

文章编号:1001-6880(2018)6-1046-09

酶法改性提取黑豆皮可溶性膳食纤维及性质的研究

沈蒙¹,康子悦¹,葛云飞¹,夏甜天¹,宁冬雪¹,寇芳¹,王维浩²,王金满³,曹龙奎^{1,2*}¹黑龙江八一农垦大学食品学院; ²黑龙江八一农垦大学食品学院 国家杂粮工程技术研究中心;³黑龙江八一农垦大学,大庆 163319

摘要:以黑豆皮为实验原料,采用酶法对其进行改性,以提高可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)的提取率,并利用响应面法优化酶法改性黑豆皮中可溶性膳食纤维的提取工艺条件。结果表明:提取的最优工艺为:酶(纤维素酶:半纤维素酶=1:2)的添加量为5%,pH值为4.6,温度为50℃,时间为3 h。SDF的提取率为14.90%。经验证实验得其接近理论值。研究发现改性后黑豆皮SDF的持水力和膨胀力分别提高3.71%,10.97%。通过扫描电镜图表明,改性后黑豆皮SDF较原始SDF的表面光滑,蜂窝状小孔较少,结构较分散,颗粒大小形状不一。本研究为黑豆皮高膳食纤维食品的开发及黑豆皮综合利用提供理论依据。

关键词:黑豆皮;可溶性膳食纤维;响应面法;物化特性;超显微结构

中图分类号:TS209;R91

文献标识码:A

DOI:10.16333/j.1001-6880.2018.6.021

Research of Enzymatic Modification on the Extraction and Properties of Soluble Dietary Fiber from Black Bean Hulls

SHEN Meng¹, KANG Zi-yue¹, GE Yun-fei¹, XIA Tian-tian¹, NING Dong-xue¹,
KOU Fang¹, WANG Wei-hao¹, WANG Jin-man³, CAO Long-kui^{1,2*}¹College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University; ²Heilongjiang Farm Produce Processing Development Center;³Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

Abstract: In this experiment, black bean hulls were used as experimental materials and modified by enzymatic method to improve the extraction rate of soluble dietary fiber (SDF) and the extraction process conditions of soluble dietary fiber from black bean hulls was optimized by response surface methodology. The results showed that the optimum conditions were as follows: the enzyme addition (cellulase: hemicellulase = 1:2) was 5%, the pH was 4.6, the temperature was 50℃ and the time was 2 h. Under this condition, the yield of SDF was 14.90% and this result is close to the theoretical value. The results showed that the water holding capacity and swelling force of enzymatic modified SDF were 3.71% and 10.97%, respectively. Scanning electron microscopy shows that the particle surface of enzymatic modified SDF was rougher, the alveolate pore was fewer, the structure was more concentrated and the particle size and shape were more uniform than original SDF. This study provides some theoretical guidance for the development of high-dietary fiber food and the comprehensive utilization of black bean hull.

Key words: black bean hull; soluble dietary fiber; response surface methodology; physical and chemical properties; super-microstructure

在黑豆加工过程中,黑豆皮作为废弃物而被遗弃,这无疑成为农产品加工过程中的浪费。黑豆皮中除了有较高含量的色素、油脂外,膳食纤维的含量也较高。膳食纤维被称为有益于人类身体健康的第

七营养素。美国谷物化学家协会定义为“膳食纤维是一种在人体小肠耐消化、吸收,在大肠完全或部分发酵的植物可食部分或类似碳水化合物”^[1]。膳食纤维根据其溶解性可分为不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)^[2]。水溶性膳食纤维指不能被人体消化酶消化分解,可溶于热水的非淀粉多糖,如果胶、部分半纤维素和植物胶等;水不溶性膳食纤维指不能被人体消化酶消化分解,且不溶于热水的非淀

收稿日期:2017-10-16 接受日期:2018-03-13

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0401203);黑龙江省农垦总局科技项目(HNK135-05-02);中央引导地方科技发展专项资金项目(ZY16C07);黑龙江省杂粮现代农业产业技术协同创新体系“品质改良与深加工”岗位

*通信作者 E-mail:caolongkui2013@163.com

粉多糖,如纤维素、部分半纤维素和木质素等^[3-5]。天然的黑豆皮膳食纤维具有明显的生理活性,能够有效地降血糖、降血脂、抗氧化、吸附重金属、促进肠道蠕动等功能^[6-8]。然而与国外相比,在我国黑豆皮还没有得到充分的利用。若从黑豆皮中提取可溶性膳食纤维并对其进行加工处理,将对黑豆皮的深加工、提高黑豆副产物的经济效益有重要意义^[9]。

目前的改性方法为化学法,生物法以及物理法。化学法以酸法和碱法为主;生物法以酶法为主;超微粉碎法,挤压技术,超高压技术以及蒸汽爆破为物理方法的代表。化学改性成本低,操作简单,但是受到反应条件的限制,转化率低;物理法改性一般利用机械降解手段,在工厂化生产中较容易实现,减少污染,但机械处理过程中高温高压会影响可溶性膳食纤维的活性;酶法改性反应条件温和,专一性强,纯度高^[10],转化率高^[11],成本相对较低,有利于实现工厂化设计。采用酶法改性是使用纤维素酶和半纤维素酶将黑豆皮细胞中的纤维素和半纤维素降解为小分子的物质被醇沉为沉淀物,从而增加可溶性膳食纤维的提取率,与物理改性超声微波协同萃取改性相比,超声微波协同萃取改性的原理为物料吸收微波能,并通过将超声波空化效应和超声机械作用相结合,将不可溶性膳食纤维分解为低聚寡糖,从而增加可溶性膳食纤维的含量。本实验采用酶法对原料进行改性,并初步的研究了黑豆皮可溶性膳食纤维的物化特性及超显微结构,为黑豆皮高膳食纤维食品的开发及黑豆皮综合利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

黑豆皮,安徽省亳州市润邦食品销售有限公司;中性蛋白酶(Sigma公司); α -耐高温淀粉酶(Sigma公司);淀粉葡萄糖苷酶(Sigma公司);纤维素酶(Sigma公司);半纤维素酶(Sigma公司);盐酸、氢氧化钠(分析纯),天津市大茂化学试剂厂;蒸馏水,实验室自制;无水乙醇(分析纯),天津市大茂化学试剂厂;石油醚(分析纯),天津市大茂化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

GDE-CSF6 意大利 VELP 膳食纤维测定仪北京盈盛恒泰科技有限公司;CW-2000A 超声-微波协同萃取反应仪 上海新拓分析仪器科技有限公司;AR2140 型分析天平 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司;DK-S24 型恒温水浴锅 上海森信实验仪器有

限公司;S220 型 pH 计 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司;TGL16B 型台式离心机 上海安亭科学仪器厂制造;DGG-9053A 型电热鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;MJ-10A 型磨粉机 上海市浦恒信息科技有限公司;RE-52AA 型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 黑豆皮 SDF 的制备

称取 1.0 g 脱脂黑豆皮,按照 1:30(g/mL)的料液比加入蒸馏水,调节 pH 至 6.0,加入 100 uL 耐高温 α -淀粉酶于 GDE 酶培养消化器中水浴培养 20 min,样品温度保持在 95~100 °C。调节 pH 至 7.0,加入 100 uL 中性蛋白酶溶液(50 mg 中性蛋白酶溶于 1 mL 蒸馏水中)于 GDE 中 60 °C 条件下培养 30 min。调节 pH 至 4.5,加入 100 uL 淀粉葡萄糖苷酶于 GDE 中 60 °C 条件下培养 30 min。将酶解后反应物转移至 CSF6 过滤装置中,滤液经浓缩后用四倍体积的 95% 乙醇醇沉 12 h,4000 rpm 离心 20 min,-108 °C 冷冻干燥 8 h 得 SDF,滤渣用热水洗涤、35 °C 干燥 10 h 得 IDF。

1.3.2 酶法改性黑豆皮 SDF

称取 1.0 g 脱脂黑豆皮,按照 1:30(g/mL)的料液比加入蒸馏水,调节 pH,按比例加入酶于 GDE 酶培养消化器中水浴培养设置温度和时间,步骤同 1.3.1。

1.3.3 酶法改性单因素试验

1.3.3.1 不同酶添加量对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

每组试验分别称取 1.0 g 脱脂黑豆皮,pH 为 4.6,温度为 50 °C,时间为 3 h,酶添加量分别为 2%、3%、4%、5%、6%、7% 时对黑豆皮 SDF 含量的影响。

1.3.3.2 不同温度对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

每组试验分别称取 1.0 g 脱脂黑豆皮,酶添加量为 5%,pH 为 4.6,时间为 3 h,温度分别为 35、40、45、50、55、60 °C 时对黑豆皮 SDF 含量的影响。

1.3.3.3 不同 pH 对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

每组试验分别称取 1.0 g 脱脂黑豆皮,酶添加量为 5%,温度为 50 °C,时间为 3 h,pH 分别为 4.0、4.2、4.4、4.6、4.8、5.0 时对黑豆皮 SDF 含量的影响。

1.3.3.4 不同时间对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

每组试验分别称取 1.0 g 脱脂黑豆皮, 酶添加量为 5%, pH 为 4.6, 温度为 50 °C, 时间分别为 1、2、3、4、5、6 h 时对黑豆皮 SDF 含量的影响。

1.4 响应面法优化酶法改性黑豆皮 SDF 的工艺

在单因素试验的基础上,选取酶法改性黑豆皮

提取工艺优化的研究,以酶添加量 X1、温度 X2、pH X3、时间 X4 为响应因素,提取黑豆皮 SDF 含量(Y)为响应值,根据 Box-Behnken 试验设计原理,采用四因素三水平的响应面分析法,对数据进行回归分析及显著性检验,确定最优工艺。每个试验点重复三次,取平均值。试验因素水平设计表如表 1。

表 1 响应面因素水平编码表
Table 1 Factors levels and codes

因素 Factor	编码 Encoding	水平 Level		
		-1	0	1
酶添加量 Enzyme addition(%)	X1	4	5	6
温度 Temperature(°C)	X2	45	50	55
pH	X3	4.4	4.6	4.8
时间 Time(h)	X4	2	3	4

1.5 改性前后黑豆皮 SDF 的物化特性

1.5.1 持水力的测定

参考 Wang 等^[12]的方法。准确称取黑豆皮 SDF 样品 1.0 g, 按 1:20(w/v)加入去离子水,充分混匀,于室温下静置 24 h, 1500 rpm 离心 10 min, 弃上清液,沉淀质量记为 M,膳食纤维的持水性(WHC)计算方法为^[13]下列公式,每次试验重复三次。

$$\text{WHC}(\text{g/g}) = \frac{\text{样品湿重(g)} - \text{样品干重(g)}}{\text{样品干重(g)}}$$

1.5.2 膨胀力的测定

准确称取黑豆皮 SDF 样品 1.0 g 于直径为 1.5 cm 的试管中,记录膳食纤维体积 V1,按 1:20(w/v)加入去离子水,充分混匀,于室温下放置 16 h,记录吸水后膳食纤维体积 V2,膳食纤维的吸水膨胀性(SWC)的计算方法为^[14]下列公式,每次试验重复三次。

$$\text{SWC}(\text{mL/g}) = \frac{\text{膨胀后样品体积(mL)} - \text{干样品体积(mL)}}{\text{样品重量(g)}}$$

1.6 改性前后黑豆皮 SDF 超微结构分析

将样品在 105 °C 条件下干燥至衡重,粉碎后取适量样品粘于观察台上,采用离子溅射方法镀金,通过扫描电子显微镜对制备好的样品进行分析,加速电压为 15 KV, 分别放大 2000 倍、20000 倍、40000 倍观察改性前后黑豆皮 SDF 的形貌,得到相应的扫描电镜照片^[15]。

2 结果与分析

2.1 酶法改性黑豆皮 SDF 提取率单因素影响分析

2.1.1 不同酶添加量对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

由图 1 可知,酶添加量在 2.0% ~ 7.0% 范围内,改性 SDF 提取率随着酶添加量的增加,呈现先增大后降低的趋势,当添加量为 5.0% 时,改性 SDF 提取率为 13.96%。当酶的添加量大于 5.0% 时,改性黑豆皮 SDF 提取率略有降低,其原因可能是由于酶的添加量过大,纤维素和半纤维素被降解成为低聚糖和单糖,不易于醇沉,得到 SDF 的含量减少^[16],所以酶添加量宜为 5%。

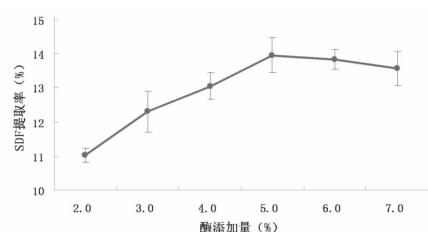


图 1 酶添加量对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

Fig. 1 Effects of enzyme addition on extraction ratio of modified black bean hull SDF

2.1.2 不同温度对黑豆皮 SDF 提取率的影响

由图 2 所示,改性黑豆皮 SDF 随着温度的升高呈现先增加后降低的趋势,当温度达到 50 °C 时,改性黑豆皮 SDF 提取率达到最大值 13.98%。当温度

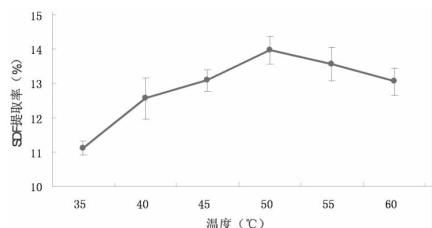


图 2 温度对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

Fig. 2 Effects of temperature on extraction ratio of modified black bean hull SDF

超过 50 °C 时,改性黑豆皮 SDF 含量有所下降。因为当温度低于酶的最适温度时,随着温度的增加,酶活力加强^[17];当温度高于最适温度时,反应速率随温度的升高而降低,酶活力减弱,不利于酶与底物的结合^[18]。故温度宜为 50 °C。

2.1.3 不同 pH 对黑豆皮 SDF 提取率的影响

由图 3 可知,当 pH 为 4.6 时,酶法改性黑豆皮 SDF 提取率达到最大值 14.12%。在反应体系中 pH 在 4.0~5.0 范围,随着 pH 的增加,改性后 SDF 的提取率呈现先增加后降低的趋势,当 pH 为 4.6

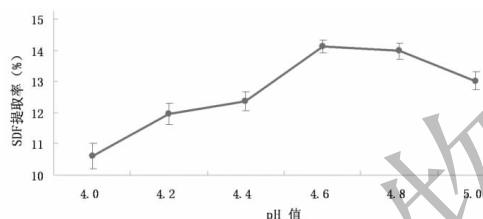


图 3 pH 对改性黑豆皮 SDF 提取率的影响

Fig. 3 Effects of pH on extraction ratio of modified black bean hull SDF

时达到最大值,由于酶和底物的结合受 pH 的影响^[19],当 pH 为 4.6 时,为酶和底物结合的最适 pH,酶促反应速度达到最大值。

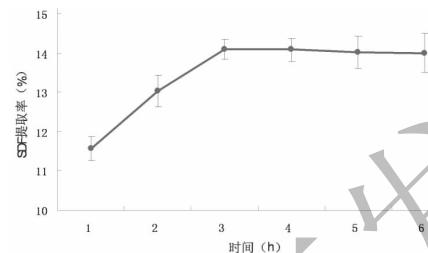


图 4 时间对改性黑豆皮 SDF 含量的影响

Fig. 4 Effects of time on extraction ratio of modified black bean hull SDF

2.1.4 不同时间对黑豆皮 SDF 提取率的影响

由图 4 所示,在 1~6 h 范围内,随着时间的增加,改性黑豆皮 SDF 提取率先增大后趋于平缓。当时间为 3 h 时,改性黑豆皮提取率为 14.10%,当时间超过 3 h 时,酶促反应速度几乎接近于零^[20],所以延长时间对改性黑豆皮 SDF 提取率影响不明显,故最佳反应时间为 3 h。

2.2 响应面优化酶法改性黑豆皮 SDF 提取工艺的试验结果与分析

2.2.1 响应面试验结果

结合单因素试验,采用 Box-Behnken 试验设计原理,以酶添加量 X1、温度 X2、pH X3、时间 X4 为响应因素,提取改性黑豆皮 SDF 含量(Y)为响应值,提取黑豆皮膳食纤维的试验设计及结果如表 2。利用 Design Expert 8.0.6 软件对表 2 中的数据进行分析,得到方差分析的结果如表 3 所示。

表 2 Box-Behnken 试验设计方案及结果

Table 2 Experimental scheme and results of Box-Behnken design

序号 Sequence number	编码水平 Encodeing level				SDF 含量 SDF Content(%)	
	X1	X2	X3	X4		
1	-1	-1	0	0	11.21	
2	1	-1	0	0	11.42	
3	-1	1	0	0	13.23	
4	1	1	0	0	12.56	
5	0	0	-1	-1	11.35	
6	0	0	1	-1	12.86	
7	0	0	-1	1	11.87	
8	0	0	1	1	13.29	
9	-1	0	0	-1	12.37	
10	1	0	0	-1	11.82	

续表2(Continued Tab. 2)

序号 Sequence number	编码水平 Encodeing level			SDF 含量 SDF Content(%)	
		X1	X2	X3	X4
11	-1	0	0	1	12.89
12	1	0	0	1	12.22
13	0	-1	-1	0	10.54
14	0	1	-1	0	12.96
15	0	-1	1	0	12.49
16	0	1	1	0	13.61
17	-1	0	-1	0	11.49
18	1	0	-1	0	11.21
19	-1	0	1	0	13.22
20	1	0	1	0	12.63
21	0	-1	0	-1	11.75
22	0	1	0	-1	13.84
23	0	-1	0	1	12.22
24	0	1	0	1	13.26
25	0	0	0	0	14.56
26	0	0	0	0	14.79
27	0	0	0	0	14.90
28	0	0	0	0	14.61
29	0	0	0	0	14.68

对表2的数据进行拟合,得到二次回归方程:

$$Y = 14.71 - 0.21A + 0.82B + 0.72C + 0.15D -$$

$$0.22AB - 0.078AC - 0.030AD - 0.033BC - 0.26BD$$

$$- 0.023CD - 1.42A^2 - 1.06B^2 - 1.26C^2 - 0.98D^2。$$

表3 回归方程方差分析表

Table 3 ANOVA for quadratic polynomial model

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	F 值 F Value	P 值 <i>p</i> -Value Prob > F	显著性 Significance
模型 Model	40.05	14	2.86	65.95	<0.0001	* *
A	0.54	1	12.69	0.54	0.0033	* *
B	8.05	1	8.05	185.64	<0.0001	* *
C	6.28	1	6.28	144.75	<0.0001	* *
D	0.26	1	0.26	5.95	0.0286	*
AB	0.19	1	0.19	4.46	0.0531	
AC	0.024	1	0.024	0.55	0.4690	
AD	3.600E-003	1	3.600E-003	0.083	0.7775	
BC	0.42	1	0.42	9.74	0.0075	* *
BD	0.28	1	0.28	6.35	0.0245	*
CD	2.025E-003	1	2.025E-003	0.047	0.8321	
A^2	13.01	1	13.01	300.05	<0.0001	* *
B^2	7.34	1	7.34	169.30	<0.0001	* *

续表3(Continued Tab. 3)

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	F 值 F Value	P 值 <i>p</i> -Value	显著性 Significance
C ²	10.30	1	10.30	237.51	<0.0001	* *
D ²	6.26	1	6.26	14.43	<0.0001	* *
残差 Residual	0.61	14	0.043			
失拟项 Lack of Fit	0.53	10	0.053	2.80	0.1664	不显著 Non-significant
纯误差 Pure Error	0.076	4	0.019			
总和 Cor Total	40.66	28				

注: * 表示显著, $P < 0.05$, ** 表示极显著, $P < 0.01$ 。

Note: * express significant, * $P < 0.05$; ** express extremely significant, ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

由表 3 可以看出 $P < 0.0001$ 表明该模型极显著, $\text{Pred}(R^2)$ 为 0.9851, $\text{Adj}(R^2)$ 为 0.9701, 说明拟合的方程较好。A、B、C、D、BC、BD 和所有二次项均

显著, 其他不显著。在所选因素水平范围内, 对 SDF 得率的影响主次顺序为: B > C > A > D。

2.2.2 响应面图

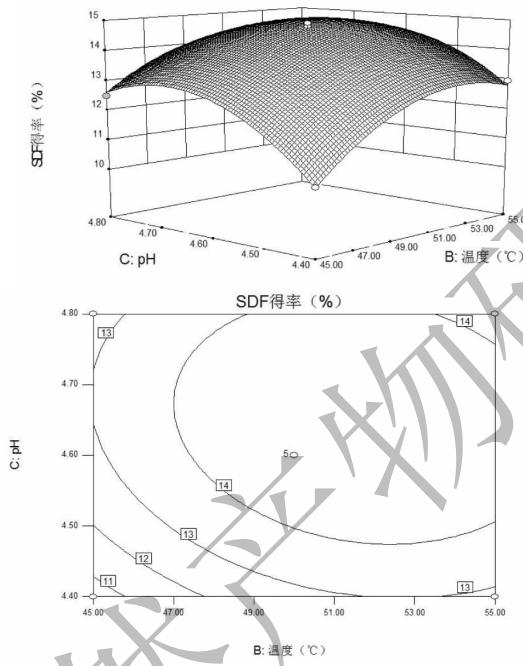


图 a 温度和 pH

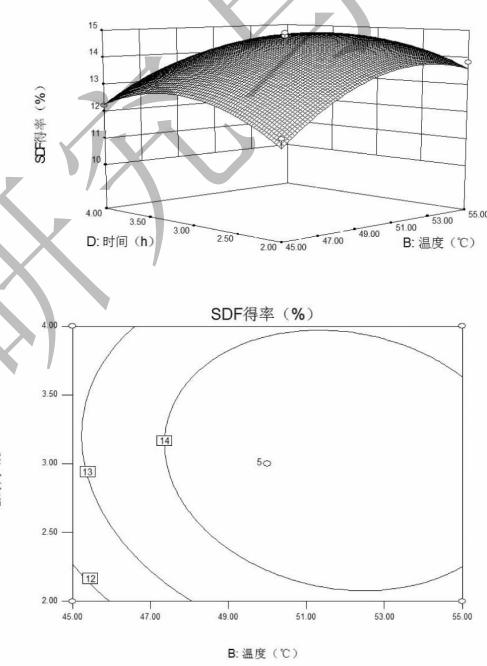


图 b 温度和时间

图 5 三因素对 SDF 得率的响应曲面图

Fig. 5 Response surface of three factors on SDF yield

各因素交互作用对 SDF 得率影响的响应曲面以及等高线如图 5 所示, 由图 5(a) 可知, 以时间和酶添加量为中心水平值时, 样品 SDF 提取率随着温度和 pH 的增加呈现先上升后下降趋势, 等高线较密集, 且呈现为椭圆形, 表明温度和 pH 交互作用显著。由图(b)可知, 以 pH 和酶添加量为中心水平值时, 样品 SDF 提取率随时间和温度的增加呈现先上升后下降趋势, 等高线较密集, 且呈现为椭圆形, 表明时间和温度交互作用显著。

2.2.3 验证试验

实验结果经 Design-Expert 优化后得到了模型的最优条件是: 酶添加量 4.85%, 温度 51.13 °C, pH 4.64, 时间 2.98 h, 此时黑豆皮 SDF 得率理论值最高为 14.93%。为验证最佳实验结果的准确性, 考虑到实际操作条件的可行性, 设定最优条件为: 酶添加量 5.0%, 温度 50 °C, pH 4.6, 时间 3 h, 在此条件下进行三次重复实验后测得黑豆皮 SDF 得率的平均值为 14.90%, 与理论值接近, 说明经过响应曲面

表 4 改性前后黑豆皮 SDF 的物化特性表

Table 4 Physical and chemical properties of black bean hull SDF before and after modification

样品 Sample	持水力 Water-holding power(g/g)	膨胀力 Expansibility(mL/g)
原始 SDF Original SDF	3.4612	1.1236
改性后 SDF Modified SDF	3.5897	1.2469

法得到的优化工艺参数可靠性较高,与实际情况相符合,具有一定的应用价值。

2.3 酶法改性前后黑豆皮 SDF 的物化特性分析

由表 4 可知,酶法改性前后黑豆皮 SDF 的持水力和膨胀力发生很大的变化,酶法改性后黑豆皮 SDF 的持水力增加 3.71%,膨胀力增加 10.97%,酶法改性是将纤维素和半纤维素分解为小分子物质。可溶性膳食纤维分子中的很多单糖结构含有亲水基团,所以可溶性膳食纤维具有较强的亲水性,这种结构赋予可溶性膳食纤维很强的持水力和膨胀力,吸

水膨胀后会呈显凝胶状,可以吸附食物中的胆固醇,进而减少了人体对胆固醇的吸收^[21]。可溶性膳食纤维的持水力、溶胀性等理化性能是衡量其生理功能的重要指标,持水力和溶胀性越大,其生理活性就越高^[22]。在最佳提取工艺条件下,获得黑豆皮 SDF 的持水力和膨胀力均比较高,这表明以酶法提取获得的黑豆皮 SDF 生理活性较高,因此,黑豆皮是一种优良的可溶性膳食纤维来源。

2.4 酶法改性前后黑豆皮 SDF 超微结构分析

从扫描电镜图可看出,在相同放大倍数下,改性

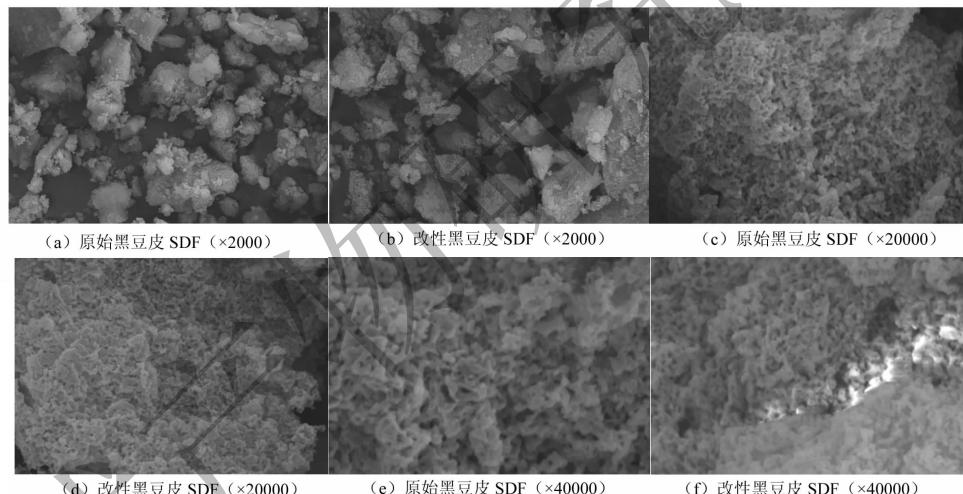


图 6 改性前后黑豆皮 SDF 的扫描电镜图

Fig. 6 SEM images of black bean hull SDF before and after modification

前后黑豆皮 SDF 具有不同的结构形态结构。图(a)、(c)、(e)为原始黑豆皮 SDF 扫描电镜图,从三幅图片可以看出,原始黑豆皮 SDF 含有大小不一的小球状物。图(b)、(d)、(f)为改性黑豆皮 SDF 扫描电镜图,改性后 SDF 由很多大小不规则的块状物,球状物及粒状物构成,可能由于酶法改性是通过纤维素酶和半纤维素酶将不可溶性膳食纤维分解为可溶性膳食纤维,分子量降低,聚合度也随之下降。在高倍数扫描电镜下可观察到原始 SDF 表面较粗糙,有许多蜂窝状小孔^[23]。而改性 SDF 表面较光滑,且蜂窝状小孔较少。可能是由于黑豆皮 SDF 产

品易溶于水,在提取过程中与空气中的水分相结合形成交联的状态,导致超微结构中出现小孔^[24]。

3 结论

以黑豆皮为原料,选用酶法对黑豆皮进行改性处理,研究了提取条件对 SDF 得率的影响。在单因素实验基础上,以 SDF 得率为指标,通过响应面法优化改性条件工艺,得到最佳处理条件:酶法改性的最优工艺为:酶添加量(纤维素酶:半纤维素酶 = 1:2)为 5%,pH 值为 4.6,温度为 50 °C,时间为 3 h。SDF 的提取率为 14.90%,接近理论值。虽然超声

微波协同萃取改性相较于酶法改性提取率上升2.42%,但是其所得到的可溶性膳食纤维中可能存在单糖种类含量多且连接方式复杂等现象,而酶法改性反应条件更温和,具有较好的专一性,能够作用于特定的连接键,纯度比较高,内部结构破坏较小,更容易实现产业化连续生产。研究发现改性后黑豆皮SDF的持水力和膨胀力分别提高3.71%,10.97%。通过扫描电镜图表明,改性后黑豆皮SDF大小不规则的块状物,球状物及粒状物,表面较光滑,蜂窝状小孔较少,结构较分散。酶法改性反应相较于其他改性方法,反应条件温和,专一性强,纯度高,副产物较少,生产成本相对较低,操作简单,有利于实现工厂化设计。本实验初步的研究了黑豆皮可溶性膳食纤维的物化特性及超显微结构,该研究结果为黑豆皮可溶性膳食纤维的综合利用及其产品的深加工和开发提供了一定的理论指导,为后续实验提供了一定的理论依据。

参考文献

- 1 Hideki Murakami, Satoru Iwane, Akihiro Munakata, et al. Changes in intraluminal pressure in rat largeIntestines with aging and effects of dietary fiber [J]. *Digeset Dis Sci*, 2001, 46:1247-1254.
- 2 Zheng JX(郑建仙). Functional foods(功能性食品) [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999:45-126.
- 3 Miao JZ(苗敬芝), Feng JH(冯金和), Dong YW(董玉玮). Ultrasonic-aided extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from ginger [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2011, 32:120-125.
- 4 Qiao GP(乔国平), Wang XG(王兴国). Development and Utilization of Soybean Skin [J]. *Cereals & Oils(粮食与油脂)*, 2001, (12):36-37.
- 5 Devriesl JW, Prosky B, LI S, et al. Historical perspective on defining dietary fiber [J]. *Cereal Foods World*, 1999, 44:367-369.
- 6 Li HX(李焕霞). Study on the technics conditions and characteristics of citrus dietary fiber [D]. Chongqing: Southwest University(西南大学), 2007.
- 7 Tang XQ(唐孝青), Jiao LX(焦凌霞), Fan MT(樊明涛), et al. Extraction and antioxidant properties of soluble dietary fiber from pear residue [J]. *Acta Agri Boreali-occidentalis Sinica(西北农业学报)*, 2010(9):93-98.
- 8 Zhou J(周坚), Xiao AH(肖安红). Functional dietary fiber foods(功能性膳食纤维食品) [M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 2005.
- 9 Zhong YP(钟艳萍). Studies on properties and preparation of soluble dietary fiber [D]. Guangzhou: South China University of Technology(华南理工大学), 2011.
- 10 Liu XT(刘晓婷). The development and utilization of dietary fiber [J]. *Food and Nutri in China(中国食物与营养)*, 2004, 9:21-23.
- 11 Wang JH(汪建红), Liu H(刘浩). Extraction of polysaccharide from eleochoairs tuberosa peel by papain [J]. *Nat Prod Res(天然产物研究与开发)*, 2016, 28: 1251-1255.
- 12 Wang HX(王宏勋), Wang YY(王岩岩), Mao YB(毛一兵), et al. Study on the modification of dietary fiber in powder granules [J]. *Sci Tech of Food Ind(食品工业科技)*, 2007, 101-102.
- 13 Wang Q(王强), Zhao X(赵欣). Research progress in the modification technologies on dietary fiber [J]. *Sci Tech of Food Ind(食品工业科技)*, 2013, 34:392-392.
- 14 Zhao TX(赵泰霞), Zhang MY(张明玉). Extraction of dietary fiber from red beans by ultrasonic assisted enzymatic method [J]. *Farm Prod Processing(农产品加工)*, 2016, 4 (405):8-16.
- 15 Chen XF(陈雪峰), Wu LP(吴丽萍), Liu AX(刘爱香). Effect of extrusion modification on the physical and chemical properties of apple's dietary fiber [J]. *Food Ferment Ind(食品与发酵工业)*, 2005, 31(12):57-60.
- 16 Chen XJ(陈小举), Wu XF(吴学凤), Jang ST(姜绍通), et al. Applying response surface methodology to optimize extraction of soluble dietary fiber from pear residue using hemicellulase [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2015, 36(6):18-23.
- 17 Huang SQ(黄生权), Li JW(李进伟), Ning ZX(宁正祥). Ultrasonic-microwave synergistic extraction of polysaccharides from cultivated ganoderma iucidum [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2010, 31(16):52-55.
- 18 Wu H(吴晖), Hou P(侯萍), Su H(苏浩), et al. Study on the extraction of soybean soluble dietary fiber [J]. *Mod Food Sci Tech(现代食品科技)*, 2008, 24:336-339.
- 19 Ling B(令博), Tian YB(田云波), Wu HB(吴洪斌), et al. Optimization of microbial fermentation of grape pomace for dietary fiber preparation [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2012, 33:178-182.
- 20 Chen SX(陈仕学), Yu JP(郁建平), Yang J(杨俊), et al. Optimization of microwave-assisted extraction of water-soluble dietary fiber from *Zingiber striolatum* diels fruits by response surface methodology [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2014, 35(18):57-62.

(下转第 1084 页)