高嫚, 杨杨, 徐悦, 等. 微波预处理对杂粮品质特性的影响及共煮同熟杂粮复配米消化特性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 75−85. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070063
GAO Man, YANG Yang, XU Yue, et al. Effects of Microwave Pretreatment on Quality Characteristics of Coarse Cereals and Digestive Properties of Mixed Coarse Cereal Rice with Simultaneous Cooking Maturity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 75−85. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070063

·研究与探讨·

微波预处理对杂粮品质特性的影响及共煮同熟杂粮复配米消化特性研究

高　嫚,杨　杨,徐　悦,张　光,王　冰,许馨予,刘　颖,马春敏*,张　娜*
(哈尔滨商业大学食品工程学院,黑龙江哈尔滨 150028)

摘　要:为研究微波预处理对杂粮品质特性的影响，并开发一种能与大米共煮同熟的杂粮复配米。以绿豆、黑豆、红豆和黑米四种杂粮为原料，通过吸水率确定最佳浸泡时间，研究微波时间对四种杂粮糊化度和感官评分的影响，对比分析预熟化前后杂粮的品质变化，并以感官评分为指标，确定杂粮复配米的比例，研究其消化特性。结果表明，绿豆、黑豆、红豆和黑米的浸泡时间分别为 3、3、8、2 h，微波时间分别为 5、5、6、4 min。预熟化后四种杂粮的水分含量和脂肪含量显著降低，淀粉含量显著增加（P<0.05），蛋白质含量无明显变化（P>0.05）；预熟化缩短了四种杂粮的熟化时间，提高了其复水率、体积膨胀率和蒸煮损失率；预熟化对四种杂粮的色泽均产生不同程度的影响；预熟化后，四种杂粮的硬度和咀嚼性显著降低，弹性显著升高（P<0.05），与蒸煮后的大米更加接近；除绿豆外，预熟化后的黑豆、红豆、黑米气味响应值明显增加；除黑豆外，预熟化后，绿豆、红豆和黑米的黏度值、衰减值和回生值显著降低，糊化温度则显著升高（P<0.05）。杂粮复配米的配方为预熟化绿豆:预熟化黑豆:预熟化红豆:预熟化黑米:大米的比例=15:10:5:21:49。与大米相比，该杂粮复配米具有较高含量的慢消化淀粉和抗性淀粉，分别为 45.16% 和 26.45%，其估计血糖生成指数为 64.61，为中 GI 食物。该结果可为微波预熟化处理在杂粮加工中的应用提供数据支撑，促进杂粮加工产业的发展。

关键词:微波,杂粮,预熟化,品质特性,共煮同熟
中图分类号:TS210.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)16−0075−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070063
本文网刊:

Effects of Microwave Pretreatment on Quality Characteristics of Coarse Cereals and Digestive Properties of Mixed Coarse Cereal Rice with Simultaneous Cooking Maturity

GAO Man，YANG Yang，XU Yue，ZHANG Guang，WANG Bing，XU Xinyu，LIU Ying，MA Chunmin*，ZHANG Na*

(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of microwave pretreatment on the quality characteristics of coarse cereals, and develop a kind of mixed coarse cereal rice with simultaneous cooking maturity. Four types of coarse cereals—mung bean, black bean, red bean, and black rice—were selected as raw materials. The optimal soaking time was determined based on water absorption rates. The influence of microwave duration on the gelatinization degree and sensory scores of the four coarse cereals was studied. Comparative analysis was conducted on the quality changes of the coarse

收稿日期: 2025−07−08
基金项目: 国家重点研发计划项目（2023YFD2100902-3）;国家自然科学基金（32372387,32402015）;黑龙江省杰出青年基金项目（JQ2024C003）;黑龙江省自然科学基金（PL2024C011）;黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目（LJGXCG202080,LJGXCG202083）;黑龙江省重点研发计划揭榜挂帅项目（2023ZXJ08B03）;中央引导地方科技发展专项项目（zy2022001）。
作者简介: 高嫚（1999−）,女,博士研究生,研究方向:谷物加工,E-mail:2050553953@qq.com。
*** 通信作者:** 马春敏（1992−）,女,博士,讲师,研究方向:大豆、谷物化学与加工机理研究,E-mail:chunmin_ma@163.com。
张娜（1979−）,女,博士,教授,研究方向:食品蛋白与食品安全,E-mail:foodzhangna@163.com。

cereals before and after pre-ripening. The proportion of the mixed coarse cereal rice was determined using sensory score as an indicator, and its digestive properties were examined. The results showed that the optimal soaking times for mung beans, black bean, red bean, and black rice were 3, 3, 8, and 2 h, respectively, while the optimal microwave times were 5, 5, 6, and 4 min, respectively. After pre-ripening, the moisture and fat content of the four coarse cereals significantly decreased, starch content significantly increased (P<0.05), and protein content remained largely unchanged (P>0.05). Pre-ripening reduced the cooking time of the coarse cereals while increasing their rehydration rate, volumetric expansion rate, and cooking loss rate. The color of the four coarse cereals was affected to varying degrees by pre-ripening. Additionally, pre-ripening significantly reduced the hardness and chewiness of the coarse cereals while significantly increasing their elasticity (P<0.05), making their texture more similar to that of cooked rice. Except for mung beans, the odor response values of black beans, red beans, and black rice increased after pre-ripening. With the exception of black beans, the viscosity, breakdown, and setback values of mung bean, red bean, and black rice significantly decreased after pre-ripening, while their gelatinization temperature significantly increased (P<0.05). The optimal formulation for the mixed coarse cereal rice was determined as follows: Pre-ripened mung bean:pre-ripened black bean:pre-ripened red bean:pre-ripened black rice:regular rice= 15:10:5:21:49. Compared with rice, this mixed coarse cereal rice had a higher content of slow digestible starch and resistant starch, which were 45.16% and 26.45% respectively, and its estimated glycemic index (GI) was 64.61, which was a medium GI food. These findings provide data support for the application of microwave precooking in coarse cereal processing and contribute to the advancement of the coarse cereal processing industry.

Key words: microwave; coarse cereals; pre-ripening; quality characteristics; simultaneous cooking

随着消费者对膳食均衡和多元化需求的提升，杂粮逐渐成为主食化研究的热点。杂粮通常指除水稻、小麦、玉米、大豆和薯类等主粮以外的粮食作物[1]，包括禾谷类如大麦、燕麦、荞麦、藜麦、黑米等，杂豆类如绿豆、红豆、黑豆、鹰嘴豆等。相比于精制谷物，杂粮富含丰富的膳食纤维、维生素和矿物质等，对维持肠道健康[2]、控制血糖和血脂水平[3]、预防心脑血管疾病[4] 等具有重要作用。提高杂粮的摄入量，对于改善国民健康状况、降低慢性病发病率具有重要意义。然而，杂粮质地坚硬、蒸煮耗时长导致其烹饪便利性差，且不同杂粮因结构、成分的差异，在传统蒸煮过程中难以实现同步熟化。对杂粮进行预熟化处理能够实现杂粮与大米共煮同熟，符合现代化简约、快速的生活节奏，同时可达到营养均衡的目的。

目前杂粮预熟化方法主要有浸泡、微波处理、常压蒸煮和高压蒸煮等。Huang 等[5] 研究了浸泡温度（30、40 和 50 ℃）对红豆吸水性和硬度的影响，得到最佳浸泡温度为 30 ℃。张羽彤等[6] 通过比较汽蒸、焙烤和微波三种不同加工方式对薏米和红米感官品质的影响，得到薏米的最佳预熟化条件为微波功率 650 W、微波时间 2 min，红米的最佳预熟化条件为焙烤温度 170 ℃、焙烤时间 15 min。倪萍等[7] 以绿豆和红豆为研究对象，采用浸泡、蒸煮的方式对其进行预熟化处理，按照食物蛋白质互补原理与大米进行复配，开发出两种杂豆同熟米。与传统预熟化处理技术相比，微波加热具有高效、节能、可控性强等优点，可以同时加热物料的内部和外部[8]。现有预熟化研究多集中于单一杂粮的工艺优化，而系统研究微波预处理对多种典型杂粮品质特性的影响，并在此基础上开发多品类复配的共煮同熟产品的研究尚显不足。此外，以往研究多关注预熟化工艺本身，对预处理后杂粮的蒸煮特性、质构及消化特性等综合品质体系的协同变化规律缺乏深入探讨，难以指导开发出既能同熟又保持良好食用品质和营养功能的杂粮复配米产品。

本研究选用微波加热作为杂粮的预熟化方法，首先通过单因素实验确定绿豆、黑豆、红豆和黑米的最佳浸泡时间，化度研究微波时间对四种杂粮糊、感官评分的影响，确定最佳微波时间。对预熟化前后四种杂粮的基本营养成分、蒸煮特性、色度和质构特性等进行比较，明确微波处理对杂粮品质特性的影响。最后将预熟化后的杂粮与大米进行复配，得到最佳复配比例，并对其消化特性进行研究。本研究旨在为共煮同熟产品的开发提供参考，从而为杂粮预熟化工艺的精准控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

绿豆、黑豆、红豆、黑米　黑龙江琢光食品有限公司；大米　黑龙江省五常金禾米业有限责任公司；葡萄糖测定试剂盒　Megazyme 公司；α-胰腺淀粉酶（12 U/mg）、淀粉葡萄糖苷酶（82.5 U/mg）　Sigma 公司；氢氧化钾、氢氧化钠、盐酸、乙酸、碘、碘化钾、无水乙醇　分析纯，天津市光复科技发展有限公司。

G70F20N3P-ZS（W0）微波炉　广东格兰仕微波生活电器制造有限公司；SMF01 多功能磨粉机　苏泊尔；101-0AB 型电热鼓风干燥箱　天津市泰斯特仪器有限公司；CS-800 分光测色仪　杭州彩谱科技有限公司；cNose 电子鼻　上海保圣实业发展有限公司；TA.new Plus 质构仪　上海瑞玢国际贸易有限公司；Rapid-20 快速黏度仪　瑞典 Perten 仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1　杂粮预熟化处理　称取除杂后的绿豆、黑豆、红豆和黑米各 50 g，淘洗三次，按照 1∶3（m/v）的料液

比加入蒸馏水，40 ℃ 下浸泡 0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、7、8、10、12 h 后，沥干表面水分，并称重。按照公式(1)进行吸水率的测定。将杂粮平铺于平皿中，控制物料厚度在 1.3±0.2 cm。将平皿转移至功率 700 W 微波炉中进行微波处理，处理时间分别为 3、4、5、6、7、8 min，处理过程中每隔 1 min 翻动一次，使其均匀加热，防止焦糊。随后经 45 ℃ 热风干燥后对杂粮的糊化度和感官评分进行测定。

$$吸水率(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中，m_1 为浸泡前杂粮质量，g；m_2 为浸泡后杂粮质量，g。

1.2.2　糊化度测定　参照朱文静[9] 的方法对预熟化杂粮的糊化度进行测定。将样品粉碎过 60 目筛，准确称取 0.2 g 样品粉末。对于未处理样品，将其悬浮于 95 mL 蒸馏水中，加入 5 mL 浓度为 10 mol/L 的氢氧化钾溶液，使用磁力搅拌器搅拌 5 min，使其充分混合。之后在 4500 r/min 下离心 10 min，取 0.2 mL 上清液，加入 0.2 mL、0.5 mol/L 的盐酸溶液中和至中性，再加入 15 mL 蒸馏水稀释，最后添加 0.2 mL 碘液，于 600 nm 波长处测定吸光度，该值记为 A_1。

对于经预熟化处理的样品，称取 0.2 g 粉末悬浮于 98 mL 蒸馏水中，加入 2 mL、10 mol/L 的氢氧化钾溶液，同样磁力搅拌 5 min，离心后取 0.2 mL 上清液，加入 0.2 mL、0.2 mol/L 的盐酸溶液进行中和，再加入 15 mL 液蒸馏水及 0.2 mL 碘，相同波长下测定吸光度，该值记为 A_2。糊化度按公式(2)计算。

$$糊化度(\%) = \frac{A_2}{A_1} \times 100 \qquad 式（2）$$

1.2.3　感官评价　根据色泽、气味、口感和组织状态等指标，由十位经过培训的人员组成感官评价小组对蒸煮后的样品进行感官评价。评分采用百分制，其中，色泽 20 分、气味 20 分、口感 30 分、组织状态 30 分。最高分为 100 分，表示样品色泽鲜亮、气味纯正、口感细腻、组织状态良好；最低分为 0 分，表示样品色泽暗淡、有异味、口感粗糙、组织状态差。具体评价标准见表 1。

表 1　感官评分标准

Table 1　Sensory evaluation standard

评定项目	评分标准	分值(分)
色泽(20分)	颜色鲜亮、自然，有光泽，均匀一致	16~20
	颜色较鲜亮，略有光泽，较为均匀	11~15
	颜色暗淡，光泽度一般，均匀性稍差	6~10
	颜色灰暗，无光泽，或有不正常变色	0~5
气味(20分)	具有该杂粮特有的纯正香气，无任何异味	16~20
	香气较纯正，无异味	11~15
	香气平淡，或有轻微不愉快气味	6~10
	无香气，或有明显哈败、焦糊等异味	0~5
口感(30分)	软硬适中，细腻爽滑，咀嚼性好	25~30
	软硬较适中，口感较为细腻，咀嚼性较好	19~24
	偏硬或偏软，口感略粗糙，咀嚼性一般	13~18
	过硬或过软，口感粗糙、僵硬或松散，有硬芯	0~12
组织状态(30分)	结构紧密均匀，颗粒完整、分明，有弹性，黏性适中	25~30
	结构较均匀，颗粒较完整，弹性与黏性适中	19~24
	结构不均匀，部分颗粒破裂，稍有粘连或松散	13~18
	结构松散或过黏，颗粒大量破裂、糊化，无弹性	0~12

1.2.4　基本营养成分测定　预熟化前后杂粮的水分含量按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定；淀粉含量根据 GB 5009.9-2023《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》中的酸水解法进行测定；蛋白质含量通过 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法进行测定；脂肪含量通过 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法进行测定。

1.2.5　蒸煮特性测定　参考刘若海[10] 的方法并稍作修改，对预熟化前后杂粮的熟化时间、复水率、蒸煮损失率和体积膨胀率进行测定。

1.2.5.1　熟化时间　在小铝盒内按料液比 1∶1.5(m/v)加入样品与蒸馏水，随后置于蒸锅中进行蒸制，每隔 1 min 取出适量样品，用食指和拇指按压测试样品的柔软度，当样品能被轻松压扁且无明显硬芯时所需的时间即为样品的熟化时间。

1.2.5.2　复水率　准确称取 4 g(m_1)样品，按照料液比 1∶5(m/v)加入 100 ℃ 蒸馏水，蒸煮 5 min，沥干水分后称重(m_2)，按照公式(3)计算样品的复水率。

$$复水率(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \qquad 式（3）$$

1.2.5.3　体积膨胀率　准确称取 2 g 样品于刻度试管中，记录蒸煮前样品体积(V_0)，按照 1∶10(m/v)的料液比加入蒸馏水，沸水浴 30 min，沥干水分，记录蒸煮后样品体积(V_1)。按照公式(4)计算样品的体积膨胀率。

$$体积膨胀率(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \qquad 式（4）$$

1.2.5.4　蒸煮损失率　准确称取 2 g(m_0)样品于离心管中，加入 20 mL 蒸馏水，沸水浴 30 min，将全部米汤转移至平皿(m_1)内，干燥至恒重(m_2)。按照公式(5)计算样品的蒸煮损失率。

$$蒸煮损失率(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100 \qquad 式（5）$$

1.2.6　色度测定　采用 de Oliveira 等[11] 的方法对预熟化前后杂粮的色度进行测定，记录样品颜色的测定参数 L^*(亮度)、a^*(红绿值)、b^*值(黄蓝值)。

1.2.7　电子鼻分析　参考 Zhou 等[12] 的方法并稍作修改。将预熟化前后杂粮与蒸馏水按照 1∶1.5(m/v)的料液比蒸 30 min 并保温 10 min。称取 2 g 于进样瓶中，静置 30 min 后上机测试。将进样针头插入含有样品的进样瓶中，利用电子鼻进行检测。检测条件：传感器清洗时长为 120 s，进样流量为 300 mL/min，

采样时长为 60 s。电子鼻传感器类别及性能见表 2。

表 2 电子鼻传感器性能

Table 2 Sensor performance of the electronic nose

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	sensor_1	对甲烷类灵敏
2	sensor_2	对含碳类物质灵敏
3	sensor_3	对氢气灵敏
4	sensor_4	对硫化物灵敏
5	sensor_5	对含氮类物质灵敏
6	sensor_6	对醛酮类灵敏
7	sensor_7	对短链烷烃类、可燃性气体灵敏
8	sensor_8	对液化气灵敏
9	sensor_9	对烷烃、醇类、酮类灵敏
10	sensor_10	对氢气、含氢气体灵敏
11	sensor_11	对烷烃、一氧化碳灵敏
12	sensor_12	对液化气、甲烷类灵敏
13	sensor_13	对短链烷烃类灵敏
14	sensor_14	对甲烷、燃气、烟雾灵敏
15	sensor_15	对含碳类物质、醇类、醛类灵敏
16	sensor_16	对硫化氢灵敏
17	sensor_17	对氨气、胺类灵敏
18	sensor_18	对甲苯、丙酮、乙醇灵敏

1.2.8 质构特性测定 将大米、预熟化前后杂粮分别与蒸馏水按照 1∶1.5(m/v)的料液比蒸 30 min 并保温 10 min。将蒸煮后的样品置于烧杯中,确保其厚度维持在 13~15 mm 之间,采用质构仪对样品的硬度、弹性和咀嚼性进行测定。质构特性测定参数为:探头型号 P/35,形变量 50%,触发力 5 g,测前、测中和测后速度分别为 2、1 和 2 mm/s。

1.2.9 糊化特性测定 参照张楚佳等[13]的方法并适当修改。将预熟化前后四种杂粮粉碎过 80 目筛,利用快速黏度仪对其糊化特性进行测定。根据快速黏度仪自带软件进行水分校正,配制质量分数为 14%(以干基计)的悬浮液,放入仪器中进行测定。具体测试程序:50 ℃ 保持 1.0 min,以 12 ℃/min 的速度升温到 95 ℃ 并保持 2.5 min,然后再以相同速率降温至 50 ℃ 后保持 2 min,记录样品糊化特征参数。

1.2.10 共煮同熟杂粮复配米配方设计 将预熟化黑米与大米分别按质量比 2∶8、3∶7、4∶6、5∶5、6∶4、7∶3、8∶2 进行复配,以感官评分为指标,确定混合米复配比例。进一步添加预熟化绿豆、预熟化黑豆和预熟化红豆,以感官评分为指标,考察预熟化绿豆、预熟化黑豆、预熟化红豆和混合米复配比例 5∶5∶5∶85、10∶10∶10∶70、15∶15∶15∶55、20∶5∶5∶70、15∶5∶10∶70、15∶10∶5∶70、10∶5∶15∶70、10∶15∶5∶70、5∶5∶20∶70、5∶10∶15∶70、5∶15∶10∶70、5∶20∶5∶70,确定共煮同熟杂粮复配米配方。

1.2.11 体外消化特性测定

1.2.11.1 快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉含量测定 参照 Zhang 等[14]的方法对杂粮复配米的快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)含量进行测定。准确称取 100(±5) mg 样品置于 50 mL 离心管中。加入已预热至 37 ℃ 的混合酶溶液 25 mL。混合酶溶液的 pH 为 6.0,酶添加量为 α-胰腺淀粉酶 3600 U、淀粉葡萄糖苷酶 360 U。涡旋混匀,160 r/min、37 ℃ 水浴下进行振荡。分别在 20、120 min 时取出反应液,用葡萄糖测定试剂盒测定其葡萄糖含量。RDS、SDS 和 RS 含量分别按照式(6)~式(8)进行计算。

$$\mathrm{RDS}(\%)=\frac{(G_{20}-\mathrm{FG})\times 0.9}{\mathrm{TS}}\times 100 \qquad \text{式(6)}$$

$$\mathrm{SDS}(\%)=\frac{(G_{120}-G_{20})\times 0.9}{\mathrm{TS}}\times 100 \qquad \text{式(7)}$$

$$\mathrm{RS}(\%)=\frac{\mathrm{TS}-(\mathrm{RDS}+\mathrm{SDS})}{\mathrm{TS}}\times 100 \qquad \text{式(8)}$$

式中:FG 为酶解前淀粉悬浮液中的游离葡萄糖含量(mg);G_{20} 为淀粉酶解 20 min 后酶解液中葡萄糖含量(mg);G_{120} 为淀粉酶解 120 min 后酶解液中葡萄糖含量(mg);0.9 为葡萄糖转化系数;TS 为样品中总淀粉含量(mg)。

1.2.11.2 估计血糖生成指数测定 淀粉水解率的测定参考 Englyst 等[15]的方法并作适当调整。在反应开始后的 0、20、30、60、90、120、180 min 分别取样,采用葡萄糖测定试剂盒测定其葡萄糖含量。根据公式(9)计算淀粉水解率。

$$\text{淀粉水解率}(\%)=\frac{G_t\times 0.9}{\mathrm{TS}}\times 100 \qquad \text{式(9)}$$

式中:G_t 为水解 t 时间后产生的葡萄糖含量(mg);0.9 为葡萄糖转化系数;TS 为样品中总淀粉含量(mg)。

以时间为横坐标、淀粉水解率为纵坐标,绘制样品的淀粉水解曲线。对所得曲线进行拟合,得出一级反应方程,计算拟合曲线 0~180 min 下表面积(AUC),得出样品的淀粉水解指数(HI),并根据式(11)计算样品的估计血糖生成指数(eGI)。

$$\mathrm{HI}=\frac{\mathrm{AUC}_{\text{样品}}}{\mathrm{AUC}_{\text{白面包}}}\times 100 \qquad \text{式(10)}$$

$$\mathrm{eGI}=39.71+0.549\mathrm{HI} \qquad \text{式(11)}$$

1.3 数据处理

所有的实验均重复 3 次,分析所得出的数据均以平均值±标准偏差表示。其中曲线图使用 Origin 2021 和 Microsoft Office Excel 进行绘制,使用 SPSS 25 进行单因素方差分析,采用 Duncan 检验进行显著性分析,$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 浸泡时间对杂粮吸水率的影响

在浸泡过程中,杂粮充分吸水,可促进后续微波加热过程中淀粉的快速糊化。绿豆、黑豆、红豆和黑米四种杂粮在不同浸泡时间下的吸水率变化如图 1

所示。可以看出，在浸泡温度为 40 ℃ 时，随着浸泡时间的延长，四种杂粮的吸水率均呈现先增加后平缓的趋势。在 0~3 h 内，绿豆和黑豆的吸水率快速增加，3 h 后，吸水率呈缓慢上升趋势。绿豆在 8 h 时吸水率基本达到最大值，为 148.67%；而黑豆则在 7 h 时吸水率基本达到最大值，为 147.56%。红豆的吸水率在 0~8 h 内缓慢上升，8 h 后吸水率趋于稳定。而黑米的吸水率则在 0~2 h 内快速增长，2 h 后吸水率增长缓慢，直至 8 h 时基本不再上升。结果表明，不同杂粮的吸水特性存在明显差异。绿豆、黑豆和红豆吸水较快，而黑米吸水较慢，这主要是由于黑米具有致密的糠层，水分渗透困难，导致吸水速率较慢[16]。为确保杂粮能充分吸收水分并节省时间，选取吸水率基本稳定时所用的最短时间为浸泡时间。因此，确定黑米的浸泡时间为 2 h、红豆的浸泡时间为 8 h。但由于绿豆和黑豆在未达到饱和吸水状态时表皮即开始脱落，为保证其外观完好和种粒完整，选取绿豆浸泡时间 3 h、黑豆浸泡时间 3 h 进行后续实验。

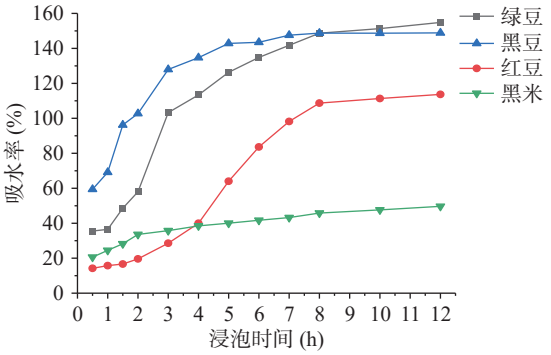


图 1　不同浸泡时间下杂粮吸水率变化

Fig.1　Changes in water absorption rate of coarse cereals under different soaking durations

2.2　微波时间对杂粮糊化度及感官评分的影响

绿豆、黑豆、红豆和黑米四种杂粮经不同时间微波处理后的外观形态如图 2 所示，糊化度和感官评分如图 3 所示。由图 2 可以看出，随着微波时间的延长，绿豆、黑豆、红豆和黑米的种皮颜色均逐渐加深，且表皮出现不同程度的皱缩和开裂现象。由图 3 可以看出，经微波处理后，绿豆、黑豆、红豆和黑米的最高糊化度差异较大。绿豆的最高糊化度在 40% 左



图 2　微波时间对杂粮外观形态的影响

Fig.2　Effect of microwave time on the appearance and morphology of coarse cereals

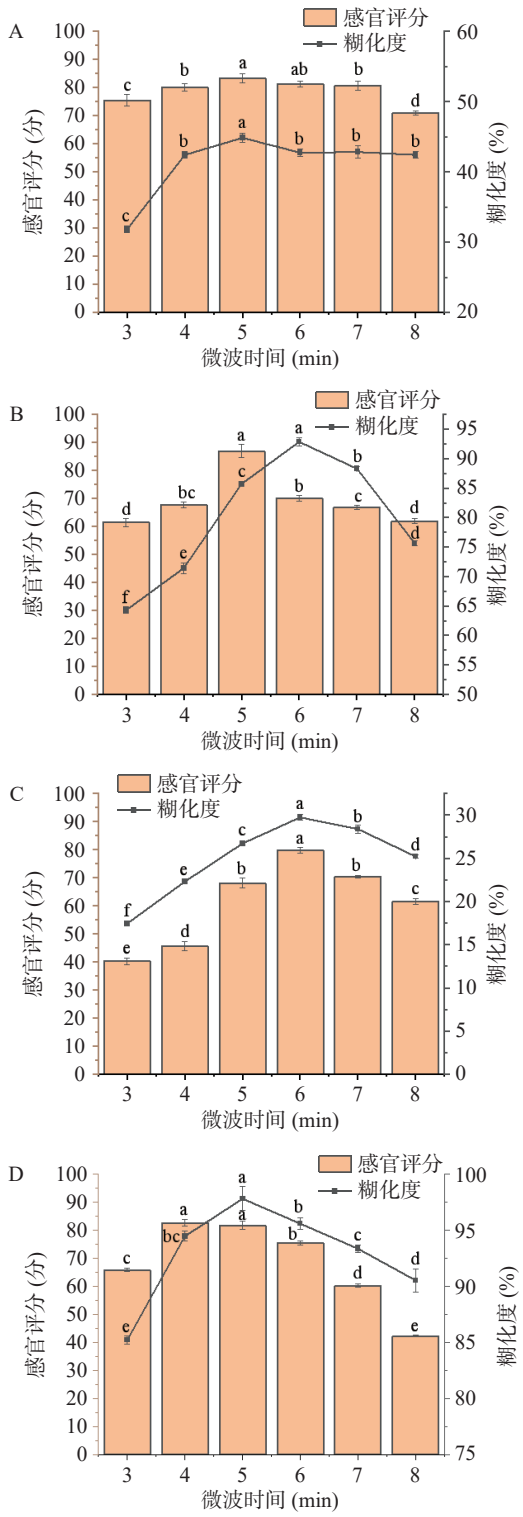


图 3　微波时间对杂粮糊化度和感官评分的影响

Fig.3　Effect of microwave time on the gelatinization degree and sensory score of coarse cereals

注：A、B、C、D 分别为绿豆、黑豆、红豆和黑米在不同微波时间下的糊化度和感官评分。不同小写字母表示差异显著（P<0.05），图 7 同。

右，黑豆和黑米的糊化度最高可达到 90% 以上，而红豆的最高糊化度则较低，在 30% 以下。不同杂粮的糊化度差异可能与它们的淀粉结构和组成有关[17]。随着微波时间的增加，四种杂粮的糊化度均呈现先升高后降低的趋势。这可能是由于微波时间过长，导致

杂粮中的水分含量降低，不利于淀粉吸水和加热糊化，导致糊化度降低[18]。绿豆、黑豆、红豆和黑米糊化度的最大值分别出现在微波处理 5、6、6、5 min 时，分别为 44.85%、92.86%、29.73%、97.78%。感官评分的变化趋势与糊化度大致相同，绿豆、黑豆、红豆和黑米的感官评分最大值分别出现在微波处理 5、5、6、4 min 时，对应的感官评分分别为 83.19、86.95、79.82、82.52 分。虽然微波 6 min 的黑豆和微波 5 min 的黑米糊化度较高，但破裂现象较严重。因此综合杂粮糊化度和感官评分，最终筛选出各杂粮的微波处理时间为：绿豆 5 min、黑豆 5 min、红豆 6 min、黑米 4 min。

2.3 预熟化杂粮品质特性分析

2.3.1 预熟化杂粮基本营养成分 微波预熟化前后绿豆、黑豆、红豆和黑米的基本营养成分变化如图 4 所示。由图 4 可以看出，不同杂粮在预熟化前的基本营养成分存在显著差异（$P<0.05$），这与不同杂粮的籽粒结构和化学成分密切相关[19]。经微波预熟化处理后，绿豆、黑豆、红豆和黑米的水分含量、脂肪含量均显著降低（$P<0.05$）。水分含量的降低主要归因于微波加热带来的高温促使水分迅速蒸发散失。脂肪含量的下降则可能是由于高温加速了脂质的氧化反应所致，该现象在李鹏[20]对黑豆的研究中也有类似发现。预熟化处理后四种杂粮中淀粉含量均显著增加（$P<0.05$），这可能是由于微波处理导致杂粮细胞结构破坏，使得原本被细胞壁束缚的淀粉得以释放，从而提高了淀粉含量[21]。此外，蛋白质含量在微波预熟化前后无显著差异（$P>0.05$），这是由于微波处理可能导致部分蛋白质变性，但其中总氮含量未发生变化[22]。

2.3.2 预熟化杂粮蒸煮特性 蒸煮特性是评价杂粮品质的主要方面之一，本研究通过测定杂粮的熟化时间、复水率、体积膨胀率和蒸煮损失率来分析微波预熟化处理对杂粮蒸煮特性的影响，测定结果如表 3 所示。可以看出，绿豆、黑豆、红豆和黑米的熟化时间分别为 41.67、47.67、69.67、49.00 min，经过预糊化后，四种杂粮的熟化时间显著降低（$P<0.05$）。当进行微波处理后，杂粮表皮受到不同程度的破损，由于水分的快速扩散和部分淀粉颗粒的糊化，加速了杂粮的熟化过程，从而缩短了熟化时间[23]。微波处理后，四种杂粮的熟化时间在 25~35 min 范围内，与大米熟化时间相当，能够实现与大米的共煮同熟。由表 3 可知，与原粮相比，微波处理后的绿豆、黑豆、红豆、黑米的复水率和体积膨胀率均显著增大（$P<0.05$）。陈楚瑶[24]在研究微波处理红豆时也观察到类似现象，这种现象可能与杂粮表皮形成裂缝有关。杂粮表皮产生的裂缝有助于水的进入，从而提高了吸水速率。杂粮籽粒开裂程度不同，导致其吸水能力存在差异。黑米微波处理时间较短，黑米表皮未出现明显开裂，吸水能力相比黑米原粮增加幅度较小。蒸煮损失率是反映杂粮蒸煮品质的指标之一。蒸煮损失率较

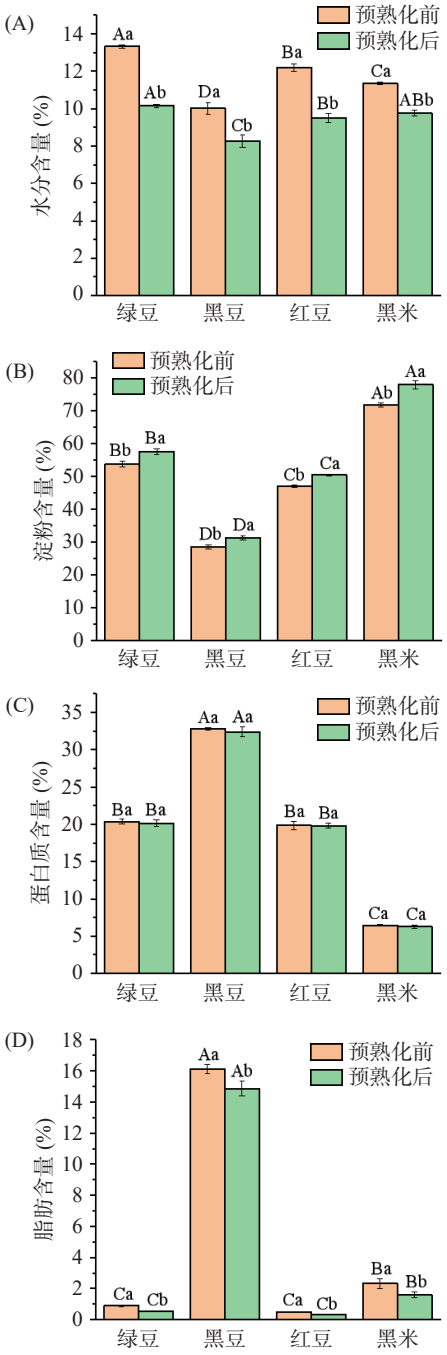


图 4 预熟化前后四种杂粮的基本营养成分

Fig.4 Basic nutritional components of four coarse cereals before and after pre-ripening

注：不同大写字母表示在相同处理条件下不同杂粮种类间差异显著（$P<0.05$），不同小写字母表示同一杂粮种类预熟化处理前后差异显著（$P<0.05$）。

低意味着在蒸煮过程中杂粮能够较好地保持其原有的结构和营养成分。经过微波预熟化的杂粮，由于其表皮产生裂缝，水分更容易进入杂粮内部，促进了淀粉的糊化和籽粒的膨胀，但同时也导致部分淀粉在蒸煮过程中溶出，增加了蒸煮损失率。

2.3.3 预熟化杂粮色度分析 色度是评价杂粮品质的重要指标之一，表 4 是利用色差仪测定预熟化前后绿豆、黑豆、红豆和黑米的 L^*、a^*、b^*值结果。L^*值代表亮度，L^*值越大，表明样品亮度越高；a^*值代表红

表 3　预熟化前后四种杂粮的蒸煮特性

Table 3　Cooking characteristics of four coarse cereals before and after pre-ripening

样品	熟化时间(min)	复水率(%)	体积膨胀率(%)	蒸煮损失率(%)
绿豆	41.67±1.15^{c}	73.33±0.85^{e}	152.62±13.04^{e}	5.19±0.29^{c}
预熟化绿豆	26.67±0.58^{d}	121.06±2.64^{b}	184.19±7.99^{d}	7.60±0.14^{b}
黑豆	47.67±1.53^{b}	68.96±1.05^{e}	198.09±2.26^{cd}	3.85±0.06^{d}
预熟化黑豆	28.33±0.58^{d}	147.19±4.71^{a}	232.73±3.77^{b}	5.48±0.30^{c}
红豆	69.67±2.08^{a}	51.78±1.83^{f}	210.86±1.96^{c}	2.43±0.28^{e}
预熟化红豆	30.33±2.52^{d}	113.56±3.60^{c}	251.92±2.21^{a}	4.19±0.12^{d}
黑米	49.00±1.00^{b}	56.91±1.44^{f}	111.72±2.75^{g}	5.79±0.18^{c}
预熟化黑米	27.33±1.53^{d}	89.37±2.25^{d}	135.47±3.18^{f}	8.27±0.21^{a}

注：同列上标字母不同表示各平均值在P<0.05水平具有显著差异，表4~表7同。

表 4　预熟化前后四种杂粮的色度值

Table 4　Chromaticity values of four coarse cereals before and after pre-ripening

样品	L^*	a^*	b^*
绿豆	42.82±0.28^{b}	−0.94±0.08^{e}	19.76±0.34^{b}
预熟化绿豆	38.42±0.51^{c}	−1.70±0.15^{f}	22.67±0.43^{a}
黑豆	30.56±0.33^{de}	−0.53±0.17^{e}	0.64±0.03^{f}
预熟化黑豆	28.37±0.85^{f}	0.36±0.09^{d}	5.87±0.03^{c}
红豆	44.86±0.19^{a}	5.86±0.24^{b}	3.46±0.28^{d}
预熟化红豆	29.73±0.05^{e}	8.14±0.12^{a}	5.47±0.16^{c}
黑米	28.04±0.16^{f}	1.03±0.02^{c}	1.58±0.09^{e}
预熟化黑米	31.08±0.32^{d}	0.11±0.03^{d}	0.37±0.05^{f}

绿色度，正值数值越大，表明样品颜色越偏红，反之则越偏绿；b^*值代表黄蓝色度，正值数值越大，表明样品颜色越偏黄，反之则越偏蓝[25]。由表 4 可知，预熟化处理显著影响了杂粮的色度(P<0.05)。经预熟化处理后，绿豆、红豆和黑豆的 L^*值降低，a^*和 b^*值升高，表明微波处理使绿豆、红豆和黑豆变暗，绿豆绿色变深、红豆和黑豆红色变深，黄度增加。黑米的 L^*、a^*、b^*值分别为 28.04、1.03、1.58，预熟化后其色泽加深，L^*值增大，a^*、b^*值减小。经微波预熟化后四种杂粮颜色的差异性可能与黄酮类、多酚类等呈色物质的含量有关[26]，也有可能与微波处理过程中杂粮发生了不同程度的美拉德反应、焦糖化反应等非酶褐变有关[27]。

2.3.4　预熟化杂粮电子鼻分析　利用电子鼻对预熟化前后杂粮的挥发性气味物质进行测定，提取对应的 18 个传感器响应值制作雷达图(图 5)和主成分分析图(图 6)。由图 5 可知，绿豆、黑豆、红豆和黑米四种杂粮在传感器 sensor_4、sensor_5、sensor_6、sensor_9 和 sensor_14 均表现出较高的响应值，这些传感器主要对硫化物、含氮物质、醛酮类化合物、烷烃类化合物、醇类以及甲烷灵敏。四种杂粮对这五个传感器的响应存在明显差异，其中黑豆对传感器的响应值最高，红豆和绿豆次之，黑米最低。这主要是由于豆类和米类在挥发性气味物质的种类、浓度和化学特性上的差异引起的[28]。豆类中的挥发性气味

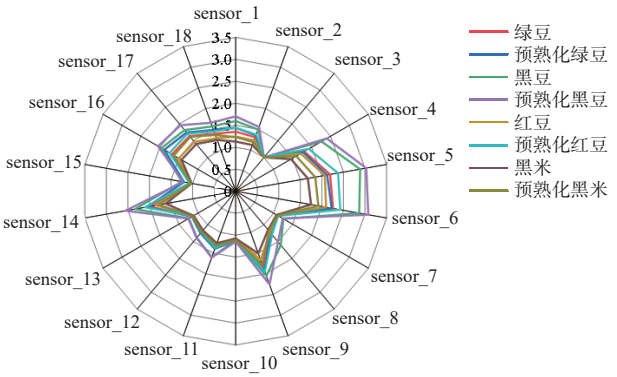


图 5　预熟化前后四种杂粮的电子鼻雷达图

Fig.5　Electronic nose radar chart of four coarse cereals before and after pre-ripening

物质主要为小分子醛/醇类和含硫化合物[29]，这些化合物含有高活性官能团，易与电子鼻的金属氧化物半导体传感器发生氧化还原反应，产生强电信号。而黑米中主要为吡嗪类、麦芽酚和 2-乙酰基-1-吡咯啉[30]，为高阈值香气成分，不易被电子鼻传感器捕获。由图 5 可知，预熟化处理前后雷达图的外形轮廓未发生明显变化，仅面积改变，说明预熟化处理未改变挥发性气味物质类别。由图 6 主成分分析图可知，预熟化前后黑豆、红豆、黑米主成分 1 和主成分 2 的总贡献率分别为 86.1%、86.2%、86.2%，超过 85%，说明该结果能够反映出其整体气味信息。而预熟化前后绿豆主成分 1 和主成分 2 的总贡献率为 80.5%，低于 85%，这可能是由于绿豆中的挥发性气味物质在预熟化处理过程中发生相互作用或转化，导致主成分分析的贡献率相对较低。雷达图和主成分分析结果表明，微波预熟化处理对四种杂粮的挥发性气味特征产生了显著影响。预熟化后的黑豆、红豆和黑米的电子鼻传感器响应值较处理前明显增加，整体气味信号强度增强。

2.3.5　预熟化杂粮质构特性　采用质构仪对绿豆、黑豆、红豆和黑米四种杂粮预熟化前后的硬度、弹性和咀嚼性进行测定，结果如表 5 所示。硬度和弹性是影响杂粮食用品质的重要因素。研究表明，硬度越低、弹性越高，其食用品质越佳[31]。经过微波预熟化处理后，绿豆、黑豆、红豆和黑米的硬度和咀嚼性均显著降低(P<0.05)，弹性显著升高(P<0.05)，食用品质提高。这是因为杂粮结构较为致密，吸水性较差，预熟化以后吸水性增强，杂粮变软造成硬度和咀嚼性的降低。弹性升高则是由于预熟化后的杂粮已经部分熟化，在相同的蒸煮时间内能够达到更佳的熟化程度，使得杂粮内部的纤维结构变得更为松散，水分更容易渗透和保持，从而表现出更高的弹性。大米蒸煮后的硬度、弹性、咀嚼性分别为 1088.36 gf、0.93 和 189.81 gf。从整体来看，经预熟化处理后的绿豆、黑豆、红豆、黑米的硬度、弹性、咀嚼性都更接近于大米，说明预熟化后其口感与大米较为接近，能够达到与大米共煮同熟的目的。

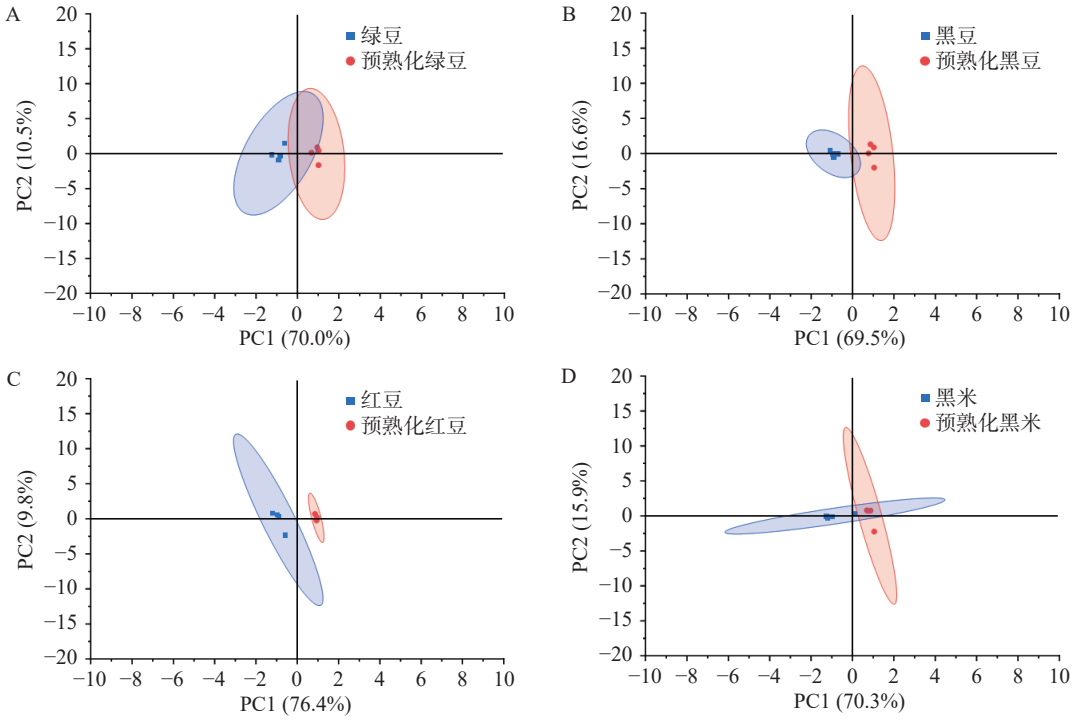


图 6 预熟化前后四种杂粮的电子鼻 PCA 图

Fig.6 PCA diagram of electronic nose for four coarse cereals before and after pre-ripening

表 5 预熟化前后四种杂粮的质构特性

Table 5 Texture characteristics of four coarse cereals before and after pre-ripening

样品	硬度(gf)	弹性	咀嚼性(gf)
大米	1088.36±84.62^{g}	0.93±0.04^{a}	189.81±11.75^{f}
绿豆	7138.15±253.55^{c}	0.40±0.02^{d}	2054.05±67.61^{bc}
预熟化绿豆	1568.34±69.89^{f}	0.59±0.02^{c}	268.30±16.55^{e}
黑豆	9377.49±179.60^{b}	0.34±0.02^{d}	2258.32±111.32^{b}
预熟化黑豆	2500.88±65.81^{e}	0.68±0.02^{b}	449.41±18.25^{de}
红豆	13430.42±349.75^{a}	0.24±0.03^{e}	5838.97±167.85^{a}
预熟化红豆	2940.11±118.87^{e}	0.74±0.01^{b}	578.00±22.92^{d}
黑米	5999.23±203.30^{d}	0.34±0.01^{d}	1906.69±97.72^{c}
预熟化黑米	1789.47±80.45^{f}	0.53±0.02^{c}	260.15±7.62^{e}

2.3.6 预熟化杂粮糊化特性 糊化特性是影响杂粮食用品质的重要指标。采用 RVA 对预熟化前后绿豆、黑豆、红豆和黑米的糊化特性进行测定，结果如表 6 所示。可以看出，与绿豆、红豆和黑米相比，黑豆的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度极低，这主要与黑豆中的低淀粉含量和高蛋白高脂肪有关。由表可知，除黑豆外，绿豆、红豆、黑米三种杂粮预熟化前后的糊化特性具有显著性差异(P<0.05)。预熟化后，绿豆、红豆和黑米的黏度值均显著降低(P<0.05)。这主要是由于绿豆、红豆和黑米中的部分淀粉颗粒在微波处理过程中已经糊化，故无法在 RVA 测试的升温阶段再次经历剧烈的吸水膨胀和破裂过程。衰减值为峰值黏度和谷值黏度的差值，能够反映样品的热稳定性[32]。回生值是最终黏度与谷值黏度的差值，回生值越高表示淀粉冷糊稳定性越差、越容易老化[33]。预熟化处理后，绿豆、红豆和黑米的衰减值和回生值均显著降低(P<0.05)，表明经微波处理后，绿豆、红豆和黑米三种杂粮的热稳定性增强，且淀粉不易老化。这一结果与 Cao 等[34] 利用微波处理藜麦淀粉的发现相一致。其原因可能是微波处理使淀粉分子发生部分解聚，或使直链淀粉-脂质复合物含量增加，从而抑制了淀粉链在冷却过程中的重新排列与结晶[35]。

表 6 预熟化前后四种杂粮的糊化特性

Table 6 Pasting properties of four coarse cereals before and after pre-ripening

样品	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	衰减值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)	糊化温度(℃)
绿豆	1517.67±13.20^{b}	1338.00±31.10^{a}	179.67±17.90^{c}	2308.33±4.73^{b}	970.33±29.54^{b}	80.13±0.45^{d}
预熟化绿豆	1101.33±18.01^{d}	1061.67±19.01^{b}	39.67±1.53^{d}	1553.33±23.59^{e}	491.67±4.73^{e}	82.28±0.03^{c}
黑豆	28.67±1.53^{g}	21.00±0.00^{e}	7.67±1.53^{f}	33.00±1.00^{g}	12.00±1.00^{g}	–
预熟化黑豆	25.33±0.58^{g}	22.00±1.00^{e}	3.33±0.58^{f}	33.00±1.00^{g}	11.00±0.00^{g}	–
红豆	835.67±13.32^{e}	799.67±11.37^{c}	36.00±2.00^{d}	1719.67±25.11^{d}	920.00±16.70^{c}	78.73±0.46^{e}
预熟化红豆	729.67±13.05^{f}	709.00±10.58^{d}	20.67±2.52^{e}	1065.00±14.18^{f}	356.00±3.61^{f}	93.63±0.03^{a}
黑米	2715.67±54.31^{a}	1310.67±39.21^{a}	1405.00±15.10^{a}	2680.67±54.15^{a}	1370.00±15.13^{a}	72.62±0.03^{f}
预熟化黑米	1400.00±22.61^{c}	1117.33±13.43^{b}	282.67±9.24^{b}	1985.00±18.52^{c}	867.67±7.37^{d}	89.67±0.06^{b}

注：“–”表示无糊化温度。

糊化温度反映了淀粉糊化的难易程度，糊化温度越高，淀粉糊化越困难。由表 6 可知，绿豆、红豆、黑米的糊化温度分别为 80.13、78.73、72.62 ℃，预熟化后，三种杂粮的糊化温度分别升高为 82.28、93.63、89.67 ℃。糊化温度的升高，可能是由于微波处理导致淀粉分子间相互作用增强，形成了更稳定的结构，因此需要更高的温度才能破坏这种结构并使其糊化[36]。黑豆在快速黏度分析仪测试中未检测到糊化温度，这可能是由于其高蛋白特性使蛋白质变性凝胶成为黏度主导因素，掩盖了淀粉糊化的典型信号。

2.4　共煮同熟杂粮复配米配方设计

2.4.1　杂粮复配比例的筛选　采用感官评分的方法探究预熟化黑米与大米的最佳复配比例，结果如图 7A 所示。随着预熟化黑米添加量的增加，混合米饭的感官评分呈先升高后下降的趋势。当预熟化黑米和大米的复配比例为 3∶7 时，混合米饭的感官评分最高，为 85.38。当预熟化黑米添加量较少时，由于大米量较大，混合米饭颜色较浅，口感较软、质地黏稠；当预熟化黑米添加量较多时，混合米饭颜色较深，口感较硬，质地较为松散[37]。在预熟化黑米、大米复配的基础上，添加预熟化绿豆、预熟化黑豆和预熟化红豆以丰富杂粮复配米饭的口感和风味，不同复配比例下杂粮复配米饭感官评价结果如图 7B 所示。可以看出，当预熟化绿豆、预熟化黑豆、预熟化红豆和混合米的比例为 15∶10∶5∶70，即预熟化绿豆、预熟化黑豆、预熟化红豆、预熟化黑米和大米的比例为 15∶10∶5∶21∶49 时，杂粮复配米饭具有最高的感官评分，为 88.43 分。预熟化红豆的复配比例低于预熟化绿豆、预熟化黑豆和预熟化黑米，这可能与红豆较低的糊化度和较长的熟化时间有关。因此最终确定共煮同熟杂粮复配米配方为：预熟化绿豆、预熟化黑豆、预熟化红豆、预熟化黑米和大米的比例为 15∶10∶5∶21∶49。

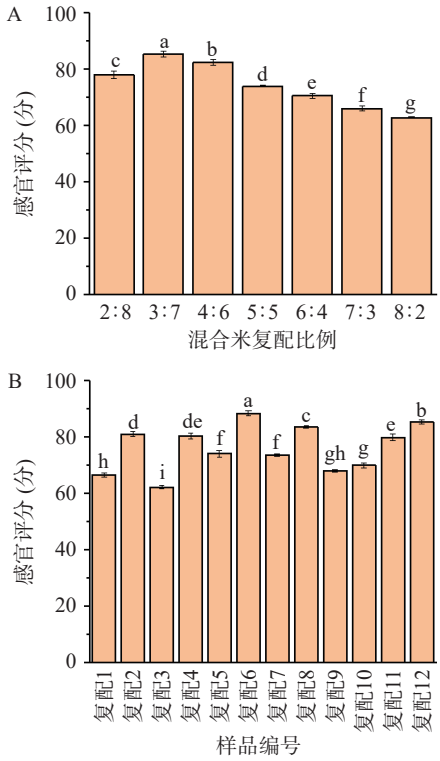


图 7　不同杂粮复配方案的感官评价

Fig.7　Sensory evaluation of different coarse cereals formulation schemes

注：A 为预熟化黑米和大米复配比例对混合米饭感官评分的影响；B 为预熟化绿豆、预熟化黑豆、预熟化红豆和混合米复配比例对共煮同熟杂粮复配米饭感官评分的影响，复配 1~12 分别为 5∶5∶5∶85、10∶10∶10∶70、15∶15∶15∶55、20∶5∶5∶70、15∶5∶10∶70、15∶10∶5∶70、10∶5∶15∶70、10∶15∶5∶70、5∶5∶20∶70、5∶10∶15∶70、5∶15∶10∶70、5∶20∶5∶70。

2.4.2　共煮同熟杂粮复配米体外消化特性　对共煮同熟杂粮复配米的消化特性进行测定，结果如图 8 和表 7 所示。由图 8 可知，所有样品的水解率均随消化时间的延长先大幅度升高，然后缓慢升高并最终趋于平缓。在相同的时间下，水解率从大到小依次为：大米>混合米>共煮同熟杂粮复配米，说明大米易消化，而共煮同熟杂粮复配米更不易消化。由表 7 可以看出，共煮同熟杂粮复配米、混合米和大米的 RDS、SDS 和 RS 含量存在显著差异（P<0.05）。混合米 RDS 含量显著低于大米，SDS 和 RS 含量显著高于大米，这可能是因为黑米的添加增加了混合米中的膳食纤维和 RS 含量，从而影响了其消化特性。复配后含有多种杂粮的共煮同熟杂粮复配米具有最高的 SDS 和 RS，说明添加杂粮减缓了淀粉消化的速度。大米、混合米和共煮同熟杂粮复配米的 eGI 值分别为 89.15、78.55 和 64.61。共煮同熟杂粮复配米的 eGI 值最低，属于中 GI（55<eGI≤70）食物，这表明添加多种杂粮后，共煮同熟杂粮复配米在消化过程中能更缓慢地释放葡萄糖，使血糖上升更为平缓，更适合需要控制血糖的人群食用。综上，相比于大米和

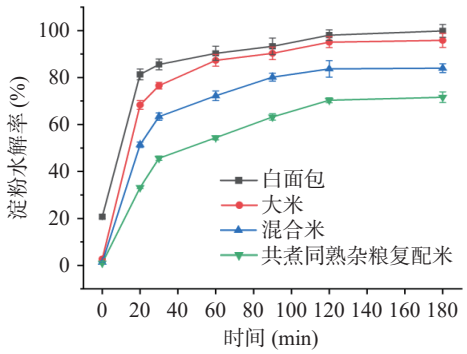


图 8　不同样品的水解曲线

Fig.8　Hydrolysis curves of different samples

表 7　共煮同熟杂粮复配米体外消化特性

Table 7　*In vitro* digestibility properties of mixed coarse cereals rice cooked to the same degree of doneness

样品	RDS含量(%)	SDS含量(%)	RS含量(%)	eGI值
大米	63.46±0.51^{a}	34.17±0.28^{c}	2.37±0.06^{c}	89.15±2.78^{a}
混合米	49.08±0.70^{b}	39.40±0.66^{b}	11.52±0.13^{b}	78.55±1.61^{b}
共煮同熟杂粮复配米	28.39±0.34^{c}	45.16±0.25^{a}	26.45±0.12^{a}	64.61±2.34^{c}

混合米，共煮同熟杂粮复配米在体外消化过程中表现出更优的特性。其较高的 SDS 和 RS 含量，以及较低的 eGI 值，共同体现了添加多种杂粮对淀粉消化速度的减缓作用。

3 结论

本研究采用微波预处理技术对绿豆、黑豆、红豆和黑米进行预熟化处理，研究了其对四种杂粮品质特性的影响，并确定了共煮同熟杂粮复配米的最佳比例。通过单因素实验确定了绿豆、黑豆、红豆和黑米的最佳浸泡时间分别为 3、3、8、2 h。以感官评分和糊化度为指标，得到绿豆、黑豆、红豆和黑米的最佳微波时间分别为 5、5、6、4 min。结果表明，微波预处理显著改善了杂粮品质。预熟化处理后的四种杂粮水分含量和脂肪含量降低，淀粉含量增加，蛋白质含量无明显变化；熟化时间缩短至 25~35 min，复水率、体积膨胀率和蒸煮损失率增加。经预熟化处理的绿豆、红豆和黑豆的 L^*值降低，a^*和 b^*值升高，黑米则相反。根据电子鼻结果发现，除绿豆外，预熟化后黑豆、红豆、黑米气味响应值明显增加。预熟化处理后，四种杂粮的硬度和咀嚼性降低，弹性升高，与蒸煮后的大米更加接近。除黑豆外，预熟化后，绿豆、红豆和黑米的黏度值、衰减值和回生值降低，糊化温度升高。共煮同熟杂粮复配米的最佳配比为：预熟化绿豆、预熟化黑豆、预熟化红豆、预熟化黑米和大米的比例为 15∶10∶5∶21∶49，其 SDS、RS 含量较高，eGI 值为 64.61，属于中 GI 食物，适合血糖控制人群。综上所述，本研究阐明了微波预处理改善多种杂粮品质特性的作用效果，所开发的共煮同熟杂粮复配米产品兼具食用便利性与营养健康价值，为杂粮主食化产品的开发提供了重要的理论依据与数据支撑。未来研究可进一步开展动物试验，以深入探究共煮同熟杂粮复配米在生物体内的消化吸收情况。

© 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] 王凯, 刘晶, 刘敬科, 等. 超微粉碎对杂粮理化性质的影响及应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 34−42. [WANG Kai, LIU Jing, LIU Jingke, et al. Research progress on the impact of superfine grinding on physicochemical properties and application of coarse cereals[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 34−42.]

[2] LE D T, KUMAR G, WILLIAMSON G, et al. (Poly)phenols and dietary fiber in beans: Metabolism and nutritional impact in the gastrointestinal tract[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110350.

[3] JIN Xiying, HE Caian, GUO Ziwei, et al. The hypoglycemic activity of buckwheat and the underlying mechanisms: A mechanistic review[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105046.

[4] CHAKRABORTY R, KALITA P, SEN S. Phenolic profile, antioxidant, antihyperlipidemic and cardiac risk preventive effect of pigmented black rice variety chakhao poireiton in high-fat high-sugar induced rats[J]. Rice Science, 2023, 30(6): 641−651.

[5] HUANG P H, CHIU C S, LU W C, et al. Study on activation energy and water adsorption behavior of adzuki beans under different soaking and cooking processing[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 101313.

[6] 张羽彤, 王岩, 孙虹迪, 等. 2 种杂粮预熟方法及其加工条件的研究[J]. 现代食品, 2024, 30(13): 107−110. [ZHANG Yutong, WANG Yan, SUN Hongdi, et al. Study on two kinds of prematuring methods and processing conditions of coarse grains[J]. Modern Food, 2024, 30(13): 107−110.]

[7] 倪萍, 沈群. 杂豆同熟米的工艺研究[J]. 中国食品学报, 2017, 17(8): 140−146. [NI Ping, SHEN Qun. Studies on the technology of same-cooked rice with beans[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(8): 140−146.]

[8] LEE Y C, HWANG C C, TSAI Y H, et al. Development and pasteurization of in-packaged ready-to-eat rice products prepared with novel microwave-assisted induction heating (MAIH) technology[J]. Applied Food Research, 2025, 5(1): 100697.

[9] 朱文静. 四季杂粮米饭伴侣开发及其品质研究[D]. 成都: 成都大学, 2023. [ZHU Wenjing. Study on the development and quality of four seasons multigrain rice companion[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.]

[10] 刘若海. 杂粮重组米血糖生成指数的调控及品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [LIU Ruohai. Study on glycemic index regulatory and quality of multigrain reconstituted rice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]

[11] de OLIVEIRA PAZ C H, COELHO S R M, SCHOENINGER V, et al. Processing in different solutions to obtain dried beans with reduced cooking time[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 90: 103491.

[12] ZHOU Lei, ZHENG Wei, SUI Yong, et al. Characterization of volatile organic compounds in selenium-enriched brown rice tea of different colors using E-nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. LWT, 2025, 224: 117830.

[13] 张楚佳, 贾健辉, 高嫚, 等. 3 种物理方法制备抗性粳米淀粉的结构与物化特性[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 193−207. [ZHANG Chujia, JIA Jianhui, GAO Man, et al. Structure and physical and chemical properties of resistant Japonica rice starch prepared by three physical methods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(1): 193−207.]

[14] ZHANG Chujia, JIA Jianhui, GAO Man, et al. Effect of different heat-moisture treatment times on the structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of Japonica starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129173.

[15] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33−S50.

[16] 郭晨. 杂豆预熟化处理工艺及其对消化性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [GUO Chen. The preripening treatment process of pulse and its effect on *in vitro* digestion performance[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2022.]

[17] ZHANG Xuanyi, LIN Xiaojun, XU Baojun. Morphological, physicochemical, and pasting properties of pre-gelatinized starch prepared by high-pressure homogenizer: A comparative study on starches from different resources[J]. Food Research International, 2024, 197: 115294.

[18] 郭晨, 田晓静, 杜月红, 等. 不同预熟化处理对绿豆营养成分及蒸煮特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(16): 27−34.

［GUO Chen, TIAN Xiaojing, DU Yuehong, et al. Effects of different pre-ripening treatments on nutrient composition and cooking characteristics of mung bean[J]. Food Research and Development, 2022, 43(16): 27−34.］

［19］ CHENG Fan, DING Ke, YIN Hanyue, et al. Influence of coarse particles on nutritional quality of flour ingredients: A comparison between cereals and pulses[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 142: 107407.

［20］ 李鹏. 黑豆吸水模型及预熟化过程结构变化的研究[D]. 无锡：江南大学, 2020.［LI Peng. Study on water absorption model and structural changes during precooking of black beans[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.］

［21］ HU Dongsheng, YANG Gaoji, TIAN Yingqi, et al. Effect of radio frequency heating on structure and physicochemical properties of protein and starch based on gelatinization degree of rice flour[J]. Food Research International, 2025, 218: 116902.

［22］ KAR A, GUHA S, SUBBIAH J, et al. Effect of radiofrequency processing on the structural and bio-functional properties of egg white proteins[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134533.

［23］ 孙军涛, 王德国, 周明明, 等. 速食杂粮预熟化工艺研究[J]. 许昌学院学报, 2024, 43(2): 75−78.［SUN Juntao, WANG Deguo, ZHOU Mingming, et al. Study on the pre-cooked technology of instant coarse cereals[J]. Journal of Xuchang University, 2024, 43(2): 75−78.］

［24］ 陈楚瑶. 酶与微波处理对红豆浸泡和预熟化特性的影响[D]. 南京：南京农业大学, 2022.［CHEN Chuyao. Effects of enzyme and microwave pretreatment on soaking and pre-cooking characteristics of adzuki beans[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.］

［25］ ZHANG Peilin, LI Bin, HU Zhigang, et al. Effects of ultrasonic and microwave treatment on color, quality and drying characteristics of rice[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 116: 103856.

［26］ DEVI L M, BADWAIK L S. Variety difference in physicochemical, cooking, textural, pasting and phytochemical properties of pigmented rice[J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100059.

［27］ LEE Y C, HWANG C C, HUANG Y T. Application of novel microwave-assisted induction heating technology for extending the shelf life of ready-to-eat rice through microbial, physical, and chemical quality preservation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 93: 103640.

［28］ VERMA D K, SRIVASTAV P P. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: A comprehensive review[J]. Food Research International, 2020, 130: 108924.

［29］ YI Cuiping, LI Yisi, ZHU Hong, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the volatile flavors of mung beans[J]. LWT, 2021, 146: 111434.

［30］ ZHONG Yejun, HE Fangqing, WANG Meng, et al. Effects of stabilization combined with fermentation treatments on the volatile composition and flavor profile of cooked black rice[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103377.

［31］ YAN Feng, TONG Shisheng, BAI Song, et al. Mechanistic study of heat-shock regulation of endogenous protease activity in paddy rice to improve the taste quality of parboiled rice[J]. Food Research International, 2025, 217: 116796.

［32］ 宋永, 贾璐泽, 张一婷, 等. 金冠豆角籽粒淀粉组成及性质研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 59−67.［SONG Yong, JIA Luze, ZHANG Yiting, et al. Composition and properties of starch from golden crown bean[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 59−67.］

［33］ LI Wenxiu, XIE Anning, LI Xiaoxiao, et al. Effects of large-ring cyclodextrin produced by 4-α-glucosyltransferase on gelatinization and retrogradation behavior of starches[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 154: 110090.

［34］ CAO Hongwei, SUN Rulian, LIU Yu, et al. Appropriate microwave improved the texture properties of quinoa due to starch gelatinization from the destructed cyptomere structure[J]. Food Chemistry, 2022, 14: 100347.

［35］ SUN X X, SALEH A S M, SUN Z Z, et al. Modification of multi-scale structure, physicochemical properties, and digestibility of rice starch via microwave and cold plasma treatments[J]. LWT, 2022, 153: 112483.

［36］ 尹婧, 康丽君, 寇芳, 等. 微波湿热处理对薏苡仁淀粉性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(7): 60−66,73.［YIN Jing, KANG Lijun, KOU Fang, et al. Effects of heat-moisture combined with microwave treatment on properties of *Coix* seed starches[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(7): 60−66,73.］

［37］ 封亚星, 王少锋, 李永新, 等. 响应面法优化方便杂粮饭工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 272−279.［FENG Yaxing, WANG Shaofeng, LI Yongxin, et al. Research on optimizing the process of convenient mixed grain rice by response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 272−279.］