

## 枇杷原浆护色配方优化及贮藏期间品质变化

郑伟, 张相钊, 邓鑫峰, 马靖雯, 鲁周民

### Optimization of Loquat Puree Color Protection Formula and Quality Change During Storage

ZHENG Wei, ZHANG Xiangzhao, DENG Xinfeng, MA Jingwen, and LU Zhoumin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080271>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

复合护色剂抑制杏酒褐变的工艺优化

Optimization of Compound Color-preserving Agent to Inhibit Browning of Apricot Wine

食品工业科技. 2021, 42(12): 168-175 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080187>

气调贮藏对金针菜外观色泽和营养品质的影响

Influence of controlled atmosphere storage on surface color and nutritional qualities of hemerocallis citrina baroni

食品工业科技. 2017(09): 339-342 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.057>

贮藏温度对草莓浆理化成分和品质变化的影响

Effect of storage temperatures on components and quality changes of strawberry puree

食品工业科技. 2018, 39(1): 280-284 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.01.051>

不同茶饮料贮藏过程中品质的变化

Quality Changes of Different Tea Beverages during Storage

食品工业科技. 2021, 42(11): 281-289 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090291>

复合增稠剂和护色剂对低糖树莓果酱品质影响

Effect of composite thickening agent and color protection agent on the quality of low sugar raspberry jam

食品工业科技. 2017(09): 228-234 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.035>

柴达木地区不同果色枸杞果实营养成分比较分析

Comparative Analysis of Nutritional Ingredient of Goji Berries with Different Fruit Colors in Qaidam Area

食品工业科技. 2021, 42(4): 202-207 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050096>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑伟, 张相钊, 邓鑫峰, 等. 枇杷原浆护色配方优化及贮藏期间品质变化 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 184–193. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080271

ZHENG Wei, ZHANG Xiangzhao, DENG Xinfeng, et al. Optimization of Loquat Puree Color Protection Formula and Quality Change During Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 184–193. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080271

· 工艺技术 ·

# 枇杷原浆护色配方优化及贮藏期间品质变化

郑 伟, 张相钊, 邓鑫峰, 马靖雯, 鲁周民\*  
(西北农林科技大学林学院, 陕西咸阳 712100)

**摘要:** 为减轻枇杷鲜果打浆过程的酶促褐变, 维持原浆色泽, 以色差值为主要响应变量, 研究了六种护色剂对枇杷鲜果打浆过程的护色效果, 并选择护色效果最佳的两种护色剂进行中心复合设计 (Central Composite Design, CCD) 试验, 在此基础上考察复合护色对枇杷原浆 5 °C 贮藏 28 d 时色泽和营养成分的影响。结果表明, 六种护色剂中抗坏血酸和植酸护色效果显著, 其最佳配比为 0.332% 抗坏血酸和 0.065% 植酸。验证试验结果表明, 复合护色后枇杷原浆平均  $\Delta E$  为 6.70, 与预测值的吻合率达 97.31%。贮藏试验表明, 复合护色可有效减缓贮藏期间枇杷原浆  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  和  $\Delta E$  值的降低, 同时缓解总糖、抗坏血酸和总酚的损失以及可滴定酸含量增加, 维持原浆的营养品质。该研究可为枇杷的加工利用提供技术参考。

**关键词:** 枇杷原浆, 酶促褐变, 护色剂, 贮藏, 色泽, 营养成分

中图分类号: TS255.36

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)14-0184-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080271



本文网刊:

## Optimization of Loquat Puree Color Protection Formula and Quality Change During Storage

ZHENG Wei, ZHANG Xiangzhao, DENG Xinfeng, MA Jingwen, LU Zhoumin\*

(College of Forestry, Northwest A&F University, Xianyang 712100, China)

**Abstract:** In order to reduce the enzymatic browning of loquat pulp during the pulping process and to maintain the original color of the pulp, the color difference value ( $\Delta E$ ) was used as the main response variable. The effect of six color protectors in protecting loquat pulp from pulping was investigated and the two best performers were selected for the central composite design (CCD) test. Based on this, an investigation was conducted into the effect of composite color protection on the color and the content of nutrition of loquat pulp during storage at 5 °C for 28 days. Out of the six color protectors, the results indicated that ascorbic acid and phytic acid had a significant impact on color protection, and the optimal ratio included 0.332% ascorbic acid, 0.065% phytic acid. The verification test showed the average  $\Delta E$  of loquat pulp after composite color protection was 6.70, which closely aligned with the predicted value at 97.31% agreement. The storage test showed that the composite color protection could effectively retard the decrease in  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  and  $\Delta E$  values of loquat pulp, while reducing the loss of total sugar, ascorbic acid and total phenol, and the increased of titratable acid content, to maintain the nutrition of the pulp. This study could provide technical reference for the processing and utilization of loquat.

**Key words:** loquat puree; enzymatic browning; color protectant; storage; color; nutrition

枇杷 (*Eriobotrya japonica* Lindl.) 是我国广泛种植的常绿树种, 以其多汁、酸甜可口的特性备受消费者青睐, 主要作为鲜果食用, 但其主产区果实成熟期

集中, 短期内大量上市易导致鲜果囤积、滞销。枇杷是非呼吸跃变型水果, 采后生理生化特性限制其鲜果的贮藏, 因此, 加工枇杷果品在一定程度上可减少鲜

收稿日期: 2023-08-29

基金项目: 财政部项目“西北农林科技大学推广专项”(TGZX2021-24)。

作者简介: 郑伟 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 经济林果品加工利用, E-mail: 1372427774@qq.com。

\* 通信作者: 鲁周民 (1966-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 经济林果品加工利用, E-mail: lzm@nwfufu.edu.cn。

果损失,增加产品附加值<sup>[1]</sup>。枇杷果汁、果醋等产品的加工过程一般包括原料挑选、去皮去核、打浆、酶解、离心、灭菌、装瓶等步骤<sup>[2-3]</sup>。其中打浆是枇杷果品生产过程的重要工序,但此过程会促使酚类物质、氧气和多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)充分接触而诱发酶促褐变<sup>[4]</sup>,需辅以各种护色处理来预防。

酶促褐变是指在氧气存在下,PPO 或过氧化物酶催化酚类迅速氧化成邻醌,后者与其他化合物聚合形成黑色素的反应<sup>[5]</sup>,参与该反应最主要的酶是 PPO。酶促褐变不仅影响枇杷产品的营养、感官品质<sup>[6]</sup>,还导致消费者接受度降低。有 50% 以上易褐变的食品因酶促褐变被浪费<sup>[5]</sup>。可采用物理或化学手段去除氧气、结合底物或酶活性位点的  $\text{Cu}^{2+}$  来防止酶促褐变<sup>[7]</sup>。各种亚硫酸盐及其衍生物可作为 PPO 的不可逆抑制剂控制食品的酶促褐变<sup>[4]</sup>,但可能引发如过敏并发症之类的副作用<sup>[5]</sup>,因此该类物质并不被提倡使用。而半胱氨酸、抗坏血酸及其衍生物具有还原性,已被广泛应用于水果或蔬菜加工,抑制褐变和控制变质<sup>[5,8]</sup>。柠檬酸、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)等因其良好的抗褐变效果也常被用于食品护色<sup>[8]</sup>。氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )对鲜切木瓜的褐变也有一定的抑制作用<sup>[9]</sup>。植酸通过螯合辅酶中的金属离子来抑制 PPO 活性,减少酶促褐变的发生<sup>[10]</sup>,常用作果蔬护色剂。颜色是食品最直观的感知属性,也是评价食品质量的重要指标,但褐变引起的色泽劣变并不能被消费者接受,这是加工者最关心的问题。然而,单一护色剂往往护色效果不稳定,且消耗量较大,复合护色可以有效弥补这些不足,发挥单一护色剂的协同增效作用。

本研究以“大五星”枇杷为原料,在打浆过程中添加不同种类、含量的护色剂,并以  $\Delta E$  为主要响应变量,选择合适的护色剂进行 CCD 试验以得到最优护色技术,同时考察该技术对贮藏期间枇杷原浆品质的影响,以期枇杷加工提供高效的护色技术。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

枇杷鲜果 于 2023 年 3 月中旬购自云南蒙自,根据大小均匀度和外部颜色,选取成熟度一致且无病虫害的果实作为试验原料;抗坏血酸、半胱氨酸、植酸、EDTA-2Na、柠檬酸、氯化钙 食品级(纯度:98%~99%),汇泉生物科技有限公司;2,2'-二联吡啶分析纯,上海凇恩科技发展有限公司;福林酚(BR)北京索莱宝科技有限公司;正己烷 分析纯,天津市百世化工有限股份公司;丙酮 分析纯,西陇科学股份有限公司;3,5-二硝基水杨酸 分析纯,上海麦克林生化科技有限公司。

JYL-C022E 九阳料理机 九阳股份有限公司;CR-10 型色差仪 日本 Konica Minolta 公司;350-8519 型万分之一分析天平 瑞士普利赛斯公司;

MULTISKAN GO 型全波长酶标仪 芬兰 Thermo Fish 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 单因素实验 选取色泽一致的枇杷鲜果,用去核器去皮、去核,并以切片器切分成约 1 cm 的薄片,暂时浸泡在含水的烧杯中以防氧化。将果片分成 5 份,每份约 100 g,在打浆前取出果片沥干水分,以 50 g 果肉质量为 100%,按表 1 依次加入不同含量的护色剂,并以未添加护色剂的果浆为对照,打浆结束后测定枇杷原浆色泽参数。

表 1 单因素实验设计  
Table 1 Design of single factor tests

实验组	抗坏血酸 (%)	半胱氨酸 (%)	植酸 (%)	EDTA-2Na (%)	柠檬酸 (%)	$\text{CaCl}_2$ (%)
T1	0.106	0.04	0.0264	0.04	0.077	0.10
T2	0.176	0.10	0.066	0.10	0.129	0.20
T3	0.352	0.16	0.132	0.16	0.258	0.30
T4	0.528	0.20	0.198	0.20	0.576	0.40
CK	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

1.2.2 中心复合设计 基于单因素实验结果,选取两种护色效果显著的护色剂,以  $\Delta E$  为响应变量进行 CCD 试验见表 2。试验数据拟合参考 Hamid 等<sup>[11]</sup>的二阶多项式模型并结合响应面试验分析,确定最佳配比。

表 2 CCD 试验因素及水平  
Table 2 Factors and levels of CCD tests

因素	水平				
	-1.682	-1	0	1	1.682
$X_1$ 抗坏血酸	0.018	0.1056	0.3168	0.528	0.616
$X_2$ 植酸	0.00674	0.0396	0.1188	0.198	0.23074

1.2.3 最佳护色配比对贮藏期间枇杷原浆营养品质的影响 选择外观一致、无损伤的枇杷鲜果,清洗、去皮、去核、打浆、脱气、灭菌、分装。在打浆过程按最佳配比添加抗坏血酸和植酸,同时分别以单一抗坏血酸和植酸为对照。无菌条件下将枇杷原浆分装于食品级密封袋,未抽真空,并放置在  $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、50% 湿度的冰箱。原浆每周取样一次,共取四次,取样时测定原浆色泽参数,重复六次;随后原浆用液氮冷冻研磨贮藏于  $-80^\circ\text{C}$ ,取样结束统一测定其余指标。

### 1.2.4 指标测定

1.2.4.1 色泽参数测定 用色差仪测定枇杷原浆的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,并根据式(1)~式(3)分别计算  $\Delta E$ 、色度( $C^*$ )和色相角( $H^*$ )。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad \text{式 (1)}$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{式 (2)}$$

$$H^* = \arctan(b^*/a^*) \quad \text{式(3)}$$

式中,  $\Delta E$  表示护色原浆与未护色原浆(CK)的色泽差异;  $L_0$  与  $L^*$ 、 $a_0$  与  $a^*$ 、 $b_0$  与  $b^*$  值分别为 CK 和护色原浆的亮度、红绿度、黄蓝度;  $L$  值表示从黑色(0)到白色(100)的亮度, 可指示褐变程度。  $L^*$  值越低, 表明食品亮度越低, 褐变程度越大<sup>[8]</sup>。色度( $C^*$ )反映颜色鲜艳程度, 数值越大, 饱和度越高, 否则越暗。色相角( $H^*$ )表示从红色( $0^\circ$ )到黄色( $90^\circ$ )色相。  $\Delta E$  值表示护色组与 CK 组的颜色差异, 值越大说明两者颜色差异越明显。根据  $\Delta E$  值大小, 可将其分为非常明显( $\Delta E > 3$ )、明显( $2 < \Delta E < 3$ )和微小差异( $\Delta E < 2$ )等几个级别<sup>[2]</sup>。

**1.2.4.2 总糖含量测定** 参考 3,5-二硝基水杨酸法<sup>[13]</sup>, 略作调整。取 0.3 g 样品于 5 mL 纯水中, 经超声提取后加入沉淀剂(乙酸锌溶液和亚铁氰化钾溶液)各 0.4 mL, 过滤收集上清液。取 1 mL 上清液加入 0.4 mL(10%)盐酸, 沸水浴 15 min, 并添加 3 滴 0.1% 酚酞指示剂, 随后用 30% NaOH 溶液滴定至溶液无明显红色。取上述水解液 0.4 mL, 依次加入 0.6 mL 水和 2 mL DNS 试剂, 沸水浴 6 min。流水冷却后测量 520 nm 处的吸光值。总糖含量以葡萄糖计, g/100 g。

**1.2.4.3 可滴定酸含量测定** 参考杨巍等<sup>[14]</sup>的方法, 略作调整。取 3 g 样品于 12 mL 水中, 50 °C 水浴 30 min, 离心(5000 r/min)5 min, 取 10 mL 上清液加入 3 滴 0.1% 酚酞指示剂, 用标定的 0.025 mol/L NaOH 溶液滴定至初显粉色并在 30 s 内不褪色。结果以苹果酸计。

**1.2.4.4 抗坏血酸含量测定** 参考 2,2'-二联吡啶法<sup>[15]</sup>, 略作调整。取 0.8 g 样品于 4 mL 6% 三氯乙酸(TCA)中, 5 °C 静置 15 min, 离心(12000 r/min)4 min。取上清液 1 mL, 依次加入 0.2 mol/L 磷酸钾缓冲液(pH 7.4)0.7 mL, 10% TCA 溶液 0.5 mL, 42%(v/v)磷酸 0.4 mL, 4% 2,2'-二联吡啶 0.4 mL, 3% 三氯化铁 0.2 mL, 42 °C 水浴 40 min 后于 525 nm 处测定吸光值。抗坏血酸含量根据抗坏血酸标准品制作的标准曲线计算, mg/100 g。标准曲线回归方程:  $y = 66.708x + 0.1197$ ,  $R^2 = 0.9985$ 。

$$\text{抗坏血酸含量(mg/100 g)} = 100C \times Vt / (Vs \times M)$$

式中,  $C$  是指从标曲获得的质量(mg);  $Vt$  是样品提取液总体积(mL);  $Vs$  是显色时提取液添加量(mL);  $M$  是样品质量(g)。

**1.2.4.5 总酚含量测定** 参考福林酚法<sup>[16]</sup>, 略作调整。取 0.4 g 样品于 4 mL 70% 乙醇溶液中, 超声提取 0.5 h, 离心(10000 r/min)10 min, 收集上清液。取 0.4 mL 样液, 依次加入 0.5 mL 福林酚和 4.6 mL 水, 混匀, 5 min 后加入 7.5% 碳酸钠溶液 1.5 mL, 并在 765 nm 处测量吸光值。总酚含量以没食子酸计,

mg/100 g。标准曲线回归方程:  $y = 9.8888x + 0.0422$ ,  $R^2 = 0.9994$ 。

$$\text{总酚含量(mg/100 g)} = 100C \times Vt / (Vs \times M)$$

式中,  $C$  是指从标曲获得的质量(mg);  $Vt$  是样品提取液总体积(mL);  $Vs$  是显色时提取液添加量(mL);  $M$  是样品质量(g)。

**1.2.4.6 类胡萝卜素含量测定** 类胡萝卜素提取参考 Suo 等<sup>[17]</sup>的方法, 总含量参考下式计算:

$$\text{TCC(mg/100 g)} = A \times V \times 10^3 / (E_{1\text{cm}}^{1\%} \times m) \quad \text{式(4)}$$

式中,  $A$ : 样品在 450 nm 处的吸光度;  $V$ : 提取物总体积(mL);  $m$ : 样品质量(g);  $E_{1\text{cm}}^{1\%}$ :  $\beta$ -胡萝卜素在己烷中的消光系数(2560)。

**1.2.4.7 PPO 活性测定** PPO 活性参考 Zhang 等<sup>[6]</sup>的方法测定。取原浆 3 g, 加入含有 1% 聚乙烯吡咯烷酮的 0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液(pH 6.5)15 mL 均质, 4 °C, 10000×g 离心 10 min。收集上清液。反应混合物包括 40 mmol/L 儿茶酚 1.5 mL 和 0.1 mol/L、磷酸钠缓冲液 2.3 mL, 置于 25 °C 水浴 5 min, 然后加入 0.2 mL 粗酶, 充分混合, 在 420 nm 波长下测定 3 min 内吸光度变化。以每克果肉每分钟吸光值变化 0.001 表示 1 个酶活性单位, 结果表示为 U/g (FW)。

## 1.3 数据处理

数据以平均值±标准差表示, 采用 SPSS 26.0 进行单因素(ANOVA)方差分析,  $P < 0.05$  表示差异显著,  $P < 0.01$  表示差异极显著, 并用 Origin 2023b 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 抗坏血酸对原浆色泽参数的影响

抗坏血酸是一种水溶性抗氧化剂, 可有效清除氧自由基, 将酶促形成的醌还原为其前体酚从而抑制酶促褐变, 有时也作为酸化剂使用<sup>[7]</sup>。不同浓度抗坏血酸对原浆色泽参数的影响如图 1 所示。T2~T4 组原浆  $L^*$  和  $\Delta E$  值均高于 CK, 表明打浆过程添加适宜含量的抗坏血酸可有效抑制果肉褐变。  $L^*$ 、 $a^*$  值随抗坏血酸浓度增加而增加, 并在 0.352% 时趋于平稳, 其余色泽参数( $b^*$ 、 $H^*$ )均呈先升后降的趋势。添加 0.352% 抗坏血酸(T3)时原浆各色泽参数值均较高, 其中  $L^*$ 、 $\Delta E$  值与 CK 组差异显著( $P < 0.05$ ), 表明此浓度下护色效果最佳。  $a^*$  值随处理浓度增加呈上升趋势, 且  $C^*$  值均高于 CK 组, 表明抗坏血酸可减少原浆红度损失, 维持色泽饱和度<sup>[18]</sup>。总之, T1~T4 组原浆各色泽参数均高于 CK 组, 添加抗坏血酸可有效维持打浆过程的枇杷色泽。

### 2.2 半胱氨酸对原浆色泽参数的影响

半胱氨酸含有巯基, 可通过与邻醌结合形成半胱氨酸加合物来抑制 PPO 引起的褐变<sup>[7]</sup>。半胱氨酸浓度对原浆色泽参数的影响如图 2 所示。各色泽参数变化随半胱氨酸浓度增加趋势不完全一致。  $a^*$  值

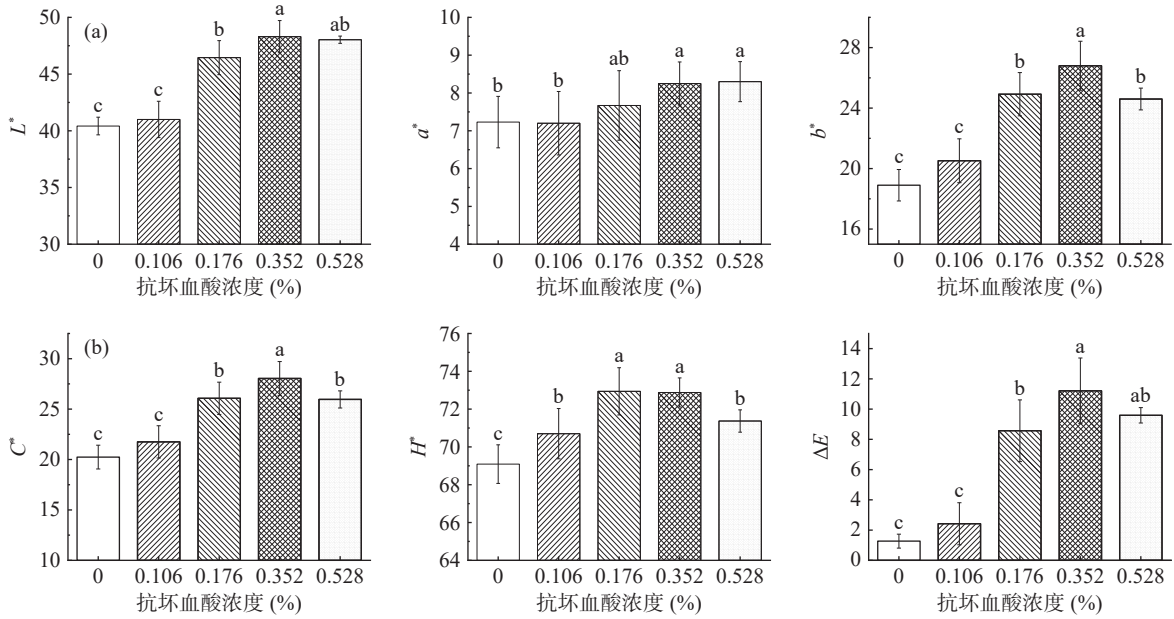


图 1 抗坏血酸浓度对原浆色泽的影响

Fig.1 Effects of ascorbic acid concentration on the color of the puree

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^*$ 、 $\Delta E$  值的变化; 不同小写字母表示不同浓度处理间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 图 2~图 6 同。

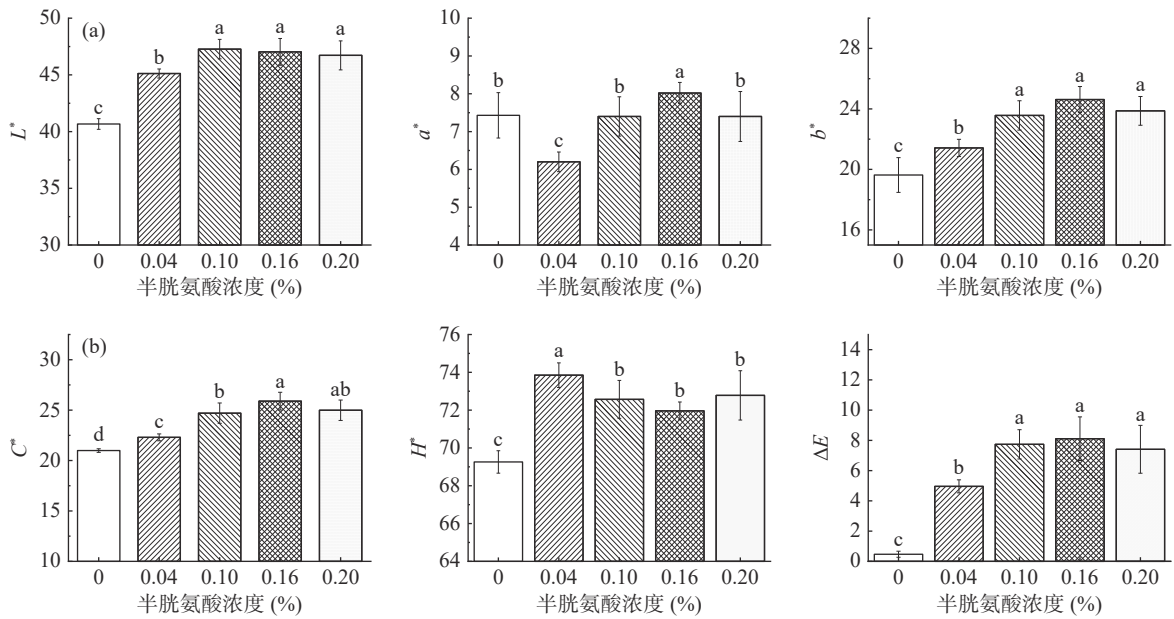


图 2 半胱氨酸浓度对原浆色泽的影响

Fig.2 Effects of cysteine concentration on the color of the puree

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^*$ 、 $\Delta E$  值的变化。

随浓度增加先升后降; 而  $b^*$ 、 $L^*$ 、 $C^*$ 、 $\Delta E$  值先升高后趋于平稳;  $H^*$  值则呈先下降并趋于平稳。T1(0.04% 半胱氨酸)组  $a^*$  值显著低于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 原浆红度值损失加剧; 仅在 T3(0.1% 半胱氨酸)组  $a^*$  值显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 原浆红度值被较好地维持。T1~T4 组原浆  $b^*$  和  $C^*$  值均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 半胱氨酸处理可有效维持原浆黄度值和饱和度。T1~T4 组原浆  $L^*$ 、 $\Delta E$  值显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 表明适宜浓度的半胱氨酸可有效打浆过程的褐变, 维持枇杷原浆色泽; 但打浆结束后发现有不良气味产生, 因此半胱氨酸不宜添加在枇杷原浆中。

### 2.3 植酸对原浆色泽参数的影响

植酸可通过降低体系 pH 以及螯合  $\text{Cu}^{2+}$  来抑制酶促褐变, 其护色效果已在苹果汁、滇橄榄果脯中得到证实<sup>[19-20]</sup>。植酸对枇杷原浆色泽参数的影响如图 3 所示。各浓度植酸处理后, 原浆  $L^*$  和  $\Delta E$  值均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 表明打浆过程添加植酸可有效抑制褐变。随着植酸浓度增加,  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$  和  $\Delta E$  值先升后降, 其中  $L^*$  值的变化与干制香蕉片表现一致<sup>[21]</sup>; 而  $a^*$  值呈下降趋势,  $H^*$  则先上升后趋于平稳, 说明植酸护色可提高枇杷原浆亮度和黄度值, 但不能维持红度值, 这与抗坏血酸表现不一致。经植酸

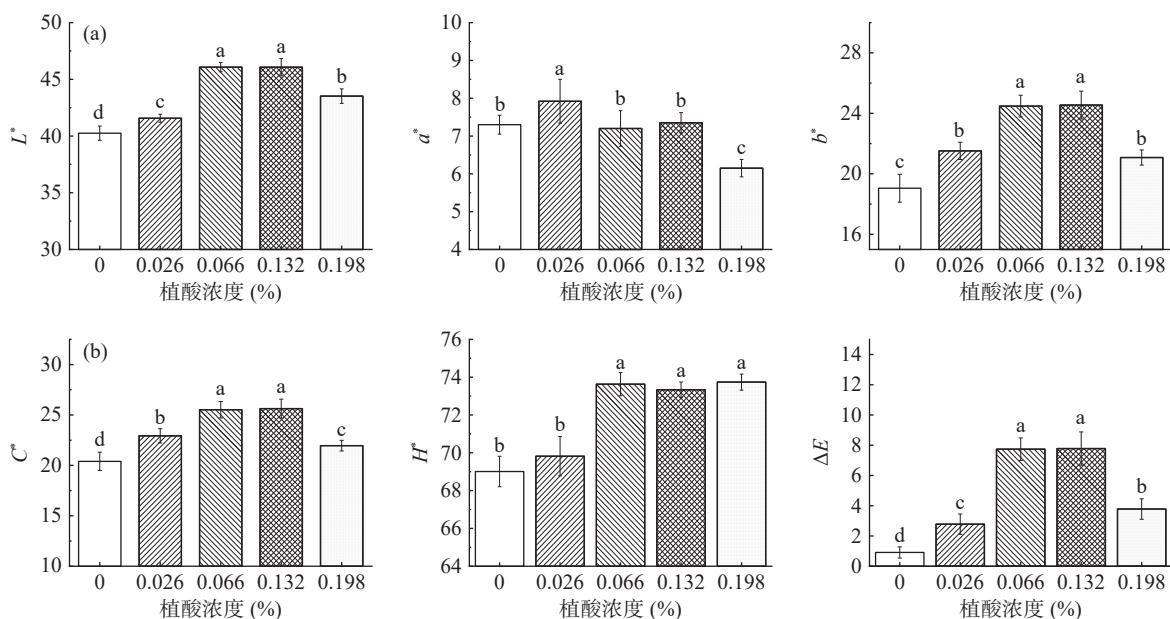


图3 植酸浓度对原浆色泽的影响

Fig.3 Effects of phytic acid concentrate on the color of the puree

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^\circ$ 、 $\Delta E$  值的变化。

护色后,除  $a^*$  值外其余色泽参数均高于 CK 组,表明原浆褐变被有效抑制,但可能使原浆色泽更趋于黄色。

### 2.4 EDTA-2Na 对原浆色泽参数的影响

EDTA-2Na 是一种金属螯合剂,可与 PPO 竞争性螯合金属离子而抑制其活性<sup>[22]</sup>。EDTA-2Na 对原浆色泽参数的影响如图 4 所示。T1~T3 组原浆  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$ 、 $\Delta E$  值显著高于 CK ( $P < 0.05$ ),表明添加低浓度(0.04%~0.16%)的 EDTA-2Na 可提高原浆亮度、饱和度 and 黄度值,对褐变有一定的抑制效果。T1~T4 组原浆各色泽参数均呈先升后降的趋势,而低浓

度(T1、T2)的护色效果较高浓度(T3、T4)更好,其中 T4 组原浆各色泽参数与 CK 组无显著差异( $P > 0.05$ ),护色效果不佳。这与对鞍山梨酒的研究相似<sup>[22]</sup>。贮藏期间,添加 0.05% 和 0.1% EDTA-2Na 的鞍山梨酒具有比添加 0.01% EDTA-2Na 更高的褐变度<sup>[22]</sup>。添加高浓度 EDTA-2Na 对护色并无效果。

### 2.5 柠檬酸对原浆色泽参数的影响

柠檬酸是天然存在的酸性物质,可使体系 pH 降低至酶最佳活性所需的 pH 以下,从而抑制 PPO 的活性;同时,它通过非竞争机制在酶活性位点螯合  $\text{Cu}^{2+}$ <sup>[7,23]</sup>。柠檬酸对原浆色泽参数的影响如图 5 所

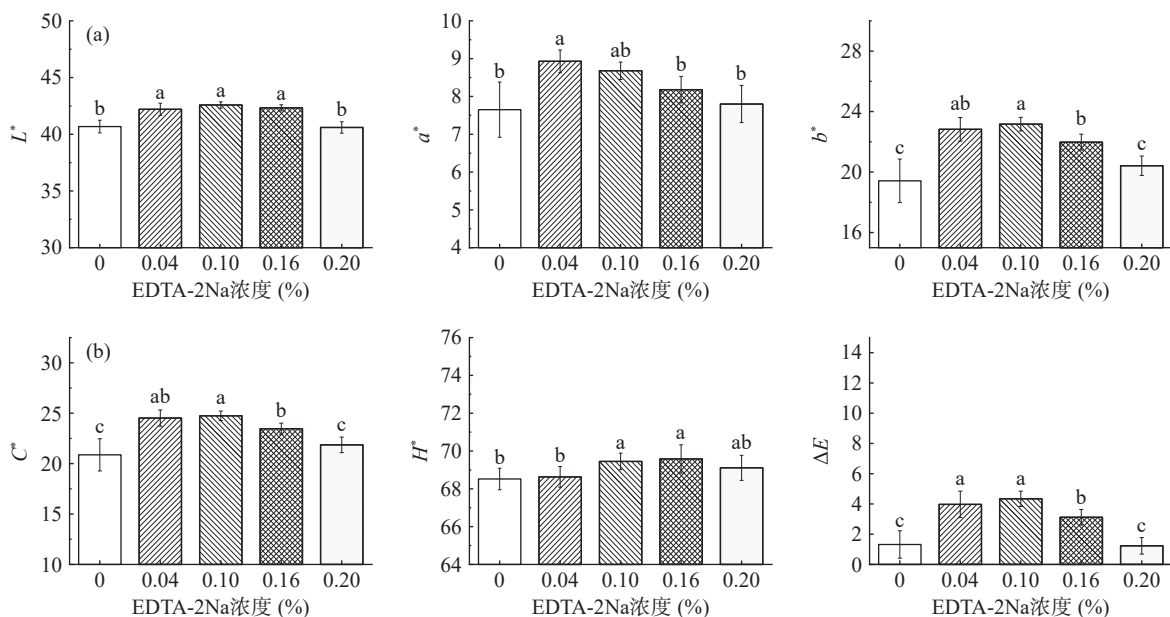


图4 EDTA-2Na 浓度对原浆色泽的影响

Fig.4 Effects of EDTA-2Na concentrate on the color of the puree

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^\circ$ 、 $\Delta E$  值的变化。

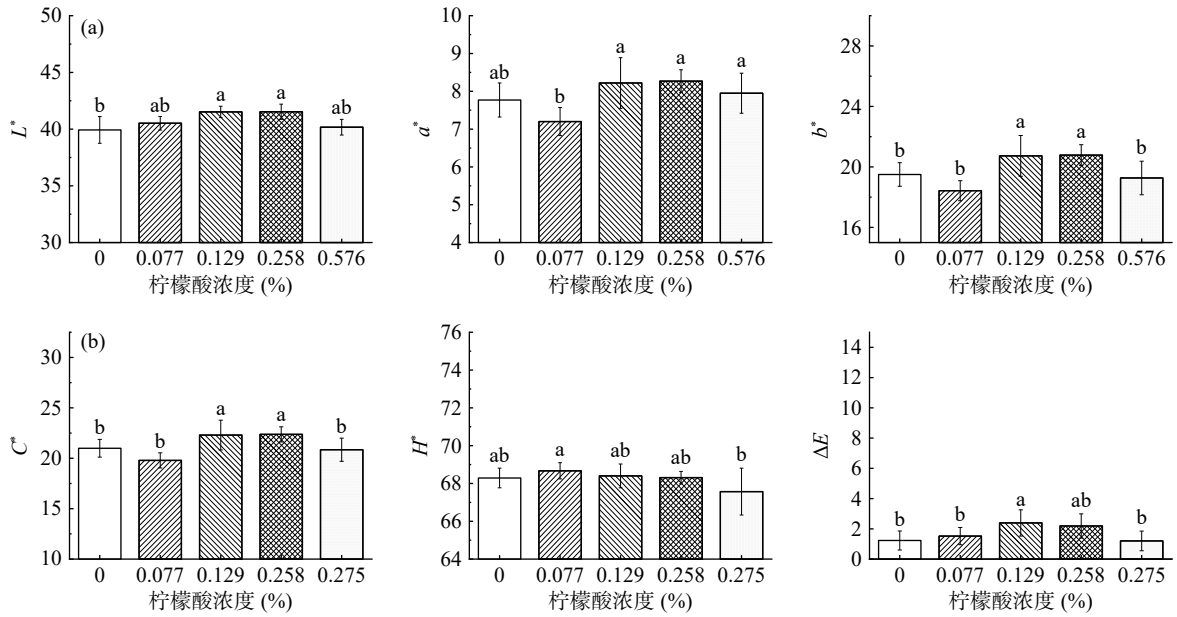


图 5 柠檬酸浓度对原浆色泽的影响

Fig.5 Effects of citric acid concentrate on the color of the puree

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^\circ$ 、 $\Delta E$  值的变化。

示。柠檬酸浓度增加, 各色泽参数变化不完全一致。各护色组(T1~T4)原浆  $L^*$  没有显著差异 ( $P>0.05$ ),  $a^*$  值先上升后趋于平稳,  $b^*$ 、 $C^*$  和  $\Delta E$  值先上升后下降, 而  $H^\circ$  则呈下降趋势。添加低浓度(0.077%)柠檬酸, 原浆  $L^*$  值没有显著升高 ( $P>0.05$ ), 而  $a^*$ 、 $b^*$  值降低, 即原浆红度、黄度值变低, 这似乎促进了打浆过程的酶促褐变, 可能是柠檬酸使原浆 pH 降到了 PPO 的最适 pH, 导致褐变加剧。T2(0.129% 柠檬酸)组具有最大  $\Delta E$ (2.39), 但和 CK 组  $\Delta E$ (1.23) 相差小于 2, 表明 T2 组原浆和 CK 组色泽仅存在微小差异<sup>[12]</sup>, 护色效果不佳。这与用 0.1%~0.5% 柠檬酸对

滇橄榄果脯护色所得结果相似<sup>[20]</sup>。在枇杷打浆时, 仅调节 pH 来抑制酶促褐变并不能取得理想的护色效果, 酸化剂(柠檬酸)往往同其他护色剂一起使用以增强护色效果, 如抗氧化剂、螯合剂<sup>[4]</sup>。

### 2.6 $\text{CaCl}_2$ 对原浆色泽参数的影响

$\text{CaCl}_2$  在鲜切水果和蔬菜方面的护色效果已有报道<sup>[14,24]</sup>。 $\text{CaCl}_2$  对原浆色泽参数的影响如图 6 所示。 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$  和  $H^\circ$  值随  $\text{CaCl}_2$  浓度增加呈下降趋势, 这表明  $\text{CaCl}_2$  处理加剧了打浆过程的酶促褐变, 导致原浆色泽暗淡, 红度、黄度损失, 饱和度降低, 与  $\text{CaCl}_2$  抑制鲜切苹果片褐变的结果不一致<sup>[14]</sup>。

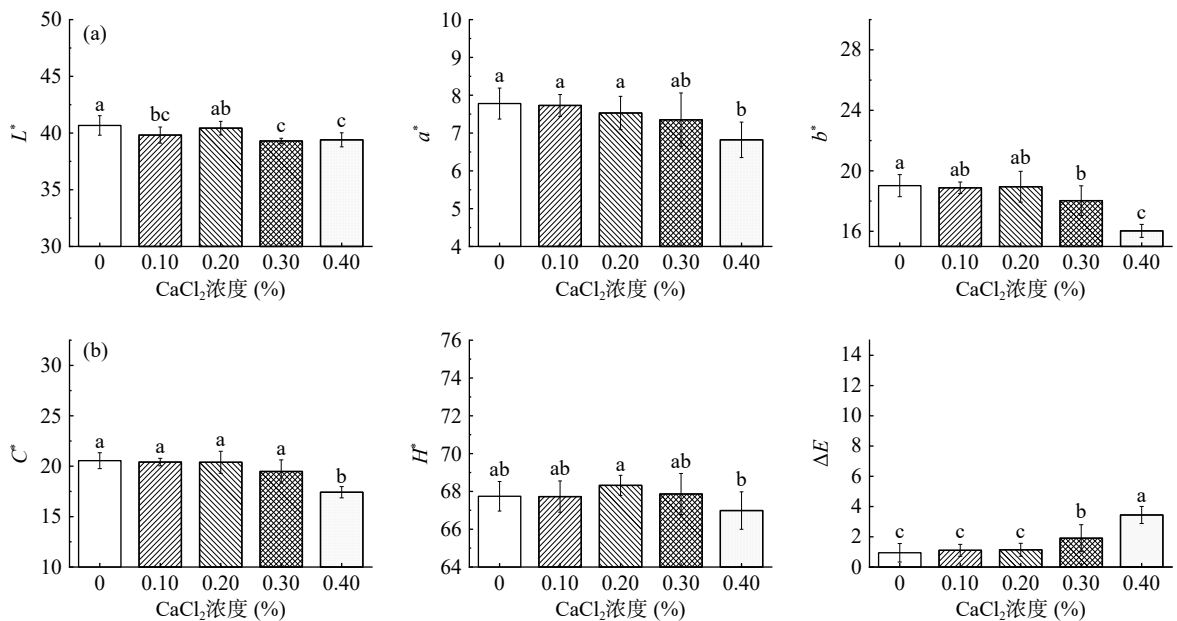


图 6  $\text{CaCl}_2$  浓度对原浆色泽的影响

Fig.6 Effects of  $\text{CaCl}_2$  concentrate on the color of the puree

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^\circ$ 、 $\Delta E$  值的变化。

CaCl<sub>2</sub> 主要通过维持细胞的区室化来抑制酶促褐变<sup>[14]</sup>,但打浆过程使果肉粉碎化, CaCl<sub>2</sub> 并不能发挥积极作用。添加 0.4% CaCl<sub>2</sub>(T4),原浆 L\*、a\*、b\*值最低,即亮度、黄度、红度值均低于其他组;其 ΔE 值(3.44)较对照组(0.94)高出 2.5,表明两者之间具有明显可见的色泽差异,添加 CaCl<sub>2</sub> 导致褐变程度加剧。氯离子被证明是苹果 PPO 的非竞争性抑制剂<sup>[24]</sup>;然而, Ca<sup>2+</sup>在枇杷上被报道对过氧化物酶有激活作用<sup>[25]</sup>,这可能促进了酶促褐变过程过氧化物酶与 PPO 的协同作用,从而加剧褐变。综上所述,抗坏血酸和植酸可较好地维持枇杷打浆过程的色泽,故将其作为 CCD 试验的主要因素,进一步考察不同组合对原浆 L\*和 ΔE 值的影响。

### 2.7 枇杷原浆复合护色剂的响应面优化试验结果

2.7.1 CCD 试验设计及方差分析 利用 Design-Expert 12.0.3 软件设计 CCD 试验,各组试验结果如表 3 所示。相较于对照组,不同组合均有效提高了原浆 L\*值;ΔE 值在 4.84~7.08,与对照组有非常明显(ΔE>3)的色泽差异<sup>[12]</sup>,表明各复合处理均显著减轻了打浆过程的酶促褐变。添加 0.3168% 抗坏血酸和 0.1188% 植酸时原浆 ΔL 和 ΔE 最高,此组合护色效果最佳。

表 3 响应面试验结果

Table 3 Results of response surface tests

实验号	抗坏血酸(%)	植酸(%)	ΔE	ΔL
1	0.3168	0.1188	6.76	4.85
2	0.5280	0.0394	6.66	4.89
3	0.6160	0.1188	5.71	4.54
4	0.5280	0.1980	4.84	3.77
5	0.3168	0.00674	6.71	5.07
6	0.3168	0.1188	6.72	4.90
7	0.3168	0.1188	6.98	4.93
8	0.0180	0.1188	5.88	4.69
9	0.1056	0.0394	6.47	5.07
10	0.1056	0.1980	6.01	4.69
11	0.3168	0.1188	7.08	5.05
12	0.3168	0.23074	5.48	4.44

利用 Design-Expert 12.0.3 软件进行回归拟合分析,可得 ΔE(Y)与护色剂(X<sub>1</sub> 抗坏血酸和 X<sub>2</sub> 植酸)之间的二次多项式回归方程: Y=5.04373+9.25638X<sub>1</sub>+14.58415X<sub>2</sub>-20.32637X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>-11.93801X<sub>1</sub><sup>2</sup>-60.97911X<sub>2</sub><sup>2</sup>。由表 4 可知,该回归模型显著(P<0.05);失拟项表示模型和试验的差异程度,失拟项不显著(P>0.05),表明无失拟因素存在且试验拟合效果好,因此该方程能较好地预测 ΔE 对两种护色剂的响应。此外,由 X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>、X<sub>1</sub><sup>2</sup>、X<sub>2</sub><sup>2</sup>的 P 值可知,三者对响应值的影响均为极显著(P>0.01)。

2.7.2 护色剂响应面分析 由 Design-Expert 12.0.3 软件根据回归方程绘制响应面和等高线图(图 7),可直观地分析抗坏血酸和植酸含量变化对 ΔE 的影响。等高线的形状可反映出交互效应的强弱。等高

表 4 ΔE 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance for regression models for ΔE

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	4.99	5	0.9981	29.98	0.0004	**
X <sub>1</sub>	0.1862	1	0.1862	60.65	0.0559	-
X <sub>2</sub>	0.1859	1	2.02	5.59	0.0002	**
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0.4624	1	0.4624	13.89	0.0098	**
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1.81	1	1.81	54.5	0.0003	**
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0.9364	1	0.9364	28.12	0.0018	**
残差	0.1998	6	0.033			
失拟项	0.1099	3	0.0366	1.22	0.4364	-
纯误差	0.0899	3	0.03			
总和	5.19	11				
相关系数	R <sup>2</sup> =0.9615		R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> =0.9294		CV%=2.91%	

注:\*\*表示差异极显著, P<0.01; \*表示差异显著, P<0.05; -表示差异不显著, P>0.05。

线图为椭圆形,表示两因素交互效应显著;若为圆形则相反<sup>[8]</sup>。X<sub>1</sub>(抗坏血酸)和 X<sub>2</sub>(植酸)的响应面陡峭,等高线图呈椭圆形,表明抗坏血酸和植酸对 ΔE 的交互作用显著,在打浆过程添加适宜浓度的抗坏血酸和植酸,可有效抑制酶促褐变,维持枇杷原浆色泽。由等高线图可知,最佳护色范畴时,抗坏血酸的有效浓度为 0.3168%~0.4224%,植酸的有效浓度为 0.0396%~0.0792%。

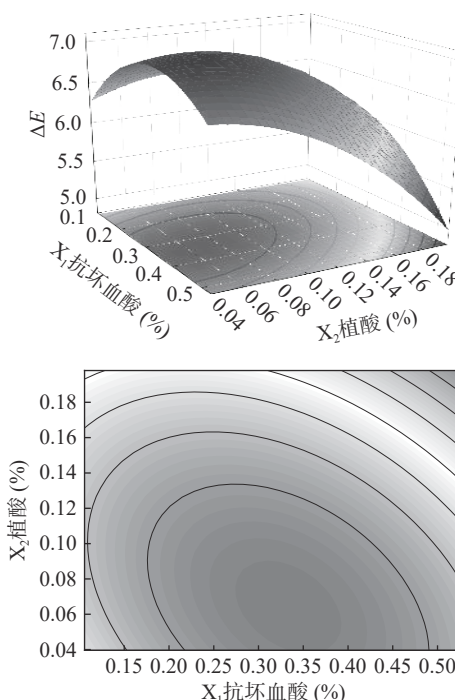


图 7 X<sub>1</sub> 和 X<sub>2</sub> 的交互作用对 ΔE 的影响

Fig.7 Effects of the interaction between X<sub>1</sub> and X<sub>2</sub> on ΔE

2.7.3 最佳护色配比的确定及验证试验 由 Design-Expert 12.0.3 软件对 ΔE 求最大值,可得最佳护色配比为 0.332% 抗坏血酸+0.065% 植酸,此时平均 ΔE 值为 6.885。为检验预测值与实际值的差距,在此条件下进行 3 次平行试验,得平均 ΔE 值为 6.70,试验值与预测值吻合度为 97.31%,说明回归模型可有效



描述抗坏血酸和植酸对枇杷原浆的护色效果。

### 2.8 护色对原浆 PPO 活性和总酚含量的影响

分别测定未护色原浆、鲜果和复合护色(0.332% 抗坏血酸+0.065% 植酸)原浆的 PPO 活性和总酚含量,以分析复合护色在打浆过程的护色机理,结果如表 5 所示。护色后未检测到枇杷原浆 PPO 活性,说明其酶活性很低,这可能归因于植酸的  $\text{Cu}^{2+}$ 螯合能力<sup>[10,20]</sup>,而  $\text{Cu}^{2+}$ 是 PPO 的辅基,在酶促反应中必不可缺。此外,护色后原浆总酚含量没有降低,且高于鲜果,这或许与打浆导致细胞内束缚态多酚的释放有关;同时,抗坏血酸将氧化型醌还原成前体酚也避免了酶促过程的酚损失<sup>[7,23]</sup>。PPO 低活性意味着枇杷鲜果不会因打浆发生剧烈的酶促褐变而导致原浆色泽恶化。

表 5 护色对原浆 PPO 活性和总酚含量的影响

Table 5 Effects of color protection on PPO activity and total phenolic content of puree

组别	PPO(U/g FW)	总酚(mg/100 g)
未护色	44.60±3.32 <sup>a</sup>	122.23±3.70 <sup>b</sup>
鲜果	46.23±1.76 <sup>a</sup>	194.63±4.86 <sup>a</sup>
复合护色	ND <sup>b</sup>	200.30±4.46 <sup>a</sup>

注: ND表示未检测出,同列不同字母表示具有显著性,  $P < 0.05$ 。

### 2.9 护色剂对枇杷原浆贮藏期间色泽的影响

贮藏期间枇杷原浆色泽参数变化如图 8 所示。三种护色处理的枇杷原浆  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$ 和  $\Delta E$  值随贮藏时间的延长而降低;  $H^*$  则相反。D2 和 D3 组原浆  $b^*$ 、 $C^*$ 和  $\Delta E$  值均显著高于 D1 组( $P < 0.05$ ),原浆黄度和饱和度较高,色泽鲜艳。此外,贮藏期末, D2 和 D3 组原浆  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值均高于 D1 组,表明添加植

酸似乎较抗坏血酸有更好的护色效果。 $L^*$  值表征食品亮度,值越低色泽越暗,褐变程度越大<sup>[9,19]</sup>;  $\Delta E$  值是贮藏时枇杷原浆和未护色原浆(对照)的总色泽差异,值越大,护色效果越好。贮藏期间, D1、D2 和 D3 组枇杷原浆  $L^*$  值分别降低 2.70、2.18 和 1.78,  $\Delta E$  分别降低 3.17、2.79 和 2.35,其中 D3 组  $L^*$  和  $\Delta E$  值减少量最低,表明在贮藏期间,其褐变程度最低,复合处理可更好地维持枇杷原浆色泽。15 min、85 °C 热处理可有效灭活枇杷 PPO,避免贮藏期间残余酶活性对原浆的负作用,但此过程似乎“漂白”了枇杷原浆,使  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值被提高。这与灭菌后的红色葡萄柚汁色泽变化相似<sup>[26]</sup>。

### 2.10 护色剂对枇杷原浆贮藏期间营养成分的影响

各处理贮藏期间总糖、可滴定酸、抗坏血酸、总酚和类胡萝卜素含量变化如表 6 所示。糖和酸是原浆重要的营养成分,直接反映枇杷产品的酸甜风味,是影响消费者口感的主要品质指标。贮藏期间,三种护色处理原浆的总糖含量呈下降趋势。与 0 d 相比,贮藏 28 d, D2 组糖损失最多,为 18.05%; D1 组次之,为 7.34%; D3 组最少,仅 4.93%。单一植酸护色并不能有效缓解糖类物质的损耗,但与抗坏血酸复合使用,则有效减缓了糖类分解。抗坏血酸是酸性还原剂,常应用于食品护色。三组枇杷原浆中 D1 组可滴定酸含量最高,为 0.37%~0.38%; D2 组含量最低,为 0.30%~0.31%,这可能是因为添加 0.332% 抗坏血酸直接影响了原浆酸含量,而植酸含量仅添加 0.065%,对酸度的影响不显著。因此,添加酸性护色剂时要注意用量,避免显著增加或降低食品酸度。

抗坏血酸在热处理过程容易被氧化降解,外源

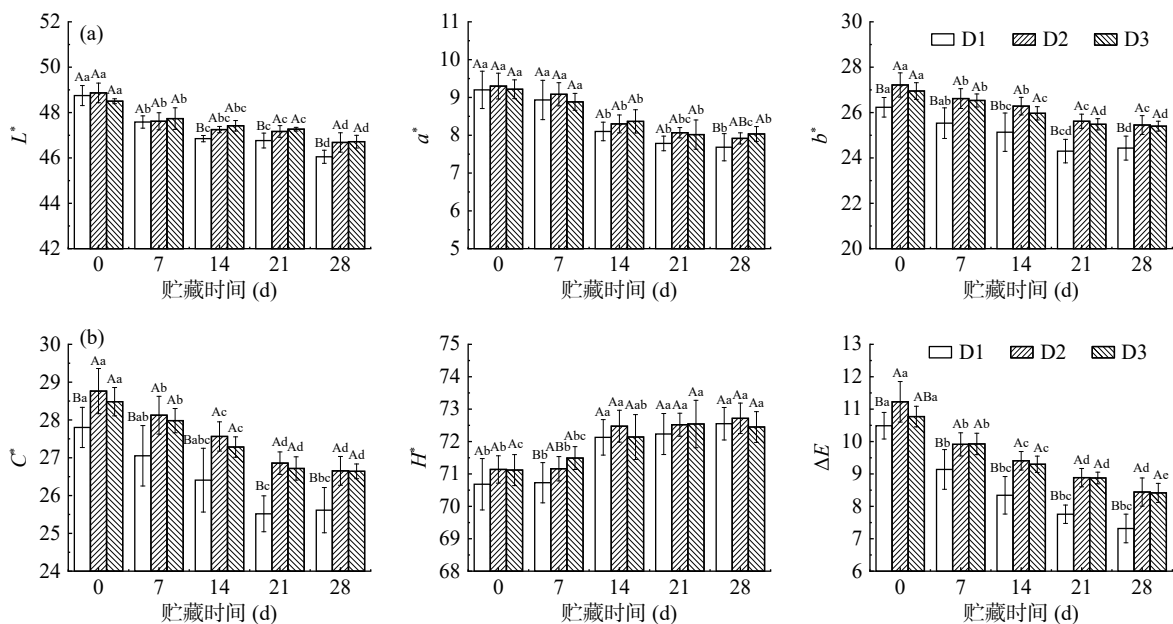


图 8 护色剂对贮藏期间原浆色泽的影响

Fig.8 Effects of color protectant on the color of puree during storage

注: (a)  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化; (b)  $C^*$ 、 $H^*$ 、 $\Delta E$  值的变化; 小写字母表示同种处理不同时间的显著性差异,  $P < 0.05$ ; 大写字母表示不同处理同一时间的显著性差异,  $P < 0.05$ ; D1: 0.332% 抗坏血酸; D2: 0.065% 植酸; D3: 0.332% 抗坏血酸+0.065% 植酸; 表 6 同。

表6 护色剂对营养成分的影响  
Table 6 Effects of color protectant on nutrients

处理	营养指标	时间(d)				
		0	7	14	21	28
D1	总糖(g/100 g)	3.95±0.10 <sup>Aa</sup>	3.86±0.09 <sup>Ab</sup>	3.78±0.07 <sup>Abc</sup>	3.84±0.09 <sup>Ab</sup>	3.66±0.08 <sup>Cc</sup>
D2		4.10±0.07 <sup>Aa</sup>	3.88±0.06 <sup>Ab</sup>	3.68±0.07 <sup>Ac</sup>	3.63±0.08 <sup>Ac</sup>	3.36±0.03 <sup>Bd</sup>
D3		4.06±0.12 <sup>Aa</sup>	4.00±0.08 <sup>Ab</sup>	3.78±0.05 <sup>Ac</sup>	3.85±0.14 <sup>Abc</sup>	3.86±0.04 <sup>Abc</sup>
D1	可滴定酸(%)	0.38±0.01 <sup>Aa</sup>	0.38±0.00 <sup>Aa</sup>	0.38±0.02 <sup>Aa</sup>	0.37±0.01 <sup>Aa</sup>	0.38±0.00 <sup>Aa</sup>
D2		0.30±0.00 <sup>Cab</sup>	0.30±0.00 <sup>Cb</sup>	0.31±0.00 <sup>Ca</sup>	0.30±0.00 <sup>Cb</sup>	0.30±0.00 <sup>Cab</sup>
D3		0.34±0.01 <sup>Bab</sup>	0.36±0.00 <sup>Ba</sup>	0.33±0.01 <sup>Bb</sup>	0.35±0.01 <sup>Bab</sup>	0.35±0.01 <sup>Bab</sup>
D1	抗坏血酸(mg/100 g)	14.55±0.30 <sup>Ba</sup>	14.18±0.33 <sup>Aa</sup>	14.92±0.29 <sup>Aa</sup>	12.53±1.08 <sup>Bb</sup>	11.84±0.53 <sup>Bb</sup>
D2		6.61±0.34 <sup>Ca</sup>	5.15±0.27 <sup>Bb</sup>	5.19±0.36 <sup>Bb</sup>	4.75±0.17 <sup>Cb</sup>	5.06±0.40 <sup>Cb</sup>
D3		16.89±0.50 <sup>Aa</sup>	14.92±0.79 <sup>Ab</sup>	14.96±0.56 <sup>Ab</sup>	15.57±0.97 <sup>Ab</sup>	15.35±0.75 <sup>Ab</sup>
D1	总酚(mg/100 g)	174.09±3.30 <sup>Ba</sup>	158.83±3.39 <sup>Bb</sup>	146.93±1.79 <sup>Bd</sup>	152.26±1.76 <sup>Bc</sup>	154.55±2.68 <sup>Bbc</sup>
D2		138.88±1.28 <sup>Ca</sup>	140.03±2.59 <sup>Ca</sup>	135.21±0.49 <sup>Cb</sup>	119.62±1.67 <sup>Cc</sup>	120.47±1.44 <sup>Cc</sup>
D3		187.21±2.44 <sup>Ac</sup>	199.03±1.10 <sup>Aa</sup>	194.76±2.28 <sup>Ab</sup>	193.54±2.44 <sup>Ab</sup>	199.10±1.51 <sup>Aa</sup>
D1	类胡萝卜素(mg/100 g)	1.79±0.05 <sup>Ba</sup>	1.78±0.05 <sup>Ab</sup>	1.68±0.07 <sup>Abc</sup>	1.68±0.04 <sup>Abc</sup>	1.61±0.07 <sup>Ac</sup>
D2		1.87±0.06 <sup>Ab</sup>	1.72±0.02 <sup>Ab</sup>	1.70±0.05 <sup>Ab</sup>	1.64±0.04 <sup>Abc</sup>	1.62±0.03 <sup>Ac</sup>
D3		1.91±0.06 <sup>Aa</sup>	1.78±0.05 <sup>Ab</sup>	1.69±0.05 <sup>Ac</sup>	1.66±0.05 <sup>Ac</sup>	1.66±0.01 <sup>Ac</sup>

抗坏血酸的添加可以弥补其热损失。贮藏期间枇杷原浆抗坏血酸含量变化如表6所示, D3组抗坏血酸含量在14.92~16.89 mg/100 g, 高于D1组(11.84~14.92 mg/100 g)和D2组(4.75~6.61 mg/100 g)。三组原浆抗坏血酸含量在贮藏期间均呈下降趋势。贮藏至28 d, D1、D2和D3组抗坏血酸分别损失了18.62%、23.45%、9.12%, 表明添加植酸可有效抑制贮藏期间的抗坏血酸氧化<sup>[27-28]</sup>, 减少贮藏期间抗坏血酸的损失。在长期贮藏过程中抗坏血酸氧化降解可产生5-羟甲基糠醛, 后者进一步和氨基酸等物质反应导致褐变<sup>[29]</sup>, 影响食品色泽、风味, 但植酸可抑制抗坏血酸氧化, 削弱后续的褐变反应。

在贮藏期间枇杷原浆的多酚易被氧化成醌, 进而与氨基酸、蛋白质和其他多酚聚合<sup>[5,30]</sup>, 导致非酶褐变。如表6所示, 贮藏期间, D3组枇杷原浆总酚含量无明显减少, 而D1和D2组呈下降趋势, 且D2组(119.62~140.03 mg/100 g)总酚含量远低于D1(146.93~174.09 mg/100 g)和D3(187.21~199.10 mg/100 g)。植酸作为酒沉淀剂, 可与酚类物质发生凝结反应, 减少酒体浑浊<sup>[28]</sup>, 这种凝结效应可直接导致总酚含量降低。抗坏血酸(0.5%)可预防酚类物质降解<sup>[23]</sup>, 这可能是D1组总酚含量高于D2组原因。但抗坏血酸因热损失以及贮藏期间的氧化降解, 对多酚的“保护”作用减弱, 使得多酚在贮藏期间因自氧化、缩合导致含量降低。然而, 添加抗坏血酸似乎显著削弱了植酸对多酚的凝结反应。植酸不同于抗坏血酸, 其稳定性较好, 热变形温度为150℃<sup>[28]</sup>, 这保证了低温贮藏期间植酸可持续发挥还原性, 抑制多酚氧化。

类胡萝卜素是枇杷的主要呈色因素, 易受食品基质、温度、氧气等的影响而氧化、异构化<sup>[31]</sup>, 其含量变化直接影响原浆色泽。在贮藏期间, 各处理枇杷原浆类胡萝卜素的含量变化如表6所示。贮藏0 d时, 枇杷原浆经热处理灭菌灭酶, D2(1.87 mg/100 g)、

D3(1.91 mg/100 g)组类胡萝卜素含量高于D1组(1.79 mg/100 g), 这表明植酸可较好地缓解热处理过程类胡萝卜素的热损失。在贮藏期间, D1、D2和D3组类胡萝卜素含量均呈下降趋势; 贮藏28 d时, 类胡萝卜素含量分别减少10.06%、13.37%和13.09%, D1组减少量最低, 这表明单一抗坏血酸处理较另两组处理更能减少类胡萝卜素的损失。

综上所述, 在打浆过程, 添加0.332%抗坏血酸和0.065%植酸可能发挥协同作用来抑制酶促褐变, 即植酸螯合PPO活性位点的Cu<sup>2+</sup>以此抑制酶促褐变, 同时抗坏血酸将氧化型酚还原, 从而维持较高的酚含量。在贮藏期间, 协同处理缓解了枇杷原浆色泽参数(L\*、a\*和b\*和ΔE)的降低, 保持了枇杷原浆的营养成分。

### 3 结论

通过单因素、CCD试验和验证得出, 0.332%抗坏血酸和0.065%植酸为最优护色配比, 可有效抑制枇杷鲜果打浆过程的酶促褐变, 维持原浆色泽。此外, 该护色配比可有效缓解贮藏期间原浆L\*、a\*、b\*和ΔE值降低, 并且减少总糖、抗坏血酸和总酚的损失以及酸增加, 保证枇杷原浆良好的颜色和营养品质。复合护色(0.332%抗坏血酸+0.065%植酸)可作为枇杷打浆过程的护色参考技术。后续可考察经复合护色灭菌的枇杷原浆在贮藏期间香气成分的变化, 全面分析护色剂对枇杷原浆营养品质的影响。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

[1] DHIMAN A, SUHAG R, THAKUR D, et al. Current status of loquat (*Eriobotrya japonica* lindl.): Bioactive functions, preserva-

- tion approaches, and processed products[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38: 286–316.
- [2] 王近近, 张兴龙, 邵兴锋. 微波杀菌对枇杷果汁品质的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(7): 1358–1364. [WANG J J, ZHANG X L, SHAO X F. Effects of microwave pasteurization process on the quality of loquat juice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(7): 1358–1364.]
- [3] 陈贤爽, 王锦涛, 鲁周民, 等. 枇杷果汁加工过程中产品品质的变化[J]. *食品科学*, 2016, 37(21): 79–84. [CHEN X S, WANG J T, LU Z M et al. Quality changes of loquat juice during processing[J]. *Food Science*, 2016, 37(21): 79–84.]
- [4] MOON K M, KWON E, LEE B, et al. Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products[J]. *Molecules*, 2020, 25(12): 2754.
- [5] HAMDAN N, LEE C H, WONG S L, et al. Prevention of enzymatic browning by natural extracts and genome-editing: A review on recent progress[J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 1101.
- [6] ZHANG X, SHAO X. Characterisation of polyphenol oxidase and peroxidase and the role in browning of loquat fruit[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2016, 33(2): 109–117.
- [7] CAPOTORTO I, AMODIO M L, DIAZ M T B, et al. Effect of anti-browning solutions on quality of fresh-cut fennel during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 137: 21–30.
- [8] 许青莲, 税玉儒, 邱叶, 等. 微波真空干燥柠檬片护色剂配方优化及其品质变化[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 238–248. [XU Q L, SHUI Y R, QIU Y, et al. Color-protected agents formulation optimization and influence on quality of microwave vacuum-dried lemon slices[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 238–248.]
- [9] Ayón-Reyna L E, Tamayo-Limón R, Cárdenas-Torres F, et al. Effectiveness of hydrothermal-calcium chloride treatment and chitosan on quality retention and microbial growth during storage of fresh-cut papaya[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(3): C594–601.
- [10] LI G P, ZHOU D, KAN L, et al. Competitive inhibition of phytic acid on enzymatic browning of chestnut (*Castanea mollissima* Blume)[J]. *Acta Alimentaria*, 2017, 46(1): 100–108.
- [11] HAMID K, MAHDI G, FATEMEH G, et al. Efficiency of chitosan nanoparticle with polyaluminum chloride in dye removal from aqueous solutions: Optimization through response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 249: 125977.
- [12] XU B G, FENG M, CHITRAKAR B, et al. Multi-frequency power thermosonication treatments of clear strawberry juice: Impact on color, bioactive compounds, flavor volatiles, microbial and polyphenol oxidase inactivation[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2023, 84: 103295.
- [13] 王明瑞, 侯彦喜, 张亚丹. 3, 5-二硝基水杨酸法测定发酵液中多糖含量[J]. *现代食品*, 2020(4): 216–222. [WANG M R, HOU Y X, ZHANG Y D. Determination of polysaccharide content in fermentation broth by 3, 5-dinitrosalicylic acid method[J]. *Modern Food*, 2020(4): 216–222.]
- [14] 杨巍, 刘晶, 吕春晶, 等. 氯化钙和抗坏血酸处理对鲜切苹果品质和褐变的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(16): 3402–3410. [YANG W, LIU J, LÜ C J, et al. Effects of CaCl<sub>2</sub> and AsA treatments on quality and browning in fresh-cut apple[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(16): 3402–3410.]
- [15] CHUMYAM A, SHANK L, FAIYUE B, et al. Effects of chlorine dioxide fumigation on redox balancing potential of antioxidative ascorbate-glutathione cycle in 'daw' longan fruit during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 222: 76–83.
- [16] WANG C, ZHANG X L, GAO Y, et al. Path analysis of non-enzymatic browning in *dongbei suancai* during storage caused by different fermentation conditions[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127620.
- [17] SUO G W, ZHOU C L, SU W, et al. Effects of ultrasonic treatment on color, carotenoid content, enzyme activity, rheological properties, and microstructure of pumpkin juice during storage[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 84: 105974.
- [18] CHOI M H, KIM G H, LEE H S. Effects of ascorbic acid retention on juice color and pigment stability in blood orange (*Citrus sinensis*) juice during refrigerated storage[J]. *Food Research International*, 2002, 35(8): 753–759.
- [19] DU Y J, DOU S Q, WU S J. Efficacy of phytic acid as an inhibitor of enzymatic and non-enzymatic browning in apple juice[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(2): 580–582.
- [20] 何代琴, 李荣辉, 胡昕, 等. 滇橄榄果脯无硫护色工艺优化研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(4): 104–109, 118. [HE D Q, LI R H, HU X, et al. Optimization of sulfur-free color preserving process for yunnan olive preserved fruit[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(4): 104–109, 118.]
- [21] 毕家钰, 代曜伊, 郑炯. 褐变抑制剂对干制香蕉片护色效果的影响[J]. *食品与机械*, 2016, 32(11): 194–197, 235. [BI J Y, DAI Y Y, ZHENG J. Effects of different browning inhibitors on color preservation of dried banana slices[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(11): 194–197, 235.]
- [22] YANG H, CHEN X X, LI X M, et al. Effects of 5 antibrowning agents on the color parameters of dangshan pear (*Pyrus* spp.) Wine during storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(5): e16582.
- [23] ALTUNKAYA A, GOEKMEN V. Effect of various inhibitors on enzymatic browning, antioxidant activity and total phenol content of fresh lettuce (*Lactuca sativa*)[J]. *Food Chemistry*, 2007, 107(3): 1173–1179.
- [24] SON S M, MOON K D, LEE C Y. Inhibitory effects of various antibrowning agents on apple slices[J]. *Food Chemistry*, 2001, 73(1): 23–30.
- [25] 林建城, 吴智雄, 彭在勤. 枇杷果肉过氧化物酶的分离纯化及其性质研究[J]. *四川农业大学学报*, 2007(4): 419–424. [LIN J C, WU Z X, PENG Z Q. The study on purification and properties of peroxidase from loquat fruit[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2007(4): 419–424.]
- [26] LEE H S, COATES G A. Thermal pasteurization effects on color of red grapefruit juices[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(4): 663–666.
- [27] 高原军, 张亚晓, 周婧琦, 等. 抗氧化剂处理对秋葵微波干燥过程中 V<sub>C</sub> 变化的影响[J]. *食品科技*, 2015, 40(2): 333–336. [GAO Y J, ZHANG Y X, ZHOU J Q, et al. Effect of antioxidants on the V<sub>C</sub> of okra in microwave drying[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(2): 333–336.]
- [28] 沙如意, 崔艳丽, 王少林, 等. 植酸/植酸钠在食品工业上的应用研究进展[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(6): 293–309. [SHA R Y, CUI Y L, WANG S L, et al. Application advances of phytic acid/sodium phytate in food industry[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(6): 293–309.]
- [29] BHARATE S S, BHARATE S B. Non-enzymatic browning in citrus juice: Chemical markers, their detection and ways to improve product quality[J]. *Journal of Food Science and Technology-mysore*, 2014, 51(10): 2271–2288.
- [30] YU Y, CHEN D, LI W, et al. Quinone reactivity: Investigation of their contribution to nonenzymatic browning[J]. *Food Frontiers*, 2023, 4(2): 945–954.
- [31] MELÉNDEZ-MARTÍNEZ A J, ESQUIVEL P, RODRIGUEZ-AMAYA D B. Comprehensive review on carotenoid composition: transformations during processing and storage of foods[J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112773.