

吴俊灵, 刘惠惠, 吴卫国, 等. 不同预处理燕麦粉对挤压方便米饭品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 252–260. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040419

WU Junling, LIU Huihui, WU Weiguo, et al. Effects of Different Pretreatment Oat Flour on the Quality of Extruded Instant Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 252–260. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040419

· 工艺技术 ·

# 不同预处理燕麦粉对挤压方便米饭品质的影响

吴俊灵<sup>1</sup>, 刘惠惠<sup>1</sup>, 吴卫国<sup>1</sup>, 任贤龙<sup>2</sup>, 晏文会<sup>3</sup>, 廖卢艳<sup>1,\*</sup>

(1.湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128;

2.湖南角山米业有限责任公司, 湖南衡阳 421200;

3.湖南富马科食品工程技术有限公司, 湖南长沙 410153)

**摘要:**为提高挤压方便米饭膳食纤维含量及燕麦在挤压方便米饭上的应用价值, 以未预处理的燕麦粉与碎米粉混合(燕麦:碎米=1:4)作对照, 探究6种预处理(高压蒸制、常压蒸制、炒制、发芽、纤维素酶酶解、 $\alpha$ -淀粉酶酶解)燕麦粉与碎米粉混合粉中糊化特性、糊化度、水和特性以及混合粉制备挤压方便米饭的综合品质(复水性、感官品质、质构品质)特性和膳食纤维含量, 分析原料特性指标与挤压方便米饭品质之间的相关性, 并筛选出最适合加工高膳食纤维挤压方便米饭的燕麦预处理方式。结果表明:添加常压蒸制燕麦粉的挤压方便米饭膳食纤维含量最高, 达到了7.91%;经发芽处理的燕麦粉对其原料混合粉糊化特性影响显著( $P<0.05$ ), 与其他预处理方式相比, 效果最明显;挤压前添加发芽燕麦粉的水溶性指数(WSI)最高(4.16%) ( $P<0.05$ ), 挤压后添加炒制燕麦粉的WSI最高(5.75%)。添加炒制燕麦粉的气味和滋味评分最高, 添加常压蒸制燕麦的感官评分和综合得分俱佳;原料混合粉的峰值粘度、谷值粘度与其方便米饭的硬度、胶黏性、综合得分呈显著负相关( $P<0.05$ ), 与感官评分呈显著正相关( $P<0.05$ )。因此常压蒸制可作为制备综合品质最佳的高膳食纤维燕麦-碎米挤压方便米饭的燕麦预处理方式。

**关键词:** 燕麦, 预处理技术, 蒸制, 高膳食纤维, 挤压方便米饭, 品质

中图分类号: TS213.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)06-0252-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040419



本文网刊:

## Effects of Different Pretreatment Oat Flour on the Quality of Extruded Instant Rice

WU Junling<sup>1</sup>, LIU Huihui<sup>1</sup>, WU Weiguo<sup>1</sup>, REN Xianlong<sup>2</sup>, YAN Wenhui<sup>3</sup>, LIAO Luyan<sup>1,\*</sup>

(1.College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2.Hunan Jiaoshan Rice Industry Co., Ltd., Hengyang 421200, China;

3.Hunan Fumach Foodstuff Engineering & Technology Co., Ltd., Changsha 410153, China)

**Abstract:** To improve the dietary fiber content of extruded instant rice and the application value of oats in extruded instant rice, 6 kinds of pretreatment (high pressure steaming, atmospheric pressure steaming, stir-frying, germination, cellulase enzyme digestion,  $\alpha$ -amylase enzyme digestion) were investigated in the mixture of oat flour and broken rice, using the mixture of unpretreated oat flour and broken rice flour (oats:broken rice=1:4) as a control, to investigate the pasting characteristics, degree of pasting, water and water characteristics, and the mixture of six kinds of pretreatment in the mixture of oat flour and broken rice. The comprehensive quality (rehydration, sensory quality, textural quality)

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 2022年度湖南省企业科技创新创业团队项目(湖南角山米业稻米科技创新创业团队);湖南省重点领域研发计划项目(2019NK2131);湖南省科技创新计划资助(2023ZJ1070)。

作者简介: 吴俊灵(1998-),女,硕士研究生,研究方向:粮油食品加工,E-mail:wujunling1114@163.com。

\*通信作者: 廖卢艳(1982-),女,博士,副教授,研究方向:粮油食品深加工及碳水化合物资源开发与利用,E-mail:liaoluyan@126.com。

characteristics and dietary fiber content of the extruded instant rice were prepared to analyze the correlation between the raw material characteristics and the quality of the extruded instant rice, and to screen out the most suitable oat pretreatment method for processing high dietary fiber extruded instant rice. Results showed that the dietary fiber content of extruded instant rice with the addition of atmospheric pressure steamed oat flour was the highest (7.91%). The germinated oat flour had a significant effect on the pasting characteristics of the raw material mixtures ( $P<0.05$ ), which was the most obvious compared with the other pretreatments. The water solubility index (WSI) of the germinated oat flour added before extrusion was the highest (4.16%) ( $P<0.05$ ), while that of the extruded instant rice with the addition of fried oat flour was the highest ( $P<0.05$ ). The highest WSI (5.75%) was obtained with the addition of fried oat flour after extrusion. The addition of fried oat flour had the highest odor and taste scores, and the addition of atmospheric steaming oats had the best sensory and composite scores. The peak viscosity and grain value viscosity of the raw material mixes were significantly negatively correlated with the hardness, gelatinous viscosity, and composite scores of their instant rice ( $P<0.05$ ), and significantly positively correlated with the sensory scores ( $P<0.05$ ). Therefore, atmospheric pressure steaming could be used as a pretreatment of oats for the preparation of high dietary fiber oat-broken rice extruded instant rice with the best composite quality.

**Key words:** oats; pretreatment technology; steaming; high dietary fiber; extruded instant rice; quality

方便米饭是一种与方便面相媲美的主食产品,其外观、风味、口感与普通大米基本一致,可以满足广大大米消费群体的需求。在碾米过程中会产生不少碎米,其营养成分与大米相近,但其成本只有大米的一半不到。碎米蛋白质和维生素含量丰富,且价格低廉,是开发挤压型方便米饭的优质原料之一。然而,随挤压方便米饭市场的不断发展,单一的挤压方便米饭很难适应不同的消费群体,多样化、营养又健康的挤压方便米饭将成为广大消费者的首选,挤压方便米饭的发展趋向于杂粮化和营养化。由于饮食结构的改变,居民膳食纤维的摄入量越来越少,加上健康饮食文化的持续推进,人们对膳食纤维的需求与日俱增。

裸燕麦作为我国的主产作物之一,风味独特、营养价值高,是一种优质的高膳食纤维食品原料。目前市场上预制燕麦粉主要作为面点辅料被加工成食品,例如燕麦挂面、燕麦馒头、燕麦速食饭等<sup>[1-3]</sup>,而在挤压方便米饭加工领域中还未见报道。燕麦本身具有丰富的营养物质,特别是膳食纤维含量为众多谷物之首,但由于其加工性能差、口感粗糙导致燕麦整体利用率低,而淀粉作为燕麦中最主要的成分,天然燕麦淀粉具有抗剪切性差和透明度低的缺点,在食品加工应用中也具有局限性,因此燕麦粉不宜直接加工利用<sup>[4]</sup>。但燕麦原料的预处理在一定程度上能改善燕麦的加工品质。Berski 等<sup>[5]</sup>通过氧化和乙酰化燕麦淀粉,提高了燕麦淀粉的吸水率和溶解度;Dar 等<sup>[6]</sup>利用高剂量  $\gamma$  辐射,提高了燕麦淀粉的抗剪切性和热稳定性。但这些处理方式所带来的化学或物理残留使得产品的安全系数难以得到保障,对产品质量安全有一定的风险。

为提升燕麦籽粒整体利用率及燕麦全粉加工性能,进一步拓展燕麦在食品领域的应用前景,本研究拟探究不同的燕麦预处理方法对燕麦挤压方便米饭原料及产品品质的影响。本文利用 3 种热处理技术、2 种酶解技术和 1 种发芽技术共 6 种预处理技

术,分别对燕麦进行预处理,并以燕麦原粉作对照,并与碎米粉混合制备成燕麦挤压方便米饭,分析考察不同预处理燕麦粉对燕麦-碎米混合粉原料膳食纤维含量、糊化特性、糊化度及水合特性等理化性质的影响,以及对其混合粉制备挤压方便米饭的复水特性、质构品质、感官品质和综合得分影响,并选出最适合制备高膳食纤维挤压燕麦方便米饭的燕麦预处理方式,以期高膳食纤维燕麦挤压方便米饭的开发提供一定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

碎米 湖南角山米业有限公司;燕麦 张家口万全区燕脉食品有限公司;纤维素酶 10 mg/mL,南宁庞博生物工程有限公司;耐高温  $\alpha$ -淀粉酶 120 U/mL,山东隆科特酶制剂有限公司;单双甘油脂肪酸酯 博联生物科技食品有限公司。

FWHE36-24 双螺杆挤压机 湖南富马科食品工程技术有限公司;HWS-250B 恒温恒湿培养箱 天津市泰斯特仪器有限公司;LDZX-50KBS 高压灭菌锅 上海申安医疗器械厂;MZ-SYS28-2B 电蒸锅 广东美的生活电器制造有限公司;TDZ5 台式低速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;TA-XT2i Plus TPA 物性测定仪 英国 Stable Micro Systems 公司;SFY-6C 冠亚水分快速测定仪 深圳冠亚水分仪科技有限公司;K9840 全自动凯氏定氮仪 海能未来技术集团股份有限公司;RVA-TecMaster 快速粘度仪 瑞典 perten 波通仪器有限公司;UPD17 L0027 紫外可见分光光度计 翱艺仪器(上海)有限公司;GFL-230 电热鼓风干燥箱 天津市莱玻特瑞仪器有限公司;DK-98-II 电热恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 燕麦预处理

##### 1.2.1.1 燕麦原粉(Raw oat flour, ROF) 将燕麦籽

粒粉碎,至完全过80目筛,4℃密封保存。

1.2.1.2 高压蒸制燕麦粉(High-pressure steamed oat flour, HOF) 将燕麦籽粒平摊在敞开容器中约厚0.5 cm,置于高压灭菌锅中120℃蒸30 min,再放入40℃恒温干燥箱中24 h,粉碎过80目,4℃密封保存。

1.2.1.3 常压蒸制燕麦粉(Atmospheric steamed oat flour, AOF) 将燕麦籽粒平摊在蒸屉中约厚0.5 cm,置于电蒸锅中隔水蒸25 min,再放入40℃恒温干燥箱中24 h,最后粉碎全部过80目筛,4℃密封保存。

1.2.1.4 炒制燕麦粉(Fried oat flour, FOF) 将清洗干净的燕麦调节水分至20%~25%,置于155℃炒锅中炒制20 min,粉碎过80目,4℃密封保存。

1.2.1.5 纤维素酶酶解燕麦粉(Cellulase enzymolysis oat flour, COF) 参照陈东方等<sup>[7]</sup>的方法并改进,取定量燕麦原粉,按照1:2(m:V)的料液比与pH4.8的柠檬酸盐缓冲溶液(0.1 mol/L)混合均匀,放入50℃水浴锅中预热5 min,加入料液总体积的0.8%纤维素酶酶液(浓度为10 mg/mL,用0.1 mol/L pH4.8的柠檬酸盐缓冲液溶解),然后在50℃水浴锅中酶解90 min,最后40℃下干燥至水分约10%左右,粉碎过80目,4℃密封保存。

1.2.1.6  $\alpha$ -淀粉酶酶解燕麦粉( $\alpha$ -Starch enzymes zymolysis oat flour, SOF) 参照李淑娟等<sup>[8]</sup>的方法并改进,取定量燕麦原粉,按照1:2(m:V)的料液比与30℃蒸馏水混合均匀,加入活性为120 U/mL  $\alpha$ -淀粉酶酶液,然后在80℃水浴锅中酶解60 min。最后40℃下干燥至水分约10%左右,粉碎过80目,4℃密封保存。

1.2.1.7 发芽燕麦粉(Germinated oat flour, GOF) 参照秦萍<sup>[9]</sup>的方法并加以改进,筛除燕麦杂质和破损颗粒,用0.1% NaClO溶液处理浸泡30 min后,用流水充分冲洗干净并过滤掉多余水分;在消毒好的燕麦加入10倍体积的去离子水,25℃避光浸泡12 h使其充分吸水;然后将燕麦籽粒平铺于垫有润湿纱布并架空的空盘上,厚度约0.5 cm。放入20℃、湿度90%的培养箱中发芽,每隔6 h洒一次水,每12 h清洗纱布和籽粒,避免籽粒发霉出现异味,发芽48 h后,40℃下干燥至水分约10%左右,粉碎过80目,25℃密封保存。

1.2.2 碎米-燕麦混合粉的制备 根据前期的预实验发现,燕麦全粉添加量只有超过20%才能保证其制备的挤压方便米饭达到高膳食纤维食品的要求,因此燕麦全粉的添加基准设定在20%,与80%的碎米粉进行混合,并加入1%的单甘脂以确保挤压切割过程中的产品性能稳定。

1.2.3 挤压方便米饭的制备 物料搅拌混匀→挤压

膨化→切割造粒→流化床干燥→烤炉干燥→冷却→包装。

双螺杆挤压机的挤压参数:固体喂料量为12 kg/h,液体喂料量为19%,螺杆转速为190 r/min,五个挤压区温度依次为65、110、140、90和80℃,切割机转速为2000 r/min。

流化床干燥的参数:将切割好的挤压方便米粒随送料机送入流化床(30℃)中初步干燥1~2 min。

烤炉干燥的参数:将流化床中的挤压方便米粒送入烤炉(一区温度为130℃,二区温度为140℃)干燥2~3 min,取出平摊冷却备用。

最后按照上述方法将制备的高膳食纤维挤压方便米饭依次编号为ROF-IR、HOF-IR、AOF-IR、FOF-IR、COF-IR、SOF-IR、GOF-IR。

1.2.4 碎米-燕麦混合粉的糊化特性 参照GB/T 24852-2010《大米及米粉糊化特性测定快速粘度仪法》。根据样品的实际水分含量,按照快速粘度分析仪中软件自动计算结果称取需要添加的样品含量于设备自带的容器中,并加入25 mL蒸馏水,搅拌均匀至完全分散后按照快速粘度分析仪操作指示进行操作分析。

1.2.5 碎米-燕麦混合粉糊化度的测定 采用王宝石等<sup>[10]</sup>的方法稍加改进,精确称取0.05 g样品(过80目)并分散于24.5 mL去离子水中,加入0.5 mL的氢氧化钾溶液(10 mol/L),匀速搅拌5 min后4500 r/min离心10 min。吸取0.2 mL上清液于带螺纹的比色管中,加入0.2 mL盐酸溶液(0.2 mol/L)中和,继续加入15 mL去离子水,最后加入0.2 mL预先配制好的碘溶液(1 g碘、4 g碘化钾溶于100 mL去离子水),在600 nm波长下的紫外分光光度计测定样品吸光度,记录吸光度值 $A_1$ 。另称取样品0.05 g分散于23.75 mL去离子水中,随即滴加1.25 mL的氢氧化钾溶液(10 mol/L),置于磁力搅拌器上匀速搅拌5 min,然后4500 r/min离心10 min。移取0.2 mL上清液于比色管中,加入0.2 mL的盐酸溶液(0.5 mol/L),继续加入15 mL去离子水,最后加入0.2 mL碘溶液,使用紫外分光光度计在600 nm波长下测定样品吸光度,记录吸光度值 $A_2$ 。糊化度按照式(1)进行计算:

$$\text{糊化度}(\%) = \frac{A_1}{A_2} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.6 碎米-燕麦混合粉水合特性的测定 参照王鹏智等<sup>[11]</sup>的方法并加以改进,准确称取样品粉末1 g于离心管中,分别记录样品和离心管质量为 $m$ 和 $M$ ,加入40 mL蒸馏水,在恒温水浴(35℃)条件下每隔5 min振荡一次,保持30 min,在4500 r/min条件下离心15 min,将上清液倾倒入已恒重的平皿( $M_0$ )中105℃下烘干称重,记录质量 $M_1$ ,沉淀部分称重记录质量 $M_2$ 。水溶性指数(WSI)、吸水性指数(WAI)和膨润力(SP)分别按照公式(2)~公式(4)进行计算:

$$WSI(\%) = \frac{M_1 - M_0}{m} \times 100$$

式 (2)

$$WAI(g/g) = \frac{M_2 - M}{m}$$

式 (3)

$$SP(g/g) = \frac{M_2 - M}{m(100 - WSI)}$$

式 (4)

式中:  $m$  为燕麦粉样品质量(g);  $M$  为离心管质量(g);  $M_0$  为恒重平皿质量(g);  $M_1$  为恒重的上清液与平皿总质量(g);  $M_2$  为沉淀与离心管总质量(g)。

1.2.7 挤压方便米饭膳食纤维含量的测定 参照 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》。准确称取一定质量试样( $m$ ), 匀质处理后脱水、脱脂、脱糖。酶解处理后加入 2 mL 100 mg/mL 二甘醇内标溶液进行总膳食纤维(TDF)、不溶性膳食纤维(IDF)、可溶性膳食纤维(SDF)的测定。残渣用乙醇和丙酮洗涤, 干燥称量得到总膳食纤维残渣质量记为  $m_r$ 、残渣中灰分和蛋白质质量分别记为  $m_a$  和  $m_p$ 、空白实验结果用  $m_b$  表示, 膳食纤维含量公式如下:

$$\text{膳食纤维含量}(\%) = \frac{m_r - m_p - m_a - m_b}{m} \times 100$$

式 (5)

1.2.8 挤压方便米饭综合品质的测定

1.2.8.1 复水特性测定 依据刘惠惠等<sup>[12]</sup>的方法测定, 准确称取 1 g 样品与 5 mL 沸水于烧杯溶解, 水浴 5 min。随后将混合物放在一块干净玻璃板上, 后用另一玻璃板覆盖, 直至无白芯出现, 所花费时间即复水时间。同样称量一定质量( $M_1$ )的样品作上述处理, 将复水后的样品除去米粒表面的多余水分进行称重, 记为  $M_2$ , 复水率(%)用  $M_2/M_1 \times 100$  表示。

1.2.8.2 质构特性测定 根据刘惠惠等<sup>[12]</sup>的方法稍作修改, 由 TA-XT2i Plus 物性测定仪(配 P 36/R 探头)检测。将样品挤压至原状的 50%, 触发力 5 g, 测速 0.5 mm/s。每组试验重复 10 次, 去掉最大值和最小值, 结果取 3 次稳定数据作平均值展示。

1.2.8.3 感官评价测定 根据刘惠惠等<sup>[12]</sup>的方法测定, 以 15 名食品专业人士系统对复水、冷却后的样品进行感官评价, 每组试验平行 3 次, 筛掉品鉴差异较大的得分, 取平均值表示。

1.2.8.4 综合得分计算 挤压方便米饭品质指标进行标准化, 根据刘惠惠等<sup>[12]</sup>的方法中挤压方便米饭综合品质评价模型中公式, 计算挤压方便米饭的综合得分。

1.3 数据处理

通过 Excel 软件对实验数据整理归纳, 采用 SPSS Statistics 25.0 软件中单因素方差分析(邓肯检验)比较显著性差异,  $P < 0.05$ , 以 Origin 2021 软件作相关性分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同预处理燕麦-碎米混合粉的糊化特性

不同预处理燕麦-碎米混合粉的糊化特性如表 1 所示。由表 1 可知, 添加 GOF 的混合粉糊化特性指标均与其他样品呈显著差异( $P < 0.05$ ), 说明经发芽处理的燕麦对混合粉糊化特性的影响显著。三种热处理的混合粉的峰值粘度、谷值粘度和最终粘度相比于添加 ROF 的混合粉均显著升高( $P < 0.05$ ), 而两种酶解处理的混合粉则降低, 其中添加 HOF 的混合粉最高, 峰值粘度高达  $2832.67 \pm 71.11 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。这与 Nguyen 等<sup>[13]</sup>的研究一致。7 种混合粉的糊化特性中衰减值的变异系数最大, 达到了 35.09%, 表明使用不同预处理燕麦制备的混合粉衰减值存在显著差异; 其中 6 种预处理燕麦-碎米混合粉的衰减值均低于未处理的混合粉, 而衰减值的降低反映了在高温下淀粉糊耐剪切能力的提升, 同时也可以提高其在后续产品加工过程中的耐受性。淀粉糊化后的老化程度与回生值成正相关, 相比于添加 ROF 的混合粉, 两种蒸制处理的混合粉回生值有所提高, 其中添加 HOF 的混合粉最高 ( $2317 \pm 143.71 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), 说明添加 HOF 混合粉的抗回生能力较差; 而其他混合粉则均降低, 其中添加 GOF 的混合粉最低, 说明添加 GOF 可提高

表 1 不同预处理燕麦-碎米混合粉的糊化特性

Table 1 Gelatinization characteristics of oat-broken rice mixed flour with different pretreatments

| 样品      | 峰值粘度(Pa·s)                 | 谷值粘度(Pa·s)                  | 衰减值(Pa·s)                   | 最终粘度(Pa·s)                 | 回生值(Pa·s)                    | 糊化温度(℃)                 |
|---------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ROF     | 2583.00±62.98 <sup>d</sup> | 1861.33±55.47 <sup>c</sup>  | 721.67±22.19 <sup>c</sup>   | 4056.67±42.03 <sup>d</sup> | 2195.33±23.03 <sup>bc</sup>  | 85.90±0.05 <sup>a</sup> |
| HOF     | 2832.67±71.11 <sup>e</sup> | 2217.67±151.50 <sup>d</sup> | 615.00±127.39 <sup>bc</sup> | 4534.67±10.97 <sup>f</sup> | 2317.00±143.71 <sup>c</sup>  | 86.70±0.83 <sup>a</sup> |
| AOF     | 2805.67±44.86 <sup>e</sup> | 2177.67±63.54 <sup>d</sup>  | 628.00±19.47 <sup>bc</sup>  | 4476.33±31.18 <sup>f</sup> | 2298.67±62.00 <sup>c</sup>   | 86.18±0.49 <sup>a</sup> |
| FOF     | 2764.00±27.87 <sup>e</sup> | 2156.33±24.01 <sup>d</sup>  | 607.67±20.98 <sup>bc</sup>  | 4346.00±49.67 <sup>e</sup> | 2189.67±29.70 <sup>bc</sup>  | 85.85±0.05 <sup>a</sup> |
| COF     | 2428.67±37.86 <sup>c</sup> | 1725.33±13.01 <sup>c</sup>  | 703.33±37.81 <sup>c</sup>   | 3838.00±42.03 <sup>c</sup> | 2112.67±40.20 <sup>b</sup>   | 85.90±0.93 <sup>a</sup> |
| SOF     | 2072.00±57.86 <sup>b</sup> | 1536.67±104.98 <sup>b</sup> | 535.33±58.16 <sup>b</sup>   | 3708.67±20.79 <sup>b</sup> | 2172.00±105.59 <sup>bc</sup> | 86.17±0.42 <sup>a</sup> |
| GOF     | 738.00±55.15 <sup>a</sup>  | 600.00±48.08 <sup>a</sup>   | 138.00±7.07 <sup>a</sup>    | 1368.00±86.27 <sup>a</sup> | 768.00±38.18 <sup>a</sup>    | 93.00±0.64 <sup>b</sup> |
| 最小值     | 738.00                     | 600.00                      | 138.00                      | 1368.00                    | 768.00                       | 85.85                   |
| 最大值     | 2832.67                    | 2217.67                     | 628.00                      | 4534.69                    | 2317.00                      | 93.00                   |
| 标准差     | 746.21                     | 569.74                      | 197.98                      | 1101.14                    | 551.29                       | 2.62                    |
| 变异系数(%) | 32.20                      | 32.49                       | 35.09                       | 29.28                      | 27.46                        | 3.01                    |

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 表2~表5同。

挤压方便米饭产品的抗回生能力。糊化温度是衡量淀粉糊化的一个重要指标,值越低表示其越易糊化,6 种预处理燕麦-碎米混合粉的糊化温度均有所升高,其中添加 GOF 混合粉的糊化温度显著高于其他样品( $P<0.05$ ),说明发芽处理起到了抑制淀粉糊化的作用,而这可能与燕麦的发芽周期有关<sup>[14]</sup>。

## 2.2 不同预处理燕麦-碎米混合粉挤压前后的糊化度

不同预处理燕麦-碎米混合粉挤压前后的糊化度如图 1 所示。糊化度是指淀粉中的糊化淀粉占总淀粉的百分比。挤压前后添加 ROF 混合粉的糊化度均在 75% 以上,可能是因为原料在磨粉过程中的机械剪切力导致部分淀粉破损,使得淀粉颗粒更易溶于水并使得糊化度偏高。相比于添加 ROF 的混合粉,挤压前 6 种不同预处理混合粉样品的糊化度均显著升高( $P<0.05$ ),其中添加 HOF 混合粉的糊化度最大(96.49%),原因可能是高压能增强蒸汽的穿透能力,燕麦籽粒内部受热均匀,致使混合粉糊化度升高;其中添加 FOF 的混合粉是挤压前预处理样品中糊化度最低的,原因可能是炒制处理温度较高,水分迅速蒸发导致燕麦籽粒受热不均,内部缺乏热量,导致整体糊化困难,糊化度偏低(85.49%)<sup>[15]</sup>。有研究发现糊

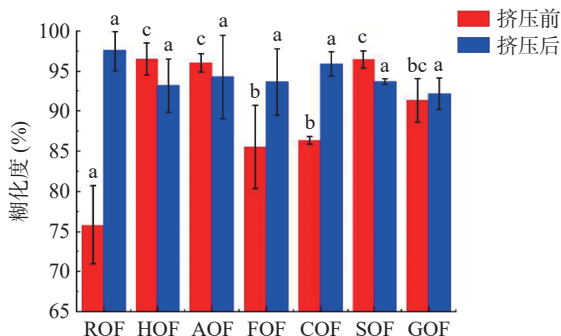


图 1 不同预处理燕麦-碎米混合粉挤压前后的糊化度

Fig.1 Gelatinization degree of oat-crushed rice mixed powder with different pretreatments before and after extrusion

注:不同小写字母表示挤压前或挤压后不同样品间显著性差异( $P<0.05$ ),图 2 同。

化度与米饭的消化吸收率成正比<sup>[16]</sup>,与挤压前相比,经过挤压后大部分预处理样品的糊化度都有所上升,而且下降的部分预处理样品变化不明显,说明添加挤压处理的燕麦有利于提高燕麦方便米饭的抗消化能力。

## 2.3 不同预处理燕麦-碎米混合粉挤压前后水合特性的影响

不同预处理燕麦-碎米混合粉挤压前后水合特性的影响如表 2 所示。WSI 和 WAI 是影响方便米饭质构品质的重要因素<sup>[17]</sup>。由表 2 可知,挤压前的水合特性指标变异系数均大于挤压后,其中挤压前的 WAI 和 SP 变异系数最大,达到了 12.29% 和 12.24%,说明添加预处理燕麦对样品的 WAI 和 SP 影响较大。WSI 主要反映淀粉分子的降解程度,WSI 越大,则淀粉的降解程度越大<sup>[18]</sup>。挤压前,添加了 GOF 与其他样品相比,WSI 呈显著增加( $P<0.05$ ),这主要是因为燕麦中的淀粉在发芽期间会转化为麦芽糖以及其他糖,淀粉含量会随着发芽周期的延长而逐渐减少<sup>[19]</sup>。挤压前的三种热处理样品 WSI 减少,可能是燕麦籽粒中脂肪含量较高,在高温下,淀粉-脂类复合物的生成,使其溶解性能下降<sup>[20]</sup>。在挤压后,6 种预处理样品的 WSI 均大于添加 ROF 的混合粉,其中添加 FOF 混合粉的 WSI 最大,与其他样品差异显著( $P<0.05$ ),可能是炒制和挤压前后两次的高温处理致使淀粉分子结构被充分破坏和降解<sup>[21]</sup>。

WAI 表征淀粉吸水膨胀形成凝胶的能力,WAI 越大,说明米粒内部淀粉糊化的越充分,米饭黏附性越大,因此会影响方便米饭的品质;SP 反应了淀粉在糊化时的吸水能力和离心后糊浆的持水力<sup>[22]</sup>。从表 2 中可以看出,在挤压前的样品 WAI 和 SP 均大于添加 ROF 的混合粉,说明添加预处理的燕麦有助于提高淀粉的吸水能力;而在挤压后所有样品的 WAI 和 SP 均小于 ROF,说明挤压能改善方便米饭的口感。其中挤压前添加 FOF 混合粉的 WAI 和 SP 最大,而挤压后最小,这可能与淀粉的二次糊化有关。

表 2 不同预处理燕麦-碎米混合粉挤压前后水合特性的影响

Table 2 Effects of different pretreatments of oats on hydration characteristics of extruded instant rice

| 样品      | WSI(%)                  |                         | WAI(g/g)                |                         | SP(g/g)                 |                         |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|         | 挤压前                     | 挤压后                     | 挤压前                     | 挤压后                     | 挤压前                     | 挤压后                     |
| ROF     | 3.50±0.01 <sup>bc</sup> | 4.64±0.19 <sup>a</sup>  | 1.54±0.76 <sup>a</sup>  | 5.77±0.02 <sup>b</sup>  | 1.60±0.79 <sup>a</sup>  | 6.05±0.01 <sup>b</sup>  |
| HOF     | 3.09±0.12 <sup>a</sup>  | 5.15±0.00 <sup>b</sup>  | 2.11±0.03 <sup>ab</sup> | 5.73±0.27 <sup>b</sup>  | 2.18±0.04 <sup>ab</sup> | 6.05±0.29 <sup>b</sup>  |
| AOF     | 3.33±0.02 <sup>b</sup>  | 4.90±0.02 <sup>ab</sup> | 2.16±0.02 <sup>ab</sup> | 5.74±0.01 <sup>b</sup>  | 2.23±0.02 <sup>ab</sup> | 6.03±0.01 <sup>b</sup>  |
| FOF     | 3.41±0.05 <sup>bc</sup> | 5.75±0.13 <sup>c</sup>  | 2.36±0.06 <sup>b</sup>  | 4.95±0.47 <sup>a</sup>  | 2.44±0.06 <sup>b</sup>  | 5.25±0.50 <sup>a</sup>  |
| COF     | 3.57±0.02 <sup>c</sup>  | 5.10±0.17 <sup>b</sup>  | 2.14±0.02 <sup>ab</sup> | 5.42±0.37 <sup>ab</sup> | 2.22±0.02 <sup>ab</sup> | 5.71±0.38 <sup>ab</sup> |
| SOF     | 3.51±0.15 <sup>bc</sup> | 4.69±0.03 <sup>a</sup>  | 2.17±0.02 <sup>ab</sup> | 5.30±0.28 <sup>ab</sup> | 2.25±0.02 <sup>ab</sup> | 5.56±0.29 <sup>ab</sup> |
| GOF     | 4.16±0.12 <sup>d</sup>  | 4.99±0.01 <sup>b</sup>  | 2.04±0.02 <sup>ab</sup> | 5.39±0.19 <sup>ab</sup> | 2.13±0.02 <sup>ab</sup> | 5.67±0.20 <sup>ab</sup> |
| 最小值     | 3.09                    | 4.64                    | 1.54                    | 4.95                    | 1.6                     | 5.25                    |
| 最大值     | 4.16                    | 5.75                    | 2.36                    | 5.77                    | 2.44                    | 6.05                    |
| 标准差     | 0.33                    | 0.37                    | 0.25                    | 0.30                    | 0.26                    | 0.30                    |
| 变异系数(%) | 9.36                    | 7.35                    | 12.29                   | 5.45                    | 12.24                   | 5.22                    |

2.4 添加不同预处理燕麦粉对高膳食纤维挤压方便米饭膳食纤维含量的影响

不同预处理燕麦粉对挤压方便米饭膳食纤维含量的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 将 6 种处理的和未处理的燕麦与碎米混合制备成挤压方便米饭, 相比于 ROF-IR, AOF-IR 中膳食纤维含量增加; 而其他的挤压方便米饭中的膳食纤维均减少, 其中 GOF-IR 的膳食纤维含量最小, 且与其他样品差异显著 ( $P<0.05$ ), 说明添加发芽处理的燕麦对挤压方便米中的膳食纤维的影响显著, 而这与罗艳平等<sup>[23]</sup>的研究结论, 发芽燕麦中膳食纤维含量增加不相符, 原因可能有两种, 一方面可能是原料配比问题, 由于添加的发芽燕麦粉只有 20%, 导致膳食纤维含量增减的趋势不明显; 另一方面挤压过程的温度、压力、湿度和时间等因素也可能对膳食纤维结构和含量有不同程度的影响<sup>[24]</sup>。根据高膳食纤维食品规定, 每 100 g 固体中膳食纤维的含量超过 6 g 以上的定义, 在燕麦添加量为 20% 时, 预处理能使燕麦挤压方便米饭符合高膳食纤维标准要求的燕麦预处理技术有 HOF-IR 和 AOF-IR。

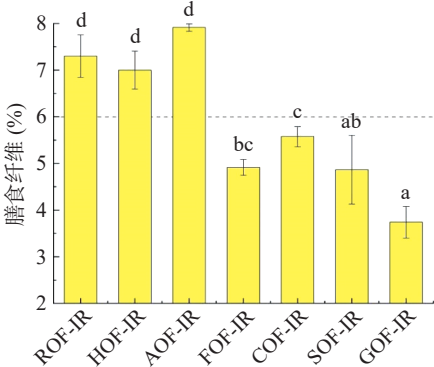


图 2 不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭膳食纤维的影响

Fig.2 Effects of different pretreatments of oats on dietary fiber of instant rice

2.5 添加不同预处理燕麦粉对高膳食纤维挤压方便米饭质构特性的影响

不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭质

表 3 添加不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭质构特性的影响

Table 3 Effects of different pretreatments of oats on texture properties of high dietary fiber extruded instant rice

| 样品      | 硬度(g)                       | 弹性(s)                   | 粘聚性                      | 胶黏性(g·s)                    | 咀嚼性(g)                       | 回复性                     |
|---------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ROF-IR  | 384.87±233.29 <sup>a</sup>  | 1.04±0.09 <sup>ab</sup> | 0.79±0.05 <sup>abc</sup> | 331.93±59.65 <sup>a</sup>   | 264.99±170.31 <sup>a</sup>   | 0.80±0.15 <sup>ab</sup> |
| HOF-IR  | 458.13±144.99 <sup>ab</sup> | 1.01±0.08 <sup>ab</sup> | 0.80±0.04 <sup>bc</sup>  | 376.70±123.07 <sup>ab</sup> | 413.97±184.45 <sup>abc</sup> | 0.87±0.10 <sup>b</sup>  |
| AOF-IR  | 609.30±259.27 <sup>b</sup>  | 1.00±0.08 <sup>ab</sup> | 0.78±0.05 <sup>ab</sup>  | 493.72±202.54 <sup>b</sup>  | 545.69±207.78 <sup>c</sup>   | 0.83±0.1 <sup>ab</sup>  |
| FOF-IR  | 420.48±73.07 <sup>a</sup>   | 0.92±0.09 <sup>a</sup>  | 0.75±0.09 <sup>a</sup>   | 345.70±191.11 <sup>ab</sup> | 302.50±50.32 <sup>a</sup>    | 0.72±0.20 <sup>a</sup>  |
| COF-IR  | 453.23±121.00 <sup>ab</sup> | 1.11±0.31 <sup>b</sup>  | 0.83±0.03 <sup>bc</sup>  | 375.93±106.40 <sup>ab</sup> | 358.26±105.66 <sup>ab</sup>  | 0.85±0.07 <sup>b</sup>  |
| SOF-IR  | 566.65±63.54 <sup>ab</sup>  | 1.00±0.03 <sup>ab</sup> | 0.85±0.01 <sup>c</sup>   | 478.84±55.24 <sup>ab</sup>  | 470.33±61.90 <sup>bc</sup>   | 0.89±0.05 <sup>b</sup>  |
| GOF-IR  | 559.60±108.16 <sup>ab</sup> | 1.08±0.19 <sup>ab</sup> | 0.84±0.01 <sup>c</sup>   | 469.73±90.98 <sup>ab</sup>  | 531.75±133.54 <sup>c</sup>   | 0.89±0.05 <sup>b</sup>  |
| 最小值     | 384.87                      | 0.92                    | 0.75                     | 331.93                      | 264.99                       | 0.72                    |
| 最大值     | 566.65                      | 1.11                    | 0.85                     | 493.72                      | 545.69                       | 0.89                    |
| 标准差     | 84.79                       | 0.06                    | 0.04                     | 68.09                       | 109.63                       | 0.06                    |
| 变异系数(%) | 17.19                       | 6.03                    | 4.38                     | 16.59                       | 26.58                        | 7.36                    |

构特性的影响如表 3 所示。由表 3 可知, 方便米饭的硬度、胶黏性和咀嚼性变异系数较大, 其中咀嚼性的变异系数最大, 达到了 26.58%, 说明添加不同预处理燕麦对挤压方便米饭咀嚼性影响较大。硬度的大小代表米饭保持形状的内部结合力<sup>[25]</sup>, 其中 6 种添加预处理燕麦的挤压方便米饭的硬度和咀嚼性均大于 ROF-IR, 而米饭的硬度和咀嚼性主要与淀粉颗粒水合作用有关<sup>[26]</sup>, 并随着原料水分含量的增加而升高, 主要原因是 6 种样品物料经预处理后水分含量减少, 而在相同挤压和复水的条件下, 米饭中淀粉颗粒水合作用较 ROF-IR 弱。其中 FOF-IR 的弹性、粘聚性和回复性最小, 并与其他样品呈显著差异 ( $P<0.05$ ), 说明 FOF-IR 的质构品质较差。根据作者团队前期研究结果表明, 挤压方便米饭质构品质指标中的硬度和胶黏性可作为挤压方便米饭品质评价的关键指标<sup>[11]</sup>, 以此为参考依据, 将样品通过两个指标的大小进行排序可得: AOF-IR>SOF-IR>GOF-IR>HOF-IR>COF-IR>FOF-IR>ROF-IR, 说明预处理能有效改善高膳食纤维挤压方便米饭的品质。

2.6 添加不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭复水特性的影响

不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭复水特性的影响如表 4 所示。复水时间和复水率考察方便米饭品质的重要指标, 从表 4 可知, 7 种挤压方便米饭的复水时间变异系数最大, 说明不同的预处理方式对高膳食纤维挤压方便米饭复水时间的影响较大; 添加了预处理燕麦粉的高膳食纤维挤压方便米饭复水时间和复水率均升高, 可能是由于预处理导致燕麦粉中可溶性膳食纤维含量增加或者膳食纤维组织结构变得疏松, 使得复水效果得到改善<sup>[27]</sup>, 其中 FOF-IR 和 COF-IR 的复水时间和复水率均大于其他样品。

2.7 添加不同预处理燕麦对挤压方便米饭感官品质及综合得分的影响

不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭感官品质如图 3 所示。从图 3 中可以发现, 不同预处理

表 4 添加不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭复水特性的影响

Table 4 Effects of different pretreatments of oats on rehydration properties of high dietary fiber extruded instant rice

| 样品      | 复水时间(min)               | 复水率(%)                  |
|---------|-------------------------|-------------------------|
| ROF-IR  | 6.17±0.58 <sup>a</sup>  | 3.67±0.11 <sup>a</sup>  |
| HOF-IR  | 7.00±0.50 <sup>b</sup>  | 3.97±0.10 <sup>bc</sup> |
| AOF-IR  | 6.83±0.29 <sup>ab</sup> | 3.83±0.02 <sup>ab</sup> |
| FOF-IR  | 8.50±0.50 <sup>c</sup>  | 4.18±0.00 <sup>c</sup>  |
| COF-IR  | 8.50±0.00 <sup>c</sup>  | 4.14±0.20 <sup>c</sup>  |
| SOF-IR  | 8.17±0.29 <sup>c</sup>  | 3.70±0.08 <sup>a</sup>  |
| GOF-IR  | 8.33±0.29 <sup>c</sup>  | 3.67±0.08 <sup>a</sup>  |
| 最小值     | 6.17                    | 3.67                    |
| 最大值     | 8.50                    | 4.18                    |
| 标准差     | 0.95                    | 0.22                    |
| 变异系数(%) | 12.49                   | 5.57                    |

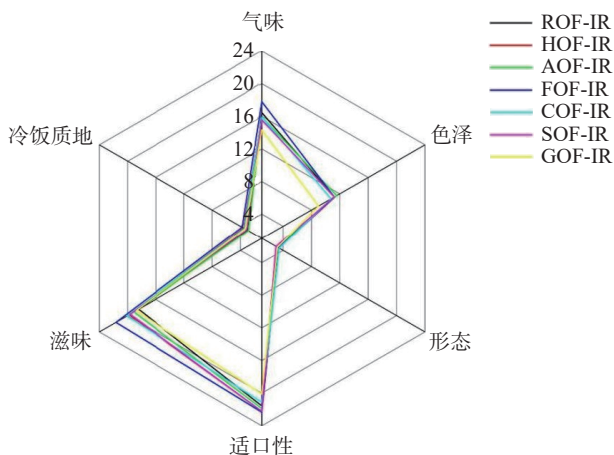


图 3 添加不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭感官品质的影响

Fig.3 Effects of different pretreatments of oats on sensory quality of high dietary fiber extruded instant rice

理对高膳食纤维挤压方便的气味、色泽和滋味影响有较大差异,而这三个指标也是影响感官评价最直观的因素,其中 FOF-IR 的气味和滋味评分最高,均达到了 18 分以上,而主要原因是炒制的燕麦富含水果香和油脂香等多种令人愉悦的挥发性香气<sup>[28]</sup>。而 GOF-IR 的气味和色泽评分较低,主要是因为燕麦发芽过程中会产生许多淀粉和蛋白质的水解产物,最后

表 5 添加不同预处理燕麦对高膳食纤维挤压方便米饭感官评分及综合得分的影响

Table 5 Effects of different pretreatments of oats on sensory score and comprehensive score of high dietary fiber extruded instant rice

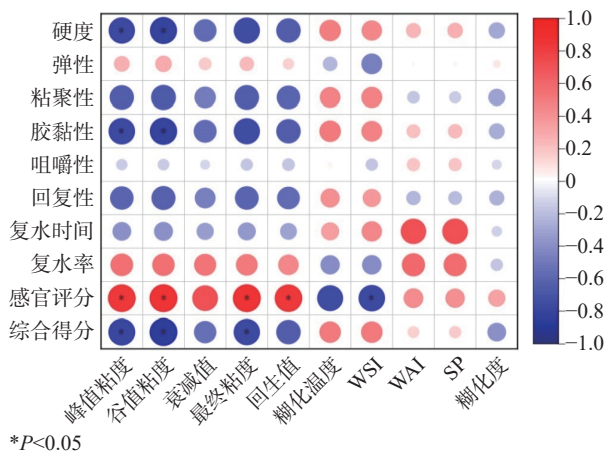
| 样品     | 感官评分                     | 排名 | 综合得分  | 排名 |
|--------|--------------------------|----|-------|----|
| ROF-IR | 75.38±9.27 <sup>ab</sup> | 6  | -0.72 | 6  |
| HOF-IR | 75.50±6.44 <sup>ab</sup> | 5  | -0.12 | 5  |
| AOF-IR | 77.50±5.18 <sup>ab</sup> | 2  | 0.94  | 1  |
| FOF-IR | 81.75±6.02 <sup>b</sup>  | 1  | -1.22 | 7  |
| COF-IR | 75.88±6.62 <sup>ab</sup> | 3  | -0.09 | 4  |
| SOF-IR | 75.75±7.13 <sup>ab</sup> | 4  | 0.36  | 3  |
| GOF-IR | 70.38±8.28 <sup>a</sup>  | 7  | 0.85  | 2  |

的干燥过程中发芽燕麦的颜色会因为这些物质发生美拉德反应而褐变<sup>[29]</sup>。而燕麦发芽过程中增加的还原糖、游离脂肪酸和游离氨基酸会形成一种独特的风味,这种风味可能在高温处理后未能被大众所接受<sup>[30]</sup>。

由表 5 可知,其中 FOF-IR 的感官评分最高,但其质构品质较差,因此综合得分低;GOF-IR 的综合得分较高,但大众接受程度低,因此感官评分差。而 AOF-IR 在两者之间均排名靠前,因此 AOF-IR 的综合品质最佳。

## 2.8 不同预处理燕麦-碎米混合粉理化特性与其制备的挤压方便米饭品质的相关性分析

由图 4 可看出,燕麦-碎米混合粉的峰值粘度、谷值粘度与高膳食纤维挤压方便米饭的硬度、胶黏性呈显著负相关( $P<0.05$ ),与挤压方便米饭的感官评分呈显著正相关( $P<0.05$ ),说明峰值粘度和谷值粘度越低,方便米饭的软硬度及黏着性品质越好,硬度和胶黏性品质越好,表明方便米饭的感官评分越高;而与挤压方便米饭的综合得分呈显著负相关( $P<0.05$ );揭示了米饭口感软硬度及黏着性与消费者喜爱度有着重要的影响。最终粘度与感官评分呈显著正相关( $P<0.05$ ),与综合得分呈显著负相关( $P<0.05$ ),可能是粘度的增加改善了某些感官特性,如口感的丰富度,但同时也影响了其他感官特性,导致综合得分下降;回生值与感官评分呈显著正相关( $P<0.05$ ),说明回生值反映了米饭的适口性,回生值越高,其方便米饭产品的适口性越好。



\* $P<0.05$

图 4 不同预处理燕麦-碎米混合粉理化特性与挤压方便米饭品质的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between physicochemical properties of oat-broken rice mixed flour with different pretreatments and quality of extruded instant rice

## 3 结论

通过将燕麦原粉经过高压蒸制、常压蒸制、炒制、纤维素酶酶解、 $\alpha$ -淀粉酶酶解以及发芽 6 种不同的预处理,分析其制成的碎米-燕麦混合粉的糊化特性、糊化度及水合特性和挤压方便米饭的膳食纤维

及综合品质,并对原料特性指标与挤压方便米饭品质作相关性分析,以明确最宜于加工高膳食纤维挤压方便米饭的燕麦预处理方式。与其他预处理方法相比,采用发芽处理的燕麦粉制成的混合粉糊化特性都偏高;常压蒸制燕麦粉制成的挤压方便米饭膳食纤维高达 7.91%;与原料相比,预处理后的燕麦粉制成的方便米饭的复水时间和复水率都有所上升,但常压蒸制变化不明显,复水性能最佳。感官评价中的最终得分排名依次为 AOF-IR、GOF-IR、SOF-IR、COF-IR、HOF-IR、ROF-IR、FOF-IR,说明常压蒸制处理燕麦粉受消费者喜爱。本文较系统化比较分析不同预处理方式对燕麦粉制成的碎米-燕麦粉混合粉的基本理化指标以及挤压方便米饭的感官品质之间的差异性和相关性,为燕麦资源的合理开发以及挤压方便米饭的生产应用提供了技术依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 徐斌,孙伊琳,刘淑一,等. 预糊化处理对高含量燕麦挂面品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 139-144, 138. [XU B, SUN Y L, LIU S Y, et al. Effect of pregelatinization on the quality of noodles with a high oat flour content[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35 (6): 139-144, 138.]
- [2] 刘运荣,范新宇,刘春雷. 燕麦杂粮馒头食用品质特性的影响因素研究[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 157-162. [LIU Y R, FAN X Y, LIU C L. Study on influencing factors of edible quality characteristics of Mantou made from oat grains[J]. Food Technology, 2021, 46(6): 157-162.]
- [3] 高嘉琦. 超高压处理对燕麦方便米饭原料特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012. [GAO J Q. The effect of ultra-high-pressure treatment on the characteristics of oat instant rice raw materials[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.]
- [4] NIKINMAA, MARKUS, SARI A. MUSTONEN, LAURI HUITULA, et al. "Wholegrain oat quality indicators for production of extruded snacks." [J]. LWT—Food Science and Technology, 2023, 174: 114457.
- [5] BERSKI W, PTASZEK A, PTASZEK P, et al. Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 665-671.
- [6] DAR M Z, DEEPIKA K, JAN K, et al. Modification of structure and physicochemical properties of buckwheat and oat starch by  $\gamma$ -irradiation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108: 1348-1356.
- [7] 陈东方,师俊玲,胡新中. 纤维素酶水解处理提高燕麦全粉中总多酚含量与抗氧化活性[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 56-62. [CHEN D F, SHI J L, HU X Z. Cellulase hydrolysis treatment improves total polyphenol content and antioxidant activity in whole oat flour[J]. Food Science, 2016, 37(1): 56-62.]
- [8] 李淑娟,曾萍,沈起兵,等. 速溶燕麦粉的制备工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 37-41. [LI S J, ZENG P, SHEN Q B, et al. Preparation technology of instant oat flour[J]. Food Industry, 2021, 42(1): 37-41.]
- [9] 秦萍. 发芽杂粮代餐粉的研制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. [QIN P. Development of meal replacement powder of germinated grains [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.]
- [10] 王宝石,郑明珠,闵伟红,等. 响应曲面法对双螺杆挤压蒸煮玉米粉条件的优化[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 16-19. [WANG B S, ZHENG M Z, MIN W H, et al. Optimization of twin-screw extrusion cooking corn flour conditions using response surface methodology[J]. Food Science, 2012, 33(14): 16-19.]
- [11] 王鹏智,祝红,易翠平. “头子”对鲜湿米粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(12): 1-6. [WANG P Z, ZHU H, YI C P. Effects of 'Touzi' on the quality of fresh wet rice noodles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2021, 36(12): 1-6.]
- [12] 刘惠惠,吴卫国,廖卢艳. 市售挤压方便米饭品质评价[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 135-143. [LIU H H, WU W G, LIAO L Y. Quality evaluation of extruded instant rice sold in market[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(6): 135-143.]
- [13] NGUYEN T T L, MITRA S, GILBERT R G, et al. Influence of heat treatment on starch structure and physicochemical properties of oats[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89: 102805.
- [14] 田斌强. 发芽燕麦淀粉的特性及结构表征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. [TIAN B Q. Characteristics and structural characterization of germinated oat starch[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.]
- [15] WU J Y, XU S Q, HUANG Y, et al. Prevents kudzu starch from agglomeration during rapid pasting with hot water by a non-destructive superheated steam treatment[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132819.
- [16] 高晗,杨亚鹏,闫薇,等. 烹饪参数对米饭消化性能的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 35-39. [GAO H, YANG Y P, YAN W, et al. Effects of cooking parameters on the digestibility of rice[J]. Grains and Oils, 2022, 35(1): 35-39.]
- [17] 马晓灵. 不同原料对军用方便米饭食用品质影响的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017. [MA X L. Study on the effect of different raw materials on the eating quality of military instant rice[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2017.]
- [18] 方浩标,郑经绍,余宏达,等. 挤压膨化对紫糙米粉营养品质及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 70-77. [FANG H B, ZHENG J S, YU H D, et al. Effect of extrusion process on the nutritious and physicochemical properties of purple brown rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 70-77.]
- [19] 徐建国,郝艳芳,闫华娟,等. 燕麦发芽过程中淀粉及其相关酶活性的动态变化[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 25-27, 49. [XU J G, HAO Y F, YAN H J, et al. Dynamic changes in starch and relevant enzyme activity in oat groats during germination[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2012, 27(4): 25-27, 49.]
- [20] 冯攀屹. 燕麦籽粒热处理对其理化及挤压特性的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012. [FENG P Y. The influence of grain heat treatment on oats physical, chemical and extrusion characteristics [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.]
- [21] MOISIO T, FORSSELL P, PARTANEN R, et al. Reorganization of starch, proteins and lipids in extrusion of oats[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 64: 48-55.
- [22] 刘淑一,赵芳芳,周小玲,等. 预糊化对燕麦全粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 56-61. [LIU S Y, ZHAO F F, ZHOU X L, et al. Effect of pre-gelatinization on the physical and chemical properties of whole oat flour[J]. Journal of the Chinese

Cereals and Oils, 2017, 32(9): 56–61. ]

[ 23 ] 罗艳平, 袁娟, 卫娜, 等. 燕麦发芽过程中营养物质的变化研究[J]. 食品与发酵科技, 2016, 52(3): 52–55. [ LUO Y P, YUAN J, WEI N, et al. Research of nutrient changes of oats during the germination process[J]. Food and Fermentation Technology, 2016, 52(3): 52–55. ]

[ 24 ] NIKINMAA M, ZEHNDER-WYSS O, NYSTRÖM L, et al. Effect of extrusion processing parameters on structure, texture and dietary fibre composition of directly expanded wholegrain oat-based matrices[J]. LWT, 2023: 114972.

[ 25 ] 李佳, 曹毅, 吕荣文, 等. 两种不同品种稻谷储藏期间加工品质及其米饭质构特性研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(3): 29–33. [ LI J, CAO Y, LÜ R W, et al. Study on the processing quality and texture characteristics of two different varieties of rice during storage[J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(3): 29–33. ]

[ 26 ] 夏凡, 董月, 朱蕾, 等. 大米理化性质与其食用品质相关性研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(5): 100–107. [ XIA F, DONG Y, ZHU L, et al. Study on the relationship between physicochemical properties and edible quality of rice[J]. Food Science and Technolo-

gy and Economy, 2018, 43(5): 100–107. ]

[ 27 ] JIA M Y, CHEN J J, LIU X Z, et al. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 468–474.

[ 28 ] 张焱, 张文刚, 党斌, 等. 炒制青稞及燕麦香气组成差异研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 43–51. [ ZHANG Y, ZHANG W G, DANG B, et al. Aroma composition difference of roasted highland barley and oats[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2020, 35(5): 43–51. ]

[ 29 ] XU Y X, ZHAO J M, WANG R, et al. Effect of heat treatment on the binding of selected flavor compounds to myofibrillar proteins[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(11): 5028–5034.

[ 30 ] APARICIO-GARCÍA N, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, FRIAS J, et al. Sprouted oat as a potential gluten-free ingredient with enhanced nutritional and bioactive properties[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127972.