

西南冷凉高地鲜切马铃薯抗褐变研究

程立君¹, 王世敏^{1*}, 李周², 程金朋², 刘健君¹, 余平莲¹

(1. 昭通学院农学与生命科学学院, 云南 昭通 657000; 2. 昭通市农业科学研究院, 云南 昭通 657000)

摘要: 西南冷凉地区是我国马铃薯主产区之一, 近年来马铃薯产业快速发展, 其加工产品不断增加, 为解决鲜切马铃薯在保鲜过程中发生的褐变问题, 以昭薯 ZT032 为试材, 选取柠檬酸、L-半胱氨酸、D-异抗坏血酸钠、氯化钙作为护色剂, 通过单因素试验, 研究了其对鲜切马铃薯片的护色效果, 并在此基础上采用响应面法进行护色剂复配研究。结果表明: 复合护色剂对多酚氧化酶活性的抑制效果优于单一护色剂, 复合护色剂的最优配方为柠檬酸 0.47%、L-半胱氨酸 0.28%、D-异抗坏血酸钠 0.05%、氯化钙 0.54%, 在此条件下, 酶活性抑制率可达 95.13%, 加工的鲜切马铃薯护色效果较好。

关键词: 鲜切马铃薯; 多酚氧化酶; 褐变; 抑制

Study on Browning Inhibition of Fresh-Cut Potatoes in Southwest Cold Highland

CHENG Li-jun¹, WANG Shi-min^{1*}, LI Zhou², CHENG Jin-peng², LIU Jian-jun¹, YU Ping-lian¹

(1. College of Agronomy and Life Sciences, Zhaotong University, Zhaotong 657000, China;

2. Zhaotong Academy of Agricultural Sciences, Zhaotong 657000, China)

Abstract: Southwest cold highland is one of the main potato producing areas in China. In recent years, the potato industry has been developed rapidly, and the processed products have been increased continually. In this study, the ZT032 potatoes were selected as test materials, and citric acid, L-cysteine, sodium D-isoascorbate and calcium chloride were applied as color protecting agents. Subsequently, the single factor experiments and response surface methodology were employed to evaluate the composite ratios and color protection effects on fresh-cut potato chips, aiming to solve the browning problem of fresh-cut potatoes during preservation. Results showed that the compound color protectant presented superior inhibition effects on polyphenol oxidase activity compared with single color protectant. The optimal formulation of compound color protectant was determined as follows: citric acid of 0.47%, L-cysteine of 0.28%, D-isoascorbate sodium of 0.05% and calcium chloride of 0.54%. Under these conditions, the inhibition rate on enzyme activity reached to 95.13%, and the color protection effects of fresh-cut potatoes were better.

Key words: fresh-cut potatoes; polyphenol oxidase; browning; inhibition

中图分类号: S532; TS255.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2021.10.002

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2019J1144); 昭通学院校级科研项目(2018xj09)

作者简介: 程立君(1986—), 男, 汉族, 硕士, 研究方向: 植物资源开发与利用。

*通信作者: 王世敏, 硕士, 副教授, 研究方向: 园艺植物栽培与生理。

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是世界第四大粮食作物,富含维生素、矿物质、膳食纤维等成分,具有丰富的营养和良好的保健功能^[1]。我国是世界马铃薯第一生产大国,种植面积和总产量均占全世界的20%左右^[2],目前形成了东北、华北、西北、南方和西南冷凉地区五大马铃薯主产区,其中西南冷凉地区因高海拔冷凉的气候环境和云贵高原得天独厚的红土资源,所产的马铃薯中淀粉和干物质含量高,质量较好^[3],适用于鲜食和加工。近年来,以马铃薯主粮化和产业扶贫为契机,西南地区马铃薯产业快速发展^[4],尤其是马铃薯主食化、鲜切等加工需求迅速增长,但是针对西南冷凉高地马铃薯的保鲜研究相对滞后。在马铃薯加工过程(如削皮、切片、粉碎)中,由于机械损伤导致代谢活动增强,氧化应激反应增加,同时组织暴露于空气表面与氧气接触,从而容易发生褐变^[5]。鲜切马铃薯的褐变导致外观不佳、品质下降以及水分和养分的流失^[6],影响产品的生产和销售,并阻碍了深加工产品的进一步发展^[7]。

鲜切马铃薯的褐变通常是由多酚氧化酶(PPO)引起的酶促褐变^[8]。多酚氧化酶是一种含有两个铜原子(CuA)的3型铜蛋白,在分子氧存在下,PPO可催化单酚酶羟基化和邻二酚氧化为邻醌,随后醌类化合物被氧化成醌衍生物,形成的邻醌与其他醌、氨基酸、蛋白质非酶聚合形成黑色化合物,导致酶促褐变^[9],并且不同品种马铃薯的多酚氧化酶活性存在差异^[10-11]。因此,如何有效抑制多酚氧化酶活性是西南冷凉高地鲜切马铃薯产业发展的迫切需要。

通过调节pH和温度等物理方法可以降低多酚氧化酶活性,从而控制马铃薯褐变的程度^[12],但是这些操作同时也容易导致马铃薯营养成分的损失。因此,本研究选择柠檬酸、L-半胱氨酸、D-异抗坏血酸钠、氯化钙4种添加剂进行复配,在单因素试验的基础上,采用响应面法研究其不同比例复配后对鲜切马铃薯的护色效果,最终获得对鲜切马铃薯褐变抑制效果最佳的组合,为鲜切马铃薯的护色保鲜提供参考,以期高原特色马铃薯产品的开发提供支持。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

试验用马铃薯品种为昭薯 ZT032,由昭通市农业科学院提供。挑选新鲜、大小基本一致、无病虫害和机械损伤的马铃薯,4℃条件下贮存,备用。

磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、亚硫酸氢钠、氯化钙、

邻苯二酚、柠檬酸、D-异抗坏血酸钠:均为国产分析纯;L-半胱氨酸:生化试剂。

1.1.2 仪器与设备

AX224ZH/E型精密电子天平,奥豪斯仪器有限公司;759型可见分光光度计,上海奥谱勒仪器有限公司;HL/T20MM型高速冷冻离心机,湖南赫西仪器装备有限公司;BGZ140型干燥箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂。

1.2 方法

1.2.1 单因素试验设计

1.2.1.1 柠檬酸对鲜切马铃薯护色的影响

新鲜马铃薯清洗、去皮后,切成厚度为3mm的薄片,于浓度分别为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%的柠檬酸溶液中浸泡护色20min后,考察其对马铃薯片PPO活性抑制率的影响。

1.2.1.2 L-半胱氨酸对鲜切马铃薯护色的影响

新鲜马铃薯清洗、去皮后,切成厚度为3mm的薄片,于浓度分别为0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.35%、0.40%的L-半胱氨酸溶液中浸泡护色20min后,考察其对马铃薯片PPO活性抑制率的影响。

1.2.1.3 D-异抗坏血酸钠对鲜切马铃薯护色的影响

新鲜马铃薯清洗、去皮后,切成厚度为3mm的薄片,于浓度分别为0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05%、0.06%的D-异抗坏血酸钠溶液中浸泡护色20min后,考察其对马铃薯片PPO活性抑制率的影响。

1.2.1.4 氯化钙对鲜切马铃薯护色的影响

新鲜马铃薯清洗、去皮后,切成厚度为3mm的薄片,于浓度分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%的氯化钙溶液中浸泡护色20min后,考察其对马铃薯片PPO活性抑制率的影响。

1.2.2 响应面法优化鲜切马铃薯护色剂配方试验

在单因素试验的基础上,采用Box-Behnken响应面法优化柠檬酸、L-半胱氨酸、D-异抗坏血酸钠和氯化钙配比,得到最优的马铃薯褐变抑制剂复合配方,并对该结果进行验证。

1.2.3 多酚氧化酶的提取及酶活性抑制率的测定

参考李利华^[13]的方法,加以改进。称取不同处理后的马铃薯样品5g,加入预冷的pH6.0的磷酸缓冲溶液10mL,在冰水浴中研磨成匀浆后,转入至25mL容量瓶中,用已预冷的pH6.0磷酸缓冲溶液定容至25mL,混匀后4℃下浸提10min,取出后以4℃、10000r/min离心30min,离心后得到的上清液即为多酚氧化酶粗酶液。

参考李利华^[13]的方法,采用比色法,取4℃冷藏

的 0.1 mol/L 磷酸缓冲溶液 4 mL 及 0.1 mol/L 邻苯二酚溶液 1.0 mL, 再加入多酚氧化酶粗酶液 0.5 mL, 混匀后在波长 420 nm 处测定吸光值(OD 值), 从加入酶液开始计时, 以不加酶液作为参比溶液每隔 30 s 记录 1 次 OD 值的变化。选取吸光度-时间曲线中线性部分确定反应时间和计算酶活性抑制率^[14]。酶活性抑制率为经抑制剂处理后酶的催化活性下降的百分数^[15]。

$$IE = (1 - \frac{\Delta A_1}{\Delta A_0}) \times 100$$

式中: IE 为酶活性抑制率, %; ΔA_0 为未处理对照样品在反应时间内吸光度变化值; ΔA_1 为处理样品在反应时间内吸光度变化值。

1.2.4 数据处理

单因素试验结果采用 SPSS(version 20.0) 软件对试验数据进行处理和统计分析; 响应面设计和数据分析采用 Design Expert(version 10.0) 进行。

2 结果与分析

2.1 柠檬酸对鲜切马铃薯护色效果的影响

柠檬酸是一种重要的有机酸, 因具有螯合作用和调节 pH 的特性, 在食品加工中能提高抗氧剂的性能, 抑制酶活性, 延长食品保存期^[16]。由图 1 可知, 柠檬酸对 PPO 活性有明显的抑制效果。随着柠檬酸添加量的升高, 对 PPO 活性的抑制率逐渐增加, 当添加量达到 0.5% 时, 酶活性抑制率达到 62.03%, 之后柠檬酸添加量继续升高, 但 PPO 活性的抑制率基本保持稳定, 这与刘丽等^[17]的研究结果较一致。分析原因可能因为柠檬酸对 PPO 活性中心的铜离子具有较强的螯合作用, 破坏了活性中心, 使 PPO 活性受到抑制^[18], 另外随着柠檬酸浓度的升高, 溶液的 pH 值逐渐下降, 使得反应体系的 pH 值远离 PPO 的最适 pH 值, 进一步导致 PPO 的结构被破坏, 从而失活^[19]。但柠檬酸达到一定浓度后, 反应底物也受到了柠檬酸的抑制, 在同一时间也会对酶的活性中心进行竞争^[20],

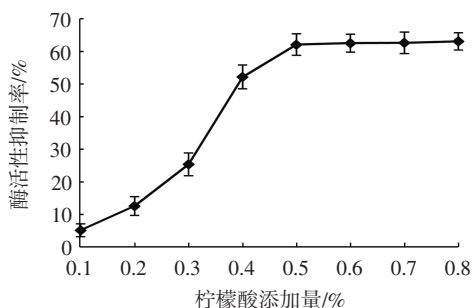


图1 柠檬酸添加量对 PPO 活性抑制率的影响

Fig.1 Effects of citric acid additions on the inhibitory rates of PPO activities

导致虽然浓度继续增加, 但效果不明显。因此, 试验选择柠檬酸浓度 0.5% 作为响应面 Box-Behnken 设计中零水平的中心点。

2.2 L-半胱氨酸对鲜切马铃薯护色效果的影响

L-半胱氨酸为含硫氨基酸之一, 属非必需氨基酸, 能直接与酶促反应产物醌类物质结合生成无色的硫氢化合物, 从而抑制褐变的发生^[21]。由图 2 可见, L-半胱氨酸对 PPO 活性有明显的抑制作用, 随着 L-半胱氨酸添加量的升高, 其对 PPO 活性的抑制率逐渐升高, 当添加量达到 0.25% 时, 酶活性抑制率达到 61.10%; 达到一定浓度后, 继续增加 L-半胱氨酸添加量, 酶活性抑制率变化不明显。原因可是由于高浓度的 L-半胱氨酸溶液在马铃薯组织中传质受阻, 从而影响 L-半胱氨酸向鲜切马铃薯的浸透^[22-23], L-半胱氨酸抑制鲜切马铃薯 PPO 活性的最佳添加量为 0.25%。因此, 选择 L-半胱氨酸添加量 0.25% 作为响应面 Box-Behnken 设计中零水平的中心点。

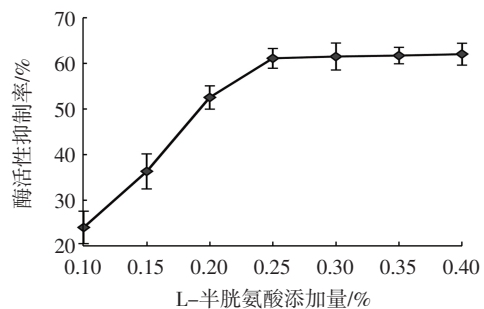


图2 L-半胱氨酸添加量对 PPO 活性抑制率的影响

Fig.2 Effects of L-cysteine additions on the inhibitory rates of PPO activities

2.3 D-异抗坏血酸钠对鲜切马铃薯护色效果的影响

D-异抗坏血酸钠又名赤藻糖酸钠, 具有极强的还原性, 是一种新型生物型食品抗氧防腐保鲜助剂, 能抑制果蔬氧化酶类的活性, 防止褐变现象的发生, 对保持果蔬的外观色泽和风味品质均有很大作用^[24]。由图 3 可知, D-异抗坏血酸钠对鲜切马铃薯 PPO 活性有显著的抑制作用, 因为 D-异抗坏血酸钠能够作用于多酚氧化酶中心的铜离子, 钝化酶活性, 同时能还原被酚酶氧化的酚类物质, 抑制褐变进程^[25]。试验结果表明, 随着 D-异抗坏血酸钠添加量的升高, 其对 PPO 活性的抑制率逐渐升高, 当添加量达到 0.04% 时, 酶活性抑制率达到 77.26%, 抑制效果明显。但当 D-异抗坏血酸钠添加量超过 0.04% 后, 酶活性抑制率变化不明显。因此, 选择 D-异抗坏血酸钠添加量 0.04% 作为响应面 Box-Behnken 设计中零水平的中心点。

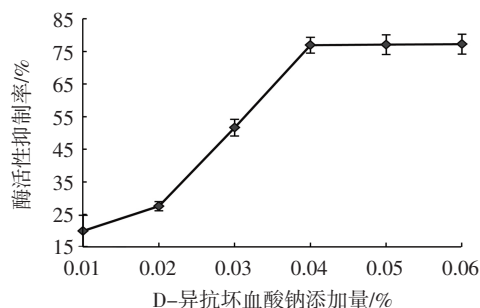


图3 D-异抗坏血酸钠添加量对 PPO 活性抑制率的影响

Fig.3 Effects of D-sodium isoascorbate additions on the inhibitory rates of PPO activities

2.4 氯化钙对鲜切马铃薯护色效果的影响

氯化钙常作为食品添加剂,能使可溶性果胶凝固为凝胶状不溶性果胶酸钙,保持果蔬加工制品的脆度和硬度,同时 Ca^{2+} 能够抑制 PPO 活性,从而延缓褐变的发生^[26-27]。由图 4 可知,氯化钙对鲜切马铃薯 PPO 活性具有一定的抑制作用,这可能是因为 Ca^{2+} 与 PPO 中具有羧基的化合物结合,从而降低 PPO 活性^[28]。随着氯化钙浓度的升高,对 PPO 活性的抑制率逐渐升高,当添加量达到 0.6% 时,抑制率为 36.09%,抑制效果明显。当氯化钙添加量超过 0.6% 后,浓度继续升高,酶活性抑制率变化趋于平缓,单独使用氯化钙作抑制剂时效果并不十分理想,有必要与其他抑制剂同时使用,通过交互作用增加抑制效果。因此,本试验选择氯化钙添加量 0.6% 作为响应面 Box-Behnken 设计中零水平的中心点。

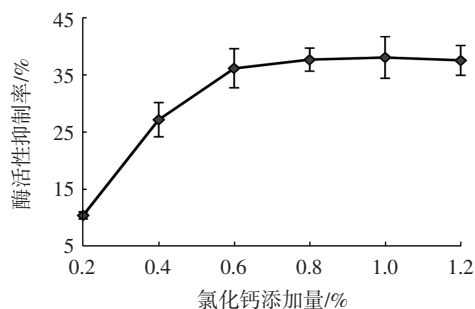


图4 氯化钙添加量对 PPO 活性抑制率的影响

Fig.4 Effects of calcium chloride additions on the inhibitory rates of PPO activities

2.5 响应面法优化鲜切马铃薯护色剂配方试验结果

2.5.1 Box-Behnken 设计与结果

根据单因素试验结果,利用 Design Expert 软件进行 Box-Behnken 响应面中心组合试验设计,以柠檬酸添加量、L-半胱氨酸添加量、D-异抗坏血酸钠添加量、氯化钙添加量 4 个因素为自变量,以 PPO 活性抑

制率为响应值,进行四因素三水平响应面试验分析,优化褐变抑制剂的配方,响应面试验因素水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

表 1 响应面试验因素水平表

Table 1 Factor and level of response surface experiment

水平	因素			
	A 柠檬酸添加量/%	B L-抗坏血酸添加量/%	C D-异抗坏血酸钠添加量/%	D 氯化钙添加量/%
-1	0.4	0.20	0.03	0.4
0	0.5	0.25	0.04	0.6
1	0.6	0.30	0.05	0.8

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface experimental design and results

序号	因素				Y 酶活性抑制率/%
	A	B	C	D	
1	-1	0	-1	0	83.43
2	0	0	0	0	90.22
3	-1	0	0	-1	83.97
4	1	1	0	0	80.27
5	1	0	0	-1	78.94
6	1	0	0	1	83.94
7	0	1	0	-1	90.15
8	0	0	-1	1	79.87
9	0	-1	-1	0	85.95
10	0	-1	0	-1	72.49
11	-1	1	0	0	82.41
12	0	-1	1	0	79.69
13	1	0	-1	0	85.81
14	0	0	-1	-1	85.88
15	-1	0	0	1	82.76
16	0	1	1	0	93.31
17	0	1	0	1	79.68
18	-1	0	1	0	86.77
19	0	0	0	0	94.22
20	0	0	1	-1	91.05
21	0	0	0	0	94.51
22	1	-1	0	0	82.23
23	1	0	1	0	82.86
24	0	0	1	1	90.87
25	0	1	-1	0	83.96
26	-1	-1	0	0	74.69
27	0	0	0	0	94.94
28	0	-1	0	1	85.16
29	0	0	0	0	94.24

2.5.2 多元二次回归方程拟合及方差分析

利用 Design Expert 软件对表 2 试验结果进行多元二次回归方程拟合,通过响应面回归过程进行数据分析,建立回归模型,得到回归方程:

$$Y=93.63+0.002A+2.46B+1.64C-0.017D-2.42AB-1.57AC+1.55AD+3.90BC-5.79BD+1.46CD-6.89A^2-6.65B^2-1.72C^2-4.81D^2$$

回归模型方差分析结果见表 3。由表 3 可知,回归方程极显著($F=10.58, P<0.0001$),失拟项不显著($P=0.2798>0.05$),表明该模型有很好的拟合度,能

将柠檬酸添加量、L-半胱氨酸添加量、D-异抗坏血酸钠添加量和氯化钙添加量 4 个因素对鲜切马铃薯护色效果进行准确的预测。方差分析结果表明:一次项 B ,交互项 BC 、 BD ,二次项 A^2 、 B^2 、 D^2 对 PPO 活性抑制率的影响极显著($P<0.01$),一次项 C 对 PPO 活性抑制率的影响显著($P<0.05$),交互项 AB 、 AC 、 AD 对 PPO 活性抑制率的影响不显著;各因素对多酚氧化酶活性抑制率影响的顺序为: B (L-半胱氨酸添加量) $>C$ (D-异抗坏血酸钠添加量) $>D$ (氯化钙添加量) $>A$ (柠檬酸添加量)。

表 3 响应面回归模型方差分析结果
Table 3 ANOVA for response surface quadratic model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	904.95	14	64.64	10.58	<0.000 1	**
A	3.33×10^{-5}	1	3.33×10^{-5}	5.46×10^{-6}	0.981 7	
B	72.87	1	72.87	11.93	0.003 9	**
C	32.18	1	32.18	5.27	0.037 7	*
D	3.33×10^{-3}	1	3.33×10^{-3}	5.46×10^{-4}	0.998 2	
AB	23.43	1	23.43	3.84	0.070 4	
AC	9.89	1	9.89	1.62	0.223 9	
AD	9.64	1	9.64	1.58	0.229 6	
BC	60.92	1	60.92	9.97	0.007 0	**
BD	133.86	1	133.86	21.92	0.000 4	**
CD	8.50	1	8.50	1.39	0.257 9	
A^2	308.12	1	308.12	50.44	<0.000 1	**
B^2	287.14	1	287.14	47.01	<0.000 1	**
C^2	19.21	1	19.21	3.15	0.097 9	
D^2	149.90	1	149.90	24.54	0.000 2	**
残差	85.51	14	6.11			
失拟项	70.67	10	7.07	1.91	0.279 8	
纯误差项	14.84	4	3.71			
总误差	990.46	28				
$R^2=0.9537$						

注:* 表示影响显著($P<0.05$),** 表示影响极显著($P<0.01$)。

2.5.3 响应曲面图分析

各因素交互作用对鲜切马铃薯 PPO 活性抑制率的影响见图 5~10。每个响应曲面图代表两个自变量之间的相互作用对 PPO 活性抑制率的影响。通过对图 5~10 的分析可知,除了 BC (图 8) BD (图 9)的响应面图陡峭,等高线呈椭圆形,表明其交互作用极显著($P<0.01$),其他两两因素交互作用的响应面图较平缓,等高线均呈椭圆形,随着柠檬酸、L-半胱氨酸、D-异抗坏血酸钠和氯化钙水平的增加,酶活性抑制率变化均呈现先增加后下降的变化趋势,表明选择合

适的柠檬酸、L-半胱氨酸、D-异抗坏血酸钠和氯化钙添加量对抑制多酚氧化酶活性至关重要。

2.5.4 褐变抑制剂配比的确定

在获得非线性回归模型和响应面分析的基础上,得出酶活性抑制率的最佳条件为:柠檬酸添加量 0.47%,L-半胱氨酸添加量 0.28%,D-异抗坏血酸钠添加量 0.05%,氯化钙添加量 0.54%,该条件下酶活性抑制率预测值为 95.84%。为验证模型预测的可靠性,在此最优配比条件下,进行 3 组平行验证试验。结果表明,酶活性抑制率的平均值为 95.13%,与预测值

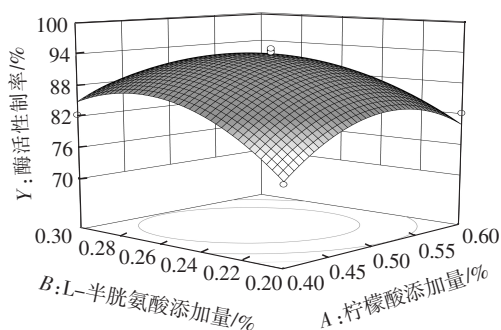


图5 柠檬酸和L-半胱氨酸添加量的交互作用对酶活性抑制率影响的响应面图

Fig.5 Response surface plot showing the interaction effects of citric acid and L-cysteine additions on the inhibitory rates of PPO activities

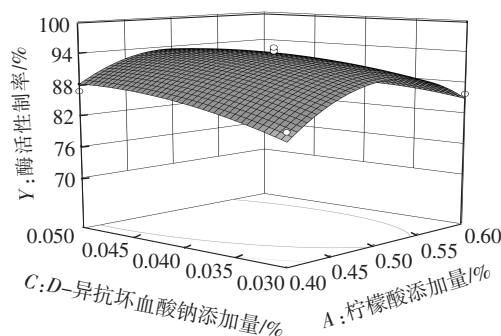


图6 柠檬酸和D-异抗坏血酸钠添加量的交互作用对酶活性抑制率影响的响应面图

Fig.6 Response surface plot showing the interaction effects of citric acid and D-sodium isoascorbate additions on the inhibitory rates of PPO activities

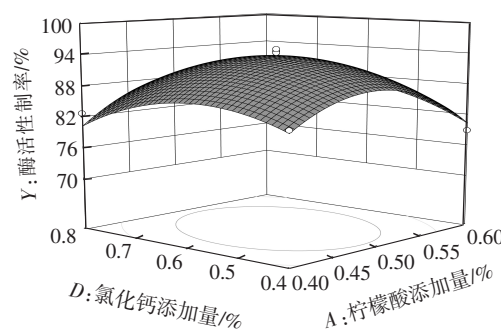


图7 柠檬酸和氯化钙添加量的交互作用对酶活性抑制率影响的响应面图

Fig.7 Response surface plot showing the interaction effects of citric acid and calcium chloride additions on the inhibitory rates of PPO activities

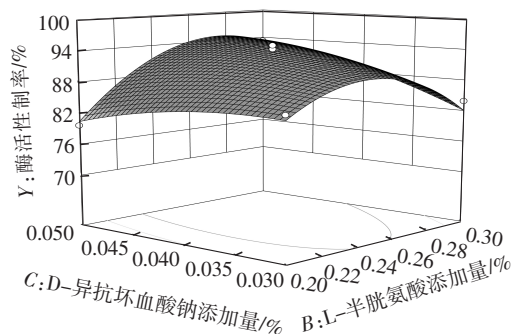


图8 L-半胱氨酸和D-异抗坏血酸钠添加量的交互作用对酶活性抑制率影响的响应面图

Fig.8 Response surface plot showing the interaction effects of L-cysteine and sodium D-isoascorbate additions on the inhibitory rates of PPO activities

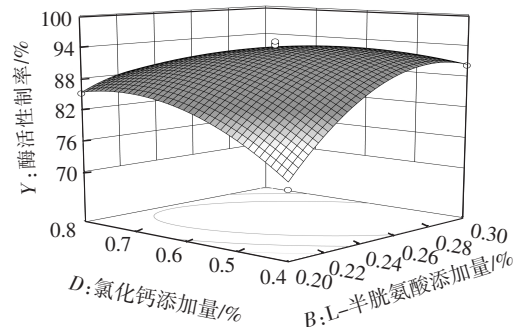


图9 L-半胱氨酸和氯化钙添加量的交互作用对酶活性抑制率影响的响应面图

Fig.9 Response surface plot showing the interaction effects of L-cysteine additions and calcium chloride on the inhibitory rates of PPO activities

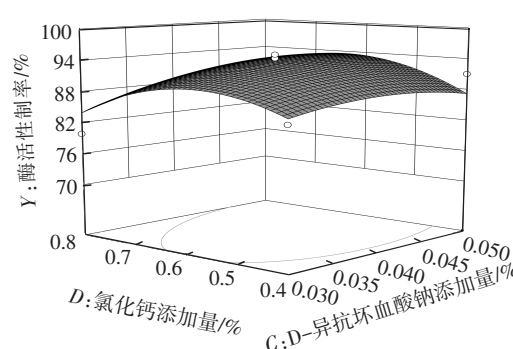


图10 D-异抗坏血酸钠和氯化钙添加量的交互作用对酶活性抑制率影响的响应面图

Fig.10 Response surface plot showing the interaction effects of sodium D-isoascorbate and calcium chloride additions on the inhibitory rates of PPO activities

相比,两者的相对误差为0.71%,误差较小,说明该模型可以很好地反映酶活性抑制率与各褐变抑制剂添加量的关系,利用响应面法优化褐变抑制剂添加量配比的研究是可靠的。

3 结论

试验选择西南冷凉高地种植的马铃薯品种昭薯ZT032为护色试验品种,通过添加护色剂抑制鲜切马

铃薯中多酚氧化酶活性,减少褐变发生。单因素试验中研究了单一柠檬酸、L-半胱氨酸、D-异抗坏血酸钠和氯化钙对鲜切马铃薯的护色效果,并在此基础上采用响应面法进行复配研究。结果发现,复合护色剂对多酚氧化酶的酶活性抑制率效果优于单一护色剂的效果。采用响应面优化试验得到西南冷凉高地鲜切马铃薯护色剂的最佳添加量配比为:柠檬酸 0.47%, L-半胱氨酸 0.28%, D-异抗坏血酸钠 0.05%, 氯化钙 0.54%, 此时 PPO 的酶活性抑制率为 95.13%, 与模型预测值的相对误差仅为 0.71%。该研究对高原特色鲜切马铃薯等产品的开发具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] CHEN C, HU W Z, HE Y B, et al. Effect of citric acid combined with UV-C on the quality of fresh-cut apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 126-131. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.08.005.
- [2] 姚春光. 美国马铃薯产业发展对中国的启示[C]//屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与脱贫攻坚(2018). 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2018: 28-35.
- [3] 隋启君. 西南地区马铃薯产业现状分析[C]//屈冬玉, 陈伊里. 中国马铃薯学术研讨会与第五届世界马铃薯大会论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004: 277-282.
- [4] 屈会娟. 西南五省马铃薯产业发展现状与对策[C]//屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与脱贫攻坚(2018). 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2018: 65-70.
- [5] SAXENA A, BAWA A S, RAJU P S. Effect of minimal processing on quality of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) bulbs using response surface methodology[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2012, 5(1): 348-358. DOI: 10.1007/s11947-009-0276-x.
- [6] CABEZAS-SERRANO A B, AMODIO M L, CORNACCHIA R, et al. Suitability of five different potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) to be processed as fresh-cut products [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2009, 53(3): 138-144. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2009.03.009.
- [7] KASNAK C. Effects of anti-browning treatments on the polyphenol oxidase and antioxidant activity of fresh-cut potatoes by using response surface methodology[J]. *Potato Research*, 2020, 63: 417-430. DOI: 10.1007/s11540-019-09448-7.
- [8] 田晓静, 刘元林, 龙鸣, 等. 鲜切马铃薯片护色方法对比与工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(14): 137-141. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2018.14.025.
- [9] 王馨雨, 杨绿竹, 王婷, 等. 植物多酚氧化酶的生理功能、分离纯化及酶促褐变控制的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 222-237. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190411-145.
- [10] 李俊, 卢扬, 刘永翔, 等. 不同品种马铃薯多酚氧化酶酶学特性对比[J]. *食品科技*, 2020, 45(6): 218-223. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2020.06.039.
- [11] 李俊, 刘嘉, 刘辉, 等. 不同品种马铃薯泥加工过程中褐变抑制研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(4): 18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2017.04.005.
- [12] 张芳, 王梦茹, 贾玉, 等. 曲酸真空浸渍处理对鲜切马铃薯冷藏期褐变及相关生理代谢的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(1): 12-18. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2021.01.003.
- [13] 李利华. 莴笋多酚氧化酶的酶学特性研究[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(1): 71-75. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2018.01.012.
- [14] 闫小宇, 董喆, 王沙沙, 等. 不同葡萄品种多酚氧化酶酶学特性比较[J]. *食品科学*, 2016, 37(19): 216-221. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201619036.
- [15] 王磊, 阿地里江·阿不都拉, 张富春, 等. 籽瓜瓢提取物对酪氨酸酶抑制作用及其成分分析[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(19): 7-13. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2018.19.002.
- [16] 崔霖芸. 野木瓜果汁非酶褐变复配抑制剂的优化[J]. *食品与机械*, 2017, 33(4): 184-189. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2017.04.036.
- [17] 刘丽, 徐洪岩, 姜俊凤. 不同抗氧化剂对鲜切马铃薯褐变的抑制效果[C]//屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与脱贫攻坚(2018). 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2018: 349-352.
- [18] 刘军平, 孙悦芳, 禹凯博, 等. 有机酸对葛根多酚氧化酶活性的抑制及其护色效应[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2019, 43(6): 550-555. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdl.2019.06.008.
- [19] 邹立强, 刘伟, 刘军平, 等. 柠檬酸对多酚氧化酶相对酶活性、动力学和褐变参数的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(17): 141-144.
- [20] 连文绮, 樊迎, 张丹. 不同褐变抑制剂对鲜切苹果保鲜性能的影响[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(2): 284-287. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2481.2018.02.30.
- [21] 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. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.118.
- [22] 额日赫木, 王梦茹, 张芳, 等. 真空浸渍辅助 L-半胱氨酸处理对贮藏期鲜切马铃薯的护色作用[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(14): 28-33. DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2020.14.005.
- [23] LIMA TRIBST A A, DE CASTRO LEITE JÚNIOR B R, DE OLIVEIRA M M, et al. High pressure processing of cocoyam, Peruvian carrot and sweet potato: Effect on oxidative enzymes and impact in the tuber color[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 302-309. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.02.010.

(下转第 22 页)

- 13995/j.cnki.11-1802/ts.024413.
- [31] STEWART R J, SAWYER B J B, BUCHELI C S, et al. Poly-phenol oxidase is induced by chilling and wounding in pineapple[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 2001, 28(3):181-191. DOI: 10.1071/PP00094.
- [32] 王静. 细胞区室化功能破坏导致的果蔬酶促褐变机理及控制方法[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(8):62-65. DOI: 10.3969/j.issn.0488-5368.2014.08.022.
- [33] TOMÁS-BARBERÁN F A, ESPÍN J C. Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 81(9):853-876. DOI:10.1002/jsfa.885.
- [34] 刘云芬, 廖玲燕, 段振华, 等. 不同处理对鲜切茼蒿褐变及贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4):15-20. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2020.04.003.
- [35] 马杰, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬苯丙烷代谢的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15):391-393.
- [36] 潘永贵, 陈维信. 鲜切荸荠组织中与褐变相关酶活性研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(31):9856-9857. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2007.31.027.
- [37] 李旋, 毕金峰, 刘璇, 等. 苹果多酚的组成和功能特性研究现状与展望[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11):328-340. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2020.11.037.
- [38] 胡晓丹, 卢黎明, 谢笔钧. 莲藕酶促褐变的研究[J]. 江苏食品与发酵, 1999(2):1-4.
- [39] 刘伟, 宋弋, 廖小军, 等. 超声波技术在果蔬采后贮藏保鲜中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23):206-216. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2017.23.040.
- [40] KHADEMI O, ASHTARI M, RAZAVI F. Effects of salicylic acid and ultrasound treatments on chilling injury control and quality preservation in banana fruit during cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249:334-339. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.018.
- [41] JANG J H, MOON K D. Inhibition of polyphenol oxidase and peroxidase activities on fresh-cut apple by simultaneous treatment of ultrasound and ascorbic acid[J]. Food Chemistry, 2011, 124(2):444-449. DOI: 10.1016/j.foodchem.201.06.052.
- 收稿日期: 2021-04-06

·····
(上接第14页)

- [24] 张礼良, 胡文忠, 姜爱丽, 等. D-异抗坏血酸钠处理鲜切果蔬的研究进展[C]//中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集. 中国食品科学技术学会, 2018:401-402.
- [25] 赵迪, 温青玉, 张康逸, 等. 复配型护色剂对菠菜生鲜面贮藏品质的调控[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4):139-148, 130. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.4.0804.
- [26] 王丽璞, 郁军, 岳鹏翔, 等. 不同金属离子对多酚氧化酶的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(13):244-247.
- [27] 周才琼, 代小容, 曾庆群. 部分金属离子的食品添加剂对茶多酚抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2007(11):199-201. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2007.11.053.
- [28] 马永强, 戴传荣, 王鑫, 等. 抑制剂对蓝莓果汁加工过程的酶促褐变研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(2):124-129. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2017.02.012.
- 收稿日期: 2021-03-23