

大豆分离蛋白/浓缩乳清蛋白/牛蒡多糖复合食用薄膜的制备、表征及在羊肚菌保鲜中的应用

宋 浩¹ 冯曦瑶² 魏嘉怡² 刘炫荣³ 陆乃彦²

(1. 江苏联合职业技术学院无锡机电分院,江苏 无锡 214111; 2. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122;
3. 江苏最新鲜健康科技有限公司,江苏 无锡 214183)

摘要:[目的]通过溶液流延法开发一种基于大豆分离蛋白(SPI)、浓缩乳清蛋白(WPC)与牛蒡多糖(*Arctium lappa L.* polysaccharide, ALP)的活性食用薄膜。**[方法]**通过对复合膜的表面形貌、拉伸强度(TS)、断裂伸长率(EAB)、水溶性(WS)、水分含量(MC)和水蒸气透过率(WVP)以及透光率进行表征,系统考察不同ALP配比对复合膜性能的影响,筛选出最优配比的复合膜,并进一步分析其在羊肚菌保鲜中的应用效果。**[结果]**当SPI/WPC与ALP质量比为1.0:0.2时,SPI/WPC/ALP薄膜的机械性能、阻隔性以及透光性能显著提高($P<0.05$)。此外,在羊肚菌保鲜试验中,SPI/WPC/ALP薄膜减少了羊肚菌酚类物质流失,降低了酪氨酸含量与丙二醛(MDA)含量,有效缓解了褐变程度,提升了羊肚菌品质,延长了保鲜时间。**[结论]**SPI/WPC/ALP复合膜可能是一种很有前途的环保包装材料,可应用于食用菌保鲜。

关键词:牛蒡多糖;大豆分离蛋白;浓缩乳清蛋白;食用薄膜;羊肚菌;保鲜

Preparation and characterization of composite edible film based on soy protein isolate, whey protein concentrate, and *Arctium lappa L.* polysaccharide and its application in *Morchella* preservation

SONG Hao¹ FENG Xiyao² WEI Jiayi² LIU Xuanrong³ LU Naiyan²

(1. Wuxi Electromechanical Branch, Jiangsu Union Technical Institute, Wuxi, Jiangsu 214111, China;
2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
3. Jiangsu Zui Xinjian Healthy Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214183, China)

Abstract: [Objective] To develop an active edible film based on soy protein isolate (SPI), whey protein concentrate (WPC), and *Arctium lappa L.* polysaccharide (ALP) by using the casting method. [Methods] This study characterizes the surface morphology, tensile strength (TS), elongation at break (EAB), water solubility (WS), moisture content (MC), water vapor permeability (WVP), and light transmittance of the composite film. It also systematically investigates the impact of different ALP proportions on film properties. The optimal ratio for the film is identified, and its performance in *Morchella* preservation is evaluated. [Results] When the mass ratio of SPI/WPC to ALP is 1.0:0.2, the SPI/WPC/ALP film shows significantly enhanced mechanical properties, barrier performance, and light transmittance ($P<0.05$). In the *Morchella* preservation experiment, this film effectively reduces the loss of phenolic substances, decreases tyrosine and malondialdehyde (MDA) levels, mitigates browning, and improves the quality and shelf life of *Morchella*. [Conclusion] The SPI/WPC/ALP composite film is a promising eco-friendly packaging material with potential applications in edible fungus preservation.

基金项目:国家自然科学基金(编号:31871865)

通信作者:陆乃彦(1985—),男,江南大学教授,博士。E-mail: lunaiyan@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2025-04-03 **改回日期:**2025-08-20

引用格式:宋浩,冯曦瑶,魏嘉怡,等. 大豆分离蛋白/浓缩乳清蛋白/牛蒡多糖复合食用薄膜的制备、表征及在羊肚菌保鲜中的应用[J]. 食品与机械,2025,41(11):225-233.

Citation: SONG Hao, FENG Xiyao, WEI Jiayi, et al. Preparation and characterization of composite edible film based on soy protein isolate, whey protein concentrate, and *Arctium lappa L.* polysaccharide and its application in *Morchella* preservation[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 225-233.

Keywords: *Arctium lappa* L. polysaccharide; soy protein isolate; whey protein concentrate; edible film; *Morchella*; preservation

羊肚菌(*Morchella*)是一种羊肚菌属食用菌,广泛分布于欧洲、亚洲和美洲,是世界上稀有和珍贵的食用菌之一^[1]。该食用菌以其独特的外观、风味和高营养价值(如多糖、蛋白质、多酚、类固醇、生育酚和类胡萝卜素)的特性而闻名^[2]。然而,新鲜羊肚菌的保质期一般较短。在没有角质层保护的情况下采摘时,它们容易受到更强的呼吸作用和微生物等的影响,导致质量迅速下降,从而腐烂和变质^[3]。

在食用菌保鲜领域,天然活性化合物相较于合成杀菌剂和化学品更具优势,因为后者可能对消费者健康和生态环境产生不利影响。因此,开发可降解、可食用且环境友好的天然绿色包装材料,以替代传统合成食品包装材料,已成为当前研究的热点和趋势。在食品包装领域,基于生物相容性薄膜的活性包装技术展现出广阔的应用前景,并在食品贮藏过程中有效维持其品质和感官特性。可食用的薄膜可以阻断氧气、微生物和水分,或作为溶质运动调节剂,以延长保质期,或通过调节呼吸速率,从而抑制其贮藏期间的体重减轻^[4]。通常,浇铸法常被用于制备以生物聚合物如大豆分离蛋白(SPI)、乳清蛋白等为基材,并添加活性分子如多糖、多酚等的复合薄膜^[5]。蛋白基可食用膜(如大豆分离蛋白膜、乳清分离蛋白膜)虽具有成膜性能良好、透明度高等特点^[6~7],但其机械强度不足、阻湿性差等问题严重制约了其实际应用^[8]。

牛蒡(*Arctium lappa* L.),又名大力子、恶实等,为菊科牛蒡属的二年生草本植物。牛蒡根中富含多种活性物质,其中牛蒡多糖(*Arctium lappa* L. polysaccharide, ALP)为其主要活性成分。ALP由 α -D-Glcp-1 \rightarrow (2- β -D-Fru-1)重复单元组成^[9]。由于多糖具有成膜能力、无毒、低成本、强机械和气体屏障性能、可及性和生物降解性^[10],因此是一种有吸引力的食品包装成膜材料。研究拟以 SPI 和浓缩乳清蛋白(WPC)为基材,经复配后筛选出最优比例,并添加不同含量 ALP,采用流延法制备功能性可食用膜,探究多糖比例对膜机械性能、阻隔特性和透光率等物理性能的影响,筛选出最佳配比的复合膜并应用于羊肚菌保鲜,通过贮藏试验评估复合薄膜对羊肚菌外观及品质特性的调控作用,有助于开发活性食品包装,以延长新鲜食用菌的保质期。

1 材料与方法

1.1 试验材料

羊肚菌:市售;

福林酚试剂、WPC、SPI:上海源叶生物科技有限公司;

三氯乙酸、醋酸—醋酸钠缓冲液、甘油、冰醋酸、Na₂S₂O₃标准溶液、2-硫代巴比妥酸、0.9%生理盐水等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

物性分析仪:TA-XT plus型,英国 Stable Microsystem 公司;

电子天平:EL204型,上海梅特勒—托利多仪器有限公司;

酶标仪:HBS-1101型,南京德铁生物科技有限公司;

高速冷冻离心机:5430R型,德国艾本德公司;

色差仪:WSC-3B型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

傅里叶红外光谱仪:IS10型,美国 Nicolet 公司;

冷冻干燥机:Scientz-10N型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

扫描电子显微镜:SU8100型,日本株式会社;

双立柱台式试验系统:5967X型,美国 INSTRON 公司;

磁力搅拌器:WH-210D型,伊孚森生物技术(中国)有限公司;

凯氏定氮仪:Kjeltec9型,丹麦福斯分析仪器有限公司;

立式高压灭菌锅:GI54DW型,厦门致微仪器有限公司;

高精度分光测色仪:UltraScan PRO型,美国 HunterLab公司。

1.3 试验方法

1.3.1 ALP 的提取 根据课题组^[11]前期方法提取得到重均分子量(Mw)为 2 340 Da 的 ALP。

1.3.2 薄膜的制备

(1) SPI 膜液:取 5 g SPI 加入 100 mL 蒸馏水,搅拌均匀后调节 pH 为 10,加入 2 mL 甘油,80 °C 搅拌 30 min,冷却,将膜液倒入亚克力平板,70 °C 干燥 40~60 min。

(2) WPC 膜液:取 5 g WPC 加入 100 mL 蒸馏水,搅拌均匀后调节 pH 为 8,加入 2.7 mL 甘油,80 °C 搅拌 30 min,冷却,将膜液倒入亚克力平板,70 °C 干燥 40~60 min。

(3) 蛋白基底膜比例:将 WPC 和 SPI 按表 1 比例加至 100 mL 蒸馏水中,磁力搅拌 10 min,制备成膜水溶液。

(4) ALP 薄膜制备:基于优化的 SPI/WPC 成膜体系,按蛋白总量与 ALP 质量比 1.0:0.1,1.0:0.2,1.0:0.5 将 ALP 添加到最优比例的成膜溶液中,制备成薄膜。

1.3.3 薄膜厚度测定 根据 GB/T 6672—2001 使用螺旋测微仪,在平衡后的膜上选取 4 个对称点进行膜厚测定,

表1 蛋白基底膜的制备比例

Table 1 Preparation ratio of protein base film

薄膜	SPI	WPC
S ₅ W ₀	5	0
S ₄ W ₁	4	1
S ₃ W ₂	3	2
S ₂ W ₃	2	3
S ₁ W ₄	1	4
S ₀ W ₅	0	5

每个样品重复3次。

1.3.4 薄膜的机械性能测定 参照杨帅帅等^[12]的方法并稍作修改。采用双立柱台式试验系统(气动探头)测定样品的抗拉伸强度(TS)和断裂伸长率(EAB)。将样品切割成等大(35 mm×10 mm),初始间距为50 mm,测试速度为50 mm/min,试验重复5次,并按式(1)计算EAB。

$$EAB = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

L₀——样品测试前的长度,mm;

ΔL——样品断裂前后长度差,mm。

1.3.5 水溶性(WS)测定 根据Edhirej等^[13]的方法并稍作修改。将膜切割为30 mm×30 mm,将薄膜与烧杯一起干燥至恒重。随后向烧杯中注入适量蒸馏水,25 °C静置24 h。保留膜片,去除水分,干燥至恒重。每个样本重复

3次,按式(2)计算WS系数。

$$WS = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

m——初始薄膜的质量,g;

m₁——初始薄膜与烧杯的质量,g;

m₂——干燥后薄膜与烧杯的质量,g。

1.3.6 水分含量(MC)测定 根据Ghoshal等^[14]的方法。

1.3.7 薄膜阻隔性能测定 根据GB/T 1037—2021测定样品的水蒸气透过量(WVP),每个样品重复3次,按式(3)计算WVP。

$$WVP = \frac{24 \times \Delta m}{A \times 24}, \quad (3)$$

式中:

Δm——瓶的增重量,g;

A——水蒸气透过膜的面积,m²。

1.3.8 透光率测定 根据Sun等^[15]的方法。

1.3.9 扫描电子显微镜(SEM) 将薄膜样品放置于金属板上的导电粘合剂中,使用SEM于5 kV真空条件下观察薄膜的微观结构及表面形态,放大倍数分别为100,1 000倍。

1.3.10 羊肚菌的保鲜处理 将制备完成的可食用薄膜紧密贴合于羊肚菌表面,随后将其贮藏于(24±2) °C的干燥容器中。

1.3.11 感官特性 由20位经过培训的评定人员按表2对样品进行感官评定,总分40分。

表2 感官评定标准

Table 2 Criteria for sensory evaluation

评分	颜色	发霉情况	自溶性情况	气味	质地
9~10	子实体新鲜,色泽鲜亮	无	子实体完整	有羊肚菌特有清香	弹性好
7~8	色泽度变暗,子实体轻度褐变	面积<10%	褐色斑块<1/4、轻微失水	味道正常,无异味	弹性一般
4~6	发生明显的褐变或白化	面积在10%~30%	褐色斑块处于1/4~3/4	略有淡淡异味	弹性下降
1~3	严重褐变或白化	面积>30%	褐色斑块>3/4以上,黑色汁液流出	异味严重,有酒精味	完全失去弹性

1.3.12 颜色变化 根据许瀛引等^[16]的方法。每批中抽取3朵羊肚菌,利用色度计检测菌柄表层的颜色变化情况,包括亮度指数L*、红绿色度a*及黄蓝色度b*,以此评估羊肚菌整体色泽的变化,按式(4)计算ΔE值。

$$\Delta E = \sqrt{(L_c - L_t)^2 + (a_c - a_t)^2 + (b_c - b_t)^2}, \quad (4)$$

式中:

L_c、a_c、b_c——采收后未经任何处理的羊肚菌颜色值(选取新鲜的羊肚菌作为标准);

L_t、a_t、b_t——贮藏后的颜色值。

1.3.13 失重率(TG)测定 采用称重法^[17],按式(5)计算TG。

$$TG = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

m₁——贮藏前羊肚菌质量,g;

m₂——测定时羊肚菌质量,g。

1.3.14 机械性能分析 使用质构分析仪对羊肚菌的机械性能进行测定。随机抽取3朵羊肚菌,对其菌柄进行测定。选用P/0.5探头,探头下压速度60 mm/min,形变量75%,保持2 s。以硬度、弹性及咀嚼性来评定羊肚菌的组织软化水平。

1.3.15 褐变程度 取羊肚菌菌帽向下0.5~1.5 cm处的菌

柄,切碎,混匀,称取 0.1 g 菌柄,加入 1 mL 95% 乙醇,研磨匀浆,4 ℃、10 000 r/min 离心 20 min,取上清液,以 95% 乙醇作参比,测得 420 nm 处吸光度^[16]。

1.3.16 多酚含量测定 参照孟丽媛等^[18]方法。

1.3.17 丙二醛(MDA)含量测定 采用王秀红等^[19]的方法。

1.3.18 酪氨酸(Tyr)含量测定

(1) 水解氨基酸:根据杨玉亮等^[20]的方法并稍作改动。精准称取 100 mg 样品于水解管中,注入 8 mL 6 mol/L 盐酸并灌入氮气,充氮 3 min,使溶液轻微沸腾,紧旋水解管的盖子。将水解管放入 120 ℃ 的烘箱加热 24 h。将样品完全移入容量瓶,加入 4.8 mL 10 mol/L 氢氧化钠,以蒸馏水定容至 25 mL。将所有溶液过滤后取 1 mL 澄清液,15 000 r/min 离心 30 min。取 400 μL 上清液于液相样品瓶中,根据氨基酸自动分析仪进行分析。

(2) 游离氨基酸:精确称取 1.0 g 样品,用 5% 三氯乙酸定容至 25 mL。常温超声 20 min 后静置 2 h。过滤后取 1 mL 上清液,15 000 r/min 离心 30 min。取 400 μL 上层清液于液相样品瓶内,依照氨基酸自动分析仪进行分析。

1.4 数据统计与分析

所有数据表示为平均值±标准差,各重复 3 次,利用 Origin 9.0、SPSS 22.0 软件制图和数据分析,使用方差分析(ANOVA)用于结果的统计分析。字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同 SPI/WPC 配比的蛋白基底薄膜理化性能

2.1.1 微观结构及表面形态 当 WPC 占比 $\geqslant 60\%$ (S₀W₅、S₁W₄ 及 S₂W₃ 组)时,在相同工艺参数下无法形成完整薄膜,推测由于高浓度 WPC 引发的分子间交联缺陷及相分离现象,导致膜基质脆性显著增加,丧失结构完整性。由图 1 可知,当 WPC 占比为 40% 时,S₃W₂ 组薄膜表面较为粗糙,呈现较多球形蛋白聚集体。当 WPC 占比为 20% 时(S₄W₁ 组),薄膜的表面趋于平滑但存在微米级褶皱,反映两相相容性仍受亲水性差异限制。纯 SPI 膜(S₅W₀ 组)表面平整光滑,结构致密。

2.1.2 机械性能 食品包装薄膜若能有效防止食品在运输、贮藏和使用中被污染,必须具备足够的机械强度^[21]。由表 3 可知,不同 SPI/WPC 配比的薄膜厚度差异不显著。纯 SPI 膜(S₅W₀)的 TS 为(9.01±0.70) MPa,当 WPC 占比为 20%(S₄W₁ 组)时,薄膜的 TS 显著升至(15.98±0.80) MPa ($P<0.05$)。然而,当 WPC 占比为 40%(S₃W₂ 组)时,薄膜的 TS 较 S₄W₁ 组有所降低。在相近膜厚条件下,S₄W₁ 组与纯 SPI 膜的 TS 差异达 6.97 MPa,表明 WPC 通过增强蛋白分子交联密度及分子链间相互作用提升机械性能,但过

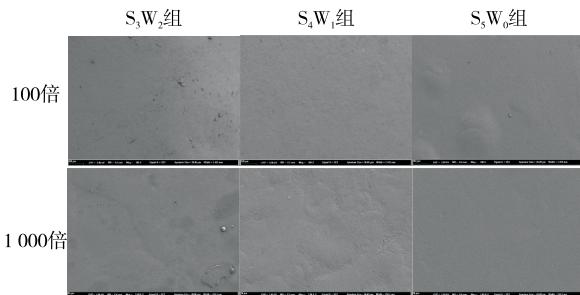


图 1 不同 SPI/WPC 配比蛋白基底薄膜的表面 SEM 图

Figure 1 Surface SEM images of protein base films with different SPI/WPC ratios

量 WPC 由于蛋白质分子键的刚性作用使膜较脆^[22]。

随着 WPC 浓度的增加,薄膜的 EAB 逐渐降低,从纯 SPI 膜的(45.03±0.28)% 降低至 S₃W₂ 组的(26.29±0.33)%。这主要归因于 SPI 本身具有很好的成膜性和柔韧性,因此纯 SPI 膜具有最高的 EAB。加入 WPC 后,由于两种蛋白的亲水性不同,影响了分子间形成的氢键作用和共凝胶作用^[23]。

表 3 不同 SPI/WPC 配比蛋白基底薄膜的厚度、TS 和 EAB

Table 3 Thickness, TS, and EAB of protein base films at different SPI/WPC ratios

样品	膜厚/mm	TS/MPa	EAB/%
S ₃ W ₂ 组	0.27±0.12	13.70±0.59 ^b	26.29±0.33 ^c
S ₄ W ₁ 组	0.24±0.11	15.98±0.42 ^a	37.63±0.35 ^b
S ₅ W ₀ 组	0.25±0.22	9.01±0.70 ^c	45.03±0.28 ^a

2.1.3 薄膜的水溶性、水分含量及阻隔性能 生物基薄膜在食品包装中的功效极易受其水分的影响,尤其是在潮湿环境中^[21]。由表 4 可知,薄膜的 WS 和 MC 随着 SPI 比例的增加显著降低;随着 WPC 比例的增加,薄膜的 WS 和 MC 相较于纯 SPI 膜均显著增加,与 Ghoshal 等^[24]的研究结果一致。这可以归因于 SPI 和 WPC 混合后,复合膜的构造变得更加松散,与水分子相互作用的位点增加,进而导致其 WS 和 MC 提高。此外,包装薄膜对水蒸气的阻隔性能直接影响其食品保鲜的有效性,薄膜的 WVP 越低,阻隔性能越好^[25]。随着 WPC 比例的增加,薄膜的

表 4 不同 SPI/WPC 配比蛋白基底薄膜的 WS、MC 和 WVP

Table 4 WS, MC, and WVP of protein base films at different SPI/WPC ratios

样品	WS/%	MC/%	WVP/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
S ₃ W ₂ 组	15.59±0.08 ^a	16.33±0.12 ^a	5.754×10 ⁻⁶ ±0.03 ^a
S ₄ W ₁ 组	13.86±0.29 ^b	12.48±0.04 ^b	5.391×10 ⁻⁶ ±0.08 ^b
S ₅ W ₀ 组	11.83±0.06 ^c	9.33±0.05 ^c	5.220×10 ⁻⁶ ±0.14 ^b

WVP 增加。与纯 SPI 膜相比, S_4W_1 组薄膜的 WVP 不存在显著性差异。当 WPC 添加比例为 20% 时,WPC 的加入不会对水蒸气的阻隔性造成影响。

2.1.4 透光率 透光率可用于评价不同聚合物的相容性,高的透光率表明聚合物之间的相容性较好^[15]。由图 2 可知,随着 WPC 添加比例的增加,透光率先增加后下降,当 WPC 添加比例为 20% (S_4W_1 组) 时,薄膜的透光率最高。基于不同 SPI/WPC 配比蛋白基底薄膜的理化性能,综合评估后选择 SPI/WPC 比例为 4:1 进行后续试验。

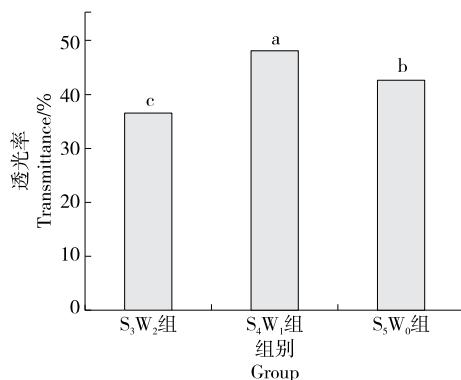


图 2 不同 SPI/WPC 配比蛋白基底薄膜的透光率

Figure 2 Light transmittance of protein base films at different SPI/WPC ratios

2.2 ALP 优化复合膜的表征

2.2.1 ALP 复合膜的表面形貌 由图 3 可知,当 SPI/WPC 与 ALP 质量比为 1.0:0.1 时,复合膜表面呈现明显褶皱和凸起颗粒;当 SPI/WPC 与 ALP 质量比为 1.0:0.2 时,复合膜表面趋于光滑,结构更为致密,凸起颗粒大幅减少。当 SPI/WPC 与 ALP 质量比为 1.0:0.5 时,复合膜表面再度呈现明显褶皱,表面粗糙度显著增加。

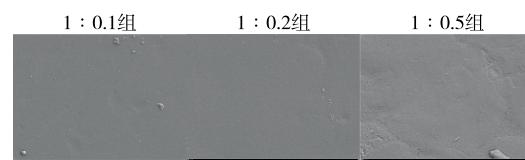


图 3 不同 ALP 配比复合膜的 SEM 图像

Figure 3 SEM images of composite films with different ALP proportions ($\times 100$)

2.2.2 ALP 复合膜的理化性能 由表 5 可知,随着 ALP 添加量的增加,复合膜的厚度、TS、WS 和 MC 增加,表明多糖分子填充增稠、增强分子间作用,提高了复合膜的机械性能和亲水性。当 SPI/WPC 与 ALP 质量比为 1.0:0.2 时,复合膜具有更高的 EAB 和 WVP,可能是该比例下,ALP 与蛋白分子间的相互作用达到最佳状态,既增强了分子间作用力,又保持了一定的柔韧性和致密性,从而提高了复合膜的 EAB 和 WVP。

表 5 不同 ALP 配比复合膜的厚度、TS、EAB、WS、MC 和 WVP

Table 5 Thickness, TS, EAB, WS, MC, and WVP of composite films with different ALP proportions

样品	膜厚/mm	TS/MPa	EAB/%	WS/%	MC/%	WVP/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
1.0:0.0	0.24±0.11 ^c	15.98±0.42 ^d	37.63±0.35 ^d	13.86±0.29 ^c	12.48±0.04 ^d	$5.391\times 10^{-6}\pm 0.08^d$
1.0:0.1	0.32±0.21 ^b	18.67±0.54 ^c	45.96±0.01 ^b	82.79±0.93 ^b	13.01±0.64 ^c	$9.427\times 10^{-6}\pm 0.03^c$
1.0:0.2	0.42±0.16 ^a	21.21±0.03 ^b	54.39±0.02 ^a	85.23±0.70 ^a	14.19±0.87 ^b	$9.505\times 10^{-6}\pm 0.15^b$
1.0:0.5	0.49±0.05 ^a	29.02±0.64 ^a	40.68±0.16 ^c	86.48±0.55 ^a	20.23±0.06 ^a	$2.717\times 10^{-5}\pm 0.25^a$

2.2.3 ALP 复合膜的透光率 由图 4 可知,随着 ALP 含量的增加,膜的透光率显著下降,主要归因于 ALP 中天然色素的混入对复合膜光学性能的负面影响。经过综合性能评估,确定最佳 SPI/WPC 与 ALP 质量比为 1.0:0.2。

2.3 SPI/WPC/ALP 可食用膜对羊肚菌保鲜效果的影响

2.3.1 常温下贮藏 4 d 的外观及感官评定分析 由图 5 可知,与无膜对照组相比,SPI/WPC/ALP 薄膜组具有更好的保鲜效果。常温下贮藏第 4 天,无膜组羊肚菌的颜色、质地、气味、自溶性以及发霉情况等均出现了显著的劣变;SPI/WPC/ALP 薄膜组的各方面指标虽有所降低,但下降速度明显缓慢,品质相对稳定,表明可食用薄膜在羊肚菌保鲜中起到了积极的作用。

2.3.2 常温下贮藏 4 d 的品质特性分析 收获的新鲜羊

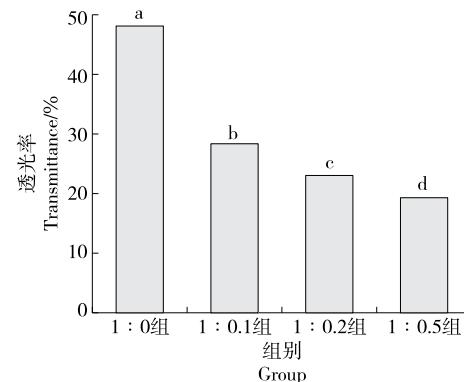


图 4 不同 ALP 配比复合膜的透光率

Figure 4 Light transmittance of composite films with different ALP proportions

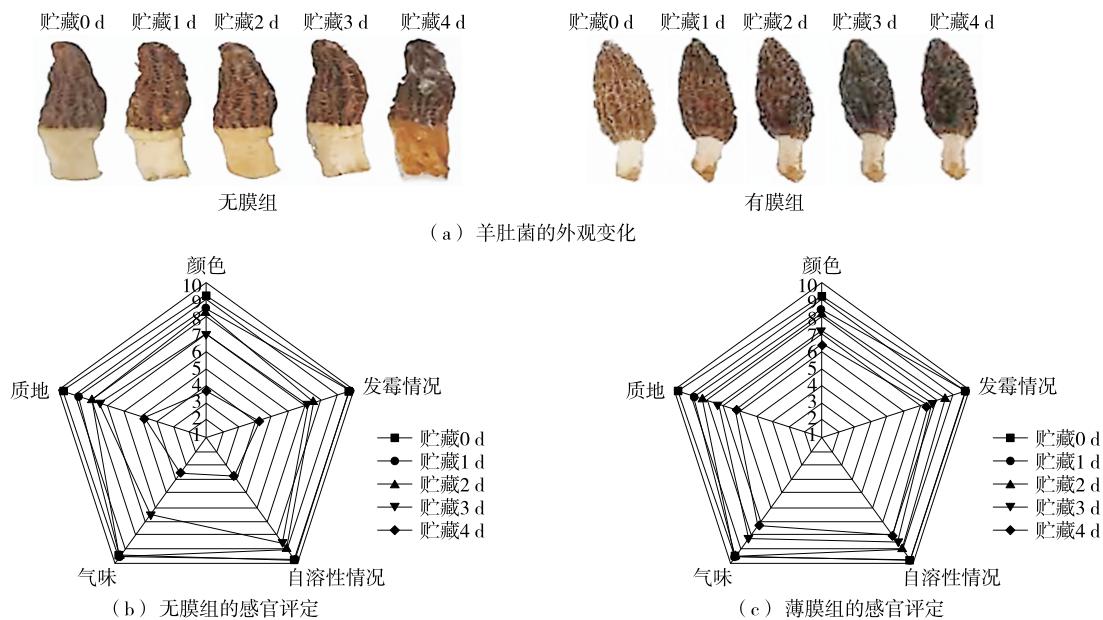


图 5 可食用膜对羊肚菌外观和感官评价变化的影响

Figure 5 Effects of edible film on the appearance and sensory evaluation changes of *Morchella*

肚菌在贮藏过程中会逐渐发生变色^[26]。由图 6(a)可知,羊肚菌的菌柄表面在贮藏过程中逐渐变成褐色。贮藏第 4 天,与无膜组相比,薄膜组的色差值为 18.26 ± 2.45 ,可食用膜的使用有效维持了羊肚菌的色泽。新鲜羊肚菌具有高水分含量和脆嫩的组织结构,呼吸、蒸腾作用强,子实体表面多孔且无保护组织,采后易发生水分流失,进而导致子实体收缩和品质劣变^[27]。由图 6(b)可知,无膜组直接暴露在环境中,导致水分快速流失;与无膜组相比,薄膜组使得羊肚菌表面的水分阻隔能力显著提高,从而减缓了羊肚菌表面水分的流失。

羊肚菌采摘后,在贮藏期间,由于持续呼吸作用和一些代谢活动,在没有营养供应的情况下,其自身的有机物被大量消耗,导致细胞衰老和硬度变化。此外,由于微生物的影响,羊肚菌组织中发生自噬和自溶作为应激生理反应,导致细胞壁溶解和破裂,从而导致硬度发生变化^[3, 28]。如图 6(c)~图 6(e)所示,贮藏 0~4 d,羊肚菌的硬度、弹性和咀嚼性均随着贮藏时间的延长显著下降。这主要与失水密切相关,当失水率达到一定阈值时,不仅口感变差,还会引发水分胁迫,导致细胞膜受损,同时水分子与蘑菇纤维素结合形成凝胶状物质,增加黏度,从而影响口感^[29]。使用 SPI/WPC/ALP 薄膜包裹后能够有效抑制羊肚菌的硬度、弹性和咀嚼性的下降速度,表明 SPI/WPC/ALP 复合膜包裹能有效缓解羊肚菌的软化和失水情况,更好保持羊肚菌在贮藏期间的品质。

食用菌组织富含酚类物质,在采后贮藏期间其子实

体持续进行的呼吸代谢活动加速了酚类物质代谢进程,致使多酚氧化为醌类物质,进而引发褐变反应^[17, 30]。因此,褐变程度是羊肚菌新鲜度的关键表征指标,菌柄色泽越趋近于乳白,其新鲜度越高。由图 6(f)可知,贮藏期间,无膜组的褐变程度随贮藏时间的延长显著增加,而经过薄膜包裹后显著抑制了羊肚菌的褐变程度。这与感官评定和色差变化结果一致,表明 SPI/WPC/ALP 复合膜能延缓羊肚菌的褐变程度。此外,两组羊肚菌的多酚含量均呈下降趋势[图 6(g)],贮藏第 4 天,与无膜组相比,薄膜组的多酚含量为 (1.708 ± 0.130) mg/g,两组较初始值分别下降了 57.63% 和 38.89%,表明 SPI/WPC/ALP 复合膜能有效减少羊肚菌中的多酚损失,维持高抗氧化活性,减少黑色素生成。由图 6(i)~图 6(j)可知,酪氨酸含量在贮藏前期上升,后期下降。这可能是因为贮藏初期,羊肚菌中的蛋白质水解作用加剧,释放出更多的酪氨酸;随着贮藏时间的延长,酪氨酸参与酶促褐变反应,被氧化并最终转化为黑色素,导致酪氨酸含量下降^[31],但在整个贮藏期间,无膜组的酪氨酸含量始终高于薄膜组,表明 SPI/WPC/ALP 复合膜可抑制酚类物质氧化,降低酪氨酸含量,减少黑色素生成,缓解褐变程度,提升羊肚菌品质,延长保鲜时间。

子实体组织在衰老进程中或受不良环境条件伤害时,会引发膜脂过氧化反应,产生脂质过氧化损伤。MDA 作为脂质过氧化及氧化应激的关键指标,其含量上升反映了细胞膜结构的受损程度^[3]。如图 6(h)所示,两组羊肚菌的 MDA 含量均随着贮藏时间的延长而上升,贮藏第 4 天,

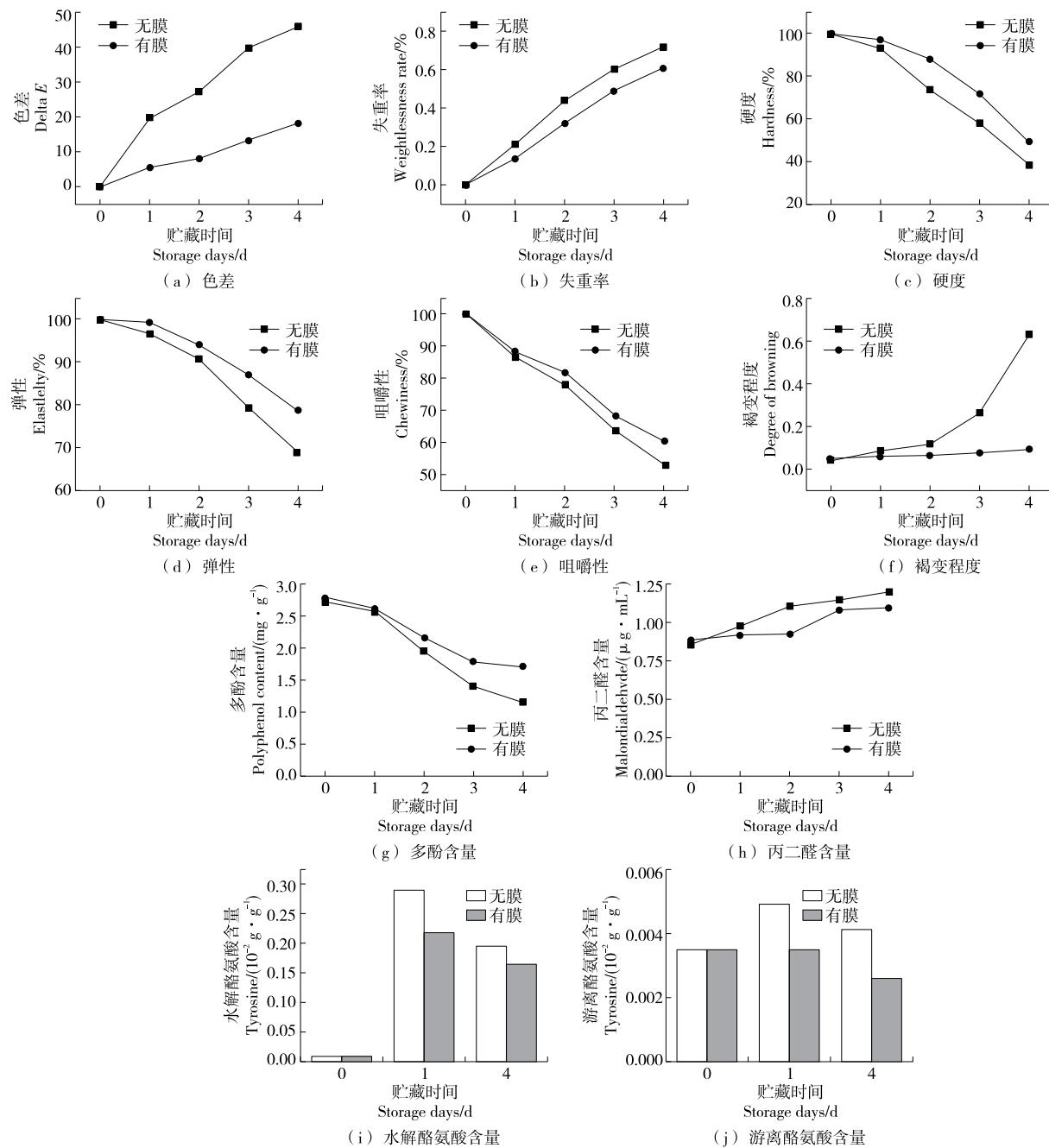


图 6 可食用膜对羊肚菌在常温下贮藏 4 d 品质特性的影响

Figure 6 Effects of edible film on quality characteristics of *Morchella* stored at room temperature for 4 days

无膜组的 MDA 含量最终上升至 $(1.198 \pm 0.035) \mu\text{g/mL}$, 薄膜组的 MDA 含量为 $(1.102 \pm 0.029) \mu\text{g/mL}$, 与贮藏初期相比分别增加了 39.75% 和 24.32%, 表明复合膜的使用可以有效抑制羊肚菌膜脂过氧化, 提升其在常温环境下的贮藏品质。

3 结论

以大豆分离蛋白与浓缩乳清蛋白为基材制备可食用

膜, 二者最佳质量比为 4:1。为优化薄膜的物理性能、机械性能及阻隔性能, 添加了不同含量的牛蒡多糖。结果表明, 牛蒡多糖的加入显著提升了薄膜的机械强度、阻隔性和透光性, 并进一步筛选出了最优比例的大豆分离蛋白/浓缩乳清蛋白/牛蒡多糖薄膜, 该薄膜对羊肚菌具有显著的保鲜效果, 与无膜对照组相比, 有效减少了羊肚菌中酚类物质的损失, 延缓了酪氨酸含量的变化及丙二醛含量的增加, 从而减缓了羊肚菌的劣变过程, 提升了其品质。

并延长了保鲜期。该研究主要验证了常温短期的保鲜效果，并未涉及其他温度下及更长时间品质变化的分析，未来需在不同贮藏条件下评估其长期稳定性与商业化潜力，并深入探究其保鲜机理。未来研究可聚焦于薄膜的耐环境性、抗菌性能的提高以及成分的多样化，以增强其实用性。

参考文献

- [1] PAN X, XU L J, MENG J L, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction of polysaccharides from *Morchella importuna*: optimization, physicochemical properties, and bioactivities[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 912014.
- [2] TIETEL Z, MASAPHY S. True morels (*Morchella*): nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(11): 1 888-1 901.
- [3] JIANG K, HUANG Y W, CUI R, et al. Application of a new packaging material in the postharvest quality and spoilage microorganisms bacteria of morels[J]. *Food Control*, 2025, 171: 111057.
- [4] LÓPEZ-ORTIZ A, PACHECO PINEDA I Y, MÉNDEZ-LAGUNAS L L, et al. Optical and thermal properties of edible coatings for application in solar drying[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 10051.
- [5] PÉREZ-MARROQUÍN X, AGUIRRE-CRUZ G, CAMPOS-LOZADA G, et al. Green synthesis of silver nanoparticles for preparation of gelatin films with antimicrobial activity[J]. *Polymers*, 2022, 14(17): 3 453.
- [6] ZHANG X Y, ZHANG B, GE X Z, et al. Fabrication and characterization of whey protein-citrate mung bean starch-capsaicin microcapsules by spray drying with improved stability and solubility[J]. *Foods*, 2022, 11(7): 1 049.
- [7] 韩莹莹. 大豆分离蛋白基活性共混膜的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018: 2.
HAN Y Y. Preparation and properties of soy protein isolate-based active blended films[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018: 2.
- [8] 白晓娇. 改性大豆分离蛋白膜的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012: 10.
BAI X J. preparation and performance analysis of active blend soy protein isolate based films[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012: 10.
- [9] ZHOU W, HE Y X, LIU F, et al. Carboxymethyl chitosan-pullulan edible films enriched with galangal essential oil: characterization and application in mango preservation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 256: 117579.
- [10] KOWALCZYK D, KORDOWSKA-WIATER M, KARAŚ M, et al. Release kinetics and antimicrobial properties of the potassium sorbate-loaded edible films made from pullulan, gelatin and their blends[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105539.
- [11] LU N Y, WEI J Y, GONG X L, et al. Preventive effect of *Arctium lappa* polysaccharides on acute lung injury through anti-inflammatory and antioxidant activities[J]. *Nutrients*, 2023, 15(23): 4 946.
- [12] 杨帅帅, 李海朝, 黄丽娟. 增塑剂改性明胶膜的制备与表征[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(21): 84-87, 301.
YANG S S, LI H C, HUANG L J. Preparation and characterization of modified gelatin films by plasticizer[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(21): 84-87, 301.
- [13] EDHIREJ A, SAPUAN S M, JAWAID M, et al. Preparation and characterization of cassava starch/peel composite film[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(5): 1 704-1 715.
- [14] GHOSHAL G, SINGH D. Synthesis and characterization of starch nanocellulosic films incorporated with Eucalyptus globulus leaf extract[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2020, 332: 108765.
- [15] SUN H T, SHAO X R, JIANG R P, et al. Effects of ultrasonic/microwave-assisted treatment on the properties of corn distarch phosphate/corn straw cellulose films and structure characterization[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(4): 1 467-1 477.
- [16] 许瀛引, 谢丽源, 张志远, 等. 微酸性电解水和紫外光结合对采后六妹羊肚菌的保鲜作用[J]. *菌物学报*, 2021, 40(12): 3 332-3 346.
XU Y Y, XIE L Y, ZHANG Z Y, et al. Combined effects of slightly-acidic electrolyzed water and ultraviolet light on the postharvest quality of *Morchella sextelata*[J]. *Mycosistema*, 2021, 40(12): 3 332-3 346.
- [17] 李萍, 于晋泽, 张娜, 等. 不同包装材料对羊肚菌保鲜效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(23): 163-169.
LI P, YU J Z, ZHANG N, et al. Effects of different packaging materials on the preservation of *Morchella*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(23): 163-169.
- [18] 孟丽媛, 王凤舞. 西兰花多酚提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(5): 62-68.
MENG L Y, WANG F W. Extraction technology and antioxidant activity of polyphenols from broccoli[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2013, 13 (5): 62-68.
- [19] 王秀红, 杨晓敏, 王雅婷, 等. 不同复合涂膜在采后双孢蘑菇贮藏保鲜中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(23): 9-16.
WANG X H, YANG X M, WANG Y T, et al. Effects of different combined-coating treatments on postharvest storage and preservation of agaricus bisporus[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(23): 9-16.

- [20] 杨玉亮,衣大龙,刘春雨,等.体外模拟消化对牦牛骨胶原蛋白肽抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(13):79-84.
- YANG Y L, YI D L, LIU C Y, et al. Effects of *in vitro* simulated digestion on the antioxidant activity of yak bone collagen peptides[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 79-84.
- [21] LIU J, JUNEJO S A, XIAO Y Q, et al. Effect of camellia oil body-based oleogels on the film-forming properties of soy protein isolate[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140282.
- [22] 张梦媛,王千一,蒲雪丽,等.乳清浓缩蛋白与卵清蛋白复合膜的制备及其性能[J].食品工业科技,2022,43(22): 105-110.
- ZHANG M Y, WANG Q Y, PU X L, et al. Preparation and properties of whey protein concentrate and egg white protein composite film[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 105-110.
- [23] YEBOAH G B, WANG S, WU W, et al. Interfacial composition on the mechanical properties, microstructure and digestion of emulsion-filled whey protein gels: effect of soy and whey protein ratios[J]. Food Bioscience, 2025, 64: 105886.
- [24] GHOSHAL G, SHIVANI. Thyme essential oil nano-emulsion/tamarind starch/whey protein concentrate novel edible films for tomato packaging[J]. Food Control, 2022, 138: 108990.
- [25] AMAL T, KASIM A A, KHALED N, et al. Effect of different concentrations of olive oil and oleic acid on the mechanical properties of albumen (egg white) edible films[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(60): 12 963-12 972.
- [26] QU T T, LI B B, HUANG X F, et al. Effect of peppermint oil on the storage quality of white button mushrooms (*Gjaricus bisporus*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(3): 404-418.
- [27] 姜峰,张胜珍,段英姿,等.羊肚菌采后保鲜技术研究[J].中国食用菌,2022,41(9): 70-74.
- JIANG F, ZHANG S Z, DUAN Y Z, et al. Research on postharvest preservation technology of *Morhella* spp[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(9): 70-74.
- [28] ZHENG C M, LI J Q, LIU H G, et al. Review of postharvest processing of edible wild-grown mushrooms[J]. Food Research International, 2023, 173: 113223.
- [29] 龚频,王佳婷,龙辉,等.羊肚菌物理、化学保鲜方法及作用机制研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(24): 312-320.
- GONG P, WANG J T, LONG H, et al. Advance in physical and chemical preservation methods and mechanism of *Morchella esculenta*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(24): 312-320.
- [30] 史宇,孙飞龙,王淑君,等.羊肚菌保鲜技术研究进展[J].包装与食品机械,2022,40(2): 102-106.
- SHI Y, SUN F L, WANG S J, et al. Research progress in preservation technology of *Morchella esculenta*[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(2): 102-106.
- [31] GAO F H, XIE W Y, ZHANG H, et al. Molecular mechanisms of browning process encountered in morels (*Morchella sextelata*) during storage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(9): 1 997-2 008.