

超声-表面活性剂提取青钱柳总黄酮的工艺优化

陈 琼, 吴菲菲*, 李化强, 赵良忠, 刘亚美, 王恒震, 张早明

(邵阳学院食品与化学工程学院, 邵阳 422000)

摘 要: **目的** 优化表面活性剂结合超声提取青钱柳中的总黄酮的工艺。**方法** 以总黄酮含量为指标, 在单因素实验的基础上运用 Box-Behnken 响应面法(response surface methodology, RSM)设计四因素三水平实验获得最佳提取条件。**结果** 青钱柳总黄酮的最佳提取工艺为: 吐温 80 浓度 5%、液料比 41:1 ($V:m$)、超声时间 26 min 和超声温度 60 °C。此条件下, 实际测得总黄酮含量为 (76.27 ± 0.27) mg/g, 与预测值 77.32 mg/g 非常接近, 是比较理想的模型。**结论** 超声与表面活性剂的结合可以较好地提取青钱柳中的总黄酮。

关键词: 青钱柳; 总黄酮; 超声; 表面活性剂; 响应面法

Optimization of ultrasonic-surfactant extraction of total flavonoids from *Cyclocarya paliurus*

CHEN Qiong, WU Fei-Fei*, LI Hua-Qiang, ZHAO Liang-Zhong, LIU Ya-Mei,
WANG Heng-Zhen, ZHANG Zao-Ming

(Department of Food and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize extraction technology of total flavonoids in *Cyclocarya paliurus* by surfactant combined with ultrasonication. **Methods** Using the total flavonoid content as an indicator, based on the single factor experiment, the Box-Behnken response surface method (RSM) was used to design the four-factor and three-level tests to obtain the best extraction conditions. **Results** The optimum extraction conditions of total flavonoids from *Cyclocarya paliurus* were as follows: Tween 80 concentration 5%, liquid to material ratio 41:1 ($V:m$), ultrasonic time 26 min and ultrasonic temperature 60 °C. Under this condition, the actual content of total flavonoids was (76.27 ± 0.27) mg/g, which was very close to the predicted value of 77.32 mg/g, and indicated that it was an ideal model. **Conclusion** The combination of ultrasound and surfactant can better extract the total flavonoids from *Cyclocarya paliurus*.

KEY WORDS: *Cyclocarya paliurus*; total flavonoids; ultrasound; surfactant; response surface methodology

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(17B241)、湖南省自然科学基金青年项目(2017JJ3284)、湖南省科技厅“三区”科技人才项目(S2017NCTPSQ0044)、湖南省教育厅科学研究一般项目(17C1433)、邵阳学院研究生科研创新项目(CX2018SY031)

Fund: Supported by Outstanding Youth Project of Hunan Provincial Education Department (17B241), Natural Science Foundation of Hunan Provincial (2017JJ3284), “Three Areas” Technology Talents Program from Hunan Provincial Science and Technology Department (S2017NCTPSQ0044), General Project of Hunan Provincial Education Department (17C1433), and Postgraduate Research Innovation Project of Shaoyang University (CX2018SY031)

***通讯作者:** 吴菲菲, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品科学技术与安全。E-mail: wufeifei0414@163.com

***Corresponding author:** WU Fei-Fei, Ph.D, Associate Professor, Department of Food and Chemistry Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China. E-mail: wufeifei0414@163.com

1 引言

青钱柳(*Cyclocarya paliurus* (Batalin) Iljinsk)又名麻柳、摇钱树, 胡桃科青钱柳属植物, 是中国特有的植物^[1]。民间江西修水将其叶子作为茶饮, 且专家运用科学手段将修水青钱柳为原料研制出了保健茶, 该项发明于 1994 年 6 月获得国家专利局颁发的“发明专利证书”^[2]。研究发现, 青钱柳中含有多种功效成分, 如黄酮类化合物、多糖、酚酸等, 其提取物具有抗菌、降三高、抗氧化抗衰老等功效^[3-5]。青钱柳研究越来越热门, 提取方法有微波法、超声波法和酶法等^[6-8], 吴茹^[9]利用响应面优化得到超声波辅助提取青钱柳叶中总黄酮的最优工艺组合为: 料液比 1:34, 超声功率 162 W, 乙醇浓度 48%, 提取时间 41 min, 总黄酮得率为 8.427%。而超声结合表面活性剂提取方法, 主要是利用超声非热加工的特点, 与表面活性剂的润湿、增溶作用相结合, 优势在于用少量表面活性剂的水溶液代替高浓度的醇溶液, 减少有机溶剂使用, 达到绿色环保、节能省时、提高含量等效果, 更有利于活性成分的溶出^[10-12], 朱欣等^[11]采用超声波-阴阳离子表面活性剂协同提取茅岩莓总黄酮的工艺研究, 表面活性剂浓度 1.1%, 乙醇浓度 40%, 提取时间 57 min, 此条件下茅岩莓总黄酮得率为 23.27%。该方法简单、节能、省时, 可用于茅岩莓总黄酮的提取。可用于山香圆叶总黄酮的提取。但是目前青钱柳总黄酮的提取工艺研究较少。

本研究以湖南邵阳的青钱柳为原料, 采用超声与表面活性剂结合提取青钱柳中的总黄酮, 探究其最佳的工艺优化参数, 以期青钱柳资源的产业化开发利用提供理论参考。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

青钱柳: 购自邵阳药房, 粉碎过 40 目筛备用; 芦丁标准品 (纯度>99%, 生工生物工程(上海)股份有限公司); 吐温 20、吐温 40、吐温 60、吐温 80、乙醇、三氯化铝、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠(分析纯, 邵阳市科仪玻化有限公司); 实验用水为蒸馏水。

2.2 仪器与设备

FW400A 高速万能粉碎机(北京科伟永兴仪器有限公司); SY-1210 恒温水浴锅(南京畅翔仪器设备有限公司); SB5200DTD 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); UV-1780 紫外分光光度计(日本岛津公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 青钱柳预处理及提取工艺

精密称取青钱柳粉末 1 g(精确到 0.0001 g)置于

100 mL 的锥形瓶中, 再加入一定量的提取溶剂进行超声(固定频率 40 KHz)提取, 离心 10 min(10000 r/min)后合并上清液, 实验时稀释成不同浓度测定。

2.3.2 总黄酮含量的测定

(1) 标准曲线的绘制

以芦丁为标准品, 参照冯宗帅等^[13]测定青钱柳中总黄酮的含量。精密称取芦丁标准品 0.200 g, 加 70%乙醇溶解于 100 mL 容量瓶中并定容至刻度; 得到 2.0 mg/mL 的芦丁储备液, 从储备液中准确移取 10 mL 溶液, 置于 100 mL 量瓶中并用去离子水稀释至刻度, 得到浓度为 0.2 mg/mL 的芦丁标准应用液。依次量取芦丁标准溶液 0.0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mL, 分别置于 25 mL 容量瓶中, 依次加入 50 mg/mL 亚硝酸钠溶液 1 mL, 摇匀后放置 6 min, 加 100 mg/mL 硝酸铝溶液 1 mL, 摇匀后放置 6 min, 加 200 mg/mL 氢氧化钠溶液 4 mL, 再加 70%乙醇定容至刻度, 摇匀, 放置 15 min。在 510 nm 波长处测定吸光度, 绘制芦丁浓度(X)与吸光度值(Y)的标准曲线。结果表明, 芦丁在浓度 8~40 $\mu\text{g/mL}$ 内与其吸光值呈线性关系, 线性回归方程为 $Y=13.243X-0.0012(r^2=0.9997)$, 表明线性关系良好。

(2) 样品中总黄酮含量的测定

按照标准曲线制作法测定吸光度, 按方程计算青钱柳总黄酮含量。公式如下:

$$\text{总黄酮含量}(\text{mg/g})=(C \times V \times n)/1000/m$$

式中: C : 根据回归方程计算得到的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V : 提取液总体积, mL;

n : 稀释倍数;

m : 青钱柳粉末的质量, g。

2.3.3 单因素实验

单因素实验探究了 6 个因素对青钱柳总黄酮含量的影响, 其中提取溶剂为吐温 20、吐温 40、吐温 60、吐温 80、水; 溶剂浓度为 1%、5%、9%、13%、17%; 液料比为 10:1、20:1、30:1、40:1、50:1 ($V:m$); 超声温度为 30、40、50、60、70 $^{\circ}\text{C}$; 超声功率为 150、180、210、240、270 W; 超声时间为 15、20、25、30、35 min。具体实验步骤根据“2.3.1”操作, 实验指标为青钱柳总黄酮含量, 每个重复 3 次。

2.3.4 响应面实验设计

在单因素实验基础上, 采用 Design Expert 软件(version:10.0.7.0)建立模型优化青钱柳总黄酮的提取工艺, 选择吐温 80 浓度(A)、液料比(B)、超声时间(C)和超声温度(D)为考察因素, 以总黄酮含量为响应值进行优化。因素水平见表 1。

2.3.5 数据统计与分析

采用 Excel 2007 计算平均值和标准偏差, 采用 Origin 8.0 软件处理单因素数据和作图, 采用 Design-Expert 10.0.7.0 软件进行响应面分析, 采用 SPSS 18.0 统计分析软

件, 利用单因素方差分析(One-way ANOVA)中的 Duncan's 多重比较法进行差异比较($P<0.05$), 所有实验重复 3 次, 即 $n=3$ 。

表 1 响应面实验因素水平表
Table 1 Factors and levels in response surface methodology

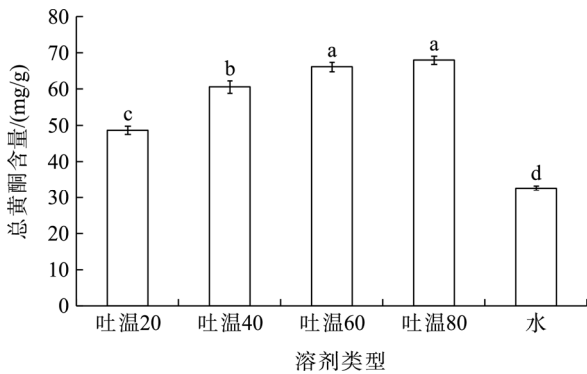
因素	水平		
	-1	0	1
A 吐温 80 浓度/%	3	5	7
B 液料比/(mL/g)	35	40	45
C 超声时间/min	20	25	30
D 超声温度/°C	55	60	65

3 结果与分析

3.1 单因素实验结果

3.1.1 提取溶剂对总黄酮含量的影响

在溶剂浓度为 5%、液料比为 30:1 ($V:m$)、超声功率为 150 W、超声时间 30 min 及超声温度 50 °C 条件下平行测定 3 次, 考察不同提取溶剂对总黄酮含量的影响。表面活性剂具有双亲结构, 其分子的疏水部分能结合在一起形成胶束, 非极性物质可以进入胶束内核或表面活性剂分子之间, 从而达到增溶目的^[14]。图 1 表明, 加入吐温 80 时青钱柳总黄酮含量最高, 加入水提取时总黄酮含量最低, 所以在后续实验中采用的表面活性剂均为吐温 80。



注: 不同字母代表具有显著性差异($P<0.05$)

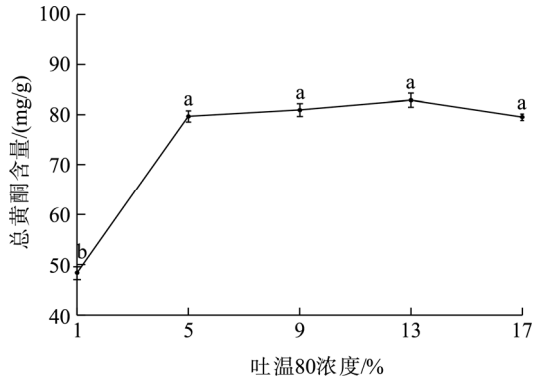
图 1 提取溶剂对黄酮含量的影响($n=3$)

Fig.1 Effect of solvent on flavonoid content ($n=3$)

3.1.2 溶剂浓度对总黄酮含量的影响

图 2 表明, 在 1%~5% 的范围内时, 总黄酮含量呈迅速

增大的趋势, 这是由于吐温 80 作为增溶剂, 更有利于黄酮的溶出, 但当浓度大于 5% 时, 含量呈稳定趋势, 原因可能是当浓度过高时形成了胶束, 黄酮类物质进入胶束中后再溶出而受阻, 导致黄酮含量变化不大甚至下降。因此, 确定 5% 为最佳的提取吐温 80 浓度。



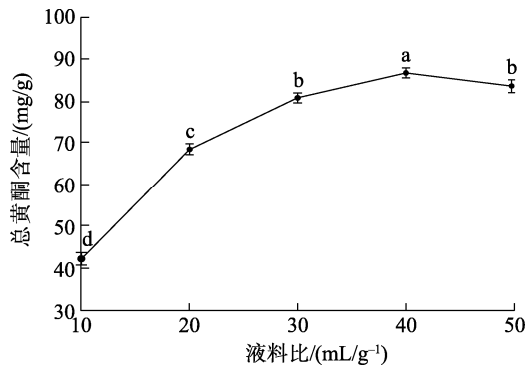
注: 不同字母代表具有显著性差异($P<0.05$)

图 2 溶剂浓度对黄酮含量的影响($n=3$)

Fig.2 Effect of Tween 80 concentration on flavonoid content ($n=3$)

3.1.3 液料比对总黄酮含量的影响

图 3 表明, 在液料比 10:1~50:1 ($V:m$) 的范围内, 青钱柳总黄酮含量先增后降, 40:1 ($V:m$) 时达到最大值。可能是料液比较低时, 溶质和溶剂接触不充分, 导致细胞中的黄酮不易溶出^[15]; 而过大的料液比会降低超声波的超声效果, 使青钱柳细胞壁不易破坏, 黄酮难以溶出, 而且会造成原料的浪费^[16]。因此, 确定 40:1 ($V:m$) 为最佳的提取液料比。



注: 不同字母代表具有显著性差异($P<0.05$)

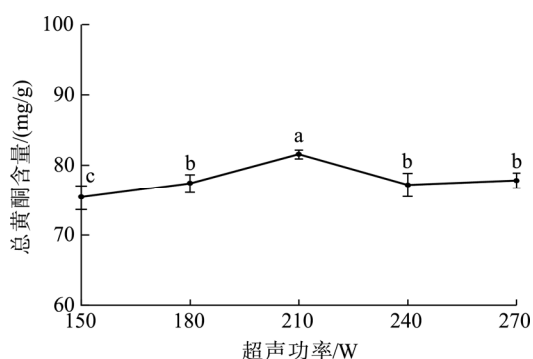
图 3 液料比对黄酮含量的影响($n=3$)

Fig.3 Effect of liquid to material ratio on flavonoid content ($n=3$)

3.1.4 超声功率对总黄酮含量的影响

图 4 表明, 随着超声功率增大, 青钱柳总黄酮含量缓慢升高, 总体变化不明显。超声波的空化效应及渗透作用,

促进了吐温 80 溶剂对青钱柳总黄酮的溶出,从而提高了总黄酮的含量,黄酮含量在超声功率 210 W 时达到最高。因此,确定 210 W 为最佳的提取超声功率。



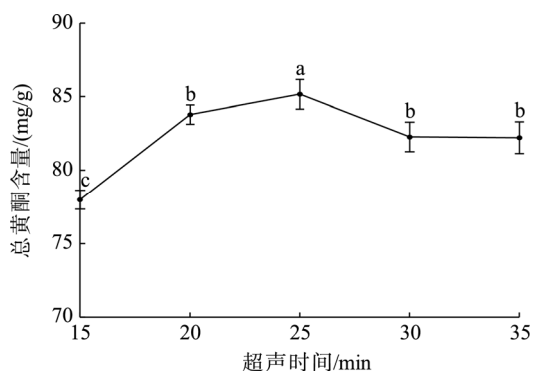
注: 不同字母代表具有显著性差异($P < 0.05$)

图4 超声功率对黄酮含量的影响($n=3$)

Fig.4 Effect of ultrasonic power on flavonoid content ($n=3$)

3.1.5 超声时间对总黄酮含量的影响

如图5表明,在超声时间 15~25 min 范围内,随着超声时间的增加黄酮含量也增加,超声波对物料的作用越充分。可见超声波能在较短时间内对物料进行充分提取,从而验证了超声波提取具有省时的优点^[17]。但 25 min 后,黄酮含量有所下降,可能由于超声波较长时间的剪切作用会破坏黄酮类物质的分子结构。因此,确定 25 min 为最佳的提取超声时间。



注: 不同字母代表具有显著性差异($P < 0.05$)

图5 超声时间对黄酮含量的影响($n=3$)

Fig.5 Effect of ultrasonic time on flavonoid content ($n=3$)

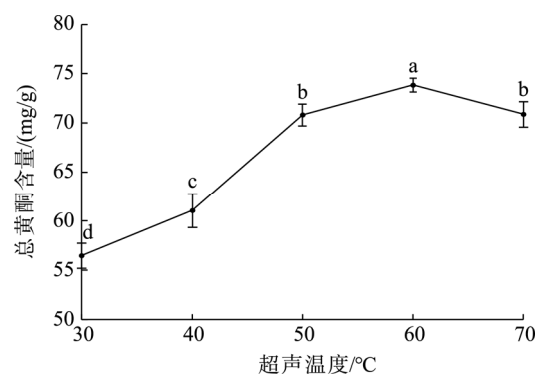
3.1.6 超声温度对总黄酮含量的影响

如图6表明,在 30~70 °C 的范围内,总黄酮含量先迅速升高,这是由于温度的逐渐升高,提高了吐温 80 水溶液渗透到原料内的能力和黄酮的溶解度,增加了黄酮含量,而当提取温度过高时,可能是其热不稳定性使黄酮的化学结构遭到破坏,从而导致黄酮含量下降^[87]。因此,确定

60 °C 为最佳的提取超声温度。

3.2 响应面设计及结果

表2为响应面法实验的结果,结果的方差分析如表3所示。由表3可知,模型的显著性 $P < 0.0001$,极显著;失拟项 $P > 0.05$,不显著,表明二次回归模型与实际情况拟合较好。 $R^2 = 0.9330$,说明所有自变量的变化可以解释 93.30% 响应值的变化。 $R^2_{adj} = 0.8660$,说明模型能在 86.60% 解释实验结果,说明该模型拟合程度良好,预测值与实测值之间有良好的相关性。模型的回归方程 $Y = 76.82 + 1.5A + 1.63B + 1.49C + 0.73D + 1.32AB + 0.56AC + 0.77AD + 0.41BC - 0.8BD - 1.68CD - 4.88A^2 - 3.87B^2 - 4.67C^2 - 4.09D^2$ 。可看出各单因素对青钱柳总黄酮含量的影响大小顺序为:液料比(B)>吐温 80 浓度(A)>超声时间(C)>超声温度(D)。由表3也可知, P_A 、 P_B 、 P_C 、 P_A^2 、 P_B^2 、 P_C^2 和 P_D^2 均小于 0.01, P_{CD} 小于 0.05,说明吐温 80 浓度、液料比和超声时间的一次项、超声时间和超声温度的交互项、以及 4 个因素的二次项均存在显著性。如图7所示,在不同的实验条件下,响应值即总黄酮含量的波动范围在 65.29~78.63 mg/g 之间,各因素之间交互作用对总黄酮含量影响较为显著,表现为曲线较陡,随着不同因素的增大黄酮含量不断升高,有极大值。



注: 不同字母代表具有显著性差异($P < 0.05$)

图6 超声温度对黄酮含量的影响($n=3$)

Fig.6 Effect of ultrasonic temperature on flavonoid content ($n=3$)

3.3 验证结果

通过模型对青钱柳总黄酮含量的最优值进行预测,得到最优实验方案:吐温 80 浓度 5.40%、液料比 41.25:1 ($V:m$)、超声时间 25.87 min 和超声温度 60.24 °C。综合考虑实际条件和可操作性,将该最优方案简化进行 3 次平行验证,模型对总黄酮含量的预测值为 77.32 mg/g,实际测得的总黄酮含量为 (76.27 ± 0.27) mg/g。可以看出,总黄酮模型的预测值与实际值非常接近,这说明模型的预测能力与拟合程度都相对较好,是比较理想的模型。

表 2 响应面法实验设计及结果
Table 2 Response Surface Methodology Test Design and Results

实验号	A 吐温 80 浓度/%	B 液料比/(mL·g ⁻¹)	C 超声时间/min	D 超声温度/°C	黄酮含量/(mg/g)
1	0	0	1	-1	72.59
2	1	1	0	0	72.97
3	0	0	0	0	75.74
4	-1	0	-1	0	65.42
5	0	-1	-1	0	65.80
6	0	1	0	-1	69.01
7	1	0	0	-1	67.37
8	0	0	0	0	76.24
9	1	0	0	1	71.58
10	0	1	1	0	71.27
11	0	0	-1	1	66.55
12	0	-1	0	1	70.96
13	0	1	0	1	71.21
14	-1	1	0	0	67.43
15	0	0	0	0	76.62
16	1	0	1	0	70.89
17	1	0	-1	0	66.87
18	0	-1	0	-1	65.54
19	0	0	1	1	67.12
20	0	0	0	0	76.87
21	0	1	-1	0	68.31
22	0	0	-1	-1	65.29
23	-1	0	0	1	66.49
24	0	0	0	0	78.63
25	-1	0	0	-1	65.36
26	-1	-1	0	0	65.48
27	0	-1	1	0	67.12
28	-1	0	1	0	67.18
29	1	-1	0	0	65.73

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和 SS	自由度 Df	均方 MS	F 值	P 值	显著性
模型	440.12	14	31.44	13.92	< 0.0001	significant
A	27.15	1	27.15	12.02	0.0038	**
B	31.92	1	31.92	14.13	0.0021	**
C	26.79	1	26.79	11.86	0.0039	**
D	6.38	1	6.38	2.83	0.1150	
AB	7.00	1	7.00	3.10	0.1002	
AC	1.28	1	1.28	0.57	0.4645	

续表 3

来源	平方和 <i>SS</i>	自由度 <i>Df</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	440.12	14	31.44	13.92	< 0.0001	significant
<i>AD</i>	2.37	1	2.37	1.05	0.3228	
<i>BC</i>	0.67	1	0.67	0.30	0.5939	
<i>BD</i>	2.59	1	2.59	1.15	0.3021	
<i>CD</i>	11.32	1	11.32	5.01	0.0419	*
<i>A</i> ²	154.34	1	154.34	68.34	< 0.0001	**
<i>B</i> ²	97.17	1	97.17	43.03	< 0.0001	**
<i>C</i> ²	141.64	1	141.64	62.72	< 0.0001	**
<i>D</i> ²	108.53	1	108.53	48.06	< 0.0001	**
残差	31.62	14	2.26			
失拟项	26.79	10	2.68	2.22	0.2294	not significant
纯误差	4.82	4	1.21			

$R^2=0.9330$ $R^2_{adj}=0.8660$

注: $P<0.01$, 影响极显著; $P<0.05$, 影响显著。

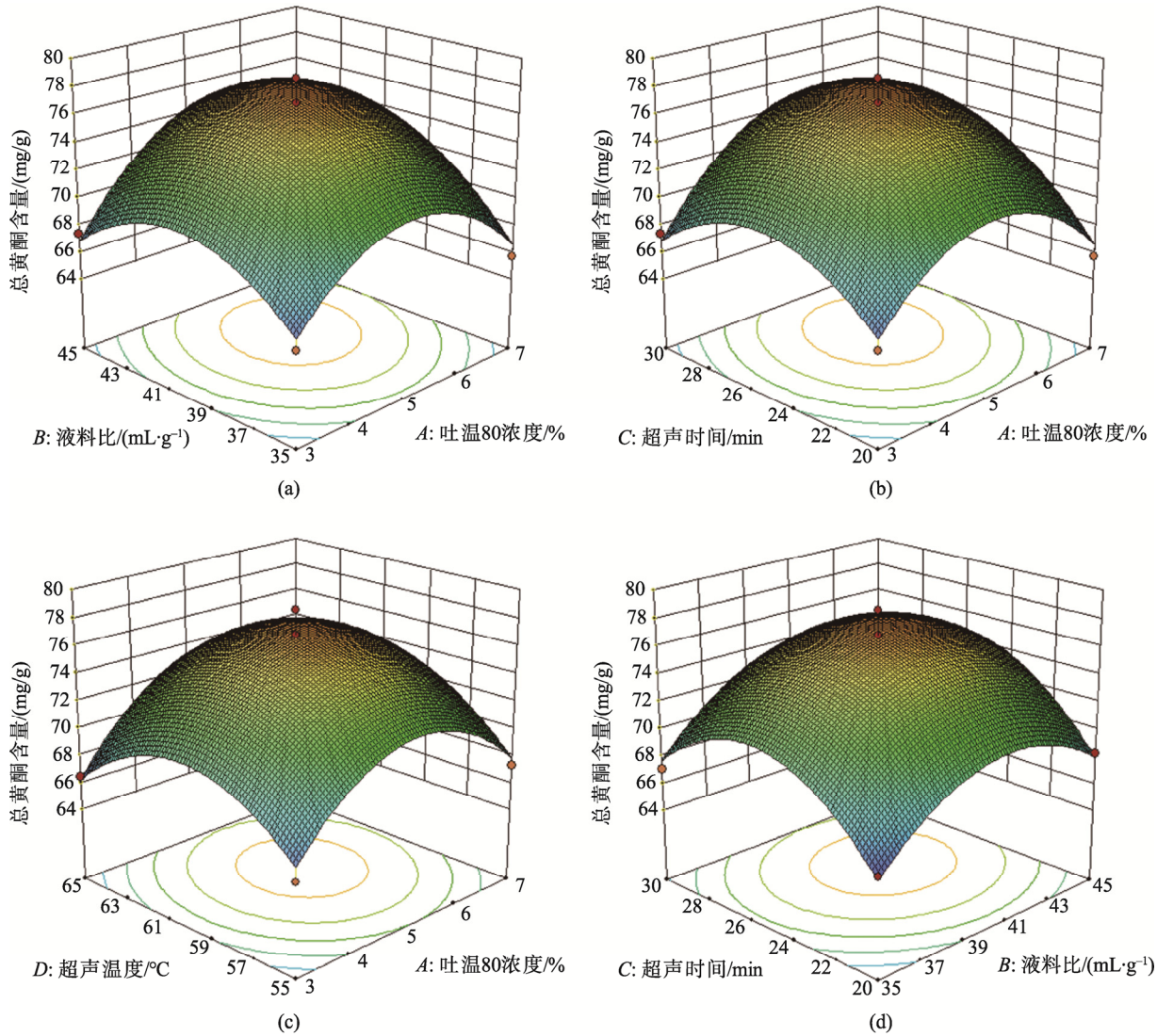
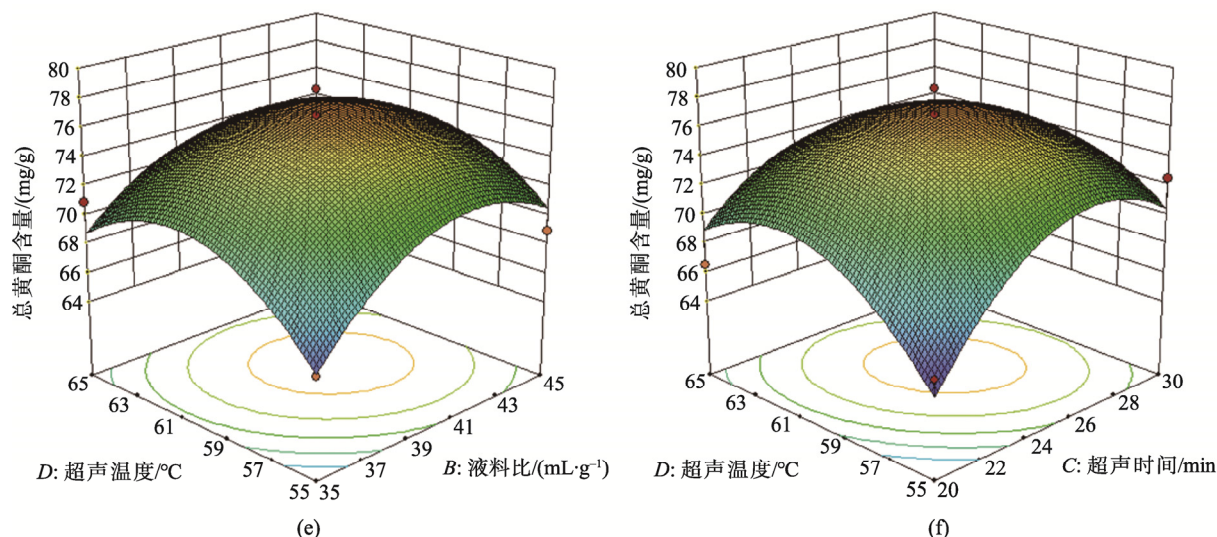


图 7 各因素对青钱柳总黄酮含量的交互作用响应面图

Fig.7 Response surface plot of interactions on total flavonoids content in *Cyclocarya paliurus*



续图 7 各因素对青钱柳总黄酮含量的交互作用响应面图
Fig.7 Response surface plot of interactions on total flavonoids content in *Cyclocarya paliurus*

4 结论与讨论

通过对影响青钱柳中总黄酮含量的吐温 80 浓度、液料比、超声功率、超声时间和超声温度进行单因素和响应面实验,建立回归模型方程,确定青钱柳总黄酮的最佳提取工艺为吐温 80 浓度 5%、液料比 41:1 ($V:m$)、超声时间 26 min 和超声温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 。此条件下,实际测得总黄酮含量为 (76.27 ± 0.27) mg/g,与预测值仅相差 1.36%,说明此模型可以用来模拟青钱柳总黄酮的提取工艺,为青钱柳产业化开发提供理论参数。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编委会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [2] 文燕. 青钱柳降糖神茶,保健食品中的一朵奇葩[J]. 中国保健营养, 2010, (2): 69.
Wen Y. Cyclocarya paliurus hypoglycemic tea, a wonderful flower in health food [J]. Chin Health Nutr, 2010, (2): 69.
- [3] 邹荣灿, 吴少锦, 张妮, 等. 青钱柳的分布、化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国药房, 2017, 28(31): 4449–4451.
Zou RC, Wu SJ, Zhang N, et al. Research progress on distribution, chemical composition and pharmacological action of *Cyclocarya paliurus* [J]. Chin Pharm, 2017, 28(31): 4449–4451.
- [4] 吴菲菲, 李化强, 赵良忠, 等. 青钱柳多糖的体外抗氧化活性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(8): 3044–3049.
Wu FF, Li HQ, Zhao LZ, et al. Evaluation of antioxidant activity of *Cyclocarya paliurus* polysaccharides in vitro [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(8): 3044–3049.
- [5] Jiang CH, Yao N, Wang QQ, et al. *Cyclocarya paliurus* extract modulates

adipokine expression and improves insulin sensitivity by inhibition of inflammation in mice [J]. J Ethnopharmac, 2014, 153(2): 344–351.

- [6] 黄元河, 潘乔丹, 唐海燕, 等. 微波-超声联合提取青钱柳总黄酮和总三萜提取工艺[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(22): 5515–5518.
Huang YH, Pan QD, Tang HY, et al. Microwave-ultrasound combined extraction of total flavonoids and total triterpenoids from *Cyclocarya paliurus* [J]. Hubei Agric Sci, 2014, 53(22): 5515–5518.
- [7] 柳旭光, 杨洋, 王峰, 等. 响应面优化酶法提取青钱柳黄酮的工艺[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 250–253.
Liu XG, Yang Y, Wang F, et al. Response surface methodology for enzymatic extraction of flavonoids from *Cyclocarya paliurus* [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(5): 250–253.
- [8] Xie JH, Dong CJ, Nie SP, et al. Extraction, chemical composition and antioxidant activity of flavonoids from *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja leaves [J]. Food Chem, 2015, 186(40): 97–105.
- [9] 吴茹. 青钱柳总黄酮提取、分离纯化及抗氧化抑菌活性研究[D]. 江西农业大学, 2015.
Wu R. Extraction, Purification, Antioxidant and Antimicrobials Activities of Total Flavonoids from *Cyclocarya Paliurus*(Batas) Leaves [D]. Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [10] Daher CF, Baroody GM, Howland RJ. Effect of a surfactant, Tween 80, on the formation and secretion of chylomicrons in the rat [J]. Food Chem Toxicol, 2003, 41(4): 575–582.
- [11] 朱欣, 郭红英, 谭兴和, 于潇杰, 张喻, 王峰, 邓洁红. 超声波-阴/阳离子表面活性剂协同提取茅岩莓总黄酮的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(1): 213–218.
Zhu X, Guo HY, Tan XH, et al. Ultrasonic- assisted anionic and cationic surfactant systems extraction of total flavonoids from *Ampelopsis grossedentata* [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(1): 213–218.
- [12] You X, Wang S, Liu F, et al. Ultrasound-assisted surfactant-enhanced emulsification microextraction based on the solidification of a floating organic droplet used for the simultaneous determination of six fungicide residues in juices and red wine [J]. J Chromatogr A, 2013, (1300): 64–69.

- [13] 冯宗帅, 吴彩娥, 方升佐, 等. 青钱柳叶总黄酮超声辅助提取工艺优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 130–134, 75.
Feng ZS, Wu CE, Fang SZ, *et al.* Ultrasound-assisted extraction of total flavonoids from *Cyclocarya paliurus* leaves [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2009, 40(2): 130–134, 75.
- [14] Park JY, Nam B, Choi SA, *et al.* Effects of anionic surfactant on extraction of free fatty acid from *Chlorella vulgaris* [J]. Bioresourc Technol, 2014, 166(37): 620–624.
- [15] Gu XD, Sun YJ, Ma CZ, *et al.* The optimization of ultrasonic extraction process of total flavonoids from *Rhodiola Crenulata* by response surface method [J]. Med Plant, 2017, 8(6): 33–39.
- [16] 安卓, 贾昌喜. 响应面优化超高压提取苦苣黄酮工艺的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(2): 105–110.
An Z, Jia CX. Response surface methodology for optimizing ultra high pressure extraction of *Sonchus flavonoids* [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2012, 12(2): 105–110.
- [17] 王赛赛, 杨飞飞, 聂正兴, 等. 超声微波双辅助法提取油莎草总黄酮工艺优化[J]. 食品工业, 2014, 35(11): 189–193.
Wang SS, Yang FF, Nie ZX, *et al.* Process optimization of ultrasonic and microwave assisted extraction of total flavonoids from *Cyperus oleifera* [J]. Food Ind, 2014, 35(11): 189–193.
- [18] Sheng ZL, Wan PF, Dong CL, *et al.* Optimization of total flavonoids content extracted from *Flos Populi* using response surface methodology [J]. Ind Crop Prod, 2013, 43(1): 778–786.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



陈 琼, 硕士, 主要研究方向为食品科学技术与安全。

E-mail: 854392175@qq.com



吴菲菲, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品科学技术与安全。

E-mail: wufeifei0414@163.com