

怀菊花精油提取工艺优化

孟雨东¹,董 颖¹,陈鑫沛¹,胡慧艳¹,王东营¹,任 翔²,汪学德^{1,*}

(1.河南工业大学粮油食品学院,河南郑州 450001;

2.河南中英科创弹射企业孵化器有限公司,河南郑州 450001)

摘 要:本研究采用响应面法优化怀菊花精油的水蒸气蒸馏提取工艺,以提高怀菊花精油得率。通过单因素实验探究加水量、蒸馏时间、浸泡时间对怀菊花精油得率的影响,并应用响应面优化提取条件。结果表明,各因素的影响重要性依次为:蒸馏时间>浸泡时间>加水量,在加水量为 693 mL,蒸馏时间为 8.45 h,浸泡时间为 9.7 h 的条件下,怀菊花精油的得率可达 0.507%,与预测最佳得率 0.51% 存在 0.59% 的相对误差,且 t 检验的结果差异不显著, $P>0.05$,可以看出该模型可以较好预测实验结果,证明拟合效果良好。通过单因素与响应面法优化的怀菊花工艺条件合理可靠,为怀菊花精油的提取提供了理论依据。

关键词:怀菊花,精油,提取,工艺优化

Optimization of Extraction Conditions of Essential Oil from Huai Chrysanthemum

MENG Yu-dong¹, DONG Ying¹, CHEN Xin-pei¹, HU Hui-yan¹,

WANG Dong-ying¹, REN Xiang², WANG Xue-de^{1,*}

(1.College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2.Henan CNUKTI Incubator Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The essential oil of Huai chrysanthemum was extracted by the method of steam distillation and optimized by response surface. Based on single factors including water addition amount, distillation time and soak period, the response surface method was used to optimize the extraction process conditions of Huai chrysanthemum essential oil, and the optimal extraction process conditions were explored. The results showed that the influence factors on the yield were as follows: Distillation time > soak period > water addition amount. Under the condition of 693 mL water addition amount, 8.45 h of distillation and 9.7 h of immersion, the extraction rate of Huai chrysanthemum essential oil was 0.507%, whose relative error was 0.59% between predicted optimum yields 0.51%. Moreover, it was obvious to observe the model were favorable fitted with the actual value due to its t-test result which was not significant ($P>0.05$). The optimized extraction conditions of essential oil from Huai chrysanthemum by single factors and response surface methodology would be reasonable and reliable with certain theoretical guiding significance for the extraction of Huai chrysanthemum essential oil.

Key words: Huai chrysanthemum; essential oil; extraction; process optimization

中图分类号: TS225.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2020)24-0157-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020100164

引文格式: 孟雨东,董颖,陈鑫沛,等.怀菊花精油提取工艺优化[J].食品工业科技,2020,41(24):157-161,167.

MENG Yu-dong, DONG Ying, CHEN Xin-pei, et al. Optimization of Extraction Conditions of Essential Oil from Huai Chrysanthemum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 157-161, 167. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

植物精油是一类从植物中提取的具有芳香气味,可随水蒸气一同蒸出但又与水不相溶的油状物^[1],具有消炎、抗菌、抗病毒、抗氧化以及保护心血管等作用^[2-3],所以植物精油一直是食品、医药以及农业环保等多个领域的研究热点^[4]。陈建烟等^[5]指明植物精油主要由萜类化合物、脂肪族化合物、芳香

族化合物以及其他含氮硫类化合物等组成,其中萜类化合物被认为是植物精油的主要成分。目前,植物精油已经被广泛地应用于各类化妆品及保健品中,近年来芳香疗法在美容行业也逐渐盛行^[6]。此外,由于人工合成抗氧化剂具有安全隐患,而植物精油和一些植物提取物可以作为天然抗氧化有效延缓

收稿日期:2019-10-22

作者简介:孟雨东(1996-),男,硕士,研究方向:油脂加工与植物蛋白,E-mail:mengyudong96@sina.com。

*通信作者:汪学德(1962-),男,博士,教授,研究方向:粮油与植物蛋白工程,E-mail:wangxuede1962@126.com。

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS14-1-29);国家自然科学基金(31972004)。

食品变质^[7-8]、提升食用油脂和肉类的货架期^[9-11],因此植物精油和植物提取物也引起了广大科研工作者的兴趣。

作为菊科植物菊的干燥头状花序,菊花(*Chrysanthemi flos*)是我国常用药食同源中药材之一。其中,作为“四大怀药”之一的“怀菊花”是中药菊花的一种。传统中医理论认为,菊花具有散风清热、清肝明目的功效。现代科学研究发现,菊花具有广泛的抗氧化^[12]、抗菌^[13]、抗炎^[14]、解热^[15]、抗癌^[16-17]、降血脂^[18]、舒张血管等多种药理作用^[19]。目前,对于菊花精油的提取工艺已经屡有报道,而且多集中于精油成分及其在化妆品等方面的应用。但是,针对怀菊花精油成分分析及其功能作用的研究仍然较少。仅有早期黄保民等通过常规水蒸气蒸馏法对怀菊花精油进行提取并对其组分进行了初步分析,发现其主要含有菊烯酮、桉油精、聚伞花烯、 β -石竹烯和菊烯酮乙酸酯等,但由于仅仅是将怀菊花精油提取,并未提及具体工艺,得率也较低,仅为0.14%^[20]。因此,本研究采取水蒸气蒸馏法提取怀菊花精油,并对加水量、浸泡时间和蒸馏时间三因素进行单因素分析,并通过响应面法优化怀菊花精油的提取工艺,以期达到提高菊花精油的得率的目的。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

怀菊花药材 购于张仲景大药房,产自河南焦作,由河北安国普天和中药饮片公司生产,经河南中医药大学药学院中药鉴定学教研室鉴定为河南焦作产怀菊花;正己烷(色谱纯)、无水硫酸钠(分析纯) 天津科密欧化学试剂有限公司;其他试剂 均为国产分析纯。

AL204 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)公司;DHG-9146A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;万能粉碎机 北京市永光明医疗仪器有限公司;恒温磁力搅拌器 巩义予华仪器有限公司;精油提取器 天长市千马设备有限公司;水浴锅 北京科伟永兴仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 怀菊花精油的提取 参照张菲菲等^[21]的提取方法。将怀菊花样品粉碎、过60目筛,得到怀菊花粉末。称取50.0 g怀菊花粉末,置于500 mL圆底烧瓶中,加入一定量的蒸馏水,浸泡一定时间后,连接精油提取器和回流冷凝管。向精油提取器中加入蒸馏水至其刻度部分,当有少量蒸馏水溢流入烧瓶时,再加入1 mL正己烷。随后,将圆底烧瓶置于电热套中加热至沸腾,调节开关,使料液由沸腾状态转变为微沸状态,保持微沸,蒸馏一定时间后,停止加热,待装置稍冷片刻后,开启精油提取器下端活塞将水缓缓放出,收集上层蓝色精油。然后将收集到的蒸馏产物采用无水硫酸钠脱水,60℃水浴6 h挥去正己烷,得到淡蓝色的怀菊花精油。并计算怀菊花精油得率。

怀菊花精油得率(%) = 怀菊花精油质量 / 怀菊花质量

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 加水量对怀菊花精油得率的影响 根据实际操作情况,加水量低于500 mL时会使得怀菊花粉末无法完全浸泡,溶液太过粘稠,因此固定浸泡时间0 h,蒸馏5 h,改变加水量为500、600、700、800、900 mL,探究加水量对精油得率的影响。

1.2.2.2 蒸馏时间对怀菊花精油得率的影响 固定浸泡时间0 h,加水量为700 mL,改变蒸馏时间为2、4、6、8、10 h,探究蒸馏时间对精油得率的影响。

1.2.2.3 浸泡时间对怀菊花精油得率的影响 固定加水量为700 mL,蒸馏时间为3 h,改变浸泡时间分别为0、2、4、6、8、10、12 h,探究浸泡时间对精油得率的影响。

1.2.3 响应面法优化怀菊花精油的提取条件 在单因素实验的基础上,以加水量、蒸馏时间和浸泡时间为影响因素,以怀菊花精油得率为响应值,对怀菊花精油的提取工艺条件进行优化,试验设计水平见表1。

表1 响应面设计因素水平表

Table 1 Response surface design factor level table

水平	因素		
	A 加水量 (mL)	B 蒸馏时间 (h)	C 浸泡时间 (h)
-1	600	6	8
0	700	8	10
1	800	10	12

1.3 数据处理

实验数据用Excel 2016和SPSS 20.0进行统计分析。用Design-Expert V 8.0.6软件进行响应面数据分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 加水量对怀菊花精油得率的影响 由图1可知,随着加水量的增加,怀菊花精油得率呈现先增加后降低的趋势。当加水量在500~700 mL时,精油得率随加水量的增加而增加,当加水量为700 mL时,得率达到最大值,为0.41%;随着加水量的增加,精油得率下降。这是因为水分过少时,怀菊花粉末无法完全浸润溶解在水中;当加水量增加时,可使怀菊

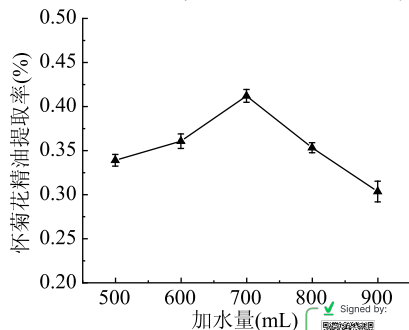


图1 加水量对精油得率的影响

Fig.1 Effect of water addition amount on extraction rate on essential oil

花粉更均匀分散在水中,避免造成提取液太过粘稠不易沸腾的情况,从而使精油得率逐渐增加。但当加水量超过 700 mL,精油得率反而下降,是因为加水量过多会导致沸腾不够充分,从而降低怀菊花精油的得率,提升电热套温度则容易导致溶液爆沸^[21]。

2.1.2 蒸馏时间对怀菊花精油得率的影响 由图 2 可知,怀菊花精油得率随蒸馏时间的增加而增加,蒸馏时间达到 8 h 时,得率已超过 0.45%。随着蒸馏时间的继续增加,精油得率呈现下降趋势。怀菊花精油的得率呈此趋势可能是因为怀菊花粉末在经过 8 h 的蒸馏后,精油基本全部被提取出来,因此,继续延长蒸馏时间,无法使精油的得率提高,且蒸馏时间为 10 h 时,精油得率有所下降,这可能是由于蒸馏时间过长,精油在较高温度下的挥发所致。

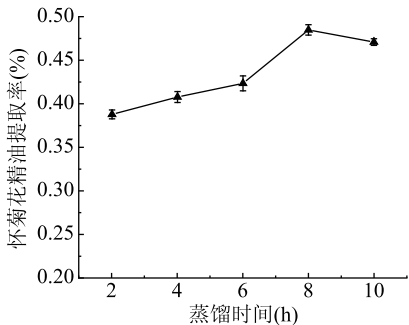


图 2 蒸馏时间对精油得率的影响

Fig.2 Effect of distillation time on essential oil

2.1.3 浸泡时间对怀菊花精油得率的影响 由图 3 可知,浸泡时间在一定范围内时,精油得率随浸泡时间的增加而增加。当浸泡时间为 8 h 时,得率达到最大值 0.39%;随着浸泡时间的继续增加,精油得率基本保持稳定。根据浸泡理论^[22],怀菊花精油的得率首先呈上升趋势是由于怀菊花粉末在经过浸泡后,细胞的组织间隙因吸水而变大,加速内外液流动交换,利于精油的提取,得率也得以提高。当浸泡时间超过 8 h 后,流动交换基本稳定,精油得率同样趋于稳定。

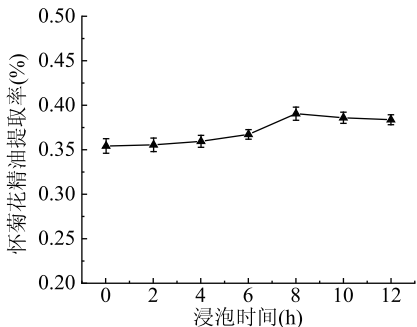


图 3 浸泡时间对精油得率的影响

Fig.3 Effect of soak time on essential oil

2.2 响应面试验优化怀菊花精油得率结果与分析

2.2.1 响应面试验优化怀菊花精油得率结果 根据单因素实验结果,以加水量(A)、蒸馏时间(B)、浸泡时间(C)3个因素作为响应变量,怀菊花精油的得率为响应值(Y),采用 Box-Behnken 中心组和试验设计进行 3 因素 3 水平的试验设计,结果见表 2。

表 2 响应面设计因素水平表

Table 2 Response surface design factor level table

实验号	A	B	C	Y 怀菊花精油得率(%)
1	1	-1	0	0.35
2	0	0	0	0.53
3	-1	1	0	0.41
4	0	1	-1	0.44
5	1	1	0	0.45
6	0	0	0	0.5
7	0	-1	-1	0.36
8	-1	0	-1	0.45
9	0	0	0	0.52
10	0	-1	1	0.36
11	-1	0	1	0.45
12	-1	-1	0	0.34
13	0	1	1	0.37
14	1	0	-1	0.4
15	0	0	0	0.46
16	1	0	1	0.38
17	0	0	0	0.51

2.2.2 回归方程拟合及方差分析 根据表 2 实验结果,采用 Design-Expert V8.0.6 软件进行方差分析,分析结果见表 3。在试验范围内,B、A²、B²、C²对精油得率的影响达到了显著水平(P<0.05),其拟合回归方程为:

$$Y = 0.50 - 8.750 \times 10^{-3} A + 0.033B - 0.011C + 7.500 \times 10^{-3} AB - 5.000 \times 10^{-3} AC - 0.018BC - 0.040A^2 - 0.077B^2 - 0.044C^2$$

回归系数 $R^2 = 0.8791$,对其 F 值进行检验,其 $F = 5.66, P < 0.05$,且 P 值接近 0.01,说明回归模型较好,其调整 $R^2 = 0.7237$,表明此模型能解释 72.37% 效应值变化^[23]。失拟项 $P = 0.2357 > 0.05$,表明距较小,吻合度较高,实验方法可行^[24]。该回归模型中,各因素对精油得率影响程度大小依次为蒸馏时间(B) > 浸泡时间(C) > 加水量(A)。其中蒸馏时间和三个因素的二次项对响应值怀菊花精油得率影响显著。

响应面法是工艺优化经常采用的一种试验方法,可以通过各因素间与响应值的关系所得到的直观 3D 响应面图进行分析^[25-27]。研究表明,等高线的形状越接近圆形,表明两个因素交互作用越弱,越接近椭圆形交互作用越强,影响越显著^[28]。对实验所得数据处理后可得到两两因素交互影响的等高线图和响应面图,可见图 4、图 5 及图 6。图 4 可直观的观察到加水量和蒸馏时间的等高线图接近圆形,表明加水量和提取时间的交互作用对怀菊花精油得率的影响较弱。由响应面图可以明显看出加水量和蒸馏时间的曲面都比较陡,因此蒸馏时间的二次项和加水量的二次项都对精油得率影响较大。由图 5 可看出加水量与浸泡时间的等高线图接近圆形,表明加水量和浸泡时间的交互影响对怀菊花精油得率的影响较弱。由图 6 可直观的看到蒸馏时间和浸泡时间

表3 回归模型显著性检验及方差分析

Table 3 Significance test of regression equation and variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.056	9	6.18×10^{-3}	5.66	0.0162	显著
A	6.13×10^{-4}	1	6.13×10^{-4}	0.56	0.4783	
B	8.45×10^{-3}	1	8.45×10^{-3}	7.74	0.0272	显著
C	1.01×10^{-3}	1	1.01×10^{-3}	0.93	0.3677	
AB	2.25×10^{-4}	1	2.25×10^{-4}	0.21	0.6636	
AC	1.00×10^{-4}	1	1.00×10^{-4}	0.092	0.771	
BC	1.23×10^{-3}	1	1.23×10^{-3}	1.12	0.3247	
A ²	6.57×10^{-3}	1	6.57×10^{-3}	6.02	0.0439	显著
B ²	0.025	1	0.025	22.86	0.002	极显著
C ²	8.34×10^{-3}	1	8.34×10^{-3}	7.63	0.028	显著
残差	7.65×10^{-3}	7	1.09×10^{-3}			
失拟	4.73×10^{-3}	3	1.58×10^{-3}	2.16	0.2357	
纯误差	2.92×10^{-3}	4	7.30×10^{-4}			
总离差	0.063	16				

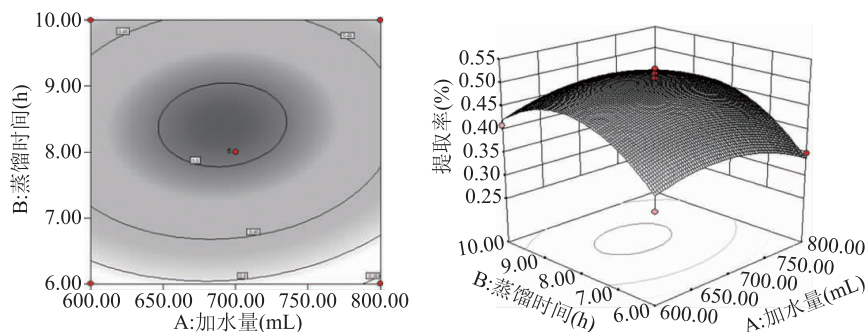


图4 加水量和蒸馏时间的等高线图和响应面图

Fig.4 Contour and response surface diagram for the interaction of water addition amount and distillation time

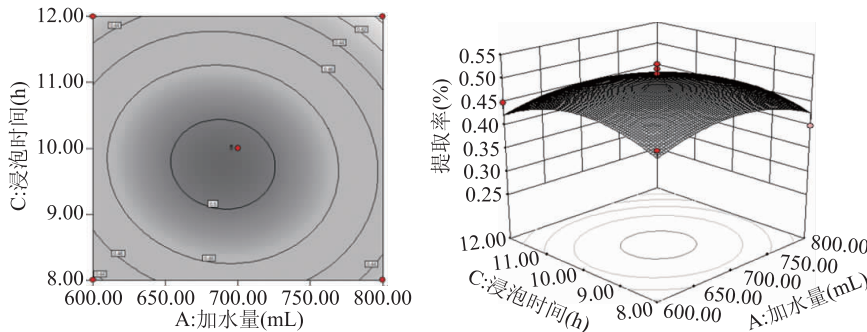


图5 加水量和浸泡时间的等高线图和响应面图

Fig.5 Contour and response surface diagram for the interaction of water addition amount and soak time

的等高线图接近椭圆形,表明蒸馏时间和浸泡时间的交互项对怀菊花精油得率的影响较小。由响应面图可以明显看出蒸馏时间和浸泡时间的曲面都有一定的坡度,但是蒸馏时间的坡度更大,因此蒸馏时间的二次项对精油得率影响更大。

综上所述,可以得出影响怀菊花精油得率的二次项因素中,蒸馏时间的二次项对精油的得率影响最大。

2.2.3 验证实验 根据 Box-Behnken 试验设计得到的结果,利用 Design Expert 软件计算出怀菊花精油的最佳提取条件为:加水量为 692.11 mL、蒸馏时间为 8.45 h、浸泡时间为 9.67 h,怀菊花精油的得率为

0.510%。根据实际情况,将优化条件调整为:加水量 693 mL、蒸馏时间 8.45 h、浸泡时间 9.7 h,取三份怀菊花进行平行实验,验证怀菊花精油的平均得率为 $0.507\% \pm 0.008\%$,相对误差 0.59%,且 t 检验的结果差异不显著, $P > 0.05$,可看出该模型可以较好预测实验结果,证明拟合效果良好^[29-30]。

3 结论

本研究以粉碎后的怀菊花为原料,采用水蒸气蒸馏法对其精油进行提取,并利用响应面分析法优化怀菊花精油的提取工艺。通过实验得知,在加水量、蒸馏时间和浸泡时间这三个影响因素中,蒸馏时间对怀菊花精油的得率的影响达到显著 ($P < 0.05$)

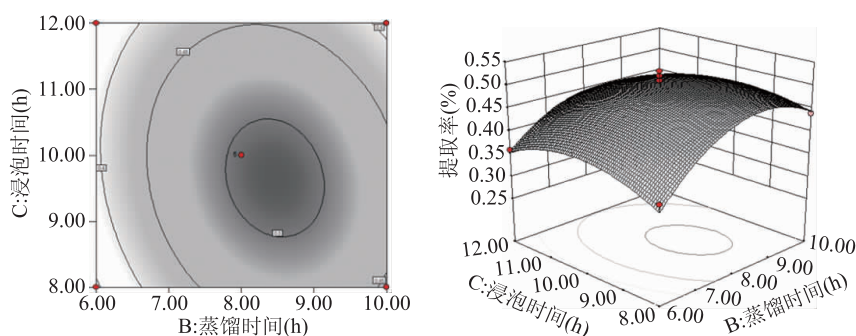


图6 蒸馏时间和浸泡时间的等高线图和响应面图

Fig6 Contour and response surface diagram for the interaction of distillation time and soak time

水平,而加水量和浸泡时间对怀菊花精油得率的影响并不显著。此外,三个因素的影响顺序为蒸馏时间>浸泡时间>加水量。利用 Design Expert V 8.0.6.软件对实验所得数据进行分析处理后,得出最佳怀菊花精油提取工艺条件为:加水量 693 mL、蒸馏时间 8.45 h、浸泡时间 9.7 h,此时怀菊花精油的得率可达到 $0.507\% \pm 0.008\%$,相对误差 0.59%,且 t 检验的结果差异不显著。本研究采用响应面法优化,相比黄保民等^[20]的研究中,怀菊花得率显著提高,为怀菊花精油后续的应用与研究提供了良好的工艺条件。

参考文献

- [1] 邹小兵,陶进转,喻彦林,等.微波辅助提取花椒挥发油的动力学及成分分析[J].高校化学工程学报,2011,25(4):703-707.
- [2] Liu X C, Liu Q Y, Zhou L, et al. Larvicidal activity of essential oil derived from *Illicium henryi* Diels (Illiciaceae) leaf [J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2015, 14(1):111-116.
- [3] 单体江,唐祥佑,刘易,等.池杉叶片和球果挥发油化学成分分析及抗菌活性[J].华南农业大学学报,2016,37(5):72-76.
- [4] Choi H, Kim G. Volatile flavor composition of gamguk (*Chrysanthemum indicum*) flower essential oils [J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(2):319-325.
- [5] 陈建烟,李永裕,吴少华.植物精油生物活性作用机理研究进展[J].天然产物研究与开发,2012,24(9):1312-1318,1322.
- [6] 牛晓娜,刘宁,莫世彬,等.植物精油的新型提取工艺及其研究进展[J].生存与发展,2013,17(4):80-82.
- [7] Wang D, Fan W, Guan Y, et al. Oxidative stability of sunflower oil flavored by essential oil from *Coriandrum sativum* L. during accelerated storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 98:268-275.
- [8] Wang D, Meng Y, Zhao X, et al. Sunflower oil flavored by essential oil from *Punica granatum* cv. Heyinshiliu peels improved its oxidative stability and sensory properties [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 111:55-61.
- [9] Ayhan B, Gökhan B. Effects of some herbal extracts on oxidative stability of corn oil under accelerated oxidation

- conditions in comparison with some commonly used antioxidants [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 89:358-364.
- [10] Betül K, Eda Ç, Zehra K, et al. Antioxidant active packaging with soy edible films and oregano or thyme essential oils for oxidative stability of hround beef patties [J]. Journal of Food Quality, 2014, 37(3):203-212.
- [11] Aouadi D, Vasta V, Nasri S, et al. The antioxidant status and oxidative stability of muscle from lambs receiving oral administration of *Artemisia herba alba* and *Rosmarinus officinalis* essential oils [J]. Meat science, 2014, 97(2):237-243.
- [12] 王存琴,汪荣斌,张艳华.菊花的化学成分及药理活性[J].长春中医药大学学报,2014,30(1):28-30.
- [13] 李响,时维静,孙洁,等.“一测多评法”测定菊花中5种化学成分的含量[J].安徽科技学院学报,2015,29(4):57-62.
- [14] 高宏.菊花中微量元素对其抗炎作用的影响[J].中医药管理杂志,2006,14(1):24-25.
- [15] 戴敏,刘青云,李道中,等.菊花解热、降压作用的物质基础研究[J].中药材,2001,24(7):505-506.
- [16] 李岳华,王丽丽,施剑明.野菊花总黄酮对肺癌细胞 A549 作用研究[J].九江学院学报:自然科学版,2014(1):74-77.
- [17] 徐统震,孙雪飞,任冬梅,等.木犀草素抑制肺癌细胞 A549 的增殖及其联合化疗作用[J].山东大学学报(医学版),2012,50(7):50-54.
- [18] 王晋.芹菜素对人胃癌细胞多药耐药性的影响及其机制[D].上海:第二军医大学,2007.
- [19] 叶蕙芝,李会婷,李西海,等.槲皮素对人软组织瘤细胞活性的抑制作用[J].福建中医药大学学报,2012,22(1):22-24.
- [20] 黄保民,刘杰.气质联用法对怀菊花及“大怀菊”挥发油化学成份的分析与比较[J].中医研究,1997(5):16-18.
- [21] 张菲菲,马永建,孙桂菊,等.菊花挥发油提取工艺研究[J].时珍国医国药,2008(4):834-836.
- [22] 郑勇,张志兰.正交实验法优选豆蔻挥发油提取工艺[J].时珍国医国药,2006(4):596.
- [23] Bilgiç-Keleş S, Şahin-Yeşilçubuk N, Barla-Demirköz A, et al. Response surface optimization and modelling for supercritical carbon dioxide extraction of *Echium vulgare* seed oil [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 143:365-369.
- [24] Akinoso R, Adeyanju J A. Optimization of edible oil extraction from Ofada rice bran using response surface methodology [J]. Food and Bioprocess Technology [J]. 2012, 5

(下转第 167 页)

[7] Wang Y, Chuang Y, Hsu H. The flavonoid, carotenoid and pectin content in peels of citrus cultivated in Taiwan[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 277-284.

[8] 何卿, 孙国峰, 林秦文, 等. 植物类胡萝卜素提取与分析技术研究进展[J]. 植物学报, 2018, 53(5): 700-709.

[9] Torkamani A E, Juliano P, Ajlouni S, et al. Impact of ultrasound treatment on lipid oxidation of Cheddar cheese whey[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(3): 951-957.

[10] Roselló-Soto E, Galanakis C M, Brnčić M, et al. Clean recovery of antioxidant compounds from plant foods, by-products and algae assisted by ultrasounds processing. Modeling approaches to optimize processing conditions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 42(2): 134-149.

[11] Saini R K, Keum Y. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 90-103.

[12] Amorim-Carrilho K T, Cepeda A, Fente C, et al. Review of methods for analysis of carotenoids[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2014, 56: 49-73.

[13] Barba A I O, Hurtado M C, Mata M C S, et al. Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and β -carotene in vegetables[J]. Food Chemistry, 2006, 95(2): 328-336.

[14] Lee H S, Castle W S. Seasonal changes of carotenoid pigments and color in hamlin, earlygold, and budd blood orange juices[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 877-882.

[15] 陈露, 李家明, 林志强. 紫色小白菜有机酸的提取优化及 UPLC 定量分析[J]. 天然产物与研究开发, 2019(31): 1038-1045.

[16] 郝经文, 陈林霖, 司华阳, 等. 蕨菜多糖超声辅助提取及其药理活性初步研究[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31(6): 957-963.

[17] 卢赛赛, 许凤, 王鸿飞, 等. 杨梅叶中总黄酮提取及其抗氧化能力研究[J]. 果树学报, 2015, 32(3): 460-468.

[18] 郭宏焱, 李冬, 雷雄, 等. 花椒多酚提取工艺响应面优化及动力学分析[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 247-253.

[19] Hao K, Hu W, Hou M, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total phenolics from Citrus aurantium L. blossoms and evaluation of free radical scavenging, anti-HMG-CoA reductase activities[J]. Molecules, 2019(24): 2368.

[20] 郭琳琳. 柑橘果实发育及保鲜的色泽和色素分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.

(上接第 161 页)

[4]: 1372-1378.

[25] Diaz-de-Cerio E, Tylewicz U, Verardo V, et al. Design of sonotrode ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Psidium guajava L. leaves[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 2781-2791.

[26] 杨婷婷, 李佳怡, 张彦青, 等. 响应面法优化超声辅助提取酸枣仁异牡荆素工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 143-147, 154.

[27] 石静文, 马春丽, 梁佳祺, 等. 响应面法优化苹果多酚微胶囊工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 155-160, 291.

汉: 华中农业大学, 2007.

[21] 马少君. 柑橘皮类胡萝卜素提取、活性分析和应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.

[22] 王业勤, 李勤生. 天然类胡萝卜素-研究进展、生产、应用[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1997: 158-159.

[23] 惠伯棣. 类胡萝卜素化学及生物化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社出版, 2005: 91-92.

[24] 范三红, 原超, 刘艳荣, 等. 超声波辅助提取南瓜籽油及其脂肪酸组成研究[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 107-110.

[25] 彭真汾, 谢倩, 池毓斌, 等. 响应面试验优化超声法提取橄榄果实游离氨基酸工艺[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 146-153.

[26] 朱明明, 樊明涛, 何鸿举. 类胡萝卜素降解方式的研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 308-317.

[27] Norshazila S, Koy C N, Rashidi O. The effect of time, temperature and solid to solvent ratio on pumpkin carotenoids extracted using food grade solvents[J]. Sains Malaysiana, 2017, 46(2): 231-237.

[28] 王涓, 潘忠礼, 马海乐, 等. 超声波的空化作用及其对多酚稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(19): 388-391.

[29] 徐昌杰. 柑橘果实类胡萝卜素研究进展[C]. 中国园艺学会第六届青年学术讨论会论文集, 2004.

[30] 曾东慧, 张俊, 陆胜民. 响应曲面法提取温州蜜柑果皮中类胡萝卜素的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 183-187.

[31] 邵金华, 黄光文, 朱智勇, 等. 柚皮中类胡萝卜素的提取及其稳定性的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 281-285.

[32] 米雪, 刘树兴, 曾桥, 等. 响应面法优化超声辅助提取柿皮类胡萝卜素及其体外抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(11): 26-31.

[33] 李宪鈔, 谭蛟, 刘梦海, 等. 超声辅助提取玉米苞叶中类胡萝卜素及其稳定性研究[J]. 分子植物育种, 2019, 17(17): 5783-5791.

[34] 刘长付, 陈媛梅. 超声波法提取西红柿中类胡萝卜素的工艺优化[J]. 食品工业, 2013, 34(8): 76-80.

[35] 胡建中. 柑橘中类胡萝卜素的提取、分离、鉴定及其稳定性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.

[36] 廖春燕, 磨文龙. 微波法提取橘皮中类胡萝卜素的工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15981-15983.

[37] Cinar I. Effects of cellulase and pectinase concentrations on the colour yield of enzyme extracted plant carotenoids[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(2): 945-949.

[28] 郑健姿, 岳田利. 魔芋葡甘聚糖为壁材的苹果多酚微胶囊制备及缓释[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(24): 48-52.

[29] Derrien M, Aghabaranjad M, Gosselin A, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of lutein and chlorophyll from spinach by-products using response surface methodology[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 93: 79-87.

[30] Wang W, Han S, Zha X, et al. Response surface optimization of supercritical carbon dioxide extraction of tea polyphenols from green tea Scraps[J]. Journal of AOAC International, 2018, 102(2): 451-456.