

DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20230096

## 挤压对柚皮可溶性膳食纤维理化、功能及结构特性的影响

袁志宁, 霍栓, 严嘉恬, 张容, 郑捷

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 为了探究挤压技术对柚皮可溶性膳食纤维(SDF)理化、功能及结构特性的影响,对柚皮的SDF进行提取后,对SDF进行理化特性、比表面积测定,观察SDF微观结构,进一步测定分析SDF的生物活性。结果表明:与对照组相比,挤压(螺杆转速160 r/min,挤出温度140℃)处理后,SDF的提取得率提高了214%,比表面积增大到原来的1.63倍;持水力、持油力和膨胀力分别提高了13.1%、160.5%和25.1%;葡萄糖吸附能力和阳离子交换能力分别提高了180.3%和70.5%;亚硝酸盐吸附能力在pH为2时提高了19.1%,在pH为7时提高了36.2%;DPPH和ABTS自由基清除率分别提高了88%和22%。挤压处理后SDF的热稳定性更高,结构疏松,表面凹凸不平,颗粒化明显,化学基团暴露数量被改变但未产生新的基团。

**关键词:** 挤压;可溶性膳食纤维;理化特性;功能特性;结构特性

中图分类号: TS255.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)03-0021-07

## Effect of Extrusion on Physicochemical, Functional and Structural Properties of Dietary Fiber from Pomelo Peel

YUAN Zhining, HUO Shuan, YAN Jiatian, ZHANG Rong, ZHENG Jie

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of extrusion technology on the physicochemical, functional and structural properties of soluble dietary fiber(SDF) from pomelo peel, SDF was extracted from pomelo peel, its physicochemical properties and specific surface area of the SDF were measured, and the microstructure of the SDF was observed to further determine and analyze its biological activity. The results showed that, compared with the control group, the extraction yield of SDF increased by 214%, and specific surface area increased to 1.63 times after extrusion treatment (screw speed 160 r/min, extrusion temperature 140℃), respectively. After extrusion treatment, the water-holding capacity, oil-holding capacity and swelling capacity increased by 13.1%, 160.5% and 25.1%, respectively, and the glucose adsorption capacity and cation exchange capacity increased by 180.3% and 70.5%, respectively, and the adsorption capacity of nitrite increased by 19.1% at pH 2 and 36.2% at pH 7, while the scavenging rate of DPPH and ABTS increased by 88% and 22%, respectively. Additionally, after the treatment, SDF had higher thermal stability, looser structure, uneven surface and obvious granulation, and the exposure amount of chemical groups was changed but no new groups were formed.

**Key words:** extrusion; soluble dietary fiber; physicochemical properties; functional properties; structural characteristics

### 引文格式:

袁志宁, 霍栓, 严嘉恬, 等. 挤压对柚皮可溶性膳食纤维理化、功能及结构特性的影响[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(3): 21-27.

YUAN Z N, HUO S, YAN J T, et al. Effect of extrusion on physicochemical, functional and structural properties of dietary fiber from pomelo peel[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(3): 21-27.

收稿日期: 2023-04-23; 修回日期: 2023-08-02

作者简介: 袁志宁(1997—), 女, 陕西定边人, 硕士研究生; 通信作者: 郑捷, 正高级实验师, jane@tust.edu.cn

柚〔*Citrus maxima* (Burm.) Merr.〕属于芸香科柑橘属,栽培历史悠久,果实硕大、耐储运,具有独特的风味和较高的营养价值。柚在加工或食用后产生皮、籽等副产物,丢弃后将导致环境污染,对其副产物开发利用能提高加工附加值,有利于环境保护。柚皮富含膳食纤维、黄酮、月桂烯等活性物质,其中膳食纤维主要来源于柚皮海绵层,因其具有较强的持水性、持油性等理化功能特性,常被作为功能性成分添加到食品中<sup>[1]</sup>。膳食纤维在人体内能够迅速吸收水分而膨胀,促进肠胃蠕动,调节排泄物在体内的滞留时间,增加人体排便次数,减轻肠道压力,从而起到预防便秘、结肠癌的作用<sup>[2]</sup>。膳食纤维中含有结合胆汁酸的糖醛酸与酚类物质,一旦胆汁酸被这些物质吸附后其浓度就会降低,能有效预防胆结石<sup>[3]</sup>。此外,膳食纤维不仅可以帮助机体代谢对人体有害的重金属离子,减轻人体负担,起到解毒作用<sup>[4]</sup>,还能够抑制甘油三酯、低密度脂蛋白的生成,吸附部分油脂及其代谢产物,降低人体摄入水平,从而起到降血脂的作用<sup>[5]</sup>。柚皮中水溶性膳食纤维(SDF)含量较少,通过改性处理不仅能够提高 SDF 含量,而且持水力、膨胀力、葡萄糖吸附能力等理化功能特性也会被改善,从而拓宽膳食纤维的应用范围,提高膳食纤维产业的经济效益。

挤压(extrusion expansion, EE)是一种新型物理改性方法,具有操作简单、效率高、污染小等优点,广泛应用于食品加工领域<sup>[6]</sup>。物料在挤压机内受到高温、高湿和强剪切力的共同作用,当压力突然降至常压时,物料喷出模口,物料内部结构被破坏,从而可改善物料的理化特性和功能特性<sup>[7]</sup>。周小理等<sup>[8]</sup>研究发现苦荞麸皮经双螺杆挤压后,体外抗氧化活性得到较好改善。张光等<sup>[9]</sup>也得出类似的结论,双螺杆挤压处理后的米糠中 SDF 含量大大提高,且米糠 SDF 的理化、功能特性以及结构也得到改善,但目前双螺杆挤压改性技术在果蔬膳食纤维中的应用研究仍较少。本研究以柚皮海绵层为原料,探究挤压对柚皮 SDF 理化特性、功能特性以及结构特性的影响,为膳食纤维在食品中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

柚皮,食品级,产地为江西省上饶市;无水乙醇,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;硝酸

银、氢氧化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、过硫酸钾,分析纯,天津市江天化工技术股份有限公司;葡萄糖,标准品,上海源叶生物科技有限公司;马铃薯淀粉,食品级,盐城厨鹤粉业有限公司;对氨基苯磺酸,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;盐酸萘乙二胺、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、3-乙基-2-亚硝基亚胺-2,3(2H)苯噻唑(ABTS),分析纯,福州飞净生物科技有限公司。

TG16-WS 型高速台式离心机,湖南湘鑫仪器仪表有限公司;Alpha-1502 型紫外-可见分光光度计,上海谱元仪器有限公司;SU1510 型扫描电子显微镜,天美仪拓实验室设备(上海)有限公司;BT-9300S 型激光粒度仪,丹东百特仪器有限公司;IS50 型傅里叶变换红外光谱分析仪,美国 Nicolet 公司;DSC-60Plus 型差示扫描量热仪,日本岛津公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 SDF 的提取

柚皮干燥后用粉碎机粉碎,过 60 目筛,得柚皮粉,4℃储存备用。

启动双螺杆挤压机预热,达到设定温度后,将 500 g 柚皮粉缓慢、连续放入进料仓内,收集处理后的条状样品在 55℃条件下烘干、粉碎,过 60 目筛,得挤压后柚皮粉,在 4℃储存,以备提取柚皮 SDF。实验中设置柚皮粉水分含量为 25%,螺杆转速分别为 140、160、180 r/min,挤压温度分别为 120、140、160℃,得到 5 组样品(处理方式):B(160 r/min、120℃)、C(160 r/min、140℃)、D(160 r/min、160℃)、E(140 r/min、140℃)、F(180 r/min、140℃),未经挤压改性的柚皮粉为对照组 A。

将柚皮粉加入蒸馏水中(质量体积比为 1:30),60℃提取 1 h,冷却后在 6000 r/min 条件下离心 10 min,过滤,收集液体并浓缩,加入 4 倍体积 95%乙醇,醇沉 12 h,抽滤并收集滤渣,在 55℃烘箱中干燥,研磨后过 100 目筛,得柚皮 SDF。

#### 1.2.2 SDF 理化特性及比表面积的测定

##### (1) 持水力

将 0.3 g SDF( $m_1$ )与 10 mL 蒸馏水充分混合,然后在 6000 r/min 条件下离心 10 min,去除上清液并称重残渣质量( $m_2$ )。按照式(1)计算持水力( $w_{\text{water}}$ )。

$$w_{\text{water}} = (m_2 - m_1) / m_1 \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为 SDF 初始质量,g; $m_2$ 为残渣质量,g。

##### (2) 持油力

将 0.3 g SDF( $m_1$ )与 10 mL 菜籽油混合 1 h,然后

在 6000 r/min 条件下离心 10 min, 去除油层并称量残渣质量 ( $m_3$ )。按照式(2)计算持油力 ( $w_{oil}$ )。

$$w_{oil} = (m_3 - m_1) / m_1 \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为 SDF 初始质量, g;  $m_3$  为残渣质量, g。

### (3) 膨胀力

将 0.5 g SDF ( $m_0$ ) 与 10 mL 蒸馏水充分混合, 静置 24 h, 观察 SDF 所占的体积 ( $V$ )。按照式(3)计算膨胀力 ( $v$ )。

$$v = V / m_0 \quad (3)$$

式中:  $m_0$  为 SDF 的质量, g;  $V$  为 SDF 所占体积, mL。

### (4) 比表面积

利用激光粒度仪测定 SDF 的比表面积。

### (5) 阳离子交换能力

称取 SDF 1.0 g ( $m_0$ ) 加入 30.0 mL 0.1 mol/L HCl 溶液中, 37 °C 静置 48 h, 过滤并用蒸馏水洗涤残渣, 用 AgNO<sub>3</sub> 溶液鉴定该溶液中氯离子是否完全消除, 待完全消除后将残渣干燥。

称取干燥后的残渣 0.5 g 加入 50.0 mL 5% NaCl 溶液中, 用磁力搅拌器搅拌 30 min。以酚酞溶液为指示剂, 用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定至淡红色, 记录消耗 NaOH 溶液的体积 ( $V_1$ ), 用蒸馏水代替 HCl 溶液消耗 NaOH 溶液的体积为  $V_2$ 。按照式(4)计算阳离子交换能力 ( $b$ )。

$$b = \frac{c(V_2 - V_1)}{m_0} \quad (4)$$

式中:  $c$  为滴定时使用 NaOH 溶液的浓度。

### (6) 亚硝酸盐吸附能力

称取 SDF 0.2 g ( $m_0$ ) 溶于 100 mL 20.0 μg/mL NaNO<sub>2</sub> 溶液中, 分别调节 pH = 2 和 pH = 7 (模拟胃环境和小肠环境), 在 37 °C 条件下振荡 20 min。取 10.0 mL 配制好的样液稀释至 100 mL。

取 25.0 mL 稀释后的样液 ( $V$ ) 置于 50.0 mL 比色管中, 加入 2.0 mL 4 g/L 对氨基苯磺酸溶液, 混匀后静置 3 min, 再加入 1.0 mL 2 g/L 盐酸萘乙二胺溶液, 用蒸馏水稀释至刻度线, 混匀并静置 15 min, 在 538 nm 处测定吸光度, 利用标准曲线计算亚硝酸盐质量浓度 ( $\rho_2$ ), 未添加 SDF 的溶液作为对照, 其体系中的亚硝酸盐质量浓度为  $\rho_1$ 。按照式(5)计算亚硝酸盐吸附能力 ( $w_{NIAC}$ )。

$$w_{NIAC} = [(\rho_1 - \rho_2) / m_0] \times V \quad (5)$$

### (7) 热稳定性

差示扫描热量法 (DSC) 分析条件为: 样品质量 3 mg, 分析温度 30 ~ 400 °C, 升温速率 5 °C/min, 氮气

流量 50 mL/min, 以空坩埚为对照。

### 1.2.3 SDF 结构性质的测定

将导电胶固定在样品台上, 用牙签蘸取适量样品粉末粘在样品台的导电胶上, 吹去杂质, 用真空喷镀仪均匀喷金, 在扫描电子显微镜 12 kV 加速电压下放大 1 000 倍, 观察样品的表面形态。

将 SDF 与 KBr 粉末以质量比 1 : 150 的比例研磨均匀, 并将混合物压成透明薄片, 使用傅里叶变换红外光谱仪进行测定, 扫描次数为 16 次, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描波长为 400 ~ 4 000 cm<sup>-1</sup>。

### 1.2.4 SDF 生物活性的测定

#### (1) 体外降血糖能力

葡萄糖吸附能力的测定: 称取 0.5 g SDF ( $m_0$ ) 溶于 50 mL ( $V$ ) 浓度为 100 mmol/L 葡萄糖溶液中, 37 °C 水浴 6 h, 在 6 000 r/min 条件下离心 15 min, 取上清液, 用 3, 5-二硝基水杨酸法 (DNS 法) 在 540 nm 处测定吸光度, 用未加入 SDF 的葡萄糖溶液作为对照。根据葡萄糖标准曲线, 计算 SDF 吸附前后葡萄糖质量浓度的变化情况, 按照式(6)计算葡萄糖吸附能力 ( $w_{GAC}$ )。

$$w_{GAC} = [(\rho_3 - \rho_4) / m_0] \times V \quad (6)$$

式中:  $m_0$  为 SDF 的质量, g;  $\rho_3$  为 SDF 吸附前糖液中葡萄糖的质量浓度, mg/mL;  $\rho_4$  为 SDF 吸附后糖液中葡萄糖的质量浓度, mg/mL;  $V$  为葡萄糖溶液的体积, mL。

$\alpha$ -淀粉酶抑制能力的测定: 取马铃薯淀粉加 4 倍体积蒸馏水溶解, 得到马铃薯淀粉溶液。准确称取不同处理条件下的 SDF 1.0 g 溶于 40.0 mL 马铃薯淀粉溶液中, 加入 4.0 mg  $\alpha$ -淀粉酶, 在 37 °C 下充分酶解 1 h, 然后加入 80.0 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液结束酶解; 在 6 000 r/min 条件下离心 15 min, 取上清液。用 DNS 法测定葡萄糖质量浓度 ( $\rho_5$ ), 以未添加 SDF 的马铃薯淀粉溶液作为对照 ( $\rho_6$ )。按照式(7)计算  $\alpha$ -淀粉酶抑制能力 ( $w_{\alpha-AAIR}$ )。

$$w_{\alpha-AAIR} = [(\rho_6 - \rho_5) / \rho_6] \times 100\% \quad (7)$$

#### (2) 抗氧化能力

DPPH 自由基清除能力的测定: 称取 3.94 mg DPPH 溶于无水乙醇并定容至 10 mL, 取 2.0 mL 新配 DPPH 溶液, 用无水乙醇稀释并定容至 100 mL, 得到 0.02 mmol/L DPPH 溶液。吸取抗氧化成分提取液 2.0 mL 与 2.0 mL DPPH 溶液混合, 避光存放 30 min, 在 517 nm 处测定吸光度, 记为  $A_1$ ; 无水乙醇代替 DPPH 与 SDF 抗氧化成分提取液混合测定的吸光度

记为  $A_2$ , 无水乙醇代替 SDF 抗氧化成分提取液与 DPPH 混合测定的吸光度为  $A_0$ 。按照式 (8) 计算 DPPH 自由基清除率 ( $R_{DPPH}$ )。

$$R_{DPPH} = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100\% \quad (8)$$

ABTS 自由基清除能力的测定: 将 5 mL ABTS 溶液 (3.8 g/L) 和 88  $\mu$ L 过硫酸钾溶液 (37.8 g/L) 在室温下混合, 暗处放置 16 min, 得到 ABTS 贮备液。用 PBS 缓冲液稀释 ABTS 贮备液, 使其在 734 nm 处的吸光度为  $0.70 \pm 0.02$ 。取 0.1 mL 抗氧化成分提取液与 2.9 mL 稀释后的 ABTS 溶液混合, 暗处反应 6 min, 在 734 nm 处测定吸光度, 记为  $A_3$ ; 以 PBS 缓冲液代替 ABTS 溶液与 SDF 抗氧化成分提取液混合测定的吸光度记为  $A_4$ ; 以 PBS 缓冲液代替 SDF 抗氧化成分提取液与 ABTS 溶液混合测定的吸光度记为  $A_5$ 。按照式 (9) 计算 ABTS 自由基清除率 ( $R_{ABTS}$ )。

$$R_{ABTS} = [1 - (A_3 - A_4) / A_5] \times 100\% \quad (9)$$

### 1.3 统计分析

所有实验均重复 3 次, 结果以“平均值  $\pm$  标准差”表示, 用 SPSS 统计软件进行方差分析, 用 Duncan 新复极差法进行显著性检验, 不同字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 挤压改性对柚皮 SDF 提取得率的影响

挤压对柚皮 SDF 提取得率的影响如图 1 所示。

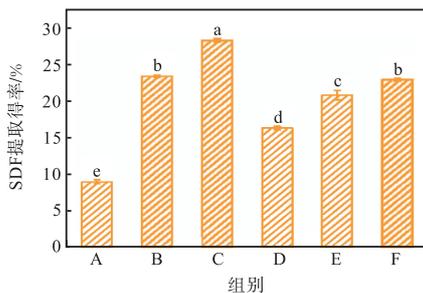


图 1 挤压对柚皮 SDF 提取得率的影响

Fig. 1 Effect of extrusion on extraction rate of SDF from pomelo peel

由图 1 可知, 与对照组 (9%) 相比, 当螺杆转速为 160 r/min 时, SDF 提取得率随温度的升高呈先上升后下降的趋势, 在挤出温度为 140  $^{\circ}$ C 时达到最大值 (28.3%)。这说明物料中纤维素等聚合物的结构受到强剪切力作用而被破坏, 糖苷键被打断, 降解为更多的小分子物质, 暴露出更多的亲水性基团<sup>[10]</sup>。温度继

续升高到 160  $^{\circ}$ C 时, SDF 提取得率显著下降到 16.3%。由于温度过高, 机筒内水分被快速蒸发, 柚皮粉的流动性变差, 堵塞机筒发生焦糊现象和美拉德反应<sup>[11]</sup>。当挤出温度为 140  $^{\circ}$ C 时, 螺杆转速对 SDF 提取得率的影响也较为明显, 160 r/min 时达到最大值, 但转速过大时物料传送速度快, 在机筒内停留时间短, 导致 SDF 提取得率有所下降。综合分析, 柚皮 SDF 受温度影响较大, 在螺杆转速 160 r/min、挤出温度 140  $^{\circ}$ C 时提取得率最高, 较对照组提高了 214%。

### 2.2 挤压改性对柚皮 SDF 理化特性的影响

#### 2.2.1 持水力、持油力、膨胀力及比表面积

挤压对 SDF 持水力、持油力、膨胀力和比表面积的影响见表 1。

表 1 挤压对 SDF 持水力、持油力、膨胀力和比表面积的影响

Tab. 1 Effect of extrusion on SDF water retention, oil retention, expansion and specific surface area

样品	持水力/ ( $g \cdot g^{-1}$ )	持油力/ ( $g \cdot g^{-1}$ )	膨胀力/ ( $mL \cdot g^{-1}$ )	比表面积/ ( $m^2 \cdot g^{-1}$ )
A	$8.18 \pm 0.16^c$	$3.04 \pm 0.31^d$	$10.13 \pm 0.16^d$	$59.58 \pm 0.08^f$
B	$8.37 \pm 0.60^{bc}$	$7.66 \pm 0.14^a$	$12.30 \pm 0.56^{ab}$	$82.74 \pm 0.18^e$
C	$9.25 \pm 0.46^a$	$7.92 \pm 0.36^a$	$12.67 \pm 0.19^a$	$97.01 \pm 0.97^a$
D	$7.75 \pm 0.29^c$	$5.37 \pm 0.15^c$	$11.52 \pm 0.07^c$	$83.52 \pm 0.10^d$
E	$8.27 \pm 0.13^{bc}$	$6.60 \pm 0.33^b$	$11.77 \pm 0.69^{bc}$	$87.26 \pm 0.17^b$
F	$8.91 \pm 0.21^{ab}$	$6.73 \pm 1.10^b$	$11.75 \pm 0.23^{bc}$	$84.57 \pm 0.22^c$

与对照组相比, 挤压处理后 SDF 的持水力、持油力、膨胀力均有不同程度的提高。挤压螺杆转速 160 r/min、挤出温度 140  $^{\circ}$ C 处理后, SDF 的持水力、持油力和膨胀力分别提高了 13.1%、160.5% 和 25.1%。在挤压螺杆转速相同的情况下, 在 120  $^{\circ}$ C、140  $^{\circ}$ C 和 160  $^{\circ}$ C 下的持水力和膨胀力呈现先增大后减小的趋势, 表明适当的高温会打断不溶性分子之间的连接, 使可溶性物质增多, 改善了 SDF 的持水力和膨胀力。当温度升高到 160  $^{\circ}$ C 时, 机筒内的压力随之增大, 柚皮粉黏度有所下降, 导致其所受到的剪切力降低, 膨胀力也随之下降<sup>[12]</sup>。处理组的持油力与对照组均有显著差异, 在处理条件为 160 r/min、140  $^{\circ}$ C 时达到最大值 ( $7.92 \pm 0.36$ ) g/g, 表明挤压处理促进纤维素和半纤维素等不可溶性膳食纤维的降解, 同时破坏蛋白质分子的高级结构, 使其暴露出更多的化学基团, 增加了可持油物质的比表面积, 使持油力增大<sup>[13]</sup>。挤压处理对柚皮 SDF 的比表面积的影响结果显示, 比表面积在相同螺杆转速下随温度的升高先增大后减小, 各处理组与未改性的 SDF 之间均有显著差异, 在处理条件为 160 r/min、140  $^{\circ}$ C 时, SDF 的比表面积达

到最大值 ( $97.01 \pm 0.97$ )  $\text{m}^2/\text{g}$ , 是对照组 ( $59.58 \pm 0.08$ )  $\text{m}^2/\text{g}$  的 1.63 倍。这可能是由于挤压处理使 SDF 颗粒碎化, 内部结构被破坏, 导致其比表面积增加<sup>[14]</sup>。

### 2.2.2 阳离子交换能力

膳食纤维结构中所含的羧基、羟基等官能团能够形成一个类似阳离子交换树脂的结构, 因此具有弱酸性阳离子交换能力。挤压对柚皮 SDF 阳离子交换能力的影响如图 2 所示。

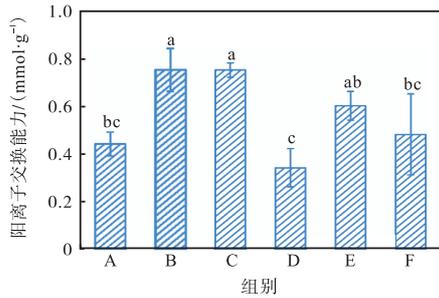


图 2 挤压对柚皮 SDF 阳离子交换能力的影响

Fig. 2 Effect of extrusion on cation exchange capacity of SDF from pomelo peel

由图 2 可知, 挤出温度对 SDF 阳离子交换能力影响较大, 随着温度的升高, 阳离子交换能力也随之增大。与对照组相比, 挤压螺杆转速 160 r/min、挤出温度 140 °C 处理后, SDF 阳离子交换能力提高了 70.5%。高温使 SDF 内部结构受到破坏, 粒径减小, 比表面积增大, 更多的羟基和羧基等功能性基团暴露在 SDF 表面, 使其阳离子交换能力大大提高<sup>[15]</sup>。但过高的温度 (160 °C) 会使柚皮粉发生焦糖化反应 (140 ~ 170 °C), 且此时 SDF 的阳离子交换能力低于对照组, 说明此时不利于功能性基团的暴露, 其阳离子交换能力也随之下降。

### 2.2.3 亚硝酸盐吸附能力

亚硝酸盐中的亚硝酸根离子能与胺类物质产生反应, 生成对人体健康有害的亚硝胺等物质, 可能增加患癌风险<sup>[16]</sup>。挤压对柚皮 SDF 亚硝酸盐吸附能力的影响如图 3 所示。除了 160 r/min、160 °C 处理条件外, 其余处理条件下的改性均显著提高了柚皮 SDF 的亚硝酸盐吸附能力 ( $P < 0.05$ )。当 pH 为 2 时, 与对照组相比, 160 r/min、140 °C 条件下的亚硝酸盐吸附能力最高, 为 ( $102.69 \pm 0.57$ )  $\text{mg}/\text{g}$ , 增加了 19.1%。这可能是因为高温下强烈的作用力破坏了膳食纤维的结构, 将纤维素等不可溶性膳食纤维降解为可溶性膳食纤维, 酚酸、糖醛酸等活性物质含量增加, 酸性条件下的  $\text{H}^+$  结合  $\text{NO}_2^-$  生成亚硝酸盐, 亚硝酸盐又会在体内累积形成亚硝酸钠, 这些物质可与 SDF 中酚酸上

的  $\text{O}^-$  进行结合, 从而发挥了其吸附结合亚硝酸盐的能力<sup>[16]</sup>。当 pH 为 7 时, SDF 的亚硝酸盐吸附能力变化趋势与 pH 为 2 时大致相似, 从 ( $26.35 \pm 0.19$ )  $\text{mg}/\text{g}$  增加到最大值 ( $35.88 \pm 0.21$ )  $\text{mg}/\text{g}$ , 增加了 36.2%。温度和转速过高反而不利于 SDF 发挥亚硝酸盐吸附能力。

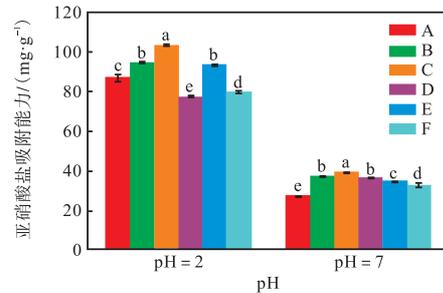


图 3 挤压对柚皮 SDF 亚硝酸盐吸附能力的影响

Fig. 3 Effect of extrusion on nitrite ion adsorption capacity of SDF from pomelo peel

### 2.2.4 热稳定性

挤压后 SDF 的热稳定性如图 4 所示。图 4 显示了未经处理和挤压条件 (160 r/min、140 °C) 下的柚皮 SDF 的 DSC 分析结果。在温度低于 50 °C 时, 对照组和处理组均显示出吸热行为, 吸热的峰值温度分别为 36.28 °C 和 40.56 °C, 柚皮 SDF 中水分蒸发程度不同造成了其吸热峰值温度的差异<sup>[18]</sup>。随着温度的升高, 在 300 ~ 350 °C 范围内表现出放热行为, 对照组和处理组的放热峰值温度分别为 311.93 °C 和 319.88 °C, 处理组的峰值温度比对照组提高了 7.95 °C, 表明降解挤压处理组 SDF 中的更多氢键需要更高的热量, SDF 具有更高的稳定性。

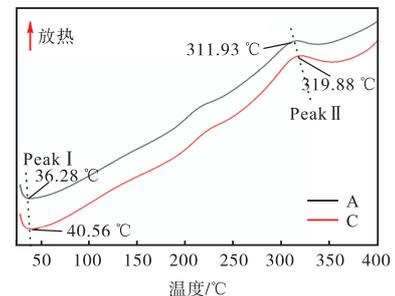


图 4 挤压后 SDF 的热稳定性

Fig. 4 Thermal stability of SDF after extrusion

## 2.3 挤压改性对柚皮 SDF 结构特性的影响

### 2.3.1 微观结构

挤压对柚皮 SDF 微观结构的影响如图 5 所示。图 5(a) 显示未经挤压处理的 SDF 表现为较致密的结构, 表面较为光滑, 呈较大的块状结构。在挤压处理

过程中,随着温度的升高,SDF 的结构逐渐变得松散,颗粒化明显。这是因为高温下强烈的作用力打断膳食纤维内部结构,加速纤维素和半纤维素等物质的降解,生成更多的碎片附着在 SDF 表面。螺杆转速比温度对 SDF 结构破坏程度的影响更大。图 5(f)显示,转速过高时,无法打破 SDF 的内部结构。图 5(c)为 160 r/min、140 °C 条件下的微观结构图,能够观察

到更多的碎片,SDF 颗粒也变得更小,有沟壑、裂痕出现,变得凹凸不平。这说明挤压处理能够破坏不可溶性膳食纤维的结构,使纤维素之间的连接断裂,显著增加了 SDF 的比表面积,暴露出更多的羟基、羧基等功能性官能团,对其理化性质和功能性质的改善有着重要的作用<sup>[19]</sup>。

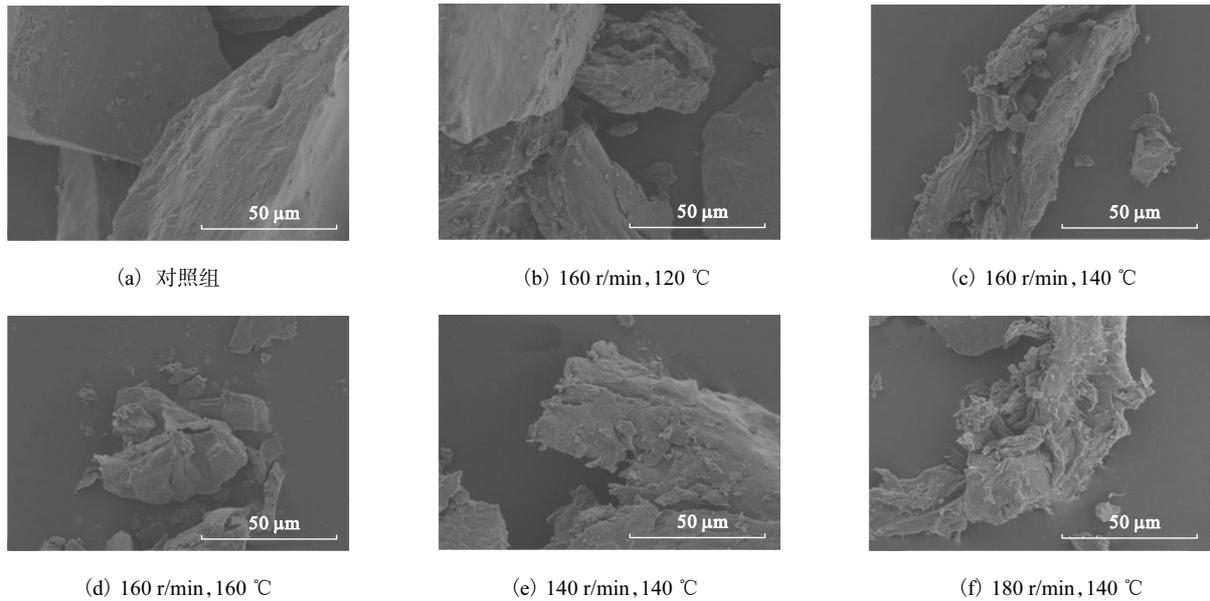


图 5 挤压对柚皮 SDF 微观结构的影响

Fig. 5 Effect of extrusion on microstructure of SDF from pomelo peel

2.3.2 分子结构

挤压后 SDF 的分子结构如图 6 所示。

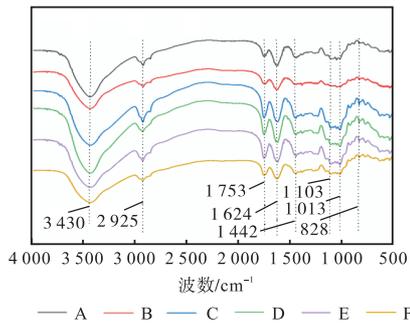


图 6 挤压后 SDF 的分子结构

Fig. 6 Molecular structure of SDF after extrusion

3 430  $\text{cm}^{-1}$  处是不可溶性膳食纤维中纤维素或半纤维素的 O—H 振动带,在 160 r/min、140 °C 时的吸收强度较强,是因为此条件下的改性打断了纤维素分子间的氢键<sup>[20]</sup>。2 925  $\text{cm}^{-1}$  处的特征吸收峰是由水溶性膳食纤维中多糖— $\text{CH}_2$ —C—H 引起的。1 753  $\text{cm}^{-1}$  处显示的是纤维素的吸收峰,与对照组相比,挤压处理后此处吸收峰减弱,表明纤维素被降解。1 624  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可能是— $\text{NH}_2$  和 C=O 引起的伸缩振动,

说明有糖醛酸存在<sup>[21]</sup>。1 442  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可能是由木质素成分的伸缩振动造成的<sup>[22]</sup>。1 103  $\text{cm}^{-1}$  和 1 013  $\text{cm}^{-1}$  附近的伸缩振动峰可能是纤维素和半纤维素的糖环中 C—O—C 结构和 C—O—H 结构中的 C—O 所引起的<sup>[23]</sup>。在 828  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是由 SDF 中  $\beta$ -糖苷键的振动产生的,挤压后强度增大可能是因为糖环之间的结构被破坏,导致  $\beta$ -糖苷键暴露更多。综合来看,挤压前后柚皮 SDF 没有产生新的化学基团,但纤维素、半纤维素和木质素等不可溶性膳食纤维被降解。

2.4 挤压对柚皮 SDF 生物活性的影响

2.4.1 体外降血糖能力

挤压对柚皮 SDF 体外降血糖能力的影响如图 7 所示。SDF 的葡萄糖吸附能力和  $\alpha$ -淀粉酶抑制能力变化趋势一致,但  $\alpha$ -淀粉酶抑制能力整体高于葡萄糖吸附能力。随着挤出温度(120 ~ 160 °C)的升高,葡萄糖吸附能力呈先增加后减小趋势,在 160 r/min、140 °C 时为最大,比对照组增加了 180.3%。这是由 SDF 内部结构变化引起的。在挤压处理后,SDF 颗粒的尺寸减小,比表面积增大,吸附葡萄糖分子的面积

也随之增大,从而导致更高的葡萄糖吸附能力<sup>[24]</sup>。在最佳处理温度 140 ℃下,葡萄糖吸附能力和 $\alpha$ -淀粉酶抑制能力都在 160 r/min 时达到最大值。温度和转速过高或过低都不能达到很好的处理效果, $\alpha$ -淀粉酶的抑制能力主要与膳食纤维的比表面积有关,比表面积增大有利于发挥 SDF 对 $\alpha$ -淀粉酶的抑制作用<sup>[25]</sup>。

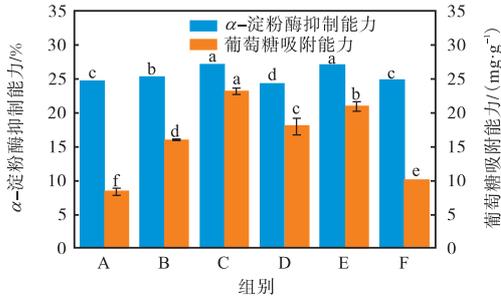


图7 挤压对柚皮 SDF 体外降血糖能力的影响

Fig. 7 Effect of extrusion on hypoglycemic activity of SDF from pomelo peel in vitro

#### 2.4.2 抗氧化能力

挤压对柚皮 SDF 抗氧化能力的影响如图 8 所示。不同处理条件下 SDF 的  $R_{DPPH}$  整体显著高于  $R_{ABTS}$ 。 $R_{DPPH}$  随着挤出温度的升高先增大后减小,在 160 r/min、140 ℃时达到最大,比对照组增加了 88%。这是因为柚皮致密的膳食纤维结构周围或内部附着或镶嵌着酚类物质,挤压处理会破坏膳食纤维结构而释放更多的酚类物质,从而使其抗氧化能力显著提高。 $R_{ABTS}$  与  $R_{DPPH}$  变化趋势相似,在 160 r/min、140 ℃时达到最大,较对照组增加 22%。但是,当温度达到 160 ℃时,二者均下降,可能是因为高温破坏了黄酮、多酚等抗氧化物质的活性<sup>[26]</sup>。

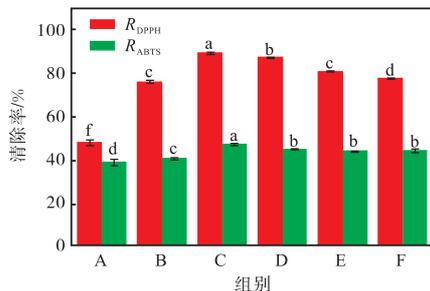


图8 挤压对柚皮 SDF 抗氧化能力的影响

Fig. 8 Effect of extrusion on antioxidant capacity of SDF from pomelo peel

### 3 结 语

与对照组相比,柚皮粉经挤压(螺杆转速 160 r/min、挤出温度 140 ℃)处理后,柚皮 SDF 提取得率

提高了 214%,且理化特性、功能特性和比表面积均有不同程度的提高;SDF 的结构被很大程度破坏,不再是较为完整光滑的块状,表面变得凹凸不平,有裂痕出现,颗粒化明显。此外,改性后 SDF 结构中的基本化学结构未被破坏,且热稳定性更高。本研究结果为柚皮的综合利用提供了新的开发思路,同时为膳食纤维在食品中的应用提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] XIAO Z, YANG X, ZHAO W, et al. Physicochemical properties of insoluble dietary fiber from pomelo (*Citrus grandis*) peel modified by ball milling[J]. Journal of food processing and preservation, 2021, 46 (2) : e16242.
- [2] WANG Y, FUNK M A, GARLEB K A, et al. The effect of fiber source in enteral products on fecal weight[J]. Journal of parenteral and enteral nutrition, 1994, 18 (4) : 340-345.
- [3] DHINGRA D, MICHAEL M, RAJPUT H, et al. Dietary fibre in foods: a review[J]. Journal of food science and technology, 2012, 49 (3) : 255-266.
- [4] 刘树兴. 膳食纤维的特性及制备[J]. 西北轻工业学院学报, 1996 (2) : 108-111.
- [5] PHILLIPS M C. Mechanisms of cholesterol-lowering effects of dietary insoluble fibres: relationships with intestinal and hepatic cholesterol parameters[J]. British journal of nutrition, 2005, 94 (3) : 331-337.
- [6] 王盼, 汪丽萍, 田晓红, 等. 挤压加工与淀粉理化性质关系的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016, 24 (6) : 13-17.
- [7] KIM J H, TANHEHCO E J, NG P K W. Effect of extrusion conditions on resistant starch formation from pastry wheat flour[J]. Food chemistry, 2006, 99 (4) : 718-723.
- [8] 周小理, 钱韵芳, 周一鸣, 等. 不同处理工艺对苦荞麸皮膳食纤维体外抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32 (8) : 1-4.
- [9] 张光, 吕铭守, 石彦国, 等. 挤压膨化工艺对米糠可溶性膳食纤维结构及功能性的影响[J]. 包装工程, 2020, 41 (19) : 45-53.
- [10] 许真, 靳学远, 段君, 等. 双螺杆挤压对枣渣膳食纤维的改性研究[J]. 轻工学报, 2021, 36 (5) : 9-15.
- [11] 赵琳, 黄润庭, 蔡鲁峰, 等. 双螺杆挤压苦荞茶生产工艺参数的优化[J]. 食品科学, 2015, 36 (4) : 74-79.
- [12] 戴彩霞, 何荣. 超高压和加热处理对菜籽蛋白功能性质和结构的影响研究[J]. 中国油脂, 2019, 44 (7) : 68-

(下转第 71 页)

- [24] CHANG C C, LIN C H, LEE C R, et al. Escaping from collapsing modes in a constrained space[C]//IEEE. Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). New York: IEEE, 2018: 204–219.
- [25] WEI J, LIU M, LUO J, et al. PeerGAN: generative adversarial networks with a competing peer discriminator [EB/OL]. [2023–03–01]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.07524>.
- 责任编辑: 郎婧
- 
- (上接第 27 页)
- 74.
- [13] ZHENG Y, WANG Q, HUANG J, et al. Hypoglycemic effect of dietary fibers from bamboo shoot shell: an in vitro and in vivo study[J]. Food and chemical toxicology, 2019, 127: 120–126.
- [14] LIU Y, ZHANG H, YI C, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. Food chemistry, 2021, 342: 128352.
- [15] HABERMEYER M, ROTH A, GUTH S, et al. Nitrate and nitrite in the diet: how to assess their benefit and risk for human health[J]. Molecular nutrition and food research, 2015, 59(1): 106–128.
- [16] 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.
- [17] ZHOU Y, XIE F, ZHOU X, et al. Effects of Maillard reaction on flavor and safety of Chinese traditional food-roast duck[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2016, 96(6): 1915–1922.
- [18] WU L, SUN H, HAO Y, et al. Chemical structure and inhibition on  $\alpha$ -glucosidase of the polysaccharides from *Cordyceps militaris* with different developmental stages [J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 148: 722–736.
- [19] LIU X, SUO K, WANG P, et al. Modification of wheat bran insoluble and soluble dietary fibers with snail enzyme[J]. Food science and human wellness, 2021, 10: 356–361.
- [20] WEN Y, NIU M, ZHANG B, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. LWT-Food science and technology, 2017, 75: 344–351.
- [21] GE S, WU Y, PENG W, et al. High-pressure CO<sub>2</sub> hydrothermal pretreatment of peanut shells for enzymatic hydrolysis conversion into glucose[J]. Chemical engineering journal, 2020, 385: 123949.
- [22] ULLAH I, YIN T, XIONG S, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (soybean residue) insoluble dietary fiber modified by high-energy wet media milling[J]. LWT-Food science and technology, 2017, 82: 15–22.
- [23] SUN C, WU X, CHEN X, et al. Production and characterization of okara dietary fiber produced by fermentation with *Monascus anka*[J]. Food chemistry, 2020, 316: 126243.
- [24] JING Q, YUE L, KINGSLEY G M, et al. The effect of chemical treatment on the in vitro hypoglycemic properties of rice bran insoluble dietary fiber[J]. Food hydrocolloids, 2016, 52: 699–706.
- [25] REN F, FENG Y, ZHANG H, et al. Effects of modification methods on microstructural and physicochemical characteristics of defatted rice bran dietary fiber[J]. LWT-Food science and technology, 2021, 151: 112161.
- [26] BRIONES-LABARCA V, MUOZ C, MAUREIRA H. Effect of high hydrostatic pressure on antioxidant capacity, mineral and starch bio-accessibility of a non-conventional food: *Prosopis chilensis* seed[J]. Food research international, 2011, 44(4): 875–883.
- 责任编辑: 郎婧