司;尿素:天津市永大化学试剂有限公司;十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS):科昊生物工程有限责任公司;5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)[5,5'-dithiobis (2-nitrobenzoic acid), DTNB]:上海麦克林生化科技有限公司;所用化学试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

TL-Pro 高压静电纺丝机:中国通力维纳公司;Fluoro Max-4 荧光分光光度计:日本 Horiba 公司;TA Plus 物性分析仪:英国 SMS 公司;Verios 460 高分辨率扫描电子显微镜:美国 FEI 公司;TGA Q500 热重分析仪:美国 TA 公司;VERTE70 傅里叶变换红外光谱仪:德国 PE 公司;NDJ-8S 黏度计:上海舜宇恒平科学仪器有限公司;DSA 100 视频接触角测量仪:德国 KRÜSS 公司;VOC 气体检测仪:美国华瑞集团。

1.3 试验方法

1.3.1 Z-CA 膜的制备

将 5 g zein 溶于 20 mL 80% 乙醇中,搅拌至玉米

醇溶蛋白完全溶解,再向溶液中添加不同含量的肉桂醛,使肉桂醛的浓度分别为 0、450、500、550、600 mg/mL,将其作为电纺液利用静电纺丝机制备纳米纤维膜,电纺参数为针头 20 号、流速 2 mL/h、电压 16 kV、纺丝时间 30 min、接收距离 10 cm。上述所得纤维膜命名为 Z-0CA 膜、Z-450CA 膜、Z-500CA 膜、Z-550CA 膜、Z-600CA 膜,其中各电纺膜的平均厚度为 0.12 mm。

1.3.2 Z-CA 溶液性质的表征

1.3.2.1 内源性荧光测定

参考任晓锋^[16]的内源性荧光测定方法,用 80% 乙醇溶液稀释 Z-CA 溶液至 0.4 mg/mL,使用荧光分光光度计扫描样品,设置激发波长为 370 nm,发射波长为 450 nm,激发狭缝宽 3.0 nm,发射狭缝宽 3.0 nm。

1.3.2.2 黏度测定

使用旋转黏度测量法测定样品黏度,该方法利用黏度计的转子与流体之间产生的剪切和阻力之间的关系而得出黏度值。选用 2 号转子(直径=18.7 mm)进行黏度测定,探头转速设置为 30 r/min。

1.3.2.3 总巯基含量测定

参考朱文慧等^[17]总巯基含量测定方法,使用 DTNB 比色法测定玉米醇溶蛋白中总巯基的含量,将不同肉桂醛浓度的 Z-CA 溶液用 80% 乙醇溶液稀释至 0.2 mg/mL,取 0.5 mL 稀释样品与 2 mL 尿素-SDS 溶液混匀后,加入 50 μ L 100 nmol/L DTNB 溶液,混匀室温避光反应 15 min,测量 412 nm 处混合溶液的吸光度,并按照以下公式计算 Z-CA 溶液的总巯基含量。

$$X = (A \times D) / (\xi \times C)$$

式中: X 为总巯基含量, nmol/mg; A 为 412 nm 处测量混合溶液的吸光度; ξ 为巯基摩尔消光系数, 13 600 L/(mol $\cdot$ cm); D 为稀释倍数; C 为蛋白质溶液质量浓度, mg/mL。

1.3.3 Z-CA 膜性能表征

1.3.3.1 傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测定

将样品与干燥的溴化钾按质量比为 1:100 混合并进行研磨、过筛和压片,扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.3.3.2 热重测定

利用热重分析仪测定 Z-CA 膜的热稳定性和热分解性,温度范围为 20~600 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,气氛补偿为氮气(N_2),升温方式为程序升温。

1.3.3.3 扫描电子显微镜测定

使用高分辨率扫描电子显微镜观察电纺 Z-CA 膜的微观形貌。样品在真空中进行镀金 30 s,使其具有导电性后放入扫描电镜下进行观察,电压 2 kV,放大至 10 000 倍观察 Z-CA 膜的形貌。纳米纤维膜直径的大小利用 Nano Measurer 软件分析。

1.3.3.4 乙烯吸附性能测定

参考 Fan 等^[18]的方法,将 Z-CA 膜剪制成 5 cm×5 cm 的正方形并将其放入采气袋中,充入 0.255~0.271 mg/L 乙烯气体,进行乙烯吸附性能试验。5 h 后,用挥发性有机化合物检测器测定袋内乙烯残留浓度,检测精度为 0.008~1.620 mg/L 异丁烯标定点的+3%。

1.3.3.5 疏水性测定

Z-CA 膜的疏水性通过接触角的大小来评估。测定方法为座滴法,液滴平衡时间为 3 s,测试温度为 25 ℃。

1.3.3.6 抑菌性能测定

参考萨仁高娃^[19]抑菌圈测定方法并进行改进,研究含有不同肉桂醛浓度 Z-CA 膜对革兰氏阴性大肠杆菌(*Escherichia.coli*)和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus.aureus*)的抑菌性。用滤纸片辅助将所制备不同肉桂醛浓度 Z-CA 膜剪制为半径 10 mm 圆片,并在紫外灯下照射数小时后备用。用移液枪取 50 μ L 菌液均匀涂布在 TSA 平板上(菌液浓度约为 10^8 CFU/mL),再将所剪制的滤纸片置于平板上,于 37 ℃培养 24 h 后,测量抑菌圈直径的大小。

1.3.4 Z-CA 膜的香蕉保鲜试验

将同一批香蕉样品与不同肉桂醛浓度的 Z-CA 膜放置于相同封闭环境(25 ℃、相对湿度 50%)中贮藏,使用电纺接收基底纸巾作为对照试验,记录香蕉表面变化情况,当任意一组香蕉表皮完全褐变时作为终点。借助物性分析仪测定香蕉果皮和果肉硬度,测试探头的前、中、后速度均为 1 mm/s。

1.4 统计分析

试验数据采用 IBM SPSS Statistics 软件进行方差分析,Duncan 多重比较检验法进行显著性分析(P 值设置为 0.05),每个测定至少重复测试 3 次,试验所有数据以平均值±标准差表示,使用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 zein 和肉桂醛之间的相互作用

Z-CA 膜的荧光光谱图如图 1 所示。

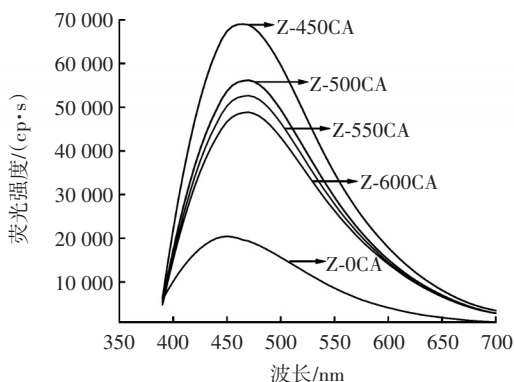


图 1 Z-CA 膜的荧光光谱

Fig.1 Fluorescence spectra of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film)

由图 1 可知,未添加肉桂醛的 zein 荧光强度最低,添加肉桂醛之后荧光强度增高,但是随着肉桂醛浓度的增大,样品溶液荧光强度逐渐降低,波长出现红移,说明高浓度肉桂醛对 zein 有荧光猝灭作用。上述现象是由于肉桂醛与 zein 存在相互作用,导致蛋白分子伸展,暴露出不同的生色基团部分,荧光强度升高;随着肉桂醛浓度增大,这种相互作用逐渐增强,导致荧光强度逐渐降低。这种现象可能是由于氢键作用、疏水相互作用或共价作用导致的^[20]。

本研究借助红外光谱进一步明确肉桂醛和 zein 之间的相互作用类型,不同 Z-CA 膜的傅里叶变换红外光谱如图 2 所示。

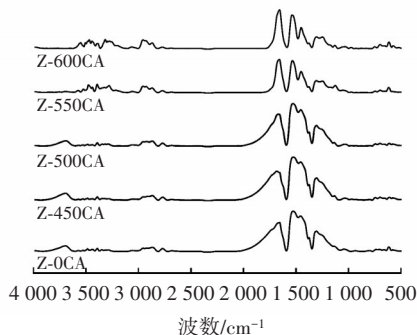


图 2 Z-CA 膜的傅里叶变换红外光谱

Fig.2 FT-IR spectra of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film)

由图 2 可知,Z-CA 膜与纯 zein 膜的特征峰相似,没有出现新的峰。此外,添加肉桂醛后 Z-CA 膜的酰胺 I 带、酰胺 II 带($1\ 450\text{ cm}^{-1}$)特征峰发生蓝移,这可能是氢键与分子构象变化的共同作用。结合上述荧光结果分析,zein 与肉桂醛之间以氢键相互作用结合。

利用热重分析法(thermogravimetry analysis, TGA)分析测定不同 Z-CA 膜的热稳定性和热分解性,如图 3 所示。

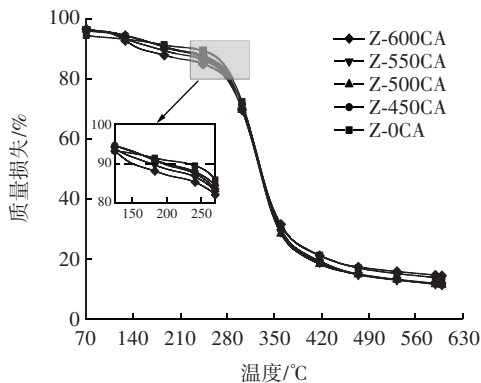


图 3 Z-CA 膜的热重曲线

Fig.3 Thermogravimetry (TG) curves of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film)

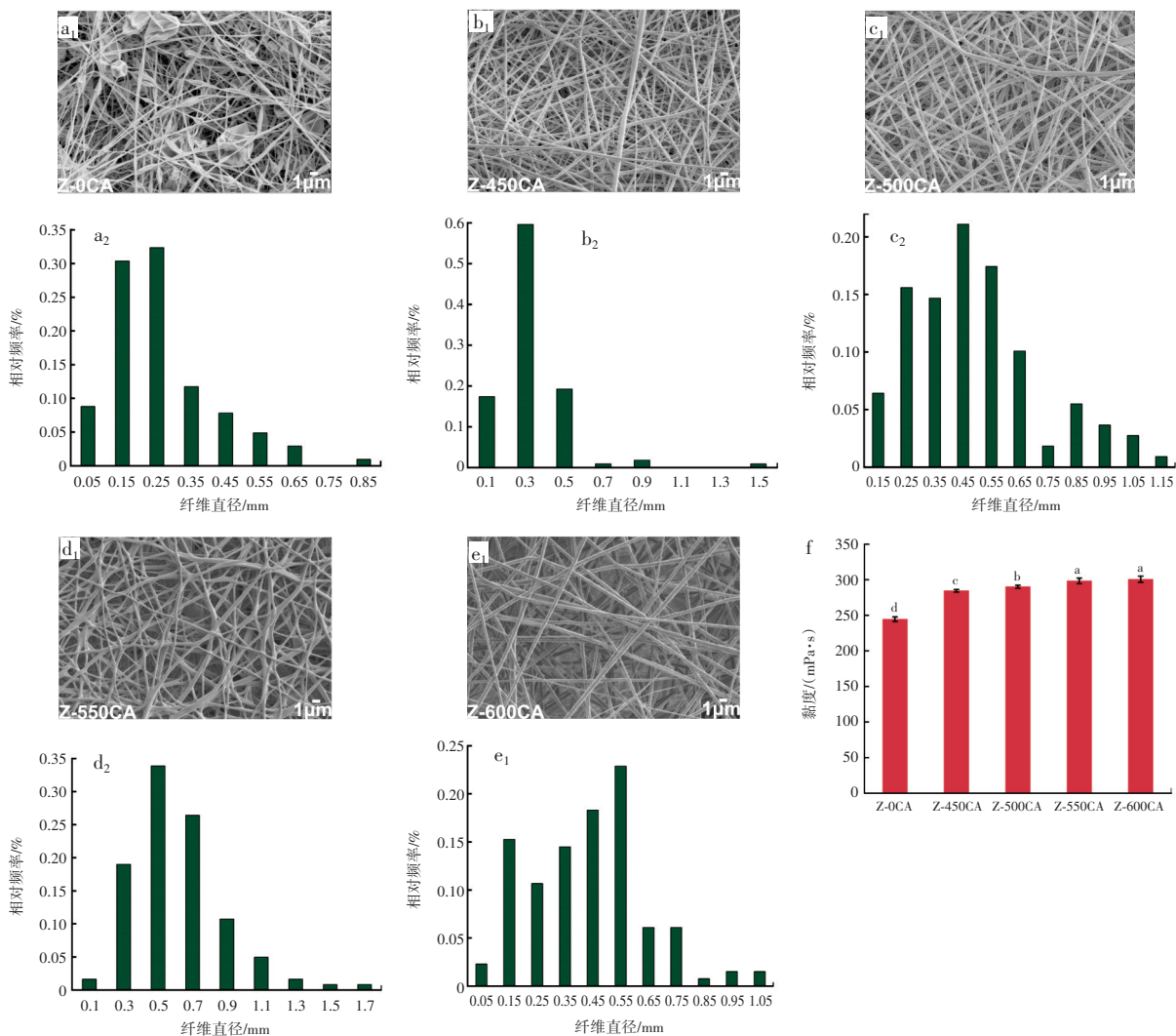
从图 3 能够看出,Z-CA 膜的失重过程分为两个阶段:第一个阶段的失重温度在 70~110 ℃,主要为 Z-CA

膜复合膜中残留的乙醇和结合水的蒸发,产生质量损失;第二阶段的失重温度在 125~320 ℃。随着 CA 浓度的增加,热分解温度越低,热稳定性越差,这是由于肉桂醛属于热不稳定性物质,加入肉桂醛量越多,热稳定性越差。

2.2 Z-CA 膜的性能表征

蛋白基纳米材料的微观形貌对其乙烯吸附性能具有重要作用^[21]。Z-CA 膜的扫描电镜图和 Z-CA 溶液黏度见图 4。

如图 4a 所示,未添加肉桂醛的 Z-0CA 膜中呈现



组间不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。a₁、a₂、Z-0CA 膜; b₁、b₂、Z-450CA 膜; c₁、c₂、Z-500CA 膜; d₁、d₂、Z-550CA 膜; e₁、e₂、Z-600CA 膜; f、Z-CA 溶液的黏度。

图 4 Z-CA 膜的扫描电镜图和黏度

Fig.4 Scanning electron microscope (SEM) images of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film) and viscosity of Z-CA solution

大量的串珠状;添加肉桂醛的 Z-CA 膜呈现规则均匀的纤维形貌(图 4b~图 4e);随着肉桂醛浓度的增加,Z-CA 膜纤维直径逐渐增加。这是由于玉米醇溶蛋白与肉桂醛之间存在氢键交联,增加了溶液的黏度,从而使纤维形貌更加均匀且纤维直径逐渐增大。随着肉桂醛浓度的增加,Z-CA 溶液黏度逐渐增大,其中 Z-0CA 溶液黏度最低,为(244.50±3.21)mPa·s;Z-600CA 溶液黏度最高,为(300.67±4.27)mPa·s。

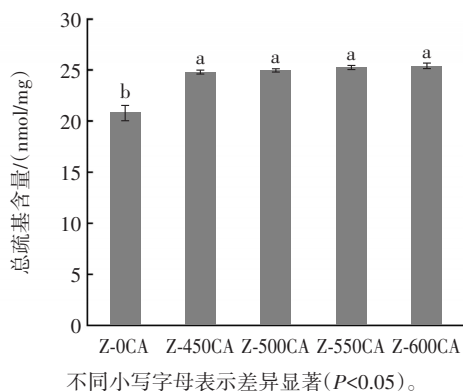
玉米醇溶蛋白中的巯基会与乙烯快速发生不可逆反应,即“点击反应”,从而提高蛋白膜的乙烯吸附性

能^[21]。Z-CA 溶液的总巯基含量如图 5 所示。

如图 5 所示,随着肉桂醛浓度的增加,溶液中总巯基含量逐渐增加,这是由于肉桂醛与玉米醇溶蛋白存在氢键相互作用,促使蛋白结构舒展,暴露出更多的活性官能团。其中,Z-600CA 溶液总巯基含量最高,为(25.4±0.22)nmol/mg。

Z-CA 膜的乙烯吸附性能如图 6 所示。

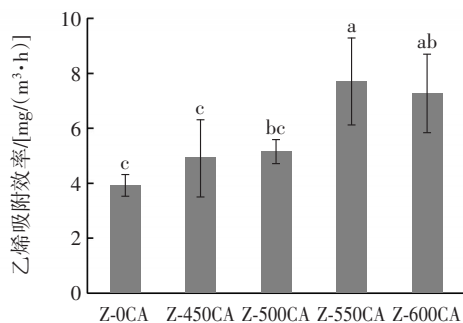
如图 6 所示,添加肉桂醛之后 Z-CA 膜的乙烯吸附效率大于未添加肉桂醛 Z-0CA 膜。这是由于肉桂醛使 zein 结构舒展,暴露更多活性官能团,提升其乙烯



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图5 Z-CA溶液的总巯基含量

Fig.5 Total thiol content of zein-cinnamaldehyde solution



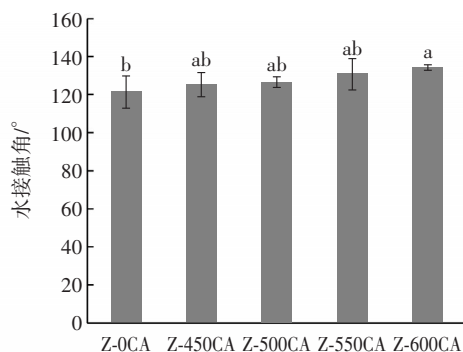
不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图6 Z-CA膜的乙烯吸附效率

Fig.6 Ethylene adsorption of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film)

吸附性能。同时,添加肉桂醛后,Z-CA膜的乙烯吸附效率呈现先增加后降低的趋势,其中,Z-550CA膜乙烯吸附效率最高,为 $[(7.73 \pm 1.57) \text{ mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})]$ 。这是由于肉桂醛除了使zein结构舒展,也会导致溶液黏度增加。例如,当肉桂醛浓度为600 mg/mL时,电纺液黏度增加,导致纳米纤维直径增加,膜材料的比表面能下降,降低了Z-CA膜的物理乙烯吸附作用。

水果保鲜膜具有一定的疏水性和抑菌性是保证其高效发挥作用的前提。Z-CA膜的疏水性如图7所示。



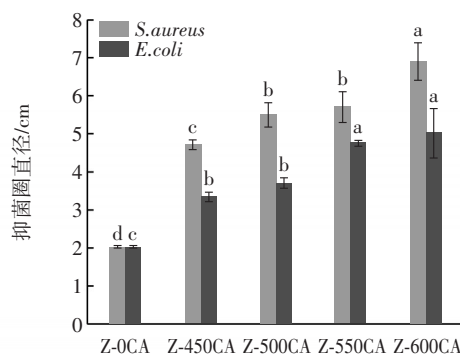
不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图7 Z-CA膜的水接触角

Fig.7 Water contact angle of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film)

如图7所示,随着肉桂醛浓度的增加,Z-CA膜的水接触角越大,疏水性越好。其中,Z-0CA膜的水接触角为 $(121.63 \pm 8.22)^\circ$,Z-600CA膜的水接触角为 $(134.45 \pm 0.85)^\circ$ 。这可能是由于肉桂醛和玉米醇溶蛋白都为疏水性物质,两者相互混合产生协同作用,增加纤维膜的疏水性。

Z-CA膜的抑菌性能如图8所示。



组间不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图8 Z-CA膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈直径

Fig.8 Inhibition zone diameter of zein-cinnamaldehyde fruit preservation film (Z-CA film) against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*

如图8所示,肉桂醛对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均具有良好的抑制作用^[22],随着CA浓度的增加,Z-CA膜的抑菌圈直径逐渐增大,其中Z-600CA膜的抑菌性能最佳,对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈直径分别为 $(6.85 \pm 0.48) \text{ cm}$ 和 $(5.02 \pm 0.63) \text{ cm}$,这是由于肉桂醛对细菌具有良好的抑菌性,且浓度越大,抑菌性能越好^[23]。

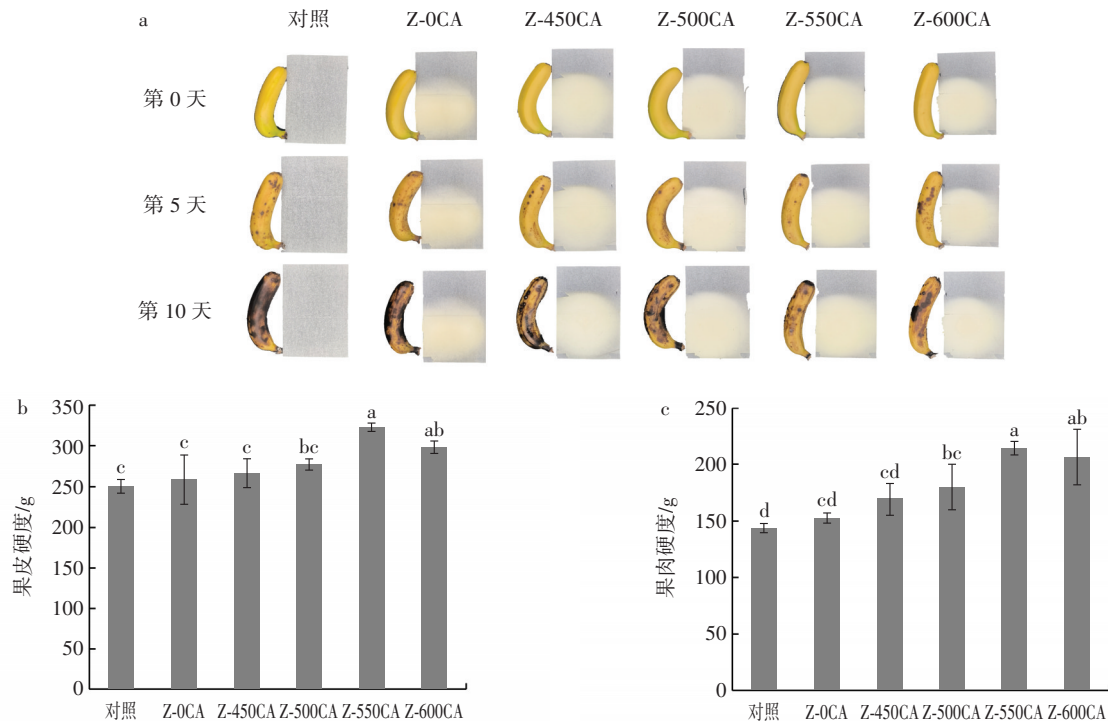
2.3 Z-CA膜的香蕉保鲜试验

香蕉与不同Z-CA膜在室温贮藏10 d过程中的变化情况如图9所示。

由图9a可知,对照组香蕉样品在10 d后外观呈现出严重的褐变和腐烂现象,而放置Z-CA膜(尤其是放置Z-550CA膜)的香蕉样品较好地保持了香蕉样品原本外观形貌,香蕉表皮褐变面积较少。如图9b~图9c所示,放置Z-550CA膜的香蕉在第10天具有最高的果皮硬度 $(323.09 \pm 4.89) \text{ g}$ 和果肉硬度 $(214.09 \pm 5.93) \text{ g}$ 。这是由于Z-550CA膜具有最高的乙烯吸附效率以及良好的抑菌性能。上述现象表明,Z-550CA膜能有效降低香蕉表皮的褐变,以及延缓香蕉果皮和果肉硬度的下降,具有良好的保鲜作用。

3 结论

本文采用静电纺丝技术制备了玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜,通过评价不同肉桂醛浓度的Z-CA膜的微观形貌、乙烯吸附性能、疏水性和抑菌性,确定



a. 外观照片; b. 香蕉果皮硬度; c. 果肉硬度。组间不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图9 贮藏10 d前后的外观照片、香蕉果皮硬度和果肉硬度

Fig.9 Appearance photos, skin hardness, and flesh hardness of bananas before and after 10 days of storage

了肉桂醛最佳添加量为 550 mg/mL。Z-550CA 膜具有良好的纤维形貌、乙烯吸附效率、疏水性、对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈分别为 (5.68 ± 0.39) cm 和 (4.73 ± 0.05) cm。此外, Z-550CA 膜能有效降低香蕉表皮的褐变, 延缓香蕉果皮和果肉硬度的下降, 有效延长香蕉的货架期和贮藏品质。研究结果为 Z-CA 膜的进一步保鲜应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 李泰, 程广燕, 黄家章, 等. 苹果和柑桔损耗与浪费的综合足迹评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 683-690.
- [2] 张清宇, 李晓如, 萧铭莹, 等. 果蔬包装用可生物降解材料的制备与应用研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 75-86.
- [3] ZHANG Qingyu, LI Xiaoru, XIAO Nuoying, et al. Preparation and application progress of biodegradable materials for fruit and vegetable packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 75-86.
- [4] ZHENG D D, CHEN J H, LIN M H, et al. Packaging design to protect hongmeiren orange fruit from mechanical damage during simulated and road transportation[J]. Horticulturae, 2022, 8(3): 258.
- [5] 王超, 杨子明, 何祖宇, 等. 乙烯清除剂在果蔬保鲜中的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(9): 82-88.
- [6] WANG Chao, YANG Ziming, HE Zuyu, et al. Research progress of ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables[J]. Storage and Process, 2022, 22(9): 82-88.
- [7] MIN D D, ZHAO J S, BODNER G, et al. Early decay detection in fruit by hyperspectral imaging-Principles and application potential[J]. Food Control, 2023, 152: 109830.
- [8] KUMAR A, RAMAKANTH D, AKHILA K, et al. Influence of halloysite nanotubes/microfibrillated cellulose on pine leaves waste based ethylene scavenging composite paper for food packaging applications[J]. Applied Clay Science, 2023, 231: 106726.
- [9] XU J R, WANG F, ZHAN J L, et al. Construction of TiO_2 /starch nanocomposite cryogel for ethylene removal and banana preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 312: 120825.
- [10] SOARES T R P, REIS A F, DOS SANTOS J W S, et al. NaY-Ag zeolite chitosan coating kraft paper applied as ethylene scavenger packaging[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(5): 1101-1115.
- [11] GAIKWAD K K, SINGH S, NEGI Y S. Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18(2): 269-284.
- [12] DE MATOS FONSECA J, PABÓN N Y L, VALENCIA G A, et al. Ethylene scavenging properties from hydroxypropyl methylcellulose- TiO_2 and gelatin- TiO_2 nanocomposites on polyethylene supports for fruit application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 178: 154-169.
- [13] WEI H Y, ZHANG T W, LI L C, et al. Platinum nanoparticles supported on dendritic mesoporous silica nanoparticles with tunable size as ethylene scavengers for food preservation[J]. Applied Surface Science, 2023, 629: 157321.
- [14] WANG B, WANG J, LOU Y Y, et al. Halloysite nanotubes strengthened electrospinning composite nanofiber membrane for on-skin flexible pressure sensor with high sensitivity, good breathability, and round-the-clock antibacterial activity[J]. Applied Clay Science, 2022, 228: 106650.

- [13] JU J G, HUANG Y T, LIU M Y, et al. Construction of electrospinning Janus nanofiber membranes for efficient solar-driven membrane distillation[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 305: 122348.
- [14] 杨海贞, 马闯, 魏肃桀, 等. 静电纺丝碳纳米管基复合材料在传感器中的应用研究进展[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(2): 256-268. YANG Haizhen, MA Chuang, WEI Sujie, et al. Research progress of electrospun carbon nanotube-based composites in sensor applications[J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(2): 256-268.
- [15] 苟玉虹. 肉桂醛联合头孢曲松治疗耐药性沙门氏菌感染的药效学研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022. GOU Yuhong. Pharmacodynamic study of cinnamaldehyde combined with ceftriaxone in the treatment of drug-resistant *Salmonella* infection[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [16] 任晓锋. 扫频超声预处理对玉米醇溶蛋白特性及其酶法制备ACE抑制肽的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2014. REN Xiaofeng. Effects of sweeping frequency ultrasound on properties of zein and preparation of ACE-inhibitory peptides on enzymatic from zein[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [17] 朱文慧, 谭桂芝, 吕月月, 等. 光催化技术对牡蛎肉杀菌效果及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(5): 202-212. ZHU Wenhui, TAN Guizhi, LÜ Yueyue, et al. Effect of photocatalytic technology on sterilization and quality of oyster meat[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5): 202-212.
- [18] FAN X, RONG L S, LI Y X, et al. Fabrication of bio-based hierarchically structured ethylene scavenger films via electrospinning for fruit preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107837.
- [19] 萨仁高娃. 百里香精油与海藻酸盐复合涂膜防控鲜切水果食源性病原微生物作用机制的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. SAREN Gao Wa. Study on prevention and control mechanism of foodborne pathogens on fresh-cut fruits by thyme oil-alginate-based coating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [20] 饶震红, 王明安, 张莉. 基于光谱分析技术的肉桂醛与玉米醇溶蛋白作用机理的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1940-1946. RAO Zhenhong, WANG Ming'an, ZHANG Li, et al. Study on the mechanism of interaction between cinnamaldehyde and zein based on spectral analysis technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6): 1940-1946.
- [21] FAN X, YANG T, LI Y X, et al. Fabrication of depolymerized zein films via high-intensity ultrasound for ethylene adsorption packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 39: 101159.
- [22] 万守梅. 高直链玉米淀粉/肉桂醛复合膜食品包装材料的制备及性能研究[D]. 厦门: 集美大学, 2022. WAN Shoumei. Preparation and properties of high-amylose corn starch/cinnamaldehyde composite film food packaging material[D]. Xiamen: Jimei University, 2022.
- [23] 黎静斌. 肉桂精油乳液的制备及其对南丰蜜桔保鲜效果的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. LI Jingbin. Preparation of cinnamon essential oil emulsion and its effect on preservation of Nanfeng tangerine[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

责任编辑:冯娜

收稿日期:2023-07-04