

不同糊化度留胚米粉理化性质和体外消化性研究

王子妍¹, 贾健辉^{1,2}, 张煜^{1,3}, 窦博鑫¹, 刘颖^{1*}, 张娜^{1*}

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028; 2. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 牡丹江 157011;
3. 黑龙江东方学院食品与环境工程学院, 哈尔滨 150076)

摘要: **目的** 以挤压膨化法制备不同糊化度留胚米粉并对其理化性质与体外消化性进行研究。**方法** 在螺杆转速 100 r/min、水分含量 30%、挤压温度为 70、90、110、130、150℃的条件下制备不同糊化度的留胚米粉, 考察不同糊化度对留胚米粉的营养成分、色度、粒径、水合特性、糊化特性、流变特性和体外消化特性的影响。**结果** 随着挤压温度的增加, 其蛋白质、脂肪、总淀粉和直链淀粉含量显著下降, 可溶性膳食纤维含量显著上升($P<0.05$); 色度、粒径、水溶性指数及膨胀度呈上升趋势, 且差异显著($P<0.05$), 吸水性指数下降; 与原留胚米粉相比, 高糊化度留胚米粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度及回生值均显著降低($P<0.05$), 消化性显著提高($P<0.05$)。**结论** 挤压膨化处理对留胚米粉的影响较大, 高糊化度的留胚米粉有较好的加工性能和更高的消化率。

关键词: 留胚米; 挤压膨化; 糊化度; 理化性质; 消化性

Study on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of embryo rice flour with different degrees of dextrinization

WANG Zi-Yan¹, JIA Jian-Hui^{1,2}, ZHANG Yu^{1,3}, DOU Bo-Xin¹, LIU Ying^{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. College of Food Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150076, China)

ABSTRACT: Objective To prepare embryo rice flour with different degrees of dextrinization by extruded puffing method and to study its physicochemical properties and *in vitro* digestibility. **Methods** Under the conditions of screw speed 100 r/min, moisture content 30% and extrusion temperature 70, 90, 110, 130, 150℃, the remaining embryo rice flour with different gelatinization degrees was prepared. The effects of different gelatinization degrees on nutritional composition, chroma, particle size, hydration characteristics, gelatinization characteristics, rheological characteristics and *in vitro* digestion characteristics of preserved embryo rice flour

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2019ZX08B02)、国家自然科学基金项目(32072258)、国家重点研发计划项目(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

Fund: Supported by the Heilongjiang Province “Ten Million” Engineering Science and Technology Major Project (2019ZX08B02), the National Natural Science Foundation of China (32072258), the National Key Research and development Program of China (2021YFD2100902-3), and the Central Finance Supports the Outstanding Young Talents Support Program of the Special Fund for the Development of Local Universities

*通信作者: 刘颖, 博士, 教授, 主要研究方向为植物蛋白工程与营养功能因子研究。E-mail: 154057693@qq.com

张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。E-mail: foodzhangna@163.com

*Corresponding author: LIU Ying, Ph.D., Professor, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China. E-mail: 154057693@qq.com

ZHANG Na, Ph.D., Professor, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China. E-mail: foodzhangna@163.com

were investigated. **Results** With the increase of extrusion temperature, the content of protein, fat, total starch and straight chain starch decreased significantly, the soluble dietary fiber content significant increased ($P<0.05$); the colour, particle size, water solubility index and swelling showed an increasing trend and the difference was significant ($P<0.05$), water absorption index decreased; the peak viscosity, grain viscosity, final viscosity and regeneration value were significantly lower ($P<0.05$) and the digestibility was significantly higher ($P<0.05$) in the high-dextruded rice flour compared to the original rice flour. **Conclusion** The extrusion and puffing treatment has a greater effect on the germ-retained rice flour, which has a better digestibility and is more easily digested and absorbed with a higher degree of dextrinization.

KEY WORDS: embryonic rice; extruded puffing; pasting degree; physicochemical properties; digestibility

0 引言

留胚米又称为胚芽米^[1],是糙米去除掉其外表面的米糠层得到的包含相对完整的糊粉层、珠心层和胚芽的大米。稻米中 60%~70% 的 B 族维生素和微量营养素都存在于胚芽中,因而留胚米中含有丰富的膳食纤维、 γ -氨基丁酸、维生素等营养物质^[2]。目前国内外对留胚米的研究多集中在制备、储藏等方面,对留胚米粉的研究鲜有报道,留胚米粉应用面较广,可作为代餐粉、婴幼儿辅食等^[3]。相较于精制大米粉,留胚米粉中含有更多的不溶性膳食纤维、矿物质、脂肪酸等物质,因此留胚米粉存在加工性能不稳定,口感粗糙,色泽暗淡,冲调性、消化性差等问题^[4]。因此,如何提高留胚米粉的加工性能和食用品质是其产品开发的重点。

挤压膨化技术是在高温、高压、高剪切力下挤压食品,使得食品中的淀粉糊化、降解的先进加工处理方式^[5]。挤压制品的糊化程度是淀粉糊化和降解的结果,其大小直接影响制品的质量。林雅丽等^[6]对糙米进行挤压并研究了挤压对糙米淀粉理化性质的影响,结果表明挤压处理使糙米淀粉的峰值黏度、回生值和热焓值分别降低,淀粉发生糊化。张亭亭等^[7]利用挤压膨化加工糙米制备婴幼儿米粉,结果表明挤压处理可以改善米粉的吸水性和消化特性。付昱东^[8]经过大量研究后指出,在运用挤压膨胀技术加工淀粉类产品时,若将挤压温度和湿度提高,则会大大提高淀粉糊化水平,进而让其营养价值更高,消化率也更高。挤压制品的糊化程度是淀粉糊化和降解的结果,其大小直接影响制品的质量。目前对留胚米的研究主要集中在贮藏和包装上,对留胚米粉的加工工艺研究鲜见报道。王子妍等^[9]以留胚米为原料,采用焙炒-挤压膨化预糊化与酶法结合制备婴幼儿米粉,得到了黏度低、冲调性和消化性好的婴幼儿留胚米粉,但对不同糊化度的留胚米粉的特性没有展开研究。

因此,本研究采用挤压膨化法制备了不同糊化度的

留胚米粉,并对不同糊化度的留胚米粉的理化性质及体外消化特性进行研究,旨在为开发具有更好消化性、冲调性的留胚米产品提供思路,为改善留胚米粉的加工工艺提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

留胚米(哈尔滨工程北米科技有限公司)。

乙醚、石油醚、盐酸(分析纯,天津市大茂化学试剂厂);乙醇(分析纯,德州安捷高科消毒制品有限公司);亚甲基蓝、亚铁氰化钾、硫酸铜(分析纯,天津市瑞金特化学品有限公司)。

1.2 仪器与设备

FW100 万能高速粉碎机(天津泰斯特仪器公司);DSE-25 双螺杆挤压膨化机(德国布拉本德公司);ESJ180-4 电子天平(感量 0.0001 g,上海恒平科学仪器有限公司);BT-9300H 激光粒度分析仪(美国麦克仪器公司);Rapid-20 快速粘度分析仪(瑞典 Perten 公司);H-PID200 流变仪(美国 TA 仪器公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 不同糊化度留胚米粉的制备

参照李婷等^[10]的方法修改如下:将留胚米经粉碎并过 50 目筛,准确称取留胚米粉,按照一定的比例加入蒸馏水混合均匀。设定好双螺杆挤压膨化机的工艺参数,然后将米粉倒入料筒中开始挤压(螺杆转速 100 r/min,水分含量 30%,挤压温度分别为 70、90、110、130、150℃,得到不同糊化度的留胚米粉记为 F1~F5。将挤压膨化后的留胚米粉块放在 45℃下干燥 24 h。烘干后,用粉碎机粉碎,并过 50 目筛,即得不同糊化度留胚米粉。密封,避光保存备用。未经过任何处理的留胚米粉记为 F。

1.3.2 不同糊化度留胚米粉糊化度的测定

参考关桦楠等^[11]的方法进行留胚米粉糊化度的测定。

1.3.3 不同糊化度留胚米粉色度的测定

取适量样品于比色皿中, 放入色差计中开始测量不同糊化度留胚米粉的色差, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* 。两个颜色之间的总色差 ΔE , 计算公式(1)为:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

式中, ΔE —色差; ΔL 、 Δa 、 Δb —原留胚米粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 与预熟后留胚米粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 之间的差。

1.3.4 不同糊化度留胚米粉粒径的测定

参照李云龙等^[12]的方法进行测定。

1.3.5 不同糊化度留胚米粉水合特性的测定

参考 SOOJUNG 等^[13]的方法进行测定。吸水性指数(water absorption index, WSI)、水溶性指数(water soluble index, WAI)与膨胀势(swelling power, SP)计算如公式(2)~(4)为:

$$WSI = \frac{m_2}{m} \quad (2)$$

$$WAI = \frac{m_1}{m} \quad (3)$$

$$SP/\% = \frac{\text{毛重} - \text{离心管质量}}{\text{样品质量}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m —留胚米粉样品的质量, g; m_1 —上清液质量(干燥后), g; m_2 —离心管中沉淀的质量, g。

1.3.6 不同糊化度留胚米粉糊化特性的测定

参考 NY/T 1753—2009《水稻米粉糊化特性测定 快速黏度分析法》的方法进行测定, 以快速粘度分析仪测量样品的峰值黏度(peak viscosity, PV)、谷值黏度(trough viscosity, TV)、最终黏度(final viscosity, FV)、回生值(FV-PV)和衰减值(PV-TV)。

1.3.7 不同糊化度留胚米粉流变特性的测定

参考刘颖等^[14]的方法进行测定, 将在快速粘度分析仪(rapid visco analyzer, RVA)糊化后的淀粉糊冷却至室温, 放入流变仪测定平台, 间隙为 1 mm。在线性黏弹性区域以 1% 的目标应变进行振荡频率测试(0.1~10 Hz), 并记录动态流变数据, 包括储能模量(G')、损耗模量(G'')和损耗角正切值($\tan\delta$)。

1.3.8 不同糊化度留胚米粉体外消化性的测定

参照 ENGLYST^[15]的方法并稍加修改, 以葡萄糖氧化酶-过氧化物酶(glucose oxidase-peroxidase, GOPOD)法测定样品中葡萄糖含量。

1.4 数据处理

各指标的测定, 均重复 3 次。使用 SPSS 20.0 对各组数据进行差异与显著性分析, 以 $P < 0.05$ 为显著性阈值, 数据用平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 挤压温度对留胚米粉糊化度的影响

糊化度代表着谷物熟化的程度。随着对留胚米粉处理温度的升高, 糊化度由 F1 的 63.36% 升高至 F5 的 97.66%。说明经过较高温度挤压膨化处理的留胚米粉可以达到基本完全熟化。

2.2 不同糊化度留胚米粉基本成分分析

从表 1 可以看出, 与未糊化的留胚米粉相比, 高糊化度留胚米粉的蛋白质、脂肪、总淀粉和直链淀粉的含量均有所下降。淀粉含量降低, 主要是因为挤压的高温以及高剪切力的作用下, 部分淀粉结构被破坏, 从大分子降解成为小分子寡糖或葡萄糖^[16]。使得挤压后留胚米粉的总淀粉含量显著降低($P < 0.05$)。同时脂肪与蛋白质含量也显著下降。原因可能是, 在挤压过程时, 处于高温高压的环境中, 水分受热蒸发减少, 使原料中的脂肪与淀粉或蛋白质形成脂肪复合物, 进而降低了留胚米粉全粉中脂肪及蛋白质含量^[17], 周星杰^[18]也得到过类似结果; 在挤压膨化过程中, 直链淀粉的线性结构发生一定程度的降解导致直链淀粉的含量有所下降^[19]。可溶性膳食纤维的含量显著提高($P < 0.05$), 这可能是由于挤压温度的升高挤压膨化机内部高温、高压、高剪切力的协同作用增强, 对不溶性膳食纤维中的糖苷键作用加强, 使得不溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维。

2.3 不同糊化度留胚米粉色度的分析

ΔE 值为色差, 其值越大说明产品的综合色差越大; L^* 表示明度, L^* 越大, 表明褐变程度越小。 a^* 表示红绿色调, 正值越大, 红色调越强; b^* 表示黄蓝色调, 正值越大, 黄色调越强。从表 2 可以看出, 与未挤压留胚米粉相比, 随着温度的升高经挤压膨化处理的留胚米粉的 L^* 逐渐降低, 说明其亮度降低。随着糊化度的增加, 留胚米粉的 a^* 显著降低, 说明其红色逐渐变浅; b^* 先降低后增大, 说明其黄色先变浅后加深。当留胚米粉糊化度达到最大值时, 总色差 ΔE 最大。这些颜色上的差异可能与留胚米粉高温下发生的美拉德反应等有关^[20]。

2.4 不同糊化度留胚米粉粒径的分析

如图 1, 挤压膨化后留胚米粉的粒径显著增大, 并且随着挤压温度的升高, 留胚米粉的糊化度不断增大, 留胚米粉的粒径也随之增大, 当留胚米粉糊化度为 97.66% 时, 平均粒径最大为 285.80 μm 。挤压后的留胚米粉颗粒破损并挤压结团, 大颗粒比例显著增加, 形状更不规则。主要是因为熔融物料释放压力时, 其体积会在短时间内快速膨胀, 最终形成多孔海绵状结构^[21], 邓林爽^[22]的研究也得到了类似结果。

表 1 不同糊化度留胚米粉的基本成分

Table 1 Basic components of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees					
样品	蛋白质/%	脂肪/%	可溶性膳食纤维/%	直链淀粉/%	总淀粉/%
F	6.63±0.18 ^a	1.73±0.11 ^a	0.86±0.12 ^f	20.50±0.43 ^a	80.38±0.34 ^a
F1	6.45±0.16 ^b	1.51±0.18 ^b	1.29±0.05 ^d	19.67±0.23 ^b	79.86±0.22 ^b
F2	6.26±0.23 ^c	1.38±0.26 ^c	1.54±0.19 ^c	18.84±0.35 ^c	78.65±0.18 ^c
F3	6.13±0.34 ^d	1.17±0.14 ^d	1.96±0.21 ^b	18.45±0.61 ^d	77.51±0.21 ^d
F4	5.97±0.21 ^c	0.98±0.09 ^e	2.31±0.14 ^a	17.89±0.52 ^e	75.37±0.11 ^e
F5	5.62±0.36 ^f	0.72±0.15 ^f	2.45±0.17 ^e	14.63±0.44 ^f	73.16±0.36 ^f

注：同列字母不同表示样品之间差异显著($P<0.05$)，下同。

表 2 不同糊化度留胚米粉的色度

Table 2 Chroma of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees				
样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
F	48.88±0.31 ^a	3.25±0.15 ^a	2.76±0.11 ^a	26.04±0.31 ^f
F1	42.57±0.21 ^b	3.21±0.12 ^b	2.67±0.14 ^e	32.04±0.34 ^e
F2	38.83±0.16 ^c	3.19±0.14 ^c	2.64±0.12 ^f	34.00±0.43 ^d
F3	35.56±0.30 ^d	3.16±0.11 ^d	2.69±0.15 ^d	37.74±0.29 ^c
F4	31.13±0.41 ^e	3.14±0.18 ^e	2.72±0.09 ^e	39.29±0.28 ^b
F5	29.24±0.43 ^f	3.11±0.13 ^f	2.74±0.11 ^b	41.41±0.33 ^a

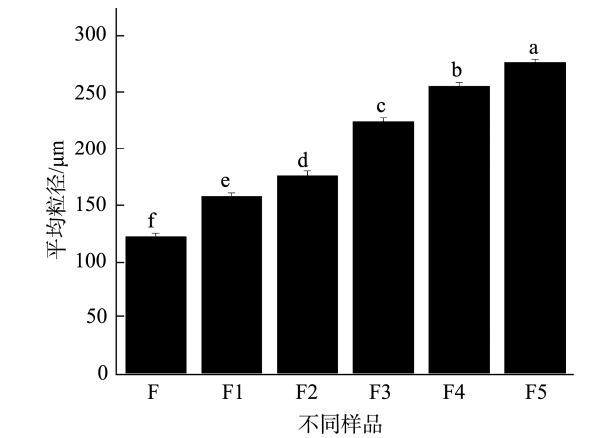


图 1 不同糊化度留胚米粉的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees

2.5 不同糊化度留胚米粉水合特性的分析

从表 3 可以看出，与未经挤压膨化的留胚米粉相比，随着糊化度的增大，经挤压膨化后的留胚米粉的 WAI 和 SP 显著升高，WSI 与 WAI 呈负相关。挤压温度增加使得物料吸收热量增加，进而增加了分子动能，淀粉蛋白质分解

会加强，糊化程度也会提高，因此增加更多的水溶性物质，具体表现为留胚米全粉的水溶性指数增加，从而导致留胚米粉的吸水性指数和膨胀势升高。

表 3 不同糊化度留胚米粉的 WAI、WSI 和 SP

Table 3 WAI, WSI and SP of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees			
样品	WAI/%	WSI/%	SP/%
F	4.56±0.16 ^f	9.74±0.13 ^a	4.25±0.24 ^f
F1	6.12±0.16 ^c	8.85±0.21 ^b	6.62±0.22 ^e
F2	6.45±0.21 ^d	8.73±0.18 ^c	6.87±0.13 ^d
F3	6.66±0.14 ^c	8.56±0.15 ^d	7.35±0.17 ^c
F4	6.73±0.23 ^b	8.33±0.06 ^e	7.65±0.18 ^b
F5	6.93±0.21 ^a	8.14±0.12 ^f	7.84±0.15 ^a

2.6 不同糊化度留胚米粉糊化特性的分析

从表 4 可以看出，与未经挤压膨化的留胚米粉相比，随着糊化度的增大，通过挤压膨化后不同糊化度留胚米粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度和回生值显著减小 ($P<0.05$)。峰值黏度是由淀粉颗粒之间相互摩擦引起的。谷值黏度是由于温度降低后由直链淀粉和支链淀粉包围的水分子的运动减弱引起的^[23]。峰值黏度和谷值黏度的降低是因为留胚米粉糊化过程中的淀粉颗粒的完整性被破坏，淀粉由大分子物质降解为小分子物质。衰减值反映淀粉糊的热稳定性及淀粉在高温下的抗剪切能力，衰减值越大，热黏度的稳定性越差^[24]。留胚米粉糊化度越高其衰减值越大，表明留胚米粉的淀粉颗粒强度较小，容易破裂，挤压膨化处理后的留胚米其热稳定较差，易于消化，同样的现象可见苦荞、玉米等谷物^[25-26]。回生值是反映淀粉糊的稳定性及老化趋势。随着糊化度的增大，留胚米粉回生值逐渐减小，这表明经挤压膨化留胚米粉越来越稳定，用高糊化度留胚米粉制作出来的食品不易老化。

表 4 不同糊化度留胚米粉的糊化特性
Table 4 Gelatinization characteristics of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees

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	峰值时间/s
F	1900±11.06 ^a	1187±12.25 ^a	126±12.63 ^f	2893±13.12 ^a	1706±11.32 ^a	6.93±0.36 ^c
F1	724±12.33 ^f	576±14.32 ^f	142±11.55 ^e	1801±11.86 ^f	625±11.45 ^e	6.73±0.34 ^f
F2	665±15.72 ^e	479±10.85 ^e	164±11.19 ^d	980±12.68 ^e	581±12.06 ^d	6.00±0.26 ^d
F3	574±11.45 ^d	441±15.45 ^d	248±10.26 ^c	910±10.96 ^c	540±8.98 ^c	5.87±0.25 ^c
F4	426±13.56 ^b	430±11.12 ^b	485±13.56 ^b	875±9.85 ^b	534±10.56 ^b	5.20±0.23 ^b
F5	417±9.74 ^c	419±11.56 ^c	613±14.35 ^a	848±10.72 ^d	469±9.76 ^f	5.14±0.34 ^a

2.7 不同糊化度留胚米粉流变特性的分析

动态流变学特性储能模量(G')表示能量贮存而可恢复的弹性性质; 损耗模量(G'')表示能量消散的黏性性质^[27]。损耗角正切值 $\tan\delta$ 为 G'' 与 G' 的比值, $\tan\delta$ 越大, 表明样品的黏性比例越大, 流动性强, 反之则弹性比例较大。在整个频率范围内, 所有样品均表现出典型的弱凝胶体系特征($G' \gg G''$), 表明弹性发挥了主导作用, 且 G' 和 G'' 都随着频率的增加而增大, 具有频率依赖性, 且样品的弹性大于黏性^[28]。

与未经挤压膨化处理的留胚米粉相比, 经过挤压膨化后的不同糊化度留胚米粉的 G' 与 G'' 均小于未经挤压膨化处理的留胚米粉的 G' 与 G'' 。这说明经过挤压膨化后的不同糊化度留胚米粉的弹性和黏性都有所下降。流体性特征增强的原因可能是挤压膨化的热处理方式造成淀粉的糊化降解, 从而影响了留胚米粉的流体性特征^[29]。在挤压温度变化期间, 经过挤压膨化后的不同糊化度留胚米粉的 G' 高于 G'' 。随着温度的增大, 挤压对留胚米淀粉有部分破坏作用, 随着温度的升高直链淀粉更易从淀粉颗

粒中渗出并相互作用导致 G' 和 G'' 升高^[30]。综上可得, 挤压膨化处理后的留胚米粉可以更加迅速地形成弹性凝胶, 弹性特征增强。

2.8 不同糊化度留胚米粉体外消化性的分析

从表 5 可以看出, 挤压膨化后留胚米粉的快消化淀粉 (rapidly digestible starch, RDS) 含量随糊化度的增加而显著增加 ($P < 0.05$)。挤压过程中, 在挤压过程中, 淀粉的表面结构被破坏, 使消化酶更容易进入淀粉颗粒的内部^[30]; 同时, 挤压可将留胚米中的淀粉大分子降解成小分子低聚糖或糊精, 更便于人体消化吸收^[31]。此外, 慢消化淀粉 (slowly digestible starch, SDS) 含量显著降低 ($P < 0.05$), 可能是一部分的 SDS 经挤压膨化转化为了 RDS 使得其含量下降。随着挤压温度的升高米粉中抗性淀粉 (resistant starch, RS) 的含量随之下降。其原因可能是高糊化度会导致淀粉结构破坏, RDS 含量增加, 淀粉糊化降解会在一定程度上降低 RS 含量。RS 不易被人体消化吸收, 降低 RS 含量有助于提高米粉的消化率^[32]。结果表明, 高糊化度的留胚米粉更易消化吸收。

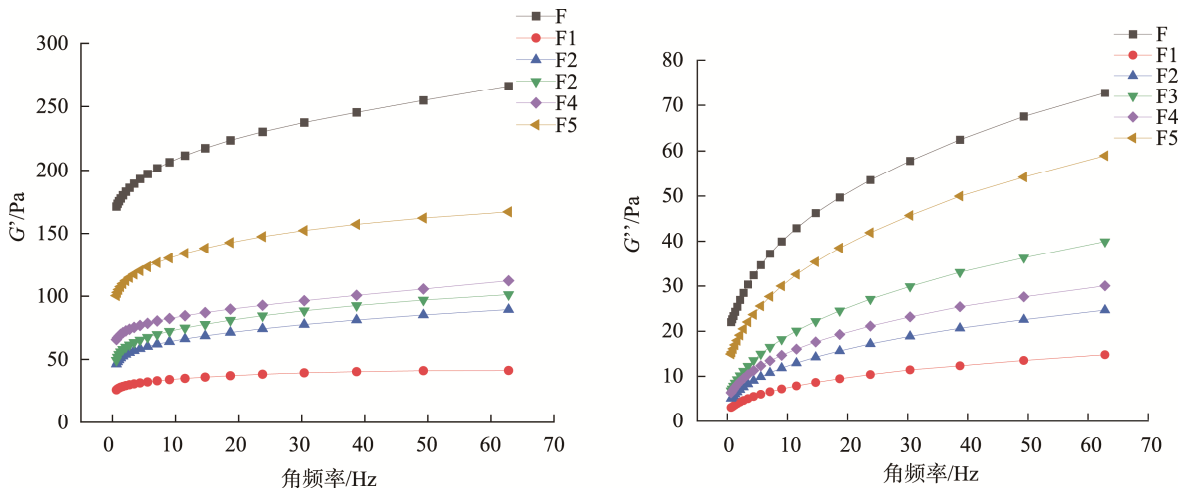


图 2 不同糊化度留胚米粉流变特性
Fig.2 Rheological properties of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees

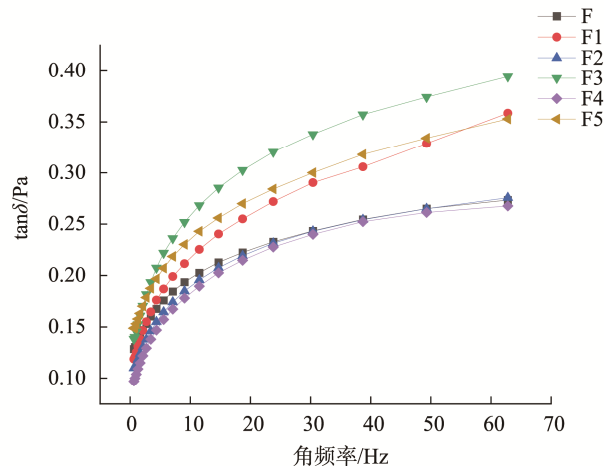


图 2(续) 不同糊化度留胚米粉流变特性
Fig.2 Rheological properties of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees

表 5 不同糊化度留胚米粉的体外消化
Table 5 *In vitro* digestion of preserved embryo rice flour with different gelatinization degrees

样品	RDS/%	SDS/%	RS/%
F	55.62±0.82 ^f	37.25±0.93 ^a	7.13±0.58 ^a
F1	58.38±0.96 ^e	34.75±0.76 ^b	6.87±0.48 ^b
F2	60.48±0.92 ^d	33.23±0.95 ^c	6.29±0.42 ^d
F3	63.61±0.85 ^c	30.18±0.81 ^d	6.21±0.31 ^f
F4	66.27±0.91 ^b	27.54±0.85 ^e	6.19±0.45 ^c
F5	68.55±0.83 ^a	25.28±0.94 ^f	6.17±0.33 ^c

3 结 论

本研究通过对挤压温度进行设计，在温度为 70~150℃下，制备不同糊化度的留胚米粉。随着挤压温度的不断提高，留胚米粉的糊化度显著增大，最大可达 97.66%；与未糊化的留胚米粉相比，高糊化度留胚米粉的蛋白质、脂肪、总淀粉和直链淀粉的含量均有所下降；随着糊化度的增加，留胚米粉可溶性膳食纤维增加，色度变化显著，粒径增大；水合特性增强；黏度显著降低；淀粉体外消化实验结果表明，高糊化度的留胚米粉有较好的消化率并且更容易消化吸收。本研究以挤压膨化法对留胚米进行加工处理，虽得到了较好消化性的留胚米粉为留胚米加工利用提供一定的思路，但在挤压膨化中会因高温、高压、高剪切的条件会对留胚米中含有的维生素进行破坏。后续研究中可以以低温挤压或酶法对留胚米进行处理，以期在加工利用的同时尽量保证留胚米营养成分。

参考文献

[1] 熊海铮, 张宁, 孙健, 等. 水稻留胚米的营养价值、加工技术及产品开发研究进展[J]. 核农学报, 2022, 26(7): 1031–1036.
XIONG HZ, ZHANG N, SUN J, *et al.* Research progress on nutritional value, processing technology and product development of left embryo rice [J]. Acta Agric Nucl Sin, 2022, 26(7): 1031–1036.

[2] 姜雯翔, 赵黎平, 顾振新, 等. 发芽糙米焙炒过程中品质变化研究[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 72–76.
JIANG WX, ZHAO LP, GU ZX, *et al.* Study of quality changes during roasting of sprouted brown rice [J]. Food Sci, 2014, 35(19): 72–76.

[3] 高雪燕. 留胚米营养成分研究及留胚米产品的开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
GAO XY. Research on nutrition components of left embryo rice and development of left embryo rice products [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.

[4] 王丹. 萌芽留胚糙米制备工艺研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2017.
WANG D. Study on preparation technology of germinated brown rice [D]. Guizhou: Guizhou University, 2017.

[5] 吴丽. 改良挤压技术制备低蛋白质构米及其性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
WU L. Preparation of low protein texture rice by improved extrusion technology and its properties [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.

[6] 林雅丽, 张晖, 王立, 等. 挤压对糙米中淀粉理化性质的影响[J]. 现代食品科技, 2021, 32(12): 254–259, 224.
LIN YL, ZHANG H, WANG L, *et al.* Extrusion effect on the physical and chemical properties of brown rice starch in [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 32 (12): 254–259, 224.

[7] 张亭亭, 邢贝贝, 赵强, 等. 挤压膨化处理对婴幼儿米粉理化和体外消

- 化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 158–165.
- ZHANG TT, XING BB, ZHAO Q, *et al.* Effects of extruding treatment on physicochemical and *in vitro* digestion characteristics of infant rice flour [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(1): 158–1651.
- [8] 付昱东. 玉米淀粉的挤压制备及理化性质研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- FU YD. Preparation and the physical and chemical properties of corn starch extrusion research [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.
- [9] 王子妍, 刘颖, 贾健辉, 等. 预糊化-复合酶解法制备婴幼儿留胚米粉及其理化性质研究[J/OL]. 食品工业科技, 2022. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010067
- WANG ZY, LIU Y, JIA JH, *et al.* Study on preparation and physicochemical properties of infant embryo rice flour by pregelatinization and compound enzymatic hydrolysis [J/OL]. *Sci Technol Food Ind*, 2022. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010067
- [10] 李婷, 江蕾, 田利亚, 等. 紫外、微波处理对留胚米理化性质及储藏期的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(12): 7–12.
- LI T, JIANG L, TIAN LY, *et al.* Ultraviolet, microwave treatment for embryo rice physical and chemical properties and the influence of storage period [J]. *J Cere Oils Ass*, 2021, 36(12): 7–12.
- [11] 关桦楠, 吴永存, 孙冰玉, 等. 高压蒸煮及微波预熟工艺改良糙米品质的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 204–211.
- GUAN HN, WU YC, SUN BY, *et al.* Effect of high pressure and microwave precooking processes on improving the quality of brown rice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(8): 204–211.
- [12] 李云龙, 董桂梅, 董吉林, 等. 不同糊化度苦荞粉理化性质和体外消化性的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 21–27.
- LI YL, DONG GM, DONG JL, *et al.* Study on physical and chemical properties and *in vitro* digestibility of tartary buckwheat powder with different gelatinization degrees [J]. *J Cere Oils Ass*, 2021, 36(3): 21–27.
- [13] SOOJUNG HEO, SOYOUNG JEON, SUYONG LEE. Utilization of lentinusedodes mushroomb glucan to enhance the functional properties of gluten efre rice noodles [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2014, 55: 627–631.
- [14] 刘颖, 徐晨冉, 高嫚, 等. 不同焙炒程度对复配糙米粉的品质影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(7): 2144–2150.
- LIU Y, XU CR, GAO M, *et al.* Effects of different roasting degrees on the quality of mixed brown rice flour [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(7): 2144–2150.
- [15] ENGLYST HN. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *Eur J Clin Nutr*, 1992, 46: S33–S50.
- [16] 焦昆鹏, 马丽苹, 罗磊, 等. 挤压膨化对山药全粉理化性质、加工特性和淀粉体外消化性的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 159–165.
- JIAO KP, MA LP, LUO L, *et al.* Effects of extrusion puffing on physicochemical properties, processing characteristics and *in vitro* digestibility of starch in whole yam powder [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(1): 159–165.
- [17] 祝东品, 吕庆云, 周梦舟, 等. 青稞全粉挤压米工艺优化及品质研究[J]. 食品科技, 2019, 44(7): 202–210.
- ZHU DP, LV QY, ZHOU MZ, *et al.* All highland barley powder extrusion process optimization and quality study [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(7): 202–210.
- [18] 周星杰. 添加挤压糊化苦荞粉对小麦面团性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- ZHOU XJ. Effects of extruded tartary buckwheat powder on wheat dough properties [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017.
- [19] 战汪涛. 黑米挤压膨化工艺及膨化黑米粉应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- ZHAN WT. Study on extrusion technology of black rice and application of the extrusive black rice flour [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.
- [20] 谢天. 不同改性方法对挤压重组米原料品质影响及加工工艺参数的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- XIE T. Study on the effect of different modification methods on the quality of extruded reconstituted rice raw materials and processing parameters [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [21] 王庆, 张光, 杨春华, 等. 挤压膨化对大米粉糊化度及蛋白质体外消化率的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 5.
- WANG Q, ZHANG G, YANG CH, *et al.* Effect of extrusion on gelatinization degree and protein digestibility of rice flour [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(7): 5.
- [22] 邓林爽. 不同糊化度糯米粉理化特性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- DENG LS. Physical and chemical properties of glutinous rice flour with different gelatinization degrees [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2019.
- [23] SUN XY, CHEN YU, FU XM, *et al.* Extruded whole buckwheat noodles: effects of processing variables on the degree of starch gelatinization, changes of nutritional components, cooking characteristics and *in vitro* starch digestibility [J]. *Food Funct*, 2019, 10: 6362–6373.
- [24] KAUSHAL P, KUMAR V, SHARMA HK. Comparative study of physicochemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeonpea (*Cajanus cajan*) flour and their blends [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2012, 48(1): 59–68.
- [25] DIXON WR, MORALES BE, KONGCHUM M, *et al.* Aroma, quality, and consumer mindsets for shelf-stable rice thermally processed by reciprocal agitation [J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1559.

- [26] 孙晓静. 糊化处理对苦荞面团性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- SUN XJ. Effect of pasting on properties of tartary buckwheat dough [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016.
- [27] 韩聪, 邢俊杰, 郭晓娜, 等. 挤压处理对苦荞粉理化特性及全苦荞挂面品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 52–58.
- HAN C, XING JJ, GUO XS, *et al.* Effects of extrusion treatment on physical and chemical properties of tartary buckwheat powder and quality of tartary buckwheat flour [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2022, 37(3): 52–58.
- [28] SHABIR AM, SOWRIAPPAN JDB, MANZOOR AS, *et al.* Process optimization and characterization of popped brown rice [J]. Int J Food Prop, 2016, 19(9/12): 2102–2112.
- [29] SAHAGÚN M, BENAVENT-GIL Y, ROSELL CM, *et al.* Modulation of *in vitro* digestibility and physical characteristics of protein enriched gluten free breads by defining hydration [J]. LWT- Food Sci Technol, 2019, 117: 108642.
- [30] VERNON-CARTER EJ, ALVAREZ-RAMIREZ J, BELLO-PEREZ LA, *et al.* Supplementing white maize masa with anthocyanins: Effects on masa rheology and on the *in vitro* digestibility and hardness of tortillas [J]. J Cereal Sci, 2020, 91: 102883.
- [31] SU SK, JIN X, ZHANG J, *et al.* Extrusion of a model sorghum-barley blend: Starch digestibility and associated properties [J]. J Cereal Sci, 2017,

75: 314–323.

- [32] BRAHMA S, WEIER SA, ROSE DJ. Effects of selected extrusion parameters on physicochemical properties and *invitro*, starch digestibility and β -glucan extractability of whole grain oats [J]. J Cereal Sci, 2016, 70: 85–90.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



王子妍, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工。

E-mail: 1780972876@qq.com



刘颖, 博士, 教授, 主要研究方向为植物蛋白工程与营养功能因子研究。

E-mail: 154057693@qq.com



张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。

E-mail: foodzhangna@163.com