刘鹏, 杨忠英, 农秀媛, 等. 改性方法对菠萝不溶性膳食纤维结构及功能性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 66−74. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060305

LIU Peng, YANG Zhongying, NONG Xiuyuan, et al. Effects of Modification Methods on the Structural and Functional Properties of Pineapple Insoluble Dietary Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 66−74. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060305

· 研究与探讨 ·

改性方法对菠萝不溶性膳食纤维结构及功能性质的影响

刘　鹏[1], 杨忠英[1,2], 农秀媛[1], 郭　蕊[1], 李　明[1,*]

（1.通化师范学院医药健康学院, 吉林通化 134002;
2.贵阳学院食品科学与工程学院, 贵州贵阳 550005）

摘　要: 以菠萝不溶性膳食纤维（Pineapple insoluble dietary fibers，PIDF）为原料，采用超声波（Ultrasonic，US）、超高压均质（Ultra-high pressure homogenization，UHPH）、盐酸（Hydrochloric acid，HCl）及碱性过氧化氢（Alkaline hydrogen peroxide，AHP）对其改性处理，并探究改性前后 PIDF 的结构和功能性质。通过扫描电子显微镜、X-ray 衍射、粒径分析、水合性质、葡萄糖和亚硝酸盐吸附能力等指标，分析 PIDF 的结构和功能性质关系。结果表明，四种方法改性处理对 PIDF 的结构和功能性质的影响效果显著。扫描电镜分析显示改性后的 PIDF 表面褶皱和孔隙增多；粒径分析结果表明，改性后的粒径显著减小（P<0.05）；FT-IR 光谱显示，改性后的 PIDF 均未引入新的官能团。对比四种改性方法，水合方面，持水力和持油力改善效果最优的为 AHP 处理，吸水膨胀力最佳的则为 US 处理，分别提升至 23.91 g/g、19.68 g/g 和 12.78 mL/g；吸附方面，葡萄糖吸附能力最优为 US 处理，可将吸附能力提升至 862.74 mg/g，亚硝酸根离子吸附能力（pH2.0）最优的为 AHP 处理，可将吸附能力提升至 450.66 μg/g，胆固醇吸附能力最优的为 UHPH 处理，可将吸附能力提升至 4.11 mg/g。以上结果表明 AHP 作为水合方面的改性较合适，而 UHPH 作为吸附方面的改性较合适。综上所述，四种方法改性不仅改变了 PIDF 的物理结构，还改善了其化学功能特性，拓展了应用范围。

关键词: 菠萝, 不溶性膳食纤维, 改性, 理化特性, 功能性质, 结构表征

中图分类号: TS225.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0066−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060305

本文网刊:

Effects of Modification Methods on the Structural and Functional Properties of Pineapple Insoluble Dietary Fiber

LIU Peng[1], YANG Zhongying[1,2], NONG Xiuyuan[1], GUO Rui[1], LI Ming[1,*]

（1.School of Pharmacy and Health Sciences, Tonghua Normal University, Tonghua 134002, China;
2.School of Food Science and Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China）

Abstract: The study investigated the effects of modifying pineapple insoluble dietary fiber (PIDF) using ultrasonic (US), ultra-high-pressure homogenization (UHPH), hydrochloric acid (HCl), or alkaline hydrogen peroxide (AHP) treatment on its structural and functional properties. The correlation between PIDF structural characteristics and functional properties were analyzed using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), particle size analysis, hydration property analysis, and measurements of glucose and nitrite adsorption capacities. The results showed that all four modification methods significantly altered PIDF structural characteristics and functional properties. SEM revealed increased surface folds and porosity in the modified samples, and particle size analysis demonstrated significant reductions in particle size (P<0.05). Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy revealed that no new functional groups were introduced. Among

收稿日期: 2025−06−25

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目（JJKH20200486KJ）。

作者简介: 刘鹏（1994−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: liupeng9405@163.com。

*** 通信作者:** 李明（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: lidaoen@163.com。

the four modification methods evaluated, alkaline hydrogen peroxide (AHP) treatment exhibited the greatest improvement in hydration properties, increasing water holding capacity to 23.91 g/g and oil holding capacity to 19.68 g/g, while ultrasonic (US) treatment yielded the highest water swelling capacity (12.78 mL/g). Regarding adsorption properties, US treatment showed the strongest glucose adsorption capacity (862.74 mg/g). AHP treatment achieved the best nitrite ion adsorption capacity at pH2.0 (450.66 μg/g), and ultra-high pressure homogenization (UHPH) treatment was most effective for cholesterol adsorption (4.11 mg/g). These results suggested that AHP was more suitable for enhancing hydration-related properties, whereas UHPH was preferable for improving adsorption performance. In summary, the four modification methods not only altered the physical structure of pineapple insoluble dietary fiber (PIDF), but also improved its chemical functional characteristics, thereby expanding its potential applications.

Key words: pineapple; insoluble dietary fiber; modification; physicochemical characteristics; functional properties; structural properties

菠萝（*Ananas comosus*），又称凤梨，是凤梨科凤梨属的热带草本植物，营养丰富，是我国的重要生产作物之一[1]。菠萝在生产、加工过程中会产生大量的菠萝皮、渣等副产物，这些副产物中包含丰富的功能性化合物，如多糖、微量营养素（矿物质和维生素）、酶、蛋白质、挥发性化合物和膳食纤维，尤其是不溶性膳食纤维的含量特别高，包括半纤维素、纤维素、木质素[2]，在食品工业中具有很大的潜在利用价值[3]。但目前大多未得到充分利用，通常被当作废弃物处理，不仅造成资源浪费，还可能对环境产生一定的压力[4]。因此，对菠萝副产物中的不溶性膳食纤维进行研究和利用具有重要的现实意义。

膳食纤维（Dietary fiber, DF），通常是指不能被人体内小肠消化和吸收但具有健康意义的，存在于天然植物中的碳水化合物，有助于预防血糖、血浆胆固醇和心血管等疾病[5]，被誉为“第七大营养素”，根据溶解性差异分为可溶性膳食纤维（Soluble dietary fibers, SDF）和不溶性膳食纤维（Insoluble dietary fibers, IDF）[6]。IDF 能吸附胆固醇、胆汁酸等物质来降低血压，还可预防结直肠癌、乳腺癌和前列腺癌等癌症[7−9]。另外，适量摄入 IDF 是一种预防肥胖的有效方法[10]，且它能凭借葡萄糖吸附特性调节肠道内碳水化合物代谢，降低餐后血糖浓度[9]。

由于不同来源的 IDP 其结构和功能不尽相同，为提高其潜在的应用价值，许多学者采用不同的方法对 IDF 进行改性处理以改善其功能性质。例如，HUANG 等[11] 探讨超声处理对大蒜秸秆的影响，结果显示大蒜秸秆 IDF 的胆固醇吸附力比对照组提高了 45.0%，葡萄糖吸附能力也明显提高，其色泽品质和物理化学特性也明显优于对照组。GAO 等[12] 利用高压均质对椰子不溶性膳食纤维进行改性，发现改性处理能显著减小粒径，提高水合能力，增强胰脂肪酶抑制活性。WANG 等[13] 用酸处理麦麸 IDF，结果显示不仅能提高其水合能力和阳离子交换能力，还能提高胆固醇、胆酸钠、葡萄糖的吸附能力和 α-淀粉酶抑制活性。李金隆等[14] 使用碱性过氧化氢处理玉米芯 IDF，发现改性对 IDF 的持水性、持油性和吸附能力也均有改善。目前针对菠萝不溶性膳食纤维（Pineapple insoluble dietary fibers, PIDF）的改性研究还鲜有报道。本研究中分别使用超声波（Ultrasonic, US）、超高压均质（Ultra-high pressure homogenization, UHPH）、盐酸（Hydrochloric acid, HCl）及碱性过氧化氢（Alkaline hydrogen peroxide, AHP）处理 PIDF 并探究不同处理方式对其结构和功能性质的影响。本研究为拓宽 PIDF 应用范围提供了理论支撑，并为改性其他来源的 IDF 加工利用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

菠萝　市售；36%~38% 盐酸溶液、3% 过氧化氢试液　哈尔滨瑞标科技有限公司；亚硝酸钠、对氨基苯磺酸、N-1-盐酸萘乙二胺、葡萄糖、冰乙酸、邻苯二甲醛　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；玉米油　益海嘉里金龙鱼食品集团股份有限公司；胆固醇标准品　北京索莱宝科技有限公司；DNS 试剂　飞净生物科技有限公司。

Xinyi-IID 超声波细胞破碎仪　宁波新艺超声设备有限公司；FB-110Q15-PLUS 超高压纳米均质机　上海励途有限公司；LGJ-50FD 真空冷冻干燥机　河南兄弟仪器设备有限公司；BeNano 90 Zeta 纳米粒度电位分析仪　丹东百特仪器有限公司；T1000 分析天平　常熟市双杰测试仪器厂；Phenom Pro 扫描电子显微镜　复纳科学仪器（上海）有限公司；iS50 傅里叶红外光谱仪　美国 Thermo Scientific 公司；D8 Advance X 射线衍射仪　德国 Bruker 公司；722S 紫外分光光度计　上海菁华科技仪器有限公司；TDL-5A 离心机　上海安亭科学仪器厂；210 全不锈钢胶体磨　张祥胶体磨厂。

1.2　实验方法

1.2.1　PIDF 的制备　参考刘鹏等[15] 的方法，采用碱法提取 PIDF。菠萝榨汁后的残渣洗涤后干燥并粉碎，得到菠萝残渣粉。将菠萝残渣粉与体积分数为 6% 的 NaOH 溶液以液料比 26∶1（m/v）混匀、置于 40 ℃ 水浴锅中提取 75 min。3000 r/min 离心 15 min，将得到的沉淀反复用蒸馏水冲洗至澄清无色，真空冷冻干燥 24 h，得 PIDF，粉碎后过 0.25 mm 筛备用，命名为 Original-PIDF（O-PIDF）。

1.2.2　PIDF 的 US 改性　参考李爽[16] 的方法改性。

取 5 g PIDF 粉末于 150 mL 的烧杯内加入 100 mL 蒸馏水，置于磁力搅拌器上以 800 r/min 持续搅拌 30 min，获得均匀的悬浮液。取 100 mL 制得的悬浮液，转移至 150 mL 的烧杯中，进行超声处理。设定超声频率为 20 kHz，输出功率为 500 W，对悬浮液样品进行处理 1 h（2 s∶4 s 工作/休息周期）。处理结束后对样品进行真空冷冻干燥，研磨，过 0.25 mm 筛，制得超声改性 PIDF 样品，命名为 US-PIDF。

1.2.3 PIDF 的 UHPH 改性 参考游玉明等[17]的方法改性。PIDF 按照料液比 1∶100（g/mL）加入蒸馏水混合均匀，通过胶体磨进行机械研磨处理，持续作用时间 10 min。将预处理液转移至超高压均质机，在 100 MPa 压力下进行均质化处理。处理结束后对样品进行真空冷冻干燥，研磨，过 0.25 mm 筛，制得超高压均质改性 PIDF 样品，命名为 UHPH-PIDF。

1.2.4 PIDF 的 HCl 改性 参考刘静娜等[18]的方法改性。PIDF 按照料液比 1∶50（g/mL）加入 1.5% HCl 溶液混合均匀，在 59 ℃ 恒温水浴磁力搅拌（100 r/min）1.5 h 后，取出等待完全晾凉后调节 pH 至中性，再进行抽滤。处理结束后对样品进行真空冷冻干燥，研磨，过 0.25 mm 筛，制得盐酸改性 PIDF 样品，命名为 HCl-PIDF。

1.2.5 PIDF 的 AHP 改性 参考李金隆等[14]的方法改性。PIDF 按照料液比 1∶20（g/mL）加入 2.0% AHP 溶液混合均匀。采用 5 mol/L NaOH 溶液调节体系 pH 至 11.0 后，80 ℃ 恒温水浴磁力搅拌（100 r/min）4 h，反应完成后，以 1 mol/L HCl 中和至溶液呈中性状态，进行抽滤处理。所得滤渣经蒸馏水反复清洗 2 次后，对样品进行真空冷冻干燥，研磨，过 0.25 mm 筛，制得碱性过氧化氢改性 PIDF 样品，命名为 AHP-PIDF。

1.2.6 扫描电子显微镜（SEM） 采用扫描电子显微镜观察 PIDF 的表面形貌。加速电压为 15 kV，分别放大 300 倍和 800 倍。

1.2.7 傅里叶红外光谱（FT-IR）测定 采用傅里叶红外光谱仪对 PIDF 中存在的官能团进行分析。测量范围 500~4000 cm^{-1}，分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数 64 次。

1.2.8 改性处理对 PIDF 的 XRD 分析 利用 X 射线衍射仪对 PIDF 的结晶结构进行表征。工作电压 30 kV，工作电流 30 mA，衍射角扫描范围为 5°~90°，测量速率：2°/min。

1.2.9 粒径分布测定 称取 PIDF 粉末样品，以蒸馏水作分散剂制备成 0.1% 悬浮液，在 25 ℃ 时通过纳米粒度电位分析仪测定其平均粒径。

1.2.10 改性前后 PIDF 的水合力的测定

1.2.10.1 持水力（WHC） WHC 根据 ZHU 等[19]的方法测定。称取 0.5 g PIDF 样品（记为 m_1）置于 10 mL 离心管中（空管质量记为 m_2），加入 5 mL 蒸馏水充分混匀，于 37 ℃ 恒温条件下静置反应 1 h。经 4000 r/min 离心 10 min 后，移除上层清液后，称量离心管及沉淀物总质量（记为 m_3）。样品的 WHC 由式（1）进行计算：

$$WHC(g/g)=\frac{m_3-m_2}{m_1} \quad 式（1）$$

式中，m_1 为吸水前样品质量，g；m_2 为空管质量，g；m_3 为离心管和吸水后样品质量，g。

1.2.10.2 持油力（OHC） OHC 根据 ZHU 等[19]的方法测定。称取 0.5 g PIDF 样品（记为 m_1）置于 10 mL 离心管中（空管质量记为 m_2），加入 12.5 mL 玉米油充分混匀，于 37 ℃ 恒温条件下静置反应 1 h。经 4000 r/min 离心 10 min 后，移除上层油脂层，称量离心管及沉淀物总质量（记为 m_3）。样品的 OHC 由式（2）进行计算：

$$OHC(g/g)=\frac{m_3-m_2}{m_1} \quad 式（2）$$

式中，m_1 为吸油前样品质量，g；m_2 为空管质量，g；m_3 为离心管和吸油后样品质量，g。

1.2.10.3 吸水膨胀力（WSC） WSC 根据 ZHU 等[19]的方法测定。称取 0.5 g PIDF 样品（记为 m）置于 10 mL 离心管中，加入 5 mL 蒸馏水后记录初始体积（记为 V_1）。经 37 ℃ 恒温反应 1 h 并 4000 r/min 离心 10 min 后，记录沉淀物体积（记为 V_2）。样品的 WSC 由式（3）进行计算：

$$WSC(mL/g)=\frac{V_2-V_1}{m} \quad 式（3）$$

式中，m 为吸水前样品质量，g；V_1 为吸水前样品体积，mL；V_2 为吸水后样品体积，mL。

1.2.11 改性前后 PIDF 葡萄糖吸附能力（GAC）的测定 GAC 根据李金隆等[14]的方法测定。量取 100 mL（记为 V）50 mmol/L 葡萄糖溶液（初始浓度记为 c_1），加入 0.5 g PIDF 样品（记为 m），于 37 ℃ 水浴条件下振荡反应 6 h。反应液经 4000 r/min 离心 15 min 后，取上清液，采用 DNS 比色法于 540 nm 波长处测定吸光值（平衡浓度记为 c_2）。样品的 GAC 值由式（4）进行计算：

$$GAC(mg/g)=\frac{(c_2-c_1)\times V}{m} \quad 式（4）$$

式中：m 为样品质量，g；c_1 为吸附前原溶液中的葡萄糖浓度，mmol/L；c_2 为吸附后上清液中葡萄糖浓度，mmol/L；V 为葡萄糖溶液体积，L。

1.2.12 改性前后 PIDF 亚硝酸根离子吸附能力（NAC）的测定 NAC 根据李金隆等[14]的方法测定。分别配制 25 mL（记为 V）500 μmol/L 亚硝酸钠溶液（初始浓度记为 c_1），各加入 1 g PIDF 样品（质量记为 m），利用盐酸/NaOH 溶液调节体系 pH 至 2.0（模拟胃液环境）和 7.0（模拟肠液环境）。将反应体系置于 37 ℃ 水浴中振荡反应 2 h，经 4000 r/min 离心 15 min 后，取上清液，采用盐酸萘乙二胺比色法

于 538 nm 波长处测定吸光值（平衡浓度记为 c_2）。样品的 NAC 值由式（5）进行计算：

$$NAC(\mu g/g)=\frac{(c_2-c_1)\times V}{m} \quad 式（5）$$

式中：m 为样品质量，g；c_1 为吸附前原溶液中的亚硝酸钠溶液浓度，μmol/L；c_2 为吸附后上清液中亚硝酸盐溶液浓度，μmol/L；V 为初始体积，L。

1.2.13　改性前后 PIDF 胆固醇吸附能力（CAC）的测定　CAC 根据 ZHANG 等[20] 方法稍加改进测定。构建胆固醇吸附测定体系。鉴于胆固醇在乳化剂存在条件下仍呈现疏水特性，本研究选用新鲜蛋黄构建仿生模型系统。量取新鲜蛋黄样品，按 1∶9 体积比与去离子水混合，通过搅拌形成均一乳液（记为 c_1）。称取 1.0 g PIDF 样品（记为 m），与 25 mL 蛋黄稀释液充分混匀（记为 c_3），将反应体系置于 37 ℃ 恒温振荡器中，设置转速 120 r/min 持续反应 2 h。吸附平衡后，加入 4 倍体积无水乙醇进行沉淀处理，随后以 4000 r/min 离心 20 min。设置 25 mL 蛋黄稀释液作为实验对照，采集离心上清液（记为 c_2），采用邻苯二甲醛比色法于 550 nm 波长处测定吸光值。样品的 CAC 值由式（6）进行计算：

$$CAC(mg/g)=\frac{(c_2-c_3)-(c_1-c_2)}{m}\times 25 \quad 式（6）$$

式中：m 为样品质量，g；c_1 为空白蛋黄乳液（蛋黄∶去离子水=1∶9）体系中胆固醇浓度，mmol/L；c_2 为对照组（仅 25 mL 蛋黄稀释液，不加 PIDF 样品）离心后上清液测得的胆固醇浓度，mmol/L；c_3 为实验组（PIDF 样品+25 mL 蛋黄稀释液反应后）离心上清液的胆固醇浓度，mmol//L；25 为蛋黄稀释液的体积，mL。

1.3　数据处理

相同试验下每组试验平行 3 次，结果以平均值±标准差表示，采用 IBM SPSS statistic26 进行差异显著性分析，利用 Origin 2021、和 WPS Office 进行数据处理和绘图。

2　结果与分析

2.1　不同改性方法处理对 PIDF 的 SEM 分析

用扫描电镜观察样品在 300 和 800 倍放大倍数下的形态特征。如图 1A 和图 1a 所示，O-PIDF 表现出光滑的表面和致密的结构，尺寸较大，颗粒间界限清晰；表面相对平整，凹凸不平和不规则结构较少；呈现出明显的层状结构。相比之下，四种改性后的 PIDF 呈现出表面不规则，其特征在于存在更明显的皱纹、略微蓬松的纹理、粒径分布范围拓宽、表面粗糙程度增加等现象。这些变化主要归因于超声处理所施加的强大的机械力和空化效应，导致纤维和半纤维素的降解以及形成松散的表面结构[16]。UHPH 处理过程中 PIDF 受到流体与管道间的剪切力、流体与流体间的碰撞力以及空穴作用力等所导致[21]。HCl 和 AHP 处理对纤维微观结构的破坏，导致部分纤维素、半纤维素及果胶组分降解，形成表面孔洞，表面褶皱化现象[22]。这些结构特征变化增强了水分渗透能力，同时使 PIDF 内部的极性和非极性基团更多暴露，增强了与周围环境的相互作用，改善了其持水力、持油力、吸水膨胀力、葡萄糖吸附能力及亚硝酸根离子吸附能力[23]。

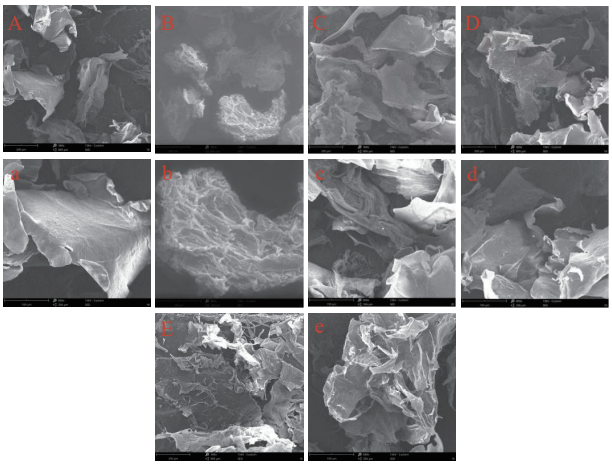


图 1　不同改性处理前后 PIDF 的表面微观结构

Fig.1　Microstructure of PIDF before and after different modification treatments

注：A 为 O-PIDF（300×）；a 为 O-PIDF（800×）；B 为 US-PIDF（300×）；b 为 US-PIDF（800×）；C 为 UHPH-PIDF（300×）；c 为 UHPH-PIDF（800×）；D 为 HCl-PIDF（300×）；d 为 HCl-PIDF（800×）；E 为 AHP-PIDF（300×）；e 为 AHP-PIDF（800×）。

2.2　改性处理 PIDF 的 FT-IR 分析

如图 2 所示，原始和改性后的 PIDF 具有相似的光谱模式。在 3300、2930、1630、1336 和 1035 cm^{-1} 处的吸收峰，分别与-OH、C-H、C=O、-CH 和 C-O 振动相关，是 IDF 的典型吸收峰[24]。在 3300 cm^{-1} 处观察到的吸收峰主要与纤维素、半纤维素和木质素中-OH 的伸缩振动有关。与 O-PIDF 相比，经过改性处理后的 PIDF，在 3300 cm^{-1} 处吸收峰强度减弱，这表明分子间氢键的破坏或减弱[25]。2930 cm^{-1} 处的吸收峰是由多糖分子中甲基和亚甲基的 C-H 伸缩振动

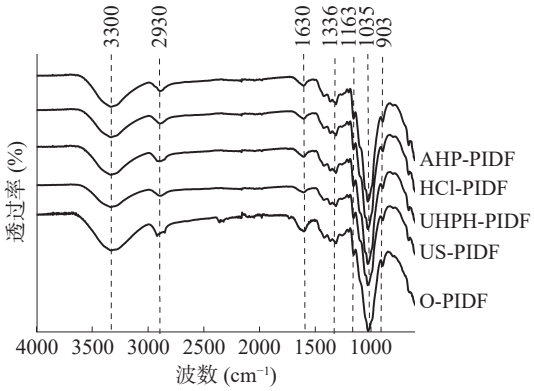


图 2　不同方法改性前后 PIDF 红外光谱图谱

Fig.2　Infrared spectra of PIDF before and after different methods

产生的，反映了纤维素的结构特征[26]。1630 cm^{-1} 处的羰基吸收峰，主要来源于半纤维素的乙酸基、木质素或半纤维素中阿魏酸和香豆酸羧基的酯键振动[27]。1336 cm^{-1} 处的特征吸收峰，是由 COO-的伸缩振动和价态振动共同引发的[28]。在 1035 cm^{-1} 处的吸收峰是源于纤维素和半纤维素中的 C-O 基团伸缩振动[29]。903 cm^{-1} 处的吸收峰，则代表葡萄糖分子中 C-H 的弯曲振动。这些现象表明，超声改性处理对多糖中由羟基形成的氢键造成了一定程度的破坏[30]。UHPH 处理会破坏纤维素晶体结构域[31]。综上，不同的改性方式并未改变 PIDF 中官能团的类型，但对官能团的伸缩振动产生了影响。

2.3 改性处理 PIDF 的 XRD 分析

IDF 的结晶度直接影响其物理和化学性质，如保水、保油和吸水膨胀能力等[32]。如图 3 所示，不同改性处理对 PIDF 的 XRD 图谱大致趋势相似。O-PIDF 在 15.53°和 21.77°处显示出明显的特征衍射峰，在 34.29°处观察到的衍射峰强度降低，证实 O-PIDF 存在具有无定形和结晶区域的纤维素 I 型结构[33]。改性前后 PIDF 样品呈现出晶态与非晶态的共存，表明改性处理并未改变 PIDF 的晶体类型。在 15.53°附近，四种改性样品的衍射峰变宽，可能是改性过程中纤维素变化导致的[34]。在 21.77°附近，US-PIDF 和 UHPH-PIDF 峰形变得尖锐，可能与纤维素无定形区域的氢键断裂有关[17,33]。HCl-PIDF 峰形变宽、峰强度变弱，可能与氢离子进入并破坏了 PIDF 的无定形区域，且对非结晶区蛋白和糖键进行破坏，降低了无定形区域，聚合度降低有关[35]。PIDF 在 34.29°处峰强度降低，这可能是由于原始有序纤维素结构的破坏和结晶度的变化有关[36]。研究显示，PIDF 的峰位置未呈现显著性改变，此现象表明纤维的结晶类型未发生改变。

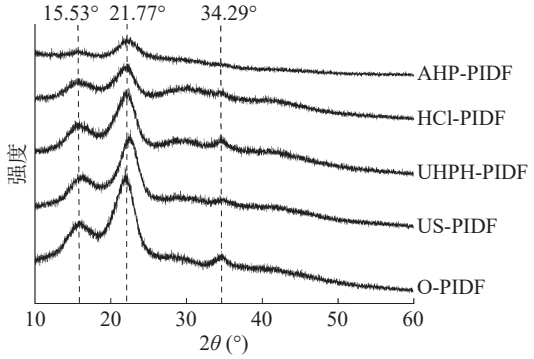


图 3 不同方法改性前后 PIDF 的 XRD 图

Fig.3 XRD patterns of PIDF before and after modification by different methods

2.4 改性处理对 PIDF 粒径的影响

粒径是 IDF 物理化学和功能特性的一个重要特征，与 WSC、吸附能力以及胃肠道转运时间有关[37]。如图 4 所示，US-PIDF（121.22 μm）、UHPH-PIDF（138.07 μm）、HCl-PIDF（156.67 μm）和 AHP-PIDF（191.70 μm）低于 O-PIDF（391.98 μm）的粒径。改性后粒径降低的现象与 AHP 处理后木质素的降解和部分醇溶性物质的去除有关，这种粒径细化现象与水合性能的改善呈现正相关关系[38]。酸处理后粒径减小，不仅增大了膳食纤维颗粒比表面积，还增加了化学物质与吸附位点的接触，进而增强其吸附能力[39]。UHPH 处理导致的粒径下降则归因于超高压流体作用所产生的高速剪切、对流碰撞、空穴等物理作用促使 PIDF 的结构被破坏，颗粒断裂，从而导致粒径减小[40]。超声处理粒径减小归因于超声波对 PIDF 的空化作用[41]。膳食纤维的粒径越小，比表面积越大，有利于其内部活性基团的暴露，提高其水合能力和吸附能力[42]。

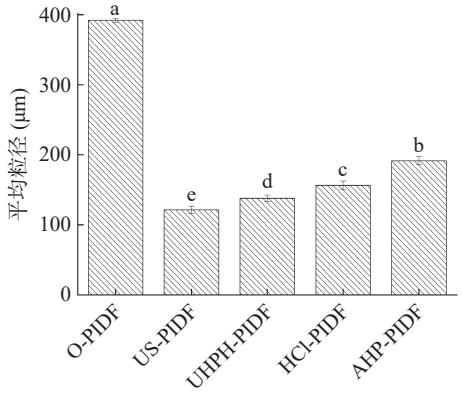


图 4 不同方法改性前后 PIDF 的平均粒径

Fig.4 Average particle size of PIDF before and after modification by different methods

注：不同字母表示差异显著（$P<0.05$），图 5~图 7 同。

2.5 改性处理对 PIDF 水合力的影响

高 WHC 可促进排泄量，加快排便速度，从而缩短残留食物在胃肠道内的滞留时间，有效预防肠道疾病的发展[43]。如表 1 所示，改性后 PIDF 的 WHC 显著高于 O-PIDF（$P<0.05$），与 O-PIDF 相比，AHP-PIDF 的 WHC 达到最大值 23.91±0.02 g/g，增加了 3.76 倍。这种变化归因于改性后 PIDF 多孔和层压结构可以暴露更多的亲水性基团并增加比表面积，使其保水性增强[44]，且 AHP 处理可以破坏（半）纤维素内部的氢键，导致果胶的随机脱酯，暴露纤维结构内更多的亲水基团，使纤维内部结构松动，从而提高

表 1 不同方法改性前后 PIDF 的持水力、持油力和吸水膨胀力

Table 1 Water-holding capacity, oil-holding capacity and water absorption expansion capacity of PIDF before and after different methods

样品	持水力(g/g)	持油力(g/g)	吸水膨胀力(mL/g)
O-PIDF	5.02±0.28^{e}	4.56±0.03^{e}	5.68±0.05^{e}
US-PIDF	9.37±0.44^{d}	16.68±0.20^{d}	12.78±0.31^{a}
UHPH-PIDF	20.97±0.06^{b}	17.76±0.14^{c}	11.29±0.08^{b}
HCl-PIDF	13.94±0.31^{c}	18.36±0.31^{b}	10.21±0.15^{d}
AHP-PIDF	23.91±0.02^{a}	19.68±0.03^{a}	10.55±0.12^{c}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

PIDF 的 WHC[22]。

OHC 对于防止食物加工过程中的油损失以及通过有效结合人类消化系统内的饮食脂肪帮助降低血清胆固醇水平至关重要[45]。如表 1 所示，改性后的 PIDF 持油能力显著增加（P<0.05）。US-PIDF、UHPH-PIDF、HCl-PIDF 和AHP-PIDF 的WHC 高于O-PIDF，其中 AHP-PIDF 的 OHC 达到最大值（19.68±0.03 g/g），增加了 3.31 倍。AHP 处理可以去除 PIDF 中的一些纤维素、半纤维素和木质素，并暴露出纤维中更多的官能团，增强 PIDF 对油脂的截留，提高 OHC[21]。

WSC 是指 DF 在饮水时膨胀或形成凝胶状物质的能力[6]。如表 1 所示，改性后 PIDF 的 WSC 显著高于 O-PIDF（P<0.05）。其中 US-PIDF的 WSC 达到最大值（12.78±0.31 mL/g），增加了 1.25倍。这种变化归因于超声处理增加孔隙率，并通过空化效应打开纤维基质，可以帮助 IDF 形成多孔结构，这有利于提高 WSC[19]。WHC、OHC 和 WSC 是IDF 生理功能的重要指标，较强的水合能力有助于增强饱腹感和促进胃肠蠕动。因此，改性处理后 PIDF的生理功能得到了一定程度的增强。

2.6　改性处理对 PIDF 的 GAC 影响

葡萄糖吸附能力是评价膳食纤维抑制餐后血糖升高的重要指标。如图 5 所示，四种改性方法均能显著（P<0.05）提高 PIDF 的 GAC。与 O-PIDF 相比，US-PIDF葡萄糖吸附能力最大为 862.74 mg/g，提高了 21.72%。这可能与 IDF 能够通过主动吸附葡萄糖分子以及形成物理屏障来影响葡萄糖的吸收有关[46]。吸附能力的提高可能源于改性处理使得 PIDF 的孔隙率提高，从而暴露出更多的活性基团；同时在超声改性过程中，膳食纤维内部形成了多孔结构，比表面积显著增大，从而使得更多的葡萄糖分子能够被吸附，最终促使 GAC 升高[47]。UHPH 处理不仅显著降低了 PIDF 在菠萝 DF 中的占比，而且可能通过破坏 PIDF 中的多糖链对其水合作用特性产生不利影响[48]。AHP 改性处理，PIDF 的表面粗糙度增加，孔隙数量增多，比表面积显著增大，增强了纤维对葡萄糖分子的捕获能力，吸附效率随之提升[49]。因此，通过不同改性处理的 PIDF 可有效将小肠中的葡萄糖保持在低水平，从而有助于降低餐后高血糖症[2]。本文研究结果表明，PIDF 可能是开发高血糖友好产品的资源。

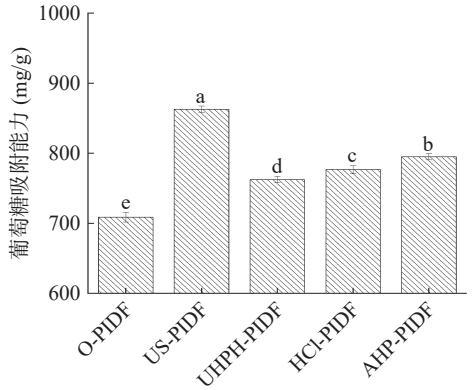


图 5　不同方法改性前后 PIDF 的葡萄糖吸附能力

Fig.5　Glucose adsorption capacity of PIDF before and after modification by different methods

2.7　改性处理对 PIDF 的 NAC 影响

在 pH2.0（模拟胃环境）和 pH7.0（模拟肠环境）的条件下，探究了不同改性处理的 PIDF 对 NAC 的影响。PIDF 具备吸收亚硝酸盐的能力，通常情况下，体内亚硝酸盐的排出量和膳食纤维的 NAC 有关联[16]。亚硝酸盐可以与胺结合产生 N-硝基化合物，这些化合物是潜在的致癌物，但 IDF 可以从机体内吸附一些亚硝酸盐，具有预防胃癌和降低其对人体毒性的作用[50]。

改性处理前后 PIDF 的 NAC 如图 6 所示。与 O-PIDF 相比，四种改性方法对改善 PIDF 的 NAC 表现出显著效果（P<0.05），pH2.0 时 AHP 吸附能力最大为 450.66 μg/g，与 O-PIDF 相比提高了 9.06 倍。这主要归因于经改性处理后，PIDF 的粒径减小，更多活性位点及网络结构得以暴露，进而提升了其对亚硝酸盐的吸附能力，然而该吸附过程受体系酸碱性的显著影响，在 pH2.0 时的吸附量高于 pH7.0 时，这与 YANG 等[51] 利用高速剪切协同酶改性后的竹笋 DF，对亚硝酸根离子吸附的研究结果相吻合。此外，AHP 处理相较于 UHPH 处理在模拟人体胃肠环境中的 NAC 较高，这可能与 AHP 处理后 PIDF 的结构变化以及香豆酸或阿魏酸等活性基团的暴露有关[52]。

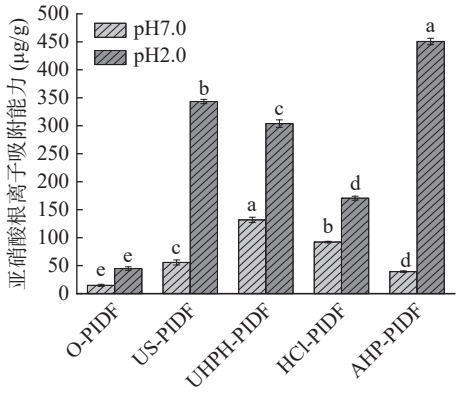


图 6　不同方法改性前后 PIDF 的亚硝酸根离子吸附能力

Fig.6　Nitrite ion adsorption capacity of PIDF before and after modification by different methods

2.8　改性处理对 PIDF 的 CAC 影响

IDF 对胆固醇吸附能力越高，越能有效地降低血浆胆固醇水平，从而减少机体对胆固醇的吸收[53]。如图 7 所示，UHPH-PIDF 的胆固醇吸附量达到峰值 4.11 mg/g，较未改性样品提升约 2.00 倍。本文还发现，在两种物理改性方法中，UHPH-PIDF 对 CAC 吸附能力比 US-PIDF 好；而两种化学改性方法中，AHP-PIDF 比 HCl-PIDF 吸附能力好。与 O-PIDF 相

比，改性后的吸附能力显著提高（$P<0.05$）。这与改性后 PIDF 表面形成的疏松多孔蜂窝结构导致的比表面积增大密切相关[54]。此外，改性过程中膳食纤维水溶性成分的增加，可能增强了 PIDF 对胆固醇分子的吸附作用[55]。经过两种物理方法改性处理后，增加了 PIDF 的表面积，因此增强了 PIDF 的 CAC[16]。

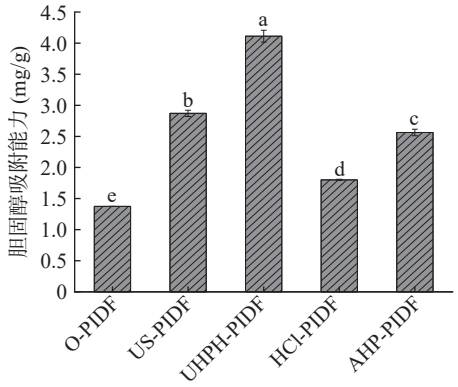


图 7 不同方法改性前后 PIDF 的胆固醇吸附能力

Fig.7 Cholesterol adsorption capacity of PIDF before and after modification by different methods

3 结论

本文采用了 US、UHPH、HCl、AHP 处理对 PIDF 进行改性，分别比较了改性前后 PIDF 的结构特性和理化特性。研究结果表明，四种方法改性处理对 PIDF 的结构和功能性质的影响效果显著。与 O-PIDF 相比，四种改性处理使 PIDF 颗粒表面形成了褶皱形态，增加了其表面的粗糙度和孔隙数量。改性处理并未引入新的官能团并且没有发生结晶类型的改变。改性处理显著减小了 PIDF 的粒径，其中 US-PIDF 粒径减小最明显。相比之下，US-PIDF 的吸水膨胀力和葡萄糖吸附能力的改善效果最好；UHPH-PIDF 胆固醇吸附能力改善效果最好；AHP-PIDF 的持水力、持油力和亚硝酸根离子吸附能力（pH2.0）改善效果最好。综上所述，四种改性方法可以改善 PIDF 的功能性质，使其在食品工业中具有更广泛的应用潜力。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] DHAR P, DEKA S C. Effect of ultrasound-assisted extraction of dietary fiber from the sweetest variety Queen pineapple waste of Tripura (India)[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(6): e14220.

[2] INA S, HAMADA A, NAKAMURA H, et al. Rice (*Oryza sativa* Japonica) albumin hydrolysates suppress postprandial blood glucose elevation by adsorbing glucose and inhibiting Na^+-D-glucose cotransporter SGLT1 expression[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103603.

[3] DHAR P, NICKHIL C, PANDISELVAM R, et al. Pineapple waste-based-biorefinery for sustainable generation of value-added products[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(20): 24927−24948.

[4] BYRESH T S, MALINI B, MEENA L, et al. Effect of addition of pineapple peel powder on white finger millet vegan probiotic beverage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(10): e16905.

[5] LEI Hongyu, ZHANG Yu, GUAN Tianci, et al. Modification of black soybean (*Glycine max* (L.) merr.) residue insoluble dietary fiber with ultrasonic, microwave, high temperature and high-pressure, and extrusion[J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143020.

[6] LIU Tong, LEI Hongyu, ZHEN Xinyu, et al. Advancements in modifying insoluble dietary fiber: Exploring the microstructure, physicochemical properties, biological activity, and applications in food industry: A review[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140154.

[7] ARAYICI M E, MERT-OZUPEK N, YALCIN F, et al. Soluble and insoluble dietary fiber consumption and colorectal cancer risk: A systematic review and meta-analysis[J]. Nutrition and Cancer, 2022, 74(7): 2412−2425.

[8] 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.

[9] TOSH S M, BORDENAVE N. Emerging science on benefits of whole grain oat and barley and their soluble dietary fibers for heart health, glycemic response, and gut microbiota[J]. Nutrition Reviews, 2020, 78(Supplement_1): 13−20.

[10] SALAH M, AZAB M, RAMADAN A, et al. New insights on obesity and diabetes from gut microbiome alterations in Egyptian adults[J]. OMICS: A Journal of Integrative Biology, 2019, 23(10): 477−485.

[11] HUANG Liurong, DING Xiaona, ZHAO Yunshu, et al. Modification of insoluble dietary fiber from garlic straw with ultrasonic treatment[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(1): e13399.

[12] GAO Xia, YI Xiangzhou, PEI Zhisheng, et al. Modification of coconut insoluble dietary fiber by enzymatic extraction and high-pressure homogenization: Physicochemical property changes and inhibitory effects on pancreatic lipase activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 310: 143280.

[13] WANG Lei, TIAN Yingpeng, CHEN Yixuan, 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.

[14] 李金隆, 魏书音, 孟珺, 等. 碱性过氧化氢改性预处理对玉米芯不溶性膳食纤维的理化性质及功能特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(3): 48−55. [LI Jinlong, WEI Shuyin, MENG Jun, et al. Effect of alkaline hydrogen peroxide modified pretreatment on physicochemical properties and functional characteristics of insoluble dietary fiber from corncob[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(3): 48−55.]

[15] 刘鹏, 于潇淳, 周家鹏, 等. 菠萝果渣中不溶性膳食纤维提取工艺优化及其功能特性研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(1): 110−115. [LIU Peng, YU Xiaochun, ZHOU Jiapeng, et al. Optimization of extraction process and functional characteristics of insoluble dietary fiber from pineapple pomace[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(1): 110−115.]

[16] 李爽. 超声处理及纳豆芽孢杆菌发酵对豆渣不溶性膳食纤维改性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. [LI Shuang. Modification of okara insoluble dietary fiber by ultrasonic treatment

and *Bacillus* natto fermentation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.]
[17] 游玉明, 王昱圭, 张洁, 等. 高压均质处理对竹笋膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 30−36. [YOU Yuming, WANG Yugui, ZHANG Jie, et al. The effect of high-pressure homogenization on physicochemical and structural properties of bamboo shoots dietary fiber[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 30−36.]
[18] 刘静娜, 庄远红. 盐酸改性西瓜皮不溶性膳食纤维对亚硝酸盐的吸附作用[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(4): 72−77. [LIU Jingna, ZHUANG Yuanhong. Adsorption of nitrite by hydrochloric acid modified insoluble dietary fiber in watermelon peel[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(4): 72−77.]
[19] ZHU Yulian, JI Xiaolong, 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.
[20] ZHANG Ning, HUANG Caihuan, OU Shiyi. *In vitro* binding capacities of three dietary fibers and their mixture for four toxic elements, cholesterol, and bile acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 236−239.
[21] ZHU Xindi, LUNDBERG B, CHENG Yanling, et al. Effect of high-pressure homogenization on the flow properties of *Citrus* peel fibers[J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(3): e12659.
[22] ZHANG Yue, QI Junru, ZENG Weiqi, et al. Properties of dietary fiber from *Citrus* obtained through alkaline hydrogen peroxide treatment and homogenization treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125873.
[23] ZHANG Yue, LIAO Jinsong, QI Junru. Functional and structural properties of dietary fiber from *Citrus* peel affected by the alkali combined with high-speed homogenization treatment[J]. LWT, 2020, 128: 109397.
[24] LIAO Aimei, ZHANG Jie, YANG Zhenlin, et al. Structural, physicochemical, and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber modified with probiotic fermentation[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 803440.
[25] JIANG Guihun, RAMACHANDRAIAH K, TAN Chaoyi, et al. Modification of ginseng insoluble dietary fiber by enzymatic method: Structural, rheological, thermal and functional properties [J]. Foods, 2023, 12(14): 2809.
[26] ULLAH I, YIN Tao, XIONG Shanbai, 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.
[27] LUO Xianliang, WANG Qi, FANG Dongya, 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] CHU Jiaxi, ZHAO Haizhen, LU Zhaoxin, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus* natto[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 79−86.
[29] KUREK M A, KARP S, WYRWISZ J, et al. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*) and millet (*Panicum miliaceum*)[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 321−330.
[30] WANG Chenzhi, LI Lin, SUN Xin, et al. High-speed shearing of soybean flour suspension disintegrates the component cell layers and modifies the hydration properties of okara fibers[J]. LWT, 2019, 116: 108505.
[31] LIU Yanlan, ZHANG Hongbang, YI Cuiping, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128352.
[32] LIN Yanan, WANG Haixing, RAO Wei, et al. Structural characteristics of dietary fiber (*Vigna radiata* L. Hull) and its inhibitory effect on phospholipid digestion as an additive in fish floss[J]. Food Control, 2019, 98: 74−81.
[33] SUN Congcong, WU Xuefeng, CHEN Xiaoju, et al. Production and characterization of okara dietary fiber produced by fermentation with *Monascus* anka[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126243.
[34] SUN Haixuan, GE Weiben, SONG Deao, et al. Structure, physicochemical and adsorption properties of insoluble dietary fiber from *Lycium barbarum* residue: A potential functional factor[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104703.
[35] 王金玉, 王赛男, 卢佳宏, 等. 盐酸改性豆渣不溶性膳食纤维对亚硝酸盐的吸附特性及机理[J]. 大豆科学, 2022, 41(4): 463−471. [WANG Jinyu, WANG Sainan, LU Jiahong, et al. Adsorption characteristics and mechanism of hydrochloric acid modified okara insoluble dietary fiber to nitrite[J]. Soybean Science, 2022, 41(4): 463−471.]
[36] MENG Weimin, HU Miao, ZHANG Pengfei, et al. Efficient conversion of insoluble dietary fiber to soluble dietary fiber by *Bacillus subtilis* BSNK-5 fermentation of okara and improvement of their structural and functional properties[J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143188.
[37] DONG Wenjiang, WANG Dandan, HU Rongsuo, et al. Chemical composition, structural and functional properties of soluble dietary fiber obtained from coffee peel using different extraction methods[J]. Food Research International, 2020, 136: 109497.
[38] HUANG Jiayi, LIAO Jinsong, QI Junru, et al. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from *Citrus* peel[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106140.
[39] GAO Wenjie, CHEN Feng, WANG Xi, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2222−2255.
[40] van BUGGENHOUT S, WALLECAN J, CHRISTIAENS S, et al. Influence of high-pressure homogenization on functional properties of orange pulp[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 30: 51−60.
[41] FALSAFI S R, MAGHSOUDLOU Y, ROSTAMABADI H, et al. Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 311−320.
[42] REZVANI Z, GOLI S A H. Fabrication, physicochemical properties and structural characteristics of nanoparticles from carrot pomace and its insoluble dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109131.
[43] XIAO Zhuqian, YANG Xinyi, ZHAO Wenwen, et al. Physicochemical properties of insoluble dietary fiber from pomelo (*Citrus* grandis) peel modified by ball milling[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(2): e16242.
[44] 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.

[45] GAN Jiapan, HUANG Ziyan, YU Qiang, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105549.

[46] JIANG Zhanmei, MU Sinan, MA Chenglong, et al. Consequences of ball milling combined with high-pressure homogenization on structure, physicochemical and rheological properties of *Citrus* fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107515.

[47] ZHANG Fangfang, YI Wangrui, CAO Jun, et al. Microstructure characteristics of tea seed dietary fibre and its effect on cholesterol, glucose and nitrite ion adsorption capacities *in vitro*: A comparison study among different modifications[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(4): 1781−1791.

[48] YAN Ling, LI Tian, LIU Changhong, et al. Effects of high hydrostatic pressure and superfine grinding treatment on physicochemical/functional properties of pear pomace and chemical composition of its soluble dietary fibre[J]. LWT, 2019, 107: 171−177.

[49] SONG Liwen, QI Junru, LIAO Jinsong, et al. Enzymatic and enzyme-physical modification of *Citrus* fiber by xylanase and planetary ball milling treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107015.

[50] SANG Jiaqi, LI Lu, WEN Jing, et al. Chemical composition, structural and functional properties of insoluble dietary fiber obtained from the Shatian pomelo peel sponge layer using different modification methods[J]. LWT, 2022, 165: 113737.

[51] YANG Mo, WU Liangru, CAO Chongjiang, et al. Improved function of bamboo shoot fibre by high-speed shear dispersing combined with enzyme treatment[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(3): 844−853.

[52] ZHU Yu, CHU Jiaxi, LU Zhaoxin, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italic*) bran[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 456−461.

[53] SI Jingyu, YANG Chaoran, CHEN Yi, et al. Structural properties and adsorption capacities of *Mesona* chinensis Benth residues dietary fiber prepared by cellulase treatment assisted by *Aspergillus niger* or *Trichoderma reesei*[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135149.

[54] XU Honggao, JIAO Qiong, YUAN Fang, et al. *In vitro* binding capacities and physicochemical properties of soluble fiber prepared by microfluidization pretreatment and cellulase hydrolysis of peach pomace[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 677−684.

[55] CHEN Ye, YE Ran, YIN Luo, et al. Novel blasting extrusion processing improved the physicochemical properties of soluble dietary fiber from soybean residue and *in vivo* evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 1−8.