

陈召桂, 陈春梅, 俞娇, 等. 发酵米糕关键品质指标与感官评价的相关性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 321-330. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050020

CHEN Zhaogui, CHEN Chunmei, YU Jiao, et al. Correlation between Key Quality Indicators and Sensory Evaluation of Fermented Rice Cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 321-330. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050020

· 分析检测 ·

发酵米糕关键品质指标与感官评价的相关性研究

陈召桂^{1,2}, 陈春梅², 俞娇², 洪雁^{1,3,*}, 顾正彪^{1,*}

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

2. 浙江五芳斋实业股份有限公司, 浙江嘉兴 314000;

3. 嘉兴未来食品研究院, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 为探究发酵米糕的品质, 本文选取 13 种市售发酵米糕, 对其色泽、比容、质构、挥发性风味物质的含量进行测定分析, 考察不同发酵米糕各项品质指标之间的差异性和相关性, 同时采用主成分分析法对发酵米糕进行综合评价, 筛选出能够代表发酵米糕品质的关键指标。结果表明: 13 种市售发酵米糕在比容、色泽、质构、挥发性风味物质种类和含量及感官评价方面均存在一定差异; 在比容和色泽指标与感官评价指标的相关性分析中, 米白色与 b^* 值呈显著负相关性 ($P < 0.05$), 与 L^* 值及比容呈极显著正相关性 ($P < 0.01$); 质构与感官评价指标的相关性分析中, 粘性适中及气孔均匀都与粘附性、内聚性、弹性、胶粘性以及咀嚼性呈显著相关性 ($P < 0.05$); 风味物质与感官评价指标的相关性分析中, 异戊醇和苯乙醇与发酵香呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 异戊醇与谷物香呈显著正相关 ($P < 0.05$)。通过主成分分析最终确定了 4 个主成分, 累积方差贡献率为 91.166%, 分别为内聚性、胶粘性、异戊醇含量和 b^* 值, 可以作为发酵米糕的核心品质指标, 表征发酵米糕的整体品质特性。

关键词: 发酵米糕, 品质, 感官评价, 相关性分析, 综合评价

中图分类号: TS234

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0321-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050020



本文网刊:

Correlation between Key Quality Indicators and Sensory Evaluation of Fermented Rice Cake

CHEN Zhaogui^{1,2}, CHEN Chunmei², YU Jiao², HONG Yan^{1,3,*}, GU Zhengbiao^{1,*}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Zhejiang Wufangzhai Industrial Co., Ltd., Jiaxing 314000, China;

3. Jiaxing Future Food Research Institute, Jiaxing 314000, China)

Abstract: Thirteen commercially available fermented rice cakes were selected to assess their quality. We evaluated the color, specific volume, texture, and volatile flavor compounds. The differences and correlations among these indicators were also investigated. Furthermore, a comprehensive evaluation was conducted using principal component analysis (PCA) to identify key indices representing overall quality. The results showed that 13 commercially available fermented rice cakes exhibited variations in specific volume, color, texture, types and contents of volatile flavor substances, and sensory characteristics. In the correlation analysis between specific volume, color index, and sensory evaluation indice: rice white color was significantly negatively correlated with b^* value ($P < 0.05$), and extremely significantly positively correlated with L^* value and specific volume ($P < 0.01$). In the correlation analysis between texture and sensory evaluation indices: moderate

收稿日期: 2025-05-08

基金项目: 嘉兴市重点研究计划项目 (2024BZ20003); 国家自然科学基金项目 (22276078); 嘉兴市新型研发机构创新引导专项 (2025YDZX009)。

作者简介: 陈召桂 (1982-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 研究方向: 米制品加工, E-mail: chen_zhaogui@wufangzhai.com。

* 通信作者: 洪雁 (1974-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 淀粉质资源开发与利用, E-mail: hongyan@jiangnan.edu.cn。

顾正彪 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 淀粉质资源开发与利用, E-mail: zhengbiaogu@jiangnan.edu.cn。

stickiness and uniform air pores were significantly correlated with adhesiveness, cohesiveness, springiness, gumminess, and chewiness ($P < 0.05$). In the correlation analysis between flavor substances and sensory evaluation indices: isoamyl alcohol and phenylethanol were extremely significantly positively correlated with fermented flavor ($P < 0.01$), and isoamyl alcohol was significantly positively correlated with cereal flavor ($P < 0.05$). Through principal component analysis, four principal components were ultimately identified with a cumulative variance contribution rate of 91.166%, namely cohesiveness, viscosity, isoamyl alcohol content, and b^* value, which could serve as core quality indicators for fermented rice cake and characterize the overall quality characteristics of fermented rice cake.

Key words: fermented rice cake; quality; sensory evaluation; correlation analysis; comprehensive evaluation

发酵米糕是我国最地道、最古老的传统大米发酵食品,由大米经浸泡、磨浆、发酵、汽蒸而成,成品内部结构呈蜂窝状,质地松软且富有弹性,米香与发酵风味融合,营养丰富且易于消化,广受民众喜爱^[1]。发酵米糕的生产历史悠久,但一直依赖传统家庭式或手工作坊生产,因此存在生产周期长、生产效率低、产品质量不稳定的弊端,同时由于缺乏系统的基础理论研究,目前尚无科学理论的指导,未能实现工业化、现代化生产,难以满足日益增长的消费需求。这些典型突出的实际问题,一定程度上制约了发酵米糕行业的发展。因此,采用现代食品高新技术对特色风味传统食品进行科学的发掘、研究、改造,有助于改善我国发酵米糕行业加工现状,为其工业化生产提供科学的理论依据。

发酵米糕品质评价通常包括感官评价和理化指标检验两种方法,感官评价受评价者主观因素干扰显著,对于不同品种的发酵米糕很难做出统一评价;理化指标的检验具有较强的可比性、重复性,但需要检验的具体指标多,包括比容、质构、色泽及风味特性等^[2-5]。近年来国内外专家对发酵米糕的研究主要集中在原料选择、配方及工艺优化、发酵菌种选择等方面,致力于探究其感官品质和理化特性。Chen等^[6]对7种不同籼米粉发酵米糕比容、色泽、质构、风味特性等理化指标及感官评价指标进行分析,发现籼米粉的脂肪含量、蛋白质以及直链淀粉的

含量可能是影响发酵米糕整体品质的重要影响因素。朱勇娟等^[7]将碎茶添加至籼米粉中制作发酵米糕,对其发酵米糕质构特性、糊化特性及感官评价进行探究,通过相关性分析评估各指标间的关联度,发现发酵米糕感官评分与质构特性、糊化特性各指标间存在密切关联。目前,关于发酵米糕品质指标与感官评价之间的相关性研究鲜有报道,故有必要进行相关研究,以期发酵米糕品质指标替代感官评价提供参考。

本研究采集市售13个品牌的白糖发酵米糕样品,系统测定其比容、色泽、质构及风味特性,并进行感官评定,深入分析样本间差异性。通过整合相关性分析与主成分分析,旨在筛选出评价发酵米糕品质的核心指标。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

13款市售白糖发酵米糕(S1~S13)均购自线上官方旗舰店,分别产自浙江、河南、广东、四川、安徽等地,具体见表1;油菜籽 市售;2,4,6-三甲基吡啶 上海麦克林生化科技股份有限公司。

ILC LOADCELL 250N 质构仪 美国 FTC 公司;CM-5 色差仪 日本柯尼卡美能达公司;GCMS-QP2010 Ultra System 单四极杆气相色谱质谱联用仪 日本岛津公司。

表1 13种市售发酵米糕配料表

Table 1 List of ingredients of 13 commercial fermented rice cakes

编号	配料	产地
S1	水,大米粉,绵白糖,酒酿,乙酰化二淀粉磷酸酯,淀粉,干酵母,复配膨松剂,黄原胶,瓜尔胶,羟甲基纤维素钠,干桂花,植物油	浙江杭州
S2	水,粘米粉,白砂糖,淀粉,羟丙基二淀粉磷酸酯,植物油,食品加工用酵母,黄原胶,海藻酸钠,单双甘油脂肪酸酯,羟甲基纤维素钠,海藻酸丙二醇酯,焦磷酸二氢二钠,磷酸氢钙,瓜尔胶,干桂花,食用香精,唾液链球菌嗜热亚种,德氏乳杆菌保加利亚亚种	河南郑州
S3	水,粘米粉,白砂糖,淀粉,乙酰化二淀粉磷酸酯,复配膨松剂,复配增稠剂,食品加工用酵母,植物油,桂花	浙江衢州
S4	水,桂花糕预拌粉,绵白糖,食品加工用酵母,桂花	河南郑州
S5	大米,水,白砂糖,桂花,酵母	浙江宁波
S6	水,糕点预拌粉,白砂糖,桂花干,酵母,食用香精,复配膨松剂	广东梅州
S7	水磨籼米粉,饮用水,白砂糖,食用木薯淀粉,大米,小麦粉,高活性干酵母,食用玉米淀粉,食用桂花,食品添加剂,食用香精	四川成都
S8	饮用水,大米粉,淀粉,白砂糖,植物油,乙酰化二淀粉磷酸酯,食品加工用酵母,起酥油,桂花,黄原胶,海藻酸丙二醇酯,海藻酸钠,复配膨松剂	四川资阳
S9	饮用水,大米粉,白砂糖,粘米粉,木薯淀粉,小麦淀粉,食品加工用酵母,干桂花,食品添加剂	安徽马鞍山
S10	大米粉,水,木薯淀粉,绵白糖,酵母,泡打粉,瓜尔胶,羟甲基纤维素钠,干桂花	浙江嘉兴
S11	粳米,水,白砂糖,糯米,猪肉,糯米酒	浙江衢州
S12	粳米,糯米,白砂糖,酒糟,肥膘,水	浙江衢州
S13	粳米,糯米,饮用水,白砂糖,米酒,猪肉	浙江衢州

1.2 实验方法

1.2.1 发酵米糕比容测定 将市售米糕复蒸 8 min 后置于室温下冷却并称重(m), 然后用油菜籽替换法^[8]测定其体积(V)。按下式计算米糕的比容:

$$\text{比容}(\text{mL/g}) = \frac{V}{m}$$

式中: m 为米糕质量(g), V 为米糕体积(mL)。

1.2.2 发酵米糕色泽测定 参考朱雯等^[9]的方法, 用切片机将蒸制、冷却 1 h 后的米糕切成厚约 25 mm 的米糕片, 使用色差仪测定中心部分米糕片的色泽, 发酵米糕颜色的三个测定参数包括 a^* 值(红绿值)、 b^* 值(黄蓝值)和 L^* 值(亮度)。

1.2.3 发酵米糕质构特性测定 将发酵米糕切成长宽高分别为 2 cm 的正方体, 采用 TPA 测试, 将样品放置于 P/25 圆柱形探头下, 测试速度为测前 3.0 mm/s, 测试 1.0 mm/s, 测后 3.0 mm/s, 两次压缩时间间隔为 5 s, 压缩程度为 40%, 触发力为 5 g。每个样品重复 6 次平行。

1.2.4 发酵米糕挥发性化合物测定 参照张文灿等^[10]方法并进行修改后, 采用固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术(Solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)对发酵米糕进行挥发性化合物测定。

样品准备: 取米糕中心部分 3.5 g 剪碎后放入顶空萃取瓶中, 在测试前向萃取瓶中加入 10 μL 浓度为 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 2,4,6-三甲基吡啶标准溶液作为内标物。

固相微萃取(Solid phase microextraction, SPME)条件: 将装有样品的萃取瓶置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中平衡 10 min, 将老化后的萃取头垂直插入瓶中吸附 30 min, 结束后取出萃取头, 转移到进样口解吸 10 min。

气相色谱(Gas chromatography)条件: DB-5MS 毛细管柱; 载气为氦气; 流速恒定为 1.0 mL/min; 进样方式: 不分流; 升温程序: 起始温度 40 $^{\circ}\text{C}$, 以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$, 保持 8 min, 然后以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 240 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min。

质谱(Mass spectrometry)条件: 离子源为电子轰击源, 能量为 70 eV; 离子源温度为 250 $^{\circ}\text{C}$, 接口温度 250 $^{\circ}\text{C}$, 检测器电压 450 V, 发射电流 15 μA ; 扫描范围 33~500 m/z。定性结果与标准质谱库(NIST)匹配获得, 获得结果均为基于相似度>85 的成分。同时, 采用峰面积归一法进行半定量分析。

1.2.5 OAV 值计算 OAV 值为每种香气成分的浓度与相对应香气成分的嗅觉阈值之比。按下式计算:

$$\text{OAV} = \frac{C}{T}$$

式中: C 为样品中测得成分的含量($\mu\text{g}/\text{kg}$), T 为该成分的阈值($\mu\text{g}/\text{kg}$)。

1.2.6 发酵米糕感官评价 按男女比例 1:1 聘请

10 名食品专业人员成立感官评价小组, 分别对新鲜米糕进行定量描述感官评定。基于模糊数学理论指导, 前期研究已成功建立发酵米糕包括色泽、组织形态、口感、风味 4 部分的感官评价标准^[11], 如表 2 所示。按照评价标准在专业的感官评定实验室内对发酵米糕进行观察、品尝及打分。实验前对 10 名人员进行相关针对性训练, 以了解米糕的感官特性及其感官特性各指标含义。分别对各实验组米糕进行打分, 最终结果取平均值(去除最高以及最低分)。为减小影响提供纯净水用于漱口以清除残留风味。

表 2 发酵米糕感官评定标准

Table 2 Standard for sensory evaluation of fermented rice cake

项目	描述词	权重	满分(分)	评分标准	分值(分)
色泽	米白色	1.0	10	呈米白色, 颜色整体均匀	10~7
				稍微有色差, 整体偏米白色	6~4
				色差较大, 有色斑, 不是米白色	3~0
	光泽	1.2	12	表面有光泽, 无脱皮现象	12~9
				表面光泽较淡, 有脱皮开裂现象	8~4
				无光泽, 脱皮开裂严重	3~0
粘性适中	0.9	9	爽口, 不粘牙	9~6	
			不爽口, 较粘牙	5~3	
			粘牙性严重	2~0	
	口感	1.1	11	咬/按压后较快恢复原状	11~8
				咬/按压后较慢恢复原状	7~4
				咬/按压后不能恢复原状	3~0
柔软	1.3	13	使用较小力即可变形	13~10	
			使用较大力才能变形	9~5	
			需要很大力才能变形	4~0	
	蓬松	1.2	12	整体形态好, 无凹陷	12~9
				整体形态较好, 有部分凹陷	8~4
				发酵米糕形态差, 有明显凹陷	3~0
组织形态	气孔均匀	1.2	12	内部气孔小而分布均匀	12~9
				内部个别气孔较大, 分布不均匀	8~4
				内部气孔大小不一, 结构粗糙	3~0
	发酵香	0.9	9	有较浓郁的发酵香味	9~6
				略带发酵香味, 无异味	5~3
				无香味, 有异味	2~0
风味	1.2	12	具有谷物清香味, 无异味	12~9	
			基本无异味, 谷物清香味较淡	8~4	
				有异味	3~0

1.3 数据处理

所有实验均重复进行 3 次, 以平均值 \pm 标准差表示。采用 SPSS 26、Metabo Analyst 2.0 进行相关性分析、显著性分析, 显著性分析采用 Duncan 多重检验。采用 Origin 8.5 及 TBtools 绘图。

2 结果与分析

2.1 发酵米糕品质指标分析

2.1.1 不同发酵米糕的比容及色泽品质分析 表 3 展示了不同发酵米糕的比容及色泽品质。比容反映的是米糕体积膨胀程度, 在一定程度上影响其外观、

口感滋味及组织状态,是表征米糕品质的重要直观指标^[12]。实验结果显示,不同发酵米糕的比容范围在1.06~2.40 mL/g之间,不同发酵米糕的比容大小存在显著差异($P<0.05$),表明不同发酵米糕样品间的体积膨胀程度差异显著。其中,S1比容最高,S13比容最低。

表3 不同市售发酵米糕的比容和色泽

Table 3 Specific volume and chromaticity of commercially available fermented rice cakes

编号	比容(mL/g)	L^*	a^*	b^*
S1	2.40±0.06 ^a	85.67±0.26 ^d	-0.43±0.02 ^c	9.69±0.45 ^{de}
S2	2.05±0.07 ^c	85.89±0.36 ^{cd}	-0.68±0.11 ^{de}	9.06±0.56 ^e
S3	2.02±0.19 ^{cd}	83.32±0.87 ^e	-0.26±0.10 ^b	10.07±0.47 ^d
S4	1.98±0.01 ^{cd}	80.07±0.47 ^e	-0.61±0.07 ^d	9.10±0.24 ^e
S5	2.27±0.12 ^{ab}	84.99±1.03 ^d	-0.46±0.10 ^c	9.65±0.84 ^{de}
S6	2.39±0.05 ^a	88.49±1.55 ^a	-0.49±0.14 ^c	11.46±1.60 ^e
S7	2.03±0.05 ^{cd}	87.16±1.00 ^b	-0.19±0.08 ^b	12.56±0.65 ^b
S8	2.14±0.10 ^{bc}	82.96±0.60 ^e	0.06±0.10 ^a	11.25±0.60 ^e
S9	1.70±0.16 ^e	86.88±1.69 ^{bc}	-0.47±0.05 ^c	11.10±0.30 ^e
S10	1.87±0.08 ^d	85.07±1.66 ^d	-0.38±0.08 ^c	10.92±1.14 ^e
S11	1.40±0.07 ^f	81.46±0.87 ^f	-0.74±0.08 ^e	11.11±0.68 ^e
S12	1.29±0.01 ^f	76.00±1.50 ⁱ	-1.08±0.16 ^f	10.00±0.57 ^d
S13	1.06±0.03 ^g	77.56±0.65 ^h	0.12±0.10 ^a	14.75±0.57 ^a

注:同列不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平下差异显著,表4、表6同。

色泽是决定消费者对其喜好程度和接受度的重要参数之一,也是感官评定的重要指标。不同样品间的色度存在显著差异($P<0.05$), L^* 值变化范围为76~88.49,其中S6的 L^* 值最高,表明其亮度最大、颜色最亮,这可能与S6具有较高的比容有关,米糕比容增大引起颜色变浅,从而亮度增加; a^* 值范围为-1.08~0.12,除S8及S13外,其余样品均呈现负值,表明样品颜色偏绿,而S8和S13颜色偏红,其中S12的 a^* 值最低,S13最高; b^* 值范围为9.06~14.75,其中S13的 b^* 值最高为14.75±0.57,表明该样品呈现出较深的黄色。

2.1.2 不同发酵米糕的质构品质分析 全质构分析是评价食品品质指标的常用方法,能够减少人的主观

因素引起的误差,客观反映食品品质变化,与感官评价存在一定的相关性^[13]。利用质构仪测定了不同发酵米糕的硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性及咀嚼性以探究其质构特性。不同发酵米糕的质构特性结果如表4所示,由表可知不同样品间的质构特性存在显著差异($P<0.05$)。通常将发酵米糕的硬度、咀嚼性及弹性特性作为主要的评价指标^[14]。其中,硬度反映的是米糕的柔软程度,S8的硬度最高,为7.59 N,而S1和S9的硬度最低,均为3.02 N;弹性可反映米糕受压力后的回弹能力,S10具有最高的弹性,为7.74 mm,而S12弹性最低,为4.15 mm;咀嚼性反映的则是米糕对咀嚼过程的持续抵抗性,S8咀嚼性最高,为39.03 N,而S12咀嚼性最低,为9.62 N。总体而言,S8具有较高的硬度、弹性及咀嚼性,这是其具有较好的膨胀性、柔韧性和组织稳定性的表现,拥有较为优良的品质特性;而S12具有较低的弹性和咀嚼性,表明其质地较为柔软。

2.1.3 不同发酵米糕的挥发性风味物质分析 挥发性风味物质的组成在决定发酵米糕品质及消费者接受度方面起着关键的作用,本研究使用SPME-GC-MS对样品的挥发性风味物质进行了半定量分析,由于烷烃类物质通常具有极低的挥发性和较弱的气味阈值,对食品的直接风味贡献较小,因此将其排除,共检测到50种挥发性风味物质,结果见图1。按照化合物结构可将其分为8大类,包括8种醛类、7种醇类、1种烯类、13种酯类、2种酸类、5种酮类、7种芳香族化合物及7种其他化合物。由图可知,不同发酵米糕中检测到的挥发性风味物质含量差异显著($P<0.05$),其中,S4的总挥发性风味物质含量最高,达46821.27 $\mu\text{g}/\text{kg}$,检测到含量最高的醛类、醇类、烯类、酯类及芳香族化合物,而S9总含量最低,为380.29 $\mu\text{g}/\text{kg}$,未检测到酯类及酸类物质。

醛酮类物质具有较低的气味阈值,对发酵米糕的整体风味贡献程度较高。醛类物质产生的挥发性风味物质主要呈现浓郁的清香、米香味及醇香味,是脂肪氧化的主要产物^[15]。不同发酵米糕的挥发性风

表4 不同市售发酵米糕的质构特性参数

Table 4 Texture characteristic parameters of commercially available fermented rice cakes

编号	硬度(N)	粘附性(N·mm)	内聚性(Ratio)	弹性(mm)	胶粘性(N)	咀嚼性(N)
S1	3.02±0.24 ^d	0.15±0.03 ^{cde}	0.67±0.05 ^{bc}	5.17±1.16 ^{de}	2.04±0.22 ^e	10.69±3.08 ^g
S2	6.06±0.86 ^{bc}	0.15±0.08 ^{de}	0.65±0.04 ^c	4.88±1.24 ^{de}	3.96±0.61 ^b	19.56±6.30 ^{cde}
S3	5.32±0.76 ^{bc}	0.12±0.03 ^e	0.68±0.05 ^{bc}	6.40±0.71 ^{bc}	3.61±0.57 ^b	22.96±3.38 ^{bc}
S4	5.82±0.64 ^{bc}	0.11±0.03 ^e	0.69±0.02 ^{bc}	6.47±0.48 ^{bc}	3.98±0.38 ^b	25.83±3.42 ^b
S5	6.29±0.68 ^b	0.31±0.17 ^b	0.60±0.04 ^d	5.82±1.06 ^{cd}	3.80±0.64 ^b	22.62±7.22 ^{bcd}
S6	5.00±0.72 ^c	0.08±0.04 ^e	0.7±0.08 ^{bc}	6.29±0.93 ^e	3.51±0.71 ^{bc}	22.19±5.56 ^{bcd}
S7	4.89±0.37 ^c	0.03±0.02 ^e	0.75±0.01 ^a	7.61±0.30 ^a	3.68±0.28 ^b	27.92±1.27 ^b
S8	7.59±2.87 ^a	0.06±0.03 ^e	0.72±0.02 ^{ab}	7.40±0.89 ^{ab}	5.46±2.05 ^a	39.03±9.87 ^a
S9	3.02±0.11 ^d	0.07±0.06 ^e	0.71±0.04 ^{ab}	7.35±0.29 ^{ab}	2.15±0.10 ^e	15.79±0.97 ^{ef}
S10	4.95±0.48 ^c	0.06±0.01 ^e	0.70±0.01 ^{bc}	7.74±0.67 ^a	3.44±0.28 ^{bc}	26.66±3.70 ^b
S11	5.64±0.33 ^{bc}	0.27±0.16 ^{bc}	0.48±0.07 ^e	4.87±1.10 ^{de}	2.69±0.50 ^{cde}	13.46±5.12 ^g
S12	5.65±0.70 ^{bc}	0.49±0.17 ^a	0.41±0.02 ^f	4.15±0.51 ^e	2.30±0.32 ^{de}	9.62±2.29 ^g
S13	5.46±0.19 ^{bc}	0.25±0.14 ^{bcd}	0.56±0.04 ^d	5.49±0.53 ^{cd}	3.04±0.21 ^{bcd}	16.64±1.37 ^{def}

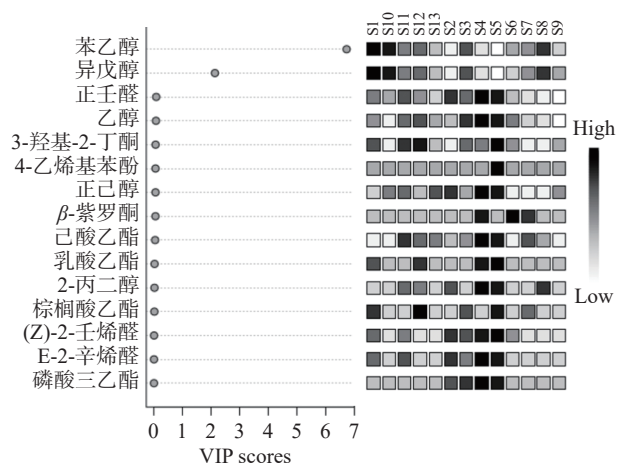


图2 发酵米糕挥发性化合物VIP值

Fig.2 VIP scores of volatile compounds in fermented rice cakes

的物质是可以被人体感知的, OAV 数值越大表明其对整体风味贡献越大^[26-27]。苯乙醇和异戊醇两种物质的气味阈值分别为 0.56423 μg/kg 和 0.0017 μg/kg^[28], 通过公式计算 13 种发酵米糕 OAV 值, 计算结果见表 5, 结果显示市售发酵米糕样品除 S5、S7、S9 和 S13 外, OAV 值均大于 1。因此, 结合 VIP 值>1 和 OAV 值>1 的结果, 最终选定苯乙醇和异戊醇作为不同发酵米糕的关键风味物质。

表5 VIP 值>1 的挥发性化合物的 OAV
Table 5 OAV for volatile compounds with VIP>1

编号	OAV值	
	异戊醇	苯乙醇
S1	277.92	2.24
S2	263.29	1.03
S3	1201.21	6.17
S4	5081.45	33.05
S5	ND	23.85
S6	487.04	1.70
S7	412.69	0.97
S8	332.15	1.40
S9	43.32	0.11
S10	402.51	1.00
S11	127.32	2.59
S12	1372.39	5.25
S13	271.19	0.55

注: ND表示未检出。

苯乙醇是发酵米制品中最为典型的挥发性风味物质^[29-30], 可作为发酵米糕的代表性风味物质, 本研究通过筛选发现苯乙醇(花香气味)的VIP值接近7, 与前人研究相一致。异戊醇在发酵食品中的风味主要体现为辛辣味、杂醇油味, 略带果香(如香蕉、苹果)^[22], 本研究中VIP值大于2, 少量存在可赋予发酵米糕风味层次感。

2.1.4 不同发酵米糕的感官评价 感官评定是对食品品质进行描述及判定最为直观的指标, 同时也是质量控制体系的重要组成部分。不同发酵米糕感官评价结果如表6所示。不同发酵米糕在色泽、口感、组

表6 不同市售发酵米糕的感官评价结果

Table 6 Results of the sensory evaluation of commercially available fermented rice cakes

编号	色泽	口感	组织形态	风味	总分
S1	17.7±3.0 ^a	26.2±3.1 ^{ab}	18.3±2.0 ^{abc}	18.2±2.9 ^a	80.4±6.5 ^a
S2	16.3±1.9 ^a	28.0±2.6 ^a	17.4±3.2 ^{bcd}	11.3±4.8 ^{bc}	73.0±7.0 ^b
S3	16.2±2.2 ^a	26.3±2.6 ^{ab}	18.4±2.2 ^{abc}	14.2±2.3 ^b	75.1±6.5 ^{ab}
S4	17.3±2.0 ^a	26.6±2.3 ^a	19.4±2.9 ^{ab}	12.2±3.2 ^{bc}	75.5±5.1 ^{ab}
S5	16.5±3.3 ^a	23.8±2.2 ^{bc}	15.0±3.8 ^{de}	9.1±5.1 ^c	64.4±10.6 ^c
S6	17.2±2.6 ^a	26.6±3.0 ^a	20.3±1.8 ^a	12.8±5.6 ^{bc}	76.9±9.2 ^{ab}
S7	12.7±2.7 ^b	27.1±2.6 ^a	19.1±2.9 ^{ab}	14.2±3.8 ^b	73.1±5.1 ^b
S8	16.7±1.9 ^a	26.2±1.9 ^{ab}	20.0±1.5 ^{ab}	13.8±3.0 ^b	76.7±4.0 ^{ab}
S9	16.2±2.0 ^a	25.4±2.0 ^{ab}	17.9±2.2 ^{abc}	13.5±4.5 ^b	73.0±4.8 ^b
S10	15.6±2.5 ^a	25.4±2.5 ^{ab}	17.8±2.5 ^{abc}	14.1±3.5 ^b	72.9±5.9 ^b
S11	15.2±2.9 ^{ab}	21.2±1.7 ^d	16.0±3.1 ^{cd}	11.4±3.3 ^{bc}	63.8±6.7 ^c
S12	15.1±2.9 ^{ab}	20.1±2.4 ^d	11.9±3.9 ^f	12.7±3.7 ^{bc}	59.8±7.7 ^c
S13	9.2±4.4 ^c	22.0±3.2 ^{cd}	13.1±3.5 ^{ef}	14.8±4.8 ^{ab}	59.1±9.3 ^c

织形态及风味的评分上具有显著差异($P<0.05$), 其中, S1的感官得分最高, 整体呈现米白色, 表面有光泽, 有浓郁的发酵香及谷物香风味, 同时爽口而不粘牙, 柔软有弹性, 蓬松无凹陷, 气孔分布均匀; S13的感官得分最低, 色泽淡黄, 光泽较淡, 组织结构较差, 内部气孔不均一, 风味不足。

2.2 发酵米糕品质指标与感官评价相关性分析

为了确定发酵米糕感官评价指标与物性指标间的关系, 对发酵米糕包括比容、色泽(L^* 、 a^* 、 b^*)、质构和关键风味物质在内的各物性指标与感官评价指标之间进行了相关性分析。

2.2.1 发酵米糕比容和色泽与感官评价相关性分析

由于不同原料及加工工艺导致发酵米糕比容和色泽有所差异, 从而影响发酵米糕的感官品质。由图3可知, 发酵米糕比容和色泽指标的相关性分析显示, 色泽指标中 a^* 值与 b^* 值间呈显著正相关($P<0.05$), 色泽指标中的 L^* 值与比容呈显著正相关($P<0.05$)。在与感官评价指标的相关性分析中同样发现多个指标存在显著相关性, 色泽指标中的 L^* 值与感官评价指标中的米白色呈极显著正相关($P<0.01$), 与粘性适中、有弹性、蓬松及气孔均匀呈显著正相关($P<$

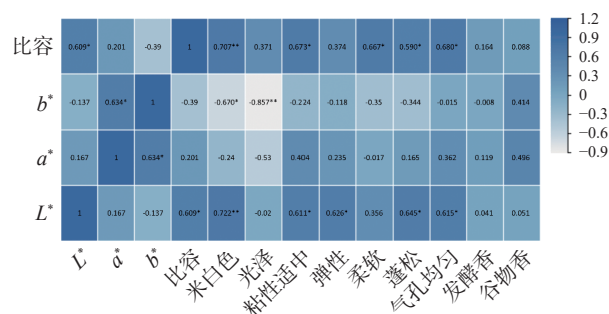


图3 发酵米糕比容和色泽与感官评价相关性

Fig.3 Correlation relationship between specific volume, chromaticity and sensory evaluation of fermented rice cakes

注: *表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关, 图4~图6同。

0.05); 色泽指标中的 b^* 值与感官评价指标中的米白色呈显著负相关($P<0.05$), 与光泽呈极显著负相关($P<0.01$), 相关系数范围在 $-0.857\sim-0.670$; 品质指标中的比容与感官评价指标中的米白色呈极显著正相关($P<0.01$), 与粘性适中、柔软、蓬松及气孔均匀呈显著正相关($P<0.05$), 相关系数范围在 $0.590\sim0.707$ 。以上分析可知, L^* 值、 b^* 值及比容与感官评价指标间具有显著相关性。

2.2.2 发酵米糕质构与感官评价相关性分析 由图 4 可知, 发酵米糕质构指标间存在一定的相关性, 其中, 咀嚼性与硬度及内聚性间存在显著正相关($P<0.05$), 与粘附性存在显著负相关($P<0.05$), 与弹性及胶粘性间存在极显著正相关($P<0.01$); 硬度与胶粘性呈极显著正相关($P<0.01$); 粘附性与内聚性及弹性间均呈极显著负相关($P<0.01$); 内聚性与弹性呈极显著正相关($P<0.01$)。质构指标与感官评价指标间的相关性分析可以看出二者间存在一定的相关性, 硬度与谷物香呈显著负相关($P<0.05$), 相关系数为 -0.562 ; 粘附性与粘性适中、有弹性、蓬松及气孔均匀均呈极显著负相关($P<0.01$), 相关系数范围在 $-0.896\sim-0.787$; 内聚性与粘性适中、有弹性、蓬松及气孔均匀均呈极显著正相关($P<0.01$), 相关系数范围在 $0.739\sim0.912$; 弹性与粘性适中、蓬松及气孔均匀呈显著正相关($P<0.05$), 与有弹性呈极显著正相关($P<0.05$), 相关系数范围在 $0.558\sim0.687$; 胶粘性粘性与粘性适中及气孔均匀均呈显著正相关($P<0.05$), 相关系数范围在 $0.574\sim0.653$; 咀嚼性与粘性适中呈显著正相关($P<0.05$), 与气孔均匀呈极显著正相关($P<0.01$), 相关系数范围在 $0.665\sim0.711$; 质构指标与感官评价指标中的米白色、有光泽、柔软及发酵香无显著相关性($P>0.05$)。

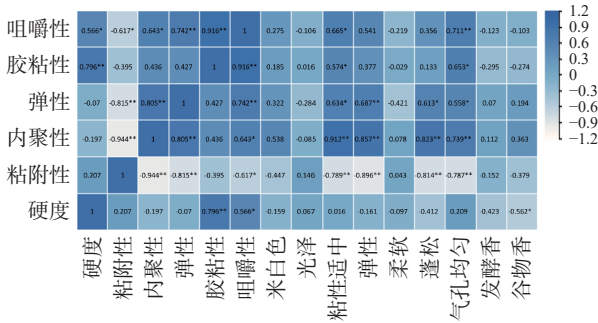


图 4 发酵米糕质构与感官评价相关性

Fig.4 Correlation relationship between texture profile analysis and sensory evaluation of fermented rice cakes

2.2.3 发酵米糕关键风味物质与感官评价相关性分析 由图 5 可知, 两种关键风味物质间存在极显著正相关($P<0.01$), 相关系数为 0.910。关键风味物质与感官评价指标间的相关性分析可以看出二者间存在一定的相关性, 异戊醇与发酵香呈极显著正相关($P<0.01$), 相关性系数为 0.869, 与谷物香呈显著正

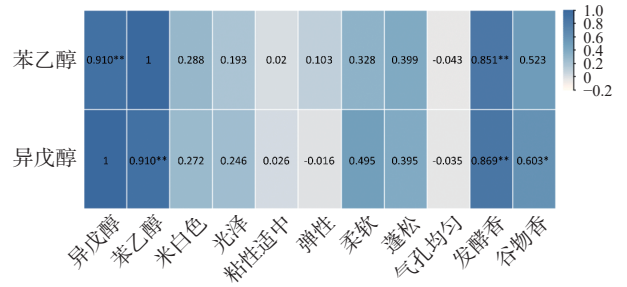


图 5 发酵米糕关键风味物质与感官评价相关性

Fig.5 Correlation relationship between key flavor compounds and sensory evaluation of fermented rice cakes

相关($P<0.05$), 相关性系数为 0.603; 苯乙醇与发酵香呈极显著正相关($P<0.01$), 相关性系数为 0.851。

2.2.4 发酵米糕品质指标相关性分析 为了确定发酵米糕物性指标间的关系以便缩减相应指标数量, 对发酵米糕各物性指标进行了相关性分析, 结果见图 6。发酵米糕的品质指标中数个或个别指标存在显著相关性, 不同物性指标间也存在一定的相关性, 色泽指标中的 L^* 值与质构指标中的粘附性呈极显著负相关($P<0.01$), 与内聚性呈极显著正相关($P<0.01$), a^* 值与弹性及咀嚼性呈显著正相关($P<0.05$); 比容与质构指标中的内聚性呈显著正相关($P<0.05$), 与色泽指标中的 L^* 值呈极显著正相关($P<0.01$); 两种关键风味物质与其余指标间均无显著相关性($P>0.05$)。

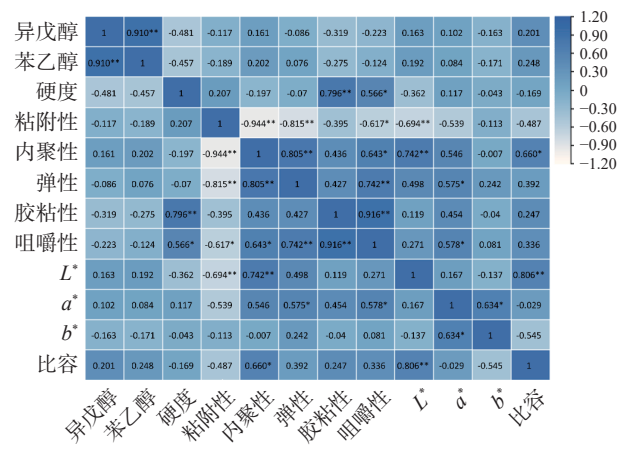


图 6 发酵米糕各项品质指标相关性

Fig.6 Correlation relationship among quality indicators of fermented rice cakes

2.3 发酵米糕品质指标与感官评价关系的建立

不同发酵米糕的品质指标间存在一定的相关性, 数据所表示的信息在一定程度上有所重叠。因此, 通过主成分分析对数据进行降维处理, 将多组数据转化为少数几个能有效反映原变量信息的指标。采用主成分分析法和因子分析法确定不同发酵米糕品质指标的主要因素(特征值>1 作为主要成分), 不同发酵米糕品质指标的主成分累积方差贡献率及载荷矩阵结果见表 7。由表可知, 发酵米糕的品质指标在经过主成分分析后, 转化成了主成分 F_1 、 F_2 、 F_3 、

表7 发酵米糕各项品质指标的累积方差贡献率和载荷矩阵

指标	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
特征值	4.851	3.063	1.788	1.238
方差贡献率(%)	40.426	25.528	14.898	10.314
累积方差贡献率(%)	40.426	65.954	80.852	91.166
粘附性	-0.924			
内聚性	0.946			
弹性	0.807			
L*	0.866			
比容	0.521			
硬度		0.888		
胶粘性		0.939		
咀嚼性		0.794		
异戊醇			0.972	
苯乙醇			0.915	
a*				0.744
b*				0.924

F₄, 特征值分别为 4.851、3.063、1.788、1.238, 累积方差贡献率为 91.166%, 能够比较准确地反映原始变量的信息。因此, 提取主成分 F₁、F₂、F₃ 和 F₄ 代替原来的 12 个品质指标, 作为对不同发酵米糕品质特性的评定, 反映不同发酵米糕的整体信息。

主成分载荷因子矩阵表示提取成分对原始变量的影响程度, 用正态最大方差准则进行因子旋转, 得到旋转因子载荷矩阵, 如表 7 所示, 其中载荷因子越大表明其对主成分影响越大^[31]。第一主成分的贡献率为 40.426%, 其与特征向量中载荷较高的内聚性、弹性、L* 和比容呈正相关, 与粘附性呈负相关, 表明第一主成分主要反映这五种指标, 其中粘附性与内聚性、弹性及 L* 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 内聚性与弹性、L* 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与比容呈显著正相关 ($P < 0.05$), 由于内聚性这一指标载荷值最大 ($r = 0.946$), 同时包含了粘附性、弹性、L* 和比容的大部分信息。本研究参照刘敏^[32]的方法选取载荷值最大的指标来进行整体分析, 因此将内聚性作为第一主成分的代表性指标, 其主要体现发酵米糕的质构特性。第二主成分的方差贡献率为 25.528%, 其中胶粘性的载荷因子最大, 其次为硬度和咀嚼性, 可将这三种指标作为第二主成分的主要指标, 硬度与胶粘性之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与咀嚼性之间呈显著正相关 ($P < 0.05$), 胶粘性 with 咀嚼性之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明胶粘性包含了硬度与咀嚼性的主要信息, 因此选择胶粘性为第二主成分的代表性指标, 体现发酵米糕的质构特性。第一主成分与第二主成分均主要体现发酵米糕的质构特性, 代表性指标分别为内聚性和胶粘性, 主要呈现正相关, 表明第一主成分和第二主成分大的发酵米糕具有口感好、组织形态优良的感官特点, 其在加工和食用过程中能够保持较好的结构, 同时说明影响人对发酵米糕品质的优劣感

觉主要是口感和组织形态。第三主成分的方差贡献率为 14.898%, 其与代表性指标中的异戊醇和苯乙醇呈正相关, 二者呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而异戊醇的载荷因子较大, 因此选择异戊醇为第三主成分代表性指标, 体现发酵米糕的风味特性, 表明第三主成分较大的发酵米糕具有良好的花果清香风味特点。第四主成分的方差贡献率为 10.314%, a* 和 b* 为代表性指标, 二者呈显著正相关 ($P < 0.05$), b* 的载荷因子较大, 因此选择 b* 为第四主成分的代表性指标, 体现发酵米糕的色泽特性, 表明第四主成分较大的发酵米糕具有偏黄的色泽特点。综上所述, 基于主成分分析最终选定内聚性、胶粘性、异戊醇和 b* 值四个指标作为发酵米糕主要品质指标, 这四个主成分能够基本上反映发酵米糕品质的全部信息, 对发酵米糕的品质评价强度依次降低。

2.4 发酵米糕品质评价体系核心指标区间确定

评价指标的权重分配对食品品质评价体系影响很大, 权重越大对总评分影响越大, 先前的研究运用统计学方法已将发酵米糕感官评价指标进行权重分配, 并将其折算成百分制, 本研究参考张桂英^[33]的方法, 对于各指标给出三种评价等级, 分别为优秀 (≥ 73 分)、良好 (≥ 35 分) 和不合格 (< 35 分), 对应感官指标中色泽分值范围分别为 ≥ 16 分、 ≥ 8 分及 < 8 分, 口感分值范围分别为 ≥ 24 分、 ≥ 12 分及 < 12 分, 组织形态分值范围分别为 ≥ 18 分、 ≥ 8 分及 < 8 分, 风味分值范围分别为 ≥ 15 分、 ≥ 7 分及 < 7 分。对于核心指标的接受范围, 主要针对感官得分优秀及良好的发酵米糕进行分析, 得出具体范围如下: 第一主成分代表指标与第二主成分代表指标均体现了发酵米糕的质构特性, 与感官描述中口感及组织形态相关, 在感官得分中优秀发酵米糕的口感分值 ≥ 24 分, 优秀的组织形态分值 ≥ 18 分, 其对应的内聚性与胶粘性可接受范围分别在 0.65~0.75 Ratio、2.04~3.98 N, 在此范围内的发酵米糕整体呈现出爽口, 不粘牙, 易变形且能较快恢复原状, 无凹陷, 内部气孔细小而分布均匀的感官特性。由于内聚性与胶粘性对于发酵米糕的质构品质来说, 并不是单一的线性变化, 是两个密切相关的力学参数, 分析时应综合考量; 第三主成分代表指标异戊醇含量体现了发酵米糕的风味特性, 与感官描述中风味相关, 在感官得分中优秀发酵米糕的风味分值 ≥ 15 分, 其对应的异戊醇含量可接受范围为 461~2042 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 在此范围内的发酵米糕整体呈现出略带谷物香及大米清香味, 无异味的感官特性; 第四主成分代表指标 b* 体现了发酵米糕的色泽特性, 与感官描述中色泽相关, 在感官得分中优秀发酵米糕的色泽分值 ≥ 16 分, 其对应的 b* 可接受范围为 9.06~11.46, 在此范围内的发酵米糕整体呈现出颜色均匀的米白色, 有光泽, 无脱皮现象的感官特性。感官评价体系具有一定的主观性, 不能真正反映发酵米糕的品质情况, 结合仪器测定的品质指标能够较好地规

避一些主观因素, 比较客观地评价发酵米糕的整体品质, 其评价结果更为客观可靠。综上所述, 感官评价中优秀的发酵米糕在品质评价体系中内聚性、胶粘性、异戊醇及 b^* 指标的可接受范围分别为 0.65~0.75 Ratio、2.04~3.98 N、461~2042 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 及 9.06~11.46。

3 结论

本文通过对 13 种市售发酵米糕色泽、比容、质构、挥发性风味物质的种类及含量和感官品质等多个指标进行测定和统计分析, 结果表明 13 个发酵米糕品种之间存在差异性。通过指标间相关性分析, 发现各指标之间有不同程度的相关性, 存在信息重叠现象, 研究发现感官评价中的米白色与色泽参数 b^* 值呈现显著负相关关系 ($P < 0.05$), 与 L^* 值及比容存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 粘性适中及气孔均匀这两项感官特征, 分别与质构特性中的粘附性、内聚性、弹性、胶粘性和咀嚼性呈现显著相关 ($P < 0.05$); 异戊醇和苯乙醇与感官评价中的发酵香感官评分呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 异戊醇与谷物香感官评分亦呈现显著正相关 ($P < 0.05$)。采用主成分分析将指标进行简化, 最终选择内聚性、胶粘性、异戊醇含量和 b^* 值这 4 个指标作为发酵米糕的主要品质指标, 这些指标能够较为全面地表征发酵米糕的整体品质特性。本研究可为发酵米糕品质综合评价提供参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 辛儒岱, 黄江艳, 丁慧, 等. 米发糕固体老酵制作工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 86-92. [XIN R D, HUANG J Y, DING H, et al. Study on the processing technology of rice steamed Chinese sponge cake with solid fermentation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(4): 86-92.]

[2] 袁翔榕, 肖宁, 徐倩倩, 等. 乳酸菌发酵菊芋全粉对糙米面团及米糕品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(11): 256-267. [YUAN Y R, XIAO N, XU Q Q, et al. Effect of fermented jerusalem artichoke on the quality of brown rice batter and steamed bread[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(11): 256-267.]

[3] 刘文佳. 植物乳杆菌发酵对菊芋膳食纤维结构特性的影响及其在无麸质糙米糕中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. [LIU W J. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on dietary fiber structure of jerusalem artichoke and its application in gluten-free brown rice cake[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.]

[4] 仰思颖. 发酵糙米糕工艺研究及品质改良[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [YANG S Y. Study on the process and quality improvement of fermented brown rice steam sponge cake[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]

[5] 杨韵. 发酵米糕加工工艺及贮藏期间品质变化研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014. [YANG Y. Studies on the process technology and changes of the quality during storage period of fermented rice cake[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.]

[6] CHEN G Z, CHEN C M, CHEN C, et al. Influence of different indica rice (*Oryza sativa* L. subsp. *indica* Kato) flours on the quality and flavor characteristics of fermented rice cakes[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(4): 884-897.

[7] 朱勇娟, 吴卫国, 张喻, 等. 碎茶挤压预处理茶粉制品对粘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. Effect of extruded crushed tea powder pretreatment on the properties of indica rice powder and the quality of fermented rice cake[J]. Journal of Cereals and Oils, 2025, 38(5): 30-36.]

[8] ENGINEERING D O F, ASSAM T T U T, ENGINEERING D O F, et al. Bread fortified with dietary fibre extracted from culinary banana bract: Its quality attributes and *in vitro* starch digestibility[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(6): 2359-2369.

[9] 朱雯, 梁建芬. 猴头菇粉在面包中的应用研究[J]. 食品科技, 2022, 47(8): 110-116. [ZHU W, LIANG J F. Adaption of *Hericium erinaceus* powder in bread making[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(8): 110-116.]

[10] 张文灿, 袁永红. 绥粳 4 号香米的风味组成及关键致香化合物的鉴定[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 5-9, 21. [ZHANG W C, YUAN Y H. Flavor composition and key aroma compounds of Suijing 4[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(4): 5-9, 21.]

[11] 陈召桂, 陈春梅, 姚远, 等. 发酵米糕感官评价标准体系的建立[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(12): 180-187. [CHEN Z G, CHEN C M, YAO Y, et al. Establishment of sensory evaluation standard system for fermented rice cake[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(12): 180-187.]

[12] HUANG M, YANG H. Eucheuma powder as a partial flour replacement and its effect on the properties of sponge cake[J]. LWT, 2019, 110: 262-268.

[13] TRUONG V D, DAUBERT C R, DRAKE M A, et al. Vane rheometry for textural characterization of cheddar cheeses: correlation with other instrumental and sensory measurements[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 35(4): 305-314.

[14] 周娟. 酸面团对微波熟化发糕质构的改善机制[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [ZHOU J. The mechanism of sourdough on improving the texture of microwaved steamed-cake[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[15] BIRCH A N, PETERSEN M A, HANSEN A S. Aroma of wheat bread crumb[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(2): 105-114.

[16] VINITA R, SUSMITA C, GUNVANTRAY M K, et al. Extraction, characterization, quantification, and application of volatile aromatic compounds from Asian rice cultivars[J]. Reviews in Analytical Chemistry, 2021, 40(1): 272-292.

[17] YU J, ZHANG Y R, WANG Q J, et al. Capsaicinoids and volatile flavor compounds profile of Sichuan hotpot as affected by cultivar of chili peppers during processing[J]. Food Research International, 2023, 165: 112476.

[18] HESAM S M, WENLI S. Mechanism of action of collagen and epidermal growth factor: A review on theory and research methods[J]. Mini reviews in Medicinal Chemistry, 2024, 24(4): 453-477.

[19] 吕想, 高甜甜, 刘伟, 等. 基于 GC-IMS 分析非酿酒酵母与酿酒酵母混合发酵脐橙酒挥发性香气成分[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 139-148. [LÜ X, GAO T T, LIU W, et al. Analysis of volatile aroma components of navel orange wine produced by mixed fermentation of non *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccha-*

- romyces cerevisiae* based on GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 139-148.]
- [20] 马宇, 黄永光. 清酱香型白酒挥发性风味组分及香气特征[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 241-248. [MA Y, HUANG Y G. Volatile flavor components and aroma characteristics of fen-maotai-flavored liquor[J]. Food Science, 2019, 40(20): 241-248.]
- [21] CAO Y, ZHANG H, YANG Z, et al. Influence of the fermentation time and potato pulp addition on the technological properties and volatile compounds of wheat dough and steamed bread[J]. LWT, 2020, 128: 109377.
- [22] 杨洋洋, 冶海潇, 梁安健, 等. 不同地区甜酒曲发酵米酒工艺的优化及风味成分比较分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 1-9. [YANG Y Y, YE H X, LIANG A J, et al. Optimization of fermentation process and comparative analysis of flavor components of rice wine fermented by different regions of sweet wine koji[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 1-9.]
- [23] 项雅科, 杨梦蝶, 孙海澜, 等. 2种鲜食黑糯玉米营养组分及香气的比较[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(1): 196-203. [XIANG Y K, YANG M D, SUN H L, et al. Comparison on nutritional composition and aroma of two kinds of fresh black waxy corns[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(1): 196-203.]
- [24] LILLY M, LAMBRECHTS M G, PRETORIUS I S. Effect of increased yeast alcohol acetyltransferase activity on flavor profiles of wine and distillates[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(2): 744-753.
- [25] XIONG Q, HU T, ZHAO S, et al. Texture and flavor characteristics of rice cake fermented by *Brettanomyces custersii* ZSM-001[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(11): 7113-7122.
- [26] ZENG X, XIA W, JIANG Q, et al. Contribution of mixed starter cultures to flavor profile of Suanyu-a traditional Chinese low-salt fermented whole fish[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(5): 13131.
- [27] GAO P, JIANG Q, XU Y, et al. Aroma profiles of commercial Chinese traditional fermented fish (Suanyu) in Western Hunan: GC-MS, odor activity value and sensory evaluation by partial least squares regression[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 213-226.
- [28] van GEMERT L J. Odour thresholds: Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Den Haag: Boom uitgevers Den Haag, 2011.
- [29] 陈芳蓉. 米发糕储藏保鲜技术与风味分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. [CHEN F R. Preservation technology and flavor analysis of fermented rice cake[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.]
- [30] 龚川杰, 姜萌艺, 李美伦, 等. 不同发酵方式及发酵剂菌比对米发糕挥发性成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(24): 124-131. [GONG C J, JIANG M Y, LI M L, et al. Effect of different fermentation methods and bacteria ratio on volatile components of fermented rice cakes[J]. Food Research and Development, 2019, 40(24): 124-131.]
- [31] ZHANG Y, LI G, WU Y, et al. Influence of amylose on the pasting and gel texture properties of chestnut starch during thermal processing[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 378-383.
- [32] 刘敏. 贵州优质稻感官品质相关性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018. [LIU M. Research on correlation of sensory quality of high-quality rice in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.]
- [33] 张桂英. 陕西关中大田小麦品质性状分析及馒头评价体系构建[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. [ZHANG G Y. Analysis of wheat quality properties and constructing for evaluation system of steamed bread of Guanzhong area in Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.]