

不同加工方式对米糠可溶性膳食纤维结构和抗氧化活性的影响

陈燕霞¹, 赵东¹, 刘磊², 董丽红¹, 邓梅¹, 张瑞芬^{1*}

(1. 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) (2. 五邑大学生物科技与大健康学院, 广东江门 529020)

摘要: 该研究以米糠为原料, 分别采用挤压膨化、米根霉发酵及发酵-挤压膨化技术处理制备米糠可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF), 分析其 SDF 的微观结构、吸收峰特征、分子量和单糖组成, 并进行抗氧化活性评价。结果表明, 3 种加工方式均显著增加了 SDF 含量, 较未处理的 SDF 分别提高了 51.49%、108.63%、118.15%; 经加工处理后的米糠 SDF 的微观结构更为疏松多孔且分子量更低; 4 种米糠 SDF 具有相似的特征吸收峰, 但其吸收峰强度存在一定差异。与未处理的米糠 SDF 相比, 米根霉发酵及其联合挤压膨化处理的米糠 SDF 出现岩藻糖结构片段, 且其鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖和半乳糖含量比例更高, 而经挤压膨化处理后其葡萄糖含量更高; 此外, 挤压膨化和发酵的米糠 SDF 具有更高抗氧化活性, 但二者联合处理的 SDF 抗氧化活性无显著差异。综合比较发现经三种加工处理的米糠 SDF 具有显著的结构差异及增强抗氧化活性能力, 其中发酵处理对米糠 SDF 的影响最显著, 该研究对开发米糠加工新工艺以制备高活性米糠 SDF 具有指导意义。

关键词: 米糠; 可溶性膳食纤维; 加工; 结构特征; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2023)06-124-131

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0782

Effects of Different Processing Methods on the Structure and Antioxidant Activity of Soluble Dietary Fibers in Rice Bran

CHEN Yanxia¹, ZHAO Dong¹, LIU Lei², DONG Lihong¹, DENG Mei¹, ZHANG Ruifen^{1*}

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

(2. School of Biotechnology and Health Sciences, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: Rice bran soluble dietary fibers (SDF) were obtained from rice bran by extrusion, fermentation with *Rhizopus oryzae*, and fermentation-extrusion. The microstructure, absorption peak characteristics, molecular weight, and monosaccharide composition of the rice bran SDFs were examined, and their antioxidant activities evaluated. The three processing methods significantly increased the SDF content to 51.49%, 108.63%, and 118.15% as compared to unprocessed SDF. Additionally, there was an increase in the number of porous microstructures observed following processing, along with a decrease in molecular weight. The four types of rice bran SDFs exhibited similar characteristic absorption peaks, but at different intensities. Compared to the unprocessed rice bran SDFs, SDFs prepared by fermentation and fermentation-extrusion contained structural fucose fragments and had higher rhamnose, arabinose, xylose, mannose, and galactose content.

引文格式:

陈燕霞, 赵东, 刘磊, 等. 不同加工方式对米糠可溶性膳食纤维结构和抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 124-131.

CHEN Yanxia, ZHAO Dong, LIU Lei, et al. Effects of different processing methods on the structure and antioxidant activity of soluble dietary fibers in rice bran [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 124-131.

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31972082); 珠海市科技计划项目 (ZH22036201210043PWC); 中央引导地方 (南雄) 科技发展资金项目; 广东省农业科学院中青年学科带头人培养计划 (R2020PY-JG011); 广东省农业科技创新推广项目 (粤财农[2021]170 号)

作者简介: 陈燕霞 (1992-), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 18016690595@163.com

通讯作者: 张瑞芬 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 营养功能食品, E-mail: ruifenzhang@163.com

Meanwhile, a higher glucose content was observed in the extruded rice bran SDFs. Both extruded and fermented SDFs exhibit improved antioxidant activities, while no change was observed in the fermentation-extrusion-generated SDFs in terms of antioxidant activity. Comprehensive comparison revealed that SDFs prepared from these three processing methods had significant structural differences and enhanced antioxidant activity as compared to SDFs from unprocessed bran. Fermentation had the most significant effect on the SDFs. This study is of significance in developing new rice bran processing technology for the preparation of highly active rice bran SDFs.

Key words: rice bran; soluble dietary fiber; processing; structure characteristics; antioxidant activity

我国是世界上最大的稻米生产国, 每年产量约 2.0×10^8 t, 米糠是稻谷加工过程中的主要副产物, 年产量 1.2×10^8 t 左右^[1]。米糠由稻米的种皮、糊粉层、珠心层以及少量胚芽构成, 约占稻谷质量的 6%, 富含膳食纤维 (Dietary Fiber, DF), 维生素和酚类化合物等活性成分, 被称为“天赐营养源”^[2,3]。然而, 米糠具有口感粗糙以及脂肪氧化“哈败”引起的风味劣变等问题, 长期作为饲料甚至燃料使用, 无法体现其营养价值, 造成粮食资源的浪费^[4]。通过加工处理改善米糠的风味口感, 提升其功能成分的生物活性是米糠增值加工的重要方向。

微生物发酵和挤压膨化是两种常用的谷物及其副产物加工方式, 在改善谷物营养品质和风味口感等方面都具有积极作用。项目组前期研究发现, 挤压膨化和米根霉发酵处理可促进米糠中结合态酚类物质释放为游离态, 同时改变米糠基质结构, 提高其结合酚的提取效率, 使得其酚类物质总含量较加工处理前分别提高 36.30% 和 71.62%^[5]。但上述处理对其他营养活性成分的影响尚不清楚。如上所述, DF 是米糠中重要的营养和活性成分, DF 根据其溶解性不同分为可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF) 两类。SDF 通常较 IDF 显示出更强的持水力、吸水膨胀性等理化特性和抗氧化活性等生物活性^[6]。研究发现, 麦麸等谷物 SDF 中富含活性多糖, 且具有较强的抗氧化能力^[7,8]。然而, 米糠中的 DF 以 IDF 为主, 一方面影响其口感, 同时也不利于其健康功效的发挥^[9]。

研究表明, 挤压膨化通过高温、高压、高剪切作用, 使物料在挤压机模具口瞬间膨化, 实现大分子的降解, 改变膳食纤维的结构特性, 促进 IDF 转化为 SDF^[10-12]; 米根霉等真菌在生长过程中, 能够分泌大量的纤维素酶, 降解纤维素为其自身的增殖提供碳源, 且能提高 SDF 的产量^[13]。因此, 挤压膨化和米根霉发酵处理可能促进米糠 IDF 转化为 SDF, 改变米糠 DF 的功能特性, 进而改善米糠的口感和功能品质。但两种处理对米糠 DF, 特别是 SDF 的结构和功能特性的影响尚未见相关的研究报道。

因此, 本研究以脱脂米糠为原料, 分别采用挤压

膨化、米根霉发酵、米根霉发酵-挤压膨化处理米糠后, 比较分析上述 3 种加工技术对米糠 SDF 的含量、显微结构、分子量、单糖组成以及抗氧化活性的影响, 旨在探明不同加工处理对米糠 DF 结构特征和功能特性的影响, 为米糠高值化利用提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料

新鲜米糠购自广东乡意浓农业科技有限公司, 米糠经超临界 CO_2 萃取脱脂处理后, 获得脱脂米糠 (DRB)。

1.1.2 试剂

半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖、鼠李糖、甘露糖、核糖标准品、DPPH (1,1-二苯基-2-三硝基苯肼), Sigma-Aldrich 公司 (美国); 羟自由基试剂盒、总抗氧化能力试剂盒, 南京建成生物工程研究所; 其它化学试剂均为分析纯。

1.1.3 主要仪器设备

FDU-2100 冷冻干燥机, 东京理化器械株式会社; EYELA N-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 高分辨率场发射扫描电子显微镜系统, 德国 Zeiss 公司; 6890N/5975B GC-MS 气质联用仪, 美国 Agilent 公司; 傅里叶变换红外光谱仪 VERTEX33, 德国 Bruker 公司; LC-20A 高效凝胶渗透色谱仪 (配有 Waters 2413 时差检测器), 日本岛津株式会社。

1.2 试验方法

1.2.1 不同加工方式处理米糠的制备

1.2.1.1 挤压膨化米糠 (EDRB) 的制备

DRB 通过 DS32-II 双螺杆膨化机制备挤压膨化米糠 (EDRB)。结合实验室前期摸索的条件, 设置挤压膨化参数如下: 将米糠水分调节至 25%, 分别设置挤压膨化机前段、中段、后段的温度为 70、98 和 134 $^{\circ}\text{C}$, 螺杆转速为 300 r/min。

1.2.1.2 米根霉发酵米糠 (FDRB) 的制备

采用米根霉 (AS3.866) 半固态发酵制备发酵米糠

(FDRB)。发酵条件参照 Schmidt 等^[14]的方法,将 40 g 的 DRB 和 20 mL 蒸馏水加入 250 mL 的锥形瓶中,在 121 °C 下高压灭菌 15 min。冷却至室温后,接种 4 mL 浓度为 1×10^5 CFU/mL 的米根霉孢子悬浮液,用玻棒搅拌充分混匀后,在 30 °C 恒温培养箱中孵育 120 h。将发酵后的米糠置于 50 °C 热风干燥箱中干燥 24 h 去除多余水分得到 FDRB。

1.2.1.3 米根霉发酵-挤压膨化米糠 (FEDRB) 的制备

将上述制得的 FDRB 参照 1.3.1.1 的参数条件进行挤压膨化处理,获得米根霉发酵-挤压膨化米糠 (FEDRB)。

将通过上述方法制备的不同加工处理的米糠粉碎后,过 80 目筛后包装于聚乙烯塑料袋,置于 4 °C 冰箱保存备用。

1.2.2 米糠 SDF 的制备

米糠 SDF 的制备参照 Bunzel 等^[15]的方法,分别将 DRB、EDRB、FDRB 和 FEDRB 依次进行糊化、 α -淀粉酶酶解、蛋白酶酶解、葡萄糖淀粉酶酶解处理后,沸水浴 10 min 灭酶,冷却至室温,4 000×g 离心 10 min,上清液用 $m=10\%$ 氢氧化钙调 pH 值至 7,离心去除沉淀,将上清液用旋转蒸发器浓缩至原体积的 1/2,装入 1 000 u 的透析袋 24 h 后,采用旋转蒸发器将透析袋内液体浓缩至原体积的 1/4,加入 4 倍于浓缩液体积的无水乙醇,置于 4 °C 醇沉 8 h,抽滤,收集沉淀后冻干,获得不同加工处理的米糠 SDF,分别命名为 USDF、ESDF、FSDF、FESDF。

1.2.3 米糠 SDF 基本结构特征分析

1.2.3.1 米糠 SDF 的微观结构

采用扫描电镜 (SEM) 观察米糠 SDF 的微观结构。取适量 SDF 粘附在 SEM 铝短柱上,使用溅射涂布机涂覆薄金层。在高真空条件下以 5.0 kV 的低加速电压拍摄涂覆的样品,图片扫描倍数选取 50×和 1 200×。

1.2.3.2 米糠 SDF 的红外光谱特征

称取约 5 mg 米糠 SDF 样品,以 1:100 (m/m) 比例与干燥的溴化钾混和,研磨均匀后压片成透明圆片,采用红外光谱仪进行分析,扫描波长为 4 000~400 cm^{-1} 。

1.2.3.3 米糠 SDF 的分子量分布

采用凝胶色谱法 (GPC) 测定米糠 SDF 分子量分布,将 SDF 和葡聚糖标准品在 Waters 1525 HPLC 上进行分析,其中进样量 10 μL ,运行时间 40 min。色谱条件:流动相为 0.02 mol/L 的 KH_2PO_4 缓冲溶液,凝胶柱为 G-1000 column (7.8 mm×300 mm) 和 G-500 column (7.8 mm×300 mm) 串联使用,流速为 0.7 mL/min, Waters 2414 示差检测器,柱温 35 °C。

1.2.3.4 米糠 SDF 的单糖组成

参照 Huang 等^[16]的方法,采用 GC-MS 气质联用仪

测定不同的米糠 SDF 的单糖组成。分别将 10 mg SDF 样品与 2 mL, 4 mol/L 三氟乙酸混匀,110 °C 水解 6 h,在 50 °C 蒸发浓缩至干,加入适量甲醇复溶后再蒸干,重复 3 次。分别加入 10 mg 的盐酸羟胺和 1 mL 的吡啶,在 90 °C 烘箱中反应 0.5 h。室温放置待其冷却后再加入 1 mL 的乙酸酐于 90 °C 反应 0.5 h,混匀后过 0.2 μm 的滤膜。GC-MS 分析方法:使用 HP-1701 的毛细管柱(管柱长宽 30 m×0.25 mm, 0.33 μm);检测器的温度设置为 290 °C;汽化室温度设置为 260 °C;柱温由 190 °C 梯度上升到 240 °C。载气为 N_2 ,流速是 1 mL/min;进样量 1 μL 。样品单糖组成根据单糖标准品出峰面积比来计算单糖摩尔百分比。

1.2.4 米糠 SDF 的抗氧化活性分析

将米糠 SDF 用蒸馏水配成 1 mg/mL 溶液,通过 DPPH 自由基清除能力、亚铁离子还原能力 (FRAP)、ABTS⁺ 自由基清除率测定其抗氧化活性。

1.2.4.1 DPPH 自由基清除能力

测定参照 Xu 等^[17]的方法。将 DPPH 用无水乙醇溶解,将不同的米糠 SDF 进行等梯度稀释(使 DPPH 清除能力介于 20%~80%),分别取稀释后的样品 0.2 mL 加入 2.8 mL DPPH 试剂,并避光反应 30 min,在 515 nm 波长下测吸光度,并测定空白对照组。DPPH 自由基清除能力用以下等式计算:

$$B = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

B——自由基清除率, %;

A_1 ——样品的吸光值;

A_0 ——空白对照的吸光值。

1.2.4.2 亚铁离子还原能力 (FRAP)

测定参照 Benzie 等^[18]的方法。FRAP 工作液的配制:取 25 mL 300 mmol/L 醋酸盐溶液 (3.1 g $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 16 mL CH_3COOH 溶于 1 L 缓冲液 (pH 值 3.6)、2.5 mL 的 10 mmol/L TPTZ 溶液 (3.12 g TPTZ 溶解于 1 L 40 mmol/L HCl) 和 2.5 mL 的 20 mmol/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液混匀后在 37 °C 温育后待用。取 0.09 mL 稀释的 SDF 溶解液与 2 mL FRAP 工作液混合混匀,室温避光静置反应 30 min。在 593 nm 测定吸光值。使用 Trolox 作为标准化合物,FRAP 的结果以每 g 干基 SDF 中所含的 Trolox 当量表示,即 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 。

1.2.4.3 ABTS⁺ 自由基清除能力

采用南京建成科技有限公司试剂盒测定。取 10 μL 1 mg/mL 的 SDF,加入 170 μL ABTS 工作液和 20 μL 过氧化物酶应用液,反应 6 min,在 405 nm 下测定吸光度值,并使用 Trolox 作标准化合物,ABTS 结果以每

克干基SDF中所含的Trolox 当量表示,即 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 。

1.3 数据分析

所有实验均重复3次,结果表示为平均值 \pm 标准偏差,使用SPSS 20.0统计软件进行ANOVA单因素方差分析,使用Origin Pro 9软件作图。

2 结果与讨论

2.1 不同加工方式对米糠SDF含量的影响

DRB经不同加工方式处理后其SDF含量变化如图1。为了消除不同加工处理后的米糠因水分含量差异对结果的影响,本研究中SDF含量均以样品干质量计。经挤压膨化、米根霉发酵、米根霉发酵-挤压膨化处理,DRB中SDF含量分别提高了51.49%、108.63%、118.15% ($P<0.05$)。FEDRB与FDRB中SDF含量最高,分别为7.33%和7.01%,均显著性高于EDRB (5.09%)。Qiao等^[19]研究发现挤压蒸煮处理米糠后,其IDF含量降低,SDF含量增加,并推测是由于高温挤压蒸煮处理有效地破坏纤维分子之间的糖苷键,将大分子IDF转化为小分子SDF。麦麸中也发现IDF转化成SDF这一结果^[20]。此外,有研究发现,真菌和乳酸菌发酵均能显著提高豆渣中SDF的含量^[21]。这与本研究结果一致。根霉菌发酵-挤压膨化处理较单独的根霉菌发酵处理,其米糠SDF含量无显著性差异,这可能是由于霉菌纤维素酶对IDF的降解作用明显强于挤压膨化这一物理作用,米糠经根霉菌发酵处理后,其IDF大幅度降解为SDF,以致根霉菌发酵的米糠再经过挤压膨化处理并没有进一步显著促进其IDF的降解。这与根霉菌发酵米糠后,其SDF的增幅较挤压膨化处理增加37.70%的结果相一致。

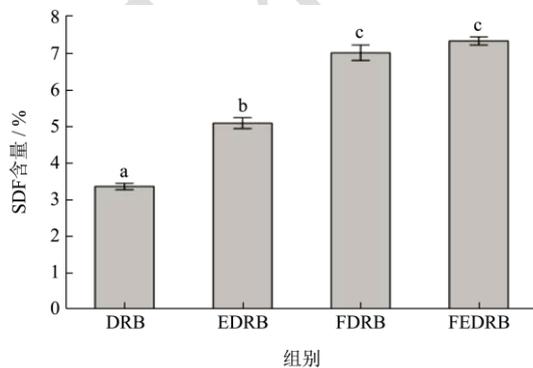


图1 不同加工方式处理米糠SDF的含量(%)

Fig.1 The content of rice bran SDF processed by different processing methods (%)

注:柱面上标注字母不同时,表示各组之间差异达到显著水平($P<0.05$),下同。

2.2 不同加工方式对米糠SDF结构特征的影响

2.2.1 米糠SDF的微观结构

不同加工方式得到的米糠SDF的微观结构如图2所示。在50 \times 扫描倍数下,4种米糠SDF均呈现大小不一的“木屑”状。在1200 \times 扫描倍数下,USDF呈致密的块状,表面可见大小不一的褶皱,整体较为光滑。与USDF相比,ESDF、FSDF和FESDF的微观结构被破坏,其中ESDF和FSDF呈现蜂窝状,但FSDF的孔隙明显小于ESDF。FESDF则呈现由细小颗粒聚集而成的立体结构,表面较粗糙,有大量缝隙和孔洞,结构较前3者更为蓬松,提示其可能具有更大的比表面积。这些结果与之前的研究一致^[9,23]。由此可知,挤压膨化、米根霉发酵、米根霉发酵-挤压膨化处理使米糠SDF微观结构改变,可能促使SDF聚合度降低,暴露更多的极性和非极性基团,有助于提高其溶解度、保水能力及抗氧化活性等功能特性^[22]。

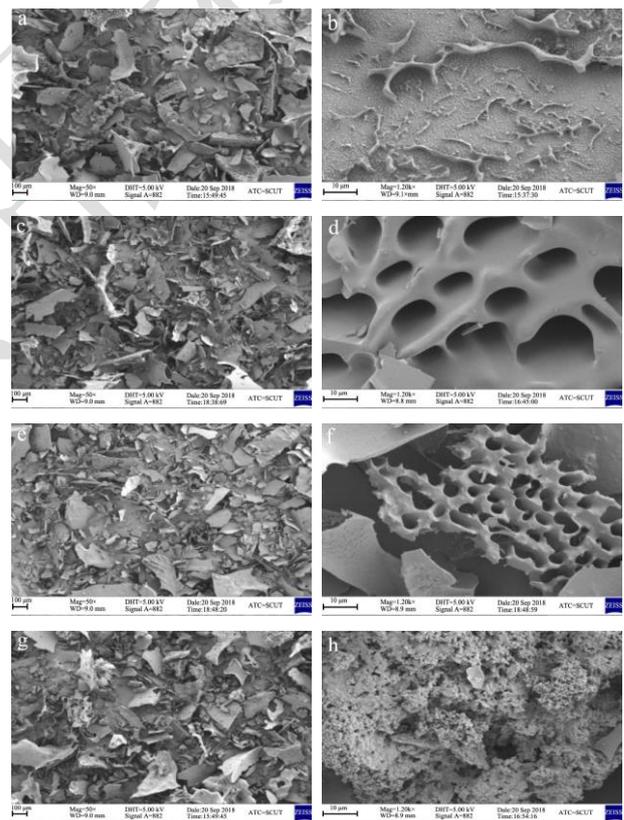


图2 不同加工方式处理米糠SDF的微观结构

Fig.2 Microstructure of rice bran SDF processed by different processing methods

注:a, b: USDF; c, d: ESDF; e, f: FSDF; g, h: FESDF。

a, c, e, g为50 \times , b, d, f, h为1200 \times 。

2.2.2 米糠SDF的红外光谱特征

FT-IR光谱用于表征物质的化学官能团。不同加工方式处理的米糠SDF红外光谱如图3所示。4种SDF

虽具有相似的特征吸收峰，但其吸收峰强度存在一定差异。在 $3\ 371\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰表示纤维素、半纤维素中 O-H 键的收缩与振动，与 USDF 相比，ESDF、FSDF 和 FESDF 在 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰强度均不同程度的降低，提示挤压膨化和发酵处理，尤其是二者联合处理可以促进纤维素和半纤维素的分解，这个过程可能会增加官能团的暴露，导致其物理和化学性质发生变化^[19]。 $2\ 900\sim 2\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 附近是糖类亚甲基 C-H 键的收缩与振动， $1\ 658\ \text{cm}^{-1}$ 附近是糖醛酸 C=O 的特征吸收峰^[23]， $1\ 405\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰为 C-H 振动，代表芳香族木质素基团， $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 附近是半纤维素中 C-O、C-C 和 C-O-C 的收缩振动^[24]。米糠 SDF 的红外光谱具有纤维素类多糖的特征吸收峰，不同加工方式处理的米糠 SDF 的官能基团比较相似，但因不同加工方法破坏其官能团的程度有所不同，使它们的吸收强度存在一定的差异，造成不同 SDF 结构发生了变化。

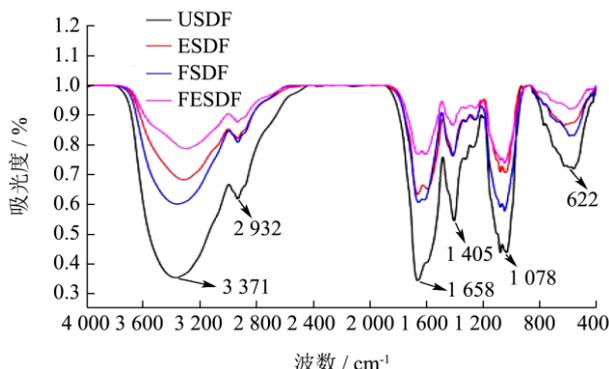


图3 不同加工方式处理米糠 SDF 的红外光谱图

Fig.3 FT-IR spectra of rice bran SDF processed by different processing methods

2.2.3 米糠 SDF 的分子量分布

SDF 的理化功能性质与其分子量之间存在密切关系^[25]，通常情况下，分子量低的 SDF 显示出较好的溶解性，较低的粘度和较高的生理功能^[26]。本研究采用凝胶渗透色谱 (GPC) 法分析不同加工方式对米糠 SDF 分子量的影响，结果见表 1。与 USDF 相比，挤压膨化、

米根霉发酵及二者联合处理均可明显降低米糠 SDF 的分子量，其中 ESDF 的分子量最小，FSDF 和 FESDF 其次。结果表明挤压膨化和米根霉发酵可以使可溶性纤维中分子链断裂，导致链长度变短，进而降低其分子量，这与不同加工方式下米糠的 SDF 红外光谱特征提示其化学结构可能发生了变化的结果相一致。前人的研究中也发现了类似的现象，Li 等^[27]研究发现豆腐渣经高压灭菌锅热处理后，可使细胞破裂导致 SDF 中的大分子降解，SDF 的分子量降低。本研究中单独的米根霉发酵和挤压膨化处理对米糠 SDF 分子量降低效果强于二者联合处理，其具体原因有待进一步研究。

表 1 米糠 SDF 的分子量

不同加工方式	USDF	ESDF	FSDF	FESDF
重均分子量/u	58 823	17 702	19 845	27 210

2.2.4 米糠 SDF 的单糖组成

通过 GC-MS 进一步分析不同加工方式对米糠 SDF 单糖组成的影响，结果如表 2 所示。4 种 SDF 主要由葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖组成，摩尔质量占比 74.31%~96.17%，还含有少量的鼠李糖、木糖和甘露糖，而岩藻糖只在 FSDF 和 FESDF 中检出，提示米根霉发酵米糠可使其 SDF 产生岩藻糖结构片段，这与前人^[28]的研究结果一致。葡萄糖是纤维素的主要成分，与 USDF 相比，ESDF 单糖组成中葡萄糖的占比显著提升，说明挤压膨化处理可促进纤维素的水解，导致 ESDF 的单糖组成含量发生变化^[23]，与 Qiao 等^[25]的研究结果一致。此外，米根霉发酵和米根霉发酵-挤压膨化处理均能有效地提高米糠 SDF 中鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖和半乳糖的含量比例，这些糖是形成果胶支链的主要单糖，果胶是细胞壁的特征性多糖^[29]。而米根霉发酵处理中米糠 SDF 葡萄糖含量显著降低，主要原因是发酵过程微生物消耗了葡萄糖。Jia 等^[9]研究发现发酵增加了米糠 SDF 的葡萄糖醛酸含量并且改变了 SDF 单糖组成的比例。

表 2 不同加工方式处理米糠 SDF 的单糖组成 (%)

Table 2 Monosaccharide composition of rice bran SDF processed by different processing methods (%)

单糖种类	USDF	ESDF	FSDF	FESDF
鼠李糖	0.86±0.00 ^b	0.42±0.00 ^{a*}	1.60±0.03 ^c	1.86±0.06 ^d
岩藻糖	ND	ND	3.07±0.10 ^a	3.70±0.19 ^b
阿拉伯糖	11.15±0.25 ^b	4.34±0.01 ^a	13.10±0.21 ^c	18.09±0.39 ^d
木糖	3.33±0.17 ^b	0.88±0.01 ^a	6.35±0.06 ^c	10.18±0.31 ^d
甘露糖	6.25±0.12 ^b	2.50±0.03 ^a	7.50±0.17 ^c	10.08±0.20 ^d
葡萄糖	66.14±0.21 ^c	87.60±0.31 ^d	54.17±0.91 ^b	40.70±0.20 ^a
半乳糖	12.29±0.28 ^b	4.23±0.05 ^a	14.27±0.28 ^c	15.52±0.12 ^d

注：ND 表示未检测到；同一行数字旁字母完全不同时，表示不同组间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同加工技术对米糠 SDF 体外抗氧化活性的影响

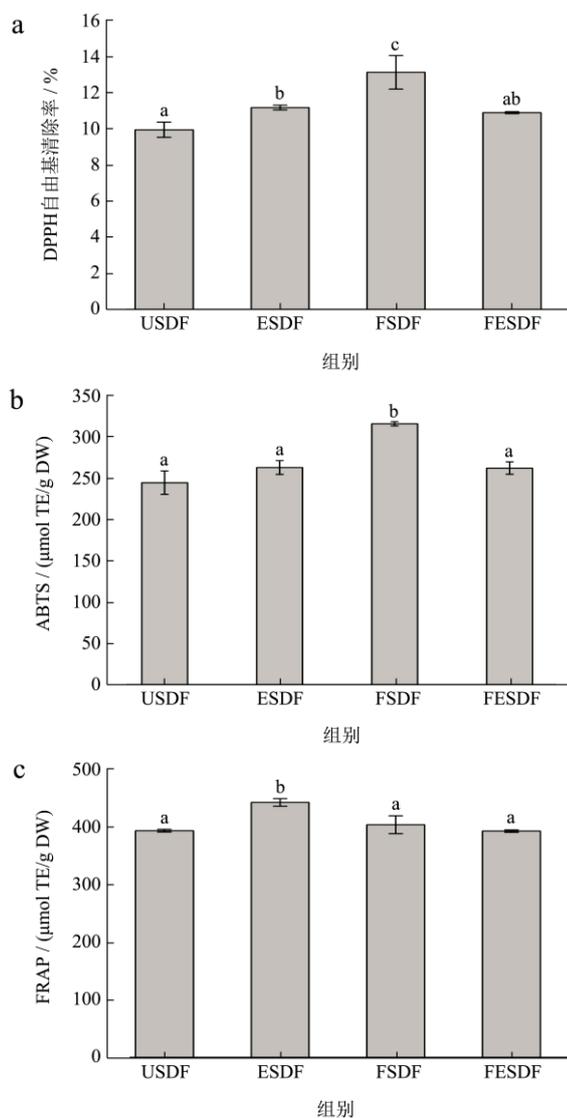


图4 不同加工方式下米糠 SDF 的 DPPH (a)、ABTS (b) 和 FRAP (c) 抗氧化活性

Fig.4 The DPPH, ABTS and FRAP antioxidant activity of rice bran SDF processed by different processing methods

活性氧自由基与多种慢性疾病的发生发展有关, 抗氧化剂能够有效的清除体内自由基, 减轻其对机体的损伤^[30]。本研究采用 DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力和亚铁离子还原能力 (FRAP) 评价了不同加工方式米糠中 SDF 的抗氧化能力, 结果如图 3 所示。由图 3a 可知, FSDF 的 DPPH 自由基清除活性 (13.12%) 最强 ($P < 0.05$), 其次是 ESDF (11.17%), FESDF (10.89%) 与 USDF (9.94%) 最低。由图 3b 可知, ESDF (262.48 $\mu\text{mol TE/g DW}$) 与 FESDF

(261.72 $\mu\text{mol TE/g DW}$) 的 ABTS 自由基清除活性与 USDF (244.12 $\mu\text{mol TE/g DW}$) 相当, 均显著低于 FSDF (315.28 $\mu\text{mol TE/g DW}$)。由图 3c 可知, FSDF (404.03 $\mu\text{mol TE/g DW}$) 与 FESDF (392.90 $\mu\text{mol TE/g DW}$) 的 FRAP 抗氧化活性与 USDF (393.73 $\mu\text{mol TE/g DW}$) 相当, 显著低于 ESDF (442.69 $\mu\text{mol TE/g DW}$)。由此可知, 挤压膨化和米根霉发酵米糠均能提高其 SDF 的抗氧化活性, 但二者联合处理米糠对其 SDF 抗氧化活性无显著影响, 其中米根霉发酵处理提高其抗氧化活性能力最强。Aguilar-garcia 等^[31]研究发现, 根据所测定的对象不同, FRAP、DPPH 和 ABTS 抗氧化能力的结果可能存在差异, 主要是因不同抗氧化剂对米糠敏感性不同而使抗氧化活性结果产生差异。Margeti 等^[32]研究发现经过真菌氧化和水解酶处理制备的 SDF 比未处理的 SDF 表现出高达 20 倍的抗氧化活性 (ABTS 和 DPPH 抗氧化活性)。Li 等^[27]的研究发现经过挤压膨化改性后的 SDF 的 DPPH 和 FRAP 抗氧化活性能力有提高。我们的研究结果与之前的报道一致, 表明米根霉发酵和挤压膨化处理可以提高 SDF 的抗氧化活性。本研究结果表明米糠 SDF 是良好的抗氧化剂, 且发酵处理对米糠 SDF 的抗氧化活性进一步提高, 有利于 SDF 高值化利用。

3 结论

挤压膨化、米根霉发酵及米根霉发酵-挤压膨化处理米糠影响其 SDF 含量、结构与抗氧化性。经这 3 种方式处理后米糠 SDF 的含量显著提高, SDF 含量依次为 FEDRB > FDRB > EDRB。与未处理的 SDF 相比, 这三种 SDF 微观结构更为疏松多孔, 其中 FSDF 的孔隙小于 ESDF, FESDF 结构较前 3 者更为蓬松。3 种加工方式能显著降低其分子量, 其中 ESDF 的分子量最小, FSDF 和 FESDF 其次。红外光谱显示 4 种米糠 SDF 具有相似的特征吸收峰, 但其吸收峰强度存在一定差异。与未处理的米糠 SDF 相比, 米根霉发酵及其联合挤压膨化处理米糠 SDF 出现岩藻糖的结构片段, 且鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖和半乳糖含量比例显著提高, 而挤压膨化处理米糠 SDF 葡萄糖占比升高。抗氧化性方面, 挤压膨化和米根霉发酵米糠均能提高其 SDF 的抗氧化活性, 但二者联合处理米糠对其 SDF 抗氧化活性无显著影响。综上所述, 米根霉发酵较其它 2 种加工方式更能提高米糠 SDF 含量及其抗氧化活性。本研究结果可为米糠 SDF 的制备及高值化利用提供一定的理论依据, 但是关于加工方式对米糠 SDF 的理化性质和功能活性的影响有待于进一步深入研究。

参考文献

- [1] 谢凤英,赵玉莹,雷宇宸,等.超高压均质处理的米糠膳食纤维对面筋蛋白结构的影响[J].中国食品学报,2020,20(11): 115-121.
- [2] A Demirci T, B Akta K, C Szeri D, et al. Rice bran improve probiotic viability in yoghurt and provide added antioxidative benefits [J]. Journal of Functional Foods, 2017, 36: 396-403.
- [3] Moongngarm A, Daomukda N, Khumpika S. Chemical compositions, phytochemical, and antioxidant capacity of rice bran, rice bran layer, and rice germ [J]. Apcbee Procedia, 2012, 2: 73-79.
- [4] Liu L, Wen W, Zhang R F, et al. Complex enzyme hydrolysis releases antioxidative phenolics from rice bran [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 1-8.
- [5] Chen Y, Ma Y, Dong L, et al. Extrusion and fungal fermentation change the profile and antioxidant activity of free and bound phenolics in rice bran together with the phenolic bioaccessibility [J]. LWT- Food Science and Technology, 2019, 115: 108461.
- [6] Zha X, Wang J, Yang X, et al. Antioxidant properties of polysaccharide fractions with different molecular mass extracted with hot-water from rice bran [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3): 570-575.
- [7] 王忠合,钟丽娟.麦麸活性多糖的提取、组成及其抗氧化活性研究[J].食品工业科技,2009,7(30):115-119.
- [8] 魏明,王晨,杨超英,等.酶法协同超声波提取米糠多糖及其抗氧化活性研究[J].中国油脂,2015,40(1):78-82.
- [9] Jia M, Chen J, Liu X, et al. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 468-474.
- [10] Tejada Ortigoza V, Garcia Amezquita L E, Campanella O H, et al. Extrusion effect on *in vitro* fecal fermentation of fruit peels used as dietary fiber sources [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 153: 112569.
- [11] 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.
- [12] Chen H, Zhao C, Li J, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of lotus root [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 93: 204-211.
- [13] Chu J, Zhao H, Lu Z, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto* [J]. Food Chemistry, 2019, 294: 79-86.
- [14] Schmidt C G, Goncalves L M, Prietto, et al. Antioxidant activity and enzyme inhibition of phenolic acids from fermented rice bran with fungus *Rizhopus oryzae* [J]. Food Chemistry, 2014, 146: 371-377.
- [15] Bunzel M, Ralph J, Kim H, et al. Sinapate dehydromers and sinapate-ferulate heterodimers in cereal dietary fiber [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(5): 1427-1434.
- [16] Huang F, Guo Y, Zhang R, et al. Effects of drying methods on physicochemical and immunomodulatory properties of polysaccharide-protein complexes from litchi pulp [J]. Molecules, 2014, 19(8): 12760-12776.
- [17] Xu G, Liu D, Chen J, et al. Juice components and antioxidant capacity of citrus varieties cultivated in China [J]. Food Chemistry, 2008, 106(2): 545-551.
- [18] Benzie I F F, Strain J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay [J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70-76.
- [19] Qiao C, Zeng F, Wu N, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107057.
- [20] Rashid S, Rakha A, Anjum F M, et al. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and water solubility index of wheat bran extrudates [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50(7): 1533-1537.
- [21] 李伟伟,曲俊雅,周才琼.真菌及乳酸菌联合发酵对豆渣膳食纤维及理化特性的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(11): 159-166.
- [22] Ma Q, Ma Z, Wang W, et al. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient - Dietary fiber extracted from potato residue [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 153: 112511.
- [23] Li S, Hu N, ZHU J, et al. Influence of modification methods on physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from corn bran [J]. Food Chemistry, 2022, 14: 100298.
- [24] Dong W, Wang D, Hu R, et al. Chemical composition, structural and functional properties of soluble dietary fiber obtained from coffee peel using different extraction methods [J]. Food Research International, 2020, 136: 109497.
- [25] Qiao H, Shao H, Zheng X, et al. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion [J]. Food Chemistry, 2021, 335:

- 127522.
- [26] 曹龙奎,康丽君,寇芳,等.改性前后小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性[J].食品科学,2018,39(11): 46-52.
- [27] Li S, Chen G, Qiang S, et al. Intensifying soluble dietary fiber production and properties of soybean curd residue via autoclaving treatment [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, 7: 100203.
- [28] Xiao M, Ren X, Yu Y, et al. Fucose-containing bacterial exopolysaccharides: Sources, biological activities, and food applications [J]. *Food Chemistry*, 2022, 13: 100233.
- [29] Feng Z, Dou W, Alaxi S, et al. Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 94-101.
- [30] Devasagayam T, Tilak J C, Boloor K K, et al. Free radicals and antioxidants in human health: current status and future prospects [J]. *Journal of Association of Physicians of India*, 2004, 52: 794-798.
- [31] Aguilar-garcia C, Gavino G, Baragano-mosoueda M, et al. Correlation of tocopherol, tocotrienol, γ -oryzanol and total polyphenol content in rice bran with different antioxidant capacity assays [J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(4): 1228-1232.
- [32] Margetić A, Stojanović S, Ristović M, et al. Fungal oxidative and hydrolyzing enzymes as designers in the biological production of dietary fibers from triticale [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 145(1): 111291.