

抗菌性大豆分离蛋白复合膜的制备与性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.2001

黄海波¹ 曹湘宇²

王嘉妮²

1. 湖南省农业装备研究所

湖南 长沙 410125

2. 中南林业科技大学

化学与化工学院

湖南 长沙 410004

摘要: 为应对石化基保鲜膜难以自然降解带来的环境问题,致力于开发一种可生物降解且兼具高效阻隔性能与抗菌性能的果蔬保鲜复合膜。以大豆分离蛋白(SPI)和壳聚糖(CS)为基材,通过低共熔溶剂(DES)法制备两亲性酯化木质素磺酸钠(ELS),并将其作为相容剂引入SPI-CS体系,经流延成膜制得SPI-CS-ELS复合膜。结果表明,ELS发挥“分子桥”作用,通过静电吸引、疏水作用及氢键与SPI、CS形成稳定相互作用,构建出均匀致密的三维网络结构。与SPI膜及SPI-CS膜相比,SPI-CS-ELS复合膜的力学性能、水蒸气与氧气阻隔性能均显著增强,并对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率超过99%。SPI-CS-ELS复合膜为高性能可降解食品包装材料的开发提供了新思路。

关键词: 抗菌膜; 大豆分离蛋白; 两亲性木质素

中图分类号: TB485.6; TB333.2⁺³

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2026)02-0001-08

引文格式: 黄海波, 曹湘宇, 王嘉妮. 抗菌性大豆分离蛋白复合膜的制备与性能研究[J]. 包装学报, 2026, 18(2): 1-8.

1 研究背景

果蔬作为人类饮食中重要的营养来源,其在全球范围内的生产量与消费量持续增长。然而,果蔬在采后贮运和销售过程中仍保持生命活动,其呼吸与蒸腾作用会不断消耗内部营养物质并导致水分流失,引发组织软化、失重萎蔫和品质劣化等问题,不仅缩短货架期,也显著降低其商品价值与经济收益^[1-3]。保鲜膜常被用作包装材料,通过调控气体交换与减缓水分蒸发以抑制果蔬的呼吸代谢,从而达到保鲜和延长货架期的目的。目前广泛使用的聚丙烯、聚乙烯等石化基薄膜虽然具有良好的力学性能与阻隔性能,但是难以自然降解,废弃后易碎裂为微塑料长期残留在环境中,对生态安全和人体健康构成威胁^[4-6]。因此,开发绿色、可降解的果蔬保鲜膜已成为食品包装领域

的重要研究方向。

近年来,生物质基高分子材料因其可再生、环境友好及可自然降解等特性,被视作石化基包装材料的理想替代品。其中,大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)来源广泛、成本低廉,具备良好的成膜性、阻氧性与生物相容性,在食品保鲜膜研究中备受关注^[7-8]。然而, SPI固有的亲水特性使其在潮湿环境下易发生吸湿膨胀,导致结构失稳和性能衰减。此外, SPI本身缺乏抗菌活性,难以满足果蔬贮运中对防腐与抑菌的要求。壳聚糖(chitosan, CS)作为自然界中唯一的天然阳离子多糖,具有广谱抗菌活性,可为制备具有抗菌功能的保鲜膜提供原料^[9]。将SPI与CS共混,理论上可实现性能互补,制备兼具良好力学强度、阻隔性能及抗菌功能的复合膜材料。但由于SPI与CS在分子结构、电荷性质等方面存在差异,

收稿日期: 2025-11-14

基金项目: 湖南省农业科技创新基金资助项目(2024CX116)

作者简介: 黄海波,女,副研究员,博士,主要从事生物质资源高效利用研究, E-mail: hebo1104@outlook.com

简单物理共混常导致二者相容性不佳、出现相分离现象，膜结构致密性和连续性较差。此类微观结构缺陷会直接影响膜的宏观性能，特别是水蒸气阻隔性能下降，难以有效抑制果蔬蒸腾作用^[10]。因此，改善 SPI 与 CS 的相容性，构建均匀、致密的分子复合网络结构，提升 SPI/CS 复合膜的阻湿性，是实现保鲜效果的重要途径。

木质素作为储量最丰富的天然芳香族聚合物，具有刚性骨架和抗氧化性，是理想的生物质增强相^[11]。Luo J. 等^[12]通过木质素诱导构建牺牲连体网络，所制备的木质素/壳聚糖复合膜力学性能显著优于纯壳聚糖膜。然而，普通木质素（如碱木质素）氢键作用强、疏水性高，在亲水基体中分散性差，易发生团聚形成应力缺陷点^[13-14]。为增强木质素的相容性，Xing Q. Q. 等^[15]利用马来酸酐（maleic anhydride, MAH）对木质素进行酯化改性，再与聚丁二酸丁二醇酯（poly(1,4-butylene succinate), PBS）混溶成膜，可制备得到一种具有紫外防护的复合膜，研究结果表明，经 MAH 改性后的木质素可提高木质素与聚合物的相容性，复合膜表现出良好的拉伸性能。酯化木质素磺酸钠（esterified lignosulfonate sodium, ELS）是经酯化改性后的木质素磺酸盐衍生物，既保留了磺酸基赋予的良好水溶性，又通过引入酯基链段赋予分子适度的疏水性与柔韧性，形成独特的两亲性结构^[16-17]。王飞^[18]研究发现，马来酰化改性木质素磺酸与聚己内酯（poly-ε-caprolactone, PCL）进行共混制备得到的膜材料，较未酯化改性木质素磺酸盐/PCL 共混膜材料具有更优异的力学性能和相容性。

然而，现有研究多集中于 ELS 与疏水性聚合物体系的相容性调控，对于其在亲水性生物大分子（如蛋白质、多糖）复合体系中的界面作用研究仍较为薄弱。基于此，本研究拟通过创新制备工艺或改性策略，将具有两亲性的 ELS 引入 SPI-CS 复合体系中充当“分子桥”，优化 SPI/CS 复合体系，增强组分的相容性，开发出高性能且具备抗菌功能的可降解复合膜，为高效、环保型果蔬保鲜材料的研发提供新思路。

2 实验

2.1 主要实验材料与仪器

1) 实验材料

大豆分离蛋白、壳聚糖（脱酰度为 95%，黏度

为 100~200 mPa·s）、木质素磺酸钠、琥珀酸酐（succinic anhydride, SA）、氯化胆碱、尿素均为分析纯，购自上海麦克林生化科技股份有限公司；无水乙醇、冰醋酸，分析纯，购自国药集团化学试剂有限公司。

2) 实验仪器

微波反应器，UWave-2000，上海新仪微波化学科技有限公司；傅里叶变换红外光谱仪（Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR spectroscopy），Nicolet iS50，美国赛默飞世尔科技公司；扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM），ZEISS Sigma 300，德国蔡司公司；电子万能试验机，CMT6104，深圳万能试验设备有限公司；水蒸气透过率测试仪，MOCON3/33MA，美国 MOCON 公司；氧气透过率测试仪，MOCON 221MD，美国 MOCON 公司。

2.2 ELS 的制备

将氯化胆碱与尿素在 80 ℃下真空干燥 12 h，冷却后置于干燥器中备用。按 1:2 的摩尔比称取干燥后的氯化胆碱与尿素，于 80 ℃加热搅拌至形成无色透明液体，制得氯化胆碱/尿素低共熔溶剂（DES），冷却后密封保存。

在 500 mL 高硼硅玻璃反应容器中，按质量比 1:20 称取 10 g LS 与 200 g DES，于 100 ℃溶解后加入 20 g SA。将混合物置于微波反应器中，100 ℃反应 10 min。反应产物在无水乙醇中再生，经离心分离得到 ELS 固体，用无水乙醇洗涤 3 次，真空干燥后得 ELS 粉末。

2.3 SPI-CS-ELS 复合膜的制备

称取 5.00 g 的 SPI 置于烧杯中，加入 95.00 g 蒸馏水，70 ℃加热搅拌至溶解，得到质量分数为 5.0% 的 SPI 溶液；称取 2.00 g 的 CS，加入 98.00 g 体积分数为 1% 的冰醋酸溶液，室温搅拌至溶解，得到质量分数为 2% 的 CS 溶液；称取 1.00 g 的 ELS 粉末，加入 99.00 g 蒸馏水中。随后，将混合液置于超声波细胞破碎仪中，在 400 W 功率下冰浴超声处理 30 min，使其充分分散与水合，得到均一的溶液。参照戴卿印等^[19]实验方法，在搅拌状态下，按照 SPI 与 CS 干基质量比为 2:1，将 CS 溶液滴加至 SPI 溶液中，搅拌 1 h 后，再滴加 SPI 和 CS 干基总质量 20% 的 ELS 溶液，充分混合后继续搅拌 1 h，将复合膜溶液置于超声清洗机中脱泡 15 min，以除去搅拌过程

中引入的气泡。取适量复合膜溶液匀速倾倒于成膜器中, 流延成膜, 并置于 40 ℃的鼓风干燥箱中, 干燥 24 h。小心揭下干燥后的复合膜, 并置于恒温恒湿箱(温度为 25 ℃, 相对湿度为 59%RH) 中存放 48 h, 确保膜内水分达到平衡。

2.4 测试与表征

1) FTIR 分析

采用溴化钾压片法对 LS、ELS、SPI 样品进行红外光谱测试; 采用全反射红外光谱法 (attenuated total reflectance, ATR) 对膜样品进行红外光谱测试。扫描范围为 500~4000 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描 32 次后采集红外光谱数据。

2) SEM 分析

将干燥后的膜样品在真空状态下进行喷金处理, 再利用 SEM 对膜的微观形貌进行观察, 仪器加速电压设置为 5 kV。

3) 力学性能测试

采用电子万能试验机对膜样品的拉伸强度和断裂伸长率进行测定, 每个样品设置 6 组平行试验, 测定结果取平均值。

4) 水蒸气透过率测试

膜的水蒸气透过率 (water vapor transmission rate, WVPR) 参照 GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》进行测试, 每个样品设置 6 组平行试验, 测定结果取平均值。

5) 氧气透过率测试

膜的氧气透过率 (oxygen transmission rate, OTR) 参照 GB/T 31354—2014《包装件和容器氧气透过性测试方法 库仑计检测法》进行测试, 每个样品设置 6 组平行试验, 测定结果取平均值。

6) 抑菌性测试

将膜样品于紫外下消杀 3 h, 其余实验用品于灭菌锅中 121 ℃灭菌 30 min, 取出后置于无菌操作台内备用。在稀释后的菌悬液中加入膜样品, 放入恒温空气摇床中振荡 24 h, 取 100 μL 菌悬液均匀涂布在培养基平板上, 37 ℃培养 24 h, 观察平板上细菌生长情况, 计算抑菌率 (R)。实验重复 3 次, 取平均值。

$$R = \frac{A - B}{A} \times 100\%,$$

式中, A、B 分别为对照组和实验组的平均菌落数。

3 结果与讨论

3.1 大豆分离蛋白复合膜的制备与化学结构表征

本研究采用 DES 溶剂体系, 以琥珀酸酐为改性剂, 通过微波辅助反应对木质素磺酸钠进行酯化改性, 制备了具有两亲性的 ELS。随后将 ELS 与 SPI、CS 溶液共混, 经流延成膜得到 SPI-CS-ELS 复合膜, 制备流程如图 1 所示。

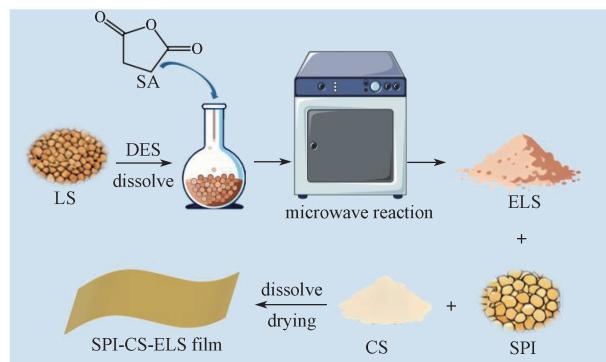
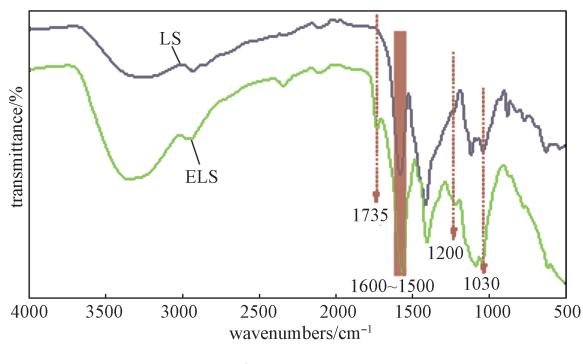


图 1 复合膜制备流程示意图

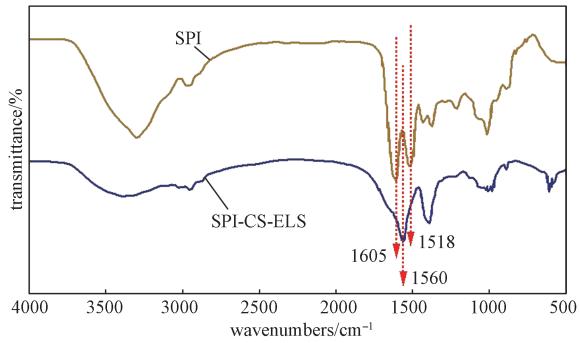
Fig. 1 Schematic diagram of the composite film preparation process

为探究各组分的化学结构及相互作用机制, 对 LS、ELS、SPI 及 SPI-CS-ELS 复合膜进行了 FTIR 分析, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, LS 在 3400 cm⁻¹ 处出现羟基的宽吸收峰, 1500~1600 cm⁻¹ 为芳香环骨架振动特征峰, 1200 cm⁻¹ 和 1030 cm⁻¹ 处对应的是磺酸基中 S=O 键的不对称和伸缩振动峰^[20]。经过琥珀酸酐酯化改性后, ELS 在 1735 cm⁻¹ 处出现酯基中 C=O 键的伸缩吸收峰, 表明羟基部分发生酯化反应, 木质素成功实现化学改性^[21-22]。相比之下, SPI 与 SPI-CS-ELS 复合膜的红外谱图中, SPI 的酰胺 I 带 (约 1605 cm⁻¹) 和酰胺 II 带 (约 1518 cm⁻¹) 均发生位移且峰形变宽, 说明体系内分子间作用增强^[23]。同时, 在 1560 cm⁻¹ 处出现了新的吸收峰, 表明 SPI、CS 与 ELS 之间形成了新的氢键结合^[24]。上述结果表明, ELS 的两亲性结构在复合体系中发挥了分子桥接作用: 其亲水性的磺酸基团与 CS 分子上的氨基发生静电吸引, 而疏水性的酯基链段及芳香环结构则与 SPI 的疏水区发生疏水作用与 π-π 堆积^[25]。多种分子间相互作用协同作用, 显著改善了 SPI 与 CS 之间的相容性, 促进了均匀致密的三维网络结构形成, 从而为复合膜优异的力学与阻隔性能提供了结构基础。



a) LS 和 ELS



b) SPI 和 SPI-CS-ELS

图2 LS、ELS、SPI 和 SPI-CS-ELS 复合膜的 FTIR 图谱

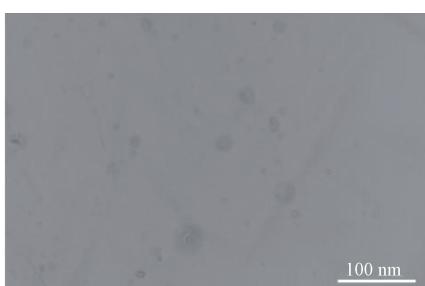
Fig. 2 FTIR spectra of LS, ELS, SPI and SPI-CS-ELS composite film

3.2 大豆分离蛋白膜的表面形貌表征

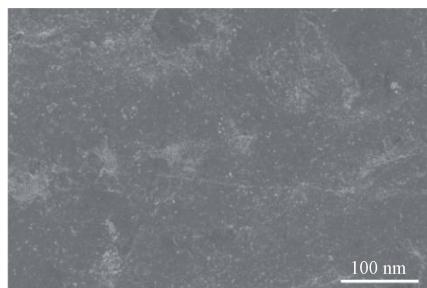
本研究制备的 SPI 膜和 SPI-CS-ELS 复合膜的外观图及表面微结构 SEM 图如图 3 所示。



a) SPI 膜和 SPI-CS-ELS 复合膜的外观图



b) SPI 膜的 SEM 图



c) SPI-CS-ELS 复合膜的 SEM 图

图3 SPI 膜和 SPI-CS-ELS 复合膜的形貌表征

Fig. 3 Surface morphology of SPI film and SPI-CS-ELS composite film

由图 3a 可知, SPI 膜外观呈透明无色状, 表面光滑平整, 显示出良好的成膜均匀性与结构致密性; 而 SPI-CS-ELS 复合膜外观则表现为半透明褐色, 颜色的加深主要归因于 ELS 中木质素芳香结构在可见光区域的吸收。尽管 SPI-CS-ELS 复合膜透明度有所下降, 但仍保持良好的柔韧性与结构完整性, 说明 SPI、CS 与 ELS 之间形成了稳定的复合网络。图 3b~c 中 SEM 表面形貌分析进一步验证了上述结果。SPI 膜表面平整均匀, 无明显相分离或孔洞, 属于典型的均一相结构; 相比之下, SPI-CS-ELS 复合膜表面出现均匀分布的微细颗粒, 整体形貌更为粗糙, 这些颗粒源于 ELS 在基体中的良好分散。该形貌特征表明 ELS 在 SPI-CS 体系中发挥了界面桥联作用, 增强了组分相容性与界面结合。颗粒结构的形成也在一定程度上增强了膜的光散射能力与物理阻隔性能。SPI-CS-ELS 复合膜在外观与微观结构上的变化共同说明, ELS 的引入有效调控了膜的聚集态结构, 为其力学性能与保鲜性能的提升奠定了结构基础。

3.3 大豆分离蛋白膜的力学性能测试

力学性能是评价果蔬保鲜膜在实际应用中可靠性的关键指标。SPI 膜、SPI-CS 和 SPI-CS-ELS 复合膜的应力 – 应变曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, SPI 膜的拉伸强度和断裂伸长率分别为 7.87 MPa 和 2.16%, 表现出典型的脆性特征。SPI-CS 复合膜的力学性能出现劣化, 拉伸强度和断裂伸长率均低于 SPI 膜。这主要是由于 SPI 与 CS 之间的界面相容性差, 导致宏观相分离, 在膜内部形成不连续界面与结构缺陷, 在外力作用下易成为应力集中点, 引发早期断裂。引入 ELS 后, SPI-CS-ELS 复合膜的拉伸强度与断裂伸长率均提升, 分别为 11.89 MPa 和 2.41%。这归因于 ELS 的两亲性结构在 SPI

与 CS 之间起到“分子桥”作用, 通过多种分子间作用力增强界面相容性, 构建更为均匀、稳定的三维网络结构。该结构有效消除了相界面处的应力集中现象, 使外力能够更好地在整个网络中传递与分散, 从而显著改善膜的力学性能, 更符合实际包装应用要求。

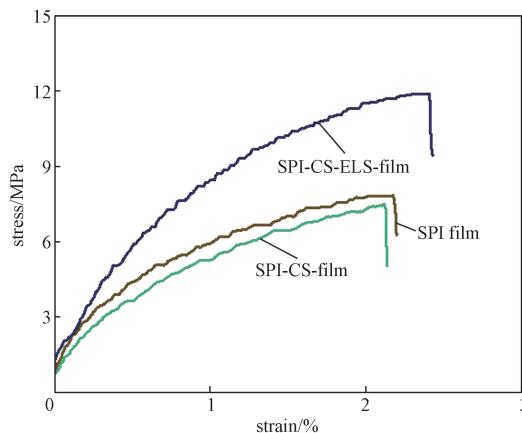


图 4 SPI 膜、SPI-CS 和 SPI-CS-ELS 复合膜的应力 – 应变曲线

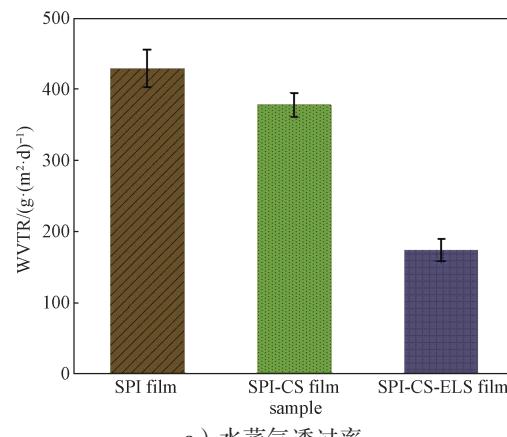
Fig. 4 Stress-strain curves of SPI film, SPI-CS and SPI-CS-ELS composite film

3.4 大豆分离蛋白膜的阻隔性能测试

气体阻隔性能(特别是对氧气和水蒸气的阻隔能力)是评价果蔬保鲜膜效能的核心指标, 直接影响其抑制果蔬呼吸代谢和延缓水分蒸腾的效果。本研究通过测定 SPI 膜、SPI-CS 和 SPI-CS-ELS 复合膜的 WVTR 和 OTR, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, SPI 膜的 WVTR 和 OTR 最高, 分别为 $429 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $38.9 \text{ mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 说明其阻隔性能最差。这主要是由于 SPI 分子结构中富含大量亲水基团(如羟基、氨基、羧基等), 这些基团极易与水分子形成氢键, 从而吸附并允许水分子渗透通过。加入 CS 后, SPI-CS 复合膜的阻隔性能得到改善, WVTR 和 OTR 分别降低至 $378 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $24.1 \text{ mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在引入两亲性的 ELS 后, 所制备的 SPI-CS-ELS 复合膜在 WVTR 和 OTR 性能上得到显著改善, 分别为 $174 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $10.3 \text{ mL}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 这归因于 ELS 引入后引发的物理结构与化学性质的协同优化。ELS 通过“分子桥”连接作用消除了 SPI 与 CS 的相界面, 构建了均匀、致密的三维网络结构, 不仅有效延长氧气分子和水分子在膜内的扩散路径, 也增加了其渗透阻力, 实现了对氧气和水蒸气的物理性阻挡^[26]。同时, ELS 分子中固有的刚性芳香环及通过酯化改性引入的疏水性脂肪族长链, 在亲水性的 SPI-CS 基体中创

造了大量纳米尺度的疏水微区, 能有效排斥并阻碍极性水分子的溶解与扩散, 从而显著降低了复合膜对水蒸气的透过性。此外, ELS 分子中丰富的羟基与磺酸基团, 可与 SPI 和 CS 骨架上的氨基、羟基等强亲水基团形成竞争性氢键。这种相互作用能够在分子层面上封锁亲水位点, 减少了水分子通过氢键接力机制进行传输的通道, 同时也有助于稳定网络结构, 降低其在高湿环境下的水合溶胀程度, 从而协同提升了阻湿与阻氧性能。



a) 水蒸气透过率

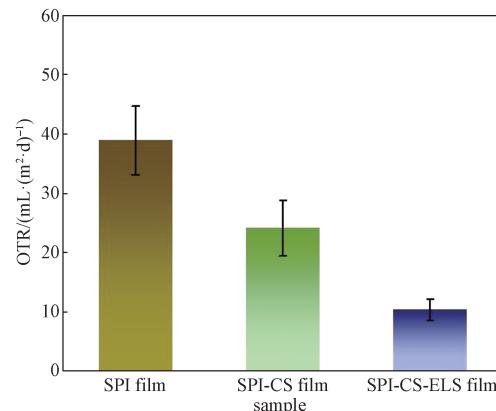


图 5 SPI 膜、SPI-CS 和 SPI-CS-ELS 复合膜的水蒸气透过率和氧气透过率

Fig. 5 Water vapor transmission rate and oxygen transmission rate of SPI film, SPI-CS and SPI-CS-ELS composite film

3.5 大豆分离蛋白膜的抑菌性能测试

抑菌功能是评估保鲜膜实际应用价值的关键指标^[27]。本研究选取大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)分别作为革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌的代表, 采用接触振荡法对不同类型膜的抑菌性能进行定量评价, 结果如图 6 所示。

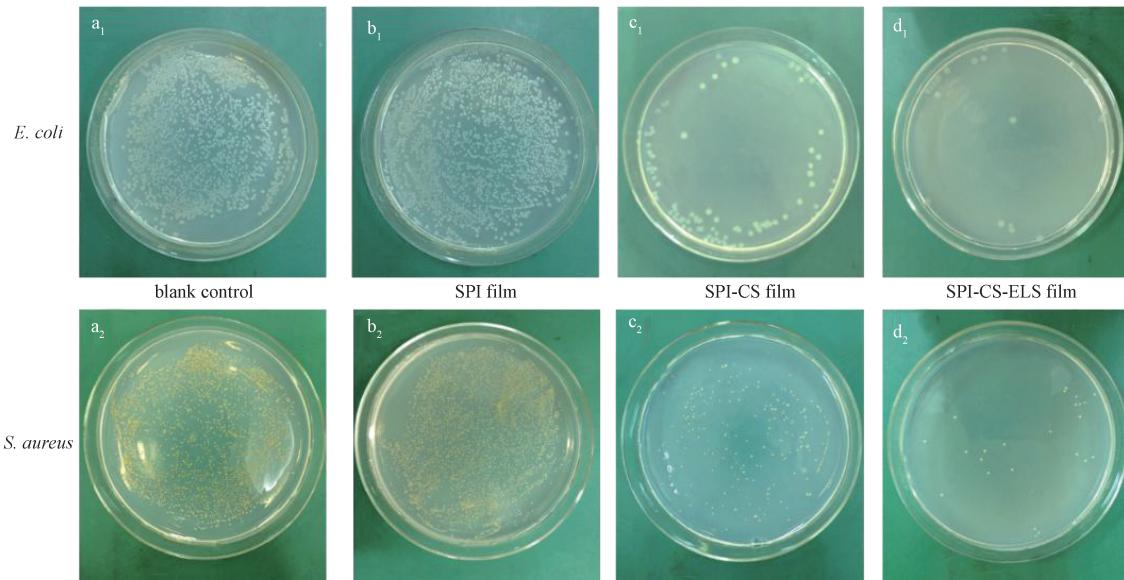


图 6 空白对照膜、SPI 膜、SPI-CS 和 SPI-CS-ELS 复合膜中的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌分布

Fig. 6 Distribution of *E. coli* and *S. aureus* in blank control film, SPI film, SPI-CS and SPI-CS-ELS composite film

对比图 6a₁~b₂ 可知, SPI 膜水浸液对两种供试菌种的浓度与空白对照组均无显著差异, 表明 SPI 膜不具备抑菌活性。相比之下, SPI-CS 复合膜表现出明显的抑菌效果, 抑菌率均超过 95% (见图 6c₁~c₂), 这主要归因于壳聚糖分子中带正电荷的氨基与细菌细胞膜表面带负电组分 (如脂多糖、磷壁酸) 发生静电吸附, 破坏细胞膜完整性, 从而抑制细菌生长^[28]。引入 ELS 后, 所制得的复合膜抑菌性能得到了进一步增强, 抑菌率提高至 99% 以上 (见图 6d₁~d₂)。这一提升可归因于以下两方面因素: 首先, ELS 的加入改善了成膜均匀性, 使壳聚糖在 SPI 基体膜中分布更为均匀, 增强了与细菌的接触效率; 其次, 木质素衍生物含有丰富的酚羟基结构和疏水骨架, 具备一定的抗氧化活性, 能够与壳聚糖形成协同效应^[29]。具体而言, ELS 中的酚羟基可通过破坏微生物细胞膜、干扰酶活性及诱导氧化应激等多种途径, 增强壳聚糖的抑菌效果; 同时, 其抗氧化性能有助于清除贮藏环境中的活性氧, 削弱微生物增殖条件, 间接延缓腐败进程。因此, ELS 不仅未削弱复合膜的抗菌核心功能, 反而通过物理增效与化学协同的双重路径, 进一步提升了其综合抗菌性能。

4 结语

本研究成功制备了兼具优异力学性能、高阻隔性能与显著抗菌活性的可降解 SPI-CS-ELS 复合膜。研究发现, 经酯化改性获得的两亲性 ELS 在复合体

系中发挥关键的“分子桥”作用, 有效改善了 SPI 与 CS 的相容性, 抑制了相分离现象, 进而构建出致密均匀的三维网络结构。这一结构优化直接促使复合膜性能实现全面提升, ELS 的引入不仅通过消除界面缺陷和促进应力均匀分散, 显著增强了复合膜的拉伸强度与韧性; 其刚性芳香骨架、疏水链段与竞争性氢键的协同作用, 也大幅提升了复合膜对氧气和水蒸气的阻隔性能。此外, ELS 与壳聚糖在抗菌方面表现出良好协同效应, 使复合膜对革兰氏阴性菌和阳性菌均表现出超过 99% 的抑菌率。综上, SPI-CS-ELS 复合膜在果蔬保鲜包装领域展现出良好的应用前景, 本研究为高性能生物基包装材料的开发提供了可行路径。

参考文献:

- [1] 王文月, 李 旋, 胡佳星, 等. 电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 398–406.
- [2] YOU K Y, CAO X H, LI Q Y, et al. Application of Magnetic Fields in Low-Temperatures Storage of Fruits and Vegetables[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(5): e70252.
- [3] LI Q F, CHEN Q, YANG K, et al. E-Poly-L-Lysine/Rhamnolipid Bifunctional Coating Based on Green Electrostatic Assembly Technology for Fruit Packaging and Preservation[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 503: 158425.

- [4] 王海松, 赵亚丽, 杜 健, 等. 生物质基可降解果蔬保鲜包装材料的制备及应用 [J]. 包装学报, 2023, 15(1): 1-11.
- [5] WU J X, TANG R, FAN K. Recent Advances in Postharvest Technologies for Reducing Chilling Injury Symptoms of Fruits and Vegetables: A Review[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101080.
- [6] HARAŽNA K, GRZELA K, STĘPIEŃ-HOŁUBCZAT K, et al. Novel, Eco-Friendly A-Tocopherol/Layered Double Hydroxides/Poly(3-Hydroxyoctanoate)-Based Active Packaging Materials with Enhanced Antimicrobial, Barrier and Antioxidant Activities[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 500: 156959.
- [7] 肖 骏, 叶双双, 陈志飞, 等. 大豆分离蛋白改性及其在食药领域应用进展 [J]. 大豆科学, 2025, 44(4): 125-136.
- [8] 丁凯炜, 吕长鑫, 贾凤维, 等. 大豆分离蛋白基 pH 值智能指示膜的制备及其对乳品新鲜度的监测 [J]. 食品科学, 2025, 46(6): 11-18.
- [9] KERCH G. Chitosan Films and Coatings Prevent Losses of Fresh Fruit Nutritional Quality: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 159-166.
- [10] 杨 欧, 张晓湘, 徐小涵, 等. 抗氧化型壳聚糖/大豆蛋白复合食用膜的制备与应用 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 210-218.
- [11] WAYAN ARNATA I, ANGGRENI A A M D, ARDA G, et al. Minimizing Food Oxidation Using Aromatic Polymer: From Lignin into Nano-Lignin[J]. Food Research International, 2024, 197: 115159.
- [12] LUO J, GU Y H, YUAN Y F, et al. Lignin-Induced Sacrificial Conjoined-Network Enabled Strong and Tough Chitosan Membrane for Food Preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 313: 120876.
- [13] RATH S, PRADHAN D, DU H S, et al. Transforming Lignin into Value-Added Products: Perspectives on Lignin Chemistry, Lignin-Based Biocomposites, and Pathways for Augmenting Ligninolytic Enzyme Production[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 7(1): 27.
- [14] CHIO C, SAIN M, QIN W S. Lignin Utilization: A Review of Lignin Depolymerization from Various Aspects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 107: 232-249.
- [15] XING Q Q, RUCH D, DUBOIS P, et al. Biodegradable and High-Performance Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate)-Lignin UV-Blocking Films[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(11): 10342-10351.
- [16] 李 媛, 魏 刚, 庄 虎, 等. 基于改性淀粉与壳聚糖/木质素磺酸钠复合涂层的加热卷烟纸研究 [J]. 包装工程, 2025, 46(13): 296-303.
- [17] XU T R, RIAZANOVA A V, LINDÉN P A, et al. Engineering of Industrial Kraft Lignin: The Role of Esterification Methods in Lignin Nanoparticle Self-Assembly[J]. Biomacromolecules, 2025, 26(9): 5727-5739.
- [18] 王 飞. 木质素/聚己内酯降解塑料的制备及性能研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- [19] 戴卿印, 周 鑫, 黄 茜, 等. 大豆分离蛋白-壳聚糖可食用性抗菌膜的制备与性能评价 [J]. 粮食与油脂, 2022, 35(6): 89-95.
- [20] WANG F, YANG X P, ZOU Y X. The Esterification of Sodium Lignosulfonate with Maleic Anhydride in Water Solution[J]. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2015, 20(1): 69-81.
- [21] ZHANG F D, ZENG G D, ZHOU Y, et al. Green and Efficient Production of Functionalized Graphene to Achieve Soybean Meal-Based Adhesive Enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134068.
- [22] TANG Q Q, ZHOU M S, YANG D J. Preparation of Uniform Lignosulfonate-Based Colloidal Spheres for UV-Absorbing Thermoplastics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219: 663-671.
- [23] HUANG G Q, SUN Y T, XIAO J X, et al. Complex Coacervation of Soybean Protein Isolate and Chitosan[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 534-539.
- [24] 田亚东, 江海玉, 张 婷, 等. 大豆分离蛋白-壳聚糖复合物的制备及结构表征 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 58-63.
- [25] PRADYAWONG S, SHRESTHA R, LI P, et al. Effect of pH and pH-Shifting on Lignin-Protein Interaction and Properties of Lignin-Protein Polymers[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2022, 30(5): 1908-1919.
- [26] 黄红军, 万红敬. 生物降解聚合物的阻隔性能研究进展 [J]. 广东化工, 2025, 52(18): 81-85.
- [27] 黄海波, 姚 进, 曾广胜, 等. 水溶性壳低聚糖抑菌性能研究 [J]. 包装学报, 2019, 11(4): 10-15.
- [28] KONG Y H, ZHANG W J, HE T, et al. Asymmetric Wettable Polycaprolactone-Chitosan/Chitosan Oligosaccharide Nanofibrous Membrane as Antibacterial Dressings[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 304:

120485.

- [29] FAZELI M, MUKHERJEE S, BANIASADI H, et al. Lignin Beyond the Status Quo: Recent and Emerging

Composite Applications[J]. Green Chemistry, 2024, 26(2): 593–630.

(责任编辑: 李玉华)

Preparation and Performance of Antibacterial Soy Protein Isolate Composite Films

HUANG Haibo¹, CAO Xiangyu², WANG Jian²

(1. Hunan Agricultural Equipment Research Institute, Changsha 410125, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To address the environmental issues caused by the poor degradability of petrochemical-based cling films, efforts are being made to develop a biodegradable composite film with enhanced barrier and antibacterial properties for fruit and vegetable preservation. Soy protein isolate (SPI) and chitosan (CS) were used as the matrix materials, while amphiphilic esterified lignosulfonate (ELS) was synthesized via a deep eutectic solvent (DES) method and introduced as a compatibilizer into the SPI-CS system. The resulting SPI-CS-ELS composite films were fabricated through solution casting. The results revealed that ELS acted as a molecular bridge, forming stable interactions with SPI and CS through electrostatic attraction, hydrophobic interactions and hydrogen bonding, thereby constructing a homogeneous and compact three-dimensional network structure. Compared with SPI and SPI-CS films, the SPI-CS-ELS composite films exhibited significantly improved mechanical strength, superior water vapor and oxygen barrier properties. Moreover, the inhibition rates against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* exceeded 99%. The SPI-CS-ELS composite film provides a new strategy for developing high-performance biodegradable food packaging materials.

Keywords: antibacterial film; soy protein isolate; amphiphilic lignin