

超临界 CO₂ 萃取番茄红素的工艺条件优化

陈俊杰, 马永强, 王鑫, 黎晨晨

(哈尔滨商业大学 食品工程学院, 哈尔滨 150076)

摘要: **目的** 为了获得超临界 CO₂ 萃取方法提取番茄红素的最优工艺条件。**方法** 以新鲜番茄为原料, 经过冷冻干燥预处理制粉, 通过单因素试验和响应面设计确定最佳的萃取压力、萃取温度、CO₂ 流速、改性剂流速及静态萃取时间。**结果** 静态萃取时间和萃取温度对番茄红素提取率有显著影响; 改性剂流速与 CO₂ 流速, CO₂ 流速与萃取温度, 萃取温度与静态萃取时间等因素间存在交互作用。确定了超临界 CO₂ 萃取番茄红素的最佳条件, 萃取压力为 35 MPa, 改性剂流速为 5 mL/min, CO₂ 流速为 6 mL/min, 萃取温度为 46 °C, 萃取时间为 90 min; 在最佳条件下, 番茄红素的提取率为 90.21%, 番茄粉的番茄红素含量为 3648.57 μg/g。**结论** 在此优化条件下, 番茄红素的提取率较高, 优化效果较好, 具有很好的实际应用价值。

关键词: 超临界 CO₂ 萃取; 番茄红素; 响应面法

中图分类号: TS264.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0042-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.007

Optimization of Technological Conditions for the Extraction of Lycopene by Supercritical CO₂

CHEN Jun-jie, MA Yong-qiang, WANG Xin, LI Chen-chen

(School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

ABSTRACT: The work aims to get the optimal technological conditions for the extraction of lycopene by supercritical CO₂. Fresh tomatoes were freeze-dried and crushed, and then single factor and response surface experiments were used to determine the best conditions, which included the extraction pressure, extraction temperature, CO₂ flow rate, modifier flow rate and static extraction time. The results showed that static time and extraction temperature had significant effects on the extraction rate of lycopene, and interactions existed between the flow rates of modifier and CO₂, between the flow rate of CO₂ and the extraction temperature, and between the extraction temperature and the static time. The optimum conditions for the extraction of lycopene by supercritical CO₂ were determined. The extraction pressure, flow rates of modifier and CO₂, extraction temperature and time were 35 MPa, 5 mL/min, 6 mL/min, 46 °C and 90 min, respectively. Under the optimum conditions, the extraction rate of lycopene was up to 90.21% and the lycopene content of tomato powder was 3648.57 μg/g. Under the optimum conditions, the extraction rate of lycopene is higher, the optimization effect is better, and it has considerable practical application value.

KEY WORDS: extraction by supercritical CO₂; lycopene; response surface methodology

收稿日期: 2019-07-02

基金项目: 哈尔滨商业大学校级科研项目 (17XN069)

作者简介: 陈俊杰 (1992—), 男, 哈尔滨商业大学硕士生, 主攻农产品加工与贮藏。

通信作者: 马永强 (1963—), 男, 哈尔滨商业大学教授, 主要研究方向为食品生物化学。

番茄红素是红色素合成并储存在番茄中的浆果色素体,是胡萝卜素之一,也是不饱和程度最高的类胡萝卜素^[1]。广泛应用于食品、药品中,且作为天然染料应用于化妆品中,具有抗氧化、防癌和抗衰老等功能,许多体内、体外研究已经证明番茄红素可以通过其强大的抗氧化活性和未完全了解的其他功能预防心血管疾病、癌症和糖尿病^[2-3]。

番茄红素的提取工艺主要有有机溶剂提取法、超临界 CO₂ 萃取法、HPLC 法、酶法、微生物发酵法及直接粉碎法等。郝丽琴等^[4]利用酶解辅助萃取法提取了番茄红素,在最优条件下番茄红素的提取率可达 0.004 457%,酶法提取时间长,且酶法提取时需严格控制温度,此外酶在有机溶剂中时,酶活力受到一定程度影响,致使番茄红素提取率有一定差异^[5]。林德菊等^[6]以番茄酱为原料利用有机溶剂法提取了番茄红素,虽然提取率可达 0.015 564%,但有机溶剂法提取番茄红素时溶剂损耗较大、耗时较长、得率及纯度低、选择性不高、安全风险大^[7]。何春玫等^[8]利用皂化预处理及微波技术处理的最优工艺条件提取,提取率可达 65.33%;微波辅助提取番茄红素时得率虽相对较高,但微波提取易破坏物质结构,番茄红素在较高萃取温度下,易发生异构化反应和氧化降解反应^[9]。超临界 CO₂ 萃取法具有选择性高、萃取时间短、萃取溶剂无毒、提取率较高等优点^[10-11]。实际上,超临界流体具有类似液体的密度和普通气体的粘度。在超临界状态下,CO₂ 易分、价格便宜,且容易获取,因此利用 CO₂ 作为溶剂进行超临界萃取,而此方法也广泛应用于食品、化妆品和制药行业的提取和分离^[12-13]。为研究超临界 CO₂ 提取番茄红素的最佳工艺,文中以番茄冻干粉为原料,采用 MV-10 ASFE 超临界萃取设备提取番茄红素,并用响应面法对番茄红素的提取工艺条件进行优化^[14-16]。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料与试剂:番茄为攀枝花米易沙瓢番茄,产于四川省攀枝花市米易县,选择成熟度高、无霉变、无机械损伤的果实;正己烷为色谱纯,购自上海展云化工有限公司;CO₂ 纯度在 99.5%以上,购自哈尔滨卿华工业气体有限公司;苏丹 I,购自上海士锋生物科技有限公司。

仪器与设备: MV-10 ASFE 超临界 CO₂ 萃取系统, Waters 科技(上海)有限公司; TU-1900 型紫外可见分光光度计,上海棱光科技有限公司; ALC-1100. II 型电子天平,上海天美天平仪器有限公司; KQ-500VDE 型双频数控超声波清洗器,深圳市德康科技有限公司;九阳 L18-Y926 破碎机,九阳股份有

限公司。

1.2 方法

1.2.1 番茄红素定量分析试验

1) 原料预处理。将新鲜西红柿洗净、称量,放入破碎机中。加入 2 倍体积的水,搅拌均匀,将匀浆置于离心机中。以 4000 r/min 的速度离心 10 min,取出沉淀物,称量后放入冰箱中。预先冷冻后于冷冻干燥机中冻干 2 d,研磨成番茄粉,称量番茄粉的质量并计算其得率,放入棕色瓶中避光储存。根据式(1)计算番茄粉平均得率为(2.59±0.1)%。

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

式中: Y 为番茄粉得率(%); m_1 为冻干后番茄粉的质量(g); m_2 为新鲜番茄的质量(g)。

2) 标准曲线的绘制。准确称取 1 mg(精确至 0.01 mg) 苏丹 I 色素,并将其溶于正己烷中,制备苏丹 I 标准溶液。称取一定量的标准溶液,用正己烷稀释至 25 mL 棕色容量瓶中。配制成质量浓度分别为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 μg/mL 的苏丹 I 标准溶液,使用正己烷作为空白试剂,在 472 nm 波长下进行比色测定^[17],计算番茄红素提取率,绘制标准曲线。

3) 番茄红素提取率的计算。准确称取 1 g(精确至 0.1 mg) 左右冻干后的番茄粉放入萃取釜中,设定超临界 CO₂ 萃取系统的萃取压力、萃取温度、静态萃取时间、改性剂流速、CO₂ 流速,进行番茄红素萃取;以正己烷作为空白试剂,通过紫外可见分光光度计在 472 nm 波长下测量提取液的吸光度(Abs),并根据标准曲线回归方程计算番茄红素提取率。提取率计算见式(2)。

$$\text{提取率} = \frac{c \times N \times V}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: c 为提取液质量浓度(μg/mL); N 为稀释倍数; V 为提取液体积(mL); m 为番茄粉中含有的番茄红素质量(g)。

1.2.2 超临界萃取体系萃取冻干基质中番茄红素的单因素试验

由于正己烷毒性较小、安全性较高、提取效率较高,故选择正己烷作为改性剂^[18]。选择一种因素作为变量,固定其他因素,其中萃取温度分别为 35, 40, 45, 50, 55 °C, 静态萃取时间分别为 30, 60, 90, 120 和 150 min; 动态萃取时间为 10 min; 改性剂流速分别为 4, 5, 6, 7 和 8 mL/min; CO₂ 流速分别为 5, 6, 7, 8 和 9 mL/min; 根据设备条件,萃取压力分别为 20, 25, 30, 35, 40 MPa。萃取番茄红素(萃取次数为 1—3 次)使用正己烷作为空白试剂,在 472 nm 波长下测定番茄红素提取率,每组重复 3 次。

1.2.3 响应曲面法优化超临界 CO₂ 提取番茄红素工艺条件

在单因素的基础上,考虑到各种因素对番茄红素提取率的影响,根据 Box-Behnken 试验设计原理^[19],以正己烷为改性剂,选择改性剂流速、CO₂ 流速、萃取温度、静态萃取时间等 4 个因素为考察因子,分别以 A, B, C, D 表示,并以 -1, 0, 1 代表低、中、高 3 个水平。以番茄红素提取率为指标,建立 4 因素 3 水平响应面试验,试验因子编码及水平见表 1,采用 Design-Expert 软件进行多元回归分析拟合二次多项式,对回归模型进行 Box-Behnken 设计检验,并对结果进行了分析,以获得超临界 CO₂ 方法提取冻干番茄基质中番茄红素的最佳试验条件。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素水平及编码
Tab.1 Box-Behnken experimental design factor level and coding

水平	A/(mL·min ⁻¹)	B/(mL·min ⁻¹)	C/°C	D/min
-1	4	5	40	80
0	5	6	45	90
1	6	7	50	100

1.3 数据统计分析

试验数据利用 SPSS 软件进行方差、均值等统计分析;响应曲面试验数据采用 Design Expert 9.0 Box-Behnken 进行分析。

2 结果与分析

2.1 原料预处理试验结果

2.2 标准曲线的绘制

拟合得番茄红素标准曲线的回归方程为 $Y=0.02038X+0.0139$,线性相关系数 $R^2=0.9992$,见图 1。根据标准曲线测得番茄粉中番茄红素含量为 3648.57 μg/mg。该试验在线性范围 0~2.5 μg/mL 内有效。

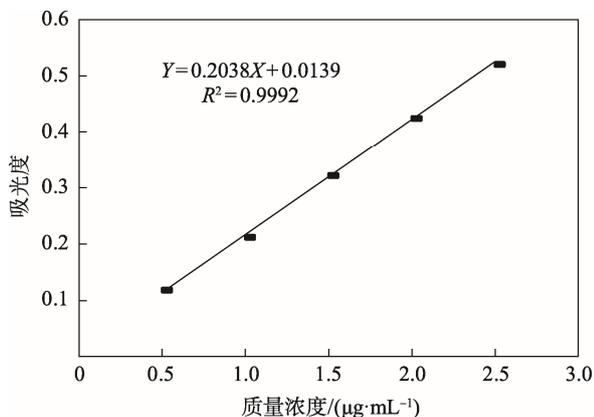


图 1 番茄红素标准曲线
Fig.1 Curve of lycopene standard

2.3 提取次数的确定

在适宜的最优条件下对番茄红素进行了 4 次提取,研究了提取次数对番茄红素提取率的影响,见图 2。由图 2 可知,4 次的提取率分别为 90.7%, 96.1%, 97.7%, 97.9%,表明第 1 次提取的番茄红素提取率明显高于后 3 次,已达到 90%以上,因此这里选择提取次数为 1 次,在第 4 次提取的原料中几乎不含番茄红素,提取 3 次之后,原料中番茄红素基本被提取完全,故文中试验选择前 3 次提取番茄红素的总和作为番茄粉中番茄红素的总含量,为 3648.57 μg/g。

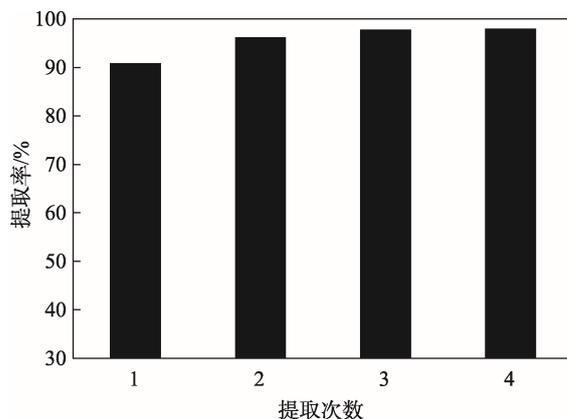


图 2 提取次数对番茄红素提取率的影响
Fig.2 Effect of extraction times on extraction rate of lycopene

2.4 超临界 CO₂ 萃取番茄红素的单因素试验结果与分析

2.4.1 萃取压力对冻干基质中番茄红素提取率的影响与分析

萃取压力对提取率的影响见图 3。由图 3 可知,番茄红素的提取率随萃取压力呈先增加后减小的趋势,当萃取压力为 35 MPa 时,提取率达到最大值,为 73.8%。这是因为当萃取温度固定时,超临界 CO₂ 的密度随着萃取压力的增加而增加,导致溶剂的溶解度增加,萃取压力过高,进而使各种分子间发生相互

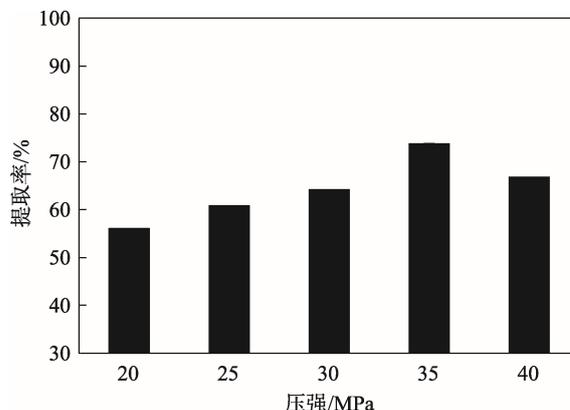


图 3 萃取压力对提取率的影响
Fig.3 Effect of extraction pressure on extraction rate

作用,最终使改性剂凝聚导致溶解性能下降,改变了萃取率。这与廖益强等^[20]的研究基本一致。由于过高的压力导致萃取设备的费用和动力消耗增大,故从经济角度出发,此试验选择单因素最优提取率时的压强作为最优条件,未将压强作为响应面分析的考察因素。

2.4.2 萃取温度对冻干基质中番茄红素提取率的影响与分析

萃取温度升高虽使分子间缔合机会变多,使番茄红素更易被萃取,但萃取温度升高的同时会使 CO₂ 密度减小,进而导致超临界流体的溶解度下降,这不利于番茄红素的提取^[21]。萃取温度对提取率的影响见图 4。由图 4 可知,当萃取温度从 35 °C 升温到 45 °C 时,番茄红素的提取率有显著提高,这表明此时萃取温度对超临界 CO₂ 溶解度的影响小于对提取物挥发性的影响。当萃取温度达到 45 °C 时,提取率最大,为 80.8%;当萃取温度从 45 °C 升温到 55 °C 时,番茄红素的提取率显著降低。此时,萃取温度对提取物溶解度的影响大于萃取温度对提取物挥发性的影响。同时,由于番茄红素是热敏材料,萃取温度长时间高于 50 °C 时会使得番茄红素部分降解,这也是提取率降低的原因^[16],途宝军等^[22]以热风干燥番茄粉为原料,经过超临界 CO₂ 得出的最佳萃取温度为 50 °C,这可能与原料的预处理方法、试验设备以及番茄品种等因素有关,进而导致试验出现偏差^[22—24]。

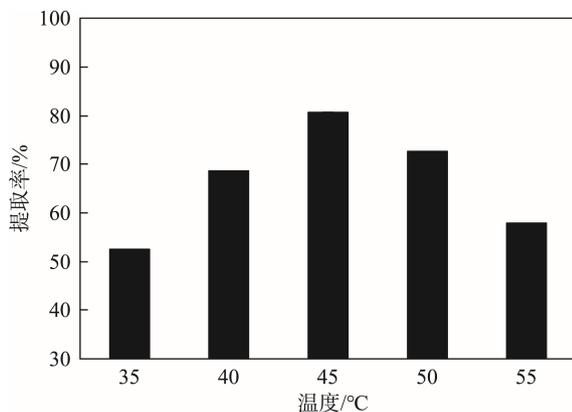


图 4 萃取温度对提取率的影响

Fig.4 Effect of extraction temperature on extraction rate

2.4.3 CO₂ 流速的影响结果与分析

CO₂ 流速对提取率的影响见图 5。由图 5 可知,当 CO₂ 流速为 5~6 mL/min 时,提取率稳定增加,且 CO₂ 流速为 6 mL/min 时,达到最大值,为 86.3%。这是由于随着 CO₂ 流速的增加,传质速率也增加,因此提取率增加;当 CO₂ 速度过高时,提取物与溶剂 CO₂ 的接触时间减少^[21],导致提取率降低,因此,选择 CO₂ 流速为 6 mL/min 更为合适。Sramek 等^[24]以冷冻干燥法制备的番茄粉为原料,经超临界 CO₂ 提取番茄

红素,获得的最佳 CO₂ 流速为 6 mL/min,与此试验研究结果较为一致。

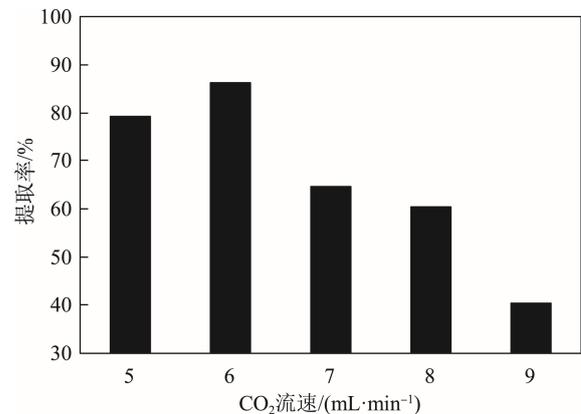


图 5 CO₂ 流速对提取率的影响

Fig.5 Effect of CO₂ flow rate on extraction rate

2.4.4 改性剂流速对冻干基质中番茄红素提取率的影响结果与分析

改性剂的挥发性在分离材料和超临界流体的挥发性之间。添加改性剂可以显著提高番茄红素在超临界 CO₂ 中的溶解度,因此改性剂添加量不同对番茄红素提取率的影响不同。也就是说,当动态萃取时间固定时,改性剂流速对番茄红素提取率有影响。改性剂流速对提取率的影响见图 6,可知,番茄红素的提取率在改性剂流速为 4~5 mL/min 时稳定增加。当改性剂流速为 5 mL/min 时,番茄红素提取率达到最大,为 90.6%。继续增加改性剂流速,提取率呈下降趋势,这是由于适当的改性剂可以改变提取液的极性,即液体溶解番茄红素的能力,且过量的改性剂使溶剂极性过大,进而使提取率下降^[25],这与 Kehili 等^[26]的研究结果较为一致。

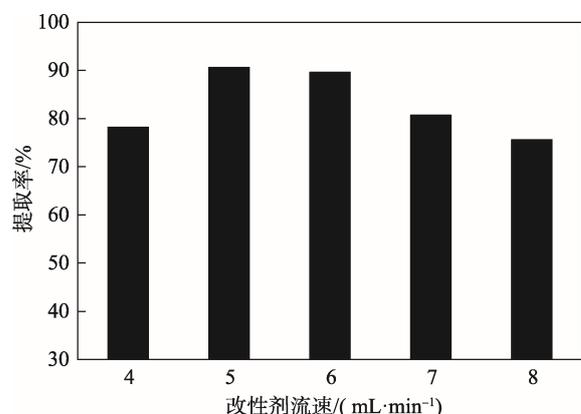


图 6 改性剂流速对提取率的影响

Fig.6 Effect of flow rate of modifier on extraction rate

2.4.5 静态萃取时间对冻干基质中番茄红素提取率的影响结果与分析

静态萃取时间对提取率的影响见图 7,可知,在

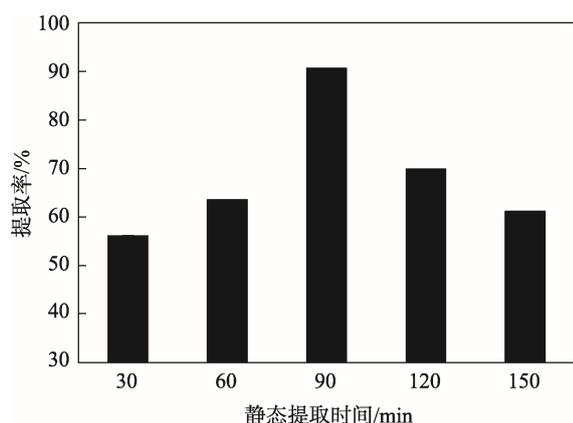


图7 静态萃取时间对提取率的影响

Fig.7 Effect of static extraction time on extraction rate

30~90 min 的静态萃取时间下, 番茄红素提取率随静态萃取时间的增加而增加。当静态萃取时间为 90 min 时番茄红素提取率达到最大值, 为 90.7%。这可能是因为在 90 min 内, 提取时间越长, 超临界流体与被

提取材料间的相互作用时间也越长, 因此提取率相应增加^[21], 达到峰值后随着静态萃取时间的增加, 番茄红素的提取率降低, 这可能是因为具有热敏性的番茄红素在 45 °C 下长时间加热, 导致部分番茄红素降解挥发, 使提取率降低。综合考虑, 静态萃取时间选择 90 min 比较合适, 这与涂宝军等^[22]的研究较为一致。

2.5 响应曲面法优化超临界 CO₂ 提取冻干基质中番茄红素工艺条件的结果与分析

2.5.1 回归模型的建立及方差分析

对通过 Design-Expert 8.0.1 软件获得的数据进行多变量回归拟合, 使用番茄红素提取率 (Y) 作为响应值, 并按照表 2 的试验方案进行试验, 番茄红素提取率对各因子编码值的回归方程为 $Y=89.78+1.11A-0.83B+2.04C+1.18D+4.33AB-0.30AC-0.2AD-4.48BC-1.05BD-3.15CD-6.67A^2-12.08B^2-10.47C^2-12.26D^2$ 。

响应面模型方差分析及回归方程系数显著检验结果见表 3。由表 3 可知, 模型 F 值为 49.20, P 值

表2 试验设计与结果

Tab.2 Test design and results

序号	改性剂流速/(mL·min ⁻¹)	CO ₂ 流速/(mL·min ⁻¹)	萃取温度/°C	提取时间/min	番茄红素提取率/%
1	4	5	45	90	74.2
2	6	6	50	90	73.4
3	5	5	40	90	61.0
4	6	7	45	90	77.1
5	4	6	50	90	72.8
6	6	6	45	80	71.2
7	5	6	45	90	90.6
8	5	6	40	80	61.6
9	5	6	45	90	89.4
10	6	6	45	100	74.4
11	4	6	45	100	72.5
12	4	6	45	80	68.5
13	5	5	45	80	64.5
14	4	7	45	90	65.3
15	5	5	50	90	74.6
16	5	6	45	90	88.4
17	5	6	40	100	68.6
18	4	6	40	90	69.1
19	5	7	50	90	66.1
20	5	7	40	90	70.4
21	5	6	50	80	72.4
22	5	5	45	100	69.4
23	6	5	45	90	68.7
24	5	7	45	80	61.4
25	5	6	50	100	66.8
26	5	6	45	90	90.1
27	5	6	45	90	90.4
28	6	6	40	90	70.9
29	5	7	45	100	62.1

表 3 响应面模型方差分析及回归方程系数显著检验
Tab.3 Response surface model variance analysis and regression equation coefficient significant test

改变源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	2230.64	14	159.33	49.20	<0.0001	**
A	14.74	1	14.74	4.55	0.0511	
B	8.33	1	8.33	2.57	0.1310	
C	50.02	1	50.02	15.45	0.0015	**
D	16.80	1	16.80	5.19	0.0390	*
AB	74.82	1	74.82	23.10	0.0003	**
AC	0.36	1	0.36	0.11	0.7438	
AD	0.16	1	0.16	0.049	0.8273	
BC	80.10	1	80.10	24.73	0.0002	**
BD	4.41	1	4.41	1.36	0.2627	
CD	39.69	1	39.69	12.26	0.0035	**
A ²	288.50	1	288.50	89.08	<0.0001	**
B ²	946.81	1	946.81	292.35	<0.0001	**
C ²	710.94	1	710.94	219.52	<0.0001	**
D ²	974.44	1	974.44	300.88	<0.0001	**
残余项	45.34	14	3.24			
失拟项	42.13	10	4.21	5.25	0.0620	
纯误差	3.21	4	0.80			
总变异	2275.98					
		R ² =0.980128	R ² _{adj} =0.9602	精密度=22.484		

注：*表示显著 (P<0.05)；**表示非常显著 (P<0.01)

小于 0.0001,表明响应面回归模型已达到非常显著水平。失拟项不显著 (P>0.05),表明预测值与试验值间具有良好的相关性。模型的决定系数 R²=0.9801,校正后的 R²=0.9602,表明该模型可以解释 96.02%番茄红素提取率的变化,因此,该模型具备较好的拟合性,可用于分析和预测超临界 CO₂ 提取冻干番茄机制中番茄红素时的提取率。从回归模型和方差分析可以看出,方程一次项 D 对番茄红素提取率的影响达到了显著水平 (P<0.05)。方程一次项和二次项 C, AB, BC, CD, A², B², C², D²对番茄红素提取率的影响达到了非常显著水平 (P<0.01)。根据响应面分析中

的 F 值,每个单因素对番茄红素提取率的影响程度大小顺序为:萃取温度 (C) > 静态萃取时间 (D) > 改性剂流速 (A) > CO₂ 流速 (B)。

2.5.2 超临界萃取体系萃取冻干粉中番茄红素的提取率响应面试验分析

根据回归方程,制作响应曲面图,见图 8—10。对响应面图形进行研究,考察改性剂流速、CO₂ 流速、萃取温度和静态萃取时间等因素对番茄红素提取率的影响。各种因素对番茄红素提取率的影响可以直接由图 8—10 看出。

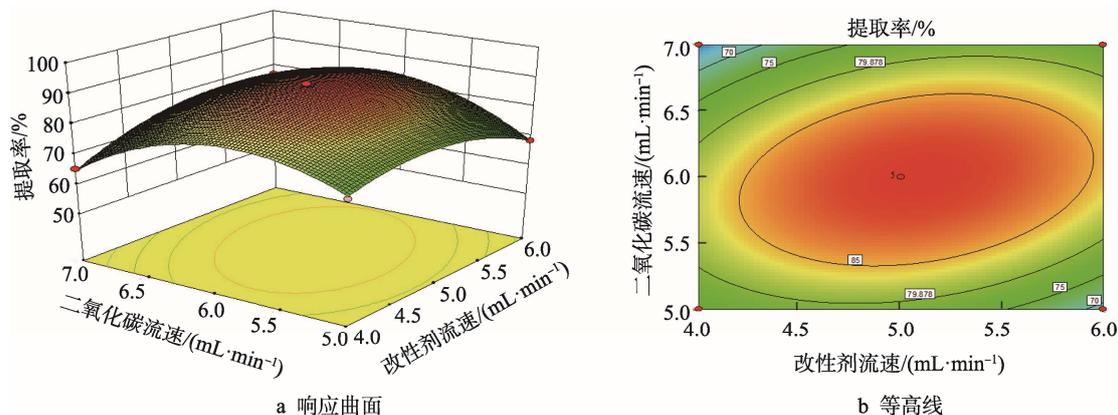


图 8 CO₂ 流速与改性剂流速对番茄红素提取率影响的响应曲面及等高线

Fig.8 Response surface and contour plot showing the effects of CO₂ flow rate and flow rate of modifier on the extraction rate of lycopene

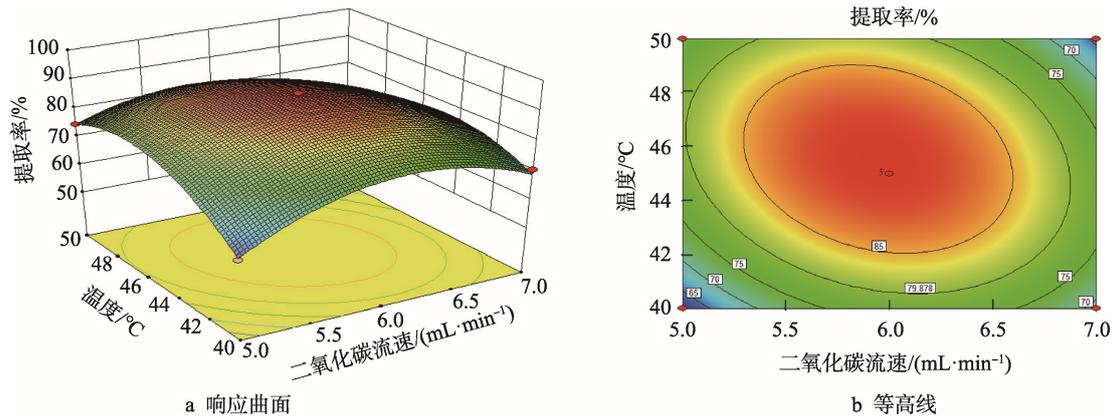


图9 CO₂流速与萃取温度对番茄红素提取率影响的响应曲面及等高线

Fig.9 Response surface and contour plot showing the effects of CO₂ flow rate and temperature on the extraction rate of lycopene

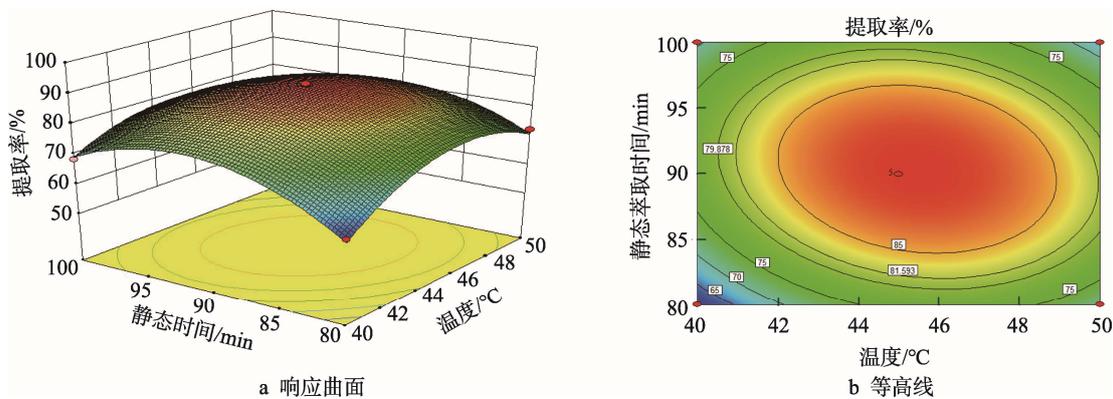


图10 萃取温度与静态萃取时间对番茄红素提取率影响的响应曲面及等高线

Fig.10 Response surface and contour plot showing the effects of temperature and static time on the extraction rate of lycopene

由图8—10可知,两两因素的交互作用等高线为椭圆形,表明CO₂流速与改性剂流速,CO₂流速与萃取温度以及萃取温度与静态萃取时间的交互作用显著,响应面等高线相对较为密集,坡度较为陡峭,表明两因素交互作用对番茄红素提取率的影响较为显著。其中,萃取温度与静态萃取时间对冻干基质中番茄红素提取率的影响较大,这与表3中的显著分析结果一致。当CO₂流速超过5.96 mL/min、萃取温度超过45.51 °C时,番茄红素的提取率随CO₂流速与萃取温度的增加而减小;当萃取温度超过45.51 °C、静态萃取时间超过90.37 min时,番茄红素的提取率随萃取温度与静态萃取时间的增加而减小;当CO₂流速和改性剂流速分别在5~7 mL/min和4~6 mL/min范围内,CO₂流速与萃取温度分别在5~7 mL/min和40~50 °C范围内以及萃取温度与静态萃取时间分别在40~50 °C和80~100 min范围内时,番茄红素提取率可以达到试验中的最大值^[19]。

2.5.3 验证试验

通过用于响应表面优化的软件获得了番茄红素提取率的最佳工艺:改性剂流速为5.07 mL/min,CO₂流速为5.96 mL/min,萃取温度为45.51 °C,静态萃取时间为90.37 min。在该条件下,番茄红色提取率

理论值为90.27%。根据实际情况将最佳条件改为改性剂流速为5 mL/min,CO₂流速为6 mL/min,萃取温度为46 °C,静态萃取时间为90 min。3次平行试验得到番茄红素的提取率均为(90.21±0.0027)%,与理论值无显著差异,说明该模型优化数据可靠,具有实用价值。

3 结语

超临界流体萃取是通过升温 and 加压使流体在高于临界萃取温度和临界压力的状态下萃取目标组分的分离技术,可通过改变萃取温度或压力改变超临界流体的密度,从而改变流体的溶解能力。文中选取影响显著的萃取压力、萃取温度、时间、CO₂流量、改性剂流速等主要因素,通过单因素及响应曲面法确定超临界CO₂萃取番茄红素的最佳工艺:最佳提取次数为1次,压强为35 MPa,改性剂流速为5 mL/min,CO₂流速为6 mL/min,萃取温度为46 °C,萃取时间为90 min。在此条件下,番茄红素的提取率为90.21%,测得的番茄红素含量为3648.57 μg/g。与未经过处理和烘干后的原料相比,最佳工艺条件下的提取率有所提高,同时改性剂的差异也对萃取结果有一

定影响。综上所述,经优化试验条件下的萃取效果较好,且试验最优条件与模型预测值无显著差异,表明通过响应面优化获得的工艺参数具有实际参照价值。

参考文献:

- [1] ŠESTAK Z, BRITTON G, LIAAEN-JENSEN S, et al. Carotenoids. Handbook[J]. Photosynthetica, 2004, 42(2): 186.
- [2] KONG K W, KHOO H E, PRASAD K N, et al. Revealing the Power of the Natural Red Pigment Lycopene[J]. Molecules, 2010, 15(2): 959—987.
- [3] 曾瑶池, 黄淑芬, 徐华, 等. 番茄红素对糖尿病小鼠骨髓内皮祖细胞功能影响及机制[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 201—206.
ZENG Yao-chi, HUANG Shu-fen, XU Hua, et al. Effects and Mechanisms of Lycopene on the Function of Bone Marrow Endothelial Progenitor Cells in Diabetic Mice[J]. Food Science, 2017, 38(13): 201—206.
- [4] 郝丽琴, 窦丹丹, 贺宇, 等. 西瓜中番茄红素的酶法提取及其抗氧化活性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 72—77.
HAO Li-qin, DOU Dan-dan, HE Yu, et al. Enzymatic Extraction of Lycopene from Watermelon and Its Antioxidant Activity[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 72—77.
- [5] 林泽华, 任娇艳. 天然番茄红素提取工艺研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(5): 50—55.
LIN Ze-hua, REN Jiao-yan. Research Progress on Extraction Technology of Natural Lycopene[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 32(5): 50—55.
- [6] 林德菊, 邵佳佳, 张宇燕, 等. 番茄中番茄红素提取工艺条件的优化研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2015, 17(9): 1938—1942.
LIN De-ju, SHAO Jia-jia, ZHANG Yu-yan, et al. Study on Optimization of Extraction Conditions of Lycopene from Tomatoes[J]. World Science and Technology-modernization of Traditional Chinese Medicine, 2015, 17(9): 1938—1942.
- [7] 王梓轩, 李娅琦, 郭慧清, 等. 三种常见枸杞子中多糖提取方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 207—213.
WANG Zi-xuan, LI Ya-qi, GUO Hui-qing, et al. Progress in the Extraction of Polysaccharides from Three Common Lycium Barbarum Fruits[J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 207—213.
- [8] 何春玫, 周贞兵. 皂化及微波法提取番茄红素的工艺[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(5): 61—64.
HE Chun-mei, ZHOU Zhen-bing. Saponification and Microwave Extraction of Lycopene[J]. Food Research and Development, 2010, 31(5): 61—64.
- [9] 龚旭昊, 张璐, 董玲玲, 等. 黄芪多糖提取方法研究进展[J]. 中国兽医杂志, 2019, 55(1): 88—92.
GONG Xu-hao, ZHANG Lu, DONG Ling-ling, et al. Advances in Extraction Methods of Astragalus Polysaccharides[J]. Chinese Veterinary Journal, 2019, 55(1): 88—92.
- [10] ABDUL H M, MOHAMMAD S R H, MADEEHA L, et al. A Comparative Study on the Recovery of Secondary Metabolites from Potamogeton Chinensis by Traditional Solvent Extraction and Supercritical Fluid Extraction[J]. Journal of Zhejiang University-science B (Biomedicine & Biotechnology), 2016, 17(9): 683—691.
- [11] MOHAMMAD Y, MEHDI R, SEIED M P, et al. Supercritical Fluid Extraction of Essential Oils[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2019, 118(5): 182—193.
- [12] 苗笑雨, 谷大海, 程志斌, 等. 超临界流体萃取技术及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(5): 209—218.
MIAO Xiao-yu, GU Da-hai, CHENG Zhi-bin, et al. Supercritical Fluid Extraction Technology and Its Application in Food Industry[J]. Food Research and Development, 2018, 39(5): 209—218.
- [13] 邱采奕. 超临界流体萃取技术及其在食品中的应用[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(2): 149—151.
QIU Cai-yi. Supercritical Fluid Extraction Technology and Its Application in Food[J]. Science and Technology and Economy Guide, 2019, 27(2): 149—151.
- [14] 王振强, 李孝坤, 王浩. 响应面试验优化超声辅助提取番茄皮渣中番茄红素工艺及其 HPLC-MS 测定[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 70—75.
WANG Zhen-qiang, LI Xiao-kun, WANG Hao. Response Interview Optimization of Ultrasound-assisted Extraction of Lycopene from Tomato Peel Residue and Its Determination by HPLC-MS[J]. Food Science, 2015, 36(12): 70—75.
- [15] 李德和, 王君为, 赵越. 响应面法优化类球红细菌中番茄红素提取工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 16—22.
LI De-he, WANG Jun-wei, ZHAO Yue. Response Surface Methodology for Optimizing the Extraction Process of Lycopene from Rhodobacteria[J]. Food Science, 2015, 36(10): 16—22.
- [16] 顾仁勇, 杨万根, 余佳. 响应面优化超临界 CO₂ 萃取八月瓜幼果多酚工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 76—80.
GU Ren-yong, YANG Wan-gen, YU Ji. Response Surface Methodology for Supercritical CO₂ Extraction of Polyphenols from Young Fruits of August Melon[J]. Food Science, 2015, 36(10): 76—80.
- [17] 李贞霞, 沈欢欢, 高苗苗, 等. 番茄红素在不同溶剂中的分光光度法分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1114—1117.
LI Zhen-xia, SHEN Huan-huan, GAO Miao-miao, et al. Spectrophotometric Analysis of Lycopene in Different Solvents[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,

- 2019, 39(4): 1114—1117.
- [18] 陈中伟, 丁芬, 吴其飞, 等. 亚临界丙烷、超临界 CO₂ 正己烷对米糠油提取品质的对比研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 36—41.
CHEN Zhong-wei, DING Fen, WU Qi-fei, et al. A Comparative Study on the Extraction Quality of Rice Bran Oil by Subcritical Propane and Supercritical CO₂ Hexane[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32(3): 36—41.
- [19] 王婉愉, 李姣, 张晓峰, 等. 响应面法优化乙醇提取草果黄酮的工艺研究[J]. 中国调味品, 2018, 43(10): 164—169.
WANG Wan-yu, LI Jiao, ZHANG Xiao-feng, et al. Response Surface Methodology for Optimizing the Extraction of Flavonoids from Grass Fruit by Ethanol[J]. Chinese Seasoning, 2018, 43(10): 164—169.
- [20] 廖益强, 黄彪, 陆则坚. 超临界 CO₂ 流体萃取番茄红素[J]. 福建农林大学学报(自然版), 2008, 37(1): 105—108.
LIAO Yi-qiang, HUANG Biao, LU Ze-jian. Supercritical CO₂ Fluid Extraction of Lycopene[J]. Journal of Fujian Agricultural and Forestry University (Nature Edition), 2008, 37(1): 105—108.
- [21] 崔丽丽, 逢世峰, 李亚丽, 等. 响应面法优化超临界 CO₂ 萃取人参挥发油的工艺[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 58—61.
CUI Li-li, PANG Shi-feng, LI Ya-li, et al. Response Test Optimization of Supercritical CO₂ Extraction of Ginseng Volatile Oil[J]. Food Science, 2016, 37(4): 58—61.
- [22] 涂宝军, 李勇, 陈尚龙, 等. 超临界 CO₂ 萃取番茄红素工艺及其抗氧化性能研究[J]. 食品工业, 2014, 35(6): 138—143.
TU Bao-jun, LI Yong, CHEN Shang-long, et al. Supercritical CO₂ Extraction of Lycopene and Its Antioxidant Properties[J]. Food Industry, 2014, 35(6): 138—143.
- [23] ANNIE D, CHANDRAMOULI V, ANTHONYSAMY S, et al. Freeze Drying vs Microwave Drying-methods for Synthesis of Sinteractive Thoria Powders[J]. Journal of Nuclear Materials, 2017, 484: 51—58.
- [24] SRAMEK M, SCHWEIGGERT R M, VAN K A, et al. Preparation of High-grade Powders from Tomato Paste Using a Vacuum Foam Drying Method[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(8): 1755—1762.
- [25] 王宪青, 王丹, 崔会哲. 超临界 CO₂ 提取番茄红素的工艺研究[J]. 食品与机械, 2005(4): 30—31.
WANG Xian-qing, WANG Dan, CUI Hui-zhe. Study on Extraction Technology of Lycopene by Supercritical CO₂[J]. Food and Machinery, 2005(4): 30—31.
- [26] KEHILI M, KAMMLOTT M, CHOURA S, et al. Supercritical CO₂ Extraction and Antioxidant Activity of Lycopene and β -carotene-enriched Oleoresin from Tomato (*Lycopersicon Esculentum*, L.) Peels by-product of a Tunisian Industry[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 102: 340—349.