

三种食物来源膳食纤维的理化性质与功能特性比较

张馨月^{1,2}, 张民¹, 邓梅², 董丽红², 马勤², 贾栩超², 陈燕霞², 张瑞芬^{2*}

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 为探究不同来源膳食纤维吸附能力的差异, 本研究以柚子、胡萝卜和米糠来源的不溶性膳食纤维为研究对象, 比较分析了其显微结构特征、理化特性, 胆酸钠吸附力与释放动力学、胆固醇吸附力、葡萄糖吸附力和亚硝酸盐清除能力等吸附特性。结果显示: 胡萝卜膳食纤维是表面较光滑的球形颗粒, 具有最佳的吸水膨胀力 (7.92 mL/g)、胆汁酸吸附力 (57.80 mg/g) 与模拟肠环境 (pH 值 7) 时的胆固醇吸附力 (11.72 mg/g); 米糠膳食纤维呈现出粗糙多孔的不规则结构, 拥有最佳的持油力 (3.00 g/g)、葡萄糖吸附力 (20.67 mmol/g)、亚硝酸盐吸附力 1 482.22 μg/g (pH 值 7), 2 836.23 μg/g (pH 值 2)、胆汁酸阻滞力 (4.47 mg/g) 和模拟胃环境 (pH 值 2) 时的胆固醇吸附力 (8.56 mg/g); 柚子膳食纤维表现为层叠的鳞片状结构, 具有最佳的持水力 (15.48 g/g)、黏度和优异的胆汁酸阻滞力 (3.55 mg/g)。可见, 三种不同来源的膳食纤维的显微结构与理化特性各具特点, 使三者的吸附特性各具差异。上述研究结果为不同种类膳食纤维在健康食品中的加工利用提供了数据支撑。

关键词: 不溶性膳食纤维; 吸附能力; 功能特性

文章编号: 1673-9078(2024)01-102-111

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0118

Comparison of the Physicochemical Properties and Functional Properties of Insoluble Dietary Fiber from Three Food Sources

ZHANG Xinyue^{1,2}, ZHANG Min¹, DENG Mei², DONG Lihong², MA Qin², JIA Xuchao²,
CHEN Yanxia², ZHANG Ruifen^{2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

(2. Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: To explore differences in adsorption capacity among dietary fiber from different sources, insoluble dietary fiber (IDF) from three different sources (pomelo, carrot, and rice bran) were selected for comparative analysis of their microstructural characteristics, physicochemical properties (including water and oil holding capacities, swelling capacity, and viscosity) and adsorption properties (including cholate adsorption capacity, diffusion kinetics of cholate release, cholesterol,

引文格式:

张馨月,张民,邓梅,等.三种食物来源膳食纤维的理化性质与功能特性比较[J].现代食品科技,2024,40(1):102-111.

ZHANG Xinyue, ZHANG Min, DENG Mei, et al. Comparison of the physicochemical properties and functional properties of insoluble dietary fiber from three food sources [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 102-111.

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31972082); 广东省青年科学基金项目 (2019A1515110633); 科技创新战略专项资金 (高水平农科院建设) (R2020PY-JG011; 202108TD)

作者简介: 张馨月 (1998-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品添加剂与功能配料, E-mail: 1317448484@qq.com

通讯作者: 张瑞芬 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 营养健康食品, E-mail: ruifenzhang@163.com

glucose and nitrite absorption capacities). Carrot IDF was composed of smooth spherical particles and exhibited the strongest swelling capacity (7.92 mL/g), and cholate (57.80 mg/g) and cholesterol (11.72 mg/g) adsorption capacities in a simulated intestinal environment (pH value 7) among the three IDFs. Rice bran IDF had a rough, porous and irregular structure and exhibited the strongest oil holding capacity (3.00 g/g), glucose adsorption capacity (20.67 mmol/g), nitrite absorption capacity (1 482.22 $\mu\text{g/g}$ at pH 7 and 2 836.23 $\mu\text{g/g}$ at pH value 2), cholic acid blocking capacity (4.47 mg/g) and cholesterol adsorption capacity (8.56 mg/g) in a simulated gastric environment (pH value 2). Pomelo IDF had a layered scale-like structure and exhibited the strongest water holding capacity (15.48 g/g), high viscosity, and excellent cholic acid blocking capacity (3.55 mg/g). The three dietary fibers from different sources had their own microstructural and physicochemical characteristics, which resulted in different adsorption properties. This study provided data support for the processing and utilization of different types of dietary fiber in health foods.

Key words: insoluble dietary fiber; adsorption capacity; functional properties

膳食纤维在调节人体健康中发挥了重要作用, 根据其在水中的溶解性, 分为可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 与不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF)。围绕各种不同来源 SDF 的健康功效已开展了大量的研究。近年来的研究表明, IDF 在改善人体健康中也发挥了重要作用。IDF 的持水性和吸水膨胀性能增加粪便体积和湿润度, 从而起到防止和减轻便秘作用; 通过其吸附特性减缓小分子糖的吸收, 降低餐后血糖, 通过吸附胆固醇、胆汁酸, 减少其重吸收, 起到改善脂代谢作用^[1]。此外, IDF 还可以通过其吸附性能减少机体对亚硝酸盐^[2]、重金属离子等有害物质的吸收。可见, IDF 的吸附特性是其发挥健康功效的重要基础。

谷物、水果和蔬菜是日常摄入膳食纤维的主要来源, 谷物膳食纤维中主要包含阿拉伯木聚糖、 β -葡聚糖、纤维素和木质素。糙米是常见的全谷物, 其米糠层是糙米碾制成精白米时去除的组织部位, 富含膳食纤维、 γ -谷维素和维生素等多种营养物质, 米糠中的膳食纤维的质量分数高达 25%~30%, 主要由 IDF 构成^[3], Zhang 等^[4]研究发现, 米糠膳食纤维能够改善 db/db 小鼠糖代谢紊乱。果蔬膳食纤维结构组成与谷物膳食纤维差异较大, 主要由纤维素和果胶构成, 胡萝卜是我国产量第二大的根茎类蔬菜, 含有丰富的 IDF^[5], 是一种具有代表性的高纤维蔬菜, Chua 等^[6]研究发现, 摄入胡萝卜膳食纤维有利于增加小鼠排便量与粪便水分含量, 降低盲肠氨浓度, 改善肠道健康。柚子是常见的柑橘属水果, 在我国南方各省份大量种植, 柚子中含有丰富的膳食纤维^[7], 特别是沙田柚, Deng 等^[8]研究发现, 其

IDF 含量是其他柚子品种的 1.50~2.66 倍, 且具有最佳的葡萄糖吸附能力, 是良好的膳食纤维来源。尽管有研究指出谷物膳食纤维比果蔬膳食纤维能更有效地降低心血管疾病风险^[9], 但不同来源 IDF 的功能特性差异尚不清楚。

因此, 本文选用米糠、胡萝卜和沙田柚 IDF 分别作为全谷物、蔬菜和水果来源 IDF 的代表, 比较其结构特性, 持水性、持油性等理化特性, 胆酸钠、胆固醇、葡萄糖吸附力等功能特性, 探究其理化和功能特性差异, 为不同来源 IDF 的利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

米糠, 购自广东省力泉食品有限公司; 胡萝卜、柚子, 购自当地超市。

α -淀粉酶 (120 KNU/g)、碱性蛋白酶 (2.4 AU/g)、淀粉葡萄糖苷酶 (300 AGU/mL), 购自诺维信 (中国) 有限责任公司; 胃蛋白酶 (250 U/mg)、胰酶 (4 \times USP)、胆酸盐、胰蛋白酶 (1 500 U/mg), 购自德国默克公司; 胆酸钠、葡萄糖, 购自上海源叶生物科技有限公司; 其它化学试剂均为国产分析纯级。

FW80 万能粉碎机, 天津泰斯特公司; T25 均质机, 广州 IKA 仪器设备有限公司; SQP 电子精密天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; Infinite M200pro 酶标仪, 奥地利 TECAN 公司; Merlin 扫描电镜, 德国 Zeiss 公司; AR1500EX 流变仪, 美国 TA 公司; SHA-BA 水浴摇床, 常州澳华仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 膳食纤维的提取制备

米糠不溶性膳食纤维 (Rice Bran Insoluble Dietary Fiber, RBIDF) 参考 Zhang 等^[4]的方法提取, 脱脂米糠经粉碎并过 80 目筛, 按固液比 1:10 (m/V) 加入蒸馏水搅拌混匀, 依次用 α -淀粉酶、蛋白酶和葡萄糖淀粉酶进行酶解处理, 4 000 g 离心 10 min, 沉淀物用蒸馏水洗涤至中性, 于 50 °C 热风干燥 48 h, 得到 RBIDF。将干燥后的 RBIDF 研磨以完全通过 80 目筛, 储存于干燥皿中待用。

胡萝卜不溶性膳食纤维 (Carrot Insoluble Dietary Fiber, CRIDF) 参考 Chau 等^[6]的方法提取, 将新鲜的胡萝卜切块、榨汁机榨汁后收集果渣, 进而按 1:10 (m/V) 的固液比将胡萝卜渣在蒸馏水中均质混匀 20 min, 70 °C 水浴下浸提 2 h, 过滤后将滤渣用体积分数 85% 乙醇洗涤 2 次, 将洗涤后的滤渣在 50 °C 下热风干燥 48 h 后, 粉碎过 80 目筛, 得到 CRIDF, 储存于干燥皿中备用。

柚子不溶性膳食纤维 (Pomelo Insoluble Dietary Fiber, PIDF) 参考 Deng 等^[8]的方法提取, 将榨汁后的沙田柚果渣以料液比 1:20 (m/V) 与蒸馏水混合, 并在 95 °C 下磁力搅拌浸提 2 h 后过滤收集滤渣, 重复上述操作两次后得到的滤渣用 70 °C 蒸馏水洗涤 3 次, 将洗涤后的滤渣在 50 °C 下热风干燥 48 h, 粉碎过 80 目筛, 得到 PIDF, 储存于干燥皿中备用。

1.2.2 膳食纤维中成分的测定

膳食纤维中各类成分含量均参照国标方法进行测定, 蛋白质含量通过 GB 5009.5-2016 凯氏定氮法测得, 淀粉含量通过 GB 5009.9-2016 中酶水解法测定; 灰分含量通过 GB 5009.4-2016 测定; 水分含量通过 GB 5009.3-2016 中的方法测得。

1.2.3 膳食纤维微观结构分析

用双面胶将不同的膳食纤维粉末样品固定在样品平台上, 在真空环境中喷涂铂金, 置于扫描电子显微镜下, 以 5 kV 的电子束观察拍摄, 放大倍数分别为 100 倍和 2 000 倍。

1.2.4 膳食纤维持水力、持油力、吸水膨胀力的测定

持油力 (Oil Holding Capacity, OHC): 称取 0.200 0 g 样品加入 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 大豆油后混匀, 室温下静置 30 min 后以 3 600 r/min 离心 20 min, 弃上清液后称量沉淀物的质量, 通过公式 (1) 计算持油力。

$$A = \frac{m_1 - m}{m} \quad (1)$$

式中:

A —持油力 (OHC), g/g;

m_1 —吸油后样品质量, g;

m —吸油前的样品质量, g。

持水力 (Water Holding Capacity, WHC): 称取 0.250 0 g 样品置于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 蒸馏水混匀, 室温放置 5 h 后离心 (3 600 r/min, 20 min), 倾倒上清液, 称量沉淀物质量, 通过公式 (2) 计算持水力。

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

式中:

B —持水力 (WHC), g/g;

m_2 —吸水后样品质量, g;

m_0 —吸水前的样品质量, g。

吸水膨胀力 (Swelling Capacity, SWC): 称取 0.200 0 g 样品并记录其自然堆积时的体积, 加入 10 mL 水完全混匀后室温静置 24 h, 记录样品的最终体积, 采用公式 (3) 计算吸水膨胀力。

$$C = \frac{v - v_0}{v_0} \quad (3)$$

式中:

C —吸水膨胀力 (SWC), mL/mL;

v —吸水膨胀后样品的体积, mL;

v_0 —吸水前样品的体积, mL。

1.2.5 膳食纤维的体外模拟消化

体外消化遵循 Minekus 等^[10]的方法, 口消化阶段: 分别准确称取 0.250 0 g 不同的膳食纤维样品和 250 μ L 蒸馏水加入 10 mL 离心管中, 冰浴下加入 500 μ L 模拟口腔消化液, 37 °C 下 120 r/min 水浴振荡反应 10 min 后, 迅速放入冰浴中终止反应; 胃消化阶段: 向口消化结束的体系中加入 840 μ L 模拟胃消化液, 用 0.1 mol/L HCl 将混合物 pH 值调至 3.0, 加入胃蛋白酶 160 μ L 后 37 °C 振荡反应 120 min, 放入冰水浴终止反应; 肠消化阶段: 用 0.1 mol/L NaOH 将胃消化后的体系 pH 值调至 7.0, 加入 2 mL 模拟肠消化液, 37 °C 下 120 r/min 于水浴摇床振荡反应 120 min 后放入冰水浴中终止反应。

其中模拟口腔消化液中含有唾液淀粉酶 (75 U/mL); 模拟胃消化液中含有胃蛋白酶 (2 000 U/mL); 肠消化液中含有胰酶 (其中胰蛋白酶活性 100 U/mL) 和胆酸盐 (10 mmol/L)。其他盐类如 KCl、KH₂PO₄、NaHCO₃、NaCl、MgCl₂(H₂O)₆、(NH₄)₂CO₃、CaCl₂(H₂O)₂

等参照 Minekus 等^[10]的方法加入。

1.2.6 膳食纤维体外消化液样品黏度测定

将上述模拟消化后的膳食纤维消化液置于沸水浴中加热 10 min 进行灭酶处理, 冷却至室温后, 将混匀后的消化液迅速滴加到流变仪平台上进行黏度测定, Gap 0.5 mm, 平板直径 40 mm, 测试温度 37 °C, 测定样品在剪切速率 0.01~200 s⁻¹ 间的粘度范围。

1.2.7 膳食纤维吸附性能的测定

1.2.7.1 膳食纤维吸附胆固醇能力 (Cholesterol Adsorption Capacity, CAC) 的测定

量取一定体积的新鲜分离的蛋黄液, 按 1:9 的体积比加入蒸馏水, 充分混匀后, 用 2 mol/L HCl 调节体系 pH 值到 2.0, 以模拟胃环境, 用 2 mol/L NaOH 调节体系 pH 值到 7.0, 以模拟肠环境, 称取 1.000 0 g 不同的膳食纤维样品分别加入 25 mL 上述不同 pH 的蛋黄稀释液中并混匀, 37 °C 下水浴振荡 2 h, 8 000 r/min 离心 20 min, 分离上清液, 取 1 mL 上清液依次加入乙酸 (90%, V/V) 5 mL、邻苯二甲醛 0.1 mL、浓硫酸 2 mL, 混匀且避光放置 20 min 后于 550 nm 处测吸光值, 以胆固醇标准品绘制标准曲线 $y=0.0091x+0.0459$ ($R^2=0.995$) 计算上清液中的胆固醇质量浓度, 通过公式 (4) 计算胆固醇吸附力。

$$D = (c_{\text{blank}} - c) \times \frac{v_1}{m_3} \quad (4)$$

式中:

D ——膳食纤维吸附胆固醇能力 (CAC), mg/g;

c_{blank} ——不加膳食纤维样品上清液的胆固醇质量浓度, mg/mL;

c ——膳食纤维样品吸附后上清液胆固醇质量浓度, mg/mL;

v_1 ——膳食纤维样品吸附后上清液体积, mL;

m_3 ——膳食纤维样品的质量, g。

1.2.7.2 膳食纤维吸附胆酸钠能力 (Bile Acid Adsorption Capacity, BAC) 的测定

精确称取 1.000 0 g 膳食纤维样品置于 100 mL 离心管中, 加入含有 100 mg 胆酸钠的生理盐水 50 mL, 混匀后将混合物 pH 值调至 7.0 并在 37 °C 下振荡 2 h, 8 000 r/min 离心 20 min, 分离全部上清液, 用糠醛比色法于 650 nm 下测定吸光度值, 以胆酸钠标准品绘制标准曲线 $y=0.3085x+0.0186$ ($R^2=0.995$) 计算上清液中的胆酸钠质量浓度, 以公式 (5) 计算胆酸钠吸附力。

$$E = m_4 - c_1 \times v_2 \quad (5)$$

式中:

E ——膳食纤维吸附胆酸钠能力 (BAC), mg/g;

c_1 ——上清液中胆酸钠的质量浓度, mg/mL;

v_2 ——上清液体积, mL;

m_4 ——样品中加入的胆酸钠质量, mg。

1.2.7.3 膳食纤维的胆酸钠释放动力学 (Cholate Release Kinetics, CRK) 测定

参考 Naumann 等^[11]的方法并进行修改, 将 1.2.5 中经过体外模拟消化后、含有 RBIDF、CRIDF、PIDF 的消化液样品转移至 12~14 ku 的透析袋中, 置于 36 mL 浓度为 50 mmol/L 的磷酸盐缓冲液 (pH 值 7) 进行透析, 将透析体系放入摇床进行水浴振荡 (120 r/min, 37 °C), 分别在 0、1、2、4、8、12 h 取 1 mL 缓冲液测定其中胆酸钠的质量浓度, 测定方法同 1.2.7.1, 标准曲线 $y=0.3356x-0.0056$ ($R^2=0.998$), 胆酸钠累计释放量通过公式 (6) 计算, 通过公式 (7) 的一级动力学方程拟合得到胆酸钠释放行为曲线, 胆酸钠阻滞量通过公式 (8) 计算得到。

$$H = \sum_{i=1}^{n-1} c_i \times v_3 + c_n \times v_n \quad (6)$$

式中:

H ——胆酸钠累计释放量 (CRK), mg/g;

c_i ——第 i 次取样时的缓冲液中胆酸钠质量浓度, mg/mL;

v_3 ——取样体积, mL;

c_n ——第 n 次取样时的缓冲液胆酸钠质量浓度, mg/mL;

v_n ——外液体积, mL。

$$c_t = c_f \times (1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

式中:

c_f ——达到平衡时的胆酸钠质量浓度, mg/mL;

k ——表观渗透率常数;

t ——取样时间, h。

$$Q = \frac{H_{\text{blank}} - H}{m_5} \quad (8)$$

式中:

Q ——胆酸钠阻滞量, mg/g;

H_{blank} ——不含膳食纤维样品的反应体系中胆酸钠累计释放量, mg;

H ——加入膳食纤维样品的反应体系中胆酸钠释放量, mg;

m_5 ——膳食纤维样品的质量, g。

1.2.7.4 膳食纤维吸附葡萄糖能力 (Glucose Adsorption Capacity, GAC) 的测定

参考 Peerajit 等^[12]的方法, 并做适当修改。准确称取 0.250 0 g 样品加入 50 mL 质量浓度为 1.00 mg/mL 的葡萄糖溶液中, 混匀后在 37 °C 水浴下振荡 6 h, 8 000 r/min 离心 20 min, 分离全部上清液, 采用 DNS 法测定上清液中葡萄糖质量浓度。以葡萄糖标

准品做标准曲线, $y=0.584 2x-0.012 9$ ($R^2=0.999$)。

$$I = \frac{(c_2 - c_3) \times v_4}{m_6} \quad (9)$$

式中:

I ——膳食纤维吸附葡萄糖能力 (GAC), mg/g;

c_2 ——膳食纤维样品吸附前反应体系的葡萄糖质量浓度, mg/mL;

c_3 ——膳食纤维样品吸附后上清液的葡萄糖质量浓度, mg/mL;

m_6 ——纤维样品的质量, g;

v_4 ——膳食纤维样品吸附后上清液的体积。

1.2.7.5 膳食纤维的亚硝酸盐吸附能力 (Sodium Nitrite Bonding Capacity, SNBC) 的测定

参考 Luo 等^[13]的方法, 将 1.000 0 g 不同的膳食纤维样品加入 50 mL 质量浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$ 的亚硝酸盐溶液中, 分别用 6 mol/L HCl 和 2 mol/L NaOH 将 pH 值调节至 2.0 和 7.0, 水浴振荡 2 h (120 r/min, 37 $^{\circ}\text{C}$) 后离心 (8 000 r/min, 20 min), 分离全部上清液, 取 1 mL 上清液与 2.5 mL 乙酸溶液 (60%, V/V) 和 5 mL ingrain 试剂 [等体积的 1 g/L N-(1-萘基)乙二胺二盐酸盐和 10 g/L 磺胺酸的混合溶液] 混合, 用超纯水补充总体积至 25 mL, 避光反应 25 min 后, 在 538 nm 处测定吸光值, 通过标准曲线 $y=0.115x-0.012$ ($R^2=0.999$) 计算上清液中亚硝酸盐质量浓度。不同膳食纤维样本的 SNBC 通过下式计算

$$J = (c_{\text{前}} - c_{\text{后}}) \times \frac{v_5}{m_7} \quad (10)$$

式中:

J ——膳食纤维的亚硝酸盐吸附能力 (SNBC), $\mu\text{g/g}$;

$c_{\text{前}}$ ——膳食纤维样品吸附前的亚硝酸盐质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

$c_{\text{后}}$ ——膳食纤维样品吸附后的亚硝酸盐质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

m_7 ——纤维样品的质量, g;

v_5 ——膳食纤维样品吸附后上清液的体积, mL。

1.2.8 数据统计分析

每个结果均来自 3 次以上的独立实验, 结果以“平均值 \pm 标准差”的形式表示, 采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析, 不同样品间的差异采用 Duncan's multiple range test 进行统计分析, $P < 0.05$ 表示差异达显著性水平。

2 结果与分析

2.1 三种不同来源膳食纤维的基本组成

三种膳食纤维的基本构成如表 1 所示, 其粗纤维质量分数均占 70% 以上, 与 Peerajit 等^[12]水洗提取的酸橙 IDF 的纯度 (72.44%) 和王司琪等^[14]碱洗提取的玉米耳 IDF 的纯度 (79.04%) 相当。RBIDF 的蛋白

质的质量分数最高, 占 16.79%, CRIDF 具有最高的淀粉含量, 质量分数为 6.74%, 这与米糠和胡萝卜本身这两类成分含量较高有直接关系, CRIDF 的灰分的质量分数为 4.39%, 高于其他两种膳食纤维。

表 1 三种不同来源膳食纤维的基本组成 (%)

Table 1 Proximate composition of insoluble dietary fiber

成分	米糠膳食纤维 (RBIDF)	柚子膳食纤维 (PIDF)	胡萝卜膳食纤维 (CRIDF)
蛋白质	16.79 \pm 0.06 ^c	9.52 \pm 0.03 ^b	1.85 \pm 0.07 ^a
淀粉	4.42 \pm 0.73 ^a	4.70 \pm 0.18 ^a	6.74 \pm 0.65 ^b
灰分	2.17 \pm 0.02 ^a	3.25 \pm 0.03 ^b	4.39 \pm 0.02 ^c
水分	5.77 \pm 0.02 ^a	8.07 \pm 0.02 ^c	7.99 \pm 0.01 ^b
粗纤维	70.86 \pm 0.74 ^a	74.46 \pm 0.18 ^b	79.03 \pm 0.58 ^c

注: 表中同一行数据后字母完全不同时, 表示样品间有显著性差异 ($P < 0.05$)。下表同。

2.2 三种不同来源膳食纤维的显微结构

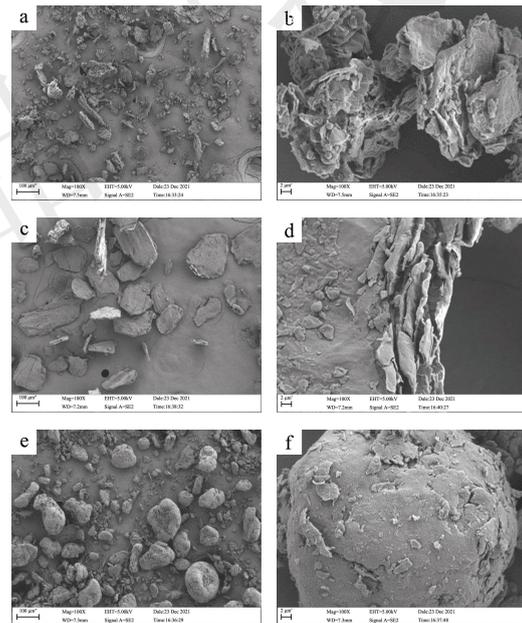


图 1 三种不溶性膳食纤维不同放大倍数的扫描电镜图

Fig.1 SEM graphs of three dietary fibers

注: a: RBIDF (100 \times); b: RBIDF (2000 \times); c: PIDF (100 \times); d: PIDF (2000 \times); e: CRIDF (100 \times); f: CRIDF (2000 \times)。

三种膳食纤维的扫描电镜图片如图 1, 可见三种 IDF 的显微结构特征有明显差异, RBIDF 呈不规则的小颗粒状 (A), 2 000 倍镜下可见其表面粗糙, 颗粒中多孔多缝隙, 组织结构松散 (B); PIDF 呈较大较薄的片层状结构 (C), 2 000 倍镜下可观察到其表面无孔隙, 截面处粗糙, 由数片薄层紧密层叠而成 (D), 这与人^[15]报道的柑橘属水果果肉 IDF 的结构特征类似; CRIDF 呈现大小不一的球形颗粒状结构, 球

体的表面光滑无明显孔隙 (E&F)。疏松多孔的结构能够增加膳食纤维的比表面积, 暴露其疏水基团, 有利于对其他成分的吸附与阻滞^[16]。

2.3 三种不同来源膳食纤维的理化性质分析

表 2 三种膳食纤维的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of insoluble dietary fiber

项目	持水性 /(g/g)	吸水膨胀力 /(mL/mL)	持油性 /(g/g)
RBIDF	4.53 ± 0.08 ^a	2.00 ± 0.25 ^a	3.00 ± 0.08 ^c
PIDF	15.48 ± 0.29 ^c	7.51 ± 0.13 ^b	2.65 ± 0.09 ^b
CRIDF	7.71 ± 0.21 ^b	7.92 ± 0.12 ^c	1.72 ± 0.04 ^a

由表 2 可知, PIDF 的持水性最强, 分别是 RBIDF 和 CRIDF 的 3.4 倍和 2 倍, CRIDF 的吸水膨胀力略高于 PIDF, 二者均显著性高于 RBIDF, 分别是其 3.5~3.7 倍。RBIDF 的持油性在三种膳食纤维中最强, 分别较 PIDF 和 CRIDF 高出 13.2% 和 74.4%。Isita 等^[17]发现, 米糠膳食纤维具有良好的持水性 (4.89 g/g) 和持油性 (4.77 g/g), 优于黑芝麻膳食纤维。高昂等^[18]发现, IDF 质量分数为 65% 的胡萝卜果渣的持水性为 6.63 g/g, 与本研究结果接近。

2.4 三种不同来源膳食纤维体外消化后黏度分析

三种膳食纤维体外消化液的表观黏度结果如图 2 所示。在 0.1~100 s⁻¹ 的剪切速率范围内, PIDF 的黏度最大, RBIDF 的黏度最低; 随着剪切速率的增大, RBIDF 和 PIDF 均呈现剪切变稀的假塑性流动行为, 而 CRIDF 的黏度随剪切速率的增大仅有较小幅度的降低。此外, 参考食糜在消化道中受到的剪切力, 比较了三种膳食纤维在剪切速率为 10 s⁻¹ 处的黏度^[19], 图 2b 为三种 IDF 在 10 s⁻¹ 剪切速率时以对数纵坐标表示的黏度差异。PIDF 的黏度为 0.50 Pa·s, 显著高于其他两种膳食纤维 ($P < 0.05$), Naumann 等^[11]也发现, 柑橘膳食纤维在剪切速率为 10 s⁻¹ 时的黏度介于 0.1~1 Pa·s 之间, 高于苹果、豌豆与小麦膳食纤维。

RBIDF 具有较低的持水性、吸水膨胀力与黏度, 并且具有最高的持油性, RBIDF 的性质特点与其纤维素骨架的刚性以及其中木质素的疏水作用力有关。Liu 等^[20]研究发现, 纤维素、半纤维素和木质素分别占米糠总膳食纤维的 26.51%、24.30% 和 18.06%, 这三种化学成分以复杂的网络结构形成了植物细胞壁坚硬的刚性骨架主体, 而木质素具有良好的疏水作用力与静电斥力, 这些结构与作用力的特点会通过影响 IDF 表面的疏水性影响其持水持油

等性质^[21]。沙田柚属于柑橘属, 柑橘纤维中包含果胶 (42.25%)、纤维素 (15.95%) 和半纤维素 (10.06%), 其中部分果胶作为植物细胞壁的组成部分, 与纤维素、半纤维素、细胞壁结构蛋白等成分相互交联, 在 IDF 的分离过程中较难溶解去除, 果胶中含有丰富的半乳糖醛酸与阿拉伯糖支链, 这些长半乳糖醛酸链会促进膳食纤维在水溶液中的交联与凝胶特性, 增加膳食纤维的粘度和持水性^[22]。剪切变稀是由于在剪切速率增加时, 溶液中网状纠缠的聚合物排列方式变得与剪切方向一致而降低流体阻力造成的, CRIDF 的黏度特点与其表面结构有关, 球形表面使颗粒间难以形成网状纠缠, 使体系更接近牛顿流体的特点。

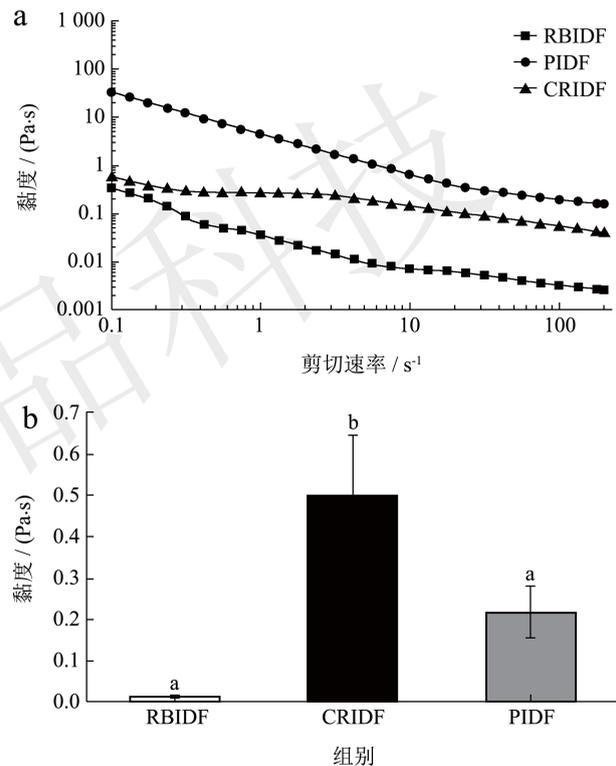


图 2 三种膳食纤维体外消化液的粘度比较

Fig.2 Comparison of the Viscosity between three dietary fiber digestion solution in vitro

注: (a) 三种膳食纤维体外消化液在不同剪切速率下的黏度曲线; (b) 三种膳食纤维体外消化液在剪切速率为 10 s⁻¹ 时的黏度值, a 图纵坐标轴为对数坐标; b 图柱上标注字母不同时, 表示差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。

2.5 三种不同来源膳食纤维的吸附性能分析

2.5.1 不同来源膳食纤维的胆固醇吸附力

膳食纤维的胆固醇吸附能力对于减少膳食胆固醇的吸收利用率, 减缓血脂水平升高有重要作用^[23]。本研究对比了三种膳食纤维在 pH 值 2 和 pH 值 7 条件下的胆固醇吸附能力。由图 3 可见, 在 pH 值 2

时, RBIDF 的胆固醇吸附力最高, 为 8.56 mg/g, 分别较 CRIDF 和 PIDF 高出 46.8% 和 165%。在 pH 值 7 条件下, CRIDF 显示出最高的胆固醇吸附能力, 为 11.72 mg/g, RBIDF 与 PIDF 的胆固醇吸附力相当, 分别为 9.33 mg/g 和 9.30 mg/g, 均显著性低于 CRIDF。就同一种膳食纤维而言, RBIDF 在 pH 值 2 和 pH 值 7 条件下的胆固醇吸附能力无显著性差异, 而 PIDF 和 CRIDF 在 pH 值 7 时的吸附能力均显著性高于 pH 值 2 条件下。

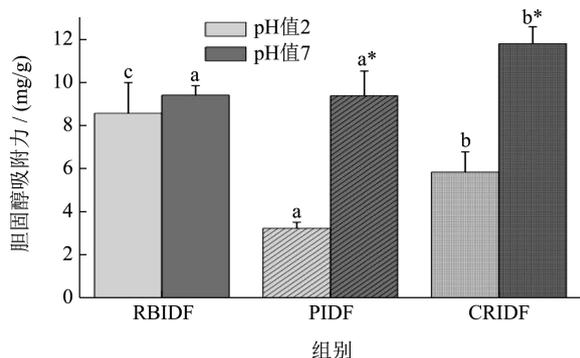


图3 三种膳食纤维在不同 pH 值条件下的胆固醇吸附力

Fig.3 Cholesterol adsorption capacity of 3 dietary fibers

注: 不同小写字母代表相同 pH 值下不同膳食纤维间差异达显著性水平 ($P < 0.05$); * 表示同种膳食纤维在不同 pH 值下吸附能力差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。

本研究测得的三种膳食纤维的胆固醇吸附力均低于纳豆芽孢杆菌发酵的小米麸膳食纤维 14.3 mg/g (pH 值 7), 9.2 mg/g (pH 值 2)^[24]。在 pH 值 2 时, Zhang 等^[25]测定的大豆皮膳食纤维的胆固醇吸附力 (5.9 mg/g) 低于本研究中的 RBIDF, 高于 PIDF 与 CRIDF。RBIDF 在 pH 值 2 与 pH 值 7 时的胆固醇吸附力没有显著性差异 ($P > 0.05$), 这与曾蓓蓓等^[26]对黑糯米糠中的米糠膳食纤维和 Liu 等^[20]对水洗提取的米糠膳食纤维的研究结果一致, 这可能与米糠膳食纤维多孔的表面结构和其中结合的大量酚酸基团有关, 在米糠膳食纤维中, 多种酚类物质与木质素通过酯键或醚键共价结合, 难以被解离, 在酸性条件下, 这些结合酚酸上的羧基解离, 暴露带负电荷的氧原子^[27], 而胆固醇作为一种两亲性脂质, 其亲水部与酚酸上的氧原子结合发生桥连, 有利于发挥吸附作用, 导致 pH 值 2 时的胆固醇吸附力增加。

2.5.2 不同来源膳食纤维的胆酸钠吸附力及其释放动力学

胆汁酸由胆固醇在肝脏中代谢生成系列代谢产物, 在小肠中参与脂肪与脂溶性维生素等营养物

质的消化吸收, 在调节机体脂质代谢稳态中发挥了重要作用^[28], 胆酸钠是人体中含量最高的胆汁酸之一。三种膳食纤维的胆酸钠吸附能力如图 4 所示, CRIDF 的胆酸钠吸附量最高, 达 57.80 mg/g, RBIDF 次之, 为 45.30 mg/g, PIDF 的胆酸钠吸附力最低, 为 39.43 mg/g。本实验中三种膳食纤维的胆汁酸吸附力高于 Kahlon 等^[29]报道的苹果膳食纤维 (6.37 mg/g)、葡萄膳食纤维 (21.5 mg/g) 和杏膳食纤维 (13.3 mg/g), 但低于 Jiang 等^[30]测定的人参膳食纤维的胆汁酸吸附力 (97 mg/g)。

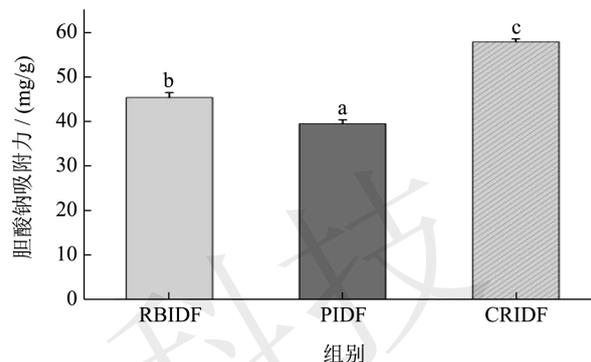


图4 三种不同来源膳食纤维的胆酸钠吸附力

Fig.4 Cholic acid adsorption capacity of three dietary fiber

注: 柱上标注字母不同时, 表示差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。

作为机体不能消化吸收的膳食成分, IDF 参与了食物从入口到转化为食物残渣随粪便排出的整个消化道旅程, 上述胆汁酸吸附力的测定方法只能反应膳食纤维在胆汁酸吸附量上的差异, 随着消化过程的推进, 受到肠道蠕动等作用力和消化液成分构成变化等的影响, 这些被 IDF 吸附的成分可能被进一步释放进入消化液。为了进一步分析膳食纤维在消化道内吸附和释放胆汁酸的动态过程, 本研究对体外消化后的膳食纤维的胆汁酸释放动力学进行了分析, 模拟膳食纤维携带其吸附的胆汁酸进入下消化道后, 对这些吸附的胆汁酸进一步游离至肠内容物时的阻滞作用, 从而对三种膳食纤维的胆汁酸吸附能力做出更全面的评价。图 5a 反应了三种膳食纤维消化液在透析过程中析出到缓冲液中的胆酸钠含量的动态变化情况, 由图可见, 三种膳食纤维消化液中胆酸钠的析出量随透析时间的延长逐渐增多, 至透析 4 h 时基本达到平台期, 8 h 时仅略有增加。RBIDF 和 PIDF 消化液中胆酸钠的析出量在整个透析过程中基本相当 ($P > 0.05$), 至透析 12 h 时分别为 11.78 mg/g 和 12.64 mg/g, 显著性低于 CRIDF

(15.27 mg/g)。图 5b 反应了在不同透析时间点被膳食纤维吸附的胆酸钠的量，即胆酸钠阻滞量，透析 12 h 后，RBIDF (4.47 mg/g) 和 PIDF (3.55 mg/g) 的胆酸钠阻滞力没有显著差异，均显著性高于 CRIDF (0.93 mg/g)。Naumann 等^[11]在比较不同膳食纤维的胆酸钠阻滞力时发现，大麦膳食纤维 (4.86 mg/g) 和燕麦膳食纤维 (4.37 mg/g) 的胆汁酸阻滞力远高于苹果膳食纤维 (0.45 mg/g) 和柑橘膳食纤维 (1.80 mg/g)。同类研究和本研究结果均表明：米糠等来源的谷物膳食纤维的阻滞胆汁酸释放能力优于大部分果蔬膳食纤维，而柑橘属来源的膳食纤维的胆汁酸阻滞力可能优于其他果蔬膳食纤维。

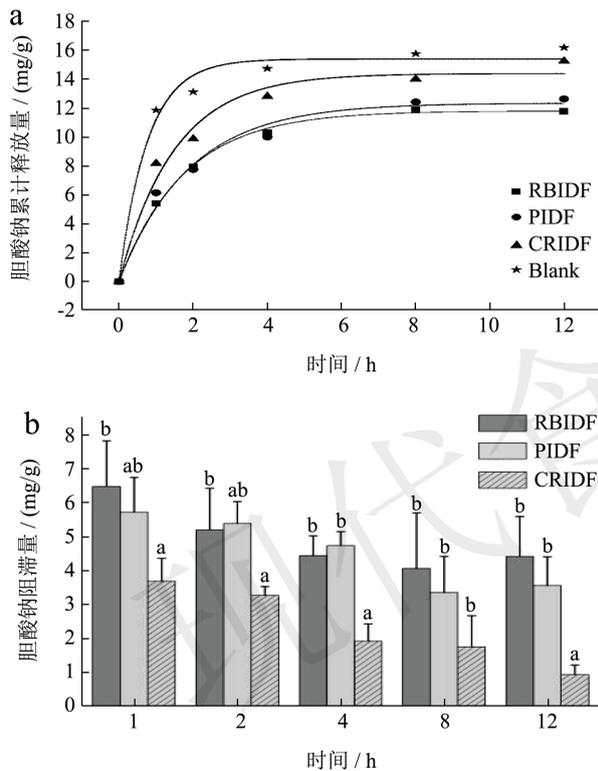


图 5 三种不同来源膳食纤维对其吸附的胆酸钠的释放情况比较

Fig.5 The diffusion kinetics and blocking capacity of cholic acid adsorbed by three dietary fiber

注：(a) 胆酸钠的释放动力学曲线；(b) 体外模拟消化不同时间后胆酸钠的阻滞量。图中不同小写字母代表相同时间点下不同膳食纤维间差异达显著性水平 ($P < 0.05$)。

膳食纤维的胆汁酸阻滞力与其黏度和疏水作用力有关^[31]。在本研究发现 RBIDF 较其他两种膳食纤维具有更高的持油性，RBIDF 等谷物膳食纤维中含有比果蔬膳食纤维更加丰富的木质素含量，为 IDF 贡献更强的疏水作用力，使膳食纤维持油性更高，也使 RBIDF 显示出强的胆汁酸阻滞力。PIDF 是三

种膳食纤维中黏度最高的，其胆汁酸阻滞力可能主要归因于由其黏附效应。CRIDF 的球型结构导致其在吸水后与胆酸盐负离子的接触面积增加，进而吸附更多的胆汁酸，然而光滑的表面使之在透析过程中难以阻滞胆汁酸的释放，从而显示出弱于 RBIDF 和 PIDF 的胆汁酸阻滞力。

2.5.3 不同来源膳食纤维的葡萄糖吸附力

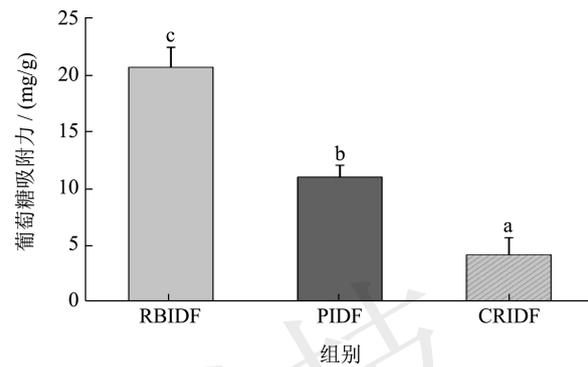


图 6 三种不同来源膳食纤维的葡萄糖吸附力

Fig.6 Glucose adsorption capacity of three dietary fiber

注：柱上标注字母不同时，表示差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。

膳食纤维对葡萄糖的吸附作用能够阻止膳食中的葡萄糖以及淀粉等其他碳水化合物消化生成的葡萄糖被小肠上皮细胞快速吸收，进而延缓餐后的血糖上升，降低餐后血糖水平，发挥降血糖作用。本研究中三种膳食纤维的葡萄糖吸附能力如图 6 所示，RBIDF 的葡萄糖吸附能力最强，为 20.67 mg/g，分别是 PIDF 和 CRIDF 的 1.88 倍和 4.94 倍。Ou 等^[32]测得麦麸 IDF 的葡萄糖吸附力为 17.77 mg/g，与本研究 RBIDF 接近，高于 CRIDF 和 PIDF。三种膳食纤维葡萄糖吸附能力的差异与谷物膳食纤维降血糖能力优于果蔬膳食纤维的研究报道相一致^[33]，Ou 等^[32]通过对比麦麸 IDF 与其他膳食纤维功能特性的差异发现，麦麸 IDF 的葡萄糖吸附和阻滞力均强于瓜尔胶、黄原胶及羧甲基纤维素，且在低浓度 (1 mmol/L) 的葡萄糖溶液体系中，仅麦麸 IDF 显示出葡萄糖吸附作用，研究人员依据上述各种膳食纤维的等温吸附行为特征推测出在低浓度的葡萄糖溶液中，膳食纤维对葡萄糖的吸附作用主要归因于其物理结构的差异，如疏松多孔的表面结构，而不是其黏度的差异。因此，本研究 RBIDF 显示出较 PIDF 与 CRIDF 更强的葡萄糖吸附能力至少也部分归因于 RBIDF 具有多孔、多缝隙的表观结构特征。

2.5.4 不同来源膳食纤维的亚硝酸盐吸附力

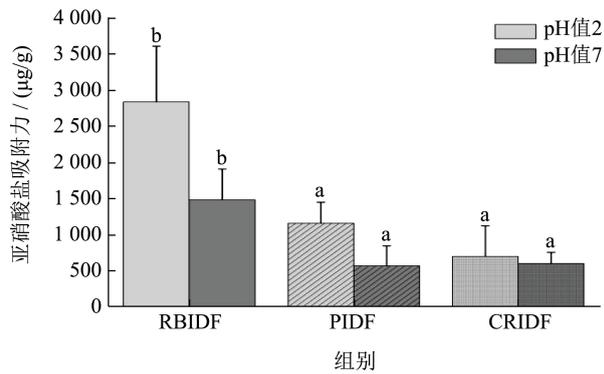


图7 三种不同来源膳食纤维的亚硝酸盐吸附力

Fig.7 Sodium Nitrite Bonding Capacity of three dietary fiber

注：图中不同小写字母代表相同 pH 值下不同膳食纤维间亚硝酸盐吸附力差异达显著性水平 ($P < 0.05$)。

亚硝酸盐是肉制品研制过程中常见的腌制剂，其被人体摄入后能够与氨基酸代谢产生的含氮类物质结合形成亚硝胺，后者是具有强致癌风险的化合物，同时还能够对人体的神经系统造成伤害。本研究分别用 pH 值 2 和 pH 值 7 的反应体系模拟胃和肠道内的 pH 值环境，探究了三种膳食纤维对亚硝酸盐的吸附能力。从图 7 可见，RBIDF 的亚硝酸盐吸附力显著高于另外两种膳食纤维 ($P < 0.05$)，RBIDF 在 pH 值 2 条件下亚硝酸盐吸附能力为 2836.23 $\mu\text{g/g}$ ，分别是 PIDF 和 CRIDF 吸附能力的 2.45 倍和 4.05 倍，RBIDF 在 pH 值 7 时的吸附能力为 1482.22 $\mu\text{g/g}$ ，分别是 PIDF 和 CRIDF 吸附能力的 2.60 倍和 2.46 倍。Chu 等^[23]测定的小米糠 IDF 在 pH 值 2 时的亚硝酸盐吸附力为 2320 $\mu\text{g/g}$ ，低于本实验中 RBIDF 的吸附力，高于 PIDF 与 CRIDF，pH 值 7 时小米糠 IDF 的亚硝酸盐吸附力为 350 $\mu\text{g/g}$ ，低于本研究中测定的三种膳食纤维。三种膳食纤维在 pH 值 2 条件下的亚硝酸盐吸附能力均稍强于 pH 值 7 条件下，但是两种 pH 值条件下没有显著性差异 ($P > 0.05$)。Zhang 等^[4]研究结果表明，RBIDF 共价结合有大量的酚酸，在酸性条件下， NO_2^- 与 H^+ 结合后生成 N_2O_3 ，与 RBIDF 的酚酸基团上带负电荷的氧原子结合^[34]，这可能是 RBIDF 较其他两种膳食纤维具有更强吸附亚硝酸盐能力的重要原因。

3 结论

作为常见的谷物、水果和蔬菜中的膳食纤维，RBIDF、PIDF 和 CRIDF 的显微结构差异显著，其不同成分的吸附特性也各具优势。RBIDF 具有粗

糙多孔的表面结构与最强的持油力，从而显示出较强的葡萄糖吸附力与胆汁酸阻滞力，在模拟胃 pH 值环境 (pH 值 2) 下，RBIDF 具有最高的亚硝酸盐吸附力和胆固醇吸附力，这是 RBIDF 中富含的结合态酚酸在酸性条件下带负电荷，产生离子交换吸附作用所致；PIDF 是层叠的鳞片状结构，具有最佳的持水力和黏度，PIDF 的高粘度也使其表现出较强的胆汁酸阻滞力；CRIDF 是表面较光滑的球形颗粒，具有最强的吸水膨胀力，吸水膨胀后的 CRIDF 与胆酸钠和胆固醇等物质的接触面积增加，从而表现出较其他两种膳食纤维更强的胆汁酸和胆固醇吸附力，但这一作用难以阻滞被吸附的胆汁酸随着反应体系的变化逐步被释放，从而表现出最低的胆酸钠阻滞力。上述研究结果为不同种类膳食纤维在健康食品中的加工利用提供了依据和参考。

参考文献

- [1] 桑嘉琪, 辜青青, 徐玉娟, 等. 提取方法对柚皮海绵层不溶性膳食纤维理化性质、功能及结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 149-154.
- [2] ZHAO D W, GUO C X, LIU X B, et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58: 1524-1537.
- [3] 朱仁威, 黄亮, 谭沙, 等. 米糠膳食纤维提取和改性及功能性质的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 12-16.
- [4] ZHANG X W, DONG L H, JIA X C, et al. Bound phenolics ensure the antihyperglycemic effect of rice bran dietary fiber in db/db mice via activating the insulin signaling pathway in skeletal muscle and altering gut microbiota [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(15): 4387-4398.
- [5] 袁驰, 赵婧, 周春丽, 等. 胡萝卜加工副产物综合利用研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(4): 161-164.
- [6] CHAU C, WU S, LEE M. Physicochemical changes upon micronization process positively improve the intestinal health-enhancement ability of carrot insoluble fibre [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1569-1574.
- [7] 王思远, 刘学铭, 陈智毅, 等. 富含膳食纤维的柚皮粉制备及其特性研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(11): 170-174.
- [8] 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, 40: 100890.
- [9] SHIVAKOTI R, BIGGS M L, DJOUSSÉ L, et al. Intake and sources of dietary fiber, inflammation, and cardiovascular disease in older US adults [J]. JAMA Netw

- Open. 2022, 5(3): e225012.
- [10] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113-1124.
- [11] Naumann S, Schweiggert-Weisz U, Eglmeier J, et al. *In vitro* interactions of dietary fiber enriched food ingredients with primary and secondary bile acids [J]. Nutrients, 2019, 11(6): 1424.
- [12] 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.
- [13] LUO X, WANG Q, ZHENG B, 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(2): 1003-1009.
- [14] 王司琪,王佳佳,李泊铮,等.提取方法对玉木耳膳食纤维结构特征和功能特性的影响[J].食品科学,2022,43(24): 93-101.
- [15] 桑嘉琪,李璐,温靖,等.蜜柑皮和蜜柑果肉膳食纤维的结构表征、理化和功能性质[J].食品与发酵工业,2022, 48(23):249-257.
- [16] LI Y, YU Y, WU J, et al. Comparison the structural, physicochemical, and prebiotic properties of litchi pomace dietary fibers before and after modification [J]. Foods, 2022, 11(3): 248.
- [17] ISITA N, MAHUA G. Studies on functional and antioxidant property of dietary fibre extracted from defatted sesame husk, rice bran and flaxseed, bioactive [J]. Carbohydrates and Dietary Fibre, 2015, 5(2): 129-136.
- [18] 高昂,梁文明,徐兴阳,等.挤压喷雾提高胡萝卜渣膳食纤维含量及其性质评价[J].食品研究与开发,2016,37(2): 97-101.
- [19] GUNNESS P, FLANAGAN B M, SHELAT K, et al. Kinetic analysis of bile salt passage across a dialysis membrane in the presence of cereal soluble dietary fibre polymers [J]. Food Chemistry, 2012, 134, 2007-2013.
- [20] LIU Y, ZHANG H, YI C, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment [J]. Food Chemistry, 2021, 16(342): 128352.
- [21] WANG N, MAXIMIUK L, FENN D, et al. Development of a method for determining oil absorption capacity in pulse flours and protein materials [J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(6): 1111-1117.
- [22] DIKEMAN C L, FAHEY G C. Viscosity as related to dietary fiber: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2006, 46(8): 649-663.
- [23] MAHDI C, CITRAWATI P, HENDRAWAN V F. The effect of rice bran on triglyceride levels and histopathologic aorta in rat (*Rattus norvegicus*) of high cholesterol dietary model [J]. Materials Science and Engineering, 2020, 833(1): 12022-12031.
- [24] CHU J, ZHAO H, LU Z, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto* [J]. Food Chemistry, 2019, 1(294): 79-86.
- [25] ZHANG N, HUANG C, OU S. *In vitro* binding capacities of three dietary fibres and their mixture for four toxic elements, cholesterol, and bile acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186 (1): 236-239.
- [26] 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.
- [27] MAQSOOD S, BENJAKUL S, ABUSHELAIBI A, et al. Phenolic compounds and plant phenolic extracts as natural antioxidants in prevention of lipid oxidation in seafood: a detailed review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(6): 1125-1140.
- [28] DONGOWSKI G. Interactions between dietary fibre-rich preparations and glycoconjugated bile acids *in vitro* [J]. Food Chemistry, 2007, 1(104): 390-397.
- [29] KAHLON T S, SMITH G E. *In vitro* binding of bile acids by bananas, peaches, pineapple, grapes, pears, apricots and nectarines [J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1046-1051.
- [30] JIANG G H, FENG X Y, WU Z G, et al. Development of wheat bread added with insoluble dietary fiber from ginseng residue and effects on physiochemical properties, *in vitro* adsorption capacities and starch digestibility [J]. LWT, 2021, 149: 111855.
- [31] ZACHERL C, EISNER P, ENGEL K H. *In vitro* model to correlate viscosity and bile acid-binding capacity of digested water-soluble and insoluble dietary fibres [J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 423-428.
- [32] OU S, KWOK K, LI Y, et al. *In vitro* study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 1026-1029.
- [33] INTERACT CONSORTIUM. The inter act consortium. Dietary fibre and incidence of type 2 diabetes in eight European countries: The EPIC-InterAct study and a meta-analysis of prospective studies [J]. Diabetologia, 2015, 58(7): 1394-408.
- [34] HONIKEL K O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products [J]. Meat Science, 2008, 78: 68-76.