

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.03.009

程卓, 吴娜娜, 丁文平, 等. 不同来源的谷物麸皮水溶性膳食纤维理化和功能性质研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 62-70.

CHENG Z, WU N N, DING W P, et al. Physicochemical and functional properties of water-soluble dietary fiber from different sources of cereal bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 62-70.

不同来源的谷物麸皮水溶性膳食纤维理化和功能性质研究

程卓, 吴娜娜, 丁文平, 谭斌✉

- (1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023;
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037)

摘要: 以稻花香米糠、长粒香米糠、籼米米糠、小米米糠、麦麸粗麸、麦麸细麸、燕麦麸皮、甜荞皮粉、苦荞皮粉、小米皮粉等 10 种谷物麸皮为实验原料提取水溶性膳食纤维 (soluble dietary fiber, SDF), 研究了其理化特性、功能特性以及分子结构之间的差异性。结果表明: 苦荞皮粉 SDF 的持水能力最强, 小米皮粉 SDF 的持油能力最强, 麦麸细麸 SDF 吸水膨胀性最强。稻花香米糠 SDF、长粒香米糠 SDF、小米米糠 SDF 和甜荞皮粉 SDF 不具有吸水膨胀性。10 种 SDF 葡萄糖结合能力在 56.95~432.83 mg/g 之间。SDF 胆固醇吸附能力在 0.41~66.21 mol/g 之间, 具有显著性差异。麦麸粗麸 SDF 的 ABTS 自由基清除率和 DPPH 清除率最高, 小米米糠 SDF 羟自由基清除率最高。10 种 SDF 总抗氧化能力在 2.00~5.59 $\mu\text{mol/g}$ 之间, 具有显著性差异。扫描电镜结果显示, 10 种 SDF 微观结构不同, 有的表面凹凸不平呈颗粒状, 有的平滑多孔; 傅里叶红外吸收光谱呈现不同的强弱峰。综上所述, 不同来源 SDF 的分子结构、理化特性、功能特性存在明显差异性, 可根据需要选择不同结构和功能的 SDF 进行利用。

关键词: 谷物麸皮; 水溶性膳食纤维; 理化性质; 功能性质; 分子结构

中图分类号: TS213; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)03-0062-09

Physicochemical and Functional Properties of Water-soluble Dietary Fiber from Different Sources of Cereal Bran

CHENG Zhuo, WU Na-na, DING Wen-ping, TAN Bin✉

- (1. School of Food Science and Engineering, Wuhan University of Light Industry, Wuhan, Hubei 430023, China; 2. Institute of Grain and Oil Processing, Academy of Sciences, State Food and Material Reserve Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: Water-soluble dietary fiber was extracted from ten kinds of cereal bran, such as rice fragrance rice bran, long grain fragrant rice bran, indica rice bran, millet rice bran, wheat bran thick bran, wheat bran thin bran, oat bran, sweet buckwheat skin powder, tartary buckwheat skin powder, millet skin powder. The

收稿日期: 2023-01-29

基金项目: 国家自然科学基金 (32072266; 31972113; 31772009)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (No.32072266; 31972113; 31772009)

作者简介: 程卓, 女, 1995 年出生, 在读硕士生, 研究方向为谷物的加工和应用。E-mail: 850315292@qq.com.

通讯作者: 谭斌, 男, 1972 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮食资源增值加工利用。E-mail: tb@ags.ac.cn.

physicochemical characteristics, functional characteristics and molecular structure of these SDF samples were studied. SDF from tartary buckwheat skin powder had the strongest water holding capacity. SDF from millet skin powder had the strongest oil holding capacity. SDF from wheat bran thin bran showed the strongest water expansion. SDF from rice fragrance rice bran, long grain fragrant rice bran, millet rice bran and sweet buckwheat skin powder did not have water absorption expansion ability. The glucose binding abilities of ten kinds of SDF were between 56.95~432.83 mg/g. The cholesterol adsorption capacity of SDF from Grain bran was significantly different in the range of 0.41~66.21 mol/g. The antioxidant ability of ABTS and DPPH for SDF from wheat bran was the highest, and the antioxidant ability of hydroxyl for SDF of millet rice bran was the highest. The total antioxidant capacity of the ten kinds of SDF was significantly varied with the range of 2.00~5.59 $\mu\text{mol/g}$. SEM results showed some uneven surface with granular and smooth with porous structure, and Fourier infrared absorption spectrum results show different weak peaks. In conclusion, there were obvious differences in the molecular structure, physical and functional properties of SDF from different sources, and SDF with different structural and functional properties can be selected according to the specific utilizations.

Key words: cereal bran; water-soluble dietary fiber; physicochemical properties; functional property; molecular

麸皮是谷物加工的主要副产物,仅小麦麸皮,我国每年出产的小麦麦麸在 2 000 万 t 以上,目前主要用作饲料,经济利用效益较低。麸皮中不仅含有大量的膳食纤维,还富含酚酸、类胡萝卜素、木酚素、VE 等大量具有强抗氧化活性的物质^[1]。谷物麸皮中膳食纤维成分约占 50%。谷物麸皮中膳食纤维的合理利用,对于提高谷物麸皮的利用率及提升其附加值具有重要意义。

膳食纤维具有对人体必不可少的生理作用,可以降低和防止糖尿病、肥胖症、心血管疾病和高血压等常见病的出现,对于胆固醇的降低也有着重要作用。膳食纤维被称为继水、碳水化合物、矿物质、维生素、蛋白质、脂肪之外的“第七大营养素”^[2]。水溶性膳食纤维(SDF)的溶解性、流动性、胶凝性及界面特性等功能性质赋予其较高使用价值,可作为食品胶凝剂、乳化剂等^[3]。美国膳食营养学家把谷物麸皮放在膳食营养金字塔的最底端,提倡全谷物食品的摄入量应达到每天 3 次,每次约 100 g^[1]。因此,人们的膳食纤维摄入量需要提高。

目前研究中,不同的谷物麸皮已经用于制备膳食纤维,如大麦粒、燕麦麸和小麦麸等^[4]。陶志杰等^[5]对小麦麸皮 SDF 的酶-化学法提取工艺进行优化,确定了最佳提取工艺为碱用量 12%、

碱解时间 45 min、酶用量 0.2%、酶解时间 4.5 h, SDF 提取率可达 16.53%。We 等^[6]研究了高温、高压和超声波处理对小米糠 SDF 理化性质和结构的影响,发现超声波处理最显著地改善了小米糠 SDF 的理化性质。不同来源的膳食纤维,其理化特性、功能特性、分子结构,营养成分可能存在显著性差异,但不同谷物麸皮来源的水溶性膳食纤维性质相较目前国内外研究较少。

本研究以 10 种不同来源的谷物麸皮为原料制备 SDF,对比研究它们的理化特性、功能特性、微观结构,为谷物麸皮水溶性膳食纤维产品的开发和利用提供基础,对于提高谷物麸皮副产品的有效利用率具有非常重要的意义。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

燕麦麸皮:张家口康麦佳食品有限公司;甜荞皮粉、苦荞皮粉:陕西定之荞农业科技有限公司;稻花香米糠、长粒香米糠、粳米米糠、小米米糠、麦麸粗麸、麦麸细麸、小米皮粉:北京润泽康生物科技有限公司。

α -淀粉酶:Sigma Aldrich(上海)贸易有限公司;糖化酶:上海麦克林生化科技有限公司;碱性蛋白酶:北京 AOBOS 生物科技有限公司;石

油醚、乙醇：天津市富宇精细化工有限公司；玉米油：益海嘉里食品营销有限公司；淀粉含量检测试剂盒：北京博欧德生物技术有限公司；葡萄糖检测试剂盒、抗氧化能力检测试剂盒、胆固醇结合能力试剂盒：北京索利堡科技有限公司；溴化钾（光谱纯）：国药集团化学试剂有限公司；硅藻土；正己烷；石油醚；盐酸；氢氧化钠；除溴化钾外，其余试剂均为分析纯。实验用水均为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

电热恒温水浴锅：广东环凯微生物科技有限公司；电热恒温鼓风干燥箱：上海森信实验仪器有限公司；BGZ-140 电热鼓风干燥箱：上海博讯实业有限公司医疗设备厂；三频数控超声波清洗器：昆山市超声仪器有限公司；L580 低速大容量离心机、台式高速离心机：上海卢湘离心机仪器有限公司；MS 3 basic 漩涡混匀器：德国 IKA 公司；ML 204 电子分析天平（最小称重 10 mg）：梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；FW80、FW100 高速万能粉碎机：天津市泰斯特仪器有限公司；SGZ-B 水浴恒温震荡器：上海博讯医疗生物仪器股份有限公司；SHJ-6ABS 磁力搅拌水浴锅：常州金坛良友仪器有限公司；FOSS 膳食纤维测定仪 Fibertec E、FOSS 脂肪测定仪：瑞典 FOSS 分析有限公司；PYRAMID TX 马弗炉：北京皮尔美特科技有限公司；rapid N cube 氮分析仪：德国 Elementar Analysensysteme GmbH 公司；D8 advance X-射线衍射仪：德国 Bruker 公司；S-3000N 扫描电子显微镜：日本 Hitachi 公司；Nicolet iN10-iZ10 傅里叶变换显微红外光谱仪：赛默飞世尔科技（中国）有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 原材料基本组分含量测定

水分含量的测定采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》中的直接干燥法；灰分含量的测定采用 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准食品中灰分的测定》中的第一法；脂肪含量的测定采用 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法；

蛋白质含量的测定采用 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法；膳食纤维的测定采用福斯分析有限公司 Fibertec E 系统分析膳食纤维中磷酸盐缓冲液法；淀粉含量的测定采用 AOAC 法 996.11 和 AACC 法 76.13 改进版—Megazyme 淀粉总量检测试剂盒进行测定。

1.3.2 膳食纤维的制备

样品磨粉过筛 60 目备用。样品脱脂：取 70 g 样品与 350 mL 正己烷于 500 mL 具塞锥形瓶中（摇晃均匀），室温下放置 8 h，然后抽滤，通风厨内风干，再以同样方式进行脱脂两次。膳食纤维提取方法如下^[7]：

取 50 g 预处理后的样品粉，置于恒温水槽烧杯中，加入 500 mL 蒸馏水，设置恒温水槽温度为 50 °C，水浴 100 min。随后提高水温至 95 °C 进行糊化 15 min。降低水浴温度至 60 °C，加入 α -淀粉 1.5 g，在 45 °C 条件下酶解 45 min。用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 至 9.5，水浴温度 50 °C，加入碱性蛋白酶 1.2 g，酶解 30 min。

用 1 mol/L HCL 溶液调节 pH 至 4.0~4.2，水浴温度 59 °C，加入糖化酶 1.5 g，酶解 30 min。酶解结束后，水槽升温至 95 °C 灭酶 15 min，冷却后，4 000 r/min 离心 30 min，不溶物置于烘箱中 45 °C 烘干，得 IDF；上清液用 4 倍体积无水乙醇沉淀，沉淀结束后 4 000 r/min 离心 15 min，沉淀置于烘箱中 45 °C 烘干，得 SDF。将提取的 SDF 研磨过筛 80 目备用。

1.3.3 持水能力的测定

持水能力的测定具体步骤如下^[8]：0.5 g 样品粉置于 30 mL 蒸馏水中，室温搅拌 24 h，4 000 r/min 离心 20 min，去除上清液，称量吸水后样品湿重；将吸水后的样品置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重，称量样品干重。持水能力（g/g）= (mf-md)/md。其中，mf 为样品吸水后的湿重（g）；md 为样品吸水后的干重（g）。

1.3.4 持油能力的测定

持油能力的测定参照 Zhang 等^[9]的方法。具体步骤如下：0.2 g 样品粉置于 30 mL 玉米油中，室温静置 18 h，2 000 g 离心 20 min，去除上清液，

称量吸油后样品粉的质量。

$$\text{持油能力(g/g)} = (\text{mr} - \text{md}) \times 100 / \text{md}$$

其中, mr 为吸油饱和后样品粉的质量(g);
 md 为吸油前样品粉的质量(g)。

1.3.5 吸水膨胀性的测定

吸水膨胀性的测定参照文献^[10]的方法。具体步骤如下: 1 g 样品粉置于 10 mL 蒸馏水中, 室温下静置 18 h, 记录样品粉吸水前后的体积。

$$\text{吸水膨胀性(mL/g)} = (\text{v}_1 - \text{v}_0) / \text{w}_0$$

其中, v_1 为吸水膨胀后样品粉的体积 (mL);
 v_0 为吸水膨胀前样品粉的体积 (mL); w_0 为吸水膨胀前样品粉的质量(g)。

1.3.6 葡萄糖结合能力的测定

葡萄糖的测定方法如下^[11]: SDF (W, 0.10 g) 与葡萄糖溶液 (C1, 1.0 mg/mL; V, 100 mL) 混合, 在 37 °C 下孵育 6 h, 达到葡萄糖吸附平衡, 然后在 4 000 r/min 下离心 20 min。用 3,5-二硝基水杨酸测定上清液中葡萄糖的含量 (C2), 然后估算 SDF 的 GBC。GBC(mg/g) = (C1 - C2)V/W, 其中 C1 为原溶液中的葡萄糖含量 (mg/mL), C2 为上清液 (mg/mL) 中的葡萄糖含量, W 为 SDF 的重量, V 为葡萄糖溶液的体积。

1.3.7 胆固醇结合能力的测定

根据 Zhu 等和 Zhang 等的方法测定^[5,12], 略有修改由于商业胆固醇的溶解性较差, 商业胆固醇被稀释的蛋黄溶液所取代。将蛋黄 (100 g) 用蒸馏水 (900 mL) 稀释。SDF (0.50 g) 与稀释的蛋黄溶液 (25 mL) 混合, 在 37 °C 下 100 r/min 振荡 2 h (混合物的 pH 为 7.0, 模拟小肠的条件)。最后, 对其进行离心处理, 测定上清液中胆固醇的含量。

1.3.8 抗氧化能力的测定

总抗氧化能力测定采用可见分光光度法进行测定^[5]。

1.3.9 ABTS 自由基清除率测定

采用 Beijing Solarbio BC4770ABTS 自由基清除能力检测试剂盒进行测定。

1.3.10 羟自由基清除率测定

采用 Beijing Solarbio BC1320 羟自由基清除能力检测试剂盒进行测定。

1.3.11 DPPH 清除率测定

采用 Beijing Solarbio BC4750DPPH 自由基清除能力检测试剂盒进行测定。

1.3.12 扫描电镜

样品被安装在带有双面胶带的铝条上, 涂上金, 然后在 15 kV 的加速电压下进行检查。扫描电子显微镜对样品进行拍摄^[12]。

1.3.13 傅里叶变换红外光谱分析

称取 2 mg 样品和 100 mg 干燥 KBr 进行研磨, 用压片法制得薄片, 利用傅里叶变换红外光谱测定凝胶冻干样品的红外光谱, 光谱范围 4 000~400 cm^{-1} , 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描 32 次^[13]。

1.4 数据处理

实验设置做 3 个平行, 结果以平均值 \pm 标准偏差表示。利用 Microsoft Excel 2007 对数据进行统计, 采用 SPSS Statistics 19.0 对数据进行差异显著性分析, 显著性差异为 $P < 0.05$, 采用 Origin 2019 作图。

2 结果与讨论

2.1 实验材料基本组分含量分析

不同来源的谷物麸皮基本营养成分测定结果见表 1。其中, 小米皮粉的水溶性膳食纤维含量最高, 为 4.63%, 稻花香米糠、籼米米糠水溶性膳食纤维次之, 为 3.68%、3.50%。燕麦麸皮水溶性膳食纤维最低, 为 2.26%。小米米糠的不可溶性膳食纤维最高, 为 68.20%。小米皮粉次之, 为 35.98%。甜荞不可溶性膳食纤维含量最低, 为 7.69%。稻花香米糠的含水量最高, 为 10.79%。甜荞皮粉和长粒香米糠含水量次之, 为 10.58%、10.29%。麦麸细麸含水量最低, 为 7.75%。为膳食纤维性质研究提供了基础依据。

2.2 不同来源的 SDF 理化特性分析

10 种不同来源的 SDF 的持水性、持油性、吸水膨胀性测定结果见表 2。结果表明, 10 种 SDF 的持水性在 1.29~6.88 g/g 之间。吸水膨胀性在 -0.56~3.2 mL/g 之间。苦荞皮粉 SDF 的持水力最高, 为 6.88 g/g。其次是甜荞皮粉 SDF, 为 6.17 g/g。而长粒香米糠 SDF 的持水力最低, 为 1.29 g/g。苦荞皮粉 SDF 高持水性表明, 苦荞皮粉 SDF 可

表 1 10 种谷物麸皮基本组分含量

Table 1 Basic components of bran SDF for the 10 cereals

样本	水分含量	灰分含量	脂肪含量	蛋白含量	淀粉含量	SDF 含量	IDF 含量
稻花香米糠	10.79±0.10 ^a	7.83±0.10 ^b	13.48±0.35 ^b	8.84±0.13 ^{ef}	23.29±1.46 ^c	3.68±0.65 ^{ab}	24.47±0.36 ^f
长粒香米糠	10.29±0.31 ^b	7.66±0.18 ^c	15.59±0.11 ^a	14.73±0.58 ^f	11.73±0.43 ^f	3.12±1.01 ^b	31.83±1.50 ^d
籼米米糠	9.30±0.13 ^d	5.52±0.14 ^d	12.16±0.19 ^e	14.73±0.58 ^f	24.96±1.07 ^c	3.50±0.54 ^{ab}	25.37±0.44 ^f
小米米糠	8.35±0.18 ^e	8.51±0.06 ^a	1.11±0.02 ^b	8.59±0.11 ^b	3.32±0.29 ^e	2.54±0.43 ^b	68.20±0.27 ^a
麦麸粗麸	8.93±0.17 ^{de}	4.58±0.03 ^f	1.96±0.07 ^e	21.15±0.29 ^b	23.61±1.46 ^c	2.65±0.72 ^b	35.73±0.27 ^b
麦麸细麸	7.75±0.14 ⁱ	4.54±0.03 ^f	4.28±0.02 ^e	16.93±0.22 ^d	21.12±0.92 ^d	3.35±0.54 ^b	28.46±1.49 ^e
燕麦麸皮	8.47±0.24 ^e	4.29±0.10 ^e	15.65±0.32 ^a	21.40±0.23 ^b	16.39±0.54 ^c	2.46±0.86 ^b	25.45±1.69 ^c
甜荞皮粉	10.58±0.39 ^{ab}	1.22±0.07 ⁱ	2.52±0.05 ^f	15.83±0.12 ^e	63.74±0.68 ^a	3.14±0.77 ^b	7.69±0.26 ^f
苦荞皮粉	9.72±0.28 ^c	3.27±0.03 ^h	5.21±0.11 ^d	22.08±0.10 ^a	45.60±0.84 ^b	3.19±0.19 ^b	14.48±1.00 ^e
小米皮粉	8.84±0.13 ^{ef}	4.93±0.10 ^e	13.51±0.14 ^b	20.29±0.20 ^c	11.35±0.99 ^f	4.63±0.74 ^a	35.98±0.08 ^b

注：每列中不同的小写字母代表样品之间存在显著性差异 ($P<0.05$) 下同。

Note: Different letters in each column indicate significant differences between samples ($P<0.05$), same below.

表 2 不同来源的 10 种谷物麸皮水溶性膳食纤维持水性、持油性、吸水膨胀性

Table 2 The water holding capacity, oil holding capacity and water absorption expansion of SDF from ten kinds of cereal bran

SDF 样本	SDF 持水能力/(g/g)	SDF 吸水膨胀性/(mL/g)	SDF 持油能力/(g/g)
稻花香米糠 SDF	1.50±0.12 ^f	-0.30±0.14 ^g	1.66±0.01 ^{bcd}
长粒香米糠 SDF	1.29±0.07 ^f	-0.43±0.32 ^g	1.95±0.06 ^{bc}
籼米米糠 SDF	2.57±0.37 ^e	0.75±0.70 ^e	1.72±0.25 ^{bcd}
小米米糠 SDF	4.15±0.19 ^{cd}	-0.15±0.21 ^{ef}	1.54±0.08 ^{cd}
麦麸粗麸 SDF	4.34±0.16 ^c	1.40±0.09 ^b	1.50±0.09 ^{cde}
麦麸细麸 SDF	4.13±0.21 ^{cd}	3.20±0.00 ^a	1.51±0.05 ^{cde}
燕麦麸皮 SDF	3.82±0.06 ^d	0.47±0.09 ^{cd}	1.85±0.05 ^{abc}
甜荞皮粉 SDF	6.17±0.22 ^b	-0.56±0.05 ^g	1.46±0.01 ^{de}
苦荞皮粉 SDF	6.88±0.21 ^a	0.17±0.05 ^{de}	1.16±0.01 ^e
小米皮粉 SDF	4.06±0.02 ^{cd}	1.27±0.00 ^b	2.13±0.35 ^a

以作为食品中的功能成分，防止食品脱水，提高产品消化率，对于延缓产品老化具有重要作用^[14]。麦麸细麸 SDF 吸水膨胀性最强，为 3.20 mL/g。其次为小米皮粉 SDF，为 1.27 mL/g。稻花香米糠 SDF、长粒香米糠 SDF、小米米糠 SDF、甜荞皮粉 SDF 均不具有吸水膨胀性。持水能力和吸水膨胀性是评判膳食纤维水合能力的重要指标，膳食纤维良好的水合能力可以使面制品吸水性提高，明显缩短面团醒发时间，减少烹饪损失，同时也是其能预防和缓解肥胖、便秘的重要原因^[15]。

持油性在 1.16~2.13 g/g 之间。小米皮粉 SDF 的持油能力最高，为 2.13 g/g。其次为长粒香米糠 SDF 持油能力，为 1.95 g/g。苦荞皮粉 SDF 持油能力最低，为 1.16 g/g。膳食纤维粒径、孔隙率、

电度、比表面积和空间结构的差异都可能对膳食纤维的持水性、持油性和吸水膨胀性有一定的影响^[16]。小米皮粉 SDF 的高持油性，可能与小米皮粉 SDF 的多孔结构有关，可以防止食品加工过程中食品的脂肪流失，并且可以增强人体吸收和排泄的能力，可控制体重和血脂^[17]。

2.3 膳食纤维功能特性分析

2.3.1 吸附能力分析

10 种不同来源的 SDF 的葡萄糖吸附能力如表 3 所示。结果表明，10 种 SDF 葡萄糖吸附能力由高到低依次为，燕麦麸皮 SDF>甜荞皮粉 SDF>苦荞皮粉 SDF>麦麸细麸 SDF>长粒香米糠 SDF>小米皮粉 SDF>籼米米糠 SDF>麦麸粗麸

表 3 不同来源的 10 种谷物麸皮水溶性膳食纤维葡萄糖和胆固醇吸附能力

Table 3 Glucose and cholesterol adsorption capacity of 10 kinds of water-soluble dietary fiber in cereal bran from different sources

SDF 样本	GBC 葡萄糖吸附能力/(mg/g)	pH=7 胆固醇吸附能力/(mol/g)
稻花香米糠 SDF	56.95±0.68 ^b	39.54±0.11 ^b
长粒香米糠 SDF	118.61±1.47 ^e	35.38±1.00 ^c
籼米米糠 SDF	88.51±1.81 ^g	41.56±0.48 ^a
小米米糠 SDF	57.91±0.75 ^b	26.35±0.64 ^c
麦麸粗麸 SDF	59.59±0.97 ^b	35.81±0.89 ^c
麦麸细麸 SDF	148.80±0.29 ^d	36.60±0.77 ^c
燕麦麸皮 SDF	432.83±1.07 ^a	35.72±1.12 ^c
甜荞皮粉 SDF	303.08±1.74 ^b	27.99±1.17 ^c
苦荞皮粉 SDF	226.40±0.88 ^c	31.93±0.62 ^d
小米皮粉 SDF	105.70±0.65 ^f	33.38±0.49 ^d

SDF>小米米糠 SDF>稻花香米糠 SDF。10 种 SDF 都具有葡萄糖吸附能力且存在显著性差异。燕麦麸皮 SDF 葡萄糖吸附能力明显高于其他 9 种 SDF, 为 432.83 mg/g。这可能是由于燕麦麸皮 SDF 的网状结构更为均匀和疏松, 比表面积更大, 所以增强了膳食纤维对葡萄糖分子的吸附, 减少了葡萄糖的扩散。研究表明, SDF 的葡萄糖吸附能力与物理结构有关, SDF 与水接触形成凝胶状物质包裹葡萄糖分子, 松散的网状结构可以将葡萄糖吸附住, 减少了葡萄糖的扩散, 增加 DF 的粘度、孔隙率和比表面积, 可以增强 DF 网络中葡萄糖分子的捕获能力^[18]。

通常情况下, 人体中的食物或者膳食纤维只在胃中停留较短的时间, 而在小肠中的停留时间更长, 一般为 1~2 h, 所以胃并不是吸收营养的主要器官, 小肠为吸收营养的主要器官^[19]。因此, 小肠环境下膳食纤维对胆固醇的吸附能力的评估尤为重要。小肠环境 pH 接近 7.0, 因此在 pH=7.0 下模拟小肠环境, 探究 SDF 的胆固醇的吸附能力。不同来源的 10 种谷物麸皮水溶性膳食纤维胆固醇吸附能力见表 3。结果表明, 10 种不同来源的水溶性膳食纤维对胆固醇的吸收能力在 26.35~39.54 mol/g 之间。10 种 SDF 在 pH=7.0 环境下对胆固醇的吸收能力存在显著性差异。籼米米糠 SDF 胆固醇吸收能力最强, 为 41.56 mol/g。稻花香米糠 SDF、麦麸细麸 SDF 对胆固醇的吸收能力次之, 分别为 39.54 mol/g、36.60 mol/g。小米米糠 SDF 胆固醇吸收能力最弱为 26.35 mol/g。这可能是籼米米糠 SDF 含有较

高的 β -葡聚糖。 β -葡聚糖抑制人体对胆汁酸的吸收, 并与小肠中的胆汁酸结合, 影响胆固醇合成。 β -葡聚糖可以降低人体的胰岛素浓度, 改善胰岛素抵抗指数 (IR), 进而减少胆固醇的合成^[20]。因此籼米米糠 SDF 降低心血管等疾病的发生。

2.3.2 抗氧化能力分析

谷物含有更广泛的具有潜在抗氧化作用的化合物, 比如叶酸、矿物质和微量元素、类胡萝卜素、植酸、木质素和其他化合物, 主要存在于麸皮部分^[21]。本研究通过测定 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率、羟自由基清除率以及总抗氧化能力, 来分析不同来源的谷物麸皮水溶性 SDF 体外抗氧化能力的差异性。结果见表 4。结果表明, 10 种水溶性膳食纤维 ABTS 自由基清除率在 97.20%~56.74% 之间。其中麦麸粗麸 SDF ABTS 自由基清除率最高, 为 97.20%。小米皮粉 SDF 和小米米糠 SDF ABTS 自由基清除率次之, 分别为 85.82%、80.35% ($P<0.05$)。这主要是由于麦麸粗麸、小米皮粉、小米米糠水溶性膳食纤维分子结构不紧密, 间隔较大, 相对于其他几种可溶性膳食纤维来说就更容易提供电子和氢离子。Yan 等认为 SDF 的抗氧化活性与碳水化合物中的还原糖、糖醛酸含量, 分子质量以及结构有关^[22]。

羟自由基清除能力的结果表明, 10 种水溶性膳食纤维羟自由基清除率在 27.13%~0.38% 之间。其中, 小米米糠 SDF 羟自由基清除率最高为 27.13%。甜荞皮粉 SDF 的羟自由基清除能力明显低于其他膳食纤维, 为 0.38%。小米米糠 SDF 羟

表 4 不同来源的 10 种谷物麸皮水溶性膳食纤维抗氧化能力

Table 4 The antioxidant capacity of water-soluble dietary fiber from 10 kinds of cereal bran

SDF 样本	ABTS 自由基清除率/%	羟自由基清除率/%	DPPH 清除率/%	总抗氧化能力/($\mu\text{mol/g}$)
稻花香米糠 SDF	69.26±0.01 ^e	4.28±0.00 ^f	15.02±0.00 ^e	2.18±0.09 ^e
长粒香米糠 SDF	60.62±0.00 ^b	5.93±0.01 ^c	10.57±0.00 ⁱ	2.00±0.05 ^b
籼米米糠 SDF	78.73±0.00 ^d	11.60±0.00 ^d	12.47±0.00 ^b	2.54±0.02 ^c
小米米糠 SDF	80.35±0.01 ^c	27.13±0.00 ^a	5.96±0.00 ^j	3.00±0.08 ^d
麦麸粗麸 SDF	97.20±0.00 ^a	10.41±0.01 ^d	55.79±0.00 ^a	5.26±0.01 ^b
麦麸细麸 SDF	79.79±0.00 ^{cd}	26.51±0.00 ^a	33.32±0.00 ^c	5.59±0.03 ^a
燕麦麸皮 SDF	74.79±0.01 ^f	17.39±0.00 ^c	19.24±0.00 ^e	2.96±0.02 ^d
甜荞皮粉 SDF	76.29±0.00 ^e	0.38±0.00 ^e	22.50±0.00 ^d	2.36±0.03 ^f
苦荞皮粉 SDF	56.74±0.01 ⁱ	6.80±0.00 ^c	17.56±0.00 ^f	2.96±0.03 ^d
小米皮粉 SDF	85.82±0.01 ^b	21.35±0.01 ^b	40.07±0.00 ^b	3.62±0.04 ^c

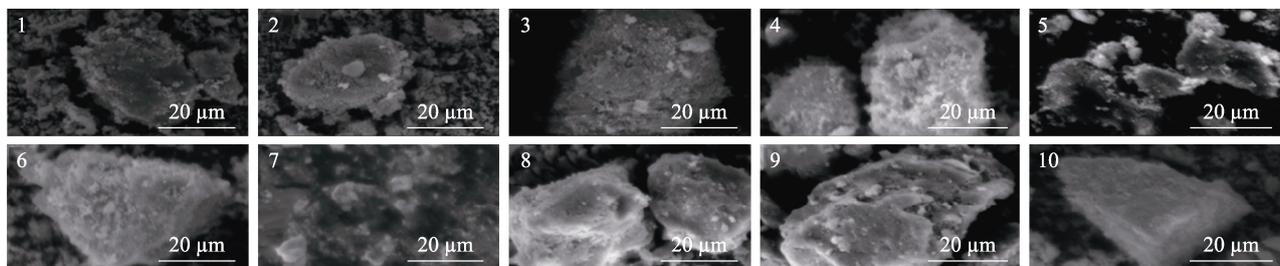
自由基清除率最高,这可能与样品中氨基酸基团含量有关,多糖的羟基和相关还原酮作为电子供体,可以通过与自由基反应形成更稳定的产物来终止自由基链机制^[23]。麦麸粗麸 DPPH 清除率最高,为 55.79%。小米皮粉 SDF DPPH 清除率次之,为 40.07%。麦麸细麸 SDF 总抗氧化能力最高,为 5.59%。麦麸粗麸 SDF 次之,为 5.26%。谷物的 DF 主要从糊粉层中提取,糊粉层是酚酸的丰富来源,如阿魏酸、香豆素酸和咖啡酸。它们主要与细胞壁多糖相连,糊粉中酚酸的含量随谷物来源而变化,而 DF 的抗氧化活性与高含量的糖醛酸和共轭多酚有关^[24],这解释了本研究中 10 种水溶性膳食纤维抗氧化活性的显著性差异。

2.4 膳食纤维分子结构分析

2.4.1 扫描电镜分析

如图 1 所示,用扫描电镜观察了 10 种不同来源的 SDF 放大 2 000 倍下的微观形态。结果显示,不同来源的谷物麸皮 SDF 具有明显不同的形态特征。稻花香、长粒香米糠、籼米米糠 SDF 结构相似。稻花香 SDF 表面呈现颗粒状表面凹凸不平,有多孔和网状结构,整体多为块状分布。长粒香

米糠 SDF 相比于稻花香米糠 SDF 表面更平整,颗粒状相对较少,结构更为紧密。籼米米糠 SDF 也呈现块状结构,表面存在颗粒物,结构较为疏松,空隙更大。小米米糠 SDF 呈现多孔状,聚集成一团,大小不一。麦麸粗麸 SDF 表面较为平整,形状不规则,呈现块状和片状分布,表面有较少的颗粒物。麦麸细麸 SDF 结构紧密,多孔结构,较多不规则形状,这与 Liu 等^[25]通过酶处理麦麸水溶性膳食纤维的结果类似。燕麦 SDF 为不规则块状结构、表面褶皱及小孔较多,表面颗粒大小不同,有较多不平整的沟壑。甜荞皮粉 SDF 表面凹凸不平,有颗粒物,呈现多孔结构,结构较为疏松。苦荞皮粉 SDF 表现凹凸和褶皱较多,结构较为疏松。小米皮粉 SDF 表面较为平整,呈现较多层次,具有多孔结构。整体呈现不规则的片状和块状结构。Jiang 等报道,膳食纤维呈现出致密的不规则片状形状,具有更多的裂缝、表面具有多孔洞,这很可能是由于膳食纤维残留的蛋白质和酚类化合物^[26]。DF 中观察到的间隙和空洞形成更大表面积,从而增强一些分子的吸附特性,这进一步解释了它们的生理效应^[12,27]。



1. 稻花香米糠 SDF 2. 长粒香米糠 SDF 3. 籼米米糠 SDF 4. 小米米糠 SDF 5. 麦麸粗麸 SDF 6. 麦麸细麸 SDF 7. 燕麦麸皮 SDF 8. 甜荞皮粉 SDF 9. 苦荞皮粉 SDF 10. 小米皮粉 SDF

图 1 不同来源的 10 种谷物麸皮水溶性膳食纤维的微观结构 (放大 2 000 倍)

Fig. 1 The SEM microstructure of water-soluble dietary fiber from 10 kinds of cereal bran(x2 000)

2.4.2 傅里叶变换红外光谱分析

FT-IR 是研究膳食纤维化合物官能团和化学键重要的方式。由图 2 可知,10 种不同来源的水溶性膳食纤维的吸收峰有着相近的红外光谱分布。但是它们具有自己特有的波段强度。10 种 SDF 均在 $3\ 380.96\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现波动较大的宽峰,这是由果胶(半乳糖醛酸)和半纤维素(如半乳糖、阿拉伯糖和甘露糖)氢键 O-H 伸缩振动引起^[10]。

此特征峰是分子间或分子间 O-H 的伸缩振动峰。其中苦荞皮粉和小米米糠 SDF 的吸收峰明显弱于其他几种 SDF,说明苦荞皮粉 SDF 果胶(半乳糖醛酸)和半纤维素含量较低。 $2\ 928.91\ \text{cm}^{-1}$ 处出现波动较小的弱峰。这个特征峰是由于甲基以及亚甲基上的 C-H 伸缩振动引起的。这表明 SDF 中可能存在羟基^[28]。但通常会被 O-H 键的拉伸振动而覆盖,所以峰值较小。 $1\ 662.17\ \text{cm}^{-1}$ 出现的

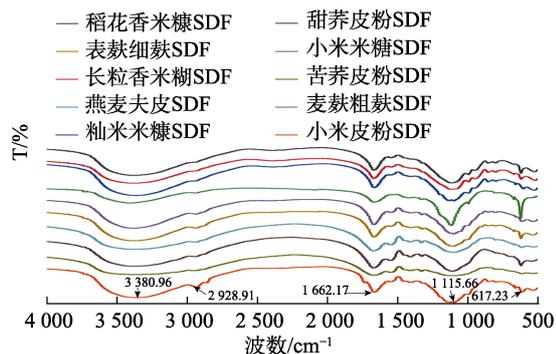


图 2 不同来源 SDF 红外光谱图

Fig. 2 The infrared spectra of SDF from different sources

特征峰代表糖醛酸的 C=O 键的特征吸收峰^[29]。羟基和糖醛酸的存在, 是 SDF 均具有明显的羟自由基清除能力和总抗氧化能力的重要原因^[23,30]。其中苦荞皮粉 SDF 的此处特征峰明显弱于其他膳食纤维在此处的特征峰, 说明苦荞皮粉 SDF 相对于其他几种 SDF 糖醛酸含量较少。1115.66 cm^{-1} 附近出现的特征峰由为多糖特征峰, 这与糖环中的 C-O-C 和 C-O-H 键的拉伸振动有关, 结果表明 SDF 含有纤维素中的 C-O-C 和 C-O-H 键^[8]。由图 2 可知, 小米米糠 SDF 的波动更为明显, 苦荞皮粉 SDF 最为平缓, 其他几种无明显差异。617.23 cm^{-1} 处的吸收峰可能是 β -C-H 的混合振动所引起, 水溶性膳食纤维中糖苷键以 β -构型为主^[28]糖苷键中的特征峰的强弱不同, 表明不同来源的谷物麸皮水溶性膳食纤维内部结构具有差异性。同时, 均具有膳食纤维典型的特征峰。

3 结论

通过对 10 种不同来源的水溶性膳食纤维的理化特性、功能特性、分子结构的对比研究, 研究结果显示不同水溶性膳食纤维分子结构、理化特性和功能特性具有差异性。例如苦荞皮粉 SDF 结构较紧密, 具有更高的持水性能。因此, 可以根据最终产品需求, 选取合适的谷物麸皮制备膳食纤维进行利用。本研究为谷物水溶性膳食纤维食品的开发和利用提供基础, 对于提高谷物副产品的有效利用具有重要意义。

参考文献:

[1] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of

Cereal Science, 2007, 46(3): 207-219.

[2] 白婕, 李娟, 张靖. 金橘果渣膳食纤维制备工艺研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(3): 118-120.

BAI J, LI J, ZHANG J. A preparation study of dietary fiber from kumquat marc[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(3): 118-120.

[3] CHONG-CHONG W, ZHEN Y, JUN-JIE X, et al. Effects and underlying mechanisms of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the crumb structure of steamed bread[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125.

[4] JIA M, YU Q, CHEN J, et al. Physical quality and in vitro starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99(c): 105-349.

[5] ZHANG N, HUANG C, OU S. In vitro binding capacities of three dietary fibers and their mixture for four toxic elements, cholesterol, and bile acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 236-239.

[6] 陶志杰, 王改玲, 王家良, 等. 酶-化学法优化麦麸可溶性膳食纤维提取工艺[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(1): 43-46.

TAO Z J, WANG G L, WANG J L, et al. Optimization of wheat bran soluble dietary fiber extraction process by enzyme-chemical method[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2019, 35(1): 43-46.

[7] QIAO C C, ZENG F K, WU N N, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107057.

[8] CONG-CONG Q, FAN-KUN Z, NA-NA W, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121.

[9] 冯翠萍, 庞候英, 常明昌, 等. 酶法提取芦笋皮中高活性膳食纤维的研究[J]. 农业工程学报, 2004, (3): 188-191.

FENG C P, PANG H Y, CHANG M C, et al. Enzymatic extraction of highly active dietary fiber from asparagus skin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 188-191.

[10] 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.

[11] 李安平, 谢碧霞, 王俊, 等. 竹笋膳食纤维的制备及其功能结构比较[J]. 中国食品学报, 2010, 10(1): 86-92.

LI A P, XIE B X, WANG J, Preparation and functional structure comparison of dietary fiber from bamboo shoots[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(1): 86-92.

[12] ZHU Y, CHU J, LU Z, et al. Physicochemical and functional

- properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italic*) bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79.
- [13] 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.
- [14] SURASANI V K R, SINGH A, GUPTA A, et al. Functionality and cooking characteristics of pasta supplemented with protein isolae from pangas processing waste[J]. *LWT*, 2019, 111.
- [15] 董晓伟, 温纪平, 王华东, 等. 麦麸膳食纤维在食品中的应用研究[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(1): 1-3.
DONG X W. Applied research of wheat bran dietary fiber in food[J]. *Cereals & Oils*, 2016, 29(1): 1-3.
- [16] O S B. Fiber, inulin and oligofructose: similarities and differences [J]. *The Journal of nutrition*, 1999, 129(7): 1424-1427.
- [17] BROWNLEE I A. The physiological roles of dietary fibre[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25 (2): 238-250.
- [18] 王庆玲, 朱莉, 孟春棉, 等. 番茄皮渣膳食纤维的理化性质及其结构表征[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(11): 60-64.
WANG Q L, ZHU L, MENG C M, et al. Study on the physiochemical properties and structural characteristics of the dietary fiber in tomato pomace[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(11): 60-64.
- [19] PEERAJIT P, CHIEWCHAN N, DEVAHASTIN S. Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(4): 1891-1898.
- [20] SUN C J, HYUNSOOK K, HO J M, et al. Consumption of barley beta-glucan ameliorates fatty liver and insulin resistance in mice fed a high-fat diet[J]. *Molecular nutrition & food research*, 2010, 54(7): 1004-1013.
- [21] AISHA S A, JAMUNA P. Antioxidant properties of digestive enzyme-treated fibre-rich fractions from wheat, finger millet, pearl millet and sorghum: A comparative evaluation[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2015, 1(1): 1073875.
- [22] 梁文康, 苏平, 魏丹. 复合酶法提取黄秋葵可溶性膳食纤维的工艺优化及其理化特性、结构表征[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(17): 199-205+18.
LI A P, XIE B X, WANG J, et al. Preparation of dietary fiber and its functional structure[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2010, 10(1): 86-92.
- [23] NANDI I, GHOSH M. Studies on functional and antioxidant property of dietary fibre extracted from defatted sesame husk, rice bran and flaxseed[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2015, 5(2): 129-136.
- [24] GUO W, BETA T. Phenolic acid composition and antioxidant potential of insoluble and soluble dietary fibre extracts derived from select whole-grain cereals[J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 518-525.
- [25] XIN L, KEKE S, PEI W, et al. Modification of wheat bran insoluble and soluble dietary fibers with snail enzyme[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2021, 10(3): 356-361.
- [26] JIANG Y, YIN H, ZHENG Y, et al. Structure, physicochemical and bioactive properties of dietary fibers from *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. seeds using ultrasonication/shear emulsifying/microwave-assisted enzymatic extraction[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109348
- [27] LAN G, CHEN H, CHEN S, et al. Chemical composition and physicochemical properties of dietary fiber from *Polygonatum odoratum* as affected by different processing methods[J]. *Food Research International*, 2012, 49(1): 406-410.
- [28] CHEN H, ZHAO C, LI J, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of lotus root[J]. *LWT*, 2018, 93.
- [29] 栗俊广, 姜茜, 望运滔, 等. 不同来源膳食纤维的结构和理化性质分析[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 18-23.
JIA J G, JIANG Q, WANG Y T, et al. The structure and physicochemical properties of different type of dietary fiber[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(12): 18-23.
- [30] WANG C, SHI L, FAN L, et al. Optimization of extraction and enrichment of phenolics from pomegranate (*Punica granatum L.*) leaves[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 42: 587-594. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。