

超声波辅助提取美人蕉叶多酚工艺 及其抗氧化活性研究

陈文娟¹, 陈建福^{2,3}, 林 艳⁴, 庄远红⁴

(1.漳州城市职业学院食品工程系, 福建 漳州 363000)

(2.漳州职业技术学院石油化工学院, 福建 漳州 363000)

(3.福建省精细化工应用技术协同创新中心, 福建 漳州 363000)

(4.闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建 漳州 363000)

[摘要] 以美人蕉叶为原料,通过单因素试验并结合响应面法,对超声波辅助乙醇溶液提取美人蕉叶多酚的工艺条件进行研究. 选择乙醇浓度、液料比、超声温度和超声时间作为响应面因素,多酚提取率为响应值,确定了能够用于美人蕉叶多酚提取率进行分析和预测的二次多项式回归模型方程. 结果表明,在乙醇浓度为 57%、液料比为 43 mL/g、超声温度为 72 ℃、超声时间为 50 min 时,测得的美人蕉叶多酚提取率最高,达到 18.89 mg/g,与理论上的美人蕉叶多酚提取率(19.15 mg/g)相对误差仅为 1.36%,证实了该模型合理,预测可靠. 所提取的美人蕉叶多酚对 DPPH 自由基和 OH 自由基具有一定的清除能力并呈现正相关关系,其 IC_{50} 分别为 49.99 mg/L 和 315.55 mg/L,证明了美人蕉叶多酚的抗氧化能力.

[关键词] 超声波辅助,美人蕉叶,多酚,响应面法,抗氧化活性

[中图分类号] TS202 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2023)03-0075-09

Ultrasonic-Assisted Extraction of Polyphenols From *Canna indica* Leaves and Its Antioxidant Activity

Chen Wenjuan¹, Chen Jianfu^{2,3}, Lin Yan⁴, Zhuang Yuanhong⁴

(1.Department of Food Engineering, Zhangzhou City Vocational College, Zhangzhou 363000, China)

(2.College of Chemical Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China)

(3.Collaborative Innovation Center of Fine Chemicals in Fujian Province, Zhangzhou 363000, China)

(4.School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: Taking *Canna indica* leaves as raw materials, the process conditions of ultrasonic-assisted ethanol solution extraction of polyphenols from *Canna indica* leaves are studied by single factor experiment combined with response surface methodology. The ethanol concentration, liquid-to-material ratio, ultrasonic temperature and ultrasonic time are selected as the response surface factors, and the polyphenol extraction yield is the response value, and the quadratic polynomial regression model equation that can be used to analyze and predict the polyphenol extraction yield of *Canna indica* leaves is determined. The results show that when the concentration of ethanol is 57%, the ratio of liquid to material is 43 mL/g, the ultrasonic temperature is 72 ℃ and the ultrasonic time is 50 minutes, the extraction yield of polyphenols from *Canna indica* leaves is the highest, reaching 18.89 mg/g. The theoretical relative error of *Canna indica* leaves polyphenol extraction yield (19.15 mg/g) is only 1.36%, which also confirms that the model is reasonable and the prediction is reliable. The extracted polyphenol from *Canna indica* leaves has a certain scavenging ability on DPPH free radical and OH free radical, and there is a positive correlation. Its IC_{50} is 49.99 mg/L and 315.55 mg/L, respectively, which proves the antioxidant capacity of *Canna indica* leaves polyphenols.

Key words: ultrasound-assisted extraction, *Canna indica* Leaves, polyphenols, response surface methodology, antioxidant activity

收稿日期: 2022-07-27.

基金项目: 漳州市自然科学基金项目(ZZ2021J27)、福建省中青年教育科研项目(JAT210934).

通讯作者: 陈建福, 博士, 副教授, 研究方向: 食品应用化学. E-mail: qj1996@163.com

美人蕉(*Canna indica* L.),又名红艳蕉、小芭蕉等,为美人蕉科多年生草本植物^[1-2],广泛种植于我国各地的公共绿地、道路绿化带、草坪、湖畔等地^[3].美人蕉资源丰富,富含挥发油、多酚、黄酮等多种天然的有效成分^[4-5].多酚是一种存在于植物的皮、叶、根及果肉的天然特殊化合物,不仅具有抗氧化、抗衰老、抗炎、抗菌等作用,还具有降血压、降血脂、降血糖、抗癌、镇痛等多种功效^[6-7],近年来多酚提取已逐渐成为天然产物开发与应用的研究热点^[8-9].

美人蕉叶片宽大,是提取植物多酚的良好原材料^[10].目前美人蕉多作为观赏性植物用于环境绿化等^[11-12],对美人蕉叶中多酚提取的研究还较少.本文采用超声波辅助乙醇溶液提取的方法,以美人蕉叶为原料,研究乙醇浓度、液料比、超声温度和超声时间 4 个因素对美人蕉叶多酚提取率的影响,通过单因素法得出各个因素适合的操作范围,再利用响应面法进一步优化美人蕉叶多酚的提取工艺,得出最优工艺条件,并考察了多酚的抗氧化活性,为美人蕉叶多酚的进一步研究开发提供参考.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

美人蕉叶,采于漳州市马鞍山,用自来水将刚采摘的美人蕉叶上的泥沙冲洗干净,然后用蒸馏水再冲洗一遍后晾干,放入 50 ℃ 烘箱中烘至恒重,粉碎后,过 60 目筛备用.

维生素 C,分析纯,西陇科学股份有限公司;特丁基对苯二酚(TBHQ),食品级,浙江一诺生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-苦肟基(DPPH),分析纯,上海伊卡生物技术有限公司;钨酸钠、钼酸钠、硫酸锂、没食子酸等均为市售分析纯;乙醇,食品医药级,河南浩宇食品添加剂有限公司.

紫外/可见分光光度计 UV-200,上海美普达仪器有限公司;高频数控超声波清洗器 KQ-100TDE,昆山市超声仪器有限公司.

1.2 试验方法

1.2.1 标准曲线的制作

用蒸馏水溶解没食子酸标准品,配制成 0.1 mg/mL 的没食子酸标准溶液.美人蕉叶多酚的测定采用福林-酚法^[13]:分别在比色管中加入 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mL 上述配制好的没食子酸标准溶液,并添加 0.5 mL 福林-酚试剂,混匀静置约 1 min,用移液枪取 1.5 mL 的 20% 碳酸钠溶液加入比色管中,定容至 10 mL 并摇匀后于 75 ℃ 下恒温 10 min,取出置于试管架冷却后,摇匀比色管,将溶液倒于比色皿中,在 765nm 波长下比色,根据测定的数据作出标准曲线,得出标准曲线方程为 $y = 0.1005x + 0.0427$, $R^2 = 0.9993$.

1.2.2 美人蕉叶多酚的提取及含量的测定

将一定质量(m)的美人蕉叶粉末加入 100 mL 圆底烧瓶中,加入一定浓度的乙醇溶液及适量沸石,放入超声波清洗器,超声波清洗器提前设置一定温度和时间,超声结束后取下圆底烧瓶,静置冷却后获得上清液.将上清液缓慢倒入小烧杯中,取 1.0 mL 上清液稀释定容至 10 mL,得到稀释 10 倍的美人蕉叶提取液,参照 1.2.1 的方法测定美人蕉叶提取液的吸光度值,通过标准曲线及下式计算美人蕉叶多酚提取率:

$$\text{多酚提取率}(\text{mg/g}) = \frac{c \times n \times V}{m \times 10^3},$$

式中, c 为美人蕉叶待测液多酚浓度(mg/L); V 为美人蕉叶提取液体积(mL); n 为稀释倍数; m 为美人蕉叶粉末质量(g).

1.2.3 单因素试验

1.2.3.1 乙醇浓度的影响

各取 1 g 美人蕉叶粉末分别加入 40 mL 体积分数分别为 40%、50%、60%、70% 和 80% 的乙醇溶液,提前设置超声波清洗器温度为 70 ℃,超声处理 50 min,参照 1.2.2 的方法计算美人蕉叶多酚的提取率.

1.2.3.2 液料比的影响

各取 1 g 美人蕉叶粉末分别加入 20、30、40、50 和 60 mL 浓度为 60% 的乙醇溶液,提前设置超声波清洗器温度为 70 ℃,超声处理 50 min,参照 1.2.2 的方法计算美人蕉叶多酚的提取率.

1.2.3.3 超声温度的影响

各取 1 g 美人蕉叶粉末并加入 40 mL 60% 的乙醇溶液,预先设置超声波清洗器温度为 60、65、70、75、80 ℃,超声处理 50 min,参照 1.2.2 的方法计算美人蕉叶多酚的提取率。

1.2.3.4 超声时间的影响

各取 1 g 美人蕉叶粉末并加入 40 mL 60% 的乙醇溶液,在提前设置温度为 70 ℃ 的超声波清洗器中,分别超声处理 30、40、50、60 和 70 min,参照 1.2.2 的方法计算美人蕉叶多酚的提取率。

1.2.4 响应面优化试验

通过上述单因素试验得出各个因素合适的操作范围,采用响应面法进一步优化美人蕉叶多酚的提取条件,其中影响因素包括乙醇浓度、液料比、超声温度和超声时间,美人蕉叶多酚提取率为响应值,利用 Design Expert 8.06b 中的 Box-Behnken 实验方法设计 4 因素 3 水平试验,响应面因素编码及水平如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 响应面因素及水平
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken response surface

因素/水平	A:乙醇浓度/%	B:液料比/(mL/g)	C:超声温度/℃	D:超声时间/min
-1	50	30	65	40
0	60	40	70	50
1	70	50	75	60

1.2.5 抗氧化活性测试

1.2.5.1 DPPH 自由基测试

准确移取 2 mL 一系列浓度的美人蕉叶多酚至比色管中,分别加入 2 mL 0.15 mmol/L DPPH 乙醇溶液,定容后摇匀避光放置 30 min,在 517 nm 处测得吸光度 A_i ;然后将多酚溶液换成无水乙醇,测得吸光度 A_0 ;将 DPPH 溶液换成无水乙醇,测得吸光度 A_j 。分别以维生素 C 和特丁基对苯二酚(TBHQ)作为阳性对照,计算美人蕉叶多酚的 DPPH 自由基清除率 R :

$$R(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0} \right) \times 100\%.$$

1.2.5.2 OH 自由基测试

准确移取 2 mL 一系列浓度的美人蕉叶多酚至比色管中,分别加入 2 mL 9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、1 mL 9 mmol/L FeSO_4 溶液和 1 mL 0.01% H_2O_2 溶液(或蒸馏水),定容后摇匀避光放置 60 min,在 510 nm 处测定吸光度 A_i (或 A_j);以 2 mL 蒸馏水替代美人蕉叶多酚,测得吸光度 A_0 ,并分别以维生素 C 和 TBHQ 作为阳性对照,计算美人蕉叶多酚的 OH 自由基清除率 Q :

$$Q(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0} \right) \times 100\%.$$

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 乙醇浓度对多酚提取率的影响

如图 1 所示,在乙醇浓度从 40% 提高到 60% 的过程中,美人蕉叶多酚的提取率显著增加,并在乙醇浓度为 60% 时到达最高,此时继续增大乙醇浓度,美人蕉叶多酚提取率反而降低。这是因为多酚与蛋白质、多糖等物质之间的疏水键、氢键易受有机溶剂破坏,从而有助于多酚的浸出^[14]。但乙醇浓度过高会促使美人蕉叶提取过程中产生的溶出色素、醇溶性物质、亲脂性强的成分等杂质与乙醇分子结合,形成与美人蕉叶多酚的竞争,导致了提取率下降。因此,确定乙醇浓度为 60%。

2.1.2 液料比对多酚提取率的影响

由图 2 可知,在液料比从 20 mL/g 扩大到 40 mL/g 的过程中,美人蕉叶多酚的提取率显著提高,并在 40 mL/g 时达到最高,此时继续增大液料比,美人蕉叶多酚提取率反而降低。这是因为美人蕉叶粉末质量不变,用于提取的乙醇溶液增多,美人蕉叶粉末与溶剂接触更加充分,溶出的多酚物质增多^[15]。但液料比过大,

诸如多糖之类的杂质也溶出,与多酚竞争溶剂,导致多酚提取率有所下降.因此,确定液料比为 40 mL/g.

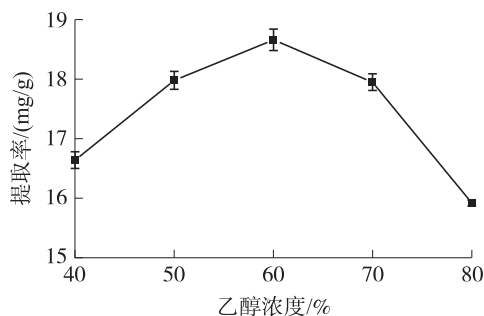


图 1 乙醇浓度对提取率的影响

Fig. 1 Effect of ethanol concentration on extraction yield

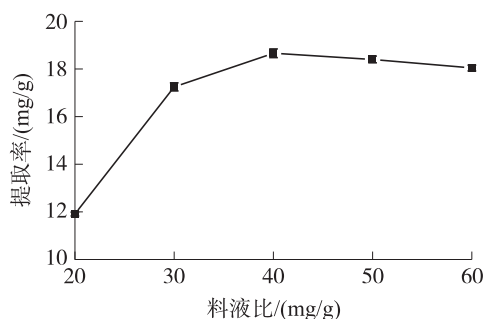


图 2 液料比对提取率的影响

Fig. 2 Effect of liquid-to-material ratio on extraction yield

2.1.3 超声温度对多酚提取率的影响

由图 3 可知,在超声温度由 60 ℃ 升高到 70 ℃ 的过程中,美人蕉叶多酚的提取率逐渐上升,在 70 ℃ 时到达最高,此时继续升高超声温度,美人蕉叶多酚提取率反而降低.这是因为超声温度设置越高,越有利于多酚物质在溶剂中的溶出.但温度过高,乙醇溶液挥发较快且温度升高易导致多酚结构遭到破坏,从而影响美人蕉叶多酚的提取率^[16].因此,确定超声温度为 70 ℃.

2.1.4 超声时间对多酚提取率的影响

由图 4 可知,在超声时间由 30 min 延长到 50 min 的过程中,美人蕉叶多酚的提取率逐渐提高,并在 50 min 时达到最高,后趋于稳定,继而略有下降.这是因为当超声波处理 30 min 左右时,由于超声波对美人蕉叶细胞壁的破坏还不够彻底,故多酚提取率较低;超声时间延长至 50 min,多酚基本完全浸出,故美人蕉叶多酚提取率明显提高.当超声波处理大于 50 min 后,美人蕉叶多酚的暴露时间延长,导致多酚结构被氧化和破坏的机率增加,从而降低了美人蕉叶多酚的提取率^[17].因此,确定超声时间为 50 min.

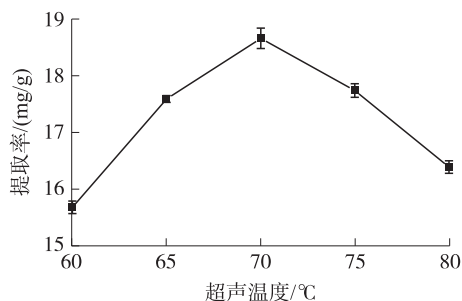


图 3 超声温度对提取率的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic temperature on extraction yield

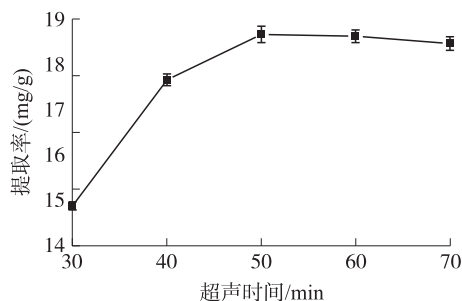


图 4 超声时间对提取率的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic time on extraction yield

2.2 响应面试验结果

2.2.1 响应面试验设计与结果

根据单因素研究的结果和 Box-Behnken 试验设计原理,建立 4 因素 3 水平响应面分析试验,产生了 29 个试验点,响应值为美人蕉叶多酚的提取率(Y),试验水平和结果如表 2 所示,方差分析结果如表 3 所示.

对表 2 的数据进行拟合,得到超声波辅助提取美人蕉叶多酚提取率对 4 个影响因素的二次多项式回归模型方程:

$$Y = 18.66 - 1.03A + 0.59B + 1.05C + 0.33D - 0.11AB + 0.20AC - 0.19AD - 0.027BC - 0.49BD - 0.20CD - 1.85A^2 - 0.86B^2 - 1.04C^2 - 1.80D^2.$$

方差分析得出,失拟项的 $P = 0.1269 > 0.05$,失拟项不显著; $F = 32.20$, $P < 0.0001$,表明该模型具有极高的显著性;决定系数 $R^2 = 0.9699$,说明该回归模型可用来分析 96.99% 的美人蕉叶多酚提取率的变化,且具有较好的拟合度,可以用来对美人蕉叶多酚的提取率进行分析、预测.经显著性检验, A 、 B 、 C 一次项和 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 二次项的 P 值均比 0.01 小,说明这几项对美人蕉叶多酚的提取率具有极显著的影响;一次项 D 和交互项 BD 的 P 值小于 0.05,说明一次项超声时间、交互项超声时间和液料比这两项对美人蕉叶多酚的

提取率具有显著的影响. 试验因素并不是通过简单的线性关系影响美人蕉叶多酚的提取率. 通过表 3 中 F 值的比较可知, F 值越大则该因素对多酚提取的影响越明显,从而得出对多酚提取影响程度的顺序为: C (超声温度) $>A$ (乙醇浓度) $>B$ (液料比) $>D$ (超声时间).

表 2 响应面分析方案及结果

Table 2 The scheme and results of response surface analysis

试验号	A/%	B/(mL/g)	C/℃	D/min	提取率/(mg/g)	试验号	A/%	B/(mL/g)	C/℃	D/min	提取率/(mg/g)
1	0	0	0	0	18.74	16	0	-1	0	1	16.18
2	0	-1	0	-1	15.07	17	0	0	0	0	18.55
3	0	0	0	0	18.31	18	1	0	1	0	15.92
4	0	0	1	1	17.59	19	0	0	1	-1	16.71
5	-1	0	0	-1	15.68	20	-1	0	1	0	17.39
6	1	1	0	0	15.62	21	0	0	0	0	18.76
7	0	1	0	-1	16.97	22	0	1	-1	0	16.27
8	0	0	0	0	18.95	23	0	1	1	0	18.16
9	1	0	0	-1	13.73	24	0	0	-1	1	15.20
10	-1	1	0	0	17.81	25	1	-1	0	0	14.18
11	-1	0	-1	0	16.20	26	1	0	-1	0	13.93
12	0	1	0	1	16.13	27	0	-1	-1	0	15.25
13	-1	-1	0	0	15.94	28	0	0	-1	-1	13.53
14	0	-1	1	0	17.25	29	-1	0	0	1	16.60
15	1	0	0	1	13.89						

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	71.20	14	5.09	32.20	<0.000 1	**
A	12.71	1	12.71	80.47	<0.000 1	**
B	4.19	1	4.19	26.52	0.000 1	**
C	13.31	1	13.31	84.29	<0.000 1	**
D	1.27	1	1.27	8.02	0.013 3	*
AB	0.046	1	0.046	0.29	0.597 0	
AC	0.16	1	0.16	1.01	0.331 3	
AD	0.14	1	0.14	0.91	0.355 2	
BC	0.003 0	1	0.003	0.019	0.891 9	
BD	0.95	1	0.95	6.02	0.027 9	*
CD	0.16	1	0.16	0.99	0.337 2	
A^2	22.27	1	22.27	141.02	<0.000 1	**
B^2	4.80	1	4.80	30.41	<0.000 1	**
C^2	7.01	1	7.01	44.36	<0.000 1	**
D^2	21.12	1	21.12	133.70	<0.000 1	**
残差	2.21	14	0.16			
失拟度	1.98	10	0.20	3.36	0.126 9	
绝对误差	0.24	4	0.059			
总离差	73.42	28				

注: * $P<0.05$, 差异显著; ** $P<0.01$, 差异极显著.

2.2.2 响应曲面图分析

响应面试验得到图 5—图 10 的响应曲面图. 响应曲面越陡, 说明响应值对于响应面因素的变化越敏感, 即该因素对美人蕉叶多酚的提取率有更大的影响. 等高线图能够反映两因素交互效应的强弱, 椭圆形说明具有明显的交互作用, 圆形则与之相反^[18].

由图 5 可以看出, 当乙醇浓度为一定值时, 增大液料比, 美人蕉叶多酚的提取率呈现先增后减的趋势, 而当液料比为一定值时, 提高乙醇浓度, 美人蕉叶多酚的提取率也呈现先增后减的趋势, 且曲面坡度都较陡峭, 说明美人蕉叶多酚的提取率对液料比或乙醇浓度的变化都较为敏感. 二者呈现圆形等高线图, 表明交互作用不明显.

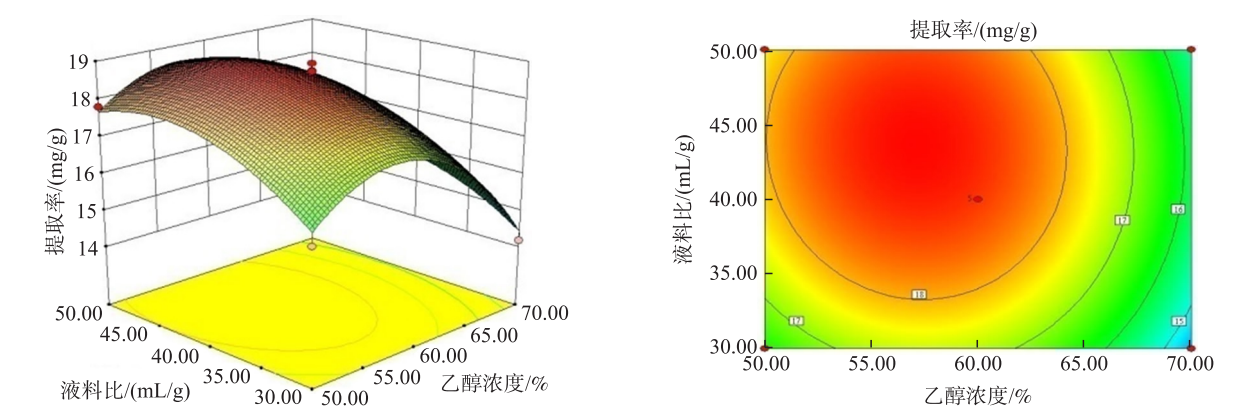


图 5 乙醇浓度和液料比的交互作用

Fig. 5 Interaction between ethanol concentration and liquid-to-material ratio

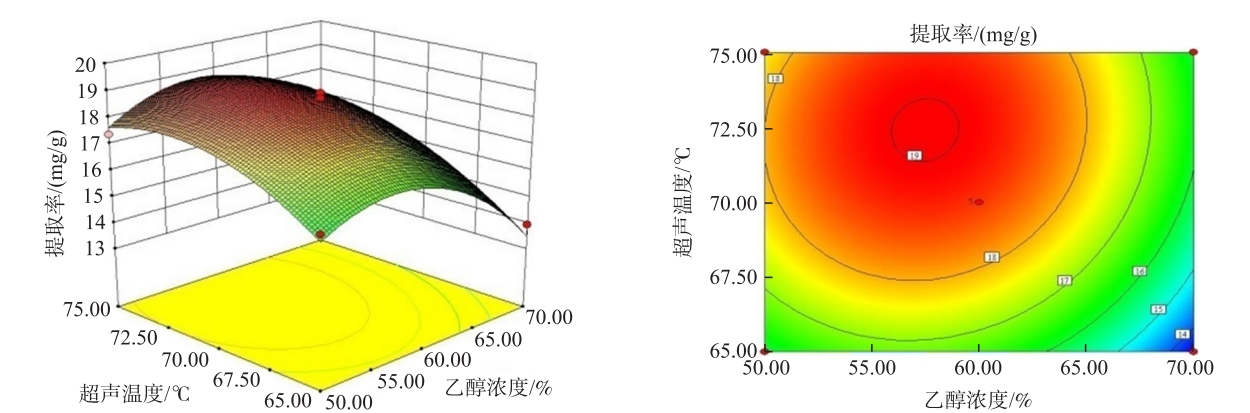


图 6 乙醇浓度和超声温度的交互作用

Fig. 6 Interaction between ethanol concentration and ultrasonic temperature

由图 6 可以看出,当超声温度为一定值时,美人蕉叶多酚的提取率随着乙醇浓度的增加而升高,达到最高点后迅速降低;当乙醇浓度为一定值时,升高超声温度,美人蕉叶多酚的提取率也呈现先增后减的趋势. 对比二者的曲面坡度,均较陡峭,说明超声温度及乙醇浓度的变化对美人蕉叶多酚的提取有较大的影响. 二者呈现圆形等高线图,表明交互作用较不明显.

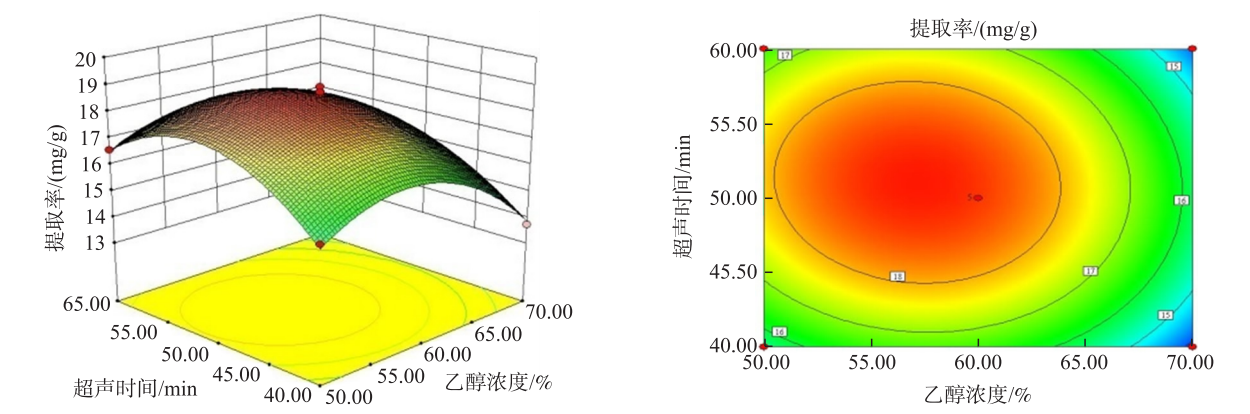


图 7 乙醇浓度和超声时间的交互作用

Fig. 7 Interaction between ethanol concentration and ultrasonic time

由图 7 可以看出,当乙醇浓度为一定值时,延长超声时间,美人蕉叶多酚的提取率先升后降;同样,当超声时间为一定值时,增大乙醇浓度,美人蕉叶多酚的提取率先升高后迅速降低. 超声时间呈现相对平缓的曲面坡度,说明超声时间对美人蕉叶多酚的提取影响更小一些. 两因素趋向圆形的等高线,说明交互作用不明显.

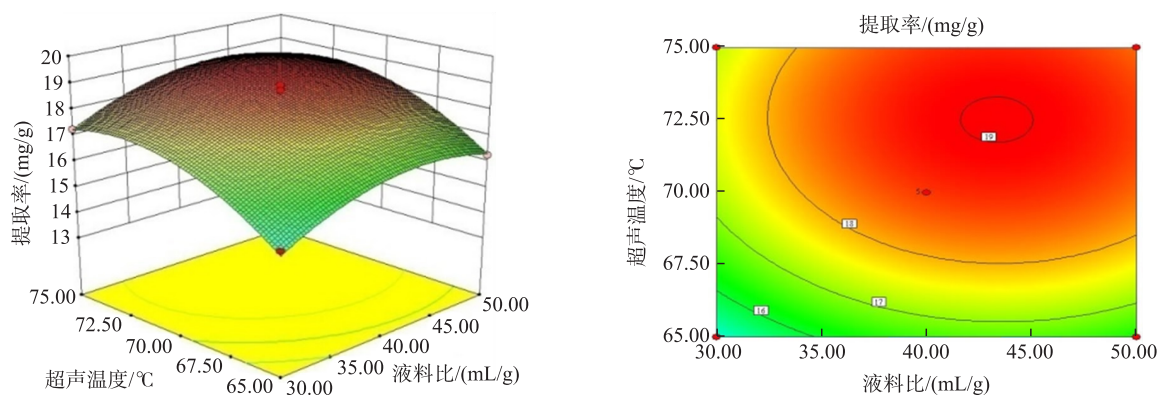


图 8 液料比和超声温度的交互作用

Fig. 8 Interaction between liquid-to-material ratio and ultrasonic temperature

由图 8 可以看出,当液料比为一定值时,升高超声温度,美人蕉叶多酚的提取率先增大后逐渐减小;当超声温度为一定值时,增大液料比,美人蕉叶多酚的提取率先增大后趋向平缓. 超声温度具有相对较陡峭的曲面坡度,说明美人蕉叶多酚的提取率对超声温度的变化更加敏感. 二者形成近似圆形的等高线图,说明两者的交互作用弱.

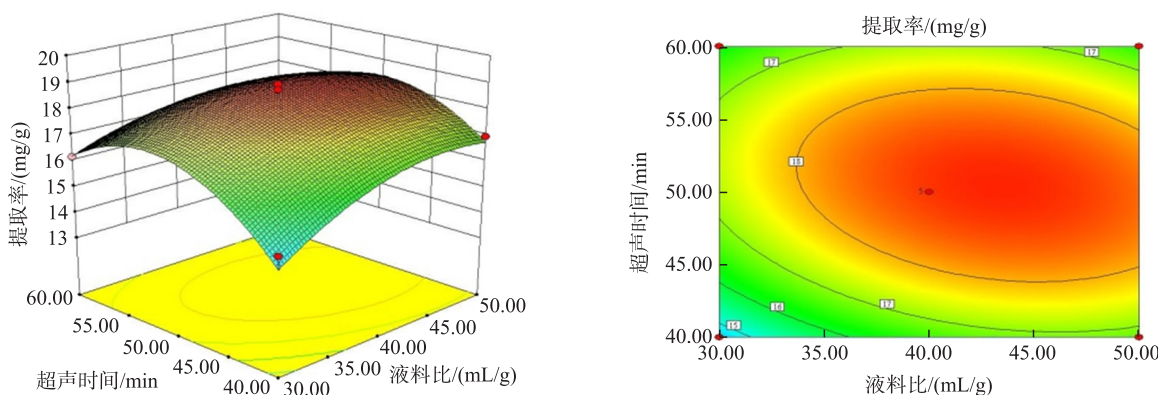


图 9 液料比和超声时间的交互作用

Fig. 9 Interaction between liquid-to-material ratio and ultrasonic time

由图 9 可以看出,固定超声时间不变,增大液料比,美人蕉叶多酚的提取率先增大后趋向平缓;固定液料比,随着超声时间的逐渐延长,美人蕉叶多酚的提取率先增加后逐渐减小. 对比曲面坡度,较陡峭的是液料比,说明液料比对美人蕉叶多酚提取率的影响相对更大. 两者等高线呈椭圆状,且椭圆的轴线与坐标轴存在一定角度,说明液料比和超声时间确实存在较明显的交互作用.

由图 10 可以看出,当超声温度为一定值时,延长超声时间,美人蕉叶多酚的提取率先增后减小;当超声时间为一定值时,升高超声温度,美人蕉叶多酚的提取率也呈现先增大后减小的趋势. 对比曲面坡度,

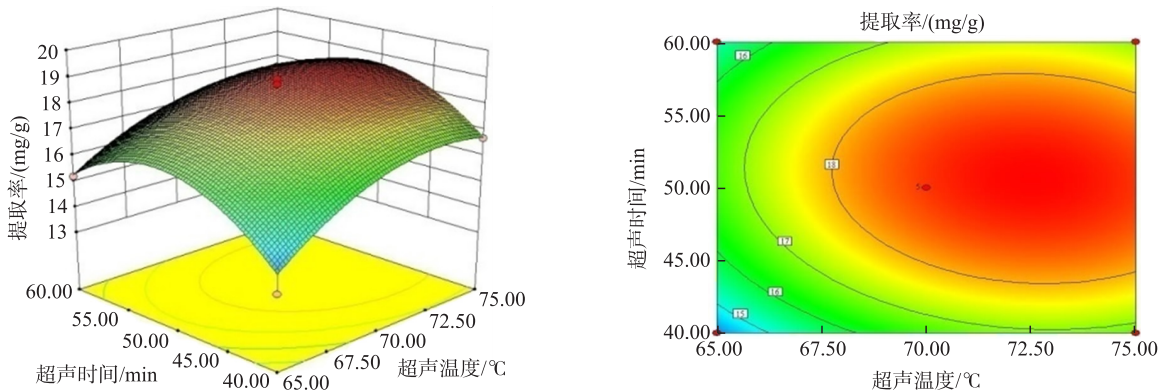


图 10 超声温度和超声时间的交互作用

Fig. 10 Interaction between ultrasonic temperature and time

较陡峭的是超声温度,说明超声温度对美人蕉叶多酚提取率的影响相对更大.二者形成近似圆形的等高线图,说明二者的交互作用弱.

2.2.3 最优工艺条件验证

利用 Design Expert 8.06b 软件对实验数据进行分析,获得回归模型,得到提取美人蕉叶多酚的最佳工艺参数为:乙醇浓度 57.37%、液料比 43.42 mL/g、超声温度 72.37 °C、超声时间 50.32 min,此条件下美人蕉叶多酚理论上提取率为 19.15 mg/g.

为检验提取美人蕉叶多酚的回归模型的可靠性,采用上述最佳的工艺参数进行美人蕉叶多酚提取验证.考虑到实验室实际条件,将上述参数修正为:乙醇浓度 57%、液料比 43 mL/g、超声温度 72 °C、超声时间 50 min,重复试验 3 次,最终得到美人蕉叶多酚提取率为 18.89 mg/g,与美人蕉叶多酚理论提取率的相对误差仅为 1.36%.说明该模型预测的最佳工艺参数准确可靠,可应用于美人蕉叶多酚的提取.

2.3 美人蕉叶多酚的抗氧化性能

通过美人蕉叶多酚对 DPPH 自由基和 OH 自由基的清除能力来评价美人蕉叶多酚的抗氧化能力,并对比美人蕉叶多酚与维生素 C、TBHQ 的抗氧化活性,其结果如图 11~12 所示.

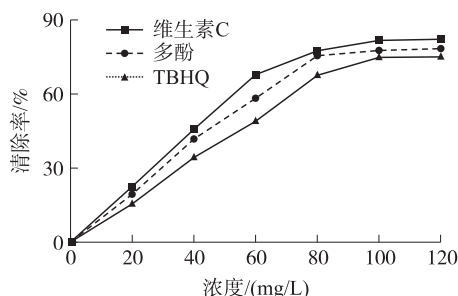


图 11 多酚、维生素 C 和 TBHQ 对 DPPH 自由基的清除效果
Fig. 11 Scavenging effect of polyphenol, Vitamin C and TBHQ on DPPH free radical

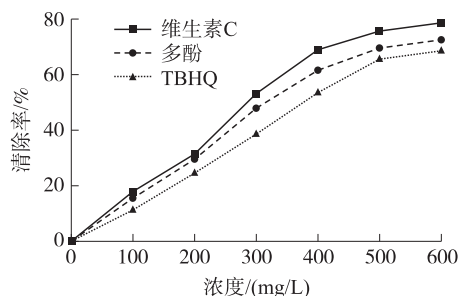


图 12 多酚、维生素 C 和 TBHQ 对 OH 自由基的清除效果
Fig. 12 Scavenging effect of polyphenol, Vitamin C and TBHQ on OH free radical

从图 11 可知,随着美人蕉多酚、维生素 C 和 TBHQ 浓度增加,三者对 DPPH 自由基的清除率均逐渐增大,说明所考察的 3 种物质与 DPPH 自由基清除率均呈现正相关关系;当 DPPH 自由基清除率为 50%时,美人蕉叶多酚、维生素 C 和 TBHQ 的 IC_{50} 分别为 49.99 mg/L、43.88 mg/L 和 61.12 mg/L.

从图 12 可知,随着美人蕉多酚、维生素 C 和 TBHQ 浓度增加,三者对 OH 自由基的清除率均逐渐增大,说明所考察的 3 种物质与 OH 自由基清除率均呈现正相关关系;当 OH 自由基清除率为 50%时,美人蕉叶多酚、维生素 C 和 TBHQ 的 IC_{50} 分别为 315.55 mg/L、285.54 mg/L 和 376.34 mg/L.

综上所述,美人蕉叶多酚与维生素 C 及 TBHQ 一样,对 DPPH 自由基和 OH 自由基均有较好的清除作用,证明了美人蕉叶多酚具有一定的抗氧化能力^[19-20],3 种物质对 DPPH 自由基和 OH 自由基的抗氧化能力顺序均为维生素 C>美人蕉叶多酚>TBHQ.

3 结论

以美人蕉叶为原料,通过改变乙醇浓度、液料比、超声温度及超声时间 4 个影响因素中的一个而保持其余 3 个不变,研究该因素对美人蕉叶多酚提取率的影响并确定合适的操作范围.采用响应面法对美人蕉叶多酚的提取条件进行优化,分析创建的回归模型,得出各因素对美人蕉叶多酚提取的影响顺序为:超声温度>乙醇浓度>液料比>超声时间.当乙醇浓度为 57%、液料比为 43 mL/g、超声温度为 72 °C、超声时间为 50 min 时,达到最佳提取条件,在此条件下得到的提取率为 18.89 mg/g,与理论提取率的相对误差仅为 1.36%,说明模型合理、预测可靠.所提取的美人蕉叶多酚对 DPPH 自由基和 OH 自由基均具有一定的清除能力且呈正相关关系,其 IC_{50} 分别为 49.99 和 315.55 mg/L,说明美人蕉叶多酚具有一定的抗氧化能力.该研究可以为美人蕉叶多酚的进一步研究应用提供参考.

[参考文献] (References)

- [1] NGUYEN D T C, LE H T N, NGUYEN T T, et al. Multifunctional ZnO nanoparticles bio-fabricated from *Canna indica* L.

- flowers for seed germination, adsorption, and photocatalytic degradation of organic dyes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126586.
- [2] OJHA P S, BIRADAR P R, TUBACHI S, et al. Evaluation of neuroprotective effects of *Canna indica* L. against aluminium chloride induced memory impairment in rats[J]. *Advances in Traditional Medicine*, 2023, 23: 539–556.
- [3] 詹华山. 美人蕉的栽培技术及在园林设计中的作用[J]. *种子科技*, 2021, 39(5): 49–51.
- [4] AYUSMAN S, DURAIVADIVEL P, GOWTHAM H G, et al. Bioactive constituents, vitamin analysis, antioxidant capacity and α -glucosidase inhibition of *Canna indica* L. rhizome extracts[J]. *Food Bioscience*, 2020, 35: 100544.
- [5] KUMBHAR S T, PATIL S P, UNE H D. Phytochemical analysis of *Canna indica* L. roots and rhizomes extract[J]. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 2018, 16: 50–55.
- [6] LUND M N. Reactions of plant polyphenols in foods: impact of molecular structure[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 241–251.
- [7] DE ARAUJO F F, DE PAULO FARIAS D, NERI-NUMA I A, et al. Polyphenols and their applications: an approach in food chemistry and innovation potential[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127535.
- [8] EFENBERGER-SZMECHTYK M, NOWAK A, CZYZOWSKA A. Plant extracts rich in polyphenols: antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(1): 149–178.
- [9] STAGOS D. Antioxidant activity of polyphenolic plant extracts[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(1): 19.
- [10] 孔杜林, 李永辉, 范超军, 等. 美人蕉叶挥发油的 GC-MS 分析[J]. *中国现代中药*, 2013, 15(6): 445–447.
- [11] PURSHOTTAM D K, SRIVASTAVA R K, MISRA P. Low-cost shoot multiplication and improved growth in different cultivars of *Canna indica*[J]. *3 Biotech*, 2019, 9(3): 67.
- [12] WANG W H, WANG Y, SUN L Q, et al. Research and application status of ecological floating bed in eutrophic landscape water restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135434.
- [13] 陈建福, 林洵, 陈仲巍. 响应面法优化超声辅助提取黄瓜多酚工艺及其对酪氨酸酶的抑制作用[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(12): 16–22.
- [14] CHMELOVA D, SKULCOVA D, LEGERSKA B, et al. Ultrasonic-assisted extraction of polyphenols and antioxidants from *Picea abies* bark[J]. *Journal of Biotechnology*, 2020, 314/315: 25–33.
- [15] RODSAMRAN P, SOTHORNVIT R. Extraction of phenolic compounds from lime peel waste using ultrasonic-assisted and microwave-assisted extractions[J]. *Food Bioscience*, 2019, 28: 66–73.
- [16] WU L, LI L, CHEN S, et al. Deep eutectic solvent-based ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from *Moringa oleifera* L. leaves: optimization, comparison and antioxidant activity[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 247: 117014.
- [17] SAHA S K, DEY S, CHAKRABORTY R. Effect of choline chloride-oxalic acid based deep eutectic solvent on the ultrasonic assisted extraction of polyphenols from *Aegle marmelos*[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 287: 110956.
- [18] XU B, FENG M, TILIWA E S, et al. Multi-frequency power ultrasound green extraction of polyphenols from *Pingyin rose*: optimization using the response surface methodology and exploration of the underlying mechanism [J]. *LWT*, 2022, 156: 113037.
- [19] BASCHIERI A, AMORATI R. Methods to determine chain-breaking antioxidant activity of nanomaterials beyond DPPH \cdot : a review[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(10): 1551.
- [20] NURCHOLIS W, PUTRI D N S, HUSNAWATI H, et al. Total flavonoid content and antioxidant activity of ethanol and ethyl acetate extracts from accessions of *Amomum compactum* fruits[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2021, 66(1): 58–62.

[责任编辑: 严海琳]