

## 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维结构及性质比较研究

朱珂<sup>1,2</sup>, 董文江<sup>2,4\*</sup>, 程金焕<sup>3\*</sup>, 胡荣锁<sup>2,4</sup>, 何红艳<sup>3</sup>, 陈小爱<sup>2,4</sup>, 龙宇宙<sup>2</sup>, 黄家雄<sup>3</sup>

1. 宁夏大学食品与葡萄酒学院, 宁夏银川 750021; 2. 中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533; 3. 云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000; 4. 海南省特色热带作物适宜性加工与品质控制重点实验室, 海南万宁 571533

**摘要:** 本研究以咖啡果皮可溶性膳食纤维 (CPSDF) 与大豆、菊粉、大枣、燕麦、芹菜 5 种市售可溶性膳食纤维为原料, 系统分析了 6 种可溶性膳食纤维的粒径、单糖组成、微观结构、理化性质及功能特性。结果表明: CPSDF 的粒径分布较宽, 均一性弱于其余 5 种可溶性膳食纤维, 共检测出 10 种单糖组分; 红外光谱和扫描电镜结果表明, 不同来源可溶性膳食纤维具有相似的光谱分布, 但特征波段的强度略有不同, 且微观结构也有差异。X-射线衍射和热重分析表明, 6 种样品结晶度不同, CPSDF 结晶度最小 (38.84%), 但其热稳定性优于其他 5 种样品。CPSDF 的持油性为 (2.18±0.03)mg/g, 与其余 5 种膳食纤维样品无显著差异; CPSDF 的溶解性为 90.9%, 低于其余 5 种可溶性膳食纤维样品; CPSDF 的亚硝酸盐吸附能力显著优于其他 5 种样品, 吸附量为 7.93 mg/g。本研究结果可为咖啡果皮的开发利用提供理论基础, 为咖啡果皮可溶性膳食纤维的高值化利用提供理论支撑。

**关键词:** 咖啡果皮; 可溶性膳食纤维; 微观结构; 功能特性

中图分类号: TS273; TS209 文献标识码: A

## Comparison of the Microstructure and Functional Properties of Soluble Dietary Fiber from Coffee Peel and Other Five Different Sources

ZHU Ke<sup>1,2</sup>, DONG Wenjiang<sup>2,4\*</sup>, CHENG Jinhuan<sup>3\*</sup>, HU Rongsuo<sup>2,4</sup>, HE Hongyan<sup>3</sup>, CHEN Xiaoi<sup>2,4</sup>, LONG Yuzhou<sup>2</sup>, HUANG Jiexiong<sup>3</sup>

1. College of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning, Hainan 571533, China; 3. Institute of Tropical and Subtropical Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan, Yunnan 678000, China; 4. Key Laboratory of Suitability Processing and Quality Control of Characteristic Tropical Crops, Wanning, Hainan 571533, China

**Abstract:** In this study, the soluble dietary fiber of coffee peel and other five commercially available soluble dietary fibers obtained from soybean, inulin, jujube, oat, and celery were used as experimental materials. The particle size distribution, monosaccharide composition, microstructure, physico-chemical properties, and functional characteristics were compared analyzed. Results indicated that the particle size distribution of soluble dietary fiber in coffee peel was wider, and the homogeneity was relatively poorer than that of the other five soluble dietary fibers, but its monosaccharide composition was relatively rich, and a total of 10 kinds of monosaccharides were detected. Fourier transform infrared spectroscopy showed different samples had similar spectral characteristics, but a slightly different intensity response of characteristic bands. X-ray diffraction and differential scanning calorimetry results demonstrated that the crystalline of soluble dietary fiber from coffee peel was lower (38.84%) than that of other samples, but exhibited excellent thermal stability. The solubility and oil holding capacity of soluble dietary fiber in coffee peel was 90.9% and (2.18±0.03)mg/g, respectively. The nitrite absorption capacity of soluble dietary fiber in coffee peel was 7.93 mg/g, which was significant

收稿日期 2022-02-15; 修回日期 2022-03-17

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2021XDNY147); 云南省创新引导与科技型企业培育计划项目 (No. 202104BI090015); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630142022010)。

作者简介 朱珂 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全。\*通信作者 (Corresponding author): 董文江 (DONG Wenjiang), E-mail: dongwenjiang.123@163.com; 程金焕 (CHENG Jinhuan), E-mail: jinhuancheng-2006@163.com。

higher than that of the other samples. This study could provide theoretical basis for high value utilization and product development of coffee peel resource.

**Keywords:** coffee peel; soluble dietary fiber; microstructure; functional properties

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.02.019

咖啡为茜草科常绿灌木或小乔木，与可可、茶并称为世界三大饮料，原产于埃塞俄比亚。我国咖啡主要种植区为海南和云南，其中海南万宁的“兴隆咖啡”为中粒种罗布斯塔咖啡，具有醇厚度高、焦糖香味浓郁等特点，国家质检总局于 2007 年授予“兴隆咖啡”国家地理标志保护产品，并于 2021 年获得“中欧 100+100”地理标志互认互保产品。

据农业农村部统计，2019 年我国咖啡总产量为  $1.379 \times 10^5$  t，居全球第 13 位，随着咖啡产量的持续增长，咖啡加工过程中产生的副产物也在逐年增加，包括咖啡果壳、咖啡果皮、银皮、咖啡渣等，这些副产物大多被作为垃圾直接扔掉<sup>[1]</sup>，不仅造成资源浪费，还会造成环境污染。研究表明，这些副产物富含生物活性物质（咖啡因、绿原酸、葫芦巴碱等），在制药、食品、化妆品行业中可能具有潜在应用价值<sup>[2]</sup>。目前，国内外对于咖啡副产物的研究主要集中在生物燃料、饲料、生物吸附剂、抗氧化剂以及聚合物复合材料的制造等方面<sup>[3]</sup>。

咖啡果皮是湿法加工过程中产生的副产物，含 35%~80% 的碳水化合物，总膳食纤维含量可达 70% 左右，还含有 4%~12% 的蛋白质、0.5%~3% 的脂类、3%~10% 的矿物质、1%~9% 的单宁以及约 1% 的咖啡因，具有较高的利用价值<sup>[4]</sup>。胡荣锁等<sup>[5]</sup>采用响应面法优化了酶法提取咖啡果皮可溶性膳食纤维的条件，王彦兵等<sup>[6]</sup>通过响应面法优化了超声辅助提取咖啡果皮多酚的提取条件，确定了最佳提取条件。ESQUIVEL 等<sup>[7]</sup>对比了不同提取方法从阿拉比卡与罗布斯塔 2 个品种的咖啡果皮中提取生物活性成分，研究其抗氧化性的差异，结果表明，不同提取方法所得的活性成分含量及抗氧化性存在差异；DONG 等<sup>[8]</sup>研究了 5 种不同提取方法对咖啡果皮可溶性膳食纤维结构及性质的影响，结果表明剪切乳化辅助酶法的提取率最高，且所得样品具有较好的功能特性。

膳食纤维（dietary fiber, DF）是一类不易被人体消化酶消化的碳水化合物，包括纤维素、半纤维素、木质素、果胶等。根据其溶解性的不同

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）两大类。SDF 主要有果胶、树胶等亲水性胶体物质及部分半纤维素，具有重要的生理功能<sup>[9]</sup>，如降血糖、降血脂、调节血压等<sup>[10]</sup>。膳食纤维的来源不同，其理化特性、结构均有差异，目前，大量的果蔬、谷物及其副产物是膳食纤维的主要来源，如龙芳<sup>[11]</sup>研究了不同提取方式对芹菜可溶性膳食纤维结构和理化特性的影响。咖啡果皮可溶性膳食纤维作为一种功能性碳水化合物，其与常见的大宗豆类、果蔬中可溶性膳食纤维组成及结构存在哪些异同点尚无报道，解析咖啡果皮相对其他来源可溶性膳食纤维的优势和特色之处，对于咖啡果皮的深度开发利用具有重要的指导意义。

本研究通过对大豆、菊粉、大枣、燕麦、芹菜 5 种市售可溶性膳食纤维与传统水提法制备的咖啡果皮可溶性膳食纤维在粒径分布、单糖组成、微观结构、热稳定性及功能特性等进行比较，探究不同来源可溶性膳食纤维在单糖组成、微观结构、理化性质及功能特性等方面的异同点，分析咖啡果皮可溶性膳食纤维对比其他样品的优异性质，为咖啡果皮可溶性膳食纤维的开发利用奠定理论基础，为咖啡果皮副产物的高值化利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 材料与试剂 咖啡鲜果（全红果）采摘于中国热带农业科学院香料饮料研究所咖啡试验基地。乙醇（西陇科学有限公司）；氢氧化钠（深圳特谱超纯材料科技有限公司）；冰乙酸、邻苯二甲醛、硝酸银、溴化钾、 $\text{NaNO}_2$ 、盐酸萘乙二胺、对氨基苯磺酸等均为分析纯，购自上海阿拉丁公司；葡萄糖、阿拉伯糖、果糖、鼠李糖、木糖、甘露糖、岩藻糖、半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸均为色谱纯，购自上海阿拉丁公司。

1.1.2 仪器与设备 Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪（美国赛默飞世尔科技公司）；Phenom

Prox 台式显微能谱一体机 (荷兰复纳科学仪器有限公司); Avanti JXN-26 高速冷冻离心机 (美国贝克曼库尔特有限公司); ICS-5000+型离子交换色谱 (美国赛默飞世尔科技公司); Mastersize 3000 激光粒度分析仪 (英国马尔文仪器有限公司); Specord 250 Plus 紫外可见分光光度仪 (德国耶拿分析仪器股份公司); DSC2500 差示扫描量热仪 (美国 TA 仪器公司); 帕纳科 X'PertPRO (荷兰帕纳科公司)。

## 1.2 方法

1.2.1 咖啡果皮可溶性膳食纤维的制备 (1) 咖啡果皮预处理。湿法加工工艺流程: 采收→鲜果浮选→机械脱皮脱胶→水洗→干燥→咖啡豆。将湿法加工得到的咖啡果皮于 40℃ 热风干燥至水分含量为 11% 左右, 高速万能粉碎机粉碎后过 60 目筛, 置于密封袋中, 4℃ 保存备用。

(2) 咖啡果皮可溶性膳食纤维的提取。参考褚盼盼等<sup>[12]</sup>的方法并略作修改, 采用传统水提法提取可溶性膳食纤维, 称取 200 g 咖啡果皮粉至烧杯中, 按照料液比 1:40 (g/mL) 加入去离子水, 90℃ 水浴 60 min 后滤去残渣, 取上清液 50℃ 下旋转蒸发至原体积的 1/6, 加入 4 倍体积的乙醇溶液醇沉 1 h, 抽滤后取滤渣, 真空冷冻干燥后得咖啡果皮可溶性膳食纤维, 装入密封袋于干燥器中保存备用。

1.2.2 粒径分析 采用 Mastersize 3000 激光粒度分析仪干法测定可溶性膳食纤维粉末的粒径分布情况, 取样品 0.05 g 置于料斗中进行测量, 样品粒径以  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$  和  $D_{99}$  来表示, 分别代表样品颗粒累积分布为 10%、50%、90% 和 99% 时对应的粒径大小。

1.2.3 单糖组成分析 参考 LI 等<sup>[13]</sup>的方法, 准确称量 20 mg 样品于安瓿管中, 加入 2.0 mL 2 mol/L 的三氟乙酸溶液, 真空封管后于 110℃ 下加热水解 3 h, 旋干三氟乙酸后, 加入 1.0 mL 甲醇溶液洗涤、旋干, 重复 3 次, 加入去离子水稀释配置成 1.0 mg/mL 样品试液。

采用高效阴离子交换色谱-脉冲安培法 (HP-SEC) 测定 10 种单糖标准品 (葡萄糖-Glu、阿拉伯糖-Ara、木糖-Xyl、半乳糖-Gal、半乳糖醛酸-GalA、岩藻糖-Fuc、鼠李糖-Rha、果糖-Fru、半乳糖醛酸-Gala、葡萄糖醛酸-GlcA) 的组成及含量。仪器配置安培检测器, 利用 Diobex CarboPac PA20 (150 mm×3 mm, 6.5 μm) 高效阴离子色谱进

行分离, 配备 CarboPac PG20 保护柱 (30 mm×3 mm, 6.5 μm)。流动相: A 相, 去离子水; B 相, 200 mmol NaOH 溶液; C 相, 1 mol/L NaAC/25 mmol NaOH。流速为 0.5 mL/min, 进样量为 25 μL。洗脱条件: 0~5 min, 9% B; 5~14 min, 4% B; 14~24 min, 4% B、5% C; 24~24.1 min, 4% B、20% C; 24.1~40 min, 100% B。结果以 g/100 g 表示。

1.2.4 结构表征 (1) 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)。参考 GU 等<sup>[14]</sup>的方法, 准确称量干燥的 5.0 mg 可溶性膳食纤维粉于玛瑙研钵中, 加入 500 mg (1:100) 干燥的光谱级 KBr 在红外灯照射下研磨至极细, 混合均匀压片, 将压好的透明薄片置于样品槽中进行扫描分析, 扫描次数 64 次, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描范围为 400~4000 cm<sup>-1</sup>。

(2) 扫描电镜 (SEM)。扫描电镜可以对样品微区形貌、结构及成分进行观察和分析。参考 MA 等<sup>[15]</sup>的方法, 在 15 kV 条件下用扫描电子显微镜观察, 将微量的干燥样品使用导电胶固定于样品台上, 在真空条件下喷金后置于电子显微镜下扫描, 观察样品放大 200 倍时的微观结构。

(3) X-射线衍射 (XRD)。X-射线衍射是通过 X-射线在晶体中所产生的衍射现象反映样品的结晶特性及结晶度。参考 WEN 等<sup>[16]</sup>的方法略有修改, 采用 X'Pert PRO 对可溶性膳食纤维样品进行 XRD 测定。测定参数: 测试靶材为铜靶; 扫描速度为 2°/min; 扫描范围为 5~70°。

(4) 差示扫描量热法 (DSC)。采用 DSC2500 差示扫描量热仪进行可溶性膳食纤维的热稳定分析。称取少量样品, 置于 DSC 铝盘中压片密封, 置于室温平衡后, 以 10℃/min 的速度从 35℃ 升至 200℃。采用空铝盘作空白对照。

1.2.5 可溶性膳食纤维的理化性质测定 (1) 持油性。参考 ZHANG 等<sup>[17]</sup>的方法, 准确称量 0.5 g 可溶性膳食纤维样品 (质量为  $m$ ) 置于 10 mL 离心管中, 质量为  $m_0$ , 加入 5 mL 花生油混合均匀, 4℃ 下静置 1 h, 4800 r/min 离心 10 min, 弃掉上层油脂, 质量为  $m_1$ , 持油性公式如下:

$$\text{持油性(g/g)} = \frac{m_1 - m_0}{m} \quad (1)$$

式中,  $m_0$ 、 $m_1$  分别为离心前后可溶性膳食纤维粉质量,  $m$  为初始可溶性膳食纤维粉质量。

(2) 溶解性。准确称量 0.1 g 可溶性膳食纤维样品, 质量为  $m$ , 加入 5 mL 蒸馏水于 90℃ 水浴 1 h, 冷却至室温后 4200 r/min 离心 10 min, 上清液置于已称重培养皿 ( $m_0$ ) 中烘至恒重后, 称重

( $m_1$ )，溶解性公式如下：

$$\text{溶解性} = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $m_0$ 、 $m_1$  分别为烘干前后盛放可溶性膳食纤维培养皿的质量， $m$  为初始可溶性膳食纤维粉质量。

1.2.6 功能特性测定 (1) 胆固醇吸附能力。参考罗白玲等<sup>[18]</sup>的方法略作修改，采用邻苯二甲醛比色法制作标准曲线：分别取 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL 0.1 mg/mL 胆固醇标准溶液，冰乙酸对应补足至 0.5 mL，混匀后加入 0.5 mL 邻苯二甲醛 (OPA) 试剂 (50 mg 邻苯二甲醛溶于冰乙酸，定容至 100 mL) 和 4.0 mL 混合酸 (浓硫酸和冰乙酸等体积混合)，充分混匀后室温下静置 10 min，在 550 nm 处测定吸光度，绘制标准曲线。

取 2 个新鲜鸡蛋，分离蛋黄与蛋清，在蛋黄中加入 9 倍体积的蒸馏水用均质机打成均匀的乳液。取 0.5 g 样品加入 25 mL 搅打均匀的蛋黄乳液，调节 pH 至 7.0，37℃ 恒温震荡 2 h，4800 r/min 离心 10 min，取 1.0 mL 上清液，去离子水稀释 20 倍后测定吸光度。

$$\text{胆固醇吸附量}(\text{mg/g}) = (m_1 - m_2)/m \quad (3)$$

式中， $m_1$  为吸附前蛋黄乳液中胆固醇质量，mg； $m_2$  为吸附后上清液中胆固醇质量，mg； $m$  为样品质量，g。

(2) 胆酸盐吸附能力。参考 HUANG 等<sup>[19]</sup>的方法稍作修改。分别配置 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的胆酸钠水溶液，吸取不同浓度胆酸钠水溶液 1.0 mL 于比色管中，加入 6.0 mL 45% 硫酸和 1.0 mL 0.3% 糠醛，混合均匀后放入 65℃ 恒温水浴锅中加热 30 min，然后取出冷却至室温，取部分反应后的溶液在 620 nm 处测定吸光度，绘制标准曲线。

准确称量样品 0.25 g 于离心管中，加入含 0.1 g 胆酸钠的 0.15 mol/L 氯化钠溶液 25.0 mL，调节 pH=7，在 37℃ 下恒温震荡 2 h，4800 r/min 离心 10 min，取 1.0 mL 上清液按上述方法测定吸光度。

$$\text{胆酸盐吸附量}(\text{mg/g}) = (m_1 - m_2)/m \quad (4)$$

式中， $m_1$  为吸附前胆酸钠质量，mg； $m_2$  为吸附后上清液中胆酸钠质量，mg； $m$  为样品质量，g。

(3) 葡萄糖吸附能力。参考阮传英等<sup>[20]</sup>的方法略作修改，采用二硝基水杨酸 (DNS) 法制作标准曲线，配制 0.5 mg/mL 的葡萄糖标准液，分别吸取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 标准液于

比色管中，加入去离子水至 3.0 mL，加入 DNS 试剂 2.0 mL，在沸水浴中反应 10 min，空白管调零，在 540 nm 处测定吸光度，绘制标准曲线。

取 SDF 样品 0.1 g 与 25 mL 50 mmol/L 的葡萄糖标准液混合，在 37℃ 水浴中震荡 2 h 后，4800 r/min 离心 10 min，取上清液并按上述方法测定吸光度。由于样品本身含有葡萄糖，需另准备一组不加葡萄糖的样品作为阴性对照。

$$\text{葡萄糖吸附量}(\text{mg/g}) = (m_1 - m_2)/m \quad (5)$$

式中， $m_1$  为吸附前葡萄糖质量，mg； $m_2$  为吸附后上清液中葡萄糖质量，mg； $m$  为样品质量，g。

(4) 亚硝酸根离子吸附能力。参考 DONG 等<sup>[8]</sup>的方法略作修改，配制 0.1 mg/mL 的亚硝酸钠标准液，分别取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL 标准液于比色管中，加水至 2.0 mL，加入 2.0 mL 对氨基苯磺酸溶液 (4.0 μg/L)，再加入 1.0 mL 盐酸萘乙二胺 (2.0 μg/L)，室温下静置 15 min 后在 538 nm 处测量吸光度，绘制标准曲线。

取 SDF 样品 0.25 g 与 25.0 mL 标准液混合均匀，分别调节 pH 为 2 (模拟胃酸环境) 和 pH 为 7 (模拟小肠环境)，在 37℃ 水浴中震荡 2 h，4800 r/min 离心 10 min，取上清液 0.5 mL 按上述方法测定吸光度。

$$\text{亚硝酸盐吸附量}(\text{mg/g}) = (m_1 - m_2)/m \quad (6)$$

式中， $m_1$  为吸附前亚硝酸钠质量，mg； $m_2$  为吸附后上清液中亚硝酸钠质量，mg； $m$  为样品质量，g。

### 1.3 数据处理

采用 Origin 2021 (Northampton, MA, USA) 软件绘图，采用 SPSS 20.0 (IBM Corporation, New York, NY) 软件中 Duncan 多重比较进行一元方差分析并比较样品间指标的差异性。每个样品平行测定 3 次，结果以平均值±标准偏差形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒径分析

粒径大小与可溶性膳食纤维理化性质、功能特性密切相关。咖啡果皮、大豆、菊粉、大枣、燕麦和芹菜可溶性膳食纤维的中值粒径  $D_{50}$  分别为 131.49、57.17、55.33、64.43、50.17、39.33 μm，不同样品间粒径大小存在显著差异 (表 1)，粒径越小，比表面积越大，则活性基团暴露越多，进而影响其理化性质。咖啡果皮可溶性膳食纤维中值粒径显著大于其余 5 种样品，可能由于采用传统提取方式，所得样品粒径大小分布不均。由图 1

表 1 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维的粒径分布

Tab. 1 Particle size distribution of soluble dietary fiber from coffee peel and other five different sources

| 可溶性膳食纤维<br>Soluble dietary fiber | D <sub>10</sub> /μm     | D <sub>50</sub> /μm      | D <sub>90</sub> /μm       | D <sub>99</sub> /μm       | 比表面积<br>Specific surface<br>area/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 径距<br>Span/μm           |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--|-------------------------|
| 咖啡果皮                             | 27.83±1.58 <sup>a</sup> | 131.49±7.67 <sup>a</sup> | 368.57±10.23 <sup>a</sup> | 576.34±3.92 <sup>a</sup>  | 108.43±6.48 <sup>d</sup>   | 2.59±0.10 <sup>a</sup>  |
| 大豆                               | 22.93±0.31 <sup>c</sup> | 57.17±0.23 <sup>c</sup>  | 119.00±2.00 <sup>c</sup>  | 186.67±10.07 <sup>c</sup> | 144.35±1.93 <sup>cd</sup>  | 1.67±0.04 <sup>d</sup>  |
| 菊粉                               | 25.63±0.75 <sup>b</sup> | 55.33±3.49 <sup>c</sup>  | 105.67±5.51 <sup>d</sup>  | 162.00±8.00 <sup>d</sup>  | 141.32±5.57 <sup>cd</sup>  | 1.45±0.02 <sup>e</sup>  |
| 大枣                               | 19.50±0.87 <sup>d</sup> | 64.43±4.01 <sup>b</sup>  | 150.00±7.00 <sup>b</sup>  | 250.00±12.53 <sup>b</sup> | 158.19±7.78 <sup>bc</sup>  | 2.02±0.05 <sup>b</sup>  |
| 燕麦                               | 15.90±0.52 <sup>e</sup> | 50.17±1.60 <sup>c</sup>  | 105.67±3.79 <sup>d</sup>  | 166.67±9.29 <sup>d</sup>  | 192.80±5.89 <sup>b</sup>   | 1.79±0.03 <sup>c</sup>  |
| 芹菜                               | 12.47±0.55 <sup>f</sup> | 39.33±0.21 <sup>d</sup>  | 81.93±0.67 <sup>e</sup>   | 129.67±5.03 <sup>c</sup>  | 275.99±61.69 <sup>a</sup>  | 1.76±0.04 <sup>cd</sup> |

注：同列不同小写字母表示差异显著 ( $P>0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P>0.05$ ).

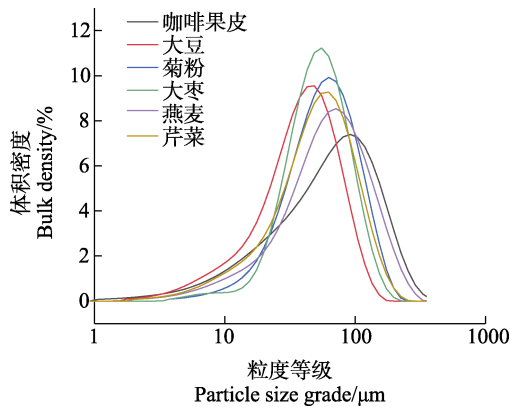


图 1 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维的粒径分布

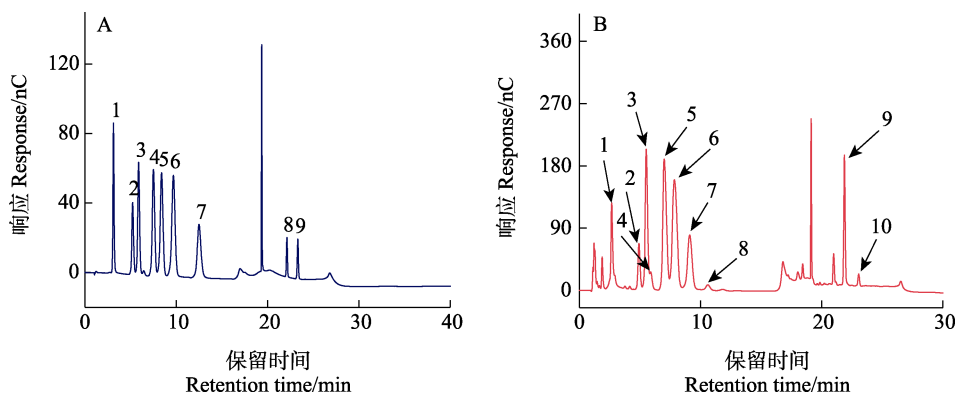
Fig. 1 Particle size distribution of soluble dietary fiber from coffee peel and other five different sources

也可看出,咖啡果皮可溶性膳食纤维粒径分布范围较宽,均一性较差,大枣可溶性膳食纤维分布最均匀。

## 2.2 单糖组成

多糖具有降糖、降脂、抗氧化及免疫调节等

生物活性,这些生物活性与单糖组成密不可分。果胶主要由半乳糖醛酸、半乳糖、鼠李糖、木糖及阿拉伯糖组成,纤维素主要由葡萄糖组成,半纤维素主要由木糖、葡萄糖、甘露糖和半乳糖组成。图 2 为 10 种单糖的标准曲线及咖啡果皮可溶性膳食纤维的单糖色谱图,由表 2 可知,不同来源可溶性膳食纤维在单糖种类、含量方面均存在差异。其中咖啡果皮可溶性膳食纤维的单糖种类最多,检测出 10 种单糖,半乳糖醛酸含量最高达 1.04 g/100 g,表明水提法制备的咖啡果皮可溶性膳食纤维主要成分为果胶,还包含部分纤维素及半纤维素。燕麦、大枣和芹菜可溶性膳食纤维中半乳糖含量最高,占比高达 87%以上,表明其主要组成为半纤维素及果胶物质。大豆和菊粉可溶性膳食纤维中含量最高的为葡萄糖,分别为 2.18、2.12 g/100 g,且占比为 66%,表示其纤维素含量较高。



A: 单糖标品; B: 咖啡果皮可溶性膳食纤维中单糖。1: 岩藻糖; 2: 鼠李糖; 3: 阿拉伯糖; 4: 半乳糖; 5: 葡萄糖; 6: 木糖; 7: 果糖; 8: 核糖; 9: 半乳糖醛酸; 10: 葡萄糖醛酸。

A: Standard monosaccharide; B: Monosaccharides in soluble dietary fiber of coffee peel. 1: Fuc; 2: Rha; 3: Ara; 4: Gal; 5: Glu; 6: Xyl; 7: Fru; 8: Rib; 9: GalA; 10: GlcA.

图 2 单糖离子色谱图

Fig. 2 Ion chromatogram of monosaccharide

表 2 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维的单糖含量  
Tab. 2 Monosaccharide content of soluble dietary fiber from coffee peel and different sources

| 单糖<br>Monosaccharide | 含量 Content/[g·(100 g) <sup>-1</sup> ] |            |           |           |           |            |
|----------------------|---------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|                      | 咖啡果皮 Coffee peel                      | 大豆 Soybean | 菊粉 Inulin | 大枣 Jujube | 燕麦 Oat    | 芹菜 Celery  |
| 岩藻糖                  | 0.04±0.01                             | -          | -         | -         | -         | -          |
| 鼠李糖                  | 0.40±0.01                             | -          | -         | 0.08±0.01 | 0.06±0.01 | -          |
| 阿拉伯糖                 | 0.61±0.01                             | 0.07±0.01  | 0.06±0.02 | 0.11±0.00 | 0.07±0.01 | 0.04±0.00  |
| 半乳糖                  | 0.07±0.02                             | 0.07±0.00  | 0.05±0.01 | 8.64±0.03 | 9.68±0.05 | 10.05±0.12 |
| 葡萄糖                  | 0.72±0.03                             | 2.18±0.08  | 2.12±0.19 | -         | -         | -          |
| 木糖                   | 0.73±0.01                             | 0.16±0.01  | 0.05±0.01 | 0.64±0.11 | 0.48±0.05 | 0.50±0.17  |
| 果糖                   | 1.01±0.03                             | 0.68±0.08  | 0.90±0.35 | 0.64±0.34 | -         | 0.91±0.38  |
| 核糖                   | 0.14±0.04                             | 0.12±0.01  | -         | -         | -         | -          |
| 半乳糖醛酸                | 1.04±0.18                             | -          | -         | 0.1±0.02  | -         | 0.05±0.00  |
| 葡萄糖醛酸                | 0.10±0.01                             | -          | -         | -         | -         | -          |

注：-表示未检出。

Note: - means not detected.

## 2.3 结构分析

2.3.1 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析 FT-IR 是研究多糖类化合物官能团及化学键常用的方法之一。由图 3 可知, 6 种可溶性膳食纤维均具有典型的多糖吸收峰, 除了某些特征波段的强度不同之外, 6 种样品具有相似的光谱分布, 样品在  $3365.4\text{ cm}^{-1}$  附近显示宽而强烈的特征峰, 是 O-H 的伸缩振动形成的吸收峰<sup>[21]</sup>, 另外 5 种可溶性膳食纤维在  $3365.4\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰均强于咖啡果皮可溶性膳食纤维, 表明其氢键含量较高。 $2933.3\text{ cm}^{-1}$  处的弱峰是由亚甲基 C-H 伸缩振动引起, 代表半纤维素的典型结构。 $1681.1\text{ cm}^{-1}$  处的峰可能是由于糖醛酸的 C=O 伸缩振动产生,  $1411.8\text{ cm}^{-1}$  处的峰可能与 O-H 的伸缩振动和 C-H 的弯曲振动有关<sup>[22]</sup>。此外,  $950\sim 1200\text{ cm}^{-1}$  范围内的吸收峰被认为是碳水化合物的特征区域<sup>[23]</sup>, 可以识别糖类的组成, 在这一区域, 6 种可溶性膳食纤维谱图表现出细微差异, 与其单糖组成具有一定的差异结果一致。

2.3.2 扫描电镜 (SEM) 分析 SEM 是研究膳食纤维微观结构的最重要方法之一。由图 4 可知, 咖啡果皮可溶性膳食纤维为不规则块状结构、大小不一、表面有不规则褶皱和蜂窝状小孔。大豆可溶性膳食纤维具有较光滑的块状结构, 表面有不规则褶皱及小孔使其表现出吸附作用。菊粉为光滑的块状结构、表面褶皱及小孔较少, 表面积较小。大枣、燕麦、芹菜均为不规则块状结构、表面褶皱及小孔较多, 但颗粒大小不同, 与粒径分析结果一致。以上结果表明, 不同来源可溶性膳食纤维具有不同形态结构。

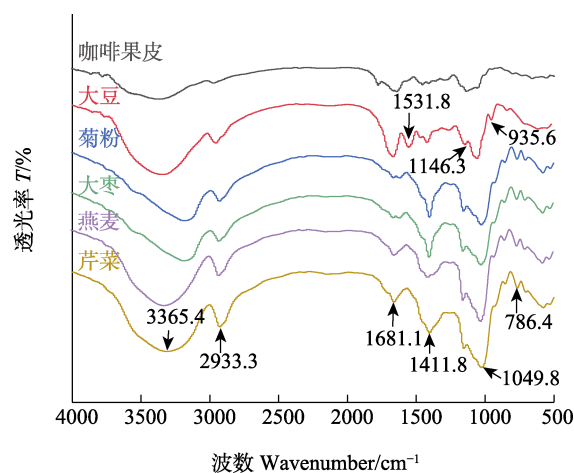
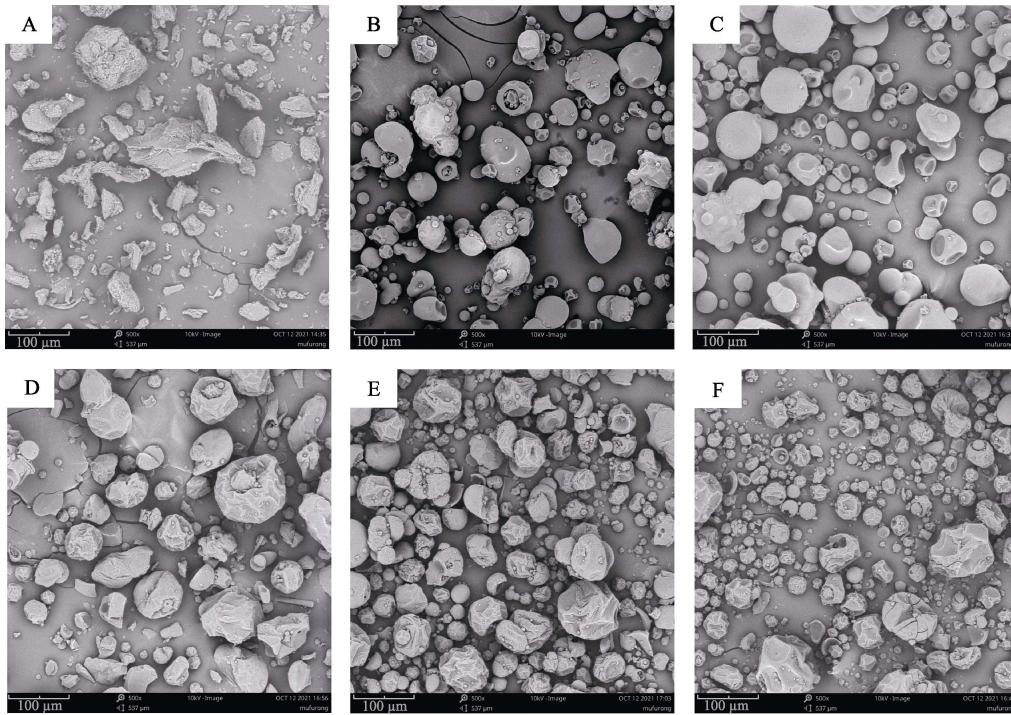


图 3 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维的红外光谱图  
Fig. 3 Infrared spectra of soluble dietary fiber from coffee peel and different sources

2.3.3 X-射线衍射 (XRD) 分析 XRD 是通过 X-射线在晶体中所产生的衍射现象反映样品的结晶特性及结晶度。其峰形可以表示晶体类型, 衍射峰强度表示结晶度, 结晶度对食品材料力学及热性能具有很大影响。由图 5 可知, 咖啡果皮、大豆、菊粉、大枣、燕麦和芹菜 6 种样品的结晶度分别为 38.8%、42.6%、45.5%、46.1%、49.5%、48.3%。6 种可溶性膳食纤维均在  $20^\circ$  附近有显著的结晶衍射峰, 被认为是典型纤维素 I 型结构, 咖啡果皮可溶性膳食纤维在此处的衍射强度显著低于其余 5 种样品, 在  $14.2^\circ$ 、 $29.5^\circ$ 、 $30.6^\circ$  和  $32^\circ$  等附近还存在一些较小的弥散衍射峰, 表明其存在部分结晶<sup>[8]</sup>, 6 种样品的结晶度, 以及在结晶区与非晶区的分布情况具有一定的差异。



A~F 分别为咖啡果皮、大豆、菊粉、大枣、燕麦、菊粉在 500×下的扫描电镜图。  
A-F are scanning electron micrographs of coffee peel, soybeans, inulin, jujube, oats, and inulin at 500× magnification, respectively.

图 4 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维扫描电镜图

Fig. 4 Scanning electron micrograph of soluble dietary fiber of coffee peel and other different sources

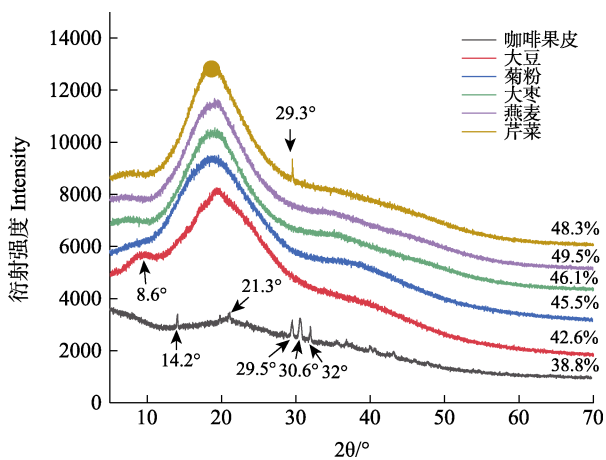


图 5 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维 X-射线衍射图

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of soluble dietary fiber from coffee peel and othe five different sources

2.3.4 热稳定性分析 热稳定性是评价物料应用于食品中的一个重要指标, 可根据物质热变性过程中温度和能量的变化来研究其结构稳定性和构象的变化。由图 6 可知, 6 种不同来源可溶性膳食纤维样品的热流曲线均表现为吸热峰, 吸热峰的峰值代表了变性温度, 峰值的差异可能与氢键的类型及数量有关, 峰值越高, 则需要更多的能量来破坏氢键<sup>[24]</sup>。菊粉可溶性膳食纤维峰值在 110℃

左右, 其余 5 种样品的吸热峰的峰值均在 120℃左右。6 种样品的焓变值 ( $\Delta H$ ) 均在 160.41~329.93 J/g 之间, 焓变值越大, 表示其热稳定性越好, 热流强度越大则表示其热稳定性越流强度低于其他几种可溶性膳食纤维样品, 说明咖啡可溶性膳食纤维样品的热稳定性优于其他几种膳食纤维样品。

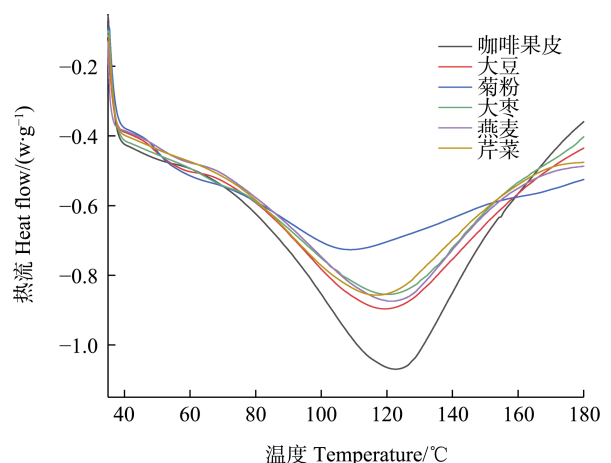


图 6 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维 DSC 曲线

Fig. 6 DSC curves of soluble dietary fiber from coffee peel and other five different sources

## 2.4 理化性质分析

溶解性、持油性是评价可溶性膳食纤维的重

要指标。持油性有利于食品在加工过程中保留油脂，在肠道中发挥调节代谢作用。表 3 为 6 种不同来源可溶性膳食纤维的持油性及溶解性，6 种样品的持油性无显著差异，但咖啡果皮 (2.18 g/g) 与芹菜可溶性膳食纤维 (2.01 g/g) 略高于其他 4 种样品，可能是由于其表面褶皱较多，表面积较大。溶解性

的高低与粒径大小及结构密切相关，菊粉可溶性膳食纤维的溶解性最高，为 99.53%±0.29%，其次为燕麦样品 (99.07%±0.54%)，而咖啡果皮与大豆可溶性膳食纤维溶解性较小，这可能与其粒径分布有关。咖啡果皮可溶性膳食纤维粒径分布较广，均一性较差，因此其溶解度相对较低。

表 3 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维的理化性质

Tab. 3 Physicochemical properties of soluble dietary fiber from coffee peel and five different sources

| 指标 Index                 | 咖啡果皮 Coffee peel        | 大豆 Soybean              | 菊粉 Inulin               | 大枣 Jujube                | 燕麦 Oat                  | 芹菜 Celery               |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 持油性/(g·g <sup>-1</sup> ) | 2.18±0.03 <sup>a</sup>  | 1.94±0.24 <sup>a</sup>  | 1.87±0.03 <sup>a</sup>  | 1.89±0.03 <sup>a</sup>   | 1.94±0.04 <sup>a</sup>  | 2.01±0.45 <sup>a</sup>  |
| 溶解性/%                    | 90.90±1.04 <sup>c</sup> | 90.37±0.90 <sup>c</sup> | 99.53±0.29 <sup>a</sup> | 92.63±1.16 <sup>bc</sup> | 99.07±0.54 <sup>a</sup> | 94.23±1.79 <sup>b</sup> |

注：同行不同小写字母表示差异显著 ( $P>0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ( $P>0.05$ ).

## 2.5 功能特性分析

2.5.1 胆固醇吸附能力 大量研究表明膳食纤维能降低血清总胆固醇的含量保护心血管<sup>[25]</sup>。由图 7A 可知，6 种不同来源的可溶性膳食纤维对胆固醇的吸附能力存在显著差异。大枣可溶性膳食纤维的胆固醇吸附量最高为 33.65 mg/g，菊粉的胆固醇吸附量最低为 1.82 mg/g；刘晓贺等<sup>[26]</sup>对比研究豌豆与菊粉物化特性差异，其中菊粉对胆固醇吸附量为 2.24 mg/g。咖啡果皮可溶性膳食纤维的胆固醇吸附量为 22.43 mg/g，高于大豆及菊粉，但低于大枣、芹菜、燕麦可溶性膳食纤维，具有作为优质膳食纤维来源的潜质。

2.5.2 胆酸钠吸附能力 胆汁酸由肝脏内合成并在胆囊中储存，在食物刺激下从胆囊中进入小肠，参与肝肠循环起到调节胆固醇代谢的作用。研究表明胆酸钠的吸附能力随其用量的增加而增强，胆酸钠浓度越高，膳食纤维的吸附能力越强。由图 7B 可知，在 pH 为 7.0 时，6 种不同来源可溶性膳食纤维对胆酸钠的吸附能力具有显著差异，大豆、大枣、燕麦、芹菜可溶性膳食纤维的吸附量高于咖啡果皮与菊粉，可能是由于胆酸钠浓度较低。

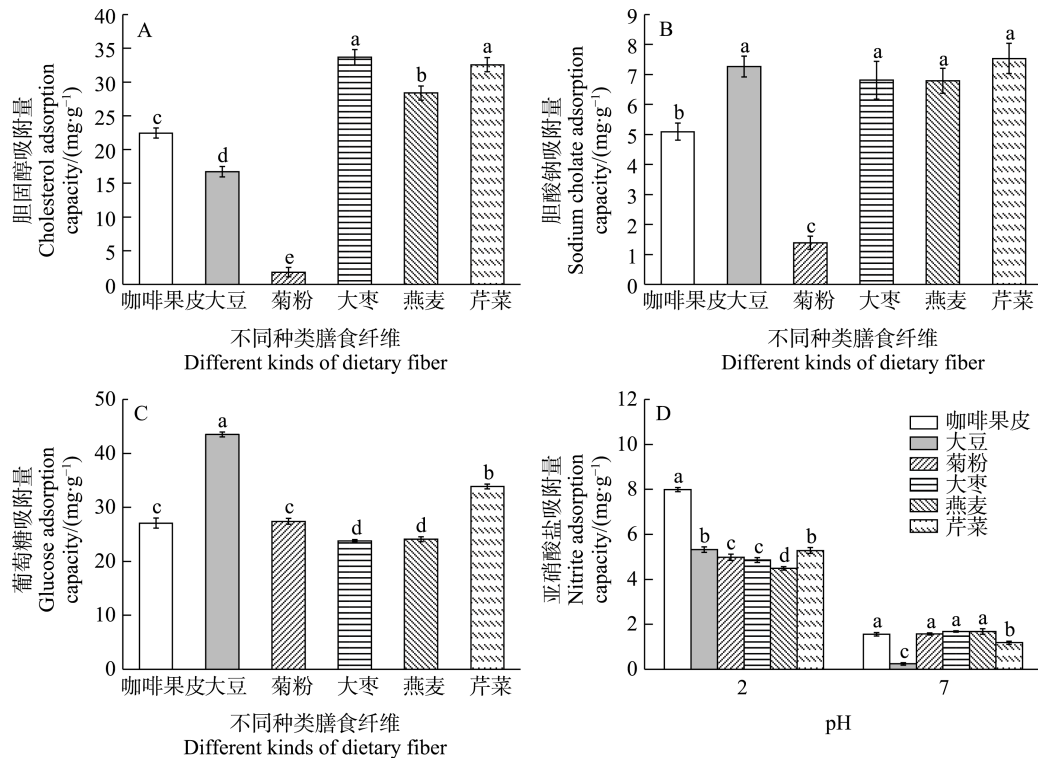
2.5.3 葡萄糖吸附能力 葡萄糖吸附能力也是膳食纤维的功能特性之一。可溶性膳食纤维可与肠液中的葡萄糖结合，导致餐后血糖水平下降，达到降血糖的目的。由图 7C 可知，6 种样品的吸附量大小依次为：大豆 (43.50 mg/g) > 芹菜 (33.85 mg/g) > 咖啡果皮 (27.40 mg/g) > 菊粉 (27.06 mg/g) > 燕麦 (24.10 mg/g) > 大枣 (23.80 mg/g)，其吸附量存在差异，可能也与葡萄糖浓度有关。郭增旺等<sup>[27]</sup>研究了不同粒度大豆皮的理化及功能特性，结果表明样品对葡萄糖的吸附量可随葡萄糖浓度的

升高而升高，浓度越高，与样品的网状结构接触几率越大，对葡萄糖的束缚力就会增强。

2.5.4 亚硝酸盐吸附能力 在胃酸环境中，亚硝酸盐与仲胺、叔胺、酰胺反应生成强致癌作用的亚硝胺化合物。研究表明，亚硝酸盐在 pH 为 2.0 条件下的吸附量显著大于 pH 为 7.0 时的吸附量。由图 7D 可知，6 种不同来源的可溶性膳食纤维在胃酸环境中吸附亚硝酸盐的能力显著高于小肠环境。在 pH 为 2.0 时，咖啡果皮可溶性膳食纤维的吸附量为 7.93 mg/g，显著高于其他 5 种样品。在 pH 为 7.0 时，咖啡果皮、菊粉、大枣、燕麦可溶性膳食纤维的亚硝酸盐吸附量高于芹菜与大豆样品。以上结果表明，pH 对样品的亚硝酸盐吸附量影响较大，不同来源可溶性膳食纤维在相同 pH 条件下，吸附量也存在显著差异。

## 3 讨论

本研究对比了 6 种不同来源可溶性膳食纤维理化性质、结构及功能特性方面的差异。膳食纤维被归类为从植物细胞壁中提取的多种不可消化营养素，被称为生物体的第 7 种重要营养素，在机体健康方面扮演着重要的角色，其中可溶性膳食纤维具有更高的生理功能。可溶性膳食纤维的来源不同其结构、理化性质及功能特性存在显著差异。罗白玲等<sup>[18]</sup>研究了超微粉碎对咖啡果皮膳食纤维结构及性质的影响，其中超微粉碎可以有效改善样品的功能性质，但本研究中粒径大小与功能特性无显著关联，可能是由于样品的某些特性不仅与粒径大小有关，还与样品的来源、提取方法、加工参数以及实验条件等因素有关。本研究中 6 种可溶性膳食纤维在结构方面均具有多糖



A: 胆固醇吸附能力; B: 胆酸钠吸附能力; C: 葡萄糖吸附能力; D: 亚硝酸盐吸附能力。

A: Cholesterol adsorption capacity; B: Sodium cholate adsorption capacity; C: Glucose adsorption capacity; D: Nitrite adsorption capacity.

图 7 咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维的功能特性

Fig. 7 Functional characteristics of soluble dietary fiber from coffee peel and five different sources

的典型特征,其扫描电镜结果与栗俊广等<sup>[28]</sup>在研究鹰嘴豆、麦麸、大豆、葡萄膳食纤维性质差异的研究中得到的结果类似。本研究中不同来源的可溶性膳食纤维在功能特性方面也表现出显著差异,咖啡果皮可溶性膳食纤维在亚硝酸盐吸附作用中表现优异,与 GAN 等<sup>[29]</sup>以葡萄柚皮为原料,探究微波辅助提取法对其结构及功能特性的影响研究中的结果类似,亚硝酸盐的吸附能力在 pH 2.0 时显著强于 pH 7.0。这可能是因为胃酸环境中存在的酚酸如阿魏酸,有利于增强亚硝酸盐的清除能力,使样品的吸附能力更强。其余几种吸附能力可能也与相关实验参数有关,如钟希琼等<sup>[30]</sup>在研究麦麸、米糠、豆渣、甘薯、大薯、葛根、香芋和马铃薯 8 种膳食纤维的胆酸钠吸附能力时,胆酸钠浓度为 2.0 mg/mL 与 3.0 mg/mL 时膳食纤维的吸附量存在显著差异。综上所述,咖啡果皮可溶性膳食纤维作为咖啡副产物,具有较高的利用价值,为后续咖啡副产物的精深加工提供了研究方向。

#### 4 结论

本研究对比了咖啡果皮可溶性膳食纤维与大

豆、菊粉、大枣、燕麦、芹菜 5 种市售可溶性膳食纤维的粒径、单糖组成、微观结构、理化性质及功能特性。明晰了传统方法提取的咖啡果皮可溶性膳食纤维与常见豆类、果蔬膳食纤维的差异,为咖啡果皮可溶性膳食纤维的改性、精深加工提供了方向。研究得出:(1) 6 种可溶性膳食纤维的粒径分布不同,其中咖啡果皮可溶性膳食纤维分布较广,均一性比其余 5 种样品差,对样品的溶解性具有一定影响;咖啡果皮可溶性膳食纤维共检出 10 种单糖,含量最多的为半乳糖醛酸,种类不同含量不同,表示其纤维素、半纤维素、果胶物质含量不同。(2) 红外光谱结果表明具有典型的多糖吸收峰,在特征波段的强度与指纹区域略有差异,与单糖组成结果一致;扫描电镜结果表明不同来源可溶性膳食纤维,形态结构略有差异。6 种样品均为不均匀块状结构,表面有小孔及褶皱,咖啡果皮可溶性膳食纤维小孔更为清晰,表面褶皱较多,大豆可溶性膳食纤维与菊粉表面则较为光滑,褶皱小孔较少;X-射线衍射结果表明 6 种样品均存在纤维素 I 型结构,且咖啡果皮结晶度最小为 38.8%,并且其热稳定性优于其他 5

种样品。(3) 不同样品间持油性无显著差异, 菊粉的溶解性最高为 99.53%, 咖啡果皮持油性最低为 90.9%。(4) 咖啡果皮可溶性膳食纤维的亚硝酸盐吸附能力显著优于其他 5 种样品, 吸附量为 7.93 mg/g。总体来说, 咖啡果皮可溶性膳食纤维较其余 5 种膳食纤维具有更丰富的单糖组成, 较高的亚硝酸盐吸附能力以及热稳定性, 本研究可为咖啡果皮资源的开发利用提供理论基础, 为咖啡果皮可溶性膳食纤维的高值化利用提供理论依据和技术支撑。

## 参考文献

- [1] ARYA S S, VENKATRAM R, MORE P R, VIGAYAN P. The wastes of coffee bean processing for utilization in food: a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59: 429-444.
- [2] SANTOS É M D, MACEDO L M D, TUNDISI L L, ATAIDE J A, JANAÍNA A, CAMARGO G A, ALVES R C, OLIVEIRA M B P P, MAZZOLA P G. Coffee by-products in topical formulations: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 280-291.
- [3] HEJNA A. Potential applications of by-products from the coffee industry in polymer technology-current state and perspectives[J]. *Waste Management*, 2021, 121: 296-330.
- [4] JANISSEN B, HUYNH T. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: a review[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 128: 110-117.
- [5] 胡荣锁, 周晶, 董文江, 赵建平, 陆敏泉, 宗迎. 响应面法优化咖啡果皮可溶性膳食纤维提取工艺和功能特性研究[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(9): 66-72.  
HU R S, ZHOU J, DONG W J, ZHAO J P, LU M Q, ZONG Y. Optimization of extraction process and functional properties of soluble dietary fiber from coffee peel by response surface methodology[J]. *Tropical Agricultural Sciences*, 2015, 35(9): 66-72. (in Chinese)
- [6] 王彦兵, 匡钰, 李国明, 刘小琼, 苏琳琳, 王晓媛, 李守岭. 小粒咖啡果皮多酚提取工艺优化及抗氧化活性[J]. *福建农业学报*, 2020, 35(6): 682-690.  
WANG Y B, KUANG Y, LI G M, LIU X Q, SU L L, WANG X Y, LI S L. Optimization of extraction process and antioxidant activity of polyphenols from small coffee peels[J]. *Fujian Agricultural Journal*, 2020, 35(6): 682-690.
- [7] ESQUIVEL P, VIAS M, STEINGASS C B, GRUSCHWITZ M, GUEVARA E, CARLE R, SCHWEIGGERT R M, JIMÉNEZ V M. Coffee (*Coffea arabica* L.) by-products as a source of carotenoids and phenolic compounds-evaluation of varieties with different peel color[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 2571-581X.
- [8] DONG W J, WANG D D, HU R S, LONG Y Z, LV L S. Chemical composition, structural and functional properties of soluble dietary fiber obtained from coffee peel using different extraction methods[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109497.
- [9] 刘秋艳, 连欣悦, 容格清, 何凯鑫, 程巧玉, 李志坤, 谭容佩. 膳食纤维生理功能研究进展[J]. *粮食与食品工业*, 2021, 28(4): 25-28.  
LIU Q Y, LIAN X Y, RONG G Q, HE K X, CHENG Q Y, LI Z K, TAN R P. Research progress on physiological function of dietary fiber[J]. *Grain and Food Industry*, 2021, 28(4): 25-28. (in Chinese)
- [10] HE Y, WANG B X, WEN L K, WANG F Z, YU H S, CHENG D X, SU X, ZHANG C. Effects of dietary fiber on human health[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 1: 1-11
- [11] 龙芳. 3 种提取方式对芹菜可溶性膳食纤维品质特性的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(3): 192-198.  
LONG F. Effects of three extraction methods on the quality characteristics of celery soluble dietary fiber[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(3): 192-198. (in Chinese)
- [12] 褚盼盼, 胡筱, 林智杰. 葵花粕水溶性膳食纤维的提取工艺及其理化性质研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(12): 203-207.  
CHU P P, HU X, LIN Z J. Extraction process and physicochemical properties of water-soluble dietary fiber from sunflower meal [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(12): 203-207. (in Chinese)
- [13] LI N, FENG Z Q, NIU Y G, YU L L. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 557-565.
- [14] GU M D, FANG H C, GAO Y H, SU T, NIU Y G, YU L L. Characterization of enzymatic modified soluble dietary fiber from tomato peels with high release of lycopene[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105321.
- [15] MA R, CHEN J N, ZHOU X J, LIN H, GAO Q, PENG X, TANOKURA M, XUE Y L. Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa* L.)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111313.
- [16] WEN Y, NIU M, ZHANG B J, ZHAO S M, XIONG S B. 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.
- [17] ZHANG W M, ZENG G G, PAN Y G, CHEN W X, HUANG W Y, CHEN H M, LI Y S. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 102-112.
- [18] 罗白玲, 刘敦华, 董文江, 胡荣锁, 龙宇宙, 陈治华, 蒋快乐. 超微粉碎对咖啡果皮理化性质、结构及吸附能力的影响

- 响[J]. 热带作物学报, 2020, 41(6): 1219-1226.
- LUO B L, LIU D H, DONG W J, HU R S, LONG Y Z, CHEN Z H, JIANG K L. Effects of ultrafine pulverization on physicochemical properties, structure and adsorption capacity of coffee peel[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(6): 1219-1226. (in Chinese)
- [19] HUANG H R, CHEN J J, CHEN Y, XIE J H, LIU S, SUN N, HU X B, YU Q. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymatic method: structural, physicochemical and functional properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111314.
- [20] 阮传英, 涂宗财, 王辉, 柳军凯, 尧思华, 秦晓辉. 豆渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. 食品科学, 2014, 35(15): 109-112.
- RUAN C Y, TU Z C, WANG H, LIU J K, YAO S H, QIN X H. *In vitro* adsorption properties of bean dregs dietary fiber[J]. Food Science, 2014, 35(15): 109-112. (in Chinese)
- [21] CHEN H, XIONG M, BAI T M, CHEN D W, ZHANG Q, LIN D R, LIU Y T, LIU A P, HUANG Z Q, QIN W. Comparative study on the structure, physicochemical, and functional properties of dietary fiber extracts from quinoa and wheat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111816.
- [22] ZHANG R, GUO J, LIU Y F, CHEN S, ZHANG S, YU Y. Effects of sodium salt types on the intermolecular interaction of sodium alginate/antarctic krill protein composite fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 189: 72-78.
- [23] LETTOW M, GRABARICS M, MUCHA E, THOMAS D A, POLEWSKI L, FREYSE J, RADEMANN J, MEIJER G, HELDEN G, PAGEL K. IR action spectroscopy of glycosaminoglycan oligosaccharides[J]. Analytical Bioanalytical Chemistry, 2020, 412: 533-537
- [24] 牛希, 史乾坤, 赵城彬, 尹欢欢, 许秀颖, 吴玉柱, 曹勇, 张浩, 刘景圣. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 130-136.
- NIU X, SHI Q K, ZHAO C B, YIN H H, XU X Y, WU Y Z, CAO Y, ZHANG H, LIU J S. Effects of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber[J]. Food Science, 2020, 41(23): 130-136. (in Chinese)
- [25] 刘楠, 孙永, 李月欣, 吴培凤. 膳食纤维的理化性质、生理功能及其应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(10): 3959-3963.
- LIU N, SUN Y, LI Y X, WU P F. Physical and chemical properties, physiological functions and applications of dietary fiber[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2015, 6(10): 3959-3963. (in Chinese)
- [26] 刘晓贺, 马思雨, 和贵文, 韩明升, 杨亚晋, 郭爱伟. 豌豆膳食纤维与菊粉化学组成及物化特性的比较[J]. 食品工业, 2021, 42(9): 158-163.
- LIU X H, MA S Y, HE G W, HAN M S, YANG Y J, GUO A W. Comparison of chemical composition and physicochemical properties of pea dietary fiber and inulin[J]. Food Industry, 2021, 42(9): 158-163. (in Chinese)
- [27] 郭增旺, 马萍, 刁静静, 李朝阳, 金志刚, 满永刚, 张丽萍. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 106-112.
- GUO Z W, MA P, DIAO J J, LI Z Y, JIN Z G, MAN Y G, ZHANG L P. Physicochemical and adsorption properties of water-insoluble dietary fiber from ultra-micro soybean hulls[J]. Food Science, 2018, 39(5): 106-112. (in Chinese)
- [28] 栗俊广, 姜茜, 望运滔, 马旭阳, 白艳红. 不同来源膳食纤维的结构和理化性质分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 18-23.
- LI J G, JIANG Q, WANG Y T, MA X Y, BAI Y H. Analysis of the structure and physicochemical properties of dietary fibers from different sources[J]. Food and Machinery, 2020, 36(12): 18-23. (in Chinese)
- [29] GAN J P, HUANG Z Y, YU Q, PENG G Y, CHEN Y, XIE J H, NIE S P, XIE M Y. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 101: 105549.
- [30] 钟希琼, 胡文娥, 林丽超. 膳食纤维对油脂、胆固醇、胆酸钠和亚硝酸根离子吸附作用的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 134-136.
- ZHONG X Q, HU W E, LIN L C. Study on the adsorption of dietary fiber on fat, cholesterol, sodium cholate and nitrite ions[J]. Food Industry Science and Technology, 2010, 31(5): 134-136. (in Chinese)