

黑麦麸膳食纤维的结构和功能特性研究

张慧娟^{1,2,3}, 靳程茗¹, 吕世豪¹, 刘书畅¹, 王静^{1,3*}

(¹中国-加拿大品营养与健康联合实验室(北京) 北京 100048

²北京市食品添加剂工程技术研究中心(北京工商大学) 北京 100048

³北京工商大学食品与健康学院 北京 100048)

摘要 以黑麦麸为原材料,采用酶法制备膳食纤维并分别测定 2 种膳食纤维的结构、单糖和酚类物质组成及功能特性。结果表明:可溶性膳食纤维(SDF)的表面疏松松散,主要由阿拉伯糖(68%)、半乳糖(13.1%)和木糖(12.2%)组成;不溶性膳食纤维(IDF)表面多孔不规则,主要由木糖(54%)和阿拉伯糖(38.3%)组成。两种膳食纤维均具有糖类红外特征吸收峰,IDF 结晶度高于 SDF,结构更加规则,SDF 表现出更好的吸水力(2.19 g/g)、吸附胆固醇的能力(2.09 mg/g,pH=7)和吸附亚硝酸根的能力(327 μg/g,pH=2)。采用高效液相色谱分析 SDF 和 IDF 的酚类物质组成,IDF 中的酚类物质组成及含量均显著高于 SDF($P<0.05$),二者的酚类化合物主要是结合型阿魏酸。

关键词 黑麦麸; 膳食纤维; 多酚; 结构; 功能

文章编号 1009-7848(2023)08-0084-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.010

黑麦麸作为黑小麦的加工副产物,在我国年产量丰富且营养价值很高。麦麸是膳食纤维的重要来源,黑麦麸膳食纤维含量达到 30%~57%^[1]。人体内源酶无法消化吸收的可食用植物细胞、多糖、木质素以及相关物质的总和被称为膳食纤维。根据其是否溶于水可以分为可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)^[2]。膳食纤维是一种功能性成分,具有良好的吸水性,形成的凝胶可吸附游离的葡萄糖和胆固醇等物质,并且吸水后体积增大,增加了粪便的体积,防止便秘,有降血糖^[3]、降血脂、调节肠道健康等功效,被称为“第七大营养素”。我国成年人每日膳食纤维摄入量低于国内外有关组织要求的 10~20 g/d,并且随着加工水平的提高而减少,因此在日常膳食中补充适量膳食纤维是必要的。

全谷物是多酚类物质的丰富来源^[4]。随着对膳食纤维研究的不断深入,已有足够的证据证明膳食纤维中存在着一些多酚类物质^[5],并且它通过共价键和非共价键^[6]与膳食纤维紧密相连,一直被作为膳食纤维中的一部分而研究。流行病学研究表

明,食用酚类化合物与预防癌症和糖尿病等慢性疾病之间存在密切关系。多酚的抗氧化功能可以应对人体产生的氧化损伤,对一些慢性疾病如高血压等起到预防作用。

麦麸膳食纤维的提取工艺和改性应用是目前国内外的研究热点^[7-8],而对麦麸膳食纤维的结构和功能特性研究甚少,且主要研究对象为小麦麸^[9]。关于黑麦麸膳食纤维还有很大的研究空间。相比之下,由于国内外科技和饮食的差异,国外对黑麦麸膳食纤维的研究更加成熟。本研究以黑麦麸为原料,采用酶法制备膳食纤维。在此基础上,对其结构组成和功能特性进行研究,以提高黑麦麸膳食纤维的综合利用水平。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑麦麸,济南渲益食品有限公司;高峰氏淀粉酶、碱性蛋白酶、糖化酶、美国 Sigma 公司;葡萄糖,北京半夏生物科技有限公司;葡萄糖测定试剂盒,上海荣盛生物技术有限公司;对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、冰醋酸,北京半夏科技发展有限公司;盐酸、亚硝酸钠,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

CR22N 高速离心机,日本日立公司;PT2500E 水浴锅,杰瑞尔电器有限公司;DGU-20A5R 高效

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871839)

第一作者: 张慧娟,女,博士,教授

通信作者: 王静 E-mail: wangjing@th.btbu.edu.cn

液相色谱,日本岛津公司; Cary 10 紫外分光光度计,安捷伦科技(中国)有限公司; C-MAGHS7 磁力搅拌器,德国艾卡公司; STARTER2100 pH 计,美国奥豪斯公司; 79600-70 冻干机,美国 LAB-CONCO 公司; 旋转蒸发仪 R-210,瑞士布奇有限公司; 傅里叶变换红外光谱仪 NICOLET iS10、Ultimate 3000 高效液相色谱仪,赛默飞世尔科技; D8 advanceX 射线衍射仪,德国布鲁克公司; JSM-6700F 扫描电子显微镜,日本电子株式会社。

1.3 方法

1.3.1 黑麦麸膳食纤维制备工艺 参考 Li 等^[10]的方法并略作修改。将黑麦麸过 80 目筛,称取 10 g 倒入 15 mL 0.05 mol/L pH 6.25 MES-TRIS 缓冲液,搅拌至完全溶解。然后避光添加热稳定 α -淀粉酶(每克样品 165 U),在 95 °C 恒温振荡水浴锅中搅拌培养 30 min。将混合物冷却至 45 °C 后,用 4 mol/L NaOH 将其 pH 值调节至 10.5,然后向混合物中添加碱性蛋白酶(每克样品 750 U),在 45 °C 恒温振荡水浴锅中培养 30 min。再使用 6 mol/L HCl 将 pH 值调节至 4.25 后,向混合物中边搅拌边添加糖化酶(每克样品 600 U),在 60 °C 下培养 30 min,趁热离心(4 000 r/min, 15 min),分离上清液和沉淀物,收集沉淀物,真空冷冻干燥,装入袋中-18 °C 避光储存即可得 IDF。向上清液中添加 4 倍体积的乙醇(60 °C, 95%),静置冷却至环境温度,并在 0~4 °C 冰箱中沉淀 12 h 以上。沉淀后取下层浑浊部分离心(4 000 r/min, 15 min)分离沉淀物,收集后真空冷冻干燥,装入袋中-18 °C 避光储存即可得 SDF。

1.3.2 结构特性 采用 KBr 压片法在 400~4 000 cm^{-1} 处测定样品的傅里叶红外光谱^[11]。将样品压入样品架中,在 X 射线衍射仪上分析 XRD,试验条件为: Cu 靶 Ka 辐射(X 射线波长 0.154 nm),管电流 30 mA,衍射方向 0~20 联动扫描方式,扫描角度 5°~50°,扫描速度 5°/min。取冷冻干燥后的样品,粘贴至扫描电镜圆形载物台的导电胶上,用洗耳球将表面的碎屑吹掉。将处理好的块状样品喷金镀膜后置于扫描电镜的载物腔内。抽真空后采用一定的放大倍数观察并拍照。

1.3.3 单糖组成测定

1) 样品处理方法 参照 Ren 等^[12]的方法。

取一定质量(10 mg,精确至 0.0001 g)多糖样品于 20 mL 水解瓶中,加入 2 mL 4 mol/L 的三氟乙酸溶液,反复抽真空抽氮气 3 次,于 110 °C 下水解 2 h,氮吹至净干,用超纯水定容至 5 mL 并调节 pH 值至中性。取 50 μL 样品溶液或者标准溶液(待测几种单糖混合标准溶液,1~100 $\times 10^{-6}$ mg/L)于 2 mL 样品瓶中,加入 50 μL 0.6 mol/L 的 NaOH 溶液,加入 100 μL 0.5 mol/L 的 PMP 衍生溶液,涡旋振荡 1 min 后置于 70 °C 下反应 80 min。待室温后,加入 0.1 mL 0.3 mol/L 的 HCl 溶液中和,加水至 1 mL,用等体积氯仿萃取 3 次,取水相待测。

2) 仪器配置及色谱条件 高效液相色谱仪(Ultimate 3000, Thermo),色谱柱: Agilent Eclipse Plus C18 column (5 μm , 250 mm \times 4.6 mm),柱温 35 °C,流动相为 $V_{\text{乙腈}}:V_{\text{20 mmol/L 磷酸二氢钠水溶液(pH=6.56)}}=1:4$,流速 1.0 mL/min,检测波长 254 nm,进样量 10 μL 。

1.3.4 多酚组成测定 参考 Chandrasekara 等^[13]的方法并略作修改。取 2 g 样品,用正己烷振荡脱脂。加入 40 mL 70% 丙酮超声提取(400 W, 30 °C, 30 min),离心得上清液,沉淀继续用丙酮提取,重复 3 次,合并上清液。将上清液在 40 °C 旋转蒸发,所得游离酚重新溶解在 25 mL 甲醇中,-18 °C 避光保存。沉淀加入 40 mL 4 mol/L NaOH 水解 4 h,用 HCl 调节 pH 值至 2,离心(10 000 r/min, 10 min),取上清液按体积比 1:1 加入乙醚和乙酸乙酯萃取 5 次,40 °C 旋转蒸发,所得结合酚重新溶解在 25 mL 甲醇中,-18 °C 避光保存。

将游离酚和结合酚提取物(各 100 μL)分别与蒸馏水(100 μL)混合,并与福林酚(1 mL)和 7.5% Na_2CO_3 溶液(800 μL)混合。在黑暗中放置 1 h。在波长 765 nm 处测量吸光度,结果以每克干重样品(mg GAE/g DW)的没食子酸质量表示^[14]。

利用反向高效液相色谱法分析黑麦麸膳食纤维酚类物质的组成^[15]。色谱条件:色谱柱 Agilent Zorbax C18(柱长 250 mm,内径 4.6 mm,颗粒大小 5 μm);流动相流速:1 mL/min;柱温:40 °C;紫外检测波长 283 nm;进样量 10 μL ;流动相 A:0.1% 甲酸,B:乙腈。梯度洗脱程序:0~10 min,95%(A)-5%(B);10~30 min,70%(A)-30%(B);30~40 min,50%(A)-50%(B);40~50 min,30%(A)-70%

(B);50~60 min,95%(A)-5%(B)。

1.3.5 膳食纤维吸附能力测定

1.3.5.1 吸水力 分别精确称取 0.25 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 蒸馏水混匀,室温下放置 24 h。离心(3 000 r/min,20 min),精确称湿重。

$$\text{吸水力}(\text{g/g}) = \frac{\text{残渣湿重} - \text{原料质量}}{\text{原料质量}} \quad (1)$$

1.3.5.2 吸油力 精确称取 0.25 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 花生油,混匀,室温下放置 18 h,离心(2 000 r/min,20 min),倒掉上清液,吸干多余油,精确称湿重。

$$\text{吸油力}(\text{g/g}) = \frac{\text{残渣湿重} - \text{原料质量}}{\text{原料质量}} \quad (2)$$

1.3.5.3 葡萄糖吸附能力 参照 Wang 等^[6]的方法,精确称 1 g 样品加入 25 mL 不同浓度的葡萄糖溶液(50,100 mmol/L),37 °C 水浴 6 h,离心(4 500 r/min),用葡萄糖测定试剂盒测定上清液中葡萄糖的含量,按式(3)计算葡萄糖吸附能力。

$$\text{葡萄糖吸附能力 GAC}(\text{mmol/g}) = \frac{C_0 - C_1}{M} \times V \quad (3)$$

式中, C_0 ——初始溶液中葡萄糖浓度,mmol/L; C_1 ——吸附后上清液中葡萄糖浓度,mmol/L; M ——样品质量,g; V ——葡萄糖溶液体积,mL。

1.3.5.4 胆固醇吸附能力 参照孟鹏等^[7]的方法,吸取 1 mg/mL 胆固醇标准工作液 0,0.1,0.2,0.3,0.4 mL 置于 15 mL 离心管中,加入冰醋酸定容至 0.4 mL。依次加入 0.2 mL 0.1 mg/mL 邻苯二甲醛试剂、0.01 mL 水、沿管壁加 4 mL 混合酸,混匀,10 min 后测定波长 550 nm 处的吸光度。精确称 1 g 样品置于 100 mL 锥形瓶中,加入 25 mL 蛋黄液,调节 pH 值分别为 2 和 7。恒温水浴 37 °C 振荡 2 h,离心(4 000 r/min,20 min)取 0.5 mL 上清,按照标准曲线方法测胆固醇含量,按式(4)计算胆固醇吸附能力。

$$\text{胆固醇吸附能力 CAC}(\text{mg/g}) = \frac{A_0 - A_1}{M} \quad (4)$$

式中, A_0 ——吸附前蛋黄液中胆固醇含量,mg; A_1 ——吸附后上清液中胆固醇含量,mg; M ——样品质量,g。

1.3.5.5 亚硝酸根吸附能力 参照吴丽萍等^[7]的方法,取 100 $\mu\text{mol/L}$ NaNO_2 溶液 0,0.2,0.4,0.6,0.8,1,1.2,1.4,1.6,1.8,2 mL 于 10 mL 离心管中,

依次加入 2 mL 0.4% 对氨基苯磺酸溶液,再加入 1 mL 0.2% 盐酸萘乙二胺溶液,加蒸馏水至 10 mL,放置 15 min 后测定波长 538 nm 处吸光度。取 50 mL 100 $\mu\text{mol/L}$ NaNO_2 溶液调节 pH 值分别为 2 和 7,再加入 0.5 g 样品,37 °C 磁力搅拌 2 h,离心(3 500 r/min,5 min)取 2 mL 上清,按照标准曲线方法测亚硝酸根含量,按式(5)计算亚硝酸根吸附能力。

$$\begin{aligned} \text{亚硝酸根吸附能力 NIAC}(\mu\text{g/g}) \\ = \frac{\text{吸附前亚硝酸根含量}(\mu\text{g}) - \text{吸附后亚硝酸根含量}(\mu\text{g})}{\text{样品质量}(\text{g})} \end{aligned} \quad (5)$$

1.4 数据处理

所有测定均重复 3 次,结果用平均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。采用 SPSS 25 统计软件经单因素方差分析、比较均值, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 结构特性

通过 FT-IR 分析 SDF 和 IDF 的光谱特征,如图 1 所示,SDF、IDF 峰型较相似,说明两种膳食纤维的化学组成基本相似。3 289.66 cm^{-1} 和 3 317.62 cm^{-1} 处的吸收峰是由分子内或分子间 O-H 伸缩振动引起的,此时 IDF 的吸收谱带相对 SDF 较宽,说明 IDF 的羟基所形成的分子间氢键强于 SDF;2 922.48,2 854.45,2 934.59 cm^{-1} 处的峰是由糖类甲基和亚甲基上的 C-H 伸缩振动引起的;1 633.15 cm^{-1} 和 1 656.91 cm^{-1} 处的吸收峰是由纤

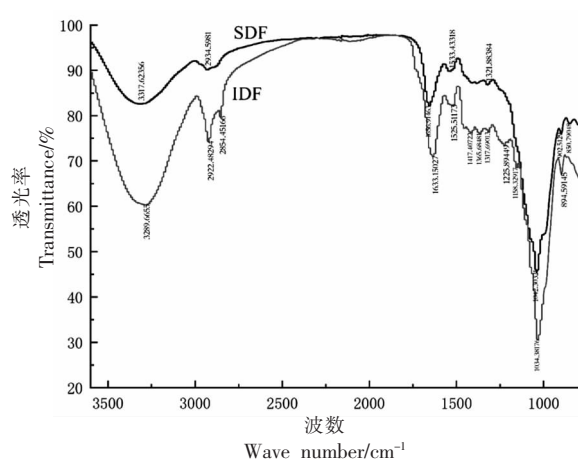


图 1 黑麦麸膳食纤维红外光谱图

Fig.1 Infrared spectrum of dietary fiber from rye bran

纤维素的 C=O 非对称收缩振动形成; $1\ 034.38\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 042.30\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是由半纤维素糖单元中的环状 C-O-C 中的 C=O 伸缩振动或者 C-O-H 中的 O-H 变形振动峰引起的, 这是一个典型的木聚糖吸收峰^[18], 表明膳食纤维成分含有木聚糖半纤维素。 $1\ 525.51\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 533.43\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是由芳香环 C-C 振动引起的, $1\ 225.89\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰为苯环的 C-H 振动, 因此说明存在多酚。 $1\ 000\sim 700\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是由 α -和 β -吡喃单糖形成的特征峰^[19]。 SDF 在 $850.79\ \text{cm}^{-1}$ 处显示出 α -吡喃糖的特征吸收峰, 而 IDF 在 $894.59\ \text{cm}^{-1}$ 处显示出 β 结构的特征吸收峰。 综上, 两种提取物的红外光谱具备相似的官能团, 含有多糖和多酚的特征吸收峰。

采用 XRD 分析了 SDF 和 IDF 的晶体结构和结晶度。 纤维素类物质由有序结晶区和无序非结晶区两部分组成, 衍射强度受纤维的结晶度以及照射角 2θ 的影响, 根据它们的变化可以绘制 XRD 曲线。 由图 2 可知, SDF 的衍射峰有 1 个, 在 20.05° , IDF 衍射峰有 2 个, 分别在 20.67° 和 32.66° , 表明二者纤维结晶属于纤维素 I 型。 SDF 和 IDF 的晶体结构几乎相似, 在任何峰位, SDF 的衍射强度都比 IDF 弱, 说明 IDF 的结晶度更高, 晶体结构更加有序。 SDF 的分子质量小, 聚合度低, 导致其纤维素和半纤维素结晶区强度弱, 衍射峰弱小。 有研究表明, 低结晶度可能会增加纤维

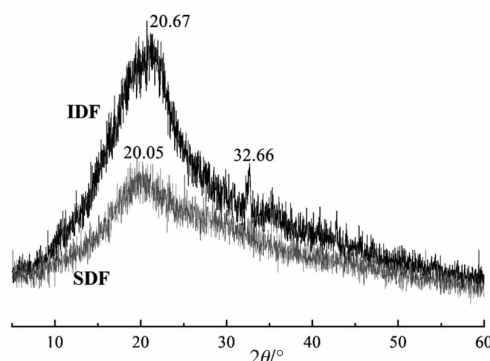
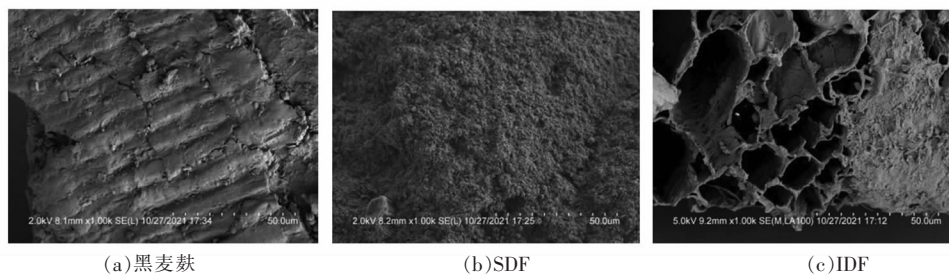


图 2 黑麦麸膳食纤维 X 射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction pattern of dietary fiber from rye bran

WHC 和 WSC, 从而增加小肠中的食物运输时间, 降低肠道胆固醇的可用性^[20]。 膳食纤维晶体结构和结晶度的差异可能与其热稳定性等性能有关。

采用扫描电镜对黑麦麸及膳食纤维的微观结构进行了对比, 如图 3 所示, 比较 a、b、c 3 张图可以观察到它们的表面有明显差异, 两种初提物均已除去绝大部分的淀粉和蛋白质, 得到的 SDF 微观结构表面呈疏松的结构, IDF 微观结构表面呈多孔、不规则结构, 这可能因为 IDF 经过酶水解后多糖链的部分糖苷键被破坏, 导致纤维结构崩溃, 因此 IDF 表面更加多孔。 而表面结构较松散的 SDF 具有较高的比表面积, 这会影响到水、油、胆固醇、亚硝酸根和葡萄糖的吸附能力^[21]。



(a) 黑麦麸

(b) SDF

(c) IDF

图 3 黑麦麸及膳食纤维的 SEM 图($\times 1\ 000$)

Fig.3 SEM of rye bran and dietary fiber($\times 1\ 000$)

2.2 单糖组成

液相色谱是单糖定性、定量的常用分析方法^[1]。 膳食纤维经过衍生化以后通过高效液相色谱分析其主要的单糖组分, 分析结果如图 4、图 5

和表 1 所示。 不同的单糖组成对二者理化性质也有所影响。 SDF 主要由阿拉伯糖和少量的半乳糖和木糖组成, 三者含量之和可达 93% 以上, 含量最低的是葡萄糖, 仅为 1.3%; IDF 主要由木糖和阿拉

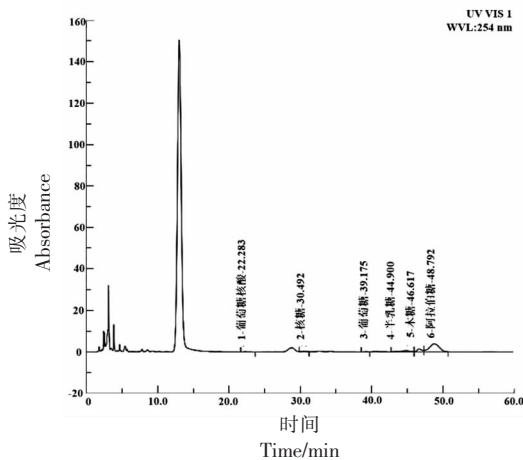


图4 SDF 的高效液相色谱图

Fig.4 High performance liquid chromatogram of SDF

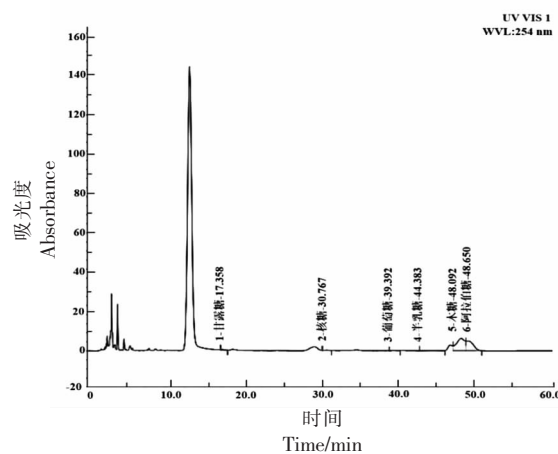


图5 IDF 的高效液相色谱图

Fig.5 High performance liquid chromatogram of IDF

伯糖组成,分别为54%和38.3%,甘露糖含量最低。SDF中未能检测到甘露糖,IDF中未能检测到葡萄糖醛酸。二者在单糖种类上存在微小差异,但单糖含量却大不相同。IDF木糖含量远高于SDF,可能是IDF中的半纤维素发生降解。二者葡萄糖的含量都很低,可能因为提取过程中葡聚糖降解成聚合度小于12的小分子物质并溶出,从而使葡萄糖含量降低^[22]。

2.3 酚类物质组成

多酚类物质以两种形式存在,分别是游离型和结合型^[23]。本研究采用超声提取和碱水解的方法分别对膳食纤维中的游离型酚类物质和结合型酚类物质进行提取,并测定总酚含量。由表2可知,无论是游离酚还是结合酚,IDF均显著高于SDF,且IDF中的酚类物质以结合型为主,说明多酚类物质主要以结合的形式存在于IDF当中。

黑麦麸中酚类化合物种类繁多,为进一步明确膳食纤维中游离酚、结合酚的组成,本研究选取10种代表性酚类化合物进行研究,结果如表3与表4所示。SDF的游离酚中未检测到丁香酸、香草酸和山奈酚,而IDF中检测到了较高含量的阿魏酸和绿原酸以及中等含量的咖啡酸;SDF中绿原酸含量最高,为228.99 $\mu\text{g/g}$,其次为原儿茶酸92.86 $\mu\text{g/g}$,含量最低的是阿魏酸,为28.84 $\mu\text{g/g}$ 。IDF游离酚的种类多于SDF,且除没食子酸外,其它酚类物质含量均显著高于SDF。两种膳食纤维结合酚酚类物质含量除咖啡酸外均高于游离酚,

表1 黑麦麸膳食纤维单糖组成

Table 1 Monosaccharide composition of dietary fiber from rye bran

样品	单糖	含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	物质的量比
SDF	甘露糖	n.a.	-
	葡萄糖醛酸	1.41	0.59
	核糖	3.00	1.18
	葡萄糖	1.05	0.43
	半乳糖	10.62	4.64
	木糖	9.89	7.43
IDF	阿拉伯糖	55.15	40.84
	甘露糖	1.85	0.98
	葡萄糖醛酸	n.a.	-
	核糖	2.16	0.82
	葡萄糖	2.04	0.82
	半乳糖	4.59	2.01
	木糖	74.40	55.52
	阿拉伯糖	52.68	38.64

注:n.a.表示未检出。

表2 黑麦麸膳食纤维多酚含量(mg GAE/g DW)Table 2 Polyphenol content of dietary fiber from rye bran (mg GAE/g DW)

膳食纤维种类	游离酚	结合酚	总酚
SDF	0.75 ± 0.01^f	3.83 ± 0.03^c	4.58 ± 0.12^d
IDF	4.87 ± 0.02^c	7.69 ± 0.03^b	12.56 ± 0.14^a

注:同一列不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

说明黑麦麸膳食纤维中的酚类物质以结合型为主,IDF结合型酚类物质含量均显著高于SDF,其

表 3 黑麦麸膳食纤维中游离酚类化合物的含量($\mu\text{g/g}$)
Table 3 Content of free phenolic compounds in dietary fiber of rye bran ($\mu\text{g/g}$)

游离酚	SDF	IDF
阿魏酸	28.84 ± 0.34^c	538.04 ± 1.22^a
咖啡酸	63.61 ± 0.87^d	176.13 ± 1.91^c
绿原酸	228.99 ± 2.20^a	490.82 ± 2.58^d
丁香酸	—	21.44 ± 1.84^e
没食子酸	66.74 ± 0.99^b	67.32 ± 0.23^b
原儿茶酸	92.86 ± 0.15^c	—
香草酸	—	59.85 ± 0.11^e
山奈酚	—	50.11 ± 0.43^f

注:同一列或同一行不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$),“—”表示未检出。

中阿魏酸含量最高,为 $3\,477.28\ \mu\text{g/g}$,含量最低的是对香豆酸,为 $46.58\ \mu\text{g/g}$,SDF 结合酚中未检测到对香豆酸、山奈酚和槲皮素,阿魏酸含量最高,丁香酸含量最低。综上,黑麦麸膳食纤维中的酚类物质以结合型阿魏酸为主,这与大多数的研究结果一致,SDF 中均未检测到对香豆酸、山奈酚和槲皮素;IDF 游离酚中未检测到原儿茶酸,SDF 的酚类物质组成少于 IDF 且含量均低于 IDF,说明二者在酚类物质组成上有一定的差异。

2.4 膳食纤维的吸附能力

2.4.1 吸水力、吸油力 吸水力常与其分子中亲水基团的暴露量有关,亲水基团暴露得越多,吸水力越高^[24]。通常,高吸水力的膳食纤维可以防止食品收缩并改变其黏度^[25]。据表 5 可知,SDF 吸水力显著高于 IDF,可能是由于 SDF 表面更加疏松,毛细孔数量更多,有利于更多水分的渗入。黑麦麸的吸水力达到了 $(4.50 \pm 0.17)\text{g/g}$,显著高于 SDF 和 IDF,这可能是黑麦麸中含有大量的蛋白质和淀粉,二者具有良好的吸水性。吸油力主要取决于膳食纤维表面的多孔性,在各种食品应用中起着至关重要的作用,如防止烹饪过程中的脂肪损失,或从人体中去除多余的脂肪^[26]。IDF 表面更多孔,因此 IDF 吸油力更高,这也证实了扫描电镜结果的推断。因此从黑麦麸中提取的膳食纤维可能是相关食品的良好膳食纤维资源,人们经常摄入这种食物,其吸水力、吸油力特性可以增加饱腹感从而减少进食和能量的摄入^[27]。

表 4 黑麦麸膳食纤维中结合酚类化合物的含量($\mu\text{g/g}$)
Table 4 Content of bound phenolic compounds in rye bran dietary fiber ($\mu\text{g/g}$)

结合酚	SDF	IDF
阿魏酸	$2\,857.19 \pm 5.58^a$	$3\,477.28 \pm 7.81^b$
对香豆酸	—	46.58 ± 0.11^j
咖啡酸	82.30 ± 1.21^f	131.81 ± 0.19^c
绿原酸	542.73 ± 1.44^b	570.41 ± 2.28^a
丁香酸	33.23 ± 0.88^d	99.31 ± 1.05^e
没食子酸	170.76 ± 0.12^e	279.89 ± 1.57^c
原儿茶酸	106.21 ± 0.12^c	144.09 ± 1.03^d
香草酸	65.68 ± 1.04^e	94.74 ± 0.91^h
山奈酚	—	114.47 ± 0.54^f
槲皮素	—	55.07 ± 0.18^i

注:同一列或同一行不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$),“—”表示未检出。

表 5 黑麦麸及膳食纤维的吸水力、吸油力(g/g)

Table 5 Water absorption and oil absorption of rye bran and dietary fiber (g/g)

	吸水力	吸油力
黑麦麸	4.50 ± 0.17^a	0.98 ± 0.19^c
SDF	2.19 ± 0.04^b	1.68 ± 0.02^b
IDF	1.99 ± 0.05^c	3.53 ± 0.05^a

注:同一列不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

表 6 黑麦麸膳食纤维葡萄糖吸附能力(mmol/g)

Table 6 Glucose adsorption capacity of rye bran dietary fiber (mmol/g)

	葡萄糖浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	
	50	100
SDF	1.12 ± 0.10^b	5.11 ± 0.04^a
IDF	0.55 ± 0.10^c	5.16 ± 0.11^a

注:同一列或同一行不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

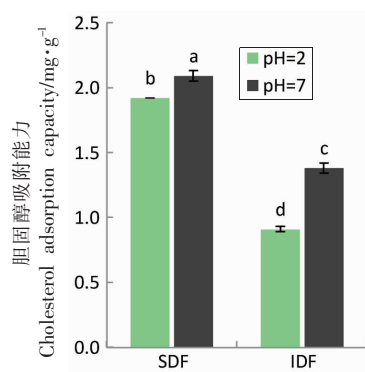
2.4.2 葡萄糖吸附能力 使用两种不同浓度的葡萄糖溶液评估 GAC(50,100 mmol/L),结果如表 6 所示。SDF 和 IDF 均具有吸附葡萄糖的能力,且吸附能力与葡萄糖的浓度呈正相关关系。在 50 mmol/L 中,SDF 显示出更强的葡萄糖吸附能力,提高了降低餐后血糖的能力;而在 100 mmol/L 时 SDF 和 IDF 的吸附能力没有显著的差异,显著高于 50 mmol/L($P<0.05$),分别显著增加了 356.3% 和 838.2%。葡萄糖吸附能力的不同与膳食纤维表

面形态密切相关,SDF表面疏松,比表面积更大,分子更容易进入膳食纤维内部,这有利于吸附并截留葡萄糖。SDF吸水后黏度增加,可能会使葡萄糖溶液的吸收速度减慢^[28]。以上结果证实了黑麦麸膳食纤维能够降低血糖浓度。

2.4.3 胆固醇吸附能力 胆固醇吸附能力(CAC)是评价膳食纤维降血脂特征的重要指标^[29]。胆固醇是心血管疾病的诱发原因之一,高胆固醇摄入会增加血清胆固醇水平,与动脉粥样硬化、高血压等疾病密切相关。由图6可知,黑麦麸膳食纤维对胆固醇的吸附能力受pH值的影响较大。在不同pH值条件下,膳食纤维对胆固醇的吸附有显著差异($P<0.05$)。SDF对胆固醇的吸附能力达到了1.92 mg/g(pH=2)和2.09 mg/g(pH=7),显著高于IDF的0.91 mg/g(pH=2)和1.38 mg/g(pH=7)($P<0.05$)。这可能是由两者结构和比表面积差异引起的,SDF表面更加疏松,毛细管作用更加明显,更易形成凝胶,有利于对胆固醇的吸附。SDF和IDF的吸附能力中性环境显著高于酸性环境,这表明对胆固醇的吸附能力在模拟肠环境下比在模拟胃的酸性环境下更强。整体来说黑麦麸膳食纤维具有对胆固醇良好的吸附能力,具有减少血清胆固醇含量的能力,这使其有望成为食品行业中降低胆固醇的功能成分^[30]。

2.4.4 亚硝酸根吸附能力 亚硝酸盐是一种反应性离子,在酸性条件下可与仲胺和酰胺反应形成N-亚硝基化合物,其中许多已被证明对动物具有致癌作用^[31]。利用膳食纤维的吸附特性可以降低其对人体的伤害。根据图7分析,无论是SDF还是IDF,在模拟胃液环境下(pH=2),对于亚硝酸根的吸附能力均优于模拟肠液(pH=7)。在pH=2时,SDF吸附能力显著高于IDF($P<0.05$)。说明膳食纤维对于亚硝酸根的吸附效果与pH值密切相关,酸性环境下有着更好的吸附。二者相比,SDF对于亚硝酸根的吸附能力超过IDF,可能是SDF表面更加蓬松,这有利于亚硝酸根的吸附。膳食纤维本身的构成相对复杂,能够与酚类物质作用生成复合物,这些酚类物质可以在酸性条件下与亚硝酸根反应,从而阻止了亚硝胺(一种致癌物)的生成。亚硝胺是胃癌的主要诱因之一^[32],因此能有效预防胃癌的发生。不过,在进入小肠环境中,pH值升

高达到中性,含羧基化合物中的羧基发生解离,增大膳食纤维表面负电荷密度,排斥 NO_2^- ,将原本吸收的 NO_2^- 释放出来。因此在pH=7时,二者吸附能力较弱且相当,不存在显著差异($P<0.05$)。亚硝酸根可以通过与膳食纤维的活性化学基团结合而吸附在膳食纤维上。一些活性酸基团,特别是糖醛酸和酚酸,在膳食纤维的亚硝酸根吸附中起着重要作用^[33]。以上结果均表明黑麦麸膳食纤维可以吸附亚硝酸根离子,促进它的排泄。



注:同一样品或同一pH值不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$),下同。

图6 黑麦麸膳食纤维胆固醇吸附能力

Fig.6 Cholesterol adsorption capacity of dietary fiber from rye bran

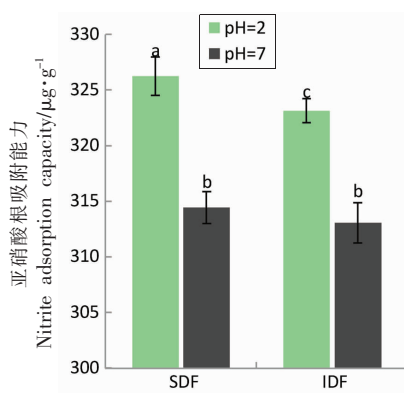


图7 黑麦麸膳食纤维亚硝酸根吸附能力

Fig.7 Nitrite adsorption capacity of rye bran dietary fiber

3 结论

本文对黑麦麸膳食纤维的结构及功能特性进行了研究。通过傅里叶红外光谱、扫描电镜及X射线衍射分析,发现酶处理已经除去绝大部分淀粉

和蛋白质,得到的膳食纤维含有一部分酚类物质,SDF 和 IDF 的微观结构表面呈现不同构造,XRD 结果表明 SDF 和 IDF 均符合纤维素 I 型结构,且 IDF 结晶度高于 SDF,说明 IDF 结构更加规则,并根据红外光谱官能团特征吸收峰对膳食纤维和多酚类物质进行了定性。不同的结构可能会造成不同的功能特性,SDF 吸水力高于 IDF,而 IDF 吸油力高于 SDF,SDF 在葡萄糖浓度为 50 mmol/l 时其吸附葡萄糖能力显著高于 IDF,且 SDF 无论在 pH=2 或 7 时胆固醇吸附能力、亚硝酸根吸附能力均高于 IDF,可能是 SDF 松散的表面所致。二者在单糖和多酚组成上存在一定差异,SDF 以阿拉伯糖为主、IDF 以木糖为主;多酚类物质主要以结合的形式存在于 IDF 中,二者酚类物质以结合型阿魏酸为主,IDF 酚类物质组成及含量均高于 SDF。本研究为今后黑麦麸及其膳食纤维的开发提供了理论支持,结果表明单一的膳食纤维不足以发挥其最佳特性,在以后的开发利用中可以用不同配比综合利用 SDF 和 IDF。

参 考 文 献

- [1] VITAGLIONE P, NAPOLITANO A, FOGLIANO V. Cereal dietary fibre: A natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(9): 451-463.
- [2] 刘红开,李放,张亚宏,等.不同品种蚕豆种皮中膳食纤维的提取工艺优化及其理化特性[J].食品科学,2016,37(16):22-28.
LIU H K, LI F, ZHANG Y H, et al. Optimized extraction conditions and physicochemical characteristics of dietary fiber from Faba bean testa from different cultivars[J]. Journal of Food Science, 2016, 37(16): 22-28.
- [3] BUDHWAR S, CHAKRABORTY M, SETHI K, et al. Antidiabetic properties of rice and wheat bran - A review[J]. Food Biochem, 2020, 44(10): e13424.
- [4] KUNDI Z M, LEE J C, PIHLAJAMAKI J, et al. Dietary fiber from oat and rye brans ameliorate western diet-induced body weight gain and hepatic inflammation by the modulation of short-chain fatty acids, bile acids, and tryptophan metabolism[J]. Mol Nutr Food Res, 2021, 65(1): e1900580.
- [5] DONG R H, YU Q, LIAO W, et al. Composition of bound polyphenols from carrot dietary fiber and its *in vivo* and *in vitro* antioxidant activity[J]. Food Chem, 2021, 339(339): 127879.
- [6] 刘甜甜,吴晓娟,吴伟.多酚-膳食纤维相互作用及其影响多酚生物利用率研究进展[J].中国粮油学报,2021,12(10):1-12.
LIU T T, WU X J, WU W. Research progress of polyphenol-dietary fiber interaction and its effect on the bioavailability of polyphenols[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 12(10): 1-12.
- [7] 吴丽萍,董康珍,楚文靖,等.微波改性对燕麦麸膳食纤维结构及功能性质的影响[J].中国食品学报,2021,21(9):30-37.
WU L P, DONG K Z, CHU W J, et al. Effects of microwave modification on the structure and functional properties of oat bran dietary fiber[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 30-37.
- [8] 万仁口,李功景,贺杨正,等.竹笋膳食纤维的结构特性及其功能性质[J].中国食品学报,2021,21(5):75-82.
WAN R K, LI G J, HE Y Z, et al. Structural and functional properties of dietary fiber from bamboo shoots[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 75-82.
- [9] 严璟瑶,王晓曦,黄继红,等.麦麸膳食纤维在面条加工中的研究进展[J].粮食加工,2021,46(2):14-19.
YAN J Y, WANG X X, HUANG J H, et al. The application of dietary fiber from wheat bran on noodle processing[J]. Journal of Grain Processing, 2021, 46(2): 14-19.
- [10] LI Q, YANG S H, LI Y Q, et al. Antioxidant activity of free and hydrolyzed phenolic compounds in soluble and insoluble dietary fibres derived from hullless barley[J]. LWT, 2019, 111(5): 534-540.
- [11] AJANTH PRAVEEN M, KARTHIKA PARVATHY K R, JAYABALAN R, et al. Dietary fiber from Indian edible seaweeds and its *in-vitro* prebiotic effect on the gut microbiota[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96(5): 343-353.
- [12] REN F Y, FENG Y L, ZHANG H J, et al. Effects of modification methods on microstructural and

- physicochemical characteristics of defatted rice bran dietary fiber[J]. *LWT*, 2021, 151(5): e112161.
- [13] CHANDRASEKARA A, SHAHIDI F. Content of insoluble bound phenolics in millets and their contribution to antioxidant capacity[J]. *Agric Food Chem*, 2010, 58(11): 6706–6714.
- [14] LI Q, YANG S H, LI Y Q, et al. Comparative evaluation of soluble and insoluble-bound phenolics and antioxidant activity of two Chinese mistletoes[J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 359–370.
- [15] 洪晴悦. 不同热加工对青稞主要生物活性成分和体外消化与肠菌发酵特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- HONG Q Y. Effects of different thermal processing on main bioactive components, *in vitro* digestion and fermentation characteristics of Qingke[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [16] WANG K L, LI M, WANG Y X, 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(9): e106162.
- [17] 孟鹏, 刘晓凤, 衣振伟, 等. 牛樟芝不溶性膳食纤维吸附特性及结构表征研究[J]. *工业微生物*, 2020, 50(5): 1–8.
- MENG P, LIU X F, YI Z W, et al. Absorption properties and structure characterization of insoluble dietary fiber from *Antrodia camphorata*[J]. *Industrial Microbiology*, 2020, 50(5): 1–8.
- [18] 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(4): 15–22.
- [19] LI N, FENG Z Q, NIU Y G, et al. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77(6): 557–565.
- [20] QI J, YOKOYAMA W, MASAMBA K G, et al. Structural and physico-chemical properties of insoluble rice bran fiber: Effect of acid-base induced modifications[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(97): 79915–79923.
- [21] LUO X L, WANG Q, FANG D Y, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120(2): 1461–1467.
- [22] 张倩芳, 李敏, 栗红瑜, 等. 不同加工方式对青稞膳食纤维组成及功能性质的影响[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(2): 91–94.
- ZHANG Q F, LI M, LI H Y, et al. Effects of different processing methods on dietary fiber composition and functional properties of highland barley[J]. *Journal of Cereals and Oils*, 2020, 33(2): 91–94.
- [23] XU Z H, XIONG X, ZENG Q Z, et al. Alterations in structural and functional properties of insoluble dietary fibers-bound phenolic complexes derived from lychee pulp by alkaline hydrolysis treatment[J]. *LWT*, 2020, 127(7): e109335.
- [24] 蓝海军, 刘成梅, 涂宗财, 等. 大豆膳食纤维的湿法超微粉碎与干法超微粉碎比较研究[J]. *食品科学*, 2007, 28(6): 171–174.
- LAN H J, LIU C M, TU Z C, et al. Wet or dry processing comparative study on super micro-milling soybean dietary fiber[J]. *Journal of Food Sciences*, 2007, 28(6): 171–174.
- [25] ELLEUCH M, BEDIGIAN D, ROISEUX O, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(2): 411–421.
- [26] RAGHAV A, AHMAD J. Glances of dietetic oral guar gum: Reducing cholesterol in human scenario [J]. *Journal of Pharmacology & Clinical Research*, 2018, 5(3): 1–3.
- [27] ZHENG Y J, XU B F, SHI P Q, et al. The influences of acetylation, hydroxypropylation, enzymatic hydrolysis and crosslinking on improved adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre[J]. *Food Chem*, 2022, 368(8): 130883.
- [28] AHMED F, SAIRAM S, UROOJ A. *In vitro* hypoglycemic effects of selected dietary fiber sources[J]. *Food Sci Technol*, 2011, 48(3): 285–289.
- [29] LUO X L, WANG Q, ZHENG B D, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice[J]. *Food Chem Toxicol*, 2017, 109(Pt 2): 1003–1009.
- [30] LIU X, SUO K 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(3): 356–361.
- [31] LIJINSKY W. Structure–activity relations in carcinogenesis by *N*–nitroso compounds [J]. *Cancer and Metastasi*, 1987, 6(3): 301–356.
- [32] MCRAE M P. The benefits of dietary fiber intake on reducing the risk of cancer: An umbrella review of Meta–analyses [J]. *Chiropr Med*, 2018, 17 (2): 90–96.
- [33] LI Y X, NIU L, GUO Q Q, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from proso millet bran [J]. *LWT*, 2022, 154(4): 1–8.

Studies on Structure and Functional Characteristics of Dietary Fiber from Rye Bran

Zhang Huijuan^{1,2,3}, Jin Chengming¹, Lü Shihao¹, Liu Shuchang¹, Wang Jing^{1,3*}

(¹China–Canada Joint Laboratory of Nutrition and Health (Beijing), Beijing 100048

²Beijing Food Additive Engineering Technology Research Center (Beijing Technology and Business University), Beijing 100048

³School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048)

Abstract Using rye bran as raw material, dietary fiber was prepared by enzymatic method, and the structure, monosaccharide and phenolic composition and functional properties of the two dietary fibers were determined respectively. The results showed that the surface of soluble dietary fiber (SDF) was loose, which was mainly composed of arabinose (68%), galactose (13.1%) and xylose (12.2%). The surface of insoluble dietary fiber (IDF) was porous and irregular, which was mainly composed of xylose (54%) and arabinose (38.3%). Both dietary fibers had infrared characteristic absorption peaks of sugars. The crystallinity of IDF was higher than that of SDF, and the structure was more regular. SDF showed better water absorption (2.19 g/g), cholesterol adsorption capacity (2.09 mg/g, pH=7) and nitrite adsorption capacity (327 μg/g, pH=2). The composition and content of phenolic substances in IDF were significantly higher than that in SDF ($P < 0.05$). The phenolic substances of IDF and SDF were mainly bound ferulic acid.

Keywords rye bran; dietary fiber; polyphenols; structure; function