邢大伟, 梁诚诚, 许智慧, 等. 低 GI 黄大茶米糕配方优化与品质特性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 262−271. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040093

XING Dawei, LIANG Chengcheng, XU Zhihui, et al. Formulation Optimization and Quality Characteristics Analysis of Low-GI Large-leaf Yellow Tea Rice Cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 262−271. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040093

·工艺技术·

低 GI 黄大茶米糕配方优化与品质特性分析

邢大伟[1,2,*], 梁诚诚[1,+], 许智慧[1], 陈建全[1], 唐晓丹[1], 郑　陶[1,2], 卢宇泉[1], 陈　婧[1]

（1.巢湖学院生物与环境工程学院, 安徽合肥 238000;
2.安徽省环巢湖乡村振兴协同技术服务中心, 安徽合肥 238000）

摘　要: 针对传统米糕升糖指数（GI）高、风味单一等问题，本研究以籼米粉、糯米粉及黄大茶粉为原料，利用赤藓糖醇代替传统白砂糖，进行低 GI 黄大茶米糕的配方优化与品质特性分析。结合单因素和正交试验分析，获得黄大茶米糕最佳配方为：籼糯米粉比例为 5∶2，黄大茶粉添加量为 3%，赤藓糖醇添加量为 3%，此配方下黄大茶米糕的综合评分为 84.67 分。风味特征解析结果显示，相比于对照组，黄大茶米糕中具有更强的鲜味和丰富性，苯甲醛等 74 种香气组分含量显著升高（$P<0.05$），形成独特的醇厚茶香特征。添加黄大茶粉能够显著提高米糕 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）和 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（$ABTS^{+}$）自由基的清除率（$P<0.01$），并有效降低米糕的体外消化率。黄大茶米糕中拥有更高的抗性淀粉含量（68.03%±4.61%）和较低的快速消化淀粉含量（12.58%±2.89%），预估血糖生成指数（eGI）值为 57.56，相比于对照组降低 11.97%，基本达到低 GI 食品要求。本研究将黄大茶粉应用于低 GI 米制品研制，为功能型传统食品创制与优化提供了理论依据和技术参考。

关键词: 黄大茶, 米糕, 配方优化, 品质分析, 血糖生成指数

中图分类号: TS213.3　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0262−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040093　　本文网刊:

Formulation Optimization and Quality Characteristics Analysis of Low-GI Large-leaf Yellow Tea Rice Cake

XING Dawei[1,2,*], LIANG Chengcheng[1,+], XU Zhihui[1], CHEN Jianquan[1], TANG Xiaodan[1], ZHENG Tao[1,2], LU Yuquan[1], CHEN Jing[1]

（1.School of Biological and Environmental Engineering, Chaohu University, Hefei 238000, China;
2.Chaohu Regional Collaborative Technology Service Center for Rural Revitalization of Anhui Province, Hefei 238000, China）

Abstract: To address the high glycemic index (GI) and monotonous flavor of traditional rice cakes, in this study, a low-GI large-leaf yellow tea rice cake was developed using indica rice flour, glutinous rice flour, and large-leaf yellow tea powder, substituting traditional white sugar with erythritol. Single-factor experiments and orthogonal testing optimization identified an optimal formula consisting of an indica rice flour to glutinous rice flour ratio of 5∶2, with the addition of 3% large-leaf yellow tea powder, and 3% erythritol content. The optimal formula achieved a comprehensive score of 84.67. The analysis results of flavor characteristics revealed enhanced umami and complexity in large-leaf yellow tea rice cakes, with significantly higher contents of 74 aromatic components (including benzaldehyde), forming a distinctive mellow tea aroma profile. Radical-scavenging assays demonstrated that large-leaf yellow tea powder significantly improved the clearance rates of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radicals. *In vitro* digestion experiments revealed an elevated resistant starch content (68.03%±4.61%) and a lower amount of rapidly digestible starch

收稿日期: 2025−04−09　　+并列第一作者

基金项目: 安徽省高等学校科学研究项目重点项目（2024AH051350）; 安徽省高等学校省级质量工程项目（2024aijy412）; 巢湖学院校级质量工程项目（x24cjrhkc04）; 巢湖学院博士启动基金项目（KYQD-202214）。

作者简介/通信作者*: 邢大伟（1995−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品科学与天然产物化学, E-mail: xingdw95@126.com。

作者简介: 梁诚诚（2004−）, 男, 本科, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 3139861172@qq.com。

content (12.58%±2.89%) in large-leaf yellow tea rice cakes, resulting in an estimated glycemic index of 57.56, 11.97% lower than that of the control group, almost meeting the criteria for low-GI foods. This study pioneers the application of large-leaf yellow tea powder in the development of low-GI rice products, providing a theoretical foundation and technical references that is expected to drive innovation in the development of functional traditional food.

Key words: large-leaf yellow tea; rice cake; formulation optimization; quality characteristics analysis; glycemic index

随着全球糖尿病和肥胖症患病率的持续攀升，消费者对低升糖指数（glycemic index, GI）食品的需求日益增长。低 GI 食品因其缓慢的碳水化合物消化速率和较低的餐后血糖波动特性，已被证实有助于改善代谢综合征和降低慢性疾病患病风险[1−2]。传统米糕作为东亚地区重要的传统小吃，通常以精制糯米或大米为主要原料，因其微润口感和丰富的营养价值而广受好评[3]。然而，高淀粉含量及快速消化特性导致传统米糕 GI 值较高，难以满足现代健康饮食的需求。因此，如何通过原料改良与工艺优化开发低 GI 米糕产品，成为食品科学领域的研究热点之一。

黄茶是我国六大茶类之一，起源于明朝，具有独特的黄化工艺。黄茶可根据原料的成熟度及加工工艺分为黄芽、黄小茶和黄大茶[4]。黄大茶因其醇厚滋味和浓郁的“锅巴香”成为近年来最受喜爱的茶叶品种之一[5]，其中富含的茶多酚、类黄酮及多糖等功能成分，已被证实具有抗氧化[6]、调节糖脂代谢[7]、抑制淀粉消化酶活性[8] 和降低食品 GI 值[9] 等功能，此外，其在预防肥胖、脂肪肝、高血糖等方面也展现出巨大潜力[4,10]。目前，黄大茶已被广泛应用于饮料加工与肉类保藏中。研究结果表明，添加黄大茶能够改善啤酒、果蔬汁和发酵饮料的口感，并保留明显的特征“锅巴香”，增强产品的抗氧化能力[11−13]。添加黄大茶烟熏液能够延缓贮藏过程中牛肉糜凝胶的持水力下降，有效延长其货架期[14]。然而，关于黄大茶在传统蒸煮米制品中的应用还鲜有报道。

基于此，本研究将黄大茶粉与传统米糕配方相结合，利用其调节传统米糕的品质特性及淀粉比例，以期在降低 GI 值的同时维持或提升产品品质。通过单因素和正交试验优化黄大茶米糕配方，并系统分析黄大茶对产品的口感、风味、抗氧化活性、体外消化行为、淀粉比例和预估血糖生成指数（expected glycemic index, eGI）的影响，为低 GI 传统食品的开发及黄茶资源的高值化利用提供新的探究及参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

黄大茶　安徽霍山抱儿钟秀茶叶股份有限公司；籼米　鄱阳湖生态农业股份有限公司；糯米　沈阳信昌粮食贸易有限公司；赤藓糖醇　安徽滁州爱乐甜食品饮料有限公司；BC4750 DPPH 自由基清除能力检测试剂盒、BC4770 ABTS$^+$自由基清除能力检测试剂盒、BC2500 葡萄糖含量检测试剂盒、BC0700 淀粉含量检测试剂盒　北京索莱宝科技有限公司；S10003-1 g α-淀粉酶（50 U/ mg）、S10017-250 g 糖化酶（1×10^5 U/g）　上海源叶生物科技有限公司；ST351 3 mol/L 醋酸钠（pH5.2, sterile, DNase free）　上海碧云天生物技术有限公司；其他化学试剂　均为分析纯。

ES-E120BII 电子分析天平　天津德安特传感技术有限公司；JYL-Y16 多功能粉碎机、DZ100HG-GZ105 电蒸锅　山东九阳小家电有限公司；HMJ-A50N1 小熊和面机　广东小熊电器有限公司；TA-XT2 质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司；HC-3618R 高速冷冻离心机　安徽中科中佳科学仪器有限公司；DKZ-2 电热恒温振荡水浴锅　上海恒一科技有限公司；DK-2000-IIIL 电热恒温水浴锅　河北菲斯福仪器有限公司；LC-WB-4 防干烧恒温水浴锅　上海力辰邦西仪器科技有限公司；TS-5000Z 电子舌　日本 Insent 公司；PEN3 电子鼻系统　德国 Airsense 公司；7890B 气相色谱仪、5977B 质谱仪、DB-Wax（30 m×250 μm×0.25 μm）色谱柱　安捷伦科技有限公司；UV-6100 紫外可见分光光度计　上海元析仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　米糕加工工艺　将籼米、糯米和赤藓糖醇分别置于多功能粉碎机中粉碎，过 80 目分样筛；将黄大茶打碎，过 16 目分样筛。将籼米、糯米、赤藓糖醇和黄大茶粉混合后，加入一定比例的纯净水，置于多功能搅拌机中低速搅拌 10 min。取 80 g 搅拌完成的匀浆装入模具中，在预热好的蒸锅中蒸煮 15 min，蒸煮完成后的米糕立即用保鲜膜密封，用于后续实验。对照组米糕不添加茶粉，具体步骤同上。

1.2.2　米糕感官审评　根据国标 GB 7099-2015《食品安全国家标准 糕点、面包》并参考已有文献 [15−16] 制定黄大茶米糕感官评价标准。感官评价由 8 名经过感官培训和考核的评审人员组成，对黄大茶米糕进行感官评分。评分标准采用百分制，包括色泽（20 分）、弹性（10 分）、软硬度（10 分）、粘性（20 分）、口感（20 分）和香气（20 分）共六部分，如表 1 所示。

1.2.3　米糕质构特性的测定　使用 TA-XT2 质构仪进行米糕质构特性分析。分析采用 TPA 测试模式，参考已有文献的方法[15−16] 并做适当修改。将蒸煮完成冷却至室温的米糕切成 5 cm×5 cm×1 cm 的正方体。使用 P/36 R 探头，在测试前速度 5 mm/s，测试中速度 5 mm/s，测试后速度 5 mm/s，触发力 5 g，目标模式为 30% strain 条件下，测得米糕的硬度和咀嚼性，每组重复 3 次。

表 1 黄大茶米糕感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation scoring standard of large-leaf yellow tea rice cake

指标	评价标准	分值
色泽(20分)	色泽均匀	16~20
	色泽较为均匀	10~15
	色泽不均匀	0~9
弹性(10分)	按下恢复快	8~10
	按下恢复性一般	4~7
	按下恢复性差	1~3
软硬度(10分)	质地柔软,软硬适中	8~10
	稍软或稍硬	4~7
	特别坚硬或软榻	1~3
粘性(20分)	有粘性,不粘牙	16~20
	有粘性,基本不粘牙	10~15
	无粘性或粘牙明显	0~9
口感(20分)	口感细腻丰富,有宜人茶味	16~20
	口感较细腻丰富,茶味过浓或过淡	10~15
	口感较差,无明显茶味	0~9
香气(20分)	茶香明显	16~20
	茶香一般	10~15
	茶香过浓或过淡	0~9

1.2.4 黄大茶米糕的配方优化

1.2.4.1 单因素实验 在籼糯米粉比例 5∶2、黄大茶粉添加量 3%、赤藓糖醇添加量 3% 的基础上,固定加水量为 40%,蒸煮时间为 15 min(均以米粉总质量为基重)。分别改变籼糯米粉比例(1∶1、2∶1、5∶2、3∶1、4∶1)、黄大茶粉添加量(1%、2%、3%、4%、5%)和赤藓糖醇添加量(1%、3%、6%、9%、12%),根据综合得分确定合适的因素梯度用于后续正交试验。

1.2.4.2 正交试验 基于单因素实验结果,以综合评分为指标,从米粉比例、黄大茶粉添加量和赤藓糖醇添加量中选择三个水平,采用三因素三水平的正交试验进行黄大茶米糕的配方优化,正交试验设计如表 2 所示。

表 2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal test design

水平/因素	A籼糯米粉比例	B黄大茶粉添加量(%)	C赤藓糖醇添加量(%)
1	2∶1	2	1
2	5∶2	3	3
3	3∶1	4	6

1.2.5 黄大茶米糕综合评分的确定 由于感官评分是反映产品品质的重要属性,参考已有研究[15],确定硬度 X_1 和咀嚼性 X_2 各占综合评分 25%,感官得分 X_3 占综合评分的 50%。其中,质构得分按照质构分析中所得数据,选取多次重复中测定的最小值 Y_0、最大值 Y_1 和均值 Y,硬度 X_1 和咀嚼性 X_2 均按照极差变换法[17−18] 进行计算,具体计算公式如下:

$$\text{质构得分} X = \frac{Y_1 - Y}{Y_1 - Y_0} \times 100 \qquad \text{式(1)}$$

$$\text{综合评分} Z = 0.25X_1 + 0.25X_2 + 0.5X_3 \qquad \text{式(2)}$$

式中:Y_0 为测定最小值;Y_1 为测定最大值;Y 为测定均值。

1.2.6 电子舌分析 取 100 ℃ 复蒸 10 min 后的米糕样品 45 g,加入 150 mL 纯净水置于多功能粉碎机中打浆 30 s,4000 r/min 离心 10 min 后取上清液备用。使用 TS-5000Z 电子舌仪器,在传感器自检 30 s,20 次;测试时间 30 s;回味时间 30 s 条件下对上清液进行电子舌分析,每次测定结束后使用清洗液对正负极进行清洗,每个组别包含 3 个重复,每个样品重复测定 3 次。其中,酸味和咸味的无味点分别为−13 和−6,其他感应器的无味点均为 0,当样品的味觉响应值低于无味点,则说明样品无该味道,反之则有[19]。

1.2.7 电子鼻分析 取 100 ℃ 复蒸 10 min 后的米糕样品 10 g 置于 100 mL 烧杯中,双层保鲜膜封口,室温下静置 30 min 后,将进样针头直接插入含有样品的烧杯中,在测定参数为采样时间 1 s/组;传感器自清洗时间 80 s;传感器归零时间 5 s;样品准备时间 5 s;进样流量 400 mL/min;分析采样时间 80 s 条件下进行电子鼻分析[19],每个组别包含 3 个重复,每个样品重复测定 3 次。

1.2.8 气相色谱-质谱联用分析(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 取 1 g 米糕样品至多功能粉碎机中粉碎后,于 100 ℃ 复蒸 10 min,加入转子置于顶空瓶中。60 ℃ 平衡萃取 30 min 后立即插入进样口,在 250 ℃ 下解析 3min,进行 GC-MS 检测。GC-MS 检测条件为:初始温度 40 ℃,预热时间 3 min;分流模式 Splitless Mode;隔垫吹扫流速 3 mL/min;柱流速 1 mL/min;柱箱升温程序 40 ℃ 保持 4 min,以 5 ℃/min 比例上升至 245 ℃,保持 5 min;前进样口温度 250 ℃;传输线温度 250 ℃;离子源温度 230 ℃;四极杆温度 150 ℃;电离电压 70 eV;质量范围 m/z 33~500。目标化合物的峰识别基于美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)数据库匹配鉴定,使用峰高归一化法进行相对定量[20],每个组别包含 6 个重复。

1.2.9 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid),$ABTS^+$)自由基清除率测定 将冷冻干燥 48 h 的米糕样品研磨均匀后过 30 目筛,称取 0.05 g 样本,使用 $ABTS^+$ 自由基清除率检测试剂盒,按照说明书对米糕进行自由基清除率检测,每个组别包含 3 个重复,每个样品重复测定 3 次。

1.2.10 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率测定 将冷冻干燥 48 h 的米糕样品研磨均匀后过 30 目筛,称取 0.05 g 样本,使用 DPPH 自由基清除率检测试剂盒,

按照说明书对米糕进行自由基清除率检测，每个组别包含 3 个重复，每个样品重复测定 3 次。

1.2.11　米糕总淀粉含量测定　将冷冻干燥 48 h 的米糕样品研磨均匀后过 30 目筛，称取 0.3 g 样品，使用淀粉含量检测试剂盒，按照说明书进行总淀粉含量 M_1(mg)测定，每个组别包含 3 个重复，每个样品重复测定 3 次。

1.2.12　体外消化特性测定　体外消化特性检测参照已有文献并作修改，称冷冻干燥 48 h 后的米糕样品粉末 0.2 g，加入 50 mL 离心管中。向离心管中加入 5 mL 醋酸钠缓冲液(pH5.2)、4 mL 糖化酶(20 U/mL)和 16 mL α-淀粉酶(6.4 U/mL)[15,21]。将混合溶液 37 ℃ 水浴 5 min 后，置于 37 ℃，200 r/min 的恒温摇床，在反应 0、20、40、60、120、180 min 时吸取 1 mL 反应液，使用 4 mL 无水乙醇终止反应，并于 4000 r/min 离心 5 min。吸取 100 μL 上清，使用葡萄糖含量检测试剂盒测定混合液中的葡萄糖含量 T，每个组别至少包含 3 个重复，每个样品重复测定 3 次，取其平均值进行淀粉水解曲线的绘制。淀粉水解率计算公式如式(3)所示：

$$\text{淀粉水解率}(\%) = \frac{\text{混合液中葡萄糖含量T} \times 0.9}{\text{总淀粉含量}M_1} \times 100 \quad \text{式（3）}$$

根据不同时间溶液中的葡萄糖含量，计算样品中的快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)值[18]，计算公式如式(4)(5)(6)所示：

$$RDS(\%) = \frac{[(T_{20} - FG) \times 0.9]}{M_1} \times 100 \quad \text{式（4）}$$

$$SDS(\%) = \frac{[(T_{120} - T_{20}) \times 0.9]}{M_1} \times 100 \quad \text{式（5）}$$

$$RS(\%) = \frac{(M_1 - RDS - SDS)}{M_1} \times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中：T_{20}：反应 20 min 时混合液中的葡萄糖含量，mg；T_{120}：反应 120 min 时混合液中的葡萄糖含量，mg；FG：反应前混合液中的葡萄糖含量，mg；M_1：样品总淀粉含量，mg。

1.2.13　eGI 值及其相关参数的计算　参考已有文献 [22−24]，根据淀粉水解率，使用 Origin 2021 软件对白面包和两种米糕的体外消化曲线进行一级动力学拟合，并计算曲线面积 AUC(0~180 min)，选择拟合公式为式(7)，得到水解动力学常数 k。以白面包作为对照，根据式(8)计算水解指数 HI，根据式(9)计算 eGI 值，具体计算公式如下：

$$C_t = C_\infty(1 - e^{-kt}) \quad \text{式（7）}$$

式中：C_t：t 时间下米糕水解率；C_∞：反应时间达到 180 min 时米糕淀粉的水解率；t：反应时间。

$$HI = \frac{AUC_{样品}}{AUC_{白面包}} \times 100 \quad \text{式（8）}$$

$$eGI = 39.71 + 0.594 \times HI \quad \text{式（9）}$$

1.3　数据处理

数据以平均值±标准偏差($\overline{X}$±SD)呈现，数据保留两位小数。正交试验设计与分析使用 SPSSAU 网站(https://spssau.com/About_spssau.html)进行，通过单因素方差分析(ANOVA)进行显著性分析，$P<0.05$ 为差异显著，使用 GraphPad Prism 8 和 Origin 2021 软件进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　籼糯米粉比例对米糕品质的影响　如表 3 所示，米糕硬度和咀嚼性随着籼米添加量的升高而不断增加，这种质构变化可能源于淀粉分子结构的差异。籼米中高直链淀粉在糊化过程中形成致密的线性网络结构[25]，其线性分子链通过氢键作用形成刚性凝胶，而糯米支链淀粉的高度分支化结构则形成弹性三维网络[26]。当籼米比例提升时，直链淀粉通过分子间有序排列增强凝胶强度，导致硬度增加，同时高直链淀粉体系的能量耗散特性使咀嚼做功显著上升[27]，感官评价指标则呈现先升后降的单峰变化趋势。当

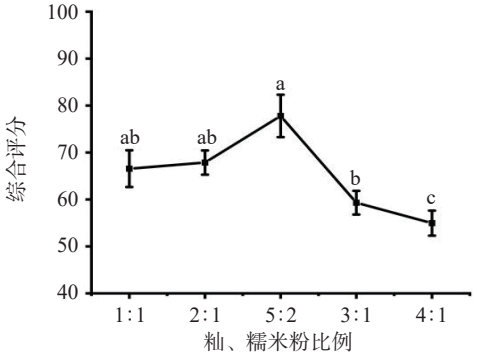


图 1　不同籼、糯米粉比例对黄大茶米糕综合评分的影响

Fig.1　Effects of different ratios of indica and glutinous rice flour on the comprehensive score of large-leaf yellow tea rice cake

注：不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$)，图 1~图 3、图 5 同。

表 3　不同籼、糯米粉比例对样品硬度、咀嚼性及感官评分的影响

Table 3　Effects of different ratios of indica and glutinous rice flour on hardness, chewiness and sensory scores of samples

籼、糯米粉比例	1:1	2:1	5:2	3:1	4:1
硬度(g)	8511.99±234.33^{c}	11805.24±669.21^{bc}	11967.97±603.99^{bc}	12394.11±605.31^{b}	15632.69±374.36^{a}
咀嚼性	6676.83±417.72^{d}	6212.92±176.52^{d}	7766.28±154.90^{c}	8661.19±237.57^{b}	12485.72±226.28^{a}
感官评分	73.22±3.75^{cd}	80.35±2.33^{b}	85.75±3.28^{a}	77.52±1.21^{c}	70.15±2.11^{d}

注：不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$)，表3~表5、表9同。

籼、糯米粉比达 5∶2 时，质构得分与感官评分达到理想平衡点，米糕产品硬度适中，质地黏而不腻，产品获得最优综合评分（77.80±4.51 分）（图 1）。当籼糯米比例超过 5∶2 时，产品适口性下降，当比例为 3∶1 时，综合评分显著降低约 10%（P<0.01）。因此，本实验最终选取籼、糯米粉比例 2∶1、5∶2 及 3∶1 三个梯度水平进行后续正交优化试验。

2.1.2 黄大茶粉添加量对米糕品质的影响 黄大茶粉添加量是影响米糕质构特性及口感风味的重要因素。如表 4 所示，当黄大茶粉添加量从 1% 增至 5% 时，米糕的硬度和咀嚼性呈上升趋势。该趋势可能与茶多酚和淀粉之间相互作用有关[28]，也可能因茶粉含量的不断增加导致儿茶素-淀粉复合物增加，增强了凝胶网络致密度[29]。当添加量达 3% 时，黄大茶米糕获得最优综合评分（74.88±3.01 分）（图 2），黄大茶与米制品的风味物质形成协调体系。但当茶粉添加量超过 3% 时，茶叶风味物质积累引发苦味阈值突破，导致感官评分呈梯度下降趋势，综合评分显著降低（P<0.05）。基于此，最终选取 2%~4% 黄大茶粉添加量为正交试验的因素水平范围。

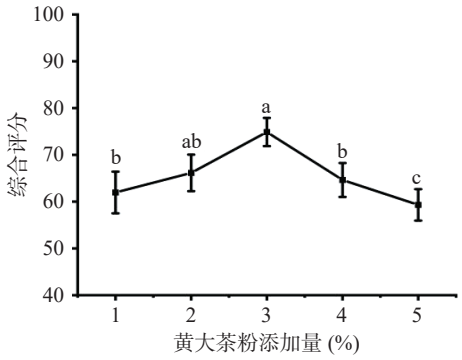


图 2 黄大茶粉添加量对黄大茶米糕综合评分的影响

Fig.2 Effect of the amount of large-leaf yellow tea powder added on the comprehensive score of large-leaf yellow tea rice cake

2.1.3 赤藓糖醇添加量对米糕品质的影响 赤藓糖醇添加量是影响黄大茶米糕品质的关键因素，其不仅直接调控产品的甜度，更与其质构特性密切相关。如表 5 所示，在质构特性方面，与已有研究结果一致，赤藓糖醇的加入增强了米糕的致密结构[30]，随着赤藓糖醇添加量的递增，米糕的硬度和咀嚼性均呈现上升趋势。在感官接受度方面，感官评分随赤藓糖醇添加量的增加表现出先升高后降低的趋势。具体而言，当添加量从 1% 增加至 3% 时，产品甜度逐渐提升，感官愉悦度随之增强，感官评分及综合评分均于 3% 添加量时达到峰值。然而，当添加量超过 3% 后，产品甜度超出适口阈值，导致明显的甜腻感，感官评分与综合评分均呈现下降趋势。基于上述结果，赤藓糖醇添加量在 3% 时能够兼顾适宜的甜度、良好的质构特性和最优的感官接受度。基于此，本研究最终确定将赤藓糖醇添加量设定为 1%~6% 用于后续正交试验。

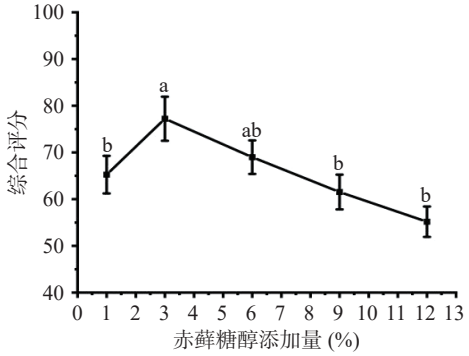


图 3 赤藓糖醇添加量对黄大茶米糕综合评分的影响

Fig.3 Effect of erythritol addition on the comprehensive score of large-leaf yellow tea rice cake

2.2 正交试验结果

按上述选定的单因素梯度，采用正交试验，通过方差分析结合主效应解析，探究黄大茶米糕的最适配方（表 6）。三因素对综合评分的极差排序为：黄大茶粉添加量（R=5.79）>籼、糯米粉比例（R=5.21）>赤藓糖醇添加量（R=1.68）。经多重比较验证，确定最优组合 $A_2B_2C_2$（籼糯米粉比 5∶2、黄大茶粉 3%、赤藓糖醇 3%），在此配方条件下制作的黄大茶米糕口感细腻，具有浓郁的黄大茶特征香气，表现出较佳的质构特性和感官品质，综合评分达 84.67 分。

表 4 不同黄大茶粉添加量对样品硬度、咀嚼性及感官评分的影响

Table 4 Effects of different amounts of large-leaf yellow tea added on the hardness, chewiness and sensory scores of samples

黄大茶粉添加量(%)	1	2	3	4	5
硬度(g)	11374.54±121.73^{c}	12309.36±197.10^{c}	13980.42±162.07^{b}	14471.76±299.24^{b}	15773.81±116.07^{a}
咀嚼性	5288.28±89.99^{e}	6229.78±70.24^{d}	6597.64±169.77^{c}	7114.95±54.70^{b}	7533.48±35.50^{a}
感官评分	75.02±1.32^{b}	80.51±2.48^{a}	80.18±2.35^{a}	78.52±2.13^{ab}	72.32±1.23^{c}

表 5 不同赤藓糖醇添加量对样品硬度、咀嚼性及感官评分的影响

Table 5 Effects of different erythritol addition amounts on sample hardness, chewiness and sensory scores

赤藓糖醇添加量(%)	1	3	6	9	12
硬度(g)	11591.43±253.9^{c}	12137.22±74.5^{bc}	13302.91±449.3^{b}	14125.24±174.5^{ab}	14762.42±265.2^{a}
咀嚼性	6277.93±158.5^{c}	6433.90±87.8^{c}	6830.33±62.9^{b}	7295.72±285.7^{a}	7001.40±237.6^{ab}
感官评分	70.31±1.32^{b}	82.55±1.35^{a}	78.28±2.32^{a}	72.12±1.32^{b}	65.7±3.25^{c}

表 6　正交试验设计及结果

Table 6　Orthogonal experimental design and results

试验号	A	B	C	综合评分(分)
1	1	1	1	72.34
2	1	2	3	78.56
3	1	3	2	75.22
4	2	1	3	76.89
5	2	2	2	84.67
6	2	3	1	79.13
7	3	1	2	74.05
8	3	2	1	77.42
9	3	3	3	73.58
K_1	226.12	223.28	228.89	
K_2	240.69	240.65	233.94	
K_3	225.05	227.93	229.03	
k_1	75.37	74.43	76.30	
k_2	80.23	80.22	77.98	
k_3	75.02	75.98	76.34	
R	5.21	5.79	1.68	

对上述结果进行方差分析，结果表明籼糯米粉比例和黄大茶粉添加量对黄大茶米糕综合评分具有显著影响(P<0.05)，而赤藓糖醇添加量对综合评分的影响未呈现统计学意义(P=0.129)(表 7)，该结论与正交试验极差分析结果具有一致性(表 6)。

表 7　正交试验方差分析结果

Table 7　Results of variance analysis of orthogonal test

因素	平方和	自由度	均方	F	P
籼糯米粉比例A	50.89	2	25.45	62.49	0.016*
黄大茶粉添加量B	53.90	2	26.95	66.18	0.015*
赤藓糖醇添加量C	5.51	2	2.76	6.77	0.129
残差	0.814	2	0.407		

注：R^2=0.993，*P<0.05。

2.3　黄大茶米糕的电子舌和电子鼻分析结果

对黄大茶米糕与对照组进行电子舌和电子鼻分析检测，以判断添加黄大茶粉对米糕风味的影响。由电子舌结果(图 4A)可知，两种米糕在酸味、涩味、苦味回味、涩味回味和咸味传感器上的响应值均低于无味点，这表明两种米糕均无上述滋味。黄大茶米糕在鲜味和丰富性传感器的响应值显著高于对照组(P<0.01)，而黄大茶米糕(4.46±0.12)在甜味传感器上的响应值显著低于对照组(5.64±0.21)(P<0.01)。这表明，添加 3% 黄大茶粉能够有效提高米糕的鲜味和口味的丰富性，而不会增加米糕的苦味和涩味。电子鼻检测响应值与米糕中的香气物质含量一一对应，如图 4B 中所示，黄大茶米糕较对照组在 W2W(有机硫化合物)、W2S 传感器(醇类、醛酮类)、W1W 传感器(无机硫化合物)、W1S 传感器(甲基类)、W5S 传感器(氮氧化合物)上的响应值更高，这表明黄大茶米糕中含有更高含量的有机硫化合物、醇类、醛酮类、甲基类、无机硫化合物和氮氧化合物。

使用主成分分析法(PCA)对电子舌和电子鼻各传感器响应值进行转化和降维，并对其进行特征向量

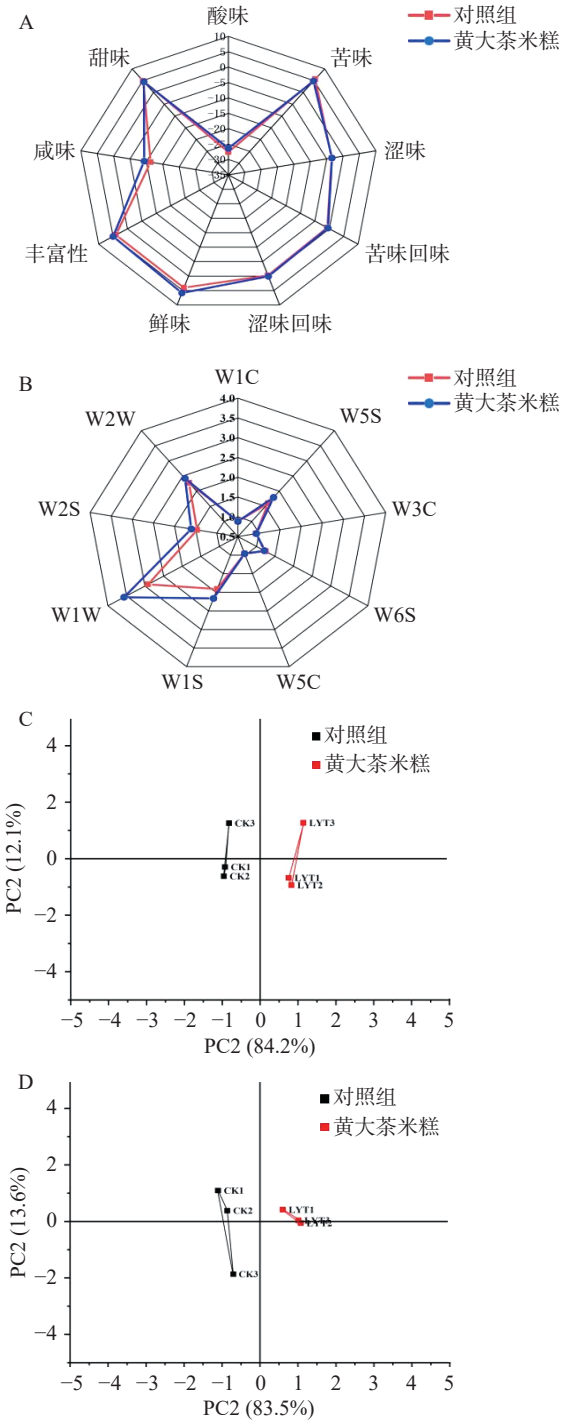


图 4　两种米糕的电子舌和电子鼻检测及 PCA 结果

Fig.4　Electronic tongue and electronic nose detection and PCA results of two types of rice cakes

注：A 图为电子舌检测结果，B 图为电子鼻检测结果，C 图为电子舌的 PCA 结果，D 图为电子鼻的 PCA 结果。

的线性分析，以判断对照组和黄大茶米糕在滋味和挥发性气味间的差异。电子舌与电子鼻的 PCA 分析结果如图 4C 和 4D 所示，电子舌检测中第一、第二主成分贡献率为 84.2% 和 12.1%，总成分贡献率为 96.3%；电子鼻检测中第一、第二主成分贡献率为 83.5% 和 13.6%，总成分贡献率为 97.1%，表明滋味和挥发性气味的主成分均能够较好反映原始多指标信息。同时，黄大茶米糕与对照组的电子舌与电子鼻

散点图区域均无重叠且距离较远，表明两组米糕间的滋味和香气存在差异。

2.4 黄大茶米糕的 GC-MS 检测结果

为进一步检测黄大茶粉对米糕挥发性风味物质的影响，通过 GC-MS 对黄大茶米糕和对照组的挥发性有机物（VOCs）进行了鉴定。与对照组相比，黄大茶米糕中共鉴定出 266 种显著差异 VOCs（P<0.05，VIP>1.0），其中 192 种化合物显著升高，74 种化合物显著降低。化学分类分析表明，醛酮类（13.1%）、萜类（8.6%）、烷烃（7.1%）、烯烃（7.1%）及其他（18.4%）等是主要的显著差异 VOCs，而酯类（4.8%）、醇类（3.8%）、羧酸类（3.4%）次之。参考已有文献 [31−34]，根据对照组和黄大茶米糕的 GC-MS 的相对定量结果，表 8 中呈现了差异倍数（Fold Change，FC）最高的 22 种米制品及黄大茶中的特征 VOCs，揭示了黄大茶米糕中苯甲醛、2,5-二甲基吡嗪、顺-3-己烯醛、顺-2-庚烯醛及芳樟醇等特征性风味物质的相对含量显著高于对照组（P<0.05）。这些化合物通过协同作用构建了独特的风味轮廓：苯甲醛和 2-甲基吡嗪等物质赋予典型的焙烤坚果香；顺-4-庚烯醛和顺-2-庚烯醛等因其较高的脂溶性和低气味阈值，有效贡献了奶油般丝滑的脂肪香气。与此形成对比的是，黄大茶米糕中的 2-羟基-5-甲基苯乙酮和顺-2,6-壬二烯-1-醇等清香型化合物，2-壬酮、癸酸甲酯、顺-3-己烯基异丁酸酯、2-戊基呋喃等果香型化合物及戊二酸二甲酯、顺式-3-己烯醇碳酸甲酯、2-甲氧基苯甲酸甲酯等花香型化合物的相对含量较对照更低。以上结果表明，添加黄大茶粉改变米糕中 VOCs 的组成特征，在保留了黄大茶中特征香气的同时，重塑了米糕整体风味轮廓。

表 8 黄大茶米糕与对照组中差异倍数最高的 22 种特征 VOCs

Table 8 22 characteristic VOCs with the highest fold change between large-leaf yellow tea rice cake and the control

物质名称	$\log_2$(FC)	香气描述[31−34]
苯甲醛	4.25	坚果香
2-甲基吡嗪	4.24	坚果味，烘焙香气
茶吡咯	3.58	烧焦气味
顺-2-戊烯醇	3.54	果香味
1-己烯-3-醇	3.54	金属味，土味
2,5-二甲基吡嗪	2.59	烤土豆味
芳樟醇	2.55	清花香
顺-3-己烯醛	2.32	草味
顺-2-己烯醛	2.18	青草香
顺-2-辛烯-1-醇	2.10	甜美的花香
顺-4-庚烯醛	1.90	奶香
顺-2-庚烯醛	1.85	奶油似香味
3-辛烯-2-酮	1.76	草药香
2,5-己二酮	1.54	甜香味
2-羟基-5-甲基苯乙酮	−1.13	草本气味
戊二酸二甲酯	−1.40	酯香花香
顺-2,6-壬二烯-1-醇	−1.45	绿色黄瓜的气味
2-壬酮	−1.49	果香和奶油香
2-乙基-1-己醇-五氟丙酸酯	−2.26	嫩叶清香
癸酸甲酯	−2.52	酒香，果香，花香气味
顺-3-己烯基异丁酸酯	−2.56	果味
顺式-3-己烯醇碳酸甲酯	−4.75	紫罗兰气味
2-戊基呋喃	−5.13	果香和豆香
2-甲氧基苯甲酸甲酯	−6.29	草本花香

2.5 黄大茶米糕的自由基清除能力分析

食品的抗氧化能力与其货架期密切相关，借助 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除能力检测评估了添加黄大茶粉对米糕抗氧化特性的改良作用。黄大茶米糕在两种自由基清除体系中均表现出显著增强的抗氧化能力（P<0.01）。具体而言，在 ABTS$^+$自由基清除实验中，黄大茶米糕清除率达 93.25%±2.76%，较对照组（17.68%±3.28%）提升至 5.3 倍；而 DPPH 自由基清除率差异更为显著，实验组（87.31%±3.08%）较对照组（1.75%±0.14%）提升至 49.9 倍（图 5）。

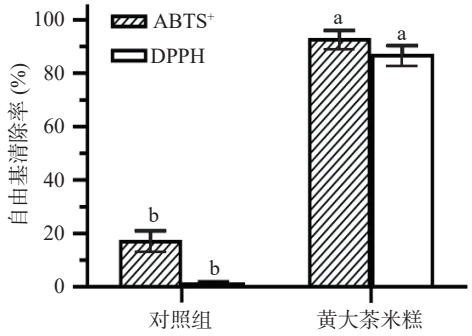


图 5 对照组与黄大茶米糕的自由基清除能力

Fig.5 Free radical scavenging ability of the control and large-leaf yellow tea rice cake

这一量级差异可能源于不同抗氧化成分的作用机制差异。黄大茶中富含的多酚类物质能提供氢质子与体内自由基结合，并参与辅酶Ⅱ的电子传递链来终止自由基的反应[35]，而多糖类物质也可通过螯合位点与金属离子进行配位，进而生成稳定的配合物，从而减少羟基自由基的产生，达到抗氧化效果[36]。DPPH 自由基作为脂溶性自由基体系，其清除效率的显著提升（49.9 倍）可能是由于黄大茶中脂溶性抗氧化成分的高效释放[37−39]。相比之下，ABTS$^+$作为水溶性自由基体系，其清除能力的提升（5.3 倍）可能与水溶性多酚的浸出相关。这种含茶食品中脂溶性体系清除效率增幅显著高于水溶性体系的特征，与前期在茶多酚改性淀粉体系中的研究结果一致[40]。以上结果表明，黄大茶经蒸煮过程后仍保留较强的抗氧化能力，赋予了米糕更高的自由基清除能力。

2.6 黄大茶米糕的体外消化特性分析及 eGI 值的计算

本研究通过体外模拟消化模型评估了添加黄大茶粉对米糕淀粉消化特性和血糖生成效应的调控作用。如图 6 体外淀粉水解率曲线显示，黄大茶米糕与对照组在 0~180 min 消化周期内淀粉水解趋势相

表 9　对照组与黄大茶米糕的淀粉含量组成及 eGI 值

Table 9　Starch content composition and eGI values of the control and large-leaf yellow tea rice cake

样品名称	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)	C_∞(%)	k	HI(%)	eGI
对照组	22.28±2.63^a	22.93±4.54^a	54.69±4.68^b	51.51±3.34^a	0.017	43.23	65.39
黄大茶米糕	12.58±2.89^b	19.39±1.74^a	68.03±4.61^a	36.04±4.25^b	0.015	30.05	57.56

似。消化初始阶段(0~20 min)两组样品均呈现快速水解趋势，在中间消化期(20~120 min)，两组样品水解速率不断降低，120 min 后两组样品的淀粉消化速度趋于稳定，180 min 时黄大茶米糕相较于对照组的淀粉水解率下降 15.48%(P<0.01)，这表明添加黄大茶粉能够显著抑制米糕的消化速率。除茶多酚能够有效抑制 α-淀粉酶的活性外，黄大茶中所含的膳食纤维也能够有效抑制葡萄糖的释放，从而降低了黄大茶米糕的体外消化速率，该现象与以往茶食品中的发现一致[17,41]。

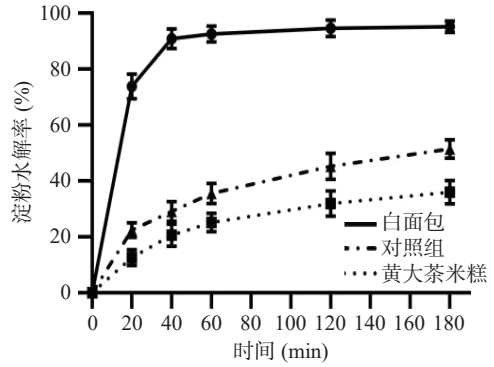


图 6　对照组与黄大茶米糕的体外淀粉水解率

Fig.6　*In vitro* starch hydrolysis rate of the control and large-leaf yellow tea rice cake

通过工艺和添加物等改变产品淀粉组分是目前研制低 GI 食品的常见方式。表 9 数据进一步量化了黄大茶对淀粉组分的结构重组效应，黄大茶米糕中快消化淀粉(RDS)比例由对照组的 22.28%±2.63% 显著降低至 12.58%±2.89%(P<0.05)，而抗性淀粉(RS)比例则从 54.69%±4.68% 显著提升至 68.03%±4.61%(P<0.05)。该现象可能与茶多酚自身对淀粉酶的抑制作用有关[42]，也可能是由于茶多酚与淀粉分子的相互作用结合形成了 V 型复合物[43]，该复合物具有更加紧密的结构，增加了对 α-淀粉酶的抗性，抑制了淀粉的消化，从而使得 RDS 含量下降。这种淀粉组分重构降低了米糕的葡萄糖释放速率和水解指数，直接导致了 eGI 的显著变化，黄大茶米糕 eGI 值为 57.56，较对照组降低 11.97%。根据 T/CNLIC 0145-2024《低血糖生成指数(GI)食品通用技术要求》规定(GI≤55 为低 GI 食品)，该产品已基本达到低 GI 食品要求。由于当前实验基于静态体外消化系统，未能完全模拟人体胃肠道的动态环境，可能导致 eGI 值与实际血糖反应的偏差[22,44]，因此本产品具有进一步优化和推广的潜力。

3　结论

本研究通过单因素实验结合正交分析，确定了黄大茶米糕的最优配方参数为籼糯米粉比例 5:2、黄大茶粉添加量 3%、赤藓糖醇添加量 3%。相较于对照组，黄大茶米糕在鲜味和风味丰富性方面呈现显著提升，并表现出更为浓郁的烘烤坚果香气。黄大茶粉的添加显著增强了米糕对于 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除能力，同时显著降低了米糕中淀粉的体外水解速率，促使 RS 比例显著提升。基于此配方制备得到的黄大茶米糕，其 eGI 为 57.56，接近国际通用的低 GI 食品阈值(GI≤55)。本研究通过多维度评价体系，揭示了黄大茶在米糕风味特征的修饰效应及其功能强化机制，为开发兼具地域特色与低 GI 特性的传统米制食品提供了理论基础和配方参考。

© 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] LUO Jianbo, XIE Xiaojuan, ZHOU Xiaoyu, et al. Effect of low glycaemic index diet on the glucose and lipid metabolism, microbiota composition, short-chain fatty acids content, immune response, and FGF-19 and CYP7A1 levels in type 2 diabetes rats[J]. Journal of Functional Foods, 2024, 118: 106261.

[2] HU Zhigeng, TAN Rongshao, JIN Di, et al. A low glycemic index staple diet reduces postprandial glucose values in Asian women with gestational diabetes mellitus[J]. Journal of Investigative Medicine, 2014, 62(8): 975−979.

[3] 刁苏晨. 菊糖对大米淀粉物化特性及米糕品质的影响[D]. 合肥：安徽农业大学, 2015. [DIAO Suchen. Effect of inulin on physicochemical properties of rice starch and the quality of rice-cakes[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.]

[4] FENG Xinyu, YANG Shiyan, PAN Yani, et al. Yellow tea: More than turning green leaves to yellow[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(22): 7836−7853.

[5] LI Yuchuan, LUO Qianqian, QIN Muxue, et al. Study on color, aroma, and taste formation mechanism of large-leaf yellow tea during an innovative manufacturing process[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 138062.

[6] WANG Qiang, ZHAO Xin, QIAN Yu, et al. *In vitro* antioxidative activity of yellow tea and its *in vivo* preventive effect on gastric injury[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2013, 6(2): 423−426.

[7] CAI Xiaqiang, LIU Zenghui, DONG Xu, et al. Hypoglycemic and lipid lowering effects of theaflavins in high-fat diet-induced obese mice[J]. Food & Function, 2021, 12(20): 9922−9931.

[8] MCDOUGALL G J, STEWART D. The inhibitory effects of berry polyphenols on digestive enzymes[J]. BioFactors, 2005,

23(4): 189−195.
[9] YU Haixia, XU Xingrui, ZHAO Shuai, et al. Effect of Zijuan tea (*Camellia sinensis* var. *assamica* cv. Zijuan) on starch digestion properties of bread and its mechanisms[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(5): 2983−2997.
[10] CAO Peiqin, LI Xiuping, OUYANG Jian, et al. The protective effects of yellow tea extract against loperamide-induced constipation in mice[J]. Food & Function, 2021, 12(12): 5621−5636.
[11] 朱尧, 孔亚帅, 李灿, 等. 黄大茶精酿啤酒酿造工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(6): 83−87. [ZHU Yao, KONG Yashuai, LI Can, et al. Optimization of brewing process of large-leaf yellow tea craft beer[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(6): 83−87.]
[12] 朱其顺, 李其琴, 汪乐飞, 等. 草莓味黄大茶发酵饮料的开发及工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(6): 67−77. [ZHU Qishun, LI Qiqin, WANG Lefei, et al. Development and process optimization of strawberry-flavored yellow tea fermented beverage[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(6): 67−77.]
[13] 朱晓凤. 原味黄大茶液体饮料加工技术研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019. [ZHU Xiaofeng. Study on processing technology of original Huangdacha liquid beverage[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.]
[14] 陈聪. 黄大茶烟熏液对牛肉糜凝胶食用品质及其货架期的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024. [CHEN Cong. Effect of liquid smoke from huangda tea on the edible quality and shelf life of beef batter gel[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024.]
[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 Zhixin, XU Xueye, ZHANG Xinzhen, 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] 汪名春, 刁苏晨, 朱培蕾, 等. 菊糖米糕的工艺及感官质构评定[J]. 食品工业科技, 2015, 36(11): 251−256. [WANG Mingchun, DIAO Suchen, ZHU Peilei, et al. Study on production technology and sensory texture evaluation of inulin rice-cakes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(11): 251−256.]
[17] 罗登林, 赵影, 徐宝成, 等. 天然菊粉对面团发酵流变学和面包品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 26−31. [LUO Denglin, ZHAO Ying, XU Baocheng, et al. Effect of natural inulin on dough rheological properties and bread quality[J]. Food Science, 2018, 39(6): 26−31.]
[18] 李美娟, 陈国宏, 陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(S1): 45−48. [LI Meijuan, CHEN Guohong, CHEN Yantai. Study on target standardization method of comprehensive evaluation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12(S1): 45−48.]
[19] 刘媛, 杨沛泉, 赵玲艳, 等. 气相色谱-质谱联用、高效液相色谱结合电子感官技术评价剁椒风味品质[J]. 食品科学, 2025, 46(10): 188−198. [LIU Yuan, YANG Peiquan, ZHAO Lingyan, et al. Evaluation of the flavor quality of fermented chopped pepper by gas chromatography-mass spectrometry, high performance liquid chromatography, electronic nose, and electronic togue[J]. Food Science, 2025, 46(10): 188−198.]
[20] GUAN Lina, MI Yongjie, ZHANG Min, et al. Construction of aroma association network of cooked rice based on gas chromatography-mass spectrometry (GC–MS) and sensory analysis[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2024, 39(1): 45−57.
[21] ZHENG Tian, CHEN Huiyun, YU Yuanguo, et al. Property and quality of Japonica rice cake prepared with *Polygonatum cyrtonema* powder[J]. Food Chemistry, 2024, 22: 101370.
[22] 孙鹏伟. 低 GI 方便香菇米茶制备及工艺优化[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024. [SUN Pengwei. The preparation and process optimization of low GI instant *Lentinula edodes* rice tea[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2024.]
[23] 张一芳. 挤压含茶米制食品的研制及其贮藏特性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019. [ZHANG Yifang. Development and storage characteristics of extruded rice food containing tea[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.]
[24] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427−437.
[25] 杨晓蓉, 李歆, 凌家煜. 不同类别大米糊化特性和直链淀粉含量的差异研究[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(6): 37−42. [YANG Xiaorong, LI Xin, LING Jiayu. Differences among rice categories in pasting characteristics and amylose content[J]. Chinese Cereals and Oils Association, 2001, 16(6): 37−42.]
[26] 贾良, 丁雪云, 王平荣, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征及其与理化品质性状相关性的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 790−794. [JIA Liang, DING Xueyun, WANG Pingrong, et al. Rice RVA profile characteristics and correlation with the physical/chemical quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(5): 790−794.]
[27] HU Wenxuan, CHEN Jie, XU Fei, et al. Study on crystalline, gelatinization and rheological properties of Japonica rice flour as affected by starch fine structure[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1232−1241.
[28] 贾敏. 表儿茶素对绿豆淀粉理化、消化特性的影响及其抑制消化酶机制初探[D]. 太原: 山西大学, 2024. [JIA Min. Effects of epicatechin on the physicochemical and digestive properties of mung bean starch and its mechanism of digestive enzyme inhibition: a preliminary study[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024.]
[29] ZHU F, WANG Y J. Rheological and thermal properties of rice starch and rutin mixtures[J]. Food Research International, 2012, 49(2): 757−762.
[30] 南冲, 熊柳, 孙庆杰, 等. 糖醇对甘薯淀粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2): 22−26,32. [NAN Chong, XIONG Liu, SUN Qingjie, et al. Effect of sugar alcohols on the physicochemical characteristics of sweet potato starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(2): 22−26,32.]
[31] 裴子莹, 赫桂影, 刘彧辰, 等. 黄大茶特征“锅巴香”的关键呈香物质鉴定[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 289−297. [PEI Ziying, HE Guiying, LIU Yuchen, et al. Characterization of the key aroma-active compounds responsible for the rice cruse-like aroma of large-leafed yellow tea (*Camellia sinensis*)[J]. Food Science, 2023, 44(12): 289−297.]
[32] SCHWERTNER H A, RIOS D C. Analysis of sesamin, asarinin, and sesamolin by HPLC with photodiode and fluorescent detection and by GC/MS: Application to sesame oil and serum samples[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2012, 89(11): 1943−1950.
[33] 郭雯飞. 茶叶香气生成机理的研究[J]. 中国茶叶加工, 1996(4): 34−37. [GUO Wenfei. Study on the mechanism of tea aroma formation[J]. China Tea Processing, 1996(4): 34−37.]
[34] 查旻昱, 吴悠, 张梁. 茶叶中挥发性香气物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(13): 4298−4303. [ZHA Minyu, WU You, ZHANG Liang. Research advances on volatile aroma compounds of tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(13): 4298−4303.]
[35] 刘本英, 王平盛. 茶多酚生物学活性的研究进展[J]. 热带农

业科技，2006, 29(2)：28−30,33. ［LIU Benying, WANG Pingsheng. Study evolution on biological activity of tea polyphenols[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2006, 29(2)：28−30, 33.］
［36］卜原玲, 姚泽远, 韩伟, 等. 竹荪多糖提取工艺及抗氧化活性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(2)：228−236. ［BU Yuanling, YAO Zeyuan, HAN Wei, et al. Extraction process of polysaccharide from *Dictyophora indusiata* and antioxidant activity[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 45(2)：228−236.］
［37］祝晗. 脂溶性茶黄素制备及抗氧化作用与应用研究[D]. 芜湖：安徽工程大学, 2020. ［ZHU Han. Study on preparation, antioxidation and application of fat-soluble theaflavins[D]. Wuhu：Anhui Polytechnic University, 2020.］
［38］庄谦谦, 姚波, 蒋晓翠. 茶黄素和脂溶性茶多酚对牛肉棒的抗氧化护色作用[J]. 食品科技, 2017, 42(2)：127−131. ［ZHUANG Qianqian, YAO Bo, JIANG Xiaocui. Antioxidant and color-protecting effect of theaflavins and lipid-soluble tea polyphenols on beef sticks[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(2)：127−131.］
［39］曾磊, 张玉军, 唐怀建. 脂溶性茶多酚的研制及其抗氧化性能研究[J]. 中国油脂, 2004, 29(11)：54−57. ［ZENG Lei, ZHANG Yujun, TANG Huaijian. Preparation and antioxidative activity of lipid-soluble tea polyphenols[J]. China Oils and Fats, 2004, 29(11)：54−57.］
［40］陈南, 高浩祥, 何强, 等. 植物多酚与淀粉的分子相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2)：497−505. ［CHEN Nan, GAO Haoxiang, HE Qiang, et al. A review of the molecular interaction between plant polyphenols and starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2)：497−505.］
［41］李梦菲, 杨涛, 王洁洁, 等. 黄茶锅巴工艺优化及其风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7)：181−190. ［LI Mengfei, YANG Tao, WANG Jiejie, et al. Process optimization and flavor components analysis of rice crust with yellow tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7)：181−190.］
［42］邓楠, 杨正香, 刘成梅, 等. 大米淀粉-多酚复合物的制备与消化特性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(11)：57−63. ［DENG Nan, YANG Zhengxiang, LIU Chengmei, et al. Preparation and digestibility of rice starch-polyphenol complex[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(11)：57−63.］
［43］YANG Jia, DONG Mengji, FANG Fang, et al. Effects of varied preparation processes on polyphenol-rice starch complexes, *in vitro* starch digestion, and polyphenols release[J]. Food Chemistry, 2024, 450：139330.
［44］华燕菲. 低 GI 小米绿豆面条配方优化及其品质特性的研究[D]. 石家庄：河北经贸大学, 2020. ［HUA Yanfei. Study on formula optimization and characteristics of low GI millet-mung bean noodles[D]. Shijiazhuang：Hebei University of Economics and Business, 2020.］