

农产品贮藏加工

## 樱桃番茄果脯的无硫复合护色工艺优化

姚舒婷<sup>a</sup>, 周声怡<sup>a</sup>, 吴文艳<sup>a</sup>, 刘东红<sup>a,b</sup>, 叶兴乾<sup>a,b</sup>

(浙江大学 a.生物系统工程与食品科学学院 b.馥莉食品研究院, 杭州 310058)

**摘要:** **目的** 研发无硫复合护色工艺替代传统硫处理护色工艺, 以解决果脯二氧化硫残留超标等问题, 从而开发出健康营养且色泽诱人的果脯。**方法** 首先通过 PB 试验, 从异抗坏血酸钠、植酸、六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精、氯化钠、柠檬酸、抗坏血酸及 L-半胱氨酸等 8 种护色剂中筛选出 4 种对樱桃番茄果脯护色有显著效果的组分, 再通过最陡爬坡试验逼近最大响应区域, 最后通过响应面进一步优化护色剂组成。**结果** 得到了樱桃番茄果脯最优护色配方, 六偏磷酸钠的质量分数为 0.2%, L-半胱氨酸的质量分数为 0.3%,  $\beta$ -环糊精的质量分数为 0.1%, 柠檬酸的质量分数为 1%。**结论** 所研发的无硫复合护色剂因六偏磷酸钠、L-半胱氨酸、 $\beta$ -环糊精和柠檬酸的协同护色, 具有良好的护色效果, 且可保持果脯的稳定性, 延长了护色时间。

**关键词:** 护色; 樱桃番茄; 果脯; 复合

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)11-0001-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.001

## Optimization of Sulfur Free Compound Color Protection Technology for Preserved Cherry Tomato

YAO Shu-ting<sup>a</sup>, ZHOU Sheng-yi<sup>a</sup>, WU Wen-yan<sup>a</sup>, LIU Dong-hong<sup>a,b</sup>, YE Xing-qian<sup>a,b</sup>

(a.College of Biosystems Engineering and Food Science

b.Fuli Institute of Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**ABSTRACT:** The work aims to develop sulfur free compound color protection technology to replace the traditional sulfur treatment and solve the problem of excessive sulfur dioxide residue in preserved fruits, so as to develop healthy and nutritious preserved fruits with attractive color. First of all, four kinds of color fixative were screened out from eight kinds of color fixative, namely sodium erythorbate, phytic acid, sodium hexametaphosphate,  $\beta$ -cyclodextrin, sodium chloride, citric acid, Vc and L-cysteine that had significant effects on the color protection of the preserved cherry tomato. Then, the maximum response area was approached by the steepest ascent experiment. Finally, the color protection formula was further optimized through the response surface. The optimal color protection formula of preserved cherry tomato obtained was 0.2% (mass fraction) sodium hexametaphosphate, 0.3% (mass fraction) L-cysteine, 0.1% (mass fraction)  $\beta$ -cyclodextrin and 1% (mass fraction) citric acid. The sulfur free compound color fixative developed herein has good color protection effect and can keep the stability of preserved fruits and prolong the time of color protection because of the synergistic color protection by sodium hexametaphosphate, L-cysteine,  $\beta$ -cyclodextrin and citric acid.

**KEY WORDS:** color protection; cherry tomato; preserved fruit; compound

收稿日期: 2019-12-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0400405); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项(2017YFE0122300)

作者简介: 姚舒婷(1995—), 女, 浙江大学硕士生, 主攻果蔬加工。

通信作者: 叶兴乾(1962—), 男, 浙江大学教授, 主要研究方向为果蔬加工。

樱桃番茄外形玲珑可爱,风味独特,富含抗坏血酸、类胡萝卜素和酚类化合物等多种有益的活性成分<sup>[1-3]</sup>,具有抗氧化、降低胆固醇、预防心血管疾病和抗癌等作用<sup>[4]</sup>。由樱桃番茄加工而成的樱桃番茄果脯具有诱人色泽和怡人口感,以及良好的贮藏性,因此深受大众喜爱,具有广阔的市场前景。

樱桃番茄果脯在加工过程中需要进行护色处理,若护色处理不当,会产生异味,如苦味和陈腐味等,还会影响果脯的营养成分,因此果脯的护色工艺是果脯加工过程中的关键步骤。在传统的果脯加工中,往往通过硫处理对鲜果进行护色,即采用熏硫或加入亚硫酸盐等护色剂来抑制果脯的褐变<sup>[5]</sup>。硫处理会导致果脯中的二氧化硫超标,因市售果脯大多由中小企业生产,硫超标问题最为常见,对广大消费者的健康造成威胁。市售的樱桃番茄果脯属于最易出现二氧化硫超标现象的果脯品种之一<sup>[6]</sup>。随着消费者对食品安全问题与健康关注度的持续上升,开发安全高效的护色剂替代亚硫酸盐成为果脯行业亟待解决的难题,且具有广阔的市场应用前景。

目前,文献报道的无硫护色剂多从抑制多酚氧化酶的角度来筛选试剂。多酚氧化酶 pH 值的适宜范围为 5~7,可被有机酸、金属离子螯合剂、硫化物和酚类底物类似物抑制<sup>[7]</sup>。单一的护色剂往往由于自身局限性无法达到满意的效果,而复合护色剂通常由不同类别的抗褐变剂组成,故可更好地满足实际生产的需求。黄诚等<sup>[8]</sup>研究了柠檬酸、酒石酸、植酸等 3 种有机酸复合护色液对猕猴桃果脯 PPO(多酚氧化酶)活性的影响。祝美云等<sup>[9]</sup>的研究表明,将质量分数分别为 0.40% 的 L-半胱氨酸、0.15% 的乙二胺四乙酸二钠、0.20% 的食盐组合成的复合护色剂对莲藕片的护色效果最佳。申晓琳等<sup>[10]</sup>研究了异抗坏血酸钠、植酸、六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精等护色剂对胡萝卜汁的护色效果。目前还没有关于樱桃番茄果脯无硫复合护色剂相关的报道。故文中将通过 PB 试验(筛选试验设计)从异抗坏血酸钠、植酸、六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精、氯化钠、柠檬酸、抗坏血酸和 L-半胱氨酸等 8 种护色剂中筛选出有效的护色剂,并通过最陡爬坡试验和响应面优化得到适合樱桃番茄果脯的复合护色剂。

## 1 实验

### 1.1 材料及试剂

主要材料和试剂:樱桃番茄,产自云南元谋;白砂糖,市售一级;氯化钙、CMC、异抗坏血酸钠、植酸、六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精、氯化钠、柠檬酸、Vc(抗坏血酸)及 L-半胱氨酸,均为食品级。

### 1.2 仪器

主要仪器:C21-SDHCB47 型号电磁炉(浙江苏泊尔股份有限公司)、JM-B30002 型号电子天平、色差计(柯尼卡美能达)、W25800K-01AG 型号微波炉(宁波方太厨具有限公司)、DHG-101-2Sb 热风干燥箱(杭州蓝途仪器有限公司)。

## 2 方法

### 2.1 工艺流程

工艺流程:新鲜樱桃番茄→挑选、清洗→刺缝→漂烫去皮→护色硬化→清洗、沥干→填充→渗糖→烘干→冷却→包装→成品→测定色泽。

### 2.2 工艺操作要点

1)原料选择。选用九成熟,大小均匀,纵轴(从果茎到顶点的连线方向)为 35~39 mm,横向直径为 21~25 mm,单个质量为 10~14 g,色泽亮红,无病虫害,无机械伤的新鲜樱桃番茄,用清水洗净。

2)刺缝。用牙签在樱桃番茄表面均匀刺 20~30 个孔。

3)漂烫。将樱桃番茄在 90~95 °C 的热水中漂烫 2~5 min,后用冷水冷却去皮。

4)护色硬化。将去皮后的樱桃番茄放入搅拌均匀的护色剂和质量分数为 0.5% 的氯化钙热水溶液中浸泡 6~10 h。

5)填充。将护色硬化后的樱桃番茄进行漂洗,然后加入质量分数为 0.5% 的 CMC(羧甲基纤维素钠)溶液中,填充 0.5 h。

6)渗糖。将填充后的樱桃番茄清洗干净,然后进行分段微波渗糖,先放入质量分数为 45% 的糖液(含质量分数为 1.1% 的柠檬酸)中,并放置到微波炉中二挡渗糖 10 min,取出常温渗糖 10 min;再放入质量分数为 55% 的糖液中,并放置到微波炉中二挡渗糖 10 min,取出常温渗糖 10 min;再放入质量分数为 60% 的糖液中,并放置到微波炉中二挡渗糖 10 min,取出常温渗糖 10 min;最后在常温下渗糖 4~6 h。

7)烘干。将樱桃番茄捞出沥干糖液,在 50~60 °C 下烘干,约需 18~24 h。

8)测定色泽。采用色差计测定,在 25 °C 的光源下,通过三色刺激值色差计的 CR-400 探头测得样品的亮度值  $L^*$ ,红度值  $a^*$ ,黄度值  $b^*$ ,通过这 3 个值来计算样品的褐变程度。其中  $L$  表示明度, $L=0$  为黑色, $L=100$  为白色; $a^*$ (正值)表示红色程度; $b^*$ (正值)表示黄色程度; $\Delta E$ (正值)表示以新鲜樱桃番茄为参照时,实验值与之相对照的总色差值。文中实验主要以  $\Delta E$  值为樱桃番茄果脯褐变程度的指

标， $\Delta E$  值越小，表示褐变程度越轻。

$$\Delta E = ((L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2)^{1/2}$$

2.3 Plackett-Burman 试验设计

PB 试验可以从多种因素中筛选出重要因素，同时显著减少了实验的次数，快速地筛选出显著性因子，并且能估计因子的主效和部分交互作用，也可以根据实验数据拟合的一次多项式来确定最陡爬坡方向，从而接近最大响应区域<sup>[11—12]</sup>。以  $\Delta E$  值为指标，拟考察异抗坏血酸钠、植酸、六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精、氯化钠、柠檬酸、Vc 及 L-半胱氨酸护色剂对樱桃番茄果脯色泽的影响，每个因素取三水平，具体试验设计见表 1。

2.4 最陡爬坡试验

响应面优化所拟合的多元非线性回归方程只有在考察的最优领域里才能充分近似真实情况，具有实际意义<sup>[13—14]</sup>，因此，需要对 PB 试验中的主效因子进行最陡爬坡试验，凭借 PB 试验回归方程模型系数符号、大小设置步长和爬坡方向来达到最优领域。其他因素的取值可结合 PB 试验的正负效应来确定。

2.5 中心组合试验设计

CCD 试验（中心组合设计）在基本保留回归正交设计试验次数的前提下，通过牺牲部分正交性来获得旋转性，从而可简化计算和部分消除回归系数之间的相关性，克服预测值方差过分依赖于试验点在因子空间中位置的不足，可以很好地根据预测值直接寻求最优区域<sup>[15]</sup>。对于二因子系统，模型可表述为： $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$ 。式中： $Y$  为

预测响应值，即  $\Delta E$  值； $X_i$  为因素； $b_0$  为截距； $b_1, b_2$  为线性系数； $b_{12}$  为交互参数； $b_{11}, b_{22}$  为二次项参数。

在 PB 试验和最陡爬坡试验的基础上，选择六偏磷酸钠和 L-半胱氨酸护色剂作为响应面试验的因素，采用五水平，其余因素（文中所提各因素含量均以质量分数计）固定为  $\beta$ -环糊精（ $X_4$ ）0.1%，柠檬酸（ $X_6$ ）1%。，响应面试验设计见表 2。

2.6 数据处理

每个实验重复 3 次，取平均值进行分析。PB 试验、响应面试验设计和分析采用软件 Design Expert 进行统计分析。

3 结果分析

3.1 PB 试验设计及结果

PB 试验的设计和结果见表 3，PB 试验的分析结果见表 4。由表 4 可知，PB 试验模型的  $P$  值为 0.0465，在显著水平为 90%时，用该模型来预测筛选樱桃番茄果脯有效护色因子在统计学上是有意义的。从各个因素的  $P$  值可知，各因素对樱桃番茄果脯成品色泽的影响水平为六偏磷酸钠（ $X_3$ ）>L-半胱氨酸（ $X_8$ ）> $\beta$ -环糊精（ $X_4$ ）>柠檬酸（ $X_6$ ）>异抗坏血酸钠（ $X_1$ ）>氯化钠（ $X_5$ ）>植酸（ $X_2$ ）>Vc（ $X_7$ ）。其中，六偏磷酸钠（ $X_3$ ）的  $P$  值为 0.0149，在显著水平为 95%时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是极显著的；L-半胱氨酸（ $X_8$ ）的  $P$  值为 0.0174，在显著水平为 95%时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是极显著的。该模型的回归模型方程为： $Y = 17.66 - 0.48X_1 - 0.31X_2 - 1.22X_3 + 0.77X_4 + 0.38X_5 - 0.63X_6 - 0.22X_7 - 1.18X_8$ 。

表 1 Plackett-Burman 设计的因素水平及编码  
Tab.1 Factors, levels and codes of Plackett-Burman design

| 水平 | $X_1/\%$<br>(异抗坏血酸钠) | $X_2/\%$<br>(植酸) | $X_3/\%$<br>(六偏磷酸钠) | $X_4/\%$<br>( $\beta$ -环糊精) | $X_5/\%$<br>(氯化钠) | $X_6/\%$<br>(柠檬酸) | $X_7/\%$<br>(Vc) | $X_8/\%$<br>(L-半胱氨酸) |
|----|----------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| -1 | 0.1                  | 0.1              | 0.1                 | 0.1                         | 1                 | 0.8               | 1                | 0.1                  |
| 0  | 0.3                  | 0.2              | 0.2                 | 0.3                         | 2                 | 1                 | 2                | 0.3                  |
| 1  | 0.5                  | 0.4              | 0.4                 | 0.5                         | 3                 | 2                 | 3                | 0.5                  |

表 2 中心组合设计因子及水平  
Tab.2 Factors and levels of central composite design

| 水平     | $X_3/\%$ (六偏磷酸钠) | $X_8/\%$ (L-半胱氨酸) |
|--------|------------------|-------------------|
| -1.414 | 0.117            | 0.217             |
| -1     | 0.2              | 0.3               |
| 0      | 0.4              | 0.5               |
| 1      | 0.6              | 0.7               |
| 1.414  | 0.683            | 0.783             |

表 3 Plackett-Burman 试验设计和结果  
Tab.3 Design and results of Plackett-Burman experiment

| 试验号 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $Y(\Delta E \text{ 值})$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| 1   | -1    | -1    | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | 1     | 19.17                   |
| 2   | -1    | -1    | 1     | 1     | -1    | -1    | 1     | 1     | 15.96                   |
| 3   | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | -1    | 16.05                   |
| 4   | 1     | -1    | -1    | -1    | -1    | 1     | 1     | 1     | 17.11                   |
| 5   | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | 21.29                   |
| 6   | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | 16.58                   |
| 7   | -1    | 1     | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 21.35                   |
| 8   | 1     | -1    | 1     | -1    | 1     | -1    | -1    | 1     | 15.07                   |
| 9   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 19.12                   |
| 10  | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | -1    | -1    | 15.65                   |
| 11  | 1     | 1     | -1    | -1    | 1     | 1     | -1    | -1    | 17.58                   |
| 12  | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 15.49                   |
| 13  | 1     | 1     | -1    | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | 17.57                   |
| 14  | 1     | -1    | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | -1    | 22.93                   |
| 15  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 16.42                   |
| 16  | -1    | 1     | 1     | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 15.32                   |
| 17  | -1    | 1     | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 19.3                    |
| 18  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 16.64                   |
| 19  | -1    | 1     | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | 16.09                   |

表 4 Plackett-Burman 试验结果分析  
Tab.4 Analysis of Plackett-Burman experiment results

| Source      | Sum of Squares | DF | Mean Square | $F$ 值 | $P$ 值  |
|-------------|----------------|----|-------------|-------|--------|
| 模型          | 70.48          | 8  | 8.81        | 3.32  | 0.0465 |
| $X_1$       | 3.62           | 1  | 3.62        | 1.36  | 0.2732 |
| $X_2$       | 1.57           | 1  | 1.57        | 0.59  | 0.4620 |
| $X_3$       | 23.94          | 1  | 23.94       | 9.01  | 0.0149 |
| $X_4$       | 9.50           | 1  | 9.50        | 3.58  | 0.0912 |
| $X_5$       | 2.26           | 1  | 2.26        | 0.85  | 0.3807 |
| $X_6$       | 6.39           | 1  | 6.39        | 2.40  | 0.1554 |
| $X_7$       | 0.76           | 1  | 0.76        | 0.29  | 0.6055 |
| $X_8$       | 22.44          | 1  | 22.44       | 8.45  | 0.0174 |
| Curvature   | 0.18           | 1  | 0.18        | 0.066 | 0.8030 |
| Residual    | 23.92          | 9  | 2.66        |       |        |
| Lack of Fit | 19.42          | 7  | 2.77        | 1.23  | 0.5175 |
| Pure Error  | 4.50           | 2  | 2.25        |       |        |
| Cor Total   | 94.57          | 18 |             |       |        |

根据 PB 的结果，筛选出六偏磷酸钠 ( $X_3$ )、L-半胱氨酸 ( $X_8$ )、 $\beta$ -环糊精 ( $X_4$ ) 和柠檬酸 ( $X_6$ ) 作为樱桃番茄果脯护色剂配方的组成成分，选择最显著的 2 个因子（即六偏磷酸钠和 L-半胱氨酸）进行最陡爬坡试验，而其余因子根据 PB 试验回归模型方程中的正负效应来固定水平。

3.2 最陡爬坡路径

根据 PB 试验回归模型方程，由于  $\beta$ -环糊精 ( $X_4$ ) 的方程系数是正的，故取 -1 水平固定，即 0.1%，而柠檬酸 ( $X_6$ ) 的系数是负的，故取 0 水平固定，即 1%。回归模型方程中六偏磷酸钠 ( $X_3$ ) 和 L-半胱氨酸 ( $X_8$ ) 的系数均为负，说明同时增加六偏磷酸钠 ( $X_3$ ) 和 L-半胱氨酸 ( $X_8$ ) 的含量对樱桃番茄果脯成品的色泽有积极的影响，故以六偏磷酸钠 ( $X_3$ ) 和 L-半胱氨酸 ( $X_8$ ) 每次增加 1% 为基本步长，最陡爬坡试验设计和结果见表 5。从表 5 可知，序号 3 对应的  $\Delta E$  值为 13.96，是最小的，而后  $\Delta E$  值开始增大，说明樱桃番茄果脯褐变更严重了，因此选择序号 3 的六偏磷酸钠 ( $X_3$ ) 和 L-半胱氨酸 ( $X_8$ ) 含量为响应面优化的中心值。

表 5 最陡爬坡实验设计和结果

Tab.5 Designs and results of steepest ascent experiment

| 序号 | $X_3/\%$<br>(六偏磷酸钠) | $X_8/\%$<br>(L-半胱氨酸) | $Y$<br>( $\Delta E$ 值) |
|----|---------------------|----------------------|------------------------|
| 1  | 0.2                 | 0.3                  | 15.46                  |
| 2  | 0.3                 | 0.4                  | 15.72                  |
| 3  | 0.4                 | 0.5                  | 13.96                  |
| 4  | 0.5                 | 0.6                  | 16.33                  |
| 5  | 0.6                 | 0.7                  | 15.81                  |
| 6  | 0.7                 | 0.8                  | 15.79                  |
| 7  | 0.8                 | 0.9                  | 16.23                  |
| 8  | 0.9                 | 1.0                  | 16.29                  |

3.3 响应面优化樱桃番茄果脯护色剂配方组成

根据最陡爬坡试验的结果，六偏磷酸钠 (0.4%) 和 L-半胱氨酸 (0.5%) 作为 0 水平，利用 Design-Expert 响应面分析中的中心组合设计，选取六偏磷酸钠和 L-半胱氨酸作为二因素，每因素取 5 个水平，中心组合设计实验结果见表 6，结果分析见表 7。由表 7 可知，该模型的  $P < 0.15$ ，在显著水平为 85% 时，该模型在统计学上是有意义的，且该模型失

拟项  $P > 0.15$ ，是不显著的，因此可用该模型来优化樱桃番茄果脯护色剂配方组成。失拟用来表示所用的模型与实验的拟合程度，对模型有利，无失拟因素存在，因此可用该回归方程代替试验真实点对实验结果进行分析。该模型的二次响应面回归方程为： $Y = 12.04 + 0.76X_1 - 0.37X_2 + 0.72X_1^2 + 0.32X_2^2 - 1.04X_1X_2$ 。

至于各因素对  $Y$  ( $\Delta E$  值) 影响的显著性，六偏磷酸钠 ( $X_1$ ) 的  $P$  值为 0.0778，在显著水平为 85% 时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是显著的；L-半胱氨酸 ( $X_2$ ) 的  $P$  值为 0.3509，在显著水平为 85% 时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是不显著的；六偏磷酸钠的平方效应 ( $X_1^2$ ) 的  $P$  值为 0.1117，在显著水平为 85% 时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是显著的；L-半胱氨酸的平方效应 ( $X_2^2$ ) 的  $P$  值为 0.4484，在显著水平为 85% 时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是不显著的；六偏磷酸钠和 L-半胱氨酸的交互作用 ( $X_1X_2$ ) 的  $P$  值为 0.0778，在显著水平为 85% 时，对樱桃番茄果脯成品色泽的影响是显著的。

此次试验指标  $\Delta E$  值越小，表明樱桃番茄果脯褐变程度越小，故  $\Delta E$  值越小越好。该模型优化获得的最佳护色剂配方在六偏磷酸钠 ( $X_1$ ) 取编码水平为 -1，L-半胱氨酸 ( $X_2$ ) 取编码水平为 -1 时，可获得最低  $\Delta E$  值 (11.6424)，即六偏磷酸钠 ( $X_1$ ) 为 0.2%，L-半胱氨酸 ( $X_2$ ) 为 0.3% 时， $\Delta E$  值为 11.6424，樱桃番茄果脯褐变程度最小，其可信度为 0.889。

表 6 中心组合试验设计和结果

Tab.6 Design and results of central composite experiment

| 序号 | $X_1$ | $X_2$ | $Y(\Delta E \text{ 值})$ |
|----|-------|-------|-------------------------|
| 1  | -1.41 | 0     | 13.29                   |
| 2  | 0     | -1.41 | 13.94                   |
| 3  | -1    | -1    | 10.76                   |
| 4  | 0     | 1.41  | 12.72                   |
| 5  | 0     | 0     | 11.32                   |
| 6  | 1     | 1     | 12                      |
| 7  | -1    | 1     | 12.24                   |
| 8  | 0     | 0     | 11.75                   |
| 9  | 1     | -1    | 14.69                   |
| 10 | 0     | 0     | 13.77                   |
| 11 | 1.41  | 0     | 14.97                   |
| 12 | 0     | 0     | 11.55                   |
| 13 | 0     | 0     | 11.83                   |

表7 中心组合试验结果分析  
Tab.7 Analysis on central composite experiment results

| Source      | Sum of Squares | DF | Mean Square | F 值  | P 值    |
|-------------|----------------|----|-------------|------|--------|
| 模型          | 13.94          | 5  | 2.79        | 2.59 | 0.1238 |
| $X_1$       | 4.60           | 1  | 4.60        | 4.27 | 0.0778 |
| $X_2$       | 1.08           | 1  | 1.08        | 1.00 | 0.3509 |
| $X_1^2$     | 3.57           | 1  | 3.57        | 3.31 | 0.1117 |
| $X_2^2$     | 0.70           | 1  | 0.70        | 0.64 | 0.4484 |
| $X_1X_2$    | 4.35           | 1  | 4.35        | 4.03 | 0.0846 |
| Residual    | 7.55           | 7  | 1.08        |      |        |
| Lack of Fit | 3.67           | 3  | 1.22        | 1.26 | 0.4000 |
| Pure Error  | 3.88           | 4  | 0.97        |      |        |
| Cor Total   | 21.49          | 12 |             |      |        |

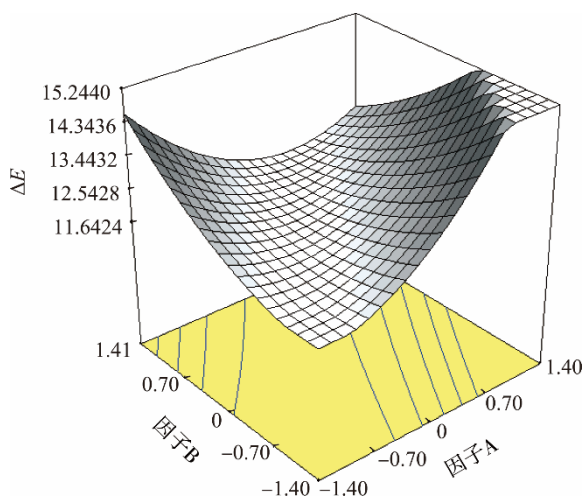


图1 六偏磷酸钠和 L-半胱氨酸交互作用的响应面  
Fig.1 Response surface of the interaction between sodium hexametaphosphate and L-cysteine

#### 4 结语

通过 PB 试验,从 8 种护色剂(异抗坏血酸钠、植酸、六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精、氯化钠、柠檬酸、Vc 及 L-半胱氨酸)中筛选出 4 种对樱桃番茄果脯护色有显著效果的组分,即六偏磷酸钠、 $\beta$ -环糊精、柠檬酸和 L-半胱氨酸,选择其中最显著的 2 种组分(即六偏磷酸钠和 L-半胱氨酸)进行最陡爬坡试验逼近最大响应区域,而  $\beta$ -环糊精取 0.1%固定,柠檬酸取 1%固定,最终以六偏磷酸钠 0.4%和 L-半胱氨酸 0.5%作为 0 水平进行响应面优化。最佳护色剂配方在六偏磷酸钠为 0.2%,L-半胱氨酸为 0.3%时, $\Delta E$  值为 11.6424,樱桃番茄果脯褐变程度最小,其可信度为 0.889。故得到了最佳护色剂配方,六偏磷酸钠为 0.2%,L-半胱氨酸为 0.3%, $\beta$ -环糊精为 0.1%,柠檬酸为 1%,樱桃番茄果脯褐变程度最小。该最佳护色

剂配方中的 4 种护色剂护色原理各不相同,六偏磷酸钠主要通过螯合多酚氧化物的铜离子来抑制酶活,达到护色效果;L-半胱氨酸则不仅可以与多酚氧化酶活性位点铜离子结合,或将酶活性位点的组氨酸残基替换,还可结合酶促反应产物,从而抑制褐变; $\beta$ -环糊精可通过对果脯中重要物质的包埋,从而增加有色物质对光、热等的稳定性,最终起到护色效果;柠檬酸通过降低果脯细胞的 pH 环境,干扰酶促反应中酶对氧的吸收,从而影响关键酶的活性,或者通过螯合多酚氧化酶中的铜离子来抑制酶活性,或者通过增强其他抗氧化剂的功效来协助抑制酶活性。由此可见,采用六偏磷酸钠、L-半胱氨酸、 $\beta$ -环糊精和柠檬酸进行协同护色,不仅具有良好的护色效果,安全可靠,还有助于保持果脯的色泽稳定性。

#### 参考文献:

- [1] ERDINC C, EKINCIALP A, GUNDOGDU M, et al. Bioactive Components and Antioxidant Capacities of Different Miniature Tomato Cultivars Grown by Altered Fertilizer Applications[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(3): 1519—1529.
- [2] NABNEAN S, THEPA S, JANJAI S, et al. Drying Kinetics and Diffusivity of Osmotically Dehydrated Cherry Tomatoes[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017, 41(1): e12735.
- [3] 王羽, 梁敏, 齐小晶, 等. 包装材料对樱桃番茄气调保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 91—96. WANG Yu, LIANG Min, QI Xiao-jing, et al. Effects of Packaging Materials on Modified Atmosphere Preservation of Cherry Tomato[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 91—96.
- [4] BARROS L, CABRITA L, BOAS M V, et al. Chemi-

- cal, Biochemical and Electrochemical Assays to Evaluate Phytochemicals and Antioxidant Activity of Wild Plants[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1600—1608.
- [5] 洪雁, 李远志, 卢昌阜, 等. 无硫护色技术在蜜饯加工中的应用研究进展[C]// 广东省食品学会第六次会员大会暨学术研讨会论文集, 2012.  
HONG Yan, LI Yuan-zhi, LU Chang-fu, et al. Research Progress in Non-sulfur Color-protection Technique in Candied Fruit Processing[C]// Paper Collection of the 6th General Meeting and Academic Seminar of Food Society, Guangdong, 2012.
- [6] 李文生, 杨军军, 王宝刚, 等. 北京市场果脯蜜饯二氧化硫残留分析[J]. 中国食品添加剂, 2014(8): 162—164.  
LI Wen-sheng, YANG Jun-jun, WANG Bao-gang, et al. Analysis of Sulfur Dioxide Residues in Preserved Fruits in Beijing Market[J]. China Food Additives, 2014(8): 162—164.
- [7] 陈瑞敏, 侯向昶. 无硫护色技术在蜜饯生产中的应用分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(11): 72—74.  
CHEN Rui-min, HOU Xiang-chang. Application of Non-sulfur Color-protection Technique in the Production of Preserved Fruits[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 72—74.
- [8] 黄诚, 沈吴诚, 尹红, 等. 有机酸复合护色液对猕猴桃果脯 PPO 活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(9): 92—95.  
HUANG Cheng, SHEN Wu-cheng, YIN Hong, et al. Influence of the Organic Acid Complex Liquid on the PPO Activity of Kiwi Fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2007, 33(9): 92—95.
- [9] 祝美云, 殷贺中. 无硫低糖莲藕脯制作工艺优化[J]. 食品科学, 2011, 22(11): 70—74.  
ZHU Mei-yun, YIN He-zhong. Process Optimization for Sulfur-free and Low-sugar Preserved Lotus Root Manufacturing[J]. Food Science, 2011, 22(11): 70—74.
- [10] 申晓琳, 李和平, 李群英, 等. 不同护色剂对胡萝卜汁护色效果研究[J]. 食品科技, 2011, 36(11): 86—88.  
SHEN Xiao-lin, LI He-ping, LI Qun-ying, et al. Effect of Different Color Fixatives to Carrot Juice[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(11): 86—88.
- [11] 徐腾洋, 方若思, 董亚晨, 等. 黑曲霉 ZJUQH 产  $\alpha$ -半乳糖苷酶的固体发酵培养基优化研究[J]. 食品科学, 2013, 34(9): 216—219.  
XU Teng-yang, FANG Ruo-si, DONG Ya-chen, et al. Optimization by Response Surface Methodology of Solid-state Fermentation Medium for  $\alpha$ -Galactosidase Production by *Aspergillus niger* ZJUQH[J]. Food Science, 2013, 34(9): 216—219.
- [12] 蒋晗, 赵进, 方结红, 等. Plackett-Burman 设计和响应面法在食品专业综合实验教学中的应用[J]. 食品工程, 2017, 6(2): 10—14.  
JIANG Han, ZHAO Jin, FANG Jie-hong, et al. Application of Plackett-Burman Design and Response Surface Methodology in the Food Speciality Comprehensive Experiment Teaching[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 6(2): 10—14.
- [13] 李广泽, 雷丁丁, 周生. 产氨细菌 design-expert 软件优化浸铜实验[J]. 山东工业技术, 2018(16): 1—3.  
LI Guang-ze, LEI Ding-ding, ZHOU Sheng. Optimization of Copper Leaching Experiment by Design Expert Software of Ammonia Producing Bacteria[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(16): 1—3.
- [14] 张莉力, 许云贺, 肖海蒂, 等. 地衣芽孢杆菌 BL-5 产孢发酵条件优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 150—155.  
ZHANG Li-li, XU Yun-he, XIAO Hai-di, et al. Optimization of Fermentation Conditions of Spores Production of *Bacillus Licheniformis* BL-5[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 150—155.
- [15] 肖怀秋, 李玉珍, 林亲录, 等. 响应面优化冷榨花生粕酶法制备多肽工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(9): 50—55.  
XIAO Huai-qiu, LI Yu-zhen, LIN Qin-lu, et al. Response Surface Methodology Optimization for Peptide Preparation from Cold Pressed Peanut Meal by Enzymatic Hydrolysis[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(9): 50—55.