

高温蒸煮结合超声酶法改性菠萝蜜籽膳食纤维工艺优化及结构表征

李丹, 汪秀妹, 梁杰, 刘涛, 林国荣, 王丽霞, 郑心怡

Process Optimization and Structure Characterization of Jackfruit Seed Dietary Fiber Modified by High Temperature Cooking Combined with Ultrasonic Enzymatic Method

LI Dan, WANG Xiumei, LIANG Jie, LIU Tao, LIN Guorong, WANG Lixia, and ZHENG Xinyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020210>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高温蒸煮结合酶解改性枣渣膳食纤维

Technology optimization on steam-cooking combining with enzymatic hydrolysis modification of dietary fiber from jujube residues

食品工业科技. 2017(23): 137-142 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.23.027>

茶树菇膳食纤维改性及理化性质研究

Modification and Physicochemical Properties of *Agrocybe aegerita* Dietary Fiber

食品工业科技. 2021, 42(4): 142-148 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019110161>

莲蓬膳食纤维的高温改性及其理化和应用特性研究

Modification of dietary fiber from lotus seedpod using high-temperature: physicochemical property and application research

食品工业科技. 2017(02): 141-145 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.018>

复合酶法同步提取葡萄籽粕蛋白质和可溶性膳食纤维的响应面优化

Response Surface Optimization of Simultaneous Extraction of Protein and Soluble Dietary Fiber from Grape Seed Meal by Complex Enzymatic Method

食品工业科技. 2019, 40(3): 134-140 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.022>

红枣膳食纤维酶法提取工艺优化及其抗氧化研究

Optimization of Enzymatic Extraction of Dietary Fiber from *Zizyphus jujube* and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2020, 41(18): 176-181,186 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.028>

复合酶辅助超声波提取菊苣根总黄酮的工艺优化及其抗氧化活性

Optimization of Extraction Technology and Antioxidant Activity of Total Flavonoids from Roots of *Cichorium Intybus* L. by Ultrasonic Assisted with Complex Enzyme

食品工业科技. 2021, 42(8): 164-171 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060184>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李丹,汪秀妹,梁杰,等. 高温蒸煮结合超声酶法改性菠萝蜜籽膳食纤维工艺优化及结构表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 203-212. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020210

LI Dan, WANG Xiumei, LIANG Jie, et al. Process Optimization and Structure Characterization of Jackfruit Seed Dietary Fiber Modified by High Temperature Cooking Combined with Ultrasonic Enzymatic Method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 203-212. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020210

· 工艺技术 ·

高温蒸煮结合超声酶法改性菠萝蜜籽膳食纤维工艺优化及结构表征

李 丹,汪秀妹,梁 杰,刘 涛,林国荣*,王丽霞,郑心怡

(莆田学院环境与生物工程学院,福建省新型污染物生态毒理效应与控制重点实验室,生态环境及其信息图谱福建省高等学校重点实验室,福建莆田 351100)

摘 要:通过高温蒸煮结合超声波酶法对菠萝蜜籽膳食纤维进行改性,结合单因素实验和响应面试验优化改性工艺条件,再利用扫描电镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、热重分析仪(TGA)、傅立叶红外光谱仪(FTIR)对改性前后可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fibre, SDF)的结构进行对比,以持水力、膨胀力、保油力和对亚硝酸盐离子、葡萄糖、胆酸盐、胆固醇的吸附能力为指标,比较改性前后 SDF 的功能性质。结果表明:膳食纤维的最佳改性条件为料液比 1:21 g/mL,高温蒸煮 121 ℃、43 min,纤维素酶添加量 8%,酶解的超声波条件 360 W、40 ℃、52 min。此条件下改性后菠萝蜜籽 SDF 得率为(24.39%±0.03%),未改性 SDF 得率为(16.93%±0.60%)。与未改性 SDF 相比,FTIR 显示菠萝蜜籽纤维素组分重新分布,SEM 显示结构更加疏松多孔,X射线衍射结果显示结晶度增加,热重分析结果显示热稳定性更好;改性后 SDF 的持水力、膨胀力、保油力、亚硝酸盐离子吸附能力、葡萄糖吸附能力、胆酸盐吸附能力、胆固醇吸附能力均显著($P<0.05$)优于未改性 SDF。结果表明高温蒸煮结合超声酶法能够改善菠萝蜜籽 SDF 的功能特性,为改性菠萝蜜籽膳食纤维提供一定理论基础。

关键词:菠萝蜜籽,膳食纤维,高温蒸煮,超声波,纤维素酶,改性

中图分类号:TS201.1

文献标识码: B

文章编号:1002-0306(2023)23-0203-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020210



本文网刊:

Process Optimization and Structure Characterization of Jackfruit Seed Dietary Fiber Modified by High Temperature Cooking Combined with Ultrasonic Enzymatic Method

LI Dan, WANG Xiumei, LIANG Jie, LIU Tao, LIN Guorong*, WANG Lixia, ZHENG Xinyi

(College of Environmental and Biological Engineering, Putian University, Fujian Provincial Key Laboratory of Ecology-Toxicological Effects & Control for Emerging Contaminants, Key Laboratory of Ecological Environment and Information Atlas Fujian Provincial University, Putian 351100, China)

Abstract: The jackfruit seed dietary fiber was modified by high temperature cooking combined with ultrasonic enzymatic method. Single factor combined with response surface method was applied to optimize the modification process conditions. The structure of soluble dietary fiber (SDF) before and after modification was compared and analyzed by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TGA) and Fourier transform infrared spectrometer (FTIR). The functional properties of SDF before and after modification were determined with water holding capacity, expansion capacity, oil holding capacity and adsorption capacity for nitrite ion, glucose, bile salt and cholesterol as indicators. The results showed that the optimum modification conditions of DF were as follows: The ratio of material to liquid 1:21 g/mL,

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2021J011107, 2020J05211);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT200521)。

作者简介: 李丹(1990-),女,硕士,实验师,研究方向:食品生物技术,E-mail: ptuld321@163.com。

*通信作者: 林国荣(1969-),男,硕士,教授,研究方向:食品营养与功能,E-mail: ptlgrub@163.com。

cooking temperature 121 °C, cooking time 43 min, cellulase amount 8%, ultrasonic-assisted enzymatic (UAE) power 360 W, UAE temperature 40 °C, UAE time 52 min. Under these conditions, the yield of SDF was 24.39%±0.03%, the yield of unmodified SDF was 16.93%±0.60%. Compared with unmodified SDF, FTIR results showed that the cellulose components of jackfruit seeds were redistributed. SEM indicated a more porous structure. XRD results showed an increase in crystallinity, and TGA results showed better thermal stability. The water holding capacity, expansion capacity, oil retention capacity, nitrite ion adsorption capacity, glucose adsorption capacity, bile salt adsorption capacity, and cholesterol adsorption capacity of modified SDF were significantly better than those of unmodified SDF ($P<0.05$). Therefore, high temperature cooking combined with ultrasonic enzymatic method could improve the functional characteristics of SDF in jackfruit seeds and provide a theoretical basis for the modification of jackfruit seed dietary fiber.

Key words: jackfruit seed; dietary fiber; high temperature cooking; ultrasonic; cellulase; modification

菠萝蜜是目前市面上可见最大的树生热带水果,其果肉及种子皆可食用,果肉柔软、汁多,具有芳香味道^[1]。菠萝蜜的果实最多可以有约 500 颗种子(2~3 cm 长,直径 1~2 cm),种子质量占水果总重量的 10%~15%,由于新鲜的种子不能长期储存,因此常被当作废弃物丢弃,大量的菠萝蜜籽资源仍未被充分开发^[2],对副产品进行生态化利用,可以减少生物资源的浪费,增加果农的经济收入^[3]。菠萝蜜籽富含氮、磷、钾、钙、镁、硫、锌、铜等多种矿物质和木酚素、皂苷、异黄酮等植物营养素^[4],还具有高淀粉(约 46%)、高膳食纤维(约 20%)和低脂肪(约 0.77%)的特点,膳食纤维(Dietary Fiber, DF)可用以预防代谢综合症及与生活习惯有关的疾病,因此菠萝蜜籽可视为新的膳食纤维来源^[5]。DF 可分为可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维(IDF)^[6]。膳食纤维中 SDF 的含量应达到 10% 以上,才能被认为是具有很强生理活性和保健功能的优质膳食纤维^[7],然而天然膳食纤维含量大多低于 10%^[8],因此有必要探究对菠萝蜜籽 DF 进行改性的方法,以提取出更多的 SDF。

目前广泛采用生物法(主要是酶法和发酵法)、化学法(主要是酸碱法)和物理法(主要是挤压法、高温蒸煮法和高压均质法)对膳食纤维进行改性^[7]。高温蒸煮法是在高温高压下对膳食纤维进行改性,导致其中的分子链断裂,把 IDF 转化为 SDF,以此增加 SDF 的含量。这种改性办法对仪器要求较高,因此常受到条件的限制,无法得到较好的结果^[7]。酶法是一种对样品内部破坏强度较低的方法,对膳食纤维损伤小,其缺点为实验耗时较长,难以在短期获得较快的提取成果,但超声波处理方式能够有效提高实验速率^[9]。将物理法与生物法结合起来,可以降低实验成本,弥补单一实验方法的不足。丁彩云等^[10]采用高温-复合木聚糖酶和纤维素酶改性脱脂小米糠膳食纤维,结果表明高温-复合酶法可以有效改性膳食纤维,提高其结构和功能特性。汪楠等^[11]分别采用纤维素酶酶解、高温蒸煮、高温蒸煮协同纤维素酶处理竹笋膳食纤维,结果表明,高温蒸煮协同酶法较单独高温蒸煮和纤维素酶解有效地提高了竹笋可溶性膳食纤维的理化性质。Li 等^[12]采用超声波辅助酶法对荔枝膳食纤维进行改性,结果表明经过超声波酶改性后, SDF 含量提高了 6.32%。Oladunjoye 等^[13]采用微波

辅助碱处理甘蔗渣,结果表明,改性处理后其持水力等功能性质提高,微波辅助处理减少了反应时间。

目前,对菠萝蜜籽的研究集中在对其蛋白及淀粉的提取或性质研究上^[1-3],未见从菠萝蜜籽中提取膳食纤维的研究,且目前多采用两种方法相结合对膳食纤维进行改性,关于高温蒸煮、超声波、酶法三种方法结合对膳食纤维进行改性报道较少。为了减少菠萝蜜籽资源的浪费,增加膳食纤维的新来源,通过对菠萝蜜籽膳食纤维进行改性,提高菠萝蜜籽 SDF 的含量与功能性质,将有助于将其作为合适的功能性食品原料。因此,本实验以菠萝蜜籽为主要原料,采用高温蒸煮结合超声波酶法改性膳食纤维,并对改性工艺方法进行优化。通过单因素实验分析料液比、高温蒸煮时间、纤维素酶添加量、超声波酶解的温度、功率和时间对菠萝蜜籽 SDF 得率的影响,并在单因素实验的基础上结合响应面优化试验对菠萝蜜籽 SDF 的改性工艺进行优化。最后测定最优工艺条件下制备所得 SDF 结构和功能性质,以期对菠萝蜜籽综合利用,为开发菠萝蜜籽膳食纤维功能性食品提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

菠萝蜜籽 产地海南,采收时间为 2~3 月份的马来西亚一号菠萝蜜,郑州然翎商贸有限公司;玉米油 益海嘉里金龙鱼粮油股份有限公司;鸡蛋 市售;纤维素酶(10000 U/g) 食品级,多美姿生物科技有限公司;耐高温 α 淀粉酶(20000 U/g) 食品级,邢台万达生物有限公司;中性蛋白酶(50000 U/g) 食品级,沃佳生物科技有限公司;甘氨酸钠 食品级,郑州安安康食品原料有限公司;亚硝酸钠、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、DNS 试剂、糠醛、邻苯二甲醛等 均为分析纯,国药化学试剂有限公司。

CS-700 中草药粉碎机 永康市天祺盛世工贸有限公司;LDZM-60L-III 立式高压蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂;TENSOR II 傅立叶红外光谱仪 德国布鲁克公司;SU8010 场发射扫描电子显微镜 日本日立公司;XRD-6100 X 射线衍射仪 日本岛津公司;SDT650 热重分析仪 美国沃特斯公司;KQ-600KDE 高功率超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菠萝蜜籽 SDF 的制备方法 清洗菠萝蜜籽,以清除所有异物和上层白色层。将菠萝蜜籽切成厚度约 5 mm 的片状,置于 60 ℃ 烘箱中 12 h,中草药粉碎机粉碎,粉碎后的粉末再次于 60 ℃ 中放置 12 h,过 40 目筛子,装入密封袋中,保持干燥,备用。

改性工艺:参考 Huang 等^[7]和 Yang 等^[14]的方法并略作修改。称取 5.00 g 样品于锥形瓶中,加入一定比例的蒸馏水,放入立式高压灭菌锅中 121 ℃ 高温蒸煮一定时间。用 2 mol/L NaOH 调节混合液 pH 至 6.0。加入耐高温 α -淀粉酶 0.4 g 以去除淀粉,并在 95 ℃ 下水解 30 min,每隔 5 min 轻轻搅拌烧杯,用 3 mol/L 醋酸调节 pH 至 3.0 灭酶。冷却至 40 ℃,用 2 mol/L NaOH 调节混合液 pH 至 7.5,加入 0.25 g 中性蛋白酶后 40 ℃ 水解 30 min,沸水浴 10 min 灭酶。冷却后用 3 mol/L 醋酸调节混合液 pH 至 5.0,加入纤维素酶于一定的温度、功率、时间条件下超声处理。沸水浴加热 10 min 灭酶后冷却至 20 ℃,12000×g 离心 15 min。取上清液,以 1:4(v/v)的比例置于 95% 乙醇进行醇沉。醇沉 2.5 h 后以 4000 r/min 离心 10 min 取沉淀,于 65 ℃ 烘干 24 h 得到 SDF。未改性 SDF 的制备:采用传统水提法提取 SDF,不经过高压灭菌锅蒸煮和超声波酶解^[14-15],其他步骤同改性的工艺。

1.2.2 单因素实验 固定蒸煮时间为 20 min,纤维素酶添加量为 0.4 g(物质质量的 8%),超声酶解时间为 10 min、超声酶解温度为 30 ℃、超声酶解功率为 300 W,改变料液比为 1:15、1:20、1:25、1:30、1:35、1:40 g/mL,研究料液比对菠萝蜜籽 SDF 得率的影响。

固定料液比 1:20 g/mL,纤维素酶添加量为 0.4 g(物质质量的 8%)、超声酶解时间为 30 min、超声酶解温度为 30 ℃、超声酶解功率 300 W,改变高温蒸煮时间为 20、30、40、50、60、70 min,研究蒸煮时间对菠萝蜜籽 SDF 得率的影响。

固定蒸煮时间为 40 min,料液比 1:20 g/mL,超声酶解时间为 30 min、超声酶解温度为 30 ℃、超声酶解功率为 300 W,纤维素酶添加量为 5%、6%、7%、8%、9% 和 10%(物质质量的百分数),研究纤维素酶添加量对 SDF 得率的影响。

固定蒸煮时间为 40 min,料液比 1:20 g/mL,纤维素酶添加量为 0.4 g(物质质量的 8%),超声酶解温度为 30 ℃、超声功率为 300 W,改变超声酶解时间为 10、20、30、40、50、60 min,研究超声酶解时间对 SDF 得率的影响。

固定蒸煮时间为 40 min,料液比 1:20 g/mL,纤维素酶添加量为 0.4 g(物质质量的 8%),超声酶解时间为 50 min、超声酶解功率为 300 W,改变超声酶解温度为 30、35、40、45、50 和 55 ℃,研究超声酶解温度对 SDF 得率的影响。

固定蒸煮时间为 40 min,料液比 1:20 g/mL,纤维素酶添加量为 0.4 g(物质质量的 8%),超声酶解时间为 50 min、超声酶解温度为 40 ℃,改变超声酶解功率为 240、300、360、420、480、540 W,研究超声酶解功率对 SDF 得率的影响。SDF 得率按照下式计算。

$$\text{SDF 得率}(\%) = (\text{SDF 质量} / \text{菠萝蜜籽粉质量}) \times 100$$

1.2.3 响应面试验优化 根据 6 种单因素实验结果,选取对 SDF 得率有显著影响的四个因素进行 Box-behnken 试验。之后对模型进行验证,进行 3 次验证实验。响应面的因素水平表见表 1。

表 1 响应面试验因素水平
Table 1 Level of response surface test factors

水平	因素			
	A 蒸煮时间 (min)	B 料液比 (g/mL)	C 超声酶解温度 (℃)	D 超声酶解时间 (min)
-1	30	1:15	35	40
0	40	1:20	40	50
1	50	1:25	45	60

1.2.4 结构表征

1.2.4.1 傅里叶红外光谱仪分析 参考汪楠等^[11]的方法,并略作修改。分别取 1.00 mg 的改性前后 SDF 样品放置在样品台上,在 400~4000 cm⁻¹ 范围内扫描 32 次,分辨率为 16 cm⁻¹。

1.2.4.2 扫描电子显微镜观察 样品粉末用导电胶固定于载物台上。样品经过离子溅射仪处理后,放入仪器中,加速电压为 15 kV,于 500、1000、2000、5000、10000 倍下观察不同样品的结构^[16]。

1.2.4.3 X 射线衍射分析 分别取菠萝蜜籽原料粉、改性前后 SDF 样品平铺于 XRD 样品板,进行扫描。测定条件:电压 40.0 kV;电流 30.0 mA;以 2°/min 的速率进行扫描;5°~90°(2 θ)范围内进行连续扫描^[17]。

1.2.4.4 热重分析 分别取 10 mg 菠萝蜜籽原料粉、改性前后 SDF 样品置于刚玉坩埚中,设置初始温度为 25 ℃,以 10 ℃/min 速率升温,升温至 600 ℃。载气为氮气,流速为 20 mL/min,测定各样品的热分解曲线^[11]。

1.2.5 功能性质的测定

1.2.5.1 保水力(Water Holding Capacity, WHC) 参考 Yang 等^[18]的方法。取 0.500 g 的三种样品分别与 25 mL 水混合 2 h,在 3000×g 下离心 10 min,用滤纸吸收沉积物中多余的水,并对样品进行称重(作为湿重)。通过公式(1)计算 WHC:

$$\text{WHC}(\text{g/g}) = \frac{W_w - W_s}{W_s} \quad \text{式 (1)}$$

其中, W_w 为湿重(g); W_s 为样品质量(g)。

1.2.5.2 膨胀力(Swelling Capacity, SWC) 参考

Yang 等^[18]的方法。向量筒中放入 500 mg 样品,测量样品体积 V_1 。测量样品中加入 5 mL 蒸馏水,于室温下放置 24 h 后的体积 V_2 。通过公式(2)计算 SWC:

$$\text{SWC}(\text{mL/g}) = \frac{V_2 - V_1}{M} \quad \text{式 (2)}$$

其中, V_2 为静置后体积(mL); V_1 为初体积(mL); M 为样品质量(g)。

1.2.5.3 保油力(Oil Holding Capacity, OHC) 参考 Yang 等^[18]的方法。1.0 g 样品与 5.0 g 玉米油在离心管混合, 37 °C 摇 1 h, 8000×g 离心 30 min, 除去上清液, 收集剩余物称重。通过公式(3)计算 OHC:

$$\text{OHC}(\text{g/g}) = \frac{W_0 - W_s}{W_s} \quad \text{式 (3)}$$

其中, W_0 为样品保油后的质量(g); W_s 为样品的原始质量(g)。

1.2.5.4 亚硝酸盐离子的吸附能力(Adsorption Capacity of Nitrite Ion, NIAC) 参考罗白铃等^[19]的方法。取 0.1 g 样品加入到装有 25 mL 1 mmol/L 亚硝酸钠溶液的烧杯中, 混合液在 37 °C 水浴 2 h, 取上清液与 2.5 mL 60% 醋酸溶液按 1:5(v/v) 混匀备用。使用对氨基苯磺酸和盐酸萘乙二胺测定上清液中的亚硝酸钠水平来测定样品所保留的亚硝酸钠。其标准曲线的回归方程为 $y=0.0087x-0.0004$, $R^2=0.998$ 。通过公式(4)计算 NIAC:

$$\text{NIAC}(\mu\text{g/g}) = \frac{(C_0 - C_s) \times V}{W_s} \quad \text{式 (4)}$$

其中, C_0 和 C_s 是吸附前后上清液中的亚硝酸钠浓度($\mu\text{g/L}$); W_s 代表样品质量(g); V 表示亚硝酸钠溶液的体积(L)。

1.2.5.5 葡萄糖吸附能力(Glucose Adsorption Capacity, GAC) 参考 Ma 等^[20]的方法。取样品 1.0 g 及 100 mmol/L 葡萄糖溶液 100 mL。37 °C 孵化 6 h, 5000 r/min 离心 15 min 后, 取上清液备用。通过 DNS 试剂测定上清液中的葡萄糖水平, 测定样品葡萄糖保留量。其标准曲线的回归方程为 $y=0.007x-0.0102$, $R^2=0.9991$ 。通过公式(5)计算 GAC:

$$\text{GAC}(\text{mmol/g}) = \frac{(C_0 - C_s) \times V}{W_s} \quad \text{式 (5)}$$

其中, C_0 和 C_s 是吸附前后的葡萄糖水平(mmol/L); W_s 代表样品质量(g); V 代表葡萄糖溶液的体积(L)。

1.2.5.6 胆酸盐的吸附能力(Cholate Adsorption Capacity, CLAC) 参考 Wang 等^[21]的方法并加以修改。0.20 g 甘氨酸钠和 1.00 g 样品混合于 20 mL 磷酸盐缓冲液中, 调节混合液 pH 至 7, 37 °C 培育 2 h。取混合液, 以 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液备用。用糠醛比色法测定上清液中甘氨酸钠的浓度, 其标准曲线回归方程为 $y=0.033x+0.0047$, $R^2=0.9993$ 。

通过公式(6)计算 CLAC:

$$\text{CLAC}(\text{mg/g}) = \frac{m_0 - m_1}{m} \quad \text{式 (6)}$$

其中, m_0 为甘氨酸钠添加量(mg); m_1 为吸附后残余甘氨酸钠质量(mg); m 为样品质量(g)。

1.2.5.7 胆固醇的吸附能力(Cholesterol Adsorption Capacity, CAC) 采用 Wu 等^[22]描述的办法并加以修改。取两个新鲜鸡蛋, 采用分离器分离蛋黄及蛋清。在烧杯中加入蛋黄 9 倍体积的蒸馏水制作乳液。称量 1.00 g 样品与 50 mL 乳液混匀, 将 pH 调节至 7.0, 37 °C 培育 2 h 后离心取上清液, 4000 r/min 离心 20 min。以邻苯二甲醛比色法测定并计算 CAC, 其标准曲线的回归方程为 $y=19.36x-0.028$, $R^2=0.9972$ 。按照公式(7)计算上清液中的 CAC:

$$\text{CAC}(\text{mg/g}) = \frac{m_1 - m_2}{m} \quad \text{式 (7)}$$

其中, m_1 为原始蛋黄乳液中胆固醇质量(mg); m_2 为吸附后上清液中胆固醇质量(mg); m 为样品质量(g)。

1.3 数据处理

实验数据通过 Excel 2019 归纳整理; 实验重复 3 次, 数据均以“均值±标准差”表示, 显著性分析采用 SPSS 22 统计软件, 经单因素方差分析, 比较方法采用 Tukey 分析, 差异性显著为 $P<0.05$; 采用 Origin 8.5 进行图形绘制; 响应面优化试验借助 Design Expert V8.0.6 进行。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

如图 1(a)所示, 料液比对于菠萝蜜籽 SDF 得率的影响呈现先上升后下降的趋势, 当料液比为 1:20 g/mL 时菠萝蜜籽 SDF 得率最高为(19.85%±0.01%)。当料液比超过 1:20 g/mL 后得率便逐渐下降。这是由于料液比增加, 样品粉末充分浸泡于水中, 使得 SDF 得以溶出。相较于 1:20 g/mL, 1:40 g/mL 的料液比条件下菠萝蜜籽 SDF 得率显著降低了 3.30% ($P<0.05$), 因为样品中的 SDF 含量有限, 当其在水中达到平衡后, SDF 可能会溶于水, 导致得率下降。结果表明: 1:20 g/mL 为菠萝蜜籽 SDF 提取的最佳料液比。

如图 1(b)所示, 菠萝蜜籽 SDF 得率随蒸煮时间的增加逐渐提高, 蒸煮时间为 40 min 时达到最高值。蒸煮时间大于 40 min 时, SDF 得率开始下降($P<0.05$)。这可能是因为蒸煮时间小于 40 min 时, 膳食纤维的部分氢键断裂, 反应并不充分^[23], 随着时间的增加, 纤维素水溶性提高, 膳食纤维的溶解性改变。但蒸煮时间越长, SDF 结构容易被破坏, 导致醇沉时 SDF 无法完全析出, 得率变低^[24]。结果表明: 40 min 为菠萝蜜籽 SDF 提取的最佳蒸煮时间。

图 1(c)所示, 当酶用量小于 8% 时, SDF 得率上升较快, 并在添加量为 8% 的情况下达到最高值

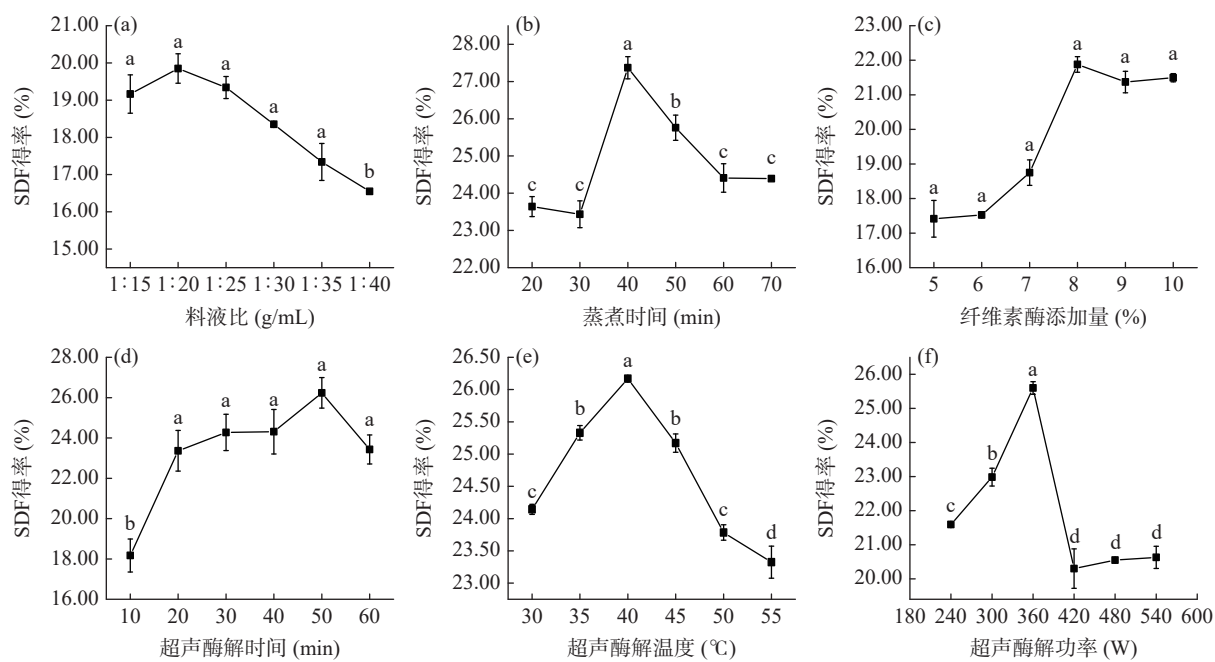


图 1 不同因素对菠萝蜜籽 SDF 得率的影响

Fig.1 Effect of different factors on SDF yield of jackfruit seeds

注: a: 料液比($P<0.05$); b: 蒸煮时间($P<0.05$); c: 纤维素酶添加量($P>0.05$); d: 超声酶解时间($P<0.05$); e: 超声酶解温度($P<0.05$); f: 超声酶解功率($P<0.05$); 不同小写字母表示组内差异显著($P<0.05$)。

(21.88%±0.23%), 酶添加量为 8%~10% 时, SDF 得率无显著差异($P>0.05$)。其原因可能为, 随着纤维素酶的增加, 当添加了 8% 的纤维素酶时, 酶的催化能力已到上限。结果表明: 菠萝蜜籽 SDF 提取的最佳酶添加量为 8%。

如图 1(d)所示, 在 10、20 min 两种条件下 SDF 得率上升趋势最明显, 其次为 40~50 min。当超声酶解时间为 50 min 时, SDF 得率最高, 为 (26.24%±0.76%)。超声时间过久, SDF 得率降低。这可能是因为超声波的作用, 使得物料的细胞壁被破坏, SDF 结构被打开, 内部的单糖物质溶出^[25]。因此, 50 min 为菠萝蜜籽 SDF 提取的最佳超声酶解时间。

图 1(e)所示, 于 40 °C 下超声时所得到的得率最高; 当温度为 55 °C 时, 得率降低了 2.84% ($P<0.05$)。其原因可能是纤维素酶在温度条件的影响下, 空间结构打开, 更多作用基团与反应底物结合, 促进反应进程。但当温度过高时, 酶的活性被抑制, 反应速率降低。结果表明: 40 °C 为菠萝蜜籽 SDF 提取的最佳超声温度。

图 1(f)所示, 当功率调整为 360 W 时, 菠萝蜜籽 SDF 得率最高为 25.60%±0.18%, 但当超声功率达到 420 W 时, 菠萝蜜籽 SDF 得率出现显著降低, 降低值为 5.05% ($P<0.05$)。其原因为高功率的超声波对细胞结构破坏程度过大, 导致膳食纤维原本的结构也被破坏, 使得 SDF 暴露^[26], 生成了较小的糖类物质, 醇沉不完全。结果表明: 360 W 的超声功率为菠萝蜜籽 SDF 提取的最佳功率。

2.2 响应面优化试验结果

响应面优化试验结果见表 2。结果表明 SDF 得

表 2 响应面分析设计及结果

Table 2 Response surface analysis design and results

实验号	A蒸煮时间 (min)	B料液比 (g/mL)	C超声酶解 温度(°C)	D超声酶解 时间(min)	SDF得率 (%)
1	30	1:15	40	50	23.25±0.11
2	50	1:15	40	50	23.29±0.27
3	30	1:25	40	50	22.71±0.10
4	50	1:25	40	50	23.49±0.25
5	40	1:20	35	40	23.62±0.18
6	40	1:20	45	40	23.38±0.06
7	40	1:20	35	60	23.75±0.57
8	40	1:20	45	60	24.18±0.03
9	30	1:20	40	40	24.27±0.13
10	50	1:20	40	40	23.54±0.44
11	30	1:20	40	60	24.38±0.18
12	50	1:20	40	60	23.47±0.21
13	40	1:15	35	50	23.78±0.03
14	40	1:25	35	50	23.75±0.48
15	40	1:15	45	50	23.51±0.18
16	40	1:25	45	50	22.47±0.41
17	30	1:20	35	50	24.52±0.17
18	50	1:20	35	50	23.76±0.58
19	30	1:20	45	50	23.36±0.24
20	50	1:20	45	50	23.33±0.16
21	40	1:15	40	40	24.21±0.04
22	40	1:25	40	40	22.85±0.08
23	40	1:15	40	60	23.63±0.27
24	40	1:25	40	60	22.15±0.34
25	40	1:20	40	50	23.81±0.47
26	40	1:20	40	50	23.67±0.23
27	40	1:20	40	50	23.76±0.45
28	40	1:20	40	50	22.67±0.35
29	40	1:20	40	50	22.78±0.18

率(Y)及自变量蒸煮时间(A)、料液比(B)、超声酶解温度(C)、超声酶解时间(D)的回归方程:

$$Y=24.31+0.47A+0.15B-(8.333E-003)C+0.13D+0.083AB+0.12AC-0.040AD-(2.500E-003)BC+0.083BD-0.055CD-0.87A^2-0.37B^2-0.29C^2-0.45D^2。$$

由表 3 所示, 方程模型 P 值 <0.0001 , 说明模型极显著; 模型失拟项 P 值 >0.05 , 说明不显著, 表明此回归方程有较好的可靠性, 可以作为预测菠萝蜜籽膳食纤维最优提取工艺参数的模型。此模型的相关校正系数 $R^2=0.9684$, 绝对校正系数 $R_{adj}^2=0.9368$, 表明模型的拟合度高。其中 A 、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 的 P 值 <0.001 , 表明它们对菠萝蜜籽 SDF 得率影响极其显著; B 、 D 的 P 值 <0.01 , 表明它们对菠萝蜜籽 SDF 的得率影响高度显著。分析可得各因素影响菠萝蜜籽 SDF 得率的顺序为: A (蒸煮时间) $>B$ (料液比) $>D$ (超声酶解时间) $>C$ (超声酶解温度)。

两因素交互作用对 SDF 得率影响的响应面 3D 图见图 2。响应面越陡, 因子之间的交互作用越重要; 响应面越平坦, 影响程度越低, 根据 3D 响应图中各因素的走势可以推断对响应值的作用大小。结果表明, 四因素对菠萝蜜籽 SDF 提取的影响力为蒸煮时间(A) $>$ 料液比(B) $>$ 超声酶解时间(D) $>$ 超声酶

表 3 回归模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型项	8.89	14	0.63	30.65	<0.0001	***
A	2.67	1	2.67	128.88	<0.0001	***
B	0.27	1	0.27	13.18	0.0027	**
C	8.33×10^{-4}	1	8.33×10^{-4}	0.04	0.8439	
D	0.21	1	0.21	9.92	0.0071	**
AB	0.027	1	0.027	1.31	0.2708	
AC	0.06	1	0.06	2.9	0.1108	
AD	6.40×10^{-3}	1	6.40×10^{-3}	0.31	0.5871	
BC	2.50×10^{-5}	1	2.50×10^{-5}	1.21×10^{-3}	0.9728	
BD	0.027	1	0.027	1.31	0.2708	
CD	0.012	1	0.012	0.58	0.4574	
A^2	4.86	1	4.86	234.39	<0.0001	***
B^2	0.91	1	0.91	43.78	<0.0001	***
C^2	0.55	1	0.55	26.36	0.0002	***
D^2	1.29	1	1.29	62.4	<0.0001	***
残差	0.29	14	0.021			
失拟项	0.21	10	0.021	1.1	0.5063	
误差项	0.077	4	0.019			
总和	9.18	28				

注: *表示 $P<0.05$, 影响显著; **表示 $P<0.01$, 影响高度显著; ***表示 $P<0.001$, 影响极其显著。

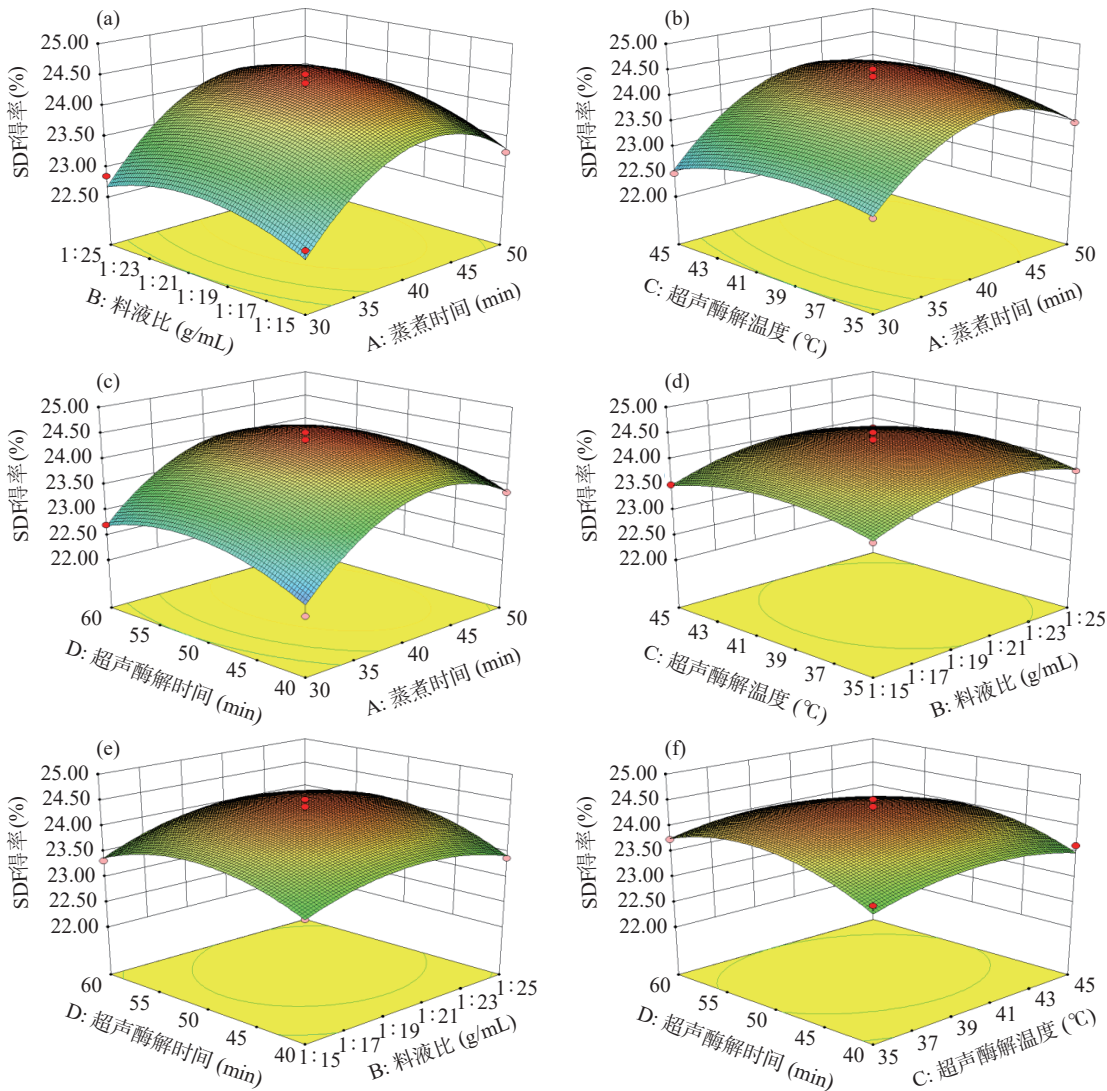


图 2 两因素交互作用对 SDF 得率影响的响应面 3D 图

Fig.2 Response surface 3D diagram of the effect of two factors interaction on SDF yield

解温度(C)。这与方差分析的结果一致。

2.3 提取条件优化及模型验证结果

通过软件分析与优化,得到最优改性工艺条件参数:蒸煮时间 42.83 min、料液比 1:21.25 g/mL、超声波酶解温度 40.15 °C、超声波酶解时间 51.55 min,该条件下可得到最佳 SDF 得率 24.41%。

结合实际实验条件,对优化的菠萝蜜籽 SDF 提取条件进行修正:蒸煮时间 43 min、料液比 1:21 g/mL、超声波酶解温度 40 °C、超声波酶解时间 52 min,经过验证实验,得到菠萝蜜籽 SDF 得率平均值为(24.39%±0.03%)。结果与模型预测的结果相符,从而验证了应用响应面法优化的工艺参数可靠性。未改性 SDF 的得率为(16.93%±0.60%),经过改性后 SDF 得率是未改性的 1.44 倍。孙静等^[24]以枣渣为原料,采用高温蒸煮结合纤维素酶改性枣渣膳食纤维,最佳工艺条件下的酶解时间 2.5 h。而本研究通过超声波辅助纤维素酶酶解,酶解时间 52 min,大大缩短了纤维素酶酶解所需要的时间。

2.4 结构表征

2.4.1 菠萝蜜籽 SDF 傅里叶红外光谱分析 由图 3 可看出,与未改性的图谱相比,改性后图谱的特征官能团的吸收峰发生了红移,这主要是由于高温高压协同超声波酶解对多糖链的破坏作用^[7]。与 SDF 的图谱相比,原料粉在 2107 cm⁻¹ 处的吸收峰强度大于 SDF 图谱在 2100 cm⁻¹ 附近的吸收峰强度。改性后 SDF 于 3389 cm⁻¹ 和未改性 SDF 于 3338 cm⁻¹ 的伸缩振动带是纤维素、半纤维素-OH 引起的,是多糖成分的特征吸收峰,改性处理后的吸收强度比改性前稍弱,这可能是高温蒸煮和超声波处理使纤维素间的氢键断裂,使膳食纤维形成多孔结构,增加了水分子和膳食纤维间的氢键所致^[27]。2920 cm⁻¹ 附近的吸收峰是多糖中-CH₃ 的 C-H 伸缩振动引起的^[26]。在 2000 cm⁻¹ 至 2500 cm⁻¹ 附近出现的是三键及累积双键非对称伸缩振动区,这个区间内含有 CN、CC 等的吸收^[26]。改性后 1603 cm⁻¹ 和未改性 1592 cm⁻¹ 的特征吸收峰是酯类 C=O 的非对称伸缩振动^[26]。改性后 1413 cm⁻¹ 和未改性 1406 cm⁻¹ 处的吸收峰通常说明存在木质素芳香苯基团,经过改性处理后的吸

收峰强度减小, IDF 含有纤维素、半纤维素和木质素,说明改性处理使 IDF 减少,可能是由于高温蒸煮和超声波处理使部分木质素转化为 SDF^[28]。1015 cm⁻¹ 附近的强吸收峰是纤维素和半纤维素 C-O-C 的收缩振动,改性后 SDF 在 1015 cm⁻¹ 的吸收峰强度小于未改性 SDF 在此处的吸收峰强度,进一步说明改性处理使 IDF 的含量减少,从而转化为更多的 SDF^[29]。总体而言,改性后 SDF 和未改性 SDF 表现出相似的红外光谱,但其特征吸收峰的波数或吸收强度存在差异。

2.4.2 菠萝蜜籽 SDF 扫描电子显微镜分析 可溶性膳食纤维的结构不仅与自身的特性有关,也可能与提取、改性工艺的不同有关^[4]。由图 4 所示,菠萝蜜籽

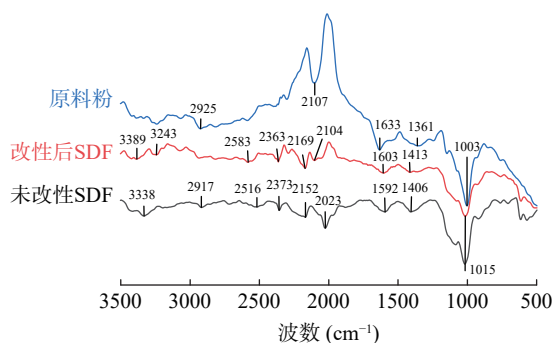


图 3 改性前后 DF 傅里叶变换红外光谱图

Fig.3 DF Fourier transform infrared before and after modification

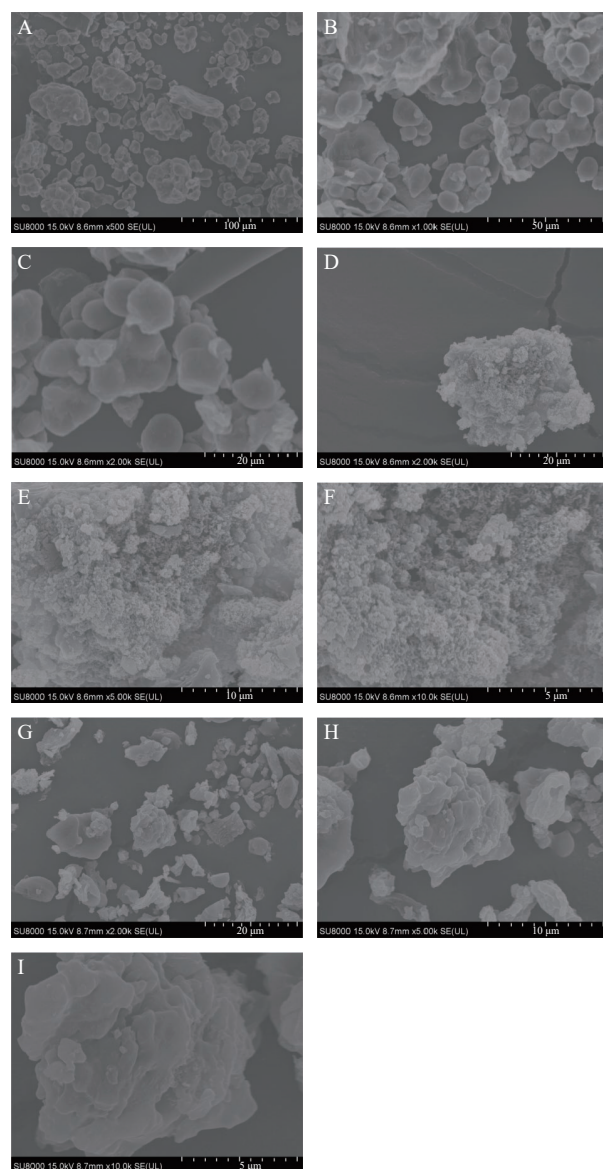


图 4 原料粉及改性前后 SDF 的扫描电镜图

Fig.4 SEM of raw material powder and SDF before and after modification

注: A、B、C 分别代表菠萝蜜籽原料粉放大 500、1000、2000 倍; D、E、F 分别代表改性后 SDF 放大 2000、5000、10000 倍; G、H、I 分别代表改性前 SDF 放大 2000、5000、10000 倍。

原料粉、改性后 SDF、未改性 SDF 三者的结构差别较大。菠萝蜜籽原料粉表面较为平坦, 呈现圆形单片状, 结构较为单一。未改性 SDF 呈现碎片、多层状结构。改性后 SDF 存在许多孔隙, 增加了比表面积。这可能是由于在高温烹饪破坏了纤维链的初始结构后, 超声波产生的空化气泡进一步促进了纤维的断裂, 导致孔隙的形成^[30], 使得更多纤维素酶能够充分地酶解, 从而形成更为疏松的结构, 这种结构可以扩大 SDF 的比表面积, 暴露更多的基团, 为其他物质与 SDF 的相互作用提供更多的位点, 可以提高 SDF 的吸附能力^[31]。

2.4.3 菠萝蜜籽 SDF X 射线衍射扫描分析 三个样品的 XRD 结果如图 5 所示。结果表明, 菠萝蜜籽原料粉及两种 SDF 的衍射图存在部分差异。菠萝蜜籽原料粉在 $2\theta=16.8^\circ$ 和 $2\theta=22.6^\circ$ 存在两个较大的衍射峰, 在 $2\theta=14.8^\circ$ 存在次衍射峰, 在 $2\theta=64.5^\circ$ 及 $2\theta=77.5^\circ$ 存在弱衍射峰。改性后 SDF 及未改性 SDF 的光谱区别较小, 衍射峰的位置也基本相同。改性前后的 SDF 在 $2\theta=22^\circ$ 左右都出现了特征晶体峰, 且 $2\theta=18.4^\circ$ 、 $2\theta=32.5^\circ$ 出现次衍射峰, 说明高温蒸煮和超声波酶处理相结合并没有改变 SDF 的晶体类型, 和未改性的 SDF 相比, 改性后 SDF 的峰型比未改性 SDF 的峰型更为尖锐, 经过 Jade6.0 软件处理后, 改性处理后 SDF 的相对结晶度为 20.62%, 未改性处理的相对结晶度为 14.84%, 改性处理后的相对结晶度较未改性处理相对结晶度提高了 38.94%, 这可能是由于处于非结晶区的纤维素、半纤维素和木质素被水解, 使结晶区的比例提高^[28]。

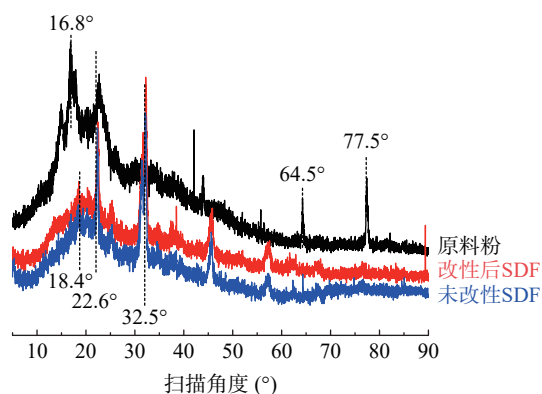


图 5 原料粉及改性前后 SDF 的 X 射线衍射谱图

Fig.5 X-ray diffraction spectrum of raw material powder and SDF before and after modification

2.4.4 菠萝蜜籽 SDF 热重分析 三种样品的热分解过程如图 6 所示, SDF 的热分解过程主要可以分为: 50~200 °C (水分蒸发)、200~350 °C (果胶及半纤维素分解)、350~600 °C (最终炭化)^[32]。在热分解的三个阶段中, 菠萝蜜籽原料粉在热分解过程中质量损失多于改性前后 SDF。改性后 SDF 的残余质量为 40.26%, 未改性 SDF 的残余质量为 38.55%。最终改性后 SDF 的热稳定性更好, 较未改性 SDF 提高了 1.71%。

综合来看, 改性前后的 SDF 热稳定性比菠萝蜜籽原料粉有一定程度的提高。SDF 更好的热稳定性可能与其结晶度提高有关^[33]。

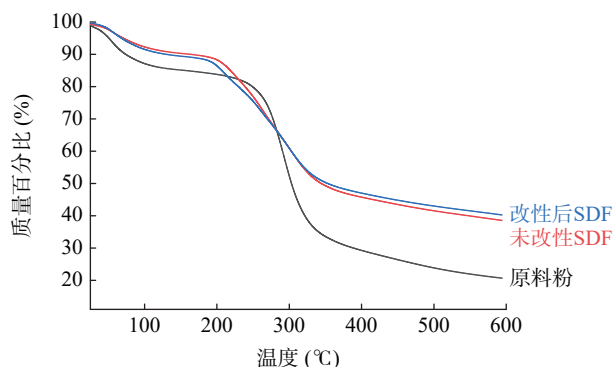


图 6 原料粉及改性前后 SDF 的热分解行为

Fig.6 Thermal decomposition behavior of raw material powder and SDF before and after modification

2.5 功能性质测定结果

由表 4 可知, 改性后 SDF 的功能性质都比改性前的功能性质高。改性后 SDF 的 WHC 和 SWC 分别较改性前显著提高了 77.59% ($P<0.05$) 和 97.54% ($P<0.05$)。改性后较高的 WHC 和 SWC 的可能原因有两个: 一是在高温蒸煮和超声酶解的作用下, 纤维素酶随着水分的流动渗透进纤维结构中, 使得纤维素微观结构变得更加疏松, 增加了亲水物质和 SDF 的结合的表面积^[34]; 二是由于物理和酶处理破坏多糖链中的糖苷键, 暴露更多的羟基、羧基等亲水官能团, 提供更多的接触位点^[35]; 而菠萝蜜籽原料粉的内部结构排列紧密, 水分难以进入结构内部, 因此其保水能力和膨胀能力都较低。OHC 可以反映 SDF 延缓脂肪的消化和吸收, 促进其排泄的能力, 改性后 OHC 较未改性显著提高了 47.03% ($P<0.05$), 主要是由于改性后 SDF 的疏松和多孔的结构^[14]。改性后 NIAC 较未改性显著提高了 281.45% ($P<0.05$), 这可能是因为多孔结构增加了吸附位点和比表面积, 使亚硝酸盐离子与 SDF 内的酚酸和官能团充分接触和反应, 导致 NIAC 的增加^[14]。GAC 可用来评估 SDF 在胃肠道吸附葡萄糖的能力, 高 GAC 的 SDF 可有效降低餐后血糖水平, 延缓消化道葡萄糖吸收, 改性后 GAC 较未改性显著提高了 59.80% ($P<0.05$), 可能是由于其疏松多孔的结构为葡萄糖提供更多的接触位点, 促进葡萄糖的吸收^[36]。改性后 SDF 的 CLAC 相比未改性 SDF 显著提高了 97.63% ($P<0.05$), 可能是比表面积增大, 使更多的极性集团暴露, 更易与胆酸钠结合^[37]。改性后 SDF 的 CAC 较未改性显著提高了 22.21% ($P<0.05$), 可能是由于改性后 SDF 的 WHC 和 SWC 较高, 微晶束较少, 在水膨胀后, 它们变成凝胶状, 能够结合食物中的胆固醇, 从而减少其吸收。此外, 在非晶态状态下, 暴露的活性基团可以直接整合胆固醇分子^[38]。Wang 等^[39]发现松散、多孔、高 OHC 的 SDF 通常具有更好的 CAC, 这与本研究的结

表 4 改性前后 SDF 和原料粉的理化功能性质

Table 4 Physical and chemical functional properties of SDF and raw material powder before and after modification

样品	WHC(g/g)	SWC(mL/g)	OHC(g/g)	NIAC(μ g/g)	GAC(mmol/g)	CLAC(mg/g)	CAC(mg/g)
改性后SDF	1.03 $\pm$ 0.01 ^a	4.01 $\pm$ 0.01 ^a	3.22 $\pm$ 0.02 ^a	3310.35 $\pm$ 60.96 ^b	4.73 $\pm$ 0.03 ^a	40.79 $\pm$ 0.75 ^a	11.94 $\pm$ 0.29 ^a
未改性SDF	0.58 $\pm$ 0.01 ^b	2.03 $\pm$ 0.06 ^b	2.19 $\pm$ 0.01 ^b	867.83 $\pm$ 60.82 ^c	2.96 $\pm$ 0.02 ^b	20.64 $\pm$ 0.54 ^b	9.77 $\pm$ 0.11 ^b
原料粉	0.35 $\pm$ 0.01 ^c	1.60 $\pm$ 0.04 ^c	1.95 $\pm$ 0.02 ^c	6212.65 $\pm$ 60.73 ^a	1.20 $\pm$ 0.02 ^b	7.91 $\pm$ 1.39 ^c	5.29 $\pm$ 0.11 ^c

注: 同列不同字母表示数据差异显著($P < 0.05$)。

果一致。

3 结论

高温蒸煮结合超声波酶法改性菠萝蜜籽膳食纤维的最佳条件为料液比 1:21 g/mL、蒸煮温度 121 $^{\circ}$ C, 蒸煮时间 43 min、纤维素酶添加量 8%、超声波酶解时间 52 min、超声波酶解功率 360 W、超声酶解温度 40 $^{\circ}$ C, 在此条件下菠萝蜜籽 SDF 得率为(24.39% $\pm$ 0.03%)。结构测定表明改性后 SDF 表面结构较松散、存在多孔性, 热稳定性较高, 残留率为 40.26%。功能性性质测定表明改性后的 SDF 的功能性质优于未改性的 SDF。为推进菠萝蜜籽可溶性膳食纤维改性工艺提供一定的理论与数据支持, 为菠萝蜜籽资源开发提供参考, 可为今后开发菠萝蜜籽可溶性膳食纤维功能性食品提供理论基础。

参考文献

- [1] CHAI T T, XIAO J, DASS S M, et al. Identification of antioxidant peptides derived from tropical jackfruit seed and investigation of the stability profiles[J]. *Food Chemistry*, 2020, 340: 127876.
- [2] KUSHWAHA R, FATIMA N T, SINGH M, et al. Effect of cultivar and maturity on functional properties low molecular weight carbohydrate and antioxidant activity of jackfruit seed flour[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 45(2): 15146.
- [3] HUANG S, HE Y, ZOU Y. Modification of insoluble dietary fibres in soya bean okara and their physicochemical properties[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2016, 50(12): 2606-2613.
- [4] NOOR F. Physicochemical properties of flour and extraction of starch from jackfruit seed[J]. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 2014, 3(4): 347-354.
- [5] 师江, 曹海燕, 郭芬. 菠萝蜜籽营养成分分析与安全性评价[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(14): 193-196. [SHI J, CAO H Y, GUO F. Nutrition analysis and security assessment of jackfruit seeds[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(14): 193-196.]
- [6] CHEN H, XIONG M, BAI T, et al. Comparative study on the structure, physicochemical, and functional properties of dietary fiber extracts from quinoa and wheat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149(9): 111816.
- [7] HUANG H, CHEN J, CHEN Y, et al. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymatic method: Structural, physicochemical and functional properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145(1): 111314.
- [8] 陈思好, 焦叶, 崔波, 等. 膳食纤维理化特性及其改性方法研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(5): 234-240. [CHEN S Y, JIAO Y, CUI B, et al. Research progression physicochemical properties and modification methods of dietary fiber[J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(5): 234-240.]
- [9] 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: 106162.
- [10] 丁彩云, 糟帆, 马玉婷, 等. 高温-复合酶法改性小米糠膳食纤维工艺优化及结构与功能分析[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(12): 67-75. [DING C Y, ZAO F, MA Y T, et al. Optimizing the preparation process of dietary fiber from millet bran modified by high temperature-composite enzyme and analysis of its structure and functional properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(12): 67-75.]
- [11] 汪楠, 黄山, 张月, 等. 高温蒸煮协同纤维素酶改性竹笋膳食纤维[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 13-18. [WANG N, HUANG S, ZHANG Y, et al. Modification of bamboo shoot dietary fiber by high temperature cooking combined with cellulase[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(4): 13-18.]
- [12] LI Y N, YU Y S, WU J J, et al. Comparison the structural, physicochemical, and prebiotic properties of litchi pomace dietary fibers before and after modification[J]. *Foods*, 2022, 11(3): 248-259.
- [13] OLADUNJOYE A O, EZIAMA S C. Effect of microwave-assisted alkaline treatment on physicochemical, functional and structural properties of hog plum (*Spondias mombin* L.) bagasse[J]. *LWT*, 2020, 132: 109821.
- [14] YANG C R, SI J Y, CHEN Y, et al. Physicochemical structure and functional properties of soluble dietary fibers obtained by different modification methods from *Mesona chinensis* Benth. residue[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111489.
- [15] 朱珂. 超声改性对咖啡果皮可溶性膳食纤维组成、结构及性质的影响[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2022: 9-10. [ZHU K. Effect of ultrasound modification on the structure and properties of soluble dietary fiber in coffee peel[D]. Ningxia: Ningxia University, 2022: 9-10.]
- [16] KAHWA P, KWANGY L, HYEONG L. Chemical composition and physicochemical properties of barley dietary fiber by chemical modification[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 60(9): 360-365.
- [17] 丁政宇, 张士凯, 何子杨, 等. 响应面优化黄精渣不溶性膳食纤维酶法提取工艺及其结构表征[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 157-163. [DING Z Y, ZHANG S K, HE Z Y, et al. Optimization of enzymatic extraction process of insoluble dietary fiber from *Polygonatum sibiricum* residue by response surface methodology and its characterization[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 157-163.]
- [18] 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 and Function*, 2021, 12: 6576-6587.
- [19] 罗白玲, 刘敦华, 董文江, 等. 超微粉碎对咖啡果皮理化性质、结构及吸附能力的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(6): 1219-1226. [LUO B L, LIU D H, DONG W J, et al. Effect of ultrafine

- grinding on physicochemical properties, structure and adsorption capacity of coffee peel[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(6): 1219–1226.]
- [20] MA T, SUN X, ZHAO J. Nutrient compositions and antioxidant capacity of kiwifruit (*Actinidia*) and their relationship with flesh color and commercial value[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 294–304.
- [21] WANG Y, ZHOU Y L, CHENG Y K, et al. Enzymo chemical preparation, physico-chemical characterization and hypolipidemic activity of granular corn bran dietary fibre[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52: 1718–1723.
- [22] WU W, HU J, GAO H, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.
- [23] 张晋, 谭芦兰, 陈伊凡, 等. 可溶性膳食纤维强化重组蛋白片的响应面优化制备和品质评价[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 155–166. [ZHANG J, TAN L L, CHEN Y F, et al. Response surface optimization and quality evaluation of soluble dietary fiber fortified restructuring egg white curd[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(12): 155–166.]
- [24] 孙静, 邵佩兰, 徐明, 等. 高温蒸煮结合酶解改性枣渣膳食纤维[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 137–142. [SUN J, SHAO P L, XU M, et al. Technology optimization on steam-cooking combining with enzymatic hydrolysis modification of dietary fiber from jujube residues[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 137–142.]
- [25] 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. [ZHANG Y L, WANG Y, WANG D, et al. Optimization of ultrasonic assisted enzymatic extraction of dietary fiber from light speckled kidney bean[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 201–205.]
- [26] 牛希, 史乾坤, 赵城彬, 等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 130–136. [NIU X, SHI Q K, ZHAO C B, et al. Effect of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber[J]. Food Science, 2020, 41(23): 130–136.]
- [27] MOCZKOWSKA M, KARP S, NIU Y, et al. Enzymatic, enzymaticultrasonic and alkaline extraction of soluble dietary fibre from flaxseed: A physicochemical approach[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90(5): 105–112.
- [28] DU X J, WANG L, HUANG X, et al. Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143(1): 111031.
- [29] ZHANG W M, ZENG G L, PAN Y G, et al. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172(9): 102–112.
- [30] CHEN T T, ZHANG Z H, WANG Z W, et al. Effects of ultrasound modification at different frequency modes on physicochemical, structural, functional, and biological properties of citrus pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113(12): 106484.
- [31] ZHUANG X B, JIANG X P, HAN M Y, et al. Influence of sugarcane dietary fiber on water states and microstructure of myofibrillar protein gels[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 253–261.
- [32] ZHONG L Z, FANG Z X, WAHLQVIST M L, et al. Extrusion cooking increases soluble dietary fibre of lupin seed coat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 547–554.
- [33] WANG Y P, DUAN D L, LIU Y H, et al. Properties and pyrolysis behavior of moso bamboo sawdust after microwave-assisted acid pretreatment[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 129(1): 86–92.
- [34] ALFRODO V O, GABRIEL R R, LUIS C G, et al. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (*Salvia hispanica* L.)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 168–173.
- [35] LIU M, ZHOU S H, LI Y X, et al. Structure, physicochemical properties and effects on nutrients digestion of modified soluble dietary fiber extracted from sweet potato residue[J]. Food Research International, 2021, 150: 110761.
- [36] GILL S K, ROSSI M, BAJKA B, et al. Dietary fibre in gastrointestinal health and disease[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2021, 18(2): 101–116.
- [37] 牛潇潇, 梁亮, 王宁, 等. 超微粉碎及不同粒度对马铃薯渣功能特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(1): 37–45. [NIU X X, LIANG L, WANG N, et al. Effects of superfine grinding and different particle sizes on functional characteristics of potato residues[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(1): 37–45.]
- [38] SHEN M, WANG W H, CAO L. Soluble dietary fibers from black soybean hulls: Physical and enzymatic modification, structure, physical properties, and cholesterol binding capacity[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(1): 1668–1674.
- [39] WANG X J, ZHANG Y Y, LI Y B, et al. Insoluble dietary fibre from okara (*Soybean residue*) modified by yeast *Kluyveromyces marxianus* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134(12): 110252.