

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220178

丹参渣和三七渣复合物中膳食纤维的 提取工艺及其理化特性

权冰艳^{1,2}, 夏 婷¹, 王永琪¹, 白晓丽^{1,2}, 耿贝贝¹, 王 敏¹

(1. 食品营养与安全国家重点实验室, 工业发酵微生物教育部重点实验室,
天津科技大学生物工程学院, 天津 300457;

2. 天士力医药集团股份有限公司, 创新中药关键技术国家重点实验室, 天津 300410)

摘 要: 中药植物中含有丰富的纤维资源, 对丹参渣和三七渣复合物中的膳食纤维进行提取, 能够提高其利用价值, 具有广阔的应用前景。本研究采用酶-化学法提取丹参渣和三七渣复合物的膳食纤维 (SPRC-DF), 通过单因素及 $L_9(3^4)$ 正交实验得到最优提取工艺为: α -淀粉酶添加量 0.07%、NaOH 质量分数 3.5%、碱解温度 90 °C、碱解时间 4 h, 在此条件下总膳食纤维含量为 90.68%。随后测得其含有纤维素 (59.54%)、半纤维素 (18.61%)、木质素 (11.70%) 和果胶 (3.27%)。SPRC-DF 的持水力为 (7.75 ± 0.23) g/g, 持油力为 (4.58 ± 0.09) g/g, 膨胀力为 (5.42 ± 0.17) mL/g, 阳离子交换能力为 (0.12 ± 0.01) mmol/g, 胆固醇吸附能力为 (14.11 ± 0.43) μ g/g (pH 2.0)、 (21.13 ± 0.24) μ g/g (pH 7.0), 葡萄糖吸附能力为 (3.41 ± 2.63) μ g/g。SPRC-DF 的重金属含量符合 GB 16740—2014《食品安全国家标准 保健食品》中的国家限量标准。SPRC-DF 粉体流动性较好, 休止角、滑动摩擦角、松装密度、振实密度和压缩度均满足生产加工的输送需求。丹参渣和三七渣复合物中的膳食纤维具有良好的理化特性, 适合作为保健食品的原料, 本研究为其综合利用提供了理论支撑。

关键词: 丹参渣; 三七渣; 膳食纤维; 酶-化学法; 理化特性

中图分类号: TS218

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)04-0001-08

Extraction and Physicochemical Properties of Dietary Fiber from *Salvia miltiorrhiza* Residue and *Panax notoginseng* Residue Complex

QUAN Bingyan^{1,2}, XIA Ting¹, WANG Yongqi¹, BAI Xiaoli^{1,2}, GENG Beibei¹, WANG Min¹

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Key Laboratory of Industrial Fermentation Microbiology, Ministry of Education, College of Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. State Key Laboratory of Core Technology in Innovative Chinese Medicine, Tasly Pharmaceutical Group Co., Ltd., Tianjin 300410, China)

Abstract: Traditional Chinese medicine plants are rich in fiber. The extraction of plant fiber from *Salvia miltiorrhiza* residue and *Panax notoginseng* residues complex can improve its utilization value, and has broad application prospects. In our present study, *Salvia miltiorrhiza* and *Panax notoginseng* residue complex dietary fiber (SPRC-DF) was extracted by enzymatic chemical method. The extraction process parameters were optimized by single factor and $L_9(3^4)$ orthogonal test as follow: α -amylase addition 0.07%, NaOH concentration 3.5%, alkaline hydrolysis temperature 90 °C and alkaline hydrolysis time 4 h. Under these conditions, the content of total dietary fiber was 90.68%, which was found to mainly contain cellulose (59.54%), hemicellulose (18.61%), lignin (11.70%) and pectin (3.27%). The water holding capacity of SPRC-DF was (7.75 ± 0.23) g/g, the oil holding capacity was (4.58 ± 0.09) g/g, the swelling capacity was (5.42 ± 0.17) mL/g, the cation exchange capacity was (0.12 ± 0.01) mmol/g, the cholesterol adsorption capacity was (14.11 ± 0.43) μ g/g at pH 2.0 and

收稿日期: 2022-07-16; 修回日期: 2022-12-21

基金项目: 天津市科技计划项目 (21ZYJJC00030); 企业横向项目 (20111116)

作者简介: 权冰艳 (1998—), 女, 湖南人, 硕士研究生; 通信作者: 王 敏, 教授, minw@tust.edu.cn

(21.13 ± 0.24) $\mu\text{g/g}$ at pH 7.0, and the glucose adsorption capacity was (3.41 ± 2.63) $\mu\text{g/g}$. The heavy metal content was within the national limit specified in GB 16740—2014 National Food Safety Standard Health Food. SPRC-DF powder had good fluidity, and the angle of repose, slip angle, loose density, tap density and compressibility meet the transportation requirements of production and processing. Our study shows that the dietary fiber in the compound of *Salvia miltiorrhiza* residue and *Panax notoginseng* residue has good physicochemical properties and is suitable as a raw material for health food, thus providing theoretical support for its widespread use.

Key words: *Salvia miltiorrhiza* residue; *Panax notoginseng* residue; dietary fiber; enzyme-chemical method; physicochemical properties

中药植物中含有丰富的膳食纤维,在制备中成药的过程中会产生数千万吨中药渣。目前,中药渣主要用于动物饲料、有机肥、菌菇培育、生物炭和生物质能源等^[1-2]。已有研究^[3]报道,中药渣中含有丰富的营养物质,如粗纤维、粗蛋白、粗多糖和矿物质等,因此中药渣中的有效成分再利用具有广泛的应用前景。复方丹参滴丸为全球首例完成 FDA III 期临床试验的复方中药制剂,具有活血化瘀、理气止痛的功效,主要成分为丹参和三七^[4]。两者皆为国家卫生部批准的可用于保健食品的原料。

膳食纤维是一类不能被人体小肠消化吸收,但能在大肠内全部或部分发酵的碳水化合物,被称为“第七大营养素”,具有降血糖、降血脂和促进肠道蠕动等功能^[5]。丹参渣和三七渣复合物为复方丹参滴丸工业提取剩余物,已有研究表明粗纤维为其中含量最高的成分^[6]。丹参渣和三七渣复合物的提取和再利用,对其功能产品的开发具有积极意义。

目前,膳食纤维的提取方法主要有化学法、物理法、酶法和发酵法等^[7-8]。化学法提取的膳食纤维品质相对较好,提取工艺成熟,操作简便快捷,是目前最常用的方法^[9]。酶法提取的膳食纤维得率高、表现出较好的理化性质^[10]。酶-化学法提取的膳食纤维纯度高,能够有效去除蛋白质和淀粉等杂质^[11]。本研究以丹参渣和三七渣复合物为研究对象,结合化学法和酶法两种方法,探讨丹参渣和三七渣复合物膳食纤维(*Salvia miltiorrhiza* and *Panax notoginseng* residue complex dietary fiber, SPRC-DF)的最佳提取工艺,测定 SPRC-DF 的理化性质、成分和重金属含量,探究 SPRC-DF 粉末的加工特性,旨在为中药渣膳食纤维的综合利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

丹参渣和三七渣复合物由天士力医药集团股份

有限公司提供。

α -淀粉酶(20 000 U/g, 食品级), 郑州万博化工产品有限公司; 氢氧化钠、柠檬酸, 天津市致远化学试剂有限公司; 95% 乙醇溶液、三羟甲基氨基甲烷、乙酸、盐酸、硫酸铜、硫酸钾、硼酸、甲基红、十二烷基硫酸钠、乙二胺四乙酸(EDTA)、硼酸钠、乙二醇单乙醚、无水磷酸氢二钠、浓硫酸、十六烷基三甲基溴化铵, 国药集团化学试剂有限公司; 石油醚, 天津市富宇精细化工有限公司; 膳食纤维检测试剂盒(热稳定 α -淀粉酶、蛋白酶、淀粉葡萄糖苷酶), 广州德资格哈特仪器有限公司; 铅、砷、汞标准溶液, 国家有色金属及电子材料分析测试中心; 半乳糖醛酸, 中国药品生物制品检定所。

FW100 型粉碎机、WGLL-125BE 型恒温鼓风干燥箱, 天津市泰斯特仪器有限公司; DK-S26 型电热恒温水浴锅, 上海森信实验仪器有限公司; SX2-2.5-10 型马弗炉, 天津市中环实验电炉有限公司; S20K 型 pH 计、XSR105DU 型电子分析天平, 梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司; K9840 型凯氏定氮仪, 济南海能仪器股份有限公司; SZF-06A 型粗脂肪测定仪, 上海新嘉电子有限公司; ETHOS 1 型微波消解仪, 意大利 Milestone 公司; iCAPQ 型电感耦合等离子体质谱仪, 美国 Thermo 公司。

1.2 成分分析

总膳食纤维含量根据 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》进行测定。蛋白质含量根据 GB/T 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》进行测定。淀粉含量根据 GB/T 5009.9—2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》进行测定。脂肪含量根据 GB/T 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行测定。灰分含量根据 GB/T 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》进行测定。纤维素、半纤维素和木质素含量参考李朝英等^[12]的方法, 采用范氏法进行测定。果胶含量根据 GB

25533—2010《食品安全国家标准 食品添加剂 果胶》进行测定,以半乳糖醛酸含量表示。

1.3 SPRC-DF的提取方法及工艺优化

将丹参渣和三七渣复合物在鼓风干燥箱中 80℃ 干燥至水分含量<5%,粉碎后过筛(12目),取 40 g 样品,按 1:20(g:mL)比例加入蒸馏水,加入 α -淀粉酶(添加量 0.03%),70℃ 酶解 60 min,之后按料液比 1:30(g:mL)加入 1.5% NaOH 溶液,70℃ 碱解 3 h,用 300 目滤布过滤后洗涤,干燥备用。

选择 α -淀粉酶添加量(0.01%、0.03%、0.05%、0.07%、0.09%)、酶解时间(40、60、80、100、120 min)、NaOH 质量分数(0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%)、碱解温度(50、60、70、80、90℃)、碱解时间(2、3、4、5、6 h)5 个因素进行单因素实验,考察各因素对 SPRC-DF 含量的影响。在单因素实验的基础上进行正交实验。

1.4 SPRC-DF 理化性质的测定

1.4.1 持水力

参考 Luo 等^[13]的方法并稍作修改。称取 0.50 g 样品,加入 10 mL 蒸馏水,室温下浸泡 24 h,4 000 r/min 离心 25 min,称量残渣质量。持水力(w_{water})按照式(1)计算。

$$w_{\text{water}} = (m_2 - m_1) / m_0 \quad (1)$$

式中: m_0 为样品质量,g; m_1 为样品和离心管的总质量,g; m_2 为吸水后样品和离心管的总质量,g。

1.4.2 膨胀力

参考 Luo 等^[13]的方法并稍作修改。称取 0.25 g 样品,加蒸馏水至 10 mL,摇匀后静置 12 h。膨胀力(v)按照式(2)计算。

$$v = (V_2 - V_1) / m_0 \quad (2)$$

式中: V_1 为样品的体积,mL; V_2 为样品膨胀后的体积,mL; m_0 为样品质量,g。

1.4.3 持油力

参考 Nsor-Atindana 等^[14]的方法并稍作修改进行测定。称取 0.50 g 样品,加入食用油 4.00 g,密封静置,37℃ 水浴加热 4 h,4 000 r/min 离心 15 min,倒掉上层油液,称量。按照式(3)计算持油力(w_{oil})。

$$w_{\text{oil}} = (m_3 - m_1) / m_0 \quad (3)$$

式中: m_0 为样品质量,g; m_1 为样品与离心管的总质量,g; m_3 为吸油后样品与离心管的总质量,g。

1.4.4 阳离子交换能力

参考 Benitez 等^[15]的方法并稍作修改。称取 0.50 g 样品,加入 20 mL 0.1 mol/L 盐酸,室温密封静

置 12 h,过滤并用蒸馏水反复洗涤至滤液中不含氯离子;滤渣加入 100 mL 5% 氯化钠溶液,搅拌 30 min,以 0.5% 酚酞-乙醇溶液为反应指示剂,用 0.10 mol/L NaOH 溶液滴定,记录消耗的氢氧化钠溶液体积。阳离子交换能力(b)按照式(4)计算。

$$b = (V_1 - V_0) \times 0.1 / m_0 \quad (4)$$

式中: V_0 为滴定空白样所消耗 NaOH 溶液体积,mL; V_1 为滴定样品所消耗的 NaOH 溶液体积,mL; m_0 为样品质量,g;0.1 为滴定所用 NaOH 溶液浓度,mol/L。

1.4.5 葡萄糖吸附能力

参考 Ma 等^[16]的方法并稍作修改进行测定。准确称取 0.25 g 样品,加入 50 μ g/mL 葡萄糖溶液 20 mL,37℃ 振荡 6 h,4 000 r/min 离心 15 min;取上清液 1 mL,采用蒽酮-硫酸法测定葡萄糖浓度。按照式(5)计算葡萄糖吸附能力(w_{glu})。

$$w_{\text{glu}} = (m_4 - m_5) / m_0 \quad (5)$$

式中: m_0 为样品质量,g; m_4 为吸附前葡萄糖质量, μ g; m_5 为吸附后葡萄糖质量, μ g。

1.4.6 胆固醇吸附能力

参考 Chen 等^[17]的方法并稍作修改。取用 9 倍体积蒸馏水稀释的鲜鸡蛋蛋黄液 20 mL,与 0.50 g 样品混匀,分别调节体系 pH 至 2.0 和 7.0,37℃ 振荡 2 h,4 000 r/min 离心 20 min,取上清液 1.0 mL,分别加入乙酸至总体积为 4.0 mL,沿管壁加入 2.0 mL 铁矾显色液,混匀后在 15~90 min 内、560 nm 波长处测其吸光度。膳食纤维对胆固醇的吸附能力(w_{chol})按照式(6)计算。

$$w_{\text{chol}} = (m_6 - m_7) / m_0 \quad (6)$$

式中: m_0 为样品质量,g; m_6 为吸附前胆固醇质量, μ g; m_7 为吸附后胆固醇质量, μ g。

1.5 SPRC-DF 中铅、汞、砷含量的测定

根据 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》进行测定。

1.6 SPRC-DF 粉体特性的测定

1.6.1 休止角

参考金俐延^[18]的方法进行测定。将漏斗固定在铁架台上,使漏斗底端距桌面 3 cm;将样品置于漏斗内,使其均匀、自由地落到平面上。按照式(7)计算休止角(ϕ)。

$$\phi = \arctan \frac{H}{R} \quad (7)$$

式中: H 为圆锥体样品顶端的高度,cm; R 为圆锥体

样品的半径, cm。

1.6.2 滑动摩擦角

取 3 g 样品置于光滑的玻璃板中心, 缓慢抬起玻璃板一侧, 直至板上 90% 粉末滑落为止, 记录此时玻璃板非固定端上升的高度, 并按照式 (8) 计算滑动摩擦角 (α)^[18]。

$$\alpha = \arcsin \frac{H'}{L} \quad (8)$$

式中: H' 为玻璃板非固定端上升的高度, cm; L 为玻璃板的长度, cm。

1.6.3 松装密度

将样品自由落入 10 mL 量筒至 10 mL 刻度线, 称量样品质量, 按照式 (9) 计算松装密度 (ρ_t)^[18]。

$$\rho_t = m/V_0 \quad (9)$$

式中: m 为样品的质量, g; V_0 为量筒的体积, mL。

1.6.4 振实密度

将样品自由落入 10 mL 量筒至 10 mL 刻度线, 压实样品, 直至样品的体积不再变化, 读取样品的体积, 按照式 (10) 计算振实密度 (ρ_b)^[18]。

$$\rho_b = m/V \quad (10)$$

式中: m 为样品的质量, g; V 为样品压缩后的体积, mL。

1.6.5 压缩度

参考金俐延^[18]的方法进行测定, 按照式 (11) 计算压缩度 (d)。

$$d = (\rho_b - \rho_t) / \rho_t \quad (11)$$

式中: ρ_b 为样品的振实密度, g/mL; ρ_t 为样品的松装密度, g/mL。

1.7 数据处理

实验数据采用 SPSS 25.0 进行显著性分析, 计算结果以“平均值 ± 标准差”表示, 不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

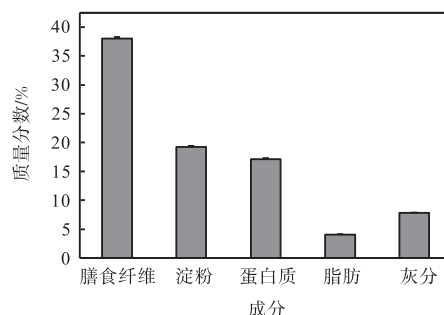
2 结果与分析

2.1 丹参渣和三七渣复合物的成分分析

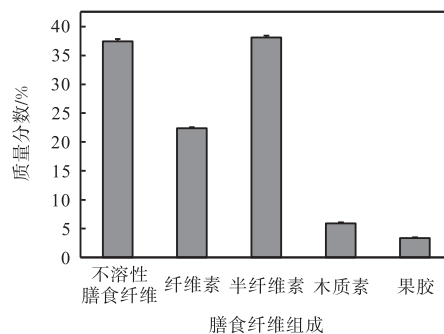
对丹参渣和三七渣复合物进行成分分析, 由图 1 可知: 丹参渣和三七渣复合物的成分种类丰富, 主要含有膳食纤维 38.01%、蛋白质 17.10%、淀粉 19.21%、脂肪 4.01%、灰分 7.82%, 膳食纤维为主要成分。进一步对不溶性膳食纤维含量进行检测, 不溶性膳食纤维占总膳食纤维的 98.55%, 结果表明: 丹参渣和三七渣复合物中膳食纤维主要为不溶性膳食纤维,

含有纤维素 22.40%、半纤维素 38.10%、木质素 5.91% 和果胶 3.38%。

成分分析结果表明蛋白质和淀粉为丹参渣和三七渣复合物中膳食纤维提取过程中的主要杂质。碱法脱蛋白是膳食纤维提取的常用方法, 并且该方法对脂肪、灰分等也有一定的脱除效果^[19]。淀粉酶为膳食纤维提取中常用的酶, 能够水解淀粉生成糊精和还原糖, 起到分离淀粉的效果^[20]。因此, 采用碱法和酶法联合分别去除蛋白质和淀粉, 可以获得高纯度的膳食纤维。



(a) 基本成分



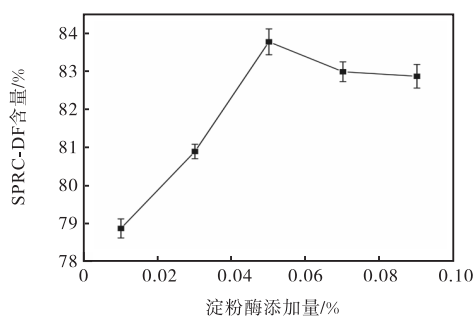
(b) 膳食纤维组成

图 1 丹参渣和三七渣复合物的基本成分和膳食纤维组成
Fig. 1 Basic components and dietary fiber components of *Salvia miltiorrhiza* and *Panax notoginseng* residue complex

2.2 SPRC-DF 提取实验分析

2.2.1 α -淀粉酶添加量对 SPRC-DF 含量的影响

α -淀粉酶添加量对 SPRC-DF 含量的影响如图 2 所示。由图 2 可知: 随着 α -淀粉酶添加量的增加, SPRC-DF 含量逐渐增加; 当 α -淀粉酶添加量达到 0.05% 时, 提取所得 SPRC-DF 含量最高, 达到 83.76%, 说明此时 α -淀粉酶的添加量已达到饱和; 随着 α -淀粉酶添加量进一步增加, SPRC-DF 含量呈微量下降趋势, 这可能是因为 α -淀粉酶添加过量, 导致半纤维素等物质溶出^[21]。因此, α -淀粉酶添加量取 0.03% ~ 0.07% 范围为宜。

图2 α -淀粉酶添加量对 SPRC-DF 含量的影响Fig. 2 Effect of α -amylase addition on SPRC-DF content

2.2.2 酶解时间对 SPRC-DF 含量的影响

酶解时间对 SPRC-DF 含量的影响如图 3 所示。由图 3 可知: 随着 α -淀粉酶酶解时间的增加, 原料中淀粉与 α -淀粉酶充分接触而酶解, SPRC-DF 含量逐渐增加; 当酶解时间达到 100 min 时, 提取所得 SPRC-DF 含量最高, 达到 84.50%; 随着酶解时间进一步增加, SPRC-DF 含量下降, 这可能是酶解时间过长, 导致部分纤维水解所致^[21]。因此, 选定 α -淀粉酶酶解时间为 100 min。

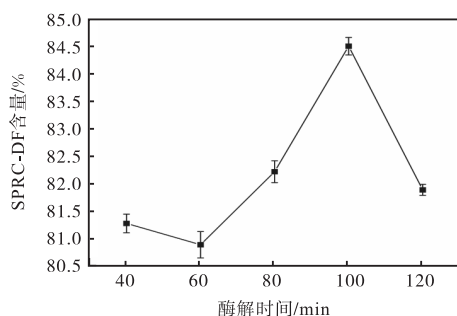


图3 酶解时间对 SPRC-DF 含量的影响

Fig. 3 Effect of enzymatic hydrolysis time on SPRC-DF content

2.2.3 NaOH 质量分数对 SPRC-DF 含量的影响

NaOH 主要发挥水解 SPRC 中蛋白质、皂化脂质和去除其他水溶性杂质的作用^[22]。NaOH 质量分数对 SPRC-DF 含量的影响如图 4 所示。

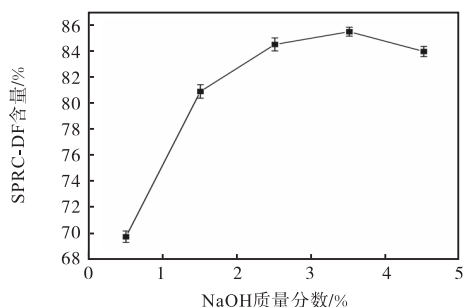


图4 NaOH 质量分数对 SPRC-DF 含量的影响

Fig. 4 Effect of NaOH concentration on SPRC-DF content

由图 4 可知: 随着 NaOH 质量分数的增加, 提取所得 SPRC-DF 含量逐渐增加; 当 NaOH 质量分数达到 3.5% 时, SPRC-DF 含量最高, 达到 85.47%; 随着 NaOH 质量分数进一步增加, SPRC-DF 含量呈下降趋势, 这可能是 NaOH 质量分数过高, 破坏了纤维的结构, 导致部分纤维水解^[23]。因此, 选择 NaOH 质量分数为 1.5% ~ 3.5%。

2.2.4 碱解时间对 SPRC-DF 含量的影响

碱解时间对 SPRC-DF 含量的影响如图 5 所示。由图 5 可知: 在 2 ~ 4 h 内 SPRC-DF 含量快速增加, 随着碱解时间进一步增加, SPRC-DF 含量无明显变化, 而碱解时间延长会增加生产成本。因此, 选择碱解时间为 3 ~ 5 h 进行下一步优化。

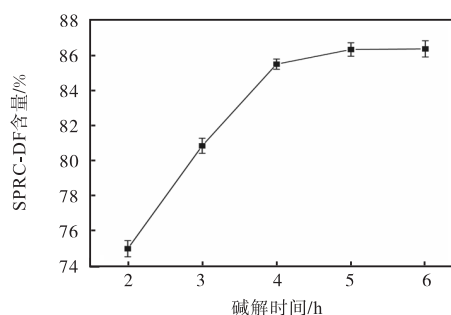


图5 碱解时间对 SPRC-DF 含量的影响

Fig. 5 Effect of alkaline hydrolysis time on SPRC-DF content

2.2.5 碱解温度对 SPRC-DF 含量的影响

碱解温度对 SPRC-DF 含量的影响如图 6 所示。由图 6 可知: 随着碱解温度的增加, SPRC-DF 含量逐渐增加, 这可能是由于升高温度增加了原料中蛋白质的溶胀、降解和脱离^[24]; 当碱解温度达到 80 °C 时, 提取所得 SPRC-DF 含量最高, 达到 84.48%; 随着碱解温度进一步增加, SPRC-DF 含量呈现下降趋势。因此, 选定碱解温度为 70 ~ 90 °C 进行下一步实验。

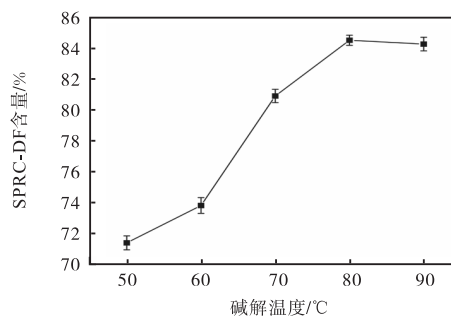


图6 碱解温度对 SPRC-DF 含量的影响

Fig. 6 Effect of alkaline hydrolysis temperature on SPRC-DF content

2.2.6 正交实验

在单因素实验的基础上,选择对膳食纤维含量影响较大的 α -淀粉酶添加量(A)、NaOH 质量分数(B)、碱解温度(C)、碱解时间(D)4 个因素进行优化,实验结果见表1。由极差分析可知,影响SPRC-DF含量的各因素主次顺序为碱解温度> α -淀粉酶添加量>NaOH 质量分数>碱解时间。最优水平组合为 $A_3B_3C_3D_2$,确定SPRC-DF提取的最优工艺为: α -淀粉酶添加量 0.07%、NaOH 质量分数 3.5%、碱解温度 90℃、碱解时间 4 h。在此工艺条件下,SPRC-DF 含量为 $(90.68 \pm 0.01)\%$ 。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交实验结果

Tab. 1 Results of orthogonal test $L_9(3^4)$

实验	α -淀粉酶 添加量/%	NaOH 质量分数/%	碱解 温度/℃	碱解 时间/h	含量/%
1	0.03	1.5	70	3	84.46
2	0.03	2.5	80	4	88.44
3	0.03	3.5	90	5	88.11
4	0.05	1.5	80	5	87.85
5	0.05	2.5	90	3	90.04
6	0.05	3.5	70	4	87.72
7	0.07	1.5	90	4	89.60
8	0.07	2.5	70	5	85.91
9	0.07	3.5	80	3	90.38
k_1	87.00	87.30	86.03	88.29	
k_2	88.53	88.13	88.89	88.59	
k_3	88.63	88.73	89.25	87.29	
R	1.63	1.43	3.22	1.30	

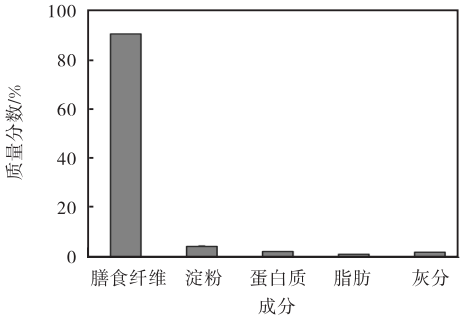
2.3 SPRC-DF的成分分析

对提取后SPRC-DF进行成分分析,结果如图7所示。SPRC-DF 含量为 90.68%,并且测得的SPRC-DF 中含有纤维素 59.54%、半纤维素 18.61%、木质素 11.70%和果胶 3.27%。提取后SPRC-DF 中蛋白质、淀粉、灰分和脂肪的含量较提取前分别降低了 85.91%、76.77%、72.89%和 67.50%。以上结果表明该提取方法用于提取SPRC-DF 对蛋白质、淀粉、灰分和脂肪均有较好的脱除效果,提取得到了高纯度的SPRC-DF 样品。

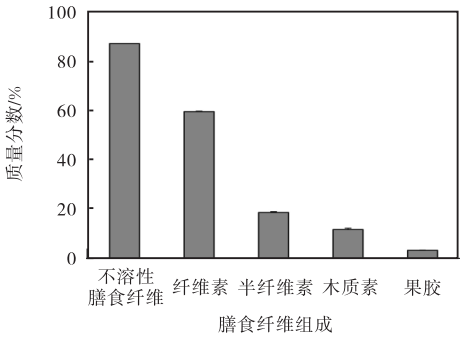
2.4 SPRC-DF的理化性质分析

膳食纤维的理化性质能反映其生理功能,SPRC-DF 的理化性质见表2。由表2可知:SPRC-DF 的持水力为 (7.75 ± 0.23) g/g,膨胀力为 (5.42 ± 0.17) mL/g,较高的持水力和膨胀力具有促进肠道蠕动、增加粪便体积、加速排便的功能^[25],结果表明SPRC-DF 具有潜在的通便功能。SPRC-DF 的持油力为 (4.58 ± 0.09) g/g,胆固醇吸附能力为 (14.11 ± 0.43) μ g/g

(pH 2.0)和 (21.13 ± 0.24) μ g/g (pH 7.0)。研究^[26]报道膳食纤维具有持油力和胆固醇吸附能力,可降低血清胆固醇的水平。本研究结果表明SPRC-DF 具有潜在的降脂功能。SPRC-DF 的葡萄糖吸附能力为 (3.41 ± 2.63) μ g/g,阳离子交换能力为 (0.12 ± 0.01) mmol/g。阳离子交换能力能对消化道的pH、渗透压以及氧化还原电位产生影响,产生一种缓冲环境保护消化道^[27]。以上结果表明:SPRC-DF 具有潜在的通便、降脂和保护消化道功能,具体功效有待进一步体内实验研究。



(a) 基本成分



(b) 膳食纤维组成

图 7 SPRC-DF的基本成分和膳食纤维组成

Fig. 7 Basic components and dietary fiber components of SPRC-DF

表 2 SPRC-DF的理化性质

Tab. 2 Physicochemical properties of SPRC-DF

理化性质	结果
持水力/(g·g ⁻¹)	7.75 ± 0.23
膨胀力/(mL·g ⁻¹)	5.42 ± 0.17
持油力/(g·g ⁻¹)	4.58 ± 0.09
胆固醇吸附能力/(μ g·g ⁻¹ , pH 2.0)	14.11 ± 0.43
胆固醇吸附能力/(μ g·g ⁻¹ , pH 7.0)	21.13 ± 0.24
葡萄糖吸附能力/(μ g·g ⁻¹)	3.41 ± 2.63
阳离子交换能力/(mmol·g ⁻¹)	0.12 ± 0.01

2.5 SPRC-DF中铅、砷、汞含量分析

对SPRC-DF 中铅、砷、汞含量进行检测,结果见表3。SPRC-DF 中铅、砷、汞含量分别为 $(0.960 \pm$

0.005) mg/kg、 (0.088 ± 0.002) mg/kg 和 (0.0070 ± 0.0002) mg/kg, 结果均符合 GB 16740—2014《食品安全国家标准 保健食品》中对重金属的限量标准。

表 3 SPRC-DF 中铅、砷和汞的含量

Tab. 3 Lead, arsenic and mercury content of SPRC-DF

重金属	铅	砷	汞
含量/(mg·kg ⁻¹)	0.960 ± 0.005	0.088 ± 0.002	0.0070 ± 0.0002

2.6 SPRC-DF 粉体特性分析

休止角表示样品颗粒之间的聚集能力, 滑动摩擦角表示样品颗粒间的附着能力, 两者通常用来衡量粉体加工过程中的流动性, 粉体的休止角和滑动摩擦角越小, 表明其流动性能越好。已有研究^[28]表明, 休止角小于 40°即可满足粉体的输送需要, 休止角小于 30°表明样品流动性好。松装密度和振实密度可以衡量样品的堆积性, 反映了样品的聚集和松软状态。压

缩度可以反映样品在加工过程中的压缩能力^[29]。粉体的这些特性为企业加工生产、包装和储藏提供了参考^[30]。SPRC-DF 粉体性质见表 4。

由表 4 可知: 20~200 目样品的休止角都小于 40°, 表明不同粒径的样品均满足生产加工过程中的输送需求, 休止角和滑动摩擦角随着粒径的减小而增大, 这主要由于小粒径的微粒具有较大的比表面积、聚合力和吸附力^[28, 31]。样品的松装密度呈现先减小后增大的趋势, 但都低于 20 目样品的松装密度。这与程晶晶等^[32]的研究结果一致, 微粉的松装密度小于粗粉。样品的振实密度随着粒径的减小也呈现先减小后增大的趋势, 并且样品为 200 目时显著增大。压缩度随着样品粒径的减小呈现增大趋势。综上所述, SPRC-DF 粉体流动性好, 满足生产加工的输送需求。

表 4 SPRC-DF 粉体性质

Tab. 4 Properties of SPRC-DF powder

粒径/目	休止角/°	滑动摩擦角/°	松装密度/(g·mL ⁻¹)	振实密度/(g·mL ⁻¹)	压缩度/%
20	26.83 ± 0.82^c	34.45 ± 0.40^c	0.22 ± 0.01^a	0.35 ± 0.02^b	58.33 ± 1.56^c
60	29.36 ± 0.20^b	36.18 ± 0.89^b	0.20 ± 0.01^{ab}	0.33 ± 0.01^b	63.99 ± 4.93^c
100	31.53 ± 0.39^a	37.39 ± 0.65^{ab}	0.19 ± 0.02^b	0.33 ± 0.02^b	73.90 ± 3.82^b
200	32.15 ± 0.93^a	38.76 ± 0.23^a	0.21 ± 0.01^{ab}	0.40 ± 0.01^a	87.78 ± 2.97^a

注: 不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结 论

本研究选用酶-化学法提取 SPRC-DF, 通过单因素与正交实验确定了 SPRC-DF 的最优提取工艺, 分析了 SPRC-DF 的组成, 测定了其理化性质和重金属含量。结果表明, SPRC-DF 最优提取工艺为: α -淀粉酶添加量 0.07%、NaOH 质量分数 3.5%、碱解时间 4 h、碱解温度 90 °C。SPRC-DF 的膳食纤维含量达 $(90.68 \pm 0.01)\%$, 含有纤维素 59.54%、半纤维素 18.61%、木质素 11.70%和果胶 3.27%; 其持水力为 (7.75 ± 0.23) g/g, 持油力为 (4.58 ± 0.09) g/g, 膨胀力为 (5.42 ± 0.17) mL/g, 阳离子交换能力为 (0.12 ± 0.01) mmol/g, 胆固醇吸附能力为 (14.11 ± 0.43) μ g/g (pH 2.0) 和 (21.13 ± 0.24) μ g/g (pH 7.0), 葡萄糖吸附能力为 (3.41 ± 2.63) μ g/g。SPRC-DF 的重金属含量符合 GB 16740—2014《食品安全国家标准 保健食品》的限量标准。SPRC-DF 粉体流动性较好, 休止角、滑动摩擦角、松装密度、振实密度和压缩度均满足生产加工的输送需求, 具有深加工和开发成通便、降脂、保护消化道等功能的保健食品的潜力。本研究可为 SPRC-DF 作为保健食品原料提供理论依据。

参考文献:

- [1] LU Q, LI C L. Comprehensive utilization of Chinese medicine residues for industry and environment protection: turning waste into treasure[J]. Journal of cleaner production, 2021, 279: 123856.
- [2] 刘梦佳, 杨茂华, 刘新育, 等. 中药渣处理及其生命周期分析的研究进展[J]. 时珍国医国药, 2021, 32(7): 1714-1717.
- [3] 孔文平, 黄勇, 段燕文, 等. 基于微生物转化的中药渣再利用研究进展[J]. 生物加工过程, 2021, 19(2): 150-155.
- [4] 刘雪竹, 杨毅, 田侃, 等. 复方丹参滴丸完成 FDA III 期临床认证对中药国际化的启示[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(9): 2298-2300.
- [5] GAN J, XIE L, PENG G, et al. Systematic review on modification methods of dietary fiber[J]. Food hydrocolloids, 2021, 119(9): 106872.
- [6] 李鹏夏, 树立, 郭敏增, 等. 复方丹参丸药渣的饲料化利用研究[J]. 饲料与畜牧, 2009, 157(4): 23-25.
- [7] KWA C, MO L, YWA B, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional

- properties of dietary fiber extracted from kiwi fruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food hydrocolloids, 2021, 110:106162.
- [8] 马昱阳,刘学成,王文亮,等. 膳食纤维的提取、药理功能及综合利用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(4): 35-38.
- [9] 丁政宇,张士凯,何子杨,等. 响应面优化黄精渣不溶性膳食纤维酶法提取工艺及其结构表征[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 157-163.
- [10] 刘义武,韩鹏,黄辉,等. 复合酶制备柠檬膳食纤维工艺条件优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 133-138.
- [11] 曲鹏宇,李丹,李志江,等. 膳食纤维功能、提取工艺及应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(19): 218-224.
- [12] 李朝英,郑路,杨文娟,等. 用范氏法测定多类植物中酸性洗涤木质素的影响因素研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31(3): 61-64.
- [13] LUO X, WANG Q, ZHENG B, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice[J]. Food and chemical toxicology, 2017, 109(2): 1003-1009.
- [14] NSOR-ATINDANA J, ZHONG F, MOTHIBE K J. In vitro hypoglycemic and cholesterol lowering effects of dietary fiber prepared from cocoa (*Theobroma cacao* L.) shells[J]. Food & function, 2012, 3(10): 1044-1050.
- [15] BENITEZ V, MOLLA E, MARTIN-CABREJAS M, et al. Physicochemical properties and in vitro antidiabetic potential of fibre concentrates from onion by-products[J]. Journal of functional foods, 2017, 36: 34-42.
- [16] MA M M, MU T H. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin[J]. Food chemistry, 2016, 194: 237-246.
- [17] CHEN H, XIONG M, BAI T M, et al. 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.
- [18] 金俐延. 超微粉碎对寒富苹果渣理化性质的影响及高纤片剂的研制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [19] 丁莎莎. 油橄榄果渣膳食纤维的制备、特性及改性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [20] 张宏邦, 罗洁, 易翠平, 等. 稻米膳食纤维的提取、改性及应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 141-146.
- [21] 薛山. 紫薯不溶性膳食纤维超声辅助酶法提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(5): 153-157.
- [22] 郭韵恬. 基于番茄皮渣膳食纤维的绿色保鲜包装薄膜的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
- [23] 杜晓静, 白新鹏, 黄香慧, 等. 脱脂椰蓉可溶性膳食纤维的抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 215-220.
- [24] 张立彦, 刘启莲. 酶法水解蟹壳蛋白[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(7): 63-67.
- [25] BAI X, HE Y, QUAN B, et al. Physicochemical properties, structure, and ameliorative effects of insoluble dietary fiber from tea on slow transit constipation[J]. Food chemistry X, 2022, 14: 100340.
- [26] WANG Q, SHEN P, CHEN B. Ultracentrifugal milling and steam heating pretreatment improves structural characteristics, functional properties, and in vitro binding capacity of cellulase modified soy okara residues[J]. Food chemistry, 2022, 384: 132526.
- [27] 黄晟, 朱科学, 钱海峰, 等. 超微及冷冻粉碎对麦麸膳食纤维理化性质的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(15): 40-44.
- [28] 陈湛. 井冈蜜柚皮和芦笋调节肠道功能食品的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [29] 龙伟. 葛渣膳食纤维的制备及其应用[D]. 南昌: 江西中医药大学, 2020.
- [30] 周慧宁, 田玉潭, 李海峰. 不同热处理方式对燕麦粉体特性和面团流变特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(20): 90-96.
- [31] 徐群英, 吕庆云, 常锦玉, 等. 不同粉碎粒度小米粉理化性质研究[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(9): 43-46.
- [32] 程晶晶, 王军, 肖付刚. 超微粉碎对红小豆全粉物化特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 13-16.

责任编辑: 郎婧