

芡实膳食纤维的结构、理化和功能特性

袁梦, 刘晓倩, 张浩, 何馨怡, 林江涛, 岳清华

Structural, Physicochemical, and Functional Properties of Dietary Fiber Extracts from *Euryale ferox*

YUAN Meng, LIU Xiaoqian, ZHANG Hao, HE Xinyi, LIN Jiangtao, and YUE Qinghua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024090128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声波处理对膳食纤维结构、理化特性影响的研究进展

Research Progress on the Effect of Ultrasonic Modification on Structures and Physicochemical Properties of Dietary Fibers

食品工业科技. 2022, 43(17): 474-481 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090102>

山西运城六种小麦淀粉结构及理化特性分析

Morphological Features and Physicochemical Properties of Starches from Six Wheat Varieties in Yuncheng, Shanxi Province

食品工业科技. 2025, 46(9): 286-294 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060090>

改性处理对牛蒡根膳食纤维结构和功能特性的影响

Effects of Modification on the Structure and Functional Properties of Dietary Fiber in Burdock Root

食品工业科技. 2024, 45(18): 63-71 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100115>

改性方法对豆渣不溶性膳食纤维结构、理化性质及功能特性的影响

Effect on the Structure, Physicochemical Properties and Functional Properties of Insoluble Dietary Fiber from Soybean Residue by Modification Methods

食品工业科技. 2025, 46(10): 154-162 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070405>

提取方法对黄精渣水不溶性膳食纤维结构和功能特性的影响

Effects of Extraction Methods on Structural and Functional Properties of Water-insoluble Dietary Fiber from *Polygonatum sibiricum* Residue

食品工业科技. 2024, 45(24): 187-195 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010181>

红枣果汁果渣与果酒果渣膳食纤维功能特性的比较研究

Comparative of Functional Properties on Dietary Fiber from Jujube Juice Pomace and Fruit Wine Pomace

食品工业科技. 2020, 41(4): 1-5,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

袁梦, 刘晓倩, 张浩, 等. 芡实膳食纤维的结构、理化和功能特性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 151–161. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090128

YUAN Meng, LIU Xiaoqian, ZHANG Hao, et al. Structural, Physicochemical, and Functional Properties of Dietary Fiber Extracts from *Euryale ferox*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 151–161. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090128

· 研究与探讨 ·

芡实膳食纤维的结构、理化和功能特性

袁梦, 刘晓倩, 张浩, 何馨怡, 林江涛*, 岳清华*

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 本研究以芡实中可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维为研究对象, 并与小麦膳食纤维进行对比, 旨在全面分析芡实膳食纤维的结构、理化和功能特性。采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和傅里叶红外光谱 (FTIR) 等技术手段分析膳食纤维的结构特性, 同时评估其抗氧化特性、葡萄糖及胆固醇吸附能力、酶活性抑制能力以及流变特性等功能性质。结果显示, 芡实不溶性膳食纤维 (GIDF) 结晶度高 (31.86%)、结构紧密、粒度小、表面积大, 表现出优异的持水力 (4.54 ± 0.07 g/g) 和持油力 (3.82 ± 0.35 g/g)。在流变学分析中, 芡实膳食纤维与小麦膳食纤维均呈现出剪切稀化行为。可溶性膳食纤维 (SDF) 样品具有较低的刚度、较高的阻尼性能和黏弹性行为以及较高的黏度和频率敏感性, 且相比于小麦可溶性膳食纤维 (WSDF), 芡实可溶性膳食纤维 (GSDF) 的 G' , G'' 更高, 表明 GSDF 中的分子链或网络结构更加紧密和有序, 从而能够更好地抵抗形变。此外, GSDF 展现出较高的 α -淀粉酶抑制活性、体外降糖活性以及胆固醇吸附能力和自由基清除能力。综上所述, 相较于小麦膳食纤维, 芡实膳食纤维在结构和功能特性上均表现出明显优势, 尤其是其抗氧化能力、体外降糖能力以及对 α -淀粉酶活性抑制更为突出, 为芡实膳食纤维在食品工业中的潜在应用提供了有力支持。

关键词: 膳食纤维, 芡实, 小麦, 结构特性, 理化特性, 功能特性

中图分类号: TS202.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0151-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090128



本文网刊:

Structural, Physicochemical, and Functional Properties of Dietary Fiber Extracts from *Euryale ferox*

YUAN Meng, LIU Xiaoqian, ZHANG Hao, HE Xinyi, LIN Jiangtao*, YUE Qinghua*

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This study focused on the soluble and insoluble dietary fibers extracted from *Euryale ferox*, and compared them with wheat dietary fiber, aiming to comprehensively analyze the structure, physicochemical properties, and functional characteristics of *Euryale ferox* dietary fiber. The structural characteristics of the dietary fibers were analyzed by technical means such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Simultaneously, their antioxidant properties, glucose and cholesterol adsorption capacities, enzyme activity inhibition capabilities, and rheological properties were evaluated. The results indicated that the insoluble dietary fiber from *Euryale ferox* (GIDF) exhibited high crystallinity (31.86%), a compact structure, small particle size, and large surface area, demonstrating excellent water holding capacity (4.54 ± 0.07 g/g) and oil holding capacity (3.82 ± 0.35 g/g). In rheological analysis, both the dietary fibers from *Euryale ferox* and wheat exhibited shear-thinning behavior. The SDF (soluble dietary fiber) samples displayed low stiffness, high damping properties and viscoelastic behavior, and high viscosity and frequency sensitivity. Compared to wheat soluble dietary fiber (WSDF), the G' and G'' of the soluble dietary fiber from *Euryale ferox*

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 青年科学基金项目 (32101985); 河南省重大科技专项 (231100110300); 河南省重大科技专项 (221100110700); 河南工业大学博士基金项目 (2023BS107)。

作者简介: 袁梦 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 谷物加工与装备, E-mail: yuanmeng001112@163.com。

* 通信作者: 林江涛 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物加工与装备, E-mail: hautlin@126.com。

岳清华 (1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物科学与加工技术, E-mail: yqhlst1208@126.com。

(GSDF) were higher, suggesting that the molecular chains or network structures in GSDF were more compact and ordered, enabling better resistance to deformation. Furthermore, GSDF exhibited high α -amylase inhibitory activity, hypoglycemic activity *in vitro*, cholesterol adsorption capacity, and radical scavenging ability. In summary, compared to wheat dietary fiber, the dietary fiber from *Euryale ferox* demonstrated significant advantages in both structural and functional characteristics, particularly in its antioxidant capacity, hypoglycemic capacity *in vitro*, and inhibition of α -amylase activity. These findings provide strong support for the potential application of dietary fiber from *Euryale ferox* in the food industry.

Key words: dietary fiber; *Euryale ferox*; wheat; structural characteristics; physicochemical properties; functional properties

膳食纤维(Dietary Fiber, DF)是一种存在于植物性食物中的多糖,能有效降低血液中的胆固醇和葡萄糖含量,进而降低罹患结肠癌、心脏病及肥胖的风险^[1]。根据溶解度,膳食纤维可分为可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)和不可溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)两类。IDF 和 SDF 均显示出一定的降血脂和降血糖活性^[2]。因此,两者都被提议作为治疗 2 型糖尿病(T2DM)的候选药物。据报道,从异质制剂来源和组合物获得的膳食纤维可能具有不同的高血糖控制的潜在机制。

芡实,又名鸡头米、柳珊瑚,属睡莲科,是可食用的水生植物,广泛分布于热带至温带地区。在印度和中国传统医学中,它常被用于治疗肝、肾和脾相关疾病^[3]。其营养丰富,主要成分为碳水化合物,包括淀粉、糖类和粗纤维,极具营养和药用价值^[4]。芡实具有抗氧化、心脏保护和抗糖尿病的潜力^[5],近年来对芡实的研究主要集中在芡实淀粉以及芡实中的多酚物质,未有芡实膳食纤维方面的研究和报道^[6-8]。传统谷物,如小麦,通常被认为是饮食中膳食纤维的良好来源,并已被广泛利用。然而,传统谷物中的麸质已被发现会引起麸质不耐受者的胃肠道不适,这限制了传统谷物作为膳食纤维来源的使用^[9]。芡实是一种水生植物的种子,它不属于小麦、黑麦、大麦等含有麸质的谷物类别,从源头上看,芡实不具备含有麸质的条件,且有研究表明,芡实中并不含有醇溶谷蛋白和谷蛋白等麸质蛋白^[5],在这种情况下,从芡实中提取膳食纤维是一种新的思路。

本文的目的是对芡实膳食纤维进行进一步的研究。以小麦膳食纤维为参考,全面了解芡实膳食纤维的结构、功能性质和理化特性,以及芡实膳食纤维的特点和优势,以期芡实膳食纤维在食品工业中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

芡实 江西明湖农业发展有限公司;小麦 河南禾作种业有限公司;耐高温 α -淀粉酶(BR)、中性蛋白酶(50 U/mg) 上海麦克林生化科技股份有限公司;糖化酶(100 U/mg) 北京索莱宝科技有限公司;猪胰腺 α -淀粉酶(5 U/mg) 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;羟自由基检测试剂盒 北京雷根生物技术有限公司。

QUANTA 250FEG 扫描电子显微镜 美国 FEI

公司; Nicolet 6700FT-IR 傅里叶红外光谱分析仪、RS 600 哈克流变仪 美国 Thermo Fisher 公司; miniflex 600 X 射线衍射仪 日本岛津公司; BT-9300H 激光粒度分布仪 丹东市百特仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 IDF 和 SDF 的制备 采用 AOAC 法^[10] 分别从芡实和小麦中分离和制备可溶性膳食纤维、不溶性膳食纤维。准确称量 40 g 样品,按 1:20 的比例与蒸馏水混合均匀,随后加入 0.1 mol/L NaOH 溶液调节体系 pH 至 8.0,室温条件下搅拌 2 h。4500 r/min 离心 15 min 去除上清液,使用 400 mL PBS(0.01 mol/L, pH6.0)溶解所得沉淀,向所得溶解液中加入 0.1 mol/L HCl,调节 pH 至 6.0,加入 2 mL 浓度为 0.2% 的耐高温 α -淀粉酶,于 95 °C 条件下酶解 2 h。酶解完成后,调节 pH 至 7.5,加入 3.0 mL(400 U/mL)中性蛋白酶,于 60 °C 水浴反应 1 h。反应结束后,将 pH 调至 4.5,加入 1.2 mL(3000 U/mL)糖化酶,在 50 °C 下反应 30 min。反应结束后,沸水浴处理 15 min 灭酶。待冷却至室温后,在 5000 r/min 下离心 15 min 收集残留物。残渣经蒸馏水洗涤两次后冷冻干燥,最终得到 IDF。对于 SDF 的提取,收集离心后的上清液,加入四倍体积 95% 乙醇,置于室温下沉淀 2 h,随后收集残留物,于通风柜内干燥,最终得到 SDF。所有膳食纤维样品干燥后均研磨过 80 目筛。膳食纤维的得率和纯度根据以下公式计算:

$$\text{得率}(\%) = \frac{\text{提取得到的干燥膳食纤维质量}}{\text{原料干重}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{纯度}(\%) = \frac{\text{提取物中膳食纤维含量}}{\text{提取得到的干燥膳食纤维质量}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.2 膳食纤维基础性质的测定 膳食纤维基础性质的测定参照 GB 5009.88-2023。

1.2.2.1 IDF 的粒度分布 IDF 的粒度分布采用激光粒度分布仪进行测定,记录样品的 D10、D50、D90、体积平均径、比表面积及峰值粒径。

1.2.2.2 IDF 的组分测定 参考 SURYA 等^[11] 的方法测定 IDF 中半纤维素、纤维素和木质素的含量。从测定每个膳食纤维中的中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)开始。

NDS 溶液: 由 18.61 g EDTA, 6.81 g 四硼酸钠,

30 g 十二烷基硫酸钠, 20 mL 2-乙氧基乙醇和 4.56 g 磷酸氢二钠在 1 L 蒸馏水中的混合物组成。ADS 溶液: 由 20 g 十六烷基三甲基溴化铵与 27.5 g NH_2SO_4 在 1 L 蒸馏水中的混合物组成。

NDF 含量测定: 0.5 g 膳食纤维(W_0)与 100 mL NDS 溶液混合, 将混合物于 105 ℃ 加热 1 h。随后, 使用预称重的玻璃坩埚(W_1)过滤溶液, 并用热水和丙酮洗涤残留物, 将洗涤后的残留物置于 105 ℃ 的烘箱中干燥 4 h, 直到达到恒定的重量(W_2)。ADF 含量测定与 NDF 相同, 改用 100 mL ADS 溶液。半纤维素含量由 NDF 和 ADF 的差值得到。NDF、ADF、半纤维素含量的计算方法如下:

$$\text{NDF}(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_0} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{ADF}(\%) = \frac{W_3 - W_1}{W_0} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

$$\text{半纤维素含量}(\%) = \text{NDF} - \text{ADF} \quad \text{式 (5)}$$

式中: W_0 为样品重量(g); W_1 为玻璃坩埚的重量(g); W_2 为样品经 NDS 洗涤后干燥至恒重重量(g); W_3 为样品经 ADS 洗涤后干燥至恒重重量(g)。

纤维素含量由 ADF 得到的残渣测定。将残渣在 72% 硫酸中浸泡 3 h, 玻璃坩埚过滤。随后在 105 ℃ 的烘箱中干燥 4 h, 直至恒重。纤维素含量的计算方法如下:

$$\text{纤维素含量}(\%) = \frac{W_3 - W_4}{W_0} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中: W_0 为样品重量(g); W_3 为样品经 ADS 洗涤后干燥至恒重重量(g); W_4 为 ADF 经 72% 的硫酸洗涤后干燥至恒重重量(g)。

木质素含量的测定: 将纤维素残渣于 600 ℃ 的马弗炉中放置 2 h, 随后转移到干燥器中, 冷却后称重。木质素含量的计算方法如下:

$$\text{木质素含量}(\%) = \frac{W_4 - W_5}{W_0} \times 100 \quad \text{式 (7)}$$

式中: W_0 为样品重量(g); W_4 为 ADF 经 72% 的硫酸洗涤后干燥至恒重重量(g); W_5 为灰化后残渣重量(g)。

1.2.3 结构特性

1.2.3.1 扫描电镜 (SEM) 将膳食纤维固定在 SEM 板上, 喷金后在 250~8000 倍放大下观察膳食纤维的形貌并拍照。

1.2.3.2 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 参考 WEI 等^[3]的方法对样品进行 FTIR 扫描。按照样品与溴化钾 1:100 的比例, 精确称取 2 mg 膳食纤维与 200 mg 已烘干至恒重的溴化钾粉末, 将两者进行混合后研磨, 用压片机将混合物压制成透明的薄片, 扫描范围 4000~400 cm^{-1} 。

1.2.3.3 X 射线衍射 (XRD) 参考 ZHANG 等^[12]的

方法, 取一定量干燥的膳食纤维在稳定的 X 射线检测。测试条件为电压 40 kV, 电流 40 mA, 特征射线为 Cu Ka($\lambda=0.1546$ nm), 测量角度 2θ 为 $5^\circ\sim 60^\circ$, 测定步长为 0.02° , 扫描速率为 $2^\circ/\text{min}$ 。

1.2.4 理化性质

1.2.4.1 流变特性 参考 JOHN 等^[13]的方法, 制备 5% SDF 溶液和 5% IDF 溶液悬浮液, 室温搅拌, 随后静置 12 h 以平衡和释放料液中夹带的空气, 使用直径 60 mm, 间隙 0.047 mm 的锥形板进行测试。温度为 25 ℃, 剪切速率为 $0.01\sim 100$ s^{-1} , 研究 SDF 溶液和 IDF 悬浮液的稳态流变特性。通过振幅扫描确定线性黏弹区, 频率扫描确定应变值。

1.2.4.2 持水力 (WHC)、持油力 (OHC) 和吸水膨胀性 (WSC) 根据 MA 等^[2]报道的方法测定样品的持水特性。称取 1 g 膳食纤维于锥形瓶中, 按照 1:20 的比例加入蒸馏水, 于室温下振荡 30 min 后以 4000 r/min 离心 20 min, 除去上清液, 称量沉淀的重量。WHC 按以下公式计算:

$$\text{WHC}(\text{g/g}) = \frac{W_1 - W}{W} \quad \text{式 (8)}$$

式中: W 为吸水前样品的重量(g); W_1 为吸水后样品的重量(g)。

OHC 的测定参考 KUREK 等^[14]的方法, 称取 1 g 烘干后的膳食纤维于离心管中, 加入 20 mL 的葵花籽油, 在室温下放置 4 h, 期间每隔 15 min 摇动一次, 于 4000 r/min 离心 30 min, 倒去上清油脂后称重。OHC 按如下公式计算:

$$\text{OHC}(\text{g/g}) = \frac{W_2 - W}{W} \quad \text{式 (9)}$$

式中: W 为吸油前样品的重量(g); W_2 为吸油后样品的重量(g)。

根据 CHEN 等^[15]报道的方法测定吸水膨胀性 (WSC)。称取 0.5 g 膳食纤维于 10 mL 量筒中, 加入 8 mL 蒸馏水, 吸水 24 h 后, 测定膨胀体积。WSC 按以下公式计算:

$$\text{WSC}(\text{mL/g}) = \frac{V_1 - V}{M} \quad \text{式 (10)}$$

式中: V 为膨胀前干样品的体积(mL); V_1 为膨胀后样品体积(mL); M 为干样品重量(g)。

1.2.4.3 胆固醇吸附量 (CAC) 将新鲜鸡蛋的蛋黄分离, 用蒸馏水稀释十倍后充分搅拌成乳液后用纱布过滤。用磷酸盐缓冲溶液调节 pH 至 2 和 7, 分别模拟胃肠道环境。取 2.00 g 膳食纤维于锥形瓶中, 加入 50 g 蛋黄乳液, 搅拌均匀后置于 37 ℃ 水浴振荡锅中振荡 2 h, 4500 r/min 离心 10 min 后测定胆固醇的含量^[16]。CAC 按以下公式计算:

$$\text{CAC}(\text{mg/g}) = \frac{(C_0 - (C_1 - C_2) \times F) \times 50}{W} \quad \text{式 (11)}$$

式中: C_0 为未添加膳食纤维的蛋黄中胆固醇的含量(mg); C_1 为添加膳食纤维的蛋黄中胆固醇的含

量(mg); C_2 为样品中胆固醇的含量(mg); F 为稀释因子 10; W 为膳食纤维的重量(g)。

1.2.5 体外降糖活性

1.2.5.1 葡萄糖吸附能力(Glucose Adsorption Capacity, GAC)和葡萄糖透析延迟指数(Glucose Dialysis Retardation Index, GDRI) 参考 JOHN 等^[13] 的方法测定 GAC; 按照 DONG 等^[17] 的方法测定 GDRI。

1.2.5.2 α -淀粉酶活性抑制 参考 DHITAL 等^[18] 的方法稍作修改, 在空白试管中分别加入 100 μ L 猪胰 α -淀粉酶液(16 U/mL)和 80 μ L 磷酸盐缓冲溶液(pH6.8), 加入 20 μ L 浓度为 10 mg/mL 的膳食纤维水溶液/悬浮液后, 将试管在 37 $^{\circ}$ C 水浴振荡 30 min, 后加入 1 mg/mL 在沸水浴下糊化 15 min 后的可溶性淀粉溶液, 37 $^{\circ}$ C 水浴振荡 30 min, 反应结束后立即沸水浴处理 20 min 终止酶促反应。空白组为不加抑制剂组, 空白对照组则是将空白组中的酶液用缓冲液代替, 抑制对照组同理。用 DNS 显色法, 测定在 540 nm 处的吸光值, 计算膳食纤维对猪胰 α -淀粉酶的抑制率, 结果用百分率表示。

1.2.6 体外抗氧化活性

1.2.6.1 DPPH 自由基清除能力 膳食纤维对 DPPH 自由基清除能力的评估参照 XIE 等^[19] 的方法, 将膳食纤维配制成一定浓度范围(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mg/mL)的水溶液或悬浮液, 向 1 mL 样品加入 4 mL DPPH 工作液, 避光反应 30 min, 测定在 517 nm 处的吸光值。

1.2.6.2 羟基自由基清除能力 羟基自由基清除能力采用试剂盒(Fenton 比色法)测定。

1.2.6.3 超氧阴离子自由基清除活性 参考 Liu 等^[20] 和王钰博等^[21] 的方法测定膳食纤维的超氧阴离子自由基清除活性。将 160 mg 膳食纤维与 3.4 mL 蒸馏水混合均匀后加入 4.5 mL 0.1 mol/L pH8.2 的 Tris-HCl 缓冲溶液, 混合均匀后在室温下静置 20 min 之后, 立即加入 30 mmol/L 的邻苯三酚溶液 0.1 mL, 立即摇匀, 反应 3 min 后加入 8 mmol/L 的 HCl 溶液 0.1 mL 终止反应。在 4000 r/min 下离心 10 min 后取上清液, 测定其在 325 nm 处的吸光度。根据下式计算超氧阴离子自由基清除活性(SRSA):

$$SRSA(\%) = \frac{A_0 - (A_i - A_j)}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (12)}$$

式中: A_0 为无样品只含邻苯三酚的吸光度; A_i 为样品与邻苯三酚混合的吸光度; A_j 为样品与替代邻苯三酚的蒸馏水混合后的吸光度。

1.3 数据处理

本研究为确保结果的可靠性和准确性, 对所有测试均进行了三次重复, 并以均数 \pm 标准差的形式表示, 使用单因素方差分析和邓肯检验评估统计显著性, 认为 $P < 0.05$ 具有统计学显著性。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维得率、纯度及组分的测定

芡实和小麦膳食纤维的得率及纯度见表 1。芡实的 SDF 多于 IDF, 得率分别为 4.63% 和 4.28%, 可能是芡实富含纤维素和其他结构复杂的多糖类物质^[22]。小麦的 IDF 的得率较高但 SDF 的得率较低, 分别为 11.27% 和 2.36%, 可能是小麦麦麸中含有大量的纤维素、木质素。

表 1 芡实和小麦膳食纤维的得率及纯度

Table 1 Yield and purity of dietary fiber from *Euryale ferox* and wheat

样品	SDF得率 (db, %)	SDF纯度 (%)	IDF得率 (db, %)	IDF纯度 (%)
芡实	4.63 \pm 0.31 ^a	85.27 \pm 3.41 ^a	4.28 \pm 0.16 ^b	75.26 \pm 5.48 ^a
小麦	2.36 \pm 0.41 ^b	88.78 \pm 2.98 ^a	11.27 \pm 0.15 ^a	79.37 \pm 3.91 ^a

注: 同列不同小写字母表示数据之间具有显著性差异($P < 0.05$), 表 2 同。

图 1 是芡实 IDF 中半纤维素、纤维素和木质素的组成情况, 可以看出, 芡实不溶性膳食纤维(GIDF)中纤维素的含量最高(56.74%), 纤维素大分子是由 β -D-葡萄糖残基彼此以 1,4-糖苷键连接而成的, 这种结构使得纤维素具有较高的结晶性能和稳定性。此外, 纤维素大分子中的每一个葡萄糖残基(不包括两端)上, 有三个自由羟基, 这些羟基基团使得纤维素具有亲水性和一定的化学反应活性^[11]。因此, GIDF 可能有较高的结晶度和亲水性。而小麦不溶性膳食纤维(WIDF)中含有较多的木质素(18.64%), 由于木质素其结构中苯环和大量甲基的存在, 具有较高的化学稳定性, 能够在多种环境下保持其结构和性能^[23]。

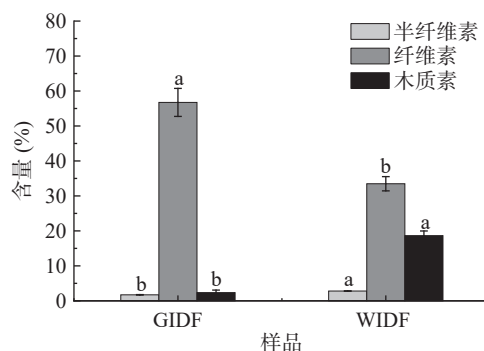


图 1 GIDF 和 WIDF 中半纤维素、纤维素和木质素的含量
Fig.1 Content of hemicellulose, cellulose, and lignin in GIDF and WIDF

注: 不同小写字母表示样品间具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 IDF 粒度分析

IDF 的粒径和表面积对其葡萄糖吸附能力、胆固醇吸附能力以及酶抑制能力具有显著影响^[21]。表 2 为 GIDF 和 WIDF 颗粒特性测定结果。相比于 WIDF, GIDF 有着更小的粒径、体积和更大的比表面积。有研究表明, 较小的粒径和较大的比表面积通常意味着更多的吸附位点和更强的吸附能力, IDF 的粒径越小, 对胆固醇及葡萄糖的吸附能力越强, 较大的

表 2 IDF 的粒度分析
Table 2 Particle size analysis of IDF

样品	D10(μm)	D50(μm)	D90(μm)	体积平均径(μm)	比表面积(m ² /kg)
GIDF	9.32±0.26 ^b	80.14±0.53 ^b	250.67±2.61 ^b	106.92±1.11 ^b	226.34±1.86 ^a
WIDF	30.13±0.35 ^a	130.08±0.29 ^a	267.08±0.38 ^a	141.58±0.26 ^a	95.39±0.23 ^b

表面积使得 IDF 能够更容易地与酶分子结合,从而抑制酶的活性^[24-26]。

2.3 结构特性分析

2.3.1 扫描电镜(SEM) 图 2 为用 SEM 观察芡实和小麦膳食纤维的微观形态结果。相较于 IDF, SDF 展现出更为疏松的微观结构,其聚合度相对较低。这种结构特点使得 SDF 更易吸附水分子、脂肪以及糖类,进而形成稳定的网状构造。与之相反, IDF 则具有更多的褶皱和裂隙,呈现出不同的结构特性。

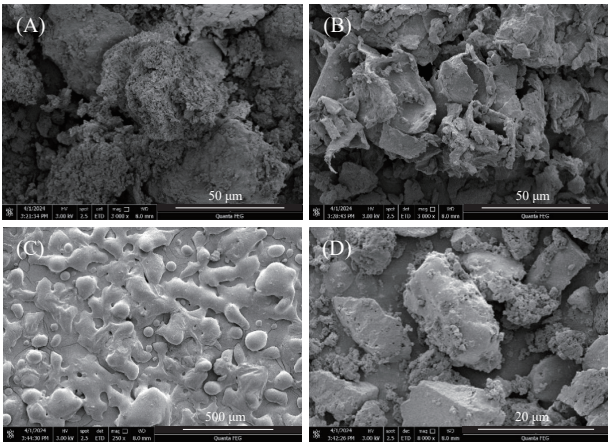


图 2 GIDF(A)、WIDF(B)、GSDF(C)和 WSDF(D)在不同放大倍数下的微观结构

Fig.2 Microstructures of GIDF (A), WIDF (B), GSDF (C), and WSDF (D) at different magnifications
注: A 和 B 放大倍数为 3000 倍, C 为 250 倍, D 为 8000 倍。

GIDF 的纤维团块大且较为完整,结构较为紧密,内部有多层次结构,表面细小孔洞更多,并伴有微小颗粒。WIDF 表面有明显的褶皱,内部中空且有多层次结构,整体呈现不规则片状和块状结构。GSDF 很容易吸湿造成表面融化,吸湿后表面光滑圆润,很难观察到表面微观结构。WSDF 表面相对平整,形态多样且不规则,主要呈现为紧密的不规则片状和块状结构,表面附着有细小颗粒物。相比之下 IDF 的结构更粗糙,褶皱团块更明显。

2.3.2 傅里叶红外光谱分析 图 3 为膳食纤维的 FT-IR 光谱,主要在 3340、2930、1650、1540、1045 cm⁻¹ 附近出现振动峰,这些特征峰大多都属于膳食纤维的特征官能团。羟基在红外光谱中的特征吸收峰通常位于 3200~3600 cm⁻¹ 区域,称为羟基伸缩振动峰。当样品中羟基含量增加时,该吸收峰的强度通常会增强^[27]。从图 3 可以看出芡实膳食纤维相对于小麦膳食纤维,在该波段内吸收峰的强度更大,因此推测芡实膳食纤维中可能含有更多的羟基。2930 cm⁻¹ 附近

的弱峰源于 C-H 伸缩振动,其强度可能受邻近 O-H 宽峰(3200~3500 cm⁻¹)的干扰而被弱化。SDF 在 1745 cm⁻¹ 处的峰可能是可溶性半纤维素的酯羧基 C=O 扩展的结果^[28]。木质素中的芳香苯环振动峰通常在 1500~1600 cm⁻¹ 区域,这些峰的存在和强度可以反映 IDF 中木质素、半纤维素等成分的含量和状态,这一特征峰的存在和强度常被用作评估木质素含量的一个指标^[29]。在此范围内 GIDF 的峰强度要明显强于 WIDF,这一现象表明 GIDF 中含有更多的木质素。在 900~1200 cm⁻¹ 的峰为多糖“指纹”区,它们与样品中的 C-O-C 和 C-O-H 弯曲振动有关^[30]。上述特征峰结果表明,这些 DF 具有纤维素多糖的典型官能团。这些基团的物理和化学性质为 DF 的持水、持油特性以及胆固醇吸附能力提供了物质基础。

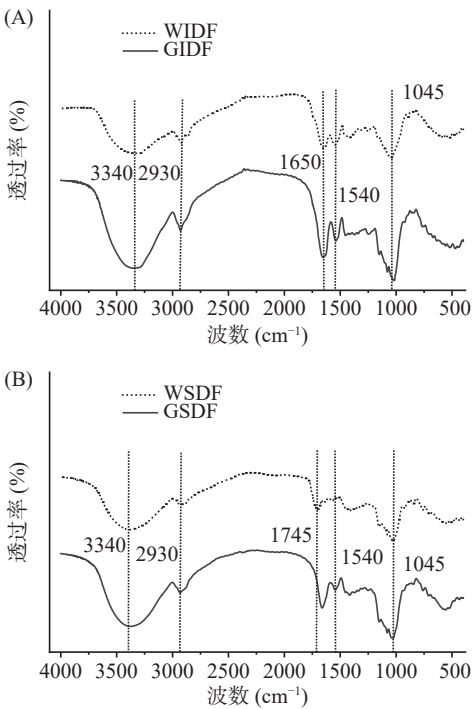


图 3 WIDF、GIDF(A)和 WSDF、GSDF(B)的红外光谱
Fig.3 Infrared spectra of WIDF, GIDF (A), and WSDF, GSDF (B)

2.3.3 XRD 分析 如图 4 所示,所有样品的 XRD 图谱均为典型的纤维素 I 型晶体构象,所有样品均在 2θ=20°~21°(对应于(020)面反射峰)和 32°~34°(对应于(004)面反射峰)附近出现明显的反射峰,说明纤维素的提取并未明显破坏晶体区域的有序结构。所有样品均出现晶态和非晶态。而 GSDF 和 WSDF 在 2θ=14°~18°(对应于(110)面反射峰)出现峰,可能是在某些加工或提取过程中得到部分可溶性的纤维素衍生物^[31]。GIDF、WIDF、GSDF 和 WSDF

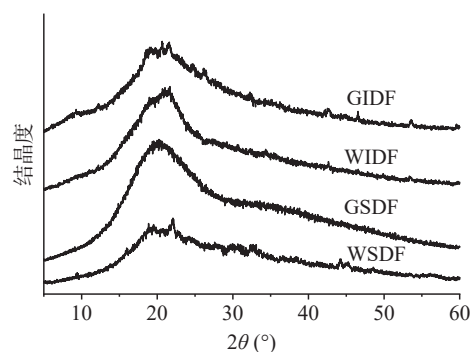


图4 芡实和小麦膳食纤维的X射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction patterns of dietary fiber from *Euryale ferox* and wheat

的相对结晶度分别为 31.86%、28.61%、24.53%、17.66%，芡实膳食纤维的相对结晶度高于小麦膳食纤维。结晶度的高低直接影响其微观结构的致密程度，高结晶度的 IDF 通常具有更为有序的纤维结构^[32]。高结晶度的 SDF 可能具有更强的持水力和膨胀力，因为其有序的微观结构能够更好地保留水分并

抵抗外部压力^[33]，该性质与 SEM 结果保持一致。其结晶度可能通过影响 SDF 的溶解性和在肠道内的滞留时间来间接影响血糖调节效果^[34]。

2.4 理化性质分析

2.4.1 流变特性 黏度是 SDF 的重要性能之一，与 SDF 降低餐后血糖反应的能力密切相关。芡实和小麦纤维组分的流变行为相似，具有典型的非牛顿剪切变薄现象(图 5A、图 5B)。剪切速率黏度值的差异反映了流体在不同剪切速率下的流变行为，当剪切速率增加时流体的黏度降低，这种现象被称为剪切变稀或假塑性行为^[13]。如图 5 所示，随着室温下剪切速率的增加，观察到黏度急剧下降，表明所有样品都具有假塑性特征(剪切稀化行为)。相较于 WSDF，GSDF 结构较为紧密、结晶度更高(24.53%)，因此，在高剪切速率下比 WSDF 更稳定。WIDF 悬浮液和 GIDF 悬浮液均为剪切稀变流体， η 值在剪切速率范围内保持不变。WIDF 悬浮液黏度要略大于 GIDF 悬浮液的黏度，表现为更具非牛顿性质，WIDF 悬浮

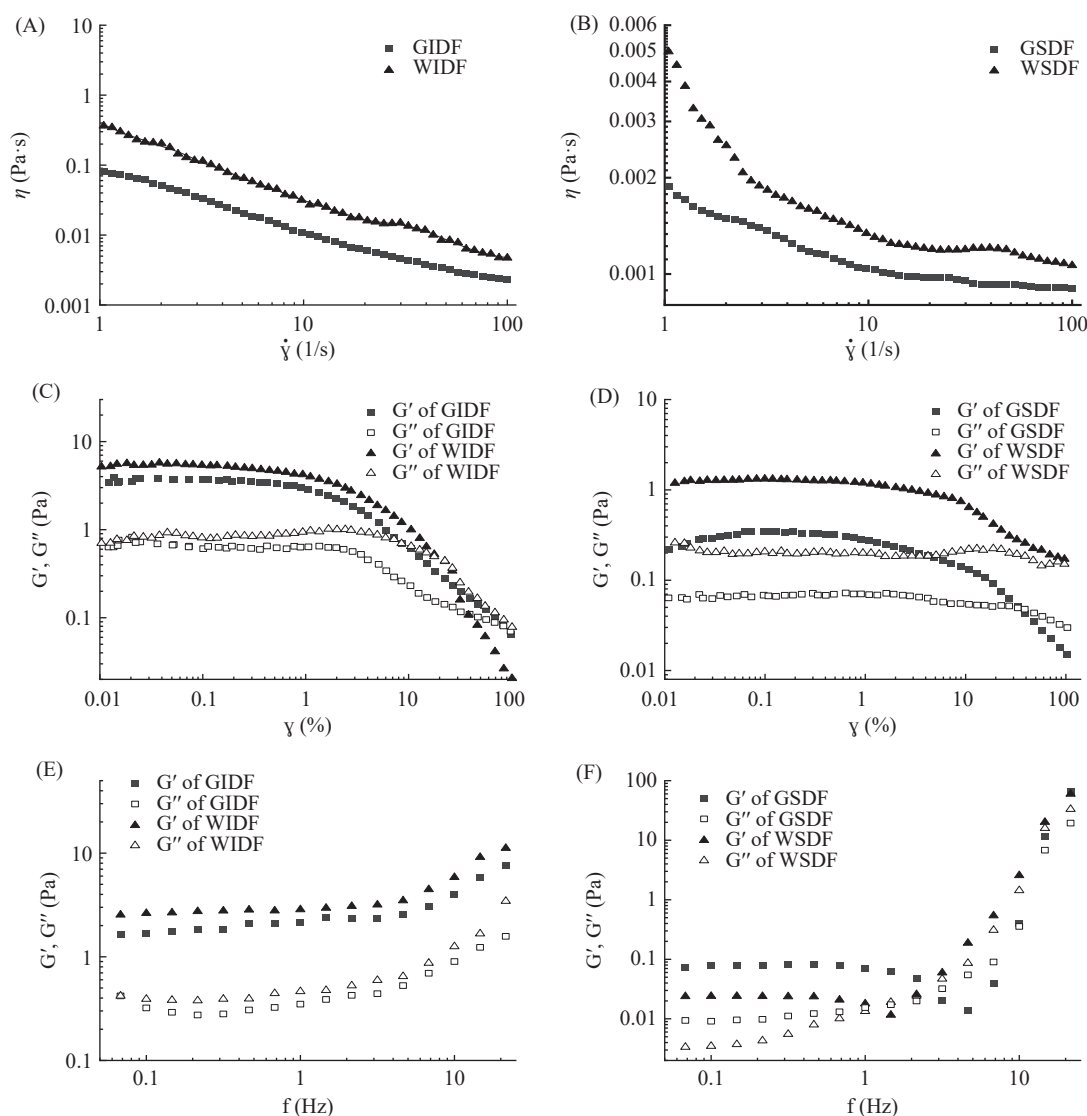


图5 芡实和小麦可溶性膳食纤维溶液和不溶性膳食纤维悬浮液的稳态流变特性

Fig.5 Steady-state rheological behavior of soluble dietary fiber solutions and insoluble dietary fiber suspensions from *Euryale ferox* and wheat

液的高黏度可能与其多孔结构有关,使得更多的液体能够固定在纤维表面,从而导致黏度增加。

图 5C、图 5D 分别为 IDF 悬浮液和 SDF 溶液的振幅扫描图,选择 0.1% 为应变值分别对 GIDF、WIDF、GSDF 和 WSDF 进行频率扫描,确保频率扫描实验处于线性黏弹区域,且扭矩在测量范围内。频率扫描结果如图 5E、图 5F 所示,可以看出在测量范围内 GIDF 和 WIDF 的储能模量(G')远大于损耗模量(G''),说明 IDF 颗粒溶解后发生了一定的分子纠缠,形成了具有固体性质的交联网状结构,弹性行为对黏性成分起主导作用^[35]。WIDF 的储存模量和损耗模量略高于 GIDF,说明 WIDF 具有更高的弹性恢复能力、更高的能量耗散以及更显著的黏性特性^[36]。如图 5F,频率在 0.1~1 Hz 之间时,随着频率升高 GSDF、WSDF 的储存模量降低而损耗模量升高,这表示 SDF 样品具有较低的刚度、较高的阻尼性能和黏弹性行为以及较高的黏度和频率敏感性。GSDF 的 G' 和 G'' 高于 WSDF,材料的损耗模量通常与材料黏性行为的增强相关,较高的储能模量通常与材料内部结构的稳定性相关,表明材料中的分子链或网络结构更加紧密和有序,从而能够更好地抵抗形变,可以作为食品增稠剂和稳定剂,用于改善食品的质地和口感。

2.4.2 持水力(WHC)、持油力(OHC)和吸水膨胀性(WSC) 芡实和小麦膳食纤维的持水力、持油力、吸水膨胀特性测定结果见表 3。四种 DF 的持水性和吸水膨胀性具有一致的变化趋势且与上文中 SEM 和粒径测试结果相符。同类型膳食纤维中,芡实膳食纤维表现出更高的持水能力、持油能力以及吸水膨胀能力。

表 3 芡实和小麦膳食纤维的持水力、持油力、吸水膨胀特性

Table 3 Water-holding capacity, oil-binding capacity, and swelling properties of dietary fiber from *Euryale ferox* and wheat

样品	GIDF	WIDF	GSDF	WSDF
WHC(g/g)	4.54±0.07 ^a	3.92±0.05 ^b	0.57±0.02 ^c	0.51±0.02 ^c
OHC(g/g)	3.82±0.35 ^a	2.33±0.07 ^b	2.44±0.17 ^b	1.32±0.37 ^c
WSC(mL/g)	3.99±0.01 ^a	2.59±0.02 ^b	0.60±0.01 ^c	0.49±0.14 ^c

注:同行不同小写字母表示数据之间具有显著性差异($P<0.05$),表4~表5同。

亲水性和网状结构是膳食纤维 WHC 的基础,WHC 高的膳食纤维可以锁住食品中的水分,避免收缩改变食物的黏性^[37]。如表 3 所示,GIDF 的 WHC 显著高于 WIDF($P<0.05$),可能是因为 GIDF 的结晶度较高,保持水分的能力更强^[33]。

OHC 和膳食纤维的表面性质、多糖组成和疏水性都存在着一一定的关联^[38]。OHC 高的膳食纤维能有效地阻止脂肪流失,能够吸收或者结合胆汁酸,改善食品感官性能,稳定食品品质、延长保质期^[39]。GIDF 的 OHC 为 3.82 ± 0.35 g/g,显著高于 WIDF 的 $2.33\pm$

0.07 g/g($P<0.05$),可能是因为 GIDF 的结晶度更高,样品结构更加有序、致密。

GIDF 的 WSC 为 3.99 ± 0.01 mL/g,显著高于 WIDF(2.59 ± 0.02 mL/g)($P<0.05$),且 IDF 样品的 WSC 显著高于 SDF 样品($P<0.05$),然而两种 SDF 之间差异并不显著。一般来说,可溶性膳食纤维相比不溶性膳食纤维具有更强的吸水膨胀能力,因为可溶性膳食纤维吸水后重量可增加到自身重量的数倍甚至数十倍,形成溶胶或凝胶状物质^[23],然而由于 SDF 在水中的高溶解度导致 WSC 的实验结果较低。不溶性膳食纤维的粒度对其吸水膨胀性有显著影响。一般来说,粒度越小,亲水性基团暴露越多,因此持水力和膨胀力增加。

2.4.3 胆固醇吸附量 如图 6 所示,GSDF 和 GIDF 对胆固醇的吸附能力显著高于小麦($P<0.05$)。相同样品来源的 SDF 比 IDF 结合的胆固醇更多,可能是 SDF 具有较高的溶解性和分散性,能够在水溶液中形成胶体或溶液,这使得 SDF 能够更有效地与胆固醇分子接触并发生相互作用。羟基含量高的可溶性膳食纤维在溶液中容易形成凝胶网络结构,这种凝胶网络结构具有较大的比表面积和孔隙率,能够更有效地捕获和结合胆固醇分子^[40]。

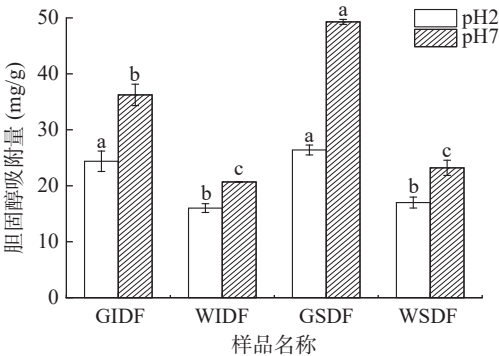


图 6 pH 为 2、7 时芡实和小麦膳食纤维的胆固醇吸附量
Fig.6 Cholesterol adsorption capacity of *Euryale ferox* and wheat dietary fiber at pH2 and 7

注:相同 pH 下,不同小写字母表示样品间具有显著性差异($P<0.05$)。

与 pH2 相比,在 pH 为 7 时,膳食纤维的胆固醇结合能力更强,吴鸿亿等^[41]的研究中不同来源的膳食纤维也有类似的观察结果。这可能是在酸性环境(pH2)下,胆固醇的溶解度较低,这限制了其被膳食纤维吸附的能力。

2.5 体外降糖活性

2.5.1 葡萄糖吸附量(GAC)和葡萄糖透析延迟指数(GDRI) GAC 是指材料或介质在一定条件下对葡萄糖分子的吸附能力,是衡量膳食纤维等生物活性物质对葡萄糖控制能力的关键参数之一,GDRI 通过测定葡萄糖通过透析膜的速率来反映其被吸附或延迟吸收的程度^[42]。由表 4 可知,随着葡萄糖浓度的提升,吸附的葡萄糖量也相应增加。GIDF 的葡萄糖吸

附量显著高于 WIDF ($P<0.05$), 膳食纤维的颗粒形态会影响水合性能, 进而影响纤维表面的水流动性, 并导致吸附能力的变化^[43]。在一定范围内, 较小的粒径有助于增加膳食纤维的比表面积, 从而提供更多的与水分子和葡萄糖分子相互作用的位点。GIDF 和 WIDF 均能有效地吸附葡萄糖, 延缓葡萄糖扩散, 表明其具有延缓葡萄糖在体外胃肠道吸收的能力^[44]。

表 4 不同葡萄糖浓度下芡实和小麦膳食纤维对葡萄糖的吸附能力

Table 4 Glucose adsorption capacity of *Euryale ferox* and wheat dietary fiber under gradient glucose concentrations

葡萄糖浓度 (mmol·L ⁻¹)	葡萄糖吸附量(mmol·g ⁻¹)			
	GIDF	WIDF	GSDF	WSDF
50	3.18±0.16 ^b	2.06±0.28 ^d	3.32±0.44 ^a	2.28±0.12 ^c
100	7.20±0.19 ^b	5.11±0.06 ^d	7.79±0.39 ^a	6.34±0.20 ^c
200	9.74±0.48 ^c	8.80±0.20 ^d	13.28±0.15 ^a	11.55±0.41 ^b

图 7 显示了芡实和小麦膳食纤维对葡萄糖扩散的影响, 结果表明膳食纤维均具有延缓葡萄糖在体外胃肠道吸收的能力, 对葡萄糖穿过透析膜进入外液的运动有着不同程度的抑制作用。所有样本的 GDRI 最小值和最大值均出现在 120 min 和 10 min, 在先前的研究中也类似现象^[45]。GSDF、WSDF 和 GIDF、WIDF 之间的 GDRI 值存在显著差异 ($P<0.05$), 这可能与膳食纤维结构不同有关, 这种差异进一步证实了纤维颗粒和纤维网络结构在调控葡萄糖吸收过程中的重要作用。SDF 明显降低了透析管中弥散性葡萄糖的水平, 且 GSDF 的效果要优于 WSDF, 是一种良好的降糖剂。

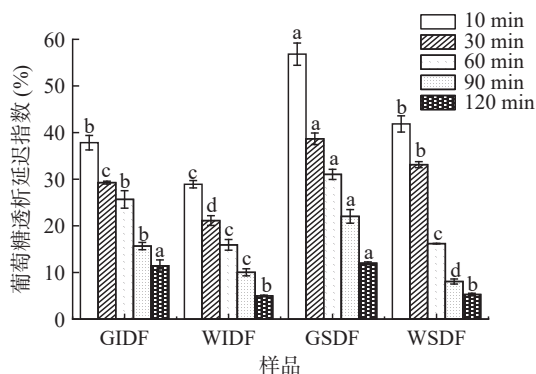


图 7 芡实和小麦膳食纤维的葡萄糖透析延迟指数

Fig.7 GDRI of dietary fiber from *Euryale ferox* and wheat
注: 相同处理时间下, 不同小写字母表示样品之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

适当的粒度(如较小的粒径但不过小)可以提供更多的与水分子和葡萄糖分子相互作用的位点, 从而增加膳食纤维的葡萄糖吸附量和 GDRI。膳食纤维的结构和粒度是影响其葡萄糖吸附量和 GDRI 的重要因素^[2]。通过优化膳食纤维的结构和粒度特性, 可以进一步提高其对葡萄糖的控制能力, 为开发新型降糖剂提供有力支持。相较于 SDF, IDF 对葡萄糖的

吸附量较小, 葡萄糖透析延迟指数值也相对较低。这可能与不溶性膳食纤维的结构较为紧密、不易与葡萄糖分子发生相互作用有关。SDF 和 IDF 的成分和结构对葡萄糖吸附量和葡萄糖透析延迟指数的影响存在显著差异。SDF 具有较高的葡萄糖吸附量和葡萄糖透析延迟指数值, 能够更有效地调节血糖水平。

2.5.2 α -淀粉酶活性抑制 膳食纤维对 α -淀粉酶活性抑制率的影响见图 8。膳食纤维对淀粉酶活性的抑制能力随底物浓度的增大而降低。可能是随着底物浓度的增加, 淀粉分子与酶分子的相互作用机会也相应增加, 导致更多的酶分子被淀粉分子所占据, 从而减少了与膳食纤维相互作用的酶分子数量^[42]。由图 8 可看出, 两种样品来源的 SDF 对酶活性的抑制率显著高于相同来源的 IDF ($P<0.05$), 这一结果与 ZHANG 等^[46]的结果一致, 可能是 SDF 的黏度导致食糜黏度升高, 周围溶剂流动速率降低, 造成一定程度的物理屏障, 减少了酶向底物的扩散或限制了接触效率, 导致淀粉分解动力学降低^[47]。在底物浓度低于 2 g/L 时, GIDF 表现出比 WIDF 更高的 α -淀粉酶抑制作用, 可能是 GIDF 在溶液中形成的特有的网络结构阻碍酶的扩散, 使酶难以到达淀粉分子。这种阻碍作用会降低酶解速率, 从而抑制淀粉酶的活性; 底物浓度在 2~8 g/L 时, GIDF 和 WIDF 对 α -淀粉酶活性的抑制作用相接近, 在高淀粉浓度下, 酶分子可能更容易达到饱和状态, 即酶分子与淀粉分子的结合已经达到最大限度。此时, IDF 对酶活性的进一步抑制作用可能变得有限, 因为酶分子已经大部分被淀粉分子所占据。

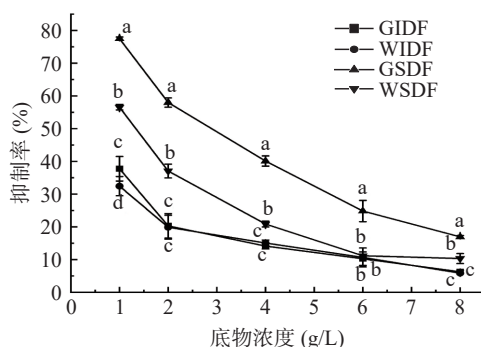


图 8 芡实和小麦膳食纤维对 α -淀粉酶活性的抑制率

Fig.8 α -Amylase inhibition rate by dietary fiber from *Euryale ferox* and wheat

注: 相同底物浓度下, 不同小写字母表示样品之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.6 体外抗氧化活性

过量的自由基在人体内可能引发一系列健康问题, 如心血管疾病、加速衰老过程, 抗氧化活性机制的核心在于其能够有效清除体内的自由基^[48]。在本研究中, 综合多种检测方法, 包括对超氧阴离子自由基、羟基自由基和 DPPH 自由基的清除能力进行评

估,以评定样品的体外抗氧化能力。

DPPH 是一种十分稳定的氮中心自由基,可以评价抗氧化剂清除自由基的能力。GSDF 的 DPPH 自由基清除能力最高,为 $82.72\%\pm1.74\%$,且 GIDF 的自由基清除能力为 $49.92\%\pm0.51\%$,高于 WIDF 的 $42.10\%\pm2.67\%$ 。这可能是因为 GSDF 和 GIDF 含有更多的羟基、羧基等,这些官能团能够与 DPPH 自由基发生反应,从而有效清除自由基^[49]。GSDF 的超氧阴离子自由基清除率为 $71.82\%\pm0.38\%$,显著高于 WSDF 的 $62.23\%\pm1.68\%(P<0.05)$ 。在人体内,羟基自由基是最活跃的活性氧,它会严重损害附近的生物分子^[50]。在本研究中,芡实膳食纤维的羟基自由基清除能力显著高于小麦膳食纤维($P<0.05$),可能是由于芡实 DF 中羟基和羧基含量较高。

SDF 和 IDF 在结构上的差异可能是导致其抗氧化能力不同的主要原因。SDF 通常具有更多的亲水基团和更小的颗粒尺寸,这使得它们更容易与自由基接触并发生反应。此外,SDF 中的某些特定成分(如酚类物质、多糖等)也可能具有更强的抗氧化活性^[51]。除了自由基清除能力外,SDF 还表现出其他多种功能活性,如葡萄糖吸附能力、胆固醇吸附能力、阳离子交换能力等。这些功能活性与 SDF 的抗氧化能力密切相关,共同构成了 SDF 在生物体内的多种生理作用^[52]。相比之下,IDF 虽然也具有一定的功能活性,但通常不如 SDF 全面和显著。

实验数据表明,芡实膳食纤维表现出更强的自由基清除能力,且 SDF 的自由基清除能力显著高于 IDF($P<0.05$)。GSDF 的抗氧化能力显著高于 WSDF,GIDF 的抗氧化能力显著高于 WIDF($P<0.05$)。由于 GSDF 具有更强的抗氧化能力和多种功能活性,因此在食品、保健品等领域具有广泛的应用前景。

表 5 芡实和小麦膳食纤维的自由基清除能力
Table 5 Free radical scavenging capacity of dietary fiber from *Euryale ferox* and wheat

自由基清除能力(%)	GIDF	WIDF	GSDF	WSDF
DPPH	49.92 ± 0.51^c	42.10 ± 2.67^d	82.72 ± 1.74^a	55.09 ± 2.63^b
超氧阴离子	61.06 ± 0.49^c	42.43 ± 2.21^d	71.82 ± 0.38^a	62.23 ± 1.68^b
羟基自由基	30.08 ± 0.61^c	23.97 ± 1.77^d	69.28 ± 2.04^a	54.37 ± 1.26^b

3 结论

本文比较了芡实和小麦中 SDF 和 IDF 的结构、理化性质和功能特性。结构上,GIDF 和 WIDF 的网络结构存在着较大的差异。GIDF 的结构较为紧凑,有明显的网络结构,能够吸附更多的水分子和油分子。从功能上看,芡实膳食纤维具有持水力高、膨胀力强、溶解性好等优点。SDF 溶液和 IDF 悬浮液均表现出剪切稀化的特性。GSDF 具有较为优异的抗氧化能力、体外降糖能力以及淀粉酶活性的抑制能力。综合来看,芡实膳食纤维在功能性和结构上都表现出更大的优势。然而,芡实膳食纤维的体内功能活

性及其食品系统中其他成分的理化和营养的相互作用仍有待进一步的研究。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 谷少涵,孙冰华,马森,等. 谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 326–332. [GU S H, SUN B H, MA S, et al. Research progress on the mechanism of dietary fiber from cereals in slowing starch digestibility[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 326–332.]

[2] MA M M, MU T H. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 237–246.

[3] WEI C H, GE Y F, LIU D Z, et al. Effects of high-temperature, high-pressure, and ultrasonic treatment on the physicochemical properties and structure of soluble dietary fibers of millet bran[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 8: 820715–820715.

[4] JIAHUI J, HAIYAN O, RUIYE C, et al. The ethnopharmacological, phytochemical, and pharmacological review of *Euryale ferox* Salisb.: A Chinese medicine food homology[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2023, 28(11): 1–19.

[5] SURBHI K, AMARJEET K, RAMANDEEP K, et al. *Euryale ferox*, a prominent superfood: Nutritional, pharmaceutical, and its economical importance[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(12): e14435–e14435.

[6] CAI M, XU Q, ZHAO S, et al. Antibacterial effect of *Euryale ferox* seed shell polyphenol extract on *Salmonella typhimurium*[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2024, 13: 53–69.

[7] ESTIBALIZ H, MARTA T, MAITE D, et al. (Poly)phenol characterization in white and red cardoon stalks: Could the sous-vide technique improve their bio accessibility?[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2021, 73(2): 11–11.

[8] MEIHONG C, XUELI Z, HANG Z, et al. Ethyl cellulose/gelatin-carboxymethyl chitosan bilayer films doped with *Euryale ferox* seed shell polyphenol for cooked meat preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 256(P1): 128286–128286.

[9] SANG J Q, LI L, WEN J, et al. Evaluation of the structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber extracted from newhall navel orange by-products[J]. Foods, 2021, 10(11): 2772–2772.

[10] BLAŽ F, MIHAELA S, MOJCA K, et al. Comparative analysis of dietary fiber determination by AOAC 991.43 and AOAC 2011. 25 for frequently consumed foods in Slovenia[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133753–133753.

[11] SURYA A H, ZAKARIA F R, LIOE H N, et al. Dietary fibre profiling of various edible parts of winged bean (*Psophocarpus tetragonolobus* L.): Pods, whole seeds, endosperms, seed coats, and cooked seeds[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2024, 32: 100425.

[12] ZHANG S S, XU X L, 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.

- [13] JOHN N A, FANG Z, JOSEPH M K. *In vitro* hypoglycemic and cholesterol lowering effects of dietary fiber prepared from cocoa (*Theobroma cacao* L.) shells[J]. *Food & Function*, 2012, 3(10): 1044–1050.
- [14] KUREK M A, KARP S, WYRWISZ J, et al. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*) and millet (*Panicum miliaceum*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85: 321–330.
- [15] CHEN J J, ZHAO Q S, WANG L W, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from maca (*Lepidium meyenii* Walp.) liquor residue[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 132: 509–512.
- [16] GUAN Y T, XIE C Y, ZHANG R, et al. Characterization and the cholesterol-lowering effect of dietary fiber from fermented black rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Food & Function*, 2023, 14(13): 6128–6141.
- [17] DONG Y F, LI Q, GUO Y H, et al. Comparison of physicochemical and hypoglycemic activity of bamboo shoot dietary fibers from different regions of Yunnan [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 9: 1–13.
- [18] DHITAL S, GIDLEY M J, WARREN F J. Inhibition of α -amylase activity by cellulose: Kinetic analysis and nutritional implications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 123: 305–312.
- [19] XIE F, LI M, LAN X H, et al. Modification of dietary fibers from purple-fleshed potatoes (Heimeiren) with high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing: A comparative study[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 42: 157–164.
- [20] LIU S, JIA M Y, CHEN J J, et al. Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 284–292.
- [21] 王钰博, 肖宇仪, 李鹏程, 等. 粒径对 *Kluyveromyces marxianus* C21 发酵豆渣不溶性膳食纤维理化及功能特性的影响 [J/OL]. 吉林农业大学学报, 1–15. [2025-06-19]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.20423>. [WANG Y B, XIAO Y Y, LI P C, et al. Effects of particle size on the physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from fermented soybean residue by *Kluyveromyces marxianus* C21 [J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1–15 [2024-11-29]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.20423>.]
- [22] QIAN S Q, CHEN S Y, CHANG W L, et al. Novel pectins extracted from fruit peel by combined hydrothermal pretreatment and enzymatic hydrolysis exhibit potential as aqueous gels and antioxidant activities[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2024, 59(7): 5192–5199.
- [23] WANG K, LI M, HAN Q, et al. Inhibition of α -amylase activity by insoluble and soluble dietary fibers from kiwifruit[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101057.
- [24] LYU B, WANG H, SWALLAH M S, et al. Structure, properties and potential bioactivities of high-purity insoluble fibre from soybean dregs (okara) [J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130402.
- [25] 王岩, 翟硕莉, 朱冰清, 等. 鸭梨果渣中可溶性膳食纤维的提取及功能性质研究 [J]. 农业与技术, 2024, 44(19): 13–17. [WANG Y, ZHAI S L, ZHU B Q, et al. Extraction and functional properties of soluble dietary fiber from pear pomace[J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(19): 13–17.]
- [26] 贾冬英, 朗黄英, 姚开, 等. 柚中果皮水不溶性膳食纤维对胆固醇的吸附研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008(3): 86–90. [JIA D Y, LANG H Y, YAO K, et al. Adsorption of cholesterol by non-soluble dietary fiber from citrus peel in *Citrus grandis* [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2008(3): 86–90.]
- [27] DAI F, ZHUANG Q, HUANG G, et al. Infrared spectrum characteristics and quantification of OH groups in coal[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(19): 17064–17076.
- [28] WU C L, TENG F, MCCLEMENTS D J, et al. Effect of cavitation jet processing on the physicochemical properties and structural characteristics of okara dietary fiber[J]. *Food Research International*, 2020, 134: 109259.
- [29] XIA M, VALVERDE-BARRANTES O J, SUSEELA V, et al. Characterizing natural variability of lignin abundance and composition in fine roots across temperate trees: A comparison of analytical methods[J]. *New Phytologist*, 2022, 236(6): 2358–2373.
- [30] TANG J, YANG C R, QIN X T, et al. Effects of cellulose-degrading fungus *Penicillium griseofulvum* on the structure characteristics and adsorption properties of soluble dietary fiber from *Citrus aurantium* L [J]. *Food Bioscience*, 2023, 55: 102999.
- [31] 朱仁威, 黄亮, 谭沙, 等. 米糠膳食纤维提取和改性及功能性质的研究进展 [J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 12–16. [ZHU R W, HUANG L, TAN S, et al. Research progress on extraction and modification of rice bran dietary fiber and functional properties[J]. *Grain and Oil*, 2022, 35(5): 12–16.]
- [32] SUN C C, WU X F, CHEN X J, et al. Production and characterization of okara dietary fiber produced by fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126243.
- [33] YANG C R, SI J Y, CHEN Y, et al. Physicochemical structure and functional properties of soluble dietary fibers obtained by different modification methods from benth residue[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111234.
- [34] SHEN M, WANG W H, CAO L K. 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): 1668–1674.
- [35] BONNAND-DUCASSE M, DELLA VALLE G, LEFEBVRE J, et al. Effect of wheat dietary fibres on bread dough development and rheological properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 52(2): 200–206.
- [36] CHEN L, WU Y C, JIANG X J, et al. Dietary fiber extraction from citrus peel pomace: Yield optimization and evaluation of its functionality, rheological behavior, and microstructure properties[J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(8): 3507–3523.
- [37] HE Y, WANG B X, WEN L K, et al. Effects of dietary fiber on human health[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(1): 1–10.
- [38] GÓMEZ-ORDÓÑEZ E, JIMÉNEZ-ESCRIG A, RUPÉREZ P. Dietary fiber and physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast[J]. *Food Research International*, 2010, 43(9): 2289–2294.
- [39] 钟希琼, 胡文娥, 林丽超. 膳食纤维对油脂、胆固醇、胆酸钠和亚硝酸根离子吸附作用的研究 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 134–136. [ZHONG X Q, HU W E, LIN L C. Study on the adsorption of fats, cholesterol, sodium taurocholate and nitrite ions by dietary fiber[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2010, 31(5): 134–136.]
- [40] 廉文涛, 黄雨洋, 李玉玲, 等. 膳食纤维对蛋白凝胶影响的研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(9): 340–348. [LIAN W T, HUANG Y Y, LI Y L, et al. Research progress on the effect of di-

etary fiber on protein gels[J]. Food Science, 2023, 44(9): 340–348.]

[41] 吴鸿亿, 黄玲冬, 刘奇, 等. 制备方法对高节竹笋头可溶性膳食纤维的理化与功能特性影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 258–266. [WU H Y, HUANG L D, LIU Q, et al. The effect of oreparation methods on the physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from the heads of high-node bamboo shoots[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 258–266.]

[42] 刘鸿铖, 樊红秀, 赵鑫, 等. 酶解-挤出复合法改性绿豆皮膳食纤维及其结构表征与理化性能[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 80–88. [LIU H C, FAN H X, ZHAO X, et al. Modification of mung bean hull dietary fiber byenzymatic hydrolysis-extrusion composite method and its structural characterization and physicochemical properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(9): 80–88.]

[43] GIACCO R, COSTABILE G, RICCARDI G. Metabolic effects of dietary carbohydrates: The importance of food digestion[J]. Food Research International, 2016, 88: 336–341.

[44] YANG X, DAI J, ZHONG Y, et al. Characterization of insoluble dietary fiber from three food sources and their potential hypoglycemic and hypolipidemic effects[J]. Food & Function, 2021, 12(14): 6576–6587.

[45] DAOU C, ZHANG H. Functional and physiological properties of total, soluble, and insoluble dietary fibres derived from defatted rice bran[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2014, 51(12): 3878–3885.

[46] ZHANG G P, WANG D, DING Y Y, et al. Effect and mechanism of insoluble dietary fiber on postprandial blood sugar regulation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 146.

[47] BANGAR S P, ASHOGBON A O, SINGH A, et al. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 287: 119265.

[48] 杨开, 杨振寰, 吴伟杰, 等. 雷笋膳食纤维酶法改性及其理化性能和结构变化[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 36–41.

[YANG K, YANG Z H, WU W J, et al. Enzymatic modification of dietary fiber from lei bamboo shoots and its physicochemical properties and structural changes[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(4): 36–41.]

[49] JI Z, SHEARDY A, ZENG Z, et al. Tuning the functional groups on carbon nanodots and antioxidant studies[J]. Molecules, 2019, 24(1): 152.

[50] RADI R. Foreword to the free radical biology and medicine special issue on "current fluorescence and chemiluminescence approaches in free radical and redox biology"[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2018, 128: 1–2.

[51] LIU Y, AO H P, ZHENG J X, et al. Improved functional properties of dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt residue by steam explosion[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): 1–12.

[52] ZHANG Z, YANG X, GAO Z, et al. Effects of modification methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber from cucumber[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101808.