

# 响应面法优化火棘水不溶性膳食纤维提取工艺

李加兴<sup>1</sup>, 梁先长<sup>2</sup>, 黄 诚<sup>1,\*</sup>, 霍永鹏<sup>1</sup>, 胡平平<sup>3</sup>, 黄寿恩<sup>3</sup>

(1.吉首大学化学化工学院, 湖南 吉首 416000; 2.林产化学加工工程湖南省重点实验室, 湖南 张家界 427000;

3.中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 以火棘果为原料, 采用碱水解法提取膳食纤维, 通过单因素试验和响应面分析, 探讨碱液质量分数、浸提时间、浸提温度和液料比对火棘水不溶性膳食纤维提取率和纯度的影响, 并对提取工艺条件进行优化。结果表明, 碱水解法提取火棘膳食纤维的最佳工艺条件为碱液质量分数 1.00%、浸提时间 3.00h、浸提温度 77.8℃、液料比 17:1(mL/g), 在此工艺条件下水不溶性膳食纤维的提取率 56.89%、纯度达到 92.74%, 表明该工艺可行。

**关键词:** 火棘; 碱水解; 水不溶性膳食纤维; 响应面分析

## Optimization of Extraction Technology for Insoluble Dietary Fiber from *Fortuneana pyracantha* Fruits by Response Surface Methodology

LI Jia-xing<sup>1</sup>, LIANG Xian-chang<sup>2</sup>, HUANG Cheng<sup>1,\*</sup>, HUO Yong-peng<sup>1</sup>, HU Ping-ping<sup>3</sup>, HUANG Shou-en<sup>3</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China;

2. Key Laboratory of Hunan Forest Product and Chemical Industry Engineering, Zhangjiajie 427000, China;

3. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forest and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** The alkali-catalyzed hydrolysis method was applied to extract insoluble dietary fiber (IDF) from the fruits of *Fortuneana pyracantha* and main process conditions were optimized by one-factor-at-a-time experiments and response surface methodology. The extraction rate and purity of IDF were investigated with respect to NaOH concentration, extraction time, extraction temperature and material-to-liquid ratio. The results showed that the optimal extraction conditions were NaOH concentration of 1.00% (g/g), extraction time of 3.00 h, extraction temperature of 77.8 °C, and material-to-liquid ratio of 1:17 (g/mL). Under the optimal extraction conditions, the extraction rate and purity of IDF were 56.89% and 92.74%, respectively.

**Key words:** *Fortuneana pyracantha*; alkali-catalyzed hydrolysis method; insoluble dietary fiber; response surface analysis

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)14-0118-06

火棘(*Pyracantha fortuneana*)俗名救兵粮、火把果、赤阳子等, 为蔷薇科苹果亚科(Maloideae)火棘属(*Pyracantha roemer*)常绿野生灌木果树植物。火棘果中所含有的营养成分种类齐全, 含量丰富<sup>[1-2]</sup>, 营养价值比苹果、猕猴桃更具特色<sup>[1]</sup>。膳食纤维被认为是继蛋白质、脂肪、水、矿物质、维生素、碳水化合物之后, 能够改善人体营养状况, 调节机体功能的“第七类营养素”。已有研究<sup>[3-8]</sup>表明, 膳食纤维具有很多重要的生理功能, 如缓解便秘、降低血糖、降低血清胆固醇水平、治疗肥胖症、防治高血压、抗氧化、清除自由基等。

膳食纤维的提取方法主要有化学法<sup>[9-10]</sup>、酶-化学法<sup>[11-12]</sup>、酶法<sup>[13-14]</sup>和生物法<sup>[15-16]</sup>。目前, 国内外主要采用化学法来提取膳食纤维, 此法具有工艺简单和成本低廉的优点。本研究采用碱水解法提制火棘果中水不溶性膳食纤维, 并采用响应面法优化提取工艺。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

野生火棘: 采摘于湘西州永顺县高坪山区; 无水乙醇、石油醚(沸程 30~60℃)、丙酮、氢氧化钠、盐酸、无水硫酸钠均为分析纯;  $\alpha$ -淀粉酶、蛋白酶(活

收稿日期: 2011-01-06

基金项目: 湖南省高校科技创新团队支持计划项目(湘教通〔2010〕212号); 吉首大学研究生科研项目(10JDY031)

作者简介: 李加兴(1969—), 男, 教授, 博士, 研究方向为天然食物资源开发与利用。E-mail: jsljiaxing@sohu.com

\*通信作者: 黄诚(1964—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为农产品加工及其分析检测技术。E-mail: huangcheng@gzu.edu.cn

性 $\geq 50$ 万U/g)。

## 1.2 仪器与设备

ZNJ-80型小型不锈钢粗碎机 北京兴时利和科技发展有限公司; XA-1型固体样品粉碎机 江苏金坛市亿通电子有限公司; TMP-2型上皿式电子天平 湘仪天平仪器设备有限公司; DSY-2-4孔恒温水浴锅 北京国华医疗器械厂; LD4-2A型低速离心机 北京医用离心机厂; RE-52A型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; DZF-6050型真空干燥箱 上海博讯事业有限公司医疗设备厂; SHZ-D(III)循环水式真空泵 浙江黄岩求精真空泵厂。

## 1.3 方法

### 1.3.1 工艺流程

火棘→破碎去籽→果肉→干燥→粉碎过筛→酶解→碱浸提→双氧水脱色→离心分离→滤渣→真空干燥→膳食纤维

### 1.3.2 操作要点

原料预处理: 采用不锈钢粗碎机破碎火棘, 分离出果肉和果籽, 果肉经60℃真空干燥后备用, 果籽可用于提油; 粉碎过筛: 火棘果肉经粉碎机粉碎, 过80~100目筛; 酶解: 火棘果肉分别用 $\alpha$ -淀粉酶、蛋白酶酶解30min, 除去淀粉和蛋白质, 以免影响提取物的纯度; 碱浸提: 酶解后的果肉与碱液按一定质量分数混合, 于一定温度下水浴恒温浸提一定时间; 脱色: 用盐酸调pH值至中性, 加入10mL双氧水, 在50℃恒温水浴锅中加热脱色30min; 离心分离: 控制转速4000r/min左右, 离心分离30min, 弃去上清液; 干燥: 用一定量的无水乙醇反复洗涤水不溶性膳食纤维后, 置于真空干燥箱干燥, 控制干燥温度为60℃, 真空度保持在0.08~0.09MPa。

### 1.3.3 影响火棘水不溶性膳食纤维提取效率单因素试验

#### 1.3.3.1 碱液质量分数对提取水不溶性膳食纤维的影响

采用液料比20:1(mL/g), 在火棘果肉中分别加入质量分数0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%的NaOH溶液, 于60℃浸提4h, 以膳食纤维的提取率和纯度为评价指标, 探讨碱液质量分数对提取水不溶性膳食纤维的影响。

#### 1.3.3.2 浸提时间对提取水不溶性膳食纤维的影响

采用液料比20:1, 在火棘果肉中加入质量分数0.8%的NaOH溶液, 60℃分别浸提1、2、3、4、5h, 以膳食纤维的提取率和纯度为评价指标, 探讨浸提时间对提取水不溶性膳食纤维的影响。

#### 1.3.3.3 浸提温度对提取水不溶性膳食纤维的影响

采用液料比20:1, 在火棘果肉中加入质量分数0.8%

的NaOH溶液, 分别于40、50、60、70、80℃浸提4h, 以膳食纤维的提取率和纯度为评价指标, 探讨浸提温度对提取水不溶性膳食纤维的影响。

### 1.3.3.4 液料比对提取水不溶性膳食纤维的影响

在火棘果肉中加入质量分数0.8%的NaOH溶液, 液料比分别为10:1、15:1、20:1、25:1、30:1(mL/g), 70℃浸提4h, 以膳食纤维的提取率和纯度为评价指标, 探讨液料比对提取水不溶性膳食纤维的影响。

## 1.3.4 火棘水不溶性膳食纤维提取工艺优化

综合单因素试验结果, 选取碱液质量分数、浸提时间、浸提温度和液料比为自变量, 水不溶性膳食纤维的提取率和纯度为响应值, 设计4因素3水平响应面分析试验, 优化提取工艺。试验设计因素水平见表1。

## 1.4 分析评价方法

表1 响应面分析因素与水平表

Table 1 Factors and levels in response surface analysis

水平	$X_1$ 碱液质量分数/%	$X_2$ 浸提时间/h	$X_3$ 浸提温度/℃	$X_4$ 液料比(mL/g)
-1	0.6	3	60	15:1
0	0.8	4	70	20:1
1	1.0	5	80	25:1

### 1.4.1 膳食纤维的测定方法

按照GB/T 5009.88—2008《食品中膳食纤维的测定》方法进行测定。

### 1.4.2 提取率与纯度计算方法

$$\text{膳食纤维提取率}/\% = \frac{m_1 \times (1 - r_1)}{m_2 \times (1 - r_2)} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $m_1$  为提取物的质量/g;  $r_1$  为提取物水分及挥发物含量/%;  $m_2$  为原料的质量/g;  $r_2$  为原料水分及挥发物含量/%。

$$\text{不溶性膳食纤维的纯度}(X)/\% = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $m_2$  为滤器加玻璃棉及试样中纤维的质量/g;  $m_1$  为滤器加玻璃棉的质量/g;  $m$  为样品的质量/g。

## 2 结果与分析

### 2.1 火棘果中水不溶性膳食纤维提取工艺单因素试验

#### 2.1.1 碱液质量分数对提取水不溶性膳食纤维的影响

由图1可知, 当NaOH质量分数小于0.8%时, 提取物中水不溶性膳食纤维纯度随着NaOH质量分数的增大呈增加趋势; 当NaOH质量分数大于0.8%时, 膳食

纤维纯度呈缓慢下降趋势；提取率随着 NaOH 质量分数的增大一直呈下降趋势，当 NaOH 质量分数在 0.8%~1.0%，提取率趋于平缓，当 NaOH 质量分数大于 1.0% 时，提取率下降加剧。由于 NaOH 具有氧化作用，浓度较大时能够破坏纤维素和半纤维素之间氢键，使得膳食纤维提取率与纯度均降低。因此，NaOH 质量分数选择 0.8% 左右较为适宜。

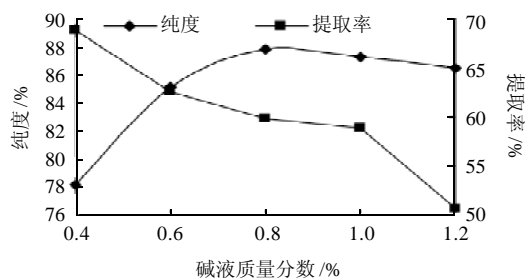


图1 碱液质量分数对提取水不溶性膳食纤维的影响  
Fig.1 Effect of NaOH concentration on extraction rate of IDF

#### 2.1.2 浸提时间对提取水不溶性膳食纤维的影响

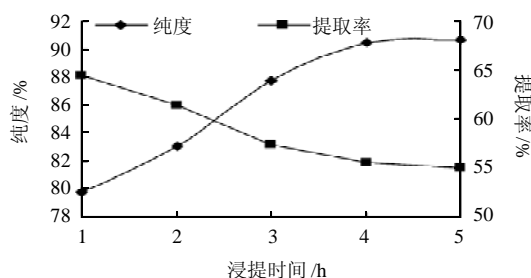


图2 浸提时间对提取水不溶性膳食纤维的影响  
Fig.2 Effect of extraction time on extraction rate of IDF

由图2可知，随着浸提时间的延长，水不溶性膳食纤维纯度迅速升高，提取率迅速降低；但当浸提时间超过4h后，水不溶性膳食纤维纯度上升趋势与提取率下降趋势均趋于平缓。这是由于随着提取时间的延长，色素等杂质被浸出，而使水不溶性膳食纤维纯度升高，提取率下降。因此，浸提时间确定为4h左右。

#### 2.1.3 浸提温度对提取水不溶性膳食纤维的影响

由图3可知，提取温度在40~70℃时，水不溶性膳食纤维的纯度随着浸提温度的升高而升高；但当浸提温度高于70℃时，水不溶性膳食纤维的纯度随着浸提温度的升高反而降低；随着浸提温度的升高，NaOH对纤维素和半纤维素的破坏能力逐渐增强，导致水不溶性膳食纤维的提取率逐渐降低。因此，浸提温度选择70℃左右较为适宜。

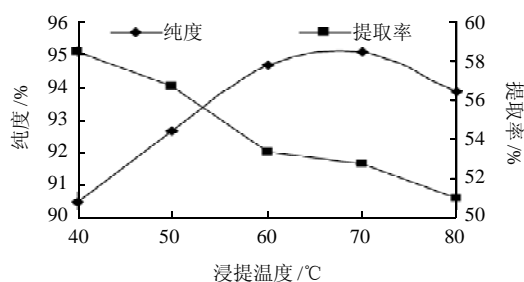


图3 浸提温度对提取水不溶性膳食纤维的影响  
Fig.3 Effect of extraction temperature on extraction rate of IDF

#### 2.1.4 液料比对提取水不溶性膳食纤维的影响

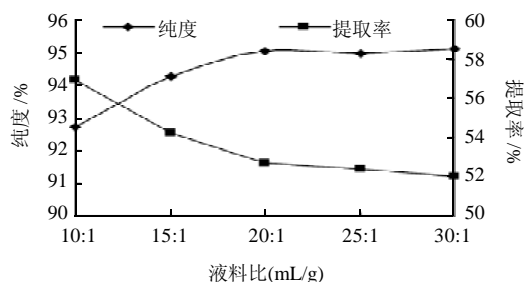


图4 液面比对提取水不溶性膳食纤维的影响  
Fig.4 Effect of material-to-liquid ratio on extraction rate of IDF

由图4可知，水不溶性膳食纤维的纯度随着液料比的增大而升高，提取率随着液料比的增大而降低；当液料比为20:1时，水不溶性膳食纤维的纯度上升趋于平缓，提取率的降低亦趋于平缓。因此，液料比选择20:1较为适宜。

#### 2.2 火棘水不溶性膳食纤维提取工艺优化

##### 2.2.1 数学模型的建立与显著性分析

采用 Design-Expert 7.0 Trial 软件，按照 Box-Behnken 组合设计，依据单因素试验结果选取碱液质量分数、浸提时间、浸提温度和液料比作为主要因素，以火棘膳食纤维的提取率和纯度作为评价指标，设计4因素3水平响应面分析试验<sup>[17-18]</sup>，试验设计方案及数据处理结果如表2所示，方差分析结果如表3所示。

对表2结果进行统计分析，可建立如下二次回归方程：

$$Y(\text{提取率}) = 52.69 - 1.78X_1 - 1.92X_2 - 1.99X_3 - 1.56X_4 + 0.84X_1X_2 + 1.55X_1X_3 + 0.80X_1X_4 + 1.57X_2X_3 + 2.11X_2X_4 + 0.49X_3X_4 + 2.77X_1^2 + 1.63X_2^2 + 0.72X_3^2 + 1.25X_4^2$$

$$Y(\text{纯度}) = 94.82 + 1.16X_1 + 1.11X_2 + 1.52X_3 + 1.13X_4 - 0.97X_1X_2 - 0.47X_1X_3 - 0.39X_1X_4 - 1.09X_2X_3 - 0.89X_2X_4 - 0.37X_3X_4 - 2.19X_1^2 - 0.90X_2^2 - 0.93X_3^2 - 1.44X_4^2$$

从表3分析结果可知，该二次回归方程的模型项、一次项、二次项及交互项中的  $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_2X_4$  都表现出极显著影响， $X_1X_2$  影响显著，并且失拟项不显著。

表2 Box-Behnken 组合试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken experimental design and corresponding results

试验号	X <sub>1</sub> 碱液质量分数	X <sub>2</sub> 浸提时间	X <sub>3</sub> 浸提温度	X <sub>4</sub> 液料比	提取率/%	预测值/%	纯度/%	预测值/%
1	-1	-1	0	0	61.42	61.63	88.62	88.49
2	1	-1	0	0	56.76	56.38	93.01	92.76
3	-1	1	0	0	56.03	56.11	92.55	92.66
4	1	1	0	0	54.74	54.23	93.04	93.02
5	0	0	-1	-1	57.77	58.70	89.65	89.43
6	0	0	1	-1	53.51	53.74	93.45	93.23
7	0	0	-1	1	55.14	54.61	92.35	92.43
8	0	0	1	1	52.83	51.61	94.65	94.73
9	-1	0	0	-1	60.38	60.84	88.69	88.52
10	1	0	0	-1	55.32	55.68	92.05	91.61
11	-1	0	0	1	55.68	56.14	91.45	91.55
12	1	0	0	1	53.81	54.16	93.27	93.09
13	0	-1	-1	0	60.09	60.52	89.15	89.27
14	0	1	-1	0	53.39	55.35	93.65	93.67
15	0	-1	1	0	52.74	53.40	94.87	94.50
16	0	1	1	0	52.33	52.71	95.00	94.54
17	-1	0	-1	0	62.34	61.50	88.75	88.55
18	1	0	-1	0	54.98	54.83	91.61	91.82
19	-1	0	1	0	54.79	54.42	92.27	92.55
20	1	0	1	0	53.63	53.95	93.23	93.92
21	0	-1	0	-1	62.34	61.15	88.75	89.35
22	0	1	0	-1	53.89	53.11	92.90	93.35
23	0	-1	0	1	53.56	53.83	93.35	93.38
24	0	1	0	1	53.53	54.21	93.93	93.82
25	0	0	0	0	53.02	52.69	94.12	94.82
26	0	0	0	0	52.51	52.69	95.05	94.82
27	0	0	0	0	52.76	52.69	94.95	94.82
28	0	0	0	0	52.77	52.69	94.88	94.82
29	0	0	0	0	52.37	52.69	95.12	94.82

表3 膳食纤维提取率响应面方差分析结果

Table 3 Variance analysis for extraction rate of IDF

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	262.43	14	18.74	31.25	< 0.0001**
X <sub>1</sub>	38.16	1	38.16	63.62	< 0.0001**
X <sub>2</sub>	44.08	1	44.08	73.49	< 0.0001**
X <sub>3</sub>	47.52	1	47.52	79.23	< 0.0001**
X <sub>4</sub>	29.02	1	29.02	48.38	< 0.0001**
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	2.84	1	2.84	4.73	0.0472*
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	9.61	1	9.61	16.02	0.0013**
X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	2.54	1	2.54	4.24	0.0586
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	9.89	1	9.89	16.49	0.0012**
X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	17.72	1	17.72	29.55	< 0.0001**
X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	0.95	1	0.95	1.58	0.2287
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	49.66	1	49.66	82.80	< 0.0001**
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	17.33	1	17.33	28.89	< 0.0001**
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	3.40	1	3.40	5.68	0.0319*
X <sub>4</sub> <sup>2</sup>	10.17	1	10.17	16.95	0.0001**
残差	8.40	14	0.60		
失拟项	8.14	10	0.81	12.78	0.1270
纯误差	0.25	4	0.064		
总离差	270.83	28			

注: \*.P &lt; 0.05, 差异显著; \*\*.P &lt; 0.01, 差异极显著。下同。

而且, 经 Design-Expert 7.0 Trial 软件分析得到, 预测的  $R^2(0.8254)$  与校正的  $R^2(0.9380)$  相差较小, 说明数学拟合模型与试验实测值能很好的拟合(与表 2 中的结果一致)。由  $F$  值大小比较可知, 影响火棘水不溶性膳食纤维提取率的主要因素主次顺序为  $X_3 > X_2 > X_1 > X_4$ , 即浸提温度对火棘水不溶性膳食纤维提取率影响最大, 浸提时间和碱液质量分数影响次之, 液料比影响最小。

表4 膳食纤维纯度响应面方差分析结果

Table 4 Variance analysis for IDF purity

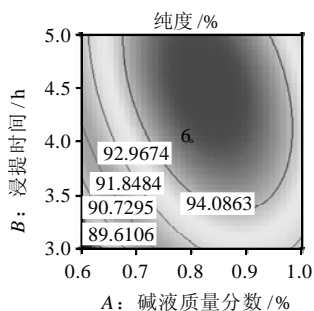
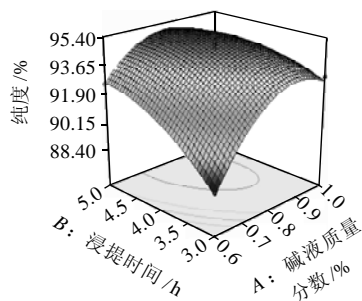
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	127.38	14	9.10	47.22	< 0.0001**
X <sub>1</sub>	16.05	1	16.05	83.32	< 0.0001**
X <sub>2</sub>	14.79	1	14.79	76.73	< 0.0001**
X <sub>3</sub>	27.94	1	27.94	145.00	< 0.0001**
X <sub>4</sub>	15.21	1	15.21	78.94	< 0.0001**
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	3.80	1	3.80	19.73	0.0006**
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.90	1	0.90	4.68	0.0482*
X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	0.59	1	0.59	3.08	0.1013
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	4.77	1	4.77	24.78	0.0002**
X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	3.19	1	3.19	16.54	0.0012**
X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	0.56	1	0.56	2.92	0.1096
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	31.05	1	31.05	161.14	< 0.0001**
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	5.29	1	5.29	27.44	0.0001**
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	5.57	1	5.57	28.90	< 0.0001**
X <sub>4</sub> <sup>2</sup>	13.53	1	13.53	70.20	< 0.0001**
残差	2.70	14	0.19		< 0.0001**
失拟项	2.04	10	0.20	1.25	0.4474
纯误差	0.65	4	0.16		
总离差	130.07	28			

从表 4 可知, 该二次回归方程的模型项、一次项、二次项及交互项中的  $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_2X_4$  都表现出极显著影响,  $X_1X_3$  影响显著并且失拟项不显著。而且, 经 Design-Expert 7.0 Trial 软件分析得到, 预测的  $R^2(0.9016)$  与校正的  $R^2(0.9585)$  相差很小, 说明数学拟合模型与试验实测值能很好的拟合(与表 2 中的结果一致)。由  $F$  值大小比较可知, 影响火棘水不溶性膳食纤维纯度的主要因素主次顺序为  $X_3 > X_1 > X_4 > X_2$ , 即浸提温度对火棘水不溶性膳食纤维纯度影响最大, 碱液质量分数和液料比影响次之, 浸提时间影响最小。

## 2.2.2 响应面分析

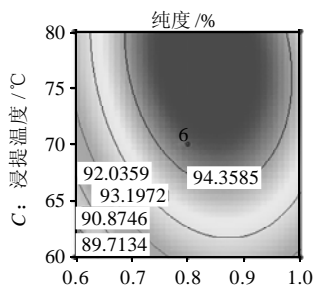
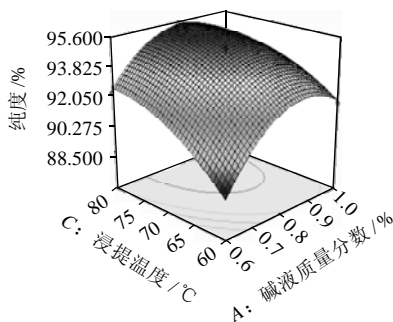
等高线呈椭圆形, 表明两因素的交互影响较强; 处在同一椭圆形区域中的等高线表示水不溶性膳食纤维纯度是相同的, 越靠近区域中心, 纯度值越大; 等高线排列越密集, 表示因素的变化对纯度影响越大<sup>[19-21]</sup>。因此, 由图 5 可知, 碱液质量分数与浸提时间( $X_1X_2$ )、碱液质量分数与浸提温度( $X_1X_3$ )、浸提时间与浸提温度( $X_2X_3$ )、浸提时间与液料比( $X_2X_4$ )等交互项对水不溶性膳

食纤维纯度表现出了很好的显著性;此外,由图5可知各个响应曲面均为凸面,表示该模型在试验范围内存在稳定点(等高线中的点5),且稳定点为最大值。



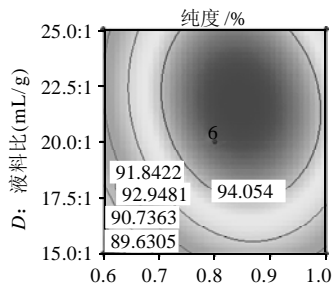
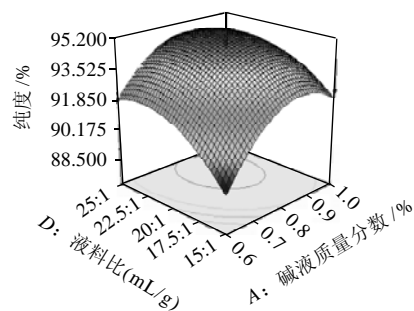
固定水平: 浸提温度 70℃; 液料比 20:1。

a. 碱液质量分数与浸提时间



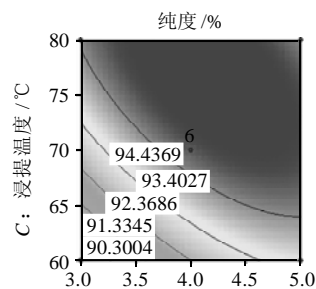
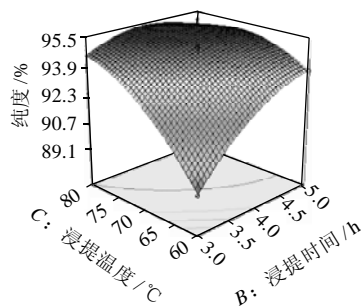
固定水平: 浸提时间 4h; 液料比 20:1。

b. 碱液质量分数与浸提温度



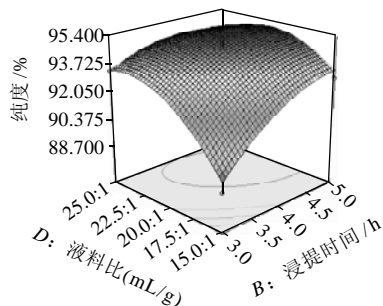
固定水平: 浸提时间 4h; 浸提温度 70℃。

c. 碱液质量分数与液料比



固定水平: 碱液质量分数 0.8%; 液料比 20:1。

d. 浸提时间与浸提温度



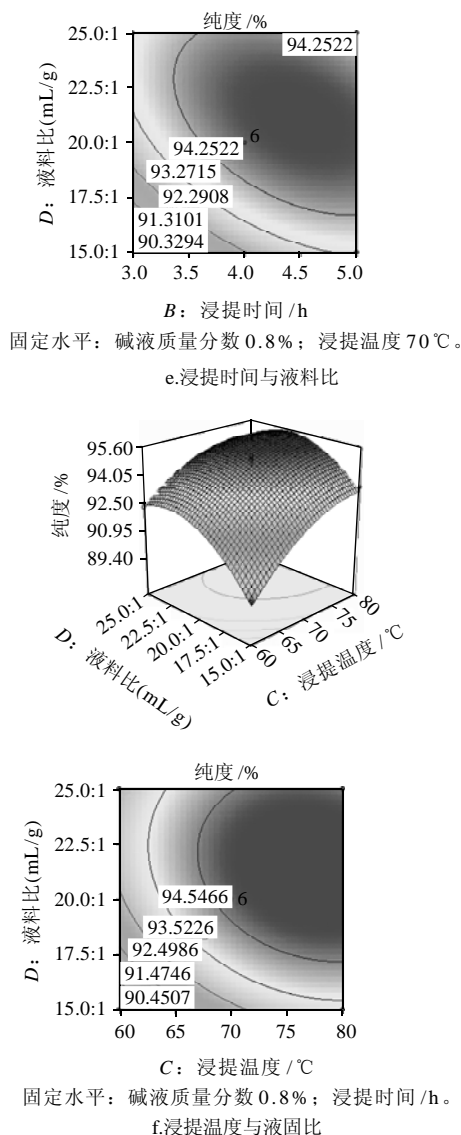


图5 各两因素交互作用对纯度影响的响应面及等高线图

Fig.5 Response surface and contour plots for the pairwise effect of four extraction conditions on IDF purity

对提取率和纯度均取最大值, 由软件自动分析得到的优化条件为碱液质量分数 1.00%、提取时间 3.00h、提取温度 77.79℃、液料比 16.89:1(mL/g), 此条件下的膳食纤维提取率理论值为 57.28%, 纯度理论值为 92.47%。为方便实际操作, 选取碱液质量分数 1.00%、浸提时间 3.00h、浸提温度 77.8℃、液料比 17:1(mL/g), 在此条件下进行 3 次平行验证实验, 膳食纤维提取率和纯度的平均值分别为 56.89% 和 92.74%, 与理论值较为接近, 说明数学模型对优化火棘中水不溶性膳食纤维的提取工艺可行。

### 3 结 论

3.1 本实验采用响应面法对碱水解法提取火棘水不溶性膳食纤维工艺进行优化, 建立的二次多项式数学模型具

有很好的显著性, 影响膳食纤维提取率的  $R^2$  为 0.9690, 影响膳食纤维纯度的  $R^2$  为 0.9793; 影响火棘水不溶性膳食纤维提取率的主要因素主次顺序为浸提温度影响最大, 浸提时间和碱液质量分数影响次之, 液料比影响最小; 影响火棘水不溶性膳食纤维纯度的主要因素主次顺序为浸提温度影响最大, 碱液质量分数和液料比影响次之, 浸提时间影响最小。

3.2 提取火棘水不溶性膳食纤维的最佳工艺条件为碱液质量分数 1.00%、浸提温度 77.8℃、浸提时间 3.00h、液料比 17:1(mL/g)。在此工艺条件下, 火棘膳食纤维提取率 56.89%, 纯度达到 92.74%, 产品外观呈浅黄绿色, 该工艺可行。

### 参考文献:

- [1] 邓如福, 王三根, 李关荣. 野生植物 - 火棘果实的营养成分[J]. 营养学报, 1990, 12(1): 79-84.
- [2] 王敬勉, 廖德胜, 粟巧功, 等. 火棘果营养成分及果胶的研究[J]. 食品科学, 1992, 13(4): 40-42.
- [3] 郑建仙. 功能性食品学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 22-26.
- [4] 于广祥.  $^{13}\text{C}$ 呼气试验研究膳食纤维对糖盒脂肪消化吸收的影响[D]. 北京: 中国协和医科大学, 1999.
- [5] 吴谋成. 功能食品研究与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 17-18.
- [6] 黄凯丰, 杜明凤. 膳食纤维研究进展[J]. 河北农业科学, 2009, 17(13): 53-55.
- [7] 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.
- [8] 韩俊娟, 木泰华, 张柏林. 膳食纤维生理功能的研究现状[J]. 食品科技, 2008, 34(6): 243-245.
- [9] 李加兴, 刘飞, 范芳利, 等. 响应面法优化猕猴桃皮渣可溶性膳食纤维提取工艺[J]. 食品科学, 2009, 30(14): 143-148.
- [10] 李安平, 谢碧霞, 王俊, 等. 竹笋膳食纤维的制备及其功能结构比较[J]. 中国食品学报, 2010, 10(1): 86-92.
- [11] 陶水霞, 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.
- [12] 赵力超, 毛新, 黄利华, 等. 荸荠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): 244-247.
- [13] 杨柳, 刘咏. 酶法提取麸皮中膳食纤维的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 303-305.
- [14] 艾仄宜, 张洁, 杨晓萍, 等. 茶叶非水溶性膳食纤维的提取及其理化特性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 121-124.
- [15] 邵佩兰, 李雯霞, 徐明. 不同提取方法对麦麸膳食纤维特性的影响[J]. 食品科技, 2003, 29(11): 98-100.
- [16] 孔令明, 秦菲. 芜菁中膳食纤维的提取及其理化性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(10): 175-179.
- [17] Blocking a response surface design-How can we block a response surface design[M/OL]. National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce. [2003-06-01]. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3364.htm>.
- [18] BOX G E P, HUNTER W G. Statistics for experiments: an introduction to design, data analysis and model building[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1990.
- [19] 陈莉, 屠康, 王海, 等. 采用响应曲面法对采后红富士苹果热处理条件的优化[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 159-163.
- [20] 张玉香, 屈慧鸽, 杨润亚, 等. 响应面法优化蓝莓叶黄酮的微波提取工艺[J]. 食品科学, 2010, 31(16): 33-37.
- [21] 郑磊, 金秀明, 赵玉红. 超声波辅助盐法提取鹿茸糖胺聚糖的工艺优化[J]. 食品科学, 2010, 31(16): 61-66.