DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260209004
引用格式: 陈露露, 王慧俐, 张辉, 等. 美国豆芋酒酿米糕配方优化及其营养成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 128–136.
CHEN LL, WANG HL, ZHANG H, *et al*. Optimization of the formula for *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cake and analysis of its nutritional components [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 128–136. (in Chinese with English abstract).

美国豆芋酒酿米糕配方优化及其营养成分分析

陈露露[1], 王慧俐[1*], 张 辉[2], 吴 琳[1]

(1. 浙江特殊教育职业学院, 杭州 310023; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘 要: 目的 研发豆芋酒酿米糕的最佳配方及其品质改良。**方法** 通过感官评价和质构检测分析, 确定豆芋最佳配方量, 并通过响应面实验探究米糕品质中粳米:糯米(*m*:*m*)、酒酿液添加量、酵母添加量和豆芋粉添加量等因素的影响。**结果** 当粳米:糯米为 6:1 (*m*:*m*)(共 500 g)、酒酿液添加量为 152 g、酵母添加量为 5 g、豆芋添加量为 45 g 时, 米糕颜色乳白、表面形态完整、内部组织结构均匀、口感绵密且香气浓郁。营养分析显示, 该米糕水分含量 44.7 g/100 g, 蛋白质含量 6.8 g/100 g, 总糖含量 7.48 g/100 g, 黄酮含量 56.3 mg/100 g, 各项指标均符合国家食品安全标准。**结论** 该配方不仅提升了米糕的感官品质, 还确保其营养成分的丰富性, 为米糕的保健功能提供科学支持, 具有重要的应用价值。

关键词: 美国豆芋; 酒酿; 米糕; 配方优化; 响应面实验

Optimization of the formula for *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cake and analysis of its nutritional components

CHEN Lu-Lu[1], WANG Hui-Li[1*], ZHANG Hui[2], WU Lin[1]

(1. *Zhejiang Vocational College of Special Education*, *Hangzhou* 310023, *China*; 2. *College of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*)

ABSTRACT: Objective To develop the optimal formulation and quality improvement of rice cakes fortified with *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice. **Methods** Sensory evaluation and texture profile analysis were employed to determine the optimal addition level of *Apios americana* Medikus. Response surface experiment was used to investigate the effects of 4 key factors, namely the ratio of non-glutinous rice to glutinous rice (*m*:*m*), the amount of sweet ferment rice, yeast dosage and *Apios americana* Medikus powder addition. **Results** The optimal formulation was determined as follows: Non-glutinous rice to glutinous rice mass ratio of 6:1 (*m*:*m*) (total 500 g), sweet ferment rice amount 152 g, yeast amount 5 g and *Apios americana* Medikus amount 45 g. The resulting rice cakes exhibited a milky white color, intact appearance, uniform internal structure, fine and dense texture, as well as intense and pleasant aroma. Nutritional analysis indicated that the product contained 44.7 g/100 g moisture, 6.8 g/100 g protein, 7.48 g/100 g total sugar and 56.3 mg/100 g flavonoids. All physicochemical indexes were in accordance with

收稿日期: 2026-02-09
基金项目: 2024 年嘉兴市公益性研究计划项目(2024AD10038); 2024 年国内访问学者教师专业发展项目(FX2024217)
第一作者: 陈露露(1993—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品科学与加工。E-mial: 742468836@qq.com
***通信作者:** 王慧俐(1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品科学与加工。E-mail: wanghl188@126.com

the national food safety standards. **Conclusion** The optimized formula not only significantly enhances the sensory quality of rice cakes but also enriches their nutritional composition, providing a scientific basis for the health-promoting functions of rice cakes and demonstrating important practical application value.

KEY WORDS: *Apios americana* Medikus; sweet ferment rice; rice cake; formula optimization; response surface experiment

0 引　言

美国豆芋(*Apios americana* Medikus), 又称美洲罗汉参, 原产地美洲, 是一种无性繁殖、多年生豆科土圞儿属的蔓生草本植物[1]。目前, 美国豆芋在欧美及日本已广泛种植与应用, 其中日本的青森县种植和食用豆芋已有超过 100 年的历史[2–3]。2009 年, 美国豆芋被引进国内并在部分地区种植与研究, 目前在杭州富阳、宁波等地种植的较多。豆芋的利用主要集中在其茎块上, 并以烹食为主。豆芋的块茎部分是一种天然的高蛋白、高钙、高能量的食物, 块茎中的可溶性蛋白为 14.98%(约为马铃薯中的 3 倍)和总糖为 11.96%(马铃薯中总糖含量约为 16%), 同时还含有较高的维生素 C、总皂苷和黄酮, 以及较为丰富且均衡的氨基酸[4]。现阶段, 其地下块茎中一小部分作无性繁殖用, 另外绝大部分作为一种新型的土豆替代食用物, 是一种天然的高蛋白、高钙食品。此外, 美国豆芋对高血压、糖尿病和高脂血症等具有明显的改善效果[5–7]。基于其具有良好的抗氧化、抗炎、降血压、降血糖、降血脂和抗肿瘤等作用, 美国豆芋被认为是一种具有广阔应用前景的、潜在药品和功能食品的原料来源[8–9]。

酒酿是一种谷物发酵的传统美食, 也有香糟、糯米酒、江米酒、醪糟和甜米酒等别称。酒酿发展历史久远, 其酿造工艺早在汉代就有记载, 明清时期已非常流行。传统的酒酿主要是用蒸熟的糯米再拌上甜酒曲, 在一定的温度和湿度下慢慢发酵而成的一种甜米酒, 是中国广泛流行的传统小吃。李时珍在《本草纲目》中写道, “米酒通血脉、厚肠胃、润皮肤、散温气、消忧制怒、宣言畅意、御风寒、治腰膝疼痛, 热饮甚良”[10]。酒酿味甘辛, 性温, 含有丰富的氨基酸、多肽、糖、有机酸、碳水化合物、矿物质、维生素 B_1、B_2等, 都是人体不可或缺的营养成分[11–12]。适量饮用可益气养颜, 促进新陈代谢, 提高身体免疫力, 民间俗语常说“人参补气, 酒酿养人”, 中医常说“醪糟味甘, 有滋补强壮之功”。酒酿除了营养美味, 还具有一定的药用价值, 对部分慢性疾病能够有一定的辅助治疗作用, 如可以促进血液循环, 缓解慢性关节炎病症, 也可以缓解慢性萎缩胃炎病症, 帮助消化, 对降血脂和防止动脉硬化有益处[13]。从中医的角度, 甜酒酿还能够温经活血、滋阴润肺, 对女性美容养颜、治疗痛经和产后恢复都有好处[14]。研究表明, 甜酒酿发酵液具有 *α*-葡萄糖苷酶抑制作用, 有利于控制人体血糖水平, 防治糖尿病、肥胖症等疾病[15]。而在小鼠实验中, 适量米酒有助于提升小鼠学习、记忆能力, 具有延缓大脑老化、预防老年痴呆症的作用[16]。醪糟里含有少量的酒精, 而酒精可以促进血液循环, 有助消化及增进食欲的功能[17–18]。

米糕又称“稻饼”“年糕”等, 是中国自古以来著名的传统美食, 有着数千年的发展历史, 是具有独特地域文化特色的传统小吃。从汉代开始, 古人就有食“糕”的记载, 直到南北朝时期就已经非常流行。米糕在几千年的日益更替中, 其生产工艺也演变的多样化, 从最初单一原材料到如今添加不同配料, 从单一的碾压制作到如今添加发酵工序等复杂流程, 逐渐形成了具有不同风味的米糕品类。但目前市面上传统功能性米糕风味单一, 随着社会的发展和人们健康意识的增强, 更健康、营养和绿色的米糕类食品是未来必然发展的方向。因此, 在保证感官品质的前提下, 如何提升米糕食品的保健功能和营养价值是当下亟需探索和研究的问题。因此, 本研究在传统米糕加工工艺基础上, 利用酒酿和酵母同时发酵米糕, 添加豆芋粉以增加其营养成分, 并通过对米糕配方的研究和改良, 制作出营养丰富又兼具一定保健功能的米糕, 为米糕的保健功能提供科学支持, 具有重要的应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

糯米(黑龙江北纯农产品开发有限公司); 南粳46大米(南京东罡农业科技有限公司); 即发酵母(燕子)(广西湘桂酵母科技有限公司); 窝窝牌鲜榨米酒 4 度酒酿液(成都巨龙生物科技股份有限公司); 白砂糖(中国糖业酒类集团有限公司); 豆芋粉, 由杭州农科院富阳实验基地捐赠的新鲜豆芋干制而成。

芦丁(纯度≥98%, 天津化工有限公司); 抗坏血酸、葡萄糖对照品(纯度 98%, 北京诚远化工技术研究院); 甲基红(分析纯, 上海源叶生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

FA2004 电子分析天平(精度 0.1 mg, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); G90F23CN3LV 微波炉(广东格兰仕集团有限公司); DC-236SZ 冻藏醒发箱[新麦机械(无锡)有限公司]; SK2-922+2S+2B 多功能烤箱、SM2-704E 热风炉(新麦烤箱股份有限公司); DM-5005 手持测温枪(德力西集团有限公司); SZ32B5 不锈钢蒸屉(苏泊尔电器有限公司); CZC-A5K03157 二层四盘层炉(东莞市精诚电能设备有限

公司); 博勒飞 Brookfield CTX 质构仪(美国阿美特克-博勒飞公司); TQ-1500Y 高速多功能粉碎机(永康市天祺盛世工贸有限公司); TU-18106 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); TG16-WS 台式高速离心机(上海安亭科学仪器厂)。

1.3 实验方法

1.3.1 豆芋酒酿米糕各原料添加量单因素实验制备工艺流程

(1)豆芋酒酿米糕制备配方

在工艺条件不变的情况下, 通过改变粳米:糯米的比例(0:5、1:4、2:3、3:2、4:1、5:0, *m*:*m*), 总米量为 500 g, 酒酿液添加量(0、50、100、150、200、250 g)、酵母添加量(0、1、2、3、4、5 g)、豆芋粉添加量为 0%、4%、8%、12%、16%、20%(克数按“糯米粳米总量×添加比例”换算), 纯净水 150 g, 细砂糖 50 g 固定不变, 各因素固定水平为: 粳米:糯米 4:1 (*m*:*m*), 酒酿液添加量 150 g, 酵母添加量 3 g, 豆芋粉添加量 6%, 通过米糕感官评价的指标来确定各因素对整个制作成品的影响。为探究豆芋粉的影响[19], 以糯米与粳米总量为基准, 将加入不同豆芋粉量(0、20、40、60、80、100 g)制得的米糕依次标为 A 组、B 组、C 组、D 组、E 组、F 组。

(2)豆芋酒酿米糕制作工艺

加入刚没过 500 g 大米表面的水量, 于常温下浸泡整夜后沥干水分, 放入破壁机中, 倒入 150 g 酒酿液和 150 g 清水(以刚溢过大米表面为最佳)。搅打 2~3 min, 直至打成细腻的米浆。搅打好的米浆倒入高温消毒过且干净无菌的盆中, 加入 0%、4%、8%、12%、16%、20%的豆芋粉(0、20、40、60、80、100 g), 再加入酵母 5 g、白砂糖 50 g, 混合均匀, 直至无颗粒状。盖上保鲜膜, 表面用牙签戳孔, 放入醒发箱发酵 2 h, 醒发箱温度为 30 ℃, 湿度为 75%。发酵结束后, 用刮刀搅拌让面糊排一下气, 将纸杯放在电子秤上, 倒入模具等量的米糊, 8 分满, 继续发酵 20 min。电蒸锅调到 2100 W, 上锅蒸 15 min, 再关火焖 5 min, 取出彻底凉透再脱模[20]。

1.3.2 豆芋酒酿米糕质构测试

将制作好的豆芋酒酿米糕放室温下完全冷却后脱模, 将米糕去掉顶部和底部, 选取中间部分, 将米糕样品统一切割为 20 mm×20 mm×20 mm 的正方体, 测试环境温度控制在 25 ℃, 相对湿度为 60%。本研究采用博勒飞 Brookfield CTX 质构仪, 使用 TA-25 柱形探头, 配合 Texture pro 软件, 1 mm/s 的速度, 使用质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)测试, 双循环下压样品 4 mm, 触发负载为 5 *g*、停留时间 5 s[21]。每批样品测 9 次, 取均值分析, 各指标定义及取值如下[22]: (1)硬度: 单位 N, 取第一次压缩的最大力峰值, 反映米糕软硬程度; (2)黏附性: 单位 N·s, 取第一次压缩后回升阶段的负力积分面积, 体现黏牙性; (3)弹性: 无单位, 按“压缩后回弹距离/压缩距离”计算, 表征回弹能力; (4)内聚性: 无单位, 为“第二次压缩最大力/第一次压缩最大力”, 反映结构紧实度; (5)咀嚼性: 单位 N, 由“硬度×内聚性×弹性”推导, 体现咀嚼所需能量[23]。最终得到不同实验条件下豆芋酒酿米糕的质构特性, 并与感官评分做相关系分析。

1.3.3 豆芋酒酿米糕营养成分测定

米糕营养成分测定参考 GB 28050—2025《营养标签通则》; 水分含量测定参考 GB/T 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》; 蛋白质含量测定参照 GB/T 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》; 总糖含量测定参照 GB/T 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》; 总黄酮含量测定参照 GB/T 20195—2006《植物提取物 总黄酮的测定》。

1.3.4 豆芋酒酿米糕感官评价

选取 10 名(男女各 5 名)受过专业感官培训且有一定感官评价经历的人员成立豆芋酒酿米糕感官评价小组。每位评价人员单独对每种实验所得的米糕进行综合评价, 分别对米糕的体积、表面色泽、外表形态、香气、颗粒和气孔、口感、组织结构 7 种因素进行赋分制评价[24–25]。其中, 米糕的感官评价表如表 1 所示。

表 1 米糕感官评定标准表

Table 1 Sensory evaluation standard table of rice cake

评分项目	评分细则	分值
比体积	2.8~3.2 cm^3/g, 膨松度适中	18~20
	2.4~2.7 cm^3/g	14~17
	2.0~2.3 cm^3/g	10~13
	<2.0 cm^3/g	≤9
表皮色泽	乳白有光泽, 无杂色、无斑点	13~15
	乳白无光泽, 无杂色	10~12
	微黄, 无杂色	7~9
	发黄有杂色	≤6
外表形态	外形规整, 表皮薄而柔软, 无塌陷, 无开裂	13~15
	外形较规整, 表皮薄软, 轻微开裂	10~12
	外形不规整, 表皮偏厚, 明显开裂	7~9
	严重塌陷/开裂	≤6

表 1(续)

评分项目	评分细则	分值
香气	兼具米香、发酵香与豆芋特有清香, 层次协调, 无异味	18~20
	有米香与发酵香, 豆芋清香较淡	14~17
	米香淡, 无豆芋清香, 有轻微酸味	10~13
	有酸味/哈败味等不良气味	≤9
口感	绵密软糯, 不黏牙、不糊口, 口感顺滑	13~15
	绵密软糯, 轻微黏牙	10~12
	偏硬/偏稀, 黏牙	7~9
	过硬/过稀, 严重黏牙	≤6
组织结构	内部气孔细小均匀, 结构致密, 无大空洞	13~15
	气孔较细小, 少量大空洞	10~12
	气孔粗大不均, 大空洞较多	7~9
	结构松散, 易散碎	≤6

1.3.5　豆芋酒酿米糕配方优化响应面实验

为优化豆芋酒酿米糕配方, 基于前期单因素实验结果, 选取对米糕品质影响显著的 4 个关键因素进行响应面优化实验[26], 分别为: 粳米:糯米(*m*:*m*) (*A*)、酒酿液添加量(以米原料总质量为基准, *B*)、酵母添加量(以米原料总质量为基准, *C*)、豆芋粉添加量(以米原料总质量为基准, *D*)(表 2)。通过 JMP 14.0 软件构建 4 因素 3 水平响应面实验模型, 以米糕的感官评分为响应值, 探究各因素及其交互作用对米糕品质的影响, 拟合因素与响应值之间的二次回归模型, 确定最优配方参数, 为豆芋酒酿米糕的工业化生产提供理论依据。

表 2　豆芋酒酿米糕响应面实验因素水平表

Table 2　Factor level table of response surface experiment for *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cake

水平	*A*(粳米:糯米)(*m*:*m*)	*B*(酒酿液添加量)/g	*C*(酵母添加量)/g	*D*(豆芋粉添加量)/g
–1	3:2	50	2	0
0	4:1	150	4	40
1	5:0	250	6	80

1.4　数据处理

本研究所有指标均设 3 次平行重复, 数据以平均值±标准偏差表示, 严格控制操作条件以减少误差[27]。数据统计采用 SPSS 26.0 软件, 单因素实验经单因素方差分析及 Duncan 多重比较(P<0.05)[28]; 响应面实验用 JMP 14.0 软件构建二次回归模型, 优化配方并分析质构特性与感官评分的相关性[29]。数据整理、制表用 Microsoft Excel 2019 软件; 各类图表采用 Origin 2021 软件绘制[30]。数据经异常值检验(剔除偏离平均值 3 倍标准差以上数据), 确保结果可靠。

2　结果与分析

2.1　豆芋酒酿米糕配方中单因素实验结果分析

2.1.1　单因素对豆芋酒酿米糕感官评价的影响

10 名评价员用表 1 的米糕感官评定标准表中的评分标准对加入不同原料添加量制得的米糕进行评价。最后得出结果如下: 当固定原料及工艺条件下, 粳米:糯米为 4:1 (*m*:*m*)时豆芋酒酿米糕感官评分最高。粳米:糯米(*m*:*m*)由 5:0 升至 4:1 时, 感官评分缓慢上升; 由 4:1 降至 0:5 时, 评分呈加速下降趋势。糯米支链淀粉含量超 98%, 赋予制品高弹性与黏性; 粳米含约 17%直链淀粉与 83%支链淀粉, 直链淀粉可提升成型性、脆性与韧性, 支链淀粉则利于膨松与松软口感。二者需适宜配比以平衡膨化与质构特性。

当固定原料与工艺条件下, 酒酿添加量为 150 g 时豆芋酒酿米糕感官评分最高。添加量低于 150 g 时, 米糕品质随酒酿用量增加逐步提升; 超过 150 g 后品质逐渐下降。酒酿具有发酵能力与特有风味, 适量添加可改善米糕蓬松度与口感, 添加不足或过量易造成发酵失衡, 导致成型不佳、口感酸苦。

当固定原料及工艺条件下, 酵母添加量为 4 g 时豆芋酒酿米糕感官评分最高。酵母添加量低于 4 g 时, 米糕品质随用量增加逐步提升; 超过 4 g 后品质逐渐下降。适量酵母可改善米糕蓬松度与内部结构, 添加不足或过量易导致发酵失衡, 破坏组织结构, 引发成型不良、口感酸苦等问题。

不同豆芋粉添加量对米糕感官评价如表 3 所示。由表 3 可知, 在原料配比及加工工艺固定条件下, 豆芋粉添加量为 40 g 时, 豆芋酒酿米糕的感官综合评分最高。随豆芋粉添加量的增加, 米糕感官品质呈现先升高后降低的趋势: 在添加量≤40 g 范围内, 产品品质随豆芋粉比例提升逐渐改善; 当添

加量超过 40 g 后, 米糕整体品质逐步下降。

其主要原因在于: 豆芋粉中富含淀粉, 淀粉在加热条件下吸水膨胀并发生糊化, 糊化淀粉具有良好的持水性, 可改善米糕的凝胶结构与弹性, 提升产品适口性。但豆芋粉添加过量时, 体系中粉质比例过高, 水分分配不足, 导致淀粉糊化不充分, 米糕内部组织结构趋于粗糙, 口感紧实发硬, 整体品质下降。综合感官评价结果表明, 豆芋粉添加量为 40 g 时, 产品感官品质最优。

2.1.2 单因素对豆芋酒酿米糕质构的影响

研究表明, 粳米:糯米(*m*:*m*)为 4:1, 酒酿液添加量为 150 g, 酵母添加量为 4 g 时米糕膨胀体积、口感与组织结构最优, 质构指标表现为硬度低、黏附性小, 弹性、内聚性与咀嚼性佳, 感官评分与质构结果相关性显著, 为豆芋酒酿米糕最佳配方。

本研究对豆芋粉添加量不同的豆芋酒酿米糕进行质构测试, 得到质构结果如表 4 所示。综合表 4 质构指标分析可知, 随着豆芋粉添加量的增加, 豆芋酒酿米糕的质构特性呈现先改善后劣变的变化规律。在豆芋粉添加量较低时(A、B 组), 米糕基质仍以粳米、糯米为主, 淀粉含量高, 凝胶结构紧密, 因此硬度较高。当豆芋粉添加量提升至 C 组(40 g)时, 豆芋粉中的膳食纤维、多糖、胶质成分充分发挥作用, 一方面破坏了纯淀粉形成的致密凝胶结构, 提高了米糕内部孔隙率与蓬松度; 另一方面与酒酿发酵产生的气体协同作用, 使组织结构更加松软。此时米糕硬度最低(853.60 N), 显著低于其他各组(P<0.05), 黏附性最小(1.12 N•s), 不黏牙; 弹性(6.13)、内聚性(0.64)均达到较高水平, 咀嚼性(30.60 N)适中, 适口性最优。

当豆芋粉添加量继续增加(D、E、F 组), 过多的膳食纤维会吸附水分、竞争淀粉吸水, 导致米糕面筋网络不足、持气能力下降, 发酵膨胀受限, 加之豆芋粉本身的致密性增强, 最终使米糕硬度与咀嚼性显著上升, 弹性与内聚性降低, 质构品质变差。

上述质构结果与感官评价结果高度一致, C 组样品因质地柔软、弹性适中、组织结构均匀细腻, 获得了最高感官总分。由此表明, 适量豆芋粉可显著降低米糕硬度, 改善柔软度; 过量添加则会导致米糕质地变硬, 这与膳食纤维对淀粉凝胶的破坏与重构作用密切相关。综合质构特性与感官品质分析, 豆芋粉添加量为 40 g 时效果最佳, 此时制得的豆芋酒酿米糕质地松软、易于咀嚼、弹性良好、结构紧密不易松散, 整体品质最优。

2.2 豆芋酒酿米糕配方添加响应面优化实验结果

在单因素实验结论的基础上, 选取粳米:糯米(*m*:*m*)、酒酿液添加量、酵母添加量和豆芋粉添加量 4 个因素, 使用 JMP 14.0 软件, 设计 4 因素 3 水平, 选择中心复合设计的设计类型, 以感官评价评分为评定指标, 将米糕配方进一步优化。最终软件自动生成 26 组实验组合, 根据这 26 组实验组合依次进行相关实验, 结果如表 5 所示。

将表 5 的感官评价分值录入 JMP 14.0 软件, 选取分析选项中的拟合模型, 角色变量选择感官评价, 特质分析选择标准最小二乘法。得到豆芋酒酿米糕响应面实验回归分析及参数汇总表 6。由表 6 可知, 所建立的回归模型极显著(P<0.0001), 失拟项不显著(P=0.1307>0.05), 表明该模型拟合度良好, 能够准确反映各因素与豆芋酒酿米糕感官评分之间的关系, 可用于后续实验结果的预测和分析。拟合优度分析显示, 模型 R^2 为 0.9736, R_{Adj}^2 为 0.9519, R_{Pre}^2 为 0.8725, 说明模型的解释能力较强, 实验误差较小, 预测值与实际值具有较好的一致性。

从各因素的影响来看, 单因素中 *C* 因素对豆芋酒酿米糕感官评分的影响极显著(P=0.0036<0.01), *A*、*B*、*D* 因素影响不显著(P>0.05); 交互作用中, *AC*、*BC* 交互作用极显著(P<0.01), *AB* 交互作用显著(P=0.0153<0.05), *AD*、*BD*、*CD* 交互作用不显著(P>0.05); 二次项中, B^2、C^2、D^2 影响极显著(P<0.01), A^2 影响不显著(P=0.0766>0.05), 表明各因素对感官评分的影响并非简单的线性关系, 而是存在复杂的二次效应和交互效应。

以感官评价为响应值的响应面图和等高线图中的变化反映出酒酿液添加量, 粳米、糯米质量比, 酵母添加量以及豆芋粉添加量 4 个因素交互作用对米糕的品质影响程度如图 1。基于已证实的有效数据, 在 JMP 14.0 软件中设置此模型的最大化意愿, 可清晰发现各影响因素的优化选择

表 3 不同豆芋粉添加量制得的豆芋酒酿米糕感官评价结果表(n=3)

Table 3 Sensory evaluation results table of *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cake made by adding different amount of *Apios americana* Medikus powder (n=3)

评分项目	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组	F 组
比体积	12.00±0.58^{ab}	13.00±0.58^{bc}	14.00±0.58^{cd}	15.00±0.58^{d}	14.00±0.58^{cd}	13.00±0.58^{bc}
表皮色泽	15.00±0.58^{d}	15.00±0.58^{d}	15.00±0.58^{d}	14.00±0.58^{cd}	13.00±0.58^{bc}	12.00±0.58^{ab}
外表形态	8.00±0.33^{a}	9.00±0.33^{ab}	10.00±0.33^{b}	10.00±0.33^{b}	9.00±0.33^{ab}	8.00±0.33^{a}
颗粒和气孔	13.00±0.58^{ab}	14.00±0.58^{bc}	15.00±0.58^{d}	14.00±0.58^{bc}	13.00±0.58^{ab}	12.00±0.58^{a}
香气	13.00±0.58^{a}	14.00±0.58^{ab}	15.00±0.58^{b}	15.00±0.58^{b}	14.00±0.58^{ab}	13.00±0.58^{a}
口感	13.00±0.58^{a}	14.00±0.58^{ab}	15.00±0.58^{b}	14.00±0.58^{ab}	14.00±0.58^{ab}	13.00±0.58^{a}
组织结构	13.00±0.58^{a}	13.00±0.58^{a}	14.00±0.58^{ab}	15.00±0.58^{b}	14.00±0.58^{ab}	13.00±0.58^{a}
总分	87.00±1.25^{a}	92.00±1.53^{b}	98.00±1.86^{c}	97.00±1.76^{c}	91.00±1.45^{b}	84.00±1.15^{a}

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表 4 同。

表 4　不同豆芋粉添加量制得的豆芋酒酿米糕质构结果表(*n*=3)

Table 4　Texture results table of *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cakes made by adding different amount of *Apios americana* Medikus powder (*n*=3)

评分项目	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组	F 组
硬度/N	1577.50±31.55^{b}	1401.30±28.03^{b}	853.60±17.07^{a}	2200.00±44.00^{c}	5500.00±110.00^{d}	5685.20±113.70^{e}
黏附性/(N・s)	8.46±0.17^{e}	3.50±0.07^{b}	1.12±0.02^{a}	4.34±0.09^{c}	5.25±0.11^{d}	6.16±0.12^{d}
弹性	5.26±0.11^{ab}	5.57±0.11^{bc}	6.13±0.12^{d}	5.01±0.10^{a}	5.19±0.10^{ab}	5.65±0.11^{c}
内聚性	0.54±0.01^{b}	0.61±0.01^{c}	0.64±0.01^{cd}	0.65±0.01^{d}	0.40±0.01^{a}	0.45±0.01^{a}
咀嚼性/N	60.40±1.21^{c}	53.40±1.07^{b}	30.60±0.61^{a}	71.40±1.43^{d}	118.40±2.37^{e}	142.30±2.85^{f}

表 5　响应面实验设计及不同因素对感官评价的影响

Table 5　Design of response surface experiment and the effects of different factors on sensory evaluation

序号	粳米:糯米 (*m*:*m*)	酒酿液添加量/g	酵母添加量/g	豆芋粉添加量/g	感官评价分值	序号	粳米:糯米 (*m*:*m*)	酒酿液添加量/g	酵母添加量/g	豆芋粉添加量/g	感官评价分值
1	5:0	50	2	0	70	14	5:0	250	6	0	83
2	4:1	250	4	40	90	15	5:0	150	4	40	93
3	5:0	50	6	80	89	16	5:0	250	6	80	81
4	5:0	250	2	0	76	17	4:1	150	4	40	98
5	3:2	250	2	80	75	18	3:2	150	4	40	88
6	4:1	150	6	40	91	19	4:1	50	2	0	73
7	3:2	50	6	80	86	20	5:0	250	2	80	77
8	4:1	150	4	40	98	21	3:2	50	6	0	83
9	3:2	250	6	80	85	22	4:1	50	4	40	89
10	3:2	250	2	0	79	23	3:2	50	2	80	81
11	3:2	250	6	0	69	24	5:0	50	6	0	87
12	4:1	150	4	0	87	25	4:1	150	2	40	87
13	5:0	50	2	80	66	26	4:1	150	4	80	91

表 6　豆芋酒酿米糕响应面实验回归分析及参数汇总表

Table 6　Regression analysis and parameter summary table of response surface experiment for *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cake

来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著水平
模型	955.9000	14	68.2786	36.91	<0.0001	**
A	1.0417	1	1.0417	0.56	0.4651	ns
B	4.8403	1	4.8403	2.62	0.1269	ns
C	22.2222	1	22.2222	12.01	0.0036	**
D	0.6173	1	0.6173	0.33	0.5727	ns
AB	14.0625	1	14.0625	7.61	0.0153	*
AC	33.0625	1	33.0625	17.88	0.0008	**
BC	45.5625	1	45.5625	24.63	0.0002	**
AD	2.2500	1	2.2500	1.22	0.2873	ns
BD	2.2500	1	2.2500	1.22	0.2873	ns
CD	0.2500	1	0.2500	0.14	0.7170	ns
A^2	6.7143	1	6.7143	3.63	0.0766	ns
B^2	108.3429	1	108.3429	58.56	<0.0001	**
C^2	22.3429	1	22.3429	12.08	0.0035	**
D^2	22.3429	1	22.3429	12.08	0.0035	**
残差	25.8833	14	1.8488			
失拟	23.0833	10	2.3083	3.30	0.1307	ns
净误差	2.8000	4	0.7000			
总和	981.7833	28				
R^2	0.9736	R_{Adj}^2	0.9519	R_{Pre}^2	0.8725	

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(P>0.05)。

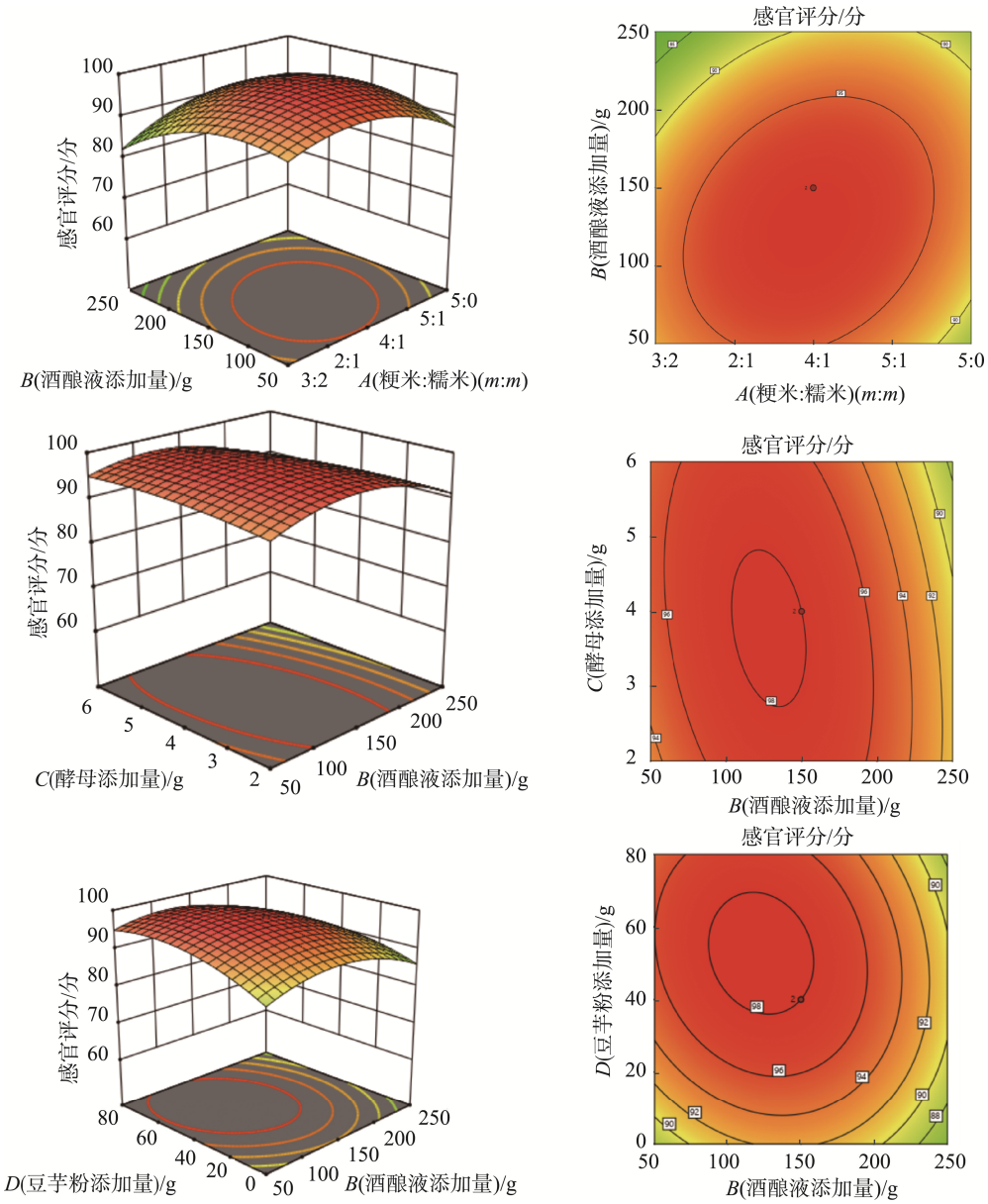


图 1 各因素对豆芋酒酿米糕的感官评价影响

Fig.1 Effects of each factor on the sensory evaluation of *Apios americana* Medikus and sweet ferment rice cake

为: 当粳米添加量为 430 g(糯米 70 g), 即粳米:糯米(*m*:*m*)为 6:1, 酒酿液添加量为 152 g, 酵母添加量为 5.04 g(约等于 5 g), 豆芋添加量为 44.8 g(约等于 45 g)时, 米糕感官评价分最高, 置信区间为[91.9919, 98.0604]。

由图 1 可知, 豆芋酒酿米糕的感官评价分值随酒酿添加量、粳米添加量、豆芋粉添加量及酵母添加量的增加均呈先增加后减小趋势; 各因素影响程度存在差异, 其中酒酿液添加量影响显著高于粳米、糯米质量比, 酵母添加量影响显著高于豆芋粉添加量及酒酿液添加量, 粳米、糯米质量比影响显著高于豆芋粉添加量。

2.3 豆芋酒酿米糕最佳配方确定

为验证响应面法优化所得米糕最佳配方[粳米添加量为 430 g(糯米 70 g), 即粳米:糯米(*m*:*m*)为 6:1, 酒酿液添加量为 152 g, 酵母添加量为 5.04 g(约等于 5 g),豆芋添加量为 44.8 g(约等于 45 g)]的可靠性与实际可操作性, 对该配方进行了验证实验。实验严格沿用响应面实验的原料批次、设备参数及操作流程, 设置 3 次平行实验, 对米糕的核心评价指标(如硬度、弹性、感官评分等)进行检测, 并与响应面模型预测值对比。结果显示, 3 批样品的实际检测值与预测值相对误差均≤8%, 且批次间各指标变异系数≤4%, 感官评分均值稳定在 98 分(与预测最佳评分一致), 表明该最佳配方具有良好的复现性与稳定性, 可稳定制备出符合预期品质的米糕。最终可确定豆芋酒酿米糕的最佳配方为, 在其他一切条件不变的前提下, 500 g 大米的粳米:糯米

(*m*:*m*)为 6:1, 酒酿液添加量为 152 g, 酵母添加量为 5 g, 豆芋添加量为 45 g。此配方制得米糕颜色乳白、表面形态完整、内部组织结构均匀、口感绵密且香气浓郁。

2.4　豆芋酒酿米糕营养成分检测结果

通过最佳配方制得的豆芋酒酿米糕经过实验测得的各营养成分含量如下所示: 水分含量为 44.7 g/100 g, 蛋白质含量为 6.8 g/100 g, 总糖含量为 7.48 g/100 g, 黄酮含量为 56.3 mg/100 g。测定黄酮含量, 旨在明确其功能性活性成分的具体水平, 以直观体现产品的潜在保健价值。

3　结　论

本研究通过系统分析豆芋酒酿米糕的理化指标、功能性成分、感官评价及质构特性, 明确粳米:糯米(*m*:*m*)、酒酿液添加量、酵母添加量、豆芋粉添加量等关键因素对其品质的影响, 核心意义在于丰富功能性米糕产品品类, 为其工业化生产提供理论支撑与技术参考。研究结果表明, 当粳米:糯米(*m*:*m*)为 6:1、酒酿液添加量 152 g、酵母添加量 5 g、豆芋添加量 45 g 时, 制备的豆芋酒酿米糕综合品质最优; 理化及功能性检测显示, 该最优条件下产品水分含量 44.7 g/100 g、蛋白质含量 6.8 g/100 g、总糖含量 7.48 g/100 g、黄酮含量 56.3 mg/100 g, 兼具营养与功能性。豆芋粉对米糕品质的改善作用主要通过调控淀粉糊化进程、促进蛋白质交联实现, 进而优化米糕质构与风味, 提升产品适口性。与前人研究的紫薯、亚麻籽油等功能性米糕[31]相比, 本研究制备的豆芋酒酿米糕有效解决了传统功能性米糕风味单一、质构不佳的痛点, 实现营养、风味与质构的协同提升, 优势显著。该产品所用原料来源广泛、成本可控, 确定的工艺参数清晰可操作, 无需特殊生产设备, 工业化生产可行性高; 同时契合现代消费者健康消费需求, 市场接受度高, 应用前景广阔, 且能为豆芋深加工提供新路径, 助力农业产业链延伸与农产品附加值提升。

参考文献

[1] KOUZUMA Y, IRIE S, YAMAZAKI R, *et al*. Purification and cDNA cloning of a lectin and a lectin-like protein from *Apios americana* Medikus tubers [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2014, 78(4): 574–581.

[2] HOSHIKAWA Y, KIYOCHIKA S, JULIARNI K. The growth of apios (*Apios americana* Medikus) a new crop, under field conditions [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1995, 62(2): 323–327.

[3] CHIKAGE K, YOSHIMI S, YOTARO K, *et al*. Physico-chemical and structural properties of starch isolated from *Apios americana* Medikus [J]. The Japanese Society of Applied Glycoscience, 2012, 59(1): 21–30.

[4] WILSON PW, GORNY JR, BLACKMON WJ, *et al.* Fatty acids in the American groundnut (*Apios americana*) [J]. Journal of Food Science, 1986, 51(5): 2–7.

[5] 楚强. 豆芋叶中功能因子对脂质代谢的调控作用及相关机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
CHU Q. Study on the regulatory effect and related mechanisms of functional factors from *Pachyrhizus erosus* leaves on lipid metabolism [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019

[6] 杨芸芸, 楚强, 阎芙洁, 等. 美国豆芋的营养成分和生理功能[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(6): 141–146.
YANG YY, CHU Q, YAN FJ, *et al*. Nutritional components and physiological functions of American *Pachyrhizus erosus* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(6): 141–146.

[7] KAWAMURA J, MIURA E, KAWAKISHI K, *et al*. Investigation of the safety and antihyperglycemic effect of *Apios americana* flower intake as a food material in normal and diabetic mice [J]. Food Science & Technology Research, 2015, 21(3): 453–462.

[8] KANETA H, KODA M, SAITO S, *et al*. Biological activities of unique isoflavones prepared from *Apios Americana* Medik [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 2016, 80(4): 5–9.

[9] TAKASHIMA M, NARA K, NIKI E, *et al*. Evaluation of biological activities of a groundnut (*Apios americana* Medik) extract containing a novel isoflavone [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 298–305.

[10] 高建新. “长耽典籍, 若啖蔗饴”——李时珍及其《本草纲目·酒》[J]. 书屋, 2021(5): 14–16.
GAO JX. “Indulging in ancient books as if tasting cane syrup”—Li Shizhen and his *Compendium of materia medica*·*alcohol* [J]. Study, 2021(5): 14–16.

[11] 杨勇, 陈卫平, 马蕤, 等. 甜酒酿营养成分分析与评价[J]. 中国酿造, 2011(6): 182–184.
YANG Y, CHEN WP, MA R, *et al*. Analysis and evaluation of nutritional components of sweet fermented rice [J]. China Brewing, 2011(6): 182–184.

[12] 闫华文. 甜酒曲中真菌多样性的研究及甜酒酿营养成分分析[D]. 济宁: 曲阜师范大学, 2015.
YAN HW. Study on fungal diversity in sweet rice wine starter and analysis of nutritional components of sweet fermented rice [D]. Jining: Qufu Normal University, 2015.

[13] 胡代欣. 醪糟的营养[J]. 营养健康新观察, 2006(2): 53–55.
HU DX. Nutrition of fermented glutinous rice [J]. New Observation on Nutrition and Health, 2006(2): 53–55.

[14] 兰景轩. 醪糟的保健食疗[J]. 家庭医学, 2005(1): 49.
LAN JX. Health and dietary therapy of fermented glutinous rice [J]. Family Medicine, 2005(1): 49.

[15] 鲁战会, 杨宁国, 李里特, 等. 醪糟发酵液对 α-葡萄糖苷酶抑制作用的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(2): 112–115.
LU ZH, YANG NG, LI LT, *et al*. Study on the inhibitory effect of fermented glutinous rice broth on α-glucosidase [J]. Food Science, 2006, 27(2): 112–115.

[16] 孟志卿, 许愿, 杨旭, 等. 孝感米酒对小鼠记忆力及抗氧化作用的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2011, 32(2): 1–2.
MENG ZQ, XU Y, YANG X, *et al*. Effects of Xiaogan rice wine on memory and antioxidant capacity of mice [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2011, 32(2): 1–2.

[17] 陈露露, 孟祥河. 酒酿最佳酿造工艺研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(3): 148–155.

CHEN LL, MENG XH. Study on the optimal brewing technology of fermented rice wine [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(3): 148–155.

[18] 王慧俐, 陈露露, 蔡成岗. 酒酿的研究现状与应用进展[J]. 食品科技, 2025, 50(4): 116–122.
WANG HL, CHEN LL, CAI CG. Research status and application progress of fermented rice wine [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(4): 116–122.

[19] 陈露露, 王慧俐. 美国豆芋干制方法及成分分析[J]. 中国农学通报, 2023, 39(4): 154–159.
CHEN LL, WANG HL. Drying methods and component analysis of American *Pachyrhizus erosus* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(4): 154–159.

[20] 孙丽平, 李新华, 王玉华. 亚麻籽油功能性米糕的配方优化及品质分析[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(3): 132–138.
SUN LP, LI XH, WANG YH. Formula optimization and quality analysis of functional rice cake with linseed oil [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(3): 132–138.

[21] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用[J]. 实验科学与技术, 2007(2): 1–4.
SUN CL, TIAN JC, ZHANG YX. Application of TPA texture analysis mode in food research [J]. Experimental Science and Technology, 2007(2): 1–4.

[22] 吴洪华, 姜松. 食品质地及其 TPA 测试[J]. 食品研究与开发, 2005(5): 130–133.
WU HH, JIANG S. Food texture and its TPA test [J]. Food Research and Development, 2005(5): 130–133.

[23] 苏东民. 中国馒头分类及主食馒头品质评价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
SU DM. Study on classification of Chinese steamed bread and quality evaluation of staple steamed bread [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.

[24] 高小妹, 隋勇, 李书艺, 等. 黑米添加量对发酵米糕品质和风味的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2025, 46(5): 68–76.
GAO XM, SUI Y, LI SY, *et al*. Effect of black rice addition on the quality and flavor of fermented rice cakes [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 46(5): 68–76.

[25] 王静, 朱科学, 钱海峰. 紫薯粉对发酵米糕品质及抗氧化性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(12): 120–126.
WANG J, ZHU KX, QIAN HF. Effects of purple sweet potato powder on quality and antioxidant activity of fermented rice cake [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(12): 120–126.

[26] 朱玲, 崔建涛, 张永芳. 响应面法优化西洋参枸杞甜酒酿发酵工艺及抗氧化性研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(5): 259–265.
ZHU L, CUI JT, ZHANG YF. Optimization of fermentation technology of American ginseng and wolfberry sweet fermented rice by response surface methodology and its antioxidant activity [J]. China Brewing, 2025, 44(5): 259–265.

[27] 杜双奎, 李志西, 于修烛. 食品试验设计与统计分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
DU SK, LI ZX, YU XZ. Experimental design and statistical analysis for food science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018.

[28] 王钦德, 杨坚. 食品试验设计与统计分析(第2版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
WANG QD, YANG J. Experimental design and statistical analysis for food science (2nd edition) [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2016.

[29] 李云飞, 葛克山, 殷涌光. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2020.
LI YF, GE KS, YIN YG. Food physical properties [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2020.

[30] 王璋, 许时婴, 江波. 食品化学(第 3 版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018.
WANG Z, XU SY, JIANG B. Food chemistry (3rd edition) [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2018.

[31] 施嘉城, 吴莹莹, 沈存宽,等. 功能性米发糕配方改良及其风味特性研究[J].食品与机械,2025.
SHI JC, WU YY, SHEN Ck, *et al*. Study on Formula Improvement and Flavor Characteristics of Functional Rice Fermented Cake[J]. Food and Machinery, 2025.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)