

不同品种蚕豆种皮中膳食纤维的提取工艺优化及其理化特性

刘红开^{1,2}, 李放², 张亚宏², 刘红², 康玉凡^{2,*}

(1. 济南大学商学院, 山东 济南 250002; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100193)

摘要:以20个品种的蚕豆为原料,测定了不同品种蚕豆种皮中膳食纤维含量,采用酶碱法从蚕豆种皮中提取膳食纤维,通过正交试验优化其提取条件。通过单因素试验考察纤维素酶用量、pH值、碱解时间、碱解温度对膳食纤维提取工艺的影响。在单因素试验基础上,通过正交试验确定最佳提取条件,并比较和分析了不同品种蚕豆膳食纤维理化特性。结果表明:20个品种蚕豆种皮膳食纤维含量范围在78.70~87.12 g/100 g之间,酶碱法提取蚕豆种皮膳食纤维的最适工艺条件为:纤维素酶用量30 U/g、pH 12.0、碱解时间60 min、碱解温度60 °C。该条件下提取20个品种蚕豆种皮中的膳食纤维并比较分析其理化特性,发现‘临蚕6号’膳食纤维持水性(7.67 g/g)、螯合 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 能力(140.09 mg/g和33.63 mg/g)均最强,‘凤豆16号’膳食纤维堆积密度最小(0.206 g/cm³),吸水膨胀能力最强(4.00 mL/g),对不饱和、饱和脂肪酸的吸附能力(4.48 g/g和4.23 g/g)、DPPH自由基清除能力(13.23 $\mu\text{mol/g}$)也均为最强。

关键词:蚕豆种皮;酶碱法;膳食纤维;理化特性

Optimized Extraction Conditions and Physicochemical Characteristics of Dietary Fiber from Faba Bean Testa from Different Cultivars

LIU Hongkai^{1,2}, LI Fang², ZHANG Yahong², LIU Hong², KANG Yufan^{2,*}

(1. Business School, University of Jinan, Jinan 250002, China;

2. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Dietary fiber (DF) contents of faba bean testa from 20 different cultivars were determined and DF was extracted by an enzyme-alkali method. The optimization of extraction conditions was investigated using single factor experiments and orthogonal array design. For this purpose, the effects of four crucial parameters including cellulose dosage, pH, alkali treatment time and temperature, on extraction efficiency were examined. Physicochemical characteristics of DF from different faba bean cultivars were compared and analyzed. The results indicated that the DF contents of faba bean testa from 20 different cultivars were 78.7~87.12 g/100 g and the optimum extraction conditions were as follows: cellulose dosage, 30 U/g; pH, 12.0; and alkali treatment for 60 min at 60 °C. Further, it was found that DF from the ‘Linca 6’ had the highest water holding capacity (7.67 g/g), the best Fe^{3+} and Cu^{2+} chelating ability (140.09 mg/g and 33.63 mg/g), whereas DF from ‘Fengdou 16’ had the lowest bulk density (0.206 g/cm³), the largest swelling capacity (4.00 mL/g), the highest adsorption ability for unsaturated and saturated fatty acids (4.48 g/g and 4.23 g/g), and the highest DPPH-scavenging ability (13.23 $\mu\text{mol/g}$).

Key words: faba bean testa; enzyme-alkali method; dietary fiber; physicochemical characteristics

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201616004

中图分类号: S529

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 16-0022-07

引文格式:

刘红开, 李放, 张亚宏, 等. 不同品种蚕豆种皮中膳食纤维的提取工艺优化及其理化特性[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 22-28. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201616004. <http://www.spkx.net.cn>

LIU Hongkai, LI Fang, ZHANG Yahong, et al. Optimized extraction conditions and physicochemical characteristics of dietary fiber from faba bean testa from different cultivars[J]. Food Science, 2016, 37(16): 22-28. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201616004. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2016-02-22

基金项目: 国家现代农业(食用豆)产业技术体系建设专项(CARS-09)

作者简介: 刘红开(1985—), 男, 博士, 研究方向为食用豆加工与贮藏。E-mail: cqalhk@163.com

*通信作者: 康玉凡(1963—), 女, 教授, 博士, 研究方向为种子生物学及豆类芽菜理论与技术。E-mail: yfkang@cau.edu.cn

膳食纤维 (dietary fiber, DF) 是一类不易被消化的食物营养素, 一般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), 多数来自于植物细胞壁, 包括木质素、纤维素、半纤维素、果胶等^[1], 它能够改善人体营养状况, 调节机体功能, 降低多种慢性病的发病率, 因而被誉为“第七营养素”^[2]。

目前居民的DF摄入主要来源于谷物和豆类^[3], 而豆类DF较谷类来说含量更高, 质感口感更好, 可以加工成高纯度、高品质、高附加值的DF产品^[4]。目前关于豆类DF的研究主要集中在大豆及豆渣DF的提取和改性等, 而蚕豆、豌豆等食用豆类DF也越来越多的被国内外学者所关注。

蚕豆富含蛋白质、碳水化合物、维生素和矿物质等, 且蚕豆DF中水溶性与不溶性部分比例相对均衡, 能有效降低血糖和血清胆固醇, 促进肠道蠕动^[5-6]。蚕豆种皮较厚, 易剥离, 生产中常被当作废料处理, 因此蚕豆种皮中所含的DF通常被浪费, 不利于蚕豆的综合利用。随着对DF生理功能的认识不断深入, 如何制备DF也成为了研究的重点, 目前从植物中提取DF的方法主要有: 水提取法^[7]、化学法^[8]、物理法^[9]、微生物发酵法^[10]和酶法^[11]。传统的酸碱法制备成本较低, 但产品色泽形态较差, 单独的酶法制备成本较高, 且耗时^[12], 因此本实验将两种方法有机结合, 通过优化工艺条件, 提高了蚕豆种皮DF的提取率, 比较分析了20个品种蚕豆种皮DF功能特性, 并筛选出最优品种。这对蚕豆种子的有效利用、改善居民膳食结构有着理论指导作用和实际应用意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

来自全国主产区20个蚕豆品种见表1。

表1 不同品种蚕豆种质及产地描述
Table 1 Description of germplasm and origin for faba bean from different cultivars

品种	产地	粒形	百粒质量/g	种皮质量分数/%
‘崇礼’	河北	中厚	117.58±1.52	12.92±0.34
‘启豆2号’	江苏	窄薄	78.54±0.52	16.12±0.17
‘海门大青皮’	江苏	阔薄	137.34±2.35	15.56±0.44
‘临蚕6号’	甘肃	阔厚	189.66±3.85	12.91±0.15
‘临蚕7号’	甘肃	阔厚	183.56±3.54	12.25±0.57
‘青蚕12号’	青海	阔厚	175.62±4.36	13.41±0.66
‘青蚕13号’	青海	窄厚	75.63±1.46	14.21±0.19
‘青蚕14号’	青海	阔厚	199.29±3.88	13.94±0.25
‘青蚕15号’	青海	阔厚	223.57±1.87	11.81±0.45
‘监利小蚕豆’	湖北	窄厚	60.70±0.24	13.94±0.36
‘成胡10号’	四川	中厚	128.03±3.86	13.67±0.65
‘成胡15号’	四川	中厚	103.98±2.15	14.65±0.42
‘成胡20号’	四川	中厚	115.60±1.76	13.90±0.12
‘凤豆6号’	云南	中厚	113.99±0.83	13.62±0.13
‘凤豆11号’	云南	中厚	119.45±2.83	14.58±0.24
‘凤豆12号’	云南	中厚	120.86±0.85	15.53±0.73
‘凤豆15号’	云南	中厚	126.07±1.26	13.36±0.54
‘凤豆16号’	云南	中厚	134.67±1.13	13.33±0.21
‘凤01010’	云南	中厚	143.32±2.39	13.35±0.34
‘凤03135’	云南	中厚	175.20±4.41	12.43±0.72

纤维素酶 北京广达恒益有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、NaOH、无水乙醇、过氧化氢、CuSO₄、FeCl₃等均为分析纯。

1.2 仪器与设备

LGJ-20冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司; FE20精密pH计 梅特勒-托利多仪器有限公司; UV-1200紫外-可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司; 5810R高速冷冻离心机 德国Eppendorf公司; GL-3250B恒温磁力搅拌器 海门市其林贝尔仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 蚕豆种质形状测定

参考《蚕豆种质资源描述规范和数据标准》^[13]测定。20个品种蚕豆的种质形状。

1.3.2 不同品种蚕豆种皮SDF和IDF含量测定

参照GB/T 5009.88—2008《食品中膳食纤维的测定》^[14]描述的方法。

1.3.3 不同品种蚕豆种皮DF提取工艺流程

采用酶碱法以蚕豆种皮为材料提取DF, 流程为:

蚕豆皮→干燥→粉碎过40目筛→酶解 (纤维素酶) →碱解 (氢氧化钠溶液) →调节pH值至中性 (稀盐酸) →脱色 (过氧化氢溶液) →用4倍体积乙醇沉淀1 h→抽滤→冷冻干燥至恒温→DF

1.3.4 单因素试验

1.3.4.1 纤维素酶用量的选取

选用总膳食纤维 (total dietary fiber, TDF) 含量最高的蚕豆品种作为实验材料, 取0.5 g豆皮粉末, 加入20 mL蒸馏水, 调节pH 4.7, 加入纤维素酶, 使酶用量分别为0、1.5、7.5、15、30、75、120、150 U/g, 50 ℃条件下酶解1 h后调节pH 11.0, 在50 ℃条件下继续碱解60 min。以SDF得率为指标, 选取正交试验所用纤维素酶用量。

1.3.4.2 pH值的选取

取0.5 g豆皮粉末, 加入20 mL蒸馏水, 调节pH 4.7、纤维素酶用量30 U/g, 50 ℃条件下酶解1 h后滴加NaOH溶液调节pH值至8.0、9.0、10.0、11.0、12.0、13.0, 在50 ℃条件下继续碱解60 min。以SDF得率为指标, 选取正交试验所用pH值。

1.3.4.3 碱解时间的选取

取0.5 g豆皮粉末, 加入20 mL蒸馏水, 调节pH 4.7、纤维素酶用量30 U/g, 50 ℃条件下酶解1 h后滴加NaOH溶液调节pH 11.0, 在50 ℃条件下继续碱解, 分别碱解20、40、60、80、100、120 min。以SDF得率为指标, 选取正交试验所用碱解时间。

1.3.4.4 碱解温度的选取

取0.5 g豆皮粉末, 加入20 mL蒸馏水, 调节pH 4.7,

纤维素酶用量30 U/g, 50 ℃条件下酶解1 h后滴加NaOH溶液调节pH 11.0, 一定温度条件下碱解60 min, 碱解温度分别为30、40、50、60、70、80 ℃。以SDF得率为指标, 选取正交试验所用碱解温度。

1.3.5 正交试验

在单因素试验的基础上, 考虑制得DF水溶性组分, 以SDF得率为指标, 采用 $L_9(3^4)$ 正交试验对提取条件进行进一步的优化。根据极差分析, 确定影响酶碱法DF提取的因素主次顺序以及最佳工艺条件。正交试验因素水平设计如表2所示。

表2 酶碱法提取DF正交试验因素与水平
Table 2 Factors and levels used in $L_9(3^4)$ orthogonal array design

水平	因素			
	A纤维素酶用量/(U/g)	B pH	C碱解时间/min	D碱解温度/℃
1	15	10.0	50	55
2	30	11.0	60	60
3	45	12.0	70	65

1.3.6 不同品种蚕豆种皮DF理化特性测定

1.3.6.1 堆积密度

取一定量样品于10 mL量筒中, 读出样品体积, 按式(1)计算样品堆积密度:

$$\text{堆积密度}/(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中: m 为样品质量/g; V 为样品体积/mL。

1.3.6.2 持水性^[15]

取0.5 g样品于10 mL离心管中, 加5 mL蒸馏水, 摇匀后37 ℃条件下静置24 h, 10 000 r/min离心10 min, 倒置直至将多余水分排出, 按式(2)计算样品持水性:

$$\text{持水性}/(\text{g}/\text{g}) = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \quad (2)$$

式中: m_1 为样品质量/g; m_2 为离心前样品和离心管总质量/g; m_3 为离心后样品和离心管总质量/g。

1.3.6.3 吸水膨胀能力^[16]

取0.5 g样品于带刻度的试管中, 加5 mL蒸馏水, 摇匀后37 ℃条件下静置24 h, 按式(3)计算样品吸水膨胀能力:

$$\text{吸水膨胀能力}/(\text{mL}/\text{g}) = \frac{V_2 - V_1}{m} \quad (3)$$

式中: V_1 为样品体积/mL; V_2 为吸水膨胀后体积/mL; m 为样品质量/g。

1.3.6.4 不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)吸附能力^[17]

取0.2 g样品于10 mL离心管中, 加3 mL油茶籽油(UFA含量大于90%), 摇匀后静置24 h, 10 000 r/min离心10 min, 倒置直至排出多余油脂, 按式(4)计算样品对UFA吸附能力:

$$\text{UFA吸附能力}/(\text{g}/\text{g}) = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \quad (4)$$

式中: m_1 为样品质量/g; m_2 为离心前样品和离心管总质量/g; m_3 为离心后样品和离心管总质量/g。

1.3.6.5 饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)吸附能力^[18]

取0.2 g样品于10 mL离心管中, 加3 mL猪油, 摇匀后37 ℃条件下静置24 h, 10 000 r/min离心10 min, 倒置直至排出多余油脂, 按式(5)计算对样品SFA吸附能力:

$$\text{SFA吸附能力}/(\text{g}/\text{g}) = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \quad (5)$$

式中: m_1 为样品质量/g; m_2 为离心前样品和离心管总质量/g; m_3 为离心后样品和离心管总质量/g。

1.3.6.6 DPPH自由基清除能力

参考Shimada等^[19]的方法进行测定。取0.1 g蚕豆种皮DF样品于离心管, 用乙醇溶液提取30 min, 离心, 取上清液。取DF提取液稀释5倍的样液2 mL, 加入0.2 mmol/L的DPPH乙醇溶液1 mL, 混匀后, 常温避光放置, 在517 nm波长处测定吸光度, 2 mL样液与无水乙醇1 mL混合液做空白, 再测定1 mL DPPH溶液与2 mL蒸馏水在517 nm波长处的吸光度作为对照。用水溶性VE做标准曲线, 结果以与每克干燥样品相当的水溶性VE含量($\mu\text{mol}/\text{g}$)表示。

1.3.6.7 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 螯合能力^[20]

配制不同浓度的 CuSO_4 溶液和 FeCl_3 溶液+显色剂(0.5%邻菲罗啉), 分别在580 nm和510 nm波长处测定其吸光度, 绘制标准曲线。取0.1 g样品于离心管, 分别加入0.04 mol/L的 CuSO_4 溶液和0.1 mol/L的 FeCl_3 溶液5 mL, 振荡后离心, 取上清液, 分别在580 nm和510 nm波长处测定上清液吸光度, 记录并分析剩余 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度。按照式(6)、(7)计算样品对 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 的螯合能力。

$$\text{Cu}^{2+}\text{螯合能力}/(\text{mg}/\text{g}) = \frac{(C_0 - C_1) \times V \times M_1}{m} \quad (6)$$

$$\text{Fe}^{3+}\text{螯合能力}/(\text{mg}/\text{g}) = \frac{(C_2 - C_3) \times V \times M_2}{m} \quad (7)$$

式中: C_0 为 Cu^{2+} 起始浓度/(mol/L); C_1 为反应后剩余 Cu^{2+} 浓度/(mol/L); C_2 为 Fe^{3+} 起始浓度/(mol/L); C_3 为反应后剩余 Fe^{3+} 浓度/(mol/L); V 为溶液的体积/mL; M_1 为 Cu^{2+} 摩尔质量/(g/mol); M_2 为 Fe^{3+} 摩尔质量/(g/mol); m 为样品质量/g。

1.4 数据处理

数据采用SPSS software Ver. 22.0进行方差分析(Duncan's新复极差法, $P < 0.05$)和相关性分析(Pearson法, $P < 0.01$), 数据分析结果用 $\bar{x} \pm s$ 的形式表示。

2 结果与分析

2.1 不同品种蚕豆种皮DF组分含量

表3 不同品种蚕豆种皮IDF、SDF及TDF含量
Table 3 IDF, SDF and TDF contents of faba bean testa from different cultivars

品种	IDF含量	SDF含量	TDF含量
g/100 g			
‘崇礼蚕豆’	75.54±0.23 ^{bcd}	6.40±0.13 ^j	81.93±0.17 ^{feh}
‘启豆2号’	75.91±0.10 ^{abcd}	6.66±0.26 ^j	82.58±0.35 ^{efg}
‘海门大青皮’	77.64±0.17 ^{ab}	7.54±0.11 ⁱ	85.18±0.06 ^{abcd}
‘临蚕6号’	77.82±0.32 ^a	7.69±0.16 ⁱ	85.51±0.17 ^{abc}
‘临蚕7号’	75.40±0.30 ^{bcd}	9.86±0.35 ^{de}	85.26±0.27 ^{abc}
‘青蚕12号’	74.72±0.43 ^{cde}	10.97±0.27 ^a	85.69±0.26 ^{abc}
‘青蚕13号’	76.48±0.41 ^{abc}	10.06±0.16 ^{bcd}	86.53±0.38 ^{ab}
‘青蚕14号’	74.31±0.18 ^{cde}	10.15±0.37 ^{bcd}	84.46±0.49 ^{bcd}
‘青蚕15号’	75.45±0.43 ^{bcd}	10.06±0.07 ^{bcd}	85.50±0.47 ^{abc}
‘监利小蚕豆’	78.04±0.35 ^a	9.07±0.30 ^b	87.12±0.44 ^a
‘成胡10号’	74.06±0.21 ^{def}	10.40±0.31 ^{bc}	84.47±0.31 ^{bcd}
‘成胡15号’	74.40±0.12 ^{cde}	9.90±0.25 ^{cde}	84.30±0.36 ^{bcd}
‘成胡20号’	72.00±3.20 ^{fg}	10.29±0.29 ^{bcd}	82.30±2.91 ^{efgh}
‘凤豆6号’	68.22±3.66 ^h	10.47±0.22 ^b	78.70±3.88 ⁱ
‘凤豆11号’	71.01±0.20 ^g	9.09±0.47 ^b	80.10±0.48 ^{hi}
‘凤豆12号’	71.59±0.68 ^g	9.25±0.32 ^{gh}	80.85±0.73 ^{gh}
‘凤豆15号’	72.04±1.13 ^{fg}	9.76±0.47 ^{ef}	81.79±0.68 ^{fgh}
‘凤豆16号’	71.72±0.29 ^g	9.35±0.13 ^{fgh}	81.07±0.23 ^{gh}
‘凤01010’	73.08±0.22 ^{efg}	9.84±0.04 ^{def}	82.92±0.21 ^{defg}
‘凤03135’	73.99±1.68 ^{def}	9.68±0.32 ^{efg}	83.66±1.97 ^{cdef}

注：同列不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

由表3可知，20个品种蚕豆种皮TDF、IDF、SDF含量差异显著（ $P<0.05$ ）。TDF含量达到78.70~87.12 g/100 g，‘监利小蚕豆’TDF含量最高，而‘凤豆6号’的TDF含量最低；IDF含量范围在68.22~78.04 g/100 g，‘凤豆6号’的IDF含量最低，而‘监利小蚕豆’IDF含量最高；SDF含量范围在6.40~10.97 g/100 g，‘青蚕12号’的SDF含量最高，而‘崇礼蚕豆’的SDF含量最低。

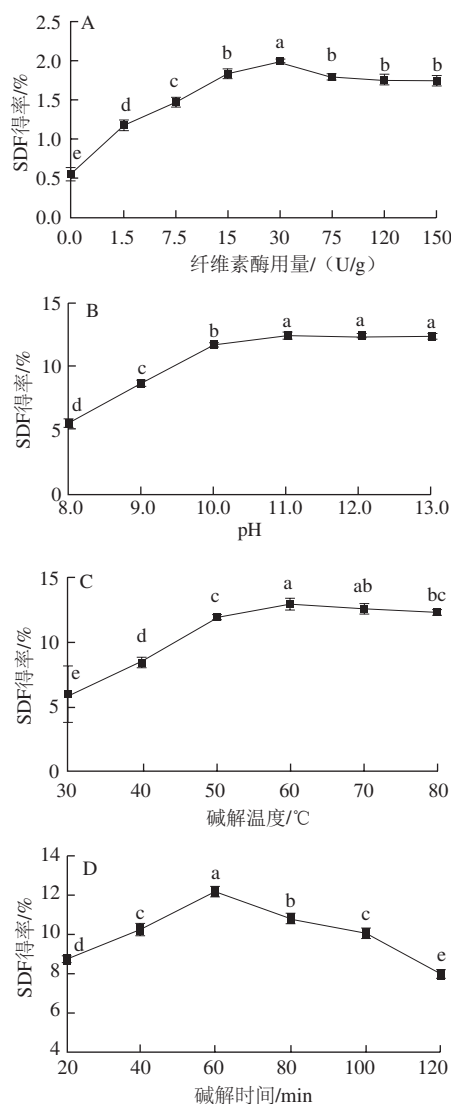
20个品种蚕豆种皮DF含量平均值达到了83.5 g/100 g，大部分是IDF（平均值为74.17 g/100 g），IDF的主要功能是具有一定的持水力和溶胀性，能够稀释结肠内容物，增加排便量，从而治疗便秘，预防结肠癌；蚕豆种皮中SDF含量较低，平均值为9.32 g/100 g，SDF主要功能是降低血清胆固醇，调节餐后血糖，改善肠道微生物菌群，从而降低心血管疾病、糖尿病、肠道疾病的发病^[21]。研究^[21]发现，膳食中的SDF与IDF比例为1:2时为最佳，因此，品种筛选时不仅要考虑TDF含量的高低，还要筛选出高SDF含量品种，在后续提取研究上，也应注重提高DF中可溶性的比例。

2.2 蚕豆种皮DF提取工艺优化

根据表3的结果，各品种蚕豆种皮TDF含量最高的品

种为‘监利小蚕豆’，因此选用‘监利小蚕豆’作为酶碱法提取蚕豆种皮DF工艺优化的品种。

2.2.1 酶碱法提取蚕豆DF单因素试验结果



A. 纤维素酶用量对SDF得率的影响；B. pH值对SDF得率的影响；C. 碱解温度对SDF得率的影响；D. 碱解时间对SDF得率的影响。不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

图1 单因素试验结果

Fig. 1 Effects of extraction conditions on SDF yield

由图1A可以看出，随着纤维素酶用量的增加，SDF得率逐渐上升，并在添加量为30 U/g时达到最大值，这是因为酶用量过低时，酶和底物接触不充分，随着纤维素酶用量的提高，酶和底物的接触面积逐渐增大，使纤维素被更多的切割成寡糖和新链末端，水溶性增强，当继续增大纤维素酶用量时，SDF得率有所下降，可能是酶质量浓度过大时，SDF继续分解成分子质量更小的寡糖和单糖等，不能被乙醇沉淀，使得SDF得率反而降低^[22]，因此纤维素酶用量选择30 U/g为宜。

由图1B可知,随着pH值的上升,碱液浓度增加,SDF得率显著上升,但pH值大于10.0时,SDF得率增加不显著,另外,pH值过高会导致纤维素和半纤维素之间的氢键大量破坏,使制得的纤维性状较差。出于物料节省方面的考虑,选择pH 12.0为最佳的提取pH值。

由图1C可知,当碱解时间小于60 min时,随着时间的延长,豆皮粉末中的蛋白质逐渐水解完全,SDF得率显著上升,在60 min达到最大值。60 min之后,SDF得率随时间延长显著下降,是由于碱解时间过长导致DF软化,DF中的纤维素、半纤维素在碱液的作用下发生大量水解,也会导致得率降低^[23]。因此,选择碱解时间60 min为最佳的提取时间。

由图1D可知,随着碱解温度的上升,SDF得率显著增加,当碱解温度为60 ℃时,SDF得率达到最大值。温度超过60 ℃时,SDF得率有所下降,但变化不显著。出于节约能耗方面考虑,选择碱解温度60 ℃为最佳的提取温度。

2.2.2 酶碱法提取蚕豆种皮DF正交试验结果

表4 $L_9(3^4)$ 正交试验设计与结果
Table 4 $L_9(3^4)$ orthogonal array design with experimental results and range analysis for SDF yield

试验号	A纤维素酶用量	B pH	C碱解时间	D碱解温度	SDF得率/%
1	1	1	1	1	8.87±0.05
2	1	2	2	2	12.20±0.04
3	1	3	3	3	11.37±0.12
4	2	1	2	3	10.02±0.04
5	2	2	3	1	10.82±0.08
6	2	3	1	2	12.88±0.13
7	3	1	3	2	10.01±0.10
8	3	2	1	3	10.21±0.05
9	3	3	2	1	12.32±0.05
k_1	10.813	9.633	10.653	10.670	
k_2	11.240	11.077	11.513	11.697	
k_3	10.847	12.190	10.733	10.533	
R	0.427	2.557	0.860	1.164	

如表4所示,根据极差值,影响酶碱法DF提取的因素主次顺序为:pH值(B)>碱解温度(D)>碱解时间(C)>纤维素酶用量(A);最佳工艺组合为 $A_2B_3C_2D_2$,即纤维素酶用量30 U/g、pH 12.0、碱解时间60 min、碱解温度60 ℃。在此工艺条件下做验证实验,‘监利小蚕豆’种皮SDF得率可达12.98%。

2.3 蚕豆种皮DF理化特性

2.3.1 20个品种蚕豆种皮DF物理性质

以优化的工艺条件对20个品种蚕豆种皮DF进行提取,20个品种蚕豆种皮DF物理特性结果和差异性分析结果见表5。

表5 20个品种蚕豆种皮DF物理特性
Table 5 Physical properties of 20 dietary fibers from faba bean testae from different cultivars

品种	堆积密度/(g/cm ³)	持水性/(g/g)	吸水膨胀能力/(mL/g)	UFA吸附能力/(g/g)	SFA吸附能力/(g/g)
‘崇礼蚕豆’	0.289±0.010 ^{ab}	5.25±0.28 ^{cd}	3.46±0.23 ^{bc}	3.37±0.04 ^g	3.08±0.26 ^{fg}
‘启豆2号’	0.286±0.008 ^{ab}	5.31±0.39 ^{cd}	2.70±0.34 ^{ef}	3.41±0.03 ^{hi}	3.16±0.07 ^{fg}
‘海门大青皮’	0.300±0.005 ^a	6.30±0.18 ^b	2.90±0.10 ^e	3.19±0.02 ^j	2.42±0.19 ^h
‘临蚕6号’	0.242±0.003 ^{fg}	7.67±0.14 ^a	2.83±0.35 ^{ef}	3.88±0.10 ^{cd}	3.09±0.09 ^{fg}
‘临蚕7号’	0.223±0.005 ^h	6.52±0.11 ^b	2.03±0.06 ^h	4.09±0.10 ^b	2.90±0.15 ^g
‘青蚕12号’	0.278±0.000 3 ^{bc}	5.56±0.33 ^c	3.06±0.23 ^{abc}	3.55±0.02 ^{ghi}	2.50±0.04 ^h
‘青蚕13号’	0.250±0.000 2 ^{ef}	6.11±0.16 ^b	2.13±0.06 ^{gh}	3.86±0.07 ^{cd}	2.86±0.02 ^g
‘青蚕14号’	0.259±0.010 ^{de}	6.19±0.19 ^b	2.46±0.06 ^{fg}	3.80±0.13 ^{cd}	3.92±0.15 ^{bc}
‘青蚕15号’	0.244±0.006 ^{fg}	4.99±0.23 ^{de}	2.70±0.30 ^{ef}	4.00±0.14 ^{bc}	3.97±0.38 ^{bc}
‘监利小蚕豆’	0.286±0.008 ^{ab}	5.23±0.17 ^{cd}	1.96±0.15 ^h	3.50±0.09 ^{ghi}	3.36±0.11 ^{ef}
‘成胡10号’	0.276±0.004 ^{bc}	4.94±0.20 ^{de}	2.46±0.35 ^{ef}	3.57±0.15 ^{ghi}	3.35±0.05 ^{ef}
‘成胡15号’	0.246±0.007 ^{fg}	5.39±0.25 ^{cd}	2.90±0.10 ^e	3.71±0.07 ^{defg}	3.73±0.26 ^{cd}
‘成胡20号’	0.273±0.009 ^{bcd}	3.55±0.19 ^g	3.33±0.23 ^{cd}	3.60±0.13 ^{ghi}	3.36±0.16 ^{ef}
‘凤豆6号’	0.268±0.011 ^{cd}	4.11±0.27 ^f	2.90±0.10 ^e	3.65±0.13 ^{ghi}	3.62±0.09 ^{de}
‘凤豆11号’	0.251±0.019 ^{ef}	4.73±0.09 ^f	3.36±0.32 ^{cd}	3.69±0.12 ^{ghi}	3.55±0.03 ^{de}
‘凤豆12号’	0.273±0.008 ^{bcd}	4.72±0.10 ^f	3.83±0.15 ^{ab}	3.71±0.13 ^{ghi}	3.56±0.13 ^{de}
‘凤豆15号’	0.242±0.003 ^{fg}	3.83±0.21 ^{fg}	2.96±0.15 ^{de}	3.80±0.20 ^{ab}	3.78±0.07 ^{cd}
‘凤豆16号’	0.206±0.011 ⁱ	5.02±0.37 ^{de}	4.00±0.10 ^a	4.48±0.15 ^a	4.23±0.22 ^a
‘凤01010’	0.250±0.006 ^{ef}	6.10±0.40 ^b	3.83±0.11 ^{ab}	3.81±0.13 ^{cd}	3.38±0.06 ^{ef}
‘凤03135’	0.231±0.012 ^{gh}	6.11±0.35 ^b	3.97±0.40 ^a	4.08±0.10 ^b	4.11±0.24 ^{ab}

堆积密度反映DF的疏松程度。堆积密度小的DF,其结构较为疏松,纤维之间空间较大,比表面积大,具有良好的表面活性。由表5可知,20个品种蚕豆种皮DF堆积密度普遍较小,平均为0.259 g/cm³。堆积密度最低的为‘凤豆16号’(0.206 g/cm³),堆积密度较高的品种有‘崇礼蚕豆’(0.289 g/cm³)、‘启豆2号’(0.286 g/cm³)、‘海门大青皮’(0.300 g/cm³)和‘监利小蚕豆’(0.286 g/cm³);不同品种蚕豆种皮DF持水性范围在3.55~7.67 g/g,平均值为5.38 g/g。持水性最高的为‘临蚕6号’,持水性较低的品种有‘成胡20号’(3.55 g/g)和‘凤豆15号’(3.83 g/g);DF具有良好吸水膨胀能力,它可使肠内容物体积增大,并促进肠道的收缩和蠕动,起到通便作用,并可以引起饱腹感,从而预防肥胖。由表5可知,20个品种蚕豆种皮DF吸水膨胀能力存在显著差异($P<0.05$),吸水膨胀能力的平均值为2.99 mL/g,‘凤豆16号’(4.00 mL/g)和‘凤03135’(3.97 mL/g)吸水膨胀能力较好,而‘监利小蚕豆’(1.96 mL/g)和‘临蚕7号’(2.03 mL/g)最低。DF结构中还具有多种活性基团,可吸附多种有机物,包括摄入过量的油脂、胆固醇、胆汁酸等,DF可吸附过量摄入的油脂,从而预防肥胖和心脑血管疾病。由表5可知,全部品种蚕豆种皮DF对UFA吸附能力范围在3.19~4.48 g/g,平均值为3.74 g/g,‘凤豆16号’(4.48 g/g)对UFA吸附能力最高,而‘海门大青皮’(3.19 g/g)和‘崇礼蚕豆’(3.37 g/g)则最低;对SFA吸附能力范围在2.42~4.23 g/g,平均值为3.40 g/g,‘凤豆16号’

(4.23 g/g) 和‘凤03135’ (4.11 g/g) 对SFA的吸附能力较高, 而‘海门大青皮’ (2.42 g/g) 和‘青蚕12号’ (2.50 g/g) 则较低。20个品种中17个品种对UFA吸附能力大于其对SFA吸附能力, 其余3个品种二者较接近。

将蚕豆种皮组成与其物理性质进行相关性分析以后发现, IDF含量和持水性存在极显著相关性 ($r=0.675$, $P<0.01$), 同时与吸水膨胀能力和SFA吸附能力呈显著负相关 ($r=-0.510$ 和 $r=-0.502$, $P<0.05$), 并且TDF含量也与其持水性呈显著负相关 ($r=-0.484$, $P<0.05$), 这说明IDF占TDF含量越高, 持水性越高, 而对吸水膨胀能力和SFA的吸附能力就越弱。因此蚕豆种皮中IDF与SDF的差异, 会影响DF的物理特性。

不同品种蚕豆种皮DF组成和结构的差异使其表现出了不同的物理特性。对比已有研究^[24-25]的大豆DF物理特性, 蚕豆DF的持水性和溶胀性与大豆及豆渣DF的研究结果基本持平, 而持油性则高于大豆及豆渣DF的研究结果。从20个蚕豆品种的综合表现来看, ‘凤豆16号’在堆积密度、溶胀性、持油性上都为最好, 而持水性也达到了5.02 g/g, 接近20个品种的平均值; 而在持水性方面, ‘临蚕6号’达到了7.67 g/g, 显著高于其他品种。这2个品种表现出最为优异的理化特性。

2.3.2 蚕豆种皮DF抗氧化性质

选取了20个蚕豆品种中物理性质较好的4个品种: ‘临蚕6号’、‘临蚕7号’、‘凤豆16号’和‘凤03135’, 测定其DF对 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 螯合能力以及DPPH自由基清除能力。

2.3.2.1 不同品种蚕豆种皮DF螯合 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 能力

表6 不同品种蚕豆种皮DF螯合 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 能力
Table 6 Fe^{3+} and Cu^{2+} chelation activity of faba bean testa DF

品种	Fe^{3+} 螯合能力	Cu^{2+} 螯合能力
‘临蚕6号’	140.09±4.08 ^a	33.63±0.95 ^a
‘临蚕7号’	114.99±4.90 ^b	30.87±0.91 ^b
‘凤豆16号’	131.46±7.19 ^a	27.63±1.16 ^c
‘凤03135’	95.38±9.41 ^c	25.95±0.55 ^c

人体能够直接吸收利用的铁元素是 Fe^{2+} , Fe^{3+} 在人体内是不能正常代谢的, 且有一定的毒性; 而 Cu^{2+} 的过量也会导致人体中毒反应, 使血红蛋白变性, 发生溶血性贫血^[26]。由表6可知, ‘临蚕6号’螯合两种金属离子能力均为最高, 分别达到了140.09 mg/g和33.63 mg/g, 而‘凤03135’对两种金属离子螯合能力在4个品种中均为最低。这些都说明蚕豆DF可以有效吸附螯合过量的金属离子, 降低毒性, 缓解中毒反应。

2.3.2.2 不同品种蚕豆种皮DF清除DPPH自由基能力

表7 不同品种蚕豆种皮DF清除DPPH自由基能力
Table 7 DPPH scavenging activity of faba bean testa DF

品种	DPPH自由基清除能力 μmol/g
‘临蚕6号’	11.54±0.25 ^e
‘临蚕7号’	12.69±0.07 ^e
‘凤豆16号’	13.23±0.10 ^b
‘凤03135’	12.00±0.23 ^d
VC	90.57±0.33 ^a

DF具有一定的抗氧化性, 可以清除体内的自由基。由表7可知, 以DPPH法体外检测蚕豆种皮DF抗氧化性, 结果显示, 4个品种平均DPPH自由基清除能力达到12.37 μmol/g, ‘凤豆16号’为最高, 与VC相比, 蚕豆品种DF的DPPH自由基清除能力相当于VC的1/8~1/7左右, 可见蚕豆DF具有很强的抗氧化能力, 能清除人体内的自由基, 起到抗衰老的作用^[27]。

3 结论

本研究以TDF含量最高的品种‘监利小蚕豆’为实验材料, 以提取的DF中SDF得率为指标, 通过单因素试验确定影响酶碱法提取DF的4个因素(纤维素酶用量、pH值、碱解时间、碱解温度)的水平范围, 并通过正交试验确定提取的最佳工艺: 纤维素酶用量30 U/g、pH 12.0、碱解时间60 min、碱解温度60 °C。在此工艺条件下做验证实验, ‘监利小蚕豆’种皮SDF得率可达12.98%。对20个品种蚕豆种皮DF的功能特性进行测定, 发现不同品种间功能特性存在显著差异。筛选出了两个功能特性优异的品种: ‘临蚕6号’和‘凤豆16号’。其中‘临蚕6号’持水性达到了7.67 g/g, 显著高于其他品种, 并且具有较强的螯合 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 能力; 而‘凤豆16号’在堆积密度、溶胀性、吸附脂肪上都为最好, 同时拥有较强的清除DPPH自由基的能力。

参考文献:

- [1] 修建成, 曹荣安, 孔保华, 等. 膳食纤维的生理功能及应用现状[J]. 农产品加工学刊, 2005(8): 48-53. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646-B.2005.08.016.
- [2] 王彦玲, 刘冬, 付全意, 等. 膳食纤维的国内外研究进展[J]. 中国酿造, 2008, 27(5): 1-4. DOI:10.3969/j.issn.0254-5071.2008.03.001.
- [3] 何梅, 杨月欣, 王光亚, 等. 我国农村谷类和干豆类食物中膳食纤维含量的研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 199-205.
- [4] 谭斌, 任保中. 中国食用豆类资源深度开发利用的思考[C]//中日学术研讨会文集. 北京: 日本味美技术研究会志, 2006: 130-135.
- [5] OSORIO-DIAZ P, BELLO-PEREZ LA, AGAMA-ACEVEDO E, et al. In vitro digestibility and resistant starch content of some industrialized commercial beans (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Food Chemistry, 2002, 78(2): 333-337. DOI:10.1016/S0308-8146(02)00117-6.
- [6] COSTA G, QUEIROZ-MONICI K, REIS S, et al. Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes[J]. Food Chemistry, 2006, 94(3): 327-330. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.11.020.

- [7] 刘焕云, 李慧荔, 赵红. 燕麦麸中水溶性膳食纤维提取工艺优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 103-106.
- [8] WAN Y T, RODEZNO L A E, SOLVAL K M, et al. Optimization of soluble dietary fiber extraction from defatted rice bran using response surface methodology[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(1): 441-448. DOI:10.1111/j.1745-4549.2012.00792.x.
- [9] JING Y, CHI Y J. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2): 884-889. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.12.003.
- [10] 令博, 田云波, 吴洪斌, 等. 微生物发酵法制取葡萄皮渣膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 178-182.
- [11] LI X L, HE X L, LÜ Y P, et al. Extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from apple pomace[J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(3): 293-298. DOI:10.1111/jfpe.12085.
- [12] 陶永霞, 周建中, 武运, 等. 酶碱法提取枣渣可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 食品科学, 2009, 30(20): 118-121.
- [13] 宗绪晓, 包世英, 关建平, 等. 蚕豆种质资源描述规范和数据标准[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 17-19.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.88—2008 食品中膳食纤维的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 周建勇. 膳食纤维测定方法的历史及现状[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(3): 10-14. DOI:10.3321/j.issn:1003-0174.2001.03.003.
- [16] 陈存社, 刘玉峰. 超微粉碎对小麦胚芽膳食纤维物化性质的影响[J]. 食品科技, 2004, 29(9): 88-91. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2004.09.028.
- [17] SANGNARK A, NOOMHORM A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse[J]. Food Chemistry, 2003, 80: 221-225. DOI:10.1016/S0308-8146(02)00257-1.
- [18] 欧仕益, 郑妍, 刘子立, 等. 醇解和酶解麦麸吸附脂肪和胆固醇的研究[J]. 食品科技, 2005, 30(2): 91-93. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2005.01.030.
- [19] SHIMADA K, FUJIKAWA K, YAHARA K, et al. Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1992, 40(6): 945-948. DOI:10.1021/jf00018a005.
- [20] 杨金凤, 周晓康, 呼丽萍, 等. 邻啡罗啉比色法测定土壤中有效铁的条件优化[J]. 土壤, 2013, 45(4): 718-721.
- [21] 刘成梅, 李资玲, 梁瑞红, 等. 膳食纤维的生理功能与应用现状[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(1): 122-125. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2006.01.041.
- [22] 赵明慧, 吕春茂, 孟宪军, 等. 苹果渣水溶性膳食纤维提取及其对自由基的清除作用[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 75-80. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201322015.
- [23] 陶永霞, 周建中, 武运, 等. 酶碱法提取枣渣可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 食品科学, 2009, 30(20): 118-121.
- [24] 李文佳, 林亲录, 苏小军. 从豆渣中制取大豆膳食纤维的研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2010(6): 51-53. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2010.06.015.
- [25] 吴光旭, 朱琳. 蚕豆粉渣膳食纤维提取及功能性质研究[J]. 长江大学学报(自科版)农学卷, 2007, 4(2): 91-94. DOI:10.3969/j.issn.1673-1409.2007.02.027.
- [26] 李青仁, 王月梅. 微量元素铜与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2007, 24(3): 61-63. DOI:10.3969/j.issn.1005-5320.2007.03.027.
- [27] VITAGLIONE P, NAPOLITANO A, FOGLIANO V. Cereal dietary fibre: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut[J]. Trends in Food Science and Technology, 2008, 19(9): 451-463. DOI:10.1016/j.tifs.2008.02.005.