

# 超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油工艺优化

蒋雨桥<sup>1</sup>, 赵仲恺<sup>2</sup>, 张文斌<sup>1</sup>

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 新疆大学 生命科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**为了得到品质优良的元宝枫籽油产品,采用超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油,以油脂萃取率为指标,通过单因素试验和响应面试验优化工艺条件,并对所得元宝枫籽油的脂肪酸组成、理化指标、甾醇和生育酚含量进行分析。结果表明:超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的最优工艺条件为原料粒度 380~830  $\mu\text{m}$ (20~40 目)、二氧化碳流量 28 L/h、萃取温度 37  $^{\circ}\text{C}$ 、萃取压力 44 MPa、萃取时间 100 min,在该条件下油脂萃取率达(98.7 $\pm$ 0.2)%;元宝枫籽油中神经酸含量高达 9.34%,总不饱和脂肪酸含量为 86.7%,各项理化指标均符合相关标准,总甾醇和总生育酚含量分别为 988.1  $\mu\text{g/g}$  和 991.4  $\mu\text{g/g}$ ,综合品质优于正己烷萃取和低温压榨制取的油脂。综上,超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的萃取率高,产品品质优良,是一种绿色、高效的提油技术。

**关键词:**元宝枫籽油;超临界二氧化碳萃取;脂肪酸组成;油脂品质

中图分类号:TS224.4;TS225.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)09-0010-06

## Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of *Acer truncatum* seed oil

JIANG Yuqiao<sup>1</sup>, ZHAO Zhongkai<sup>2</sup>, ZHANG Wenbin<sup>1</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;

2. College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** In order to obtain high-quality *Acer truncatum* seed oil, the supercritical carbon dioxide extraction method was used to extract *Acer truncatum* seed oil, and the process conditions were optimized through single factor experiment and response surface methodology using the oil extraction rate as an indicator. The fatty acid composition, physicochemical indexes, and contents of sterol and tocopherol of the *Acer truncatum* seed oil were analyzed. The results showed that the optimal process conditions for supercritical carbon dioxide extraction of *Acer truncatum* seed oil were particle size 380–830  $\mu\text{m}$ (20–40 meshes), carbon dioxide flow rate 28 L/h, extraction temperature 37  $^{\circ}\text{C}$ , extraction pressure 44 MPa, and extraction time 100 min. Under these conditions, the oil extraction rate reached (98.7 $\pm$ 0.2)%. The nervonic acid content in *Acer truncatum* seed oil was as high as 9.34%, and the total unsaturated fatty acid content was 86.7%. The physicochemical indexes of *Acer truncatum* seed oil were in line with the relevant standards, and its total sterol and total tocopherol contents were 988.1  $\mu\text{g/g}$  and 991.4  $\mu\text{g/g}$ , respectively. The comprehensive quality of *Acer truncatum* seed oil extracted by supercritical carbon dioxide extraction was better than that of the oil extracted by hexane extraction and low-temperature pressing. In summary, the supercritical carbon dioxide extraction method has a high oil extraction rate

and excellent product quality, which is a green and efficient oil extraction technology.

**Key words:** *Acer truncatum* seed oil; supercritical carbon dioxide extraction; fatty acid composition; oil quality

收稿日期:2023-12-21;修回日期:2024-06-23

基金项目:“十四五”国家重点研发计划(2021YFD2100301-04);  
新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02009-4)

作者简介:蒋雨桥(1999),男,在读硕士,研究方向为超临界二氧化碳制油工艺及甘油三酯改性(E-mail)6210113184@stu.jiangnan.edu.cn。

通信作者:张文斌,教授,硕士生导师(E-mail)wbzhang@jiangnan.edu.cn。

元宝枫(*Acer truncatum*),因其种子形似元宝而得名,为槭树科槭属落叶乔木,是一种兼具观赏价

值、油用价值和药用价值的植物,主要分布于我国东北、华北、华中地区,在浙江、安徽、河南、云南等省份也有种植<sup>[1]</sup>。元宝枫种仁含油42%~48%,元宝枫籽油中不饱和脂肪酸含量达85%以上,功能性脂肪酸神经酸含量为3%~9%<sup>[2]</sup>。2011年3月中华人民共和国卫生部(现国家卫生健康委员会)批准元宝枫籽油为新资源食品<sup>[3]</sup>。神经酸,为顺-15-二十四碳一烯酸,别名鲨油酸、鲨鱼酸,是一种 $\omega$ -9单不饱和脂肪酸,最早发现于动物的脑组织中。神经酸是脑组织中神经细胞的核心成分,是神经细胞生长、发育和维持的必不可少的物质,具有促进神经细胞生长发育和修复神经末梢活性的功能,不仅有利于新生儿大脑发育,而且对老年人阿尔茨海默病、帕金森综合征等脑部疾病具有良好的辅助治疗效果<sup>[4]</sup>。

目前,常用的制油工艺有压榨法和溶剂浸出法<sup>[5]</sup>,此外还有水媒法<sup>[6]</sup>、亚临界萃取法<sup>[7]</sup>、超临界二氧化碳萃取法<sup>[8]</sup>等。压榨法优点是操作简单、污染较小,但热榨法因加工温度高,会导致油脂品质下降,低温压榨法虽条件温和,但与热榨法一样具有饼残油率高的问题<sup>[9]</sup>。溶剂浸出法优点是油脂提取率高,但需经过复杂的精炼处理才能得到成品油,且加工过程中存在环境和健康风险<sup>[10]</sup>。超临界二氧化碳是指在二氧化碳温度、压力超过其临界点(7.38 MPa、31.06℃)的状态,其兼具气体的黏度与扩散能力和液体的密度与溶解能力,对非极性溶质具有很强的选择性,适合用来萃取油料中的油脂。超临界二氧化碳萃取法具有操作条件温和、油脂提取率高、原油品质好、无溶剂残留、油脂有益伴随物损失小、污染小的优点,是一种绿色的食用植物油加工方法<sup>[8]</sup>。然而该方法的设备投资大、维护成本高、运行能耗高,所以往往用于萃取高价值、热敏性的植物油、精油、色素等成分。根据市场调研结果,元宝枫籽的售价较高,约300元/kg,而市售元宝枫籽油的价格高达1600元/kg,从其中提取的神经酸产品售价更是高达2万~3万元/kg,因此元宝枫籽属于高价值油料,适合使用超临界二氧化碳萃取其中的油脂。

本研究采用超临界二氧化碳萃取法萃取元宝枫籽油,通过单因素试验和响应面法优化了萃取工艺条件,对萃取元宝枫籽油的脂肪酸组成、理化指标及甾醇、生育酚含量进行测定,以期为元宝枫籽油的大规模产业化生产提供科学的理论依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

元宝枫籽(产地为河北);二氧化碳(纯度 $\geq$

99.95%),无锡市鑫锡仪科技有限公司;正己烷、甲醇,色谱级,赛默飞世尔科技公司;石油醚、乙醚、95%乙醇、三氯甲烷、冰乙酸、碘化钾、氯化碘、氢氧化钾、可溶性淀粉,分析级,国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

超临界二氧化碳萃取设备(萃取釜容积1 L,选择二氧化碳流量10~28 L/h、萃取温度35~65℃、萃取压力15~45 MPa),南通华达制药设备科技有限公司;RG311榨油机,深圳香聚智能有限公司;中药磨粉机,合肥荣事达电子电器集团有限公司;自动索氏抽提机,上海纤检仪器有限公司;Pegasus BT气相色谱-高通量飞行时间质谱仪,美国力可公司;电热鼓风干燥箱,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 原料预处理

元宝枫籽经粉碎,在电热鼓风干燥箱中于65℃烘干至水分含量为2%,分别过830  $\mu$ m(20目)、380  $\mu$ m(40目)、180  $\mu$ m(80目)筛备用。

#### 1.2.2 元宝枫籽油的超临界二氧化碳萃取

在萃取釜中装入300 g经预处理的元宝枫籽粉,密封萃取釜,调节二氧化碳流量,加压至所需压力开始萃取,在分离压力5 MPa、分离温度50℃下从分离釜中收集元宝枫籽油。

按GB 5009.6—2016测定原料和粕的含油量,根据公式(1)计算油脂萃取率。

$$Y = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:Y为油脂萃取率; $m_1$ 为原料中油脂的质量; $m_2$ 为粕中油脂的质量。

#### 1.2.3 元宝枫籽油的正己烷萃取

取1.2.1中经预处理的元宝枫籽粉[粒度380~830  $\mu$ m(20~40目)],加入其10倍质量的正己烷,在50℃下浸泡萃取2 h,过滤后50℃真空旋转蒸干正己烷,得到元宝枫籽油。

#### 1.2.4 元宝枫籽油的低温压榨制取

取1.2.1中经预处理的元宝枫籽粉[粒度380~830  $\mu$ m(20~40目)],使用榨油机在50℃下压榨制油,经离心过滤后得到元宝枫籽油。

#### 1.2.5 元宝枫籽油品质指标的测定

酸值按GB 5009.229—2016测定;过氧化值按GB 5009.227—2016测定;碘值按GB/T 5532—2022测定;皂化值按GB/T 5534—2008测定;脂肪酸组成按GB 5009.168—2016测定;甾醇含量按GB/T

25223—2010 测定;生育酚含量按 GB/T 26635—2011 测定。

### 1.2.6 数据处理

所有试验均在相同条件下重复 3 次,使用 SPSS 26.0 软件对试验数据进行方差分析,使用 Design Expert 13 软件设计分析响应面试验,使用 Origin Pro 2022 软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的单因素试验

#### 2.1.1 萃取时间对油脂萃取率的影响

按 1.2.2 方法,在原料粒度 380 ~ 830  $\mu\text{m}$  (20 ~ 40 目)、萃取温度 45  $^{\circ}\text{C}$ 、萃取压力 35 MPa、二氧化碳流量 28 L/h 的条件下萃取元宝枫籽油,每隔 20 min 收集一次油脂,共萃取 160 min,考察萃取时间对油脂萃取率的影响,结果如图 1 所示。

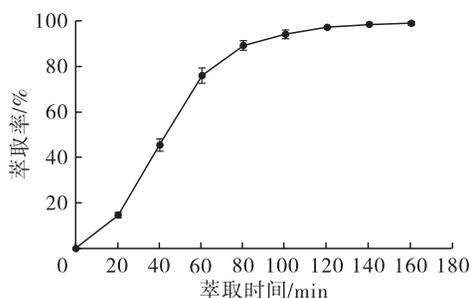


图 1 萃取时间对油脂萃取率的影响

超临界二氧化碳萃取油脂的过程主要分 4 个阶段,分别是溶剂浸润期、恒定速率期、速率下降期和扩散控制期<sup>[11]</sup>。由图 1 可知:在溶剂浸润期(0 ~ 20 min),超临界二氧化碳逐渐浸润原料,萃取速率较慢但逐渐上升;在恒定速率期(20 ~ 60 min),萃取速率几乎恒定不变,萃取方式以对流传质效应为主导;在速率下降期(60 ~ 100 min),由于原料中油脂含量不断减少,对流传质逐渐减弱,导致萃取速率逐渐下降;在扩散控制期(100 ~ 160 min),原料中油脂几乎被全部萃取,剩余的少量油脂依靠扩散机制进入超临界二氧化碳中,速度非常缓慢。萃取时间的选择关系到最终产品的经济效益,选择速率下降期和扩散控制期的交界时间 100 min 为最佳萃取时间,此时油脂萃取率为(94.1  $\pm$  1.3)%,这样既可以保证原料中油脂的充分利用,生产成本也相对较低。

#### 2.1.2 原料粒度对油脂萃取率的影响

按 1.2.2 方法,在萃取温度 45  $^{\circ}\text{C}$ 、萃取压力 35 MPa、二氧化碳流量 28 L/h、萃取时间 100 min 的条件下萃取元宝枫籽油,考察原料粒度对油脂萃取率的影响,结果见图 2。

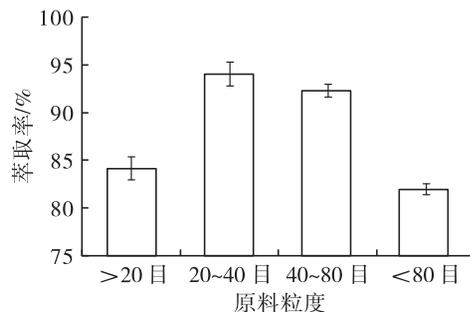


图 2 原料粒度对油脂萃取率的影响

粒度越小,原料与超临界二氧化碳的接触面积越大,有助于加快超临界二氧化碳在颗粒中的浸润作用,从而提升萃取速率;然而,过小的粒度会导致原料颗粒在高压下聚集,从而影响超临界二氧化碳对这些聚集体的渗透,降低萃取速率。因此,选择合适的粒度十分重要<sup>[12]</sup>。由图 2 可知,原料粒度在 20 ~ 40 目时油脂萃取率最高,为(94.1  $\pm$  1.3)%,相比粒度大于 20 目的原料提升 11.7%,相比小于 80 目的原料提升 14.7%。因此,选择 20 ~ 40 目作为最佳原料粒度。

#### 2.1.3 二氧化碳流量对油脂萃取率的影响

按 1.2.2 方法,在原料粒度 380 ~ 830  $\mu\text{m}$  (20 ~ 40 目)、萃取温度 45  $^{\circ}\text{C}$ 、萃取压力 35 MPa、萃取时间 100 min 的条件下萃取元宝枫籽油,考察二氧化碳流量对油脂萃取率的影响,结果见图 3。

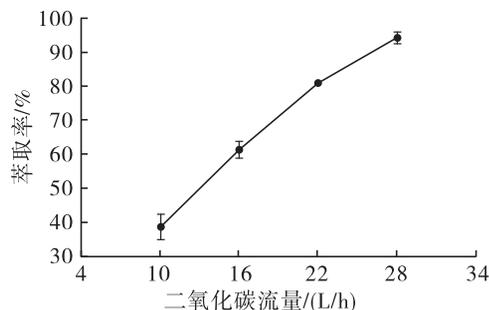


图 3 二氧化碳流量对油脂萃取率的影响

更高的二氧化碳流量有助于加快原料中油脂与溶剂之间的溶质传递,从而提升萃取速率<sup>[13]</sup>,但选择二氧化碳流量也需要考虑设备的实际工况。由图 3 可知,二氧化碳流量在 10 ~ 28 L/h 的范围内,油脂萃取率与二氧化碳流量近似成正比关系。因此,选择 28 L/h 作为最佳二氧化碳流量。

#### 2.1.4 萃取温度对油脂萃取率的影响

按 1.2.2 方法,在原料粒度 380 ~ 830  $\mu\text{m}$  (20 ~ 40 目)、萃取压力 35 MPa、二氧化碳流量 28 L/h、萃取时间 100 min 的条件下萃取元宝枫籽油,考察萃取温度对油脂萃取率的影响,结果见图 4。

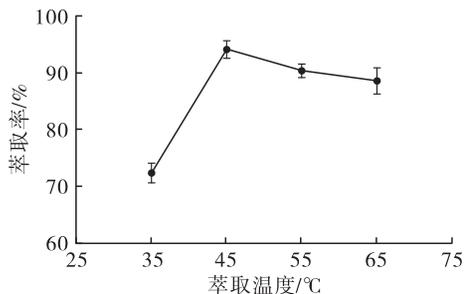


图4 萃取温度对油脂萃取率的影响

随着温度的升高,分子热运动加快,超临界二氧化碳更容易与油脂接触,从而提升萃取速率;然而,超临界二氧化碳的密度随着温度的升高而下降,会导致其对油脂的溶解能力下降,也会造成热敏性油脂伴随物的损失<sup>[14]</sup>,因此需合理控制萃取温度。由图4可知:萃取温度从35℃升高到45℃时,油脂萃取率提升明显,提升了30.1%;当萃取温度继续升高到65℃时,油脂萃取率缓慢下降。因此,选择45℃作为最佳萃取温度。

#### 2.1.5 萃取压力对油脂萃取率的影响

按1.2.2方法,在原料粒度380~830 μm(20~40目)、萃取温度45℃、二氧化碳流量28 L/h、萃取时间100 min的条件下萃取元宝枫籽油,考察萃取压力对油脂萃取率的影响,结果见图5。

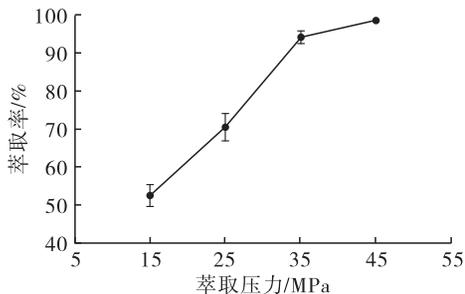


图5 萃取压力对油脂萃取率的影响

超临界二氧化碳密度会随着压力的增加而增加,从而对原料中油脂的溶解能力更强;此外,更高的压力也会使原料的细胞壁破裂更多,从而提升萃取速率<sup>[15]</sup>。由图5可知,油脂萃取率随萃取压力的增加而增加,萃取压力增加到45 MPa时,油脂萃取率最大,为(98.5±0.1)%。因此,选择45 MPa作为最佳萃取压力。

### 2.2 超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的响应面试验

#### 2.2.1 试验设计及结果

在单因素试验基础上,根据Box-Behnken设计响应面试验以进一步优化超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的工艺。原料粒度的选择是一个大致的范围,难以精确获得想要的粒度,其不合作为主要考

察因素;在萃取过程中,油脂萃取率总是随萃取时间延长而上升,萃取时间同样也不适合作为考察因素。故将原料粒度确定为380~830 μm(20~40目),萃取时间确定为100 min,选择二氧化碳流量(A)、萃取温度(B)和萃取压力(C)作为考察因素,油脂萃取率(Y)作为响应值,每个因素取3个水平进行响应面试验。响应面试验因素及水平见表1,响应面试验设计及结果见表2。

表1 响应面试验因素及水平

水平	A 二氧化碳流量/(L/h)	B 萃取温度/°C	C 萃取压力/MPa
-1	16	35	25
0	22	45	35
1	28	55	45

表2 响应面试验设计及结果

试验号	A	B	C	Y/%
1	0	0	0	80.9
2	0	-1	-1	80.2
3	-1	1	0	62.5
4	0	-1	1	84.8
5	1	1	0	90.3
6	1	0	-1	97.4
7	0	1	1	84.2
8	-1	-1	0	60.2
9	0	0	0	80.9
10	0	1	-1	79.2
11	-1	0	-1	60.2
12	1	-1	0	96.4
13	0	0	0	80.9
14	0	0	0	83.9
15	1	0	1	98.5
16	-1	0	1	65.0
17	0	0	0	80.9

#### 2.2.2 响应面试验分析

使用Design Expert 13软件对表2中的数据进行多元回归拟合,得到响应值对自变量的回归方程: $Y = -70.8534 + 8.5670A + 1.7099B - 0.7488C - 0.0350AB - 0.0154AC + 0.0001BC - 0.0829A^2 - 0.0116B^2 + 0.0177C^2$ 。

回归方程的方差分析见表3。

由表3可以看出,该回归模型极显著( $p < 0.01$ ),失拟项不显著( $p > 0.05$ ),说明该模型可信度较高。一次项A(二氧化碳流量)、C(萃取压力)、二次项 $A^2$ 对油脂萃取率的影响极显著( $p < 0.01$ ),交互项AB

及二次项  $C^2$  影响显著 ( $p < 0.05$ )。3 个因素对油脂萃取率的影响大小依次为  $A > C > B$ , 其中  $A$  的影响远高于  $B$  和  $C$ , 说明二氧化碳流量是影响油脂萃取率最主要的因素。该模型的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.993 7, 调整决定系数 ( $R^2_{Adj}$ ) 为 0.985 6, 说明此模型可以准确描述 98.56% 的响应值变化; 该模型的变异系数 (CV) 很低, 为 1.83%, 说明可信度很高。综上, 该模型与实际试验拟合程度高, 误差小, 可以很好地反映二氧化碳流量、萃取温度和萃取压力对油脂萃取率的影响, 并能够准确预测其结果。

表 3 回归方程的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$p$
模型	2 377.57	9	264.17	122.31	<0.000 1**
$A$	2 268.01	1	2 268.01	1 050.06	<0.000 1**
$B$	3.64	1	3.64	1.69	0.235 1
$C$	30.03	1	30.03	13.90	0.007 4**
$AB$	17.64	1	17.64	8.17	0.024 4*
$AC$	3.42	1	3.42	1.58	0.248 5
$BC$	0.04	1	0.04	0.02	0.895 6
$A^2$	37.47	1	37.47	17.35	0.004 2**
$B^2$	5.65	1	5.65	2.62	0.149 9
$C^2$	13.14	1	13.14	6.09	0.043 0*
残差	15.12	7	2.16		
失拟项	7.93	3	2.64	1.47	0.349 4
纯误差	7.19	4	1.80		
总误差	2 392.69	16			

注: \* 表示显著 ( $p < 0.05$ ), \*\* 表示极显著 ( $p < 0.01$ )

### 2.2.3 最优工艺条件预测及验证试验

使用 Design Expert 13 软件预测超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的最优工艺条件为二氧化碳流量 27.7 L/h、萃取温度 36.9 °C、萃取压力 44.3 MPa, 在此条件下油脂萃取率预测值为 98.5%。根据设备实际情况, 在二氧化碳流量 28 L/h、萃取温度 37 °C、萃取压力 44 MPa 条件下进行验证试验, 油脂萃取率为 (98.7 ± 0.2)%, 与预测值接近, 说明该模型预测准确。

## 2.3 超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的品质

### 2.3.1 脂肪酸组成

在最优工艺条件下通过超临界二氧化碳萃取得到元宝枫籽油, 经检测, 其中含有 29 种脂肪酸, 主要脂肪酸 (含量 > 2%) 组成及含量见表 4。

GB/T 37748—2019《元宝枫籽油》中规定了元宝枫籽油的亚油酸、油酸和神经酸的含量标准 (亚油酸含量 30.0% ~ 40.0%, 油酸含量 15.0% ~ 30.0%, 神经酸含量 3.0% ~ 6.5%)。由表 4 可知,

超临界二氧化碳萃取的元宝枫籽油中亚油酸与油酸含量均符合该标准, 神经酸含量高于该标准, 总不饱和脂肪酸含量高达 86.7%, 说明超临界二氧化碳萃取法可以很好地保护包括神经酸在内的不饱和脂肪酸。

表 4 超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的主要脂肪酸组成及含量

脂肪酸	含量/%
棕榈酸	5.74 ± 0.00
亚麻酸	3.53 ± 0.02
亚油酸	32.60 ± 0.39
油酸	20.10 ± 0.10
硬脂酸	4.78 ± 0.11
芥酸	18.10 ± 0.20
神经酸	9.34 ± 0.12
单不饱和脂肪酸	49.5 ± 0.1
多不饱和脂肪酸	37.1 ± 0.3
总不饱和脂肪酸	86.7 ± 0.3

### 2.3.2 理化指标

3 种方法提取的元宝枫籽油的酸值、碘值、皂化值及过氧化值见表 5。

表 5 3 种方法提取的元宝枫籽油的理化指标

项目	超临界二氧化碳萃取	正己烷萃取	低温压榨制取
酸值 (KOH)/ (mg/g)	0.6 ± 0.0 <sup>c</sup>	0.8 ± 0.0 <sup>b</sup>	1.6 ± 0.0 <sup>a</sup>
碘值 (I)/ (g/100 g)	106.4 ± 1.5 <sup>a</sup>	101.6 ± 3.1 <sup>b</sup>	95.5 ± 1.0 <sup>c</sup>
皂化值 (KOH)/ (mg/g)	183.6 ± 2.8 <sup>b</sup>	190.4 ± 0.8 <sup>a</sup>	191.6 ± 3.1 <sup>a</sup>
过氧化值/ (g/100 g)	0.08 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>a</sup>

注: 同行不同字母表示具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。下同

由表 5 可知, 超临界二氧化碳萃取的元宝枫籽油的酸值、碘值和皂化值均符合 GB/T 37748—2019《元宝枫籽油》中的规定 [酸值 (KOH) ≤ 2.0 mg/g (一级油), 碘值 (I) 100 ~ 113 g/100 g, 皂化值 (KOH) 180 ~ 196 mg/g], 过氧化值符合 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》中的规定 (≤ 0.25 g/100 g)。超临界二氧化碳萃取的元宝枫籽油酸值显著低于正己烷萃取和低温压榨制取的油脂, 其过氧化值与正己烷萃取的油脂无显著差异, 显著低于低温压榨制取的油脂。与正己烷萃取和低温压榨制取的元宝枫籽油相比, 超临界二氧化碳萃取

的元宝枫籽油碘值显著升高,皂化值显著降低。

### 2.3.3 甾醇和生育酚含量

3种方法提取的元宝枫籽油的甾醇和生育酚含量见表6。

表6 3种方法提取的元宝枫籽油的甾醇和生育酚含量

项目	μg/g		
	超临界二氧化碳萃取	正己烷萃取	低温压榨制取
菜油甾醇	56.1 ± 0.8 <sup>a</sup>	54.7 ± 0.8 <sup>a</sup>	47.6 ± 0.4 <sup>b</sup>
豆甾醇	201.2 ± 4.0 <sup>a</sup>	196.5 ± 3.9 <sup>a</sup>	161.7 ± 0.0 <sup>b</sup>
谷甾醇	730.8 ± 3.7 <sup>a</sup>	714.3 ± 6.9 <sup>b</sup>	629.2 ± 5.3 <sup>c</sup>
总甾醇	988.1 ± 8.5 <sup>a</sup>	965.5 ± 9.3 <sup>a</sup>	838.5 ± 5.6 <sup>b</sup>
α-生育酚	152.3 ± 2.3 <sup>a</sup>	143.9 ± 3.6 <sup>b</sup>	142.5 ± 2.6 <sup>b</sup>
β-生育酚	62.2 ± 0.9 <sup>a</sup>	59.0 ± 1.2 <sup>a</sup>	53.4 ± 0.3 <sup>b</sup>
γ-生育酚	489.5 ± 7.3 <sup>a</sup>	472.1 ± 4.7 <sup>a</sup>	402.3 ± 0.0 <sup>b</sup>
δ-生育酚	287.4 ± 5.7 <sup>a</sup>	266.2 ± 4.0 <sup>b</sup>	249.1 ± 0.9 <sup>c</sup>
总生育酚	991.4 ± 5.0 <sup>a</sup>	941.2 ± 8.1 <sup>b</sup>	847.3 ± 3.0 <sup>c</sup>

由表6可知:超临界二氧化碳萃取的元宝枫籽油总甾醇含量为(988.1 ± 8.5) μg/g,显著高于低温压榨制取的油脂;总生育酚含量为(991.4 ± 5.0) μg/g,显著高于正己烷萃取和低温压榨制取的油脂。

### 3 结论

本研究通过单因素试验和响应面试验优化确定超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的最优工艺条件为原料粒度380~830 μm(20~40目)、二氧化碳流量28 L/h、萃取温度37℃、萃取压力44 MPa、萃取时间100 min,在该条件下油脂萃取率为(98.7 ± 0.2)%。最优条件下得到的元宝枫籽油的亚油酸、油酸和神经酸含量分别为32.60%、20.10%、9.34%,酸值(KOH)、碘值(I)、皂化值(KOH)和过氧化值分别为0.6 mg/g、106.4 g/100 g、183.6 mg/g和0.08 g/100 g,总甾醇和总生育酚含量分别为988.1 μg/g和991.4 μg/g。超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的综合品质优于正己烷萃取和低温压榨制取的油脂。超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油的萃取率高,原油品质好,无有机溶剂残留,污染极小,是一种绿色、高效的提油技术。

### 参考文献:

[1] 王性炎. 中国元宝枫[M]. 成都:四川民族出版社,2003.  
[2] 刘祥义,付惠,陈玉惠. 元宝枫油理化特性及脂肪酸组成研究[J]. 中国油脂,2003,28(3):66-67.

[3] 卫生部关于批准元宝枫籽油和牡丹籽油作为新资源食品的公告(2011年第9号)[EB/OL]. (2011-03-29)[2023-12-21]. [https://www.gov.cn/gzdt/2011-03/29/content\\_1833664.htm](https://www.gov.cn/gzdt/2011-03/29/content_1833664.htm).  
[4] YANG R, ZHANG L, LI P, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China[J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 74: 26-32.  
[5] 丁福祺. 食用油压榨法和浸出法工艺的区别[J]. 中国油脂,2005,30(1):5-6.  
[6] 杨瑞金,倪双双,张文斌,等. 水媒法提取食用油技术研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(9):308-314.  
[7] 祁鲲. 亚临界溶剂生物萃取技术的发展及现状[J]. 粮食与食品工业,2012,19(5):5-8.  
[8] AHANGARI H, KING J W, EHSANI A, et al. Supercritical fluid extraction of seed oils: A short review of current trends[J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 111: 249-260.  
[9] 沈小刚. 浅析压榨法花生油加工技术[J]. 食品安全导刊,2018(26):70.  
[10] 冯华. 压榨制油与浸出制油[J]. 黑龙江粮食,2006(4):29-30.  
[11] ESSIEN S O, YOUNG B, BAROUTIAN S. Recent advances in subcritical water and supercritical carbon dioxide extraction of bioactive compounds from plant materials[J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 97: 156-169.  
[12] PUTRA N R, RIZKIYAH D N, ZAINI A S, et al. Effect of particle size on yield extract and antioxidant activity of peanut skin using modified supercritical carbon dioxide and Soxhlet extraction[J/OL]. J Food Process Preserv, 2018, 42(8): e13689 [2023-12-21]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13689>.  
[13] RUSLAN M S H, IDHAM Z, NIAN Y L, et al. Effect of operating conditions on catechin extraction from betel nuts using supercritical CO<sub>2</sub>-methanol extraction[J]. Sep Sci Technol, 2018, 53(4): 662-670.  
[14] YANG Y C, WEI M C, HUANG T C, et al. Extraction of protocatechuic acid from *Scutellaria barbata* D. Don using supercritical carbon dioxide[J]. J Supercrit Fluids, 2013, 81: 55-66.  
[15] NDAYISHIMIYE J, CHUN B S. Optimization of carotenoids and antioxidant activity of oils obtained from a co-extraction of citrus (Yuzu ichandrin) by-products using supercritical carbon dioxide[J]. Biomass Bioenerg, 2017,106: 1-7.