

牡丹籽油微波预处理—压榨法制备 工艺优化及品质分析

华金丹

(濮阳医学高等专科学校, 河南 濮阳 457000)

摘要: [目的] 获得高品质的牡丹籽油。[方法] 以牡丹籽为材料, 探究牡丹籽水分含量、微波功率、微波时间和仁壳比对牡丹籽出油率的影响, 然后采用响应面法优化了微波预处理—压榨法制备牡丹籽油的工艺条件, 并对微波预处理—压榨法、超临界 CO₂ 萃取和溶剂萃取 3 种方法制备的牡丹籽油进行品质比较。[结果] 微波预处理—压榨法制备牡丹籽油的工艺条件为牡丹籽水分含量 8.6%、微波功率 1 000 W, 微波时间 5 min, 仁壳比 ($m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹籽壳}}$) 15:1, 该工艺条件下牡丹籽出油率为 $(26.74 \pm 0.58)\%$ 。3 种方法制备的牡丹籽油虽然理化指标上存在差异, 但均符合食用植物油标准。提取方法对脂肪酸的提取是非选择性的, 未发生脂肪酸的异构化或氧化, 但微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油含有更高的微量成分, 如角鲨烯、生育酚和总酚含量, 具备更好的抗氧化活性。[结论] 微波预处理—压榨法是一种获得高品质牡丹籽的加工方法。

关键词: 牡丹籽油; 微波预处理; 压榨法; 酸价; 过氧化值; 脂肪酸; 微量成分; 抗氧化

Optimization of microwave pretreatment-pressing methods for preparing peony seed oil and its quality analysis

HUA Jindan

(Puyang Medical College, Puyang, Henan 457000, China)

Abstract: [Objective] To obtain high-quality peony seed oil. [Methods] Using peony seeds as materials, this study investigated the effects of moisture content, microwave power, microwave time, and kernel-shell mass ratio on peony seed oil yield. Response surface methodology was then used to optimize the process conditions for peony seed oil preparation via microwave pretreatment-pressing methods. The quality of peony seed oil obtained by microwave pretreatment-pressing methods was compared with that extracted by supercritical CO₂ extraction and solvent extraction. [Results] The optimal process conditions for microwave pretreatment-pressing methods to prepare peony seed oil were listed below: moisture content of 8.6%, microwave power of 1 000 W, microwave time of 5 min, and kernel-shell mass ratio of 15:1. Under these conditions, the oil yield from peony seeds was $(26.74 \pm 0.58)\%$. Although there were differences in the physicochemical indicators of peony seed oil produced by the three methods, all met the standards for edible vegetable oil. The extraction methods were non-selective for fatty acid extraction, with no isomerization or oxidation of fatty acids. However, the peony seed oil prepared by microwave pretreatment-pressing methods contained higher levels of trace components such as squalene, tocopherols, and total phenols, which gave it better antioxidant activity. [Conclusion] Microwave pretreatment-pressing methods are effective processing methods for obtaining high-quality peony seed oil.

Keywords: peony seed oil; microwave pretreatment; pressing method; acid value; peroxide value; fatty acids; trace components; antioxidant

牡丹籽含油量高达 30% 以上, 且富含不饱和脂肪酸以及丰富的脂溶性微量成分, 具有多种生物活性功能, 如抗氧化、降血脂、保肝、免疫调节、降血糖、保护神经、抗炎等^[1-3]。此外, 牡丹籽油安全性高, 无任何毒副作用, 因而牡丹籽油已经实现多种高附加值产品的生产, 如牡丹籽油微胶囊、纳米乳凝胶和日化产品等^[2,4]。

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (编号: 23B350006)

通信作者: 华金丹 (1988—), 女, 濮阳医学高等专科学校讲师, 硕士。E-mail: 3414712767@qq.com

收稿日期: 2024-07-15 改回日期: 2025-01-20

牡丹籽油的提取方法有多种,如压榨法、溶剂提取法、超临界 CO₂萃取法和亚临界萃取法等^[2]。其中压榨法制备牡丹籽油不使用有机溶剂,工艺简单,能最大限度保持油的营养成分和天然风味,具有绿色、环保和品质高等特点,但出油率低^[5-6]。溶剂提取法出油率高,设备简单,但使用正己烷等有机溶剂,易造成溶剂残留,有一定的安全风险^[7-8]。超临界 CO₂萃取法具有脂溶性强、传质性能好、无毒、安全等优点,是目前最常用的实验室研究手段,但其设备价格高昂,难以工业化使用^[9-10]。亚临界流体萃取是继超临界流体萃取之后发展起来的一种新型分离技术,它克服了压榨法出油率低、蒸炒过度、溶剂萃取法溶剂残留等缺陷,虽然压力低于超临界,但其设备造价也很高,不利于工业化使用^[11]。

为了获得适合高品质、高产量的食用油脂并克服压榨法出油率低的缺点,通常会采用一定的措施(如微波、超声以及酶法等)对原材料进行预处理以破坏植物细胞壁。其中,微波处理不仅能抑制油脂脂肪酶和脂肪氧化酶活性,还能提高油脂的氧化稳定性^[12-13],已被广泛应用于菜籽、亚麻籽、芝麻、葵花籽等油料作物的预处理。何雅静等^[14]研究表明,微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油的品质优于烘烤预处理—压榨法和炒籽预处理—压榨法的,但未对微波预处理—压榨法进行工艺优化,且忽视了牡丹籽种壳中的黄酮、低聚芪类化合物等天然功能性成分的利用。研究拟以牡丹籽为原料,优化微波预处理—压榨法制取牡丹籽油工艺条件,同时在最佳出油率的工艺条件下,比较微波预处理—压榨法、溶剂法和超临界 CO₂萃取法对牡丹油品质的影响,以期为高品质牡丹籽油的加工提供一定的参考。

1 材料和方法

1.1 材料

牡丹籽:菏泽市牡丹区子谦木业有限公司;

正己烷、乙醇、甲醇、碳酸钠、没食子酸等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设备

密闭式微波消解仪:QYWB-16G型,上海乔跃电子科技有限公司;

家用全自动榨油机:ZYJ-420型,河北朵麦信息科技有限公司;

索氏提取仪:Soxtec™ 8000型,南京泰昌生物科技有限公司;

超临界流体萃取系统:HA221-50-06型,南通市华安超临界流体萃取公司;

气相色谱仪:8890型,安捷伦科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 微波预处理—压榨法制备牡丹籽油 牡丹籽经清

理挑选后破壳分离出种仁,测定种仁水分,通过计算添加去离子水至最终水分含量6%,于4℃冰箱中放置12h吸收充分(水分含量6.05%)。取30g牡丹籽仁置于微波消解仪中进行微波预处理。冷却至室温后按比例掺入种壳,使用螺旋压榨机压榨(榨螺转速60r/min,榨头温度60℃)出油,离心(8000r/min,20min)去除油渣后得牡丹籽毛油。

1.3.2 微波预处理—压榨法制备牡丹籽油工艺优化

(1) 单因素试验:以牡丹籽水分含量6%、微波功率800W、微波时间5min、仁壳比($m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹籽壳}}$)15:1为基准,以牡丹籽出油率为评价指标,考察牡丹籽水分含量(2%,4%,6%,8%,10%)、微波功率(400,600,800,1000,1200W)、微波时间(1,3,5,7,9min)和仁壳比($m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹籽壳}}$)分别为15:0,15:1,15:2,15:3,15:4对牡丹籽出油率的影响。

(2) 优化试验:对上述4个单因素进行优化试验,以确认最佳工艺参数。

1.3.3 溶剂萃取法制备牡丹籽油 以未经微波预处理的牡丹籽为原料,参照Gao等^[15]的方法并进行一定的修改。萃取条件:以正己烷为溶剂、浸提温度60℃、浸提时间6h、料液比1:10(g/mL)、原料粉碎粒度40目。

1.3.4 超临界 CO₂萃取法制备牡丹籽油 以未经微波预处理的牡丹籽为原料,参照赵菁菁等^[16]的方法并进行一定的修改。萃取条件:取200g牡丹籽置于样品容器中,萃取温度45℃,萃取压力32MPa,萃取时间2.8h,CO₂流量18L/h;从分离一和分离二处收集油脂后,8000r/min离心20min,取上层油保存在4℃以供后续分析。

1.3.5 牡丹籽油出油率及品质指标测定

(1) 牡丹籽油出油率:按式(1)进行计算。

$$Y = X_1/X_2 \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y ——牡丹籽油出油率,%;

X_1 ——牡丹籽油的质量,g;

X_2 ——牡丹籽仁的质量,g。

(2) 酸价:参照GB 5009.229—2016。

(3) 过氧化值:参照GB 5009.227—2016。

(4) 磷脂:参照GB/T 5537—2008。

(5) 脂肪酸组成和含量:参照ISO 12966-2:2017。

(6) 生育酚:参照ISO 9936:2016。

(7) 植物甾醇:参照ISO 12228-1:2014。

(8) 总酚:参照Zhang等^[17]的方法。

1.3.6 牡丹籽油抗氧化诱导时间测定 参照Sundar等^[18]的方法。

1.3.7 牡丹籽油抗氧化活性测定 参照Suri等^[19]的方法测定牡丹籽油的ABTS自由基清除率和铁离子还原能力。

1.3.8 统计分析 响应面设计分析采用Design-Expert

8.0.6 软件进行数据处理及分析。方差分析采用 SPSS 22.0 软件 LSD 法进行, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 牡丹籽水分含量对出油率的影响 由图 1 可知,随着牡丹籽水分含量的升高,牡丹籽出油率呈先升高后降低的趋势,当牡丹籽水分含量为 8% 时,牡丹籽出油率达到最大。微波处理会使物料内部水分蒸发,使物料干燥,当物料干燥过度时,物料经螺杆挤压后会形成粉末,不易形成饼粕,而且由于物料水分较少,压榨时产生的高温容易造成物料糊化,导致出油率降低^[19]。当物料水分含量过高时,物料经螺杆挤压后会结成团状,同样会导致出油率降低^[20]。因此,物料水分适当时,物料在压榨时可正常形成饼粕,保持物料的流动性,保证物料压榨时榨膛压力正常,从而使物料出油率达到最高。因此,牡丹籽水分含量控制在 6% 为宜。

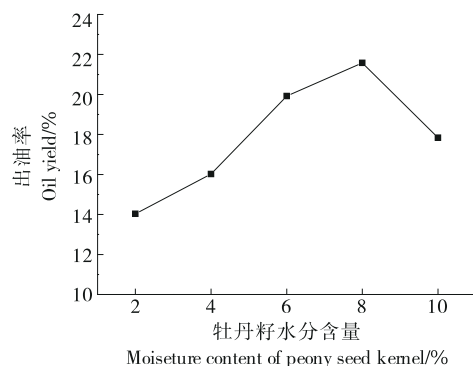


图 1 牡丹籽水分含量对出油率的影响

Figure 1 Effect of moisture content of peony seeds on the oil yield

2.1.2 微波功率对出油率的影响 由图 2 可知,随着微波功率的升高,牡丹籽出油率呈先升高后降低的趋势,当微波功率为 1 000 W 时,牡丹籽出油率达到最大。微波产生的辐射可穿透到细胞内部,使细胞内部温度快速升高并产生膨胀,当膨胀压力达到一定值时会造成细胞壁破裂,使其内部油脂流出^[20]。同时,微波还是一种非离子化辐射能,可极化分子,使其极性变换,从而产生键的振动、撕裂,以及粒子间摩擦和碰撞,并迅速生成大量的热能,促使细胞破裂^[21-22]。微波功率越高,对细胞产生的膨胀压力越大,对分子的极化效果越好,对细胞造成的破坏越大。但微波功率过大时,会造成物料产生的热量过多,使物料干燥过度,导致其出油率降低。适当的微波功率可保证物料的含水量和对物料的破坏足够大,使其出油率最大。因此,微波功率控制在 1 000 W 为宜。

2.1.3 微波时间对出油率的影响 由图 3 可知,随着微波

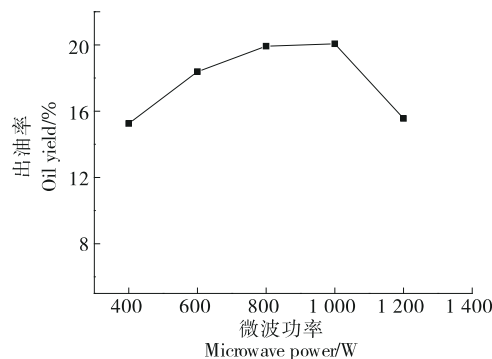


图 2 微波功率对出油率的影响

Figure 2 Effect of microwave power on the oil yield

时间的升高,牡丹籽出油率呈先升高后降低的趋势,当微波时间为 5 min 时,牡丹籽出油率达到最大。微波对植物细胞破坏作用除了功率外,还与微波时间有关,微波时间越长,对植物细胞的破坏程度越大,可促进植物细胞内溶物的流出,使出油率升高^[23]。但微波时间过长,植物细胞积累的热量过高,也会造成其水分含量过低,出油率下降。适当的微波时间可保证物料的含水量和对物料的破坏足够大,使其出油率最大。因此,微波时间控制在 5 min 为宜。

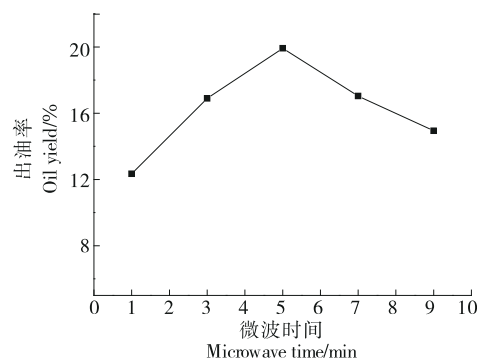


图 3 微波时间对出油率的影响

Figure 3 Effect of microwave time on the oil yield

2.1.4 仁壳比对出油率的影响 由图 4 可知,随着仁壳比的升高,牡丹籽出油率呈先升高后降低的趋势,当 $m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹籽壳}}$ 为 15:1 时,牡丹籽出油率达到最大。油料的种籽较为松软,压榨时容易形成黏糊状半固体,难以形成饼粕,造成出油率不高,而种壳较为坚硬,适量添加可使物料较好地形成饼粕,有利于增大出油率,但种壳具有吸收油脂的特性,添加过多会降低出油率且不利于饼粕形成,甚至造成榨油机榨膛的堵塞^[12,24]。适当的仁壳比可保证压榨过程饼粕的形成和出油的连贯性,从而使物料出油率达到最高。因此, $m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹籽壳}}$ 控制在 15:1 为宜。

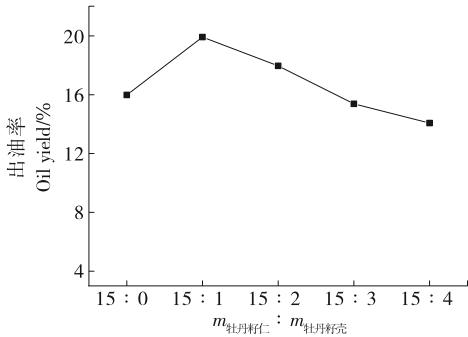


图 4 仁壳比对比出油率的影响

Figure 4 Effect of kernel-shell mass ratio on the oil yield

2.2 响应面优化试验

响应面试验因素水平见表 1, 试验设计及结果见表 2。

表 1 响应面优化因素及其水平

Table 1 Response surface optimization factors and levels				
水平	A 牡丹籽水分含量/%	B 微波功率/W	C 微波时间/min	D $m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹壳}}$
-1	6	800	3	15:0
0	8	1 000	5	15:1
1	10	1 200	7	15:2

使用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 中的试验结果进行分析, 推算出四因素对牡丹籽出油率的理论方程为

$$Y=25.60+0.97A+1.57B-0.44C-0.19D-0.065AB-0.11AC-0.027AD+0.053BC+0.18BD-0.053CD-1.63A^2-2.63B^2-1.5C^2-0.58D^2。(2)$$

对该模型进行方差分析, 结果如表 3 所示。该模型极显著 ($P<0.000\ 1$), 失拟项不显著 ($P=0.262\ 6$), $R^2=0.993\ 2$, 说明该模型可用于分析预测牡丹籽出油率。牡丹籽水分含量、微波功率、微波时间对牡丹籽出油率影响极显著, 仁壳比对牡丹籽出油率影响显著, 四因素之间交互作用均不显著。

图 5~图 10 中的响应面图均未呈明显的降落伞状弯曲, 弯曲程度不高。说明牡丹籽水分含量、微波功率、微波时间、仁壳比 4 个因素之间两两交互作用不显著。

根据牡丹籽出油率的理论方程, 预测出当牡丹籽水分含量为 8.59%、微波功率为 1 058.1 W、微波时间为 4.7 min、 $m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹壳}}$ 为 15:0.8 时, 牡丹籽出油率最高, 为 26.02%。但由于微波设备参数设定局限性以及考虑操作的便捷性, 将参数调整为牡丹籽水分含量 8.6%、微波功率 1 000 W、微波时间 5 min、 $m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹壳}}=15:1$, 在此工艺参数下进行 3 次验证实验, 求得牡丹籽出油率为 $(26.74\pm0.58)\%$, 与理论最大值差异不足 3%, 说明牡丹籽

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken experimental design and results					
试验号	A	B	C	D	Y 出油率/%
1	0	0	0	0	25.82
2	0	1	0	1	25.66
3	0	1	1	0	24.23
4	0	0	-1	1	25.62
5	0	0	0	0	23.68
6	-1	-1	0	0	22.57
7	-1	0	0	1	24.10
8	0	-1	0	1	25.56
9	0	0	-1	-1	18.19
10	1	0	-1	0	22.13
11	0	-1	-1	0	20.50
12	1	0	0	-1	24.23
13	1	1	0	0	23.93
14	-1	1	0	0	20.34
15	1	-1	0	0	24.56
16	0	0	0	0	23.78
17	1	0	1	0	22.34
18	0	-1	1	0	20.61
19	-1	0	1	0	25.35
20	0	-1	0	-1	23.11
21	-1	0	-1	0	19.33
22	0	1	-1	0	21.22
23	0	0	1	-1	21.32
24	-1	0	0	-1	21.60
25	0	1	0	-1	23.37
26	0	0	1	1	23.18
27	0	0	0	0	22.35
28	0	1	0	1	24.09
29	0	1	1	0	22.84

出油率工艺参数可靠稳定。

2.3 不同工艺制备的牡丹籽油品质比较

2.3.1 出油率、酸价和过氧化值 如表 4 所示, 在出油率上, 溶剂萃取法最高, 其次为超临界 CO_2 萃取法, 均高于微波预处理—压榨法 ($P<0.05$)。然而, 超临界 CO_2 萃取法提取时需要超高的工作压力, 导致设备投资大, 不利于工业化生产。溶剂萃取法虽然设备投资低, 但使用正己烷, 后期去除溶剂成本较高且存在有溶剂残留风险。因此, 微波预处理—压榨法仍具有一定的优势。3 种工艺制备的牡丹籽油酸价和过氧化值有显著差异 ($P<0.05$), 说明不同工艺制备的牡丹籽油理化性质上有一定差异, 但均符合 GB/T 40622—2021 牡丹籽油酸价 (不超过 3.0 mg KOH/g) 和过氧化值 (不超过 0.25 g/100 g) 质量标准。

表3 回归方程方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值	显著性
模型	102.238 6	14	7.302 8	146.057 6	<0.000 1	**
A	11.349 1	1	11.349 1	226.985 3	<0.000 1	**
B	29.516 0	1	29.516 0	590.330 5	<0.000 1	**
C	2.358 5	1	2.358 5	47.171 4	<0.000 1	**
D	0.421 9	1	0.421 9	8.437 6	0.011 5	*
AB	0.016 9	1	0.016 9	0.338 0	0.570 2	
AC	0.048 4	1	0.048 4	0.968 0	0.341 9	
AD	0.003 0	1	0.003 0	0.060 5	0.809 3	
BC	0.011 0	1	0.011 0	0.220 5	0.645 9	
BD	0.042 0	1	0.042 0	0.840 5	0.365 0	
CD	0.011 0	1	0.011 0	0.220 5	0.637 6	
A ²	17.334 5	1	17.334 5	346.696 5	<0.000 1	**
B ²	44.730 0	1	44.730 0	894.615 0	<0.000 1	**
C ²	14.662 8	1	14.662 8	293.260 5	<0.000 1	**
D ²	2.180 2	1	2.180 2	43.604 2	<0.000 1	**
残差	0.700 0	14	0.050 0			
失拟项	0.583 5	10	0.058 4	2.003 8	0.262 6	
误差项	0.116 5	4	0.029 1			

† **表示差异极显著, $P < 0.01$; *表示差异显著, $P < 0.05$ 。

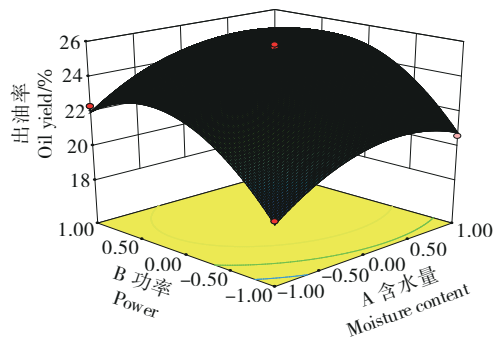


图5 牡丹籽含水量和微波功率的响应面图

Figure 5 Response surface of moisture content of peony seeds and microwave power on the oil yield of peony seeds

2.3.2 脂肪酸组成 在牡丹籽油中检测出了11种不同的脂肪酸,如表5所示。牡丹籽油中的不同脂肪酸组成相似,每种脂肪酸碳链长度为14~20个碳原子。其中,亚麻酸($C_{18:3}$)含量最高(36.38%~40.23%),并且微波预处理—压榨法的亚麻酸高于其他工艺。亚麻酸是一种重要的多不饱和脂肪酸,对心血管疾病的预防和治疗具有重要作用。其次是油酸($C_{18:1}$, 25.72%~28.68%)和亚油酸($C_{18:2}$, 24.72%~27.71%),二者是必需的18碳不饱和脂肪酸,油

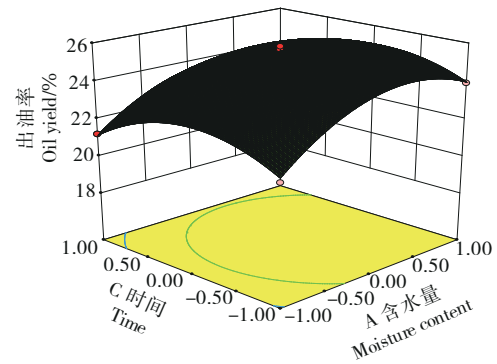


图6 牡丹籽含水量和微波时间的响应面图

Figure 6 Response surface of moisture content of peony seeds and microwave time on the oil yield of peony seeds

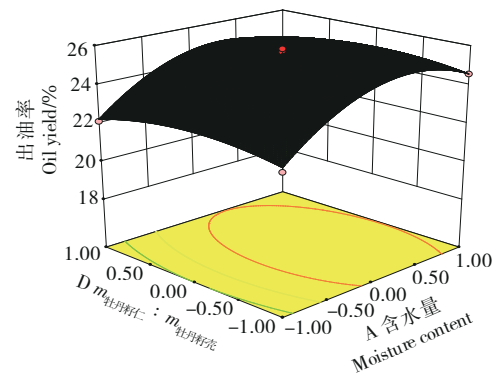


图7 牡丹籽含水量和仁壳比的响应面图

Figure 7 Response surface of moisture content of peony seeds and kernel-shell mass ratio on the oil yield of peony seeds

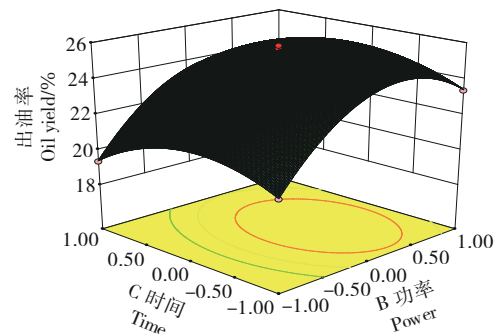


图8 微波功率和微波时间的响应面图

Figure 8 Response surface of microwave power and microwave time on the oil yield of peony seeds

酸和亚油酸对人体的生长发育具有重要意义。统计分析表明,不同提取工艺制备牡丹籽油的脂肪酸含量存在显著性差异($P < 0.05$),但不饱和脂肪酸(UFA)和饱和脂肪酸(SFA)总含量无显著差异($P > 0.05$),与Guo等^[11]的研

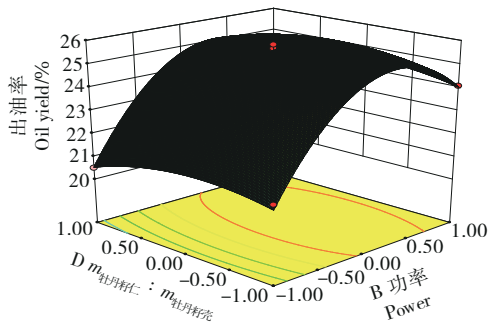


图9 微波功率和仁壳比的响应面图
Figure 9 Response surface of microwave power and kernel-shell mass ratio on the oil yield of peony seeds

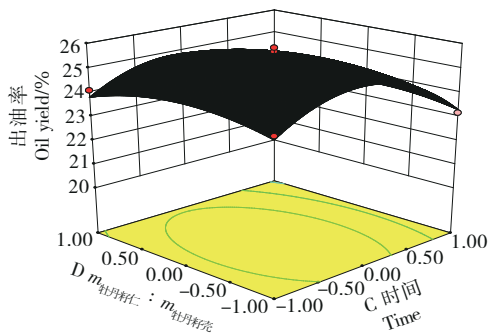


图10 微波时间和仁壳比的响应面图
Figure 10 Response surface of microwave time and kernel-shell mass ratio on the oil yield of peony seeds

究结果类似。总体而言,不同提取方法对脂肪酸的提取是非选择性的,并且在提取条件下未发生脂肪酸的异构化或氧化。

2.3.3 微量成分分析 不同工艺制备的牡丹油的角鲨烯、植物甾醇、生育酚、黄酮和总酚含量见表6。牡丹籽油中角鲨烯含量为139.25~162.45 mg/kg,微波预处理—压榨法的角鲨烯含量显著高于其他制备工艺($P<0.05$)。微

表4 不同工艺制备牡丹籽油出油率、酸价和过氧化值比较[†]
Table 4 Comparison of oil yield, acid value, and peroxide value of peony seed oil prepared by different processes

制备方法	出油率/%	酸价/(mg KOH·g ⁻¹)	过氧化值/(10 ⁻² g·g ⁻¹)
微波预处理—压榨法	27.74±0.48 ^c	1.21±0.02 ^b	0.19±0.02 ^a
超临界CO ₂ 萃取法	29.38±0.23 ^b	1.08±0.02 ^c	0.10±0.04 ^c
溶剂萃取法	33.58±0.32 ^a	1.32±0.04 ^a	0.12±0.02 ^b

[†] 字母不同表示不同方法之间差异显著($P<0.05$)。

波预处理—压榨法的植物甾醇含量最高。微波预处理—压榨法的总生育酚含量最高,其次分别是超临界CO₂萃取法和溶剂萃取法。超临界CO₂萃取法和微波预处理—压榨法的黄酮和总酚含量无显著差异($P>0.05$),溶剂萃取法的黄酮和总酚含量最低。

2.3.4 抗氧化能力 不同工艺制备的牡丹籽油的氧化诱导时间和抗氧化活性见表7。微波预处理—压榨法的氧化稳定性最高,且对铁离子还原能力和ABTS自由基清除能力最强,说明微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油具有较好的氧化诱导时间和抗氧化活性。油脂的抗氧化能力与角鲨烯、植物甾醇、生育酚、黄酮和总酚等物质含量有关,在2.3.3中发现微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油的角鲨烯、植物甾醇、生育酚、黄酮和总酚物质含量明显高于超临界CO₂萃取法和溶剂萃取法制备的牡丹籽油,佐证了微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油的最高的抗氧化能力。

3 结论

微波预处理—压榨法制备牡丹籽油的最佳工艺条件为牡丹籽水分含量8.6%、微波功率1 000 W,微波时间5 min,仁壳比($m_{\text{牡丹籽仁}}:m_{\text{牡丹籽壳}}$)15:1,在此工艺条件下牡丹籽出油率为(26.74±0.58)%。微波预处理—压榨法制备牡丹籽油的酸价和过氧化值均高于超临界CO₂萃取的

表5 不同工艺制备牡丹籽油脂肪酸构成比较[†]
Table 5 Comparison of fatty acid composition of peony seed oil prepared by different processes

制备方法	C _{14:0}	C _{16:1}	C _{17:0}	C _{17:1}	C _{20:0}	C _{16:0}	C _{18:0}
微波预处理—压榨法	0.06±0.01	0.12±0.02	0.12±0.01	0.08±0.02	0.14±0.02	5.87±0.01	2.57±0.01
超临界CO ₂ 萃取法	0.06±0.02	0.11±0.02	0.10±0.02	0.07±0.01	0.17±0.02	5.89±0.01	2.58±0.01
溶剂萃取法	0.07±0.02	0.12±0.02	0.15±0.02	0.12±0.02	0.15±0.01	5.94±0.01	2.58±0.01
制备方法	C _{18:1}	C _{18:2}	C _{18:3}	C _{20:1}	SFA	UFA	
微波预处理—压榨法	25.72±0.02 ^c	25.67±0.01 ^b	40.23±0.10 ^a	0.22±0.01	8.75±0.06	92.04±0.18	
超临界CO ₂ 萃取法	28.68±0.01 ^a	24.72±0.01 ^c	38.38±0.08 ^b	0.20±0.01	8.80±0.08	92.16±0.23	
溶剂萃取法	27.49±0.02 ^b	27.71±0.01 ^a	36.37±0.06 ^c	0.20±0.01	8.88±0.07	92.02±0.34	

[†] 字母不同表示不同方法之间差异显著($P<0.05$)。

表6 不同工艺制备牡丹籽油微量成分比较[†]

Table 6 Comparison of trace components of peony seed oil prepared by different processes					mg/kg
制备方法	角鲨烯	植物甾醇	生育酚	黄酮	总酚
微波预处理—压榨法	162.45±4.38 ^a	2 682.25±47.64 ^a	583.39±5.45 ^a	38.28±0.44 ^a	34.54±0.35 ^a
超临界CO ₂ 萃取法	144.26±3.02 ^b	2 458.41±40.57 ^b	535.25±5.99 ^b	39.25±0.27 ^a	33.98±0.52 ^a
溶剂萃取法	129.25±2.84 ^c	2 128.86±50.04 ^c	506.52±4.49 ^c	36.58±0.41 ^b	24.35±0.43 ^b

† 字母不同表示不同方法之间差异显著($P<0.05$)。

表7 不同工艺制备牡丹籽油抗氧化能力比较[†]

Table 7 Comparison of antioxidant capacity of peony seed oil prepared by different processes			
制备方法	氧化诱导时间/h	铁离子还原能力/ (10^{-2} mmol TE·g ⁻¹)	ABTS自由基清除能力/ (10^{-2} mmol TE·g ⁻¹)
微波预处理—压榨法	3.84±0.06 ^a	105.80±0.65 ^a	89.05±1.40 ^a
超临界CO ₂ 萃取法	3.45±0.03 ^b	86.54±0.79 ^b	82.05±1.74 ^b
溶剂萃取法	3.06±0.08 ^c	78.67±0.94 ^c	76.52±2.24 ^c

† 字母不同表示不同方法之间差异显著($P<0.05$)。

和溶剂萃取的,但远低于GB/T 40622—2021牡丹籽油酸价(不超过3.0 mg KOH/g)和过氧化值(不超过0.25 g/100 g)质量标准,说明微波预处理—压榨法不会造成牡丹籽油质量不合格。微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油亚麻酸(C_{18:3})含量均高于溶剂萃取的和超临界CO₂萃取的,此外,微波预处理—压榨法、超临界CO₂萃取和溶剂萃取制备的牡丹籽油的脂肪酸含量存在显著差异($P<0.05$),但不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸总含量无显著差异($P>0.05$),且微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油含有的角鲨烯、植物甾醇、生育酚、黄酮和总酚等微量活性成分更高,氧化诱导时间和抗氧化活性更佳。因此,微波预处理—压榨法制备的牡丹籽油品质优于溶剂萃取和超临界CO₂萃取两种工艺。风味也是影响消费者选择食用油的主要因素,后续应研究微波预处理—压榨法对牡丹籽油风味特性的影响,包括联合电子鼻技术、采用气相色谱质谱仪和气相色谱—离子迁移谱联用仪等仪器以及耦合化学计量学方法对油脂风味进行评价,从而有利于微波预处理—压榨法制备牡丹籽油的商业化生产。

参考文献

- [1] 王欣, 孟玉倩, 徐宝成, 等. 牡丹籽油高温碱煮—蒸汽爆破辅助水酶法提取工艺优化及其品质分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 147-153.
WANG X, MENG Y Q, XU B C, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction process assisted by high-temperature alkaline liquor cooking and steam explosion for peony seed oil and its quality analysis[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 147-153.
- [2] 马艺方, 蒋晴, 程恒光, 等. 10种小宗植物油的脂肪酸组成及氧化稳定性[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 51-59.

- MA Y F, JIANG Q, CHENG H G, et al. Composition and oxidative stability of fatty acids in ten small trade vegetable oils [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 51-59.
- [3] DENG R X, GAO J Y, YI J P, et al. Peony seeds oil by-products: chemistry and bioactivity[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 187: 115333.
- [4] XIA Z W, ZHANG J G, NI Z J, et al. Functional and emulsification characteristics of phospholipids and derived O/W emulsions from peony seed meal[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133112.
- [5] 冯贞, 方晓璞, 任春明. 不同提取方法对牡丹籽油品质和微量活性成分的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 17-19.
FENG Z, FANG X P, REN C M. Effects of extraction methods on quality and trace active components of peony seed oil[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(10): 17-19.
- [6] 李文罡, 孙晓莉, 祖元刚, 等. 适温压榨牡丹籽油工艺优化及理化性质分析[J]. 植物研究, 2020, 40(1): 73-78.
LI W G, SUN X L, ZU Y G, et al. Optimization peony seed oil extraction process at suitable temperature and physicochemical property analysis[J]. Bulletin of Botanical Research, 2020, 40(1): 73-78.
- [7] NDE D B, FONCHA A C. Optimization methods for the extraction of vegetable oils: a review[J]. Processes, 2020, 8(2): 209.
- [8] 王兴宏, 马绍英, 李秉建, 等. 牡丹籽油提取工艺与精炼工艺的优化[J]. 核农学报, 2019, 33(8): 1 559-1 568.
WANG X H, MA S Y, LI B J, et al. Optimization of extraction technology and refining process of peony seed oil by response surface methodology[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(8): 1 559-1 568.

- [9] 史小锋, 任力民. 超临界 CO₂ 萃取牡丹籽油的研究进展[J]. 粮食加工, 2016, 41(6): 47-54.
- SHI X F, REN L M. Research advance on preparation of peony seed oil by supercritical carbon dioxide extraction[J]. Grain Processing, 2016, 41(6): 47-54.
- [10] 赵优萍, 张沙沙, 张婷, 等. 不同提取方法对牡丹籽油品质与抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 11-16, 22.
- ZHAO Y P, ZHANG S S, ZHANG T, et al. Effects of different extraction methods on the quality and antioxidant properties of *Paeonia suffruticosa* seed oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 11-16, 22.
- [11] GUO T T, WAN C Y, HUANG F H. Extraction of rapeseed cake oil using subcritical R134a/butane: process optimization and quality evaluation[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(11): 3 570-3 580.
- [12] 李信, 郑畅, 上官慧娟, 等. 响应面法优化微波预处理文冠果冷榨工艺的研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(3): 8-12.
- LI X, ZHENG C, SHANGGUAN H J, et al. Optimization of microwave pretreatment for cold pressing of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. seed by response surface methodology[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(3): 8-12.
- [13] PAUL A, RADHAKRISHNAN M. Pomegranate seed oil in food industry: extraction, characterization, and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 273-283.
- [14] 何雅静, 傅金凤, 陈莉, 等. 预处理方式对牡丹籽毛油出油率及品质影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 86-91.
- HE Y J, FU J F, CHEN L, et al. Effect of pretreatment methods on oil yield and quality of peony seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(6): 86-91.
- [15] GAO P, LIU R, JIN Q, et al. Effects of processing methods on the chemical composition and antioxidant capacity of walnut (*Juglans regia* L.) oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 109958.
- [16] 赵菁菁, 田刚, 姜天宇, 等. 超临界 CO₂ 流体萃取牡丹籽油工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 131-135, 154.
- ZHAO Q Q, TIAN G, JIANG T Y, et al. Supercritical CO₂ fluid extraction of peony seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 131-135, 154.
- [17] ZHANG H H, GAO P, FANG H W, et al. High-oleic rapeseed oil quality indicators and endogenous antioxidant substances under different processing methods[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100804.
- [18] SUNDAR S, SINGH B, KAUR A. Infrared pretreatment for improving oxidative stability, physiochemical properties, phenolic, phytosterol and tocopherol profile of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 206: 117705.
- [19] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Physicochemical characteristics, oxidative stability, pigments, fatty acid profile and antioxidant properties of co-pressed oil from blends of peanuts, flaxseed and black cumin seeds[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100231.
- [20] 连四超, 刘玉兰, 朱文学, 等. 油莎豆脱皮和榨油条件对其工艺效果的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(12): 6-10.
- LIAN S C, LIU Y L, ZHU W X, et al. Influence of decortication and pressing oil conditions on the process effect of *Cyperus esculentus*[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(12): 6-10.
- [21] REZIG L, HARZALLI Z, GHARSALLAH K, et al. Microwave and roasting impact on pumpkin seed oil and its application in full-fat mayonnaise formula[J]. Foods, 2022, 11(18): 2 732.
- [22] ZHOU X, GEZAHEGN Y, ZHANG S, et al. Theoretical reasons for rapid heating of vegetable oils by microwaves[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100641.
- [23] 王晨曦, 夏依旦·买合苏木, 房徐涵, 等. 芫菁子油脂微波提取工艺及其脂肪酸和生物活性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10): 56-62.
- WANG C X, MAHSUM X, FANG X H, et al. Study on micro wave extraction technology of *Brassica rapa* L. seed oil and its fatty acids and biological activity[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(10): 56-62.
- [24] 杨芙蓉, 王进英, 雷风, 等. 烘烤和微波预处理对植物油品质特性影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 121-129.
- YANG F R, WANG J Y, LEI F, et al. Effects of oil-bearing materials roasting and microwave pretreatment on quality characteristics of oils prepared by screw mechanical pressing [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 121-129.