

# 乌饭树叶黄酮超声—微波辅助提取工艺的优化

## Optimization of ultrasound/microwave assisted extraction (UMAE) of flavones from *Vaccinium Bracteatum Thunb* Leaves

陈义勇<sup>1</sup> 张德谨<sup>1,2</sup>

CHEN Yi-yong<sup>1</sup> ZHANG De-jin<sup>1,2</sup>

(1. 常熟理工学院生物与食品工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221008)

(1. School of Biology and Food Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**摘要:**以乌饭树叶为原料,采用超声—微波辅助提取技术,探讨液固比、微波功率、温度以及提取时间对乌饭树叶黄酮得率的影响。在单因素试验的基础上,采用响应面法对超声—微波辅助提取乌饭树叶黄酮的工艺条件进行优化,通过与传统热水浸提方法进行比较,探讨超声—微波提取对乌饭树叶黄酮结构的影响。结果表明,超声—微波辅助提取乌饭树叶黄酮的最佳工艺条件为:微波功率 140 W,超声功率 50 W,温度 69 °C,液固比 51:1(V:m),时间 11 min,该条件下,乌饭树叶黄酮的得率为 3.64%。红外光谱分析表明:超声—微波辅助提取对乌饭树叶黄酮结构没有影响。

**关键词:**乌饭树叶;黄酮;超声—微波辅助提取;红外光谱

**Abstract:** *Vaccinium Bracteatum Thunb* Leaves (VBTL) was used as material. An efficient ultrasound/microwave assisted extraction (UMAE) technique was employed to extract flavones from VBTL. The effects of microwave power, ratio of solvent to solid, temperature and time on the yield of flavones from VBTL were investigated. To optimize the extraction process, response surface methodology was used based on the results of single factor experiment. IR spectrum was scanned to validate the effect of UMAE technology compared with the traditional solvent extraction technology. The results indicated the optimal conditions of UMAE were 140 W of microwave power, 50 W of ultrasound power, 69 °C of temperature, 51:1(V:m) of solvent-solid ratio and 11 min of extraction time, respectively. The yield of flavones was 3.64% under the optimal technology. The results of IR spectrum implied UMAE had no influence on the structure of flavones from VBTL.

**Keywords:** *Vaccinium Bracteatum Thunb* leaves; flavones; ultrasonic/microwave assisted extraction; IR spectrum

乌饭树古称染菽,属于杜鹃花科,在中国江苏、浙江、福建、安徽以及广东等省分布广泛。黄酮类化合物作为乌饭树叶(*Vaccinium Bracteatum Thunb* leaves, VBTL)中的主要功能成分之一,具有多种生理活性,如抗氧化<sup>[1-3]</sup>、抑菌<sup>[4-6]</sup>、抗疲劳<sup>[7]</sup>以及改善改善糖尿病患者血糖和血脂水平<sup>[8]</sup>等。

目前,乌饭树叶黄酮主要的提取方法有传统的溶剂浸提法<sup>[9-11]</sup>、超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法<sup>[12]</sup>等,但是超临界流体萃取设备价格昂贵,而传统的溶剂浸提法提取时间较长、溶剂消耗大,提取效率较低。近年来,超声波和微波提取技术以其能耗低、效率高特点广泛地应用于各种生物活性成分的提取过程<sup>[13-17]</sup>。超声波是利用超声波辐射压强产生的空化效应、骚动效应以及热效应来加速物质的扩散溶解,超声波产生的巨大压力可使植物细胞壁瞬间破碎,并引起湍动效应,从而增大传质速率,达到辅助提取的效果<sup>[18-19]</sup>。微波萃取技术是利用高频电磁波穿透萃取介质,由于吸收微波能,细胞内部温度迅速上升,最终达到加速溶质扩散的效果<sup>[20]</sup>。目前,微波和超声辅助技术应用于乌饭树叶黄酮的提取都是采用单一辅助提取技术<sup>[21-23]</sup>,尚未见到同时将超声和微波辅助提取技术应用于乌饭树叶黄酮提取的报道。因此,本试验拟采用超声—微波辅助技术提取乌饭树叶黄酮,并对其提取工艺进行优化,旨在为乌饭树叶黄酮的产业化应用提供参考和依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

新鲜乌饭树叶:购自江苏宜兴;

芦丁标准品:纯度大于 98%,贵州迪大生物科技有限公司;

乙醇:分析纯,江苏强盛功能化学股份有限公司;

氯化铝:分析纯,上海强顺化学试剂有限公司。

**作者简介:**陈义勇(1974—),男,常熟理工学院副教授,博士。

E-mail:chenyxp@126.com

**收稿日期:**2015—10—05

## 1.2 主要仪器

超声—微波协同萃取仪: CW-2000型, 上海新拓分析仪器有限公司;

密封式粉碎机: HK-20B型, 广州市旭朗机械设备有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: DHG-9030A型, 上海三发科学仪器有限公司;

精密天平: PGC 753e型, 爱德姆衡器(武汉)有限公司;

可见分光光度计: 722型, 上海菁华科技仪器有限公司;

循环水式多用真空泵: SHB-B95型, 郑州长城科工贸有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪: Nicolet 6700型, 美国 Thermo Fisher公司。

## 1.3 方法

1.3.1 标准曲线的制作 精确称取干燥后的芦丁 10 mg, 放在 10 mL 的容量瓶中, 用 95% 乙醇溶解并定容至刻度, 得到浓度为 1 mg/mL。分别移取 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 mL 标准液至 10 mL 容量瓶中, 用 1%  $\text{AlCl}_3$  定容至刻度, 摇匀, 静置 5 min, 在 390 nm 处测其吸光度<sup>[24]</sup>。得到标准曲线方程为:  $A = 22.16242C + 0.02235$ , 线性范围 0~0.045 mg/mL,  $R^2 = 0.99767$ 。

1.3.2 乌饭树叶黄酮得率的计算 取 1 mL 乌饭树叶黄酮提取液加入到 10 mL 容量瓶中, 用 1%  $\text{AlCl}_3$  定容至刻度, 摇匀, 静置 5 min, 在 390 nm 处测其吸光度, 根据标准曲线方程得到黄酮浓度, 按式(1)计算乌饭树叶黄酮得率。

$$Y = \frac{C \times 10 \times V}{1000 \times M} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Y——黄酮得率, %;

C——根据标准曲线方程得到黄酮浓度, mg/mL;

V——乌饭树叶黄酮提取液的总体积, mL;

M——乌饭树叶质量, g。

1.3.3 乌饭树叶黄酮超声—微波辅助提取 乌饭树叶粉碎后, 过 60 目筛。称取 2.000 g 乌饭树叶, 与蒸馏水按一定液固比在 100 mL 的萃取容器中混合, 固定超声波功率为 50 W, 设定一定的萃取时间、温度以及微波功率, 经升温 and 恒温两个阶段提取乌饭树叶黄酮, 抽滤后, 向滤液中加入无水乙醇, 将乙醇体积分数调至 80%, 静置 24 h 后离心(转速 4 000 r/min, 时间 20 min), 即得乌饭树叶黄酮。

### 1.3.4 单因素试验

(1) 微波功率对乌饭树叶黄酮得率的影响: 在液固比为 50 : 1 ( $V : m$ ), 提取时间 10 min, 温度 70 °C, 超声波功率 50 W 的条件下, 分别考察不同微波功率(50, 100, 150, 200, 250 W)对乌饭树叶黄酮得率的影响。

(2) 温度对乌饭树叶黄酮得率的影响: 在液固比为 50 : 1 ( $V : m$ ), 微波功率 150 W, 提取时间 10 min, 超声波功率 50 W 的条件下, 分别考察不同提取温度(40, 50, 60, 70, 80 °C)对乌饭树叶黄酮得率的影响。

(3) 液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响: 在微波功率为 150 W, 提取时间 10 min, 温度 70 °C, 超声波功率 50 W 的条

件下, 分别考察不同液固比(20 : 1, 30 : 1, 40 : 1, 50 : 1, 60 : 1,  $V : m$ )对乌饭树叶黄酮得率的影响。

(4) 提取时间对乌饭树叶黄酮得率的影响: 在液固比为 50 : 1 ( $V : m$ ), 微波功率 150 W, 温度 70 °C, 超声波功率 50 W 的条件下, 分别考察不同提取时间(5, 10, 15, 20, 25 min)对乌饭树叶黄酮得率的影响。

1.3.5 响应面优化试验 在单因素试验的基础上, 根据 Box-Behnken 设计原理, 以乌饭树叶黄酮得率作为响应值, 利用 Design-Expert 软件对试验结果进行响应面分析, 确定超声—微波辅助提取乌饭树叶黄酮的工艺参数。

1.3.6 超声—微波辅助提取法与传统热水浸提法比较 分别采用超声—微波辅助提取和传统热水浸提的方法提取乌饭树叶黄酮, 并对两种提取方法得到的黄酮得率以及结构进行比较。传统热水浸提法参照章海燕等<sup>[9]</sup>乌饭树叶水溶性黄酮的提取方法, 以水作为提取溶剂, 在液固比 40 : 1 ( $V : m$ ), 温度 50 °C, 提取时间 2 h, 提取次数为 2 次的工艺条件下提取乌饭树叶黄酮。

1.3.7 红外光谱分析 将超声—微波辅助提取法和传统浸提法得到的乌饭树叶黄酮放在 50 °C 的真空干燥箱中进行干燥, 通过红外光谱比较两种提取方法得到的乌饭树叶黄酮结构上的异同红外分析条件为: 光谱范围 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ; DTGS 检测器, 分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数 32 次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微波功率对乌饭树叶黄酮得率的影响

微波功率对乌饭树叶黄酮得率的影响见图 1。由图 1 可知, 随着微波功率的提高, 乌饭树叶黄酮得率先升高后下降, 在微波功率为 150 W 时, 乌饭树叶黄酮得率达到最高值。可能是随着微波功率的提高, 升温阶段持续的时间变短, 处于较高功率下的微波辐射时间也减少, 从而导致乌饭树叶黄酮得率下降。因此, 微波功率控制在 150 W 左右为宜。

### 2.2 温度对乌饭树叶黄酮得率的影响

温度对乌饭树叶黄酮得率的影响见图 2。由图 2 可知, 随着温度的增加, 乌饭树叶黄酮得率先逐渐增加后下降, 在温度为 70 °C 时乌饭树叶黄酮得率达到最大值。这是因为随着温度的升高, 分子运动加快, 乌饭树叶黄酮溶解度增大, 得率增大, 但温度过高可能会破坏黄酮的结构, 使其丧失活性<sup>[9, 25]</sup>。因此, 提取温度控制在 70 °C 左右为宜。

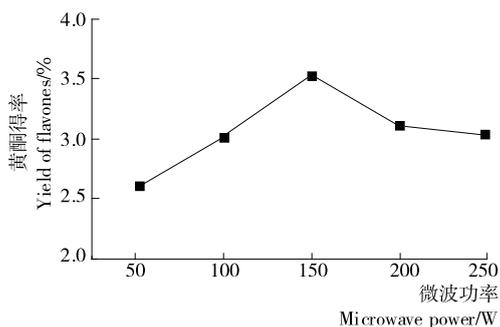


图 1 微波功率对乌饭树叶黄酮得率的影响

Figure 1 Effect of microwave power on yield of flavones from VBTL

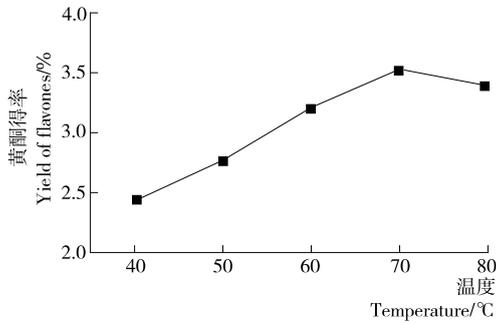


图 2 温度对乌饭树叶黄酮得率的影响

Figure 2 Effect of temperature on yield of flavones from VBTL

### 2.3 液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响

液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响见图 3。由图 3 可知,随着溶剂用量的增大,乌饭树叶黄酮得率逐渐升高,在液固比达到 50 : 1(V : m)后,乌饭树叶黄酮得率趋于稳定。这是因为随着溶剂体积的增大,乌饭树叶内外黄酮的浓度差增大,较高的浓度梯度有利于黄酮分子向浓度低的方向扩散,也就有利于黄酮的提取。另一方面,随着溶剂体积的增大,升温阶段持续的时间会增长,处于较高功率下的微波辐射时间会变长,这也促进了乌饭树叶黄酮的溶解。考虑到节约溶剂,料液比控制在 50 : 1(V : m)左右为宜。

### 2.4 提取时间对乌饭树叶黄酮得率的影响

提取时间对乌饭树叶黄酮得率的影响见图 4。由图 4 可

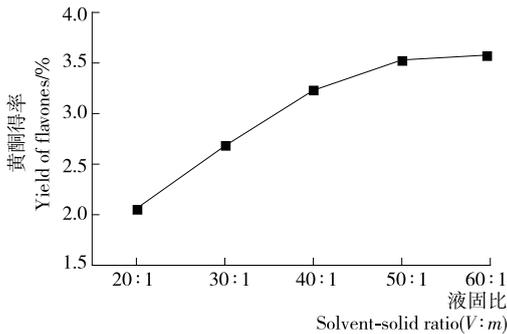


图 3 液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响

Figure 3 Effect of solvent-solid ratio on yield of flavones from VBTL

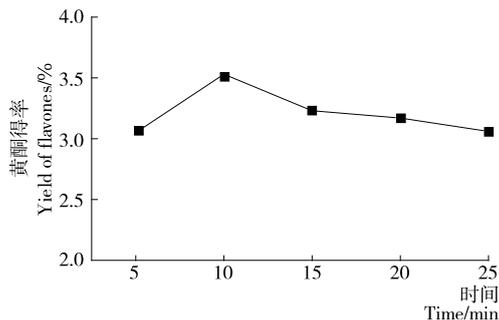


图 4 提取时间对乌饭树叶黄酮得率的影响

Figure 4 Effect of time on yield of flavones from VBTL

知,乌饭树叶黄酮得率随提取时间增加,乌饭树叶黄酮得率先升高后下降,在提取时间为 10 min 时达到最大值,这是因为提取超过一定时间,黄酮结构有可能被破坏,造成黄酮提取得率有所下降。因此,提取时间控制在 10 min 左右为宜。

### 2.5 响应面分析与优化

2.5.1 响应面法试验设计与结果分析 根据 Box-Behnken 设计原理,在单因素试验的基础上,以黄酮得率作为响应值,通过四因素三水平响应面法对超声—微波辅助提取乌饭树叶黄酮工艺进行优化,试验设计见表 1,结果见表 2。

表 1 响应面分析法的因素与水平表

Table 1 The factors and levels of the response surface analysis

水平	A 微波功率/W	B 温度/°C	C 液固比(V : m)	D 时间/min
-1	100	60	40 : 1	5
0	150	70	50 : 1	10
1	200	80	60 : 1	15

表 2 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 2 Results and design of Box-Behnken experiments

试验序号	A	B	C	D	黄酮得率/%
1	-1	-1	0	0	3.47
2	1	-1	0	0	3.33
3	-1	1	0	0	3.43
4	1	1	0	0	3.33
5	0	0	-1	-1	3.18
6	0	0	1	-1	3.15
7	0	0	-1	1	3.35
8	0	0	1	1	3.34
9	-1	0	0	-1	3.18
10	1	0	0	-1	2.95
11	-1	0	0	1	3.35
12	1	0	0	1	3.26
13	0	-1	-1	0	3.44
14	0	1	-1	0	3.41
15	0	-1	1	0	3.44
16	0	1	1	0	3.41
17	-1	0	-1	0	3.24
18	1	0	-1	0	3.30
19	-1	0	1	0	3.43
20	1	0	1	0	3.14
21	0	-1	0	-1	3.15
22	0	1	0	-1	3.16
23	0	-1	0	1	3.32
24	0	1	0	1	3.31
25	0	0	0	0	3.62
26	0	0	0	0	3.62
27	0	0	0	0	3.58
28	0	0	0	0	3.41
29	0	0	0	0	3.53

方差分析结果见表3。由表3可知,模型项P值小于0.05,表明模型项显著,具有统计学意义。失拟项P值大于0.05,表明无失拟因素存在。 $R^2=0.9194$ 表明试验具有较好的可靠性,可以用此模型对超声-微波辅助提取黄酮的得率进行预测。一次项A、D及二次项 $A^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$ 对黄酮得率的影响极显著( $P<0.01$ ),交互项AC影响显著( $P<0.05$ ),

其余项均不显著( $P>0.05$ )。根据试验结果,建立的模型为:

$$Y = -4.0546 + 0.0220A + 0.0610B + 0.1170C + 0.1868D + 2.0000 \times 10^{-5}AB - 1.7500 \times 10^{-4}AC + 1.4000 \times 10^{-4}AD - 1.9429 \times 10^{-18}BC - 1.0000 \times 10^{-4}BD + 1.0000 \times 10^{-4}CD - 5.7733 \times 10^{-5}A^2 - 4.5583 \times 10^{-4}B^2 - 9.1833 \times 10^{-4}C^2 - 9.3233 \times 10^{-3}D^2 \quad (2)$$

表3 方差分析<sup>†</sup>

Table 3 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.630	14	0.045	11.400	<0.0001	**
A	0.052	1	0.052	13.170	0.0027	**
B	8.333E-4	1	8.333E-4	0.210	0.6531	
C	8.333E-6	1	8.333E-6	2.110E-3	0.9640	
D	0.110	1	0.110	28.390	0.0001	**
AB	4.000E-4	1	4.000E-4	0.100	0.7550	
AC	0.031	1	0.031	7.750	0.0146	*
AD	4.900E-3	1	4.900E-3	1.240	0.2842	
BC	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
BD	1.000E-4	1	1.000E-4	0.025	0.8759	
CD	1.000E-4	1	1.000E-4	0.025	0.8759	
A <sup>2</sup>	0.140	1	0.140	34.210	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	0.013	1	0.013	3.410	0.0860	
C <sup>2</sup>	0.055	1	0.055	13.850	<0.0001	**
D <sup>2</sup>	0.350	1	0.350	89.210	<0.0001	**
残差	0.055	14	3.950E-3			
失拟项	0.025	10	2.462E-3	0.320	0.9340	不显著
净误差	0.031	4	7.670E-3			
总离差	0.690	28				

<sup>†</sup> \*. 差异显著( $P<0.05$ ); \*\*. 差异极显著( $P<0.01$ )

2.5.2 响应曲面图分析 微波功率、温度、液固比以及时间之间的交互作用对乌饭树叶黄酮得率的影响见图5~10。各响应曲面均具有最高点,表明在所选的范围内乌饭树叶黄酮得率具有最大值。响应曲面的形状可以直观的反映各因素对乌饭树叶黄酮得率的影响,曲线越陡峭,表明该因素对乌饭树叶黄酮得率的影响越显著。由图5~10可知,微波功率与时间对乌饭树叶黄酮得率的影响较为显著,而温度和液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响不显著,这与方差分析的结果相吻合。另外,等高线的形状可以反映因素间的交互作用是否明显。图5~10的等高线均为椭圆形,表明AB、AC、AD等因素间均具有交互作用。

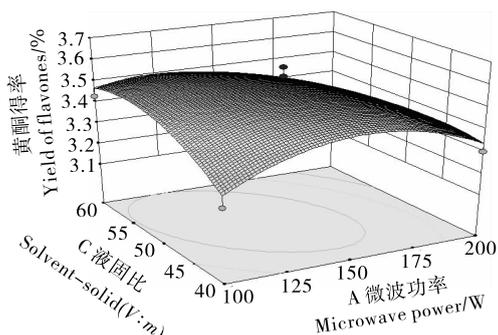


图6 微波功率与液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响  
Figure 6 Effect of microwave power and solvent-solid ratio on yield of flavones from VBTL

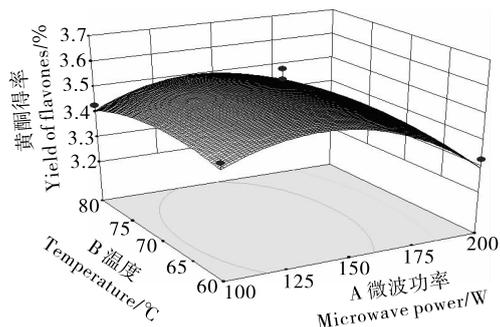


图5 微波功率与温度对乌饭树叶黄酮得率的影响  
Figure 5 Effect of microwave power and temperature on yield of flavones from VBTL

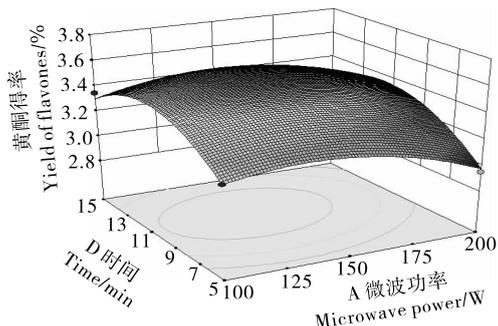


图7 微波功率与时间对乌饭树叶黄酮得率的影响  
Figure 7 Effect of microwave power and time on yield of flavones from VBTL

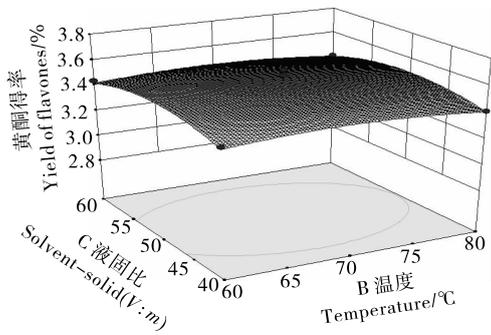


图 8 温度与液固比对乌饭树叶黄酮得率的影响  
Figure 8 Effect of temperature and solvent-solid ratio on yield of flavones from VBTL

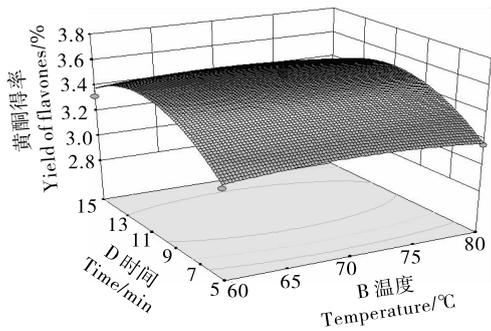


图 9 温度与时间对乌饭树叶黄酮得率的影响  
Figure 9 Effect of temperature and time on yield of flavones from VBTL

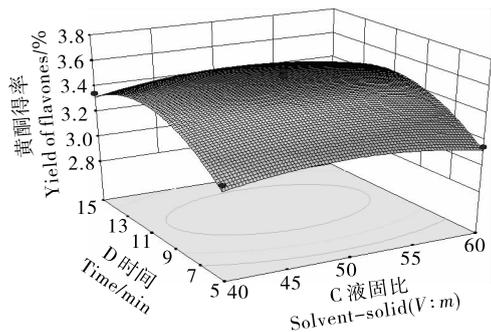


图 10 液固比与时间对乌饭树叶黄酮得率的影响  
Figure 10 Effect of solvent-solid ratio and time on yield of flavones from VBTL

2.5.3 响应面优化与验证 利用 Design-Expert 软件对试验结果进行优化,得到超声—微波辅助提取乌饭树叶黄酮的最佳工艺条件为:微波功率 137.80 W,温度 68.70 °C,液固比 51.17 : 1(V : m),时间 10.96 min。根据选择的最佳工艺,调整乌饭树叶黄酮提取的工艺条件为微波功率 140 W,温度 69 °C,液固比 51 : 1(V : m),时间 11 min,进行 3 次平行实验,得到的乌饭树叶黄酮得率为 3.64%。与理论预测值 3.72%相比,其相对误差约为 2.19%,说明优化结果可靠。

## 2.6 超声—微波辅助提取法与传统浸提法的比较

2.6.1 乌饭树叶黄酮得率比较 不同提取方法对黄酮得率的影响见表 4。由表 4 可知,传统热水浸提法得到乌饭树叶黄酮得率为 1.72%,而利用超声—微波辅助提取法提取黄

酮,得到黄酮得率为 3.64%。因此,与热水浸提法相比,超声—微波辅助提取法的黄酮得率较高,且时间较短。这主要是由于微波加热速度较快,结合超声波的空化效应,提高了传质速率,大大缩短了萃取时间,提高了萃取效率。

表 4 提取方法对乌饭树叶黄酮得率的影响

Table 4 Effect of different extraction methods on yield of flavones from VBTL

提取方法	黄酮得率/%	提取时间/min
传统热水浸提法	1.72	120
超声—微波辅助提取法	3.64	11

2.6.2 红外光谱分析与比较 为了进一步比较两种提取方法,通过红外光谱验证超声—微波辅助提取方法对乌饭树叶黄酮的结构影响,见图 11。图 11 中,3 436.85  $\text{cm}^{-1}$  为羟基的特征吸收峰,由于此处羟基吸收峰的峰型宽而钝,因此可能有分子间或分子内的氢键存在;3 132.10  $\text{cm}^{-1}$  为不饱和碳的碳氢伸缩振动;1 620.35  $\text{cm}^{-1}$  处峰的强度偏低,此处是碳碳双键或碳氧双键的特征吸收峰;1 400.06  $\text{cm}^{-1}$  为苯环的骨架振动;1 069.36  $\text{cm}^{-1}$  和 955.02  $\text{cm}^{-1}$  为不对称环醚的伸缩振动的特征吸收峰;900~650  $\text{cm}^{-1}$  区域是苯环因取代而产生的吸收。比较超声—微波辅助提取方法与传统热水浸提法得到乌饭树叶黄酮的红外光谱可知,二者所得的乌饭树叶黄酮特征吸收峰位置基本一致,表明超声—微波辅助提取法和热水浸提法相比,没有破坏乌饭树叶黄酮的结构。

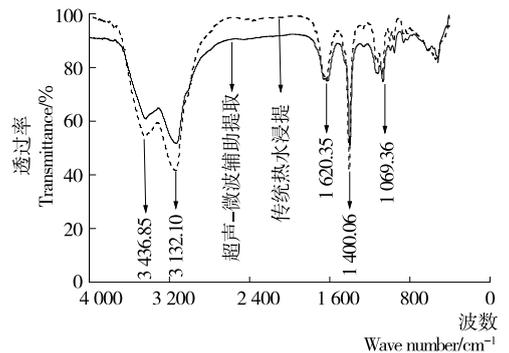


图 11 红外谱图对比

Figure 11 Comparison of FTIR spectra

## 3 结论

本研究采用响应面法优化得出超声—微波辅助提取乌饭树叶黄酮的最佳工艺条件为:微波功率 140 W,超声功率 50 W,温度 69 °C,液固比 51 : 1(V : m),时间 11 min,在此条件下,乌饭树叶黄酮得率为 3.64%。与传统热水浸提法相比,超声—微波辅助提取法未破坏乌饭树叶黄酮的结构,提取效率高,可为后期乌饭树叶黄酮的开发利用及其产业化生产提供参考。本研究提供了一种乌饭树叶黄酮超声—微波辅助高效提取方法,但是乌饭树叶黄酮的纯化、结构鉴定及生物活性还需进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 蔡凌云. 乌饭树叶中总黄酮体外抗氧化活性[J]. 中成药, 2011, 33(6): 1 054-1 057.
- [2] Daniela B, Luisa T, Francesca D G, et al. Antioxidant activities of sicilian prickly pear(*opuntia ficus indica*)fruit extracts and reducing properties of its betalains; betanin and indicaxanthin[J]. *Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(23): 6 895-6 901.
- [3] 曾伟, 丁利君, 黄聪华, 等. 黑曲霉发酵法辅助提取芒果黄酮及其抗氧化研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 115-118.
- [4] 章海燕, 王立, 张晖. 乌饭树叶水溶性黄酮的抑菌作用的研究[J]. 中国食品添加剂, 2010(5): 62-67.
- [5] Edziri H, Mastouri M, Ammar S, et al. Antimicrobial, antioxidant, and antiviral activities of *retama raetam* (forssk.) webb flowers growing in Tunisia[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2008, 24(12): 2 933-2 940.
- [6] Gomah N. Antimicrobial activity of *Calotropis procera* Ait. (Asclepiadaceae) and isolation of four flavonoid glycosides as the active constituents[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013(29): 1 255-1 262.
- [7] 黄丽娜, 马文领, 周健, 等. 乌饭树叶醇提物抗大鼠精神疲劳作用[J]. 中国公共卫生, 2008, 24(8): 964-966.
- [8] Wang Li, Zhang Xue-tong, Zhang Hai-yan, et al. Effect of *Vaccinium bracteatum* Thunb. Leaves extract on blood glucose and plasma lipid levels in streptozotocin-induced diabetic mice[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2010, 130(3): 465-469.
- [9] 章海燕, 王立, 张晖. 基于响应面分析法优化的乌饭树叶水溶性黄酮提取条件[J]. 食品工业科技, 2010, 31(3): 260-263.
- [10] 余青, 许慧星, 肖小蓉, 等. 基于响应面分析法优化的乌饭树叶总黄酮提取条件[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 93-98.
- [11] 王立, 姚惠源. 乌饭树叶中黄酮类色素的提取与分离纯化[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(9): 120-125.
- [12] 余青, 郑小严, 黄红霞, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取乌饭树叶总黄酮的工艺[J]. 福建农林大学学报, 2009, 38(1): 97-101.
- [13] Zhao Gui-li, Chen Xue, Wang Lei, et al. Ultrasound assisted extraction of carbohydrates from microalgae as feedstock for yeast fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 128(1): 337-344.
- [14] 陈丛瑾, 黄克瀛, 李德良, 等. 香椿叶总黄酮的超声波辅助提取及其清除 DPPH 自由基能力的研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 76-80.
- [15] 王娟, 沈平壤, 沈永嘉. 葛根中有效成分微波辅助萃取研究[J]. 中国医药工业杂志, 2002, 33(8): 382-384.
- [16] 苏东林, 单杨, 李高阳. 微波法提取柑桔皮总黄酮的应用研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(3): 73-77.
- [17] 刘全德, 唐仕荣, 宋慧. 超声波—微波协同萃取芹菜黄酮的工艺研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 134-137.
- [18] Ranjan A, Patil C, Moholkar V S. Mechanistic assessment of microalgal lipid extraction[J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2010(49): 2 979-2 985.
- [19] Ahmad-Qasem M H, Cánovas J, Barrajo-Catalán E, et al. Kinetic and compositional study of phenolic extraction from olive leaves (var. Serrana) by using power ultrasound[J]. *Innovative Food Science Emerging Technologies*, 2013(17): 120-129.
- [20] 唐浩国. 黄酮类化合物研究[M]. 香港: 科学教育出版社, 2009: 42-43.
- [21] 黄佳萍, 郑青, 郭梦梦, 等. 超声波法提取乌饭树叶槲皮素的工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(9): 4 050-4 052.
- [22] 顾文秀, 谢为明, 夏文水, 等. 超声波提取乌饭树叶色素及其稳定性的研究[J]. 林产化学与工业, 2005, 25(4): 74-78.
- [23] 胡志杰, 蔡智慧. 微波辐射提取乌饭树叶黑色素工艺的研究[J]. 中国野生植物资源, 2007, 26(6): 52-54.
- [24] 王立. 乌饭树黑色素中功能性成分研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- [25] 王芳, 张庆庆, 乔璐, 等. 乌饭叶中黄酮、多酚的提取及其抗氧化性研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 4 158-4 163.

(上接第 105 页)

### 3 结论

为了寻找到六安绿茶理条工序的最佳工艺条件, 研究了理条时间、理条温度和投叶量对最后茶叶品质的影响, 对正交试验结果进行多元回归分析, 建立人工神经网络模型优化理条工艺条件。研究表明理条温度对理条工艺中的影响最大, 其次是理条机转速, 最后是投叶量, 当理条温度为 93 ℃, 理条时间为 5 min, 投叶量为 1.0 kg, 六安绿茶的理条效果最好。以往关于茶叶理条工艺的研究, 如文献[5]和[7], 都是从茶叶理化性质角度寻找最优参数, 而没有以成茶率和碎茶率的角度去分析。本研究不仅寻找到最优理条工艺参数, 还为茶叶加工其它工序的最优参数寻找提供方法与依据, 接下来要对理条因素之间的交互作用进行进一步的试验, 在对其它可能潜在的因素也进行试验分析。

## 参考文献

- [1] 周智修, 段文华, 吴海燕, 等. 我国名优茶发展现状与趋势[J]. 茶叶科学, 2013, 33(2): 171-178.
- [2] 周智修, 段文华, 吴海燕, 等. 中国名优茶消费需求调查分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(3): 412-416.
- [3] 司辉清, 庞晓莉, 刘建军, 等. 机制针形名优绿茶工艺研究[J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(4): 370-373.
- [4] 钟映富, 周正科, 胡翔, 等. 振动理条对针形名茶品质的影响[J]. 中国茶叶, 2002, 24(1): 32-33.
- [5] 余志, 杨艳, 周继荣, 等. 机制针形名茶做形工艺研究[J]. 茶叶科学, 2007, 27(4): 311-315.
- [6] 刘二根, 王广超, 朱旭生. MATLAB 与数学实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [7] 田波平, 孙秋梅, 廖庆喜, 等. 6CZZ-600 型针形名优茶做形机及成型工艺优化[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 65-68.
- [8] 陈习村. 六安瓜片加工工艺研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2001.
- [9] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [10] 朱德泉, 蒋克荣, 王继先, 等. 干燥过程模糊神经网络控制器的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4 768-4 771.
- [11] 刘卫国. matlab 程序设计与应用[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [12] 刘海臣, 卓金武, 吴国光. 基于人工神经网络的茶叶咖啡因提取条件的优化[J]. 应用化学, 2007, 24(4): 457-460.