doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.03.006

响应面法优化鲜切马铃薯片褐变抑制涂膜保鲜剂

余　婕[1,2],蔡泽田[1],周　蕙[1],于丽娟[2],孔晓雪[1],罗海波[1]

(1.南京师范大学食品与制药工程学院,江苏 南京 210023)
(2.云南省农业科学院农产品加工研究所,云南 昆明 650221)

[**摘要**]　褐变是鲜切马铃薯在保鲜过程中最主要的品质劣变现象,严重限制其货架期. 本文探索了 6 种生物多糖和 7 种保鲜剂处理对鲜切马铃薯片在(4±1)℃贮藏期间色泽、总色差(ΔE)、多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性的影响,在此基础上,以 ΔE 为响应值,采用响应面试验设计对复合涂膜保鲜剂进行优化. 结果表明,魔芋葡甘聚糖(KGM)和 *L*-半胱氨酸对鲜切马铃薯片褐变抑制作用最显著,其余涂膜剂和保鲜剂也有不同程度的保鲜效果,最佳复合涂膜保鲜剂配比为 0.53% 魔芋葡甘聚糖+0.88%负载 *L*-半胱氨酸的纳米颗粒+0.5%*L*-半胱氨酸,在此条件下 ΔE 预测值为 4.886($R^2=0.937$). 验证实验显示,实际测得 ΔE 值为 4.960,与预测值相对误差仅为 1.5%,可维持良好外观至 8 d. 本实验开发了一种新型可食性复合涂膜保鲜剂,可显著抑制鲜切马铃薯片褐变,延长其货架期,同时为其他鲜切果蔬的贮藏保鲜提供了参考.

[**关键词**]　鲜切马铃薯,可食复合涂膜,酶促褐变,壳聚糖纳米颗粒
[**中图分类号**]TS255.3　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1672-1292(2026)03-0050-10

Optimization of Coating Preservative for Browning Inhibition in Fresh-cut Potatoes Using Response Surface Methodology

Yu Jie[1,2],Cai Zetian[1],Zhou Hui[1],Yu Lijuan[2],Kong Xiaoxue[1],Luo Haibo[1]

(1.School of Food Science and Pharmaceutical Engineering,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)
(2.Agro-products Processing Research Institute,Yunnan Academy of Agricultural Sciences,Kunming 650221,China)

Abstract:Browning is the most important quality deterioration phenomenon of fresh-cut potatoes during preservation, which severely limits their shelf-life. In this paper,we explore the effects of six biopolysaccharides and seven preservative treatments on the colour,total colour difference(ΔE),polyphenol oxidase(PPO)and peroxidase(POD)activities of fresh-cut potato slices during storage at(4±1)℃. On this basis,we optimize the composite film-coating preservative using response surface experimental design with ΔE as the response value. The results show that konjac glucomannan(KGM) and *L*-Cysteine have the most significant inhibitory effect on the browning of freshly cut potato slices,and the rest of the coating agents and preservatives also have different degrees of preservation effects,and the optimal composite coating preservative ratio is 0.53% KGM+0.88% *L*-Cysteine-loaded nanoparticles+0.5% *L*-Cysteine,and the predicted value of ΔE under this condition is 4.886($R^2=0.937$). Verification experiments demonstrate that the actual measured ΔE value is 4.960,with a relative error of merely 1.5% compared to the predicted value,maintaining an excellent appearance for up to eight days. This experiment develops a new edible composite film preservative,which can significantly inhibit the browning of freshly cut potato slices and prolong their shelf life,and also provides a reference for the storage and preservation of other freshly cut fruits and vegetables.

Key words:fresh-cut potatoes,edible composite coating,enzymatic browning,chitosan nanoparticles

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是茄科茄属的一年生草本植物,又称土豆、洋芋、荷兰薯等,产量高、营养丰富,且易于被人体消化吸收,是全球第四大粮食作物[1]. 鲜切马铃薯是将马铃薯经过分级、清洗、修整、去皮、切分和包装等加工后在冷链下运输和销售的产品,因其方便性和营养性备受消费者青睐[2]. 然

收稿日期:2025-07-01.
基金项目:云南省科技人才与平台计划资助项目(202405AF140080).
通讯作者:孔晓雪,高级实验师,研究方向:食品分析. E-mail:kongxiaoxue@163.com;罗海波,博士,教授,研究方向:食品科学. E-mail:luohaibo_1216@126.com

而,鲜切加工导致的组织损伤会引发酶促褐变、水分流失和微生物侵染等问题,其中多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)介导的褐变是影响产品质量的关键因素,尤其是 PPO 介导的酶促褐变[3]. 当细胞完整性被破坏时,酚类物质与 PPO 在氧气作用下生成醌类聚合物,导致典型的表面褐变,这不仅影响感官品质,还会造成营养价值损失[4].

鲜切马铃薯保鲜技术主要有以下 4 类方法:物理方法(低温、气调包装等)褐变抑制效果有限,且存在能耗高、设备要求高等局限性[5-6];化学方法(酸化处理、抗氧化剂等)可能存在药物残留风险[7];生物方法(抗菌肽、植物提取物等)受限于成本高和技术成熟度不足等问题[8];可食性涂膜技术因其能有效调控微环境气体交换和水分迁移,且具有操作简便、成本低廉和环境友好等优势,在鲜切果蔬保鲜领域展现出良好的应用前景[9]. 在可食性涂膜材料中,黄原胶、壳聚糖、海藻酸钠、魔芋葡甘聚糖、普鲁兰多糖和羧甲基纤维素钠这 6 种天然多糖因其优异的成膜性和阻隔性受到研究者的关注[10-12]. 此外,*L*-半胱氨酸、抗坏血酸、柠檬酸、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)、绿原酸、曲酸和竹叶黄酮也常被用于鲜切果蔬的保鲜研究. 其中,*L*-半胱氨酸通过巯基竞争性抑制 PPO 活性中心,抗坏血酸作为电子供体还原醌类物质,柠檬酸通过降低 pH 值抑制酶活,EDTA-2Na 螯合金属离子,绿原酸和竹叶黄酮作为多酚类物质兼具抗氧化和抗菌作用,曲酸则通过微生物代谢产物特性抑制褐变,这些保鲜剂通过不同作用途径均可有效延缓鲜切果蔬褐变[13-17]. 然而,同一涂膜剂应用在不同果蔬上可能存在较大差异. 前期研究发现,羧甲基纤维素钠对鲜切莴笋具有良好的保鲜效果,但其在鲜切马铃薯上的应用效果并不理想[18]. 因此,有必要对适用于鲜切马铃薯的涂膜保鲜剂进行筛选优化以提高其保鲜效果.

基于此,本研究首先通过单因素实验,系统评价了 6 种生物多糖涂膜剂和 7 种保鲜剂对鲜切马铃薯贮藏期间色泽和 PPO 及 POD 活性的影响,筛选出最优的涂膜基质,再与上述褐变抑制剂以及实验室前期制备的壳聚糖纳米颗粒进行复配,旨在开发一种可抑制鲜切马铃薯片褐变的高效复合涂膜保鲜剂.

1　材料与方法

1.1　实验试剂与仪器

新鲜荷兰 15 马铃薯购于南京市栖霞区苏果超市,选用大小一致、无病虫害、无机械损伤的马铃薯.

试剂:*L*-半胱氨酸、抗坏血酸、柠檬酸、乙二胺四乙酸二钠、绿原酸、曲酸、竹叶黄酮、黄原胶、壳聚糖、海藻酸钠、魔芋葡甘聚糖、普鲁兰多糖和羧甲基纤维素钠均为食品级,三聚磷酸钠为分析纯.

仪器:YP602N 电子天平,上海菁海仪器有限公司;CR-10Plus 色差计,Konica Minolta 公司;ZHTE-48 多样品组织研磨仪,南京卓恒科学仪器有限公司;SCI-FS 固定式混匀仪,赛洛捷克(美国)仪器有限公司;UV-2800A 紫外可见分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司.

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理

将马铃薯洗净,沥干、去皮,用不锈钢刀切成约 5 mm 厚薄片.

1.2.1.1　不同涂膜剂处理

采用浸泡法进行涂膜处理. 以蒸馏水为溶剂配制质量分数分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1%的 6 种多糖溶液:黄原胶(XG)、壳聚糖(CTS)、海藻酸钠(SA)、魔芋葡甘聚糖(KGM)、普鲁兰多糖(PUL)、羧甲基纤维素钠(CMC-Na). 将新鲜马铃薯片按样品质量与溶液体积比 1∶2(*m*/*v*)浸泡 20 min,同时设置蒸馏水浸泡组作为空白对照(CK). 处理后的样品经沥干,放置于无菌聚乙烯塑料保鲜盒中,用保鲜膜封口包装,于(4±1)℃贮藏 4 d,每个处理组设 3 个重复.

参考 Zhang 等[19]的方法制备负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒,并稍作修改. 称取 1.125 g 壳聚糖溶于 150 mL 1% 乙酸溶液于室温下磁力搅拌(600 r/min)至完全分散,在磁力搅拌下通过注射泵以 1 mL/min 速率把 10 mL 0.1 mol/L 三聚磷酸钠和 25 mL 3 g/L *L*-半胱氨酸混合溶液缓慢滴加到壳聚糖溶液中,持续反应 4 h,10 000×g 离心 20 min,弃去上清液,沉淀用去离子水洗涤 3 次得到 CS-LCNPs,备用.

1.2.1.2　不同保鲜剂处理

选取 8 种具有潜在褐变抑制效果的保鲜剂进行筛选实验:*L*-半胱氨酸(*L*-Cys)、抗坏血酸(VC)、柠檬酸(CA)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)、绿原酸(CGA)、曲酸(KA)、竹叶黄酮(BFA)和负载 *L*-半胱氨酸

的壳聚糖纳米颗粒(CS-LCNPs). 以蒸馏水为溶剂配制质量分数分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1%的保鲜剂溶液,将新鲜马铃薯片按样品质量与溶液体积比 1∶2(m/v)浸泡 20 min,同时设置蒸馏水浸泡组作为空白对照(CK). 处理后的样品经沥干后置于无菌聚乙烯塑料保鲜盒中,用保鲜膜封口包装,(4±1)℃贮藏 4 d,每个处理组设 3 个重复.

1.2.1.3　色泽测定

用色差计测定贮藏前、贮藏后鲜切马铃薯片明度(L^*,0=黑,100=白)、红绿值(a^*,$+a^*$ 表示红,$-a^*$ 表示绿)、黄蓝值(b^*,$+b^*$ 表示黄,$-b^*$ 表示蓝). 总色差(ΔE)计算公式为:

$$\Delta E=[(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2]^{1/2}.$$

1.2.1.4　PPO 酶活测定

参照马玉荣[20]的方法并作如下改进:取 1.0 g 马铃薯(精确至 0.01 g)粉末与 0.1 g 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)置于 50 mL 离心管中,加入 9 mL 预冷的磷酸盐缓冲液(PBS,0.1 mol/L,pH 6.8),用微型旋涡混合仪混匀后于 4 ℃提取 5 min,8 000×g 离心 15 min,上清液即为 PPO 粗酶提取液. 酶活力测定体系(1.25 mL)组成如下:0.125 mL 邻苯二酚(0.02 mol/L)、0.625 mL PBS、0.5 mL 粗酶液,混匀后测定 410 nm 波长处吸光度值,以 30 s 为间隔连续记录 3 min 内的吸光度变化值. 酶活力单位(U)定义为:在测定条件下,每分钟引起吸光度值变化 0.01 所需的酶量,以 U/kg 鲜重表示. PPO 酶活变化结果以相对酶活表示,计算公式为:

$$相对酶活(\%)=A_1/A_2\times100\%.$$

式中,A_1、A_2 分别为测定管与对照管的酶活力,U/(kgFW·min).

1.2.1.5　POD 酶活测定

参照曹建康等[21]的测定方法并作如下改进:称取 2.0 g 新鲜马铃薯粉末,加入 6 mL 预冷的硼酸缓冲液(0.1 mol/L,pH 8.7,含 1% PVP-40),用微型旋涡混合仪混匀后于 4 ℃提取 5 min,8 000×g 离心 15 min,上清液为 POD 粗酶提取液. 酶活性测定的反应体系(3.3 mL)组成如下:2.0 mL 乙酸缓冲液(0.1 mol/L,pH 5.4)、1.0 mL 愈创木酚溶液(0.25%,用乙酸缓冲液配制)、0.1 mL 0.75% H_2O_2 溶液、0.2 mL 粗酶液,混匀后在 460 nm 波长处测定吸光度值,以 30 s 为间隔连续记录 3 min 内的吸光度值变化. 酶活力单位(U)定义为:在测定条件下,每分钟引起吸光度值变化 0.01 所需的酶量,以 U/kg 鲜重表示. POD 酶活变化结果以相对酶活表示,计算公式同上.

1.2.2　复合涂膜剂的制备

根据单因素实验结果,以魔芋葡甘聚糖、L-半胱氨酸及负载 L-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒制备复合涂膜保鲜剂. 魔芋葡甘聚糖在室温下分散在去离子水中,在 600 r/min 磁力搅拌下缓慢加入 L-半胱氨酸溶液,再加入制备好的壳聚糖纳米颗粒,继续搅拌 1 h 至分散均匀,获得复合涂膜保鲜剂.

1.2.3　响应面试验设计

采用 Design-Expert 13.0 软件建立 Box-Behnken 设计模型. 选取 L-半胱氨酸(0.25%~0.75%,w/v)、魔芋葡甘聚糖(0.25%~0.75%,w/v)、壳聚糖纳米颗粒(0.5%~1%,w/v)3 个因素作为自变量,每个因素设置 3 个水平(-1,0,+1),共设计 17 个实验点(包含 5 个中心点重复),以总色差(ΔE)为响应值,采用二阶多项式模型进行数据拟合:$Y=\beta_o+\Sigma\beta_iX_i+\Sigma\beta_{ii}X_i^2+\Sigma\beta_{ij}X_iX_{ij}$. 通过三维响应面图和等高线图分析各因素对响应值的单独及交互影响,并确定最优参数组合.

表 1　响应面试验设计因素与水平

Table 1　Factors and levels of response surface experiment

因素		水平		
		-1	0	1
A	L-半胱氨酸/%	0.25	0.5	0.75
B	魔芋葡甘聚糖/%	0.25	0.5	0.75
C	壳聚糖纳米颗粒/%	0.5	0.75	1

1.2.4　验证实验

以响应面优化所得的最佳条件制备复合涂膜剂,浸泡鲜切马铃薯片 20 min 后沥干,置于无菌聚乙烯塑料保鲜盒中,用保鲜膜封口包装,(4±1)℃贮藏 4 d 后测定总色差(ΔE).

1.3　数据分析

实验结果以平均值±标准差表示,使用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析和 Duncan's 多重极差检验,$P<0.05$ 为具有显著性差异. 图表采用 Excel 2024 软件制作.

2　结果与分析

2.1　不同涂膜剂和保鲜剂对鲜切马铃薯片外观和总色差的影响

图 1 和表 2 展示了使用 6 种涂膜剂、7 种保鲜剂及负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒(CS-LCNPs)处理后鲜切马铃薯片在 4 ℃贮藏 4 d 的外观变化和总色差(ΔE)变化. 低温贮藏 4 d 后,对照组从中心向四周变黑且出现干裂纹,ΔE 值达到 23.0±2.2(见表 2),失去食用价值. 使用涂膜剂处理组中 0.5%的魔芋葡甘聚糖护色效果最好,4 d 后 ΔE 值仅为 8.3±2.6. 使用保鲜剂处理组中不同浓度 *L*-半胱氨酸处理组样品外观均优于其他处理组,其中使用 0.75%*L*-半胱氨酸处理护色效果最好,4 d 后 ΔE 值仅为 1.5±0.6. 需要特别指出的是,0.5%和 1.0%*L*-半胱氨酸处理组贮藏 4 d 后 ΔE 值显著高于 0.25%和 0.75%处理组,是高浓度 *L*-半胱氨酸因饱和或副反应导致护色效果下降,还是样品误差或试验错误,具体原因有待进一步研究. CS-LCNPs 处理的鲜切马铃薯在贮藏 4 d 后,色泽仍然鲜亮,也能维持良好的外观品质;0.75% CS-LCNPs 护色效果最好,ΔE 值为 9.7±2.4. 此外,海藻酸钠、曲酸、抗坏血酸、黄原胶、壳聚糖、柠檬酸和竹叶黄酮在适宜浓度下对抑制鲜切马铃薯褐变也有一定效果,ΔE 值均显著低于对照组($P<0.05$). 普鲁兰多糖、羧甲基纤维素纳、乙二胺四乙酸二钠、绿原酸处理对马铃薯片褐变有抑制作用,但均出现明显褐变,不适用于鲜切马铃薯的贮藏保鲜.

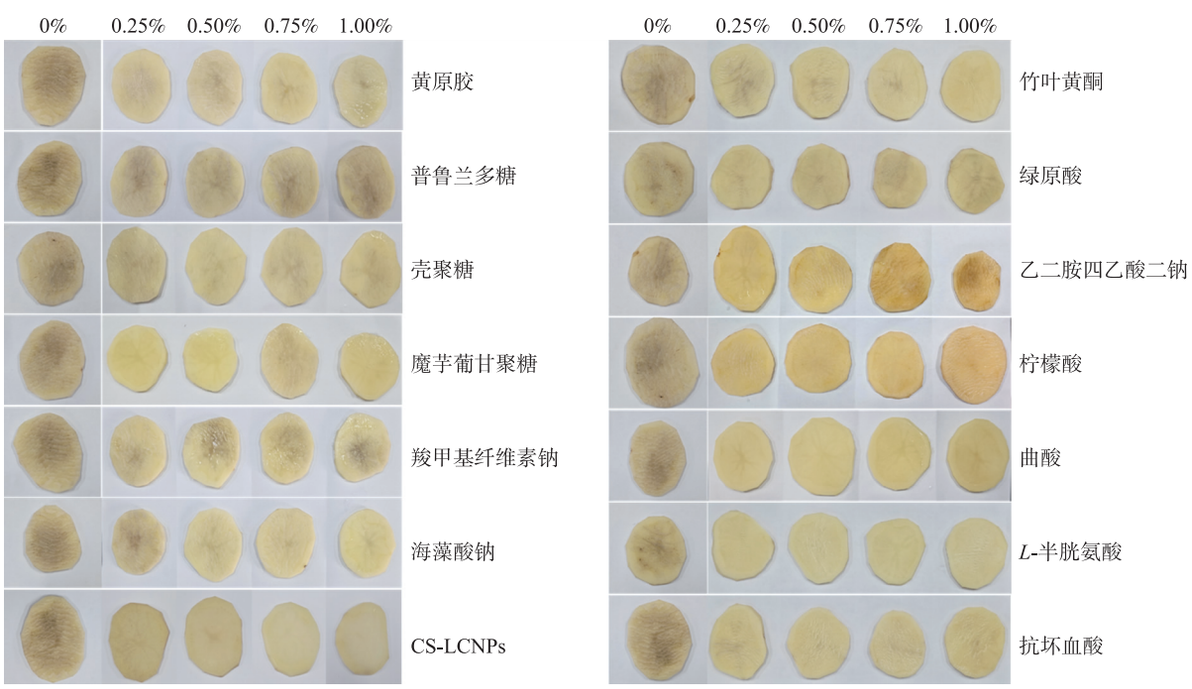


图 1　不同涂膜剂和保鲜剂处理鲜切马铃薯 4 ℃贮藏 4 d 后的外观变化图

Fig. 1　Appearance changes of fresh-cut potatoes under different coating and preservative treatments after 4 days of storage at 4 ℃

2.2　不同保鲜剂对鲜切马铃薯片 POD 与 PPO 活力的影响

表 3 所示为不同浓度的保鲜剂处理组贮藏 4 d 后 POD 相对酶活的变化情况. 由表 3 可知,7 种保鲜剂对鲜切马铃薯 POD 活力均表现出不同程度的抑制作用. 其中,*L*-半胱氨酸抑制效果最强,当处理浓度为 0.75%时,POD 活性最低,仅为对照组的(33.66±1.81)%,显著低于其他处理组($P<0.05$). 抗坏血酸和曲酸处理组的 POD 活性随浓度升高呈现波动性下降趋势. 在 1.00%处理浓度下,二者分别使 POD 活性降低至对照组的(47.27±2.16)%和(47.66±0.94)%,抑制效果无显著差异($P>0.05$). 植物源保鲜剂中,竹叶黄酮和绿原酸表现出相似的抑制模式,浓度为 0.75%时抑制效果最差,其余 3 个浓度下 POD 活性分别为对照组的 44.59%~56.27%以及 50.61%~59.38%. 乙二胺四乙酸二钠在 0.25%和 1.00%浓度时对 POD 活性抑

制效果较好,为对照组的54%左右,表现出浓度非依赖性的抑制特征. 柠檬酸处理组 POD 活性维持在对照组的 69.54%~83.60%范围内,抑制效果显著弱于其他处理组(P<0.05),表明其对 POD 活性的抑制能力相对有限.

表 2　不同浓度涂膜剂和保鲜剂处理组贮藏 4 d 后总色差(ΔE)的变化情况

Table 2　Changes of total color difference(ΔE) of different concentration of coating agent and preservative treatment group after 4 days of storage

保鲜剂	处理浓度(质量分数)/%				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00
黄原胶	23.0±2.2Aa	14.0±1.2Bb	15.4±3.9Bab	10.0±2.8Cbc	12.0±1.3BCb
普鲁兰多糖	23.0±2.2Aa	19.4±2.8ABa	17.2±2.6ABa	14.6±4.6Ba	17.2±2.5ABa
壳聚糖	23.0±2.2Aa	14.0±1.2Bb	11.7±1.6Bb	13.0±0.8Bab	12.2±1.0Bb
魔芋葡甘聚糖	23.0±2.2Aa	9.3±1.2Cd	8.3±2.6Cc	15.1±1.6Ba	10.4±0.5Cbc
羧甲基纤维素钠	23.0±2.2Aa	17.3±5.0Aa	19.1±3.6Aa	13.6±5.8Aab	17.4±4.3Aa
海藻酸钠	23.0±2.2Aa	20.0±3.7Aa	10.5±3.5Bbc	10.7±2.8Bbc	8.4±2.4Bc
CS-LCNPs	23.0±2.2Aa	13.6±2.1Bb	12.3±3.8Bb	9.7±2.4Bbc	9.8±1.4Bbc
竹叶黄酮	23.0±2.2Aa	11.9±1.7Bc	6.2±1.9Cd	4.6±2.7Cd	5.9±1.1Cd
绿原酸	23.0±2.2Aa	9.5±2.5Cd	9.5±0.2Cc	13.5±0.7Bab	13.0±2.4Bb
乙二胺四乙酸二钠	23.0±2.2Aa	9.0±1.0Cd	7.0±1.9Ccd	13.3±0.6Bab	12.9±3.6Bb
柠檬酸	23.0±2.2Aa	7.0±0.3Be	6.5±0.4Bd	4.5±0.3Cd	7.7±1.1Bcd
曲酸	23.0±2.2Aa	5.3±2.2BCe	4.0±1.2Ce	6.3±1.1BCcd	7.7±1.7Bcd
L-半胱氨酸	23.0±2.2Aa	1.6±0.8Cf	5.1±0.5Be	1.5±0.6Ce	6.7±0.6Bd
抗坏血酸	23.0±2.2Aa	5.4±0.8Be	6.2±0.8Bd	3.9±0.9Bd	5.9±1.6Bd

注:同一行大写字母或同一列小写字母不同表示存在显著差异(P<0.05).

表 3　不同浓度保鲜剂处理组贮藏 4 d 后 POD 相对酶活的变化情况

Table 3　Changes in relative POD enzyme activity after 4 days of storage in groups treated with different concentrations of preservative

化学物质	处理浓度(质量分数)/%				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00
竹叶黄酮	100.00±4.43Aa	55.01±1.12Cd	44.59±1.81Dd	71.80±3.19Bb	56.27±3.02Cb
绿原酸	100.00±4.43Aa	50.61±4.08Dd	59.38±2.78Cc	75.74±1.68Ba	52.95±4.56Dc
柠檬酸	100.00±4.43Aa	80.14±1.02Ba	71.49±2.13Cb	69.54±2.68Cb	83.60±1.23Ba
乙二胺四乙酸二钠	100.00±4.43Aa	53.80±3.40Cd	66.11±3.60Bb	69.44±1.81Bb	53.93±2.14Cbc
曲酸	100.00±4.43Aa	77.90±3.55Ba	56.18±6.03Dc	64.18±1.41Cc	47.66±0.94Ed
L-半胱氨酸	100.00±4.43Aa	62.31±5.32Bc	43.67±1.48Cd	33.66±1.78De	51.20±6.19Cc
抗坏血酸	100.00±4.43Aa	71.87±1.09Cb	78.95±1.25Ba	53.54±1.87Dd	47.27±2.16Ed
CS-LCNPs	100.00±4.43Aa	67.13±11.76CDc	70.79±7.73Cb	56.22±1.49Dd	84.82±2.42Ba

注:同一行大写字母或同一列小写字母不同表示存在显著差异(P<0.05).

表4 所示为不同浓度保鲜剂处理组贮藏4 d 后 PPO 相对酶活的变化情况. 如表4 所示,不同保鲜剂对鲜切马铃薯片中 PPO 活性的抑制效果存在显著差异(P<0.05). 根据抑制效果可将其分为 3 类:低效抑制剂组,包括曲酸和柠檬酸,在所有测试浓度(0.25%~1.00%)下均表现出较弱的抑制效果,曲酸抑制效果最差,各组 PPO 活性维持在对照组的 65%以上. 中效抑制剂组,包括竹叶黄酮、抗坏血酸和绿原酸,在适宜浓度下可以把 PPO 活性降至对照组的 30%左右. 高效抑制剂组,包括乙二胺四乙酸二钠和 *L*-半胱氨酸,其中浓度为 0.25%的乙二胺四乙酸二钠可以把 PPO 活性降至 27.31%,但其他浓度下抑制效果不佳;抑制效果最强的是 *L*-半胱氨酸,浓度为 1%时可将 PPO 活性降至对照组的 21.15%,浓度为 0.75%也可将时 PPO 活性降至对照组的 22.18%.

此外,负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒(CS-LCNPs)对鲜切马铃薯中两种褐变关键酶——多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)均表现出显著的抑制效果(P<0.05). 实验设置了 0.25%、0.5%、0.75%和 1% 4 个浓度梯度,并以蒸馏水处理作为空白对照(CK),发现浓度为 0.75%的 CS-LCNPs 对两种酶的抑制效果最好,与对照组相比,两种酶的活性都降至 56%左右.

表 4　不同浓度保鲜剂处理组贮藏 4 d 后 PPO 相对酶活的变化情况

Table 4　Changes in relative PPO enzyme activity after 4 days of storage in groups treated with different concentrations of preservatives

化学物质	处理浓度(质量分数)/%				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00
竹叶黄酮	100.00±4.23Aa	59.89±4.23Bb	29.42±1.08Dd	47.85±5.10Cb	41.12±2.64Cd
绿原酸	100.00±4.23Aa	34.49±2.57Bd	30.06±1.63Bd	35.19±4.31Bc	30.41±0.76Bde
柠檬酸	100.00±4.23Aa	57.37±3.00Bb	49.72±1.85Cbc	56.46±1.80Bb	62.66±4.89Bb
乙二胺四乙酸二钠	100.00±4.23Aa	27.31±0.58De	65.67±4.86Bab	48.56±8.30Cb	54.20±2.77Cbc
曲酸	100.00±4.23Aa	66.06±1.12Da	71.62±1.34Ca	83.93±2.22Ba	70.41±1.44Cb
L-半胱氨酸	100.00±4.23Aa	27.79±1.62Ce	38.19±1.34Bcd	22.18±3.95CDd	21.15±0.71Df
抗坏血酸	100.00±4.23Aa	41.73±6.36Bc	42.67±1.30Bc	34.41±5.97Bc	30.92±11.07Bde
CS-LCNPs	100.00±4.23Aa	74.65±19.10BCa	67.49±0.46CDab	56.25±0.14Db	86.61±0.85Ba

注:同一行大写字母或同一列小写字母不同表示存在显著差异($P<0.05$).

2.3　响应面试验

根据不同单因素处理组总色差变化情况及对 PPO、POD 的抑制作用,选择魔芋葡甘聚糖(质量分数为 0.50%~1.00%)、负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒(质量分数为 0.25%~0.75%)和 *L*-半胱氨酸(质量分数为 0.25%~0.75%)进行响应面实验,优化复合涂膜保鲜剂组合.

2.3.1　响应面回归模型的建立

为确定涂膜剂的最佳复配比,本研究选取 *L*-半胱氨酸质量分数(A)、魔芋葡甘聚糖质量分数(B)和负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒质量分数(C)作为自变量,以 ΔE 值(Y)作为响应指标. 基于 Design-Expert 13 软件,采用响应面分析法进行试验设计与多元回归分析,各因素的实验水平设置如表 1 所示,具体试验结果如表 5 所示. 通过回归分析,建立了以下二次多项式预测模型:

$$Y=5.70-2.09A-1.25B-2.69C-0.350\ 0AB+4.38AC+1.45BC+4.59A^2+1.81B^2+2.29C^2.$$

表 5　试验设计及结果

Table 5　Design and results of experimental

试验号	A	B	C	$Y(\Delta E)$	试验号	A	B	C	$Y(\Delta E)$	试验号	A	B	C	$Y(\Delta E)$
1	1	1	0	8.1	7	0	0	0	7.1	13	1	0	−1	8.5
2	1	0	1	11.7	8	0	0	0	6.5	14	0	−1	−1	14.4
3	−1	1	0	12.2	9	0	1	1	8.1	15	−1	0	−1	22.2
4	0	0	0	5.9	10	−1	−1	0	15.4	16	0	1	−1	10.4
5	0	0	0	4.8	11	−1	0	1	7.9	17	0	−1	1	6.3
6	0	0	0	4.2	12	1	−1	0	12.7					

2.3.2　模型显著性和交互作用分析

方差分析结果表明,该回归模型达到极显著水平($P<0.001$),失拟项不显著($P>0.05$),说明模型拟合良好且预测可靠性较高. 模型的决定系数(R^2)为 0.967 8,表明该模型可解释 96.78%的响应值变化;校正决定系数(R^2_{Adj})为 0.926 3,进一步验证了模型的准确性. 此外,变异系数(coefficient of variation,CV)为 12.74%,表明实验数据具有较好的重复性和稳定性. 综合分析表明,该回归模型能够准确反映各因素对鲜切马铃薯总色差(ΔE)的影响,适用于后续工艺优化预测.

在考察的变量范围内,各因素对总色差的影响程度排序为:负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒(C)>*L*-半胱氨酸(A)>魔芋葡甘聚糖(B). 其中,负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒质量分数(C)对 ΔE 的影响达到极显著水平($P<0.001$),表明其在调控鲜切马铃薯色泽稳定性方面具有关键作用.

图 2 展示了各因素两两交互作用对鲜切马铃薯色差(ΔE)影响的响应面及等高线图. 分析结果表明,在三组两两交互作用中,*L*-半胱氨酸(A)与负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒(C)的交互效应最为突出(AC 项系数=4.38),其响应面呈现明显的抛物线特征,且等高线呈显著椭圆形,说明二者协同调控色差的效果显著. 相比之下,*L*-半胱氨酸与魔芋葡甘聚糖(AB)的交互作用较弱(AB 项系数=−0.35),响应面曲率

平缓,等高线趋近圆形,这与回归模型中 *AB* 项较低显著性相一致. 该结果进一步验证了负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒(*C*)在复合涂膜体系中的关键作用,为其在鲜切马铃薯护色工艺中的优化应用提供了理论依据.

表 6　总色差(Δ*E*)回归方程方差分析

Table 6　Variance analysis of total color difference of regression equations

方差来源	平方和	自由度	均方和	*F* 值	*P* 值	显著性
模型	326.62	9	36.29	23.34	0.000 2	***
A	34.86	1	34.86	22.42	0.002 1	**
B	12.50	1	12.50	8.04	0.025 2	*
C	57.78	1	57.78	37.17	0.000 5	***
AB	0.49	1	0.49	0.32	0.592 0	
AC	76.56	1	76.56	49.25	0.000 2	***
BC	8.41	1	8.41	5.41	0.052 9	
A^2	88.61	1	88.61	57.00	0.000 1	***
B^2	13.83	1	13.83	8.90	0.020 4	*
C^2	22.03	1	22.03	14.17	0.007 0	**
残差	10.88	7	1.55			
失拟项	5.18	3	1.73	1.21	0.413 2	
纯误差	5.70	4	1.42			
总离差	337.50	16				
		$R^2=0.967\ 8$;$R^2_{Adj}=0.926\ 3$;CV = 12.74%				

注:* 表示对结果影响显著($P<0.05$);** 表示对结果影响高度显著($P<0.01$);*** 表示对结果影响极其显著($P<0.001$).

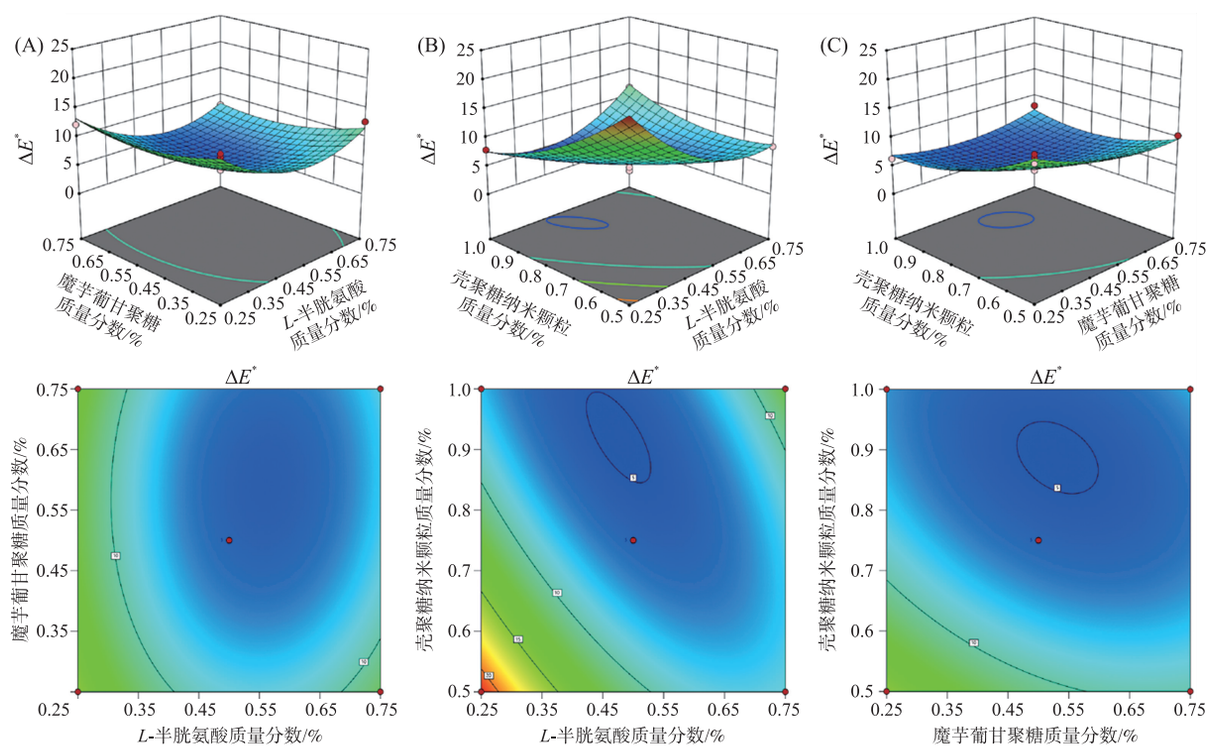


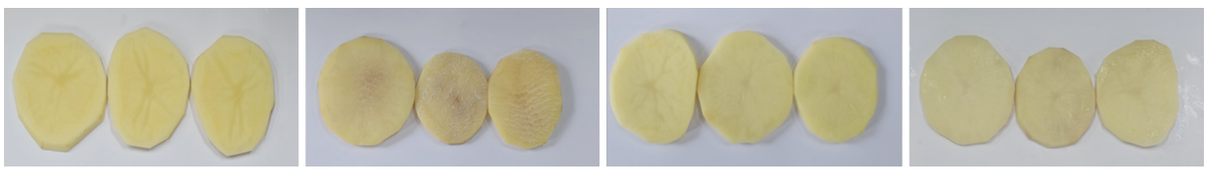
图 2　两因素交互作用对总色差(Δ*E*)的影响

Fig. 2　Effects of two-factor interaction on total color difference

2.4　验证实验结果

基于响应面优化分析,本研究确定了复合涂膜剂的最佳配方:魔芋葡甘聚糖 0.53%、负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒 0.88%、*L*-半胱氨酸 0.5%. 通过建立的二次回归模型预测,该优化配比下鲜切马铃薯片的色差预测值(Δ*E*)为 4.886. 为验证模型可靠性,采用该优化配方进行实验验证,如图 3 所示. 结果显示,在 4 ℃贮藏 4 d 后,实测 Δ*E* 值为 4.960,与预测值的相对偏差仅为 1.51%,充分证实了回归模型具有较高的预测精度. 进一步的贮藏稳定性实验表明,优化后的复合涂膜处理组在 4 ℃条件下贮藏 8 d 后,Δ*E* 值为 6.302,样品

仍保持较好的色泽和外观品质,表面无明显褐变现象. 这一结果不仅验证了数学模型的有效性,更证实了复合涂膜剂能显著延缓鲜切马铃薯在冷藏过程中的色泽劣变,具有良好的实际保鲜应用价值.



A. 对照第0 d　　B. 对照第4 d　　C. 复合处理第4 d　　D. 复合处理第8 d

图 3　复合涂膜对鲜切马铃薯 4 ℃贮藏前后外观的影响

Fig. 3　Effect of composite coating on the appearance of fresh-cut potatoes before and after storage at 4 ℃

3　讨论

壳聚糖纳米颗粒因其比表面积大、生物活性强、靶向性高等特性,近年来在鲜切果蔬保鲜领域应用广泛[22]. 鲜切马铃薯在加工过程中因失去保护性表皮组织,易发生组织损伤、加速褐变、水分流失及表皮硬化等问题,严重影响其感官品质和商品价值. 其中,酶促褐变是制约产品保质期的关键因素,主要表现为:在有氧条件下,多酚氧化酶(PPO)催化酚类物质氧化;过氧化物酶(POD)则在过氧化氢存在下引发黑色素形成[23]. 因此,有效抑制 PPO 与 POD 活性成为延缓鲜切马铃薯褐变的重要途径.

现有研究表明,多种天然物质对 PPO 和 POD 活性具有抑制作用. 邓钦予等[24]发现采用 1%的抗坏血酸处理鲜切竹根姜,可使其 POD 和 PPO 活性分别降低 41.52%和 25.31%;冯程程等[25]报道 2.0 g/L *L*-半胱氨酸对鲜切紫甘薯 POD 的抑制率达 53.50%,并能有效控制 PPO 活性. 范文广等[26]用 1.0 g/L 的曲酸溶液处理鲜切百合鳞茎,发现可以抑制 POD、PPO 和苯丙氨酸解氨酶(PAL)的活性. 本实验结果表明,*L*-半胱氨酸、抗坏血酸和曲酸对鲜切马铃薯片 POD 和 PPO 活性都有显著抑制效果,尤其是 *L*-半胱氨酸处理后的鲜切马铃薯在 4 d 后仍能保持良好的色泽品质.

利用天然生物多糖制备可食性涂膜,可以通过调节果实呼吸代谢和阻隔微生物侵染,达到延长采后果蔬贮藏期和品质的目的. 何国菊等[27]用 1.0%魔芋葡甘聚糖涂膜有效抑制了百香果采后水分蒸发,将果实皱缩指数和失重率都控制在较低水平,同时维持果皮色泽参数(L^*、a^*、b^*值)的稳定性,使果实在常温贮藏条件下保持良好的外观品质. Hesami 等[28]则发现壳聚糖涂膜可显著延缓毛瑞桐果实硬度、可溶性固形物、可滴定酸及抗坏血酸含量的下降,其中 1%壳聚糖处理可将果实货架期延长至 21 d. 任玉锋等[29]证实海藻酸钠、壳聚糖和普鲁兰多糖涂膜能显著抑制灵武长枣低温贮藏期间 PPO、POD 活性的上升,从而延缓贮藏期的褐变. 本研究对比分析了多种天然多糖对鲜切马铃薯的保鲜效果,结果表明魔芋葡甘聚糖和海藻酸钠均能有效延缓褐变进程,其中魔芋葡甘聚糖效果最好. 相比之下,普鲁兰多糖和羧甲基纤维素钠对鲜切马铃薯片的保鲜效果不佳. 这一发现为鲜切马铃薯保鲜剂的筛选提供了重要参考,同时也印证了不同涂膜剂在保鲜效果上存在特异性,在实际应用中需根据果蔬种类和贮藏需求进行针对性选择.

壳聚糖纳米颗粒可与生物多糖、功能活性物质形成复合涂层,利用壳聚糖的包埋作用可以增强活性物质的稳定性,并在整个贮藏期实现控释,从而强化保鲜效果. 壳聚糖纳米颗粒因其优异的保鲜性能在鲜切果蔬领域受到广泛关注[22,30]. 壳聚糖纳米颗粒/海藻酸钠/蜂蜡复合涂层可使鲜切香蕉的水分损失减少 50%以上,同时显著延缓褐变,海藻酸钠的羧基与 CS-LCNPs 的氨基形成的聚电解质复合物能有效调控膜孔径,实现选择性气体透过[30]. Sun 等[31]研究表明壳聚糖纳米颗粒/魔芋葡甘聚糖涂层应用于葡萄保鲜时,抑菌率>90%,货架期延长了 8 d. 本研究系统评价了魔芋葡甘聚糖、负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒、*L*-半胱氨酸复合可食性涂膜剂对鲜切马铃薯的保鲜效果. 实验结果表明,0.53%魔芋葡甘聚糖+0.88%负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒+0.50% *L*-半胱氨酸组成的复合涂膜剂有优秀的保鲜性能,4 ℃条件下可维持鲜切马铃薯的外观色泽至第 8 d. 这可能是由于负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒与魔芋葡甘聚糖形成的三维网络结构能有效调控贮藏微环境的气体交换,从而抑制呼吸强度[31],此外魔芋葡甘聚糖+负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒+*L*-半胱氨酸可以通过双重机制抑制褐变:一方面,纳米颗粒表面的氨基与 PPO 活性中心的 Cu^{2+}形成稳定螯合物[22];另一方面,*L*-半胱氨酸能持续清除醌类物质和自由基[14].

4　结论

试验所选 6 种生物多糖、7 种保鲜剂及负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒对鲜切马铃薯片褐变均有不同程度的抑制作用. 7 种保鲜剂均能显著抑制鲜切马铃薯片 PPO 和 POD 活性. 单独处理时,魔芋葡甘聚糖和 *L*-半胱氨酸对鲜切马铃薯片的褐变抑制作用最显著($P<0.05$). 响应面试验获得鲜切马铃薯复合涂膜保鲜剂最优配方为:0.53%魔芋葡甘聚糖+0.88%负载 *L*-半胱氨酸的壳聚糖纳米颗粒+0.5% *L*-半胱氨酸. 验证实验结果表明,在最优复合涂膜剂处理条件下,鲜切马铃薯在(4±1)℃贮藏 4 d 后其实际 ΔE 值(4.960)与预测值(4.886)接近,并可保持良好的外观色泽至第 8 d,表明该复合涂膜剂具有良好的保鲜效果,为鲜切马铃薯的保鲜提供了一种可供选择的方案.

[参考文献](References)

[1] Calliope R S, Lobo O M, Samman C N. Biodiversity of andean potatoes: Morphological, nutritional and functional characterization[J]. Food Chemistry,2018,238:42-50.

[2] 华雪兰. 鲜切果蔬加工工艺与保鲜技术分析[J]. 农业开发与装备,2022(9):206-208.

[3] 程立君,王世敏,李周,等. 西南冷凉高地鲜切马铃薯抗褐变研究[J]. 保鲜与加工,2021,21(10):8-14.

[4] 曹贞菊,陈明俊,罗小波,等. 马铃薯褐变机制及控制技术研究进展[J]. 中国瓜菜,2024,37(11):10-18.

[5] Zhao S S,Han X Y,Liu B,et al. Shelf-life prediction model of fresh-cut potato at different storage temperatures[J]. Journal of Food Engineering,2022,317:110867.

[6] 王斌,林薇,袁晓. 鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J]. 食品科学,2025,46(7):367-384.

[7] Xu X,Liu P,Dong T T,et al. Short-term warming inhibits polyphenol oxidase activity and influences free amino acid accumulation and de novo synthesis of tyrosine in fresh-cut potato[J]. Postharvest Biology and Technology,2022,186:111830.

[8] 田甲春,张洁,葛霞,等. 气调贮藏对马铃薯保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工,2022,22(8):1-7.

[9] Cao J,Ma S,Zhang L,et al. Browning inhibition on fresh-cut potatoes by high voltage electrostatic field(HVEF) pre-treatment[J]. Acta Horticulturae,2021,1319:153-162.

[10] 吴风超,周纷,任小青. 植物源可食性膜在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业,2025,51(9):385-394.

[11] 曾仪雯,周恩弛,黄高瓠,等. 可食性膜在食品保鲜中的应用现状及研究进展[J]. 保鲜与加工,2023,23(4):62-67.

[12] Dai L M,Wang X S,Zhang J,et al. Application of chitosan and its derivatives in postharvest coating preservation of fruits[J]. Foods,2025,14(8):1318.

[13] Procaccini L M G,Huarte M,Goñi M G,et al. Ascorbic acid and citric acid treatments increase the shelf life of fresh-cut potato:Cultivar effect[J]. Potato Research,2025,68:239-261.

[14] Li G Q,Duan P R,Wang M R,et al. Untargeted metabolomics reveals the mechanism of ultrasound combined with *L*-Cysteine treatment inhibiting the browning of fresh-cut potatoes[J]. Postharvest Biology and Technology,2024,216:113088.

[15] Bhat A T,Rather H A,Hussain Z S,et al. Efficacy of ascorbic acid,citric acid,ethylenediaminetetraacetic acid,and 4-hexylresorcinol as inhibitors of enzymatic browning in osmo-dehydrated fresh cut kiwis[J]. Journal of Food Measurement and Characterization,2021,15:4354-4370.

[16] 李娟华,王红蕾,刘义存,等. 竹叶黄酮/热塑性聚酯纤维膜的制备及保鲜性能研究[J]. 包装与食品机械,2025,43(1):78-87.

[17] 王毓慧. 曲酸和月桂酰精氨酸乙酯盐酸盐联合处理对保持鲜切马铃薯品质的作用研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2024.

[18] 虞任莹,张强,童秀子,等. 基于响应面法优化鲜切莴笋复合涂膜保鲜剂[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2022,22(4):55-63.

[19] Zhang Q,Bu Q H,Xia J Y,et al. High performance,degradable,self-healing bio-based nanocomposite coatings with antibacterial and antioxidant properties[J]. Nanomaterials,2023,13(7):1220.

[20] 马玉荣. 鲜切马铃薯褐变控制技术研究[D]. 泰安:山东农业大学,2010.

[21] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.

[22] Wang Y Y,Qin R R,Xue J Y,et al. Development and characterization of sodium alginate composite films incorporating self-assembled cyclodextrin succinic acid/chitosan nanoparticles encapsulating resveratrol for blueberry preservation[J]. Food

Packaging and Shelf Life,2025,49:101512.
[23] Ouyang N N,Guo L N,Hong C,et al. Effects of delayed tuber cutting after catalytic infrared heat treatment on browning of fresh-cut potatoes and its potential mechanisms[J]. Food Chemistry,2025,480:143834.
[24] 邓钦予,张杨涛,郑果,等. 外源抗坏血酸对鲜切竹根姜保鲜特性的影响[J]. 中国食品添加剂,2023,34(5):176-183.
[25] 冯程程,于筠,王春玲. *L*-半胱氨酸对鲜切紫甘薯护色保鲜作用[J]. 食品与发酵工业,2019,45(22):150-156.
[26] 范文广,杜娜娜,牛晓倩,等. 曲酸-海藻酸钠复合膜的制备及其对百合鳞茎片褐变的抑制作用[J]. 食品工业科技,2019,40(11):284-290.
[27] 何国菊,胡吉刚,何艳,等. 植酸魔芋葡甘聚糖混合涂膜液对黄秋葵保鲜探究[J]. 食品工业,2021,42(7):158-162.
[28] Hesami A,Kavoosi S,Khademi R,et al. Effect of chitosan coating and storage temperature on shelf-life and fruit quality of *Ziziphus mauritiana*[J]. International Journal of Fruit Science,2021,21(1):509-518.
[29] 任玉锋,李壮桃,张冠楠. 涂膜处理对灵武长枣低温贮藏期间抗氧化酶和 PPO 活性的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(19):170-171.
[30] Kim J,Seo J,Kim H J,et al. Synergistic design of Pickering emulsion inks of nanochitosan-alginate-beeswax for edible coating in fruit preservation[J]. Food Hydrocolloids,2025,167:111462.
[31] Sun J S,Jiang H X,Wu H B,et al. Multifunctional bionanocomposite films based on konjac glucomannan/chitosan with nano-ZnO and mulberry anthocyanin extract for active food packaging[J]. Food Hydrocolloids,2020,107:105942.

[责任编辑:严海琳]

(上接第 49 页)

[30] Wei L J,Gao S J,Li F,et al. Transcriptomics and physiological indicators analyzed the delayed effect of carboxymethyl chitosan on lignification of okra during postharvest cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology,2025,222:113394.
[31] Xu T T,Wang J,Li C H,et al. *EuMYB*308 regulates lignin accumulation by targeting *EuLAC*17 in *Eucalyptus urophylla*[J]. Industrial Crops and Products,2024,218:118988.
[32] Qian C L,Ji Z J,Sun Y,et al. Lignin biosynthesis in postharvest water bamboo(*Zizania latifolia*)shoots during cold storage is regulated by rboh-mediated reactive oxygen species signaling[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2023,71(7):3201-3209.
[33] Berthet S,Demont-Caulet N,Pollet B,et al. Disruption of LACCASE4 and 17 results in tissue-specific alterations to lignification of arabidopsis thaliana stems[J]. Plant Cell,2011,23(3):1124-1137.
[34] Hu J,Wu W J,Fang X J,et al. Studies on the lignification and the differential expression of regulatory genes in *Phyllostachys praecox*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2024,24(3):183-190.
[35] Zhang X,Zhang Q P,Sun X Y,et al. Differential expression of genes encoding phenylpropanoid enzymes in an apricot cultivar (*Prunus armeniaca* L.)with cleavable endocarp[J]. Trees-Structure and Function,2019,33(6):1695-1710.
[36] Tang S W,Xu Z Y,Chen C W,et al. Effect of different postharvest pre-cooling treatments on quality of water bamboo shoots (*Zizania latifolia*)during refrigerated storage[J]. Plants-Basel,2024,13(20):2856.
[37] Ali S,Anjum M A,Nawaz A,et al. Effect of pre-storage ascorbic acid and Aloe vera gel coating application on enzymatic browning and quality of lotus root slices[J]. Journal of Food Biochemistry,2020,44(3):e13136.

[责任编辑:严海琳]