

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81274

# 海红米挤压工艺优化及理化性质、 消化与营养特性研究

孙武飞<sup>1,2</sup> 汪卓<sup>1,2,3,4,5</sup> 钟赛意<sup>1,2,3,4,5</sup> 邹文韬<sup>1,5</sup> 胡嘉康<sup>1,5</sup>

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东 湛江 524088;  
3. 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东 湛江 524088; 4. 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东 湛江  
524088; 5. 广东省亚热带果蔬加工科技创新中心, 广东 湛江 524088)

**摘要:** [目的] 探讨挤压膨化技术对海红米理化性质、消化特性及营养成分的影响。[方法] 采用响应面法优化海红米挤压膨化工艺参数。通过水溶性指数 (WSI)、糊化度、淀粉消化特性 (包括快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉) 及抗营养因子 (植酸) 含量等探究挤压处理对海红米粉理化性质的影响, 并对挤压前后海红米粉的微观结构、淀粉晶型和结晶度进行表征。[结果] 经过挤压膨化处理, 海红米粉的水溶性和糊化度得到改善, 其水溶性指数 (WSI) 为 18.48%, 糊化度达到了 95.35%; 海红米粉的淀粉晶型由 A 型转变为 V 型, 结晶度下降了 56.44% ( $P < 0.01$ ), 且其黏度系数和糊化峰值温度显著降低。挤压膨化还能降低海红米粉中抗营养因子植酸含量 18.83% ( $P < 0.01$ ), 提高其快消化淀粉比例, 降低抗性淀粉含量, 体外淀粉消化率升至 74.72%。[结论] 挤压膨化技术显著改善了海红米的理化性质, 降低了抗营养因子含量并有效保留了其营养成分, 提升了淀粉的消化特性。

**关键词:** 海红米; 挤压膨化; 理化性质; 结构表征; 消化特性

## Extrusion process optimization of sea red rice and its physicochemical properties, digestion characteristics, and nutritional components

SUN Wufei<sup>1,2</sup> WANG Zhuo<sup>1,2,3,4,5</sup> ZHONG Saiyi<sup>1,2,3,4,5</sup> ZOU Wentao<sup>1,5</sup> HU Jiakang<sup>1,5</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;  
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;  
3. Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;  
4. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;  
5. Guangdong Provincial Science and Technology Innovation Center for Subtropical Fruits and Vegetables Processing, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the effects of extrusion technology on the physicochemical properties, digestion characteristics, and nutritional components of sea red rice. [Methods] The extrusion process parameters for sea red rice are optimized by response surface methodology. The effects of the extrusion treatment on the physicochemical properties of the sea red rice flour are explored by water solubility index (WSI), gelatinization degree, starch digestion properties (including rapidly digestible starch, slowly digestible starch, and resistant starch), and the anti-nutritional factor content (phytic acid). The microstructure, starch crystal form, and crystallinity are

**基金项目:** 广东省科技专项资金农业技术攻关专题 (编号: 2021A05198); 广东省高校重点领域专项 (编号: 2023ZDZX2025); 广东海洋大学科研启动经费 (编号: 060302042403)

**通信作者:** 汪卓 (1993—), 男, 广东海洋大学讲师, 博士。E-mail: wz202206@gdou.edu.cn  
钟赛意 (1979—), 男, 广东海洋大学教授, 博士。E-mail: zsy1xc@126.com

**收稿日期:** 2024-12-13 **改回日期:** 2025-05-08

**引用格式:** 孙武飞, 汪卓, 钟赛意, 等. 海红米挤压工艺优化及理化性质、消化与营养特性研究 [J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 164-172.

**Citation:** SUN Wufei, WANG Zhuo, ZHONG Saiyi, et al. Extrusion process optimization of sea red rice and its physicochemical properties, digestion characteristics, and nutritional components [J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 164-172.

characterized before and after extrusion. [Results] After extrusion treatment, the water solubility (WSI) of 18.48% and gelatinization degree (95.35%) are improved in the sea red rice flour. The starch crystal form of sea red rice flour is changed from A type to V type, the crystallinity is decreased by 56.44% ( $P < 0.01$ ), and the viscosity coefficient and gelatinization peak temperature are decreased significantly. Additionally, extrusion reduces the content of phytic acid, an antinutritional factor in sea red rice flour, by 18.83% ( $P < 0.01$ ), while increasing the rapidly digestible starch proportion and reducing the resistant starch content, with *in vitro* starch digestibility increased to 74.72%. [Conclusion] Extrusion technology significantly improves the physicochemical properties of sea red rice, reduces the antinutritional factor contents, and effectively retains its nutrients, improving the digestion characteristics of starch.

**Keywords:** sea red rice; extrusion; physicochemical property; structural characterization; digestion characteristic

大米由于其低过敏性、高能量以及丰富的营养成分,成为全球范围内婴幼儿辅食的主流原料<sup>[1-2]</sup>。尤其是在中国,米粉类辅食占据了市场主导地位,成为婴幼儿成长的重要营养来源<sup>[3]</sup>。然而,随着科学技术的进步和消费者对食品营养的多样化需求的增加,传统大米产品已难以满足特定人群(如婴幼儿)对营养和功能性食品的需求。

海红米中富含硒、花青素、膳食纤维等多种有益健康的成分,且其微量元素(如锌、铁、钙)含量远高于普通白米<sup>[4-5]</sup>。但是海红米的消化性较差且富含抗营养因子(如植酸),限制了其在婴幼儿辅食中的广泛应用。

挤压膨化工艺不仅能够提高谷物的淀粉消化性和营养成分的可用性,还能赋予其良好的水溶性、口感和营养价值<sup>[6-8]</sup>。郭艳利<sup>[9]</sup>利用普鲁兰酶处理米粉与其他辅料,通过挤压工艺开发了婴幼儿营养米粉,其溶解度为82%,体外消化率为77.9%。曹家宝等<sup>[10]</sup>以大米和绿豆为原料,通过挤压技术制备婴幼儿膨化营养米粉,发现挤压通过增加淀粉表面碎裂和粗糙度并降低密度,使膨化营养米粉的消化率高于市售婴幼儿营养米粉。何静盈等<sup>[11-13]</sup>研究表明,挤压膨化对其他谷物的消化性有显著改善作用。目前,有关海红米的研究主要集中在副产物加工利用、功能物质提取工艺优化及活性研究等方面,有关海红米整体开发利用及加工对其消化性特性的研究较少。试验拟优化海红米的挤压膨化工艺,以提升其消化性、减少抗营养因子,并探索其作为婴幼儿辅食的潜力,以期海红米高值化利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

海红米:海红11号,广东省湛江市遂溪建新卜巢村海水稻基地;

猪胰 $\alpha$ -淀粉酶:9 U/mg,上海源叶生物科技有限公司;

糖化酶(100 U/mg)、植酸含量检测试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;

葡萄糖(GLU)测试盒:南京建成生物工程研究所;

淀粉含量检测试剂盒:北京盒子生工科技有限公司;

无水乙醇、盐酸、氢氧化钠、碘、碘化钾等均为国产分

析纯。

#### 1.1.2 主要仪器设备

双螺杆挤压膨化机:DS32-II型,济南盛润机械有限公司;

多功能酶标仪:Varioskan Flash型,美国 Thermo Scientific公司;

差示扫描量热仪:Q2000型,美国TA公司;

傅里叶红外光谱仪:Tensor-27型,德国Bruker公司;

色差计:CR-400型,柯尼卡美能达投资有限公司;

热场发射扫描电镜:JSM-7610F型,日本电子株式会社;

X射线衍射仪:X'Pert PRO型,英国Malvern Panalytical公司;

高级模块化流变仪:HAAKE-MARS III型,美国Thermo Fisher Scientific公司。

## 1.2 方法

1.2.1 单因素试验 参照文献[14]并结合预试验,将进料速度设为20 Hz,机筒前两个区温度分别设定为80, 110 °C,固定水分含量为18%、螺杆转速为25 Hz、末区温度为140 °C,分别考察水分含量(14%, 16%, 18%, 20%, 22%)、螺杆转速(25, 30, 35, 40, 45 Hz)和末区温度(125, 140, 155, 170, 185 °C)对海红米粉糊化度和水溶性指数的影响。

1.2.2 响应面试验 根据单因素试验结果,采用三因素三水平的Box-Behnken试验设计方法,选取水分含量、螺杆转速和末区温度作为自变量,并以水溶性指数和糊化度的综合评分作为响应值进行参数优化。

1.2.3 水合特性测定 参照Khan等<sup>[15]</sup>的方法并稍作修改。将1.00 g样品与20 mL水混匀,30 °C保温30 min,4 500 r/min离心10 min。将上清液转移至烧杯内,105 °C烘干至恒重。分别按式(1)、式(2)计算持水性指数(WAI)和水溶性指数(WSI)。

$$W_{WSI} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

$$W_{WAI} = \frac{m_3}{m_2}, \quad (2)$$

式中:

$W_{\text{WSI}}$ ——水溶性指数, %;

$W_{\text{WAI}}$ ——持水性指数;

$m_1$ ——上清液残留质量, g;

$m_2$ ——样品干重质量, g;

$m_3$ ——离心后样品质量, g。

1.2.4 糊化度测定 参照赵志浩等<sup>[16]</sup>的方法。

1.2.5 综合评分方法 参照池春欢等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改。分别以 WSI( $F_1$ )和糊化度( $F_2$ )作为评价指标,对各指标以其最大值为参照进行归一化后,赋予各指标不同的权重系数进行多指标综合评分。其中, WSI 权重系数为 0.4, 糊化度权重系数为 0.6, 按式(3)计算最终评分。

$$F = (0.4F_1/F_{1\max} + 0.6F_2/F_{2\max}) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$F$ ——综合评分, 分;

$F_1$ ——持水性指数, %;

$F_{1\max}$ ——持水性指数最大值, %;

$F_2$ ——糊化度, %;

$F_{2\max}$ ——糊化度最大值, %。

1.2.6 流变特性分析 参照白晓蓉<sup>[18]</sup>的方法并修改。制备 8% 的样品溶液, 95 °C 水浴 30 min。将适量样品平铺于测试台, 静置 2 min, 采用 60 mm 直径模具进行测试, 测试温度为 25 °C, 板间间隙为 1 mm, 测定样品剪切应力和表观黏度随剪切速率(0~100 s<sup>-1</sup>)的变化。

1.2.7 色差测定 参照陈坤林等<sup>[19]</sup>的方法。

1.2.8 热力学性质分析 参照袁嘉渝等<sup>[20]</sup>的方法并修改。使用差示扫描量热仪进行测试, 以空坩埚作为参照, 称取 5.0 mg 样品置于铝制坩埚中, 设置升温速率为 10 °C/min, 测定样品从 30 °C 升温至 200 °C 的热力学特性参数变化。

1.2.9 扫描电镜分析 使用加速电压为 12.0 kV 的扫描电子显微镜观察样品在挤压前后的结构变化, 放大倍数分别为 1 000, 2 000, 4 000, 6 000。

1.2.10 晶体衍射分析 参照李家祺等<sup>[21]</sup>的方法并修改。仪器参数: 管压 40 kV, 管流 30 mA, 扫描  $2\theta$  范围为 7°~40°, 步宽为 0.02°, 扫描速度 4 (°)/min。

1.2.11 快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)含量和体外淀粉消化率测定 参照 Englyst 等<sup>[22]</sup>的方法并修改。准确称取 100 mg 样品于玻璃瓶中, 加入 15 mL 0.2 mol/L 醋酸钠缓冲溶液(pH 6.5)混匀, 加入 10 mL 混合酶液(猪胰  $\alpha$ -淀粉酶 180 U/mL、糖化酶 80 U/mL), 37 °C 恒温水浴, 260 r/min 搅拌, 并分别于 0, 20, 40, 60, 90, 120, 180 min 取 1 mL 酶解液, 高温灭活, 10 000 r/min 离心 5 min, 取上清液稀释一定倍数, 用葡萄糖测试盒测定还原糖含量。分别按式(4)~式(7)计算快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)含量

及体外淀粉消化率(SH)。

$$S_{\text{RD}} = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{T_s} \times 100\%, \quad (4)$$

$$S_{\text{SD}} = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{T_s} \times 100\%, \quad (5)$$

$$S_{\text{R}} = 100\% - S_{\text{RD}} - S_{\text{SD}}, \quad (6)$$

$$S_{\text{H}} = \frac{G_{\text{T}} \times 0.9}{T_s} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

$S_{\text{RD}}$ ——快消化淀粉含量, %;

$S_{\text{SD}}$ ——慢消化淀粉含量, %;

$S_{\text{R}}$ ——抗性淀粉含量, %;

$S_{\text{H}}$ ——体外淀粉消化率, %;

$G_0$ ——消化前游离葡萄糖含量, mg;

$G_{20}$ 、 $G_{120}$ 、 $G_t$ ——消化 20, 120 min 及  $t$  时刻的葡萄糖释放量, mg;

$T_s$ ——总淀粉质量, mg;

0.9——转换系数。

1.2.12 营养成分测定

(1) 总淀粉: 采用淀粉含量检测试剂盒。

(2) 脂肪: 参照 GB 5009.6—2016。

(3) 蛋白质: 参照 GB 5009.5—2016。

(4) 灰分: 参照 GB 5009.4—2016。

(5) 植酸: 采用植酸含量检测试剂盒。

1.3 数据处理

所有试验均重复进行 3 次, 结果以平均值 ± 标准差表示。使用 SPSS 27.0 和 Design-Expert 13 软件进行数据处理和分析, 采用 Origin 2021 软件绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

2.1.1 水分含量对海红米粉品质的影响 由图 1 可知, 当海红米粉水分含量为 14%~18% 时, 糊化度变化较为平缓。当水分含量 > 18% 时, WSI 和糊化度均显著下降。这可能是由于高水分含量导致机腔内热量积累减少, 剪切力作用减弱及润滑作用增强, 从而降低了升温速率对糊化过程的影响, 并减少了大分子物质的降解<sup>[23-24]</sup>。综合考虑, 选择水分含量为 14%, 16%, 18% 进行后续试验。

2.1.2 螺杆转速对海红米粉品质的影响 由图 2 可知, 随着螺杆转速的增加, WSI 和糊化度呈先升后降趋势。当螺杆转速 < 40 Hz 时, WSI 和糊化度逐渐上升。这可能归因于螺杆转速直接影响物料在机腔内的停留时间和剪切力大小<sup>[25]</sup>; 随着螺杆转速的提升, 原料在机腔内受螺杆间及螺杆与机腔内壁之间剪切力和摩擦力作用, 淀粉分解加速<sup>[26]</sup>, 但螺杆转速过高, 海红米粉受剪切作用的时间缩短, 导致 WSI 下降。因此, 选择螺杆转速为 35, 40, 45 Hz 进行后续试验。

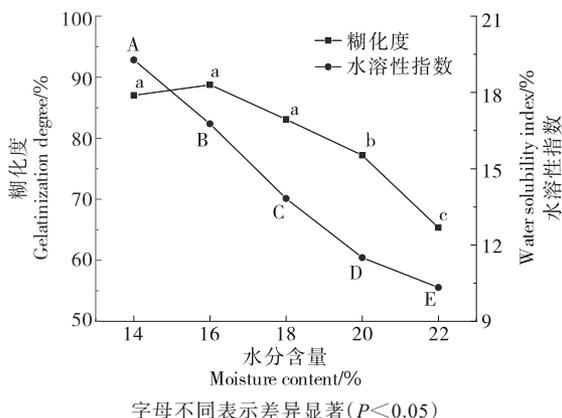


图1 水分含量对海红米粉糊化度和WSI的影响

Figure 1 Effects of moisture content on gelatinization degree and WSI of sea red rice flour

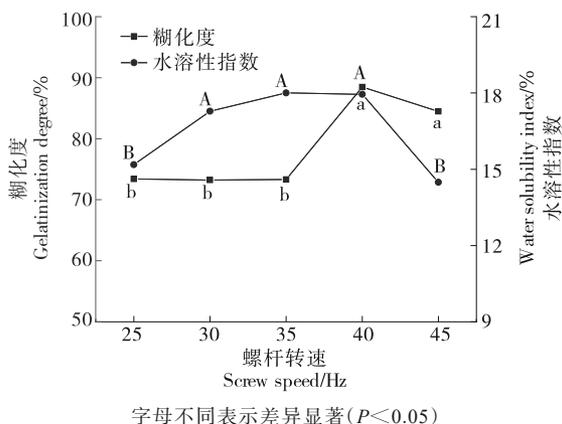


图2 螺杆转速对海红米粉糊化度和WSI的影响

Figure 2 Effects of screw speed on the gelatinization degree and WSI of sea red rice flour

2.1.3 末区温度对海红米粉品质的影响 由图3可知,海红米粉的WSI和糊化度随着机筒末区温度的升高先增加后减少趋势,表明末区温度可能对淀粉的物理化学性质具有双重作用,即在相对较低温度范围(如155℃左右),淀粉颗粒逐渐吸水膨胀,微晶区结构开始被破坏,分子链解离,糊化度和WSI随之上升<sup>[27]</sup>。当末区温度超过一定范围(如>185℃)时,过高的温度可能导致淀粉焦糊,生成的焦化产物会降低降解效率并抑制溶解性<sup>[28]</sup>。因此,选择末区温度为155,170,185℃进行后续研究。

2.2 响应面实验

2.2.1 响应面实验设计及结果 海红米粉挤压膨化响应面实验因素水平见表1,试验设计及结果见表2。

对综合评分进行多元回归拟合,得二次多项回归方程为:

$$Y=92.07-4.79A+4.03B+0.1995C+2.57AB+0.8378AC-1.34BC+1.71A^2-3.32B^2-0.1885C^2. \quad (8)$$

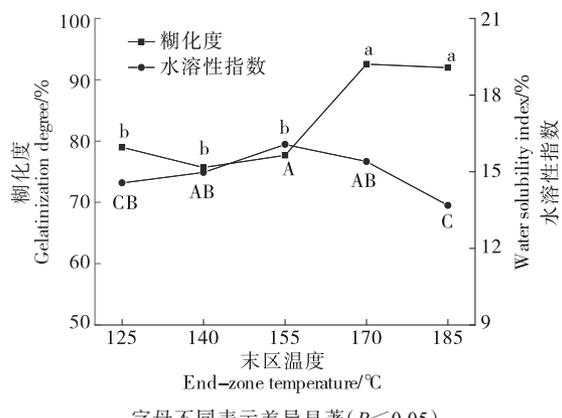


图3 末区温度对海红米粉糊化度和WSI的影响

Figure 3 Effects of end-zone temperature on gelatinization degree and WSI of sea red rice flour

表1 响应面实验因素水平表

水平	A 水分含量/%	B 螺杆转速/Hz	C 末区温度/°C
1	18	45	185
0	16	40	170
-1	14	35	155

由表3可知,模型 $P<0.01$ ,失拟项 $P>0.05$ ,表明模型有效,拟合度良好,试验结果准确可靠。决定系数 $R^2=0.9583$ ,校正决定系数 $R_{adj}^2=0.9047$ ,变异系数 $CV=1.74$ ,说明试验结果与模型预测结果高度一致,重现性较好,可用于挤压膨化海红米粉的工艺优化。根据回归分析结果,对综合评分的影响程度依次为水分含量>螺杆转速>末区温度。一次项A、B和二次项 $B^2$ 对综合评分影响极显著( $P<0.01$ ),交互项AB对综合评分影响显著( $P<0.05$ )。

2.2.2 验证实验 通过Design-Expert 13软件对试验数据进行分析,得到海红米粉的最佳挤压膨化工艺参数为水分含量18%、螺杆转速45 Hz、末区温度157.98℃,此参数下的综合评分为92.78。为适应实际生产条件,将工艺参数调整为水分含量18%、螺杆转速45 Hz、末区温度158℃,测得样品的水溶性指数为 $(18.48\pm 0.30)\%$ ,糊化度为 $(95.35\pm 1.76)\%$ ,综合评分为88.89( $n=3$ ),与理论预测值接近,表明该模型具有较高的可靠性和实际应用价值。

2.3 挤压膨化对海红米粉理化性质和结构的影响

2.3.1 流变特性 由图4可知,挤压处理前后,海红米粉的表观黏度均随剪切速率的升高逐渐下降,且呈现出非线性特征,表明海红米粉具有非牛顿流体的特性。由表4可知,拟合方程的决定系数 $R^2$ 均 $>0.99$ ,具有极高的拟合质量。相较于未挤压的样品,经过挤压处理的样品显示

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Response surface experiment design and results

试验号	A	B	C	糊化度/%	水溶性指数/%	综合评分
1	-1	1	0	95.47	21.44	93.61
2	0	1	-1	76.62	19.59	78.88
3	1	1	0	95.55	23.34	96.66
4	0	0	0	95.03	20.70	92.18
5	0	0	0	95.41	25.37	99.78
6	0	0	0	94.56	18.60	88.57
7	0	-1	1	95.76	23.26	96.67
8	-1	1	-1	91.92	19.81	88.82
9	-1	-1	0	80.83	19.91	82.03
10	1	-1	0	88.00	23.78	92.62
11	1	0	-1	84.05	21.74	86.94
12	1	0	0	87.92	23.52	92.17
13	-1	0	1	86.17	23.39	90.87
14	0	1	1	87.20	22.69	90.40
15	0	-1	-1	88.51	22.55	91.00
16	1	0	1	90.68	23.24	93.45
17	0	0	0	92.21	22.98	94.00

表 3 综合评分的回归方程方差分析<sup>†</sup>

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) of the linear regression equation of comprehensive scores

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	405.52	9	45.06	17.89	0.000 5	**
A	183.08	1	183.08	72.67	<0.000 1	**
B	129.32	1	129.32	51.33	0.000 2	**
C	0.32	1	0.32	0.13	0.732 8	
AB	26.25	1	26.25	10.42	0.014 5	*
AC	2.81	1	2.81	1.12	0.325 6	
BC	7.20	1	7.20	2.86	0.134 7	
A <sup>2</sup>	12.26	1	12.26	4.87	0.063 1	
B <sup>2</sup>	46.29	1	46.29	18.37	0.003 6	**
C <sup>2</sup>	0.15	1	0.15	0.06	0.814 5	
残差	17.63	7	2.52			
失拟项	6.72	3	2.24	0.82	0.5460	不显著
纯误差	10.91	4	2.73			
总方差	423.16	16				

† \*表示显著(P<0.05);\*\*表示极显著(P<0.01)。

表 5 挤压膨化对海红米粉水合特性和色差的影响<sup>†</sup>

Table 5 Effects of extrusion on hydration characteristics and color difference of sea red rice flour

样品	WSI/%	WAI	L	a	b	△E
挤压前	3.40±0.09	2.45±0.03	72.55±0.14	5.03±0.02	9.16±0.16	
挤压后	18.48±0.30*	5.40±0.49*	64.82±0.74*	6.64±0.11*	9.22±0.14	7.90±0.60

† \*表示显著(P<0.05)。

出更低的黏度和n值,说明挤压后的海红米粉剪切稀化现象更明显。这可能是因为挤压过程中,海红米淀粉受热力和剪切力作用并吸水膨胀,导致颗粒破碎,从而增强了分子间的活动性。同时,支链淀粉降解为小分子直链淀粉,进一步减少了分子间的相互作用<sup>[29]</sup>,最终导致溶液黏度下降。

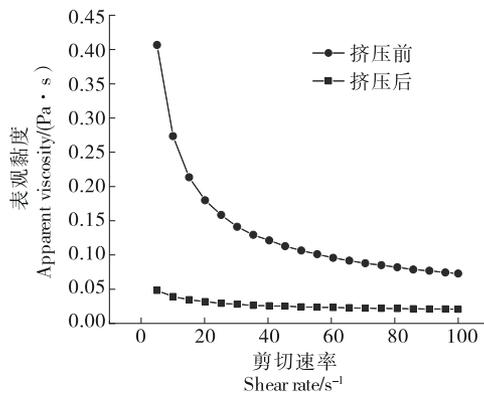


图 4 挤压前后海红米粉的流变特性曲线图

Figure 4 Rheological properties of sea red rice flour before and after extrusion

表 4 挤压膨化对海红米粉幂定律模型拟合参数的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effects of extrusion on the fitting parameters of power law model of sea red rice flour

样品	黏度系数 k/(Pa·s)	n	R <sup>2</sup>
挤压前	1.062±0.024	0.414±0.013	0.999
挤压后	0.080±0.006**	0.018±0.026**	0.993

† \*\*表示极显著(P<0.01)。

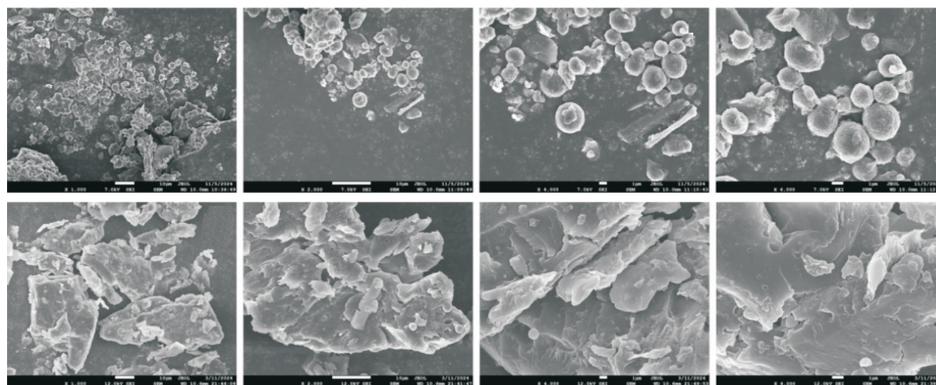
2.3.2 水合特性和色差 WSI主要反映淀粉颗粒降解为可溶性多糖的程度,间接体现样品中可溶性营养成分的含量及其溶解特性<sup>[30]</sup>;WAI表示糊化淀粉吸水能力,受亲水基团可用性及其凝胶形成能力的影响<sup>[31]</sup>。由表 5 可知,相比于未经处理的样品,挤压膨化处理显著提升了海红米粉的 WSI 和 WAI(P<0.05),表明该处理能有效增强其溶解性能,与蒲莲莲等<sup>[32]</sup>的结论一致。

挤压膨化处理后,海红米粉的 L 值显著下降(P<0.05),a 值显著上升(P<0.05),表明海红米粉的亮度降低、颜色变暗且红色调增强,而黄色调变化不显著。此

外,由于色差 $\Delta E > 3$ ,说明存在肉眼可辨的色差,可能是由于高温高剪切力下物料中还原糖含量增加,进而促进美拉德反应和焦糖化等非酶促褐变过程,同时可能改变海红米中原有色素的呈现<sup>[33]</sup>。

2.3.3 热力学性质 由表6可知,经挤压处理后海红米粉的起始糊化温度略有下降,而峰值温度( $P < 0.05$ )、终止糊化温度( $P < 0.01$ )及糊化焓显著降低( $P < 0.05$ ),表明挤压处理引发了海红米粉的糊化。这可能与淀粉颗粒的晶型结构遭到破坏,支链淀粉双螺旋结构解离有关<sup>[34-35]</sup>,与王霞等<sup>[36]</sup>的研究结果相吻合。

2.3.4 微观结构 由图5可知,未经挤压处理的海红米粉颗粒结构完整,呈团块状,表面相对平滑,颗粒间空隙较大,整体分布松散。挤压处理后,海红米粉颗粒结构遭到破坏,呈现不规则的疏松多孔片状,表面粗糙且布满孔



从左至右依次为放大1 000,2 000,4 000,6 000倍;从上至下依次为挤压前、挤压后

图5 挤压前后海红米粉不同倍数扫描电镜图

Figure 5 SEM images of sea red rice flour with different multiples before and after extrusion

2.3.5 晶体结构 由图6可知,未经挤压处理的海红米粉在 $2\theta$ 为 $15.21^\circ$ , $17.43^\circ$ , $18.13^\circ$ , $23.23^\circ$ 处显示出明显的衍射峰,其中 $17^\circ$ , $18^\circ$ 处呈现出典型的A型淀粉晶体结构特有的连续双峰特征<sup>[38]</sup>,表明海红米粉为A型淀粉晶体结构。经挤压处理后,原有的衍射峰消失,并分别在 $13.01^\circ$ , $20.01^\circ$ 处出现新衍射峰,表明挤压处理促使海红米淀粉的结晶结构由A型向V型转变,可能与直链淀粉-脂质复合物的形成有关<sup>[39]</sup>。

此外,挤压处理使海红米淀粉的相对结晶度由挤压前的16.69%下降至7.27% ( $P < 0.01$ ),与DSC结果相印证,表明挤压过程中海红米粉的淀粉结晶区遭到破坏,无定型区域增加,从而提高了糊化度和溶解性<sup>[40]</sup>,最终有助于提升淀粉的消化率。

## 2.4 挤压膨化对海红米粉体外消化特性和营养成分的影响

2.4.1 体外消化特性 SDS和RS由于其缓慢吸收特性及有助于稳定血糖水平的作用,对预防和治疗糖尿病及

表6 挤压膨化对海红米粉热力学特性参数的影响<sup>†</sup>

Table 6 Effects of extrusion on thermodynamic properties of sea red rice flour

样品	起始糊化温度/ $^\circ\text{C}$	峰值温度/ $^\circ\text{C}$	终止温度/ $^\circ\text{C}$	焓变/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
挤压前	$33.77 \pm 1.53$	$67.23 \pm 2.57$	$105.97 \pm 0.40$	$316.63 \pm 12.19$
挤压后	$30.55 \pm 1.62$	$61.33 \pm 1.51^*$	$100.10 \pm 2.11^{**}$	$274.80 \pm 18.92^*$

<sup>†</sup> \*表示显著( $P < 0.05$ );\*\*表示极显著( $P < 0.01$ )。

洞。这可能是由于淀粉材料在极端物理条件作用下,从模具中挤出时压力的骤降及水分迅速蒸发所致,形成了不规则的孔状结构,从而增加了淀粉颗粒的表面积<sup>[19,37]</sup>,这种结构变化有利于提高海红米粉的水溶性和淀粉消化性。

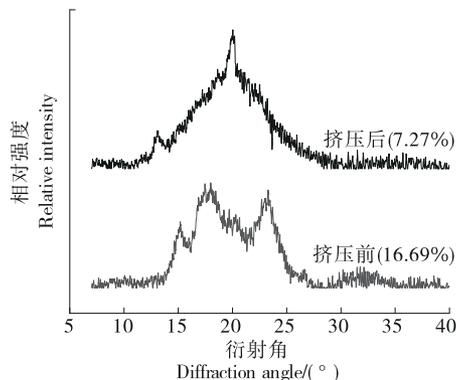


图6 挤压前后海红米粉的晶体衍射图

Figure 6 X-ray diffraction patterns of sea red rice flour before and after extrusion

肥胖等慢性疾病具有积极意义<sup>[41]</sup>。由表7可知,与挤压前相比,海红米挤压粉的消化率由44.84%提升至52.47%,RDS由8.38%升至12.56% ( $P < 0.05$ );RS由75.40%降至71.29%;体外淀粉消化率由58.40%增至74.72% ( $P <$

0.01)。说明挤压膨化工艺可显著提高海红米粉中淀粉的可消化性。这可能是因为挤压处理破坏了淀粉晶体结构,降低了相对结晶度,并增加了易分解的无定形区域比例。此外,该处理还削弱了淀粉与其他大分子物质间的相互作用,从而增加了淀粉与消化酶接触位点,进一步提升消化效率<sup>[42-43]</sup>,这与陆梓洋等<sup>[3]</sup>的研究结论一致。

表 7 挤压膨化对海红米粉消化特性的影响<sup>†</sup>

Table 7 Effects of extrusion on digestion characteristics of sea red rice flour

样品	快消化 淀粉/%	慢消化 淀粉/%	抗性淀粉/%	体外淀粉 消化率/%
挤压前	8.38±0.005	16.23±0.007	75.40±0.003	58.40±3.16
挤压后	12.56±0.004**	16.15±0.004	71.29±0.002**	74.72±2.16*

† \*表示显著( $P<0.05$ );\*\*表示极显著( $P<0.01$ )。

表 8 挤压膨化对海红米粉主要营养成分及植酸含量的影响<sup>†</sup>

Table 8 Effects of extrusion on main nutritional components and phytic acid content of sea red rice flour g/100 g

样品	总淀粉	蛋白质	脂肪	灰分	植酸
挤压前	70.63±0.65	10.76±0.77	2.53±0.06	1.43±0.02	16.99±0.08
挤压后	71.82±1.66	10.34±0.13	0.83±0.04**	1.45±0.02	13.79±0.66**

† \*\*为差异极显著( $P<0.01$ )。

### 3 结论

通过优化挤压膨化工艺参数,确定了海红米粉的最佳挤压工艺条件为未区温度 158℃、水分含量 18%、螺杆转速 45 Hz,此条件下,海红米粉的水溶性指数为 18.48%,糊化度为 95.35%,综合评分为 88.89。此外,挤压膨化后,海红米粉的微观结构显著变化( $P<0.05$ ),淀粉晶型由 A 型转变为 V 型,结晶度显著下降( $P<0.05$ ),且水溶性和吸水性显著提高( $P<0.05$ )。同时,挤压膨化处理显著改善了海红米粉的淀粉消化性( $P<0.05$ )。快速消化淀粉含量由 8.38% 增至 12.56%,体外淀粉消化率提升至 74.72%。在营养成分方面,挤压膨化处理能较好地保留海红米的主要营养成分,并显著降低抗营养因子植酸含量( $P<0.05$ )。综上,挤压膨化技术对海红米粉的消化性、营养成分及其理化性质具有显著优化作用。挤压膨化技术在降低植酸含量方面具有一定的效果,但其作用存在一定局限性。未来,可以通过将挤压膨化与其他技术手段结合使用,以进一步增强其去除植酸的效果,从而提升食物的营养价值。

#### 参考文献

[1] WANG H, DENNEY L, ZHENG Y D, et al. Food sources of energy and nutrients in the diets of infants and toddlers in urban areas of China, based on one 24-hour dietary recall[J]. BMC

2.4.2 营养成分 由表 8 可知,海红米粉经过挤压膨化处理后,脂肪和植酸含量分别下降了 67.19% 和 18.83% ( $P<0.05$ ),其他营养成分未发生显著变化。脂肪含量的下降可能与挤压过程中机械能与热能共同作用下,脂肪发生分解有关。同时,脂肪分解产生的游离脂肪酸因黏度降低,更易黏附至挤出机螺杆上,从而造成脂肪损失<sup>[44]</sup>。此外,挤压过程中,原料中的淀粉结构在熔融状态下变得松动,直链淀粉与脂质结合形成有序的 V 型晶体结构<sup>[45]</sup>,进一步降低了脂肪的提取率。植酸含量的下降主要归因于植酸的热不稳定性及其与其他成分形成了不溶性复合物<sup>[46]</sup>。植酸通过与铁、锌、钙等矿物质结合,抑制其吸收,并影响消化酶活性,从而阻碍蛋白质和碳水化合物的消化与吸收,不利于婴幼儿的正常发育。综上,挤压膨化不仅能有效保留海红米粉的营养成分,还能降低其抗营养因子(如植酸)含量,从而提高营养物质利用率。

Nutrition, 2015, 1(1): 19.

[2] PANTOA T, BARICEVIC-JONES I, SUWANNAPORN P, et al. Young rice protein as a new source of low allergenic plant-based protein[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102970.  
 [3] 陆梓洋, 余宏达, 郑经绍, 等. 混菌发酵紫米粉工艺优化及其对营养品质的改善[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 252-261.  
 LU Z Y, YU H D, ZHENG J S, et al. Optimization of mixed fermentation process of purple rice flour and its nutritional improvement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 252-261.  
 [4] 张威毅, 侯召华, 任贵兴, 等. 不同产地红米营养成分比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 263-267, 272.  
 ZHANG W Y, HOU Z H, REN G X, et al. Comparison of nutrient composition of red rice from different areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 263-267, 272.  
 [5] 赖双定, 龙宇, 陈逸君, 等. 海水稻营养成分与加工利用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(6): 13-15, 35.  
 LAI S D, LONG Y, CHEN Y J, et al. Research progress on nutritional functional components and processing utilization of seawater rice[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(6): 13-15, 35.  
 [6] ZHANG G, SUN Z Q, WANG T H, et al. Effects of extrusion on the available energy and nutrient digestibility of soybean meal and its application in weaned piglets[J]. Animals, 2024, 14(23): 3355.  
 [7] 张新振, 杨涛, 蒋依婷, 等. 蓝莓渣复合粳米膨化工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 194-200.

- ZHANG X Z, YANG T, JIANG Y T, et al. Optimization of puffing process of blueberry residue composite indica rice and its antioxidant activity [J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(10): 194-200.
- [8] ZHANG Z, ZHU M L, XING B, et al. Effects of extrusion on structural properties, physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of Tartary buckwheat flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108197.
- [9] 郭艳利. 幼儿营养米粉研制及体外消化率研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020: 40-42.
- GUO Y L. Study on the development and *in vitro* digestibility coefficient of infant nutrition rice flour[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020: 40-42.
- [10] 曹家宝, 范广琦, 林欣梅, 等. 挤压膨化制备婴儿膨化营养米粉的工艺优化及其性质研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(3): 159-165.
- CAO J B, FAN G Q, LIN X M, et al. Process optimization and properties extruded and extruded infant nutrition rice flour[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(3): 159-165.
- [11] 何静盈, 李海玲, 皮彩玉, 等. 海水稻米糠饼干生产工艺优化及其品质特性分析[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(4): 111-119.
- HE J Y, LI H L, PI C Y, et al. Optimize the production process and quality characteristics of sea rice bran biscuit[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(4): 111-119.
- [12] 陈岑, 陈建平, 黄文浩, 等. 海红米糠多糖的提取工艺、结构表征及抑制 HepG2 细胞增殖研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(13): 47-54.
- CHEN C, CHEN J P, HUANG W H, et al. Study on extraction technology, structure characterization, and inhibition of HepG2 cell proliferation of sea red rice bran polysaccharide[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(13): 47-54.
- [13] 钟凯翠, 刘思炜, 巫雨桐, 等. 海红米花色苷的提取工艺优化及其体外降糖作用研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(14): 97-103.
- ZHONG K C, LIU S W, WU Y T, et al. Study on extraction process optimization of anthocyanins from sea red rice and its hypoglycemic effect *in vitro*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(14): 97-103.
- [14] 何扬航, 刘刚, 夏陈, 等. 挤压膨化对青稞中不同形态多酚组成及抗氧化活性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(3): 36-40.
- HE Y H, LIU G, XIA C, et al. Effect of extrusion process on different forms of phenolic compounds and antioxidant activities of hulless barley[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(3): 36-40.
- [15] KHAN S A, ZHANG M W, LIU L, et al. Co-culture submerged fermentation by lactobacillus and yeast more effectively improved the profiles and bioaccessibility of phenolics in extruded brown rice than single-culture fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2020, 326: 126985.
- [16] 赵志浩, 刘磊, 张名位, 等. 预酶解—挤压膨化对全谷物糙米粉品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 108-116.
- ZHAO Z H, LIU L, ZHANG M W, et al. Combined effect of enzymatic pretreatment and extrusion on quality properties of brown rice flour[J]. *Food Science*, 2019, 40(1): 108-116.
- [17] 池春欢, 汪云友, 陈厚荣. 多指标综合评分法优化辣椒热泵—微波联合干燥工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(6): 172-179.
- CHI C H, WANG Y Y, CHEN H R. Optimization of chili heat pump-microwave combined drying process with multi-index comprehensive grading method[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(6): 172-179.
- [18] 白晓蓉. 不同品种糙米的挤压膨化特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 26-27.
- BAI X R. Study on extrusion characteristics of different brown rice varieties[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 26-27.
- [19] 陈坤林, 黄明珠, 李祥, 等. 挤压膨化处理对芡实速溶粉理化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(17): 259-266.
- CHEN K L, HUANG M Z, LI X, et al. Effect of extrusion treatment on physical and chemical properties of *Euryale ferox* instant powder[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(17): 259-266.
- [20] 袁嘉渝, 林利忠, 程颖. 挤压膨化和焙烤工艺对代餐粉特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(9): 34-39.
- YUAN J Y, LIN L Z, CHENG Y. Effect of extrusion and baking on the characteristics of meal replacement powder[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(9): 34-39.
- [21] 李家祺, 黄晓兵, 彭苕丹, 等. 超微粉碎处理对椰粕营养与理化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 152-159.
- LI J Q, HUANG X B, PENG S D, et al. Effect of ultrafine grinding treatment on the nutritional and physicochemical properties of coconut pulp [J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 152-159.
- [22] 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.
- [23] HIRTH M, LEITER A, BECK S M, et al. Effect of extrusion cooking process parameters on the retention of bilberry anthocyanins in starch based food[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 125: 139-146.
- [24] PARDHI S D, SINGH B, AHMAD NAYIK G, et al. Evaluation of functional properties of extruded snacks developed from brown rice grits by using response surface methodology[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2019, 18(1): 7-16.
- [25] GÜMÜŞAY Ö A, ŞEKER M, SADIKOĞLU H. Response surface methodology for evaluation of the effects of screw speed, feed moisture and xanthan gum level on functional and physical properties of corn half products[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111: 622-631.
- [26] HUANG X Y, LIU H S, MA Y, et al. Effects of extrusion on

- starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility-a review[J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2 538.
- [27] WANG Y, CHEN L, YANG T Y, et al. A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106543.
- [28] 张艳荣, 王大为, 祝威. 高品质玉米膳食纤维生产工艺的研究[J]. *食品科学*, 2004, 25(9): 213-217.  
ZHANG Y R, WANG D W, ZHU W. Study on production technique of high quality corn dietary fiber[J]. *Food Science*, 2004, 25(9): 213-217.
- [29] CHEN P, ZHANG Y L, QIAO Q, et al. Comparison of the structure and properties of hydroxypropylated acid-hydrolysed maize starches with different amylose/amylopectin contents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106134.
- [30] 邱婷婷, 熊华, 朱雪梅, 等. 滚筒干燥和挤压膨化对黑色谷物理化性质及储藏稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 73-83.  
QIU T T, XIONG H, ZHU X M, et al. Effect of drum drying and extrusion on physicochemical properties and storage stability of black grains[J]. *Food Science*, 2020, 41(21): 73-83.
- [31] NEDER-SUÁREZ D, AMAYA-GUERRA C A, BÁEZ-GONZÁLEZ J G, et al. Resistant starch formation from corn starch by combining acid hydrolysis with extrusion cooking and hydrothermal storage[J]. *Starch-Stärke*, 2018, 70(5/6): 1700118.
- [32] 蒲莲莲, 杨颖, 刘漫, 等. 养生代餐粉的熟化工艺筛选与抗抑郁功能评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(21): 386-394.  
PU L L, YANG Y, LIU M, et al. Curing process screening and antidepressant functional evaluation of health meal replacement powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(21): 386-394.
- [33] 申瑞玲, 张亚蕊, 张婷, 等. 不同热加工对萌动青稞营养成分和加工特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(3): 147-152.  
SHEN R L, ZHANG Y R, ZHANG T, et al. Effects of different thermal processing methods on nutritional composition and processing characteristics of germinating highland barley[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(3): 147-152.
- [34] WANG B, DONG Y Q, FANG Y X, et al. Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130804.
- [35] WU W Q, JIAO A Q, XU E B, et al. Effects of extrusion technology combined with enzymatic hydrolysis on the structural and physicochemical properties of porous corn starch[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(3): 442-451.
- [36] 王霞, 刘永吉, 白吉敏, 等. 挤压膨化对杂粮代餐粉营养品质及理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(22): 28-35.  
WANG X, LIU Y J, BAI J M, et al. Effects of extrusion on nutritional quality and physicochemical properties of multigrain meal replacement powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(22): 28-35.
- [37] 李光磊, 章银, 魏楷东, 等. 挤压膨化对膨化米粉品质特性的影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(8): 67-74.  
LI G L, ZHANG Y, WEI K D, et al. Effect of extrusion conditions on quality characteristics of extruded rice flour[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(8): 67-74.
- [38] 熊绍百, 杨晓莉, 陈婷婷, 等. 糙米粉粒径对糙米直条米粉品质的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(9): 174-178, 199.  
XIONG S B, YANG X L, CHENG T T, et al. The effect of brown rice flour particle size on the quality of brown rice noodles[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(9): 174-178, 199.
- [39] ZHANG G P, XUAN Y, LYU F, et al. Microstructural, physicochemical properties and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124594.
- [40] LI E P, DHITAL S, HASJIM J. Effects of grain milling on starch structures and flour/starch properties[J]. *Starch-Stärke*, 2014, 66(1/2): 15-27.
- [41] 李岩, 刘娟, 宋晓凡, 等.  $\beta$ -淀粉酶提高青稞慢消化淀粉含量工艺优化[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 217-222.  
LI Y, LIU J, SONG X F, et al. Optimization the process of increasing the content of slowly digestible starch in highland barley by  $\beta$ -amylase[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(10): 217-222.
- [42] 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 K P, MA L P, LUO L, et al. Effects of extrusion on the physicochemical properties, processing properties and starch digestibility in vitro of Chinese yam powder[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(1): 159-165.
- [43] 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 Y L, DONG G M, DONG J L, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of tartary buckwheat flour with different degrees of gelatinization[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(3): 21-27.
- [44] ESPINOSA-RAMÍREZ J, RODRÍGUEZ A, DE LA ROSA-MILLÁN J, et al. Shear-induced enhancement of technofunctional properties of whole grain flours through extrusion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106400.
- [45] 张雯, 刘步瑜, 吴卫成, 等. 制备工艺对高直链玉米淀粉—硬脂酸复合物性质的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(6): 25-33.  
ZHANG W, LIU B Y, WU W C, et al. Influences of preparation process on the properties of high amylose corn starch-stearic acid complex[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(6): 25-33.
- [46] KAUR S, SHARMA S, SINGH B, et al. Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(3): 1 670-1 676.