

超微粉碎黑米糠膳食纤维的理化和功能特性分析

胡婷¹, 陈艳梅¹, 王鑫¹, 董丽红², 张帅^{2,3}, 马勤^{2*}

(1. 武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北武汉 430205) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

(3. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 为探究超微粉碎对黑米糠膳食纤维的组成、结构及理化和功能特性的影响, 本研究以黑米糠膳食纤维为原料, 分析了黑米糠超微粉和粗粉的膳食纤维粒径、微观结构、吸附特性和抗氧化能力的变化。结果表明, 超微粉碎可显著降低黑米糠不可溶性膳食纤维 (IDF) 和可溶性膳食纤维 (SDF) 的粒径大小和相对结晶度, 使其表现出更加松散及多孔的状态, 但其主要构成没有发生变化; 经过超微粉碎后, 黑米糠 IDF 的溶胀力、胆酸盐吸附能力和胆固醇吸附能力分别提高了 57.43%、22.71% 和 24.92%, SDF 的 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 抗氧化能力分别提高为粗粉 SDF 的 2.77 倍和 1.71 倍。综上, 超微粉碎可显著降低黑米糠膳食纤维的颗粒粒径, 促使其形成疏松多孔的微观结构, 并改善 IDF 的理化和功能特性。该研究结果为黑米糠膳食纤维的精深加工利用提供了一定的理论依据。

关键词: 黑米糠; 超微粉碎; 膳食纤维; 物理化学性质; 功能特性

文章编号: 1673-9078(2025)10-107-114

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0990

Physicochemical and Functional Properties of Dietary Fibres from Ultrafinely Ground Black Rice Bran

HU Ting¹, CHEN Yanmei¹, WANG Xin¹, DONG Lihong², ZHANG Shuai^{2,3}, MA Qin^{2*}

(1. College of Environmental Ecology and Bioengineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory Processing, Guangzhou 510610, China)

(3. Department of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to explore the effects of ultrafine grinding on the composition, structure, physicochemical and functional properties of dietary fiber from black rice bran, this study used black rice bran dietary fiber as the raw material to analyze the changes in the particle size, microstructure, adsorption characteristics and antioxidant capacity of the dietary fibers from ultra-fine and coarse black rice bran powders. The results showed that, the particle size and relative crystallinity of insoluble dietary fiber (IDF) and soluble dietary fiber (SDF) of black rice bran could be significantly reduced by ultrafine grinding, which led to a looser and more porous state, though their main compositions did not change. After ultrafine grinding, the swelling capacity, cholic acid adsorption

引文格式:

胡婷,陈艳梅,王鑫,等.超微粉碎黑米糠膳食纤维的理化和功能特性分析[J].现代食品科技,2025,41(10):107-114.

HU Ting, CHEN Yanmei, WANG Xin, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fibres from ultrafinely ground black rice bran [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 107-114.

收稿日期: 2024-07-11; 修回日期: 2024-11-03; 接受日期: 2024-11-07

基金项目: 广州市科技计划项目 (2025D04J0066; 202202010071); 广东省农业科学院人才引进项目 (R2019YJ-YB1003); 广东省农产品加工技术研发中试公共服务平台升级建设项目 (粤财农[2024]37号)

作者简介: 胡婷 (1988-), 女, 副教授, 研究方向: 功能食品, E-mail: huting1988@163.com; 共同第一作者: 陈艳梅 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品, E-mail: 1625614735@qq.com

通讯作者: 马勤 (1990-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: qinma_gaas@163.com

capacity and cholesterol adsorption capacity of IDF from the black rice bran powder were increased by 57.43%, 22.71% and 24.92%, respectively, while the DPPH free radical scavenging capacity and FRAP antioxidant capacity of SDF were increased by 2.77 times and 1.71 times, respectively, those of the crude SDF. In conclusion, ultrafine grinding can significantly reduce the particle size of black rice bran dietary fiber, promote the formation of loose porous microstructure, and improve the physicochemical and functional properties of IDF. The research results provide a theoretical basis for the deep processing and utilization of black rice bran dietary fiber.

Key words: black rice bran; ultrafine grinding; dietary fiber; physicochemical properties; functional properties

黑米是一种珍贵的有色稻米品种,因其米糠层富含花色苷而呈现黑色。现代药理学研究表明黑米具有多种健康功效,包括降血糖、降血脂、抗炎、抗动脉粥样硬化等^[1],且大多研究发现黑米的健康功效主要源于其丰富的花色苷。然而,作为一种典型的全谷物,黑米米糠层膳食纤维含量高达30%,是膳食纤维的良好来源^[2]。已有多项人群观察试验结果表明全谷物膳食纤维摄入量与2型糖尿病发病风险呈显著负相关关系^[3,4]。但黑米糠中纤维素和半纤维素含量较高,适口性差、质地坚硬且不易被消化,导致黑米糠的高值化利用受限^[5]。因此,找到合适的加工方法改善黑米糠膳食纤维的理化特性非常重要。

目前,膳食纤维的改善方法主要有物理、化学和生物法,其中物理法具有工艺简单、绿色环保等优势而被广泛应用^[6]。常用的物理改性方法有挤压膨化、蒸汽爆破(SE)、高压蒸制、超微粉碎等。Zhang等^[7]的研究发现,米糠经挤压膨化后其SDF的含量和纯度均有提高,且在挤压温度为100℃和120℃时,SDF的水溶性、持水力、持油力、抗氧化能力均显著高于未挤压米糠SDF。Ma等^[8]发现SE处理提高了麦麸SDF含量,并改善SDF的葡萄糖吸附能力、胰脂肪酶抑制能力及 α -淀粉酶抑制作用。但黑米中富含花色苷等热敏性物质,其在热加工中极易降解损失^[9]。超微粉碎是一种能将物料粉碎至微米级的加工技术,其可以通过微细化物料改善其口感和质地,提高营养成分的释放,广泛应用于食品加工领域^[10]。Niu等^[11]研究发现米糠不溶性膳食纤维经球磨粉碎处理后,其粒径显著减小,同时游离酚的释放提高了12.2%。Zhao等^[12]的研究发现米糠不溶性膳食纤维经超细研磨后其持水能力、溶胀能力及亚硝酸盐离子吸附能力均有所提高,并表现出更高的酚酸可萃取性。Cao等^[13]对锤磨处理后不同粒径米糠的理化性质进行探究,发现随着颗粒粒径的降低,米糠的吸水性、溶胀性及抗氧化能力显著提高,且锤磨粉碎使米糠中不溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维。Li等^[14]发现豌豆经过超微粉碎后其不溶性膳食纤维(IDF)的葡萄糖的吸附能力显著提高,可能与其比表面积和孔体积增加有关。由

此可见,超微粉碎技术已广泛应用于米糠膳食纤维的改性处理,并表现出良好的效果。目前已有研究表明超微粉碎可促进黑米糠酚类物质的释放^[15],但膳食纤维同为黑米糠中的重要活性成分,其对黑米糠膳食纤维理化功能特性的影响尚不清楚。

因此,本研究采用超微粉碎处理黑米糠制备膳食纤维,探究超微粉碎对黑米糠膳食纤维的结构、理化和功能特性的影响,以期超微粉碎在黑米糠的精深加工中的应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

黑米,山东鹤来香食品有限公司;总抗氧化能力检测试剂盒,上海碧云天生物技术有限公司;2,2-二苯基-1-苦基肼,美国Sigma公司; α -淀粉酶(Termamyl 120 L, 120 KNU-S/mL)、蛋白酶(Alcalase 2.4 L, 4.42 AU/mL)和葡萄糖淀粉酶(AMG 300 L, 300 AGU/mL),购于诺维信(中国)有限责任公司;其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

J1500-A碾米机,山东卡琪诺机械有限公司;XDW-6BL振动式超微粉碎机,济南达微机械有限公司;IKA T25高速均质机,德国IKA公司;JIDI-21RH高速冷冻离心机,广州吉迪仪器有限公司;EYELAN-1100旋转蒸发仪,东京理化器械株式会社;Infinite M200pro酶标仪,奥地利TECAN公司;Merlin扫描电镜仪,德国Carl Zeiss AG公司;低温连续相变萃取设备,华南农业大学天然活性物研究中心自主研发设备;Bruker D8 X射线衍射仪,荷兰PNAlytical B.V.公司;VERTEX 70红外光谱仪,德国Bruker Optics公司;Bettersize2600激光粒度分析仪,丹东百特仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黑米糠的制备

新鲜黑米经碾米机碾磨,粉碎后过60目筛得到黑

米糠,采用低温连续相变萃取设备^[16],以正丁烷为萃取溶剂,在0.5 MPa,45℃条件下萃取60 min得到脱脂黑米糠。将脱脂黑米糠置于低温振动式超微粉碎机中,设定仪器温度为4℃,打开空气压缩开关,粉碎时间为15 min,得到黑米糠超微粉。超微粉碎前后黑米糠的水分、灰分、淀粉、蛋白含量没有发生显著性变化^[17]。

1.3.2 黑米糠IDF和SDF的提取

参考赵广河^[18]的方法提取黑米糠中的IDF和SDF。取60 g黑米糠与600 mL去离子水充分混匀,将料液置于95℃磁力搅拌水浴锅中反应10 min,以糊化淀粉;接着先加入0.9 mL α -淀粉酶反应20 min (pH值6.0,95℃);再加入3.0 mL蛋白酶反应60 min (pH值7.5,60℃);最后加入1.2 mL葡萄糖淀粉酶反应30 min (pH值4.5,60℃);反应完成后,沸水浴20 min以确保酶失活,室温下离心分别取上清液和残渣,残渣用60℃蒸馏水洗涤2次后,40℃干燥24 h得IDF。

将离心后得到的上清液和两次洗涤残渣所得的洗涤水进行合并,随后缓慢加入10% (m/V) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以沉淀其中的植酸;接着常温下离心取上清液浓缩,将浓缩液置于8 kDa透析袋中,室温下透析48 h以脱除盐分,再往透析液加入4倍体积无水乙醇混匀后静置24 h;最后,将料液以8 000 r/min的离心速度离心10 min,所得的沉淀加水复溶后真空冷冻干燥72 h即得SDF。

1.3.3 黑米糠膳食纤维粒径分布

取少量样品于水溶液中制成浓度为10%的匀浆,用胶头吸管吸取样液缓慢加入激光粒度分析仪进样器中,根据系统提示调节进样浓度,使其遮光度在粒度仪正常检测范围,同一样品测定五次取平均值。 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别代表10%、50%、90%的样品颗粒的直径小于此粒径值。

1.3.4 黑米糠IDF和SDF的微观结构分析

黑米糠IDF和SDF的微观结构通过Merlin扫描电子显微镜进行观察。取干燥后的样品粉末以导电胶稳固,通过溅射镀膜技术于样品表面镀覆金层,以增强导电性,之后置于显微镜下,以500倍的放大倍数扫描并拍摄图像。

以傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析探究其化学结构特征。称取约5 mg黑米糠膳食纤维样品,按质量比1:100与干燥溴化钾混合,经充分研磨后,置入压膜器中加压5 min,形成透明的圆形薄片。然后迅速取出放入VERTEX70型傅里叶变换红外光谱仪内,于4 000~400 cm^{-1} 的波长范围内进行扫描,共重

复32次,分辨率设定为4 cm^{-1} 。

采用Bruker D8型X-射线衍射仪测定黑米糠膳食纤维样品的结晶度。采用铜靶作为辐射源,波长为0.154 18 nm ($K\alpha$),0.154 06 nm ($K\alpha_1$),工作电压与电流分别为40 kV与40 mA,扫描范围为5~65°,扫描速度12°/min,步长为0.013°。以Jade 5.0软件处理数据,样品相对结晶度以结晶区面积与总面积之比计算。

1.3.5 黑米糠IDF的理化特性

参照符慧珍等^[19]的方法,评估了黑米糠IDF进行了持水力(WHC)、持油力(OHC)和溶胀力(WSC)的测定。对于持水力的测定,将黑米糠IDF与蒸馏水按1:100 (g/mL)的比例充分混匀,在室温条件下静置18 h,以确保充分浸润;接着在室温条件下离心去上清液,称量吸水后样品的质量。以每g样品保留水的质量来表示持水力。

$$B_1 = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \quad (1)$$

式中:

B_1 ——样品持水力(WHC), g/g;

M_1 ——样品吸水后的质量, g;

M_0 ——样品吸水前的质量, g。

将黑米糠IDF与大豆油以1:60 (g/mL)充分混匀,室温条件下静置18 h,10 000 r/min离心20 min,弃去上清液,称量样品的质量。以每g样品保留油的质量表示持油力。

$$B_2 = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \quad (2)$$

式中:

B_2 ——样品持油力(OHC), g/g;

M_1 ——样品吸油后的质量, g;

M_0 ——样品吸油前的质量, g。

取0.50克黑米糠IDF样品于刻度离心管中,加20 mL蒸馏水,充分混匀,室温下静置18 h,测定溶胀后样品体积。溶胀力以每g样品吸收水的体积表示。

$$B_3 = \frac{V_1 - V_0}{M} \quad (3)$$

式中:

B_3 ——样品溶胀力(WSC), mL/g;

V_0 ——吸水溶胀前样品体积, mL;

V_1 ——吸水溶胀后样品体积, mL;

M ——吸水溶胀前样品质量, g。

1.3.6 黑米糠IDF的功能特性分析

参照符慧珍等^[19]的方法评估了黑米糠IDF的胆酸盐吸附能力(SCAC)及胆固醇吸附能力(CAC)。SCAC的测定,采用了糠醛比色法进行测定,结果

以每克样品所能吸附的胆酸钠毫克数表示。向 50 mL 2 mg/mL 胆酸钠溶液中加入 1.0 g 黑米糠 IDF 样品, 并充分混匀; 在室温条件下振荡反应 2 h; 离心取上清液测定。

$$D_1 = \frac{(C_1 - C_2) \times V}{M} \quad (4)$$

式中:

D_1 ——样品胆酸盐吸附能力 (SCAC), mg/g;

C_1 ——胆酸钠溶液初始质量浓度, mg/mL;

C_2 ——上清液中胆酸钠的质量浓度, mg/mL;

V ——上清液体积, mL;

M ——样品质量, g。

胆固醇吸附能力以邻苯二甲醛比色法测定。向 1.0 g 黑米糠 IDF 样品中加入 25 mL 新鲜蛋黄溶液并充分混匀, 接着调节 pH 值至 7.0, 室温下震荡反应 2 h, 离心取上清液。

$$D_2 = \frac{[(C_1 - C_2) - (C_0 - C_1)] \times V}{M} \quad (5)$$

式中:

D_2 ——样品胆固醇吸附能力 (CAC), mg/g;

C_1 ——蛋黄溶液的胆固醇质量浓度, mg/mL;

C_2 ——上清中蛋黄溶液的胆固醇质量浓度, mg/mL;

C_0 ——不含样品的蛋黄溶液的胆固醇质量浓度;

V ——蛋黄溶液的体积, mL;

M ——样品质量, g。

1.3.7 抗氧化能力测定

样品总抗氧化能力的测定选定 FRAP 试剂盒进行测定。具体步骤如下, 准确称取 5 mg 黑米糠 SDF, 以去离子水溶解 (超声辅助溶解), 配制成 1.0 mg/mL 的样品溶液。在 96 孔板中加入 180 μ L FRAP 工作液和 5 μ L 黑米糠 SDF 样品溶液, 37 $^{\circ}$ C 孵育 5 min, 并在 593 nm 条件下测定吸光度。以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 吸光值建立标准曲线, 以 FeSO_4 标准溶液的浓度表示样品样液的抗氧化能力, 即 $\mu\text{mol FeE/g DW}$ 。

DPPH 抗氧化活性参考李杰等^[20]和 Liu 等^[21]稍作修改。准确称取 5 mg 黑米糠 SDF, 以去离子水溶解, 配制成 1.0 mg/mL 的样品溶液; 取 0.1 mL 样品溶液加入 3.9 mL (0.1 mmol/L) DPPH 工作液, 避光反应 30 min, 并在 517 nm 测定吸光度, 采用上述方法测定不同浓度的 Trolox 标准溶液在 517 nm 波长处的吸光度, 建立标准曲线方程, 抗氧化能力以 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 表示。

1.4 数据统计与分析

每组实验设定三个平行, 结果以均值 $\pm$ 标准差 (Mean $\pm$ SD) 的形式表示, 使用 Origin 2023 软件进

行绘图。数据的统计与分析采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行, 其中 $P < 0.05$ 时表示差异达到显著性水平。

2 结果与分析

2.1 超微粉碎处理对黑米糠膳食纤维含量的影响

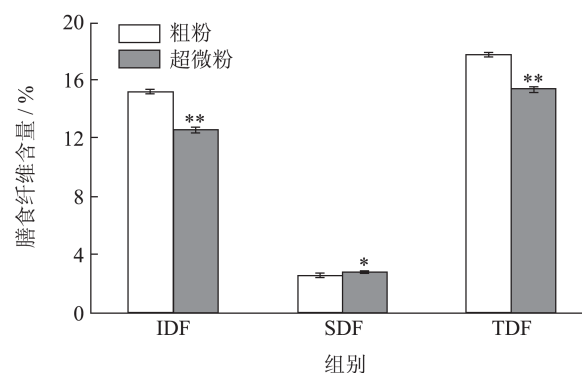


图 1 超微粉碎对黑米糠膳食纤维含量的影响

Fig.1 Effects of ultrafine grinding on the content of dietary fiber in black rice bran

注: * 表示显著差异 ($P < 0.05$). ** 表示极显著差异 ($P < 0.01$).

黑米糠膳食纤维含量如图 1 所示, 超微粉碎处理后黑米糠 IDF 和 SDF 均发生显著变化 ($P < 0.05$), 其 SDF 的含量提高了 9.34%, 而 IDF 和 TDF 的含量分别下降了 17.40% 和 13.54%, IDF 与 SDF 的比例从 5.93 下降到 4.48。这可能是源于在超微粉碎的高速撞击力和剪切力作用下, IDF 的结构被破坏, 导致支链纤维素向短链可溶性无定形纤维素转变, 转化为 SDF^[22], 在此过程中可能也伴随着小分子成分的释放, 导致 TDF 含量的下降^[15,23]。此外, 膳食纤维的来源、组成、类型等会影响提取率, 进而影响其含量。Qin 等^[24]的研究发现, 沙田柚、马家柚、井冈蜜柚子皮膳食纤维经超微粉碎处理后, TDF 的含量均显著增加, 而大布蜜柚柚皮膳食纤维含量却下降了 4.56%。

2.2 超微粉碎处理对黑米糠膳食纤维粒径的影响

超微粉碎对黑米糠膳食纤维粒径分布的影响如表 1 所示, 黑米糠粗粉 IDF 和 SDF 中值粒径 (D_{50}) 分别为 122.72 μm 和 16.68 μm , 经超微粉碎后, 其中值粒径分别降低了 65.83% 和 76.62%。相较于 D_{50} , 超微粉 IDF 和 SDF 的最大颗粒粒径 (D_{90}) 显示出较小的下降趋势, 其 D_{90} 较粗粉分别降低了 29.09% 和 9.42%。这些结果表明物料在超微粉碎过程中会受到机械设备的强压力、剪切力、摩擦力等的综合作用, 导致物料内部凝聚力遭到破坏, 从而使粒径极大程度减

小^[25]。超微粉碎可以降低黑米糠 SDF 和 IDF 的粒径大小，可能进一步改善其理化功能特性。

表 1 超微粉碎对黑米糠膳食纤维粒径分布的影响
Table 1 Effect of ultrafine grinding on particle size distribution of dietary fiber from black rice bran

样品		粒径/ μm		
		D_{10}	D_{50}	D_{90}
IDF	粗粉	14.01 ± 0.04	122.72 ± 0.37	268.48 ± 1.50
	超微粉	$5.93 \pm 0.08^{**}$	$41.93 \pm 0.43^{**}$	$190.38 \pm 2.52^{**}$
SDF	粗粉	4.43 ± 0.01	16.68 ± 0.43	37.05 ± 2.52
	超微粉	$0.99 \pm 0.01^{**}$	$3.90 \pm 0.10^{**}$	$33.56 \pm 0.91^{**}$

注：** 极显著差异 ($P<0.01$)。

2.3 超微粉碎对黑米糠膳食纤维微观结构的影响

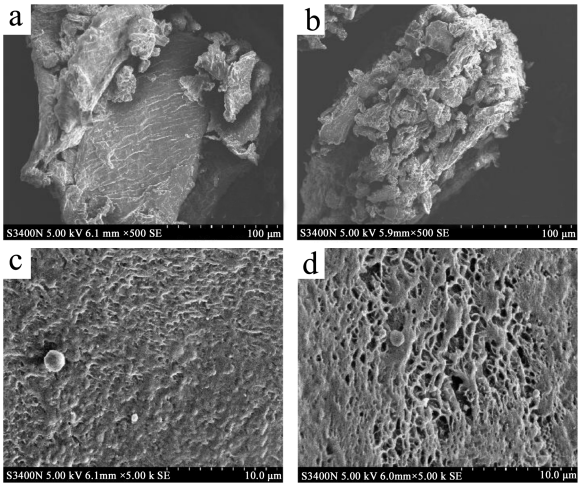


图 2 黑米糠超微粉碎前后 SEM 图
Fig.2 SEM images of black rice bran before and after ultrafine grinding

注：a 为粗粉-IDF；b 为超微粉-IDF；c 为粗粉-SDF；d 为超微粉-SDF。

采用扫描电镜探究黑米膳食纤维经超微粉碎前后其微观结构变化情况，结果如图 2 所示。粗粉-IDF 以大块片状物呈现，结构连接紧密，颗粒直径大，表面有少量褶皱且较为光滑平整；经超微粉碎后粉体片状结构被破碎，出现密集的小颗粒团聚，表面沟壑加深且孔隙增加，结构较未粉碎前疏松。粗粉-SDF 的微观结构主要呈现紧致而平整的网状结构，颗粒之间紧密连接，几乎无分散颗粒堆叠，出现轻微的褶皱型纹路；经超微粉碎后 SDF 结构仍表现出平整的状态，但表面孔隙增加，且有明显裂缝，表现出更加疏松的状态。黑米糠膳食纤维经超微粉碎后其层状结构遭到破坏，交联被打开，呈现出更小的颗粒大小。李菁等^[26]的研究发现，超微粉碎处理会使豆渣碱-酸不溶性膳食纤维及水不溶性膳食纤维组织状态变得更加疏松，并

且表面出现裂纹、孔隙增大等现象。以上结果表明超微粉碎可以破坏黑米糠膳食纤维的致密结构，使其呈现疏松多孔的状态。

2.4 超微粉碎对黑米糠膳食纤维红外光谱和晶体结构的影响

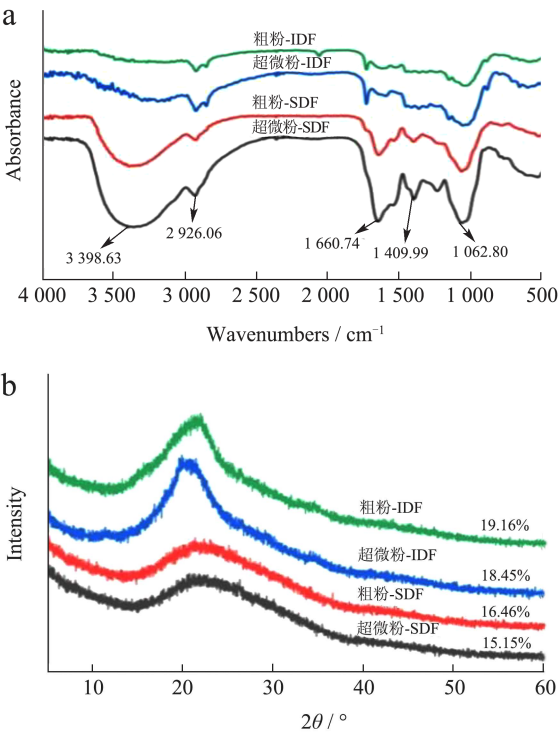


图 3 黑米糠超微粉碎前后 IDF 和 SDF 的 FT-IR (a) 和 XRD (b) 图

Fig.3 FT-IR and XRD of black rice bran before and after ultrafine grinding

注：a 为 FT-IR；b 为 XRD。

采用红外光谱特征和 X-射线衍射等方法探究黑米糠超微粉碎前后 IDF 和 SDF 的结构特性变化，结果如图 3 所示。黑米糠相同类型的膳食纤维的 FTIR 光谱图具有相似峰形，但在吸收强度上有一定的差异。在 $3\,398\text{ cm}^{-1}$ 的位置，膳食纤维样品可以观察到一个宽而大的吸收峰，这代表了纤维素和半纤维素中 O-H 的收缩与振动；而在 $2\,926\text{ cm}^{-1}$ 的位置，则是纤维素特征 C-H 键的收缩与振动^[27,28]。在 $1\,660\text{ cm}^{-1}$ 处出现吸收峰，它通常被认为与半纤维素中醛酸中 C=O 和 $-\text{COO}^-$ 的特征吸收有关；而 $1\,409\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰则反映了 C-H 键的弯曲振动模式；此外，在 $1\,062\text{ cm}^{-1}$ 区域出现的吸收峰，则紧密关联于木质素或半纤维素分子中 C-O 键的伸缩振动（图 3a）^[29]。这些结果表明黑米糠膳食纤维中存在丰富的亲水性和其他活性基团，这些基团对膳食纤维的理化性质至关重要，而超微粉碎未能改变膳食纤维的基本构成，但对其组成成分的含量造成

一定影响。

超微粉碎前后黑米糠 IDF 和 SDF 在扫描角度 2θ 为 $5^\circ\sim 60^\circ$ 范围呈现弥散衍射, 其主衍射峰的位置没有发生明显变化, 均在 2θ 为 21.8° 处出现一个强衍射峰 (图 3b)。粗粉 IDF 和 SDF 的相对结晶度分别为 19.16% 和 16.46%, 超微粉碎后 IDF 和 SDF 的相对结晶度均有降低, 分别降低至 18.45% 和 15.51%。这可能是超微粉碎处理破坏了黑米糠膳食纤维的分子间作用力从而破坏其有序结构, 结晶度下降^[30]。Li 等^[14]的研究也发现, 随着豌豆不溶性膳食纤维粒度的减小, 纤维素之间的氢键被破坏, 而当晶粒尺寸变得足够小时, 晶体结构会受到严重破坏, 从而导致结晶度下降。

2.5 超微粉碎处理对黑米糠IDF功能特性的影响

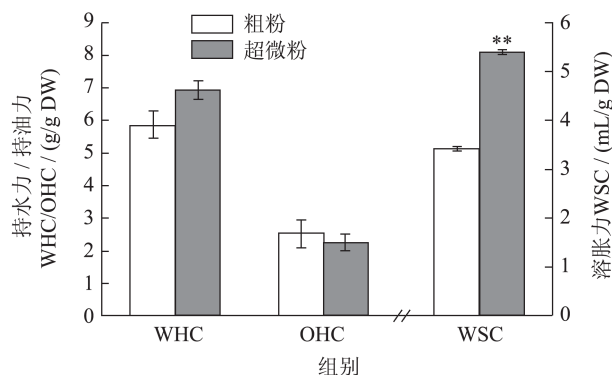


图 4 超微粉碎对黑米糠 IDF 理化特性的影响

Fig.4 Effects of ultrafine grinding on physicochemical properties of IDF in black rice bran

注: ** 表示极显著差异 ($P<0.01$)。

IDF 的理化特性与其生理功能效应密不可分, 其优异的持水力与溶胀能力对于促进肠道的蠕动及缩短小肠内容物的通过时间起着关键作用; 此外, DF 的持油能力直接关系到 DF 促进脂肪排泄效率及降低血清胆固醇浓度水平的能力。超微粉碎对黑米糠 IDF 持水力、持油力和溶胀力的影响如图 4 所示。黑米糠粗粉 IDF 的溶胀力为 3.43 mL/g DW , 经超微粉碎后其 IDF 溶胀力提高至 5.40 mL/g DW ($P<0.01$), 但其持水力和持油力没有显著变化 ($P>0.05$)。黑米糠经过超微粉碎后, 其 IDF 溶胀力和持水力的增加可能是由于超微粉碎的机械作用破坏了 IDF 中的氢键, 导致亲水基团的暴露, 增强了与水分子的相互作用, 进而促进了水分子的渗透和吸收过程; 而 IDF 的持油能力则受其固有疏水性、表面物理化学特性以及整体电荷密度的综合影响^[31]; 但 IDF 的持油力并无明显变化, 这可能是由于超微粉碎处理并未对 IDF 的官能团和晶体结构产生明显影响。梅新等^[32]对甘薯渣进行超微粉碎后, 其 DF 持水力和溶胀力分别为 14.07 g/g 和 7.24 mL/g , 相较

于未粉碎前增加了 31.13% 和 18.30%, 而持油力显著下降。超微粉碎处理会影响膳食纤维的结构及离子键, 暴露出羧基、羟基等基团, 从而改变其物理特性。

2.6 超微粉碎处理对黑米糠IDF吸附特性的影响

胆酸盐吸附量和胆固醇吸附量是评价膳食纤维降低胆固醇能力的重要指标, 为其发挥调节脂代谢等生理功能提供了基础^[33]。黑米糠超微粉碎前后 IDF 的吸附特性如图 5 所示, 黑米糠超微粉 IDF 胆酸盐吸附能力和胆固醇吸附能力均显著高于粗粉 ($P<0.01$), 其中超微粉 IDF 胆酸盐吸附能力 (96.49 mg/g DW) 是粗粉 (74.31 mg/g DW) 的 1.29 倍, 胆固醇吸附能力 (14.79 mg/g DW) 是粗粉 (11.84 mg/g DW) 的 1.25 倍, 这可能与超微粉碎后黑米糠 IDF 呈现的疏松多孔的结构有关^[34], 同时 IDF 较小的粒径使胆固醇的吸附能力增加^[24]。

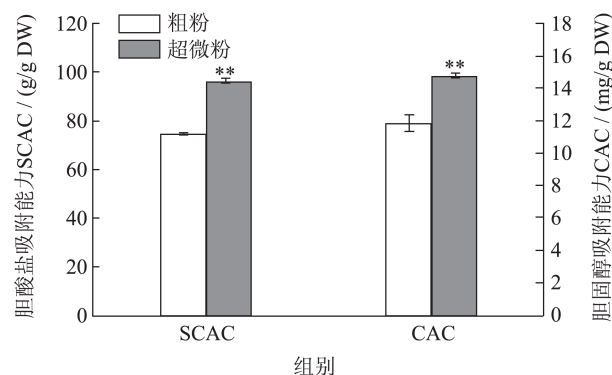


图 5 超微粉碎对黑米糠 IDF 吸附特性的影响

Fig.5 Impact of ultrafine grinding on the antioxidant capacity of SDF in black rice bran

注: ** 表示极显著差异 ($P<0.01$)。

2.7 超微粉碎处理对黑米糠SDF抗氧化能力的影响

超微粉碎前后黑米糠 SDF 对 DPPH· 的清除能力和总抗氧化能力的变化如图 6 所示。超微粉碎可以显著提高黑米糠 SDF 的抗氧化活性 ($P<0.01$), 其中超微粉 SDF 的 DPPH 和 FRAP 值分别为 $462.00 \mu\text{mol TE/g DW}$ 和 $819.62 \mu\text{mol FeE/g DW}$, 较粗粉分别提高了 188.75% 和 71.04%, 表现出良好的抗氧化能力 ($P<0.01$)。如前所述, Zhang 等^[35]的研究发现燕麦麸经超微粉碎处理后其提取物清除 DPPH·、ABTS· 和 OH· 的能力为 68.71%、82.48% 和 49.38%, 分别是未处理组的 1.35 倍、1.15 倍和 1.44 倍。Zhu 等^[36]研究发现, 酿酒葡萄渣不溶性膳食纤维经超微粉碎处理后其 ABTS· 清除能力和 Fe^{3+} 还原能力均显著增强。上述结果表明, 超微粉碎加工可以有效提高膳食纤维的抗氧化能力, 增

强其功能活性。膳食纤维是分子结构中具有醇羟基的低聚糖化合物,具有还原能力^[37]。超微粉碎使膳食纤维结构展开,比表面积增大,暴露出更多的羟基基团,使其还原能力增强,而表现出更加良好的抗氧化能力;此外,膳食纤维经超微粉碎以后其微观结构呈现疏松、裂纹状态,致使与食品基质交联紧密的酚酸化合物得到释放而增强了膳食纤维的抗氧化能力^[38]。

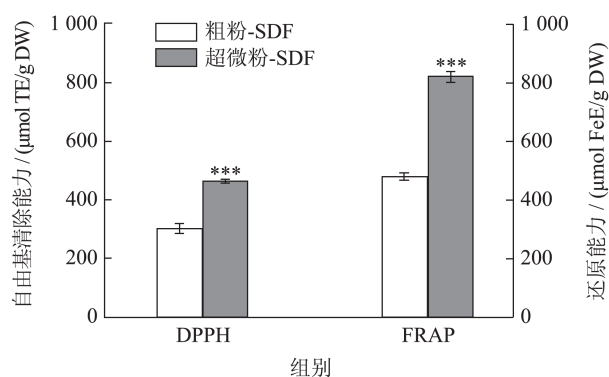


图6 超微粉碎对黑米糠 SDF 抗氧化能力的影响

Fig.6 Effect of ultrafine grinding on SDF antioxidant capacity of black rice bran

注:***表示非常显著性差异($P<0.001$)。

3 结论

本研究首次探究了超微粉碎对黑米糠膳食纤维结构及其理化和功能特性的影响。结果表明,超微粉碎降低黑米糠 IDF 和 SDF 的粒径,且超微粉 SDF 含量较粗粉显著提高;微观结构方面,超微粉黑米糠 SDF 和 IDF 的结构更加疏松多孔,但其基本构成并未发生明显变化;理化功能特性方面,超微粉碎显著提高黑米糠 IDF 的溶胀力、胆酸盐吸附和胆固醇吸附能力和 SDF 的抗氧化。因此,超微粉碎具有改善黑米糠膳食纤维理化功能特性的作用,可以作为黑米及其副产物的加工利用的重要手段。

参考文献

[1] ITO V C, LACERDA L G. Black rice (*Oryza sativa* L.): A review of its historical aspects, chemical composition, nutritional and functional properties, and applications and processing technologies [J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125304.

[2] ZHANG S, MA Q, DENG M, et al. Composition, structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber from different milling fractions of black rice bran [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2024, 195: 115743.

[3] JUKKA M, PAUI K, RITVA J, et al. Whole-grain and fiber intake and the incidence of type 2 diabetes [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2003, 77 (3): 622-9.

[4] JENKINS D J A, WILLETT W C, YUSUF S, et al. Association

of glycaemic index and glycaemic load with type 2 diabetes, cardiovascular disease, cancer, and all-cause mortality: a meta-analysis of mega cohorts of more than 100 000 participants [J]. Lancet Diabetes and Endocrinology 2024, 12 (2): 107-118.

[5] GUAN Y, XIE C, ZHANG R, et al. Characterization and the cholesterol-lowering effect of dietary fiber from fermented black rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Food & Function 2023, 14 (13): 6128-6141.

[6] 肖园园,徐晨凤,王露露,等.膳食纤维物理改性及其营养效应的研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(14):346-356.

[7] ZHANG M, BAI X, ZHANG Z. Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran [J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54 (1):98-103.

[8] MA J, YUAN M, LIU Y, et al. Effects of steam explosion on yield and properties of soluble dietary fiber from wheat bran [J]. Food Science and Technology Research, 2021, 27 (1): 35-42.

[9] 王二雷,黄佳莹,段海章,等.花色苷稳态化技术研究进展及应用前景[J].食品工业科技,2024,45(18):394-403.

[10] 付晓康,苏玉,黄亮,等.蒸汽爆破-超微粉碎对米糠膳食纤维结构和功能性质的影响[J].中国粮油学报,2020,35(4):142-150.

[11] NIU L, GUO Q Q, XIAO J, et al. The effect of ball milling on the structure, physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from three grain bran [J]. Food Research International, 2023, 163: 112263.

[12] 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, 2018, 87: 450-456.

[13] CAO Y, ZHAO J, TIAN Y, et al. Physicochemical properties of rice bran after ball milling [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45 (10): e15785.

[14] LI L, LIU J, ZHANG Y, et al. Qualitative and quantitative correlation of microstructural properties and *in vitro* glucose adsorption and diffusion behaviors of pea insoluble dietary fiber induced by ultrafine grinding [J]. Foods, 2022, 11 (18): 2814.

[15] 卫子颜,谢勇,王朦朦,等.超微粉碎对米糠多酚的组成及抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(14):138-144.

[16] 胡流云,刘岑岑,陈洪璋,等.低温连续相变萃取灵芝活性成分的工艺优化[J].现代食品科技,2022,38(2):180-189.

[17] 胡婷,王鑫,耿可赞,等.超微粉碎对黑米糠多酚的组成及活性的影响[J].现代食品科技,2024,40(12):209-217.

[18] 赵广河.米糠膳食纤维中结合态酚类物质的模拟消化释放特征及其改善脂质代谢作用[D].武汉:华中农业大学,2023.

[19] 符慧珍,邓梅,张名位,等.黑曲霉改性葛渣膳食纤维的工艺优化及其理化功能特性[J].中国农业科学,2023,56 (12):2380-2394.

[20] 李杰,贾栩超,张瑞芬,等.黑芝麻黑色素的分离纯化,结构表征及体外抗氧化活性[J].中国农业科学,2020,53(12):2477-2492.

[21] LIU Q, QIU Y, BETA T. Comparison of antioxidant activities of different colored wheat grains and analysis of phenolic compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58 (16): 9235-9241.

[22] WANG M, CHEN X, DONG L, et al. Modification of pea dietary fiber by ultrafine grinding and hypoglycemic effect in diabetes mellitus mice [J]. Journal of Food Science, 2021, 86 (4): 1273-

- 1282.
- [23] ABDULMANNAN F, JASON A, ANDREW P, et al. Improving the extractability of arabinoxylans and the molecular weight of wheat endosperm using extrusion processing [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 84: 55-61.
- [24] QIN X, DONG X, TANG J, et al. Comparative analysis of dietary fibers from grapefruit peel prepared by ultrafine grinding: Structural properties, adsorption capacities, *in vitro* prebiotic activities [J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103163.
- [25] 余青,陈嘉浩,王寅竹,等.超微粉碎处理对麦麸粉功能及结构特性的影响[J].*粮食科技与经济*,2020,45(2):56-62,81.
- [26] 李菁,吴聪聪,叶沁,等.不同处理方法对豆渣膳食纤维结构和降血糖性质的影响[J].*食品与发酵工业*,2021,47(15):178-184.
- [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 fermentation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 468-474.
- [28] ROUHOU M C, ABDELMOUMEN S, THOMAS S, et al. Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus rackets: Structural and microstructural studies [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 116: 901-910.
- [29] DU X J, WANG L, HUANG X, et al. Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111031.
- [30] QIN X T, DONG X W, TANG J, et al. Comparative analysis of dietary fibers from grapefruit peel prepared by ultrafine grinding: Structural properties, adsorption capacities, *in vitro* prebiotic activities [J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103163.
- [31] XIAO Z, YANG X, ZHAO W, et al. Physicochemical properties of insoluble dietary fiber from pomelo peel modified by ball milling [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46 (2): e16242.
- [32] 梅新,木泰华,陈学玲,等.超微粉碎对甘薯膳食纤维成分及物化特性影响[J].*中国粮油学报*,2014,29(2):76-81.
- [33] ZHENG Y, WANG X, TIAN H, et al. Effect of four modification methods on adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre [J]. *Food Research International*, 2021, 147 (0963-9969):110565.
- [34] ZHU Y, HE C H, FAN H X, et al. Modification of foxtail millet (*Setaria italica*) bran dietary fiber by xylanase-catalyzed hydrolysis improves its cholesterol-binding capacity [J]. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 2019, 101: 463-468.
- [35] ZHANG Y K, ZHANG M L, GUO X Y, et al. Improving the adsorption characteristics and antioxidant activity of oat bran by superfine grinding [J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11 (1): 216-227.
- [36] ZHU F M, DU B, LI J. Effect of ultrafine grinding on physicochemical and antioxidant properties of dietary fiber from wine grape pomace [J]. *Food Science and Technology International*, 2014, 20 (1): 55-62.
- [37] 付旭恒,吴伟,吴晓娟,等.米糠贮藏时间对米糠可溶性膳食纤维抗氧化性质的影响[J].*中国油脂*,2017,42(8):32-36.
- [38] 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.