

李珊珊, 张桂芳, 张东杰, 等. 小米麸皮不同前处理方式对其可溶性膳食纤维结构及理化性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 230–239. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040286

LI Shanshan, ZHANG Guifang, ZHANG Dongjie, et al. Effects of Different Pretreatment Methods on the Structure and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber from Millet Bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 230–239. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040286

· 工艺技术 ·

# 小米麸皮不同前处理方式对其可溶性膳食纤维结构及理化性质的影响

李珊珊<sup>1</sup>, 张桂芳<sup>1,2,3</sup>, 张东杰<sup>1,2,3,\*</sup>, 周航庆<sup>1</sup>, 李莹<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 朱蓉<sup>1</sup>

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江省大庆 163319;

3.黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:** 为探究不同前处理方式对小米麸皮可溶性膳食纤维 (Soluble dietary fiber, SDF) 结构及理化性质的影响, 实现其高值化利用。本研究以小米麸皮为原料, SDF 得率为指标, 借助单因素和正交试验确定不同处理方法 (超声波、超微粉碎、超声波-超微粉碎联用) 的最佳前处理条件; 通过检测小米麸皮 SDF 的单糖组成、相对分子质量分布、红外光谱、内部颗粒结构、微观形貌、热重、持水力、持油力、膨胀力和溶解力等指标, 分析不同处理方法对小米麸皮 SDF 结构和理化特性的影响。结果表明, 在粉碎粒径为 800 目, 料液比为 1:40 (g/mL)、超声功率为 330 W、超声时间为 50 min 的条件下, 小米麸皮 SDF 得率最高为 20.44%±0.17%, 得率提升 2.68 倍。相较于普通粉碎, 超声波、超微粉碎以及两者联用改变了小米麸皮 SDF 的单糖组分相对含量, 两者联用增加高分子量组分的占比至 45.42%, 使其晶体表面形成既疏松又多孔的结构, 最大程度地降低其有序性和热稳定性。同时理化性质分析表明, 超声波-超微粉碎联用对小米麸皮 SDF 的持水力、持油力、膨胀力及溶解力具有显著提高效果 ( $P<0.05$ )。因此, 超声波和超微粉碎联合处理通过改善其结构提升理化性质, 从而提高小米麸皮 SDF 的加工性能, 增加其潜在利用价值。

**关键词:** 小米麸皮, 可溶性膳食纤维, 结构表征, 理化性质

中图分类号: TS205.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2026)09-0230-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040286



本文网刊:

## Effects of Different Pretreatment Methods on the Structure and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber from Millet Bran

LI Shanshan<sup>1</sup>, ZHANG Guifang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Dongjie<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHOU Hangqing<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, ZHU Rong<sup>1</sup>

(1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2.National Coarse Cereal Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

3.Key Laboratory of Agro-products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Provincial, Daqing 163319, China)

**Abstract:** To explore the effects of different pretreatment methods on the structure and physicochemical properties of soluble dietary fiber (SDF) from millet bran and to achieve its high-value utilization. This study used millet bran as the raw material and SDF yield as the indicator. Single-factor and orthogonal experiments were employed to determine the optimal

收稿日期: 2025-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2025YFD2100402); 庆雁人才支持计划项目 (DQLY202401); 黑龙江省杂粮生产与加工优势特色学科项目 (2022-78); 黑龙江八一农垦大学学术成果与人才引进研究启动项目 (XDB202306)。

作者简介: 李珊珊 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: 2224063414@qq.com。

\* 通信作者: 张东杰 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品质量与安全, E-mail: byndzj@126.com。

pretreatment conditions for the different pretreatment methods (ultrasound, superfine grinding, and ultrasound-superfine grinding combination). The effects of different treatment methods on the structure and physicochemical characteristics of millet bran SDF were analyzed by measuring indicators such as monosaccharide composition, molecular weight distribution, infrared spectra, internal particle structure, micro-morphology, thermogravimetric, water holding capacity, oil holding capacity, swelling capacity, and solubility. The results showed that under the conditions of grinding particle size of 800 mesh, solid-liquid ratio of 1:40 (g/mL), ultrasonic power of 330 W, and ultrasonic time of 50 min, the highest SDF yield of millet bran reached  $20.44\% \pm 0.17\%$ , representing a 2.68-fold increase in yield. Compared with conventional grinding, ultrasound, and superfine grinding, their combination altered the relative content of monosaccharide components in millet bran SDF. The combination of both methods increased the proportion of high molecular weight components to 45.42%, forming a loose and porous structure on the crystal surface, and had the most obvious effect on reducing its orderliness and thermal stability. Meanwhile, analysis of physicochemical characteristics indicated that the ultrasound-superfine grinding combination significantly improved the water-holding capacity, oil-holding capacity, swelling capacity, and solubility of millet bran SDF ( $P < 0.05$ ). Therefore, the combined treatment of ultrasound and superfine grinding enhances the physicochemical characteristics by improving its structure, thereby improving the processing performance and increasing the potential utilization value of millet bran SDF.

**Key words:** millet bran; soluble dietary fiber; structural characterization; physicochemical characteristics

小米麸皮是小米加工过程中的副产物,富含蛋白质、脂肪、矿物质、维生素、纤维素和半纤维素等营养物质,其膳食纤维(Dietary fiber, DF)含量达50%~60%<sup>[1]</sup>,根据DF的溶解特性可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)<sup>[2]</sup>。研究表明,SDF具有调节肠道蠕动节律,改善便秘或腹泻等肠道功能异常问题;调节肠道菌群平衡;能够降低血糖与胆固醇浓度,预防肥胖;减少胰岛素的分泌量等生物活性<sup>[3-5]</sup>。因其具有优良的生理功能与生理活性,成为研究热点。小米麸皮是一种优质天然SDF的来源,具有极高的加工潜力。目前仅有小部分小米麸皮被用来制作动物饲料,绝大部分小米麸皮被丢弃,造成环境污染和资源浪费,其合理开发利用对提高农产品附加值、减少资源浪费具有重大意义<sup>[6]</sup>。

目前国内外提取SDF的方法主要包括物理法、化学法和生物酶法,物理方法提取效率低,不适合工业化生产,化学方法虽然操作简单,成本低,但易降低SDF的品质,并造成化学试剂残留,生物酶法作为一种温和、高效且具有高度选择性的方法,在SDF制备中占据重要地位<sup>[7]</sup>。近年来,超声波、超微粉碎等新兴技术应运而生,并展现出独特优势。超声波技术凭借其空化效应、机械效应等,能在短时间内破坏植物细胞壁结构,打开通道,加速细胞内物质的溶出,提高SDF得率<sup>[8]</sup>。此外,超声波技术还可分解多糖的复杂结构,诱导-OH、-COOH等极性基团暴露,减弱表面疏水性,改善功能和理化性质<sup>[9]</sup>。超微粉碎技术则可减小物料粒径,将物料细化至微米甚至纳米级别,极大地增加物料的比表面积,提高得率及改善物化性质<sup>[10]</sup>。将超声波、超微粉碎预处理方法与酶法有机结合,有望进一步提高小米麸皮SDF的得率,改善其理化特性。深入探究超声波-超微粉碎-酶法制备的小米麸皮SDF的理化特性,如溶解性、持水性、膨胀性等,以及对其结构进行精准表征,包括微观形

态、化学组成、分子结构等方面,不仅可为小米麸皮的高值化利用提供坚实的理论支撑,还能为功能性食品配料的开发开辟新路径。

本研究在传统酶法提取工艺基础上,应用4种物理前处理方式,包括普通粉碎、超声波处理、超微粉碎以及超声波与超微粉碎的联合处理,以小米麸皮SDF得率为指标,通过单因素实验和正交试验,确定最佳前处理条件。运用光谱分析、液相色谱及显微观察等多种现代技术手段,从分子结构、理化性能、微观形态等多个层面与角度,系统且全面地剖析不同前处理方式对小米麸皮SDF的理化特性及结构表征产生的影响。该研究旨在通过科学实验数据,为小米麸皮资源的高值化开发与综合利用提供扎实的实验依据和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

小米麸皮 黑龙江省大庆市肇州县托古小米厂;耐高温 $\alpha$ -淀粉酶(40 U/mg)、中性蛋白酶(50 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(10万 U/mg) 上海麦克林生化科技股份有限公司;石油醚、无水乙醇 辽宁泉瑞试剂有限公司;溴化钾(光谱纯) 天津市科密欧化学试剂有限公司;实验所用试剂均为分析纯。

WZJ-6 BI 低温振动式超微粉碎机 济南倍力粉体工程技术有限公司;RE-52 AA 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;SHZ-D(III)循环水式真空泵 巩义市予华仪器有限公司;KDN-18 全自动凯氏定氮仪 上海纤检仪器有限公司;Pro-4055 真空冷冻干燥机 南京金实仪器设备有限公司;SB 25-12 DTD 超声波清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司;Agilent 1100 高效液相色谱仪 美国安捷伦科技有限公司;ICS 3000 离子色谱仪 美国戴安公司;Nicoletis 50 傅立叶变换红外光谱仪 美国赛默飞世尔科技公司;XRD-6100X 射线衍射仪 日本岛津

公司;SU 8600 冷场发射扫描电镜 配有 ultimax 40 牛津能谱分析仪,日本日立公司;STA 2500 A-0048 同步热分析仪、NETZSCH 3500 差示扫描量热仪 德国耐驰公司;Waters 2695 高效液相色谱仪(配 2410 示差折光检测器和 Empower 工作站) 美国沃特世公司。

## 1.2 实验方法

1.2.1 小米麸皮 SDF 的制备 脱脂处理:取一定质量的小米麸皮,加入料液比 1:5(g/mL)的石油醚,在 25 °C 条件下浸泡 60 min,通过真空抽滤收集滤渣,重复脱脂操作 3 次,并用 90% 乙醇洗净残留石油醚后干燥。

小米麸皮 SDF 提取方法:参考张荣等<sup>[11]</sup>的方法,并略作修改,取一定量脱脂小米麸皮(按 5.00 g 计),进行不同方法的前处理(普通粉碎、超声波、超微粉碎、超声波-超微粉碎),加入一定比例的去离子水,使用 1 mol/L HCl 和 1 mol/L NaOH 溶液将体系 pH 调节至 5.5;加入 0.50 g 耐高温  $\alpha$ -淀粉酶,在 95 °C 水浴条件下反应 40 min,以碘液检测至体系不变蓝,表明淀粉水解完全;将体系 pH 调至 7.0,加入 0.50 g 中性蛋白酶,于 45 °C 水浴反应 60 min;将体系 pH 调节至 4.5,加入 0.50 mL 淀粉葡萄糖苷酶,在 63 °C 水浴中反应 50 min。酶解反应结束后,沸水浴 15 min 灭酶。冷却至室温,超滤,离心(4000 r/min, 20 min),取上清液旋转蒸发浓缩至原体积的 1/4,加入 4 倍体积的 95% 乙醇溶液于 4 °C 沉淀 12 h,离心(4000 r/min, 20 min),收集沉淀并冷冻干燥 24 h,制得小米麸皮 SDF。

1.2.1.1 小米麸皮 SDF 得率计算 参照国标 GB 5009.88-2023 测不同粒径小米麸皮 SDF 含量,按公式(1)计算小米麸皮 SDF 得率。

$$R(\%) = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中:R 为小米麸皮 SDF 的得率,%;  $m_1$  为干燥后的小米麸皮 SDF 质量,g;  $m_0$  为脱脂小米麸皮样品的质量,g。

### 1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 粒径对小米麸皮 SDF 得率的影响 将脱脂小米麸皮在 4 °C 条件下,粉碎分别过 50、100、200、400 和 800 目筛,分别取相同质量的小米麸皮,加入料液比为 1:30(g/mL)的去离子水,置于超声波清洗仪中,调节功率为 420 W,清洗时间为 30 min,采用 1.2.1 的提取方法,探究粒径对小米麸皮 SDF 得率的影响。

1.2.2.2 料液比对小米麸皮 SDF 得率的影响 称取 5 份等质量 800 目的脱脂小米麸皮,分别加入料液比为 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50(g/mL)的离子水,置于超声波清洗仪中,调节功率为 420 W,清洗时间为 30 min,采用 1.2.1 的提取方法,探究料液比对小

米麸皮 SDF 得率的影响。

1.2.2.3 超声功率对小米麸皮 SDF 得率的影响 称取 6 份等量 800 目的脱脂小米麸皮,加入料液比为 1:40(g/mL)的去离子水,置于超声波清洗仪中,调节功率分别为 0、240、330、420、510 和 600 W,温度为 30 °C,清洗 30 min,采用 1.2.1 的提取方法,探究超声功率对小米麸皮 SDF 得率的影响。

1.2.2.4 超声时间对小米麸皮 SDF 得率的影响 称取 6 份等量 800 目的脱脂小米麸皮,加入料液比为 1:40(g/mL)的去离子水,置于超声波清洗仪中,调节温度为 30 °C,功率为 420 W,清洗时间为 0、20、30、40、50 和 60 min,采用 1.2.1 的提取方法,探究超声时间对小米麸皮 SDF 得率的影响。

1.2.3 小米麸皮 SDF 提取条件优化正交试验 参考匡燕等<sup>[12]</sup>的方法,略作修改,基于单因素实验结果,以小米麸皮 SDF 得率为指标,选取液料比、超声功率和超声时间 3 个因素进行正交试验设计,确定最优前处理条件。正交试验因素水平设计参照表 1。

表 1 正交试验因素水平设计  
Table 1 Factor level design of orthogonal test

因素水平	A 料液比(g/mL)	B 超声功率(W)	C 超声时间(min)	D 空白
1	1:20	330	40	1
2	1:30	420	50	2
3	1:40	510	60	3

### 1.2.4 不同前处理条件对小米麸皮 SDF 得率的影响

基于正交试验结果,对小米麸皮进行普通粉碎(50 目,过筛)、超声波(50 目,过筛,超声功率为 330 W,超声时间为 50 min)、超微粉碎(800 目,过筛)、超声波联合超微粉碎(800 目,过筛,超声功率为 330 W,超声时间为 50 min)处理,采用 1.2.1 的提取方法,制备小米麸皮 SDF。得到基于超声波处理条件下的小米麸皮 SDF(U-MSDF)、基于超微粉碎处理条件下的小米麸皮 SDF(S-MSDF)、基于超声波联合超微粉碎处理条件下的小米麸皮 SDF(SU-MSDF),以及普通粉碎处理条件下的小米麸皮 SDF(MSDF),探究四种处理方法对小米麸皮 SDF 得率的影响。

1.2.5 单糖组分分析 参考马定远等<sup>[13]</sup>的方法,略作修改,具体方法如下。

标准品配制:精密称取适量甘露糖、核糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、岩藻糖等标准品,加水溶解至各标准品质量浓度为 50  $\mu\text{g/mL}$ 。

衍生化标记:将待测样品置于 1 mL 具塞试管中,向干燥的试管中依次加入 20  $\mu\text{L}$  1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮溶液(0.5 mol/L 甲醇溶液)和 20  $\mu\text{L}$  氢氧化钠溶液(0.3 mol/L)混匀后置于 70 °C 水浴 30 min,室温放置 10 min;再加入 25  $\mu\text{L}$  盐酸溶液(0.3 mol/L)中和,混匀后用 0.5 mL 乙酸异戊酯萃取,涡旋 2 min,

离心(6000 r/min, 10 min), 弃去有机层, 重复操作三次, 上清液用于高效液相色谱分析。

色谱条件: 色谱柱为 Hypersil BOS-C<sub>18</sub>(5 μm, 250×4 mm, Hewlett-Packard); 柱温为 30 ℃; 流速为 1.0 mL/min; 流动相为溶剂 A: 15%(V/V) 乙腈+50 mmol/L 磷酸缓冲液(pH6.9), 溶剂 B: 40%(V/V) 乙腈+50 mmol/L 磷酸缓冲液(pH6.9); 时间梯度为 0 min→9 min→25 min, 对应溶剂 B 浓度梯度为 0%→10%→55%; 检测波长为 250 nm; 进样体积为 20 μL。

样品的水解: 精密称取样品 1.5 g 至 5 mL 安瓿中, 加入 2.0 mL 2 mol/L 三氟乙酸溶液, 封管, 110 ℃ 酸解 2 h, 干燥箱挥干三氟乙酸, 加 2.0 mL 水复溶。

1.2.6 相对分子质量分布分析 称取 60.00 mg 小米麸皮 SDF 于 10 mL 容量瓶, 用流动相溶解后定容。

高效液相色谱条件<sup>[14]</sup>: 检测器为示差折光检测器; 色谱柱为 Waters Ultrahydrogel TM Linear (7.8 mm×300 mm); 流动相为 NaNO<sub>3</sub> 溶液(0.1 mol/L); 流速为 0.5 mL/min; 柱温为 40 ℃; 进样量为 20 μL。

1.2.7 傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)分析 参考 XING 等<sup>[15]</sup>方法, 分别称取 2.00 mg 小米麸皮 SDF 样品与 200 mg KBr 充分混匀, 研磨均匀后, 压片, 在 4000~500 cm<sup>-1</sup> 波数范围内进行扫描。

1.2.8 X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱分析 参考 SANG 等<sup>[16]</sup>方法, 取适量的 SDF 在稳定的 X 射线下测定, 测试条件的加速电压为 40 kV, 衍射角范围为 10°~80°, 扫描速度为 10°/min。

1.2.9 扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)分析 参考 ZHOU 等<sup>[17]</sup>方法, SDF 喷金后, 在加速电压为 10 kV、放大倍数为 500、1000、20000 下观察小米麸皮 SDF 形貌图像。

1.2.10 热重(Thermogravimetric, TG)分析 参考 DU 等<sup>[18]</sup>的方法, 取样品 5.00~8.00 mg 装入氧化铝坩埚, 在氮气的保护作用下, 以 10 ℃/min 的升温速率, 在 35~600 ℃ 范围内进行分析。

1.2.11 持水力测定 参考 ZHANG 等<sup>[19]</sup>方法, 分别称取 0.20 g 小米麸皮 SDF 样品与 20 mL 蒸馏水充分混匀, 室温下静置 2 h, 离心 10 min(5000 r/min), 弃去上清液, 收集沉淀物称重。持水力计算如公式(2)所示:

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{m_1 - m}{m} \quad \text{式(2)}$$

式中: m 为样品干重, g; m<sub>1</sub> 为样品吸水后湿重, g。

1.2.12 持油力测定 参考 LIU 等<sup>[20]</sup>方法, 分别称取 0.10 g 小米麸皮 SDF 样品与 5.00 g 玉米油充分

混匀, 室温下静置 2 h, 离心 30 min(8000 r/min), 弃去上清液, 收集沉淀物称重。持油力计算如公式(3)所示:

$$\text{持油力(g/g)} = \frac{m_1 - m}{m} \quad \text{式(3)}$$

式中: m 为样品干重, g; m<sub>1</sub> 为样品吸油后湿重, g。

1.2.13 膨胀力测定 参考 YANG 等<sup>[21]</sup>方法, 分别称取 0.10 g 小米麸皮 SDF 样品与 5 mL 蒸馏水充分混匀, 记录体积, 25 ℃ 静置 24 h, 记录膨胀后体积。膨胀力计算如公式(4)所示:

$$\text{膨胀力(mL/g)} = \frac{V_1 - V}{m} \quad \text{式(4)}$$

式中: m 为样品质量, g; V 为干样体积, mL; V<sub>1</sub> 为样品膨胀后体积, mL。

1.2.14 溶解力测定 参考 XIONG 等<sup>[22]</sup>方法, 称取 0.10 g 小米麸皮 SDF 样品与 5 mL 蒸馏水充分混匀, 再于 90 ℃ 水浴 1 h, 冷却, 离心 10 min(8000 r/min)。上清液倒入蒸发皿中, 105 ℃ 烘干至恒重。溶解力计算如公式(5)所示:

$$\text{溶解力(\%)} = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中: m 为样品质量, g; m<sub>0</sub> 为蒸发皿质量, g; m<sub>1</sub> 为蒸发皿与样品上清液恒重之和, g。

### 1.3 数据处理

所有实验均进行 3 次重复, 实验数据采用平均值±标准差表示; 使用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析, P<0.05 为差异显著; 采用 DesignExpert13.0 软件和 Origin10.1 软件进行数据分析和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果分析

由图 1a 可知, 小米麸皮 SDF 得率随着粉碎粒径的减小, 呈现逐渐增大的趋势。这可能是由于超微粉碎强大的机械力破坏小米麸皮结构, 使分子链发生断裂和熔断现象<sup>[23]</sup>, 同时极大地增加了小米麸皮的比表面积, 促使 IDF 转变为 SDF, 当粉碎粒径达到 800 目时, 小米麸皮 SDF 得率最高为 15.30%, 考虑到实验成本, 且 800 目已达超微粉标准, 因此后续正交试验, 选用 800 目的小米麸皮作为原料。

由图 1b 可知, 小米麸皮 SDF 得率随着料液比升高, 呈现先增加后减小的趋势。料液比主要是通过影响体系内的传质推动力进而影响得率。增大料液比在一定程度上会加大传质推动力, 使得物料与溶剂充分接触<sup>[24]</sup>, SDF 得率显著提高(P<0.05); 但随着料液比的持续增加, 体系中原料与酶液被进一步稀释, 分子相互作用力减弱, 反应速率降低, 得率也逐渐降低。当料液比为 1:40(g/mL)时, 小米麸皮 SDF 得率最高, 为 16.67%。考虑到后续试验需要大量乙醇沉淀, 液体量越大, 成本越高, 因此, 在后续正交试验中, 料液比的水平选择 1:20、1:30 和 1:40(g/mL)。

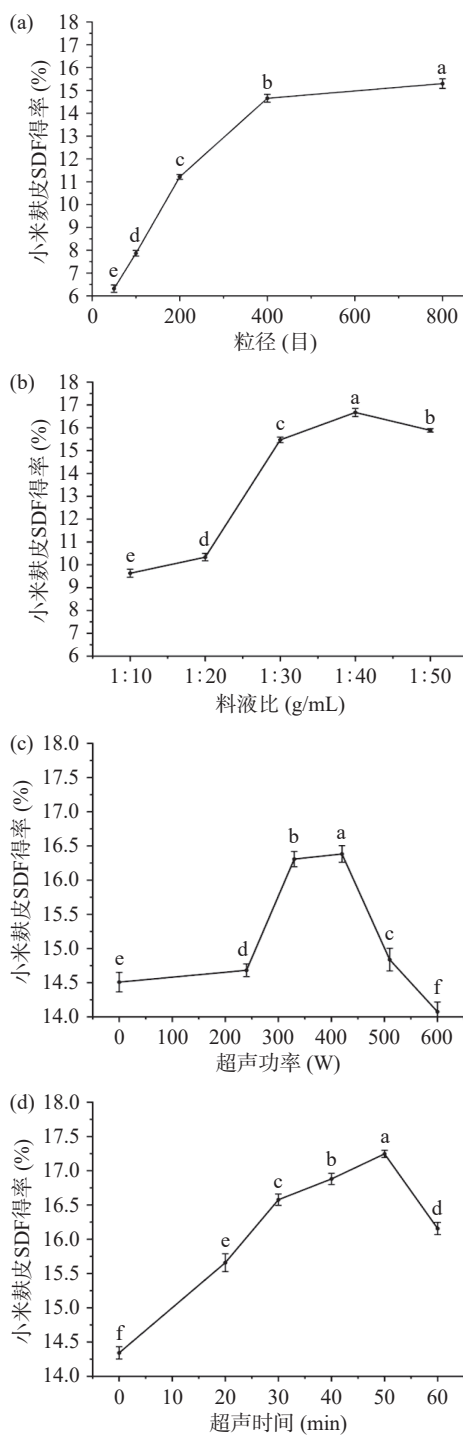


图1 粒径(a)、料液比(b)、超声功率(c)和超声时间(d)对小米麸皮 SDF 得率的影响

Fig.1 Effects of particle size (a), solid-to-liquid ratio (b), ultrasonic power (c) and ultrasonication time (d) on the yield of SDF from millet bran

注: 不同小写字母表示有显著差异( $P < 0.05$ ), 图2、图8同。

由图 1c 可知, 随着超声功率的升高, 小米麸皮 SDF 得率呈现先逐渐增大后下降的趋势, 这可能是由于随着功率的增加, 超声波产生的空化气泡破裂能量增强, 破坏细胞组织, 使小米麸皮 SDF 溶出, 当超声功率超过临界值持续增大时, 机械效应过强, 破坏了小米麸皮 SDF 的结构, 导致得率下降<sup>[25]</sup>, 当超声功率为 420 W 时, 小米麸皮 SDF 得率最高, 为 16.38%。

因此, 在后续正交试验中, 超声功率水平选择 330、420 和 510 W。

由图 1d 可知, 随着超声时间延长, 小米麸皮 SDF 得率呈现先增大后下降的趋势, 这可能是因为, 开始阶段超声波对细胞壁的剪切作用和产生的热量上升, 小米麸皮 SDF 快速溶出, 当作用力过强时, 超声波产生的巨大的机械力导致小米麸皮 SDF 结构被破坏, 导致得率显著( $P < 0.05$ )下降<sup>[26]</sup>, 当超声时间为 50 min 时, 小米麸皮 SDF 得率最大, 为 17.25%。因此, 在后续正交试验中, 超声时间水平选择 40、50、60 min。

### 2.2 正交试验结果

根据单因素实验结果, 选用正交表  $L_9(3^4)$  设计试验, 具体因素及水平设计见表 1, 试验方案及结果见表 2。

表2  $L_9(3^4)$ 正交试验方案及结果  
Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal test scheme and results

试验号	A	B	C	D(空白)	SDF得率(%)
1	1	1	1	1	13.67
2	1	2	2	2	14.11
3	1	3	3	3	13.59
4	2	1	2	3	16.89
5	2	2	3	1	16.43
6	2	3	1	2	16.29
7	3	1	3	2	20.03
8	3	2	1	3	19.82
9	3	3	2	1	20.38
$K_1$	41.38	50.60	49.80	50.49	
$K_2$	49.62	50.37	51.38	50.44	
$K_3$	60.24	50.27	50.05	50.31	
$k_1$	13.79	16.87	16.60	16.83	
$k_2$	16.54	16.79	17.13	16.81	
$k_3$	20.08	16.76	16.68	16.77	
R	6.29	0.11	0.53	0.06	

根据极差分析结果可得, 影响小米麸皮 SDF 得率的主次顺序为: A(料液比) $>$ C(超声时间) $>$ B(超声功率)。由 K 值得到小米麸皮 SDF 的最佳前处理参数组合为  $A_3B_1C_2$ , 由于该最优组合未在正交表中, 应进行验证实验, 验证结果显示, 在最优工艺参数条件下, 小米麸皮 SDF 得率最高, 达到 20.54%, 显著高于其他组别, 说明数据可靠。因此, 小米麸皮 SDF 的最佳前处理条件为: 料液比为 1:40(g/mL), 超声功率为 330 W, 超声时间为 50 min。

### 2.3 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 得率的影响

如图 2 所示, 小米麸皮 SDF 得率分别为 SU-MSDF(20.44% $\pm$ 0.17%)、S-MSDF(14.43% $\pm$ 0.21%)、U-MSDF(11.58% $\pm$ 0.25%)、MSDF(7.63% $\pm$ 0.17%), 超微粉碎和超声波单一处理的小米麸皮 SDF 得率均能显著( $P < 0.05$ )提升, 这可能是由于超声波和超微粉碎强大的机械力和剪切力将小米麸皮中 IDF 转化为小米麸皮 SDF<sup>[27]</sup>, 尤其是 SU-MSDF, 得率高达 20.44% $\pm$ 0.17%, 显著( $P < 0.05$ )高于 MSDF、S-MSDF

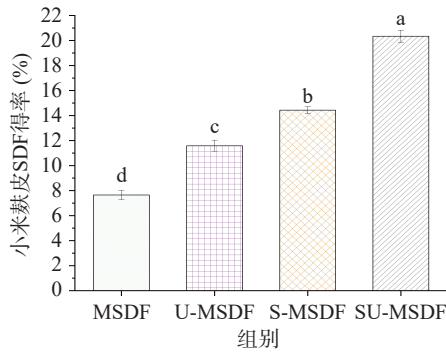


图 2 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 得率的影响

Fig.2 Effects of different pretreatment methods on the SDF yield of millet bran

和 U-MSDF。结果表明超微粉碎联合超声波辅助酶法是一种较好的前处理方法。

### 2.4 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 结构的影响

2.4.1 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 单糖组分的影响 单糖组成与 SDF 的理化、功能性质密切相关<sup>[28]</sup>。表 3 为不同前处理条件下小米麸皮 SDF 的单糖含量。由表 3 结果可得,小米麸皮 SDF 为杂多糖,4 种前处理方式得到的 SDF 单糖组成相同,均检出 12 种单糖。果胶的典型组成成分为半乳糖、半乳糖醛酸和鼠李糖,半纤维素的组成成分主要包括阿拉伯糖、木糖、葡萄糖和甘露糖<sup>[29]</sup>,小米麸皮 SDF 中含有的单糖种类,表明果胶和半纤维素可能是小米麸皮 SDF 的主要组成成分。虽然处理方式均未改变单糖种类,但引起了单糖组成相对含量的改变,具体表现为经处理后的小米麸皮 SDF 甘露糖与半乳糖醛酸含量减少,而葡萄糖及阿拉伯糖含量增加,其中甘露糖与阿拉伯糖的含量变化尤为显著( $P<0.05$ )。处理方式对单糖组成相对含量的影响由高到低依次为: SU-MSDF>S-MSDF>U-MSDF。由此推断,物理处理手段可通过破坏多糖分子链的糖苷键连接或空间

表 3 不同前处理方式下小米麸皮 SDF 的单糖组成及含量

Table 3 Monosaccharide composition and content of SDF in millet bran under different pretreatment methods

种类	分组			
	MSDF	U-MSDF	S-MSDF	SU-MSDF
甘露糖	25.40±0.53 <sup>a</sup>	18.34±0.40 <sup>b</sup>	10.46±0.17 <sup>c</sup>	7.59±0.23 <sup>d</sup>
氨基葡萄糖	2.43±0.04 <sup>b</sup>	3.24±0.11 <sup>a</sup>	2.09±0.05 <sup>c</sup>	2.07±0.06 <sup>e</sup>
核糖	1.55±0.02 <sup>c</sup>	2.12±0.05 <sup>a</sup>	1.94±0.07 <sup>b</sup>	1.68±0.05 <sup>e</sup>
鼠李糖	2.45±0.07 <sup>b</sup>	2.11±0.01 <sup>c</sup>	2.65±0.02 <sup>a</sup>	2.66±0.05 <sup>a</sup>
葡萄糖醛酸	2.52±0.06 <sup>a</sup>	1.74±0.07 <sup>c</sup>	2.22±0.12 <sup>b</sup>	2.33±0.03 <sup>ab</sup>
半乳糖醛酸	5.55±0.10 <sup>a</sup>	2.35±0.07 <sup>c</sup>	2.56±0.29 <sup>c</sup>	2.86±0.02 <sup>b</sup>
氨基半乳糖	0.20±0.01 <sup>a</sup>	0.20±0.03 <sup>a</sup>	0.17±0.06 <sup>a</sup>	0.17±0.04 <sup>a</sup>
葡萄糖	12.79±0.58 <sup>b</sup>	16.20±0.60 <sup>a</sup>	15.30±0.17 <sup>a</sup>	15.90±0.27 <sup>a</sup>
半乳糖	21.96±0.55 <sup>a</sup>	19.72±0.28 <sup>b</sup>	21.36±0.39 <sup>a</sup>	21.39±0.23 <sup>a</sup>
木糖	5.60±0.11 <sup>b</sup>	5.23±0.20 <sup>b</sup>	11.69±0.15 <sup>a</sup>	12.56±0.14 <sup>a</sup>
阿拉伯糖	18.85±0.73 <sup>b</sup>	27.91±0.52 <sup>a</sup>	28.68±0.39 <sup>a</sup>	29.87±1.08 <sup>a</sup>
岩藻糖	0.70±0.02 <sup>a</sup>	0.83±0.01 <sup>a</sup>	0.91±0.02 <sup>a</sup>	0.91±0.04 <sup>a</sup>

注:表中数据表示各组成单糖的百分比,不同字母表示不同条件下小米麸皮 SDF 单糖含量差异显著( $P<0.05$ )。

构象,促使特定单糖残基的暴露或释放,进而引起单糖组成比例的重构,其中机械力与空化效应的协同作用对其解构效率最为显著。

2.4.2 不同前处理方式对小米麸皮的相对分子质量分布的影响 图 3 显示,4 种 SDF 凝胶柱洗脱曲线均有 2 个洗脱峰,MSDF 由 22.124 kDa(73.84%)和 356.443 kDa(26.16%)组成,U-MSDF 由 21.852 kDa(71.46%)和 363.481 kDa(28.54%)组成,S-MSDF 由 21.983 kDa(62.75%)和 405.332 kDa(37.25%)组成,

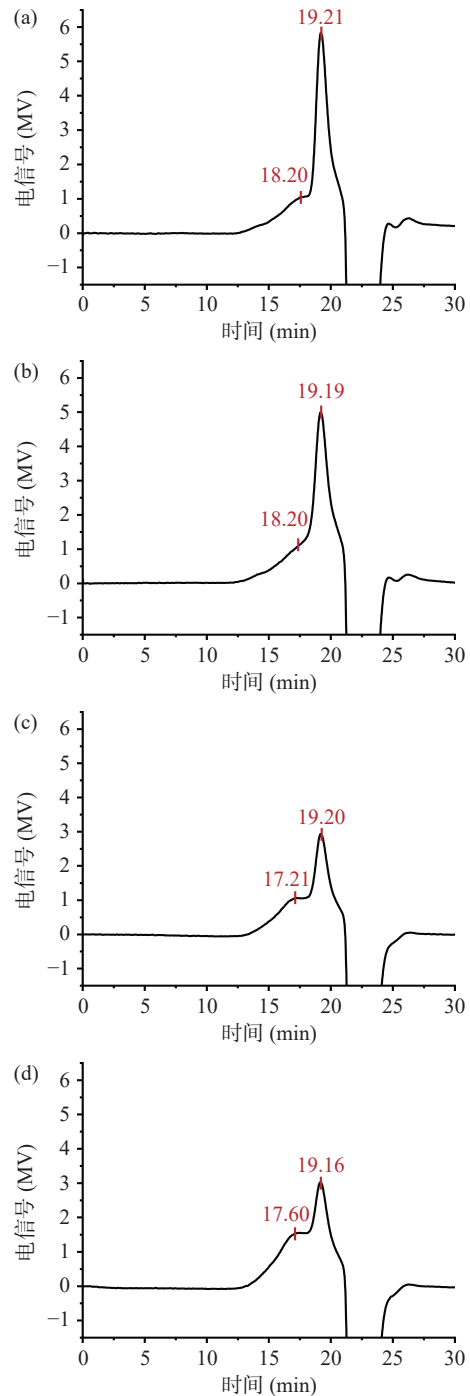


图 3 不同前处理方式下小米麸皮 SDF 的凝胶色谱图

Fig.3 Gel chromatograms of millet bran SDF with different pretreatment methods

注: a: MSDF; b: U-MSDF; c: S-MSDF; d: SU-MSDF。

SU-MSDF 由 21.542 kDa(54.58%)和 387.772 kDa(45.42%)组成。与 MSDF 相比,其他三个处理组 SDF 高分子质量组分增加,其中 SU-MSDF 高分子质量组分占比最大,达到 45.42%。这可能是由于超声波和超微粉碎利用强大的机械力和剪切力,使小米麸皮中的 IDF 转化为 SDF<sup>[30]</sup>,而两者联合则会加强其作用力,破坏 IDF 结构,使更多的 SDF 溶出。由此可知,不同的前处理方法对小米麸皮 SDF 的相对分子质量分布产生较大的影响。

**2.4.3 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 红外光谱的影响** 如图 4 可知,4 种 SDF 在 4000~500 cm<sup>-1</sup> 范围内均有多糖的特征吸收峰,FT-IR 光谱特征相似,但吸收峰强度有差异,说明前处理条件不同对小米麸皮 SDF 的结构有一定的影响。在 3399 cm<sup>-1</sup> 附近出现宽而强的吸收峰,主要来自纤维素和半纤维素的-OH 拉伸<sup>[31]</sup>。2938 cm<sup>-1</sup> 处有较弱的吸收峰,是 C-H 在甲基和亚甲基上伸缩振动引起的,是多糖类物质典型特征吸收峰<sup>[32]</sup>。1654 cm<sup>-1</sup> 附近的峰是 COOR 和 COO-的 C=O 的伸缩振动吸收峰,其含有糖醛酸,这是由于果胶中半乳糖醛酸作用所致<sup>[33]</sup>,相较于 MSDF,其他 3 个处理组 SDF 吸收峰强度减弱,这与单糖组分测定中,不同前处理条件会导致半乳糖醛酸含量减少结果一致。1322~1543 cm<sup>-1</sup> 处的弱峰是典型的 C-H 键的变角振动峰<sup>[34]</sup>。1108 cm<sup>-1</sup> 附近的吸收峰是由纤维素和半纤维素 C-O-C 中 C-O 拉伸振动产生,表明 4 种 SDF 均存在木聚糖和阿拉伯糖。此外 823 cm<sup>-1</sup> 是吡喃 β 型 C-H 弯曲振动的特征吸收峰<sup>[35]</sup>。

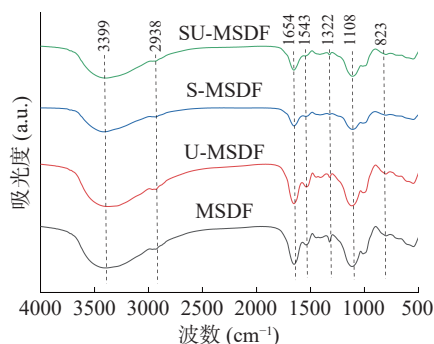


图 4 不同前处理方式下小米麸皮 SDF 的 FT-IR 光谱图  
Fig.4 FT-IR spectra of millet bran SDF under different pretreatment methods

**2.4.4 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 内部颗粒结构的影响** XRD 可检测样品内部颗粒的结构变化。由图 5 可知,4 种 SDF 的衍射图谱均呈现较为弥散的峰形,未出现尖锐的强衍射峰,表明 4 个处理组可能均具有较低的结晶度,都是由大部分无序的半纤维素、纤维素非结晶区域构成的<sup>[36]</sup>。与 MSDF 相比,其他处理组小米麸皮 SDF 衍射图谱的强度和峰形均有变化,在 2θ 约为 31.92°(S-MSDF)和 31.94°(MSDF)处出现了相对明显的衍射峰,而 SU-MSDF 和 U-

MSDF 在此处峰形更弥散。经过 OriginPro2022 软件计算出相对结晶度, SU-MSDF(24.23%)<U-MSDF(25.85%)<S-MSDF(26.43%)<MSDF(28.49%)。SU-MSDF 的衍射强度在整体范围内相对较低且更平滑,说明超声波协同超微粉碎处理对小米麸皮 SDF 结构的破坏或无序化程度较高。这些变化可能与处理过程中对小米麸皮 SDF 的物理作用(如机械力、空化效应等)改变了样品内部的原子或分子排列有关。有研究表明,具有较低结晶度的 SDF 通常表现出较好的持水性、持油性和吸附能力<sup>[37]</sup>。

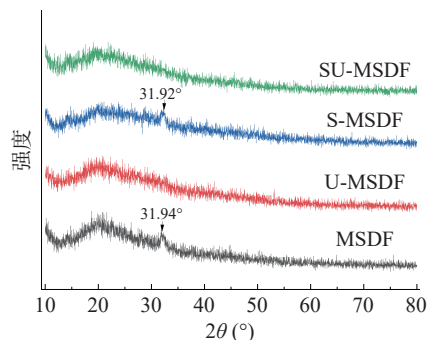


图 5 不同前处理方式下小米麸皮 SDF 的 X-射线衍射图  
Fig.5 X-ray diffraction patterns of wheat bran SDF under different pretreatment methods

**2.4.5 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 表面形貌的影响** 表面形貌表征了有机材料的特征,并定义了其物理和化学性质。表面微观结构也是表征聚合物的重要工具。如图 6 所示,从左到右,依次是在 500×、1000×、20000×下的小米麸皮 SDF 微观结构,膳食纤维的微观形态不仅与其自身特性有关,还可能与不同的提取方法有关<sup>[30]</sup>。观察扫描电镜图可知,U-MSDF 表面粗糙度增加,出现不规则凸起与凹陷,结构致密性降低,颗粒边界开始模糊,表现出初步破碎迹象;S-

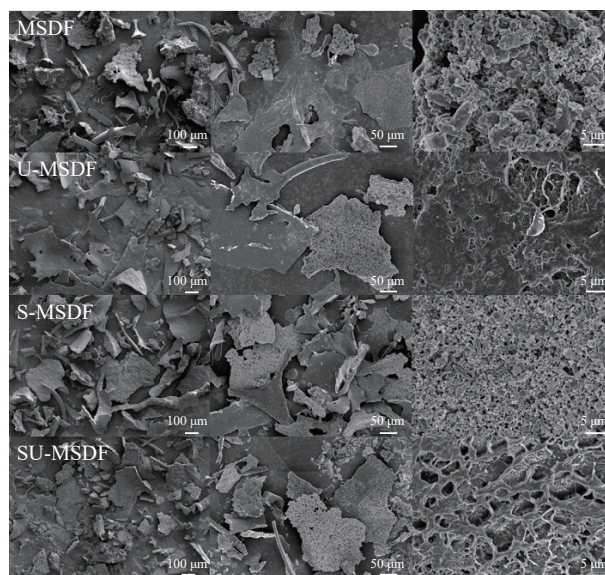


图 6 不同前处理方式下小米麸皮 SDF 的扫描电镜图  
Fig.6 Scanning electron microscope images of millet bran SDF under different pretreatment methods

MSDF 颗粒显著细化为碎片状,表面孔隙数量增多,结构疏松度提升,颗粒间连接松散且粒径差异明显;SU-MSDF 几乎难以分辨出明显的大颗粒,多为细小的、相互交织的结构单元。这种微观结构特征变化的主要原因可能是超声波的空化效应和超微粉碎的机械力作用,破坏了小米麸皮 SDF 原有的结构,使表面变得粗糙、孔隙增多、颗粒细化,两者联合作用更明显<sup>[38-39]</sup>,这些结构变化可能对样品的物理化学性质产生重要影响。

2.4.6 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 热重的影响

热重分析可用于表征物质的热稳定性和组分的热分解。如图 7 所示,4 个处理组的热重曲线均表现出相同的热分解趋势,起始失重温度相近,都在 100 °C 左右开始失重,这可能是由于聚合物结构中的 C-C 和 C-O 键因解聚而断裂,从而形成 CO、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。在 244 °C 时,4 种 SDF 失重质量均在 13.76% 左右,表明 4 种 SDF 均有较好的热稳定性,可以有效地用于各种食品应用中<sup>[40]</sup>。在 600 °C 时 MSDF、U-MSDF、S-MSDF 和 SU-MSDF 的残留质量分别为 55.06%、53.57%、51.78% 和 50.26%,说明超声波和超微粉碎处理均会导致热稳定性降低,两者联合作用更明显,这可能是由于超声波、超微粉碎及两者联合处理可能破坏了小米麸皮 SDF 原有的分子间作用力和结构,使小米麸皮 SDF 结构变得疏松或碎片化<sup>[41]</sup>,改变了热重特性。这与扫描电镜、FT-IR 光谱及 X-射线衍射分析结果一致。

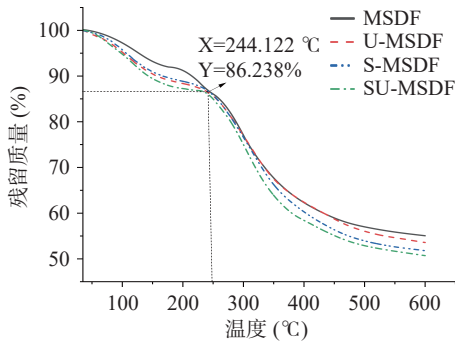


图 7 不同前处理方式下小米麸皮 SDF 的热重分析  
Fig.7 Thermogravimetric analysis of millet bran SDF under different pretreatment methods

2.4.7 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 理化性质的影响

超声和超微粉碎的剪切、空化、湍流等作用使 FT-IR 图谱中 U-MSDF、S-MSDF、SU-MSDF 的特征峰强度发生变化,XRD 图谱中 U-MSDF 和 SU-MSDF 尖锐衍射峰的消失,结晶度降低,改变了小米麸皮 SDF 结构,SEM 微观结构图也证实了这一点,SDF 独特的结构特性与其理化及功能性质紧密相关<sup>[42]</sup>,改变小米麸皮 SDF 结构,其理化性质也随之改变。图 8 结果表明,经过超声波、超微粉碎、两者联合应用处理后的小米麸皮 SDF 的持水力、持油力、膨胀力以及溶解力均有显著提升,超声波-超微粉碎

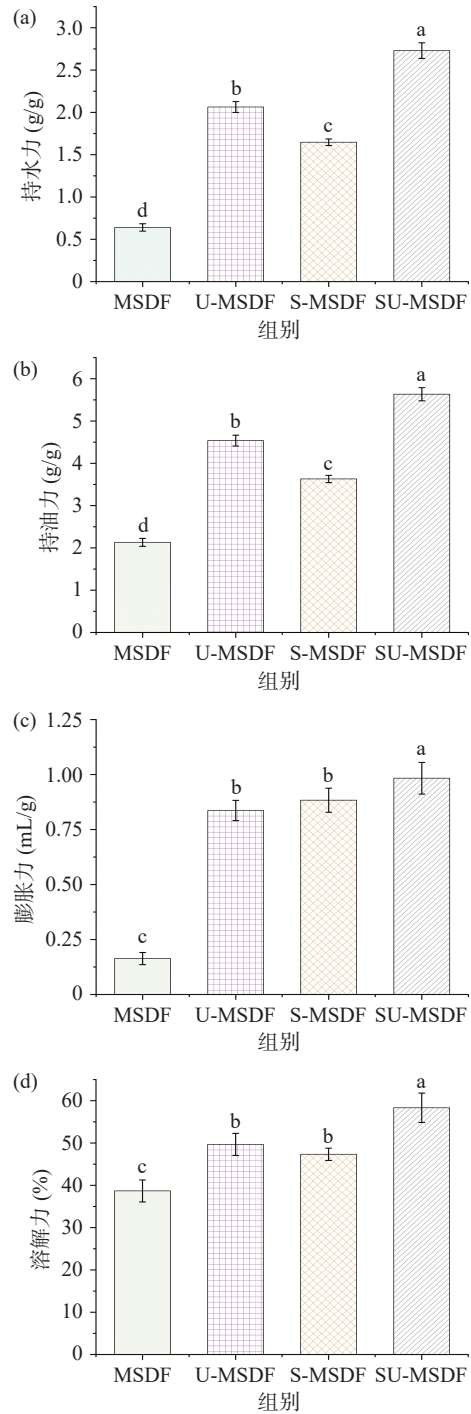


图 8 不同前处理方式对小米麸皮 SDF 持水力(a)、持油力(b)、膨胀力(c)、溶解力(d)的影响

Fig.8 Effects of different pretreatment methods on the water-holding capacity (a), oil-holding capacity (b), swelling capacity (c) and solubility (d) of millet bran SDF

联合应用处理效果最显著( $P < 0.05$ ),分别提升了 176.56%、86.97%、502.14%、50.84%。这可能是由于超声波处理使其暴露更多氢键和羟基,增加小米麸皮 SDF 的亲水性,调整了结晶区和非晶区之间的比例,使得水分子更容易进入 SDF 内部,提高持水力、持油力、膨胀力和溶解力<sup>[43]</sup>。超微粉碎减小了小米麸皮 SDF 的粒径、增大了比表面积,使其形成更加疏松多孔的结构,提高了其理化功能,两者具有协同作用。SEM 图中 SU-MSDF 结构松散多孔,使其暴

露了更多的亲水性基团(如极性基团和醛酸基团),吸附更多的油脂和水分,可以有效结合胆固醇,有助于使血液中胆固醇含量稳定在健康水平,并对健康产生积极作用<sup>[44]</sup>。研究表明,SDF的理化性质提高,例如持水力、持油力、膨胀力等,会增强肠道蠕动力、通便排毒,有助于缓解便秘和改善便秘症状<sup>[20,45]</sup>。

### 3 结论

本研究基于小米麸皮 SDF 展开研究,在单因素实验基础上,通过正交试验设计确定了最优的前处理工艺参数:粉碎粒径为 800 目,料液比为 1:40(g/mL),超声功率为 330 W,超声时间为 50 min。对比 4 种不同前处理方法,超声波与超微粉碎联用的处理方式,能够显著提高小米麸皮 SDF 的得率,效果优于其他单一处理方法。超声波-超微粉碎联用未改变小米麸皮 SDF 的单糖种类,但可破坏多糖分子链的糖苷键与空间构象,导致甘露糖、半乳糖醛酸含量下降,阿拉伯糖、葡萄糖、木糖含量显著上升;同时使小米麸皮 SDF 高分子质量组分比例提高、结晶度降低、微观结构疏松多孔、特征官能团吸收峰强度减弱,分子间作用力下降。上述结构改变使小米麸皮 SDF 暴露更多亲水基团,其持水力、持油力、膨胀力和溶解力较未处理组显著提升,且仍保持良好的热稳定性,可为小米麸皮膳食纤维的高效提取与高值化应用提供技术支撑。本研究仍存在一定局限性,对于小米麸皮 SDF 在分子层面的影响机制尚不明确,还有待后续研究进一步探索和揭示。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

[1] 韩秋敏,陆正清,黄小米中水溶性膳食纤维提取工艺[J]. 中国食品添加剂,2012,23(6):198-201. [HAN Qiumin, LU Zhengqing. Extraction processing of water-soluble dietary fiber from rice bran of millet[J]. China Food Additives, 2012, 23(6): 198-201.]

[2] ZHANG Wenjuan, LI Defa, LIU Ling, et al. The effects of dietary fiber level on nutrient digestibility in growing pigs[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2013, 4(1): 17.

[3] SUN Yujiao, LI Baobao, XUE Yuanye, et al. Comparison of immunomodulatory activity of polysaccharides and soluble dietary fibers and adsorption capacities of insoluble dietary fibers extracted from *Lentinus edodes* stipes[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2024, 6(1): 64.

[4] GUAN Chunmin, LUO Lijuan, WANG Qing, et al. Fabrication and characterization of dry rice noodles with low glycemic index by formulating with different soluble dietary fibers[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(12): 10093-10101.

[5] 李丽娟,师凤华,谭木秀,等.膳食纤维调节肠道菌群的作用机制研究进展[J]. 中国现代医生,2020,58(36):188-192. [LI Lijuan, SHI Fenghua, TAN Muxiu, et al. Progress in the mechanism of dietary fiber in regulating intestinal flora[J]. China Modern Doctor, 2020, 58(36): 188-192.]

[6] 朱仁威,黄亮,谭沙,等.米糠膳食纤维提取和改性及功能性

质的研究进展[J]. 粮食与油脂,2022,35(5):12-16. [ZHU Renwei, HUANG Liang, TAN Sha, et al. Research progress on extraction, modification and functional properties of rice bran dietary fiber[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(5): 12-16.]

[7] 张汪,时超,褚莹莹,等.米糠膳食纤维提取工艺的研究进展[J]. 食品工程,2016(4):1-3. [ZHANG Wang, SHI Chao, CHU Yingying, et al. Research of rice bran dietary fiber extraction process[J]. Food Engineering, 2016(4): 1-3.]

[8] SINGH P M K, DHAR P, BHAGYA RAJ G V S, et al. Effect of ultrasound assisted extraction of dietary fiber from pineapple peel and its application with anthocyanin rich black rice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17111.

[9] HASSAN Z, IMRAN M, AHMAD M H, et al. Ultrasound-assisted modification of insoluble dietary fiber from Chia (*Salvia hispanica* L.) seeds[J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021(1): 5035299.

[10] 钱珊珊,桂双英,杨满琴,等.中药超微粉碎技术的研究进展[J]. 陕西中医药大学学报,2019,42(3):136-140. [QIAN Shanshan, GUI Shuangying, YANG Manqin, et al. Research progress of superfine grinding technology of traditional Chinese medicine[J]. Journal of Shaanxi University of Chinese Medicine, 2019, 42(3): 136-140.]

[11] 张荣,任清,罗宇.小米可溶性膳食纤维提取及其理化性质分析[J]. 食品科学,2014,35(2):69-74. [ZHANG Rong, REN Qing, LUO Yu. Extraction of soluble dietary fiber from foxtail millet and analysis of its physical and chemical properties[J]. Food Science, 2014, 35(2): 69-74.]

[12] 匡燕,罗跃中,姚琦.超声辅助碱法提取脱脂米糠中膳食纤维[J]. 食品工程,2023(2):16-18,77. [KUANG Yan, LUO Yuezhong, YAO Qi. Extraction of dietary fiber from defatted rice bran by ultrasound assisted alkali method[J]. Food Engineering, 2023(2): 16-18,77.]

[13] 马定远,陈君,李萍,等.柱前衍生化高效液相色谱法分析多糖中的单糖组成[J]. 分析化学,2002,30(6):702-705. [MA Dingyuan, CHEN Jun, LI Ping, et al. Analysis of monosaccharide compositions in polysaccharides by pre-column derivatization high performance liquid chromatography[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2002, 30(6): 702-705.]

[14] 孙元琳,陕方,刘惠芳,等.黑小麦麦麸多糖的制备与分析[J]. 中国粮油学报,2010,25(6):94-97. [SUN Yuanlin, SHAN Fang, LIU Huifang, et al. Preparation and analysis of polysaccharides from black-grain wheat bran[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(6): 94-97.]

[15] XING Yunhao, ZHOU Yunmeng, KUANG Chuyu, et al. Structural, physicochemical and functional properties of dietary fibers from tea residue modified by steam explosion[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 7: 1326102.

[16] SANG Jiaqi, LI Lu, WEN Jing, et al. Evaluation of the structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber extracted from newhall navel orange by-products[J]. Foods, 2021, 10(11): 79-86.

[17] ZHOU Yadi, SUN Qijie, TENG Chao, et al. Preparation and improvement of physicochemical and functional properties of dietary fiber from corn cob fermented by *Aspergillus niger*[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2024, 34(2): 330-339.

[18] DU Xiaojing, WANG Li, HUANG Xin, et al. Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour[J]. LWT, 2021, 143: 111031.

[19] ZHANG Weimin, ZENG Guanglin, PAN Yonggui, et al. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction

- [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172: 102–112.
- [20] LIU Jie, WANG Zongwei, WANG Ziyuan, et al. Physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from different colored quinoa varieties (*Chenopodium quinoa* Willd)[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103045.
- [21] YANG Renhui, SONG Xinai, WANG Tongxin, et al. Superfine grinding combined with enzymatic modification of pea dietary fibre: Structures, physicochemical properties, hypoglycaemic functional properties, and antioxidant activities[J]. Lwt, 2024, 207: 116651.
- [22] XIONG Min, FENG Mei, CHEN Yanli, et al. Comparison on structure, properties and functions of pomegranate peel soluble dietary fiber extracted by different methods[J]. Food Chemistry, 2023, 19: 100827.
- [23] 周鑫. 超微粉碎对亚麻籽壳粉理化性质及功能特性的分析研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [ZHOU Xin. Study on the physicochemical properties and functional characteristics of flaxseed shell powder by superfine grinding[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]
- [24] 高一帆, 李若思, 吉莉, 等. 超声波辅助纤维素酶提取黄瓜皮色素工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 142–147. [GAO Yifan, LI Ruosi, JI Li, et al. Study on ultrasonic-assisted cellulase extraction of pigment from cucumber peel[J]. Food Research and Development, 2022, 43(11): 142–147.]
- [25] 马恺扬, 宋欣欣, 胡昕迪, 等. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 协同超声辅助提取绿豆可溶性膳食纤维及其体外  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(9): 90–95. [MA Kaiyang, SONG Xinxin, HU Xindi, et al. Study on the ultrasound assisted extraction of soluble dietary fiber from mung beans with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and its *in vitro*  $\alpha$ -glucosidase inhibitory activity[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(9): 90–95.]
- [26] 余祚庆, 彭飞, 俞禧, 等. 超声辅助复合酶法提取板栗仁中可溶性膳食纤维工艺优化及其结构表征[J]. 河北科技师范学院学报, 2024, 38(1): 48–54, 61. [YU Zuoqing, PENG Fei, YU Xi, et al. Optimization of ultrasonic-assisted composite enzyme extraction process for soluble dietary fiber in chestnut kernels and its structural characterization[J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2024, 38(1): 48–54, 61.]
- [27] ZHU Renwei, XU Tianhui, HE Bian, et al. Modification of artichoke dietary fiber by superfine grinding and high-pressure homogenization and its protection against cadmium poisoning in rats[J]. Foods, 2022, 11(12): 1716.
- [28] FILHO A M M, PIROZI M R, da SILVA BORGES J T, et al. Quinoa: Nutritional, functional, and antinutritional aspects[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(8): 1618–1630.
- [29] LI Na, FENG Ziqian, NIU Yuge, et al. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 557–565.
- [30] YANG Renhui, YE Ying, LIU Weiting, et al. Modification of pea dietary fibre by superfine grinding assisted enzymatic modification: Structural, physicochemical, and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131408.
- [31] 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 fiber of rice bran[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(6): 124–131.]
- [32] 李悦, 张钰, 张玉萍, 等. 汽爆对麦麸可溶性膳食纤维功能性质影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(11): 48–51. [LI Yue, ZHANG Yu, ZHANG Yuping, et al. Effect of steam explosion on the functional properties of soluble dietary fiber in wheat bran[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(11): 48–51.]
- [33] CHAHARBAGHI E, KHODAIYAN F, HOSSEINI S S. Optimization of pectin extraction from pistachio green hull as a new source[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 173: 107–113.
- [34] 魏诗召, 刘荟萃, 杨雨晨, 等. 乳酸菌固态发酵对青稞麸皮可溶性膳食纤维物理、结构及功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 11–20. [WEI Xuzhao, LIU Huicui, YANG Yuchen, et al. Effects of solid-state fermentation of lactic acid bacteria on the physical, structural and functional properties of soluble dietary fiber from highland barley bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 11–20.]
- [35] LIU Y, ZHANG B, IBRAHIM S A, et al. Purification, characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Flammulina velutipes* residue[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 145: 71–77.
- [36] OUYANG Huan, GUO Baoli, HU Yang, et al. Effect of ultrahigh pressure treatment on structural and functional properties of dietary fiber from pomelo fruitlets[J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102436.
- [37] QIN Xiaoting, DONG Xuewen, TANG Jie, 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.
- [38] WANG Lei, XU Honggao, YUAN Fang, et al. Preparation and physicochemical properties of soluble dietary fiber from orange peel assisted by steam explosion and dilute acid soaking[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 90–98.
- [39] WANG Weihao, QUAN Zhigang, KOU Fang, et al. Preparation and characterization of soluble dietary fiber from tiger nut residues, showing enhanced antioxidant activity and metal-ion-binding properties[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1275473.
- [40] BOUGATEF H, TANDIA F, SILA A, et al. Polysaccharides from baobab (*Adansonia digitata*) fruit pulp: Structural features and biological properties[J]. South African Journal of Botany, 2023, 157: 387–397.
- [41] 吴鸿亿, 黄玲冬, 刘奇, 等. 制备方法对高节竹笋头可溶性膳食纤维的理化与功能特性影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 258–266. [WU Hongyi, HUANG Lingdong, LIU Qi, et al. Effects of preparation methods on physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from *Phyllostachys prominens* bamboo shoot head[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 258–266.]
- [42] 李文远. 食用菌可溶性膳食纤维对人体肠道菌群的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021. [LI Wenyuan. Effects of soluble dietary fiber from edible fungi on human intestinal microflora[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.]
- [43] DICKINSON E. Hydrocolloids acting as emulsifying agents—How do they do it?[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 78: 2–14.
- [44] QIAO Hanzhen, SHAO Huimin, ZHENG Xiaojing, et al. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127522.
- [45] LIU Jie, WANG Zongwei, MAI Peishi, et al. Quinoa bran soluble dietary fiber ameliorates dextran sodium sulfate induced ulcerative colitis in BALB/c mice by maintaining intestinal barrier function and modulating gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 216: 75–85.