



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240232

网络首发日期: 2025-05-06; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250502.1745.001>

聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜的制备及其抗菌性能研究

李紫杉^{1,2}, 杨春雪^{1,2}, 任舒悦², 高志贤², 刘继锋¹

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;

2. 军事科学院军事医学研究院环境医学与作业医学研究所, 天津 300050)

摘要: 为了延长果蔬采后货架期, 避免其受到微生物侵入而腐烂变质, 采用静电纺丝技术制备聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜。结果表明: 聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜具有优异的机械性能和抗氧化性, 膜的拉伸强度为 (3.65 ± 0.51) MPa, 断裂伸长率为 $(131.13 \pm 5.04)\%$, DPPH 自由基清除率为 $(80.13 \pm 0.23)\%$ 。当槲皮素的添加量为 6% 时, 聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜对大肠杆菌的抑菌率达 99.63%, 对金黄色葡萄球菌的抑菌率达 99.64%。以千禧小番茄贮藏实验评估膜的实际应用, 与市售 PE 膜相比, 聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜可以延长千禧小番茄贮藏期 6 d。这表明可降解的聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜能够有效抑制食源性致病菌的增长, 作为食品包装材料可以延长番茄的货架期。

关键词: 可降解; 高效抑菌; 抗氧化; 延长贮藏期

中图分类号: TS206.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)04-0017-08

Preparation and Antibacterial Properties of Polycaprolactone-Quercetin Nanofiber Membrane

LI Zishan^{1,2}, YANG Chunxue^{1,2}, REN Shuyue², GAO Zhixian², LIU Jifeng¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Institute of Environmental Medicine and Occupational Medicine, Academy of Military Sciences, Tianjin 300050, China)

Abstract: To extend the post-harvest shelf life of fruits and vegetables and prevent them from spoilage and deterioration due to microbial invasion, polycaprolactone-quercetin nanofiber membranes were prepared using electrospinning technology. The results showed that the nanofiber membranes exhibited excellent mechanical properties and antioxidant activity. The tensile strength, elongation at break, and DPPH radical scavenging rate of the membranes were (3.65 ± 0.51) MPa, $(131.13 \pm 5.04)\%$, and $(80.13 \pm 0.23)\%$, respectively. When the addition amount of quercetin reached 6%, the antibacterial rate against *Escherichia coli* and the antibacterial rate against *Staphylococcus aureus* reached 99.63% and 99.64%, respectively. The practical application of the nanofiber membranes was evaluated by the storage experiment with millennium cherry tomatoes. Compared with commercially available polyethylene (PE) films, the membranes could significantly extend the storage period of millennium cherry tomatoes by 6 days. This indicates that the degradable polycaprolactone-quercetin nanofiber membranes can effectively inhibit the growth of foodborne pathogenic bacteria and can be used as food packaging materials to extend the shelf life of tomatoes.

Key words: biodegradable; highly effective antibacterial; antioxidant; extended storage period

引文格式:

李紫杉, 杨春雪, 任舒悦, 等. 聚己内酯-槲皮素纳米纤维膜的制备及其抗菌性能研究[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41(4): 17-24.

Li Zishan, Yang Chunxue, Ren Shuyue, et al. Preparation and antibacterial properties of polycaprolactone-quercetin nanofi-

收稿日期: 2024-11-14; 修回日期: 2025-01-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1103100, 2020YFF0305002)

作者简介: 李紫杉(2001—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生; 通信作者: 刘继锋, 教授, jfliu@tust.edu.cn

ber membrane[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2026, 41 (4) : 17-24.

食品包装膜在食品加工、运输和销售过程中能够保护食品免受微生物的侵染,从而延长货架期^[1]。市面上常见的食品包装膜大多采用不可降解的石油基塑料制作,石油基塑料的大规模使用使生态系统超负荷工作^[2]。因此,制备可生物降解的食品包装薄膜迫在眉睫。水果在贮藏过程中容易受到微生物的污染,从而加快其腐败变质的速度。鉴于此,越来越多的研究将活性成分引入食品包装薄膜的制备中,提高普通包装膜缺失的抗氧化^[3]和抗菌^[4]性能。纳米纤维膜作为一种高孔隙率和高比表面积的薄膜,可以作为活性成分的运送载体,实现活性物质的缓慢释放,从而延长蔬果的货架期。选取可降解的生物聚合物作为静电纺丝基质,能够有效改善石油基塑料难以降解的问题^[5-6]。已有诸多研究将活性抗菌剂和活性抗氧化剂封装到静电纺丝的纳米薄膜中^[7]。

番茄作为一种热销水果,其营养价值高,富含维生素C、番茄红素等多种有益成分^[8]。然而,采摘后活跃的蒸腾作用,往往导致营养物质快速流失以及水分蒸发,使果实萎蔫^[9]。与此同时,番茄果实极易受到微生物的污染,出现变质、腐烂等现象,这导致其失去固有的商业价值。传统的保鲜方法虽然在一定程度上能够延缓番茄的腐败进程,但往往存在局限性,如化学保鲜剂可能会残留在食品表面,从而带来安全隐患^[10],而冷藏保鲜成本较高且对设备有一定的依赖。因此,寻找新型、高效且安全环保的保鲜技术成为当前研究的热点。含有活性成分的纳米纤维膜保鲜技术应运而生,其在延长番茄货架期、保持番茄品质等方面展现出巨大潜力。

聚己内酯(PCL)由己内酯单体开环聚合而成,是一种新型的可生物降解的聚合物^[11]。PCL具有良好的生物相容性和优异的机械性能,在药物运输、伤口愈合、食品包装等领域具有广阔的应用前景。槲皮素(Que)作为一种天然的膳食类黄酮^[12],广泛存在于洋葱、苹果、蓝莓等果实中^[13]。Que在抗氧化和抗菌方面极为出色,能够清除自由基和杀灭食源性致病菌,可广泛应用于食品包装^[14]。

本研究采用静电纺丝技术,以疏水材料PCL作为纺丝载体,Que作为活性成分,制备了聚己内酯-槲皮素(PCL-Que)纳米纤维膜。对PCL-Que纳米纤维膜的机械性能进行测试,并对其抗菌性能进行评估。以千禧小番茄为模拟果实,评估纳米纤维膜对蔬

果货架期的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

聚己内酯(相对分子质量 80 000)、槲皮素(97%)、DPPH 自由基,上海麦克林生化科技股份有限公司;磷酸盐缓冲溶液(1×PBS),北京索莱宝科技有限公司;金黄色葡萄球菌(*S. aureus*) ATCC 6538、大肠杆菌(*E. coli*) ATCC 25922,北京北纳创联生物技术研究院;灰霉菌菌饼,北京农学院。

ZNCL-TS 型磁力搅拌电热器,上海一科仪器有限公司;ZX-2BX 型真空干燥箱,天津中环电炉股份有限公司;Vertex 70 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),美国布鲁克·道尔顿公司;Sigma 500 型扫描电子显微镜,卡尔蔡司光学(中国)有限公司。

1.2 PCL-Que 纺丝液的配制

首先称取 PCL 溶于 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)和二氯甲烷(DCM)溶液中(DMF 溶液与 DCM 溶液的体积比为 2:3),搅拌 4 h,得到终质量分数为 15% 的 PCL 溶液。将 Que 加入其中,使 Que 的终质量分数分别为 2%、4%、6%。纺丝针头选用 20 号钝针,纺丝针头距离滚筒收集器的距离为 15~17 cm,滚筒转速为 500 r/min,选用 10 mL 注射器,流量为 0.8 mL/h,高压电源设定为 18~20 kV,温度为(25±2)℃,空气相对湿度为(50±1)%。纺丝完成后,在 25℃真空干燥箱中干燥,得到的纳米纤维膜分别记为 PCL、PQ-2、PQ-4、PQ-6。

1.3 纳米纤维膜的表征

1.3.1 扫描电子显微镜观察

采用扫描电子显微镜对不同 Que 添加量的纳米纤维膜进行表面微观结构的观察,将样品裁剪为 5 mm×5 mm,置于导电胶表面进行测试,加速电压设定为 5 kV,观察倍数为 5 000~10 000 倍。

1.3.2 傅里叶变换红外光谱测定

将纳米纤维膜裁剪为 1 cm×1 cm,采用傅里叶变换红外光谱仪在 600~4 000 cm⁻¹ 处扫描,分辨率为 4 cm⁻¹,重复扫描 3 次。

1.3.3 水接触角表征

将纳米纤维膜裁剪为 1 cm×3 cm。以超纯水作为测试溶剂,采用水接触角测定仪重复测定 6 次,评

估纳米纤维膜的表面润湿性。

1.3.4 机械性能表征

使用拉力试验机测定薄膜拉伸强度(TS)和断裂伸长率(EAB),将复合薄膜裁剪成 $1\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的矩形,选用千分尺,在 5 个不同位置对纳米纤维膜的厚度进行测量,结果取平均值。使用拉力试验机以速度 50 mm/min 、夹具间初始距离 50 mm 进行测量,每组样品重复测量 3 次,取平均值。

1.4 纳米纤维膜抗氧化性

通过纳米纤维膜对 DPPH 自由基的清除能力评估其抗氧化性能^[15]。取 DPPH 自由基溶于无水乙醇,终浓度为 0.1 mmol/L ,避光保存。取纳米纤维膜 5 mg ,剪碎后加入 5 mL DPPH 自由基溶液,在避光条件下反应 30 min 。在 517 nm 处测定 DPPH 自由基溶液的吸光度(A_0),加入材料后 DPPH 自由基溶液的吸光度记为 A_1 ,按照式(1)计算 DPPH 自由基清除率(R_{DPPH})。

$$R_{\text{DPPH}} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

通过纳米纤维膜对 ABTS 自由基的清除能力评估其抗氧化性能^[16]。配制 7 mmol/L ABTS 自由基溶液和 2.45 mmol/L $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 水溶液,按照体积比 $1:1$ 混合, $4\text{ }^\circ\text{C}$ 放置 12 h ,将其稀释 10 倍后使用。取纳米纤维膜 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$,加入 4 mL ABTS 自由基溶液,在避光条件下反应 30 min 。在 738 nm 处测定 ABTS 自由基溶液的吸光度(A_1),加入材料后 ABTS 自由基溶液的吸光度记为 A_2 ,按照式(2)计算 ABTS 自由基清除率(R_{ABTS})。

$$R_{\text{ABTS}} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100\% \quad (2)$$

1.5 纳米纤维膜抗菌性能评估

采用琼脂平板计数法对 PCL-Que 纳米纤维膜的抗菌性能进行评估。选取以金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)为代表的革兰氏阳性菌、以大肠杆菌(*E. coli*)为代表的革兰氏阴性菌,评价纳米纤维膜的抗菌性能。选取两种菌分别接种在 10 mL 液体培养基中, $37\text{ }^\circ\text{C}$ 、 200 r/min 培养至 $1 \times 10^8\text{ CFU/mL}$,将菌液稀释至 $1 \times 10^4\text{ CFU/mL}$ 备用。取 $100\text{ }\mu\text{L}$ 菌液,滴加到不同种类的膜($2\text{ cm} \times 3\text{ cm}$)上, $37\text{ }^\circ\text{C}$ 培养 120 min ,加入 0.9 mL 液体 LB 培养基,在 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 、 200 r/min 的条件下培养一段时间后,取 $100\text{ }\mu\text{L}$ 菌液,滴在固体琼脂平板上,涂布均匀,在恒温恒湿培养箱中过夜培养。通过平板计数法评估材料的抑菌性能。

$$R = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R 为抑菌率,%; N_0 和 N 分别为对照组菌落数和实验组菌落数。

采用霉菌的生长直径评估 PCL-Que 纳米纤维膜的抗菌性能,选用灰霉作为实验菌。由于 PCL 没有抑菌特性,因此在配制 PDA 固体培养基的过程中向其中加入 Que,分别加入 100 、 200 、 300 mg ,模拟不同种类的 Que 纳米纤维膜加入培养基的环境,PCL 组选用加有 100 mg PCL 颗粒的固体培养基。在所有组固体平板表面接种霉菌,接种直径为 9 mm 。培养 3 d 后,测定菌落直径,评估纳米纤维膜的抑菌性能。

$$R_1 = \frac{d_0 - d}{d_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_1 为霉菌抑菌率,%; d_0 和 d 分别为对照组和实验组的菌落直径。

1.6 纳米纤维膜在千禧小番茄保鲜中的应用

选取果实大小成熟度均一、无机械损伤的千禧小番茄作为实验对象,进行保鲜实验。选用 PCL-Que 纳米纤维膜对同一批次的千禧小番茄进行包装,在室温条件下存放 18 d ,每 3 d 进行拍照。将番茄平均分为 5 组,对照组采用 PE 膜进行包装处理记为 PE;实验组采用 PCL 纳米纤维膜和不同槲皮素添加量的纳米纤维膜进行包装处理,分别记为 PCL、PQ-2、PQ-4、PQ-6。每 3 d 测定千禧小番茄样品的失重率、硬度、可溶性固形物等指标,直至千禧小番茄腐烂,每组进行 3 次平行实验。

1.6.1 失重率的测定

为评估其品质变化,测定果实的失重率^[17]。千禧小番茄的初始质量为 m_0 。每隔 2 d 取出千禧小番茄称量,质量为 m_i 。按照式(5)计算失重率(R_L)。

$$R_L = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

1.6.2 腐烂率的测定

千禧小番茄腐烂率的测定,采用贮藏期间小番茄腐烂个数(N_{rot})与初始完好无损个数(N_{total})的比值进行评估,千禧小番茄的腐烂率(R_{rot})按照式(6)计算。

$$R_{\text{rot}} = (N_{\text{rot}}/N_{\text{total}}) \times 100\% \quad (6)$$

1.7 数据处理

采用 Prism 软件处理实验数据,结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示,*、**和***分别表示组间差异显著 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 。

2 结果与分析

2.1 纳米纤维膜的表征

选取 Que 作为活性成分加入 PCL 纳米纤维膜中,提高 PCL 纳米纤维膜的抗氧化性能和抗菌性能。不同 Que 添加量纳米纤维膜扫描电子显微镜图如图 1 所示。纤维为圆柱状,均呈现出网络结构。纤维出现部分粘连,可能是由于在纺丝过程中有机溶剂挥发不完全。表观形貌图像的右上角为不同 Que 添加量纳米纤维膜的实物图,加入 Que 后纳米纤维膜的颜色呈浅黄色,随着 Que 添加量的增加,颜色逐渐加深。

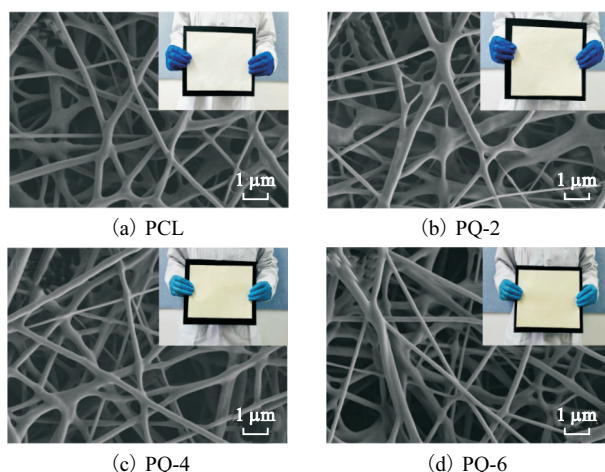


图 1 不同 Que 添加量纳米纤维膜的扫描电子显微镜图
Fig. 1 Scanning electron microscopy images of nanofiber membranes with different Que addition levels

2.2 纳米纤维膜的 FTIR 分析

不同 Que 添加量纳米纤维膜的傅里叶变换红外光谱图如图 2 所示。

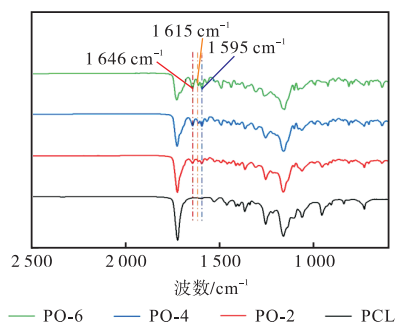


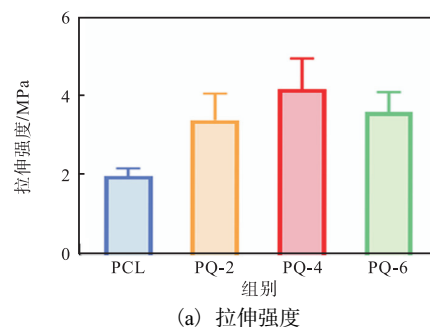
图 2 不同 Que 添加量纳米纤维膜的傅里叶变换红外光谱图
Fig. 2 FTIR spectrum image of nanofiber membranes with different Que addition levels

与 PCL 纳米纤维膜相比,加入 Que 后的纳米纤维膜在 1595 、 1615 、 1646 cm^{-1} 处出现了新的吸收峰,这可能是由苯环骨架的振动引起的。随着 Que 添

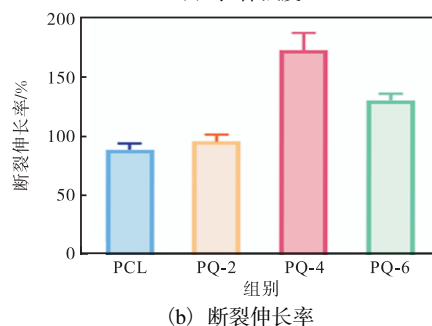
加量的增加,吸收峰明显增强,说明 Que 成功嵌入 PCL 纳米纤维膜中^[18]。

2.3 纳米纤维膜的机械性能

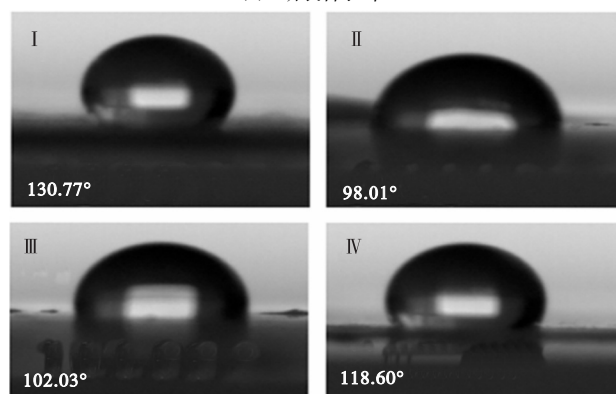
不同 Que 添加量对纳米纤维膜的拉伸强度、断裂伸长率、水滴形貌和水接触角的影响如图 3 所示。



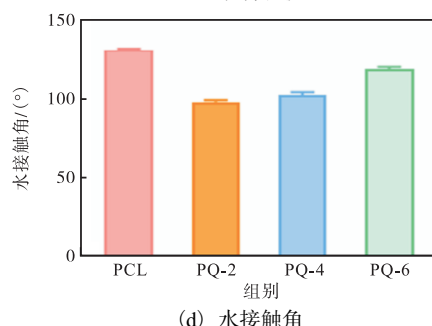
(a) 拉伸强度



(b) 断裂伸长率



(c) 水滴形貌



(d) 水接触角

图 3 不同 Que 添加量对纳米纤维膜的拉伸强度、断裂伸长率、水滴形貌和水接触角的影响

Fig. 3 Effects of different Que addition levels on tensile strength, elongation at break, water contact angle topography, and water contact angle of nanofiber membranes

拉伸性能是衡量纳米纤维膜能否用于食品包装的关键指标。加入 Que 后, 纳米纤维膜的拉伸性能远高于纯 PCL 纳米纤维膜, 其中 PQ-4 纳米纤维膜的 TS 达到最高, 为 (4.23 ± 0.78) MPa; PQ-6 纳米纤维膜的 TS 略小于 PQ-4 纳米纤维膜, 为 (3.65 ± 0.51) MPa。PQ-4 纳米纤维膜的 EAB 为 $(173.37 \pm 14.74)\%$, PQ-6 纳米纤维膜的断裂伸长率可达 $(131.13 \pm 5.64)\%$ 。

材料表面的润湿性能也是衡量其能否作为食品包装的关键指标。加入槲皮素后, 纳米纤维膜的水接触角下降到 98.01° , 但是随着槲皮素添加量的增加, 水接触角逐渐上升至 118.60° 。这可能是槲皮素表面含有羟基, 与水分子形成氢键, 使水接触角下降, 但槲皮素具有内部疏水结构, 因此随着槲皮素添加量的增加, 水接触角逐渐上升。

良好的机械性能和疏水性均说明 PCL-Que 纳米纤维膜具备作为食品包装膜的基本条件。

2.4 纳米纤维膜的抗氧化性能

食品包装膜具有抗氧化活性, 能够在一定程度上降低食品变质的速度。不同 Que 添加量对纳米纤维膜 DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率的影响如图 4 所示。

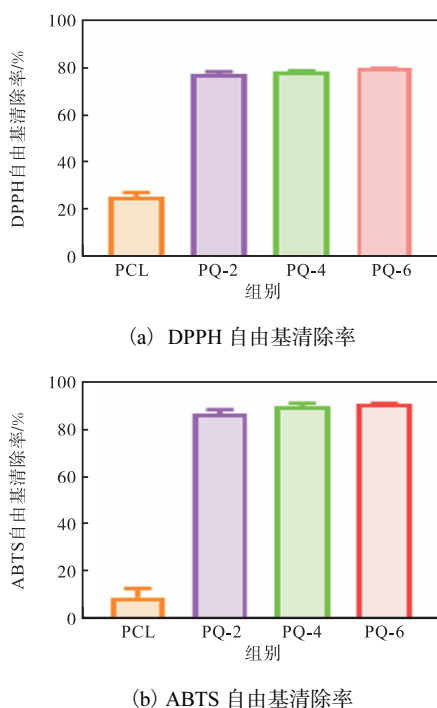


图 4 不同 Que 添加量对纳米纤维膜 DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率的影响

Fig. 4 Effects of different Que addition levels on DPPH and ABTS radical scavenging rates of nanofiber membranes

PCL 纳米纤维膜的 DPPH 自由基清除率为 25.47%, 几乎没有抗氧化性能, 加入了 Que 后提高了 PCL 纳米纤维膜的 DPPH 自由基清除率, 由原来的 25.47% 增加到 77.87%, 随着 Que 添加量的增加, DPPH 自由基清除率也逐渐升高至 80.13%。这表明 Que 的加入极大地提高了纳米纤维膜的抗氧化性能。单纯的 PCL 纳米纤维膜对 ABTS 自由基的清除率为 9.18%, Que 加入后, 纳米纤维膜的自由基清除率提高了约 9 倍, 且随着 Que 加入量的增加, 自由基清除率由 86.86% 增加至 91.16%。综上所述, Que 的加入显著提高了纳米纤维膜的抗氧化性, 且该纳米纤维膜具有优异的抗氧化性能。

2.5 纳米纤维膜的抗菌性能

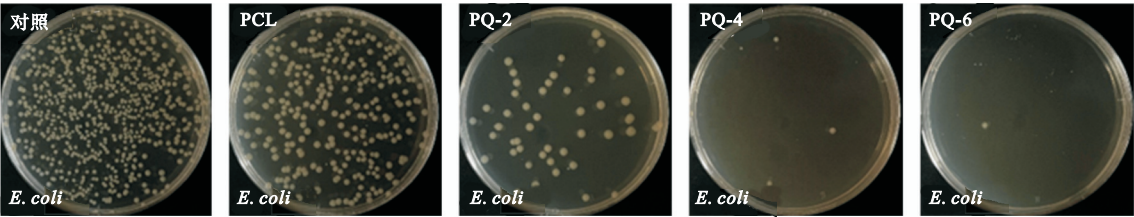
食源性致病菌的侵染是水果腐败变质的重要原因。选用以 *E. coli* 为代表的革兰氏阴性菌和以 *S. aureus* 为代表的革兰氏阳性菌, 评估不同 Que 添加量纳米纤维膜的抗菌性能, 结果如图 5 所示。

随着 Que 添加量的增加, 在琼脂平板上的菌落数逐渐减少。当 Que 的添加量为 6% 时, 抗菌作用尤其显著, 对大肠杆菌的抑菌率可达 99.63%, 对金黄色葡萄球菌的抑菌率可达 99.64%。PCL 纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌也具有抑制作用, 这可能是因为纳米纤维膜的多孔结构, 吸附了大肠杆菌和金黄色葡萄球菌, 从而起到抑制作用^[19]。

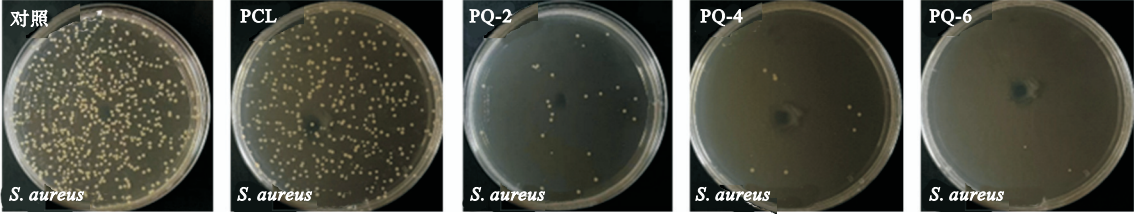
对照组的霉菌生长直径为 44.11 mm, 在加入 Que 后, 霉菌的生长直径减小到 34.21 mm, 随着 Que 添加量的增加, 霉菌的生长直径逐渐减小至 27.94 mm。Que 加入后显著增强了纳米纤维膜对灰霉菌的抑制作用, 当 Que 的添加量为 6% 时, 对灰霉菌的抑菌率可达 37.36%, 与 PCL 纳米纤维膜组相比具有显著差异。综上所述, Que 的加入在一定程度上能够抑制霉菌的生长, 添加 Que 的纳米纤维膜具备作为食品包装材料的基本条件。

2.6 纳米纤维膜对千禧小番茄的保鲜性能

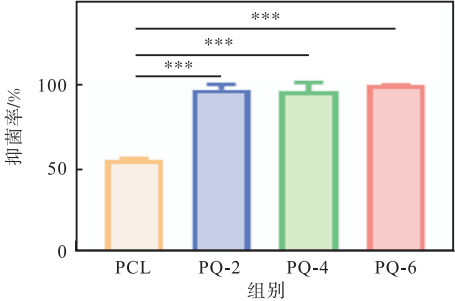
不同 Que 添加量对纳米纤维膜包裹的千禧小番茄保鲜性能的影响如图 6 所示。对照组样品在贮藏 6 d 时出现了霉变白点现象, PQ-4 组也出现了番茄皱缩破裂, 但未发生霉变, 可能是因为在放置过程中出现了挤压。在贮藏 12 d 时, 除了 PQ-6 组, 其他各组均出现了霉变果。在贮藏 18 d 时, 对照组出现 7 个霉变果, 随着贮藏时间的延长, PCL、PQ-2、PQ-4 组也相继出现坏果和霉变果, 但在 PQ-6 纳米纤维膜包装中的小番茄仅仅表现出因蒸腾作用而出现皱缩失水



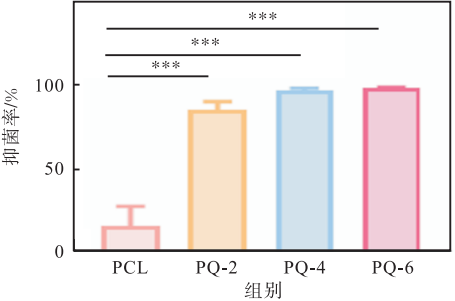
(a) 不同 Que 添加量纳米纤维膜对大肠杆菌的抑菌作用



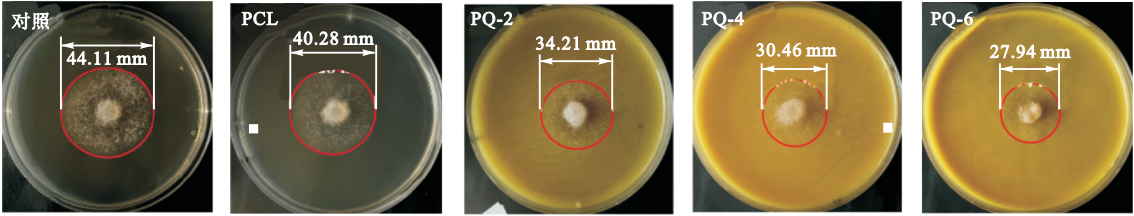
(b) 不同 Que 添加量纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌的抑菌作用



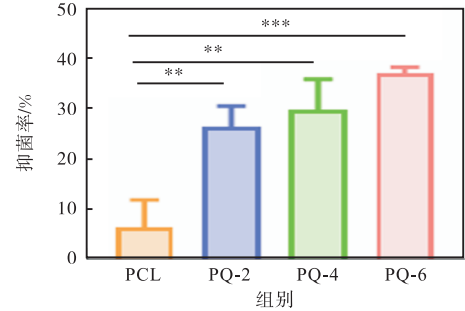
(c) 纳米纤维膜对大肠杆菌的抑菌率



(d) 纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌的抑菌率



(e) 不同 Que 纳米纤维膜对灰霉菌的抑菌作用



(f) 纳米纤维膜对灰霉菌的抑菌率

注:**表示组间差异显著 $P<0.01$,***表示组间差异极显著 $P<0.001$ 。

图 5 不同 Que 添加量的纳米纤维膜的抗菌性能

Fig. 5 Antibacterial properties of nanofiber membranes with different Que addition levels

现象,未发生霉变现象以及光泽变暗。这主要是由于 Que 的加入能够保护千禧小番茄在采后免受微生物的侵扰,表明 PQ-6 纳米纤维膜具有被开发为食品包装的潜力。

千禧小番茄在贮藏过程中容易受到细菌的污染而腐败变质,使经济效益降低。不同贮藏时间千禧小番茄的腐烂率和失重率如图 7 所示。
番茄的腐败率随着时间的增加而增长,在贮藏前

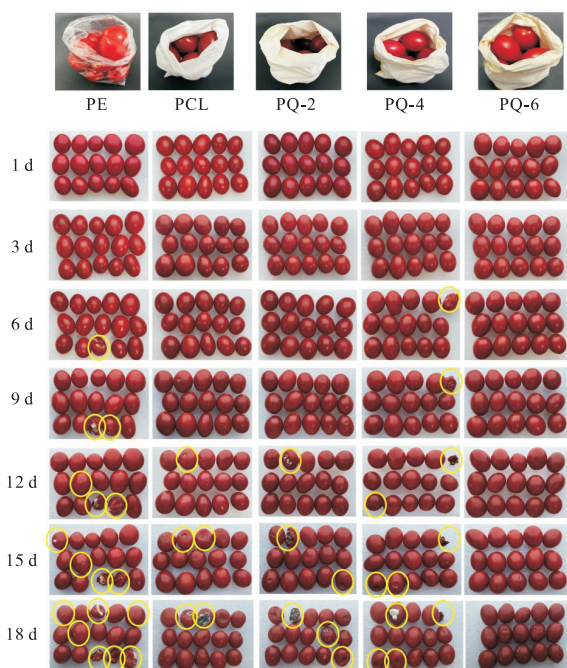
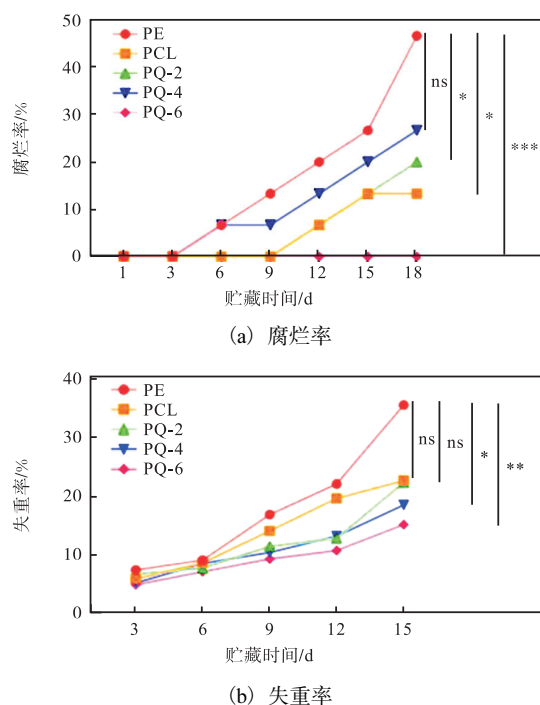


图 6 不同 Que 添加量对纳米纤维膜包裹的千禧小番茄保鲜性能的影响

Fig. 6 Effect of different Que addition levels on preservation performance of millennium cherry tomatoes wrapped in nanofiber membrane



注: ns 表示组间无显著差异, *, **, *** 分别表示组间差异显著 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$ 。

图 7 不同贮藏时间千禧小番茄的腐烂率和失重率

Fig. 7 Decay rate and weight loss rate of millennium cherry tomatoes at different storage times

期(1~9 d) PCL 组、PQ-2 组、PQ-6 组纳米纤维膜包裹的小番茄未出现腐败果实, 而 PE 膜处理组在贮藏

6 d 时已经出现腐败果实; 贮藏 9 d 后, PCL 组和 PQ-2 组相继出现腐败果实; 贮藏 18 d 后, PE 膜处理组的果实腐败率已经达到 46.67%, 而 PQ-6 组一直到第 18 天均未出现腐败果实, 说明槲皮素的加入能够延长番茄果实的贮藏期。这是因为槲皮素具有一定的抗菌和抗氧化性能, 能够减弱细菌对番茄果实的侵染, 从而延长番茄果实的贮藏期。

添加不同量槲皮素的实验组和对照组的失重率都随着时间的增加而增加, 在贮藏 15 d 时, 失重率达到最高, 但对照组的增长速率远高于实验组。在贮藏 1~6 d 时, 5 组样品的失重率相差不大, 该段时间失重主要是番茄的水分流失。第 6 天后, PE 膜处理组的失重率远高于实验组, 所有组在第 12 天后, 失重率明显加大, 这可能是大量的水分流失以及微生物的侵染导致的。

总体而言, PQ-6 纳米纤维膜包装可以延缓千禧小番茄在贮藏过程中发霉和失重的进程, 有效延长了番茄的贮藏期。

3 结 论

本研究采用静电纺丝技术制备了 PCL-Que 纳米纤维膜, 该膜呈均匀的浅黄色, 表面均匀光滑。评估不同槲皮素添加量对纳米纤维膜机械性能、水接触角、抗菌性能的影响, 并以千禧小番茄为模拟果实, 验证了纳米纤维膜的常温保鲜效果。该纳米纤维膜具有良好的疏水性能、机械性能和抗氧化性。当槲皮素的添加量为 6% 时, 该膜对大肠杆菌的抑菌率为 99.63%, 对金黄色葡萄球菌的抑菌率为 99.64%, 对灰霉菌的抑菌率为 37.36%。与市售 PE 膜相比, 该膜可以延长千禧小番茄贮藏期 6 d。除此之外, PCL-Que 纳米纤维膜采用绿色环保材料, 具有可降解性, 不会给生态系统带来负担。综上所述, PCL-Que 纳米纤维膜能够作为新型食品保鲜包装材料, 为后续将全生物基活性成分引入可降解的食品包装膜中提供了可能性。

参考文献:

- [1] Lin Wei, Ni Yan, Pang Jie. Size effect-inspired fabrication of konjac glucomannan/polycaprolactone fiber films for antibacterial food packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 853-860.
- [2] Yu Zhe, Li Bo, Chu Jing, et al. Silica in situ enhanced PVA/chitosan biodegradable films for food packages[J].

- Carbohydrate Polymers, 2018, 184: 214–220.
- [3] Yadav S, Mehrotra G K, Bhartiya P, et al. Preparation, physicochemical and biological evaluation of quercetin based chitosan-gelatin film for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 227: 115348.
- [4] Jovanović J, Ćirković J, Radojković A, et al. Chitosan and pectin-based films and coatings with active components for application in antimicrobial food packaging [J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 158: 106349.
- [5] Zhu Wei, Zhang Dong, Liu Xiao, et al. Improving the hydrophobicity and mechanical properties of starch nanofibrous films by electrospinning and cross-linking for food packaging applications [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 169: 114005.
- [6] Ahmed A, Zhang Min, Li Shu, et al. Batch preparation and characterization of anthocyanin/CS/PEO nanofiber membranes for food packages [J]. Fibers and Polymers, 2023, 24(9): 3075–3084.
- [7] Min Tao, Zhou Lei, Sun Xu, et al. Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: a review [J]. Food Chemistry, 2022, 391: 133239.
- [8] 栗方宇. 百里香酚微胶囊的交联复合膜制备及其在樱桃番茄保鲜中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 21–68.
- [9] Xanthopoulos G T, Templalex C G, Aleiferis N P, et al. The contribution of transpiration and respiration in water loss of perishable agricultural products: the case of pears[J]. Biosystems Engineering, 2017, 158: 76–85.
- [10] Chen Kai, Zhang Min, Bhandari B, et al. Edible flower essential oils: a review of chemical compositions, bioactivities, safety and applications in food preservation[J]. Food Research International, 2021, 139: 109809.
- [11] Wang Kai, Lim P N, Tong S Y, et al. Development of grapefruit seed extract-loaded poly(ϵ -caprolactone)/chitosan films for antimicrobial food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100396.
- [12] Shimul I M, Moshikur R M, Nabila F H, et al. Formulation and characterization of choline oleate-based micelles for co-delivery of luteolin, naringenin, and quercetin[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136911.
- [13] Lee J, Mitchell A E. Pharmacokinetics of quercetin absorption from apples and onions in healthy humans[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(15): 3874–3881.
- [14] Al-Naymi H A S, Oladzadabbasabadi N, Karim D K, et al. Development of an innovative reinforced food packaging film based on corn starch/hydroxypropyl methylcellulose/nanocrystalline cellulose incorporated with nanogel containing quercetin[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(2): 1514–1533.
- [15] 陆秋玲, 黄夏兰, 农丽莎, 等. 纤维素基静电纺丝材料在空气过滤领域的研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 648–652.
- [16] Qi Xin, Yang Ning, Luo Yang, et al. Resveratrol as a plant type antioxidant modifier for polysulfone membranes to improve hemodialysis-induced oxidative stress [J]. Materials Science & Engineering C: Materials for Biological Applications, 2021, 123: 111953.
- [17] 杨婷婷. 快递物流过程番茄品质变化及涂膜保鲜研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022: 14–47.
- [18] 玛丽哈巴·拜克来, 管骁, 刘静, 等. 负载槲皮素的大麦醇溶蛋白纳米纤维的制备及性质[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 137–143.
- [19] 陈美萍. 基于姜黄素的抗菌纳米纤维膜的制备及其性能[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 15–59.

责任编辑: 郎婧