

滇橄榄果渣膳食纤维的提取及其体外吸附性能研究

吴 婧, 刘祚祚, 吴 杰, 罗秋君, 姜 燕

Extraction and *in Vitro* Adsorption Properties of Dietary Fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. Pomace

WU Jing, LIU ZuoZuo, WU Jie, LUO QiuJun, and JIANG Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040269>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蒜黄根膳食纤维提取工艺优化及其理化性质分析

Optimization of Extraction Conditions of Dietary Fiber from the Root of Blanched Garlic Leaves and Its Physicochemical Properties Analysis

食品工业科技. 2020, 41(23): 189–194,222

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

油橄榄果渣水不溶性膳食纤维结构表征及体外吸附性能研究

Structural characterization and *in-vitro* adsorption capacity of olive pomace insoluble dietary fiber

食品工业科技. 2017(03): 108–112

竹笋膳食纤维理化特性及改性技术研究进展

Research Advance on Physicochemical Properties and Modification of Bamboo Shoot Dietary Fiber

食品工业科技. 2020, 41(12): 353–357

红枣果汁果渣与果酒果渣膳食纤维功能特性的比较研究

Comparative of Functional Properties on Dietary Fiber from Jujube Juice Pomace and Fruit Wine Pomace

食品工业科技. 2020, 41(4): 1–5,12

七种药食两用中药膳食纤维体外抗氧化及胆酸盐结合能力研究

Study on the *in Vitro* Antioxidant and Bile Salts Binding Activity of the Dietary Fibers from Seven Edible Rraditional Chinese Medicines

食品工业科技. 2021, 42(11): 314–320



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴婧, 刘祚祚, 吴杰, 等. 滇橄榄果渣膳食纤维的提取及其体外吸附性能研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 174–181. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040269

WU Jing, LIU Zuozuo, WU Jie, et al. Extraction and *in Vitro* Adsorption Properties of Dietary Fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. Pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 174–181. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040269

滇橄榄果渣膳食纤维的提取及其 体外吸附性能研究

吴婧¹, 刘祚祚¹, 吴杰², 罗秋君¹, 姜燕^{1,*}

(1.大理大学公共卫生学院, 云南大理 671000;

2.云南树翡翠农林科技有限公司, 云南宾川 671600)

摘要: 本文以滇橄榄果渣为原料, 优化其膳食纤维的碱法提取工艺, 同时探讨了滇橄榄果渣、总膳食纤维 (total dietary fiber, TDF)、水不溶性膳食纤维 (insoluble dietary fiber, IDF) 及水溶性膳食纤维 (soluble dietary fiber, SDF) 的理化性质及其体外吸附能力。结果表明: 碱法提取滇橄榄果渣膳食纤维的最优工艺为: NaOH 浓度为 8 g/L, 料液比为 1:35 (g:mL), 70 °C 处理 40 min, IDF 和 SDF 的得率分别为 61.72%±0.04%、17.57%±0.03%。滇橄榄果渣及其膳食纤维均具有较好的水化特性和持油力, TDF 的持水力最低但膨胀力最高, 与滇橄榄果渣、SDF 和 IDF 存在显著性差异 ($P<0.05$); SDF 的持油力、膨胀力和对脂肪的吸附能力均较低, 但在模拟胃环境 (pH2) 的条件下对胆固醇和 NO_2^- 的吸附能力均高于滇橄榄果渣、TDF 和 IDF, 且存在显著性差异 ($P<0.05$)。滇橄榄果渣及其膳食纤维对胆固醇和 NO_2^- 的吸附与 pH 有关, TDF 和 SDF 在模拟胃环境的条件下对胆固醇的吸附能力强于模拟小肠环境, 滇橄榄果渣和 IDF 则相反; 四个样品在模拟胃环境的条件下对 NO_2^- 的吸附能力均强于模拟小肠环境。本文对滇橄榄果渣膳食纤维的提取及性能研究, 可为其在保健食品中的应用提供一定的理论参考。

关键词: 滇橄榄果渣, 膳食纤维, 碱法提取, 理化性质, 体外吸附

中图分类号: TS209

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)02-0174-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040269



本文网刊:

Extraction and *in Vitro* Adsorption Properties of Dietary Fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. Pomace

WU Jing¹, LIU Zuozuo¹, WU Jie², LUO QiuJun¹, JIANG Yan^{1,*}

(1.School of Public Health, Dali University, Dali 671000, China;

2.Yunnan Shufecui Agriculture and Forestry Technology Co., Ltd., Binchuan 671600, China)

Abstract: An investigation was carried out to optimize the extraction process of dietary fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. pomace, and the physicochemical properties and *in vitro* adsorption capacity of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace, total dietary fiber (TDF), insoluble dietary fiber (IDF), and soluble dietary fiber (SDF) were investigated. The results showed that the optimal extraction process using alkali method was: Concentration of NaOH 8 g/L, material-to-liquid ratio of 1:35 (g:mL), treatment at 70 °C for 40 min, and the yield of IDF and SDF were 61.72%±0.04% and 17.57%±0.03%, respectively. *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fiber both had good hydration properties and oil-holding capacity. TDF had the lowest water holding and the highest swelling capacity significantly different from *Phyllanthus emblica* Linn. pomace, SDF and IDF ($P<0.05$). SDF had lowly capacity to oil-holding, swelling and fat, however under simulated stomach (pH2) which had the higher adsorption capacity for cholesterol and NO_2^- than *Phyllanthus emblica* Linn. pomace, TDF and IDF ($P<0.05$). The adsorption capacity of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fiber on cholesterol and NO_2^- was related with pH *in vitro*. The cholesterol adsorption capacity of TDF and SDF were higher under simulating stomach pH, while the adsorption capacity of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and IDF on cholesterol were

收稿日期: 2021-04-27

基金项目: 大理大学博士启动基金 (KTBS2018005); 2020 年大学生创新训练项目 (202010679003)。

作者简介: 吴婧 (1999-), 女, 本科, 研究方向: 天然产物活性成分提取及功效分析, E-mail: xxx_128@126.com。

* 通信作者: 姜燕 (1981-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食物营养成分、功能因子的协同作用和健康效应, E-mail: jiang_ya@126.com。

higher under simulating small intestine. The *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fiber had higher adsorption capacity on NO_2^- under stomach pH than simulated small intestinal pH. This paper studied the extraction and properties of dietary fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. pomace, which could provide some theoretical reference for its application in health food.

Key words: *Phyllanthus emblica* Linn. pomace; dietary fiber; alkaline extraction; physicochemical properties; *in vitro* adsorption

滇橄榄(*Phyllanthus emblica* L.)又名余甘子,大戟科(Euphorbiaceae)叶下珠属(*Phyllanthus*),广泛分布于我国南方多个省区,云南和福建产量居多^[1]。滇橄榄作为一种重要的药食同源植物资源,含有丰富的微量元素^[2]、氨基酸^[3]、维生素、黄酮和多酚类物质。现代药理学研究表明:滇橄榄具有保肝、抗氧化、抑菌抗炎、清咽生津、抗糖尿病^[4]等多种药理作用^[5]。

滇橄榄在加工过程中会产生大量的加工废弃物—滇橄榄果渣。滇橄榄果渣富含膳食纤维,具有降低血液胆固醇含量、增加肠道菌群的多样性^[6]、预防结肠癌^[7]、改善便秘、预防肿瘤^[8]等功效。而且膳食纤维中的植酸、阿魏酸^[9]和在肠道微生物的作用下的发酵产物—丁酸对癌症的形成有抑制作用^[10]。

目前对果渣中膳食纤维的研究主要有采用化学法提取红树莓果渣水溶性膳食纤维^[11];碱法提取油橄榄果渣膳食纤维,并研究其理化性质和葡萄糖透析延迟指数^[12];刺梨果渣膳食纤维的提取和体外吸附性能的研究^[13]等。而对滇橄榄果渣膳食纤维的提取方法及体外吸附性能的研究尚未见报道,故本研究拟从滇橄榄果渣中提取膳食纤维,优化提取工艺,分析膳食纤维的理化性质及体外吸附性能,为滇橄榄果渣膳食纤维在保健食品和医疗领域应用提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

滇橄榄果渣 由云南树翡翠农林科技有限公司提供,滇橄榄品种为“盈玉”。将“盈玉”滇橄榄果渣于 60 ℃ 热风干燥箱中烘干,粉碎过 60 目筛得滇橄榄果渣粉,密封储存备用;胆固醇标准品(纯度 ≥ 99%)、盐酸、95% 乙醇、氢氧化钠、乙酸、硫酸钾、硫酸、硝酸、磷酸、亚硝酸钠、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺 均为分析纯,蒙自龙宇试验仪器经营部;耐高温 α-淀粉酶(2000 U/g)、碱性蛋白酶(200 U/mg)、糖化酶(10 万 U/mL)、纤维素酶(1 万 U/g) 均为食品级,武汉华翔科洁生物技术有限公司。

CPA324S 型分析天平 德国塞利多斯;TG16-WS 型高速离心机 上海竣仓电器有限公司;ED115 干燥箱 德国 BNDER 公司;8400 型全自动凯氏定氮仪 美国福斯公司;T6 新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;Phoenix 微波灰化系统 美国 CEM 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 滇橄榄果渣基本成分的测定 水分的测定:

GB 5009.3-2016 食品中水分的测定,采用直接干燥法进行测定;蛋白质的测定:GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定,凯氏定氮法;灰分的测定:GB 5009.4-2016 食品中灰分的测定,灼烧称量法;脂肪含量的测定:GB 5009.6-2016 食品中脂肪的测定,酸水解法;总膳食纤维(TDF)、水不溶性膳食纤维(IDF)及水溶性膳食纤维(SDF)的测定:GB 5009.88-2014 食品中膳食纤维的测定。

1.2.2 滇橄榄果渣膳食纤维的提取 本研究从酸法、碱法、碱性蛋白酶法和纤维素酶法中筛选滇橄榄果渣膳食纤维提取方法。

a. 酸法提取:取 1.00 g 滇橄榄果渣按 1:15 (g:mL)料液比加入 2% HCl 液,70 ℃ 水解 60 min^[11]。

b. 碱法提取:取 1.00 g 滇橄榄果渣按 1:25 (g:mL)料液比加入 8 g/L NaOH 溶液,40 ℃ 水解 60 min^[11]。

c. 纤维素酶法:取 1.00 g 滇橄榄果渣按 1:30 (g:mL)料液比加入 pH7.0 磷酸盐,加入 2.0% 的纤维素酶(v/w),50 ℃ 酶解 60 min,加热煮沸 10 min 灭酶^[14]。

d. 碱性蛋白酶法:取 1.00 g 滇橄榄果渣按 1:30 (g:mL)料液比加入 0.05 mol/L 磷酸缓冲液,加入 0.2%(v/w)碱性蛋白酶,60 ℃ 酶解 2 h^[15]。

将上述所得水解液用 4 倍体积 95% 乙醇溶液醇沉 4 h,过滤,沉淀用 95% 乙醇醇洗至中性,于 (103±1) ℃ 干燥至恒重即得 TDF。水解液分别进行抽滤,滤饼用三级水水洗至中性,于 (103±1) ℃ 干燥至恒重即得 IDF;滤液用 4 倍体积 95% 的乙醇溶液醇沉 4 h,过滤,沉淀用 95% 乙醇醇洗至中性,于 (103±1) ℃ 干燥至恒重即得 SDF。IDF 和 SDF 的得率均以产品质量占原料质量的百分数计。

1.2.3 滇橄榄果渣膳食纤维提取单因素和正交优化验证试验

1.2.3.1 单因素实验 在料液比 1:25(g:mL)、提取时间 60 min 和提取温度 40 ℃ 的条件下,考察 NaOH 浓度为 6、7、8、9、10 g/L 对 IDF 和 SDF 得率的影响。在 NaOH 浓度 8 g/L、提取时间 60 min 和提取温度 40 ℃ 的条件下,考察料液比为 1:15、1:20、1:25、1:30、1:35(g:mL)对 IDF 和 SDF 得率的影响;在 NaOH 浓度 8 g/L、料液比 1:25(g:mL)和提取温度 40 ℃ 的条件下,考察提取时间为 40、60、80、100、120 min 对 IDF 和 SDF 得率的影响;在

NaOH 浓度 8 g/L、料液比 1:25(g:mL)和提取时间 60 min 的条件下,考察提取温度为 40、50、60、70、80 °C 对 IDF 和 SDF 得率的影响。

1.2.3.2 正交优化及验证实验 碱液在碱解分离 IDF 和 SDF 的同时,还会使部分 IDF 转化为 SDF,使 SDF 的提取率达到最大,故正交试验以 SDF 的得率为指标。在单因素实验结果的基础上,进行 $L_9(3^4)$ 的正交试验(表 1);并进行 3 次重复性验证性试验,验证最佳工艺的可行性和结果的可靠性。

表 1 正交试验因素水平表
Table 1 Level of factors for orthogonal test

| 水平 | 因素 | | | |
|----|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | A NaOH浓度 (g/L) | B 料液比 (g:mL) | C 提取时间 (min) | D 提取温度 (°C) |
| 1 | 7 | 1:25 | 40 | 60 |
| 2 | 8 | 1:30 | 60 | 70 |
| 3 | 9 | 1:35 | 80 | 80 |

1.2.4 滇橄榄果渣及膳食纤维的理化性质及体外吸附性能测定

1.2.4.1 持水力的测定 精确称取 0.20 g 的果渣、TDF、IDF 和 SDF 于 50 mL 离心管中,加入 5 mL 蒸馏水,充分搅拌 1 h 后,以 3500 r/min 的转速离心 10 min,弃去上层清液并用滤纸将离心管内壁残留的水分吸干,称质量按式(1)计算持水力(R_{WHC})^[12]:

$$R_{WHC}(g/g) = \frac{m_1 - m}{m} \quad \text{式 (1)}$$

式中: m 为样品干质量, g; m_1 为样品吸水后质量, g。

1.2.4.2 持油力测定 精确称取 0.20 g 的果渣、TDF、IDF 和 SDF 于 50 mL 离心管中,加入 4 g 植物油,室温下静置 1 h,以 3000 r/min 的转速离心 20 min,去掉上层油脂并用滤纸将离心管内壁残留的植物油吸干,称重量,按式(2)计算持油力(R_{OHC})^[12]:

$$R_{OHC}(g/g) = \frac{m_2 - m}{m} \quad \text{式 (2)}$$

式中: m 为样品干质量, g; m_2 为样品吸油后质量, g。

1.2.4.3 膨胀力的测定 精确称取 0.50 g 干燥果渣、TDF、IDF 和 SDF 于 10 mL 量筒中,轻微振荡,保持表面平整,读取干品体积,准确 5 mL 蒸馏水加入其中,振荡均匀后放置 24 h,读取体积,按式(3)计算膨胀力(R_{SC})^[12]:

$$R_{SC}(mL/g) = \frac{V_1 - V_0}{m} \quad \text{式 (3)}$$

式中: m 为样品干质量, g; V_0 为样品干样品体积, mL; V_1 为样品膨胀性后, mL。

1.2.4.4 对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附作用 对不饱和脂肪酸的吸附^[13]: 分别取一定量(W_1)滇橄榄果渣、IDF、TDF 和 SDF 于离心管中,加入一定

量的植物油, 37 °C 静置 1 h, 4000 r/min 离心 20 min, 去掉上层油, 残渣用滤纸吸干油离的植物油, 称重得 W_2 , 吸油量 = $(W_2 - W_1)/W_1$ 。

对饱和脂肪酸的吸附^[13]: 分别取一定量(W_1)滇橄榄果渣、IDF、TDF 和 SDF 于离心管中, 加入一定量的猪油, 37 °C 静置 1 h, 4000 r/min 离心 20 min, 去掉上层油, 残渣用滤纸吸干油离的猪油, 称重得 W_3 , 吸油量 = $(W_3 - W_1)/W_1$ 。

1.2.4.5 对胆固醇的吸附作用 根据 GB/T 5009.128-2016 食品中胆固醇的测定(比色法)绘制胆固醇标准曲线为: $Y = 3.478x - 0.0216$, $R^2 = 0.9948$ 。

吸附效果的测定: 将鲜鸡蛋蛋黄用 9 倍的蒸馏水稀释, 充分搅拌成乳液; 分别取 0.50 g 滇橄榄果渣及其膳食纤维(TDF、IDF 和 SDF)于 250 mL 的锥形瓶中, 加入 20 mL 稀释蛋黄液, 均匀搅拌, 调节吸附体系 pH 模拟胃环境(pH2)和小肠环境(pH7), 37 °C 恒温水浴锅中反应 2 h, 不断搅拌使反应充分, 过滤, 取 1 mL 滤液, 参照标准曲线法在波长 560 nm 处比色测定胆固醇含量^[13]; 按式(4)计算胆固醇的吸附量。

$$\text{胆固醇的吸附量}(mg/g) = \frac{A_1 - A_2}{M} \quad \text{式 (4)}$$

式中: A_1 为吸附前蛋黄液中胆固醇量, mg; A_2 为吸附后滤液中胆固醇含量, mg; M 为样品质量, g。

1.2.4.6 对亚硝酸盐的吸附作用 根据 GB 5009.33-2016 食品中亚硝酸盐和硝酸盐的测定分光光度法绘制 NO_2^- 标准曲线为: $y = 0.0548x - 0.0003$, $R^2 = 0.9996$ 。

吸附效果的测定: 分别取 0.50 g 滇橄榄果渣及其膳食纤维(TDF、IDF 和 SDF)于 250 mL 三角瓶中, 调节吸附体系 pH 模拟胃环境(pH2)和小肠环境(pH7), pH2 的体系中加入浓度为 100 $\mu g/mL$ 的 NO_2^- , pH7 的体系中加入浓度为 50 $\mu g/mL$ 的 NO_2^- , 于 37 °C 恒温水浴锅中反应 2 h 后, 各取 1 mL 样液, 按标准曲线的方法在波长 538 nm 处测定 NO_2^- 的浓度^[13]。按式(5)计算 NO_2^- 吸附量。

$$NO_2^- \text{ 吸附量 } (g/g) = \frac{A_1 - A_2}{M} \quad \text{式 (5)}$$

式中: A_1 为吸附前 NO_2^- 含量, μg ; A_2 为吸附后 NO_2^- 含量, μg ; M 为称取重量, g。

1.3 数据处理

数据用平均值 \pm 标准差表示, 采用 Origin 2017 进行图形处理, 用 SPSS25.0 进行显著性分析, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准。

2 结果与分析

2.1 滇橄榄果渣的基本成分

滇橄榄果渣的主要成分(表 2)是膳食纤维(76.60%), 其中 IDF 的含量为 64.88%, SDF 的含量为 11.72%, IDF/SDF 值约为 5.5:1, 高于油橄榄果渣 IDF/SDF 值(1.8:1)^[12], 但低于竹笋(11.7:1)^[16]、大豆皮(21.1:1)^[17] 和豆渣(8.6:1)^[18] 中的 IDF/SDF 值。

表 2 滇橄榄果渣的基本成分

Table 2 Basic components of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace

| 组分 | 水分 | 脂肪 | 蛋白质 | 灰分 | TDF | IDF | SDF |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 含量(g/100 g) | 4.84±0.06 | 0.79±0.11 | 3.95±0.14 | 1.25±0.07 | 76.60±0.88 | 64.88±0.54 | 11.72±0.06 |

滇橄榄果渣中 SDF 的含量较高,且能达到高品质膳食纤维的要求($SDF \geq 10\%$)^[19],可以作为一种优质的膳食纤维补充剂。DF 特异的化学组成及结构使其具有特定的生理功能,可用于减肥、治疗糖尿病、降低胆固醇和改善肠道微生物菌群^[20]。

2.2 滇橄榄果渣膳食纤维提取方法的确定

由图 1 可知,碱法提取所得的 IDF 和 SDF 与纤维素酶法、酸法和碱性蛋白酶法存在显著性差异($P<0.05$),这是因为碱液在碱解分离制备 IDF 和 SDF 的同时,还能水解果渣中的蛋白质、皂化脂肪,从而获得高纯度的膳食纤维^[12]。影响膳食纤维生理功能的重要因素是 SDF 的占比^[21],故选取碱法提取滇橄榄果渣膳食纤维做进一步的探讨。

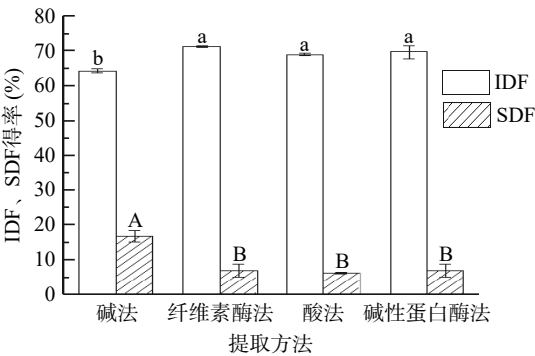


图 1 不同提取方法对滇橄榄果渣膳食纤维得率的影响

Fig.1 Effects of different extraction methods on the dietary fiber yield of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace

注: 图中不同大小写字母表示各处理组差异显著 ($P<0.05$), 图 3~图 4 同。

2.3 滇橄榄果渣膳食纤维提取条件的优化

2.3.1 单因素实验结果

2.3.1.1 NaOH 浓度 由图 2A 可知, SDF 的得率随 NaOH 浓度的增加而增大, IDF 的得率则逐渐减小, 在 NaOH 浓度为 8 g/L 时, SDF 的得率达到最大, 为 18.2%; 当 NaOH 浓度大于 9 g/L 时, IDF 和 SDF 的得率都趋于平稳。这是由于碱液溶度过低会导致滇橄榄果渣水解不完全, 而随着碱液浓度的增加, IDF 中半纤维素部分水解, 使得部分 IDF 向 SDF 转化, SDF 的得率增加。当碱液浓度超过一定水平值时, 膳食纤维又会进一步分解生成小分子葡萄糖, 导致 IDF 和 SDF 的得率降低^[22]。

2.3.1.2 料液比 由图 2B 可知, 在料液比为 1:15 (g:mL) 至 1:25 (g:mL) 之间时, SDF 的得率随着溶剂使用量的增加而增大, 而 IDF 的得率则逐渐减小; 在料液比为 1:30 (g:mL) 至 1:35 (g:mL) 之间, SDF 和 IDF 的得率有所增加, 当反应体系中存在大量的

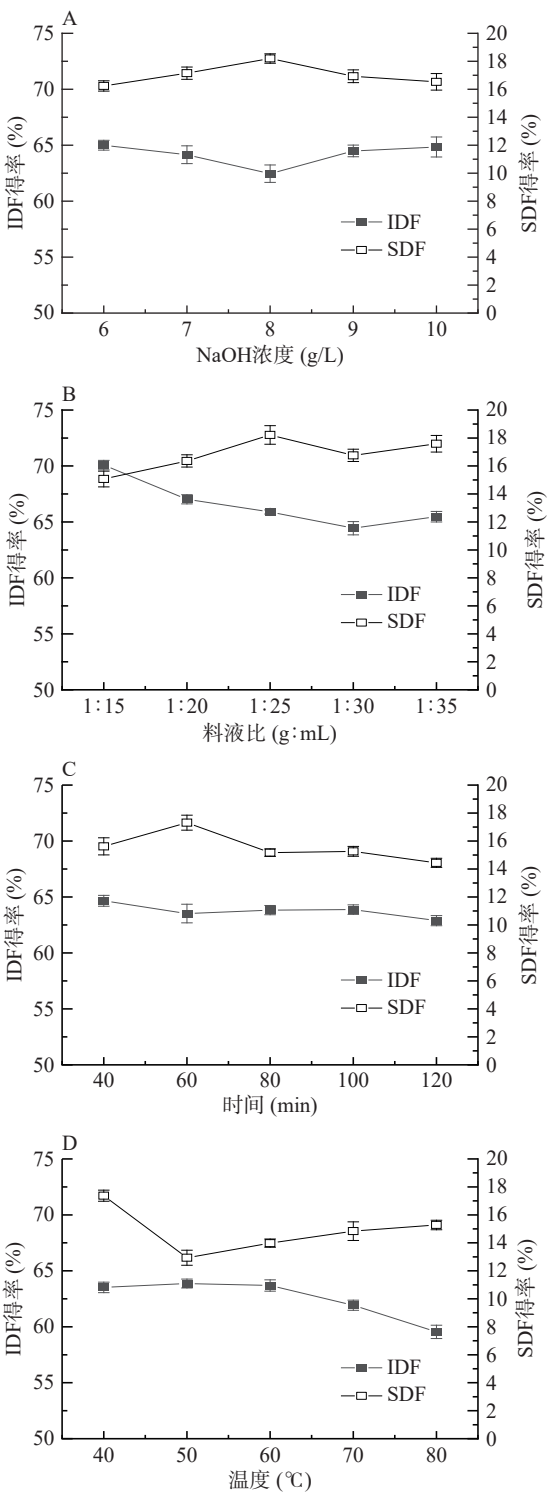


图 2 不同反应条件对 IDF 和 SDF 得率的影响

Fig.2 Effects of different reaction conditions on IDF and SDF yield of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace

碱液时,滇橄榄果渣膳食纤维会发生水解,导致膳食纤维损失,从而使提取率降低^[23]。但当料液比过大时,会增加醇沉时乙醇的用量^[24]。

2.3.1.3 提取时间 由图 2C 可知,随着提取时间的增加, SDF 的得率先增加后减少, IDF 的得率先减小,后趋于平缓。在 60 min 时, SDF 得率达到最大,为 17.31%;当提取时间超过 80 min 时, SDF 和 IDF 的得率都趋于平缓。当碱解时间过短时,果胶水解不充分, SDF 的得率较低;当碱解时间过长时,果胶被裂解, IDF 中纤维素和半纤维素会发生轻度水解,导致 SDF 和 IDF 提取率降低^[22]。

2.3.1.4 提取温度 由图 2D 可知,随着提取温度不断升高, SDF 的得率先减小后增加, IDF 的得率先增加后减少,当提取温度超过 60 ℃ 时, IDF 的得率不断降低,而 SDF 的得率不断增加。碱液温度过高,滇橄榄果渣中的蛋白质、色素等成分水解完全,部分 IDF 向 SDF 转化,使得 SDF 得率增加, IDF 的提取率降低^[24-25]。

2.3.2 滇橄榄果渣膳食纤维提取正交优化及验证试验 由表 3 可知,影响滇橄榄果渣 SDF 提取率各因素主次顺序:料液比>NaOH 浓度>处理温度>处理时间;碱法制备滇橄榄果渣膳食纤维的最佳条件为 A₂B₃C₂D₂,但处理时间对滇橄榄果渣的提取影响最低,增加提取时间, SDF 的提取率未显著提高,故提取时间选择 40 min。综上,碱法提取滇橄榄果渣膳食纤维的最佳条件为:NaOH 浓度为 8 g/L,料液比为 1:35, 70 ℃ 处理 40 min,在此工艺下进行 3 次重复性验证性试验, IDF 的得率为 61.72%±0.04%, SDF 的得率为 17.57%±0.03%,在试验范围内重现性良好,说明上述最佳工艺可行,结果可靠,能用于滇橄榄果渣膳食纤维的提取。

表 3 正交试验结果分析
Table 3 Analysis of orthogonal test results

| 实验号 | 因素 | | | | SDF得率 (%) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| | ANaOH浓度 (g/L) | B料液比 (g:mL) | C提取时间 (min) | D提取温度 (℃) | |
| 1 | 7 | 1:25 | 40 | 60 | 14.38 |
| 2 | 7 | 1:30 | 60 | 70 | 15.71 |
| 3 | 7 | 1:35 | 80 | 80 | 17.08 |
| 4 | 8 | 1:25 | 60 | 80 | 14.85 |
| 5 | 8 | 1:30 | 80 | 60 | 15.00 |
| 6 | 8 | 1:35 | 40 | 70 | 17.57 |
| 7 | 9 | 1:25 | 80 | 70 | 14.16 |
| 8 | 9 | 1:30 | 40 | 80 | 14.89 |
| 9 | 9 | 1:35 | 60 | 60 | 16.61 |
| k ₁ | 15.72 | 14.46 | 15.61 | 15.33 | |
| k ₂ | 15.81 | 15.20 | 15.72 | 15.81 | |
| k ₃ | 15.22 | 17.09 | 15.41 | 15.61 | |
| R | 0.59 | 2.63 | 0.31 | 0.48 | |
| 最优水平 | A ₂ | B ₃ | C ₂ | D ₂ | |
| 影响顺序 | B>A>D>C | | | | |

2.4 滇橄榄果渣及其膳食纤维的水化特性和持油力

水化特性和持油力是衡量膳食纤维生理功能的重要指标,水化特性越强,说明进食膳食纤维后排出

的粪便体积大、频率高、质地软,间接减轻直肠和泌尿系统压力,有利于防止便秘和结肠癌的发生^[26]。由表 4 可知, TDF 的持水力最低,与滇橄榄果渣、 IDF 和 SDF 存在显著性差异($P<0.05$)。 SDF 的持油力最低,滇橄榄果渣的持油力较高。 IDF 和 SDF 的膨胀力最低, TDF 的膨胀力最高($P<0.05$)。滇橄榄果渣、 TDF 和 IDF 的持油力均高于复合酶改性后马铃薯膳食纤维(2.89 g/g)^[27],滇橄榄果渣 SDF 的持油力高于百香果皮 SDF(0.88 g/g)^[28],滇橄榄果渣 SDF 的持水力和持油力均高于香芋皮 SDF(2.12、1.68 g/g)^[29];滇橄榄果渣及其膳食纤维均具有较好的水化特性和持油力,能更好的增加与饱腹感有关的激素水平,降低刺激饥饿的激素水平,延迟胃排空,产生饱腹感,预防肥胖;将粪便中的有害物质排出体外,改善肠道功能、缓解便秘等^[6]。

表 4 滇橄榄果渣及其膳食纤维的水化特性和持油力
Table 4 Hydration properties and oil-holding capacity of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fiber

| 样品 | 持水力(g/g) | 持油力(g/g) | 膨胀力(mL/g) |
|-------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| 滇橄榄果渣 | 5.08±0.11 ^a | 3.86±0.04 ^a | 3.63±0.05 ^b |
| TDF | 4.24±0.05 ^b | 3.33±0.15 ^{ab} | 5.38±0.02 ^a |
| IDF | 4.85±0.20 ^a | 3.29±0.30 ^{ab} | 2.88±0.04 ^c |
| SDF | 4.97±0.10 ^a | 2.77±0.33 ^b | 2.88±0.04 ^c |

注:同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$);表 5 同。

2.5 滇橄榄果渣及其膳食纤维的体外吸附性能

2.5.1 滇橄榄果渣及其膳食纤维对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附作用 能量摄入过多导致肥胖人群的比例逐年增加,而能量中脂肪的占比较大。由表 5 可知,滇橄榄果渣对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附能力虽然高于 TDF、 IDF 和 SDF,但与 TDF、 IDF 之间并不存在显著性差异($P<0.05$),橄榄果渣 IDF 对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附能力均强于豌豆纤维粉 IDF(1.75、1.27 g/g)^[30]。 SDF 对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附均低于滇橄榄果渣、 TDF 和 IDF,但高于西番莲果皮 SDF 对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附能力(1.55、1.29 g/g)^[31]。结果说明滇橄榄果渣及其膳食纤维对脂肪具有一定的吸附能力,可以减少机体对脂肪的吸收,预防肥胖,降低慢性疾病的发病率^[32]。

表 5 滇橄榄果渣及其膳食纤维对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的吸附能力

Table 5 Adsorption capacity of saturated fatty acids and unsaturated fatty acids of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fiber

| 样品 | 滇橄榄果渣 | TDF | IDF | SDF |
|----------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 饱和脂肪酸的吸附(g/g) | 3.68±0.17 ^a | 3.13±0.14 ^a | 3.19±0.25 ^a | 2.38±0.29 ^b |
| 不饱和脂肪酸的吸附(g/g) | 3.86±0.04 ^a | 3.33±0.15 ^{ab} | 3.29±0.30 ^{ab} | 2.77±0.33 ^b |

2.5.2 滇橄榄果渣及其膳食纤维对胆固醇的吸附作用 当人体摄入过多的高脂食物时,食物中过多的胆

固醇与血液中低密度脂蛋白结合,形成低密度脂蛋白胆固醇,在血管壁上沉积,导致动脉粥样硬化。膳食纤维通过吸附胆汁酸抑制肠道对胆汁酸的吸收,降低肝中胆汁酸的含量,从而加速分解体内的胆固醇,有效降低人体血清和肝中胆固醇的含量^[33]。

由图 3 可知,在 pH2(模拟胃环境)的条件下,SDF 对胆固醇的吸附能力显著高于滇橄榄果渣、TDF 和 IDF($P<0.05$)。在 pH7(模拟小肠环境)的条件下,滇橄榄果渣对胆固醇的吸附能力显著高于 SDF、TDF 和 IDF($P<0.05$)。SDF 和 TDF 在 pH2(模拟胃环境)的条件下对胆固醇的吸附高于 pH7(模拟小肠环境),可能是由于 SDF 中部分侧链基团在较高 pH 下发生解离^[34],从而影响 SDF 和 TDF 对胆固醇的吸附。丁莎莎等^[35]的研究结果表明,膳食纤维能够吸附胆固醇,可以有效降低血清中胆固醇的含量,减小心血管疾病的发病机率。

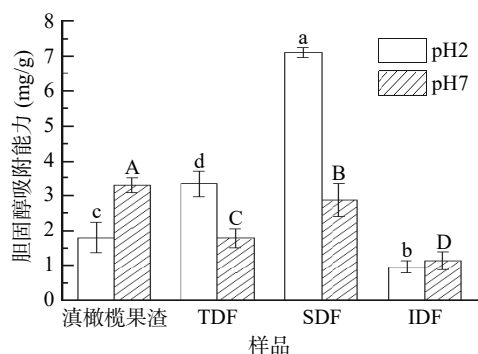


图 3 滇橄榄果渣及其膳食纤维对胆固醇的吸附能力
Fig.3 Adsorption capacity of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fiber on cholesterol

2.5.3 滇橄榄果渣及其膳食纤维对 NO_2^- 的吸附作用
在胃酸的作用下,亚硝酸盐与蛋白质的分解产物二级胺反应生成亚硝胺,亚硝胺具有强烈的致癌作用,会引起食管癌、胃癌、肝癌和大肠癌等^[36]。

由图 4 可知,在 pH2(模拟胃环境)的条件下,各样品对于 NO_2^- 的吸附强于 pH7(模拟小肠环境),说明膳食纤维对 NO_2^- 的吸收主要发生在胃部。两者之间的差异可能是由于 DF 中阿魏酸引起的,酚酸基团

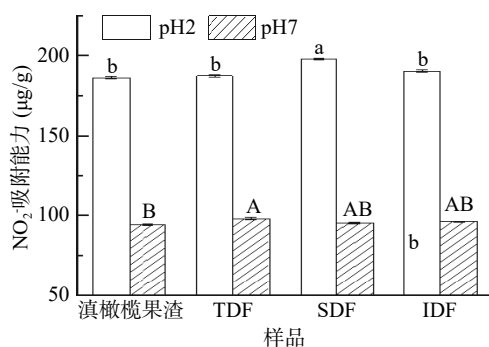


图 4 滇橄榄果渣及其膳食纤维对 NO_2^- 的吸附能力
Fig.4 Adsorption capacity of *Phyllanthus emblica* Linn. pomace and its dietary fibers on NO_2^-

对亚硝基具有较强的吸附作用,但在小肠环境中,由于 pH 的升高使阿魏酸上的羧基发生解离,增大膳食纤维表面负电荷密度,从而排斥 NO_2^- ,影响吸附效果^[37]。在 pH2 的条件下,SDF 对 NO_2^- 的吸附能力最强,达 $197.82 \mu\text{g/g}$;滇橄榄果渣、TDF 和 IDF 对 NO_2^- 的吸附无显著性差异($P>0.05$)。在 pH7(模拟小肠环境)的条件下,TDF、SDF 和 IDF 对 NO_2^- 的吸附能力接近,滇橄榄果渣的吸附能力最小($P<0.05$)。在 pH2 和 pH7 的条件下,滇橄榄果渣 SDF 对 NO_2^- 的吸附能力均强于玉米耳根 SDF (23.41 、 21.73 mg/kg)^[38];滇橄榄果渣 IDF 对 NO_2^- 的吸附均低于黑糯米米糠 IDF (348.5 、 $346.96 \mu\text{g/g}$)^[39]。由此可知,滇橄榄果渣及其膳食纤维能有效减少亚硝酸盐在胃中的分解,降低亚硝酸盐对人体造成的伤害。

3 结论与讨论

本研究通过提取方法的选取确定碱法为最佳提取方法,并通过单因素实验、正交优化及验证性试验确定最佳提取条件为最优提取条件为 NaOH 浓度为 8 g/L ,料液比为 $1:35(\text{g}:\text{mL})$, 70°C 处理 40 min ,在此条件下 IDF 和 SDF 的得率分别为 $61.72\%\pm0.04\%$ 、 $17.57\%\pm0.03\%$;滇橄榄果渣及其膳食纤维对饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸都具有一定的吸附能力,可减少机体对膳食中脂肪的吸收,预防肥胖。滇橄榄果渣及其膳食纤维样品在模拟胃环境和小肠环境的条件下对胆固醇的吸附能力有所差别,滇橄榄果渣 SDF 在模拟胃环境的条件下对胆固醇有较好的吸附能力,说明膳食纤维对胆固醇的吸附与 pH 有关。四个样品在模拟胃环境的条件下对 NO_2^- 的吸附都强于模拟小肠环境,表明膳食纤维对 NO_2^- 的吸收发生在胃环境中,与周笑犁等^[13]的研究结果一致。

综上,滇橄榄果渣及其膳食纤维有较好的水化特性和持油力,能够有效降低机体对脂肪的吸收和血液中胆固醇的含量,还能减少 NO_2^- 在胃和小肠中的分解,说明滇橄榄果渣膳食纤维可以作为优质的膳食纤维补充剂,在预防肥胖、降低心血管疾病、慢性病、结肠癌的发病率等方面具有积极的作用。下一步将探讨滇橄榄果渣膳食纤维的抗氧化活性和润肠通便功能,为滇橄榄果渣膳食纤维在医疗和保健食品中的开发利用提供更充分的理论依据。

参考文献

- [1] 伍晓玲,项昭保. 橄榄营养成分和生物活性物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 346-352. [WU Xiaoling, XIANG Zhaobao. Progress in nutritional components and bioactive components of *Canarium album* L.[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(24): 346-352.]
- [2] 袁建民,何璐,杨晓琼,等. ICP-OES 法测定余甘子不同器官中 11 种微量元素[J]. 热带农业科学, 2019, 39(7): 79-86. [YUAN Jianmin, HE Lu, YANG Xiaoqiong, et al. Determination of eleven trace elements in different organs of *Phyllanthus emblica* L. by ICP-OES[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2019, 39(7): 79-86.]

- [3] 王晏, 车彦云, 夏杰, 等. 亲水色谱-超高效液相-串联质谱法测定滇橄榄中水解氨基酸研究[J]. 中国现代中药, 2020, 22(1): 47-52, 64. [WANG An, CHE Yanyun, XIA Jie, et al. Determination of hydrolyzed amino acids by hydrophilic chromatography-ultra high performance liquid-tandem mass spectrometry in *Phyllanthus emblica* Linn.[J]. Modern Chinese Medicine, 2020, 22(1): 47-52, 64.]
- [4] HUANG H Z, QIU M, LIN J Z, et al. Potential effect of tropical fruits *Phyllanthus emblica* L. for the prevention and management of type 2 diabetic complications: A systematic review of recent advances[J]. European Journal of Nutrition, 2021(3): 1-18.
- [5] 兰杨, 姜红, 张仕谨, 等. 余甘子化学成分、药理活性及质量控制提升的研究进展[J]. 中国药业, 2020, 29(7): 156-159. [LAN Yang, JIANG Hong, ZHANG Shijin, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological activities and quality control of *Phyllanthus emblica*[J]. China Pharmaceuticals, 2020, 29(7): 156-159.]
- [6] 王津, 刘爽, 邹研, 等. 肠道膳食纤维和肠道微生物及相关疾病的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 201-207. [WANG Jin, LIU Shuang, ZOU Yan, et al. Research advances in the associations of dietary fiber with gut microbiota and related disease[J]. Food Research and Development, 2020, 41(11): 201-207.]
- [7] CARUSO R, KUFFA P, INOHARA N, et al. Dietary fiber deprivation quells colonic inflammation by targeting gut pathobionts in a new model of crohn's disease[J]. Inflammatory Bowel Diseases, 2021, 160(35): 53-54.
- [8] XIE Y, REN Y W, LI X L, et al. A review of the associations between dietary fiber intake and cancer prevention or prognosis[J]. Journal of Nutritional Oncology, 2020, 5(2): 123-131.
- [9] 李森, 刘坤, 郑丽鲜. 膳食纤维与肠道微生物及相关疾病的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 249-254. [LI Miao, LIU Kun, ZHENG Lixian, et al. Research progress of dietary fiber and intestinal microorganism and related diseases[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(1): 249-254.]
- [10] HUNT J E, HARTMANN B, SCHOONJANS K, et al. Dietary fiber is essential to maintain intestinal size, L-cell secretion, and intestinal integrity in mice[J]. Frontiers in Endocrinology, 2021, 12.
- [11] 李施瑶, 代玲敏, 范宜杰, 等. 化学法提取红树莓果渣可溶性膳食纤维的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 180-186, 193. [LI Shiyao, DAI Lingmin, FAN Yijie, et al. Optimization of extraction process of soluble dietary fiber from raspberry pomaces by chemical method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 180-186, 193.]
- [12] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 油橄榄果渣膳食纤维碱法提取工艺优化及其理化性质研究[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(1): 116-122. [DING Shasha, HUANG Lixin, ZHANG Caihong, et al. Optimization of extraction technology of dietary fiber from olive pomace and its physicochemical characteristics[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2017, 37(1): 116-122.]
- [13] 周笑犁, 王瑞, 高蓬明, 等. 刺梨果渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(2): 187-191. [ZHOU Xiaoli, WANG Rui, GAO Pengming, et al. Adsorption capacity of dietary fibers from roxburgh rose pomace *in vitro*[J]. Food Research and Development, 2018, 39(2): 187-191.]
- [14] 全文玲, 郭玉如, 徐建国. 碱法和酶法提取方法对胡麻渣可溶性膳食纤维理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 93-97. [TONG Wenling, GUO Yuru, XU Jianguo. Effects of alkali and enzyme extraction methods on physicochemical properties of soluble dietary fiber from flax residue[J]. Food Research and Development, 2019, 40(23): 93-97.]
- [15] 李琳, 张小康, 周子政, 等. 白萝卜不溶性膳食纤维提取方法的比较及其对饼干消化的影响[J]. 农产品加工, 2020(7): 38-41. [LI Lin, ZHANG Xiaokang, ZHOU Zizheng, et al. Comparison of extraction methods for insoluble dietary fiber of white radish and the effect of IDF on biscuits digestion[J]. Aem Roducts Rocessing, 2020(7): 38-41.]
- [16] 万仁口, 贺杨正, 李功景, 等. 酶解制备竹笋可溶性膳食纤维及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 153-160. [WAN Renkou, HE Yangzheng, LI Gongjing, et al. Preparation and antioxidant activity of bamboo shoot soluble dietary fiber extracted by enzyme method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Tec, 2021, 21(3): 153-160.]
- [17] 李晓宁, 郭咪咪, 段章群. 酸法制取大豆皮可溶性膳食纤维[J]. 中国油脂, 2020, 357(11): 32-35, 51. [LI Xiaoning, GUO Mimi, DUAN Zhangqun. Preparation of soluble dietary fiber from soybean hull by acid hydrolysis method[J]. China Oils and Fats, 2020, 357(11): 32-35, 51.]
- [18] 姜慧燕, 邹礼根, 翁丽萍, 等. 豆渣营养成分分析及蛋白质营养价值评价[J]. 食品工业, 2020, 41(6): 325-328. [JIANG Huiyan, ZOU Ligen, WENG Liping, et al. Nutritional components analyzation and protein nutrition evaluation of soybean residue[J]. The Food Industry, 2020, 41(6): 325-328.]
- [19] 吕秉霖, 袁尔东. 膳食纤维的改性及应用[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(3): 78-81. [LV Binglin, YUAN Erdong. Modification and application of dietary fiber[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2019, 44(3): 78-81.]
- [20] 刘贺, 赵亚凡, 杨立娜, 等. 膳食纤维的结构特性及其调控肠道菌群改善糖尿病的研究进展[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 289-297. [LIU He, ZHAO Yafan, YANG Lina, et al. The structural characteristics of dietary fiber and its regulation of intestinal flora and improvement of diabetes mellitus[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 289-297.]
- [21] 杨明华, 太周伟, 俞政全, 等. 膳食纤维改性技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(10): 207-210. [YANG Minghua, TAI Zhouwei, YU Zhengquan, et al. The progress of the modification technologies on dietary fiber[J]. Food Research and Development, 2016, 37(10): 207-210.]
- [22] 高晓丽, 王瑞, 闫艳华. 碱法提取黍米粉膳食纤维的研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(21): 105-107. [GAO Xiaoli, WANG Rui, YAN Yanhua. Study on extraction of dietary fiber from millet flour by alkaline method[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(21): 105-107.]

- [23] 邹兰,任国文,李梁.碱法制备苹果梨渣膳食纤维工艺优化及物化特性研究[J].*粮食与油脂*,2019,32(4):72-75. [ZOU Lan, REN Guowen, LI Liang. Study on optimizing technology and physicochemical properties of dietary fiber from apple-pear pomace prepared by alkali method[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(4): 72-75.]
- [24] 杨桂霞,许晓娟,程志强,等.响应面法优化蓝莓果渣可溶性膳食纤维提取工艺[J].*吉林农业大学学报*,2015(6):739-745. [YANG Guixia, XU Xiaojuan, CHENG Zhiqiang, et al. Optimization of extraction technology of soluble dietary fiber from blueberry pomace by response surface method[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2015(6): 739-745.]
- [25] 王杰,张莹,杨娟,等.茶叶可溶性膳食纤维提取及理化特性分析[J].*南方农业*,2020,14(1):1-5,10. [WANG Jie, ZHANG Ying, YANG Juan, et al. Extraction of soluble dietary fiber from tea and analysis of physicochemical properties[J]. *South China Agriculture*, 2020, 14(1): 1-5,10.]
- [26] DENG M, LIN Y, DONG L, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from pummelo (*Citrus grandis* L. Osbeck) and grapefruit (*Citrus paradisi* Mcfad) cultivars[J]. *Food Bioscience*, 2021(1):100890.
- [27] 张海芳,李艳,韩育梅,等.酶法改性对马铃薯渣膳食纤维单糖组分及理化性质的影响[J].*食品研究与开发*,2020,41(1):60-66. [ZHANG Haifang, LI Yan, HAN Yumei, et al. Effects of different enzymatic modifications on monosaccharide composition and physicochemical properties of dietary fiber from potato pulp[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(1): 60-66.]
- [28] 周淑仪,李敏.百香果皮可溶性膳食纤维酶法提取及性质研究[J].*食品科技*,2019,44(7):283-290. [ZHOU Shuyi, LI Min. The enzymatic extraction and characterics of soluble dietary fiber from passion fruit peel[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(7): 283-290.]
- [29] 陈秋娟,谢微,韦师,等.香芋皮水溶性膳食纤维超声提取及其结构表征[J].*食品工业*,2020,41(3):20-24. [CHEN Qiu Juan, XIE Wei, WEI Shi, et al. Ultrasonic-assisted extraction and structural characterization of soluble dietary fiber from peel taro[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(3): 20-24.]
- [30] 刘秉书,吴淑华,孙谕莹,等.挤压豌豆纤维粉制备的不可溶膳食纤维油脂吸附能力研究[J].*食品研究与开发*,2020,41(9):50-55. [LIU Bingshu, WU Shuhua, SUN Yuying, et al. Study on the adsorption capacity of insoluble dietary fiber oil prepared from extruded pea fiber powder[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(9): 50-55.]
- [31] 李晗,杨宗玲,毕永雪,等.超声辅助酶法提取西番莲果皮可溶性膳食纤维及理化性质[J].*食品工业科技*,2020,41(7):161-165,172. [LI Han, YANG Zongling, BI Yongxue, et al. Extraction of soluble dietary fiber from passiflora edulis peel by ultrasonic assisted enzymatic method and its physicochemical properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(7): 161-165,172.]
- [32] 罗明,余卫强.脂肪细胞内质网应激反应蛋白与肥胖的关系[J].*中国临床解剖学杂志*,2020,38(2):235-238. [LUO Ming, YU Weiqiang. Relationship between endoplasmic reticulum stress protein expression of adipocytes and obesity[J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2020, 38(2): 235-238.]
- [33] 孟鹏,刘晓凤,衣振伟,等.牛樟芝不溶性膳食纤维吸附特性及结构表征研究[J].*工业微生物*,2020,50(5):1-8. [MENG Peng, LIU Xiaofeng, YI Zhenwei, et al. Adsorption properties and structure characterization of insoluble dietary fiber from *Antrodia camphorate*[J]. *Industrial Microbiology*, 2020, 50(5): 1-8.]
- [34] 杨开,杨振寰,吴伟杰,等.雷笋膳食纤维酶法改性及其理化性能和结构变化[J].*食品与发酵工业*,2019,45(4):36-41. [YANG Kai, YANG Zhenhuan, WU Weijie, et al. Physicochemical properties and structural changes of bamboo shoots dietary fiber with enzymatic modification[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(4): 36-41.]
- [35] 丁莎莎.油橄榄果渣膳食纤维的制备、特性及改性研究[D].北京:中国林业科学研究院,2017. [DING Shasha. Preparation, properties and modification of dietary fiber from olive pomace[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.]
- [36] 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(NOVa1): 124983.1-124983.9.
- [37] 杨振寰.雷笋膳食纤维改性及性能研究[D].杭州:浙江工业大学,2019. [YANG Zhenhuan. Physicochemical properties of bamboo shoots dietary fiber with enzymatic modification[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.]
- [38] 司凤玲,刘小裕,邓俊林.玉木耳根膳食纤维提取工艺优化及理化性质测定[J].*食品与发酵工业*,2019,45(20):209-214. [SI Fengling, LIU Xiaoyu, DENG Junlin. Optimization of extraction process and physicochemical properties of dietary fiber from *Auricularia cornea* var. *Li* root[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(20): 209-214.]
- [39] 曾蓓蓓,常锦玉,吕庆云,等.黑糯米米糠中水不溶膳食纤维功能特性研究[J].*中国食物与营养*,2019,25(6):51-55. [ZENG Beibei, CHANG Jinyu, LV Qingyun, et al. Functional properties of insoluble dietary fiber from black glutinous rice bran[J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25(6): 51-55.]