

改性红薯叶不溶性膳食纤维的特性比较

王译晗¹, 刘荣^{1,2*}, 竹娟¹, 陈立莉¹, 曲文鑫¹

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

(2. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 该文研究了以红薯叶为原料提取红薯叶不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF), 并采用物理粉碎法、酸法、碱-过氧化氢法、纤维素酶法对其进行改性, 通过对改性处理后的样品进行表征分析及理化性质的变化的研究, 探究不同改性处理对其微观形貌、化学结构、晶相结构及功能特性的影响。扫描电子显微镜 (SEM) 结果显示改性处理改变了红薯叶 IDF 的微观结构; 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 结果显示化学结构无明显变化; 比表面积 (BET) 结果显示改性前后红薯叶 IDF 比表面积有一定影响。X 射线衍射 (XRD) 结果显示改性前后的特征衍射峰位置基本未发生改变。改性操作提高了不溶性膳食纤维的阳离子吸附能力 (CEC) 和负电荷吸附能力 (TNC) 分别提升 0.31~2.86、0.75~2.88 倍, 以酸改性的 SIDF3 表现出最强的持水力 (WHC)、膨胀力 (SC)、葡萄糖吸附能力 (GAC), 相较于未改性的 SIDF1 分别提升了 0.34、4.33、0.16~0.39 倍; 以酶改性的 SIDF5 的特油力 (OHC) 最强, 相较于未改性的 SIDF1 提升了 0.24 倍。研究结果表明对红薯叶进行不同改性处理可以改变其性质和功能特性, 为进一步应用红薯叶不溶性膳食纤维提供了基础。

关键词: 红薯叶; 不溶性膳食纤维; 改性

文章编号: 1673-9078(2024)07-128-136

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.7.0885

Properties of Insoluble Dietary Fibers from Sweet Potato Leaves before and after Modification

WANG Yihan¹, LIU Rong^{1,2*}, ZHU Juan¹, CHEN Lili¹, QU Wenxin¹

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

(2. Key Laboratory of Forest Food Resource Utilization of Heilongjiang Provincial, Harbin 150040, China)

Abstract: Insoluble dietary fibers (IDFs) were extracted from sweet potato leaves and modified by physical crushing or using an acid, alkali-hydrogen peroxide, and cellulases. The modified samples were characterized, and changes in their physical and chemical properties were evaluated. The effects of different modification treatments on the micromorphology, chemical structure, crystal phase structure, and functional properties were investigated. Scanning electron microscopy showed that the microstructure of IDF in sweet potato leaves was altered by the different treatments. Fourier transform infrared spectroscopy suggested no obvious changes in the chemical structure. Additionally, the specific surface areas of IDFs in sweet potato leaves before and after modification varied. X-ray diffraction analysis indicated that the positions of

引文格式:

王译晗, 刘荣, 竹娟, 等. 改性红薯叶不溶性膳食纤维的特性比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 128-136.

WANG Yihan, LIU Rong, ZHU Juan, et al. Properties of insoluble dietary fibers from sweet potato leaves before and after modification [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 128-136.

收稿日期: 2023-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500307-07)

作者简介: 王译晗 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1412079053@qq.com

通讯作者: 刘荣 (1971-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品营养与功能性食品, E-mail: lrwxh123@163.com

characteristic diffraction peaks were mostly unchanged before and after modification. The cation exchange capacity and total negative charge of IDFs increased by 0.31~2.86- and 0.75~2.88-fold, respectively. Acid-modified SIDF3 showed the highest water-holding, swelling, and glucose adsorption capacities, which were 0.34, 4.33, and 0.16~0.39-fold higher than those of unmodified SIDF1, respectively. The oil-holding capacity of enzyme-modified SIDF5 was the highest, 0.24-fold higher than that of unmodified SIDF1. The results demonstrated that the properties and functional properties of sweet potato leaves can be altered by different modification treatments, providing a basis for further application of insoluble dietary fibers in sweet potato leaves.

Key words: sweet potato leaf; insoluble dietary fiber; modification

在1953年,新术语“膳食纤维”被定义为构成但不可被人体消化利用的碳水化合物总和^[1]。随着饮食越来越精细和动物性食品的占比增加,人们摄入的膳食纤维不足,这导致了一系列健康问题的出现^[2]。因此,研究膳食纤维对健康的好处变得非常重要。红薯叶(Sweet Potato Leaves)富含丰富的膳食纤维,是主要粮食作物红薯的副产品。然而,传统上红薯叶被用作饲料或肥料,未被充分利用。近年来,一些研究报道指出红薯叶是膳食纤维的丰富来源,因此提取红薯叶中的不溶性膳食纤维,并对其改性处理,对于膳食纤维在食品市场的应用具有一定意义^[3-5]。不溶性膳食纤维(IDF)是红薯叶中主要的膳食纤维成分,然而,目前对于红薯叶中IDF的开发程度还不够充分。因此,开发改性的红薯叶IDF以获得更优质的生物活性变得重要。

物理改性方法如超高压处理增加了果渣IDF孔隙度,显著提高果渣IDF的持水、持油和膨胀力^[6],使其在食品工业中作为增稠剂、保湿剂更具应用潜力,化学改性方法如酸法可提升结晶度增强稳定,使麦麸IDF的持水性、膨胀力、持油力和阳离子交换能力提高^[7],其在食品工业中作为稳定剂、吸附剂等方面有更广泛的应用,生物改性方法如酶法可以显著提高姜渣IDF的持水、持油和膨胀能力且具备降脂功效^[8],与未改性的姜渣IDF相比改性后显著增大其比表面积、暴露更多亲水官能团,在食品加工中作为增稠剂、功能性成分方面有潜在应用,组合改性是将不同的改性手段结合使用,例如沙棘IDF经过球磨和纤维素酶处理得到共改性沙棘IDF,因改性操作使其粒度更小结构更松散,显著增强了其对葡萄糖吸附、葡萄糖扩散抑制、淀粉消化抑制、淀粉糊化干扰和 α -淀粉酶活性抑制的作用^[9],在消化抑制、酶活性抑制有良好应用前景。

全面了解改性条件对红薯叶IDF的影响,包括功能、物理和结构特性,对于提高其潜在应用场

景具有重要意义。因此,本实验采用四种改性方法对SIDF纤维进行修饰,并通过扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和比表面积(BET)等分析手段对红薯叶IDF进行表征。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

材料:自然晾晒干燥的红薯叶片(中国河南省濮阳市)经粉碎机粉碎后过40目筛;鲁花葵花籽油;鸡蛋。

试剂:盐酸、硫酸、氢氧化钠、苯酚、30%过氧化氢、氯化钠、无水乙醇、冰乙酸、邻苯二甲醛、酚酞,均为分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;中性蛋白酶、 α -淀粉酶,上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

PHS-3E型pH计,上海佑科仪器仪表有限公司;DHG-9240型电热鼓风干燥箱,上海一恒仪器有限责任公司;RT-6000型酶标仪,深圳雷杜生命科学有限公司;FW100型高速粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;TGL-16C型台式离心机,上海安亭科学仪器厂;FTIR-650型傅里叶变换红外光谱仪,天津港东科技发展股份有限公司;MiniFlex 600型X射线粉末衍射仪,日本株式会社理学;JW-BK200型高性能比表面积及孔径分析仪,北京精微高博仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 红薯叶不溶性膳食纤维的提取

取30g红薯叶粉末,按照质量分数0.4%的比例添加 α -淀粉酶,料液比1:25(g/mL)加入蒸馏水以稀盐酸调节pH值为6.5,60℃恒温水浴85min后,沸水浴3min灭酶,冷却以0.1mol/L的氢氧化

钠溶液调整至中性后加入按照质量分数 0.4% 的比例加入中性蛋白酶, 45 °C 恒温水浴 75 min 后, 沸水浴三分钟灭酶, 冷却后进行抽滤并用蒸馏水进行洗涤直至滴落的水呈无色, 转入烘箱 30 °C 烘干备用记作 SIDF1。

1.3.2 改性红薯叶不溶性膳食纤维的制备

1.3.2.1 粉碎改性

将干燥好的红薯叶不溶性膳食纤维放入小型高速万能粉碎机中, 约占其容积 1/2, 进行粉碎, 粉碎过程中每粉碎 15 s 需暂停 10 s, 使发电机散热以防止膳食纤维热变性同时减少损失, 持续粉碎直至物料均通过 100 目筛, 记作 SIDF2。

1.3.2.2 盐酸改性

调配稀盐酸溶液 pH 值为 1, 准确称量 10 g 红薯叶不溶性膳食纤维, 料液比 1:20 (g/mL), 于 70 °C 水浴锅中加热 120 min。加热完毕后, 进行抽滤用蒸馏水洗至中性, 烘箱 30 °C 烘干, 记作 SIDF3。

1.3.2.3 碱-过氧化氢改性

将 30% 过氧化氢稀释至 10%, 用氢氧化钠溶液调节 pH 值为 10, 准确称量 10 g 红薯叶不溶性膳食纤维, 料液比 1:25 (g/mL), 常温下磁力搅拌 120 min, 间断对其进行搅拌, 防止泡沫溢出, 造成损失, 搅拌完毕后, 进行抽滤用蒸馏水洗至中性, 烘箱 30 °C 烘干, 记作 SIDF4。

1.3.2.4 纤维素酶改性

用稀盐酸调节溶液 pH 值为 5, 准确称量 10 g 红薯叶不溶性膳食纤维, 添加 0.2 g 400 U/mg 纤维素酶, 于 50 °C 水浴锅中加热 120 min, 加热完毕后, 进行抽滤用蒸馏水洗至中性, 烘箱 30 °C 烘干, 记作 SIDF5。

1.3.3 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维的表征

1.3.3.1 扫描电镜测定 (SEM)

参考 Li 等^[10]试验方法并作出一定修改, 喷金处理后将待测样品放于双面胶带上, 以 10.00 kV 的加速电压于扫描电镜观察台上收集图像, 放大倍数为 600、2 400、5 000 倍。

1.3.3.2 傅里叶红外光谱测定 (FT-IR)

参考 Li 等^[10]试验方法并作出一定修改, 称取 1 mg 待测样品与 100 mg 溴化钾 (KBr) 混匀研磨, 利用压片机压片备用。以 4 000~400 cm⁻¹ 进行扫描, 光谱分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描次数设置 64 次。

1.3.3.3 比表面积测定 (BET)

参考 Zhao 等^[11]试验方法并作出一定修改, 称

取 0.5~1.0 g 干燥的待测样品置于测定所用的样品室, 环境温度为 25 °C, 在 110 °C 的真空条件下脱气 6 h, 吸附质为 N₂, 吸附温度为 77 K, 测量比表面积。

1.3.3.4 X射线衍射测定 (XRD)

参考 Yang 等^[12]试验方法并作出一定修改, 称取 0.1~0.2 g 干燥的待测样品置于测定所用的样品室, 并利用钢片将其压实, 随后进行测定。参数设置为工作电流: 30 mA; 工作电压: 30 kV; 靶: Cu-Kα; 步长: 0.02°; 起始角: 10°; 终止角: 80°; 扫描速度: 10 °/min; 采用连续性扫描方式。

1.3.4 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维物理性质测定

1.3.4.1 持水力 (WHC)

参考 Feng 等^[13]的方法, 测定持水力。准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.000 g, 置于 100 mL 离心管中, 加入 80 mL 蒸馏水, 搅拌均匀后放入 37 °C 水浴锅中水浴加热 2 h, 4 000 r/min 离心 20 min, 弃去上清液, 并使用裁剪成细长条的滤纸擦拭其内壁水渍与膳食纤维表面上残余蒸馏水, 称重其质量记作 m₂, 通过公式计算其持水力。

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (1)$$

式中:

A——持水力 (WHC), g/g;

m₁——样品质量, g;

m₂——样品吸水后质量, g。

1.3.4.2 持油力 (OHC)

参考 Feng 等^[13]的方法, 准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.000 g 置于 100 mL 离心管中, 加入 80 mL 葵花籽油, 搅拌均匀, 放置 2 h 后, 4 000 r/min 离心 20 min, 弃去上层油, 并使用裁剪成细长条的滤纸擦拭其内壁油渍与膳食纤维上残余食用油, 反复擦拭直至无明显油膜感称重得 m₂, 通过公式计算其持油力。

$$B = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (2)$$

式中:

B——持油力 (OHC), g/g;

m₁——样品质量, g;

m₂——样品吸油后质量, g。

1.3.4.3 膨胀力 (SC)

参考 Li 等^[14]的方法并加以修改测定膨胀力。准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.000 g, 置

于具塞试管中, 加入 20 mL 蒸馏水, 搅拌均匀, 静置后读取其体积记作 V_1 , 24 h 后再次读取其体积记作 V_2 , 通过公式计算其膨胀力。

$$C = \frac{V_2 - V_1}{m_1} \quad (3)$$

式中:

C —膨胀力 (SC), g/g;

m_1 —样品质量, g;

V_1 —样品吸水前体积和水的体积, mL;

V_2 —样品吸水后体积和水的体积, mL。

1.3.4.4 阳离子吸附能力 (CEC)

参考 He 等^[15]描述的方法测定阳离子吸附能力。准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.000 g, 放置于 100 mL 锥形瓶中, 加入 50 mL 标定过的 0.1 mol/L 的 HCl 溶液混合, 室温下放置 24 h 后过滤, 将残渣放置于烧杯中再加入 40 mL 0.5 mol/L NaCl 溶液混合, 磁力搅拌器搅拌 45 min 后, 用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液进行滴定, 消耗的 NaOH 溶液的体积记为 V_1 , 空白实验中使用蒸馏水替换 HCl 溶液, 消耗的 NaOH 溶液的体积记为 V_0 , 通过公式计算其阳离子吸附能力。

$$D = \frac{(V_1 - V_0) \times 0.1}{m_1} \quad (4)$$

式中:

D —阳离子吸附能力 (CEC), mmol/g;

m_1 —样品质量, g;

V_1 —样品所消耗氢氧化钠溶液体积, mL;

V_0 —空白所消耗氢氧化钠溶液体积, mL。

1.3.4.5 负电荷吸附能力 (TNC)

参考 Wang 等^[16]的方法测定负电荷吸附能力。准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.000 g, 放置于 100 mL 锥形瓶中, 加入 50 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液混合, 室温下静置 24 h 后过滤, 将残渣放置于烧杯中再加入 40 mL 0.5 mol/L NaCl 溶液混合, 磁力搅拌器搅拌 45 min 后。用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液进行测定。空白实验中使用蒸馏水替换氢氧化钠溶液, 消耗的 HCl 溶液的体积记为 V_0 , 通过公式计算其负电荷吸附能力。

$$E = \frac{(V_1 - V_0) \times 0.1}{m_1} \quad (5)$$

式中:

E —负电荷吸附能力 (TNC), mmol/g;

m_1 —样品质量, g;

V_1 —样品所消耗 HCl 溶液体积, mL;

V_0 —空白所消耗 HCl 溶液体积, mL。

1.3.5 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维功能性质测定

1.3.5.1 葡萄糖吸附能力 (GAC)

准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.00 g, 分别置于 25 mL 不同浓度 5、10、50 mmol/L 的葡萄糖溶液中, 吸附前葡萄糖溶液浓度记为 g_1 , 搅拌均匀, 在 37 °C 水浴恒温孵育 6 h。吸附平衡后, 将混合物置于离心管中以 3 800 r/min 离心 20 min 后取 1 mL 上清液, 并利用苯酚-硫酸法测定葡萄糖浓度。

$$F = \frac{g_1 - g_2}{m_1} \times V \quad (6)$$

式中:

F —葡萄糖吸附能力 (GAC), mmol/g;

m_1 —样品质量, g;

g_1 —配置溶液的葡萄糖浓度, mmol/L;

g_2 —吸附后溶液葡萄糖浓度, mmol/L;

V —溶液体积, mL。

1.3.5.2 胆固醇吸附能力 (CAC)

取用四个新鲜鸡蛋的蛋黄用蒸馏水稀释至十倍, 搅拌至完全乳化, 分别调节 pH 值为 2 和 pH 值为 7。准确称取改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 1.000 g 与分别于 25 mL pH 值为 2 和 pH 值为 7 蛋黄乳液混合。然后在 37 °C 下反应 1 h。将混合物以 5 800 r/min 离心 30 min 后, 用邻苯二甲醛法测算 1 mL 上清液中胆固醇含量, 胆固醇吸附能力通过公式计算胆固醇吸附能力。

$$G = \frac{C_1 - C_2}{m_1} \quad (7)$$

式中:

G —胆固醇吸附能力 (CAC), mg/g;

m_1 —样品质量, g;

C_1 —吸附前胆固醇的含量, mg;

C_2 —吸附后胆固醇的含量, mg。

1.4 数据分析

每个样品进行至少 3 次重复实验, 并取平均值表示结果, 使用 (平均值 ± 标准差) 进行表示。数据处理和显著性分析使用 SPSS 23.0 软件, 当 $P < 0.05$ 时认为差异显著。绘图使用 OriginPro 2021 软件, 结晶度计算采用 jade 6.5 软件。

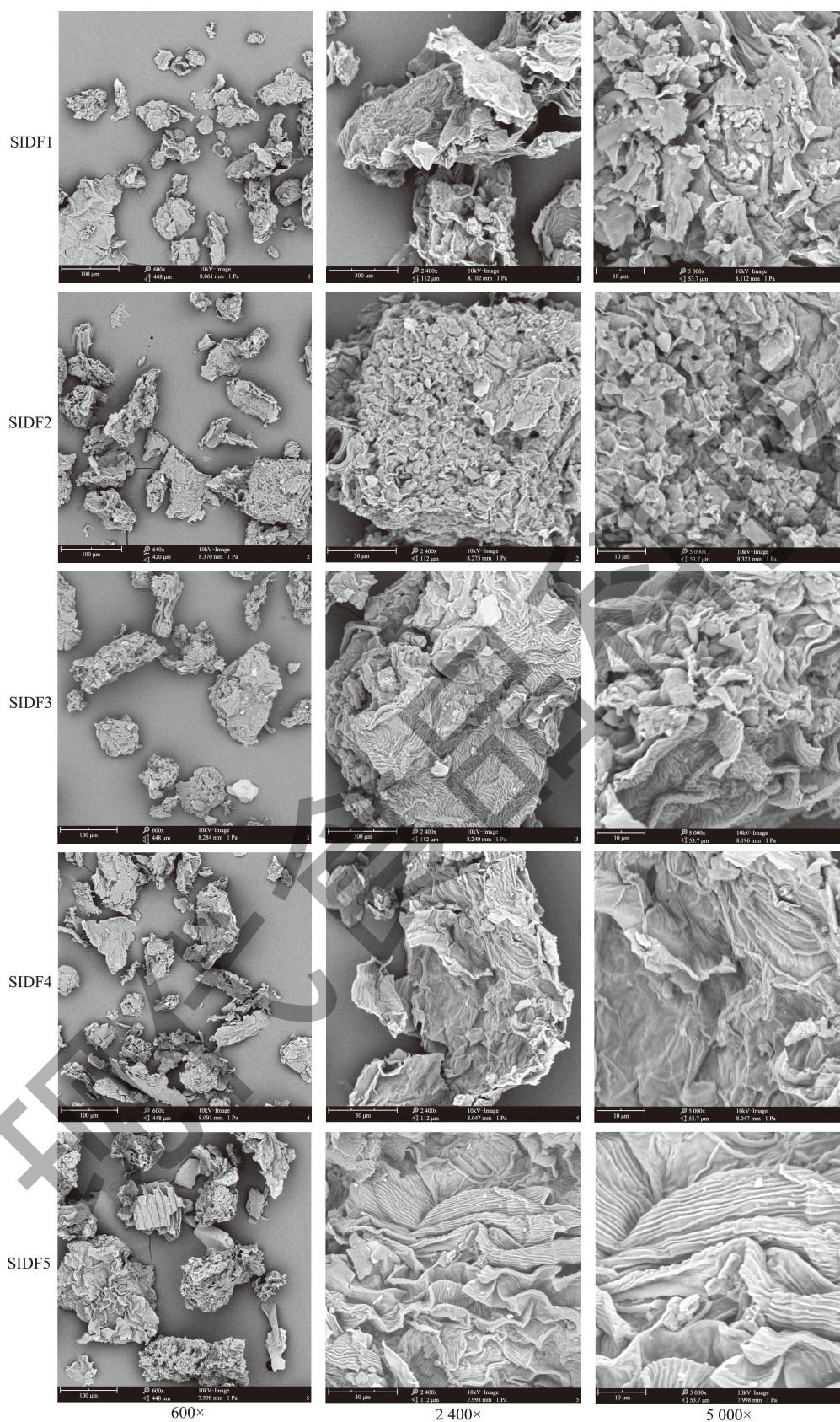


图1 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维扫描电子显微镜图

Fig.1 Scanning electron microscopy of insoluble dietary fiber in sweet potato leaves before and after modification

注：SIDF1 为未改性红薯叶 IDF，SIDF2 为粉碎改性红薯叶 IDF，SIDF3 为酸法改性红薯叶 IDF，SIDF4 为碱-过氧化氢改性红薯叶 IDF，SIDF5 为纤维素改性红薯叶 IDF。下同。

2 结果与分析

2.1 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维结构表征

2.1.1 扫描电镜结果分析

不同改性处理前后的 SIDF 纤维扫描电镜结果如图 1 所示, 其中 SIDF3 经酸法改性后的膳食纤维表面褶皱最多, 比表面积增大, 基团暴露可能性增加, 故对于葡萄糖分子的吸附能力较强; SIDF2 经粉碎处理后, 表面略显平滑呈现碎片化堆叠状态, 破坏了膳食纤维基本网状结构, 比表面积增加较小; SIDF4 经碱-过氧化氢处理, 出现明显裂纹与沟壑这可能需归因为碱-过氧化氢会降解膳食纤维中的木质素等物质; SIDF5 经纤维素酶处理改性后, 其中纤维素半纤维素大量降解, 网状结构基本转变为束状结构。红薯叶膳食纤维的结构发生改变, 其生理功能也发生一定变化^[17]。

2.1.2 傅里叶红外光谱测定结果分析

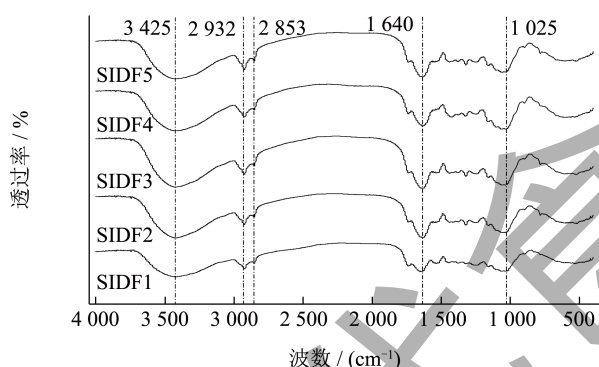


图 2 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维傅里叶红外光谱图
Fig.2 Fourier infrared spectroscopy of insoluble dietary fiber in sweet potato leaves before and after modification

分子中的官能团和化学键在不同波长的红外光下发生振动吸收, 故红外光谱可通过利用吸收峰位置和强弱变化判断官能团和化学键的变化。如图 2 所示, 改性前后红薯叶 IDF 具有典型的碳水化合物的吸收峰, 谱带 1025 cm^{-1} 处为木质素或半纤维素中醚键 (C-O-C) 伸缩振动吸收峰, 谱带 1640 cm^{-1} 所形成的吸收峰对应纤维素与半纤维素中羧基 (C=O) 伸缩振动吸收峰, 谱带 2932 cm^{-1} 较小的吸收峰由甲基 (-CH₃)、亚甲基 (=CH₂) 或碳氢键 (C-H) 振动拉伸引起, 谱带 3425 cm^{-1} 处较宽吸收峰主要归因于纤维素和半纤维素中羟基 (-OH) 的伸缩振动^[18,19]。红外光谱中的特征吸收峰增强且峰面积增

大, 但未观察到明显变化。这表明不溶性膳食纤维在改性过程中, 暴露的官能团数量增加, 但未引入新的化学基团。同时, 四种改性方法都使纤维结构更加松散。此外, 膳食纤维的结晶度可能发生变化, 进一步增强了特征吸收峰的强度。

2.1.3 比表面积测定结果分析

不同改性方法对红薯叶 IDF 的比表面积产生了影响。改性前后红薯叶 IDF 比表面积如表 1 所示。SIDF5 的比表面积最大为 $1.726\text{ m}^2/\text{g}$, 其后依次是 SIDF3、SIDF1、SIDF2 和 SIDF4, 比表面积分别为 1.583 、 1.024 、 0.929 和 $0.703\text{ m}^2/\text{g}$ 。这可能是由于酶法改性导致 IDF 中的大分子物质解聚^[18], 微观结构发生变化, 纤维素酶使得致密的网格状结构松散, 从而增大比表面积。酸法改性水解了纤维素交联的淀粉和少量半纤维素、木质素, 导致蚀刻现象和条状纤维骨架的暴露^[20], 进一步增大比表面积。未改性的红薯叶 IDF, 经粉碎处理后, 粒度减小可能导致孔洞坍塌, 从而减小比表面积, 同时持水性、持油性和膨胀力也降低。过氧化氢在碱性条件下的作用更强, 有效降解木质素和少量纤维素, 破坏了纤维骨架, 形成较大的蜂窝状结构, 导致比表面积减小^[21]。

表 1 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维比表面积分析

Table 1 Analysis of specific surface area of insoluble dietary fiber in sweet potato leaves before and after modification

名称	BET 比表面积 (m^2/g)	孔径体积 (cm^3/g)	吸附平均孔径 /nm
SIDF1	1.024	0.003	12.581
SIDF2	0.929	0.003	15.031
SIDF3	1.583	0.004	12.259
SIDF4	0.703	0.003	14.109
SIDF5	1.726	0.005	11.509

2.1.4 X射线衍射结果分析

X 射线衍射可通过不同的衍射角以对应相应的晶体结构^[22], 故利用其表征改性操作对 SIDF 结晶状态的影响。如图 3 所示, 在 $2\theta=15^\circ$ 、 $2\theta=21^\circ$ 处有强衍射峰, 表明包含双螺旋结构 I 型天然纤维素的结晶区以及部分非结晶纤维素、半纤维素和木质素组成的非洁净区^[23], 表明改性操作未改变其纤维素晶体构型, 但衍射强度发生一定改变, 结晶度分别为 29.41% 、 20.67% 、 49.46% 、 37.50% 、 26.47% 。

表 2 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维物理指标分析

Table 2 Analysis of physical indicators of insoluble dietary fiber in sweet potato leaves before and after modification

名称	WHC/(g/g)	OHC/(g/g)	SC/(g/g)	CEC/(mmol/g)	TNC/(mmol/g)
SIDF1	10.54 ± 0.37 ^c	5.14 ± 0.54 ^b	1.48 ± 0.63 ^d	3.36 ± 0.64 ^d	1.22 ± 0.13 ^d
SIDF2	8.18 ± 0.85 ^d	3.98 ± 0.95 ^{bc}	2.66 ± 0.44 ^c	4.43 ± 0.34 ^c	4.73 ± 0.25 ^a
SIDF3	14.16 ± 0.39 ^a	5.58 ± 0.73 ^b	7.89 ± 0.52 ^a	8.97 ± 0.27 ^b	3.26 ± 0.19 ^b
SIDF4	11.75 ± 0.63 ^b	3.73 ± 0.12 ^c	2.31 ± 0.85 ^{cd}	9.89 ± 0.85 ^b	2.14 ± 0.37 ^c
SIDF5	9.58 ± 0.22 ^c	6.39 ± 0.37 ^a	5.42 ± 0.26 ^b	12.97 ± 0.38 ^a	2.92 ± 0.53 ^b

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

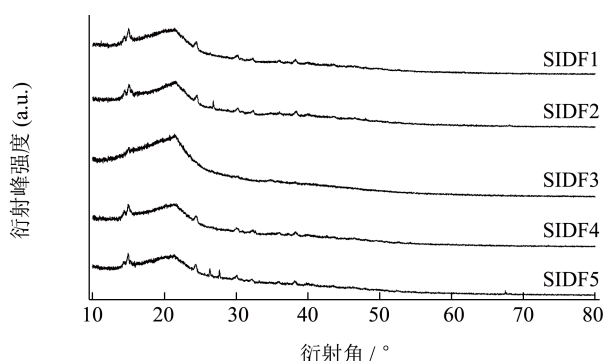


图 3 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维 X 射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction of insoluble dietary fiber in sweet potato leaves before and after modification

2.2 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维物理性质分析

持水力、持油力、膨胀力都是考察 IDF 品质的重要指标, 持水力一般与亲水基团的数量、比表面积、粒径、结构相关, IDF 的持水力有助于食品中水分的保留, 适量添加对食品的风味与外观都有一定帮助, 如表 2 所示, 未改性的 SIDF1 持水力为 10.54 g/g, 粉碎改性的 SIDF2、酶法改性的 SIDF5 持水力分别下降 0.22、0.09 倍, 酸法改性的 SIDF3、碱-过氧化氢改性的 SIDF4 分别提升了 0.34、0.11 倍; 持油力与 IDF 亲油性、比表面积、木质素含量相关, IDF 的持油力可大大改善食品的物性, 抑制油脂氧化, 延长货架期, SIDF1 持油力为 5.14 g/g, SIDF2、4 分别下降了 0.22、0.27 倍, SIDF3、5 分别提升了 0.08、0.25 倍。Yan 等^[24]研究过程中发现碱与过氧化氢的协同作用下可以去除草本中的木质素, 且不溶性膳食纤维持油力与木质素含量正相关^[25], 因此 SIDF4 的持油力下降; 膨胀力也称溶胀力与空间结构、氢键数量相关, IDF 的膨胀力可有效预防肥胖, 增加排便次数^[26,27], 与 SIDF1 膨胀力为 1.48 g/g, 与其相比 SIDF2、3、4、5 分别提高了 0.80、4.33、0.56、2.66 倍。

改性操作会破坏 IDF 中糖苷键等共价键, 使得暴露更多官能团。阳离子吸附能力、负电荷吸附能力与官能团有关 (如氨基、羟基、羧基) 将对以钠离子与氯离子 (Na^+ 、 Cl^-) 为主要代表的阳离子与阴离子产生吸附作用, 可适度降低其浓度, 排出体外, 减少机体对其吸收利用, 与未改性的 SIDF1 相比, 改性后的样品 SIDF2、3、4、5, 阳离子吸附能力分别提升了 0.31、1.66、1.93、2.86 倍; 负电荷吸附能力分别提升了 2.88、1.67、0.75、1.39 倍。

改性前后红薯叶膳食纤维在 WHC、OHC、SC、CEC 和 TNC 方面表现出差异。SIDF3 在持水力、膨胀力和阳离子交换能力方面表现出最佳的性能。SIDF5 在持油力和负电荷吸附能力方面表现出较好的性能。SIDF2 在这些指标中表现较差, Feng 等^[13]也得出随着粒径的减小, 研磨粉碎处理破坏了结构完整性会导致持水力、持油力降低。

2.3 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维功能性分析

2.3.1 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维葡萄糖吸附能力分析

IDF 具有体外降血糖的功效主要是暴露出的官能团与其吸附特性, 对于葡萄糖有一定吸附能力, 可减缓机体对葡萄糖的吸收^[28]。如表 3 所示, 四种改性方法均显著提高对葡萄糖分子的吸附能力, 葡萄糖浓度为 5 mmol/L 时, SIDF2、3、4、5 提升了 0.26、0.33、0.18、0.32 倍; 葡萄糖浓度为 10 mmol/L 时改性后分别提升了 0.08、0.16、0.03、0.08 倍; 葡萄糖浓度为 50 mmol 时改性后分别提升了 0.27、0.39、0.13、0.23 倍。

不同浓度的葡萄糖浓度下, 表现出不同吸附力^[19]。IDF 的较高持水力和膨胀力有助于将葡萄糖分子吸附嵌入于其空隙中并排出体外, SIDF3 经酸法改性的 IDF 对葡萄糖表现出最高的吸附能力, 可

能由于其褶皱较多且稀疏多孔的结构导致的。

表 3 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维葡萄糖吸附能力

Table 3 Glucose adsorption capacity of insoluble dietary fiber in sweet potato leaves before and after modification

名称	5 mmol	10 mmol	50 mmol
SIDF1	3.52 ± 0.35 ^c	7.49 ± 0.42 ^c	25.51 ± 0.46 ^d
SIDF2	4.45 ± 0.15 ^{ab}	8.09 ± 0.73 ^a	32.57 ± 0.25 ^b
SIDF3	4.69 ± 0.24 ^{ab}	8.70 ± 0.19 ^b	35.59 ± 0.57 ^a
SIDF4	4.16 ± 0.16 ^b	7.73 ± 0.21 ^{bc}	29.04 ± 0.86 ^c
SIDF5	4.68 ± 0.86 ^{ab}	8.16 ± 0.16 ^b	31.49 ± 0.47 ^b

2.3.2 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维胆固醇吸附能力分析

表 4 改性前后红薯叶不溶性膳食纤维胆固醇吸附能力

Table 4 Adsorption capacity of insoluble dietary fiber cholesterol in sweet potato leaves before and after modification

名称	pH 值 2	pH 值 7
SIDF1	7.24 ± 0.46 ^c	18.48 ± 0.24 ^c
SIDF2	23.35 ± 0.25 ^c	53.49 ± 0.42 ^c
SIDF3	25.31 ± 0.33 ^a	58.30 ± 0.39 ^a
SIDF4	13.47 ± 0.20 ^d	31.45 ± 0.24 ^d
SIDF5	24.16 ± 0.45 ^b	54.56 ± 0.23 ^b

胆固醇过高可增加罹患冠心病、动脉硬化、血栓的风险,研究表明 IDF 胆固醇的吸附能力可有效减少胆固醇的吸收^[29]。如表 4 所示,在模拟小肠 pH 值的情况下, IDF 对胆固醇的吸附能力更强,主要原因可能是,在氢离子较多的酸性条件下,氢离子附着于 IDF 表面,于携带正电荷的胆固醇相排斥,从而导致吸附量的降低。四种改性方法均显著 ($P < 0.05$) 提高红薯叶其对胆固醇的吸附能力,对胆固醇吸附能力在 pH 值 2 和 pH 值 7 的条件下排列均为 SIDF3 > SIDF5 > SIDF2 > SIDF4 > SIDF1。这可能因为改性过程中增大了不溶性膳食纤维的比表面积,结构更加疏松,暴露更多活性官能团所致,改性前后红薯叶不溶性膳食纤维在胆固醇的吸附能力均强于空化射流改性后的豆渣不溶性膳食纤维^[30]。

3 结论

本研究旨在评估不同的红薯叶不溶性膳食纤维 (SIDF) 在吸附性能方面的差异,并探讨不同改性方法对其吸附能力的影响。研究发现,不同的 SIDF 样品在持水力 (WHC)、持油力 (OHC)、膨胀力 (SC)、阳离子交换能力 (CEC) 和负电荷交换能力

(TNC) 方面表现出明显差异。具体而言,酸法改性的 SIDF3 在持水力、膨胀力和阳离子交换能力方面表现出最佳性能,而酶法改性的 SIDF5 在持油力和负电荷吸附能力方面表现较好,可进一步研究结构和功能的变化,有助于深入了解其性质和应用前景。相比之下, SIDF2 在这些指标中表现较差。这表明不同的 SIDF 样品具有不同的性能。通过扫描电镜观察了不同改性处理前后的 SIDF 的微观结构变化。结果显示,其结构发生了改变,并且这种结构的变化与其生理功能的改变相一致。红外光谱分析、比表面积分析结果发现,酸法、酶法改性操作后, SIDF 内部的一些化学键被破坏,导致更多的羟基暴露,使得结构更加松散比表面积增大。根据 X 射线衍射发现改性操作一定程度上也很会改变样品结晶度,从而导致特性上的变化。不同的改性方法对其微观结构和特性产生了影响,这些改变可能对其生理功能和应用潜力产生重要影响,进一步研究这些结构和功能的变化有助于深入了解 IDF 的性质和应用前景。

参考文献

- [1] 史志璞.膳食纤维对人体疾病作用的研究进展[J].粮食与食品工业,2023,30(2):40-46.
- [2] BARBER T M, KABISCH S, PFEIFFER A F H, et al. The health benefits of dietary fibre [J]. *Nutrients*, 2020, 12(10): 3209.
- [3] 章澄.这些常被丢掉的蔬菜边角料,其实很有营养[J].人人健康,2022,577(20):50.
- [4] ISHIDA H, SUZUNO H, SUGIYAMA N, et al. Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* Poir) [J]. *Food Chemistry*, 2000, 68(3): 359-367.
- [5] 元伟华,胡楠楠,琚心心,等.红薯叶中糖蛋白的提取工艺研究[J].粮食与油脂,2023,36(1):135-138.
- [6] WANG S, XIA J, DE PAEPE K, et al. Ultra-high pressure treatment controls *in vitro* fecal fermentation rate of insoluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt pomace and induces butyrogenic shifts in microbiota composition [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(36): 10638-10647.
- [7] WANG L, TIAN Y, CHEN Y, et al. Effects of acid treatment on the physicochemical and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber [J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 99(2): 343-354.
- [8] WANG C, SONG R, WEI S, et al. Modification of insoluble dietary fiber from ginger residue through enzymatic treatments to improve its bioactive properties [J].

- Lwt, 2020, 125: 109220.
- [9] ZHU Y, JI X, YUEN M, et al. Effects of ball milling combined with cellulase treatment on physicochemical properties and *in vitro* hypoglycemic ability of sea buckthorn seed meal insoluble dietary fiber [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 820672.
- [10] LI H, ZHAO P, ZHUO S, et al. Structural characterization, free radical scavenging activity and α -glucosidase inhibitory activity of insoluble dietary fiber from *Pholiota nameko* [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(4): 3062-3076.
- [11] ZHAO D, GUO C, LIU X, et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 1524-1537.
- [12] 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.
- [13] FENG X, YU B, REGENSTEIN J M, et al. Effect of particle size on composition, physicochemical, functional, and structural properties of insoluble dietary fiber concentrate from citrus peel [J]. *Food Science and Technology International*, 2023, 29(3): 195-203.
- [14] LI H, GUO X, ZHU X, et al. Effect of ultrahigh pressure processing (UHP) on physicochemical properties, antioxidant activity and anti-inflammatory activity of insoluble dietary fiber from *Pholiota nameko* [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2024, 33: 453-464.
- [15] HE Y, LI W, ZHANG X, et al. Physicochemical, functional, and microstructural properties of modified insoluble dietary fiber extracted from rose pomace [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57: 1421-1429.
- [16] WANG H, HUANG T, TU Z. The adsorption of lead (II) ions by dynamic high pressure micro-fluidization treated insoluble soybean dietary fiber [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(6): 2532-2539.
- [17] 王司琪,王佳佳,李泊铮,等.提取方法对玉米耳膳食纤维结构特征和功能特性的影响[J].*食品科学*,2022,43(24): 93-101.
- [18] YANG B, WU Q, SONG X, et al. Physicochemical properties and bioactive function of Japanese grape (*Hovenia dulcis*) pomace insoluble dietary fibre modified by ball milling and complex enzyme treatment [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(7): 2363-2373.
- [19] 赵宇楠,贾丹丹,蔡丹,等.食用菌发酵对人参不溶性膳食纤维结构及功能特性的影响[J].*食品科学*,2023,44(22): 80-88.
- [20] 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.
- [21] LEWIS S M, MONTGOMERY L, GARLEB K A, et al. Effects of alkaline hydrogen peroxide treatment on *in vitro* degradation of cellulosic substrates by mixed ruminal microorganisms and *Bacteroides succinogenes* S85 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, 54(5): 1163-1169.
- [22] YE F, TAO B, LIU J, et al. Effect of micronization on the physicochemical properties of insoluble dietary fiber from citrus (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka) pomace [J]. *Food Science and Technology International*, 2016, 22(3): 246-255.
- [23] MA M, MU T. 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.
- [24] YAN X, CHENG J R, WANG Y T, et al. Enhanced lignin removal and enzymolysis efficiency of grass waste by hydrogen peroxide synergized dilute alkali pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122756.
- [25] NAVARRO-GONZÁLEZ I, GARCÍA-VALVERDE V, GARCÍAALONSO J, et al. Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber [J]. *Food Research International*, 2011, 44(5): 1528-1535.
- [26] GUO Y, BYAMBASUREN K, LIU X, et al. Extraction, purification, and characterization of insoluble dietary fiber from oat bran [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2021, 27: 385-393.
- [27] 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: 1461-1467.
- [28] 王梦阳,曾庆梅.香蕉皮膳食纤维的酶法提取优化及理化性质分析[J].*粮食与油脂*,2023,36(4):83-87.
- [29] 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.
- [30] 吴长玲,陈鹏,李顺秀,等.空化射流条件下豆渣不溶性膳食纤维结构与功能性研究[J].*农业机械学报*,2021,52(3): 350-356.