

整粒小麦加工全麦脆片前后营养成分的变化

鲍王璐¹, 孟婷婷¹, 佟恩杰², 袁蒋梦¹, 赵建伟¹, 周星^{*1}, 金征宇^{1,3}

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 中粮麦芽(大连)有限公司, 辽宁 大连 116200; 3. 食品科学与技术国家重点实验室, 江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为了最大程度保留小麦的营养并赋予最终产品良好的口感, 直接以整粒小麦为原料, 采用浸泡蒸煮、挤压膨化、微波真空干燥等技术制备了全麦脆片, 对加工前后小麦主要营养成分的变化进行了研究。结果表明: 经过挤压和微波真空干燥后, 淀粉少量降解, 且达到完全糊化, 其水溶性和吸水性指数增加; 蛋白质质量分数略有上升, 游离氨基酸质量分数变化不大, 蛋白质体外消化率从 69.31% 增加到 76.55%; 脂肪质量分数变化不大, 饱和脂肪酸质量分数从 36.71% 增加到 56.78%, 脂肪酸值降低; 总膳食纤维质量分数变化不大, 可溶性膳食纤维从 2.06% 增加到 2.64%; 总酚质量分数增加了 2.6 倍。

关键词: 整粒小麦; 全麦脆片; 挤压; 微波真空干燥; 营养成分

中图分类号: TS 210.1 文章编号: 1673-1689(2020)07-0067-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.07.010

Changes of Nutrients in Whole Wheat Grains before and after Processed into Whole Wheat Crisps

BAO Wanglu¹, MENG Tingting¹, TONG Enjie², YUAN Jiangmeng¹, ZHAO Jianwei¹,
ZHOU Xing^{*1}, JIN Zhengyu^{1,3}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. COFCO Malt (Dalian) Limited Liability Company, Dalian 116200, China; 3. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to maximize the retention of wheat nutrients and give good mouthfeel of final products, whole wheat grains were directly used to prepare whole wheat crisps by following the steps of steaming, extrusion and microwave vacuum dehydration. Changes of main nutrients in wheat before and after processing were analyzed. The results showed that after extrusion and microwave vacuum dehydration, the starch was degraded slightly and completely gelatinized, besides its water solubility and water absorption index increased. The protein content increased slightly, and the free essential amino acids content remained unchanged. The in vitro protein digestibility increased from 69.31% to 76.55%. The fat content did not change significantly, whereas the saturated fatty acid content increased from 36.71% to 56.78%, and the fatty acid content decreased. The total dietary fiber content did not change much, but the soluble dietary fiber increased from 2.06% to 2.64%. The total phenolic content increased by 2.6 times.

收稿日期: 2019-01-12

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFD0400701)。

* 通信作者: 周星(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事食品组分与物性研究。E-mail: zhouxing@jiangnan.edu.cn

Keywords: whole wheat grain, whole wheat crisp, extrusion, microwave vacuum dehydration, nutrient content

小麦籽粒一般由质量分数 80% 胚乳, 15% 麸皮和 5% 胚芽组成。淀粉是小麦胚乳中的主要成分, 也是小麦主要的营养物质^[1]。小麦麸皮富含膳食纤维和多酚类抗氧化物质。膳食纤维有利于改善人体微生物肠道菌群, 能增加粪便容量, 降低结肠癌风险^[2]。多酚作为抗氧化剂, 可结合致癌物, 降低心脏病、癌症和糖尿病的风险^[3-5]。胚芽是小麦籽粒的生命源泉, 麦胚富含脂类特别是不饱和脂肪酸, 未脱脂的小麦胚中蛋白质质量分数达 30%~33%。从氨基酸组成上看, 麦胚的营养效价很高, 不仅含有大量的各种必需氨基酸, 并且各类氨基酸的组成十分均衡, 尤其赖氨酸的含量较高^[6], 随着人们健康意识的提升, 保留麸皮和胚芽的全麦食品愈受欢迎。

小麦通常先经磨粉后再进一步加工成各种食品, 现代制粉过程中麸皮和部分麦胚会被脱去, 损失一定的营养成分。由于小麦麸皮和小麦胚芽中富含活性成分、黏性戊聚糖以及不溶性膳食纤维, 其与小麦籽粒分离后存在储藏稳定性差、加工适用性差等问题, 全麦粉也一般是小麦磨粉后, 将分离得到的麸皮稳定化处理、超微粉碎后以一定比例回添至麦粉中得到, 真正完全利用小麦籽粒制备的麦粉或食品并不多见。另外, 全麦食品生产过程中经常使用的焙烤、高温挤压蒸煮、热风干燥、油炸等加工方式会造成全麦营养成分损失、脂肪易氧化、保质期短、口感欠佳等问题^[7-10]。

将蒸煮后的完整小麦籽粒送入挤压机, 在相对较低的挤压温度下使小麦籽粒得到充分剪切混合、糊化, 随后经低温微波真空干燥得到全麦脆片, 低温条件有利于最大程度的保留小麦的营养成分, 同时, 高效的微波效应有助于提高产品脆性。作者主要探究挤压及干燥前后小麦营养成分的变化, 为加工口感好, 营养价值高的全麦产品提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

美红软小麦: 山东省滨州市中裕有限公司产品; 没食子酸标准品: 百灵威科技有限公司产品; 胃蛋白酶: Sigma 公司产品; 盐酸、甲醇、无水乙醇、福

林酚试剂等: 国药集团化学试剂有限公司产品。

FMHE36-24 型双螺杆挤压机 (螺杆直径 36 mm, 长径比 24:1); 湖南富马科食品工程技术有限公司产品; HWS24 型电热恒温水浴: 上海一恒科技有限公司产品; 高速多功能粉碎机: 上海冰都电器有限公司产品; X-DSC7000 型差示扫描量热仪 (DSC): 日本精工公司产品; V-1800 紫外分光光度计: 上海美谱达仪器有限公司产品; ORW15S-3Z 微波真空干燥仪: 南京澳润微波科技有限公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 全麦挤压脆片的制备 小麦粒浸泡 24 h 达到饱和吸水量, 常压蒸煮 8 min, 趁热送入挤压机得到长条形挤出物。机筒温度从进料段到出口段分 5 段控制, 分别为: 65、90、90、60、60 °C, 螺杆转速为 65 r/min。全麦挤出物送入微波真空干燥器, 在 45 °C、500 W 下干燥 15 min 分析全麦挤出物和脆片前, 将其粉碎并通过孔径 0.125 mm 标准筛。

1.2.2 基本成分的测定 水分、蛋白质、脂肪、总淀粉、膳食纤维质量分数分别根据 GB 5009.3-2016、GB 5009.5-2016、GB 5009.6-2016、GB 5009.9-2008、GB 5009.88-2014 测定, 每个数据平行测定 3 次。

1.2.3 游离型、结合型多酚的提取 小麦中游离型、结合型多酚化合物的提取参考 Zhao 等人^[11]的方法, 并做适当修改。准确称取 1 g 粉碎的小麦样品与 20 mL 预冷的酸化甲醇溶液 (体积分数 95% 的甲醇与 1 mol/L 的 HCl 按体积比 85:15 混合), 摇床振荡提取 2 h 后离心 (4 000 r/min, 15 min), 收集上清液, 将残渣按照上述步骤重复提取两次。合并上清液在 45 °C 下旋转蒸发浓缩至干燥, 重新溶解到 10 mL 甲醇中, 此即为游离型多酚提取液, -40 °C 保存备用。

收集上述游离型多酚提取后的残渣, 加入 20 mL 2 mol/L 的 NaOH, 摇床振荡水解 2 h。接着用浓盐酸调整至 pH=2, 并用正己烷洗涤除去脂溶性物质。然后用乙酸乙酯萃取 6 次, 收集萃取液 40 °C 下旋转蒸发浓缩至干燥, 用甲醇定容至 10 mL, 所得溶液即为结合型多酚提取液, -40 °C 下储存备用。

1.2.4 总酚质量分数的测定 采用福林酚法测定样品中的总酚含量。取 0.4 mL 适当稀释的样品溶

液,分别加入 2.6 mL 去离子水,0.5 mL 福林酚试剂,充分混合。静置 6 min 后,加入 1.5 mL 质量分数为 20% 的 Na_2CO_3 溶液,最后用去离子水补足至 10 mL,旋涡混匀。最后在 40 °C 水浴避光反应 2 h,测定吸光值。以甲醇代表样品作为空白对照,没食子酸作为标准品绘制标准曲线。

1.2.5 游离氨基酸质量分数测定 采用 Agilent 1100 氨基酸自动分析仪测定样品的游离氨基酸。称取 1 g 粉碎的样品(精确至 0.000 1 g),用质量分数 5% 的三氯乙酸定容至 25 mL,混匀,超声 20 min,静置至少 2 h 后过滤。吸取 1 mL 滤液于 1.5 mL 离心管中,15 000 g 离心 30 min,吸取 400 μL 上清液进行液相分析。色谱分析条件如下:ODS Hypersil 色谱柱(4.0 mm $\times$ 250 mm),流动相(A:体积分数 50% 的乙腈;B:体积分数 90% 的乙腈),柱温 40 °C,流量 1 mL/min,采用梯度洗脱(0 min 体积分数 8% 的试剂 B $\rightarrow$ 17 min 体积分数 50% 的试剂 B $\rightarrow$ 20.1 min 体积分数 100% 的试剂 B $\rightarrow$ 24 min 体积分数 0% 的试剂 B),紫外检测波长 338 nm,测定结果以干基为计算基础。

1.2.6 热特性的测定 准确称取已知水分的 3 mg (精确至 0.001 mg)磨碎的样品,于差示扫描量热仪(DSC)PE 液体铝制坩埚中,以 1 g:2 mL 粉水比例加入去离子水与粉样混合,加盖密封,室温下平衡过夜。用 DSC 测试时,以空坩埚为参照,以 10 °C/min 的升温速率将样品从 20 °C 加热至 90 °C,记录 DSC 热流曲线。

1.2.7 吸水指数(WAI)和水溶性指数(WSI)的测定 准确称取一定量粉碎的样品,加入 30 mL 蒸馏水于已恒重的 50 mL 离心管内,在 50 °C 水浴中保温 30 min 并充分搅拌后,在 4 000 g 下离心 15 min。取上清液于恒重的铝盒内,称量离心管中留下胶体的质量,计算 WAI。铝盒的上清液蒸发后称量得到溶解于上清液中样品的质量,计算 WSI。计算公式如下:

$$\text{WAI}=(m_2-m_1)/W \quad (1)$$

$$\text{WSI}=(m_4-m_3)/W \quad (2)$$

式中:WAI 为吸水指数,(g/g);WSI 为吸水性指数,(g/hg); m_1 为离心管的质量(g); m_2 为盛有胶体的离心管的质量(g); m_3 为空铝盒恒重的质量(g); m_4 为盛有上清液铝盒干燥后恒重的质量(g); W 为样品的质量(g)。

1.2.8 蛋白质体外消化率 称取 200 mg 粉碎后过

80 目的原料样品,将样品悬浮于 35 mL 胃蛋白酶溶液中(质量浓度 1.5 mg/mL,酶活性为 250 U/mg)并将悬浮液在 37 °C 水浴锅中振荡 2 h。之后立即加入 2 mL 2 mol/L 的 NaOH 溶液停止反应。将悬浮液在 4 000 g 下离心 20 min,倒去上清液,将残渣在磷酸盐缓冲液(pH=7)中洗涤两次,然后在 40 °C 热风干燥箱中烘干。烘干物按 GB/T 5009.5-2013,凯氏定氮法测定粗蛋白质量分数。同时称取样品 200 mg,直接按 GB/T 5009.5-2013,凯氏定氮法,测定样品中粗蛋白质量分数。样品中胃蛋白酶消化率按下式表示:

$$D=(W_1-W_2)/W_1 \times 100\% \quad (3)$$

式中: D 为样品中胃蛋白酶消化率,(%); W_1 为未经胃蛋白酶处理过的样品中粗蛋白质质量分数,(%); W_2 为经胃蛋白酶处理后样品中粗蛋白质质量分数,(%)。

1.2.9 脂肪酸质量分数的测定 脂肪酸的测定参考 GB 5009.168-2016。称取 3.0 g 的样品进行脂肪的提取、脂肪的皂化以及脂肪酸的甲酯化。甲酯化后的脂肪酸用气相色谱仪分析。根据与脂肪酸甲酯混合标品的保留时间进行对比来识别脂肪酸的种类及各种脂肪酸的质量分数。

1.2.10 脂肪酸值的测定 脂肪酸值的测定参考 GB/T 15684-2015。取 5 g 粉碎的样品置于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 体积分数 95% 的乙醇,密封离心管,在摇床 20 °C、200 r/min 下振荡 1 h,2 000 g 20 °C 下离心 5 min,取上清液 20 mL 至锥形瓶中,加入 5 滴酚酞。采用微量滴定管,用 NaOH 溶液滴定至呈淡粉红色,持续约 3 s,并同时做空白试验滴定。

数据平行测定 3 次,结果用平均值 $\pm$ 标准偏差的形式表示。采用 SPSS 20.0 软件对数据进行分析,Origin 8.5 软件对数据进行图形化处理。

2 结果与讨论

2.1 挤压及干燥前后小麦营养成分含量的变化

由表 1 可以看出,挤出物和脆片的粗蛋白质、粗脂肪、粗淀粉质量分数的变化。在挤压过程中小麦受到螺杆剪切与热效应,淀粉糊化且部分降解成糊精等小分子,粗淀粉质量分数减少了 2.8%。经过挤压和真空干燥之后,粗蛋白质质量分数从 8.21% 分别增加到 9.38% 和 10.19%。这是因为加工后小麦的结构被软化,麸皮表面疏松度提高,暴露出更多

的孔洞,同时,所采用的加工条件对蛋白质的结构破坏不大,从而蛋白质的提取率增加^[13-14]。在加工过

程中粗脂肪和总膳食纤维质量分数变化不明显,而挤出物和脆片总酚质量分数较原小麦有所增加。

表 1 挤压及干燥前后营养成分变化(以干基计)

Table 1 Change of content of nutrients (dry basis) after extrusion and dehydration

类别	粗淀粉/%	粗蛋白质/%	粗脂肪/%	总膳食纤维/%	总酚/(mg/hg)
小麦	60.36±0.3 ^b	8.21±0.1 ^a	1.16±0.1 ^a	11.62±0.09 ^a	36.30±0.96 ^a
挤出物	57.56±0.4 ^a	9.38±0.3 ^b	0.99±0.1 ^a	11.68±0.07 ^a	119.00±4.69 ^c
脆片	57.43±0.2 ^a	10.19±0.0 ^c	0.95±0.1 ^a	11.60±0.11 ^a	94.29±5.48 ^b

注:表中同列数据的不同字母表示数值之间具有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 挤压及干燥前后小麦中淀粉的变化

2.2.1 热力学性质的变化 由图 1、表 2 可知,小麦淀粉的糊化温度区间为 57.50~67.75 °C, 因此挤压机的温度设置可以满足小麦淀粉的充分糊化。但挤出物仍然存在一定的结晶熔融峰,根据其出峰位置(37.72~56.71 °C)及其焓值(0.76 J/g)分析,挤出物发生了轻微的回生。由于实验室条件所限,小麦颗粒挤出后未能立刻干燥处理。未干燥前,挤出物中含有一定水分以及挤压时淀粉部分降解产生的糊精,都有助于挤出物放置过程中淀粉发生回生^[15]。然而,微波真空干燥之后的脆片没有检测到任何结晶峰,说明干燥条件下挤出物中产生的淀粉回生重结晶可以被熔融,因此脆片中淀粉呈现无定形状态。

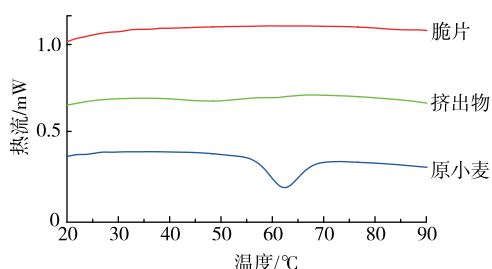


图 1 挤压及干燥前后小麦淀粉的 DSC 谱图

Fig. 1 DSC spectrum of wheat starch before and after extrusion and dehydration

2.2.2 水合性质的变化 由表 3 可以看出挤压及干燥后样品的 WAI 及 WSI 的变化。WAI 反映了糊化过程中淀粉颗粒吸水溶胀的能力,是评价淀粉糊化程度的重要指标^[16]。其变化规律与淀粉的热力学性质变化规律一致。整粒小麦在挤压过程中淀粉糊化、分子链展开暴露出更多的羟基等亲水基团和水分子结合使得挤出物及脆片的 WAI 值不断升高^[17]。挤出物、脆片的 WAI 值分别比原小麦提高 2.74 g/g

和 3.3 g/g,挤出物有所回生导致了其 WAI 值低于脆片。WSI 一方面反映的是淀粉降解以及降解过程中生成可溶性多糖的程度,另一方面也反映了物料的表面结构^[18]。挤出物 WSI 与原小麦相比变化不显著,这也说明了低转速和低温的挤压过程中淀粉的降解较少。微波真空干燥之后,脆片的结构疏松,增大了水合时的接触面积,因此水溶性指数大大提高^[19]。

表 2 挤压及干燥前后小麦淀粉的 DSC 糊化参数

Table 2 DSC gelatinization parameters of wheat starch before and after extrusion and dehydration

类别	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
小麦	57.50±0.67	63.39±0.58	67.75±0.37	6.40±0.16
挤出物	37.72±0.98	47.52±0.22	56.71±0.39	0.76±0.22
脆片	—	—	—	—

注: T_g 、 T_p 、 T_f 、 ΔH 分别表示起始糊化温度、峰值温度、终止糊化温度、糊化焓变。

表 3 挤压及干燥前后小麦 WAI 及 WSI

Table 3 WAI and WSI values before and after extrusion and dehydration

类别	WAI/(g/g)	WSI/(g/hg)
原小麦	2.60±0.1 ^a	4.32±0.0 ^a
挤出物	5.34±0.0 ^b	4.54±0.2 ^a
脆片	8.64±0.2 ^c	9.51±0.2 ^b

2.3 挤压及干燥前后小麦蛋白质的变化

2.3.1 游离氨基酸质量分数的变化 如表 4 所示,全自动氨基酸分析仪可检测 17 种游离氨基酸,其中赖氨酸作为谷物食品中的第一限制氨基酸,在挤出物及脆片的加工过程中得到保留,同时原小麦、挤出物、脆片中其他 16 种游离氨基酸的变化差异也不显著,说明在较低转速、较低温的挤压条件以

及微波真空干燥条件下,原小麦的蛋白质结构依然保持完整,没有发生明显降解。

表 4 原小麦、挤出物及脆片游离氨基酸质量分数

Table 4 Amino acids contents of wheat, extrudes and crisps

游离氨基酸	原小麦	挤出物	脆片
天冬氨酸	159.20±7.07 ^a	170.88±7.07 ^a	156.93±0.00 ^a
谷氨酸	222.88±7.07 ^a	226.31±21.21 ^a	253.85±3.54 ^a
丝氨酸	28.66±0.71 ^a	30.94±4.95 ^a	28.15±1.06 ^a
组氨酸	57.77±2.12 ^a	62.35±0.71 ^a	61.85±1.41 ^a
甘氨酸	63.22±3.54 ^a	62.81±18.38 ^a	69.23±0.71 ^a
苏氨酸	73.23±3.54 ^a	82.67±3.54 ^a	75.69±1.41 ^a
精氨酸	227.43±14.14 ^a	226.31±21.21 ^a	216.93±3.54 ^a
丙氨酸	204.68±7.07 ^a	221.69±28.28 ^a	203.08±0.00 ^a
酪氨酸	181.94±0.00 ^a	175.50±14.14 ^a	212.31±21.21 ^a
半胱氨酸	18.64±0.71 ^a	17.09±2.12 ^a	18.00±1.06 ^a
缬氨酸	84.60±0.00 ^a	101.61±0.00 ^a	92.31±0.00 ^a
蛋氨酸	34.57±4.24 ^a	38.80±5.66 ^a	35.54±1.77 ^a
苯丙氨酸	75.05±0.71 ^a	78.98±4.95 ^a	74.77±3.54 ^a
异亮氨酸	60.95±11.31 ^a	63.27±3.54 ^a	56.31±0.71 ^a
亮氨酸	90.97±0.00 ^a	106.23±7.07 ^a	96.93±3.54 ^a
赖氨酸	82.33±4.95 ^a	88.21±3.54 ^a	84.93±1.41 ^a
脯氨酸	382.07±14.14 ^a	360.24±14.14 ^a	369.24±7.07 ^a
总氨基酸	2 048.19±37.47 ^a	2 113.89±112.43 ^a	2 106.05±20.51 ^a

注:表中同行数据的不同字母表示数值之间具有显著性差异($P<0.05$)

2.3.2 蛋白质体外消化率 图 2 为原小麦、挤出物、脆片之间的蛋白质体外消化率的比较。经过挤压、微波真空干燥处理后,原小麦的蛋白质体外消化率增加。和原小麦相比,挤出物的蛋白质体外消化率增加差异化不显著,推测是由于较低温和低转速的挤压条件对蛋白质的组织结构破坏力度较小,蛋白质结构未被完全展开,不利于酶解反应,进而蛋白质体外消化率变化较小。挤出物受到微波真空干燥的热效应后,脆片结构疏松,蛋白质上胃蛋白酶的作用位点被更多的暴露出来,使蛋白质体外消化率增加^[20]。因此,相比于传统的小麦蒸煮加工,经过挤压及微波真空干燥后的小麦蛋白质更易于人体消化吸收。

2.4 挤压及干燥前后小麦脂肪的变化

2.4.1 脂肪酸组成的变化 表 5 为挤压及干燥前后小麦中脂肪酸组分质量分数的变化。从表中可以

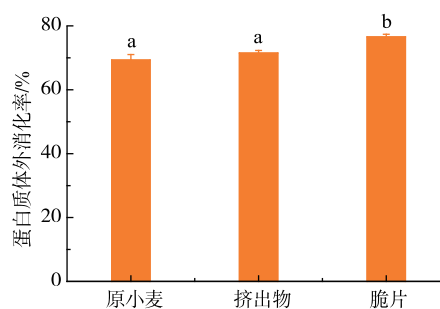


图 2 原小麦、挤出物和脆片的蛋白质体外消化率

Fig. 2 In vitro protein digestibility before and after extrusion and dehydration

看出,原小麦中主要脂肪酸为棕榈酸(21.23%)、硬脂酸(15.14%)、油酸(35.76%)、亚油酸(20.40%),这 4 种脂肪酸占到了总脂肪酸质量分数的 92.59%。饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的质量分数在挤出物和原小麦间的变化不显著($P>0.05$),但脆片中饱和脂肪酸的含量增加、不饱和脂肪酸减少,说明微波真空干燥过程中不饱和脂肪酸能够被氧化生成饱和脂肪酸,可能是微波加热不均匀,出现了局部过热,促进了不饱和脂肪酸氧化^[21]。

表 5 挤压及干燥前后小麦脂肪酸质量分数

Table 5 Fatty acid composition before and after extrusion and dehydration

类别	原小麦	挤出物	脆片
月桂酸	0.027±0.00 ^b	0.03±0.00 ^c	0.02±0.00 ^a
肉豆蔻酸	0.82±0.02 ^c	0.51±0.03 ^a	0.67±0.01 ^b
十五烷酸	0.08±0.00 ^a	0.11±0.00 ^b	0.09±0.01 ^a
棕榈酸	21.23±0.20 ^a	25.37±0.69 ^b	32.01±0.15 ^c
棕榈油酸	1.87±0.09 ^b	1.14±0.04 ^a	1.05±0.04 ^a
珍珠酸	0.18±0.00 ^a	0.24±0.00 ^a	0.41±0.04 ^b
硬脂酸	15.14±0.30 ^a	10.32±0.35 ^a	23.30±4.39 ^b
油酸	35.76±1.01 ^b	22.70±0.14 ^a	22.17±4.75 ^a
亚油酸	20.40±0.60 ^b	34.10±0.63 ^c	15.63±0.20 ^a
亚麻酸	1.17±0.05 ^b	2.04±0.01 ^c	0.91±0.02 ^a
花生酸	0.15±0.00 ^a	0.17±0.00 ^a	0.23±0.04 ^a
二十碳酸	0.99±0.02 ^a	0.78±0.07 ^a	0.77±0.12 ^a
附子脂酸	0.44±0.01 ^a	0.40±0.09 ^a	0.52±0.02 ^a
花生四烯酸	0.64±0.02 ^a	0.90±0.23 ^a	0.85±0.37 ^a
山嵛酸	0.07±0.00 ^a	0.12±0.00 ^b	0.06±0.01 ^a
二十二碳四烯酸	0.26±0.00 ^a	0.34±0.05 ^a	0.28±0.07 ^a
C _{22:6} DHA	0.77±0.01 ^{ab}	0.72±0.17 ^a	1.05±0.03 ^b
ΣSFA	37.71±0.48 ^a	36.88±1.07 ^a	56.78±4.24 ^b
ΣUFA	61.86±0.47 ^b	62.72±0.98 ^b	42.70±4.27 ^a

注:SFA:饱和脂肪酸,UFA:不饱和脂肪酸;表中同行数据的不同字母表示数值之间具有显著性差异($P<0.05$)。

2.4.2 脂肪酸值的变化 与淀粉、蛋白质相比,小麦中的脂肪更易发生酸败变质,故以小麦中脂肪性质的变化来衡量加工过程中物料性质变化显得尤为重要^[22]。因此选用表示小麦脂肪水解程度的游离脂肪酸值来说明这一情况。从图3可以看出,经过挤压及干燥加工处理后,挤出物及脆片的游离脂肪酸值的较原小麦下降,挤出物和脆片之间脂肪酸值的差异不显著($p>0.05$)。以上结果表明,经过挤压及干燥加工处理后,脂肪酶及脂肪氧化酶被钝化^[23],小麦脂肪的水解反应得到抑制,脆片不易酸败较为稳定。

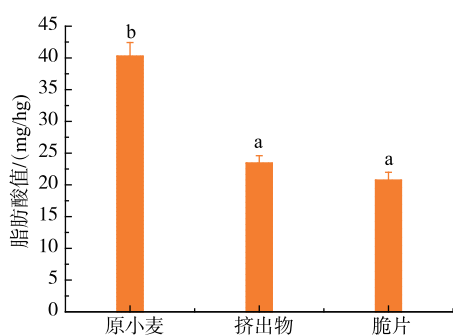


图3 挤压及干燥前后小麦脂肪酸值

Fig. 3 Free fatty acids value before and after extrusion and dehydration

2.5 挤压及干燥前后小麦膳食纤维含量的变化

相比于原小麦,挤出物和脆片的总膳食纤维含量无明显变化,挤出物与脆片的可溶性膳食纤维的含量增加,不可溶性膳食纤维含量减少,结果见表6。挤压加工使得不溶性纤维分子间的化学键断裂,一些的可溶性膳食纤维成分得到释放,不可溶性膳食纤维转化生成可溶性膳食纤维^[24]。挤出物和脆片之间的膳食纤维含量变化不明显,说明微波真空干燥条件对纤维素结构的影响较小。

2.6 挤压及干燥前后小麦总酚质量分数变化

总酚主要由游离酚和结合酚组成。经过挤压、微波真空干燥等程序制成的最终脆片的多酚质量分数比原小麦多出2.60倍,结果见表7。将蒸煮后的小麦送入挤压机之后,经过65 r/min、90℃的挤压条件之后,挤出物的游离酚和结合酚的质量分数相

表6 挤压及干燥前后样品膳食纤维质量分数变化

Table 6 Amount of dietary fiber before and after extrusion and dehydration

类别	总膳食纤维/(g/hg)	可溶性膳食纤维/(g/hg)	不可溶性膳食纤维/(g/hg)
原小麦	11.62±0.06 ^a	2.06±0.06 ^a	9.58±0.14 ^b
挤出物	11.75±0.13 ^a	2.71±0.13 ^b	9.03±0.17 ^a
脆片	11.69±0.09 ^a	2.64±0.09 ^b	9.06±0.13 ^a

注:表中同行数据的不同字母表示数值之间具有显著性差异($P<0.05$)。

对于原小麦大幅度增加,挤压过程对小麦麸皮的剪切与软化以及某些热稳定性酚类物质结合态的释放使得多酚提取率增加,质量分数增加^[25]。微波真空干燥后,脆片中游离酚的质量分数有所下降,结合酚的质量分数下降较大。魏巍^[26]等人也发现了微波真空干燥条件下绿茶中茶多酚的质量分数降低,原因是微波能量对酚类物质的稳定性产生不利影响。

表7 挤压及干燥前后样品总酚质量分数变化

Table 7 Amount of total phenolic before and after extrusion and dehydration

类别	游离酚/(mg/hg)	结合酚/(mg/hg)	总酚/(mg/hg)
原小麦	17.56±0.97	18.75±1.54	36.30±0.96
挤出物	37.11±3.34	81.88±4.33	119.00±4.69
脆片	36.47±4.16	57.81±4.83	94.29±5.48

注:表中同行数据的不同字母表示数值之间具有显著性差异($P<0.05$)。

3 结语

整粒小麦加工成全麦脆片后,淀粉完全糊化,溶解性提高;蛋白质消化性提高;脂肪的酸败得到抑制;可溶性膳食纤维以及总酚质量分数增加。以上变化说明小麦经挤压及微波真空干燥制得的全麦脆片营养价值较高,且更加稳定。但是微波真空干燥过程中总酚质量分数显著降低,后续可以通过改进干燥设备及干燥条件,降低总酚的损失率。

参考文献:

- [1] 宋韵琳,蔡剑. 小麦籽粒淀粉理化特性与品质关系及其生理机制研究进展[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1338-1351.
- [2] 赵瑞昌. 小麦麸皮中蛋白质、淀粉的分离技术研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009.

- [3] JONES J M,ENGLESON J.Whole grains:benefits and challenges[J]. **Annual Review of Food Science and Technology**,2010,1 (1):19-40.
- [4] JACOBS D R,SLAVIN J,MARQUART L. Whole grain intake and cancer;a review of the literature[J]. **Nutrition & Cancer**, 1995,24(3):221-229.
- [5] MORRIS J N,MARRJ W,CLAYTON D G. Diet and heart;a postscript[J]. **British Medical Journal**,1977,2 (6098):1307-1314.
- [6] 葛毅强,蔡同一. 麦胚——人类天然的营养宝库[J]. 中国食物与营养,2001(4):48-50.
- [7] OLIVEIRA L C,NATALIA M M,STEEL C J. Improvement of sensorial and technological characteristics of extruded breakfast cereals enriched with whole grain wheat flour and jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel [J]. **LWT –Food Science and Technology**,2018,90:207-214.
- [8] 李娟. 全麦苏打饼干烘焙品质改良以及水分迁移机制的研究[D]. 无锡:江南大学,2013.
- [9] 张才科. 谷物早餐在热牛奶中的保脆性研究[D]. 无锡:江南大学,2014.
- [10] 吴广森. 紫糯全麦粉的挤压膨化处理及其应用研究[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
- [11] ZHAO M,ZHU D,SUN-WATERHOUSE D,et al. *In vitro* and *in vivo* studies on adlay-derived seed extracts:phenolic profiles, antioxidant activities,serum uric acid suppression,and xanthine oxidase inhibitory effects[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2014,62(31):7771-7778.
- [12] JAFARI M,KOOCHKEI A,MILANI E. Effect of extrusion cooking on chemical structure,morphology,crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates[J]. **Journal of Cereal Science**,2017,75.
- [13] OLIVEIRA L C,ROSELL C M,STEEL C J. Effect of the addition of whole - grain wheat flour and of extrusion process parameters on dietary fibre content,starch transformation and mechanical properties of a ready-to-eat breakfast cereal [J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2015,50(6):1504-1514.
- [14] 徐苗均. 小麦麸皮可溶性膳食纤维的制备及其性质研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [15] 田耀旗. 淀粉回生及其控制研究[D]. 无锡:江南大学,2011.
- [16] BADRIE N,MELLOWES W A. Cassavastarch or amylose effects on characteristics of cassava extrudate[J]. **Journal of Food Science**,1992,57(1):5.
- [17] ALVES P,BERRIOS J,PAN J,et al. Passion fruit shell flour and rice blends processed into fiber-rich expanded extrudates[J]. **Journal of Food Chemistry**,2018,16(1):901-908.
- [18] RAYASDUARTE P,MAJEWSKA K,DOETKOTT C. Effect of extrusion process parameters on the quality of buckwheat flour mixes[J]. **Cereal Chemistry**,1998,75(3):338-345.
- [19] CHAUHAN G S,SHARMA P,BAINS G S. Effect of extrusion cooking on X-ray diffraction characteristics of rice and rice-legume blends[J]. **International Journal of Food Properties**,2003,6(1):7.
- [20] 李燕燕. 改性提高大米蛋白体外消化率的研究[D]. 无锡:江南大学,2015.
- [21] 张志慧. 米糠的微波稳定化及其油脂和蛋白质的提取研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.
- [22] 胡月明. 过热蒸汽处理对小麦及小麦粉品质的影响研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
- [23] 王芳婷. 微波稳定化对全麦粉品质的影响[D]. 郑州:河南工业大学,2016.
- [24] 张颖,姜启兴,许艳顺,等. 挤压加工对谷物早餐粉膳食纤维成分和物理性质的影响[J]. 食品与机械,2014(3):19-24.
- [25] PRUCKLE R M,SIEBENHANDL-EHN S,APPRICH S,et al. Wheat bran-based biorefinery 1:Composition of wheat bran and strategies of functionalization[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2014,56(2):211-221.
- [26] 魏巍. 不同干燥技术对绿茶品质影响的研究[D]. 福州:福建农林大学,2009.