

干燥方式对挤压麸皮理化性质和 抗氧化活性的影响

The effect of drying method on the physical and chemical properties
and antioxidant activity of extruded wheat bran

吴凡¹ 王展^{1,2} 周坚^{1,2} 沈汪洋^{1,2} 贾喜午^{1,2}

WU Fan¹ WANG Zhan^{1,2} ZHOU Jian^{1,2} SHEN Wang-yang^{1,2} JIA Xi-wu^{1,2}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023;

2. 大宗粮油精深加工省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430023)

(1. College of Food and Science Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan,

Hubei 430023, China; 2. Key Laboratory of the Deep Processing of Bulk Grain and Oil

Authorized by Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430023, China)

摘要:目的:确定挤压小麦麸皮的最佳干燥方式。方法:探究 3 种干燥方式(流化床干燥、微波干燥、热风干燥)对挤压麸皮基本成分、持水力、水溶性、膨胀力、持油力、色值、抗氧化性、总酚和总黄酮含量等的影响;以抗氧化性、总酚和总黄酮含量为指标,确定挤压麸皮最佳干燥方式。结果:3 种干燥方式对挤压麸皮的粗蛋白、粗脂肪、灰分和总膳食纤维含量无显著性影响;与流化床干燥相比,微波干燥和热风干燥能提高淀粉和粗纤维含量;干燥对挤压麸皮水溶性的影响是:热风干燥>流化床干燥>微波干燥;与微波干燥和热风干燥相比,流化床干燥能提高挤压麸皮的膨胀力和持油力;与流化床干燥和热风干燥相比,微波干燥能提高挤压麸皮的持水力、抗氧化性、总酚和总黄酮含量,降低亮度和白度。结论:挤压麸皮最佳干燥方式为微波干燥。

关键词:挤压麸皮;流化床干燥;微波干燥;热风干燥;理化性质;抗氧化活性

Abstract: Objective: Using wheat bran as raw material, the extruded bran is obtained by extrusion stabilization treatment, and the best drying method for extruded bran is determined. **Methods:** The effects of three drying methods (fluidized bed drying, microwave drying, hot air drying) were studied on the basic components of extruded bran, water holding capacity,

water solubility, swelling power, oil holding power, color value and other physical and chemical properties, oxidation resistance, total phenols and total flavonoids; Using antioxidant, total phenols and total flavonoids as indicators to determine the best drying method for extruded bran. **Results:** The three drying methods have no significant effect on the crude protein, crude fat, ash and TDF of the extruded bran; Compared with fluidized bed drying, microwave drying and hot air drying can increase the content of starch and crude fiber; Drying has an effect on extrusion, and the influence of the water solubility of extruded wheat bran is: hot-air drying > fluidized bed drying > microwave drying; Compared with microwave drying and hot-air drying, fluidized bed drying can improve the expansion force and oil holding capacity of extruded bran; Compared with fluidized bed drying and hot-air drying, microwave drying can improve the water holding capacity, oxidation resistance, total phenol and total flavonoids content of extruded bran, and reduce brightness and whiteness. **Conclusion:** The best drying method is determined to be microwave drying.

Keywords: extruded wheat bran; fluidized bed drying; microwave drying; hot air drying; physicochemical properties; antioxidant activity

基金项目:湖北省中央引导地方科技发展专项(编号:2020ZYD015)

作者简介:吴凡,女,武汉轻工大学在读硕士研究生。

通信作者:沈汪洋(1978—),男,武汉轻工大学教授,博士。

E-mail: wangyangshen@126.com

收稿日期:2021-12-24

麸皮是小麦籽粒的外层,主要由果皮、糊粉层和种皮组成,约占小麦籽粒重的 15%^[1-2]。其富含膳食纤维,可以预防和治疗动脉硬化和冠心病,降低患结肠癌的风险和便秘的发病率,并对糖尿病有一定的预防作用,是决定全谷物健康益处的关键因素。麸皮中的酚类化合物是小麦在进行生命活动过程中产生的次级代谢产物,具有较

高的生物活性,能对人体的生理调节活动起到有益的作用^[3-6]。酚酸类物质是具有抗氧化活性的生物活性化合物,能抑制癌细胞(如肿瘤细胞和白血病)的生长使其凋亡,并对亚硝胺和多环芳香烃等有毒物质具有显著的抑制作用^[5-6]。类黄酮是麸皮皮层中的具有生物活性的植物雌激素,在人体内通过抗自由基作用和抑制细胞被脂质氧化过程,抑制肿瘤细胞糖酵解等活性功能而起到抗癌作用^[5-6]。小麦麸皮中的脂肪酶和脂肪氧化酶等酶活较高,贮存不当或者未进行稳定化处理,易造成小麦麸皮脂质氧化酸败,产生哈喇味。因而,需要对小麦麸皮进行稳定化处理,降低或者抑制小麦麸皮中的酶活^[7]。

挤压处理是一种食品原料加工预处理方式,可以将均质、破碎、杀菌、熔融和熟化等复杂操作综合利用,具有污染少,能耗低和提高可溶性膳食纤维含量等特点。挤压技术对麦麸稳定化处理,可提高麦麸可溶性膳食纤维的含量和可食性,且能延长其制品的货架期。赵妍嫣等^[8]研究发现,经挤压处理后小麦麸皮的膳食纤维和可溶性膳食纤维含量分别提高 11.69% 和 1.16%;李雪杰等^[9]研究发现,添加经挤压处理麸皮可以改善馒头品质,并延长其货架期。

干燥是物料进行挤压加工后必不可少的环节,目前干燥对于挤压麸皮物理品质及抗氧化性方面的影响尚缺乏系统深入研究。与自然干燥相比,热风干燥效率高,不受天气等自然因素的影响,且热风干燥设备结构简单,生产能力比较大,操作简单方便,常用于食品、药材生产等^[10-11]。流化床干燥具有干燥效率高、操作控制简单和安全、输送物料的效率高等干燥优势^[10,12];与传统干燥方式相比,微波干燥具有操作成本低,干燥效率高,污染小、快速启动和关闭等特点,微波干燥已经在多个领域进行了应用,如微波干燥水果和蔬菜^[10-12]。因此,研究拟比较 3 种干燥方式对挤压麸皮理化性质和抗氧化活性的影响,为挤压麸皮工业化加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

小麦麸皮:湖北三杰粮油食品集团;

ABTS 和 DPPH:西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;

Folin-Phenol:上海蓝天化学试剂有限公司;

无水乙醇、无水碳酸钠、芦丁标准品、无水亚硝酸钠、无水硝酸铝、无水过硫酸钾、无水乙酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

双螺杆挤压膨化机:FMHE36-24R 型,湖南富马科食品工程技术有限公司;

流化床:YG-GZ/LHC 型,长沙育创仪器设备有限公司;

数显鼓风干燥箱:GXZ-9070 MB 型,上海博讯实业有

限公司;

微波炉:HR-7803C 型,青岛海尔微波制品有限公司;

高速离心机:TG16-WS 型,湖南湘仪离心机仪器有限公司;

电子分析天平:ML 204 型,梅特勒—托利多(上海)有限公司;

紫外分光光度计:UV-3000 型,上海美普达仪器有限公司;

手持色差仪:CR-10 型,苏州圣光仪器有限公司;

扫描电子显微镜:S-3000N 型,日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品处理

(1) 挤压处理:使用双螺杆挤压机对小麦麸皮进行挤压处理,双螺杆挤压参数:液体进料量 19%,喂料速度 12 kg/h,螺杆转速 110 r/min,Ⅱ区温度 60℃,Ⅲ区温度 90℃,Ⅳ区温度 110℃,Ⅴ区温度 60℃,Ⅵ区温度 50℃,得到挤压麸皮^[13]。

(2) 流化床干燥:干燥时间为 1 h,干燥温度为 60℃,干燥物料量为 500 g。

(3) 微波干燥:干燥时间为 12 min,干燥功率为 350 W,干燥物料量为 150 g。

(4) 热风干燥:干燥时间为 6 h,干燥温度为 50℃,干燥物料量为 300 g。

(5) 酚类化合物提取:参照 Velazquez 等^[14]的方法,修改如下:分别准确量取干燥后的挤压麸皮 0.50 g 于 50 mL 锥形瓶中,以 $m_{\text{样品}}:V_{\text{乙醇}}$ 为 1:20 (g/mL) 的比例加入 60% 乙醇溶液,在 60℃,300 W 超声的条件下提取 90 min,10 000 r/min 离心 10 min,取上清液置于-20℃冰柜中贮藏备用。

1.2.2 扫描电子显微镜观察 取适量干燥后的挤压麸皮,表面镀金后在 10 kV 加速电压下扫描,观察样品微观结构,放大 2 000 倍^[15]。

1.2.3 基本成分测定

(1) 水分:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 灰分:按 GB 5009.4—2016 执行。

(3) 淀粉:按 GB 5009.9—2016 执行。

(4) 粗脂肪:按 GB 5009.6—2016 执行。

(5) 粗蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。

(6) 粗纤维:按 GB/T 5515—2008 执行。

(7) 总膳食纤维(TDF):按 GB 5009.88—2014 执行。

1.2.4 持水力测定 参照 Esposito 等^[16]的方法,按式(1)计算样品持水力。

$$H_{\text{WC}} = \frac{m_3 - m_2}{m_1}, \quad (1)$$

式中:

H_{WC} ——持水力,g/g;

m_1 ——原料样品质量,g;

m_2 ——离心后沉淀湿质量, g;

m_3 ——烘干后恒重, g。

1.2.5 水溶性测定 参照刘丽娜等^[17]的方法,按式(2)计算样品水溶性。

$$W_s = \frac{m_2 - m_3}{m_1}, \quad (2)$$

式中:

W_s ——水溶性, g/g;

m_1 ——原料样品质量, g;

m_2 ——恒重的铝盒和上清液的质量, g;

m_3 ——烘干后恒重, g。

1.2.6 膨胀力测定 参照 Femenia 等^[18]的方法,按式(3)计算样品的膨胀力。

$$E_F = \frac{V_2 - V_1}{m}, \quad (3)$$

式中:

E_F ——膨胀力, mL/g;

m ——原料样品质量, g;

V_1 ——初始量筒内干粉的体积, mL;

V_2 ——静置 24 h 后量筒内湿基的体积, mL。

1.2.7 持油力测定 参照施建斌等^[19]的方法,按式(4)计算样品的持油力。

$$O_{HC} = \frac{m_2 - m_1 - m}{m}, \quad (4)$$

式中:

O_{HC} ——持油力, g/g;

m ——原料样品质量, g;

m_1 ——滤纸浸泡花生油后悬挂至无油滴滴落的质量, g;

m_2 ——滤纸和样品浸泡花生油后悬挂至无油滴滴落的质量, g。

1.2.8 色值测定 根据 Sozzi 等^[20]的方法稍加修改:将物料均匀置于培养皿中,物料足以覆盖培养皿表面(高度约 1 cm),然后用手持色差仪进行测量。根据式(5)计算样品的白度。

$$H = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2}, \quad (5)$$

式中:

H ——样品的白度;

L ——样品的亮度,黑色为 0,白色为 100;

a ——样品的红/绿值,正值表示样品颜色偏红,负值表示样品颜色偏绿;

b ——样品的黄/蓝值,正值表示样品颜色偏黄,负值表示样品颜色偏蓝。

1.2.9 抗氧化性测定

(1) DPPH 自由基清除率:参照 Lertittikul 等^[21]的方法,根据式(6)计算样品对 DPPH 自由基的清除率。

$$C_{DPPH} = \left(1 - \frac{A_s - A_r}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

C_{DPPH} ——DPPH 自由基清除率, %;

A_0 ——DPPH 溶液的吸光度;

A_s ——样品+DPPH 溶液的吸光度;

A_r ——样品+无水乙醇的吸光度。

(2) ABTS 自由基清除率:参照 Tu 等^[22]的方法,根据式(7)计算样品对 ABTS 自由基的清除率。

$$C_{ABTS} = \left(1 - \frac{A_s - A_r}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

C_{ABTS} ——ABTS 自由基清除率, %;

A_0 ——样品+蒸馏水+ABTS⁺溶液的吸光度;

A_s ——样品+ABTS⁺溶液的吸光度;

A_r ——样品+无水乙醇的吸光度。

1.2.10 总酚(TPC)测定 参照 Apea-Bah 等^[23]的方法,以吸光度为纵坐标、浓度为横坐标绘制标准曲线为 $y = 2.9849x + 0.1108$, $R^2 = 0.9945$,根据标准曲线计算样品中总酚含量。

1.2.11 总黄酮测定 参照 Perales-Sánchez 等^[24]的方法,以吸光度为纵坐标、浓度为横坐标绘制标准曲线为 $y = 0.1194x + 0.5025$, $R^2 = 0.9902$,根据标准曲线计算样品中总黄酮含量。

1.2.12 数据分析 采用 SPSS Version 24 软件和 Origin-lab 2018 软件进行统计分析。所有试验数据均为 3 次重复试验的平均值。采用 ANOVA 和 LSD 检验计算结果的显著性差异, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 扫描电子显微镜观察结果

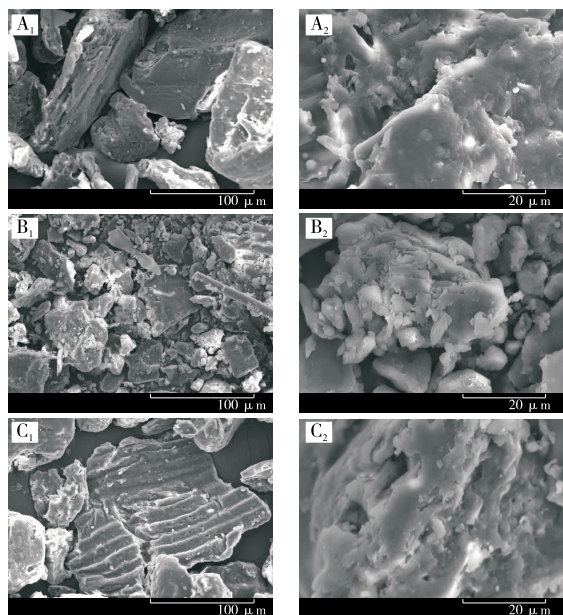
如图 1 所示,经流化床干燥和热风干燥的挤压麸皮的表面结构呈块状(A_1, C_1),表面褶皱,放大 2 000 倍后,纤维表面平整,附着不规则的颗粒(A_2, C_2);经微波干燥处理的挤压麸皮表面结构破坏严重,碎片尺寸减少(B_1),放大 2 000 倍,结构破坏严重,出现气孔,纤维表面附着不规则的颗粒(B_2)。以上结果表明微波干燥挤压麸皮对其结构有明显影响。

2.2 干燥方式对挤压麸皮基本成分的影响

由表 1 可知,挤压麸皮经流化床干燥、微波干燥和热风干燥后的水分含量、粗蛋白、粗脂肪、灰分和总膳食纤维(TDF)无显著性差异($P > 0.05$);挤压麸皮经流化床干燥后淀粉和粗纤维含量明显低于微波干燥和热风干燥,经微波干燥和热风干燥挤压麸皮的淀粉和粗纤维含量无显著性差异($P > 0.05$),且挤压麸皮经 3 种干燥方式干燥之后符合 NY/T 3218—2018《食用小麦麸皮》的标准,水分含量 $\leq 12\%$ 。

2.3 干燥方式对挤压麸皮持水力和水溶性的影响

如图 2 所示,挤压麸皮经流化床干燥、微波干燥和热



A₁. 流化床干燥挤压麸皮(500×) A₂. 流化床干燥挤压麸皮(2 000×) B₁. 微波干燥挤压麸皮(500×) B₂. 微波干燥挤压麸皮(2 000×) C₁. 热风干燥挤压麸皮(500×) C₂. 热风干燥挤压麸皮(2 000×)

图 1 不同干燥方式挤压麸皮电子显微镜图

Figure 1 Electron micrographs of extruded bran with different drying methods

风干燥的持水力分别为 1.95, 3.23, 1.96 g/g, 表明挤压麸皮经微波干燥的持水力显著高于经流化床干燥和热风干燥, 且相比流化床干燥和热风干燥, 挤压麸皮经微波干燥的持水力大约提高了 65%, 说明相比流化床干燥和热风干燥, 微波干燥能提高挤压麸皮的持水力, 可能是因为微波干燥的挤压麸皮内部组织较为疏松^[10,13]。从图 1 中也可以看出微波干燥的挤压麸皮内部组织疏松, 此结构有利于水分的储存^[13]。挤压麸皮分别经流化床干燥、微波干燥和热风干燥的水溶性分别为 0.19, 0.18, 0.20 g/g。与流化床干燥和热风干燥相比较, 微波干燥能提高挤压麸皮的持水力和降低其水溶性。

2.4 干燥方式对挤压麸皮膨胀力和持油力的影响

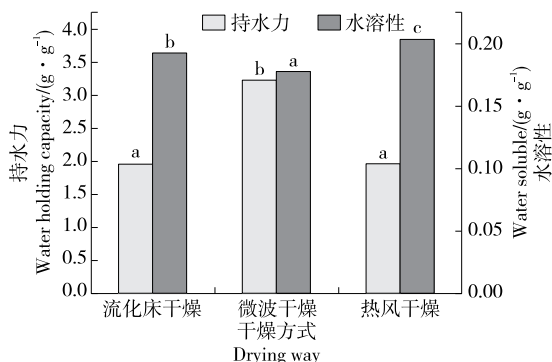
如图 3 所示, 经流化床干燥、微波干燥和热风干燥对挤压麸皮膨胀力影响为流化床干燥>热风干燥>微波干燥, 但挤压麸皮经微波干燥和热风干燥的膨胀力无显著性差异($P>0.05$); 流化床干燥、微波干燥和热风干燥对挤压麸皮持油力影响为流化床干燥>热风干燥>微波干燥, 但挤压麸皮经微波干燥和热风干燥的持油力无显著性差异($P>0.05$), 与膨胀力变化趋势一致, 说明相比微波干燥和热风干燥, 流化床干燥能提高挤压麸皮的膨胀力和持油力, 可能是因为流化床干燥挤压麸皮, 加强了其与油脂间的作用力^[10]。与微波干燥和热风干燥相比较, 流化床干燥能提高挤压麸皮的膨胀力和持油力。

表 1 干燥方式对挤压麸皮基本成分的影响[†]

Table 1 The effects of drying methods on the basic components of extruded bran drying %

干燥方式	水分	粗蛋白	粗脂肪	淀粉	灰分	粗纤维	总膳食纤维
流化床干燥	10.78±0.11	16.70±0.21	3.27±0.43	20.50±0.16 ^a	5.69±0.17	8.91±0.51 ^a	45.68±0.22
微波干燥	10.92±0.23	16.70±0.32	3.25±0.11	21.66±0.56 ^b	5.52±0.47	9.38±0.37 ^b	45.20±0.07
热风干燥	11.08±0.12	16.53±0.04	3.65±0.64	21.27±0.03 ^b	5.53±0.06	9.30±0.64 ^b	45.43±0.34

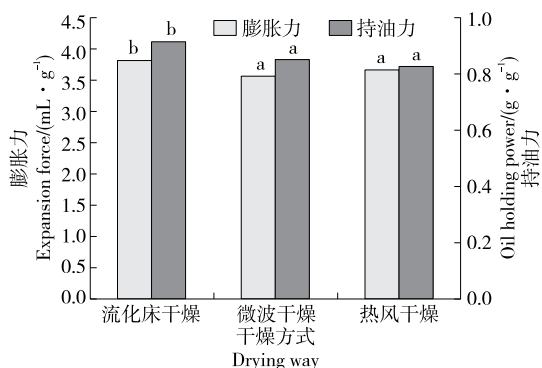
[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 2 干燥方式对挤压麸皮持水力和水溶性的影响

Figure 2 The effects of drying methods on the water holding capacity and water solubility of extruded bran



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 3 干燥方式对挤压麸皮膨胀力和持油力的影响

Figure 3 The effects of drying method on swelling force and oil holding capacity of extruded bran

2.5 干燥方式对挤压麸皮色值的影响

由表 2 可知,经微波干燥挤压麸皮的 L 值和白度都明显小于流化床干燥和热风干燥,说明挤压麸皮经微波干燥亮度降低,颜色偏暗。经流化床干燥和热风干燥的挤压麸皮 L 值和白度无显著性差异 ($P>0.05$),经

流化床干燥、微波干燥和热风干燥处理后的 a 值和 b 值无显著性差异 ($P>0.05$)。这是因为微波干燥辐射导致挤压麸皮发生了褐变反应,亮度降低,颜色偏褐色^[10,13,22]。微波干燥对挤压麸皮白度影响比较大,造成白度偏低。

表 2 干燥方式对挤压麸皮色值的影响[†]

Table 2 The effects of drying method on the color of the extruded bran

干燥方式	L	a	b	H
流化床干燥	65.57±0.26 ^b	5.52±0.21	18.00±0.48	60.76±0.18 ^b
微波干燥	61.70±0.21 ^a	5.16±0.52	17.87±0.70	57.42±0.20 ^a
热风干燥	65.21±0.26 ^b	5.57±0.15	17.89±0.32	60.48±0.23 ^b

[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.6 干燥方式对挤压麸皮抗氧化性的影响

如图 4 所示,挤压麸皮经流化床干燥、微波干燥和热风干燥的 ABTS 自由基清除率分别为 67.42%, 73.98%, 67.45%, 表明挤压麸皮经微波干燥的 ABTS 自由基清除率显著高于流化床干燥和热风干燥,且相比流化床干燥和热风干燥,挤压麦麸经微波干燥的 ABTS 自由基清除率大约提高了 9%,挤压麸皮经流化床干燥和热风干燥的 ABTS 自由基清除率无显著性差异 ($P>0.05$);挤压麸皮经流化床干燥、微波干燥和热风干燥的 DPPH 自由基清除率分别为 20.13%, 21.95%, 20.06%, 表明挤压麸皮经微波干燥的 DPPH 自由基清除率显著高于流化床干燥和热风干燥,挤压麸皮经流化床干燥和热风干燥的 DPPH 自由基清除率无显著性差异 ($P>0.05$)。相比较流化床干燥和热风干燥,微波干燥挤压麸皮能提高挤压麸皮的抗氧化性,与王坤华等^[11]的研究一致,这是因为微波干燥挤压麸皮,抑制其抗氧化酶,减少了挤压麸皮的氧化^[10,23]。故微波干燥能提高挤压麸皮的抗氧化活性。

2.7 干燥方式对挤压麸皮总酚和总黄酮的影响

如图 5 所示,挤压麸皮经流化床干燥、微波干燥和热

风干燥的总酚含量分别为 0.15, 0.17, 0.14 mg GAE/mL, 说明挤压麸皮经微波干燥的总酚含量明显高于流化床干燥和热风干燥,经流化床干燥和热风干燥的总酚含量无显著性差异 ($P>0.05$);挤压麸皮经流化床干燥、微波干燥和热风干燥处理后的总黄酮含量分别为 0.18, 0.25, 0.17 mg Rutin/mL, 说明挤压麸皮经微波干燥的总黄酮含量明显高于流化床干燥和热风干燥,且经流化床干燥和热风干燥的总黄酮含量无显著性差异 ($P>0.05$)。相比较流化床干燥和热风干燥,微波干燥挤压麸皮能提高挤压麸皮的总酚和总黄酮含量,这是因为微波干燥辐射造成多酚氧化酶活性被抑制,酚类物质氧化减少,且加热会使挤压麸皮内结合酚结构被破坏变成游离型的酚类,会使测量结果显示总酚和总黄酮含量增加^[12,24]。故微波干燥能提高挤压麸皮的总酚和总黄酮含量。

3 结论

相比于流化床干燥和热风干燥,微波干燥可降低挤压麸皮水溶性和白度,提高其持水力、ABTS 自由基清除率、DPPH 自由基清除率、总酚和总黄酮含量。以抗氧化性、总酚和总黄酮含量综合考察,干燥挤压麸皮的最佳方

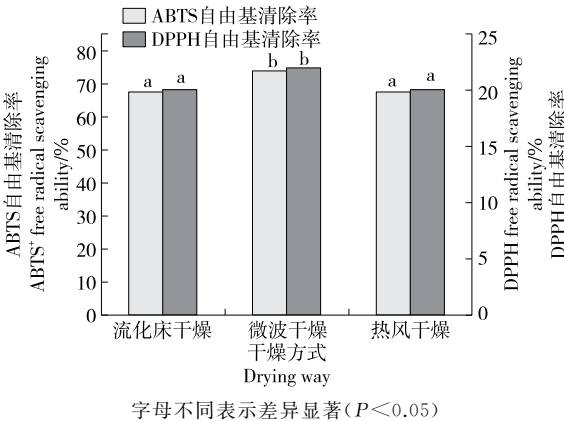


图 4 干燥方式对挤压麸皮抗氧化性的影响

Figure 4 The effects of drying methods on the oxidation resistance of extruded bran

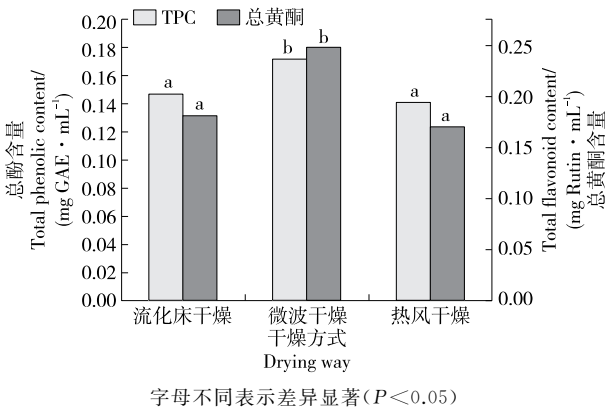


图 5 干燥方式对挤压麸皮 TPC 和总黄酮含量的影响

Figure 5 The effects of drying methods on the TPC and total flavonoids of the extruded bran

式为微波干燥。微波干燥技术效率较高,对挤压麸皮抗氧化活性有着显著的影响,且为挤压麸皮的工艺研究提供了理论参数指导和试验参数支持,但该方式有着操作复杂的短板,其干燥技术仍需进一步探索。

参考文献

- [1] JAVED M M. Wheat bran as a brown gold: Nutritious value and its biotechnological applications[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, 6(4): 724-733.
- [2] HELL J, KNEIFEL W, ROSENAU T, et al. Analytical techniques for the elucidation of wheat bran constituents and their structural features with emphasis on dietary fiber: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2014, 35(2): 102-113.
- [3] APPRICH S, TIRPANALAN Ö, HELL J, et al. Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2014, 56(12): 222-231.
- [4] PRÜCKLER 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.
- [5] PADILHA C V, MISKINIS G A, DE SOUZA M E, et al. Rapid determination of flavonoids and phenolic acids in grape juices and wines by RP-HPLC/DAD: Method validation and characterization of commercial products of the new Brazilian varieties of grape[J]. *Food Chemistry*, 2017, 228: 106-115.
- [6] RAMOS-ENRÍQUEZ J R, RAMÍREZ-WONG B, ROBLES-SÁNCHEZ R M, et al. Effect of extrusion conditions and the optimization of phenolic compound content and antioxidant activity of wheat bran using response surface methodology[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2018, 73(3): 228-234.
- [7] 刘姣, 汪丽萍, 谭斌, 等. 小麦麸皮生物加工及其在面制品中应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(12): 375-379.
LIU Jiao, WANG Li-ping, TAN Bin, et al. Research progress on biological processing of wheat bran and its application in flour product[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(12): 375-379.
- [8] 赵妍嫣, 徐苗均, 姜绍通, 等. 小麦麸皮膳食纤维挤压加工工艺研究[J]. *包装与食品机械*, 2012, 30(2): 1-4, 20.
ZHAO Yan-yan, XU Miao-jun, JIANG Shao-tong, et al. Research on extrusion processing of wheat bran dietary fiber[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2012, 30(2): 1-4, 20.
- [9] 李雪杰, 张剑, 郑文刚, 等. 小麦麸皮挤压加工对全麦粉面团及馒头的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(5): 181-187.
LI Xue-jie, ZHANG Jian, ZHENG Wen-gang, et al. Effects of extrusion processing wheat bran on the dough and steamed bread of whole wheat flour[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(5): 181-187.
- [10] 季蕾蕾, 木泰华, 孙红男. 不同干燥方式对甘薯叶片水分迁移、微观结构、色泽及复水性能影响的比较[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 90-96.
JI Lei-lei, MU Tai-hua, SUN Hong-nan. Comparative effect of different drying processes on mass migration, microstructure, color and rehydration property of sweet potato leaves[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 90-96.
- [11] 王坤华, 李佳美, 彭飞, 等. 射频处理对红枣中短波红外干燥动力学及品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 117-123.
WANG Kun-hua, LI Jia-mei, PENG Fei, et al. Effects of radio frequency treatment on short-and medium-wavelength infrared drying kinetics and quality characteristics of red jujubes[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 117-123.
- [12] 谭颢, 彭思维, 李玮轩, 等. 不同干燥方式对龙眼多酚及抗氧化活性影响[J]. *果树学报*, 2021, 38(3): 411-420.
TAN Si, PENG Si-wei, LI Wei-xuan, et al. Effects of different drying methods on polyphenol profile and antioxidant activities in longan (*Ficus carica* Linn.)[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(3): 411-420.
- [13] 黄雅琪, 庄坤, 沈汪洋, 等. 挤压处理对小麦麸皮与胚芽复配粉的稳定化[J]. *食品工业*, 2020, 41(11): 86-90.
HUANG Ya-qi, ZHUANG Kun, SHEN Wang-yang, et al. The stabilization of wheat bran and germ powder by extrusion[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(11): 86-90.
- [14] VELAZQUEZ V C, VILLA R M G, ALVAREZ R C, et al. Total phenolic compounds in milk from different species. Design of an extraction technique for quantification using the Folin-Ciocalteu method[J]. *Food Chemistry*, 2015, 176(1): 480-486.
- [15] LI Zhu, BING Yu, CHEN Hong, et al. Comparisons of the micronization, steam explosion, and gamma irradiation treatment on chemical composition, structure, physicochemical properties, and in vitro digestibility of dietary fiber from soybean hulls[J]. *Food Chemistry*, 2021, 366(1): 130-142.
- [16] ESPOSITO F, ARLOTTI G, BONIFATI A M, et al. Antioxidant activity and dietary fibre in durum wheat bran by-products[J]. *Food Research International*, 2005, 38(10): 1 167-1 173.
- [17] 刘丽娜, 路风银, 李顺峰, 等. 两种超微粉碎方法对香菇柄粉体性质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2020(6): 66-70.
LIU Li-na, LU Feng-yin, LI Shun-feng, et al. Effects of two ultra-fine grinding methods on powder property of mushroom stem[J]. *Storage and Process*, 2020(6): 66-70.
- [18] FEMENIA A, LEFEBVRE A C, THEBAUDIN J Y, et al. Bourgeois, physical and sensory properties of model foods supplemented with cauliflower fiber[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 62(4): 635-639.
- [19] 施建斌, 隋勇, 蔡沙, 等. 麦麸及麦麸膳食纤维常规粉碎和超微粉碎物化特性比较[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(1): 150-156.
SHI Jian-bin, SUI Yong, CAI Sha, et al. Comparison of physico-chemical properties of wheat bran and its dietary fiber subjected to conventional crushing and superfine grinding[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2021, 37(1): 150-156.
- [20] SOZZI A, ZAMBON M, MAZZA G, et al. Fluidized bed drying of blackberry wastes: Drying kinetics, particle characterization and nutritional value of the obtained granular solids[J]. *Powder Technology*, 2021, 385(2): 37-49.

(下转第 150 页)