

不同粒径海水稻米糠不溶性膳食纤维理化性质和功能特性的比较

许敏¹, 贺天懿¹, 吴婧媛¹, 陈韬文¹, 杨成志¹, 胡家睿¹, 叶盛权², 刘磊^{1*}

(1. 五邑大学药品与食品工程学院, 广东江门 529000) (2. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524000)

摘要: 为比较不同粒径海水稻米糠不溶性膳食纤维的理化性质和功能特性, 对采用超微粉碎加工制备的海水稻米糠不溶性膳食纤维的持水性、持油性、水膨胀性、阳离子交换作用及亚硝酸盐吸附、胆酸钠吸附、胆固醇吸附、葡萄糖吸附和扩散抑制能力进行了测定。结果表明, 随着粒径的减小, 海水稻米糠不溶性膳食纤维持水力和膨胀力呈上升的趋势, 与对照组相比, IDF-M300 效果最明显, 分别为 3.21 g/g 和 5.33 mL/g; 持油力显著下降, IDF-M300 为 3.51 g/g ($P<0.05$)。在葡萄糖浓度为 50~200 mmol/L 范围内, 海水稻米糠 IDF 的葡萄糖吸附力亦明显上升; IDF 扩散抑制能力随着粒径的减小而增加。IDF-M300 在 pH 值为 2 时的胆固醇吸附力显著高于 pH 值为 7 时, 达到 27.13 mg/g; 当质量浓度为 300 mg/mL 时, IDF-M300 的胆酸钠吸附能力和 pH 值为 2 条件下亚硝酸盐清除能力最高, 分别为 67.96 mg/g 和 9.11 mg/g。以上结果表明, 超微粉碎处理显著改善了海水稻米糠不溶性膳食纤维的理化性质和功能特性, 该结果将为海水稻米糠不溶性膳食纤维在糖尿病人专用食品中的应用提供理论参考。

关键词: 粒径; 海水稻米; 不溶性膳食纤维; 理化性质; 功能特性

文章编号: 1673-9078(2025)10-89-97

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0275

Comparison of Physicochemical and Functional Properties of Insoluble Dietary Fiber from Sea Rice Bran with Different Particle Sizes

XU Min¹, HE Tianyi¹, WU Jingyuan¹, CHEN Taowen¹, YANG Chengzhi¹, HU Jiarui¹, YE Shengquan², LIU Lei^{1*}

(1. College of Biotechnology and Health Sciences, Wuyi University, Jiangmen 529000, China)

(2. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: The physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber (IDF) from sea rice bran with different particle sizes were compared. The water-holding, oil-holding, swelling, cation exchange, nitrite adsorption, sodium cholate adsorption, cholesterol adsorption, glucose adsorption, and diffusion inhibition capacities of IDF from sea rice bran prepared via ultrafine grinding were measured. The results showed that as the particle size decreased, the water-holding capacity and swelling capacity of sea rice bran IDF increased. Compared with that of the control group, the effect of IDF-M300 was the most significant, reaching 3.21 g/g and 5.33 mL/g, respectively. The oil-holding capacity decreased significantly, with IDF-M300 showing a value

引文格式:

许敏, 贺天懿, 吴婧媛, 等. 不同粒径海水稻米糠不溶性膳食纤维理化性质和功能特性的比较[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 89-97.

XU Min, HE Tianyi, WU Jingyuan, et al. Comparison of physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from sea rice bran with different particle sizes [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 89-97.

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-04-10; 接受日期: 2025-04-27

基金项目: 广东省普通高校重点领域专项 (2024ZDZX2007); 广东省百校联百县助力百千万工程行动项目 (BQW2024001); 广东大学生科技创新培育专项资金资助项目 (pdjh2024b379); 广东省科技创新战略专项资金 (“大专项 + 任务清单”) 项目 (江科[2023]72 号)

作者简介: 许敏 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品, E-mail: minxu2644764627@163.com

通讯作者: 刘磊 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与品质调控, E-mail: liulei@wyu.edu.cn

of 3.51 g/g ($P<0.05$). At glucose concentrations of 50–200 mmol/L, the glucose adsorption capacity of sea rice bran IDF increased significantly. The diffusion inhibition ability of IDF increased with decreasing particle sizes. The cholesterol adsorption capacity of IDF-M300 at pH 2 was significantly higher than that at pH 7, reaching 27.13 mg/g. When the concentration was 300 mg/mL, IDF-M300 showed the highest sodium cholate adsorption capacity and nitrite scavenging capacity at pH 2, which were 67.96 and 9.11 mg/g, respectively. The above results demonstrate that treatment with ultrafine grinding significantly improved the physicochemical properties and functional properties of sea rice bran IDF, providing a theoretical reference for the application of sea rice bran IDF in special foods for patients with diabetes.

Key words: particle size; sea rice; insoluble dietary fiber; physicochemical property; functional property

海水稻米是种植于盐碱性地区的一类水稻品种^[1], 是重要的粮食战略资源。相比较于普通稻米, 海水稻米糠含有更多的钠、镁和钙等矿物质^[2]和膳食纤维、多酚、黄酮等多种活性成分。膳食纤维 (Dietary Fiber, DF) 被营养学家定义为人类的第七类营养素, 来源于水果、蔬菜和谷物等植物。根据溶解度, 可细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)。IDF 和 SDF 均显示出一定的降血脂和降血糖活性^[3]。海水稻米糠 IDF 由于存在色泽暗淡、口感粗糙等缺陷导致其食品化利用率较低^[4]。

超微粉碎技术是一种能够将物料粉碎至微米级的新型精细加工技术, 具有显著的物料改性效果, 目前已广泛应用于食品领域^[5]。王博等^[6]利用超微粉碎技术加工处理 4 种杂粮粉 (薏米、红豆、青稞、荞麦), 加工后的荞麦粉的粒径结构形态最为明显, 对葡萄糖吸附力的降血糖功能特性显著提升。唐雁^[7]将超微粉碎技术应用于无机盐类钙制剂的加工, 使粉体粒径达到亚微米级, 促进生物钙的吸收。黄浩然等^[8]通过球磨技术对菠萝蜜果皮 IDF 进行粉碎处理, 研究表明, 球磨处理不仅能够有效实现菠萝蜜果皮 IDF 的粉碎与改性, 还可显著改善其持水力及阳离子交换能力等理化特性。罗白玲等^[9]用超微粉碎处理咖啡果皮 IDF, 结果表明, 超微粉碎可有效改善咖啡果皮 IDF 的葡萄糖吸附、胆固醇吸附和胆酸钠的吸附力, 随着粒径的减小呈现显著增加的趋势。以上研究表明, 超微粉碎技术能够显著提升 IDF 粉体的持水力、阳离子交换能力等理化性质及胆酸钠吸附力、葡萄糖吸附力等功能特性, 使其更能适应生加工的需要。

海水稻米中 IDF 含量远高于 SDF。目前, 关于海水稻米膳食纤维功能特性的研究鲜有报道。因此本文以海水稻米为原料提取制备 IDF, 采用超微粉碎加工技术对其进行改性, 研究该技术对海水稻米糠 IDF 持水力、持油力等理化性质和胆固醇吸附力、葡萄糖吸附力等功能特性的影响, 以期对海水稻米 DF 的开发

利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

海红 11 号, 购自广东海稻红农业科技有限公司; 新鲜鸡蛋、大豆油, 市售。

耐高温 α -淀粉酶 (4×10^4 U/g)、胆酸钠、葡萄糖、胆固醇, 购自上海源叶生物科技有限公司; 中性蛋白酶 (100 U/mg)、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、糖醛, 购自上海麦克林生物科技有限公司; 淀粉葡萄糖苷酶 (300 AGU/g), 购自诺维信 (中国) 有限公司; 亚硝酸钠, 购自天津市大茂化学试剂厂; DNS 试剂, 购自飞净生物科技有限公司; 其他化学试剂均为分析纯级。

SXJMJ-168 精米机, 台州市华昌粮油机械有限公司; PLS-10L 振动超微粉碎机, 济南普莱申机械装备有限公司; T 25 分散机, 广州 IKA 仪器设备有限公司; Infinite M200pro 酶标仪, 奥地利 TECAN 公司; TGL-16 型高速冷冻离心机: 四川蜀科仪器有限公司; 800A 多功能粉碎机: 永康市红太阳机电有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 海水稻脱脂米糠的制备

海水稻脱脂米糠的制备参考 Zhao 等^[10]的方法提取, 并做适当修改, 海红 11 号通过使用精米机对糙米抛光, 进行 40 s 的碾磨处理后得到精米和米糠。将新制备的米糠粉碎过 60 目筛, 按照固液比 (1:10, m/V) 加入石油醚, 在 37 °C 下震荡 24 h 以脱除脂肪, 重复两次, 得到脱脂米糠, 贮存于 4 °C 冰箱备用。

1.2.2 海水稻米糠IDF的制备

海水稻米糠不溶性膳食纤维的制备参考 Bunzel 等^[11]的方法提取, 脱脂米糠经多功能粉碎机粉碎后过 60 目筛。称取 60 g 脱脂米糠与 600 mL 超纯水搅拌混匀, 在 95 °C 水浴中糊化 10 min。采用酶解工艺对糊化脱脂米糠进行处理, 依次使用以下酶试

剂：首先，以 0.025% (m/V) 耐高温 α -淀粉酶 (pH 值 6.0, 95 °C, 20 min) 进行淀粉水解, 随后以 0.25% (m/V) 中性蛋白酶 (pH 值 7.5, 60 °C, 60 min) 去除蛋白质, 最后加入 1.2 mL 淀粉葡萄糖苷酶 (pH 值 4.5, 60 °C, 30 min) 进一步降解残留淀粉。反应结束后, 将反应液在 8 000 r/min 条件下离心 10 min。最后用超纯水 (60 °C) 洗涤残渣两次, 残渣在 60 °C 烘箱中进行干燥, 以获得不溶性膳食纤维, 储存于 4 °C 冰箱中备用。

1.2.3 海水稻米糠IDF超微粉碎样品的制备

用普通的多功能粉碎机粉碎上述海水稻米糠 IDF 30 s 得到细粉 (过 60、180 目筛)。将得到的细粉用 PLS-10L 振动超微粉碎机在 20 °C 粉碎。通过调节粉碎时间, 将 IDF 过 240 目、300 目筛, 得到超微粉。所得产品分别命名为 CK (粗粉)、M60 (60~180 目)、M180 (180~240 目)、M240 (240~300 目) 和 M300 (300 目及以上)。每种类型的 IDF 粉末均制备 3 个重复。所有样品密封保存于 4 °C 直至分析。

1.2.4 海水稻米糠IDF持水力、持油力和吸水膨胀力的测定

持油力 (Oil Holding Capacity, OHC) 的测定方法参考 Luo 等^[12]并稍作修改: 将 0.50 g 不同粒度的 IDF 样品与 8 mL 大豆油混合于离心管中, 在室温下孵育 4 h, 期间每隔 15 min 摇动一次, 然后在 4 000 r/min 下离心 15 min。弃去离心管上层的油相后, 使用滤纸吸除管壁残留的花生油, 称量并计算 OHC。通过尼龙网过滤回收颗粒, 称量沉积物, 并使用公式 (1) 计算 OHC。

$$B_1 = \frac{w_1 - w}{w} \quad (1)$$

式中:

B_1 ——持油力 (OHC), g/g;

w_1 ——吸油后 IDF 的质量, g;

w ——吸油前 IDF 的质量, g。

持水力 (Water Holding Capacity, WHC) 的测定方法参考 Xia 等^[13]的方法并稍作修改: 将 0.50 g 不同粒度的 IDF 样品与 15 mL 蒸馏水置于量筒中混匀, 静置 18 h, 取出样品用滤纸沥干至无水滴出, 称重。记录水化残留量, 并在 105 °C 下干燥 2 h, 获得剩余干重。并使用公式 (2) 计算 WHC,

$$B_2 = \frac{w_1 - w}{w} \quad (2)$$

式中:

B_2 ——持水力 (WHC), g/g;

w_1 ——吸水后 IDF 的质量, g;

w ——吸水前 IDF 的质量, g。

吸水膨胀力 (Swelling Capacity, SC) 的测定方法参考 Bender 等^[14]并稍作修改: 将称量准确的 IDF (0.20 g) 放入刻度试管中, 加入约 10 mL 水, 水化 18 h 后, 测量 IDF 吸水后的最终体积。并使用公式 (3) 计算 SC。

$$B_3 = \frac{v_1 - v_2}{w} \quad (3)$$

式中:

B_3 ——膨胀力 (SC), mL/g;

v_2 ——吸水后 IDF 所占体积, mL;

v_1 ——吸水前 IDF 所占体积, mL;

w ——IDF 的质量, g。

1.2.5 海水稻米糠IDF的阳离子交换能力的测定

阳离子交换能力 (Cation Exchange Capability, CEC) 的测定方法参考 Zhang 等^[15]并稍作修改, 将 0.50 g 不同粒度的 IDF 样品与 0.1 mol/L 的盐酸 (1:70, m/V) 混匀 24 h, 得到酸样品。过滤, 用超纯水充分洗掉多余的酸, $\varphi=10\%$ 的硝酸银溶液滴定滤液, 直到未检测到 Cl^{-1} (无白色沉淀)。然后在 60 °C 下干燥。称取 0.10 g 酸性样品, 分散于 50 mL 5 wt.% 的 NaCl 溶液中, 用 0.02 mol/L 的 NaOH 滴定, 记录混合物的 pH 值和滴定的 NaOH 体积。CEC 表示为每 g 样品消耗的 NaOH 的含量。根据实验数据, 绘制 NaOH 溶液体积 V (NaOH) 与 pH 值的关系曲线图。

1.2.6 海水稻米糠IDF吸附性能的测定

1.2.6.1 海水稻米糠IDF的胆固醇吸附能力的测定

胆固醇吸附能力 (Cholesterol Adsorption Capacity, CAC) 的测定方法参考 Luo 等^[16]并稍作修改, 将 1.00 g 不同粒度的 IDF 样品与 50 mL 稀释的蛋黄溶液 (用 9 体积蒸馏水稀释并匀浆的新鲜蛋黄) 混合, 然后调节 pH 值至 7.0 或 2.0 (模拟人体小肠和胃环境), 37 °C 振荡 120 min, 在室温下 5 000 r/min 离心 10 min, 在 550 nm 处测量上清液的吸光度。以胆固醇标准品绘制标准曲线 $y=6.6005x+0.0068$ ($R^2=0.9993$) 计算上清液中的胆固醇质量浓度, 并使用公式 (4) 计算 CAC。

$$D_1 = (c_{blank} - c) \times \frac{v}{m} \quad (4)$$

式中:

D_1 ——胆固醇吸附能力 (CAC), mg/g;

c_{blank} ——不加 IDF 上清液的胆固醇质量浓度, mg/mL;

c ——IDF 吸附后上清液胆固醇质量浓度, mg/mL;

v ——IDF 吸附后上清液体积, mL;

m ——IDF 的质量, g。

1.2.6.2 海水稻米糠IDF胆酸钠的吸附能力的测定

胆酸钠吸附能力 (Cholate Adsorption Capacity, CLAC) 的测定方法参考 Zheng 等^[17]并稍作修改, 将 1.00 g 不同粒度的 IDF 样品分别与 50 mL 胆酸钠 (200 mg 或 300 mg) 置于离心管中混合均匀, 随后将溶液 pH 值调节至 7.0, 在 37 °C 条件下振荡反应 120 min, 反应结束后于室温下以 5 000 r/min 离心 10 min。采用糠醛比色法, 在 620 nm 波长下测定上清液的吸光度。以胆酸钠标准品绘制标准曲线 $y=0.7641x+0.0047$ ($R^2=0.9998$) 计算上清液中的胆酸钠质量浓度, 并使用公式 (5) 计算胆酸钠吸附力。

$$D_2 = m - c \times v \quad (5)$$

式中:

D_2 ——胆酸钠吸附能力 (CLAC), mg/mL;

c ——上清液中胆酸钠的质量浓度, mg/mL;

v ——上清液体积, mL;

m ——样品中加入的胆酸钠质量, mg。

1.2.6.3 海水稻米糠的IDF亚硝酸盐吸附能力的测定

亚硝酸盐吸附能力 (Nitrite Ion Absorption Capacity, NIAC) 的测定方法参考 Zhu 等^[18]并作如下修改。将 0.20 g 不同粒度的 IDF 样品与 50 mL 亚硝酸钠 (0.1 mg/mL) 置于离心管中混合均匀, 分别用 1 mol/L 盐酸和 1 mol/L 氢氧化钠调节 pH 值为 2.0 和 7.0。37 °C 避光恒温振荡 120 min, 在室温下以 5 000 r/min 离心 15 min。然后取 1 mL 上清液与 2 mL 对氨基苯磺酸溶液 (4 g/mL) 混合均匀, 静置 5 min, 加 1 mL 盐酸萘乙二胺溶液 (2 g/L) 混合, 用超纯水稀释定容至 25 mL 后, 在室温下避光静置 25 min, 于 538 nm 处测定上清液的吸光度。以亚硝酸钠标准品绘制标准曲线 $y=0.3114x-0.0002$ ($R^2=0.9996$) 计算上清液中亚硝酸盐的质量浓度。并使用公式 (6) 计算:

$$D_3 = (c_1 - c_2) \times \frac{v}{m} \quad (6)$$

式中:

D_3 ——亚硝酸盐吸附能力 (NIAC), $\mu\text{g/g}$;

c_1 ——IDF 样品吸附前的亚硝酸盐质量浓度, $\mu\text{g/g}$;

c_2 ——IIDF 样品吸附后的亚硝酸盐质量浓度, $\mu\text{g/g}$;

v ——IIDF 样品吸附后上清液的体积, mL;

m ——IIDF 样品的质量, g。

1.2.7 海水稻米糠不溶性膳食纤维的体外降糖活性

1.2.7.1 海水稻米糠IDF的葡萄糖吸附能力的测定

葡萄糖吸附能力 (Glucose Adsorption Capacity, GAC) 的测定方法参考 Zheng 等^[19]并做适当修改。将 0.50 g 不同粒度的 IDF 样品与 50 mL 葡萄糖溶液 (50、100、200 mmol/L) 混合均匀, 37 °C 恒温水浴 6 h, 在

室温下 8 000 r/min 离心 10 min。用 DNS 法于 540 nm 处测定上清液的吸光度, 以葡萄糖标准品绘制标准曲线, $y=1.4148x-0.0124$ ($R^2=0.9991$)。并使用公式 (7) 计算:

$$D_4 = \frac{(c_1 - c_2) \times v}{m} \quad (7)$$

式中:

D_4 ——葡萄糖吸附能力 (GAC), mmol/g;

c_1 ——IDF 样品吸附前反应体系的葡萄糖质量浓度, mmol/L;

c_2 ——IDF 样品吸附后反应体系的葡萄糖质量浓度, mmol/L;

v ——IDF 样品吸附后上清液的体积, mL;

m ——IDF 样品的质量, g。

1.2.7.2 海水稻米糠IDF的葡萄糖的扩散和透析延迟指数的测定

葡萄糖扩散和透析阻滞指数 (Glucose Dialysis Retardation Index, GDRI) 的测定方法参照 Zheng 等^[19]和 Yang 等^[20]并稍作修改。将 0.50 g 不同粒度的 IDF 样品分散在 10 mL 葡萄糖溶液 (100 mmol/L) 中, 37 °C 下搅拌 1 h, 并使用截留分子量为 8 000~14 000 Da 的透析膜在 37 °C 下用 200 mL 蒸馏水透析分散液。20、30、60、90、120、180 min 后, 使用 DNS 法测定透析液中葡萄糖含量, 在不添加 IDF 的情况下进行对照试验。以葡萄糖标准品绘制标准曲线, $y=1.4148x-0.0124$ ($R^2=0.9991$), 并通过公式 (8) 计算 GDRI:

$$E = (1 - \frac{c_1}{c_2}) \times 100\% \quad (8)$$

式中:

E ——透析阻滞指数 (GDRI), %;

c_1 ——样品组中葡萄糖的透析量, mmol/L;

c_2 ——对照组中葡萄糖的透析量, mmol/L。

1.3 数理统计

所有实验一式三份进行, 结果均以平均值 $\pm$ 标准差 (Means $\pm$ SD) 表示, 使用 SPSS Statistics 27.0 进行分析数据, 平均数之间的差异通过 ANOVA 分析, $P < 0.05$ 为显著性差异, 采用 Graph Pad Prism 6.0 软件进行统计分析和图形制作。

2 结果与讨论

2.1 海水稻米糠IDF的持水力、持油力和水膨胀力

图 1 显示的是不同粒径海水稻米糠不溶性膳食纤维的持水力、持油力和吸水膨胀特性。由图可知, 五种米糠 IDF 的持水力分别为 2.67、2.71、2.99、3.11 和 3.21 g/g, 对照组和 M60 的持水力相当, 而 M300、M240、M180 的持水力分别较 CK 组显著提高了 20.45%、16.47% 和 11.91%。这可能是由于粒径的减小导致膳食纤维的致密

结构逐渐疏松化,同时颗粒的比表面积、表面能及孔隙率显著增加所致。五种米糠 IDF 的水膨胀力分别为 2.9、3.20、4.27、4.60 和 5.3 mL/g,随着粒径减小,呈现显著增加的趋势,与 CK 相比,增加范围在 9.1%~81.8% 之间。这可能是因为超微粉碎过程中,部分细胞结构发生破裂,导致纤维素和半纤维素中的亲水性基团进一步暴露,增大了颗粒与水的接触面积和接触位点,从而显著提升了其分散性,使得持水力和膨胀力均得到明显增强^[21]。已有研究报道,超微粉碎处理提高了青稞麸皮 IDF^[22]及胡萝卜渣 IDF^[23]的持水力和膨胀力。

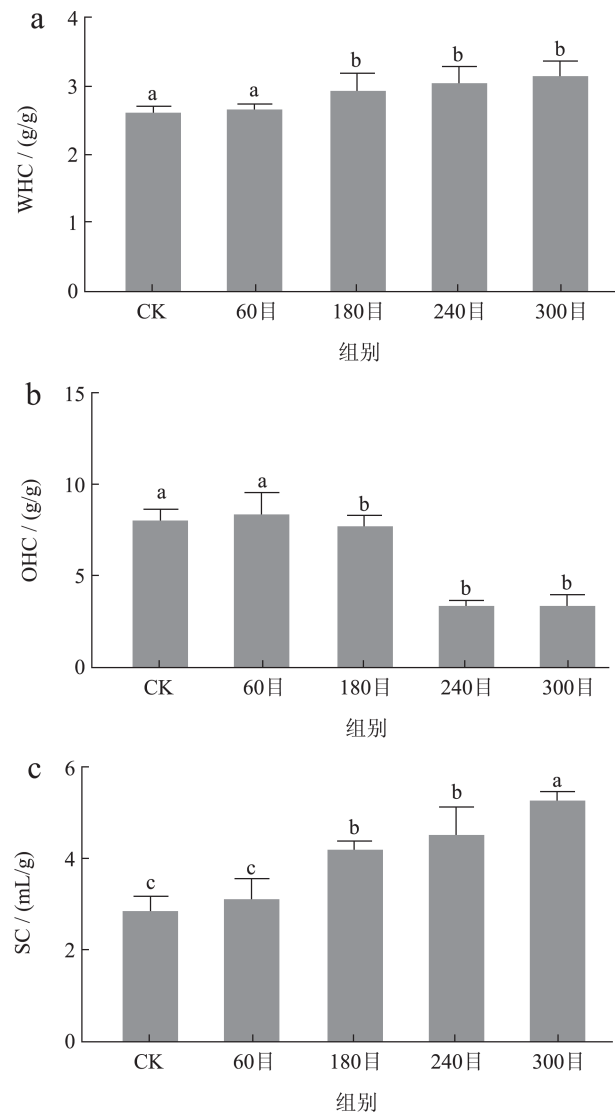


图 1 不同粒径海水稻米糠 IDF 的持水力、持油力和水膨胀力
Fig.1 WHC, OHC, SC of sea rice bran IDF with different particle size

注:(a)WHC: 持水力;(b)OHC: 持油力;(c)SC: 膨胀力。
图柱上标注字母不同时,表示差异达到显著性水平 ($P<0.05$),下同。

5 种海水稻米糠 IDF 的持油力分别为 8.31、8.57、8.6、7.93、3.57 和 3.51 g/g,经过超微粉碎处理后呈现先增加后降低的趋势,在 60 目的时候,其持油力达到最高,较 CK 增加了 3.13%;这说明适当的粉碎可能引起了 IDF 亲油基团的暴露,持油力得以增加^[24]。然而,M180、M240 和 M300 较之对照组相比分别降低了 4.61%、57.06% 和 57.78%。这可能是因为粉体粒度过小,粉体在油脂中产生了团聚现象,表面与油脂无法充分地接触吸附,导致了持油力下降^[25]。前人也有类似的研究报道,发现超微粉碎后降低了米糠 IDF^[10]的持油力。

2.2 海水稻米糠IDF的阳离子交换能力

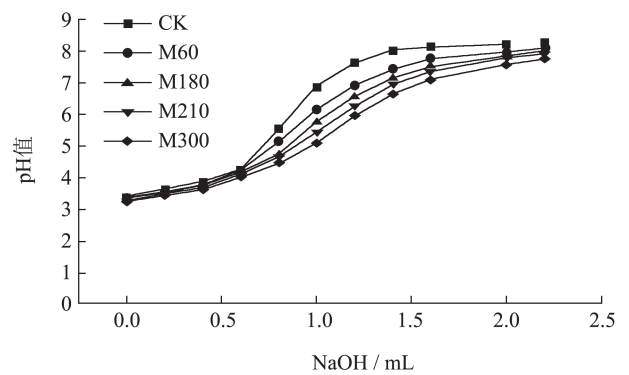


图 2 不同粒径海水稻米糠 IDF 的阳离子交换能力
Fig.2 CEC of sea rice bran IDF with different particle size

阳离子交换能力是观察阳离子结合能力的一个重要参数。CEC 可通过 pH 值的变化程度进行评估,pH 值变化越小,表明其阳离子交换能力越强,从而对人体具有更高的健康价值。图 2 显示的是不同粒径海水稻米糠不溶性膳食纤维的阳离子交换能力,随着 NaOH 添加量的增加,IDF 的 pH 值呈增加趋势。5 种 IDF (pH 值变化范围为 3.21~8.11) 溶液的 CEC 随着 IDF 粒径的减小而增加,随着 NaOH 体积的增加,溶液的 pH 值呈现先缓慢增加 (0~0.6 mL),然后快速上升 (0.6~1.6 mL),最后基本趋于一致 (1.6~2.2 mL),达到动态平衡。与其他 4 个纤维样品相比,IDF-M300 的 CEC 提升效果最明显。这主要是由于海水稻米糠 IDF 在超微粉碎过程中受到强压力、剪切力及摩擦力的作用,导致颗粒组织结构破碎,使得分子中的 -COOH、-OH 等基团的数量增加,添加 NaOH 后,阳离子吸附能力更高,变化更快^[26]。滕硕^[27]及汤小明^[28]的对甜杏仁红衣粉和豆渣粉的研究表明, IDF 粒径的减小与 CEC 提高相关联,适当的超微粉碎处理能够提高甜杏仁红衣粉和豆渣粉的阳离子交换能力。

2.3 海水稻米糠IDF吸附性能的测定

2.3.1 海水稻米糠IDF的胆固醇吸附能力

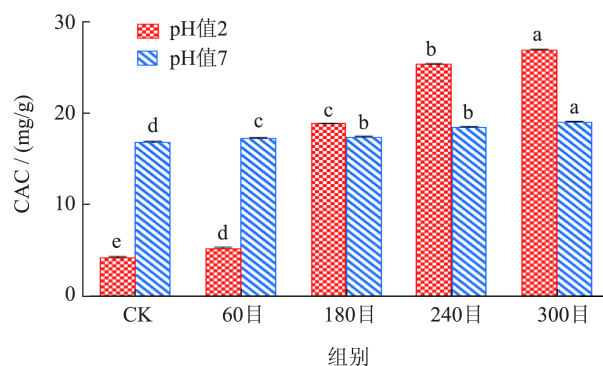


图3 不同粒径海水稻米糠IDF的胆固醇吸附能力

Fig.3 CAC of sea rice bran IDF with different particle size

图3显示的是不同粒径海水稻米糠IDF对不同pH值条件(pH值7和pH值2)下的胆固醇的吸附能力。如图所示,在pH值为2时,粉碎后的IDF(M60、M180、M240、M300)的胆固醇吸附能力分别为5.37、19.05、25.57和27.13 mg/g,相比于对照组(4.28 mg/g)分别增加了25.47%、344.81%、497.17%、533.49%;在pH值为7时,4种IDF的CAC分别为17.46、17.58、18.63和19.20 mg/g,相比于对照组(17.02 mg/g)分别增加了2.56%、3.29%、9.43%、12.80%。结果显示,在不同pH值条件下,随着粒径的减小,CAC呈现上升的趋势,超微粉IDF-M300的效果最好。Li等^[29]利用超微粉碎处理青稞麸皮IDF显著增加胆固醇吸附能力,这可能因为IDF的吸附能力与其结构和形态密切相关,经过超微粉碎的加工处理后,较小粒径和较大比表面积IDF为胆固醇结合提供了更多的位点,从而具有更强的CAC^[30]。海水稻米糠IDF经过超微粉碎处理后,在胃液(pH值2)中比肠液环境(pH值7)中的CAC效果更显著。

2.3.2 海水稻米糠IDF的胆酸钠吸附能力

图4显示的是不同粒径海水稻米糠IDF对不同浓度的胆酸钠吸附能力。如图所示,粉碎后的海水稻米糠IDF对胆酸钠的吸附能力有显著差异($P < 0.05$),当胆酸钠浓度升高时,海水稻米糠IDF的胆酸钠吸附能力也随之增加。胆酸钠的质量为300 mg时,5种膳食纤维的CLAC分别为25.37、34.21、40.24、65.96和67.96 mg/g,粉碎后样品相比于CK显著增加了34.85%、58.62%、160.01%、167.93%。胆酸钠的质量为200 mg时,5种膳食纤维的CLAC分别为7.12、25.19、28.40、31.21和32.81 mg/g,粉碎后样品相比于CK显著增加了253.49%~360.52%。在同一浓度下,随着粒径的减小,CLAC呈现显著增加的趋势,

IDF-M300的胆酸钠吸附能力最强。方东亚^[31]研究的气流粉碎处理笋头IDF和Niu等^[32]研究的谷物麸皮同样使胆酸钠吸附能力增加。海水稻米糠IDF的胆酸钠吸附能力与其浓度呈正相关,二者结合胆汁酸盐的能力越强,表明肝脏中胆固醇转化为胆汁酸的速率越快,从而具有更显著的降胆固醇效果,进一步体现了其潜在的降血脂活性^[33],再次验证了其辅助降脂的潜在功能。

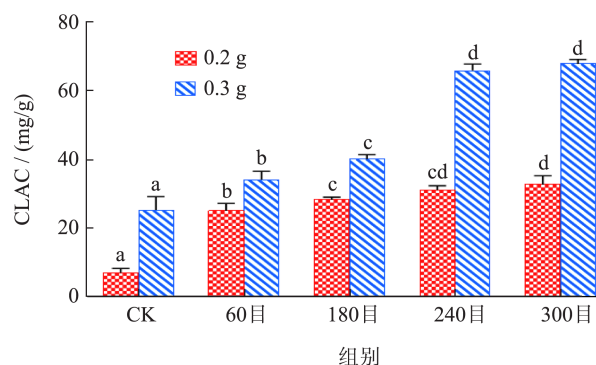


图4 不同粒径海水稻米糠IDF的胆酸钠吸附能力

Fig.4 CLAC of sea rice bran IDF with different particle size

2.3.3 海水稻米糠IDF的亚硝酸盐吸附能力

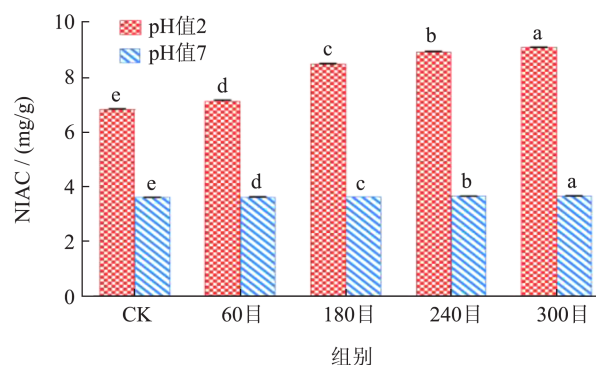


图5 不同粒径海水稻米糠IDF的亚硝酸盐吸附能力

Fig.5 NIAC of sea rice bran IDF with different particle size

图5显示的是不同粒径海水稻米糠IDF在不同pH值条件下的亚硝酸盐的吸附能力,模拟了胃(pH值2)和肠道内(pH值7)的消化环境。如图所示,在pH值2的条件下,粉碎处理后的海水稻米糠IDF表现出优异的亚硝酸盐吸附能力,分别为7.14、8.51、8.93和9.11 mg/g,相比于对照组(6.84 mg/g),粉碎后的IDF的亚硝酸盐吸附能力分别增加了4.32%、24.31%、30.43%、33.02%,IDF-M300的NIAC效果最显著。这表明超微研磨后的海水稻米糠IDF可能具有将亚硝酸盐吸附到胃中的巨大潜力。在酸性条件下,IDF可能会发生一定程度的水解,使一些酚酸基团更好地暴露出来,增强其与 NO_2^- 的相互作用^[34]。在pH值7条件下,随着粒径的减小,5种海水稻米糠IDF显示出

显著增加的 NIAC，这表明海水稻米糠 IDF 可能具有很强的吸附肠道中亚硝酸盐的能力。研究表明，IDF 在胃环境的 NIAC 显著高于肠环境，这可能是由于随着 pH 值的升高，特别是在中性或碱性环境中，溶液中的大量阴离子可能会聚集在 IDF 表面，从而阻碍 IDF 样品对 NO₂ 的吸附能力^[15]。此外，Ma 等^[35]研究的超微粉碎后的胡萝卜 IDF 对 NIAC 具有显著增加。因此，超微粉碎处理后的海水稻米糠 IDF 显著提高海水稻米糠 IDF 对 NaNO₂ 的清除能力，有效地降低了模拟胃液和肠液中 NaNO₂ 的浓度，从而可以预防由 NaNO₂ 引起的癌症。

2.4 海水稻米糠IDF的体外降糖活性

2.4.1 海水稻米糠IDF的葡萄糖吸附能力

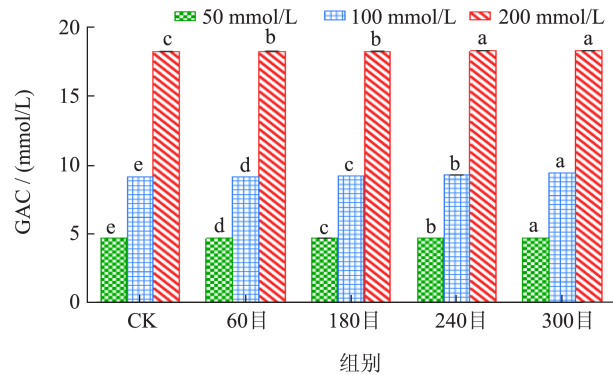


图 6 不同粒径海水稻米糠 IDF 的葡萄糖吸附能力
Fig.6 GAC of sea rice bran IDF with different particle size

图 6 显示的是不同粒径海水稻米糠不溶性膳食纤维对不同浓度的葡萄糖吸附能力。如图所示，不同粒径海水稻米糠 IDF 对葡萄糖均有较好的吸附效果。海水稻米糠 IDF 在高浓度葡萄糖的吸附量大于低浓度下的吸附量，这是由于纤维吸附量随葡萄糖浓度的变化

而变化。在同一葡萄糖浓度下，随着粒径的减小，超微粉的 GAC 显著增加。IDF-M300 对葡萄糖吸附能力最强，GAC 按葡萄糖浓度由低到高分别为 4.72、9.45、18.34 mmol/g，较对照组分别增加了 71.90%、2.81%、0.34%。Ma 等^[36]报道超微粉胡萝卜 IDF 对高浓度的 GAC 有显著增大的吸附影响。这可能是由于葡萄糖吸附的表面积和孔隙率的增加的原因。Chau 等^[37]报道，IDF 的葡萄糖吸附能力可能有助于将葡萄糖保持在低葡萄糖浓度，并减少小肠中可用葡萄糖的含量。研究结果一致表明，超微粉碎 IDF 的 GAC 显著高于 IDF-CK 的 ($P<0.05$)，尤其是 IDF-M300。因此，通过超微粉碎增强海水稻米糠 IDF 的葡萄糖吸附能力有助于改善肠道功能。

2.4.2 海水稻米糠IDF的葡萄糖扩散和延迟指数

表 1 和图 7 显示的是不同粒径海水稻米糠 IDF 的葡萄糖扩散和延迟指数，用来模拟葡萄糖在人体肠道中的扩散和吸收，在体外评价样品降低餐后血糖水平的效果。如图所示，对比同一时间不同处理的海水稻米糠不溶性膳食纤维对葡萄糖扩散和透析延迟效果，随着粒径的减小，透析液中葡萄糖含量不断减少和 GDRI 逐渐增加，与对照组相比，IDF-M300 时 IDF 的 GDRI 在透析时间范围内均为最大值，表明此粒径 IDF 稳定餐后血糖的能力最强。随着时间的延长，IDF-M300 的葡萄糖扩散量为 (5.41~84.57 mmol) 时，葡萄糖浓度低于其他 4 组。Niu 等^[32]研究发现粉碎处理三种谷物（糙谷、麦麸和米糠）后，GDRI 随着粒径减小而增大。根据 Zhu 等^[38]的研究，IDF 对 GDRI 的影响可以归因于颗粒尺寸的减小。结合葡萄糖扩散和 GDRI 数据发现，5 种粒径海水稻米糠 IDF 均能与葡萄糖结合，且超微粉碎加剧了这种情况。

表 1 不同粒径海水稻米糠IDF对葡萄糖扩散和葡萄糖透析延迟指数的影响

样品	透析液中的葡萄糖/mmol					
	20 min	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min
空白	44.33 (0) ^a	45.98(0) ^a	76.82(0) ^a	96.11 (0) ^a	100.23(0) ^a	112.93(0) ^a
CK	6.07 (86.29) ^{ab}	17.28 (62.29) ^c	60.00 (21.84) ^d	76.82 (20.06) ^d	95.62 (4.61) ^d	107.82 (4.53) ^d
M60	5.24 (88.16) ^a	14.31 (68.73) ^b	44.49 (42.04) ^c	71.87 (25.22) ^c	93.31 (6.90) ^c	105.18 (6.86) ^c
M180	7.22 (83.71) ^b	13.16 (71.30) ^{ab}	44.16 (42.46) ^b	64.12 (33.29) ^b	84.57 (15.61) ^b	101.88 (9.78) ^b
M240	9.86 (77.76) ^c	12.83 (72.09) ^{ab}	38.72 (49.56) ^b	63.62 (33.79) ^b	83.91 (16.28) ^b	100.40 (11.10) ^b
M300	5.41 (87.81) ^a	11.35 (75.32) ^a	31.14 (59.45) ^a	54.88 (42.89) ^a	68.24 (31.92) ^a	84.57 (25.12) ^a

注：1. 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)；2. 括号中的数据显示了各种样品的葡萄糖透析延迟指数。

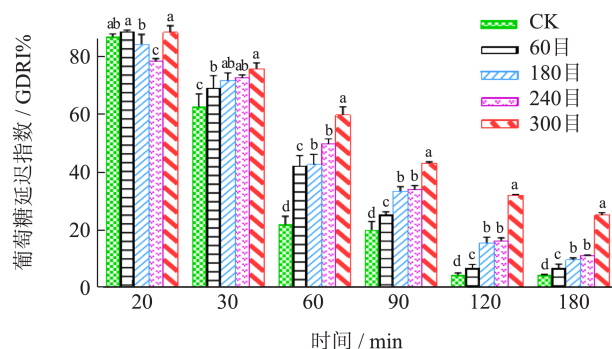


图7 不同粒径海水稻米糠 IDF 的葡萄糖延迟指数

Fig.7 GDRI of sea rice bran IDF with different particle size

3 结论

本研究主要以海水稻米为原料提取制备不溶性膳食纤维,对其进行常规粉碎和超微粉碎,分别得到不同粒径的海水稻米糠不溶性膳食纤维。结果表明:与对照组相比,超微粉碎处理 IDF 后,持水力和膨胀力显著增加, IDF-M300 具有最高的 WHC 和 SC,分别为 3.21 g/g 和 5.33 mL/g;持油力呈现先增加后下降的变化趋势,最高的是 IDF-M60,为 8.57 g/g,最低是 IDF-M300,为 3.51 g/g,超微粉米糠 IDF 阳离子交换能力显著增高。普通粉碎条件下,海水稻米糠 IDF 在 pH 值为 7 条件下对胆固醇的吸附能力明显高于 pH 值 2;而在超微粉碎下,海水稻米糠 IDF 在 pH 值为 2 条件下对胆固醇的吸附能力显著低于 pH 值为 7。海水稻米糠 IDF 对胆酸钠的吸附是一个动态过程;胆酸钠浓度为 3 mg/mL 时,粒径越小,胆酸钠吸附能力越高,超微粉 IDF-M300 的 CLAC 为 67.96 mg/g,可增强其降血脂的功能。海水稻米糠 IDF 随着粒径的减小明显提升了 NIAC,且在 pH 值为 2 条件下显著高于 pH 值为 7,更有利于在胃环境中清除 NaNO_2 浓度。高浓度(50~200 mmol/L)葡萄糖条件下,超微粉碎可明显提升海水稻米糠 IDF 葡萄糖吸附量,扩散抑制能力亦增加,稳定血糖作用显著。本研究表明海水稻米糠通过常规粉碎和超微粉碎后理化和功能特性呈不同的变化,为海水稻米糠 IDF 在糖尿病人和高血脂人群专用食品中的应用提供参考。

参考文献

- [1] 赖双定,龙宇,陈逸君,等.海水稻营养成分与加工利用研究进展[J].粮食与油脂,2022,35(6):13-15,35.
- [2] 何静盈,李海玲,皮彩玉,等.海水稻米糠饼干生产工艺优化及其品质特性分析[J].粮油食品科技,2022,30(4):111-119.
- [3] 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.

- [4] QIAO C C, ZENG F K, WU N N, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107057.
- [5] 张巧,何雨婕,李巧巧,等.超微粉碎对柠檬皮渣理化、功能特性的影响[J].食品科技,2023,48(08):90-97.
- [6] 王博,姚铁俊,李枝芳,等.超微粉碎对4种杂粮粉理化性质及功能特性的影响[J].食品科学,2020,41(19):111-117.
- [7] 唐雁.超微粉碎技术在无机盐类钙制剂中的应用[J].化工设计通讯,2019,45(2):190-210.
- [8] 黄浩然,张星启,温辉翠,等.球磨处理对菠萝蜜果皮不溶性膳食纤维结构及性能的影响[J].食品工业科技,2023,1:217-224.
- [9] 罗白玲,刘敦华,董文江,等.超微粉碎对咖啡果皮理化性质、结构及吸附能力的影响[J].热带作物学报,2020,41(6):1219-1226.
- [10] ZHAO G H, ZHANG R F, DONG L H, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its ph enolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. LWT, 2018, 87: 450-456.
- [11] MIRKO B, JOHN R, HOON K, et al. Sinapate dehydromers and sinapate-ferulate heterodimers in cereal dietary fiber[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(5): 1427-1434.
- [12] LUO X L, WANG Q, FANG D Y, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: structural characterization and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1461-1467.
- [13] XIA Q, GU M D, LIU J, et al. Novel composite gels of gelatin and soluble dietary fiber from black bean coats with interpenetrating polymer networks [J]. Food Hydrocoll, 2018, 83: 72-78.
- [14] BENDER A B B, SPERONI C S, MORO K I B, et al. Effects of micronization on dietary fiber composition, physicochemical properties, phenolic compounds, and antioxidant capacity of grape pomace and its dietary fiber concentrate [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 117: 108652.
- [15] 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.
- [16] LUO X L, WANG Q, ZHENG B D, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 109: 1003-1009.
- [17] ZHENG Y J, XU B F, SHI P Q, et al. The influences of acetylation, hydroxypropylation, enzymatic hydrolysis and crosslinking on improved adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fiber [J]. Food Chemistry, 2021, 368: 130883.
- [18] ZHU F M, DU B, XU B J. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 43-47.
- [19] ZHENG Y J, WANG X Y, TIAN H L, et al. Effect of four modification methods on adsorption capacities and *in vitro*

- hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre [J]. Food Research International, 2021, 147: 110565.
- [20] YANG T, YAN H L, TANG C H, et al. Wet media planetary ball milling remarkably improves functional and cholesterol-binding properties of okara [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106386.
- [21] 李安平, 谢碧霞, 钟秋平, 等. 不同粒度竹笋膳食纤维功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2008, 3: 83-85.
- [22] ZHU F M, DU B, XU B J. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 43-47.
- [23] MA S B, REN B, DIAO Z J, et al. Physicochemical properties and intestinal protective effect of ultra-micro ground insoluble dietary fibre from carrot pomace [J]. Food & Function, 2016, 7: 3902-3909.
- [24] 夏晓霞, 寇福兵, 薛艾莲, 等. 超微粉碎对枣粉理化性质、功能特性及结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 37-45.
- [25] 张明, 马超, 王崇队, 等. 不同粉碎粒度对大麦苗粉体品质和加工特性的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(7): 224-228.
- [26] YE F Y, TAO B B, LIU J, et al. Effect of micronization on the physicochemical properties of insoluble dietary fiber from citrus (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka) pomace [J]. Food Science and Technology International, 2015, 22: 246-255.
- [27] 滕硕. 超微粉碎对甜杏仁红衣理化性质的影响及工艺研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 26-27.
- [28] 汤小明. 豆渣膳食纤维的制备及其改性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [29] LI J X, XI H H, WANG A X, et al. Effects of high-pressure microfluidization treatment on the structural, physicochemical properties of insoluble dietary fiber in highland barley bran [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 129743.
- [30] YAN X G, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: the increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran [J]. Food Chemistry, 2015, 180: 106-115.
- [31] 方东亚. 改性笋头膳食纤维的结构、功能性质及在酸奶中的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [32] NIU L, GUO Q Q, XIAO J, et al. The effect of ball milling on the structure, physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from three grain bran [J]. Food Research International, 2023, 163: 112263.
- [33] MAEKYNNEN K, JITSAAARDKUL S, TACHASAMRAN P, et al. Cultivar variations in antioxidant and antihyperlipidemic properties of pomelo pulp (*Citrus grandis* [L.] Osbeck) in Thailand [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1-4): 735-43.
- [34] TIAN Y, WU T, SHENG Y N, et al. Effects of cavitation-jet technology combined with enzyme treatment on the structure properties and functional properties of OKARA insoluble dietary fiber [J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136286.
- [35] MA S B, REN B, DIAO Z J, et al. Physicochemical properties and intestinal protective effect of ultra-micro ground insoluble dietary fibre from carrot pomace [J]. Food & Function, 2016, 7: 3902-3909.
- [36] MA M M, MU T H, SUN H N, et al. Optimization of extraction efficiency by shear emulsifying assisted enzymatic hydrolysis and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin (*Cuminum cyminum* L.) [J]. Food Chemistry, 2015, 179: 270-277.
- [37] CHI-FAI C, CHIEN-HUNG C, CHING-YI L. Insoluble fiber-rich fractions derived from Averrhoa carambola: hypoglycemic effects determined by *in vitro* methods [J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37: 331-335.
- [38] ZHU Y L, JI X L, YUEN M, et al. Effects of ball milling combined with cellulase treatment on physicochemical properties and *in vitro* hypoglycemic ability of sea buckthorn seed meal insoluble dietary fiber [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 28(8): 820672.