

聚乙烯醇—纳米银膜制备及在猴头菇保鲜中的应用

张雪松 洪 意 顾蓉蓉 高大响 李嘉欣

(江苏农林职业技术学院茶与食品科技学院,江苏 句容 212400)

摘要: [目的] 开发新型包装膜,延长果蔬货架期,提高金针菇利用水平。[方法] 以金针菇水提取物作为还原剂,聚乙烯醇(PVA)为分散剂,硝酸银溶液作为银来源绿色制备纳米银(AgNPs),制备具有疏水表面的PVA-AgNPs复合膜,并用于猴头菇保鲜。[结果] AgNPs的最佳制备条件为pH 13、金针菇水提取物添加量2 g、PVA添加量2 g、硝酸银溶液终浓度0.20%、微波时间60 s。FT-IR、SEM、TEM、XRD及接触角分析显示制备的AgNPs有明显的标准银晶态衍射峰,与成膜基质PVA之间存在作用力,并较好地分散在其中。制备的复合膜成功构建了疏水表面,其接触角为137.3°。[结论] 通过猴头菇贮藏期间的失重率、维生素C含量、褐变度、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的测定,制备的PVA-AgNPs复合膜可以提高猴头菇保鲜贮藏品质,显示出较好的保鲜效果,具有潜在应用前景。

关键词: 猴头菇;金针菇水提取物;纳米银;聚乙烯醇

Preparation of PVA-silver nanoparticle composite film and application in *Hericium erinaceus* preservation

ZHANG Xuesong HONG Yi GU Rongrong GAO Daxiang LI Jiaxin

(College of Tea and Food Science and Technology, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong, Jiangsu 212400, China)

Abstract: [Objective] To develop a novel packaging film to prolong the shelf life of fruits and vegetables and improve the utilization of enoki mushroom. [Methods] Silver nanoparticles (AgNPs) were green-synthesized using enoki mushroom water extract as the reducing agent, polyvinyl alcohol (PVA) as the dispersant, and silver nitrate solution as the silver source. A PVA-AgNP composite film with a hydrophobic surface was prepared and applied for the preservation of *Hericium erinaceus*. [Results] The optimal conditions for AgNP synthesis were pH 13, 2 g of enoki mushroom water extract, 2 g of PVA, 0.20% final concentration of silver nitrate solution, and 60 s microwave treatment. FT-IR, SEM, TEM, XRD, and contact angle analyses showed that the prepared AgNPs exhibited distinct characteristic silver crystal diffraction peaks, had interactions with the PVA film matrix, and were well dispersed within it. The composite film successfully formed a hydrophobic surface with a contact angle of 137.3°. [Conclusion] During *H. erinaceus* storage, measurements of weight loss, vitamin C content, browning degree, peroxidase (POD), and catalase (CAT) activities demonstrated that the prepared PVA-AgNP composite film effectively improved preservation quality, exhibiting good preservation effects and promising potential applications.

Keywords: *Hericium erinaceus*; water extract of enoki mushroom; silver nanoparticles; polyvinyl alcohol

猴头菇是著名食药两用真菌,含有丰富的多糖、人体必需氨基酸、不饱和脂肪酸、维生素和生物碱等,具有抗癌、抗炎、增强免疫力等活性,可以预防和治疗消化系统、免疫系统等相关疾病^[1-2]。猴头菇组织含水量较高,采后

失水容易引起菌体收缩、质地变硬,在运输过程中也容易被损坏,降低品质并缩短其货架期^[3-4]。

聚乙烯醇(PVA)是一种外观为片状、絮状或粉末状的有机化合物,在降解性和生物相容性方面表现出优异的

基金项目: 江苏高校“青蓝工程”资助(2024);江苏农林职业技术学院亚夫科技创新与服务项目(编号:2024KJ04)

通信作者: 张雪松(1979—),男,江苏农林职业技术学院副教授,博士。E-mail:316375046@qq.com

收稿日期: 2025-02-11 **改回日期:** 2025-07-30

引用格式: 张雪松,洪意,顾蓉蓉,等.聚乙烯醇—纳米银膜制备及在猴头菇保鲜中的应用[J].食品与机械,2025,41(11):101-108.

Citation: ZHANG Xuesong, HONG Yi, GU Rongrong, et al. Preparation of PVA-silver nanoparticle composite film and application in *Hericium erinaceus* preservation[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 101-108.

特性,且具有优异的透气性、透湿性、透光性、柔韧性和安全性,因而在果蔬包装领域备受关注^[5]。黄若男等^[6]以PVA为基材制备了聚乙烯醇/维生素C复合保鲜膜并应用于白玉菇保鲜。李慧等^[7]以PVA为基质,采用共混法制备聚乙烯醇/纳米纤维素晶体/石榴皮多酚复合抗菌薄膜。由于PVA分子链中存在大量亲水基团(OH),耐水性较差,自身没有抗氧化或抑菌等活性,限制了其在保鲜领域的应用^[8]。Yan等^[9]研究表明,二氧化硅、纳米氧化锌等纳米填料可以显著提高PVA膜的力学性能和保鲜能力。纳米银具有优异的抗菌性能,利用天然提取物绿色合成纳米银并制备抗菌保鲜膜已成为当前研究的热点。Wu等^[10]利用壳聚糖制备的含有AgNPs的壳聚糖膜具有较好的保鲜效果。Raja等^[11]以红樱花叶提取物制备出具有较好抑菌和抗氧化性能的AgNPs。王鑫等^[12]利用甜玉米芯多糖还原合成AgNPs,并通过流延成膜制备了复合薄膜,提升了草莓采后保鲜效果。

金针菇中富含多糖、蛋白质、维生素等活性成分,具有抗氧化、抗癌、抗炎、抑菌等功效^[13]。试验拟利用金针菇水提取物中多种天然抗氧化剂作为还原剂绿色制备纳米银,并以PVA为分散剂和基质制备PVA-AgNPs复合膜,采用单因素试验探究纳米银的最佳制备工艺,通过FT-IR、SEM、TEM、XRD及接触角对制备的PVA-AgNPs复合膜结构和性能进行表征并将其应用于猴头菇的保鲜中,旨在为开发新型食品保鲜膜,提高金针菇综合利用率提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

猴头菇、金针菇:鲜食品,市售;

无水乙醇、氢氧化钠、无水磷酸二氢钠、草酸、高岭土、抗坏血酸、邻苯二甲酸氢钾:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

聚乙烯醇:1788型,上海麦克林生化科技有限公司;

硝酸银:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

愈创木酚:>99.0% GC,上海麦克林生化科技有限公司;

POD活性测试试剂盒、CAT活性测试试剂盒:北京索莱宝科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

数显恒温水浴锅:HH-2型,常州越新仪器制造有限公司;

循环水式多用真空泵:ShZ-D(III)型,郑州长城科工贸有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DGH-9030A型,上海一恒科学仪器有限公司;

高速冷冻离心机:LC-LX-hLR250D型,中国力辰科技仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV752型,北京普析通用仪器有限公司;

恒温生化培养箱:LHS-250SC型,上海齐欣科学仪器有限公司;

pH计:PHS-3C型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

磁力加热搅拌器:78-1型,常州苏瑞仪器有限公司;

微波反应器:MKX-H1CIR型,青岛迈克威微波创新有限公司;

傅里叶红外光谱仪:Spectrum 3型,珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司;

透射电子显微镜:Talos F200X S/TEM型,北京欧波同光学技术有限公司;

X-射线衍射仪:D2型,荷兰帕纳科公司;

接触角测定仪: HARKE-SPCAX2型,北京哈科试验仪器厂;

电子天平:YP-1002型,上海精密仪器仪表有限公司。

1.2 方法

1.2.1 金针菇水提取物制备 参照文献[14]。

1.2.2 AgNPs 及 PVA-AgNPs 复合膜制备 参照马璟等^[15]的方法稍作修改。将PVA溶于60 mL蒸馏水中,搅拌30 min。添加金针菇水提取物,搅拌混匀,滴加20% NaOH溶液调整pH值,添加20%硝酸银溶液,定容。将混合溶液置于微波反应器中反应一段时间,溶液颜色从淡黄色变为红棕色则反应完成,稀释8倍后,测定350~500 nm处吸收曲线。

在培养皿中平整地放入适应培养皿的荷叶,倒入适量道康宁PDMS胶水,24 h自然干燥后揭膜。以此制备的PDMS膜为模板置于培养皿中,倒入25 mL AgNPs溶液,紫外灯照射10 min,65 °C烘箱中干燥3 h。降至室温揭膜,得PVA-AgNPs复合膜。

1.2.3 单因素试验

(1) pH: 取4 g PVA溶于60 mL蒸馏水中,搅拌30 min。添加1 g金针菇水提取物,搅拌混匀,滴加20% NaOH溶液调节溶液pH分别为10,11,12,13,14。添加20%硝酸银溶液,定容,硝酸银溶液终浓度为0.28%。将溶液置于微波反应器中反应40 s制备纳米银。反应结束后将反应液稀释8倍,测定350~500 nm处吸收曲线。

(2) PVA添加量: 分别取1,2,3,4,5 g PVA溶于60 mL蒸馏水中,搅拌30 min。添加1 g金针菇水提取物,

搅拌混匀,滴加20% NaOH溶液调节溶液pH为13。添加20%硝酸银溶液,定容,硝酸银溶液终浓度为0.28%。将溶液置于微波反应器中反应40 s制备纳米银。反应结束后将反应液稀释8倍,测定350~500 nm处吸收曲线。

(3) 金针菇水提取物添加量:取2 g PVA溶于60 mL蒸馏水中,搅拌30 min。分别添加1,2,3,4,5 g金针菇水提取物,搅拌混匀,滴加20% NaOH溶液调节溶液pH为13。添加20%硝酸银溶液,定容,硝酸银溶液终浓度为0.28%。将溶液置于微波反应器中反应40 s制备纳米银。反应结束后将反应液稀释8倍,测定350~500 nm处吸收曲线。

(4) 硝酸银溶液终浓度:取2 g PVA溶于60 mL蒸馏水中,搅拌30 min。添加2 g金针菇水提取物,搅拌混匀,滴加20% NaOH溶液调节溶液pH为13。添加20%硝酸银溶液,定容,硝酸银溶液终浓度分别为0.12%,0.16%,0.20%,0.24%,0.28%。将溶液置于微波反应器中反应40 s制备纳米银。反应结束后将反应液稀释8倍,测定350~500 nm处吸收曲线。

(5) 微波时间:取2 g PVA溶于60 mL蒸馏水中,搅拌30 min。添加2 g金针菇水提取物,搅拌混匀,滴加20% NaOH溶液调节溶液pH为13。添加20%硝酸银溶液,定容,硝酸银溶液终浓度为0.20%。将溶液置于微波反应器中分别反应20,40,60,80,100 s制备纳米银。反应结束后将反应液稀释8倍,测定350~500 nm处吸收曲线。

1.2.4 猴头菇保鲜试验 将24个新鲜猴头菇分成3组:A组不覆盖任何膜,作为空白对照;B组用所制备的构建了疏水表面的PVA-AgNPs复合膜包裹(疏水面朝内);C组为未构建疏水面的PVA-AgNPs复合膜包裹。包裹后的猴头菇于25 °C恒温箱中贮藏6 d,每天测定猴头菇各项指标。

1.2.5 猴头菇综合指标测定

- (1) 失重率:参照文献[16]。
- (2) 褐变度:参照文献[14]。
- (3) 维生素C含量:参照GB 5009.86—2016,按式(1)计算维生素C相对含量。

$$X = \frac{X_i}{X_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X——维生素C相对含量,%;

X_i ——贮藏期间维生素C测定值,mg/100 g;

X_1 ——样品初始维生素C含量,mg/100 g。

(4) 过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性:称

取10 g猴头菇样品,加入10 mL磷酸缓冲液研磨,10 000 r/min离心10 min,取上清液。分别用POD活性测试试剂盒以及CAT活性测试试剂盒进行酶活检测,并按式(2)计算相对酶活。

$$E = \frac{X_i}{X_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

E——相对酶活,%;

X_i ——贮藏期间酶活测定值,U/(g·min);

X_1 ——样品初始酶活测定值,U/(g·min)。

1.2.6 复合膜结构性能表征

(1) 傅里叶变换红外光谱(FT-IR):扫描范围为4 000~500 cm⁻¹,分辨率为4 cm⁻¹。

(2) 透射电子显微镜(TEM):使用透射电子显微镜进行内部微观测试分析。

(3) X射线衍射(XRD):衍射角为5°~60°,扫描速度为2(°)/min。

(4) 接触角:使用接触角测量仪测定复合膜表面的接触角。

1.3 数据处理

每个试验进行3次取平均值,采用GraphPad Prism 5软件作图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 pH对纳米银形成的影响 由图1可知,随着pH值的增加,产物在406 nm处的紫外吸收峰先增大后减小,在pH 13时峰值达到最大。在406 nm处出现一个较强的AgNPs特征吸收峰,说明金针菇水提取物将硝酸银还原成AgNPs。pH值过高会导致峰值下降,可能是由于过高的pH值使得硝酸银更容易生成氧化银,导致反应液不稳定^[17~18]。因此,pH为13时反应效果最好。

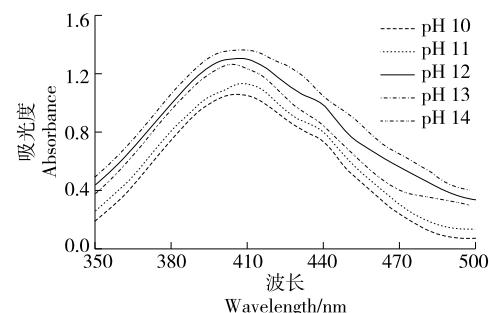


图1 pH对纳米银紫外可见光谱的影响

Figure 1 Effect of pH on UV-Vis spectrum of silver nanoparticles

2.1.2 PVA 添加量对纳米银形成的影响 由图 2 可知, 随着 PVA 添加量的增加, AgNPs 的特征吸收峰峰值先增大后减小。当 PVA 添加量为 2 g 时, 吸收峰峰值最大。PVA 在 AgNPs 的制备过程中可以起到阻止 AgNPs 颗粒团聚的作用, PVA 加入量过高会吸附 AgNPs 粉体, 从而减少被还原的 AgNPs 粒子, 阻碍 AgNPs 的合成^[19]。因此, PVA 添加量为 2 g 时反应效果最好。

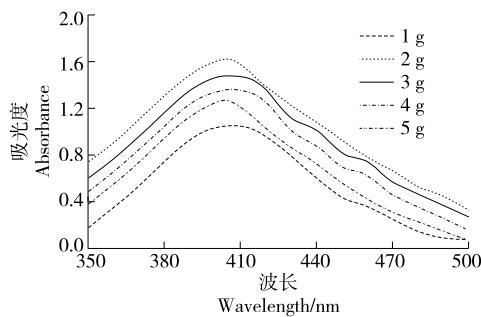


图 2 PVA 添加量对纳米银紫外可见光谱的影响

Figure 2 Effect of PVA addition on UV-Vis spectrum of silver nanoparticles

2.1.3 金针菇水提取物添加量对纳米银形成的影响 由图 3 可知, 随着金针菇水提取物添加量的增加, AgNPs 的特征吸收峰峰值先增大后减小。当金针菇水提取物添加量为 2 g 时, 吸收峰峰值最大。金针菇水提取物添加量较少时, 溶液中还原剂含量较低, 不能完全将硝酸银中的银离子还原为纳米银; 金针菇水提取物添加量较高时, 可能是因为提取物浓度的增加, 纳米银颗粒分布的均匀性变差, 出现纳米银团聚现象而产生沉淀, 导致峰值降低^[20]。因此, 金针菇水提取物添加量为 2 g 时反应效果最好。

2.1.4 硝酸银溶液终浓度对纳米银形成的影响 由图 4 可知, 随着硝酸银溶液终浓度的增加, AgNPs 的特征吸收

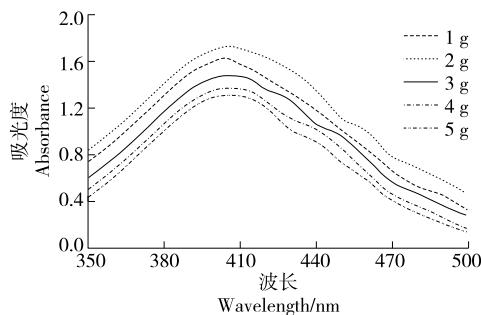


图 3 金针菇水提取物添加量对纳米银紫外可见光谱的影响

Figure 3 Effect of the amount of water extract of enoki mushroom on UV-Vis spectrum of silver nanoparticles

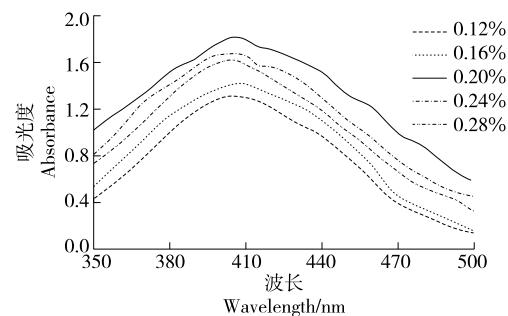


图 4 硝酸银终浓度对纳米银紫外可见光谱的影响

Figure 4 Effect of final concentration of silver nitrate on UV-Vis spectrum of silver nanoparticles

峰峰值先增大后减小。当硝酸银溶液终浓度为 0.20% 时, 吸收峰峰值最大。随着硝酸银溶液浓度的增加, 单位时间内会生成更多的银原子, 促进 AgNPs 晶核的形成。同时, 随着硝酸银溶液浓度的升高可供还原银离子数量增加, 也促进了更多 AgNPs 生成, 使得吸收峰变强^[21]。硝酸银溶液终浓度过高时, 新生成的 AgNPs 粒径可能变大, 且富集在有限的晶核表面形成新的晶核, 容易发生二次团聚^[22]。因此, 硝酸银溶液终浓度为 0.20% 时反应效果最好。

2.1.5 微波时间对纳米银形成的影响 由图 5 可知, AgNPs 吸收峰峰值随着微波时间的延长先增大后减小。当微波时间为 60 s 时, 吸收峰峰值最大。微波时间延长有助于 AgNPs 的生成。但过长的微波时间使得在高温下反应速率太快, 稳定剂无法包裹 AgNPs 颗粒, 容易出现二次团聚, 从而影响产量^[23]。因此, 微波时间为 60 s 时反应效果最好。

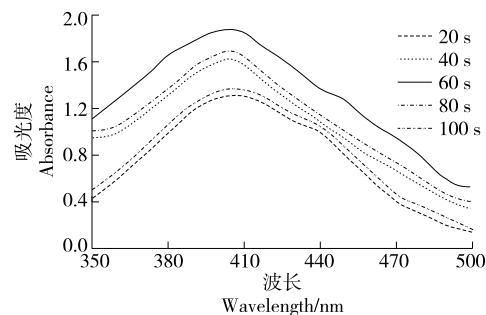


图 5 微波时间对纳米银紫外可见光谱的影响

Figure 5 Effect of microwave time on UV-Vis spectrum of silver nanoparticles

2.2 PVA-AgNPs 复合膜表征分析

2.2.1 FT-IR 分析 由图 6 可知, PVA 膜在 1085 cm^{-1} 处的峰对应 PVA 非晶区的 C—O 键的伸缩振动, 3280 cm^{-1} 处对应 O—H 键的伸缩振动, 2912 cm^{-1} 处对应—CH₂ 的

伸缩振动, 1423 cm^{-1} 处对应 $\text{CH}-\text{CH}_2$ 弯曲振动^[24]。PVA 膜中加入 AgNPs 后, 4 个特征峰向低波数方向有所偏移, 表明成膜的基质 PVA 与纳米银之间存在相互作用^[14]。复合膜在 1561 cm^{-1} 处显示 $-\text{NO}_2$ 的特征伸缩振动峰^[15]。与 PVA 膜相比, 复合膜在 1404 cm^{-1} 处的峰值变强, 说明 AgNPs 分子与成膜基质 PVA 之间存在范德华力相互作用^[25]。

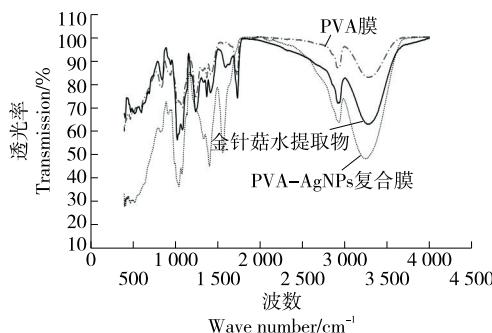


图 6 PVA 膜、金针菇水提取物和 PVA-AgNPs 的红外光谱
Figure 6 IR spectra of PVA membrane, water extract of enoki mushroom, and PVA-AgNP film

2.2.2 TEM 分析 由图 7 可知, 复合膜中 AgNPs 颗粒为球形或类球形, 颗粒尺寸为 $2\text{~}10\text{ nm}$ 。颗粒尺寸分布相对均匀, 颗粒间团聚现象较少。

2.2.3 XRD 分析 由图 8 可知, PVA 膜和 PVA-AgNPs 复合膜在衍射角为 19.6° 处显示出明显的 PVA 晶型特征峰。

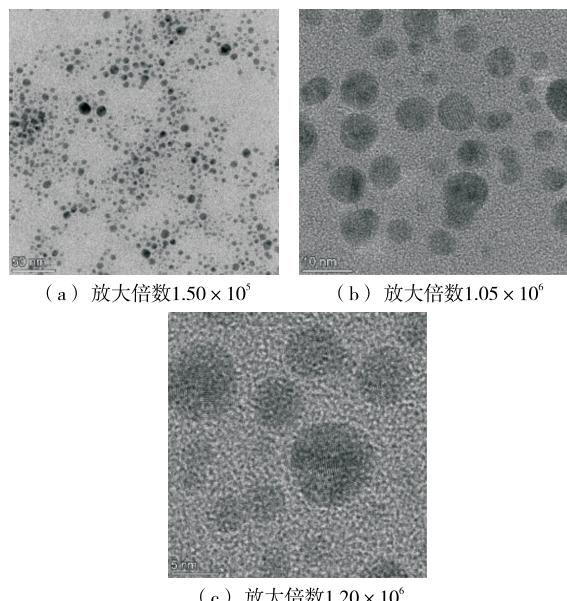


图 7 PVA-AgNPs 复合膜透射电镜

Figure 7 Transmission electron micrograph of PVA-AgNP composite film

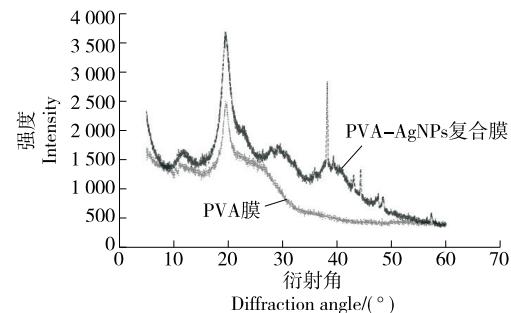


图 8 PVA-AgNPs 复合膜和 PVA 膜的 X 衍射图谱
Figure 8 X-diffraction pattern of PVA-AgNP composite and PVA films

制备的复合膜在 38.2° 、 44.3° 处产生了明显的标准银晶态衍射峰^[26]。

2.2.4 接触角分析 由图 9 可知, 与普通 PVA 膜表面亲水性的 38.7° 接触角相比, 试验制备的 PVA-AgNPs 复合膜疏水面的接触角提高到了接近超疏水表面的 137.3° , 提高了 254.78% , 疏水性明显增强, 说明试验制备的复合膜成功构造了具有较好疏水性的表面。

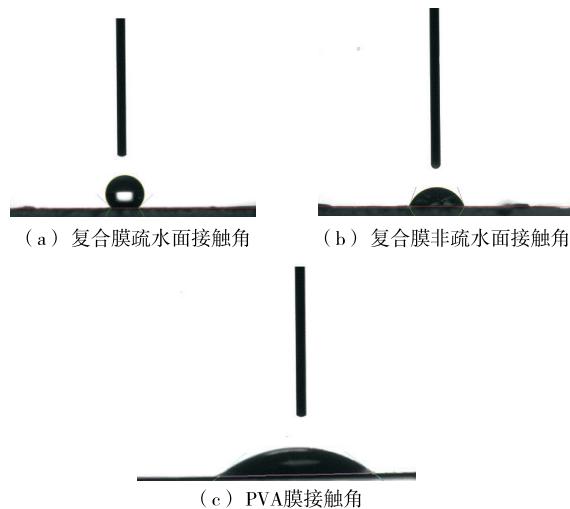


图 9 接触角图
Figure 9 Contact angle diagram

2.3 PVA-AgNPs 复合膜对猴头菇的保鲜效果

2.3.1 对失重率的影响 由图 10 可知, 贮藏期间, 猴头菇失重率均有升高。贮藏第 6 天, A 组猴头菇失重率达到了 65.47% , C 组失重率为 54.86% , B 组失重率为 35.17% , 与 A、C 组相比, B 组失重率分别降低了 35.89% 、 46.28% 。复合膜处理对样品失重率的减缓效果明显低于其他组。

2.3.2 对褐变度的影响 由图 11 可知, 贮藏期间, 3 组猴头菇褐变度均处于上升趋势。A 组的褐变度为 B 组的 $1.49\text{~}1.53$ 倍, 且贮藏时间越长, 两者的褐变度相差越大。

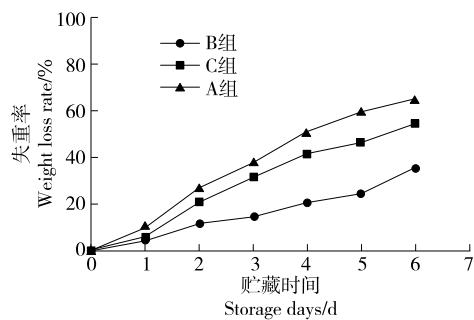


图 10 处理方式对猴头菇失重率的影响

Figure 10 Effect of different treatment methods on weight loss rate of *Hericium erinaceus*

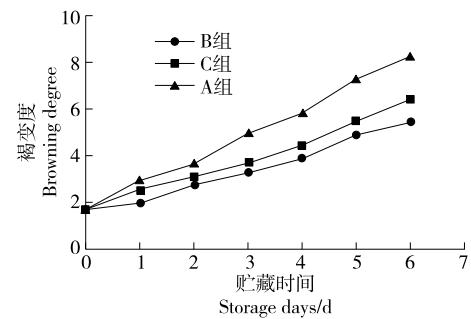


图 11 处理方式对猴头菇褐变度的影响

Figure 11 Effect of different treatments on browning of *Hericium erinaceus*

贮藏第 6 天, A 组的褐变度由 1.722 升到 8.309, 升高了 4.83 倍; C 组的由 1.728 升到 6.417, 升高了 3.71 倍; B 组的由 1.716 升到 5.467, 升高了 3.19 倍。复合膜处理对样品褐变的减缓效果远好于其他组。

2.3.3 对维生素 C 含量的影响 由图 12 可知, 贮藏期间, 猴头菇维生素 C 相对含量均呈下降趋势。贮藏第 6 天, A 组的维生素 C 相对含量下降到 23.93%, C 组的下降到 43.71%, B 组的下降到 54.33%。与 A、C 组相比, B 组的维生素 C 相对含量分别提高了 127.04% 和 24.30%。

与其他组相比, 复合膜处理可以有效减缓样品中维生素 C 的氧化与流失。

2.3.4 对 POD 酶活性的影响 由图 13 可知, 贮藏期间, 猴头菇的 POD 酶活性随着贮藏时间的延长均呈先上升后下降趋势。贮藏第 6 天, A、B、C 3 组猴头菇中 POD 酶相对酶活分别为 73.80%, 318.94%, 183.09%。与 A、C 组相比, B 组 POD 酶相对酶活分别提高了 332.17% 和 74.20%。与其他组相比, 复合膜处理样品可以使 POD 酶活处于较高水平。

2.3.5 对 CAT 酶活性的影响 由图 14 可知, 贮藏期间, 猴头菇的 CAT 酶活性随着贮藏时间的延长均呈先上升

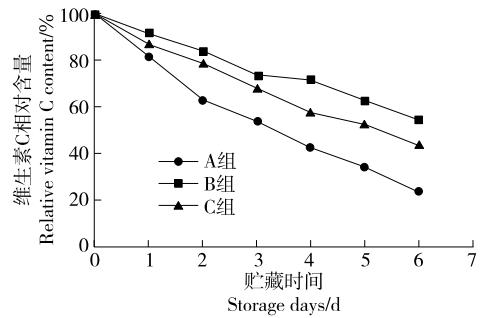


图 12 处理方式对猴头菇维生素 C 相对含量的影响

Figure 12 Effect of different treatment methods on vitamin c content of *Hericium erinaceus*

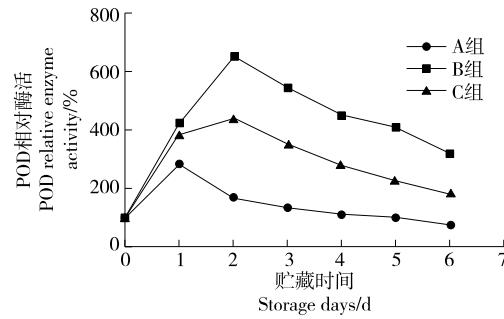


图 13 处理方式对猴头菇 POD 活性的影响

Figure 13 Effect of different treatment methods on POD activity of *Hericium erinaceus*

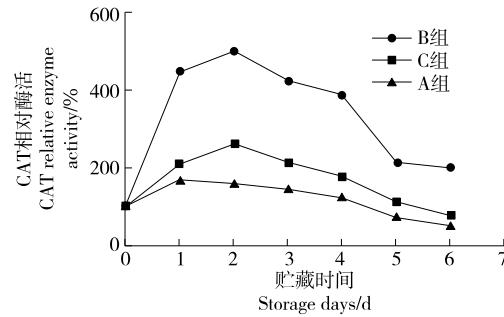


图 14 处理方式对猴头菇 CAT 活性的影响

Figure 14 Effect of different treatment methods on CAT activity of *Hericium erinaceus*

后下降趋势。贮藏第 6 天, A、B、C 3 组猴头菇中 CAT 相对酶活分别为 52.58%, 203.09%, 76.21%, 与 A、C 组相比, B 组 CAT 相对酶活分别提高了 286.25% 和 166.49%。与其他组相比, 复合膜处理样品可以使 POD 酶活处于较高水平。

3 结论

以金针菇水提取物为还原剂制备了纳米银, 以聚乙烯醇为基质制备了聚乙烯醇—纳米银复合膜, 并基于荷

叶仿生技术构建了具有较高接触角的疏水面。结果表明,纳米银的最佳制备条件为pH 13,金针菇水提取物添加量2 g,聚乙烯醇添加量2 g,硝酸银溶液终浓度0.20%,微波时间60 s。制备的复合膜包裹猴头菇25 ℃贮藏6 d,与空白对照组相比,包裹复合膜组失重率可以降低46.28%,褐变度降低34.20%,维生素C相对含量提高127.04%,过氧化物酶和过氧化氢酶相对酶活分别提高了332.17%和286.25%。制备的聚乙烯醇—纳米银复合膜可以延缓猴头菇的劣变,延长其贮藏时间。但是纳米银的加入以及疏水面的构建对于膜的拉伸强度、水蒸气透过系数、断裂延伸率等相关膜性能的影响尚未涉及,后续将对制备的复合膜进行性能测试,持续优化改进膜制备方法。

参考文献

- [1] LI H, FENG J X, LIU C, et al. Polysaccharides from an edible mushroom, *Hericium erinaceus*, alleviate ulcerative colitis in mice by inhibiting the NLRP3 inflammasomes and reestablish intestinal homeostasis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131251.
- [2] TAN Y F, MO J S, WANG Y K, et al. The ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of the genus *Hericium*[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 319: 117353.
- [3] 孙厚静, 谌金吾, 李琳琪. 猴头菇保鲜贮藏及精深加工工艺技术研究进展[J]. 中国食用菌, 2023, 42(5): 7-13.
- SUN H J, SHEN J W, LI L Q. Research progress on the fresh-keeping storage and deep processing technology of *Hericium erinaceus*[J]. Edible Fungi of China, 2023, 42(5): 7-13.
- [4] 杨永佳, 孔梵, 景赛, 等. 食用菌采后品质变化及物理保鲜技术研究进展[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 139-147.
- YANG Y J, KONG F, JING S, et al. Progress in postharvest quality change and physical preservation technologies of edible fungi[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 139-147.
- [5] ZHANG Y C, WANG Y, BAO Y H, et al. Multifunctional PVA/gelatin DN hydrogels with strong mechanical properties enhanced by Hofmeister effect[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 691: 133833.
- [6] 黄若男, 刘陈梦, 吕俊阁, 等. 聚乙烯醇/维生素C复合保鲜膜制备及其对白玉菇品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 99-106.
- HUANG R N, LIU C M, LÜ J G, et al. Preparation of polyvinyl alcohol/vitamin C composite films and its effect on quality of white *Hypsizygus marmoreus*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 99-106.
- [7] 李慧, 田家瑶, 庞姗姗, 等. 聚乙烯醇/纳米纤维素/石榴皮多酚复合抗菌薄膜性能研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 103-109, 177.
- LI H, TIAN J Y, PANG S S, et al. Study on properties of polyvinyl alcohol/nanocellulose/pomegranate peel polyphenol composite antibacterial films[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 103-109, 177.
- [8] WANG Y L, HE J W, ZOU L M, et al. High performance polyvinyl alcohol/lignin fibers with excellent mechanical and water resistance properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131244.
- [9] YAN J, WANG D, BAI T, et al. Electrospun PVA nanofibrous membranes reinforced with silver nanoparticles impregnated cellulosic fibers: morphology and antibacterial property[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2021, 37(3): 505-511.
- [10] WU Z G, HUANG X J, LI Y C, et al. Novel chitosan films with laponite immobilized Ag nanoparticles for active food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 199: 210-218.
- [11] RAJA S, RAMESH V, THIVAHARAN V. Green biosynthesis of silver nanoparticles using *Calliandra haematocephala* leaf extract, their antibacterial activity and hydrogen peroxide sensing capability[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10(2): 253-261.
- [12] 王鑫, 周卓, 岳振歌, 等. PVA-甜玉米芯多糖纳米银复合薄膜的制备及草莓保鲜应用[J]. 精细化工, 2024, 41(9): 2 018-2 030.
- WANG X, ZHOU Z, YUE Z G, et al. Preparation of PVA-sweet corncob polysaccharide nano-silver composite film and its application in strawberry preservation[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(9): 2 018-2 030.
- [13] 陆欢, 王瑞娟, 刘建雨, 等. 不同品种金针菇的营养成分分析与评价[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 69-75, 96.
- LU H, WANG R J, LIU J Y, et al. Analysis and evaluation of nutrient components of different strains of *Flammulina filiformis*[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 69-75, 96.
- [14] 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.
- ZHANG X S, LIU L, TANG Y J, 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.
- [15] 马璟, 李蔚然, 王丽杰, 等. 柠檬汁纳米银抗菌复合膜的制备工艺优化及性能研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 31-40.
- MA J, LI W R, WANG L J, et al. Preparation process optimization and performance research of lemon juice nano silver antimicrobial composite membrane[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 31-40.
- [16] 刘娅妮, 王飞宇, 孙鹏伟, 等. 物理活性包装对香菇贮藏品质、呼吸及能量代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24):

- 301-310.
- LIU Y N, WANG F Y, SUN P W, et al. Effects of physical active packaging on storage quality, respiratory and energy metabolism of *Lentinula edodes* during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(24): 301-310.
- [17] 邢亚阁, 廖兴梅, 李文秀, 等. 不同制备条件对纳米银绿色合成的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(7): 231-237.
- XING Y G, LIAO X M, LI W X, et al. Effect of different preparation conditions on green synthesis of silver nanoparticles[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(7): 231-237.
- [18] 王薇, 曹雯. 沙棘果渣多糖—纳米银复合粒子的制备及其抑菌活性[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(5): 148-154.
- WANG W, CAO W. Preparation and antibacterial activity of seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(5): 148-154.
- [19] 卢季红. 微波法制备纳米银及其表征[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(5): 10-13.
- LU J H. The preparation of silver nanoparticles by microwave radiation and its characterization[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2016, 33(5): 10-13.
- [20] 缪宏超, 姚江薇, 赵德方, 等. 陈皮提取物纳米银的合成及性能[J]. *上海纺织科技*, 2024, 52(4): 107-110.
- LIAO H C, YAO J W, ZHAO D F, et al. Synthesis and properties of nano silver extracted from tangerine peel[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2024, 52(4): 107-110.
- [21] 王哲, 钟成, 赵雪晴, 等. 微波辅助法制备细菌纤维素—纳米银(BC-AgNPs)复合材料及其表征[J]. *生物加工过程*, 2023, 21(1): 25-31.
- WANG Z, ZHONG C, ZHAO X Q, et al. Preparation and characterization of bacterial cellulose-silver nanoparticles (BC-AgNPs) composites[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2023, 21(1): 25-31.
- [22] 韩婉毓, 李会珍, 张志军, 等. 紫苏籽壳提取物纳米银颗粒的制备及性能表征[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(6): 49-58.
- HAN W Y, LI H Z, ZHANG Z J, et al. Preparation and performance characterization of silver nanoparticles of perilla seed shell extract[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(6): 49-58.
- [23] 曹雪玲, 鲍长坤, 陈颖, 等. 微波法制备纳米银胶及其在葡萄保鲜中的应用[J]. *北京联合大学学报*, 2016, 30(4): 58-62.
- CAO X L, BAO C K, CHEN Y, et al. Microwave-assisted synthesis nano-silver colloids and its fresh-keeping of grape[J]. *Journal of Beijing Union University*, 2016, 30(4): 58-62.
- [24] SHAFIEI M, HAJIAN M. Poly (vinyl butyral)/zeolitic imidazole framework-8/poly (vinyl alcohol) thin-film nanocomposite nanofiltration membrane: synthesis and characterization[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2019, 28(8): 659-672.
- [25] CHOO K W, DHITAL R, MAO L, et al. Development of polyvinyl alcohol/chitosan/modified bacterial nanocellulose films incorporated with 4-hexylresorcinol for food packaging applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 30: 100769.
- [26] 王芳. 活性多糖纳米银复合粒子的制备及荔枝保鲜的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017: 22.
- WANG F. Study on the preparation of polysaccharide-silver nanoparticles and its application in litchi preservation [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017: 22.