

粳米重组米的制备工艺优化及性能研究

高 嫚, 贾健辉, 张楚佳, 张 智, 刘 颖, 窦博鑫, 张 娜

Optimization of Preparation Process and Properties Study of Japonica Recombinant Rice

GAO Man, JIA Jianhui, ZHANG Chujia, ZHANG Zhi, LIU Ying, DOU Boxin, and ZHANG Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040256>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二次挤压制备重组米的响应面优化及品质研究

Response Surface Optimization and Quality Research during the Preparation of Recombinant Rice by Two Times of Extrusion Shaped
食品工业科技. 2019, 40(16): 133-139 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.022>

挤压重组紫薯米工艺优化 及其抗氧化活性研究

Optimization of Process Parameters and Antioxidant Activity of Extrusion Recombinant Purple Sweet Potato Rice
食品工业科技. 2020, 41(8): 137-142,150 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.022>

不同辅料添加量对挤压重组米的消化特性的影响

Effect of Different Additives on the Digestibility of Extruded Rice
食品工业科技. 2020, 41(16): 16-20 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.003>

低温挤压对粳糙米营养特性及理化性质的影响

Effect of Lower-temperature Extrusion on the Nutritious and Physicochemical Properties of Japonica Brown Rice
食品工业科技. 2019, 40(12): 12-17,25 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.003>

全蛋白挤压复配米配方的研究

Study on the Whole Protein Extrusion Compound Rice Formula
食品工业科技. 2021, 42(11): 156-161 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080030>

紫糙米粉挤压工艺优化及其理化性质分析

Optimization of Extrusion Process of Purple Brown Rice Flour and Its Physicochemical Properties
食品工业科技. 2021, 42(10): 195-202 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080099>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

高嫚, 贾健辉, 张楚佳, 等. 粳米重组米的制备工艺优化及性能研究 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 169–176. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040256

GAO Man, JIA Jianhui, ZHANG Chujia, et al. Optimization of Preparation Process and Properties Study of Japonica Recombinant Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 169–176. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040256

· 工艺技术 ·

粳米重组米的制备工艺优化及性能研究

高 嫚¹, 贾健辉^{1,2}, 张楚佳¹, 张 智^{1,3}, 刘 颖¹, 窦博鑫^{1,*}, 张 娜^{1,*}

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 黑龙江牡丹江 157011;

3. 北大荒米业集团有限公司, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘 要: 以碎粳米粉为原料, 添加一定量的抗性粳米淀粉, 采用双螺杆挤压技术制备重组米, 考察了模头温度、水分含量和螺杆转速对重组米品质的影响。在单因素基础上, 采用响应面优化了挤压工艺条件, 测定了重组米的糊化、流变、蒸煮和消化性能。结果表明, 当模头温度 100 °C、水分含量 28%、螺杆转速 96 r/min 时, 重组米的综合得分达到 70.7±0.5。重组米糊化特性的各项指标均低于市售粳米, 而黏度、回生值和糊化温度略高于空白重组米; 重组米 G'、G'' 低于市售粳米, 略高于空白重组米; 重组米的吸水率、体积膨胀率和蒸煮损失率均高于空白重组米和市售粳米; 相比于空白重组米和市售粳米, 重组米的 SDS 和 RS 含量较高, RDS 含量较低, 分别为 51.62%、9.37% 和 39.01%。本研究结果可为低消化性重组米产品的开发提供实验依据。

关键词: 重组米, 挤压, 性能, 抗性粳米淀粉

中图分类号: TS210.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)05-0169-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040256

本文网刊:



Optimization of Preparation Process and Properties Study of Japonica Recombinant Rice

GAO Man¹, JIA Jianhui^{1,2}, ZHANG Chujia¹, ZHANG Zhi^{1,3}, LIU Ying¹, DOU Boxin^{1,*}, ZHANG Na^{1,*}

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. College of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, China;

3. Beidahuang Rice Industry Group Co., Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract: The recombinant rice was prepared by twin-screw extrusion with broken japonica rice flour as raw material and a certain amount of resistant japonica rice starch. The study investigated the effects of die temperature, moisture content and screw speed on the quality of the recombinant rice. On the basis of single factor, the extrusion process conditions were optimized by response surface methodology. The pasting, rheological, cooking, and digestive properties of the recombinant rice were subsequently determined. The findings indicated that a composite score of 70.7±0.5 of recombinant rice was achieved at a die temperature of 100 °C, moisture content of 28%, and screw speed of 96 r/min. The pasting properties indexes of recombinant rice were less than commercially available japonica rice, but slightly higher than blank recombinant rice, considering viscosity, retention value, and pasting temperature. The G' and G'' of the recombinant rice were lower than those of commercially available japonica rice but slightly higher than those of the blank recombinant rice. Recombinant rice had higher water absorption, volume expansion, and cooking loss than blank recombinant rice and commercially available japonica rice. The recombinant rice had higher SDS and RS contents and lower RDS contents compared to the blank

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项 (2021ZX12B07); 国家自然科学基金面上项目 (32072258); 国家重点研发计划 (2021YFD2100902-3); 中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目。

作者简介: 高嫚 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 谷物加工, E-mail: 2050553953@qq.com。

*** 通信作者:** 窦博鑫 (1987-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品生物催化, E-mail: 394831971@qq.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。

recombinant rice and commercially available japonica rice, which were respectively 51.62%, 9.37%, and 39.01%. The study results may serve as an experimental foundation for the creation of low-digestible recombinant rice products.

Key words: recombinant rice; extrusion; performance; resistant japonica rice starch

近年来,随着人们生活水平的提高,高血糖、高血脂、肥胖等“富贵病”的发病率呈上升趋势^[1]。为有效控制血糖和体重,应避免摄入会使血糖升高较快的食物。米饭是人们的主食之一,大米的主要成分是淀粉,研究表明,大米淀粉易被消化吸收,会引起人体餐后血糖水平的迅速上升,不适宜糖尿病患者食用^[2]。重组米是指以淀粉基原料(如大米、小麦等)为主体,根据目标产品的需要复配其他组分,经过挤压熟化、切割、干燥制成的与天然大米类似的颗粒。开发适宜糖尿病患者、高血脂和肥胖人群食用的重组米具有重要意义和广泛应用前景。

粳米中直链淀粉含量较低,胶稠度软,口感柔软顺滑,深受消费者青睐^[3]。粳米在加工过程中会产生一定比例的碎米,碎米营养成分和整米一致,但价格低廉,可用于重组米的制备,以提高其经济价值^[4]。抗性淀粉被认为是一种新型膳食纤维,因其良好的物理化学及功能特性被广泛应用于各种食品中^[5-6]。抗性淀粉低热量、易饱腹等特点越来越受到大众认可,抗性淀粉可以减少餐后血糖的升高,可制成适合糖尿病人食用的功能性食品^[7]。采用添加抗性淀粉,降低传统稻米的消化速率的方法,能够达到餐后稳糖的效果,有助于糖尿病患者控制病情发展。

近年来,对低消化性重组米的研究越来越多。李卢等^[8]将南瓜粉、谷朊粉等添加到燕麦粉、马铃薯全粉中挤压制备重组米,重组米的消化性显著降低。方冲^[9]将高直链玉米淀粉添加至籼米粉中,制备的挤压重组米具有良好的降血糖功效。目前这些关于糖尿病患者食用的挤压重组米的制备研究较多,但将抗性粳米淀粉添加到碎粳米粉中挤压制备抗性重组米的研究还未见报道。抗性粳米淀粉由粳米淀粉改性获得,它具有与粳米淀粉类似的优良特质,是制备重组米的优质原料。课题组前期对粳米淀粉进行物理改性获得了抗性粳米淀粉,并将其与碎粳米粉混合,挤压制备得到了具有较低消化性的重组米,但得到的重组米品质与市售粳米尚有差异。众多研究发现,挤压工艺参数对所得产品品质影响较大^[10-11]。因此,本文研究挤压工艺参数对重组米品质的影响,确定最佳工艺条件,并以市售粳米和空白重组米为对照,研究重组米的糊化、流变、蒸煮和消化性能,旨在为研发加工特性和食用品质较好的重组米提供理论依据,为我国碎米资源的综合利用及深加工提供一条新的途径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

碎粳米(水分含量 10.14%)、市售粳米(水分含量 10.90%) 黑龙江省五常金禾米业有限责任公司;

抗性粳米淀粉(水分含量 9.74%,快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉含量分别为 37.61%、33.65% 和 28.74%) 课题组自制;葡萄糖测定试剂盒 Megazyme 公司; α -胰液淀粉酶(12 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(82.5 U/mg) Sigma 公司;乙酸、氢氧化钠、无水乙醇 AR,天津市光复科技发展有限公司。

DSE-25 双螺杆挤压膨化机 德国布拉本德公司;FW100 高速万能粉碎机 苏州江东精密仪器有限公司;JA 2003 电子天平 上海浦春计量仪器有限公司;Rapid-20 快速粘度分析仪 瑞典 Perten 仪器公司;H-PID200 流变仪 美国 TA 仪器公司;DHP-9162 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 重组米的制备 工艺流程:碎粳米粉、抗性粳米淀粉→调质→挤压→造粒→干燥→成品。

将碎粳米粉碎过 80 目筛,取 350 g 与 30% 的抗性粳米淀粉(以混合粉质量计)均匀混合,并调节水分含量,然后将其放入 4 ℃ 的冰箱中平衡 24 h,水分平衡后放入双螺杆挤压机中进行挤压。将得到的重组米于 45 ℃ 烘箱中干燥,直到水分含量低于 14%。空白重组米是不添加抗性粳米淀粉挤压制备的重组米。

1.2.2 单因素实验 根据预实验,在模头温度 100 ℃、水分含量 28%、螺杆转速 120 r/min 的基础条件下,保持其他条件不变,只改变其中一个因素,分别设置模头温度(80、90、100、110、120 ℃)、水分含量(24%、26%、28%、30%、32%)、螺杆转速(80、100、120、140、160 r/min),以重组米的质构、感官和蒸煮损失率的综合得分为考察指标,进行单因素实验。

1.2.3 响应面试验 根据单因素实验结果,选择模头温度、水分含量和螺杆转速 3 个因素,分别选取 3 个水平,以重组米的质构、感官和蒸煮损失率的综合得分为考察指标,进行响应面试验设计,如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素与水平
Table 1 Response surface test factors and levels

因素	水平		
	-1	0	1
A模头温度(℃)	90	100	110
B水分含量(%)	26	28	30
C螺杆转速(r/min)	80	100	120

1.2.4 感官评价 重组米感官评价参照王娴等^[12]的方法,感官评定人员由 10 名经培训后的食品专业人员担任。

1.2.5 质构特性测定 根据文献 [13–14] 描述的方法进行适当的修改。在铝盒中加入 1:1.5(m:m) 的重组米和蒸馏水, 在锅中蒸 15 min, 然后冷却至室温。蒸煮后的重组米放置于烧杯中, 厚度控制为 13~15 mm, 为模仿人体咀嚼过程, 将 TPA 压缩次数设为两次。使用直径 35 mm 的平底柱形探头 P/35 对重组米进行质构分析, 测试前、测试期间和测试后的探头速度分别设置为 1、2 和 1 mm/s。压缩力度为 50%, 触发力为 5 g, 时间间隔为 5 s。重复测定 7 次, 去除硬度最大和最小值的两个值后, 取另外 5 组数据平均, 分别得到样品米的硬度、弹性、咀嚼性和黏聚性等指标。

1.2.6 蒸煮损失率测定 参照 Lourembam 等^[15] 的方法稍作调整。在离心管中放置 2.00 g(m_0) 重组米, 倒入 20 mL 蒸馏水, 蒸煮 10 min, 将全部米汤转移至平皿(m_1) 内, 然后在 105 °C 烘箱中干燥, 直至恒重(m_2), 蒸煮损失率的计算公式如下:

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

1.2.7 综合评分 重组米的综合评分由感官评分、质构评分和蒸煮损失评分 3 部分构成, 综合评分权重设定为: 重组米综合评分=40% 感官评分+30% 质构评分+30% 蒸煮损失评分, 具体评分规则参考高帅^[16] 的方法。

1.2.8 糊化特性的测定 参考 Zheng 等^[17] 的方法, 使用快速黏度仪(RVA)测定重组米的糊化特性。根据 RVA 自带软件进行水分校正, 配制质量分数为 14%(以干基计)的淀粉乳溶液, 放入仪器中进行测定。测定条件: 50 °C 预热 1 min, 以 12 °C/min 的速率升温至 95 °C, 保持 2 min, 以 12 °C/min 的速率冷却至 50 °C 并保持 2 min。采用 RVA 标准程序, 通过 TCW3 软件得到峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、衰减值和回生值等糊化参数。

1.2.9 流变特性的测定 参考 Guo 等^[18] 的方法并进行适当的修改。使用直径为 50 mm 的平板, 在室温下进行样品的流变学特性测定, 间隙为 1 mm, 以 1% 的应变进行频率测试(0.1~20 Hz), 记录动态流变数据。

1.2.10 蒸煮特性的测定 参照王肇慈^[19] 的方法, 对样品蒸煮特性进行测定。

1.2.10.1 吸水率测定 称取样品米 5.00 g(m_0) 于烧杯中, 加入 50 mL 蒸馏水, 沸水浴 10 min, 蒸煮后将样品米沥干至不再有米汤滴下, 再将其冷却 0.5 h, 然后称量样品质量 m_1 , 吸水率按照如下公式计算:

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

1.2.10.2 体积膨胀率测定 称取样品米 5.00 g(m_0) 于量筒中, 测试样品米的体积 V_0 , 加入 50 mL 蒸馏水, 沸水浴 10 min, 蒸煮后将样品米沥干至不再有米汤滴下, 再将其冷却 0.5 h, 然后用量筒测此时的体

积 V_1 , 膨胀率按照如下公式计算:

$$\text{膨胀率}(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100$$

1.2.11 消化特性的测定 参考高嫚等^[20] 的方法并稍作修改。准确称取 100(±5) mg 样品置于 50 mL 离心管中, 加入已预热至 37 °C 的混合酶溶液 25 mL, 混合酶溶液 pH 为 6.0, 酶添加量为 AMY(3600 U)+AMG(360 U), 涡旋混匀, 160 r/min、37 °C 水浴下进行振荡。分别在 20、120 min 时取出反应液, 用 GOPOD 测定其葡萄糖含量。快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)含量的计算公式如下:

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

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

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

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 后酶解液中的葡萄糖含量(mg); G_{120} 为淀粉酶解 120 min 后酶解液中的葡萄糖含量(mg); 0.9 为葡萄糖转化系数; TS 为样品中总淀粉含量(mg)。

1.3 数据处理

实验数据以平均值±标准偏差表示, 使用 Origin 2021 和 Design Expert 8.0.6 绘图, 单因素方差分析使用 SPSS 25 进行分析。

2 结果与分析

2.1 模头温度、水分含量和螺杆转速对重组米品质的影响

模头温度是影响重组米品质的重要参数之一。温度的高低决定着重组米品质的好坏, 高温可使重组米糊化程度升高, 低温反之, 糊化程度的高低影响着重组米品质的好坏^[21]。由图 1 可知, 随着模头温度

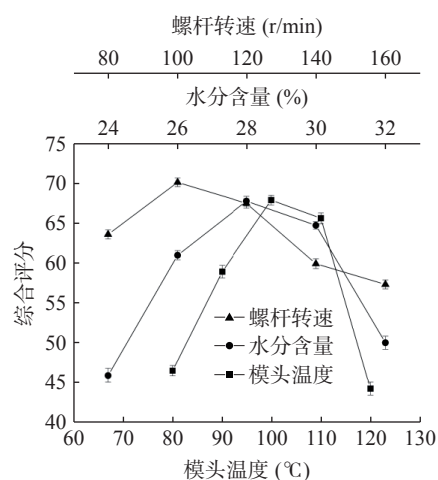


图 1 模头温度、水分含量和螺杆转速对重组米品质的影响

Fig.1 Effect of die temperature, moisture content and screw speed on the quality of recombinant rice

的增加,重组米的综合评分呈现先上升后下降的趋势。当模头温度为 100 ℃ 时,重组米的综合评分最高。当模头温度低于 100 ℃ 时,淀粉糊化程度低,产品结构疏松,米粒香气淡、米饭口感差^[22]。而当模头温度高于 100 ℃ 时,淀粉的糊化程度较高,大分子物质降解形成小分子物质,物料水溶性增大,重组米黏性增大,蒸煮后损失率较高,且部分重组米出现膨化现象,重组米表面气泡较多,和大米外观相差较大,品质较差^[23]。因此,选取模头温度 90~110 ℃ 进行下一步试验。

物料水分含量对重组米品质影响较大^[24]。由图 1 可知,随着水分含量的增加,重组米的综合评分呈现先上升后下降的趋势。当水分含量为 28% 时,重组米的综合评分最高。物料水分含量较低时,物料难以糊化,水分不充足导致物料与机筒间摩擦增加,物料滞留,产品较难挤出,重组米容易出现开裂、表面粗糙的现象,影响品质^[25]。而水分含量过多时,物料糊化过度,重组米黏度大,且产品水分含量较高,干燥时间长,品质差^[26]。考虑到重组米的品质特性,选取物料水分含量 26%~30% 进行下一步试验。

螺杆转速影响物料在挤压机中的剪切程度、停留时间和模口成型压力,从而影响产品质量^[27]。由图 1 可知,随着螺杆转速的增加,重组米的综合评分呈现先上升后下降的趋势。当螺杆转速为 100 r/min 时,重组米的综合评分最高。当螺杆转速较低时,螺杆对物料的剪切作用较小,淀粉的糊化程度较低^[28]。随着螺杆转速增大,淀粉的糊化程度增大,而当螺杆转速过大时,物料在挤压机内停留及受热时间较短,受热不均匀,不利于良好结构的形成,重组米蒸煮品质差^[29]。综上,选取螺杆转速 80~120 r/min 进行下一步试验。

2.2 响应面优化

2.2.1 模型的建立与方差分析 为了进一步优化重组米的挤压工艺条件,采用响应面设计进行了 17 组试验,试验设计和结果如表 2 所示。使用 Design Expert 8.0.6 软件对响应面数据进行回归分析,得到的回归方程为:

$$Y=69.98+2.05A+1.45B-1.02C-2.20AB+1.00AC-0.25BC-4.44A^2-3.44B^2-2.54C^2$$

对回归方程进行方差分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,模型的 F 值 38.64,其相应的 P 值小于 0.01,表明试验中使用的回归模型具有极其显著的意义。失拟项 $F=6.03$,对应的 P 值为 0.0577,不显著 ($P>0.05$),表明试验获得的模型是可靠的,具有良好的拟合性。该模型的决定系数 R^2 为 0.9803,校正后为 0.9549,表明方程拟合较好,并且变异系数(1.33)较低,说明试验精确度较高,可靠性强。

模型中 A 、 B 、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 AB 对响应值的影响是极显著的($P<0.01$),因素 C 达到显著水平($P<0.05$)。 F 值越大,表明该因素对重组米综合评分的影响越显

表 2 响应面分析试验设计及结果

Table 2 Design and results of response surface test

试验号	A模头温度	B水分含量	C螺杆转速	Y综合评分
1	0	0	0	69.8
2	0	0	0	69.6
3	-1	0	-1	62.5
4	1	-1	0	65.3
5	1	1	0	62.5
6	0	-1	-1	62.9
7	0	-1	1	60.9
8	0	0	0	70.5
9	-1	-1	0	57.3
10	0	1	-1	67.6
11	-1	0	1	58.9
12	0	0	0	69.5
13	0	1	1	64.6
14	1	0	1	65.5
15	-1	1	0	63.3
16	0	0	0	70.5
17	1	0	-1	65.1

表 3 回归模型及方差分析

Table 3 Regression model and analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P
模型项	260.00	9	28.89	38.64	<0.0001**
A	33.62	1	33.62	44.97	0.0003**
B	16.82	1	16.82	22.50	0.0021**
C	8.40	1	8.40	11.24	0.0122*
AB	19.36	1	19.36	25.90	0.0014**
AC	4.00	1	4.00	5.35	0.0539
BC	0.25	1	0.25	0.33	0.5812
A^2	83.00	1	83.00	111.03	<0.0001**
B^2	49.83	1	49.83	66.65	<0.0001**
C^2	27.16	1	27.16	36.34	0.0005**
残差	5.23	7	0.75		
失拟项	4.28	3	1.43	6.03	0.0577
纯误差	0.95	4	0.24		
总离差	265.23	16			
$R^2=0.9803$		$R^2_{Adj}=0.9549$		C.V.%=1.33	

注:“*”表示差异显著($P<0.05$);“**”表示差异极显著($P<0.01$)。

著,由分析可得影响响应值的因素顺序由大到小为: A (模头温度) $>B$ (水分含量) $>C$ (螺杆转速)。

2.2.2 各因素交互作用影响分析 各因素交互作用的响应面图见图 2。由图可知,响应曲面均为开口向下,响应值随着因素水平的增加而增加,当增加到极值点后,它又随着因素水平的增加而逐渐降低,响应面具有最高点,表明此模型在选定范围内存在最优条件。 A 和 B 的响应曲面比较陡峭,响应值变化比较大,表明因素之间的交互作用比较大; A 和 C 、 B 和 C 两组对应的响应面相对平坦,表明这两组因素之间的交互作用比较弱。

2.2.3 试验验证 经过 Design Expert 8.0.6 软件分析得到响应面优化制备重组米的最佳工艺条件为:模头温度 101.72 ℃,水分含量 28.32%,螺杆转速 96.48 r/min,此时的综合评分为 70.4。考虑实际操作,将最佳工艺条件调整为模头温度 100 ℃,水分含

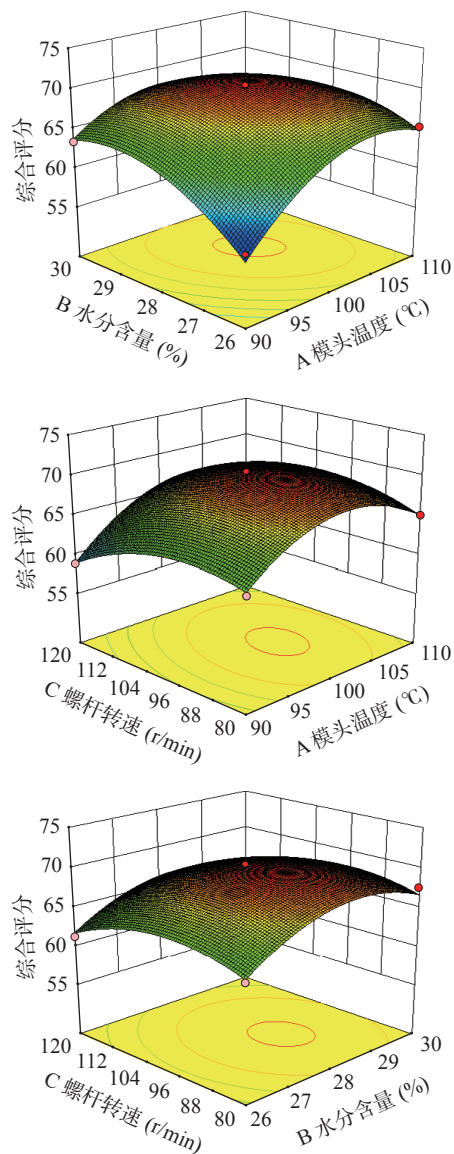


图2 模头温度、水分含量、螺杆转速间交互作用对综合评分的影响

Fig.2 Influence of the interaction between die temperature, moisture content and screw speed on the comprehensive score

量 28%, 螺杆转速 96 r/min。在此优化条件下得到的综合评分为 70.7±0.5, 与理论预测值无显著差异。因此, 由响应面模型得到的制备重组米最佳工艺条件是合理的。

2.3 糊化特性分析

重组米的糊化特性如表 4 所示。由表 4 可知, 重组米与市售粳米相比, 其峰值黏度、谷值黏度、衰减值、最终黏度、回生值和糊化温度均显著降低 ($P<0.05$), 重组米与市售粳米的糊化特性差异大, 这

与郭世龙等^[30] 研究结果一致。这可能是因为挤压过程中, 淀粉的颗粒结构被破坏, 导致熔融和破裂, 吸水膨胀后相互之间的摩擦力减小, 一些淀粉大分子链也发生降解, 分子量降低, 都会导致挤压后淀粉的糊化特性值低^[31]。此外, 蛋白质发生变性, 脂肪与淀粉形成复合物等变化, 这些都会导致糊化黏度以及回生值的显著下降^[32]。重组米衰减值、回生值低于市售粳米, 说明重组米淀粉颗粒热稳定性好, 不易于破裂。重组米相比市售粳米糊化温度低, 可能是由于重组米经历过一次糊化, 再糊化时所需要的温度低^[33]。与空白重组米相比, 重组米的黏度值均较高, 说明添加抗性粳米淀粉可以促进淀粉的溶胀, 提高淀粉糊的黏度。衰减值反映淀粉在高温下的抗剪切能力, 重组米的衰减值略低于空白重组米, 说明重组米淀粉颗粒抗剪切能力较好^[27]。

2.4 流变特性分析

动态流变学可用于测定不同样品的黏弹性, 对样品的加工特性和品质控制具有很大的应用价值^[34]。重组米的动态流变学特性如图 3 所示。由图 3 可知, 重组米的储能模量(G')大于其损耗模量(G''), 且 G' 与 G'' 随着振荡频率的增加呈现出上升趋势, 表现出频率依赖性, 为典型的弱凝胶体系特征^[35]。在同一频率下, 重组米和空白重组米的 G' 、 G'' 明显低于市售粳米。这可能与挤压过程中淀粉分子的降解有关, 挤压过程中淀粉分子量的降低和侧链分支的降解可能会削弱淀粉分子间的相互作用, 增强淀粉凝胶的流动性, 形成较弱的凝胶结构^[36]。Wani 等^[37] 在研究挤压对淀粉糊流变特性的影响时也得到了类似的结果。此外, 重组米的 G' 、 G'' 高于空白重组米, 说明抗性粳米淀粉的添加对重组米的黏弹性有影响, 重组米和空白重组米相比具有更好的粘弹性, 凝胶体系网络结构相对较强。损耗角正切值($\tan\delta$)是 G'' 与 G' 的比值, $\tan\delta$ 越大, 说明体系的黏性比例越大, 流动性强, 反之则弹性比例较大。由图 3c 可知, 重组米 $\tan\delta$ 高于市售粳米, 这表明挤压后体系的流动性较强, 具有良好的亲水性。三个样品的 $\tan\delta$ 均小于 1, 说明弹性是样品糊的主要特征, 并且随着频率的增加而不断增大, 表明样品 G'' 随频率的变化比 G' 更快, 样品逐渐接近类似液体的趋势^[38]。

2.5 蒸煮特性分析

大米的蒸煮特性能直观地表示其食味品质, 重组米、空白重组米和市售粳米的蒸煮特性如表 5 所示。由表 5 可知, 三种米之间的蒸煮特性具有显著

表 4 重组米的糊化特性

Table 4 Gelatinization characteristics of recombinant rice

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(℃)
重组米	551.00±3.51 ^b	257.00±2.65 ^b	294.00±2.52 ^c	582.67±2.35 ^b	325.67±2.50 ^b	74.25±0.35 ^b
空白重组米	524.00±2.08 ^c	222.67±2.52 ^c	301.33±2.48 ^b	528.00±2.13 ^c	305.33±2.39 ^c	73.45±0.46 ^c
市售粳米	2757.67±11.83 ^a	1836.00±5.57 ^a	921.67±6.03 ^a	2996.00±12.27 ^a	1160.00±5.98 ^a	75.10±0.48 ^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5、表6同。

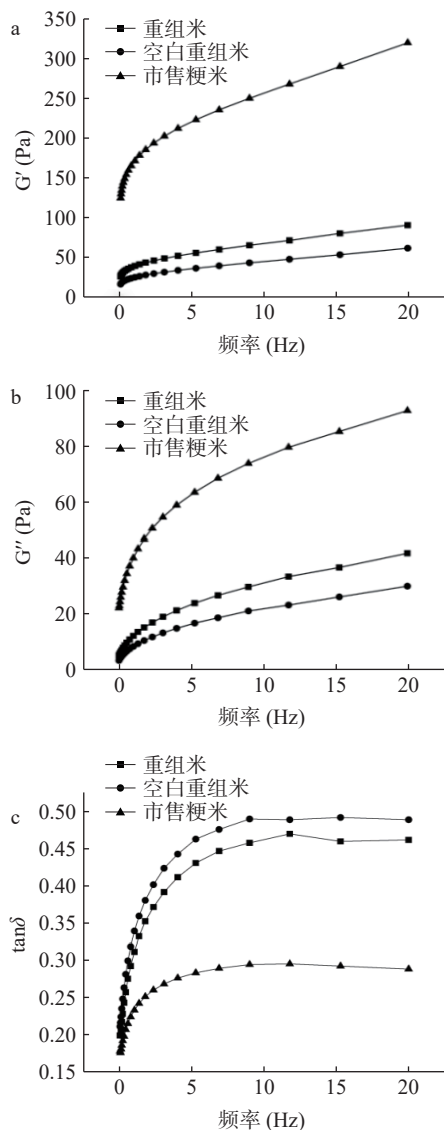


图3 重组米的流变学特性

Fig.3 Rheology characteristics of recombinant rice

表5 重组米蒸煮特性

Table 5 Cooking characteristics of recombinant rice

样品	吸水率(%)	体积膨胀率(%)	蒸煮损失率(%)
重组米	242.18±2.51 ^a	150.30±1.35 ^a	7.10±0.23 ^a
空白重组米	239.79±2.09 ^b	146.18±1.37 ^b	6.38±0.19 ^b
市售粳米	114.71±1.16 ^c	124.60±1.18 ^c	4.22±0.15 ^c

性差异($P<0.05$)。吸水率可以反映米粒在蒸煮过程中吸收水分能力的强弱^[39]。Bwa 等^[31]研究表明,米粒的吸水率和体积膨胀率之间存在显著的正相关关系,吸水率的提高会造成体积膨胀率的提高。重组米的吸水率和体积膨胀率最高,分别为 242.18% 和 150.30%,这可能是由于挤压会破坏淀粉的晶体结构,增加破损淀粉的含量,从而使重组米具有较高的吸水率和体积膨胀率^[40]。大米吸水率越高,蒸煮时间越短,口感越好,但吸水率和体积膨胀率过高易引起大米过度软烂,无黏弹性,降低米饭口感^[41]。重组米的蒸煮损失率高于市售粳米,这可能是由于在高温、高压和高剪切力的作用下,淀粉充分糊化,大分子物

质断裂成小分子物质,可溶性物质增加,从而导致重组米的蒸煮损失增加^[42]。

2.6 消化特性分析

重组米的消化特性如表 6 所示。由表 6 可知,重组米、空白重组米和市售粳米的消化特性存在显著差异($P<0.05$)。空白重组米中 RDS 含量显著低于市售粳米,SDS 和 RS 含量显著高于市售粳米($P<0.05$),这可能是因为糊化的淀粉分子重排形成结晶;另外,挤压过程中米粉含有的脂质与淀粉复合,从而提高了淀粉对酶解的抗性,并最终将部分 RDS 转化为 SDS 或 RS^[43]。当添加抗性粳米淀粉后,重组米中 SDS 和 RS 含量进一步增加,说明抗性粳米淀粉的添加对重组米的抗消化性具有促进作用,这可能是由于加入的抗性粳米淀粉中存在较难被消化酶降解的结构^[44]。综上,相比于空白重组米和市售粳米,重组米的 SDS 和 RS 含量较高,RDS 含量较低,具有良好的抗消化性。

表6 重组米消化特性

Table 6 Digestion characteristics of recombinant rice

样品	RDS含量(%)	SDS含量(%)	RS含量(%)
重组米	39.01±0.31 ^c	51.62±0.55 ^a	9.37±0.10 ^a
空白重组米	47.04±0.39 ^b	49.00±0.47 ^b	3.96±0.09 ^b
市售粳米	56.26±0.46 ^a	41.77±0.38 ^c	1.97±0.05 ^c

3 结论

本研究以碎粳米粉和抗性粳米淀粉为原料挤压制备重组米,通过单因素和响应面试验得到制备重组米的最佳工艺条件为:模头温度 100 ℃、水分含量 28%、螺杆转速 96 r/min,在此条件下挤压制备的重组米的综合评分为 70.7±0.5。研究表明,重组米与市售粳米相比,峰值黏度、谷值黏度、衰减值、最终黏度、回生值和糊化温度均显著降低;与空白重组米相比,衰减值降低,黏度、回生值和糊化温度升高。流变学特性结果表明,重组米的 G' 、 G'' 低于市售粳米,略高于空白重组米。重组米的吸水率、体积膨胀率和蒸煮损失率均高于空白重组米和市售粳米。与空白重组米和市售粳米相比,重组米具有较高的 SDS、RS 和较低 RDS,抗消化性能较好。本研究制备的重组米品质得到了改善,研究可为重组米的产品开发提供新思路,为进一步提升重组米品质提供了理论研究基础,对实现健康饮食和碎米资源的有效利用具有重要意义。

参考文献

- [1] LI S, LI Q, ZHU F, et al. Effect of vacuum combined ultrasound treatment on the fine structure and physiochemical properties of rice starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107198.
- [2] PAN L, CHEN F, YANG Y, et al. The underlying starch structures of rice grains with different digestibilities but similarly high amylose contents[J]. *Food Chemistry*, 2022, 379: 132071.
- [3] LI S, REN X, ZHANG M, et al. New perspective to guide rice breeding: Evaluating the eating quality of japonica rice[J]. *Cereal*

Chemistry, 2022, 99(3): 603–614.

[4] 李林轩, 李硕, 王晓芳, 等. 碎米综合利用技术探讨[J]. 粮食加工, 2018, 43(1): 30–33. [LI Linxuan, LI Shuo, WANG Xiaofang, et al. Discussion on the comprehensive utilization technology of broken rice[J]. Grain Processing, 2018, 43(1): 30–33.]

[5] WANG M T, LIU G X, LI J, et al. Structural and physicochemical properties of resistant starch under combined treatments of ultrasound, microwave, and enzyme[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 232: 123331.

[6] 沙丙含. 毛薯淀粉及其抗性淀粉的制备与理化性质研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022. [SHA Binghan. Preparation and physicochemical properties of hairy potato starch and its resistant starch[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.]

[7] MEHMET T A, İSMAIL C. Effect of gamma-irradiation and extrusion on the physicochemical, thermal and aroma-active compounds of rice flour[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 195: 110061.

[8] 李卢, 刘震远, 李喜宏, 等. 南瓜粉对挤压米膳食血糖指数及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 39–45. [LI Lu, LIU Zhenyuan, LI Xihong, et al. The effect of pumpkin powder on the dietary blood glucose index and quality of extruded rice[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(11): 39–45.]

[9] 方冲. 不同添加物对挤压重组米血糖生成指数及性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [FANG Chong. The effect of different additives on the glycemic index and properties of extruded recombinant rice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.]

[10] WAN F L S, DUAN Y M, TONG L F, et al. Effect of extrusion parameters on the interaction between rice starch and glutelin in the preparation of reconstituted rice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 225: 277–285.

[11] YU X S, WANG L S, ZHANG J J, et al. Effects of screw speed on the structure and physicochemical properties of extruded reconstituted rice composed of rice starch and glutelin[J]. Food Structure, 2023, 36: 100313.

[12] 王嫚, 周显青, 胡宏海, 等. 辅料添加对挤压复配米外观结构, 蒸煮食用品质及体外血糖生成指数的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 60–68. [WANG Xian, ZHOU Xianqing, HU Honghai, et al. The effect of additive addition on the appearance structure, cooking and edible quality, and *in vitro* blood glucose production index of extruded composite rice[J]. Food Science, 2018, 39(11): 60–68.]

[13] ZHANG Y, LI F, HUANG K, et al. Structural changes of starch under different milling degrees affect the cooking and textural properties of rice[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100627.

[14] CHEN X, ZHANG X X, WANG B Y, et al. Investigation of water migration and its impacts on eating qualities of black rice during cooking process[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89: 102810.

[15] LOUREMBAM M D, LAXMIKANT S B. Variety difference in physico-chemical, cooking, textural, pasting and phytochemical properties of pigmented rice[J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100059.

[16] 高帅. 碎米重组米研制及其对肠道菌群影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021. [GAO Shuai. Research on the development of broken rice recombinant rice and its effect on intestinal microbial flora[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021.]

[17] ZHENG Y, TIAN J, OGAWA Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestion of extruded rice with grape seed proanthocyanidins[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103064.

[18] GUO L, HU J, ZHANG J, et al. The role of entanglement concentration on the hydrodynamic properties of potato and sweet potato starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 93: 1–8.

[19] 王肇慈. 粮油食品品质分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000. [WANG Zhaoqi. Analysis of grain, oil and food quality[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2000.]

[20] 高嫚, 贾健辉, 周迅, 等. 基于 AOAC 法对 Englyst 法测定粳米淀粉消化特性的优化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 264–269. [GAO Man, JIA Jianhui, ZHOU Xun, et al. Optimization of Englyst method for determining the digestibility characteristics of japonica rice starch based on AOAC method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 264–269.]

[21] SHAO Z, HAN J, WANG J, et al. Process optimization, digestibility and antioxidant activity of extruded rice with agaricus bisporus[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 152: 112350.

[22] DALBHAGAT G. Effects of extrusion process conditions on system parameters; physicochemical properties and cooking characteristics of extruded fortified rice kernels[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89: 102782.

[23] YU X S, ZHANG J J, WANG L S, et al. Changes in physicochemical properties and structural characteristics of rice starch during extrusion processing: The role of glutelin and different extrusion zones[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 82: 103163.

[24] YI C P, QIANG N N, ZHU H, et al. Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains[J]. Food Research International, 2022, 160: 111681.

[25] 王梦妍, 李文钊, 冯亚倩, 等. 挤压工艺对复合组织蛋白品质及结构的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 143–150. [WANG Mengyan, LI Wenzhao, FENG Yaqian, et al. The effect of extrusion process on the quality and structure of composite tissue proteins[J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 143–150.]

[26] ZHANG Y T, XU F, WANG Q F, et al. Effects of moisture content on digestible fragments and molecular structures of high amylose jackfruit starch prepared by improved extrusion cooking technology[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 108023.

[27] QLA B, YWA B, YYA B, et al. Effects of extrusion and enzymatic debranching on the structural characteristics and digestibility of corn and potato starches[J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101679.

[28] 沈宇光. 含抗性淀粉的马铃薯重组米的制备及其性质研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2019. [SHEN Yuguang. Preparation and properties of potato recombinant rice containing resistant starch[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2019.]

[29] LIU Y F, CHEN J, WU J Y, et al. Modification of retrogradation property of rice starch by improved extrusion cooking technology[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 213: 192–198.

[30] 郭世龙, 肖志刚, 陈革, 等. 芋头全粉对富硒芋头营养重组米结构及特性的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 232–239.

[GUO Shilong, XIAO Zhigang, CHEN Ge, et al. The effect of taro head whole powder on the structure and characteristics of selenium rich taro head nutritional recombinant rice[J]. Food Technology, 2020, 45(1): 232–239.]

[31] BWA B, YDA B, YF C, et al. Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion[J]. Food Chemistry, 2021, 368: 130804.

[32] CHENG W W, GAO L W, DI G, et al. Effect of improved

extrusion cooking technology on structure, physiochemical and nutritional characteristics of physically modified buckwheat flour: Its potential use as food ingredients[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 133: 109872.

[33] 蔡灿欣. 抗性淀粉的挤压法制备、性质及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [CAI Canxin. Study on the preparation, properties, and application of resistant starch by extrusion method [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[34] HU Y Y, LI C M, TAN Y B, et al. Insight of rheology, water distribution and *in vitro* digestive behavior of starch based-emulsion gel: Impact of potato starch concentration[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 132: 107859.

[35] JAFARI M, KOOCHEKI A, MILANI E. Effect of extrusion cooking of sorghum flour on rheology, morphology and heating rate of sorghum-wheat composite dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 77: 49–57.

[36] 周兵兵. 挤压重组米食用品质改良及消化性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [ZHOU Bingbing. Improvement of edible quality and digestibility of squeezed recombinant rice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]

[37] WANI I A, FAROOQ G, QADIR N, et al. Physico-chemical and rheological properties of Bengal gram (*Cicer arietinum* L.) starch as affected by high temperature short time extrusion[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 131: 850–857.

[38] 刘颖, 徐晨冉, 张楚佳, 等. 精白米与糙米配比对复配糙米粉品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(6): 186–190. [LIU Ying, XU Chenran, ZHANG Chujia, et al. Effect of the ratio of polished white rice to brown rice on the quality of compound brown rice noodles[J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(6): 186–190.]

[39] 刘晓飞, 李祥, 孟倩楠, 等. 富硒营养强化留胚米的制备工艺优化及其品质特性研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(5): 174–184.

[LIU Xiaofei, LI Xiang, MENG Qiannan, et al. Optimization of the preparation process and quality characteristics of selenium enriched nutrient enriched embryo rice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(5): 174–184.]

[40] 伏曦. 土圪儿粉理化性质与加工适宜性研究及重组米制备[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [FU Xi. Study on the physicochemical properties and processing suitability of soil flour and preparation of recombinant rice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]

[41] 江宇峰. 豆渣粉膳食纤维重组米的研制及其性质研究[D]. 长春: 长春大学, 2021. [JIANG Yufeng. Preparation and properties of soybean residue powder dietary fiber recombinant rice[D]. Changchun: Changchun University, 2021.]

[42] 孙威, 陈轩. 葛根重组米的蒸煮特性和黄酮提取研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(7): 57–62. [SUN Wei, CHEN Xuan. Study on the cooking characteristics and flavonoids extraction of kudzu root recombinant rice[J]. *Grain and Oil*, 2022, 35(7): 57–62.]

[43] 张淑仪, 许祥, 张林华, 等. 高直链玉米淀粉添加对挤压荞麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 116–124. [ZHANG Shuyi, XU Xiang, ZHANG Linhua, et al. The effect of adding high amylose corn starch on the structure, cooking quality, and digestion characteristics of extruded buckwheat noodles[J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 116–124.]

[44] 张阳. 低GI挤压重组米的配方优化及其食用品质和理化特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [ZHANG Yang. Optimization of the formula, edible quality, and physicochemical properties of low GI extruded recombinant rice[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]