郭雷, 李琛. 不同来源蛋白对木薯淀粉薄膜性能与结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 72−81. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050076

GUO Lei, LI Chen. Effects of Different Protein Sources on the Properties and Structure of Cassava Starch Films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 72−81. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050076

·研究与探讨·

不同来源蛋白对木薯淀粉薄膜性能与结构的影响

郭　雷,李　琛*

（东北林业大学家居与艺术设计学院,黑龙江哈尔滨 150040）

摘　要: 为提升木薯淀粉（CS）薄膜的力学性能和水分阻隔能力，本研究采用花生分离蛋白（PPI）及明胶（GL）两种蛋白与 CS 制备复合薄膜，系统研究了不同来源蛋白与添加比例（0∶10、1∶9、2∶8、3∶7、4∶6 和 5∶5）对复合膜性能与微观结构的影响。结果显示，两种蛋白与 CS 均具有良好的相容性，能有效改善薄膜的力学性能、水分阻隔性能和微观结构致密性。在 PPI/CS 复合膜中，最佳质量比为 3∶7，薄膜的水分含量、水溶性、吸水性、吸湿性和水蒸气透过率分别较纯 CS 膜降低了 28.32%、19.39%、14.79%、27.87% 和 11.98%，断裂伸长率也从 53.39% 提高至 82.16%。而在 GL/CS 复合膜中，GL 的加入主要提升了薄膜的拉伸强度，在 GL/CS 质量比为 4∶6 时，拉伸强度从 2.36 MPa 提高至 4.44 MPa，且水分阻隔性能得到显著改善（P<0.05）。扫描电镜和 XRD 分析显示，蛋白质的加入优化了膜的表面形貌并改变了其结晶结构，FTIR 结果进一步证实了蛋白与淀粉分子间的氢键作用。综上，PPI/CS 复合膜更适用于需高柔韧性和水分阻隔性能的短期包装，而 GL/CS 复合膜适用于对结构稳定性要求较高的食品包装，展示出在可降解包装材料领域的应用潜力。

关键词: 木薯淀粉薄膜,花生分离蛋白,明胶,性能,结构表征

中图分类号: TS206.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0072−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050076

本文网刊:

Effects of Different Protein Sources on the Properties and Structure of Cassava Starch Films

GUO Lei，LI Chen*

（College of Home and Art Design, Northeast Forestry University, Heilongjiang 150040, China）

Abstract: To enhance the mechanical properties and moisture barrier performance of cassava starch (CS) films, this study employed peanut protein isolate (PPI) and gelatin (GL) as protein modifiers to prepare composite films with CS. The effects of protein sources and addition ratio (0∶10, 1∶9, 2∶8, 3∶7, 4∶6, and 5∶5) on the properties and microstructure of the composite films were systematically investigated. The results showed that both proteins demonstrated good compatibility with CS, effectively enhancing the mechanical properties, water barrier performance, and microstructure density of the films. In the PPI/CS composite film, the optimal mass ratio was 3∶7. The moisture content, water solubility, water absorption, moisture absorption, and water vapor permeability of the film were reduced by 28.32%, 19.39%, 14.79%, 27.87%, and 11.98%, respectively, compared to those of the pure CS film. The elongation at break also increased from 53.39% to 82.16%. In the GL/CS composite film, the addition of GL primarily improved the tensile strength of the film. When the mass ratio of GL/CS was 4∶6, the tensile strength increased from 2.36 to 4.44 MPa, and the water barrier properties were significantly improved (P<0.05). Scanning electron microscopy and X-ray diffraction analyses indicated that protein addition optimized the surface morphology and modified the crystalline structure of the films, whereas Fourier-transform infrared spectroscopy confirmed the formation of hydrogen bonds between protein and starch molecules. In

收稿日期: 2025−05−12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目（32471790）。

作者简介: 郭雷（2000−）,男,硕士研究生,研究方向:淀粉基复合材料,E-mail:846041025@qq.com。

*** 通信作者:** 李琛（1979−）,女,博士,副教授,研究方向:生物基包装材料,E-mail:lichen_nefu@163.com。

summary, PPI/CS composite films are more appropriate for short-term packaging requiring high flexibility and moisture barrier performance, whereas GL/CS composite films are more suitable for food packaging applications requiring greater structural stability. Both composites demonstrate significant potential for application in the field of biodegradable packaging materials.

Key words: cassava starch film; peanut protein isolate; gelatin; performance; structural characterization

木薯淀粉（Cassava Starch, CS）是一种来源广泛、价格低廉的天然聚合物，具有优异的成膜性能、高粘度和良好的凝胶性能[1]。其制成的薄膜透明度高、表面光滑，适合用作食品包装材料。然而木薯淀粉基材料易吸潮、机械性能欠佳等问题，制约了其广泛应用。为解决这些问题，通过将木薯淀粉与天然填充材料复合，如纤维素、蛋白质、壳聚糖、纳米材料等，显著改善其性能[2]。其中蛋白质作为一种天然高分子材料，因具有优良的生物相容性、可加工性和成膜性得到广泛关注。将蛋白质直接添加到淀粉中时，其特有的分子结构与淀粉分子发生相互作用，有效增强了薄膜的力学性能、柔韧性和水分阻隔性。此外，蛋白质的加入还能提升复合薄膜的抗氧化性、抗菌性和生物降解性，从而在延长食品保质期的同时，确保材料的环保性[3]。常见的与淀粉共混的蛋白种类包括动物来源的明胶[4]、乳清蛋白[5] 和胶原蛋白[6]，植物来源的花生蛋白[7]、谷蛋白[8]、大豆蛋白[9] 和莲藕蛋白[10] 等。

明胶（Gelatin, GL）是源于动物皮肤和肌腱中胶原蛋白的水溶性蛋白质，通常通过酸或碱的水解过程制备而成，因其具有良好的生物相容性和可生物降解性而备受关注[11]。GL 不仅在食品工业和医药领域中广泛应用，还因其优异的成膜性能成为可食性膜和可生物降解膜研究中的重要原料。GL 在与淀粉共混后，能够显著改善淀粉材料的力学性能[12]。同时，GL 与增塑剂之间通常具有良好的相容性，这使其在淀粉基材料的共混改性中展现出较高的应用潜力和研究价值[13]。

花生是我国重要的油料经济作物之一，年产量超过 1900 万吨，具有显著的资源优势[14]。其富含蛋白质、糖类和油脂，经过脱脂或冷榨等工艺处理后，可获得蛋白质含量为 47%~55% 的脱脂花生粉。通过进一步的提取和纯化处理，可以得到蛋白质含量超过 90% 的花生分离蛋白（Peanut Protein Isolate, PPI），是制备生物可降解蛋白膜的优质原料[15]。Reddy 等[16] 通过模压成型制备的 PPI 膜展现了良好的力学性能，拉伸强度达 8.0 MPa，断裂伸长率为 63%，模量为 147 MPa，整体性能优于大多数植物蛋白膜。Li 等[17] 开发了 PPI/阿拉伯胶复合膜，与纯 PPI 膜相比，复合薄膜的拉伸强度和水蒸气阻隔性增加，但断裂伸长率有所下降。Sun 等[18] 的研究表明，PPI 可以改善豌豆淀粉薄膜阻隔性能。因此，将 PPI 与 CS 这两种来源广泛的材料结合制备复合膜，为克服 CS 薄膜的不足提供了一种可行的研究策略。

本文通过制备不同比例的 GL/CS 和 PPI/CS 复合膜，探讨 PPI、GL 及其添加量对 CS 薄膜力学性能、水分含量、水溶性、吸水性、吸湿性、水蒸气透过率以及结构的影响，揭示 CS 基材与 PPI、GL 之间的相互作用，为开发新型可降解食品包装材料提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

木薯淀粉（食品级）　新乡良润全谷物有限公司；花生分离蛋白　生物试剂级，上海源叶生物科技有限公司；明胶（冻力 180 Bloom）　上海毕得医药科技股份有限公司；甘油、氢氧化钠　分析纯，天津永大化学试剂有限公司。

DF-101S 集热式磁力搅拌器　上海析牛莱伯仪器有限公司；101-1AB 电热恒温鼓风箱　天津市泰斯特仪器有限公司；SB-800 超声清洗机　宁波新芝科技生物股份有限公司；L5S 紫外-可见光分光光度计　上海仪电（集团）有限公司；CR-410 电子色差仪　日本柯尼卡美能达株式会社；GKB-4 薄膜标准测厚仪、LD-05 电子万能试验机　长春月明小型仪器试验厂；FEI-NOVA-NANO230 场发射扫描电镜、Nicolet iS50 傅立叶变换红外光谱仪　赛默飞世尔科技公司；X'Pert3 Powedr X 射线衍射仪　荷兰帕纳科公司。

1.2　实验方法

1.2.1　复合薄膜的制备

1.2.1.1　PPI/CS 复合膜的制备　按 PPI/CS 质量比（w/w）0∶10、1∶9、2∶8、3∶7、4∶6 和 5∶5[19]，准确称取相应质量的 PPI 和 CS，分散于去离子水中配制成 5%（w/v）的混合溶液，用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 9.0[20−21]，并加入 PPI/CS 总质量 40% 的甘油作为增塑剂。随后，将混合溶液置于 95 ℃ 恒温磁力搅拌器中，搅拌 50 min。完成搅拌后，将溶液放置于室温下，缓慢搅拌直至其冷却至室温，然后超声 5 min（40 kHz, 240 W）以去除气泡。最后，将成膜液倒入 12 cm×12 cm 方形培养皿中并置于通风、干燥且阴凉的环境中静置 72 h，自然晾干后揭膜，平衡水分备用。

1.2.1.2　GL/CS 复合膜的制备　按 GL/CS 质量比（w/w）0∶10、1∶9、2∶8、3∶7、4∶6 和 5∶5[19]，准确称取相应质量的 GL 和 CS，分散于去离子水中配制成 5%（w/v）的混合溶液，加入 GL/CS 总质量 40% 的甘油作为增塑剂。随后，将混合溶液置于 95 ℃ 恒温磁力搅拌器中，搅拌 50 min。完成搅拌后，将溶液放置于室温下，缓慢搅拌直至其冷却至室温，然后超声 5 min

(40 kHz, 240 W)以去除气泡。最后,将成膜液倒入 12 cm×12 cm 方形培养皿中并置于通风、干燥且阴凉的环境中静置 72 h,自然晾干后揭膜,平衡水分备用。

1.2.2 复合薄膜性能测定

1.2.2.1 厚度测定 在薄膜样品上随机选择五个测量点,使用精度为 0.01 mm 的厚度仪进行测量。取其平均值得到薄膜的最终厚度,单位为 mm。

1.2.2.2 光学性能测定 透光率测定根据成晓祎等[22]的方法略有修改,将样品裁剪为 3 cm×1 cm 的矩形并贴于比色皿内侧,置于紫外-可见分光光度计中,测定其在 660 nm 波长处的吸光度(A),透光率按公式(1)计算:

$$透光率(\%) = 0.1^{A} \times 100 \quad 式(1)$$

薄膜颜色使用色差仪根据 CIE LAB 色彩模型测量[23]。白板作为标准参考,分别记录其 L^*、a^*、b^*值。总色差(ΔE^*)按公式(2)计算:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad 式(2)$$

式中:ΔL^*、Δa^*、Δb^*是样品颜色与标准参考的差值。

1.2.2.3 力学性能测定 将薄膜裁剪成 100 mm×10 mm 的长条。通过使用电子万能试验机对复合薄膜进行拉伸测试来测量其机械性能,夹具初始距离为 50 mm,拉伸速度为 20 mm/min。拉伸强度按公式(3)计算,断裂伸长率按公式(4)计算[24]:

$$拉伸强度(MPa) = \frac{F}{A} \quad 式(3)$$

$$断裂伸长率(\%) = \frac{\Delta G}{G} \times 100 \quad 式(4)$$

式中:F 是薄膜断裂时承受的最大拉力(N);A 是测试时薄膜的横截面积(mm^2);ΔG 是薄膜断裂时拉伸的长度(mm);G 是薄膜的初始长度(mm)。

1.2.2.4 水分含量和水溶性 将薄膜切成 2 cm×2 cm 的大小,测定样品初始质量 m_1(g),将薄膜在 100 ℃干燥至质量恒定 m_2(g)。水分含量按公式(5)计算[25]:

$$水分含量(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad 式(5)$$

将干燥后的薄膜置于恒重称量瓶中,加入 20 mL 蒸馏水至称量瓶中,室温浸泡 24 h。24 h 后,100 ℃下再次干燥至恒重 m_3(g),水溶性按公式(6)计算[26]:

$$水溶性(\%) = \frac{m_3 - m_2}{m_2} \times 100 \quad 式(6)$$

1.2.2.5 吸水性 薄膜的吸水性测定参照 Rammak 等[27]的方法并加以适当修改。将薄膜切成 2.5 cm×2.5 cm 的大小,在 100 ℃下干燥后称重 A(g),并置于恒重称量瓶中,加入 20 mL 蒸馏水至称量瓶中,室温浸泡 20 min。20 min 后,立即取出样品,用吸水纸除去多余的水分,然后称重 B(g),吸水性按公式(7)计算:

$$吸水性(\%) = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad 式(7)$$

1.2.2.6 吸湿性 将薄膜裁成约 2 cm×2 cm 的大片,在 100 ℃下干燥后称重 W_0(g),将薄膜置于干燥器中,底部倒入 1000 mL 去离子水提供 100% 的相对湿度(100% RH),并用凡士林密封干燥器。48 h 后称重 W_1(g),吸湿性按公式(8)计算[28]:

$$吸湿性(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad 式(8)$$

1.2.2.7 水蒸气透过率的测定 水蒸气渗透率的测定根据 Yang 等[29]的方法稍作修改。将 15 mL 蒸馏水加入 30 mm×60 mm 的高型称量瓶中以保持 100% 的相对湿度(100% RH)。选取平整、无褶皱、无孔洞的薄膜,裁剪成略大于瓶口的圆形,并用厚度仪测量其厚度。随后将薄膜覆盖于瓶口,并使用石蜡沿边缘密封,确保水分仅能通过薄膜扩散。密封后的称量瓶进行称重后置于室温下 0%RH(由无水 $CaCl_2$ 提供)的干燥器中。待平衡一段时间后,每隔 1 h 测定杯子的重量,持续 12 h。水蒸气透过率按公式(9)计算:

$$水蒸气透过率(g\cdot m/(m^2\cdot s\cdot Pa)) = \frac{\Delta w}{t}\cdot\frac{X}{A\Delta p} \quad 式(9)$$

式中:Δw 是瓶子重量的变化(g);X 是薄膜的厚度(m);t 是时间间隔(s);A 是称量瓶瓶口面积(m^2);Δp 是瓶子内外两侧的饱和水蒸气压差(Pa)。

1.2.3 复合薄膜结构表征

1.2.3.1 扫描电子显微镜观察 采用场发射扫描电子显微镜观察薄膜的表面形貌[30]。使用导电胶将样品固定在样品台上,后对样品表面进行喷金处理,测试时设定加速电压为 15~20 kV,放大倍数为 1000 倍。

1.2.3.2 X 射线衍射分析 将薄膜裁成一元硬币大小进行 X 射线衍射扫描,扫描角度范围为 5°~60°,电压为 40 kV,电流为 30 mA,测试步长为 0.02°,扫描速率为 2 s/步。

1.2.3.3 傅里叶变换红外光谱分析 将薄膜样品裁剪为 2 cm×2 cm 的正方形薄片。在 25 ℃条件下,使用傅里叶变换红外光谱仪对样品进行测试,光谱采集范围为 4000~500 cm^{-1},分辨率为 4 cm^{-1}。将样品置于光谱仪探头处,记录其红外吸收谱图,并分析特征吸收峰的变化以探究材料的分子结构特征。

1.3 数据处理

所有实验均重复进行三次,采用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),并在 $P<0.05$ 水平下进行 Duncan 多重比较检验。使用 Origin 2018 软件和 Excel 软件进行数据处理及图表绘制,结果以平均值±标准偏差的形式呈现。

2 结果与分析

2.1 复合薄膜光学性能分析

2.1.1 透光率及外观分析 透光率和外观是包装薄

膜的重要特性，直接影响消费者接受度和食品质量。两类薄膜在透光率和外观上存在明显差异。如图 1 所示，PPI/CS 复合膜的透光率随着 PPI 比例的增加而显著降低（P<0.05）。其中，纯 CS 膜透光率为 82.17%，而当 PPI/CS 质量比为 5∶5 时，透光率降至 47.27%，说明 PPI 的引入对膜的光学性能产生了较大的影响。这是由于 PPI 的加入干扰了 CS 的结晶行为，并诱导了薄膜表面粗糙度的增加，从而引起光散射增强与光泽度降低，最终导致透光率下降[31]。Huntrakul 等[32] 将豌豆分离蛋白加入乙酰化木薯淀粉薄膜中会导致复合膜透光率降低，薄膜较低透光率可以防止光诱导的脂质氧化[18]，适用于包装光敏感或易氧化的产品。而对于 GL/CS 复合膜，随着 GL 比例的增加，复合膜透光率略减弱，GL 的加入对膜的透光率影响较小。不同质量比的 PPI/CS 复合膜和 GL/CS 复合膜外观如图 2 所示。随着 PPI 的加入复合膜表面颜色逐渐加深，而对于 GL/CS 复合膜，薄膜整体呈现均匀的白色透明特性，显示出良好的成膜效果。

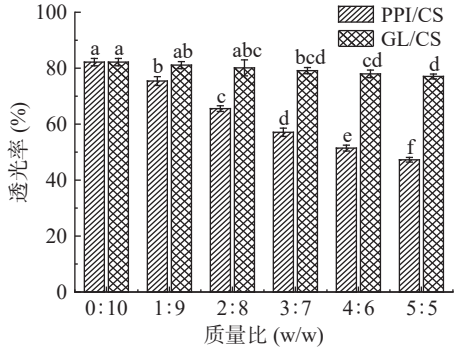


图 1　两类复合膜的透光率

Fig.1　Transmittance of two types of composite films

注：不同的字母表示同一类复合膜不同比例之间具有显著性差异，P<0.05；图 5 同。



图 2　两类复合膜的外观

Fig.2　Appearance of two types of composite films

2.1.2　色度分析　PPI/CS 复合膜色度变化见表 1。不同配比下所得 PPI/CS 复合膜的 L^*、a^*、b^*与 ΔE^* 值均表现出显著变化（P<0.05）。随着 PPI 添加量增加，薄膜 ΔE^*值呈现上升的趋势，表明薄膜颜色变化显著；L^*值显著减小，说明薄膜的白度降低；a^*值、b^*值逐渐变大，a^*值逐渐增加表示红色加深，b^*值增加表明薄膜的黄色加深。造成上述变化的原因可能是 PPI 为米黄色或灰色粉末，导致复合薄膜颜色随 PPI 含量的增加而变深，此外 PPI 的氨基与 CS 发生美拉德反应也能解释此现象[33]。表 2 展示了 GL/CS 复合膜色度变化，随着比例 GL 的增加，薄膜 L^*值整体略有上升，表明薄膜亮度有所提高；a^*值则呈下降趋势，颜色逐渐偏向绿色；b^*值稍有增加，表现为黄色增强，这与 GL 薄膜本身呈浅黄色、透明度高的光学特性一致[34]。ΔE^*值在 1∶9 比例时最低，薄膜颜色最接近标准参考，色差最小，而当 GL 含量进一步增加时，ΔE^*值显著升高（P<0.05），反映薄膜颜色变化更加明显。

表 1　PPI/CS 复合膜色度

Table 1　Color of PPI/CS composite films

薄膜	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
纯CS	97.53±0.67^{a}	−3.09±0.03^{f}	18.61±0.10^{d}	1.81±0.16^{f}
PPI/CS(1∶9)	95.63±1.07^{b}	−2.90±0.05^{e}	19.16±0.56^{cd}	3.50±0.18^{e}
PPI/CS(2∶8)	94.30±0.63^{b}	−2.80±0.04^{d}	19.96±0.79^{c}	5.05±0.28^{d}
PPI/CS(3∶7)	91.23±1.18^{c}	−2.42±0.04^{c}	21.66±0.52^{b}	8.56±0.12^{c}
PPI/CS(4∶6)	89.39±1.43^{d}	−2.02±0.09^{b}	22.28±0.28^{b}	10.49±0.21^{b}
PPI/CS(5∶5)	87.11±1.41^{e}	−1.75±0.06^{a}	23.52±0.72^{a}	13.10±0.32^{a}

注：同列不同字母表示具有显著性差异，P<0.05；表2~表4同。

表 2　GL/CS 复合膜色度

Table 2　Color of GL/CS composite films

薄膜	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
纯CS	97.53±0.67^{c}	−3.09±0.03^{a}	18.61±0.10^{c}	1.81±0.16^{c}
GL/CS(1∶9)	98.87±0.26^{a}	−3.51±0.05^{b}	18.48±0.17^{c}	1.47±0.80^{d}
GL/CS(2∶8)	97.77±0.27^{bc}	−3.51±0.04^{b}	19.05±0.21^{b}	2.04±0.17^{b}
GL/CS(3∶7)	98.78±0.20^{a}	−3.65±0.06^{c}	18.71±0.14^{cd}	1.66±0.12^{cd}
GL/CS(4∶6)	98.23±0.30^{ab}	−3.66±0.05^{c}	18.88±0.15^{bc}	1.79±0.10^{c}
GL/CS(5∶5)	98.44±0.34^{ab}	−3.71±0.04^{c}	19.50±0.76^{a}	2.40±0.14^{a}

2.2　复合薄膜力学性能分析

PPI/CS 薄膜的力学性能变化如图 3 所示。随着 PPI 添加量的增加，复合膜的拉伸强度呈显著下降趋势（P<0.05）。纯 CS 膜的拉伸强度为 2.36 MPa。在 PPI/CS 质量比为 3∶7 时，拉伸强度降至 1.29 MPa；当质量比增加至 5∶5 时，拉伸强度下降至 1.08 MPa；与拉伸强度变化趋势相反，断裂伸长率显著提高（P<0.05）。纯 CS 膜的断裂伸长率为 53.39%，在 3∶7 质量比下达到 82.16%，在 5∶5 质量比下升至 97.24%，

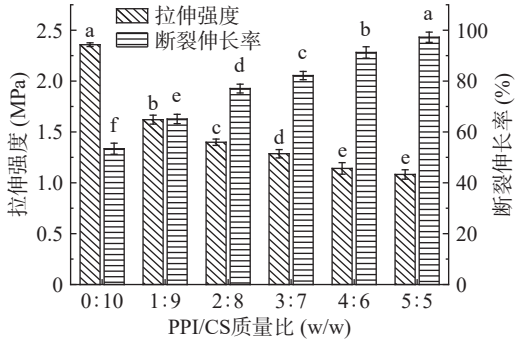


图 3　PPI/CS 复合膜力学性能

Fig.3　Mechanical properties of PPI/CS composite films

注：不同的字母表示同一指标不同比例之间具有显著性差异，P<0.05；图 4 同。

较纯 CS 膜提高 82.13%。PPI/CS 复合膜拉伸强度降低而断裂伸长率增加, 主要与分子链柔韧性的提高有关。PPI 分子与淀粉颗粒发生相互作用, 削弱淀粉链间原有的氢键网络结构, 降低分子间作用力, 增强分子链的运动与重排能力, 从而形成较为柔性的网络结构[35]。类似地, Kadival 等[7] 在稻淀粉(RS)/PPI 共混凝胶体系中也发现, PPI 的加入削弱了凝胶网络结构, 导致 RS/PPI 共混凝胶的硬度显著降低。

GL/CS 薄膜的力学性能变化如图 4 所示。与 PPI/CS 复合薄膜相反, GL/CS 复合膜的拉伸强度随着 GL 含量的增加显著上升, 同时断裂伸长率显著下降(P<0.05)。纯 GL 膜质地硬且脆[36], 因此随着 GL 添加量的增加, 复合膜的延展性降低, 表现为断裂伸长率下降。拉伸强度的提升主要是由于 GL 中的氨基与 CS 中的羟基之间形成了较强的分子间氢键[37]; 此外, CS 与 GL 分子间还可能通过阳离子基团与阴离子基团的静电作用交联, 构建更稳定的网状结构, 从而增强复合膜的拉伸强度。共混膜是 CS、GL、甘油和水之间通过自由羟基形成氢键的体系。在 GL/CS 质量比为 4∶6 时, 复合膜的拉伸强度达到最高值 4.44 MPa, 此时断裂伸长率下降至 35.72%; 当 GL/CS 质量比达到 5∶5 时, 拉伸强度为 4.01 MPa, 断裂伸长率为 32.59%。这可能是由于高 GL 比例下淀粉分子趋于形成分子内氢键而非分子间氢键[38], 从而削弱了复合体系的结构稳定性。

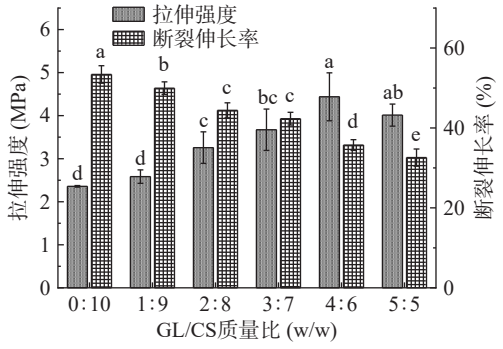


图 4 GL/CS 复合膜力学性能

Fig.4 Mechanical properties of GL/CS composite films

2.3 复合薄膜水分相关性能分析

2.3.1 水分含量、水溶性分析 水分含量反映了薄膜在平衡湿度条件下的吸湿能力, 关系到其机械性能和阻隔性能的保持[39]。而水溶性体现了薄膜在水中溶解的程度, 直接影响其在潮湿环境中的稳定性[40]。两类复合薄膜的水分含量及水溶性变化如图 5 所示。图 5(a)显示了两种类型薄膜的水分含量。纯 CS 膜表现出最高的水分含量, 为 15.22%, 这归因于其亲水性。相比之下, 随着 PPI 或 GL 的添加, 复合膜的水分含量整体呈下降趋势。两类复合膜的水分含量均低于纯 CS 薄膜。在 PPI/CS 复合膜中, 当 PPI/CS 质量比为 3∶7 时, 由于复合膜中 CS 和 PPI 之间的相互作用以及 PPI 中含有疏水性氨基酸残基, PPI 可以部分覆盖淀粉中亲水性基团, 使得水分含量降至最低的 10.91%, 降幅达 28.32%。在 GL/CS 复合膜中, GL/CS 质量比为 4∶6 时复合膜水分含量降低至 12.27%。图 5(b)显示了两种类型复合膜的水溶性变化趋势。与纯 CS 膜相比, 两类蛋白质的加入均显著降低了薄膜的水溶性(P<0.05), 说明 PPI 和 GL 的添加提高了薄膜在水环境中的稳定性。其中, PPI/CS 复合膜的水溶性最低值为 29.36%, GL/CS 复合膜的最低值为 30.73%, 分别较纯 CS 膜降低了 19.39% 和 15.64%。

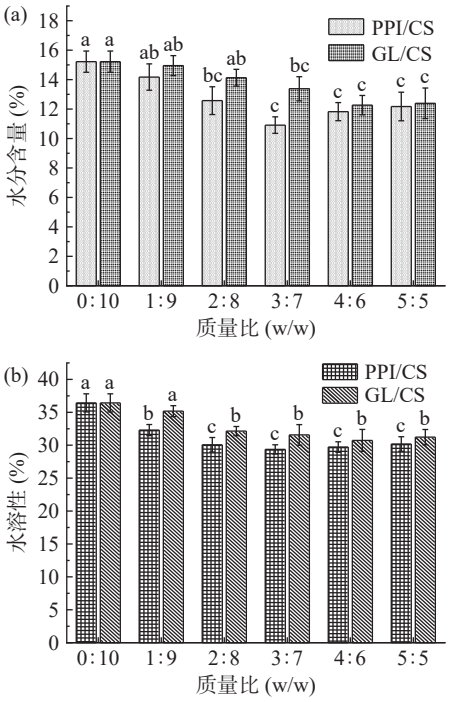


图 5 两类复合膜的水分含量(a)和水溶性(b)

Fig.5 Moisture content (a) and water solubility (b) of two types of composite films

水分含量和水溶性的降低均可归因于 CS 的羟基基团和两类蛋白质中巯基基团之间的相互交联[41]。蛋白质的加热展开了其三维结构并暴露了巯基基团[42], 这有利于与糊化淀粉的羟基基团相互作用, 从而限制了水分子与薄膜基质中自由羟基的结合能力。此外, 由于 PPI 在水中的溶解性低于 CS, 其掺入可进一步抑制膜的水溶性; 而 GL 含量的增加使其与 CS 分子间交联作用增强, 从而减少了亲水基团的暴露。Sukhija 等[43] 报道了含乳清浓缩蛋白和莲藕淀粉的复合膜的水分含量和水溶性低于仅由莲藕淀粉制成的膜。

2.3.2 吸水性、吸湿性及水蒸气透过率分析 吸水性、吸湿性和水蒸气透过率是评价复合薄膜在湿度环境中表现的关键指标, 对薄膜的实际应用性能具有重要影响。吸水性和吸湿性则分别揭示了薄膜在直接接触水和暴露于高湿环境下的吸湿行为, 而水蒸气透过率反映了薄膜对水蒸气的阻隔能力[44]。由表 3 与表 4 可以得到, 两类蛋白质的引入明显降低了复

合薄膜的吸水性、吸湿性及水蒸气透过率。这可是由于聚合物链的迁移性[45] 以及淀粉和蛋白质官能团之间的相互作用等使得复合薄膜表面变得光滑和致密[46]，从而限制了气体与水分的扩散传输。此前在玉米醇溶蛋白/淀粉[47]、大豆分离蛋白/玉米淀粉[48] 及豌豆分离蛋白/木薯淀粉[32] 等多种复合膜体系的研究中均有类似发现，证实蛋白质的掺入有助于改善淀粉基薄膜的水分阻隔性能。

表 3　PPI/CS 复合膜吸水性、吸湿性、水蒸气透过率

Table 3　Water absorption, moisture absorption and water vapor permeability of PPI/CS composite films

薄膜	吸水性(%)	吸湿性(%)	水蒸气透过率 (10^{-10} g·m/m^2·s·Pa)
纯CS	425.17±3.83^a	60.81±1.50^a	3.59±0.03^a
PPI/CS(1:9)	393.33±7.01^b	54.85±1.32^b	3.42±0.04^b
PPI/CS(2:8)	370.87±9.64^c	48.03±1.88^c	3.36±0.06^{bc}
PPI/CS(3:7)	362.27±8.63^c	43.86±1.23^e	3.16±0.14^d
PPI/CS(4:6)	374.41±7.93^c	44.59±0.65^{de}	3.19±0.07^{cd}
PPI/CS(5:5)	391.80±9.41^b	46.10±0.55^d	3.25±0.09^{cd}

表 4　GL/CS 复合膜吸水性、吸湿性、水蒸气透过率

Table 4　Water absorption, moisture absorption and water vapor permeability of GL/CS composite films

薄膜	吸水性(%)	吸湿性(%)	水蒸气透过率 (10^{-10} g·m/m^2·s·Pa)
纯CS	425.17±3.83^a	60.81±1.50^a	3.59±0.03^a
GL/CS(1:9)	427.47±8.70^a	58.67±1.08^{ab}	3.53±0.04^a
GL/CS(2:8)	411.00±15.71^{ab}	55.71±1.39^b	3.47±0.06^{ab}
GL/CS(3:7)	398.80±10.63^{bc}	51.10±0.50^c	3.38±0.08^{bc}
GL/CS(4:6)	384.08±12.52^c	48.23±4.15^c	3.29±0.06^c
GL/CS(5:5)	396.67±11.53^{bc}	48.42±2.21^c	3.32±0.12^c

随着 PPI 的增加，复合膜吸水性、吸湿性及水蒸气透过率呈现出先降低后上升的趋势，阻隔性降低一方面是由于 PPI 分子链中的部分氨基酸带有疏水基团[49]，故其耐水性强于仅以葡萄糖为重复结构单元的淀粉。另一方面，CS 在成膜过程中大量羟基暴露，且随着 PPI 含量的增加其中存在的自由巯基数目增多，二者交互作用变强，使气体与水分不易通过复合膜，也可能导致其阻隔增加[18]。当 PPI/CS 质量比为 3:7 时，复合膜的吸水性为 362.27%、吸湿性为 43.86%、水蒸气透过率为 3.16×10^{-10} g·m/m^2·s·Pa，相较纯 CS 膜分别降低了 14.79%、27.87%、11.98%，均达到所有薄膜中的最低值。PPI/CS 质量比超过最佳比例后，过多的 PPI 容易聚集，难以均匀分布从而导致其水分阻隔性能回升。

对于 GL/CS 复合膜，GL/CS 质量比为 4:6 时，其水蒸气透过率、吸水性和吸湿性相对于纯 CS 膜得到最大程度的降低，这是由于 GL 分子既有带正电荷的部分，又有带负电荷的部分[50]。两个带电片段可以通过分子间和分子内相互作用连接。CS 羟基上的氢原子与 GL 氨基与酰胺基上的氢原子之间形成分子间氢键，从而抑制了该比例下薄膜亲水性。PPI 疏水性较强、分子量大、湿度的稳定性更好且在特定条件下（如适宜的 pH 和蛋白浓度）能够与 CS 形成较为致密的交联网络，故总体看来，PPI 在降低复合膜水分敏感性方面的效果优于 GL。

2.4　复合薄膜微观形貌分析

纯 CS 薄膜以及两种蛋白质复合薄膜的微观形貌如图 6 所示。纯 CS 薄膜表面粗糙，存在明显的突起和凹陷，这是由于淀粉糊化不完全导致的[51]。CS 在水中糊化后，由于淀粉颗粒部分膨胀但未完全破裂，故薄膜干燥后会沉淀出许多溶胀的淀粉颗粒。

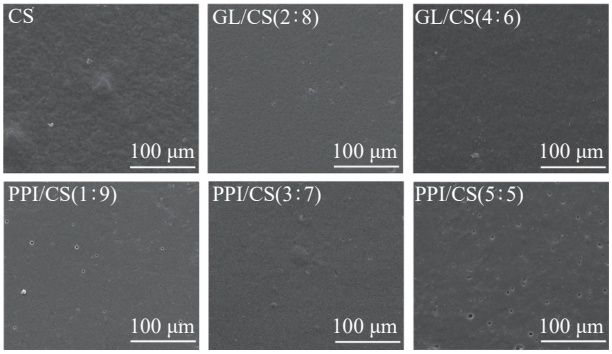


图 6　两类复合膜表面扫描电镜图

Fig.6　Scanning electron microscopy images of the surfaces of two types of composite films

相较于纯 CS 薄膜，GL/CS 质量比为 2:8 和 4:6 时，复合薄膜表面相对光滑和连续，没有明显的孔和裂纹，这证实了 GL 的加入可改善 CS 薄膜的内部结构，使得复合膜粗糙度更低，外观与结构致密均匀。这一结果与 GL-壳聚糖复合薄膜的扫描电镜显微图像一致，研究发现 GL 和壳聚糖之间可能会发生相互作用[52]。根据 GL/CS 复合薄膜的微观结构，也证明了向 CS 薄膜中添加 GL 可以提高拉伸强度。

在 PPI/CS 复合膜中，膜表面结构的变化与 PPI 的添加比例以及 PPI 与 CS 的相互作用密切相关。当 PPI/CS 质量比为 1:9 和 5:5 时，由于 PPI 与 CS 间的相分离效应和高浓度 PPI 的聚集，导致膜表面不均匀并产生孔隙，同时干燥过程中局部收缩不同步进一步加剧了这种现象。而当 PPI/CS 质量比为 3:7 时，复合膜表面呈现致密和平滑的形貌。这可能与 PPI 与 CS 间形成了较强的氢键和疏水相互作用相关，PPI 均匀分散，构建了稳定的复合网络结构，有效填充了淀粉颗粒之间的空隙，避免了 PPI 高浓度引发的聚集效应。

2.5　复合薄膜 X 射线衍射分析

两类复合薄膜的 X 射线衍射图谱如图 7 所示。纯 CS 薄膜表现出较为宽阔的衍射峰。具有半结晶聚合物的特征，这表明在糊化处理过程中，CS 的螺旋结构被解开，结晶结构遭到破坏。且在 2θ=17.5°、19.5°、24.5°处存在明显衍射峰，它们是 B 型晶体峰[53]。

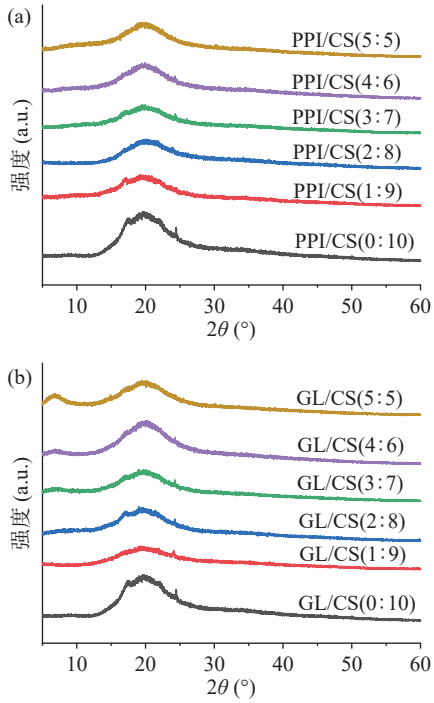


图 7 X 射线衍射图谱

Fig.7 X-ray diffraction patterns

注: (a)PPI/CS 薄膜; (b)GL/CS 薄膜。

添加 PPI 后, 其空间位阻效应使 CS 分子难以相互接近并形成晶体。如图 7(a)所示。随着 PPI 比例的增加, 2θ 为 17.5°和 2θ 为 24.5°处的衍射峰逐渐减弱, 复合物中氢键的变化改变了结晶区的形成, 进而导致结晶度下降, 但也说明 PPI 和 CS 两种大分子之间具有很好的生物相容性[22]。纯 CS 膜的晶粒最大, PPI 的加入显著降低了复合膜的晶粒尺寸[54]。因此。PPI 的加入会减少 CS 膜的结晶度, 从而影响复合膜柔韧性, 这与薄膜机械性能评估所得的结果相符。

GL/CS 复合薄膜 X 射线衍射图谱如图 7(b)所示。与 PPI/CS 复合膜相同, 随着 GL 比例的增加, 2θ 为 17.5°和 24.5°处的衍射峰呈现出减弱的趋势。特别的是, 在 2θ=7°处出现了一个新峰, 该峰为 GL 的特征峰[55], 表明 GL 已成功加入 CS 基质中, 且随着 GL 比例的增加, 该峰强度增强。2θ=19.5°附近的峰为直链淀粉在加工冷却后形成的 Vh 型结晶峰[22], 随着 GL 含量的增加, Vh 型结晶峰变宽, 表明复合膜的结晶峰降低, 是由于添加的 GL 阻碍了复合膜中淀粉结晶的重排; 当 GL/CS 质量比为 4:6 时, Vh 型结晶峰逐渐变窄, 表明晶粒尺寸增大且结晶度有所提升[56], 这一结果证明 GL 与 CS 已成功构建起稳定的复合体系。

2.6 复合薄膜傅里叶变换红外光谱分析

采用傅里叶变换红外光谱分析了聚合物之间的化学作用和化学键的变化[57]。如图 8 所示。纯 CS 及两类复合膜均在 3000~3600 cm^{-1} 范围内显示出宽谱带, 对应于 CS 的 O-H 伸缩振动[58]。位于 2800~3000 cm^{-1} 的吸收峰为 C-H 伸缩振动区域[59], 包括 CH_2 或 CH_3 不对称谱带。纯淀粉膜光谱在 1640~1650 cm^{-1} 处显示出尖锐的吸收峰, 这归因于 CS 分子中牢固结合的水[60]。加入 GL 和 PPI 后, 红外光谱图新增酰胺带吸收峰, 主要表现为酰胺Ⅰ带(1600~1700 cm^{-1})和酰胺Ⅱ带(1500~1600 cm^{-1})[61], 酰胺Ⅰ带对应于蛋白质中 C=O 的伸缩振动, 酰胺Ⅱ带对应于 N-H 弯曲振动和 C-N 伸缩振动[62]。这些吸收峰的出现表明 GL 和 PPI 在复合膜中分别与 CS 相互作用, 且两类蛋白质构象和氢键模式发生了改变[63]。

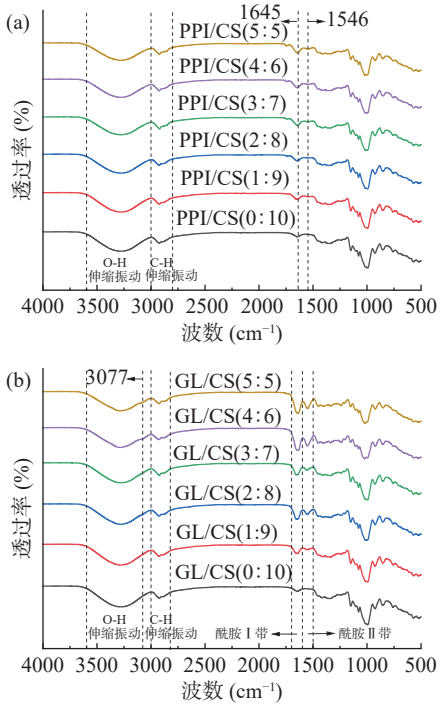


图 8 傅里叶变换红外光谱图

Fig.8 Fourier transform infrared spectra

注: (a)PPI/CS 薄膜; (b)GL/CS 薄膜。

向 CS 膜中加入 PPI 后, 如图 8(a)所示。红外光谱中出现酰胺Ⅰ带(1645 cm^{-1})和酰胺Ⅱ带(1546 cm^{-1})的特征峰, 并随着 PPI 含量增加而逐渐增强。这是由于 PPI 中酰胺基团(来源于肽键)的特征吸收增加[64], 同时 PPI 与 CS 分子间的氢键或其他相互作用进一步强化了这些振动吸收强度。这表明 PPI 的加入不仅改变了膜的化学环境, 还增强了两种聚合物之间的相容性。

如图 8(b)所示, 加入 GL 的复合薄膜酰胺带吸收峰比 PPI/CS 复合膜更明显, 主要因为 GL 中含有较多的酰胺基团, 且其分子结构规整, 易与 CS 形成强相互作用, 从而产生较强的红外吸收峰。而 PPI 的分子结构更加复杂, 酰胺基团的分布不如 GL 均匀。与 PPI/CS 复合薄膜不同, GL/CS 质量比为 1:9 和 3:7 下的复合薄膜, 酰胺Ⅰ带与酰胺Ⅱ带的特征峰透过率显著低于质量比为 2:8、4:6 和 5:5 的复合膜。这表明, 在 GL/CS 质量比为 2:8、4:6

和 5∶5 这三种比例下制备的复合膜，酰胺Ⅰ带中 C=O 键的伸缩振动、酰胺Ⅱ带中 N-H 键的弯曲振动以及 C-N 键的伸缩振动显著增强。这可能归因于加热过程中，GL 的疏水基团以及隐藏的巯基和羟基逐渐暴露[65]。CS 中的疏水分子易于与 GL 的疏水链段聚集并发生相互作用，增强了 CS 与 GL 分子的结合性能。GL/CS 质量比为 3∶7 的复合膜酰胺Ⅱ带吸收峰透过率的下降，可能是由于 CS 与 GL 之间较弱的相互作用导致分子结构发生变化。此外还发现随着 GL 含量的提升，GL/CS 复合膜在 3077 cm^{-1} 处产生了肩峰，这是由于 N-H 伸缩振动[66]，且其对氢键的形成具有敏感性。

3　结论

将植物蛋白 PPI 和动物蛋白 GL 引入 CS 基薄膜中，制备的复合膜在性能和结构上表现出明显变化。结构表征显示，CS 基质与 PPI 及 GL 之间存在显著相互作用，且二者与 CS 表现出良好的相容性，进而影响复合膜的理化性能和微观形貌。在 PPI/CS 体系中，随着 PPI 含量的增加，复合薄膜的颜色逐渐加深，透光性显著降低（P<0.05），同时表现出较好的延展性和水分阻隔性。当质量比为 3∶7 时，复合膜的水分含量、水溶性、吸湿性、吸水性及水蒸气透过率均降至最低，断裂伸长率为 82.16%，但拉伸强度降至 1.29 MPa。相比之下，GL 在 GL/CS 体系中对薄膜颜色和透光率影响较小，但 GL 的加入显著提升了复合膜的拉伸强度（P<0.05）。此外，GL 也可改善薄膜的水分阻隔性能，但在相同质量比下，其改善效果弱于 PPI。在 GL/CS 质量比为 4∶6 时，复合膜结构致密均匀，表面光滑且具有较低的吸湿性和水蒸气透过率，拉伸强度达到最大值 4.44 MPa，但断裂伸长率下降至 35.72%。

PPI/CS 复合膜因其良好的柔韧性和优异的水分屏障性能，适用于果蔬、熟食等短期食品包装。相比之下，GL/CS 复合膜在力学强度方面具有显著优势，结构更加稳定，适合用于干货、谷物及粉状食品的保护性包装。两种复合薄膜均在不同方面提升了 CS 薄膜的性能，展现出良好的应用前景，为高性能天然可降解包装材料的设计提供了理论支持和实践方案。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ RUAMCHAROEN J, MUNLEE R, RUAMCHAROEN P. Eco-friendly bio-based composites of cassava starch and natural rubber compatibilized with nanoclays[J]. Polymer Composites, 2023, 44(2): 1071−1082.

［2］ 郑进宝, 李琛. 淀粉基发泡材料制备及性能优化研究进展[J]. 精细化工, 2022, 39(8): 1513−1524,1557. ［ZHENG Jinbao, LI Chen. Research progress in preparation and performance optimization of starch-based foaming materials[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(8): 1513−1524,1557.］

［3］ MORENO O, ATARÉS L, CHIRALT A. Effect of the incorporation of antimicrobial/antioxidant proteins on the properties of potato starch films[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 133: 353−364.

［4］ 谭心, 梁春艳, 邓松林, 等. 氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊壳的制备与表征[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 188−193. ［TAN Xin, LIANG Chunyan, DENG Songlin, et al. Preparation and characterization of oxidized corn starch/gelatin composite capsules[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 188−193.］

［5］ BASIAK E, GALUS S, LENART A. Characterisation of composite edible films based on wheat starch and whey-protein isolate [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50 (2): 372−380.

［6］ 邵磊, 秦志鹏, 梅浩斌, 等. 胶原蛋白肽-甘薯淀粉复合体系理化特性表征[J]. 食品工业科技, 2025, 46(24): 128−135. ［SHAO Lei, QIN Zhipeng, MEI Haobin, et al. Characterization of physicochemical properties of collagen peptide-sweet potato starch complex system[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46 (24): 128−135.］

［7］ KADIVAL A, MITRA J, KAUSHAL M. Influence of incorporation of peanut protein isolate on pasting, rheological and textural properties of rice starch[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 341: 111312.

［8］ 张现芳, 黄婷, 刘石生. 谷蛋白及改性谷蛋白对木薯淀粉理化性质和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(24): 22−30. ［ZHANG Xianfang, HUANG Ting, LIU Shisheng. Influence of gluten and modified gluten on the physicochemical and digestive properties of cassava starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(24): 22−30.］

［9］ 魏宇君, 肖华西, 林亲录, 等. 大豆蛋白对不同晶型淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(5): 254−263. ［WEI Yujun, XIAO Huaxi, LIN Qinlu, et al. Effects of soybean protein on physicochemical properties of different crystalline starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24 (5): 254−263.］

［10］ 刘海鹏, 冯磊, 李玲, 等. 莲藕淀粉/乳清蛋白复合膜的制备、表征及性能[J]. 精细化工, 2022, 39(6): 1228−1233,1249. ［LIU Haipeng, FENG Lei, LI Ling, et al. Preparation, characterization and properties of *Lotus* root starch/whey protein composite film[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(6): 1228−1233,1249.］

［11］ KHAN M R, SADIQ M B. Importance of gelatin, nanoparticles and their interactions in the formulation of biodegradable composite films: A review[J]. Polymer Bulletin, 2021, 78(7): 4047−4073.

［12］ ROSSETO M, KREIN D D, BALBÉ N P, et al. Starch–gelatin film as an alternative to the use of plastics in agriculture: A review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(15): 6671−6679.

［13］ TYUFTIN A A, KERRY J P. Gelatin films: Study review of barrier properties and implications for future studies employing biopolymer films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 29: 100688.

［14］ 张宛君, 陈复生, 郭兴凤, 等. 花生肽的分离纯化及其与金属离子螯合机制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(20): 395−404. ［ZHANG Wanjun, CHEN Fusheng, GUO Xingfeng, et al. Research progress on the isolation and purification of peanut peptides and their chelation mechanism with metal ions[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(20): 395−404.］

［15］ DEAN L L. Peanut as a source of sustainable vegetable pro-

tein-processes and applications[M]. Sustainable Protein Sources. Amsterdam: Elsevier, 2024: 311−322.
[16] REDDY N, CHEN Lihong, YANG Yiqi. Thermoplastic films from peanut proteins extracted from peanut meal[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 43: 159−164.
[17] LI Chen, ZHU Weizhe, XUE Haoran, et al. Physical and structural properties of peanut protein isolate-gum Arabic films prepared by various glycation time[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 322−328.
[18] SUN Qingjie, SUN Cuixia, XIONG Liu. Mechanical, barrier and morphological properties of pea starch and peanut protein isolate blend films[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(1): 630−637.
[19] PANG Z, BOUROUIS I, SUN M, et al. Physicochemical properties and microstructural behaviors of rice starch/soy proteins mixtures at different proportions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 2061−2069.
[20] LIU C C, TELLEZ-GARAY A M, CASTELL-PEREZ M E. Physical and mechanical properties of peanut protein films[J]. LWT - Food Science and Technology, 2004, 37(7): 731−738.
[21] JANGCHUD A, CHINNAN M S. Peanut protein film as affected by drying temperature and pH of film forming solution[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(1): 153−157.
[22] 成晓祎, 孙铭悦, 任轩雨, 等. 大豆球蛋白-马铃薯淀粉可食膜的微观结构及机械性能[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 276−284. [CHENG Xiaoyi, SUN Mingyue, REN Xuanyu, et al. The microstructure and mechanical properties of soybean globulin-potato starch edible film[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 276−284.]
[23] CHEN Chenwei, HE Lili, TIAN Yifan, et al. Improving the preparation process to enhance the retention of cinnamon essential oil in thermoplastic starch/PBAT active film and its antimicrobial activity[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 230: 120990.
[24] 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. [YANG Ou, ZHANG Xiaoxiang, XU Xiaohan, et al. Preparation and application of antioxidative chitosan/soybean protein isolate composite edible membrane[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 210−218.]
[25] CHEN Xiaohan, LIU Zhuolin, MA Wenya, et al. High strength and water tolerance fish gelatin-xanthan gum acid-induced electrostatic film by melt extrusion method[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109769.
[26] ZENG Yafan, CHEN Yingying, DENG Yuanyuan, et al. Preparation and characterization of *Lotus* root starch based bioactive edible film containing quercetin-encapsulated nanoparticle and its effect on grape preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121389.
[27] RAMMAK T, BOONSUK P, KAEWTATIP K. Mechanical and barrier properties of starch blend films enhanced with Kaolin for application in food packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 1013−1020.
[28] TIAN Jiarong, KONG Yingqi, QIAN Shaoping, et al. Mechanically robust multifunctional starch films reinforced by surface-tailored nanofibrillated cellulose[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275: 111339.
[29] YANG Mingyue, XU Xiaoyan, TIAN Xingguo. Chitosan-pullulan edible coating loaded with dihydromyricetin: Enhanced antioxidant activity and barrier properties to prolong Cantonese sausages' shelf-life[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 139831.
[30] ZOU Youning, REN Jiahao, FAN Yiting, et al. Enhanced hydrophobicity, antioxidant activity, and antimicrobial efficacy of edible starch-based films incorporating pullulan and geraniol for fresh salmon preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 49: 101530.
[31] JIMÉNEZ A, FABRA M J, TALENS P, et al. Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(1): 302−310.
[32] HUNTRAKUL K, YOKSAN R, SANE A, et al. Effects of pea protein on properties of cassava starch edible films produced by blown-film extrusion for oil packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100480.
[33] ZHANG Binjia, QIAO Dongling, ZHAO Siming, et al. Starch-based food matrices containing protein: Recent understanding of morphology, structure, and properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 212−231.
[34] KARNNET S, POTIYARAJ P, PIMPAN V. Preparation and properties of biodegradable stearic acid-modified gelatin films[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 90(1): 106−110.
[35] HU G, CHEN J, GAO J. Preparation and characteristics of oxidized potato starch films[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(2): 291−298.
[36] CHEN Liang, QIANG Taotao, CHEN Xuejun, et al. Fabrication and evaluation of biodegradable multi-cross-linked mulch film based on waste gelatin[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 419: 129639.
[37] LIU Yi, ZHENG Furun, ZHAO Haibo, et al. Physicochemical and digestible properties of corn starch/gelatin complexes: Effect of pH, type of gelatin, and gelatin/starch ratio[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110268.
[38] TONGDEESOONTORN W, MAUER L J, WONGRUONG S, et al. Mechanical and physical properties of cassava starch-gelatin composite films[J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 2012, 61(10): 778−792.
[39] WANG J, GARDNER D J, STARK N M, et al. Moisture and oxygen barrier properties of cellulose nanomaterial-based films[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(1): 49−70.
[40] HAN Shuang, HONG Juan, LUO Qingwei, et al. Hygroscopicity of organic compounds as a function of organic functionality, water solubility, molecular weight, and oxidation level[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(6): 3985−4004.
[41] HE Mingyu, ZHANG Meng, GAO Tian, et al. Assembly of soy protein-corn starch composite gels by thermal induction: Structure, and properties[J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137433.
[42] YANG Suqi, TAO Liling, YAN Zihang, et al. Role of heat pretreatment and transglutaminase treatment on the gelling properties of pea protein[J]. Food Bioscience, 2025, 66: 106166.
[43] SUKHIJA S, SINGH S, RIAR C S. Analyzing the effect of whey protein concentrate and *Psyllium* husk on various characteristics of biodegradable film from *Lotus* (*Nelumbo nucifera*) rhizome starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 128−137.
[44] AHMAD K, DIN Z U, ULLAH H, et al. Preparation and characterization of bio-based nanocomposites packaging films reinforced with cellulose nanofibers from unripe banana peels[J]. Starch - Stä rke, 2022, 74(5−6): 2100283.
[45] YOU Y, LUDESCHER R D. Effect of starch on the molecular mobility of amorphous sucrose[J]. Journal of Agricultural and

Food Chemistry, 2011, 59(7): 3340−3347.
[46] ZHAO Yuan, TIAN Ran, ZHANG Qin, et al. Enhancing the properties of soy protein isolate and dialdehyde starch films for food packaging applications through tannic acid crosslinking[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 332: 121903.
[47] GAO Pingping, WANG Feng, GU Fengying, et al. Preparation and characterization of zein thermo-modified starch films[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 1254−1260.
[48] ZHU Tingwei, YANG Jinyu, QIN Wanting, et al. Drying kinetics of soy protein isolate-corn starch film during preparation and its moisture adsorption characteristics during storage[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2023, 6(3): 120−126.
[49] HE Xuanhui, LIU Hongzhi, LIU Li, et al. Effects of high pressure on the physicochemical and functional properties of peanut protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 123−129.
[50] YOUNG S, WONG M, TABATA Y, et al. Gelatin as a delivery vehicle for the controlled release of bioactive molecules[J]. Journal of Controlled Release, 2005, 109(1−3): 256−274.
[51] LIN Lin, PENG Shuangxi, SHI Ce, et al. Preparation and characterization of cassava starch/sodium carboxymethyl cellulose edible film incorporating apple polyphenols[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 212: 155−164.
[52] JRIDI M, HAJJI S, BEN AYED H, et al. Physical, structural, antioxidant and antimicrobial properties of gelatin–chitosan composite edible films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 67: 373−379.
[53] ZHENG Yixin, OU Yujia, ZHANG Chong, et al. The impact of various exogenous type starch on the structural properties and dispersion stability of autoclaved *Lotus* seed starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 175: 49−57.
[54] 宋慧君, 孟春丽, 汤克勇. 明胶-壳聚糖复合膜的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(8): 165−167,171. [SONG Huijun, MENG Chunli, TANG Keyong. Preparation and properties of gelatin-chitosan composite films[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(8): 165−167,171.]
[55] DAS M P, SUGUNA P R, PRASAD K, et al. Extraction and characterization of gelatin: A functional biopolymer[J]. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 2017, 9(9): 239.
[56] LI M, XIE F, HASJIM J, et al. Establishing whether the structural feature controlling the mechanical properties of starch films is molecular or crystalline[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 262−270.
[57] DARDARI O, AMADINE O, SAIR S, et al. Cellulose nanocrystal stabilized copper nanoparticles for grafting phase change materials with high thermal conductivity[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 79: 110182.
[58] AL-ANSI W, MUSHTAQ B S, ALI M A, et al. Molecular structure, morphological, and physicochemical properties of highlands barley starch as affected by natural fermentation[J]. Food Chemistry, 2021, 356: 129665.
[59] DEEYAI P, SUPHANTHARIKA M, WONGSAGONSUP R, et al. Characterization of modified tapioca starch in atmospheric *Argon plasma* under diverse humidity by FTIR spectroscopy[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(1): 018103.
[60] KARMAKAR B, SARKAR S, CHAKRABORTY R, et al. Starch-based biodegradable films amended with nano-starch and tannic acid-coated nano-starch exhibit enhanced mechanical and functional attributes with antimicrobial activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 341: 122321.
[61] CHENG Jingjing, LI Zhengze, WANG Jing, et al. Structural characteristics of pea protein isolate (PPI) modified by high-pressure homogenization and its relation to the packaging properties of PPI edible film[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132974.
[62] WEI Yunxiao, HUANG Ze'en, YU Zuolong, et al. Preparation and properties of fractionated soybean protein isolate films[J]. Materials, 2021, 14(18): 5436.
[63] SIVAM A S, SUN-WATERHOUSE D, PERERA C O, et al. Application of FT-IR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and polyphenols[J]. Food Research International, 2013, 50(2): 574−585.
[64] ZHANG Lixia, SUN Xiaojing, LU Xin, et al. Characterization of peanut protein hydrolysate and structural identification of umami-enhancing peptides[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2853.
[65] ZHU Zengfang, MAO Xiaoying, WU Qingzhi, et al. Effects of oxidative modification of peroxyl radicals on the structure and foamability of chickpea protein isolates[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3): 824−833.
[66] IBRAHIM M, MAHMOUD A A, OSMAN O, et al. Molecular spectroscopic analyses of gelatin[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, 81(1): 724−729.