

响应面优化复合糖液配方对非热渗糖工艺处理杏脯的影响

张亚男^{1,2}, 冯作山^{1,2*}, 白羽嘉^{1,2*}, 段继华³, 李超¹

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (2. 新疆果品采后科学与技术重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052) (3. 新疆丝凯食品有限公司, 新疆昌吉 831100)

摘要: 该实验以新疆特色林果李光杏为原料, 为解决杏脯加工步骤繁多问题, 采用配比复合渗糖溶液, 将硬化、护色、渗糖、防腐简化为复合渗糖溶液, 同时进行非热渗糖处理, 旨在研究鲜杏果脯最佳非热渗糖配方。研究利用单因素试验结合模糊数学感官模型, 以感官品质、理化性质、营养成分为指标测定复合溶液结合冷渗处理对果脯品质的影响。设计响应面法优化试验, 进行数据的处理和分析。结果表明: 复合溶液渗糖配方为: 1.0% CaCl₂+0.8% 护色剂 (0.20% L-半胱氨酸+0.20% 抗坏血酸+0.60% 柠檬酸)、糖稀液 (白糖烯: 砂糖=2:8) (以上比例均按质量分数计算)。该配方进行低温冷渗处理后杏脯的模糊感官得分为 84.10, 硬度 3 636.50 g, 总糖含量为 39.20%, 可滴定酸含量为 1.52%, 维生素 C 含量为 6.60 mg/100 g, 色差值为 38.41, POD 酶活性为 1.72 U/g、PPO 酶活的相对活性是 1.21 U/g。综上所述, 该条件处理的杏脯相较传统工艺能提高营养物质保留率, 提升感官特性, 具有良好鲜杏风味, 品质最佳。该研究为果脯非热加工处理提供理论依据。

关键词: 非热渗糖; 复合渗糖溶液; 响应面法; 模糊数学感官模型

文章编号: 1673-9078(2024)09-296-306

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.9.1022

Effects of Optimal Composite Sugar Permeation Formula for Non-thermal Osmotic Dehydration for Preserving Apricots by Response Surface Methodology

ZHANG Yanan^{1,2}, FENG Zuoshan^{1,2*}, BAI Yujia^{1,2*}, DUAN Jihua³, LI Chao¹

(1. School of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. Xinjiang Key Laboratory of Postharvest Science and Technology for Fruit Products, Urumqi 830052, China)

(3. Xinjiang Sikai Food Co. Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: The complicated processing steps in the production of dried apricots were addressed. Li Guangxing, a special fruit of Xinjiang, was used as the raw material. A composite sugar permeation with effects such as hardening, color

引文格式:

张亚男, 冯作山, 白羽嘉, 等. 响应面优化复合糖液配方对非热渗糖工艺处理杏脯的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9):296-306.

ZHANG Yanan, FENG Zuoshan, BAI Yujia, et al. Effects of optimal composite sugar permeation formula for non-thermal osmotic dehydration for preserving apricots by response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 296-306.

收稿日期: 2023-08-29

基金项目: 新疆杏产业技术体系专项基金项目 (XJCYTX-03-05-2021)

作者简介: 张亚男 (1998-), 女, 硕士研究生, 农产品加工与贮藏工程, E-mail: 3028109251@qq.com

通讯作者: 冯作山 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: 2393441954@qq.com; 共同通讯作者: 白羽嘉

(1984-) 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: 1550763155@qq.com

protection, osmotic dehydration, and preservation was used along with a non-thermal osmotic dehydration process to explore the best low-temperature osmotic dehydration process non-thermal for making fresh apricot into preserved fruit. The effect of composite solution combined with non-thermal osmotic dehydration treatment on the quality of preserved fruit was measured using single-factor experiments and a fuzzy mathematical sensory model, taking sensory quality, physicochemical properties, and nutritional components as indexes. A response surface methodology was used to design and optimize the experiment, process, and analyze the data. The results showed that the saccharifying formula of the composite sugar permeation should be: 1.0% CaCl_2 +0.8% colorant (0.20% L-cysteine +0.20% ascorbic acid+0.60% citric acid) and sugar syrup (sucrose: granulated sugar=2:8) (the proportions above were calculated according to the mass fraction). The fuzzy sensory scores of preserved apricots processed by non-thermal osmotic dehydration treatment with the above formula were 84.10, hardness was 3 636.50 g, total sugar content was 39.20 mg/100 g, titratable acid content was 1.52%, Vc content was 6.60 mg/100 g, the color difference value was 38.41, POD enzyme activity was 1.72 U/g, and relative PPO enzyme activity was 1.21 U/g. In summary, compared with the traditional process, the preserved apricots treated under this process exhibited the best quality, showing an improved retention rate of nutrients and enhanced sensory properties, and the preserved apricots had retained the fresh fruit flavor. This study provides a theoretical basis for the non-thermal processing of preserved fruit.

Key words: non-thermal osmotic dehydration; compound sugar permeation; response surface method; fuzzy mathematical sensory model

杏树 (*Prunus armeniaca* L.) 为蔷薇科李属落叶乔木植物^[1]。其果肉、果仁均可食用。果实呈圆、长圆或扁圆形, 果皮多金黄色, 向阳部有红晕和斑点, 营养丰富, 内含糖、蛋白质、维生素 A 原、维生素 C 和 B 族维生素以及钙、磷等矿物质, 是夏季主要水果之一。我国大部分地区均产, 西北、华北和东北各地分布最广, 杏树在新疆已经有 1 400 多年的历史, 资源丰富, 优良品种多, 面积和产量位居全国第一。但由于杏果有成熟快、采收期短的问题, 鲜杏的运销目前存在阻碍, 因此研究杏加工产品对推动新疆杏产业发展具有重要意义。

糖制果脯是果蔬加工过程中较为常见的方式, 依靠高浓度糖液的渗透浸渍作用, 使糖液替代果实内部水分, 在内部组织中形成高渗环境, 这一反应既能提升产品感官品质同时也能达到长期贮藏保存的目的^[2]。传统果脯生产要经历过糖液高温煮制、热风干脱水等一系列的热加工流程, 其维生素 C 等营养成分大量损失, 同时能造成果脯的感官品质下降。解决这一问题最为关键的程序是渗糖^[3]。目前较为普遍的渗糖方式有真空渗糖、超声渗糖、微波渗糖。其中真空渗糖的原理是在密封体内部形成真空环境过程中使原料内部空气同时排出, 在去除真空泄压平衡的瞬间糖液代替空气进入原料组织中, 利用压力差达到促进渗糖效果。从而达到能较好的保持原料口感色泽和风味物质的目的, 同时提高加

工过程中营养物质的保留率^[4]。Hu 等^[5]研究发现金橘果脯在真空条件的应用有利于金橘果脯中水 - 溶质的交换, 渗透移除较多水分, 可以缩短干燥过程所需的时间。使用真空渗糖不仅能提升渗糖速率同时缩短干燥时间。谢婧等^[6]研究发现真空渗糖时间 120 min, 真空温度 55 °C, 真空条件为 0.085 MPa 时可加工出口感、色泽、质地状态皆适宜的椰肉果脯产品。

目前果脯渗糖研究已经证明了真空渗糖工艺具有能降低加工过程中温度的优点, 但对于适宜的真空渗糖的溶液研究不足^[6]。研究复配渗糖溶液用于低温冷渗的处理的工艺, 具有减少鲜果香气和水溶性、热敏性功能成分的损失, 提升果脯感官品质的意义。

1 材料与方法

1.1 主要原料与试剂

李光杏: 采购于新疆乌鲁木齐市北园春市场, 选取市售色泽相近, 大小一致, 无病虫害侵染和机械损伤的新鲜果实; 白砂糖 (食品级), 舒可曼食品有限公司; 氯化钙 (食品级), 上海鑫泰实业有限公司; 苯甲酸钠、L- 半胱氨酸、抗坏血酸、柠檬酸 (食品级), 浙江旭美景生物科技有限公司; 苯酚, 天津盛通泰化工有限公司; 邻苯二酚、愈创木酚、磷酸, 天津市致远化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

TP-A500 电子天平, 上海贵虎实业发展有限公司; TU-1080 紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限公司; 水浴锅, 北京永光明医疗仪器有限公司; TGL-16gR 离心机, 上海安亭科学仪器厂; 真空渗糖装置, 自制; 3nh-TS7 系列分光测色仪测色仪, 美国 Hunter Lab 公司; TA-XT 质构仪, 英国 BMS 有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 原料制作步骤

选取无机械损伤, 大小形态基本一致的鲜杏果实清洗干净, 沿杏脐缝切半去核后, 放置于复合渗糖溶液中经过真空-低温的三个梯度的渗糖工艺处理, 渗糖后进行沥糖, 待无糖液渗出时干燥成干基含水量低于 20% 的杏子果脯产品。

1.3.2 单因素实验设计

本研究采取复合渗糖溶液处理鲜杏生产杏子果脯。传统加工过程需要经过硬化剂硬化表皮细胞后再使用护色剂糖煮以达到护色目的, 护色结束后为改变果实渗透压使用糖液渗透, 达到高渗环境用以长久保存, 工艺复杂繁琐不适应当下生产需求, 研究复合渗糖溶液旨在合并加工过程中的漂烫、硬化、护色、渗糖四个步骤, 将其简化为仅需要复合渗糖溶液进行低温渗糖处理。同时以相同原料根据传统杏脯制作工艺进行处理用作空白组, 测量相应数据进行比较。

1.3.2.1 硬化剂质量分数对杏脯品质的影响

预实验发现复合糖液处理中, 氯化钙浓度大于 3.0% 条件下所得果脯肉质粗糙, 组织纤维化严重, 口感差, 因此实验采用质量分数 0.20% L-半胱氨酸+0.20% 异抗坏血酸+0.60% 柠檬酸作护色剂、糖稀替代量为 20.0% 和 0.05% 苯甲酸钠配比 0.50%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 氯化钙, 研究非热冷渗糖技术中, 硬化剂的最佳质量分数。

1.3.2.2 护色剂质量分数对杏脯品质的影响

试验在 1.0% 氯化钙、20.0% 糖稀替代量和 0.05% 苯甲酸钠条件下, 研究无硫护色剂的最佳配比。以未添加护色剂作为空白对照组、实验组 CP1、CP2、CP3、CP4 分别采用采用无硫护色剂^[4](0.20% 半胱氨酸+0.20% 异抗坏血酸+0.60 柠檬酸) 设计试验进行研究, 质量分数依次为 0.5%、0.8%、1.0%、1.5%。

1.3.2.3 糖稀替代量质量分数对杏脯品质的影响

低温渗糖处理中容易出现杏脯返砂的问题, 使用糖稀替代砂糖进行渗糖能改善果脯产品反砂现象。单因素实验以护色剂质量分数 0.8%、硬化剂质量分数 1.0% 和 0.05% 苯甲酸钠配比糖稀替代量分别为质量分数的 10%、20%、30%、40%、50% 的实验组进行最佳糖稀替代量的研究。

1.3.3 模糊数学感官模型的建立

多因素评价模型中最常见的模糊综合评价数学模型, 其基本思想是利用模糊逻辑理论将多个评价指标进行量化和综合, 形成综合评价结果^[7]。模糊数学模型中, 因素集是指一组因素或参数, 用于衡量或评估某个事物、过程或现象, 以便进行分析、决策或改进。评语集则是指一组常见的评价语言^[8]。

1.3.4 响应面实验设计

以单因素试验结果为依据^[9], 结合 Box-Behnken 试验设计, 采用硬化剂质量分数、护色剂质量分数、糖稀替代量为考察因素, 模糊数学感官评价结果作为评价指标, 进行三因素三水平试验设计, 以达到优化复合低温渗糖溶液配方的目的, 试验因素及水平如表 1 所示。

表 1 响应面因素水平表

Table 1 Factor level table of response surface design			
水	因素		
平	硬化剂质量分数/%	护色剂质量分数/%	糖稀替代量/%
-1	0.5	0.5	10
0	1.0	0.8	20
1	1.5	1.0	30

1.4 指标测定

总糖的测定: 参考董艳等^[10]的方式测定杏脯中总糖含量。可滴定酸测定: 参考孔丽洁等^[11]的方法, 使用 0.095 mol/L NaOH 滴定分析可滴定酸。质构测定: 参照卢珍兰等^[12]的质构分析略做修改, 对硬度、粘性、咀嚼性、凝聚力、弹性进行分析。PPO 酶活性测定: 参考曹建康等^[13]《果蔬采后生理生化试验指导》进行测定。POD 酶活性: 依照曹建康等《果蔬采后生理生化试验指导》略作修改。抗坏血酸测定: 参考国家标准^[14]。色差测定: 使用色差仪对样品 L^* 、 a^* 、 b^* 进行测定^[15], 按式 (1) 计算出色差值。

$$\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

式中:

ΔE^*ab ——果脯与新鲜原料之间的差别程度;

ΔL^* ——果脯产品与新鲜原料之间的亮度差值;
 Δa^* ——果脯产品与新鲜原料之间的红绿值差值;
 Δb^* ——果脯产品与新鲜原料之间的蓝黄值差值。

1.5 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件对结果进行数据统计与分析。使用 Origin 2019 进行图形绘制, 采用 Design-Expert.V8.0.6.1 进行响应面设计和分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验分析

2.1.1 不同硬化剂质量分数对杏脯质构特性的影响

质构特性包括硬度、黏附性、凝聚力等指标对杏脯口感具有重要意义。本研究采用低温冷渗技术处理杏果, 使用硬化剂能使硬化剂中的钙离子细胞组织中的果胶互相结合, 在带羧基的多糖间和果胶酸或果胶酸间形成交叉链桥, 使细胞壁的透性降低, 阻止植物组织产生真菌类病原体或者其他可引起果蔬发生腐败和变软的微生物与酶类物质, 能有效保持长时间低温浸渍过程中鲜杏果实的硬度降低过大的问题。黄妙云等^[16]研究对比了三种硬化剂在圣女果果脯制作过程中对果脯品质影响, 研究发现氯化钙做硬化剂利于提升产品硬度且整体感官评分适宜。由表 2 可以看出, 低温冷渗处理杏脯与空白对照组形成显著性差异 ($P < 0.05$), 传统工艺生产杏脯晾干过程中失水率高, 杏脯硬度约为 5 662.01 g, 复合溶液低温冷渗后杏脯硬度低于空白组。随着硬化剂浓度的增加, 杏脯硬度、粘性、黏着性整体呈上升趋势, 其中 2.5% 质量分数下的杏脯硬度为 5 710.38 g、黏附性为 499.50 g、凝聚力为 0.88 N/m; 1.5% 质量分数氯化钙条件下凝聚力和弹性最佳, 分别为 0.69 N/m 和 0.99。

2.1.2 不同护色剂质量分数对杏脯色泽品质的影响

各类食品的褐变现象会带来多种不良反应, 食

品的营养价值也会随之降低同时引起产品风味发生改变, 产生多种不良成分^[17]。从褐变发生的机制角度, 褐变现象作用机理可以划分为酶促褐变(生化褐变)和非酶褐变两类。杏脯生产过程中控制酶促褐能有效防止褐变度过高, 色泽过深的影响。许多学者研究了抑制果蔬酶促褐变的方法, 其中使用化学抑制剂是最廉价且有效的方法^[18], 同时优化褐变抑制剂配方是目前研究的重点, 本部分研究中, 根据 POD 酶和 PPO 酶的相对活性变化和色差值的变化确定低温渗糖最佳护色配方。维生素 C 和柠檬酸可与抗氧化剂被氧化后的自由基发生反应, 使抗氧化剂获得再生^[19]。维生素 C 和柠檬酸与其他抗氧化效果较强的抗氧化剂联合使用^[20], 半胱氨酸是一种高效的 PPO 抑制剂, 赵欣等^[21]将半胱氨酸作为抗褐变剂与护色剂联合应用于杏酒褐变研究。由图 1 可以看出, 添加护色剂能有效改善低温渗糖过程中杏脯褐变, CK 的色差值为 17.97, CP4 的色差值最高, 为 37.34。与漂烫处理后的杏脯进行对比发现渗糖溶液能有效抑制 PPO 和 POD 酶活性从而抑制褐变现象, 由图 2、3 可知 CP2 号 POD 酶活的相对活性为 1.83 U/g、PPO 酶活的相对活性为 1.24 U/g, CK 的 POD 酶活的相对活性是 2.10 U/g、PPO 酶活相对活性为 1.54 U/g, 综合认为 CP2 号最佳。

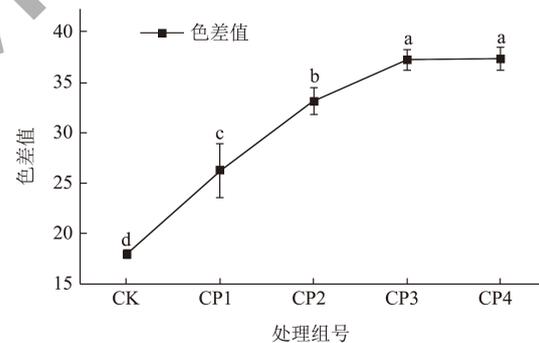


图 1 不同护色剂质量分数对杏脯色泽影响

Fig.1 Effect of different concentration of color guard on color of preserved apricot

表 2 不同硬化剂浓度对杏脯质构的影响

Table 2 Effect of different hardener concentration on the texture of apricot breast

硬化剂 质量分数/%	质构特性				
	硬度/g	黏附性	粘性/g	弹性	凝聚力/(N/m)
CK	5 662.01 ± 43.26 ^b	590.62 ± 52.75 ^d	391.12 ± 45.44 ^b	0.65 ± 0.01	0.89 ± 0.02
0.5	1 956.66 ± 57.43 ^a	136.10 ± 49.30 ^a	247.87 ± 11.97 ^a	0.65 ± 0.01	0.81 ± 0.03
1.0	3 117.85 ± 48.54 ^b	243.52 ± 33.74 ^b	225.77 ± 36.47 ^b	0.64 ± 0.05	0.84 ± 0.07
1.5	3 567.26 ± 33.37 ^b	385.72 ± 22.08 ^c	374.47 ± 17.24 ^b	0.69 ± 0.02	0.99 ± 0.01
2.0	4 624.09 ± 30.55 ^b	488.30 ± 18.37 ^c	375.41 ± 13.02 ^b	0.66 ± 0.01	0.94 ± 0.04
2.5	5 710.38 ± 65.50 ^b	499.50 ± 20.84 ^d	382.13 ± 21.23 ^a	0.63 ± 0.02	0.88 ± 0.02

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

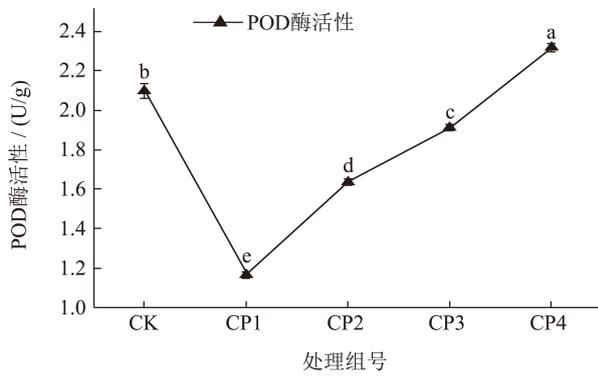


图2 不同护色剂质量分数对杏脯 POD 酶活性影响

Fig.2 Effect of different concentrations of color protectants on POD enzyme activity of preserved apricots

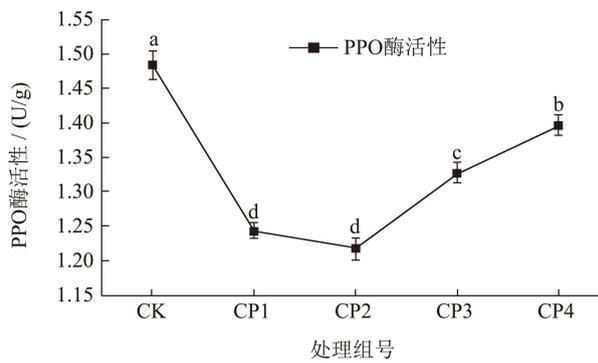


图3 不同护色剂质量分数对杏脯 PPO 酶活性影响

Fig.3 Effect of different concentration of color guard on PPO enzyme activity of preserved apricot

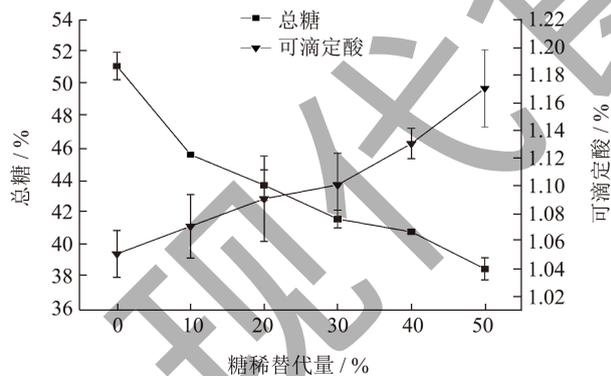


图4 不同糖稀替代量对杏脯总糖和可滴定酸含量的影响

Fig.4 Effect of different sugar replacement amount on total sugar and titratable acid content of preserved apricot

2.1.3 不同糖稀替代量对杏脯品质的影响

传统杏脯的含糖量在 70% 以上，属于高糖食品，容易造成返砂问题。研究表明，造成返砂的主要原因在于果脯、蜜饯制品中蔗糖含量较高，而转化糖含量不足^[22]。研究糖稀替代蔗糖的渗糖配方能降低产品含糖量保持口感营养的同时，减少贮藏过

程中返砂流沙问题^[23]。由图 4、图 5 可知，糖稀替代组的含糖量明显低于空白组 ($P > 0.05$) 随着糖稀含量增加，总糖含量呈下降趋势，可滴定酸逐步上升，表明使用糖稀复配渗糖溶液能在低温渗糖过程中降低含糖量，解决口感甜腻问题。为评估糖稀替代组感官品质，将感官参数带入模糊数学进行感官评定，40% 糖稀替代组评定分数为 68.75。总糖含量为 40.80%，可滴定酸含量为 1.13%，根据杏脯感官评定得分和总糖、可滴定酸含量综合认为糖稀替代量为 20% 时为最优组。

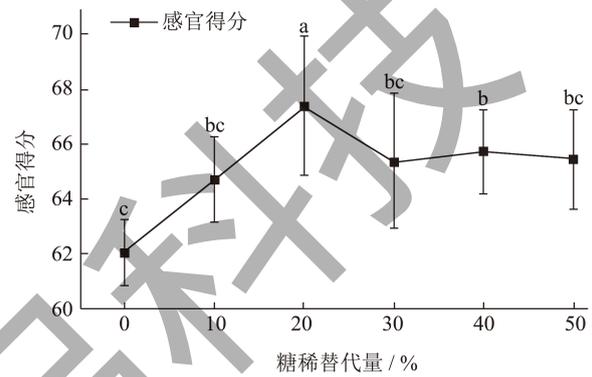


图5 不同糖稀替代量对杏脯感官品质的影响

Fig.5 Effect of different sugar replacement amount on sensory quality of preserved apricot

2.2 模糊数学感官评价

2.2.1 确定评价因素集、评语集和权重集

本文以杏脯的气味、色泽、口感、组织形态为评价因素，组成评价因素集 $U = (R_1, R_2, R_3, R_4)$ ；以优 X_1 、良 X_2 、中 X_3 、差 X_4 构成评语集， $X = (X_1, X_2, X_3, X_4)$ ，其中：优 90 分，良 80 分，中 70 分，差 60 分；权重集用来描述模型的参数^[24]。在感官评价中能对应表现每一个评语集。采用用户调查法请 10 名食品专业的工作人员对杏脯的口感、色泽、气味、组织形态四项因素在感官评价中的权重占比进行打分，得分情况如表 2 所示，确定权重集 $N = (N_1, N_2, N_3, N_4)$ ，且权重总和为 1。即 $N = (N_1, N_2, N_3, N_4) = (\text{气味、色泽、口感、组织形态}) = (0.33, 0.24, 0.27, 0.16)$ 。详见表 3。构建模糊数学模型 $Y = N \cdot R$ 式中： Y 为模糊数学感官评价结果； N 为各因素的权重集； R 为样品的模糊数学感官评价矩阵。通过感官评定标准对各个因素等级进行评定，得到感官综合分数。

表 3 杏脯各因素权重打分

Table 3 Apricot weight score of each factor

序号	3	4	5	6	7	8	9	10	合计	占比
口感	3	4	3	5	3	2	3	2	33	0.33
气味	3	1	2	2	3	2	2	1	24	0.24
色泽	3	2	3	2	3	2	3	3	28	0.28
组织形态	1	1	2	1	1	3	2	2	17	0.17
合计	10	10	10	10	10	10	10	10	100	1.00

表 4 复合溶液渗糖杏脯感官评价标准

Table 4 Apricot weight score of each factor

等级	气味	色泽	口感	组织形态
优级 90	具有鲜杏滋味、气味浓郁，无异味	橙黄，金黄，色泽均匀，无褐点	软硬适中，不粘牙，略有嚼劲，酸甜适宜	形状完整，质地柔软，有韧性，无明显返砂或流糖现象
良好 80	鲜杏滋味较淡、气味较淡，无异味	暗黄浅褐色，色泽暗淡均匀，无明显褐点	硬度偏硬或偏软，较粘牙，较有嚼劲，偏甜或偏酸	形状存在残面，质地较软，有韧性，少许返砂或流糖现象
中等 70	鲜杏滋味淡、气味淡，少许异味	褐色较深，色泽暗淡较均匀，无明显褐点	硬度较硬或软，粘牙，有嚼劲，偏甜或偏酸	形状存在残面，质地软，韧性较大不易碎，少许返砂或流糖现象
差 60	缺乏鲜杏滋味、气味混杂，有异味	褐色近黑色，色泽暗淡，存在褐点	干硬，粘牙，不易下咽，嚼劲较大，单一酸味或甜味	形状切口平整欠佳，质地较硬，少韧性，有明显返砂或流糖现象

表 5 复合糖液冷渗杏脯感官评价票数情况

Table 5 The votes of mixed sugar liquid cold permeated apricot breast were evaluated by sensory evaluation

样品号	气味				色泽				口感				组织形态			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
1	0	0	1	9	0	1	0	9	0	0	1	9	0	0	1	9
2	0	1	1	8	1	1	0	8	0	0	1	9	0	1	0	9
3	2	0	1	7	0	1	1	8	0	2	2	6	1	2	1	6
4	0	0	1	9	0	1	1	8	0	0	2	8	0	0	1	9
5	0	2	3	5	0	0	4	6	1	0	3	6	0	1	4	5
6	0	2	3	5	0	1	3	6	1	0	5	4	0	2	3	5
7	1	3	2	4	1	2	3	4	1	2	5	2	2	1	3	4
8	0	2	3	5	1	1	3	5	1	3	4	2	1	1	3	5
9	0	2	3	5	0	1	3	6	0	2	5	3	0	1	3	6
10	0	1	3	6	0	0	3	7	0	2	5	3	0	1	3	6
11	1	0	3	6	1	0	4	5	0	2	5	3	0	1	3	6
12	3	0	3	4	3	0	4	3	2	2	4	2	3	0	3	4
13	5	3	2	0	4	3	2	1	4	4	2	0	6	0	2	2
14	5	3	2	0	5	4	1	0	4	4	2	0	6	0	2	2
15	5	3	2	0	5	3	2	0	4	3	2	1	6	1	2	1
16	5	3	2	0	5	2	2	1	4	3	2	1	6	0	2	2
17	0	0	1	9	0	1	0	9	0	0	1	9	0	0	1	9

表 6 模糊数学感官得分情况

Table 6 Fuzzy mathematics sensory score situation

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
得分	62.46	64.01	67.27	62.98	67.17	68.14	72.46	70.43	68.08
序号	10	11	12	13	14	15	16	17	
得分	66.94	68.23	74.24	83.15	84.11	83.65	82.85	86.74	

2.2.2 模糊数学感官评价结果

由 10 位经过筛选和培训的食品专业人员对响应面设计中的 17 组样品根据感官评定表 4 分别从气味、色泽、口感、组织形态 4 项因素进行评价，感官评定室的室内温度在为 21 ℃，湿度在为 45%~50% 之间，对每个样品的评价因素中不同等级所获得的票数进行统计，得出复合渗糖溶液在低温渗糖处理条件下生产的杏脯的感官综合评价结果，杏脯感官综合评价结果见表 5。

根据表 5 进行模糊数学矩阵运算，由评价人员的评定结果确定，即将评定结果除以总人数，得到 17 个模糊矩阵：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \end{pmatrix}, \text{同理可得 } R_2 \sim R_{17} \text{ 样品}$$

矩阵，根据模糊数学感官评定模型公式 $Y=N \cdot R$ 代入权重集计算矩阵公式为：

$$Y_1 = N \cdot R_1 = (0.33, 0.24, 0.28, 0.17) \times$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \end{pmatrix} = (0, 0.02, 0.078, 0.918)。根据$$

上式同理得到 $Y_2 \sim Y_{17}$ ：

$$Y_2 = (0.024, 0.074, 0.061, 0.861)$$

$$Y_3 = (0.083, 0.114, 0.13, 0.693)$$

$$Y_4 = (0, 0.024, 0.13, 0.866)$$

$$Y_5 = (0.028, 0.083, 0.347, 0.562)$$

$$Y_6 = (0.028, 0.124, 0.362, 0.506)$$

$$Y_7 = (0.119, 0.22, 0.329, 0.352)$$

$$Y_8 = (0.069, 0.191, 0.334, 0.426)$$

$$Y_9 = (0, 0.163, 0.362, 0.495)$$

$$Y_{10} = (0, 0.106, 0.362, 0.552)$$

$$Y_{11} = (0.057, 0.073, 0.386, 0.504)$$

$$Y_{12} = (0.278, 0.056, 0.358, 0.328)$$

$$Y_{13} = (0.475, 0.283, 0.204, 0.058)$$

$$Y_{14} = (0.499, 0.307, 0.18, 0.034)$$

$$Y_{15} = (0.499, 0.272, 0.204, 0.045)$$

$$Y_{16} = (0.499, 0.231, 0.204, 0.086)$$

$$Y_{17} = (0.681, 0.196, 0.119, 0.024)$$

对矩阵进行赋分 $N = (\text{优, 良, 中, 差}) = (90, 80, 70, 60)$ ，计算得出模糊数学感官评定分数为：

$$S_1 = Y_1 \cdot V = (0, 0.02, 0.078, 0.918) \times \begin{pmatrix} 90 \\ 70 \\ 70 \\ 60 \end{pmatrix} = 62.46, \text{同理可得}$$

出 17 组样品的模糊数学感官评分情况为表 6。

2.3 响应面结果分析

以硬化剂质量分数 (A)、护色剂质量分数 (B)、糖稀替代量 (C) 三个因素为单因素，通过 10 组感官评价票数带入模糊数学矩阵计算得出模糊数学感官评分，用评分和色差值为响应值进行 3 因素 3 水平响应面实验，实验结果见表 7。

表 7 响应面设计结果

Table 7 Results of response surface design

序号	A	B	C	感官得分	色差值
1	1	0	-1	68.14	36.39
2	-1	0	-1	67.17	39.21
3	0	0	0	86.74	36.45
4	0	0	0	82.85	35.68
5	1	0	1	70.43	35.41
6	0	0	0	83.65	33.86
7	-1	1	0	67.27	34.05
8	0	1	1	74.24	36.74
9	-1	0	1	72.46	35.21
10	0	-1	1	68.23	34.08
11	0	0	0	84.11	36.64
12	0	-1	-1	68.08	34.53
13	0	0	0	83.15	26.01
14	0	1	-1	66.94	28.17
15	1	-1	0	64.01	27.39
16	-1	-1	0	62.46	26.53
17	1	1	0	62.98	26.12

2.3.1 感官得分分析

感官得分 = 84.10 - 0.47*A + 1.08*B + 1.88*C - 1.46*AB -

2.3.1.1 感官得分方差分析

0.75*AC + 1.79*BC - 9.87*A₂ - 10.05B₂ - 4.68*C₂ 对回归模型进行显著性分析, 分析结果如表 8 所示。

利用 DesignExpert 8.0.6.1 对表 3 数据进行分析, 获得多元回归拟合方程:

表 8 感官得分回归模型方差分析

Table 8 Analysis of variance of sensory score regression model

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 086.567	9	120.729	83.338	<0.001	**
A	1.805	1	1.805	1.245	0.301	ns
B	9.353	1	9.353	6.456	0.039	*
C	28.237	1	28.238	19.492	0.003	**
AB	8.526	1	8.526	5.885	0.046	*
AC	2.251	1	2.250	1.553	0.253	ns
BC	12.781	1	12.780	8.822	0.021	*
A ²	410.280	1	410.280	283.214	<0.001	**
B ²	425.168	1	425.168	293.490	<0.001	**
C ²	92.171	1	92.172	63.625	<0.001	**
残差	10.140	7	1.448			
失拟值	0.503	3	0.168	0.069	0.973	
净误差	9.637	4	2.409			
总和	1 096.708	16				
R ² =0.999						
R ² _{Adj} =0.979						

注: * 表示差异显著 (P<0.05), ** 表示差异极显著 (P<0.01), ns 表示差异不显著, 下表相同。

表 9 色差值回归模型方差分析

Table 9 Variance analysis of color difference regression model

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	322.749	9	35.861	67.507	<0.001	**
A	3.367	1	3.367	6.338	0.040	
B	7.431	1	7.431	13.988	0.007	**
C	2.420	1	2.420	4.556	0.070	ns
AB	5.267	1	5.267	9.915	0.016	*
AC	6.864	1	6.864	12.922	0.008	**
BC	0.240	1	0.240	0.452	0.523	ns
A ²	115.798	1	115.798	217.986	<0.001	**
B ²	109.269	1	109.269	205.694	<0.001	**
C ²	42.492	1	42.492	79.988	<0.001	**
残差	3.718	7	0.531			
失拟值	0.344	3	0.115	0.136	0.934	
纯误差	3.375	4	0.844			
总和	326.468	16				
R ² =0.989						
R ² _{Adj} =0.974						

由表 8 可知, 模型 F 值为 83.3, $P < 0.01$, 模型达到极显著水平。失拟项 F 值为 0.069 65, $P = 0.973 2 > 0.05$, 失拟项不显著表示概念回归方程的拟合程度较好, 能与实际预测值稳定拟合。该模型的复相关系数为 $R^2 = 0.990 8$, $AdeqPrecision = 23.817$, 表明该模型与实际实验具有高度拟合性和可信度。 $CV = 1.66\%$, CV 表示实验精度, 数值越小表示实验的响应可靠性越高^[23]。综上所述, 实验本身存在误差较小, 可以对杏脯感官品质进行较好的分析和评估, 具有良好的实践意义。由显著性检可以看出, 一次项 B 护色剂种类对感官得分的作用显著, C 糖稀替代量对感官得分的作用极显著, 交互项 AB 、 BC 作用显著, 二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 作用极显著, 根据上表确定各单因素对感官评分影响大小为 C (糖稀替代量) $> B$ (护色剂浓度) $> A$ (硬化剂浓度)。

2.3.1.2 感官得分交互分析

响应面 3D 图及等高线图能够直观的反映出各因素间的交互作用对该响应值的影响。各因素之间交互作用明显程度通常表现为响应面 3D 图的凸出或凹陷弧度大小, 等高线图是否趋向于椭圆形^[25]。分别固定任意两个因素, 以第三因素作为自变量, 自变量取值范围为最佳处理条件 $\pm 0.5\%$ 或 $\pm 10\%$, 带入两个回归方程中计算各自对应的模糊数学感官得分和色差值。固定糖稀替代量为质量分数的 20%, 护色剂质量分数为 0.8%, 分别带入硬化剂质量分数为 0.5%、1%、1.5%, 带入得出感官得分; 将硬化剂质量分数固定为 1%, 护色剂质量分数固定为 0.8%, 带入糖稀替代量分别为 10%、20%、30% 计算得出感官得分; 固定硬化剂质量分数为 1%、糖稀替代量为 20%, 分别带入护色剂质量分数为 0.5%、0.8%、1.0%, 计算回归方程的感官得分。对结果进行分析, 计算得到的感官评分与变量的变化幅度基本一致, 与单因素实验结果相符合。

由图 6 可知, 护色剂质量分数和糖稀替代量交互项的拱图最倾斜, 且等高线为椭圆形, 表明 BC 的交互作用显著 ($P < 0.05$), 表示低温渗糖处理过程中, 护色剂质量分数和糖稀替代量对杏脯口感、组织形态、色泽、气味影响最明显, 决定了模糊数学感官评定分值; AC 交互项近乎圆形, 表明硬化剂质量分数和糖稀替代量交互作用不显著 ($P > 0.05$), 各个因素对杏脯感官得分影响分别为 $C > B > A$ 。根据结果认为随着硬化剂质量分数的增加果胶和硬化剂中的离子结合程度越大, 使细胞呈

现硬质状态导致产品硬度增大, 细胞壁透性减少导致糖度提升幅度下降使杏脯色泽口感变差, 综合模糊数学感官得分降低。

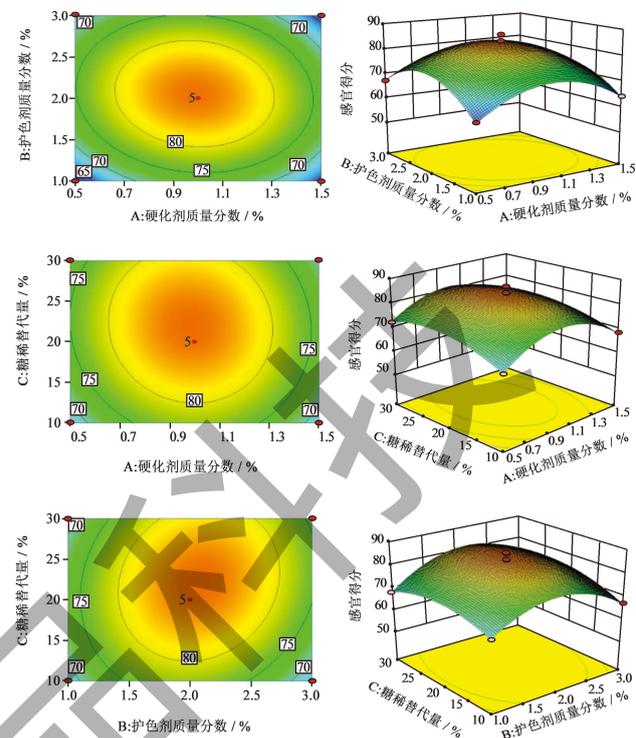


图 6 实验因素交互作用和等高线图

Fig.6 Interaction of experimental factors and contour plots

2.3.2 色差值分析

2.3.2.1 色差值方差分析

利用 DesignExpert 8.0.6.1 对表 9 色差值数据进行分析, 获得色差值对自变量 A (硬化剂质量分数)、 B (护色剂质量分数)、 C (糖稀替代量) 的二次多项回归模型方程为:

$$\text{色差值} = 26.84 + 0.40 * A - 0.84 * B + 0.43 * C - 0.90 * A * B + 1.06 * A * C - 0.24 * B * C + 4.99 * A^2 + 5.09 * B^2 + 3.18 * C^2$$

由表 9 可知, 该因素下响应面回归方程的 F 值为 67.51, P 值 $< 0.000 1$, 说明该模型极显著。失拟项 ($P = 0.933 6 > 0.05$) 不显著, 该结果表明本模型拟合情况良好, 具有统计学意义。模型中 A 、 B 、 AB 、 AC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 具有显著性。根据 F 值可以判断得出, 各单因素对色差值的影响大小顺序为 B (护色剂质量分数) $> A$ (硬化剂质量分数) $> C$ (糖稀替代量); 交互项因素对色差值影响的大小为 $AC > AB > BC$ 。

2.3.2.2 色差值交互分析

响应面的拱图大小程度说明了模型的显著程度, 由图 7 可知, 三个响应面均呈现凹陷型曲线,

曲线最低点的值表明该响应面的最小值^[26]，色差值越小，说明杏脯色泽与鲜杏色泽越接近，表示护色效果越显著，成品色泽则呈现和鲜杏类似的透亮黄。选取的试验因素最佳值均在设计水平范围内。由图7可以看出，A（硬化剂质量分数）和B（护色剂质量分数）、A（硬化剂质量分数）和C（糖稀替代量）之间的响应面3D图坡度较陡峭，等高线图趋向于椭圆，表示两两因素之间交互作用较强；而B（护色剂质量分数）和C（糖稀替代量）的响应面曲线坡度平缓，等高线图趋于圆形，说明其二者之间的交互作用较小。对比图7可以看出，硬化剂质量分数和护色剂质量分数对色差值的影响较为显著，具体表现在其响应曲面的坡度较陡，凹面拱度较大；而糖稀替代量的响应曲面较为平缓，说明交互作用不显著，与方差分析的结果一致。

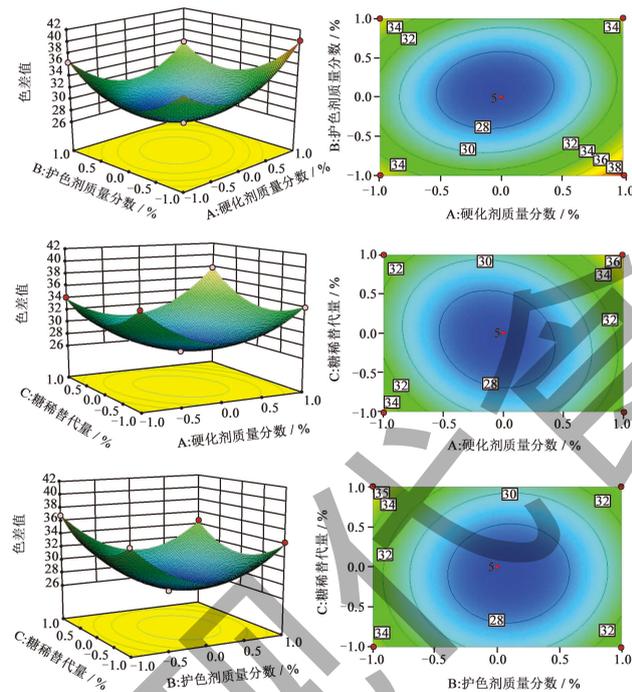


图7 三因素交互作用和等高线图

Fig.7 Interaction of three factors and contour map

2.4 验证实验

通过 Design Expert 得到的二次线性回归方程计算出复合渗糖溶液的最佳质量分数配方含量为：A（硬化剂质量分数）为 1.0%、B（护色剂质量分数）为 0.8%、C（糖稀替代量）为 20%，此配方条件下杏脯的模糊数学感官模型得分为 84.1 分。所得产品的理化性质为：感官得分为 84.1，硬度 3 636.49 g，总糖含量为 39.2%，可滴定酸含量为 1.52%，Vc 含量为 6.6 mg/100 g，色差值为 38.41，

POD 酶活性为 1.72%、PPO 酶活为 1.21%。含水量为 21.79%，干燥率为 78.21%。与模型预测的数值较为相近，证明该模型拟合程度较好，可以很好的预测杏脯的复合溶液配方。且产品各项指标均符合《SB/T11025-2013 果脯类流通规范》^[27]。伊丽达娜等^[4]研究的无硫护色配方需结合 90 °C 漂烫得到色泽鲜亮，L 值为 64.05，认为复合护色剂能代替硫护色剂达到护色效果，徐栋焱等^[28]研究了 0.6% 氯化钙加入护色溶液进行漂烫处理，能有效保持杏脯色泽的同时使果实结构稳定。张芳等^[29]研究发现柠檬酸能有效抑制杏脯的酶促氧化。本文使用复合护色剂配比硬化剂和糖液对杏脯进行真空低温渗糖处理，简化渗糖步骤。

3 结论

本研究通过响应面优化了复合糖液配方，将硬化、护色、渗糖、防腐简化为复合糖液非热渗糖处理。得出的复合溶液渗糖配方为：1.0% CaCl₂+0.8% 护色剂（0.2% L-半胱氨酸+0.2% 抗坏血酸+0.6% 柠檬酸）、糖稀液（白糖烯：砂糖=2:8）（以上比例均按质量分数计算）。该配方进行非热糖液渗透处理后杏脯的模糊感官得分为 84.10，硬度 3 636.50 g，总糖含量为 39.20%，可滴定酸含量为 1.52%，Vc 含量为 6.60 mg/100 g，色差值为 38.41，POD 酶活性为 1.72 U/g、PPO 酶活为 1.21 U/g。传统工艺制得李光杏脯总糖含量为 51.10%、可滴定酸含量为 1.05%、Vc 含量为 3.10 mg/100 g，色差值为 17.91。证明了该配方所得不仅优化加工工艺，同时提高了果脯品质。

本研究表明使用复合渗糖溶液结合非热渗糖所处理制得杏脯总糖、可滴定酸、维生素 C、色差值均能达到低糖无硫杏脯的要求，且维生素 C 得的保留量大于传统热加工。从工业化生产的角度出发，研究的复合渗糖溶液用以简化渗糖步骤的同时能提升产品营养成分和感官特性，提高企业能效。本研究为果脯非热加工提供了实践性的理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] 刘敏,高伟,张睿梅.杏汁发酵与杏皮渣发酵对杏酒香气质量的影响[J].食品科学,2021,42(22):193-200.
- [2] 王超,孙浩然,苏为耿,等.响应面法优化低糖滇黄糖果脯制备工艺[J].山东农业科学,2022,54(12):129-135
- [3] 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.
- [4] 伊丽达娜·开赛尔.不同浸糖方式对杏脯品质和香气的影响研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [5] HU X, WANG R R, XIE Q, et al. Changes in water state, distribution, and physico-chemical properties of preserved kumquats during different processing methods [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(7): 16.
- [6] 谢婧,李咏梅,陈晓欣,等.响应面法优化低糖椰肉果脯真空渗糖工艺[J].食品工业,2022,43(10):5-9.
- [7] 陈建旭,黄球荣,黄健玲,等.基于模糊数学感官评价法优化黑椒酱配方[J].保鲜与加工,2023,23(3):49-55.
- [8] 古明亮,刘学彬.模糊数学在丹棱不知火橘橙果实感官评价中的应用[J].南方农业,2017,11(19):4-7.
- [9] GEMED H F. Nutritional and antinutritional evaluation of complementary foods formulated from maize , pea, and anchote flours [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(4): 9.
- [10] 董艳,杨庆丽,姬妍茹,等.黑蒜果脯的研制[J].农产品加工,2015,(18):18-19.
- [11] 孔丽洁,冯作山,白羽嘉.不同工艺处理对杏汁理化指标及挥发性物质成分的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(17):243-250.
- [12] 卢珍兰,韦爱珍,余森艳,等.凤梨果脯超声波渗糖工艺的研究[J].粮食与食品工业,2023,30(1):28-33.
- [13] 曹健康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化试验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [14] GB 5009.86-2016,食品中抗坏血酸的测定[S].
- [15] 姚舒婷,周声怡,吴文艳,等.樱桃番茄果脯的无硫复合护色工艺优化[J].包装工程,2020,41(11):1-7.
- [16] 黄妙云,郭美媛,陈宇,等.圣女果果脯硬化工艺的探讨[J].轻工科技,2017,33(8):18-19.
- [17] 邬滢涛.氯化钠溶液对鲜切梨果褐变的影响[D].泰安:山东农业大学,2023.
- [18] 邓家棋,黄桂颖,姚敏等.感官分析在果脯中的应用[J].农产品加工,2021,15:76-79.
- [19] 季月月,董明,费莉娟,等.宣木瓜罐头生产过程中的护色工艺[J].食品工业科技,2014,35(19):204-207.
- [20] MARGARETN D, NATIVIDAD S, ALEGRIA M, et al. Strawberry (*Fragaria*×*Ananassa*) and Kiwifruit (*Actinidia Deliciosa*) extracts as potential radioprotective agents: relation to their phytochemical composition and antioxidant capacity [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(15): 13.
- [21] 赵欣,韩建欣,武晋海,等.响应面法优化复合护色剂对柿汁褐变的影响[J].中国食品添加剂,2022,33(1):146-153.
- [22] 王加园,加卫,何丽红.无硫低糖杏脯保藏性研究[J].现代食品,2021,13:83-87.
- [23] 李珊珊,姜启兴,吕兵,等.中等水分芒果脯加工中原料特性及护色工艺研究[J].食品科技,2020,45(4):37-42..
- [24] 孙娜,朱秀娟,胡文斌,等.模糊数学感官评价法优化低糖五叶草莓果脯加工工艺[J].保鲜与加工,2021,21(2):80-87,93.
- [25] 王杰.响应面优化狮头柑总黄酮提取工艺[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [26] 冯颖,张萍萍,赵存朝,等.响应面优化百香果果皮果脯制备工艺[J].食品工业科技,2022,43(17):275-282.
- [27] SB/T 11025-2013,食品安全商业标准 果脯类流通规范[S].
- [28] 徐栋焱.低糖杏脯加工关键技术及适宜性评价[D].晋中:山西农业大学,2022.
- [29] 张芳,康三江,苟丽娜,等.无硫杏脯褐变控制技术研究[J].食品研究与开发,2017,38(23):100-104.