

椰肉加工副产物营养与理化特性比较分析

李家祺^{1,2}, 彭芍丹¹, 黄晓兵^{1*}, 周伟¹, 李如一¹, 陈绵鸿¹, 张利¹,
邓福明³, 徐永利⁴, 李积华¹

1. 中国热带农业科学院农产品加工研究所/农业农村部热带作物产品加工重点实验室, 广东湛江 524001; 2. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070; 3. 中国热带农业科学院椰子研究所, 海南文昌 571339; 4. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665099

摘要: 椰粕 (coconut oil residue, COR) 和椰麸 (coconut milk residue, CMR) 是椰肉 2 种主要加工副产物, 分别在椰油和椰奶加工过程中产生, 为探究 2 种椰肉加工副产物的加工适宜性, 对其营养和理化特性进行了全面分析。结果发现, COR 的脂肪含量 (19.37 g/100 g) 要低于 CMR, 而蛋白质 (11.32 g/100 g)、总膳食纤维 (63.92 g/100 g)、可溶性膳食纤维 (4.42 g/100 g) 等营养成分以及多糖 (25.67 mg/g)、黄酮 (4.21 mg/g)、总酚 (1.15 mg/g) 等活性成分含量均高于 CMR。COR 与 CMR 的水解氨基酸种类相似, 但含量存在明显差异, 其含量分别为 94.955、56.975 mg/g。理化特性方面, 不同温度下 COR 均比 CMR 显示出更好的水合特性, 但二者的流动性均较差。COR 比 CMR 具有相对较高的热稳定性、较完整的晶体结构和较高的基团活性。综上, 与 CMR 相比, COR 的营养成分和活性成分更加丰富, 水合特性和流动性也具有相对优势, 且具有较高的热稳定性和稳定的晶体结构, 是理想的低脂低糖高纤食品加工原料, 本研究结果可为椰肉加工副产物在食品工业中的高值化利用提供理论指导。

关键词: 椰粕; 椰麸; 营养评价; 加工特性; 食品原料

中图分类号: TS209 文献标志码: A

Comparative Analysis of Nutritional and Physicochemical Properties of Coconut Meat Processing By-products

LI Jiaqi^{1,2}, PENG Shaodan¹, HUANG Xiaobing^{1*}, ZHOU Wei¹, LI Ruyi¹, CHEN Mianhong¹, ZHANG Li¹,
DENG Fuming³, XU Yongli⁴, LI Jihua¹

1. Agricultural Products Processing Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Tropical Crop Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang, Guangdong 524001, China; 2. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wenchang, Hainan 571339, China; 4. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665099, China

Abstract: Coconut oil residue (COR) and coconut milk residue (CMR) are the two main by-products of coconut meat, which are produced during the processing of coconut oil and coconut milk, respectively. In order to explore the processing suitability of the two by-products, the nutritional and physicochemical properties of the two by-products were comprehensively analyzed. The results showed that the fat content of COR (19.37 g/100 g) was lower than that of CMR, while the nutrients such as protein (11.32 g/100 g), total dietary fiber (63.92 g/100 g), soluble dietary fiber (4.42 g/100 g), polysaccharides (25.67 mg/g), flavonoids (4.21 mg/g), total phenols (1.15 mg/g) and other active ingredients were higher than those of CMR. The hydrolyzed amino acids of COR and CMR were similar, but the content was significantly different, which was 94.955 mg/g and 56.975 mg/g, respectively. COR showed better hydration properties

收稿日期 2024-07-01; 修回日期 2024-07-22

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2023XDNY073); 海南省自然科学基金项目 (No. 321MS0797); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630122022005)。

作者简介 李家祺 (2000—), 男, 硕士, 研究方向: 农产品加工。*通信作者 (Corresponding author): 黄晓兵 (HUANG Xiaobing), E-mail: huang5102@foxmail.com。

nificantly different, which was 94.955 mg/g and 56.975 mg/g, respectively. COR showed better hydration properties than CMR at different temperatures, but the fluidity of both was poor. COR had relatively higher thermal stability, more complete crystal structure and higher group activity than CMR. In conclusion, compared with CMR, COR has more nutrients and active ingredients, hydration properties and fluidity, and has higher thermal stability and stable crystal structure, which is an ideal raw material for low-fat, low-sugar and high-fiber food processing. The results of this study could provide theoretical guidance for the high-value utilization of coconut meat processing by-products in the food industry.

Keywords: coconut oil residue; coconut milk residue; nutritional evaluation; processing characteristics; food raw material

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.12.025

椰子 (*Cocos nucifera* L.) 是我国重要的木本油料作物和热带特色经济作物, 主要分布于海南、广东南部、云南南部及台湾等地区, 其中海南省椰子种植面积约 37 333 hm², 占全国的 99%, 年产量约 2.2 亿个, 全产业链产值约 200 亿元^[1], 是海南“六棵树”之一, 也是支撑我国热带地区乡村振兴的支柱产业。椰肉风味独特, 营养价值高, 富含蛋白质、脂肪、膳食纤维和钙、磷、钾等矿物质^[2], 目前主要以榨汁、榨油、干制加工为主。据统计, 全球每年椰肉加工产生的副产物达 6300 万 t^[3], 椰粕 (coconut oil residue, COR) 和椰麸 (coconut milk residue, CMR) 是产量最高的 2 种副产物, 分别由椰肉榨油和榨奶干燥后得到。研究表明, 椰肉加工副产物含有丰富的营养成分, 分别含有 4.2%~12.6% 的蛋白质、9.2%~42.6% 的脂肪、19.2%~39.1% 的碳水化合物和超过 20% 的膳食纤维^[4], 具有良好的开发利用价值。然而, 由于加工理论与技术研究不足, 椰肉加工副产物未得到合理的开发与利用, 目前工业上开发利用模式主要停留在以生产动物饲料^[5-7]、纤维材料^[8]、作物肥料^[9-11]等低附加值产品阶段, 利用其营养特性开发高值化、功能化食品的相关研究较少。因此, 为加快椰肉加工副产物在食品领域的开发利用, 本研究以椰肉 2 种主要加工副产物 COR 和 CMR 为研究对象, 系统比较分析 2 种副产物的营养特点与加工特性, 以期为其食品化开发利用提供理论依据与方法指导。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 材料与试剂 椰粕 (椰干冷压榨所得, 饼状) 和椰麸 (椰肉打浆过滤后干燥得到, 粉状) 由中国热带农业科学院椰子研究所提供; 石油醚、苯酚、无水乙醇、氯化钠、氢氧化钠、乙酸分析纯,

购自西陇科学股份有限公司; 牛血清白蛋白、无水碳酸钠分析纯, 购自麦克林生化科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备 1000Y 型万能粉碎机购自永康市铂欧五金制品有限公司; Kjeltac™ 8400 全自动凯氏定氮仪、Fibertec 2010 全自动纤维分析系统购自丹麦 FOSS 公司; BT-1000 型粉体综合特性测试仪购自丹东百特科技有限公司; Sigma/3-30K 低温离心机购自美国 Sigma 公司; A300 型全自动氨基酸分析仪购自德国 MembraPure 公司; DF-06 型膳食纤维测定仪购自海能未来技术集团股份有限公司; DSCQ2000 差示扫描量热仪购自美国 TA 公司; INVENIO S 型傅里叶变换红外光谱仪购自德国 Bruker 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品的制备 COR 和 CMR 粉碎后过 60 目筛, 密封保存备用。

1.2.2 基础营养成分分析 水分含量参照 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》第一法直接干燥法测定; 粗蛋白含量参照 GB 5009.5《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中第一法凯氏定氮法测定; 粗脂肪含量参照 GB 5009.6《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中第一法索氏抽提法测定; 灰分含量参照 GB 5009.4《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中第一法测定; 粗纤维含量参照 GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》测定。

1.2.3 还原糖含量测定 采用二硝基水杨酸比色法^[12]测定样品还原糖含量, 葡萄糖标准曲线为 $y=1.791x-0.0616$, $R^2=0.9996$, 据此计算样品中的还原糖含量。

1.2.4 膳食纤维分析 采用 DF06 型膳食纤维测定仪测定可溶性膳食纤维 (soluble dietary fiber, SDF)、不溶性膳食纤维 (insoluble dietary fiber, IDF) 以及总膳食纤维 (total dietary fiber, TDF)

含量。

1.2.5 组分蛋白测定 采用 Osborn 法^[13]提取组分蛋白, Bradford 法测定提取液中蛋白浓度, 牛血清白蛋白标准曲线为 $y=0.816x+0.0368$, $R^2=0.9974$, 据此计算各组分蛋白含量。

1.2.6 氨基酸组成分析 称取 0.50 g 样品于水解管中, 加 15 mL 盐酸溶液, 于 110 °C 水解 24 h, 冷却后抽滤, 取滤液定容至 25 mL, 取 2 mL 吹干, 加 4 mL 样品稀释液, 漩涡震荡使其溶解, 过 0.45 μm 滤膜后加入进样瓶中, 上机分析。

1.2.7 多糖含量测定 采用苯酚-硫酸法^[14]测定样品中的多糖含量, 葡萄糖标准曲线为 $y=15.13x-0.0107$, $R^2=0.9988$, 据此计算样品中的多糖含量。

1.2.8 黄酮含量测定 采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法^[15]测定样品中的黄酮含量, 芦丁标准曲线为 $y=1.1386x-0.0082$, $R^2=0.9992$, 样品中的黄酮含量以芦丁当量 (RTE) 表示, 据此计算样品中的黄酮含量。

1.2.9 总酚含量测定 采用福林酚比色法^[16]测定样品中的总酚含量, 没食子酸标准曲线为 $y=8.7781x+0.0222$, $R^2=0.9993$, 样品中的多酚含量以没食子酸当量 (GAE) 表示, 据此计算样品中的多酚含量。

1.2.10 水溶性的测定 参考 ANDERSON 等^[17]的方法并稍作修改, 称取 2.0 g 样品, 加入 30 mL 蒸馏水, 漩涡振荡使样品完全分散于水中, 分别于 40、50、60、70、80、90 °C 下保温 60 min, 每隔 15 min 振荡 1 次, 过滤后将滤液转移至烧杯中, 105 °C 烘干至恒重, 计算样品的水溶性指数。

$$\text{水溶性指数} = \frac{(m_2 - m_1)}{m_0} \times 100\%$$

式中, m_0 为样品质量, 单位为 g; m_1 为烧杯质量, 单位为 g; m_2 为烘干至恒重的烧杯和样品质量, 单位为 g。

1.2.11 溶胀性的测定 参考 ZHANG^[18]的方法并稍作修改, 称取 3.0 g 样品, 倒入量筒, 记录体积, 向量筒中加 30 mL 蒸馏水, 混合均匀, 静置 24 h, 每隔 3 h 读取 1 次自由膨胀体积, 计算样品的溶胀性。

$$\text{溶胀性} = \frac{V_1 - V_2}{M}$$

式中, V_1 为溶胀后样品体积 (mL); V_2 为初始样品体积 (mL); M 为初始样品质量 (g)。

1.2.12 持水性与持油性的测定 参考 KEBEDE

等^[19]的方法并稍作修改, 称取 0.2 g 样品分别与 10 mL 蒸馏水 (油) 充分混合, 分别在 40、50、60、70、80、90 °C 下保持 40 min, 离心, 弃上清液, 计算样品的持水性和持油性。

$$\text{持水性(持油性)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1}$$

式中, m_1 为样品干基质量 (g); m_2 为样品湿基质量 (g)。

1.2.13 密度与压缩度的测定 参考 ABDULLAH 等^[20]的方法并稍作修改, 将样品装于 10 mL 干燥洁净的量筒内, 填充至 10 mL 刻度处, 称量样品和量筒质量。再将装有样品的量筒在厚纱布上振实 300 次, 至样品体积无变化, 读取此时样品的体积, 分别计算堆积密度、振实密度和压缩度。

$$\rho_b = \frac{(m_1 - m_0)}{10}$$

$$\rho_t = \frac{(m_2 - m_0)}{V_f}$$

$$\text{压缩度} = \frac{(\rho_t - \rho_b)}{\rho_t} \times 100\%$$

式中, ρ_b 为样品堆积密度 (g/mL); m_1 为样品和量筒总质量 (g); m_0 为量筒质量 (g); ρ_t 为样品振实密度 (g/mL); m_2 为振实后样品和量筒总质量 (g); V_f 为样品振实后体积 (mL)。

1.2.14 休止角和滑角的测定 采用 BT-1000 型粉体综合特性测试仪测定休止角和滑角。

1.2.15 扫描电镜分析 (SEM) 将导电胶贴到金属试样板上, 沾取少量样品, 使其均匀地落在导电胶带上, 吹去未粘住的试样。将粘有样品的试样板置于离子溅射仪试样舱内, 喷金, 随后在 50 倍和 600 倍下进行观察。

1.2.16 热稳定性分析 (DSC) 称取 5 mg 样品置于铝坩埚中, 压片机压片, 与空白坩埚一起放到仪器样品架上扫描。充入流量为 50 mL/min 的氮气, 在 40~250 °C 的范围内以 10 °C/min 匀速升温。

1.2.17 X-射线衍射分析 (XRD) 将样品放在载玻片上压平, 在管流为 30 mA, 管压为 30 kV, 靶型为 Cu 的条件下进行分析, 以 10°/min 的扫描速度在 $5 \leq 2\theta \leq 90^\circ$ 的范围内对样品进行扫描, 步长为 0.02°。利用 Origin 软件在 $5^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ 的范围内分别对结晶区和总衍射区进行积分, 用结晶区面积与总衍射区面积的比值来代表相对结晶度

(relative crystallinity, RC)。

1.2.18 傅里叶红外光谱分析 (FT-IR) 称取 2 mg 样品与溴化钾按 1 : 100 的比例混合, 研磨成均匀的粉末, 烘干, 压片后测试, 在 4000~400 cm⁻¹ 之间的吸收模式下扫描 FT-IR 光谱, 扫描次数为 32 次, 分辨率为 4 cm⁻¹。

1.3 数据处理

试验结果均为至少 3 次重复试验的平均值, 表示为均值±标准差, 采用 Excel 2021 软件进行数据统计分析, 采用 Origin 2021 软件进行显著性分析及图形绘制。

2 结果与分析

2.1 营养成分分析

2.1.1 营养成分与活性成分分析 COR 和 CMR 的营养成分与活性成分测定结果如表 1 所示, 蛋白质、脂肪和膳食纤维是二者的主要成分, COR 的粗蛋白含量为 11.32 g/100 g, 是 CMR 的 1.92 倍, 但二者的可溶性蛋白含量相当, 分别为 47.07、48.75 mg/g, 谷蛋白是 COR 可溶性蛋白的主要组分, CMR 则相反, 主要组分蛋白为清蛋白和球蛋白, 这与 RODSAMRAN 等^[21]的研究结果一致; COR 和 CMR 均含有较多的油脂, 其中 CMR 的脂肪高达 49.27 g/100g, 接近全粉质量一半, 这些油脂赋予了原料特有的椰香, 也具有一定的应用前景; 膳食纤维被誉为第七大营养素, 包括 IDF 和 SDF, IDF 可以促进胃肠道蠕动, 加快食物通过胃肠道, SDF 能够降低患心脏病、高血脂、糖尿病等慢性疾病的风险^[22]。COR 和 CMR 的膳食纤维含量分别为 63.92 g/100g 和 38.33 g/100g, 其中 SDF 分别为 4.42 g/100g 和 1.98 g/100g, 分别占比 6.91%和 5.17%, 二者 SDF 含量均不高, 在食品工业中可以通过改性拓展其利用值。

比较二者的活性成分发现, COR 的多糖、黄酮和总酚含量均高于 CMR, 一方面, 这可能是由于 CMR 含有较高的脂肪以及色素等脂溶性成分, 使得活性成分被紧紧包裹在脂肪颗粒的内部, 不易被释放到溶剂中, 导致提取率降低^[23]。另一方面, 2 种副产物的前加工工艺的不同也可能造成活性成分含量的差异, 椰油为冷榨工艺, 在一定程度上保护了活性成分, 椰奶的制作工艺包括热加工和机械打浆, 在热加工过程中会使椰肉中的水溶性多糖被带至椰奶中, 而剧烈的机械打浆也会造成黄酮和多酚损失。

表 1 COR 和 CMR 营养成分与活性成分比较
Tab. 1 COR and CMR nutritional content compared to active ingredients

	指标 Index	椰粕 COR	椰麸 CMR
基础营养成分	水分/[g·(100g) ⁻¹]	6.25±0.200 ^a	5.51±0.130 ^b
	粗蛋白/[g·(100g) ⁻¹]	11.32±0.040 ^a	5.89±0.046 ^b
	粗脂肪/[g·(100g) ⁻¹]	19.37±0.300 ^b	49.27±0.460 ^a
	粗纤维/[g·(100g) ⁻¹]	18.42±0.170 ^a	12.76±0.036 ^b
	灰分/[g·(100g) ⁻¹]	1.82±0.130 ^a	1.14±0.004 ^b
	还原糖/(mg·g ⁻¹)	1.67±0.150 ^b	2.71±0.230 ^a
膳食纤维 /[g·(100g) ⁻¹]	TDF	63.92±0.480 ^a	38.33±0.230 ^b
	IDF	59.50±0.420 ^a	36.35±0.220 ^b
	SDF	4.42±0.057 ^a	1.98±0.001 ^b
组分蛋白 /(mg·g ⁻¹)	清蛋白	5.02±0.690 ^b	18.94±0.770 ^a
	球蛋白	4.52±0.610 ^b	21.47±2.410 ^a
	谷蛋白-1	9.25±0.250 ^a	5.19±0.650 ^b
	谷蛋白-2	28.28±1.640 ^a	3.15±0.350 ^b
活性成分 /(mg·g ⁻¹)	多糖	25.67±0.270 ^a	9.53±0.430 ^b
	总黄酮	4.21±0.610 ^a	2.62±0.180 ^b
	总酚	1.15±0.064 ^a	0.51±0.027 ^b

注：同行不同小写字母表示原料间差异显著 (*P*<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between raw materials (*P*<0.05).

2.1.2 水解氨基酸分析 如表 2 所示, COR 和 CMR 均含有 17 种水解氨基酸, 包括 8 种必需氨基酸和 9 种非必需氨基酸。COR 的氨基酸总量为 94.955 mg/g, 其中必需氨基酸含量为 28.625 mg/g, 占比 30.15%;CMR 的氨基酸总量为 56.975 mg/g, 必需氨基酸含量为 16.495 mg/g, 占总量的 28.95%。谷氨酸是椰肉加工副产物中含量最高的非必需氨基酸, 亮氨酸、苯丙氨酸和缬氨酸是含量前三的必需氨基酸。此外, COR 和 CMR 中还含有天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸等 5 种药用氨基酸^[24], 分别占氨基酸总量的 53.39%和 48.73%。椰肉加工副产物水解氨基酸含量较高、种类丰富, 且氨基酸模式理想, 在食品和药品领域具有良好的开发利用价值。

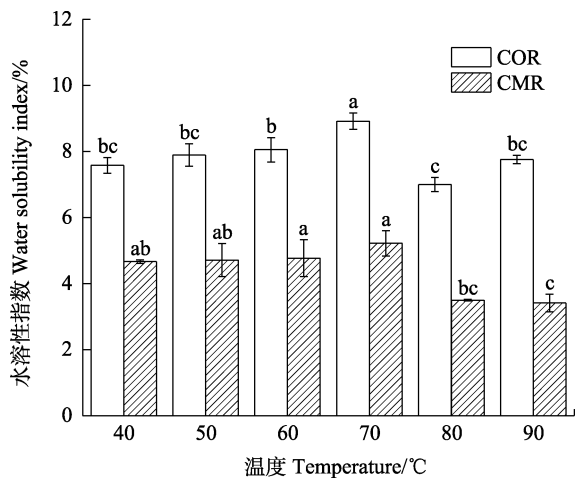
2.2 理化特性分析

2.2.1 水溶性分析 由图 1 可知, 随着温度的升高, COR 和 CMR 的溶解率均呈现出先上升后降低的趋势, 当温度达到 70 ℃时, 溶解率达到最大值。蛋白质是影响样品溶解度的主要物质, 试验结果也侧面反映了样品中的蛋白质在升温过程中先解离而后又发生变性聚集, 适当升高温度, 可

表 2 COR 和 CMR 的水解氨基酸组成
Tab. 2 Hydrolyzed amino acid composition
of COR and CMR

名称 Name	椰粕 COR	椰麸 CMR
天冬氨酸 [#] Asp	9.055±0.375	4.875±0.106
苏氨酸 [*] Thr	3.295±0.092	1.690±0.014
丝氨酸 Ser	5.815±0.205	2.990±0
谷氨酸 [#] Glu	21.735±0.700	11.195±1.322
脯氨酸 Pro	3.490±0.127	6.240±2.828
甘氨酸 [#] Gly	4.665±0.191	2.530±0.127
丙氨酸 Ala	4.815±0.134	2.580±0.098
胱氨酸 Cys	1.515±0.176	0.905±0.077
缬氨酸 [*] Val	4.300±0.014	2.695±0.558
甲硫氨酸 [*] Met	1.685±0.106	0.665±0.657
异亮氨酸 [*] Ile	2.685±0.021	1.800±0.480
亮氨酸 [*] Leu	6.790±0.169	3.960±0.367
酪氨酸 [#] Tyr	1.830±0.070	1.405±0.077
苯丙氨酸 [*] Phe	4.325±0.134	2.385±0.148
组氨酸 [*] His	2.160±0.127	1.225±0.148
赖氨酸 [*] Lys	3.385±0.063	2.075±0.219
精氨酸 [#] Arg	13.410±0.311	7.760±0.268
必需氨基酸 EAA	28.625	16.495
非必需氨基酸 NEAA	66.330	40.480
药用氨基酸	50.695	27.765
水解氨基酸总量	94.955	56.975

注：*为必需氨基酸，[#]为药用氨基酸。
Note: * is essential amino acid, # is medicinal amino acid.



不同小写字母表示不同温度间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicates significant difference among
different temperature ($P<0.05$).

图 1 温度对 COR 和 CMR 水溶性的影响
Fig. 1 Effect of temperature on water solubility
of COR and CMR

以使部分聚集态的蛋白解离，并促进蛋白质分子在水中的运动，增强蛋白质与水分子相互作用，从而提高样品的溶解率。但当环境温度达到椰肉蛋白的变性起始温度（70℃左右）时，部分蛋白质发生变性，部分已经解离的蛋白质重新聚集，导致样品的溶解度降低^[25]。此外，在相同温度下，COR 的溶解率始终要强于 CMR，这可能是 COR 中的蛋白质、多糖、SDF 等可溶性成分的含量要高于 CMR，同时由于 CMR 由椰肉榨汁所得，残留的油脂含量较高，且水溶性成分在其加工过程中流失也是其溶解率较低的原因之一。

2.2.2 溶胀性分析 图 2 为室温下 COR 和 CMR 的 24 h 溶胀曲线，随着时间的延长，样品的溶胀性逐渐上升而后趋于稳定，且 COR 的溶胀性要优于 CMR。溶胀性主要取决于其中的 SDF，随样品在水中浸泡时间的延长，SDF 中的亲水性基团更多地露出，从而使其吸水伸长后产生更大的体积，提高了样品的溶胀性^[26]，而 COR 的 SDF 含量要显著高于 CMR，可能是 COR 溶胀性相对较高的主要原因。

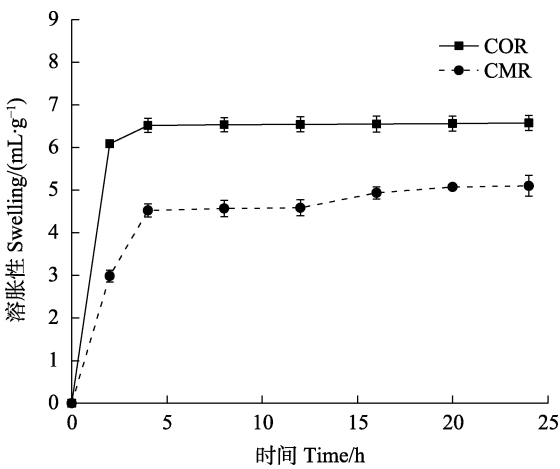


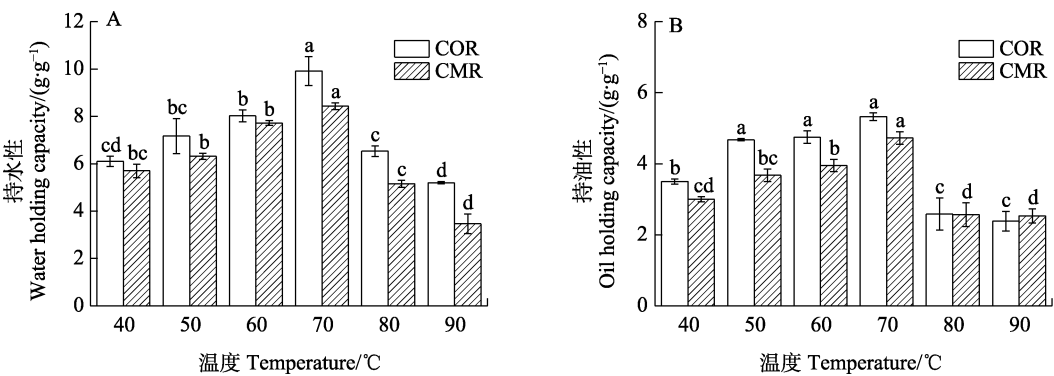
图 2 COR 和 CMR 的 24 h 溶胀曲线
Fig. 2 24 h swelling curve of COR and CMR

2.2.3 持水性与持油性分析 由图 3 可知，COR 和 CMR 的持水性和持油性随温度的升高呈现先升后降的趋势，且相同温度下 COR 的持水力和持油力均高于 CMR。在 70℃附近，COR 的持水性和持油性分别为 9.92 g/g 和 5.33 g/g，CMR 的持水性和持油性分别为 8.43 g/g 和 4.73 g/g，均达到最大值。温度超过 70℃后，样品的持水性和持油性出现降低趋势，这可能是高温导致样品中的纤维基质以其致密的多孔网状结构被破坏，使得滞

留、吸附在其内部空隙间的水分、油脂抵御离心力的能力减弱^[27]，此外，高温还会使蛋白质分子间发生絮凝聚集，也会使样品的持水性和持油性降低^[28]。

2.2.4 流动性评价 采用密度、压缩度、休止角和滑角等指标对物料的流动性进行评价，由表 3 可知，COR 的堆积密度、振实密度显著高于 CMR，说明 COR 的孔隙率大，较大的孔隙率有利于亲水基与溶剂分子间的吸附溶解^[29]，这也是

其水合特性优于 CMR 的重要因素，且 COR 的振实密度与堆积密度的比值更接近于 1，说明其流动性比 CMR 好；COR 压缩度、休止角和滑角均明显低于 CMR，说明 COR 可压缩性大，休止角越小流动性越好，当物料的休止角 $\leq 40^\circ$ 时，说明流动性良好，二者的休止角均大于 40° ，说明 2 种副产物的流动性整体均较差，但 COR 的流动性要优于 CMR，可能是 CMR 脂肪含量较高所导致。



同列不同小写字母表示不同温度间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicates significant difference among different temperature ($P<0.05$).

图 3 温度对 COR 和 CMR 持水性 (A) 和持油性 (B) 的影响

Fig. 3 Effect of temperature on water (A) or oil (B) holding capacity of COR and CMR

表 3 COR 和 CMR 的流动性指标测定结果

Tab. 3 Measurement results of mobility indicators of COR and CMR

样品 Sample	堆积密度 Bulk density/(g·mL ⁻¹)	振实密度 Tap density/(g·mL ⁻¹)	压缩度 Compression/%	休止角 Angle of rest/°	滑角 Sliding corners/°
COR	0.32±0.0007 ^a	0.53±0.0042 ^a	39.72±0.35 ^b	57.16±1.59 ^b	53.40±0.53 ^b
CMR	0.21±0.0045 ^b	0.42±0.0028 ^b	50.34±0.76 ^a	60.23±0.73 ^a	64.93±0.51 ^a

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 indicates significant difference ($P<0.05$).

2.3 结构表征

2.3.1 SEM 观察 2 种椰肉加工副产物的微观结构如图 4 所示，COR 和 CMR 的微观结构类似，均呈不规则块状，且表面粗糙，存在较多的凸起、凹陷结构。在 50 倍下观察发现，COR 颗粒小且分布均匀，而 CMR 颗粒较大、分布不均匀，颗粒之间分布密集，存在一定范围的团聚现象。放大到 600 倍观察发现，COR 的颗粒各结构处的轮廓较为清晰，而 CMR 各结构处的轮廓呈现出胶黏状，这可能是因为 CMR 高油脂含量所导致，高油脂导致颗粒之间的相互作用力增加，黏度增加，在一定程度上也解释了 2.2.4 中 CMR 流动性较 COR 差的现象。

2.3.2 DSC 分析 COR 和 CMR 的 DSC 曲线见

图 5，在 50~350 °C 的范围内，二者的 DSC 曲线的形状大似相同，均在 80~120 °C 附近出现了明显的吸热峰，主要是由水分蒸发引起，CMR 水分蒸发峰的焓值明显小于 COR，说明 CMR 中的水分更易蒸发，这是因为 CMR 的持水性较 COR 更低，锁水效果较差。在 300 °C 附近出现明显放热峰，是由纤维热降解引起，在此温度范围内，COR 和 CMR 中的木质素、半纤维素等成分发生降解并放出热量^[30]。COR 和 CMR 的纤维热解峰温度范围并无明显差异，说明二者所含纤维的成分基本相同，但与 COR 相比，CMR 中的纤维热分解放出的热量较少，表明 CMR 中的纤维分解程度较低，更难分解，这可能是 CMR 较高的油脂含量所导致，因为油脂可通过包裹作用来阻碍蛋白、纤维

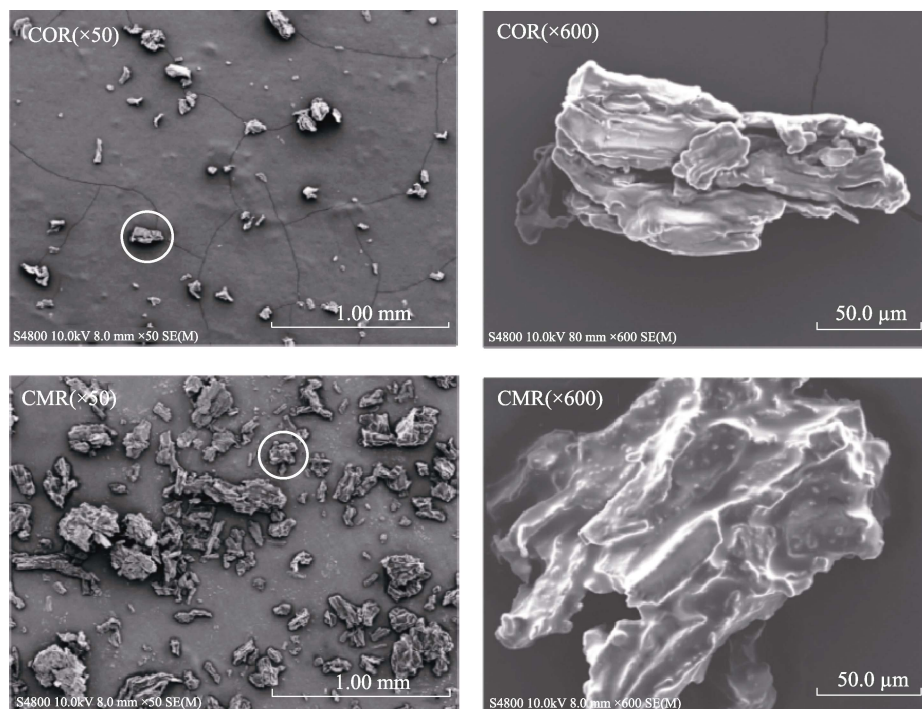


图 4 COR 和 CMR 的形态结构 SEM 图

Fig. 4 Scanning electron microscopy of COR and CMR

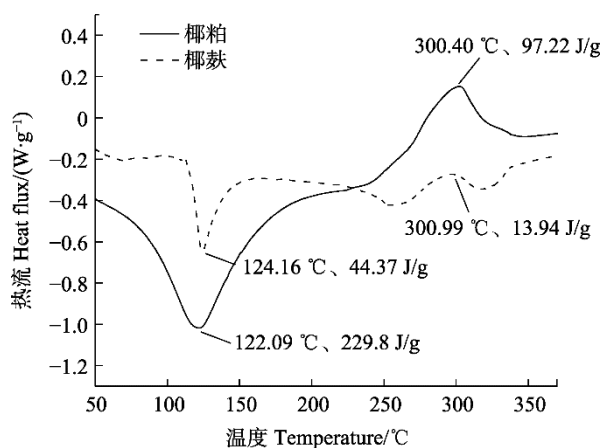


图 5 COR 和 CMR 的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curve of COR and CMR

等大分子热分解。

2.3.3 XRD 分析 COR 和 CMR 在 $5 \leq 2\theta \leq 90^\circ$ 的范围内的 XRD 图谱如图 6 所示, 2 种副产物均在 16.08° 和 20.12° 附近出现了较强的结晶衍射峰, COR 在 23.82° 、 25.32° 和 32.94° 附近出现 3 个强度较弱的结晶衍射峰, 但 CMR 在对应位置的衍射峰强度极低, 几乎消失。2 种副产物均出现了典型的天然纤维素 I 晶体结构特征衍射峰, 说明 COR 和 CMR 的纤维晶体类型均属于纤维素 I 型^[31], 2 种副产物的出峰位置、峰形并无明显差异, 说明 2 种副产物存在着较为相近的结晶区结构。此外,

COR 的相对结晶度为 13.56%, 显著高于 CMR, 说明 COR 的晶体结构更为完整, 热稳定性更好, 但 2.3.2 的结果显示 CMR 的热稳定性更好, 这说明油脂的包裹作用占主导。

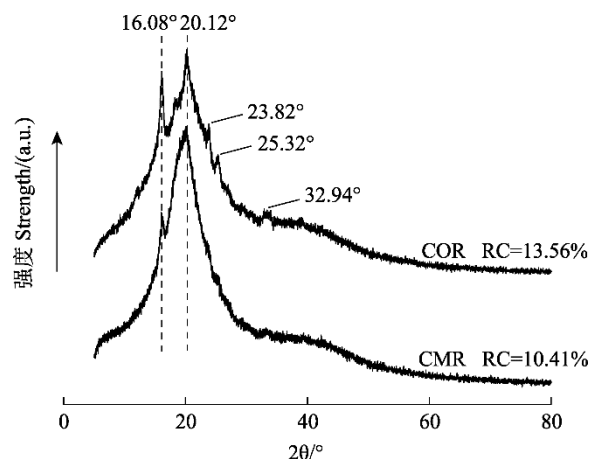


图 6 COR 和 CMR 的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of COR and CMR

2.3.4 FT-IR 分析 从图 7 可以看出, COR 和 CMR 的红外图谱形状基本相似, 但特征峰的峰高和峰面积有所不同。其中, 3550 cm^{-1} 附近的特征峰对应纤维素和半纤维素中羟基的伸缩振动^[32], COR 在 3550 cm^{-1} 附近出现了 1 个吸收峰, 而 CMR 在对应位置未出现明显吸收峰, 说明 COR 存在较

多的羟基,解释了COR水溶性和溶胀性高于CMR这一试验结果^[33]; 2种副产物在 $2950\sim 2850\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在2个峰,分别对应蛋白质和油脂的脂肪链中的 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 基团的对称和不对称伸缩振动^[34],这是其高脂肪含量所导致; 1747 cm^{-1} 附近的特征峰对应酯羰基的拉伸振动,这是半纤维素的特征吸收峰^[34-36]; 1152 cm^{-1} 附近的强吸收峰对应糖苷键的伸缩振动^[37],COR对应的特征峰数量和强度均高于CMR,可能是由于COR中的膳食纤维含量更高。

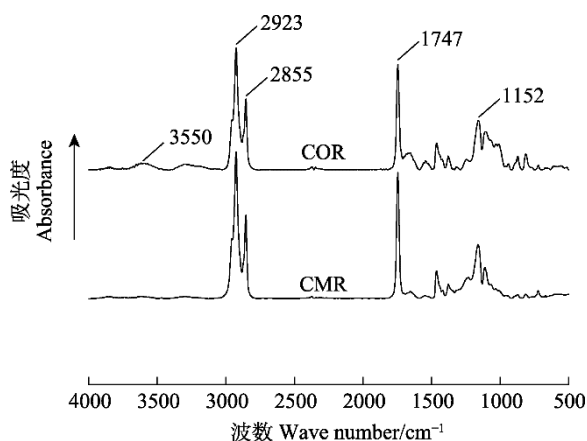


图 7 COR 和 CMR 的 FT-IR 光谱图

Fig. 7 FT-IR spectra of COR and CMR

3 讨论

近年来,在健康饮食的大背景下,椰汁、椰奶、椰油等椰子产品越来越受到消费者的青睐,椰肉加工业进入新的发展机遇期。随着椰肉加工业的迅速发展,椰粕和椰麸等椰肉加工副产物的产量也在逐年增加。但目前椰子企业对椰粕、椰麸等副产物的利用率极低,大部分椰粕、椰麸在产生后会被直接丢弃,污染环境,仅有一小部分被回收利用,并且对其开发利用仍停留在相对浅显的层面,精深加工水平极低,国际市场上的相关产品还处于原辅料和半成品阶段。加工理论与技术研究方面的不足是限制椰粕和椰麸的高值化利用及其食品配料研发的主要原因,现阶段国内外对椰肉加工副产物的研究主要是针对其中某一特定组分开展,对副产物整体开发利用方面的研究鲜有报道,无法为椰子企业在副产物回收利用方面提供理论支撑。为此,本研究对椰粕和椰麸2种最主要的椰肉加工副产物进行了系统的营养特性和理化特性分析,以期为其综合利用提供理

论与数据支撑。

对椰粕、椰麸营养组成与理化特性的测定结果表明,与CMR相比,COR含有相对较低的脂肪($19.37\text{ g}/100\text{ g}$)和较高的蛋白质($11.32\text{ g}/100\text{ g}$)、TDF($63.92\text{ g}/100\text{ g}$)、SDF($4.42\text{ g}/100\text{ g}$)、多糖(25.67 mg/g)、总黄酮(4.21 mg/g)、水解氨基酸(94.955 mg/g)含量,在低脂高纤食品配料方面更具备应用前景。在水解氨基酸方面,COR与CMR中氨基酸种类相似,均含有多多种必需氨基酸和药用氨基酸;同时COR具有相对较好的水合特性和流动性,是一种易于加工的原料;此外,COR具有相对较高的热稳定性、较完整的晶体结构。COR作为营养相对丰富且低糖低脂高纤的天然原料,加工特性较好,来源广泛、价格低廉、产地相对集中且产量较大,在食品工业中具有较大的开发应用潜力,本研究对椰肉加工副产物的食品化加工增值利用具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 张建国, 宋菲. 我国椰子产业现状及发展战略分析[J]. 中国农业信息, 2016(12): 139-141.
ZHANG J G, SONG F. Analysis of the current situation and development strategy of China's coconut industry [J]. China Agricultural Informatics, 2016(12): 139-141. (in Chinese)
- [2] PHONPHOEM W, SINTHUVANICH C, ARAMRAK A, SIRICHIEWSAKUL S, ARIKIT S, YOKTHONGWATTANA C. Nutritional profiles, phytochemical analysis, antioxidant activity and DNA damage protection of makapuno derived from Thai aromatic coconut[J]. Foods, 2022, 11(23): 3912.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The high level of expert consultation on coconut sector development in Asia and the Pacific region[R], Bangkok: FAO, 2013.
- [4] YALEGAMA L, KARUNARATNE D N, SIVAKANESAN R, JAYASEKARA C. Chemical and functional properties of fiber concentrates obtained from by-products of coconut kernel[J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 124-130.
- [5] 王爽, 张亚男, 黄雪冰, 夏伟光, 李凯潮, 王胜林, 陈伟, 郑春田. 饲粮椰子粕和复合酶添加水平对蛋鸭生产性能、蛋品质、血浆生化指标及卵巢发育指标的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(5): 2980-2990.
WANG S, ZHANG Y N, HUANG X B, XIA W G, LI K C, WANG S L, CHEN W, ZHENG C T. Effects of dietary copra meal and compound enzyme supplemental levels on performance, egg quality indexes and ovarian development

- indexes, plasma biochemical indexes of laying ducks[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(5): 2980-2990. (in Chinese)
- [6] KHATOON M, JAKHESARA S J, RANK D N, JOSHI C G, KUNJADIYA A P. Exploration of rumen microbial and carbohydrate-active enzyme profiles in cattle fed coir a lignin-rich diet using a metagenomic approach[J]. Gene, 2022, 846: 146848.
- [7] PIPATPAITTOON N, PARAKSA N. Defatted coconut residue as alternative feedstuff for growing and finishing pigs[J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2021, 43(2): 364-371.
- [8] 周琦, 藕志强, 饶鑫, 杜学禹. 椰子果皮废弃物的高值化利用现状及发展趋势[J]. 广州化工, 2020, 48(18): 16-19. ZHOU Q, OU Z Q, RAO X, DU X Y. Status and development trend of higher value utilization of coconut waste husk[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(18): 16-19. (in Chinese)
- [9] ROZEN N, KASIM M, KUSUMAWATI A, IKRAM H, SHOLIHAT I. The early heading growth stage of rice plants in using the SRI method by giving liquid organic fertilizer of coconut husk and banana stems[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1160(1): 012006.
- [10] 甘珊. 椰糠与草炭配比下马铃薯原种生产的综合分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. GAN S. Comprehensive technical analysis of potato original seed production under the ratio of coconut bran and peat[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [11] AFRILLAH M, JUNITA D, ARISKA N, SIREGAR M P A, SUAIDI S. Growth and production response of three cucumber varieties to liquid organic fertilizer of coconut coir[J]. E3S Web of Conferences, 2023, 373: 03016.
- [12] KAG S, KUMAR P, KATARIA R. Potato peel waste as an economic feedstock for PHA production by *Bacillus circulans*[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2024, 196(5): 2451-2465.
- [13] 马开创, 黄宏飞, 彭吟雪, 何东平, 胡传荣. 椰子分级蛋白制备的研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(5): 67-72. MA K C, HUANG H F, PENG Y X, HE D P, HU C R. Preparation of coconut fractionated protein[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(5): 67-72. (in Chinese)
- [14] 詹麒鸿, 周爱存, 任佳慧, 程怡然, 余宇帆. 酶解前后商品多糖的总糖含量与体外抗氧化活性比较[J]. 中国食品工业, 2022(15): 107-109, 114. ZHAN Q H, ZHOU A C, REN J H, CHENG Y R, SHE Y F. Comparison of total sugar content of commercial polysaccharides with antioxidant activity *in vitro* before and after enzymatic hydrolysis[J]. China Food Industry, 2022(15): 107-109, 114. (in Chinese)
- [15] CHUMROENPHAT T, SOMBOONWATTHANAKUL I, SAENSOUK S, SIRIAMORNUN P. Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128121.
- [16] HUANG Z T, CHEN Q Q, HU K X, ZHANG R F, YUAN Y, HE S, ZENG Q Z, SU D X. Effects of *in vitro* simulated digestion on the free and bound phenolic content and antioxidant activity of seven species of seaweeds[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 56(5): 2365-2374.
- [17] ANDERSON R A, CONWAY H F, PEPLINSKI A J. Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming[J]. Starch-Starke, 1970, 22(4): 130-135.
- [18] ZHANG W, ZENG G, PAN Y, 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.
- [19] KEBEDE Y S, TEFERRA T F. Isoelectric point isolation and characterization of proteins from lupine cultivars as influenced by chemical and thermal treatments[J]. Heliyon, 2023, 9(3): 14027.
- [20] ABDULLAH Z, TAIP F S, MUSTAPA KAMAL S M, RAHMAN R Z A. The effect of drying temperature and sodium caseinate concentration on the functional and physical properties of spray-dried coconut milk[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 58(8): 3174-3182.
- [21] RODSAMRAN P, SOTHORNVIT R. Physicochemical and functional properties of protein concentrate from by-product of coconut processing[J]. Food Chemistry, 2018, 241: 364-371.
- [22] WANG T L, XIAO Z S, LI T G, GUO G, CHEN S Y, HUANG X Q. Improving the quality of soluble dietary fiber from *Poria cocos* peel residue following steam explosion[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100829.
- [23] 刘恒蔚. 石油醚除脂处理对香菜总黄酮提取的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25): 13699-13700. LIU H W. Effects of degreasing treatment with petroleum ether on extracting of flavonoids from *Coriandrum sativum* L.[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38 (25): 13699-13700. (in Chinese)
- [24] 王长伟, 冯晓梅, 刘楚怡, 付雪媛, 杜芬. 不同海域野生海参体壁营养成分的比较分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 341-348. WANG C W, FENG X M, LIU C Y, FU X Y, DU F. Com-

- parative analysis of nutritional components of wild sea cucumbers in different sea areas[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 341-348. (in Chinese)
- [25] CROGUENNEC T, RENAULT A, BEAUFILS S, DUBOIS J, PEZENNEC S. Interfacial properties of heat-treated ovalbumin[J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 2007, 315(2): 627-636.
- [26] RAGHAVENDRA S N, SWAMY S R R, RASTOGI N K, RAGHAVARAO K, KUMAR S, THARANATHAN R. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: a source of dietary fiber[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 72(3): 281-286.
- [27] TAN Y Y, LI S X, LI C F, LIU S X. Glucose adsorption and α -amylase activity inhibition mechanism of insoluble dietary fiber: comparison of structural and microrheological properties of three different modified coconut residue fibers[J]. *Food Chemistry*, 2023, 418: 135970.
- [28] 杨岚. 热处理强度对大豆蛋白凝胶性质的影响及机制初探[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- YANG L. Effect of heat treatment intensity on the gel properties of soybean protein and study on its mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018. (in Chinese)
- [29] 王储炎, 阎晓明, 任子旭, 刘艳伟, 贾俊强, 范涛, 桂仲争. 不同干燥方式对桑葚果粉物理特性的影响[J]. *蚕业科学*, 2013, 39(2): 340-345.
- WANG C Y, YAN X M, REN Z X, LIU Y W, JIA J Q, FAN T, GUI Z Z. Effects of different drying methods on physical properties of mulberry fruit powder[J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2013, 39(2): 340-345. (in Chinese)
- [30] KANWAR P, YADAV R B, YADAV B S. Cross-linking, carboxymethylation and hydroxypropylation treatment to sorghum dietary fiber: effect on physicochemical, micro structural and thermal properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 233: 123638.
- [31] ZHAO X Y, CHEN J, CHEN F L, WANG X C, ZHU Q J, AO Q. Surface characterization of corn stalk superfine powder studied by FTIR and XRD[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 104: 207-212.
- [32] MUHAMMAD A R, FARHAN S, MUHAMMAD A, ALI I, BUSHRA N, MUZZAMAL H, AMARA R, MUHAMMAD K M, MUHAMMAD W, ENTESSAR A J. Comparative study of cross-and uncross-linked arabinoxylans extracted from maize bran with special reference to their structural and antioxidant potential[J]. *International Journal of Food Properties*, 2022, 25(1): 2495-2504.
- [33] MALGORZATA M, KARP S, NIU Y, MARCIN A K. Enzymatic, enzymatic-ultrasonic and alkaline extraction of soluble dietary fiber from flaxseed—a physicochemical approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 105-112.
- [34] SUNGSINCHAI S, NIAMNUY C, JAREE A, DEVAHAS-TIN S. Influences of pretreatment and drying methods on composition, micro/molecular structures and some health-related functional characteristics of dietary fiber powder from orange pulp residues[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(10): 2217-2229.
- [35] OUYANG H, GUO B L, HU Y, LI L J, JIANG Z D, LI Q B, NI H, LI Z P, ZHENG M J. Effect of ultra-high pressure treatment on structural and functional properties of dietary fiber from pomelo fruitlets[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102436.
- [36] SI J Y, YANG C R, MA W J, CHEN Y, XIE J H, QIN X T, HU X B, YU Q. Screen of high efficiency cellulose degrading strains and effects on tea residues dietary fiber modification: structural properties and adsorption capacities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 220: 337-347.
- [37] WANG L, LIU H M, XIE A J, ZHU C Y, QIN G Y. Dietary fiber extraction from defatted corn hull by hot-compressed water[J]. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2018, 68(2): 133-140.