

# 酶法纯化麦麸不溶性膳食纤维的结构及理化性质

张欣, 邹锦成, 刘琳, 谭葆瑶, 赵雷, 胡卓炎, 王凯\*

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 该研究以麦麸为原料, 采用酶法提取不溶性膳食纤维 (IDF), 分别探究碱性蛋白酶和 $\alpha$ -淀粉酶的用量和酶解时间对蛋白质和淀粉水解程度的影响, 对 IDF 的提取条件进行优化, 并对麦麸 IDF 的结构特征和理化性质进行研究。结果表明, 碱性蛋白酶和 $\alpha$ -淀粉酶用量分别为 4 000 U/g 麦麸和 140 U/g 麦麸, 酶解时间分别为 2 h 时, 得到麦麸 IDF 的纯度达 82.56%。采用扫描电子显微镜、X-射线衍射仪和傅里叶变换红外光谱对麦麸 IDF 的结构进行表征, 发现经酶法提取后的麦麸 IDF 具有明显孔洞及裂缝, 表现出典型的 I 型纤维素结晶结构, 主要组分包括纤维素、木质素和半纤维素。对麦麸 IDF 理化性质的研究发现, 与麦麸相比, 麦麸 IDF 的持水力 (3.82 g/g)、膨胀度 (2.59 mL/g) 和持油性 (1.78 g/g) 均得到改善, 说明其具有用于面制品、凝胶制品、肉制品等提高产品稳定性和感官品质的潜力。此外, 麦麸 IDF 的亚硝酸根离子清除率达到 95.63%, 说明其可作为功能性食品配料降低亚硝酸盐对人体健康的影响。研究结果将对提高麦麸的附加值, 及麦麸 IDF 在高品质健康食品中的应用提供指导。

**关键词:** 麦麸; 不溶性膳食纤维; 酶法提取; 结构; 理化性质

文章编号: 1673-9078(2022)12-223-229

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0187

## Structure and Physicochemical Properties of Insoluble Dietary Fiber from Wheat Bran Extracted Using the Enzymatic Method

ZHANG Xin, ZOU Jincheng, LIU Lin, TAN Baoyao, ZHAO Lei, HU Zhuoyan, WANG Kai\*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Insoluble dietary fiber (IDF) was extracted from wheat bran using the enzymatic method. The effects of dosages of alkaline protease and  $\alpha$ -amylase as well as the duration of enzymolysis on the degrees of hydrolysis of protein and starch were investigated. The extraction conditions of IDF were optimized. The structure and physicochemical properties of IDF from wheat bran were studied. At the alkaline protease and  $\alpha$ -amylase dosages of 4 000 U/g and 140 U/g, respectively, and the duration of enzymolysis of 2 h for each enzyme, the purity of extracted wheat bran IDF was 82.56%. The structure of wheat bran IDF was characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, and Fourier transform infrared spectroscopy. The particles of extracted wheat bran IDF had holes and cracks on the surface, their crystalline structure was a typical type I cellulose crystalline structure, and the main components of wheat bran IDF were cellulose, lignin, and hemicellulose. The obtained wheat bran IDF showed higher water holding capacity (3.82 g/g), swelling power (2.59 mL/g), and oil holding capacity (1.78 g/g) than wheat bran, suggesting its potential application in flour products, gelled foods, and meat products to improve the stability and sensory qualities of the products. In addition, the nitrite ion clearance ability of wheat bran IDF reached 95.63%, implying its applicability as a functional ingredient in foods for reducing the negative impacts of nitrites on human health. These results provide guidance for improving the added value of wheat bran and for the application of wheat bran IDF in high-quality healthy foods.

**Key words:** wheat bran; insoluble dietary fiber; enzymatic extraction; structure; physicochemical properties

引文格式:

张欣, 邹锦成, 刘琳, 等. 酶法纯化麦麸不溶性膳食纤维的结构及理化性质[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 223-229

ZHANG Xin, ZOU Jincheng, LIU Lin, et al. Structure and physicochemical properties of insoluble dietary fiber from wheat bran extracted using the enzymatic method [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 223-229

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31801490)

作者简介: 张欣 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: bomnei163@163.com

通讯作者: 王凯 (1985-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: kaiwang@scau.edu.cn

麦麸即麸皮, 是小麦制粉工业的主要副产品。在碾磨和精炼小麦时麦麸多被丢弃, 导致麦麸资源的有效利用率低。麦麸中有丰富的膳食纤维, 占麦麸总质量的 50%以上<sup>[1]</sup>。根据水溶性的不同, 膳食纤维可以分为水溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF), 例如果胶, 及水不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF), 通常包括纤维素、不溶性半纤维素和木质素<sup>[2]</sup>。麦麸膳食纤维中 90%以上为不溶性膳食纤维<sup>[1]</sup>。研究表明, 摄入适量的膳食纤维可以降低肥胖、糖尿病、胃肠道疾病等疾病的发病率<sup>[3,4]</sup>, 因此膳食纤维摄入量可被视为健康饮食的标志<sup>[5]</sup>。而 IDF 在人体中发挥着促进肠道蠕动、吸附油脂、重金属和其他有毒物质等重要作用<sup>[6]</sup>。事实上, 人体摄入的膳食纤维中 IDF 的摄入量需达到 50%~75%才能达到最佳的健康益处<sup>[7]</sup>。此外, 由于 IDF 具有较好的吸水性、吸油性等理化性质, 加入到面制品、肉制品及饮料等食品中, 不仅能提高产品的营养价值, 还能改善产品的品质<sup>[8]</sup>。因此, 将麦麸中的 IDF 进行分离纯化加以利用, 对于提高麦麸的附加值, 以及改善人体健康方面的作用不容忽视。

目前, 膳食纤维的提取方法主要有化学法、酶法和生物发酵法<sup>[9]</sup>。比较而言, 化学法 (如酸法和碱法) 成本低, 但其制备过程的强酸或强碱条件可能会破坏膳食纤维的结构, 从而会影响其理化性质, 且制备过程中产生的污染物会对环境造成影响。生物发酵法是利用微生物发酵产酶去除原料中杂质, 从而提取膳食纤维, 但发酵产酶的量可能不足, 导致除杂不充分, 产品纯度不高。酶法提取是利用酶 (如蛋白酶、 $\alpha$ -淀粉酶等) 降解原料中的杂质成分, 对膳食纤维进行提取纯化。酶法具有反应条件温和且节约能源的优点, 在提取多种原料中的 IDF 已得到广泛使用。曹银等<sup>[11]</sup>利用酶法 ( $\alpha$ -淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶) 提取大麦槽中的 IDF, 得到大麦槽 IDF 的纯度高达 87.14%。Yang 等<sup>[10]</sup>利用酶法 ( $\alpha$ -淀粉酶、中性蛋白酶和糖化酶) 提取金针菇、胡萝卜、燕麦中的 IDF, 并对三个原料中 IDF 的结构、理化特性进行测定, 结果表明不同来源的 IDF 具有不同形态 (片状、块状、纤维长条状等) 和理化特性 (持水性、持油性和膨胀度等)。麦麸中膳食纤维含量丰富, 但目前对酶法提取麦麸 IDF 的工艺条件优化以提高产物纯度的研究不足, 对于麦麸 IDF 的结构及理化性质的评价不充分。而优化麦麸 IDF 的纯化工艺条件, 并对其结构和理化性质进行研究, 将为麦麸 IDF 在食品中的应用提供理论和实践指导。本研究采用  $\alpha$ -淀粉酶和碱性蛋白酶处理麦麸, 对 IDF 进行提取纯化, 分别讨论碱性蛋白酶及  $\alpha$ -淀粉酶的用量及处理时间对麦麸 IDF 纯度的影响, 并对麦麸 IDF 的化学组成、

结构特征和理化性质等进行评价。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

#### 1.1.1 材料与amp;试剂

麦麸, 购于当地市场;  $\alpha$ -淀粉酶 (4 000 U/g)、碱性蛋白酶 (200 U/mg) 购于上海源叶生物科技有限公司; 总淀粉含量试剂盒, 爱尔兰 Megazyme 公司; 其余化学试剂均为分析纯。

#### 1.1.2 主要仪器

Uvmini-1240 紫外可见分光光度计, 日本 SHIMADZU 公司; EVO MA 15 扫描电子显微镜, 德国 ZEISS 有限公司; X 射线衍射仪, 荷兰帕纳科公司; Vertex70 型傅里叶红外光谱仪, 德国布鲁克公司; MR Hel-Tec (CN) 磁力搅拌器, 德国 Heidolph 公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 麦麸不溶性膳食纤维的提取纯化

麦麸 IDF 的提取参考 Hua 等<sup>[12]</sup>的方法, 并做适当修改。先用蒸馏水洗涤麦麸原料, 水洗离心数次后, 将麦麸分散于蒸馏水中 (1:10,  $m/V$ ), 用 1 mol/L 柠檬酸调节 pH 值至 5.5, 在 55 °C 搅拌 1.5 h 后用蒸馏水洗涤以分解植酸。离心弃去上清液后取沉淀物分散于蒸馏水中 (料液比 1:10), 用 2 mol/L 的 NaOH 调节 pH 值至 7.5, 然后加入一定量的碱性蛋白酶, 于 55 °C 水解一定时间以除去样品中的蛋白质, 沸水浴加热 10 min 灭酶, 离心后收集沉淀物得去除蛋白质的麦麸。采用甲醛滴定法测定上清液中氨基酸态氮质量分数, 可得蛋白质水解度。将去除蛋白质的麦麸样品与蒸馏水按 1:10 ( $m/V$ ) 的比例混合, 用柠檬酸 (1 mol/L) 调节 pH 值至 6, 用  $\alpha$ -淀粉酶在 60 °C 水解样品中的淀粉, 水解后沸水浴 10 min 灭酶。离心后以上清液中的麦芽糖当量为淀粉水解度的指标, 利用 PAHBAH 法测定淀粉水解度<sup>[13]</sup>, 沉淀物即为麦麸 IDF。最后用 3% 过氧化氢 (1:10,  $m/V$ ) 对经上述处理的麦麸 IDF 进行脱色, 于室温下搅拌 1.5 h 后离心, 沉淀物进行冷冻干燥, 粉碎并过 60 目筛后, 收集样品备用。

#### 1.2.2 化学组成

采用凯氏定氮法测定蛋白质含量 (GB 5009.5-2016), 索氏抽提法测定脂肪含量 (GB 5009.6-2016), 采用食品中总灰分的测定方法测灰分含量 (GB 5009.4-2016)。淀粉含量的测定使用 Megazyme 总淀粉含量试剂盒<sup>[14]</sup>。总膳食纤维及不溶性膳食纤维含量采用食品中膳食纤维的方法测定 (GB 5009.88-2014)。

### 1.2.3 微观结构分析

利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察麦麸 IDF 的微观结构。将干燥的样品用双面胶固定在铝金属的短板上, 用真空镀膜仪 (EMACE600, 德国) 给样品镀上一层金属薄膜, 使其导电。在 10 kV 的电压条件下捕获放大 500 倍及 1 000 倍的样品图像。

### 1.2.4 结晶结构分析

利用 X-射线衍射仪 (XRD) 测定麦麸 IDF 的结晶结构。扫描速度为 4°/min, 负载电压为 40 kV, 电流为 40 mA, 得到扫描范围为 4°到 45°的衍射图样<sup>[15]</sup>。

### 1.2.5 红外光谱分析

使用傅里叶红外光谱仪 (FT-IR) 测定麦麸 IDF 分子中的官能团<sup>[16]</sup>。将样品与溴化钾以 1:100 (*m/m*) 的比例混合, 设置分辨率 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数 32 次, 在扫描波长为 400~4 000 cm<sup>-1</sup> 范围内读取光谱。

### 1.2.6 麦麸不溶性膳食纤维的理化性质

#### 1.2.6.1 持水性

参考 Zhang 等<sup>[17]</sup>的方法, 称取样品干基 1.00 g (*W*<sub>1</sub>), 加入蒸馏水 (料液质量比为 1:40), 25 °C 下磁力搅拌 1 h 后, 离心去除上清液 (3 500 r/min, 15 min), 称取滤渣质量记为 *W*<sub>2</sub>, 按下式计算样品的持水性 (*A*, g/g)。

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (1)$$

#### 1.2.6.2 持油性

参考 Zhang 等<sup>[17]</sup>的方法, 称取 1.00 g (*M*<sub>1</sub>) 样品, 按料油质量比为 1:20 加入花生油后混匀, 恒温 25 °C 静置 1 h 后离心 15 min (3 500 r/min), 弃去上清液油层, 用滤纸抹除残留在离心管壁上的油, 残渣的质量记为 *M*<sub>2</sub>, 按下式计算样品的持油性 (*B*, g/g)。

$$B = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (2)$$

#### 1.2.6.3 膨胀度

参考 Gouw 等<sup>[18]</sup>的方法, 称取 0.50 g 样品于 10 mL 量筒中, 加入 5 mL 蒸馏水。适当振荡后于室温下放置 24 h, 使其充分溶胀后测定样品溶胀体积。

$$C = \frac{V}{m} \quad (3)$$

式中:

*C*——膨胀度, mL/g;

*V*——样品溶胀体积, mL;

*m*——样品质量, g。

#### 1.2.6.4 亚硝酸根离子吸附能力

将 0.50 g 样品与 100 mL 浓度为 100 μmol/L 的亚硝酸钠溶液混合, 用 0.1 mol/L HCl 调节体系 pH 值至 2.0, 于 37 °C 下磁力搅拌 2 h, 混合物于 3 500 r/min 离心

15 min, 取上清液, 亚硝酸盐含量按照盐酸萘乙二胺法测得, 通过紫外分光光度计测得反应前后亚硝酸盐含量, 根据反应前后的浓度差计算亚硝酸根离子吸附能力, 检测波长为 538 nm<sup>[19]</sup>。

### 1.2.7 数据统计分析

所有试验均重复至少两次, 采用 SPSS 25.0 对数据进行统计分析, 采用方差分析法 (ANOVA) 进行显著性差异分析, 当 *p*<0.05 时认为有显著性差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 麦麸不溶性膳食纤维的提取纯化

#### 2.1.1 碱性蛋白酶添加量对蛋白质水解程度的影响

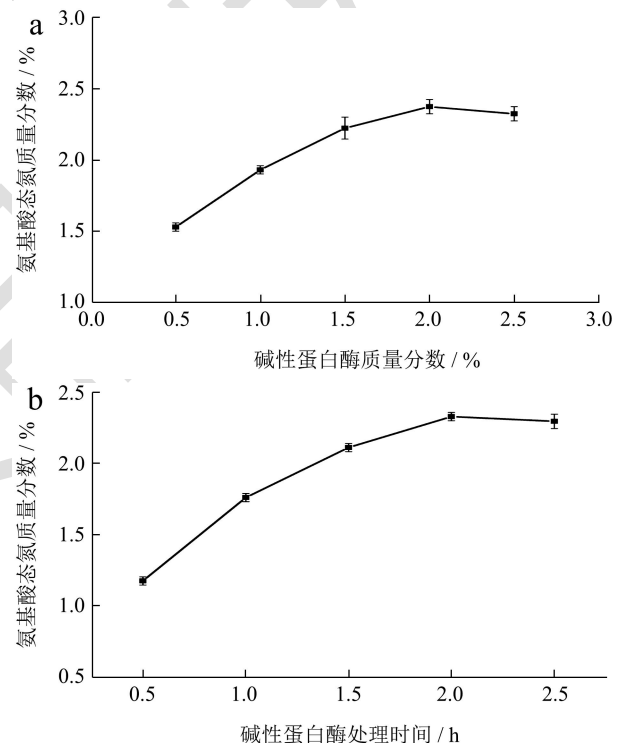


图1 碱性蛋白酶用量及处理时间对蛋白质水解程度的影响

Fig.1 Effects of alkaline protease amount and treatment time on protein hydrolysis degree of wheat bran

用碱性蛋白酶水解麦麸中的蛋白质, 研究碱性蛋白酶用量 (分别为麦麸干基质量的 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和 2.5%) 对蛋白质水解程度的影响, 酶解时间为 2 h, 结果见图 1a。由图可知, 当碱性蛋白酶用量在 0.5%~2.0% 时, 蛋白质的水解程度随碱性蛋白酶添加量增大而上升, 这是由于增加酶用量可以提高酶与底物结合的概率从而提高蛋白质水解率。当碱性蛋白酶用量大于 2.0% 时, 酶解液中氨基酸态氮质量分数不再增加 (氨基酸态氮质量分数表征上清液中游离氨基酸含量), 即蛋白质水解程度趋于稳定, 说明继续增加酶用

量不能进一步提高蛋白质水解程度,反而会增加成本。

### 2.1.2 碱性蛋白酶处理时间对蛋白质水解程度的影响

图 1b 显示碱性蛋白酶(占麦麸干基质量的 2.0%)的作用时间(分别为 0.5 h、1.0 h、1.5 h、2.0 h 和 2.5 h)对蛋白质水解程度的影响。结果表明,当酶解时间为 0.5~2 h 时,蛋白质的水解程度随反应时间的延长而提高。水解时间大于 2 h 时,蛋白质水解程度无显著提高,趋于稳定。这是由于随酶水解时间的延长,酶活力会下降,且不断堆积的反应产物可能抑制酶促反应的继续进行。

### 2.1.3 $\alpha$ -淀粉酶的添加量对淀粉水解程度的影响

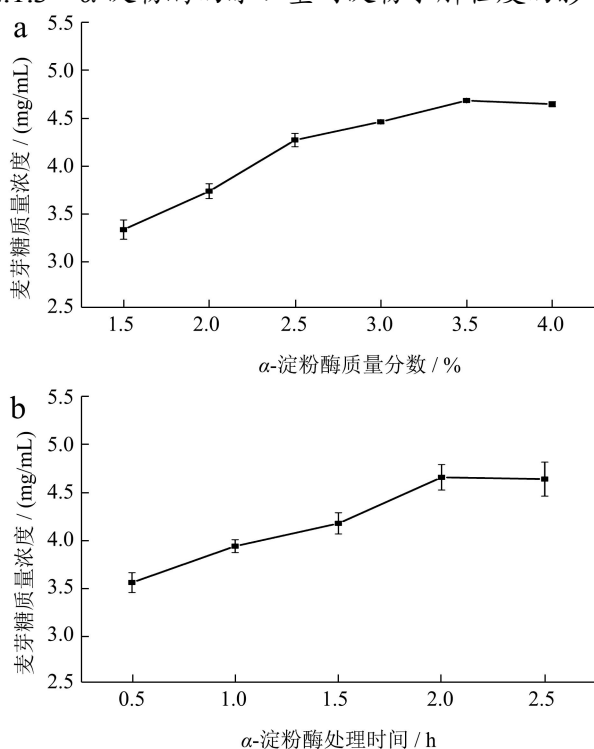


图 2  $\alpha$ -淀粉酶用量及处理时间对淀粉水解程度的影响

Fig.2 Effects of  $\alpha$ -amylase amount and treatment time on starch hydrolysis degree

表 1 麦麸及麦麸不溶性膳食纤维(IDF)的化学组成

Table 1 Chemical components of wheat bran and wheat bran insoluble dietary fiber (IDF)

组分/(g/100 g)	脂肪	淀粉	蛋白质	灰分	总膳食纤维	IDF
麦麸	2.67±0.00 <sup>a</sup>	27.05±0.40 <sup>a</sup>	18.51±0.01 <sup>a</sup>	5.75±0.04 <sup>a</sup>	51.20±0.21 <sup>b</sup>	49.81±0.15 <sup>b</sup>
麦麸 IDF	2.17±0.00 <sup>b</sup>	0.56±0.12 <sup>b</sup>	4.26±0.00 <sup>b</sup>	5.56±0.03 <sup>a</sup>	86.50±0.10 <sup>a</sup>	82.56±0.38 <sup>a</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异性 ( $p<0.05$ )。

## 2.3 麦麸不溶性膳食纤维结构性质

### 2.3.1 微观结构

麦麸 IDF 的 SEM 图像如图 3 所示。由图 3a 可观察到的麦麸 IDF 颗粒的形状和大小不规则,多呈长条

状,同时可观察到一些不规则的块状和小碎片。由图 3b 可观察到麦麸 IDF 表面结构疏松并且粗糙,有明显的孔洞和裂缝。有研究表明孔洞和裂缝使 IDF 具有较大的表面积,且此结构与样品的理化特性相关,可显著影响水合性质(持水性和膨胀度等)及持油性<sup>[20]</sup>。

### 2.1.4 $\alpha$ -淀粉酶水解时间对淀粉水解程度的影响

采用 $\alpha$ -淀粉酶(用量为麦麸干基质量的 3.5%)对经碱性蛋白酶处理后的样品中的淀粉进行水解,研究水解时间(分别为 0.5 h、1.0 h、1.5 h、2.0 h 和 2.5 h)对淀粉水解程度的影响,结果见图 2b。由图可知,反应时间在 0.5~2 h 时,随着 $\alpha$ -淀粉酶处理时间的增加,淀粉的水解程度逐渐上升。当水解时间大于 2 h,酶解液中麦芽糖含量总体趋于稳定,淀粉水解程度不再增加,此时淀粉几乎被完全水解。

## 2.2 麦麸不溶性膳食纤维的化学组成

采用碱性蛋白酶(用量为麦麸干基质量的 2.0%即 4 000 U/g 麦麸,酶解 2 h)和 $\alpha$ -淀粉酶(用量为麦麸干基质量的 3.5%即 140 U/g 麦麸,酶解 2 h)除去麦麸中的蛋白质和淀粉后,分离得到麦麸 IDF 样品(提取率 91.16%),测定麦麸及麦麸 IDF 的化学组成,结果如表 1 所示。麦麸和麦麸 IDF 中脂肪质量分数分别为 2.67%和 2.17%,低的脂肪含量表明其具有成为低热量食品成分的潜在应用价值。膳食纤维占麦麸干基质量的 51.20%,是麦麸的主要成分。采用酶法除去蛋白质和淀粉等杂质后得到的麦麸 IDF 中,淀粉和蛋白质质量分数由麦麸的 27.05%和 18.51%分别降低至 0.56%和 4.26%,说明淀粉和蛋白质组分被有效除去。灰分质量分数保持在约 5.75%~5.56%。IDF 提取物中总膳食纤维质量分数升至 86.50%,其中 IDF 质量分数达 82.56%。

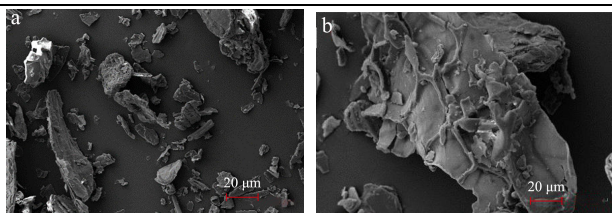


图3 麦麸不溶性膳食纤维 (IDF) 的微观结构

Fig.3 SEM images of insoluble dietary fiber from wheat bran (IDF)

注: a 放大 500 倍; b 放大 1 000 倍。

### 2.3.2 结晶结构

图4为麦麸IDF的XRD衍射图谱。如图所示,麦麸IDF在约 $21.9^\circ$ 处有明显的衍射峰,在 $34.5^\circ$ 处出现微弱的衍射峰。一般来说,于 $15.98^\circ\sim 22^\circ$  ( $2\theta$ ) 范围出现的强衍射峰是纤维素结晶结构的特征峰,对应纤维素结晶结构的002晶面, $2\theta$ 为 $34.5^\circ$ 对应纤维素结晶结构的004晶面<sup>[11,21]</sup>。膳食纤维通常由有序结晶区和非晶区组成,其中结晶区主要由结晶纤维素组成,无定形区域由非结晶纤维素、半纤维素和木质素组成<sup>[15]</sup>。图4结果表明麦麸IDF中存在结晶纤维素、半纤维素和木质素,且麦麸IDF是典型的I型纤维素结晶结构,此结果与人参IDF的结晶结构的结果类似<sup>[12]</sup>。

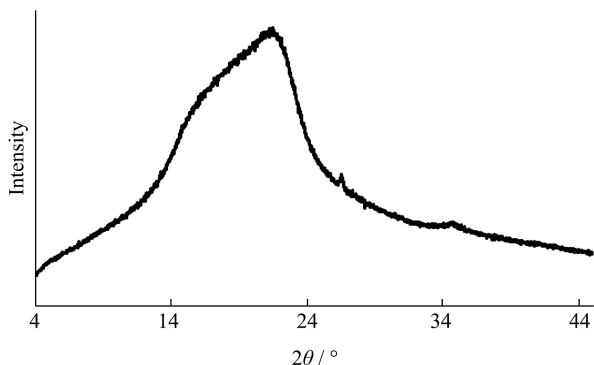


图4 麦麸不溶性膳食纤维 (IDF) 的结晶结构

Fig.4 XRD curve of insoluble dietary fiber (IDF) from wheat bran

### 2.3.3 红外光谱分析

采用红外光谱仪对麦麸IDF在分子水平上的官能团和结构基团进行检测,结果见图5。结果显示,麦麸IDF在 $3351.99\text{ cm}^{-1}$ 处有一个宽吸收峰,这主要归因于纤维素和半纤维素中-OH的伸缩振动。在 $2924.95\text{ cm}^{-1}$ 处存在吸收峰,这是由-CH<sub>3</sub>或=CH<sub>2</sub>的C-H拉伸引起,代表纤维素多糖化合物的典型结构。 $1735.77\text{ cm}^{-1}$ 处为半纤维素中乙酰基和/或羧基上C=O的伸缩振动吸收峰。 $1514.29\text{ cm}^{-1}$ 处的弱峰对应木质素苯环的特征吸收。 $897.53\text{ cm}^{-1}$ 是纤维素中 $\beta$ -D-葡萄糖基的特征吸收峰<sup>[12]</sup>。上述结果表明,麦麸IDF具有膳食纤维的典型官

能团,结合XRD结果可知麦麸IDF的组分包括纤维素、半纤维素和木质素,这与文献报道豆渣IDF和人参IDF的结果类似<sup>[12,16]</sup>。

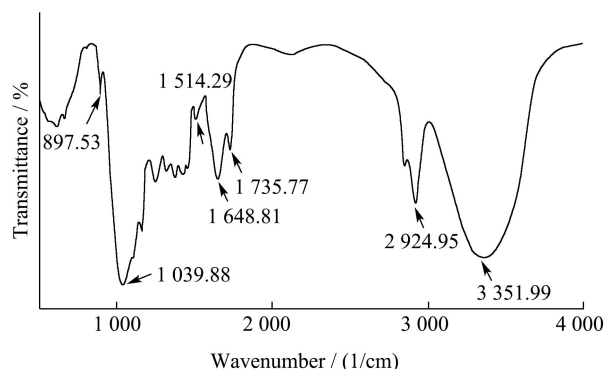


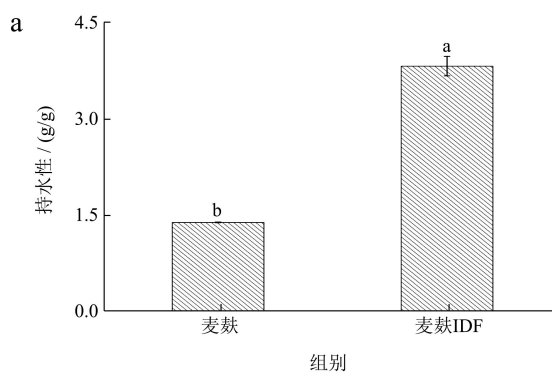
图5 麦麸不溶性膳食纤维 (IDF) 的红外光谱图

Fig.5 The FT-IR curve of insoluble dietary fiber (IDF) from wheat bran

## 2.4 麦麸不溶性膳食纤维的理化性质

### 2.4.1 持水性、持油性及膨胀度

持水性、膨胀度和持油性是评价膳食纤维预防和缓解肥胖、肠道疾病等功能性质的重要指标<sup>[22]</sup>。麦麸IDF的持水性、膨胀度和持油性结果如图6所示。由图6a和图6b可知,与麦麸相比,麦麸IDF的持水力和膨胀度均显著增加,其中持水性由 $1.39\text{ g/g}$ 提升到 $3.82\text{ g/g}$ ,膨胀度从 $1.18\text{ mL/g}$ 增加到 $2.59\text{ mL/g}$ 。麦麸IDF的持水能力高于经酶法提取的竹笋壳IDF ( $2.83\text{ g/g}$ )<sup>[23]</sup>。有研究表明,良好的持水性和膨胀度有利于凝胶的形成和结构的稳定,说明麦麸IDF具有可应用于果酱等食品中提高食品稳定性的潜力,且较高的持水性和膨胀度有利于提高人体摄入后的饱腹感<sup>[8]</sup>。从图6c可看出,麦麸IDF的持油性为 $1.78\text{ g/g}$ ,显著高于麦麸的持油性 ( $0.75\text{ g/g}$ ),与文献报道人参IDF的持油性 ( $1.78\text{ g/g}$ ) 接近<sup>[12]</sup>,且明显高于莲藕IDF ( $0.62\sim 1.50\text{ g/g}$ )<sup>[24]</sup>。较高的持油性表明麦麸IDF可应用于肉制品中,赋予肉制品良好的持油能力,有利于改善肉制品的口感。



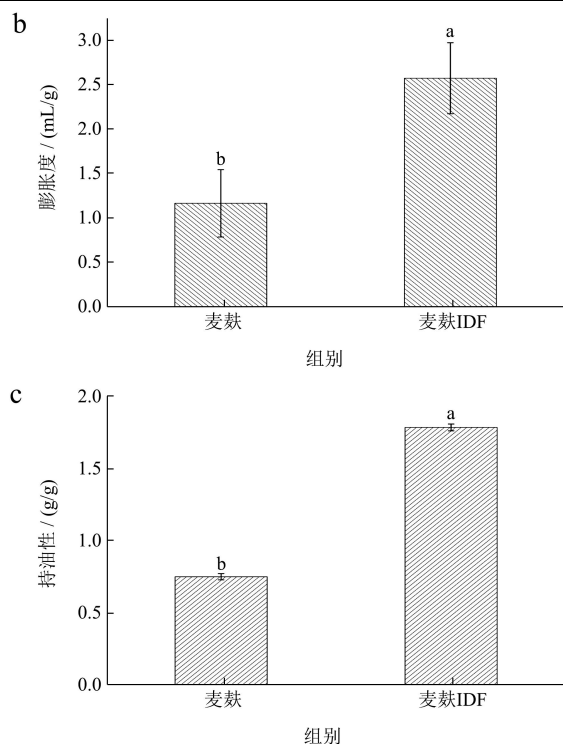


图6 麦麸及麦麸不溶性膳食纤维 (IDF) 的持水性、膨胀度及持油性

Fig.6 Water holding, swelling capacities and oil holding of wheat bran and insoluble dietary fiber (IDF) from wheat bran

注: 不同组之间的字母不同表示差异性显著 ( $p < 0.05$ )。

#### 2.4.2 亚硝酸根离子吸附能力

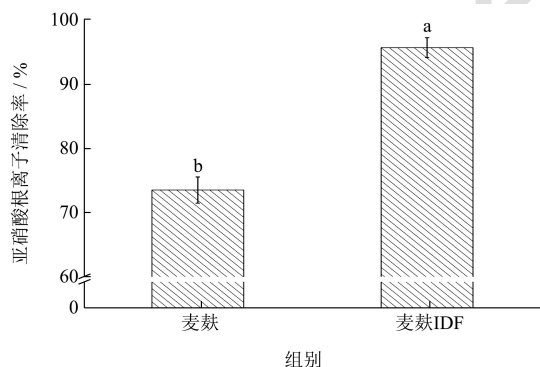


图7 麦麸及麦麸不溶性膳食纤维 (IDF) 的亚硝酸根离子清除率

Fig.7 Nitrite scavenging rate of wheat bran and insoluble dietary fiber from wheat bran

注: 不同小写字母表示差异性显著 ( $p < 0.05$ )。

亚硝酸会对人体健康产生如致癌致畸等负面影响, 前期有研究指出, 麦麸膳食纤维具有防癌的作用, 并推测这可能与它具有消除亚硝酸根离子的能力有关<sup>[19]</sup>。因此, 本研究测定麦麸 IDF 对亚硝酸根离子的吸附能力, 结果见图 7。由图可知, 麦麸与麦麸 IDF 的亚硝酸根离子清除率分别为 73.57% 和 95.63%, 表明麦麸及麦麸 IDF 均具有清除亚硝酸根离子的能力, 且麦麸 IDF 清除亚硝酸根离子的能力显著强于麦麸, 说明麦麸 IDF

具有较强的用于吸附食品中有害物质的能力。结合 SEM 结果分析, 这可能是由于麦麸 IDF 比麦麸具有更大的表面积, 更大的表面各有助于提高亲水性基团和亲脂性基团暴露的可能性, 从而提高麦麸 IDF 吸附亚硝酸根离子的能力<sup>[25]</sup>。

### 3 结论

本研究以麦麸为原料, 采用碱性蛋白酶和 $\alpha$ -淀粉酶对麦麸进行酶解以去除蛋白质和淀粉等主要杂质, 纯化麦麸 IDF。对酶解条件研究的结果表明, 当碱性蛋白酶的用量为麦麸干基质量 2.0% (即 4 000 U/g 麦麸), 酶解时间为 2 h;  $\alpha$ -淀粉酶的用量为麦麸干基质量 3.5% (即 140 U/g 麦麸), 作用时间为 2 h 时, 对麦麸 IDF 的提取纯化效果较好, 提取物中总膳食纤维含量为 86.50%, 其中 IDF 含量为 82.56%。利用 SEM 观察麦麸 IDF 的表观形貌, 观察到麦麸 IDF 多呈长条状, 表面结构疏松并且粗糙, 有明显的孔洞和裂缝, 此结构可能有利于提高麦麸 IDF 的水合性质及持油性。采用 XRD 和 FTIR 对麦麸 IDF 的结晶结构及官能团进行分析, 结果表明麦麸 IDF 具有典型的 I 型纤维素结晶结构, 主要组分包括纤维素、木质素和半纤维素。与麦麸相比, 麦麸 IDF 的理化性质得到显著改善, 其持水力达到 3.82 g/g, 膨胀度达 2.59 mL/g, 良好的持水性和膨胀度说明麦麸 IDF 可应用于果酱等食品提高食品稳定性, 且有利于提高人体摄入后的饱腹感。麦麸 IDF 的持油性较好 (1.78 g/g), 说明其可用于肉制品提高持油能力改善口感。此外, 亚硝酸根离子清除率高达 95.63%, 说明麦麸 IDF 可作为功能成分用于食品, 可降低亚硝酸盐对人体健康的不良影响。上述结果表明, 麦麸 IDF 具有作为食品配料用于面制品、肉制品、凝胶制品等提高产品稳定性、感官品质和功能性的潜力。

### 参考文献

- [1] Cheng W, Sun Y, Fan M, et al. Wheat bran, as the resource of dietary fiber: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(26): 7269-7281
- [2] Alba K, Macnaughtan W, Laws A P, et al. Fractionation and characterisation of dietary fibre from blackcurrant pomace [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 398-408
- [3] Patel S. Cereal bran fortified-functional foods for obesity and diabetes management: triumphs, hurdles and possibilities [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 14: 255-269
- [4] Holscher H D. Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota [J]. Gut Microbes, 2017, 8(2): 172-184

- [5] Stephen A M, Champ M M J, Cloran S J, et al. Dietary fibre in Europe: current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health [J]. *Nutrition Research Reviews*, 2017, 30(2): 149-190
- [6] Makki K, Deehan E C, Walter J, et al. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease [J]. *Cell Host & Microbe*, 2018, 23(6): 705-715
- [7] 周新,唐世英,杨贺祺,等.不溶性膳食纤维的提取、表征及改性研究进展[J].*食品工业科技*,2021,42(3):359-366,372
- [8] 宋康,宋莎莎,弓志青,等.水不溶性膳食纤维生理功能、制备工艺及应用研究进展[J].*食品工业*,2020,41(2):258-262
- [9] 吴晖,侯萍,李晓凤,等.不同原料中膳食纤维的提取及其特性研究进展[J].*现代食品科技*,2008,1:91-95
- [10] 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
- [11] 曹银,杨芳,周露.碱法与酶法提取大麦糟膳食纤维的比较[J].*现代食品科技*,2011,27(3):317-320
- [12] Hua M, Lu J, Qu D, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient [J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 522-529
- [13] Moretti R, Thorson J S. A comparison of sugar indicators enables a universal high-throughput sugar-1-phosphate nucleotidyltransferase assay [J]. *Analytical Biochemistry*, 2008, 377(2): 251-8
- [14] Wang K, Hasjim J, Wu A C, et al. Roles of GBSSI and SSIIa in determining amylose fine structure [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 127: 264-274
- [15] 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: 237-46
- [16] Ullah I, Yin T, Xiong S, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (*Soybean residue*) insoluble dietary fiber modified by high-energy wet media milling [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 82: 15-22
- [17] 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: 102-112
- [18] Gouw V P, Jung J, Zhao Y. Functional properties, bioactive compounds, and *in vitro* gastrointestinal digestion study of dried fruit pomace powders as functional food ingredients [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 80: 136-144
- [19] 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
- [20] Al-Sheraji S H, Ismail A, Manap M Y, et al. Functional properties and characterization of dietary fiber from *Mangifera pajang* Kort. fruit pulp [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2011, 59(8): 3980-3985
- [21] 谢三都,陈惠卿,周春兰,等.橄榄渣膳食纤维理化和体外吸附特性及结构表征[J].*食品与机械*,2019,35(10)29-34
- [22] 李琦,曾凡坤,华蓉,等.麦麸膳食纤维理化特性、制备方法及应用研究进展[J].*食品工业科技*,2020,41(17):352-357,367
- [23] Luo X, Wang Q, Zheng B, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2017, 109: S0278691517300753
- [24] Hussain S, Li J, Jin W, et al. Effect of micronisation on dietary fibre content and hydration properties of lotus node powder fractions [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(3): 590-598
- [25] Lin Y, Chen K, Tu D, et al. Characterization of dietary fiber from wheat bran (*Triticum aestivum* L.) and its effect on the digestion of surimi protein [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 102: 106-112