

doi:10.3969/j.issn.2095-6002.2016.02.011

文章编号:2095-6002(2016)02-0068-08

引用格式:李雪影,徐辉,张晶,等.紫萁干可溶性膳食纤维提取工艺优化[J].食品科学技术学报,2016,34(2):68-75.



LI Xueying, XU Hui, ZHANG Jing, et al. Optimized extraction for soluble dietary fiber from dried osmund [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016,34(2):68-75.

紫萁干可溶性膳食纤维提取工艺优化

李雪影, 徐辉, 张晶, 李新旺, 陆宁*

(安徽农业大学茶与食品科技学院, 安徽合肥 230036)

摘要:利用响应面法对紫萁干可溶性膳食纤维的提取工艺进行优化。通过单因素实验,选取料液质量浓度、提取温度、超声时间、超声功率作为响应因子,SDF的得率为响应值,根据 Central-Composite 实验设计原则,采用响应面优化分析法,依据回归分析,探讨各响应因子的显著性及其交互作用对于响应值的影响。结果表明,紫萁干 SDF 最佳提取工艺条件为 NaOH 质量浓度 0.02 g/mL、碱解时间 90 min、料液质量浓度 1.0 g/23 mL、提取温度 54 °C、超声时间 25 min、超声功率 380 W,该条件下 SDF 的得率可达 38.39%。

关键词:紫萁干;可溶性膳食纤维;碱法;超声波;响应面法

中图分类号:TS255.36

文献标志码:A

紫萁(*Osmunda japonica* Thunb),为蕨类植物门(Pteridophyta)原始薄囊蕨纲(Protoleptosporangiopsida)紫萁目(Osmundales)紫萁科(Osmundaceae)紫萁属(*Osmunda*)植物,亦别名薇菜、紫萁、白线鸡尾、大贯众、广东苔、黑背龙、鸡老壳、老虎台、拳菜、一把抓、月亮草。紫萁以幼嫩拳卷叶供食用,质脆味美,是兼具营养及食疗保健价值的天然珍品,素有“野菜之王”之美称^[1]。有研究表明,紫萁中富含膳食纤维、蛋白质、维生素、微量元素等营养素,同时含黄酮类、内酯类、甾酮类、多糖类、鞣酸等药理成分,具有清热安神、减肥降压、抗癌等功效,并对乙型脑炎、流感等多种病毒有显著的抑制效果^[2]。

膳食纤维(dietary fiber,DF)是一类不能为人体内源性酶所消化利用的多糖类与木质素等高分子化合物的总称,按其溶解性可分为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber,SDF)和不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber,IDF)两大类^[3-4]。其中 SDF 在防治心血管相关性疾病、降低胆固醇、预防结肠癌、清除自由基和控制体重等方向具备比 IDF 更强大的

生理功效,因此受到国内外营养学家们的极大关注^[5-6]。

紫萁的季节性较强,若不及时采摘或采摘后不及时加工,很快会出现组织纤维化,导致资源利用率较低。对紫萁副产物的 DF 特别是 SDF 进行提取利用,可以延长紫萁加工产业链,增加其产品的附加值,提高紫萁资源的综合利用率。目前,对紫萁的研究主要集中在对其加工方式、黄酮类和多糖类天然活性成分的提取方面,而对 SDF 的提取鲜有报道。本研究以紫萁干为原料,采用碱水解法,结合超声波附加物理场的作用提取 SDF,并通过 Design-Expert_8.0.6 软件进行响应面优化分析研究,确定最佳提取工艺参数,以期为紫萁的精深加工和综合开发应用提供一些理论上的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

紫萁干,合肥元政农林有限公司提供; φ (乙醇)=95%的溶液和氢氧化钠均为分析纯。

收稿日期:2015-01-29

作者简介:李雪影,女,硕士研究生,研究方向为营养与食品卫生;

*陆宁,女,教授,博士,主要从事食品和农产品贮藏及加工方面的研究。通信作者。

1.2 仪器与设备

FS-450型超声波处理器,上海生析超声仪器有限公司;DGT-G42型电热恒温鼓风干燥箱,合肥华德利科学器材有限公司;HC-3514型高速离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;X7-100型高速多功能粉碎机,永康市红太阳机电有限公司;HH-6型数显恒温水浴锅,常州国华电器有限公司;BS210S型分析天平,Sartorius有限公司;DZF-6050型真空干燥箱,上海博讯事业有限公司医疗设备厂。

1.3 实验方法

1.3.1 工艺流程

紫萁干60℃条件下烘干,至恒重,粉碎,过100目筛,备用。取约2.0g紫萁干粉样品置于250mL烧杯中,按实验拟定的料液质量浓度缓缓地加入一定体积的NaOH溶液,充分搅拌,后置于恒温水浴中碱解一段时间。超声处理,离心(4000r/min,15min),过滤,得上清液。上清液加4倍体积体积分数为95%乙醇,醇沉,静置(至沉淀完全)。静置后离心(4000r/min,10min),除上清液,滤渣用体积分数为95%乙醇重复洗涤3次,沥干,真空干燥(60℃,0.08MPa),至恒重,计算SDF得率^[7-8]。

1.3.2 单因素实验

以NaOH质量浓度、碱解时间、料液质量浓度、提取温度、超声时间、超声功率为考察因素,SDF得率为指标,进行单因素实验,确定SDF的适宜提取条件。

1.3.2.1 NaOH质量浓度的选择

取100目紫萁干粉约2.0g,按料液质量浓度(紫萁干粉质量:碱液体积)1.0g/25mL分别加入0.01,0.02,0.03,0.04,0.05,0.06g/mL的NaOH溶液,50℃水浴恒温碱解90min,超声功率300W下提取20min,离心分离,过滤,取上清液,醇沉后离心,滤渣真空干燥,至恒重,计算得率。

1.3.2.2 碱解时间的选择

取100目紫萁干粉约2.0g,按料液质量浓度1.0g/25mL加入0.02g/mL的NaOH溶液,50℃水浴恒温碱解30,60,90,120,150,180min,超声功率300W下提取20min,离心分离,过滤,取上清液,醇沉后离心,滤渣真空干燥,至恒重,计算得率。

1.3.2.3 料液质量浓度的选择

取100目紫萁干粉约2.0g,按料液质量浓度

1.0g/15mL,1.0g/20mL,1.0g/25mL,1.0g/30mL,1.0g/35mL,1.0g/40mL加入0.02g/mL的NaOH溶液,50℃水浴恒温碱解90min,超声功率300W下提取20min,离心分离,过滤,取上清液,醇沉后离心,滤渣真空干燥,至恒重,计算得率。

1.3.2.4 提取温度的选择

取100目紫萁干粉约2.0g,按料液质量浓度1.0g/25mL加入0.02g/mL的NaOH溶液,于20,30,40,50,60,70℃恒温水浴碱解90min,超声功率300W下提取20min,离心分离,过滤,取上清液,醇沉后离心,滤渣真空干燥,至恒重,计算得率。

1.3.2.5 超声时间的选择

取100目紫萁干粉约2.0g,按料液质量浓度1.0g/25mL加入0.02g/mL的NaOH溶液,50℃水浴恒温碱解90min,超声功率300W下提取10,15,20,25,30,35min,离心分离,过滤,取上清液,醇沉后离心,滤渣真空干燥,至恒重,计算得率。

1.3.2.6 超声功率的选择

取100目紫萁干粉约2.0g,按料液质量浓度1.0g/25mL加入0.02g/mL的NaOH溶液,50℃水浴恒温碱解90min,超声功率200,250,300,350,400,450W下提取20min,离心分离,过滤,取上清液,醇沉后离心,滤渣真空干燥,至恒重,计算得率。

1.3.3 响应面试验

以单因素实验为基础,依据Central-Composite实验设计原理^[9-10],采用4因素5水平的响应面分析方法,对SDF提取工艺条件进行优化。其中,料液质量浓度、提取温度、超声时间、超声功率4个因素的编码值分别以 X_1, X_2, X_3, X_4 代表,每个因素按水平的高低分别以-2, -1, 0, +1, +2进行编码,见表1,编码公式见式(1)。

$$X_i = \frac{X - X_0}{\Delta X} \quad (1)$$

式(1)中 X_i 为实验因子的编码值($i=1, 2, 3, 4$); X 为实验因子的真实值,分别用a, b, c, d代替; X_0 为实验因子0点的真实值; ΔX 为实验因子真实值的步长,即编码值的一个单位。结合实验安排经换算可得编码值和真实值间的关系,用式(2)方程表示。

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{a-25}{5}; X_2 = \frac{b-50}{5}; \\ X_3 &= \frac{c-25}{5}; X_4 = \frac{d-350}{50} \end{aligned} \quad (2)$$

表1 响应面 Central-Composite 试验设计因素水平

Tab. 1 Factors and levels of response surface central composite design

因素	编码	编码水平				
		-2	-1	0	+1	+2
ρ (料液)/(g·mL ⁻¹)	X_1	1:15	1:20	1:25	1:30	1:35
θ (提取)/°C	X_2	40	45	50	55	60
t (超声)/min	X_3	15	20	25	30	35
P (超声)/W	X_4	250	300	350	400	450

式(2)中 a, b, c, d 分别为料液质量浓度、提取温度、超声时间、超声功率的真实值。

1.4 SDF 得率的测定方法

紫萁干 SDF 得率按式(3)进行计算,

$$\text{SDF 得率} = \frac{m_{\text{SDF}}}{m_{\text{微藻干粉原料}}} \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 紫萁干 SDF 提取工艺单因素实验

2.1.1 NaOH 质量浓度对 SDF 得率的影响

按照 1.3.2.1 节的方法, 得出 SDF 得率随 NaOH 质量浓度变化的趋势图, 见图 1。

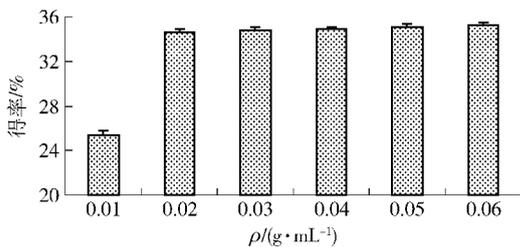


图1 NaOH 质量浓度对 SDF 得率的影响

Fig. 1 Effect of alkaline concentration on yield of soluble dietary fiber

由图 1 可知, NaOH 质量浓度较小时, SDF 得率随 NaOH 质量浓度的增大呈上升趋势; 当 NaOH 的质量浓度大于 0.02 g/mL 时, SDF 得率增幅趋于平稳。原因可能是碱液浓度较小时, 样品中 DF 在碱性环境下降解, 同时由于皂化反应水解了样品中少量的脂肪, 使杂质逐渐减少, 得率增大; 而当 NaOH 过量时, 果胶中的果胶酯酸可能由于脱甲基作用而溶解, 半纤维素也可能胶溶于碱液中, 即 IDF 向 SDF 转化, 反应至一定程度后进行缓慢^[11-12]。基于 NaOH 质量浓度越大, 所得 SDF 颜色会越深, 以及节约经济等因素, NaOH 质量浓度选 0.02 g/mL 为宜。

2.1.2 碱解时间对 SDF 得率的影响

按照 1.3.2.2 节的方法, 得出 SDF 得率随碱解时间变化的趋势图, 见图 2。

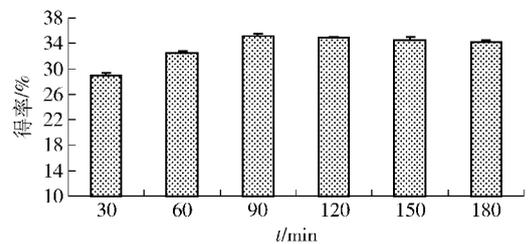


图2 碱解时间对 SDF 得率的影响

Fig. 2 Effect of extraction time on yield of soluble dietary fiber

由图 2 可知, 起始阶段, SDF 得率随碱解时间的延长而逐渐增大; 当时间大于 90 min 后, SDF 得率略微下降、并趋于平缓。原因可能是时间太短, 溶液和溶质未充分接触, 得率较低; 随着时间的延长, 传质达到良好状态, SDF 得率增大; 提取一段时间后, SDF 在固液之间接近平衡, 从而使提取率变化不大。且能耗增大, 效率降低^[13-14]。从节约能源与成本方面考虑, 最佳碱解时间为 90 min。

2.1.3 料液质量浓度对 SDF 得率的影响

按照 1.3.2.3 节的方法, 得出 SDF 得率随料液质量浓度变化的趋势图, 见图 3。

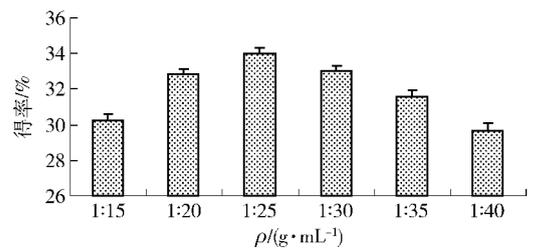


图3 料液质量浓度对 SDF 得率的影响

Fig. 3 Effect of solid-liquid ratio on yield of soluble dietary fiber

由图 3 可知, 开始阶段(1:15 ~ 1:25), SDF 得

率随料液质量浓度的增大呈上升趋势,主要是由于经干燥粉碎处理后的紫萁干呈疏松多孔状态,能吸收一定体积的水分。若加入浸提液的量较少,被紫萁干粉吸收用作超声介质的液体组分就会很少,致使超声波在液相介质中的吸收大于其在固相介质中的吸收;当浸提液的量增多时,紫萁干粉在浸提液中的分散度变大、接触面增加,即浸提液中 SDF 的浓度与紫萁干粉边界层浓度差增大, SDF 由紫萁干粉向浸提液的扩散速率加快,细胞内部的 SDF 更容易被提取出来^[15-16]。料液质量浓度 1:25 时得率最高,其后得率呈下降趋势,究其原因可能是随着提取液用量的进一步增大,DF 浓度相对降低,从而不利于 SDF 的提取致使得率呈下降趋势。

2.1.4 提取温度对 SDF 得率的影响

按照 1.3.2.4 节的方法,得出 SDF 得率随提取温度变化的趋势图,见图 4。

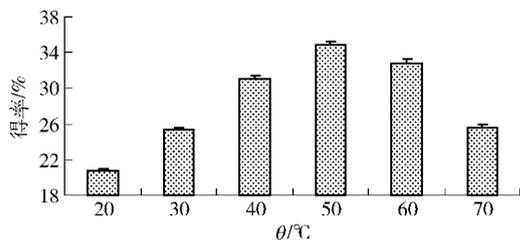


图 4 提取温度对 SDF 得率的影响

Fig. 4 Effect of extraction temperature on yield of soluble dietary fiber

由图 4 可知,在一定温度范围内,随着水浴温度的升高, SDF 得率相应增大;温度 50 °C 时, SDF 得率最大。主要由于温度升高,分子的平均运动速率加快,在分子的振动、转动等物理撞击和碱液的作用下, SDF 脱离不溶性物质的束缚,溶解出来,从而使 SDF 得率提高;但温度大于 50 °C 时, SDF 得率下降比较明显,可能是温度过高导致溶剂气化,使得载体与溶剂接触不充分^[17];另外,温度过高,碱使其他物质溶出,导致溶液的黏稠度增大,阻碍了 SDF 的溶出,且可能使目标成分的结构被破坏,从而得率降低。

2.1.5 超声时间对 SDF 得率的影响

按照 1.3.2.5 节的方法,得出 SDF 得率随超声时间变化的趋势图,见图 5。

由图 5 可知,10 至 25 min 范围内,超声提取时间延长, SDF 得率升高,25 min 时得率最高;时间超过 25 min 后, SDF 得率逐渐下降。主要原因是:超

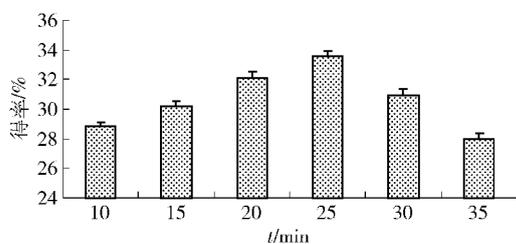


图 5 超声时间对 SDF 得率的影响

Fig. 5 Effect of ultrasonic time on yield of soluble dietary fiber

声波可加速介质质点的运动,在物料的内部产生剧烈的振动与空化效应。开始阶段,空化效应对植物细胞的破壁作用较强,促使 SDF 溶出量增加、得率不断增大;25 min 时,空化效应产生的细胞破壁作用基本完成,同时随着超声时间的增加,超声波产生的较强的机械剪切作用,打断了部分 SDF 链的结构,导致得率显著降低^[18]。

2.1.6 超声功率对 SDF 得率的影响

按照 1.3.2.6 节的方法,得出 SDF 得率随超声功率变化的趋势图,见图 6。

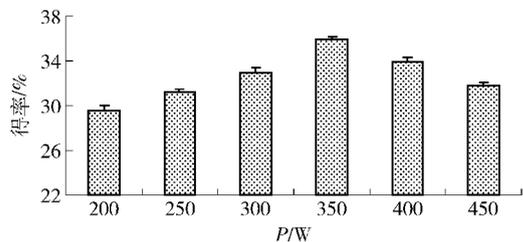


图 6 超声功率对 SDF 得率的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic power on yield of soluble dietary fiber

由图 6 可知,超声提取功率增大, SDF 得率呈先增大、后减小的趋势。当超声提取功率为 350 W 时, SDF 的得率最大;功率大于 350 W 时, SDF 得率又逐渐变小。其原因是:超声功率增大,对细胞破壁作用增强,降低了植物组织中各成分之间结合的紧密程度,从而较有利于 SDF 的溶出^[19]。而可溶性成分的大量溶出,使浸提液的浓度过大,抑制了 SDF 向料液的进一步分散;另外超声功率过高也能引起一部分 SDF 的分解,使 SDF 得率降低。

2.2 紫萁干 SDF 提取工艺的优化

2.2.1 模型建立及数据分析

通过 Design-Expert_8.0.6 软件,对响应面试验结果(见表 2)进行统计分析,得出各实验因子编码值与响应值的四元二次回归方程如式(4)。

表2 Central-Composite 试验设计及结果

Tab.2 Arrangements and experimental results of response surface central composite design

实验号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y(SDF 得率)/%	实验号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y(SDF 得率)/%
1	-1	-1	-1	-1	31.77	16	1	1	1	1	34.99
2	1	-1	-1	-1	31.53	17	-2	0	0	0	35.23
3	-1	1	-1	-1	34.49	18	2	0	0	0	33.72
4	1	1	-1	-1	33.91	19	0	-2	0	0	31.15
5	-1	1	1	-1	32.00	20	0	2	0	0	36.60
6	1	-1	1	-1	31.97	21	0	0	-2	0	31.36
7	-1	1	1	-1	34.24	22	0	0	2	0	32.76
8	1	1	1	-1	33.89	23	0	0	0	-2	33.73
9	-1	-1	-1	1	32.35	24	0	0	0	2	35.76
10	1	-1	-1	1	31.13	25	0	0	0	0	37.83
11	-1	1	-1	1	36.89	26	0	0	0	0	37.70
12	1	1	-1	1	34.96	27	0	0	0	0	37.75
13	-1	-1	1	1	33.73	28	0	0	0	0	37.75
14	1	-1	1	1	32.05	29	0	0	0	0	37.38
15	-1	1	1	1	36.80	30	0	0	0	0	37.81

表3 方差分析和显著性检验

Tab.3 Analysis of variance and significance test

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	156.18	14	11.16	166.46	<0.000 1	**
X_1	4.91	1	4.91	73.33	<0.000 1	**
X_2	49.71	1	49.71	741.76	<0.000 1	**
X_3	1.23	1	1.23	18.40	0.000 6	**
X_4	7.22	1	7.22	107.68	<0.000 1	**
$X_1 X_2$	0.14	1	0.14	2.10	0.168 0	
$X_1 X_3$	6.250×10^{-4}	1	6.250×10^{-4}	9.326×10^{-3}	0.924 3	
$X_1 X_4$	1.85	1	1.85	27.60	<0.000 1	**
$X_2 X_3$	0.68	1	0.68	10.16	0.006 1	**
$X_2 X_4$	1.64	1	1.64	24.45	0.000 2	**
$X_3 X_4$	0.21	1	0.21	3.16	0.095 9	
X_1^2	19.72	1	19.72	294.27	<0.000 1	**
X_2^2	27.31	1	27.31	407.59	<0.000 1	**
X_3^2	57.80	1	57.80	862.52	<0.000 1	**
X_4^2	16.71	1	16.71	249.28	<0.000 1	**
残差	1.01	15	0.067			
失拟项	0.87	10	0.087	3.19	0.106 4	不显著
纯误差	0.14	5	0.027			
总和	157.18	29				
R^2	0.993 6	R^2_{Adj}	0.987 6			

**差异极显著($P < 0.01$); * 差异显著($0.01 < P < 0.05$)

$$Y = 37.70 - 0.45X_1 + 1.44X_2 + 0.23X_3 + 0.55X_4 - 0.094X_1X_2 + (6.250 \times 10^{-03})X_1X_3 - 0.34X_1X_4 - 0.21X_2X_3 + 0.32X_2X_4 + 0.12X_3X_4 - 0.85X_1^2 - 1.00X_2^2 - 1.45X_3^2 - 0.78X_4^2 \quad (4)$$

对回归方程进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)^[20-21],结果见表3。 $P < 0.0001$,模型效应极显著; $R^2 = 0.9936$,响应值与响应因子间的线性关系显著; $R^2_{Adj} = 0.9876$,说明能够模拟98.76%响应值的变化;失拟项不显著($P = 0.1064 > 0.05$),说明模型可信度较高,拟合度较好,能较好地对SDF得率进行预测。模型一次项、二次项表现为极显著,表明其对SDF得率影响极大。由F值大小可知,影响因素的先后顺序为: X_2 (提取温度) $> X_4$ (超声功率) $> X_1$ (料液质量浓度) $> X_3$ (超声时间),交互作用先后顺序为: $X_1X_4 > X_2X_4 > X_2X_3 > X_3X_4 > X_1X_3 > X_1X_2$ 。

2.2.2 响应面等高线分析

利用Design-Expert_8.0.6软件,进行回归拟合分析,得回归方程的响应面等高线图(见图7)。通过等高线图,可以更直观地分析各响应因子及其交互作用对于响应值影响的大小。其中响应面等高线的形状,反映了两响应因子间交互作用的强弱:椭圆形表明两响应因子之间的交互作用对SDF得率的影响显著,而圆形则表示两响应因子间的交互效应相对较弱;等高线排列密集表明对SDF得率影响较大,等高线稀疏则表示对响应值影响较小^[22]。

由图7可知,图7c、图7d、图7e中各响应因子的交互效应对紫萁干SDF得率的影响显著,等高线排列密集且呈椭圆形。图7a、图7b、图7f中各响应因子的交互作用对紫萁干SDF得率的影响较小,反映在等高线上为或排列稀疏或趋近于圆形。图形分析结果与方差分析结果一致。

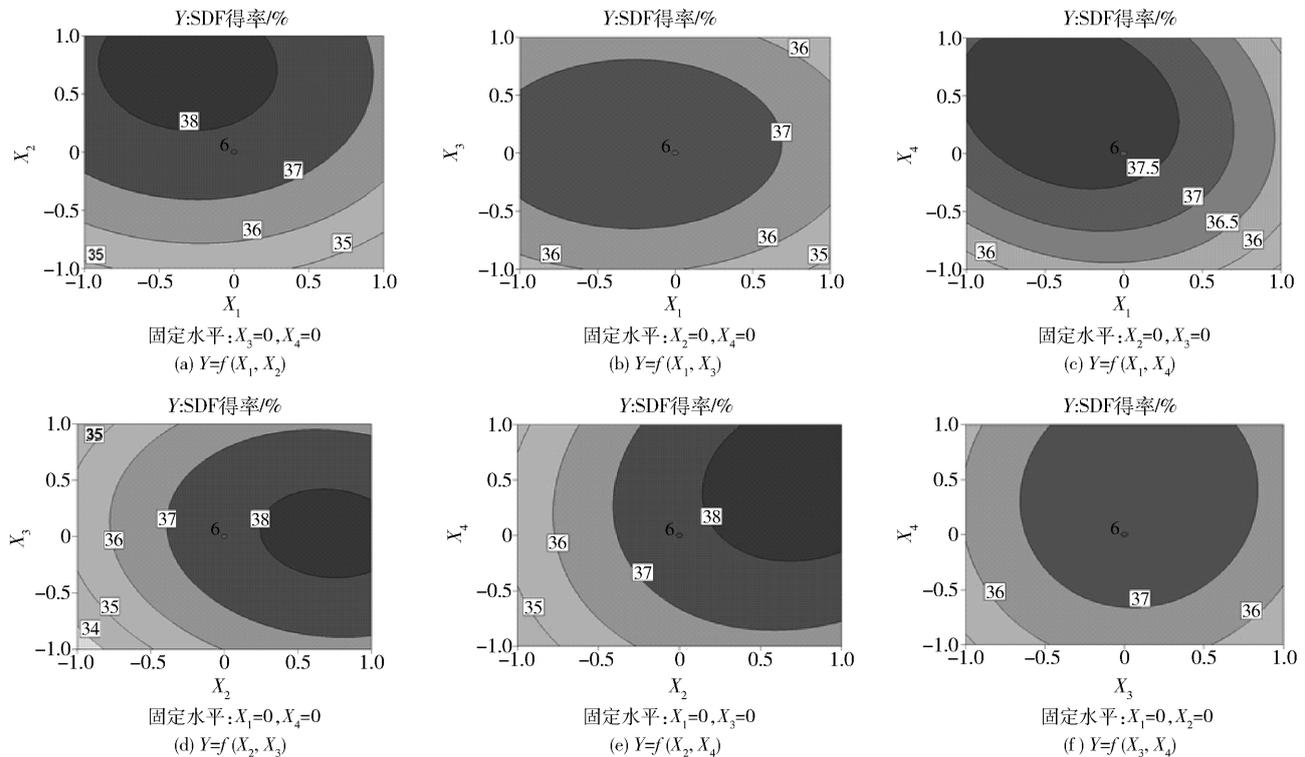


图7 各因素交互作用对SDF得率影响的等高线

Fig. 7 Contour plots for interactive effects of different factors on yield of soluble dietary fiber

2.2.3 提取工艺的优化与实验验证

为进一步确定最佳提取工艺参数,对建立的数学模型分别求4个自变量的一阶偏导数,并分别令其值等于0,得四元一次方程组:

$$\begin{cases} -0.45 - 1.7X_1 - 0.094X_2 + 0.31X_3 - 0.34X_4 = 0 \\ 1.44 - 0.094X_1 - 2X_2 - 0.21X_3 + 0.32X_4 = 0 \\ 0.23 + 0.31X_1 - 0.21X_2 - 2.9X_3 + 0.12X_4 = 0 \\ 0.55 - 0.34X_1 + 0.32X_2 + 0.12X_3 - 1.56X_4 = 0 \end{cases}$$

联立方程求解,得各实验因子的编码值: $X_1 = -0.4355$, $X_2 = 0.8399$, $X_3 = -0.0024$, $X_4 = 0.6196$,根据编码公式,与之对应的SDF实际最佳提取工艺参数为料液质量浓度(a) = 1.0; $(-0.4355 \times 5 + 25) = 1.0/22.82 \text{ g/mL}$;提取温度(b) = $0.8399 \times 5 + 50 = 54.20 \text{ }^\circ\text{C}$;超声时间(c) = $-0.0024 \times 5 + 25 = 24.99 \text{ min}$;超声功率(d) = $0.6196 \times 50 + 350 = 380.98 \text{ W}$ 。

在上述条件下,紫萁干SDF的理论得率为38.57%。为了便于实际操作,将较佳提取工艺条件修正为料液质量浓度1.0 g/23 mL、提取温度54 $^\circ\text{C}$ 、超声时间25 min、超声功率380 W。在该条件下进行验证,重复3次,取平均值,得到紫萁干SDF的得率为38.39%,同理论预测值(38.57%)的误差约为0.18%。表明建立的数学模型对于优化紫萁干SDF的提取工艺条件是合理有效的。

3 结 论

本研究通过响应面分析法,优化了超声波协同碱法提取紫萁干SDF的工艺条件。结果表明,紫萁干SDF最佳提取工艺条件为料液质量浓度1.0 g/23 mL、提取温度54 $^\circ\text{C}$ 、超声时间25 min、超声功率380 W、NaOH质量浓度0.02 g/mL、碱解时间90 min,该条件下SDF得率可达38.39%,同理论预测值的误差约为0.18%。说明建立的模型合理可靠,可用于实际预测。本提取工艺较为简单,成品得率和纯度均较高,是一种较理想的制备SDF的方法,也是提高紫萁综合利用率的有效途径之一。在此基础上,可进一步对所制备的紫萁干SDF进行功能研究与改善,以获得生理活性高、保健功效显著的优质紫萁干SDF。

参考文献:

[1] 徐怀德. 药食同源新食品加工[M]. 北京:中国农业出版社,2002:181-182.

[2] 陆宁,龙海荣,柴洪迪. 即食薇菜加工工艺的研究[J]. 食品研究与开发,2007,28(10):116-119.

[3] 王金华,张声华. 啤酒糟中可溶性膳食纤维的提取及化学组成[J]. 食品科技,2002,23(11):64-66.

[4] BAZZANO L A. Effects of soluble dietary fiber on low-density lipoprotein cholesterol and coronary heart disease

risk[J]. Current Atherosclerosis Reports, 2008, 10(6): 473-477.

[5] ZACHERL C, EISNER P, ENGEL K H. *In vitro* model to correlate viscosity and bile acid-binding capacity of digested water-soluble and insoluble dietary fibres [J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 423-428.

[6] PARK K H, LEE K Y, LEE H G. Chemical composition and physicochemical properties of barley dietary fiber by chemical modification [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 60(9): 360-365.

[7] 张晓龙,田亚红,常丽新,等. 响应面优化超声-碱解法提取玉米芯中可溶性膳食纤维的工艺[J]. 食品工业科技,2014,35(12):262-267.

[8] 苗敬芝,冯金和,董玉玮. 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, 32(24):120-125.

[9] DOS SANTOS T C, GOMES D P, BONOMO R C, et al. Optimisation of solid state fermentation of potato peel for the production of cellulolytic enzymes [J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1299-1304.

[10] FAN Jieping, CAO Jing, ZHANG X H, et al. Optimization of ionic liquid based ultrasonic assisted extraction of puerarin from *Radix Puerariae Lobatae* by response surface methodology [J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2299-2306.

[11] 赵力超,毛新,黄利华,等. 葶苈皮膳食纤维酶化学法提取工艺研究 [J]. 食品工业科技,2009,30(11): 244-246, 250.

[12] 黄群,杨万根,余佶,等. 超声波辅助碱法提取杜仲籽粕可溶性膳食纤维的工艺优化 [J]. 食品科学,2013, 34(22):70-74.

[13] 孟鹏,郑宝东. 超临界二氧化碳萃取金柑中柠檬苦素工艺条件优化及数学模型研究 [J]. 中国食品学报, 2012,12(7):80-87.

[14] TOSH S M, YADA S. Dietary fibres in pulse seeds and fractions: characterization, functional attributes, and applications [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 450-460.

[15] 林忠宁,何友建,陆丞,等. 响应面分析法优选灵芝超声波提取工艺的研究 [J]. 中国食品学报,2012, 12(7):97-104.

[16] BENDAHOU A, DUFRESNE A, KADDAMI H, et al. Isolation and structural characterization of hemicelluloses from palm of *Phoenix dactylifera* L. [J]. Carbohydrate

- Polymers, 2007, 68(3): 601–608.
- [17] KAMIYAMA M, SHIBAMOTO T. Flavonoids with potent antioxidant activity found in young green barley leaves[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(25): 6260–6267.
- [18] 刘静,李湘利,孔娴,等. 超声波协同酶法提取香椿老叶可溶性膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 41–45.
- [19] 董艳红,李姝婧,郑惠华,等. 响应曲面优化超声波提取灵芝多糖工艺研究[J]. 食品科学, 2009, 30(16): 98–101.
- [20] REYES-MORENO C, ROMERO-URÁAS C, MILÁN-CARRILLO J, et al. Optimization of the solid state fermentation process to obtain tempeh from hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L.) [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2000, 55(3): 219–228.
- [21] LI Quanhong, FU Caili. Application of response surface methodology for extraction optimization of germinant pumpkin seeds protein [J]. Food Chemistry, 2005, 92(4): 701–706.
- [22] KALIL S J, MAUGERI F, RODRIGUES M I. Response surface analysis and simulation as a tool for bioprocess design and optimization [J]. Process Biochemistry, 2000, 35(6): 539–550.

Optimized Extraction for Soluble Dietary Fiber from Dried Osmund

LI Xueying, XU Hui, ZHANG Jing, LI Xinwang, LU Ning*

(School of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Response surface methodology was applied to optimize the technological parameters of the ultrasonic-assisted alkaline extraction of soluble dietary fiber from dried osmund. Effects of four independent variables including solid-liquid ratio, extraction temperature, ultrasonic time, and ultrasonic power on the yield of soluble dietary fiber were studied by single-factor experiments. A quadratic regression mathematical model was established by Central-Composite experimental design and analyzed by response surface methodology. Meanwhile, the influences of independent variables and their interactions on the response value were discussed. The optimal technological parameters were determined as follows: alkaline concentration 0.02 g/mL, extraction time 90 min, solid-liquid ratio 1.0 g/23 mL, extraction temperature 54 °C, ultrasonic time 25 min, and ultrasonic power 380 W. Under the optimal extraction conditions, the yield of soluble dietary fiber was up to 38.39%.

Key words: dried osmund; soluble dietary fiber; alkaline process; ultrasonic method; response surface methodology

(责任编辑:李 宁)