

不同方式提取的绿豆膳食纤维理化性质比较

刘金阁^{1,2}, 滕聪², 黎素玲³, 胡昕迪², 任贵兴⁴, 陈新⁵, 李莹^{1,2*}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)(2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)(3. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316022)(4. 山西大学生命科学学院, 山西太原 030006)(5. 江苏省农业科学院经济作物研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 以绿豆为原料, 运用超声辅助酶法和碱法提取绿豆中的可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF), 以持水力、持油力、膨胀力, 对胆酸盐、胆固醇和葡萄糖的吸附能力以及抑制胰脂肪酶活性的能力为评价指标, 探究不同提取方式对绿豆膳食纤维 (Dietary Fiber, DF) 理化特性的影响。结果表明: IDF 比 SDF 具有更好的持油力和膨胀力, 对于胆酸钠的吸附能力更稳定; SDF 具有更高的持水力和胆固醇吸附能力。酶法提取 DF 的持油力和胆酸盐吸附能力优于碱法提取; 碱法提取 DF 的膨胀力、胰脂肪酶活性抑制能力优于酶法提取。其中, 酶法提取的 SDF 持水力较高为 5.27 g/g, IDF 持油力较高为 3.98 g/g; 碱法提取的 IDF 膨胀力较高为 3.17 mL/g; 酶法和碱法提取的 SDF 对胰脂肪酶活性半抑制质量浓度 IC_{50} 分别为 23.50 mg/mL 和 1.26 mg/mL。四种膳食纤维均有较强的葡萄糖吸附能力, 无显著差异。综上所述, 酶法和碱法提取的绿豆 DF 在降脂的理化性质上各有优势。该研究旨在为绿豆膳食纤维降脂功能食品的开发提供参考。

关键词: 绿豆; 提取方式; 膳食纤维; 理化性质

文章编号: 1673-9078(2024)09-188-197

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.9.0804

Comparison of Physicochemical Properties of Mung Bean Dietary Fiber Extracted Using Different Methods

LIU Jinge^{1,2}, TENG Cong², LI Suling³, HU Xindi², REN Guixing⁴, CHEN Xin⁵, LI Ying^{1,2*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China) (2. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China) (3. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China) (4. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China) (5. Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Soluble dietary fiber (SDF) and insoluble dietary fiber (IDF) were extracted from mung beans using the ultrasound-assisted enzymatic method and the alkaline method. Indicators, such as the water-holding capacity, oil-holding capacity, swelling power, adsorption capacity of cholate, cholesterol and glucose, and pancreatic lipase activity inhibiting ability were evaluated to explore the effects of different extraction methods on the physicochemical properties of mung bean dietary fiber (DF). The results showed that IDF had better oil holding capacity and swelling power than SDF, and

引文格式:

刘金阁, 滕聪, 黎素玲, 等. 不同方式提取的绿豆膳食纤维理化性质比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 188-197.

LIU Jinge, TENG Cong, LI Suling, et al. Comparison of physicochemical properties of mung bean dietary fiber extracted using different methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 188-197.

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(23)1014)

作者简介: 刘金阁 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能农产品加工, E-mail: ljg19515661930@163.com

通讯作者: 李莹 (1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: hijoly@163.com

that the adsorption capacity of sodium cholate was more stable than that of other samples. SDF exhibited higher water holding capacity and cholesterol adsorption capacity than IDF. The oil-holding capacity and cholate adsorption capacity of DF extracted with the enzymatic method were better than those extracted using the alkaline method. The swelling power and pancreatic lipase inhibition ability of DF extracted with the alkaline method was better than those extracted with the enzymatic method. The water holding capacity of SDF extracted by the enzymatic method was 5.27 g/g and the oil holding capacity of IDF was 3.98 g/g. The swelling power of IDF extracted by alkaline method was 3.17 mL/g. When using the enzymatic method, the half maximal inhibitory concentration (IC_{50}) of pancreatic lipase activity of the extracted SDF was 23.50 mg/mL. When using the alkali method, this value was 1.26 mg/mL. The four types of DF all had strong glucose adsorption capacity with no significant difference. In summary, both the enzymatic and alkaline methods for mung bean dietary fiber extraction have their own advantages in terms of the physicochemical lipid-lowering properties. The aim of this study is to provide a reference for the development of lipid-lowering foods using mung bean dietary fiber.

Key words: mung bean; extraction method; dietary fiber; physicochemical properties

肥胖是一种慢性代谢疾病，会影响肠道菌群的组成，诱发代谢综合征^[1]，会导致II型糖尿病、心血管疾病、非酒精性脂肪性肝炎和多种癌症的发病率增加^[2]。研究表明，增加膳食纤维的摄入有助于预防和减轻代谢综合征和其他相关的疾病^[3]，可发酵的膳食纤维如 β -葡聚糖、菊粉等可以调节肠道微生物群，促进产生短链脂肪酸，改善肠道屏障功能，减少炎症发生^[4]。粘性膳食纤维（如果胶、魔芋葡甘露聚糖）可通过改变乳液微观结构从而影响脂质消化过程^[5]，通过将营养物质困在粘性溶液或凝胶状物质中来限制营养物质的运输，以防止其被人体吸收，从而降低高血糖状态^[6]。

膳食纤维（Dietary Fiber, DF）不能被小肠消化吸收，在大肠中经过发酵后直接排出体外，根据其溶解性分为可溶性膳食纤维（Soluble Dietary Fiber, SDF）和不溶性膳食纤维（Insoluble Dietary Fiber, IDF）^[7]。DF的提取方法主要有化学法、酶法、发酵法。化学法一般在酸碱环境下提取，样品得率高，但容易破坏分子结构。酶法常用 α -淀粉酶、蛋白酶提取，纯度通常较高，但反应环境要求严格。发酵法常用于果皮等副产物的提取。超声常作为辅助提取方式。SDF可通过延缓葡萄糖的扩散和吸收，吸附胆汁酸或阻碍胆固醇被胆汁乳化等途径而发挥降脂功效^[8]。IDF的水合特性、离子交换力、胆酸盐吸附力、胆固醇吸附力等理化特性被证实与其调节脂质代谢作用有着密切联系^[9]。通过对大鼠结肠中短链脂肪酸的形成、血清中的短链脂肪酸、代谢风险标志物和盲肠微生物群的分析，发现添加膳食纤维可使肝脏胆固醇含量降低约31%^[10]。因此食用膳食纤维对机体代谢健康有积极的影响，值得深入研究^[11]。

绿豆在我国是主要的杂粮作物，也是传统的药食同源食物，具有高蛋白、高淀粉、高纤维、低脂肪的特点^[12]。中医认为，绿豆具有“消肿利尿，降压明目，清热解毒，润喉止渴”等功效。目前对绿豆的研究主要集中在绿豆的蛋白质和黄酮方面^[13]。绿豆中DF含量约有7%，血糖生成指数（Glycemic Index, GI）较低，常被作为添加剂降低食品GI值^[14,15]。绿豆是DF的优质来源，具有降低血糖、血脂，调节胆固醇水平，提高免疫力等多种生理功能^[16]。

目前，对膳食纤维的提取方法有较多报道，但不同提取手段对绿豆膳食纤维理化性质的影响研究较少。不同提取工艺制备的膳食纤维成分不同，进而影响膳食纤维的营养价值和生理功能^[17]。本研究采用酶法提取和碱液提取两种方法获得绿豆膳食纤维，并测定其理化指标，分析降脂活性相关功能特性，为实现绿豆的高值转化与利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 原料

绿豆（苏绿7号），江苏省农业科学院经济作物研究所提供；鸡蛋、植物油，购自超市；碱性蛋白酶、胰脂肪酶、纤维素酶、复合蛋白酶、 α -淀粉酶、糖化酶、中性蛋白酶，南京都莱生物技术有限公司；乙酸、乙醇、糠醛、硫酸、盐酸、氢氧化钠、胆固醇、苯酚、邻苯二甲醛、胆酸钠、葡萄糖、乙酸钠、月桂酸-4-硝基苯酯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；DNS试剂、TritonX-100，上海源叶生物科技有限公司。

1.2 主要仪器设备

JBQ-ZD 全温振荡器, 常州普天仪器制造有限公司; KQ-400DE 型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; HH 系列数显恒温水浴锅, 上海江星仪器有限公司; LKDC-2006 低温恒温槽, 南京立思高设备有限公司; SHZ-III 型循环水真空泵, 上海亚荣生化仪器厂; 旋转蒸发器 RE-52AA, 上海亚荣生化仪器厂; HG-9145A 型鼓风干燥箱, 北京亚泰科隆仪器技术有限公司; DLH-100 型高速多功能粉碎机, 武义祺腾电器有限公司; pH 计, 梅特勒-托利多(上海)有限公司; H1850R 型高速冷冻离心机, 长沙湘仪离心机仪器有限公司; 分析天平, 梅特勒-托利多(上海)有限公司; 全自动微孔板分光光度计, 美国伯腾仪器有限公司; LGJ-12 冷冻干燥机, 北京松源华兴科技发展有限公司; EVOLS10 扫描电子显微镜, 德国卡尔蔡司公司。

1.3 试验方法

1.3.1 绿豆膳食纤维提取

参考文献报道^[18-20]的方法并略作修改。

原料预处理: 将干燥绿豆粉碎后, 用 5 倍体积乙醇脱脂 4 h, 烘干后过 80 目筛储存备用。以下反应均在超声环境 (320 W/g) 下进行。

脱脂后的绿豆粉末按照 1:14 的料液比加入蒸馏水, pH 值调至 6.0, 加入质量分数为 2% 的 α -淀粉酶 50 °C 反应 30 min 后, 沸水浴灭酶。用 0.1 mol/L 盐酸将 pH 值调至 5.0, 加入质量分数为 1% 的复合蛋白酶 45 °C 反应 1 h 后灭酶。调 pH 值至 4.5, 加入质量分数为 2% 的纤维素酶 50 °C 反应 6 h 后灭酶。在 5 000 r/min 离心 10 min 后去除沉淀, 旋转蒸发浓缩上清液, 加入 4 倍体积的 $\phi=95\%$ 乙醇沉淀 24 h 后离心, 倒去上清液, 沉淀冻干为酶法提取可溶性膳食纤维 (Enzymatically Extracted Soluble Dietary Fiber, ESDF)。

脱脂后的绿豆粉末按照 1:14 的料液比加入蒸馏水, pH 值调至 6.0, 分别加入质量分数为 1% 的 α -淀粉酶和糖化酶 70 °C 反应 60 min 后, 沸水浴灭酶。pH 值调至 7.0, 加入质量分数为 1% 的中性蛋白酶, 在 50 °C 条件下反应 60 min 后灭酶。在 5 000 r/min 离心 10 min 后取沉淀, 冻干得酶法提取不溶性膳食纤维 (Enzymatically Extracted Insoluble Dietary Fiber, EIDF)。

脱脂后的绿豆粉末按照 1:14 的料液比加入蒸馏

水, 用 1 mol/L NaOH 溶液将 pH 值调至 11.0, 在超声环境 (320 W/g) 下室温反应 6 h。在 5 000 r/min 离心 10 min 后取上清液, 旋转蒸发浓缩后, 加入质量分数为 1% 的碱性蛋白酶以除去蛋白。在 50 °C 反应 2 h 后沸水浴灭酶, 离心取上清液, 用 4 倍体积 95% 乙醇沉淀 24 h, 取沉淀冻干为碱法提取可溶性膳食纤维 (Alkaline Extracted Soluble Dietary Fiber, ASDF)。

脱脂后的绿豆粉末按照 1:14 的料液比加入蒸馏水, 用 1 mol/L NaOH 溶液将 pH 值调至 11.0, 在超声环境 (320 W/g) 下室温反应 6 h。在 5 000 r/min 离心 10 min 后取沉淀, 经过抽滤水洗, 冻干为碱法提取不溶性膳食纤维 (Alkaline Extracted Insoluble Dietary Fiber, AIDF)。按以下公式计算其得率。

$$D = \frac{m_0}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——膳食纤维粗提物得率, %;

m_0 ——膳食纤维粗提物质量, g;

m ——绿豆粉末质量, g。

1.3.2 绿豆膳食纤维的总糖含量、蛋白含量、总酚含量的测定

总糖含量的测定采用苯酚硫酸法测定; 蛋白质含量测定参照《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》GB 5009.5-2016; 总酚含量采用福林酚法测定。

1.3.3 绿豆膳食纤维持水力、持油力和膨胀力的测定

参考 Zhang 等^[21]方法并做适当调整, 分别测定四种绿豆膳食纤维的持水力、持油力和膨胀力。

取 0.5 g 干燥的膳食纤维样品, 加入 25 mL 蒸馏水, 混匀密封, 室温静置 11 h。离心, 去上清液, 用滤纸吸去多余水分, 称量样品湿质量。

$$C = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (2)$$

式中:

C ——持水力 (WHC), g/g;

m_0 ——干燥样品质量, g;

m_1 ——离心管质量, g;

m_2 ——吸水后样品与离心管的总质量, g。

取 0.2 g 干燥的膳食纤维样品, 加入植物油 10 mL 混匀后密封, 室温静置 8 h。离心后去上清液, 用滤纸吸去多余油脂, 称量样品湿质量。重复三次。

$$O = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (3)$$

式中:

O —持油力(OHC), g/g;

m_0 —干燥样品质量, g;

m_1 —离心管质量, g;

m_2 —吸油后样品与离心管质量之和, g。

取 0.2 g 干燥的膳食纤维样品, 放入 5 mL 带刻度试管中, 记录样品自然堆积体积。加蒸馏水至 5 mL, 密封室温放置 18 h, 记录样品膨胀后体积。

$$S = \frac{v_1 - v_0}{m_0} \quad (4)$$

式中:

S —膨胀力(SP), g/mL;

m —干燥样品质量, g;

v_1 —吸水膨胀后样品的体积, mL;

v_0 —样品自然堆积时的体积, mL。

1.3.4 绿豆膳食纤维对胆酸盐的吸附能力测定

参考 Huang 等^[22]的方法并做适当调整。分别配制 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mg/mL 的胆酸钠标准溶液, 各取 1 mL 加入 6 mL 体积分数为 45% 的 H_2SO_4 和 1 mL 体积分数为 0.3% 的糠醛, 混合均匀后在 65 °C 恒温水浴锅中加热反应 30 min。冷却至室温, 测定 OD_{620} , 绘制胆酸钠质量浓度标准曲线: $y=0.7563x+0.0818$, $R^2=0.9961$ 。

配制 2 mg/mL 的胆酸钠溶液, 调 pH 值至 7.0。取 20 mL 于离心管中, 分别加入 0.2 g 膳食纤维, 搅拌均匀至完全溶解, 置于 37 °C 恒温水浴锅中加热反应, 每隔 10 min 吸取 1 mL, 按照上述糠醛比色法, 测定 OD_{620} , 根据标准曲线计算上清液中胆酸钠的质量浓度。

$$B = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

B —胆酸钠吸附率(SCA), %;

c_1 —吸附前胆酸钠质量浓度, mg/mL;

c_2 —吸附后胆酸钠质量浓度, mg/mL。

1.3.5 绿豆膳食纤维对胆固醇的吸附能力测定

参考 Zheng 等^[23]方法并做适当调整。分别取 0、0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mL 的 1 mg/mL 的胆固醇标准溶液, 用冰乙酸分别补足样液至 0.5 mL。混合均匀后加入 1.5 mL 由冰乙酸配制的 0.1 mg/mL 的邻苯二甲醛溶液和 1 mL 浓硫酸, 充分混匀后室温静置 10 min, 测定 OD_{550} , 并绘制胆固醇质量浓度

标准曲线: $y=8.7423x+0.1196$, $R^2=0.9951$ 。

取新鲜鸡蛋的蛋黄, 用蒸馏水稀释 10 倍成乳液。取 0.5 g 干燥的膳食纤维样品, 加入 15 mL 乳液中搅拌均匀, 分别将体系 pH 值调至 2.0 和 7.0, 37 °C 振荡 2 h, 之后取出样液, 4 000 r/min 离心 20 min。取 0.15 mL 上清液, 加入 0.35 mL 冰乙酸, 1.5 mL 邻苯二甲醛溶液和 1 mL 浓硫酸, 混合摇匀后室温静置 10 min, 于 550 nm 处测定 OD 值。

$$E = \frac{m_1 - m_2}{m} \quad (6)$$

式中:

E —胆固醇吸附能力(CA), mg/g;

m_1 —乳液中原有胆固醇的质量, mg;

m_2 —上清液中胆固醇质量, mg;

m —膳食纤维样品质量, g。

1.3.6 绿豆膳食纤维对葡萄糖的吸附能力测定

参考梁文康^[24]的方法并做适当调整。配制质量浓度梯度为 0、1、2、3、4、5 mg/mL 葡萄糖溶液, pH 值调至 7.0。各取葡萄糖溶液和 DNS 试剂 0.5 mL, 沸水浴 5 min, 冷却至室温后使用蒸馏水补充样液体积至 5 mL, 测定 OD_{540} 并绘制葡萄糖质量浓度标准曲线: $y=0.2982x+0.2286$, $R^2=0.9935$ 。

分别配制浓度为 50、100、200、500、1 000 mmol/L 的葡萄糖溶液, 调 pH 值至 7.0。取 0.5 g 膳食纤维加入至 30 mL 上述葡萄糖溶液中, 混匀后在 37 °C 条件下振荡 6 h, 之后取出样液于 4 000 r/min 离心 15 min, 用上述 DNS 比色法测定上清液中葡萄糖的浓度。

$$G = \frac{n_1 - n_2}{m} \quad (7)$$

式中:

G —葡萄糖吸附能力(GA), mmol/g;

n_1 —吸附前溶液中的葡萄糖的量, mmol;

n_2 —吸附后上清液中葡萄糖的量, mmol;

m —膳食纤维样品质量, g。

1.3.7 绿豆膳食纤维对胰脂肪酶的抑制能力测定

参考武媛^[25]的方法并做适当调整。反应体系如表 1 所示, 配制 100 mL 月桂酸-4-硝基苯酯溶液: 0.08 g 月桂酸-4-硝基苯酯、5 mmol/L 的乙酸钠溶液 99 mL、1 mL TritonX-100。分别配制质量浓度梯度为 10、20、30、40、50 mg/mL 的 ESDF 溶液和 2、4、6、8、10 mg/mL 的 ASDF 溶液。在 2 mL 离心管中分别加入 10 mg/mL 的胰脂肪酶溶液、不

同质量浓度的膳食纤维溶液、PBS 溶液和月桂酸-4-硝基苯酯溶液。37 ℃水浴反应 30 min，405 nm 处测定吸光度值。

表 1 胰脂肪酶活性抑制体系

组别	胰脂肪酶/ μL	膳食纤维/ μL	PBS/ μL	月桂酸-4-硝基苯酯/ μL
空白管	300	—	300	400
空白对照管	—	—	600	400
样品管	300	100	200	400
样品对照管	—	100	500	400

$$R = \frac{(A_1 - A_2) - (A_3 - A_4)}{A_1 - A_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

R —胰脂肪酶抑制率, %;

A_1 —空白管吸光度值;

A_2 —空白对照管吸光度值;

A_3 —样品管吸光度值;

A_4 —样品对照管吸光度值。

1.3.8 绿豆膳食纤维的扫描电镜分析

将绿豆 ESDF、EIDF、ASDF、AIDF 样品进行粘台、喷金处理,置于扫描电镜下观察其表面形态特征。

1.3.9 数据分析

所有实验数据平行处理三次,结果用平均值±标准差表示。用 SPSS 25.0 进行统计分析和方差分析,以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准,用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 酶法和碱法超声辅助提取绿豆膳食纤维得率

ESDF、EIDF、ASDF 和 AIDF 的得率分别为 12.60%、21.20%、19.35%、26.97%,说明碱法的膳食纤维提取率高于酶法。原因可能是在碱性条件下,部分 IDF 水解转化为 SDF,而部分小分子量 SDF 经过酶法提取变为低聚糖,不易被乙醇沉淀^[26]。普通干燥后的 DF 通常体积缩小、质地变硬,易发生氧化。冷冻干燥后,样品呈多孔蓬松的海绵状,溶解性更好,故本文选用冻干方式制备 DF。

2.2 绿豆膳食纤维的总糖含量、蛋白含量、总酚含量的测定

表 2 绿豆膳食纤维的总糖含量、蛋白含量、总酚含量的测定

Table 2 Determination of total sugar content, protein content and total phenol content in mung bean dietary fiber

样品	总糖含量/%	蛋白含量/%	总酚含量/%
ESDF	48.31 ± 0.27 ^a	10.35 ± 0.11 ^c	0.37 ± 0.18 ^a
EIDF	14.31 ± 0.02 ^c	16.52 ± 0.30 ^a	0.18 ± 0.09 ^c
ASDF	30.65 ± 0.02 ^b	14.42 ± 0.31 ^b	0.33 ± 0.01 ^b
AIDF	7.73 ± 0.09 ^d	0.33 ± 0.02 ^d	0.01 ± 0.04 ^d

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

如表 2 所示,ESDF 的总糖含量显著高于 ASDF ($P < 0.05$),蛋白质含量显著低于 ASDF ($P < 0.05$),说明酶法提取得到的可溶性膳食纤维有效组分含量更高,杂质更少,除蛋白效果明显。ESDF 和 ASDF 的总酚含量较高,分别达到 0.37% 和 0.33%,AIDF 总酚含量最低,为 0.01%,多酚具有抗氧化性,常与降脂降糖等生物活性有关。

2.3 绿豆膳食纤维的持水力、持油力和膨胀力

表 3 绿豆膳食纤维的持水力、持油力和膨胀力

Table 3 Water holding, oil holding and dilatibility of mung bean dietary fiber

样品	持水力/(g/g)	持油力/(g/g)	膨胀力/(mL/g)
ESDF	5.27 ± 0.05 ^a	2.63 ± 0.30 ^b	2.53 ± 0.09 ^b
EIDF	3.70 ± 0.13 ^d	3.98 ± 0.37 ^a	2.00 ± 0.41 ^c
ASDF	4.76 ± 0.40 ^b	2.28 ± 0.08 ^b	2.33 ± 0.24 ^{bc}
AIDF	4.29 ± 0.06 ^c	2.40 ± 0.07 ^b	3.17 ± 0.24 ^a

持水力、持油力和膨胀力是评价膳食纤维的比表面积和吸附性能的重要指标,吸附性能强可能会具有更好的生理功能。如表 3 所示,ESDF 和 ASDF 的持水力均高于 EIDF 和 AIDF,其中 ESDF 持水力更佳,达到 5.27 g/g, EIDF 的持水力最低,为 3.70 g/g。EIDF 持油力为 3.98 g/g,显著高于其他三种膳食纤维 ($P < 0.05$),可能是由于其中不溶性成分含量更高。ESDF、ASDF、AIDF 的持油力效果之间差异不大,其中 ASDF 持油力为最低,为 2.28 g/g。AIDF 膨胀力较高,为 3.17 mL/g, EIDF 的膨胀力最低,为 2.00 mL/g, EIDF 和 ASDF 的膨胀力差异性不显著。在酶的作用下 SDF 可能暴

露出更多的亲水基团, IDF 暴露出更多的亲油基团。AIDF 膨胀力更高, 原因可能是多糖可以通过氢键将更多的水结合位点暴露给周围的水, 膳食纤维中的不溶性部分形成了亲水基质, 水被膳食纤维捕获后充满了纤维结晶的间隙, 引起膨胀^[27]。

杨末等^[18]以绿豆皮为原料, 通过碱法制得 SDF 的持水力、持油力和膨胀力分别为 5.97 g/g、3.28 g/g 和 4.57 mL/g, IDF 的持水力、持油力和膨胀力分别为 2.54 g/g、4.20 g/g 和 2.20 mL/g, 从而得出与绿豆皮 IDF 相比, 绿豆皮 SDF 具有更好的持水力、膨胀力, 较低的持油力, 说明加工工艺及原料来源的不同, 对膳食纤维的理化性质有较大影响。

2.4 绿豆膳食纤维对胆酸钠的吸附作用

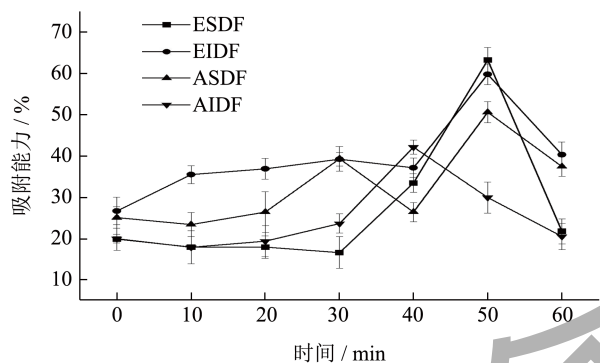


图1 绿豆膳食纤维对胆酸钠的吸附能力随时间变化

Fig.1 The adsorption capacity of mung bean dietary fiber to sodium cholate changed with time

研究表明, 膳食纤维能通过氢键和疏水作用与胆汁酸的相互作用, 从而有效切断胆固醇在肝肠的循环, 加快分解胆固醇, 辅助降低血液中胆固醇的含量^[28]。如图1所示, 随着时间增加, 膳食纤维和胆酸钠充分接触, 吸附能力呈增加趋势, 在 40 min 和 50 min 时样品吸附能力达到了最大, 但在 60 min 时又下降至平均水平, 说明膳食纤维对胆酸钠的吸附保持动态平衡, 当体系中胆酸钠的浓度较高时, 膳食纤维对其有较高的吸附作用, 当体系中胆酸钠的浓度相对较低时, 膳食纤维的吸附能力减弱, 有助于维持机体胆酸盐正常水平。ESDF、EIDF 和 ASDF 对胆酸钠的吸附率均在 50 min 时达到最大值, 分别为 63.34%、59.86% 和 50.71%, 其中 ESDF 吸附率最高; AIDF 的吸附率在 40 min 时达到最高值, 为 42.27%。整体来看, ESDF 吸附率波动较大, EIDF 的吸附率相对稳定且普遍较高, ASDF 的吸附能力整体高于 AIDF。本研究扫描电镜结果表明, 酶法提取 DF 内部疏松多孔, 有较大

的孔隙率, 具有良好的胆酸钠吸附性能。碱法提取 DF 表面粗糙, 含有较多的褶皱, 在消化过程中不易被降解, 故胆酸钠最大吸附率较低。SDF 在反应过程中的溶解分散性能更好, 故胆酸钠吸附性能高于 IDF。田海龙等^[29]用四种改性后的小米糠膳食纤维吸附胆酸钠, 同样分别在 40 min 和 50 min 时吸附率达到最高, 得到的最高吸附率分别为 44.50%、47.68%、61.83%、54.62%, 且整体保持动态平衡。

2.5 绿豆膳食纤维对胆固醇的吸附作用

胆固醇摄入过多会增加多种心脑血管疾病患病风险, 而膳食纤维能够很好地吸附体内的胆固醇, 延缓其在肠道内的扩散转移^[30]。如图2所示, SDF 对胆固醇的吸附能力几乎均高于 IDF。在 pH 值为 2 时, ESDF 对胆固醇的吸附能力较高, 达到 9.48 mg/g; EIDF 的吸附能力较低, 为 7.62 mg/g。在 pH 值为 7 时 ASDF 对胆固醇的吸附能力较高, 达到 9.52 mg/g; ESDF 的吸附能力较低, 为 7.69 mg/g。DF 吸附胆固醇为物理吸附, 在吸附过程中, 先在表面快速形成单分子层吸附, 再以分子间引力形成多分子层吸附。酸性条件可促进酶法提取的绿豆膳食纤维的快速吸附能力, 在中性条件下有所减弱, 故导致不同酸碱体系对酶法所得膳食纤维的吸附能力有显著影响。酸碱环境对碱法提取的膳食纤维影响较小, 该结果说明吸附能力可能与膳食纤维组分本身的 pH 值有关。

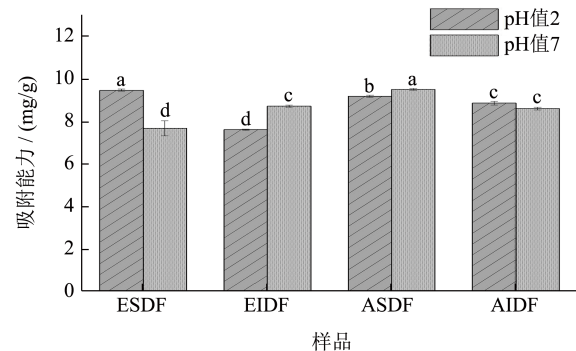


图2 绿豆膳食纤维在胃液环境和小肠环境中的吸附能力
Fig.2 Adsorption capacity of mung bean dietary fiber in gastric fluid environment and small intestine environment

注: 同一酸碱体系下不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

王虎玄等^[31]以超声波-酶耦合法提取陕北狗头红枣 SDF, 其胆固醇吸附率在 pH 值为 2 时为 8.12 mg/g, 在 pH 值为 7 时为 10.35 mg/g。刘鸿钺等^[32]用三种改性方式处理绿豆皮膳食纤维, 在 pH 值为 2 时吸附力达到 2.38 mg/(mL·g), pH 值为 7 时

为 3.45 mg/(mL·g)。与之对比, 本实验所得膳食纤维具有较好的胆固醇吸附作用, 其中 ESDF 在酸性环境 (pH 值为 2) 中吸附效果更好, ASDF 在中性环境 (pH 值为 7) 中吸附效果更好。

2.6 绿豆膳食纤维对葡萄糖的吸附作用

膳食纤维可以有效阻止餐后葡萄糖的扩散, 降低血糖升高水平^[33]。如图 3 所示, 随着葡萄糖浓度的升高, 绿豆膳食纤维对葡萄糖的吸附能力逐渐增强, 且四组样品之间吸附能力无显著差异。在葡萄糖浓度为 1 000 mmol/L 时, ESDF、EIDF、ASDF 和 AIDF 的吸附能力较高, 分别达到 59.11、59.13、58.62、59.03 mmol/g, 说明在此浓度范围内, 葡萄糖浓度越高, 膳食纤维对其吸附作用越强。郭增旺等^[34]将大豆皮的不溶性膳食纤维用气流粉碎成不同粒度吸附葡萄糖, 在葡萄糖浓度为 100 mmol/L 时, 对葡萄糖的吸附能力最高达到 1.50 mmol/g。与之相比, 本实验得到的 EIDF 和 AIDF 对同样浓度的葡萄糖的吸附能力分别为 4.01、4.04 mmol/g。说明绿豆 SDF 和 IDF 对葡萄糖均具有较强的吸附能力, 两种提取方法对葡萄糖吸附能力影响不大。

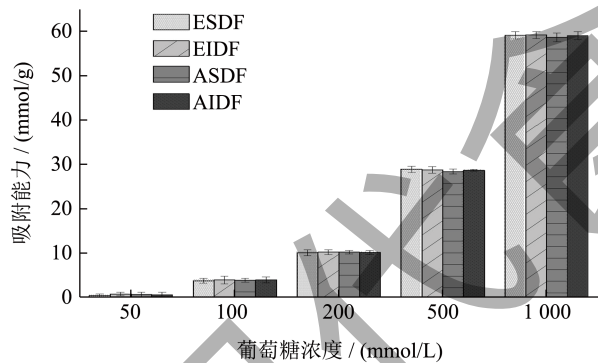


图 3 绿豆膳食纤维的对葡萄糖的吸附能力

Fig.3 Glucose adsorption capacity of mung bean dietary fiber

2.7 绿豆膳食纤维对胰脂肪酶的抑制作用

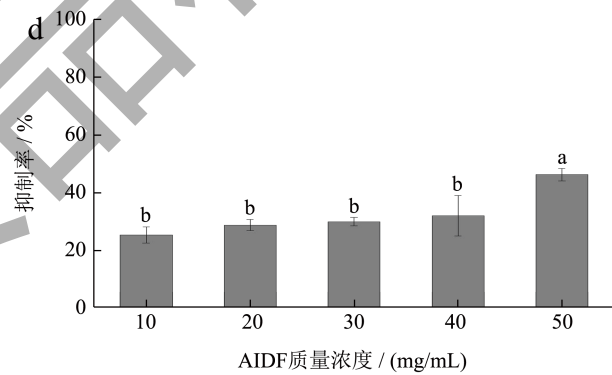
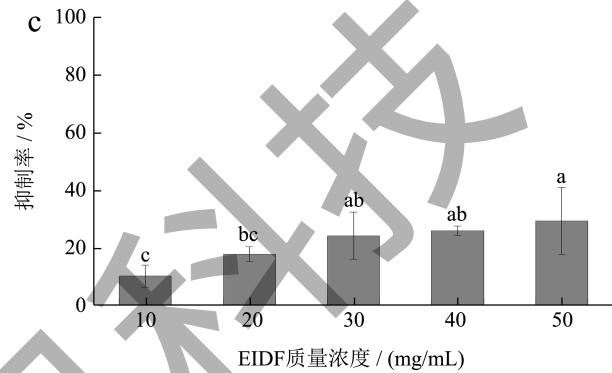
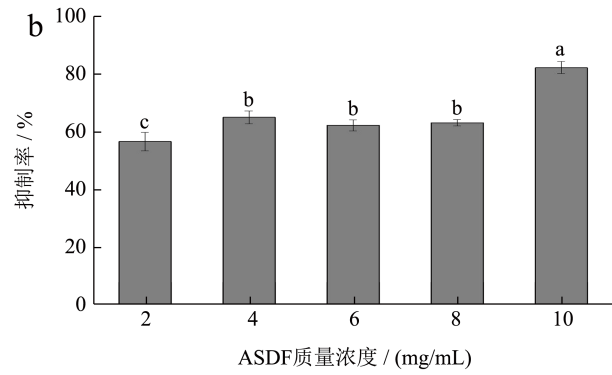
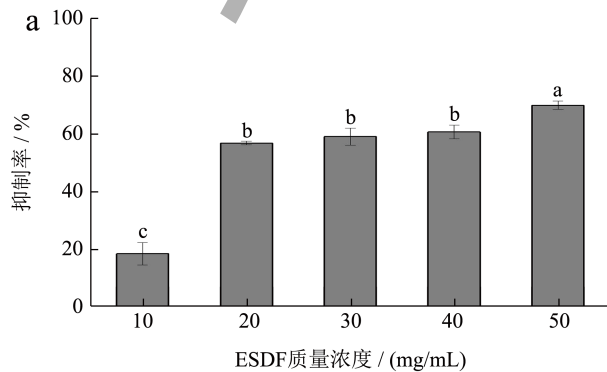


图 4 不同质量浓度的 ESDF、ASDF、EIDF、AIDF 对胰脂肪酶的抑制率

Fig.4 Inhibition rate of pancreatic lipase with different mass concentrations of ESDF, ASDF, EIDF, AIDF

注: 不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

膳食纤维对胰脂肪酶的抑制作用是评价其降血脂活性的重要指标。膳食纤维可在脂肪球周围形成涂层, 阻碍脂肪酶进入脂肪球, 从而影响脂质的消化吸收^[35]。图 4 分别是不同质量浓度的 ESDF、ASDF、EIDF、AIDF 对胰脂肪酶的抑制效果。结果表明, 随着膳食纤维质量浓度的升高, ESDF 对胰脂肪酶的抑制率升高, 质量浓度为 50 mg/mL 时, 抑制率达到 69.92%, IC_{50} 为 23.50 mg/mL。ASDF 为 2 mg/mL 时, 对胰脂肪酶的抑制率最低为 56.63%; 质量浓度为 10 mg/mL 时, 抑制率达到

82.23%， IC_{50} 为 1.26 mg/mL。在 10~50 mg/mL 质量浓度范围内，EIDF 对胰脂肪酶的抑制率最高为 29.39%，AIDF 对胰脂肪酶的抑制率最高为 46.02%，且随着质量浓度的升高，抑制率变化并不显著。结果表明 ASDF 对胰脂肪酶的抑制活性显著高于 EISDF、EIDF 和 AIDF，其中 EIDF 和 AIDF 对酶的抑制活性偏低。本实验在 pH 值为 8.2 的条件下进行，说明体系 pH 值和溶解度均影响 DF 对胰脂肪酶活性的抑制。武媛等^[25]用内部沸腾法提取的石榴皮多糖对胰脂肪酶的半抑制质量浓度为 9.46 mg/mL。与之相比，本研究从绿豆中提取的 ESDF 和 ASDF 对胰脂肪酶活性均有明显的抑制效果，尤其是 ASDF。

2.8 绿豆膳食纤维的微观结构分析

不同提取方式的膳食纤维的微观结构往往会存

在差异，进而影响其功能特性。如图 5 所示，从左到右，依次是在 300×、500×、1 000×、2 000× 下的 DF 微观结构。ESDF 表面光滑，呈大面积粘连状态，在放大 2 000 倍的图像中发现内部疏松多孔的现象，可能是由于膳食纤维经酶法提取后结构松散，孔隙率提高，更容易吸收空气中的水分。在同样的放大倍数下，单个 EIDF 组分体积较大，结构疏松多孔，孔隙更为密集明显，且不溶于水，在室温下更容易保持结构稳定。ASDF 表面布满密集小孔，结构疏松，呈不规则片状或块状。AIDF 表面较为光滑，不平整，有较多褶皱，整体呈致密胶束状结构。从表观结构来看，酶法提取的 IDF 结构呈现更加致密蜂窝状，吸附优势更明显。

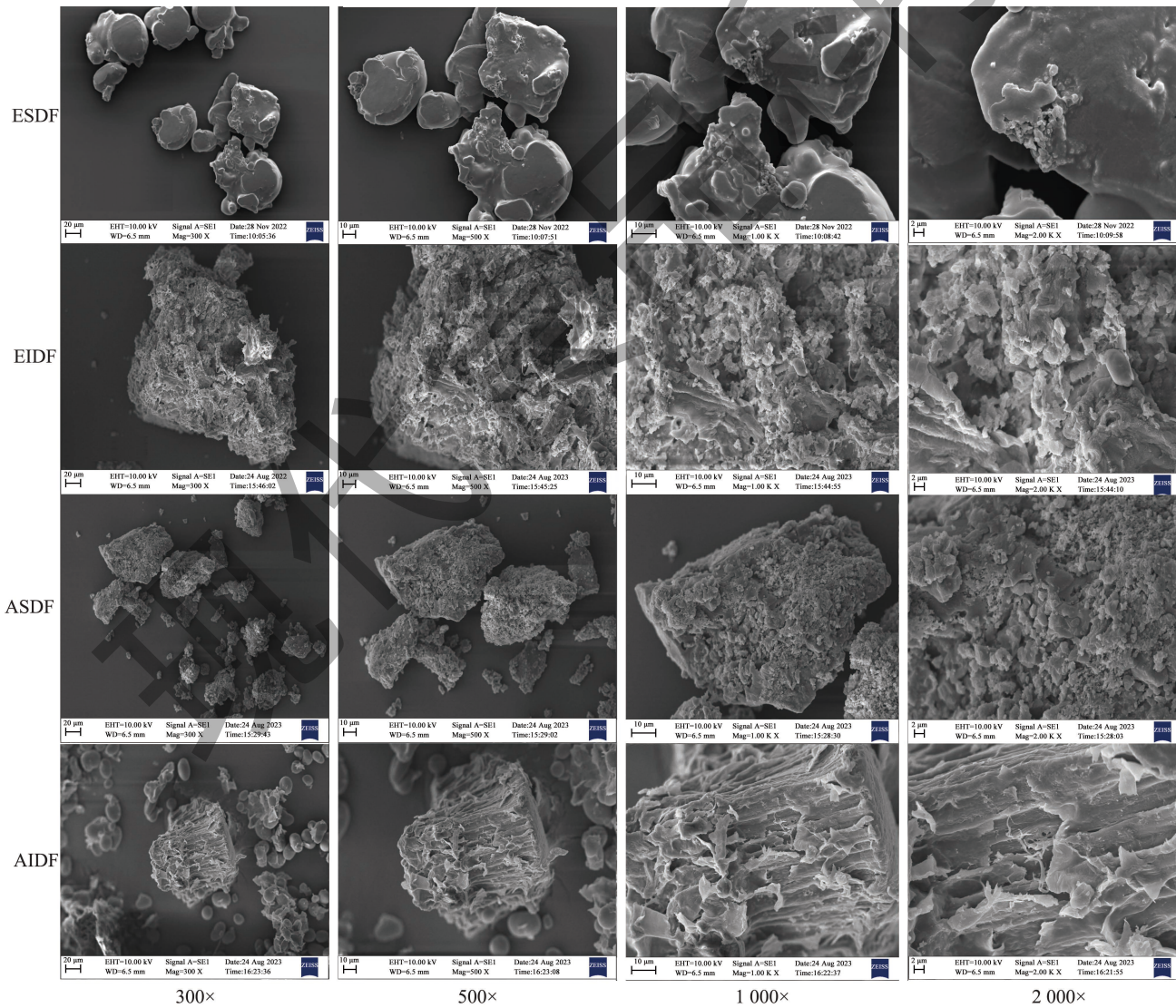


图 5 ESDF、EIDF、ASDF、AIDF 的扫描电镜图
Fig.5 SEM images of ESDF, EIDF, ASDF and AIDF

3 结论

通过超声辅助酶法和碱法分别提取绿豆中的SDF和IDF,ESDF、EIDF、ASDF、AIDF的得率分别为12.60%、21.20%、19.35%、26.97%,两种提取方法相比,碱法的膳食纤维提取率较高。通过对其吸附能力测定发现,ESDF的持水力较高,EIDF的持油力较高,AIDF的膨胀力较高;其次绿豆膳食纤维对胆酸钠的吸附保持动态平衡,其中SDF对胆酸钠的吸附率波动较大;两种方式提取的膳食纤维均对胆固醇有较好的吸附能力,在pH值为2的环境中ESDF吸附效果更好,在pH值为7的环境中ASDF吸附胆固醇效果较好。四种DF对葡萄糖的吸附能力无显著性差别,均具有较好的吸附性;ASDF对胰脂肪酶的抑制活性明显高于ESDF,EIDF和AIDF对其抑制活性较低。扫描电镜结果表明,四种DF在表观结构上均有良好的吸附优势,其中EIDF更为明显,这主要是由于提取方式不同。绿豆膳食纤维微观结构与其持水力、持油力、膨胀力,和对葡萄糖、胆固醇、胆酸盐的吸附能力及对胰脂肪酶抑制能力测定结果相符。

综上所述,绿豆是较优质的膳食纤维来源,通过不同提取方式得到的绿豆可溶性、不溶性膳食纤维的功能特性有所差异。我国是世界上最大的绿豆生产国,对绿豆的加工目前仍以淀粉为主的初加工,对其他营养成分如膳食纤维开发较少。本研究期望为绿豆膳食纤维的精深加工、降脂相关保健食品开发以及资源综合利用提供参考。

参考文献

- [1] DELZENNE N M, NEYRINCK A M, BÄCKHED F, et al. Targeting gut microbiota in obesity: effects of prebiotics and probiotics [J]. *Nature Reviews. Endocrinology*, 2011, 7(11): 639-646.
- [2] DRENTH J P H, TEN B R P G, VAN L C J H M. Obesity and metabolic syndrome, too big of an enemy to be just fought with a scalpel [J]. *Obesity Surgery*, 2020, 30(2): 777-779.
- [3] JOANNE S. Fiber and prebiotics: mechanisms and health benefits [J]. *Nutrients*, 2013, 5(4): 1417-1435.
- [4] MIRJAM A C L L, DIELEMAN L A. Prebiotics in chronic intestinal inflammation [J]. *Inflammatory Bowel Diseases*, 2009, 15(3): 454-462.
- [5] LIN X J, AMANDA J W. Pectin and gastric pH interactively affect DHA-rich emulsion *in vitro* digestion microstructure, digestibility and bioaccessibility [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 76: 49-59.
- [6] YE S X, SHAH B R, LI J, et al. A critical review on interplay between dietary fibers and gut microbiota [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 124: 237-249.
- [7] 扈晓杰,韩冬,李铎.膳食纤维的定义、分析方法和摄入现状[J].*中国食品学报*,2011,11(3):133-137.
- [8] TAN Y Y, LI S X, LI C F, et al. Glucose adsorption and α -amylase activity inhibition mechanism of insoluble dietary fiber: comparison of structural and microrheological properties of three different modified coconut residue fibers [J]. *Food Chemistry*, 2023, 418: 135970-135970.
- [9] 赵广河.米糠膳食纤维中结合态酚类物质的模拟消化释放特征及其改善脂质代谢作用[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [10] JAKOBSDOTTIR G, XU J, MOLIN G, et al. High-fat diet reduces the formation of butyrate, but increases succinate, inflammation, liver fat and cholesterol in rats, while dietary fibre counteracts these effects [J]. *Plos One*, 2013, 8(11): e80476.
- [11] DONG W J, WANG D D, HU R S, 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.
- [12] 周素梅,李若凝,唐健,等.绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J].*粮油食品科技*,2022,30(2):16-23,12.
- [13] QIN L, CHEN S, XIE L M, et al. Recent advances in mung bean polysaccharides: extraction, physicochemical properties and biological activities [J]. *Process Biochemistry*, 2022, 121: 248-256.
- [14] SINGH M, MANICKAVASAGAN A, SHOBANA S, et al. Glycemic index of pulses and pulse-based products: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 61(9): 1-22.
- [15] 蔡文强,崔嘉航,刘瑞,等.杂豆膳食纤维生理功能及其作用机制研究进展[J].*食品研究与开发*,2023,44(16):185-192.
- [16] ZHENG Y T, LIU S, XIE J H, et al. Antioxidant, α -amylase and α -glucosidase inhibitory activities of bound polyphenols extracted from mung bean skin dietary fiber [J]. *LWT*, 2020, 132: 1-11.
- [17] 刘秋艳,连欣悦,容格清,等.膳食纤维生理功能研究进展[J].*粮食与食品工业*,2021,28(4):25-28.
- [18] 杨末.绿豆皮可溶性膳食纤维的提取及其降血脂研究[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [19] 秦续缘,程志强,于寒松.复合酶法提取对黑果腺肋花楸不溶性膳食纤维结构及功能特性的影响[J].*食品研究与开发*,2023,44(3):66-71.
- [20] 谢建华,张桂云,李足环,等.柚皮不溶性膳食纤维提取工艺优化及其理化性质分析[J].*食品工业科技*,2023,

- 44(20):206-212.
- [21] ZHANG Y J, WU L R, ZHANG F S, et al. Sucrose ester alleviates the agglomeration behavior of bamboo shoot dietary fiber treated via high pressure homogenization: influence on physicochemical, rheological, and structural properties [J]. *Food Chemistry*, 2023, 413: 135609-135609.
- [22] HUANG H R, CHEN J 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*, 2021, 145: 111314.
- [23] ZHENG Y J, LI Y, XU J G, et al. Adsorption activity of coconut (*Cocos nucifera* L.) cake dietary fibers: effect of acidic treatment, cellulase hydrolysis, particle size and pH [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(6): 2844-2850.
- [24] 梁文康. 黄秋葵可溶性膳食纤维提取及通便作用研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [25] 武媛. 石榴皮多糖的提取纯化、结构表征及体外降脂活性研究[D]. 西安:陕西师范大学,2021.
- [26] 池玉闽,董怡,何强,等. 油橄榄果肉和核壳中膳食纤维的功能特性分析[J]. *现代食品科技*, 2023,39(5):157-163.
- [27] HSIANG Y Y, NAN W S, MIN H L. Chemical compositions and physicochemical properties of the fiber-rich materials prepared from shoyu mash residue [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2005, 53(11): 4361.
- [28] TAN Y Y, LI S X, LIU S X, et al. Modification of coconut residue fiber and its bile salt adsorption mechanism: Action mode of insoluble dietary fibers probed by microrheology [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136(PA): 108221.
- [29] 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.
- [30] WU W J, HU J, GAO H Y, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics [J]. *Food Chemistry*, 2020, 332(prepublish): 127372.
- [31] 王虎玄,赵天添,王聪,等. 陕北狗头红枣可溶性膳食纤维提取工艺优化及其理化特性与抗氧化活性研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2022,40(5):54-62,99.
- [32] 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.
- [33] MIEHLE E, HAAS M, BADER-MITTERMAIER S, et al. The role of hydration properties of soluble dietary fibers on glucose diffusion [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107822.
- [34] 郭增旺,马萍,刁静静,等. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性[J]. *食品科学*, 2018,39(5):106-112.
- [35] VANESA B, MIGUL R, SARA H, et al. Coffee parchment as a new dietary fiber ingredient: functional and physiological characterization [J]. *Food Research International*, 2019, 122: 105-113.