

# 响应面法优化超声辅助水酶法提取辣木籽油

张秀芬, 黄珍玲, 吴玲玲, 何文, 李恒锐, 莫周美, 谢君锋\*

(广西南亚热带农业科学研究所, 广西 崇左 532415)

**摘要:** 以辣木籽为原料, 通过超声辅助水酶法提取辣木籽油。以辣木籽油提取率为指标, 利用单因素试验考察 pH 值、果胶酶添加量、提取时间、提取温度、超声功率对辣木籽油提取率的影响, 在此基础上采用响应面法确定提取辣木籽油的最佳工艺条件。结果表明, 最佳提取工艺为果胶酶添加量 0.50%、pH3.5、提取温度 54 ℃、提取时间 12 h、超声功率 84 W, 此时辣木籽油提取率为 30.56%。

**关键词:** 辣木籽油; 超声辅助提取; 水酶法; 响应面; 优化

## Optimization of Ultrasound-Assisted Aqueous Enzymatic Extraction of *Moringa oleifera* Seed Oil Using Response Surface Methodology

ZHANG Xiu-fen, HUANG Zhen-ling, WU Ling-ling, HE Wen,

LI Heng-rui, MO Zhou-mei, XIE Jun-feng\*

(Guangxi Southern Subtropical Agriculture Science Research Institute, Chongzuo 532415, Guangxi, China)

**Abstract:** The *Moringa oleifera* seed oil was extracted by ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction with *Moringa oleifera* seed as raw material. The extraction rate was used as the indicator and the extraction condition was optimized by single factor experiments and response surface methodology (RSM). The optimum conditions were as follows: addition amount of pectinase 0.50% (based on *Moringa oleifera* seed mass), pH3.5, extraction temperature 54 ℃, extraction time 12 h, and ultrasonic power 84 W. Under these conditions, the extraction rate was 30.56%.

**Key words:** *Moringa oleifera* seed oil; ultrasound-assisted extraction; aqueous enzymatic extraction; response surface methodology; optimization

引文格式:

张秀芬, 黄珍玲, 吴玲玲, 等. 响应面法优化超声辅助水酶法提取辣木籽油[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 108-114.  
ZHANG Xiufen, HUANG Zhenling, WU Lingling, et al. Optimization of Ultrasound-Assisted Aqueous Enzymatic Extraction of *Moringa oleifera* Seed Oil Using Response Surface Methodology[J]. Food Research and Development, 2022, 43(21): 108-114.

辣木又名鼓槌树、马萝卜树、鸡腿树, 属辣木科 (Moringaceae) 辣木属 (*Moringa*), 是多年生热带落叶乔木<sup>[1]</sup>, 原产于印度西北部喜马拉雅山脉南麓<sup>[2]</sup>, 广泛种植于东亚、东南亚、波利尼西亚、西印度群岛<sup>[3]</sup>, 在我国广西、广东、云南等地区均有种植, 辣木具有极高营养价值和诸多生理活性。辣木的叶、芽、花和籽仁均可食用, 常被用于糖尿病、高血压、高血脂、肥胖病、贫血等

疾病的预防和治疗。此外, 辣木种子 (辣木籽) 富含油脂、蛋白质、多糖、矿物质等, 其含油量在 35%~40% 之间, 多为油脂和单不饱和脂肪酸, 其成分及含量与橄榄油、茶油十分相似, 具有良好的抗氧化性和耐煎炸性, 被誉为“油中珍品”, 是有助于人体健康的功能性食用油<sup>[4-8]</sup>。

近年来, 人们采用压榨法、溶剂法、超声波辅助溶

基金项目: 广西自然科学基金面上项目 (2020GXNSFAA259069); 广西农业科学院基本科研业务专项项目 (桂农科 2021YT158)

作者简介: 张秀芬 (1990—), 女 (汉), 助理研究员, 硕士, 研究方向: 天然产物化学。

\* 通信作者: 谢君锋 (1982—), 男 (汉), 助理研究员, 硕士, 研究方向: 辣木栽培与育种。

剂法、超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法、水酶法、微波辅助提取技术、湿法超微粉碎结合水酶法等方法技术提取辣木籽油。但是压榨法提取率低;有机溶剂法污染环境;超临界 CO<sub>2</sub> 萃取和微波辅助提取法设备昂贵;水酶法虽然安全、经济,但是提取效率却不高;而超声辅助水酶法设备简单、对环境友好、可以缩短提取时间,提高提取效率<sup>[4-5,9-10]</sup>。本试验采用超声波辅助水酶法提取辣木籽油,以提取率为评价标准,研究提取时间、提取温度、超声功率、酶添加量、pH 值对辣木籽油提取率的影响,旨在确定辣木籽油的最佳提取工艺条件,为辣木资源的深加工提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

辣木种子:成都源滋初生物科技有限公司;石油醚(沸点 60 ℃~90 ℃):天津市光复精细化工研究所;果胶酶(500 U/mg):上海源叶生物科技有限公司;盐酸、NaOH:国药集团化学试剂有限公司。所用试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

FW135 型中草药粉碎机:天津市泰斯特仪器有限公司;XM-P30H 超声波清洗机:小美超声仪器(昆山)有限公司;TP-214 电子分析天平:丹佛仪器(北京)有限公司;CT15RT 台式高速冷冻离心机:上海天美科学仪器有限公司;DHG-9203A 鼓风干燥箱:上海精宏实验设备有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 原料含油率的测定

辣木籽去壳后,用中草药粉碎机粉碎,过 60 目筛后得到辣木籽粉末。参考 GB/T 14488.1—2008《植物油料 含油量测定》方法,以石油醚为有机提取溶剂,称取一定的辣木籽粉末,采用索氏提取法提取,重复提取 3 次,最终收集粗油脂,测定原料的含油率。

#### 1.3.2 辣木籽油的提取

辣木籽→去壳、烘干→粉碎、过 60 目筛→加水煮沸 10 min→冷却至室温(22 ℃~26 ℃)→调节 pH 值→添加果胶酶→超声提取→离心(4 000 r/min、20 min)→分离油脂。

$$\text{辣木籽油提取率}/\% = \frac{\text{提取辣木籽油质量}(g)/\text{辣木籽质量}(g)}{\text{辣木籽含油率}} \times 100$$

#### 1.3.3 单因素试验

##### 1.3.3.1 pH 值对辣木籽油提取率的影响

准确称取 5.00 g 辣木籽粉末,加 40 mL 超纯水,沸水浴煮沸 10 min,冷却至常温(22 ℃~26 ℃)后,用 6 mol/L 盐酸或 NaOH 调整 pH 值为 2.0、3.5、5.0、6.5、

8.0,加入质量浓度为 0.50%的果胶酶,超声功率 60 W,提取温度 50 ℃,超声辅助提取 1 h,考察 pH 值对辣木籽油提取率的影响。

##### 1.3.3.2 果胶酶添加量对辣木籽油提取率的影响

准确称取 5.00 g 辣木籽粉末,加 40 mL 超纯水,沸水浴煮沸 10 min,冷却至常温(22 ℃~26 ℃)后,用 6 mol/L 盐酸调整 pH 值为 3.5,分别加入 0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%果胶酶,超声功率 60 W,提取温度 50 ℃,超声辅助提取 1 h,考察果胶酶添加量对提取率的影响。

##### 1.3.3.3 提取时间对辣木籽油提取率的影响

准确称取 5.00 g 辣木籽粉末,加 40 mL 超纯水,沸水浴煮沸 10 min,冷却至常温(22 ℃~26 ℃)后,用 6 mol/L 盐酸调整 pH 值为 3.5,加入 0.50%果胶酶,超声功率 60 W,温度 50 ℃,提取时间分别为 1、5、10、15、20 h,考察提取时间对提取率的影响。

##### 1.3.3.4 提取温度对辣木籽油提取率的影响

准确称取 5.00 g 辣木籽粉末,加 40 mL 超纯水,沸水浴煮沸 10 min,冷却至常温(22 ℃~26 ℃)后,用 6 mol/L 盐酸调整 pH 值为 3.5,加入 0.50%果胶酶,超声功率 60 W,提取时间 10 h,提取温度分别为 30、40、50、60、70 ℃,考察提取温度对提取率的影响。

##### 1.3.3.5 超声功率对辣木籽油提取率的影响

准确称取 5.00 g 辣木籽粉末,加 40 mL 超纯水,沸水浴煮沸 10 min,冷却至常温(22 ℃~26 ℃)后,用 6 mol/L 盐酸调整 pH 值为 3.5,加入 0.50%果胶酶,提取温度 50 ℃,提取时间 10 h,超声功率分别为 30、40、60、80、100 W,考察超声功率对提取率的影响。

#### 1.3.4 响应面法优化试验

以提取辣木籽油的单因素试验结果为依据,以影响辣木籽油提取率较大的提取时间、提取温度、超声功率为试验因素,辣木籽油提取率为响应值,以 Box-Behnken 为原理建立三因素三水平的中心组合试验。响应面法试验因素水平编码见表 1。

表 1 Box-Behnken 中心组合试验因素与水平  
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken experiment

水平	因素		
	A 提取时间/h	B 提取温度/℃	C 超声功率/W
-1	7.5	45	70
0	10.0	50	80
1	12.5	55	90

#### 1.4 数据处理

响应面试验设计及分析采用 Design Expert 8.0,采

用 SPSS 22.0 进行显著性分析,采用 Origin 8.6 绘图<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

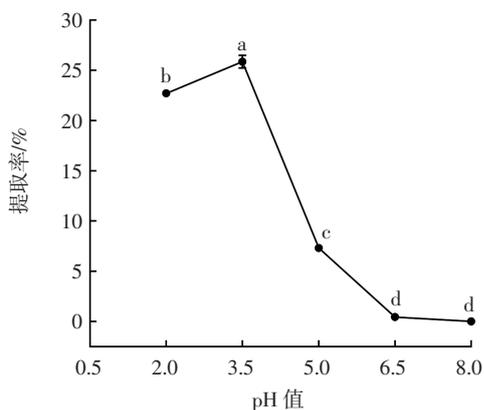
### 2.1 辣木籽含油率的测定结果

利用索氏提取法提取的辣木籽含油率为 36.67%,符合相关文献报道(含量为 36.10%~37.4%)<sup>[6,10,12]</sup>。因此,该测定值可继续进行下一步试验数据的分析和处理。

### 2.2 单因素试验结果

#### 2.2.1 pH 值对提取率的影响

pH 值对提取率的影响如图 1 所示。



不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

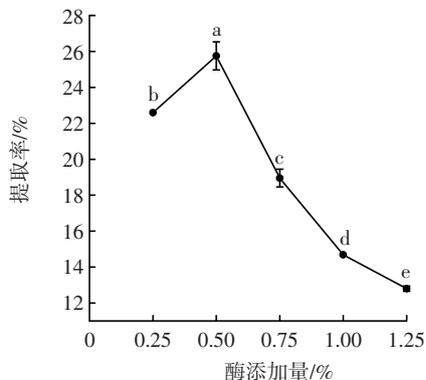
图 1 pH 值对提取率的影响

Fig.1 Effects of pH on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

如图 1 所示,随着 pH 值的升高,提取率先升高后降低。当 pH 值为 3.5 时,提取率最大,为 25.85%。因此,超声辅助水酶法提取辣木籽油的最适 pH 值应控制在 3.5 左右。

#### 2.2.2 果胶酶添加量对提取率的影响

果胶酶添加量对提取率的影响见图 2。



不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

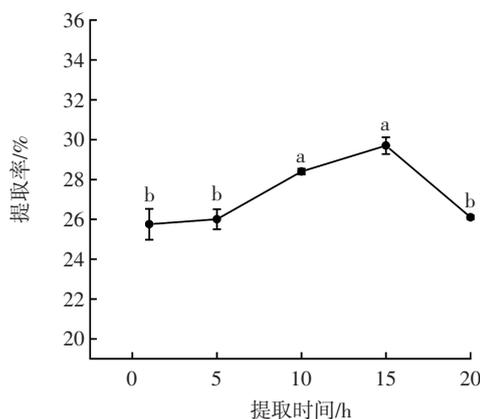
图 2 果胶酶添加量对提取率的影响

Fig.2 Effects of enzyme concentration on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

由图 2 可知,当果胶酶添加量为 0.50% 时,辣木籽油提取率最高,为 25.75%。当果胶酶添加量低于或大于 0.50% 时,辣木籽油的提取率均降低。这是由于随着酶添加量的增加,酶与底物接触机会增大,酶解细胞壁彻底,使油脂从细胞中分离出来提取效率升高。而当酶量添加到一定程度时,过量的酶会导致多糖降解,致使提取效率降低。因此,超声辅助水酶法提取辣木籽油的最适果胶酶添加量为 0.50%。

#### 2.2.3 提取时间对提取率的影响

提取时间对提取率的影响见图 3。



不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图 3 提取时间对提取率的影响

Fig.3 Effects of extraction time on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

由图 3 可知,随着提取时间的延长,辣木籽油提取率呈现先上升后下降的趋势。当提取时间为 15 h 时,提取率最高为 29.7%,然而提取 10 h 后,随着提取时间的延长,辣木油提取率增加已不太明显,对其进行方差分析发现,10 h 与 15 h 之间辣木籽油提取率已无明显差异,进一步延长提取时间已没有太大的意义。因而,选择 10 h 为超声辅助水酶法提取辣木籽油的最佳提取时间。

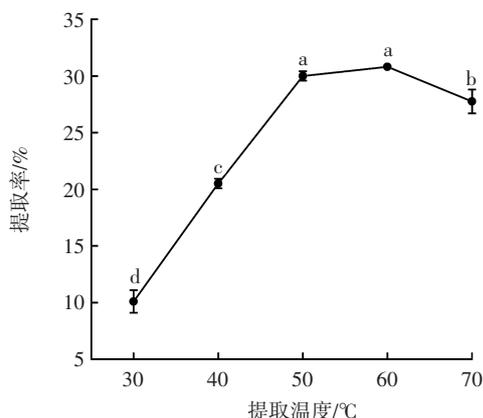
#### 2.2.4 提取温度对提取率的影响

提取温度对提取率的影响见图 4。

由图 4 可知,随着提取温度的升高,辣木籽油提取率呈现先上升后下降的趋势,当提取温度达到 60 °C 时,辣木籽油提取率最高,达到 30.8%。过低或过高的温度均会影响酶的活性,甚至可能使酶蛋白变性,进而影响酶的催化反应速度,从而降低提取率。鉴于 50 °C 与 60 °C 的提取率无显著性差异,因此,选择超声辅助水酶法提取辣木籽油的最佳提取温度为 50 °C。

#### 2.2.5 超声功率对提取率的影响

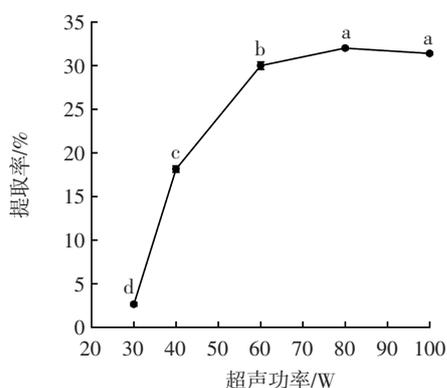
超声功率对提取率的影响见图 5。



不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图4 提取温度对提取率的影响

Fig.4 Effects of extraction temperature on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil



不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图5 超声功率对提取率的影响

Fig.5 Effects of ultrasonic power on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

由图5可知,随着超声功率的增加,辣木籽油提取率呈先上升后下降的趋势,当超声功率为80W时,辣木籽油提取率最大,可能是由于随着超声功率的增加,超声波产生高速、强烈的空化效应和搅拌作用,破坏了油脂细胞,使溶剂渗透到油脂细胞中将油脂溶出,当超声功率达到一定值时,油脂细胞内外渗透压达到平衡,增大功率反而不利于油脂的浸出<sup>[8]</sup>,因此最佳的超声功率为80W。

### 2.3 响应面试验结果

#### 2.3.1 响应面设计结果

在单因素试验基础上,采用Box-Behnken中心组合试验设计对辣木籽油提取进行优化,响应面设计及结果见表2。

通过Design Expert 8.0软件对表2试验数据进行多元回归拟合,得到与A、B、C3个因素相关的辣木籽油提取率Y的二次多项回归模型为 $Y = 29.15 + 2.27A +$

表2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken experimental design and results

试验号	A 提取时间	B 提取温度	C 超声功率	提取率/%
1	0	0	0	28.37
2	0	0	0	29.20
3	0	-1	-1	18.46
4	0	1	1	28.10
5	-1	1	0	20.11
6	1	0	-1	22.87
7	0	-1	1	19.56
8	-1	0	1	21.49
9	0	0	0	28.93
10	0	0	0	28.10
11	1	1	0	31.13
12	1	-1	0	19.83
13	-1	-1	0	19.56
14	0	1	-1	25.62
15	-1	0	-1	21.76
16	0	0	0	31.13
17	1	0	1	27.27

$3.44B + 0.96C + 2.69AB + 1.17AC + 0.35BC - 3.04A^2 - 3.45B^2 - 2.76C^2$ , 方程中二次项系数的正、负反映影响方向,系数为正,表示与响应值正相关,反之为负相关。由于该自变量的二次项系数均为负值,推断出该方程所代表的抛物面开口向下,具有极大值点,符合实际意义,能进行优化分析。对该模型进行显著性方差分析<sup>[13]</sup>,结果见表3。

表3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of the regression model

变异来源	离差平方和	自由度	均方	F值	p值	显著性
模型	313.59	9	34.84	24.41	0.000 2	**
A 提取时间	41.31	1	41.31	28.94	0.001 0	**
B 提取温度	94.88	1	94.88	66.46	<0.000 1	**
C 超声功率	7.43	1	7.43	5.21	0.056 5	
AB	28.89	1	28.89	20.24	0.002 8	**
AC	5.45	1	5.45	3.82	0.091 6	
BC	0.48	1	0.48	0.33	0.581 7	
A <sup>2</sup>	38.86	1	38.86	27.22	0.001 2	**
B <sup>2</sup>	50.13	1	50.13	35.12	0.000 6	**
C <sup>2</sup>	32.09	1	32.09	22.48	0.002 1	**
残差	9.99	7	1.43			
失拟项	4.31	3	1.44	1.01	0.475 0	不显著
纯误差	5.68	4	1.42			
总离差	323.58	16				

注:\*\*表示差异极显著( $p < 0.01$ )。

在统计学上,模型的决定系数 $R^2$ 表示特定模型中X值的变化决定Y的变化, $R^2$ 值越大(max=1.000 0),说明模型具有的显著性越高,p值进一步说明 $R^2$ 值的有效性。由表3可知,回归模型的F值为24.41,p值<

0.01,表明回归模型极显著;失拟项  $p$  值为 0.475 0 > 0.05,表明差异不显著,说明该模型与试验有良好的拟合性<sup>[14]</sup>。此模型的  $R^2=0.969 1, R^2_{Adj}=0.929 4$ ,能够解释试验 92.94%的响应值变异,表明模型与真实数据拟合程度较好,具有实践指导意义,因此可用该模型优化辣木籽油的提取工艺<sup>[15]</sup>。

根据  $p$  值的大小可以看出模型一次项  $A$ 、 $B$  对响应值影响极显著 ( $p < 0.01$ ),  $C$  对响应值影响不显著 ( $p > 0.05$ );模型交互项  $AB$  影响极显著 ( $p < 0.01$ ),  $AC$ 、 $BC$  影响不显著 ( $p > 0.05$ );二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  影响均极显著 ( $p <$

0.01)。根据  $F$  值可以看出,各因素对辣木籽油提取率的影响顺序为提取温度( $B$ )>提取时间( $A$ )>超声功率( $C$ )。

### 2.3.2 响应面试验结果分析

不同试验因素的交互作用对辣木籽油提取率的影响,见图 6~图 8。响应曲面的坡度越陡峭,反映处理因素的改变对响应值的影响越深;相反,坡面越平缓,影响程度越低。响应面在底面的投影,即等高线图,该图的形状反映两因素交互效应的强弱,越接近椭圆形表示交互作用越明显,圆形则为交互作用不明显<sup>[16]</sup>。

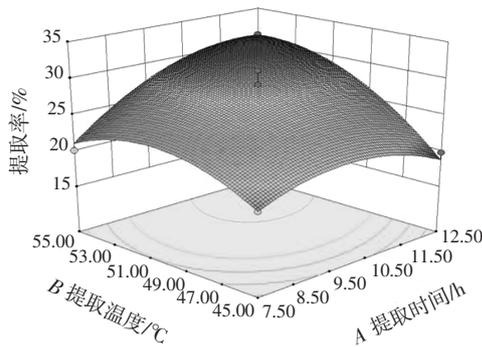


图 6 提取温度和提取时间对辣木籽油提取率的影响

Fig.6 Effects of extraction temperature and time on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

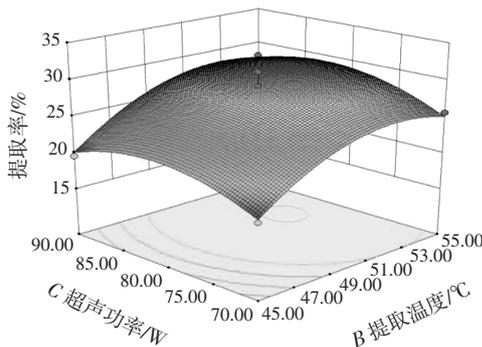
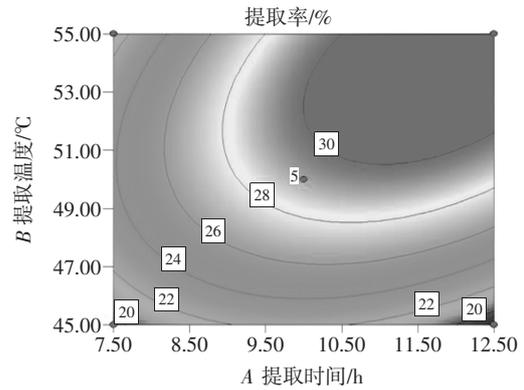


图 7 提取温度和超声功率对辣木籽油提取率的影响

Fig.7 Effects of extraction temperature and ultrasonic power on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

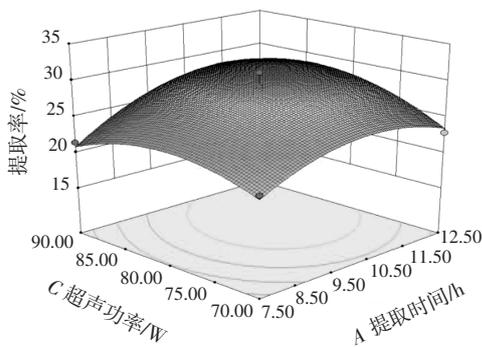
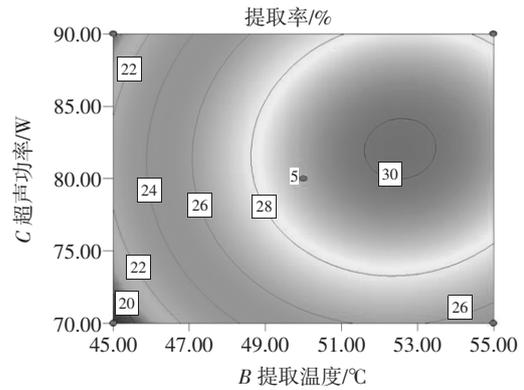


图 8 提取时间和超声功率对辣木籽油提取率的影响

Fig.8 Effects of time and ultrasonic power on extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil

由图6可知,提取时间和提取温度交互项响应面坡度较陡,说明两者交互作用对辣木籽油提取率有较大影响。由等高线可知,提取温度对响应值的影响大于提取时间,且两者间交互作用显著。上述分析与模型回归的方差分析基本一致。

由图7可知,提取温度和超声功率对辣木籽油提取率交互作用不显著,当超声功率一定时,随着提取温度的升高,提取率先升高后降低;当提取温度一定时,随着超声功率的增大,提取率变化不大。由等高线图可知,超声功率对辣木籽油提取率的影响相对较小。

由图8可知,提取时间和超声功率对辣木籽油提取率交互作用不显著,当超声功率一定时,随着提取时间的延长,提取率先升高后降低,当提取时间一定时,随着超声功率的增大,提取率变化不大。

根据所建立的模型得到最佳工艺条件为提取时间 12.06 h、提取温度 54.20 °C、超声功率 84.02 W,此时辣木籽油提取效率为 31.72%。

### 2.3.3 验证试验

为了进一步确定提取辣木籽油的最佳工艺条件,利用 Design-Expert 8.0 继续分析。根据模型预测结果进行近似验证试验,并综合经济原则和实际操作的可行性,调整最优试验条件为提取时间 12 h、提取温度 54 °C、超声功率为 84 W,进行 3 次平行试验以确保试验的准确性,此时辣木籽油提取率为 30.56%,与预测值无显著性差异,说明该响应面法优化辣木籽油的提取条件具有可行性。

## 3 讨论与结论

辣木籽油具有良好的感官品质、较好的营养保健功能、良好的热稳定性,具有替代传统煎炸植物油的应用前景。Gharsallah 等<sup>[17]</sup>研究了辣木籽的化学组成及油脂特性,辣木种子中蛋白质、纤维、灰分、总糖和脂肪的含量分别为 33.39%、3.90%、3.10%、10.13%和 41.7%。辣木籽油中的脂肪酸主要是油酸(C18:1),含量为 73.36%,这与徐华等<sup>[4]</sup>对辣木籽油脂肪酸成分测定结果(油酸含量 75.77%)、李美萍等<sup>[9]</sup>对辣木籽油的脂肪酸组成测定结果(油酸含量 65.94%)基本一致;种子油中还含有大量的生育酚,以  $\alpha$ -生育酚为主(51%)<sup>[17]</sup>。由于辣木籽油含有大量的不饱和脂肪酸和大量生育酚,使其具有良好的抗氧化性、耐煎炸性、降低患冠心病风险的优良性质<sup>[18]</sup>。

本试验在单因素试验的基础上,采用响应面优化酶法辅助超声提取辣木籽油,最佳工艺为 5.00 g 辣木籽粉末,加 40 mL 超纯水,果胶酶添加量 0.50%,54 °C 酶

解 12 h,超声功率 84 W,此时辣木籽油提取率为 30.56%。Mat Yusoff 等<sup>[18]</sup>使用复合酶(蛋白酶:纤维素酶=3:1)提取辣木籽油,当料液比 1:8 (w/w)、pH4.5、酶添加量 2%、40 °C 酶解 1 h 时,辣木籽油的提取率为 70%。本研究提取率远低于 Mat Yusoff 等<sup>[18]</sup>使用复合酶的提取率,可能是因为辣木籽细胞中含有大量蛋白质,蛋白质在水溶液中发生乳化,从而包裹油分子,使油不容易被提取,蛋白酶对脂多糖、脂蛋白具有分解作用,有利于油脂从复合体中释放,从而提高提取率<sup>[20]</sup>。本试验中使用果胶酶加超声进行提取,提取率比邓韦丝等<sup>[19]</sup>单用果胶酶的高,说明超声有助于辣木籽油的浸出,可能是超声波的空化、乳化与击碎等联合作用破坏了组织结构,加速了油类物质的浸出。

## 参考文献:

- [1] 张秀芬,何文,谢君锋,等.辣木茶多酚的提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J].化学与生物工程,2019,36(4):37-41.  
ZHANG Xiufen, HE Wen, XIE Junfeng, et al. Optimization in extraction process of *Moringa oleifera* tea polyphenols and their antioxidant activity[J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36(4): 37-41.
- [2] TORONDEL B, OPARE D, BRANDBERG B, et al. Efficacy of *Moringa oleifera* leaf powder as a hand-washing product: A crossover controlled study among healthy volunteers[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2014, 14: 57.
- [3] NWIDU L L, ELMORSY E, APRIOKU J S, et al. *In vitro* anti-cholinesterase and antioxidant activity of extracts of *Moringa oleifera* plants from rivers state, Niger delta, Nigeria[J]. Medicines (Basel, Switzerland), 2018, 5(3): 71.
- [4] 徐华,张茹,刘连亮,等.辣木籽油微波提取工艺优化及其脂质分析[J].核农学报,2018,32(7):1393-1399.  
XU Hua, ZHANG Ru, LIU Lianliang, et al. Optimization of microwave-assisted extraction technology of *Moringa oleifera* seed oil and analysis of its lipid composition[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(7): 1393-1399.
- [5] 王铁旦,杨敏,杨芳,等.辣木籽油功能性成分检测及多元统计分析[J].食品科学,2020,41(16):145-150.  
WANG Tiedan, YANG Min, YANG Fang, et al. Determination and multivariate statistical analysis of functional components of *Moringa oleifera* seed oil[J]. Food Science, 2020, 41(16): 145-150.
- [6] 丁鹏霞,李蓉,李美萍,等.超声波辅助提取辣木籽油的工艺优化及其脂肪酸分析[J].山西农业科学,2018,46(3):453-457.  
DING Pengxia, LI Rong, LI Meiping, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of *Moringa oleifera* seed oil and analysis of its fatty acid composition[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(3): 453-457.
- [7] NADEEM M, IMRAN M. Promising features of *Moringa oleifera* oil: Recent updates and perspectives[J]. Lipids in Health and Disease, 2016, 15(1): 212.

- [8] 余芳, 杨爱萍, 石雪萍, 等. 辣木籽营养成分测定及多糖提取工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 82-85.  
YU Fang, YANG Aiping, SHI Xueping, et al. The determination of nutritional components and polysaccharide extraction technology of *Moringa* seeds[J]. The Food Industry, 2020, 41(11): 82-85.
- [9] 李美萍, 李彩林, 张生万, 等. 响应面法优化辣木籽油超声辅助提取工艺及其脂肪酸组成[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 14-18.  
LI Meiping, LI Cailin, ZHANG Shengwan, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction process of *Moringa oleifera* seed oil by response surface methodology and its fatty acid composition[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 14-18.
- [10] 王标诗, 胡小军, 张卫国, 等. 湿法超微粉碎结合水酶法提取辣木籽油及其氧化稳定性分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 19-24.  
WANG Biaoshi, HU Xiaojun, ZHANG Weiguo, et al. Extraction of *Moringa oleifera* seed oil by aqueous enzymatic method combined with wet superfine comminution pretreatment and its oxidation stability[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 19-24.
- [11] 沈春红, 李金星, 何越雯, 等. 响应面法优化厚朴花总酚浸提工艺[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 69-76.  
SHEN Chunhong, LI Jinxing, HE Yuewen, et al. Optimization of total phenol extraction from *Magnolia officinalis* flower as determined by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2021, 42(13): 69-76.
- [12] 余建兴, 马李一, 赵春, 等. 超声波辅助提取辣木油的工艺研究[J]. 食品科学, 2009, 30(6): 64-67.  
YU Jianxing, MA Liyi, ZHAO Chun, et al. Study on ultrasonic-assisted extraction process of *Moringa oleifera* seed oil[J]. Food Science, 2009, 30(6): 64-67.
- [13] 吴雅露, 王心怡, 泮张彬, 等. 响应面法优化红巨苋多酚的提取工艺及抗氧化性[J]. 粮食与饲料工业, 2019(7): 40-46.  
WU Yalu, WANG Xinyi, PAN Zhangbin, et al. Extraction optimization of polyphenols from red giant amaranth by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Cereal & Feed Industry, 2019(7): 40-46.
- [14] 张弘弛, 付莉媛, 周凤, 等. 响应面法优化酶-超声波辅助提取恒山黄芪总皂苷工艺[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 116-122.  
ZHANG Hongchi, FU Liyuan, ZHOU Feng, et al. Optimization of enzyme-ultrasonic assisted extraction of total saponins from *Astragalus membranaceus* using response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2021, 42(12): 116-122.
- [15] 陈文璐, 刘妍妍, 巩燕妮. 响应面法优化干酪风味发酵乳的发酵工艺[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 235-242.  
CHEN Wenlu, LIU Yanyan, GONG Yanni. Optimization of fermentation processing of cheese flavor fermented milk by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 235-242.
- [16] 徐彩红, 马丽鑫, 李桂杰, 等. 响应面法优化米糠多酚的醇提工艺[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 194-198.  
XU Caihong, MA Lixin, LI Guijie, et al. Optimization of ethanol extraction technique of polyphenols from rice bran by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(16): 194-198.
- [17] GHARSALLAH K, REZIG L, MSAADA K, et al. Chemical composition and profile characterization of *Moringa oleifera* seed oil[J]. South African Journal of Botany, 2021, 137: 475-482.
- [18] MAT YUSOFF M, GORDON M H, EZEHO O, et al. Aqueous enzymatic extraction of *Moringa oleifera* oil[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 400-408.
- [19] 邓韦丝, 王敏, 吕秋冰. 复合酶法提取辣木籽油及其体外抗氧化活性[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(12): 67-72.  
DENG Weisi, WANG Min, LÜ Qiubin. Study on composite enzymatic extraction and *in vitro* anti-oxidative of *Moringa oleifera* seed oil[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(12): 67-72.
- [20] 张岩春, 于国萍. 关于大豆酶法制油的复合酶筛选与复合的研究[J]. 粮食加工, 2004, 29(3): 53-56.  
ZHANG Yanchun, YU Guoping. The study of compound enzyme selecting and compounding of enzymatic extracting oil from soybean[J]. Grain Processing, 2004, 29(3): 53-56.

加工编辑:冯娜

收稿日期:2021-08-13