

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60049

米面包品质改良研究进展

郭 恬¹ 霍 坚² 程 昊^{3,4} 易翠平¹

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 聚宝金昊农业高科有限公司, 湖南 湘潭 411100;
3. 广西科技大学生物与化学工程学院, 广西 柳州 545006; 4. 广西糖资源绿色加工重点实验室, 广西 柳州 545006)

摘要:米面包因其低致敏性和高消化率特性, 成为替代传统小麦面包的重要产品。然而, 大米的分子特性导致其难以形成类似麸质的连续黏弹网络, 受此影响米团的气体截留效率显著降低, 大米面包存在风味不足、硬化掉渣和易老化等品质劣变问题。为解决这一问题, 国内外学者研究了米面包水分、质构、色泽和风味等方面的变化, 并总结了原料筛选及预处理、外源改良以及酸米团发酵技术、冷冻米团技术和烘焙新技术等品质改良方法, 为米面包的品质改良和劣变控制提供了试验依据与理论基础。

关键词:米面包; 品质改良; 改良剂; 加工工艺

Research progress on quality enhancement of rice bread

GUO Tian¹ HUO Jian² CHENG Hao^{3,4} YI Cuiping¹

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Jubao Jinhao Agricultural High-tech Co., Ltd., Xiangtan, Hunan 411100, China; 3. College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Green Processing of Sugar Resources, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

Abstract: Owing to the low allergenicity and high digestibility, rice bread has become an important alternative product to traditional wheat bread. However, the molecular characteristics of rice make it challenging for rice to form a continuous viscoelastic network akin to gluten. Consequently, the gas retention efficiency of rice dough is substantially diminished, resulting in quality degradation problems in rice bread, such as inadequate flavor, textural hardening, crumbling, and easy staling. To this end, both domestic and international scholars have examined the variations in the moisture content, texture, color, and flavor of rice bread. Meanwhile, various strategies for quality enhancement are summarized, including the selection and pretreatment of raw materials, exogenous improvement, sourdough fermentation technology, frozen dough techniques, and innovative baking technology. Finally, an experimental reference and theoretical foundation are provided for improving the quality of rice bread and controlling its degradation.

Keywords: rice bread; quality enhancement; amendment; processing technology

米面包作为主食, 因其口感温和、过敏性低等优点而受到消费者青睐^[1]。然而大米蛋白无法形成类似小麦麸质^[2]的连续三维网络结构, 使得米团结构松散, 黏弹性、拉伸性及保气性能变差, 制备出的米面包不仅存在比容小、口感粗糙等品质缺陷, 还容易在运输和贮藏过程中出现风味劣变^[3]、硬化掉渣等问题, 阻碍了米面包市场的拓展。

为突破这一瓶颈, 国内外研究者通过原料筛选、外源添加剂、工艺改良等方式改善米面包的品质^[4-5], 探究不同方式对米面包的作用效果和作用机理。目前, 已有关于改良剂与加工技术对米面包物理特性的影响的相关报道, 然而对于米面包品质改良的研究还相对匮乏。因此, 研究拟综述米面包加工及贮藏过程中的品质变化及改良措

基金项目:广西糖资源绿色加工重点实验室开放基金(编号: GXTZYKF202306)

通信作者:易翠平(1973—), 女, 长沙理工大学教授, 博士。E-mail: 109823769@qq.com

收稿日期:2025-01-16 **改回日期:**2025-04-22

引用格式:郭恬, 霍坚, 程昊, 等. 米面包品质改良研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 225-231.

Citation: GUO Tian, HUO Jian, CHENG Hao, et al. Research progress on quality enhancement of rice bread[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 225-231.

施,以期为米面包品质调控提供理论依据,为提升大米基烘焙食品品质控制技术开拓新路径。

1 米面包品质变化

1.1 米面包的水分变化

米面包在烘焙和贮藏过程中,水分会发生显著的迁移和分布变化,这对其品质有着至关重要的影响。在混合过程中,米面包的配方会对米团持水性有不同的影响,从而导致面包最终水分含量的差异。不同品种的水稻在混合过程中其水合状态各不相同,其中普通米粉的保水性要优于糯米粉,因此米团的保水性也具有相同的趋势,最终影响了面包的水分含量^[6]。在烘焙过程中,米面包内部的水分状态会发生改变。米团中的自由水在高温下会逐渐蒸发,而结合水则与面包中的各种成分紧密结合。随着烘焙的进行,面包内部的水分开始向表皮迁移。这是因为表皮直接与高温环境接触,水分蒸发速度较快,形成了一个水分梯度,促使内部水分不断向表皮扩散。烘焙方式是一个重要因素,不同的烘焙温度和时间会导致面包内部水分的蒸发速度和迁移程度不同。吕隆重^[7]采用先蒸制定型后焙烤的工艺进行米面包的制备,使得面包品质获得大幅度的改善。

不同状态水分在米面包中发挥着不同的作用。自由水的存在使得面包在烘焙过程中能够膨胀和定型,赋予面包柔软的口感。结合水则与面包中的大分子物质如淀粉、蛋白质等通过氢键等作用力结合在一起,对面包的稳定性和保质期有着重要影响。孙司卉等^[8]研究了不同植物蛋白和动物蛋白对米团持水性能的影响,结果表明,添加大豆蛋白的米团持水性能表现优良,面包品质最好。在贮藏过程中,米面包的水分迁移仍在继续。水分会从面包内部缓慢地向表皮转移,同时也会通过面包皮散发到周围环境中。赵芳芳^[9]研究了不同催化类型的淀粉酶对米面包水分分布的影响,结果显示,对照样品及两种酶添加的无麸质面包在贮藏期的 T_{23} 均向更短的弛豫时间移动,表明老化过程中无麸质面包中的可交换游离水的含量降低;而添加了催化糖基水解的淀粉酶的无麸质面包,在贮藏期的 T_{22} 位置均略向更短的弛豫时间移动,表明强结合水的生成。水分迁移与再分布规律表明,水分在分子内和分子间的迁移与再分布是导致米面包质地硬化的因素之一。

1.2 米面包的质构变化

米面包的质构特性,如硬度、咀嚼性、胶黏性和弹性等,在烘焙和贮藏过程中会发生明显改变,这些变化受到多种因素(原料、外源添加剂、烘焙工艺等)的影响。Kang 等^[10]研究发现,使用圆淀粉颗粒结构的大米制备的面包

具有更低的硬度,这可能是因为圆淀粉颗粒间独特的间隙空间使得研磨过程中的损伤淀粉含量较少,降低了米面包的硬度。海藻酸丙二醇酯(PGA)作为一种兼具稳定和乳化双重作用的天然胶体,与羟丙基甲基纤维素(HPMC)协同作用后能显著降低大米面包的硬度,提升回复性和弹性^[11],这一结果表明不同亲水胶体之间的协同作用在提升米面包组织结构方面有很大的潜力。Qin 等^[12]使用超声处理后的半干磨米粉制作面包,发现物理改性的米粉降低了米面包的硬度、内聚性和胶黏性,使得面包的口感更好。随着贮藏时间的延长,米面包的硬度通常会增加。这主要是因为淀粉的老化,淀粉分子在冷却过程中会重新排列形成结晶结构,导致面包变得紧实和坚硬。Lee 等^[13]研究发现,添加乳化剂有利于提升大米面包体积,乳化剂能与直链淀粉形成复合物,抑制面包贮藏过程中直链淀粉的重结晶,减少贮藏过程中硬度变化,其中硬脂酰乳酸钠具有较优的品质改良效能,其面包具有最高的体积和最低的硬度。Tuta Şimşek 等^[14]采用新型技术制备无麸质面包,发现在半真空条件下焙烤面包的体积比在大气压焙烤下更大,该技术通过调控气体膨胀受限效应,使面包比容显著提升,面包芯气室较大且相对均匀,并且更耐贮藏。

质构变化对米面包的品质有着重要影响。硬度和咀嚼性的增加会使面包变得难以咀嚼,影响口感;胶黏性过高会使面包黏牙,降低消费者的接受度;弹性下降则会使面包失去蓬松感,变得干瘪。因此,通过合理选择食品原料、外源添加剂和烘焙技术等方式来控制米面包的质构变化,对于提高米面包的品质至关重要。

1.3 米面包的色泽变化

米面包的色泽是其品质的重要视觉指标,通常采用 CIELab 表色系对面包的颜色进行评价。CIELab 表色系也称 L^* 、 a^* 和 b^* 表色系, L^* 表示明暗度, a^* 表示红绿色, b^* 表示黄蓝色^[15]。它的形成主要归因于一系列复杂的化学反应,其中美拉德反应起着关键作用。美拉德反应是指羰基化合物(如还原糖)与氨基化合物(如氨基酸、蛋白质)在常温或加热时发生的一系列复杂反应。然而米面包随着烘焙时间的延长和温度的升高,美拉德反应的程度相较于小麦面包较为平缓,烘烤后的米面包颜色偏白。氨基酸的种类和含量也会影响米面包的色泽。Pico 等^[16]揭示了蛋白质对无麸质面包表皮色泽以及风味物质的调控规律,动物蛋白中乳清蛋白使得面包壳的颜色变深,诱导吡嗪类挥发物质的产生,面包香气变浓郁;植物蛋白中大米蛋白可使面包外壳色泽更深,更容易受到消费者青睐。而发酵工艺对米面包色泽的影响较小,Dan 等^[17]研究了

3种不同品种的大米经酸米团发酵后面包的色泽变化,结果显示,三者之间的面包颜色有所差异,这可能是酸米团中的代谢物与大米组成协同作用的结果。

1.4 米面包的风味变化

米面包的风味是其品质的重要组成部分,风味物质的产生和变化受到多种反应和因素的影响。无麸质米粉面包的风味物质与小麦面包不同,除了缺乏含有焦糖味的麦芽酚^[18]外,米面包中还存在特征风味物质(2-氨基乙酰苯),这是米面包具有强烈米香味的来源^[19]。此外,米面包在美拉德反应过程中的中间物质可通过降解和裂解反应,生成酮、醛类及挥发性杂环化合物,直接影响面包风味^[20]。在大米面包的制备过程中,大米蛋白能够诱导面包中2-乙酰-1-吡咯啉香味物质浓度的增加,改善面包的风味。

除烘焙过程中产生的风味物质外,发酵方式也会影响米面包风味物质的生成。但杭妍^{[21]43-46}以酸米团技术对粳米、籼米、糯米进行处理,3种米团在发酵24 h后游离氨基酸含量显著增加,谷氨酸、丙氨酸、精氨酸以及天冬酰胺含量明显高于其他氨基酸,使得米面包呈现出甜味和鲜味。面包关键香气物质的主要前体物质脯氨酸的积累量也显著上升,其中关键香气成分为苯乙醇、辛酸乙酯、月桂酸乙酯。

2 米面包品质的改良

2.1 大米原料及预处理工艺

2.1.1 大米原料筛选 稻米品种资源和生态地域造成大米淀粉分子特性间存在差异性,主要体现在直链淀粉含量、淀粉颗粒晶体构型和短支链淀粉占比方面,这些差异直接决定了米制品的加工适用性。在面包加工过程中,大米种质资源间的差异也会造成面包品质参差不齐,具体表现为面包比容和组织结构的变化。Aoki等^[22]研究表明,面包比容与直链淀粉含量呈正相关,较高的直链淀粉

比例能够增强米团网络结构稳定性,在提升大米面包比容方面具有关键调控作用;Han等^[23]发现,制作大米面包的适宜直链淀粉含量范围为23.43%~24.54%,过量反而会劣化产品品质。

除此之外,淀粉颗粒形态与大米面包的品质也息息相关。Kang等^[10]研究了淀粉形态与米面包品质的构效关系,选用了3种不同品种的大米制作面包,其淀粉颗粒形态分为多边形和圆形,研究发现,选用圆淀粉颗粒结构的大米品种制作出的面包呈现出比容更大和气孔更均匀的特征。这可能是因为圆淀粉颗粒独特的间隙结构赋予体系较低的硬度,且损伤淀粉含量较低,有利于米团组织结构的形成。De La Hera等^[24]采用不同目数的米粉制作面包,结果表明,米粉颗粒粒径与面包品质呈负相关,过细的淀粉颗粒破坏了米团连续相结构的稳定。大米原料的多尺度结构通过调控其水合特性参数、黏弹性和热力学性质,显著影响米团体系的动态流变学行为和气室稳定性,这一变化最终反映在面包的比容和组织结构等宏观指标上。因此,在进行大米品种的筛选时,要综合考虑其淀粉分子特性、吸水性和淀粉颗粒结构等因素对面包品质的影响。

2.1.2 预处理工艺 大米粉可以通过多种加工技术进行改性处理,能够使其更适用于米面包的生产,包括物理方法、化学方法及生物技术(表1)。物理法可改善米粉内部的交联状态,糊化后的大米粉冷却后可形成具有三维网状结构的凝胶^{[25]31},凝胶化后的米粉在制备米团阶段水合作用增强,所得面包具有更大比容和更低的硬度^[30]。化学法采用基团修饰的方法对米粉进行改性,使米粉自身的水合特性得到加强,体系内部的水分状态重新分布,从而抑制面包的回生进程。生物法则主要通过酶的作用直接或间接改善米团的物理特性,从而达到延缓米面包老化和提升营养价值的目的。

表1 预处理工艺及面包品质改善效果
Table 1 Pretreatment processes and quality enhancement effect of bread

方法	预处理工艺	对面包品质的影响	参考文献
物理法	预糊化	米面包中三维网络均匀致密,有更高的淀粉消化率和水分活度,面包的比容增大,硬度降低	[25] ³²
	挤压预糊化	经挤压膨化处理后,米团的剪切速率和弹性增大,面包体积、持水性和持气性增加,硬度降低	[26]
	微波处理	提高米粉米团的黏弹性和抗形变能力,流变特性的改善对增大比容和延长产品货架期有显著作用	[27]
化学法	磷酸化	提升了米粉的膨胀力和溶解度,抑制面包的回生进程	[28]
生物法	发芽	激活糙米的内源酶系统,促进谷物中的矿物质和生物活性物质的定向富集,有效改善米面包营养素的生物利用	[29]
	酶处理	延缓面包老化:①降低淀粉回生程度;②减少微晶结构的连接以及支链淀粉网络结构的形成;③减少贮藏期水分的迁移和再分布,保持面包基质的假塑性	[9]

2.2 外源改良剂

2.2.1 辅料类 面包改良剂从内部基质连续性、水分迁移以及淀粉结晶特性等方面发挥作用,具体表现为无麸质面包比容提升,口感改善,产品货架期延长等方面。Nieto-Mazzocco 等^[31]基于大米—高粱—苋菜三元复配体系制备无麸质产品,其质构、流变等特性方面与传统小麦产品具有等效性。Kim 等^[32]以多源淀粉通过梯度复配改性策略优化大米面包品质,结果表明,复合粉体系制作的面包感官可接受度均优于纯米粉面包。Hosokawa 等^[33]研究表明,由香蕉果实制备的香蕉粉可替代面筋制备无麸质面包,原料自身能够提供酵母代谢所需的糖分。此外,大豆分离蛋白(SPI)可通过非共价力作用于支链淀粉有效延缓老化过程,这一发现为大豆粉作为功能组分引入大米面包体系提供了理论依据^[34]。复配外源改良剂的使用^[35]不仅能够协同改善产品感官品质与营养平衡性,同时还能够延缓淀粉重结晶动力学过程。天然外源添加剂的使用更符合部分抵制食品添加剂的消费者需求,其清洁标签特性在无麸质烘焙米制品市场具有重要价值。

2.2.2 亲水胶体类 亲水胶体是一组具有不同化学结构、高分子量和亲水性的长链水溶性多糖分子。添加亲水胶体对无麸质谷物产品具有积极影响,因为它们改善了最终产品的结构、体积、质地、味道和整体质量,并延长了保质期。Jang 等^[36]研究发现,使用 5 种不同种类的亲水胶体制作面包,混合阶段瓜尔胶对于大米团的黏弹性具有更为显著的增强作用,而烘焙后对于面包比容贡献较大的是羟丙基甲基纤维素(HPMC)。HPMC 能与大米蛋白形成亲水键促进水合作用,有助于无麸质米团的稳定性和均匀性^[37]。Ari Akin 等^[38]研究发现,不同比例的车前子胶和黄原胶均可显著提升面包的弹性,降低其硬度。除此之外,亲水胶体还可与蛋白产生协同作用,Imamura 等^[39]使用豆浆进行米面包的制作,并探究了不同亲水胶体对米面包孔隙特性的影响,结果显示,HPMC 能与豆浆结合,增强体系界面活性,提升气泡稳定,使得米面包内部气孔均匀。

2.2.3 蛋白类 蛋白质因其界面活性与分子间作用力调控机制,在米团体系中展现多重功能协同效应,一方面增强了米团的气体截留率,另一方面提升了米团体系的三相界面稳定性^[8]。在烘焙米制品体系中,动植物蛋白的引入不仅能够通过分子交联强化面包基质网络连续性,还能够通过美拉德反应强化烘焙香气物质生成、同步实现改善颜色和硬度、强化营养的作用。有研究^[40]表明,SPI 可促进分子间巯基—二硫键的动态交换,诱导二硫交联网络的形成。SPI 中的 11S 球蛋白与大米蛋白在水合作用下形成更多非共价键,这些相互作用促进了混合米团内

网络结构的发展,导致抗形变能力增强、硬度降低和弹性增加^[41]。在米团体系中非必需氨基酸(如赖氨酸)的生物富集度也在提升,无麸质面包的营养价值进一步得到强化。Salah 等^[42]发现,添加 6% 的油菜蛋白能够改善大米面包的基质特性,显著优化产品质构特性,在降低面包硬度的同时提升蓬松度和弹性。Pico 等^[16]揭示了蛋白质源对无麸质面包表皮色泽以及风味物质的调控规律,其中动物蛋白中乳清蛋白使得面包壳的颜色变深,诱导吡嗪类挥发物质的产生,面包香气变浓郁;而植物蛋白中相较于豌豆蛋白,大米蛋白能够诱导面包中 2-乙酰-1-吡咯啉香味物质浓度的增加,面包外壳色泽更深,更容易受到消费者青睐。

2.3 改良技术

2.3.1 冷冻米团技术 冷冻米团技术是一种新型的加工贮藏的技术手段,这一技术对米面包的贮藏品质有着显著影响。在该技术中,米团在发酵一定程度后被冷冻保存,需要时再解冻继续发酵和烘焙。这一技术能够使米面包的体积更加稳定,面包内部的气孔更加均匀。这是因为在冷冻过程中,米团中的冰晶形成会对面筋网络产生一定的破坏,但同时也会促使米团中的水分重新分布,使得米团在解冻后发酵更加均匀。Wei 等^[43]探究了冷冻方式对面筋重构米团质地的影响,发现液氮冷冻对米团的影响最小,冻结速度的减慢会导致冷冻过程中米团淀粉颗粒和蛋白质结构被破坏的程度增加,从而导致受损淀粉增加,蛋白质有序结构减少,冷冻米团中的结合水变为游离水,米团质地进一步恶化。然而,在这一过程中会对米团内部结构造成不利影响,导致解冻后米团变脆且凝聚力较弱,从而降低最终产品的整体质量。为解决这一问题,冷冻米团技术会与羧甲基壳聚糖(CMCh)等亲水胶体一起调控米面包的整体质量,CMCh 在米团的保水性和面包的品质改善方面表现较为优异^[44]。

2.3.2 酸米团发酵技术 酸米团发酵技术是利用天然的乳酸菌和酵母菌进行发酵的技术。酸米团发酵还可以改善面包的质构,使面包更加柔软和有弹性。这一酸化作用对米团的结构形成成分有显著影响,韩雨茜^[45]研究发现,含酪蛋白水解物的江米团自然发酵后可使其淀粉颗粒变得更圆滑且空隙变小,凝胶结构紧密,能显著改善米团的内部结构。这可能是因为淀粉的酸水解增加了淀粉颗粒的水结合能力,面筋蛋白在有机酸的作用下发生溶胀和溶解,使米团更柔软,并且阿拉伯木聚糖的溶解度在酸性条件下显著提高,增强了面包的体积和柔软度^[46]。

酸米团发酵可以产生独特的风味物质,如乳酸、醋酸等有机酸,这些有机酸不仅赋予米面包独特的酸味和香气,还能抑制有害微生物的生长,延长面包的保质期。但

杭妍^{[21]35-42}使用酸米团技术发酵的米面包的比容显著增大,乳酸等酸味物质的富集有利于得到更柔软的面包。除此之外,酸米团发酵还改变了米面包的挥发性化合物的组成,其含量随着发酵时间的增加而上升。Yang等^[47]研究表明,酸米团发酵后的米团酸度显著增加,且与最佳烘焙条件相结合后能够使得米面包表皮颜色呈现金黄色。

此外,还有一些其他的发酵技术也在不断探索和应用中。如采用复合发酵剂^[48]进行发酵,可以充分发挥不同菌种的优势,提高发酵效果的同时还可达到降糖效果。

2.3.3 新型烘焙技术

烘焙技术对米面包的水分、质构、色泽和风味有着重要影响。传统的热风烘焙可以使面包表面均匀受热,形成酥脆的外壳,然而大米面包在这一阶段易出现气体逸散、表皮开裂及结构塌陷等相态失稳现象,同时面临风味物质逸失与表皮褐变不足等品质缺陷^[4]。针对这一技术瓶颈,Srikanlaya等^[49]系统评估了两种热加工技术及其复合使用后对无麸质大米烘焙制品品质的影响,微波烘焙和热风微波烘焙技术的引入可缩短烘焙周期,降低面包的血糖指数,然而这一加工技术也加剧了低温贮藏条件下淀粉的有序化重排。Tuta simşek^[14]采用半真空烘焙技术制备无麸质面包,真空环境降低了烤箱内的气压从而增强了面团的热力学膨胀效应,致使面包体积比在大气压下焙烤时更大,面包的比容、质构特性等方面都有较为优异的表现。

欧姆加热^[50]是另一种新兴技术,在电流通过期间,食物材料通过电阻加热进行膨胀。这种方法的优点是加热较为均匀,并且面包的比容、弹性和孔隙率均优于常规烘焙方法。然而,由于面包配方不同,面团/面糊的黏度、泡沫形成、稳定性或空气(孔隙)的掺入,以及在欧姆加热过程中这些结构特性的诱导变化都会影响欧姆烘焙对面包的改良效果^[51]。因此,烘焙参数需要根据这些步骤针对性地调整加工参数,从而量身定制加工方案。

3 结论与展望

高质量米面包的开发仍面临巨大瓶颈,主要体现在以下方面:加工工艺方面,米团黏弹性不足、持气性较差导致结构组织松散;产品品质方面,面临水分损失快、口感粗糙等问题;感官方面,存在表面色泽偏白、烘焙香气不足等局限性。

未来改良需聚焦多维度创新:① 利用多组学技术解析淀粉—蛋白—水分的互作网络,阐明风味标志物的代谢通路;② 开发低GI、高膳食纤维等功能性产品,结合发芽、发酵技术提升营养物质生物可及性;③ 研发超高压、脉冲电场等绿色加工技术,减少化学添加剂依赖;④ 构建智能化工艺模型,实现原料配比与烘焙参数的精准预测。

产业化需突破原料预处理、设备兼容性及副产物高值化利用等瓶颈。同时,应建立涵盖地域风味偏好与质构需求的感官设计体系,推动米面包从传统主食向营养靶向化、加工低碳化的新型健康食品转型。

参考文献

- [1] 马洁. 添加苦荞麦粉对米面团流变学及面包品质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019: 7.
MA J. The effects of adding tartary buckwheat flour on rice flour dough rheological properties and bread quality[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2019: 7.
- [2] 杨天一, 徐学明, 金亚美, 等. 不同面筋蛋白组分对面包品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(2): 40-44.
YANG T Y, XU X M, JIN Y M, et al. Effects of different gluten components on bread quality[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(2): 40-44.
- [3] 邓仲利, 范光君, 袁瑞博, 等. 米珍营养米食味品质、风味物质及主要活性成分分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 145-151.
DENG Z L, FAN G J, YUAN R B, et al. Mizhen nutritional rice taste quality, flavor substances, and main active ingredients[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 145-151.
- [4] 吕隆重, 李波轮, 任传顺, 等. 无麸质大米面包加工技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 279-287.
LV L Z, LI B L, REN C S, et al. Research progress of gluten free rice bread processing technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(11): 279-287.
- [5] CULETU A, DUTA D E, PAPAGEORGIOU M, et al. The role of hydrocolloids in gluten-free bread and pasta; rheology, characteristics, staling and glycemic index[J]. Foods, 2021, 10 (12): 3 121.
- [6] SAITO K, OKOUCHI M, YAMAGUCHI M, et al. Quality improvement of gluten-free rice flour bread through the addition of high-temperature water during processing[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(11): 4 820-4 830.
- [7] 吕隆重. 乳蛋白对无麸质大米面包品质的影响及机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 58.
LV L Z. Study on the effect of milk protein on the quality of gluten-free rice bread and its mechanism[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 58.
- [8] 孙司卉, 杨杨, 任琨琨, 等. 外源蛋白改良剂对米面团热力学性能及面包品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 149-161.
SUN S H, YANG Y, REN L K, et al. Effect of exogenous protein conditioner on the thermodynamic properties of rice dough and bread quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(3): 149-161.
- [9] 赵芳芳. 淀粉酶改善无麸质面包品质及其作用机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 68-69.
ZHAO F F. Improvement and mechanism of amylolytic

- enzymes on gluten-free bread quality[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 68-69.
- [10] KANG T Y, SOHN K H, YOON M R, et al. Effect of the shape of rice starch granules on flour characteristics and gluten-free bread quality[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(8): 1 743-1 749.
- [11] ZHAO F F, LI Y, LI C M, et al. Co-supported hydrocolloids improve the structure and texture quality of gluten-free bread [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 152: 112248.
- [12] QIN W Y, XI H H, WANG A X, et al. Ultrasound treatment enhanced semidry-milled rice flour properties and gluten-free rice bread quality[J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5 403.
- [13] LEE M H, CHANG H G, LEE Y T. Effects of enzymes and emulsifiers on the loaf volume and crumb hardness of rice breads[J]. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 2008, 37(6): 761-766.
- [14] TUTA ŞİMŞEK S. Evaluation of partial-vacuum baking for gluten-free bread: effects on quality attributes and storage properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 91: 102891.
- [15] 徐虹, 王琮琮, 龚凌霄. 莲子红衣黄酮对馒头品质和消化特性的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(10): 120-129.
- XU H, WANG C C, GONG L X. Effect of lotus seed red-skin flavonoids on quality and digestibility of steamed buns[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2024, 43(10): 120-129.
- [16] PICO J, REGUILÓN M P, BERNAL J, et al. Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of rice flour-corn starch based gluten-free breads[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 86: 92-101.
- [17] DAN H Y, GU Z P, LI C, et al. Effect of fermentation time and addition amount of rice sourdoughs with different microbial compositions on the physicochemical properties of three gluten-free rice breads[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111889.
- [18] 邹奇波, 程新, 陈诚, 等. 混菌发酵酸面团对全麦面包风味与烘焙特性的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(4): 32-39.
- ZOU Q B, CHENG X, CHEN C, et al. Effects on flavor and baking characteristics of whole wheat bread by fermented sourdough with the mixed culture[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(4): 32-39.
- [19] BOESWETTER A R, SCHERF K A, SCHIEBERLE P, et al. Identification of the key aroma compounds in gluten-free rice bread[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67 (10): 2 963-2 972.
- [20] 徐慢. 谷氨酸-木糖美拉德反应中间体制备及其加工风味 [D]. 无锡: 江南大学, 2019: 1-4.
- XU M. Preparation of glutamic acid-xylose Mailard reation intermediate and its processing flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 1-4.
- [21] 但杭妍. 米粉自然发酵酸面团菌群结构、理化性质及其面包烘焙特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- DAN H Y. Studies on the microbial community structure and physicochemical properties of rice spontaneous fermentation sourdough and the baking quality of sourdough bread[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [22] AOKI N, KATAOKA T, NISHIBA Y. Crucial role of amylose in the rising of gluten- and additive-free rice bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 92: 102905.
- [23] HAN H M, CHO J H, KANG H W, et al. Rice varieties in relation to rice bread quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(7): 1 462-1 467.
- [24] DE LA HERA E, MARTINEZ M, GÓMEZ M. Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 54(1): 199-206.
- [25] 丁芳. 大米凝胶的制备及其在面包加工中的应用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- DING F. The preparation of rice gel and its application in bread processing[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017.
- [26] 贺方清. 基于挤压膨化联合固态发酵的黑米制品开发与应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 65.
- HE F Q. Development and application of black rice products based on extrusion combined with solid state fermentation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024: 65.
- [27] VILLANUEVA M, HARASYM J, MUÑOZ J M, et al. Rice flour physically modified by microwave radiation improves viscoelastic behavior of doughs and its bread-making performance[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 472-481.
- [28] KRINGEL D H, DA SILVA FILIPINI G, DE LAS MERCEDES SALAS-MELLADO M. Influence of phosphorylated rice flour on the quality of gluten-free bread [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2017, 52(5): 1 291-1 298.
- [29] 吴昊桐. 发芽糙米复合粉无麸质面包研究制备及标准制订 [D]. 锦州: 渤海大学, 2020: 2.
- WU H T. Development of gluten-free bread with germinated brown rice compound flour and product standard formulation [D]. Jinzhou: Bohai University, 2020: 2.
- [30] NAKANO A, KOKAWA M, KITAMURA Y. Development and characterization of gluten-free bread using rice gel and rice flour[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2018, 65 (3): 124-129.
- [31] NIETO-MAZZOCCO E, SALDAÑA-ROBLES A, FRANCO-ROBLES E, et al. Optimization of sorghum, rice, and amaranth flour levels in the development of gluten-free bakery products using response surface methodology[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(1): e14302.
- [32] KIM M, YUN Y, JEONG Y. Effects of corn, potato, and tapioca starches on the quality of gluten-free rice bread[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2015, 24(3): 913-919.

- [33] HOSOKAWA K, OHISHI K, IKEDA T, et al. Properties of ripe banana flour and application to gluten-free breadmaking [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44 (10): e14789.
- [34] SCIARINI L S, RIBOTTA P D, LEÓN A E, et al. Influence of gluten-free flours and their mixtures on batter properties and bread quality[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3(4): 577-585.
- [35] 张钰萌, 鲍雨婷, 孙玥, 等. 双孢菇面包复合改良剂优化及其对面包品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 212-216.
- ZHANG Y M, BAO Y T, SUN Y, et al. Optimization of *Agaricus bisporus* bread composite improver and its effect on bread quality[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(3): 212-216.
- [36] JANG K J, HONG Y E, MOON Y, et al. Exploring the applicability of tamarind gum for making gluten-free rice bread [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(6): 1 639-1 648.
- [37] MORREALE F, GARZÓN R, ROSELL C M. Understanding the role of hydrocolloids viscosity and hydration in developing gluten-free bread. A study with hydroxypropylmethylcellulose [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 629-635.
- [38] ARI AKIN P, BRUMMER Y, JOYE I J, et al. The impact of different hydrocolloids on gluten-free bazlama bread quality [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 156: 110236.
- [39] IMAMURA M, ITO S, ARAI E. Effects of different types of hydrocolloids on the quality improvement of gluten-free rice flour bread made with soymilk[J]. *Food Science and Technology Research*, 2021, 27(3): 389-395.
- [40] ZHANG Y Y, GUO X F, SHI C S, et al. Effect of soy proteins on characteristics of dough and gluten[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126494.
- [41] YANG Y, WU M Q, MA C M, et al. Interaction between rice protein and soybean 11S globulin: effect on the characteristics of rice dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2024, 118: 103972.
- [42] SALAH K, OLKHOVATOV E A, AİDER M. Effect of canola proteins on rice flour bread and mathematical modelling of the baking process[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(8): 3 744-3 753.
- [43] WEI Q, ZHANG G, MEI J, et al. Optimization of freezing methods and composition of frozen rice dough reconstituted by glutinous rice starch and gluten[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 240: 124424.
- [44] WEI Q, ZHANG G, XIE J. Modulatory effects of carboxymethyl chitosan on the textural and quality attributes of frozen rice dough and corresponding rice bread[J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 162: 111021.
- [45] 韩雨茜. 酪蛋白水解物对江米酸面团的理化性质和细菌菌群结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 38.
- HAN Y Q. Effects of casein hydrolysates on the physicochemical properties and bacterial flora in glutinous rice sourdough[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 38.
- [46] ISLAM M A, ISLAM S. Sourdough bread quality: facts and factors[J]. *Foods*, 2024, 13(13): 2 132.
- [47] YANG Z X, XU D, ZHOU H L, et al. Rheological, microstructure and mixing behaviors of frozen dough reconstituted by wheat starch and gluten[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 212: 517-526.
- [48] 杨欢, 刘敬科, 李朋亮, 等. 乳酸菌协同酵母菌发酵杂粮面包降糖效果研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 211-218.
- YANG H, LIU J K, LI P L, et al. Research progress on hypoglycemic effect of coarse grain bread fermented by lactic acid bacteria and yeast[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 211-218.
- [49] SRIKANLAYA C, THERDTHAI N, RITTHIRUANGDEJ P, et al. Effect of butter content and baking condition on characteristics of the gluten-free dough and bread[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52 (8): 1 904-1 913.
- [50] WAZIIROH E, BENDER D, FUHRMANN P L, et al. Effect of non-covalent interactions on gluten-free batter stability and bread properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2025, 215: 117263.
- [51] WAZIIROH E, SCHOENLECHNER R, JAEGER H, et al. Understanding gluten-free bread ingredients during ohmic heating: function, effect and potential application for breadmaking[J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248(4): 1 021-1 034.