

超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维及理化特性分析

巫永华,刘梦虎,孙悦,邵颖,陈安徽,刘恩岐*

(徐州工程学院,江苏省食品资源开发与质量安全重点实验室,江苏徐州 221008)

摘要:利用超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维,并分析其理化特性。试验结果表明,在超声微波辅助下,以料液比 1:25 (g/mL),纤维素添加量 20 mg/g、温度为 60 °C 条件下提取 23 min,黑豆皮水溶性膳食纤维得率可达 19.12% ± 0.23%。黑豆皮水溶性膳食纤维理化性质研究表明,黑豆皮水溶性膳食纤维的膨胀力为 585.71%,持水力为 11.89 g/g,持油力为 10.52 g/g,乳化稳定性的乳化能力(EC)为 42.45%,乳化的稳定性(ES)为 64.76%,葡萄糖吸附值为 19.72 mmol/L,在 30、60 和 120 min 时,葡萄糖延迟指数分别为 34.65、30.48 和 25.72 mmol/g。浓度为 10% 的黑豆皮水溶性膳食纤维溶液的粘度为 0.0093 Pa·s。微观结构研究表明黑豆皮水溶性膳食纤维具有表面具有大量的孔隙和褶皱,这有利于提高其吸附能力。红外光谱分析表明黑豆皮水溶性膳食纤维具有典型的多糖特征。

关键词:黑豆皮,水溶性膳食纤维,提取,理化特性,超声,微波,酶法

Ultrasonic-microwave Assisted Enzymatic Extraction of Water-soluble Dietary Fiber from Black Soybean Hull and Its Physicochemical Properties

WU Yong-hua, LIU Meng-hu, SUN Yue, SHAO Ying, CHEN An-hui, LIU En-qi*

(Jiangsu Key Laboratory of Food Resource Development and Quality Safe,
Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The water-soluble dietary fiber from black soybean hull was extracted by ultrasound-microwave-assisted enzymatic method, and its physicochemical properties were analyzed. The results showed that the yield of water-soluble dietary fiber from black soybean peel could reach 19.12% ± 0.23% when the ratio of material to liquid was 1:25 (g/mL), the amount of papain was 20 mg/g and the temperature was 60 °C for 23 min. The physicochemical properties of water-soluble dietary fiber from black soybean peel showed that the swelling power of the dietary fiber was 585.71%, water-holding capacity was 11.89 g/g, oil-holding capacity was 10.52 g/g, emulsifying stability (EC) was 42.45%, emulsifying stability (ES) was 64.76%, glucose adsorption value was 19.72 mmol/L, glucose delay index were 34.65, 30.48, 25.72 mmol/g at 30, 60 and 120 min, respectively. The viscosity of 10% black soybean peel water-soluble dietary fiber solution was 0.0093 Pa·s. Microstructure study showed that black soybean peel water-soluble dietary fiber had a large number of pores and wrinkles on its surface, which was conducive to improving its adsorption capacity. Infrared spectrum analysis showed that water-soluble dietary fiber from black soybean peel had typical polysaccharide characteristics.

Key words: black bean hull; soluble dietary fiber; extract; physical and chemical properties; ultrasound; microwave; enzymatic method

中图分类号: TS214.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)06-0008-07

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020.06.002

引文格式: 巫永华, 刘梦虎, 孙悦, 等. 超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维及理化特性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 8-14.

膳食纤维是指既不能让胃肠道消化吸收,也无法产生能量的一种多糖物质^[1]。膳食纤维在防治疾病和保障人体康健方面有着非常大的作用,是十分

优质安全的功能性保健食品原辅料,被称为第七大营养素^[2]。水溶性膳食纤维是一种无法被消化酶消化和人体吸收,能够在水中溶解的非淀粉多糖,如菊

收稿日期: 2019-07-11

作者简介: 巫永华(1984-),男,硕士,实验师,研究方向:食品科学, E-mail: yonghuawu2006@163.com。

* 通讯作者: 刘恩岐(1964-),男,博士,教授,研究方向:食品生物技术, E-mail: leq@xzit.edu.cn。

基金项目: 安徽省科技重大专项(17030801019);江苏省科技项目(BE2017352);江苏省苏北科技专项(XZ-SZ201818);国家自然科学基金青年项目(31701566)。

粉、果胶以及低聚木糖和琼脂等物质。膳食纤维不仅有丰富的原料来源,而且具有良好的生理作用,如抗氧化^[3]、降血糖、降低血脂^[4]、预防冠心病,预防结肠和直肠癌,以及减肥和防止便秘等功效^[5]。水溶性纤维还能够有效地活化肠道中的益生菌,促进益生菌大量繁殖,使肠道保持一个健康良好的生态^[6]。随着专家对膳食纤维特别是水溶性膳食纤维的研究不断深入,探求可以食用的安全的水溶性膳食纤维已经成为当前的研究热门课题,研究人员开展了从柑橘皮^[7]、柚子皮^[8]、葡萄皮渣^[9]、香梨皮渣^[10]等植物皮渣中采用水提法、物理辅助提取法、生物酶法和发酵法等方法提取制备水溶性膳食纤维的探索。

黑豆在我国各地被广泛种植,其内销和出口的主要是新鲜黑豆及一些初级加工产品。黑豆皮多数作为饲料使用,其潜在的价值没有被挖掘出来。从黑豆皮中提取水溶性膳食纤维能提高黑豆皮资源的附加值,对于黑豆制品加工行业的发展和资源的高效利用具有极其重要的意义。因此本文研究超声微波辅助酶法提取黑豆皮中水溶性膳食纤维的工艺,并对黑豆皮水溶性膳食纤维的部分理化特性进行了分析,以期为其在功能性食品中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

东北黑豆 徐州卜蜂莲花超市;木瓜蛋白酶(800 U/mg)、纤维素酶(400 U/mg)、果胶酶(500 U/mg)、透析袋(8000~14000 U) 上海源叶生物科技有限公司;溴化钾(光谱纯) 美国 PIKE 公司;六偏磷酸钠、乙醇、苯酚、硫酸、葡萄糖 国药集团化学试剂有限公司;其余试剂 均为分析纯。

CW-2000 超声微波协同萃取仪 上海新拓分析仪器科技公司;IT61M/CSF6-GDE 膳食纤维测定仪 意大利 VELP 公司;R206 旋转蒸发器 上海申生科技有限公司;旋转粘度计 上海昌吉地质仪器有限公司;IT-09A-5 型数显恒温磁力搅拌器 上海一恒科学仪器有限公司;DL-5 低速离心机 上海安亭科学仪器厂;INSPECTS50 扫描电子显微镜 美国 FEI 公司;Nicolet iS10 傅里叶红外光谱仪 美国 Thermo fisher 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黑豆皮的预处理及水溶性膳食纤维的提取 黑豆皮用万能粉碎机粉碎,过 50 目筛,备用。准确称取一定量的黑豆皮粉,加入一定的质量分数为 2% 的六偏磷酸钠溶液,调节 pH 至 6.5,在 100 °C 水浴 1.5 h,降温至 60 °C 左右,加入一定合适的酶后于一定的温度下在超声波功率为 50 W,微波功率为 400 W 下辅助提取一定的时间,100 °C 灭酶 10 min 后,冷却离心,收集上清液,浓缩至一定体积后加入 4 倍体积的乙醇沉淀,过夜,收集沉淀,用适量水复溶后透析 24 h,干燥后即得黑豆皮水溶性膳食纤维。

1.2.2 黑豆皮水溶性膳食纤维的提取工艺研究

1.2.2.1 酶种类的筛选 在料液比 1:25 (g/mL),提取温度为 60 °C 和提取时间 20 min 下,考察分别添加果胶酶、木瓜蛋白酶、纤维素酶和不添加酶对黑豆皮

水溶性膳食纤维得率的影响。

1.2.2.2 料液比的选择 在纤维素酶添加量为 20 mg/g,提取温度为 60 °C 和提取时间 20 min 下,分别考察料液比 1:10、1:15、1:20、1:25 和 1:30 (g/mL) 对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响。

1.2.2.3 酶添加量的选择 在料液比 1:25 (g/mL),提取温度为 60 °C 和提取时间 20 min 下,分别考察添加 10、15、20、25 和 30 mg/g 的纤维素酶对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响。

1.2.2.4 提取温度的选择 在料液比 1:25 (g/mL),纤维素酶添加量为 20 mg/g 下,分别考察在 50、55、60、65 和 70 °C 下提取 20 min 对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响。

1.2.2.5 提取时间的选择 在料液比为 1:25 (g/mL),纤维素酶添加量为 20 mg/g,提取温度为 60 °C 下,分别考察提取时间 10、15、20、25 和 30 min 对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响。

1.2.2.6 提取条件的优化 根据单因素实验结果,采用正交试验优化提取剂浓度、料液比和提取时间等参数,确定最佳提取工艺条件。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of the orthogonal tests

水平	因素			
	A 料液比 (g/mL)	B 酶添加量 (mg/g)	C 提取温度 (°C)	D 提取时间 (min)
1	1:23	18	55	17
2	1:25	20	60	20
3	1:27	22	65	23

1.2.3 水溶性膳食纤维的测定 根据国标 GB 5009.88-2014 食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定^[11]方法进行测定。

得率(%) = 水溶性膳食纤维的提取质量(g)/黑豆皮质量(g) × 100

1.2.4 黑豆皮水溶性膳食纤维理化特性分析 根据上述优化后的条件制备黑豆皮水溶性膳食纤维,在 60 °C 真空干燥箱中干燥 18 h 后、研磨、过 100 目筛后进行理化特性分析。

1.2.4.1 黑豆皮水溶性膳食纤维持水力的测定 参考王庆玲等^[12]报道的方法。准确称取黑豆皮水溶性膳食纤维样品 0.50 g 于 50 mL 离心管中,加入 12.50 mL 蒸馏水,室温下振荡 0.5 h,4000 r/min 的条件下离心 15 min,弃去上清液并用滤纸吸干离心管残留水份,称重后计算持水力:

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

式中:m:离心管重,g;m₁:样品干重,g;m₂:样品湿重,g。

1.2.4.2 黑豆皮水溶性膳食纤维持油力的测定 参考王庆玲等^[12]报道的方法,准确称取 0.50 g 黑豆皮水溶性膳食纤维样品于 50 mL 离心管中,加入植物油 10 mL,振荡摇匀,室温下放置 1.5 h,4000 r/min 的条件下离心 30 min,小心除去上清液,称重后计算持油力:

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

式中: m : 离心管重, g ; m_1 : 样品干重, g ; m_2 : 样品吸油后重量, g 。

1.2.4.3 黑豆皮水溶性膳食纤维膨胀力的测定 参考王庆玲等^[12]报道的方法,称取 1.0 g 黑豆皮水溶性膳食纤维样品于 10 mL 量筒中,读取干基样品的体积,转移至 50 mL 量筒中并加蒸馏水(室温)至 25 mL 处,用玻璃棒将黑豆皮水溶性膳食纤维搅匀,让其充分吸收水分,静置 24 h,第 2 d 观察并读取膨胀的黑豆皮水溶性膳食纤维体积,计算膨胀力:

$$\text{膨胀力}(\%) = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100$$

式中: V_1 : 吸水前样品体积, mL; V_2 : 吸水后样品体积, mL。

1.2.4.4 黑豆皮水溶性膳食纤维葡萄糖吸附值(GAC)的测定 参考 Peerajit 等^[13]报道的方法,称取 0.5 g 的黑豆皮水溶性膳食纤维与 50 mL 质量浓度为 200 mmol/L 的葡萄糖溶液混合均匀,于 37 °C 恒温培养 6 h。当吸附达到平衡后,4000 r/min 的条件下离心 20 min。采用苯酚硫酸法测定上清液的葡萄糖溶液浓度,计算 GAC 值:

$$\text{GAC}(\text{mmol/L}) = \frac{(C_i - C_s) \times V_i}{W_s}$$

式中: C_i : 原葡萄糖溶液浓度, mmol/L; C_s : 吸附平衡后葡萄糖溶液浓度, mmol/L; W_s : 黑豆皮水溶性膳食纤维样品的质量, g ; V_i : 葡萄糖溶液体积, L。

1.2.4.5 黑豆皮水溶性膳食纤维乳化稳定性的测定 称取一定量的干燥后的样品,分别配成质量分数为 2.0% 的黑豆皮水溶性膳食纤维溶液。取样品溶液 5 mL,在室温下加入 5 mL 色拉油,于高速分散器中以 2000 r/min 的转速乳化 2 min,之后 1300 r/min 离心 5 min,记录乳化层体积,按下式计算乳化能力(Emulsion Capabilit, EC)。

$$\text{EC}(\%) = \frac{\text{被乳化层高度}}{\text{离心管中液体总体积}} \times 100$$

将上述乳化样品,置于 80 °C 水浴中保温 30 min,再用自来水冷却 15 min,于 1300 r/min 离心 5 min,计算乳化稳定性(Emulsion Stability, ES)。

$$\text{ES}(\%) = \frac{\text{保持乳化状态的液层高度}}{\text{最初乳化层的高度}} \times 100$$

1.2.4.6 黑豆皮水溶性膳食纤维葡萄糖延迟指数(GRI)的测定 GRI 可以用来预测样品在肠道中延迟吸收葡萄糖的效果。试验参照 Peerajit 等^[13]报道的方法,称取 0.5 g 黑豆皮水溶性膳食纤维加入 25 mL 质量浓度为 50 mmol/L 的葡萄糖溶液中,混匀后转入的透析袋(12000 U)中,将透析袋放入含 100 mL 蒸馏水的烧杯中,于 37 °C、120 r/min 的振荡器中振荡,同时空白对照组。于 30、60、120 min 时,采用苯酚硫酸法测定样品组和空白组 1 mL 透析液中的葡萄糖含量,计算 GRI 值。

$$\text{GRI}(\text{mmol/g}) = 100 - \frac{\text{样品组透析液葡萄糖含量}}{\text{空白组透析液葡萄糖含量}} \times 100$$

1.2.4.7 黑豆皮水溶性膳食纤维粘度的测定 从微观来说粘度就是流体受力的作用其质点间作相对运动时产生阻力的性质,这种阻力来自分子运动或分子引力。粘度是一个流变特性参数,它的大小决定了产品的应用范围。试验使用旋转粘度计测定在一定黑豆皮水溶性膳食纤维不同浓度溶液(2%、4%、6%、8% 和 10%)的表观粘度。

1.2.5 黑豆皮水溶性膳食纤维的微观结构分析 参照 Zhang 等^[14]方法,将干燥粉碎至 20 目的样品喷金后放入扫描电子显微镜中,20 kV 加速电压条件下,对样品 1000 和 2000 倍的微观结构进行拍照观察。

1.2.6 黑豆皮水溶性膳食纤维的红外光谱分析 称取试样样品 2 mg 于 120 °C 干燥 2 h,与 KBr 混合后研细压片,在 400~4000 cm^{-1} 区间进行红外光谱扫描分析。

1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次以上,采用 Excel 2010 软件进行绘图,使用 SPSS 18.0 软件进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 最佳提取工艺的确定

2.1.1 作用酶的确定 由图 1 可知,添加果胶酶和纤维素酶水解提取黑豆皮水溶性膳食纤维的得率极显著($P < 0.05$)高于不加酶的 CK 组,加入纤维素酶的得率为 15.12%,比添加果胶酶和木瓜蛋白酶的得率分别提高了 23.83% 和 61.71%,效果最优,这可能与黑豆皮含有较多的纤维素有关。乔小全等^[15]采用超微粉碎辅助纤维素酶提取黑豆皮水溶性膳食纤维,其得率为 12.01%,低于本试验结果,可能与原料组成和超声波辅助效果有关。故本试验选用纤维素酶进行后续试验。

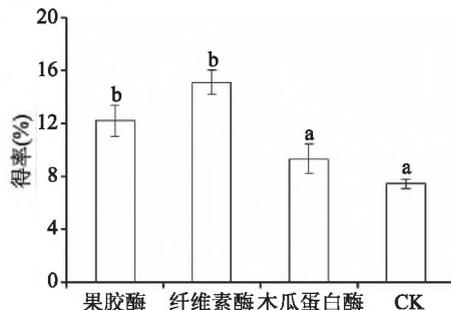


图 1 不同酶水解对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响

Fig.1 Effect of different enzymes

on the yield of water-soluble dietary fiber

2.1.2 料液比的确定 由图 2 可知,料液比的改变对黑豆皮水溶性膳食纤维的得率有较大的影响,随着料液比的增加,水溶性膳食纤维的得率也随之增加,在 1:25 g/mL 的时候水溶性膳食纤维的得率达到最大,随后黑豆皮水溶性膳食纤维得率变化不显著。提取剂用量的增加在一定程度上能提高可溶性膳食纤维的溶出,但过高时不仅会增大溶剂成本,也会使得后续处理步骤难度加大^[16]。故选择料液比为 1:25 g/mL 左右较为合适。

2.1.3 酶添加量的确定 由图 3 可知,在添加量小于 20 mg/g 时,黑豆皮水溶性膳食纤维的得率随着酶添

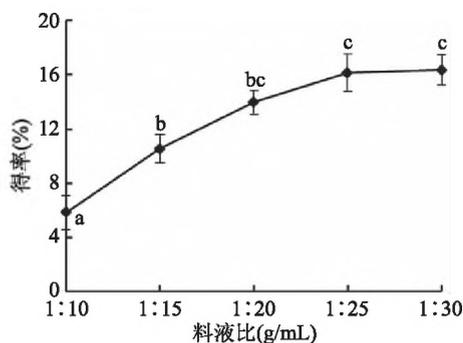


图2 料液比对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响
Fig.2 Effect of liquid/material ratio on the yield of water-soluble dietary fiber

加量的增加逐渐上升,在酶添加量为 20 mg/g 时水溶性膳食纤维的得率达到最大;之后,随着酶添加量的不断增加得率反而有所下降。这是因为随着酶浓度的不断升高,原料中的可溶性膳食纤维不断溶出,同时纤维素酶能将不溶性膳食纤维转化成可溶性膳食纤维^[17]。但当酶的浓度过高时,会使得部分膳食纤维被进一步水解成不能被乙醇沉淀的低聚糖,反而降低得率^[5]。故选择酶添加量为 20 mg/g 左右比较合适。

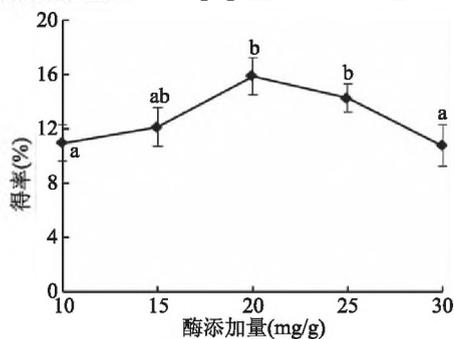


图3 酶添加量对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响
Fig.3 Effect of enzyme dosage on the yield of water-soluble dietary fiber

2.1.4 酶解温度的确定 试验所用的纤维素酶的最适温度 55~65 °C, 试验考察了 50~70 °C 下对黑豆皮膳食纤维得率的影响, 由图 4 可知, 温度小于 60 °C, 温度升高有利于黑豆皮水溶性膳食纤维的提取, 但当温度高于 65 °C 时, 得率降低。可能是由于温度的逐步升高, 不仅会加快溶剂分子和溶质分子的运动速度, 也会加快酶促反应的速度, 从而使得率提高; 但温度过高时, 溶液的黏度变大会导致底物与酶的接触困难, 同时也会降低酶的活性^[18], 使得水溶性膳食纤维得率下降。由试验结果可知, 选择提取温度为 60 °C 较为合适。

2.1.5 提取时间的确定 由图 5 可知, 在 20 min 前, 随着提取时间的延长, 水溶性膳食纤维得率也随之增加, 20 min 时候达到最大值, 之后得率呈下降趋势。可能是前期由于在酶的水解和超声波的空穴效应、微机械效应及热效应的共同作用下提高了水溶性膳食纤维的得率, 但大于 20 min 后, 这种效应会使得膳食纤维发生降解^[5], 使其水溶性膳食纤维得率下降, 故选取 20 min 左右最为合适。

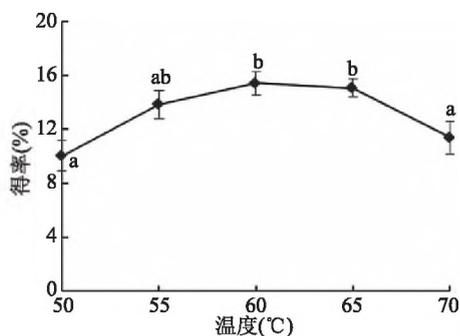


图4 提取温度对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响
Fig.4 Effect of extraction temperature on the yield of water-soluble dietary fiber

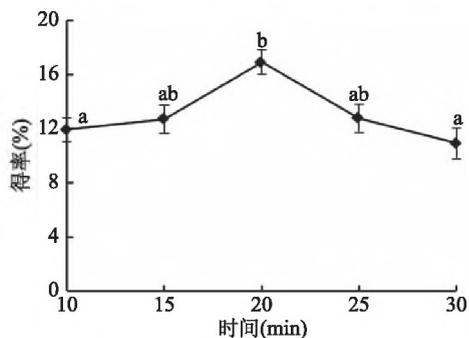


图5 提取时间对黑豆皮水溶性膳食纤维得率的影响
Fig.5 Effect of extraction time on the yield of water-soluble dietary fiber

2.1.6 超声辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维的正交试验结果 在单因素实验的基础上, 采用 $L_9(3^4)$ 正交试验对料液比、酶添加量、温度和提取时间这几个因素进行优化, 以确定最佳工艺条件, 试验结果见表 2 所示。

表2 正交试验结果

Table 2 Results of the orthogonal tests

序号	A	B	C	D	得率(%)
1	1	1	1	1	14.89
2	1	2	2	2	16.31
3	1	3	3	3	15.32
4	2	1	3	2	16.75
5	2	2	1	3	18.38
6	2	3	2	1	17.47
7	3	1	2	3	18.22
8	3	2	3	1	16.19
9	3	3	1	2	17.83
k_1	15.507	16.620	17.000	16.183	
k_2	17.500	16.927	17.333	16.963	
k_3	17.413	16.873	16.087	17.273	
R	1.99	0.31	1.25	1.09	

由表 2 可知, 影响超声结合酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维得率的主要因素依次为料液比 > 提取温度 > 提取时间 > 酶添加量, 理论最优方案是 $A_2B_2C_2D_3$, 即料液比为 1:25 (g/mL)、提取温度 60 °C, 提取时间为 23 min, 纤维素酶添加量为 20 mg/g。由

表4 黑豆皮水溶性膳食纤维理化性质分析结果

Table 4 Physicochemical properties of water-soluble dietary fiber from black soybean peel

项目	持水力 (g/g)	持油力 (g/g)	膨胀力 (%)	葡萄糖吸附值 GAC (mmol/g)	乳化能力 EC (%)	乳化稳定性 ES (%)
结果	11.89	10.52	585.71	19.72	42.45	64.76

表3 方差分析可知,料液比对得率具有显著影响 ($P < 0.05$),酶添加量在所选水平内对结果影响较小。把理论最佳方案与单因素最优条件(料液比 1:25,添加 20 mg/g 的纤维素酶,在 60 °C 下提取 20 min) 进行比较验证,结果表明理论最优方案的得率为 $19.12\% \pm 0.23\%$,高于其他方案。

表3 正交试验方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis of orthogonal test

变异来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
A	7.616267	2	3.808133	47.29	$P < 0.05$
C	1.892600	2	0.946300	11.75	
D	2.499467	2	1.249733	15.52	
误差项	0.161067	2	0.080533		

注: $F_{0.05}(2,2) = 19.00$; $F_{0.01}(2,2) = 99.00$ 。

2.2 黑豆皮水溶性膳食纤维理化特性分析结果

2.2.1 黑豆皮水溶性膳食纤维理化性质分析结果 表4 为黑豆皮水溶性膳食纤维的基本理化指标,膳食纤维的持水力、持油力及膨胀力分别为 11.89 g/g、10.52 g/g 和 585.71%。王庆玲等^[12] 研究发现经过酶处理的番茄皮渣膳食纤维其持水力、持油力及膨胀力分别为 9.33 g/g、9.29 g/g 和 604.2%; 苗敬芝等^[19] 研究发现从生姜中提取出来的水溶性膳食纤维其持水力、持油力及膨胀力分别为 3.61 g/g、3.57 g/g 和 358.7%,相比较而言,本试验所制备的黑豆皮水溶性膳食纤维的持水力和持油力比番茄皮渣和生姜水溶性膳食纤维要高。这可能是由于不同膳食纤维具有不同的表面积、多孔性和密度,以及不同的表面性质、电荷密度、厚度及颗粒疏水性;结果提示黑豆皮水溶性膳食纤维进入消化道后会吸水膨胀,增加食物体积,使人产生饱腹感,减少食物摄入量^[20],故而适合于作为功能性食品原辅料。

水溶性膳食纤维的 GAC 能体现葡萄糖通过胃肠时水溶性膳食纤维对葡萄糖的吸附行为,黑豆皮水溶性膳食纤维的 GAC 为 19.72 mmol/g,说明其具有一定缓解糖尿病人对葡萄糖的吸收速率,并控制血糖上升的作用。刘朝霞等^[21] 研究发现苜蓿水溶性膳食纤维在 200 mmol 葡萄糖溶液中 GAC 可达 18.069 mmol/g,黑豆皮水溶性膳食纤维与其相比,具有更好的葡萄糖吸附效果,可能与黑豆皮水溶性膳食纤维的结构上的多孔性及颗粒大小有关。此外,其还具有一定的乳化能力(42.45%)和乳化稳定性(64.76%),提示其可以作为食品乳化剂。

2.2.2 黑豆皮水溶性膳食纤维葡萄糖延迟指数(GRI)的测定结果 水溶性膳食纤维具有延迟葡萄糖扩散的作用,葡萄糖可以在一定程度上被水溶性膳食纤维吸收,并且可以使溶液在小肠中的粘度有所增加^[12]。由图 6 可知,黑豆皮水溶性膳食纤维的

GRI 值在 30、60 和 120 min 时分别为 34.65、30.48 和 25.72 mmol/g,即随着透析时间的延长而逐渐减小。研究表明葡萄糖延迟指数与可溶性膳食纤维的、结构、水合性质、含量及溶液的粘度直接相关^[22];另外,膳食纤维颗粒的大小会影响 GRI,颗粒结构越小,表面积越大,能够加速网络结构对葡萄糖的截留^[13]。黑豆皮水溶性膳食纤维的最大 GRI 值出现在透析 30 min 时,结果与王庆玲等^[12] 和王旭^[22] 的结果相似。也有研究发现挤压柳橙果浆的最高 GRI 值出现在透析 60 min 时^[23]。

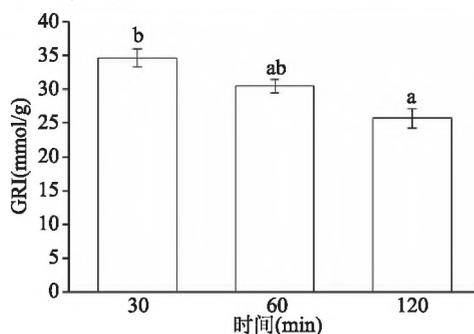


图6 黑豆皮水溶性膳食纤维葡萄糖延迟指数

Fig.6 GRI of water-soluble dietary fiber

2.2.3 黑豆皮水溶性膳食纤维黏度的测定结果 黏度是一个流变特性参数,产品的应用效果可由粘度的大小来决定^[24]。黑豆皮水溶性膳食纤维浓度-黏度的关系见图 7。由图 7 可知,在膳食纤维浓度为 2%~10% 范围内,随着浓度的增加,黑豆皮水溶性膳食纤维的表观黏度呈上升趋势,杨卫东等^[25] 在研究麦麸水溶性膳食纤维时得到了相似的结果,认为是因为浓度的增加导致其分子之间相互缠绕及分子间摩擦力的增加,从而引起黏度增加。

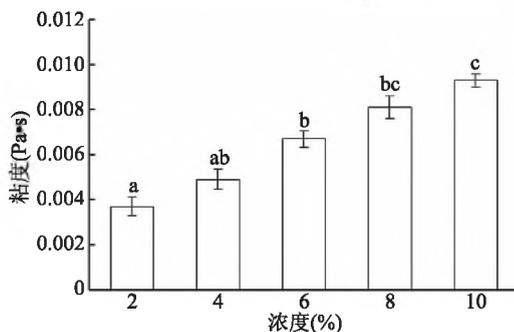


图7 黑豆皮水溶性膳食纤维不同浓度溶液的表观粘度

Fig.7 Apparent viscosity of water-soluble dietary fiber at different concentrations

2.3 黑豆皮水溶性膳食纤维的微观结构分析

由图 7 可以看出,黑豆皮膳食纤维表面较为粗糙,存在许多不规则的颗粒状物质,且有大量的褶皱和孔隙存在,这种结构的存在有利于增加膳食纤维

与其他物质作用时的接触面积,而大量的孔隙有利于水分子进入膳食纤维内部,形成的氢键或偶极作用可以增加膳食纤维的吸附能力,从而使膳食纤维的持水力和膨胀力增加^[26]。

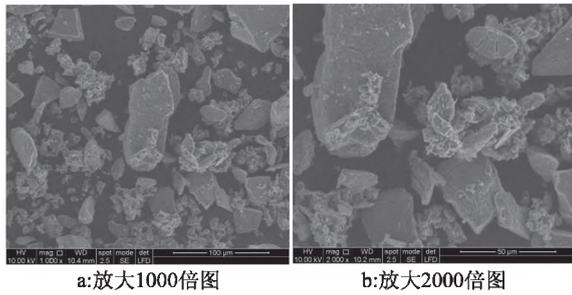


图8 黑豆皮水溶性膳食纤维扫描电镜图

Fig.8 Scanning electron microscope of water-soluble dietary fiber

2.4 黑豆皮水溶性膳食纤维红外光谱分析结果

黑豆皮水溶性膳食纤维红外光谱分析结果见图9,由图9可知,黑豆皮SDF在 3340.56 cm^{-1} 附近有一个最强吸收峰,这是由于多糖分子内部或分子间的O-H发生收缩振动所引起的,说明其具有较多缔合状态的氢键^[27]。在 2938.5648 cm^{-1} 处是糖类甲基和亚甲基上C-H的变角振动引起的吸收峰^[12],是一个糖类的特征吸收峰。在 1654.05 cm^{-1} 处有一个峰,这是由于C=O发生不对称振动收缩所引起的。在 1425.21 cm^{-1} 左右存在的峰是由于 CH_3 、 CH_2 和CH等的C-H弯曲振动而引起的,是糖类的特征峰^[28]。在 1066.30 cm^{-1} 左右存在的强吸收峰是吡喃型糖苷环骨架C-O变角振动引起的吸收峰,表明分子中存在糖环C-O-C和C-O-H结构。在 896.16 cm^{-1} 处存在吸收峰,表明其可能有 β -D-葡萄糖吡喃糖吸收峰的存在^[12],在 848.12 cm^{-1} 左右处出现的弱小峰,表明其存在 α -型吡喃糖^[27]。

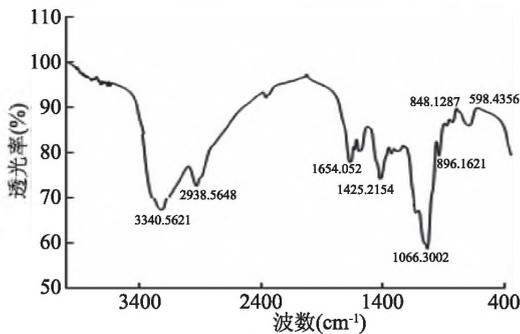


图9 黑豆皮水溶性膳食纤维红外光谱图

Fig.9 Infrared spectrum of water-soluble dietary fiber

3 结论与讨论

黑豆皮是黑豆制品加工中主要的废弃物,对其中的色素和花色苷的研究已有大量报道,而对其中的水溶性膳食纤维研究较少,沈蒙等^[29]采用响应面优化了超声-微波技术提取黑豆皮中可溶性膳食纤维的工艺,表明在料液比1:40 g/mL,微波功率450 W,温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下微波处理30 min,黑豆皮可溶性膳食纤维得率为15.7280%;冯子倩等^[30]研究表明在 H_2O_2 浓度15% (V/V),pH11,料液比1:18 (m/V)下反应

时间0.5h,黑豆皮可溶性膳食纤维提取率为16.85%,胆酸结合实验证明黑豆皮可溶性膳食纤维有着较强的胆酸结合能力。乔小全等^[15]报道了超微粉碎辅助提取黑豆皮水溶性膳食纤维工艺,表明在物料粒径 $25\sim 38\text{ }\mu\text{m}$,液固比30:1 (mL/g),添加纤维素酶188 (U/mg),温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下酶解2 h,其得率达12.01%,所得产品的膨胀力 2.56 (mL/g) ,持水力377%,持油力138%,对胆酸钠的吸附率达29.89%,具有被开发成有预防心血管疾病功能的食品添加剂的潜质。

试验研究表明,纤维素有利于提高黑豆皮水溶性膳食纤维的提取,在料液比1:25 (g/mL)、酶添加量为 20 mg/g , $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理23 min,得率达 $19.12\% \pm 0.23\%$ 。所得黑豆皮水溶性膳食纤维的具有较高的持水力、膨胀性、乳化能力和乳化稳定性,GRI在30 min时最高,为 34.65 mmol/g ,其较好的理化特性与其表面较为粗糙、存在许多不规则的颗粒状物质及具有大量的褶皱和孔隙有关;通过红外光谱分析显示黑豆皮水溶性膳食纤维具有吡喃型多糖特征,研究为黑豆皮水溶性膳食纤维的开发和其在功能食品中的应用提供了依据。

参考文献

- [1] Joanne Slavin. Impact of the proposed definition of dietary fiber on nutrient databases [J]. J Food Compos Anal, 2003, 16 (3): 287-291.
- [2] Slavin J. L Dietary fiber and body weight [J]. Nutr, 2005, 21 (3): 411-418.
- [3] Lecumberri E, Mateos R, María Izquierdo-Pulido, et al. Dietary fibre composition, antioxidant capacity and physicochemical properties of a fibre-rich product from cocoa (*Theobroma cacao* L.) [J]. Food Chemistry, 2007, 104 (3): 948-954.
- [4] 冯雁波,包怡红. 超微粉碎对松仁膳食纤维体外降血糖、降血脂功能的影响 [J]. 食品工业科技, 2016 (23): 343-347, 351.
- [5] 阮之阳. 酶-超声联合处理植物废渣制备膳食纤维及其生物活性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [6] 康鉴文化编辑部. 防癌抗癌食疗事典 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2010.
- [7] 杨雪, 杨颖, 陆胜民, 等. 提高柑橘皮渣水溶性膳食纤维含量的菌株筛选及鉴定 [J]. 中国食品学报, 2016 (3): 205-211.
- [8] 谢婧. 响应面优化复合植物水解酶提取梅州金柚皮可溶性膳食纤维 [J]. 食品科技, 2015 (4): 296-301.
- [9] 郭红珍, 李丛胜, 解春艳, 等. 酶法对葡萄皮渣中可溶性膳食纤维的提取研究 [J]. 酿酒科技, 2015 (9): 107-110.
- [10] 董娟, 史学伟, 魏长庆, 等. 超声碱法提取香梨酿酒皮渣中水溶性膳食纤维及其结构分析 [J]. 食品科技, 2016 (8): 200-205.
- [11] GB 5009.88-2014 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [12] 王庆玲, 朱莉, 孟春棉, 等. 番茄皮渣膳食纤维的理化性质及其结构表征 [J]. 现代食品科技, 2014, 30 (11): 60-64.
- [13] Peccajit P, Chiewchan N, Devahastin S. Effects of

pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1891-1898.

[14] Zhang Min, Bai Xin, Zhang Zesheng. Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(1): 98-103.

[15] 乔小全, 任广跃, 段续, 等. 超微粉碎辅助提取黑皮水溶性膳食纤维及其特性研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 92-98.

[16] 唐海珊, 陈佩瑶, 丁晴, 等. 超声辅助酶法提取柚子皮水溶性膳食纤维及其抗氧化活性研究[J]. 保鲜与加工, 2016(6): 103-106.

[17] 莎日娜, 韩育梅, 周霞, 等. 纤维素酶提高马铃薯渣可溶性膳食纤维得率的工艺条件研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(15): 114-116.

[18] 曲玲玉, 李大为, 张鹏, 等. 酶水解制备山药皮可溶性膳食纤维及性能测定[J]. 天然产物研究与开发, 2015(3): 128-133, 143.

[19] 苗敬芝, 冯金和, 董玉玮, 等. 超声结合酶法提取生姜中水溶性膳食纤维及其功能性研究[J]. 食品科学, 2011, 24(32): 121-122.

[20] 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(12): 203-207.

[21] 刘朝霞, 姜亚东. 苜蓿水溶性膳食纤维提取方法的研究

[J]. 内蒙古草业, 2006, 18(3): 51-52.

[22] 王旭. 米糠膳食纤维的改性制备及其特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.

[23] Miguel Angel LarreaCéspedes, Fernando MartínezBustos, Chang Y K. The effect of extruded orange pulp on enzymatic hydrolysis of starch and glucose retardation index [J]. Food & Bioprocess Technology, 2010, 3(5): 684-692.

[24] 张荣, 任清, 罗宇. 小米可溶性膳食纤维提取及其理化性质分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 69-74.

[25] 杨卫东, 吴晖, 余以刚, 等. 麦麸水溶性膳食纤维流变学特性的研究[J]. 现代食品科技, 2009, 25(1): 27-30.

[26] Al-Sheraji S H, Ismail A, Manap M Y, et al. Functional properties and characterization of dietary fiber from *Mangifera pajang* Kort. fruit Pulp [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(8): 3980-3985.

[27] 黄萍, 林亲录, 朱凤霞, 等. 米糠水溶性膳食纤维理化特性及抗氧化性[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 14-19.

[28] 刘昊飞. 豆渣水溶性膳食纤维特性研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(1): 122-127.

[29] 沈蒙, 曹龙奎. 提取黑皮中可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(9): 82-87.

[30] 冯子倩, 窦唯, 刘来玉, 等. 应用碱性过氧化氢法提取黑皮可溶性膳食纤维及其胆酸结合能力的研究[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2017(35): 89-94.

(上接第7页)

of extrusion conditions on the physicochemical properties of a snack made from purple rice (Hom Nil) and soybean flour blend [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(1): 201-208.

[17] 巩敏, 席亭亭, 孙翠霞, 等. 小米挤压膨化特性的差异及相关性分析[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(5): 4-7.

[18] Tucker G, Plunkett A, Ainsworth P, et al. The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(2): 142-148.

[19] Martínez M, Oliete B, Gómez M. Effect of the addition of extruded wheat flours on dough rheology and bread quality [J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 424-429.

[20] Gonzalez R J, Greef D M D, Torres R L, et al. Effects of endosperm hardness and extrusion temperature on properties of products obtained with grits from two commercial maize cultivars [J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2004, 37(2): 193-198.

[21] Chen L, Zheng X Q, Liu X L. Instant nutrition powder made

from extrusion waxy corn [J]. Food Science & Technology, 2011, 36(8): 161-163.

[22] 岳崇慧. 糙米粉食特性及其在挤压速食粥中的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.

[23] 张敏, 刘辉, 杨明, 等. 速食小米粥的研制[J]. 食品工业科技, 2010, 31(6): 209-211.

[24] Liu C F, Wang Z S, Dong H Z, et al. Study on the influence of extrusion processing on soybean residue [J]. Food Ferment Ind, 2008, 34(12): 102-105.

[25] 吴娜娜, 王娜, 谭斌, 等. 发芽糙米粉面团性质及面包品质研究[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(4): 1-5.

[26] 刘敬科, 刘松雁, 赵巍, 等. 小米粥中挥发性风味物质的分析与研究[J]. 粮食与饲料工业, 2010(11): 31-33.

[27] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业, 2005.

[28] 周芳. 酱肉加工工艺及挥发性风味物质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.

[29] 徐托明. 燕麦茶的研发及其风味物质的评价研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.

北大核心期刊, 轻工优秀期刊

订阅热线: 010-87244116 QQ: 1787000719