王楠, 宋昕凌, 马彪, 等. 酶法结合化学改性对油棕粕膳食纤维理化性质与降血糖活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 43−50. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050200

WANG Nan, SONG Xinling, MA Biao, et al. Effects of Enzymolysis Combined with Chemical Modification on Physicochemical Properties and Hypoglycemic Activity of Oil Palm Kernel Expeller Dietary Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 43−50. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050200

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

酶法结合化学改性对油棕粕膳食纤维理化性质与降血糖活性的影响

王　楠, 宋昕凌, 马　彪, 刘心语, 张怡萱, 郑亚军*, 王　浩
（山西师范大学食品科学学院, 山西太原 030092）

摘　要: 本文探究酶法结合羧甲基化或乙酰化改性对油棕粕膳食纤维的化学组成、结构、理化性质与降血糖活性的影响。结果表明，两种复合改性均使油棕粕膳食纤维的微观结构变得疏松多孔；FT-IR 光谱证实化学改性成功引入了羧甲基和乙酰基，且 3400 cm^{-1} 附近吸收峰的伸缩振动说明复合改性破坏了纤维中的氢键。经酶法结合羧甲基改性和酶法结合乙酰化改性处理后，油棕粕纤维的可溶性膳食纤维含量从 4.00% 显著增至 16.14% 和 12.85%（P<0.05）；持水力从 2.06 g/g 分别增至 5.72 g/g 和 4.15 g/g；膨胀力从 1.01 mL/g 分别增至 3.58 mL/g 和 2.46 mL/g；黏度从 4.08 cP 分别增至 13.90 cP 和 7.71 cP；葡萄糖吸附能力从 1.84 μmol/g 分别增至 3.99 μmol/g 和 4.53 μmol/g；葡萄糖扩散抑制能力从 16.32% 分别增至 38.18% 和 25.15%。此外，经酶法结合羧甲基处理的纤维，其 α-淀粉酶抑制活性（19.41%）较未改性纤维提升了 0.43 倍，而酶法结合乙酰化处理的纤维该活性并未得到提高。综上所述，酶法结合羧甲基或乙酰化均可一定程度增强油棕粕膳食纤维的理化性质与降血糖活性，其中酶法结合羧甲基改性的效果最优，这有助于扩大其在食品工业生产中的应用。

关键词: 油棕粕膳食纤维, 酶法改性, 羧甲基化, 乙酰化, 理化性质, 降血糖活性
中图分类号: TS229　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0043−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050200
本文网刊:

Effects of Enzymolysis Combined with Chemical Modification on Physicochemical Properties and Hypoglycemic Activity of Oil Palm Kernel Expeller Dietary Fiber

WANG Nan, SONG Xinling, MA Biao, LIU Xinyu, ZHANG Yixuan, ZHENG Yajun*, WANG Hao
（College of Food Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030092, China）

Abstract: This study investigated the effects of enzymolysis combined with carboxymethylation or acetylation modification on the chemical composition, structure, physicochemical properties, and hypoglycemic activity of oil palm kernel expeller dietary fiber. The results demonstrated that both composite modification methods rendered the microstructure of oil palm kernel expeller dietary fiber more loose and porous. Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy confirmed the successful introduction of carboxymethyl and acetyl groups via chemical modification, and the stretching vibration of the absorption peak around 3400 cm^{-1} indicated that the composite modifications disrupted the hydrogen bonds in the fiber. After enzymolysis combined with carboxymethylation and enzymolysis combined with acetylation, the soluble dietary fiber content of oil palm kernel expeller fiber increased significantly from 4.00% to 16.14% and 12.85% (P<0.05); water-holding

收稿日期: 2025−05−21
基金项目: 山西省自然科学基金面上项目（202203021221139）; 山西师范大学 2025 年大学生创新创业计划项目（2025DCXM-63）; 山西师范大学 2025 年大学生创新创业计划项目（2025DCXM-71）。
作者简介: 王楠（2004−）, 女, 大学本科, 研究方向: 功能性食品的研究与开发, E-mail: 18635975320@163.com。
*** 通信作者:** 郑亚军（1980−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能性食品的研究与开发, E-mail: zhengyajun200705@163.com。

capacity rose from 2.06 g/g to 5.72 g/g and 4.15 g/g; water-swelling capacity increased from 1.01 mL/g to 3.58 mL/g and 2.46 mL/g; viscosity increased from 4.08 cP to 13.90 cP and 7.71 cP; glucose adsorption capacity enhanced from 1.84 μmol/g to 3.99 μmol/g and 4.53 μmol/g; and glucose diffusion inhibition capacity improved from 16.32% to 38.18% and 25.15%, respectively. In addition, for the oil palm kernel expeller dietary fiber treated with enzymolysis combined with carboxymethylation, its α-amylase inhibitory activity (19.41%) was increased by 0.43 times compared with that of the unmodified fiber, while the activity of the oil palm kernel expeller dietary fiber treated with enzymolysis combined with acetylation was not improved. In conclusion, enzymolysis combined with either carboxymethylation or acetylation could enhance the physicochemical properties and hypoglycemic activity of oil palm kernel expeller dietary fiber to a certain extent, with enzymolysis combined with carboxymethylation yielding the best results. This thus expands its application potential in the food industry.

Key words: oil palm kernel expeller dietary fiber; enzymatic modification; carboxymethylation; acetylation; physicochemical properties; hypoglycemic activity

油棕(*Elaeis guineensis* Jacp.)作为世界上产油率最高的多年生油料作物,素有“世界油王”之称,其脱脂后的副产物富含蛋白质、碳水化合物、膳食纤维及微量元素等,是极具开发潜力的植物源膳食纤维资源[1−2]。膳食纤维作为人体必需的“第七类营养素”,通过调节肠道菌群、抑制碳水化合物消化酶活性、延缓葡萄糖吸收等机制,在预防 2 型糖尿病、心血管疾病及改善代谢综合征等方面发挥着非常重要的作用[3−5]。其中,可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)因具有亲水性基团丰富、水合能力强等特性,能够吸附葡萄糖、胆酸及胆固醇,进而降低餐后血糖峰值并改善机体对胰岛素的敏感性[6]。然而,天然油棕粕膳食纤维(oil palm kernel expeller dietary fiber, OPKEDF)中可溶性成分含量较低(仅为 4.00 g/100 g),且功能活性较差,限制了其在食品工业中的应用,目前大多被用作饲料或肥料[7]。

通过改性可以显著提高膳食纤维的理化性质和功能活性。膳食纤维的改性技术主要包括物理、化学及酶法改性。酶法改性通过纤维素酶、半纤维素酶等降解膳食纤维的糖苷键,可有效增加可溶性成分含量并改善其理化性质[8−9]。化学改性如羧甲基化、乙酰化等,通过引入极性基团(如羧甲基、乙酰基)增强膳食纤维的亲水性和膨胀力,进一步提升其功能活性[10−11]。酶法结合化学改性相较于单一改性方法,更能有效提高膳食纤维的理化性质和功能活性,其通过不同方法的互补作用,可协同改善膳食纤维的结构与功能。例如田海龙[9] 发现酶法结合乙酰化处理能显著提高小米糠膳食纤维的葡萄糖吸附能力,ZHENG 等[11] 证实酶法结合乙酰化和羟丙基化增强了小米糠膳食纤维对 α-淀粉酶的抑制活性。然而,目前针对油棕膳食纤维的复合改性研究仍极为有限,其改性后化学组成的动态变化、微观结构特征及其对理化性质与降血糖活性的影响机制尚不明确。

因此,本研究以油棕核仁脱脂副产物为原料,采用酶法分别结合羧甲基化、乙酰化技术对其膳食纤维进行改性,分析不同改性方法对油棕粕膳食纤维的化学组成(总膳食纤维、可溶性/不可溶性膳食纤维含量等)、理化性质(持水性、膨胀力、黏度)及降血糖活性(葡萄糖吸附能力、葡萄糖扩散抑制能力、α-淀粉酶抑制活性)的影响。旨在为油棕膳食纤维的深度开发提供理论依据,推动其在功能性食品中的应用,同时拓展油棕副产物资源化利用的新途径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

油棕 海南省海口市大致坡加工厂提供;石油醚、氢氧化钠、乙酸、氯乙酸、无水乙醇、盐酸、二甲基亚砜、无水碳酸钠、乙酸异丙烯酯、异丙醇、甲醇、苯酚、浓硫酸 分析纯,天津市大茂化学试剂厂;α-淀粉酶(1.0×10^5 U/g)、葡萄糖淀粉酶(1.0×10^5 U/g)、木瓜蛋白酶(5×10^3 U/g)、纤维素酶(3.0×10^5 U/g)、木质素酶(75 U/g) 上海源叶生物科技有限公司。

XR 53648 数显恒温水浴锅 金坛区西城新镜仪器厂;101-3AB 干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司;DS-37 高温鼓风干燥箱 上海灯晟仪器制造有限公司;JC-TP 万分之一电子天平 青岛精诚仪器仪表有限公司;PHS-3E pH 计 鹤壁市华晨电子科技有限公司;60SH 恒温定时电动搅拌器 上海析牛莱伯仪器有限公司;RE-201D 旋转蒸发器 郑州科达机械仪器设备有限公司;KQ-300E 型超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;FB-1 万用电炉 济南森亚实验仪器有限公司;GNXL-8 马弗炉 鹤壁市隆桦仪器仪表有限公司;UV-1800PC 紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;LB-SHA-2 双功能数显恒温振荡器 李沧区恒瑞兴达仪器仪表行;TGL-15B 离心机 江苏华大制造有限公司;SZ-2000B-3 超高速多功能粉碎机 深圳尚族机电有限公司;RVA4500 快速黏度分析仪 津越工业设备(武汉)有限公司;JSM-IT800 扫描电子显微镜 惠州市华高仪器设备有限公司;Nicolet Apex FTIR 光谱仪 赛默飞世尔科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油棕粕膳食纤维的制备 参考田海龙[9] 和李肖肖[10] 的方法略作修改。首先将油棕果皮去除得到油棕核仁,粗粉碎后用 60~90 ℃ 沸点的石油醚(1∶10, m/v)脱脂 8 h,得到油棕粕(oil palm kernel expeller,

OPKE）。将 OPKE 经粉碎机研磨后过 100 目标准筛，取 20 g 筛下粉末置于锥形瓶中，加入 200 mL 浓度为 100 μmol/L 的磷酸盐缓冲液充分混匀；加入 0.3 g α-淀粉酶，于 90 ℃ 恒温振荡水浴中反应 1.5 h，期间每 30 min 用 0.1 mol/L NaOH/HCl 溶液调节 pH 至 5.0；调 pH 至 7.0 后加入 0.1 g 木瓜蛋白酶，于 50 ℃ 恒温反应 2 h；调 pH 至 4.0 后加入 0.2 g 糖化酶，50 ℃ 继续反应 2 h。反应结束后经沸水浴灭酶 10 min，过滤并收集滤渣，于 50 ℃ 干燥 3 h，制得油棕粕膳食纤维（oil palm kernel expeller dietary fiber，OPKEDF）。

1.2.2　双酶改性油棕粕膳食纤维的制备　参考田海龙[9]和李肖肖[10]的方法略作修改。精确称量 20 g OPKEDF 样品，转移至 400 mL 乙酸缓冲体系（pH4.5，0.1 mol/L）中充分混匀。加入纤维素酶（75 U/g OPKEDF），于 35 ℃ 恒温水浴中搅拌酶解 2 h；随后使用碱液调节体系 pH 至 6.5，加入木质素酶（25 U/g OPKEDF），继续在 35 ℃ 恒温水浴振荡器中酶解 2 h。反应结束后将分散液在沸水中加热 10 min 使酶失活，过滤并收集滤渣，于 50 ℃ 干燥 6 h，制得酶解改性的 OPKEDF（OPKEDF-E）。

1.2.3　酶法结合羧甲基改性油棕粕膳食纤维的制备　参考李肖肖[10]的方法并略作修改。称取 20 g OPKEDF-E，加入 400 mL、70 mmol/L 的 NaOH 溶液（溶于 85% 乙醇中，v/v），在 35 ℃ 恒温环境中碱化处理 70 min；随后加入 37 mL、3.5 mmol/L 的氯乙酸中（溶于 85% 乙醇溶液），在 35 ℃、115 r/min 水浴振荡条件下反应 30 min；缓慢加入 45 mL、3.4 mol/L 的 NaOH 溶液，升温至 53 ℃ 持续反应 4 h。反应体系经 8.75 mol/L 的醋酸中和至中性，4000 r/min 离心 30 min 收集沉淀，所得沉淀用无水乙醇（每次 15 mL）反复洗涤，并于 50 ℃ 下干燥 7 h，制得酶法结合羧甲基改性的 OPKEDF（OPKEDF-EC）。

1.2.4　酶法结合乙酰化改性油棕粕膳食纤维的制备　参考 ZHENG 等[11]的方法并略作修改。称取 20 g OPKEDF-E 置于三角瓶中，沿内壁缓慢加入 270 mL 二甲基亚砜，在 70 ℃ 水浴中以 45 r/min 搅拌反应 3 h；降温至 40 ℃ 后，加入 0.3 g 碳酸钠和 16 mL 的乙酸异丙烯酯（7.4 mol/L），以 145 r/min 搅拌反应 70 h。反应结束后过滤，滤渣用异丙醇纯化 3 次，于 50 ℃ 下干燥 7 h，制得酶法结合乙酰化改性的 OPKEDF（OPKEDF-EA）。

1.2.5　油棕粕膳食纤维化学组成的测定　水分含量采用恒温干燥恒重法测定（GB 5009.3-2016）；蛋白质含量采用凯氏定氮法测定（GB 5009.5-2016）；脂肪含量采用索氏抽提法测定（GB 5009.6-2016）；灰分含量采用马弗炉高温灼烧法测定（GB 5009.4-2016）；总膳食纤维、可溶性膳食纤维及不可溶性膳食纤维含量均采用复合酶重量分析法（GB 5009.88-2023）进行测定。

1.2.6　表面微观结构的观察　参考 YU 等[12]的方法，运用扫描电子显微镜（SEM）对 OPKEDF、OPKEDF-EC、OPKEDF-EA 三种样品的表面微观结构进行观察。将干燥后的样品均匀涂抹在样品台上，进行喷金处理后放入 SEM 中，并在加速电压为 20 kV，距离为 12.3 mm，电镜标尺为 50 μm，放大倍数为 1000 倍下观察图像并记录。

1.2.7　傅里叶变换红外光谱分析　参考 LI 等[13]的方法，将 0.2 g 干燥的溴化钾与 4 mg 样品充分混合，压制成薄片（直径 1~2 cm、厚度 10 nm），然后在扫描范围为 4000~500 cm^{-1}、分辨率为 4 cm^{-1} 的条件下利用傅里叶变换红外光谱仪扫描样品的 FT-IR 光谱。

1.2.8　油棕粕膳食纤维理化性质的测定

1.2.8.1　持水力测定　参照刘鸿铖等[14]的实验方法并稍作修改。精确称量 0.5 g 纤维样品（m_2）并转移至已称重的 50 mL 离心管中，加入 30 mL 蒸馏水后，于 25 ℃ 恒温条件下静置 12 h。经 4000 r/min 离心 15 min 后，弃去上层清液，使用滤纸吸除残液后进行二次称重（m_1）。持水力计算如公式（1）所示：

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \qquad \text{式（1）}$$

1.2.8.2　膨胀力测定　参考 CHEN 等[15]的实验方法并稍作修改。精确称量 0.5 g（m）纤维样品转移至 20 mL 的量筒中，记录初始干样体积（V_1）。向其中注入 10 mL 蒸馏水，振荡混合均匀后，于 25 ℃ 恒温条件下静置水合 24 h，最终读取膨胀稳定后的体积（V_2）。膨胀力计算如公式（2）所示：

$$\text{膨胀力(mL/g)} = \frac{V_2 - V_1}{m} \qquad \text{式（2）}$$

1.2.8.3　黏度测定　参考 ZHENG 等[16]的方法，精确称量 0.3 g 纤维样品，加入 25 g 蒸馏水，并以 1000 r/min 的转速分散 30 s 使其形成均匀悬浮液。将搅拌桨插入样品筒后固定于黏度仪测试位，盖紧安全罩启动测试程序，全程记录 15 min 的黏度变化曲线。

1.2.9　油棕粕膳食纤维降血糖活性的测定

1.2.9.1　对葡萄糖的吸附能力　将待测纤维用 80% 甲醇浸泡，50 ℃ 振荡 2 h，过滤并收集滤渣，重复 2~3 次，于 60 ℃ 干燥后得到脱糖纤维样品。参考 SI 等[17]的方法并稍作修改。准确称量 1 g 无糖纤维样品，加入 20 mL、0.1 g/L 葡萄糖标准溶液，于 37 ℃ 恒温水浴振荡器中反应 3 h。反应体系经 3000×g 离心 20 min 后，取上清液采用 3,5-二硝基水杨酸（DNS）比色法测定还原糖含量。以葡萄糖为标准物质制作标准曲线为：y=2.9421x−0.071，R^2=0.9748。葡萄糖吸附能力的计算如公式（3）所示：

$$\text{葡萄糖吸附能力(μmol/g)} = \frac{(C_1 - C_2) \times V}{M} \qquad \text{式（3）}$$

式中：V 表示吸附液体积，mL；C_1 表示吸附前的葡萄糖浓度，mmol/L；C_2 表示吸附后的葡萄糖浓度，

mmol/L; M 表示油棕粕膳食纤维样品质量, g。

1.2.9.2 对葡萄糖扩散的抑制能力 参考 ZHENG 等[11] 的方法。准确称量 0.5 g 无糖纤维样品置于 15 mL 葡萄糖标准液(0.2%, w/v)中, 装入截留分子量为 3500 Da 的透析袋(预先于蒸馏水中软化)后转移至含 250 mL 蒸馏水的烧杯, 37 ℃ 水浴 1 h。吸取外液 2 mL, 采用 DNS 比色法测定葡萄糖含量。样品对照组以等量蒸馏水代替葡萄糖溶液, 空白对照组不加无糖纤维样品, 其余步骤同上。葡萄糖扩散抑制能力的计算如公式(4)所示:

$$葡萄糖扩散抑制能力(\%) = 100 - \frac{C_1 - C_2}{C_3} \times 100 \quad 式(4)$$

式中: C_1 表示样品的葡萄糖浓度, mmol/L; C_2 表示样品对照的葡萄糖浓度, mmol/L; C_3 表示空白对照的葡萄糖浓度, mmol/L。

1.2.9.3 对 α-淀粉酶的抑制活性 参考 WANG 等[18] 的方法。称取 0.1 g 无糖纤维样品与 50 mL 淀粉溶液(0.5%, w/v)混合, 加入 20 mg α-淀粉酶后装入透析袋。将透析袋置于含 250 mL 蒸馏水的烧杯中, 于 37 ℃ 恒温摇床(115 r/min)内振荡 1 h。反应结束后移取 2 mL 透析液, 采用 DNS 法检测葡萄糖含量。α-淀粉酶抑制活性计算如公式(5)所示:

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制活性}(\%) = \frac{N_c - N_s}{N_c} \times 100 \quad 式(5)$$

式中: N_c 表示不加样品的透析液中葡萄糖浓度, mmol/L; N_s 表示加样品后透析液中葡萄糖浓度, mmol/L。

1.3 数据处理

数据结果以平均值±标准差形式呈现, 所有实验至少重复三次。采用 SPSS 27.0 统计软件进行单因素方差分析(ANOVA), 组间差异比较采用 Duncan 多重比较法, 显著性差异的阈值(P<0.05)为 95%。绘图采用 Origin 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 不同改性方法对 OPKEDF 化学组成的影响

不同改性方法对 OPKEDF 化学组成的影响如表 1 所示。可以看出, 酶法结合羧甲基化和酶法结合乙酰化改性后的 OPKEDF 总膳食纤维含量分别达到 73.87 和 75.74 g/100 g。两种改性方法对可溶性膳食纤维(SDF)的提升尤为显著, OPKEDF-EC 和 OPKEDF-EA 的 SDF 含量分别达 16.14 和 12.85 g/100 g, 是未改性纤维的 4.0 倍和 3.2 倍, 这表明酶法结合化学改性的协同作用显著改善了膳食纤维的水溶性。原因可能是纤维素酶和木质素酶可以降解糖苷键, 释放出更多的亲水基团(如羟基、羧基等), 增加了 OPKEDF 的 SDF 含量[13]; 而化学改性则通过取代反应进一步增加了纤维的极性位点, 如羧甲基化通过醚化反应在纤维表面引入负电荷基团, 增强了与水分子的相互作用; 乙酰化则通过酯键形成降低了纤维的结晶度, 提高了其水溶性[19]。

表 1 不同改性方法对油棕粕膳食纤维化学组成的影响

Table 1 Effects of different modification methods on the chemical composition of oil palm kernel expeller dietary fiber

化学组成	OPKEDF	OPKEDF-EC	OPKEDF-EA
水分 (g/100 g)	9.67±0.62^a	7.00±0.79^a	7.21±0.38^a
脂肪 (g/100 g)	3.56±0.21^a	2.79±0.65^a	2.73±0.54^a
灰分(g/100 g)	3.28±0.39^b	4.23±0.32^a	1.81±0.48^c
蛋白质 (g/100 g)	4.47±0.07^a	3.72±0.24^a	2.44±0.18^a
总膳食纤维 (g/100 g)	66.60±2.40^b	73.87±5.67^a	75.74±5.52^a
不可溶性膳食纤维 (g/100 g)	62.61±2.26^a	57.73±4.25^a	61.89±5.34^a
可溶性膳食纤维 (g/100 g)	4.00±0.14^b	16.14±1.41^a	12.85±1.18^a

注: 同一行中不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

此外, 复合改性方法对水分、脂肪和蛋白质含量没有显著影响(P>0.05); 而 OPKEDF-EC 的灰分含量(4.23%)较未改性组(3.28%)显著增加了 28.96%(P<0.05), 这可能归因于羧甲基化过程中引入的金属离子(如 Na^+)与膳食纤维结合[13]; 相反, OPKEDF-EA 的灰分含量(1.81%)显著降低(P<0.05), 可能是由于乙酰化反应过程中, 二甲基亚砜等有机溶剂长时间的处理脱除了部分盐分, 导致灰分降低。

2.2 不同改性方法对 OPKEDF 表面微观结构的影响

不同改性方法的纤维样品表面微观结构如图 1 所示, OPKEDF(图 1a)的表面块状结构突出, 孔隙较少, 说明其结构致密, 内部空间有限, 不利于与外界物质接触和相互作用。OPKEDF-EC(图 1b)的表面呈多孔蜂窝状, 孔隙丰富且相互连通, 这种结构大幅增加了纤维的比表面积, 能为水分子提供更多的吸附位点, 有利于提高纤维的水合能力。OPKEDF-EA(图 1c)的表面也呈多孔结构, 但孔隙大小、分布及结

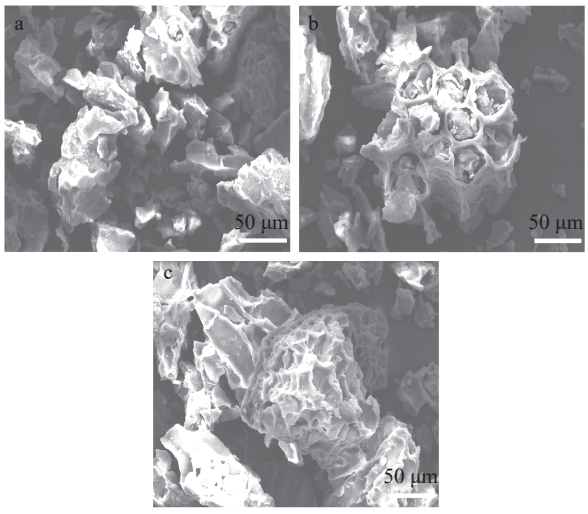


图 1 不同改性对 OPKEDF 表面微观结构的影响

Fig.1 Effects of different modifications on surface microstructure of oil palm kernel expeller dietary fiber

注: a、b、c 分别代表 OPKEDF、OPKEDF-EC、OPKEDF-EA。

构疏松度不如羧甲基化改性，然而其比表面积较 OPKEDF 仍显著增加，这可以在一定程度上改善其水合性能。这一变化是源于双酶协同化学改性的双重作用机制：纤维素酶和木质素酶通过降解糖苷键，破坏了纤维原本的致密结构[20]，同时羧甲基化与乙酰化处理时的化学反应也会使纤维分子间作用力改变，促使结构展开，最终形成了多孔结构。这种疏松多孔的结构不仅增加了纤维与水分子的接触机会，还可能在肠道中更有效地吸附葡萄糖、胆固醇以及各种有害物质，增强其在肠道内的生理功能[21−22]。

2.3　不同改性 OPKEDF 的傅里叶红外光谱分析

如图 2 所示，改性前后 OPKEDF 的傅里叶红外光谱均呈现典型的多糖吸收峰，并在 3430、2924、1640、1069 cm^{-1} 附近均有特征吸收峰。3400 cm^{-1} 附近宽而强的吸收峰是纤维中羟基(-OH)的伸缩振动产生的，OPKEDF-EC(3438 cm^{-1})和 OPKEDF-EA(3436.2 cm^{-1})的峰发生蓝移，可能是因为酶法结合羧甲基化和乙酰化改性破坏了 OPKEDF 中的氢键[23]。在 2924.8 cm^{-1} 的吸收峰对应纤维中甲基或亚甲基的 C-H 的伸缩振动。1640.1 cm^{-1} 处的吸收峰对应羰基(C=O)的伸缩振动。1069.1 cm^{-1} 附近的吸收峰对应 C-O 伸缩振动，可能是 OPKEDF 中的 C-O-H 和 C-O-C 键。对于 OPKEDF-EC，1640.1 cm^{-1} 和 1069.1 cm^{-1} 处的吸收峰发生了偏移，表明羧甲基化改性引入了羧基(-COOH)；OPKEDF-EC 中 1384.6 cm^{-1} 处的吸收峰对应-CH_3 的伸缩振动，这些共同说明 OPKEDF-EC 中羧甲基的成功引入[13]。对于 OPKEDF-EA，2928.5、1636.5 和 1089 cm^{-1} 处吸收峰的偏移共同说明了 OPKEDF-EA 中乙酰基的成功引入[11]。此外，OPKEDF-EC 和 OPKEDF-EA 中 870.4 cm^{-1} 处的吸收峰都有所偏移，而 870.4 cm^{-1} 处的吸收峰对应 OPKEDF 中糖苷键的伸缩振动，这说明酶法改性可以破坏纤维中的 β-糖苷键[20]。上述结果表明，酶法结合化学改性使 OPKEDF 的结构发生了明显变化。

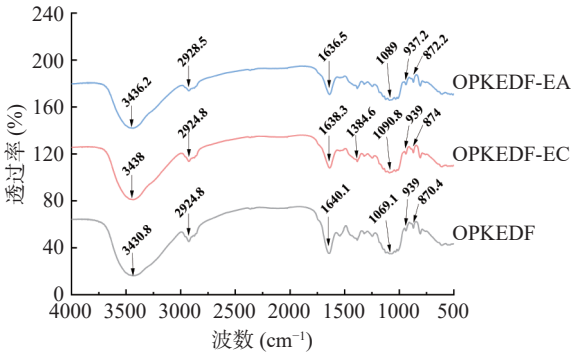


图 2　不同改性 OPKEDF 的傅里叶红外光谱

Fig.2　FT-IR spectra of different modified oil palm kernel expeller dietary fiber

2.4　不同改性方法对 OPKEADF 持水性的影响

水合能力是评价膳食纤维性能的核心指标，不仅直接影响其在肠道内的排毒、排便效果，也是食品工业开发增稠剂及保湿剂时的重要考量指标[24−25]。如图 3 所示，OPKEDF-EC 和 OPKEDF-EA 的持水能力均显著提高(P<0.05)，这说明酶法结合化学改性的协同作用可有效改善 OPKEDF 的水吸附能力。这主要归功于改性后的可溶性膳食纤维含量的提高(见表 1)，使得纤维与水分子间的亲和力更强。在双酶改性中，纤维素酶和木质素酶使纤维中的糖苷键被破坏；化学改性中，强碱或长时间的高温处理也会使纤维分子中的氢键断开，羟基等亲水基团暴露出来，进一步增强了纤维表面的亲水性。此外，改性导致纤维表面出现多孔的微观结构(见图 1)，为水分吸附提供了更多的结合位点[26]。实验结果中 OPKEDF-EC 持水力达 5.72 g/g(较 OPKEDF 提高 177.7%)，效果优于 OPKEF-EA(4.15 g/g，较 OPKEDF 提高 101.4%)，这可能是前者的化学改性引入的羧甲基是亲水基团，与水分子结合形成氢键的能力更强[27]。

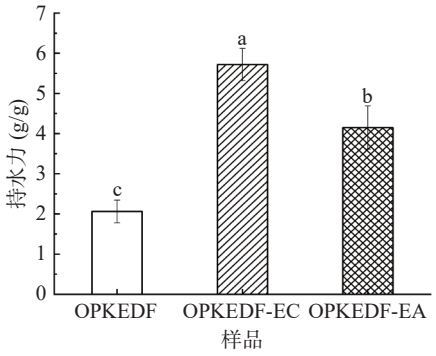


图 3　不同改性对 OPKEDF 持水力的影响

Fig.3　Effects of different modifications on water-holding capacity of oil palm kernel expeller dietary fiber

注：不同小写字母表示有显著性差异(P<0.05)，图 4~图 8 同。

2.5　不同改性方法对 OPKEDF 膨胀力的影响

膨胀力是膳食纤维的另一水合性质[25]，其大小受亲水基团含量、粒径、表面结构和表面的游离羟基等多因素共同调控[9]。如图 4 所示，与 OPKEDF(1.01 mL/g)相比，OPKEDF-EC 和 OPKEDF-EA 的膨胀力分别提升至 3.58 mL/g 和 2.46 mL/g。这是由于复合改性显著提升了可溶性膳食纤维(SDF)含量，强化了纤维与水分子的亲和性；同时，改性使 OPKEDF 的比表面积增大，结构更为疏松多孔(见图 1)，极大地增加了纤维与水分子的接触面积[27]，从而有效提升膨胀力。但 OPKEDF-EA 的膨胀力效果不如 OPKEDF-EC，一方面是由于 OPKEDF-EA 中的乙酰基与水分子形成氢键的能力弱于羧甲基，难以通过亲水作用吸引大量水分子进入纤维结构内部；另一方面乙酰基中的甲基(-CH_3)具有一定的空间体积，会在纤维分子链表面形成空间位阻，阻碍水分子向纤维内部的扩散与渗透，减少了纤维结构因吸水而扩张的程度。ZHENG 等[11] 也发现，羧甲基、交联等化学改性都可以有效改善小米糠膳食纤维的膨胀力，这与本研究结果一致。

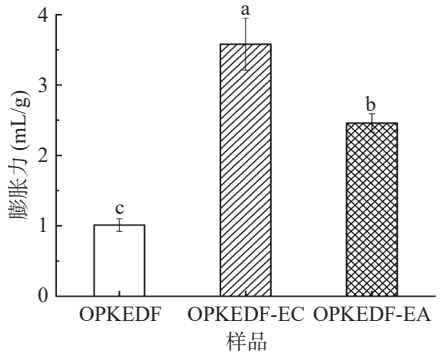


图 4 不同改性对 OPKEDF 膨胀力的影响

Fig.4 Effects of different modifications on the water-swelling capacity of oil palm kernel expeller dietary fiber

2.6 不同改性方法对 OPKEDF 黏度的影响

膳食纤维的黏度与血糖和胆固醇浓度、胃排空时间有关,其具有的黏性能够缩短胃中的食物转送至小肠的时间[28]。研究表明,溶液中膳食纤维的黏度特性与其水分含量、粒径、分子量大小、化学组成和纤维结构等密切相关[29]。如图 5 所示,OPKEDF-EC 的黏度(13.90 cP)相较于未改性 OPKEDF(4.08 cP)显著提高了 2.4 倍(P<0.05);OPKEDF-EA 的黏度(7.71 cP)相较于未改性 OPKEDF(4.08 cP)显著提高了 0.89 倍(P<0.05)。这可能是因为酶解处理通过降解 β-1,4-糖苷键,降低了 OPKEDF 的粒径并增加其比表面积[13];图 1 结果也表明复合改性后 OPKEDF 的表面结构更加多孔和碎片化,比表面积增大,与水的相互作用增强,使黏度变大。在此基础上,羧甲基化引入的强极性羧甲基(-CH_2COOH),既能增强纤维表面的静电排斥作用以抑制纤维团聚[30],其较强的亲水性又可与水分子形成稳定的氢键,从而显著提升 OPKEDF 黏度;而乙酰化引入的乙酰基(CH_3CO-)极性较弱且存在空间位阻,导致其与水分子的氢键作用减弱,因此对黏度的影响没有羧甲基改性的效果好。

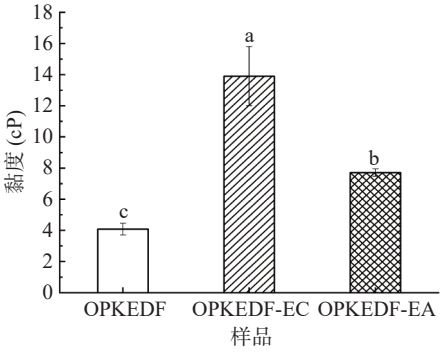


图 5 不同改性对 OPKEDF 黏度的影响

Fig.5 Effects of different modifications on the viscosity of oil palm kernel expeller dietary fiber

2.7 不同改性 OPKEDF 对葡萄糖吸附能力的影响

葡萄糖吸附能力是表征体外胃肠道运输过程中纤维结合葡萄糖能力的关键参数之一[31]。由图 6 可以看出,OPKEDF-EC(3.99 μmol/g)和 OPKEDF-EA(4.53 μmol/g)的葡萄糖吸附能力,相较于未改性油棕粕纤维(OPKEDF,1.84 μmol/g),分别提升了 1.16 倍和 1.46 倍。荆淳等[32]发现葡萄糖吸附能力与纤维粒径大小有关,粒径越小,葡萄糖吸附能力则越强。张慧娟等[33]的研究表明,葡萄糖吸附能力与膳食纤维表面疏松程度和表面积大小有关。因此改性后 OPKEDF 对葡萄糖吸附能力显著提升的原因可能是复合改性处理使 OPKEDF 的致密结构被破坏,形成疏松多孔的微观形态(见图 1),为葡萄糖分子提供了更多潜在的吸附位点;另一方面,改性后纤维粒径减小、比表面积增大,增加了 OPKEDF 与葡萄糖分子的接触面积,最终使葡萄糖吸附能力增强。此外,改性后的 OPKEDF 黏度增大(见图 4),而较大的黏度可有效延缓葡萄糖分子的扩散速率与吸收效率,即通过物理阻隔作用增强 OPKEDF 对葡萄糖分子的结合能力,该结论也与闫宇轩[34]的研究结果一致。

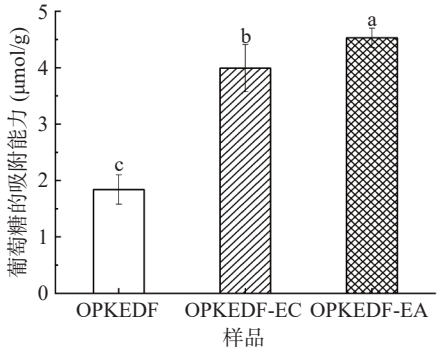


图 6 不同改性 OPKEDF 对葡萄糖吸附能力的影响

Fig.6 Effects of different modified oil palm kernel expeller dietary fiber on glucose adsorption capacity

2.8 不同改性 OPKEDF 对葡萄糖扩散抑制能力的影响

膳食纤维对葡萄糖扩散的抑制能力与其化学基团、SDF 含量、多孔结构、黏度以及膨胀力等特性有关[20]。如图 7 所示,OPKEDF-EC(38.18%)与 OPKEDF-EA(25.15%)相较于 OPKEDF(16.32%),都展现出更高的葡萄糖扩散抑制能力。纤维可通过

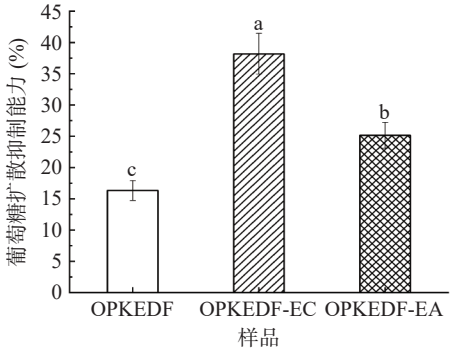


图 7 不同改性 OPKEDF 对葡萄糖扩散抑制能力的影响

Fig.7 Effects of different modified oil palm kernel expeller dietary fiber on the inhibition capacity against glucose diffusion

物理和化学机制抑制葡萄糖的扩散。从物理机制分析，纤维膨胀力或黏度的提升可以通过增强物理屏障作用来抑制葡萄糖的扩散，如 HU 等[35] 发现较高黏度的纤维能够抑制葡萄糖分子的运动并将其截留于纤维网络结构中。从化学机制来看，羧甲基化改性引入的羧甲基基团（-OCH_2COOH）可以增强纤维与葡萄糖的化学亲和力，这也可能是 OPKEDF-EC 的葡萄糖扩散抑制能力最高的关键因素。

2.9　不同改性 OPKEDF 对 α-淀粉酶抑制活性的影响

膳食纤维可通过抑制 α-淀粉酶活性来减少淀粉的水解，从而发挥降血糖的作用[36]。由图 8 所示，OPKEDF-EC（19.41%）对 α-淀粉酶的抑制能力显著强于 OPKEDF（13.54%）（P<0.05）。研究表明，多孔结构、SDF 浓度、黏度和葡萄糖结合能力的改善都能提高纤维物理阻断 α-淀粉酶与淀粉接触的能力[18]。此外，酶在膳食纤维上的直接吸附也会导致 α-淀粉酶的作用位点减少，活性降低[34]。因此，OPKEDF-EC 较高的 SDF 含量、黏度及葡萄糖吸附活性，可能是其抑制 α-淀粉酶效果更优的主要原因。相较之下，OPKEDF-EA（6.47%）对 α-淀粉酶的抑制能力最差，这可能是因为 α-淀粉酶活性中心含色氨酸、苯丙氨酸等疏水性氨基酸，而化学改性中引入的乙酰基可能使这些疏水性基团进一步暴露，影响了 α-淀粉酶的构象和活性，这使得 OPKEDF-EA 的 α-淀粉酶抑制活性降低[37−38]。

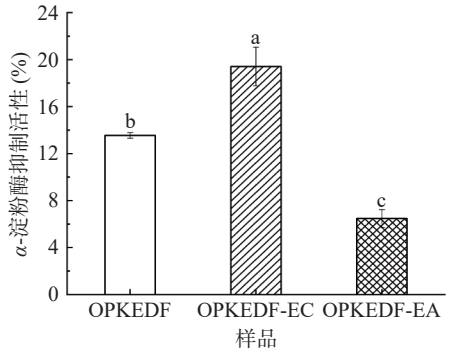


图 8　不同改性 OPKEDF 对 α-淀粉酶抑制活性的影响

Fig.8　Effects of different modified oil palm kernel expeller dietary fiber on the inhibition activity against α-amylase

3　结论

本文研究酶法协同两种化学改性对油棕粕膳食纤维结构与降血糖活性的影响。研究表明，酶法结合羧甲基改性和酶法结合乙酰化改性处理后，OPKEDF 的总膳食纤维和可溶性膳食纤维含量均明显上升。理化性质与降糖活性分析中，酶法结合羧甲基化油棕粕纤维具有较高的持水力（5.72 g/g）、膨胀力（3.58 mL/g）、黏度（13.90 cP）、葡萄糖扩散抑制能力（38.18%）和 α-淀粉酶抑制活性（19.41%）；酶法结合乙酰化油棕粕纤维具有较高的葡萄糖吸附能力（4.53 μmol/g），但 α-淀粉酶抑制活性较差。总体来看，相对于未处理的 OPKEDF，两种复合改性均可一定程度提高 OPKEDF 的理化性质和降血糖活性，其中酶法结合羧甲基改性的效果更优，它们具有避免餐后血糖快速升高的潜力。本实验结果为油棕纤维的深度开发利用提供了理论依据，有助于扩大其在食品工业生产中的应用，推动油棕副产物的资源化利用。

© 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] 张建国，曹红星，冯美利，等. 油棕粕乙醇提取物抗氧化性的研究[J]. 食品工业，2017，38(9)：48−51. [ZHANG Jianguo, CAO Hongxing, FENG Meili, et al. Study on the antioxidant of ethanol extract from palm kernel expeller[J]. The Food Industry, 2017, 38(9): 48−51.]

[2] 张骥昌. 油棕果实发育过程中生长特性、脂肪酸含量及主要品质指标变化研究[D]. 海口：海南大学，2017. [ZHANG Jichang. Oil palm fruit growth characteristics, fatty acid content in the development process and the main quality indicators research [D]. Haikou: Hainan University, 2017.]

[3] 许锡凯，辛嘉英，任佳欣，等. 水溶性膳食纤维的提取方法及其在食品中的应用[J]. 食品研究与开发，2021，42(4)：203−208. [XU Xikai, XIN Jiaying, REN Jiaxin, et al. Study on extraction method of soluble dietary fiber and its application in food[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 203−208.]

[4] 仇菊，朱宏，吴伟菁. 苦荞中可溶性及不可溶性膳食纤维调控糖尿病小鼠糖脂代谢的功效[J]. 食品科学，2021，42(15)：129−135. [QIU Ju, ZHU Hong, WU Weijing. Regulatory effect of soluble and insoluble dietary fiber from Tartary buckwheat on glucose and lipid metabolism in diabetic mice[J]. Food Science, 2021, 42(15): 129−135.]

[5] 王艳峰，杨锡洪，曹峻菡，等. 膳食纤维调节 2 型糖尿病血糖作用研究进展[J]. 食品与机械，2020，36(10)：6−11,17. [WANG Yanfeng, YANG Xihong, CAO Junhan, et al. Research progress on the mechanism of dietary fiber in regulating blood sugar of type 2 diabetes[J]. Food and Machinery, 2020, 36(10): 6−11,17.]

[6] 沈蒙，王维浩，康丽君，等. 黑豆皮可溶性膳食纤维对糖尿病小鼠抗炎因子的调节作用[J]. 食品科学，2020，41(9)：81−85. [SHEN Meng, WANG Weihao, KANG Lijun, et al. Effect of soluble dietary fiber from black soybean hull on the regulation of anti-inflammatory factors in diabetic mice[J]. Food Science, 2020, 41(9): 81−85.]

[7] 安艳霞，董艳梅，张剑，等. 膳食纤维的功能特性及在食品行业中的应用与展望[J]. 粮食与饲料工业，2019(6)：30−33. [AN Yanxia, DONG Yanmei, ZHANG Jian, et al. Functional properties of dietary fiber and its application in the food industry[J]. Cereal & Feed Industry, 2019(6): 30−33.]

[8] 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 Caiyun, ZAO Fan, MA Yuting, 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.]

[9] 田海龙. 四种改性方法对小米糠膳食纤维理化性质和功能活性的影响[D]. 临汾：山西师范大学，2021. [TIAN Hailong. Effects of four modification methods on the physical and chemical properties and functional activity of millet bran dietary fiber[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2021.]

[10] 李肖肖. 基于肠道菌群探讨羧甲基改性小麦膳食纤维对Ⅱ型糖尿病小鼠的改善作用[D]. 合肥：合肥工业大学，2022. [LI

Xiaoxiao. The effect of carboxymethylated wheat bran dietary fiber on type Ⅱ diabetic mice through gut microbiota[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.]
[11] ZHENG Yajun, XU Bufan, SHI Panqi, et al. The influences of acetylation, hydroxypropylation, enzymatic hydrolysis and crosslinking on improved adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130883.
[12] YU Guoyong, BEI Jia, ZHAO Jing, et al. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. Sativa Hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 333−340.
[13] LI Yan, FENG Chen, WANG Xueying, et al. Millet bran dietary fibers modified by heating and enzymolysis combined with carboxymethylation, acetylation, or crosslinking: Influences on properties of heat-induced egg white protein gel[J]. Foods, 2024, 13(17): 2827.
[14] 刘鸿铖, 樊红秀, 赵鑫, 等. 改性处理对绿豆皮膳食纤维结构及功能特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 82−91. [LIU Hongcheng, FAN Hongxiu, ZHAO Xin, et al. Effects of modification on the structure and functional properties of dietary fiber in mung bean skin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 82−91.]
[15] 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.
[16] ZHENG Yajun, LI Yan. Physicochemical and functional properties of coconut (*Cocos nucifera* L) cake dietary fibres: Effects of cellulase hydrolysis, acid treatment and particle size distribution[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 135−142.
[17] 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.
[18] WANG Kunli, LI Mo, HAN Qianyun, et al. Inhibition of *α*-amylase activity by insoluble and soluble dietary fibers from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)[J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101057.
[19] RODRÍGUEZ-FABIÀ S, TORSTENSEN J, JOHANSSON L, et al. Hydrophobization of lignocellulosic materials part Ⅱ: Chemical modification[J]. Cellulose, 2022, 29(17): 8957−8995.
[20] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124983.
[21] ZHANG Jianguo, YANG Gang, ZHANG Wangwei, et al. Physicochemical and functional properties of carboxymethylated insoluble dietary fiber of *Lycium barbarum* seed dreg[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101270.
[22] RAJI Z, KARIM A, KARAM A, et al. A review on the heavy metal adsorption capacity of dietary fibers derived from agro-based wastes: Opportunities and challenges for practical applications in the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 137: 74−91.
[23] KANWAR P, YADAV R B, YADAV B S. Cross-linking, carboxymethylation and hydroxypropylation treatment to sorghum dietary fiber: Effect on physicochemical, micro structural and thermal properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123638.
[24] 何李, 李灿明, 李绍振, 等. 制备工艺对果渣膳食纤维水合性质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 186−190. [HE Li, LI Canming, LI Shaozhen, et al. Effect of processing on hydration properties of fruit pomace dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(3): 186−190.]
[25] 李益臻, 宋欣欣, 马恺扬, 等. 改性处理对牛蒡根膳食纤维结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 63−71. [LI Yizhen, SONG Xinxin, MA Kaiyang, et al. Effects of modification on the structure and functional properties of dietary fiber in burdock root[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 63−71.]
[26] 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.
[27] 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.
[28] MÄLKKI Y. Physical properties of dietary fiber as keys to physiological functions[J]. Cereal Foods World, 2001, 46(5): 196−199.
[29] 蔡松铃, 刘琳, 战倩, 等. 膳食纤维的黏度特性及其生理功能研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 224−231. [CAI Songling, LIU Lin, ZHAN Qian, et al. Viscosity characteristics and physiological functions of dietary fiber: A review[J]. Food Science, 2020, 41(3): 224−231.]
[30] WÅGBERG L, DECHER G, NORGREN M, et al. The build-up of polyelectrolyte multilayers of microfibrillated cellulose and cationic polyelectrolytes[J]. Langmuir, 2008, 24(3): 784−795.
[31] XIONG Min, ZHENG Siyuan, BAI Tingmei, et al. The difference among structure, physicochemical and functional properties of dietary fiber extracted from *Triticale* and hull-less barley[J]. LWT, 2022, 154: 112771.
[32] 荆淳, 岳田利, 袁亚宏, 等. 雪莲菌发酵对苹果渣膳食纤维结构和功能特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 1−7,23. [JING Chun, YUE Tianli, YUAN Yahong, et al. Effects of Tibetan kefir grain fermentation on the structure and functional properties of dietary fiber from apple pomace[J]. Food Research and Development, 2023, 44(15): 1−7,23.]
[33] 张慧娟, 靳程茗, 吕世豪, 等. 黑麦麸膳食纤维的结构和功能特性研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(8): 84−93. [ZHANG Huijuan, JIN Chengming, LÜ Shihao, et al. Studies on structure and functional characteristics of dietary fiber from rye bran[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(8): 84−93.]
[34] 闫宇轩. 金针菇菇根膳食纤维的水溶性改性及其理化和功能性质评价[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [YAN Yuxuan. Water-soluble modification and evaluation of physicochemical and functional properties of dietary fiber from Flammulina velutipes root[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[35] HU Kai, CHEN Dongyan, SUN Zhida. Structures, physicochemical properties, and hypoglycemic activities of soluble dietary fibers from white and black glutinous rice bran: A comparative study[J]. Food Research International, 2022, 159: 111423.
[36] 李思彤, 洪钒迪, 王钰帆, 等. 豆类不溶性膳食纤维的提取、功能特性及应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(12): 202−209. [LI Sitong, HONG Fandi, WANG Yufan, et al. Research progress on extraction, functional properties and application of water insoluble dietary fiber from legumes[J]. Food Research and Development, 2024, 45(12): 202−209.]
[37] TONG Dapeng, ZHU Kexue, GUO Xiaona, et al. The enhanced inhibition of water extract of black tea under baking treatment on *α*-amylase and *α*-glucosidase[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 129−136.
[38] ZHENG Yuxue, YANG Wenhan, SUN Weixuan, et al. Inhibition of porcine pancreatic *α*-amylase activity by chlorogenic acid[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103587.