赵玲玲, 崔少宁, 陈文培, 等. 红豆粉对蒸糕品质及抗老化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 203−212. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2026020079

ZHAO Lingling, CUI Shaoning, CHEN Wenpei, et al. Effects of Adzuki Bean Powder on the Quality and Anti-retrogradation Properties of Steamed Cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 203−212. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2026020079

· 研究与探讨 ·

红豆粉对蒸糕品质及抗老化特性的影响

赵玲玲[1], 崔少宁[2,*], 陈文培[2], 魏晗婷[1], 宋延静[1], 郭　光[1], 施新琴[1,*], 朱　琳[1]

（1.山东省蚕业研究所, 功能作物种质创新与栽培利用山东省工程研究中心, 烟台市蚕桑功能物质评价与利用重点实验室, 植物干细胞定向育种烟台市工程研究中心, 山东烟台 264002;
2.烟台南山学院健康学院, 山东烟台 265713）

摘　要: 为抑制蒸糕贮藏期淀粉老化并提升综合品质，探究红豆粉不同添加量（0%、8%、16%、24%、32%）对混合粉（小麦粉、糯米粉、山药粉与芋头粉的质量比为 15∶5∶3∶2）持水性、持油性，蒸糕质构、抗氧化性、色泽、比容、蛋白质含量及感官等品质特性的影响，并结合低场核磁共振（LF-NMR）、傅里叶变换红外光谱（FTIR）、X 射线衍射（XRD）和差示扫描量热分析（DSC）等技术揭示其抗老化机制。结果表明：随着红豆粉添加量增加，混合粉持水性由 0.97 g/g 显著提升至 1.43 g/g（P<0.05），持油性呈先升后降趋势；蒸糕比容由 1.80 mL/g 升至 2.48 mL/g，蛋白质含量由 2.17 g/100 g 增至 2.72 g/100 g，硬度由 683.95 g 降至 498.59 g；红度（a^*）显著上升（P<0.05），亮度（L^*）和黏着性均显著降低（P<0.05）。当添加量为 24% 时，蒸糕的总抗氧化能力、总还原力与 $ABTS^+$自由基清除率达峰值。蒸糕在 4 ℃ 储藏 7 d，硬度均显著低于对照组（P<0.05）。机制解析表明，红豆粉通过增强氢键网络与淀粉-面筋体系发生了深度融合，16%~24% 的添加量能有效截留水分，显著降低淀粉的短程有序性，其中深层结合水比例较对照组增加 12.13%~44.19%；进而从长程有序性与热力学层面抑制了淀粉分子重排，使相对结晶度从 12.08% 降至 9.01%~9.15%，老化焓值较对照组降低了 15.11%~41.49%。综合比较，红豆粉添加量为 16%~24% 时，能显著提升蒸糕品质并有效抑制其储藏期淀粉老化。

关键词: 红豆粉, 蒸糕, 品质特性, 抗氧化性, 抗老化特性

中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0203−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2026020079　　本文网刊:

Effects of Adzuki Bean Powder on the Quality and Anti-retrogradation Properties of Steamed Cake

ZHAO Lingling[1], CUI Shaoning[2,*], CHEN Wenpei[2], WEI Hanting[1], SONG Yanjing[1], GUO Guang[1], SHI Xinqin[1,*], ZHU Lin[1]

（1.Shandong Institute of Sericulture, Shandong Engineering Research Center of Functional Crop Germplasm Innovation and Cultivation Utilization, Yantai Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Silkworm Functional Substances, Yantai Engineering Research Center of Plant Stem Cell Targeted Breeding, Yantai 264002, China;
2.School of Health, Yantai Nanshan University, Yantai 265713, China）

Abstract: To inhibit starch retrogradation and enhance the quality of steamed cakes during storage, in this study, we investigated the effects of different addition levels of adzuki bean powder (ABP) (0%, 8%, 16%, 24%, and 32%) on the water-holding capacity (WHC) and oil-holding capacity (OHC) of composite flour (wheat flour, glutinous rice flour, yam flour, and taro flour at a mass ratio of 15∶5∶3∶2), and on the texture, antioxidant activity, color, specific volume, protein content,

收稿日期: 2026−02−09

基金项目: 烟台市科技计划项目（2024YD031）; 山东省农业科学院揭榜项目（SHJB2022-54）; 山东省自然科学基金面上项目（ZR2023MC098, ZR2025MS556）; 山东省蚕桑产业技术体系加工与综合利用项目（SDAIT-18-01）。

作者简介: 赵玲玲（1989−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: 17362136805@163.com。

*** 通信作者:** 崔少宁（1990−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 粮油精深加工, E-mail: csn0701@163.com。

施新琴（1980−）, 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: xinqin07@163.com。

and sensory properties of the resulting steamed cakes. Low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and differential scanning calorimetry (DSC) were used to elucidate the anti-retrogradation mechanisms. The results showed that as ABP content increased, the WHC of the composite flour significantly rose from 0.97 g/g to 1.43 g/g (P<0.05). Meanwhile, the OHC exhibited an initial increase followed by a decrease. For the steamed cakes, the specific volume increased from 1.80 mL/g to 2.48 mL/g, protein content rose from 2.17% to 2.72%, and hardness decreased from 683.95 g to 498.59 g. Redness (a^*) increased significantly (P<0.05), while brightness (L^*) and adhesiveness significantly decreased (P<0.05). At the 24% addition level, the total antioxidant capacity, total reducing power, and $ABTS^{+\cdot}$ scavenging activity peaked. After 7 d of storage at 4 ℃, the hardness of all the ABP-supplemented groups remained significantly lower than that of the control group (P<0.05). Mechanistic analysis showed that ABP was deeply integrated into the starch-gluten system by strengthening the hydrogen bond network. Addition of 16%~24% effectively sequestered moisture and significantly reduced the short-range molecular order of starch. The proportion of deeply bound water increased by 12.13% to 44.19% relative to the control. This further inhibited starch molecular rearrangement from the perspectives of long-range order and thermodynamics, decreasing the relative crystallinity from 12.08% to 9.01%~9.15% and reducing the retrogradation enthalpy by 15.11%~41.49% compared to the control. In conclusion, the addition of 16%~24% ABP significantly enhanced the quality of steamed cakes and effectively inhibited starch retrogradation during storage.

Key words: adzuki bean powder; steamed cake; quality characteristics; antioxidant activity; anti-retrogradation property

蒸糕是以小麦粉、米粉等为主要原料，通过蒸汽传热使淀粉糊化、蛋白质变性并固定气泡结构而成的传统中式糕点。因其加工过程避开了高温油炸或烘烤，最大限度地保留了原料的营养成分，且具备口感松软、易于消化吸收等特点，深受各年龄段消费者青睐[1]。然而，市售蒸糕普遍存在营养单一、膳食纤维匮乏等问题，且在贮藏过程中极易发生淀粉老化，导致质地变硬、食用品质下降，严重制约其货架期。

前期研究虽已开发出“小麦-糯米-山药-芋头”复合基础配方，在营养均衡性和初始风味上有所突破，但该多组分体系在储藏期间仍面临淀粉重结晶迅速、水分流失快等痛点。红豆作为药食同源原料[2]，蛋白质含量高达 20%，富含膳食纤维、赖氨酸[3−4] 及皂苷、多酚等活性物质。研究表明，红豆粉可提升产品蛋白质含量及抗氧化活性[5]，具有抗氧化[6]、辅助控糖[7−9]、降血压[10]、减肥[11−12] 等多重健康益处，是杂粮主食改良的优质原料。红豆中丰富的膳食纤维与高亲水性物质，在竞争性结合水分、形成空间位阻以干扰淀粉链重结晶方面具有天然优势[13]。目前，红豆在食品工业中的应用仍多局限于传统的豆沙馅料或简单的全粉冲调，深加工利用率及附加值较低[14−17]。现有关于面制品抗老化的研究多聚焦于单一原料的配方优化[18−19]，而对于红豆粉在多组分复合体系中，特别是在蒸制这一特定热加工方式下，其延缓淀粉老化的深层机制尚缺乏系统探讨。

本研究以该混合粉为基质，引入不同比例的红豆粉，通过测定质构、比容及感官等宏观指标，结合低场核磁共振（LF-NMR）、傅里叶变换红外光谱（FTIR）、X-射线衍射（XRD）及差示扫描量热法（DSC）等微观表征手段，从水分迁移、分子间作用力、结晶动力学与热特性角度系统揭示红豆粉抑制淀粉回生、延缓老化的机制，明确红豆粉在蒸糕中的最优添加量，为开发高品质、耐贮藏的杂粮蒸糕提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红豆　市售；低筋小麦粉、糯米粉　新乡良润全谷物食品有限公司；山药粉、芋头粉　兴化市绿帅食品有限公司；白砂糖、酵母粉　安琪酵母有限公司；玉米油　益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司；α-淀粉酶（生物试剂，10000 U/g）、猪胆盐（生物试剂，胆酸含量≥65%）、牛血清白蛋白（纯度≥98%）　索莱宝生物科技有限公司；胃蛋白酶（10000 U/g）、胰蛋白酶（250 U/mg）、2,2′-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（ABTS）、三吡啶三吖嗪（TPTZ，纯度≥98%）　飞净生物科技有限公司；考马斯亮蓝 G250 试剂　上海源叶生物科技有限公司；KH_2PO_4、Na_2HPO_4、NaCl、KCl、NaOH、$NaHCO_3$　分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

HWS-26 电热恒温水浴锅　上海一恒科学仪器有限公司；ZY-UV755B 紫外分光光度计　山东中仪仪器有限公司；TA.GEL 型质构仪　上海保圣实业发展有限公司；CS-800 彩谱分光测色仪　杭州彩谱科技有限公司；Nicolet iS20 型红外光谱仪　ThermoFisher 有限公司；JWFJ-150 超微粉碎机 江阴市佳科机械制造有限公司；FD-2 真空冷冻干燥机　北京博医康实验仪器有限公司；H2200R 台式高速离心机　长沙湘仪离心机仪器有限公司；JMTY 面包体积测定仪　杭州绿博仪器有限公司；NM42-060H-1 核磁共振成像与分析系统　苏州纽迈分析仪器股份有限公司；D8 ADVANCE X 射线衍射仪　德国布鲁克 AXS 公司；HS-DSC-101A-Pro 差示扫描量热仪　上海和晟仪器科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 超微红豆全粉的制备　参照陈雪珍等[18] 的方

法。先对红豆进行粗粉碎，再用超微粉碎机对粗粉粉碎处理 20 min，过 200 目筛备用。

1.2.2　混合粉的配制及蒸糕的制作　蒸糕混合粉采用自主设计配方。基于前期预实验的感官评价结果，确定基础混合粉的最优质量比为：小麦粉∶糯米粉∶山药粉∶芋头粉=15∶5∶3∶2。以此为基础，按占总粉质量（基础混合粉与红豆粉质量之和）的百分比计，红豆粉的添加量分别设定为 0%、8%、16%、24% 和 32%，用于后续实验。设定总混合粉质量为 100 g，将 1.4 g 活性干酵母与 12 g 白砂糖溶解于 100 g（35±1）℃ 的纯净水中，将该混合液缓慢加入到混合粉中搅拌均匀，加入 4 g 玉米油，继续搅拌 2 min 至完全乳化，将调制好的面糊置于恒温发酵箱（35±1）℃ 中至体积膨胀为原体积的 1.5 倍，将面糊倒入模具中，每份 40 g，将倒入模具中的面糊置于恒温发酵箱（35±1）℃ 中至体积再次膨胀为原体积的 1.5 倍，将模具进行适当振荡处理以消除面糊内部形成的不规则气孔结构后，将其置于 100 ℃ 的蒸锅中蒸制 20 min，关火后焖 5 min，将蒸糕置于室温环境中冷却，进行脱模，用于后续指标测定。

1.2.3　混合粉持水性与持油性的测定

1.2.3.1　混合粉持水性的测定　参照蔡沙等[20] 的方法测定。取一定量蒸糕混合粉记为 M_1，按料液比 1∶20（g/mL）加入蒸馏水，用磁力搅拌器搅拌 30 min 后，2500 r/min 离心 10 min，弃去上清液，沉淀质量记为 M_2。持水性（A，g/g）按式（1）进行计算：

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad \text{式（1）}$$

1.2.3.2　混合粉持油性的测定　参照蔡沙等[20] 的方法测定。取一定量蒸糕混合粉记为 M_3，按料液比 1∶10（g/mL）加入玉米油，充分混匀后静置 1 h，1500 r/min 离心 10 min，弃去上清液，沉淀质量记为 M_4。持油性（B，g/g）按式（2）进行计算：

$$B = \frac{M_4 - M_3}{M_3} \quad \text{式（2）}$$

1.2.4　蒸糕理化特性的测定

1.2.4.1　比容的测定　采用面包体积测定仪（菜籽置换法）测定蒸糕的体积 V，电子天平测定质量 M_5。比容（S，mL/g）由公式（3）计算。

$$S = \frac{V}{M_5} \quad \text{式（3）}$$

1.2.4.2　色差的测定　采用 CS-800 彩谱分光测色仪测定蒸糕的 L^*、a^*、b^* 值。其中，L^* 值表示亮度，a^* 值表示红绿偏向，b^* 值表示黄蓝偏向[21]。

1.2.4.3　水分含量的测定　参照国标 GB 5009.3-2016[22] 中的方法进行。

1.2.4.4　蛋白质含量的测定　参照 SN/T 3926-2014[23] 中的方法测定。

1.2.5　蒸糕体外模拟消化抗氧化活性

1.2.5.1　体外模拟消化　参照孟晓华等[24] 的方法测定。采用体外模拟口腔-胃-肠三段消化过程：10 g 样品加 35 mL 模拟唾液（pH6.75，含 α-淀粉酶），37 ℃、180 r/min 振荡 10 min 后沸水浴灭酶活。调 pH 至 1.5 加 30 mL 模拟胃液，振荡 120 min；再调 pH 至 7.0 加 30 mL 模拟肠液及电解质溶液，振荡 60 min，沸水浴灭酶活得待测液。

1.2.5.2　FRAP 法测定总抗氧化能力　取 0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mmol/L $FeSO_4$ 溶液各 60 μL，各加 FRAP 工作液 6.0 mL，混匀后 37 ℃ 水浴 10 min，593 nm 测吸光值，得标曲方程 y=0.1986x+0.4719（R^2=0.9952）。将待测液代替 $FeSO_4$ 溶液测吸光值，计算 FRAP 值。

1.2.5.3　总还原力的测定　取 0.1 mL 待测液，依次加 pH6.6 磷酸缓冲液、1% 铁氰化钾各 2.5 mL 混匀，50 ℃ 水浴反应 20 min；加 10% 三氯乙酸、蒸馏水各 2.5 mL，0.1% 氯化铁溶液 0.5 mL，静置 10 min，700 nm 测吸光值。

1.2.5.4　$ABTS^+$ 自由基清除率的测定　将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液等体积混合，室温避光静置 12~16 h，用蒸馏水稀释至在 734 nm 处的吸光值为 0.7±0.02，即为 ABTS 工作液。

精确吸取 40 μL 蒸糕模拟消化待测液，加入 $ABTS^{+}$· 工作液 4 mL，混匀后，在室温暗处条件下静置 10 min，在波长 734 nm 测定样品组吸光度值，同法以 40 μL 的模拟消化空白液代替待测液作为空白对照，测定吸光度值。$ABTS^+$ 自由基清除率按公式（4）计算。

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_{样}}{A_0} \times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中：A_0 为空白对照组（模拟消化空白液+$ABTS^{+}$· 工作液）的吸光度值；$A_{样}$ 为样品测试组（蒸糕模拟消化待测液+$ABTS^{+}$· 工作液）的吸光度值。

1.2.6　蒸糕质构特性的测定　将蒸糕切成 30×30×30 mm 的样品块进行 TPA 测试。条件如下：P/36R 柱形探头，压缩形变量 40%，测前速度 2.0 mm/s，测试速度 1.7 mm/s，测后速度 2.0 mm/s，触发力 5 g，时间间隔 10 s，记录各组样品的硬度、弹性、黏着性、咀嚼性等质构参数。

1.2.7　蒸糕感官特性的测定　选择 10 名经过感官评定训练的食品专业的人员组成品鉴小组（其中，男女各 5 人），按规定的评分标准（表 1）对产品的指标进行综合评分，取平均值为最终结果。

1.2.8　储藏期蒸糕的老化特性分析

1.2.8.1　储藏期蒸糕硬度的测定　参照刘兴丽等[25] 的方法。将不同红豆粉添加量的蒸糕冷却后，装入食品包装袋中热封，置于 4 ℃ 冰箱中分别储藏 0、1、3、5、7 d，采用 1.2.6 相同的质构参数进行硬度测定。

表 1 蒸糕感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for steamed cakes

项目	评分标准	感官评分(分)
外观形态(20分)	外形整齐, 表面细腻, 无收缩塌陷	17~20
	外形较整齐, 表面略微粗糙, 略有塌陷	10~16
	外形明显歪斜, 表面粗糙, 塌陷较严重	0~9
色泽(20分)	表面色泽均匀, 呈淡红色	17~20
	表面颜色偏淡, 光泽较差	10~16
	表面颜色暗沉, 偏暗红色	0~9
组织状态(20分)	松软有弹性, 不松散, 气孔小而均匀	17~20
	松软有弹性, 较为松散, 气孔较均匀	10~16
	不够松软, 松散掉渣, 气孔不均匀	0~9
滋味口感(20分)	软糯适中, 有红豆香气, 无异味, 食而不腻	17~20
	较硬或较软, 红豆香气过淡, 食之稍腻	10~16
	偏硬或偏软, 豆腥味过重, 易腻	0~9
杂质(20分)	蒸糕内部无外来杂质	17~20
	蒸糕内部有少许杂质	10~16
	蒸糕内部有明显杂质	0~9

1.2.8.2 蒸糕水分分布的测定 取在 4 ℃ 储藏 7 d 的各组蒸糕样品, 从中心切取大小一致的长方体 1.5 cm×1.5 cm×3.0 cm, 放入低场核磁管(25 mm 径)中, 利用 Q-CPMG 脉冲序列测量样品。实验参数为: SW=200 kHz、TW=2000 ms、NS=16、TE=0.25 ms、NECH=2000。

1.2.8.3 蒸糕红外光谱的测定 根据邓昱辰等[26]的方法采用 FTIR 测定。取在 4 ℃ 储藏 7 d 的各组样品经真空冷冻干燥后粉碎过 100 目筛, 与 KBr 按 1∶100(mg/mg)混合研磨均匀后压片。测试条件: 扫描次数 100 次, 分辨率 32 cm^{-1}, 测量范围 4000~500 cm^{-1}。

1.2.8.4 蒸糕晶体结构的测定 根据张思怡等[27]的方法, 取在 4 ℃ 储藏 7 d 的蒸糕冻干样品, 粉碎过 100 目筛, 采用 X 射线衍射仪进行测定。测试条件: 管压 40 kV, 管流 40 mA。扫描区域 4°~40°, 扫描速率 2°/min。根据式(5)计算各样品的相对结晶度。

$$X_c(\%) = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100 \qquad 式(5)$$

式中: X_c 为相对结晶度, %; A_c 为结晶区面积; A_a 为非结晶区面积。

1.2.8.5 蒸糕热力学特性的测定 取在 4 ℃ 储藏 7 d 的各组蒸糕冻干粉末, 称取 3.0 mg 置于铝坩埚中, 按 1∶2(w/v)比例加入去离子水, 压片密封, 室温平衡 24 h。使用差示扫描量热仪以 10 ℃/min 的升温速率从 20 ℃ 扫描至 100 ℃。记录起始温度、峰值温度、终止温度及热焓值。

1.3 数据处理

试验重复 3 次, 结果以“平均值±标准误”表示。采用 Origin 2018 绘图, 选择 Duncan's 模型进行显著性分析, 不同字母代表差异显著(P<0.05), 相同字母代表差异不显著(P>0.05)。

2 结果与分析

2.1 蒸糕混合粉的持水性、持油性

混合粉的持水性与持油性是预测面糊加工适应性及成品口感的重要理化指标。如图 1 所示。随着红豆粉添加量的增加, 混合粉的持水性呈上升趋势, 持油性则呈先升后降的趋势。这与蔡沙等[20]甘薯生全粉添加量对混粉特性影响的结果一致。混合粉的持水性由 0.97 g/g 显著(P<0.05)提升至 1.43 g/g, 主要归因于红豆粉中较高的直链淀粉含量和丰富的膳食纤维[28]。直链淀粉具有较强的吸水能力, 而膳食纤维的多孔结构及其表面的亲水性羟基能通过氢键结合并物理截留大量水分子[29−31]。相比之下, 混合粉持油性初期上升可能与适量红豆蛋白的引入增强了对油脂的物理截留能力有关[32]。然而, 由于红豆粉脂肪含量(约 0.6 g/100 g)显著低于小麦粉(约 1.5 g/100 g)[33], 高比例替代稀释了体系亲脂基团的密度, 导致持油性降低。这一结果表明, 在配方设计中, 若需通过高持油性来改善口感或乳化性能, 红豆粉的添加量不宜过高。

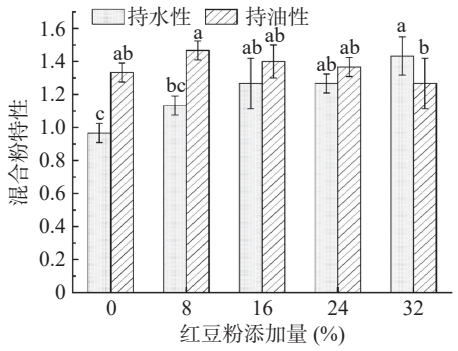


图 1 不同红豆粉添加量对蒸糕混合粉持水性、持油性的影响

Fig.1 Effect of different adzuki bean powder addition levels on the water holding capacity and oil holding capacity of the composite flour

注: 图中同一指标中不同小写字母表示在不同红豆粉添加量水平下差异显著(P<0.05); 图 2~图 5、图 8、图 9 同。

2.2 蒸糕的理化特性

2.2.1 蒸糕的比容 比容是衡量蒸糕膨松度的重要

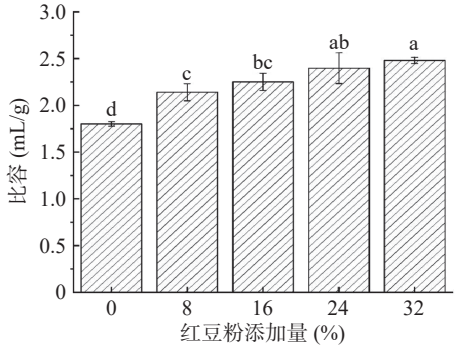


图 2 不同红豆粉添加量对蒸糕比容的影响

Fig.2 Effect of different adzuki bean powder addition levels on the specific volume of steamed cakes

指标，直接反映了面糊在蒸制过程中的产气与持气能力。由图 2 可知，蒸糕的比容随着红豆粉添加量的增加呈上升趋势，从 1.80 mL/g 升至 2.48 mL/g。这一结果突破了“添加无面筋粉类原料通常会导致烘焙制品体积减小”的传统认知。这可能是因为红豆粉中的膳食纤维虽然不形成面筋，但在湿热环境下吸水膨胀，构建了一种物理支撑网络，辅助面筋蛋白维持气孔结构，防止蒸后塌陷[34]。此外，红豆粉颗粒的存在可能改变了面糊的微观孔隙度，促进了淀粉充分糊化和膨胀，从而引起蒸糕比容增加。

2.2.2　蒸糕的色差　色泽是评价食品外观品质的关键指标，并能反映加工过程中成分的变化。如图 3 所示，蒸糕的色泽随着红豆粉添加量的增加发生显著变化。亮度（L^*值）从 63.86 显著降至 59.12（P<0.05），表明蒸糕颜色逐渐变暗，与陈楚瑶等[35] 使用微波处理红豆的结论一致。红度（a^*值）从 0.06 激增至 5.18，这主要源于红豆皮中花色苷等天然色素的引入[36]。在高温蒸制条件下，红豆种皮中的原花青素可能发生氧化聚合，导致颜色明显加深[37]。黄度（b^*值）从 11.03 升至 14.82，这除了与红豆中天然存在的类胡萝卜素等黄色素有关，还可能源于其丰富的还原糖与蛋白质在加热过程中发生的美拉德反应，生成黄褐色的类黑精物质[34]。

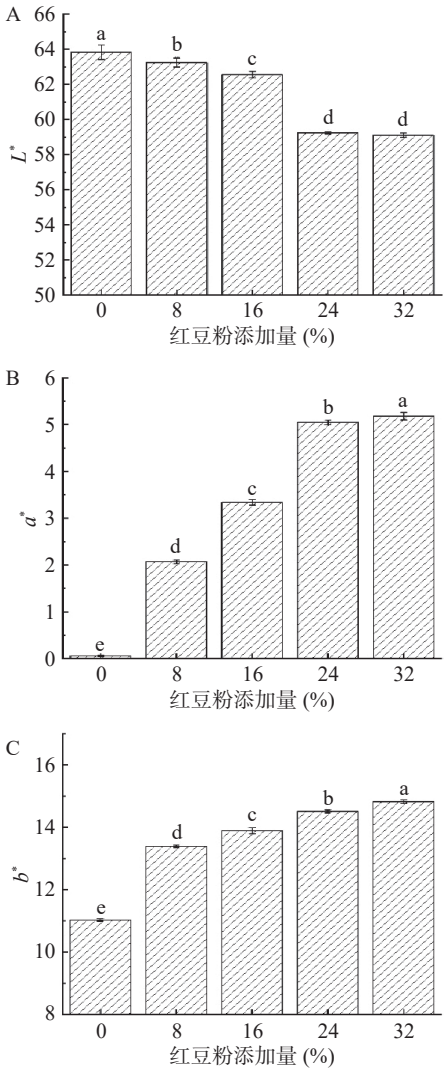


图 3　不同红豆粉添加量对蒸糕色差的影响

Fig.3　Effect of different adzuki bean powder addition levels on the color difference of steamed cakes

2.2.3　蒸糕的水分与蛋白质含量　如图 4 所示，随着红豆粉添加量的增加，蒸糕的水分含量与蛋白质含量均呈逐步上升趋势。水分含量的增加表明红豆粉显著增强了蒸糕的持水能力，这与混合粉持水性的测定结果一致。这是因为混合粉较高的持水性有助于在蒸制过程中锁住水分，为成品带来更加湿润、柔软的口感。同时，蒸糕蛋白质含量由 2.17 g/100 g 增加至 2.72 g/100 g，这是由于红豆粉蛋白质含量（约 20.2 g/100 g）显著高于小麦粉（约 11.2 g/100 g）、糯米粉（约 7.3 g/100 g）等原料[33]，其添加直接提高了蒸糕的蛋白质水平。

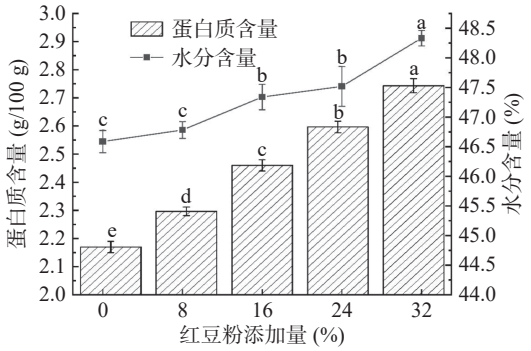


图 4　不同红豆粉添加量对蒸糕水分含量和蛋白质含量的影响

Fig.4　Effect of different adzuki bean powder addition levels on the moisture content and protein content of steamed cakes

2.3　蒸糕体外模拟消化抗氧化活性

由图 5 知，随着红豆粉添加量的增加，蒸糕的总抗氧化能力、总还原力与 ABTS^{+}·清除率均呈先升后降趋势，当添加量为 24% 时达最高值。这是因为红豆种皮中丰富的多酚、黄酮和花色苷等活性物质显著提升了蒸糕抗氧化活性[17]。当红豆粉添加量过高时，因红豆粉中的膳食纤维和蛋白质剧烈争夺水分，阻碍淀粉糊化并破坏面筋网络，致使蒸糕质地紧密、

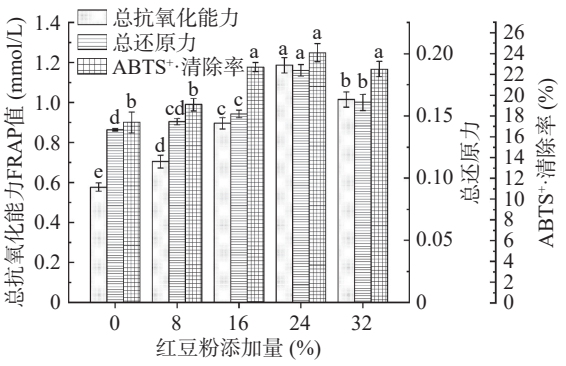


图 5　不同红豆粉添加量对蒸糕氧化指标的影响

Fig.5　Effect of different adzuki bean powder addition levels on the antioxidant indices of steamed cakes

表 2 不同红豆粉添加量对蒸糕质构的影响

Table 2 Effect of different adzuki bean powder addition levels on the textural properties of steamed cakes

红豆粉添加量(%)	硬度(g)	黏着性(g·s)	弹性	咀嚼性(g)	胶着性(g)	内聚性	回复性
0	683.95±9.91^{a}	−64.91±22.56^{b}	0.79±0.0065^{a}	292.36±17.95^{a}	366.43±18.09^{a}	0.43±0.07^{ab}	0.27±0.01^{ab}
8	664.34±17.63^{a}	−18.16±6.29^{a}	0.76±0.0054^{b}	251.84±14.18^{b}	330.15±20.93^{b}	0.40±0.05^{ab}	0.27±0.02^{ab}
16	524.31±22.15^{b}	−9.50±4.09^{a}	0.74±0.0036^{c}	165.92±7.71^{c}	219.19±12.42^{c}	0.44±0.02^{a}	0.28±0.01^{a}
24	479.93±30.51^{c}	−6.95±1.40^{a}	0.70±0.0031^{e}	150.87±14.93^{cd}	212.37±15.25^{c}	0.41±0.04^{ab}	0.25±0.00^{b}
32	498.59±19.05^{bc}	−5.30±4.07^{a}	0.73±0.0067^{d}	123.03±19.21^{d}	164.61±10.88^{d}	0.34±0.03^{b}	0.21±0.03^{c}

注: 表中同列不同字母表示差异显著(P<0.05); 表3、表4同。

硬度增加[18,38]。此外, 多酚类物质在高温蒸制条件下加速降解, 或与蛋白质、淀粉形成“多酚-蛋白质/淀粉复合物”而被包裹, 最终导致抗氧化能力降低[34]。

2.4 蒸糕的质构特性

由表 2 得知, 随着红豆粉的增加, 蒸糕硬度从 683.95 g 显著下降至 498.59 g(P<0.05), 咀嚼性也呈下降趋势。这与张思怡等[27] 添加燕麦纤维对蛋糕品质影响的结论一致。原因可能在于: 一方面, 红豆粉的高持水性有效保留了更多自由水和结合水, 水作为增塑剂增强了淀粉-蛋白网络的柔顺性; 另一方面, 红豆淀粉颗粒的嵌入可能物理阻断了小麦面筋蛋白的过度交联, 形成更为疏松、柔软的复合凝胶结构[34]。蒸糕的黏着性从 64.91 g·s 大幅降低至 5.30 g·s。表明蒸糕变得更加爽口, 不粘牙。这主要归因于红豆粉中的粗纤维降低了淀粉糊的粘滞性, 改善了咀嚼的清爽感。蒸糕的弹性、内聚性与回复性呈波动变化, 在添加量 16% 左右保持较好水平, 过量添加后略有下降。说明适量红豆粉中的蛋白质与多糖可能通过相互作用优化了网络结构, 使其在受力后仍能较好地恢复原状, 但过量会因面筋被过度稀释而导致网络结构松散, 恢复力减弱[34]。

2.5 蒸糕的感官特性

由图 6 可知, 红豆粉添加量对蒸糕的感官品质具有显著影响。随着添加量从 0% 增至 32%, 蒸糕的外观形态评分呈上升趋势, 主要归因于红豆粉中膳食纤维形成的三维凝胶网状结构, 有效增强了产品的支撑性与抗塌陷能力。色泽与滋味口感评分均呈先升后降趋势。当添加量为 24% 时, 色泽评分最高(18 分), 蒸糕呈现均匀淡红色; 继续添加则因花青素氧化聚合导致色泽转为暗红, 评分下降。滋味口感在添加量 16% 时得分最高(18 分), 此时蒸糕软糯适中、豆香清爽; 过量添加则因红豆中脂氧合酶催化不饱和脂肪酸产生的挥发性醛酮类物质积累, 引入明显豆腥味, 评分降低。组织状态评分同样在添加量 16% 时最优(18 分), 质地紧实有弹性、气孔均匀; 过量添加后, 因纤维与面筋蛋白竞争性吸水, 导致质地松散, 甚至出现“掉渣”, 评分下降。各组在杂质指标上得分基本持平, 表明红豆粉的添加未引入额外异物。综上所述, 适量添加红豆粉(16%~24%)可显著改善蒸糕的综合感官品质, 而过高添加量则易导致色泽暗沉、豆腥味突出及组织粗糙等问题, 这与陈雪珍等[18] 红豆超微粉对面包的影响一致。

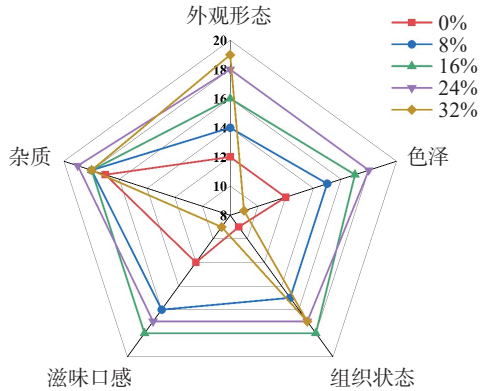


图 6 不同红豆粉添加量对蒸糕感官的影响

Fig.6 Effect of different adzuki bean powder addition levels on the sensory scores of steamed cakes

2.6 红豆粉对储藏期蒸糕老化特性的影响

2.6.1 储藏期蒸糕的硬度变化 由图 7 所示, 随着储藏时间的延长, 各组蒸糕的硬度均显著增加, 表现出典型的淀粉回生特征。在相同储藏时间(1、3、5、7 d), 添加红豆粉的组别硬度均显著低于对照组(P<0.05), 黄成烨[39] 也有类似发现。当红豆粉添加量为 24% 时, 硬度控制效果最佳, 在第 7 d 时, 其硬度较对照组降低了 33.26%。观察发现, 对照组(0%)在第 3 d 时的硬度(1162.55 g)已经超过了 24% 红豆粉组在第 5 d 时的硬度(1001.88 g), 这表明红豆粉添加量为 24% 时能使蒸糕在达到同等硬度的情况下, 比对照组延缓至少 2 d 以上。分析原因为适量红豆

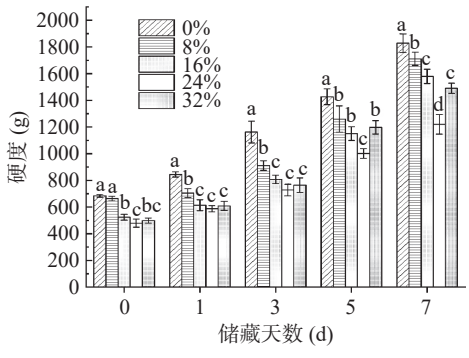


图 7 储藏期间各组蒸糕硬度变化

Fig.7 Changes in hardness of steamed cakes during storage

注: 图中不同小写字母表示同一储藏天数下, 不同红豆粉添加量组间差异显著(P<0.05)。

粉中的可溶性膳食纤维和蛋白质具有极强的水合能力，它们通过竞争性结合水分子，限制了水分向淀粉结晶区的迁移，从而在一定程度上干扰了淀粉分子重结晶过程，起到了延缓老化的作用[40]。然而，在高添加量下，红豆粉可能会过度争夺水分，导致淀粉凝胶网络因局部缺水而加速硬化。

2.6.2　蒸糕的水分分布　由图 8 得知，弱结合水在各组蒸糕样品中占据主导地位（87.06%~90.23%），深层结合水占比次之，自由水占比最低，这一分布特征与 Wan 等[41] 的报道相似。随着红豆粉添加量的增加，弱结合水比例呈先升后降趋势，并在添加量 16% 时达到峰值（90.23%），同时自由水比例从 4.55% 降至最低值 3.25%，表明适量的红豆粉能与原有体系协同构建更加致密的凝胶网络，显著增强体系的物理截留与持水能力。图中深层结合水的比例随红豆粉添加量的增加呈先升后降趋势，在添加量 16%~24% 时达到 6.47%~8.32%，较对照组增加 12.13%~44.19%。这表明适量的红豆粉（富含膳食纤维和植物蛋白）具有较强的水合能力，能通过氢键等作用将更多游离水转化为紧密结合的状态，从而限制了水分子的流动性。然而，当添加量增至 32% 时，自由水比例回升至 5.54%。结合质构分析可知，过量添加导致的凝胶网络受损使部分弱结合水转变为自由水渗出。综合表明，16%~24% 的红豆粉添加量能使蒸糕体系达到最优的水合平衡状态。

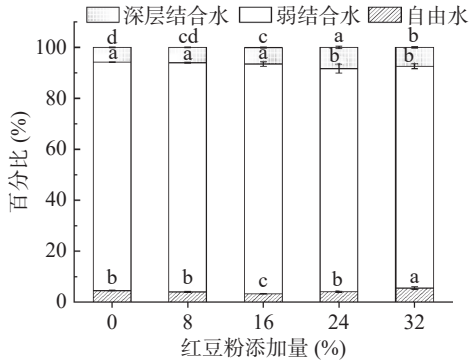


图 8　不同红豆粉添加量对蒸糕水分分布的影响

Fig.8　Effect of different adzuki bean powder addition levels on water distribution in steamed cakes

2.6.3　蒸糕的红外光谱分析　观察图 9A 红外全波段图谱发现，红豆粉的添加未改变基本吸收峰位，但显著影响了 3200~3600 cm^{-1} 区域（O-H 伸缩振动）的峰强，表明红豆粉组分与基质间形成了强烈的氢键相互作用[42]。为进一步探究红豆粉添加量对淀粉短程有序结构产生的影响，对 900~1200 cm^{-1} 区域进行吸光度转换与去卷积处理。其中，1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} 与 995 cm^{-1}/1022 cm^{-1} 的吸光度比值分别表征淀粉的短程有序度（结晶区）和无定形程度[43]。如图 9B、C 所示，储藏 7 d 后，对照组（0%）的 1047/1022 比值最高（0.612），而 995/1022 比值最低（1.120），表明其淀粉双螺旋大量缔合，处于高度有序的老化状态。当

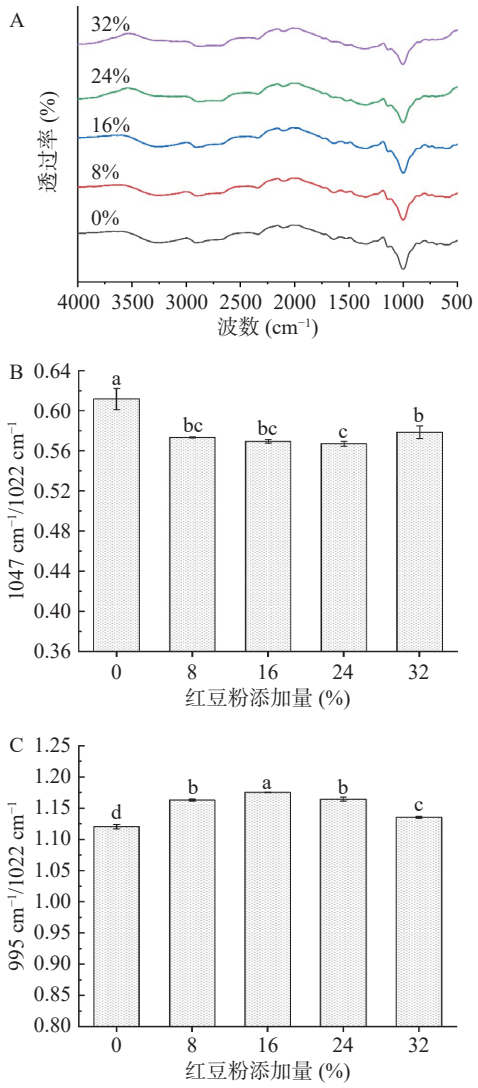


图 9　不同红豆粉添加量下蒸糕的红外光谱图（A）及 1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1}（B）与 995 cm^{-1}/1022 cm^{-1}（C）的吸光度比值

Fig.9　FT-IR spectra (A), and peak intensity ratios at 1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} (B) and 995 cm^{-1}/1022 cm^{-1} (C) of steamed cakes with different adzuki bean powder addition levels

红豆粉添加量为 16%~24% 时，体系的短程结构发生逆转，1047/1022 比值降至最低区间（0.567~0.570），对应 995/1022 比值升至最高峰值（1.164~1.175）。这从分子作用力层面揭示了其抗老化机制：适量红豆纤维与蛋白富含的极性基团，与淀粉分子形成了竞争性的氢键。这种分子间的强交联不仅截留了大量水分（印证了 LF-NMR 结果），更在物理上构筑了空间位阻，有效阻断了支链淀粉双螺旋结构的缔合，迫使淀粉维持在无定形状态。而添加量 32% 组两项比值的反弹，再次印证了网络破裂与水分流失会加速残存淀粉链的刚性回生。

2.6.4　蒸糕的晶体结构分析　如图 10 的 XRD 图谱所示，各组样品均呈现出相似的衍射轮廓，在 2θ 约为 17°和 20°处均出现明显的特征衍射峰。这表明红豆粉的添加并未改变蒸糕回生淀粉的基本晶型种类，

但显著影响了衍射峰的相对强度。结合表 3 的数据可知，红豆粉的添加对储藏期蒸糕的相对结晶度产生了显著影响。相对结晶度的大小直观反映了淀粉的回生（老化）程度，结晶度越低，说明淀粉分子的重排与晶体生长受到的阻碍越大[27]。表 3 中，对照组（0%）的相对结晶度最高（12.08%），表明淀粉双螺旋结构高度有序，老化最严重。当红豆粉添加量为 16%~24% 时，特征峰峰形变得相对平缓、弥散，相对结晶度降至最低区间（9.01%~9.15%），表明适量的红豆粉能有效抑制储藏期间淀粉分子的重排。这一微观结晶的抑制现象与前文的理化指标高度关联。一方面，FTIR 分析已证实红豆组分强化了体系的分子间氢键，这种复合网络在物理上产生了极强的空间位阻，阻断了淀粉链的靠拢；另一方面，LF-NMR 结果表明该组具有高比例的弱结合水，这种竞争性水合作用剥夺了淀粉重结晶所需的介质环境，从结晶动力学上延缓了晶体生长。然而，当添加量过高（32%）时，相对结晶度反弹至 10.06%，这也与 LF-NMR 中自由水异常升高及质构分析的结果相呼应。过量添加对网络结构的破坏导致水分流失加速，局部淀粉浓度升高反而促进了残存淀粉链的回生。

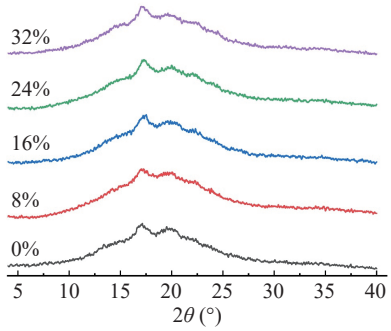


图 10 不同红豆粉添加量下蒸糕的 X 射线衍射图谱
Fig.10 X-ray diffraction patterns of steamed cakes with different adzuki bean powder addition levels

表 3 不同红豆粉添加量对储藏期蒸糕相对结晶度的影响
Table 3 Effect of different adzuki bean powder addition levels on relative crystallinity of steamed cakes during storage

红豆粉添加量(%)	相对结晶度(%)
0	12.08±0.43^{a}
8	11.82±0.39^{a}
16	9.15±0.26^{c}
24	9.01±0.13^{c}
32	10.06±0.81^{b}

2.6.5 蒸糕的热力学特性分析 吸热焓值是量化蒸糕在储藏过程中老化程度的关键指标[25]。不同红豆粉添加量对储藏期蒸糕老化焓的影响如表 4 所示。结果显示，在 4 ℃ 储藏 7 d 后，所有添加红豆粉的蒸糕的老化焓值均显著低于对照组（P<0.05），较对照组降低了 15.11%~41.49%，这表明红豆粉能够抑制支链淀粉重结晶，延缓蒸糕的老化。随着红豆粉添加量增加，老化焓值呈显著的先降后升趋势（P<0.05）。当添加量为 16%~24% 时，老化焓值降至最低区间（2.44~2.51 J/g，两组间无显著差异），防老化效果达到最佳。结合前文微观分析，这一显著的抗重结晶效果源于双重机制：一是红豆纤维凭借强持水性（LF-NMR 证实）竞争性截留了水分，剥夺了淀粉链迁移所需的介质；二是多糖-蛋白复合网络在物理上产生了强烈的空间位阻，直接阻断了支链淀粉的缔合。然而，当过量添加（32%）时，网络体系破裂导致局部脱水，残存淀粉链刚性缔合，致使热焓值反弹至 3.16 J/g。该结果与 XRD 结晶动力学规律高度契合。

表 4 不同红豆粉添加量对储藏期蒸糕热特性的影响
Table 4 Effects of different adzuki bean powder addition levels on the thermal properties of steamed cakes during storage

红豆粉添加量（%）	起始温度（℃）	峰值温度（℃）	终止温度（℃）	老化焓（J/g）
0	55.45±0.72^{a}	61.41±0.92^{a}	72.52±0.61^{a}	4.17±0.20^{a}
8	51.84±0.56^{c}	58.27±0.86^{c}	68.78±0.64^{c}	3.54±0.26^{b}
16	48.83±0.66^{d}	54.64±0.69^{d}	64.11±0.19^{e}	2.44±0.10^{d}
24	49.39±0.34^{d}	55.06±0.71^{d}	65.58±0.59^{d}	2.51±0.18^{d}
32	53.73±0.47^{b}	59.66±0.54^{b}	69.74±0.44^{b}	3.16±0.14^{c}

3 结论

本文研究了不同红豆粉添加量对复合蒸糕品质及储藏期老化特性的影响。结果表明，16%~24% 的红豆粉添加量为最优区间，显著提升了体系的持水性，使蒸糕比容增至 2.48 mL/g、蛋白质含量升至 2.72 g/100 g，有效降低了硬度与黏着性，改善了蒸糕的综合感官品质，使其质地软糯适中、气孔均匀，色泽呈现均匀淡红色。当添加量为 24% 时，蒸糕的抗氧化效果达到峰值，总抗氧化能力为 1.19 mmol/L、总还原力为 0.19、ABTS^{+}自由基清除率达到 24.10%。在机制层面，适量红豆粉通过强化氢键网络与基质深度融合，发挥了延缓水分迁移与构筑空间位阻的双重效应：其强水合作用使深层结合水比例较对照组增加 12.13%~44.19%，限制了淀粉重结晶所需的水分。同时，红豆纤维与蛋白的极性基团通过氢键竞争与物理位阻效应，干扰了支链淀粉双螺旋结构的短程缔合，使储藏 7 d 后的相对结晶度降至 9.01%~9.15%，老化焓值降低 15.11%~41.49%，从结晶动力学和热力学层面有效抑制了淀粉老化。然而，本研究仅考察了 4 ℃ 短期（7 d）的物理老化特性，未涉及实际货架期中微生物引起的腐败变质，且多组分体系中红豆活性物质与特定淀粉分子间的互作靶点尚待明确。未来研究将进一步探究不同储藏条件下的微生物稳定性与综合保鲜技术，并分离纯化红豆特征组分，结合分子动力学模拟等手段，深入解析分子层面的互作机制，为高品质、长货架期功能性杂粮面制品的开发提供更全面的理论依据。

© 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］ 母志平, 林永翅, 赵莎莎, 等. 红豆荞麦蒸糕的配方优化及品质分析[J]. 农产品加工, 2025(2): 18−24. ［MU Zhiping, LIN Yongchi, ZHAO Shasha, et al. Formulation optimization of red bean buckwheat steamed cake and its quality analysis[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2025(2): 18−24.］

［2］ LIANG Jing, XIE Jiayan, GU Yue, et al. Optimization and identification of bound polyphenols from rice bean (*Vigna umbellata*) skin dietary fiber, antioxidant activities and *α*-glucosidase inhibition mechanism[J]. Food Chemistry, 2025, 32: 103278.

［3］ 赵慧芳, 赵志刚, 史红霞. 红豆藜麦饼干的研制[J]. 农产品加工, 2024(16): 19−22,25. ［ZHAO Huifang, ZHAO Zhigang, SHI Hongxia. Development and research of quinoa functional food[J]. Agricultural Products Processing, 2024(16): 19−22,25.］

［4］ JOHNSON J B, NEUPANE P, BHATTARAI S P, et al. Partitioning of nutritional and phytochemical constituents in nine Adzuki bean genotypes from Australia[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 10: 100398.

［5］ HAYAT I, AHMAD A, RAFIQUE N, et al. Quality attributes of cookies enriched with functional protein isolate from red kidney beans[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2022, 40(5): 367−374.

［6］ LUO Jiaqiang, CAI Weixi, WU Tong, et al. Phytochemical distribution in hull and *Cotyledon* of adzuki bean (*Vigna angularis* L.) and mung bean (*Vigna* radiate L.), and their contribution to antioxidant, anti-inflammatory and anti-diabetic activities[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 350−360.

［7］ LIU Yanping, WANG Qiyan, LI Shanshan, et al. Convenient food made of extruded adzuki bean attenuates inflammation and improves glycemic control in patients with type 2 diabetes: A randomized controlled trial[J]. Therapeutics and Clinical Risk Management, 2018, 14: 871−884.

［8］ ZHAO Qingyu, HOU Dianzhi, FU Yongxia, et al. Adzuki bean alleviates obesity and insulin resistance induced by a high-fat diet and modulates gut microbiota in mice[J]. Nutrients, 2021, 13(9): 3240.

［9］ ZHAO Qingyu, HOU Dianzhi, LARAIB Y, et al. Comparison of the effects of raw and cooked adzuki bean on glucose/lipid metabolism and liver function in diabetic mice[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(5): 1081−1090.

［10］ JEONG E W, PARK S Y, YANG Yunsun, et al. Black soybean and adzuki bean extracts lower blood pressure by modulating the renin-angiotensin system in spontaneously hypertensive rats[J]. Foods, 2021, 10(7): 1571.

［11］ HAN K H, OHASHI S, SASAKI K, et al. Dietary adzuki bean paste dose-dependently reduces visceral fat accumulation in rats fed a normal diet[J]. Food Research International, 2020, 130: 108890.

［12］ ZHANG Jiayu, JIANG Xiujie, XU Qingpeng, et al. Lipidomic analysis reveals the anti-obesity and hepatoprotective effects of flavonoid mimetic components in adzuki beans on high-fat diet-induced obese mice[J]. Foods, 2025, 14(18): 3191.

［13］ LI Hang, ZOU Liang, LI Xinyan, et al. Adzuki bean (*Vigna angularis*): Chemical compositions, physicochemical properties, health benefits, and food applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(3): 2335−2362.

［14］ WANG Jiale, YU Yujuan, LIANG Wenhui, et al. Cryoprotective role of *Lactiplantibacillus plantarum* fermented buckwheat-adzuki sourdough in enhancing the freezing stability and quality of frozen dough[J]. Food Research International, 2025, 222: 117794.

［15］ 陈超, 贾敏, 秦楠. 速溶阿胶红豆薏米粉的配方优化[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 67−74. ［CHEN Chao, JIA Min, QIN Nan. Optimizing formulation of instant powder of Ejiao, *Vigna angularis* and semen coicis[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 67−74.］

［16］ 罗佳燕, 徐菲菲, 刘飞, 等. 蒸煮方式对红豆全豆豆沙品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(6): 11−20. ［LUO Jiayan, XU Feifei, LIU Fei, et al. Effect of cooking methods on the quality of whole adzuki bean paste[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(6): 11−20.］

［17］ 吴艾潼, 韩露萱, 周航, 等. 红小豆营养与保健功能及加工利用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(8): 217−225. ［WU Aitong, HAN Luxuan, ZHOU Hang, et al. Research progress on the nutritional and health benefits of adzuki beans and their processing utilization[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(8): 217−225.］

［18］ 陈雪珍, 陈燕红. 薏米红豆超微全粉面包工艺配方的响应面优化[J]. 轻工学报, 2020, 35(1): 28−34. ［CHEN Xuezhen, CHEN Yanhong. Optimization of bread prepared with superfine *Coix* rice and red bean powder using response surface methodology[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science Edition), 2020, 35(1): 28−34.］

［19］ 朱定祥, 史雅凝, 王怡文, 等. 红豆薏米糕配方优化及品质分析[J]. 南昌大学学报(理科版), 2024, 48(3): 271−279. ［ZHU Dingxiang, SHI Yaning, WANG Yiwen, et al. Formula optimization and quality analysis of adzuki bean *Coix* seed rice cakes[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2024, 48(3): 271−279.］

［20］ 蔡沙, 蔡芳, 施建斌, 等. 甘薯生全粉对面团特性及馒头品质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 219−225. ［CAI Sha, CAI Fang, SHI Jianbin, et al. Effects of raw whole sweet potato flour on dough characteristics and steamed bread quality[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 219−225.］

［21］ 温慧颖, 于洪梅, 毛春玲, 等. 肉桂-陈皮粉对主食面包贮藏品质及抗氧化性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(4): 68−73,78. ［WEN Huiying, YU Hongmei, MAO Chunling, et al. Effect of cortex cinnamomi-pericarpium citri reticulatae powderon storage quality and antioxidant properties of staple food bread[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(4): 68−73,78.］

［22］ 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中水分的测定 GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3−4. ［National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National Food Safety Standard - Determination of moisture in food GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 3−4.］

［23］ 国家质量监督检验检疫总局. 出口乳、蛋、豆类食品中蛋白质含量的测定 考马斯亮蓝法 SN/T 3926-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. ［General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Determination of protein content in dairy foods, egg foods and soy foods for export—Coomassie brilliant blue method SN/T 3926-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］

［24］ 孟晓华, 徐贵华, 姬玉梅. 海棠果溶豆的研制[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 191−199. ［MENG Xiaohua, XU Guihua, JI Yumei. Development of *Begonia* fruit dissoluble beans[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 191−199.］

［25］ 刘兴丽, 樊俊鹏, 申慧珊, 等. 葡聚糖分子量对荞麦无麸质馒头品质及淀粉老化行为的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−11

[2026-06-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080170. [LIU Xingli, FAN Junpeng, SHEN Huishan, et al. Effect of dextran molecular weight on gluten-free buckwheat steamed bread quality and starch retrogradation[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−11[2026-06-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080170.]

[26] 邓昱辰, 冯洁, 费雨萱, 等. 辣椒素对南美白对虾凝胶特性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−15[2026-06-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025090206. [DENG Yuchen, FENG Jie, FEI Yuxuan, et al. Effects of capsaicin on the gel properties of *Litopenaeus vannamei*[J]. Science and Technology of Food Industry,1−15[2026-06-16]https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025090206.]

[27] 张思怡, 王恒鹏, 吴鹏, 等. 燕麦膳食纤维对戚风蛋糕品质特性及抗老化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 134−142. [ZHANG Siyi, WANG Hengpeng, WU Peng, et al. Effects of oat dietary fiber on the quality characteristics and anti-aging ability of chiffon cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 134−142.]

[28] 孙丽丽, 董银卯, 李丽, 等. 红豆生物活性成分及其制备工艺研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(4): 390−392,396. [SUN Lili, DONG Yinmao, LI Li, et al. Research progress in active components and preparation technology of adzuki beans[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(4): 390−392,396.]

[29] 阚建全. 食品化学[M]. 3 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2016: 11−43, 89−130. [KAN Jianquan. Food chemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2016: 11−43, 89−130.]

[30] 杨晨夕, 张珮珮, 徐阳, 等. 发酵改性膳食纤维的生理功能及其在食品中的应用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 342−353. [YANG Chenxi, ZHANG Peipei, XU Yang, et al. Physiological function of fermented modified dietary fiber and its application in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 342−353.]

[31] 樊华, 刘夫国, 王玉堂, 等. 球磨联合碱辅助酶法改善淡竹叶水溶性膳食纤维的物化和功能特性[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 74−82. [FAN Hua, LIU Fuguo, WANG Yutang, et al. Ball milling combined with alkaline-assisted enzymatic extraction improved the physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from herba lophatheri[J]. Food Science, 2022, 43(24): 74−82.]

[32] MENG G, MA C Y. Characterization of globulin from Phaseolus angularis (red bean)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(6): 687−695.

[33] 杨月欣, 中国疾病预防控制中心营养与健康所. 中国食物成分表[M]. 标准版 第 6 版/第一册. 北京: 北京大学医学出版社, 2018. [YANG Yuexin. China food composition table[M]. (6th edition of standard edition/volume I). Beijing: Peking University Medical Press, 2018.]

[34] 李少辉, 张柳, 生庆海, 等. 湿热处理对豆粉营养品质及面团物化特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 198−207. [LI Shaohui, ZHANG Liu, SHENG Qinghai, et al. Effects of heat-moisture treatment on nutritional quality and dough properties of legume flours[J]. Food Science, 2024, 45(14): 198−207.]

[35] 陈楚瑶, 李丹丹, 陶阳, 等. 微波预处理对红豆吸水特性、外观及淀粉特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 56−64. [CHEN Chuyao, LI Dandan, TAO Yang, et al. Effect of microwave pretreatment on water absorption characteristics, appearance and starch properties of adzuki bean[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 56−64.]

[36] JIANG Minghao, ZHANG Yue. Biopolymer-based encapsulation of anthocyanins as reinforced natural colorants for food applications[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 11: 100488.

[37] HA T J, PARK J E, LEE K S, et al. Identification of anthocyanin compositions in black seed coated Korean adzuki bean (*Vigna angularis*) by NMR and UPLC-Q-Orbitrap-MS/MS and screening for their antioxidant properties using different solvent systems[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128882.

[38] 方颖, 高向阳, 杨汝鸿, 等. 保健型南瓜赤小豆馒头的制作条件研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(2): 349−353,387. [FANG Ying, GAO Xiangyang, YANG Ruhong, et al. Study on the processing development of nutritional pumpkin red bean steamed bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(2): 349−353,387.]

[39] 黄成烨. 混菌发酵红豆麦麸酸面团面包烘焙与营养特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025. [HUANG Chengye. Studies on the baking and nutritional characteristics of red bean-wheat bran sourdough bread fermented with mixed strains[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2025.]

[40] 申茹晓, 唐浩国, 杨同香, 等. 白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 136−143. [SHEN Ruxiao, TANG Haoguo, YANG Tongxiang, et al. Effect of white kidney bean powder on quality characteristics of dough and biscuits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 136−143.]

[41] WAN J H, WEI Y F, ZHANG Y H, et al. Innovative use of wastewater-extracted Arabinoxylans: Elevating steamed bread texture and structure[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142120.

[42] 谷春梅, 候春宇, 程安玮. 蒸汽爆破对红豆和绿豆多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(7): 1574−1582. [GU Chunmei, HOU Chunyu, CHENG Anwei. Effects of steam explosion on polyphenol content and antioxidant activity of red and mung beans[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(7): 1574−1582.]

[43] XIE Huan, HONG Yan, LI Lingjin, et al. Influence of structural changes of starch in starchy foods during storage on their edible quality: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2026, 373: 124684.