

高雪丽, 顾欠欠, 李光辉, 等. 响应面法优化红薯叶凉粉的配方及工艺 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 276–282. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110222

GAO Xueli, GU Qianqian, LI Guanghui, et al. Optimization of the Formulation and Process of Sweet Potato Leaf Jelly by Response Surface Methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 276–282. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110222

· 工艺技术 ·

响应面法优化红薯叶凉粉的配方及工艺

高雪丽¹, 顾欠欠¹, 李光辉¹, 王永辉¹, 何胜华¹, 黄继红^{1,2}, 郭卫芸^{1,*}

(1. 许昌学院食品与药学院, 河南许昌 461000;

2. 河南大学农学院, 河南郑州 450000)

摘要: 为研究红薯叶提取液对凉粉产品综合品质的影响, 本文以红薯叶及红薯淀粉为主要原料, 考察碳酸钠添加量、白砂糖添加量、红薯叶提取液添加量、红薯淀粉添加量、蒸制时间等因素对红薯叶凉粉感官品质和质构特性的影响, 在此基础上, 以弹性为响应值做响应面优化试验, 确定红薯叶凉粉的最优配方及工艺参数。结果表明, 采用浓度为 0.20 g/100 mL 的碳酸钠溶液制备红薯叶提取液效果较为理想。红薯叶凉粉最佳配方为: 红薯叶提取液 40 mL/100 g、白砂糖 1 g/100 g、红薯淀粉 19 g/100 g、纯净水 40 mL/100 g。原料经充分混合并蒸制处理 8 min, 再经冷却制得的红薯叶凉粉色泽翠绿, 质地均匀, 具有红薯叶特有香气, 经验证弹性为 6.19。本研究为进一步拓展红薯叶应用范围, 提升红薯产业综合附加值提供了技术支持。

关键词: 红薯叶, 凉粉, 配方, 工艺, 响应面

中图分类号: TS201.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)18-0276-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110222



本文网刊:

Optimization of the Formulation and Process of Sweet Potato Leaf Jelly by Response Surface Methodology

GAO Xueli¹, GU Qianqian¹, LI Guanghui¹, WANG Yonghui¹, HE Shenghua¹,
HUANG Jihong^{1,2}, GUO Weiyun^{1,*}

(1. Food and Pharmacy College, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. College of Agriculture, Henan University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To research the effect of sweet potato leaf extract on the comprehensive quality of starch jelly, this study investigated the impact of several factors, including sodium carbonate, white granulated sugar, sweet potato leaf extract, sweet potato starch, and steaming time, on the sensory quality and texture characteristics of sweet potato leaf jelly, which was made using sweet potato leaf and sweet potato starch as the main ingredients. Response surface optimization experiments were conducted, using elasticity as the response value, to determine the optimal formula and process parameters for sweet potato leaf jelly. The optimal formula for sweet potato leaf jelly was: Sweet potato leaf extract 40 mL/100 g, white granulated sugar 1 g/100 g, sweet potato starch 19 g/100 g, purified water 40 mL/100 g. The raw materials were thoroughly mixed and steamed for 8 minutes, and then cooled. The resulting product had a green color, uniform texture, and a unique sweet potato leaf aroma, and the elasticity was verified to be 6.19. This study would provide a technical support for expanding the application of sweet potato leaf and improving the comprehensive value of the sweet potato industry.

Key words: sweet potato leaf; starch jelly; formula; process; response surface

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 河南省重大科技专项 (201300110300); 河南省高等学校重点科研项目 (22B550017); 河南省高等学校骨干教师项目 (2019GGJS216, 2020GGJS206)。

作者简介: 高雪丽 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品研究及评价, E-mail: gaoxueli83@yeah.net。

* 通信作者: 郭卫芸 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工及食品检测, E-mail: gwy2002@126.com。

红薯叶是红薯秧茎顶端的叶部分,亚洲蔬菜研究中心将其列为高营养的蔬菜品种^[1-2]。有研究表明,红薯叶中含有多糖、黄酮、水溶性膳食纤维、多酚和蛋白复合物等,具有一定保健功效^[3-5],尤其对因长期食用淀粉类产品而导致的血糖升高现象具有良好的抑制效果^[6]。凉粉是一种以淀粉为主要原料,如绿豆淀粉、红薯淀粉、土豆淀粉等,经蒸煮、冷却等工艺制成的凝胶状产品,广受中国、韩国等众多亚洲消费者的喜爱^[7]。

当前,对红薯叶提取物的研究主要体现在以下几个方面:首先是通过干扰细胞凋亡有效抑制直肠癌、宫颈癌的发生,如 Taira 等^[8]发现红薯叶提取物能够抑制细胞凋亡 β -连环蛋白/Tcf-4 信号传导,具有预防结直肠癌作用, Vishnu 等^[9]发现其中含有的叶花青素对宫颈癌细胞和乳腺癌细胞的抑制作用明显;其次对红薯叶中功效成分的提取研究,如刘捷等^[10]研究红薯叶多糖的分离纯化,通过正丁醇-三氯乙酸去除蛋白、透析法去除小分子杂质后,分离得到了精制的红薯叶多糖;最后是创新产品制备^[11-13]及人工修饰等对红薯叶有效成分含量及功能的影响等相关研究^[14-15]。对凉粉的研究主要体现在工艺、风味、质构等方面,如采用多糖、变形淀粉等提高凉粉弹性和粘性^[16-17],如王永志等^[16]利用凉粉草与卡拉胶复配的方法制作凉粉,所制得的凉粉具有较好的弹性和粘性。另外也有通过添加臭黄荆叶、胖大海、凉粉草等提升改善其风味、质构和功效品质的相关研究^[18-19],如陈湘霞^[19]利用响应面法得到臭黄荆叶凉粉最佳制备配方,即料液比 15:1、碳酸钠浓度 30 mmol/L、卡拉胶:魔芋胶比值为 1.6:1,此时凝胶稳定;胡海娥^[18]以胖大海、凉粉草为原料制作的胖大海凉粉,最佳配方为加糖量 10%、卡拉胶用量 0.50%、柠檬酸钾添加量 0.10%、柠檬酸添加量 0.015%,所制备凉粉具有良好的风味。

为了研发出具有新型风味和质地的凉粉产品,本研究拟通过添加红薯叶提取液以改善凉粉的香气和口感,强化其凝胶弹性和咀嚼性,改善其营养品质,从而为红薯叶的应用拓展及红薯淀粉类休闲食品的开发提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红薯鲜叶 福薯 18,福建绿林农牧业;精制红薯淀粉 二级品,山东圣琪生物有限公司;碳酸钠 食品级,河北兆发食品有限公司。

TMS-PRO 质构仪 美国 FTC 公司;LT3002E 电子天平 常熟市天量仪器有限责任公司;DK-8D 电热恒温水浴锅 常州普天仪器制造有限公司;BCD-301DHN 冰箱 上海双鹿上菱企业集团有限公司;C21-WT2104A 多功能电磁炉 广州美的生活电器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 红薯叶凉粉制备及操作要点

1.2.1.1 红薯叶提取液的制备 挑选经去柄,洗净,沥干水分后的新鲜红薯叶,称取 40 g,加入浓度为 0.20 g/100 mL 碳酸钠溶液(0.20 g 碳酸钠充分溶于 100 mL 纯净水中制得)100 mL,置于提取容器中,90 ℃ 水浴锅中提取 1 h,期间不断地翻动,热提结束后,趁热将其倒入纱布,经揉搓后过滤得到红薯叶提取液^[18]。

1.2.1.2 红薯叶凉粉的制备 将红薯叶提取液、红薯淀粉、纯净水与白砂糖按照一定的添加量进行配制,并置于容器中混匀,静置 20 min,以便红薯淀粉充分溶胀;将静置后的淀粉再次搅拌,将得到的匀浆倒入容器并置于蒸锅进行蒸制,期间不断搅动至淀粉完全糊化;最后,将成品倒入模具,放置冰箱冷藏、定型^[18-19]。

1.2.2 单因素实验 碳酸钠溶液浓度的确定:各称取红薯叶 40 g,分别加入 100 mL 浓度为 0.00、0.10、0.20、0.30、0.40 g/100 mL 的碳酸钠溶液,充分振荡后提取得到红薯叶提取液,再量取提取液 40 mL、纯净水 41 mL,加入白砂糖 1 g、红薯淀粉 18 g,蒸制 6 min,冷却得到红薯叶凉粉后分别进行质构和感官评定确定合适的碳酸钠溶液浓度。

白砂糖添加比例的确定:量取红薯叶提取液 40 mL/100 g,加入红薯淀粉 18 g/100 g、加入白砂糖比例分别为 0、1、2、3、4 g/100 g(以最终产品总质量计),用纯净水补足至总质量 100 g,蒸制 6 min,冷却得到红薯叶凉粉后分别进行质构和感官评定,确定白砂糖合适的添加量。

红薯叶提取液添加量的确定:分别量取红薯叶提取液 25、30、35、40、45 mL/100 g,用纯净水补足至总质量 100 g,加入白砂糖 1 g/100 g、红薯淀粉 18 g/100 g,蒸制时间 6 min,冷却得到红薯叶凉粉后分别进行质构和感官评定,确定红薯叶提取液合适的添加量。

红薯淀粉添加量的确定:量取红薯叶提取液 40 mL/100 g,以白砂糖添加量 1 g/100 g、选择红薯淀粉比例分别为 14、16、18、20、22 g/100 g,用纯净水补足总质量至 100 g,蒸制时间 6 min,冷却得到红薯叶凉粉后分别进行质构和感官评定,确定合适的红薯淀粉添加量。

蒸制时间的确定:称取红薯淀粉 18 g/100 g、白砂糖 1 g/100 g、红薯叶提取液 40 mL/100 g、用纯净水补足总质量至 100 g,选择蒸制时间为 4、6、8、10、12 min 进行单因素实验,通过检测质构指标与感官评定,确定合适的蒸制时间。

1.2.3 响应面优化试验 在单因素实验的基础上,选取对红薯叶凉粉品质具有较大影响的因素,采用 Box-Behnken Design 试验设计原理设计实验,因素的水平取值范围:A 红薯叶提取液的添加量为 35、

40、45 mL/100 g, B 红薯淀粉添加量为 16、18、20 g/100 g, C 蒸制时间 6、8、10 min, 以弹性为响应值进行综合对比分析, 实验因素的编码见表 1。

表 1 响应面试验因素水平设计
Table 1 Factor and level code of response surface test

水平	因素		
	A红薯叶提取液 (mL/100 g)	B红薯淀粉 (g/100 g)	C蒸制时间 (min)
-1	35	16	6
0	40	18	8
1	45	20	10

1.2.4 评价指标

1.2.4.1 质构特性 参考王锦云等^[20]质构分析方法并进行适当修改, 确定红薯叶凉粉的质构特性分析方法: 首先, 将样品在冰箱内储存 15 h 后取出, 静置至室温; 其次, 采用质构仪, 测定模式 TPA, 探头型号为 P/50, 测定条件如下: 样品长 25 mm, 宽 23 mm, 高 23 mm, 测试速度 1.00 mm/s, 返回速度 1.00 mm/s, 循环次数 2 次; 起始力 0.50 N, 穿刺深度为 30%, 每项测试平行 3 次, 测定凉粉的硬度、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性、凝胶强度等, 其中凝胶强度值为破裂力与破裂时位移的乘积。

1.2.4.2 感官评分 以红薯叶、红薯淀粉为原料制作凉粉, 选择 6 名经过感官评定训练的食品专业大四学生作为品评员 (年龄在 21~23 岁, 其中男女各 3 名), 根据表 2 对该产品进行感官评分。

表 2 红薯叶凉粉感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation standard of sweet potato leaf jelly

评分项目	评分标准	得分(分)
组织状态(25分)	组织均匀、较少气泡、表面结构细密	25~20
	组织均匀、少量气泡、表面结构粗糙	19~15
	组织不均匀、大量气泡、严重变形	14~0
凝胶效果(25分)	果冻状、无凹陷	25~20
	果冻状、稍微凹陷	19~15
	半凝胶状、严重凹陷	14~0
口感(25分)	有嚼劲、富有弹性、不粘牙	25~20
	有嚼劲、弹性一般、不粘牙	19~15
	无嚼劲、弹性不足、粘牙	14~0
滋味(25分)	滋味适宜可口、有红薯叶香气	25~20
	滋味可口、红薯叶香气较淡或较浓	19~15
	滋味不协调、无红薯叶香气	14~0

表 3 碳酸钠溶液浓度对红薯叶凉粉品质的影响

Table 3 Effect of sodium carbonate concentration on sensory and texture characteristics of sweet potato leaf jelly

碳酸钠浓度(g/100 mL)	感官评分(分)	硬度(N)	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	凝胶强度(g·mm)
0.00	57.38±2.56 ^a	6.50±0.11 ^d	0.89±0.01 ^a	5.85±0.08 ^a	5.78±0.10 ^d	33.75±0.5 ^c	26.10±1.58 ^a
0.10	76.50±2.27 ^c	4.65±0.12 ^a	0.93±0.00 ^c	6.21±0.14 ^c	4.32±0.08 ^a	26.87±0.59 ^a	34.53±1.40 ^b
0.20	87.75±3.85 ^d	5.43±0.05 ^b	0.93±0.01 ^c	6.35±0.06 ^d	5.20±0.11 ^c	31.93±0.68 ^b	39.30±1.69 ^c
0.30	76.63±3.93 ^c	5.70±0.11 ^c	0.91±0.00 ^b	6.18±0.12 ^{bc}	5.03±0.05 ^b	31.46±0.98 ^b	35.64±1.93 ^b
0.40	60.87±3.68 ^b	4.65±0.16 ^a	0.93±0.01 ^c	6.07±0.11 ^b	4.33±0.19 ^a	26.76±1.40 ^a	27.12±2.63 ^a

注: 同一参数的均值后标注不同的字母存在显著性差异($P<0.05$); 表4~表7同。

1.3 数据处理

采用 SPSS 16 软件中的 Duncan 对单因素实验的感官评分和质构特性测定数据进行分析, 得到单因素方差分析结果^[21]; 采用 Design expert 8.0.6 软件中的 Box-Behnken 对响应面实验的感官评分和弹性数据进行数学统计分析, 得到回归分析结果^[22]。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 碳酸钠溶液浓度对红薯叶凉粉品质的影响

由表 3 可知, 随着碳酸钠浓度的提高, 红薯叶凉粉的感官评分、弹性和凝胶强度的变化呈现先增大后减小的趋势; 硬度、胶粘性、咀嚼性的变化趋势为先减小后增大再减小。碳酸钠浓度增加到 0.20 g/100 mL 时, 红薯叶凉粉的颜色由黄色逐渐向翠绿色转变, 光泽度不断提高, 表现出良好的凝胶质地, 此时凝胶的弹性和凝胶强度均达到最大值, 若进一步提高碱的浓度, 会使凉粉口感呈现后苦味, 凝胶色泽发暗, 凝胶的弹性和强度均出现明显下降。凉粉的硬度、胶粘性、咀嚼性受到碳酸钠的影响也较大, 但影响趋势呈现波浪式, 在碳酸钠浓度为 0.20 g/100 mL 时数值适中; 凉粉内聚性数值随碳酸钠用量的变化范围不大, 表明碳酸钠添加量对凉粉内聚性的影响不明显。研究表明, 在红薯叶提取时合理使用碳酸钠, 对红薯叶颜色具有较好的保护作用, 并且有利于其中营养成分的溶出; 碱的加入有利于改善凉粉凝胶的结构性质, 降低水的流动性, 减小凝胶的尺寸, 使凝胶结构更紧凑^[23]。实验可知, 碳酸钠的加入对淀粉分子的重排具有显著影响, 当碳酸钠浓度为 0.20 g/100 mL 时, 淀粉老化所形成的淀粉凝胶体系结构更为紧实, 表现为凉粉硬度、弹性、凝胶强度等指标值的显著上升($P<0.05$), 陈湘霞采用响应面法分析碳酸钠对凉粉持水性、硬度、黏度的影响效果时获得了类似的结论^[19]; 通过以上分析可知, 碳酸钠浓度为 0.20 g/100 mL 时, 所得红薯叶凉粉的综合品质较优。

2.1.2 白砂糖添加量对红薯叶凉粉品质的影响 由表 4 可知, 白砂糖添加量对红薯叶凉粉感官品质的影响呈现先增大再减小的趋势。当白砂糖添加量为 1 g/100 g 时, 红薯叶凉粉甜度适中, 组织均匀, 光泽度好, 继续增加白砂糖的使用量, 凉粉甜感提升, 会对特征风味产生一定的掩蔽效果; 蔗糖的加入量对凉粉

表 4 白砂糖添加量对红薯叶凉粉品质的影响

Table 4 Effect of white granulated sugar amount on sensory and texture characteristics of sweet potato leaf jelly							
白砂糖(g/100 g)	感官评分(分)	硬度(N)	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	凝胶强度(g·mm)
0	58.00±3.78 ^a	4.07±0.15 ^a	0.94±0.01 ^b	5.51±0.10 ^a	3.83±0.15 ^a	21.06±1.11 ^a	22.34±1.56 ^a
1	89.75±3.28 ^d	6.38±0.16 ^d	0.93±0.01 ^{ab}	6.01±0.30 ^b	5.82±0.26 ^d	35.74±2.01 ^d	35.24±1.64 ^c
2	79.38±4.00 ^c	5.53±0.14 ^c	0.92±0.00 ^{ab}	5.88±0.11 ^b	5.08±0.12 ^c	29.66±0.74 ^c	33.77±1.24 ^c
3	72.25±2.38 ^b	4.82±0.12 ^b	0.91±0.02 ^b	5.81±0.19 ^b	4.45±0.12 ^b	24.57±0.85 ^b	27.97±1.24 ^b
4	57.88±5.41 ^a	4.80±0.11 ^b	0.91±0.04 ^{ab}	5.59±0.13 ^a	4.43±0.27 ^b	25.91±1.74 ^b	25.77±3.24 ^b

的形成及其凝胶特性如硬度、弹性、凝胶强度等具有显著($P<0.05$)影响^[18],具体表现为随着白砂糖的加入,凉粉的硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性、凝胶强度等均呈现先上升后下降的趋势,当白砂糖添加量为 1 g/100g 时,凉粉的硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性、凝胶强度均达到最大值。然而,蔗糖添加量的进一步增大对质构指标的影响效果会呈现负相关,这主要是因为蔗糖会降低淀粉微相区中淀粉的浓度,淀粉分子链重排度会降低,从而降低凉粉的凝胶特性^[24]。而且,结合感官评分和质构特性可以得出,通过对红薯叶凉粉评价指标分析可知,在白砂糖添加量为 1 g/100 g 时,红薯叶凉粉的各项指标均呈现较优值。

2.1.3 红薯叶提取液添加量对红薯叶凉粉品质的影响 由表 5 可知,随着红薯叶提取液使用量的提高,凉粉的感官评分、弹性、胶粘性呈现先上升后下降的趋势,硬度、咀嚼性、凝胶强度呈现波浪形变化趋势,内聚性变化不明显。当红薯叶提取液使用量为 40 mL/100 g 时,红薯叶凉粉颜色翠绿,富有光泽,组织均匀,具有明显的红薯叶香气,硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性以及凝胶强度均呈现最大值,表明红薯叶中的成分参与了淀粉凝胶的形成过程,并提升了凉粉的综合品质,例如,红薯叶中含有的多糖类成分能够促进凉粉凝胶的形成,多酚类成分与直链淀粉通过氢键和范德华力结合在一起,从而对淀粉分子的结晶产生抑制作用^[25]。通过对红薯叶凉粉评价指标分析可知,在红薯叶提取液为 40 mL/100 g 时,红薯叶凉粉

除内聚性外的评价指标优于其他组,后续将以此为中心点进一步开展响应面优化试验。

2.1.4 红薯淀粉用量对红薯叶凉粉品质的影响 由表 6 可知,随着红薯淀粉使用量的提升,凉粉的硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性、凝胶强度数值均呈现逐渐增大的趋势,表明红薯淀粉的糊化和重排是凉粉凝胶形成的最核心因素,淀粉用量越大,所形成的凉粉凝胶结构越致密,强度越高,弹性越好,这与陈湘霞^[19]的研究结果相似;而内聚性数值变化随着红薯淀粉的增加几乎无变化,说明凉粉凝胶的内聚性不受淀粉浓度的影响。但是,凉粉的感官评分的变化趋势与红薯淀粉并非呈现正相关,而是先增大再减小,且在红薯淀粉用量为 18 g/100 g 时达到最高值,此时制得的红薯叶凉粉组织均匀,呈果冻状,凉粉凝胶弹性较好,强度适中,红薯叶香气较为突出。通过以上分析可知,选择红薯淀粉的用量为 18 g/100 g 为中心点开展二次旋转回归优化试验。

2.1.5 蒸制时间对红薯叶凉粉品质的影响 王林^[25]研究发现,蒸制时间对凉粉的凝胶强度及感官品质有显著影响,由表 7 可知,随着蒸制时间的增加,红薯叶凉粉的感官评分和弹性值呈现先增加后减小的趋势,当蒸制时间为 8 min 时,所得红薯叶凉粉颜色翠绿,质地均匀,具有明显的红薯叶香气,此时凉粉的弹性呈现最大值。凉粉的硬度、胶粘性、咀嚼性和凝胶强度呈现波浪升高趋势,表明蒸制时间的延长能够促使淀粉之间的结合程度更高,对于凝胶性能的提升有积

表 5 红薯叶提取液添加量对红薯叶凉粉品质的影响

Table 5 Effect of amount of sweet potato leaf extract on sensory and texture characteristics of sweet potato leaf jelly							
提取液(mL/100 g)	感官评分(分)	硬度(N)	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	凝胶强度(g·mm)
25	55.25±4.77 ^a	4.78±0.10 ^a	0.93±0.01 ^b	5.45±0.06 ^a	4.40±0.11 ^a	24.12±0.57 ^a	25.03±1.61 ^a
30	65.38±8.23 ^b	4.93±0.14 ^b	0.92±0.01 ^b	5.78±0.06 ^b	4.42±0.10 ^a	26.23±0.85 ^c	27.22±2.93 ^a
35	76.38±7.07 ^c	4.70±0.11 ^a	0.93±0.01 ^b	5.84±0.09 ^b	4.52±0.15 ^a	25.33±0.71 ^b	26.73±1.14 ^a
40	90.13±4.36 ^d	6.77±0.11 ^c	0.91±0.00 ^a	6.05±0.05 ^c	6.13±0.05 ^b	37.18±0.64 ^d	34.67±0.81 ^b
45	77.25±2.66 ^c	4.77±0.08 ^a	0.93±0.01 ^b	5.80±0.06 ^b	4.40±0.11 ^a	25.73±0.59 ^{bc}	26.13±2.35 ^a

表 6 红薯淀粉添加量对红薯叶凉粉品质的影响

Table 6 Effect of amount of sweet potato starch on sensory and texture characteristics of sweet potato leaf jelly							
淀粉(g/100 g)	感官评分(分)	硬度(N)	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	凝胶强度(g·mm)
14	57.38±5.18 ^a	3.28±0.10 ^a	0.93±0.01 ^a	4.98±0.14 ^a	3.05±0.10 ^a	15.19±0.74 ^a	16.99±1.39 ^a
16	78.13±3.48 ^b	3.52±0.13 ^b	0.93±0.01 ^a	5.07±0.10 ^b	3.30±0.13 ^b	16.68±0.89 ^b	18.67±1.10 ^a
18	82.13±2.80 ^b	4.87±0.05 ^c	0.92±0.02 ^a	6.30±0.06 ^b	4.48±0.16 ^c	28.28±0.88 ^c	28.45±1.29 ^b
20	80.88±6.40 ^b	5.15±0.20 ^d	0.93±0.03 ^a	6.40±0.10 ^b	4.77±0.35 ^d	30.59±2.22 ^d	29.02±2.89 ^b
22	60.13±7.68 ^a	9.02±0.12 ^c	0.93±0.01 ^a	6.98±0.04 ^c	8.35±0.14 ^c	58.48±0.87 ^c	69.61±2.49 ^c

表 7 蒸制时间对红薯叶凉粉品质的影响

Table 7 Effect of steaming time on sensory and texture characteristics of sweet potato leaf jelly

时间(min)	感官评分(分)	硬度(N)	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	凝胶强度(g·mm)
4	52.63±3.70 ^a	5.03±0.15 ^a	0.92±0.01 ^b	5.93±0.07 ^a	4.67±0.16 ^a	29.23±0.93 ^{ab}	33.05±0.65 ^{ab}
6	75.63±4.50 ^c	5.10±0.19 ^a	0.93±0.01 ^b	6.26±0.07 ^c	4.77±0.14 ^b	30.47±1.24 ^b	34.67±0.81 ^b
8	89.13±3.94 ^e	5.15±0.16 ^a	0.93±0.01 ^b	6.37±0.11 ^d	4.72±0.20 ^a	28.09±1.38 ^a	31.03±0.38 ^a
10	79.50±4.54 ^d	7.22±0.12 ^b	0.89±0.03 ^a	6.10±0.05 ^b	6.45±0.27 ^c	39.30±1.46 ^c	47.71±2.43 ^c
12	59.25±6.16 ^b	7.25±0.05 ^b	0.91±0.02 ^b	6.01±0.03 ^a	6.62±0.12 ^c	39.72±0.73 ^c	60.98±3.20 ^d

极作用。但是,蒸制时间过长,红薯叶色素易发生褪色,香气散失度增加,所制得的红薯叶凉粉颜色和香气品质会出现下降。通过以上分析可知,在蒸制时间为 8 min 时,红薯叶凉粉的综合品质较优,可以此为

2.2 响应面优化试验

2.2.1 响应指标的确定 利用 SPSS 16 软件进行相关性分析,相关性系数见表 8,可知:感官评分与质构特性测定的相关性大小关系为:弹性>凝胶强度>咀嚼性>胶粘性>硬度>内聚性。凉粉感官评分与硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性、凝胶强度呈正相关,其相关性系数越大,关系越紧密,即感官测定与弹性的关系最为紧密^[26]。为了减少在优化实验中的主观影响,选用弹性作为主要响应值,并采用感官评分辅助结果验证。

表 8 感官评分与质构特性测定的相关性系数

Table 8 Correlation coefficient between sensory score and texture characteristics

度量指标	硬度	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	凝胶强度
Spearman 相关性系数	0.251**	-0.020	0.444**	0.253**	0.271**	0.326**

注:**表示在 $P<0.01$ 水平上存在极显著差异。

2.2.2 响应面试验结果与回归分析 响应面方案及结果,见表 9。采用 Design expert 8.0.6 对表 9 数据

表 9 响应面试验方案及结果

Table 9 Response surface test plan and results

实验号	因素			弹性	
	A	B	C	Y测定值	预测值
1	-1	-1	0	5.44	5.38
2	1	-1	0	4.80	4.84
3	-1	1	0	5.36	5.34
4	1	1	0	5.80	5.88
5	-1	0	-1	5.31	5.32
6	1	0	-1	5.34	5.32
7	-1	0	1	5.15	5.11
8	1	0	1	5.06	5.11
9	0	-1	-1	5.07	5.09
10	0	1	-1	5.23	5.22
11	0	-1	1	4.49	4.52
12	0	1	1	5.42	5.39
13	0	0	0	6.11	6.11
14	0	0	0	6.12	6.11
15	0	0	0	6.03	6.11
16	0	0	0	6.03	6.11
17	0	0	0	6.25	6.11

进行统计学分析,得到以弹性为响应值的回归分析结果见表 10。得回归方程为:

$$Y=6.11-0.033A+0.25B-0.10C+0.27AB+0.19BC-0.30A^2-0.46B^2-0.60C^2$$

式(1)

可知,该模型的 F 值为 81.93,表明二次回归方程具有显著意义^[26]。该模型对实验结果的影响是极显著($P<0.01$),失拟项不显著($P=0.8502>0.05$),说明该回归模型拟合度较好,用该模型预测出红薯叶凉粉最优的配方及工艺参数是真实可信的^[27]。通过对一次项的 F 值进行比较得到三因素对弹性的影响顺序为: $B>C>A$ 。一次项 B 、 C ,交互项 AB 、 BC ,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对红薯叶凉粉弹性的影响极显著($P<0.01$);一次项 A 、交互项 AC 对红薯叶凉粉弹性均无显著影响,决定系数 R^2 为 0.9785(矫正后 0.9795)。

表 10 回归分析结果

Table 10 Regression analysis results

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	4.09	9	0.45	81.93	<0.0001	**
A	8.45E-03	1	0.01	1.52	0.2571	
B	0.51	1	0.51	90.98	<0.0001	**
C	0.086	1	0.09	15.51	0.0056	**
AB	0.29	1	0.29	52.53	0.0002	**
AC	3.60E-03	1	0.00	0.65	0.4471	
BC	0.15	1	0.15	26.7	0.0013	**
A ²	0.37	1	0.37	67.25	<0.0001	**
B ²	0.89	1	0.89	160.68	<0.0001	**
C ²	1.49	1	1.49	268.77	<0.0001	**
残差	0.039	7	0.01			
失拟项	6.38E-03	3	0.00	0.26	0.8502	
误差项	0.032	4	0.01			
总和	4.13	16				

注:**表示 $P<0.01$ 对结果影响极显著。

2.2.3 交互作用分析 3D 响应面图可客观地预测和检验交互作用对红薯叶凉粉弹性的影响^[28]。因素间交互作用响应面图见图 1。从图 1a、图 1c 可知, AB 和 BC 的等高线呈椭圆形,曲面颜色变化较快且曲面陡峭,说明 AB 和 BC 之间交互作用显著,对红薯叶凉粉弹性影响较大,从图 1b 可知, AC 等高线不呈椭圆形,曲面颜色变化较慢且曲面较为平缓,表明 AC 之间交互对结果影响不大。

通过 Box-Behnken Design 系统对该模型进行分析,并拟合出最优的配方及工艺参数为^[29]:红薯叶

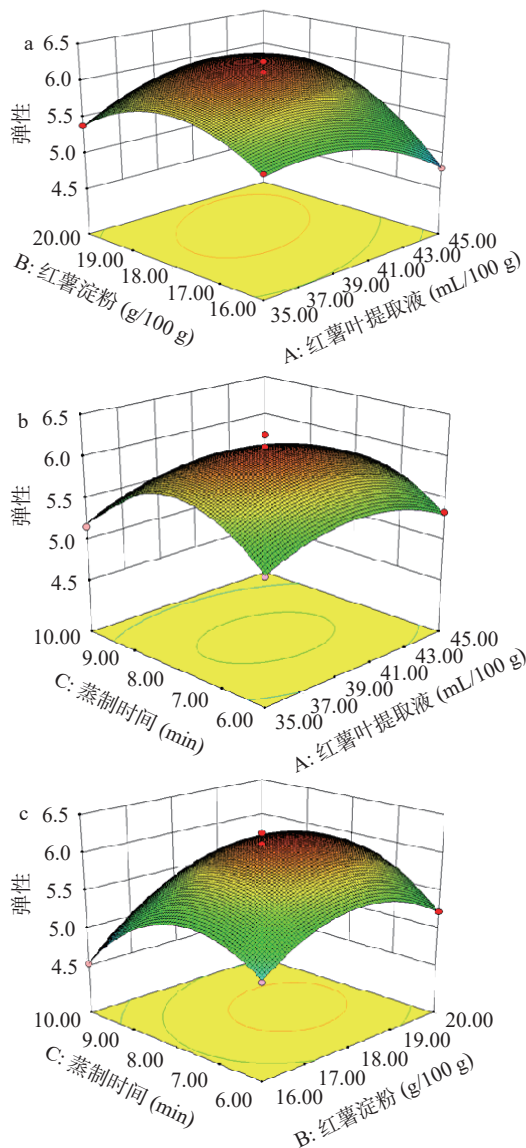


图 1 因素间交互作用对凉粉弹性的影响

Fig.1 Influence of interaction between factors on the elasticity of sweet potato leaf jelly

提取液添加量为 40.37 mL/100 g, 淀粉添加量为 18.57 g/100 g, 蒸制时间为 7.92 min, 此时的弹性为 6.14。考虑实际可操作性, 将最优配方及工艺参数调整为红薯叶提取液添加量为 40 mL/100 g, 淀粉添加量为 19 g/100 g, 蒸制时间为 8 min。

2.2.4 最优参数验证试验 由表 11 可知, 以弹性为响应值得到最优配方及工艺参数为: 红薯叶提取液添加量为 40 mL/100 g, 淀粉添加量为 19 g/100 g, 蒸制时间为 8 min, 经质构仪测定弹性为 6.19, 与预测值无统计学差异, 表明此模型得到的红薯叶凉粉最优参

表 11 最优配方及工艺参数验证结果

Table 11 Validation results optimal formula and process parameters

试验组	因素			弹性	
	A(mL/100 g)	B(g/100 g)	C(min)	测定值	预测值
红薯叶凉粉	40	19	8	6.19	6.14

数是可靠的。

3 结论

以红薯叶、红薯淀粉为主要原料, 通过优化红薯叶凉粉的配方及工艺, 制得质构及感官可接受度均较高的凉粉产品。经过单因素实验和二次旋转回归优化得到红薯叶凉粉的最优配方及工艺参数为: 红薯叶提取液添加量为 40 mL/100 g、红薯淀粉比例 19 g/100 g、蒸煮时间 8 min、碳酸钠使用量为 0.20 g/100 g、白砂糖添加量为 1 g/100 g。红薯叶是红薯种植的副产物, 原料价格低廉, 易得, 所得红薯叶凉粉的加工方法简便快捷, 产品色泽翠绿, 质地均匀, 硬度适中, 弹性较好, 能够表现出明显的红薯叶特征风味。未来可进一步优化红薯叶凉粉的加工工艺, 一方面将红薯叶的主要功效成分进行提取、浓缩和纯化, 有效提升产品中有效成分含量或浓度, 另一方面需进一步研究红薯叶凉粉的贮藏性能, 尤其应确保经贮藏后主要成分的保留率, 从而为进一步丰富我国凉粉产品类型, 提高红薯产业附加值提供技术借鉴。

参考文献

[1] 王秋亚, 薛航. 红薯叶有效成分的提取及开发应用研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 260–263. [WANG Qiuya, XUE Hang. Progress of the extraction of effective components in the sweet potato leaves and their applications[J]. Food Industry, 2018, 39(7): 260–263.]

[2] 沈梦兰, 庞林江, 陆国权, 等. 甘薯叶菜的营养保健及贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 270–274. [SHEN Menglan, PANG Linjiang, LU Guoquan, et al. Application value and research status of storage and preservation of sweet potato leafy vegetables[J]. Food Industry, 2019, 40(5): 270–274.]

[3] 李俊玲. 红薯茎叶功能性成分分析及其饮料的研制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. [LI Junling. Analysis of functional components in stem and leaf of sweet potato and development of its beverage[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.]

[4] 陈琼玲, 薛霖莉, 张丹, 等. 红薯叶中水溶性膳食纤维提取工艺优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 234–237, 242. [CHEN Qiongling, XUE Linli, ZHANG Dan, et al. Optimization of extraction process of soluble dietary fiber from sweet potato leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(15): 234–237, 242.]

[5] CHINH N H, CHEN C, LIN K, et al. Bioactive compounds, antioxidants, and health benefits of sweet potato leaves[J]. *Molecules*, 2021, 26(7): 1820.

[6] JENG T L, CHIANG Y C, LAI C C, et al. Sweet potato leaf extract inhibits the simulated *in vitro* gastrointestinal digestion of native starch[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2015, 23(3): 399–406.

[7] CHA J, CHA G H, CHUNG L N, et al. Investigation on the history of the Muck (traditional starch jelly) and its processing methods reviewed in the ancient and the modern culinary literatures[J]. *Journal of the Korean Society of Food Culture*, 2008(23): 73–89.

[8] TAIRA J, UEHARA M, TSUCHIDA E, et al. Inhibition of the β -catenin/tcf signaling by caffeoylquinic acids in sweet potato leaf through down regulation of the Tcf-4 transcription[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(1): 167–172.

[9] VISHNU V R, RENJITH R S, MUKHERJEE A, et al. Com-

- parative study on the chemical structure and in vitro antiproliferative activity of anthocyanins in purple root tubers and leaves of sweet potato (*Ipomoea batatas*) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(9): 2467–2475.
- [10] 刘捷, 张体祥, 于立芹, 等. 红薯叶多糖的分离纯化及其结构鉴定 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 46–50. [LIU Jie, ZHANG Tixiang, YU Liqin, et al. Separation, purification and structure identification of polysaccharides from ipomoea batatas leaves [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 31(5): 46–50.]
- [11] 宋文华, 何佳, 袁江月, 等. 不同乳杆菌强化发酵红薯叶及其酸菜品质的研究 [J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 193–198, 236. [SONG Wenhua, HE Jia, YUAN Jiangyue, et al. Effect of different lactobacillus on reinforce-fermented sweet potato leaves on the quality of its pickles [J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(2): 193–198, 236.]
- [12] 杜航, 孙小童, 马思文, 等. 红薯叶黄豆馒头的研制 [J]. 现代食品, 2019(13): 37–39, 46. [DU Hang, SUN Xiaotong, MA Siwen, et al. Development of sweet potato leaf soybean steamed bread [J]. *Modern Food*, 2019(13): 37–39, 46.]
- [13] HU Y, SUN H, MU T. Effects of sweet potato leaf powder on sensory, texture, nutrition, and digestive characteristics of steamed bread [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022(7): 46.
- [14] 张体祥, 刘捷, 于立芹, 等. 硫酸化红薯叶多糖的制备工艺及其抗氧化活性研究 [J]. 食品科技, 2009, 34(8): 154–157. [ZHANG Tixiang, LIU Jie, YU Liqin, et al. Study on preparation process and antioxidant activities of sulfated sweet potato leaf polysaccharides [J]. *Food Science and Technology*, 2009, 34(8): 154–157.]
- [15] SUN H, MU T, XI L, et al. Effects of domestic cooking methods on polyphenols and antioxidant activity of sweet potato leaves [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(34): 8982–8989.
- [16] 王永志, 赖富饶, 吴晖. 凉粉草胶与卡拉胶复配制作凉粉的质构特性研究 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 224–227. [WANG Yongzhi, LAI Furao, WU Hui. Study on textural characteristics of jelly formulated with κ -carrageenan-MBG compound gel [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(7): 224–227.]
- [17] 王瑞斌, 李明, 魏益民. 品质改良剂对绿豆凉粉冻融稳定性及硬度的影响 [J]. 中国食品添加剂, 2016, 154(12): 182–188. [WANG Ruibin, LI Ming, WEI Yimin. Influence of different quality improving agents on the freeze-thaw stability and hardness of mung bean jelly [J]. *China Food Additives*, 2016, 154(12): 182–188.]
- [18] 胡海娥. 胖大海凉粉工艺研究 [J]. 食品研究与开发, 2013, 34(17): 45–48. [HU Haie. The technology research of preparation of sterculia lychnophora bean jelly [J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(17): 45–48.]
- [19] 陈湘霞. 基于响应面分析法优化臭黄荆叶凉粉凝胶制备工艺 [J]. 食品科技, 2011, 36(10): 84–88. [CHEN Xiangxia. Premna leaves powder jelly gel process based on response surface analysis [J]. *Food Science and Technology*, 2011, 36(10): 84–88.]
- [20] 王锦云, 陈芄, 肖洪, 等. 正交试验优化薄荷绿豆凉粉的制作工艺 [J]. 粮食与油脂, 2018, 31(3): 65–67. [WANG Jinyun, CHEN Peng, XIAO Hong, et al. Optimization of production technology of mint and green bean jelly by orthogonal experiment [J]. *Grain and Oil*, 2018, 31(3): 65–67.]
- [21] 黄锦琪, 江联, 温笑, 等. 红薯黑凉粉的配方优化 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 1–9. [HUANG Jinqi, JIANG Lian, WEN Xiao, et al. Optimization of formula of sweetpotato black Chinese jelly [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 1–9.]
- [22] 吴均, 黄传书, 赵珮, 等. 响应面试验优化桑葚果酒发酵工艺及其品质分析 [J]. 中国酿造, 2021, 40(1): 98–104. [WU Jun, HUANG Chuanshu, ZHAO Pei, et al. Optimization of fermentation technology of mulberry wine by response surface methodology and quality analysis [J]. *China Brewing*, 2021, 40(1): 98–104.]
- [23] AMALIA R R, LESTARI E, SAFITRI N E. Pemanfaatan jagung (*Zea mays*) sebagai bahan tambahan dalam pembuatan permen Jelly [J]. *Teknologi Pangan Media Informasi Dan Komunikasi Ilmiah Teknologi Pertanian*, 2021, 12(1): 123–130.
- [24] 李月月, 薛惠元, 李美利, 等. 凉粉老化原理及改善方法研究进展 [J]. 食品安全导刊, 2022(15): 167–170. [LI Yueyue, XUE Huiyuan, LI Meili, et al. Research progress on aging principle and improvement methods of jelly [J]. *Food Safety Guide*, 2022(15): 167–170.]
- [25] 王林. 豌豆凉粉配方工艺优化研究 [J]. 保鲜与加工, 2021, 21(3): 111–117. [WANG Lin. Study on the formulation and technology optimization of pea jelly [J]. *Storage and Process*, 2021, 21(3): 111–117.]
- [26] 张琳, 徐莉莉. 基于链接分析的企业网站评价指标的有效性分析 [J]. 图书情报工作, 2010, 54(16): 86–89, 129. [ZHANG Lin, XU Lili. Effectiveness analysis of enterprise website evaluation indexes based on the analysis of link indexes [J]. *Library and Information on Service*, 2010, 54(16): 86–89, 129.]
- [27] 林丽华. 凉粉草多糖提取优化、理化性质及流变胶凝特性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2017. [LIN Lihua. Polysaccharides from mesona chinesis: Extraction optimization, physicochemical characterizations, rheological and gelation properties [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.]
- [28] 陈丽丽, 白春清, 袁美兰, 等. 响应面分析法优化鱼露挥发性风味物质萃取工艺 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 172–178, 184. [CHEN Lili, BAI Chunqing, YUAN Meilan, et al. Optimization of extraction process of volatile flavor extracts from fish sauce by response surface methodology [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(21): 172–178, 184.]
- [29] 王蓉琳, 谢林美, 吕峰. 基于因子分析和 Box-Behnken 响应面提高冷冻淮山紫薯球品质 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 146–153, 160. [WANG Ronglin, XIE Linmei, LÜ Feng. Improving the quality of frozen purple sweet potato ball with Chinese yam by factor analysis and Box-Behnken response surface [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(2): 146–153, 160.]