

改性方法对柠檬皮渣粉结构及功能特性的影响

张巧, 何雨婕, 李贤, 雷激

Effects of Modification Methods on the Structural and Functional Properties of Lemon Peel Residue Powders

ZHANG Qiao, HE Yujie, LI Xian, and LEI Ji

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油茶壳木质素理化性质及表征

Physicochemical Properties and Structural Characterization of Lignin from *Camellia oleifera* Shell

食品工业科技. 2021, 42(4): 33-38 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050136>

复合酶法提取黄秋葵可溶性膳食纤维的工艺优化及其理化特性、结构表征

Optimization Techniques for the Extraction of Soluble Dietary Fiber from Okra with Complex Enzymes and Its Physicochemical Properties and Structure Characterization

食品工业科技. 2020, 41(17): 199-205,218 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.033>

赤藓糖醇对豌豆分离蛋白结构和功能特性的影响

Effects of erythritol on structural and functional properties of pea protein isolate

食品工业科技. 2018, 39(8): 73-77,84 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.08.014>

改性冰糖橙皮渣对结晶紫及亚甲基蓝的吸附性能

Adsorption Properties of Modified Citrus Sinensis Osbeck Peel Residue for Crystal Violet and Methylene Blue

食品工业科技. 2020, 41(10): 7-12,18 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.002>

白灵菇蛋白质的理化及功能特性

Physicochemical and Functional Properties of Protein from *Pleurotus nebrodensis*

食品工业科技. 2018, 39(16): 37-41 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.007>

富平尖柿果皮色素的理化及功能特性

Physicochemical Properties and Functionality of 'Fuping-Jianshi' Persimmon Peel Pigment

食品工业科技. 2021, 42(6): 35-42 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060065>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张巧, 何雨婕, 李贤, 等. 改性方法对柠檬皮渣粉结构及功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 88–96. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030143

ZHANG Qiao, HE Yujie, LI Xian, et al. Effects of Modification Methods on the Structural and Functional Properties of Lemon Peel Residue Powders[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 88–96. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030143

· 研究与探讨 ·

改性方法对柠檬皮渣粉结构及功能特性的影响

张巧^{1,2,3}, 何雨婕^{1,2,3}, 李贤^{1,2,3}, 雷激^{1,2,3,*}

(1. 西华大学食品与生物工程学院, 四川成都 610039;

2. 食品微生物四川省重点实验室, 四川成都 610039;

3. 川渝共建特色食品重庆市重点实验室, 四川成都 610039)

摘要: 为提高柠檬皮渣粉的品质及柠檬加工副产物综合利用率, 本研究采用微波、高速剪切、超微粉碎三种方式对柠檬皮渣粉进行改性, 通过扫描电镜、傅里叶红外光谱、热重分析对改性前后的形态结构、热稳定性进行分析, 并对理化、功能特性进行测定以评价不同改性柠檬皮渣粉的综合品质。结果表明, 三种改性使柠檬皮渣粉结构变得疏松; 改性后主要官能团未发生明显变化; 微波、高速剪切处理显著提高了柠檬皮渣粉的热稳定性 ($P<0.05$)。整体而言, 经高速剪切改性的柠檬皮渣粉各项理化、功能特性均为最佳, 其总膳食纤维含量 (Total dietary fiber, TDF)、可溶性膳食纤维 (Soluble dietary fiber, SDF) 含量、持水力、持油力、膨胀力分别为 81.88%、33.07%、20.05 g/g、2.00 g/g、34.99 mL/g, 并具有最佳的阳离子交换能力、延迟葡萄糖透析的能力、吸附葡萄糖能力、吸附胆固醇能力, 因此具有与膳食纤维 (Dietary fiber, DF) 类似的理化和功能特性。相关性分析提示, 柠檬皮渣粉中 SDF 含量与各理化、功能指标之间呈极显著正相关 ($P<0.01$)。综上, 提高 SDF 含量可作为改善柠檬皮渣粉品质的一个参考指标, 经高速剪切改性后的柠檬皮渣粉具有作为优质 DF 来源的潜力, 这可为提高柠檬皮渣粉的品质及其作为潜在的功能性食品配料提供一定理论参考。

关键词: 柠檬皮渣粉, 改性, 结构表征, 理化特性, 功能特性

中图分类号: TS209

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)01-0088-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030143



本文网刊:

Effects of Modification Methods on the Structural and Functional Properties of Lemon Peel Residue Powders

ZHANG Qiao^{1,2,3}, HE Yujie^{1,2,3}, LI Xian^{1,2,3}, LEI Ji^{1,2,3,*}

(1. College of Food Science and Biological Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Food Microbiology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610039, China;

3. Chongqing Key Laboratory of Speciality Food Co-Built by Sichuan and Chongqing, Chengdu 610039, China)

Abstract: In this study, lemon peel residue powders were modified by microwave, high-speed shear and ultra-fine grinding, respectively, to improve its quality and the comprehensive utilization rate of lemon processing by-products. The morphological structure and thermal stability before and after modification were characterized by scanning electron microscopy, Fourier infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis. The physicochemical and functional properties were measured to evaluate the overall quality of the lemon peel residue powders after different modifications. The results showed that the structure of lemon peel residue powders was loosened after these three modifications and the main functional groups were not significantly changed after the modification. The thermal stability of lemon peel residue

收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 四川省科技厅重大项目 (2020YFN0149)。

作者简介: 张巧 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 1361564325@qq.com。

* 通信作者: 雷激 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养学, E-mail: 121175698@qq.com。

powders was significantly improved after microwave and high-speed shear modification ($P<0.05$). Overall, the physicochemical and functional properties of the lemon peel residue powders modified by high-speed shearing were the best. Its total dietary fiber (TDF), soluble dietary fiber (SDF), water holding capacity, oil holding capacity and swelling capacity were 81.88%, 33.07%, 20.05 g/g, 2.00 g/g and 34.99 mL/g, respectively, as well as had the best cation exchange capacity, ability to delay glucose dialysis, glucose adsorption capacity, and cholesterol adsorption capacity, and therefore had similar physicochemical and functional properties to dietary fiber (DF). Correlation analysis suggested a highly significant positive correlation between the SDF content in lemon peel residue powders and each physicochemical and functional index ($P<0.01$). In conclusion, increasing the SDF content could be used as a reference indicator to improve the quality of lemon peel residue powders, and the lemon peel residue powders modified by high-speed shear had the potential to be a high quality source of DF, which could provide some theoretical reference to improve the quality of lemon peel residue powder and its potential as functional food ingredient.

Key words: lemon peel residue powders; modification; structural characterization; physicochemical properties; functional properties

柠檬皮渣是柠檬加工过程中未被有效利用的主要副产物, 约占柠檬重量 50% 以上^[1], 其含有丰富的膳食纤维(Dietary fiber, DF)、维生素 C、黄酮、多酚类等生物活性成分^[2], 其中含量最高的是膳食纤维, 高达 50% 以上^[3], 是所有柑桔类原料中膳食纤维含量最高的品种^[4]。目前柠檬皮渣被广泛用于制备膳食纤维, 然而提取膳食纤维往往需要使用大量酸、碱、各类酶制剂等, 处理不当会污染环境^[5], 同时皮渣中性质不稳定的生物活性成分也会在制备过程中因为酸、碱、高温等原因大量损失。膳食纤维根据溶解性可分为可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不可溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF), 相较于 IDF, SDF 具有更好的口感和更为优质的水合性质、吸附特性、离子交换能力, 对 DF 发挥生理功能起着更重要的作用^[6]。然而, 大量相关报道显示提取制备的柠檬皮渣膳食纤维中 SDF 含量远低于 IDF 含量^[7-9], 这就导致其口感较差, 并且在食品配料中生理功能的发挥也受到限制, 因此限制了其在食品领域中的广泛应用。而有关报道指出改性膳食纤维能提高膳食纤维纯度以及 SDF 含量, 而 SDF 含量的增加会显著提升膳食纤维的结构和理化功能特性^[10]。因此, 若直接对柠檬皮渣改性以提高其膳食纤维、SDF 含量, 使其具有膳食纤维类似的特性, 不仅能避免提取膳食纤维中的诸多不利因素, 同时还省去了繁琐的制备过程, 并有望直接获得品质较佳的柠檬膳食纤维, 这也能最大限度利用柠檬皮渣的有效成分。

膳食纤维的改性方法有生物法、化学法、物理法。其中, 物理改性具有成本低、操作简单、更容易实现工业规模化的优点, 因而被广泛使用^[10]。据相关报道, 微波、高速剪切、超微粉碎这三种物理改性方法均对 DF 的品质有较好的改良效果, 黄嘉仪^[11]对柑橘皮渣纤维进行高速剪切处理后其 SDF 含量、持水力、膨胀力均提高, 比表面积增加; Gan 等^[12]采用微波对柚子皮纤维进行改性后, 其 SDF 含量、吸附葡萄糖能力、吸附胆固醇能力均提高; Yan 等^[13]采用超微粉碎处理寒富苹果渣后, 其 SDF 含量、持水力、持油力均提高。

目前关于柠檬皮渣改性的报道非常少, 改性前后其结构、理化特性和功能特性变化尚不清楚。为此, 本实验以柠檬皮渣粉为原料, 针对其中 SDF 含量偏低的缺点, 采用微波、高速剪切、超微粉碎三种方式对其进行改性, 分析改性前后柠檬皮渣粉的结构表征和功能特性, 筛选出最佳的改性方法以期获得品质较佳的柠檬膳食纤维, 同时为柠檬皮渣的高值化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

柠檬 产于四川安岳, 采收于 2022 年 10 月; 新鲜鸡蛋 市售; 道道全菜籽油 湖南巴陵油脂有限公司; 葡萄糖、胆固醇 标准品, 上海源叶生物科技有限公司; NaOH、NaCl、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 、 NaNO_2 、 NaCO_3 、HCl、 NaHCO_3 、无水乙醇、冰醋酸、邻苯二甲醛、浓硫酸、DNS 试剂、福林酚试剂(均为分析纯)、溴化钾(光谱纯) 成都市科龙化工试剂厂。

800A 多功能粉碎机 永康市红太阳机电有限公司; 1900 岛津双光束紫外分光光度计、DTG-60 差热-热重分析仪 日本岛津中国分公司; MM440 混合型球磨仪 长沙米淇仪器设备有限公司; K1100 自动凯氏定氮仪、SH420 石墨消解仪 山东海能科学仪器有限公司; SX-8-10 箱式电阻炉 天津市泰斯特仪器有限公司; TGL-16 高速冷冻离心机 四川蜀科仪器有限公司; S-320pH 计 成都世纪方舟科技有限公司; BPG-9270A 鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司; 蔡司 Supra55 扫描电镜 德国卡尔蔡司公司; APV-1000 高速剪切机 丹麦 APV 公司; 金牛 4010 微波消解仪 上海屹尧仪器科技发展有限公司; Nicolet 傅里叶变换红外光谱仪 上海力晶科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 柠檬皮渣粉的制备 参考黄清霞等^[1]的方法, 并作适当修改。新鲜柠檬清洗干净后去油胞, 再破碎去汁, 取果皮、残渣切碎后置于 95% 乙醇浸提 90 min (去除一些小分子可溶性物质, 使皮渣中膳食纤维成

分更有效地沉淀下来), 过滤后将得到的滤渣冷冻干燥至恒重, 再粉碎过 80 目筛, 得到未改性的柠檬皮渣粉, 简称 CK。

1.2.2 柠檬皮渣粉的改性

1.2.2.1 微波改性 参考谢靓^[14]的方法, 作适当修改。称取 1 g 柠檬皮渣粉, 按料液比 1:20(g:mL) 加入蒸馏水并搅拌均匀, 用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH5, 在微波温度 115 ℃ 条件下处理 4 min, 待冷却后加入 4 倍体积的无水乙醇, 醇沉 60 min, 以 8000 r/min 的转速离心 15 min, 取沉淀在 50 ℃ 下烘干, 粉碎, 过 80 目筛, 命名为 WBF。

1.2.2.2 高速剪切改性 参考黄嘉怡^[11]的方法, 作适当修改。称取 5 g 柠檬皮渣粉, 按料液比 1:25 (g:mL) 加入蒸馏水并搅拌均匀, 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH7, 在剪切转速 10000 r/min 条件下处理 6 min, 冷却至室温, 加入 4 倍体积的无水乙醇, 醇沉 60 min, 以 8000 r/min 的转速离心 15 min, 取沉淀在 50 ℃ 下烘干, 粉碎, 过 80 目筛, 命名为 GQF。

1.2.2.3 超微粉碎改性 参考史早等^[15]的方法, 作适当修改。称取 5 g 柠檬皮渣粉于球磨罐中, 在振动频率 25 Hz 的条件下粉碎 20 min, 命名为 CWF。

1.2.3 柠檬皮渣粉的结构表征

1.2.3.1 扫描电镜观察 取少量样品, 置于载物台上, 表面喷金处理提高导电性, 观察在放大倍数 10000 时的形貌微观结构^[16]。

1.2.3.2 傅里叶红外光谱分析 取样品 1 mg 于玛瑙研钵中, 加入 100 mg 溴化钾, 在研磨后压片, 进行红外光谱扫描, 分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描范围: 4000~400 cm⁻¹^[17]。

1.2.4 热重分析 取样品 3~5 mg, 采用热重法在充氮条件下测定其热力学性质。仪器参数: 升温速率 10 ℃/min, 测定范围 40~600 ℃^[17]。

1.2.5 柠檬皮渣粉中膳食纤维含量的测定 膳食纤维包括总膳食纤维(Total dietary fiber, TDF)、SDF、IDF, 其含量测定依据 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定方法》。

1.2.6 柠檬皮渣粉理化特性的测定

1.2.6.1 持水力(Water holding capacity, WHC)的测定 参考 Zhang 等^[18]的方法, 稍作调整。准确称取 0.5 g(M) 样品(精确到 0.001 g)于 50 mL 离心管(M₁)中, 加入 35 mL 蒸馏水, 振荡使其混匀, 放置 24 h, 在 8000 r/min 的条件下离心 15 min, 弃上清液, 称重(M₂)。通过式(1)进行计算。

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{M_2 - M_1 - M}{M} \quad \text{式(1)}$$

1.2.6.2 持油力(Oil holding capacity, OHC)的测定 参考 Chu 等^[19]的方法, 稍作调整。称取样品 1 g (M₀) 倒入 50 mL 离心管(M₁)中, 加入 20 g 食用油,

搅拌均匀后放置 24 h, 8000 r/min 离心 20 min, 将上清液全部倒出, 称离心管与湿粉质量(M₂)。根据式(2)进行计算。

$$\text{持油力(g/g)} = \frac{M_2 - M_1 - M_0}{M_0} \quad \text{式(2)}$$

1.2.6.3 膨胀力(Swelling force, SC)的测定 参考黄嘉仪^[11]的方法进行测定。称取样品 0.2 g(M₀), 置于 10 mL 试管中, 记录下粉体体积 V₁(mL), 向试管内加入 10 mL 蒸馏水, 振荡均匀后静置 24 h, 记录粉体溶胀后体积 V₂(mL)。根据式(3)进行计算。

$$\text{膨胀力(mL/g)} = \frac{V_2 - V_1}{M_0} \quad \text{式(3)}$$

1.2.7 柠檬皮渣粉功能特性的测定

1.2.7.1 阳离子交换能力(Cation exchange capacity, CEC)的测定 参考王崇队等^[20]的方法, 适当修改。将适量的待测样品浸没于 0.1 mol/L HCl 溶液中, 放置 24 h 过滤, 并用蒸馏水多次冲洗残渣以除去多余的酸(用质量分数 10% 的 AgNO₃ 溶液鉴定, 至不含 Cl⁻为止), 然后干燥。称取干燥后的样品 0.5 g 于烧杯中, 加入 100 mL 5% 的 NaCl 溶液, 在转速 400 r/min 下, 磁力搅拌 5 min 后, 用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定, 记录 pH。以样品液 pH 达到 7.0 时, 每克样品所消耗 0.1 mol/L NaOH 的量来衡量阳离子交换能力。根据式(4)进行计算。

$$\text{CEC(mmol/g)} = \frac{0.1 \times V}{M} \quad \text{式(4)}$$

式中: V 为 0.1 mol/L NaOH 体积, mL; M 为样品质量, g。

1.2.7.2 葡萄糖吸附能力(Glucose adsorption capacity, GAC)的测定 参考 Peerajit 等^[21]的方法, 作适当修改。将 1 g 样品(经 80% 乙醇在转速 100 r/min 下振荡 60 min 后抽滤并再用 80% 乙醇洗两次)加入到 30 mL 50 mmol/L 葡萄糖溶液中, 37 ℃ 在转速 100 r/min 下振荡 5 h, 于 4000 r/min 条件下离心 20 min, 取上清液, 对照组设置为不含样品, 采用 DNS 法进行测定。根据式(5)进行计算。

$$\text{GAC(mg/g)} = \frac{C_1 - C_2}{M} \quad \text{式(5)}$$

式中: C₁ 为吸附前葡萄糖含量, mg; C₂ 为吸附后葡萄糖含量, mg; M 为样品干重, g。

1.2.7.3 葡萄糖透析延迟指数(Glucose dialysis retardation index, GDRI)的测定 参考黄清霞等^[1]的方法。在 15 mL 2% 的葡萄糖溶液中加入 400 mg 的样品(用 80% 的乙醇洗两次), 经过 1 h 的搅拌后转移到 12 cm 长的透析袋中, 放于装有 400 mL 蒸馏水的烧杯中透析, 连续振荡 1 h, 每 10 min 测定透析液中的葡萄糖含量, 对照组设置为不含样品, 根据式(6)进行计算。

$$\text{GDRI}(\%) = \left(1 - \frac{\text{样品杯中葡萄糖透析量}}{\text{对照杯中葡萄糖透析量}}\right) \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

1.2.7.4 胆固醇吸附能力 (Cholesterol adsorption capacity, CAC) 的测定 参考谢靛^[14] 的方法, 作适当修改。取鸡蛋蛋黄, 加 9 倍质量的蒸馏水搅打成乳液状。称取 1 g 样品混合 20 mL 蛋黄乳液, 震荡均匀后, 分别调节 pH 至 2.0 和 7.0, 在 37 °C 下振荡 2 h, 4000 r/min 下离心 20 min, 取上清液, 对照组设置为不含样品, 采用邻苯二甲醛法进行测定。根据式(7)进行计算。

$$\text{CAC}(\text{mg/g}) = \frac{C_1 - C_2}{M} \quad \text{式 (7)}$$

式中: C_1 为吸附前蛋黄液中初始胆固醇质量, mg; C_2 为吸附后蛋黄液中残余的胆固醇质量, mg; M 为样品干重, g。

1.3 数据处理

实验数据平行测定 3 次, 实验结果以平均值±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示。数据采用 SPSS 26.0 软件进行多样本均数比较的方差分析, 各组间两两比较采用 SNK 检验, 采用皮尔逊法进行相关性分析, $P < 0.05$ 为差异显著; 采用 Origin2021 作图。

2 结果与分析

2.1 改性前后柠檬皮渣粉微观结构分析

由图 1 可看出, 改性前后柠檬皮渣粉微观结构变化明显。CK 的结构严密, 表面更为光滑、紧密。WBF 表面粗糙, 有小颗粒, 明显有较多的孔隙和裂痕, 这与罗舜菁等^[22] 用微波改性甘薯渣、苹果渣、大豆渣中膳食纤维得到的结果相似。这可能是由于微波改性造成柠檬皮渣粉内部过热, 细胞内的蒸汽压快速升高, 局部水汽爆破细胞壁破裂^[22-23]。GQF 表面粗糙, 呈现出较多的褶皱且层次变多, 其结构更为疏松, 这是高速剪切过程中强烈的机械剪切、液压等作

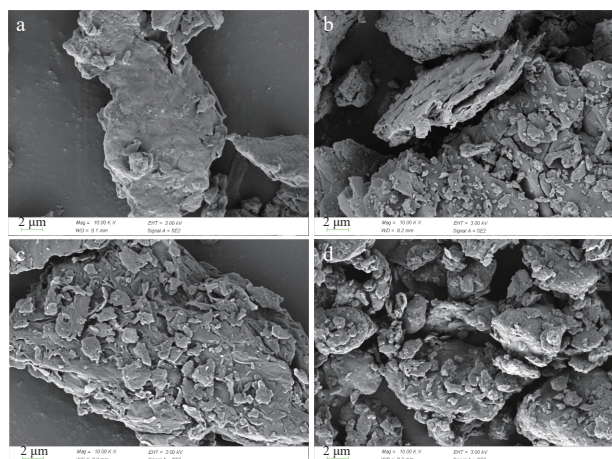


图 1 不同改性处理后柠檬皮渣粉的扫描电镜

Fig.1 Scanning electron microscope of lemon peel residue powder after different modifications

注: a: CK; b: WBF; c: GQF; d: CWF。

用引起的^[11]。CWF 多呈现为不规则团状或块状, 有孔洞, 同时可能因为颗粒过小, 分子间吸引力增加, 小颗粒更易附着在大颗粒的表面^[24], 出现团聚现象, 这与赵愉涵等^[25] 的研究结果一致。上述结果表明, 三种改性方式都在一定程度上使柠檬皮渣粉表面积增加, 结构疏松, 这可以使更多的亲水基团外露, 因而可能改善柠檬皮渣粉的水合特性、吸附特性等^[26]。

2.2 改性前后柠檬皮渣粉红外光谱分析

图 2 为三种改性处理对柠檬皮渣粉产生的红外光谱分析图, 可用于测定其改性前后的官能团变化。由图 2 可知, 四种样品均在 3404 cm^{-1} 间出现纤维素和半纤维素分子间或分子内的 O-H 特征吸收峰^[27], 其中, WBF、GQF、CWF 的峰强度明显低于 CK, 可能是纤维素分子间的氢键断裂所致^[19], 有利于多孔结构的形成^[28]。在 2927 cm^{-1} 附近的峰主要由糖类亚甲基上的 C-H 基团伸缩振动引起^[28], GQF、WBF 峰强度明显弱于 CK, 说明这两种处理可使多糖的含量减少。 1746 cm^{-1} 附近处是木质素中苯环的特征吸收峰^[15], 在 1640 cm^{-1} 和 1051 cm^{-1} 附近的特征峰来自通过分子间氢键与纤维素链相连的羧基特有的弯曲或拉伸^[29], 经三种改性后, 所对应的峰强度均有所下降, 表明三种改性在不同程度均导致了部分纤维素、木质素的降解, 向 SDF 转化。综上可以推断三种改性并未使柠檬皮渣粉的主要官能团结构发生明显变化, 仅在某些特征带的峰强度有变化, 而峰强度的变化提示柠檬皮渣粉的理化及功能特性可能会在原有的基础上发生变化^[26]。

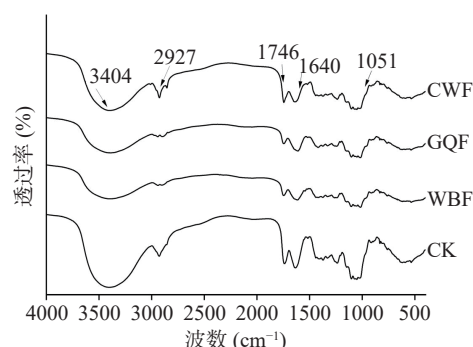


图 2 不同改性处理后柠檬皮渣粉的红外光谱图

Fig.2 Infrared spectra of lemon peel residue powder after different modifications

2.3 改性前后柠檬皮渣粉热重分析

由图 3 所示, 四种样品的失重大致分为三个阶段: 第一阶段为温度 $50 \sim 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 该阶段质量损失率最低, 主要质量损失是柠檬皮渣粉中的自由水以及结晶水^[17]。第二阶段为温度 $150 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 此阶段为失重的主要阶段, 发生了强烈的热裂解反应和碳链、氢键和糖苷键的断裂^[11], 纤维素、半纤维素、木质素等物质受热分解^[30], 其中 $200 \sim 325 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时四种样品的损失率基本一致, 在 $325 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 四种样品损失率开始出现差异, 如图所示。CK 和 CWF 的初始降解温

度约在 140 ℃, WBF、GQF 的初始降解温度分别约在 180、190 ℃, 这说明微波、高速剪切均都有效提高柠檬皮渣粉的热稳定性。第三阶段为温度 400 ℃ 以上, 此阶段是生物质碳化过程, 最终, CK、WBF、GQF、CWF 的残余质量分数分别为 8.12%、14.26%、21.63%、6.46%, 除了 CK 与 CWF 之间没有显著差异($P>0.05$), 其余处理之间残余质量分数两两比较均有显著差异($P<0.05$)。该结果与初始降解温度的结果一致, 进一步说明微波和高速剪切能显著提高柠檬皮渣粉的热稳定性, 这可能是因为这两种处理提高了柠檬皮渣粉的结晶度, 而结晶度越高, 热稳定性也越强^[7]。Lin 等^[31]用微波处理燕麦膳食纤维后, 其热稳定性也升高。CWF 与 CK 的热稳定性无显著差异($P>0.05$), 这与超微粉碎处理咖啡果皮 IDF^[32]得到的结果一致。

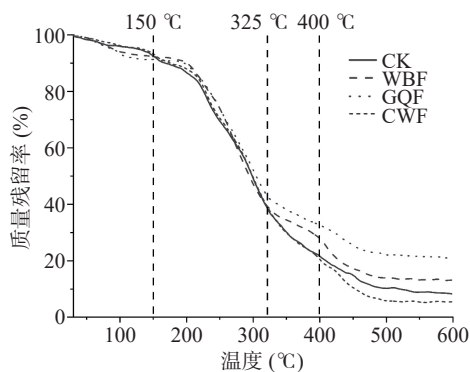


图3 不同改性处理后柠檬皮渣粉的热重分析图
Fig.3 Thermogravimetric analysis of lemon peel residue powder after different modifications

2.4 改性前后柠檬皮渣粉 DF 含量分析

由表1可知, WBF、GQF 的 TDF 含量较 CK 有显著上升($P<0.05$), 可能是在微波、高速剪切的过程中损失了一些醇溶性的成分, 如脂肪、小分子糖、酸类物质, 而极大地保留了膳食纤维^[11], 从而提高了柠檬皮渣粉中膳食纤维的纯度。此外, WBF、GQF 的 SDF 较改性前分别增加了 45.06%、109.57%, 这可能是因为微波处理过程中微波形成的空泡效应下, 细胞壁结构被破坏, 其中的半纤维素等成分从细胞壁上断裂, 易被微波分解成可溶性的纤维^[33]; 而剪切过程中产生的强烈剪切、分散作用力可能破坏了纤维分子间的氢键, 小分子基团转化为游离态, 使 IDF 易转化为 SDF^[11], 这与红外光谱结果相对应。GQF 的 TDF、SDF 含量分别为 81.88%、33.07%, 均高于周丽玲等^[7]、刘义武等^[8]采用酶解法提取制备的柠檬皮渣膳食纤维中 TDF(67.63%、73.00%)、SDF 含量(11.03%、28.9%), 与欧阳玲花等^[9]采用化学法制备的柠檬皮膳食纤维中 TDF(89.26%)、SDF 含量(34.58%)非常接近, 提示高速剪切改性的柠檬皮渣粉可视为一种柠檬膳食纤维。超微粉碎过程中由于强烈的压力、剪切力、摩擦力等综合作用力, 柠檬皮渣粉中的 DF 结构被破坏, 因此 CWF 的 TDF 含量

下降^[34]。CWF 的 SDF 含量较改性前增加了 18.95%, IDF 含量较改性前降低了 14.57%, 是因为经超微粉碎粉体粒径减小, 纤维素结晶区被破坏, 比表面积增加及更多亲水基团的暴露, 可能导致部分 IDF 转化成 SDF^[35], 或者是包裹在 IDF 结构内部的 SDF 被释放出来^[35]。总体来说, 高速剪切获得的样品其 DF 含量最高, 并且更有利于提高其 SDF 的含量。

表1 不同改性处理后柠檬皮渣粉中 TDF、IDF、SDF 的含量
Table 1 Contents of TDF, IDF and SDF in lemon peel residue powder after different modifications

膳食纤维(%)	CK	WBF	GQF	CWF
TDF	55.02±0.97 ^b	68.34±0.75 ^c	81.88±0.46 ^d	52.30±0.67 ^a
IDF	39.25±0.76 ^b	45.44±0.80 ^c	48.82±0.76 ^d	33.53±0.56 ^a
SDF	15.78±1.52 ^a	22.89±1.07 ^c	33.07±1.14 ^d	18.77±0.38 ^b

注: 不同小写字母表示同行数据差异显著($P<0.05$)。

2.5 改性前后柠檬皮渣粉的 WHC、OHC、SC 分析

由图4可知, 三种改性方式均能显著提高柠檬皮渣粉的持水力(WHC)、膨胀力(SC), 其中高速剪切的效果最好, 其持水力、膨胀力分别为 20.05 g/g、34.99 mL/g, 均高于蒋丽等^[36]采用发酵法、周丽玲等^[7]采用酶解法制备的柠檬皮渣膳食纤维的持水力(9.15、14.39 g/g)、膨胀力(13.21、16.36 mL/g)。柠檬皮渣粉的持水力和膨胀力主要与其微观结构以及其 SDF、IDF 含量有关^[37], 柠檬皮渣粉表面积大, 结构疏松, 会增加与水的结合位点并增强水分子的渗透作用, 而 SDF 能与水形成凝胶, 锁住水分, 使水分无法流失^[38]。由膳食纤维含量和扫描电镜结果可知, 三种改性方式均在不同程度提高了柠檬皮渣粉中 SDF 含量并使其结构变疏松、表面积增大, 这为水合性质的提升提供了依据。三种改性均提高了柠檬皮渣粉持油力(OHC), 微波、高速剪切的效果优于超微粉碎, 分别较改性前增加了 18.29%、21.95%。OHC 的提升与体积密度降低、多孔性和毛细管吸引力作用增强有关^[39]。三种改性均使柠檬皮渣粉比表面积增大, 增加了与油的接触面积, 同时孔隙率的提高, 使毛细管对油脂的吸引力增大^[40], 因此 OHC 提高。通过

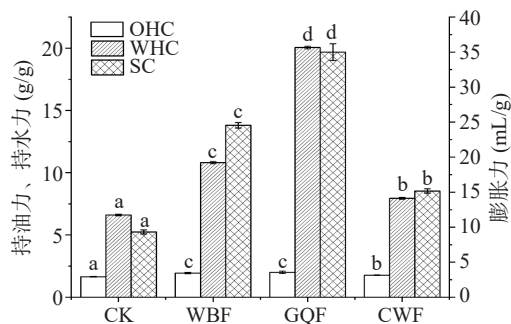


图4 不同改性处理后柠檬皮渣粉的 OHC、WHC、SC
Fig.4 OHC, WHC, SC of lemon peel residue powder after different modifications

注: 不同小写字母表示同一指标在不同处理之间差异显著($P<0.05$), 图5、图6同。

对三个指标进行比较,持油力的增幅小于持水力、膨胀力,说明三种改性更有利于改善柠檬皮渣粉的水合性质。

2.6 改性前后柠檬皮渣粉的 CEC 分析

膳食纤维含有的一些羟基、羧基等侧链基团能与身体中的有机阳离子进行交换,通过改变离子的瞬间浓度,对消化道内的渗透压、pH 产生影响,从而提供一个有利于消化吸收的缓冲环境,起到排毒、降血压的生理功效^[41]。由图 5 可知, WBF、GQF、CWF 的阳离子交换能力分别为 0.33、0.46、0.24 mmol/g,较 CK 提高了 50.00%、109.10%、9.10%,高速剪切的 GQF 最大;三种改性均提高了柠檬皮渣粉的阳离子交换能力,这可能是因为三种改性均能引起柠檬皮渣粉中膳食纤维的侧链基团暴露出来,增加了与阳离子的交换作用,可以更大程度地控制 pH 的剧烈变化,更好地起到缓冲作用,从而控制酸碱环境^[11]。

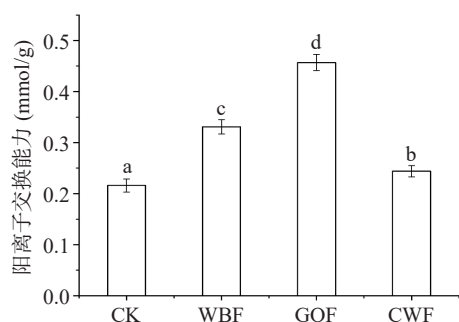


图 5 不同改性处理后柠檬皮渣粉的阳离子交换能力
Fig.5 CEC of lemon peel residue powder after different modifications

2.7 改性前后柠檬皮渣粉的 GAC 分析

葡萄糖的吸附能力可以在一定程度上反映人体对葡萄糖的吸收和转运能力,样品的 GAC 值越大,则提示其控制血糖波动的能力越强。由图 6 可知,三种改性均提高了柠檬皮渣粉吸附葡萄糖的能力, WBF、GQF、CWF 的 GAC 分别为 35.50、40.33、23.98 mg/g,分别较改性前提高了 228.70%、273.43%、122.04%,说明高速剪切对柠檬皮渣粉的 GAC 提升效果最佳,其次是微波,最后是超微粉碎。其原因可能是三种改性均在不同程度使柠檬皮渣粉中 SDF 含

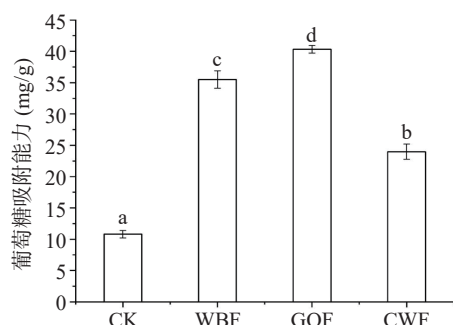


图 6 不同改性处理后柠檬皮渣粉吸附葡萄糖的能力
Fig.6 GAC of lemon peel residue powder after different modifications

量上升,而 SDF 高粘度有助于形成粘性水化层包裹葡萄糖分子^[42]。结合电镜结果,三种改性后柠檬皮渣粉的比表面积均在一定程度上增大,这有利于对葡萄糖分子的吸附,相较于超微粉碎,微波、高速剪切改性后的柠檬皮渣粉还具有更多层次结构和疏松多孔的结构,这将使葡萄糖分子嵌入多孔纤维网络中,从而增强对其的束缚力^[43],而 CWF 的扫描电镜显示其小颗粒明显附着在大颗粒表面,出现团聚现象,这对葡萄糖分子的吸附会有一定的消极影响。

2.8 改性前后柠檬皮渣粉的 GDRI 分析

GDRI 是一个能够有效反映葡萄糖在人体胃肠道中被延迟吸收的体外指标, GDRI 越高,间接说明样品维持人体餐后血糖稳定的能力越强。如图 7 所示,三种改性均显著提高了柠檬皮渣粉的 GDRI ($P < 0.05$),其中 WBF、GQF 延迟葡萄糖透析的效果显著优于 CWF。这可能是因为三种改性均在不同程度增加了柠檬皮渣粉 SDF 含量和比表面积,而微波处理和高速剪切处理还获得了更加疏松的内部结构,进而增强了对葡萄糖的物理吸附和空间阻碍^[44]。在透析时间为 40 min 以及之前, WBF 的 GDRI 高于 GQF,但其 60 min 时的 GDRI 均高于 30、40 min,这说明 GQF 对延迟葡萄糖透析的效果相较于 WBF、CWF 更持久且稳定,若用于功能性食品或药物产品中,更能预防或辅助糖尿病的治疗。整体看来,随着透析时间的延长,四种样品的 GDRI 均大致呈下降趋势且透析后期变化幅度变小,这是因为随透析时间的不断延长,对葡萄糖的吸附量接近饱和,吸附过程达到动态平衡^[45]。

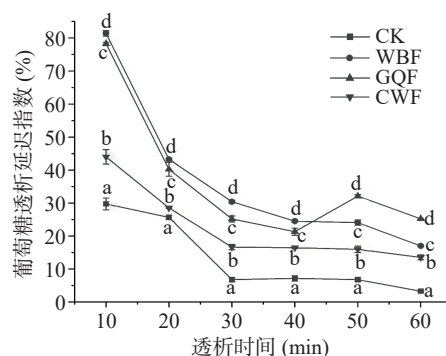


图 7 葡萄糖透析延迟指数与透析时间的关系图

Fig.7 Plot of GDRI versus dialysis time

注:不同小写字母表示同一透析时间下不同样品的数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.9 改性前后柠檬皮渣粉的 CAC 分析

CAC 能反映样品对胆固醇吸附能力的大小,该值越高,可间接说明样品可能更有效地降低血浆胆固醇水平,减少机体对胆固醇的吸收。由图 8 可知,四种样品均在 pH7(模拟小肠内环境)时的 CAC 大于 pH2(模拟胃部环境)时的 CAC,说明柠檬皮渣粉在肠道中对胆固醇的吸附能力强于在胃中的吸附能

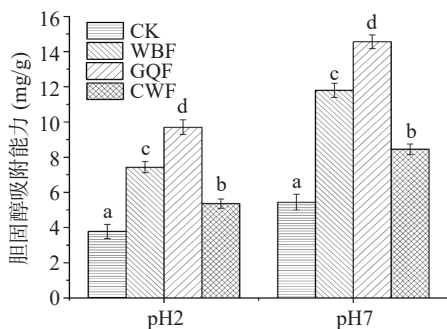


图8 不同改性处理后柠檬皮渣粉吸附胆固醇的能力

Fig.8 CAC of lemon peel residue powder after different modifications

注:不同小写字母表示同一 pH 下不同样品数据差异显著 ($P<0.05$)。

力,原因可能是酸性条件下存在大量 H^+ ,使柠檬皮渣粉和胆固醇表面均携带了正电荷,两者相互排斥,结合力减弱,导致了吸附胆固醇能力的下降^[46]。三种改性均显著提高了柠檬皮渣粉对胆固醇的吸附能力 ($P<0.05$),其中高速剪切最佳,在 pH2 和 pH7 时分别为 9.70、14.56 mg/g,比改性前分别提高了 156.61%、167.65%,其次是微波,最后是超微粉碎。出现这种现象可能是因为 SDF 比 IDF 更能吸附胆固醇^[47],这与三种改性后柠檬皮渣粉中 SDF 含量均在不同程度增加的结果相吻合。同时,三种改性均提高了柠檬皮渣粉的阳离子交换能力,而具有高阳离子交换能力的 DF 会捕获、破坏脂质乳液,导致包括胆固醇在内的脂质的扩散、吸收和利用减少^[48]。

2.10 SDF 与各指标之间的相关性分析

为进一步探索验证柠檬皮渣粉中 SDF 含量与其理化、功能特性间的关系,对其 SDF 含量与相关理化(WHC、SC、OHC)、功能特性(CEC、GAC、GDRI、CAC)进行相关性分析,其中 GDRI 以 6 个取样时间点的平均值代入计算^[49]。由表 2 可知,柠檬皮渣 SDF 含量与 WHC、SC、OHC、CEC、GAC、GDRI、CAC 均呈极显著正相关($P<0.01$),各理化、功能指标之间

表2 柠檬皮渣粉 SDF 含量与其理化、功能特性之间的相关性($n=12$)Table 2 Correlation between SDF content and physicochemical and functional properties of lemon peel residue powder ($n=12$)

相关系数	SDF 含量	WHC	SC	OHC	CEC	GAC	GDRI	CAC (pH2)	CAC (pH7)
SDF 含量	1	0.984**	0.973**	0.837**	0.979**	0.881**	0.827**	0.958**	0.933**
WHC		1	0.956**	0.811**	0.978**	0.828**	0.770**	0.938**	0.906**
SC			1	0.915**	0.982**	0.951**	0.923**	0.993**	0.986**
OHC				1	0.875**	0.932**	0.934**	0.923**	0.928**
CEC					1	0.890**	0.859**	0.970**	0.941**
GAC						1	0.983**	0.953**	0.980**
GDRI							1	0.929**	0.955**
CAC (pH2)								1	0.978**
CAC (pH7)									1

注:**表示在0.01水平(双尾)显著相关。

也呈极显著正相关($P<0.01$),提示柠檬皮渣粉 SDF 含量对其发挥上述理化、功能特性起着贡献作用,其 SDF 含量越高,理化、功能特性也越强,因此通过适宜的改性方法在提高 SDF 的同时可以改善柠檬皮渣粉的相关理化和功能特性指标,理化指标的改善也有利于功能特性的提高。

3 结论

本研究以提高 SDF 为目标,探讨了微波、高速剪切和超微粉碎三种改性对柠檬皮渣粉结构及理化、功能特性的影响。结果表明,三种方式均可有效改善柠檬皮渣粉的表面微观结构,改性后其表面微观结构均由光滑紧密变成不同程度的粗糙与疏松,孔隙率增加,但不会改变其主要官能团;微波、高速剪切改性显著提高了柠檬皮渣粉热稳定性($P<0.05$);三种改性均可提高 SDF 含量,SDF 提高的同时可以改善柠檬皮渣粉的理化和功能特性指标。整体而言,高速剪切改性的效果最佳,其 TDF、SDF 含量高达 81.88%、33.07%,持水力、阳离子交换能力、葡萄糖吸附能力等其他理化、功能特性均最佳,具有膳食纤维类似的理化和功能特性,可视为一种柠檬膳食纤维。综上,提高 SDF 含量可作为改善柠檬皮渣粉品质的一个重要指标,高速剪切为改性柠檬皮渣粉的一种优良方法,可为柠檬皮渣的高品质利用提供思路。

本研究重点从体外试验的角度考察改性柠檬皮渣粉的结构、理化指标及与膳食纤维相关的功能特性指标,后续尚需通过体内试验包括人体试验进一步验证其功能特性,并探讨其作为食品配料在相关产品中的应用,以期更好满足大众对功能食品的需求。

参考文献

- [1] 黄清霞,雷激,李华鑫,等.高生物活性柠檬膳食纤维的功能特性研究[J].食品工业科技,2012,33(5):226-229. [HUANG Q X, LEI J, LI H X, et al. Study on the physiological characteristics of lemon dietary fiber rich in bioactive composition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(5): 226-229.]
- [2] 董昕颖,周志钦.柠檬果实与人体健康[J].保健医学研究与实践,2019,16(4):1-6. [DONG X Y, ZHOU Z Q. Lemon fruit and human health[J]. Health Medicine Research and Practice, 2019, 16(4): 1-6.]
- [3] 陈贵婷,胡坦,徐阳,等.柑橘膳食纤维理化性质、生理功能及其在食品中的应用研究进展[J].食品科学,2022,43(23):336-345. [CHEN G T, HU T, XU Y, et al. Physicochemical properties and physiological functions of citrus dietary fiber and its application in foods: A review of recent research[J]. Food Science, 2022, 43(23): 336-345.]
- [4] 雷激,李华鑫,王静波,等.工艺条件对柠檬皮渣膳食纤维物理特性的影响[J].食品科技,2011,36(5):122-126. [LEI J, LI H X, WANG J B, et al. Effects of production technology on physical properties of dietary fiber from lemon peel[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(5): 122-126.]
- [5] 张静,黄月.水果中膳食纤维提取方法研究进展[J].中国果菜,2021,41(6):101-104. [ZHANG J, HUANG Y. Research progress on extraction methods of dietary fiber from fruit[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(6): 101-104.]
- [6] 徐燕,谭熙蕾,周才琼.膳食纤维的组成、改性及其功能特性

- 研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(23): 211–218. [XU Y, TAN X L, ZHOU C Q. Composition, modification and functional properties of dietary fiber[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(23): 211–218.]
- [7] 周丽玲, 罗佳倩, 常霞, 等. 酶解法制备柑橘皮渣膳食纤维的理化特性及抗氧化活性[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(4): 124–131. [ZHOU L L, LUO J Q, CHANG X, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of dietary fiber from citrus peel pomace prepared by enzymatic hydrolysis[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(4): 124–131.]
- [8] 刘义武, 韩鹏, 黄辉, 等. 复合酶制备柠檬膳食纤维工艺条件优化[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(16): 133–138. [LIU Y W, HAN P, HUANG H, et al. Optimization of dietary fiber extraction from lemon by compound enzyme[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(16): 133–138.]
- [9] 欧阳玲花, 冯健雄, 李思明, 等. 化学法和绿色木霉(*Trichoderma viride*)发酵法提取柠檬皮膳食纤维的研究[J]. *食品科技*, 2008(2): 222–224. [OUYANG L H, FENG J X, LI S M, et al. Study on the extraction of dietary fiber from lemon peel by chemical method and *Trichoderma viride*[J]. *Food Science and Technology*, 2008(2): 222–224.]
- [10] 陈思好, 焦叶, 崔波, 等. 膳食纤维理化特性及其改性方法研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(5): 234–240. [CHEN S Y, JIAO Y, CUI B, et al. Research progress in physicochemical properties and modification methods of dietary fiber[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(5): 234–240.]
- [11] 黄嘉仪. 柑橘纤维的制备及其乳化性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. [HUANG J Y. Study on preparation and emulsifying properties of citrus fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.]
- [12] GAN J P, HUANG Z Y, YU Q, 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(C): 105549.
- [13] YAN T C, LIU R, SHI L, et al. Superfine grinding improves the physicochemical, sensory and functional characteristics of Hanfu apple pomace[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 58(4): 2077–2084.
- [14] 谢靓. 微波改性对膳食纤维理化特性及肠道菌群调节作用的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. [XIE L. Influence of microwave modification on the physicochemical properties and gut microbiota modulation of dietary fiber[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.]
- [15] 史早, 张甫生, 杨金来, 等. 超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 40–47. [SHI Z, ZHANG F S, YANG J L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* shoot powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(24): 40–47.]
- [16] 尹立晨. 豆渣膳食纤维的改性及其在酸奶冰淇淋中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [YIN L C. Modification of okara dietary fiber and its application in frozen yogurt[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [17] 张月, 汪楠, 钟金锋, 等. 超声波协同高压均质处理对笋壳膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(12): 123–128. [ZHANG Y, WANG N, ZHONG J F, et al. Effect of ultrasonic assisted high pressure homogenization on physicochemical properties and structure of bamboo shoot shell dietary fiber[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(12): 123–128.]
- [18] ZHANG W M, ZENG G L, PAN Y G, et al. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 102–112.
- [19] CHU J X, ZHAO H Z, LU Z X, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 79–86.
- [20] 王崇队, 张明, 杨立凤, 等. 不同来源膳食纤维品质分析及抗氧化活性研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(5): 78–83. [WANG C D, ZHANG M, YANG L F, et al. Quality analysis and antioxidant activity of dietary fiber from different sources[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(5): 78–83.]
- [21] PEERAJIT P, CHIEWCHAN N, DEVAHASTIN S. Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(4): 1891–1898.
- [22] 罗菁菁, 谢靓, 熊绍百, 等. 微波对膳食纤维结构和功能特性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 30–35. [LUO S Q, XIE L, XIONG S B, et al. Effects of microwave on the structural and functional properties of dietary fibers from different sources[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 30–35.]
- [23] LI X L, HE X L, LÜ Y P, et al. Extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from apple pomace[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2014, 37(3): 293–298.
- [24] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 278–286. [ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of ultrafine crushing on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 278–286.]
- [25] 赵愉涵, 秦畅, 孙斐, 等. 超微粉碎处理对八宝粥粉理化特性及功能特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 21–28. [ZHAO Y H, QIN C, SUN F, et al. Effects of superfine grinding treatment on the physicochemical and functional properties of mixed congee powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(18): 21–28.]
- [26] 吴丽萍, 董康珍, 楚文靖, 等. 微波改性对燕麦麸膳食纤维结构及功能性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 30–37. [WU L P, DONG K Z, CHU W J, et al. Effects of microwave modification on the structure and functional properties of oat bran dietary fiber[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 30–37.]
- [27] MA M M, MU T H. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 237–246.
- [28] 刘鸿斌, 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 H C, FAN H X, ZHAO X, 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.]
- [29] ZHENG Y J, LI Y. 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.
- [30] WEN Y, MENG N, ZHANG B J, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. *LWT-Food*

Science and Technology, 2017, 75: 344–351.

[31] LIN D R, LONG X M, HUANG Y C, et al. Effects of microbial fermentation and microwave treatment on the composition, structural characteristics, and functional properties of modified okara dietary fiber[J]. LWT, 2020, 123(C): 109059.

[32] 罗白玲. 超微粉碎对咖啡果皮不溶性膳食纤维加工和功能特性的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020. [LUO B L. Effects of ultrafine grinding on processing and functional properties of insoluble dietary fiber from coffee peel[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.]

[33] MENG S, WANG W H, CAO L K. Soluble dietary fibers from black soybean hulls: Physical and enzymatic modification, structure, physical properties, and cholesterol binding capacity[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(6): 1668–1674.

[34] 赵学旭, 武蕊, 衣春敏, 等. 沙棘果渣粉的超微冷冻粉碎制备及其理化性质与结构特性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 87–95. [ZHAO X X, WU R, YI C M, et al. Seabuckthorn pomace powder preparation by superfine freeze pulverization and characterization of its physicochemical and structural properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 87–95.]

[35] 牛潇潇, 王杰, 王宁, 等. 超微粉碎对马铃薯渣理化性质和微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 84–91. [NIU X X, WANG J, WANG N, et al. Effect of Superfine grinding on physicochemical properties and microstructure of potato residues[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 84–91.]

[36] 蒋丽, 雷激. 发酵法从柠檬果渣中制备膳食纤维的研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(3): 133–136. [JIANG L, LEI J. Dietary fiber preparation from lemon fruit residue by fermentation[J]. China Brewing, 2016, 35(3): 133–136.]

[37] YALEGAMA L L W C, NEDRA KARUNARATNE D, SIVAKANESAN R, et al. Chemical and functional properties of fibre concentrates obtained from by-products of coconut kernel[J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 124–130.

[38] GÓMEZ-ORDÓÑEZ E, JIMÉNEZ-ESCRIG A, RUPÉREZ P, et al. Dietary fibre and physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast[J]. Food Research International, 2010, 43(9): 2289–2294.

[39] 张益嘉, 张甫生, 李彬, 等. 单甘酯对高压均质处理竹笋膳食纤维理化及结构特性的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–9. [2023-03-09]. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032581. [ZHANG Y J, ZHANG F S, LI B, et al. Effect of glyceryl monostearate on physicochemical and structural properties of dietary fiber from bamboo shoots treated with high-pressure homogenization[J/OL]. Food and Fermentation Industries: 1–9. [2023-03-09]. DOI:10.13995/

j.cnki.11-1802/ts.032581.]

[40] ZHAO X Y, YANG Z B, GAI G S, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 91(2): 217–222.

[41] 孙颖. 小麦麸皮膳食纤维的脱色及超微粉碎加工[D]. 无锡: 江南大学, 2008. [SUN Y. Study on the decoloration and micronization of wheat bran dietary fiber[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.]

[42] LIU C, LIN X L, WAN Z L, et al. The physicochemical properties, *in vitro* binding capacities and *in vivo* hypocholesterolemic activity of soluble dietary fiber extracted from soy hulls[J]. Food & function, 2016, 7(12): 4830–4840.

[43] MA M M, MU T H. Modification of deoiled cumin dietary fiber with laccase and cellulase under high hydrostatic pressure[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 87–94.

[44] 李菁, 吴聪聪, 叶沁, 等. 不同处理方法对豆渣膳食纤维结构和降血糖性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 178–184.

[LI Q, WU C C, YE Q, et al. Effect of different treatments on structure and hypoglycemic properties of okara dietary fibers[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 178–184.]

[45] PRACHI G, PREMAVALI K S. *In vitro* studies on functional properties of selected natural dietary fibers[J]. International Journal of Food Properties, 2011, 14(2): 397–410.

[46] 郭姪, 过利敏, 周玉岩, 等. 改性方式对红花籽粕可溶性膳食纤维理化性质和吸附特性的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(5): 137–142. [GUO Y, GUO L M, ZHOU Y Y, et al. Effects of modification methods on physicochemical properties and adsorption of soluble dietary fiber from safflower seed meal[J]. China Brewing, 2022, 41(5): 137–142.]

[47] 苏珏, 席路, 杨武, 等. 四种玉米皮膳食纤维的组分对其吸附等功性质影响的研究[J]. 食品工业, 2012, 33(7): 81–84. [SU Y, XI L, YANG W, et al. The Effects of components of four kinds of dietary fiber made from corn bran on its property[J]. The Food Industry, 2012, 33(7): 81–84.]

[48] CHAU C F, HUANG Y L. Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibers prepared from the peel of *Citrus sinensis* L. cv. Liucheng[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(9): 2615–2618.

[49] 官印琬, 周丽妍, 王辉, 等. 动态高压微射流对刺梨果渣膳食纤维及其抑制淀粉消化和葡萄糖扩散的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 79–86. [GUAN Y L, ZHOU L Y, WANG H, et al. Impact of dynamic high pressure microfluidization on dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt. pomace and its inhibitory capacity against starch digestion and glucose diffusion[J]. Food Science, 2022, 43(9): 79–86.]