

doi:10.12301/spxb202200303

文章编号:2095-6002(2023)04-0159-09

引用格式:张慧娟,冯雪佳,王静.干热处理对黑麦麸理化性质及消化特性的影响[J].食品科学技术学报,2023,41(4):159-167.



ZHANG Huijuan, FENG Xuejia, WANG Jing. Effects of dry heat treatment on physicochemical properties and digestion characteristics of rye bran[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023,41(4):159-167.

干热处理对黑麦麸理化性质及消化特性的影响

张慧娟^{1,2}, 冯雪佳¹, 王静^{1,*}

(1.北京工商大学 中国-加拿大食品营养与健康联合实验室(北京),北京 100048;

2.北京工商大学 北京市食品添加剂工程技术研究中心,北京 100048)

摘要:以黑麦麸为研究对象,探讨不同条件的干热处理对黑麦麸理化性质和营养消化特性的影响。以脂肪酶活力、植酸含量和游离多酚含量为考察指标,干热处理条件分别为110℃-12 min、130℃-9 min、150℃-6 min。黑麦麸的理化性质研究表明:干热处理后,黑麦麸的持水力和持油力显著提高($P < 0.05$);红外光谱特征吸收峰的整体峰形、位置并未发生明显改变,而强度有变化;游离酚类物质的含量提高,同时总酚和花色苷发生热降解,使总酚类物质和花色苷的含量降低。干热处理后黑麦麸多酚和黄酮的含量在胃肠道消化过程中出现不同程度的提高,抗氧化能力逐渐增强,110℃-12 min、130℃-9 min、150℃-6 min处理组的多酚生物可及性分别为73.26%、70.74%和74.44%,均显著高于未处理组($P < 0.05$)。110℃-12 min组的黄酮生物可及性为43.17%,显著高于未处理组($P < 0.05$)。研究旨在利用干热处理改善工业化生产中黑麦麸的营养品质,促进功能性黑麦麸产品的开发和利用。

关键词:黑麦麸;干热处理;理化性质;酚类物质;抗氧化能力;模拟胃肠道消化

中图分类号:TS210.9

文献标志码:A

黑麦麸是黑小麦制粉过程中的副产物,比普通麦麸含有更丰富的膳食纤维、酚类物质等生物活性物质,可以降低血脂、抗动脉粥样硬化、降压和降血糖,还可以对抗氧化应激,通过诱导饱腹感来避免肥胖^[1],具有极高的营养价值。但是麦麸的一些不利因素使其利用受到限制,如麦麸中含有较多的不饱和脂肪酸和内源性脂肪酶,易氧化酸败并产生不良气味^[2];并且麦麸具有一些难以被消费者接受的风味化合物^[3]。小麦中80%以上的植酸存在于麸皮中,是一种抗营养因子,会影响人体对矿物质和微量元素的吸收^[4]。酚类物质是麦麸重要的营养成分,

具有良好的调节细胞氧化状态的能力,可预防炎症^[1],其健康益处取决于消化道吸收的数量^[5],也就是酚类物质的生物可及性。然而,麦麸中的大多数酚类物质以结合形式存在,被酯键和氢键等束缚在麸皮基质中,难以释放并被消化道吸收,从而不能在体内发挥生理作用^[5]。

干热处理是一种高效的谷物麸皮预处理技术,具有快速、低成本、促进功能成分释放等优势。干热处理不仅可以钝化脂肪酶活性,改善麸皮稳定性^[2];还可以通过美拉德反应改善风味,产生具有营养性能的美拉德产物;同时能破除麦麸厚壁结构,

收稿日期:2022-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31871839);北京市自然科学基金资助项目(6202001)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China (31871839); Beijing Natural Science Foundation (6202001)。

第一作者:张慧娟,女,教授,博士,主要从事食品功能性配料及全谷物食品方面的研究。

*通信作者:王静,女,教授,博士,主要从事食品功能性配料及全谷物食品方面的研究。

提高麦麸产品品质。Sudha 等^[6]发现,经过热处理的麸皮脂肪酶活性降低 50%,在 3 个月内没有产生酸败味。Li 等^[7]研究表明,热处理过程中发生的美拉德反应能有效改善麦麸的风味。Irakli 等^[8]研究表明,热处理可以降低米糠中抗营养剂含量。目前干热处理在改善麸皮的限制因素上已有广泛的研究,但关于干热处理后黑麦麸的理化性质和生物可及性变化的研究很少。因此,本研究通过分析干热处理对黑麦麸理化性质及营养特性的影响,以期在黑麦麸在食品中的应用提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑麦郎 1 号黑麦麸(蛋白质质量分数 13.1%、水质量分数 7.58%、灰分质量分数 4.56%),济南渲益食品有限公司;α-淀粉酶、胃蛋白酶、胰酶,北京迈瑞达科技有限公司;猪胆盐、福林酚试剂、甲醇、正己烷、盐酸、乙酸乙酯、三氯化铁、氢氧化钠等,均为分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;植酸、没食子酸、芦丁标准品,上海源叶生物科技有限公司;DPPH 自由基清除能力试剂盒、ABTS⁺ 自由基清除能力试剂盒,苏州格瑞斯生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Cary 10 型紫外分光光度计,安捷伦科技(中国)有限公司;THZ-82A 型水浴恒温振荡器,上海江星仪器有限公司;R-210 型旋转蒸发仪,瑞士布奇有限公司;Nicolet iS10 型傅里叶变换红外光谱仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

每批 50 g 黑麦麸分散均匀,以 0.4 cm 厚度平铺在烤盘中,待温度升至不同设定温度(110、130、150 °C)后将烤盘放置在电烤箱中进行不同时间(3、6、9、12、15 min)的干热处理。

1.3.2 黑麦麸脂肪酶活力测定

取未处理和干热处理后的黑麦麸各 0.5 g,分别加入 5 mL 0.066 7 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 值 6.6),冰浴匀浆,在 4 °C 下 10 000 r/min 离心 30 min,取上清液置于冰上备用。3 mL 磷酸盐缓冲液和 1 mL 橄榄油 37 °C 下搅拌反应 5 min 后,加入 0.1 mL 不同处理样品上清液,磁力搅拌 10 min,立即加 8 mL 苯,继续搅拌 2 min,终止反应。在 25 °C,8 000 r/min

下离心 10 min,取上层有机相 4 mL,加入 1 mL 0.05 g/mL 的醋酸铜溶液(吡啶调节 pH 值至 6.2),搅拌 3 min 后,于 710 nm 处测吸光度^[9]。

带入标准曲线计算脂肪酸浓度,根据式(1)计算脂肪酶活力。

$$X = cV/tV' \quad (1)$$

式(1)中, X ,脂肪酶活力, U/mL; c ,脂肪酸浓度, $\mu\text{mol/mL}$; V ,脂肪酸-苯溶液的体积, mL; t ,作用时间, min; V' ,提取液的用量, mL。

1.3.3 黑麦麸植酸含量测定

分别取 300 mg 未处理和干热处理后的黑麦麸,使用 10 mL HCl(0.4 mol/L)-TCA(体积分数 15%)室温下振荡萃取 3 h。3 000 r/min 离心 15 min 后,将 50 μL 上清液与 550 μL NaOH(36.3 mmol/L)、200 μL $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.3 mg/mL)-磺基水杨酸(3 mg/mL)混合。将混合物以 2 000 r/min 离心 10 min,取上清液,测量 500 nm 处的吸光度^[10]。

1.3.4 黑麦麸酚类物质提取

游离酚类提取:参照 Liao 等^[11]的方法稍加修改,分别称取 1 g 未处理和干热处理后的黑麦麸,以液料比(mL/g)10:1 使用正己烷脱脂,室温下 45 MHz 超声 50 min,4 000 r/min 离心 15 min,将脱脂后的样品放入 40 °C 的真空干燥箱,干燥 20 min,加入 30 mL 甲醇在 25 °C 下振荡 3 h,8 000 r/min 离心 6 min。用 10 mL 甲醇在相同条件下再次提取沉淀,合并 2 次上清液,在 45 °C 下旋转蒸发至 3~4 mL,用甲醇调节体积至 10 mL,得到待测液,置于 -20 °C 保存。

结合酚类提取:将提取完游离酚类后的残渣用氮气吹干甲醇,加入 40 mL 2 mol/L NaOH 并用氮气充满离心管,室温下消化 4 h。加入浓盐酸至 pH 值为 2,2 500 r/min 下离心 10 min,除去上层清液,加入 20 mL 乙酸乙酯,涡旋 2 min,4 000 r/min 下离心 15 min,收集乙酸乙酯提取物。重复提取 5 次,合并提取液在 45 °C 下旋转蒸干。用甲醇将提取液定容至 10 mL,得到待测液,于 -20 °C 下储存备用^[12]。

1.3.5 黑麦麸酚类物质含量测定

总酚含量测定:取 1.3.4 节制备的待测液 0.5 mL,加入 0.5 mL 福林酚试剂和 1.5 mL 质量分数 20% Na_2CO_3 ,用纯水定容至 10 mL。室温下反应 2 h 后,测量 765 nm 处的吸光度^[13],采用没食子酸作为标准品。

总黄酮含量测定:取 1.3.4 节制备的待测液

5.5 mL,加入4 mL质量分数1% AlCl_3 的甲醇溶液,以甲醇定容至10 mL,充分混匀。40 °C水浴反应20 min,测定410 nm处吸光度^[14],采用芦丁作为标准品。

1.3.6 黑麦麸花色苷含量测定

使用pH差分法测定花色苷含量^[15]。在黑暗条件下,分别取0.5 g未处理和干热处理后的黑麦麸,加入甲醇、1 mol/L HCl(体积比85:15),磁力搅拌45 min后重复提取3次,然后在室温下以5 000 r/min离心15 min,透明上清液为花色苷提取物。用pH值为1的质量分数1.49% KCl缓冲液(盐酸酸化)和pH值为4.5的质量分数1.64%醋酸钠水缓冲液(盐酸酸化)将样品分别稀释2倍至最终体积为10 mL。在520 nm和700 nm处测量每个样品的吸光度。花色苷含量用氰基-3-葡萄糖苷当量表示,根据式(2)计算花色苷质量浓度(mg/L)。

$$w(\text{花色苷}) = \frac{A \times M \times DF \times 1000}{\varepsilon \times L} \quad (2)$$

式(2)中, $A = (A_{\text{pH}1.0-520\text{nm}} - A_{\text{pH}1.0-700\text{nm}}) - (A_{\text{pH}4.5-520\text{nm}} - A_{\text{pH}4.5-700\text{nm}})$; M ,氰基-3-葡萄糖苷的摩尔质量,449.2 g/mol; DF ,稀释因子; ε ,氰基-3-葡萄糖苷的摩尔吸光系数,26 900 L/(cm × mol); L ,单元路径长度,1 cm。

1.3.7 黑麦麸水合性质测定

持水力(water holding capacity, WHC):分别取1 g未处理和干热处理后的黑麦麸在10 mL去离子水中浸泡60 min后,4 000 r/min离心10 min,弃上清液。将离心管倒置45°,使样品沥干15 min,称量残渣,根据式(3)计算持水力(g/g)^[16]。

$$WHC = (m_2 - m_1) / m_1 \quad (3)$$

式(3)中, m_1 ,麦麸干质量,g; m_2 ,麦麸吸水后的质量,g。

持油力(oil holding capacity, OHC):分别取1 g未处理和干热处理后的黑麦麸置于离心管中,加入适量的花生油混匀,室温下放置4 h。4 000 r/min离心20 min,除去上层油脂,用滤纸擦净管壁多余的油脂,称重,根据式(4)计算持油力(g/g)^[17]。

$$OHC = (m_3 - m_1) / m_1 \quad (4)$$

式(4)中, m_1 ,麦麸干质量,g; m_3 ,麦麸持油后的质量,g。

1.3.8 黑麦麸结构分析

分别称取2 mg未处理和干热处理后的黑麦麸,与KBr粉末于玛瑙研钵中充分研磨后置于压膜器

内进行压片,压成薄片后取出,置于傅里叶变换红外光谱仪中扫描,扫描范围400 ~ 4 000 cm^{-1} ,分辨率4 cm^{-1} ^[18]。

1.3.9 模拟胃肠道消化实验

根据Minekus等^[19]的方法进行了改进,模拟胃肠道消化由口腔阶段、胃阶段和肠道阶段组成。在口腔阶段,分别向1 g未处理和干热处理后的黑麦麸中添加4.00 mL含 α -淀粉酶的模拟唾液、25.00 μL 0.3 mol/L的 CaCl_2 和975.00 μL 水,并将混合物在37 °C下培养2 min。然后再添加3.75 mL模拟胃液、0.80 mL胃蛋白酶液(25 000 U/mL)、2.50 mL 0.3 mol/L CaCl_2 ,用0.10 mL 10.3 mol/L HCl调pH值至3,并加入347.50 μL 水,将混合物在37 °C下培养2 h后灭酶10 min,在4 °C下7 500 r/min离心10 min,取出2 mL离心后的胃消化上清液,置于-20 °C冰箱中备用并完成后续指标测定。向其余消化液中添加4.40 mL模拟肠液、2.00 mL胰酶液、0.16 g胆盐和16 μL CaCl_2 ,并用1 mol/L NaOH调pH值至7,将混合物在37 °C下培养2 h后灭酶,在4 °C下7 500 r/min离心10 min,取出离心后的肠消化上清液,置于-20 °C冰箱中备用并完成后续指标测定。

1) 消化液中酚类物质含量测定。按照体积比1:1向胃和肠消化上清液中加入甲醇,在4 °C下10 000 r/min离心10 min取上清液,按照1.3.5节方法完成2个阶段消化液总酚含量(以没食子酸当量表示)和总黄酮含量(以芦丁当量表示)的测定。

2) 消化液抗氧化能力测定。参照DPPH和ABTS⁺自由基清除能力试剂盒说明书进行消化液上清液的抗氧化性测定。

1.4 数据处理

所有测定均重复3次,结果用平均值 \pm 标准偏差($\bar{x} \pm s$)表示。采用SPSS 25.0统计软件经单因素方差分析、均值比较进行数据分析, $P < 0.05$ 为差异显著。

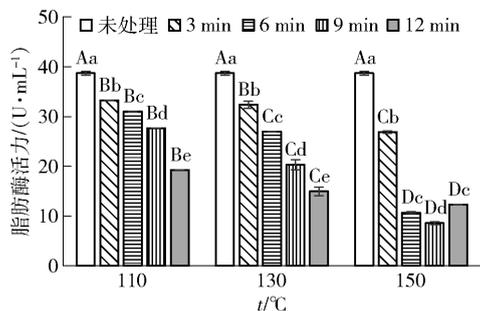
2 结果与分析

2.1 黑麦麸干热处理条件的确定

2.1.1 干热处理后黑麦麸脂肪酶活力变化

脂肪酶催化是谷物麸皮脂质劣化的主要原因,干热处理后的黑麦麸脂肪酶活力变化如图1。干热处理后黑麦麸的脂肪酶活力总体都显著低于未处理

组($P < 0.05$),降低了14%~78%,说明脂肪酶在高温下易变性失活。在同一时间下,随着干热处理温度的提高,脂肪酶活力逐渐降低,说明更高的处理温度对降低脂肪酶活力更有效。在110℃和130℃下,样品的脂肪酶活力随着干热处理时间的延长而下降,在150℃下处理9 min的黑麦麸脂肪酶活力最低。据报道,脂肪酶的耐热性取决于热处理过程中使用的温度和时间^[20],在一定范围内,提高处理温度和延长处理时间都有助于黑麦麸的稳定化,并降低其脂肪酶活力。



小写字母表示样品在同一温度下具有显著性差异($P < 0.05$),大写字母表示样品在同一时间下具有显著性差异($P < 0.05$)。

图1 干热处理对黑麦麸脂肪酶活力的影响

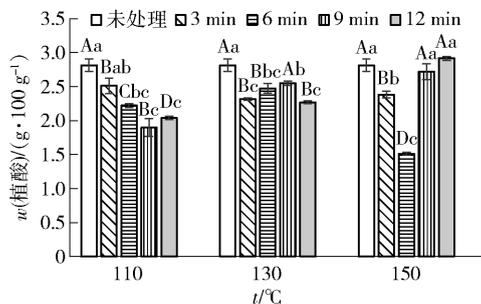
Fig. 1 Effect of dry heat treatment on lipase activity of rye bran

2.1.2 干热处理后黑麦麸植酸含量变化

植酸具有螯合钙、镁、铁等金属离子的能力,在肠胃中与蛋白质、维生素等形成不溶性复合物,减少了人体对微量元素和蛋白质的消化吸收^[4]。不同干热处理条件下黑麦麸的植酸含量如图2。在110℃和130℃的4个干热处理时间和150℃-3 min、150℃-6 min条件下,处理后的植酸含量都显著低于未处理组($P < 0.05$),降低了9.36%~46.25%,可能是由于干热处理使六磷酸肌醇降解为五磷酸和四磷酸或植酸环本身的裂解^[21],使黑麦麸的植酸含量降低。在150℃处理9、12 min,植酸含量无显著差异($P > 0.05$),可能随着温度和时间的增加,淀粉会产生糊化现象,逐渐增多的糊化淀粉基质会将植酸包裹起来,减小植酸被破坏的程度。结果表明:一定条件下的干热处理可以降低植酸的含量,减少其他营养成分的损失。

2.1.3 干热处理后黑麦麸游离酚类含量变化

不同干热处理条件下黑麦麸的游离酚类的含量如图3。在110℃下,游离多酚的含量随时间的增

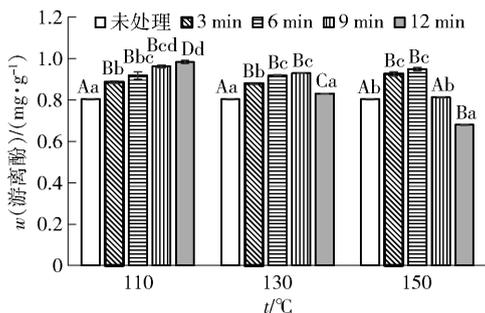


小写字母表示样品在同一温度下具有显著性差异($P < 0.05$),大写字母表示样品在同一时间下具有显著性差异($P < 0.05$)。

图2 干热处理对黑麦麸植酸含量的影响

Fig. 2 Effect of dry heat treatment on phytic acid content of rye bran

加而增加,比未处理组显著提高了11.25%~22.50%;在130℃和150℃下,游离酚类的含量分别在9 min和6 min达到最大值,比未处理组显著提高了16.25%、18.75%。在一定条件下,干热处理可以破坏植物细胞壁,促进麦麸中酚类从细胞壁中释放,这与Jiang等^[22]的观点一致,他们研究得出由于基质的分解,热风干燥后沙梨粉的酚类含量增加。酚类含量增加还可能是由于糖苷基团或其他取代基的水解,使得游离羟基基增加^[23]。但超过一定时间,酚类含量呈现降低的趋势,可能是由于酚类的热降解作用。



小写字母表示样品在同一温度下具有显著性差异($P < 0.05$),大写字母表示样品在同一时间下具有显著性差异($P < 0.05$)。

图3 干热处理对黑麦麸游离酚类含量的影响

Fig. 3 Effect of dry heat treatment on free polyphenol content of rye bran

2.1.4 干热处理条件的选择分析

通过测定干热处理钝化黑麦麸脂肪酶活力的效果及降低植酸含量和保留游离多酚的能力,综合考虑选取了110℃-12 min、130℃-9 min和150℃-6 min,作为干热处理黑麦麸的条件,并进一步测定了干热处理后黑麦麸的理化性质,利用模拟胃肠道消化探究酚类物质的生物可及性和抗氧化能力。

2.2 干热处理对黑麦麸水合特性的影响

麦麸含有丰富的膳食纤维,其结构中含有较多的亲水性基团,如羧基、羟基等,因此,具有较高的持水力^[24]。具有高持水性的麦麸被人体摄入后,可增加人体粪便体积,加快排便速度,防治便秘。持油力是物料吸附油脂的能力,麦麸通过吸附食物中的脂肪,起到降低胆固醇的作用^[24]。干热处理黑麦麸的水合性质如表1。与未处理的黑麦麸相比,干热处理黑麦麸的持水力和持油力都显著增加($P < 0.05$),说明干热处理后的黑麦麸具有良好的水合性能,可能是麦麸结构致密,干热处理会破坏黑麦麸纤维素和木质素,使其空间结构变得疏松,比表面积变大,暴露出更多的亲水、亲油基团,提高了黑麦麸的持水性和持油性。

表1 干热处理对黑麦麸持水力和持油力的影响

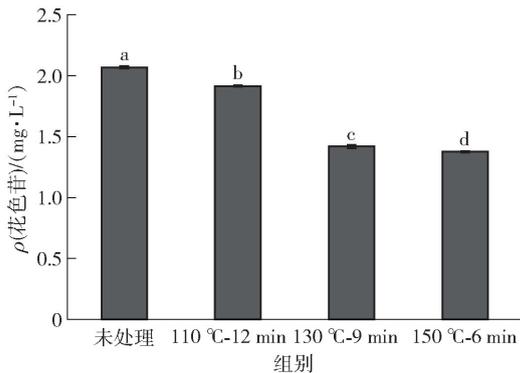
Tab.1 Effect of dry heat treatment on water and oil

组别	holding capacity of rye bran	
	WHC	OHC
未处理	3.32 ± 0.07 ^a	1.40 ± 0.04 ^a
110 °C - 12 min	3.49 ± 0.01 ^b	1.56 ± 0.02 ^b
130 °C - 9 min	3.64 ± 0.11 ^b	1.55 ± 0.06 ^b
150 °C - 6 min	4.09 ± 0.04 ^c	1.57 ± 0.01 ^b

同列不同字母表示组间数据具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.3 干热处理后黑麦麸花色苷含量变化

干热处理对黑麦麸花色苷含量的影响见图4。由图4可知,干热处理后黑麦麸的花色苷含量都显著降低($P < 0.05$),110 °C - 12 min、130 °C - 9 min和150 °C - 6 min分别降低了7.50%、31.43%、33.55%。Hiemori等^[25]报道,蒸煮温度是影响花色苷稳定性的主要因素,花色苷是一种水溶性色素,遇



不同小写字母表示样品间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图4 干热处理对黑麦麸花色苷含量的影响

Fig.4 Effect of dry heat treatment on anthocyanin content of rye bran

热不稳定,所以在加热过程中会造成黑麦麸中花色苷的大量降解。

2.4 干热处理对黑麦麸结构的影响

干热处理前后黑麦麸的红外光谱如图5。干热处理前后的黑麦麸具有相似的红外光谱吸收峰,峰形未发生明显变化,但部分吸收峰的位置和吸收强度发生了改变。3 300 cm^{-1} 附近出现的强吸收峰是来自纤维素和半纤维素中O—H的伸缩振动^[26],干热处理后该吸收峰强度减弱,可能是因为干热处理导致纤维素分子间的氢键断裂,使O—H数量增加;在2 924 cm^{-1} 处出现了多糖甲基和亚甲基的C—H伸缩振动,干热处理削弱了此峰的强度^[18],这些结果与水合特性实验结果进一步吻合。2 857 cm^{-1} 处出现的吸收峰不仅是由脂肪族物质C—H振动引起的^[27],还受到其他主要化学成分的影响。1 647 cm^{-1} 处为木质素苯环的特征吸收峰,是芳香烃化合物—COOH伸缩振动,代表样品含有糖醛酸^[28],干热处理后此处拉伸峰强度变弱,说明糖醛酸含量降低。1 650 cm^{-1} 处的峰为C=O的拉伸振动和N—H的弯曲振动,对应酰胺I键。1 540 cm^{-1} 处的峰是由于C—N、C—O和C—C拉伸振动,对应酰胺II键^[27],酰胺I键和II键与蛋白质结构有关。干热处理后,这2个条带的强度降低,这与蛋白质的变性或蛋白质与其他大分子相互作用,增加了与H—H的肽键残基交换有关^[29]。1 150 cm^{-1} 和1 080 cm^{-1} 处的光谱波段出现与淀粉等糖苷类化合物有关的O—C—O和C=O链^[30],干热处理后削弱了此峰的强度。红外光谱结果表明,干热处理对黑麦麸结构造成了一定程度的改变。

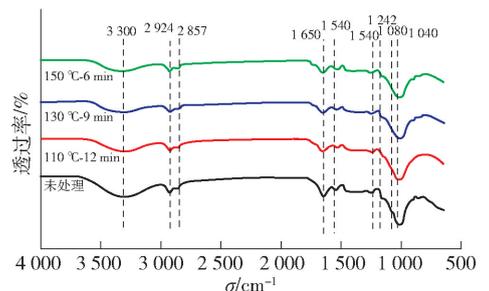


图5 干热处理后黑麦麸的红外光谱

Fig.5 Infrared spectrum of rye bran after dry heat treatment

2.5 模拟胃肠道消化中黑麦麸酚类物质含量及抗氧化能力变化

2.5.1 干热处理对酚类物质消化吸收的影响

表2显示了未消化前干热处理黑麦麸的结合酚

类及总酚含量。热处理组的结合酚类和总酚含量分别降低了 18.23% ~ 23.40%、12.03% ~ 15.36%。在麦麸中酚类物质通过酯键或醚键与细胞壁结合在一起^[31],干热处理可能通过破坏细胞壁成分,使结合多酚从基质上释放出来,提高了游离酚类物质的含量,降低了结合酚类的含量。干热处理也会使酚类物质发生热降解,使得干热处理后黑麦麸的总酚含量下降,Rico 等^[32]通过水热处理麦麸也获得了相

似的结果。因为黄酮是麦麸中的一类酚类化合物^[33],故与酚类含量有着相同的变化趋势。与未处理组相比,结合黄酮的含量降低了 29.46% ~ 44.73%。在总黄酮含量的变化上,110 °C - 12 min 和 130 °C - 9 min 组与未处理组无显著差异 ($P > 0.05$);而 150 °C - 6 min 显著降低了 13.00%,说明此条件可以破坏麸皮基质,使结合黄酮释放出来,还会使黄酮发生热降解。

表 2 干热处理对黑麦麸酚类物质含量的影响

Tab. 2 Effect of dry heat treatment on phenolic content of rye bran

组别	w (结合酚)	w (总酚)	w (结合黄酮)	w (总黄酮)
未处理	3.80 ± 0.04 ^a	4.60 ± 0.04 ^a	0.31 ± 0.02 ^b	0.45 ± 0.02 ^b
110 °C - 12 min	2.91 ± 0.00 ^b	3.98 ± 0.01 ^b	0.22 ± 0.03 ^a	0.44 ± 0.02 ^{ab}
130 °C - 9 min	3.11 ± 0.18 ^b	4.04 ± 0.18 ^b	0.22 ± 0.02 ^a	0.44 ± 0.01 ^{ab}
150 °C - 6 min	3.10 ± 0.19 ^b	4.05 ± 0.17 ^b	0.17 ± 0.02 ^a	0.39 ± 0.00 ^a

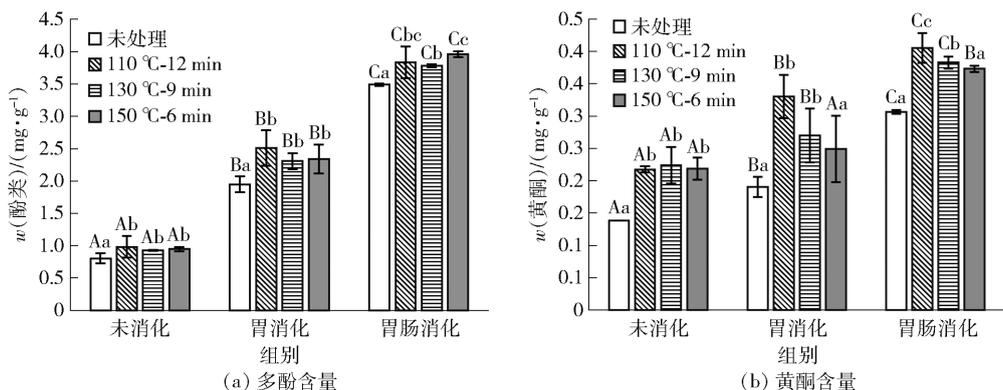
不同字母表示同列数据具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

通过模拟胃肠道消化,来探究干热处理对黑麦麸中酚类物质生物可及性的影响,生物可及性以食物中的营养成分被人体吸收利用的量占食物总量的比表示^[34]。干热处理对黑麦麸胃肠道消化中酚类物质含量的影响见图 6。由图 6 可知,经过胃肠消化后各组的酚类和黄酮含量都要高于未消化的,这是因为胃液的酸性环境和胃肠相关的酶导致酚类和黄酮从麦麸上释放,从而引起含量增加^[35]。由图 6(a)可知,各干热处理组的酚类释放在胃消化和肠消化阶段都要高于未处理组。110 °C - 12 min、130 °C - 9 min、150 °C - 6 min 组酚类的生物可及性分别为 73.26%、70.74%、74.44%,均高于未处理组的 58.44%,干热处理可以提高酚类的生物可及

性。由图 6(b)可知,干热处理组的总黄酮释放在胃和肠阶段都要高于未处理组。未处理、110 °C - 12 min、130 °C - 9 min、150 °C - 6 min 组的黄酮生物可及性分别为 37.53%、43.17%、36.08%、39.66%,110 °C - 12 min 组的黄酮生物可及性高于其他组,说明此条件更有利于黄酮的利用。

2.5.2 干热处理对黑麦麸体外消化过程中抗氧化能力的影响

通过测定 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除能力,来评价不同干热处理条件对黑麦麸在模拟体外胃肠道消化过程中抗氧化能力的影响(表 3)。由表 3 可知,从胃消化到肠消化过程中,各组 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除能力分别提高了 91% 和 149% 左



不同小写字母表示不同样品在同一过程下具有显著性差异 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一样品在不同过程下具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 6 干热处理对黑麦麸胃肠道消化中酚类物质含量的影响

Fig. 6 Effect of dry heat treatment on phenolic content of rye bran during gastrointestinal digestion

右。从DPPH自由基清除能力来看,在胃消化阶段,130℃-9 min的黑麦麸消化液的抗氧化能力最高;在胃肠道消化阶段,干热处理组的抗氧化能力都显著提高了3.86%左右($P < 0.05$)。而通过测定ABTS⁺自由基清除能力发现,在胃消化阶段经过干热处理后黑麦麸的抗氧化能力显著降低($P < 0.05$),经过肠消化后又显著增加($P < 0.05$),其中

150℃-6 min组的黑麦麸消化液的抗氧化能力最高。DPPH和ABTS⁺自由基清除能力的结果有细微的差别,可能是不同条件的干热处理导致其生物活性成分的结构、性质和含量改变,因此对黑麦麸在胃肠道消化过程中抗氧化能力的影响也有差别^[36]。总体来说,干热处理通过释放具有抗氧化性的酚类物质提高了黑麦麸在消化液中的抗氧化能力。

表3 干热处理对黑麦麸胃肠道消化中抗氧化能力的影响

Tab.3 Effect of dry heat treatment on antioxidant capacity of rye bran during gastrointestinal digestion mmol/g

组别	胃消化液抗氧化能力		胃肠消化液抗氧化能力	
	DPPH 自由基	ABTS ⁺ 自由基	DPPH 自由基	ABTS ⁺ 自由基
未处理	10.30 ± 0.02 ^a	1.1 ± 0.01 ^b	19.34 ± 0.08 ^a	2.52 ± 0.02 ^a
110℃-12 min	10.38 ± 0.04 ^{ab}	1.07 ± 0.02 ^a	19.75 ± 0.05 ^b	2.71 ± 0.01 ^c
130℃-9 min	10.53 ± 0.07 ^b	1.06 ± 0.01 ^a	20.29 ± 0.02 ^c	2.64 ± 0.02 ^b
150℃-6 min	10.42 ± 0.06 ^{ab}	1.07 ± 0.01 ^a	20.21 ± 0.25 ^c	2.82 ± 0.01 ^d

不同字母表示同列数据具有显著性差异($P < 0.05$)。

3 结 论

本研究通过测定干热处理后黑麦麸的脂肪酶活力、植酸和游离多酚的含量,确定了110℃-12 min、130℃-9 min和150℃-6 min作为优化的干热处理条件,进一步研究了干热处理对黑麦麸理化性质和营养消化特性的影响。结果表明:干热处理增加了黑麦麸的持水力和持油力,并对黑麦麸官能团造成了一定程度的改变。干热处理可以使结合酚类从基质上释放出来,从而提高游离酚类物质的含量,但会使总酚和花色苷发生热降解,降低总酚类物质和花色苷的含量。干热处理后黑麦麸的酚类和黄酮含量在胃肠道消化过程中会出现不同程度的提高,酚类的生物可及性显著提高,且抗氧化能力逐渐增强。干热处理能有效改善黑麦麸理化性质和营养品质。

参考文献:

[1] PATEL S. Cereal bran fortified-functional foods for obesity and diabetes management: triumphs, hurdles and possibilities [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 14: 255-269.

[2] LIU Y Q, STRAPPE P, ZHOU Z K, et al. Impact on the nutritional attributes of rice bran following various stabilization procedures [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(15): 2458-2466.

[3] RAPISARDA T, MEREU A, CANNAS A, et al. Volatile organic compounds and palatability of concentrates fed to

lambs and ewes [J]. *Small Ruminant Research*, 2012, 103(2/3): 120-132.

- [4] KVASNIČKA F, COPÍKOVÁ J, SEVČÍK R, et al. Determination of phytic acid and inositol phosphates in barley [J]. *Electrophoresis*, 2011, 32(9): 1090-1093.
- [5] JAKOBEK L, MATIĆ P. Non-covalent dietary fiber-polyphenol interactions and their influence on polyphenol bioaccessibility [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 235-247.
- [6] SUDHA M L, RAMASARMA P R, RAO G V. Wheat bran stabilization and its use in the preparation of high-fiber pasta [J]. *Food Science and Technology International*, 2011, 17(1): 47-53.
- [7] LI Q, SUN H, ZHANG M, et al. Characterization of the flavor compounds in wheat bran and biochemical conversion for application in food [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(5): 1427-1437.
- [8] IRAKLI M, LAZARIDOU A, BILIADERIS C G. Comparative evaluation of the nutritional, antinutritional, functional, and bioactivity attributes of rice bran stabilized by different heat treatments [J]. *Foods*, 2020, 10(1): 57.
- [9] 江慧芳,王雅琴,刘春国. 三种脂肪酶活力测定方法的比较及改进 [J]. *化学与生物工程*, 2007, 24(8): 72-75.
- JIANG H F, WANG Y F, LIU C G. Comparison and improvement of three determination methods for lipase activity [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2007, 24(8): 72-75.

- [10] CHEN R M, XUE G X, CHEN P, et al. Transgenic maize plants expressing a fungal phytase gene [J]. *Transgenic Research*, 2008, 17(4): 633–643.
- [11] LIAO M J, DAMAYANTI W, XU Y R, et al. Hot air-assisted radio frequency heating for stabilization of rice bran: enzyme activity, phenolic content, antioxidant activity and microstructure [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109754.
- [12] ZHANG J L, DING Y, DONG H Z, et al. Distribution of phenolic acids and antioxidant activities of different bran fractions from three pigmented wheat varieties [J]. *Journal of Chemistry*, 2018(1): 1–9.
- [13] ZHOU K Q, SU L, YU L L. Phytochemicals and antioxidant properties in wheat bran [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(20): 6108–6114.
- [14] 王苗苗, 韩飞, 严欢, 等. 黑粒小麦麸皮功能性成分的分析及抗氧化活性的研究 [J]. *食品科技*, 2018, 43(12): 201–205.
WANG M M, HAN F, YAN H, et al. Analysis of functional components and antioxidant activity in black wheat bran [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(12): 201–205.
- [15] SHAO Y F, XU F F, SUN X, et al. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(2): 211–218.
- [16] JACOBS P J, HEMDANE S, DELCOUR J A, et al. Dry heat treatment affects wheat bran surface properties and hydration kinetics [J]. *Food Chemistry*, 2016, 203: 513–520.
- [17] SANGNARK A, NOOMHORM A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse [J]. *Food Chemistry*, 2003, 80(2): 221–229.
- [18] WEI C H, GE Y F, LIU D Z, et al. Effects of high-temperature, high-pressure, and ultrasonic treatment on the physicochemical properties and structure of soluble dietary fibers of millet bran [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 820715.
- [19] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food: an international consensus [J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1113–1124.
- [20] WANG T X, KHIR R, PAN Z L, et al. Simultaneous rough rice drying and rice bran stabilization using infrared radiation heating [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 78: 281–288.
- [21] KATARIA A, SHARMA S, DAR B N. Changes in phenolic compounds, antioxidant potential and antinutritional factors of Teff (*Eragrostis tef*) during different thermal processing methods [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(11): 6893–6902.
- [22] JIANG G H, LEE K C, AMEER K, et al. Comparison of freeze-drying and hot air-drying on Asian pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai ‘Niiitaka’) powder: changes in bioaccessibility, antioxidant activity, and bioactive and volatile compounds [J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2019, 56(6): 2836–2844.
- [23] GIOVANELLI G, PARADISO A. Stability of dried and intermediate moisture tomato pulp during storage [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(25): 7277–7281.
- [24] RAGHAVENDRA S N, SWAMY S R R, RASTOGI N K, et al. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: a source of dietary fiber [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 72(3): 281–286.
- [25] HIEMORI M, KOH E, MITCHELL A E. Influence of cooking on anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 57(5): 1908–1914.
- [26] MA M M, MU T H. Modification of deoiled cumin dietary fiber with laccase and cellulase under high hydrostatic pressure [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 136: 87–94.
- [27] GUO X Y, ZHANG M L, HUO R, et al. Study on the effects of combined processing of micro-pulverization and extrusion on the physicochemical properties of oat bran [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(3): e16323.
- [28] 刘湾. 蒜皮膳食纤维物理改性技术及其抑制铅离子吸收的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016: 32.
LIU W. Study on physical modification of dietary fiber in garlic skin and inhibition of lead adsorption [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016: 32.
- [29] CUETO M, FARRONI A, RODRÍGUEZ S D, et al. Assessing changes in enriched maize flour formulations after extrusion by means of FTIR, XRD, and chemometric analysis [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(8): 1586–1595.
- [30] KALSCHNE D L, DA SILVA-BUZANELLO R A, BYLER A P I, et al. Rice and rice bran from different cultivars; physicochemical, spectroscopic, and thermal analysis characterization [J]. *Semina-Ciências Agrárias*,

- 2020, 41(6): 3081–3092.
- [31] RANDHIR R, KWON Y I, SHETTY K. Effect of thermal processing on phenolics, antioxidant activity and health-relevant functionality of select grain sprouts and seedlings [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2007, 9(3): 355–364.
- [32] RICO D, VILLAVERDE A, MARTINEZ-VILLALUENGA C, et al. Application of autoclave treatment for development of a natural wheat bran antioxidant ingredient [J]. *Foods*, 2020, 9(6): 781.
- [33] MA D Y, WANG C Y, FENG J C, et al. Wheat grain phenolics: a review on composition, bioactivity, and influencing factors [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(15): 6167–6185.
- [34] ZHAO G H, ZHANG R F, DONG L H, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 450–456.
- [35] LI Y, LI M L, WANG L L, et al. Effect of particle size on the release behavior and functional properties of wheat bran phenolic compounds during *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. *Food Chemistry*, 2022, 367: 130751.
- [36] LIN S, GUO H, LU M, et al. Correlations of molecular weights of glucans from qingke (Tibetan hulless barley) to their multiple bioactivities [J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1710.

Effects of Dry Heat Treatment on Physicochemical Properties and Digestion Characteristics of Rye Bran

ZHANG Huijuan^{1,2}, FENG Xuejia¹, WANG Jing^{1,*}

(1. *China-Canada Joint Lab of Food Nutrition and Health (Beijing)*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing 100048, China*;

2. *Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additive*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing 100048, China*)

Abstract: The effects of dry heat treatment on physicochemical properties and nutrient digestion characteristics of rye bran were studied. Lipase activity, phytic acid content and free polyphenol content were used as inspection index under dry heat treatment conditions including 110 °C – 12 min, 130 °C – 9 min, and 150 °C – 6 min. The results of physicochemical properties of rye bran showed that dry heat treatment could significantly ($P < 0.05$) improve the water and oil holding capacity of rye bran. The overall peak type and position of the characteristic absorption peak of infrared spectrum did not changed significantly, but the intensity changed after dry heat treatment. Dry heat treatment could increase the content of free phenols, and reduce the content of total phenols and anthocyanins due to thermal degradation. After dry heat treatment, contents of polyphenols and flavonoids of rye bran increased in varying degrees during gastrointestinal digestion, and the antioxidant capacity increased gradually. The bioavailability of polyphenols at 110 °C – 12 min, 130 °C – 9 min and 150 °C – 6 min groups were 73.26%, 70.74% and 74.44%, respectively, which were significantly higher than those in the untreated group ($P < 0.05$). The bioavailability of flavonoids in 110 °C – 12 min group was 43.17%, which was significantly higher than that in untreated group ($P < 0.05$). Therefore, this study aimed to improve the nutritional quality of rye bran in industrial production by dry heat treatment, and promote the development and utilization of functional rye bran products.

Keywords: rye bran; dry heat treatment; physicochemical property; phenols; antioxidant capacity; simulated gastrointestinal digestion

(责任编辑:张逸群)