

超声-微波辅助酶法对小米 SDF 提取和物理性质的影响

王娟¹, 康子悦¹, 肖金玲¹, 魏春红¹, 王维浩², 曹龙奎^{1,2}

(1.黑龙江八一农垦大学 食品学院, 黑龙江 大庆 163319;

2.国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: **目的** 为了提高小米中水溶性膳食纤维(SDF)的得率, 实验采用超声-微波(U-M)辅助酶法提取小米 SDF, 并对提取工艺进行优化。**方法** 以小米 SDF 的得率为测定指标, 对微波功率、提取温度、提取时间、料液比等 4 个因素进行单因素试验, 并利用正交试验对以上 4 个因素进行优化。对此条件下提取的 SDF 和采用传统酶法提取的 SDF 得率及其物理性质进行研究。**结果** 得到了提取小米粉 SDF 的最优条件, 微波功率为 550 W, 料液比(g/mL)为 1:25, 微波温度为 55 °C, 微波时间为 20 min, 提取率为 13.63%, 比传统酶法提取的 SDF 含量提高了 46.88%; 通过对小米 SDF 物理性质的测定, 发现超声-微波处理对小米 SDF 的持水力、膨胀力、持油力均有显著提高, 分别提高了 24.79%, 25.16%, 15.74%。**结论** 通过超声-微波辅助酶法可以提高小米 SDF 的得率, 对其物理性质影响显著。

关键词: 小米; 水溶性膳食纤维; 物理性质; 超声-微波提取

中图分类号: TS206 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)07-0025-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.004

Influence of Ultrasonic-microwave Assisted Enzymatic Method on Extraction and Physical Properties of Water-soluble Dietary Fiber from Millet

WANG Juan¹, KANG Zi-yue¹, XIAO Jin-ling¹, WEI Chun-hong¹, WANG Wei-hao^{1,2}, CAO Long-kui^{1,2}

(1.College of Food Science, Heilongjiang Ba-yi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2.National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

ABSTRACT: The work aims to extract the millet SDF in the ultrasound-microwave (U-M) assisted enzymatic method during the experiment and optimize the extraction process, in order to improve the yield of water-soluble dietary fiber (SDF) in millet. According to the yield of millet SDF, microwave power, extraction temperature, extraction time and material-to-liquid ratio were tested by single factor, and the above-mentioned four factors were optimized by orthogonal test. The yield and physical properties of SDF extracted under this condition and conventionally extracted SDF were studied. The optimum conditions for extracting SDF from millet flour were: 550 W microwave power, 1:25 material-to-liquid ratio, 55 °C microwave temperature, 20 min microwave time and 13.63% extraction rate, which was 46.88% higher than that of traditional enzymatic extraction. By measuring the physical properties of millet SDF, it was found that the ultrasonic-microwave treatment significantly improved the water holding capacity, swelling power and oil holding capacity of millet SDF, which increased by 24.79%, 25.16% and 15.74%, respectively. Ultrasound-microwave assisted enzymatic method can improve the yield of millet SDF and has a significant effect on its physical properties.

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0401203)

作者简介: 王娟(1995—), 女, 黑龙江八一农垦大学硕士生, 主攻食品科学与工程。

通信作者: 曹龙奎(1965—), 男, 博士, 黑龙江八一农垦大学教授, 主要研究方向为农产品加工技术。

KEY WORDS: millet; water-soluble dietary fiber; physical properties; ultrasound-microwave extraction

近年来,由于人们对自身健康的重视,五谷杂粮也逐渐进入人们的日常饮食中,小米(millet)是我国传统谷物,在我国北方俗称谷子^[1]。小米中含有碳水化合物(73.5%),维生素含量丰富,营养价值高,能健脾养胃、清热解毒,对产妇的恢复有特效,还对缺铁性贫血有一定的预防作用。相关研究表明,小米中的膳食纤维含量较高,是大米中膳食纤维的2.3倍^[2]。膳食纤维(Dietary fiber, DF)是食物中不被人体胃肠消化酶所分解、不可消化植物成分的总称,包括水溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)^[3]。其中水溶性膳食纤维具有多种保健功能,如预防癌症^[4]、修复糖尿病大鼠的氧化损伤^[5]、对急性胰腺炎治疗等都具有显著疗效^[6],而且不会影响血液中血糖和胰岛素的含量^[7],并可以通过调节人体肠道菌群结构改善人体亚健康现象^[8],这些功能特性对人体健康的意义重大。

超声-微波协同提取技术成熟,在食品研究方面得到了广泛应用。沈蒙等^[9]使用超声-微波协同法萃取黑豆皮中的可溶性膳食纤维,得到了最佳工艺条件:料液比(小米质量(g)与蒸馏水体积(mL)的比例)为1:40,微波功率为450 W,微波时间为30 min,微波温度为45℃,在此最佳工艺条件下,测得黑豆皮的SDF得率为15.7280%,结果说明此法可以有效提高SDF的物理性质。唐小闲等^[10]利用超声-微波辅助、超声波辅助、微波辅助分别提取了莲藕中的膳食纤维,发现相同条件下,超声-微波辅助提取膳食纤维的提取率为36.83%,较其它2种方法分别高出13.70%,8.13%。相关研究结果也表明,得率的提高是因为超声、微波处理会对物料表层结构进行破坏,使大分子物质通过物理手段处理后变为小分子物质,且体系更加均匀,从而使水溶性膳食纤维更易溶出^[11]。

我国作为小米的主产区,对于小米的研究主要集中在色素^[12]、蛋白^[13]、淀粉^[14]等组分,而对于小米中水溶性膳食纤维的研究较少,且采用超声-微波协同法研究小米水溶性膳食纤维的提取及其物理性质也未见报道。由此,文中实验将利用超声-微波协同方法提取小米中的水溶性膳食纤维,并对小米水溶性膳食纤维的相关物理性质进行研究,以期为小米的开发利用及深加工提供理论基础。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料和试剂:小米,东方亮谷,由山西东方

亮生命科技有限公司提供;蛋白酶(水解酶类,酶的催化能力为6万u/mg), α -耐高温淀粉酶(水解酶类,酶的催化能力为4万u/mL),淀粉葡萄糖苷酶(水解酶类,酶的催化能力为10万u/mL),Sig-ma公司;体积分数为95%的乙醇(分析纯),天津永晟精细化工有限公司。

主要仪器和设备:GDE-CSF6意大利VELP膳食纤维测定仪,北京盈盛恒泰科技有限公司;CW-2000A超声-微波协同萃取反应仪,上海新拓分析仪器科技有限公司;DK-S24型恒温水浴锅,上海森信实验仪器有限公司;TGL16B型台式离心机,上海安亭科学仪器厂制造;RE-52AA型旋转蒸发,上海亚荣生化仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 小米SDF的超声微波协同处理

称取5.0 g脱脂小米粉,按照不同料液比加入蒸馏水,在超声波开启的状态下(超声波功率和频率分别为50 W,40 kHz),调节微波功率、温度及时间,并置于超声-微波协同萃取仪中进行处理,然后按1.2.2节步骤提取SDF。

1.2.2 小米SDF的提取工艺

小米SDF提取的工艺流程:脱脂小米粉5.0 g→按料液比(g/mL)1:20加入蒸馏水→加入250 mL磷酸盐缓冲溶液(0.08 mol/L, pH=6)→加 α -耐高温淀粉酶(500 μ L, pH 6.0)于GDE酶培养消化器中95~100℃水浴15 min→加入中性蛋白酶溶液(500 μ L, pH 7.0)于GDE中60℃条件下水浴30 min→加入淀粉葡萄糖苷酶(500 μ L, pH 4.5)于GDE中60℃条件下水浴30 min,用碘液检测,直至不变蓝为止→加热灭酶(100℃,10 min)→加适量硫酸铵,使未溶解的蛋白质充分沉淀→将反应物转移至CSF6过滤装置→滤液离心(4000 r/min,20 min)→浓缩→4倍浓缩液体积的乙醇(95%)沉淀12 h→4000 r/min离心20 min→-108℃冷冻干燥8 h→小米SDF^[15-16]。

1.2.3 小米SDF得率的计算

根据郑红艳^[17]提取小米麸皮所运用到的公式计算小米SDF得率,见式(1)。

$$R = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为SDF得率(%); m_1 为SDF冷冻干燥品的质量(g); m_2 为脱脂小米粉的质量(g)。

1.2.4 U-M 提取小米 SDF 工艺的单因素试验

1) 微波功率不同对小米 SDF 得率的影响。每组试验分别称取 5.0000 g 脱脂小米粉, 设置微波温度为 50 °C, 料液比 (g/mL) 为 1:20, 微波时间为 40 min, 研究微波功率分别为 400, 450, 500, 550, 600, 650 W 时对小米 SDF 得率的影响。

2) 微波时间不同对小米 SDF 得率的影响。每组实验分别称取 5.0000 g 脱脂小米粉, 设置微波温度为 50 °C, 料液比 (g/mL) 为 1:20, 微波功率为 500 W, 研究微波时间分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60 min 时对小米 SDF 得率的影响。

3) 微波温度不同对小米 SDF 得率的影响。每组实验分别称取 5.0000 g 脱脂小米粉, 设置微波时间为 40 min, 料液比 (g/mL) 为 1:20, 微波功率为 500 W, 研究微波温度分别为 40, 45, 50, 55, 60, 65 °C 时对小米 SDF 得率的影响。

4) 料液比不同对小米 SDF 得率的影响。每组实验分别称取 5.0000 g 脱脂小米粉, 设置微波时间为 40 min, 微波温度为 50 °C, 微波功率为 500 W, 研究料液比 (g/mL) 分别为 1:10, 1:15, 1:20, 1:25, 1:30, 1:35 时对小米 SDF 得率的影响。

1.2.5 正交试验优化小米 SDF 的提取工艺

根据单因素试验的结果, 以小米 SDF 得率为评价指标, 选择微波功率、微波时间、微波温度和料液比等 4 个因素作为影响小米 SDF 得率的主要因素, 并设计四因素 $L_9(3^4)$ 正交试验。每组实验重复 3 次, 取平均值。实验因素水平设计见表 1。

表 1 小米粉 SDF 得率正交试验因素水平

Tab.1 Orthogonal test factor level of millet flour SDF yield

水平	微波功率 A/W	微波时间 B/min	微波温度 C/°C	料液比 D/(g·mL ⁻¹)
1	550	20	50	1:25
2	600	30	55	1:30
3	650	40	60	1:35

1.2.6 小米 SDF 物理性质的测定

1) 持水力的测定。根据文献[18], 称取膳食纤维样品 2.5000 g 于 100 mL 离心管中, 加入 50 mL 蒸馏水, 将样品与蒸馏水充分搅拌, 在室温条件下密封 12 h, 在 4000 r/min 下离心 25 min, 倒掉上清液, 称量有样品的离心管质量。持水力按式 (2) 计算。

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \quad (2)$$

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 为样品的干质量 (g)。

2) 膨胀力的测定。根据文献[19], 称取干燥膳食纤维样品 0.2500 g 于 10 mL 刻度试管中, 测得样品干样体积, 加入 5 mL 蒸馏水, 充分搅拌, 并振动去除产生的气泡, 在室温下静置 12 h, 读出吸水膨胀后样品在刻度试管中的总体积。膨胀力按式 (3) 计算。

$$E = \frac{v_1 - v_2}{m} \quad (3)$$

式中: E 为膨胀力 (mL/g); v_1 为样品膨胀后的体积 (mL); v_2 为样品干样的体积 (mL); m 为样品的干质量 (g)。

3) 持油力的测定。根据文献[20], 将 0.5000 g 样品放入 50 mL 离心管中, 加入大豆油 4.000 g, 密封静置于 37 °C 水浴锅中 4 h, 将离心管以 4000 r/min 离心 15 min, 倒掉上层油液, 称取残渣的质量。按式 (4) 计算持油力。

$$O = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (4)$$

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)。

1.2.7 数据统计分析

所有实验均重复 3 次, 取其平均值, 并使用 SPSS 2.0 软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 U-M 提取小米 SDF 工艺的单因素试验

2.1.1 微波功率对小米 SDF 得率的影响

微波功率是影响小米 SDF 得率的关键参数^[21], 微波功率对小米 SDF 得率的影响结果见图 1。通过统计学分析发现, 微波功率对小米 SDF 得率的影响显著 ($P < 0.05$)。从图 1 中可以看出, 在微波温度为 50 °C, 料液比 (g/mL) 为 1:20, 微波时间为 40 min, 且超声开启的条件下, 随着微波功率的增加, 小米 SDF 的得率持续增加, 其峰值出现在 600 W。微波功率不

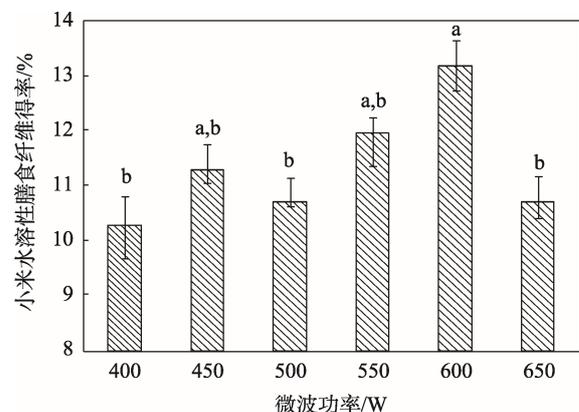


图 1 微波功率对 SDF 得率的影响

Fig.1 Effect of microwave power on SDF yield

同对小米 SDF 得率具有不同的影响，小米 SDF 得率的增加可能是由于微波使细胞扩散，并导致细胞破裂，从而使小米 SDF 更易溶出^[22]。随后小米 SDF 得率降低，这可能是由于高微波功率导致 SDF 热降解。此外，当 SDF 溶解在水中时，提取产物的收集受到影响，这也导致 SDF 产率的降低^[23]。

2.1.2 微波时间对小米 SDF 得率的影响

由图 2 可知，当微波时间达到 30 min 时，小米粉的 SDF 得率为 11.84%，在整个时间区间内，总体趋势均表现为先增加后降低。这可能是因为随着时间的延长，小米中一些对温度敏感的成分发生降解，从而使 SDF 得率降低^[24]。Maran 等^[25]认为，发生这种现象是由于小米对微波能量的吸收，导致提取溶液中的热积累，进而促进 SDF 溶解到溶液中，同时超声波可以增强传质，使 SDF 更容易释放和扩散到水中，但是时间过长可能导致 SDF 降解，因为 SDF 具有热不稳定性。实验所得结果与胡晓冰^[24]、黄琼等^[26]的研究结果一致，微波处理时间均在 30 min 左右，实验所得结果具有可行性，且通过统计学分析知微波时间对小米 SDF 得率的影响极显著 ($P < 0.01$)。

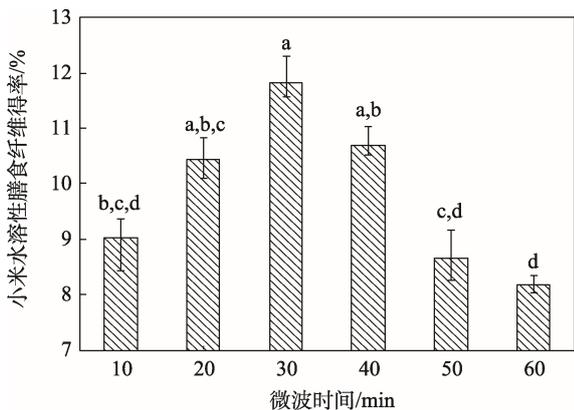


图 2 微波时间对 SDF 得率的影响
Fig.2 Effect of microwave time on SDF yield

2.1.3 微波温度对小米 SDF 得率的影响

由图 3 可知，在微波时间为 40 min，料液比 (g/mL) 为 1:20，微波功率为 500 W，且超声波开启的条件下，小米粉 SDF 得率在温度区间内呈现先增后降的趋势，且通过统计学分析知，微波温度对小米 SDF 得率的影响差异显著 ($P < 0.05$)。当微波温度达到 55 °C 时，SDF 得率最大，之后缓慢降低，这可能是因为随着温度的升高，SDF 在水中的溶解度增大，从而使 SDF 得率增大。随着温度的增加，促进了 SDF 的降解，进而降低了 SDF 得率^[27]。李怡杰等^[28]在提取油茶菇中的膳食纤维时同样发现与文中研究相同的现象，并分析造成这种现象的原因是：温度会增加水溶性膳食纤维在水中的溶解度，但过高的温度

会使其发生降解，故得率降低。也有研究分析造成这种现象的原因是超声波在较高温度下对水溶性膳食纤维的结构会造成一定程度的破坏，进而造成得率的下降^[29]。

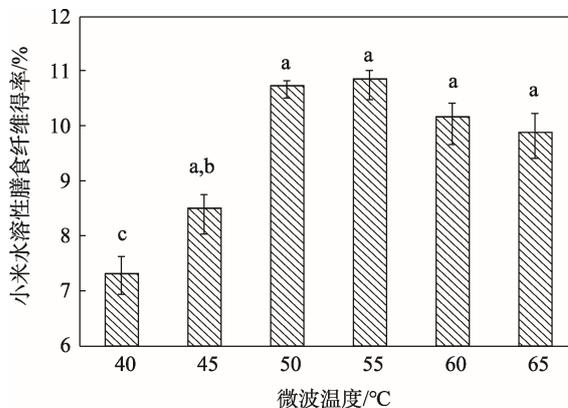


图 3 微波温度对 SDF 得率的影响
Fig.3 Effect of microwave temperature on SDF yield

2.1.4 料液比对小米 SDF 得率的影响

由图 4 可知，在微波时间为 40 min，微波温度为 50 °C，微波功率为 500 W，且超声波开启的条件下，整个料液比区间内随着溶剂用量的增加，小米 SDF 得率呈现先增加后下降的趋势，且通过统计学分析知，微波温度对小米 SDF 得率的影响差异显著 ($P < 0.05$)。在料液比 (g/mL) 为 1:30 时得率最高，为 13.93%。这是因为在一定浓度范围内，溶剂可以使溶质完全浸入其中，溶剂 (水) 可以有效地吸收微波，从而增强植物材料的膨胀，有利于增加接触植物基质和溶剂之间的表面积，导致目标化合物的产率更高^[30]。随着溶剂用量的持续增加，阻碍了微波能对原料的作用力，不利于 SDF 的溶出^[31]，也可能是由于溶剂的增加不能使更多的 SDF 溶出，并且导致浓缩时间延长，造成了 SDF 的浪费^[32]。Ying 等^[33]认为造成这种现象可能是因为高剂量的溶剂与溶质的比例

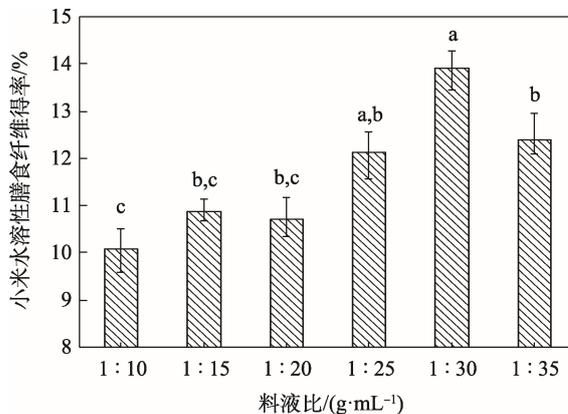


图 4 料液比对 SDF 得率的影响
Fig.4 Effect of material-to-liquid ratio on SDF yield

延长了溶质向内部组织的扩散距离,并在后期提取过程造成一部分的损失,导致提取物含量的降低。

2.2 正交试验结果

由表 2 可知,不同因素对 U-M 辅助酶法提取的小米粉 SDF 得率的影响大小顺序为:微波功率 A>料液比 D>微波温度 C>微波时间 B。通过方差分析(见表 3)可知,微波功率和微波时间对小米粉 SDF 得率的影响极显著 ($P<0.01$),料液比对小米粉 SDF 得率的影响具有显著性 ($P<0.05$)。其最佳组合为 $A_1B_1C_2D_1$,即微波功率为 550 W,料液比 (g/mL) 为 1:25,微波温度为 55 °C,微波时间为 20 min。为了验证上述理论值的准确性,按照上述正交试验所得最优组合进行实验,重复进行 6 组实验,得到小米粉 SDF 得率为 13.63%,所以此条件为超声微波协同酶法提取小米 SDF 所需的最佳工艺条件。

表 2 小米粉 SDF 得率正交试验设计及结果
Tab.2 Orthogonal test design and results of SDF yield of millet flour

实验号	微波功率 A/W	微波时间 B/min	微波温度 C/°C	料液比 D/(g·mL ⁻¹)	得率/%
1	1	1	1	1	11.31
2	1	2	2	2	10.39
3	1	3	3	3	11.91
4	2	1	2	3	9.72
5	2	2	3	1	8.91
6	2	3	1	2	9.75
7	3	1	3	2	9.67
8	3	2	1	3	10.12
9	3	3	2	1	12.04
k_1	5.60	5.12	4.39	5.38	
k_2	3.92	4.9	5.36	4.16	
k_3	5.31	4.81	5.08	5.29	
R	1.68	0.31	0.97	1.22	

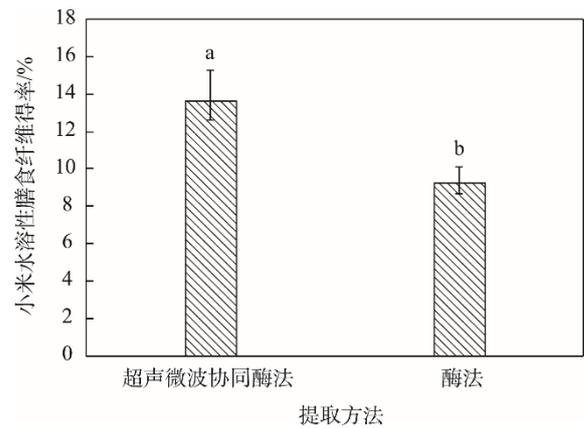
表 3 小米粉 SDF 得率正交试验结果方差分析
Tab.3 Analysis of variance of orthogonal test results of millet flour SDF

因素	偏差平方和/%	自由度	均方/%	F/%	显著性
A	10.12	2	5.06	17.70	**
B	5.88	2	2.94	10.29	**
C	0.97	2	0.48	1.69	
D	2.61	2	1.31	4.57	*
误差	2.57	9			

注:*表示显著性差异 ($P<0.05$), **表示显著性差异 ($P<0.01$)

2.3 不同方法提取小米 SDF 得率的比较

由图 5 可知,在微波功率、微波时间、微波温度、料液比相同的条件下,采用 U-M 辅助酶法提取的小米 SDF 得率为 13.63%,采用酶法提取的小米 SDF 得率为 9.28%,两者差异极显著 ($P<0.01$)。这可能是因为超声微波协同萃取仪是集超声波和微波于一体,具有超声波的空化作用和微波的高能作用^[11],对小米籽粒中的细胞结构具有一定的破坏作用,可以使 SDF 更易溶出^[21],从而提高了 SDF 的得率。



注:a,b 表示不同方法提取的小米 SDF 的显著性差异 ($P<0.05$)

图 5 不同方法提取小米 SDF 得率的比较

Fig.5 Comparison of the yield of millet SDF extracted by different methods

2.4 不同方法提取小米 SDF 物理性质的比较

由表 4 可知,U-M 辅助酶法显著提高了小米水溶性膳食纤维的持水力、膨胀力和持油力,分别提高了 24.79%,25.16%,15.74%。这可能是因为物料经过超声微波处理后,物料中的 SDF 粒度变小,使水分子更易进入,进而增大了持水性能和 SDF 的膨胀力^[34]。持水力、膨胀力、持油力等物理特性决定了膳食纤维的功能特性,研究表明,SDF 因具有较多的亲水基团,从而使其具有良好的吸湿性和保湿性,持水性能优良,故利于肠道蠕动,可促进排泄^[35];膳食纤维良好的膨胀性能可以使食用者产生饱腹感,延缓胃排空,具有减肥的效果^[36];良好的持油力说明 SDF 对脂肪具有一定的吸附能力,降低了人体的脂肪含量,达到了减肥的效果^[37]。

表 4 不同方法提取小米 SDF 物理性质的比较
Tab.4 Comparison of physical properties of millet SDF extracted by different methods

提取方法	持水力/(g·g ⁻¹)	膨胀力/(mL·g ⁻¹)	持油力/(g·g ⁻¹)
超声微波协同酶法	1.51	3.98	3.53
酶法	1.21	3.18	3.05

3 结语

通过实验证明了超声-微波处理可以提高小米中水溶性膳食纤维的得率,且得率较传统酶法提高了46.88%。通过对U-M辅助酶法提取SDF及传统酶法提取SDF的持水力、持油力、膨胀力进行对比,发现U-M辅助酶法提取SDF的持油力、膨胀力分别为3.53 g/g和3.98 mL/g,较传统酶法分别提高了25.16%和15.74%。文中实验说明,超声微波处理不仅可以提高水溶性膳食纤维的得率,而且对水溶性膳食纤维的持水率、膨胀力、持油力具有不同程度的影响,进一步验证了超声微波处理手段在提取过程中的可行性,为小米的加工利用和深加工提供一定的理论依据,证明小米也是水溶性膳食纤维很好的来源。

参考文献:

- [1] 王海滨,夏建新. 小米的营养成分及产品研究开发进展[J]. 粮食科技与经济, 2010(4): 36—38.
WANG Hai-bin, XIA Jian-xin. Progress in Research and Development of Nutritional Components and Products of Millet[J]. Food Science and Technology, 2010(4): 36—38.
- [2] 黄汉莹. 十大好谷物——小米[J]. 糖尿病天地: 教育刊, 2017(7): 47.
HUANG Han-ying. Ten Good Cereals-Millet[J]. Diabetes World: Education Journal, 2017(7): 47.
- [3] CHAU C F, CHEN C H, LEE M H. Comparison of the Characteristics, Functional Properties, and in Vitro Hypoglycemic Effects of Various Carrot Insoluble Fiber-rich Fractions[J]. LWT-food Science and Technology, 2004, 37(2): 155—160.
- [4] MCRAE M P. The Benefits of Dietary Fiber Intake on Reducing the Risk of Cancer: an Umbrella Review of Meta-analyses[J]. Journal of Chiropractic Medicine, 2018, 17(2): 90—96.
- [5] 佐兆杭,王颖,刘淑婷,等. 杂豆膳食纤维对糖尿病大鼠胰腺氧化损伤的修复作用[J]. 中国生物制品学杂志, 2018, 31(8): 830—834.
ZUO Zhao-hang, WANG Ying, LIU Shu-ting, et al. Effect of Miscellaneous Bean Dietary Fiber on Pancreatic Oxidative Damage Repair of Diabetic Rats[J]. Chinese Journal of Biologicals, 2018, 31(8): 830—834.
- [6] 林宁,孙红玉,陈亭,等. 膳食纤维在急性胰腺炎治疗中的作用[J]. 肠外与肠内营养, 2018, 25(5): 265—268.
LIN Ning, SUN Hong-yu, CHEN Ting, et al. The Role of Dietary Fiber in the Treatment of Acute Pancreatitis [J]. Parenteral and Enteral Nutrition, 2018, 25(5): 265—268.
- [7] 朱峰,陈景垚,蓝蔚青. 菊粉的功能特性与开发利用研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 34—39.
ZHU Feng, CHEN Jing-yao, LAN Wei-qing. Research Progress on the Functional Properties and Utilization of Inulin[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 34—39.
- [8] 费亚芬,王玉婷,陆夏逸,等. 海藻膳食纤维提取工艺优化及其对小鼠肠道菌益生作用[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2019, 32(1): 54—63.
FEI Ya-fen, WANG Yu-ting, LU Xia-yi, et al. Extraction and Optimization of Marine Algae Dietary Fiber and Its Effects on Mice Intestinal Microflora[J]. Journal of Hainan Normal University(Natural Science Edition), 2019, 32(1): 54—63.
- [9] 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 Meng, CAO Long-kui. Extraction Technology of Soluble Dietary Fiber in Black Bean Hull[J]. China Food Additives, 2017(9): 82—87.
- [10] 唐小闲,邱培生,段振华,等. 响应面法优化超声-微波辅助提取莲藕膳食纤维工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 132—139.
TANG Xiao-xian, QIU Pei-sheng, DUAN Zhen-hua, et al. Optimization of Ultrasonic-Microwave Assisted Extraction of Dietary Fiber from Lotus Root by Response Surface Methodology[J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 132—139.
- [11] 张和清. 微波化学领域的又一创新成果 超声-微波协同萃取新技术及仪器简介[J]. 现代科学仪器, 2005(2): 90.
ZHANG He-qing. Another Innovation in the Field of Microwave Chemistry Introduction of New Ultrasonic-Microwave Synergistic Extraction Technology and Instruments[J]. Modern Scientific Instruments, 2005(2): 90.
- [12] 杨延兵,张涵,王润丰,等. 谷子籽粒小米黄色素含量的测定[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 121—125.
YANG Yan-bing, ZHANG Han, WANG Run-feng, et al. Determination of Yellow Pigment Content in Foxtail Millet[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(3): 121—125.
- [13] 闫舟,郝利平,梁亚萍,等. 小米蛋白提取、测定以及 SDS-PAGE 电泳[J]. 食品科技, 2018, 43(9): 227—232.
YAN Zhou, HAO Li-ping, LIANG Ya-ping, et al. Extraction, Determination and SDS-PAGE Electrophoresis of Millet Protein[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(9): 227—232.
- [14] 张佳丽,张爱霞,刘敬科,等. 酶法制备低DE值小米淀粉糖浆的技术研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 154—157.
ZHANG Jia-li, ZHANG Ai-xia, LIU Jing-ke, et al. Preparation of Low DE Syrups from Millet Starch by Enzyme[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(3): 154—157.
- [15] 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.
- [16] 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 Meng, KANG Zi-yue, GE Yun-fei, 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.
- [17] 郑红艳. 小米麸皮膳食纤维的提取及成分和功能性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 78.
ZHENG Hong-yan. Study on the Extraction of Millet Bran, Dietary Fiber and Research on its Ingredient Functional Properties[D]. Chongqing: Southwest University, 2010: 78.
- [18] 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.
- [19] ROBERTSON J A, MONREDON F D D, DYSELER P, et al. Hydration Properties of Dietary Fibre and Resistant Starch: a European Collaborative Study[J]. LWT-food Science and Technology, 2000, 33(2): 72—79.
- [20] CHAU C F, HUANG Y L. Comparison of the Chemical Composition and Physicochemical Properties of Different Fibers Prepared from the Peel of Citrus Sinensis L Cv Liucheng[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(9): 2615—2618.
- [21] SUN H, LI C Y, NI Y J, et al. Ultrasonic/Microwave-assisted Extraction of Polysaccharides from Camptotheca Acuminata Fruits and Its Antitumor Activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 206(15): 557—564.
- [22] YAN M M, LIU W, FU Y J, et al. Optimisation of the Microwave-assisted Extraction Process for four main Astragalosides in Radix Astragali[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1663—1670.
- [23] ZHAO C, YANG R F, QIU T Q. Ultrasound-enhanced Subcritical Water Extraction of Polysaccharides from Lycium Barbarum L[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 120: 141—147.
- [24] 胡晓冰, 王振伟, 申森, 等. 超声波微波协同提取超微粉碎落葵中多糖工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2017(7): 55—60.
HU Xiao-bing, WANG Zhen-wei, SHEN Sen, et al. Optimization of Microwave-ultrasound Assisted Extraction Process of Polysaccharide from Basella Rubra L after Ultramicro Grinding[J]. Food Research and Development, 2017(7): 55—60.
- [25] MARAN J P, SWATHI K, JEEVITHA P, et al. Microwave-assisted Extraction of Pectic Polysaccharide from Waste Pango Peel[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 123: 67—71.
- [26] 黄琼, 何燕萍. Box-Behnken 响应面法优化超声波-微波协同提取玫瑰茄多糖工艺[J]. 福建农业学报, 2018, 33(12): 1324—1329.
HUANG Qiong, HE Yan-ping. Optimization of Ultrasound/Microwave-assisted Extraction of Polysaccharides from Hibiscus Sabdariffa L by Box-behnken Response Surface Methodology[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2018, 33(12): 1324—1329.
- [27] ZHAO Z Y, ZHANG Q, LI Y F, et al. Optimization of Ultrasound Extraction of Alisma Orientalis Polysaccharides by Response Surface Methodology and their Antioxidant Activities[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 119: 101—109.
- [28] 李怡杰, 陆海南, 覃江克, 等. 微波辅助提取油茶枯中膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 188—192.
LI Yi-jie, LU Hai-nan, QIN Jiang-ke, et al. Optimization for Microwave-assisted Extraction of Dietary Fiber from Camellia Cakes[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(5): 188—192.
- [29] 和法涛, 刘光鹏, 朱风涛, 等. 微波超声波组合提取猴头菇多糖工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(1): 74—82.
HE Fa-tao, LIU Guang-peng, ZHU Feng-tao, et al. Optimization of Microwave-ultrasonic Assisted Extraction of Polysaccharides from Hericium erinaceus Antioxidant Activity in Vitro[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(1): 74—82.
- [30] WANG Y X, LU Z X. Optimization of Processing Parameters for the Mycelial Growth and Extracellular Polysaccharide Production by Boletus Spp ACCC 50328[J]. Process Biochemistry, 2004, 40(3/4): 1043—1051
- [31] 胡春晓, 宣丽, 齐森. 微波辅助提取香菇柄水溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(2): 49—51.
HU Chun-xiao, XUAN Li, QI Sen. Study on Microwave-assisted Extraction Technology of Soluble Dietary Fiber from Lentinus Edodes Stem[J]. Cereals & Oils, 2015, 28(2): 49—51.
- [32] 刘鑫, 朱丹, 牛广财, 等. 超声波-微波协同萃取沙棘籽油工艺优化[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 34—44.
LIU Xin, ZHU Dan, NIU Guang-cai, et al. Process Optimization of Sea Buckthorn Seed Oil by Ultrasonic-microwave Synergistic Extraction[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 34—44.
- [33] YING Z, HAN X, LI J. Ultrasound-assisted Extraction of Polysaccharides from Mulberry Leaves[J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 1273—1279.

- [34] 高宇萍, 韩育梅, 李周永, 等. 超声波处理对水不溶性膳食纤维膨胀力及持水力的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 299—301.
GAO Yu-ping, HA Yu-mei, LI Zhou-yong, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on Expansive force and Water-holding Capacity of Insoluble Dietary Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(16): 299—301.
- [35] 曲鹏宇, 李丹, 李志江, 等. 膳食纤维功能、提取工艺及应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(19): 218—224.
QU Peng-yu, LI Dan, LI Zhi-jiang, et al. Research Progress on Function, Extraction Process and Application of Dietary Fiber[J]. Food Research and Development, 2018, 39 (19): 218—224.
- [36] 朱毓芬, 吴保锋, 田庆生. 膳食纤维的性质与作用[J]. 内蒙古科技与经济, 2007(19): 110—112.
ZHU Yu-fen, WU Bao-feng, TIAN Qing-sheng. The Nature and Function of Dietary Fiber[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2007(19): 110—112.
- [37] 褚盼盼, 胡筱, 林智杰. 葵花粕水溶性膳食纤维的提取工艺及其理化性质研究[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 203—207.
CHU Pan-pan, HU Xiao, LIN Zhi-jie. Extraction and Physicochemical Property of Poluble Dietary Fiber from Sunflower Meal[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(12): 203—207.