



中国粮油学报

Journal of the Chinese Cereals and Oils Association

ISSN 1003-0174, CN 11-2864/TS

《中国粮油学报》网络首发论文

题目：物理改性处理对小米水溶性膳食纤维理化性质及结构的影响
作者：魏春红，曾明霞，武云娇，赵姝婷，刘德志，王一飞，苏有韬，王维浩，张东杰，曹龙奎
收稿日期：2021-05-18
网络首发日期：2022-03-28
引用格式：魏春红，曾明霞，武云娇，赵姝婷，刘德志，王一飞，苏有韬，王维浩，张东杰，曹龙奎. 物理改性处理对小米水溶性膳食纤维理化性质及结构的影响[J/OL]. 中国粮油学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20220325.1046.020.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

物理改性处理对小米水溶性膳食纤维理化性质及结构的影响

魏春红¹ 曾明霞¹ 武云娇¹ 赵姝婷¹ 刘德志¹ 王一飞¹

苏有韬¹ 王维浩^{1,2} 张东杰¹ 曹龙奎^{1,2}

(黑龙江八一农垦大学食品学院¹, 大庆 163319)

(黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心², 大庆 163319)

摘要: 利用高温高压、蒸煮、超声 3 种手段分别对小米水溶性膳食纤维进行物理改性, 探究不同物理改性对小米水溶性膳食纤维的理化性质及结构的影响。结果表明, 改性后小米水溶性膳食纤维的化学基团无明显变化, 表面出现裂痕, 结构疏松多孔, 有团聚现象, 热稳定性上升, 持水力、水膨胀力、持油力、结合脂肪能力均得到提高, 其中经超声处理后四种能力提高最为显著 ($P<0.05$), 分别提高 101.82%、36.67%、63.86%、33.08%; 通过测定处理后的水溶性膳食纤维总抗氧化能力, 发现经超声处理后的水溶性膳食纤维总抗氧化能力较强 ($P<0.05$)。3 种物理改性手段均对小米水溶性膳食纤维的理化性质及结构特性具有一定影响, 其中经超声处理后的小米水溶性膳食纤维理化性质改善较明显。

关键词 小米 物理改性 水溶性膳食纤维 理化性质 结构特性

中图分类号: TS201 文献标志码: A

Effect of physical modification on physicochemical properties and structure of soluble dietary fiber of millet

Wei Chunhong¹ Zeng Mingxia¹ Wu Yunjiao¹ Zhao Shuting¹

Liu Dezhi¹ Wang Yifei¹ Su Youtao¹ Wang Weihao^{1,2}

Zhang Dongjie¹ Cao Longkui^{1,2}

(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University¹, Daqing 163319)

(Heilongjiang Farm Produce Processing Development Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University², Daqing 163319)

Abstract: Physical modification of soluble dietary fiber of millet was carried out by means of high temperature-high pressure, cooking and ultrasonic treatment, in order to explore the influence of different physical modification on the physical and chemical properties and structure of soluble dietary fiber of millet. The results show that the modified soluble dietary fiber from millet

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0206300); 黑龙江省优势特色学科资助项目([2018]4 号);

收稿日期: 2021-05-18

作者简介: 魏春红, 女, 1982 年出生, 博士, 农产品精深加工

通信作者: 曹龙奎, 男, 1965 年出生, 教授, 农产品加工

张东杰, 男, 1966 年出生, 教授, 食品安全

chemical group has no obvious change, surface crack, porous structure, has a reunion phenomenon, thermal stability, hold water, water expansion force, oil force, combined with fat ability are improved, which after ultrasonic treatment four ability to improve the most significant ($P<0.05$), respectively increased by 101.82%, 36.67%, 63.86%, 33.08%. By measuring the total antioxidant capacity of water-soluble dietary fiber after ultrasonic treatment, it was found that the total antioxidant capacity of the soluble dietary fiber of millet after ultrasonic treatment was stronger ($P<0.05$). The three physical modification methods have certain influence on the physical and chemical properties and structural characteristics of soluble dietary fiber of millet, among which the physical and chemical properties of soluble dietary fiber of millet after ultrasonic treatment are significantly improved.

Key words: millet; physical modification; soluble dietary fiber; physicochemical properties; structure

目前, 我国的杂粮种类与产量处于世界首位, 其中杂粮产量约占我国粮食总产量的 10%^[1], 约占世界杂粮总产量的 17%。在药用方面, 食用小米制品可以起到清热除湿、健脾养胃的作用, 对缺铁性贫血疾病具有预防作用^[2]。美国谷物化学家协会将膳食纤维定义为“一种在人体小肠抗消化、吸收, 在大肠完全或部分发酵的植物可食用组织或相似碳水化合物”^[3]。小米中膳食纤维含量丰富, 是大米中膳食纤维的 2.3 倍^[4]。通常根据水溶解性情况将膳食纤维(DF)分为水溶性膳食纤维(SDF)和水不溶性膳食纤维(IDF)两类。SDF 对于肠道疾病^[6]、调控血糖水平^[5]和胰岛素水平都具有良好作用。IDF 由于本身口感较粗糙, 不适合直接应用于食品工业中^[7], 因此 IDF 的生理功能低于 SDF, 但因天然膳食纤维中 IDF 的含量远高于 SDF, 所以可通过改性来提高 SDF 的含量与品质。

目前主要采用化学法、生物法、物理法和联合改性法等^[8]对膳食纤维进行改性。Su 等^[9]运用高压均质技术对柑桔皮膳食纤维进行改性, 发现改性后的膳食纤维理化性质得到改善。汪楠等^[10]运用高温蒸煮技术处理竹笋膳食纤维, 发现水不溶性膳食纤维可以转变为水溶性膳食纤维, 且改性后的膳食纤维持水力、膨胀力、持油力等方面均得到提高。超声主要是利用产生的剪切力、湍流作用等^[11], 使物料表层结构受到一定程度的破坏。沈蒙等^[12]运用超声-微波协同的方法提取黑豆皮当中的 SDF, 发现改性后的 SDF 物理性质得到改善与提高。

国内外针对于小米膳食纤维的研究主要集中于提取工艺的优化和理化性质的测定等方面^[13,14], 将 3 种方法对小米 SDF 进行改性并对比改性前后理化性质及结构鲜有报道。因此本研究利用高温高压技术、蒸煮技术、超声技术对小米 SDF 进行改性, 探究改性前后小米 SDF 的理化性质与结构特性, 为小米的功能性综合利用提供了参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

小米; 中性蛋白酶, α -耐高温淀粉酶, 淀粉葡萄糖苷酶; 95%乙醇(分析纯); 大豆油; 溴化钾(光谱级); 其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

GDE-CSF6 意大利 VELP 膳食纤维测定仪, DSC25 型差示扫描量热仪, Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪, SU8020 扫描电子显微镜, MLS-3781L-PC 高压蒸汽灭菌锅; JBT 超声波药片处理机, Specord-200 型紫外可见分光光度计。

1.3 方法

1.3.1 小米 SDF 的制备

取脱脂小米粉 20 g, 加入 400 mL 的蒸馏水、1 000 mL 的磷酸盐缓冲液, 加入 α -耐高温淀粉酶, 95 °C 水浴 20 min, 加入中性蛋白酶溶液, 60 °C 水浴 30 min, 加入淀粉葡萄糖苷酶

[15], 60 °C水浴 30 min, 灭酶, 按原液 0.2 倍进行浓缩, 按浓缩液体积 1:4 比例添加 95%乙醇, 醇沉 15 h, 离心, 冷冻干燥, 在 4°C下保存。

1.3.2 小米 SDF 的 3 种改性处理

(1) 高温高压处理

取小米 SDF 2 g, 1:30 的比例加入蒸馏水混匀, 在 0.1 MPa 高压灭菌锅中处理, 冷却, 离心, 保留上层清液, 按清液体积 1:4 的比例加入 95%乙醇, 醇沉 15 h, 离心, 干燥, 得到高温高压小米 SDF^[16]。

(2) 蒸煮处理

取小米 SDF 2 g, 1:30 的比例加入蒸馏水混匀, 在 125 °C下蒸煮 50min, 离心 15 h, 保留上层清液, 按清液体积 1:4 的比例加入 95%乙醇, 醇沉 15 h, 离心、干燥得到蒸煮小米 SDF^[17]。

(3) 超声处理

取小米 SDF 2 g, 1:30 的比例加入蒸馏水混匀, 超声功率 100 W, 处理 1 h, 离心 15 h, 保留上层清液, 按清液体积 1:4 的比例加入 95%乙醇, 醇沉 15 h, 离心、干燥得到超声小米 SDF^[18]。

1.3.3 小米 SDF 表面微观结构的测定

参照涂宗财等^[19]的方法进行表面微观结构测定, 将一定量的小米 SDF 粘贴、表层镀金, 进行×20 000、×50 000 倍放大观察, 选择清晰图像拍照。

1.3.4 小米 SDF 傅里叶红外光谱的测定

参照张艳荣等^[20]的方法进行傅里叶红外光谱测定: 按 1 : 100 的比例加入 KBr 粉末, 混匀, 研磨粉碎, 压片, 最后放入傅里叶红外光谱仪中进行扫描。

1.3.5 小米 SDF 理化性质的测定

持水力的测定: 取样品 1 g, 20 mL 蒸馏水, 静置 12 h, 在 4 000 r/min 下离心 25 min, 倒液留渣, 按照公式进行计算^[21]。

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_3}$$

式中: W 为持水力/g/g; m_1 为 SDF 吸水后样品和离心管的质量/g; m_2 为离心管的质量/g; m_3 为样品干质量/g。

水膨胀力的测定: 取样品 0.25 g, 5 mL 蒸馏水, 搅拌去泡, 静置 12 h, 按照公式进行计算^[22]。

$$E = \frac{V_1 - V_2}{m}$$

式中: E 为膨胀力/mL/g; V_1 为样品膨胀后的测定体积/mL; V_2 为样品干样的测定体积/mL; m 为样品干质/g。

持油力的测定: 取 0.5 g 样品, 加入 4 g 大豆油, 密封静置 37 °C水浴锅中 4 h, 4 000 r/min 下离心 15 min, 倒液留渣, 按照公式进行计算^[23]。

$$O = \frac{m_1 - m_2}{m_2}$$

式中: O 为持油力/g/g; m_1 为残渣的质量/g; m_2 为样品的质量/g。

结合脂肪能力的测定: 参照李娜等^[24]的测定方法进行, 取 4 g 样品, 加入 20 mL 大豆油, 搅拌 30 min (每 5 min 搅拌 1 次), 在 1 600 r/min 下离心 25 min。游离的脂肪通过离心被分离开, 结合脂肪的能力可以被测出, 即每 g 膳食纤维试样结合脂肪的量。

1.3.6 小米 SDF 体外抗氧化活性的测定

采用总抗氧化能力(T-AOC)试剂盒进行测定^[25]。具体步骤按照说明书进行,进行3组重复实验。

在波长为 520 nm 处测定小米 SDF 的吸光度值,按照公式进行计算。

$$T(U/mL) = \frac{OD_{\text{测定}} - OD_{\text{对照}}}{0.01} \div 30 \times \frac{V_{\text{反}}}{V} \times A$$

式中: T 为总抗氧化能力/U/mL; $OD_{\text{测定}}$ 为样品管中待测样品吸光度值; $OD_{\text{对照}}$ 为对照管中待测样品吸光度值; $V_{\text{反}}$ 为反应液的总体积/mL; V 为样品取样量体积/mL; A 为样品测试前稀释倍数。

1.3.7 小米 SDF 热特性的测定

参考王旭等^[26]的测定方法并稍作修改:取 3~5 mg 样品放入氧化铝盘中,由 0 °C 升温至 250 °C,设定参数为:升温速率 10 °C/min,氮气,流速 50 mL/min。

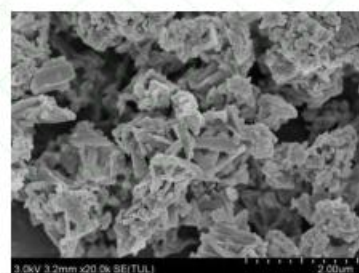
1.4 数据统计与分析

所有实验均重复进行 3 次,实验数据均取平均值并计算相对标准偏差,运用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理与汇总,SPSS 22.0 对数据进行差异显著性分析,采用 Origin 2019 软件进行绘图处理。

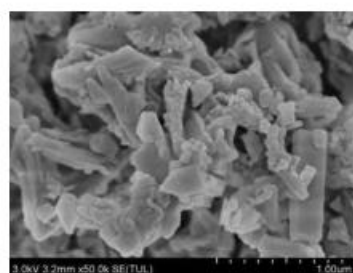
2 结果与分析

2.1 3 种改性前后小米 SDF 的表面微观结构

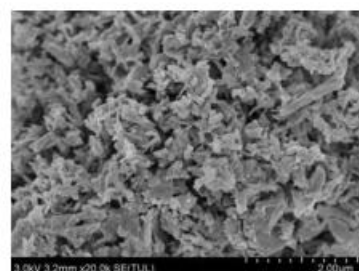
3 种改性前后小米 SDF 的微观形态结果如图 1。未改性小米 SDF 整体为不规则碎片状,表面结构较紧密,颗粒较聚集^[25]。高温高压处理后的 SDF 表面出现裂痕、空隙率增加,整体为无定形分散状,可能是由于高压过程产生的剪切力与碰撞力等作用力导致颗粒尺寸减小造成^[27]。蒸煮处理后的 SDF 表面出现很多空隙,且部分成球状。超声处理后的 SDF 表面出现褶皱,凹凸不平,可能是因结构经超声作用被空气泡破裂后产生的微射流撞击,导致表面结构出现空隙^[28]。其中还有球状物附着,可能是残余的蛋白质与酯类^[29]。改性后的 SDF 表面出现许多裂痕,结构疏松多孔,可能是因改性条件下交联作用导致半纤维素和木质素缺失,使孔隙率增加,孔隙大小增大,最终影响 SDF 的理化性质^[30]。



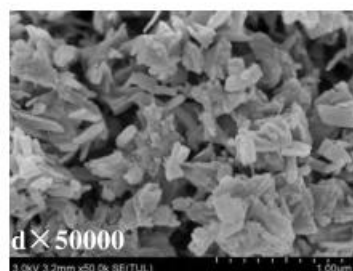
a 原 SDF (×20 000)



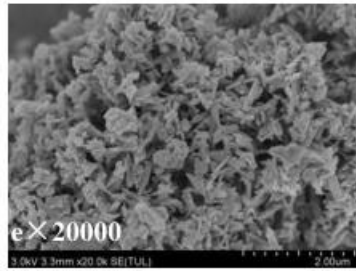
b 原 SDF (×50 000)



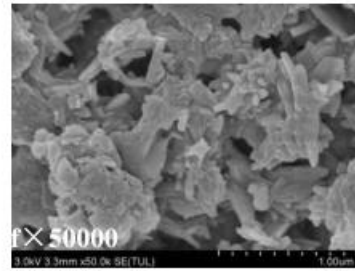
c 高温高压处理的 SDF (×20 000)



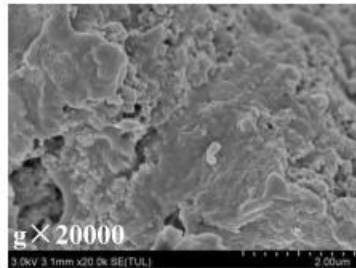
d 高温高压处理的 SDF (×50 000)



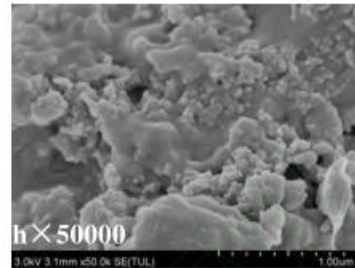
e 蒸煮处理的 SDF ($\times 20\ 000$)



f 蒸煮处理的 SDF ($\times 50\ 000$)



g 超声处理的 SDF ($\times 20\ 000$)



h 超声处理的 SDF ($\times 50\ 000$)

图 1 3 种改性处理前后小米 SDF 的扫描电子显微镜图

2.2 3 种改性前后小米 SDF 的傅里叶变换红外光谱

3 种改性前后小米 SDF 的红外光谱结果如图 2。对比改性前后小米 SDF 的光谱图发现四者具有类似的光谱分布，没有出现新峰，说明物理改性没有改变小米 SDF 的化学结构，分析是因为官能团含量或结合的方式改变所造成，使其在相应的波数下峰的吸收强度发生改变，从而影响 SDF 的理化性质^[31]。3 398 cm^{-1} 处的吸收峰是典型的半纤维素和纤维素 O-H 伸缩振动带，经改性后吸收峰的强度发生改变，分析原因可能是改性导致纤维素间的部分氢键断裂，使 SDF 结构疏松，空隙变大，与扫描电镜的结果相符合。2 928 cm^{-1} 处较弱的峰是多糖甲基与亚甲基的 C-H 拉伸振动带，这部分峰经改性后变弱，小米 SDF 的空隙变大，同时会导致改性后的样品持油力上升^[27]。1 650 cm^{-1} 处的峰是木质素中芳香苯基团的伸缩振动峰。1 150 cm^{-1} 处的峰是半纤维素、木质素、纤维素的 C-O 拉伸带与变形带。869 cm^{-1} 处的峰表明 SDF 中可能含有甘露糖苷键^[32]。整体上，改性后的小米 SDF 的红外图谱特征吸收峰的强度发生一定变化，但特征峰的峰形与位置没有发生明显变化，所以证明这 3 种物理改性对小米 SDF 的官能团没有突出影响^[33]。

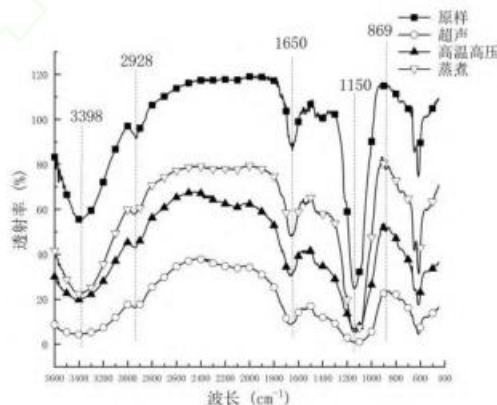


图 2 3 种改性处理前后小米 SDF 红外光谱图

2.3 3 种改性前后小米 SDF 的持水力、水膨胀力、持油力、结合脂肪能力

持水力、水膨胀力、持油力、结合脂肪能力是衡量膳食纤维理化性质的重要指标，假如

指标越大则表明该膳食纤维的生理活性越好^[34]，对预防糖尿病有一定的作用^[35]。由表 1 可知，改性前小米 SDF 的持水力为 0.55 g/g、水膨胀力为 1.2 mL/g、持油力为 2.49 g/g、结合脂肪能力为 2.625 g/mL，经高温高压处理后，持油力得到显著提高（ $P<0.05$ ），推测因 SDF 经高温高压处理后粒径变小，孔隙率变大，比表面积变大，导致储存空间变大^[9]。经超声处理后，4 个指标都得到显著提高（ $P<0.05$ ），推测因超声使 SDF 的亲水基团暴露出来，与水的结合点增多，水合面积增多^[36]。所测定的结果与电子显微镜和傅里叶红外光谱仪的结果相吻合。

表 1 3 种改性处理前后小米 SDF 理化性质的测定

性质	原 SDF	高温高压	蒸煮	超声
持水力/g/g	0.55±0.11 ^b	0.77±0.15 ^a	0.69±0.11 ^b	1.11±0.13 ^a
水膨胀力/mL/g	1.20±0.08 ^c	1.48±0.11 ^{ab}	1.32±0.1 ^{cb}	1.64±0.07 ^a
持油力/g/g	2.49±0.23 ^b	3.80±0.40 ^a	2.90±0.12 ^b	4.08±0.14 ^a
结合脂肪能力 /g/mL	2.63±0.13 ^c	3.00±0.1 ^b	2.75±0.11 ^{bc}	3.50±0.25 ^a

注：同行肩标不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

2.4 3 种改性前后小米 SDF 的体外抗氧化活性

总抗氧化能力的高低是衡量样品提供电子能力强弱的指标^[37]。由表 2 可见，改性处理后的小米 SDF 的总抗氧化能力都得到了提高，其中超声和高温高压改性后的样品抗氧化能力有显著提高（ $P<0.05$ ），分析可能是因其中糖醛酸、羟基增加导致。膳食纤维属于一种多糖类物质，其抗氧化能力与物质本身的分子量、物质中含有的糖醛酸含量等有关^[38]。由红外光谱图可知，在波长为 1 700 cm^{-1} 处出现了吸收峰，证明样品可能有醛基或羧基的存在^[26]，从而引起了抗氧化能力的提高。

表 2 3 种改性处理前后小米 SDF 的总抗氧化能力

改性处理	总抗氧化能力/U/mL
原 SDF	5.55±0.49 ^c
高温高压	6.61±0.3 ^b
蒸煮	6.02±0.37 ^{cb}
超声	7.59±0.48 ^a

注：不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

2.5 3 种改性前后小米 SDF 的热特性

由图 3 可见，改性后的小米 SDF 的吸收峰的位置发生不同程度的偏移，说明改性后小米 SDF 的热稳定性发生改变。膳食纤维的吸收峰峰值出现在 170~210 $^{\circ}\text{C}$ ，属于吸热反应过程。高温高压改性的小米 SDF 在 205.11 $^{\circ}\text{C}$ 处出现吸热失重，蒸煮改性的小米 SDF 在 173.5 $^{\circ}\text{C}$ 处出现吸热失重，超声改性的小米 SDF 在 178.5 $^{\circ}\text{C}$ 处出现吸热失重，未改性的小米 SDF 在 183.24 $^{\circ}\text{C}$ 处出现吸热失重，分析可能是由于膳食纤维的氢键被破坏所导致，与电子显微镜和傅里叶红外光谱仪测定的结果相吻合，部分的水分析出，出现吸热失水现象^[39]。另一方面经过改性后样品在 250 $^{\circ}\text{C}$ 以下没有出现显著的放热峰，说明其具有良好的热稳定性。

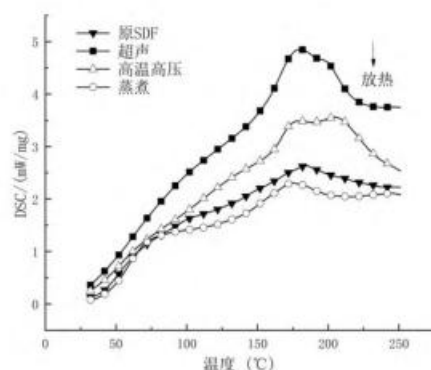


图3 3种改性处理前后小米SDF的DSC热分析图

由表3可见,改性后小米SDF的 ΔH 都比未改性小米SDF的 ΔH 高,其中超声处理后的样品 ΔH 最大,为110.60 J/g,表明小米SDF的热稳定性都得到一定提高^[40]。

表3 3种改性处理前后小米SDF的DSC热力学参数

改性处理	起始温度 $T_o/^{\circ}\text{C}$	峰值温度 $T_p/^{\circ}\text{C}$	终止温度 $T_e/^{\circ}\text{C}$	热焓值 $\Delta H/\text{J/g}$
原 SDF	158.63	183.24	193.28	45.93
高温高压	161.21	205.11	233.60	76.45
蒸煮	137.79	173.50	198.89	47.97
超声	156.16	178.50	217.58	110.60

3 结论

高温高压、蒸煮、超声处理手段有效改善了小米SDF的理化性质与结构特性。经过高温高压、蒸煮、超声的改性处理后,与未改性的小米SDF比较,持油力、水膨胀力、持油力、结合脂肪能力、总抗氧化能力升高,其中超声处理后的效果最佳。傅里叶红外光谱、扫描电镜、DSC热分析图结果显示,改性处理后的小米SDF各吸收峰强度改变,但结构没有发生明显变化,表面褶皱疏松,孔隙率增加,热稳定性被提高。

参考文献

- [1] 王勇,宋歌,庞邵杰,等.应用 Illumina NovaSeq 测序技术比较 3 种杂粮对大鼠肠道菌群的影响[J/OL].食品科学: 1-14[2021-03-15]
WANG Y,SONG G,PANG S J, et al.Comparative Three Kinds of Coarse Cereals Supplementation on Gut Microbiota in Rats by Illumina NovaSeq Sequencing Technology[J/OL].Food Science,1-14[2021-03-15]
- [2] 王娟,康子悦,肖金玲,等. 超声 - 微波辅助酶法对小米 SDF 提取和物理性质的影响 [J] .包装工程,2020,41(7):25-32
WANG J,KANG Z Y,XIAO J L, et al. Influence of Ultrasonic-microwave Assisted Enzymatic Method on Extraction and Physical Properties of Water-soluble Dietary Fiber from Millet [J] .Packaging Engineering,2020,41(7):25-32
- [3] HOWLETT J F, BETTERIDGE V A, CHAMP M, et al . The definition of dietary fiber - Discussions at the Ninth Vahouny Fiber Symposium: Building scientific agreement[J].Food Nutrition Research,2010,54(1):1-5
- [4] 黄汉莹.十大好谷物——小米[J].糖尿病天地:教育刊,2017(7):47
HUANG H Y. Ten-size grain——millet[J].Diabetes World: Education Journal,,2017(7):47

- [5] 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 R, REN Q, LUO Y. Extraction of Soluble Dietary Fiber from Foxtail Millet and Analysis of its Physical and Chemical Properties[J]. Food Science, 2014, 35(2): 69-74
- [6] WANG L, XU H G, YUAN F, 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
- [7] 陈致印,刘伟鹏,王盈希,等. 3 种不同改性方法对甘薯渣不溶性膳食纤维改性效果的研究[J]. 食品与发酵工业,2021,47(2):57-62
CHEN Z Y, LIU W P, WANG Y X, et al. Study of three different modification methods on insoluble dietary fiber in sweet potato residue[J]. Food and Fermentation Industries., 2021, 47(2): 57-62
- [8] 龚娣,陈程莉,常馨月,等. 竹笋膳食纤维的改性研究进展[J]. 中国食品添加剂,2020,31(1):172-178.
GONG D, CHEN C L, CHANG X Y, et al. Research progress on modification of bamboo shoot dietary fiber[J]. China Food Additives, 2020, 31(1): 172-178
- [9] SU D B, ZHU X D, WANG Y et al. Effects of high-pressure homogenization on physical and thermal properties of citrus fiber[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116, 108553
- [10] 汪楠,黄山,张月,等. 竹笋膳食纤维理化特性及改性技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 353-357
WANG N, HUANG S, ZHANG Y, et al. Research Advance on Physicochemical Properties and Modification of Bamboo Shoot Dietary Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 353-357
- [11] 赵城彬,尹欢欢,刘景圣,等. 超声-转谷氨酰胺酶改善红豆蛋白功能性质及结构[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 120-127
ZHANG C B, YIN H H, LIU J S, et al. Functional Properties and Structure of Red Bean Protein Improved by Combined[J]. Food Science, 2019, 40(19): 120-127
- [12] 沈蒙,曹龙奎. 提取黑豆皮中可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(9): 82-87
SHEN M, CAO L K.. Extraction Technology of Soluble Dietary Fiber in Black Bean Hull[J]. China Food Additives, 2017(9): 82-87
- [13] KUREK M A, KARP S, WYRWISZ J, et al. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*) and millet (*Panicum miliaceum*)[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85(12): 321-330
- [14] 郭文奎,焦月华,刘飞. 小米和燕麦中水溶性膳食纤维结构表征及对体外发酵体系短链脂肪酸的影响 [J]. 食品科技, 2017, 42(3): 190-194
GUO W K, JIAO Y H, LIU F. Structure and short chain fatty acids produced characteristics by in vitro fermentation of water soluble dietary fibers isolated from millet and oats[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 190-194
- [15] 沈蒙,康子悦,葛云飞,等. 酶法改性提取黑豆皮可溶性膳食纤维及性质的研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(6): 1046-1053
SHEN M, KANG Z Y, GE Y F, et al. Research of Enzymatic Modification on the Extraction and Properties of Soluble Dietary Fiber from Black Bean Hulls [J]. Natural Product Research and Development 2018, 30(6): 1046-1053

- [16] 常世敏,张玉星.高压蒸汽作用对梨渣膳食纤维改性的研究[J].食品工业,2019,40(2):130-133
CHANG S M, ZHANG Y X. Study on Pear Pomace Dietary Fiber Modification by High Pressure Steam[J].The Food Industry,2019,40(2):130-133
- [17] 刘学成. 金针菇膳食纤维提取、改性及应用研究[D].泰安: 山东农业大学,2020:13
LIU X C. Study on Extraction,Modification and Application of Dietary Fiber from Flammulina Velutipes[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020:13
- [18] 刘玉凌. 物理改性方竹笋膳食纤维理化性能及结构的研究[D].重庆: 西南大学,2016:16
LIU Y L. Study on the Physicochemical Properties and Structure of Chimonobambusa Dietary Fiber Modified by Physical Ways[D].Chongqing: Southwest University Master Dissertation,2016:16
- [19] 涂宗财,段邓乐,王辉,等.豆渣膳食纤维的结构表征及其抗氧化性研究[J].中国粮油学报,2015,30(6):22-26
TU Z C, DUAN D L, WANG H, et al. Structural Characterization and Antioxidant Activity of Soybean Dregs Dietary Fiber[J].Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2015,30(6):22-26
- [20] 张艳荣,魏春光,崔海月,等.马铃薯膳食纤维的表征及物性分析[J].食品科学,2013,34(11):19-23
ZHANG Y R, WEI C G, CUI H Y, et al. Characterization and Property Analysis of Potato Dietary Fiber[J].Food Science,2013,34(11):19-23
- [21] CHEN Y, YE R, YIN L, et al .Novel Blasting Extrusion Processing Improved the Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber from Soybean Residue and in Vivo Evaluation [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 1-8
- [22] ROBERTSON J A, MONREDON F D D, DYSELER P, et al. Hydration Properties of Dietary Fibre and Re sistant Starch: a European Collaborative Study[J]. LWT-food Science and Technology, 2000, 33(2): 72-79
- [23] CHAU C F, HUANG Y L . Comparison of the Chemi cal Composition and Physicochemical Properties of Different Fibers Prepared from the Peel of\r, Citrus Sinensis\r, L Cv Liucheng[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(9): 2615-2618
- [24] 李娜,宁正祥,祝子坪,等.豆渣膳食纤维的制备及性能研究[J].食品科学,2009,30(20):251-254
LI N, NING Z X, ZHU Z P, et al. Preparation and Characterization of Dietary Fibers from Soybean Dregs.[J].Food Science,2009,30(20):251-254
- [25] 王娟,魏春红,王维浩,等.小米 Se-SDF 的抗氧化活性及对昆明小鼠肠道菌群产色氨酸能力的影响[J/OL].食品科学:1-15[2021-03-19]
WANG J, WEI C H, WANG W H, et al. Antioxidant Activity of Millet Se-SDF and its Effect on the Tryptophan Production Ability of Kunming Mouse Intestinal Flora[J/OL].Food Science:1-15[2021-03-19]
- [26] 王旭,梁栋,徐杨,等.挤压膨化辅助提取米糠可溶性膳食纤维及其特性研究[J].中国粮油学报,2017,32(9):153-159
WANG X, LIANG D, XU Y, et al. Extracting soluble dietary fiber from rice bran assisted by extrusion and expansion and its characteristics[J].Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2017,32(9):153-159
- [27] 游玉明,王昱圭,张洁,等.高压均质处理对竹笋膳食纤维理化性质及结构的影响[J/OL].食

品与发酵工业:1-10[2021-04-02]

- YOU Y M, WANG Y G, ZHANG J, et al. Effects of high pressure homogenization on physicochemical properties and structure of bamboo shoot dietary fiber[J/OL].Food and Fermentation Industries:1-10[2021-04-02]
- [28] ŠPOLJARIĆ I V, SMERDEL B, ČUKELJ N, et al. Ultrasound assisted extraction of soluble dietary fiber from cereal bran[C]//7th International Congress Flour-Bread'13 and 9th Croatian Congress of Cereal Technologists, 16-18 October 2013, Opatija, Croatia. Proceedings. Josip Juraj Strossmayer University, Agriculture Faculty in Osijek, 2014: 203-210
- [29] 胡筱,潘浪,朱平平,等.超声波改性对葵花粕膳食纤维性质与结构的影响[J].中国食品学报, 2019,19(11):88-99
- HU X, PAN L, ZHU P P, et al. Effects of Ultrasonic Modification on the Properties and Structure of Dietary Fiber in Sunflower Meal[J].Chinese Journal of Food Science,2019,19(11):88-99
- [30] 祁静. 高吸附性米糠纤维的制备及其吸附特性的研究[D].无锡: 江南大学,2016:19
- QI J. Preparation and adsorption properties of rice bran fiber with high adsorption capacity[D].Wuxi: Jiangnan University,2016:19
- [31] 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 *Trichoderma viride* fermentation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94(9): 468-474
- [32] LI W W, WANG C, YUAN G Q, et al. Physicochemical characterisation and α -amylase inhibitory activity of tea polysaccharides under simulated salivary, gastric and intestinal conditions[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(2): 423-429
- [33] 汪楠,黄山,张月,等.高温蒸煮协同纤维素酶改性竹笋膳食纤维[J].食品与发酵工业,2020,46(4):13-18
- WANG N, HUANG S, ZHANG Y, et al. Modification of bamboo shoot dietary fiber by high temperature cooking and cellulase[J].Food and Fermentation Industries,2020,46(4):13-18
- [34] 付晓. 纤维素酶法制备黑木耳残渣中的膳食纤维及性质测定[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2014:35
- FU R.The preparation and properties of Dietary Fiber from *Auricularia auricular* residues with Cellulase[D].Haerbin:Northeast Agricultural University, 2014:35
- [35] HUANG J Y, LIAO J S, QI J R, et al. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiberprepared from citrus peel[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110, 106140
- [36] CHEN J L ,GAO D X ,YANG L T ,et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. Food Research International,2013,54(2): 1821-1827
- [37] 万仁口,贺杨正,李功景,等.酶解制备竹笋可溶性膳食纤维及其抗氧化活性研究[J].中国食品学报,2021,21(3):153-160
- WANG R K, HE Y Z, LI G J, et al. Preparation of soluble dietary fiber from bamboo shoots by enzymatic hydrolysis and its antioxidant activity[J].Chinese Journal of Food Science,2021,21(3):153-160
- [38] CHAO L, QIANG H, XIONG F, et al. Characterization, antioxidant and immunomodulatory activities of polysaccharides from *Prunella vulgaris* Linn[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2015,75,298-305
- [39] 王彪. 青稞膳食纤维的改性及其应用研究[D].芜湖: 安徽工程大学,2019:34
- WANG B.Study on modification and application of highland barley dietary

fiber[D].Wuhu:Anhui Engineering University,2019:34

[40] 牛希,史乾坤,赵城彬,等.超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J].食品科学,2020,41(23):130-136

NIU X, SHI Q K, ZHAO C B, et al. Effect of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber[J].Food Science,2020,41(23):130-136.

中国知网