

“凤丹”油用牡丹籽多酚提取工艺优化及抗氧化活性研究

Extraction technology and antioxidant activity of polyphenols from peony seed of *paeonia ostii*

蔡如玉¹ 常世敏¹ 宋春丽²

CAI Ru-yu¹ CHANG Shi-min¹ SONG Chun-li²

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北农业大学食品科技学院, 河北 保定 071001)

(1. College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. College of Food Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

摘要:采用超声辅助提取“凤丹”油用牡丹籽多酚,通过Box-Behnken响应面法优化牡丹籽多酚提取工艺,并研究其抗氧化活性。结果表明,牡丹籽多酚提取的最佳条件为料液比1:14(g/mL)、超声功率160 W、超声时间98 min、提取温度57℃,该条件下牡丹籽多酚提取率为33.38 mg/g;牡丹籽多酚能有效地清除DPPH自由基和ABTS自由基,具有一定的抗氧化能力,可成为一种新的天然抗氧化剂。

关键词:牡丹籽;多酚;抗氧化

Abstract: In this study, ultrasound-assisted extraction of polyphenols from *paeonia ostii* oil peony seeds was used. On the basis of a single factor test, the material-liquid ratio, ultrasonic time, extraction temperature and ultrasonic power were set as independent variables, and the polyphenol yield was response value, optimize the extraction process of peony seed polyphenols by Box-Behnken response surface method. The results showed that the best conditions for extracting polyphenols from peony seeds were the ratio of material to liquid 1:14 (g/mL), ultrasonic power 160 W, ultrasonic time 98 min, extraction temperature 57℃. Under the best technological conditions, the extraction rate of polyphenols in peony seeds was 33.38 mg/g. According to in vitro antioxidant experiments, peony seed polyphenols can effectively remove DPPH free radicals and ABTS free radicals, have a certain degree of antioxidant capacity, and can become a new natural antioxidant. This study is a comprehensive development of

peony seed provide theoretical basis and reference.

Keywords: *paeonia ostii*; polyphenols; antioxidant activity

“凤丹”牡丹既是常见的药用品种,也是重要的油用品种^[1],在中国各地广泛种植。目前有关牡丹籽油提取工艺^[2]、成分分析^[3]、抗氧化活性分析^[4],牡丹籽黄酮提取工艺^[5]等方面的研究较多,而关于牡丹籽多酚的提取工艺及其抗氧化活性尚未见报道。

多酚是高等植物中含有多元酚结构的次生代谢产物,广泛存在于植物根、皮、叶以及果实中^[6]。研究^[7-8]表明,多酚具有抗菌、抗病毒、抗氧化、降血糖、降血脂、抗动脉硬化、抗衰老及预防心血管疾病等作用。王彦阳等^[9]采用超声波辅助对腰果叶多酚进行了提取,其得率为10.29%;魏春红等^[10]研究了酶法辅助提取小米多酚,最佳提取条件下总酚含量为4.83 mg/g;吕蒙蒙等^[11]采用响应面法优化了超声波—微波协同萃取杉木球果鳞片多酚,其提取率相较于索氏提取法提高了76.58%,且缩短了提取时间;朱素英^[12]、陈程等^[13]分别采用超声波辅助对牡丹花和牡丹籽粕中多酚提取进行了研究,其提取率分别为130.627 mg/mL和17.42 mg/g。试验拟对牡丹籽多酚提取工艺进行优化,并采用体外抗氧化试验评价其抗氧化活性,为牡丹籽的综合利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

“凤丹”油用牡丹籽:河北国福牡丹科技开发有限公司;

没食子酸标品、Folin-Ciocalteu试剂:分析纯,北京索莱宝科技有限公司;

1,1-二苯基-2-苦基肼基自由基:分析纯,梯希(上海)

基金项目:河北省重点研发计划项目(编号:18227139D);河北省教育厅项目(编号:2019GJJG254)

作者简介:蔡如玉,女,河北工程大学在读硕士研究生。

通信作者:常世敏(1977—),女,河北工程大学副教授,博士。

E-mail: keyancsm@126.com

收稿日期:2020-03-13

化成工业发展有限公司;

2,2'-联氮-二(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐:分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司;

抗坏血酸、无水乙醇:分析纯,天津欧博凯化工有限公司;

过硫酸钾:分析纯,山东西亚化学股份有限公司;

无水碳酸钠:分析纯,天津市红岩化学试剂厂;

摇摆式高速中药粉碎机:F-1000 型,1 000 g,新昌县德科机械有限公司;

高速台式离心机:TGL-10B 型,上海安亭科学仪器有限公司;

高功率数控超声波清洗器:KQ-200KDB 型,昆山市超声仪器有限公司;

恒温磁力搅拌器:85-2 型,上海司乐仪器有限公司;

紫外—可见分光光度计:MAPADA 型,上海美谱达仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 牡丹籽多酚提取 牡丹籽粉碎,过 50 目筛,称取 5 g,按相应的液料比、乙醇浓度、提取温度、超声时间、超声功率进行多酚提取,5 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,冷藏备用。

1.2.2 标准曲线的绘制 参照文献[14],得标准曲线回归方程为 $Y=7.2988X+0.0157$, $R^2=0.9977$ 。

1.2.3 多酚含量的测定 采用福林酚试剂法^[15]。按式(1)计算多酚提取率。

$$R=\frac{CV}{m}, \quad (1)$$

式中:

R ——多酚提取率,mg/g;

C ——提取液多酚浓度,mg/mL;

V ——提取液体积,mL;

m ——样品质量,g。

1.2.4 单因素试验

(1) 料液比:精准称量 5 g 牡丹籽粉于锥形瓶,分别按料液比 1:10,1:14,1:18,1:22,1:26 (g/mL)加入 60%乙醇,用磁力搅拌器搅拌 30 min,于提取温度 55℃、超声功率 160 W 下提取 100 min,考察料液比对多酚提取率的影响。

(2) 超声时间:精准称量 5 g 牡丹籽粉于锥形瓶,按料液比 1:18 (g/mL)加入 60%乙醇,用磁力搅拌器搅拌 30 min,于提取温度 55℃、超声功率 160 W 下分别提取 60,80,100,120,140 min,考察超声时间对多酚提取率的影响。

(3) 提取温度:精准称量 5 g 牡丹籽粉于锥形瓶,按料液比 1:18 (g/mL)加入 60%乙醇,用磁力搅拌器搅拌 30 min,于提取温度分别为 45,50,55,60,65℃,超声功率

160 W 下提取 100 min,考察提取温度对多酚提取率的影响。

(4) 超声功率:精准称量 5 g 牡丹籽粉于锥形瓶,按料液比 1:18 (g/mL)加入 60%乙醇,用磁力搅拌器搅拌 30 min,于提取温度 55℃、超声功率分别为 120,140,160,180,200 W 下提取 100 min,考察超声功率对多酚提取率的影响。

1.2.5 响应面优化试验 在单因素试验的基础上,以料液比、超声时间、提取温度、超声功率为试验因素,以多酚提取率为评价指标,设计四因素三水平响应面优化牡丹籽多酚提取工艺条件^[16]。

1.2.6 体外抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除能力测定:参照文献[17]并略有改动,精确称取 1.0 mg DPPH,加入 20 mL 无水乙醇,避光放置,3.5 h 内用完。取 2 mL DPPH 溶液,加入 1 mL 无水乙醇,混匀,室温避光反应 30 min,测定 517 nm 处吸光度。以抗坏血酸为对照,每组重复 3 次,取平均值。按式(2)计算 DPPH 自由基清除率。

$$D=\frac{A_0-A}{A_0}\times 100\%, \quad (2)$$

式中:

D ——自由基清除率,%;

A_0 ——反应体系吸光度;

A ——样品吸光度;

(2) ABTS 自由基清除能力测定:参照文献[18]并略有改动。精确称取 3.0 mg ABTS,加入 0.735 mL 蒸馏水超声辅助溶解,配置 7.4 mmol/L 的 ABTS 储备液。取 1 mg 过硫酸钾,加入 1.43 mL 蒸馏水溶解,配置 2.6 mmol/mL 的过硫酸钾储备液。ABTS 储备液与过硫酸钾储备液按体积比 1:1 混匀,室温避光反应 12~16 h。用无水乙醇将 ABTS 母液稀释 40~50 倍,测定 734 nm 处测吸光度。取 50 μ L 不同浓度样品液,加入 ABTS 母液 950 μ L,振荡 10 s,放置 6 min,测定 734 nm 处吸光度。以抗坏血酸为对照,每组重复 3 次,取平均值。按式(2)计算 ABTS 自由基清除率。

1.2.7 数据处理 单因素试验结果及体外抗氧化活性采用 SPSS 软件进行分析,响应面试验结果采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行分析。每个试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 料液比对牡丹籽多酚提取率的影响 由图 1 可知,多酚提取率随料液比的不断增加而下降^[19]。综合考虑,选取 1:18 (g/mL)为最佳料液比。

2.1.2 提取温度对牡丹籽多酚提取率的影响 由图 2 可知,牡丹籽多酚提取率随提取温度的升高先上升后下降,当提取温度为 55℃时,提取率最大,可能是提取温度过

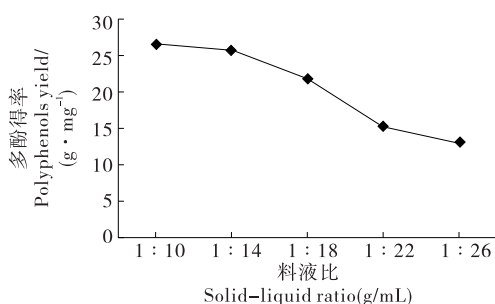


图1 料液比对多酚提取率的影响

Figure 1 Effect of solid-liquid ratio on the yield of polyphenols

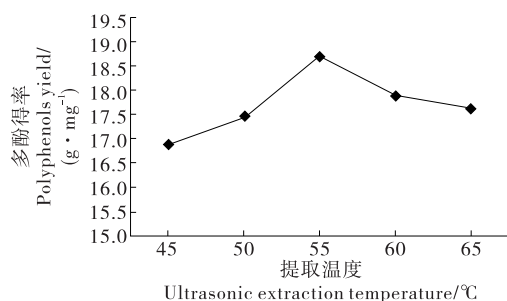


图2 提取温度对多酚提取率的影响

Figure 2 Effect of extraction temperature on polyphenol yield

高导致热敏感的多酚类物质转化或降解,从而使提取率降低^[17]。故选取 55 °C 为最佳提取温度。

2.1.3 超声功率对牡丹籽多酚提取率的影响 由图 3 可知,多酚提取率随超声功率的升高先增加后下降,可能是功率过大加快了物料的温度与提取液的流动,在提高多酚浸出的同时也加快了多酚的分解和氧化。故选取 160 W 为最佳超声功率。

2.1.4 超声时间对牡丹籽多酚提取率的影响 由图 4 可知,多酚提取率随提取时间的延长先增加后下降,可能是多酚随超声时间的延长发生氧化、缩合及分解等反应^[20-21]。故选取 100 min 为最佳超声时间。

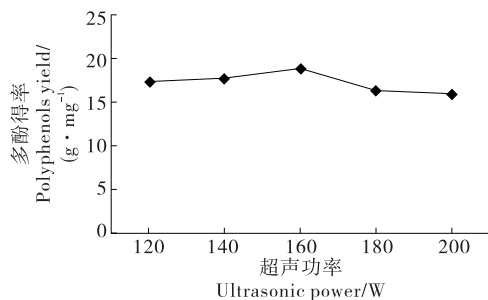


图3 超声功率对多酚提取率的影响

Figure 3 Effect of ultrasonic power on the yield of polyphenols

2.2 响应面优化试验

2.2.1 试验设计与分析 根据单因素试验结果,以料液比、提取温度、超声功率、超声时间为试验因素,以多酚提取率为响应值,根据 Box-Behnken 中心组合原理进行响应面设计,试验因素与水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

2.2.2 模型的建立及方差分析 对表 2 结果进行统计分析^[22],建立牡丹籽多酚提取率的二次多项回归方程:

$$Y = 33.28 - 0.066A + 0.16B + 0.038C - 5.833D + 0.038AB + 0.083AC + 0.013AD - 0.047BC - 0.023BD + 0.033CD - 0.090A^2 - 0.19B^2 - 0.082C^2 - 0.13D^2. \quad (3)$$

由表 3 可知,模型 $P < 0.0001$,达到极显著水平,失拟项 $P = 0.1048 > 0.05$,不显著,说明该模型误差小; $R^2 = 0.9215$, $R_{adj}^2 = 0.8913$,表明该模型拟合度较好。 $CV = 0.19\%$,说明模型置信度较好,可用此模型来分析响应值的变化^[23]。B 项的 $P < 0.0001$,说明提取温度对多酚提取率的影响最大;A 项的 $P < 0.01$,说明料液比对多酚提取率影响较显著;AC 项的 $P < 0.05$,表明料液比和超声功率的交互作用对多酚提取率影响显著。由 F 值可知,各因素对多酚提取率的影响顺序为 $B > A > C > D$ 。

2.2.3 响应面分析 进一步对表 3 进行分析可知,料液比与超声功率的交互项对牡丹籽多酚提取的含量影响显著($P < 0.05$)^[24]。由图 5 可知,在试验所选范围内,AC 响应面较为陡峭,响应值存在极值,再次说明料液比与超声功率交互作用影响显著^[25]。

由响应面建立的模型及二次回归方程预测的最优提取工艺条件为料液比 1:13.74 (g/mL)、提取温度 57 °C、

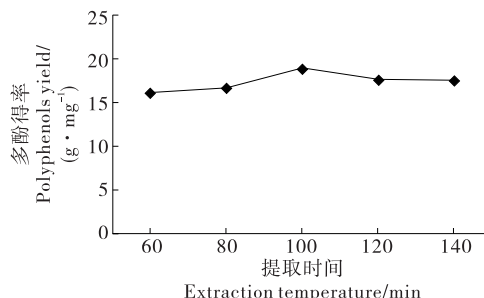


图4 超声时间对多酚提取率的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic time on polyphenol yield

表1 响应面因素和水平设计表

Table 1 Factors and coded levels in response surface analysis

水平	A 料液比 (g/mL)	B 提取温 度/°C	C 超声功 率/W	D 超声时 间/min
-1	1:10	50	140	80
0	1:14	55	160	100
1	1:18	60	180	120

超声功率 159.16 W、超声时间 98.44 min,此条件下多酚提取率为 33.32 mg/g。为便于操作,将提取工艺条件修正为料液比 1 : 14 (g/mL)、提取温度 57 ℃、超声功率 160 W、超声时间 98 min,进行 3 次实验验证,得到牡丹籽

多酚提取率为 33.38 mg/g,与预测值相近,说明该提取模型预测优化牡丹籽多酚提取工艺是准确可行的。

2.3 体外抗氧化活性

2.3.1 DPPH 自由基清除能力 由图 6 可知,DPPH 自

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface methodologies

试验号	A	B	C	D	多酚提取率/(mg · g ⁻¹)	试验号	A	B	C	D	多酚提取率/(mg · g ⁻¹)
1	-1	0	-1	0	33.25	16	0	0	-1	1	33.00
2	-1	-1	0	0	32.92	17	0	0	0	0	33.31
3	1	0	-1	0	32.91	18	0	0	0	0	33.25
4	0	1	0	-1	33.12	19	1	-1	0	0	32.73
5	-1	0	1	0	33.14	20	0	0	1	-1	33.14
6	1	1	0	0	33.23	21	0	-1	-1	0	32.77
7	1	0	0	-1	32.96	22	1	0	0	1	33.00
8	0	0	0	0	33.28	23	-1	0	0	1	33.08
9	-1	0	0	-1	33.09	24	0	-1	1	0	32.92
10	0	0	-1	-1	33.09	25	0	-1	0	-1	32.82
11	-1	1	0	0	33.27	26	0	1	0	1	33.05
12	0	0	0	0	33.21	27	0	1	-1	0	33.14
13	1	0	1	0	33.13	28	0	0	1	1	33.18
14	0	-1	0	1	32.84	29	0	1	1	0	33.10
15	0	0	0	0	33.27						

表 3 方差分析[†]

Table 3 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.680	14	0.049	11.74	<0.000 1	* * *
A	0.052	1	0.052	12.55	0.003 2	* *
B	0.300	1	0.300	73.36	<0.000 1	* * *
C	0.011	1	0.011	2.75	0.119 3	
D	8.333E-006	1	8.333E-006	2.01E-003	0.964 9	
AB	5.625E-003	1	5.625E-003	1.36	0.263 5	
AC	0.027	1	0.027	6.57	0.022 5	*
AD	6.250E-004	1	6.250E-004	0.15	0.703 6	
BC	3.025E-003	1	3.025E-003	0.73	0.407 3	
BD	7.225E-003	1	7.225E-004	1.74	0.207 9	
CD	4.225E-003	1	4.225E-003	1.02	0.329 8	
A ²	0.041	1	0.041	10.00	0.006 9	* *
B ²	0.210	1	0.210	50.66	<0.000 1	* * *
C ²	0.044	1	0.044	10.63	0.005 7	* *
D ²	0.082	1	0.082	19.78	<0.000 6	* * *
残差	0.058	14	4.144E-003			
失拟项	0.052	10	5.250E-003	3.80	0.104 8	不显著
误差	5.520E-003	4	1.380E-003			
总离差	0.740	28				

[†] * * * 表示 P<0.000 1,影响极显著; * * 表示 P<0.01,影响较显著; * 表示 P<0.05,影响显著; R²=0.921 5, R_{Adj}²=0.891 3, CV=0.19%。

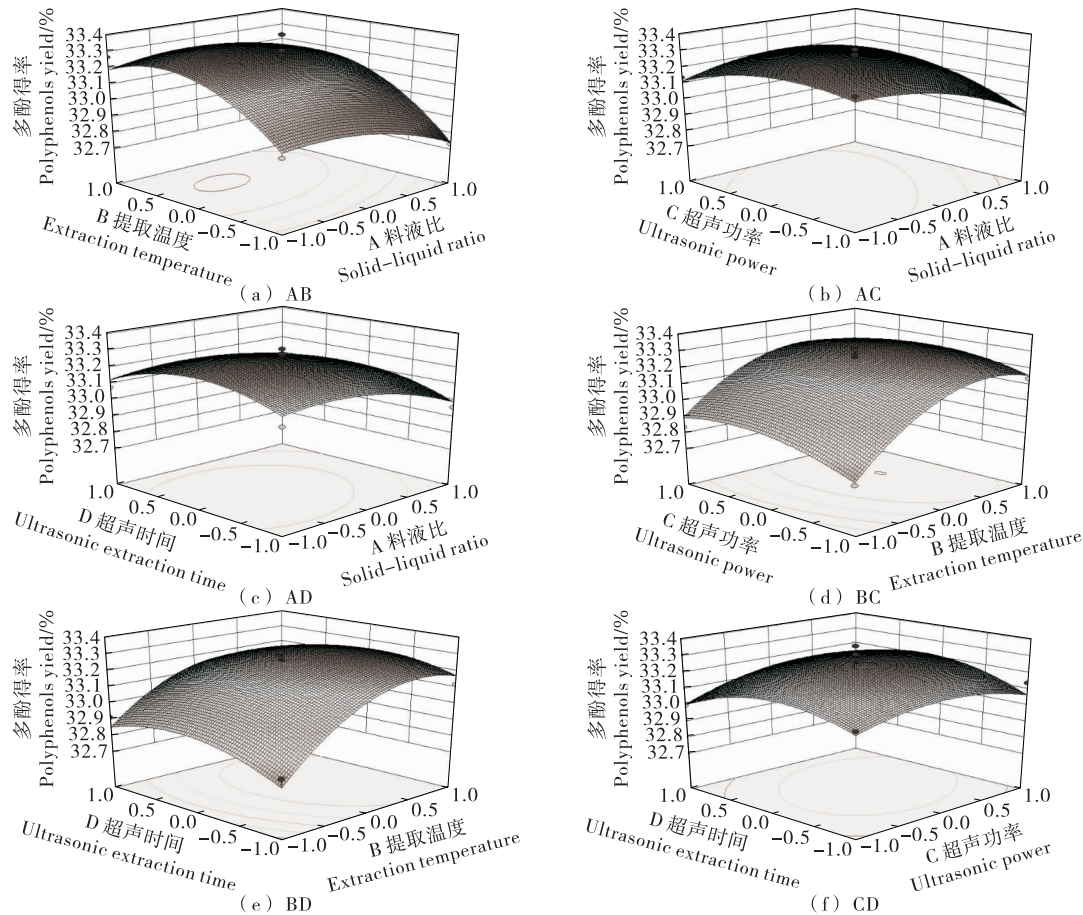


图5 两因素交互作用对提取率的响应面图

Figure 5 Response surface diagram of the interaction of extraction temperature, ultrasonic power, and extraction time

由基清除能力随多酚粗提取液浓度的增加逐渐增强,当多酚粗提液浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$ 时,其清除能力达 14.17%,低于维生素 C 的,表明多酚粗提液对 DPPH 自由基具有一定的清除能力。

2.3.2 ABTS 自由基清除能力 由图 7 可知,ABTS 自由基清除能力随多酚粗提取液浓度的增加而显著增强,当多酚粗提取液浓度为 40 $\mu\text{g/mL}$ 时,其清除能力明显高于抗坏血酸的,表明多酚粗提液对 ABTS 自由基有较强的

清除能力。

3 结论

试验表明,牡丹籽多酚的最佳提取工艺条件为料液比 1 : 13 (g/mL)、提取温度 57 $^{\circ}\text{C}$ 、超声功率 160 W、超声时间 98 min,此条件下的提取率为 33.38 mg/g。体外抗氧化试验发现,牡丹籽多酚粗提液对 DPPH 自由基和 ABTS 自由基均具有一定的清除能力,且呈良好的量效关

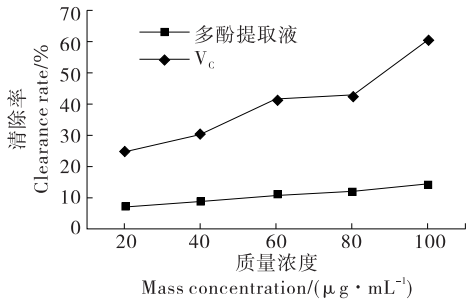


图6 牡丹籽多酚对 DPPH 自由基的清除能力

Figure 6 Scavenging ability of peony seed kernel polyphenols to DPPH free radicals

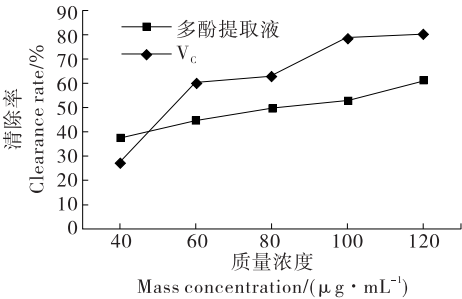


图7 牡丹籽多酚对 ABTS 自由基的清除能力

Figure 7 Scavenging ability of polyphenols from peony seed kernels to ABTS free radicals

系,表明牡丹籽多酚有可能成为一种新的天然抗氧化剂。后续可对“凤丹”牡丹籽多酚的代谢途径、单体种类及功能特性进行研究。

参考文献

- [1] 冯汉字,江颖,张立全,等.油用牡丹‘凤丹’在北京引种栽培研究初报[J].中国农学通报,2018,34(4):65-70.
- [2] 宋媛媛,杨瑞金,张文斌,等.牡丹籽油乙醇辅助水酶法提取工艺优化及品质分析[J].食品与机械,2018,34(4):180-185.
- [3] 高婷婷,王亚芸,任建武.GC-MS 法分析牡丹籽油的成分及其防晒效果的评定[J].食品科技,2013,38(6):296-299.
- [4] 李静,姚茂君,王旭东,等.牡丹籽油自氧化及抗氧化性能的研究[J].食品工业科技,2013,34(22):84-87.
- [5] 吴悠,李梅青,孙强,等.超声辅助提取凤丹籽总黄酮的工艺研究[J].天然产物研究与开发,2012,24(10):1454-1457.
- [6] 牛红军,李军,李建文,等.超声技术在植物多酚提取中的应用进展[J].农学学报,2014,4(7):92-95.
- [7] KANG N J, SHIN S H, LEE H J, et al. Polyphenols as small molecular inhibitors of signaling cascades in carcinogenesis[J]. Pharmacology & Therapeutics, 2011, 130(3): 310-324.
- [8] JIA Q, LIU X, WU X, et al. Hypoglycemic activity of a polyphenolic oligomer-rich extract of *Cinnamomum parthenoxylon* bark in normal and streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Phytomedicine, 2009, 16(8): 744-750.
- [9] 王彦阳,张中润,郑晓端,等.腰果叶多酚超声波辅助提取工艺及其抗氧化能力测定[J].食品研究与开发,2020,41(3):53-58.
- [10] 魏春红,何丽娜,丁闻浩,等.酶法辅助提取小米多酚的工艺研究[J].中国粮油学报,2019,34(1):93-98.
- [11] 吕蒙蒙,张健,武忆寒,等.响应面法优化超声波-微波协同萃取杉木球果鳞片多酚提取工艺[J].江西农业大学学报,2019,41(6):212-221.
- [12] 朱素英.牡丹花多酚提取优化与抗氧化性[J].生物技术,2014,24(3):78-82.
- [13] 陈程,王海坤,张存芳,等.响应面法优化超声辅助提取牡丹籽粕中多酚工艺[J].中国油脂,2017,42(3):127-130.
- [14] 赵聪.核桃种皮多酚的提纯鉴定及抗氧化活性研究[D].天津市:天津科技大学,2016:14.
- [15] 李加兴,房惠芳,陈选,等.牡丹籽粕蛋白提取工艺优化及其等电点分析[J].食品与机械,2014,30(3):147-150.
- [16] 吕长鑫,李萌萌,徐晓明,等.响应面分析法优化纤维素酶提取紫苏多糖工艺[J].食品科学,2013,34(2):6-10.
- [17] LI Xi-can, LIN Jing, GAO Yao-xiang, et al. Antioxidant activity and mechanism of Rhizoma Cimicifugae[J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6(1): 140.
- [18] 朱洁,王红宝,孔佳君,等.梨幼果多酚的纯化及其抗氧化性[J].食品科学,2017,38(5):14-20.
- [19] 刘柏华,殷钟意,郑旭熙.超声波辅助提取牡丹籽粕中油脂的工艺研究[J].食品研究与开发,2016,37(8):40-44.
- [20] 李珍.苹果皮渣多酚提取、纯化及抗氧化活性研究[D].北京:中国农业科学院,2014:15.
- [21] 陈洪彬,宋露露,金瑾萱,等.坛紫菜多酚提取工艺及体外抗氧化与抑菌活性研究[J].食品与机械,2018,34(9):157-161.
- [22] 许英一,徐艳霞,王宇,等.玉米须多酚预热结合超声辅助提取工艺及抗氧化性研究[J].食品与机械,2019,35(1):153-158.
- [23] 汪泽,崔丽红,唐冰,等.响应面优化菠萝叶纤维多酚提取工艺[J].食品工业科技,2017(1):213-217.
- [24] 陈洪彬,杨敏,宋露露,等.龙须菜多酚提取工艺优化及其体外抗氧化活性[J].食品与机械,2017,33(4):139-143,194.
- [25] 王春霞,蒲彪,蒋燕,等.藤椒冷榨油饼粕中黄酮类物质的提取及体外抗氧化活性研究[J].食品与机械,2017,33(1):137-143,154.
- (上接第 91 页)
- [4] 王立鹏,王军政,汪首坤,等.基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J].机械工程学报,2013,49(1):39-44.
- [5] 余剑武,舒新,罗红,等.灌装机中弧面凸轮建模与造型研究[J].食品与机械,2016,32(6):77-82.
- [6] 席晓燕.推料机构凸轮轮廓曲线设计仿真及误差分析[J].食品与机械,2017,33(2):77-80.
- [7] 赵漫漫,吴佳,何雪明,等.高速凸轮变系数多项式凸轮曲线的研究[J].食品与机械,2018,34(3):98-102.
- [8] 曲梦可.变胞变尺度腿混合四足机器人研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017:1-4.
- [9] 高峰,郭为忠.中国机器人的发展战略思考[J].机械工程学报,2016,52(7):1-5.
- [10] 刘静,赵晓光,谭民.腿式机器人的研究综述[J].机器人,2006,28(1):81-88.
- [11] 陈奇,张祺,姚志刚,等.面向足式机器人腿部运动的组合机构反求设计[J].机械与电子,2018,36(5):71-74,80.
- [12] 张陈曦,吴胜权,何永,等.仿生步行机器人腿部八连杆机构轨迹优化[J].机械传动,2018,42(6):39-43.
- [13] 章永年,王美思,吴阳,等.五连杆足式机器人腿部机构多目标优化算法[J].农业机械学报,2016,47(10):398-404.
- [14] 柏龙,龙樟,陈晓红,等.连续电驱动四足机器人腿部机构设计与分析[J].机器人,2018,40(2):136-145.
- [15] 李满宏,张小俊,张建华,等.面向给定轨迹的六足机器人多足协调控制[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(4):32-37.
- [16] 罗中华,杨雨.揉面机四杆机构的优化设计[J].机械设计,2013,30(6):44-47.
- [17] 王小平,曹立明.遗传算法:理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002:155-156.
- [18] 北京兆迪科技有限公司.UG NX10.0 运动仿真与分析教程[M].北京:机械工业出版社,2015:135-139.