

不同提取工艺对芹菜可溶性膳食纤维结构及抗氧化特性的影响

龙芳*

(长沙商贸旅游职业技术学院湘菜学院, 湖南长沙 410116)

摘要: 以芹菜渣为原料, 采用水提(W), 碱提(A)和超声辅助碱提(UA)工艺制备三种可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF), 并对比其结构及抗氧化活性的差异。通过傅里叶红外光谱(FT-IR)、热分析技术和扫描电镜等表征SDF的结构, 结果显示: 碱处理可导致酯键断裂, 而超声辅助碱处理可裂解醚键致SDF含量增多; W-SDF、A-SDF和UA-SDF的吸热峰温分别为146.99、150.09和153.44℃, 热稳定性大小为: UA-SDF>A-SDF>W-SDF; W-SDF表面光滑紧实, 平均粒径最大(1481 nm), 而A-SDF与UA-SDF均呈现多孔疏松的结构, A-SDF粒径次之(841 nm), UA-SDF最小(588.34 nm), 这说明通过碱处理和超声处理, 可导致酯键和醚键的断裂, 进而将不溶性SDF转变为可溶性SDF。三种SDF体外抗氧化活性存在显著性差异($P<0.05$), 其中UA-SDF对·OH和DPPH·清除能力最强, 且 IC_{50} 分别为0.67和0.31 mg/mL, 其次是A-SDF的 IC_{50} 分别为1.25和0.58 mg/mL, W-SDF的 IC_{50} 分别为1.72和0.86 mg/mL。综合分析, 芹菜可溶性膳食纤维的抗氧化特性差异是由其化学成分和表面结构的差异引起的。

关键词: 芹菜渣; 可溶性膳食纤维; 不同提取方法; 结构特性; 抗氧化特性

文章编号: 1673-9078(2024)11-297-304

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1299

Effects of Different Extraction Processes on the Structure and Antioxidant Properties of Soluble Dietary Fiber from Celery

LONG Fang*

(Department of Hunan Cuisine, Changsha Commerce & Tourism College, Changsha 410116, China)

Abstract: Three types of soluble dietary fibers (SDF) were prepared from celery residue by water extraction (W-SDF), alkali extraction (A-SDF), and ultrasound-assisted alkali extraction (UA-SDF), and the differences in their structure and antioxidant properties were compared. The structures of the SDF samples were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), thermal analysis techniques and scanning electron microscopy. The results showed that alkali treatment could cause ester bond cleavage, while ultrasound-assisted alkali treatment could increase the content of SDF through breaking the ether bonds. The endothermic peak temperatures of W-SDF, A-SDF, and UA-SDF were 146.99, 150.09, and 153.44 °C, respectively, and the thermal stability followed the order of UA-SDF>A-SDF>W-SDF. The W-SDF had a smooth

引文格式:

龙芳.不同提取工艺对芹菜可溶性膳食纤维结构及抗氧化特性的影响[J].现代食品科技,2024,40(11):297-304.

LONG Fang. Effects of different extraction processes on the structure and antioxidant properties of soluble dietary fiber from celery [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 297-304.

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(22B1094)

作者简介: 龙芳(1988-), 女, 在读博士, 讲师, 研究方向: 天然产物绿色修饰及综合利用、餐饮食品加工及其组分变化研究, E-mail: longfang2013jie@163.com

and compact surface with the largest average particle size (1 481 nm), whilst the A-SDF and UA-SDF showed porous and loose structures with average particle sizes being 841 nm and 588.34 nm, respectively, indicating that the alkali treatment and ultrasound treatment resulted in the cleavage of ester and ether bonds thereby causing the conversion of insoluble fiber to soluble fibers. The *in vitro* antioxidant activity results showed significant differences ($P<0.05$) among the three kinds of fibers. Among them, the UA-SDF exhibited the strongest abilities to scavenge $\cdot\text{OH}$ and DPPH \cdot with IC_{50} values being 0.67 and 0.31 mg/mL, respectively, followed by A-SDF (which had IC_{50} values of 1.25 and 0.58 mg/mL, respectively), and W-SDF (which had IC_{50} values of 1.72 and 0.86 mg/mL, respectively). Comprehensive analysis suggests that the differences in the antioxidant properties of the soluble dietary fibers from celery residue were caused by the differences in their chemical compositions and surface structures.

Key words: celery residue; soluble dietary fiber; different extraction methods; structural characteristics; antioxidant properties

近年来,我国蔬菜产量逐年增长,蔬菜加工业也发展迅猛,但目前仍面临诸多挑战,如副产物加工利用不足和环境污染问题。芹菜是我国的主要蔬菜之一,年产量超过了2 000万t,远高于美国和欧洲总产量^[1]。芹菜富含维生素、胡萝卜素、蛋白质、纤维素、矿物质等营养成分,是类黄酮、挥发油和抗氧化剂的良好来源,也是世界范围内种植广泛的具有重要药用价值的蔬菜和芳香植物^[2]。然而,食品加工厂将芹菜榨汁后,产生的副产物芹菜渣处理不充分,仅有少部分用于饲料工业,每年约有1 200 t残渣被废弃,造成了大量资源浪费和环境污染^[3]。因此,从芹菜废弃物中提取膳食纤维不仅可以提高经济效益,而且还能减少环境污染。

芹菜渣不仅营养价值高还具有保健功效,芹菜渣中含有丰富的低聚糖、果胶、纤维素、半纤维素等膳食纤维(Celery Dietary Fiber, CDF),膳食纤维具有润肠通便、降脂降糖、预防糖尿病和心脏病以及减肥等多种功效。研究发现芹菜膳食纤维能抑制有害菌的生长,减少胆汁酸的产生,对调节胃肠道健康具有积极作用,对自由基有较强的清除能力,从而防治结肠癌^[4-6]。因此,开展芹菜渣中膳食纤维的研究具有重要意义。

目前关于芹菜膳食纤维的研究已有一些报道,如于金慧等^[5]研究表明芹菜纤维能有效降低小鼠血清胆固醇和血糖;Yan等^[6]研究显示芹菜纤维素水凝胶载体具有控制短链脂肪酸的释放;李昌文等^[7,8]采用微波辅助法成功提取了芹菜SDF,并发现其对芝麻油具有一定的抗氧化作用。膳食纤维常规的提取方法主要包括化学法、酶法和微生物法等,相较于这些方法,结合超声技术提取的膳食纤维具有更好的功能特性^[9,10]。如Chutia等^[11]研究显示联合超声处理能显著提高葡萄糖吸附量(9.5~18.3 mmol葡萄

糖/克纤维)、 α -淀粉酶活性和乳化量(38.9%~50.1%)。

本研究以芹菜渣为原料,通过水提、碱提和超声辅助碱提三种方法制备出可溶性芹菜膳食纤维,以OH自由基和DPPH自由基清除率为评价指标,考察不同提取工艺对芹菜可溶性膳食纤维抗氧化特性的影响;采用傅里叶红外光谱、热分析技术和扫描电镜表征不同提取方法得到的膳食纤维的结构特性,并分析三种膳食纤维的结构及抗氧化活性的差异,以期对芹菜的深加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料设备

1.1.1 材料与试剂

试验原材料:本芹购自本地农贸市场,长沙雨花区冯家冲农贸市场。

主要试剂:1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) 和水杨酸,上海索莱宝生物科技有限公司;无水 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 、 $(\text{NaPO}_3)_6$ 、HCl、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)、 NaHCO_3 、NaOH、 FeSO_4 以及邻苯二甲醛均为国产分析纯。

1.1.2 仪器与设备

pH-2型酸度计,上海雷磁仪器有限公司;JY92-11N超声细胞粉碎机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Nano-ZS-90马尔文激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;BS224S分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司;Spectrum Two傅里叶红外光谱仪,美国珀金埃尔默股份有限公司;TGA6000热重分析仪、DSC-4000差示量热扫描仪,美国珀金埃尔默股份有限公司;ALPHA 1-2 LD plus德国冷冻干燥机(德国Christ),上海顶仪科技有限公司;S3400型扫描

电镜, 日本 Hitachi 公司。

1.2 研究方法

1.2.1 样品预处理

芹菜渣的预处理: 原材料为本芹, 取自当地菜市场, 将新鲜芹菜洗净去除根及芹菜叶片, 切成小断, 置于 60℃ 烘箱中烘干, 然后用粉碎机破碎, 收集粉末, 备用。

称取一定量上述芹菜粉置于 96% (V/V) 沸腾的乙醇中, 反应时间为 20 min, 冷却过滤, 然后再用 $\varphi=70\%$ 乙醇溶液进行洗涤, 除去分子量小的糖、有机酸等。将滤渣置于 40℃ 的干燥箱中干燥, 得到不溶于醇的残留物。将残留物粉碎过 50 目标准筛筛选, 并经过高速粉碎后再过 80 目筛, 最后在 40℃ 下烘干, 获得芹菜渣粉。

1.2.2 芹菜可溶性膳食纤维制备工艺

1.2.2.1 水提取可溶性膳食纤维 (W-SDF)

取 10 g 芹菜渣粉样品, 按照料液比 1:15 (g/mL) 加入去离子水, 在室温下磁力搅拌 30 min, 然后以 4 000 r/min 的速度离心 30 min。取上清液, 在室温下加入 3 倍体积的乙醇进行沉淀, 静置 60 min, 再以 8 000 r/min 的速度离心 30 min, 收集沉淀的 SDF, 冷冻干燥得到 W-SDF^[12], 其得率按照下面公式 (1) 计算。

$$Y = \frac{m_{SDF}}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Y—得率, %;

m_{SDF} —SDF 的质量, g;

m —试样的质量, g。

1.2.2.2 碱提 (Alkali) 可溶性膳食纤维 (A-SDF)

参照前人已报道文献^[13], 稍作修改。取 10 g 芹菜渣粉样品, 按料液比 1:15 (g/mL) 加入 1% (m/m) 的 NaOH 溶液中, 在 50℃ 的恒温水浴中以磁力搅拌 30 min, 然后以 4 000 r/min 的速度离心 30 min。取上清液, 在室温下加入 3 倍体积的乙醇溶液进行沉淀, 静置 60 min, 再以 8 000 r/min 的速度离心 30 min, 收集沉淀的 SDF, 冷冻干燥获得 A-SDF。

1.2.2.3 超声辅助碱 (Ultrasond-assisted Alkali) 提取 SDF (UA-SDF)

准确称取 10.0 g 芹菜渣粉样品于三角瓶中。在 1.2.2.2 的基础上, 以超声功率 184 W、温度为 50℃ 水浴条件下提取 30 min, 然后以 4 000 r/min 的速度离

心 30 min。取上清液, 在室温下加入 3 倍体积的乙醇, 静置 60 min, 再以 8 000 r/min 的速度离心 30 min, 收集沉淀的 SDF, 冷冻干燥获得 UA-SDF。

1.2.3 结构表征

1.2.3.1 傅里叶红外光谱

参考 Beck 等^[14]的方法, 精确称取 2 mg 干燥的 SDF 样品, 加入 200 mg 的溴化钾, 进行研磨混合均匀, 然后进行压片, 将含有样品的溴化钾片置于恒温箱中平衡 5 min, 首先采用红外光谱仪进行空气空白扫描, 然后进行样品红外光谱扫描, 扫描波段为 4 000~1 000 cm^{-1} , 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数 32。采集红外图谱。

1.2.3.2 差示扫描量热分析

在 50 μL 铝制液体皿加入 2.000 mg 的 SDF 样品, 以去离子水密封铝液体坩埚作为参比, 设置扫描速度为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 扫描温度范围为 20~200 $^{\circ}\text{C}$, 试验数据分析采用 Pyris Software DSC 4000 通用软件进行分析。

1.2.3.3 热重分析

采用 Perkin Elmer STA6000 型热重分析仪对样品进行热重分析: 上样量 3.0 mg, 测试温度为 30~750 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 15 $^{\circ}\text{C}$, 采用高纯度氮气作为载气, 载气速率为 20 mL/min、压力为 2 MPa, 采用仪器自带软件 Pris 1 TGA 进行分析, 每个样品做 3 次平行试验。

1.2.3.4 粒子特性分析

采用马尔文激光粒度分析仪测定样品的流体动力学粒径及其分布。将样品用 pH 值 7.2 的磷酸盐缓冲液配制成 1 mg/mL 的溶液, 过 0.45 μm 水系醋酸纤维素滤膜。在温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、平衡时间为 120 s、分散相折射率为 1.471 和分散剂折射率为 1.330 条件下, 平行测定 3 次, 取平均值。将样品用 DTS1060C 皿在 Malvern Zeta Plus 测定电位。

1.2.3.5 扫描电镜测定

取适量冻干后的样品均匀粘在扫描电镜观察台上, 用 Q150T ES 型粒子溅射镀膜仪给样品镀金, 厚度约为 15 nm, 采用 Hitachi S3400 型扫描电镜观测, 仪器观测参数: 加速电压 5 kV, 放大倍数 500 倍。

1.2.4 体外抗氧化能力测定

将不同制备工艺下的 SDF 配置成质量浓度为 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1 mg/mL 的样品液, 分别测定 OH 自由基清除和 DPPH 自由基清除半抑制率 (50% Inhibitory Concentration, IC_{50})。

(1) 羟基自由基清除测定

羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 清除能力参考曾剑华等^[15]方法采用水杨酸法测定, 具体如下: 取 0.5 mL 样品于比色管中, 分别加入 0.5 mL 硫酸亚铁溶液 (9.1 mmol/L)、5 mL 过氧化氢溶液 (8.8 mmol/L) 的和 0.5 mL 水杨酸-无水乙醇溶液 (9.1 mmol/L), 用去离子水定容至 10 mL, 于 37 °C 水浴中静置 30 min, 在波长 510 nm 处测定吸光值。计算公式 (2) 如下:

$$S = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

S —羟基清除率, %;

A_0 —表示只加蒸水溶液的吸光值 (作空白);

A_1 —表示加样品后溶液的吸光值;

A_2 —表示未加硫酸亚铁溶液的吸光值。

(2) DPPH·清除率测定

DPPH·测定方法参照 Nicklisch 等^[16]的方法, 并稍作修改: 将 0.5 mL 样品溶液加入 3.3 mL 含有 1% 吐温 20 柠檬酸/磷酸盐缓冲液 (0.1 mol/L, pH 值 7.0), 接着加入 0.2 mL 2 mmol/L 的 DPPH 甲醇溶液 (现配现用), 使 DPPH 最终浓度为 0.1 mmol/L。在黑暗条件下反应 2 h 后, 在 517 nm 波长下测定吸光值。同时以 0.1 mol/L pH 值 3.0 的柠檬酸/磷酸盐缓冲液和去离子水作空白对照。DPPH·清除率计算公式 (3) 如下:

$$R = \left(\frac{A_{S0} - A_{S1}}{A_{S0}} - \frac{A_{C0} - A_{C1}}{A_{C0}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

R —DPPH·清除率;

A_{S0} —样品初始吸光值;

A_{C0} —空白初始吸光值;

A_{S1} —样品反应后的吸光值;

A_{C1} —空白反应后的吸光值。

1.3 数据处理与分析

数据结果用 $M \pm SD$ 表示, 使用 SPSS 22.0 软件进行统计分析, 组间差异显著性采用单因素方差分析 ($P < 0.05$); 用 Origin 2017 软件绘制试验数据趋势曲线图; 每个指标做 3 次平行试验。

2 结果与分析

2.1 结构分析

2.1.1 红外光谱分析

由图 1 所示, W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的

FT-IR 谱图特征基本相似, 通过碱处理和超声处理后的膳食纤维红外光谱中没有出现新的红外吸收峰, 只是官能团谱带的吸收强度和位置有变化, 表明碱处理会导致酯键断裂, 而超声辅助碱处理使其降解为更多的 SDF^[11]。在 3 285 cm^{-1} 处有强而宽的吸收, 这对应于 OH 基团的拉伸, 主要来自果胶 (半乳糖醛酸) 和半纤维素 (木糖, 甘露糖, 半乳糖和阿拉伯糖), 同时 2 912 cm^{-1} 处有 CH 基团拉伸弱吸收带, 结果表明三种 SDF 均存在多糖化合物的典型结构, 与已报道的文献结果类似^[17]。通常酯化羧基的特征吸收峰在 1 745~1 750 cm^{-1} 处, 由图 1 中 A-SDF 和 UA-SDF 的谱图可知, 在这个范围内没有明显的振动信号, 而 W-SDF 的红外光谱图在 1 750 cm^{-1} 处有吸收峰, 表明碱处理可导致酯键的断裂; 同时, 超声处理可以裂解醚键, 因此可推测 A-SDF 和 UA-SDF 中的果胶是低甲氧基果胶^[18]。在 1 616~1 644 cm^{-1} 范围内的振动对应于来自果胶的糖醛酸和半纤维素的糠醛酸酯化与离子化羧基的特征吸收峰, 同时, 1 419 cm^{-1} 和 1 017 cm^{-1} 是木聚糖和木质素典型碳骨架的特征吸收峰^[19]。由红外图谱可知, 经超声处理后的 UA-SDF 在 1 644 cm^{-1} 和 1 419 cm^{-1} 和 1 017 cm^{-1} 吸收峰强度减小, 表明该样品中含有羰基结构和木质素含量减少, 说明超声辅助碱处理导致不可溶性膳食纤维降解为富含羧基的 SDF^[12]。

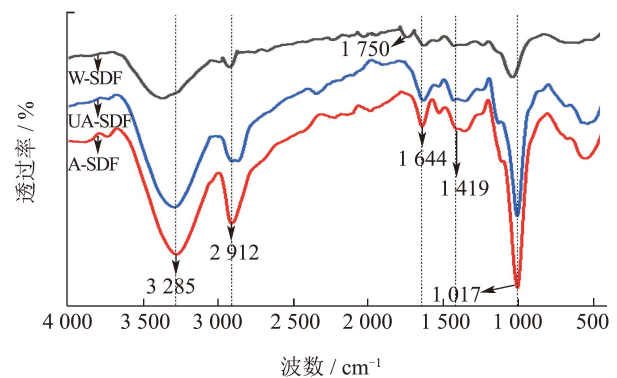


图 1 W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的红外光谱

Fig.1 FT-IR spectrums of W-SDF, A-SDF and UA-SDF

2.1.2 热稳定性分析

采用差示扫描量热和热重分析可表征不同制备工艺下提取物的热稳定性, 结果如图 2 和 3 所示。

由图 2 可知, W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的 DSC 曲线形状基本类似, 只出现单一吸收峰, 表明制备的 3 个样品含有的杂质较少。W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的吸热峰温分别为 146.99、150.09 和 153.44 °C, 同时, W-SDF 的热流随着碱处理和超

声处理逐渐减小,表明碱提取和超声辅助碱提取能得到更多的短链 SDF 分子,而短链可溶性膳食纤维含量多的 A-SDF 和 UA-SDF 所形成的氢键比 SDF 强,因此破坏 A-SDF 和 UA-SDF 的晶体结构就需要吸收更多的能量,因而表现出吸热峰温度: UA-SDF > A-SDF > W-SDF。此外,由热流曲线位置可知,3 个样品的能量为: W-SDF > A-SDF > UA-SDF,因此可以推测 3 个样品中可溶性膳食纤维稳定性大小为: UA-SDF > A-SDF > W-SDF,这与 Zhang 等^[19]发现挤压处理燕麦膳食纤维比未处理的热稳定性高结果相一致。

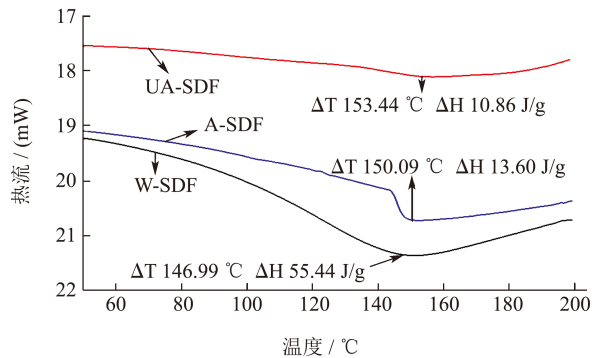


图 2 W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的 DSC 图谱

Fig.2 DSC spectrums of W-SDF, A-SDF and UA-SDF

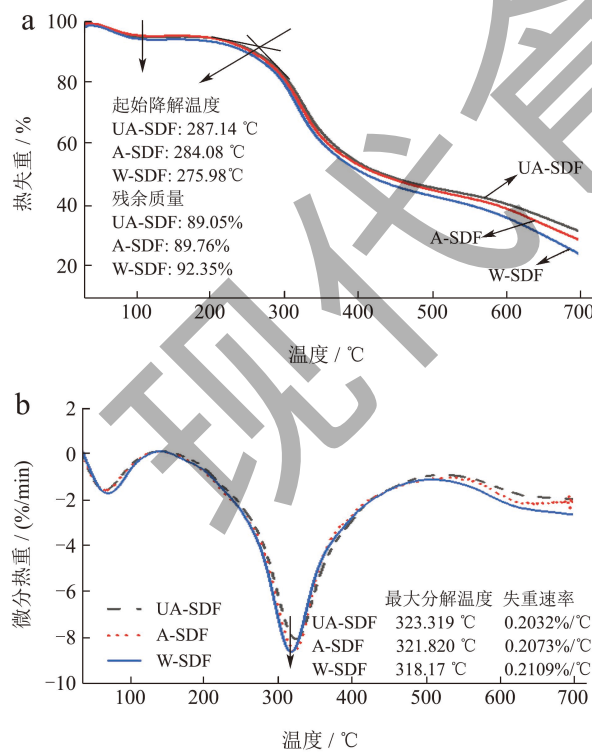


图 3 W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的热重 (a)

和微分热重 (b) 曲线

Fig.3 TG (a) and DTG (b) curves of W-SDF, A-SDF and UA-SDF

通过热重分析 W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的热稳定性差异,由图 3a 可知,W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的热失重曲线形状类似。热失重过程主要分为三个阶段,第一阶段是 30~120 °C 范围左右,这一过程的失重主要是样品失水(自由水和部分束缚水);由图 3a 可知,这一阶段质量损失大小为: UA-SDF > A-SDF > W-SDF,这可能是因为在碱性条件下进行超声处理,可能会导致膳食纤维微观结构发生破坏,亲水部位增多,增加了膳食纤维的持水能力^[20,21]。第二阶段是 120~400 °C,其中 120~200 °C 这个过程样品质量基本无变化,是样品预热降解过程,而热降解过程主要是发生在 200~400 °C 范围内,是样品失重的主要过程;由图 3a 可知,样品的起始分解温度最高的是 UA-SDF (287.14 °C),其次是 A-SDF (284.08 °C),最后是 W-SDF (275.98 °C),起始分解温度越高,表明样品稳定性越好,这与 DSC 分析结果相一致。因此,UA-SDF 具有较高的热降解温度,因而表现出较好的热稳定性,能更好地应用于食品和药品加工过程中。由图 3b 可知,W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的最大降解速率分别为 0.210 9、0.207 3 和 0.203 2%/°C,十分接近,表明超声辅助碱提取可溶性膳食纤维并未改变 SDF 的热分解机制。第三阶段是 400~700 °C,该阶段三个样品重量损失减缓,可能是由于样品残渣的主要成分为纤维素(木质素化合物)或碳化分解引起的^[21]。

2.1.3 颗粒特性和微观结构分析

采用马尔文激光粒度仪表征样品的颗粒特性,结果如图 4 所示。

由图 4a 可知,本实验制备的样品颗粒粒径呈现多峰分布,粒径大小在 100~10 000 nm 之间,其中热水浸提的 W-SDF 平均粒径最大,为 1 481 nm 左右,碱提取的 A-SDF 次之,为 841 nm,超声辅助碱提的 UA-SDF 最小为 588.3 nm,表明通过碱提和超声辅助碱提后 SDF 的平均粒径逐渐减小,这可能是碱处理产生水解以及超声处理产生的空化效应,导致纤维束裂解成单根纤维、纤维素和半木质素降解成断链的可溶性 SDF,并暴露出部分亲水游离基,从而导致 SDF 表面电荷含量增加(图 4b)。

2.1.4 扫描电镜分析

通过扫描电镜进一步深入分析碱提取和超声辅助碱提取对 SDF 微观结构的影响,结果如图 5 所示。

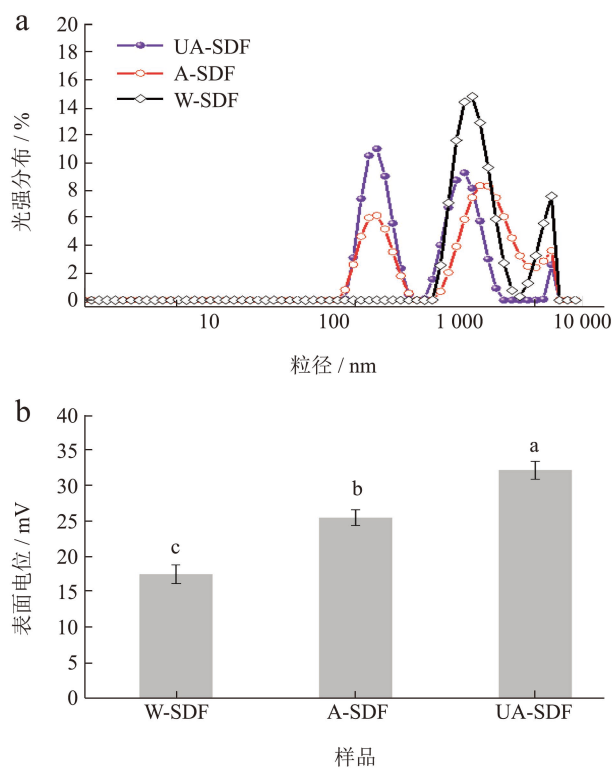


图4 W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 的粒径分布 (a) 和表面电位 (绝对值) (b) 图

Fig.4 Particle size distribution (a) and Zeta potential (b) of W-SDF, A-SDF and UA-SDF

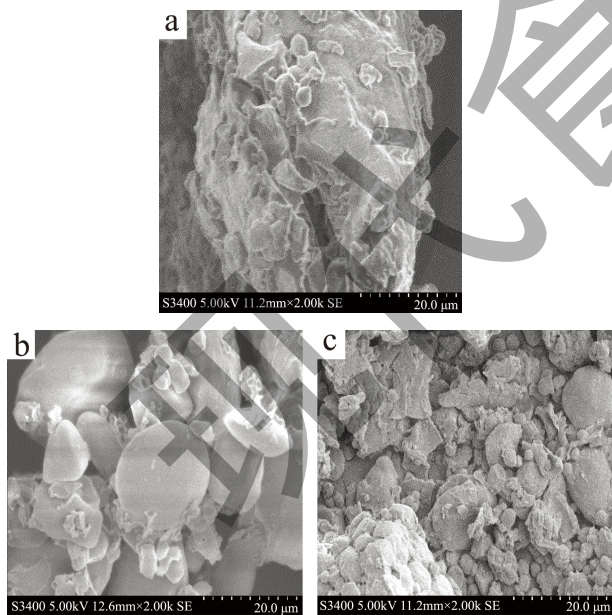


图5 W-SDF (a)、A-SDF (b) 和 UA-SDF (c) 的扫描电镜图

Fig.5 Scanning electron microscopy of W-SDF (a), A-SDF (b) and UA-SDF (c)

由图 5a 可知, 热水浸提 W-SDF 的表面较光滑, 且质地相对密实, 而经碱处理 A-SDF (图 5b) 和超

声辅助碱处理 UA-SDF (图 5c) 的 SDF 表面一体结构逐渐被打破, 且逐渐细小颗粒化, 并呈现出多孔隙结构。这是由于碱处理产生的水解效应以及超声辅助碱处理产生的空化效应和机械效应等作用, 很大程度上破坏了膳食纤维结构结构中的糖苷键和多糖分子链间与链内的氢键, 使得长链的膳食纤维降解成断链的 SDF, 并暴露出亲水游离基以及更多的活性基团, 最终使其结构变得疏松和多孔^[22,23]。

2.2 不同制备工艺下 SDF 抗氧化性的影响

微量的自由基在体内稳态调节和介导体内应激反应有着重要的作用, 但是大量的自由基会对蛋白质、脂质和 DNA 产生氧化损伤, 进而引起疾病。因此, 外源抗氧化剂对预防阿尔茨海默病、心血管等疾病具有重要意义^[24-27]。用 IC_{50} 表达芹菜 SDF 的 $\cdot OH$ 和 DPPH \cdot 清除活性^[28], 结果见表 1。

表 1 不同制备工艺下膳食纤维抗氧化性的影响

Table 1 Effects of different extractions on the antioxidant activity of diet fiber

抗氧化性能测试	W-SDF	A-SDF	UA-SDF
$\cdot OH$ - IC_{50} /(mg/mL)	1.72 ± 0.12^a	1.25 ± 0.17^b	0.67 ± 0.21^c
DPPH \cdot - IC_{50} /(mg/mL)	0.86 ± 0.11^a	0.58 ± 0.13^b	0.31 ± 0.10^c

注: 同一行不同上标小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异。

由表 1 可知, 总体上, 芹菜可溶性膳食纤维对 DPPH \cdot 的清除能力要强于 $\cdot OH$ 清除能力; 且三种制备方式存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其中超声提取物 (UA-SDF) 对 $\cdot OH$ 和 DPPH \cdot 清除能力最强, IC_{50} 分别为 0.67 和 0.31 mg/mL, 其次是碱提取物 (A-SDF), IC_{50} 分别为 1.25 和 0.58 mg/mL, 最后是水提取物 (SDF), IC_{50} 分别为 1.72 和 0.86 mg/mL。据报道, 游离多酚和黄酮以及较低分子量的多糖对自由基具有良好的清除能力, UA-SDF 抗氧化活性的增加可能是由于超声空化效应使得 IDF 进一步降解为 SDF, 同时还可能产生更多的低分子量多糖, 结合前期研究已得出 W-SDF、A-SDF 和 UA-SDF 三种提取方式得到 SDF 得率为 (17.57%、24.93%、43.05%) 和 IDF (58.11%、56.31%、46.61%)^[13], 进一步表明, 超声辅助提取能显著提高芹菜 SDF 的抗氧化活性, 这可能与超声处理形成富含羧基的 UA-SDF 多孔结构有关。Huang 等^[29] 研究显示超声处理能显著提高大蒜秸秆可溶性膳食纤维的抗氧化特性, 如酸性的车前草可溶性膳食纤维的清除自由基

的能力要比中性的好^[30]。此外,超声空化效应促进结合态的酚类和酮类变成游离态的酚类和酮类物质也可能导致芹菜膳食纤维抗氧化性的提高,但该推猜有待进一步证实。

3 结论

不同制备工艺对芹菜可溶性膳食纤维的结构和功能特性会产生不同的影响。在结构上,三种制备工艺获得的芹菜 SDF 的傅里叶红外谱图的出峰位置基本类似,其中碱处理和超声辅助处理的各吸收峰强度相对较高;三种不同制备工艺的 SDF 的热稳定性大小为:UA-SDF > A-SDF > W-SDF;三种不同制备工艺的 SDF 颗粒粒径呈现多峰分布,其中 W-SDF 的平均粒径最大(1 481 nm),A-SDF 次之(841 nm),UA-SDF 粒径最小(588.3 nm);三种不同制备工艺的 SDF 的表面结构也存在一定差异,热水浸提 W-SDF 表面较光滑,且质地相对紧实,而经过碱和超声处理的 A-SDF、UA-SDF 为疏松细小的颗粒状,并呈现多孔结构。

在抗氧化活性上,三种不同制备工艺 SDF 的体外抗氧化活性存在显著性差异($P < 0.05$),其中超声辅助提取物 UA-SDF 对·OH 和 DPPH 自由基清除能力最强,其 IC₅₀ 分别为 0.67 和 0.31 mg/mL,其次是碱提的 A-SDF 的 IC₅₀ 分别为 1.25 和 0.58 mg/mL,水提取的 W-SDF 的 IC₅₀ 分别为 1.72 和 0.86 mg/mL。

综上所述,超声辅助碱提法(UA-SDF)是最佳的提取方法,超声辅助处理后 UA-SDF 粒径减小,表面呈现疏松多孔的结构,具有良好的热稳定性,且超声辅助处理 UA-SDF 的抗氧化活性最强,能更好地应用于食品和药品加工过程中。三种工艺提取的可溶性膳食纤维的抗氧化特性差异是由其化学成分和表面结构的差异引起的,本研究成果将为芹菜的综合加工利用提供理论支撑。

参考文献

- [1] 高国训,王武台,吴锋,等.我国芹菜生产发展变化及育种策略[J].长江蔬菜,2014,2:1-4.
- [2] SOWBHAGYA H B. Chemistry, technology, and nutraceutical functions of celery (*Apium graveolens* L.): an overview [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(3): 389-398.
- [3] 李昌文,张丽华,胡少帅,等.超微粉碎对芹菜渣理化特性的影响[J].食品工业,2021,42(7):150-153.
- [4] 赵全利,吉欣,吕奇,等.芹菜膳食纤维制备工艺的探讨[J].

现代食品科技,2006,22(4):142-144.

- [5] 于金慧,尤升波,高建伟,等.芹菜功能性成分及生物活性研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(7):5-10.
- [6] YAN L, WANG L, GAO S, et al. Celery cellulose hydrogel as carriers for controlled release of short-chain fatty acid by ultrasound [J]. Food Chemistry, 2020, 309(C): 125717-125748.
- [7] 李昌文,纵伟,赵光远,等.微波辅助提取芹菜渣水溶性膳食纤维工艺条件研究[J].食品工业,2015,36(3):49-52.
- [8] 李昌文,张丽华,纵伟,等.芹菜渣水溶性膳食纤维的抗氧化活性研究[J].食品工业,2016,37(9):63-66.
- [9] 吴菲菲,巢玲,李化强,等.超声技术在食品工业中的应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(7):2670-2677.
- [10] MOCZKOWSKA M, KARP S, NIU Y, et al. Enzymatic, enzymatic-ultrasonic and alkaline extraction of soluble dietary fibre from flaxseed—a physicochemical approach [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 105-112.
- [11] CHUTIA H, SHARMA M, DASM J, et al. Properties of dietary fibre from passion fruit seed obtained through individual and combined alkaline and ultrasonication extraction techniques [J]. Waste and Biomass Valorization, 2024, 15: 2345-2359.
- [12] HUA M, LU J, QU D, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: a potential functional ingredient [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522-529.
- [13] 龙芳.3种提取方式对芹菜可溶性膳食纤维品质特性的影响[J].食品科技,2021,46(3):192-198.
- [14] BECK S M, KNOERZER K, ARCOT J. Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 166-174.
- [15] 曾剑华,刘琳琳,杨杨,等.大豆亲脂蛋白组分分析及体外抗氧化特性[J].食品科学,2020,41(14):58-65.
- [16] NICKLISCH S C T, WAITE J H. Optimized DPPH assay in a detergent-based buffer system for measuring antioxidant activity of proteins [J]. MethodsX, 2014, 1: 233-238.
- [17] JIANG G H, RAMACHANDRAIAH K, WU Z G, et al. The influence of different extraction methods on the structure, rheological, thermal and functional properties of soluble dietary fiber from Sanchi (*Panax notoginseng*) flower [J]. Foods, 2022, 11: 1995-2012.
- [18] ZHANG W, ZENG G, PAN Y, 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.
- [19] ZHANG M, BAI X, ZHANG Z. Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran [J]. Journal

- of Cereal Science, 2011, 54 (1): 98-103.
- [20] 龚卫华,胡强,向卓亚,等.麻竹笋壳醋酸木质素结构特性及抗氧化性[J].精细化工,2017,34(12):1417-1422.
- [21] TANG C D, WU L R, ZHANG F S, et al. Comparison of different extraction methods on the physicochemical, structural properties, and *in vitro* hypoglycemic activity of bamboo shoot dietary fibers [J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132642-132651.
- [22] 黄六容,陈甜,赵匀淑,等.超声波改善大蒜秸秆不溶性膳食纤维结构及吸附性[J].农业工程学报,2018,34(12):294-299.
- [23] YU G, BEI J, ZHAO J, et al. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. *Sativa* Hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure [J]. Food Chemistry, 2018, 257: 333-340.
- [24] 马凤,张振宇,陈启苗,等.梨渣可溶性膳食纤维提取工艺优化及功能特性分析[J].现代食品科技,2024,40(3):229-238.
- [25] 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.
- [26] 池玉闽,董怡,何强,等.油橄榄果肉和核壳中膳食纤维的功能特性分析[J].现代食品科技,2023,39(5):157-163.
- [27] 张欣,邹锦成,刘琳,等.酶法纯化麦麸不溶性膳食纤维的结构及理化性质[J].现代食品科技,2022,38(12):223-229.
- [28] ZHAO Z, WANG W, LI C, et al. Reactive oxygen species-activatable liposomes regulating hypoxic tumor microenvironment for synergistic photo/chemodynamic therapies [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(44): 1905013-1905024.
- [29] HUANG L, ZHANG W, CHENG J, et al. Antioxidant and physicochemical properties of soluble dietary fiber from garlic straw as treated by energy-gathered ultrasound [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 678-688.
- [30] 张建民,肖小年,易醒,等.车前草可溶性膳食纤维的提取及其对自由基清除能力的研究[J].天然产物研究与开发, 2007,4:667-670.