

响应面优化微波无溶剂提取鸡蛋花精油的研究

赵欣幸¹, 邓建梅^{1,2}, 余传波^{1,2*}

¹攀枝花学院生物与化学工程学院(农学院), 四川 攀枝花

²攀枝花市干热河谷特色生物资源开发四川省高校重点实验室, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月20日

摘 要

采用微波无溶剂萃取的方法, 通过响应面法优化鸡蛋花精油的提取工艺。探索浸润时间, 颗粒度, 微波提取时间, 微波提取功率对鸡蛋花精油得率的影响, 优化最佳提取工艺。结果表明, 影响鸡蛋花精油提取率的各种因素大小关系为微波提取功率 > 微波提取时间 > 浸润时间 > 颗粒度。提取鸡蛋花精油最佳工艺条件为浸润时间4.00 h, 颗粒度40目, 微波提取时间33.00 min, 微波提取功率470.00 W, 此时得率为0.1582%, 可得出响应面优化微波无溶剂提取鸡蛋花精油提取率较高, 该研究结果以期为鸡蛋花的合理开发提供理论依据。

关键词

鸡蛋花, 精油, 响应面

Study on Solvent Free Extraction of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*” Essential Oil by Microwave with Response Surface Optimization

Xinxing Zhao¹, Jianmei Deng^{1,2}, Chuanbo Yu^{1,2*}

¹College of Biological and Chemical Engineering (College of Agriculture), Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

²Key Laboratory of Dry-Hot Valley Characteristic Bio-Resources Development in Universities of Sichuan Province in Panzhihua City, Panzhihua Sichuan

Received: September 8, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 20, 2025

*通讯作者。

文章引用: 赵欣幸, 邓建梅, 余传波. 响应面优化微波无溶剂提取鸡蛋花精油的研究[J]. 农业科学, 2025, 15(10): 1206-1216. DOI: 10.12677/hjas.2025.1510151

Abstract

Microwave solvent-free extraction is used to optimize the extraction process of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*” essential oil by the response surface method. To explore the effects of soaking time, particle size, microwave extraction time and microwave extraction power on the yield of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*” essential oil, and to explore the best extraction technology. The results show that the factors affecting the extraction rate of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*” essential oil are as follows: microwave extraction power > microwave extraction time > soaking time > particle size. The optimum extraction conditions of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*” essential oil are as follows: soaking time is 4.00 h, granularity is 40.00, microwave extraction time is 33.00 min, microwave extraction power is 470.00 W, and the yield is 0.1582%. It can be concluded that the response surface optimization microwave solvent-free extraction of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*” essential oil has a higher extraction yield. The results of this study are expected to provide a theoretical basis for the reasonable development of *Plumeria rubra* “*Acutifolia*”.

Keywords

Plumeria rubra “*Acutifolia*”, Essential Oil, Response Surface

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鸡蛋花(*Plumeria rubra* ‘*Acutifolia*’)是夹竹桃科鸡蛋花属的植物, 别名蛋黄花、缅栀子、大季花等[1]。鸡蛋花原产于墨西哥、西印度群岛及委内瑞拉等地, 现广泛栽植于亚洲的热带及亚热带地区[2], 目前我国也有少许省份栽培鸡蛋花。鸡蛋花在 2010 年被国家卫生部批准为药食两用的中药材, 是王老吉、五花茶的主要原料[3]。鸡蛋花具有清新淡雅的香味, 香气的主要成分为醇类和酯类物质[4]-[6], 用于提取名贵精油, 作为高级化妆品、香皂和食品添加剂等。

植物精油是一种芳香性液体, 可以采用多种方法从植物的组织中提取出来[7]。目前提取精油的方法有水蒸气蒸馏法[8] [9], 超声波辅助水蒸气蒸馏法[10], 超临界 CO₂ 萃取技术[11]。但这几种方法有以下问题, 比如有机溶剂残留、操作复杂、提取效率低。本着绿色环保的概念, 本实验采用无溶剂微波法, 利用微波辐照植物组织, 植物组织水分发生汽化, 精油随之馏出, 再经冷凝管冷凝, 得到植物精油。这种无溶剂微波萃取高效, 反应充分, 无残留, 得到精油安全无毒。

精油是天然绿色产品, 可以作为绿色抗菌剂, 开发成中草药, 在日用品等产业上具有一定的研究价值和发展前景。目前国内外已有较多鸡蛋花相关的研究报道[12]-[14], 还未有关于无溶剂微波萃取工艺提取鸡蛋花精油的相关报道, 因此本研究对微波无溶剂萃取工艺条件进行优化, 为鸡蛋花精油提取工艺打下一定基础。

2. 材料和方法

2.1. 材料

新鲜鸡蛋花花朵(黄缅栀), 含水率 55%, 采自攀枝花市区, 采集时间 2025 年 5 月。

2.2. 试剂

蒸馏水。

2.3. 主要仪器与设备

MKX-E1A 微波生物萃取仪，青岛迈克威微波创新科技有限公司；YF-150B 高速多功能粉碎机，永历制药有限公司；LC-FA1004 电子天平，上海力辰科技有限公司。

2.4. 方法

2.4.1. 微波无溶剂提取鸡蛋花精油

将新鲜鸡蛋花自然晾干后粉碎，称取鸡蛋花粉末 100.0000 g，放入干燥圆底烧瓶中，加入适量的蒸馏水，在微波无溶剂萃取仪中反应，将馏出液收集起来，提纯，每次实验三次重复，取其平均值，按式 1 计算得率。

$$\text{鸡蛋花精油得率}(\%) = (\text{鸡蛋花精油的质量} / \text{鸡蛋花粉末的质量}) \times 100\% \quad (\text{式 } 1)$$

2.4.2. 单因素实验

鸡蛋花精油用微波无溶剂法提取，按照 1.4.1 方法进行提取，分别考察提取鸡蛋花精油的浸润时间、颗粒度、微波提取功率、以及微波提取时间的影响。设置浸润时间为 1、2、3、4、5 h，颗粒度为 20 目、40 目、60 目、80 目、100 目，微波提取时间 20、30、40、50、60 min 和微波提取功率 300、400、500、600、700 W。

2.4.3. 响应面实验

本次实验利用 Design-Expert 软件中的 Box-Behnken 的设计原理，通过以上单因素实验结果对 4 因素 3 水平进行响应面实验。再通过响应面实验从实验数据中分析鸡蛋花精油的最佳工艺条件。实验设计如表 1，进行 4 因素 3 水平设计，进行响应面实验。

2.4.4. 验证性试验

在上述响应面分析法所得到的最佳工艺条件下，结合实际情况，对结果进行修正，进行验证试验。并重复 3 次实验将获得的鸡蛋花精油提取率取平均值，并与之与响应面软件所得的最佳工艺条件下所得的鸡蛋花精油得率相比较，判断结果的真实性。

Table 1. Response surface experiment design

表 1. 响应面实验设定

因素	水平		
	-1	0	1
A (浸泡时间/h)	2	3	4
B (颗粒度/目)	40	60	80
C (微波提取时间/min)	30	40	50
D (微波提取功率/W)	400	500	600

3. 结果与分析

3.1. 单因素结果分析

3.1.1. 浸润时间对精油提取率的影响

如图 1 所示，鸡蛋花经过 3 h 的浸润，精油的提取率达到最大。在浸润时间为 1 h~3 h 里，精油提取

率逐渐升高,当浸润时间为3 h~5 h时,精油提取率再次下降。可能是采用少量水进行浸润时,细胞内的活性物质逐渐释放出来,挥发性物质增多,从而精油提取率增加。但当浸润时间过多时,挥发性物质逐渐释放完,精油提取率逐渐降低[15][16]。所以在浸润时间3 h时达到顶峰,选用3 h作为最佳浸润时间。

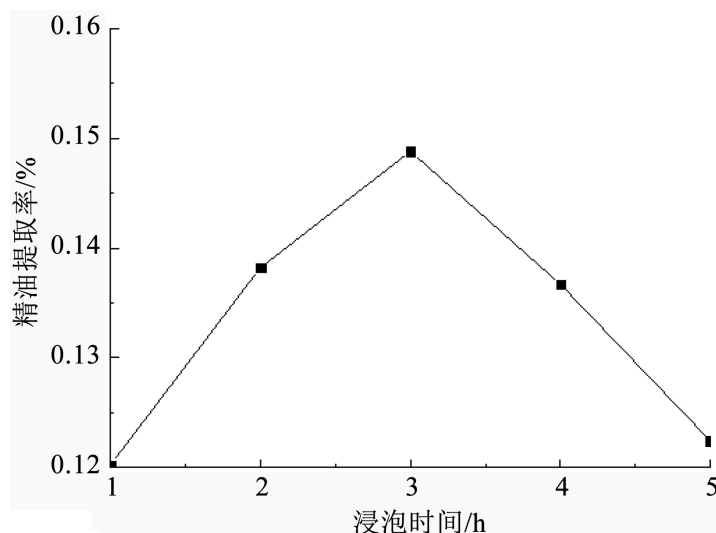


Figure 1. Effect of soaking time on extraction rate of essential oil
图 1. 浸泡时间对精油提取率的影响

3.1.2. 颗粒度对精油提取率的影响

如图2所示,鸡蛋花精油的提取率在颗粒度增加的情况下,呈现先扬后抑的趋势。当颗粒度达到60目时,精油提取率达最大值。当颗粒度在20目~60目时,精油提取率逐渐上升,这可能与物质的比表面积有关,颗粒越大,比表面积小,精油没能很好地释放出来。当颗粒度在60目~100目时,颗粒越细,但可能会出现团聚现象,使得比表面积较大,抑制精油释放[17]。而颗粒度在60目时,精油提取率达到0.1457%。综上所述,采用60目作为最佳提取颗粒度。

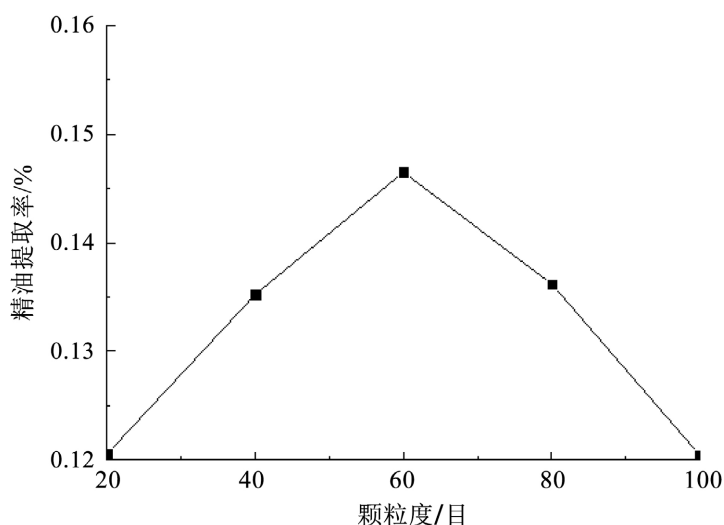


Figure 2. Effect of particle size on extraction rate of essential oil
图 2. 颗粒度对精油提取率的影响

3.1.3. 微波提取时间对精油提取率的影响

由图 3 所示,当微波提取时间为 20 min~40 min 时,精油提取率呈现直线上升,超过 40 min 后逐渐降低。这可能是因为微波提取精油,加快鸡蛋花细胞壁的快速破裂,从而使精油很快释放出来,当后期随着时间增多,细胞壁破裂完毕,精油量也随之减少[18]。但当微波提取时间在 40 min~60 min 时,精油提取率反而下降,这可能是随着时间的增加,细胞空隙已经增大到极限,精油逐渐释放完。所以,选用 40 min 作为微波提取的最佳时间。

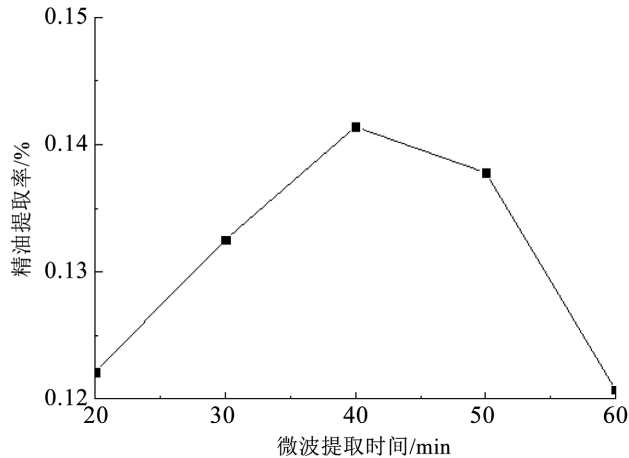


Figure 3. Effect of microwave extraction time on extraction rate of essential oil
图 3. 微波提取时间对精油提取率的影响

3.1.4. 微波提取功率对精油提取率的影响

如图 4 所示,鸡蛋花精油的提取率在微波 500 W 的情况下达到最大值。在进行微波功率试验时,当微波功率为 300 W~400 W 时,精油提取率直线上升,当 400 W~500 W 时,精油提取率继续上升,但趋势较缓慢。当 500 W~700 W 时,精油提取率逐渐降低。这可能在微波提取中,微波功率越大,鸡蛋花细胞破裂得越快[19][20],但当功率过大时,可能会导致挥发性物质损失,甚至活性物质发生分解[21][22]。在 500 W 时,达到峰值,因此,选用 500 W 作为最佳的微波提取功率。

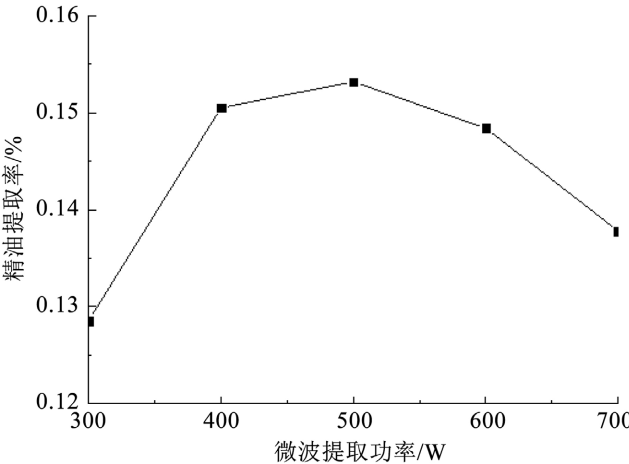


Figure 4. Effect of microwave extraction power on extraction rate of essential oil
图 4. 微波提取功率对精油提取率的影响

3.2. 响应面实验结果与分析

3.2.1. 响应面试验结果

用字母 Y 表示鸡蛋花精油的提取率，具体结果见表 2。

Table 2. The response surface experimental results

表 2. 响应面试验结果

试验号	A/h	B/目	C/min	D/W	精油提取率% (Y)
1	−1	−1	0	0	0.1471
2	1	−1	0	0	0.1499
3	−1	1	0	0	0.1478
4	1	1	0	0	0.1467
5	0	0	−1	−1	0.1433
6	0	0	1	−1	0.1320
7	0	0	−1	1	0.1392
8	0	0	1	1	0.1452
9	−1	0	0	−1	0.1411
10	1	0	0	−1	0.1441
11	−1	0	0	1	0.1448
12	1	0	0	1	0.1437
13	0	−1	−1	0	0.1498
14	0	1	−1	0	0.1420
15	0	−1	1	0	0.1402
16	0	1	1	0	0.1475
17	−1	0	−1	0	0.1431
18	1	0	−1	0	0.1477
19	−1	0	1	0	0.1450
20	1	0	1	0	0.1436
21	0	−1	0	−1	0.1446
22	0	1	0	−1	0.1404
23	0	−1	0	1	0.1449
24	0	1	0	1	0.1471
25	0	0	0	0	0.1528
26	0	0	0	0	0.1525
27	0	0	0	0	0.1498
28	0	0	0	0	0.1521
29	0	0	0	0	0.1497

3.2.2. 模型的建立及方差分析

回归分析结果如表 3 所示。

Table 3. Results of regression analysis
表 3. 回归分析结果

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr > F	显著性
模型	14	5.522×10^{-4}	3.945×10^{-5}	32.04	<0.0001	**
A	1	3.853×10^{-6}	3.853×10^{-6}	3.13	0.0986	
B	1	2.083×10^{-6}	2.083×10^{-6}	1.69	0.2143	
C	1	1.121×10^{-5}	1.121×10^{-5}	9.11	0.0092	**
D	1	3.136×10^{-5}	3.136×10^{-5}	25.48	0.0002	**
AB	1	3.802×10^{-6}	3.802×10^{-6}	3.09	0.1007	
AC	1	9.000×10^{-6}	9.000×10^{-6}	7.31	0.0171	*
AD	1	4.202×10^{-6}	4.202×10^{-6}	3.41	0.0859	
BC	1	5.700×10^{-5}	5.700×10^{-5}	46.30	<0.0001	**
BD	1	1.024×10^{-5}	1.024×10^{-5}	8.32	0.0120	*
CD	1	7.482×10^{-5}	7.482×10^{-5}	60.78	<0.0001	**
A ²	1	2.137×10^{-5}	2.137×10^{-5}	17.36	0.0010	**
B ²	1	1.253×10^{-5}	1.253×10^{-5}	10.18	0.0065	**
C ²	1	1.664×10^{-4}	1.664×10^{-4}	135.17	<0.0001	**
D ²	1	2.406×10^{-4}	2.406×10^{-4}	195.42	<0.0001	**
残差	14	1.723×10^{-5}	1.231×10^{-6}			
失拟项	10	8.127×10^{-6}	9.127×10^{-7}	0.36	0.9151	
纯误差	4	9.108×10^{-6}	2.277×10^{-6}			
总和	28	5.695×10^{-4}		R ² =0.9697	R ² _{Adj} = 0.9395	

注：“**”为差异极显著(P < 0.01)；“*”为差异显著(P < 0.05)；不显著(P > 0.05)。

对鸡蛋花精油的提取率及各影响因素进行回归拟合，得到提取率(Y)与影响提取率的因素：浸润时间(A)、颗粒度(B)、微波提取时间(C)、微波提取功率(D)之间的二次回归拟合方程如式 2 所示：

$$Y = 0.15 + 5.667 \times 10^{-4} A - 4.167 \times 10^{-4} B - 9.667 \times 10^{-4} C + 1.617 \times 10^{-3} D - 9.750 \times 10^{-4} AB - 1.500 \times 10^{-3} AC - 1.025 \times 10^{-3} AD + 3.775 \times 10^{-3} BC + 1.600 \times 10^{-3} BD + 4.325 \times 10^{-3} CD - 1.815 \times 10^{-3} A^2 - 1.390 \times 10^{-3} B^2 - 5.065 \times 10^{-3} C^2 - 6.090 \times 10^{-3} D^2 \quad (\text{式 } 2)$$

根据表 2 的实验结果，进行回归分析，具体分析见表 3。

由表 3 看出，失拟项 P > 0.05，模拟模型非常显著(P < 0.0001)，回归模型的相关系数 R² = 0.9697，Radj² = 0.9395，说明蛋花精油的提取过程模型与实际情况有较高的拟合度，故可用于优化鸡蛋花精油的提取。其中一次项 C、D、交互项 BC、CD，二次项 A²、B²、C²、D² 都很显著(P < 0.01)；交互项 AC、BD 显著(P < 0.05)，表明鸡蛋花精油的提取率与各提取条件之间有非线性关系，即鸡蛋花精油的得率不是受单一因素影响，而是由多种因素综合的影响。比如 AC 交互显著，可能是由于浸泡时间越久，提取功率越大，激活细胞内精油释放，两者交互影响显著[23]。通过表 3 中 F 值可知影响鸡蛋花精油提取率的因素大小顺序依次为 D > C > A > B，即微波提取功率 > 微波提取时间 > 浸润时间 > 颗粒度。

3.2.3. 以鸡蛋花精油得率为响应值的响应面等高线及三维立体图结果和分析

根据构建的回归模型，考察鸡蛋花精油的各提取条件交互作用与提取率之间的响应面图。通过建立模型可以直观地展示浸润时间/h(A)、颗粒度/目(B)、微波提取时间/min(C)、微波提取功率/W(D)四个因子交互作用，由三维图最高点和等高线圆心可以得出，在所选范围内存在极值，这个极值是响应面三维图的最高点，同时它是等高线中最小椭圆的中心点[24]。三维立体图及等高线图见图 5~图 10。

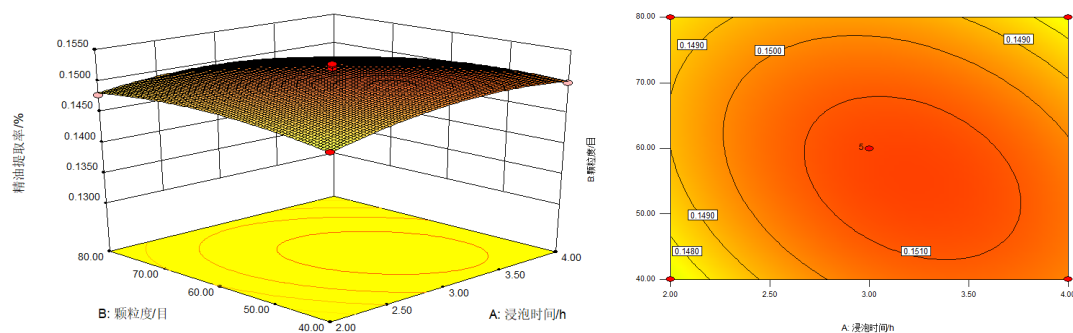


Figure 5. Response surface and contour of $Y = f(A, B)$

图 5. $Y = f(A, B)$ 的响应面及等高线

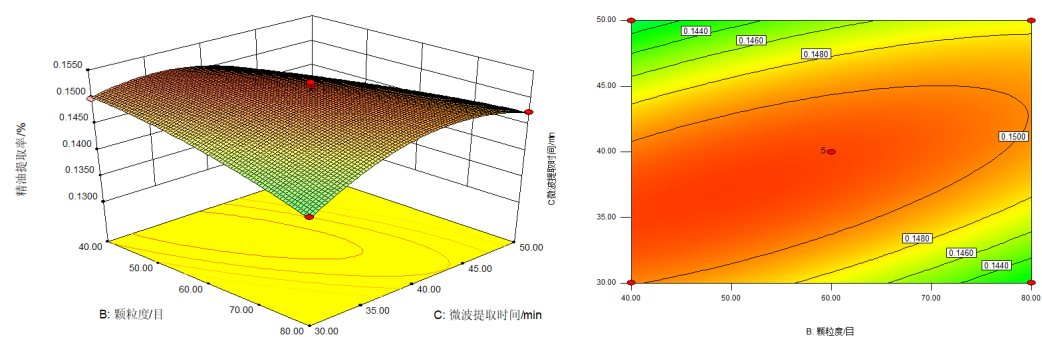


Figure 6. Response surface and contour of $Y = f(B, C)$

图 6. $Y = f(B, C)$ 的响应面及等高线

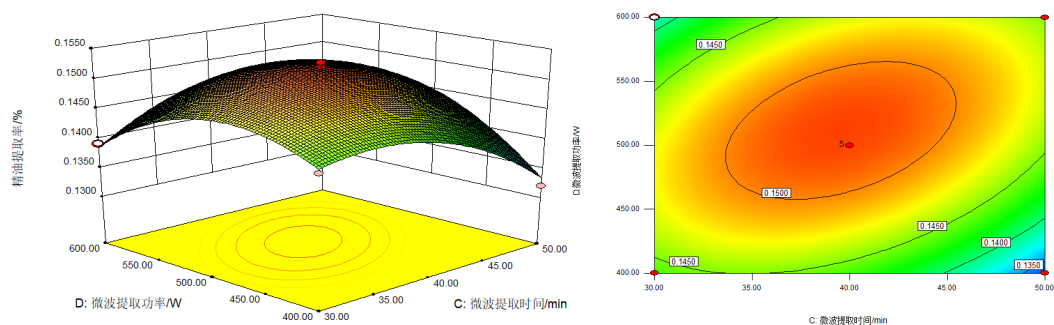


Figure 7. Response surface and contour of $Y = f(C, D)$

图 7. $Y = f(C, D)$ 的响应面及等高线

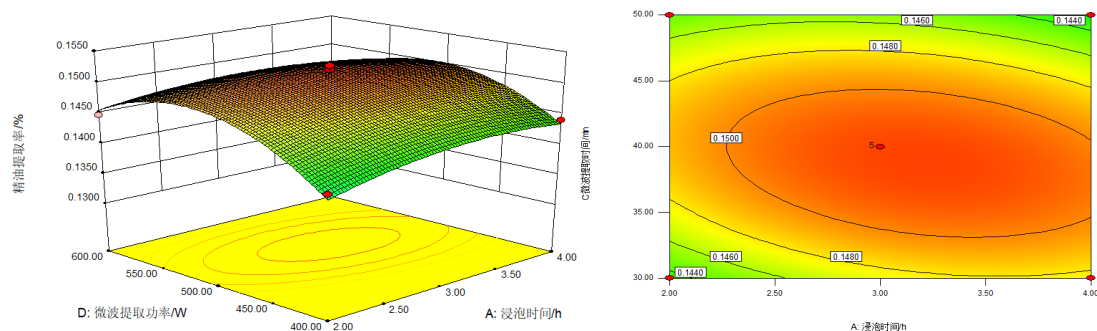


Figure 8. Response surface and contour of $Y = f(A, D)$

图 8. $Y = f(A, D)$ 的响应面及等高线

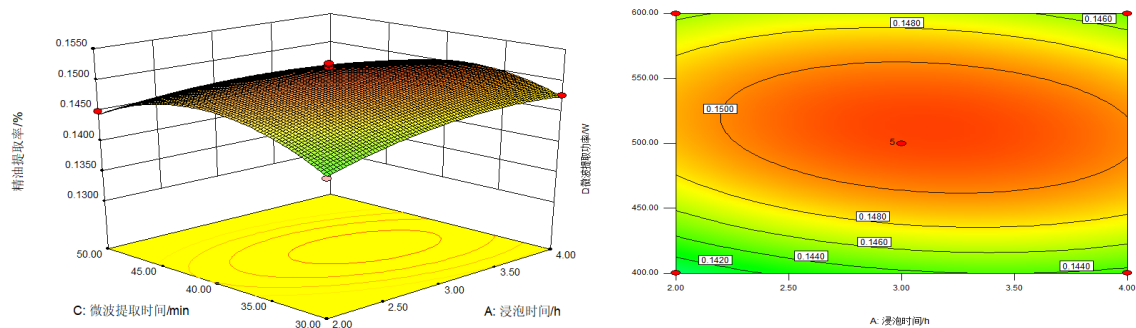


Figure 9. Response surface and contour of $Y = f(A, C)$
图 9. $Y = f(A, C)$ 的响应面及等高线

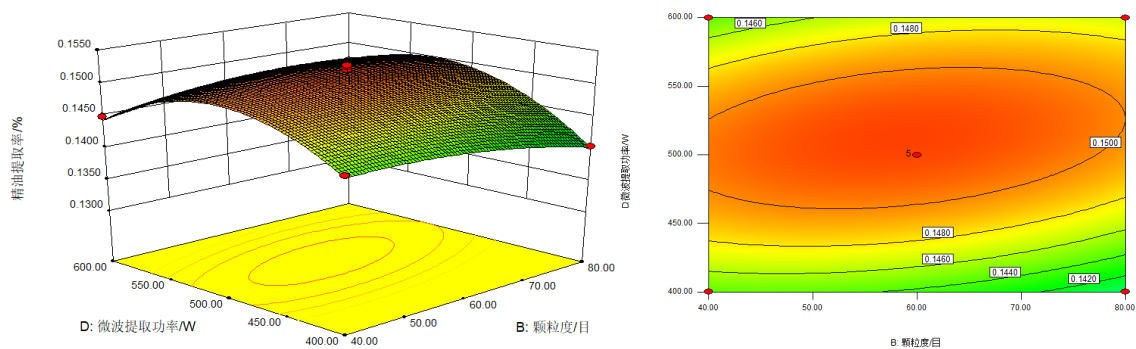


Figure 10. Response surface and contour of $Y = f(A, C)$
图 10. $Y = f(B, D)$ 的响应面及等高线

由图 5~图 10 的三维立体图可以看出, 颜色由绿黄红变化, 表示响应值也从小到大逐渐变化, 变化迅速的响应面越陡峭。具体表现为微波提取功率对鸡蛋花精油提取率影响最显著, 在图上呈现陡峭的曲面, 微波提取时间对鸡蛋花精油提取率影响也较显著, 曲面比较陡峭; 影响较小的是浸润时间和颗粒度, 通过图表现为曲面较平滑, 响应值变化不明显。

从图 6 和图 7 的三维图看出, 曲面最为陡峭, 曲面颜色由绿到黄最后到红的变化, 表明微波提取时间和颗粒度对鸡蛋花精油提取率的交互影响显著, 同时也表明微波提取时间和微波提取功率对鸡蛋花精油提取率的交互影响也显著; 而图 9、图 10 的曲面变化较平滑, 几者对鸡蛋花精油提取率的交互作用较明显; 但图 5、图 8 的曲面变化平坦, 几者对鸡蛋花精油提取率的交互作用不显著。

从图 5 和图 10 的等高线图同理分析: 图 6 和图 7 的等高线呈现明显的椭圆形, 且密集排布, 由此看出颗粒度和微波提取时间以及微波提取时间和微波提取功率对鸡蛋花精油提取率的交互作用最显著[24]。而图 9 和图 10 的等高线接近于圆形, 排布较分散, 说明浸润时间和颗粒度以及颗粒度和微波提取功率对鸡蛋花精油提取率的交互作用较显著。剩下两个等高线几乎呈圆形, 说明对鸡蛋花精油提取率几乎没有影响, 这与响应面分析表一致。

3.2.4. 微波辅助提取鸡蛋花精油优化及验证

通过 Design-expert 软件模拟得到最优的微波无溶剂辅助提取鸡蛋花精油工艺条件: 浸润时间 3.80 h, 颗粒度 40.00 目, 微波提取时间 32.71 min, 微波提取功率 467.40 W。此时鸡蛋花精油得率达到最高值, 且为 0.1528%。考虑到实际操作可行性, 最终确定以浸润时间 4.0 h, 颗粒度 40.00 目, 微波提取时间 33.00 min, 微波提取功率 470.00 W 为超声波辅助提取鸡蛋花精油的最优工艺条件, 并进行 3 次重复试

验,进行验证,结果见表4。结果表明,平均值为0.1582%,由此可知,采用响应面 Design-expert 软件模拟得出的最优工艺条件的工艺参数真实可靠,具有较强的参考价值。

Table 4. Results of confirmatory experiment
表 4. 验证性实验结果

	第一组	第二组	第三组	平均值	相对误差
鸡蛋花精油得率	0.1530%	0.1549%	0.1538%	0.1582%	1.0100%

4. 结论

为更好地提取鸡蛋花精油,设置了单因素实验和响应面设计实验。结果表明:在单因素实验中,当浸润时间 3 h,颗粒度 60 目,微波提取时间 40 min,微波提取功率 500 W 时,鸡蛋花精油率达到最大值。在响应面优化实验中,当浸润时间 4.00 h,颗粒度 40.00 目,微波提取时间 33.00 min,微波提取功率 470.00 W,此时得率为 0.1582%,表明模型的可行性,同时得到回归方程拟合度较高,表明试验设计合理。同时该值高于韩明研究的水蒸气提取鸡蛋花精油得率 0.1100% [25] [26],可能是由于采用微波辅助无溶剂提取,减少鸡蛋花精油损失,故提取率较高。这也证实了微波辅助无溶剂提取精油的优越性,该研究结果以期为鸡蛋花的合理开发提供理论依据。

基金项目

干热河谷特色生物资源开发四川省高校重点实验室(JDH-2019-C-03)。

参考文献

[1] 梅全喜. 广东地产药材研究[M]. 广州: 广东科技出版社, 2010: 387.

[2] 武爱龙, 吴建阳, 卓海容. 鸡蛋花的研究进展[J]. 农业科技通讯, 2017(7): 55-58.

[3] 刘敬, 林静曼, 赵斌, 等. ICP-MS 测定鸡蛋花无机元素的主成分分析和聚类分析[J]. 中医药导报, 2020, 26(4): 8-11.

[4] Egwaikhede, P.A., Okeniyi, S.O. and Gimba, C.E. (2009) Screening for Anti-Microbial Activity and Phytochemical Constituents of Some Nigerian Medicinal Plants. *Journal of Medicinal Plants Research* 3, 1088-1091.

[5] Spmi, S., Abdulwali, A. and Jamaludin, M. (2018) The Antioxidant and Xanthine Oxidase Inhibitory Activity of *Plumeria rubra* Flowers. *Molecules*, 23, Article 400.

[6] 农石蓉, 莫焯, 梁焕葵, 等. 鸡蛋花的化学成分及药理作用研究进展[J]. 玉林师范学院学报, 2024, 45(3): 76-83.

[7] 王东营, 董颖, 孟雨东, 等. 响应面法优化水蒸气蒸馏提取茺菟精油的工艺研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(5): 183-186.

[8] 王莹, 江涛, 阮征, 等. 溶剂萃取法纯化迷迭香酸研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(5): 20-21.

[9] 孙凤蕊. 肉桂油提取工艺的研究及优化[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.

[10] 李杰, 李婧楠, 王艺文, 等. 超声辅助低共熔溶剂法提取黄芩中 3 种黄酮类成分的工艺研究[J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(2): 143-146.

[11] 陈铁壁, 全沁果, 段丽萍, 等. 超临界 CO₂ 萃取肉桂皮中肉桂油[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(12): 229-234.

[12] 邓永飞, 何惠欢, 马瑞佳, 等. 植物精油在食品行业中的应用[J]. 中国调味品, 2020, 45(6): 181-184, 200.

[13] 张丽霞, 刘红星, 陈今浩. 鸡蛋花挥发油成分的提取及分析[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(6): 39-40.

[14] Golmakani, M. and Rezaei, K. (2008) Comparison of Microwave-Assisted Hydrodistillation with the Traditional Hydrodistillation Method in the Extraction of Essential Oils from *Thymus vulgaris* L.. *Food Chemistry*, 109, 925-930. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.084>

[15] 孙宁云, 姚欣, 张英慧, 等. 鸡蛋花多糖提取工艺优化及生物活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 180-185.

[16] 李小红, 吴地尧, 李安, 等. 缬草挥发油的微波辅助提取工艺及其抗氧化活性[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8):

- 198-201.
- [17] Calinescu, I., Gavrilă, A., Ivopol, M., Ivopol, G., Popescu, M. and Mircioaga, N. (2014) Microwave Assisted Extraction of Essential Oils from Enzymatically Pretreated Lavender (*Lavandula angustifolia* Miller). *Open Chemistry*, **12**, 829-836. <https://doi.org/10.2478/s11532-014-0532-4>
- [18] Sayyar, S., Abidin, Z.Z., Yunus, R. and Muhammad, A. (2009) Extraction of Oil from Jatropha Seeds-Optimization and Kinetics. *American Journal of Applied Sciences*, **6**, 1390-1395. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.1390.1395>
- [19] 李燕, 雷云周. 溶剂、微波萃取法提取柑橘皮精油[J]. 应用化工, 2013, 42(10): 1851-1853.
- [20] Liu, Z., Deng, B., Li, S. and Zou, Z. (2018) Optimization of Solvent-Free Microwave Assisted Extraction of Essential Oil from *Cinnamomum camphora* Leaves. *Industrial Crops and Products*, **124**, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.016>
- [21] Vinatoru, M., Mason, T.J. and Calinescu, I. (2017) Ultrasonically Assisted Extraction (UAE) and Microwave Assisted Extraction (MAE) of Functional Compounds from Plant Materials. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **97**, 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.002>
- [22] Kapadiya, S.M., Parikh, J. and Desai, M.A. (2018) A Greener Approach Towards Isolating Clove Oil from Buds of *Syzygium aromaticum* Using Microwave Radiation. *Industrial Crops and Products*, **112**, 626-632. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.060>
- [23] Kshirsagar, A.C. and Singhal, R.S. (2007) Optimization of Starch Oleate Derivatives from Native Corn and Hydrolyzed Corn Starch by Response Surface Methodology. *Carbohydrate Polymers*, **69**, 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.01.007>
- [24] 杜建平, 韦启迪, 崔宏浩, 等. 响应面法优化钩藤中钩藤碱、异钩藤碱和毛钩藤碱的提取工艺[J/OL]. 分子植物育种: 1-14. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230602.1439.013.html>, 2023-06-04.
- [25] 韩明. 鸡蛋花精油提取及其成分分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(20): 6100-6102.
- [26] 王萍, 张瑞瑞, 廖予菲, 等. 微波辅助水蒸气蒸馏法提取芹菜籽挥发油及其体外抗氧化活性研究[J]. 现代中药研究与实践, 2025, 39(2): 61-65.