

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241016001

引用格式: 叶丽敏, 艾超, 刘祎帆, 等. 响应面法优化红心火龙果皮果脯加工工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 275–282.

YE LM, AI C, LIU HF, *et al.* Optimization of processing technology of red pitaya peel preserved fruit by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 275–282. (in Chinese with English abstract).

响应面法优化红心火龙果皮果脯加工工艺

叶丽敏¹, 艾超², 刘祎帆¹, 谢永顺¹, 莫清华¹, 谢必新¹, 王琴¹,
马路凯¹, 肖更生¹, 谢曦^{1*}

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点试验室, 广东省岭南特色食品科学与技术重点试验室, 广州 510225; 2. 广东海洋大学食品科技学院, 湛江 524088)

摘要: **目的** 以红心火龙果皮为原料, 优化红心火龙果皮果脯的加工工艺。**方法** 通过单因素试验来确定影响火龙果皮果脯的3个主要因素(柠檬酸钠浓度、糖液浓度和烘烤时间)的取值范围, 并以成品的感官评分为响应值, 通过响应面法优化以确定红心火龙果皮果脯的最佳制作工艺。**结果** 确定了红心火龙果皮果脯加工的最佳工艺, 护色处理的柠檬酸钠浓度为0.75%、腌渍糖液浓度40%、烘烤时间3.0 h的制作工艺下, 得到的火龙果皮果脯色泽饱满, 口感独特。**结论** 本研究优化开发出了一种利用红心火龙果皮为原料制作的新型果脯产品, 有效利用了火龙果加工副产物。

关键词: 火龙果皮果脯; 响应面法; 质构特性; 感官评分; 单因素试验

Optimization of processing technology of red pitaya peel preserved fruit by response surface methodology

YE Li-Min¹, AI Chao², LIU Hui-Fan¹, XIE Yong-Shun¹, MO Qing-Hua¹, XIE Bi-Xin¹,
WANG Qin¹, MA Lu-Kai¹, XIAO Geng-Sheng¹, XIE Xi^{1*}

(1. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food of Ministry and Rural Affairs, Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, College of Light Industry and Food Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;
2. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the processing technology for preserved fruit made from red pitaya peel. **Methods** The 3 primary factors sodium citrate concentration, sugar solution concentration, and baking time were selected based on single factor experiments. Sensory scores of the preserved red pitaya peel fruit were used as response variables, and the optimal processing conditions were determined using response surface methodology. **Results** The optimal processing conditions for the peel and preserved fruit of red-fleshed pitaya was determined: 0.75% sodium citrate (for color retention), 40% sugar solution concentration and a baking time of 3.0 hours. The

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 广州市重点研发计划项目(2023B03J0821); 江门市基础与应用基础研究重点项目(2220002000277); 广东省重点研发计划项目(2023B20205001)

第一作者: 叶丽敏(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品发酵。E-mail: 290166755@qq.com

*通信作者: 谢曦(1988—), 女, 副教授, 主要研究方向为生物技术。E-mail: xixie31@hotmail.com

resulting product exhibited a vibrant color and distinctive taste. **Conclusion** This study proposes a novel method for producing preserved fruit using red pitaya peel, thereby effectively utilizing by-products from pitaya processing.

KEY WORDS: pitaya peel preserved fruit; response surface method; texture characteristics; sensory score; single factor experiments

0 引言

火龙果(*Hylocereus* spp.)是广泛种植在世界各地的热带或亚热带地区,属于仙人掌科量天尺属的果实,原产于墨西哥和中美洲以及南美洲的热带地区^[1]。根据果肉和果皮的外观可分为红肉/红皮、白肉/红皮和白肉/黄皮 3 种火龙果^[2]。在我国种植区域主要集中在广东、广西、福建和海南等地^[3]。火龙果富含可溶性糖、蛋白质和钾、镁、钙等矿物质,同时含有多酚、类黄酮和维生素 C、花青素等具有抗氧化性的成分^[4]。火龙果在华南地区广泛种植,产量大,但贮藏期短,以鲜果销售的方式进入市场造成极大的浪费,随着种植面积逐年扩大,贮藏期短成为了制约火龙果产业发展的短板,因此对火龙果进行深加工势在必行。

目前火龙果的产品开发包括果酒^[5]、果醋^[6]、果脯^[7]、果汁^[8]、果酱^[9]、果干^[10]、果粉^[11]、酸奶^[12]、益生菌饮料^[13]和酵素^[14]等。程志华等^[15]以去皮的红心火龙果为原料,进行酒精发酵,研究发酵过程中的酒精度、香气和生物活性成分等。沈晓怡等^[16]用去皮的红心火龙果研究营养果醋的生产最佳工艺。李国胜等^[7]以去皮的白肉火龙果为原料,研究低糖火龙果果脯的加工工艺。多数产品开发都是以火龙果的果肉为主,果皮占火龙果的三分之一左右,丢弃形成极大的浪费。火龙果皮中果胶含量高达 63.74%,维生素 C 在 7.04~7.62 mg/100 g 之间,矿物质在 0.17~0.22 mg/100 g 之间,总膳食纤维在 56.91~79.37 g/100 g 之间,除此之外,果皮中还富含甜菜红素、酚类化合物、萜类化合物、生物碱等^[2]。KIM 等^[17]研究发现火龙果皮中的总多酚和类黄酮含量比果肉高。火龙果产品的开发主要集中在火龙果的果肉上,关于火龙果皮的研究更多集中在甜菜红素^[18]、总酚^[19]、花青素^[20]和果胶^[21]等的提取,少数是利用火龙果皮通过发酵技术得到发酵类产品,如廖明星等^[22]利用红心火龙果皮为原料制作发酵饮料,也有通过提取火龙果皮中的花青素,制作成凝胶果糖^[23]。火龙果皮通常被视为废弃物,通过加工利用,可以有效减少食品废弃物,推动资源的循环利用,并能延长火龙果的生产和加工链条,增加农民和企业的收入。火龙果皮的研究利用集中在营养物质的提取,关于加工成果脯的研究较少,果脯水分含量低,易于保存,方便携带,受人们的喜爱,将火龙果皮开发成果脯,可以创造新的市场机会。本研究以火龙果皮为原料,探究柠檬酸钠浓度、渗糖过程中糖液的浓度和干燥过程中烘烤时间对火龙果果脯感官评价的影响,旨在获得一款甜度合适,口感适口,

色泽宜人的火龙果皮果脯。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红心火龙果(购买于沃尔玛超市万达广场广州白云店);白砂糖[上海市糖业烟酒(集团)有限公司];食盐(广东省盐业集团有限公司);食用级柠檬酸钠(山东英轩实业股份有限公司);食用级抗坏血酸(河南万邦化工科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

HH-4 恒温水浴锅(上海力辰邦西仪器科技有限公司);C-RT21E01 电磁炉(美的集团股份有限公司);PTX-FA120S 分析天平(精度 0.1 mg, 华志福建电子科技有限公司);DHG-9203A 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);HK/ZYGY-2 硬度计(北京中慧天诚科技有限公司);ColorFlex EZ 色差仪(美国 HunterLab 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

火龙果皮果脯的生产工艺流程如下:

原料→筛选→清洗→护色→灭酶漂烫→冷却→脱痒喉味→低温渗糖→烘干→冷却回软→成品包装

1.3.2 操作要点

(1)原料筛选。选择果皮完整的新鲜火龙果,除去表皮的鳞片和枝叶,剥下火龙果皮,保留果皮备用,果肉可作其他生产加工用。

(2)清洗、切分。清洗火龙果皮表面的泥土和杂质,修理果皮的形状,尽可能使果皮厚度一致。

(3)护色。配制柠檬酸钠和抗坏血酸的混合溶液,抗坏血酸的浓度为 0.5%,将火龙果皮至于混合溶液中,保持料液比为 1:2 (g:mL),护色 2 h。选择不同浓度的柠檬酸钠溶液对比护色效果。

(4)漂烫灭酶。将火龙果皮放入 100 °C 的水中漂烫 1 min,达到灭酶的目的。

(5)冷却。及时将火龙果皮捞出,至于流动水下冲洗冷却 1 min,迅速降温并除去漂烫残液。

(6)脱痒喉味。在常温下,将火龙果皮至于柠檬酸钠和食盐的混合溶液中(0.5%柠檬酸钠和 0.5%的食盐),保持料液比为 1:2,作用 20 min。

(7)低温渗糖。配制白砂糖溶液,将火龙果皮放置在白

砂糖溶液, 保持料液比为 1:2 (g:mL), 在常温常压下渗糖 2 h。对比不同浓度白砂糖溶液的渗糖效果对成品的感官影响。

(8)烘干。火龙果皮平铺在托盘上, 防止重叠, 温度为 60 ℃。烘烤过程中及时翻面, 保证烘烤时受热均匀。

(9)包装。将冷却回软的火龙果果脯放入聚乙烯塑料袋中, 约 50 g 一包, 封口保存。

1.3.3 火龙果皮果脯感官评定标准

请 10 名志愿者(5 男 5 女)经过培训后组成评定小组, 采用综合评定的方法对火龙果皮果脯的外观色泽、组织状态、口感风味、气味进行感官评分。火龙果皮果脯感官评定标准见表 1。

表 1 火龙果皮果脯的感官评分标准表
Table 1 Sensory evaluation criteria of pitaya peel preserved fruit

感官指标	评分标准	分值/分
外观色泽 (30)	颜色不均匀, 不透明, 无光泽, 少量反砂	1~9
	颜色较均匀, 半透明, 有光泽, 无反砂	10~19
	颜色均匀一致, 透明, 富有光泽	20~30
组织形态 (30)	肉质软化、饱满度差、干缩明显或严重、没有柔软度, 韧性太强或太弱, 有杂质	1~9
	肉质疏松、有一定的饱满度、有一点黏手、没有柔软度, 韧性较强或较弱, 无杂质	10~19
	肉质致密、饱满度好、无破损、不黏手、柔软适度, 韧性适中, 无杂质	20~30
口感风味 (20)	过甜或过咸、无原果味、硬度过高或过低、口感粗糙、不适口	1~7
	甜度和咸度不协调、原果味不浓、硬度适中、口感偏硬或偏软	8~13
	甜度和咸度适中、原果味浓、硬度适中、有一定的嚼劲	14~20
气味 (20)	没有火龙果香气、有异味	1~7
	火龙果香气一般、无异味	8~14
	火龙果香气较浓、无异味	14~20

1.3.4 火龙果皮果脯单因素试验

以柠檬酸钠浓度为 0.5%, 渗糖浓度为 40%, 烘干时间为 3 h 为基础试验条件, 改变单一因素变量, 分别研究护色剂柠檬酸钠浓度(0.3%、0.5%、0.8%、1.0%、1.5%、2.0%)、渗糖浓度(30%、40%、50%、60%、70%)、烘烤时间(2.5、3.0、3.5 h)对火龙果皮果脯感官评分、水分、硬度和色差等指标的影响。

1.3.5 火龙果皮果脯响应面法试验

在单因素试验的基础上, 根据中心组合(Box-Behnken)试验设计原理, 选取柠檬酸钠浓度(A)、糖液浓度(B)、烘干时间(C) 3 个因素, 以火龙果皮果脯的感官评分(Z)为响应值, 设计 3 因素 3 水平的响应面法试验, 优化火龙果皮果脯加工工艺, 试验因素与水平见表 2。

表 2 响应面法试验因素与水平表

Table 2 Factors and levels table of response surface test

水平	因素		
	A(柠檬酸钠浓度)/%	B(糖液浓度)/%	C(烘烤时间)/h
-1	0.50	30	2.5
0	0.75	40	3.0
1	1.00	50	3.5

1.3.6 理化指标测定

(1)水分

火龙果皮果脯的水测定分采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法。每个样品做 3 次平行试验, 结果取平均值。

(2)硬度

采用硬度计随机测量不同制作方式的果脯的硬度, 在果脯上随机取 3 个点测量, 每种样品重复 5 次。

(3)色差

采用色差计测定火龙果皮果脯色泽, 同一个样品选取 3 处测量取平均值。火龙果皮果脯与鲜火龙果皮的色差值(ΔE)的计算见公式(1)。

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

式中: L 为火龙果皮果脯亮度值; L_0 为鲜火龙果皮亮度值; a 为火龙果皮果脯红度值; a_0 为鲜火龙果皮红度值; b 为火龙果皮果脯黄度值; b_0 为鲜火龙果皮黄度值。

1.4 数据处理

本研究的单因素相关数据的收集和整理工作使用 OriginPro 2024 和 IBM SPSS Statistics 20 统计软件对试验数据进行分析及绘图。利用 Design-Expert 8.0.6 进行响应面分析, 结果以均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 火龙果皮果脯单因素结果与分析

2.1.1 不同浓度柠檬酸钠对果脯品质的影响

火龙果皮果脯在制作过程中甜菜红素不稳定, 容易发生褐变, 本研究利用柠檬酸钠进行护色, 设置 6 个浓度(分别为 0.3%、0.5%、0.8%、1.0%、1.5%和 2.0%), 观察柠檬酸钠对火龙果皮果脯护色的效果。火龙果皮呈现红色主要是其富含甜菜红素, 甜菜红素在 pH 3~7 的范围内保持较强的稳定性, 同时有研究表明 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 等金属离子对火龙果皮中的甜菜红素的稳定性有一定的促进作用, 而 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 则相反^[2]。由表 3 的数据可以发现各个浓度的柠檬酸钠护色后的火龙果皮果脯均与鲜火龙果皮有色差, 其中柠檬酸钠浓度为 0.5%和 0.8%的色差偏大, 可能是因为柠檬酸钠溶液引起 pH 变化导致甜菜红素

表3 柠檬酸钠浓度对果脯颜色的影响
Table 3 Effects of sodium citrate concentration on color of preserved fruits

果脯颜色指标	柠檬酸钠浓度/%					
	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0
ΔL	-0.097 ± 1.77^b	-4.57 ± 0.26^a	-4.77 ± 0.27^a	-1.24 ± 1.38^b	-1.55 ± 0.62^b	-0.87 ± 1.72^b
Δa	-7.21 ± 0.89^c	-18.31 ± 1.23^a	-14.65 ± 0.75^b	-6.76 ± 1.50^c	-4.18 ± 1.35^d	-9.26 ± 1.38^c
Δb	-2.59 ± 0.27^a	-3.00 ± 0.57^a	-2.76 ± 0.86^a	-0.52 ± 0.48^b	0.96 ± 1.77^b	-0.31 ± 0.76^b
ΔE	7.80 ± 0.89^b	19.12 ± 1.19^d	15.67 ± 0.85^c	6.99 ± 1.56^b	4.89 ± 0.83^a	9.42 ± 1.51^b

注: 同一组标注相同小写字母表示无差异显著, 试验结果的统计分析采用单因素方差分析($P < 0.05$), 表4~5同。

不稳定, 红色褪去; 在浓度为1.0%和1.5%时护色效果有明显改善, 可能时因为柠檬酸钠中的钠离子起到稳定甜菜红素的作用。与王春丽^[24]研究结果相同, 探究金属离子对红甜菜色素稳定性的影响, Na^+ 对红甜菜色素保留率在70%以上, 且对溶液的色差影响较少。张晓宁等^[25]研究不同浓度盐离子胁迫对翅碱蓬幼苗的甜菜红素影响, 随着NaCl浓度的升高甜菜红素含量呈先增加后减少的趋势。

柠檬酸钠除护色外还可作为酸度调节剂, 改善产品风味和口感, 但添加的柠檬酸钠高于1.0%时, 过量的柠檬酸钠会让果脯带有怪味影响其感官评价。由图1可知, 火龙果果脯水分含量低, 则硬度高, 主要是水分的减少会影响果脯的质构。综合火龙果皮果脯的外观色泽、组织形态、口感风味和气味进行感官评价, 柠檬酸钠浓度为0.8%感官评分最高, 72.6分。

2.1.2 不同糖液浓度对果脯感官评分的影响

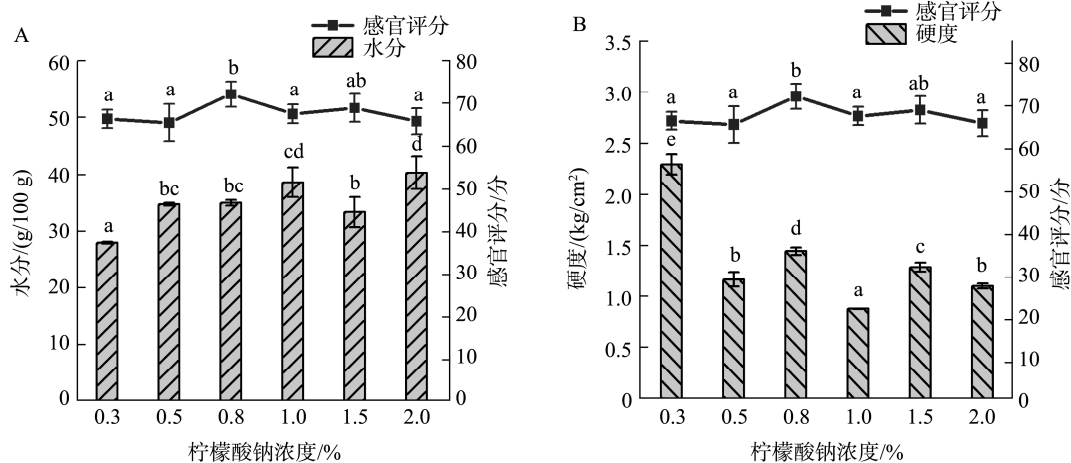
果脯生产的重要原料之一是蔗糖, 蔗糖的添加可以增加果脯的风味和改善口感, 糖可以让果蔬原料发生渗透作用, 影响水分含量, 含水量不同的果脯口感不同, 适宜的糖浓度可以使果脯香甜软糯, 甜度宜人^[26]。如图2所示, 火龙果皮经不同浓度的糖液处理, 经烘干后水分含量有明显差异, 糖液浓度在50%以上, 水分含量更低, 与

RAHMAN等^[27]的研究一致, 经过糖液渗透处理的果蔬由于渗透作用脱水, 初始含水量比未经糖液渗透处理的低, 且高浓度产生更高的压力梯度, 因此高糖溶液中处理的样品显示出更高的干燥速率。由于水分损失大, 火龙果皮果脯的硬度随着水分的降低而升高, 硬度过高导致火龙果皮果脯难咀嚼, 不符合人们对果脯口感软糯的需求, 因此感官评分发生下降。与隋勇等^[28]优化低糖甘薯果脯工艺中糖度影响果脯的感官评价相同, 高浓度糖液使果脯水分快速析出, 果脯甜腻, 口感偏硬, 感官评分低。

高浓度的糖液产生渗透作用, 在干燥过程中, 水果表面形成的糖层在对流干燥过程中对空气形成屏障, 防止褐变^[29]。如表4所示, 糖液浓度为60%和70%的火龙果皮果脯与鲜火龙果皮的色差更小, 但由于糖度高, 甜腻导致感官评分低, 综合考虑口感、甜度及颜色等因素, 40%为最佳糖液浓度。

2.1.3 不同烘烤时间对果脯感官评分的影响

烘干是果脯制作过程中的重要工艺, 烘干时长影响水分及硬度, 直接影响果脯的口感^[30], 适当的含水量可使果脯有韧劲, 但含水量过低, 得到的果脯质地偏硬, 出现干瘪现象, 影响果脯硬度和感官评分。由图3可知, 当烘烤时间为3.0h时, 此时的果脯肉质紧密、饱满度好、火龙



注: 同一组标注相同小写字母表示无差异显著, 试验结果的统计分析采用单因素方差分析($P < 0.05$), 图2~3同。

图1 柠檬酸钠添加量对果脯品质的影响

Fig.1 Effects of sodium citrate concentration on the quality of preserved fruit

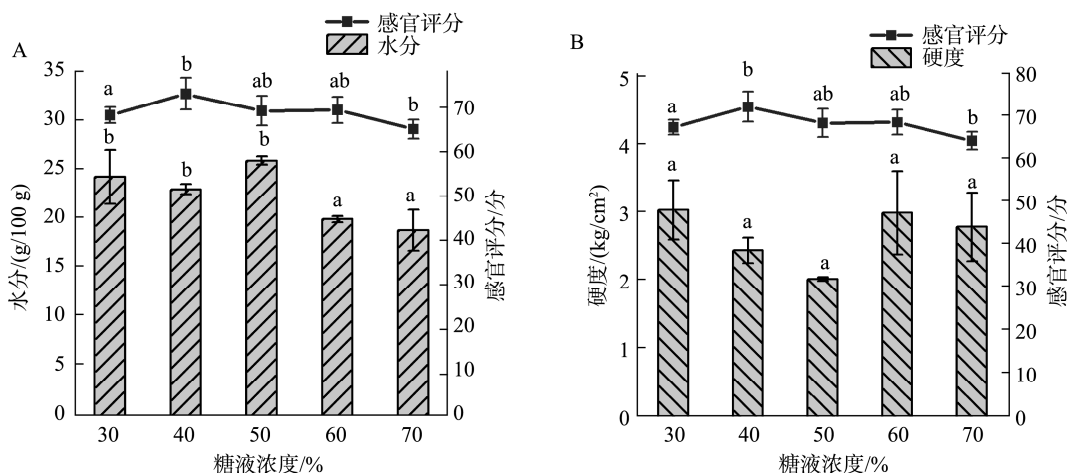


图 2 糖液浓度对果脯品质的影响
Fig.2 Effects of sugar concentration on the quality of preserved fruit

表 4 糖液对果脯颜色的影响
Table 4 Effects of sugar concentration on color of preserved fruits

果脯颜色指标	糖液浓度/%				
	30	40	50	60	70
ΔL	1.57±1.67 ^c	-1.73±0.28 ^a	-2.35±0.50 ^a	-0.19±0.28 ^b	-2.17±0.48 ^a
Δa	-5.37±2.36 ^b	-4.55±0.62 ^b	-7.85±0.42 ^a	-2.77±0.41 ^b	-3.64±1.17 ^b
Δb	1.65±0.22 ^{ab}	2.82±0.34 ^c	-0.073±2.04 ^a	3.86±0.17 ^c	1.87±0.27 ^{ab}
ΔE	6.16±1.57 ^a	5.65±0.41 ^a	8.38±0.26 ^b	4.78±0.08 ^a	4.66±1.12 ^a

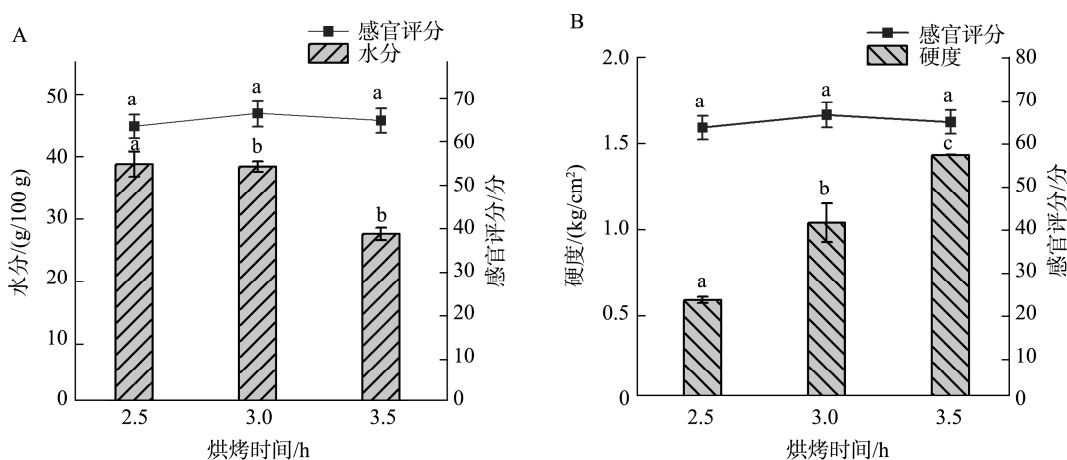


图 3 烘烤时间对果脯品质的影响
Fig.3 Effects of baking time on the quality of preserved fruit

果香气浓郁, 感官评分达到最佳。当果脯烘烤时间过短, 果脯内部的物质无法均匀分散到果脯内部各处, 果脯颜色不均匀, 糖分渗透不充分, 果脯表面糖液较多且未烘干; 而烘烤时间过长, 果脯因长时间的高温烘烤而大量失水, 表面皱缩且口感干涩偏硬, 火龙果香气挥发。

甜菜红素稳定性受温度影响, 随温度的升高, 吸光度先增大后减小, 在 40 °C 时, 吸光度达到最小值^[31], 因

此火龙果皮果脯在烘干过程中甜菜红素含量会减少。由表 5 可知, 不同烘烤时间的火龙果皮果脯色差均与鲜火龙果皮有差异, Δa 在加工后为负值, 说明红色下降, Δb 为正值, 说明颜色偏黄, 且随着时间的延长, Δa 偏向负值越大。红色的损失主要是由于甜菜红色在烘干过程中不稳定, 在高温的条件下色素发生降解, 火龙果皮果脯由红色变为棕红色。这与 BACCUS-TAYLOR 等^[32]的研究结

果一致,新鲜的波美拉克由于果肉呈深红色,红色值大,制成蜜饯的波美拉克在干燥过程中变成浅棕色,红色值下降,是由于花青素在高温的条件下不稳定发生分解所导致。随着红色色差的增大,火龙果皮果脯的颜色变为棕红色,影响感官评分。综合考虑火龙果皮果脯的硬度及色差,在烘烤时间为 3.0 h 的条件下感官评分最高。

表 5 烘烤时间对果脯颜色的影响

Table 5 Effects of baking time on color of preserved fruits

果脯颜色 指标	烘烤时间/h		
	2.5	3.0	3.5
ΔL	2.15±0.69 ^b	-0.39±0.05 ^a	-0.19±0.70 ^a
Δa	-0.01±2.11 ^a	-2.83±1.47 ^a	-3.60±1.48 ^a
Δb	3.35±0.98 ^a	2.37±0.80 ^a	2.83±1.49 ^a
ΔE	4.44±0.36 ^a	3.92±0.73 ^a	4.92±0.17 ^a

2.2 响应面法优化试验结果与分析

2.2.1 响应面法优化火龙果皮果脯加工工艺

在火龙果皮果脯单因素试验的基础上,以柠檬酸钠浓度、糖液浓度和烘烤时间为自变量,火龙果皮果脯感官评分为响应值,研究自变量及各因素间的交互作用对火龙果皮果脯感官评价的影响。试验设计及结果见表 6。

表 6 响应面设计及试验结果

Table 6 Design and experimental results of response surface

序号	A(柠檬酸钠 浓度)/%	B(糖液 浓度)/%	C(烘烤 时间)/h	Z(感官 评分)/分
B1	-1	-1	0	71.60
B2	1	-1	0	70.28
B3	-1	1	0	70.60
B4	1	1	0	72.24
B5	-1	0	-1	69.00
B6	1	0	-1	71.32
B7	-1	0	1	70.60
B8	1	0	1	68.44
B9	0	-1	-1	72.68
B10	0	1	-1	71.68
B11	0	-1	1	72.04
B12	0	1	1	71.92
B13	0	0	0	77.44
B14	0	0	0	75.96
B15	0	0	0	76.12
B16	0	0	0	75.20
B17	0	0	0	75.78

2.2.2 模型建立及显著性检验

对表 6 进行多元回归拟合处理之后,分别获取到火龙果皮果脯感官评分值(Z)、柠檬酸钠浓度(A)、糖液浓度(B)、烘烤时间(C)的二次方程模型为: $Z=76.10+0.0600A-0.0200B-0.2100C+0.7400AB-1.12AC+0.2200BC-3.58A^2-1.34B^2-2.68C^2$,回归模型的方差分析结果见表 7。

表 7 回归模型方差分析表

Table 7 Regression model analysis of variance table

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	108.5500	9	12.0600	25.0600	0.0002	**
A(柠檬酸钠 浓度)	0.0288	1	0.0288	0.0598	0.8138	
B(糖液浓度)	0.0032	1	0.0032	0.0066	0.9373	
C(烘烤时间)	0.3528	1	0.3528	0.7331	0.4202	
AB	2.1900	1	2.1900	4.5500	0.0703	
AC	5.0200	1	5.0200	10.4300	0.0145	*
BC	0.1936	1	0.1936	0.4023	0.5461	
A ²	53.9600	1	53.9600	112.1300	<0.0001	**
B ²	7.5600	1	7.5600	15.7100	0.0054	**
C ²	30.2400	1	30.2400	62.8400	<0.0001	**
残差	3.3700	7	0.4813			
失拟项	0.6408	3	0.2136	0.3132	0.8163	
误差	2.7300	4	0.6820			
总和	111.9200	16				
R	0.9699					
R ² _{adj}	0.9312					

注: *表示差异显著, $P<0.05$; **表示差异极显著, $P<0.01$ 。

从表 7 分析得出,所选因素对感官评分的影响强弱顺序为 C(烘烤时间)>A(柠檬酸钠浓度)>B(糖液浓度)。该回归方程 $P=0.0002<0.05$,说明模型建立极显著;失拟项 $P=0.8163>0.05$ 不显著,说明试验所得二次回归方程能很好地对响应值进行预测;因变量与所考察自变量之间的复相关数 $R^2=0.9699$ 说明该模型拟合程度较好,试验误差小。模型调整确定系数 $R^2_{adj}=0.9312$,说明该模型能解释 93.12%响应值的变化,拟合程度较好。从表 7 和图 4 可以看出,各个交互因素的最佳作用点都落在试验范围内,经过优化,得到最佳的工艺为柠檬酸钠浓度为 0.753%、糖液浓度为 39.92%、烘烤时间为 2.98 h,在此优化条件下,感官评分的理论预测值为 76.11 分。但考虑到实际工艺操作,将柠檬酸钠浓度改为 0.75%、糖液浓度改为 40%、烘烤时间 3 h。在经过 3 次重复试验验证,在优化后的试验条件下,所得产品的感官评分的平均值为 73.24 分,接近预测值。因此,在响应曲面分析法优化分析得出的试验结果准确可靠,具有稳定性和实用性。

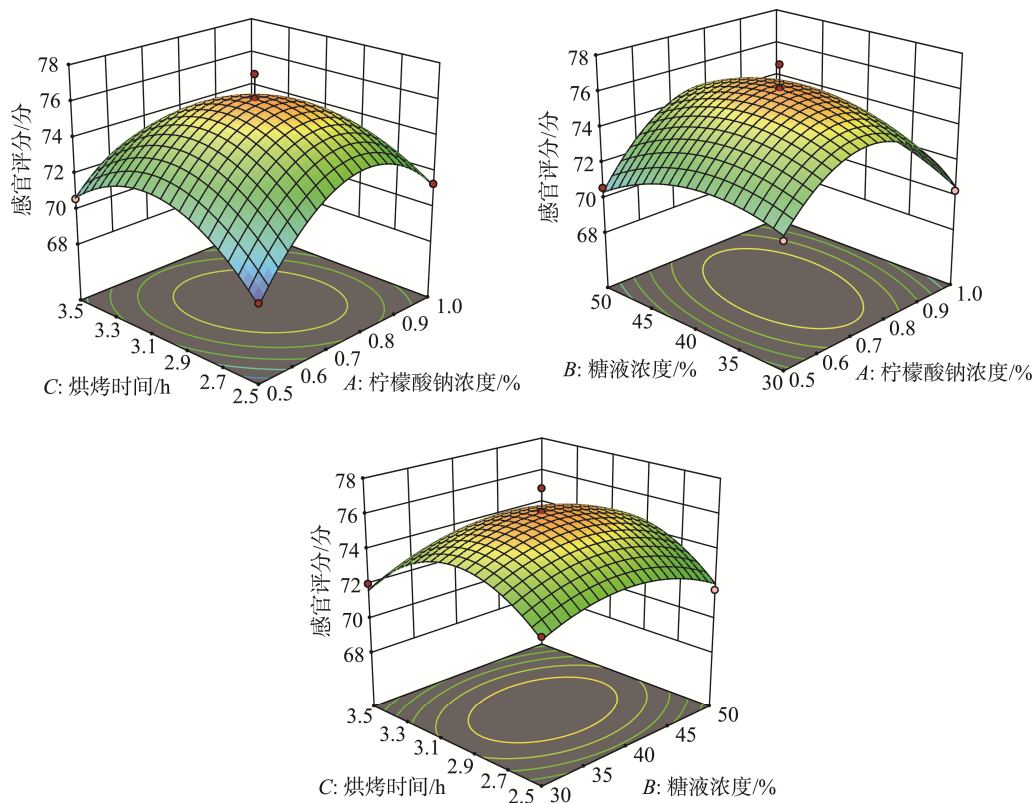


图 4 3 个因素对感官评分的影响响应曲面图

Fig.4 Response surface diagram of the effects of 3 factors on sensory scores

3 结 论

试验在单因素试验的基础上, 使用响应曲面分析法制作火龙果果脯的条件进行优化, 以感官评分作为标准得出优化工艺条件: 柠檬酸钠浓度修正为 0.75%、糖液浓度修正为 40%、烘烤时间 3.0 h; 在此条件下, 感官评分为 73.24 分, 试验所得产品颜色均匀一致、肉质致密、饱满度好柔软适度, 韧性适中, 无杂质, 甜度和咸度适中火龙果香气较浓、无异味。该果脯的研发对促进火龙果深加工、提升火龙果的价值开发具有一定的意义。

参考文献

- [1] QUIROZ-GONZÁLEZ B, GARCÍA-MATEOS R, CORRALES-GARCÍA JJE, *et al.* Pitaya (*Stenocereus* spp.): An under-utilized fruit [J]. Journal of the Professional Association for Cactus Development, 2018, 20: 82-100.
- [2] JIANG H, ZHANG W, LI X, *et al.* Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (*Hylocereus* spp.) peels: A comprehensive review [J]. Food Science & Technology, 2021, 116: 199-217.
- [3] 李涛, 王明月, 杜海群, 等. 红肉火龙果与白肉火龙果的品质分析[J]. 保鲜与加工, 2015, 15(4): 59-61, 65.
LI T, WANG MY, DU HQ, *et al.* Quality analysis of red pitaya and white pitaya [J]. Storage and Process, 2015, 15(4): 59-61, 65.
- [4] ARIVALAGAN M, KARUNAKARAN G, ROY TK, *et al.* Biochemical and nutritional characterization of dragon fruit (*Hylocereus species*) [J]. Food Chemistry, 2021, 353. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129426
- [5] 董法宝, 李声威, 刘元昊, 等. 火龙果香蕉刺梨复合果酒酿造工艺优化及其风味品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 155-165.
DONG FB, LI SW, LIU YH, *et al.* Brewing process optimization and flavor quality analysis of *Hylocereus polyrhizus*, *Musa nana* and *Rosa roxburghii* compound fruit wine [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(14): 155-165.
- [6] 陆敏, 肖敏, 周景瑞, 等. 红心火龙果醋发酵工艺的研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(2): 184-188.
LU M, XIAO M, ZHOU JR, *et al.* Optimization of fermentation technology of red pitaya vinegar [J]. China Brewing, 2018, 37(2): 184-188.
- [7] 李国胜, 陈小碗. 响应面法优化低糖火龙果果脯加工工艺[J]. 食品工业, 2015, 36(8): 68-73.
LI GS, CHEN XW. Optimization of low sugar preserved pitaya processing technology by response surface methodology [J]. The Food Industry, 2015, 36(8): 68-73.
- [8] 赵世民, 陈余燕. 果胶酶对火龙果汁的澄清效果[J]. 现代食品, 2022, 28(8): 97-100.
ZHAO SM, CHEN YY. Clarification effect of pectinase on pitaya juice [J]. Modern Food, 2022, 28(8): 97-100.
- [9] 吴洁, 宋莺丽, 王晴, 等. 火龙果橙皮低糖复合果酱的研发[J]. 中国调味品, 2022, 47(6): 103-106.
WU J, SONG YL, WANG Q, *et al.* Research and development of low-sugar compound jam of pitaya and orange peel [J]. China Condiment, 2022, 47(6): 103-106.
- [10] 孟繁博, 黄道梅, 郑秀艳, 等. 超声波预处理对热风干燥火龙果片品质

- 的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 205–209.
- MENG FB, HUANG DM, ZHENG XY, *et al.* Ultrasound pretreatment on quality of pitaya before hot air drying [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 205–209.
- [11] 刘洋洋, 龚霄, 刘义军, 等. 不同加工方式对火龙果果粉理化特性的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(9): 2689–2695.
- LIU YY, GONG X, LIU YJ, *et al.* Effect of different preparation methods on properties of pitaya fruit powder [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(9): 2689–2695.
- [12] 唐海尧, 刘和平, 陈雅萍, 等. 凝固型火龙果果汁酸奶的工艺配方研究[J]. 农产品加工(上半月), 2019(3): 30–32, 35.
- TANG HY, LIU HP, CHEN YP, *et al.* The study on technical formula for solidified dragon-fruit yoghurt [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2019(3): 30–32, 35.
- [13] 马晓伟, 林小晖, 杜冰. 益生菌发酵火龙果饮料的工艺研究[J]. 饮料工业, 2017, 20(3): 48–52.
- MA XW, LIN XH, DU B. Research and produce of pitaya fermented beverage with *Lactobacillus* [J]. The Beverage Industry, 2017, 20(3): 48–52.
- [14] 赵飞, 孙莉, 刘雪梅, 等. 黄秋葵-火龙果酵素工艺优化及特性分析[J]. 中国果菜, 2023, 43(9): 41–47.
- ZHAO F, SUN L, LIU XM, *et al.* Study on process optimization and properties of okra and pitaya jiaosu [J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(9): 41–47.
- [15] 程志华, 龚霄, 袁源, 等. 红心火龙果果酒发酵特性的研究[J]. 酿酒科技, 2018(9): 17–21.
- CHENG ZH, GONG X, YUAN Y, *et al.* Fermentation characteristics of pitaya wine [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2018(9): 17–21.
- [16] 沈晓怡, 何艳梅, 覃丽娟, 等. 红心火龙果营养果醋加工工艺研究[J]. 中国调味品, 2016, 41(11): 91–94.
- SHEN XY, HE YM, QIN LJ, *et al.* Study on the processing technology of pitaya vinegar [J]. China Condiment, 2016, 41(11): 91–94.
- [17] KIM H, CHOI HK, MOON JY, *et al.* Comparative antioxidant and antiproliferative activities of red and white pitayas and their correlation with flavonoid and polyphenol content [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1). DOI: 10.1111/j.1750-3841.2010.01908.x
- [18] 艾雅娜, 张海娟, 廖红梅. 火龙果果皮中甜菜红素的提取、鉴定及金属离子对其稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 212–221.
- AI YN, ZHANG HJ, LIAO HM. Extraction, identification, and the effect of metal ions on the stability of beetroot red pigment in dragon fruit peel [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 212–221.
- [19] 钟焯钰, 刘宇佳, 朱杰, 等. 超声辅助酶解法提取火龙果皮结合酚及其抗氧化和酶抑制活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 25–32.
- ZHONG XY, LIU YJ, ZHU J, *et al.* Study on ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis for extraction of bound phenol of pitahaya peel and its antioxidant and enzyme inhibitory activities [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 25–32.
- [20] 黄春兰, 许文婷, 莫子燕, 等. 红心火龙果皮花青素提取工艺优化及花青素组成分析[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 183–191.
- HUANG CL, XU WT, MO ZY, *et al.* Optimization of anthocyanin extraction process and analysis of anthocyanin composition in pericarp of red pitaya [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(9): 183–191.
- [21] 李靛, 朱涵彬, 李长滨, 等. 响应面优化超声波法提取火龙果皮果胶的工艺研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 13–19.
- LI J, ZHU HB, LI CB, *et al.* Research on ultrasonic extraction process of pectin from pitaya peel by response surface optimization [J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(5): 13–19.
- [22] 廖明星, 吴华鑫, 缪园欣. 响应面法优化红心火龙果皮发酵饮料发酵工艺[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 142–146.
- LIAO MX, WU HX, MIAO YX. Optimization of fermentation technology of fermented red dragon fruit peel beverage by response surface method [J]. China Brewing, 2020, 39(4): 142–146.
- [23] 纪昊垚, 麦梓锋, 全文彬, 等. 火龙果皮原花青素提取及凝胶软糖的开发研究[J]. 中国食物与营养, 2024, 30(2): 26–32.
- JI HY, MAI ZF, QUAN WB, *et al.* Extraction of procyanidins from pitaya peel and exploration of gelatinous candy [J]. Food and Nutrition in China, 2024, 30(2): 26–32.
- [24] 王春丽. 红甜菜甜菜红素的稳定性及降血脂作用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- WANG CL. Study on the stability and hypolipidemic effect of betacyanin from red beet [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [25] 张晓宁, 洪晓松, 朱紫檀, 等. 不同盐离子胁迫对翅碱蓬幼苗的甜菜红素影响[J]. 园艺与种苗, 2024, 44(1): 37–39.
- ZHANG XN, HONG XS, ZHU ZT, *et al.* Effects of different salt ion stressors betacyanin in *Suaeda salsa* seedlings [J]. Horticulture & Seed, 2024, 44(1): 37–39.
- [26] 洗娅雪, 陶虹, 王君睿, 等. 糖因素对菠萝果脯品质的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(8): 28–33.
- XIAN YX, TAO H, WANG JR, *et al.* Effects of sugar on the quality of preserved pineapple fruits [J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(8): 28–33.
- [27] RAHMAN SMA, MUJUMDAR AS. Effect of osmotic treatment with concentrated sugar and salt solutions on kinetics and color in vacuum contact drying [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2007, 31(6): 671–687.
- [28] 隋勇, 施建斌, 蔡沙, 等. 响应面法优化低糖甘薯果脯制作工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 83–87.
- SUI Y, SHI JB, CAI S, *et al.* Optimization of processing conditions for low-sugar preserved sweet potato using response surface methodology [J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 83–87.
- [29] RADOJČIN M, PAVKOV I, BURSAČ-KOVAČEVIĆ D, *et al.* Effect of selected drying methods and emerging drying intensification technologies on the quality of dried fruit: A review [J]. Processes, 2021, 9(1): 132.
- [30] 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.
- FENG Y, ZHANG PP, ZHAO CC, *et al.* Optimization of preparation technology of passion fruit peel and preserved fruit by response surface methodology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 275–282.
- [31] 李桂玲, 李甜甜. 甜菜红素稳定性的研究[J]. 现代食品, 2024, 30(6): 211–213.
- LI GL, LI TT. Study on the stability of betalains [J]. Modern Food, 2024, 30(6): 211–213.
- [32] BACCUS-TAYLOR GSH, FREDERICK PDA, AKINGBALA JO. Studies on pomerae (*Syzygium malaccense*) candied fruit slices [J]. Acta Horticulturae, 2009(806): 293–300.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)