

星点设计-响应面法优化密闭微波辅助提取辣椒素工艺

游国叶, 史琼, 杜晶(信阳职业技术学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 目的 优化密闭微波辅助提取辣椒素的提取工艺。方法 以提取率为因变量, 以粒度、液料比、提取时间、提取温度为考察单因素, 采用星点设计-响应面优化法优化提取工艺条件, 通过方差分析及线性、二项式回归方程模型拟合, 进行预测分析。结果 经优化得到最佳实验条件为药材粒度 90 目, 液料比(mL : g)43 : 1, 微波温度 85 °C, 微波时间 18 min, 微波功率为 550 W, 75%乙醇做提取溶剂。在此条件下, 辣椒素得率为 7.59 mg·g⁻¹(RSD=2.52%, n=3), 与模型预测值相符。结论 与传统溶剂回流法相比, 该方法简单、提取率更高。

关键词: 辣椒素; 星点设计; 密闭微波提取; 响应面法; 辣椒

中图分类号: R943 文献标志码: B 文章编号: 1007-7693(2021)08-0959-07

DOI: 10.13748/j.cnki.issn1007-7693.2021.08.010

引用本文: 游国叶, 史琼, 杜晶. 星点设计-响应面法优化密闭微波辅助提取辣椒素工艺[J]. 中国现代应用药学, 2021, 38(8): 959-965.

Optimization of Pressurized Microwave-assisted Extraction Technology of Capsaicin by Central Composite Design-response Surface Methodology

YOU Guoye, SHI Qiong, DU Jing(Xinyang Vocational and Technical College, Xinyang 464000, China)

ABSTRACT: OBJECTIVE To optimize extraction technology of capsaicin by pressurized microwave-assisted extraction. **METHODS** Using extraction rate as dependent variables, using particle size, ratio of liquid to solid, extraction time, extraction temperature as independent variables, central composite design-response surface methodology were used to optimize the extracting process conditions. Through variance analysis and linear and binomial regression equation model fitting, the prediction analysis was carried out. **RESULTS** The optimum extraction conditions were as follows: particle size was 90 mesh, ratio of liquid to solid(mL : g) was 43 : 1, microwave temperature was 85 °C, microwave time was 18 min, microwave power was 550 W, solvent was 75% ethanol. Under these conditions, the yield of capsaicin could reach 7.59 mg·g⁻¹(RSD was 2.52%, n=3), which was close to the model predictions. **CONCLUSION** Compared with traditional solvent reflux method, this method is simple and has higher extraction rate.

KEYWORDS: capsaicin; central composite design; pressurized microwave-assisted extraction; response surface; Capsici Fructus

辣椒又名海椒、番椒、辣茄等, 为茄科植物辣椒(*Capsicum annuum* L.)的干燥成熟果实^[1]。辣椒素是从辣椒属植物中得到一种生物碱类药用活性成分, 高纯度的辣椒碱为白色片状或针状结晶或白色粉末, 能溶于乙醇、乙醚、苯及氯仿, 微溶于二硫化碳^[2]。它是辣椒中含量较高的有效成分, 具有促进肾上腺分泌、抑菌、镇痛止痒、消炎消肿、增进食欲、防治风湿与抗肿瘤、促进人体代谢、催泪催嚏等作用^[2-5], 在医药、军事、化工涂料及食品保健等领域应用广泛^[2], 具有极高的药用价值和经济价值, 因此研究从辣椒中有效地提取分离出辣椒素, 具有十分重要的意义。

目前, 国内已有多种提取辣椒素的方法^[6-9], 微波提取技术具有加热迅速、耗能低、操作时间短、溶剂耗量少、不破坏环境、降低污染、提取效率高等优点^[10-11], 根据提取方式不同可分为高压式微波提取和常压式微波提取 2 类, 前者是在高温高压条件下提取有效成分, 可同时快速、高效地处理多个样品, 亦称为密闭微波辅助提取 (pressurized microwave-assisted extraction, PMAE) 法; 后者则是在常压条件改装设备进行提取, 存在提取不均匀且提取时间长, 挥发性物质易损失等缺陷, 亦称为聚焦微波提取法。本研究首次采用 PMAE 法提取, 以辣椒素得率为指标, 通过

基金项目: 河南省科技发展计划(172102310315)

作者简介: 游国叶, 女, 硕士, 讲师 Tel: 18211737065 E-mail: yeziyin_xiangyou@sina.com

HPLC 测定提取物中辣椒素含量,采用星点设计-响应面法优化提取条件得到最佳提取工艺,与文献[7-9]中的方法相比,无需改动微波装置,避免因局部受热不均而产生暴沸的情况,以期为辣椒及辣椒素类产品生产提供参考。

1 仪器与试剂

HC-83203FB 微波炉(格兰仕公司); LC-10AT 型高效液相色谱仪,包括 SPD-10AVP 型紫外检测器、CBM-102 型色谱工作站(日本岛津公司)、Kromasil-C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm); TU-1810 紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); RE-52AA 型旋转蒸发器、HH-型恒温水浴(上海雅荣生化设备仪器有限公司); pH5-25 数显 pH 计(上海虹益仪器仪表有限公司); 中药粉碎机(温岭市林大机械有限公司); KQ5200DB 数控型超声波清洗器(昆山超声波仪器有限公司)。

天然辣椒素对照品(中国药品生物制品检定所,批号:100829-201605;纯度:95%);无水乙醇、盐酸、氢氧化钠、甲醇、氯仿(分析纯,郑州德众化学试剂厂);甲醇、乙腈(色谱纯,山东禹王实业有限公司);干辣椒(亳州市药材有限公司,批号:20180809,20180819,20180825),经信阳职业技术学院吴长忠副教授鉴定为朝天椒[*Capsicum annuum* L. var. *conoides* (Mill.) Irish]果实。药材机械粉碎后过筛,按不同目数分别存储,备用。

2 方法与结果

2.1 提取方法

2.1.1 微波提取法 称取已过 90 目的辣椒干粉 3.0 g,按液料比(mL : g)为 43 : 1 加入 75%乙醇后,密闭微波 550 W 处理(18 min, 85 °C),提取液冷却至室温。

2.1.2 溶剂回流法 称取已过 90 目辣椒干粉 3.0 g 于提取罐中,加入 75%乙醇 240 mL 后置于水浴上(100 °C,提取 60 min,回流 2 次),提取液冷却至室温。

2.2 分离及纯化

将上提取液分别减压抽滤,旋干滤液,加 30 mL pH 2.0 盐酸溶液超声(40 kHz, 200 W, 5 min 为一间隔振摇,共计 15 min)溶解,之后置于分液漏斗中,加氯仿萃取,水相用 1% NaOH 溶液调至 pH 10.0,同法操作重复 3 次,每次 30 mL,收集氯仿层,旋干,用甲醇溶解、定容,得供试品溶液,备用。

2.3 HPLC 的建立

2.3.1 溶液的制备 ①对照品溶液的制备:精密称取辣椒素对照品 50 mg,乙醇稀释定容至 100 mL 量瓶中,配成质量浓度为 500 μg·mL⁻¹ 的对照品储备液,密封,置于冰箱内保存,使用时按需逐级稀释。②供试品溶液的制备:按照“2.1.1”项下方法提取、“2.2”项下方法分离纯化即得。③空白样品溶液:同辣椒素对照品溶液配制方法配制不含辣椒素的空白样品溶液,备用。

2.3.2 测定条件 辣椒素对照品溶液在 200~400 nm 波长内扫描,显示其在 280 nm 处有最大吸收,且阴性对照在此处无吸收,故选择检测波长为 280 nm。

色谱条件:甲醇-水(80 : 20)为流动相,280 nm 为检测波长,柱温 30 °C,流速 1.0 mL·min⁻¹,进样量 20 μL。出峰时间 6.5 min,相邻色谱峰的分度度>1.5,分离效果良好。辣椒素对照品溶液及辣椒素供试品溶液色谱图见图 1。

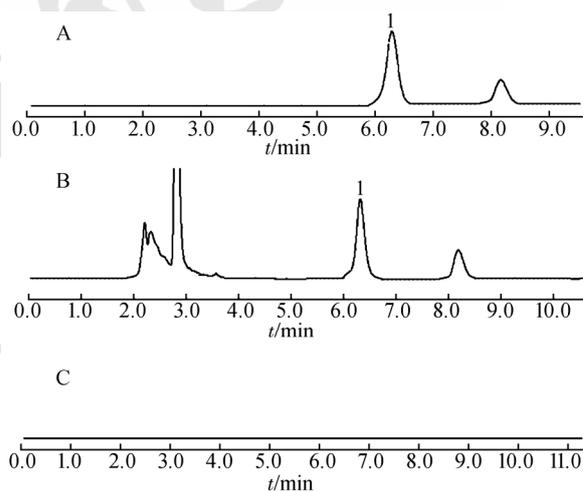


图 1 高效液相色谱图

A-对照品溶液; B-供试品溶液; C-空白样品溶液; 1-辣椒素。

Fig. 1 HPLC chromatograms

A-standard solution; B-sample solution; C-blank sample solution; 1-capsaicin.

2.3.3 线性关系、检测限、定量限考察 分别吸取辣椒素对照品储备液适量,用流动相稀释定容于 25 mL 量瓶内,按“2.3.2”项下色谱条件测定,以峰面积(A)对相应质量浓度(C)绘制标准曲线。结果显示,辣椒素的质量浓度在 2~100 μg·mL⁻¹ 与其峰面积呈良好线性关系,回归方程为 $A=17\ 118C+2\ 851.6$, $r=0.999\ 9$ 。检出限及定量限分别为 0.016 μg·mL⁻¹ 和 0.080 μg·mL⁻¹。

2.3.4 仪器精密度考察 取辣椒素对照品储备液适量,以流动相稀释,重复测定 6 次,考察日内精密度,结果显示,日内精密度 RSD 为 0.28%,表明仪器精密度良好。

2.3.5 重复性试验 称取 3.0 g 辣椒干粉 6 份(批号:20180819,按“2.1.1”项下微波提取方法进行提取并纯化,按“2.3.2”项下色谱条件进样测定,结果显示 RSD 为 1.40%($n=6$),表明重复性良好。

2.3.6 稳定性试验 取供试品溶液(批号:20180819),分别于 0, 2, 4, 8, 16, 24 h 测定,结果显示 RSD 为 1.20%($n=6$),表明提取液在 24 h 内稳定。

2.3.7 准确度考察 按照优化试验条件,分别称取已知含量的干辣椒药材加入辣椒素对照品溶液进行加标回收试验,测定含量,计算回收率。平均回收率为 97.57%, RSD 为 0.83%。

2.4 单因素试验

为得到辣椒素的最佳提取工艺,结合前期预实验结果,本研究以提取率为考察指标,分别对粒度、液料比、提取溶剂种类及浓度、微波功率、提取时间及温度等对辣椒素提取率有影响的因素进行了考察。

2.4.1 提取溶剂种类及浓度对提取率的影响 因辣椒素仅能溶解于某些有机溶剂,故试验中首先考察了甲醇、乙醇、丙酮、乙醇-丙酮(1:1)、甲醇-丙酮(1:1) 4 类不同提取溶剂对辣椒素提取率的影响,浓度均为 75%,结果见图 2。考虑到提取率和安全性,最终选择乙醇做提取溶剂。然后对乙醇浓度进行了考察,结果显示浓度在 30%~75%,辣椒素的提取率随乙醇浓度的增大而增大,当乙醇浓度达到 75%时,提取率最大,之后随着乙醇浓度的进一步增大,提取率反而降低。综合考虑,最终选择 75%的乙醇溶液为提取溶剂。

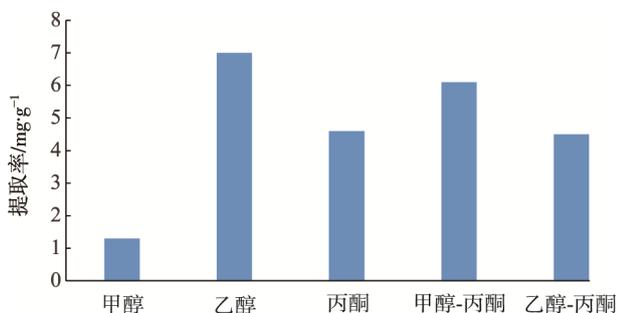


图 2 提取溶剂对提取率的影响

Fig. 2 Effect of extraction solvent on extraction rate

2.4.2 药材颗粒对提取率的影响 微波提取过程中,样品粒度大小会影响微波加热的速率和均匀性,进而影响微波的穿透能力。故在 75%乙醇为提取溶剂、液料比(mL:g)40:1、微波温度 80 °C、微波时间 15 min、微波功率为 550 W 试验条件下分别考察 40, 60, 80, 100, 120, 140 目药材粒度对提取率的影响,结果表明,随着药材目数的增加提取率先增加后降低,其中 80 目时提取率达最大,故选择 80 目为试验中线做进一步考察。结果见图 3。

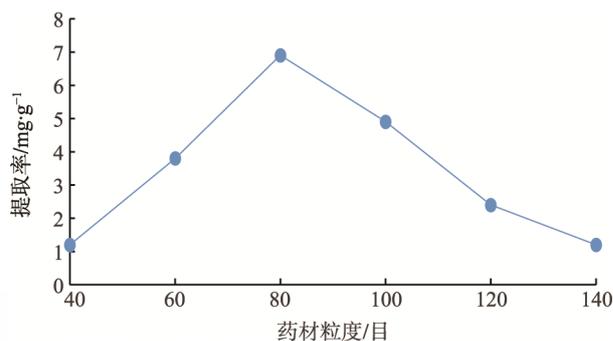


图 3 药材粒度对提取率影响

Fig. 3 Effect of particle size on extraction rate

2.4.3 液料比对提取率的影响 采用 75%乙醇为提取溶剂、药材粒度 80 目、微波温度 80 °C、微波时间 15 min、微波功率为 550 W 试验条件下,考察液料比(mL:g)20:1, 30:1, 40:1, 50:1, 60:1 对辣椒素提取率的影响。结果表明,在一定范围内,辣椒素的提取率随液料比的增大而增加,但当液料比增至 50:1 时,有效成分提取率较 40:1 时略有所降低,根据相似因子法计算 f_2 值为 89.99,说明 40:1 和 50:1 液料比提取率无显著差异,提示有效成分可能已达到饱和,之后提取量基本保持恒定。因此选择液料比 40:1 为试验中线进一步进行后续考察。结果见图 4。

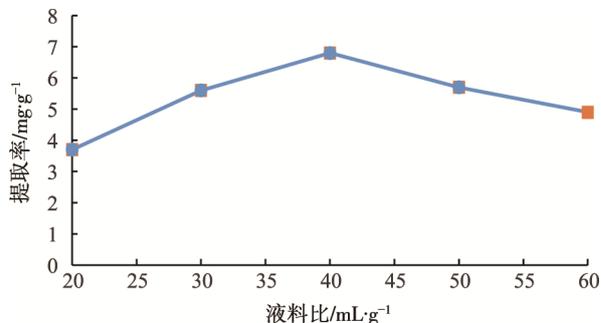


图 4 液料比对提取率影响

Fig. 4 Effect of ratio of solvent to material on extraction rate

2.4.4 微波功率对提取率的影响 采用 75%乙醇为提取溶剂、药材粒度 80 目、液料比(mL : g)40 : 1、微波温度 80 °C、微波时间 15 min 试验条件下考察不同功率对提取率的影响, 考查范围为 100~700 W, 可见微波功率 550 W 时提取率最高, 考虑到微波功率作为离散型变量不宜使用响应面法, 故实验中选择 550 W 作为提取固定条件。结果见图 5。

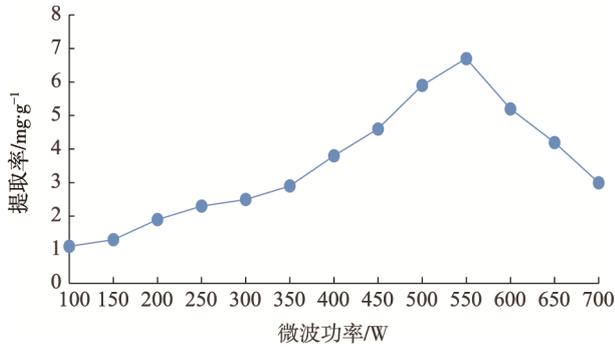


图 5 微波功率对提取率影响
Fig. 5 Effect of extraction power on extraction rate

2.4.5 提取时间对提取率的影响 采用 75%乙醇为提取溶剂、药材粒度 80 目、液料比(mL : g)40 : 1、微波温度 80 °C、微波功率为 550 W 试验条件下考察不同微波时间(2~20 min)对辣椒素提取的影响。结果显示, 微波提取时间在 2~15 min, 辣椒素的提取率随提取时间延长而增大, 当微波提取时间为 15 min 时, 提取率最大, 继续延长提取时间, 提取率下降, 最终选择 15 min 微波处理时间为试验中线进行后续考察。结果见图 6。

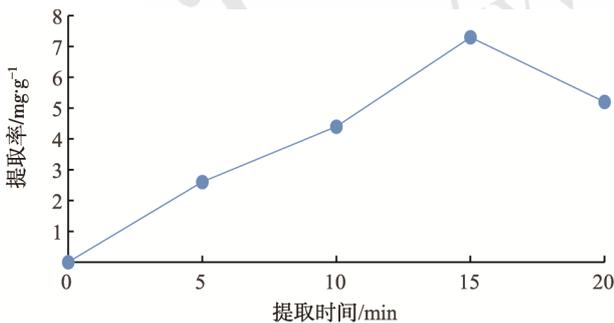


图 6 提取时间对提取率影响
Fig. 6 Effect of extraction time on extraction rate

2.4.6 提取温度对提取率的影响 采用 75%乙醇为提取溶剂、药材粒度 80 目、液料比(mL : g)40 : 1、微波时间 15 min、微波功率为 550 W 试验条件下, 考察微波温度对辣椒素提取率的影响, 由图可看出辣椒素的提取量随温度的升高而增大,

但增加趋势逐渐减小, 当温度>80 °C 时, 继续增加温度, 对于提取量的增加并没有实质性作用, 选择提取温度 80 °C 为试验中线进一步进行后续考察。结果见图 7。

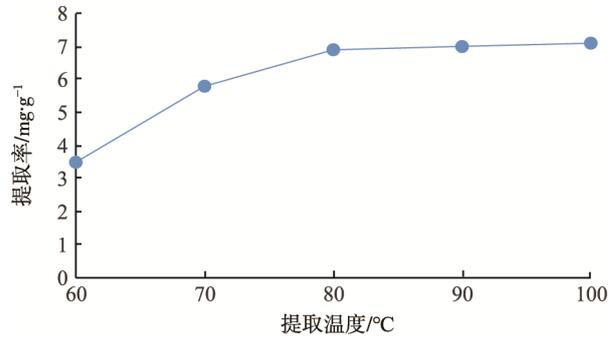


图 7 提取温度对提取率影响
Fig. 7 Effect of extraction temperature on extraction rate

2.5 星点设计-响应面法优化

2.5.1 星点设计与结果 在单因素试验中发现粒度、液料比、提取温度、提取时间对提取率影响较大, 故在此基础上采用星点设计-响应面法优化提取工艺, 分别选择粒度(A)、液料比(B)、提取温度(C)、提取时间(D) 4 个因素为自变量, 提取率为因变量, 根据星点设计原理对各因素进行 5 水平设计, 采用 Design-Expert 8.0.6 软件安排试验及进行数据分析处理。因素及水平分布见表 1, 试验安排及结果见表 2。

2.5.2 模型拟合、方差分析及响应面分析 将所得数据采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行模型拟合及方差分析并依据模型做响应面处理。以提取率 Y 对各因素 X 进行多元线性回归和二项式方程拟合, 得到各因素与提取率之间的回归方程如下, 其中多元线性回归方程为 $Y=5.56+0.25A+0.41B+0.30C+0.69D(r=0.5498, P=0.0104)$; 二项式方程为 $Y=7.32+0.25A+0.41B+0.30C+0.69D-0.044AB+0.16AC+6.25 \times 10^{-3}AD+0.21BC-0.22BD-0.094CD-0.51A^2-0.57B^2-0.65C^2-0.46D^2(r=0.9680, P<0.0001)$ 。

表 1 因素与水平表

Tab. 1 Factors and levels of central composite design

水平	因素			
	A (粒度/目)	B (液料比)	C (提取温度/°C)	D (提取时间/min)
-2	40	20 : 1	60	5
-1	60	30 : 1	70	10
0	80	40 : 1	80	15
1	100	50 : 1	90	20
2	120	60 : 1	100	25

表 2 试验设计与结果

Tab. 2 Experimental design and results

序号	A	B	C	D	提取率/%
1	100	30	70	20	5.3
2	60	50	70	20	5.1
3	40	40	80	15	5.1
4	100	50	90	20	6.8
5	60	30	70	10	3.5
6	80	40	80	25	6.9
7	100	30	90	20	6.4
8	80	40	80	15	7.5
9	100	30	70	10	3.8
10	80	40	80	15	7.0
11	60	30	90	20	4.8
12	60	30	90	10	3.1
13	60	50	90	20	6.2
14	100	50	70	20	6.3
15	80	40	80	15	7.5
16	60	30	70	20	5.7
17	80	40	60	15	4.1
18	80	40	80	5	3.8
19	120	40	80	15	5.2
20	80	40	80	15	7.4
21	80	40	80	15	7.1
22	100	30	90	10	4.9
23	100	50	90	10	6.0
24	60	50	70	10	4.3
25	60	50	90	10	5.8
26	80	20	80	15	4.4
27	80	60	80	15	5.4
28	100	50	70	10	4.9
29	80	40	100	15	5.1
30	80	40	80	15	7.4

由回归方程可看出, 多元线性回归方程 $r=0.5498$, 相关度较低, 而二项式回归方程 $r=0.9680$, 说明回归方程回归效果好, 失拟项 $F=6.09$, $P=0.298>0.05$, 失拟项不显著, 说明试验中其他未参与拟合的因素对试验结果影响很小, 实测数据和理论数据拟合度很高, 试验误差小, 可信度大。

回归模型方差结果见表 3, 该模型 $P<0.0001$, 说明此模型拟合度极显著, 足以拟合试验数据, 且方差分析中液料比(B)、提取温度(C)、提取时间(D)的 P 值均 <0.01 , 表明三者对辣椒素提取率影响极显著; 而交互项(AB、AC、AD、BC、BD 及 CD)的 P 值均 >0.05 , 说明各因素相互之间的关系不显著; 各因素的二次项(A^2 、 B^2 、 C^2 以及 D^2)的 P 值均 <0.0001 , 表明各因素对辣椒素提取率的影响并不是简单的线性关系, 而是二次曲线关系; 各因素对辣椒素得率影响程度为提取时间(D) $>$ 液料比

(B) $>$ 提取温度(C) $>$ 粒度(A)。综上所述, 此模型具有显著的拟合度和预测性, 可以用于辣椒中辣椒素的提取分析和预测。

表 3 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance

变异来源	离均差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	44.86	14	3.20	15.96	<0.0001
A	1.55	1	1.55	7.72	0.0140
B	4.08	1	4.08	20.35	0.0004
C	2.10	1	2.10	10.46	0.0056
D	11.34	1	11.34	56.51	<0.0001
AB	0.031	1	0.031	0.15	0.7016
AC	0.39	1	0.39	1.95	0.1833
AD	6.25×10^{-4}	1	6.25×10^{-4}	3.114×10^{-3}	0.9562
BC	0.68	1	0.68	3.39	0.0854
BD	0.77	1	0.77	3.81	0.0697
CD	0.14	1	0.14	0.70	0.4157
A^2	7.18	1	7.18	35.75	<0.0001
B^2	9.04	1	9.04	45.02	<0.0001
C^2	11.55	1	11.55	57.55	<0.0001
D^2	5.84	1	5.84	29.10	<0.0001
残差	3.01	15	0.20		
失拟误差	2.78	10	0.28	6.09	0.298
纯误差	0.23	5	0.046		
总计	47.87	29			

根据回归方程及星点设计结果, 各因素间交互作用的三维响应面图见图 8。

通过图 8 的比较, 对辣椒素提取量影响最大的因素是提取时间, 最小的为粒度。这与上述方差分析表得出的结论也是一致的。通过模型拟合及响应面优化, 软件给出最佳提取工艺为药材粒度 85.62 目, 液料比(mL : g)42.69 : 1, 微波温度 85.57 °C, 微波时间 18.28 min(微波功率为 550 W, 75%乙醇做提取溶剂), 在此条件下辣椒素的得率(预测值)为 $7.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。为便于生产, 最终确定辣椒素最佳提取工艺为药材粒度 90 目, 液料比(mL : g)43 : 1, 微波温度 85 °C, 微波时间 18 min(微波功率为 550 W, 75%乙醇做提取溶剂)。

2.5.3 验证试验 为了验证星点设计-响应面优化试验的可靠性及模型的准确度, 按照响应面法优化的工艺条件进行 3 批验证, 结果辣椒素得率的平均值为 $7.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (RSD=2.52%), 与预测值较吻合, 试验结果与模型预测值基本一致, 在实际工业化生产过程中, 应用优选出的最佳提取工艺可以较好地提高辣椒素的得率, 且工艺参数稳定可靠, 具有一定的应用价值。结果见表 4。

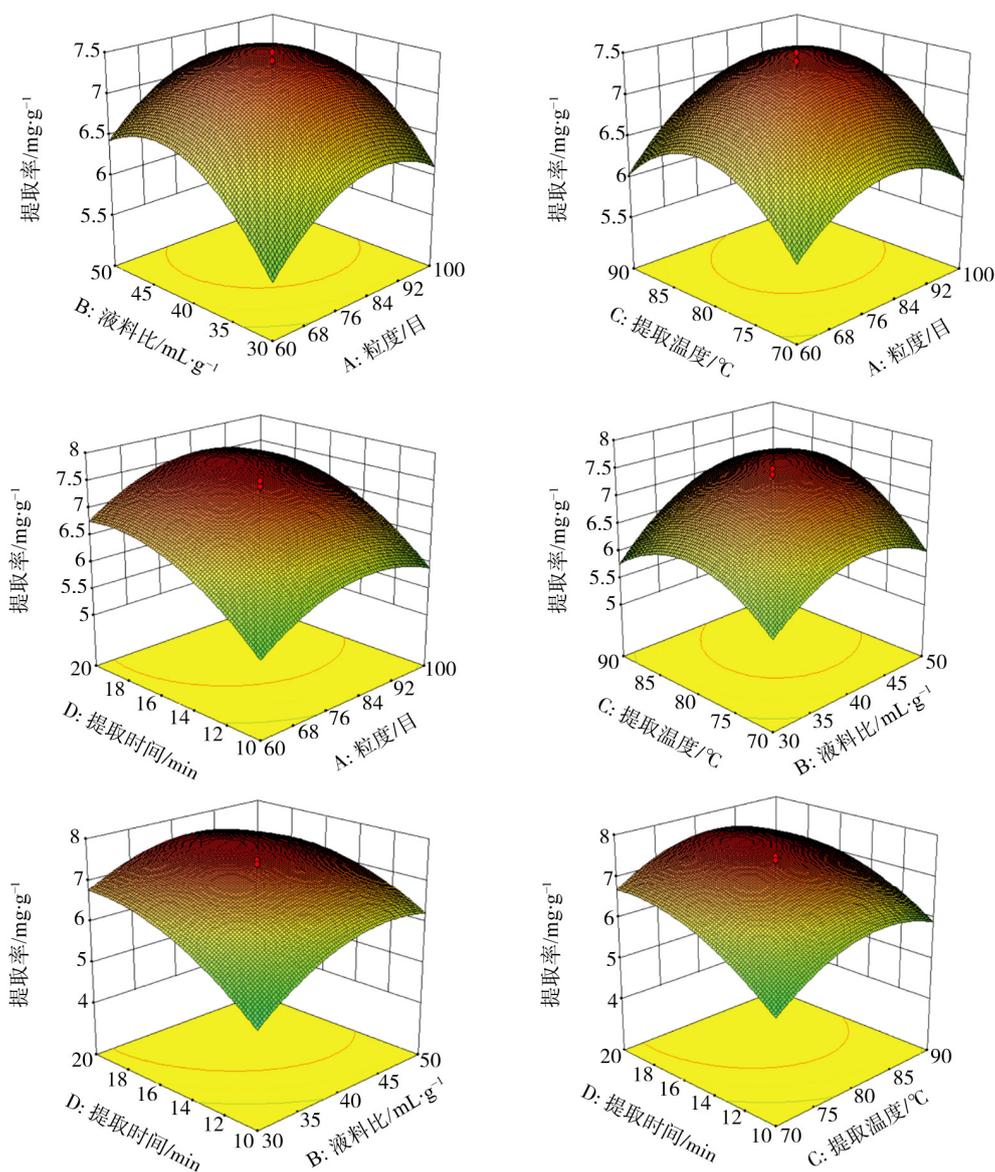


图 8 三维响应面图

Fig. 8 Three-dimensional response surface plot

表 4 验证试验结果

Tab. 4 Results of verification test

序号	测定值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	预测值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	偏差/%
1	7.56	7.67	1.43
2	7.59	7.67	1.04
3	7.61	7.67	0.78

注: 偏差(%)=(预测值-试验值)/预测值 \times 100%。

Note: Bias(%)=(predict value-test value)/predict value \times 100%.

2.6 提取方法的比较

据文献报道,生物碱通常采用溶剂回流提取(solvent reflux extraction, SRE)法进行提取^[12],因此本研究亦采用了 SRE 法提取。为比较 2 种方法的优劣,分别通过星点设计-响应面法优选得到了最佳提取方案与 SRE 法最佳条件(药材粒度 90 目,

液料比($\text{mL}:\text{g}$)80:1, 100 °C 提取 60 min, 回流 2 次),按照“2.1.1”“2.1.2”项下方法对 3 批次干辣椒进行提取并比较提取率,结果见表 5。

表 5 PMAE 与 SRE 提取结果比较($n=3$)

Tab. 5 Comparison of extraction results of PMAE and SRE($n=3$)

批号	提取方法	提取率/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	RSD/%
20180809	PMAE	7.57	1.2
	SRE	1.21	1.6
20180819	PMAE	7.63	1.1
	SRE	1.95	0.9
20180825	PMAE	7.61	1.6
	SRE	1.47	1.4

PMAE 法的提取率约是 SRE 法的 6 倍,说明不同的提取方式对辣椒素的提取率有所影响。本研究中通过 PMAE 法使得提取溶剂及药材被迅速整体加热,从而克服了传统的 SRE 法提取过程中温度梯度影响,加热速度快、无滞后效应,从而有效提高提取率。通过比较,相较于传统 SRE 法,PMAE 法提取更适于辣椒中辣椒素的提取,且方法简单、实用,在提取应用方面具有良好的前景。

3 结论

本研究将密闭微波辅助提取技术应用于辣椒中辣椒素生物碱的提取,通过星点设计-响应面优化法对辣椒素的提取条件进行了优化,并建立了一种简便快速、灵敏度及重现性好、仪器精密度高的 HPLC 测定辣椒素分析方法,可为辣椒及辣椒素的进一步开发提供科学依据。采用星点设计-响应面优化法确定的 PMAE 法提取辣椒素工艺条件(粒径为 90 目,液料比为 43:1,85 °C 提取 18 min),通过验证表现出较高的得率,表明所建立的模型具有较好的预测性,为辣椒素类生物碱的生产工艺参数选择提供了科学依据。

REFERENCES

[1] 中国药典. 一部[S]. 2015: 附录, 370.
[2] 阳凤, 彭燕. 辣椒素的临床应用进展[J]. 临床消化病杂志, 2016(28): 129-132.
[3] JIANG C Y, GE Y Z, LIU Y F, et al. The effects of the volatile oil of *Nardostachy chinensis* Batal on cardiac sodium currents in salt-sensitive hypertensive rat by injuring sensory nerve[J]. Lishizhen Med Mater Med Res(时珍国医国药), 2017, 28(12): 2855-2858.

[4] ZUO M, HU L Z. Tumor prevention and anti-carcinogenic mechanism of capsaicin[J]. J Cancer Control Treat(肿瘤预防与治疗), 2017, 30(6): 465-469.
[5] ZHANG X L, WENG Q H, YANG J Z, et al. Influences of capsaicin on acute hepatic injury induced by carbonyl tetrachloride in rats[J]. Chin J Mod Appl Pharm(中国现代应用药学), 2018, 35(3): 379-381.
[6] CUI G J, XIE Q T, ZHANG Q, et al. Extraction methods and application of apsaicin in pepper[J]. Sci Technol Food Ind(食品工业科技), 2018, 39(13): 306-310.
[7] DENG X Y, LIU Y H, GAO K, et al. Optimizing microwave-assisted extraction process for paprika red pigments using response surface methodology[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis(江西农业大学学报), 2012, 34(2): 382-387.
[8] PANG M, WANG Y H, LIU Q. Optimization on extraction of capsaicinoids assisted by ultrasonic-microwave synergistic extracting[J]. Food Mach(食品与机械), 2016, 32(12): 175-178, 188.
[9] FAN Y, LU Y M, YU B, et al. Extraction and purification of capsaicin from *Capsicum* oleoresin using an aqueous two-phase system combined with chromatography[J]. J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci, 2017, 1063: 11-17.
[10] ZHANG M T, MA X, ZHANG P, et al. Determination of the contents of heavy metals in Jiebai capsules by microwave digestion and ICP-MS[J]. Chin J Mod Appl Pharm(中国现代应用药学), 2018, 35(7): 963-966.
[11] WANG X M, ZHAO Y Q, CHEN Y, et al. Study on microwave extraction process of total flavonoids from *Vaccinium bracteatum* Thunb. leaves by orthogonal design[J]. Chin J Mod Appl Pharm(中国现代应用药学), 2019, 36(5): 575-579.
[12] QUE S, WANG Z B, LI C S, et al. Optimization of ultrasonic extraction of total alkaloids from *Corydalis conspersa* Maxim[J]. Chin J Mod Appl Pharm(中国现代应用药学), 2017, 34(3): 358-362.

收稿日期: 2020-02-03
(本文责编: 李艳芳)