

不同热处理方式的红豆全粉物化特性 及其馒头品质比较

李少辉¹, 张柳², 贾艳菊², 赵巍¹, 张爱霞¹, 刘敬科^{1*}

(1. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北石家庄 050051)

(2. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北石家庄 050061)

摘要: 该研究选取炒制、微波和湿热三种热处理方式, 通过色度仪、低场核磁仪、扫描电镜、X 衍射仪、RVA 粘度仪、流变仪等研究不同热处理对红豆粉色差、水分分布、微观结构, 淀粉晶体结构、糊化特性和流变特性的影响, 并揭示热处理对淀粉改性后馒头消化性质的联系。结果表明, 热处理色度 ΔE 变化为微波 > 炒制 > 湿热。热处理未改变红豆粉 C 型结构, 但炒制和微波后红豆粉的颗粒形貌破损较大。热处理后 WAI 和 SP 有约 25% 的提升, 但微波降低 S 指数。湿热降低红豆全粉的峰值粘度、谷值粘度、终值粘度和回生值, 为 1 031.67、921.00、1 541.33 和 620.33 mPa·s, 均比微波和炒降低显著 ($P < 0.05$)。湿热较其他方式, 结合水丧失得更多。流变学研究表明面团 G' 和 G'' 均升高, 粘弹性增加, $\tan\delta$ 的变化不显著, 但持水性改善。炒制和微波 6 min 处理后馒头的抗性淀粉含量增加高达 12.8% 和 13.69%。该研究为选择合适的处理手段提升红豆馒头品质提供数据参考。

关键词: 热处理; 物化特性; 红豆; 馒头品质

文章编号: 1673-9078(2025)02-233-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0026

Physicochemical Characteristics of Adzuki Bean Flour Made Using Different Heat Treatment Methods and Comparison of Its Steamed Bread Quality

LI Shaohui¹, ZHANG Liu², JIA Yanju², ZHAO Wei¹, ZHANG Aixia¹, LIU Jingke^{1*}

(1. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)(2. College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Three heat treatments, namely roasting, microwaving, and wet heating, were examined to determine their effects on the color differences, moisture distribution, microstructure, starch crystalline structure, pasting characteristics, and rheological properties of adzuki bean flour using a colorimeter, low-field nuclear magnetic resonance spectrometer, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, rapid Visco analyzer, and rheometer. Furthermore, the relationships of

引文格式:

李少辉, 张柳, 贾艳菊, 等. 不同热处理方式的红豆全粉物化特性及其馒头品质比较 [J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 233-243.

LI Shaohui, ZHANG Liu, JIA Yanju, et al. Physicochemical characteristics of adzuki bean flour made using different heat treatment methods and comparison of its steamed bread quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 233-243.

收稿日期: 2024-01-07

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (22327101D); 河北省农林科学院现代农业科技创新工程课题资助 (2022KJCZX-SSS-1)

作者简介: 李少辉 (1986-) 男, 在读博士, 助理研究员, 研究方向: 食品风味与物化特性, E-mail: lishaohui007@163.com

通讯作者: 刘敬科 (1979-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品化学及谷物加工, E-mail: liujingke79@163.com

different heat treatments on the digestive properties of steamed bread after starch modification were examined. The results showed that the chromaticity changes ΔE were in the following order: microwaving>roasting>wet heating. Heat treatments did not change the C-type structure of adzuki bean flour, but the particle morphology of adzuki bean flour was significantly damaged after roasting and microwaving. The water absorption index and swelling power increased by approximately 25% after heat treatments, but microwaving decreased the S index. Wet heating lowered the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, and setback of adzuki bean flour to 1 031.67, 921.00, 1 541.33, and 620.33 mPa·s, respectively. The reduction was more remarkable than that caused by microwaving and roasting ($P<0.05$). Wet heating resulted in more significant loss of bound water than the other two methods. Rheological studies suggested increased dough G' and G'' as well as viscoelasticity, insignificant changes in $\tan\delta$, and improved water-holding capacity. The resistant starch contents of steamed bread increased to 12.8% and 13.69% after roasting and microwaving for 6 min, respectively. This study provides a reference for choosing suitable treatment methods to improve the quality of steamed bread made from adzuki bean flour.

Key words: heat treatment; physicochemical property; adzuki bean; quality of steamed bread

红豆在中国种植范围广，营养价值较高，是蛋白质、碳水化合物、维生素和矿物质的良好来源^[1]。红豆具有多种生物活性^[2]，但由于高膳食纤维含量、淀粉高回生特性^[3]等原因导致口感较差，加工品质有待提升。

热处理加工方式在谷豆原材料加工方面的研究持续升温，而且豆类的碳水化合物一般比谷物消化速率慢，餐后血糖升高速度慢，可用作低 GI 值食品。有研究发现不同加工方式对红小豆粉的 eGI 值有影响，其中经微波处理红豆粉后，测定其 eGI 值较低^[4]。湿热处理影响豆类淀粉分子的结构和理化性质，比如提高糊化温度和淀粉糊的热稳定性，降低在人体内的消化率等，淀粉的分子间发生定向重排，进而抗性淀粉含量提高，增强淀粉的消化抵抗性^[5]。干热处理 1、3 和 9 h 的红豆淀粉颗粒形态完整，淀粉的晶型没有发生变化，而红豆淀粉中慢消化淀粉和抗性淀粉的含量均增加^[6]。部分热处理方式对豆粉的晶型影响不大，而豆粉的颗粒结构可能发生变化。经热处理后豆粉中淀粉与其他物质的结合包裹，减少酶和淀粉的接触或者形成了更多的淀粉-脂肪复合物或者淀粉-蛋白质复合物，进而影响豆粉的消化性^[7,8]。但到目前为止，研究多集中在湿热面粉的性质，未对最终产品进行延伸。因此，将热处理的红豆粉制成红豆馒头，探讨不同热处理方式对红豆粉物化特性及红豆馒头品质的影响，具有实际的研究意义。

本研究采取炒制、微波和湿热三种热处理方式，比较三种处理方式对红豆全粉物化特性及馒头品质

的影响，主要测定热处理前后红豆全粉糊化特性、微观结构和晶体结构等物化指标以及对馒头面团流变特性、水分含量和馒头质构及馒头淀粉的体外消化率的影响。

1 材料与方法

1.1 原料

红豆，购自当地超市（产地辽宁省朝阳市）；高筋小麦粉，购自五得利面粉集团有限公司；酵母，购自湖北宜昌市安琪酵母股份有限公司；葡萄糖标准品、 α -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶，购自 Sigma 有限公司；丙三醇，购自天津市永大化学试剂有限公司；无水乙醇，购自国药集团化学试剂有限公司。实验所用试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

Tech Master 4500 RVA 快速粘度分析仪，波通瑞华科学仪器有限公司；752 型紫外可见分光光度计，上海光谱仪器有限公司；WSF 分光测色仪，上海精密科学仪器有限公司；101-3AB 型电热鼓风干燥箱，天津市泰斯特仪器有限公司；Smart Lab 9KW 型 X 射线衍射仪，日本理学株式会社；S-4800 扫描电子显微镜，日本日立公司；MetoMR23-060H-I 型核磁共振成像分析仪，苏州纽迈分析仪器股份有限公司；凯伍德（KENWOOD）KVC3100 和面机，英国凯伍德集团；RH2112 电磁炉，美的集团；ZB1-GF3V 微波炉，格兰仕微波炉有限公司；TMS-Pro 质构仪，美国 FTC 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 热处理豆粉的制备

红豆经粉碎后分过 100 目筛进行以下热处理:

炒制: 红豆全粉于电磁炉炒锅中在炒制模式下翻炒, 功率 500 W, 温度 120 °C, 炒制 2、4 和 6 min。

微波: 红豆全粉经调整湿度为 20%, 于微波炉, 功率 1 000 W, 微波 2、4 和 6 min。

湿热: 调节红豆全粉的含水量为 25%, 密封于湿热反应容器中, 室温下平衡水分 24 h, 平衡后转移到电热鼓风干燥箱中, 100 °C 加热 30、60 和 90 min。未经热处理的红豆全粉作为对照。

1.3.2 色度的测定

使用 WSF 分光测色仪测定红豆全粉的色度。炒制、微波和湿热处理后红豆粉采用 L^* 、 a^* 、 b^* 色空间法来分析其色泽变化, 其中 L^* 为亮度; a^* 、 b^* 为色度, $+a^*$ 红色方向, $-a^*$ 为绿色方向; $+b^*$ 为黄色方向, $-b^*$ 为蓝色方向。将红豆全粉均匀平铺于容器内, 固定好后进行色度测量。每个样品重复测定三次^[9]。

1.3.3 扫描电镜观察

参考 Zhang 等^[10]的研究方法, 用导电胶将适量淀粉颗粒粘贴在扫描电子显微镜的载物台上, 然后进行喷金处理。电镜加速电压为 15.0 kV, 放大倍数为 1 000 倍。

1.3.4 X射线衍射测定

将红豆全粉样品研磨过筛, 并保持在平衡水分含量, 用 SmartLab9KW 全自动多功能 X 射线衍射仪进行测定^[11]。

1.3.5 红豆全粉的水分分布

取 2 g 红豆全粉样品置于检测管, 并放入核磁共振检测室进行检测。检测参数: 主频率 (MHz) =21, 采样频率 (kHz) =250, 回波时间 (ms) =0.200 00, 回波个数 =8 000, 重复扫描次数 (ns) =12, 弛豫时间点 =100, 温度为 30 °C。利用脉冲序列 CPMG 测定样品的横向弛豫时间 (T_2)^[12]。

1.3.6 水合特性的测定

参照 Hagenimana 等^[13]的测定方法并作适当修改。称取 0.75 g 样品, 加入 7 mL 蒸馏水, 置于 70 °C 的水浴锅中加热 0.5 h。接着 4 000 r/min 离心 20 min,

将上清液分离置于已知质量的称量瓶, 105 °C 的鼓风干燥箱内烘干至恒重, 称取上清液烘干后称量瓶、离心管和剩余沉淀的质量。计算公式见式 (1) 至式 (3)。

$$B_1 = \frac{m_2}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$B_2 = \frac{m_2}{0.75 \times (1-S)} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

B_1 ——吸水性指数 (Water Absorption Index, WAI), %;

S ——水溶性指数 (Solubility, S), %;

B_2 ——膨润力 (Swelling Power, SP), %;

m_0 ——样品干重, g;

m_1 ——上清液质量, g;

m_2 ——沉淀物的质量, g。

1.3.7 糊化特性的测定

采用快速粘度分析仪 (Rapid Visco Analyser, RVA) 按照文献描述略作修改热处理后的红豆全粉进行测定^[14], 测试程序如下: 50 °C 时恒温 50 s, 在 222 s 内逐渐升温至 95 °C 后恒温 150 s, 228 s 内由 95 °C 降至 50 °C 后恒温 120 s。

1.3.8 混合面团的流变特性

参照 Li 等^[15]面团的制作方法并适当修改, 具体为红豆粉: 小麦粉 =3:7 质量比用温水和面, 采用 HR-10 流变仪测定面团的流变学特性, 模式: 震荡频率; 温度: 25 °C; 等待时间: 30.0 s; 应变: 1%; 角频率 1 rad/s 到 100 rad/s; 数量级点数: 5。夹具参数设置: 平板夹具直径 40 mm; 测试间隙 1 mm; 加样间隙 45 000 μm 。

1.3.9 混合面团的水分迁移

取 3 g 红豆面团样品, 用保鲜膜将其包裹放入检测管, 置于核磁共振检测室进行检测。检测参数同 1.3.5。

1.3.10 红豆馒头的质构评价

参照李少辉等^[16]的方法试制馒头, 按红豆粉: 小麦粉 =3:7 质量比用温水和面, 酵母添加量 1%, 和面机和面 5 min 至面团光滑、不沾手, 放到温度 38 °C、湿度 80% 的发酵箱发酵 90 min, 使面团体积增大到 1.5 倍。揉成 75 g 的馒头坯, 醒发 5 min 后上锅蒸 30 min, 馒头出锅后冷却 60 min 进行

质构测试。采用 TMS-Pro 质构仪 TPA 测试模式对整个馒头进行质构测定,测试参数:力量感应元为 TA 3/100 型 500 N 探头、形变百分量 30%、检测速度为 60 mm/min、起始力为 1 N、探头回升到样品表面高度为 35 mm。

1.3.11 馒头的体外消化特性测定

参考 Hung 等^[17]的方法,稍加修改。取 1 g 馒头芯于研钵中,加入 20 mL 醋酸钠缓冲液 (pH 值为 5.2, 0.1 mol/L), 研磨成匀浆后转入 50 mL 离心管,在 37 ℃ 水浴锅中预热 20 min,取 1 mL 清液于 10 mL 具塞试管中。用 DNS 法在 540 nm 波长处测定吸光度,即得 G_0 。向离心管中加入 100 mg α -淀粉酶和 0.5 mL 淀粉葡萄糖苷酶,分别在酶解 20 和 120 min 后,各取 1 mL 酶解液,加入 4 mL 无水乙醇灭酶,离心 (3 000 r/min, 10 min),取 1 mL 上清液于 10 mL 具塞试管中。用 DNS 法在 540 nm 波长处测定吸光度,即得 G_{20} 和 G_{120} 。计算公式见式 (4) 至 (6):

$$D_1=\frac{(G_{20}-G_0)\times0.9}{E}\times100\%$$
 (4)

$$D_2=\frac{(G_{120}-G_{20})\times0.9}{E}\times100\%$$
 (5)

$$D_3=\frac{E-D_1-D_2}{E}\times100\%$$
 (6)

式中:
 D_1 ——快消化淀粉含量 (Rapid Digestible Starch, RDS), %;
 D_2 ——慢消化淀粉含量 (Slowly Digestible Starch, SDS), %;

D_3 ——抗性淀粉含量 (Resistant Starch, RS), %;
 E ——样品总淀粉质量 (Total Starch, TS);
 G_0 、 G_{20} 、 G_{120} ——酶解 0、20、120 min 时的葡萄糖的含量;
0.9——转换系数。

1.3.12 数据处理

利用 Excel、SPSS22、进行数据分析,单因素方差和 Duncan 检验,采用字母上标来表示显著性分析结果,字母不同表示具有显著性差异 ($P<0.05$),用 Origin 2018 绘图。

2 结果与讨论

2.1 热处理红豆全粉的色度变化

由表 1 可知,热处理前后红豆全粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 存在显著性差异。随着炒制时间的增加,红豆粉亮度 L^* 下降,6 min 时最终为 68.23,豆粉 a^* 减小至 -3.34 即偏红, b^* 越来越大达到 25.51 即偏黄。随着微波时间的增加,红豆粉亮度呈下降趋势, a^* 由 -3.34 增大至 -1.99, b^* 偏黄增大到 28.28。随着湿热时间的增加,红豆粉亮度有所下降,颜色越来越偏绿色,颜色越来越偏黄色。热处理之后红豆的 L^* 值均降低,可能是热处理使豆粉中淀粉的还原糖与蛋白质的氨基发生美拉德反应^[18]。 a^* 值和 b^* 值均随热处理时间的增加而增加,表明色泽变差。 ΔE 表示样品的总色差,可以表征热处理前后红豆全粉的颜色变化。热处理时间越长,红豆全粉的 ΔE 越大,微波 6 min 时 ΔE 达到 17.12。因此,根据红豆全粉的 ΔE 变化对热处理方式进行排序:微波>炒制>湿热。

表 1 热处理对红豆全粉色度的影响
Table 1 Effect of heat treatment on total pink degree of adzuki bean

热处理方式	时间/min	L^*	a^*	b^*	ΔE
未处理	0	71.58 ± 0.27 ^a	-0.50 ± 0.17 ^a	12.51 ± 0.53 ^h	—
	2	69.08 ± 0.22 ^c	-3.64 ± 0.05 ^g	22.90 ± 0.17 ^d	11.15 ± 0.75 ^c
	4	68.77 ± 0.35 ^c	-3.80 ± 0.11 ^g	23.74 ± 0.21 ^c	12.04 ± 0.70 ^c
炒制处理	6	68.23 ± 0.12 ^{cd}	-3.34 ± 0.08 ^f	25.51 ± 0.37 ^b	13.73 ± 0.37 ^b
	2	70.02 ± 0.33 ^b	-3.64 ± 0.04 ^g	25.29 ± 0.22 ^b	13.26 ± 0.36 ^b
	4	67.72 ± 0.23 ^d	-2.08 ± 0.05 ^b	28.62 ± 0.22 ^a	16.65 ± 0.35 ^a
微波处理	6	65.16 ± 0.67 ^c	-1.99 ± 0.14 ^b	28.28 ± 0.44 ^a	17.12 ± 0.68 ^a
	30	71.00 ± 0.49 ^a	-2.68 ± 0.08 ^c	19.00 ± 0.06 ^g	6.89 ± 0.65 ^f
	60	68.88 ± 0.45 ^c	-2.84 ± 0.05 ^d	19.66 ± 0.36 ^c	8.00 ± 0.69 ^d
湿热处理	90	68.83 ± 0.56 ^c	-2.93 ± 0.06 ^c	19.42 ± 0.49 ^f	7.84 ± 0.31 ^e

注:同一列的不同字母表示差异性显著 ($P<0.05$)。

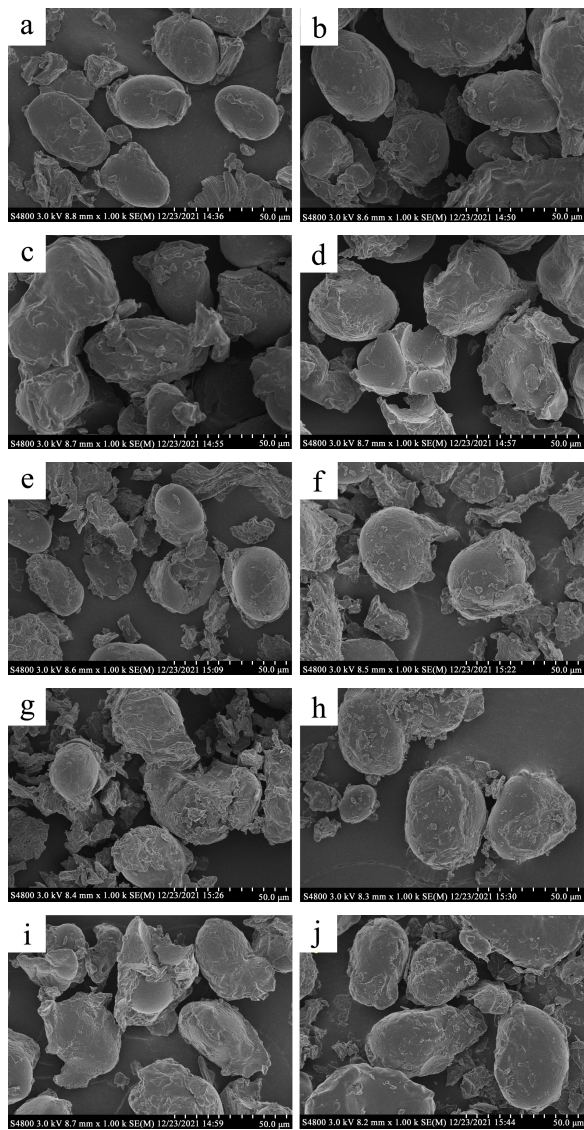


图 1 热处理后红豆全粉的微观结构图

Fig.1 Microstructures of adzuki bean after heat treatment

注：(a) 未处理；(b) 炒制 2 min；(c) 炒制 4 min；
(d) 炒制 6 min；(e) 微波 2 min；(f) 微波 4 min；(g) 微波 6 min；
(h) 湿热 30 min；(i) 湿热 60 min；(j) 湿热 90 min。

2.2 扫描电镜微观结构分析

扫描电镜结果表明，未处理的红豆全粉颗粒呈不规则的椭圆颗粒，表面较松散，排列紧密，有一定的间隙，较其他热处理后的红豆全粉颗粒更完整。随着炒制时间的增加，红豆全粉的颗粒破损程度越严重，颗粒间发生一些聚集、粘连。有研究表明干热处理会使谷物如板栗淀粉的表面结构由光滑变得多孔或者开裂^[19]。红豆全粉颗粒破损可能由于炒制时温度升高，颗粒失水收缩，而炒制 6 min 时红豆全粉颗粒破损最为严重（图 1d）。随着微波时间的增加，红豆全粉的颗粒破损程度越严重，微波

6 min 时（图 1g）红豆全粉颗粒粘结最严重，椭圆结构几乎消失。随着湿热时间的增加，红豆全粉的颗粒破损程度不同。湿热 30 min（图 1h）的红豆全粉颗粒破损较轻，仅有少量物质粘附在红豆全粉颗粒的表面，可能是非淀粉物质经湿热处理后发生改性。湿热 60 min、90 min（图 1i、1j）的红豆全粉颗粒破损较大，且也发生了粘连现象。在高温和含水量一定的条件下，湿热时间对红豆颗粒形貌有一定影响，同时高温对非淀粉物质例如蛋白质变性也有一定影响，湿热对红豆全粉颗粒的影响较小^[20]。综上所述，炒制和微波处理后红豆全粉的颗粒破损更加严重，炒制和微波处理的温度远高于湿热的温度，同时微波处理可能直接对红豆全粉内部结构作用。

2.3 热处理对红豆全粉结晶结构的影响

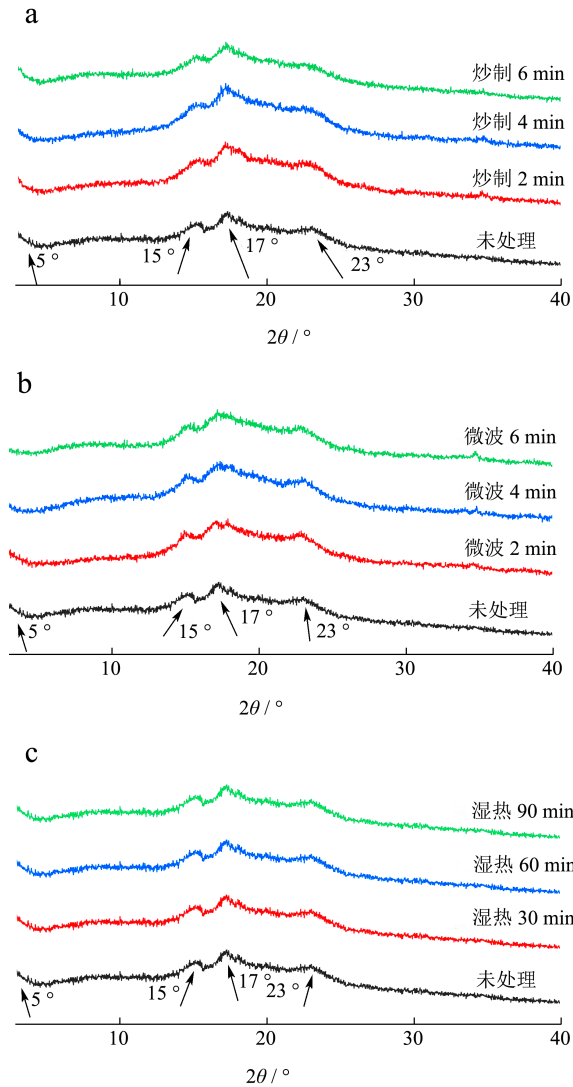


图 2 热处理后红豆全粉的 X-射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction pattern of adzuki bean flour after heat treatment

红豆全粉经热处理前后的 X-射线衍射图谱如图 2 所示, 红豆全粉的晶体类型是 C 型晶体。结晶区可表现出尖状特征峰, 无定形区表现出弥散特征。红豆全粉在 5°、15°、17° 和 23° 附近出现特征衍射峰。C 型结晶类型是 A 型和 B 型的混合物, 豆粉和豆类淀粉的晶体类型一般为 C 型。这些衍射峰没有变化 (图 2), 说明炒制、微波和湿热后红豆全粉的晶体类型没有发生改变, 依然是 C 型。炒制处理属于干热处理, 经炒制的红豆全粉晶型没有发生变化^[20]。湿热处理红豆全粉之后, 红豆全粉的晶型没有发生变化。但淀粉链内部或淀粉链间的氢键受湿热影响可能破坏, 双螺旋结构重排, 重排的结果及程度未能最终影响淀粉的结晶结构。有文献表明湿热处理蚕豆淀粉, 其结构由 C 型转变为 A 型^[21], 晶型未发生转变可能的原因一是调节红豆全粉的含水量稍低; 二是文献中直接处理的淀粉, 红豆全粉中还含有非淀粉物质, 且不同的豆类也稍有区别。

2.4 热处理对红豆全粉水分流动性的影响

低场核磁共振 (Low-field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR) 技术通过检测氢质子在核磁共振谱中的弛豫时间, 描述水分子的运动情况及其存在状态, 已广泛应用于检测食品中水的流动性^[22,23]。其中弛豫时间表示水的结合形态, 信号幅度表示质子密度, 采用 CPMG 序列得到不同热处理红豆全粉的 T₂ 图谱。如图 3 所示, 低场核磁共振测定红豆样品得到的 T₂ 图谱中出现 3 个明显的峰, T₂₁ 分布在 0.1~1 ms, T₂₂ 分布在 10~100 ms, T₂₃ 分布在 100~1 000 ms。其中 T₂₁ 表示结合水, T₂₂ 表示不易流动的弱结合水, T₂₃ 表示自由水^[24]。

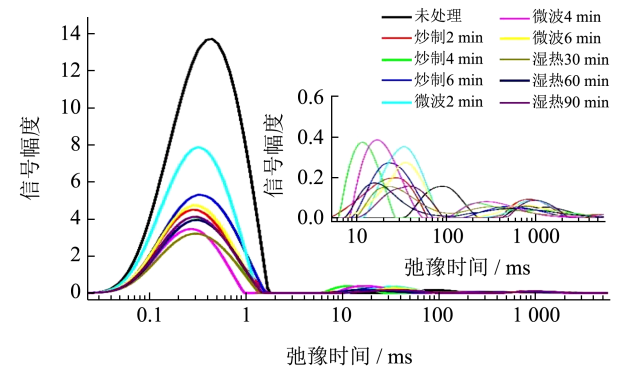


图 3 不同热处理条件下红豆全粉的水分分布图

Fig.3 Moisture distribution of whole adzuki bean flour under different heat treatment conditions

从图 3 可以看出红豆全粉中水的主要存在状态为结合水。湿热较其他两种热处理方式, 结合水丧失得更多, 其中湿热 30 min 的结合水丧失得更多。热处理会使结合水丧失, 使豆粉大分子的吸水能力增加, 面团的品质更好。此外, 自由水的结果说明, 炒制和微波处理后, 自由水的弛豫时间缩短, 淀粉的吸水膨胀能力增强, 而湿热处理后红豆全粉中自由水的弛豫时间延长, 淀粉的吸水膨胀能力减弱, 这一点与热处理后红豆全粉的水合特性结果一致。因此, 热处理会增加红豆全粉中淀粉蛋白等物质的吸水能力, 从而进一步提高面团的吸水性和馒头的品质。

2.5 热处理红豆全粉的水合特性

表 2 热处理对红豆全粉水合特性的影响

Table 2 Effect of heat treatment on hydration characteristics of adzuki bean flour

类型	时间 /min	吸水性指数 WAI/%	水溶性指数 S/%	膨润力 SP/%
未处理	0	2.78 ± 0.05 ^d	19.24 ± 0.1 ^a	3.44 ± 0.07 ^c
	2	3.11 ± 0.11 ^c	19.51 ± 1.67 ^a	3.79 ± 0.08 ^b
炒制	4	3.50 ± 0.06 ^a	19.72 ± 1.59 ^a	4.33 ± 0.07 ^a
	6	3.49 ± 0.03 ^a	18.57 ± 1.09 ^b	4.26 ± 0.04 ^a
微波	2	3.49 ± 0.04 ^a	10.06 ± 3.30 ^d	3.98 ± 0.21 ^b
	4	3.50 ± 0.07 ^a	10.28 ± 0.39 ^d	3.93 ± 0.07 ^b
	6	3.49 ± 0.09 ^a	9.27 ± 0.89 ^d	3.76 ± 0.14 ^b
	30	2.67 ± 0.03 ^d	20.84 ± 0.22 ^a	3.34 ± 0.05 ^c
湿热	60	2.75 ± 0.17 ^d	19.87 ± 1.24 ^a	3.40 ± 0.17 ^c
	90	3.21 ± 0.02 ^b	15.33 ± 2.75 ^c	3.86 ± 0.06 ^b

注: 同一列的不同字母表示差异性显著 (P<0.05)。

热处理前后红豆全粉的吸水性、水溶性和膨润力会发生变化, 与热处理后全粉的颗粒破损程度和非淀粉物质粘附有关联。由表 2 可以看出, 不同热处理条件下红豆全粉的吸水性指数、水溶性指数和膨润力存在显著性差异。随着炒制和微波时间的增加, 红豆全粉的吸水性指数、水溶性指数和膨润力先增大后减小; 随着湿热时间的增加, 红豆全粉的吸水性指数和膨润力增大, 水溶性指数减小。炒制 4、6 min、微波 2、4、6 min 和湿热 90 min 时的吸水性指数均提升了 25% 左右, 说明微波和炒制处理相较于湿热处理, 红豆全粉的持水力更好水溶性指数均随热处理时间减小, 其中湿热 30 min 时的水溶性指数最好, 一方面湿热处理可能使原料粉颗粒破损且

发生粘结，溶解度降低；另一方面湿热可能改变了脂肪－直链淀粉的复合作用，使直链淀粉更容易溶出^[8]。炒制处理较其他两种处理方式，膨润力比处理前均有一定的提高，与炒制之后峰值粘度上升趋势一致，豆粉中的淀粉吸水膨胀能力增强，膨润力提高。因此，炒制、微波和湿热处理均改善了红豆全粉的水合特性，炒制 4 min 较其他条件的改善效果更好。

2.6 热处理对红豆全粉糊化特性的影响

热处理红豆全粉糊化特征参数见表 3，随着炒制时间的增加，红豆全粉的峰值粘度、谷值粘度和终值粘度呈上升趋势，回生值下降，崩解值先下降后升高。经炒制后的红豆全粉吸水性升高，使淀粉的峰值黏度升高至 1 959.33 mPa·s，这一点与膨润力升高的变化趋势一致。随着微波时间的增加，峰值粘度和谷值粘度呈上升趋势，终值粘度下降，崩解值下降再上升，回生值下降再升高。随着湿热时间的增加，峰值粘度、谷值粘度、终值粘度和回生值呈下降趋势，最终值为 1 031.67、921.00、1 541.33 和 620.33 mPa·s 均比微波和炒降低显著 ($P<0.05$)。黏度降低可能的原因一是湿热后红豆全粉中淀粉颗粒的重结晶作用降低了吸水性，使淀粉的峰值黏度降低^[25]。二是淀粉发生糊化，减少了直链淀粉溶出。湿热 60 min 的崩解值最低，说明此时红豆全粉的热稳定性，抗剪切能力最好。随着炒制时间的增加，糊化温度呈下降趋势。可能是在测试过程中降低了

豆粉中淀粉分子内或分子间氢键的作用力，水分子更容易渗入淀粉颗粒内部而引起膨胀，导致起糊温度降低^[26]。而随着湿热和微波时间的增加，糊化温度有显著升高，且比未处理的要高。有可能湿热和微波过程淀粉分子移动重排，结晶结构完善或新结晶结构形成造成的^[27]，随着热处理时间的增加，回生值降低，说明红豆粉糊的稳定性提高且不易老化。

2.7 红豆全粉混合面团流变学特性分析

图 4 为红豆全粉混合面团储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 及损耗因子 ($\tan\delta=G''/G'$) 随角频率变化的关系。由图 4 可知，红豆面团的储能模量 G' 和耗能模量 G'' 均随频率的增加而增加，并且 G' 值大于 G'' 值，呈现出弹性体的特征。从储能模量 (G') 的曲线中可以看出，随着炒制、微波和湿热时间的增加， G' 升高。从耗能模量 (G'') 的曲线中可以看出，随着炒制、微波和湿热时间的增加， G'' 升高，其中炒制 6 min 时，面团的 G'' 最高，此时粘弹性最高，说明炒制时间过长对红豆面团影响较大。经热处理之后，红豆全粉的水合能力增强，淀粉和蛋白质结构发生改变，面团的分子链交联紧密，从而面团的弹性增大。红豆面团 $\tan\delta$ 的变化不显著，随着频率的增加而减小。其中微波 6 min 时， $\tan\delta$ 最低，可能微波处理时间长影响了面团的聚合度。结果表明，热处理可能会引起蛋白－淀粉和淀粉－脂质的交联作用，影响面筋的网络结构，因而在一定程度上影响面团的流变性。

表 3 热处理对红豆全粉糊化特性的影响
Table 3 Effect of heat treatment on pasting properties of adzuki bean

方式	时间/ min	峰值黏度/ (mPa·s)	谷值黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	终值黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	出峰时间/ min	糊化温度/ ℃
未处理	0	1 643.00 ± 82.21 ^c	1 590.67 ± 75.08 ^c	52.33 ± 19.30 ^d	2 819.33 ± 19.30 ^a	1 228.67 ± 43.78 ^a	6.69 ± 0.54 ^{ab}	75.02 ± 0.78 ^{de}
	2	1 687.67 ± 71.65 ^{bc}	1 641.33 ± 75.83 ^{bc}	46.33 ± 6.35 ^e	2 816.67 ± 79.39 ^a	1 175.33 ± 17.39 ^a	6.98 ± 0.04 ^a	74.47 ± 0.46 ^{ef}
炒制	4	1 832.00 ± 30.41 ^{ab}	1 782.33 ± 34.15 ^{ab}	49.67 ± 8.74 ^{de}	2 891.67 ± 63.72 ^a	1 109.33 ± 42.15 ^{ab}	6.76 ± 0.21 ^{ab}	73.47 ± 0.06 ^{ef}
	6	1 959.33 ± 92.36 ^a	1 881.00 ± 71.71 ^a	78.33 ± 23.35 ^c	2 890.00 ± 96.38 ^a	1 009.00 ± 32.14 ^{bc}	6.49 ± 0.23 ^{bc}	72.60 ± 0.05 ^f
微波	2	1 689.33 ± 86.23 ^{bc}	1 625.00 ± 118.12 ^{bc}	64.33 ± 31.90 ^{cd}	2 151.33 ± 87.79 ^{bc}	526.33 ± 31.09 ^c	6.22 ± 0.10 ^c	76.40 ± 0.39 ^{cd}
	4	1 736.33 ± 19.35 ^{bc}	1 677.33 ± 17.01 ^{bc}	59.00 ± 3.61 ^d	2 342.67 ± 31.09 ^{bc}	665.33 ± 14.15 ^d	6.40 ± 0.07 ^{bc}	78.28 ± 0.06 ^b
	6	1 758.33 ± 41.00 ^{bc}	1 689.33 ± 31.97 ^{bc}	69.00 ± 11.27 ^{cd}	2 346.67 ± 67.84 ^{bc}	657.33 ± 39.53 ^d	6.51 ± 0.19 ^{bc}	78.27 ± 0.03 ^{bc}
湿热	30	1 374.33 ± 44.43 ^d	1 269.67 ± 51.73 ^d	104.67 ± 7.57 ^{ab}	2 410.00 ± 57.30 ^b	1 140.33 ± 14.19 ^{ab}	7.00 ± 0.00 ^a	76.38 ± 0.42 ^{cd}
	60	1 199.33 ± 91.09 ^e	1 173.33 ± 83.10 ^d	126.00 ± 8.19 ^a	2 086.00 ± 216.34 ^c	912.67 ± 133.36 ^c	7.00 ± 0.00 ^a	75.88 ± 0.03 ^d
	90	1 031.67 ± 59.18 ^f	921.00 ± 58.21 ^e	110.67 ± 2.08 ^a	1 541.33 ± 83.97 ^d	620.33 ± 28.71 ^d	7.00 ± 0.00 ^a	83.12 ± 2.10 ^a

注：同一列的不同字母表示差异性显著 ($P<0.05$)。

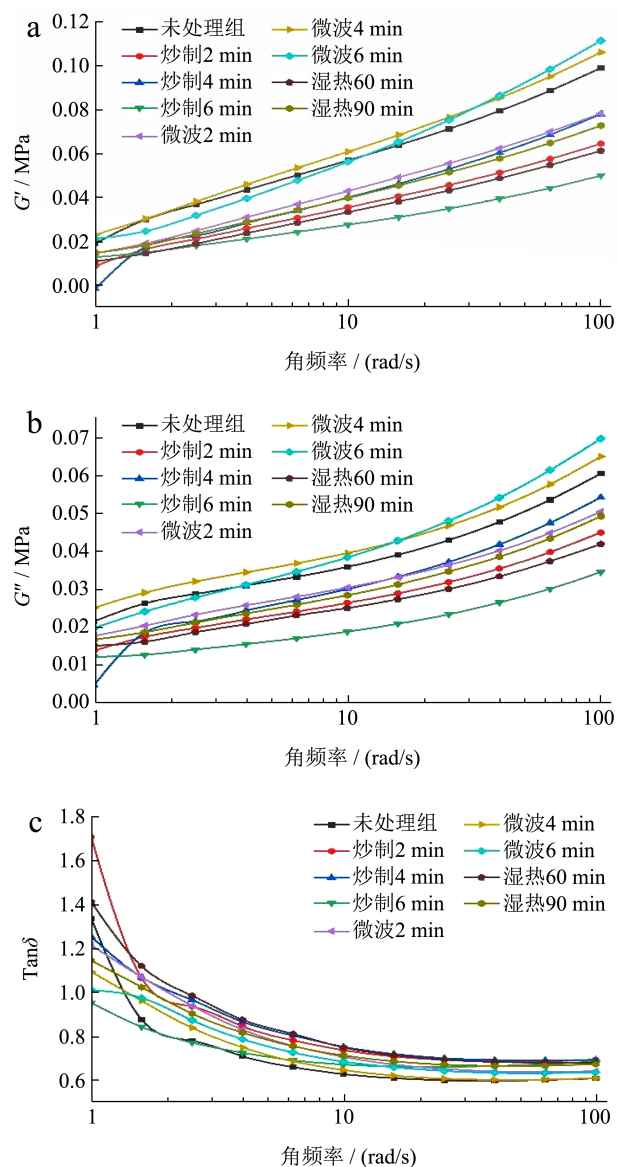


图4 红豆全粉混合面团的流变学特性

Fig.4 Rheological properties of mixed dough with whole adzuki bean flour

2.8 热处理对红豆混合面团水分流动性的影响

如图5所示,低场核磁共振测定面团样品得到的T2图谱中出现2个峰: T_{21} 和 T_{22} 。 T_{21} 分布在8~50 ms, T_{22} 分布在400~1 000 ms。 T_{21} 、 T_{22} 峰值面积占总面积比例 S_{21} 、 S_{22} 分别反映了不同种类的水的含量,如 S_{21} 比例越大,表示结合水的含量越多,面团的持水性也就越好。由5a可知,微波4 min时红豆面团的 S_{21} 最大,说明此时红豆全粉的吸水性和膨润力更好,因而红豆面团的持水力更好。与处

理前比,红豆面团持水力下降,这一点与红豆全粉的吸水性指数趋势一致。如图5b所示,T2图谱中出现2个峰: T_{21} 和 T_{22} 。 T_{21} 分布在8~50 ms, T_{22} 分布在400~1 000 ms。炒制4 min时红豆面团时持水力更好。如图5c所示,T2图谱中出现2个峰: T_{21} 和 T_{22} 。 T_{21} 分布在8~50 ms, T_{22} 分布在400~1 000 ms。从图中可以看出湿热60 min红豆面团的持水性更好。说明在制作混合红豆面团的过程中,热处理后红豆全粉的吸水增加,面团中的水通过氢键与淀粉、面筋蛋白等结合,使面团变得更加柔软。

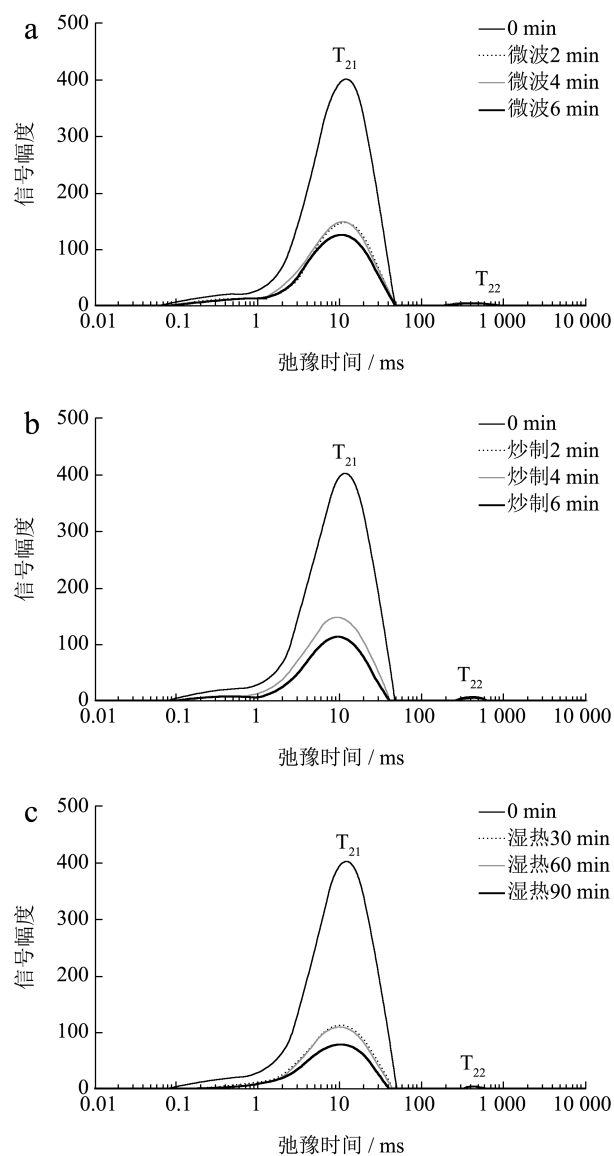


图5 红豆混合面团的T2图谱

Fig.5 Relaxation time spectra of adzuki bean mixed dough

表 4 红豆馒头的质构特性

Table 4 Texture characteristics of adzuki bean steamed bread

热处理类型	时间/min	硬度/N	内聚性/Ratio	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
未处理	0	24.11 ± 4.78 ^b	0.76 ± 0.01 ^{ab}	5.04 ± 0.66 ^{ab}	18.31 ± 3.53 ^b	91.63 ± 17.98 ^{abc}
	2	18.71 ± 3.13 ^c	0.77 ± 0.01 ^a	5.09 ± 0.18 ^b	14.37 ± 2.54 ^c	73.40 ± 15.78 ^{cd}
炒制	4	30.03 ± 1.49 ^a	0.74 ± 0.02 ^c	4.64 ± 0.73 ^{abc}	22.33 ± 0.70 ^a	103.81 ± 18.73 ^{ab}
	6	6.16 ± 0.60 ^e	0.76 ± 0.01 ^{ab}	5.21 ± 0.46 ^a	22.55 ± 0.42 ^a	117.46 ± 10.64 ^a
微波	2	15.82 ± 0.34 ^d	0.76 ± 0.01 ^{ab}	4.05 ± 0.63 ^{bc}	12.07 ± 0.45 ^d	49.01 ± 8.58 ^e
	4	5.06 ± 0.47 ^e	0.76 ± 0.01 ^{ab}	4.28 ± 0.38 ^{abc}	17.53 ± 2.37 ^{bc}	75.54 ± 15.82 ^{cd}
	6	4.72 ± 0.75 ^e	0.75 ± 0.00 ^{ab}	3.89 ± 0.70 ^c	14.61 ± 2.51 ^{bc}	58.03 ± 19.54 ^{de}
湿热	30	24.06 ± 1.19 ^b	0.76 ± 0.00 ^{ab}	4.40 ± 0.20 ^{abc}	18.21 ± 0.87 ^b	80.29 ± 7.05 ^{bc}
	60	21.67 ± 1.42 ^{bc}	0.77 ± 0.01 ^a	4.80 ± 0.67 ^{abc}	16.77 ± 0.85 ^{bc}	80.61 ± 13.55 ^{bc}
	90	22.74 ± 3.52 ^{bc}	0.77 ± 0.01 ^a	4.60 ± 0.51 ^{abc}	17.56 ± 2.72 ^{bc}	81.33 ± 19.13 ^{bc}

注：同一列的不同字母表示差异性显著（ $P<0.05$ ）。

2.9 不同热处理红豆粉对红豆馒头质构特性分析

三种不同处理方式对红豆馒头质构特性产生显著性差异。由表 4 可知，湿热处理后馒头硬度虽略微降低，但与对照组相比差异较小。而经过炒制和微波处理后，红豆馒头的硬度变化幅度大，呈现出先升高后减少趋势，特别是炒制 6 min 和微波 4 min 和 6 min 后，红豆馒头的硬度大幅度降低，其原因可能是红豆粉的加入增加了面粉的密度，豆粉和面筋蛋白之间的二硫化物交换以及大豆纤维对水分的吸收导致面团粘度的增加，硬度升高^[28]。但随着两种处理方式时间的延长，较高的温度破坏了馒头内部网状结构，从而使硬度出现大幅度降低，也正因为其硬度的降低，所以改善了馒头的质地。内聚性是产品内部凝聚力的指标：一般来说，内聚性低的馒头容易断裂和碎裂，而三种处理方式后馒头的内聚性与对照组无较大差异，因此三种处理方式对馒头内部影响较小。弹性被定义为产品在去除变形的力后恢复到初始状态的速度。含水量、水分分布和淀粉糊化对弹性影响较大。因三种热处理导致馒头中的水分缺失从而使弹性出现其降低趋势，与文献报道一致^[29]。咀嚼性是食物咀嚼对人体所消耗的能量，与对照组相比，除炒制外，微波处理和湿热处理均消耗能量较少，且随热处理时间的增加呈下降趋势。总体而言，炒制处理后的红豆馒头，硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性增大，馒头的适口性较差。经湿热后，红豆馒头的硬度和咀嚼性变化不大，说明湿热处理红豆全粉对馒头的内聚力和弹性影响较小，馒头的膨胀性、柔韧性和组织结构稳定性变化

不大。因此，与其他热处理条件相比，微波处理后红豆馒头柔软和膨胀性较好，适口性强。

2.10 不同热处理红豆粉对红豆馒头体外消化率的影响

根据食物中淀粉在人体内的消化率，将其分为 RDS、SDS 和 RS 三种类型。抗性淀粉是指在小肠内不能被酶解，而在人的肠胃道中与挥发性脂肪酸发生发酵作用，食用后消化缓慢，不会使血糖升高过快；慢消化淀粉指在小肠中需要 20~120 min 才能被完全消化吸收的一类淀粉，食用后不会造成血糖的急剧升高，有助于维持血糖稳态^[30]。由表 5 可知，与未处理的红豆馒头相比，炒制、微波和湿热处理后的红豆馒头抗性淀粉的含量均增加了。随着炒制时间的增加，红豆馒头的快消化淀粉的含量增加，慢消化淀粉的含量减少，抗性淀粉的含量逐渐增加。炒制 6 min 时，抗性淀粉含量较未处理增加了 8.4% 左右。结果表明，炒制处理后抗性淀粉含量显著增加可能是因为高温过程中，豆粉中的淀粉与蛋白质或脂肪形成复合物减缓了消化速率。随着微波时间的增加，红豆馒头的快消化淀粉含量增加且小于未处理的红豆馒头，慢消化淀粉含量减小，抗性淀粉的含量增加。微波 6 min 时，抗性淀粉含量较未处理增加了 9.3%。结果表明，微波处理后抗性淀粉的含量显著升高，可能是因为微波处理采用整豆微波加工的方式，水分有限，豆粉中的淀粉分子无法充分展开，同时细胞壁对消化酶仍有屏障作用。随着湿热时间的增加，红豆馒头的快消化淀粉含量增加，慢消化淀粉的含量呈减小后增加的趋势，抗性

淀粉的含量增加。湿热 6 min，红豆馒头的慢消化淀粉较未处理增加了 2.7%，抗性淀粉较未处理增加了 3%。结果表明，湿热处理后抗性淀粉的含量显著提高，可能是因为湿热使大量的支链淀粉分子断裂，形成更多的直链淀粉，降温过程中直链淀粉与氢键连接形成更多的抗性淀粉。因此，微波处理后红豆馒头的抗性淀粉含量整体高于其他两种热处理方式。

表 5 红豆馒头的体外消化特性
Table 5 *In vitro* digestion characteristics of adzuki bean steamed bread

热处理类型	时间/min	RDS/%	SDS/%	RS/%
未处理	0	15.87 ± 0.04 ^{ab}	14.59 ± 0.03 ^{bc}	4.42 ± 0.01 ^c
	2	15.42 ± 1.02 ^b	13.98 ± 1.32 ^c	5.68 ± 0.30 ^d
炒制	4	15.76 ± 2.23 ^{ab}	12.73 ± 2.41 ^d	9.84 ± 0.17 ^b
	6	16.87 ± 0.71 ^a	11.57 ± 0.97 ^c	12.80 ± 0.25 ^a
微波	2	13.81 ± 0.09 ^c	13.24 ± 1.49 ^{cd}	9.84 ± 1.59 ^b
	4	14.55 ± 0.11 ^c	14.69 ± 0.43 ^{bc}	6.90 ± 0.31 ^{cd}
	6	15.11 ± 0.60 ^b	7.95 ± 0.85 ^f	13.69 ± 0.25 ^a
湿热	30	11.16 ± 0.57 ^d	11.05 ± 0.23 ^e	7.11 ± 0.80 ^c
	60	12.44 ± 3.34 ^{cd}	15.67 ± 4.06 ^b	7.18 ± 0.72 ^c
	90	13.93 ± 2.47 ^c	17.34 ± 0.95 ^a	7.43 ± 3.42 ^c

注：同一列的不同字母表示差异性显著（*P* < 0.05）。

3 结论

本文通过对红豆全粉进行炒制、微波和湿热三种热处理方式，测定热处理前后红豆全粉的物化特性，研究红豆全粉的色度、水合特性、糊化特性、电镜结构和晶体结构等重要指标，以及对馒头品质的影响。结果表明炒制、微波和湿热处理对红豆全粉的物化特性有显著影响，热处理后红豆全粉的亮度均下降，颜色偏绿且越来越黄；炒制和微波对红豆全粉的颗粒形貌影响较大，处理时间越长，破损越严重；热处理前后，红豆全粉的晶型未发生变化，结合水丧失。炒制处理较其他两种处理方式，膨润力和吸水性指数比其他两种方式高；随着炒制和微波时间的增加，红豆全粉的峰值粘度、谷值粘度和终值粘度呈上升趋势，回生值和崩解值均呈下降趋势；而炒制时间过长，面团的粘弹性影响最大，进而影响馒头的硬度和咀嚼性等。体外消化实验结果表明炒制、微波和湿热三种处理方式均使馒头的抗性淀粉含量升高，幅度分别为 8.4%、9.3%、3%，

并且热处理时间对馒头的抗性淀粉含量有显著影响。微波处理增强淀粉短程有序性，增加直链淀粉含量，抗性淀粉含量整体高于其他两种处理方式，降低馒头淀粉消化率。另外，湿热处理对红豆全粉的理化特性和馒头品质的影响较小，可以考虑延长湿热时间，进一步探究湿热时间的影响。因此，微波处理对红豆全粉的理化特性影响更大，红豆馒头的品质更好，相对更适合馒头加工。本实验有助于进一步了解为热处理对红豆淀粉的物化特性的变化机制，并为红豆制品的加工应用提供了理论支持和技术参考。

参考文献

[1] LEE H, HA M J, SHAHBAZ H M, et al. High hydrostatic pressure treatment for manufacturing of red bean powder: A comparison with the thermal treatment [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 238: 141-147.

[2] YAO Y, XUE P, ZHU Y, et al. Antioxidant and immunoregulatory activity of polysaccharides from adzuki beans (*Vigna angularis*) [J]. Food Research International, 2015, 77: 251-256.

[3] SCHAFRANSKI K, ITO V C, LACERDA L G. Impacts and potential applications: A review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106690.

[4] 杨小雪,王丽丽,丁岚,等. 加工方式对红小豆粉理化性质及预估血糖生成指数的影响[J].中国粮油学报,2021, 36(1):33-38.

[5] JI N, LI X, QIU C, et al. Effects of heat moisture treatment on the physicochemical properties of starch nanoparticles [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 605-609.

[6] GE X, SHEN H, SU C, et al. The improving effects of cold plasma on multi-scale structure, physicochemical and digestive properties of dry heated red adzuki bean starch [J]. Food Chem, 2021, 349: 129159.

[7] NILSSON K, JOHANSSON M, SANDSTRÖM C, et al. Pasting and gelation of faba bean starch-protein mixtures [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108494.

[8] GUO P, YU J, COPELAND L, et al. Mechanisms of starch gelatinization during heating of wheat flour and its effect on *in vitro* starch digestibility [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 370-378.

[9] SHARMA S, SINGH N, VIRDI A S, et al. Himalayan kidney bean germplasm: Grain-flour characteristics, structural-functional properties and *in-vitro* digestibility of starches [J]. Food Research International, 2015, 77: 498-505.

[10] ZHANG Y, ZHAO X, BAO X, et al. Effects of pectin and heat-moisture treatment on structural characteristics

- and physicochemical properties of corn starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106664.
- [11] 朱偌端,陈瑾,何大伟,等. 湿热-蒸煮处理对板栗淀粉-多酚复合物消化和回生性能的影响[J].现代食品科技,2023, 39(11):143-150
- [12] WANG H, CHE G, WAN L, et al. Combination of LF-NMR and BP-ANN to monitor the moisture content of rice during hot-air drying [J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(9): e14102.1-e14102.12.
- [13] HAGENIMANA A, DING X, FANG T. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking [J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 38-46.
- [14] DHULL S B, PUNIA S, KUMAR M, et al. Effect of different modifications (physical and chemical) on morphological, pasting, and rheological properties of black rice (*Oryza sativa* L. Indica) starch: a comparative study [J]. Starch-Stärke, 2020, 73(1-2).
- [15] LI W, CAO W, WANG P, et al. Selectively hydrolyzed soy protein as an efficient quality improver for steamed bread and its influence on dough components [J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129926.
- [16] 李少辉,生庆海,赵巍,等. 不同粒径小米粉对面团流变特性及馒头质构特性的影响[J].食品科学,2022,43(16):98-106.
- [17] VAN HUNG P, BINH V T, NHI P H Y, et al. Effect of heat-moisture treatment of unpolished red rice on its starch properties and *in vitro* and *in vivo* digestibility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 1-8.
- [18] 程新,黄璟,JACOB OJOBI OMEDI,等.湿热处理和混菌发酵对白芸豆面包淀粉消化率的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(13):59-65.
- [19] GUL K, RIAR C S, BALA A, et al. Effect of ionic gums and dry heating on physicochemical, morphological, thermal and pasting properties of water chestnut starch [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 348-355.
- [20] LIANG S, SU C, SALEH A S M, et al. Repeated and continuous dry heat treatments induce changes in physicochemical and digestive properties of mung bean starch [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): 15281.
- [21] LIU K, HAO Y, CHEN Y, et al. Effects of dry heat treatment on the structure and physicochemical properties of waxy potato starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 1044-1050.
- [22] SUN K, PAN C, CHEN S, et al. Effect of water change on quality deterioration of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during partial freezing storage [J]. Food Chemistry, 2023, 416: 135836.
- [23] 钱鑫,李良怡,周文化,等.银杏粉对小麦面团流变学特性和水分分布及迁移规律的影响[J].食品科学,2022, 43(12):74-80.
- [24] MENG X, LI T, ZHAO J, et al. Effects of different bran pretreatments on rheological and functional properties of triticale whole-wheat flour [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 16(3): 576-588.
- [25] WANG H, WANG Z, LI X, et al. Multi-scale structure, pasting and digestibility of heat moisture treated red adzuki bean starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 102: 162-169.
- [26] ZAVAREZE E D R, DIAS A R G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 317-328.
- [27] PIECYK M, DOMIAN K. Effects of heat-moisture treatment conditions on the physicochemical properties and digestibility of field bean starch (*Vicia faba* var. minor) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 425-433.
- [28] SHIN D J, KIM W, KIM Y. Physicochemical and sensory properties of soy bread made with germinated, steamed, and roasted soy flour [J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 517-523.
- [29] PEREZ I C, MU T H, ZHANG M, et al. Effect of heat treatment to sweet potato flour on dough properties and characteristics of sweet potato-wheat bread [J]. Food Science and Technology International, 2017, 23(8): 708-715.
- [30] 刘淑婷,王颖,王志辉,等.不同品种芸豆淀粉及其抗性淀粉结构和物化特性比较[J].中国食品学报,2020,20(4):49-56.