

不同来源膳食纤维的结构和理化性质分析

The structure and physicochemical properties of different types of dietary fiber

栗俊广^{1,2,3}姜茜^{1,2,3}望运滔^{1,2,3}马旭阳^{1,2,3}白艳红^{1,2,3}LI Jun-guang^{1,2,3}JIANG Xi^{1,2,3}WANG Yun-tao^{1,2,3}MA Xu-yang^{1,2,3}BAI Yan-hong^{1,2,3}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南 郑州 450000;

2. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南 郑州 450000;

3. 河南省食品生产与安全协同创新中心, 河南 郑州 450000)

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450000, China;

2. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou, Henan 450000, China;

3. Henan Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Zhengzhou, Henan 450000, China)

摘要:以鹰嘴豆膳食纤维(dietary fiber, DF)、葡萄 DF、大豆 DF 和麦麸 DF 为试验原料,研究了 4 种不同来源 DF 的理化特性(持水力、持油力、膨胀力、粒径、溶解度、热特性)之间的差异,并用傅里叶变换红外光谱、扫描电镜表征其结构变化。结果表明:鹰嘴豆 DF 的持水力、持油力最高,分别为 2.45、1.97 g/g;麦麸 DF 的膨胀力最好,为 3.18 mL/g;4 种膳食纤维的溶解度与温度呈正比,其中鹰嘴豆 DF 的溶解度最高;傅里叶变换红外光谱分析发现,4 种 DF 的红外吸收光谱基本相同,均含有 C—H、O—H、C=O、C—O—C 键;热特性分析结果表明豆类 DF 有更高的变性温度,而麦麸 DF 的热稳定性最好。扫描电镜结果显示鹰嘴豆 DF 颗粒表面带有无规则褶皱,褶皱存在使 DF 表面积增大,从而表现出更高的持水力和持油力。综上,鹰嘴豆 DF 可以作为良好的保水保油剂,应用于肉制品、乳制品等食品加工,提升产品品质。

关键词:膳食纤维;理化特性;傅里叶变换红外光谱;热稳定性

Abstract: The physicochemical characteristics, including water holding capacity, oil holding capacity, swelling capacity, particle size, solubility, and thermal properties, of chickpea dietary fiber (DF), grape DF, soybean DF and wheat bran DF were evaluated in this study. The structural properties of DFs were characterized

by Fourier transform infrared spectrum and scanning electron microscope. The results showed that chickpea DF had the best water holding capacity and oil holding capacity, at 2.45 g/g and 1.97 g/g, respectively. Wheat bran DF had the best swelling capacity (3.18 mL/g). The solubility of four dietary fibers were positively proportional to temperature, among which the solubility of chickpea DF was the highest. Fourier transform infrared spectral analysis indicated the infrared absorption spectrum of four DFs were basically the same. And they all had C—H, O—H, C=O, C—O—C. Thermal characteristics analysis showed that the modified temperature of beans DFs were higher than others and the thermal stability of wheat bran DF was best. Scanning electron microscopic analysis confirmed chickpea DF had irregular folds on the surface. DF with folds showed higher water holding capacity and oil holding capacity. In order to improve product quality, chickpea DF can be applied in meat products, dairy products and other food processing, as a good water and oil retention agent.

Keywords: dietary fiber; physicochemical properties; Fourier transform infrared spectrum; the thermal characteristic

膳食纤维是指不能被人体消化酶消化的碳水化合物,也被称“第七营养素”。食用膳食纤维对人体健康有多种益处,例如控制餐后血糖反应、降低血脂和胆固醇、有助于肠道运输等^[1-2]。膳食纤维分为可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维(IDF)。SDF 主要包含树胶、粘胶和果胶等, IDF 主要包含纤维素、半纤维素和木质素等^[3-4]。Galisteo 等^[5]报道了 IDF 具有较高的保水性和水胀能力,食用可提高饱腹感,增加粪便排泄量;SDF 可以

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(编号:2018YFD0401200);河南省科技攻关项目(编号:202102110294,202102110295)

作者简介:栗俊广,男,郑州轻工业大学副教授,博士。

通信作者:白艳红(1975—),女,郑州轻工业大学教授,博士。

E-mail: baiyanhong212@163.com

收稿日期:2020-07-17

调节和改善肠道菌群,并防止糖尿病和其他心血管疾病。另外,在饮食中添加膳食纤维(DF)不仅可减少冠心病的得病几率,还能减轻长期大量饮酒对胰脏的伤害^[6-8]。

适量摄入膳食纤维对人体健康有积极作用,这些积极作用主要与DF的理化性质密切相关^[9-10]。DF的结构中含有较多的亲水性基团,如羟基等,因此具有较高的持水力和膨胀力^[11],被摄入人体后,可以加快排便速度,使体内毒素迅速排出体外。DF表面有疏水基团,结构为孔状结构,可以通过疏水作用和毛细吸附作用吸附油类、香气成分等有机物质,并赋予食品一定的香气和风味^[12]。DF的溶解性、黏性对其生理功能有重要影响,可延缓和降低葡萄糖、胆汁酸和胆固醇等物质的吸收^[13]。由于DF具有一定的持水性和持油性,可以作为食品功能性添加成分:例如,具有高持油性的DF可以稳定高脂肪食品和乳液;具有高持水性的膳食纤维可用作营养增强剂和天然添加剂,改变食品的风味与质构^[14]。但是高膳食纤维类食品的开发和利用在中国仍然比较缺乏,在食品行业中有巨大的发展空间。

不同来源的膳食纤维,其理化特性、结构均有所差异,而农产品加工的各种废料废渣是膳食纤维的良好来源,如豆渣、米糠、麦麸及其他各种蔬菜果皮渣等。大豆和鹰嘴豆是世界上栽培面积较大的食用豆类作物,产量分别居于第一和第二。鹰嘴豆是一种高营养价值食用豆,能有效控制血糖、降低胆固醇等;每年大豆、麦麸产量丰富,合理加工利用,能提高其附加值;葡萄皮渣中富含膳食纤维,是一种优质的膳食纤维资源。研究拟选用鹰嘴豆DF、葡萄DF、大豆DF和麦麸DF为原料,从4种膳食纤维的理化特性和结构进行比较,为DF的开发及利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

鹰嘴豆DF、葡萄DF、大豆DF和麦麸DF:西安优硕生物科技有限公司;

非转基因大豆油:郑州市丹尼斯超市;

溴化钾(KBr):分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

分析天平:AB265-S型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

高速冷冻离心机:Avanti J-26s XPI型,美国Beckman公司;

激光粒度仪:LS13320/ULM2型,美国贝克曼库尔特公司;

傅里叶变换红外光谱仪:Vertex70型,美国Bruker光学公司;

差示量热扫描仪:DSC Q20型,美国TA仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 持水力的测定 根据文献^[15]修改如下:分别称取4种DF样品1.000 g,加入30 mL蒸馏水震荡均匀,在室温下放置18 h,4 000×g离心20 min,倒掉上清液,称样品重量(湿重),在105℃下干燥2 h,记录样品干重。按式(1)计算持水力。

$$C_{WH} = (m_2 - m_1) / m_1, \quad (1)$$

式中:

C_{WH} ——持水力,g/g;

m_1 ——样品干重,g;

m_2 ——样品湿重,g。

1.2.2 持油力的测定 根据文献^[16]修改如下:分别称取4种DF样品1.000 g于干燥离心管中,加入20 mL植物油震荡均匀,在室温下静置18 h,4 000×g离心20 min,倒掉上清液至离心管内壁无油迹,称重。按式(2)计算持水油力。

$$C_{OH} = (m_2 - m_1) / m_0, \quad (2)$$

式中:

C_{OH} ——持油力,g/g;

m_2 ——样品和离心管的重量,g;

m_1 ——干燥离心管的重量,g;

m_0 ——样品的重量,g。

1.2.3 膨胀力的测定 根据文献^[15]的方法:分别称取4种DF样品1.000 g于干燥的10 mL量筒中,记录此时刻度 V_0 ,加入8 mL蒸馏水,混合均匀后室温静置18 h,记录膨胀后的膳食纤维体积 V_1 。按式(3)计算膨胀力。

$$C_{SW} = (V_1 - V_0) / m, \quad (3)$$

式中:

C_{SW} ——膨胀力,mL/g;

V_1 ——膨胀后的膳食纤维体积,mL;

V_0 ——膳食纤维初始体积,mL;

m ——样品的重量,g。

1.2.4 溶解度的测定 根据文献^[17]修改如下:分别称取4种DF样品200 mg于离心管中,加入5 mL纯水,在不同温度下(20,40,60,80,100℃)搅拌30 min,4 000×g离心20 min,将上清液倒入已知质量的离心管中,在105℃烘箱中干燥至恒重后称质量。溶解度以加入每毫升纯水搅拌后离心所得上清液中固形物的质量表示。以温度为横坐标,溶解度为纵坐标作图。按式(4)计算DF溶解度。

$$C = m / V, \quad (4)$$

式中:

C ——溶解度,g/mL;

m ——定量上清液干燥后的固形物含量,g;

V ——所取水体积, mL。

1.2.5 粒径的测定 分别称取 4 种 DF 样品 1.0 g, 加入蒸馏水配置成一定浓度的溶液, 采用 LS13320/ULM2 激光粒度仪分析 DF 的粒径, 结果用中位径 D_{50} 表示, 每个样品重复 3 次。

1.2.6 傅里叶变换红外光谱分析 精确称取干燥的 4 种 DF 样品 1.000 mg 于玛瑙研钵中, 加入 100 mg 干燥的 KBr 晶体, 轻轻研磨混匀, 用压片机压片, 制成一定直径和厚度的透明片, 用红外分光光度计于 $4\ 000\sim400\text{ cm}^{-1}$ 中红外区扫描, 得到傅里叶变换红外光谱曲线。

1.2.7 扫描电子显微镜分析 样品干燥后过 100 目筛, 将样品平铺在贴好导电胶的样品台上, 用洗耳球吹去没有导电胶固定的粉末, 喷金处理 120 s。置于 JSM-6490LV 型扫描电子显微镜下观察, 加速电压 20 kV, 观察各样品颗粒的形貌。

1.2.8 热特性分析 根据文献[18]修改如下: 采用 Q20 差示扫描量热仪(DSC)进行测定, 精确称取 4 种 DF 样品 5.000 mg, 置于固体铝坩埚当中密封, 空白固体坩埚作为参照。测试温度范围为 $25\sim360\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 载气为氮气, 流速为 $50\text{ mL}/\text{min}$, 观察样品和参比物之间的热流差随温度的变化。

1.3 数据统计分析

试验重复 3 次, 结果表示为平均数 $\pm$ 标准差。采用 SPSS Statistics 19.0 分析软件进行统计分析, 使用单因素方差分析(ANOVA), 采用 Duncan's 多重比较检验法进行显著性分析($P<0.05$); 采用 Origin 9.0 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维理化特性分析结果

对膳食纤维进行理化指标测定, 结果显示不同来源的 DF 理化性质有显著差异, 测定结果见表 1。鹰嘴豆 DF 的持水力、持油力最高, 分别为 $2.45, 1.97\text{ g}/\text{g}$ 。DF 的高持水力可以加快排便速度, 促进人体消化; 而 DF 保留油脂的能力在食品应用中可能很重要, 例如, 在烹饪方面

表 1 不同来源膳食纤维的理化特性[†]

Table 1 Physicochemical properties of different types of dietary fiber

样品	持水力/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	持油力/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	膨胀力/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)
鹰嘴豆 DF	2.45 ± 0.04^a	1.97 ± 0.04^a	
麦麸 DF	2.37 ± 0.08^a	1.80 ± 0.06^b	3.18 ± 0.06^a
大豆 DF	2.07 ± 0.05^b	1.87 ± 0.04^{ab}	1.46 ± 0.07^c
葡萄 DF	2.39 ± 0.03^a	1.95 ± 0.06^a	2.34 ± 0.05^b

[†] 同列肩标字母不同表示差异显著($P<0.05$); 表内空白代表未测定, 鹰嘴豆 DF 溶解性较强, 不具有溶胀性, 故无法测定。

可以防止脂肪流失^[19]; 在营养方面, 可以增强吸收或结合胆汁酸及其排泄的能力^[20]。Akhtar 等^[21]研究了鹰嘴豆壳多糖的物理化学、功能、结构等性质, 发现其持水力、持油力分别为 $(0.37 \pm 0.25), (3.46 \pm 0.31)\text{ g}/\text{g}$ 。麦麸膳食纤维的膨胀力为 $(3.18 \pm 0.06)\text{ mL}/\text{g}$, 显著高于葡萄 DF 和大豆 DF, 而鹰嘴豆膳食纤维溶解性较高, 不具有膨胀性。王崇队等^[22]研究了不同来源膳食纤维品质分析, 发现麦麸膳食纤维膨胀力为 $2.0\text{ mL}/\text{g}$ 左右。DF 的持水力、持油力和膨胀力的差异可能与粒径、孔隙率、电荷密度、比表面积和空间结构有关^[23]。

2.2 溶解性分析结果

溶解性是评价膳食纤维的重要指标之一, 其溶解性基本取决于样品的分子组成和结构^[24], 不同来源的膳食纤维其溶解性有一定的差异。试验测定了在不同温度下的溶解度, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 不同来源的 DF 溶解度随温度的升高而增加。当温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 鹰嘴豆 DF、葡萄 DF、麦麸 DF 和大豆 DF 的溶解度分别为 $0.032, 0.028, 0.028, 0.011\text{ g}/\text{mL}$ 。当温度为 $20\sim60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时鹰嘴豆 DF 和大豆 DF 的溶解度升高趋势相对缓慢, 在 $60\sim100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内溶解度升高趋势相对增加; 而葡萄 DF、麦麸 DF 升高趋势与之相反。当温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 鹰嘴豆 DF、麦麸 DF、葡萄 DF 和大豆 DF 的溶解度分别为 $0.054, 0.037, 0.036, 0.023\text{ g}/\text{mL}$ 。朱凤霞^[25]通过测定米糠膳食纤维的理化性质, 得到米糠 DF 在 $20, 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的溶解度分别为 $0.014, 0.026\text{ g}/\text{mL}$, 随着温度的升高, 溶解度趋势与葡萄 DF、麦麸 DF 相一致。溶解度随温度升高而增加的原因可能是热作用力破坏了纤维素多糖分子侧链间的氢键和离子键, 造成部分分子链断裂, 使分子质量降低, 溶解度提高^[26]。

2.3 粒径分析结果

采用 LS13320/ULM2 激光粒度仪测定膳食纤维的粒径, 以中位径 D_{50} 为试验指标。由表 2 和图 2 可知, 不同来源的 DF 粒径大小及分布有显著性差异, 可能与物

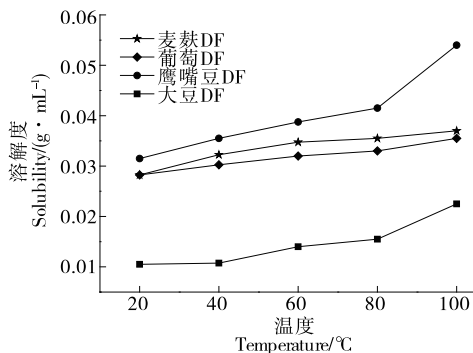


图 1 温度对不同来源膳食纤维溶解度的影响

Figure 1 Effect of temperature on the solubility of dietary fiber from different sources

表 2 不同来源膳食纤维粒径分布[†]

Table 2 Particle size distributions of dietary fiber from different sources

样品	$D_{50}/\mu\text{m}$
鹰嘴豆 DF	$2.56\pm 0.01^{\text{d}}$
麦麸 DF	$3.48\pm 0.01^{\text{a}}$
大豆 DF	$3.43\pm 0.01^{\text{b}}$
葡萄 DF	$3.00\pm 0.01^{\text{c}}$

[†] 同列肩标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

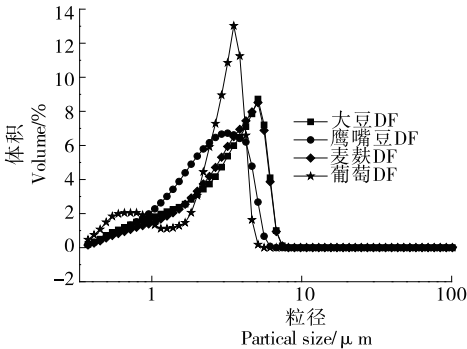


图 2 不同来源膳食纤维粒径分布情况

Figure 2 Particle size distributions of dietary fiber from different sources

质本身和提取方法有关。鹰嘴豆 DF 的粒径为 $2.56\ \mu\text{m}$ ，显著低于其他 3 种 DF，但粒径分布峰形较宽。麦麸 DF 与大豆 DF 的粒径分布情况基本一致。粒径的大小会影响 DF 的理化特性和功能特性，粒径减小，DF 亲水基团暴露较多，比表面积增大，使持水力、膨胀力均表现出增加的趋势；但若粒径进一步减小，则 DF 孔洞坍塌，网状结构被破坏，导致 DF 的持水力、膨胀力降低^[27]。

2.4 傅里叶变换红外光谱分析结果

红外光谱法是研究多糖类化合物结构的重要方法，利用红外光谱法能得到多糖类化合物分子的结构。由图 3 可以看出，不同来源样品几个主要的多糖特征吸收峰无明显变化。主要的几个多糖特征吸收峰与张艳莉等^[28]的研究结果相一致。 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 附近的宽峰是由于分子间与分子内氢键的形成而引起 O—H 的伸缩振动。鹰嘴豆 DF 在此处的吸收峰比其他几种更强，内部缔合状态的氢键更多；而大豆 DF 在此处的吸收峰较小，可能是因为提取方法导致纤维素分子之间的氢键断裂^[18]。 $2\ 930\ \text{cm}^{-1}$ 附近的峰是多糖亚甲基的 C—H 伸缩振动的吸收峰。 $1\ 630\ \text{cm}^{-1}$ 附近的峰是多糖分子中羰基的吸收峰，由 C=O 的伸缩振动产生的，说明样品中存在糖醛酸。 $1\ 200\sim 1\ 420\ \text{cm}^{-1}$ 范围内的峰是多糖的特征吸收峰，是由 C—H 的变角振动产生的。在 $1\ 154\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是醚键 C—O—C 的不对称伸缩振动引起的。在

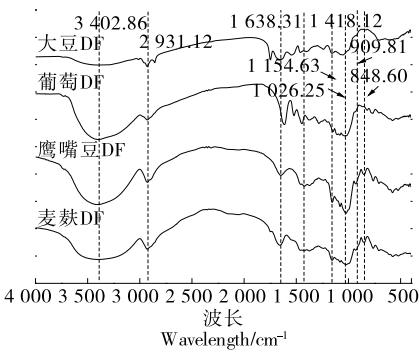


图 3 不同来源膳食纤维的红外光谱图

Figure 3 Fourier transform infrared of dietary fiber from different sources

$1\ 030\ \text{cm}^{-1}$ 存在吸收峰，可能是由两种 C—O 伸缩振动引起的，分别为 C—O—H 和糖环 C—O—C，或者由醇的 C—O 伸缩振动引起。 $900\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰是 β -吡喃糖 C—H 变角振动的特征吸收峰^[29]。

2.5 扫描电子显微镜分析结果

如图 4 所示，通过扫描电镜观察 4 种不同来源膳食纤维放大 500 倍的微观形貌图，发现不同来源的 DF 具有不同的形态结构。鹰嘴豆 DF 和葡萄 DF 多为形状不规则块状结构，颗粒不均一，且颗粒表面凹凸不平整，带有褶皱，褶皱是无规则的，鹰嘴豆 DF 颗粒表面凹凸程度比葡萄 DF 的大。大豆 DF 颗粒呈一定的片状、层状结构，颗粒表面的褶皱是无规则的，呈蜂窝状小孔，除纤维外还间杂少许颗粒物。麦麸 DF 颗粒聚集成一团，结构疏松，不规则形状。由于褶皱和蜂窝状小孔的存在使膳食纤维表面积更大，从而表现出更高的持水力和持油力。

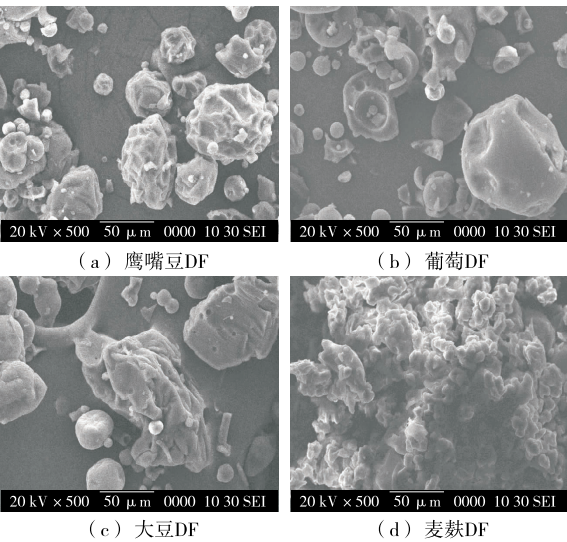


图 4 不同来源膳食纤维的扫描电镜

Figure 4 SEM images of dietary fiber from different sources

2.6 热特性分析结果

差式扫描量热仪(DSC)根据物质热变性过程的温度和能量的变化来研究物质结构稳定性和构象的变化^[30]。DSC 常常用来测蛋白的变性、淀粉的糊化和老化等研究,主要是基于温度变化产生的热效应。主要研究物质在吸热或放热变化过程中温度和焓值(ΔH)等,其能够使聚合物质从有序的结晶或部分有序的半结晶状态转变为完全无序的无定形态,克服分子间力需要吸收的能量或者破坏在交界区域氢键所需的能量^[31]。

从图 5 可以看出,根据起始温度(T_0)、最终温度(T_c)和峰值(T_p)判断这几种不同的膳食纤维具有不同的特征参数,通过峰面积的大小确定焓值(ΔH),焓值越

大,表示这种物质的热稳定性越好。A 谱图显示的是鹰嘴豆 DF 的 DSC 曲线,只有一个吸收峰,峰值表示了变性温度,从谱图上得到鹰嘴豆 DF 的变性温度为 207.64 °C,焓值为 42.63 J/g。麦麸 DF、大豆 DF、葡萄 DF 的变性温度分别为 203.74, 209.25, 165.18 °C;焓值分别为 118.60, 75.89, 51.73 J/g。峰值的差异可能与 DF 的氢键数量与类型有关,峰值越高,说明 DF 内的氢键数量更多,需要更多的能量来破坏 DF 中的晶体结构。鹰嘴豆 DF、麦麸 DF 和大豆 DF 的峰值差异并没有显著性差异,而 C 谱图上 DSC 的吸收峰峰形与其他 DF 峰形差异很大,可能是由葡萄 DF 的内部氢键数量较少和氢键种类的差异造成的。

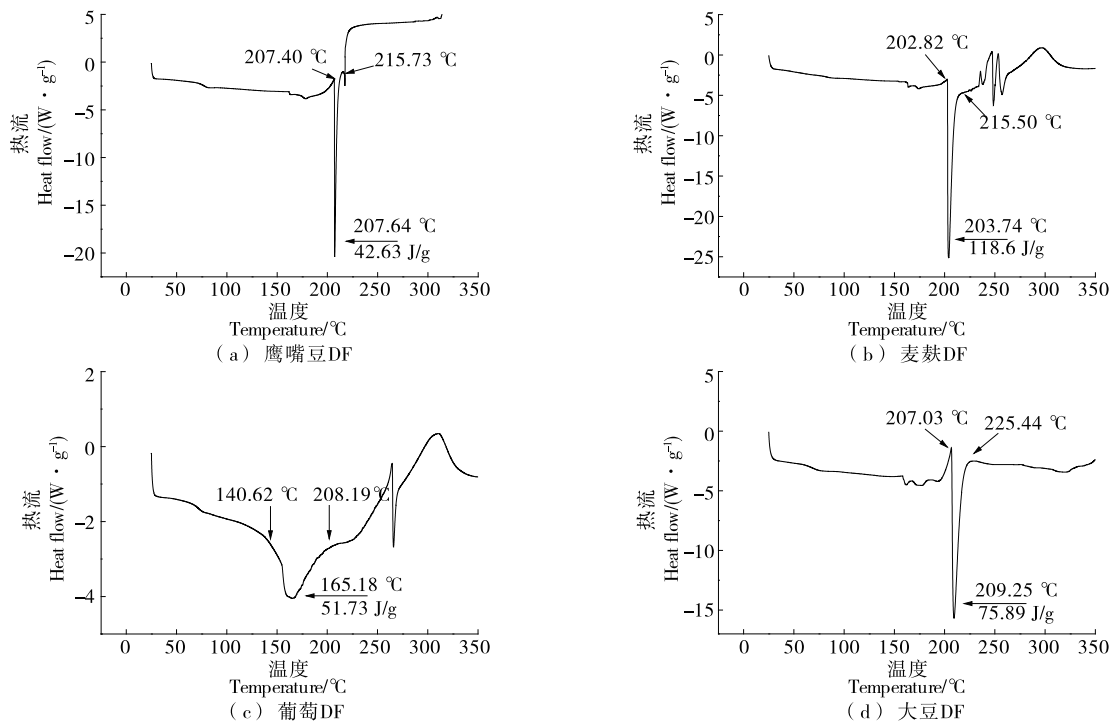


图 5 不同来源膳食纤维的差式扫描量热谱图

Figure 5 The thermal characteristic analysis of dietary fiber from different sources

3 结论

不同来源的膳食纤维在性质上有显著差别。通过对 4 种膳食纤维理化性质进行比较,结果发现鹰嘴豆膳食纤维有较好的持水性、持油性、溶解度和粒径,这些良好的特性使鹰嘴豆膳食纤维可以添加到肉制品、烘焙食品和酸奶制品中等。添加到肉制品中以增加保水、提高持水能力;有较好的溶解度,可以添加到酸奶中改善产品风味和质地;粒径小,表面积增加,添加到面包中,通过羟基与水的作用提高面包吸水性,使之松软可口,不易干硬。通过扫描电镜观察发现不同来源的膳食纤维具有不同的形态结构,而微观结构密切影响其性质。若膳食纤维存在褶皱或蜂窝状小孔,这就使膳食纤维表面积增大,从而表

现出更高的持水力和持油性。虽然膳食纤维的添加能更好地改善食品的风味、质地和营养价值,但其理化特性和功能特性对食品的质地和营养价值有何影响还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] JAROSŁAW W, MARCIN K. The application of dietary fiber in bread products[J]. Journal of Food Processing & Technology, 2015, 6(5): 1-4.
- [2] PEERAJIT P, CHIEWCHAN N, DEVAHASTIN S. Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fiber powder from lime residues[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1 891-1 898.

- [3] KHAN A R, ALAM S, ALI S, et al. Dietary fiber profile of food legumes[J]. Sarhad Journal of Agriculture, 2007, 23: 763-766.
- [4] MAGALHÃES S C, TAVEIRA M, CABRITA A R, et al. European marketable grain legume seeds: Further insight into phenolic compounds profiles[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 177-184.
- [5] GALISTEO M, DUARTE J, ZARZUELO A. Effects of dietary fibers on disturbances clustered in the metabolic syndrome[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2008, 19(2): 71-84.
- [6] YANG J K, CHIO M S, KIM C J, et al. Physiological function of insoluble dietary fiber prepared from exploded oak wood (*Quercus mongolica*) [J]. American Journal of Chinese Medicine, 2006, 34(1): 87-97.
- [7] 许晖, 孙兰萍, 张斌. 酶解法制备米糠膳食纤维[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(4): 117-120.
- [8] 李伦, 张晖, 王兴国, 等. 超微粉碎对脱脂米糠膳食纤维理化特性及组成成分的影响[J]. 中国油脂, 2009, 34(2): 56-59.
- [9] BAZZANO L A. Effects of soluble dietary fiber on low-density lipoprotein cholesterol and coronary heart disease risk[J]. Current Atherosclerosis Reports, 2008, 10(6): 473-477.
- [10] FERNANDEZ M L. Soluble fiber and nondigestible carbohydrate effects on plasma lipids and cardiovascular risk[J]. Current Opinion in Lipidology, 2001, 12(1): 35-40.
- [11] RAGHAVENDRA S, SWAMY S R, RASTOGI N, et al. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(3): 281-286.
- [12] 祁静. 高吸附性米糠纤维的制备及其吸附特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 6.
- [13] 钟艳萍. 水溶性膳食纤维的制备及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 6.
- [14] 刘楠, 孙永, 李月欣, 等. 膳食纤维的理化性质、生理功能及其应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015(10): 3 959-3 963.
- [15] SOWBHAGYA H B, SUMA P F, MAHADEVAMMA S, et al. Spent residue from cumin - A potential source of dietary fiber[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1 220-1 225.
- [16] 曾蓓蓓, 常锦玉, 吕庆云, 等. 黑糯米米糠中水不溶膳食纤维功能特性研究[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(6): 51-55.
- [17] 刘锐雯. 木薯膳食纤维的提取工艺及理化性质的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014: 25.
- [18] WEN Ya, NIU Meng, ZHANG Bin-jia, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 344-351.
- [19] BROWNLEE I A. The physiological roles of dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 25(2): 238-250.
- [20] SCHNEEMAN B O. Fiber, inulin and oligofructose: Similarities and differences[J]. Journal of Nutrition, 1999, 129(7): 1 424S-1 427S.
- [21] AKHTAR H M S, ABDIN M, HAMED Y S, et al. Physicochemical, functional, structural, thermal characterization and α -amylase inhibition of polysaccharides from chickpea (*Cicer arietinum* L.) hulls [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108265.
- [22] 王崇队, 张明, 杨立凤, 等. 不同来源膳食纤维品质分析及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(5): 78-83.
- [23] 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.
- [24] NILE S H, PARK S W. Total, soluble, and insoluble dietary fiber contents of wild growing edible mushrooms[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2014, 32(3): 302-307.
- [25] 朱凤霞. 米糠水溶性膳食纤维的优化提取及功效特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015: 26-27.
- [26] DAOU C, ZHANG Hui. Physicochemical properties and antioxidant activities of dietary fiber derived from defatted rice bran[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2011, 3(5): 339-347.
- [27] RAGHAVENDRA S N, RASTOGI N K, RAGHAVARAO K S M S, et al. Dietary fiber from coconut residue: Effects of different treatments and particle size on the hydration properties[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(6): 563-567.
- [28] 张艳莉, 王颖, 王迪, 等. 芸豆渣膳食纤维超声辅助酶法提取工艺优化及特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 201-205.
- [29] 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.
- [30] LAZARIDOU A, BILIADERIS C G, IZYDORCZYK M S. Molecular size effects on rheological properties of oat β -glucans in solution and gels[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(5): 693-712.
- [31] LAZARIDOU A, BILIADERIS C G, MICHA-SCRETTAS M, et al. A comparative study on structure function relations of mixed-linkage (1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 4) linear β -D-glucans[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(5): 837-855.