

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250318002

引用格式: 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 YX, WANG SF, LI YX, *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. (in Chinese with English abstract).

响应面法优化方便杂粮饭工艺研究

封亚星*, 王少锋, 李永新, 边丽贤, 阴俊

(石家庄市惠康食品有限公司, 石家庄 050800)

摘要: 目的 通过响应面法来优化方便杂粮饭工艺。**方法** 以紫米、黑米、燕麦米、红米为主要原料, 通过杂粮吸水率和糊化度确定预糊化工艺, 通过单因素和响应面法试验, 以感官评价为指标, 优化方便杂粮饭制作工艺。**结果** 杂粮预熟化工艺为 23 °C 浸泡 120 min, 蒸煮 20 min; 方便杂粮饭的适宜工艺参数为杂粮米添加量 27%, 蒸煮时间 54 min, 米水比 1:1.3, 此时制得一款风味、组织状态、口感和色泽较优的方便杂粮饭。

结论 本研究开发出一款便捷、口感丰富的方便杂粮饭, 为预熟化处理在杂粮饭加工过程中提供一定理论基础, 对杂粮食品的工业化发展起到一定的促进作用。

关键词: 方便杂粮饭; 预糊化; 响应面法

Research on optimizing the process of convenient mixed grain rice by response surface methodology

FENG Ya-Xing*, WANG Shao-Feng, LI Yong-Xin, BIAN Li-Xian, YIN Jun

(Shijiazhuang Huikang Food Co., Ltd., Shijiazhuang 050800, China)

ABSTRACT: Objective To study the optimization of convenient mixed grain rice process through response surface methodology. **Methods** Using purple rice, black rice, oatmeal rice and red rice as the main raw materials, the pregelatinization process was determined by the water absorption and pasting degree of the miscellaneous grains. To optimize the production process of convenient omnivorous rice through single-factor and response surface tests using sensory evaluation as an index. **Results** The result showed that the pregelatinization process of mixed grains was soaking at 23 °C for 120 min and steaming for 20 min; the suitable parameters of the process for the convenient mixed grain rice were 27% of mixed grain rice addition, 54 min of cooking time, and 1:1.30 of rice-water ratio. This time, it was possible to produce a convenient mixed grain rice with superior flavor, tissue state, texture and color. **Conclusion** In this study, a convenient and flavorful rice of convenient mixed grains was developed. This provides a certain theoretical basis for pre-cooking treatment in the processing of mixed grain rice and promotes the industrialization of mixed grain food.

KEY WORDS: convenient mixed grain rice; pregelatinization; response surface methodology

0 引言

随着现代化进程的发展,人们对食品的营养性与健康性都提出了要求,具有营养性的快捷方便米饭受到了消费者的青睐。方便米饭是指经过工业化生产后,消费者只需经过简单的复热或直接食用的速食产品^[1]。对于日常主食的选择,多数人群会选择加工精细的白面、大米,然而单一的主食结构不利于人体的健康^[2]。近年来,我国一些慢性病发病率提高,如糖尿病、心血管疾病、肥胖、结肠癌等,这些疾病的产生可能是由于消费者常吃过于精细的粮食^[3]。《中国居民膳食指南》提倡要平衡膳食来促进人体健康,强调饮食结构要以谷类为主,蔬菜、奶、畜禽等制品为辅,同时注意粗细搭配,多吃粗粮、杂粮和全谷类食品^[4]。杂粮中含有大量的膳食纤维,其能够有效预防心血管疾病、提高人体免疫等,对人体健康有着十分重要的作用^[3]。

我国是农业大国,有着丰富的杂粮资源^[5],据统计,我国 2022 年杂粮的总产量约 68653 万 t^[3]。杂粮具有较好的营养价值,能够发挥食疗食补功效,在现代人类饮食结构中起到重要的作用^[6-7]。杂粮因其口味独特、饱腹感强、营养物质丰富等受到人们的日益关注,其中,紫米、黑米、燕麦米、红米深受消费者喜爱。紫米富含蛋白质、矿物质和花色苷等营养物质,具有一定的保健功效,能够抗糖尿病、抗炎、抗肥胖等,被认为具有较大的商品和经济价值^[8];黑米富含淀粉、蛋白质和矿物质等营养成分,其麸皮中含有较多的花色苷,能够有效控制高血脂、高血压等疾病^[9];燕麦富含蛋白质、膳食纤维等营养成分,其能够较好控制糖尿病等慢性疾病,此外丰富的膳食纤维能够使消费者快速产生饱腹感,能够改善肠道环境、预防肥胖等^[10-11];红米富含蛋白质、矿物质及丰富的 B 族维生素,含有较多的黄酮类、花青素等生物活性物质,具有较好的控制血糖、抗氧化能力^[12]。

将杂粮米与大米复配蒸煮是近年来兴起的新型健康营养主食^[13],能够补充大米缺少的赖氨酸,增加米饭营养、使其口感更饱满,色泽更丰富鲜明^[14]。然而杂粮的质地较硬,在与白米共同蒸煮过程中,需提前花费较长时间浸泡杂粮,这给杂粮饭的生产带来了诸多不便^[15],因此对杂粮进行预熟化处理,实现与大米同煮共熟,能够提高杂粮饭生产制作的方便性,此外预熟化处理还能够保留杂粮外观品质,组织状态与营养成分^[16]。本研究以杂粮和粳米为原料,对杂粮的预熟化进行测试,确定杂粮预熟化工艺,分析方便杂粮饭的工业化生产配方及工艺、确定杂粮饭的适宜工艺参数,为开发健康的方便主食工业化生产提供一定的理论基础,对开发功能性预制食品具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

稻花香 2 号、紫米、黑米、燕麦米、红米(建平县朱碌科镇丰源杂粮加工厂)。

氢氧化钾、碘、碘化钾、盐酸(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);平板计数琼脂培养基(北京索莱宝科技有限公司)。

1.2 试验与设备

AR423CN 电子天平[精度 0.01 g, 奥豪斯仪器(上海)有限公司];HDJDG-28C 电蒸箱(山东惠当家电器有限公司);DT-100A 电热鼓风干燥箱(重庆银河试验仪器有限公司);SPX 型智能生化培养箱(宁波东南仪器有限公司);DGL-35G 高压灭菌锅(湖南立辰仪器科技有限公司);SW-CJ-2D 超净工作台(苏州净化仪器公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 杂粮饭工艺流程

杂粮淘洗→预糊化→干燥→杂粮、大米混合→蒸煮→成品预冷→装盒→急速冷冻。

1.3.2 杂粮预糊化处理

(1) 浸泡条件

参照朱益清等^[6]的试验方法并做修改。各称取 100 g 紫米、黑米、燕麦米和红米于器皿中,清洗 2 次后向器皿中各加入 300 mL 蒸馏水,23 °C 浸泡 30、60、90、120、150 min。

(2) 蒸煮条件

将浸泡后的杂粮米置于电蒸箱中,100 °C 汽蒸 5、10、15、20、25 min。将蒸煮后的样品于 55 °C 电热鼓风干燥箱中烘干 6 h,装袋备用。

(3) 杂粮饭蒸煮方法

将 20 g 干燥后的杂粮米与 80 g 白米按照 1:1.3 (g:mL,下同)米水比在电蒸箱中 100 °C 蒸煮 60 min,将制得的预熟化杂粮饭进行感官分析。

1.3.3 方便杂粮饭制备

将干燥后的杂粮与大米按照一定比例混合,加入一定质量的蒸馏水,将杂粮与大米充分离散,平铺于托盘中,米粒厚度约 1 cm,放入电蒸箱中,100 °C 汽蒸一段时间。将制得的方便杂粮饭预冷后装盒,于-35 °C 急速冷冻储存。

1.3.4 杂粮饭单因素试验

准确称取 100 g 混合杂粮米,加入蒸馏水,利用电蒸箱 100 °C 加热一定时间,通过感官评价,分别考察杂粮米添加量(10%、15%、20%、25%、30%)、米水比(1:1.0、1:1.3、1:1.6、1:1.9、1:2.2)和蒸煮时间(20、30、40、50、60 min)对杂粮饭的影响。

1.3.5 杂粮饭响应面试验

在单因素试验的基础上,以杂粮饭感官评分为响应值,根据 Box-Behnken 试验设计原理,对杂粮米添加量、蒸煮时间和米水比采用 3 因素 3 水平通过响应面法对杂粮饭生产工艺进行优化,响应面试验设计见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken experimental design

水平	A(杂粮米添加量)/%	B(蒸煮时间)/min	C(米水比)
-1	20	40	1:1.0
0	25	50	1:1.3
1	30	60	1:1.6

1.3.6 试验检测指标

(1)吸水率测定

参照倪萍等^[17]的方法, 每组取 3 份 10 g 紫米、黑米、燕麦米、红米置于容器中, 加入 20 mL 蒸馏水各浸泡 30、60、90、120、150 min, 每次取 1 份杂粮, 测定不同时长杂粮吸水后的质量 m_1 。吸水率按公式(1)计算。

$$\text{吸水率}/\% = \frac{m_1 - 10}{10} \times 100\% \quad (1)$$

(2)糊化度测定

参照朱文静^[4]的方法, 将预糊化后的杂粮饭干燥磨粉后, 取 0.1 g 样品加入蒸馏水 49 mL, 加入 10 mol/L 氢氧化钾溶液 1 mL, 搅匀后, 4000 r/min 离心 10 min, 取上清液 0.2 mL, 向其中加入 0.2 mol/L 盐酸溶液 0.2 mL, 加入蒸馏水 15 mL, 最后加入 0.2 mL 碘溶液, 用紫外分光光度计测定吸光度 A_1 , 波长为 600 nm。另取 0.1 g 样品加入蒸馏水 47.5 mL, 加入 10 mol/L 氢氧化钾溶液 2.5 mL, 搅匀后, 4000 r/min 离心 10 min, 取上清液 0.2 mL, 加入 0.5 mol/L 盐酸溶液 0.2 mL, 加入蒸馏水 15 mL, 加入 0.2 mL 碘溶液, 用紫外分光光度计测定吸光度 A_2 。糊化度按公式(2)计算。

$$\text{糊化度}/\% = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (2)$$

(3)感官评价分析

将冷冻储存的方便杂粮饭用微波炉复热 8 min 至全熟, 选择 10 位(5 男 5 女)有食品专业背景的专业人员组成评分小组, 根据 GB/T 15682—2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》的规定分别对预熟化杂粮饭及方便杂粮饭的各项指标进行评价, 评价标准见表 2 和表 3。

1.3.7 微生物指标测定

分别参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》、GB 4789.3—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》、GB 4789.10—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 金黄色葡萄球菌检验》对方便杂粮饭的微生物指标进行测定。

1.4 数据处理

所有数据的整理使用软件 Excel 2010, 统计学分析使用软件 SPSS 26.0, 显著性分析采用 Duncan's 多重比较, 图像处理使用软件 OriginPro 2021。

表 2 预熟化杂粮饭感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for pre-cooked mixed grain rice

指标	评分明细	分值 /分
风味 (30分)	风味香气协调浓郁, 无异味	25~30
	有特有风味香气, 无异味	15~24
	特有风味香气不明显, 有异味	0~14
组织状态 (30分)	颗粒饱满完整, 基本无碎粒, 米粒结构紧密完整	25~30
	颗粒较干或出现爆花, 有少量碎粒, 米粒大部分结构紧密完整	15~24
口感 (20分)	颗粒干瘪或出现爆花, 有大量碎粒, 整体形态不均匀	0~14
	口感软弹适中, 基本全部与大米同熟	15~20
	口感较硬或较软, 大部分与大米同熟	8~14
色泽 (20分)	口感过硬或过软, 口感夹生	0~7
	色泽均一, 正常光泽	15~20
	色泽一般, 表面颜色较暗	8~14
	色泽差, 表面颜色过暗	0~7

表 3 方便杂粮饭感官评价标准

Table 3 Sensory evaluation criteria for instant omnivorous rice

指标	评分明细	分值 /分
风味 (30分)	风味香气协调浓郁, 特有风味、甜感明显	25~30
	特有风味香气, 甜感较浓或较淡	15~24
	特有风味香气, 甜感过浓或过淡	0~14
组织状态 (30分)	颗粒饱满完整, 基本无碎粒, 米粒结构紧密完整	25~30
	颗粒较干或出现爆花, 有少量碎粒, 米粒大部分结构紧密完整	15~24
口感 (20分)	颗粒干瘪或出现爆花, 有大量碎粒, 整体形态不均匀	0~14
	口感软弹适中, 有黏性, 不黏牙	15~20
	口感较硬或较软, 黏性较低或较高	8~14
色泽 (20分)	口感过硬或过软, 黏性过低或过高	0~7
	色泽良好, 表面颜色深浅适中, 表面具有明显光泽	15~20
	色泽一般, 表面颜色较深或较淡, 表面光泽不明显	8~14
	色泽差, 表面颜色过深或过淡, 表面无光泽	0~7

2 结果与分析

2.1 浸泡时间对杂粮吸水率的影响

如图 1 为不同杂粮米在浸泡不同时长后的吸水率, 随着浸泡时间的增长杂粮米的吸水率增加, 这是由于经过浸泡后的杂粮, 水分分布更加均匀, 水分渗透杂粮细胞, 促进淀粉与水结合, 从而促进杂粮中淀粉的糊化^[18-19], 这能够实现后期杂粮与大米共煮同熟; 此外, 浸泡时长过长将

会带来一定的不良影响, 如米中的钙, 铁等营养物质会发生损失^[20], 也可能影响米的风味物质^[21]。由图 1 可知, 紫米、燕麦米、黑米和红米在浸泡 120 min 后吸水率基本不变, 此时杂粮浸泡吸水达到饱和值, 为保证杂粮在蒸煮前能够充分吸水, 节省后期杂粮烹饪时间, 保持杂粮中的营养物质, 故选取吸水率基本不变时的时间 120 min 作为杂粮浸泡预处理时间。

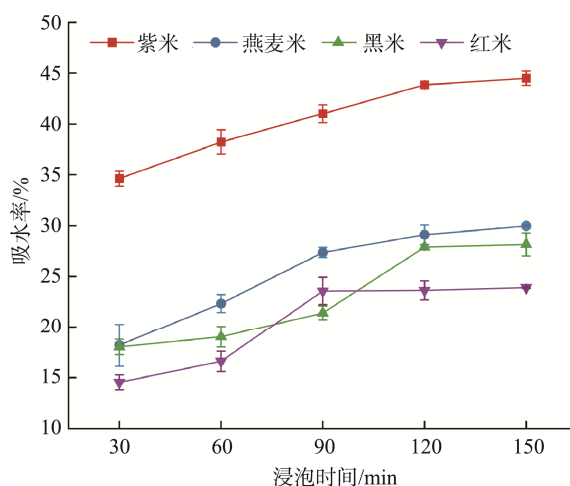


图 1 不同浸泡时间对杂粮吸水率的影响
Fig.1 Effects of different soaking times on water absorption of mixed grains

2.2 蒸煮时间对杂粮糊化度和感官评分的影响

由图 2 可知, 紫米、燕麦米、黑米和红米的糊化度随蒸煮时间的延长而增加, 这是由于在蒸煮过程中, 米中的淀粉颗粒吸水膨胀, 其内部晶体结构被破坏, 分子排列变为无序状态, 易被淀粉酶分解, 从而加速糊化进程^[16,22]。4 种杂粮米感官评分随着汽蒸时间的增加呈先上升后下降的趋势, 紫米在汽蒸 15 min 时感官评分最高, 而燕麦米、黑

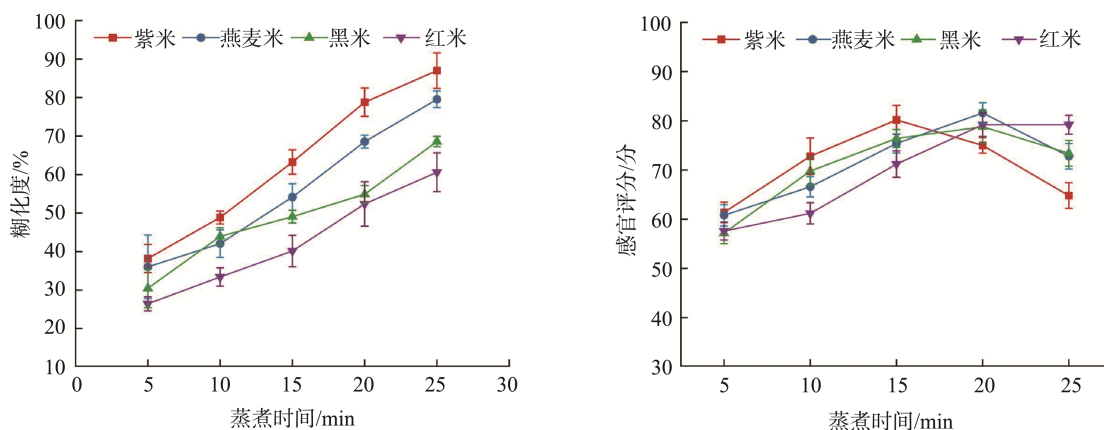


图 2 不同蒸煮时间对杂粮糊化度和感官评分的影响
Fig.2 Effects of different cooking times on the pasteurization and sensory scores of mixed grains

米和红米在 20 min 时感官评分最高。当汽蒸时间较短时, 杂粮米无法与大米实现同煮共熟; 然而当时间超过 20 min 时, 紫米、黑米会吸收过多的水分变得泡软黏稠, 这可能是由于随着汽蒸时间的延长, 杂粮米出现糊化过度的现象, 部分淀粉降解为可溶性碳水化合物, 使杂粮口感变差^[23-25]。结合生产的实际需要, 为节省时间与资源, 故 4 种杂粮米预处理汽蒸时间为 20 min。

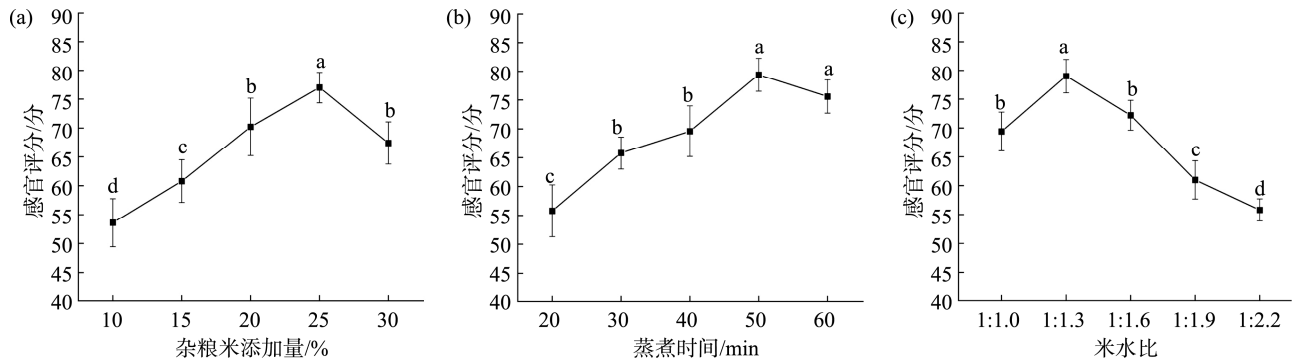
2.3 单因素试验分析

2.3.1 杂粮米添加量对方便杂粮饭质量的影响

图 3(a)为杂粮米添加量对杂粮饭感官评分的影响, 随着杂粮米的添加感官评分呈先上升后下降的趋势, 当杂粮米添加量为 25% 时, 感官评分最高。当杂粮米添加量较少时, 由于白米量较大, 杂粮饭颜色较浅, 口感较软、质地黏稠; 当杂粮米添加量较多时, 杂粮饭颜色较深, 口感过硬, 质地较为松散。许晓兰等^[26]研究发现当杂粮米饭配比为粳米:燕麦:高粱:黑米:薏仁:荞麦=12:1:2:2:1:2 时, 能够制得颜色柔和均一的杂粮米饭, 与本研究结果趋势一致。故选取杂粮米添加量 20%、25%、30% 作为响应面试验的 3 个水平。

2.3.2 蒸煮时间对方便杂粮饭质量的影响

图 3(b)为杂粮饭蒸煮时间对感官评分的影响, 感官评分随蒸煮时间的延长呈先上升后下降的趋势, 当蒸煮时间为 50 min 时, 感官评分最高。当蒸煮时间较短时, 杂粮与大米吸水不充分, 米中淀粉糊化不均匀, 因此会出现杂粮米心较硬、夹生的情况, 杂粮饭口感较硬; 随着蒸煮时间的逐渐延长, 杂粮米吸收过量水分, 这会导致米的过度糊化, 出现爆花、破碎现象, 杂粮饭口感过软、黏稠, 咀嚼性差^[23]。马莉莎等^[27]研究发现当对米饭进行二次蒸煮 50 min 时, 即食米饭的口感较好, 软硬度适中, 不易老化, 与本研究结果趋势一致。故选取蒸煮时间 40、50、60 min 作为响应面试验的 3 个水平。



注: 不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

图 3 各因素对感官评分的影响

Fig.3 Effects of factors on sensory scores

2.3.3 米水质量比对方便杂粮饭质量的影响

图 3(c)为米水质量比对方便杂粮饭感官评分的影响,随着水添加量的增加,杂粮饭感官评分呈先上升后下降的趋势,米水质量比为 1:1.3 时,杂粮饭感官评分最高。当水量较少时,杂粮饭硬度较高且饭粒松散;随着水添加量的增加,杂粮饭硬度逐渐降低,米粒间黏性开始增强,然而水量过多将会使杂粮饭的口感过软,米粒由于过度吸水使得结构溶胀破裂,口感软烂,嚼劲不足。这可能是由于当杂粮与大米吸水不足时,米粒外层受热强于内层,从而使米的内层淀粉不能完全糊化^[28];随着过量水的添加,米饭糊化程度过高,米饭结构破坏程度强,使杂粮饭破裂严重^[29]。沙文轩等^[30]研究发现当米水比为 1:1.3~1:1.5 时,米饭的食味品质相对较高,与本研究结果趋势一致。故选取米水质量比 1:1.0、1:1.3、1:1.6 作为响应面试验的 3 个水平。

2.4 响应面优化结果分析

2.4.1 响应面回归模型与结果

根据单因素试验结果,选取杂粮米添加量、蒸煮时间和米水质量比 3 个因素作为自变量,响应面法实验设计及其对杂粮饭品质影响的结果见表 4。通过对表 4 进行多元回归拟合分析,得出杂粮饭感官评分与 3 因素变量之间的二次回归方程为 $Y=81.14+4.31A+4.00B+1.86C+0.80AB-3.52AC-0.05BC-6.61A^2-6.83B^2-6.76C^2$ 。

表 5 为该模型的方差分析与显著性检验,表 6 为模型的可信度分析结果。该试验模型值 $P<0.0001$,属于极显著范围,失拟项 $P=0.2862$,属于不显著范围,决定系数 $R^2=0.9864$,修正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9689$,信噪比为 21.446,一次项杂粮米添加量(A)、蒸煮时间(B)、米水比(C)对结果影响极显著($P<0.01$)^[31],交互项 AC 对结果影响极显著($P<0.01$),二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对结果影响极显著($P<0.01$)。通过 F 大小,获得各因素对杂粮饭感官评分的影响程度由大到小顺序为杂粮米添加量(A)>蒸煮时间(B)>米水比(C)。

表 4 响应面试验方案及结果

Table 4 Test scheme and results of response surface

试验号	A(杂粮米添加量)/%	B(蒸煮时间)/min	C(米水比)	感官评分/分
1	20	40	1:1.3	61.2
2	30	40	1:1.3	68.1
3	20	60	1:1.3	65.7
4	30	60	1:1.3	75.8
5	20	50	1:1.0	58.3
6	30	50	1:1.0	74.1
7	20	50	1:1.6	68.5
8	30	50	1:1.6	70.2
9	25	40	1:1.0	60.4
10	25	60	1:1.0	70.4
11	25	40	1:1.6	64.8
12	25	60	1:1.6	74.6
13	25	50	1:1.3	82.4
14	25	50	1:1.3	81.5
15	25	50	1:1.3	79.5
16	25	50	1:1.3	80.3
17	25	50	1:1.3	82.0

表 5 方差分析和显著性检验

Table 5 Analysis of variance and significance test

来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	996.81	9	110.76	56.33	<0.0001	**
A(杂粮米添加量)	148.78	1	148.78	75.66	<0.0001	**
B(蒸煮时间)	128.00	1	128.00	65.09	<0.0001	**
C(米水比)	27.75	1	27.75	14.11	0.0071	**
AB	2.56	1	2.56	1.30	0.2914	
AC	49.70	1	49.70	25.28	0.0015	**
BC	0.010	1	0.010	5.09×10^{-3}	0.9451	
A^2	183.83	1	183.83	93.49	<0.0001	**
B^2	196.56	1	196.56	99.96	<0.0001	**
C^2	192.27	1	192.27	97.78	<0.0001	**
残差	13.76	7	1.97			
失拟项	7.91	3	2.64	1.80	0.2862	不显著
纯误差	5.85	4	1.46			
总和	1010.58	16				

注: **表示影响极显著($P<0.01$)。

表 6 回归模型的可信度分析
Table 6 Reliability analysis of regression model

项目	标准差	变异系数	R^2	R^2_{Adj}	信噪比
数值	1.40	1.96	0.9864	0.9689	21.446

2.4.2 响应面交互作用分析

根据回归方程利用 Design Expert 8.0.6 软件绘制各因素对杂粮饭感官评分的响应面分析图及等高线图。响应面图能够反映各因素的最佳水平范围, 坡面越陡可反应该因

素的改变对响应值的影响越大, 坡面越缓影响越小^[32]; 等高线图能够反映交互作用的强弱, 当等高线图呈椭圆形表示两因素交互作用显著, 而圆形表示交互作用不显著。如图 4 所示, 随着杂粮米添加量(A)、蒸煮时间(B)、米水比(C)的增加, 感官评分均呈先上升后下降的趋势, 这与单因素结果保持一致; 此外 AC 组间的等高线图呈椭圆形, 表示杂粮米添加量与米水比的交互作用极显著($P < 0.01$), 这与方差分析结果一致。

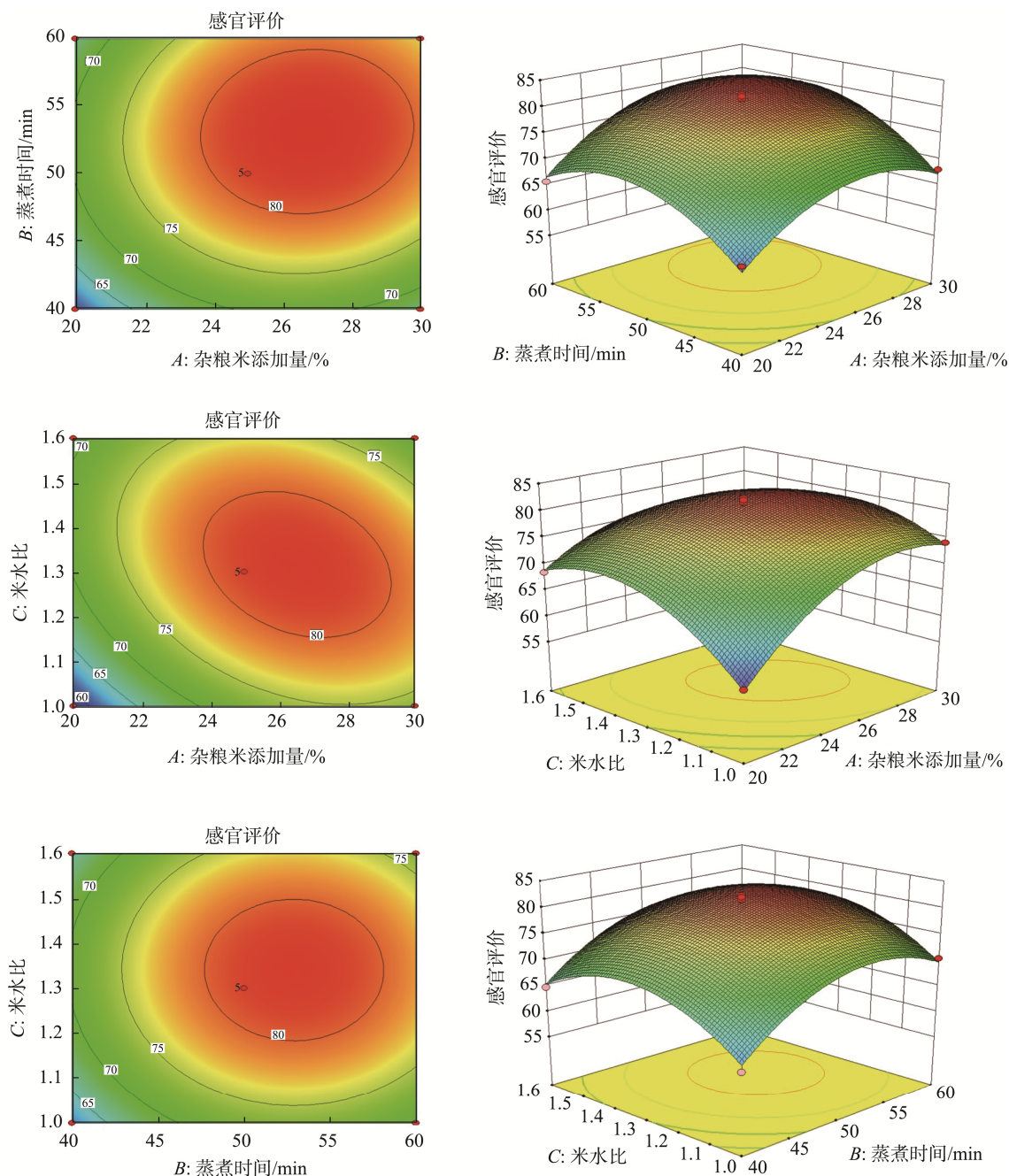


图 4 不同因素交互作用对方便杂粮饭感官评分影响的曲面图和等高线图
Fig.4 Surface and contour plots of the effects of different factor interactions on the sensory scores of convenient mixed grain rice

2.4.3 适宜工艺条件试验验证结果

经过 Design Expert 8.0.6 分析, 获得适宜制备方便杂粮饭的工艺参数为杂粮米添加量 27%, 蒸煮时间 53.84 min, 米水比 1:1.29, 此参数下杂粮饭感官评分预测值为 82.43 分。考虑到实际操作的方便性, 适宜工艺参数选择杂粮米添加量 27%, 蒸煮时间 54 min, 米水比 1:1.3, 在此条件下进行验证试验, 最终结果为(81.33±2.05)分, 与模型预测值差异较小, 表明该工艺参数可以用于方便杂粮饭的生产。

2.5 产品质量指标

杂粮饭的微生物指标检验参照 GB 19295—2021《食品安全国家标准 速冻面米与调制食品》进行, 优化后杂粮饭产品质量指标结果如表 7 所示。检测发现杂粮饭的微生物检测结果符合国家标准, 所制得的杂粮饭产品微生物安全性可靠。

表 7 杂粮饭的微生物指标(CFU/g)

Table 7 Microbiological indicators of mixed grain rice (CFU/g)

项目	数量	GB 19295—2021
菌落总数	55	≤10000
大肠杆菌	7	≤10
金黄色葡萄球菌	未检出	不得检出
沙门氏菌	未检出	不得检出

3 结 论

本研究以紫米、黑米、燕麦米和红米 4 种杂粮为原料, 经过浸泡、汽蒸预处理后, 能够与大米同熟, 通过杂粮米的吸水率、糊化度和感官评分的分析得出杂粮米经 23 °C 浸泡 120 min, 汽蒸 20 min, 在此条件下杂粮米能够较好地实现与大米同煮共熟。在单因素基础上, 通过 Box-Behnken 响应面分析法确定方便杂粮饭的适宜工艺配方: 杂粮米添加量 27%, 蒸煮时间 54 min, 米水比 1:1.3, 在此工艺参数下方便杂粮饭感官评分较高。本研究能够建立较为完善的方便杂粮米加工流程, 制得外观形态及口感良好、籽粒完整、营养丰富、适合不同大众需求的方便杂粮饭。

参考文献

- 汪长钢, 句荣辉, 马长路, 等. 不同蒸煮方式对方便米饭品质影响研究[J]. 食品工业, 2015, 36(2): 118–121.
WANG CG, JU RH, MA CL, *et al.* Different cooking methods affect the quality of instant rice [J]. The Food Industry, 2015, 36(2): 118–121.
- FU J, ZHANG Y, HU YC, *et al.* Concise review: Coarse cereals exert multiple beneficial effects on human health [J]. Food Chemistry, 2020, 325(4): 126761.
- 郝斯佳, 刘贺. 即食杂粮饭的优势及加工前景[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 101–115.

HAO SJ, LIU H. The advantages and processing prospects of instant coarse cereals foods [J]. Journal of Bohai University Philosophy and Social Science Edition, 2024, 45(2): 101–115.

- 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 WJ. Study on the development and quality of four seasons multigrain rice companion [D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.
- 张媛, 苏静雯, 张克, 等. 杂粮预糊化处理及营养品质特性[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 336–339.
ZHANG Y, SU JW, ZHANG K, *et al.* The coarse cereals' pretreatment and nutritional quality characteristics [J]. The Food Industry, 2020, 41(7): 336–339.
- 朱益清, 倪萍, 赵卿宇, 等. 预糊化处理对杂粮米饭食用品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 114–124.
ZHU YQ, NI P, ZHAO QY, *et al.* Effect of pre-gelatinization treatment on the eating quality of multigrain rice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 114–124.
- ZHAO JK, GUO WJ, WANG JP, *et al.* Exploring the association of dietary patterns with the risk of hypertension using principal balances analysis and principal component analysis [J]. Public Health Nutrition, 2023, 26(1): 160–170.
- 郑瑞龙. 紫米酒的开发与工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
ZHENG RL. Development and production technology of purple rice wine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- 吴艺婕. 不同蒸煮条件对黑米饭品质及低 GI 特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
WU YJ. Effects of different cooking conditions on the quality and low GI characteristics of black rice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- PRASADI VPN, JOYE IJ. Dietary fibre from whole grains and their benefits on metabolic health [J]. Nutrients, 2020, 12(10).
- WONG C, HARRIS PJ, FERGUSON LR. Potential benefits of dietary fibre intervention in inflammatory bowel disease [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(6).
- 王洪国. 杂粮与大米同熟工艺及产品研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
WANG HG. Study on the co-cooking technology and products of coarse cereals and rice [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.
- KIM MJ, LEE KH, KO JY, *et al.* Effect of cooking methods on cooked and antioxidant characteristics of cooked mixed grain rice with added proso millet [J]. The Korean Journal of Food and Nutrition, 2017, 30(2): 218–225.
- 刘晓松, 付亭亭, 姚佳, 等. 4 种杂粮预熟化工艺及其复配产品的研究[J]. 食品科技, 2019, 44(2): 170–177.
LIU XS, FU TT, YAO J, *et al.* Research of compound product and the precook process of four coarse cereals [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(2): 170–177.
- 刘佳男, 于雷, 李帅斐, 等. 薏仁与大米共煮同熟工艺的研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(4): 62–67.
LIU JN, YU L, LI SF, *et al.* Optimization of the process of cooking coix seed to reach same maturity when cooked with rice [J]. Cereals & Oils, 2016, 29(4): 62–67.

- [16] 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 YT, WANG Y, SUN HD, *et al.* Study on two kinds of prematuring methods and processing conditions of coarse grains [J]. Modern Food, 2024, 30(13): 107–110.
- [17] 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 P, SHEN Q. 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.
- [18] 赵康程, 谭斌, 李森, 等. 蒸谷处理对糙米和白米食用品质、糊化性质和体外消化性质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2024, 50(3): 443–454.
ZHAO KC, TAN B, LI S, *et al.* Effects of parboiling treatment on the edible qualities, gelatinization properties and *in vitro* digestive properties of brown rice and white rice [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2024, 50(3): 443–454.
- [19] 张晓绘. 即食米饭的加工和贮藏特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
ZHANG XH. Study on the processing and storage characteristics of instant rice [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [20] LIANG JF, HAN BZ, NOUT MJR, *et al.* Effect of soaking and phytase treatment on phytic acid, calcium, iron and zinc in rice fractions [J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 789–794.
- [21] CHAMPAGNE ET, BETT-GARBER KL, THOMSON JL, *et al.* Impact of presoaking on flavor of cooked rice [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(5): 706–710.
- [22] 张子涵. 富硒蒸谷米加工工艺及品质变化研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
ZHANG ZH. The processing technology and quality changes of Selenium-enriched parboiled rice [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2024.
- [23] 朱旭浩. 米饭的质构特性与其适口性评价及影响因素研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
ZHU XH. Study on the texture characteristics of rice and its palatability evaluation and influencing factors [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [24] 朱转, 侯磊, 陈燕卉, 等. 浸泡和超高压处理对米饭食用品质的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(10): 86–91.
ZHU Z, HOU L, CHEN YH, *et al.* Effects of soaking and ultrahigh-pressure pretreatment on edible quality of cooked rice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(10): 86–91.
- [25] WONGSA J, UTTAPAP D, LAMSAL BP, *et al.* Effect of puffing conditions on physical properties and rehydration characteristic of instant rice product [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(3): 672–680.
- [26] 许晓兰, 朱晶, 任建军. 方便杂粮米饭配方及主要工艺参数的优化设计[J]. 粮食科技与经济, 2015, 40(4): 54–57.
XU XL, ZHU J, REN JJ. Optimization design of convenient mixed grain rice formula and main process parameters [J]. Food Science and Technology and Economy, 2015, 40(4): 54–57.
- [27] 马莉莎, 陈书攀, 何国庆. 浸煮条件对即食米饭品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(17): 170–175, 81.
MA LS, CHEN SP, HE GQ. Effects of soaking and cooking conditions on the quality of instant rice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(17): 170–175, 81.
- [28] 吕平, 刘建奎, 段晓亮, 等. 小米饭的制作及食用品质评价方法[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(3): 67–74.
LV P, LIU JL, DUAN XL, *et al.* Method for evaluation of foxtail millet cooking and edible quality [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(3): 67–74.
- [29] 周显青, 邓灵珠, 张玉荣. 米饭物性与食味形成机理研究进展[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(4): 1–6.
ZHOU XQ, DENG LZ, ZHANG YR. Research progress on physical properties and taste mechanism of cooked rice [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2012, 20(4): 1–6.
- [30] 沙文轩, 章海风, 朱文政, 等. 米水比对米饭食用品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 31–36.
SHA WX, ZHANG HF, ZHU WZ, *et al.* Effect of cooking rice-to-water ratio on the rating quality of cooked rice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(6): 31–36.
- [31] 李少峰, 王贻森, 王海峰, 等. 蓝靛果复合液态饮品的研制及综合评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 144–154.
LI SF, WANG YS, WANG HF, *et al.* Development and comprehensive evaluation of *Lonicera caerulea* composite liquid beverage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 144–154.
- [32] 罗慧馨, 苏婷婷. 响应面法优化沙棘叶中总黄酮提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 243–251.
LUO HX, SU TT. Optimization of total flavonoids extraction process from *Hippophae rhamnoides* L. leaves based on response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(21): 243–251.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)