牛思文, 柴佳彤, 李佳怡, 等. 沙米与藜麦膳食纤维的结构、理化性质及功能特性的比较 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 104−115. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020057
NIU Siwen, CHAI Jiatong, LI Jiayi, et al. Structure, Physicochemical, and Functional Properties of Dietary Fiber Extracts Obtained from *Agriophyllum squarrosum* Seed and Quinoa[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 104−115. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020057

· 研究与探讨 ·

沙米与藜麦膳食纤维的结构、理化性质及功能特性的比较

牛思文, 柴佳彤, 李佳怡, 蒋艳琼, 刘天乐, 王　乾, 韩立宏*
（北方民族大学生物科学与工程学院, 食品生产与安全协同创新中心, 宁夏银川 750021）

摘　要: 从自然界可获取材料中挖掘具有优异功能活性的膳食纤维新资源对于提升人类膳食水平意义重大。本文以藜麦膳食纤维为参考，通过傅里叶变换红外光谱仪、核磁共振光谱仪、扫描电镜等方法对三种不同产区的新资源沙米的膳食纤维的结构进行了表征，并对三种膳食纤维的粘度、持水力和持油力等理化性质，体外降糖和抗氧化功能特性进行了系统分析。结果表明，所有膳食纤维均具有典型的多糖红外光谱特征；与藜麦可溶性膳食纤维（soluble dietary fiber，SDF）相比，沙米 SDF 结构紧凑，具有更高的甘露糖含量（14.97~16.82 mg/mg）和 DPPH 自由基清除能力（63.18%~63.42%）；沙米不溶性膳食纤维（insoluble dietary fiber，IDF）较藜麦 IDF 具有较多的空隙，且结合酚含量、持水力、胆固醇吸附能力、体外降糖活性、DPPH 自由基清除活性、羟基自由基清除活性和还原力均显著（P<0.05）高于藜麦 IDF。可见，沙米膳食纤维具有与藜麦膳食纤维不同的形态结构、物理性质和功能特性，是一种优质的膳食纤维资源。

关键词: 沙米, 藜麦, 膳食纤维, 结构, 理化性质, 功能特性
中图分类号: TS213　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0104−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020057
本文网刊:

Structure, Physicochemical, and Functional Properties of Dietary Fiber Extracts Obtained from *Agriophyllum squarrosum* Seed and Quinoa

NIU Siwen, CHAI Jiatong, LI Jiayi, JIANG Yanqiong, LIU Tianle, WANG Qian, HAN Lihong*
（College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Yinchuan 750021, China）

Abstract: It was of great significance to explore new dietary fiber resources with excellent functional activity from available materials in nature for improving human diet level based on quinoa dietary fiber, the structure, by Fourier transform infrared spectroscopy, nuclear magnetic resonance, scanning electron micrographs, physicochemical properties, such as viscosity, water-holding capacity and oil-holding capacity, and functional properties of hypoglycemic and antioxidant properties from *Agriophyllum squarrosum* seeds of three different regions were systematically analyzed in this paper. The results showed that all dietary fibers had typical infrared spectral characteristics of polysaccharides. Compared with quinoa soluble dietary fiber (SDF), *Agriophyllum squarrosum* SDF had a compact structure, higher mannose content (14.97~16.82 mg/mg) and DPPH free radical scavenging ability (63.18%~63.42%). Compared with insoluble dietary fiber from quinoa (IDF), *Agriophyllum squarrosum* IDF had more void space, and binding phenol content, water retention capacity, cholesterol adsorption capacity, *in vitro* hypoglycemic activity, DPPH radical scavenging activity, hydroxyl radical scavenging activity and reducing power were significantly higher (P<0.05) than quinoa soluble dietary fiber. It could be seen that *Agriophyllum squarrosum* dietary fiber had different morphological structure, physical properties and

收稿日期: 2025−02−12
基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目（202411407026）。
作者简介: 牛思文（2004−）, 女, 本科, 研究方向: 谷物深加工理论及应用, E-mail: 17803976810@163.com。
*** 通信作者:** 韩立宏（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 谷物深加工理论及应用, E-mail: hanlihong_0317@126.com。

functional properties from quinoa dietary fiber, and would be a high-quality dietary fiber resource.

Key words: *Agriophyllum squarrosum* seed; quinoa; dietary fiber; structure; physiochemical properties; functional properties

膳食纤维是广泛存在于谷物、蔬菜和水果细胞壁中的一类高分子碳水化合物, 不能被人体小肠吸收, 根据其在水中的溶解度可分为不可溶性纤维(insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性纤维(soluble dietary fiber, SDF)[1], 前者主要由纤维素、木质素和不溶性半纤维素组成, 后者由可溶性半纤维素、果胶、树胶和低聚糖组成[2]。膳食纤维能在大肠中发酵, 促进肠道有益菌的生长, 产生有益代谢产物, 降低心血管疾病、糖尿病和肠道疾病的风险[3], 系统综述和 meta 分析表明, 膳食纤维摄入量最高的人与摄入量最低的人相比, 其患心血管疾病、Ⅱ型糖尿病和结直肠癌的风险, 以及中风发病率和死亡率降低了 15%~30%[4]。因此, 膳食纤维被认为是促进人体健康的重要大分子。为了丰富膳食纤维的来源, 满足消费者随着健康意识增强和生活方式改变而对膳食纤维产生的日益增长的需求, 研究者们探索了各种食材所含膳食纤维的价值。传统谷物, 如小麦, 通常被认为是膳食中膳食纤维的良好来源, 但是小麦面筋蛋白已被发现会引起乳糜泻患者的胃肠道不适[5−6], 这在一定程度上限制了小麦作为膳食纤维来源的广泛使用。因此, 从无面筋蛋白成分的材料中获取膳食纤维已经成为当前的研究焦点[7]。

近年来, 藜麦等加工食用属性与谷物相似的假谷物作为膳食纤维来源越来越受到消费者和研究人员的青睐。已有研究发现, 藜麦中膳食纤维含量与传统谷物接近, 约 11%, 其中可溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维的比例在 2∶8 左右[8]。藜麦膳食纤维同小麦膳食纤维一样具有多糖的红外光谱特征; 同等制备条件下所得藜麦 SDF 的粒径大于小麦 SDF, 且前者与后者相比较拥有紧凑的微观结构、更高的还原力和消化酶抑制活性[9]; 藜麦 SDF 中的结合酚具有良好的 DPPH 自由基清除能力和 α-淀粉酶抑制活性[9−10]。因此, 藜麦是一种潜在的优质膳食纤维来源。

与藜麦同属于假谷物的沙米(*Agriophyllum squarrosum*), 是苋科藜亚科沙蓬属一年生草本植物沙蓬的籽粒。沙蓬耐寒、耐旱、耐贫瘠, 适于生长在裸露沙地或流动沙丘, 当前作为防风固沙的先锋植物已在我国西北为主的沙漠及沙化地区有大规模的野生和人工种植。野生沙蓬的沙米产量约 500~750 kg/hm^2, 而人工种植沙蓬的沙米产量可达 950 kg/hm^2, 相当于高产糜子[11−12]。随着人类对沙漠生态环境治理工作的不断推进, 沙蓬的种植面积有望不断扩大, 沙米资源将会越来越丰富。前人研究表明, 沙米中含有丰富的碳水化合物、粗蛋白、膳食纤维、多酚、脂肪及矿物质元素等, 营养价值堪比联合国推荐的全营养食物藜麦[13−14], 具有健脾胃、清热解毒、助消化、降血脂、抗氧化、利尿等功效[11,14−15]。沙区牧民把沙米作为粮食食用已有 1300 多年历史, 沙米羊肉转刀面、沙米凉粉就是宁夏、甘肃等沙区的传统美食。近年来, 随着研究者对沙米认识的不断深入, 沙米被认为是应对全球气候恶化导致粮食减产大背景下的潜在粮食作物[11]。可见, 沙米是一种优异的功能型荒漠特色食品新资源。目前国内外还没有关于沙米膳食纤维结构、理化和功能特性的系统公开报道。

本研究以藜麦膳食纤维为对照, 对沙米所含 SDF 和 IDF 从结构、理化性质和功能特性方面进行系统分析, 进而为沙米资源的深度开发利用提供理论依据和实践指导。这对于沙蓬经济价值的挖掘具有重大意义。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

野生沙米　采自宁夏陶乐戈壁滩、内蒙古乌兰布和沙漠和腾格里沙漠甘肃民勤地段(2022 年 10 月采收), 分别编号为 AS-1、AS-2 和 AS-3; 藜麦　采自宁夏回族自治区固原市原州区三营镇(2022 年 10 月采收); 中性蛋白酶(50 U/mg)、糖化酶(100 U/mg)　瑞勇生物技术有限公司(中国上海); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、耐高温 α-淀粉酶(50 U/mg)、α-葡萄糖苷酶(50 U/mg)、单糖标准品(葡萄糖、半乳糖、木糖、甘露糖、阿拉伯糖和半乳糖醛酸)　美国 Sigma-Aldrich 有限公司; 其他本研究所用到的化学试剂　均来自国药集团化学试剂有限公司; 以上试剂均为分析纯。

J-600 核磁共振光谱仪　日本 JASCO 公司; ICS-5000 离子交换色谱仪　美国 Thermo Fisher Scientific 公司; S-3400N 扫描电子显微镜　日立高新技术公司; Mastersizer 2000 马尔文激光粒度仪　英国马尔文帕纳科仪器有限公司; MCR301 旋转流变仪　奥地利安东帕(上海)商贸有限公司; DH108 傅里叶变换红外光谱仪　得利特(北京)科技有限公司; 2050R-1 冷冻离心机　长沙湘仪离心机仪器有限公司; Grinder-CHOPIN 旋风磨　法国肖邦技术公司; AL104 分析天平、FE28-Standard 台式酸度计　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; 101-3-BS-II 电热恒温鼓风干燥箱　上海跃进医疗器械有限公司; SD-303-4A 数显电热恒温培养箱　南通金石试验仪器有限公司; NP-28S 旋涡混合器　常州恩培仪器制造有限公司; HH W-2 水浴锅　金坛市友联仪器研究所。

1.2 实验方法

1.2.1 膳食纤维的制备 沙米和藜麦膳食纤维的制备参考 Guo 等[16] 的方法。将去壳的沙米和藜麦籽粒分别经旋风磨粉碎成粉, 过 50 目筛, 筛上物反复粉碎, 直到全部通过 50 目筛, 筛下物混合均匀, 得到沙米和藜麦原料粉。将不同种类原料粉分别分散在正己烷(1∶5, w/v)中, 室温浸泡 12 h, 沥出正己烷, 此过程重复两次进行脱脂。将 10 g 脱脂粉末分别用含 0.55 g α-淀粉酶的酶液(10 U/mg, pH6.5, 90 ℃ 水浴 2 h)、含 0.1 g 糖化酶的酶液(100 U/mg, pH4.5, 60 ℃ 水浴 60 min)和含 0.8 g 中性蛋白酶的酶液(50 U/mg, 65 ℃ 水浴 2 h)进行水解。酶解样品经 100 ℃ 加热 10 min 使酶失活, 冷却至室温, 6000×g 离心 10 min, 去离子水洗涤并离心 2 次。离心所得残渣依次用 95% 乙醇洗涤两次, 丙酮洗涤两次, 40 ℃ 干燥 16 h 后制得 IDF; 所得上清液与 60 ℃ 的 95% 乙醇混合(1∶4, v/v), 沉淀过夜, 沉淀物在 8000×g 离心 10 min, 真空干燥得 SDF。

1.2.2 膳食纤维的组成分析 提取物中 SDF 和 IDF 的含量按照 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定》方法测定[17]; 膳食纤维样品中水分、灰分和蛋白质含量分别参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》中的直接干燥法[18]、GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》[19] 和 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》方法[20] 进行分析; 膳食纤维的单糖组成采用离子交换色谱法进行分析[21], 制备岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、氨基半乳糖盐酸盐、盐酸氨基葡萄糖、N-乙酰-D 氨基葡萄糖、古罗糖醛酸、甘露糖醛酸标准品(10 mg、100 mg/L)的混合物。样品经两步 72% w/w(20 ℃ 时比重 1.6338)硫酸水解, 稀释 10 倍, 0.22 μm 微孔过滤膜过滤制备样品待测液。通过样品与标准品峰时间和峰面积的比较, 确定样品水解液中单糖的组成及含量。

1.2.3 傅里叶红外光谱(FT-IR)分析 称取 1.2.1 所得的沙米和藜麦膳食纤维样品各 1.0 mg 于玛瑙研钵中, 加入 100.0 mg 干燥的溴化钾晶体, 轻轻研磨混匀, 使用压片机进行压片, 制成透明且均匀的膜, 用傅里叶变换红外光谱仪在红外区 4000~400 cm^{-1} 范围内进行扫描, 得到红外光谱特征曲线。光谱图中, 896 cm^{-1} 和 1424 cm^{-1} 处的吸光度强度比可以用来计算膳食纤维的结晶度指数(CrI)[22], 具体计算公式如下:

$$CrI(\%) = A_{1424}/A_{896} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.4 ^{13}C CP/MAS 核磁共振光谱(NMR)分析 使用核磁共振光谱仪获取固态 ^{13}C NMR 光谱, 参考王淑玉等[23] 的方法, 以实现对 1.2.1 所得的膳食纤维样品的分子水平表征。采用交叉极化/魔角旋转(CP/MAS)技术, 工作频率为 100.6 kHz。样品在 4 mm Kel-F 帽 ZrO 转子中的旋转转速为 14 kHz, 脉冲为 1H, 接触时间为 1 ms。为了获得合适的信噪比, 在 2 s 的脉冲延迟下进行了 15000~81000 次扫描。

1.2.5 扫描电镜分析 参考王淑玉等[23] 的方法, 取适量 1.2.1 所得沙米和藜麦膳食纤维样品, 干燥至恒重。将干燥的样品用双面胶固定在电镜专用样品台上, 喷金 30 s 后分别在 2000×放大倍数下观察样品颗粒的形貌。

1.2.6 黏度的测定 1.2.1 所得的沙米和藜麦 SDF 的黏度采用 Ding 等[24] 提出的方法稍作修改进行评价。称取 0.010 g 的沙米和藜麦 SDF 于 100 mL 超纯水中, 25 ℃ 下持续搅拌 5 h, 通过旋转流变仪(平板夹具直径: 50 mm; 间隙: 0.047 mm; 测试温度: 20 ℃)测定 SDF 样品黏度随剪切速率的变化。

1.2.7 持水力和持油力的测定 1.2.1 所得的沙米和藜麦膳食纤维的持水和持油能力依据 Ma 等[25] 的方法测定。室温下将两份 0.100 g 干燥 IDF 样品放置在离心管中分别与 5 mL 蒸馏水混合 24 h, 6000 r/min 离心 20 min, 倾倒上层液体, 称量残渣重量。根据公式(2)计算样品的持水力(g/g)。

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad \text{式(2)}$$

式中, m_1 和 m_2 分别为干样品 IDF 质量(g)和残渣质量(g)。

分别准确称取 0.200 g 干膳食纤维样品置于试管中, 加入 30 mL 葵花籽油, 室温放置 18 h(每隔 1 h 振荡一次), 3000 r/min 离心 20 min, 除去油层, 称量残渣。根据公式(3)计算样品的持油力(g/g)。

$$\text{持油力(g/g)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad \text{式(3)}$$

式中 m_1 和 m_2 分别为干膳食纤维质量(g)和残渣质量(g)。

1.2.8 结合酚含量测定 1.2.1 所得的沙米和藜麦 IDF 中结合酚的含量测定参考 Chandrasekara 等[26] 和 Zhang 等[27] 的方法。称取 1.000 g 的 IDF, 25 mL 乙醇溶液(80%, V/V)浸提, 4 ℃ 离心(4000×g) 20 min。此过程重复 3 次, 收集离心后的残渣提取结合酚类化合物。将残渣与 20 mL(2 mol/L)NaOH 溶液在室温下混合 1 h, 用 6 mol/L HCl 调节 pH 为 2, 4000×g 离心 20 min, 上清液用正己烷和乙酸乙酯萃取 5 次。萃取液 45 ℃ 蒸发后, 将残留物溶于甲醇中, −20 ℃ 暗藏待测。以没食子酸为对照, 结果以没食子酸当量(GAC)mg/g 干样品(mg GAE/g)表示。

1.2.9 胆固醇吸附能力的测定 1.2.1 所得的沙米和藜麦膳食纤维的胆固醇吸附能力测定参考 Wu 等[28] 利用比色法进行测定。取 0.100 mg/mL 的胆固醇标准工作液 0、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 mL 分别于 10 mL 试管中, 在各管内加入冰乙酸

使总体积均达 0.40 mL，沿管壁加入 0.20 mL 邻苯二甲醛溶液（1 mg/mL）和 4 mL 混合酸（冰乙酸∶浓硫酸=1∶1）混合均匀，室温静置 10 min，550 nm 波长处测定吸光度。并以总胆固醇量（mg）为横坐标，吸光度为纵坐标，绘制胆固醇标准曲线。

称取 1.000 g 膳食纤维样品分别置于 100 mL 的锥形瓶中，各加入 50 mL 稀释后的蛋黄液（取新鲜鸡蛋蛋黄与 9 倍质量的蒸馏水充分搅拌混匀即得蛋黄液），混合均匀，调节溶液的 pH 至 2.0 和 7.0，摇床振荡 2 h（温度 37 ℃，转速 120 r/min），6000 r/min 离心 20 min，取上清液 1 mL，加入 90% 的乙酸稀释五倍；取 0.1 mL 稀释液，加入 0.3 mL 冰乙酸，按照标准曲线法在 550 nm 处测定吸光度值，然后根据公式（4）计算样品的胆固醇吸附能力（g/g）。

$$\text{胆固醇的吸附能力(g/g)} = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \qquad \text{式（4）}$$

式中 m_1、m_2 和 m_3 分别代表吸附前蛋黄液中胆固醇量（g）、吸附后上清液中胆固醇量（g）和膳食纤维的质量（g）。

1.2.10　体外降糖活性测定

1.2.10.1　葡萄糖吸附量（GA）和葡萄糖透析迟缓指数（GDRI）分析　参考 Qi 等[29] 的方法，取 1.2.1 所得的膳食纤维样品（0.100 g）分别与 10 mL 不同浓度的葡萄糖（50、100 和 200 mmol/L）混合，37 ℃ 下孵育 6 h，4000×g 下离心 20 min，用葡萄糖测定试剂盒测定上清液中的葡萄糖含量，计算样品的葡萄糖吸附量；将样品（0.1000 g）分散于 10 mL 50 mmol/L 的葡萄糖溶液中，使用截留分子量为 12000 Da 的透析膜在 37 ℃ 下对 200 mL 蒸馏水进行透析。在 30、60、90 和 120 min 后，用葡萄糖测定试剂盒测定透析液中的葡萄糖含量。在不添加膳食纤维样品的情况下进行对照试验。葡萄糖透析迟缓指数的计算公式如下：

$$\text{葡萄糖透析迟缓指数(\%)} = \left(1 - \frac{\text{添加膳食纤维样品后的葡萄糖含量}}{\text{对照中的葡萄糖含量}}\right) \times 100 \qquad \text{式（5）}$$

1.2.10.2　α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性抑制率　参考 Zhang 等[27] 的方法测定样品的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性。将 500 μL 20 mg/mL 的样品与 500 μL 1 U/mL 的 α-淀粉酶溶液混合，37 ℃ 水浴培养 10 min，加入 500 μL 1%（w/w）的淀粉溶液，37 ℃ 下再培养 10 min，加入 1 mL DNS，沸水浴 5 min 终止反应，冷却至室温，用 9 mL 蒸馏水稀释，520 nm 处测量吸光度。按照上述程序开展无样品对照试验。α-淀粉酶抑制率计算公式如下：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率(\%)} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \qquad \text{式（6）}$$

式中 A_1 和 A_2 分别代表对照和样品的吸光度。

同样，将 50 μL、20 mg/mL 的样品与 100 μL、100 mmol/L 的 PBS 和 0.2 mL 0.5 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶混合，37 ℃ 水浴预孵育 10 min，加入 0.4 mL、1.5 mmol/L 的 PNPG 混合，37 ℃ 孵育 30 min，加入 1 mL 1 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液终止反应，400 nm 处测定吸光度。膳食纤维样品对 α-葡萄糖苷酶的抑制率与 α-淀粉酶的抑制率的计算方式相同。

1.2.11　抗氧化活性测定

1.2.11.1　DPPH 自由基清除能力　参考 Yan 等[30] 的方法，分别将测试样品按照 0.2~1.2 mg/mL 的浓度范围分散在蒸馏水中。取 150 μL SDF 样品液与 1 mL 0.2 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液混合后，室温下避光保存 20 min，517 nm 处测定吸光度（A_2）；以蒸馏水替代样品液同样条件下测得的吸光度记作 A_1。

另外，取 0.5 mL 的 IDF 样品悬浮液与 0.5 mL 0.2 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液混合，室温黑暗条件下反应 30 min，与 IDF 相同测定条件测定吸光度（A_2）；以蒸馏水替代样品悬浮液同样条件下测得的吸光度记作 A_1。样品清除 DPPH 自由基的能力计算公式如下：

$$\text{DPPH自由基清除能力(\%)} = \frac{A_1 - (A_2 - A_3)}{A_1} \times 100 \qquad \text{式（7）}$$

式中，A_3 为与样品测试相同条件下，乙醇溶液代替 DPPH-乙醇溶液条件下样品的吸光度。

1.2.11.2　羟基自由基清除能力　取 100 μL 样品溶液，加入 2 mL 0.02 mol/L 的 PBS（pH7.4）、100 μL 1.8 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、100 μL1.8 mmol/L 的 $FeSO_4$ 溶液、25 μL 0.02% 的 H_2O_2 及 175 μL 超纯水，37 ℃ 孵育 30 min，510 nm 处测定吸光度。样品对羟基自由基的清除活性计算公式如下：

$$\text{羟基自由基清除活性(\%)} = \frac{A_1 - (A_2 - A_3)}{A_1} \times 100 \qquad \text{式（8）}$$

式中，A_1 为空白对照组的吸光度；A_2 为样品的吸光度；A_3 为与 A_2 相同条件下，水杨酸-乙醇溶液代替 $FeSO_4$ 和 H_2O_2 溶液条件下样品的吸光度。

1.2.11.3　总还原力　参考 Zhang 等[27] 的方法确定膳食纤维样品的总还原能力。将 20 μL 1 mg/L 的样品溶液，100 μL 0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲液（pH6.6）和 100 μL 铁氰化钾（1%）溶液混合，50 ℃ 水浴中反应 20 min 后加入 100 μL TCA（10%），再室温反应 30 min。取 250 μL 反应溶液加入 100 μL 蒸馏水和 20 μL 0.1% 的 $FeCl_3$ 溶液，混合均匀，静置 10 min，700 nm 处测定吸光度。

1.3　数据处理

每个实验做 3 次重复，实验结果表示为“平均值±标准差”。样品之间的差异显著性（P<0.05）

采用 SPSS 软件的 Duncan 法进行分析，绘图采用 Origin2023 软件。

2 结果与分析

2.1 沙米和藜麦膳食纤维的化学成分

从沙米和藜麦中所得 SDF 和 IDF 的产量和化学组成如表 1 所示。沙米和藜麦的 SDF 的产量分别为 0.81~1.17 g/100 g 和 1.69 g/100 g，均显著低于两种原料中的 IDF 的产量（P<0.05），这与植物性膳食纤维大多数为 IDF 的发现是一致的[31]。三种不同产地沙米中 SDF 含量显著低于藜麦（P<0.05）；沙米中 IDF 含量均显著高于藜麦（P<0.05），但三种沙米材料中的 IDF 含量没有显著性差异。这些发现可以归因于样品的不同植物来源和生长条件[32]；两种 SDF 中的水分、蛋白质和灰分含量均显著高于对应的 IDF（P<0.05），这与 Chen等[9] 关于藜麦和小麦膳食纤维的相关研究所得结果一致；沙米 SDF 和 IDF 的灰分含量均显著高于相对应的藜麦 SDF 和 IDF（P<0.05），这与沙米相对于藜麦含有更丰富的矿物质元素有关[33−34]；在沙米样品中，AS-2 的灰分含量显著高于 AS-1 和 AS-3（P<0.05），这可能是因为 AS-2 的生长环境含有较多的矿物元素。

2.2 沙米和藜麦膳食纤维的单糖分析

沙米和藜麦膳食纤维的单糖组成分析结果如表 2 所示。藜麦 SDF 的单糖成分有葡萄糖、半乳糖醛酸、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、甘露糖和盐酸氨基葡萄糖，含量依次为葡萄糖>半乳糖醛酸>半乳糖>木糖>阿拉伯糖>甘露糖。这主要归因于藜麦 SDF 中木葡聚糖和果胶多糖的存在，有报道称它们是藜麦 SDF 的主要成分[7−9]。与藜麦 SDF 相比，沙米 SDF 中所含单糖的成分与前者一致，但是沙米 SDF 中葡萄糖、木糖和甘露糖含量高于前者。甘露糖是半纤维素的主要成分之一[35]，说明沙米 SDF 相对于藜麦 SDF 含有更多的半纤维素成分。就 IDF 而言，藜麦 IDF 中检测到葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖和半乳糖醛酸成分，含量依次为葡萄糖（437.63 μg/mg）>木糖（57.11 μg/mg）>阿拉伯糖（46.22 μg/mg）>半乳糖（28.35 μg/mg）>半乳糖醛酸（26.52 μg/mg）；沙米 IDF 中的单糖成分与藜麦 IDF 一致，其中最主要的单糖，依次为葡萄糖和木糖、半乳糖、阿拉伯糖、半乳糖醛酸。这是因为两种 IDF 中纤维素和木聚糖的存在，已有研究发现木聚糖是所有双子叶种子细胞壁中主要的交联半纤维素[36]。三种沙米的膳食纤维的单糖组成一致，但在单糖含量上存在差异。样品 AS-2 的木糖水平低于 AS-1 和 AS-3，而其半乳糖醛酸、半乳糖含量则显著高于后两者。这些变化可能与它们不同的生长环境有关。已有研究表明，湿度、温度和养分水平等环境因素可能会影响植物膳食纤维中的单糖组成和含量[37]。

2.3 FT-IR 分析结果

反映沙米和藜麦膳食纤维官能团的 FT-IR 光谱如图 1 所示。从图 1A 中可以看出，沙米和藜麦 SDF 的一般光谱特征相似。谱图中 2930 cm^{-1} 处的

表 1 沙米和藜麦中所得 SDF 和 IDF 产量及化学组成

Table 1 Yields and compositions of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

样品			产量 (g/100 g)	纯度 (%)	水分含量 (%)	蛋白质含量(%)	灰分含量(%)
沙米	AS-1	SDF	0.99±0.13^{de}	62.46±0.18^{c}	10.98±0.10^{a}	13.28±0.21^{a}	15.22±0.15^{b}
		IDF	12.02±0.19^{a}	72.85±0.19^{a}	7.66±0.07^{c}	11.17±0.14^{bc}	8.34±0.12^{e}
	AS-2	SDF	1.17±0.11^{d}	60.83±0.15^{e}	10.66±0.13^{a}	13.07±0.16^{a}	16.01±0.13^{a}
		IDF	11.76±0.20^{a}	72.71±0.22^{a}	7.49±0.10^{c}	11.00±0.15^{bc}	8.98±0.17^{d}
	AS-3	SDF	0.81±0.16^{e}	61.32±0.14^{d}	10.59±0.09^{a}	12.89±0.22^{a}	15.49±0.19^{b}
		IDF	11.68±0.37^{a}	72.96±0.17^{a}	7.58±0.09^{c}	11.46±0.18^{b}	8.16±0.11^{e}
藜麦		SDF	1.69±0.11^{c}	64.25±0.24^{b}	10.79±0.07^{a}	12.99±0.17^{a}	13.18±0.09^{c}
		IDF	8.76±0.15^{b}	72.84±0.17^{a}	9.01±0.06^{b}	10.97±0.18^{c}	7.08±0.14^{f}

注：SDF为可溶性膳食纤维；IDF为不可溶性膳食纤维；同一列中不同字母表示数值间具有显著性差异（P<0.05）。

表 2 沙米和藜麦膳食纤维的单糖组成

Table 2 Monosaccharide composition of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

单糖(μg/mg)	沙米						藜麦	
	AS-1		AS-2		AS-3			
	SDF	IDF	SDF	IDF	SDF	IDF	SDF	IDF
葡萄糖	610.92	393	578.17	375	600.53	336	457.05	437.63
半乳糖	19.02	23.79	16.88	24.66	21.08	24.32	27.32	28.35
木糖	27.08	47.36	29.45	44.64	24.79	44.95	17.13	57.11
甘露糖	16.82	–	14.97	–	15.58	–	8.06	–
阿拉伯糖	7.36	22.93	8.93	21.69	6.92	21.44	10.23	46.22
半乳糖醛酸	8.19	9.33	9.06	10.74	7.61	10.02	32.69	26.52

注：SDF为可溶性膳食纤维；IDF为不可溶性膳食纤维；“–”表示未检测到数据（含量低，未达仪器检测限）。

弱吸收峰源于多糖聚合物中 C-H 和 CH_2 基团的伸缩[38]；3300 cm^{-1} 处的宽峰是 O-H 的伸缩振动峰，而 O-H 主要来自纤维素或半纤维素[39]。藜麦 SDF 在这两个波段的吸收峰相对较弱，说明纤维素和果胶多糖的氢键含量较低。沙米 SDF 的峰强度较高，说明其中可能含有更多的木聚糖等半纤维素，这与单糖组成的研究结果一致（表 2）。谱图中 1000、1220 和 1660 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应于 C-O、CO-OR 和芳香木质素烃的伸缩振动[7,38]。如图 1B 所示，藜麦 IDF 的整体键活性弱于沙米 IDF。在 2929 cm^{-1} 和 3340 cm^{-1} 处，沙米 IDF 的峰强度高于藜麦 IDF，说明沙米 IDF 比藜麦 IDF 具有更典型的多糖复合物结构。沙米和藜麦 IDF 均在约 1000 cm^{-1} 处表现出较高的峰强度，这是典型的木聚糖吸收峰[40]，进一步表明两种 IDF 含有木聚糖。

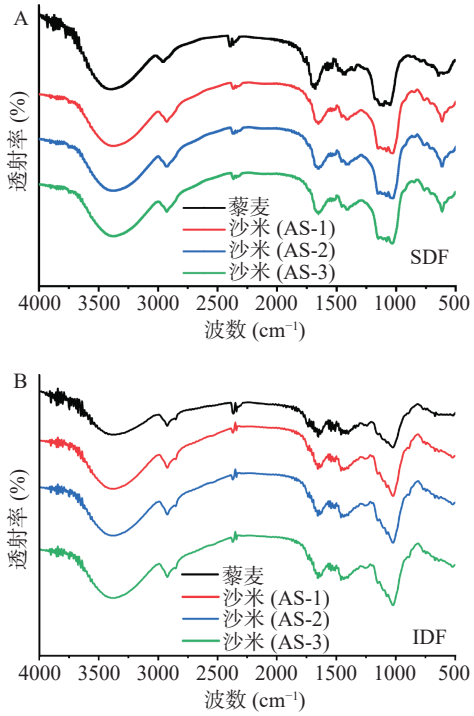


图 1　沙米和藜麦 SDF 和 IDF 的红外光谱图

Fig.1　FT-IR spectra of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

此外，从表 3 中 FT-IR 图谱所得的 CrI 值可知，所有 SDF 样品的有序度均小于 IDF 样品；沙米 SDF 样品的结晶度高于藜麦 SDF，但是沙米 IDF 的结晶度却低于藜麦 IDF。这种有序度差异将对膳食纤维的功能特性产生显著影响。

2.4　NMR 分析结果

图 2 是膳食纤维样品的^{13}C CP/MAS NMR 图谱，所有样品在碳水化合物区域（60~110 ppm）显示出显著的信号峰。δ60~70 ppm 范围内的峰对应于 C6，δ70~81 ppm 之间的峰群则分配给 C2、C3 和 C5，δ98~108 ppm 处的共振信号被分配给 C1，79~86 ppm 范围内的信号与非晶态纤维素的 C4 相关，而 86~93 ppm 的信号则与结晶纤维素的 C4 相关[41]。沙米和藜麦的 SDF 或 IDF 样品的 NMR 光谱信号相似，这表明它们由于相同的单糖组成而具有可比的化学结构。79~86 ppm 和 86~92 ppm 之间的 C4 峰比率可以用来测量纤维素的结晶度[41]，由此得出来的沙米和藜麦膳食纤维的 CrI 值如表 3 所示。所有 IDF 样品的 CrI 值均高于 SDF 样品，且藜麦的 IDF 的 CrI 值高于沙米 IDF，表明藜麦的 IDF 具有更高的结晶值和更有序的结构，这些跟 FT-IR 的研究结果一致。63.0 ppm 处的信号归因于纤维素和/或半纤维素[42]，所有 SDF 样品的信号强度强于 IDF 样品，且藜麦的 SDF 信号强度大于沙米的 SDF 信号。这些结果可能归因于所有 SDF 样本中半纤维素含量高于 IDF 样本，以及藜麦 SDF 中半纤维素含量高于沙米 SDF。

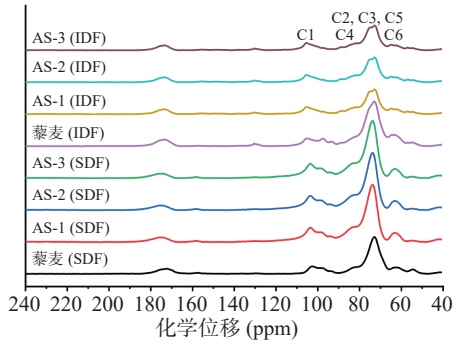


图 2　沙米和藜麦膳食纤维的核磁共振碳谱

Fig.2　NMR carbon spectra of dietary fibers from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

注：SDF：可溶性膳食纤维；IDF：不可溶性膳食纤维。

2.5　表观形态

表征沙米和藜麦膳食纤维微观形态的扫描电镜图片如图 3 所示。藜麦 SDF 表面粗糙、结构松散，有一定的间隙度；而沙米 SDF 表面相对平整、结构致密空洞少、碎片不规则。与两种 SDF 样品相比，藜麦和沙米 IDF 空间网络结构更紧密，呈现较大的团块状，且藜麦 IDF 相对于沙米 IDF 呈现出更加紧

表 3　沙米和藜麦膳食纤维的 CrI 值

Table 3　CrI values of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

指标		沙米						藜麦	
		AS-1		AS-2		AS-3			
		SDF	IDF	SDF	IDF	SDF	IDF	SDF	IDF
CrI值（%）	FT-IR	25.12	48.95	24.56	49.66	24.38	47.93	17.89	59.89
	NMR	10.06	34.71	11.23	31.79	10.96	33.68	7.84	42.90

注：SDF为可溶性膳食纤维；IDF为不可溶性膳食纤维。

密无孔的结构。这些结果进一步证实了 FT-IR 和 NMR 所得的 CrI 值反映的不同膳食纤维样品有序度之间的差异。膳食纤维的微观结构不仅与其自身的性能有关，还取决于诸多因素[43]。如提取方法和加工条件会对纤维素和半纤维素产生不同程度的破坏，进而造成其形态上的差异。

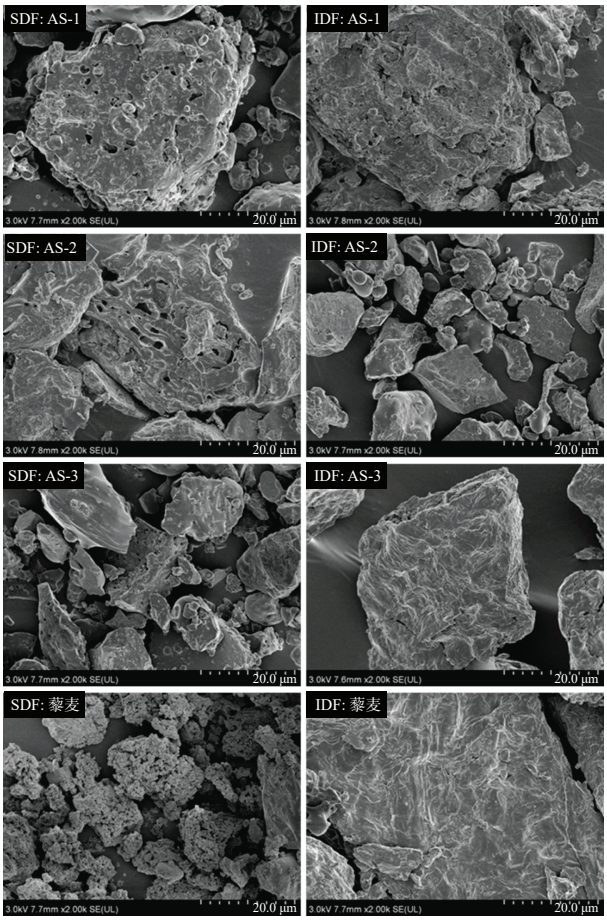


图 3 沙米和藜麦膳食纤维的电镜照片(2000×)

Fig.3 Microstructure of dietary fibers from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples (2000×)

2.6 黏度分析

黏度是 SDF 的重要特性之一，与其降低餐后血糖反应的能力有关[9]。沙米和藜麦 SDF 溶液的黏度随着剪切速率的变化趋势如图 4 所示，室温条件下随着剪切速率的增大，四种 SDF 溶液的黏度均迅速降低，呈现出剪切稀化属性，表明所有 SDF 样品溶液均为假塑性流体[44]，这与 Chen 等[9] 关于藜麦和小麦 SDF 溶液黏度的研究结果一致。沙米和藜麦 SDF 溶液的黏度接近，这可能是因为他们的分子量及所含粘性纤维种类和数量相近。

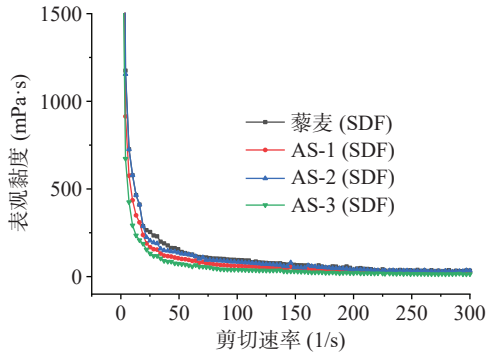


图 4 沙米和藜麦可溶性膳食纤维的表观黏度随剪切速率的变化趋势

Fig.4 Trends of apparent viscosity with the shear rate of SDF from *Agriophyllum squarrosum* and quinoa samples

2.7 持水力和持油力分析

持水力反映膳食纤维在受到外力时保持水分的能力[25]。如表 4 所示，三种沙米 IDF 的持水能力显著(P<0.05)高于藜麦 IDF，这是由于沙米 IDF 的结构相对藜麦 IDF 更疏松、孔隙率更高，暴露出更多的氢键和水结合位点[45]；另外，膳食纤维的持水力也跟加工条件和电荷密度等诸多因素有关[45]。在三种沙米 IDF 样品中，AS-3 的保水能力显著(P < 0.05)低于 AS-1 和 AS-2，这可能是由于 AS-3 相比于 AS-1 和 AS-2 具有更紧凑的结构(这一结果已在 SEM 分析实验中得到证实)。

膳食纤维的持油力取决于其表面性能、总电荷密度和疏水性[46]，高持油能力的膳食纤维可阻止食品加工过程中脂肪的流失，以及带走人体中过多摄入的脂肪[47]。藜麦和三种沙米 SDF 的持油力均显著(P<0.05)高于相对应的 IDF 样品，这主要归因于 SDF 具有相对于 IDF 更松散的网络结构，Wang 等[43] 研究发现结构相对疏松的猕猴桃 SDF 的持油力显著高于猕猴桃 IDF；藜麦 SDF 表现出比三种沙米 SDF

表 4 沙米和藜麦膳食纤维持水能力、持油能力、结合酚含量和胆固醇吸附能力

Table 4 Water retention capacity, oil-holding capacity, bound phenol content and cholesterol adsorption capacity of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

指标		沙米						藜麦	
		AS-1		AS-2		AS-3			
		SDF	IDF	SDF	IDF	SDF	IDF	SDF	IDF
持水力 (g/g)		–	6.16±0.72^{ab}	–	6.81±0.43^{a}	–	5.86±0.37^{b}	–	4.45±0.96^{c}
持油力 (g/g)		13.87±0.39^{b}	10.07±0.11^{cd}	14.19±0.26^{b}	10.61±0.32^{c}	13.74±0.31^{b}	9.37±0.19^{d}	15.49±0.24^{a}	8.66±0.41^{e}
结合酚含量 (mg GAE/g 干基样品)		–	4.78±0.19^{a}	–	4.22±0.16^{a}	–	4.36±0.25^{a}	–	2.03±0.25^{b}
胆固醇吸附能力 (mg/g)	pH2	17.21±0.12^{b}	16.27±0.16^{c}	17.03±0.20^{b}	16.01±0.29^{c}	16.75±0.31^{b}	15.79±0.17^{c}	18.82±0.23^{a}	13.14±0.09^{d}
	pH7	20.70±0.13^{c}	22.34±0.17^{b}	20.99±0.10^{c}	21.98±0.22^{b}	19.70±0.18^{c}	21.79±0.20^{b}	24.43±0.13^{a}	18.08±0.200^{d}

注：SDF为可溶性膳食纤维；IDF为不可溶性膳食纤维；–表示未检测到数据；同一行中不同字母表示数值间具有显著性差异(P<0.05)。

显著高的持油力(P<0.05), 但是藜麦 IDF 的持油力显著低于三种沙米 IDF(P<0.05), 这些结果与样品的形态结构的研究结果一致, 越疏松的网络结构表现出越高的持油能力。

2.8　结合酚含量和胆固醇吸附能力分析

膳食纤维中的酚类物质, 尤其是与 IDF 结合的多酚类物质, 与膳食纤维的一些功能特性密切相关[48]。藜麦 IDF 中结合酚含量约 2.03 mg GAE/g (表 4), 显著低于沙米 IDF 的 4.22~4.78 mg GAE/g 左右。已有研究发现, 藜麦中的酚类物质主要以游离酚的形式存在, 游离组分对总酚含量的贡献在 53.5%~78.0% 之间[9]。沙米 IDF 结合酚含量约为藜麦 IDF 的 3 倍, 说明沙米中以结合态存在的酚类物质的含量要高于藜麦。这可能跟沙米 IDF 相对藜麦 IDF 具有更疏松的形态结构有关, 因为酚类物质会进入膳食纤维的疏水空腔或孔洞并发生以疏水相互作用为主导的结合[49]。

胆固醇吸附能力是评价材料体外降血脂能力的重要指标。沙米和藜麦膳食纤维在 pH2(模拟胃环境)和 pH7(模拟肠道环境)条件下对胆固醇的吸附能力如表 4 所示。所有膳食纤维样品在 pH7 时的胆固醇吸附能力显著强于 pH2 时, 这与 Wu 等[28] 关于竹笋膳食纤维胆固醇吸附能力的研究结果一致, 说明藜麦和沙米膳食纤维与竹笋膳食纤维一样均具有更强的降低小肠胆固醇浓度的能力。藜麦 SDF 的胆固醇吸附量显著高于三种沙米 SDF(P<0.05), 而藜麦 IDF 的胆固醇吸附量显著低于三种沙米 IDF(P<0.05)。这可能是因为藜麦 SDF 相对于沙米 SDF, 沙米 IDF 相对于藜麦 IDF 具有更疏松多孔的结构, 因而有更大的比表面积, 从而具有更多的胆固醇吸附位点。由于其物理化学性质, 沙米和藜麦膳食纤维可以作为一种降胆固醇的功能性散装成分在各种食品加工中得到潜在的利用, 如膳食纤维面条、烘焙、浓缩和其他需要油和水分保持的食品。

2.9　体外降糖活性测定

2.9.1　葡萄糖吸附量(GA)和葡萄糖透析迟缓指数(GDRI)分析　GA 和 GDRI 指标是评价膳食纤维对肠道血糖影响的重要体外参数。已有研究表明, 竹笋、谷物等高膳食纤维食品可以延迟或者降低消化道对葡萄糖的吸收, 进而呈现一定的降血糖功能[50]。如表 5 所示, 四种膳食纤维样品对不同浓度的葡萄糖(50~200 mmol/g)均表现出了有效的吸附能力, 且每种样品对葡萄糖的吸附量与葡萄糖浓度均成正比, 在葡萄糖低浓度条件下, 三种沙米 SDF 的 GA 值显著低于(P<0.05)藜麦 SDF, 当葡萄糖浓度达到 200 mmol/g 时, 沙米和藜麦 SDF 的 GA 值没有显著性差异; 藜麦 SDF 的 GDRI 值在 30~120 min 范围内均高于三种沙米 SDF。这可能是因为藜麦 SDF 相对更疏松的质地, 增加了吸收葡萄糖的接触面积, 减缓了葡萄糖溶液的扩散速度, 进而表现出相对沙米 SDF 较高的 GA 和 GDRI 值, 此发现与 Gu 等[51] 对不同酶处理的马铃薯皮 SDF 的研究结果一致; 高糖浓度(200 mmol/L)下两种 SDF 的葡萄糖吸附能力没有显著性差异, 这可能归因于两者相似的黏度, SDF 的黏性可以增强葡萄糖分子在纤维网络内的包裹, 从而延缓葡萄糖的扩散[25], 达到吸附葡萄糖的效果。三种沙米 IDF 的 GA 和 GDRI 值在三种葡萄糖浓度下均显著高于(P<0.05)藜麦 IDF, 沙米和藜麦 IDF 脱酚后的 GA 和 GDRI 值均显著低于(P<0.05)相对应的未脱酚的 IDF 样品。这可能主要还是

表 5　沙米和藜麦膳食纤维的体外降糖活性

Table 5　*In vitro* hypoglycemic activities of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

样品			葡萄糖吸附量(mmol/g)			葡萄糖透析迟缓指数(%)			
			50 mmol/L	100 mmol/L	200 mmol/L	30 min	60 min	90 min	120 min
沙米	AS-1	SDF	1.99±0.11^{b}	5.69±0.09^{b}	11.32±0.12^{a}	50.23±0.32^{b}	40.12±0.24^{b}	26.27±0.25^{b}	24.19±0.28^{b}
		IDF	1.57±0.10^{c}	5.21±0.14^{c}	7.76±0.21^{b}	40.16±0.27^{c}	27.27±0.19^{c}	22.38±0.28^{c}	20.53±0.18^{c}
		脱酚IDF	0.78±0.07^{f}	2.37±0.11^{f}	3.40±0.16^{e}	30.82±0.14^{d}	16.21±0.09^{e}	19.87±0.18^{d}	18.47±0.31^{d}
		IDF结合酚	–	–	–	–	–	–	–
	AS-2	SDF	1.96±0.07^{b}	5.58±0.10^{b}	11.44±0.10^{a}	50.46±0.27^{b}	40.00±0.16^{b}	25.94±0.22^{b}	23.89±0.21^{b}
		IDF	1.53±0.12^{c}	5.14±0.12^{c}	7.83±0.1^{b}	40.41±0.23^{c}	27.09±0.14^{c}	22.33±0.17^{c}	20.37±0.23^{c}
		脱酚IDF	0.79±0.10^{f}	2.41±0.13^{f}	3.44±0.11^{e}	31.08±0.15^{d}	16.39±0.14^{e}	19.98±0.13^{d}	18.69±0.17^{d}
		IDF结合酚	–	–	–	–	–	–	–
	AS-3	SDF	1.91±0.09^{b}	5.62±0.12^{b}	11.25±0.13^{a}	50.07±0.18^{b}	39.88±0.21^{b}	26.59±0.22^{b}	24.16±0.17^{b}
		IDF	1.61±0.13^{c}	5.24±0.07^{c}	7.69±0.12^{b}	39.95±0.22^{c}	27.41±0.22^{c}	22.46±0.16^{c}	20.67±0.10^{c}
		脱酚IDF	0.72±0.08^{f}	2.30±0.08^{f}	3.41±0.1^{3e}	30.58±0.20^{d}	16.01±0.18^{e}	20.05±0.20^{d}	18.25±0.26^{d}
		IDF结合酚	–	–	–	–	–	–	–
藜麦		SDF	2.29±0.09^{a}	6.88±0.09^{a}	11.39±0.10^{a}	54.29±0.30^{a}	44.07±0.29^{a}	30.66±0.38^{a}	27.65±0.22^{a}
		IDF	1.27±0.08^{d}	4.68±0.14^{d}	7.01±0.17^{c}	31.45±0.23^{d}	20.97±0.16^{d}	16.67±0.18^{e}	15.93±0.15^{e}
		脱酚IDF	1.01±0.07^{e}	3.08±0.15^{e}	4.83±0.13^{d}	24.76±0.27^{e}	10.58±0.14^{f}	13.63±0.17^{f}	12.59±0.13^{f}
		IDF结合酚	–	–	–	–	–	–	–

注: SDF为可溶性膳食纤维; IDF为不可溶性膳食纤维; –表示未检测到数据; 同一列中不同字母表示数值间具有显著性差异(P<0.05)。

因为沙米 IDF 相对藜麦 IDF 具有更多孔的结构; 其次, 酚酸基团对葡萄糖有很强的亲和力[52], 因此脱酚 IDF 的 GA 和 GDRI 值相对于未脱酚 IDF 显著降低。

2.9.2 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性 通过抑制参与碳水化合物消化的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性降低葡萄糖吸收率和餐后血糖升高, 在控制高血糖和糖尿病方面已经取得了巨大成功[53]。前人研究表明, 膳食纤维可以通过增加胃肠道粘液的粘度或将酶和底物包裹在纤维的网络结构中来降低酶和底物之间的可达性, 也可以通过形成酶-抑制剂或酶-抑制剂-底物复合物来改变 α-淀粉酶的构象这两种主要方式减弱 α-淀粉酶的酶促反应[54−55]。沙米和藜麦膳食纤维样品的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性如表 6 所示。沙米 SDF 对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制活性均显著小于(P<0.05)藜麦 SDF, 这可能是因为藜麦 SDF 具有更高的纯度(表 1)和比表面积(结构疏松、孔隙度高), 高孔隙表面结构就是导致膳食纤维具有高 α-淀粉酶抑制活性的主要原因[54]; 沙米 IDF 的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制活性均显著(P<0.05)高于藜麦 IDF, 脱酚 IDF 的酶抑制活性显著低于相对应的未脱酚的 IDF 样品, 这可能是由于沙米 IDF 对于藜麦 IDF 含有更多的结合酚导致的, 多项研究表明 IDF 脱酚之后其 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性均显著下降[9,56−57]; 沙米和藜麦结合酚对两种酶的抑制活性均没有显著性差异, 这进一步验证了藜麦 IDF 中含有更高的结合酚。

表 6 沙米和藜麦膳食纤维 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性

Table 6 Inhibitory activities of α-amylase and α-glucosidase of SDF and IDF in *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

样品			α-淀粉酶抑制活性(%)	α-葡萄糖苷酶抑制活性(%)
沙米	AS-1	SDF	67.28±0.10^{c}	81.09±0.25^{bc}
		IDF	64.37±0.19^{d}	78.05±0.16^{d}
		脱酚IDF	53.39±0.36^{f}	73.39±0.24^{e}
		IDF结合酚	86.82±0.27^{a}	81.55±0.14^{b}
	AS-2	SDF	67.71±0.12^{c}	80.87±0.22^{bc}
		IDF	64.55±0.11^{d}	78.23±0.19^{d}
		脱酚IDF	53.58±0.24^{f}	73.60±0.27^{e}
		IDF结合酚	86.49±0.25^{a}	81.28±0.24^{b}
	AS-3	SDF	67.45±0.18^{c}	81.26±0.20^{bc}
		IDF	64.60±0.23^{d}	77.85±0.19^{d}
		脱酚IDF	53.48±0.19^{f}	73.51±0.21^{e}
		IDF结合酚	87.01±0.25^{a}	81.73±0.19^{b}
藜麦		SDF	71.09±0.17^{b}	83.65±0.21^{a}
		IDF	62.57±0.23^{e}	73.85±0.29^{e}
		脱酚IDF	50.94±0.28^{d}	63.73±0.20^{f}
		IDF结合酚	87.39±0.38^{a}	80.82±0.42^{c}

注: SDF为可溶性膳食纤维; IDF为不可溶性膳食纤维; 同一列中不同字母表示数值间具有显著性差异(P<0.05); 表7同。

2.10 抗氧化活性测定

DPPH 自由基清除活性、羟基自由基清除活性和还原力实验被广泛用于评价膳食抗氧化剂的体外活性。如表 7 所示, 沙米 SDF 的 DPPH 自由基清除活性显著高于(P<0.05)藜麦 SDF, 这是因为沙米 SDF 中含有更多的木糖(表 2), 木糖的 C(O)-2 和 C(O)-3 位点存在较多的羟基, 可以提供电子或氢原子与自由基结合[21]; 而沙米 SDF 的羟基自由基清除活性却显著(P<0.05)低于藜麦 SDF, 这归因于藜麦 SDF 中含有更多的醛酸(表 2), 这可能会改变多糖的性质, 提高其抗氧化活性[58]; 藜麦 SDF 的还原能力显著(P<0.05)高于沙米 SDF, 所有 SDF 样品的抗氧化活性均高于 IDF 样品, 这与 Chen 等[9] 对藜麦和小麦膳食纤维的抗氧化活性的研究结果一致; 沙米 IDF 的 DPPH 自由基清除活性、羟基自由基清除活性和还原力均显著(P<0.05)优于藜麦 IDF, 脱酚 IDF 的三种抗氧化能力均显著(P<0.05)低于相对应的未脱酚 IDF 样品, 表明 IDF 样品的抗氧化能力部分来自其结合酚, 因为沙米 IDF 中结合酚含量显著(P<0.05)高于(表 5)藜麦 IDF, 因此沙米 IDF 抗氧化性能优于藜麦 IDF; 沙米和藜麦 IDF 结合酚的三种抗氧化能力之间无显著性差异, 这表明沙米和藜麦 IDF 的结合酚的组成可能相似。

表 7 沙米和藜麦膳食纤维的抗氧化活性

Table 7 Antioxidant activity of SDF and IDF from *Agriophyllum squarrosum* seeds and quinoa samples

样品			DPPH自由基清除率(%)	羟基自由基清除活性(%)	总还原力
沙米	AS-1	SDF	63.18±0.15^{b}	74.91±0.20^{b}	0.31±0.01^{c}
		IDF	20.36±0.35^{d}	46.95±0.24^{d}	0.27±0.02^{c}
		脱酚IDF	7.34±0.23^{g}	30.77±0.22^{f}	0.10±0.02^{e}
		IDF结合酚	71.55±0.18^{a}	49.88±0.40^{c}	1.15±0.03^{a}
	AS-2	SDF	63.42±0.20^{b}	74.75±0.22^{b}	0.32±0.01^{c}
		IDF	20.30±0.17^{d}	46.69±0.26^{d}	0.27±0.01^{c}
		脱酚IDF	7.59±0.18^{g}	30.81±0.19^{f}	0.09±0.02^{e}
		IDF结合酚	71.78±0.15^{a}	49.94±0.27^{c}	1.17±0.04^{a}
	AS-3	SDF	63.02±0.14^{b}	74.91±0.20^{b}	0.33±0.02^{c}
		IDF	20.49±0.23^{d}	46.65±0.18^{d}	0.26±0.01^{c}
		脱酚IDF	7.28±0.27^{g}	30.49±0.28^{f}	0.10±0.01^{e}
		IDF结合酚	71.37±0.17^{a}	49.78±0.20^{c}	1.16±0.02^{a}
藜麦		SDF	51.94±0.28^{c}	80.72±0.39^{a}	0.47±0.01^{b}
		IDF	11.72±0.26^{f}	36.33±0.28^{e}	0.17±0.03^{d}
		脱酚IDF	12.63±0.21^{e}	30.04±0.37^{f}	0.09±0.00^{e}
		IDF结合酚	70.92±0.35^{a}	50.31±0.33^{c}	1.13±0.01^{a}

3 结论

本研究对比分析了沙米与藜麦 SDF 和 IDF 的结构、理化性质和功能特性。结果表明, 藜麦 SDF 较沙米 SDF 具有更疏松多孔的网络结构, 而藜麦 IDF 的结构相对于沙米 IDF 更致密; 沙米 IDF 的结合酚含量、持水力及胆固醇吸附能力显著高于藜麦 IDF; 沙米 IDF 的 GA 值、GDRI 值、α-淀粉酶抑制能力、α-葡萄糖苷酶抑制能力、DPPH 自由基清除活性、羟基自由基清除活性和还原力均高于藜麦 IDF;

但是藜麦 SDF 的体外降糖活性、羟基自由基清除活性和还原力优于沙米 SDF。总体来说，沙米和藜麦膳食纤维由于网络结构、单糖组成和结合酚含量不同而表现出各有优势的物理性质和功能特性，沙米膳食纤维可以认为是一种功能优异的膳食纤维资源。本研究为沙米资源的深度开发利用提供了重要的理论及实践指导，但需结合多学科技术从分子水平剖析沙米膳食纤维与酚类物质结合位点，为其在精准营养和慢性病防控领域的创新应用提供科学支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] GONZÁLEZ-AGUILAR G A, BLANCAS-BENÍTEZ F J, SÁYAGO-AYERDI S G. Polyphenols associated with dietary fibers in plant foods: Molecular interactions and bioaccessibility[J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 13: 84−88.

[2] DAI F J, CHAU C F. Classification and regulatory perspectives of dietary fiber[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2017, 25(1): 37−42.

[3] KOH A, DE VADDER F, KOVATCHEVA-DATCHARY P, et al. From dietary fiber to host physiology: Short-chain fatty acids as key bacterial metabolites[J]. Cell, 2016, 165(6): 1332−1345.

[4] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: A series of systematic reviews and meta-analyses[J]. Lancet, 2019, 393(10170): 434−445.

[5] MURRAY J A, WATSON T, CLEARMAN B, et al. Effect of a gluten-free diet on gastrointestinal symptoms in celiac disease[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2004, 79(4): 669−673.

[6] TURSI A, BRANDIMARTE G, GIORGETTI G. High prevalence of small intestinal bacterial overgrowth in celiac patients with persistence of gastrointestinal symptoms after gluten withdrawal[J]. The American Journal of Gastroenterology, 2003, 98(4): 839−843.

[7] LIU Jie, WANG Zongwei, WANG Ziyuan, et al. Physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from different colored quinoa varieties (*Chenopodium quinoa* Willd)[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103045.

[8] LAMOTHE L M, SRICHUWONG S, REUHS B L, et al. Quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) and amaranth (*Amaranthus caudatus* W.) provide dietary fibres high in pectic substances and xyloglucans[J]. Food Chemistry, 2015, 167: 490−496.

[9] CHEN Hong, XIONG Min, BAI Tingmei, et al. Comparative study on the structure, physicochemical, and functional properties of dietary fiber extracts from quinoa and wheat[J]. LWT, 2021, 149: 111816.

[10] LIU Shuai, JIA Mengyun, CHEN Jiajun, et al. Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 284−292.

[11] ZHAO Pengshan, CAPELLA-GUTIÉRREZ S, SHI Yong, et al. Transcriptomic analysis of a psammophyte food crop, sand rice (*Agriophyllum squarrosum*) and identification of candidate genes essential for sand dune adaptation[J]. BMC Genomics, 2014, 15(1): 872.

[12] HAN Lihong, WEI Qiang, CAO Shaopan, et al. The assisting effects of ultrasound on the multiscale characteristics of heat-moisture treated starch from *Agriophyllum squarrosum* seeds[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 187: 471−480.

[13] 李文婷, 彭菁, 孙旭阳, 等. 双螺杆挤压对沙米复合粉理化及糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(4): 112−117,125. [LI Wenting, PENG Jing, SUN Xuyang, et al. Effects of twin-screw extrusion on physicochemical and pasting properties of sand rice composite powder[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(4): 112−117,125.]

[14] ZHAO Pengshan, LI Xiaofeng, SUN Hong, et al. Healthy values and domestication of sand rice (*Agriophyllum squarrosum*), a comparative view against *Chenopodium quinoa*[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(19): 4188−4209.

[15] 彭菁, 章梦琦, 邢梦珂, 等. 沙米麸皮和外胚乳分离蛋白的理化及功能性质[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 71−76. [PENG Jing, ZHANG Mengqi, XING Mengke, et al. Physiochemical and functional properties of protein isolates prepared from bran and perisperm of sand rice seeds (*Agriophyllum squarrosum*)[J]. Food Science, 2017, 38(13): 71−76.]

[16] GUO W W, BETA T. Phenolic acid composition and antioxidant potential of insoluble and soluble dietary fibre extracts derived from select whole-grain cereals[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 518−525.

[17] 国家卫生健康委员会、国家市场监管总局. 食品中膳食纤维的测定: GB 5009.88-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 1−2. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Determination of dietary fiber in foods: GB 5009.88-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023: 1−2.]

[18] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1−2. [National Health and Family Planning Commission. Determination of moisture in foods: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1−2.]

[19] 中华人民共和国卫生健康委员会, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.4-2003 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. [National Health Commission of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 5009.4-2003 Determination of ash in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.]

[20] 中华人民共和国卫生健康委员会, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.5-2003 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. [National Health Commission of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 5009.5-2003 Determination of protein in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.]

[21] WU Qinglan, ZHANG Ming, HU Haipeng, et al. Comparative study on chemical composition, functional properties of dietary fibers prepared from four China cereal brans[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128510.

[22] HUAMANI-PALOMINO R G, MAYTA S, CÓRDOVA B M, et al. Study of the effect of bleaching agents on the crystalline index of cellulose-based materials derived from corn husk by CP/MAS ^{13}C NMR and FT-IR spectroscopies[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 346: 122593.

[23] 王淑玉, 何大栓, 张建才, 等. 动态高压微射流对山楂果渣膳食纤维理化和结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(17):

174−182. ［WANG Shuyu, HE Daling, ZHANG Jiancai, et al. Effect of dynamic high-pressure microjet on physicochemical and structural properties of dietary fiber from hawthorn pomace[J]. Food Science, 2024, 45(17): 174−182.］

［24］ DING H H, CUI S W, GOFF H D, et al. Soluble polysaccharides from flaxseed kernel as a new source of dietary fibres: Extraction and physicochemical characterization[J]. Food Research International, 2014, 56: 166−173.

［25］ MA Mengmei, MU Taihua. 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.

［26］ CHANDRASEKARA A, SHAHIDI F. Determination of antioxidant activity in free and hydrolyzed fractions of millet grains and characterization of their phenolic profiles by HPLC-DAD-ESI-MS^n[J]. Journal of Functional Foods, 2011, 3(3): 144−158.

［27］ 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.

［28］ WU Weijie, HU Jie, GAO Haiyan, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.

［29］ QI J, LI Y, MASAMBA K G, et al. The effect of chemical treatment on the *in vitro* hypoglycemic properties of rice bran insoluble dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 699−706.

［30］ YAN Jingkun, WU Lixia, CAI Wudan, et al. Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124987.

［31］ ZHENG Yajun, LI Yan. Physicochemical and functional properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) cake dietary fibres: Effects of cellulase hydrolysis, acid treatment and particle size distribution[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 135−142.

［32］ KHORASANIHA R, OLOF H, VOISIN A, et al. Diversity of fibers in common foods: Key to advancing dietary research[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108495.

［33］ 许海燕, 冯鑫红, 张金玉, 等. 沙蓬的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 346−354. ［XU Haiyan, FENG Xinhong, ZHANG Jinyu, et al. Recent progress in research on *Agriophyllum squarrosum*(L.)moq[J]. Food Science, 2020, 41(13): 346−354.］

［34］ VILLACRÉS E, QUELAL M, GALARZA S, et al. Nutritional value and bioactive compounds of leaves and grains from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Plants, 2022, 11(2): 213.

［35］ PADAYACHEE A, DAY L, HOWELL K, et al. Complexity and health functionality of plant cell wall fibers from fruits and vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(1): 59−81.

［36］ BUNZEL M, RALPH J, STEINHART H. Association of non-starch polysaccharides and ferulic acid in grain amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) dietary fiber[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2005, 49(6): 551−559.

［37］ SERNA SALDÍVAR S O, AYALA SOTO F E. Chemical composition and biosynthesis of dietary fiber components[M]. Science and Technology of Fibers in Food Systems. Cham: Springer International Publishing, 2020: 15-43.

［38］ ZHAO Xiaoyan, CHEN Jun, CHEN Fengliang, et al. Surface characterization of corn stalk superfine powder studied by FTIR and XRD[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 104: 207−212.

［39］ PICKLES N A, AOKI H, AL-ASSAF S, et al. Characterisation and properties of *Acacia senegal* (L.) Willd. var, Senegal with enhanced properties (*Acacia* (Sen) SUPER GUM™): Part 3 Immunological characterisation of *Acacia* (Sen) SUPER GUM™[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(3): 338−346.

［40］ ULLAH I, YIN T, XIONG S B, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (soybean residue) insoluble dietary fiber modified by high-energy wet media milling[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 82: 15−22.

［41］ ZHANG Yue, QI Junru, ZENG Weiqi, et al. Properties of dietary fiber from *Citrus* obtained through alkaline hydrogen peroxide treatment and homogenization treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125873.

［42］ MODICA A, ROSSELLI S, CATINELLA G, et al. Solid state ^{13}C-NMR methodology for the cellulose composition studies of the shells of *Prunus dulcis* and their derived cellulosic materials[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240: 116290.

［43］ WANG Kunli, LI Mo, WANG Yuxiao, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106162.

［44］ CHEN Huanhuan, ZHAO Chunmei, LI Jie, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of *Lotus* root[J]. LWT, 2018, 93: 204−211.

［45］ CHAU C F, WANG Y T, WEN Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre[J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1402−1408.

［46］ JIA Mengyun, CHEN Jiajun, LIU Xiaozhen, et al. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 468−474.

［47］ RAGHAV A, AHMAD J. Glances of dietetic oral guar gum: Reducing cholesterol in human scenario[J]. Journal of Pharmacology & Clinical Research, 2018, 5(3): 555663.

［48］ XU Zhuohui, XIONG Xiong, ZENG Qingzhu, et al. Alterations in structural and functional properties of insoluble dietary fibers-bound phenolic complexes derived from lychee pulp by alkaline hydrolysis treatment[J]. LWT, 2020, 127: 109335.

［49］ 冯舒涵, 易建勇, 毕金峰, 等. 苹果酚类物质与膳食纤维的结合作用[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 335−346. ［FENG Shuhan, YI Jianyong, BI Jinfeng, et al. Combination effect of apple phenolic compounds and dietary fibers[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(12): 335−346.］

［50］ DONG Jilin, WANG Lei, LÜ Jing, et al. Structural, antioxidant and adsorption properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italica*) bran[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(8): 3886−3894.

［51］ GU Meidong, FANG Huicheng, GAO Yuhang, et al. Characterization of enzymatic modified soluble dietary fiber from tomato peels with high release of lycopene[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105321.

［52］ KABIR A U, SAMAD M B, D'COSTA N M, et al. Anti-hyperglycemic activity of *Centella asiatica* is partly mediated by carbohydrase inhibition and glucose-fiber binding[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2014, 14(1): 31.

［53］ JIANG Yongli, YIN Hao, ZHENG Yuanrong, et al. Structure, physicochemical and bioactive properties of dietary fibers from

Akebia trifoliata（Thunb.）Koidz. seeds using ultrasonication/shear emulsifying/microwave-assisted enzymatic extraction[J]. Food Research International, 2020, 136: 109348.

[54] BENITEZ V, REBOLLO-HERNANZ M, HERNANZ S, et al. Coffee parchment as a new dietary fiber ingredient: Functional and physiological characterization[J]. Food Research International, 2019, 122: 105−113.

[55] DHITAL S, GIDLEY M J, WARREN F J. Inhibition of α-amylase activity by cellulose: Kinetic analysis and nutritional implications[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 123: 305−312.

[56] WU Nana, LI Huanhuan, TAN Bin, et al. Free and bound phenolic profiles of the bran from different rice varieties and their antioxidant activity and inhibitory effects on α-amylose and α-glucosidase[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 206−212.

[57] ZHENG Yuting, LIU Shuai, XIE Jianhua, et al. Antioxidant, α-amylase and α-glucosidase inhibitory activities of bound polyphenols extracted from mung bean skin dietary fiber[J]. LWT, 2020, 132: 109943.

[58] HU Zhengyu, WANG Penghui, ZHOU Hongli, et al. Extraction, characterization and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Carex meyeriana* Kunth using different methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2155−2164.