

浙江大学学报(农业与生命科学版)

Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)

ISSN 1008-9209,CN 33-1247/S

《浙江大学学报(农业与生命科学版)》网络首发论文

题目：负载百里酚的聚己内酯纳米纤维膜制备及保鲜应用研究
作者：金蓉，蔡子涵，赵以勒，沈超怡，杨智超，吴迪，陈昆松
收稿日期：2022-07-01
网络首发日期：2022-09-06
引用格式：金蓉，蔡子涵，赵以勒，沈超怡，杨智超，吴迪，陈昆松. 负载百里酚的聚己内酯纳米纤维膜制备及保鲜应用研究[J/OL]. 浙江大学学报(农业与生命科学版). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1247.S.20220905.1736.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

负载百里酚的聚己内酯纳米纤维膜制备及保鲜应用研究

金蓉¹, 蔡子涵², 赵以勒², 沈超怡³, 杨智超³, 吴迪^{2,4*}, 陈昆松²

(1. 浙江大学农业试验站, 杭州 310058; 2. 浙江大学农业与生物技术学院, 杭州 310058; 3. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 4. 浙江大学中原研究院, 郑州 450000)

摘要 现有的传统活性保鲜包装存在孔隙率小、透气性差等缺点, 因此制备纳米级保鲜控释包装材料是果蔬采后贮藏物流领域的研究热点。本研究采用溶液吹塑纺丝技术制备了负载百里酚(thymol, THY)的聚己内酯(polycaprolactone, PCL)纳米纤维膜, 并通过材料表征和抑菌实验对THY/PCL纳米纤维膜的性能进行了评价。结果表明, 负载THY后的PCL纳米纤维的结晶度降低, 热稳定性提高, 而水蒸气透过性能、表面疏水性与机械性能不受影响。此外, THY/PCL纳米纤维膜表现出对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的良好抑菌活性, 展现了在果蔬采后保鲜领域良好的应用前景。

关键词 溶液吹塑纺丝; 纳米纤维; 百里酚; 聚己内酯; 果蔬; 抑菌

中图分类号 S 609.3; S 377

文献标志码 A

引用格式 金蓉, 蔡子涵, 赵以勒, 等. 负载百里酚的聚己内酯纳米纤维膜制备及保鲜应用研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版): 1-8. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.2022.07.011

JIN Rong, CAI Zihan, ZHAO Yile, et al. Fabrication of thymol-loaded polycaprolactone nanofiber membrane for freshness preservation[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*: 1-8.

Fabrication of thymol-loaded polycaprolactone nanofiber membrane for freshness preservation

JIN Rong¹, CAI Zihan², ZHAO Yile², SHEN Chaoyi³, YANG Zhichao³, WU Di^{2,4*}, CHEN Kunsong² (1. Agricultural Experimental Station, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Zhongyuan Institute, Zhejiang University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract The fabrication of nanoscale packaging materials that can slow release and retain freshness is a hot research topic in the field of postharvest fruits and vegetables in the supply chain. In this study, polycaprolactone (PCL) nanofiber membranes loaded with thymol (THY) were prepared by solution blow spinning technique, and the characteristics of THY/PCL nanofiber membranes were evaluated by characterization and bacterial inhibition experiments. The results showed that the PCL nanofiber loaded with THY had lower crystallinity and increased thermal stability, while their water vapor transmission properties, surface hydrophobicity and mechanical properties were not affected. In addition, the THY/PCL nanofiber membranes showed good antibacterial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, demonstrating a good application prospect in the field of

基金项目 浙江省重点研发计划项目(2019C02074); 浙江大学科研发展专项(2021FZZX001-55)。

***通信作者** (Corresponding author): 吴迪 (https://orcid.org/0000-0002-4997-5082), Tel: +86-571-88982226, E-mail: di_wu@zju.edu.cn

第一作者 (First author): 金蓉 (https://orcid.org/0000-0002-3703-3784), E-mail: rong@zju.edu.cn

收稿日期 (Received): 2022-07-01; **接受日期** (Accepted): 2022-08-02

postharvest preservation of fruits and vegetables.

Key words solution blow spinning; nanofiber; thymol; polycaprolactone; fruits and vegetables; antibacterial

新鲜果蔬水分含量高、营养物质丰富,深受消费者喜爱;但其在采后贮运过程易滋生微生物,导致品质劣变和腐烂损耗,影响市场竞争力和商品价值;同时鲜食果蔬也会增加食源性疾病的风险。为降低减少因病原微生物引起果蔬采后贮藏物流损耗和鲜食风险,具有抑菌功能的活性包装研究近年来受到广泛关注^[1]。纳米纤维膜作为活性包装材料中的一类,具有孔隙率高、透气性好、比表面积高等特性,近年来在保鲜包装领域逐渐受到关注^[2,3]。目前,静电纺丝技术得益于装置简易、操作便捷而被广泛研究。但对于保鲜包装领域,纳米纤维的制备速度是一个需要关注的重要因素。溶液吹塑纺丝(solution blow spinning, SBS)作为一种新型的纳米纤维制备技术,相比于静电纺丝可以获得数倍至数十倍的纺丝速度。SBS设备由注射泵、喷嘴、高速气源和收集器组成^[4-5]。其中,同心的内外喷嘴分别用于输送聚合物溶液和高速气体流。不同于静电纺丝,SBS工艺通过加压的高速气体将聚合物溶液拉伸成细丝,随着溶剂的蒸发,细丝在收集器上形成纳米纤维^[6]。SBS技术在包装用纳米纤维膜的快速制备方面展示出了广阔的应用潜力。

在保鲜包装材料中添加抗菌剂是抑制微生物生长的有效手段。其中,从香料、香草和精油中提取的植物源天然抑菌剂具有较高的安全性,成为保鲜包装的研究热点。百里酚(5-methyl-2-isopropylphenol, THY)是从百里香中提取的天然酚类化合物,具有抗菌、抗氧化、抗炎等多种生物活性^[7]。THY可以通过诱导细胞质膜通透化和去极化抑制部分革兰氏阴性菌与革兰氏阳性菌的生长^[8]。然而,THY具有较强的挥发性,无法持续有效释放,造成贮藏期间使用的浪费和低效,导致其在果蔬抑菌保鲜中的使用受到限制^[9]。而SBS工艺具备优秀的包埋能力,可以有效将THY包埋到纳米纤维膜中制备活性包装材料。各种水溶液或有机可溶性聚合物和生物大分子,特别是具有良好生物相容性和生物降解性能的都可以用作纺丝溶液,包括聚乙醇酸(PGA)、聚乳酸(PLA)、聚己内酯(PCL)等。其中,PCL是一种由己内酯单体聚合的半结晶脂肪族

聚酯材料,具有良好的生物相容性与机械性能^[10]。因此,本研究以PCL为原料,采用SBS工艺制备了THY/PCL纳米纤维膜。通过场发射扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱分析、X射线衍射分析、热力学分析、机械拉伸、水接触角和水蒸气透过率等对制备的THY/PCL纳米纤维膜进行性能表征,同时还以大肠埃希菌与金黄色葡萄球菌为对象研究了THY/PCL纳米纤维膜的体外抑菌特性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料:灰霉菌、大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌,由浙江大学果树科学研究所保存;THY、2,2,2-三氟乙醇,购自上海麦克林有限公司;聚己内酯(PCL),购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

仪器:JNS-SBS-01溶液吹塑纺丝设备,购自南京捷纳思新材料有限公司;GeminiSEM 300场发射扫描电子显微镜,购自德国ZEISS公司;Nicolet 170-SX傅里叶变换红外光谱仪,购自美国Thermo Nicolet公司;D8 Advance衍射仪,购自德国Bruker公司;The Mettler Toledo STARe System DSC3差示扫描量热仪,购自瑞士Mettler Toledo Crop公司;The Mettler Toledo STARe System TGA2热重分析仪,购自瑞士Mettler Toledo Crop公司;Instron 5944机械分析仪,购自美国Instron公司;OCA20接触角测角仪,购自德国Data Physics公司。

1.2 纳米纤维膜制备

将1 g PCL溶于10 mL 2,2,2-三氟乙醇中得到混合溶液,分别将质量分数为2%、4%和6%的THY加入混合溶液中搅拌6 h得到纺丝溶液。采用实验室已建立的SBS工艺^[11]制备纳米纤维膜:将纺丝溶液装入20 mL注射器中,由输液速度为3 mL/h的气泵推入,空气压力控制在0.1 MPa以获得恒定的剪切力,在距喷嘴20 cm处放置网状收集器以沉积纳米纤维,并最终形成纳米纤维膜。

将不添加THY和包封有2%、4%和6%THY的纳米纤维膜分别标记为PCL膜、2% THY/PCL膜、

4% THY/PCL 膜和 6% THY/PCL 膜。

1.3 纳米纤维膜性能表征

1.3.1 扫描电镜表征

纳米纤维膜裁剪后使用场发射扫描电子显微镜观察并拍摄,观察纳米纤维的形态结构,观察前对纳米纤维膜进行镀金处理。

1.3.2 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

使用傅里叶变换红外光谱仪进行 FTIR 分析^[12],将样品与溴化钾混合压缩后进行 FTIR 分析,设置分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描范围为 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.3 X 射线衍射(XRD)分析

参考已有方法^[13]进行 X 射线衍射分析,衍射仪采用 Cu K α 辐射源,设置测定参数:电压 40 kV、电流 35 mA、扫描范围 $5^\circ\sim 90^\circ(2\theta)$ 、扫描速率 $2^\circ/\text{min}$ 。

1.3.4 热力学分析

热分析参考已有方法^[14]进行,通过采用差示扫描量热仪测定 DSC 参数,设定温度范围为 $20\sim 320\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,通入 $50\text{ mL}/\text{min}$ 氮气作为保护气体。通过热重分析仪记录 TGA 参数,设定温度范围为 $30\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,通入 $50\text{ mL}/\text{min}$ 氮气作为保护气体。

1.3.5 机械性能

将测试纳米纤维膜切割成尺寸为 $40\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的条带,使用螺旋测微器测定每个条带的厚度,通过机械分析仪测定纳米纤维膜的机械性能,载荷传感器为 10 N,控制作用力速率为 $1\text{ mm}/\text{min}$,计算拉伸强度(tensile strength, TS)和断裂伸长率(elongation at break, EB)。

1.3.6 水接触角

使用接触角测角仪测定纳米纤维膜的水接触角^[15]。将纳米纤维膜固定在载玻片上,使一滴蒸馏水沉积在膜表面,在 0 s 与 30 s 时进行拍摄并测定水滴左右两侧的水接触角,重复测量 5 次,取平均值。

1.3.7 水蒸气透过率

水蒸气透过率的测定参考已有方法并略作修改^[16]。将纳米纤维膜固定在装有 10 mL 蒸馏水的透湿杯顶部铝环间,将透湿杯放入装有变色硅胶的干燥器中,每隔 12 h 进行透湿杯称量,连续 5 d,根据以下公式计算水蒸气透过率:

$$WVP = \frac{\Delta M \times d}{\Delta t \times A \times \Delta p} \quad (1)$$

式中: ΔM 是水分损失的质量, g; d 是纳米纤维膜厚度, mm; A 是铝环的面积, m^2 , Δp 是膜两侧水蒸气压差,在室温下为 3.167 kPa 。

1.4 抑菌试验

采用抑菌圈法评估 THY/PCL 纳米纤维膜对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的抑菌活性。将菌液浓度稀释至 $10^6\text{ CFU}/\text{mL}$,通过涂布法将 $100\text{ }\mu\text{L}$ 的病原菌菌液均匀分散到培养基表面。将已灭菌的纳米纤维膜(直径约为 1 cm)样品贴于培养基中心,用镊子轻轻按压使其充分接触。在菌落最适生长环境下培养一定时间后,测量抑菌圈的直径,每组纤维膜样品保证 3 个以上的重复处理。

1.5 数据处理与分析

实验均重复 3 次,数据结果以平均值 \pm 标准差表示。使用 Origin 9.9.5 软件进行数据处理。采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,以 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 纳米纤维膜的结构表征

图 1 显示了负载不同质量分数 THY 的 PCL 纳米纤维在电镜下的形貌。可以看到,随着 THY 的加入,PCL 纳米纤维呈现出更复杂的缠绕形态;同时,PCL 纳米纤维的平均直径从 172.09 nm 分别增加到 310.35 、 389.24 、 519.77 nm 。纤维直径的增加是由于 THY 加入使得摩尔质量增加,进而导致纺丝溶液的黏度增加,阻碍纳米纤维的伸长,从而产生更宽的纤维直径分布^[17]。

2.2 傅里叶变换红外分析结果

图 2 显示了 THY 和 THY/PCL 纳米纤维膜的红外光谱。纯 THY 在 $3\text{ }229\text{ cm}^{-1}$ 的特征峰表征为—OH 伸缩振动,在 $2\text{ }957\sim 2\text{ }600\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\text{ }875\sim 1\text{ }419\text{ cm}^{-1}$ 的特征峰分别表征为芳环的 C—H 伸缩振动与 C=C 伸缩振动,而 C—O 伸缩振动位于 $1\text{ }242$ 、 $1\text{ }157$ 、 $1\text{ }091\text{ cm}^{-1}$ 处^[18]。当添加了 2%、4% THY 时,THY/PCL 纳米纤维膜的振动峰位置与振动强度都和 PCL 纳米纤维膜高度相似;而当加入 6% THY 时,THY/PCL 纳米纤维膜在 $1\text{ }170$ 、 $1\text{ }732\text{ cm}^{-1}$ 处的峰强度发生了明显变化,表明 THY 成功装载到 PCL 纳米纤维上。此外,观察到 THY/PCL 纳米纤维膜在 $3\text{ }445\text{ cm}^{-1}$ 处出现特征峰,表明 THY 与 PCL 纳米纤维之间

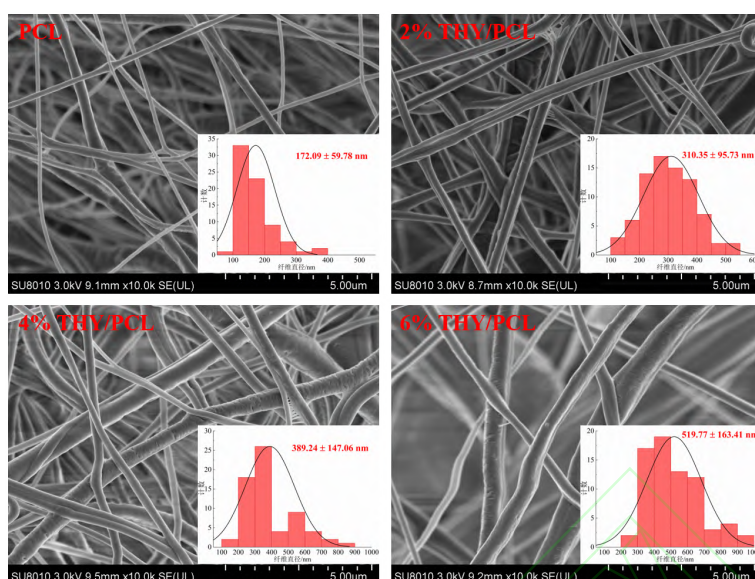


图1 PCL纳米纤维膜扫描电镜图

Fig. 1 FE-SEM images of PCL nanofibers

形成了氢键。

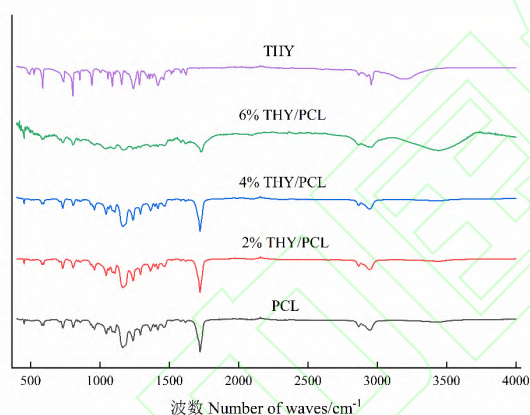


图2 THY和THY/PCL纳米纤维膜的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectra of thymol and THY/PCL nanofiber membranes

2.3 X射线衍射(XRD)结果分析

图3显示了THY和纳米纤维膜的晶体结构。如图3A所示,THY在 $2\theta=7.98^\circ$ 、 14.43° 、 15.91° 、 18.81° 、 16.65° 、 18.80° 处显示出尖锐的特征衍射峰,表明THY具有高度结晶结构。图3B显示,当THY被包埋后,PCL纳米纤维膜在 $2\theta=21.40^\circ$ 处尖峰的峰面积均明显减小,表明THY/PCL纳米纤维膜的结晶度降低,THY已成功装载到PCL纳米纤维上。

2.4 热力学结果分析

图4显示了PCL和THY/PCL纳米纤维膜的热力学分析曲线。由DSC曲线可以看出,随着THY的加入,PCL纳米纤维膜在 60°C 附近的特征吸热峰的熔融焓 ΔH_m 值逐渐下降,从 66.8 J/g 降低至 31.5 J/g ,表明THY/PCL纳米纤维膜的结晶度降低^[19]。此外,THY/PCL纳米纤维膜在 230°C 左右的第二个较

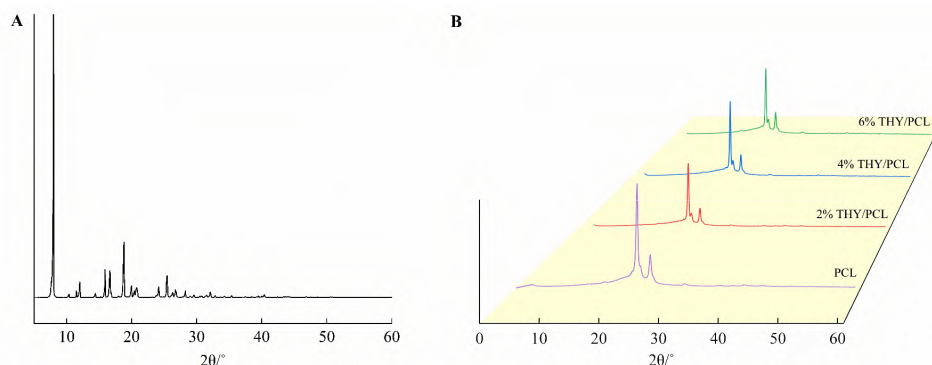


图3 THY(A)和纳米纤维膜(B)的X射线衍射

Fig. 3 X-ray diffraction of thymol (A) and nanofibrous membrane (B)

宽吸热峰熔融焓 ΔH_m 值逐渐上升,从 20.4 J/g 增加至 101.3 J/g。

从失重速率分析,PCL 及 THY/PCL 纳米纤维膜均呈现两个峰值变化。100~200 °C 归属于水的蒸发,350~450 °C 归属于 PCL 和 THY 的降解。同时,

当 THY 加入后,PCL 纳米纤维膜的最大失重率略有降低,600 °C 时的残留量从 1.28% 分别增加到 1.96%、1.49% 和 1.45%,THY/PCL 纳米纤维膜的热稳定性得到了一定程度的改善,这可能归因于 THY 与 PCL 纳米纤维之间形成的氢键。

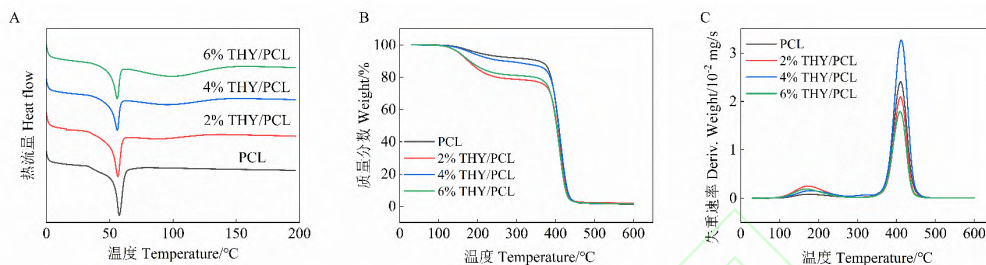


图4 PCL 和 THY/PCL 纳米纤维膜的 DSC 曲线(A)和 TGA 曲线(B、C)

Fig. 4 DSC (A) and TGA curves (B, C) of PCL and THY/PCL nanofiber membranes

2.5 机械性能结果分析

图5显示了PCL和THY/PCL纳米纤维膜的机械性能。从弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率三个参数分析机械性能的变化,发现2% THY/PCL 纳米纤维膜机械性能略有上升,6% THY/PCL 纳米纤维膜机械性能略有下降,但与未装载THY的PCL纳米纤维膜相比差异均不显著。上述结果表明装载THY后不会影响PCL纳米纤维膜的机械性能,制备的THY/PCL纳米纤维膜可以作为内包装添加物使用。

2.6 水接触角(WCA)结果分析

PCL和THY/PCL纳米纤维膜的水接触角结果如图6所示。结果表明,PCL纳米纤维膜表征出较强的疏水性,且加入THY后的疏水性能未发生显著变化。THY/PCL纳米纤维膜良好的疏水表面可以抵抗亲水微生物的粘附^[20],将有助于其应用于果蔬保鲜。

2.7 水蒸气透过率结果分析

PCL和THY/PCL纳米纤维膜的水蒸气透过率结果如图7所示。结果表明,加入THY后,PCL纳米纤维膜的水蒸气透过率基本保持不变。这是由于装载THY后纳米纤维膜中亲疏水组分的比值以及孔隙大小未发生显著变化,因此THY的加入不会影响PCL纳米纤维膜的水汽阻隔性能。

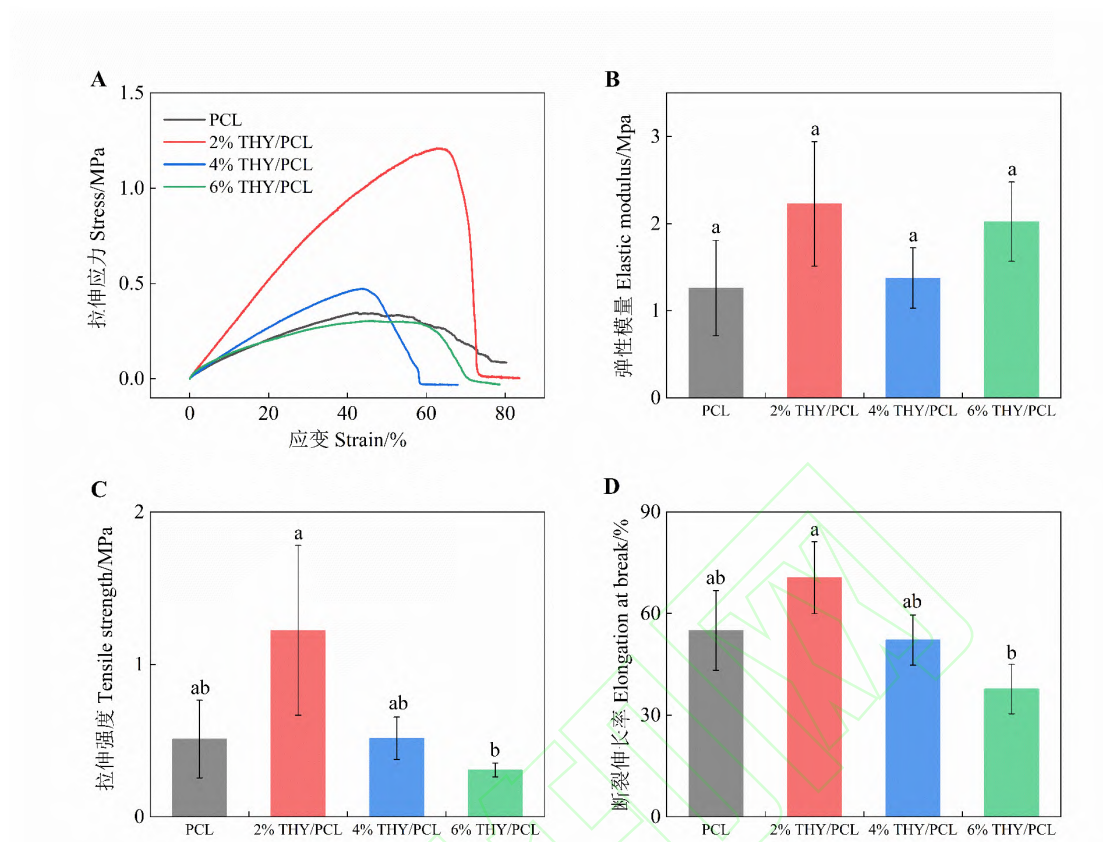
2.8 抑菌试验

以金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌为研究对象评价了THY/PCL纳米纤维膜的体外抑菌效果,结果

如图8~9所示。PCL膜对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径为0 mm,而对大肠埃希菌的抑菌圈直径趋近于0 mm,说明未负载THY的PCL膜没有抑菌效果。而THY/PCL纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌产生了良好的抑菌效果,随着THY添加量的增加,抑菌圈直径逐渐增大,且均与对照的PCL膜存在显著性差异。对于大肠埃希菌,当纳米纤维膜中THY质量分数为2%和4%时,存在一定的抑菌效果但不稳定;而6%THY/PCL纳米纤维膜表现出良好的抑菌效果,与对照差异显著。同时,THY/PCL纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径明显大于对大肠埃希菌的抑菌圈直径,推测THY/PCL纳米纤维膜对革兰氏阳性菌的抑菌活性高于革兰氏阴性菌,这可能是由细胞壁组成的差异导致。革兰氏阳性菌的细胞壁由肽聚糖组成,而革兰氏阴性菌的细胞壁更复杂,由较薄的肽聚糖层和外磷脂膜组成。相比磷脂膜,THY更易穿透肽聚糖层^[9],因而对金黄色葡萄球菌的抑菌活性优于大肠埃希菌。ZHANG等^[21]以草莓为试材,以同轴静电纺丝技术制备含有THY的纳米纤维膜,包裹果实测试其抗菌及保鲜性能,结果表明能有效抑制细菌、真菌的生长,延长水果的货架期。

3 结论

本研究采用SBS技术制备了负载不同质量THY的PCL纳米纤维膜。红外光谱结果表明THY



A. 应力-应变曲线; B. 弹性模量; C. 拉伸强度; D. 断裂伸长率。短栅上的小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异有统计学意义, 下同。

A. Stress-strain curve; B. Modulus of elasticity; C. Tensile strength; D. Elongation at break. Different lowercase letters above bars indicate significant differences at the 0.05 probability level, and the same as below.

图5 PCL和THY/PCL纳米纤维膜的机械性能

Fig. 5 Mechanical properties of PCL and THY/PCL nanofiber films

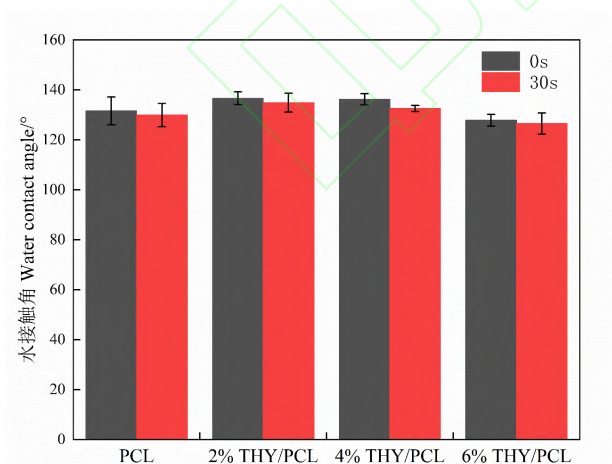


图6 PCL和THY/PCL纳米纤维膜的水接触角

Fig. 6 PCL and THY/PCL nanofiber membranes water contact angle

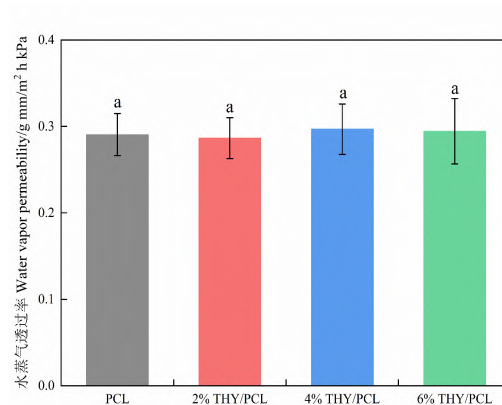


图7 PCL和THY/PCL纳米纤维膜的水蒸气透过率

Fig. 7 Water vapor transmission rate of PCL and THY/PCL nanofiber membranes

成功装载到PCL纳米纤维上,X射线衍射分析结果显示THY/PCL纳米纤维膜的结晶度降低,热力学分

析结果表明THY/PCL纳米纤维膜的热稳定性提高。同时,装载THY后不会影响PCL纳米纤维膜的水蒸

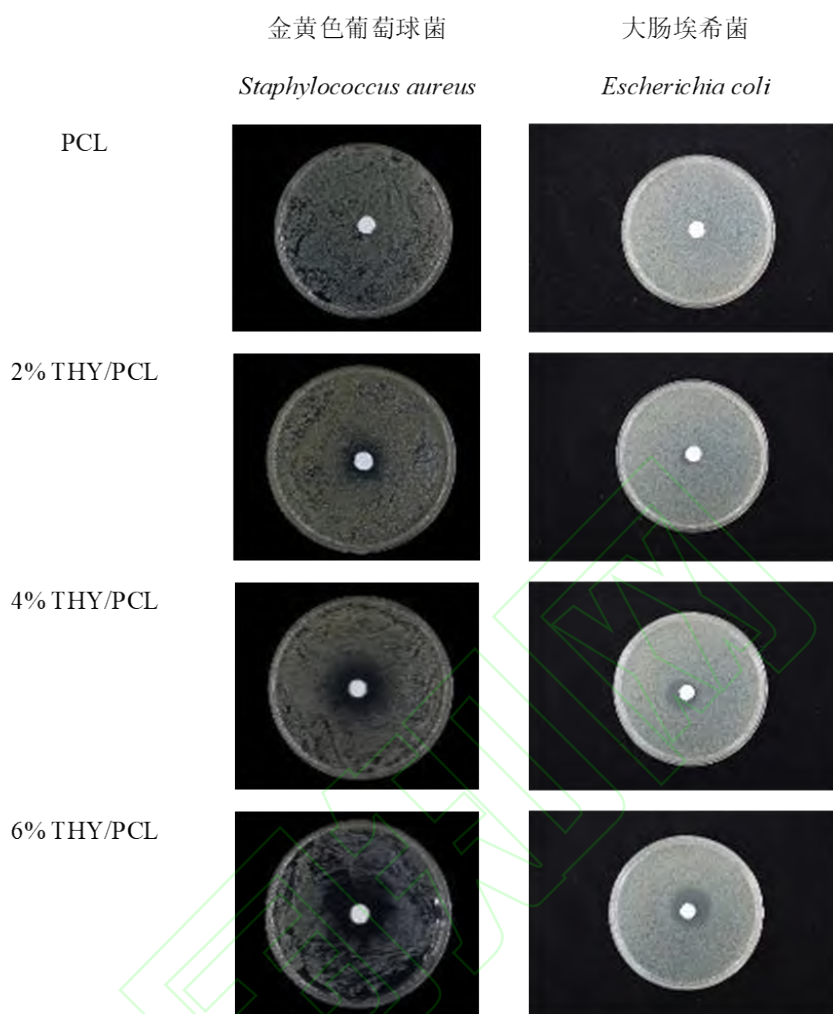


图8 纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌的抑菌活性

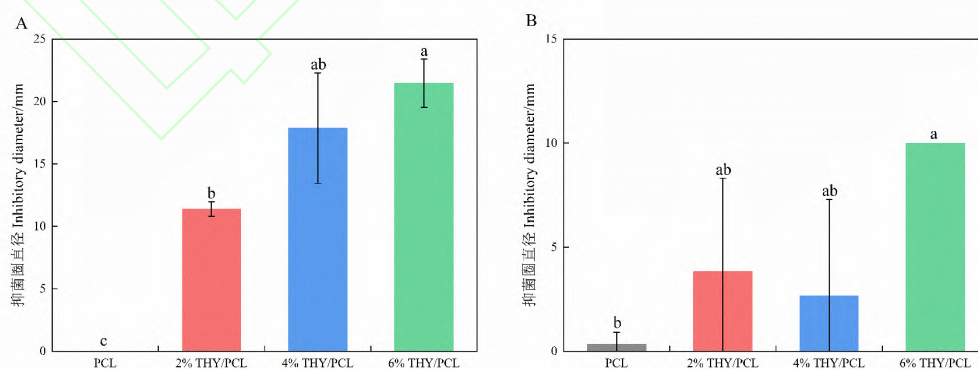
Fig. 8 Antibacterial activity of nanofiber membrane against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*

图9 纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌(A)和大肠埃希菌(B)的抑菌圈直径

Fig. 9 Diameter of the inhibition circle of nanofiber membrane against *Staphylococcus aureus* (A) and *Escherichia coli* (B)

气透过性能、表面疏水性与机械性能。体外抑菌结果显示,THY/PCL 纳米纤维膜对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌有良好的抑制能力。综上所述,采用

SBS 工艺制备的 THY/PCL 纳米纤维膜具有应用于果蔬保鲜抑菌包装,抑制果蔬腐败,延长货架期的潜力。

参考文献(References):

- [1] 隋思瑶,王毓宁,马佳佳,等. 活性包装技术在果蔬保鲜上的应用研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 1–6. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2017.09.002
- [2] SUI S, WANG Y, MA J, et al. Research Advances of Application of Active Packaging Technology in Preservation of Fruits and Vegetables[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(9): 1–6.
- [3] 杨智超, 沈超怡, 张辉, 等. 静电纺丝技术在食品保鲜领域的应用及展望[J]. 未来食品科学, 2021, 1(2): 1–14. DOI: 10.12281/ffs2708-1893-20210326-001
- [4] YANG Z, SHEN C, ZHANG H, et al. Review on Application and Prospect of Electrospinning Technology in Food Preservation[J]. *Future Food Science*, 2021, 1(2): 1–14.
- [5] ZHANG C, LI Y, WANG P, et al. Electrospinning of Nanofibers: Potentials and Perspectives for Active Food Packaging [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 479–502. Doi: 10.1111/1541-4337.12536
- [6] CUI T, YU J, LI Q, et al. Large-Scale Fabrication of Robust Artificial Skins from a Biodegradable Sealant-Loaded Nanofiber Scaffold to Skin Tissue Via Microfluidic Blow-Spinning [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(32): 2000982. Doi: 10.1002/adma.202000982
- [7] SHEN C, CAO Y, RAO J, et al. Application of Solution Blow Spinning to Rapidly Fabricate Natamycin-Loaded Gelatin/Zein/Polyurethane Antimicrobial Nanofibers for Food Packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100721. Doi: 10.1016/j.fpsl.2021.100721
- [8] DADOL G C, KILIC A, TIJING L D, et al. Solution Blow Spinning (Sbs) and Sbs-Spun Nanofibers: Materials, Methods, and Applications [J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101656. Doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101656
- [9] SALEHI B, MISHRA A P, SHUKLA I, et al. Thymol, Thyme, and Other Plant Sources: Health and Potential Uses [J]. *Phytotherapy Research*, 2018, 32(9): 1688–706. DOI: 10.1002/ptr.6109
- [10] MARCHESE A, ORHAN I E, DAGLIA M, et al. Antibacterial and Antifungal Activities of Thymol: A Brief Review of the Literature [J]. *Food Chemistry*, 2016, 210: 402–14. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.04.111
- [11] CHEN F-P, KONG N-Q, WANG L, et al. Nanocomplexation between Thymol and Soy Protein Isolate and Its Improvements on Stability and Antibacterial Properties of Thymol [J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 127594. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127594
- [12] SUN J, LIU X, CHEN Z, et al. The Application of Polycaprolactone Scaffolds with Poly(Ε-Caprolactone)&Ndash;Poly(Ethylene Glycol)&Ndash;Poly(Ε-Caprolactone) Loaded on Kidney Cell Culture [J]. *Materials*, 2022, 15(4). DOI: 10.3390/ma15041591
- [13] YANG Z, SHEN C, ZOU Y, et al. Application of Solution Blow Spinning for Rapid Fabrication of Gelatin/Nylon 66 Nanofibrous Film [J]. *Foods*, 2021, 10(10). DOI: 10.3390/foods10102339
- [14] SOW L C, TAN S J, YANG H. Rheological Properties and Structure Modification in Liquid and Gel of Tilapia Skin Gelatin by the Addition of Low Acyl Gellan [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 9–18. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.12.006
- [15] DENG L, LI Y, ZHANG A, et al. Nano-Hydroxyapatite Incorporated Gelatin/Zein Nanofibrous Membranes: Fabrication, Characterization and Copper Adsorption [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154: 1478–89. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.029
- [16] ZOU Y, ZHANG C, WANG P, et al. Electrospun Chitosan/Polycaprolactone Nanofibers Containing Chlorogenic Acid-Loaded Halloysite Nanotube for Active Food Packaging [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116711. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116711
- [17] HASANPOUR ARDEKANI-ZADEH A, HOSSEINI S F. Electrospun Essential Oil-Doped Chitosan/Poly(E - Caprolactone) Hybrid Nanofibrous Mats for Antimicrobial Food Biopackaging Exploits [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115108. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115108
- [18] CUI H, YUAN L, LIN L. Novel Chitosan Film Embedded with Liposome-Encapsulated Phage for Biocontrol of Escherichia Coli O157: H7 in Beef [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 177: 156–64. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.08.137
- [19] DIAS F T G, REMPEL S P, AGNOL L D, et al. The Main Blow Spun Polymer Systems: Processing Conditions and Applications [J]. *Journal of Polymer Research*, 2020, 27(8): 205. DOI: 10.1007/s10965-020-02173-7
- [20] SUN C, CAO J, WANG Y, et al. Ultrasound-Mediated Molecular Self-Assemble of Thymol with 2-Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin for Fruit Preservation [J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130327. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130327
- [21] MARRETO R N, CARDOSO G, DOS SANTOS SOUZA B, et al. Hot Melt-Extrusion Improves the Properties of Cyclodextrin-Based Poly(Pseudo)Rotaxanes for Transdermal Formulation [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2020, 586: 119510. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2020.119510
- [22] KO J, CHO K, HAN S W, et al. Hydrophilic Surface Modification of Poly(Methyl Methacrylate)-Based Ocular Prostheses Using Poly(Ethylene Glycol) Grafting [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2017, 158: 287–94. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2017.07.017
- [23] ZHANG Y, ZHANG Y, ZHU Z, et al. Encapsulation of Thymol in Biodegradable Nanofiber Via Coaxial Electrospinning and Applications in Fruit Preservation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(6): 1736–41. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b06362