DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0509

西蓝花茎果胶提取工艺优化、体外抗氧化活性及其复合涂膜对鲜切马铃薯保鲜效果研究

张小梅[1,2],吴思佳[1],贾可欣[1],张晶晶[1]

(1.郑州工程技术学院食品与健康工程学院 郑州 450044; 2.河南省速冻食品工程技术研究中心 郑州 450044)

摘 要:为实现西蓝花废弃茎的资源化高值利用,减少资源浪费与环境污染,同时解决鲜切马铃薯加工贮藏过程中易褐变、失重、品质劣变及货架期短的问题,以西蓝花茎为原料,采用超声协同复合酶法提取果胶,通过单因素试验与响应面优化试验确定果胶最佳提取工艺,并对最优工艺提取的粗果胶开展体外抗氧化活性测定,评价其 DPPH 自由基、羟基自由基清除能力;再以提取的果胶为基质,搭配壳聚糖、溶菌酶、甘油复配制备可食性复合涂膜,采用浸渍法处理鲜切马铃薯,并于 4 ℃恒温贮藏,探究不同配比复合涂膜对鲜切马铃薯保鲜效果的影响。结果表明,超声协同复合酶法可高效提取西蓝花茎果胶,最优提取工艺为酸性蛋白酶与半纤维素酶质量比 1∶1、复合酶添加量 6%、液料比 25∶1 mL·g^{-1}、超声功率 360 W、超声时间 80 min、酶解温度 50 ℃、酶解时间 90 min、乙醇体积分数 80%,此条件下果胶得率达 26.59%,与模型预测值 26.25%接近,二者无显著差异,拟合效果良好;体外抗氧化试验证实,由西蓝花茎提取的粗果胶具备优良体外抗氧化能力,果胶提取液浓度(ρ,后同)1.0 mg·mL^{-1}时,DPPH 自由基最大清除率为 42.86%;浓度为 0.9 mg·mL^{-1}时,羟基自由基最大清除率可达 67.40%。利用果胶的天然抗氧化活性,不同配比的复合涂膜均能显著改善鲜切马铃薯的贮藏品质,有效抑制褐变、水分流失及相关酶活性变化,从而延长货架期。该研究结果为西蓝花废弃茎资源化利用及鲜切马铃薯绿色保鲜技术开发提供了试验依据与技术参考。

关键词:西蓝花茎果胶;超声协同复合酶法;可食性涂膜;马铃薯;保鲜

中图分类号:S635.3+S532 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-154-13

Optimization of pectin extraction process from broccoli stems, *in vitro* antioxidant activity, and its application in edible composite coating for fresh-cut potato preservation

Zhang Xiaomei[1,2], Wu Sijia[1], Jia Kexin[1], Zhang Jingjing[1]

(*1. School of Food and Health Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, Henan, China; 2. Henan Frozen Food Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450044, Henan, China*)

Abstract: To valorize discarded broccoli stems and develop a green preservation strategy for fresh-cut potato, crude pectin was extracted from broccoli stems using an ultrasound-synergized compound enzymatic method. Its *in vitro* antioxidant properties were characterized, and the extracted pectin was further fabricated into a matrix for edible composite coating. The extraction process was optimized by single-factor experiments and response surface methodology. The optimal conditions were an acid protease-to-hemicellulase ratio of 1∶1, enzyme dosage of 6%, liquid-to-solid ratio of 25∶1 mL·g^{-1}, ultrasonic power of 360 W, ultrasonication time of 80 min, enzymolysis temperature of 50 °C, enzymolysis time of 90 min, and ethanol concentration of 80%. Under these conditions, the broccoli stems pectin(BSP)yield reached 26.59%, close to the predicted value of 26.25%, with no significant difference, indicating good model reliability. *In vitro* antioxidant tests verified that crude BSP from broccoli stems exhibited excellent antioxidant capacity. The maximum 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl(DPPH)radical scavenging rate reached 42.86% at a BSP extract concentration of 1.0 mg·mL^{-1}, while the highest hydroxyl radical scavenging rate was 67.40% at 0.9 mg·mL^{-1}. Utilizing the natural antioxidant activity of pectin, composite coatings with different formulations could markedly improve the storage quality of fresh-cut potatoes, effectively suppress browning, water loss and variations in related enzyme activities, thereby prolonging the shelf-life. These findings provide a feasible approach for broccoli stem valorization and fresh-cut potato preservation.

收稿日期:2026-07-08;**修回日期:**2026-08-28

基金项目:郑州工程技术学院横向项目(2026410112000082)

作者简介:张小梅,女,讲师,主要从事天然产物开发与加工利用研究。E-mail:20151013@zzut.edu.cn

Key words: Broccoli stem pectin; Ultrasonic-synergized compound enzymatic extraction; Edible coating; Potato; Freshness preservation

西蓝花又名绿菜花、嫩茎花椰菜（*Brassica oleracea* var. *italica*），属十字花科芸薹属一年生或二年生植物，因其口感佳、营养丰富（富含多酚、黄酮膳食纤维、蛋白质和矿物质等），并具有多种健康功能而在全球被广泛食用[1-2]。西蓝花的原产地在地中海东部沿岸地区，如意大利，近些年来才在我国栽培发展，因其丰富的营养成分，被誉为“蔬菜皇冠”。

市售西蓝花球通常带有约 10 cm 长的附着茎段。虽然靠近花球的鲜嫩茎部可食用，但底部茎段已木质化，不适合作为食物消费。若能实现茎和叶的潜在食用价值，可将全球西蓝花作物的产量从15%提高至 83%，从而提升其生产效率和可持续性[3]。西蓝花茎在西蓝花植株中占比为 20%~30%，其营养成分构成与花球部位相似[4]，具有较高的维生素（维生素 C、E、A、K）、必需矿物质（氮、钾、钙、铁）、膳食纤维、酚类物质、硫代葡萄糖苷及 γ-氨基丁酸（γ-aminobutyric acid，GABA）等营养成分及生物活性物质含量[5]，可作为富含生物活性化合物的高附加值产物。但目前西蓝花茎常被作为废弃物而直接丢弃，不仅造成了资源浪费，也污染了环境[6]。目前有关西蓝花废弃物的研究多集中在活性成分硫代葡萄糖苷[7-11]、酚类物质[10,12-13]、抗菌肽[14-16]等方面，而含有约 1.6%膳食纤维的西蓝花茎和叶片却研究较少。果胶作为一种具有抗腹泻、抗肿瘤和降糖作用的可溶性膳食纤维[10]，是一种来源广泛、结构复杂的植物多糖，具有安全无毒、可生物降解且可食用等特点，在食品工业中已被广泛用作胶凝剂、增稠剂和胶体稳定剂[17]。近年来，西蓝花茎果胶的提取和应用也逐渐得到了越来越多的关注[18-22]。

Dao 等[23]通过对比常规加热和微波辅助加热响应面优化法提高红肉火龙果（三角柱火龙果）果皮、白肉火龙果果皮以及百香果果皮果胶得率。Zhang 等[24]采用响应面法优化超声辅助提取嘉宝果多糖的工艺参数、结构特性及抗氧化活性。随着全球果胶市场规模的增长，研究方向也由果胶的凝胶性[25]、成膜性[26]、乳化性、提取工艺[17,23]发展到果胶与其他分子的相互作用等[27]。研究表明，甘油作为增塑剂与果胶的交互作用对可食用薄膜各项性能具有显著影响[28]。Lin 等[29]添加 10%纳米纤维素晶体的芒果果皮果胶/壳聚糖基薄膜表现出最优/高的拉伸性能与水蒸气透过率。因此，果胶作为天然可食性高分子，由于其成膜性和生物相容性良好，可通过与其他聚合物复配，弥补单一膜材短板，适用于可食性涂膜剂的相关研发[27,30]。

多项研究已证实可食膜/涂层在果蔬表面形成阻隔层，能够更好地锁住水分，保持湿度，通过富集气体，可以延缓成熟进程，为果蔬表面形成良好的防护屏障。因此，可食性涂膜技术可作为一种绿色环保的保鲜方法，以多糖、脂质等天然高分子物质为成膜基材，添加可食用的交联剂、增塑剂、抗氧化剂等，通过特定加工工艺形成网络结构，以浸渍、喷洒、涂布等方式覆盖于食品表面，可有效隔绝氧气、水分和微生物，减少食品品质劣变，达到保鲜目的[5]。鉴于此，笔者通过超声波协同复合酶解法优化西蓝花茎粗果胶的提取工艺，测定体外抗氧化活性后将其与壳聚糖组合为复合基质，构建植物源生物保鲜膜，旨在为西蓝花废弃茎的资源化高值利用提供新途径，同时为鲜切马铃薯绿色保鲜技术的开发提供试验依据与技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料

试验于 2025 年 2 月至 2026 年 6 月在郑州工程技术学院紫外可见分析实验室和仪器分析测试中心进行。西蓝花茎由学校食堂后勤部提供，马铃薯购自当地农资市场。把西蓝花茎洗干净，然后切成均匀大小和粗细的片状，在沸水中漂烫 5 min，再用凉水洗净（为了不让果胶多糖分解，导致果胶多糖产量下降），挤出多余的水分后，在 60 ℃烤箱烘干后磨碎，过 80 目筛后装入自封袋中，避光保存。

1.2　方法

1.2.1　粗果胶提取的工艺流程　果胶的提取参考让凤菊等[31]的方法，略有改动。工艺流程：西蓝花茎→漂烫→凉水洗净→60 ℃鼓风干燥→粉碎过筛（80目）→复合酶（半纤维素酶、酸性蛋白酶质量比=1∶1）（先超声后酶解）→灭酶离心→80%乙醇过夜→60 ℃烘干至恒质量→西蓝花茎粗果胶（BSP）。

1.2.2　粗果胶得率的计算　西蓝花茎粗果胶得率按式（1）计算。

$$P/\% = m/M \times 100。\quad (1)$$

式中：P 为粗果胶得率（%）；m 为提取得到的粗果胶质量（g）；M 为西蓝花茎粉末质量（g）。

1.2.3　单因素试验设计　称取 1.00 g 预处理后的

西蓝花茎粉置于 50 mL 离心管中，固定半纤维素酶与酸性蛋白酶复配比为 1∶1（质量比）、pH 4.8、酶解温度 50 ℃，改变复合酶的添加量（样品质量的 3%、4%、5%、6%、7%）、液料比（10∶1、15∶1、20∶1、25∶1、30∶1 mL·g^{-1}）、超声时间（40、60、80、100、120 min）、超声功率（240、300、360、420、480 W）、酶解时间（30、60、90、120、150 min）5 个因素条件，探究各个因素对复合酶辅助超声法提取西蓝花茎中粗果胶得率的影响。

1.2.4 响应面试验设计 根据单因素方差分析结果，选择复合酶用量（A）、液料比（B）、超声时间（C）、酶解时间（D）作为自变量。进行四因子三水平优化试验，得到最佳提取组合试验设计方案，见表 1。

表 1 响应面采用的因素及水平

Table 1 Factor and level used in the response surface design

因素 Factor	水平 Level		
	−1	0	1
A 复合酶添加量 Composite enzyme dosage/%	5	6	7
B 液料比 Liquid-to-solid ratio/（mL·g^{-1}）	20∶1	25∶1	30∶1
C 超声时间 Ultrasonication time/min	60	80	100
D 酶解时间 Enzymatic hydrolysis time/min	60	90	120

1.2.5 抗氧化活性测定 DPPH 自由基清除率：以叶群丽等[32]和王锦秀等[33]的研究方法作为参考并作修改。在最后得出的最佳工艺试验中获得的果胶提取液，先配制一个 10 mg·mL^{-1}的母液，从母液中取出 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL，用蒸馏水定容至 10 mL，配制成浓度依次为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 mg·mL^{-1}的样品溶液，取 6 支 10 mL 试管，各取 4 mL 不同浓度的果胶提取液，分别加入 4 mL 0.2 mol·L^{-1} DPPH 溶液，记为 A_1；同时以蒸馏水和 80%乙醇溶液作对照，记为 A_0、A_2；摇匀后，于室温避光 30 min，用紫外光谱仪对 400~600 nm 波段进行扫描，并于 517 nm 波段进行了吸收。对照为维生素 C 组。根据公式（2）计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率/\%} = \left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100。 \quad (2)$$

羟基自由基清除率参考侯敏娜等[34]的方法，稍作修改。先配制成 10 mg·mL^{-1}的母液，再配制浓度为 0.0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mg·mL^{-1}的样品溶液，取 6 只 10 mL 试管，在每一支管中按顺序加入 2.00 mL 不同浓度梯度的果胶提取液、1.8 mmol·L^{-1} $FeSO_4$溶液 2.00 mL、2 mL 1.8 mmol·L^{-1}的水杨酸溶液和 2.00 mL 8.8 mmol·L^{-1} H_2O_2溶液，混合均匀后，37 ℃避光水浴 30 min，然后在 510 nm 下测定吸收值 A_1。空白对照用蒸馏水代替样品溶液，同上步骤测定吸光值 A_0。用维生素 C 作为标准对照，以 A_2表示。根据公式（3）计算羟基自由基清除率。

$$\text{羟基自由基清除率/\%} = \left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100。 \quad (3)$$

1.2.6 复合涂膜剂的制备 复合膜的原料比例如表 2 所示，首先将西蓝花茎粗果胶、溶菌酶分别溶于含有去离子水的烧杯中，在 70 ℃水浴锅中加热溶解，制成质量分数分别为 1%、2%、3%的溶液，然后将壳聚糖溶于 1%的乙酸溶液 70 ℃水浴加热，制得质量分数分别为 1%、2%、3%的溶液，最后加入质量分数为 2%的甘油作为增塑剂。将制得的各个质量分数的壳聚糖、果胶、溶菌酶和甘油溶液等体积称取后，按表 2 比例制成复合涂膜液。以不做任何处理的空白组为对照（CK）。

表 2 壳聚糖、果胶、溶菌酶按不同比例配制复合涂膜剂

Table 2 Preparation of composite film agents with different ratios of chitosan, BSP and lysozyme %

原料 Raw material	CK	A011	A101	A110	B111	B211	B311	C121	C131	D112	D113
壳聚糖 Chitosan	0	0	1	1	1	2	3	1	1	1	1
果胶 Pectin	0	1	0	1	1	1	1	2	3	1	1
溶菌酶 Lysozyme	0	1	1	0	1	1	1	1	1	2	3
甘油 Glycerol	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

1.2.7 鲜切马铃薯涂膜后理化指标的测定 将马铃薯（无机械损伤和虫害）去皮后切成大小均等的鲜切马铃薯切片，浸泡在水中备用。每组选取 15 份平行样品，然后将每组鲜切马铃薯块分别放置到不同配比的复合涂膜剂中进行预涂膜处理，各组均处理 5 min 后取出晾干，密封在保鲜袋中，然后在 4 ℃恒温培养箱中避光贮藏，每隔 2 d 取出 3 个样品，测定鲜切马铃薯块在贮藏过程中理化指标的变化。

根据文献[35]测定硬度，修改如下：采用质构仪穿刺法测定硬度，TA39 探头，触发点负载 10 g，测速 1 mm·s^{-1}，穿刺距离 3 mm。每个处理测定鲜切马铃薯块茎 9 个部位，取其平均值。

采用称量法[36]测定失重率，以最初果实质量（m_0）与每次测定果实质量（m_1）之差占最初果实质量的百分比表示，公式如下：

$$失重率/\%=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times 100\ 。\qquad (4)$$

根据文献[37]测定褐变度，修改如下：称取 5 g 马铃薯果肉组织，加入 5 mL 95%乙醇，研磨成匀浆，在 4000 r·min^{-1} 条件下离心 20 min，取上清液在 420 nm 下测其 OD 值，以蒸馏水进行调零，重复测定 3 次。采用邻苯二酚法比色法测定多酚氧化酶（PPO）活性[38-39]，采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶（POD）活性[38]。

1.3　数据处理

采用 Design-Expert V8.0.6.1 软件开展试验设计，采用 IBM SPSS Statistics 软件进行统计学分析，使用 Origin 8.0 与 Prism 9.5 软件进行数据可视化绘图。

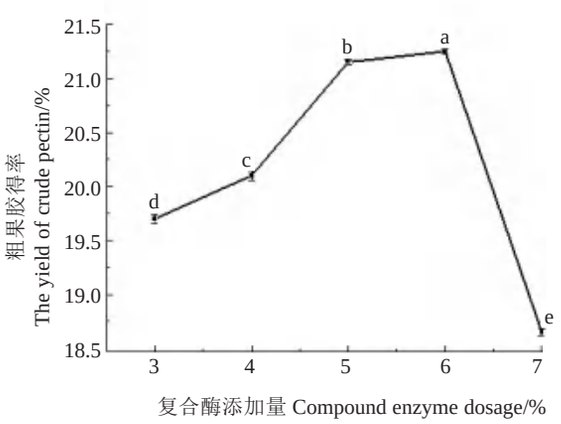
2　结果与分析

2.1　复合酶添加量对粗果胶得率的影响

西蓝花茎中粗果胶得率与复合酶添加量的关系如图 1 所示。在复合酶添加量从 3%增加至 6%的过程中，粗果胶得率由 19.70%显著升高至 21.25%；当复合酶添加量继续增加至 7%时，粗果胶得率急剧下降至 18.65%。因此，选取复合酶添加量 6%进行后续单因素优化试验。

2.2　液料比对粗果胶得率的影响

液料比与西蓝花茎粗果胶得率的关系如图 2 所示。当液料比从 10∶1 mL·g^{-1} 增加至 25∶1 mL·g^{-1} 的过程中，粗果胶得率由 14.50%显著增加至 23.80%；当液料比继续增加至 30∶1 mL·g^{-1} 时，粗果胶得率急剧下降至 13.30%。因此，选取液料比 25∶1 mL·g^{-1} 进行后续单因素优化试验。



注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。图 2~5 同。

Note: Different samll letters indicate significant difference at 0.05 level. The same for figure 2-5.

图 1　复合酶添加量对西蓝花茎中粗果胶得率的影响

Fig. 1　Effects of compound enzyme dosage on the yield of crude BSP

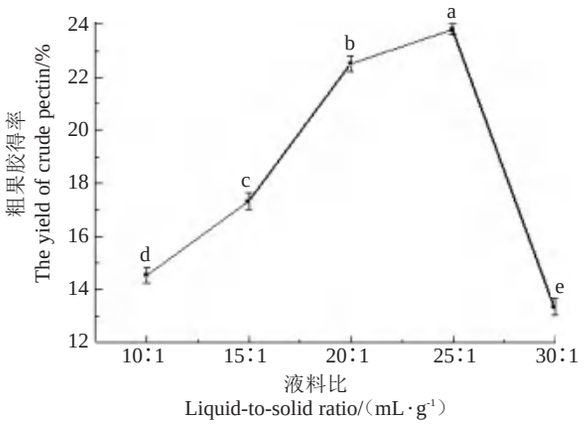


图 2　液料比对西蓝花茎中粗果胶得率的影响

Fig. 2　Effects of liquid-to-solid ratio on the yield of crude BSP

2.3　超声时间对粗果胶得率的影响

超声时间与西蓝花茎粗果胶得率的关系如图 3 所示。在超声时间从 40 min 增加至 80 min 的过程中，粗果胶得率由 22.97%显著上升至最大值 24.00%；超声时间超过 80 min 后，粗果胶得率开始下降；当超声时间延长至 120 min 时，粗果胶得率急剧降低至 20.33%。因此，选取超声时间 80 min 进行后续单因素优化试验。

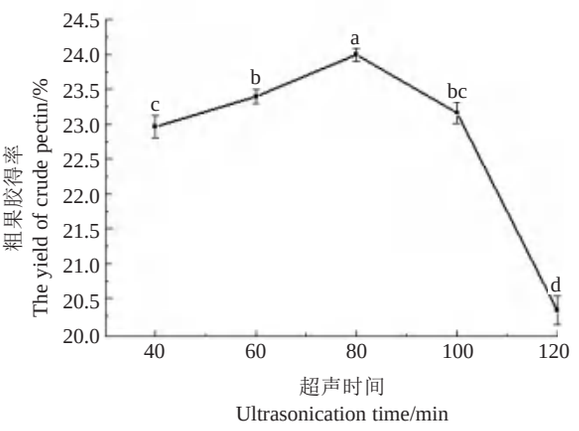


图 3　超声时间对西蓝花茎中粗果胶得率的影响

Fig. 3　Effects of ultrasonication time on the yield of crude BSP

2.4　超声功率对粗果胶得率的影响

西蓝花茎中粗果胶得率与超声功率的关系如图 4 所示。在超声功率由 240 W 增加至 360 W 过程中，粗果胶得率由 16.20%显著上升至峰值

24.07%。超声功率超过 360 W 之后，粗果胶得率开始显著下降；当超声功率升高至 480 W 时，粗果胶得率降低至 17.90%。综合以上结果，选取超声功率 360 W 进行后续单因素优化试验。

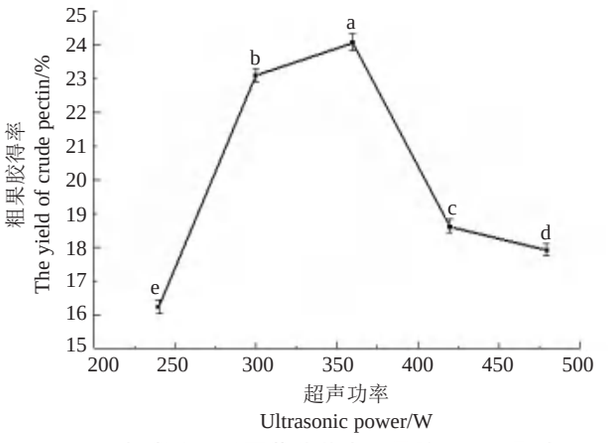


图 4　超声功率对西蓝花茎中粗果胶得率的影响

Fig. 4　Effects of ultrasonic power on the yield of crude BSP

2.5　酶解时间对粗果胶得率的影响

西蓝花茎中粗果胶得率与酶解时间的关系如图 5 所示。酶解时间在 30~90 min 范围内，随着酶解时间的延长，粗果胶得率由 14.70%显著上升至最高 25.37%。酶解时间超过 90 min 后，粗果胶得率开始显著下降；当酶解时间延长至 150 min 时，得率降低至 18.70%。综合以上结果，选取酶解时间 90 min 进行后续单因素优化试验。

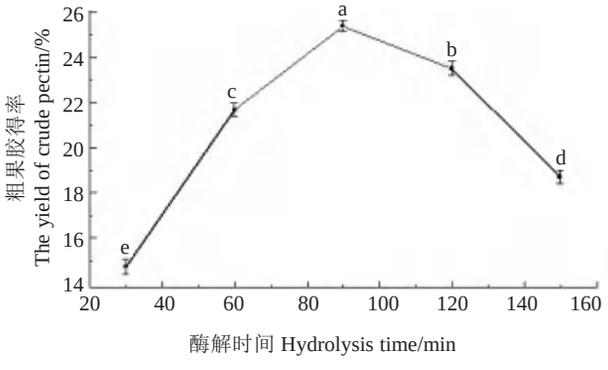


图 5　酶解时间对西蓝花茎中粗果胶得率的影响

Fig. 5　Effects of hydrolysis time on the yield of crude BSP

2.6　响应面试验分析

综合方差分析结果，本响应面试验考察了复合酶添加量、料液比、超声时间、酶解时间对粗果胶得率的影响。由表 3 可知，不同工艺条件下粗果胶得率差异明显，变化范围为 16.02%~26.59%。其中在复合酶添加量 6%、液料比 25∶1 mL·g^{-1}、超声时间 80 min、酶解时间 90 min 条件下粗果胶得率最高，可达 26.59%；在复合酶添加量 6%、液料比 30∶1 mL·g^{-1}、超声时间 60 min、酶解时间 90 min 条件下粗果胶得率最低。

2.7　响应面回归模型方差分析

通过 *F* 值、响应面二次多项式模型的方差分析（ANOVA）检验了回归模型的显著性，见表 4。失拟项通常用来描述回归模型的合适程度，考察没有在回归范围内被包含的数据点。本研究模型失拟项 *F* 值为 0.743 6，*P* 值为 0.680 5，表明失拟项不显著，该模型拟合度较好。A、B、C、D、AC、BC、BD、B^2、C^2、D^2 对西蓝花茎粗果胶得率的影响显著，交互项 AB、AD、CD 均不显著。由各因素 *P* 值可以得知，各因素对西蓝花茎粗果胶得率的影响顺序为 C>D>B>A，即超声时间>酶解时间>液料比>复合酶添加量。

对西蓝花茎粗果胶得率的二次多项式进行解析，通过软件模型得出最佳工艺条件为：复合酶添加量为 6.5%，液料比为 23∶1 mL·g^{-1}，超声时间为 94 min，酶解时间为 85 min，按此工艺做 5 次平行验证试验，粗果胶得率为 26.13%，与模型预测结果 26.25%有少许误差，但属于正常误差范围，说明模型具有一定可行性。

2.8　模型交互项分析

各因素之间的相互作用与粗果胶得率之间的关系可以通过三维响应面来预测。响应面的斜率表示每个因素对西蓝花茎粗果胶得率的影响，各因素的影响越大，响应面越陡峭。模型各因素间交互作用结果见图 6。响应面构建模型图直观反映了西蓝花茎粗果胶得率随着各因素水平变化而变化，A 与 C、B 与 D 曲线坡度最为陡峭，说明复合酶添加量与超声时间、液料比与酶解时间的交互作用最为显著，其次是 B 与 C，说明液料比与超声时间的交互作用较为显著，与方差分析的结果一致。

2.9　抗氧化分析

2.9.1　DPPH 自由基清除率　西蓝花茎中的果胶与维生素 C 对 DPPH 自由基清除率如图 7 所示，随着溶液浓度从 0.2 mg·mL^{-1} 增加至 1.0 mg·mL^{-1}，粗果胶与维生素 C 对 DPPH 自由基的清除率均呈缓慢上升趋势。当粗果胶浓度为 1.0 mg·mL^{-1} 时，清除率达到最高，为 42.86%；而在相同浓度下，西蓝花茎粗果胶对 DPPH 自由基的清除率明显低于维生素 C。此外，西蓝花茎果胶与维生素 C 对 DPPH 自由基的清除率差异已从 0.2 mg·mL^{-1} 时的 76.77%逐渐

表 3　响应面设计及结果

Table 3　Response surface design and experimental results

编号 Number	A 复合酶添加量 Composite enzyme dosage/%	B 液料比 Liquid-to-solid ratio/（mL·g^{-1}）	C 超声时间 Ultrasonication time/min	D 酶解时间 Enzyme hydrolysis time/min	粗果胶得率 Crude pectin yield/%
1	5	20∶1	80	90	23.82
2	7	20∶1	80	90	24.35
3	5	30∶1	80	90	20.50
4	7	30∶1	80	90	23.80
5	6	25∶1	60	60	16.21
6	6	25∶1	100	60	21.73
7	6	25∶1	60	120	19.92
8	6	25∶1	100	120	23.41
9	5	25∶1	80	60	17.76
10	7	25∶1	80	60	23.11
11	5	25∶1	80	120	23.62
12	7	25∶1	80	120	25.42
13	6	20∶1	60	90	23.01
14	6	30∶1	60	90	16.02
15	6	20∶1	100	90	24.94
16	6	30∶1	100	90	23.60
17	5	25∶1	60	90	21.74
18	7	25∶1	60	90	19.12
19	5	25∶1	100	90	20.86
20	7	25∶1	100	90	26.50
21	6	20∶1	80	60	21.95
22	6	30∶1	80	60	16.06
23	6	20∶1	80	120	20.99
24	6	30∶1	80	120	23.45
25	6	25∶1	80	90	24.85
26	6	25∶1	80	90	26.59
27	6	25∶1	80	90	23.35
28	6	25∶1	80	90	25.79
29	6	25∶1	80	90	24.59

缩小至 1.0 mg·mL^{-1}时的 53.34%。

2.9.2　*羟基自由基清除率*　西蓝花茎粗果胶与维生素 C 对羟基自由基的清除率如图 8 所示，随着溶液浓度从 0.2 mg·mL^{-1}增加至 1.0 mg·mL^{-1}时，粗果胶与维生素 C 对羟基自由基的清除率均呈上升趋势。当粗果胶浓度为 0.9 mg·mL^{-1}时，清除率达到最高，为 67.40%；用维生素 C 做标准对照，结果显示，西蓝花茎粗果胶对羟基自由基的清除率明显低于维生素 C。此外，西蓝花茎粗果胶与维生素 C 对羟基自由基的清除率差异已从 0.3 mg·mL^{-1}时的 78.50%逐渐缩小至 0.9 mg·mL^{-1}时的 26.50 %。

2.10　不同比例果胶复合涂膜剂对马铃薯硬度和失重率的影响

硬度和失重率是鲜切马铃薯品质最重要的评价指标。鲜切马铃薯组织损伤后因蒸腾作用和呼吸作用强度较高，因此在贮藏期间极易流失水分，不仅造成失重率上升，还会使其果肉硬度降低，品质劣变加快。从图 9 可以看出，从 A 系列单一组分数据来看，无壳聚糖的 A011 组硬度保持的效果优于无果胶的 A101 组和无溶菌酶的 A110 组。在 B 系列含壳聚糖浓度梯度组中，2%壳聚糖的 B211 组在贮藏期间能维持较高的硬度，且失重率低于 2%壳聚糖的 B111 组，表现出最优的综合保鲜效果；在果胶浓度梯度组中，随着果胶浓度的提升，马铃薯的硬度维持和失重率控制效果均得到明显改善，3%果胶的 C131 组贮藏期硬度最好，后期失重率也处于较低水平，是综合表现优异的配方。而 D 系列溶菌酶梯度组中硬度和失重率与 B111 组差异不明显。综合硬度和失重率指标，B211 和 C131 组对鲜

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of regression model

差异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value	显著性 Significance
模型 Model	236.00	14	16.86	13.62	< 0.000 1	**
A 复合酶添加量 Compound enzyme dosage	16.33	1	16.33	13.20	0.002 7	**
B 液料比 Liquid-to-solid ratio	20.36	1	20.36	16.45	0.001 2	**
C 超声时间 Ultrasonication time	52.17	1	52.17	42.16	< 0.000 1	**
D 酶解时间 Hydrolysis time	33.30	1	33.30	26.91	0.000 1	**
AB	1.92	1	1.92	1.55	0.233 5	
AC	17.06	1	17.06	13.78	0.002 3	**
AD	3.15	1	3.15	2.55	0.132 9	
BC	7.98	1	7.98	6.45	0.023 6	*
BD	17.43	1	17.43	14.09	0.002 1	**
CD	1.03	1	1.03	0.83	0.377 0	
A^2	1.24	1	1.24	1.00	0.333 6	
B^2	13.66	1	13.66	11.04	0.005 0	**
C^2	29.43	1	29.43	23.78	0.000 2	**
D^2	42.47	1	42.47	34.32	< 0.000 1	**
残差 Residual	17.32	14	1.24			
失拟项 Lack of fit	11.26	10	1.13	0.743 6	0.680 5	不显著 Not significant
误差 Pure error	6.06	4	1.51			
总变异 Total variation	253.33	28				

注:**表示在 0.01 水平差异极显著;*表示在 0.05 水平差异显著。

Note: ** represents extremely significant difference at 0.01 level; * represents significant difference at 0.05 level.

切马铃薯贮藏品质的保护效果较优,可作为后续优化研究的重点方向。

2.11 不同比例果胶复合涂膜剂对马铃薯褐变度的影响

褐变度是反映马铃薯贮藏期间酶促褐变程度的核心指标,褐变度越低,说明复合涂膜对褐变的抑制效果越好。从图 10 可以看出,空白组(CK)褐变度始终处于所有组最高水平,贮藏后期(10 d)褐变度接近 0.7,说明无涂膜保护时,马铃薯组织直接暴露在空气中,极易发生酶促褐变;鲜切马铃薯贮藏期间随着时间的延长褐变度呈持续上升趋势,但涂膜组的上升幅度明显低于空白组,说明复合涂膜能有效抑制鲜切马铃薯的褐变进程。从 A 系列单一组分数据来看,无壳聚糖组褐变度高于含壳聚糖组,说明壳聚糖的成膜性可减少氧气与组织的接触机会,从而抑制酶促褐变;在 B 系列壳聚糖浓度梯度组中,随着其浓度的增加,褐变度在贮藏前期呈逐渐降低趋势,再次证明了高浓度壳聚糖形成的致密膜能有效地阻隔氧气,降低组织内部氧含量,抑制褐变反应;在 C 系列果胶浓度梯度组中,C131 组褐变度在所有涂膜组中最低,贮藏 10 d 时褐变度仍远低于空白组和其他处理组,说明高浓度果胶能改善膜的致密性与阻隔性,与壳聚糖协同形成更有效的氧阻隔层。而 D 系列溶菌酶浓度梯度组中,随着浓度的提升,褐变度变化幅度相对较小,说明溶菌酶对褐变的直接抑制效果有限,其作用更多的是通过抑菌减少微生物对细胞结构的破坏,间接延缓褐变程度。

2.12 不同比例果胶复合涂膜剂对马铃薯中多酚氧化酶和过氧化物酶活性的影响

从图 11 可以看出,贮藏期间鲜切马铃薯的多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性整体上随贮藏时间延长呈降低趋势,酶活性峰值多出现在贮藏前期的 2~4 d。可能原因为贮藏 2~4 d,果蔬受采后生理胁迫产生氧化应激,再加上复合涂膜尚未完全固化、活性成分缓释滞后、氧气阻隔能力有限,导致各组 PPO 活性呈上升趋势;随着贮藏时间延长,壳聚糖-溶菌酶-果胶交联结构趋于稳定,溶菌酶与多糖活性成分持续渗透发挥抑酶、抑菌作用,膜层有效降低组织氧含量、维持细胞结构完整,显著抑制 PPO 活性与催化能力,因此贮藏 6 d 后多酚氧化酶活性显著降低并维持在较低水平。

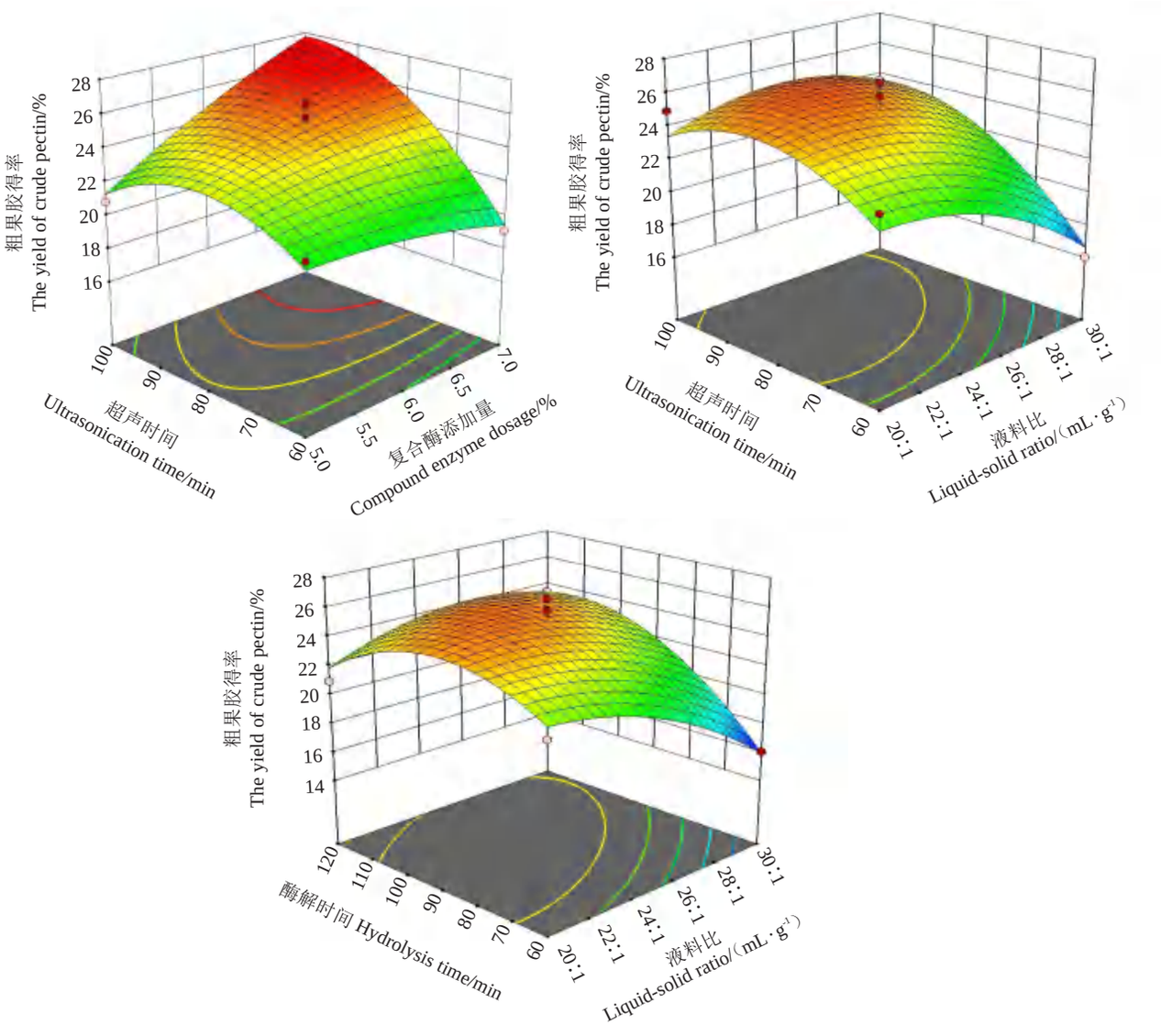


图 6　各因素交互作用对粗果胶得率的影响

Fig. 6　Effects of interactions among different factors on crude BSP yield

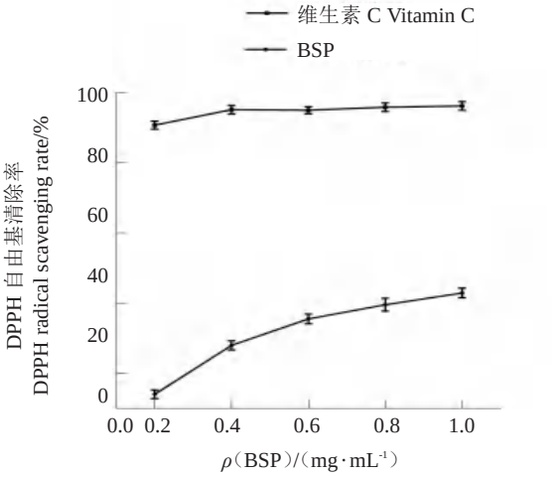


图 7　不同浓度西兰花茎果胶与维生素 C 对 DPPH 清除率的影响

Fig. 7　Effects of different concentrations of BPS and vitamin C on DPPH radical scavenging rate

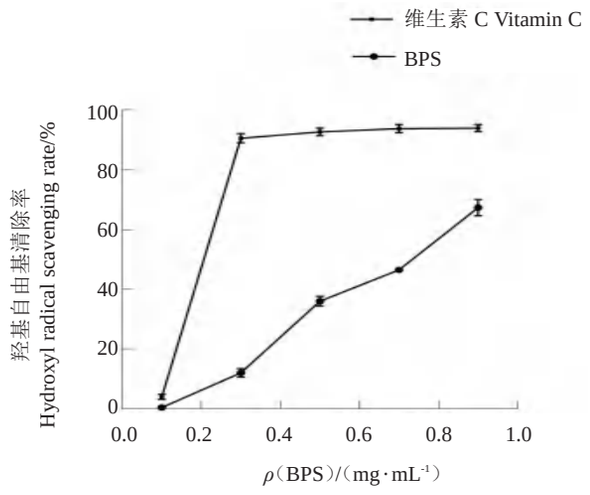
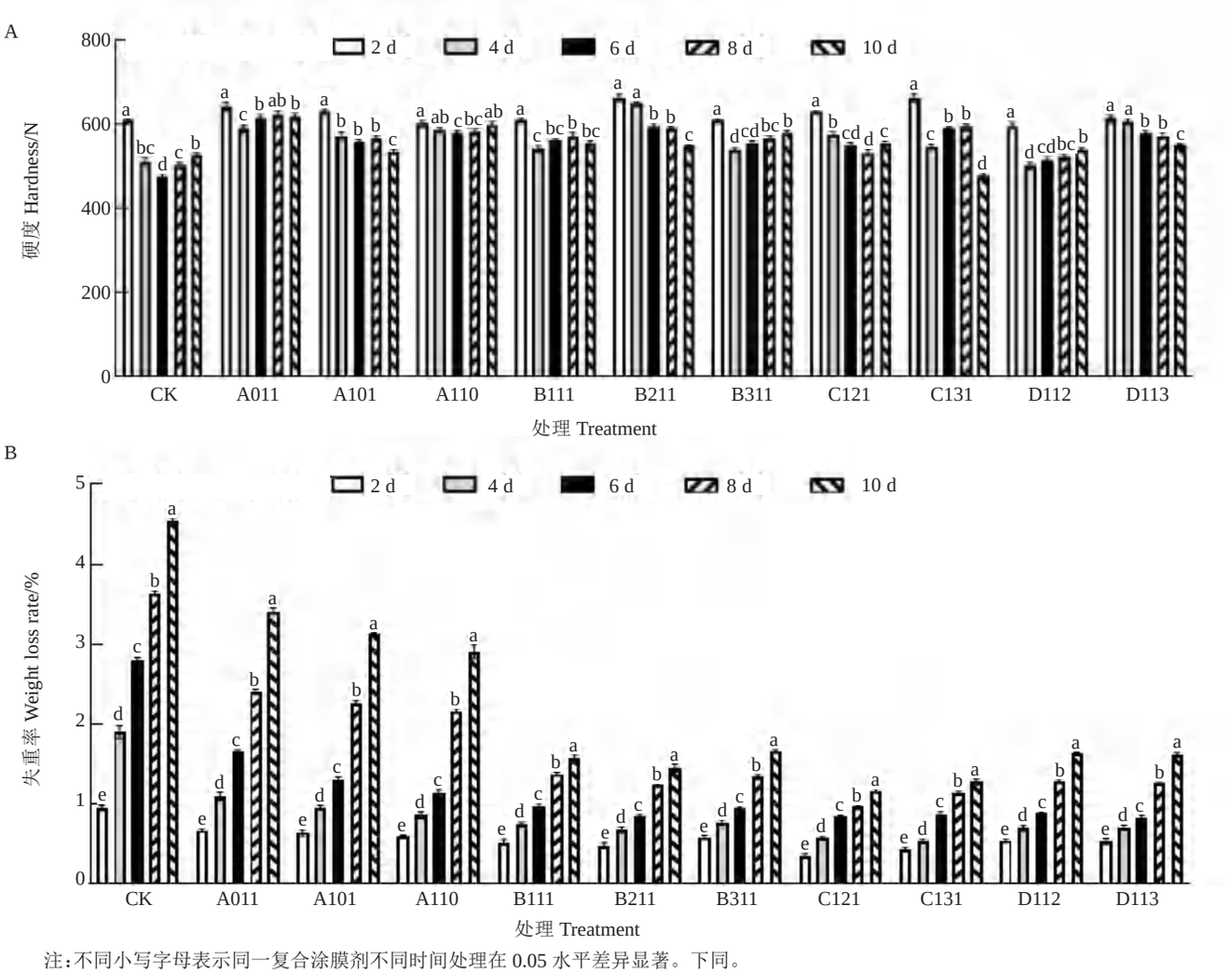


图 8　不同浓度西兰花茎果胶与维生素 C 对羟基自由基清除率的影响

Fig. 8　Effects of different concentrations of BPS and vitamin C on hydroxy1 radical scavenging rate



注：不同小写字母表示同一复合涂膜剂不同时间处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different time tretaments of the same composite film agent at 0.05 level. The same below.

图 9　不同比例复合涂膜剂处理鲜切马铃薯贮藏期间硬度（A）和失重率（B）的变化

Fig. 9　Changes in hardness（A）and weight loss rate（B）of fresh-cut potatoes treated with composite film agents at different proportions during storage

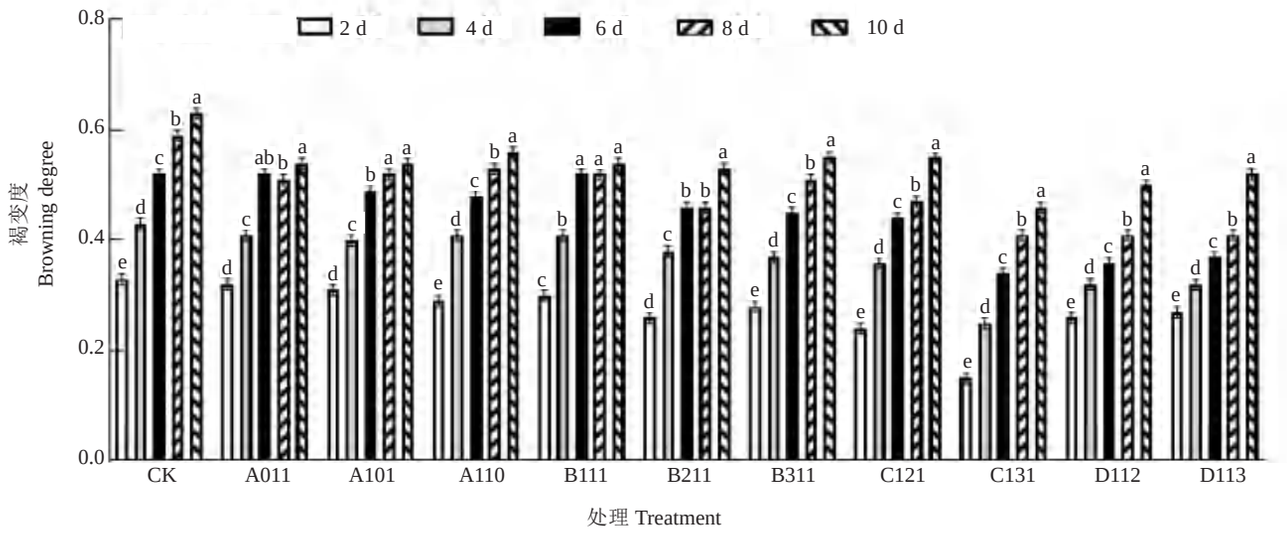


图 10　不同比例复合涂膜剂处理鲜切马铃薯贮藏期间褐变度的变化

Fig. 10　Changes in browning degree of fresh-cut potato treated with composite film agents at different proportions during storage

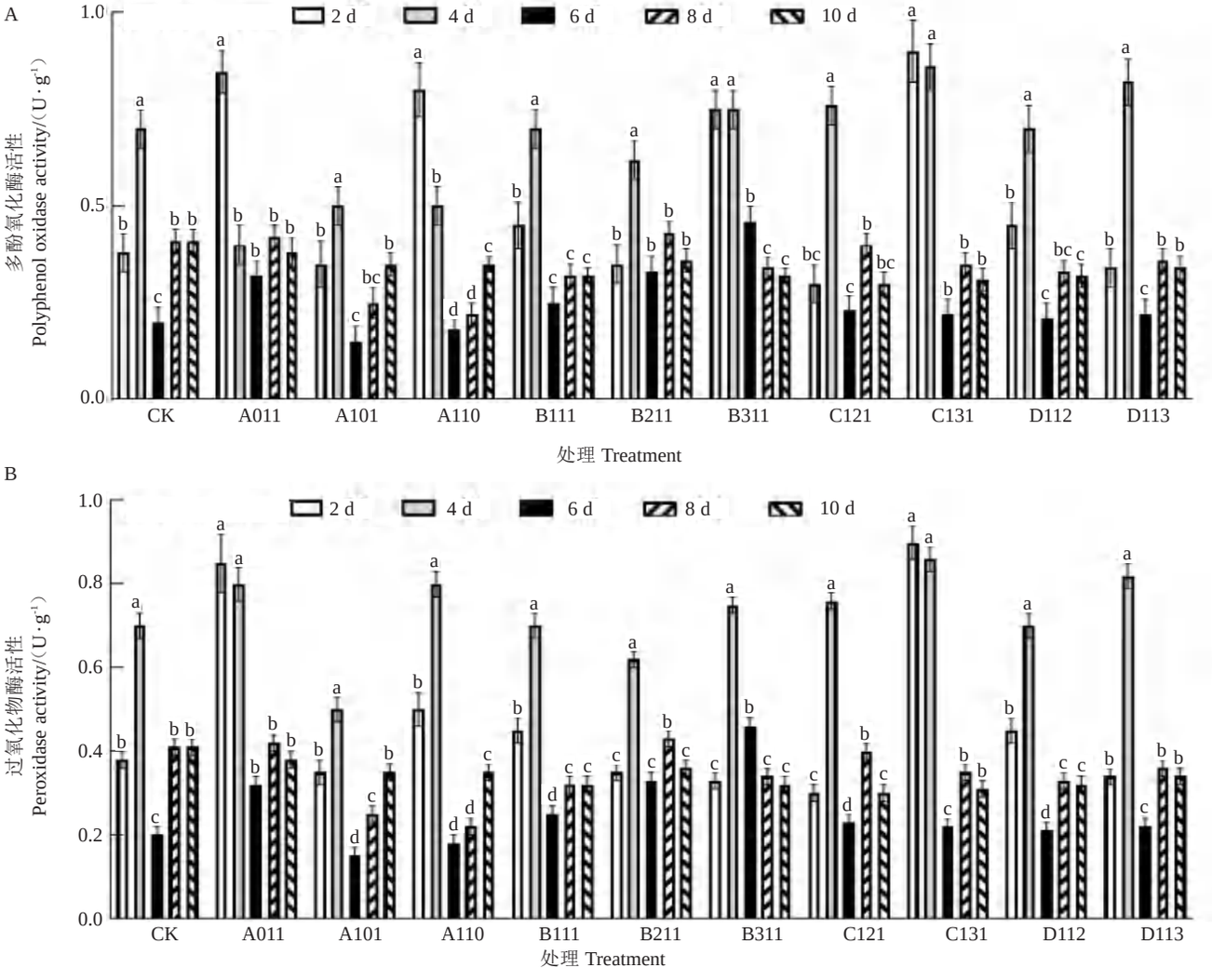


图 11　不同比例复合涂膜剂处理鲜切马铃薯贮藏期间多酚氧化酶活性（A）和过氧化物酶活性（B）的变化

Fig. 11　Changes in polyphenol oxidase activity（A）and peroxidase activity（B）of fresh-cut potato treated with composite film agents at different proportions during storage

3 讨论与结论

西蓝花茎中含纤维素与结构蛋白，能有效地将表皮细胞分解，具有酸性蛋白酶的辅助作用，能解除果胶与蛋白的交联，二者能协同促进果胶的溶出[40]。随着复合酶添加量的增多，果胶得率上升，但超过6%以后，粗多糖得率不升反降，可能原因是持续增加酶含量会引起杂质的溶出和粗果胶的分解[34]。适宜的液料比可保障酶与底物充分接触，改善底物分散性，25∶1 mL·g^{-1}的液料比可解决底物接触不充分或酶体系浓度稀释的问题，最大化提升果胶溶出效率[41]。超声空化效应可有效破坏植物组织结构、瓦解细胞壁屏障，促进不溶性果胶向水溶性果胶转化，但超声时间过长和超声功率过高均会破坏果胶多糖骨架结构，引发糖苷键断裂，导致果胶进一步降解[42-43]，而酶解时间长则会导致果胶的分解以及体系中酶的稳定性发生改变[35]。本研究结果表明，复合酶添加量为6%、液料比为25∶1 mL·g^{-1}、超声时间为80 min、酶解时间为90 min条件下，粗果胶得率为26.59%，与响应面模型预测结果26.25%基本相符合，说明回归模型拟合度良好，具有一定可行性。

体外抗氧化活性结果表明，西蓝花茎粗果胶对DPPH、羟基自由基的清除能力均表现出明显的浓度依赖性，随果胶浓度升高自由基清除效果呈现上升趋势，在最佳作用浓度下可有效清除体内活性自由基。相较于维生素C标准品，果胶的抗氧化效果虽略有逊色，但浓度提升过程中二者对自由基清除率的差距逐渐缩小，充分证明该果胶可作为优良的天然抗氧化活性物质开发利用。

硬度、失重率、褐变度、多酚氧化酶（PPO）与过氧化物酶（POD）活性是评判鲜切马铃薯贮藏保鲜效果的主要指标。随着贮藏时间的延长，各个比例复合涂膜剂处理下的马铃薯硬度整体上均呈下降趋势，但涂膜组的硬度下降幅度明显小于空白组，说明未进行涂膜处理的鲜切马铃薯缺少物理防护屏障，无法抵御外界环境带来的影响[44]。空白组的失重率明显高于含壳聚糖的复配组，表明壳聚糖可能是抑制水分流失的关键组分，与文献[36]中单一壳聚糖可抑制冷藏期间果蔬呼吸作用和微生物繁殖的结果一致。而溶菌酶则主要是通过抑菌作用延缓马铃薯的劣变，对膜的物理阻隔性没有直接显著影响[45]。综合硬度、失重率、褐变度各项贮藏指标，1%壳聚糖、3%果胶复配配方保鲜效果较优。鲜切马铃薯由于细胞膜结构遭到破坏，在贮藏过程中易发生酶促褐变，而细胞质中的多酚氧化酶和过氧化物酶是驱动褐变反应的关键酶类，其活性水平直接反映了鲜切马铃薯的褐变程度与贮藏品质[46]。酶活测定结果表明，复合涂膜可明显抑制贮藏过程中马铃薯PPO、POD活性的异常升高，通过稳定细胞结构、降低果实氧化应激反应，从根源上延缓酶促褐变进程，有效维持鲜切马铃薯的贮藏品质。

综上所述，本研究优化的超声波协同复合酶提取工艺高效、稳定、重复性好，可高效提取西蓝花茎源粗果胶。所提取的果胶兼具一定的体外抗氧化活性与成膜保鲜性能，制备的复配生物保鲜膜绿色安全、保鲜效果明显，可有效改善鲜切马铃薯的贮藏品质、延长货架期。本研究不仅实现了西蓝花茎加工废弃物的资源化高值利用，也为果蔬绿色可降解保鲜材料的开发与应用提供了新的理论依据和技术支撑，具有良好的经济与应用价值。

参考文献

[1] Wang Q，Zhao Y，Zhang W，et al. Valorization of broccoli waste：Unlocking its potential as a functional food ingredient for sustainable nutrition[J]. Journal of Advanced Research，2026，83：1-23.

[2] Li H，Xia Y，Liu H Y，et al. Nutritional values，beneficial effects，and food applications of broccoli（*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck）[J]. Trends in Food Science & Technology，2022，119：288-308.

[3] Liu M，Zhang L，Ser S，et al. Comparative phytonutrient analysis of broccoli by-products：The potentials for broccoli by-product utilization[J]. Molecules，2018，23（4）：900.

[4] Gudi O I，Martn A，Casquete R，et al. Evaluation of broccoli（*Brassica oleracea* var. *italica*）crop by-products as sources of bioactive compounds[J]. Scientia Horticulturae，2022，304：111284.

[5] Ali M，Ali A，Ali S，et al. Global insights and advances in edible coatings or films toward quality maintenance and reduced post-harvest losses of fruit and vegetables：An updated review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2025，24（1）：e70103.

[6] Shinali T S，Zhang Y Y，Altaf M，et al. The valorization of wastes and byproducts from cruciferous vegetables：A review on the potential utilization of cabbage，cauliflower，and broccoli by-products[J]. Foods，2024，13（8）：1163.

[7] Penalver J G，Aldaya M M，Muez A M，et al. Carbon and water footprints of the revalorisation of glucosinolates from broccoli by-products：Case study from Spain[J]. Food and Bioproducts Processing，2025，151：211-221.

[8] Maria B M，Lozano-Snchez J，Quirantes-Pin R，et al. Glucosinolates from broccoli by-products obtained by pressurized liquid extraction exert anti-inflammatory activity on non-malignant co-

lonic myofibroblasts [J]. Plants，2025，14(11)：1700.

[9] Li L Z，Ma P H，Nirasawa S，et al. Formation，immunomodulatory activities，and enhancement of glucosinolates and sulforaphane in broccoli sprouts：A review for maximizing the health benefits to human[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2023：1311.

[10] Ferreira S S，Monteiro F，Passos C P，et al. Blanching impact on pigments，glucosinolates，and phenolics of dehydrated broccoli by-products[J]. Food Research International，2020，132：109055.

[11] 张睿，于建丽，宋璇，等.西蓝花萝卜硫苷提取物的抑菌及体外免疫活性探究[J].食品研究与开发，2021，42(4)：1-7.

[12] Bas-Bellver C，Barrera C，Segu L. Impact of thermophysical and biological pretreatments on antioxidant properties and phenolic profile of broccoli stem products[J]. Foods，2024，13(22)：3585.

[13] Cano-Gonzalez C N，Aguirre-Loredo R Y，Ascacio Valdes J A，et al. Enzyme-assisted recovery of phenolic compounds from broccoli waste with antioxidant and antihyperglycemic activities evaluated through *in vitro* and molecular docking studies[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology，2025，67：103632.

[14] Andrs C M C，De La Lastra J M P，Munguira E B，et al. The multifaceted health benefits of broccoli：A review of glucosinolates，phenolics and antimicrobial peptides[J]. Molecules，2025，30(11)：2262.

[15] Nicolas-Espinosa J，Yepes-Molina L，Carvajal M. Bioactive peptides from broccoli stems strongly enhance regenerative keratinocytes by stimulating controlled proliferation[J]. Pharmaceutical Biology，2022，60(1)：235-246.

[16] Vega-Galvez A，Uribe E，Pasten A，et al. Comprehensive evaluation of the bioactive composition and neuroprotective and antimicrobial properties of vacuum-dried broccoli（*Brassica oleracea* var. *italica*）powder and its antioxidants[J]. Molecules，2023，28(2)：766.

[17] Roy S，Priyadarshi R，Łopusiewicz Ł，et al. Recent progress in pectin extraction，characterization，and pectin-based films for active food packaging applications：A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2023，239：124248.

[18] Shang Y，Zhang W B，Dang Y，et al. Physical properties and functional characteristics of broccoli-soluble dietary fiber[J]. Food Bioscience，2023，56：103272.

[19] Petkowicz C L O，Williams P A. Pectins from food waste：Characterization and functional properties of a pectin extracted from broccoli stalk[J]. Food Hydrocolloids，2020，107：105930.

[20] Ma S N，Yang Z X，Sun H Y，et al. Multiscale comparative study of pectin extraction from broccoli stalk using alkaline and enzymatic modifications：Structural characterization and gelling properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2025，330：148164.

[21] Ayuso P，Penalver R，Quizhpe J，et al. Broccoli，artichoke，carob and apple by-products as a source of soluble fiber：How it can be affected by enzymatic treatment with pectinex® ultra sp-L，viscozyme® L and celluclast® 1.5 L[J]. Foods，2024，14(1)：10.

[22] Ferreira S S，Correia A，Silva A M S，et al. Structure-function relationships of pectic polysaccharides from broccoli by-products with *in vitro* B lymphocyte stimulatory activity[J]. Carbohydrate Polymers，2023，303：120432.

[23] Dao T A T，Webb H K，Malherbe F. Optimization of pectin extraction from fruit peels by response surface method：Conventional versus microwave-assisted heating[J]. Food Hydrocolloids，2021，113：106475.

[24] Zhang S J，Zhang Q，Wang T G，et al. Response surface optimization of polysaccharides from jaboticaba（*Myrciaria cauliflora* [Mart.] O. Berg）fruits：Ultrasound-assisted extraction，structure properties，and antioxidant/hypoglycemic activities[J]. Chemistry & Biodiversity，2024，21(3)：e202302070.

[25] Said N S，Olawuyi I F，Lee W Y. Pectin hydrogels：Gel-forming behaviors，mechanisms，and food applications[J]. Gels，2023，9：732.

[26] Zhang X L，Chen X C，Dai J M，et al. Edible films of pectin extracted from dragon fruit peel：Effects of boiling water treatment on pectin and film properties[J]. Food Hydrocolloids，2024，147：109324.

[27] Syarifuddin A，Muflih M H，Izzah N，et al. Pectin-based edible films and coatings：from extraction to application on food packaging towards circular economy-a review[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications，2025，9：100680.

[28] Asfaw W A，Tafa K D，Satheesh N. Optimization of citron peel pectin and glycerol concentration in the production of edible film using response surface methodology[J]. Heliyon，2023，9(3)：e13724.

[29] Lin X，Chen S J，Wang R M，et al. Fabrication，characterization and biological properties of pectin and/or chitosan-based films incorporated with noni（*Morinda citrifolia*）fruit extract[J]. Food Hydrocolloids，2023，134：108025.

[30] Surolia R，Singh A. Underutilized sources of pectin as edible coating[J]. Letters in Applied NanoBioScience，2022，12(3)：83.

[31] 让凤菊，王俊龙，刘伟，等.西蓝花茎果胶的提取及理化性质研究[J].食品研究与开发，2022，43(16)：104-110.

[32] 叶群丽，冯可，梁大伟，等.响应面法优化耙耙柑皮果胶超声辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J].化学与生物工程，2022，39(9)：35-40.

[33] 王锦秀，赵晴晴，徐心怡，等.响应面优化超声波辅助酸法提取百香果皮果胶工艺及其抗氧化活性研究[J].食品工业科技，2022，43(13)：162-170.

[34] 侯敏娜，侯少平，王洁，等.复合酶法提取太白贝母中多糖工艺及其抗氧化活性研究[J].中医药学报，2025，53(9)：39-44.

[35] Li W L，Yuan J L，Duan H M，et al. Comprehensive evaluation of potato tuber texture[J]. Scientia Agricultura Sinica，2022，55(12)：2278-2293.

[36] Shyu Y S，Chen G W，Chiang S C，et al. Effect of chitosan and fish gelatin coatings on preventing the deterioration and preserving the quality of fresh-cut apples[J]. Molecules，2019，24(10)：2008.

[37] 刘莉，陈华，廖宏钰，等.不同处理方式对鲜切马铃薯保鲜效果

的影响[J].食品研究与开发,2025,46(6):74-81.

[38] 胡盼盼.不同预涂膜方式对鲜切马铃薯贮藏品质的影响[J].食品研究与开发,2021,42(24):135-140.

[39] Procaccini L M G,Mu T H,Sun H N.Effect of innovative food processing technologies on microbiological quality,colour and texture of fresh-cut potato during storage[J].International Journal of Food Science & Technology,2021,57(2):898-907.

[40] Costa J R,Tonon R V,Cabral L,et al.Valorization of agricultural lignocellulosic plant by-products through enzymatic and enzyme-assisted extraction of high added value compounds:A Review[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2020,8(35):13112-13125.

[41] Vasco-Correa J,Zapata A D Z.Enzymatic extraction of pectin from passion fruit peel(*Passiflora edulis* f.*flavicarpa*)at laboratory and bench scale[J].LWT-Food Science and Technology,2017,80:280-285.

[42] Wei Y Y,Li M M,Yang M M,et al.Optimization of extraction process of pectin from papaya peel by complex enzymes and analysis of product properties[J].Journal of Food Safety and Quality,2022,13(2):381-387.

[43] Wang J X,Zhao Q Q,Xu X,et al.Optimization of response surface for ultrasonic acid extraction of pectin from passion fruit peel and its antioxidant activity[J].Science and Technology of Food Industry,2022,43(13):162-170.

[44] Ali N,Dina E,Tas A A.Bioactive edible coatings for fresh-cut apples:A study on chitosan-based coatings infused with essential oils[J].Foods,2025,14(13):2362.

[45] Xu F X,Liu S Y,Liu Y F,et al.Effectiveness of lysozyme coatings and 1-MCP treatments on storage and preservation of kiwifruit[J].Food Chemistry,2019,288:201-207.

[46] Li G Q,Wang X X,Zhu H M,et al.Use of different food additives to control browning in fresh-cut potatoes[J].Food Science & Nutrition,2023,11(12):7967-7973.