

基于响应面法优化鲜切莴笋复合涂膜保鲜剂

虞任莹, 张 强, 童秀子, 徐伟程, 陈育如, 孔晓雪, 罗海波

(南京师范大学食品与制药工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 以鲜切莴笋为研究对象, 根据 12 种化学物质对多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性的抑制作用, 选择 3 种酶活抑制效果显著的化学物质(茶多酚、抗坏血酸和 L-半胱氨酸)和 4 种涂膜剂(羧甲基纤维素钠、黄原胶、海藻酸钠和葡甘露聚糖), 考察不同保鲜剂浓度对鲜切莴笋 4 ℃贮藏 4 d 后外观和色泽的影响。以此单因素实验为基础, 进行响应面分析, 结果显示复合涂膜最佳组合为 0.38% 抗坏血酸+0.85% L-半胱氨酸+0.67% 羧甲基纤维素钠, 在此条件下, 鲜切莴笋在 4 ℃贮藏 6 d 后红绿色差 Δa^* 值为 0.170, 与回归方程预测值 0.166 相近, 且货架寿命可延长至 12 d 以上, 表明优化后的复合涂膜保鲜剂具有良好的实际保鲜效果。

[关键词] 鲜切莴笋, 复合涂膜, 褐变, 品质, 货架寿命

[中图分类号] TS255.3 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2022)04-0055-09

Optimization of Composite Coating Preservative for Fresh-cut Asparagus Lettuce Based on Response Surface Methodology

Yu Renying, Zhang Qiang, Tong Xiuzi, Xu Weicheng, Chen Yuru, Kong Xiaoxue, Luo Haibo

(School of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Fresh-cut asparagus lettuce is taken as the research object. According to the inhibitory effects of 12 kinds of chemical substances on PPO and POD activities, 3 kinds of chemical substances (tea polyphenols, ascorbic acid and L-cysteine) with significant inhibitory effects on PPO and POD activities and 4 kinds of coating agents (carboxymethylcellulose sodium, xanthan gum, sodium alginate and glucomannan) are selected. Meanwhile, the effects of different concentrations on the appearance and chromatic aberration of fresh-cut asparagus lettuce are investigated after 4 days of storage at 4 ℃. The results of response surface analysis show that the optimal condition is 0.38% ascorbic acid+0.85% L-cysteine+0.67% carboxymethylcellulose sodium. Under this condition, the red-green chromatic aberration after storage for 6 days is 0.170, which is close to 0.166 predicted by regression equation. Moreover, the shelf life can be extended to more than 12 days at 4 ℃, indicating that the optimized composite coating preservative has great practical fresh-keeping effect.

Key words: asparagus lettuce, composite coating, browning, quality, shelf-life

莴笋(*Lactuca sativa* var. *angustata*, Asparagus lettuce)又名茎用莴苣,在我国各地均有栽培,是一种大众化的茎用蔬菜^[1]。莴笋因其口感酥脆、香气宜人以及营养物质(如维生素 C、维生素 K 和叶酸等)含量较高而广受欢迎^[2]。莴笋的食用方法众多,切丝、切片、切块均可,煮、炒、拌、腌俱佳,也可与各种荤菜搭配。因此,莴笋十分适合加工成鲜切产品销售。然而,鲜切莴笋在加工和贮运销售期间极易发生切割面褐变甚至发红的现象,尤其是在环境温度高和湿度低的情况下,即使在 4 ℃的低温条件下贮藏,货架期也仅能维持 1-2 d。因此,采用合适的保鲜方法,延长鲜切莴笋的货架寿命是亟需解决的问题。

目前,鲜切莴笋主要贮藏手段有物理和化学方法,物理方法包括辐照^[3]、脉冲强光^[4]、超声波处理^[5]、气调保鲜^[6]和复合膜包装^[7]等,化学方法主要有二氧化氯^[1]和次氯酸钙处理^[8]等,以上方法均能延缓鲜切莴笋褐变,但具有一定局限性,保鲜效果有待提高。辐照和脉冲强光目前还停留在理论探索阶段,是否

收稿日期:2022-06-20。

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

适用于大规模的鲜切莴笋保鲜还有待于进一步的实验证明. 二氧化氯和次氯酸钙等非食品添加剂化学物质对产品和环境的潜在影响尚未可知. 涂膜保鲜具有成本低廉、操作方法简便等优点. 涂膜是通过浸渍和涂抹等方式使涂膜剂在物品表面形成薄膜,具有抑制微生物侵入和控制褐变等作用^[9]. 目前,涂膜保鲜已被应用于紫甘薯^[10]、胡萝卜^[11]、苹果^[12]和甜瓜^[13]等鲜切果蔬. 将不同褐变抑制剂与涂膜保鲜剂进行组合,形成复合涂膜保鲜剂,其效果比单一涂膜更优^[14]. 前期研究发现,将优化的鲜切莲藕复合涂膜剂(0.50%海藻酸钠+0.76%柠檬酸+0.27%L-半胱氨酸^[15])应用于鲜切莴笋,效果并不理想. 因此,有必要对适用于鲜切莴笋的涂膜保鲜剂进行筛选优化以提高其保鲜效果.

本文以鲜切莴笋为研究对象,探究 12 种化学物质对鲜切莴笋褐变相关酶 PPO 和 POD 活性的影响,筛选效果较好的褐变抑制剂,同时选择羧甲基纤维素钠、黄原胶、海藻酸钠和葡甘露聚糖等涂膜剂,以色泽为评价指标,采用单因素及响应面实验确定最佳复配比,为鲜切莴笋的贮藏提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜莴笋购于南京市栖霞区李秀芬蔬菜经营部,立即运回实验室,挑选形态大小一致、无感官异常的莴笋备用.

氯化钙、硫酸镁、氯化锌、柠檬酸、亚硫酸氢钠、乙二胺四乙酸二钠、聚乙烯吡咯烷酮、4-己基间苯二酚、 ϵ -聚赖氨酸为分析纯,茶多酚、抗坏血酸、L-半胱氨酸、羧甲基纤维素钠、海藻酸钠、黄原胶、葡甘露聚糖为食品级,南京峰昌生物科技有限公司.

AUY220 电子分析天平,日本 Shimadzu 公司;UV-1100 紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;美能达 CR-200 色差仪,深圳三利化学制品有限公司;GL-88B 漩涡混合器,海门其林贝尔仪器有限公司.

1.2 实验方法

1.2.1 化学物质对鲜切莴笋 PPO 与 POD 活性的影响

1.2.1.1 PPO 活性测定

参考文献[16]的方法,稍作修改. 称取 20 g 新鲜莴笋冷冻粉末,加入 pH6.4 磷酸缓冲液 60 mL,10 000 r/min 离心 15 min,收集上清液. 取上清液 0.5 mL,加入 pH5.4 乙酸缓冲液 2 mL 和 40 mmol/L 邻苯二酚 1 mL,在 410 nm 下连续测定 3 min 内吸光度. 定义每分钟内吸光度变化 0.01 为一个酶活力单位(U).

1.2.1.2 POD 活性测定

参考文献[16]的方法,稍作修改. 称取 20g 新鲜莴笋冷冻粉末,加入 pH8.7 硼酸缓冲液 60 mL,10 000 r/min 离心 30 min,收集上清液. 取上清液 0.05 mL,加入 pH5.4 乙酸缓冲液 2 mL、0.25%愈创木酚 1 mL 和 0.75% H_2O_2 0.1 mL,在 460 nm 下连续测定 3 min 内吸光度. 定义每分钟内吸光度变化 0.01 为一个酶活力单位(U).

1.2.1.3 化学物质对 PPO 和 POD 活性的影响

以乙酸缓冲液为对照,分别加入 1.0 mL 质量分数为 0%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%的氯化钙、氯化锌、硫酸镁、柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸、亚硫酸氢钠、乙二胺四乙酸二钠、聚乙烯吡咯烷酮、茶多酚、 ϵ -聚赖氨酸、4-己基间苯二酚溶液,其他条件不变,测定 PPO 和 POD 吸光值,计算相对酶活.

$$\text{相对酶活}/\% = A_1/A_2 \times 100\%, \quad (1)$$

式中, A_1 为测定管酶活性,U/gFW; A_2 为对照管酶活性,U/gFW.

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 样品处理

将莴笋去皮,切片(厚度为 3~5 mm),立刻置于干净的去离子水中.

1.2.2.2 不同保鲜剂处理

以化学物质对鲜切莴笋 PPO、POD 活性的影响为参考,选择适宜的食品级化学物质作为褐变抑制剂,并挑选海藻酸钠、羧甲基纤维素钠、葡甘露聚糖和黄原胶等涂膜剂设置单因素实验. 将切分好的莴笋分别放入质量分数为 0%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%的茶多酚、抗坏血酸、L-半胱氨酸、羧甲基纤维素钠、黄原胶、海藻酸钠、葡甘露聚糖溶液中处理 10 min,沥干,用 17×11.5×6 cm 的保鲜盒进行分装(每盒重 200±

5 g),置于4℃贮藏,4 d后测定色泽.

1.2.2.3 色泽测定

用色差仪测定莴笋 a^* 值, a^+ 表示红色, a^- 表示绿色^[9],计算红绿色差.

$$\Delta a^* = a^* - a_0^*, \tag{2}$$

式中, Δa^* 为红绿色差; a_0^* 为入贮前的红绿值; a^* 为入贮后的红绿值.

1.2.3 响应面试验

如表1所示,根据单因素实验结果,选择2种褐变抑制剂和1种涂膜保鲜剂,采用 Design-Expert12 软件 Box-Behnken 法建立3因素3水平模型方案,以贮藏6 d 后的红绿色差(Δa^*)为响应值,筛选鲜切莴笋最佳复合涂膜保鲜剂及其复配比.

1.2.4 验证实验

以响应面优化所得最佳条件处理鲜切莴笋,验证所建数学回归方程的正确性.

1.3 数据分析

响应面实验采用 Design-Expert12,显著性分析采用 SPSS26.0.

2 结果与分析

2.1 化学物质对 PPO 与 POD 活性的影响

表2所示为不同化学物质对鲜切莴笋 PPO 活性的影响. 抗坏血酸、亚硫酸氢钠、茶多酚可以显著抑制 PPO 活性,质量分数达到0.25%时即可完全抑制 PPO 活性. *L*-半胱氨酸对 PPO 活性也有较强抑制作用,0.25%*L*-半胱氨酸可以抑制89.81% PPO 活性. 4-己基间苯二酚、 ϵ -聚赖氨酸、氯化锌对抑制 PPO 活性具有一定效果,4-己基间苯二酚质量分数达到1.00%时可以抑制 PPO 活性30.97%, ϵ -聚赖氨酸质量分数达到0.25%时可以抑制 PPO 活性26.14%,氯化锌质量分数达到0.50%时可以抑制 PPO 活性26.54%. 柠檬酸表现出较弱的抑制作用. 氯化钙、硫酸镁、乙二胺四乙酸二钠和聚乙烯吡咯烷酮在实验浓度下对 PPO 活性无显著抑制作用.

表2 化学物质对 PPO 活性的影响
Table 2 Effects of chemical substances on PPO activity

化学物质	处理浓度(质量分数)/%				
	0	0.25	0.50	0.75	1
氯化钙	100.00±3.51 ^{AB}	100.69±3.94 ^{ABab}	92.71±8.84 ^{Bc}	98.96±9.38 ^{ABb}	106.77±0.74 ^{Ab}
氯化锌	100.00±3.51 ^A	75.93±3.08 ^{Bd}	73.46±1.08 ^{Be}	74.26±3.51 ^{Bd}	74.59±2.30 ^{Be}
硫酸镁	100.00±3.51 ^B	99.92±5.60 ^{Bb}	98.46±4.48 ^{Bb}	99.90±11.94 ^{Bb}	116.91±1.12 ^{Aa}
柠檬酸	100.00±3.51 ^A	92.13±4.04 ^{Bc}	92.65±4.04 ^{Bc}	89.62±3.90 ^{Bc}	92.04±3.46 ^{Bc}
抗坏血酸	100.00±3.51 ^A	—	—	—	—
<i>L</i> -半胱氨酸	100.00±3.51 ^A	10.19±0.22 ^{Be}	9.09±0.13 ^B	8.96±0.51 ^{Be}	8.61±1.68 ^{Bg}
ϵ -聚赖氨酸	100.00±3.51 ^A	73.86±2.79 ^{Cd}	82.51±3.25 ^{Bd}	81.84±2.94 ^{Bcd}	79.91±4.55 ^{Bd}
亚硫酸氢钠	100.00±3.51 ^A	—	—	—	—
乙二胺四乙酸二钠	100.00±3.51 ^B	102.04±4.89 ^{Bab}	113.84±2.98 ^{Aa}	113.01±4.88 ^{Aa}	119.77±3.31 ^{Aa}
聚乙烯吡咯烷酮	100.00±3.51 ^C	104.46±3.25 ^{BCa}	112.50±5.77 ^{ABa}	118.49±5.77 ^{Aa}	107.65±4.15 ^{Bb}
茶多酚	100.00±3.51 ^A	—	—	—	—
4-己基间苯二酚	100.00±3.51 ^A	96.71±0.10 ^{Ab}	81.99±6.27 ^{Bd}	78.15±1.65 ^{Bd}	69.03±1.96 ^{Cf}

注:“—”表示未检出;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($P<0.05$).

如表3所示,不同化学物质在不同程度上影响鲜切莴笋 POD 活性. 抗坏血酸、茶多酚、*L*-半胱氨酸可以显著抑制 POD 活性,在质量分数达到0.25%时能够完全抑制 POD 活性. 亚硫酸氢钠对 POD 活性也有较强的抑制作用,质量分数达到0.5%时可完全抑制 POD 活性. 4-己基间苯二酚和乙二胺四乙酸二钠对抑制 POD 活性具有一定效果,4-己基间苯二酚质量分数达到1.0%时可抑制 POD 活性73.87%,乙二胺四乙

酸二钠质量分数达到 0.75%时可抑制 POD 活性 69.34%. 硫酸镁和柠檬酸对 POD 活性的抑制作用较弱. 氯化钙、氯化锌、聚乙烯吡咯烷酮和 ϵ -聚赖氨酸在实验浓度下对 POD 活性无显著抑制作用.

表 3 化学物质对 POD 活性的影响
Table 3 Effects of chemical substances on POD activity

化学物质	处理浓度(质量分数)/%				
	0	0.25	0.50	0.75	1
氯化钙	100.00±2.82 ^C	106.50±0.67 ^{Bbc}	107.90±3.31 ^{Bab}	114.85±1.69 ^{Aa}	107.35±0.08 ^{Ba}
氯化锌	100.00±2.82 ^B	104.88±6.33 ^{Abc}	104.01±0.85 ^{ABb}	103.80±2.03 ^{ABbc}	101.44±2.56 ^{ABc}
硫酸镁	100.00±2.82 ^{AB}	89.55±7.45 ^{Cd}	105.48±5.61 ^{Ab}	97.39±2.69 ^{Bd}	97.24±1.60 ^{Bd}
柠檬酸	100.00±2.82 ^B	107.32±0.53 ^{Ab}	98.34±6.75 ^{Bc}	88.82±4.60 ^{Ce}	90.37±0.56 ^{Ce}
抗坏血酸	100.00±2.82 ^A	—	—	—	—
L-半胱氨酸	100.00±2.82 ^A	—	—	—	—
ϵ -聚赖氨酸	100.00±2.82 ^B	103.13±0.86 ^{Ac}	102.45±0.94 ^{ABb}	102.82±0.53 ^{ABc}	104.09±2.83 ^{Ab}
亚硫酸氢钠	100.00±2.82 ^A	71.66±2.60 ^{Be}	—	—	—
乙二醇四乙酸二钠	100.00±2.82 ^A	34.94±0.62 ^{Bf}	34.12±1.85 ^{Bd}	30.66±0.51 ^{Cf}	32.34±1.36 ^{BCf}
聚乙烯吡咯烷酮	100.00±2.82 ^C	112.48±3.07 ^{Aa}	111.25±6.52 ^{ABa}	106.11±5.27 ^{Bb}	101.94±3.46 ^{BCc}
茶多酚	100.00±2.82 ^A	—	—	—	—
4-己基间苯二酚	100.00±2.82 ^A	71.41±3.11 ^{Be}	29.86±1.66 ^{Ce}	29.09±0.14 ^{CDf}	26.13±0.55 ^{Dg}

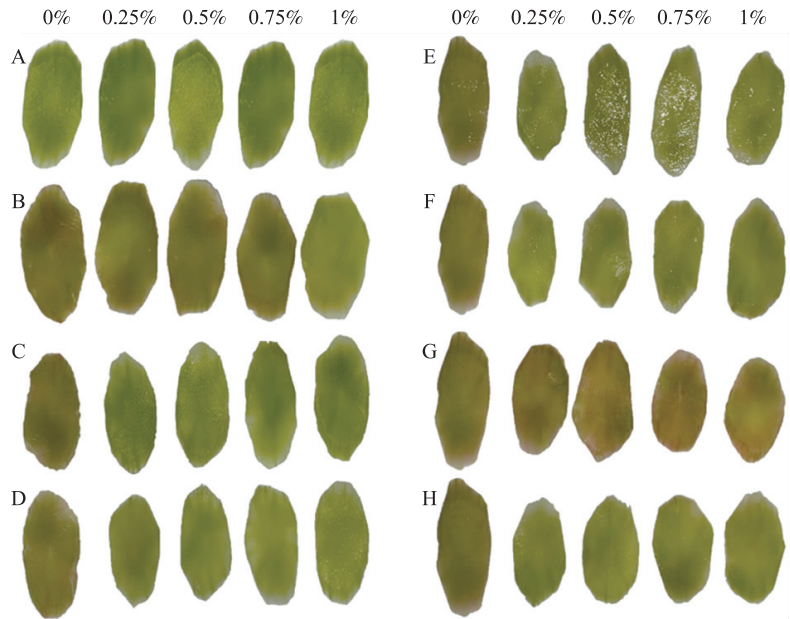
注:“—”表示未检出;同一行大写字母或同一列小写字母不同表示存在显著差异($P<0.05$).

2.2 单因素实验结果

从 2.1 节的实验结果可知,由于茶多酚、抗坏血酸、L-半胱氨酸对鲜切莴笋 PPO 和 POD 活性抑制作用较强,故选择食品级茶多酚、抗坏血酸和 L-半胱氨酸作为褐变抑制剂进行单因素实验.

色泽是评价鲜切产品品质的指标之一^[17],直观表现为褐变. 图 1 为采用 3 种褐变抑制剂和 4 种涂膜剂处理后,鲜切莴笋 4 ℃贮藏 4 d 的外观图. 对照组样品贮藏 4 d 后已发生明显褐变现象,经抗坏血酸、L-半胱氨酸、羧甲基纤维素钠和黄原胶处理的鲜切莴笋样品维持了较好的色泽和外观品质,茶多酚和葡甘露聚糖也有一定效果,而海藻酸钠处理过的样品比对照更差.

红绿色差(Δa^*)能够直观地体现鲜切莴笋红绿值的变化,对判断褐变程度有重要的参考价值. Δa^* 越大,表示样品褐变后红色程度越严重,反之则褐变程度较小. 鲜切莴笋经 3 种褐变抑制剂和 4 种涂膜剂



注:A,对照 0 d;B,茶多酚;C,抗坏血酸;D,L-半胱氨酸;E,黄原胶;F,羧甲基纤维素钠;G,海藻酸钠;H,葡甘露聚糖.

图 1 不同褐变抑制剂或涂膜剂处理对鲜切莴笋 4 ℃贮藏 4 d 后外观的影响
Fig. 1 Effects of different browning inhibitors or coating agents on the appearance of fresh-cut asparagus lettuce after 4 °C storage for 4 days

处理在 4 ℃贮藏 4 d 后的 Δa^* 值如表 4 所示. 其中,茶多酚、抗坏血酸、L-半胱氨酸 3 种褐变抑制剂与黄原胶、羧甲基纤维素钠和葡甘露聚糖 3 种涂膜保鲜剂处理组的 Δa^* 值均显著低于对照组 ($P<0.05$),表明采用以上 6 组化学保鲜剂处理能够有效抑制鲜切莴笋褐变,护色效果良好,与外观结果基本一致.

表 4 贮藏 4 d 后各浓度褐变抑制剂或涂膜剂处理组红绿色差结果
Table 4 The red-green chromatic aberration of the group treated with browning inhibitors or coating agents at different concentrations after 4 days of storage

保鲜剂	处理浓度(质量分数)/%				
	0	0.25	0.50	0.75	1
茶多酚	4.03±0.15 ^A	1.73±0.40 ^{BCb}	1.93±0.23 ^{Bb}	2.10±0.36 ^{Bb}	1.36±0.21 ^{Cc}
抗坏血酸	4.03±0.15 ^A	1.20±0.36 ^{Bc}	1.20±0.26 ^{Bc}	0.70±0.40 ^{BCc}	0.57±0.15 ^{Cd}
L-半胱氨酸	4.03±0.15 ^A	1.33±0.31 ^{Bc}	0.70±0.44 ^{Ced}	0.97±0.12 ^{BCc}	0.73±0.12 ^{Cd}
羧甲基纤维素钠	4.03±0.15 ^A	1.17±0.23 ^{Cc}	1.00±0.17 ^{Cc}	1.70±0.10 ^{Bb}	1.20±0.17 ^{Cc}
黄原胶	4.03±0.15 ^A	1.10±0.10 ^{CDc}	1.17±0.06 ^{Cc}	1.87±0.51 ^{Bb}	1.57±0.12 ^{B^{BCc}}
海藻酸钠	4.03±0.15 ^B	5.73±0.45 ^{Aa}	5.83±0.15 ^{Aa}	6.10±0.61 ^{Aa}	4.43±0.55 ^{Ba}
葡甘露聚糖	4.03±0.15 ^A	1.93±0.25 ^{Cb}	1.43±0.55 ^{Cbc}	1.80±0.10 ^{Cb}	2.57±0.15 ^{Bb}

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($P<0.05$).

由表 4 可知,茶多酚处理组中质量分数为 1%是组内效果最好的, Δa^* 为 1.36±0.21;抗坏血酸处理组中质量分数为 1%效果最好, Δa^* 为 0.57±0.15;L-半胱氨酸处理组中质量分数为 0.5%和 1.0%效果较好, Δa^* 分别为 0.70±0.44 和 0.73±0.12. 在褐变抑制剂处理组中,抗坏血酸和 L-半胱氨酸有较好的褐变抑制作用,两者与茶多酚有显著性差异($P<0.05$).

羧甲基纤维素钠处理组中质量分数为 0.5%效果最好, Δa^* 为 1.00±0.17;黄原胶处理组中质量分数为 0.25%效果最好, Δa^* 为 1.10±0.10;葡甘露聚糖处理组中质量分数为 0.5%效果最好, Δa^* 为 1.43±0.55;海藻酸钠保鲜效果差,不考虑进行下一步实验. 羧甲基纤维素钠和黄原胶的保鲜效果较好,两者与葡甘露聚糖存在显著性差异($P<0.05$). 在涂膜保鲜剂处理组中,保鲜效果依次为 0.5%羧甲基纤维素钠>0.25%黄原胶>0.5%葡甘露聚糖.

综合考虑褐变抑制效果及成本,选择抗坏血酸和 L-半胱氨酸 2 种褐变抑制剂与羧甲基纤维素钠作为涂膜保鲜剂进行响应面优化试验. 其中,抗坏血酸质量分数为 0%~1%,L-半胱氨酸质量分数为 0%~1%,羧甲基纤维素钠质量分数为 0%~0.75%.

2.3 响应面实验结果

2.3.1 响应面回归模型的建立

为确定涂膜处理最佳复配比,以抗坏血酸质量分数(A)、L-半胱氨酸质量分数(B)和羧甲基纤维素钠质量分数(C)为自变量, Δa^* (Y)为响应值,采用 Design-Expert 12 进行多元回归拟合. 试验设计因素与水平如表 1 所示,结果如表 5 所示. 可得拟合方程为:

$$Y=0.530\ 0-0.250\ 0A-0.841\ 3B-0.183\ 8C+0.457\ 5AB-0.027\ 5AC+0.130\ 0BC+0.345\ 0A^2+0.627\ 5B^2-0.027\ 5C^2.$$

表 5 试验设计及结果

Table 5 Experimental design and results

试验号	A	B	C	Y	试验号	A	B	C	Y	试验号	A	B	C	Y
1	0	1	-1	0.47	7	0	-1	-1	2.11	13	1	0	-1	1.00
2	0	0	0	0.50	8	0	0	0	0.37	14	1	-1	0	1.62
3	-1	-1	0	3.37	9	-1	0	1	0.75	15	0	0	0	0.66
4	1	1	0	0.55	10	0	1	1	0.41	16	-1	0	-1	1.11
5	0	0	0	0.42	11	0	0	0	0.70	17	-1	1	0	0.47
6	1	0	1	0.53	12	0	-1	1	1.53					

2.3.2 模型显著性和交互作用分析

表 6 所示为回归方程的各项方差. 由表 6 可知,回归模型为极显著水平($P<0.001$),失拟项不显著($P>0.05$),决定系数为 0.950 9,校正决定系数为 0.887 7,变异系数为 27.32%. 整体而言,回归模型能够满足对

鲜切莴笋红绿色差的分析和预测要求. 在水平范围内,三因素对红绿色差的影响为 $B>A>C$,即 L -半胱氨酸 $>$ 抗坏血酸 $>$ 羧甲基纤维素钠,其中 L -半胱氨酸对鲜切莴笋红绿色差的影响极显著($P<0.001$),抗坏血酸对红绿色差的影响显著($P<0.05$).

表 6 红绿色差回归方程方差分析

Table 6 Variance analysis of red-green chromatic aberration regression equations						
方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	9.60	9	1.070 0	15.05	0.000 9	***
A	0.500 0	1	0.500 0	7.05	0.032 7	*
B	5.66	1	5.660 0	79.84	<0.000 1	***
C	0.270 1	1	0.270 1	3.81	0.091 9	
AB	0.837 2	1	0.837 2	11.81	0.010 9	*
AC	0.003 0	1	0.003 0	0.042 7	0.842 2	
BC	0.067 6	1	0.067 6	0.953 3	0.361 4	
A^2	0.501 2	1	0.501 2	7.07	0.032 5	*
B^2	1.66	1	1.660 0	23.38	0.001 9	**
C^2	0.003 2	1	0.003 2	0.044 9	0.838 2	
残差	0.496 4	7	0.070 9			
失拟项	0.412 0	3	0.137 3	6.510 0	0.051 0	
纯误差	0.084 4	4	0.021 1			
总离差	10.10	16				

$R^2=0.950\ 9;R^2_{Adj}=0.887\ 7;C.V.=27.32\%$

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 为各因素交互作用的响应面图. 曲面图能直观反映各因素之间的交互作用,抛物面越明显,表明两因素间的交互作用越强. 图 2A-C 显示三因素两两交互作用对红绿色差的影响,抗坏血酸与 L -半胱氨酸的交互作用对鲜切莴笋红绿色差的影响较大.

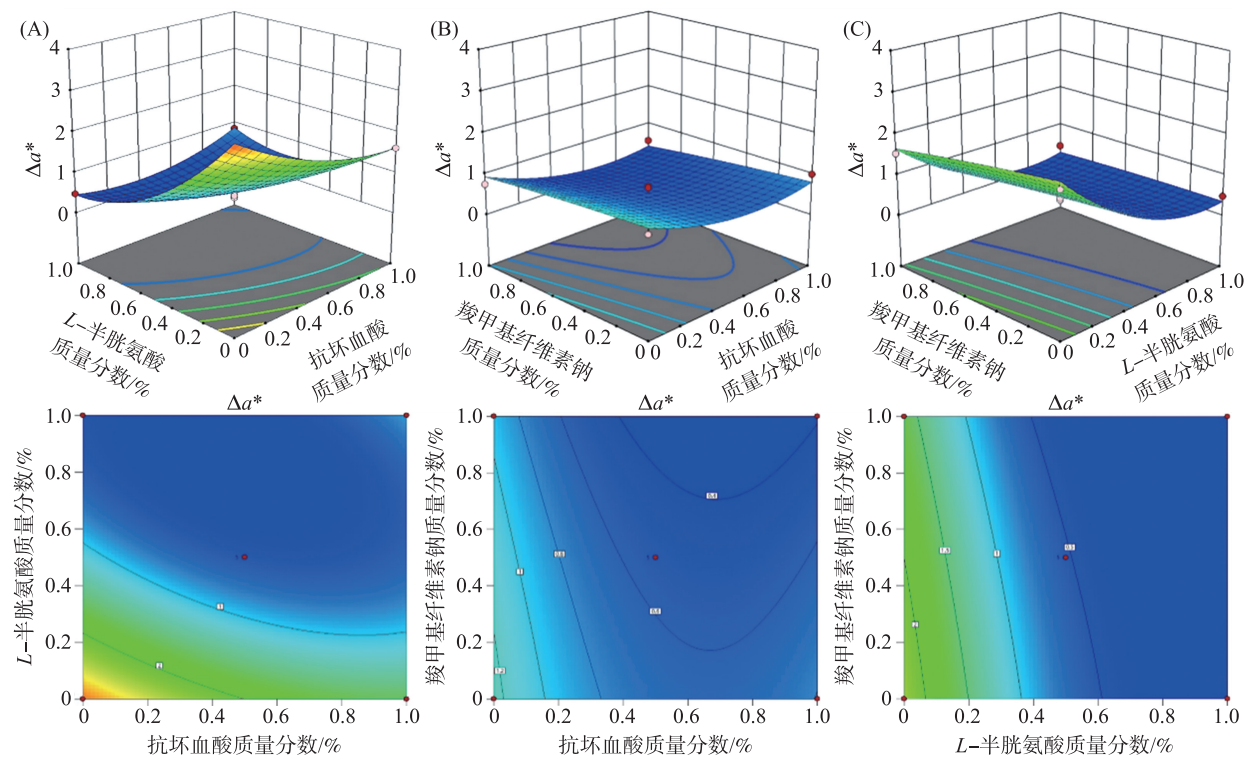


图 2 两因素交互作用对红绿色差的影响

Fig. 2 Interactive effects on the red-green chromatic aberration

2.4 验证实验结果

根据响应面实验结果,考虑复合涂膜处理对红绿色差的影响,分析可得最佳复配比为 0.38%抗坏血酸、0.85% L -半胱氨酸、0.67%羧甲基纤维素钠,相应的响应面二次模型预测 Δa^* 为 0.166. 选取此最佳工

艺进行验证,如图3所示,得到鲜切莴笋 Δa^* 为 0.170,与预测值接近,表明回归模型可有效预测鲜切莴笋贮藏期间的色差.进一步贮藏实验表明,复合涂膜处理组在 4℃ 贮藏 12 d 后 Δa^* 为 0.767,仍能维持较好的色泽和外观品质,表明优化后的复合涂膜保鲜剂具有很好的实际保鲜效果.

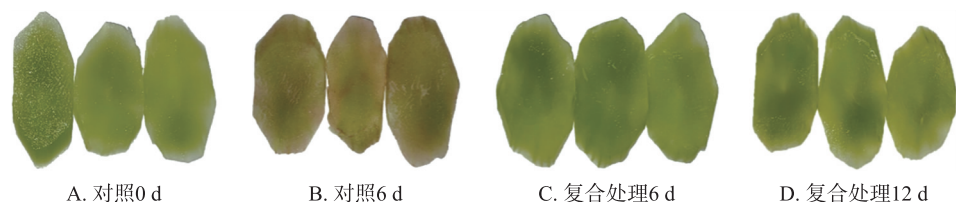


图3 复合涂膜对鲜切莴笋 4℃贮藏前后外观的影响

Fig. 3 Effect of composite coating on appearance of fresh-cut asparagus lettuce of storage at 4℃

3 讨论

褐变是影响鲜切果蔬品质的因素之一,会引起鲜切果蔬品质下降和营养损失^[18]. PPO 在酶促褐变和植物体内色素合成中起重要作用^[19-20]. POD 在过氧化氢存在的情况下,催化酚类物质和抗坏血酸的氧化发生酶促褐变^[21]. 因此,抑制或降低 PPO 和 POD 活性可延缓鲜切果蔬褐变进程^[22]. 研究表明,氯化钙、氯化锌、硫酸镁、柠檬酸、抗坏血酸、L-半胱氨酸、 ϵ -聚赖氨酸、亚硫酸氢钠、乙二胺四乙酸二钠、聚乙烯吡咯烷酮、茶多酚、4-己基间苯二酚等对不同鲜切果蔬的 PPO 和 POD 活性具有一定调控作用^[21,23-24]. 李彩云等^[25]研究了抗坏血酸对莲藕汁 PPO 和 POD 活性的影响,表明 8 mmol/L 抗坏血酸对 PPO 和 POD 的抑制率分别为 77.78%和 88.24%. 田国政等^[26]对青蒿多酚氧化酶的酶学特性进行研究,发现 0.03 g/L 维生素 C、1.2 g/L 柠檬酸和 20 g/L 聚乙烯吡咯烷酮对青蒿 PPO 的抑制率分别为 70.4%、83.7%、77.6%. 本实验中,抗坏血酸、L-半胱氨酸、亚硫酸氢钠、茶多酚能够显著抑制鲜切莴笋 PPO 和 POD 活性,其余 8 种化学物质对 PPO 和 POD 的抑制作用相对较弱,这可能与不同果蔬 PPO、POD 的同工酶催化位点和底物特异性有关,同一化学物质对不同材料中的 PPO 与 POD 特性的影响有差异,因此针对性地探究抑制鲜切莴笋 PPO 和 POD 活性的化学物质,对控制实际生产中鲜切莴笋褐变具有参考价值. 进一步将上述酶活抑制作用较好的化学物质应用于鲜切莴笋保鲜,发现抗坏血酸和 L-半胱氨酸对鲜切莴笋的护色作用明显,表明其具有较好的保鲜效果.

涂膜保鲜能控制气体交换、抑制微生物侵入、控制褐变^[27]. 因其具有成本低廉、操作方法简便等优点,已成为鲜切果蔬广泛应用的保鲜方法. 潘旭琳等^[28]采用不同浓度的羧甲基纤维素钠处理鲜切苹果,发现 3.0%羧甲基纤维素钠制得的可食性膜对鲜切苹果块的硬度、失重率和感官评价保持效果最佳. Lara 等^[29]采用质量分数分别为 0.1%、0.3%和 0.5%的黄原胶处理鲜切莲藕,结果表明黄原胶涂膜处理有效降低了鲜切莲藕在贮藏期间的酶促褐变,并抑制了枯草芽孢杆菌的生长. 张春洁^[30]用 3 种不同涂膜剂处理鲜切莲藕,4℃贮藏 12 d 后,0.25%海藻酸钠的护色效果最优. 张小琴^[31]采用不同涂膜剂处理鲜切桃,结果表明 2.0%葡甘露聚糖涂膜能够有效抑制鲜切桃褐变,维持其硬度和失重率. 本文实验中,羧甲基纤维素钠、黄原胶和葡甘露聚糖涂膜处理对鲜切莴笋褐变均有抑制作用,其中羧甲基纤维素钠的保鲜效果最好,而海藻酸钠涂膜保鲜效果较差.

复合涂膜比单一涂膜保鲜效果更佳,应用范围更广泛^[32-33]. Liu 等^[34]以羧甲基纤维素钠和壳聚糖为原料,采用分层静电沉积法制备了聚电解质多层膜(PEM)可食用涂层,并应用于鲜切苹果保鲜,实验结果表明将 PEM 涂层应用于鲜切苹果,具有良好的抑制失重、保持硬度和抗褐变性能. 张海生等^[35]用羧甲基纤维素钠复合纳他霉素和乳酸链球菌素涂膜处理鲜切苹果,结果显示 0.5%羧甲基纤维素钠+0.015%乳酸链球菌素+0.010%纳他霉素处理可以有效抑制褐变和多酚氧化酶活性. Chen 等^[36]用黄原胶-羟丙基甲基纤维素-茶多酚复合膜处理鲜切青椒,结果显示茶多酚添加量为 6%时复合膜拉伸强度达到最大值,增强了抗氧化活性和抗菌性能,抑制了金黄色葡萄球菌的生长,控制了维生素 C 的流失. 本文实验中,0.38%抗坏血酸+0.85% L-半胱氨酸+0.67%羧甲基纤维素钠复合涂膜处理可显著抑制鲜切莴笋褐变,其货架寿命在 4℃条件下可延长至 12 d 以上,实验结果表明本文优化筛选的复合涂膜保鲜剂组合适宜于鲜切莴笋的贮藏保鲜.

4 结论

抗坏血酸、L-半胱氨酸、亚硫酸氢钠、茶多酚等4种化学物质对鲜切莴笋的PPO和POD活性具有显著抑制作用($P<0.05$)。茶多酚、抗坏血酸、L-半胱氨酸、羧甲基纤维素钠、黄原胶和葡甘露聚糖等6种保鲜剂可以显著延缓鲜切莴笋的褐变($P<0.05$)。响应面优化实验获得鲜切莴笋复合涂膜的最佳组合为0.38%抗坏血酸+0.85% L-半胱氨酸+0.67%羧甲基纤维素钠。验证实验结果显示,经复合涂膜处理的鲜切莴笋在4℃下贮藏6d后的红绿色差 Δa^* 值为0.170,与回归方程预测值0.166相近,且在4℃条件下货架寿命可延长至12d以上,表明保鲜效果良好。

[参考文献](References)

- [1] CHEN Z, ZHU C H, ZHANG Y, et al. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on enzymatic browning and shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 58(3): 232–238.
- [2] PANAYIOTA X, ANTONIOS C, NIKOLAOS T. The combined and single effect of marjoram essential oil, ascorbic acid, and chitosan on fresh-cut lettuce preservation [J]. *Foods*, 2021, 10(3): 575.
- [3] HAN C, ZHEN W N, CHEN Q M, et al. UV-C irradiation inhibits surface discoloration and delays quality degradation of fresh-cut stem lettuce [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2021, 147: 111533.
- [4] TAO T T, DING C, HAN N N, et al. Evaluation of pulsed light for inactivation of foodborne pathogens on fresh-cut lettuce: effects on quality attributes during storage [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 21: 100385.
- [5] FAN K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A combination treatment of ultrasound and ϵ -polylysine to improve microorganisms and storage quality of fresh-cut lettuce [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2019, 113: 108315.
- [6] PENG H, KANDEL J S, MICHELMORE R W, et al. Identification of factors affecting the deterioration rate of fresh-cut lettuce in modified atmosphere packaging [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13: 1997–2011.
- [7] 王羽, 云雪艳, 李见森, 等. PA/PE复合膜对鲜切莴笋保鲜效果的影响 [J]. *食品科学*, 2015, 36(24): 343–347.
- [8] 高愿军, 樊振江, 路源, 等. 清洗方式对鲜切莴笋品质和农残去除的影响 [J]. *食品与机械*, 2011, 27(5): 159–162.
- [9] 张春洁, BATA GOUDA M H, 王俊豪, 等. 海藻酸钠复合天然化学物质涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(1): 175–184.
- [10] 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.
- [11] VALERIA I, AMALIA P, OLGA M, et al. Efficacy of pectin-based coating added with a lemon byproduct extract on quality preservation of fresh-cut carrots [J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1314.
- [12] 吴永玲, 朱昱静, 宋爽, 等. 响应面法优化薄荷、丁香和壳聚糖复配对鲜切苹果的保鲜效果 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(3): 317–324.
- [13] 时月, 李玥, 王宇滨, 等. 丁香油-壳聚糖复合膜涂膜处理对鲜切甜瓜品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 278–283.
- [14] 王韵仪, 王峥鉴, 陈志红, 等. 茶多酚-川陈皮素-羧甲基纤维素钠复合涂膜剂对刺嫩芽的保鲜效果 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 272–277.
- [15] BATA GOUDA M H, ZHANG C J, PENG S J, et al. Combination of sodium alginate-based coating with L-cysteine and citric acid extends the shelf-life of fresh-cut lotus root slices by inhibiting browning and microbial growth [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 175: 111502.
- [16] 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.
- [17] LIANG D D, LIU L L, QIN Z Y, et al. Antioxidant and antityrosinase activity of extractable condensed tannins from durian shells with antibrowning effect in fresh-cut asparagus lettuce model [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2022, 162: 113423.
- [18] 罗海波, 何雄, 包永华, 等. 鲜切果蔬品质劣变影响因素及其可能机理 [J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 324–330.
- [19] 程丽莉, 程运河, 曹庆昌, 等. 板栗PPO基因家族鉴定及生物信息学分析 [J]. *果树学报*, 2020, 37(9): 1305–1313.
- [20] GOMES M H, VIEIRA T, FUNDO J F, et al. Polyphenoloxidase activity and browning in fresh-cut ‘Rocha’ pear as affected by pH, phenolic substrates, and antibrowning additives [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 91: 32–38.
- [21] 罗海波. 鲜切茭白品质劣变机理及控制技术研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.

- [22] ALI S, KHAN A S, MALIK A U. Postharvest *L*-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 121: 135–142.
- [23] 丁薪源, 曹建康. 果蔬过氧化物酶酶学特性研究进展[J]. *食品科技*, 2012, 37(10): 62–66.
- [24] 廖春丽, 王衡, 李亚平, 等. *L*-半胱氨酸及金属离子对马铃薯、苹果、甘薯多酚氧化酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(11): 375–377.
- [25] 李彩云, 李洁, 严守雷, 等. 抗坏血酸处理对鲜榨莲藕汁酶促褐变和品质特征的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 151–158.
- [26] 田国政, 程超, 田莉, 等. 青蒿多酚氧化酶的酶学特性研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(19): 149–152.
- [27] 罗海波, 姜丽, 余坚勇, 等. 鲜切果蔬的品质及贮藏保鲜技术研究进展[J]. *食品科学*, 2010, 31(3): 307–311.
- [28] 潘旭琳, 张春芝, 胡亚光. 可食性复合膜在鲜切苹果块保鲜中的应用研究[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(8): 21–27.
- [29] LARA G, YAKOUBI S, VILLACORTA C M, et al. Spray technology applications of xanthan gum-based edible coatings for fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera*) [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109723.
- [30] 张春洁. 海藻酸钠复合褐变抑制剂涂膜对鲜切莲藕的保鲜效果及机理研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [31] 张小琴. 可食性涂膜对鲜切水果品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [32] PEREIRA J F, LONNI A, MALI S. Development of biopolymeric films with addition of vitamin C and catuaba extract as natural antioxidants[J]. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2022, 52: 1–10.
- [33] 张黎. 可食性复合膜的制备及其在黄瓜、苦瓜和西葫芦保鲜中的应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [34] LIU X F, TANG C B, HAN W, et al. Characterization and preservation effect of polyelectrolyte multilayer coating fabricated by carboxymethyl cellulose and chitosan[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 529: 1016–1023.
- [35] 张海生, 刘霞, 张娇娇, 等. 复合涂膜保鲜剂对鲜切苹果保鲜品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(5): 21–25.
- [36] CHEN J F, ZHENG M X, TAN K B, et al. Development of xanthan gum/hydroxypropyl methyl cellulose composite films incorporating tea polyphenol and its application on fresh-cut green bell peppers preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 211: 198–206.

[责任编辑: 严海琳]