

DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.06.006

# 微波对膳食纤维结构和功能特性的影响

## Effects of microwave on the structural and functional properties of dietary fibers from different sources

罗舜菁<sup>1</sup> 谢 靛<sup>1</sup> 熊绍百<sup>1</sup> 杨 榕<sup>1</sup>LUO Sun-jing<sup>1</sup> XIE Liang<sup>1</sup> XIONG Shao-bai<sup>1</sup> YANG Rong<sup>1</sup>陈婷婷<sup>1</sup> 邓莉萍<sup>2</sup> 刘成梅<sup>1</sup>CHEN Ting-ting<sup>1</sup> DENG Li-ping<sup>2</sup> LIU Cheng-mei<sup>1</sup>

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047;

2. 江西大北农科技有限责任公司, 江西 南昌 331700)

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 2. Jiangxi Dabeinong Technology Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 331700, China)

**摘要:**采用微波对甘薯渣、苹果渣、大豆渣中的膳食纤维进行改性,通过扫描电镜、X-射线衍射及热重分析,研究微波对 3 种膳食纤维结构的影响,并对比处理前后膳食纤维持水力、持油力、胆固醇吸附力、亚硝酸根离子吸附力的变化。结果表明:微波改性可以使膳食纤维的可达性边缘暴露,结晶度升高,热稳定性加强,且 3 种膳食纤维的功能特性均有不同程度改善,是一种优良的膳食纤维改性方法。此外,改性后 3 种膳食纤维中的可溶性纤维质量分数分别提高 63.11%, 4.51%, 358.79%, 与功能特性综合提高幅度并非正相关,改性后膳食纤维功能性质的提升是可溶性膳食纤维增加与不溶性膳食纤维可达性边缘的增加共同作用的结果。

**关键词:**微波;甘薯;苹果;大豆;膳食纤维;结构特性;功能特性

**Abstract:** The microwave was used to modify the dietary fibers (DFs) in sweet potato pomace, apple pomace, and soybean pomace. The changes in the structural properties of three kinds of DFs by microwave were investigated by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. Moreover, the functional properties, including water holding capacity, oil holding capacity, cholesterol adsorption capacity and

**基金项目:**食品科学与技术国家重点实验室自由探索资助课题(编号:SKLF-ZZB-201920);国家自然科学基金委员会青年科学基金项目(编号:31901703);南昌大学研究生创新专项(编号:CX20181118)

**作者简介:**罗舜菁,女,南昌大学教授,硕士。

**通信作者:**邓莉萍(1970—),女,江西大北农科技有限责任公司高级工程师,硕士。E-mail: 943165474@qq.com

**收稿日期:**2021-03-29

nitrite ions adsorption capacity, were evaluated in this study. The results showed that microwave was an excellent modification method that could expose the accessibility margin, increase crystallinity, strengthen thermal stability, and improve the functional properties of three dietary fibers to varying degrees. In addition, after modification, the soluble dietary fiber mass fractions of the three dietary fibers were increased by 63.11%, 4.51% and 358.79%, respectively, which was not positively correlated with the improvement of functional properties. The improvement of functional properties was related to the mass fraction of SDF, but the exposure of the accessibility margin on IDF also promoted an important influence for the improvement of DFs functional properties.

**Keywords:** microwave; sweet potato; apple; soybean; dietary fiber; structural properties; functional properties

膳食纤维(dietary fibers, DFs)因其独特的降血脂、调节肠道菌群、通便等功能性质正受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。为进一步提高 DFs 的生理活性,通常会对天然植物 DFs 进行改性处理。传统的化学、生物方法存在反应时间长、副反应较多、工艺过程复杂等不足,与之相比微波改性具有显著优势。微波作为一种波能量,它能使被处理的溶剂发生偶极旋转,迅速升高溶剂温度,导致其中化合物的溶解度增加。更重要的是,微波处理可以增加细胞内的压力,使细胞壁破裂,暴露出更多的可达性边缘,有利于 DFs 对特定物质的吸附以及肠道菌群的附着利用<sup>[3]</sup>。吴卫成等<sup>[4]</sup>采用微波提升了甘薯皮中可溶性纤维(soluble dietary fiber, SDF)的得率,同时提高了中性多

糖的含量。任雨离等<sup>[5]</sup>利用微波改性方竹笋膳食纤维,改性后的方竹笋膳食纤维持水力与铁离子还原能力均比改性前显著提升,且其结晶强度和比表面积增加。Cantu-Jungles 等<sup>[6]</sup>发现采用微波处理木聚糖 A、木聚糖 T 及阿拉伯聚糖,可以提高这些不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)的可发酵性,促进了短链脂肪酸等有益于人体健康的代谢物的产生。大量的研究<sup>[7-8]</sup>对于 DFs 改性效果的评价主要是用 SDF 得率作为重要指标,然而对改性后 IDF 变化的影响关注较少。此外,不同来源的 DFs 根据其来源细胞的不同,具有的结构和功能也大不相同<sup>[9]</sup>,例如具有储能功能的块状根茎,果胶丰富的果实及豆科植物的种子,均是 DFs 的良好来源,但其细胞壁中纤维的构造和主要化学成分(如纤维素、半纤维素及木质素)千差万别,因此对它们进行同一种改性,可以更好地验证改性效果的普适性。

目前,微波改性 DFs 的研究主要集中在 SDF 或活性物质的提取工艺优化等方面<sup>[10-11]</sup>,而比较微波处理对不同种类 DFs 的成分及结构影响,以及最终导致其功能性质改变的研究报道较少。为此研究拟根据不同 DFs 来源选择 3 种有代表性的根茎类、水果类及豆类植物副产物,即甘薯渣、苹果渣和大豆渣。在相同微波条件下对 3 种不同来源的 DFs 进行微波改性,对比 DFs 成分、结构特性及功能特性的变化,探究微波改性在 DFs 改性领域的使用效益,以期提高甘薯渣、苹果渣、大豆渣等副产品的综合利用率。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

甘薯渣、苹果渣和大豆渣:南京市溧水渡江蛋白粉厂;

耐高温  $\alpha$ -淀粉酶(250 U/g)、中性蛋白酶(0.8 U/g)、淀粉葡萄糖苷酶(260 U/mL):美国 Sigma 公司;

总淀粉测定试剂盒(K-TST A-100A)、总膳食纤维测定试剂盒(K-TDFR-200A):爱尔兰 Megazyme 公司;

胆固醇标准品、亚硝酸钠标准品:阿拉丁生物技术有限公司;

邻苯二甲醛、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺等:分析纯,西陇科学股份有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

微波消解仪:MDS-6G 型,上海新仪微波化学科技有限公司;

紫外分光光度计:TU-1810 型,北京普析通用仪器有限责任公司;

真空冷冻干燥机:FD5 型,美国 SIM 公司;

扫描电镜:JSU8100 型,日立高新技术公司;

X-射线衍射仪:D8 Advance 型,德国 Bruker 公司;

热重分析仪:TGA 4000 型,美国 PerkinElmer 公司。

### 1.2 方法

1.2.1 提取未经处理的膳食纤维 根据 Dang 等<sup>[12]</sup>的方法,将原料水洗后分散于水中,调节 pH 6.0,加入耐高温  $\alpha$ -淀粉酶(15 U/g),90 °C 下水浴震荡 30 min。调节 pH 为 6.5,加入蛋白酶(10 U/g),50 °C 恒温震荡 4 h。最后调节 pH 4.5,加入葡萄糖苷酶(52 U/g),60 °C 反应 30 min 后,沸水浴灭酶 5 min。之后用 4 倍体积的 95%乙醇醇沉 4 h 后以 4 500 r/min 离心 15 min,收集沉淀,50 °C 干燥得到未经处理的甘薯渣膳食纤维(WSPF)、苹果渣膳食纤维(WAF)、大豆渣膳食纤维(WSF)。

1.2.2 微波改性膳食纤维 收集 1.2.1 的原料,调节水料比  $V_{\text{水}} : m_{\text{膳食纤维}} = 20 : 1$  (mg/L),转移至微波消解罐中。在微波消解仪中根据以下微波条件进行处理<sup>[13]</sup>:微波功率 800 W,微波温度 160 °C,微波时间 10 min(升温时间 8 min)。微波结束后静置冷却,醇沉 4 h 后以 4 500 r/min 离心 15 min,并将沉淀于 50 °C 干燥,得到微波改性甘薯渣膳食纤维(MWSPF)、微波改性苹果渣膳食纤维(MWAF)、微波改性大豆渣膳食纤维(MWSF)。

#### 1.2.3 微波提取前后膳食纤维的成分测定

(1) 蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。

(2) 脂肪:按 GB 5009.6—2016 执行。

(3) 灰分:按 GB 5009.4—2016 执行。

(4) 总淀粉:用总淀粉测定试剂盒测定。

(5) SDF 和 IDF:用总膳食纤维测定试剂盒测定。

#### 1.2.4 微波提取膳食纤维的结构特征

(1) 微观形貌分析:将 10 mg 冻干的样品放在贴有双面胶的金属台上,表面镀金膜,在加速电压 25 kV,用扫描电镜在放大倍数 1 000 倍数下拍摄得到结果。

(2) X-射线衍射分析:取 10 mg 冻干的样品与 100 mg KBr 共同碾磨并压片,在 30 kV 和 20 mA 的操作电压和电流下收集 XRD 的曲线。测量范围  $2\theta = 5^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,结晶度的计算参照 Segal 等<sup>[14]</sup>的方法。

(3) 热重性能分析:根据 Khatkar 等<sup>[15]</sup>的方法修改如下:取 5 mg 样品置于热重分析仪中,在氮气环境,升温速度 25 °C/min 的条件下,得到样品在 50 ~ 600 °C 的 TGA 曲线。

#### 1.2.5 微波提取膳食纤维的功能特性

(1) 持水力及持油力的测定:参照 Luo 等<sup>[16]</sup>的方法修改如下:称取 2 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 25 mL 蒸馏水(玉米油),室温静置 2 h 后,4 500 r/min 离心 12 min,取沉淀称重。样品的持水力(持油力)为吸附水(油)的重量与样品重量的比值(g/g)。

(2) 胆固醇吸附能力(CAC)测定:根据 Jia 等<sup>[17]</sup>的方法修改如下:取鸡蛋黄 20 mL,在烧杯中与 180 mL 蒸馏

水搅打成乳液。称取 0.5 g 样品与 15 mL 蛋黄乳液混合，并在 37 ℃ 下震荡 2 h。4 500 r/min 离心 15 min 后取上清液 1 mL 用冰醋酸稀释到 10 mL，然后取 0.4 mL 稀释液加入 0.2 mL 1 mg/mL 的邻苯二甲醛及 4 mL 混合酸 ( $V_{\text{冰乙酸}} : V_{\text{硫酸}} = 1 : 10$ ) 混匀静置 10 min 后于 550 nm 处测定吸光度。同时用不加样品的蛋黄乳液作空白对照，根据胆固醇标准曲线进行定量。按式(1)计算胆固醇吸附能力。

$$C = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \quad (1)$$

式中：

C——胆固醇吸附力, mg/g;

$M_1$ ——吸附前蛋黄液中胆固醇质量, mg;

$M_2$ ——吸附后蛋黄液中残余胆固醇质量, mg;

$M_0$ ——样品干重, g。

(3) 亚硝酸根离子吸附力 (NIAC) 测定: 基于 Gan 等<sup>[18]</sup> 的方法修改如下: 称取 0.5 g 样品与 20 mL  $\text{NaNO}_2$  溶液 (25  $\mu\text{g/mL}$ ) 混合, 将 pH 调至 2.0 和 7.0, 模拟胃环境和小肠环境。室温下放置 2 h, 4 500 r/min 离心 15 min 后, 将 0.8 mL 上清转移到玻璃管中。加超纯水至 4 mL, 再加入对氨基苯磺酸 4 mL (4  $\mu\text{g/mL}$ ) 和盐酸萘乙二胺 2 mL (2  $\mu\text{g/mL}$ )。黑暗中反应 15 min 后, 于 538 nm 处测定吸光度, 并根据亚硝酸根离子标准曲线进行定量。按式(2)计算亚硝酸根离子吸附能力。

$$N = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \quad (2)$$

式中：

N——亚硝酸根离子吸附力,  $\mu\text{g/g}$ ;

$M_1$ ——吸附前溶液中亚硝酸根离子质量,  $\mu\text{g}$ ;

$M_2$ ——吸附后溶液中残余亚硝酸根离子质量,  $\mu\text{g}$ ;

$M_0$ ——样品干重, g。

### 1.3 统计分析

所有试验均重复 3 次, 用 SPSS 26.0 软件进行数据分析, 试验结果表示为平均值  $\pm$  标准偏差 ( $n = 3$ ), 采用 Tukey 法检验结果的显著性差异,  $P < 0.05$  表示差异

显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 微波对膳食纤维成分组成的影响

由表 1 可知, 水洗和酶解处理后, 3 种来源样品 IDF 与 SDF 的总量达到 65%~77%, 但仍残余了部分蛋白质及淀粉等杂质。微波后脂肪、蛋白质等杂质的质量分数均有所下降, 说明微波改性在提取 DFs 过程中可能对这些杂质的去除有一定促进作用。IDF 的质量分数在各 DFs 中均占比最高, 经过微波改性后, MWSPF、MWAF 及 MWSF 的 IDF 质量分数分别下降了 6.89%, 1.02%, 34.65%, 相对应 SDF 质量分数均有提高, 分别提高了 63.11%, 4.51%, 358.79%。这可能是由于微波可以通过增加细胞间压力, 从而破坏细胞壁结构, 使其中膳食纤维连接键断裂, 转变成可溶性组分<sup>[16]</sup>。此外, 苹果渣的 SDF 提升幅度最低, 大豆渣的 SDF 提升幅度最高。这可能是由于苹果渣细胞壁结构致密, 不易被微波破坏产生 SDF<sup>[19]</sup>, 而大豆作为一种富含半纤维素的豆类植物, 纤维大分子之间的结合较为薄弱, 在微波形成的空泡效应下, 其中的半纤维素等成分从细胞壁上断裂, 易被微波破坏分解成可溶性纤维<sup>[20]</sup>。

### 2.2 微波对膳食纤维结构特征的影响

2.2.1 微观形貌分析 图 1 为微波前后 3 种 DFs 中的 IDF 的微观形貌图。3 种 DFs 在微波改性后, 表面都形成了较多孔隙结构, 可能是由于微波改性造成 DFs 局部过热, 细胞内的蒸汽压急速升高, 局部水汽爆破使细胞壁破裂所导致<sup>[19]</sup>。此外, MWSPF 表面变得更加平整, 孔隙大小不一; 苹果渣 DFs 壁层较薄, MWAF 部分结构发生断裂, 分离成带有孔隙的碎片; 而 MWSF 表面出现规则的圆形孔洞。上述结果表明, 微波改性使 3 种植物来源的 DFs 比表面积增加, 出现大量孔隙结构, 由于这些孔隙的存在使得这些 DFs 的可及性边缘大大增加, 其中苹果渣 DFs 的结构变化最大, 可及性边缘增加最多, 因此可能表现出更好的水合特性、吸附特性等有益于人体健康的性质<sup>[21]</sup>。

表 1 微波改性前后各膳食纤维样品的成分组成(干基)<sup>†</sup>

Table 1 Composition of dietary fiber samples before and after microwave modification (Dry Mass)

样品	蛋白质	脂肪	灰分	淀粉	IDF	SDF
WSPF	8.08 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	2.11 $\pm$ 0.12 <sup>d</sup>	11.96 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	8.38 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	61.22 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	5.07 $\pm$ 0.36 <sup>f</sup>
MWSPF	7.39 $\pm$ 0.02 <sup>e</sup>	1.30 $\pm$ 0.25 <sup>f</sup>	12.97 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>	6.06 $\pm$ 0.19 <sup>b</sup>	57.00 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>	8.27 $\pm$ 0.54 <sup>d</sup>
WAF	10.32 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	3.83 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>	5.59 $\pm$ 0.38 <sup>c</sup>	0.11 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	60.66 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	16.42 $\pm$ 0.22 <sup>c</sup>
MWAF	10.31 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	3.10 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	4.59 $\pm$ 0.19 <sup>d</sup>	0.10 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	60.04 $\pm$ 0.08 <sup>c</sup>	17.16 $\pm$ 0.28 <sup>b</sup>
WSF	14.63 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	2.44 $\pm$ 0.16 <sup>c</sup>	5.19 $\pm$ 0.22 <sup>c</sup>	—	66.78 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	6.77 $\pm$ 0.19 <sup>e</sup>
MWSF	10.50 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.74 $\pm$ 0.08 <sup>e</sup>	4.65 $\pm$ 0.16 <sup>d</sup>	—	43.64 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	31.06 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); “—”表示未检测出该成分。

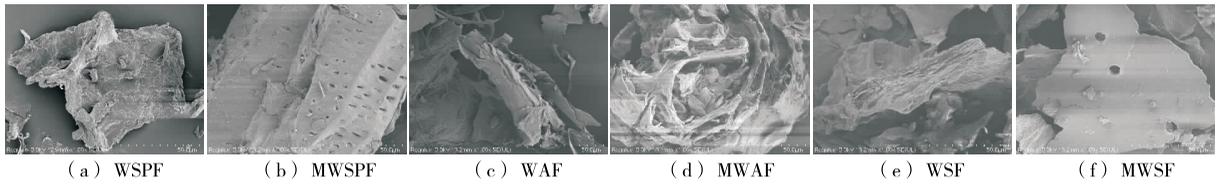


图1 微波前后3种膳食纤维样品的扫描电镜图

Figure 1 Scanning electron micrographs of three DF samples before and after microwave modification (×1 000)

2.2.2 X-射线衍射图谱分析 微波改性前后3种DFs的X-射线衍射对比结果如图2所示。3种DFs样品皆在 $2\theta$ 为 $22.0^\circ \sim 25.0^\circ$ 处出现明显纤维素晶体特征峰,且在 $15.0^\circ \sim 17.5^\circ$ 及 $35.0^\circ$ 附近为弱衍射峰,表明3种DFs样品中存在非晶结构物质<sup>[22]</sup>。各样品微波改性前后的峰型和出峰位置没有明显变化,说明微波改性后DFs样品仍保持较相近的结晶区结构,但微波后3种DFs峰型变得更加尖锐,且结晶强度有不同程度的上升,其中甘薯渣DFs结晶度由36.13%增加到37.80%,大豆渣DFs由33.50%增加到36.31%,苹果渣DFs改性后增加最多,由22.03%增加到31.92%,结晶度增加了9.89%。这可能是由于微波改性导致DFs结晶重排,使得分子排布更加规整,同时微波处理后蛋白质、脂肪、淀粉等含量下降,增加了样品中纤维素的比例<sup>[23]</sup>。

2.2.3 热稳定性分析 微波改性前后3种DFs样品的热重曲线如图3所示,3种DFs样品质量损失过程均可分为水分蒸发( $30 \sim 250^\circ\text{C}$ )、多糖热分解( $250 \sim 350^\circ\text{C}$ )及最终炭化( $350 \sim 600^\circ\text{C}$ )3个阶段<sup>[24]</sup>,其中第二阶段样品的质量迅速下降,失重率达到50%。在前两个阶段中

MWSPF及MWAF相比未改性DFs失重更快,而MWSF却始终保持比WSF更低的失重率,热稳定性改善效果最佳。升温结束后,3种DFs质量残留不同,但相比于未经微波改性的DFs样品,微波改性后DFs的质量残留均有所增加,分别提升了4.53%,0.66%,4.97%。结果表明,微波改性对3种DFs样品的热稳定性有一定的提升效果,与结晶度提高的结果相吻合。

### 2.3 微波改性对膳食纤维功能特性的影响

2.3.1 持水力和持油力 微波改性后3种DFs的持水持油能力均显著提高( $P < 0.05$ )。持水力和持油力是DFs重要的功能特性指标,良好的持水力可防止食品脱水收缩,而高持油力可以降低脂质在肠道内的吸收<sup>[25]</sup>。由表2可知,3种DFs的持水持油能力以大豆渣DFs最高,苹果DFs持水能力次之,但持油力最弱。这可能与不同种类DFs的成分、亲水官能团的数量等有关,大豆渣DFs相比其余两类DFs具有更复杂的单糖组成<sup>[20]</sup>,因此表现出更强的持水持油能力。此外,虽然微波改性后3种DFs的持水持油均有不同程度提升,但相比SDF质量数提升更多的MWSPF与MWSF,MWAF的持水持油能力改

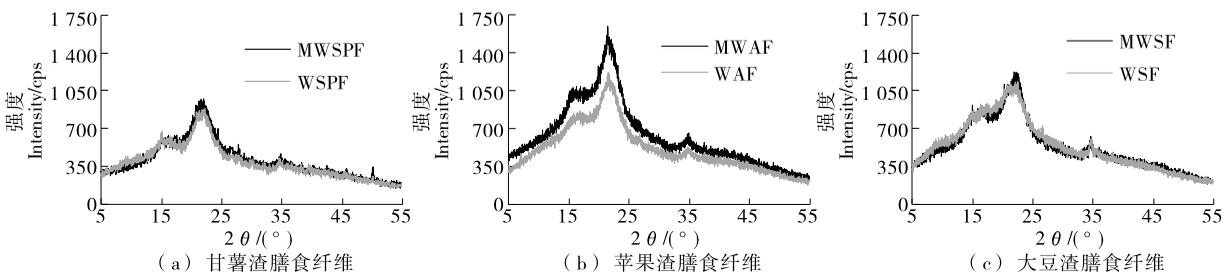


图2 微波改性前后3种膳食纤维样品的X射线衍射图谱

Figure 2 XRD patterns of three DF samples before and after microwave modification

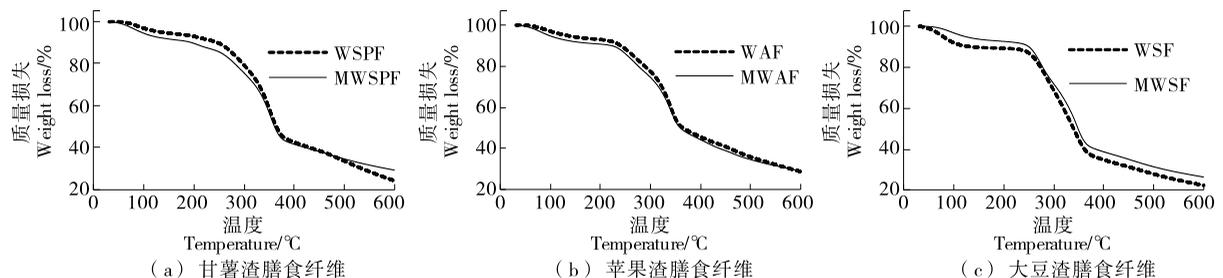


图3 微波改性前后3种膳食纤维样品的热重曲线

Figure 3 Thermal properties of three DF samples before and after microwave modification

表 2 微波改性前后 3 种膳食纤维样品的功能特性<sup>†</sup>

Table 2 Physicochemical properties of three DF samples before and after microwave modification

样品	持水力/ (g · g <sup>-1</sup> )	持油力/ (g · g <sup>-1</sup> )	胆固醇吸附力/ (mg · g <sup>-1</sup> )	亚硝酸根离子吸附力/(μg · g <sup>-1</sup> )	
				pH 2	pH 7
WSPF	7.56 ± 0.09 <sup>f</sup>	2.23 ± 0.10 <sup>e</sup>	2.53 ± 0.03 <sup>e</sup>	549.27 ± 0.39 <sup>f</sup>	53.87 ± 0.21 <sup>d</sup>
MWSPF	8.79 ± 0.02 <sup>e</sup>	2.93 ± 0.11 <sup>b</sup>	3.34 ± 0.11 <sup>b</sup>	613.89 ± 0.33 <sup>d</sup>	198.60 ± 0.29 <sup>a</sup>
WAF	9.12 ± 0.10 <sup>d</sup>	1.44 ± 0.01 <sup>f</sup>	2.75 ± 0.05 <sup>d</sup>	683.81 ± 0.40 <sup>b</sup>	30.29 ± 0.23 <sup>e</sup>
MWAF	11.54 ± 0.05 <sup>c</sup>	2.41 ± 0.03 <sup>d</sup>	3.85 ± 0.09 <sup>a</sup>	735.20 ± 0.22 <sup>a</sup>	126.79 ± 0.37 <sup>c</sup>
WSF	13.13 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.57 ± 0.03 <sup>c</sup>	2.05 ± 0.08 <sup>f</sup>	584.40 ± 0.26 <sup>e</sup>	54.03 ± 0.16 <sup>d</sup>
MWSF	15.88 ± 0.15 <sup>a</sup>	3.25 ± 0.18 <sup>a</sup>	3.08 ± 0.12 <sup>c</sup>	626.64 ± 0.36 <sup>c</sup>	142.85 ± 0.42 <sup>b</sup>

† 同列字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

善效果最佳,分别提升了 26.53% 及 67.36%,这与苹果渣 DFs 改性更多可及性边缘的暴露(图 2)有关,与李天等<sup>[26]</sup>的研究结论一致。说明改性之后,DFs 吸附特性的改变不仅仅与 SDF 的质量分数有关,改性之后 IDF 可及性边缘的暴露与更复杂的空间结构也是促进 DFs 功能性质改变的重要原因。

2.3.2 胆固醇吸附能力 冠心病的发生与血液中胆固醇含量有直接的关系,因此改善 DFs 胆固醇的吸附能力具有重大意义<sup>[27]</sup>。对比改性前后 3 种 DFs 的胆固醇吸附能力,MWSPF、MWAF 及 MWSF 的胆固醇吸附能力分别提高了 32.02%,40.00%,50.24%。其中吸附能力提升最多的是 MWSF,吸附量由 2.05 mg/g 上升到 3.08 mg/g。Theuwissen 等<sup>[28]</sup>的研究结果表明,DFs 结合胆固醇的能力不仅与其内部结构有关,成分组成也是影响其结合胆固醇能力的重要因素之一,如 β-葡聚糖一类的 SDF,相比 IDF 在降血清胆固醇方面效果更好,因此 MWSF 中提升较多的 SDF 可能是导致其胆固醇吸附能力相比其他 DFs 提升更多的重要原因。

2.3.3 亚硝酸根离子吸附力 pH 作为一项重要指标,对 DFs 吸附亚硝酸根离子能力有较大影响<sup>[29]</sup>。因此模拟胃环境(pH 2)和肠道环境(pH 7)下各 DFs 对亚硝酸根离子的吸附能力,结果如表 2 所示。DFs 结构中含有的糖醛酸、氨基酸,特别是酚酸等活性基团在酸性条件下对亚硝基有较强的吸附作用<sup>[30]</sup>,因此在胃环境下 DFs 的亚硝酸根离子吸附能力显著高于肠道环境( $P < 0.05$ )。不同 pH 条件下微波后的 DFs 对亚硝酸根离子吸附力均有所提高,胃环境(pH 2)下 MWSPF、MWAF、MWSF 的吸附能力分别提升了 11.76%,7.52%,7.23%,而肠道环境(pH 7)下吸附能力的提升幅度要显著高于胃环境,分别提升了 268.67%,318.59%,164.39%。同时由于苹果渣 DFs 相比于其他两种 DFs,含有较多的酚类物质<sup>[31]</sup>,所以酸性条件下,微波前后苹果渣 DFs 的亚硝酸根离子吸附力在 3 种 DFs 中最强(WAF 683.81 μg/g; MWAF 735.20 μg/g)。微波改性后,尽管苹果渣的可溶性膳食纤维

增加幅度比大豆渣和甘薯渣少,但是其样品表面出现疏松多孔的结构,在一定程度上使得 DFs 暴露出更多可结合亚硝酸根离子的吸附位点,同时这些孔隙形成的毛细管效应加快了亚硝酸根离子进入 DFs 结构内部的速度,因此改性后 DFs 对亚硝酸根离子的吸附能力在胃肠环境下都有提高,特别是对于亚硝酸根离子的吸附能力相对较弱的肠道环境提升幅度尤其显著。

### 3 结论

微波改性是一种高效的具有普适性的膳食纤维改性方法。微波改性后 3 种膳食纤维总体的变化趋势是可溶性纤维质量分数升高,不溶性膳食纤维质量分数下降,可及性边缘增加,结晶度升高及热稳定性加强。同时,微波改性能使膳食纤维更好地与水、油、胆固醇、亚硝酸根离子等物质结合。

由于 3 种不同来源的膳食纤维样品自身成分及细胞壁结构的差异,微波改性对其结构及功能特性的改善效果也显著不同。总体而言,苹果渣膳食纤维的功能性质改善最为显著,但是微波改性后可溶性膳食纤维的增加却最低,这与苹果渣膳食纤维表观结构破坏程度更大有关。大豆渣膳食纤维微波改性后可溶性纤维质量分数最高(31.06%),增幅最大(358.8%),其持水持油性及肠道条件下的亚硝酸根离子吸附能力的改善效果均弱于微波改性苹果渣膳食纤维(可溶性纤维质量分数 16.4%;增幅 4.5%)。因此,膳食纤维吸附特性的改变不仅与可溶性纤维的质量分数有关,不溶性膳食纤维可及性边缘的暴露也是促进膳食纤维功能性质改善的重要原因。

### 参考文献

- [1] MAKKI K, DEEHAN E C, WALTER J, et al. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease[J]. Cell Host Microbe, 2018, 23(6): 705-715.
- [2] ZHENG Bo, ZHONG Shao-wen, TANG Yu-kuo, et al. Understanding the nutritional functions of thermally-processed whole grain highland barley in vitro and in vivo [J]. Food

- Chemistry, 2020, 310: 125979.
- [3] AMINI N, HARITOS V S, TANKSALE A. Microwave assisted pre-treatment of eucalyptus sawdust enhances enzymatic saccharification and maximizes fermentable sugar yield [J]. *Renewable Energy*, 2018, 127: 653-660.
- [4] 吴卫成, 戴建波, 曹艳, 等. 物理改性对甘薯皮膳食纤维含量、多糖组成及其结构的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(3): 490-498.
- [5] 任雨离, 刘玉凌, 何翠, 等. 微波和微粉碎改性对方竹笋膳食纤维性能和结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(8): 145-150.
- [6] CANTU-JUNGLES T M, ZHANG Xiao-wei, KAZEM A E, et al. Microwave treatment enhances human gut microbiota fermentability of isolated insoluble dietary fibers[J]. *Food Research International*, 2021, 143: 110293.
- [7] YU Li-na, GONG Qing-xuan, YANG Qing-li, et al. Technology optimization for microwave-assisted extraction of water soluble dietary fiber from peanut hull and its antioxidant activity[J]. *Food Science and Technology Research*, 2011, 17(5): 401-408.
- [8] 闫荣玲, 廖阳, 毛龙毅, 等. 柚皮膳食纤维微波辅助碱法提取工艺优化及其功能特性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(12): 143-147.
- [9] 栗俊广, 姜茜, 望运滔, 等. 不同来源膳食纤维的结构和理化性质分析[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 18-23.
- [10] 康丽君, 寇芳, 沈蒙, 等. 响应面试验优化小米糠膳食纤维改性工艺及其结构分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 240-247.
- [11] ANDREANI E S, KARBOUNE S. Comparison of enzymatic and microwave-assisted alkaline extraction approaches for the generation of oligosaccharides from American cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) pomace[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(8): 2 443-2 451.
- [12] DANG T T, VASANTHAN T. Modification of rice bran dietary fiber concentrates using enzyme and extrusion cooking[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 773-782.
- [13] LAMOTHE L M. Fermentable carbohydrate sources generated from cereal and pseudocereal insoluble dietary fibers and their *in vitro* fecal fermentation[D]. West Lafayette: Purdue University, 2014: 65-97.
- [14] SEGAL L, CREELY J J, MARTIN A E, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. *Textile Research Journal*, 1959, 29(10): 786-794.
- [15] KHATKAR B S, BARAK S, MUDGIL D. Effects of gliadin addition on the rheological, microscopic and thermal characteristics of wheat gluten [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 53: 38-41.
- [16] LUO Xian-liang, WANG Qi, FANG Dong-ya, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 1 461-1 467.
- [17] JIA Meng-yun, CHEN Jia-jun, LIU Xiao-zhen, 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.
- [18] GAN Jia-pan, HUANG Zi-yan, YU Qiang, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105549.
- [19] LI Xue-li, HE Xiu-li, LV Yuan-ping, et al. Extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from apple pomace[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2014, 37(3): 293-298.
- [20] SHEN Meng, WANG Wei-hao, CAO Long-kui. Soluble dietary fibers from black soybean hulls: Physical and enzymatic modification, structure, physical properties, and cholesterol binding capacity[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(6): 1 668-1 674.
- [21] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 高压均质和胶体磨改性对油橄榄果渣水不溶性膳食纤维性能的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(8): 10-13, 18.
- [22] KARAMAN E, YILMAZ E, TUNCEL N B. Physicochemical, microstructural and functional characterization of dietary fibers extracted from lemon, orange and grapefruit seeds press meals[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2017, 11: 9-17.
- [23] 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.
- [24] WANG Yun-pu, DUAN Deng-le, LIU Yu-huan, et al. Properties and pyrolysis behavior of moso bamboo sawdust after microwave-assisted acid pretreatment[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 129: 86-92.
- [25] ELLEUCH M, BEDIGIAN D, ROISEUX O, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review[J]. *Food Chemistry*, 2010, 124(2): 411-421.
- [26] 李天, 颜玲, 李沛军, 等. 超高压和超微粉碎改性对梨渣膳食纤维的影响[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(23): 18-23.
- [27] NSOR-ATINDANA J, ZHONG Fang, MOTHIBE K J. *In vitro* hypoglycemic and cholesterol lowering effects of dietary fiber prepared from cocoa (*Theobroma cacao* L.) shells[J]. *Food & Function*, 2012, 3(10): 1 044-1 050.
- [28] THEUWISSEN E, MENSINK R P. Water-soluble dietary fibers and cardiovascular disease[J]. *Physiology & Behavior*, 2008, 94(2): 285-292.
- [29] 王鑫, 黄韬睿, 黄丽娟, 等. 小麦麸皮清除和结合亚硝酸盐能力的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2017(5): 9-12.
- [30] 王旭. 米糠膳食纤维的改性制备及其特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 63-65.
- [31] TREUTTER D. Biosynthesis of phenolic compounds and its regulation in apple[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 34(1): 71-89.