

# 功能性米发糕配方改良及其风味特性研究

施嘉城 吴莹莹 沈存宽 张慧恩 杨 华

(浙江万里学院生物与环境学院, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** [目的] 开发具有营养强化和风味提升功能的新型米发糕, 实现传统米发糕的健康化改良。[方法] 以粳米粉为基质, 辅以植物乳杆菌和酿酒酵母菌协同发酵。通过单因素试验结合主成分分析法优化亚麻籽粉(7%)与鹰嘴豆粉(5%)复配比例, 系统评估改良配方对产品品质、营养组成、体外消化特性、抗氧化活性及风味特征的影响。[结果] 改良后米发糕在保持色泽白度的同时, 总酚含量提升了 3 倍, DPPH 自由基和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率分别提高了 2 倍; 慢消化淀粉与抗性淀粉显著增加, 体外消化估计血糖升糖指数 (eGI) 降至 53.758, 达到低升糖指数食品标准。营养指标显示蛋白质含量增加 1.105 g/L, 胆固醇、淀粉含量显著降低。GC-MS 结合 OPLS-DA 分析表明, 配方改良有效降低了发酵酸味, 新增异丁醇等特征风味物质。[结论] 亚麻籽粉—鹰嘴豆粉复配技术可显著提升米发糕的营养价值与抗氧化特性, 优化消化代谢性能并改善其风味特征。

**关键词:** 亚麻籽粉; 鹰嘴豆粉; 米发糕; 功能性食品; 气相色谱—质谱法

## Formulation optimization and flavor characteristics of functional rice cake

SHI Jiacheng WU Yingying SHEN Cunkuan ZHANG Huien YANG Hua

(College of Biology and Environment, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

**Abstract:** [Objective] To develop a novel functional rice cake with enhanced nutritional value and improved flavor, achieving a health-conscious modification of traditional rice cake formulation. [Methods] Japonica rice flour was used as the base substrate, supplemented with co-fermentation of plant lactic acid bacteria and brewing yeast. The composite ratio of flaxseed meal (7%) and chickpea meal (5%) was optimized by single-factor experiments combined with principal component analysis (PCA). The effects of the improved formulation on product quality, nutritional composition, *in vitro* digestion characteristics, antioxidant activity, and flavor profile were systematically evaluated. [Results] The optimized rice cake maintained whiteness while total phenolic content increased threefold, and DPPH and ABTS<sup>+</sup> radical scavenging rates doubled. Slowly digestible starch and resistant starch content significantly increased, with an estimated glycemic index (eGI) reduced to 53.758, meeting low glycemic index food standards. Nutritional analysis revealed a 1.105 g/L increase in protein content, with significant decreases in cholesterol and starch. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined with orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) demonstrated that the formulation effectively reduced fermentation acidity and introduced characteristic flavor compounds such as isobutanol. [Conclusion] The flaxseed-chickpea composite technology significantly enhances the nutritional value and antioxidant properties of the rice cake, optimizes digestive metabolic performance, and improves flavor characteristics.

**Keywords:** flaxseed meal; chickpea meal; rice cake; functional food; GC-MS

随着消费者对食品健康属性需求的日益增长, 传统食品如米发糕因其升糖指数较高和营养价值较低的问题, 亟需进行健康化改良<sup>[1]</sup>。目前, 相关研究主要集中在

单一功能性食材 (如谷物、果蔬) 或具体食品类型 (如煎饼、面包) 在食品中的应用方面, 而对米制食品的系统性功能改良较少。基于此, 试验以粳米粉为主料, 辅以鹰嘴

**基金项目:** 宁波市科技特派员团队项目 (编号: 2025S202); 浙江省一流学科 A 类学生创新项目 (编号: CX2025020)

**通信作者:** 杨华 (1978—), 男, 浙江万里学院教授, 博士。E-mail: yanghua@zww.edu.cn

**收稿日期:** 2025-02-07 **改回日期:** 2025-07-31

**引用格式:** 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, 41(11): 136-143.

**Citation:** SHI Jiacheng, WU Yingying, SHEN Cunkuan, et al. Formulation optimization and flavor characteristics of functional rice cake [J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 136-143.

豆粉和亚麻籽粉进行混料设计。

亚麻籽作为一种富含膳食纤维和抗氧化物质的功能性食品,已被广泛应用于食品中以改善其营养价值和健康属性<sup>[2]</sup>。王贝贝等<sup>[3]</sup>研究表明,亚麻籽中的膳食纤维可以降低肥胖、糖尿病和心血管疾病的风险,并显著增加食品的慢消化淀粉含量。此外,鹰嘴豆因其丰富的蛋白质、维生素和膳食纤维,也被用于改善食品的口感和营养特性<sup>[4]</sup>。胡蒙蒙等<sup>[5]</sup>在面包中加入鹰嘴豆粉,成功降低了面包中的脂肪含量,并实现了延缓血糖升高的效果。

微生物发酵作为调控发酵制品品质的核心要素,在米发糕体系中表现为乳酸菌与酵母菌的协同作用<sup>[6-7]</sup>。其中,酵母菌通过淀粉分解代谢生成单糖、乙醇及二氧化碳<sup>[8]</sup>,而乳酸菌的增殖不仅可以显著降低体系 pH 值以抑制杂菌<sup>[9]</sup>,其代谢产生的乳酸等有机酸更可以与酵母代谢产物协同作用,共同塑造米发糕特有的松软质地与柔和甜酸风味。微生物协调发酵为传统发酵食品的健康化升级提供了双重保障。试验拟以粳米粉为主料,辅以鹰嘴豆粉和亚麻籽粉进行混料设计,运用数学模型建立最优配方,系统分析改良配方对产品品质、营养组成、体外消化特性、抗氧化活性及风味特征的影响,旨在探索通过功能性食品原料优化米发糕的营养价值和健康属性,为食品工业在功能性食品开发领域的研究与实践提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

鹰嘴豆粉:蛋白质 45%,脂肪 11%,碳水化合物 7%,本垒县农家兄弟农业发展有限公司;

亚麻籽粉:云南康和生物科技有限公司;

粳米粉:宁波市江北五桥粮油有限责任公司;

面粉:五得利面粉集团有限公司;

白砂糖:安琪酵母股份有限公司;

糖化酶(1 000 U/mg)、麦芽糖培养基和德氏乳杆菌培养基(MRS):北京索莱宝科技有限公司;

胰酶(4 000 U/mg)、 $\alpha$ -淀粉酶(5 U/mg)和胃蛋白酶(10 000 U/g):上海源叶生物有限公司;

DPPH 自由基清除能力和总胆固醇测定试剂盒:南京建成生物工程研究所;

植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum* KCKM0720)、酵母菌(*Saccharomyces cerevisiae* HBUAS61921):保藏于浙江万里学院生物与环境学院实验室;

其他化学试剂均为国产分析纯;

可见分光光度计:HU5700 型,日立高新技术有限公司;

酶标仪:SpectraMax 型,美国 Bio-Rad 公司;

超低温高速离心机:CF16RX II 型,日本 HITACHI 公司;

TA-XT Plus 物性分析仪:TMS-PRO 型,美国 FTC 公司;

分光测色仪:CS-580 型,杭州彩谱科技有限公司;

GC-MS:5977B 型,美国 Agilent 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 米发糕的制备

(1) 菌液调配:将酿酒酵母菌和植物乳杆菌分别接种至麦芽糖培养基和 MRS 液体培养基中,扩大培养 48 h 后收集至 50 mL 离心管中,4 000 r/min 离心 8 min,弃去上清后加入无菌水重悬,调整菌液浓度至  $10^8$  CFU/mL,备用。

(2) 米发糕制作:将粳米粉与水按质量比 1:1,加入亚麻籽粉和鹰嘴豆粉混匀,添加粳米粉质量比 10% 面粉,15% 糖,7.5% 植物乳杆菌液,7.5% 酿酒酵母菌液,调制为米发糕浆液,30 ℃ 发酵 15 h<sup>[10]</sup>。将米发糕浆液装入 7 cm×4 cm×5 cm 模具中,蒸煮 30 min。以不添加鹰嘴豆粉和亚麻籽粉的米发糕作为对照组,其余步骤相同。

1.2.2 单因素试验和混料试验 以亚麻籽粉添加量(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)、鹰嘴豆粉添加量(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)为变量,以米发糕主成分分析得到的综合评分为响应值,进行单因素试验,选取最佳添加量范围进行混料试验。

1.2.3 米发糕的感官评价 参照李佳等<sup>[11]</sup>的方法并稍加修改。由 8 名食品专业评审人员组成评价小组,按表 1 对米发糕进行感官评分,得分结果去除一个最大值和一个最小值。评分标准采用 100 分制,包括形态(20 分)、色泽(20 分)、气味(20 分)、口感(20 分)和组织(20 分)。

表 1 米发糕感官评价评分标准

Table 1 Scoring criteria for sensory evaluation of rice cakes

类别	评分标准	评分
形态(20 分)	表面光滑,不塌陷	16~20
	表面稍光滑,轻微塌陷	10~15
	表面大面积塌陷	0~9
色泽(20 分)	颜色均匀,色泽透亮	16~20
	颜色较均匀,色泽较透亮	10~15
	颜色基本均匀,色泽稍透亮	0~9
气味(20 分)	具有香味,酸味几乎无	16~20
	香味淡,略有酸味	10~15
	香味无,酸味重	0~9
口感(20 分)	柔软且易咀嚼,不粘牙	16~20
	稍柔软且咀嚼性较差,稍粘牙	10~15
	质地较硬,咀嚼性差,粘牙	0~9
组织(20 分)	横截面气孔均匀且致密	16~20
	横截面气孔稍均匀,较致密	10~15
	横截面气孔不均匀,不致密	0~9

1.2.4 质构特性 参照朱勇娟等<sup>[12]</sup>的方法并略作修改。米发糕冷却至室温后,使用模具切成 4 cm×4 cm×4 cm 的立方体,采用 P/36R 探头,测前速度 3 mm/s,测后速度 3 mm/s,触发力 0.049 N,目标模式选为 Strain,40%。

1.2.5 白度测定 先用白色校准板对色度仪进行校准,随即将白度仪置于米发糕上方,用  $L^*$  值(白度,从黑到白,0~100)来分析米发糕的色泽<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.6 营养成分含量测定

(1) 淀粉含量:参照 GB 5009.9—2023。

(2) 蛋白质含量:参照 GB 5009.5—2016。

(3) 总胆固醇含量:采用总胆固醇测定试剂盒。

#### 1.2.7 抗氧化特性

(1) 提取液制备:参照 Zhang 等<sup>[14]</sup>的方法稍加改进。准确称取 2 g 冻干后的米发糕样品,加入 40 mL 体积分数为 80% 的甲醇,37 °C、200 r/min 振荡提取 2 h,上清液于 4 °C 贮藏备用。

(2) 总酚含量测定:参照李志鑫等<sup>[15]</sup>的方法。

(3) DPPH 自由基清除率测定:采用 DDPH 自由基清除率试剂盒。

(4) ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率测定:参照米春孝等<sup>[16]</sup>的方法稍加改进。配制 5.45 mmol/L 的 ABTS 溶液与 5.45 mmol/L 的过硫酸钾,按体积比 1:1 混匀,暗处反应 12 h,取 1 mL 溶液稀释 50 倍,将 2 mL 溶液与 0.1 mL 提取液混匀,测定吸光度。以无水乙醇代替样品与 ABTS 溶液反应为对照组,以无水乙醇代替 ABTS 与样品反应为空白组,按式(1)计算 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率。

$$X = \left( 1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$X$ ——ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率,%;

$A_{\text{样品}}$ ——样品的吸光度;

$A_{\text{对照}}$ ——对照组吸光度;

$A_{\text{空白}}$ ——空白组吸光度。

#### 1.2.8 体外消化特性

(1) 淀粉组成:参照陈辉凡等<sup>[17]</sup>的方法并略作修改。米发糕淀粉含量为 (90±2) mg/g。加入 6.0 mL 蒸馏水和 10.0 mL pH 为 6.0 的醋酸钠缓冲溶液,37 °C 水浴 10 min。另取 5 mL pH 为 6.0 的醋酸钠缓冲溶液,加入 210 U/mL  $\alpha$ -淀粉酶和 210 U/mL 糖化酶,37 °C 平衡 10 min,将酶液与样品混匀,37 °C 分别水浴 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 min,取 0.1 mL 混合液与 0.9 mL 无水乙醇混合。将灭活后的消化液以 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液加入 0.5 mL DNS 试剂,95 °C 水浴 5 min,稀释至 25 mL,测定 450 nm 处吸光度。分别按式(2)~式(5)计算淀粉消化率、快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)含量。

$$R_{\text{SD}} = \frac{A}{A_0} \times 21 \times 10 \times \frac{1}{90} \times \frac{162}{180}, \quad (2)$$

$$R_{\text{RDS}} = G_{0-20} \times R_{\text{SD}}, \quad (3)$$

$$R_{\text{SDS}} = G_{20-120} \times R_{\text{SD}}, \quad (4)$$

$$R_{\text{RS}} = R_{\text{TS}} - R_{\text{DS}} - R_{\text{SDS}}, \quad (5)$$

式中:

$R_{\text{SD}}$ ——淀粉消化率,%;

$R_{\text{RDS}}$ ——快消化淀粉含量,mg/mL;

$R_{\text{SDS}}$ ——慢消化淀粉含量,mg/mL;

$R_{\text{RS}}$ ——抗性淀粉含量,mg/mL;

$A$ ——样品相对于空白溶液的吸光度;

$A_0$ ——空白溶液的吸光度;

$G_{0-20}$ ——0~20 min 内样品的葡萄糖释放量,mg/g;

$G_{20-120}$ ——20~120 min 内的葡萄糖释放量,mg/g;

$R_{\text{TS}}$ ——米发糕中淀粉含量,mg/g。

(2) 估计血糖升糖指数(eGI):采用 DNS 试剂法<sup>[18]</sup>。

(3) 口腔消化:准确称取 1 g 米发糕,与 5 mL 模拟唾液溶液混匀,加入唾液淀粉酶(75 U/mL),37 °C 搅拌 3 min,模拟不同米发糕在人体口腔环境内的消化情况。

(4) 胃部消化:将口腔消化液中的样品与 5 mL 的模拟胃液和胃蛋白酶(60 U/mL)混匀。以加入模拟胃液的时间开始计算,分别取出 0, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120 min 的混合液 200  $\mu$ L,加入 1.8 mL 无水乙醇灭酶活。3 000 r/min 离心 10 min,取上清液,加入 0.5 mL DNS 试剂,95 °C 水浴 5 min,稀释至 25 mL,测定 450 nm 处吸光度。根据葡萄糖标准曲线计算葡萄糖含量。

(5) 肠道消化:向剩余消化液中加入 10 mL 模拟肠液,加入胰酶(100 U/mL),37 °C 水浴 30 min,分别按式(6)~式(8)计算淀粉水解率、水解指数和估计血糖升糖指数。

$$D_{\text{H}} = \frac{G_{\text{t}} \times 0.9}{T_{\text{s}} \times R_{\text{s}}} \times 100\%, \quad (6)$$

$$H_{\text{I}} = \frac{A_{\text{UCI}}}{A_{\text{UC0}}} \times 100\%, \quad (7)$$

$$e_{\text{GI}} = 0.862 \times H_{\text{I}} + 8.198, \quad (8)$$

式中:

$D_{\text{H}}$ ——淀粉水解率,%;

$G_{\text{t}}$ ——葡萄糖含量,mg/g;

$T_{\text{s}}$ ——总淀粉含量,mg/g;

$R_{\text{s}}$ ——抗性淀粉含量,mg/mL;

$A_{\text{UCI}}$ ——样品水解率曲线下面积;

$A_{\text{UC0}}$ ——标准物质水解率曲线下面积;

$H_{\text{I}}$ ——水解指数,%;

$e_{\text{GI}}$ ——估计血糖升糖指数。

1.2.9 挥发性风味物质 参照朱斌超等<sup>[19]</sup>的方法并略作修改。取 2 g 米发糕放入顶空瓶底部,将盖子旋紧,45 °C 水浴 40 min,用 50/30  $\mu$ m DVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶

空瓶中,萃取40 min,结束后将萃取头放入250℃进样口中解吸5 min,平行进样3次。GC条件:色谱柱为HP-INNOWax(30 mm×250 μm,0.25 μm),载气(He)氮气,纯度≥99.999%,流速1 mL/min,进样温度250℃;萃取头解析5 min,脉冲无分流进样;升温程序:45℃保持2 min,以10℃/min升至70℃保持10 min;以5℃/min升至170℃保持5 min;以10℃/min升至230℃保持5 min。各组分质谱结果经NIST.11谱库进行检索,根据相似度≥80确认其香气成分,采用面积归一化法计算样品各组分的相对含量。

1.2.10 香味物质成分分析 基于NIST.11谱库,对样本的代谢物进行质谱定性,得到香气成分含量。采用SIMCA 14.1软件进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA),计算预测变量的重要性投影(VIP)。以VIP值>1筛选关键性风味物质。对米发糕各指标进行主成分分析,得到指标的特征值和贡献率,特征值>1的进行主成分因子提取。按式(9)计算综合得分。

$$X=(X_1Y_1+X_2Y_2)/A, \quad (9)$$

式中:

$X$ ——综合得分;

$A$ ——累计特征值;

$X_1、X_2$ ——各指标在主成分1、2中的得分;

$Y_1、Y_2$ ——各主成分的贡献值。

### 1.3 数据分析

各试验重复3次,结果表示为平均值±标准差,采用

SPSS Statistics 17.0软件进行样本独立 $T$ 检验,进行显著性分析和主成分分析计算,采用Design-Expert 13.0软件进行方差分析,采用Origin 2018软件制图。

## 2 结论与分析

### 2.1 单因素与混料试验分析

由图1可知,随着鹰嘴豆粉和亚麻籽粉添加量的增加,米发糕的硬度和咀嚼性显著提升,与Schirmer等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。具体而言,淀粉组分发生显著减少会影响米发糕内部的网络结构强度,从而影响其内部结构稳定性,使产品本身的咀嚼性显著提升。随着鹰嘴豆粉和亚麻籽粉添加量的增加,米发糕的白度和感官评分逐渐下降,这可能与纤维的强吸水性形成水分网络有关,导致自由水量减少,从而降低白度<sup>[21]</sup>。

由表2、表3和图2可知,累计综合贡献率为94.930%,累计贡献率超过85%的阈值标准<sup>[22]</sup>,表明主成分分析能够有效解释米发糕的品质变化。通过综合得分的计算,最佳的添加量组合为亚麻籽粉添加量7%、鹰嘴豆粉添加量5%,此条件下米发糕的硬度、咀嚼性和抗性淀粉含量均达到较高水平,而白度和感官评分则相对较好。

### 2.2 体外消化特性

由表4可知,改良米发糕的抗性淀粉、快消化淀粉和慢消化淀粉含量显著高于对照组。由图3可知,最佳配方的米发糕整体淀粉消化率较低,这可能与抗性淀粉和慢

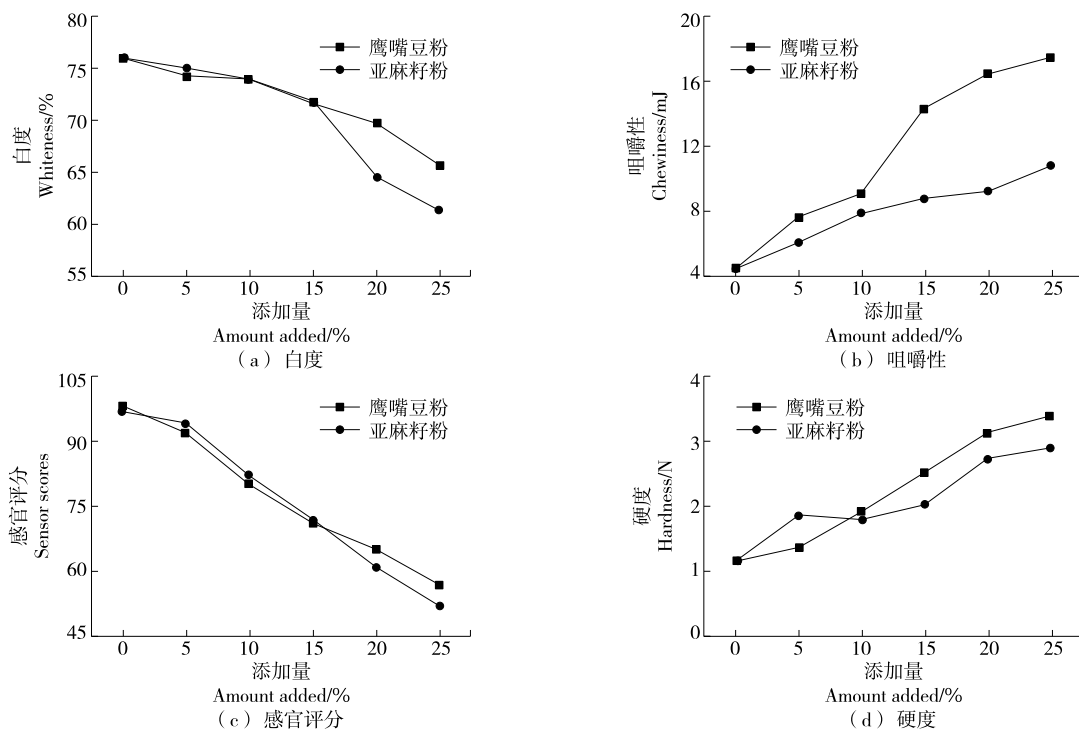


图1 鹰嘴豆粉和亚麻籽粉添加量对米发糕品质的影响

Figure 1 Effect of chickpea meal and flaxseed meal addition on the quality of rice cake

表 2 单因素主成分分析特征值及贡献率

Table 2 Eigenvalues and contribution rates of univariate principal component analysis

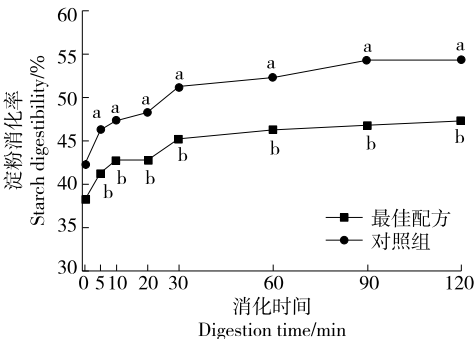
主成分	特征值/%	贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.376	87.511	87.511
2	0.371	7.420	94.930
3	0.162	3.237	98.167
4	0.056	1.114	99.282
5	0.036	0.718	100.000

表 3 主成分得分值及综合得分

Table 3 Principal component scores and composite scores

试验组	鹰嘴豆粉 添加量/%	亚麻籽粉 添加量/%	第 1 主 成分	第 2 主 成分	综合 得分
1	0	5	2.396	2.268	2.800
2	0	10	2.105	1.946	2.351
3	0	15	1.596	1.448	1.574
4	0	20	0.744	0.870	0.595
5	0	25	0.190	0.383	0.129
6	5	0	2.527	2.348	3.254
7	10	0	2.079	1.883	2.889
8	15	0	1.476	1.171	2.454
9	20	0	0.965	0.753	2.209
10	25	0	0.283	0.134	1.714

消化淀粉含量的增加有关,延缓了淀粉分解过程。亚麻籽粉和鹰嘴豆粉富含不溶性和可溶性膳食纤维,其中可溶性膳食纤维可通过促进肠道蠕动,减少淀粉的停留时间和完



字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )

图 3 不同米发糕的淀粉消化率

Figure 3 Starch digestibility rate of different rice cakes

全消化机会<sup>[23]</sup>。李金鑫等<sup>[15]</sup>通过在米糕中加入绿茶粉,提升了米糕中茶多糖和膳食纤维含量,有效增加了抗性淀粉和慢消化淀粉比例。Moreira 等<sup>[24]</sup>研究表明,亚麻籽中的膳食纤维能够提高其结晶度,从而抑制葡萄糖在淀粉水解中的扩散,并有效降低 $\alpha$ -淀粉酶活性。基于淀粉消化率和公式推算,米发糕的 eGI 值 $\leq 55$ ,表明其可能为低 GI 食品<sup>[5]</sup>。

2.3 抗氧化活性分析

由图 4 可知,最佳配方的米发糕在抗氧化活性方面显著优于对照组。最佳配方米发糕的总酚含量较对照组高出 3 倍( $P<0.05$ ),表明其抗氧化能力更强。DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率也分别较对照组高出 2 倍( $P<0.05$ ),进一步验证了最佳配方米发糕的显著抗氧化效果。

亚麻籽粉的抗氧化特性源于多种生物活性成分的协

表 4 不同米发糕的 HI、eGI 与淀粉组成<sup>†</sup>

Table 4 HI, eGI values, and starch composition of different rice cakes

组别	水解指数/%	估计血糖升糖指数	快消化淀粉/(mg·mL <sup>-1</sup> )	慢消化淀粉/(mg·mL <sup>-1</sup> )	抗性淀粉/(mg·mL <sup>-1</sup> )
对照组	60.94±1.02 <sup>a</sup>	60.73±1.57 <sup>a</sup>	73.23±1.08 <sup>a</sup>	23.49±1.03 <sup>b</sup>	1.28±0.06 <sup>b</sup>
最佳配方	52.85±2.07 <sup>b</sup>	53.76±3.76 <sup>b</sup>	58.21±1.65 <sup>b</sup>	32.75±2.05 <sup>b</sup>	9.04±0.57 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

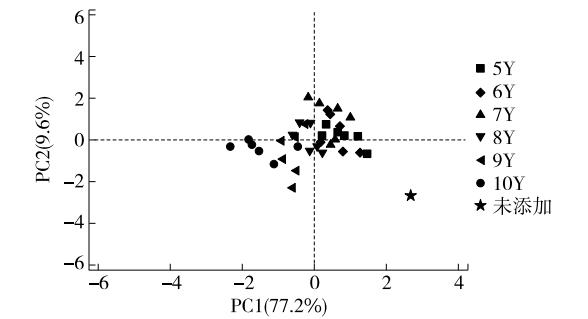


图 2 PCA 主成分分析图

Figure 2 Principal component analysis diagram

同作用。其中,维生素 E 作为主要的脂溶性抗氧化剂,能够有效抑制脂质过氧化,而 $\alpha$ -亚麻酸则通过其抗炎特性间接促进抗氧化过程<sup>[25]</sup>。Kaur 等<sup>[26]</sup>研究发现,亚麻籽粉及其制品中的原儿茶酸、食子酸等酚类和类黄酮化合物,通过清除自由基和抑制氧化链反应来延缓脂质氧化。鹰嘴豆粉的抗氧化活性主要来自咖啡酸、槲皮素和儿茶素等酚类物质,其蛋白质在消化过程中还可产生具抗氧化特性的生物活性肽<sup>[27]</sup>。Delgao-Andrade 等<sup>[28]</sup>研究表明,在饼干中添加鹰嘴豆后,其在烘焙过程中因高蛋白含量而生成具抗氧化性的美拉德反应产物,且在消化过程中

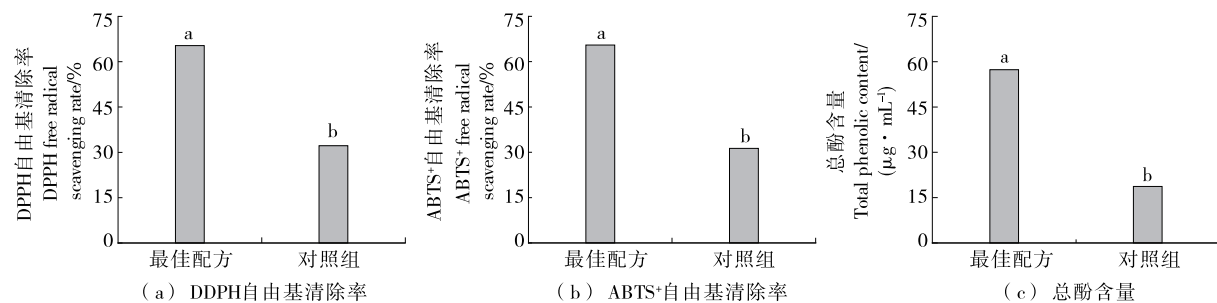
字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图4 不同米发糕的抗氧化活性

Figure 4 Antioxidant activity of different rice cakes

释放的亮氨酸和赖氨酸等氨基酸进一步增强了抗氧化作用。

最佳配方的米发糕的抗氧化特性显著高于对照组,可能与这些成分的协同作用机制有关。具体而言,亚麻籽粉和鹰嘴豆粉通过其协同作用增强了自由基清除能力,同时减少了脂质过氧化的发生。此外,米发糕加工过程中高含量的蛋白质可能也为自由基清除提供了有利条件。

#### 2.4 营养成分分析

由表5可知,与对照组相比,最佳配方中淀粉含量显著降低 ( $P < 0.05$ ),这不仅源于亚麻籽粉膳食纤维的替代效应,也源于鹰嘴豆粉中占比65%的 $\alpha$ -半乳糖苷的特殊代谢特性,与温科等<sup>[29]</sup>的研究形成呼应。相较于传统谷物制品的高淀粉含量,这种复合多糖体系可能更利于餐后血糖调控,与全麦面包中添加菊粉的血糖指数改良效应应具有相似机制<sup>[30]</sup>。

在脂质代谢层面,最佳配方的米发糕的胆固醇含量下降了54.5% ( $P < 0.05$ ),揭示了植物基原料的协同作用机制。亚麻籽木脂素作为选择性雌激素受体调节剂的功能已获多项临床研究支持<sup>[31]</sup>。蛋白质体系的优化则可以发现当鹰嘴豆粉含量增加5%的同时,鹰嘴豆蛋白较高的体外消化率预示其营养效价的实质性改善。这一发现突破了传统谷物制品氨基酸限制的瓶颈<sup>[32]</sup>。亚麻籽和鹰嘴豆粉度都具有较强的营养价值且可以为食品带来功能性,赋予食品新的价值。

#### 2.5 风味物质分析

表6揭示了亚麻籽—鹰嘴豆复合粉对米发糕风味轮廓

表5 不同米发糕的营养成分<sup>†</sup>

Table 5 Nutritional components of different rice cakes

组别	蛋白含量/ (g·L <sup>-1</sup> )	淀粉含量/ %	胆固醇含量/ (mol·L <sup>-1</sup> )
对照组	1.87±0.14 <sup>b</sup>	87.21±5.74 <sup>a</sup>	2.75±0.54 <sup>a</sup>
最佳配方	2.98±0.24 <sup>a</sup>	64.11±3.22 <sup>b</sup>	1.25±0.37 <sup>b</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

的重构机制,这一发现与谷物基质发酵过程中挥发性代谢物的动态调控研究形成理论相呼应。最佳配方的VIP>1的18种标志性风味物质(含3类新增芳香族化合物)不仅印证了辅料添加引发的代谢途径转换,更揭示了传统米制品风味工程中植物蛋白与膳食纤维的协同增效作用。选出VIP值较高的18种香气成分,其中醇类1种,醛类2种,烷烃4种,酸类5种,酮类2种,烯萜类2种,其他2种。

对照组以乙酸和丙酸为主导的酸类代谢特征,符合传统糯米发酵的典型挥发性谱<sup>[33]</sup>。而最佳配方的辛酸乙

表6 不同米发糕的香气成分<sup>†</sup>

Table 6 Aroma components of different rice cakes

种类	香气成分	保留时间/min	相对含量/%		VIP值
			最佳配比	对照组	
醇类	异丁醇	4.85	31.27±1.32	0.03±0.02	1.775
醛类	己醛	5.32	1.41±0.32	2.71±0.41	0.987
	壬醛	9.43	1.10±0.62	—	0.764
烷烃类	1,4-二甲基环己烷	14.27	0.59±0.04	1.81±0.21	0.775
	环辛烷	15.45	—	2.45±0.13	0.632
	儿茶酚硼烷	16.65	0.56±0.03	1.83±0.57	0.842
	偶氮甲烷	21.76	—	0.78±0.21	0.932
酸类	乙酸	7.32	1.02±0.23	38.40±2.32	1.423
	丙酸	8.94	—	1.42±0.19	1.023
	丁酸	10.33	—	0.63±0.15	0.723
	正癸酸	16.32	—	0.70±0.12	0.832
	己酸	21.53	0.92±0.14	1.01±0.32	0.653
酮类	3-羟基-2-丁酮	10.76	2.82±0.76	—	1.012
	香叶基丙酮	15.65	—	0.60±0.03	0.865
烯萜类	姜烯	10.42	4.79±0.76	1.81±0.21	1.323
	辛酸乙酯	18.45	22.11±2.54	5.74±1.01	1.653
其他	蔡	15.06	1.66±0.15	0.62±0.27	1.510
	2-正戊基呋喃	21.22	0.48±0.17	0.46±0.11	0.831

<sup>†</sup> “—”代表未检出。

酯(VIP=1.653)显著性检出( $P<0.05$ ),与鹰嘴豆粉富含的中链脂肪酸直接相关。且异丁醇(VIP=1.755)的生成量较对照组增加了31%,其代谢溯源研究表明,亚麻籽粉中的天门冬氨酸可为酵母提供支链氨基酸前体,通过Ehrlich途径转化为具有麦芽香气的醇类,这一机制在啤酒酿造体系中已获充分验证<sup>[34]</sup>。从风味感知整合视角分析,最佳配方建立的“酯—萜—醇”三元协同体系显著优化了米发糕的感官接受度,特别是辛酸乙酯的添加,其呈香强度(OAV值=3.7)较对照组的(OAV=2.1)具有更优的甜香持续性。

### 3 结论

以粳米粉为主要原料,添加5%亚麻籽粉和7%鹰嘴豆粉,通过主成分分析确定最佳配方,该米发糕口感细腻、软硬适中,香味浓郁。改良后的米发糕中抗性淀粉含量提高了9%,其估计血糖升糖指数数值达到低升糖指数食品水平。总酚、ABTS<sup>+</sup>自由基和DPPH自由基清除率测定结果显示,最佳配方米发糕具有显著抗氧化特性。营养成分分析表明,最佳配方米发糕的蛋白质含量增加,淀粉和胆固醇含量显著降低。此外,GC-MS和OPLS-DA结果显示,最佳配方米发糕中的酸味物质大幅减少,且产生了新的风味物质异丁醇,具有独特的香味。综上,通过对米发糕配方的优化,提升了米发糕的功能性和风味特性,降低了米发糕酸味。未来应重点探讨功能性配料与基质的相互作用机制,建立功能性改良产品的品质预测模型。

#### 参考文献

- [1] ZHENG T, CHEN H Y, YU Y G, et al. Property and quality of Japonica rice cake prepared with Polygonatum cyrtonema powder[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101370.
- [2] 孙强, 王丽艳, 荆瑞勇, 等. 不同品种亚麻籽8种生物活性物质含量及其主成分分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 40-45, 145. SUN Q, WANG L Y, JING R Y, et al. Determination and principal component analysis of 8 kinds of bioactive substances in different flaxseed varieties[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 40-45, 145.
- [3] 王贝贝, 张永顺, 郭洪涛, 等. 亚麻籽粉对面条品质和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 72-79. WANG B B, ZHANG Y S, GUO H T, et al. Effects of flaxseed powder on the quality and digestive characteristics of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 72-79.
- [4] 朴升虎, 袁洁瑶, 徐丽, 等. 5种杂豆粉的理化性质及凝胶特性[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 168-172. PIAO S H, YUAN J Y, XU L, et al. Study on physicochemical and gel properties of five kinds of minor bean flours[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 168-172.
- [5] 胡蒙蒙, 廖梓康, 黎琼, 等. 两种杂粮对面包预拌粉烘烤性能和淀粉消化性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 185-193. HU M M, LIAO Z K, LI Q, et al. Effects of two kinds of coarse cereals on baking properties and in vitro starch digestibility of pre-blend multigrain bread flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 185-193.
- [6] LU Z H, CAO W, PENG H H, et al. Effect of fermentation metabolites on rheological and sensory properties of fermented rice noodles[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(12): 2 134-2 141.
- [7] GENG D H, LIANG T T, YANG M, et al. Effects of *Lactobacillus* combined with semidry flour milling on the quality and flavor of fermented rice noodles[J]. Food Research International, 2019, 126: 108612.
- [8] 牛婷婷, 周雪洁, 余小波, 等. 过表达PDI对毕赤酵母分泌淀粉样蛋白的影响:以胱抑素为例[J]. 微生物学报, 2021, 61(10): 3 315-3 327. NIU T T, ZHOU X J, XU X B, et al. Effect of PDI overexpressing on secretion of exogenous amyloid protein in *Pichia pastoris*: take cystatin as an example[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(10): 3 315-3 327.
- [9] 王博, 张维清, 李鹏, 等. 不同发酵类型乳酸菌对全麦面包品质影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 180-186. WANG B, ZHANG W Q, LI P, et al. Effects of different fermentation types of lactic acid bacteria on the quality of whole wheat bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 180-186.
- [10] HE L, CHEN Y H, ZHANG H T, et al. Isolation and identification of *Lactobacillus* and yeast species and their effect on the quality of fermented rice cakes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102984.
- [11] 李佳, 吴娜娜, 刘春, 等. 常压蒸煮米糠对籼米粉性质及米发糕品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(11): 221-232. LI J, WU N N, LIU C, et al. Effects of rice bran treated by atmospheric pressure cooking on the properties of indica rice flour and the quality of rice cake[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and, 2024, 24(11): 221-232.
- [12] 朱勇娟, 吴卫国, 张喻, 等. 碎茶挤压预处理茶粉制品对籼米粉性质及米发糕品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(5): 30-36. ZHU Y J, WU W G, ZHANG Y, et al. Effects of extruded crushed tea powder pretreatment on the properties of indica rice powder and the quality of fermented rice cake[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(5): 30-36.
- [13] 叶文倩, 陈峰, 胡冰彦, 等. 冻结温度对米发糕品质特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 46-53. YE W Q, CHEN F, HU B Y, et al. Effects of freezing temperatures on quality characteristics of rice steamed cake[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2022, 37(10): 46-53.
- [14] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124983.

- [15] 李志鑫, 徐雪野, 张新振, 等. 绿茶米糕研制及其品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 171-178.  
LI Z X, XU X Y, ZHANG X Z, et al. Preparation and quality analysis of rice cake contained green tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 171-178.
- [16] 米春孝, 周慧, 胡兴媛, 等. 微波辅助酶解罗非鱼皮抗氧化肽制备及结构分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 173-181.  
MI C X, ZHOU H, HU X Y, et al. Preparation and structural analysis of antioxidant peptides from tilapia skin by microwave-assisted enzymatic hydrolysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 173-181.
- [17] 陈辉凡, 吴卫国, 任贤龙, 等. 菊芋全粉对米发糕贮藏品质特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 245-253.  
CHEN H F, WU W G, REN X L, et al. Study on correlation between total powder content of Jerusalem artichoke and storage quality of rice steamed Chinese sponge cake[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1): 245-253.
- [18] PIECYK M, WOROBIEJ E, WOŁOSIAK R, et al. Effect of different processes on composition, properties and in vitro starch digestibility of grass pea flour[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(1): 848-856.
- [19] 朱斌超, 陈德文, 沈伊亮, 等. 米发糕发酵米浆中脂肪酸成分的GC-MS分析[J]. 食品科技, 2010, 35(11): 309-311.  
ZHU B C, CHEN D W, SHEN Y L, et al. GC determination of fatty acids in fermented slurry from steamed sponge cake[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(11): 309-311.
- [20] SCHIRMER M, HÖCHSTÖTTER A, JEKLE M, et al. Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(1): 52-63.
- [21] 宫春宇, 廉雅雯, 于洋, 等. 玉米须不溶性膳食纤维分析及其对面包品质和消化特性的影响研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 67-73, 83.  
GONG C Y, LIAN Y W, YU Y, et al. Analysis of corn silk insoluble dietary fiber and its effects on quality and digestion characteristics of bread[J]. China Condiment, 2024, 49(1): 67-73, 83.
- [22] CHUN M H, KIM E K, LEE K R, et al. Quality control of *Schizonepeta tenuifolia* Briq by solid-phase microextraction gas chromatography/mass spectrometry and principal component analysis[J]. Microchemical Journal, 2010, 95(1): 25-31.
- [23] 李美妮, 高洋, 代羽可欣, 等. 低GI面包预拌粉的研制[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(6): 33-39.  
LI M N, GAO Y, DAI Y K X, et al. Development of low GI bread premixed flour[J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(6): 33-39.
- [24] MOREIRA F D, REIS C E G, WELKER A F, et al. Acute flaxseed intake reduces postprandial glycemia in subjects with type 2 diabetes: a randomized crossover clinical trial[J]. Nutrients, 2022, 14(18): 3 736.
- [25] 张煌, 刘依, 杨贝, 等. 亚麻籽粉粒径对面包品质及其抗氧化特性影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(8): 24-28, 55.  
ZHANG H, LIU Y, YANG B, et al. Effect of particle size of flaxseed powder on bread quality and its antioxidant property[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(8): 24-28, 55.
- [26] KAUR M, SINGH B, KAUR A. Dry-air roasting impact on physicochemical, functional, antioxidant properties, phenolic profile and Maillard reaction products of flaxseed flour and cake flour[J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138571.
- [27] 王敬丽, 孟珺, 朱萌茜, 等. 发酵豆乳乳酸菌的筛选及其对豆乳抗氧化性能的改善作用[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 76-83.  
WANG J L, MENG J, ZHU M X, et al. Screening of lactic acid bacteria to improve the fermentation and antioxidant properties of bean milk[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 76-83.
- [28] DELGADO-ANDRADE C, OLÍAS R, MARÍN-MANZANO M C, et al. Chickpea seed flours improve the nutritional and the antioxidant profiles of traditional shortbread biscuits: effects of *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Antioxidants, 2024, 13(1): 118.
- [29] 温科, 毕文, 金学莹. 低碳水化合物轻脂面包配方研究[J]. 农产品加工, 2023(11): 5-8.  
WEN K, BI W, JIN X Y. The research of formula of bread with low-carb and light fat[J]. Farm Products Processing, 2023(11): 5-8.
- [30] 陈昊, 胡蒙蒙, 李赤翎, 等. 杂粮面包预拌粉的烘焙品质改良[J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 195-203, 240.  
CHEN H, HU M M, LI C L, et al. Study on baking quality improvement of multi-grain pre-blent bread flour[J]. Food & Machinery, 2023, 39(1): 195-203, 240.
- [31] HYVÄRINEN H K, PIHLAVA J M, HIIDENHOVI J A, et al. Effect of processing and storage on the stability of flaxseed lignan added to bakery products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(1): 48-53.
- [32] 王嘉男, 秦永萍, 曾鹏, 等. 鹰嘴豆蛋白的特性分析及即食豆腐的开发[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(14): 140-148.  
WANG J N, QIN Y Q, ZENG P, et al. Characteristics of chickpea protein and development of ready-to-eat tofu[J]. Food Research and Development, 2025, 46(14): 140-148.
- [33] MI Y J, WANG Z H, GUAN L N, et al. Analysis of volatile compounds in rice porridge of different Japonica rice varieties in Northeast China[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 113: 103749.
- [34] HAZELWOOD L A, DARAN J M, VAN MARIS A J, et al. The Ehrlich pathway for fusel alcohol production: a century of research on *Saccharomyces cerevisiae* metabolism[J]. Applied and environmental microbiology, 2008, 74(8): 2 259-2 266.