

火龙果果皮中天然红色素的微波提取工艺优化及其应用研究

金承皓*, 董欣灵*, 唐智鑫#, 蓝嘉玟, 杜泳

浙江农林大学暨阳学院, 浙江 诸暨

收稿日期: 2025年4月7日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

火龙果果皮中的天然红色素具有多种生物活性和功能, 有望代替人工合成色素应用于食品工业。本文采用微波加热法提取火龙果果皮中的天然红色素, 通过单因素试验, 探究提取剂的浓度、火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比、色素溶液的pH值、微波提取功率、微波提取时间五个因素对色素提取效果的影响。在此基础上, 通过正交优化确定提取火龙果果皮中天然红色素的最佳工艺, 并进一步研究了提取色素的稳定性。研究结果表明: 50%的乙醇浓度、1:40火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比、480 W的微波提取功率、50 s的微波提取时间、5.0的色素溶液pH值为最优提取工艺参数。此时测得色素提取液的平均吸光度为1.791。此外, 适量添加酸味剂和甜味剂对火龙果果皮中天然红色素的稳定性具有积极影响。对添加红色素后的酸奶感官评定结果表明, 适量添加天然红色素可以改善酸奶的感官品质。综上, 本研究开拓了火龙果果皮资源的高值化利用新领域, 并展望了其产业应用前景, 同时为天然色素替代人工合成色素在食品工业中的实践奠定了理论基础。

关键词

微波提取, 火龙果, 稳定性, 酸奶

Research on the Optimization of Microwave Extraction Process of Natural Red Pigment from Pitaya Peel and Its Application

Chenghao Jin*, Xinling Dong*, Zhixin Tang#, Jiawen Lan, Yong Du

Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji Zhejiang

*共同第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 金承皓, 董欣灵, 唐智鑫, 蓝嘉玟, 杜泳. 火龙果果皮中天然红色素的微波提取工艺优化及其应用研究[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 371-383. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143042

Abstract

The natural red pigment in the peel of pitaya fruits possesses various biological activities and functions, and it is expected to replace synthetic pigments and be applied in the food industry. This paper extracted the natural red pigment from the pitaya peel by microwave heating. Through single-factor experiments, the effects of five factors, namely the concentration of the extraction agent, the ratio of pitaya outer skin powder to ethanol, the pH value of the pigment solution, the microwave extraction power, and the microwave extraction time, on the pigment extraction effect were studied. On this basis, the optimal extraction process of the natural red pigment from pitaya peel was determined by orthogonal optimization, and the stability of the extracted pigment was investigated. The research results showed that the optimal extraction process parameters were 50% ethanol concentration, 1:40 ratio of pitaya outer skin powder to ethanol, 480 W microwave extraction power, 50 s microwave extraction time, and 5.0 pH value of the pigment solution. At this time, the average absorbance value of the pigment extraction solution was 1.791. In addition, the addition of acid and sweeteners in appropriate amounts had a certain impact on the stability of the natural red pigment in pitaya peel. The sensory evaluation results of yogurt after adding red pigment showed that the addition of natural red pigment in appropriate amounts can improve the sensory quality of yogurt. In summary, this study has opened up a new field for the high-value utilization of pitaya peel resources and has a prospect for its industrial application. At the same time, it has laid a theoretical foundation for the practice of replacing synthetic pigments with natural pigments in the food industry.

Keywords

Microwave Extraction, Pitaya, Stability, Yogurt

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

火龙果(*Hylocereus undatus*), 又称红龙果, 属于仙人掌科的热带亚热带水果, 具有丰富的食用价值[1]-[3], 在中国广西、广东、海南、福建等地区广泛种植[3]。此外, 火龙果的果皮也极具营养价值, 琥珀酸、苹果酸、柠檬酸等的含量比果肉高, 多酚类物质含量比果肉高出 10 倍以上[4], 火龙果果皮呈玫瑰红或紫红色[5], 其色素的色泽主要来源于天然红色素[6]。火龙果皮中包含甜菜红素和花青素, 其中甜菜红素具有抗氧化、抗炎症、预防和辅助性治疗糖尿病等功能[7], 可以作为天然着色剂应用于食品中。然而, 目前对于火龙果的果皮利用程度仍然较低[8], 使得这种具有广阔开发前景的食品原材料未被充分利用。

目前研究人员不断对火龙果中的甜菜红素和花青素的应用和提取工艺进行研究, 多集中在工艺优化等方面, 如对提取火龙果中天然红色素的工艺优化等[9]。研究表明, 火龙果皮色素提取方法主要有溶剂提取法、超声波提取法、微波提取法、超临界 CO₂ 提取法以及酶辅助提取法这五种[10]。周俊良等[11]优化了溶剂提取法提取火龙果果皮红色素的最优工艺为乙醇浓度 40%、pH = 4、提取温度为 30℃、料液比为 1:8, 振荡 30 min。溶剂提取法具有操作简单、提取设备要求低、安全稳定的特点, 但通常在提取前需要较长的处理时间且提取率低, 因此, 为提高色素的提取效率, 更高效的提取技术已逐渐被开发

和应用。其中微波提取法具有提取时间短、提取成本低、提取率高、选择性强等优点[11]。例如, 郝抗园[12]通过正交试验对微波辅助提取火龙果果皮红色素的 4 个提取因素进行优化, 最终得出最优工艺参数分别为料液比 1:40, 提取时间 80 s, 乙醇体积分数 40%, 微波功率 300 W。

酸奶是一种由鲜牛乳经过高温灭菌处理后通过乳酸菌发酵制成的一种发酵型乳制品[13], 拥有丰富的营养价值和功能特性, 是人们日常生活和饮食中十分重要的营养型食品[14]。近年来, 随着时代的发展以及人们生活水平的提高, 消费者已不再满足于传统酸奶, 更期望于选择其他具有独特风味或者营养价值的酸奶。因此, 天然色素作为极具潜力的食品材料, 其在酸奶新品类研发中的潜力尚未得到挖掘。将火龙果果皮中的红色素作为天然食品着色剂应用于酸奶中有望具有广阔的研究前景。综上所述, 本研究采用单因素试验和正交试验设计首先对高效提取火龙果皮中天然红色素的最佳工艺进行了探究。通过调节提取剂浓度、火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比、色素溶液的 pH 值、微波提取功率、微波提取时间五个因素, 优化红色素的提取工艺并验证优化效果。同时, 探索酸味剂和甜味剂对火龙果果皮中天然红色素稳定性的影响, 并通过感官评价探索火龙果果皮红色素作为酸奶中食品着色剂的可行性, 为推动天然色素在酸奶中的应用提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料与仪器

红皮白心火龙果(越南孟俊进出口食品有限公司), 火龙果大小、体形、体色均一旦正常。酸奶粉(青岛凯麦森食品科技有限公司), 一杯优酪酸奶(内蒙古伊利实业集团有限公司), 纯牛奶(内蒙古伊利实业集团股份有限公司), 葡萄糖(汕头市乐万家食品工业有限公司), 白砂糖(安徽田汁坊食品有限公司), 以上材料均购于当地市场。

95%乙醇, 一水柠檬酸(国药集团化学试剂有限公司), 柠檬酸钠(天津市北辰方正试剂厂), L-苹果酸(河南万胜食品科技有限公司)等化学试剂均为分析级。

台式电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂), 电子分析天平(上海舍岩仪器有限公司), 微波炉(格兰仕微波炉电器有限公司), TD5G 台式低速离心机(湖南湘仪试验室仪器开发有限公司), 紫外分光光度计(尤尼柯(上海)仪器有限公司), 研磨机(永康市昂黎工贸有限公司), PHS-3C 型 pH 计(上海晶磁仪器有限公司)。

2.2. 试验方法

2.2.1. 火龙果果皮红色素提取流程

选择同一批次的新鲜火龙果, 将火龙果果皮保留, 去除果肉、绿叶, 除去的果肉冷藏备用, 将火龙果果皮用清水清洗干净, 去除果皮中的残余果肉并沥干, 置于鼓风干燥箱中于 60℃ 温度下干燥 15 h。将火龙果果皮从干燥箱中取出后冷却至室温, 使用研磨机将火龙果干果皮研磨并粉碎至粉末, 装入保鲜袋中密封备用。准确称取 0.5 g 的火龙果果皮干粉置于容量为 200 mL 锥形瓶中, 以乙醇作为提取剂提取火龙果果皮粉末中的红色素。通过柠檬酸和柠檬酸钠调节色素溶液的 pH 值、用微波炉以不同功率的微波和加热时间加热提取, 调节离心机转速为 5000 r·min⁻¹、离心时间 5 min, 得到色素提取液, 吸取上清液并测定 540 nm 处的吸光度, 每组试验均做三组平行试验, 以平均吸光度评价红色素的提取率[15]。

2.2.2. 添加天然红色素的酸奶制作流程

色素提取液以单因素试验结果所得出的最优工艺方式提取, 参考 GB 2760-2024《食品添加剂使用标准》中的甜菜红色素最大添加量和天然苋菜红色素最大添加量。取 2 mL 火龙果果皮红色素的提取液置于 50 mL 容量瓶中, 蒸馏水稀释红色素提取液并定容至 22 mL, 移取 5 mL 加入到 500 mL 全脂鲜牛乳中,

加入适量的酸奶粉, 在酸奶机中进行第一次发酵, 第一次发酵时间为 15 h; 发酵完毕后取少量半成品酸奶作为菌种, 以 10:1 加入全脂鲜牛奶于酸奶机中进行第二次发酵, 此次发酵时间为 10 h, 即可得到成品酸奶。

2.2.3. 单因素试验

以火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比、微波提取的功率、微波提取的时间、提取剂乙醇的浓度、色素溶液的 pH 值五个影响因素为自变量, 并针对每个变量分别设置 8 个不同的因素水平(见表 1) [16]。

Table 1. Single-factor experiment
表 1. 单因素试验表

试验号	试验因素				
	料液比(g/mL)	乙醇浓度(%)	微波功率(W)	提取时间(s)	pH 值
1	1:10	20	80	10	2
2	1:15	30	160	20	3
3	1:25	35	240	25	4
4	1:30	40	320	30	5
5	1:40	45	400	40	6
6	1:50	50	480	45	7
7	1:55	65	560	50	8
8	1:60	70	640	60	9

(1) 提取剂乙醇的浓度对火龙果皮红色素提取率的影响

分别称取 0.5 g 火龙果外皮粉末于 200 mL 锥形瓶中, 以 8 组不同浓度的乙醇(即 20%、30%、35%、40%、45%、50%、65%、70%)为变量, 固定火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比为 1:40 g/mL、色素溶液的 pH 值为 6.0、微波提取的功率为 320 W、微波提取的时间为 40 s, 采用微波提取法提取火龙果皮中的天然红色素。待色素溶液冷却后离心, 调节离心机的转速为 5000 r/min、离心时间为 5 min, 得到色素溶液的提取液。取色素提取液的上清液测定 540 nm 处的吸光度并绘制折线图, 根据折线图曲线变化, 选择最佳乙醇浓度。

(2) 料液比对火龙果皮红色素提取率的影响

分别称取 0.5 g 火龙果外皮粉末于 200 mL 的锥形瓶中, 以 8 组不同的火龙果外皮粉末和乙醇料液配比(即 1:10、1:15、1:25、1:30、1:40、1:50、1:55、1:60 g/mL)为变量, 固定提取剂乙醇浓度为 50%、色素溶液的 pH 值为 6.0、微波提取的功率为 320 W、微波提取的时间为 40 s, 采用微波提取法提取火龙果皮中的天然红色素, 待色素溶液冷却后离心, 调节离心机的转速为 5000 r/min、离心时间为 5 min, 得到色素溶液的提取液。取色素提取液的上清液测定 540 nm 处的吸光度并绘制折线图, 根据折线图曲线变化, 选择最佳的火龙果果皮粉末和乙醇料液配比。

(3) 色素溶液的 pH 值对火龙果皮红色素提取率的影响

分别称取 0.5 g 火龙果外皮粉末于 200 mL 锥形瓶中, 以 8 组不同的色素溶液 pH 值(即 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0)为变量, 固定火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比为 1:40 g/mL、提取剂乙醇浓度为 50%、微波提取的功率为 320 W、微波提取的时间为 40 s, 采用微波提取法提取火龙果皮中的天然红色素, 待色素溶液冷却后离心, 调节离心机的转速为 5000 r/min、离心时间为 5 min, 得到色素溶液的提取液。取色素提取液的上清液测定 540 nm 处的吸光度并绘制折线图, 根据折线图曲线变化, 选择最佳的

色素溶液 pH 值。

(4) 微波提取功率对火龙果皮红色素提取率的影响

分别称取 0.5 g 火龙果外皮粉末于 200 mL 锥形瓶中, 以 8 组不同的微波提取功率(即 80、160、240、320、400、480、560、640 W)为变量, 固定火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比为 1:40 g/mL、提取剂乙醇浓度为 50%、色素溶液的 pH 值为 6.0、微波提取的时间为 40 s 的条件下, 采用微波提取法提取火龙果皮中的天然红色素, 待色素溶液冷却后离心, 调节离心机的转速为 5000 r/min、离心时间为 5 min, 得到色素溶液的提取液。取色素提取液的上清液测定 540 nm 处的吸光度。根据吸光度变化趋势, 选择最佳的微波提取功率。

(5) 微波时间对火龙果皮红色素提取率的影响

分别称取 0.5 g 火龙果外皮粉末于 200 mL 锥形瓶中, 以 8 组不同的微波提取时间(10、20、25、30、40、45、50、60 s)为变量, 固定提取剂乙醇浓度为 50%、火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比为 1:40 g/mL、色素溶液的 pH 值为 6.0、微波提取的功率为 320 W, 采用微波提取法提取火龙果皮中的天然红色素, 待色素溶液冷却后离心, 调节离心机的转速为 5000 r/min、离心时间为 5 min, 得到色素溶液的提取液。取色素提取液的上清液测定 540 nm 处的吸光度。根据吸光度变化趋势, 选择最佳的微波提取时间。

2.2.4. 正交试验

采用单因素试验设计以乙醇浓度、火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比、色素溶液的 pH 值、微波提取功率、微波提取时间五个变量确定最佳因素水平, 通过单因素试验得出的变量中各因素的水平范围, 以色素提取液平均吸光度为评价指标, 在单因素试验结果的基础上设计 L16(4⁵)正交试验, 具体因素水平见表 2。

Table 2. Factor-level table of L16(4⁵) orthogonal experiment
表 2. L16(4⁵)正交试验因素水平表

水平	因素				
	乙醇浓度%	料液比(g/mL)	pH 值	微波功率/W	微波时间/s
1	45	1:30	5	400	45
2	50	1:40	6	480	50
3	65	1:50	7	560	60
4	70	1:55	8	640	70

2.2.5. 酸味剂对色素稳定性的影响

准确量取火龙果果皮红色素的提取液 1 mL, 置于四支容量一致的干净试管中, 加入 3 mL 蒸馏水稀释, 标号为 1, 2, 3, 4。分别加入体积比为 4%、6%、8%、10%的柠檬酸和苹果酸, 保鲜膜包封。在常温条件下置于阴凉处放置 15 h, 以防止光照对色素的影响。对该色素溶液进行平行试验并在 540 nm 波长下测定色素的吸光度[11]。

2.2.6. 甜味剂对色素稳定性的影响

准确量取火龙果果皮红色素的提取液 1 mL, 置于四支容量一致的干净的试管中, 加入 3 mL 蒸馏水稀释, 标号为 1, 2, 3, 4。分别加入体积比为 4%、6%、8%、10%的蔗糖和葡萄糖, 保鲜膜包封。在常温条件下置于阴凉处放置 15 h, 以防止光照对色素的影响。对该色素溶液进行平行试验并在 540 nm 波长下测定色素的吸光度[15]。

2.2.7. 酸奶的感官评定

Table 3. Sensory evaluation criteria of yogurt after pigment addition

表 3. 添加色素后的酸奶感官评定标准

	好(9~7)	较好(6~4)	差(3~0)
色泽	自制酸奶总体呈现乳白色, 含有的淡红色或淡紫色的色素添加物且色泽均匀	自制酸奶总体呈现乳白色, 色泽较均匀	自制酸奶色泽不均匀, 表面有淡绿色霉斑或其他杂质
香气	具有浓郁的酸奶香气	酸奶的香气较淡	无酸奶香气或酸奶具有酸臭气味
滋味	具有一定的酸度, 凝块细腻润滑	具有一定的酸度。凝块较细腻润滑	凝块粗糙, 酸涩感强
组织状态	组织均匀无分层, 酸奶表面无气泡, 凝块硬度较高	组织较均匀, 无分层, 酸奶表面无气泡或仅有少量气泡, 凝块硬度较软	组织不均匀, 有分层, 酸奶表面有大量气泡, 凝块硬度过软

由 5 名评定人员组成评定小组, 评价过程中保证周围环境安静、评定环境的空气清新、感官评定人员身体健康。感官评定人员在评定前需避免接触刺激性物质, 禁止吸烟、食用辛辣食品、咀嚼口香糖等可能会影响感官评定的行为。此次评定以酸奶的色泽、香气、滋味、形态四个因素作为评定标准, 并分别设立三个等级, 见表 3 [17], 计算出总分并分析酸奶的感官品质。

2.3. 数据处理

所有试验均做三次平行试验, 以三次的平均值作为结果, 使用 Origin 2021 (OriginLab, USA) 软件绘制统计图, 使用 SPSS 20.0 软件(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行显著性分析、方差比较等。

3. 结果与分析

3.1. 不同因素对火龙果火龙果皮红色素提取率的影响

3.1.1. 提取剂乙醇的浓度对火龙果皮红色素提取率的影响

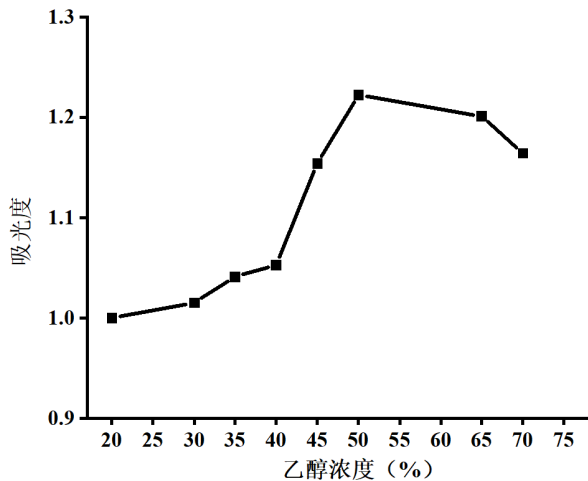


Figure 1. Influence of ethanol concentration in the extracting agent on pigment extraction
图 1. 提取剂乙醇的浓度对色素提取的影响

由图 1 所示, 当乙醇浓度低于 50% 时, 吸光度随着乙醇浓度的增加而升高, 即从最低值 1.000 上升至 1.222。表明乙醇浓度在 50% 时, 提取剂对火龙果果皮中红色素的提取效果最好, 这与卓泽晟等[18]研究得出的结论一致。当乙醇浓度大于 50% 时制得的色素溶液, 离心后色素提取液的吸光度会随乙醇浓度的增加而下降, 此时测得色素提取液的吸光度由最高值 1.222 下降至 1.164。这可能是由于随着乙醇在色素溶液中的占比不断上升, 微波加热提取火龙果果皮红色素使得乙醇更容易挥发, 提取率下降。邱志的研究也呈现了类似趋势[19]。故本试验选取的最佳乙醇浓度为 50%。

3.1.2. 料液比对火龙果皮红色素提取率的影响

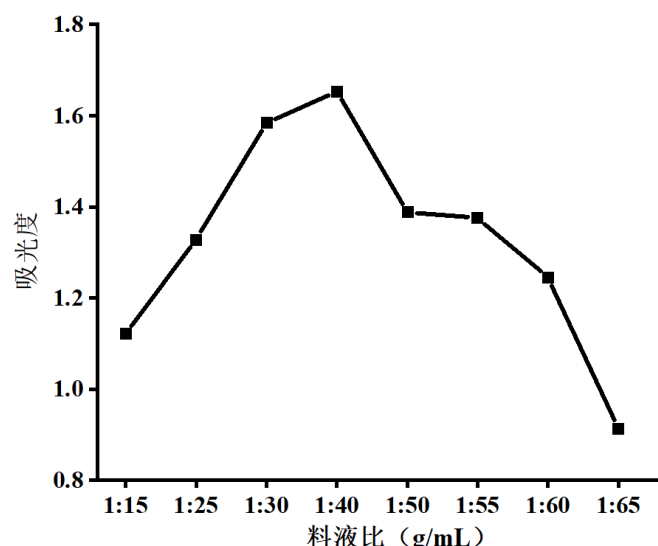


Figure 2. Influence of the material-liquid ratio of pitaya outer skin powder to ethanol on pigment extraction
图 2. 火龙果外皮粉末和乙醇的料液比对色素提取的影响

由图 2 所示, 当火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比在 1:40 以下时, 色素提取液的吸光度随料液比的提高而升高, 即从 1.122 上升至 1.584。可能是由于随着提取剂乙醇的比例不断增加, 对火龙果果皮细胞中的脂类以及其他干扰组分起到破坏作用, 从而促进色素的提取[20]。料液比为 1:40 时, 色素溶液的提取效果最好, 即此时色素提取液的吸光度为最高值 1.653。在火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比低时测得的吸光度较低, 这可能是由于加入溶剂过少, 物料无法完全溶解, 且经过微波处理后溶剂蒸发过度所致[18]。随着料液比进一步增大, 色素提取液的吸光度又逐渐下降, 此时吸光度由最高值 1.653 下降到最低值 0.913。这可能是由于提取剂的增加使得微波加热负荷增大, 使得火龙果果皮组织中的细胞破壁程度不理想, 色素无法完全溶出引起的[21]。故本试验选取的最佳料液比为 1:40。

3.1.3. 色素溶液的 pH 值对火龙果皮红色素提取率的影响

在 pH 值为 2.0~5.0 时, 随着色素溶液 pH 值的提高, 色素提取液的吸光度也随之升高, 见图 3。当色素溶液的 pH 值到达 5.0 时, 火龙果果皮红色素的提取率最高。在酸性条件下测得的色素提取液的吸光度较低, 可能由于酸度过大使红色素的酰基部分水解[22]。当色素溶液由酸性逐步转变为碱性转变时(pH 值从 5.0 上升至 9.0), 吸光度从最高值 1.585 下降到 1.219, 这可能与红色素发生裂解反应有关[23]。因此, 本试验选取的最佳 pH 值为 5.0。同时, 在偏酸环境下(pH 值为 5.0~6.0)测得的色素提取液吸光度比在碱性条件下(pH 值大于 7)测得的吸光度高, 故在偏酸环境下更有利于红色素的稳定, 因此该色素可用于低酸性食品的着色[16]。

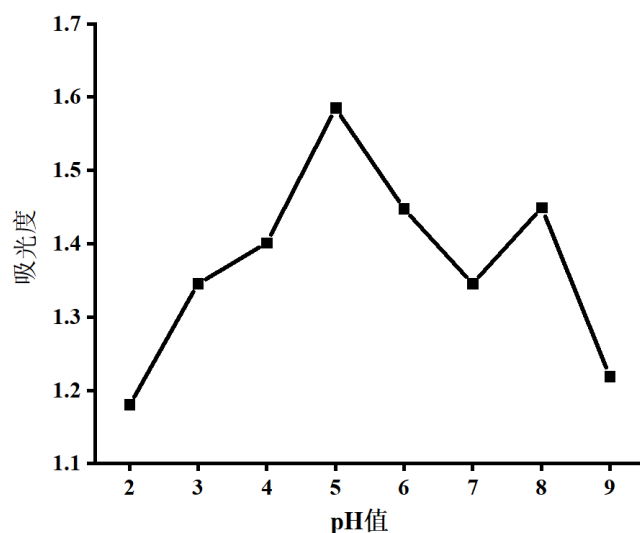


Figure 3. Influence of pH value on pigment extraction

图 3. pH 值对色素提取的影响

3.1.4. 微波提取功率对火龙果皮红色素提取率的影响

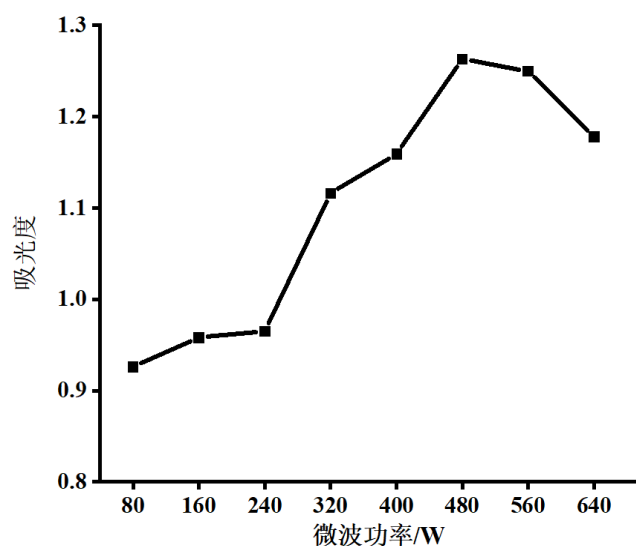


Figure 4. Influence of microwave extraction power on pigment extraction

图 4. 微波提取功率对色素提取的影响

如图 4 所示, 以低于 480 W 的微波功率提取色素时, 随着微波功率的增加, 吸光度增加。在 480 W 的微波功率条件下, 吸光度达到最高值 1.263。微波功率增大至 480 W 以上后, 吸光度从最高值 1.263 降至 1.178。研究表明, 增大微波功率使火龙果皮中红色素的分子结构受到破坏[24], 但是微波功率过高也会导致乙醇挥发, 从而降低提取红色素的效率[25]。故本试验将 480 W 作为微波提取的最佳功率。

3.1.5. 微波提取时间对火龙果皮红色素提取率的影响

由图 5 可得, 微波提取时间为 20 s~50 s 时, 色素溶液的提取率随微波加热时间的延长而增加, 吸光度从 0.341 上升至最高值 1.193。长时间(大于 50 s)加热色素溶液, 吸光度随着微波加热时间的增加反而

下降。邱志的研究表明微波加热时间过长使体系内的温度过高, 从而对火龙果果皮中的热敏性色素产生降解和破坏作用[26], 从而使得色素溶液的吸光度下降。故本试验将 50 s 作为微波提取的最佳时间。

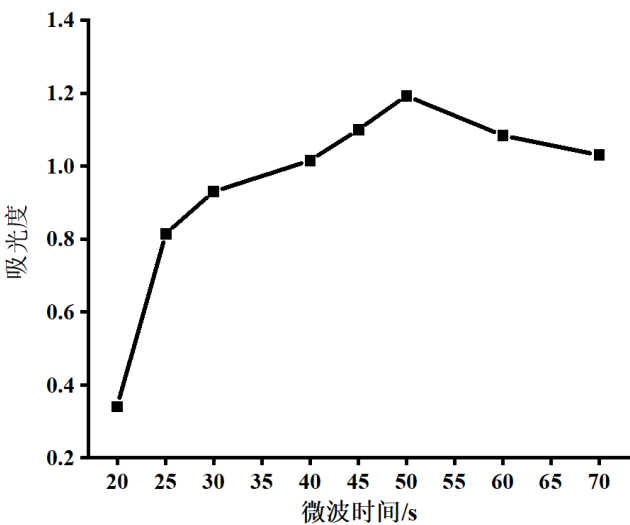


Figure 5. Influence of microwave extraction time on pigment extraction
图 5. 微波提取时间对色素提取的影响

3.2. 正交试验

由表 4 所示, 在单因素试验的基础上选择提取剂乙醇的浓度(A)、火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比(B)、色素溶液的 pH 值(C)、微波提取的功率(D)、微波提取的时间(E)5 个因素, 选择 L16(4⁵)因素水平进行正交试验。影响火龙果果皮中天然红色素提取效果的因素由主及次依次为料液比 > 色素溶液的 pH 值 > 微波提取时间 > 微波提取功率 > 提取剂乙醇的浓度, 即料液比对比对火龙果果皮中的红色素提取效果影响最大, 其次是色素溶液 pH 值、微波时间和微波功率, 提取剂乙醇的浓度对火龙果果皮中的红色素提取效果影响相对较小。最佳提取工艺组合为 A2B2C1D2E2, 这表明乙醇浓度 50%、料液比配比 1:40、pH 值 5.0、微波功率 480 W、微波时间 50 s 的组合条件下, 对火龙果果皮中天然红色素的提取效果最佳。

Table 4. The results of the orthogonal test
表 4. 正交试验结果

试验号	A 乙醇浓度%	B 料液比	C pH 值	D 微波功率/W	E 微波时间/s	吸光度
1	1 (45)	1 (1:30)	1	1 (400)	1 (45)	1.316
2	1	2 (1:40)	2	2 (480)	2 (50)	1.342
3	1	3 (1:50)	3	3 (560)	3 (60)	1.244
4	1	4 (1:55)	4	4 (640)	4 (70)	1.237
5	2 (50)	1	2	3	4	1.307
6	2	2	1	4	3	1.344
7	2	3	4	1	2	1.288
8	2	4	3	2	1	1.261
9	3 (65)	1	3	4	2	1.300
10	3	2	4	3	1	1.331

续表

11	3	3	1	2	4	1.293
12	3	4	2	1	3	1.253
13	4 (70)	1	4	2	3	1.309
14	4	2	3	1	4	1.270
15	4	3	2	4	1	1.266
16	4	4	1	3	2	1.319
K1	5.140	5.232	5.274	5.128	5.174	
K2	5.201	5.287	5.163	5.205	5.250	
K3	5.178	5.092	5.076	5.201	5.151	
K4	5.165	5.071	5.165	5.148	5.108	
k1	1.285	1.308	1.318	1.282	1.294	
k2	1.300	1.322	1.292	1.301	1.313	
k3	1.294	1.273	1.269	1.300	1.288	
k4	1.291	1.268	1.291	1.287	1.277	
R	0.015	0.054	0.049	0.019	0.036	
优水平	A2	B2	C1	D2	E2	
主次顺序	B > C > E > D > A					

3.3. 验证试验

取同批次烘干制得的火龙果果皮粉末 3 份, 在最优条件组合即提取剂乙醇的浓度为 50%、火龙果外皮粉末和乙醇的料液配比为 1:40、色素溶液的 pH 值为 5.0、微波提取功率为 480 W、微波加热时间为 50 s 下, 测得色素提取液的平均吸光度为 1.791, 均大于正交试验设计中所有因素组合的吸光度, 说明优化试验切实有效。

3.4. 火龙果色素稳定性测定

3.4.1. 酸味剂对色素稳定性的影响

之前的研究表明, 天然色素食用安全, 色调自然, 但对光照、热处理、酸性物质等十分敏感。柠檬酸, 苹果酸是食品生产加工过程中常用的食品添加剂, 因此可能会对火龙果果皮中天然红色素造成一定的影响[16]。

由图 6 可见, 随着酸味剂在色素溶液中的浓度增加, 两种酸味剂(柠檬酸和苹果酸)都会使红色素的吸光度显著下降。添加苹果酸的色素溶液吸光度从 1.406 降到 1.093, 添加柠檬酸的色素溶液吸光度从 1.352 降到 1.106。当柠檬酸和苹果酸的浓度为 6%时, 添加苹果酸的色素溶液吸光度高于柠檬酸, 说明此时火龙果果皮红色素的稳定性受苹果酸的影响更小。不同于酸味剂浓度达到 8%时, 柠檬酸作为酸味剂时测得的吸光度比苹果酸高。因此, 在浓度为 8%时相较于苹果酸, 柠檬酸对提高色素稳定性的效果更显著, 推测适宜浓度的柠檬酸对火龙果果皮红色素具有护色效果[27]。这可能是因为一定浓度的柠檬酸抑制了氧气与红色素结合, 避免了红色素中的花青素被氧化降解[28], 同时, 适宜浓度的柠檬酸能够抑制花青素-β-葡萄糖苷酶(一种糖苷水解酶)的活性, 避免花青素与其糖基端部分被水解分离并防止稳定的花青素糖苷变成游离的花青素苷元, 增加了花青素的稳定性[29]。

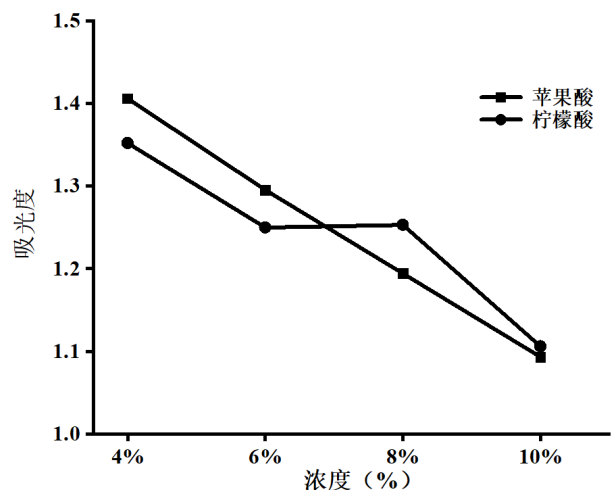


Figure 6. Influence of acidulants on the stability of natural red pigment in pitaya peel
图 6. 酸味剂对火龙果果皮中的天然红色素稳定性的影响

3.4.2. 甜味剂对色素稳定性的影响

蔗糖在食品生产加工过程中常作为甜味剂添加到食品中, 此外还有葡萄糖、果葡糖浆等[16]。我们的研究表明, 蔗糖和葡萄糖对火龙果果皮中天然红色素的稳定性也会造成一定的影响, 见图 7。随着蔗糖和葡萄糖糖液的浓度增加, 色素溶液的吸光度逐渐下降。当葡萄糖和蔗糖的浓度为 6% 时, 添加葡萄糖的色素溶液吸光度为 1.346, 比添加蔗糖的色素溶液的吸光度高 0.059, 说明火龙果果皮红色素对葡萄糖的稳定性更强。但当糖液浓度为 10% 时, 蔗糖作为甜味剂时测得的色素溶液吸光度比葡萄糖高, 即蔗糖对提高色素稳定性的效果更好。有研究显示, 蔗糖水解后的单糖使红色素糖基化增强, 有利于提高红色素的稳定性[30], 同时, 溶液中的单糖还促进了花青素中糖苷键的形成, 增加了红色素的稳定性[28]。

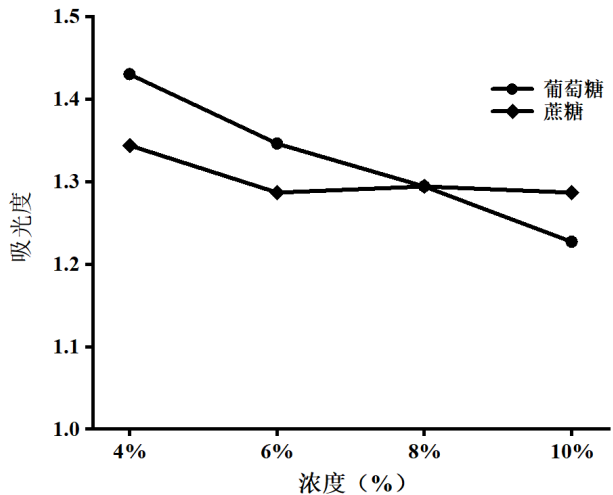


Figure 7. Influence of sweeteners on the stability of betacyanin in pitaya peel
图 7. 甜味剂对火龙果果皮中的甜菜红素稳定性的影响

3.5. 酸奶的感官品质评价

5 位评价员按照先前制定好的评定方法和评定标准, 对添加了火龙果果皮红色素的酸奶进行感官评

定, 结果见表 5。评定人员对于自制酸奶在色泽方面均给出较高的分数, 这表明以天然色素作为食品着色剂时, 添加一定量的着色剂有利于改善酸奶的成色。

Table 5. Sensory evaluation of yogurt with added red pigment
表 5. 添加红色素后的酸奶感官评定表

	色泽	香气	滋味	组织状态
1	9	8	7	9
2	9	8	7	9
3	8	8	8	7
4	9	7	6	7
5	8	9	8	9

4. 结论

本文采用微波提取法优化了火龙果果皮中天然红色素的提取工艺, 确定了最佳提取工艺参数为乙醇浓度 50%、料液比 1:40、色素溶液 pH 值 5.0、微波提取功率 480 W、微波加热提取时间 50 s。该组合条件下测得的色素提取液平均吸光度为 1.791, 经统计学分析证实其色素提取率显著优于其他工艺组合。稳定性研究结果表明, 适宜浓度的甜味剂和酸味剂在一定程度上对火龙果果皮中的天然红色素具有护色效果。即合理调控甜味剂与酸味剂的添加浓度可有效提升色素的稳定性, 这为天然红色素在复杂食品体系中的应用提供了技术支持。进一步感官评价证实, 适量添加该红色素的酸奶制品在色泽、香气、滋味及组织状态等感官指标上均表现优异, 充分验证了火龙果果皮天然红色素在食品加工领域的实际应用价值。综上, 本研究不仅为农业废弃物的高值化利用开辟了新路径, 更为天然色素替代合成色素的产业化应用提供了科学理论依据与实践参考。

基金项目

浙江农林大学暨阳学院大学生创新创业训练计划项目(S202413283074)。

参考文献

- [1] Jalgaonkar, K., Mahawar, M.K., Bibwe, B. and Kannaujia, P. (2020) Postharvest Profile, Processing and Waste Utilization of Dragon Fruit (*Hylocereus* Spp.): A Review. *Food Reviews International*, **38**, 733-759. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1742152>
- [2] 林润婷, 梁家嘉, 莫雨杏, 等. 火龙果果皮红色素抑菌活性及对鲮鱼肉新鲜度的指示效应[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 64-71.
- [3] 邓仁菊, 范建新, 蔡永强. 国内外火龙果研究进展及产业发展现状[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 188-192.
- [4] 王蔚婕, 唐道邦, 曹清明, 等. 火龙果的营养价值及加工现状[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(4): 27-30.
- [5] 黄凤珠, 陆贵锋, 韦蒴瞳, 等. 基于田间表型性状的火龙果优异种质资源评价研究[J]. 中国南方果树, 2024, 53(3): 118-123.
- [6] Roriz, C.L., Heleno, S.A., Alves, M.J., Oliveira, M.B.P.P., Pinela, J., Dias, M.I., *et al.* (2022) Red Pitaya (*Hylocereus costaricensis*) Peel as a Source of Valuable Molecules: Extraction Optimization to Recover Natural Colouring Agents. *Food Chemistry*, **372**, Article ID: 131344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131344>
- [7] 王萌璇, 熊建文, 和丽媛, 等. 火龙果红色素研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2016, 41(6): 65-68.
- [8] Roriz, C.L., Heleno, S.A., Alves, M.J., Oliveira, M.B.P.P., Pinela, J., Dias, M.I., *et al.* (2022) Red Pitaya (*Hylocereus costaricensis*) Peel as a Source of Valuable Molecules: Extraction Optimization to Recover Natural Colouring Agents. *Food Chemistry*, **372**, Article ID: 131344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131344>
- [9] 胡元庆, 王建荟, 李凤霞. 微波辅助法提取火龙果果皮色素及其功能活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23):

182-188+202.

- [10] 蒋边. 火龙果色素研究进展[J]. 食品工程, 2015(4): 6-10.
- [11] 周俊良, 沈佳奇, 韩秀梅, 等. 提取火龙果果皮红色素主要工艺的比较研究[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(1): 110-114.
- [12] 郝抗园, 买申申, 郝文, 等. 微波辅助提取火龙果果皮色素及其稳定性的研究[J]. 农产品加工, 2024(1): 13-15.
- [13] 刘绪, 李欣怡, 刁英, 等. 凝固型大樱桃酸奶的工艺探究及其品质分析[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(4): 95-99+128.
- [14] 来庆华, 王晓琳, 王朝瑾, 等. 水果果皮的加工利用现状及研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3): 876-881.
- [15] 刘冰. 火龙果果皮甜菜红素提取及抗氧化保护作用研究[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 锦州医科大学, 2018.
- [16] 张兆英, 韩婧, 宋丽丽, 等. 微波辅助提取火龙果果皮红色素及其稳定性的研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 168-172.
- [17] 李超敏, 李林珂, 郭明月. 营养保健型沙棘酸奶的研制及感官评定研究[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(3): 27-29.
- [18] 卓泽晟, 曾健, 蔡真珍, 等. 微波辅助提取废弃火龙果果皮红色素的工艺[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2023, 35(2): 187-192.
- [19] 邱志. 洋甘菊总黄酮的提取、分离及其护肤功效研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [20] 余莉莉. 火龙果果皮红色素提取、纯化、稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西农业大学, 2012.
- [21] 刘佳, 周亚梅, 张潇丹, 等. 响应面法优化牛膝多糖的微波法提取工艺研究[J]. 农产品加工, 2023(14): 27-31+38.
- [22] 方进, 赵星, 张广知. 火龙果色素提取及蚕丝织物上染性能[J]. 上海纺织科技, 2023, 51(4): 52-55.
- [23] 李玲, 郭丽萍. 超声辅助提取火龙果果皮花色苷及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 298-303+323.
- [24] 张园园, 刘畅, 周枫, 等. 柚子绿茶风味低糖酸奶的研制[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(6): 220-226.
- [25] 张莉, 李勇, 赵建勇, 等. 微波辅助提取红花黄色素工艺的优化[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(22): 7386-7388.
- [26] 赵文红, 梁彬霞, 白卫东, 等. 火龙果果皮色素的研究进展[J]. 中国调味品, 2012, 37(8): 111-115.
- [27] 徐馨, 李霞, 丁金龙. 食品添加剂对火龙果皮红色素稳定性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2018(4): 141-147.
- [28] Farr, J.E., Sigurdson, G.T. and Giusti, M.M. (2018) Influence of Cyanidin Glycosylation Patterns on Carboxypyrananthocyanin Formation. *Food Chemistry*, **259**, 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.117>
- [29] Jurić, S., Jurić, M., Król-Kilińska, Ž., Vlahoviček-Kahlina, K., Vinceković, M., Dragović-Uzelac, V., et al. (2020) Sources, Stability, Encapsulation and Application of Natural Pigments in Foods. *Food Reviews International*, **38**, 1735-1790. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1837862>
- [30] 付世涛, 张剑鸣, 曹灿灿, 等. 紫甘蓝色素稳定性研究[J]. 大学化学, 2024, 39(4): 367-372.