

基于主成分分析的聚乙烯醇-金针菇水提取物复合膜制备、表征与保鲜应用

张雪松, 刘丽, 唐玉娟, 谢以勒, 卞鑫宇

Preparation, Characterization and Preservation of Composite Membranes of Polyvinyl Alcohol-Enoki Mushroom Aqueous Extract Based on Principal Component Analysis

ZHANG Xuesong, LIU Li, TANG Yujuan, XIE Yile, and BIAN Xinyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060164>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚乙烯醇/壳聚糖/芒果皮提取物复合膜的制备与表征

Preparation and Characterization of Polyvinyl Alcohol/Chitosan/Mango Peel Extract Composite Film

食品工业科技. 2021, 42(12): 95-102 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010198>

基于聚乙烯醇-溶菌酶复合抗菌涂膜剂的鸡蛋保鲜研究

Application of polyvinyl alcohol-chitosan composite antimicrobial coating agent in preservation of fresh eggs

食品工业科技. 2018, 39(8): 251-256, 308 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.08.046>

高抗菌性聚乙烯醇/Ag@MOF食品包装膜的制备与表征

Fabrication and Characterization of Antibacterial Polyvinyl Alcohol/Ag@MOF Films for Food Packing

食品工业科技. 2021, 42(23): 243-250 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040039>

次氯酸钠杀菌结合聚乙烯醇基纳米SiO₂复合材料涂膜对鸭蛋保鲜效果的影响

Effect of sodium hypochlorite disinfection combined with polyvinyl alcohol-based composite packaging material with nano-SiO₂ coating on fresh-keeping of duck eggs

食品工业科技. 2017(18): 295-299 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.056>

聚乙烯醇活性薄膜对大黄鱼保鲜效果及品质动态监控

Active Poly(vinyl)Alcohol Film on the Fresh-keeping Effect and Quality Dynamic Monitoring of *Pseudosciaena crocea*

食品工业科技. 2019, 40(10): 290-296 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.10.048>

响应面-主成分分析法优化马铃薯饼干配方

Optimization of Potato Biscuits Technology by Response Surface Methodology and Principal Component Analysis

食品工业科技. 2018, 39(21): 185-190 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.033>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张雪松, 刘丽, 唐玉娟, 等. 基于主成分分析的聚乙烯醇-金针菇水提取物复合膜制备、表征与保鲜应用 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 205–217. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060164

ZHANG Xuesong, LIU Li, TANG Yujuan, et al. Preparation, Characterization and Preservation of Composite Membranes of Polyvinyl Alcohol-Enoki Mushroom Aqueous Extract Based on Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 205–217. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060164

· 包装与机械 ·

基于主成分分析的聚乙烯醇-金针菇水提取物 复合膜制备、表征与保鲜应用

张雪松^{1,*}, 刘 丽², 唐玉娟², 谢以勒¹, 卞鑫宇¹

(1. 江苏农林职业技术学院茶与食品科技学院, 江苏句容 212400;

2. 南京晓庄学院食品科学学院, 江苏南京 211171)

摘要: 为开发新型食品包装膜, 提高金针菇资源化利用水平, 以可降解的聚乙烯醇 (PVA) 和金针菇水提取物共混制备 PVA-金针菇水提取物复合膜。以拉伸强度、断裂延伸率、耐水性系数、厚度、不透明度及水蒸气透过系数等复合膜物理性能参数, 研究 PVA 添加量、2-乙酰柠檬酸三乙酯 (ATEC) 添加量、金针菇水提取物添加量、干燥时间和干燥温度对复合膜物理性能的影响; 采用主成分分析法对复合膜性能进行综合评价; 并结合响应面分析法, 建立了 PVA-金针菇水提取物复合膜制备的多元二次回归方程模型, 优化了复合膜制备条件, 并研究了复合膜在 20 ℃ 条件下对草莓贮藏期间 (6 d) 褐变度、失重率、维生素 C、丙二醛等保鲜指标的影响。研究表明, PVA 添加量 4.0 g、ATEC 添加量 4.0 g、金针菇水提取物添加量 3.9 g、干燥温度 62 ℃, 干燥时间 3.5 h 为最佳制备条件, 所得复合膜拉伸强度为 31.76 ± 0.50 N/cm²、断裂延伸率为 $97.99\% \pm 0.25\%$ 、水蒸气透过系数为 $1.44 \times 10^{-9} \pm 1.53 \times 10^{-11}$ g·mm/m²·h·kPa、耐水性系数为 549.14 ± 0.94 s/mm、膜厚度为 0.062 ± 0.002 mm、不透明度为 20.97 ± 0.39 , 物理性能综合得分为 102.25 ± 0.16 , 与模型预测结果的相对误差为 0.57%。红外光谱、扫描电子显微镜、X 射线衍射分析表明复合膜结构完整, 金针菇水提取物与基质相容性较好, 并以氢键结合。通过草莓贮藏期间褐变度、失重率、维生素 C 以及丙二醛的测定, 制备的复合膜显示出较好的保鲜效果。

关键词: 金针菇提取物, 聚乙烯醇, 主成分分析, 响应面分析

中图分类号: TS206.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)09-0205-13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060164



本文网刊:

Preparation, Characterization and Preservation of Composite Membranes of Polyvinyl Alcohol-Enoki Mushroom Aqueous Extract Based on Principal Component Analysis

ZHANG Xuesong^{1,*}, LIU Li², TANG Yujuan², XIE Yile¹, BIAN Xinyu¹

(1. College of Tea and Food Science and Technology, Jiangsu Polytechnic College of Agriculture
and Forestry, Jurong 212400, China;

2. School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: To develop a new type of food packaging film and improve the level of resource utilization of enoki mushroom, polyvinyl alcohol (PVA) was used as the film-forming substrate, and the composite film of PVA-enoki mushroom aqueous extract was prepared by blending with enoki mushroom aqueous extract. The physical properties of the composite film, such as tensile strength, elongation at break, water resistance, thickness, opacity and water vapor transmission rate were taken as parameters to study the effects of PVA addition, 2-acetyltriethyl citrate (ATEC) addition, enoki mushroom aqueous extract addition, drying time and drying temperature on the physical properties of the composite film. Principal component

收稿日期: 2023-06-16

基金项目: 江苏农林职业技术学院科技项目 (2022kj49)。

作者简介/通信作者*: 张雪松 (1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物开发应用, E-mail: 316375046@qq.com。

analysis was used to comprehensive evaluation of composite film performance. The multiple regression equation model was established for the preparation of PVA-enoki mushroom aqueous extract composite film by response surface analysis, and the conditions for the preparation of the composite film were optimized. The effects of composite film on freshness indexes such as browning degree, weight loss, vitamin C and malondialdehyde of strawberries during storage (6 d) at 20 °C were also investigated. The results showed that 4.0 g of PVA, 4.0 g of ATEC, 3.9 g of aqueous extract of enoki mushroom, 62 °C drying temperature and 3.5 h drying time were the optimal conditions for composite film preparation. The tensile strength of the composite film was 31.76 ± 0.50 N/cm², elongation at break was $97.99 \pm 0.25\%$, water vapor transmission rate was $1.44 \times 10^{-9} \pm 1.53 \times 10^{-11}$ g·mm/m²·h·kPa, water resistance was 549.14 ± 0.94 s/mm, film thickness was 0.062 ± 0.002 mm, opacity was 20.97 ± 0.39 , and a combined physical property score of 102.25 ± 0.16 , with a relative error of 0.57% from the model prediction. Infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction analyses showed that the composite film was structurally intact, and the aqueous extract of enoki mushroom was compatible with the matrix and bound by hydrogen bonding. According to the indicators including the browning degree, weight loss, vitamin C, and malondialdehyde, the prepared composite film showed a better preservation effect during strawberry storage.

Key words: enoki mushroom extract; polyvinyl alcohol; principal component analysis; response surface analysis

石油合成聚合物是食品包装中使用最普遍的材料。尽管这些聚合物具有适合各种包装材料的机械和物理性能,但这些物质在环境中不可降解,对大气、水和土壤极易造成污染,对人类健康和其他生物体造成许多危害。因此,近年来,由于在食品包装中使用来自石油产品的合成薄膜会存在安全隐患,所以天然聚合物已成为食品包装膜的主要研究方向^[1-3]。研究表明多糖和蛋白质等植物或动物来源的天然和可生物降解聚合物是不可降解石油聚合物的最合适替代品^[4-5]。

我国是金针菇工厂化生产大国。金针菇产量稳居全球之首^[6]。研究表明,金针菇提取物含有多糖、构菌素、活性蛋白等多种活性物质,具有抗菌、抗氧化等作用^[7]。而聚乙烯醇膜具有亲水性和透湿性能,应用于果蔬保鲜时,果蔬呼吸作用和蒸腾作用所产生的水汽不会形成聚集,可以避免水蒸气凝聚滴落在果蔬表面,也避免了产品包装内部空气湿度过大而引起的腐败变质,有助于果蔬保鲜^[8]。但是,PVA膜自身缺乏抗氧化抗菌等生物活性,并且机械性能相对较差,限制了在包装保鲜方面的应用。研究表明在PVA膜中添加多糖^[9]、精油^[10]、蛋白质^[11]和植物提取物^[12]等天然组分可以改善PVA膜的某些力学性能,提升保鲜效果。

本实验以PVA为基质,将金针菇水提取物添加到PVA中,采用共混法制备PVA-金针菇水提取物复合膜。通过主成分分析法对复合膜的性能进行综合评价,结合响应面试验,优化复合膜制备工艺条件,提高复合膜的综合性能,以期开发新型食品包装膜,提高金针菇资源化利用水平提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

聚乙烯醇 1788 型、2-乙酰柠檬酸三乙酯 (97%)、2-硫代巴比妥 (98%)、愈创木酚 (>99%GC) 上海麦克林生化科技有限公司;无水氯化钙、氯化钾、氯化钙 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;金针菇、草莓、PE 保鲜膜 市售。

LHS-250SC 恒温生化培养箱 上海齐欣科学仪器有限公司;LC-LX-HLR250D 高速冷冻离心机 力辰科技仪器有限公司;Scient-10N/12N 真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技有限公司;RE-5200 旋转蒸发仪 上海亚荣生化仪器厂;T6 新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;TA.XT PlusC SMS 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;Tescan mira4 场发射扫描电镜 泰思肯(中国)有限公司;X'Pert3 Powder 粉末 X 射线衍射仪 荷兰帕纳科公司;Nicolet IS5 傅里叶红外光谱仪 Thermo。

1.2 实验方法

1.2.1 金针菇水提取物的制备 参考张万利等^[13]的方法略作修改。金针菇洗净后晾干,置于-20 °C 冷冻 24 h 后捣碎,按料液比 1:20(m/v)加入蒸馏水,60 °C 水浴提取 2 h。过滤后将滤液减压浓缩,经真空冷冻干燥后得水提取物。

1.2.2 PVA-金针菇水提取物复合膜的制备 参考李悦等^[14]的方法并稍作修改。称取 4 g PVA 于 100 mL 去离子水中,60 °C 磁力搅拌 1 h 至聚乙烯醇充分溶解,加入一定量乙酰柠檬酸三乙酯,继续 60 °C 搅拌 30 min,制得 PVA-乙酰柠檬酸三乙酯混合液。称量一定质量的金针菇水提取物加入混合液中 60 °C 继续搅拌 1 h 至充分混合,取出后放入超声振荡器中脱气 30 min。将脱气后的混合液倒入方形塑料培养皿,均匀平铺在培养皿底部,放入鼓风干燥箱,60 °C 干燥 3.5 h,将干燥后的膜置于密封袋常温保存待测。

1.2.3 复合膜物理性能测定

1.2.3.1 厚度测定 将复合膜裁成 10.0 cm×10.0 cm 的正方形。用数显千分尺测定四个顶点及一个中心点的厚度,计算平均值,计为该成品膜的厚度,单位为 mm。

1.2.3.2 拉伸强度与断裂延伸率的测定 采用 SMS 质构仪对成品膜的拉伸强度(TS)进行测试。将成品膜裁成 10.0 cm×2.0 cm 的长条状。将成品膜夹在上下两个探头之间,记录探头间复合膜的长度(L₀)。设

定测试前速度: 2.5 mm/s, 测试中速度: 2.0 mm/s, 测试后速度: 10.0 mm/s, 直至复合膜拉断, 读取复合膜断裂时的最大作用力(F)以及复合膜断裂时的长度(L)。对每个复合膜进行三次测定并取平均值, 按下式计算拉伸强度:

$$TS(N/cm^2) = \frac{F}{AB}$$

式中: TS 为拉伸强度, N/cm²; F 为膜断裂时的瞬间拉力, N; A 为膜的长度, cm; B 为膜的宽度, cm。

按下式计算断裂延伸率:

$$EAB(\%) = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100$$

式中: EBA 为断裂延伸率, %; L₀ 为膜测试前的长度, cm; L 为膜拉伸断裂时的长度, cm。

1.2.3.3 耐水性系数测定 将成品膜置于直径为 3.0 cm 的锥形瓶口, 用皮筋固定。移取 1 mL 蒸馏水置于复合膜表面, 记录第一滴水渗入锥形瓶的时间, 按下式计算耐水性系数:

$$WPT(s/mm) = \frac{t}{m}$$

式中: WPT 为耐水性系数, s/mm; t 为第一滴水坠入锥形瓶的时间, s; m 为成品膜的厚度, mm。

1.2.3.4 水蒸气透过系数测定 根据 GB/T 1037-2021 对成品膜的水蒸气透过系数进行测定。将无水氯化钙进行研磨并进行干燥处理, 称取 3.0 g 无水氯化钙于直径为 18 mm 的试管中, 用复合膜将管口进行密封, 置于装有饱和 KCl 溶液的干燥器中, 测定存储 48 h 前后的质量变化。三次测定并取平均值, 水蒸气透过系数按下式计算:

$$WVP(g \cdot mm/m^2 \cdot h \cdot kPa) = \frac{\Delta m \times L}{A \times t \times \Delta p}$$

式中: WVP 为水蒸气透过系数, g·mm/m²·h·kPa; Δm 为水蒸气迁移量, g; A 为复合膜的面积, m²; t 为测定时间, h; L 为复合膜的厚度, mm; Δp 为复合膜两侧的蒸汽压差, kPa。

1.2.3.5 不透明度测定 采用分光光度计对复合膜的不透明度进行测定, 将待测成品膜裁成 20 mm×8 mm 的矩形, 贴于石英比色皿光面内侧, 以蒸馏水为参照, 测定 500 nm 吸光度, 对每个复合膜进行三次测定并取平均值, 不透明度按下式计算:

$$\text{不透明度} = \frac{A}{X}$$

式中: A 为吸光度, Abs; X 为复合膜的厚度, mm。

1.2.4 复合膜结构的表征

1.2.4.1 扫描电子显微镜(SEM)观察微观结构 使用液氮对复合膜进行脆断, 然后对断面进行喷金处理后, 使用扫描电镜对复合膜断面进行微观形貌分析。

1.2.4.2 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析 将样品磨成粉末后与 KBr 充分混合, 压片得到均匀的薄片

进行测试。扫描范围为 4000~500 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹。

1.2.4.3 X 射线衍射(XRD)分析 将样品干燥至恒重, 放入衍射扫描室。衍射角 2θ 为 5°~60°的范围内, 以 2°/min 的扫描速度获得衍射曲线。

1.2.5 单因素实验 PVA 添加量、乙酰柠檬酸三乙酯(ATEC)添加量、金针菇水提取物添加量、干燥温度和干燥时间为实验因素, 均设 5 个水平, 测其物理性能(厚度、不透明度、拉伸强度、断裂延伸率、耐水性系数及水蒸气透过系数), 因素水平设计见表 1。当第一因素进行实验时, 其他因素均选取水平 3 的相应参数, 此后每完成一个因素, 后续将采用该因素最优水平作为实验参数。

表 1 单因素实验因素水平设计

Table 1 Factor level design of single-factor experiment

水平	A PVA 添加量 (g)	B ATEC 添加量 (g)	C 金针菇水提 物添加量 (g)	D 干燥 温度 (℃)	E 干燥 时间 (h)
1	3	1	1	55	2
2	4	2	2	60	2.5
3	5	3	3	65	3
4	6	4	4	70	3.5
5	7	5	5	75	4

1.2.6 响应面试验设计 根据单因素实验结果, 采用 Design-expert 对试验进行设计和分析。响应面试验以复合膜性能综合得分为评价指标, 因素水平如表 2 所示。

表 2 响应面试验因素水平设计

Table 2 Factor level design of response surface experiment

水平	A PVA 添加量 (g)	B ATEC 添加量 (g)	C 金针菇水提 物添加量 (g)	D 干燥 温度 (℃)	E 干燥 时间 (h)
-1	3	3	3	55	3.0
0	4	4	4	60	3.5
1	5	5	5	65	4.0

1.2.7 草莓包装保鲜实验

1.2.7.1 草莓包装及贮藏条件 将草莓样品分成四组, 每组约 100 g 草莓, A 组为草莓空白对照组, 不做其它任何表面处理, 置于托盘中; B 组使用纯 PVA 膜包裹每个草莓样品, 置于托盘中; C 组使用制备的 PVA-金针菇水提取物复合膜包裹每个草莓样品, 置于托盘中; D 组则使用 PE 保鲜膜包裹每个草莓样品, 并置于托盘中。覆膜完成后放置在 20 ℃(±2 ℃) 的恒温箱里。每天取出样品, 测定各项指标。

1.2.7.2 褐变度的测定 称取 4 g 草莓样品, 加入 36 mL 的磷酸缓冲溶液并进行研磨, 10000 r/min 冷冻离心 10 min, 取上层清液, 在 450 nm 处测定吸光度值。褐变度按下式计算:

$$\text{褐变度} = 5 \times A_{450}$$

1.2.7.3 失重率的测定 失重率参照徐愉聪等^[15]的方法使用称重法进行测定。失重率按下式计算:

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{贮藏前草莓称重} - \text{贮藏后草莓称重}}{\text{贮藏前草莓称重}} \times 100$$

1.2.7.4 维生素 C 含量的测定 根据《GB 5009.86-2016 食品中抗坏血酸的测定》采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定。维生素 C 含量以保留率来表示,按下式计算:

$$\text{维生素C保留率}(\%) = \frac{X_i}{X_1} \times 100$$

式中: X_i 为贮藏期间第 1 d 至第 6 d 每日维生素 C 含量(mg/g); X_1 为贮藏第 1 d 维生素 C 含量(mg/g)。

1.2.7.5 丙二醛(MDA)含量的测定 丙二醛的测定参照李新明等^[16]的方法略作修改。称取 10 g 草莓,加入 20 mL 磷酸缓冲液进行研磨。10000 r/min 离心 10 min 后取上清液 1.5 mL,加入 2.5 mL 0.5% 硫代巴比妥酸,置于 100 °C 沸水中加热 20 min,迅速冷却后,10000 r/min 离心 20 min。分别测定上层清液在 450、532 及 600 nm 处的吸光度,按以下公式计算 MDA 浓度 $C(\mu\text{mol/L})$ 和含量(nmol/g FW)。

$$C(\mu\text{mol/L}) = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}$$

$$\text{MDA含量(nmol/g FW)} = \frac{C \times 4 \times \frac{V}{1.5} \times 1000}{m}$$

式中: C 为 MDA 浓度, $\mu\text{mol/L}$; 4 为反应体系总体积, mL; V 为提取液总体积, mL; 1.5 为测定时提取液使用体积, mL; m 为样品质量, g。

丙二醛含量以增加率来表示,按下式计算:

$$\text{丙二醛增加率}(\%) = \frac{Y_i - Y_1}{Y_1} \times 100$$

式中: Y_i 为贮藏期间第 1 d 至第 6 d 丙二醛含量(nmol/g FW); Y_1 为贮藏第 1 d 丙二醛含量(nmol/g FW)。

1.3 数据处理

实验重复三次,数据取平均值。作图采用 GraphPad Prism5 软件;主成分分析采用 IBM SPSS Statistics 19 软件分析;响应面试验采用 Design-Expert 11 软件分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 PVA 添加量对膜性能的影响 PVA 添加量对复合膜性能的影响如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着 PVA 添加量的增加,膜的断裂延伸率、拉伸强度均呈现先上升后下降的趋势。不透明度则先下降后上升。膜的厚度、水蒸气透过系数以及耐水性系数则随着 PVA 添加量的增加而增加。当 PVA 添加量为 4 g 时,膜的断裂延伸率最高,为 76.36%,拉伸强度最高,达到 8.93 N/cm²,膜的耐水性系数为

652.11 s/mm,是最高值的 88.43%,水蒸气透过系数为 2.38×10^{-9} g·mm/m²·h·kPa,厚度为 0.073 mm,不透明度为 19.96,为最低值的 108.60%。当 PVA 添加量达到 7 g 时,其厚度最大,耐水性系数最高,但其水蒸气透过系数较高,极易吸水,且质地较硬透明度较低,拉伸强度和断裂延伸率仅为最高值的 66.87%和 50.74%,不适于果蔬保鲜。综合来看,PVA 添加量为 4 g 时膜的综合性能最佳。

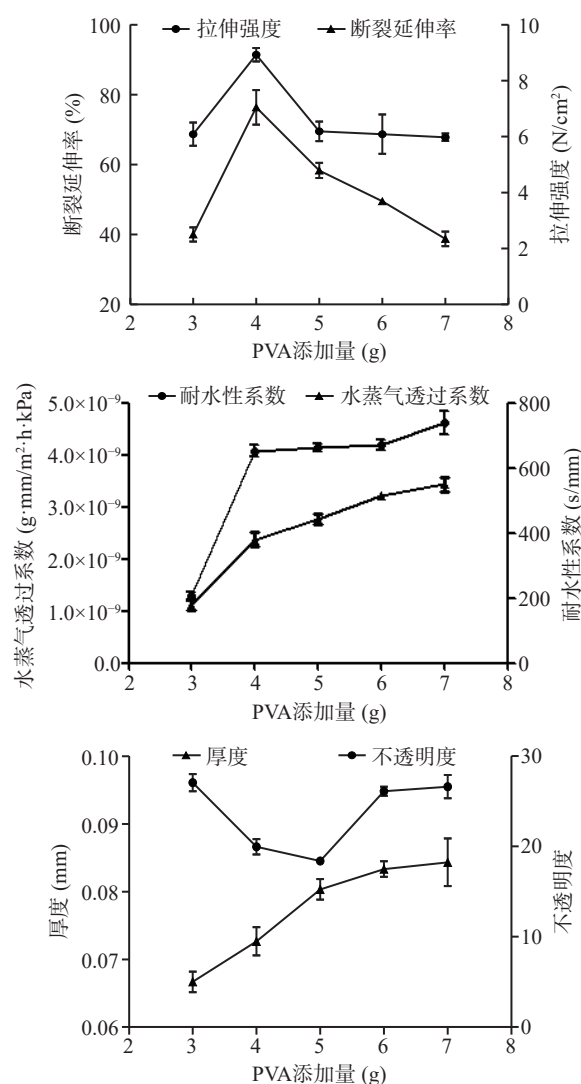


图 1 PVA 添加量对膜性能的影响

Fig.1 Effect of PVA addition amount on film properties

2.1.2 ATEC 添加量对膜性能的影响 ATEC 添加量对膜性能的影响见图 2。从图 2 可以看出,随着 ATEC 添加量的增加,膜的水蒸气透过系数、耐水性系数、拉伸强度以及断裂延伸率均呈现先增加后降低的趋势。而厚度以及不透明度则先降低后增加。当 ATEC 添加量为 4 g 时,膜的耐水性系数最高,达到 678.31 s/mm,断裂延伸率最高,达到 79.35%,拉伸强度最高,达到 11.37 N/cm²,水蒸气透过系数最低,达到 2.30×10^{-9} g·mm/m²·h·kPa,不透明度最低,为 14.74。综合来看,ATEC 添加量为 4 g 时膜的综合性能最佳。

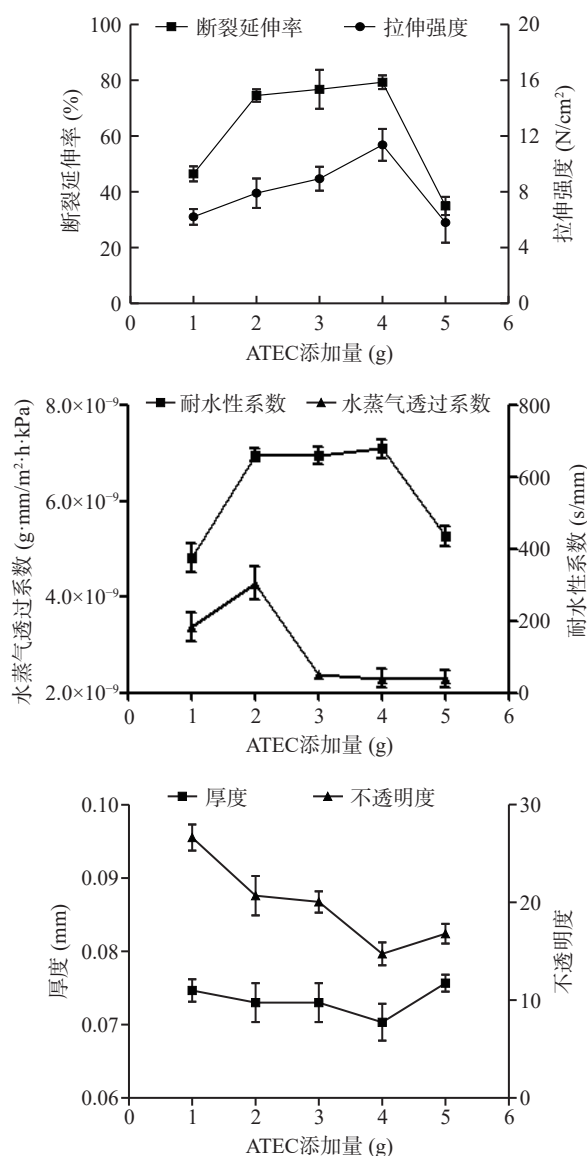


图2 ATEC添加量对膜性能的影响
Fig.2 Effect of ATEC addition amount on film properties

2.1.3 金针菇水提取物添加量对膜性能的影响 金针菇水提取物对复合膜性能的影响如图3所示。从图3可以看出,随着金针菇水提取物添加量的增加,膜的拉伸强度、断裂延伸率以及水蒸气透过系数均呈先上升后下降的趋势。厚度、不透明度则随着金针菇水提取物添加量的增加而增大,耐水性系数随着金针菇水提取物添加量的增加而明显下降。当金针菇水提取物添加量为4 g时,膜的拉伸强度最高,达到19.34 N/cm²,断裂延伸率最高,达到96.98%,膜的不透明度为14.44,水蒸气透过系数为 $1.39 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$,为最低值的105.30%,厚度为0.0755 mm,耐水性系数为433.70 s/mm,达到最高值的59.35%。当金针菇水提取物添加量为1 g时,虽然其厚度、不透明度最低,耐水性系数最高,但是其拉伸强度仅为最高值的46.84%,断裂延伸率为最高值的54.99%,水蒸气透过系数为最低值的128.32%。综合来看,金针菇水提取物添加量为4 g时膜的综合性能最佳。

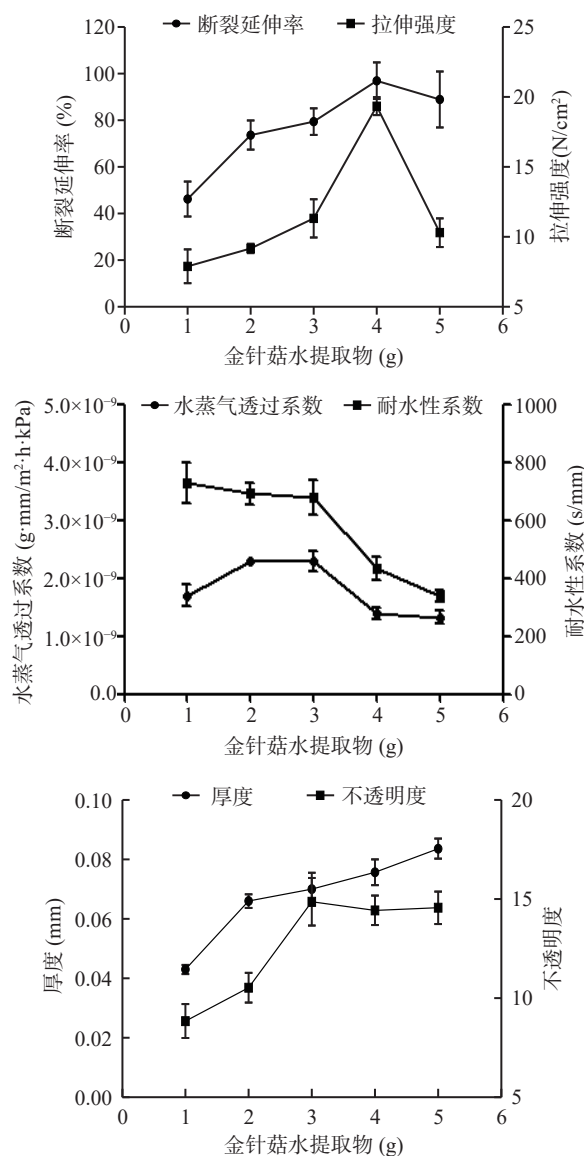


图3 金针菇水提取物添加量对膜性能的影响
Fig.3 Effect of enoki mushroom aqueous extract addition amount on film properties

2.1.4 干燥温度对膜性能的影响 干燥温度对复合膜性能的影响如图4所示。从图4可以看出,随着干燥温度的升高,膜的拉伸强度、断裂延伸率以及耐水性系数均呈先上升再下降的趋势。厚度、不透明度及水蒸气透过系数则均呈现先下降再上升的趋势。当温度为60℃时,膜的断裂延伸率最高,达到94.61%,不透明度最低,为14.97,水蒸气透过系数最低,达到 $1.39 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{mm} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$,厚度为0.0713 mm,是最低值的100.99%,拉伸强度为19.85 N/cm²,是最高值的86.87%,耐水性系数为432.09 s/mm,是最高值的98.99%。综合来看,干燥温度为60℃时膜的综合性能最好。

2.1.5 干燥时间对膜性能的影响 干燥时间对复合膜的影响如图5所示。从图5可以看出,随着干燥时间的延长,膜的拉伸强度、断裂延伸率以及厚度均呈先上升后下降的趋势。不透明度及水蒸气透过系数则呈现先下降后上升的趋势。膜的耐水性系数随

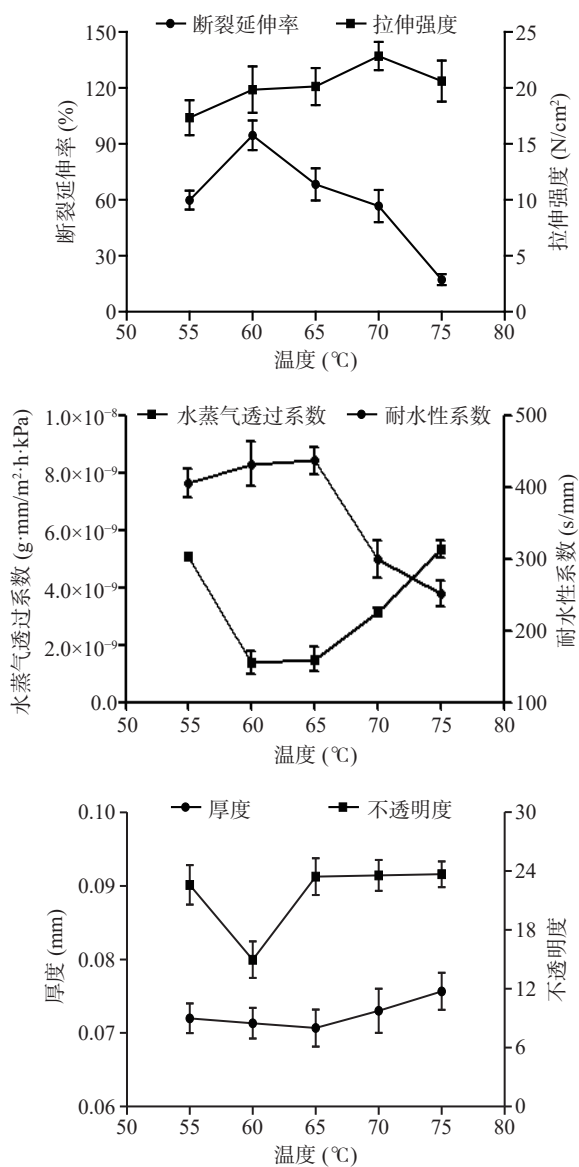


图4 干燥温度对膜性能的影响

Fig.4 Effect of drying temperature on film properties

干燥时间的延长而增大。当干燥时间为 3.5 h 时,膜的拉伸强度最高,达到 27.81 N/cm²,断裂延伸率为 87.98%,为最高值的 92.41%,耐水性系数为 542.21 s/mm,为最高值的 92.15%,水蒸气透过系数为 1.40×10^{-9} g·mm/m²·h·kPa,不透明度为 20.60,厚度为 0.0627 mm。与干燥时间为 3 h 相比时,厚度降低了 10%,拉伸强度提高了 43.87%,耐水性系数提高了 23.37%。综合来看,干燥时间为 3.5 h 时膜综合性能更佳。

2.2 PVA-金针菇水提取物复合膜物理性能指标综合评价

2.2.1 主成分分析 将 25 组单因素实验数据进行标准化处理后,利用 IBM SPSS Statistics 19 对厚度、不透明度、拉伸强度、断裂延伸率、耐水性系数及水蒸气透过系数 6 个指标进行主成分分析,第一主成分 F1 的特征值为 3.528,第二主成分 F2 的特征值为 1.058,方差贡献率分别为 58.803% 和 17.633%,累

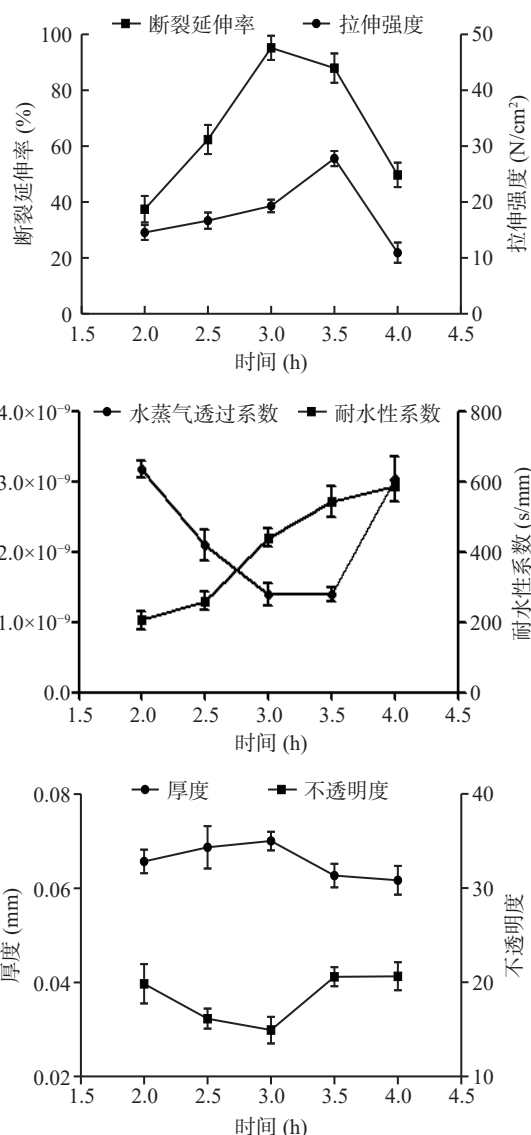


图5 干燥时间对膜性能的影响

Fig.5 Effect of drying time on film properties

计方差贡献率为 76.436%,已包含样品中的绝大部分信息,证明主成分 F1、F2 可以反映复合膜物理性能指标的信息,结果见表 3。

表3 主成分特征值及贡献率
Table 3 Eigenvalues and contribution rate of principal component

主成分	特征值 λ_i	方差贡献率 (%)	累计方差贡献率 (%)
1	3.528	58.803	58.803
2	1.058	17.633	76.436
3	0.645	10.746	87.182
4	0.397	6.617	93.800
5	0.260	4.337	98.136
6	0.112	1.864	100.000

因子载荷数是用来描述各指标对主成分的影响。本研究中 6 个影响因子的载荷数和因子系数见表 4。

2.2.2 PVA-金针菇水提取物复合膜的物理性能综合评价 复合膜综合性能评价利用 IBM SPSS Statis-

表 4 主成分 F1、F2 的因子载荷和因子系数
Table 4 Factor loads and factor coefficients for principal components F1 and F2

因子	主成分F1		主成分F2	
	因子载荷数A ₁	因子系数U ₁	因子载荷数A ₂	因子系数U ₂
厚度	0.868	0.462	0.333	0.324
不透明度	0.817	0.435	0.510	0.496
拉伸强度	0.812	0.432	0.058	0.056
断裂延伸率	0.787	0.419	-0.052	-0.050
耐水性系数	0.718	0.382	-0.453	-0.440
水蒸气透过系数	-0.560	-0.300	0.690	0.671

tics 19 软件对拉伸强度、断裂延伸率等多项指标进行主成分分析,确定各指标的权重。因拉伸强度、断裂延伸率及耐水性系数 3 个指标越大指征的性能越好,因此属于正相关指标。厚度、不透明度及水蒸气透过系数 3 个指标越小指征的性能越好,因此属于负相关指标。对其进行归一化处理,综合得分模型中的系数按下式计算:

$$Z = \frac{58.803A_1 + 17.633A_2}{76.436}$$

各指标权重按下式计算:

$$X = \frac{Z_i}{\text{SUM}(Z_1 : Z_6)}$$

计算结果见表 5,最终建立评价膜性能综合得分的数学模型为 $Y=0.18P_1+0.19P_2+0.15P_3+0.14P_4+0.17P_5+0.16P_6$ 。

表 5 综合得分模型中的系数及指标权重
Table 5 Coefficients and metric weights in the composite model score

指标P _i	综合得分模型中的系数Z _i	指标权重
厚度	0.43	0.18
不透明度	0.45	0.19
拉伸强度	0.35	0.15
断裂延伸率	0.33	0.14
耐水性系数	0.40	0.17
水蒸气透过系数	0.39	0.16

2.3 响应面试验结果分析

2.3.1 响应面试验结果 PVA-金针菇水提物复合膜制备响应面试验设计及结果见表 6。

2.3.2 方差分析结果 运用 Design-Expert 11 对表 6 数据进行方差分析,分析结果见表 7。

从表 7 可以看出该模型显著($P<0.05$),失拟项为不显著($P>0.05$),即所选的模型可靠。其中 PVA 添加量、ATEC 添加量、金针菇水提物添加量、干燥温度及干燥时间的 P 值均小于 0.05,因此都显著,各因素之间的交互影响表现为显著的有 PVA 添加量-金针菇水提物添加量、ATEC 添加量-干燥温度、ATEC 添加量-干燥时间、金针菇水提物添加量-干燥温度、金针菇水提物添加量-干燥时间。

表 6 响应面试验设计及结果
Table 6 Response surface experimental design and results

试验号	A PVA 添加量(g)	B ATEC 添加量(g)	C 金针菇水提物添加量(g)	D 干燥温度(℃)	E 干燥时间(h)	综合得分
1	3	3	4	60	3.5	49.21
2	5	3	4	60	3.5	51.48
3	3	5	4	60	3.5	51.30
4	5	5	4	60	3.5	41.79
5	4	4	3	55	3.5	26.50
6	4	4	5	55	3.5	54.90
7	4	4	3	65	3.5	80.16
8	4	4	5	65	3.5	39.45
9	4	3	4	60	3	40.53
10	4	5	4	60	3	60.32
11	4	3	4	60	4	75.53
12	4	5	4	60	4	38.52
13	3	4	3	60	3.5	62.84
14	5	4	3	60	3.5	21.27
15	3	4	5	60	3.5	20.87
16	5	4	5	60	3.5	53.31
17	4	4	4	55	3	68.70
18	4	4	4	65	3	81.61
19	4	4	4	55	4	78.87
20	4	4	4	65	4	83.83
21	4	3	3	60	3.5	34.26
22	4	5	3	60	3.5	22.98
23	4	3	5	60	3.5	21.10
24	4	5	5	60	3.5	21.87
25	3	4	4	55	3.5	70.40
26	5	4	4	55	3.5	67.67
27	3	4	4	65	3.5	80.26
28	5	4	4	65	3.5	70.23
29	4	4	3	60	3	65.39
30	4	4	5	60	3	32.32
31	4	4	3	60	4	45.05
32	4	4	5	60	4	60.94
33	3	4	4	60	3	65.84
34	5	4	4	60	3	59.60
35	3	4	4	60	4	77.87
36	5	4	4	60	4	61.31
37	4	3	4	55	3.5	61.71
38	4	5	4	55	3.5	37.92
39	4	3	4	65	3.5	58.89
40	4	5	4	65	3.5	70.71
41	4	4	4	60	3.5	98.83
42	4	4	4	60	3.5	101.57
43	4	4	4	60	3.5	98.40
44	4	4	4	60	3.5	98.39
45	4	4	4	60	3.5	101.14
46	4	4	4	60	3.5	103.12

模型 R^2 、校正 R^2 及预测 R^2 分别为 0.9897、0.9814 和 0.9607,并且预测 R^2 与校正 R^2 数值相差极小,信噪比为 35.7392(>4),因此回归方程拟合度较高,准确度高,试验误差小,故此模型可以用来对 PVA-金针菇水提物复合膜的工艺条件进行优化以及预测。影响因子的最终方程式为多元二次回归方程模型:综合得分=100.24-3.25×A-2.96×B-3.35×C+6.15×D+2.98×E-2.94×AB+18.50×AC-1.83×AD-2.58×AE+3.01×BC+8.90×BD-14.20×BE-17.28×CD+12.24×CE-1.99×DE-19.83×A²-33.76×B²-40.01×C²-9.29×D²-12.25×E²。

表 7 响应面二次模型方差分析

Table 7 Analysis of variance of quadratic models of response surfaces

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值
模型	25338.97	20	1266.95	120.04	<0.0001
A-PVA添加量	168.53	1	168.53	15.97	0.0005
B-ATEC添加量	139.83	1	139.83	13.25	0.0012
C-金针菇水提物添加量	180.02	1	180.02	17.06	0.0004
D-干燥温度	606.00	1	606.00	57.42	<0.0001
E-干燥时间	141.64	1	141.64	13.42	0.0012
AB	34.67	1	34.67	3.28	0.082
AC	1369.12	1	1369.12	129.72	<0.0001
AD	13.33	1	13.33	1.26	0.2717
AE	26.61	1	26.61	2.52	0.1249
BC	36.27	1	36.27	3.44	0.0756
BD	317.00	1	317.00	30.03	<0.0001
BE	806.55	1	806.55	76.42	<0.0001
CD	1193.74	1	1193.74	113.10	<0.0001
CE	599.48	1	599.48	56.80	<0.0001
DE	15.80	1	15.80	1.50	0.2326
A ²	3433.54	1	3433.54	325.32	<0.0001
B ²	9948.83	1	9948.83	942.63	<0.0001
C ²	13967.16	1	13967.16	1323.36	<0.0001
D ²	752.82	1	752.82	71.33	<0.0001
E ²	1310.46	1	1310.46	124.16	<0.0001
残差	263.86	25	10.55		
失拟项	244.21	20	12.21	3.11	0.106
纯误差	19.64	5	3.93		
总误差	25602.82	45			

2.3.3 响应面图及其等高线图 图 6~图 10 分别为交互影响显著的 ATEC 添加量-干燥时间、金针菇水提物添加量-干燥温度、PVA 添加量-金针菇水提物添加量、ATEC 添加量-干燥温度和金针菇水提物添加量-干燥时间交互影响等高线图及响应面 3D 图。根据图 6~图 10 可确定两两交互影响因素的最佳水平范围分别是 ATEC 添加量在 3.78~4.09 g 之间时干燥时间在 3.48~3.70 h 之间, 金针菇水提物添加量在 3.65~4.11 g 之间时干燥温度在 59.72~64.86 °C

之间, 金针菇提取物添加量在 3.85~4.03 g 之间时 PVA 添加量在 3.73~4.05 g 之间, ATEC 添加量在 3.83~4.25 g 之间时干燥温度在 59.50~63.55 °C 之

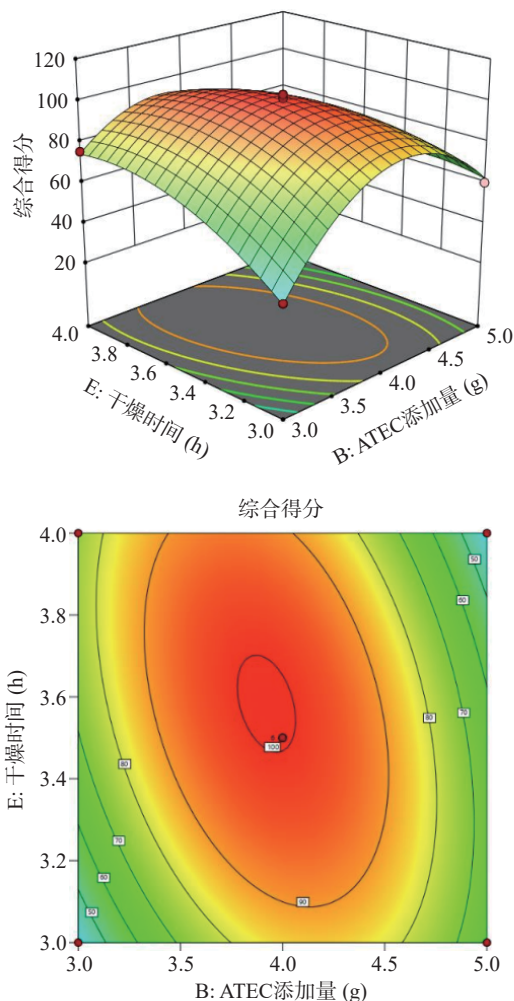


图 6 ATEC 添加量-干燥时间对复合膜综合得分影响的响应面 3D 图和等高线图

Fig.6 Response surface 3D plot and contour map of the effects of ATEC addition amount-drying time on the composite film comprehensive score

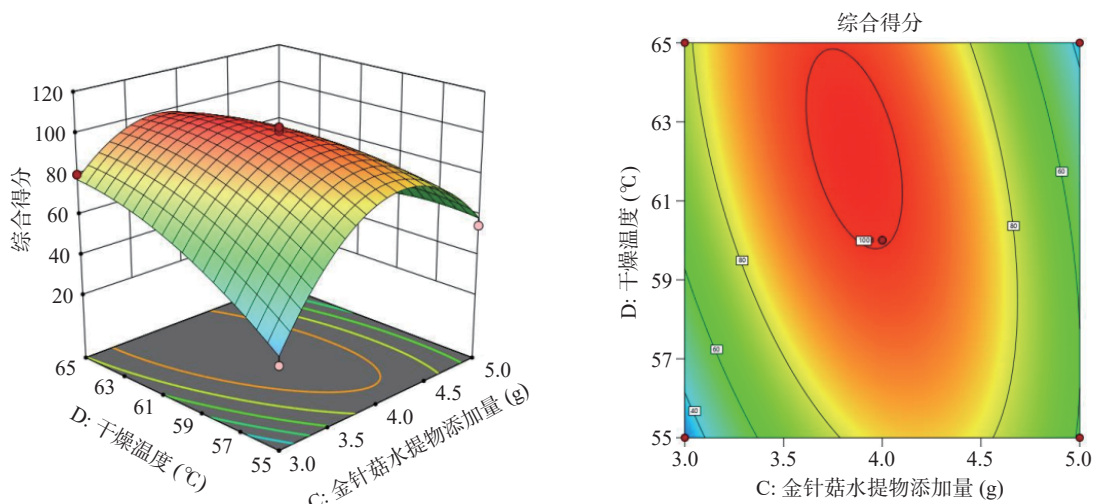


图 7 金针菇水提物添加量-干燥温度对复合膜综合得分影响的响应面 3D 图和等高线图

Fig.7 Response surface 3D plot and contour map of the effects of enoki mushroom aqueous extract addition amount-drying temperature on the composite film comprehensive score

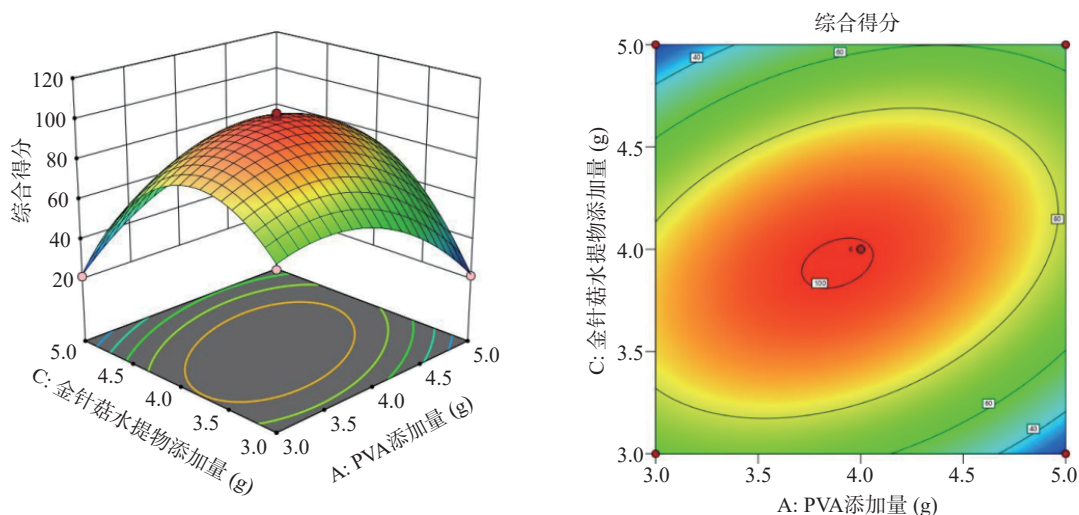


图 8 金针菇水提物添加量-PVA 添加量对复合膜综合得分影响的响应面 3D 图和等高线图

Fig.8 Response surface 3D plot and contour map of the effects of enoki mushroom aqueous extract addition amount-PVA addition amount on the composite film comprehensive score

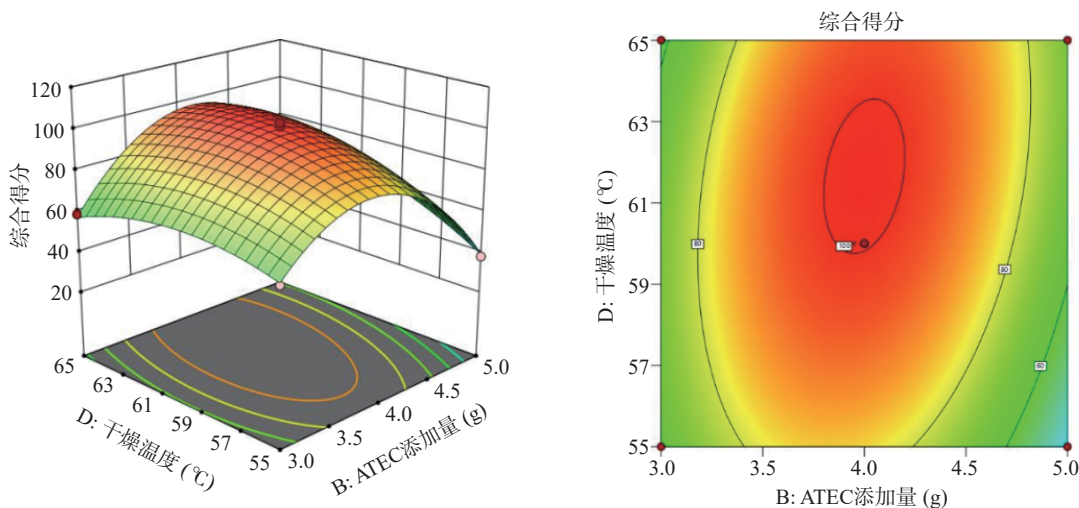


图 9 ATEC 添加量-干燥温度对复合膜综合得分影响的响应面 3D 图和等高线图

Fig.9 Response surface 3D plot and contour map of the effects of ATEC addition amount-drying temperature on the composite film comprehensive score

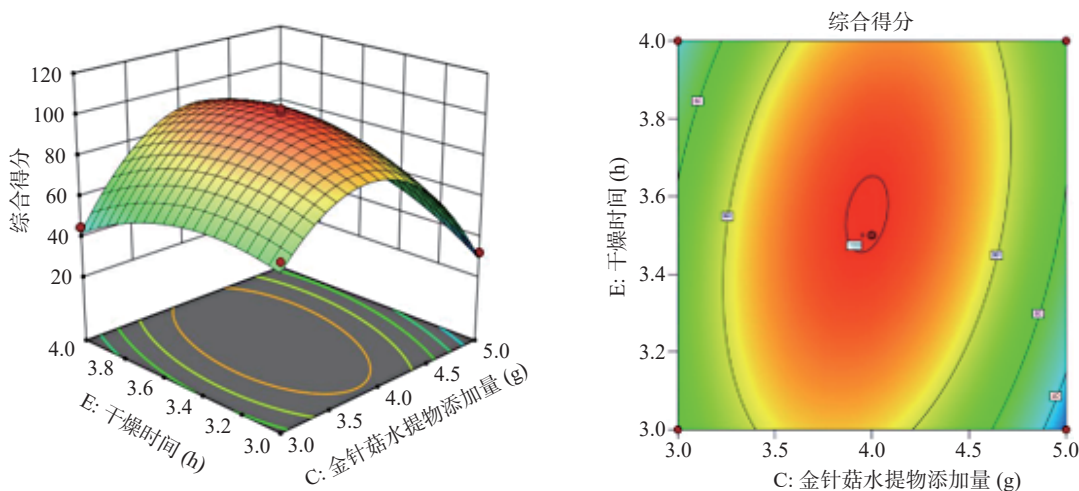


图 10 金针菇水提物添加量-干燥时间对复合膜综合得分影响的响应面 3D 图和等高线图

Fig.10 Response surface 3D plot and contour map of the effects of enoki mushroom aqueous extract addition amount-drying time on the composite film comprehensive score

间,金针菇水提取物添加量在 3.80~4.10 g 之间时干燥时间在 3.48~3.68 h 之间。

2.3.4 最优条件预测 软件预测最佳条件为 PVA 添加量 4.033 g、ATEC 添加量 4.005 g、金针菇水提取物添加量 3.871 g、干燥温度 62.245 ℃、干燥时间 3.507 h,复合膜性能理论综合得分为 101.67 分。为便于实际实验,按 PVA 添加量 4.0 g、ATEC 添加量 4.0 g、金针菇水提取物添加量 3.9 g、干燥温度 62 ℃、干燥时间 3.5 h 条件进行验证,重复测定三次所得膜厚度为 0.062 ± 0.002 mm、不透明度为 20.97 ± 0.39 、拉伸强度 31.76 ± 0.50 N/cm²、断裂延伸率 $97.99\% \pm 0.25\%$ 、耐水性系数 549.14 ± 0.94 s/mm、水蒸气透过系数 $1.44 \times 10^{-9} \pm 1.53 \times 10^{-11}$ g·mm/m²·h·kPa。综合得分为 102.25 ± 0.16 ,与模型预测的综合得分其相对误差为 0.57%,证明模型预测数据可信。

2.4 SME 分析复合膜微观结构

PVA-金针菇水提取物复合膜、PVA 膜横截面以及表面显微结构扫描如图 11 所示。从图 11 可以看出 PVA 膜的表面相对平坦无微孔,加入金针菇水提取物后的复合膜的表面粗糙且存在一些微孔,可能是因为金针菇水提取物的加入打破了原有的 PVA 和 ATEC 的共混体系所致^[17]。从图 11d 中可以清晰地看到复合膜的横截面虽然粗糙但内部联系紧密无空隙,这种均匀的基质代表了结构完整性,从而证明了金针菇水提取物与 PVA 交联关系较好^[18]。

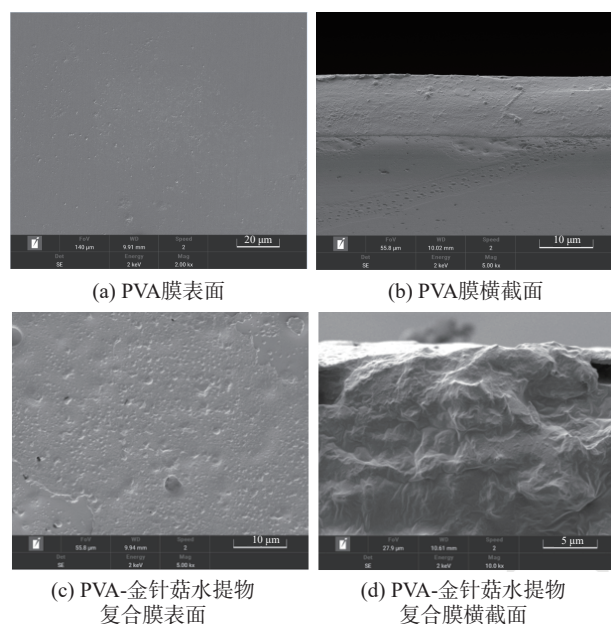


图 11 横截面以及表面显微结构扫描

Fig.11 Cross-sectional and surface microstructure scanning

2.5 FT-IR 光谱表征复合膜结构

PVA 膜、金针菇水提取物和 PVA-金针菇水提取物复合膜的红外光谱谱图见图 12。PVA 膜在 1095 cm^{-1} 和 1447 cm^{-1} 处分别为 C-O 键的伸缩振动和基本碳骨架 CH-CH₂ 的弯曲振动峰^[19]。在 3301 cm^{-1} 以及 2919 cm^{-1} 分别对应于 O-H 键的伸缩振动和-CH₂ 的

伸缩振动吸收峰^[20]。在 PVA 膜中加入金针菇水提取物后, 1447 、 1095 、 3301 和 2919 cm^{-1} 四个特征峰向低波数方向均有所偏移,表明成膜的基质 PVA 与金针菇水提取物之间存在相互作用^[19]。并且振动加强,导致部分键能增加,这可能造成复合膜的性能改变。同时, 1182 cm^{-1} 为与 PVA 结晶有关的 C-C 伸缩振动峰^[21],从图 12 可以看出,由于金针菇水提取物的加入,PVA 的结晶峰消失,说明金针菇水提取物的加入破坏了 PVA 分子链的规整度,进而改变其结晶度。此外,金针菇水提取物在 1570 cm^{-1} 左右处存在 N-H 弯曲伸缩峰,但是在复合膜中发生了减小和偏移,说明 PVA 分子中的羟基与复合膜中的氨基形成了分子间的氢键。

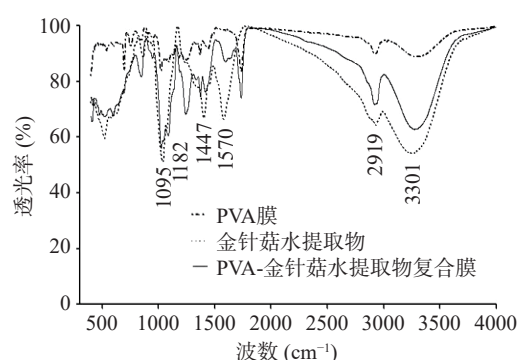


图 12 PVA 膜、金针菇水提取物和 PVA-金针菇水提取物复合膜的红外光谱

Fig.12 Infrared spectra of PVA film, enoki mushroom aqueous extract and PVA-enoki mushroom aqueous extract composite film

2.6 XRD 衍射分析复合膜微观结构

PVA 膜、复合膜均在 19.8° 显示出 PVA 的衍射峰^[22],而金针菇水提取物在 21° 左右有一个宽峰对应提取物的非晶态。若 PVA、金针菇水提取物之间没有相互作用或相互作用很弱,则在 PVA-金针菇水提取物复合膜中应该会有各自的结晶区,XRD 图谱将表现为 PVA 与金针菇水提取物图谱的简单叠加。图 13 说明复合膜中的金针菇水提取物与 PVA 混溶效果较好。

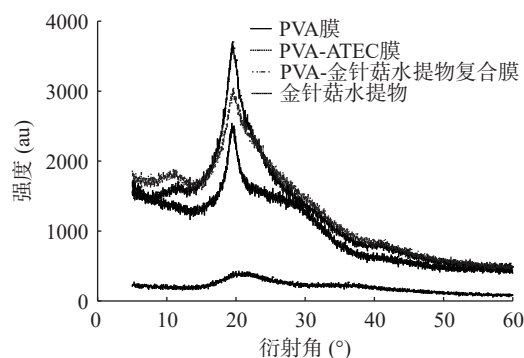


图 13 PVA 膜、金针菇水提取物和 PVA-金针菇水提取物复合膜的 X 衍射图谱

Fig.13 X diffraction pattern of PVA film, enoki mushroom aqueous extract and PVA-enoki mushroom aqueous extract composite film

2.7 PVA-金针菇水提取物复合膜在草莓保鲜中的应用实验

2.7.1 复合膜对草莓褐变度的影响 四组处理方式对草莓褐变度的影响见图 14。四个组草莓样品的褐变度随贮藏时间增加而逐渐升高。从图 14 可见空白对照组的褐变度是复合膜组的 1.623~3.33 倍,且贮藏时间越长,两组的褐变度相差越大。在贮藏的第 6 d,空白对照组草莓的褐变度达到 0.7669,而复合膜组草莓的褐变度为 0.5473,褐变度降低了 28.63%。与纯 PVA 膜组以及保鲜膜组相比,褐变度分别降低了 18.19%、14.08%。复合膜可以有效的抑制草莓贮藏期间褐变度的增加,这可能是因为复合膜的透氧性和透湿性适中,可以维持草莓的代谢速率相对平稳,减少草莓的无氧呼吸作用的强度,延缓草莓的氧化速率,从而减缓草莓的褐变,延长保鲜期^[23]。

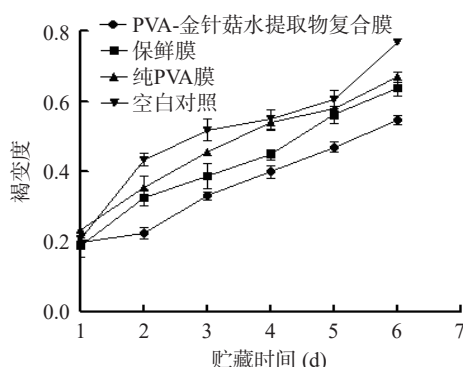


图 14 不同处理方式对草莓褐变度的影响

Fig.14 Effect of different treatments on the browning degree of strawberry

2.7.2 复合膜对草莓失重率的影响 四组处理方式对草莓失重率的影响见图 15。在四种处理方式下,草莓失重率均随贮藏时间的延长而逐渐升高。空白对照组草莓样品失重率上升最快,在第 3 d 时草莓样品的失重率已达到 18.98%。从图 15 可以看出,复合膜组草莓样品失重率增长速率低于其余 3 组,在贮藏第 3 d 时草莓样品失重率为 13.60%,比空白对照组草莓样品减少了 28.34% 水分的流失。在贮藏 6 d 后,四组草莓样品的失重率分别为 40.52%、36.27%、

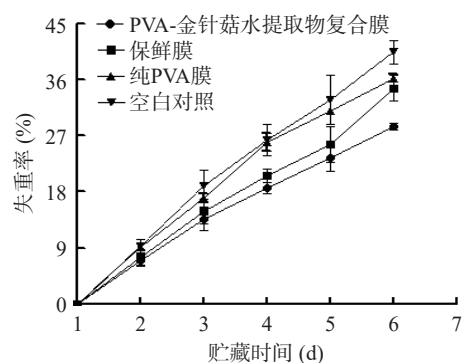


图 15 不同处理方式对草莓失重率的影响

Fig.15 Effect of different treatments on the weight loss rate of strawberry

28.51%、34.67%,与空白对照组、纯 PVA 膜组及保鲜膜组相比,复合膜组草莓失重率分别减少了 29.64%、21.40% 和 17.77% 的营养物质流失。由此可见,复合膜在一定程度上有利于减少草莓水分的丢失。这可能是因为复合膜对草莓的呼吸作用产生了一定的影响,并且抑制了霉菌等微生物的生长,从而减轻了草莓果皮的缩水失重程度,减少了对草莓果皮的侵害。而更好的表皮强度特性减少了草莓水分的损失^[24]。

2.7.3 复合膜对草莓维生素 C 的影响 四组处理方式对维生素 C 保留率的影响见图 16。在第 4 d,空白对照组和纯 PVA 组维生素 C 保留率降至 60% 以下,复合膜组维生素 C 保留率则在第 5 d 降至 64.52%,在第 6 d 降至 60% 以下。在草莓样品贮藏期间,空白对照组草莓样品维生素 C 保留率最终低至 35.87%,纯 PVA 膜组草莓样品维生素 C 保留率低至 40.12%,保鲜膜组草莓样品维生素 C 保留率降至 55.86%,复合膜组草莓样品维生素 C 保留率则为 58.98%。与空白对照组、纯 PVA 膜组及保鲜膜组维生素 C 保留率相比,复合膜处理的维生素 C 的保留率分别提高了 64.43%、47.01%、5.59%,由此可见复合膜可以减缓草莓还原型维生素 C 的氧化与流失,效果与保鲜膜相当。

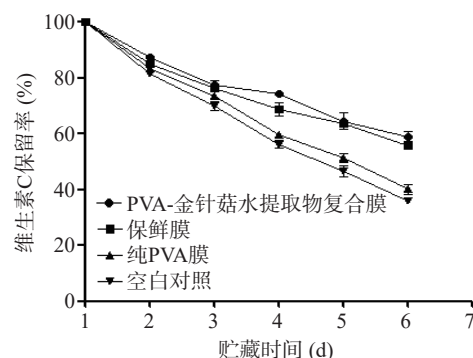


图 16 不同处理方式对草莓维生素 C 保留率的影响

Fig.16 Effect of different treatments on the retention rate of vitamin C in strawberry

2.7.4 复合膜对草莓丙二醛的影响 四组处理方式对草莓中丙二醛增加率的影响见图 17。四组草莓中丙二醛含量都处于上升趋势。在贮藏期间,不同组间丙二醛含量增加率差异较大。从图 17 可以看出,在贮藏第 6 d,空白对照组、纯 PVA 膜组、复合膜组以及保鲜膜组草莓中丙二醛增加率分别为 289.16%、224.88%、108.37%、163.32%,复合膜组丙二醛增加率较空白对照组、纯 PVA 膜组和保鲜膜组分别下降了 62.52%、51.81%、33.65%。在果蔬内,自由基在脂质产生了过氧化反应,其氧化最终产物是丙二醛^[25]。丙二醛可以加剧果蔬细胞膜的损伤。草莓内丙二醛含量的增长与草莓细胞膜脂损伤成正比,标志着草莓衰败的加剧^[26]。由此可见,PVA-金针菇水提取物复合膜能够抑制草莓丙二醛含量的增加,保护草莓细胞膜脂,减少过氧化反应,从而延缓草莓的腐败,延长保鲜期。

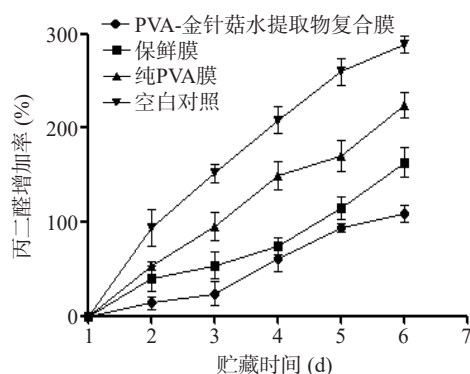


图 17 不同处理方式对草莓丙二醛增加率的影响

Fig.17 Effect of different treatments on the growth rate of malondialdehyde in strawberry

3 结论

本文以 PVA 为基质通过添加金针菇水提取物共混制备 PVA-金针菇水提取物复合膜。通过主成分分析对复合膜性能进行综合得分评价,响应面优化复合膜制备最佳条件为 PVA 添加量 4.0 g、ATEC 添加量 4.0 g、金针菇水提取物添加量 3.9 g、干燥温度 62 ℃、干燥时间 3.5 h,复合膜性能综合得分为 102.25±0.16。傅里叶变换红外光谱、X 射线衍射以及显微结构扫描分析显示复合膜的基质 PVA 与金针菇水提取物之间存在相互作用,两者之间存在氢键。金针菇水提取物与 PVA 的交联性较好。利用该膜包裹草莓在 20 ℃ 储藏 6 d,与空白对照组相比,复合膜包裹的草莓褐变度降低 28.63%,失重率降低 29.64%,维生素 C 保留率提高 64.43%,丙二醛增加率降低 62.52%,优化制备的复合膜显示出较好的保鲜效果。本文的研究表明添加金针菇水提取物可以改善 PVA 膜综合性能以及保鲜效果,以金针菇水提取物制备可降解复合膜用于草莓的防腐保鲜具有较好的应用前景。

© The Author(s) 2024. 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] PIRSA S, MAHMUDI M, EHSANI A. Biodegradable film based on cress seed mucilage, modified with lutein, maltodextrin and alumina nanoparticles: Physicochemical properties and lutein controlled release[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 224: 1588–1599.

[2] 张钰. 可得然多糖/聚乙烯醇共混膜的制备及其在冷鲜肉保鲜中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2019. [ZHANG Y. Preparation of curdlan and polyvinyl alcohol blending films and its application in chilled meat preservation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.]

[3] 陶海燕, 赵丽凤, 陈刚, 等. 富含苹果皮根皮素壳聚糖-聚乙烯醇抗氧化保鲜膜的研制[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2022, 56(4): 648–655. [TAO H Y, ZHAO L F, CHEN G, et al. Preparation of chitosan-PVA composite membranes containing phloretin and used as antioxidant film[J]. Journal of Central China

Normal University (Nature Science), 2022, 56(4): 648–655.]

[4] PIRSA S, SANI I K. Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100789.

[5] PIRSA S, ASADI S. Innovative smart and biodegradable packaging for margarine based on a nano composite polylactic acid/lycopene film[J]. Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2021, 38(5): 856–869.

[6] 刘启燕, 戚俊, 王卓仁, 等. 我国金针菇工厂化生产现状与思考[J]. 中国食用菌, 2021, 40(12): 83–88, 92. [LIU Q Y, QIE J, WANG Z R, et al. Current situation and thinking of *Flammulina filiformis* in industrialized production in China[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(12): 83–88, 92.]

[7] 李晨, 肖林刚, 胡亚鹏, 等. 金针菇提取物不同组分的抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 5–9. [LI C, XIAO L G, HU Y P. Antioxidant activity of *Flammulina velutipes* with different polarities[J]. Food Research and Development, 2016, 37(23): 5–9.]

[8] 李家辉. SPI/PVA/MMT 复合膜的制备及其在金针菇、白玉菇保鲜中的应用[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018. [LI J Y. Preparation of SPI/PVA/MMT film and its application in *Flammulina velutipes* and beech mushroom[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018.]

[9] 高喜平, 王晓, 杜丽媛, 等. 多糖类天然高分子/PVA 可生物降解共混膜的研究进展[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 74–79, 88. [GAO X P, WANG X, DU L Y, et al. Research progress in polysaccharide nature polymer/PVA biodegradable blend films[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 74–79, 88.]

[10] YANG H, WANG J, YANG F X, et al. Active packaging films from ethylene vinyl alcohol copolymer and clove essential oil as shelf life extenders for grass carp slice[J]. Packaging Technology & Science, 2016, 29(7): 383–396.

[11] 赵晓彤, 徐丽娜, 张宏, 等. 超声辅助提高大豆蛋白纳米复合膜包装性能及其保鲜应用[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 230–237. [ZHAO X T, XU L N, ZHANG H, et al. Ultrasonic treatment for improved properties of soybean protein nanocomposite packaging film and its application in preservation of cherry tomatoes[J]. Food Science, 2020, 41(19): 230–237.]

[12] 成军, 刘群, 高亚惠, 等. 聚乙烯醇/壳聚糖/芒果皮提取物复合膜的制备与表征[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 95–102. [CHENG J, LIU Q, GAO Y H, et al. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol/chitosan/mango peel extract composite film[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 95–102.]

[13] 张万利, 王沛芸, 谭幼玲, 等. 物理提取法对金针菇提取物营养及风味的影响[J]. 中国食品添加剂, 2012, 115(6): 181–185. [ZHANG W L, WANG P Y, TAN Y L, et al. The effect of physical extracting method on the nutrition and flavor of *Flammulina velutipes* extract[J]. China Food Additives, 2012, 115(6): 181–185.]

[14] 李悦, 李晓娇, 张云娟, 等. 葛根淀粉可食膜的制备及其性能研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 108–115. [LI Y, LI X J, ZHANG Y J, et al. Preparation and physical properties of *Pueraria lobata* starch edible film[J]. Food Research and Development, 2021, 42(12): 108–115.]

[15] 徐愉聪, 张艳娜, 张晓虎, 等. 南五味子木脂素复合涂膜液在草莓保鲜中的应用[J]. 农学报, 2022, 12(10): 35–43, 86. [XU

- Y C, ZHANG Y N, ZHANG Y H, et al. Application of *Kadsura longipedunculata* lignan compound coating solution in strawberry preservation[J]. *Journal of Agriculture*, 2022, 12(10): 35–43, 86.]
- [16] 李新明, 郭霄飞, 郭尚. 壳聚糖、淀粉、苹果多酚复合膜对双孢蘑菇保鲜效果的影响[J]. *北方园艺*, 2022(15): 98–105. [LI X M, GUO X F, GUO S. Effects of chitosan/starch/apple polyphenol composite film on fresh-keeping effect of *Agaricus bisporus*[J]. *Northern Horticulture*, 2022(15): 98–105.]
- [17] 张群利, 马瑞博, 崔琳琳. 聚乙烯醇/淀粉/凤仙透骨草提取物复合膜的制备及性能[J/OL]. *精细化工*. [2023-5-16]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20230052>. [ZHANG Q L, MA R B, CUI L L. Preparation and properties of polyvinyl alcohol/starch/fenugreek turbinado extract composite films[J]. *Fine Chemicals*. [2023-5-16]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20230052>.]
- [18] ZEHRA K, NAWAB A, ALAM F, et al. Development of novel biodegradable water chestnut starch/PVA composite film. Evaluation of plasticizer effect over physical, barrier, and mechanical properties[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(3): 16334–16346.
- [19] 邹小波, 蒋彩萍, 张俊俊, 等. 紫薯花青素与淀粉/PVA 复合膜的制备与表征[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(1): 148–153, 110. [ZOU X B, JIANG C P, ZHANG J J, et al. Preparation and characterization of starch/PVA composite films incorporated with anthocyanins of purple sweet potato[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(1): 148–153, 110.]
- [20] 邹小波, 王圣, 石吉勇, 等. 天然花青素提取物与壳聚糖明胶复合膜的制备和表征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 294–300. [ZOU X B, WANG S, SHI J Y, et al. Preparation and characterization of chitosan/gelatin composite films incorporated with four natural pigments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 294–300.]
- [21] 闫秀玲. 辐照聚乙烯醇的红外谱图分析[J]. *伊犁师范学院学报(自然科学版)*, 2010, 13(1): 35–37. [YAN X L. The infrared spectra of irradiated PVA analysis[J]. *Journal of Yili Normal University (Nature Science Edition)*, 2010, 13(1): 35–37.]
- [22] CHEN Y, CAO X D, PETER R C. Comparative study on the films of poly (vinyl alcohol)/pea starch nanocrystals and poly (vinyl alcohol)/native pea starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 73(1): 8–17.
- [23] 程丹. 猴头菇褐变原因及其保鲜技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013. [CHENG D. Study on browning reason of *Hericium erinaceus* and fresh-keeping technology of *Hericium erinaceus* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.]
- [24] BOZKURT F, TORNU F, TOKER O S, et al. Effect of vaporized ethyl pyruvate as a novel preservation agent for control of post-harvest quality and fungal damage of strawberry and cherry fruits[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 1044–1049.
- [25] 李朋超, 孟陆丽, 程谦伟, 等. 不同温度对香蕉果实丙二醛、呼吸速率和能量代谢影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(9): 152–157. [LI P C, MENG L L, CHEN Q W, et al. Effects of different temperature on malondialdehyde respiration rate and energy metabolism of banana fruits[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(9): 152–157.]
- [26] 马雪, 胡亚哲. 细胞凋亡和丙二醛在长时间大强度运动模型大鼠骨骼肌中的表达[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(12): 1928–1933. [MA X, HU Y Z. Cell apoptosis and expression of malondialdehyde in the skeletal muscle in a model rat undergoing long-term and high-intensity exercise[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2018, 22(12): 1928–1933.]