陈宇, 唐余莉, 刘晏妤, 等. 黑枸杞花色苷提取物调控淀粉凝胶网络提升米发糕品质的研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 120−128. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010058

CHEN Yu, TANG Yuli, LIU Yanyu, et al. Quality Improvement of Steamed Rice Bread by Regulating Starch Gel Network with Anthocyanin Extracts from *Lycium ruthenicum* Murr[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 120−128. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010058

·研究与探讨·

黑枸杞花色苷提取物调控淀粉凝胶网络提升米发糕品质的研究

陈　宇[1], 唐余莉[1], 刘晏妤[1], 蒋方程[1,2], 沈汪洋[1], 黄庆荣[2], 金伟平[1,*]

（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023;
2.罗格斯新泽西州立大学, 新泽西州 08901）

摘　要: 本研究以质构特性、气孔分布和感官评价为指标，探究了黑枸杞花色苷提取物在 0.45~2.70 g/100 g 米粉添加量下对米发糕品质提升的影响规律，并通过流变学、红外光谱等分析手段，研究了花色苷对米发糕成型过程中淀粉凝胶网络和发酵膨胀过程的作用机制。结果表明，当花色苷提取物添加量为 1.80 g/100 g 米粉时，米发糕硬度为 14.02 N，比容为 1.78 mL/g，获得最高的感官评价得分 76.63 分。红外图谱中-OH 伸缩振动峰的红移表明花色苷提取物可以通过氢键与淀粉分子结合，去卷积图谱中 $R_{1052/1022}$ 增大说明添加花色苷提取物明显增加了淀粉分子的短程有序度。流变学结果显示，花色苷提取物降低了米糊复合模量|G*|，促进发糕内部气室的膨胀；此外，花色苷通过颜色的 pH 响应性指示了米糊的发酵进程，赋予米发糕鲜亮色泽，提升食欲。综上，黑枸杞花色苷提取物的添加通过调控淀粉凝胶网络，有效地促进米糊凝胶化和发酵膨胀过程，提高了米发糕品质。

关键词: 米发糕, 淀粉凝胶, 动态流变, 气孔分布, 花色苷提取物

中图分类号: TS213.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0120−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010058　　本文网刊:

Quality Improvement of Steamed Rice Bread by Regulating Starch Gel Network with Anthocyanin Extracts from *Lycium ruthenicum* Murr

CHEN Yu[1], TANG Yuli[1], LIU Yanyu[1], JIANG Fangcheng[1,2], SHEN Wangyang[1], HUANG Qingrong[2], JIN Weiping[1,*]

（1.School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2.Rutgers University, New Jersey 08901, America）

Abstract: In this study, the effects of adding anthocyanins (0.45~2.70 g/100 g rice flour) extracted from *Lycium ruthenicum* Murr on the quality improvement of steamed rice bread were investigated through textural profile, gas cell distribution, and sensory evaluation. The mechanisms underlying the effects of anthocyanins on the starch gel network and fermentation of steamed rice bread were investigated based on rheology and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results revealed that the optimal amount of supplementary anthocyanin extract was 1.80 g/100 g rice flour, which gave rise to steamed rice bread with a hardness of 14.02 N, a specific volume of 1.78 mL/g, and a sensory evaluation score of 76.63. The red shift of the -OH stretching vibration peak in the FTIR spectrum indicated that anthocyanin extracts might bind to starch molecules through hydrogen bonds. The increase of $R_{1052/1022}$ in the deconvolution curve suggested that the addition of anthocyanin extracts increased the short-range order of starch. The rheological results showed that anthocyanin extracts decreased the complex modulus (|G*|) of rice paste and promoted the expansion of gas cell chambers in the steamed rice bread. In addition, anthocyanins acted as an indicator for the fermentation process based on their pH-dependent color,

收稿日期: 2025−01−09

基金项目: 湖北省重点研发计划项目（2023BBB068）。

作者简介: 陈宇（2000−）（ORCID: 0009−0004−3035−9070）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 谷物资源精深加工, E-mail: qf291211@163.com。

*** 通信作者:** 金伟平（1988−）（ORCID: 0000−0002−2184−1955）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 粮油食品生物大分子, E-mail: jwpacademic@outlook.com。

giving a bright color and good appetite to the steamed rice bread. In conclusion, the addition of anthocyanin extracts from *Lycium ruthenicum* Murr could promote the gelation and fermentation of steamed rice bread by regulating the starch gel network, resulting in quality improvement.

Key words: steamed rice bread; starch gels; dynamic rheology; gas cell distribution; anthocyanin extracts

米发糕是一种我国传统大米发酵食品，因其风味独特、营养价值丰富、易于消化吸收，深受消费者青睐[1−2]。从结构与组成上看，米发糕属于无麸质食品，由于缺乏面筋结构，其质地调控依赖于淀粉的凝胶化和网络结构[3]。米发糕中直链淀粉凝胶网络相比于面筋蛋白网络，存在黏弹性差、内部孔隙稀疏、持水持气能力差、易老化等问题[4]。无麸质发酵烘焙食品品质改良常用方法为添加亲水性多糖[5]、蛋白质[6]等大分子，实现提高比容、改善质构、延缓老化[7]。多酚类物质在改善面粉加工和营养特性应用中效果显著[8]。然而其在无麸质食品品质改良的研究仍十分有限。

花色苷是花色素与糖以糖苷键结合而成的类黄酮化合物[9]，属于多酚类的一种，多存在于紫薯、黑枸杞等果实细胞液中。黑枸杞花色苷以锦葵色素-3-O-(6-O-对香豆酰-3-O-乙酰)-5-O-二葡萄糖苷、矮牵牛素-3-O-(6-O-对香豆酰)芸香糖苷-5-O-葡萄糖苷和锦葵色素-3,5-二葡萄糖苷等为主，具有抗疲劳、降血糖、抗氧化等功效[10]。近年来，花色苷作为生物活性分子、指示剂等广泛用于米面制品的品质改良，不仅可以赋予食品独特色泽，还能提升营养价值[11−12]。例如，Wang 等[11]将黑枸杞多酚提取物(花青素含量为 25.19 mg/g)添加于面粉制备面包，相较于对照组，添加 5% 的黑枸杞多酚提取物面包的硬度由 8.97 N 显著增加至 15.29 N，同时对比容和弹性没有负面影响。多数文献将花色苷对米面制品品质提升的机制归因于花色苷和面粉中的淀粉和蛋白质的相互作用，但过多的花色苷类物质添加会导致面包的硬度过高，弹性变差[13]。因此，适量添加花色苷有望成为提升米发糕品质的潜在改良剂。

本论文系统研究了黑枸杞花色苷提取物对米发糕感官品质、质构和气孔分布的影响规律，依次从米糊发酵与蒸制固化两个加工工段入手，揭示花色苷调控淀粉凝胶网络和气孔结构的形成、膨胀与固化的潜在机制。此外，研究进一步发现花色苷的 pH 响应性颜色变化可辅助指示米糊的发酵，为多酚类物质全面发挥米发糕品质提升作用和加工过程精准控制提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

粳米粉(总淀粉含量 75.29%±1.16%，直链淀粉含量 19.28%±0.50%，蛋白质含量 5.95%±0.08%，水分含量 11.71%±0.37%，粗脂肪含量 2.58%±0.12%)　浙江宁波五桥粮油公司；白砂糖、耐高糖高活性酵母、双效泡打粉　湖北宜昌安琪酵母有限公司；黑枸杞干果　产地青海省；盐酸等化学试剂均为分析纯　国药集团化学试剂有限公司。

Milli-Q Integral 超纯水机　美国 Millipore 公司；Evolution 220 扫描型紫外可见分光光度计　美国 Thermo Scientific 公司；RW 20 digital 机械搅拌器　德国 IKA 公司；SP-16S 恒温醒发箱　珠海三麦机械有限公司；GL 21M 冷冻离心机　湖南平凡科技有限公司；FTC TMS-Pro 物性分析仪　美国 FTC 公司；C-CELL 图像分析仪、BBM-L370 食品体积测定仪　瑞典 Perten 仪器公司；Malvern Kinexus Pro+多功能旋转剪切流变仪　英国 Malvern 仪器公司；GL840 数据采集器　日本图技公司；CS-10 手持式色差仪　杭州彩谱科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　黑枸杞花色苷提取物制备及花色苷含量测定

参考江甜[14]的方法并稍作修改。称取黑枸杞干果 100 g，加入 10 mL 超纯水匀浆，以料液比 1∶8(w/v)加入盐酸-甲醇溶液(1%，v/v)，400 W、60 ℃ 超声辅助提取 30 min，离心(6000 r/min，30 min，4 ℃)得黑枸杞花色苷提取液，旋转蒸发浓缩，冷冻干燥，得黑枸杞花色苷提取物，在避光干燥条件下保存至备用。

参考 Guo 等[15]的方法，采用 pH 示差法测定提取物中枸杞花色苷的含量。配制 1 mg/mL 的花色苷溶液，取 1 mL 花色苷溶液于 10 mL 棕色离心管中，分别加入 9 mL 的氯化钾-盐酸缓冲溶液(pH1.0，0.2 mol/L)和醋酸钠-冰醋酸缓冲溶液(pH4.5，0.2 mol/L)稀释至 10 mL，静置 0.5 h，使用紫外分光光度计在 400~750 nm 波长范围内测定其吸收曲线，记录最大吸收波长和 700 nm 处的吸光度，根据下式计算黑枸杞花色苷提取物中花色苷的含量。

$$A = (A_{max} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{max} - A_{700})_{pH4.5} \quad \text{式（1）}$$

$$\text{花色苷含量(mg/g)} = \frac{A \times M_w \times DF \times V \times 10^3}{\varepsilon \times L \times m} \quad \text{式（2）}$$

式中：A_{max} 和 A_{700} 分别为花色苷溶液在最大吸收波长(525 nm)和 700 nm 处的吸光度；Mw 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷分子质量，449.2 g/mol；ε 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷摩尔消光系数，26900 $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$；DF 为稀释倍数；L 为比色皿光路直径，1 cm；V 为样品体积，1 mL；m 为样品质量，1 mg。

1.2.2　米发糕配方的优化

1.2.2.1　米发糕的制备　取 100 g 粳米粉和 2 g 酵母混合，按 100 g 粳米粉质量计，依次加入超纯水(86、

88、90、92、94 g)、白砂糖(5、10、15、20、25 g)和黑枸杞花色苷提取物(0.45、0.90、1.80、2.70 g),用机械搅拌机(800 r/min)均匀物料 5 min,移入醒发箱(36 ℃,湿度 85%)醒发 60 min;加入 0.6 g 泡打粉,再次机械搅拌 1 min 充分排气。取 50 g 米糊倒入带盖圆形铝盒(直径 7 cm,高 4.5 cm),于醒发箱内在相同条件下静置 10 min,移入蒸锅沸水蒸制 15 min,常温下冷却 1 h 后加盖密封,即得米发糕样品。配方优化时采取的方法为逐级优化,优化加水量时的加糖量为 20 g/100 g 米粉,且不添加黑枸杞花色苷提取物。

1.2.2.2 米发糕质构特性的测定 从模具中取出米发糕,切成直径为 7 cm,高 2 cm 的圆盘状,参考 Qin 等[16] 的方法并稍作修改,使用物性分析仪测定米发糕的质构特性。模式选择 TPA 模式,触发类型为自动,使用 38 mm 圆柱形探头,测前、后速度为 2 mm/s,测试速度为 2 mm/s,触发力 5 g,压缩比 50%。

1.2.2.3 米发糕比容的测定 参考黎钧铸等[17] 的方法,使用食品体积测定仪测定米发糕的体积,使用天平称取米发糕的质量,根据式(3)计算米发糕的比容。

$$比容(mL/g)=\frac{V}{m} \quad 式(3)$$

式中:V 为米发糕的体积,m 为米发糕的质量。

1.2.2.4 米发糕孔隙分布测定 参考张烁等[18] 的方法,将米发糕从中部进行平整的切片,避免破坏其内部结构,使用图像分析仪测定米发糕孔隙分布。

1.2.2.5 米发糕感官评价 参考李美伦等[19] 的方法并稍作修改,选取 10 名食品专业人员(男女各 5 人)组成感官评价小组,对米发糕的组织形态、口感、弹韧性、色泽和滋味进行感官评定,感官评定指标及评分标准如表 1 所示。

表 1 米发糕感官指标及评分标准

Table 1 Sensory evaluation and scoring standard of steamed rice bread

指标	评分标准	评分
组织形态(20分)	表面不粘,切面孔洞细密均匀,蓬松	16~20
	表面稍粘,断面孔洞基本均匀,较蓬松	11~15
	表面较粘,断面孔洞不均匀,不蓬松	5~10
口感(20分)	柔软有嚼劲,爽口不粘牙	16~20
	柔软较有嚼劲,稍粘牙	11~15
	质地偏硬,嚼劲很差,粘牙	5~10
弹韧性(20分)	用手指按压复原性好	16~20
	用手指按压有一定的复原性	11~15
	用手指按压复原性差	5~10
色泽(20分)	颜色均匀、有食欲	16~20
	颜色基本均匀,较有食欲	11~15
	颜色不均匀,食欲较差或无食欲	5~10
滋味(20分)	米香味、发酵气味适宜,米发糕甜淡适中	16~20
	米香味、发酵气味较浓或较淡,米发糕较甜或较淡	11~15
	米香味、发酵气味太浓或太淡,米发糕过甜或过淡	5~10

1.2.3 黑枸杞花色苷提取物提升米发糕品质的作用机制

1.2.3.1 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)测试 参考 Miao 等[20] 的方法测定添加黑枸杞花色苷提取物后米糊样品的红外光谱图。取 0.45、0.90、1.80、2.70 g 黑枸杞花色苷提取物溶解于 90 g 水中,与 100 g 粳米粉混合,机械搅拌机(800 r/min)均匀物料 5 min 形成米糊,醒发箱(36 ℃,湿度 85%)水合 1 h。将米糊沸水浴糊化 30 min 后冷却,冷冻干燥后粉碎过 100 目筛。另取水合后未糊化的米糊,离心(6000 r/min,4 ℃)取上清液,冻干得米糊上清液中的可溶性物质,未添加黑枸杞花色苷提取物的米糊为空白对照。将两种样品分别和 KBr 以 1∶10 比例混合,充分研磨均匀后压片。测试条件为:扫描次数 32 次,分辨率 4 cm^{-1},扫描范围 4000~400 cm^{-1}。

1.2.3.2 流变特性的测定 取 0.18 g 黑枸杞花色苷提取物溶解于 9 g 水中,加入 10 g 粳米粉均匀混合形成米糊(不添加糖和酵母),以不添加花色苷提取物的米糊作为空白对照。参考 Avallone 等[21] 的方法设计流变学实验,测定米糊升温过程中淀粉凝胶形成过程的流变学变化。前期使用数据采集器测定蒸制过程中米发糕内部温度的变化,绘制升温曲线,并对曲线进行拟合,确定流变测定的升温速率为:0~4 min,25 ℃ 升高至 35 ℃(2.5 ℃/min);4~9 min,35 ℃ 升高至 85 ℃(10 ℃/min);9~15 min,85 ℃ 升高至 97 ℃(2 ℃/min)。在动态振荡 Ramp 升温模式下,固定应变为 0.1%,角速度 10 rad/s,记录模拟米糊蒸制升温过程中弹性模量(G′)和黏性模量(G″)随时间与温度的变化曲线,根据式(4)计算复合模量|G*|。

$$|G^*|=\sqrt{(G')^2+(G'')^2} \quad 式(4)$$

1.2.3.3 米糊发酵体积的测定 取 100 g 粳米粉和 2 g 酵母混合,称取 1.8 g 黑枸杞花色苷提取物溶解于 90 g 水中,机械搅拌机(800 r/min)均匀物料 5 min 形成新鲜米糊。取 10 g 米糊,装入平底圆柱形玻璃杯(内径 d=4.9 cm),于醒发箱(36 ℃,湿度 85%)中发酵,使用游标卡尺的深度尺测量杯口到杯底高度 h_0,并每隔 5 min 测量米糊顶部至杯口的高度 h_1。另外制备一份米糊,在醒发箱中发酵 60 min,加入 0.6 g 小苏打,搅拌排气 1 min,取样后于醒发箱中静置 10 min,沸水上锅蒸制 15 min,期间每隔 5 min 测量一次,每组样品至少测量三处并求均值,根据下式计算米糊的体积。

$$V(mL)=\pi\times\left(\frac{d}{2}\right)^2\times(h_0-h_1) \quad 式(5)$$

1.2.4 花色苷提取物指示米糊发酵过程的观察

1.2.4.1 米糊 pH 的变化 按 1.2.3.3 的方法制备新鲜米糊,参考李忍等[22] 的方法,米糊发酵开始前和每间隔 20 min 取 3 g 米糊,加入 10 倍体积的超纯水对

样品进行稀释，12000 r/min 均质 1 min，离心 10 min（6000 r/min，4 ℃），测定上清液的 pH。

1.2.4.2　米糊发酵过程的色度值变化　使用手持色差仪在发酵开始前和每间隔 20 min 测定米糊的色度，记录色度值 L^*、a^*、b^*，根据公式(6)计算色差。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad 式（6）$$

式中：L_0^*、a_0^*、b_0^*为初始样品的色度值的平均值。

1.3　数据处理

每组样品重复三次，实验结果采用“平均值±标准偏差”的形式表示，不同字母之间表示存在显著性差异（P<0.05），使用 SPSS Statistics 19 进行数据处理及显著性分析，使用 OMNIC 8.0 对红外图谱进行处理，PeakFit v4.12 计算蛋白质二级结构含量，使用 Origin 2021 绘图。

2　结果与分析

2.1　米发糕配方的优化

在米发糕基础配方中，适量的水能够使米糊具有适当的黏稠度，水分不足或过多均会对米发糕的品质产生不良影响[23]。不同加水量对米发糕质构特性的影响如图 1a 所示，硬度、内聚性和弹性随着加水量的增加，呈现先增大后减小的趋势。在加水量为 90 g/100 g 米粉时，米发糕获得了最高的硬度（11.18 N）和内聚性（0.839）。由图 1b 可知，加水量主要影响了米发糕的口感和弹韧性，在加水量为 90 g/100 g 米粉时，感官评价总分最高。米发糕气孔参数如表 2 所示，气孔数量呈现先增加后减少的变化趋势。孔隙分布可以反映米发糕内部结构是否均匀，一般情况下，气孔数量越多，气孔越小，结构越致密，产品品质越好[24]。因此，选择 90 g/100 g 米粉的加水量进行加糖量的优化。

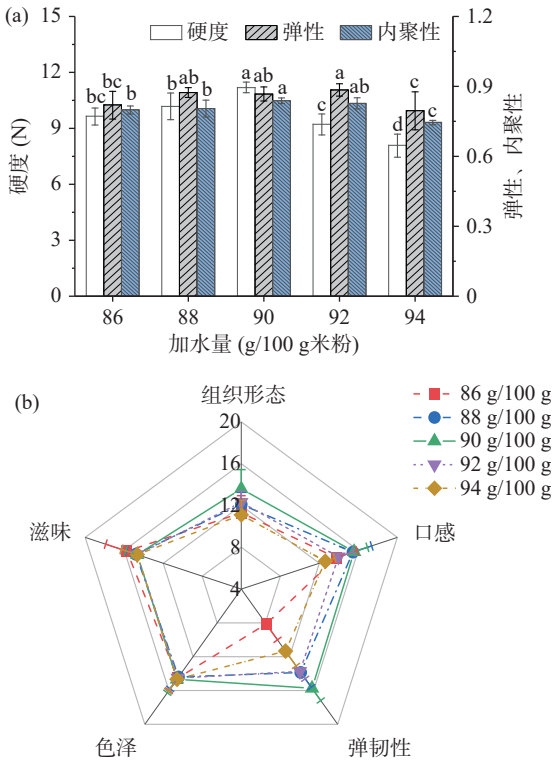


图 1　不同加水量对米发糕质构参数(a)和感官评分(b)的影响

Fig.1　Effects of different water addition on the textural profiles (a) and sensory scores (b) of steamed rice bread

注：同一指标下不同字母代表存在显著性差异（P<0.05），图 2、图 3、图 5、图 9 同。

表 2　不同加水量对米发糕孔隙分布和比容的影响

Table 2　Effects of different water addition on the gas cell distribution and specific volume of steamed rice bread

加水量（g/100 g米粉）	气孔数量（个）	气孔面积（%）	气孔直径（mm）	气孔体积	孔壁厚度（mm）	比容（mL/g）
86	1138±30.99^{b}	50.40±1.37^{a}	2.07±0.12^{b}	16.51±1.22^{b}	0.177±0.012^{b}	1.45±0.04^{b}
88	1150±35.68^{b}	49.87±1.38^{a}	1.92±0.05^{b}	15.68±0.80^{b}	0.183±0.001^{b}	1.51±0.06^{ab}
90	1244±8.080^{a}	49.40±0.35^{a}	1.84±0.13^{b}	13.09±1.12^{b}	0.184±0.002^{b}	1.56±0.02^{a}
92	1137±24.17^{b}	49.30±0.95^{a}	2.12±0.35^{b}	13.59±2.69^{b}	0.181±0.006^{b}	1.51±0.01^{ab}
94	971.0±35.08^{c}	50.80±0.10^{a}	3.08±0.28^{a}	22.22±3.78^{a}	0.202±0.005^{a}	1.48±0.04^{b}

注：同列不同字母代表存在显著性差异（P<0.05），表3~表4同。

加糖量主要影响发糕发酵中酵母菌生长和产气量。不同加糖量对米发糕的质构影响如图 2a 所示，随着加糖量的增加，米发糕的弹性逐渐增加，而硬度呈先增大后减小的趋势，推测为蔗糖能通过增加淀粉凝胶硬度而提升发糕的硬度[25]。图 2b 显示加糖量

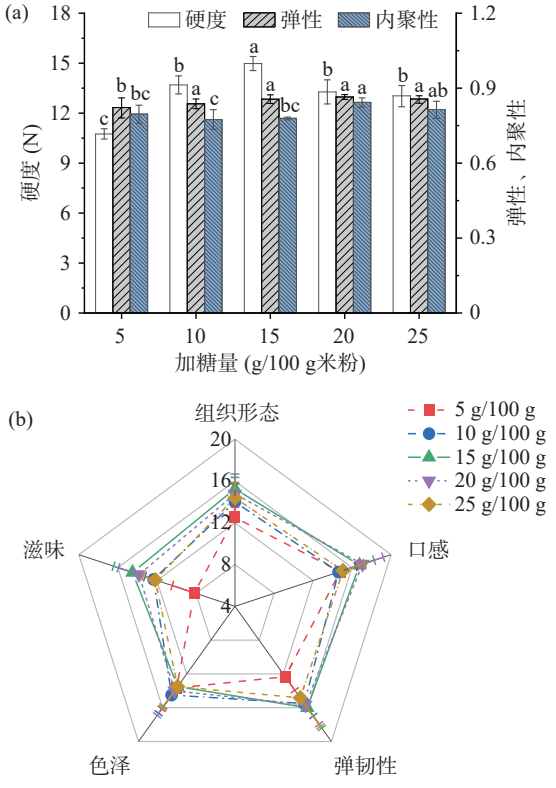


图 2　不同加糖量对米发糕质构参数(a)和感官评分(b)的影响

Fig.2　Effects of different sugar addition on the textural profiles (a) and sensory scores (b) of steamed rice bread

对米发糕滋味得分的影响显著。此外，随着加糖量的增加，米发糕切面的气孔数量呈先增加后减少的趋势（表 3），这可能是因为糖的添加促进了酵母菌发酵，消耗了较多溶解在米糊中的氧气并置换出 CO_2 形成气孔。当酵母过于活跃产生 CO_2 过多时，米糊无法稳定气室，导致小气孔连通形成大气孔[26]，这与气孔直径和气孔体积增大的趋势保持了一致。综合考虑米发糕的感官评价与硬度、气孔数量、气孔直径等参数，选择加糖量为 15 g/100 g 米粉为最优。

表 3 不同加糖量对米发糕孔隙分布和比容的影响

Table 3 Effects of different sugar addition on the gas cell distribution and specific volume of steamed rice bread

加糖量（g/100 g米粉）	气孔数量（个）	气孔面积（%）	气孔直径（mm）	气孔体积	孔壁厚度（mm）	比容（mL/g）
5	1158±8.140^{b}	51.03±2.00^{a}	1.46±0.13^{b}	10.67±1.43^{b}	0.197±0.006^{a}	1.40±0.03^{c}
10	1154±63.57^{b}	49.90±0.80^{a}	1.46±0.34^{b}	10.53±3.46^{b}	0.192±0.004^{a}	1.48±0.06^{bc}
15	1338±29.16^{a}	49.37±0.87^{a}	1.07±0.07^{c}	6.61±1.25^{b}	0.163±0.005^{c}	1.61±0.05^{a}
20	1098±53.38^{b}	49.53±0.83^{a}	1.66±0.14^{b}	11.23±2.17^{b}	0.178±0.008^{b}	1.53±0.03^{b}
25	1136±38.97^{b}	51.17±1.18^{a}	2.72±0.21^{a}	19.98±5.94^{a}	0.189±0.003^{a}	1.45±0.02^{c}

由 pH 示差法计算的花色苷提取物中花色苷含量为 25.53±0.23 mg/g，不同花色苷提取物添加量对米发糕质构参数的影响如图 3a 所示。当添加量为 1.80 g/100 g 米粉时，米发糕的硬度显著（P<0.05）增大至 14.02 N，且弹性最高为 0.864。当提取物添加量增加至 2.70 g/100 g 米粉时，米发糕的硬度增加至 17.44 N，但过高的硬度对感官得分有负面的影响。Sui 等[27] 研究中报道了类似的结果，使用 4% 的黑米花色苷提取物添加于面包时，面包硬度由 284.31 N 增加至 457.05 N，内聚性由 0.81 降低至 0.72。Montes 等[28] 研究指出添加 0.5% 海藻多酚使无麸质面包的硬度由 6.7 N 增加至 13.6 N，内聚性由 0.87 降低至 0.77。可能是过多的多酚可作为连桥结构，通过氢键诱导直链淀粉重新聚集，增强了淀粉凝胶的强度[29]。在综合感官评价中，花色苷的添加对米发糕色泽影响较大，当黑枸杞花色苷提取物的添加量达到 1.80 g/100 g 米粉时，感官评价总分最高为 76.63 分。

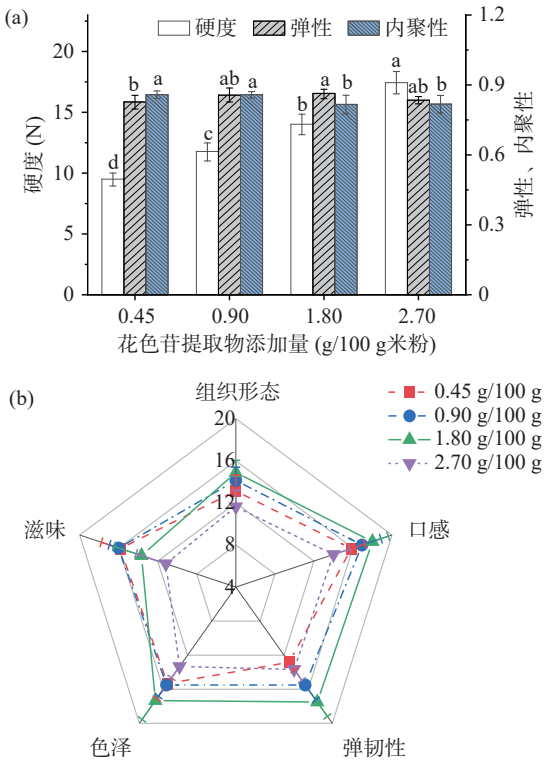


图 3 不同花色苷提取物添加量对米发糕质构参数(a)和感官评分(b)的影响

Fig.3 Effects of different anthocyanins extracts addition on the textural profiles (a) and sensory score (b) of steamed rice bread

黑枸杞花色苷提取物对米发糕气孔结构的影响如表 4 所示，随着花色苷添加量增大，发糕比容显著增加（P<0.05），切面气孔数量呈先增大后减小的趋势。当花色苷添加量为 1.80 g/100 g 米粉时，比容增加至 1.78 mL/g，气孔数量为 1305 个，而孔壁厚度呈先减小后增大的趋势。图 4 为米发糕切面的气孔分布图，较深的蓝色表示较小的气孔，较浅的蓝色表示较大的气孔，黄色和红色表示气孔结构较粗糙。当花色苷添加量达到 2.70 g/100 g 米粉时，气孔数量显著减少，气孔直径显著增加（P<0.05），米发糕内部结构较差，感官得分降低。综上所述，当黑枸杞花色苷提取物的添加量为 1.80 g/100 g 米粉时，米发糕获得较好的质构特性，同时具有均匀的内部孔隙结构和最高感官得分。

表 4 不同花色苷提取物添加量对米发糕孔隙分布和比容的影响

Table 4 Effect of different anthocyanin extracts addition on the gas cell distribution and specific volume of steamed rice bread

添加量（g/100 g米粉）	气孔数量（个）	气孔面积（%）	气孔直径（mm）	气孔体积	孔壁厚度（mm）	比容（mL/g）
0.45	1047±31.28^{c}	47.90±1.12^{a}	0.77±0.05^{c}	6.33±0.97^{b}	0.181±0.001^{b}	1.65±0.01^{c}
0.90	1164±36.74^{b}	48.07±1.18^{a}	0.95±0.13^{bc}	7.56±1.45^{b}	0.178±0.004^{bc}	1.70±0.02^{b}
1.80	1305±38.61^{a}	49.90±0.28^{a}	0.91±0.02^{b}	6.32±1.23^{b}	0.174±0.002^{c}	1.78±0.01^{a}
2.70	1169±68.62^{b}	49.40±0.86^{a}	1.59±0.11^{a}	15.64±1.07^{a}	0.194±0.004^{a}	1.77±0.02^{a}

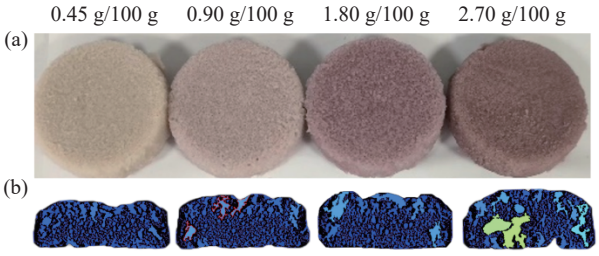


图 4 不同花色苷提取物添加量的米发糕形貌和气孔分布图

Fig.4 Morphology and gas cell distribution images of steamed rice bread with different anthocyanins extracts addition

2.2 黑枸杞花色苷提取物提升米发糕品质的作用机制

2.2.1 黑枸杞花色苷提取物对米糊红外光谱的影响

花色苷提取物和糊化后米糊的红外扫描图谱如

图 5a 所示，添加黑枸杞花色苷提取物后红外图谱中未出现新的特征吸收峰。图中 3400 cm^{-1} 附近的宽吸收峰主要是-OH 键的伸缩振动，随着花色苷提取物添加量增加，-OH 吸收峰向低波数方向发生红移，波数由 3408 cm^{-1} 移动至 3367 cm^{-1}，推测花色苷中的酚羟基与大米淀粉分子的羟基形成氢键[30]。1600~1700 cm^{-1} 为酰胺 I 带，附近的特征峰与 C=O 的伸缩振动有关，米糊的 1650 cm^{-1} 处的特征峰发生略微蓝移，推测花色苷提取物添加可能影响了蛋白质内部相互作用的方式。红外光谱 900~1200 cm^{-1} 范围内的峰主要与 C-C 和 C-O 键的伸缩振动有关[31]，使用 OMNIC 8.0 软件进行去卷积数据处理后结果如图 5b 所示。去卷积图谱中 1052 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 附近的峰分别代表淀粉的结晶区和非结晶区，峰强度比值 $R_{1052/1022}$ 可反映淀粉的短程有序程度[31]。如图 5b 所示，黑枸杞花色苷提取物添加量增加时，$R_{1052/1022}$ 值明显增加，说明淀粉分子的短程有序度增大，多酚与淀粉分子链之间的相互作用增强了分子链之间的引力，使淀粉分子链的排列更加紧密，这可能与米发糕硬度的增加有关。

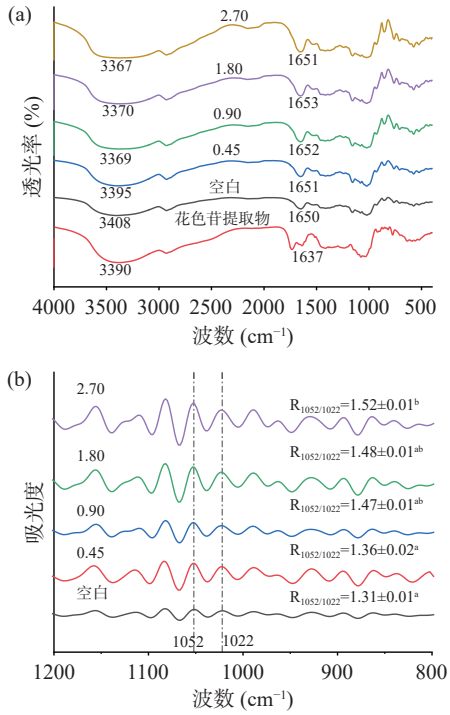


图 5　花色苷提取物对米糊 FT-IR 光谱(a)和去卷积图谱(b)的影响

Fig.5　Effect of anthocyanin extracts on the FT-IR spectra (a), and deconvoluted FT-IR data (b) of rice paste

2.2.2　黑枸杞花色苷提取物对米糊蒸制过程中流变特性的影响　为模拟米糊在蒸制过程中淀粉凝胶网络变化，采用动态温度扫描对米糊的流变学参数进行了测定。首先，采用温度探头测定米发糕在蒸制过程中米糊中心温度随时间的变化(图 6a)，对曲线分为三个阶段进行线性拟合，确定了 3 个升温阶段的大致速率，并在流变程序里设定模拟升温过程的参数，得到米糊在蒸制过程(0~900 s)和冷却过程(900~1800 s)中弹性模量、黏性模量和复合模量|G*|的变化(图 6b, c)。在蒸制初期(<350 s)，弹性模量 G'和黏性模量 G"基本保持不变，且 G'>G"，表现出类固体性质。添加黑枸杞花色苷提取物显著降低了米糊的 G'，这可能与花色苷提取物与米糊中溶解的部分蛋白质和破损淀粉的相互作用有关。当温度逐渐升高达到糊化温度时，米糊的 G'和 G"开始急剧升高达到峰值，随后又因淀粉颗粒的破裂和高温下分子运动速率加快而回落。冷却过程中米糊凝胶的 G'与 G"持续缓慢升高，直链淀粉分子开始重排。复合模量|G*|反映凝胶对抗形变的总阻力，冷却阶段|G*|的升高说明在蒸制过程中淀粉凝胶体系逐渐固化，这与 Avallone 等[21] 和 Ren 等[32] 在使用流变学 Ramp 升温模式分别模拟小麦面团和无麸质面团烘焙过程中复合模量|G*|的变化类似。整体来看，黑枸杞花色苷提取物的加入显著降低了未加热米糊的黏弹性模量，但对米糊

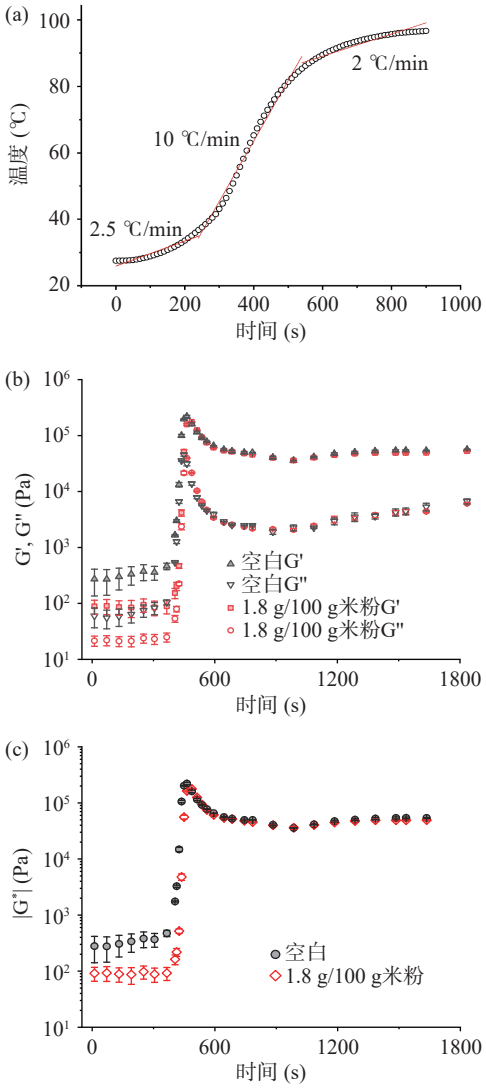


图 6　模拟蒸制过程中米糊的流变特性

Fig.6　Rheological properties of rice paste simulated in steaming process

注：(a)升温曲线，(b)米糊弹性模量 G'、黏性模量 G"，(c)复合模量|G*|。

的糊化凝胶过程及凝胶的固化并未有显著影响。

为探究添加花色苷提取物导致初始米糊 G'下降的原因，对米糊可溶部分冻干并进行红外图谱分析。图 7a 结果显示 3400 cm^{-1} 处的-OH 键和 1600~1700 cm^{-1} 处的 C=O 键伸缩振动峰为破损淀粉和可溶性蛋白质的特征吸收峰。在添加花色苷提取物后，-OH 键的伸缩振动峰由 3400 cm^{-1} 移动至 3344 cm^{-1}，表明花色苷与溶解的破损淀粉之间存在氢键相互作用。1600~1700 cm^{-1} 处的蛋白质酰胺Ⅰ带 C=O 的伸缩振动峰也向较低波数方向发生了红移，波数由 1638 cm^{-1} 移动至 1630 cm^{-1}。进一步拟合米粉中可溶性蛋白质二级结构含量[33]，发现花色苷添加使米粉中 α-螺旋含量降低（24.72% 至 14.41%），β-折叠含量升高（16.84% 至 27.53%），α-螺旋向 β-折叠的转变导致了米糊中蛋白质发生聚集，降低了米糊的模量[34]。

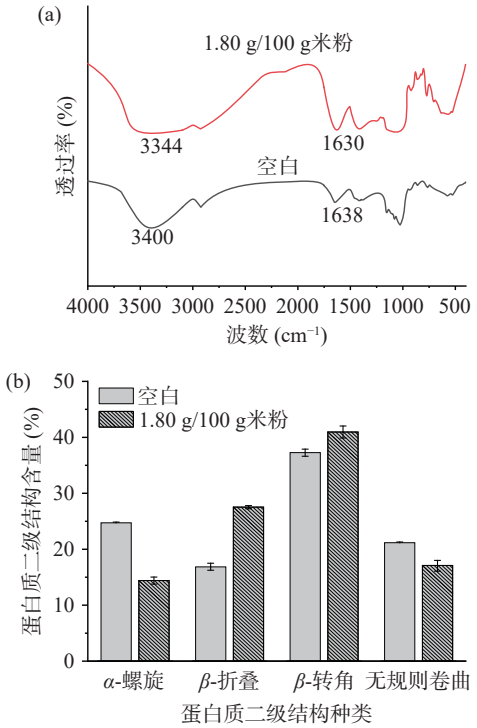


图 7 花色苷提取物对米糊上清液 FT-IR 光谱(a)和蛋白质二级结构含量(b)的影响

Fig.7 Effects of anthocyanin extracts on FT-IR spectrum (a) and protein secondary structure content (b) of rice paste supernatant

2.2.3 黑枸杞花色苷提取物对米糊膨胀过程的影响

黑枸杞花色苷提取物对未加热米糊的流变学有显著的影响，但也可能会影响米糊的发酵过程从而最终影响米发糕的品质。米糊体积的膨胀是因为酵母菌消耗物料混匀时溶解于米糊中的 O_2 并产生 CO_2，当 CO_2 在米糊中达到饱和时逸出并被米糊包裹，气室变大使米糊体积膨胀[26]。本研究探讨了黑枸杞花色苷提取物的添加对发酵过程米糊体积变化的影响，由图 8 可知在初次发酵阶段，添加花色苷使发酵体积略有增加，但整体差异较小，在加入泡打粉搅拌排气后的二次发酵时，添加花色苷的米糊有较大的膨胀体积，并在米发糕蒸制过程中进一步膨胀，可能是因为花色苷提取物的添加降低了米糊的黏度，降低了米糊膨胀所需的压力，最终提升了米发糕的比容。

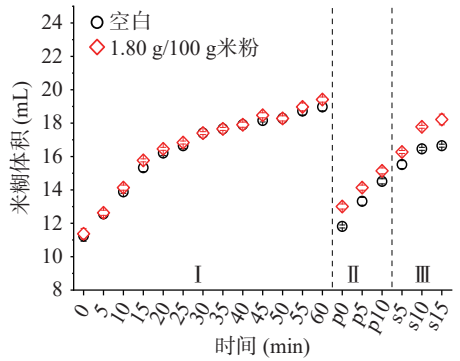


图 8 花色苷提取物对米发糕制作过程中发酵（Ⅰ）、二次醒发（Ⅱ）和蒸制（Ⅲ）三阶段体积的影响

Fig.8 Effect of anthocyanins extracts on the volume of three stages in the production of steamed rice bread, namely fermentation (Ⅰ), proofing (Ⅱ) and steaming (Ⅲ)

2.3 花色苷提取物对米糊发酵的指示作用

在实际生产中，由于环境因素等的不稳定，仅依靠发酵时间来评估米糊的发酵程度可能会不够准确，花色苷提取物的添加还可指示发酵的过程。发酵过程实质上是酵母菌分解米糊中的淀粉等有机物，产生乳酸、醋酸等有机酸，导致体系 pH 逐渐降低（图 9a），在发酵 40 min 时 pH 约为 4.0，60 min 时 pH 下降至约 3.5，随着发酵的进行，米糊 pH 最终趋于平稳。花色苷的颜色对环境 pH 敏感，为避免过度酸化引起感官下降，花色苷提取物的添加还可以起到发酵指示的作用。

采用 CIE $L^*a^*b^*$色彩模型评价添加黑枸杞花色苷提取物后，米糊在发酵过程的颜色变化（图 9b 和图 9c）。L^*表示样品的亮度（0~100 表示从黑至白），a^*和 b^*分别为样品的红绿值（正值表示偏红，负值表示偏绿）和黄蓝值（正值表示偏黄，负值表示偏蓝），色差 ΔE^*是色度的综合评定指标。色差 ΔE^*的变化与 pH 的变化趋势基本相反，在发酵 60 min 后 ΔE^*值无显著差异。发酵开始时，米糊的 pH 在 5.5~6.0 之间，此时主要的显色物质为醌式碱，呈紫色，米糊有最高的蓝度值 b^*的绝对值为 11.16。随着发酵的进行，米糊 pH 降低至 4.0~5.0 之间，米糊的 L^*值升高，红度值 a^*和蓝度值 b^*（绝对值）降低，这是因为此时花色苷中主要的显色物质转变为无色的甲醇假碱。当发酵 40 min 后，米糊的 pH 降低至 4.0 以下，花色苷的显色物质开始转变为红色的黄素阳离子，米糊红度值 a^*开始逐渐增大，蓝度值 b^*趋于平稳，而亮度 L^*增大。综上，米糊中添加 1.80 g/100 g 米粉的黑枸杞花色苷提取物，颜色会随着发酵过程中环境 pH 的变化而呈现不同的颜色状态，而 60 min 后色差 ΔE^*不再有显著性的变化，可以将米糊色差 ΔE^*无显著性变化

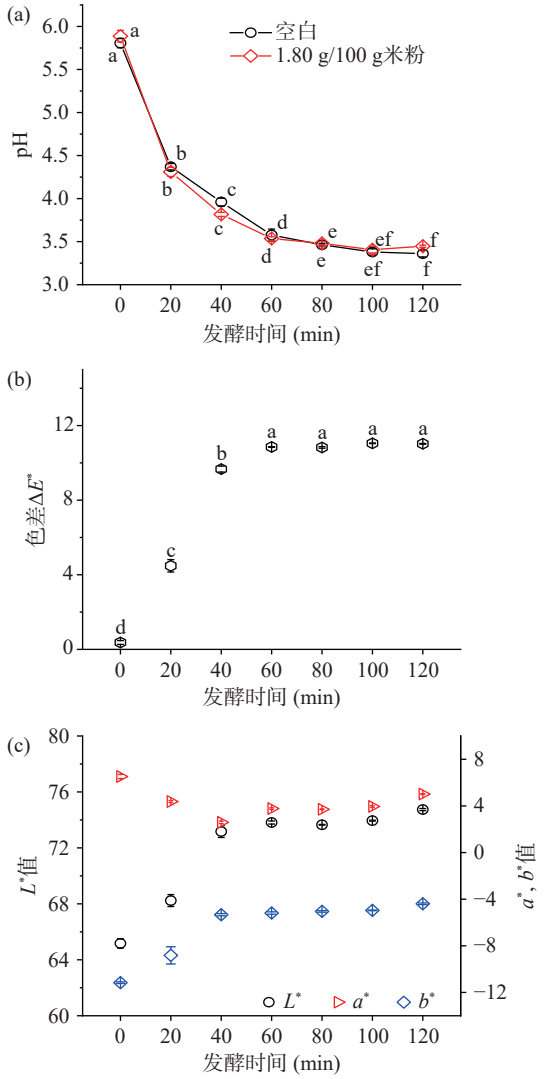


图 9　米糊发酵过程中各参数的变化

Fig.9　Changes of various parameters during rice paste fermentation

注：(a)pH，(b)米糊色差 ΔE^*，(c)色度值。

作为发酵终点来制备米发糕，实现品质提升和过程监控的同步。

3　结论

本研究以质构、比容、感官评价和气孔分布为指标，探究了配方对米发糕品质的影响规律，所得优化的参数依次为加水量 90 g/100 g 米粉，加糖量 15 g/100 g 米粉和花色苷提取物添加量 1.80 g/100 g 米粉。最佳配方得到米发糕的硬度为 14.02 N，比容为 1.78 mL/g，感官得分为 76.63 分。黑枸杞花色苷提取物的添加明显增加了淀粉的短程有序性，增强了淀粉凝胶网络结构，从而提升了米发糕硬度；在初始米糊中，花色苷提取物与米粉中的破损淀粉通过氢键结合，与可溶性蛋白质结合改变其二级结构，降低了米糊的黏度，减小了米糊发酵中气体膨胀所受到的压力，使米糊在二次醒发和蒸制时获得了更高的体积，最终增加了米发糕的比容；此外花色苷提取物的添加还可以通过颜色变化辅助指示米糊的发酵进程。综上所述，黑枸杞花色苷提取物有效地增强了淀粉凝胶网络和发酵膨胀过程，提高了米发糕品质，本研究可为米发糕品质的改良和花色苷提取物在食品加工中的应用提供参考。

© 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] 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 Huifan, WU Weiguo, REN Xianlong, 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.]

[2] 范洪臣, 茜琳, 丁警驰, 等. 3 种乳酸菌发酵米浆对发糕品质的影响比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(18): 260−268. [FAN Hongchen, XI Lin, DING Jingchi, et al. Comparative study on the effects of 3 kinds of lactic acid bacteria fermented rice slurry on the quality of rice cake[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(18): 260−268.]

[3] HOUNGBÉDJI M, MADODÉ Y E, MESTRES C, et al. The quality of steam-cooked rice bread is directly linked with the level of starch gelatinization and the fluidity of fermented dough[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80: 1−8.

[4] 何林阳, 杨杨, 陈凤莲, 等. 无麸质面包品质改良研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 439−447. [HE Linyang, YANG Yang, CHEN Fenglian, et al. Research progress in the gluten-free bread quality improvement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 439−447.]

[5] MOVAHED S, MIRZAEI M, CHENARBON H A. Evaluation of additional carboxy methyl cellulose and κ-carrageenan gums on the qualitative properties of gluten-free toast breads[J]. Journal of Food Biosciences and Technology, 2014, 4(2): 45−56.

[6] 孙司卉, 杨杨, 任丽琨, 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 Sihui, YANG Yang, REN Likun, 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.]

[7] 刘冬梅, 邝嘉华, 黄燕燕, 等. 复合乳酸菌发酵米发糕风味物质及储存特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 1−8. [LIU Dongmei, KUANG Jiahua, HUANG Yanyan, et al. Flavor compounds and storage property of lactic acid bacteria fermented rice cake[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(11): 1−8.]

[8] GUAN Yanbin, WANG Yaqiong, YANG Xun, et al. Effects of tannic acid on physicochemical properties of gluten-free flour and the underlying mechanisms[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110508.

[9] QI Qianqian, CHU Meijun, YU Xiuting, et al. Anthocyanins and proanthocyanidins: Chemical structures, food sources, bioactivities, and product development[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 4581−4609.

[10] 谭亮, 董琦, 曹静亚, 等. 黑果枸杞中花色苷的提取与结构鉴定[J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(11): 1797−1802,1760. [TAN Liang, DONG Qi, CAO Jingya, et al. Extraction and identification of anthocyanins in *Lycium ruthenicum* Murr[J]. Natural Product Re-

search and Development, 2014, 26(11): 1797−1802,1760.]
[11] WANG Hua, XIA Xiaoyan, YU Hongzhu, et al. Effect of liquid fermentation on bread fortified with *Lycium ruthenicum*: A quality attribute and *in vitro* digestibility study[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125131.
[12] SICARI V, ROMEO R, MINCIONE A, et al. Ciabatta bread incorporating goji (*Lycium barbarum* L.): A new potential functional product with impact on human health[J]. Foods, 2023, 12(3): 566.
[13] OU S J L, YU J Y ZHOU W B, et al. Effects of anthocyanins on bread microstructure, and their combined impact on starch digestibility[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131744.
[14] 江甜. 紫薯蛋白花色苷复合物的结构表征及生物活性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020. [JIANG T. Structural characterization and biologicalactivity of protein-anthocyanin complexesfrom purple sweet potato[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2020.]
[15] GUO Pengyu, ZHANG Bin, HU Zongli, et al. Anthocyanin accumulation and transcriptional regulation in purple flowering stalk (*Brassica campestris* L. var. *purpurea* Bailey)[J]. Plant Molecular Biology, 2023, 111(1): 57−72.
[16] QIN W, LIN Z, WANG A, et al. Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread[J]. LWT, 2021, 151: 112236.
[17] 黎钧铸, 黄文晶, 沈汪洋, 等. 卡拉胶/*α*-淀粉酶复合冻融稳定性对馒头的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(11): 82−89. [LI Junzhu, HUANG Wenjing, SHEN Wangyang, et al. Effects of freeze-thaw stability of carrageenan/*α*-amylase complex on steamed bread[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(11): 82−89.]
[18] 张烁, 王倩, 郭志顶, 等. *β*-葡聚糖酶对青稞面包质构特性及其风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 11−19. [ZHANG Shuo, WANG Qian, GUO Zhiding, et al. Effect of *β*-glucanase on the texture and flavor compounds of highland barley bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 11−19.]
[19] 李美伦, 姜萌艺, 龚川杰, 等. 乳酸菌、酵母菌的筛选鉴定及其在米发糕中的应用[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 14−20. [LI Meilun, JIANG Mengyi, GONG Chuanjie, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria and yeasts and its application in fermented rice cake[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 14−20.]
[20] MIAO Lange, XU Yan, JIA Caihua, et al. Structural changes of rice starch and activity inhibition of starch digestive enzymes by anthocyanins retarded starch digestibility[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 261: 117841.
[21] AVALLONE P R, IACCARINO P, GRIZZUTI N, et al. Rheology-driven design of pizza gas foaming[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(3): 033109.
[22] 李忍, 姜鹏, 王长远, 等. 高粱粉对小麦粉面团 pH 和体积品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 24−27. [LI Ren, JIANG Peng, WANG Changyuan, et al. Effect of sorghum powder on the pH and volume quality of wheat flour dough[J]. The Food Industry, 2020, 41(12): 24−27.]
[23] 樊德灵. 米发糕加工及品质改良技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [FAN D L. Study on processing and quality improvement of rice steamed sponge cake[D]: Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
[24] WANG Lijuan, LI Yang, GUO Zicong, et al. Effect of buckwheat hull particle-size on bread staling quality[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134851.
[25] 谢新华, 马红静, 徐超, 等. 蔗糖和海藻糖对糯米淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(12): 29−32. [XIE Xinhua, MA Hongjing, XU Chao, et al. Effect of sucrose and trehalose on freeze-thaw stability of waxy rice starch gel[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(12): 29−32.]
[26] JANSSEN F, WOUTERS A G B, DELCOUR J A. Gas cell stabilization by aqueous-phase constituents during bread production from wheat and rye dough and oat batter: Dough or batter liquor as model system[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 3881−3917.
[27] SUI Xiaonan, ZHANG Yan, ZHOU Weibiao. Bread fortified with anthocyanin-rich extract from black rice as nutraceutical sources: Its quality attributes and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 910−916.
[28] MONTES L, SANTAMARIA M, GARZON R, et al. Effect of polyphenols from *Ascophyllum nodosum* seaweeds on the rheology and digestion of corn starch gels and gluten-free bread features [J]. Heliyon, 2024, 10(7): e27469.
[29] 万芊. 多酚与玉米淀粉的相互作用及其对淀粉消化和加工特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [WAN Q. Interaction between polyphenol and corn starch and its effects on digestibility and processing properties of starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
[30] 苗兰鸽, 许燕, 赵思明, 等. 花青素对不同直链淀粉含量的淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 22−28. [MIAO Lange, XU Yan, ZHAO Siming, et al. Effects of anthocyanin on physicochemical properties of starches with different amylose contents[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 22−28.]
[31] 张宁, 徐丽娜, 王展, 等. 木糖醇对糯米粉理化性质及汤圆品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 51−58. [ZHANG Ning, XU Lina, WANG Zhan, et al. Effects of xylitol on physicochemical properties of glutinous rice flour and quality of glutinous rice dumplings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 51−58.]
[32] REN Yi, LINTER B R, FOSTER T J. Starch replacement in gluten free bread by cellulose and fibrillated cellulose[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105957.
[33] HU G, MA M H, BATOOL Z, et al. Gel properties of heat-induced transparent hydrogels from ovalbumin by acylation modifications[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130912.
[34] 曲敏, 王宇, 朱秀清, 等. 谷朊粉基共混黏合体系的构建及在素肉饼中的应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 285−294. [QU Min, WANG Yu, ZHU Xiuqing, et al. Construction of gluten based blend adhesive system and its application in vegetable meat pie[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(19): 285−294.]