

沙棘籽粕膳食纤维的结构特征与功能性质分析

陈小乐^{1,2}, 马珊², 邓玮亮¹, 郑巧文¹, 陈坤锥¹, 张猛猛³, 吴梦瑶⁴, 申迎宾^{1*}, 张磊^{2*}

(1. 广州大学生命科学学院, 广东广州 510006) (2. 新疆农业大学林学与风景园林学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (3. 仲恺农业工程学院化学化工学院, 广东广州 510225) (4. 广州大学化学化工学院, 广东广州 510006)

摘要: 为探讨沙棘籽粕膳食纤维的理化功能性质。该研究以沙棘籽粕为原料, 采用复合酶解法制备得到沙棘籽粕的可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和不可溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF), 并进行了系统表征其理化性质及结构特征。结果显示, IDF 得率为 76.03%, 占主导地位, SDF 得率仅为 5.23%。在化学成分方面, SDF 中总糖含量高达 84.43%, 显著高于 IDF, 而两者黄酮类化合物含量无显著差异; 在结构特征方面, 红外光谱分析显示 SDF 与 IDF 化学组成相似, 但 SDF 氢键网络更紧密; X-射线衍射分析了 SDF 的无定型结构以及 IDF 的有序高结晶度。扫描电镜观察显示, SDF 为平滑均匀球状, 而 IDF 为大块多孔蜂窝状。功能特性分析表明, IDF 因其粗糙多褶皱表面及多孔网状结构, 展现出优异的持水能力 ($2.50 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、持油能力 ($2.96 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) 及膨胀性能 ($3.66 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$), SDF 则因少结晶和松散结构, 展现出优异的水结合力 ($1.86 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)。此外, 两种组分均表现出潜在的胆固醇吸附作用和葡萄糖吸附能力。该研究不仅为沙棘籽粕的高值化利用提供了新途径, 也为膳食纤维的深入研究和应用开发提供了科学依据。

关键词: 沙棘籽粕; 可溶性膳食纤维; 结构分析; 功能特性; 复酶法

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1689

Analysis of Preparation and Structure of Dietary Fiber from Seabuckthorn (*Hippophae Rhamnoides* L.) Seed Meal Functional Characteristics

CHEN Xiaole^{1,2}, MA Shan², DENG Weiliang¹, ZHENG Qiaowen¹, CHEN Kunzhui¹, ZHANG Mengmeng³, WU Mengyao⁴, SHEN Yingbin^{1*}, ZHANG Lei^{2*}

(1.College of Life Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China) (2.College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)(3.College of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China) (4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To investigate the physicochemical and functional properties of dietary fiber derived from sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) seed meal, soluble dietary fiber SDF and insoluble dietary fiber IDF were prepared via a combined enzymatic method. Systematic characterization was conducted to analyze their structural and functional attributes. The results demonstrated a dominant IDF yield of 76.03%, significantly higher than that of SDF (5.23%). Chemically, SDF exhibited a total sugar content of 84.43%, markedly surpassing IDF, while both fractions showed comparable flavonoid levels. Structural analyses revealed that SDF and IDF shared similar chemical compositions, as confirmed by FT-IR spectroscopy, but SDF displayed a denser hydrogen-bond network. XRD patterns further identified SDF as amorphous and IDF as highly crystalline. Morphologically, SEM imaging distinguished SDF as smooth spherical particles and IDF as porous honeycomb structures. Functionally, IDF outperformed SDF in water-holding ($2.50 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), oil-holding ($2.96 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), and swelling capacities ($3.66 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$), attributed to its rough, folded surface and porous network. Conversely, SDF exhibited

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-03-16; 接受日期: 2025-03-17

基金项目: 新疆重点研发计划项目 (2022B02005-3)

作者简介: 陈小乐 (2001-), 女, 研究生在读, 研究方向: 生物医药, E-mail: lele@e.gzhu.edu.cn

通讯作者: 申迎宾 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 精准营养, E-mail: shenybin@gzhu.edu.cn; 共同通讯作者: 张磊 (1983-), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向: 天然产物开发与利用, E-mail: zlei_xj@sina.com

superior water-binding capacity ($1.86 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) due to its loose, low-crystallinity structure. Both fractions demonstrated potential cholesterol adsorption and glucose retardation capabilities. This study not only proposes a sustainable strategy for valorizing sea buckthorn seed meal but also provides critical insights into the structure-function relationships of dietary fibers, supporting their application in functional food development.

Keywords: seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) seed meal; soluble dietary fiber; structural analysis; functional properties; multiple enzymatic method

沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.) 是胡颓子科沙棘属多年生落叶灌木, 其果实作为典型浆果类植物器官, 由外果皮、中果肉及内种籽构成三级解剖结构。成分分析表明, 沙棘果实富含维生素类、黄酮类、多酚类及原花青素等次生代谢产物, 构成其独特营养体系的物质基^[1,2]。在沙棘深加工产业链中, 籽粕作为籽粒脱脂后的主要副产物, 呈现显著的资源特征, 其膳食纤维含量高达 57.50%, 同时富含黄酮苷、植物甾醇及 K、Ca、Mg 等矿物质元素, 兼具营养强化与环境友好双重属性^[3]。

膳食纤维作为第七大营养素, 根据非淀粉多糖溶解特性可分为可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 与不可溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF) 两大亚类^[4]。它不能在人体口腔、胃和小肠内被消化吸收, 但在大肠中可以被发酵。膳食纤维不仅在日常饮食中能够增添食品的营养价值, 还有助于改善肥胖、心血管疾病和肠道问题^[5,6]。研究证实, 可溶性膳食纤维已被广泛应用于各类预制食品中, 能够提高食品的营养价值, 增强持水力、乳化性能和起泡性, 从而改善食品的质地和食用特性, 加强结构稳定性, 并延长保质期^[7]。此外, SDF 还能通过 ADPN-AMPK/PPAR- α 信号通路抑制小鼠体内脂肪的过多形成, 达到减轻体重的效果^[8]。

然而, 尽管国内外学术界已对膳食纤维在调节肠道微生物菌群^[9]、预防肥胖^[10]、降低血糖血脂水平^[11]等作用进行了大量研究, 但对于富含多种生物活性物质沙棘籽粕的膳食纤维^[12,13], 当前研究存在明显局限性。在提取方法方面, 多采用传统水提法或酸碱处理, 存在效率低、成分破坏严重等问题^[14]; 在结构表征方面, 局限于 FT-IR 初步鉴定, 缺乏 XRD 结晶度、SEM 微观形貌等系统分析^[4]; 此外, 不同来源的膳食纤维在理化性质和功能特性上存在显著差异^[3], 因此需要进一步研究以明确沙棘籽粕膳食纤维的独特之处。

因此, 本研究采用复合酶解法, 建立沙棘籽粕膳食纤维高效提取工艺, 并对其化学成分、结构特征、功能特性以及生物活性进行深入分析。旨在为沙棘资源高值化利用提供了新的技术路径, 同时为功能性膳食纤维的研发建立了系统的分析方法体系。

1 材料与方法

1.1 原料

沙棘籽粕, 新疆康元生物技术集团股份有限公司。

1.2 试剂

无水乙醇, 广东光华科技股份有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、冰乙酸, 天津大茂化学试剂有限公司; 氢氧化钠、苯酚、盐酸、浓硫酸、3,5-二硝基水杨酸、无水葡萄糖, 广州市东红化工厂; α -淀粉酶、碱性蛋白酶、淀粉葡萄糖化酶, 北京索莱宝科技有限公司, 以上试剂均为分析纯。

1.3 仪器与设备

FB224 电子分析天平, 上海舜宇恒平科学仪器; RE212-B 旋转蒸发仪, 雅拓科技贸易 (上海) 有限公司; DHG-9075A 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 800C 多功能粉碎机, 永康市红太阳机电有限公司; SCIENTZ-18N/B 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; HWS-26 恒温水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; TD5B 台式大容量离心机, 长沙英泰仪器有限公司; THZ-412 台式恒温振荡箱, 上海精宏实验设备有限公司; 捷克 TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜, 牛津公司; Rigaku Ultima IV X 射线衍射仪, 日本理学公司; TENSORII 傅里叶红外光谱仪, 德国 BRUKER 光谱仪器公司。

1.4 实验方法

1.4.1 沙棘籽粕膳食纤维的制备

参考 Wu 等^[15]的方法, 取 175 g 脱脂原料放入烧杯, 加入 1 700 mL 蒸馏水, 加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液调节 pH 值至 9.0, 随后加入 5.0 g 碱性蛋白酶, 50°C 下反应 30 min。调节 pH 值至 6.5, 加入 14.2 g α -淀粉酶, 60°C 反应 30 min。加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸溶液调节 pH 值至 4.0, 加入 6.0 g 糖化酶, 60°C 下反应 30 min。沸水浴灭酶 5 min, 静置冷却至室温。4 000 r/min 离心 20 min, 离心后的沉淀物经蒸馏水洗涤后, 冷冻干燥。粉碎过筛 (100 目), 得到 IDF, 4°C 保存, 浓缩上清液以及洗涤液, 量取体积, 加入无水乙醇进行醇沉 (四倍体积, 4 h)。离心 15 min (4 000 r/min), 用无水乙醇洗涤沉淀 2 次, 沉淀物冷冻干燥, 粉碎过筛 (100 目), 得到 SDF, 4°C 保存。

1.4.2 沙棘籽粕膳食纤维化学成分的测定

根据 AOAC 方法^[16]分析蛋白含量、总糖含量、总酚含量和黄酮含量。

1.4.3 傅里叶红外光谱的测定

分别称取 2 mg SDF 和 IDF, 与适量的 KBr 粉末混合, 研磨均匀后进行压片。将制好的压片放入红外光谱仪内进行扫描, 扫描区间为 $400\sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$, 用 Nexus 系统软件对采集到红外吸收图谱进行分析^[17]。

1.4.4 X-射线衍射的测定

X-射线衍射仪测定蒸汽爆破改性前后 SDF 的衍射图谱。使用铜靶, 设定管压、管流分别为 40 kV、40 mA, 衍射角设置为 2θ , 扫描范围为 $5^\circ\sim 60^\circ$ ^[17]。

1.4.5 扫描电子显微镜的测定

将少量样品放置在导电胶上使用真空喷镀仪镀金后, 在电镜下放大 200 倍和 5 000 倍扫描并拍照记录^[18]。

1.4.6 持水力、持油力、膨胀力和结合水力的测定

1.4.6.1 持水力 (Water Holding Capacity, WHC) 测定

WHC 的测定参照 Tang 等^[19]的方法并进行适当修改, 准确称取 0.5 g 样品于 20 mL 干净离心管中, 加入 10 mL 去离子水, 室温下振荡混合 30 min, 静置 24 h, 在 5 000 r/min 条件下离心 10 min, 小心吸出上清液, 滤纸吸干多余水分称取样品吸水后质量, 按照下列公式计算 WHC。每个样品重复三次, 取平均值。

$$W = \frac{(M1 - M2)}{M1} \quad (1)$$

式中:

W ——持水力, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

$M1$ ——样品质量, g;

$M2$ ——样品吸水后质量, g。

1.4.6.2 持油力 (Oil Holding Capacity, OHC) 测定

OHC 的测定参照 Tang 等^[19]的方法并进行适当修改, 准确称取 0.5 g 样品于 20 mL 干净离心管中, 加入 10 mL 玉米油, 室温下振荡混合 30 min, 静置 24 h。在 5 000 r/min 条件下离心 20 min, 小心倒去上层油脂, 滤纸吸除多余油分称取样品持油后质量。按照下列公式计算 OHC。每个样品重复三次, 取平均值。

$$O = \frac{(M2 - M1)}{M1} \quad (2)$$

式中:

O ——持油力, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

$M1$ ——样品质量, g;

$M2$ ——取样品持油后质量, g。

1.4.6.3 膨胀力 (Swelling Capacity, SC) 测定

SC 的测定参照 Tang 等^[19]的方法并进行适当修改, 准确称取 0.5 g 样品于干燥的量筒中, 读取其初始体积, 加入 10 mL 去离子水。室温下搅拌均匀 30 min, 静置 24 h, 读取其自由膨胀后的体积, 按照下列公式计算 SC。每个样品重复三次, 取平均值。

$$S = \frac{(V2 - V1)}{M1} \quad (3)$$

式中:

S ——膨胀力, $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$;

$M1$ ——样品质量, g ;

$V1$ ——样品的初始体积, mL ;

$V2$ ——样品吸水膨胀后的体积, mL 。

1.4.6.4 结合水力 (Hydraulic-Binding, HB) 测定

HB 的测定参照 Fu 等^[20]的方法并进行适当修改, 取 0.1 g ($M3$) 的样品于已加入 10 mL 蒸馏水的离心管中, 常温震荡 1 h , 取沉淀, 室温静置 1 h 后称量, 记为 $M1$, 再将沉淀置于恒温干燥箱中烘干, 称重记为 $M2$ 。

$$H = \frac{(M1 - M2)}{M3} \quad (4)$$

式中:

H ——结合水力, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;

$M1$ ——沉淀质量, g ;

$M2$ ——沉淀烘干后的质量, g ;

$M3$ ——样品质量, g 。

1.4.7 功能性质的测定

1.4.7.1 胆固醇吸附能力 (Cholesterol adsorption capacity, CAC) 测定

参考 Ma 等^[21]的方法稍作修改。取 10.0 mg 胆固醇标准品, 冰乙酸定容至 100 mL 容量瓶中, 制得胆固醇标准液。分别取质量浓度为 0.1 mg/mL 的胆固醇标准溶液的 0 、 0.16 、 0.32 、 0.48 、 0.64 、 0.80 mL 后, 用冰乙酸对应补足至 0.80 mL 并混匀。加入 0.4 mL 由冰乙酸配制质量浓度为 1.0 mg/mL 的邻苯二甲醛溶液和 8 mL 混合酸 (冰乙酸与浓硫酸按照体积比 $1:1$ 混匀), 混匀后室温静置 10 min 。测定波长 550 nm 处的吸光值并绘制标准曲线。测得胆固醇标准曲线: $y=0.1216x-0.0917$, $R^2=0.9909$ 。

样品测定: 新鲜鸡蛋的蛋黄与蒸馏水按 $1:9$ 比例混合 (混合液), 取 0.1 g 样品与 5 mL 混合液均匀混合, 分别调节 pH 值为 2.0 和 7.0 , 随后在 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 摇床中反应 2 h 。随后 10000 r/min 离心 10 min , 取 0.1 mL 上清液, 加 0.7 mL 冰乙酸、 0.4 mL 邻苯二甲醛溶液和 8.0 mL 混合酸, 混匀放置 10 min 后, 在 550 nm 处取 $200\text{ }\mu\text{L}$ 样液测定吸光值。对照为未加样品的蛋黄混合液, 计算如公式 (5) 所示:

$$C = \frac{(M2 - M3)}{M1} \quad (5)$$

式中:

C ——胆固醇吸附能力, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;

$M1$ ——样品质量, g ;

$M2$ ——未加样的溶液中胆固醇含量, mg ;

$M3$ ——加样品溶液中的胆固醇含量, mg 。

1.4.7.2 葡萄糖吸附能力 (Glucose adsorption capacity, GAC) 测定

参考 Li 等^[22]的方法略作修改。取 100.0 mg 无水葡萄糖标准品于 100 mL 容量瓶并用蒸馏水定容, 配得葡萄糖标准液。在 15 mL 离心管中加入 0.0 、 0.1 、 0.2 、 0.4 、 0.8 、 1.0 mL 的葡萄糖标准液, 加蒸馏水补足至 1.0 mL 。向离心管中加入 2.0 mL DNS 试剂, 沸水浴加热 2 min 后冷却, 定容至 15 mL 。测定波长 540 nm 时的吸光度来绘制标准曲线。测得葡萄糖标准曲线: $y=1.1068x+0.0094$, $R^2=0.9988$ 。

样品测定: 取 0.1 g 样品与 10 mL 葡萄糖溶液 (质量浓度: 100 mg/mL) 混匀。经 6 h 的 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴, 4000 r/min 离心 20 min , 取上清液, 540 nm 处用 DNS 法比色, 对照为未加入膳食纤维的葡萄糖溶液, 计算公式如下:

$$G = \frac{(M1 - M2)}{M3} \quad (6)$$

式中:

G ——葡萄糖吸附能力, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;

M1——葡萄糖溶液原质量, mg;
M2——离心后上清液葡萄糖溶液质量, mg;
M3——样品质量, g。

1.5 数据处理与分析

除 1.3.3、1.3.4 和 1.3.5 外, 各实验均重复 3 次, 实验数据用平均值±标准差表示。采用 Origin 2024 对分析的数据进行作图, 采用 SPSS 软件对其进行差异显著性分析 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 沙棘籽粕膳食纤维的得率

沙棘在食用与药用等多个领域均展现出显著的功效。该研究的重点在于对沙棘籽粕中的膳食纤维进行深入的功效评价。表 1 记录了采用复酶法提取 SDF 的得率, 其结果为 5.23%。相较于刘畅^[23]所提及的水提法最佳工艺, 该研究通过复合酶法提取, 使得 SDF 提取率提高了 15.45%。这一显著提升的原因可能在于, 多种酶进行协同酶解, 从而促进了 SDF 的充分溶出, 增加了 SDF 的含量^[24]。研究还发现 IDF 的得率高达 76.03%, 表明在沙棘籽粕中 IDF 占据了主导地位。这一现象主要归因于实验所用原料——农业加工副产物沙棘籽粕的固有特性。经过多重加工工序后, 该原料本身的 SDF 含量相对较少, 而 IDF 含量则相对丰富。类似地, 其他农业加工副产物如玉米皮也表现出相似的规律, 即经过脱油或机械加工后, 其 SDF 含量较低, 而 IDF 含量较高^[25]。这进一步说明, 农业加工副产物的特性对膳食纤维的类型和含量有显著影响。进一步对沙棘籽粕的组成进行分析, 如图 1 所示, 主要由两部分构成: 一部分为坚硬且呈黑色的皮壳颗粒, 另一部分则为灰色内含物颗粒。这种独特的结构特征对膳食纤维的提取效率, 尤其是 SDF 的提取, 产生了间接的影响。

表 1 沙棘籽粕膳食纤维的化学成分质量分数和得率表 (%)

Table 1 Chemical composition and yield table of dietary fiber from seabuckthorn seed meal (%)

沙棘籽粕	蛋白质	总糖	总黄酮	总酚	得率
SDF	9.26±0.01	84.43±0.05	2.84±0.01	2.37±0.01	5.23±0.17
IDF	1.35±0.04	1.20±0.01	2.51±0.01	1.48±0.01	76.03±1.3



图 1 沙棘籽粕组成

Fig.1 Composed of seabuckthorn seed meal

注: A: 皮壳颗粒; B: 内含物颗粒。

2.2 沙棘籽粕膳食纤维化学成分分析

表 1 数据显示, 在酶解作用下, 膳食纤维中的蛋白质发生了明显的降解, 导致其质量分数较低。SDF 的主要组成成分为糖类物质, 这与已有报道中竹笋中的 SDF 主要成分为果胶多糖相一致^[15]。相比之下, IDF 则主要由纤维素、不溶性半纤维素、木质素等在水中不溶解的成分构成, 这些特性使得 IDF 中的总糖含量较低。SDF 和 IDF 中的黄酮和酚类物质含量相近, 这可能与其共同来源于沙棘籽有关, 沙棘籽中黄酮类化合物在植物体内分布广泛, 且具有相似的生物合成路径^[26]。具体而言, SDF 的蛋白质含量为 9.26%, 总糖含量为 84.43%,

总黄酮含量为 2.84%，总酚含量为 2.37%。而 IDF 的蛋白质含量为 1.35%，总糖含量为 1.20%，总黄酮含量为 2.51%，总酚含量为 1.48%。尽管 IDF 的糖类含量较低，但其结构特点和功能性质与其高孔隙率和多孔性有关，这些特性有助于其在持水力、持油力和膨胀力等方面表现出更高的功能特性。然而，SDF 和 IDF 在化学成分和结构特征上的本质差异，表明 SDF 和 IDF 具有不同的功能特性，这一点需要进一步探究和理解。

2.3 沙棘籽粕膳食纤维结构性质的分析

2.3.1 傅里叶红外光谱结果分析

红外光谱是一种吸收光谱技术，其原理基于分子振动引发的偶极矩变化，从而产生红外吸收现象。分子的振动频率与化学键的强度和原子质量紧密相关，因此可以通过精确测定这些振动频率从而识别出特定的官能团。对 SDF 与 IDF 进行红外光谱分析，结果揭示了两者在化学组成上的高度相似性，如图 2A 所示。具体而言，两者的特征吸收峰在位置和数量上均未观察到显著差异。在 $3\,274\text{ cm}^{-1}$ 处，两者均呈现出一个由 O-H 伸缩振动引起的宽峰，这一共同特征指示了氢键作用力的存在。进一步分析发现， $1\,631\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰源自芳香环苯基团，而 $1\,039\text{ cm}^{-1}$ 附近则对应于纤维素与半纤维素中 C=O (-COC) 的伸缩振动，这些均为多糖类物质的典型红外吸收特征，证明了 SDF 与 IDF 均具备糖类结构的基础框架。

然而，尽管 SDF 与 IDF 在红外光谱的整体趋势上保持一致，但两者在吸收光强上却展现出显著差异：IDF 的吸收光强明显低于 SDF。这一发现与化学成分分析结果相一致，表明 SDF 中的多糖含量更高。因为在红外光谱中，多糖类物质的特征吸收峰通常较强，而 SDF 的吸收光强更高，说明其多糖含量相对较高。此外，IDF 内部可能含有更多本身吸收强度较弱的化学键或官能团，如 C=C 键等，这导致其在红外光谱中呈现出较低的光强度。IDF 中氢键作用可能较为微弱，进一步降低了其光强度，这可能与跃迁几率较小、物质吸收强度较低等因素有关。相比之下，SDF 可能具有更为紧密的氢键网络结构，这些氢键不仅稳固了 SDF 的结构，还增强了其对红外光的吸收能力。

值得注意的是，Wu 等^[15]对竹笋的 SDF 和 IDF 进行了红外光谱对比分析，结果显示两者红外吸收光谱图相似，均含有糖类化合物结构，但吸收强度无显著差异。而王磊鑫等^[27]的研究则表明，挤压蒸煮加工方式会导致米糠中 SDF 和 IDF 在 $1\,047\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,022\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰峰高比降低。因此，对于红外吸收强度的影响因素仍需进一步地探究。

2.3.2 X-射线衍射结果分析

X 射线衍射技术能应用于膳食纤维晶体结构的确定，其中不同的晶体结构会在特定的衍射角上产生相应的衍射峰。图 2B 展示了 SDF 与 IDF 中典型的纤维素形式，其相对峰强度各异。SDF 在 22° 处呈现出的尖锐峰，是纤维素 I 型的特征标志，该特征峰通常出现在 2θ 角约为 21° 的位置。类似地，竹笋 SDF^[15]在 21° 附近也展现出了明显的尖锐峰，同时在 32° 和 45° 附近出现的强烈峰则进一步证实了 SDF 具有典型的纤维素晶体结构。然而，该研究中 SDF 的整体衍射峰强度相对较弱，这与其他可溶性膳食纤维的衍射特征存在显著差异。这可能是由于在复酶法提取过程中，多次使用 NaOH 溶液调节提取液 pH 值，导致附着在纤维素微纤维表面的无序无定形半纤维素被优先水解，从而在一定程度上破坏了 SDF 的结晶区域，使其结晶度有所下降，分子间作用力减弱，呈现出更为松散的形态。这种结构变化有利于 SDF 的水合性能提升^[24]。

相比之下，IDF 在 22° 处呈现出明显的衍射峰，即纤维素 I 型晶体的特征表现；而在 35° 处则出现一个圆顿峰，这是 IDF 的显著特征之一。对于豌豆 IDF^[22]的研究也证实了这一点，在 35° 处同样存在圆顿峰。然而，玫瑰果渣 IDF^[28]的衍射结果却与 IDF 存在差异，后者在 20° 两侧缺少尖锐峰。这表明该研究中采用的复酶提取法可能对 IDF 的结晶结构造成了一定程度的损伤。

综上所述，IDF 具有有序、高结晶度的结构特点，导致其难以被水溶剂渗透；而 SDF 则基本呈现无定型的结晶结构，分子刚性较差，使得水等溶剂易于渗入。这一检测结果与两者的溶解性能相吻合。但从衍射峰的强弱程度来看，复合酶法提取对 SDF 的结晶区造成了更大的破坏。Zhu 等^[3]的研究也发现，酶法提取的 DF 通过 FTIR 和 SEM 分析证实了寡糖与淀粉基质之间分子内氢键的破坏，这有助于提高 DF 的产量。同时，酶改性处理会导致 SDF 的木质素和纤维素部分降解，从而降低其结晶度^[28]。这些研究均表明，酶提取法可能对 DF 的结晶区造成了一定的破坏。

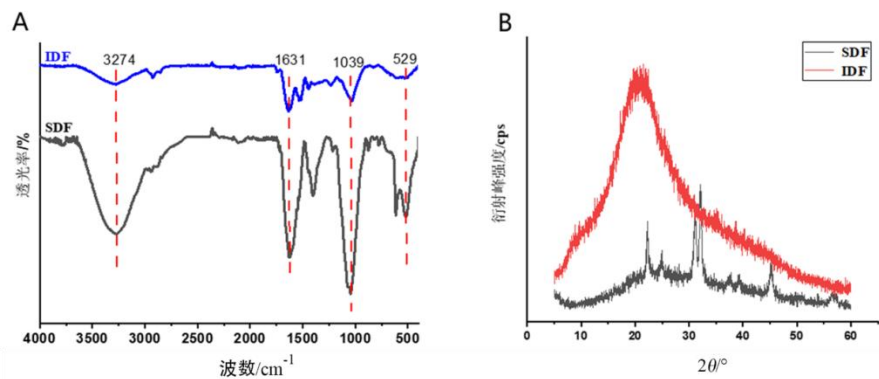


图 2 SDF 和 IDF 的傅里叶红外光谱测定和 X-衍射测定

Fig.2 Determination of SDF and IDF by Fourier infrared Spectroscopy and X-ray diffraction

注：A：傅里叶红外光谱测定，B：X-衍射测定。

2.3.3 扫描电子显微镜结果分析

在图 3A2 中，以 200 倍放大倍数观察，可见 SDF 展现出一种相对致密的结构特征，其表面平整光滑，呈现出较大的块状结构形态，且边缘断裂整齐。同样，竹笋 SDF^[15]的电镜图像也呈现出表面光滑、块状结构的特征。进一步放大至 5 000 倍（图 3A1），SDF 颗粒呈现出一种相对均匀且圆润的球形结构，这种微观形态与多糖^[29]及淀粉^[30]的已知结构相似，从而进一步证实了 SDF 的主要化学成分为糖类物质，这与表 1 中列出的化学成分分析结果相吻合。

在图 3B2 中，以 200 倍放大倍数观察 IDF 的表面结构，其呈现出大块蜂窝状结构，这种结构显著增加了其表面积。当放大至 5 000 倍（图 3B1）时，IDF 的多孔结构清晰可见，与 SDF 的微观结构形成显著差异。Li 等^[22]的研究 IDF 同样具有大量多孔结构，此外，目前大部分研究报道的 SDF 与 IDF 在微观结构上存在显著差异^[15,28]，该研究结果亦支持这一结论。

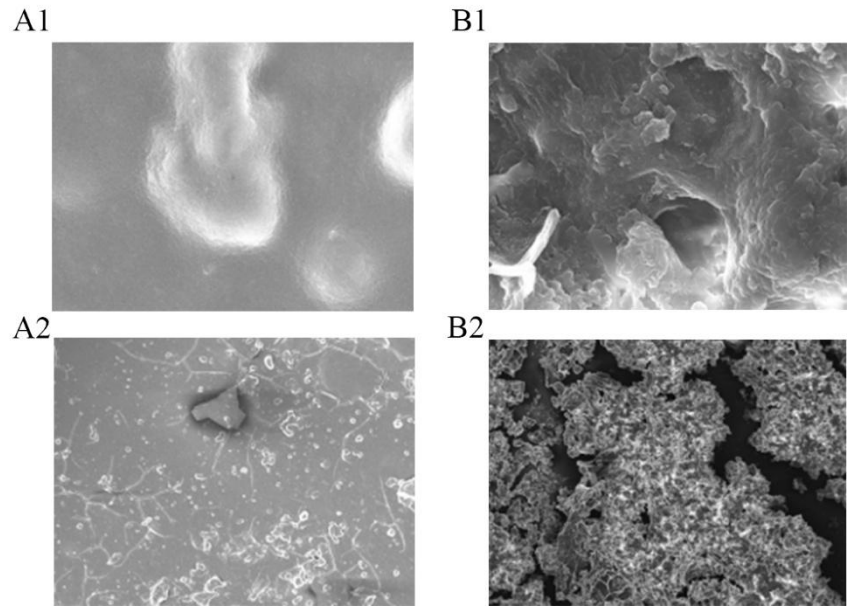


图 3 电镜下的 SDF 和 IDF

Fig.3 SDF and IDF under an electron microscope

注：A1：SDF×5000，A2：SDF×200，B1：IDF×5000，B2：IDF×200。

2.4 沙棘籽粕 SDF 和 IDF 的持水力、持油力、膨胀力、结合水力结果

膳食纤维的持水力、持油力、膨胀力和结合水力等理化特性决定了其在胃肠道中发挥功能的作用。这些特性在预防慢性疾病、科学研究和产品开发方面具有重要意义。

图4清晰地展示了SDF与IDF在水合性质方面的测试结果。具体而言, IDF的持水力、持油力、膨胀力和结合水力分别为 $2.50\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $2.96\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.66\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.10\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 而SDF的对应数值则为 $1.10\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1.33\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.74\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.86\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。从这些数据可以看出, IDF的持水力、持油力和膨胀力均显著优于SDF, 但SDF的结合水力则高于IDF。IDF之所以在持水力、持油力和膨胀力上表现更佳, 主要归因于其结构特点: IDF具有较高的孔隙率, 这些孔隙能够容纳并锁住更多的水分和油脂, 同时其结构相对紧密, 有助于保持这些成分。相比之下, SDF虽然表面的亲水基团较多, 吸水能力强, 但由于其结构相对松散, 因此在持水力、持油力和膨胀力上不如IDF。此外, SDF表面光滑平整, 这一特点使其更易于与水结合溶解, 从而在结合水力上表现出优势。然而, 这种结构也导致SDF储存水分的能力较低, 不如IDF能够有效保持水分。以往的研究也表明, SDF和IDF在功能特性上存在差异^[31]。但总体来看, IDF因其独特的结构优势, 在持水力、持油力和膨胀力方面通常优于SDF^[32,33]。而对于SDF和IDF而言, 这一规律同样适用: IDF在持水力、持油力和膨胀力上显著优于SDF, 这主要归因于两者在结构上的差异。

综合评估结果显示, IDF在持水力、持油力和膨胀力上表现卓越, 这得益于其粗糙多褶、多孔网状的特殊结构, 有效提升了锁水和吸油能力。相比之下, SDF凭借少结晶、松散的结构, 展现出优异的水结合力。由此可见, 沙棘籽粕膳食纤维在健康饮食和体重管理方面展现出巨大的应用潜力, 成为调节胃肠功能和促进健康的新选择。

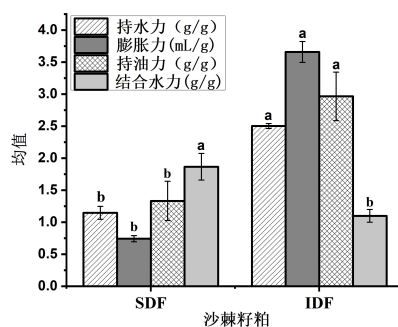


图4 SDF和IDF的持水力、持油力、膨胀力及结合水力结果

Fig.4 Hydraulic, oil holding, swelling, and combined hydraulic results of SDF and IDF

注: 不同小写字母表示同一指标差异显著 ($P<0.05$) (下同)。

2.5 沙棘籽粕膳食纤维功能性质分析

2.5.1 胆固醇吸附能力分析

在评估和开发能够降低血液中胆固醇水平的物质或方法时, 胆固醇吸附能力分析至关重要, 对减轻心血管疾病的风险具有积极意义。SDF和IDF在模拟胃pH值为2.0和模拟肠pH值为7.0条件下的胆固醇吸附能力测定结果如图5所示。结果显示, 在模拟胃环境中, SDF对胆固醇的吸附能力为 $4.50\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 在模拟肠环境中为 $6.25\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 略低于山楂果渣SDF^[34], 但高于青稞酒糟的SDF^[35]。而IDF在模拟胃环境中为 $13.24\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 在模拟肠环境中为 $4.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 均低于玫瑰果渣的IDF^[28]。整体而言, IDF对胆固醇的吸附能力显著小于SDF, 这可能与SDF的表面更加疏松, 有利于胆固醇分子的接近并吸附的特性有关。此外, SDF与IDF的胆固醇吸附能力均受到酸碱环境的显著影响, 酸性环境不利于胆固醇的吸附。SDF和IDF在中性环境下的胆固醇吸附能力显著高于酸性环境, 这可能是由于在酸性条件下, H^+ 大量存在, 使得膳食纤维和胆固醇均携带正电荷, 从而电荷排斥作用导致结合力减弱, 进而降低了吸附胆固醇的能力^[24]。因此, SDF和IDF主要在肠道中发挥作用。

研究结果表明, 相同pH值条件下, SDF的胆固醇吸附能力显著高于IDF。膳食纤维的独特性在于其表面富含能与胆固醇产生螯合效应的活性基团, 这一机制有效遏制了胆固醇向胆汁酸的转化过程, 并在降低肝脏内胆固醇积累方面展现出积极效果^[36]。因此, 可以推断SDF具有更大的比表面积和疏松的内部结构, 从而暴露出更多的极性和非极性基团, 增强了SDF与胆固醇的相互作用, 并影响其吸附能力。类似地, 张慧娟等^[37]

的研究也表明，SDF 对胆固醇的吸附能力显著高于 IDF，可能是由于两者在结构和比表面积方面的差异。因此，SDF 在调节肠道健康和降低胆固醇方面具有更大的潜在应用价值。

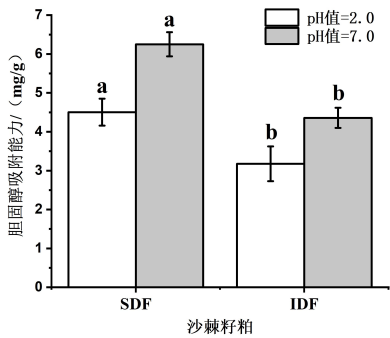


图 5 SDF 和 IDF 的胆固醇吸附能力

Fig.5 Cholesterol adsorption capacity of SDF and IDF

2.5.2 对葡萄糖吸附能力分析

膳食纤维凭借其卓越的吸附能力，能够有效减缓食物中葡萄糖的吸收速率，进而帮助控制餐后血糖的快速升高，为糖尿病患者带来显著的健康益处。根据图 6 所示，SDF 对葡萄糖的吸附能力（45.48 mg·g⁻¹）略高于 IDF（40.63 mg·g⁻¹）。这一结果不仅揭示了不同膳食纤维在葡萄糖吸附特性上可能存在的相似性，而且 SDF 与麦麸 IDF 对葡萄糖吸附能力相近的结果进一步印证了这一点^[38]。SDF 之所以对葡萄糖展现出略高的吸附能力，或许与其独特的物理结构特性相关。SDF 的光滑球状结构使得更多化学基团得以充分暴露，从而增强了与葡萄糖分子的亲和力^[3]。此外，研究表明，提高膳食纤维的粘度和比表面积能够有效改善其对葡萄糖的吸附能力^[39]。因此，推测 SDF 之所以具备较高的吸附能力，可能正是得益于其较大的比表面积和适宜的粘度。

综上所述，沙棘籽粕中提取的膳食纤维在食品科学与健康营养等领域展现出了巨大的应用潜力。未来研究可进一步深入探索其结构与功能之间的关系，以期优化膳食纤维的吸附性能，并为糖尿病患者的饮食管理提供更加科学、精准的指导。

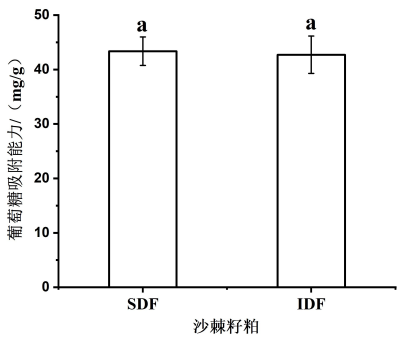


图 6 SDF 和 IDF 的葡萄糖吸附能力

Fig.6 Glucose adsorption capacity of SDF and IDF

3 结论

该研究采用复酶法从沙棘籽粕中高效提取了 SDF 与 IDF，并系统比较了这两种膳食纤维的组成成分、结构特性及功能性质。结果显示，SDF 与 IDF 的提取率分别为 5.23%和 76.03%，且它们在理化特性和功能表现上展现出显著的差异。具体而言，SDF 富含多糖类物质和少量的酚类及黄酮类物质，其形态以光滑平整的片状结构和部分均匀圆润的球状颗粒为主，整体结构相对松散；IDF 则呈现出大块且致密的蜂窝状结构，并伴随着丰富的多孔特征。红外光谱分析进一步证实，这两种纤维均具备多糖类物质的典型光谱特征，特别是在 1039 cm⁻¹ 处的纤维素特征峰。在功能特性方面，IDF 展现出了卓越的持水力（2.50 g·g⁻¹）、膨胀力（3.66 mL·g⁻¹）

及持油力 ($2.96 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), 这主要归因于其多孔结构和低蛋白质含量。而 SDF 则在结合水力 ($1.86 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)、胆固醇吸附能力 ($6.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 方面表现突出, 其多糖结构和丰富的亲水性基团有助于这些功能特性的发挥。尽管 SDF 和 IDF 在葡萄糖吸附能力上无显著性差异, 但 SDF 由于其多糖结构的复杂性和丰富的活性基团, 可能在某些实际应用中表现出更多的优势。该研究不仅深入剖析了沙棘籽粕中 SDF 与 IDF 的组成与结构特征, 还提高了 SDF 和 IDF 的提取效率, 并揭示了这些膳食纤维在促进肠道健康、调节血糖及降低胆固醇水平等方面的潜在功效。因此, 该研究为沙棘籽粕的精细化加工与利用提供了重要依据, 并为相关产品的开发奠定了实验基础。在后续研究中, 可进一步挖掘沙棘籽中的其他有益成分, 并将其应用于保健品、药物等健康产业领域, 以期更好地服务于人类健康事业。

参考文献

- [1] MA Q G, HE N X, HUANG H L, et al. *Hippophae rhamnoides* L.: a comprehensive review on the botany, traditional uses, phytonutrients, health benefits, quality markers, and applications [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(12): 4769-4788.
- [2] ZHANG G, LIU Y, LIU P. Active components from sea buckthorn (*hippophae rhamnoides* L.) regulate hepatic stellate cell activation and liver fibrogenesis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(46): 12257-12264.
- [3] ZHU Y, JI X, YUEN M, et al. Effects of ball milling combined with cellulase treatment on physicochemical properties and in vitro hypoglycemic ability of sea buckthorn seed meal insoluble dietary fiber [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 8: 820672.
- [4] ZHANG M, LIU Y, LIU J, et al. Extraction methods of dietary fiber and effect on bioactivity: a review [J]. Process Biochemistry, 2024, 146: 451-461.
- [5] TANG C, WANG Y, CHEN D, et al. Natural polysaccharides protect against diet-induced obesity by improving lipid metabolism and regulating the immune system [J]. Food Research International, 2023, 172: 113192.
- [6] SOLIMAN G A. Dietary fiber, atherosclerosis, and cardiovascular disease [J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1155.
- [7] JOSHI M, AAYUSH K, SHARMA K, et al. Fiber and nanofiber based edible packaging for enhancing the shelf life of food: a review [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103970.
- [8] ZHAO J, JI Y, TIAN G, et al. Pear pomace soluble dietary fiber suppresses fat deposition in high fat diet-fed mice by regulating the ADPN-AMPK/PPAR- α signaling pathway [J]. Journal of Functional Foods, 2024, 122: 106483.
- [9] GU Q, GAO X, ZHOU Q, et al. Characterization of soluble dietary fiber from citrus peels (*citrus unshiu*), and its antioxidant capacity and beneficial regulating effect on gut microbiota [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125715.
- [10] WANG H, HONG T, LI N, et al. Soluble dietary fiber improves energy homeostasis in obese mice by remodeling the gut microbiota [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 498(1): 146-151.
- [11] LIU Y, FAN C, TIAN M, et al. Effect of drying methods on physicochemical properties and in vitro hypoglycemic effects of orange peel dietary fiber [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): e13292.
- [12] WEI J, ZHAO J, SU T, et al. Flavonoid extract from seed residues of *hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* protects against alcohol-induced intestinal barrier dysfunction by regulating the Nrf2 pathway [J]. Antioxidants, 2023, 12(3): 562.
- [13] YANG J, HONG J, AIHAITI A, et al. Preparation of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) seed meal peptide by mixed fermentation and its effect on volatile compounds and hypoglycemia [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1355116.
- [14] BERKTAS S, CAM M. Effects of acid, alkaline and enzymatic extraction methods on functional, structural and antioxidant properties of dietary fiber fractions from quince (*cydonia oblonga miller*) [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141596.
- [15] WU W, HU J, GAO H, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics [J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.
- [16] LATIMER G W, HORWITZ W, AOAC International. Official methods of analysis of AOAC international: OMA [M]. 22nd edition. Oxford New York, NY: AOAC International, 2023.
- [17] ZHANG S, XU X, CAO X, et al. The structural characteristics of dietary fibers from *tremella fuciformis* and their hypolipidemic effects in mice [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 503-511.

- [18] NIU M, HOU G, LEE B, et al. Effects of fine grinding of millfeeds on the quality attributes of reconstituted whole-wheat flour and its raw noodle products [J]. Food Science and Technology, 2014, 57(1): 58-64.
- [19] TANG C, WU L, ZHANG F, 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.
- [20] FU Y, ZHANG J, CHEN K, et al. An in vitro fermentation study on the effects of dendrobium officinale polysaccharides on human intestinal microbiota from fecal microbiota transplantation donors [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 53: 44-53.
- [21] MA W, LIANG Y, LIN H, et al. Fermentation of grapefruit peel by an efficient cellulose-degrading strain, (*penicillium* YZ-1): modification, structure and functional properties of soluble dietary fiber [J]. Food Chemistry, 2023, 420(15): 136123.
- [22] LI L, LIU J, ZHANG Y, et al. Qualitative and quantitative correlation of microstructural properties and In vitro glucose adsorption and diffusion behaviors of pea insoluble dietary fiber induced by ultrafine grinding [J]. Foods, 2022, 11(18): 2814.
- [23] 刘畅.沙棘粕水溶性膳食纤维的制备及应用[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [24] ZHANG H, LI Y, CAO C, et al. Enzymatic Modification of Potato Residue Fiber Improves Cholesterol and Sugar Absorption[J]. American Journal of Potato Research, 2023, 100(4): 305-313.
- [25] 郭雪飞.玉米皮不溶性膳食纤维特性的研究[D].长春:吉林农业大学,2011.
- [26] SHEN N, WANG T, GAN Q, et al. Plant flavonoids: classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132531.
- [27] 王磊鑫,吴娜娜,吕莹果,等.挤压蒸煮加工米糠可溶和不溶膳食纤维对米淀粉性质的影响及其相互作用分析[J].食品科学,2022,43(16):107-113.
- [28] HE Y, LI W, ZHANG X, et al. Physicochemical, functional, and microstructural properties of modified insoluble dietary fiber extracted from rose pomace [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1421-1429.
- [29] LI X G, ZHANG F Y, JIANG C X, et al. Structural analysis, in vitro antioxidant and lipid-lowering activities of purified Tremella fuciformis polysaccharide fractions [J]. Process Biochemistry, 2023, 133: 99-108.
- [30] SHEN C, CHEN W, AZIZ T, et al. Effects of cold plasma pretreatment before different drying process on the structural and functional properties of starch in chinese yam [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133307.
- [31] WANG K, LI M, WANG Y, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106162.
- [32] ROBERTSON J A, DE MONREDON F D, DYSELER P, et al. Hydration properties of dietary fibre and resistant starch: a european collaborative study [J]. Food Science and Technology, 2000, 33(2): 72-79.
- [33] WANG L, WANG J, WANG J, et al. Soluble and insoluble dietary fiber at different ratios: hydration characteristics, rheological properties, and ameliorative effects on constipation [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101996.
- [34] 祖齐欣,王勇,刘素稳,等.不同提取方式对山楂果渣可溶性膳食纤维结构及功能特性的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(9):164-173.
- [35] 陈甜甜,高鹏,唐小红,等.青稞酒糟水溶性膳食纤维的提取及其结构研究[J].粮食与油脂,2024,37(5):22-26.
- [36] XUE Z, GAO X, JIA Y, et al. Structure characterization of high molecular weight soluble dietary fiber from mushroom lentinula edodes (berk.) pegler and its interaction mechanism with pancreatic lipase and bile salts[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 1281-1290.
- [37] 张慧娟,靳程茗,吕世豪,等.黑麦麸膳食纤维的结构和功能特性研究[J].中国食品学报,2023,23(8):84-93.
- [38] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124983.
- [39] CHAU C F, WANG Y T, WEN Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre [J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1402-1408.