

挤压膨化对杂粮代餐粉营养品质及理化性质的影响

王霞, 刘永吉, 白吉敏, 鹿保鑫

Effects of Extrusion on Nutritional Quality and Physicochemical Properties of Multigrain Meal Replacement Powder

WANG Xia, LIU Yongji, BAI Jimin, and LU Baoxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

挤压膨化对紫糙米粉营养品质及理化性质的影响

Effect of Extrusion Process on the Nutritious and Physicochemical Properties of Purple Brown Rice Flour

食品工业科技. 2021, 42(19): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010205>

小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较

Difference of Physicochemical Properties and Nutritional Quality between Raw and Extruded Foxtail Millet Flour

食品工业科技. 2019, 40(22): 13-18,23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.003>

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>

不同杂粮添加对籼米粉粉质特性及挤压米粉品质特性的影响

Effects of Different Types of Coarse Cereals on the Flour Properties of Rice and Quality Characteristics of Extruded Noodle

食品工业科技. 2019, 40(8): 66-72 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.012>

挤压膨化对大米粉糊化度及蛋白质体外消化率的影响

Effect of extrusion on gelatinization degree and protein digestibility of rice flour

食品工业科技. 2017(07): 230-234 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.07.037>

人参山药挤压膨化工艺优化及其理化性质研究

Optimization of Extrusion Technology and Physicochemical Properties of Ginseng Yam Blend

食品工业科技. 2020, 41(21): 193-198,207 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020031>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120128

WANG Xia, LIU Yongji, BAI Jimin, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120128

· 研究与探讨 ·

挤压膨化对杂粮代餐粉营养品质及理化性质的影响

王霞^{1,2,*}, 刘永吉^{1,3}, 白吉敏¹, 鹿保鑫¹

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2.黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;

3.黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319)

摘要:以青稞、绿豆、黑豆、苦荞多种杂粮为原料, 采用双螺杆挤压膨化技术制备杂粮代餐粉, 分析其挤压前后营养成分、挥发性风味物质、晶体结构等理化性质的变化。结果表明: 经挤压处理后杂粮代餐粉蛋白质、脂肪、水分、淀粉、总酚、总黄酮含量分别下降了 2.83%、0.47%、4.45%、2.62%、17.89 mg/100 g、9.02 mg/100 g; 膳食纤维和灰分变化不显著。风味贡献较大的醛类、醇类、杂环类物质有所增加, 大大改善其风味。结晶结构由 A 型转变为 V 型, 结晶度下降了 24.97%。RVA、DSC 结果显示, 峰值黏度、最低黏度、崩解值、最终黏度、回生值和峰值时间分别下降了 156、46、110、111、177 cP、2.2 min, 焓变值下降为 0.15 J·g⁻¹ 表明大部分的淀粉已糊化。凝胶质构结果显示, 硬度及胶粘性分别下降了 35.72 g、4.08 g, 粘附力、内聚性、弹性、咀嚼性分别增加了 5.11 g、0.19 Ratio、5.08 mm、1.98 mJ, 赋予其良好的口感。粉体品质特性研究显示可溶性固形物含量、持水力增加, 持油力减少; 粉体特性明显改善, 色泽变化明显。

关键词:杂粮, 挤压膨化, 营养品质, 糊化特性

中图分类号: TS217.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0028-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120128



本文网刊:

Effects of Extrusion on Nutritional Quality and Physicochemical Properties of Multigrain Meal Replacement Powder

WANG Xia^{1,2,*}, LIU Yongji^{1,3}, BAI Jimin¹, LU Baoxin¹

(1.College of Food, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2.Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, Daqing 163319, China;

3.Key Laboratory of Agro-products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China)

Abstract: Using highland barley, mung bean, black bean and Tartary buckwheat as raw materials, the multigrain meal replacement powder was set by twin-screw extrudate technology. The changes of nutrient composition, volatile flavor, crystal structure and other physicochemical properties were tested before and after extrudate. The results showed that the contents of protein, fat, moisture, starch, total phenol and total flavone of multigrain meal replacement powder were reduced by 2.83%, 0.47%, 4.45%, 2.62%, 17.89 mg/100 g and 9.02 mg/100 g, respectively. The changes of dietary fiber and ash were not significant. The aldehydes, alcohol and heterocyclic substances that contribute more to the flavor were increased, which greatly improved the flavor. The crystal structure changed from A-type to V-type, and the crystallinity reduced by 24.97%. RVA and DSC results showed that the peak viscosity, minimum viscosity, disintegration value, final viscosity, recovery value and peak time decreased by 156, 46, 110, 111, 177 cP and 2.2 min, respectively. The enthalpy

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 国家重点研发计划计划 (2018YFE0206300); 黑龙江省自然科学基金研究团队项目 (TD2020C003)。

作者简介/通信作者*: 王霞 (1971-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: wangxia71@136.com。

change decreased to $0.15 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, indicating that most of the starch had been gelatinized. The results of gel texture showed that the hardness and adhesion decreased by 35.72 g and 4.08 g respectively, while the adhesion, cohesiveness, elasticity and capability increased by 5.11 g, 0.19 Ratio, 5.08 mm and 1.98 mJ respectively, giving it a good taste. The study of the quality characteristics of the powder showed that the content of soluble solid and the water holding capacity increased while the oil holding capacity decreased. The characteristics of power were obviously improved. The color changed obviously.

Key words: cereal; extrusion; nutritional quality; gelatinization

杂粮通常是指水稻、小麦、玉米、大豆和薯类五大作物以外的粮豆作物。但多数杂粮由于种植面积少、种植地区特殊、产量较低,质地粗糙,适口性差,因此其主食化加工受到较大限制。鉴于此,寻找一种加工技术,改善其适口性、冲调性等成为研究的重点^[1]。

挤压膨化技术是目前杂粮预加工的新型加工技术^[2-4],其特点是工艺简单、能耗低、成本低、无“三废”、产量高、质量好,在改善杂粮风味、抑制不良因素和提高蛋白质消化率方面起着重要作用。范宽秀等^[5]研究得出挤压膨化处理能够提高淮山全粉的速溶性。谢仲寅等^[6]研究证明,挤压膨化处理可改善小米风味、口感,提高产品质量。方浩标等^[7]研究表明,紫糙米经过最优挤压膨化处理后,营养虽有一定的损失,但溶解度与熟化度得到极大地提升。目前,有关挤压膨化的研究更多地集中在单一杂粮和挤压工艺优化上,有关对复合杂粮粉挤压前后基本营养成分、挥发性风味物质、结晶特性、糊化特性、水合特性、粉体特性等全面评价的研究甚少。

本实验系统研究了挤压膨化对复合杂粮粉基本营养成分、挥发性风味物质、理化性质以及杂粮粉粉体特性的影响。旨在为挤压膨化技术在杂粮食品加工中的应用及杂粮产品的进一步开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

青稞 藏青 311,市售;绿豆 鹦哥绿,市售;黑豆 龙黑大豆 1 号,市售;苦荞 九江苦荞,市售;葡萄糖酸钙(AR) 郑州瑞普生物工程有限公司;甲醇 色谱级,国药集团化学试剂有限公司。

DSE32 型双螺杆挤压实验机 济南鼎润机械设备有限公司;高速多功能粉碎机 皇代电器旗舰店;75 μm CAR/PDMS 萃取纤维头、手动 SPME 进样器 美国 Sigma 公司;差示扫描量热仪 德国耐驰;RVA-4500 型快速粘度分析仪 波通瑞华科学仪器有限公司;CS-580A 型分光测色仪 深圳市君达时代仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 杂粮代餐粉的工艺流程 多种杂粮进行粉碎(过 80 目筛)→杂粮粉按配比混合均匀→调节水分(挤压处理前样品)→挤压膨化机加工(螺杆转速 162 r/min,挤压温度 160 $^{\circ}\text{C}$,物料水分含量 18%)→粉碎(过 80 目筛)→成品。^[1]

1.2.2 基本营养成分的测定 将原料粉、杂粮代餐粉进行主要产品组分的变化,测定方法按下列方法进

行。蛋白质含量的测定,采用 GB 5009.5-2016 中的凯氏定氮法;粗脂肪含量的测定,采用 GB 5009.5-2016 中的索式抽提法;灰分的测定,采用 GB 5009.4-2016 中的第一法(灼烧法);总膳食纤维的测定,采用 GB 5009.88-2014 中的酶重量法;淀粉含量的测定,采用 GB/T 5009.9-2016《食品中淀粉的测定》(酶水解法)测定。

1.2.3 总酚含量测定 总酚含量采用福林酚比色法测定^[8]。在 10 mL 容量瓶中,加入 0.5 mL 酚类提取物,用蒸馏水定容至 5 mL,然后加入 0.5 mL 福林酚试剂,摇匀,加入 1 mL 0.5 mol/L 碳酸钠溶液,摇匀,避光放置 1 h,在 765 nm 处测量吸光度,平行测量三次。使用没食子酸标准品制作标准曲线。

1.2.4 黄酮含量测定 总黄酮含量根据 Liu 等^[9]的方法进行测定,并稍作修改。吸取 0.5 mL 酚类提取物到 10 mL 容量瓶中,用 70% 乙醇溶液将其体积增加到 5 mL,加入 0.3 mL 5% 的 NaNO_2 ,混合均匀后静置 6 min,加入 0.3 mL 10% 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$,混合均匀后静置 6 min,最后加入 4 mL 4% 的 NaOH 溶液,用 70% 乙醇溶液将其体积增加到 10 mL,混合均匀后静置 15 min。在 510 nm 处测量吸光度,平行测量三次。使用芦丁标准品制作标准曲线。

1.2.5 固相微萃取结合气-质联用测定其可挥发性风味物质

1.2.5.1 挥发性风味物质的采集 准确称取样品 5.0 g,放入 20 mL 的固相萃取管中,插入带有 75 μm CAR/PDMS 纤维头的手持注射器中,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 顶空萃取 1 h,立即取出萃取头并放入 GC 中,在 250 $^{\circ}\text{C}$ 下对样品进行热解析 5 min。

1.2.5.2 气相色谱条件 色谱柱为 HP-5MS 石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm,0.25 μm);初始柱温为 45 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,然后以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 170 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min,然后以 7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min;柱室温度为 45 $^{\circ}\text{C}$;入口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$ 。汽化室的温度为 250 $^{\circ}\text{C}$ 。使用纯度为 99.999% 氦气为载气,载气流速为 1 mL/min,分流比 10:1。质谱条件:EI 源,离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$,电子能量 70 eV,接口温度 270 $^{\circ}\text{C}$,单四极杆质量分析器,质量扫描范围 35~350 amu,检测电压 1.00 kV。

定性:GC-MS 分析得到的质谱图与计算机中 NIST17 标准谱库进行比对,提供匹配度大于等于 80% 的物质作为参考风味物质成分(若无>80% 的物

质,选择提供相似的最高的物质)。定量:用峰面积归一化法计算出样品中各成分的相对含量。

1.2.6 理化性质的检测

1.2.6.1 X-衍射分析 参考唐君钰^[10]的方法,稍作修改。测试条件的参数如下:铜靶板;管压电流:40 kV/35 mA;步长:0.02°;扫描速度:8°/min;衍射角:2 θ ;扫描范围:4°~60°。

1.2.6.2 热特性检测 利用差示量热扫描仪(Differential Scanning Calorimeter, DSC)对代餐粉的热特性进行分析。参考程雯^[11]的方法,稍作修改。将样品准确称量到3.0 mg的铝制坩埚中,加入9 μ L去离子水,盖上盖子,让坩埚在4 °C下平衡24 h。使用一个空的坩埚作为参考样品,以10 mL/min的氮气作为载气,将样品从20 °C加热到150 °C,加热速率为5 °C/min。

1.2.6.3 糊化特性检测 参考李兆钊^[12]的方法,稍作修改。将仪器预热20 min,称取3 g含水量为14%的样品和25 mL蒸馏水,放入RVA仪器的铝制容器中,沿同一方向混合,不要形成结块。将试验条件设定在50 °C,持续1 min,然后升至95 °C,以12 °C/min的速度持续2.5 min,然后冷却至50 °C,以12 °C/min的速度持续2 min。搅拌器在前10 s以960 r/min的速度运行,然后以160 r/min的速度运行,共14 min。使用RVA的TCW软件对数据进行分析。

1.2.6.4 凝胶质构特性的测定 参考廖卢艳等^[13]的方法,稍作修改。利用RVA使挤压前后杂粮粉充分糊化后,置于4 °C冰箱内保存24 h,TPA模式下进行测量:探针:TA/O.5;形变量:50%;触发力:10 g;测试速度:1.0 mm/s;样品高度:75 mm。

1.2.7 代餐粉品质特性

1.2.7.1 可溶性固形物测定 参照王大为等^[14]的方法,略有改动。将待测的粉末样品在70 °C的烘箱中干燥6~8 h,准确称取干燥后样品0.3 g并加入0.7 mL蒸馏水,将其配制成7%的溶液,在100 °C的水浴中保持30 min,然后以4000 r/min的速度旋转30 min。取出上清液,用手持糖量折光仪测定可溶性固体含量。

$$A(\%) = \frac{A_0}{7\%} \times 100$$

式中:A为样品中可溶性固形物含量,%;A₀为溶液中可溶性固形物含量,%。

1.2.7.2 水合特性测定 持水性的测定参照Mari等^[15]的方法,略有改动。将样品配制成5%的溶液后,在室温下放置4 h,然后以4000 r/min的速度离心15 min,倒出上清液,算持水力公式如下:

$$\text{持水性}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{m_1 - m}{m}$$

式中:m₁为样品湿重,g;m为样品干重,g。

持油性的测定参照汤小明等^[16]的方法,略有改动。样品与食用油质量比为1:8混合均匀,在室温下静置4 h后,经4000 r/min离心15 min,计算持油性公式如下:

$$\text{持油性}(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{m_1 - m}{m}$$

式中:m₁为样品湿重,g;m为样品干重,g。

1.2.7.3 粉体特性测定 a.休止角及滑角的测定:休止角(θ):将漏斗固定在铁架台上,使漏斗底端高于桌面上方格纸(H)3 cm,然后把样品均匀地倒进漏斗中,直到成型后锥体的顶部与漏斗底部相接触,被测锥体的直径记为2R^[17]。按公式计算:

$$\theta(^{\circ}) = \arctan(2R/H)$$

滑角(α):将5.0 g样品放置在玻璃板上(L:130 mm),把平板的一头慢慢地提起,测量顶面到水平面的垂直距离(H)。按公式计算:

$$\alpha(^{\circ}) = \arcsin(H/L)$$

b.松密度(ρ_B)、轻敲密度(ρ_T)、卡氏指数(Carr)、霍斯纳比值(Hausner)的测定^[18]: ρ_B :取一个100 mL量筒,精密称取10 g样品,将样品用漏斗倒入量筒中,并准确记录粉体体积,进行三次平行实验。按公式计算:

$$\rho_B(\text{g/mL}) = \frac{m_2 - m_1}{V_B}$$

式中:m₁为量筒的质量,g;m₂为样品与量筒的总质量,g;V_B为注入样品的体积,mL。

ρ_T :将上述量筒从距桌面高度3 cm处自由下落,重复300次,记录振实后粉末体积,进行三次平行实验。按公式计算:

$$\rho_T(\text{g/mL}) = \frac{m_2 - m_1}{V_T}$$

式中:V_T为振实后样品的体积,mL。

Carr指数、Hausner比值按公式计算:

$$\text{Carr指数}(\%) = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_B} \times 100$$

$$\text{Hausner比值} = \frac{\rho_T}{\rho_B}$$

c.川北方程:将样品小心倒入量筒100 mL标记处,再使量筒在垂直桌面1 cm的高度上自由下落,直到体积恒定,记录该时刻样品的体积及落下次数。川北方程变形为:

$$\frac{n}{c} = \frac{n}{a} + \frac{1}{ab}$$

式中:n为轻敲次数(即落下次数);a为轻敲次数无穷大时体积减少数;b为充填速度常数;c为样品相对体积减小数。

轻敲次数无穷大时,a、b按公式计算:

$$a = \frac{V_0 - V_\infty}{V_0}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{n(V_n - V_\infty)}{V_0 - V_n}$$

式中: V_0 为初始体积; V_n 为轻敲 n 次后样品体积; V_∞ 为轻敲无穷次后样品体积。

1.2.7.4 色泽测定 使用 CS-580A 型分光测色仪, 每个样品测 3 次, 求其平均值。根据所得数据, 计算色度(C^*), 色相角(H^*), 总颜色(E^*)、明亮值(L^*)、红绿值(a^*)、黄蓝值(b^*)和白度(W)。按公式计算:

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{0.5}$$

$$H^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

$$E^* = (L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{0.5}$$

$$W(\%) = \left\{ 100 - \left[(100 - L^*)^2 + (a^{*2} + b^{*2}) \right]^{0.5} \right\} \times 100$$

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2019 软件计算实验数据均值和标准偏差; 采用 SPSS 26 软件对数据进行显著性差异分析; 采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 挤压膨化对代餐粉基本成分的影响

由表 1 可知, 杂粮粉经挤压膨化以后, 蛋白质、脂肪、水分、淀粉、总酚、总黄酮含量显著降低($P <$

0.05), 膳食纤维和灰分变化不显著($P > 0.05$)。这可能是由于物料在挤压机机械能与热能的共同作用下, 蛋白质部分变性降解产生小分子肽和氨基酸; 脂肪分解为生单甘油和游离脂肪酸; 淀粉不仅会发生糊化, 同时也伴随着降解反应, 生成小分子的还原糖与糊精。酚类物质对热较敏感, 在热效应与剪切效应的共同作用下, 可能发生热降解或与淀粉和脂肪等大分子物质发生结合, 从而使酚类物质含量下降^[19]。

表 1 挤压前后营养成分比较

Table 1 Comparison of nutritional composition before and after extrusion

项目	挤压前	挤压后
蛋白质(g/100 g)	22.06±0.55 ^a	19.23±0.21 ^b
脂肪(g/100 g)	6.99±0.13 ^a	6.52±0.06 ^b
膳食纤维(g/100 g)	12.91±0.69 ^a	12.92±0.16 ^a
水分(%)	12.47±0.66 ^a	8.02±0.05 ^b
灰分(g/100 g)	3.24±0.09 ^a	3.31±0.02 ^a
淀粉(g/100 g)	52.59±1.00 ^a	49.97±0.82 ^b
总酚(mg/100 g)	187.14±2.83 ^a	169.25±1.46 ^b
总黄酮(mg/100 g)	134.41±1.53 ^a	125.39±2.06 ^b

注: 数值为平均值±标准差; 同行中不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$), 表6同。

2.2 挥发性风味物质的变化

如表 2 所示通过顶空固相微萃取和气相色谱-质谱(GC-MS)联用对挤压前后复合杂粮粉进行检测; 鉴定出大量挥发性风味成分: 碳氢类、醛类、酮类、

表 2 挤压前后杂粮粉的挥发性风味物质的变化

Table 2 Changes in volatile flavor compounds of coarse grain flour before and after extrusion

序号	保留时间(min)	CAS	名称	相对质量分数(%)	
				挤压前	挤压后
1	7.93	61142-07-2	1-乙烯-3-亚甲基环戊烯	1.78	1.54
2	11.165	57266-86-1	十六烷基二甲基叔胺	1.91	5.26
3	14.647	5989-27-5	d-柠檬烯	0.71	/
4	18.451	1120-21-4	十一烷	3.19	1.67
5	21.934	1002-43-3	3-甲基十一烷	0.89	/
6	23.41	112-40-3	正十二烷	15.71	9.35
7	24.389	61142-70-9	2,4-二乙基-1-甲基环己烷	/	1.27
8	28.098	629-59-4	十四烷	11.14	5.56
9	31.199	13187-99-0	2-溴十二烷	1.86	1.4
10	32.515	629-62-9	正十五烷	6.73	7.74
11	33.456	17334-55-3	白菖烯	1.54	/
12	34.647	28973-97-9	(E)-beta-金合欢烯	8.99	/
13	36.846	13877-93-5	石竹烯	1.85	/
14	39.481	112-95-8	正二十烷	0.5	0.39
15	40.646	629-92-5	正十九烷	0.65	0.87
合计				57.45	35.05
1	4.552	66-25-1	正己醛	12.37	25.54
2	8.483	111-71-7	庚醛	/	1.06
3	13.497	124-13-0	正辛醛	1.8	/
4	18.654	124-19-6	壬醛	5.37	7.43
5	23.664	112-54-9	十二醛	/	1.56
合计				19.54	35.59

续表 2

序号	保留时间(min)	CAS	名称	相对质量分数(%)	
				挤压前	挤压后
1	15.261	1669-44-9	3-辛烯-2-酮	2.13	/
2	16.84	38284-27-4	38284-27-4 (3E,5E)-辛-3,5-二烯-2-酮	/	4.14
合计				2.13	4.14
1	7.082	629-33-4	甲酸己酯	10.78	4.86
2	11.905	112-23-2	甲酸庚酯	/	1.16
3	47.453	13674-84-5	磷酸三(2-氯丙基)酯	0.37	/
4	48.049	137888-35-8	2-氯-1-甲基乙基双(3-氯丙基)磷酸酯	0.15	/
合计				11.3	6.02
1	3.779	71-41-0	1-戊醇	4.5	5.48
2	12.345	3391-86-4	1-辛烯-3-醇	4.01	6.06
3	14.836	104-76-7	2-乙基己醇	1.06	2.64
合计				9.57	14.18
1	8.887	123-32-0	2,5-二甲基吡嗪	/	5.03
合计				/	5.03

酯类、醇类、杂环类化合物。其中未加工杂粮粉检出 24 种风味物质: 碳氢类 14 种(57.45%); 醛类 3 种(19.54%)、酮类 1 种(2.13%)、酯类 3 种(11.3%)、醇类 3 种(9.57%)。挤压后代餐粉检出 21 种风味物质: 碳氢类 10 种(35.05%); 醛类 4 种(35.59%)、酮类 1 种(4.14%)、酯类 2 种(6.02%)、醇类 3 种(14.18%)、杂环类 1 种(5.03%)。经过挤压处理后挥发性风味物质中碳氢类和酯类物质含量减少, 而醛、酮和醇的含量增加, 并产生杂环化合物。虽然挤压后碳氢类物质含量仍然较高, 但是其风味阈值较高, 不具备明显的风味特征^[20]; 挤压后产生新的酯类物质赋予了杂粮代餐粉特殊香气, 对杂粮代餐粉的风味具有一定辅助作用; 挤压后醛类物质含量高达 35.59%, 是杂粮代餐粉主要香气成分; 酮类物质阈值较高^[21], 且含量较少, 对整体风味贡献较小; 醇类物质具有令人愉悦的蘑菇、甘草香气^[22], 赋予了杂粮代餐粉特殊风味; 杂环类中吡嗪类物质提供烤香、坚果香气^[23], 对杂粮代餐粉的香气也起到一定的作用。总的来说挤压膨化后杂粮粉主要挥发性成分醛类、醇类、杂环类物质有所增加, 大大改善其产品风味, 赋予杂粮代餐粉更加清香, 令人愉悦的气味。

2.3 挤压膨化对代餐粉理化性质的影响

2.3.1 挤压处理对结晶特性的影响 如图 1 所示, 未加工杂粮粉在衍射角度 2θ 为 17° 、 18° 、 20° 、 23° 附近表现出 A 型淀粉晶型, 结晶度为 46.80%。加工后代餐粉在 7.4° 、 12.5° 、 20.5° 处出现了强衍射峰, 属于 V 型结构, 结晶度为 21.83%。以上现象归因于挤压时高温、高压及高剪切力等综合因素对淀粉分子键造成损伤。氢键被破坏, 导致淀粉原有的结晶结构丧失, 形成新的结晶区, 并降低了淀粉的结晶度。这与徐晓茹等^[24] 在研究大米挤压前后结晶特性时所得出的, 挤压破坏了淀粉原有的晶体结构, 形成新的结晶区结论相一致。

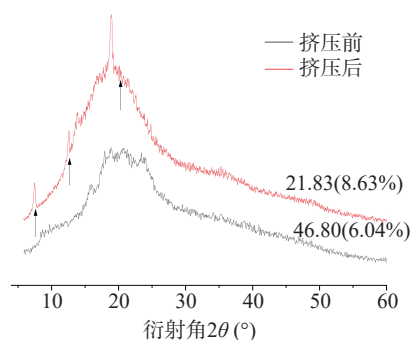


图 1 挤压前后杂粮粉的 XRD 测定结果

Fig.1 XRD measurements of coarse grain powder before and after extrusion

2.3.2 挤压膨化对杂粮粉热特性的影响 由表 3 可知, 经挤压处理后起始糊化温度和峰值温度有所升高, 终止糊化温度和糊化焓变值显著降低($P<0.05$), 表明挤压处理后杂粮粉发生糊化。可能是因为淀粉的颗粒、晶型结构遭到破坏, 氢键断裂, 双螺旋连解聚, 导致糊化焓变值降低, 这与上述 X-射线衍射分析的结果一致。

表 3 挤压前后杂粮粉的 DSC 测定结果

Table 3 DSC measurements of coarse grain flour before and after extrusion

样品	起始糊化温度(°C)	峰值温度(°C)	终止糊化温度(°C)	糊化焓变值(J·g ⁻¹)
挤压前	92.98±0.79 ^a	97.78±0.64 ^a	113.12±0.34 ^a	0.39±0.02 ^a
挤压后	93.07±0.16 ^a	98.56±0.77 ^a	100.82±1.55 ^b	0.15±0.01 ^b

注: 数值为平均值±标准差; 同列中不同字母表示有显著性差异($P<0.05$); 表4-表5、表7同。

2.3.3 挤压膨化对杂粮粉糊化特性的影响 由表 4 可知, 经挤压处理后杂粮粉的各项指标均显著降低($P<0.05$)。这是由于杂粮粉在挤压机筒体中受到高温、高压和高剪切力作用, 使淀粉结构遭破坏, 部分降解为小分子物质, 蛋白质发生变性、重组及组织化, 脂肪与淀粉、蛋白质形成脂肪复合体等物化变

表 4 挤压前后杂粮粉的糊化参数值

Table 4 Gelatinization parameter values of coarse grain flour before and after extrusion

样品	峰值黏度(cP)	最低黏度(cP)	崩解值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)	峰值时间(min)
挤压前	317±1.40 ^a	197±1.01 ^a	120±0.72 ^a	466±2.14 ^a	315±2.00 ^a	7.00±0.19 ^a
挤压后	161±0.58 ^b	151±1.73 ^b	10±0.31 ^b	355±1.77 ^b	138±0.58 ^b	4.80±0.20 ^b

表 5 挤压前后杂粮粉的凝胶特性

Table 5 Gel characteristics of coarse grain flour before and after extrusion

样品	硬度(g)	粘附力(g)	内聚性(Ratio)	弹性(mm)	胶粘性(g)	咀嚼性(mJ)
挤压前	97.96±4.08 ^a	-39.80±1.32 ^a	0.48±0.01 ^b	4.79±0.08 ^b	47.96±1.02 ^a	2.25±0.02 ^b
挤压后	62.24±3.06 ^b	-34.69±1.76 ^a	0.67±0.02 ^a	9.87±0.11 ^a	43.88±0.84 ^a	4.23±0.03 ^a

化,使得峰值黏度、最低黏度、最终黏度显著降低($P<0.05$)。崩解值为峰值黏度和最低黏度的差值反映其热稳定性,崩解值由 120 cP 显著降低为 10 cP,较低的崩解值表明挤压处理后杂粮粉更加稳定;回生值表示淀粉老化程度,回生值越低淀粉越不易老化^[25-27]。综上所述,挤压膨化能使杂粮粉较充分糊化并且使得口感更好,更易于消化吸收。

2.3.4 挤压膨化对杂粮粉凝胶质构的影响 由表 5 所示,硬度是最直接反映口感的一项指标,直接影响咀嚼性和内聚性。硬度太大,不仅口感不好,而且其消化吸收性和嗜好性也不好。经过挤压膨化处理后硬度由 97.96 g 降到了 62.24 g,弹性增加,赋予其良好的品质特性^[28-29]。粘附力有所提高使产品具有黏性口感,以满足消费者要求。胶粘性降低,咀嚼性增加,良好的咀嚼性可以提供食品良好的口感。

2.4 代餐粉品质特性的变化

2.4.1 可溶性固形物、水合特性、粉体特性的变化 如表 6 所示,经挤压膨化后杂粮粉的可溶性固形物含量增加了 12.57%,可能是由于淀粉、蛋白质等大分子物质降解为糊精、麦芽糖、游离氨基酸和多肽等小分子物质导致^[30]。代餐粉持水力较未加工显著提高($P<0.05$),持油力下降。可能是挤压膨化处理导致杂粮代餐粉的内部结构发生部分降解而变得疏松,其颗粒表面羧基和羟基等亲水基团暴露^[31],导致持水力增大;而油脂与之接触的区域减少,致使持油力降低。休止角和滑动角可以反映粉末流动性的变化,角度越小,流动性越好;松密度和轻敲密度与填充性有关,密度越大,填充性越好;川北方程中 a 值越小,粉

表 6 挤压前后杂粮粉的可溶性固形物、水合特性、粉体特性的测定结果

Table 6 Soluble solids, hydration characteristics, and powder characteristics of coarse grain flour before and after extrusion

指标	挤压前	挤压后
可溶性固形物含量(%)	41.67±1.25 ^b	54.17±1.02 ^a
持水性(g·g ⁻¹)	18.31±3.00 ^b	50.79±5.83 ^a
持油性(g·g ⁻¹)	9.33±0.62 ^a	8.83±1.13 ^a
θ (°)	53.33±1.02 ^a	38.99±1.16 ^b
α (°)	42.48±0.83 ^a	35.64±0.90 ^b
ρ_B (g/mL)	0.27±0.00 ^b	0.33±0.01 ^a
ρ_T (g/mL)	0.35±0.01 ^b	0.39±0.01 ^a
Carr 指数(%)	23.72±1.00 ^a	15.39±3.52 ^b
Hausner 比值	1.31±0.02 ^a	1.18±0.05 ^a
川北方程	n/c=2.94n+31.36	n/c=3.7n+29.6
a	0.34±0.01 ^a	0.27±0.01 ^b
1/b	10.67±0.89 ^a	8.00±1.08 ^b

体的流动性越好;1/b 值越小,粉体的填充速度越大,填充更易于进行。挤压后休止角、滑动角、a、1/b 分别从 53.33°、42.48°、0.34、10.67 降到 38.99°、35.64°、0.27、8.00,松密度和轻敲密度分别从 0.27、0.35 g/mL 升为 0.33 和 0.39 g/mL。

如表 7 所示,经挤压处理后各项指标均有变化,其中 L^* 、 a^* 、 H^* 、 E^* 变化显著($P<0.05$),存在肉眼可辨的色差。这可能与物料在高温高压作用下发生美拉德反应与淀粉糊化等有关。这与肖香等^[32]在研究挤压膨化对大麦全粉色度的影响时所得出的 L 值下降, a 值、 b 值增加,挤出物颜色为黄褐色,颜色变深,结论相一致。

表 7 挤压对杂粮粉色度的影响

Table 7 Effect of extrusion on the pindness of coarse grains

样品	L^*	a^*	b^*	C^*	H^* (rad)	E^*	W (%)
挤压前	84.13±0.26 ^a	-2.92±0.02 ^b	19.47±0.22 ^a	19.69±0.17 ^a	-1.42±0.01 ^b	86.40±0.97 ^a	74.12±0.87 ^a
挤压后	75.04±0.18 ^b	2.31±0.01 ^a	21.13±0.41 ^a	21.26±0.62 ^a	1.46±0.01 ^a	77.99±0.82 ^b	75.06±1.21 ^a

3 结论

本实验以复合杂粮粉为原料,研究了挤压处理对复合杂粮粉营养品质和理化性质的影响。复合杂粮粉经挤压处理后蛋白质、脂肪、水分、淀粉、总酚、

总黄酮含量降为 19.23 g/100 g、6.52 g/100 g、8.02%、49.97 g/100 g、169.25 mg/100 g、125.39 mg/100 g,膳食纤维和灰分变化不明显;杂粮代餐粉主要香气成分:醛类物质含量高达 35.59%,风味明显优于未处理

杂粮复合粉; 结晶度下降, 糊化更加充分; 硬度由 97.96 g 降到了 62.24 g, 弹性增加, 赋予其良好的口感; 可溶性固形物含量及持水力增强, 持油力减弱, 粉体流动性、填充性、色泽均得到改善。综上所述, 复合杂粮粉经挤压膨化后, 营养成分虽有一定的损失, 但风味、溶解度、糊化度均得到极大地提升, 证明挤压膨化技术是提高复合杂粮粉品质的一种有效的方法。

参考文献

- [1] 王霞, 刘永吉, 董莹, 等. 杂粮代餐粉的配方设计和工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 75-82. [WANG Xia, LIU Yongji, DONG Ying, et al. Formulation design and process optimization of meal powder substitute for cereals[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(2): 75-82.]
- [2] KRISHNA P, PAYEL G, ABDULLAH S, et al. Recent development, challenges, and prospects of extrusion technology[J]. Future Foods, 2021, 3(4): 100019.
- [3] CORTAZZO M H, MICHELE E, JANZANTTI, et al. Physical and sensory characteristics of cheese-flavored expanded snacks obtained using butyric acid and cysteine as aroma precursors: Effects of extrusion temperature and sunflower oil content[J]. LWT, 2020, 122:109001.
- [4] 叶琼娟, 杨公明, 张全凯, 等. 挤压膨化技术及其最新应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(5): 1329-1334. [YE Qiongjuan, YANG Gongming, ZHANG Quankai, et al. The new application and progress of extrusion technology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, 4(5): 1329-1334.]
- [5] 范宽秀, 李清明, 王锋, 等. 挤压处理对淮山全粉速溶性和理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 71-76. [FAN Kuanxiu, LI Qingming, WANG Feng, et al. Effect of extrusion treatment on instant solubility and physicochemical properties of yam flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 71-76.]
- [6] 谢仲寅, 任欣, 张敏, 等. 小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 13-18, 23. [XIE Zhongyin, REN Xin, ZHANG Min, et al. Difference of physicochemical properties and nutritional quality between raw and extruded foxtail millet flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(22): 13-18, 23.]
- [7] 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 Haobiao, ZHENG Jingshao, YU Hongda, 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.]
- [8] DEWANTO V, WU X, ADOM K K, et al. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(10): 3010-3014.
- [9] LIU L, WEN W, ZHANG R, et al. Complex enzyme hydrolysis releases antioxidative phenolics from rice bran[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 1-8.
- [10] 唐君钰. 挤压协同酶切调控淀粉链长分布及其抗消化回生结构研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. [TANG Junyu. Study on the regulation of starch chain length distribution and its anti-digestive retrogenesis structure by squeezing and enzyme cutting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.]
- [11] 程雯. β -淀粉酶对小麦淀粉结构特性、糊化性质及回生性质的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [CHENG Wen. Effects of β -amylase on the structural properties, gelatinization properties and retrogradation properties of wheat starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [12] 李兆钊, 吴卫国, 廖卢艳, 等. 挤压杂粮重组米糊化特性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 54-58. [LI Zhaozhao, WU Weiguo, LIAO Ruyan, et al. Studies on gelatinization properties of extruded rice with coarse grains[J]. Food and Machinery, 2020, 36(5): 54-58.]
- [13] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338. [LIAO Luyan, WU Weiguo. Relationship between gelatinization and gelatinization of different starch and vermicelli quality[J]. Transactions of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 332-338.]
- [14] 王大为, 孙丽琴, 吴丽娟, 等. 挤出处理对碎米粉中可溶性固形物及可溶性糖含量的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 21-25. [WANG Dawei, SUN Liqin, WU Lijuan, et al. Effect of extrusion on contents of soluble solids and soluble sugar in rice flour[J]. Food Science, 2011, 32(20): 21-25.]
- [15] MARI C L, BAILINA C, VIUDA M M, et al. Properties of dietary fibers from agroindustrial coproducts as source for fiber-enriched foods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(12): 2400-2408.
- [16] 汤小明, 卢坚雯, 曾艳红. 脱蛋白结合超微粉碎对豆渣膳食纤维成分及功能特性影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 74-79. [TANG Xiaoming, LU Jianwen, ZENG Yanhong. Effect of protein removal methods and superfine grinding on the chemical composition and functional properties of dietary fiber prepared from okara[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 74-79.]
- [17] ZHAO X Y, YANG Z B, GAI G S, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 217-222.
- [18] 陈盛君, 朱家璧, 祁小乐. 粉末直接压片常用辅料的粉体学性质评价[J]. 中国医药工业杂志, 2013, 44(10): 1010-1013. [CHEN Shengjun, ZHU Jiabi, QI Xiaole. Evaluation of micromeritic properties of excipients for direct compression[J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2013, 44(10): 1010-1013.]
- [19] 马占倩, 吴娜娜, 易翠平, 等. 热加工过程对植物酚类物质结构、含量及抗氧化活性影响研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 152-159. [MA Zhanqian, WU Nana, YI Cuiping, et al. Advances in studies on the effects of thermal processing on the structure, content and antioxidant activity of phenolic compounds in plants[J]. Food & Machinery, 2018, 34(12): 152-159.]
- [20] 李雯, 陈怡菁, 任建华, 等. 熟化方式对小米粉制品挥发性成分的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(4): 93-97. [LI Wen, CHEN Yijing, REN Jianhua, et al. Effects of cooking methods on volatile compounds of millet powder products[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(4): 93-97.]
- [21] YANG D S, LEE K S, JEONG O Y, et al. Characterization of volatile aroma compounds in cooked black rice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(1): 235-240.
- [22] 陈焱芳, 张名位, 张雁, 等. 发芽及挤压膨化对糙米挥发性风味物质的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 190-202. [CHEN Yanfang, ZHANG Mingwei, ZHANG Yan, et al. Effects of germination and extrusion on volatile flavor compounds in brown rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(1): 190-202.]
- [23] 冯飞. 复合杂粮冲调粉的制备工艺及风味品质评价[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020. [FENG Fei. Preparation technology

- and flavor quality evaluation of composite mixed grain powder[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.]
- [24] 徐晓茹,周坚,吕庆云,等. 挤压前、后大米淀粉理化性质的变化[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 187-194. [XU Xiaoru, ZHOU Jian, LÜ Qingyun, et al. Changes in the physicochemical properties of rice starch before and after extrusion[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(12): 187-194.]
- [25] 黄浩庭. 挤压膨化对紫薯全粉理化特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015. [HANG Haoting. Research on extrusion to physic-chemical properties of purple sweet potato powder[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.]
- [26] 贾喜午. 原料成分对挤压产品品质影响及营养米品质评价的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015. [JIA Xiwu. Research on the effect of raw material composition to product quality and the evaluation method of nutritional rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2015.]
- [27] BRYANTR J F, KADAN R S, CHAMPAGNEET, et al. functional and digestive characteristics of extruded rice flour[J]. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(2): 131-137.
- [28] TORBICA A, HADNADEV M, TAMARA D. Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(6): 626-632.
- [29] 王佳玉,陈碧莹,陈凤莲,等. 不同杂粮添加对籼米粉粉质特性及挤压米粉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(8): 66-72. [WANG Jiayu, CHEN Biying, CHEN Fenglian, et al. Effects of different types of coarse cereals on the flour properties of rice and quality characteristics of extruded noodle[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(8): 66-72.]
- [30] 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 Kunpeng, MA Liping, LUO Lei, 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.]
- [31] 曹家宝. 冲调婴儿复配营养米粉的研制及品质评价[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020: 33-35. [CAO Jiabao. Preparation and quality evaluation of compound nutritional rice flour for infants [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020: 33-35.]
- [32] 肖香,周玉蓉,杨华平,等. 挤压膨化对大麦全粉理化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(20): 41-45. [XIAO Xiang, ZHOU Yurong, YANG Huaping, et al. Effect of extrusion on physicochemical properties of whole barley flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 41-45.]