

超声辅助提取花生红衣色素工艺的优化

The optimization of ultrasonic assisted extraction of pigment from peanut skin

罗璇 何景

LUO Xuan HE Jing

(武汉设计工程学院食品与生物科技学院, 湖北 武汉 430205)

(Wuhan Institute of Design and Sciences, School of food and Biotechnology, Wuhan, Hubei 430205, China)

摘要:以花生红衣为原料,利用响应面分析法对超声辅助提取花生红衣色素的工艺进行优化。在单因素试验、Plackett-Burman 试验设计和最陡爬坡试验的基础上,以花生红衣色素综合提取效果值为响应值,利用响应面法研究各因素及其交互作用对花生红衣色素提取效果的影响,建立预测模型,选出最佳工艺条件。结果表明:超声辅助提取花生红衣色素的最佳条件为以乙醇为溶剂,乙醇浓度 68%,料液比 1:30 (g/mL),超声时间 27 min,超声温度 55 ℃。该条件下花生红衣色素的总提取率为 21.6%,色价为 34.6,原花色素得率为 17.77 mg/g,综合提取效果值为 24.65,经验证实验结果表明,该试验建立的花生红衣色素的响应模型较成功。

关键词:花生;红衣;色素;超声辅助提取

Abstract: Using the response surface method, the process conditions of ultrasonic-assisted extraction peanut red pigment from the peanuts red skin was optimized. Based on the single factor experiment, Plackett-Burman experiment design and the steepest ascent experiment, with peanut red pigment comprehensive extraction effect value as a response, using the response surface method studied the factors and their interactions of peanuts red pigment extraction effect, the prediction model was established. The results showed that the optimum conditions for ultrasonic assisted extraction of peanut red pigment are as follows: ethanol as solvent, ethanol concentration 68%, solid-liquid ratio 1:30 (g/mL), working at 55 ℃ for 27 min. In this condition, we found that the extraction rate of peanut red pigment 21.6%, the color value 34.6, the Proanthocyanidins yield 17.77 mg/g, and the result is 24.65. Our empirical test results showed that a successful response model of peanut red pigment was established.

Keywords: peanut; red peanut skin; pigment; ultrasonic assisted extraction

花生红衣是花生加工过程中的副产品,每年产生约 600 t,除了少量用于制药外,其余都用于饲料或丢弃,造成极大的浪费^[1]。花生红衣中富含优良天然色素^[2],其中包括原花色素和红色素,原花色素能够改善人体的皮肤循环、保护心血管、抗癌,有美容抗衰老的作用,还可用于治疗眼疾,是一种安全无毒的新型天然抗氧化剂^[3]。红色素为红褐色粉末,其色艳丽,无臭无味,染色性好,对蛋白质和淀粉的着色显著,可作为天然食品着色剂^[4]。从花生红衣中提取原花色素和红色素,不仅可以提高花生的综合利用价值,还能扩大天然色素的开发来源,增加经济效益。

目前,关于花生红衣色素提取的研究已有报道,但都是对花生红中原花色素的提取,利用超声波辅助提取和响应面优化提取花生红衣色素的工艺研究还未见。本研究拟以单因素试验为基础,设计 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和中心组合试验,用响应面法优化超声波辅助提取花生红衣色素,以得到提取的最佳工艺及预测模型,旨在为花生红衣色素的开发应用与生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

花生红衣:亳州市草木堂中药材销售有限公司;
丙酮:分析纯,天津市天力化学试剂有限公司;
盐酸:分析纯,信阳市化学试剂厂;
甲醇、95%乙醇、冰乙酸、石油醚、氢氧化钠、香草醛:分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器

高速粉碎机:DFY-300 型,上海新苗医疗器械机械有限公司;
旋转蒸发仪:RE52-CS 型,上海新苗医疗器械机械有限公司;
离心机:TDL-5-A 型,武汉冈部投资有限公司;
电子天平:FA 2014 B 型,上海越平科技仪器有限公司;
电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9240A 型,上海新苗医疗器械有限公司;
可见分光光度计:722 型,天津市普瑞斯仪器有限公司;

基金项目:湖北省教育厅科研项目(编号:B2015205)
作者简介:罗璇(1982—),女,武汉设计工程学院副教授,硕士。
E-mail:luoxuan20051982@126.com

收稿日期:2016-03-08

超声波清洗器:MEC-200SAH 型,台湾明和超音波工业股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 花生红衣预处理 根据文献[5]中原料处理的方法,进行花生红衣的脱脂。

1.2.2 花生红色素的提取方法 称取 2.00 g 花生红衣粉末于 250 mL 锥形瓶中,加入 60% 的乙醇,在 60 ℃ 下超声提取 20 min,提取液抽滤,滤液用旋转蒸发仪减压浓缩,将浓缩液转入 45 ℃ 鼓风干燥机干燥至恒重,所得产品即为花生红色素的粗提物^[6]。

1.2.3 总提取率的测定 花生红衣粗提物提取率按式(1)计算:

$$P = \frac{m}{M} \times 100\%,$$
 (1)

式中:

P——花生红衣粗提物提取率,%;

m——花生红衣粗提物质量,g;

M——提取所用花生红衣质量,g。

1.2.4 红色素色价的测定 参照文献[7],按式(2)计算红色素色价。

$$E = \frac{OD_{500} \times f}{m},$$
 (2)

式中:

E——红色素色价;

OD₅₀₀——在 500 nm 下测得的吸光度值;

f——稀释倍数。

1.2.5 原花色素含量的测定 根据文献[8]中的盐酸—香草醛法,修改如下:于 30 ℃ 下显色 15 min 左右的混合溶液,转移至离心管中,3 500 r/min 离心 10 min。取 1 mL 上清液,稀释,在 500 nm 下测定吸光值。原花色素含量按式(3)计算:

$$H = \frac{A \times 100 \times n}{0.55},$$
 (3)

式中:

H——样液中的原花色素含量,μg;

A——在 500 nm 下测得的吸光度值;

n——稀释倍数。

1.2.6 提取效果评价值的计算 总提取率、色价和原花色素含量是评价色素提取效果的重要指标。本试验的响应值采取加权平均,综合评分公式为:

$$Y = (P + E + H) \div 3,$$
 (4)

式中:

Y——花生红色素提取效果评价值;

P——花生红衣粗提物提取率,%;

E——红色素色价;

H——原花色素含量,μg。

1.2.7 单因素试验设计

(1) 提取溶剂的选择:固定提取溶剂浓度为 60%,料液比为 1:30(g/mL),超声提取温度为 55 ℃,提取时间为

20 min,分别考察提取溶剂为甲醇、乙醇、丙酮、冰乙酸、水时花生红衣粗提物色素的总提取率、色价和原花色素得率,并计算出提取效果综合评价值。

(2) 超声时间的选择:固定提取溶剂为 60% 的乙醇,料液比为 1:30(g/mL),超声提取温度为 55 ℃,分别考察提取时间为 10,20,30,40,50 min 时花生红衣粗提物色素的总提取率、色价和原花色素得率,并计算出提取效果综合评价值。

(3) 超声温度的选择:固定提取溶剂为 60% 的乙醇,料液比为 1:30(g/mL),超声辅助提取时间为 20 min,考察提取温度为 25,35,45,55,65 ℃ 时花生红衣粗提物色素的总提取率、色价和原花色素得率,并计算出提取效果综合评价值。

(4) 料液比的选择:固定提取溶剂为 60% 的乙醇,超声提取温度为 55 ℃,提取时间为 20 min,考察料液比为 1:10,1:20,1:30,1:40,1:50(g/mL) 时花生红衣粗提物色素的总提取率、色价和原花色素得率,并计算出提取效果综合评价值。

(5) 溶剂浓度的选择:固定提取溶剂为乙醇,超声提取温度为 55 ℃,提取时间为 20 min,料液比为 1:30(g/mL),考察乙醇溶剂浓度为 50%,55%,60%,65%,70% 时花生红衣粗提物色素的总提取率、色价和原花色素得率,并计算出提取效果综合评价值。

1.2.8 Plackett-Burman 试验和最陡爬坡试验 利用 Design Expert 8.05b 软件,以提取效果值为响应值,对超声时间、超声温度、料液比、乙醇浓度 4 个因素进行 Plackett-burman 试验设计,选出对提取效果影响显著的因素。再通过最陡爬坡试验,找出试验最佳值区域。

1.2.9 中心组合试验 以提取效果评价值为响应值,设计中心组合试验。拟合最佳值附近的相应模型,找出提取花生红色素的最佳工艺。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 提取溶剂对提取效果的影响 由图 1、2 可知,乙醇为提取溶剂时,总提取率和红色素色价值最佳。而乙酸作为提取溶剂时,原花色素得率最高,但由于红色素难溶于乙酸,红色素色价很低。综合考虑提取效果评价值和经济因素,选择乙醇作为提取溶剂。

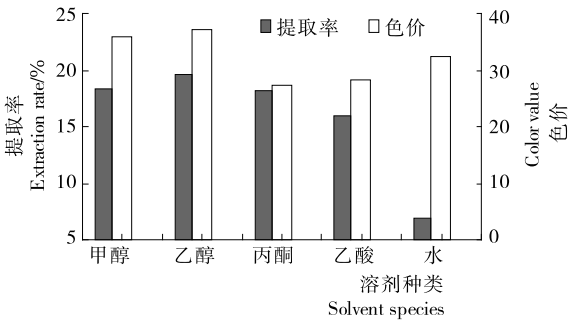


图 1 溶剂对红色素提取率和色价的影响

Figure 1 Effect of different solvents on extraction rate and color value for red pigment

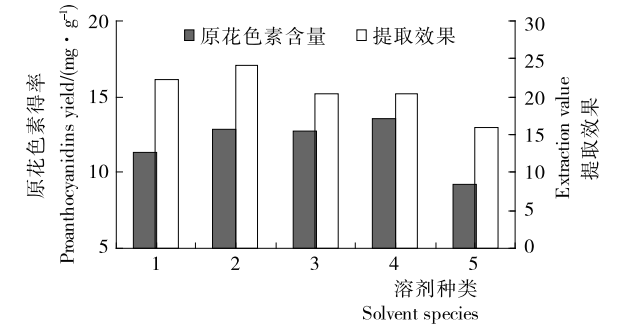


图 2 溶剂对原花色素得率和综合提取效果的影响
Figure 2 Effects of solvents on the proanthocyanidins yield and comprehensive extraction effect

2.1.2 超声时间对提取效果的影响 由图 3、4 可知,随着提取时间的增大,提取率、色价、原花色素含量都是先增大后减小。当超声时间为 20 min 时,提取效果最佳。是因为时间过短,色素不能充分溶于溶剂;时间过长,色素中部分活性物质受损,两者均使提取效果降低。

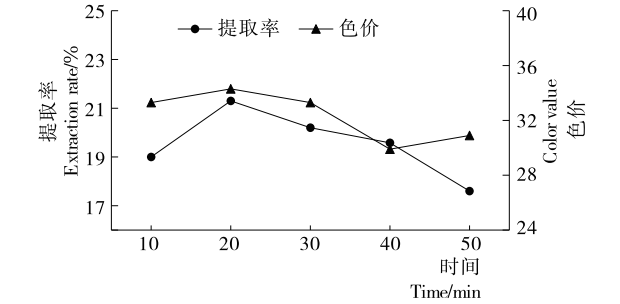


图 3 超声时间对红色素提取率和色价的影响
Figure 3 Effect of ultrasonic time on extraction rate and color value for red pigment

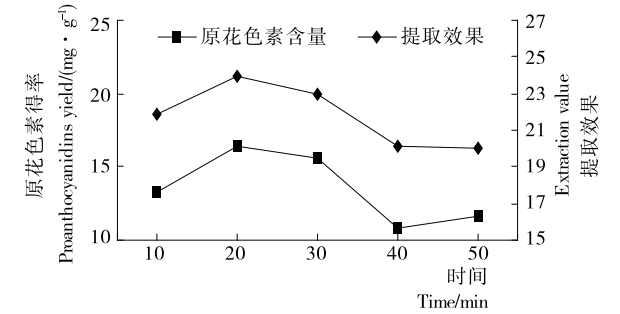


图 4 超声时间对原花色素得率和综合提取效果的影响
Figure 4 Effect of ultrasonic time on the proanthocyanidins yield and comprehensive extraction effect

2.1.3 超声温度对提取效果的影响 由图 5、6 可知,随着提取温度的增大,提取率、色价、原花色素含量都是先增大后减小。当提取温度为 55 ℃ 时,提取效果最佳。温度升高的过程中,分子运动加剧,渗透和溶解速度增快,提取效果增加;温度过高后,超声波的热效应会破坏有效成分,溶质会产生氧化作用,提取效果降低。

2.1.4 料液比对提取效果的影响 由图 7、8 可知,随着料液比的增大,提取率、色价、原花色素含量都是先增大后减小。

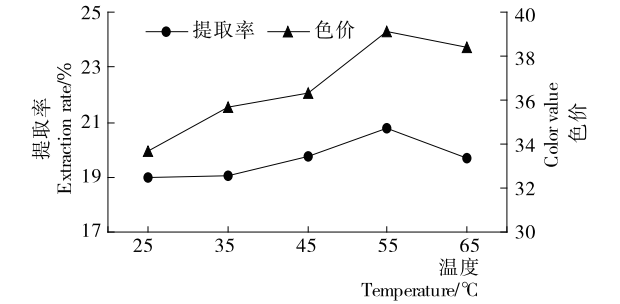


图 5 超声温度对红色素提取率和色价的影响
Figure 5 Effect of ultrasonic temperature on extraction rate and color value for red pigment

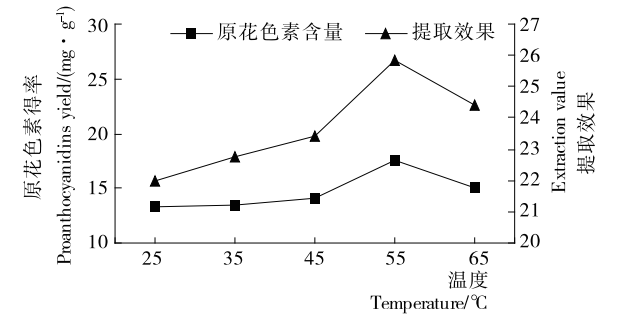


图 6 超声温度对原花色素得率和综合提取效果的影响
Figure 6 Effect of ultrasonic temperature on the proanthocyanidins yield and comprehensive extraction effect

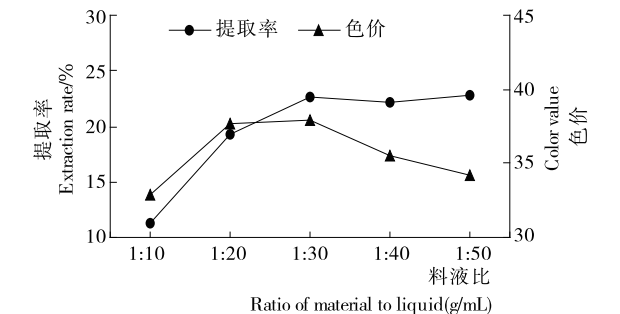


图 7 料液比对红色素提取率和色价的影响
Figure 7 Effect of ratio of material to liquid on extraction rate and color value for red pigment

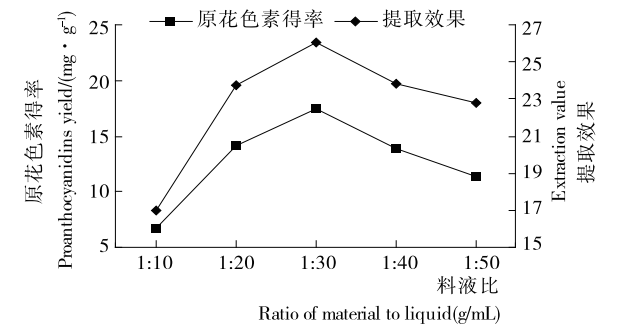


图 8 料液比对原花色素得率和综合提取效果的影响
Figure 8 Effect of material liquid ratio on the proanthocyanidins yield and comprehensive extraction effect

料液比为 1：30(g/mL)时,提取效果最佳。随着溶剂体积增大,色素的溶解程度增大,提取效果增大;但溶剂过多时,部分溶质会残留在水相中造成损失,提取效果降低。

2.1.5 溶剂浓度对提取效果的影响 由图 9、10 可知,随着料液比的增大,提取率、色价、原花色素含量都是先增大后减小。溶剂浓度为 55%时,色价值最高。溶剂浓度为 60%时,原花色素得率、总提取率最佳,这是红色素和原花色素的性质差异造成的。随着浓度增大,极性增强,色素的溶解增加;浓度过大后,醇溶性和脂溶性强的物质会析出,与色素竞争乙醇—水分子,色素的提取效果降低。

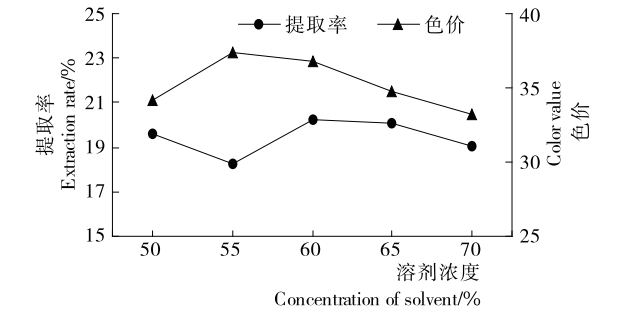


图 9 溶剂浓度对红色素提取率和色价的影响

Figure 9 Effect of solvent concentration on extraction rate and color value for red pigment

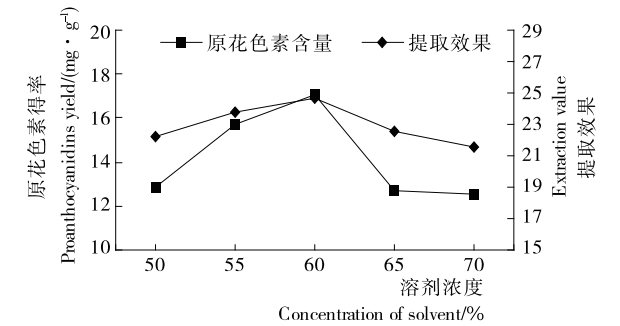


图 10 溶剂浓度对原花色素得率和综合提取效果的影响

Figure 10 Effect of solvent concentration on the proanthocyanidins yield and comprehensive extraction effect

2.2 Plackett-Burman 试验结果与分析

根据单因素试验结果,设计 Plackett-burman 试验见表 1、2。

由表 2 可知,模型极显著($P<0.000\ 1$),拟合度好($R^2=0.968\ 6$),试验误差小,本试验 95.07%的数据变异可以用此回归方程来解释,进行优化试验。因素 X_1 、 X_4 对试验结果影响极显著, X_2 和 X_3 对试验结果影响不显著,据此可以对超声

表 1 PB 试验因素水平设计表

Table 1 PB experimental factor level design table				
编码水平	X_1 超声时间/min	X_2 超声温度/℃	X_3 料液比(g/mL)	X_4 乙醇浓度/%
—1	10	45	1：20	50
1	40	65	1：40	65

表 2 PB 试验设计及结果 [†]					
Table 2 PB experimental design and its results					
试验号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y 提取效果值
1	1	1	1	—1	22.93
2	—1	—1	1	—1	21.89
3	1	—1	—1	—1	23.88
4	1	1	—1	—1	23.95
5	—1	—1	—1	—1	22.11
6	—1	1	1	—1	22.14
7	—1	1	1	1	23.55
8	1	—1	1	1	25.65
9	1	1	—1	1	25.30
10	—1	1	—1	1	23.69
11	1	—1	1	1	25.70
12	—1	—1	—1	1	24.06
F 值	95.21	2.87	1.22	116.96	
P 值	< 0.000 1	0.134 3	0.305 3	< 0.000 1	

[†] 模型 F 值为 54.07, $P<0.000\ 1$, R^2 为 0.968 6, R^2_{adj} 为 0.950 7。

时间和溶剂浓度这两个因素设计最陡爬坡试验。回归得到方程为：

$Y=23.74+0.83X_1-0.14X_2-0.094X_3+0.92X_4。$ (5)

2.3 最陡爬坡试验的设计与结果分析

将提取温度 X_2 和料液比 X_3 固定在单因素试验的中心点水平,以试验效应值确定超声时间 X_1 和乙醇浓度 X_4 的爬坡方向和步长,进行爬坡试验。试验设计和结果见表 3。

表 3 最陡爬坡试验设计与结果

Table 3 Experimental design and results of the steepest ascent			
序号	X_1 /min	X_4 /%	Y 提取效果值
1	10	50	21.54
2	15	55	22.97
3	20	60	24.56
4	25	65	25.08
5	30	70	24.20
6	35	75	23.37

由表 3 可知,随着爬坡的进行,Y 值增大,在第 4 组试验时达到最高点,之后开始减小。表明在第 4 组试验对应的条件下,即乙醇浓度为 65%,超声时间为 25 min 时,花生红衣色素的提取效果最接近最优值。故选取这一组的水平作为中心组合设计的中心点。

2.4 中心组合试验设计与结果分析

利用 Design Expert 8.05b 设计 2 因素 5 水平的中心组合试验,中心组合试验因素及水平编码值见表 4,中心组合试验设计及结果见表 5。

对表 5 试验数据进行多元回归拟合,得到回归模型：

$Y=25.11+0.28X_1-0.35X_4+0.32X_1X_4-0.76X_1^2-1.02X_4^2。$ (6)

表 4 中心组合试验因素及水平编码值

Table 4 List of coded factors of central composite design

水平	X ₁ /min	X ₄ /%
−1.414	17.93	58
−1	20.00	60
0	25.00	65
1	30.00	70
1.414	32.07	72

表 5 中心组合试验设计及结果

Table 5 Central composite design and the corresponding responses

序号	X ₁	X ₄	提取效果值
1	0	−1.414	23.44
2	0	0	24.79
3	1.414	0	24.09
4	−1.414	0	23.13
5	0	1.414	22.73
6	0	0	25.34
7	0	0	25.16
8	0	0	25.25
9	−1	1	22.34
10	0	0	25.03
11	−1	−1	23.87
12	1	1	23.42
13	1	−1	23.67

由表 6 可知,模型极显著($P<0.000\ 1$),拟合度 $R^2=0.976\ 4$,表明该模型试验误差小,设计合理。失拟项不显著($P=0.573\ 6$),表明未知因素对试验的干扰小,可以用来预测和分析提取效果。

方程中一次项 X_1X_4 显著, X_1 、 X_4 、 X_1^2 和 X_4^2 极显著,表明乙醇浓度与超声时间的交互作用对提取效果的影响显著且

表 6 中心组合试验模型方差分析结果[†]

Table 6 Central composite design model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著值
模型	12.00	5	2.40	57.91	<0.000 1	* *
X ₁	0.63	1	0.63	15.19	0.005 9	* *
X ₄	0.97	1	0.97	23.48	0.001 9	* *
X ₁ X ₄	0.40	1	0.40	9.73	0.016 9	*
X ₁ ²	3.99	1	3.99	96.29	<0.000 1	* *
X ₄ ²	7.24	1	7.24	174.59	<0.000 1	* *
残差	0.29	7	0.04	—	—	—
失拟项	0.11	3	0.03	0.76	0.573 6	不显著
误差	0.19	4	0.04	—	—	—
综合	12.29	12	—	—	—	—

[†] * 表示因素对响应值的影响显著, $P<0.05$; * * 表示因素对响应值的影响极显著, $P<0.01$ 。

并非简单的线性关系,其响应面分析和优化见图 11。由图 11 可知,综合提取效果值最初会随着乙醇浓度和提取时间的增大而增大,超过试验所取的中心值时,提取效果值会随着两因素的增大而减小。乙醇浓度的曲面比提取时间陡,表明乙醇浓度对提取效果的影响比提取时间大。

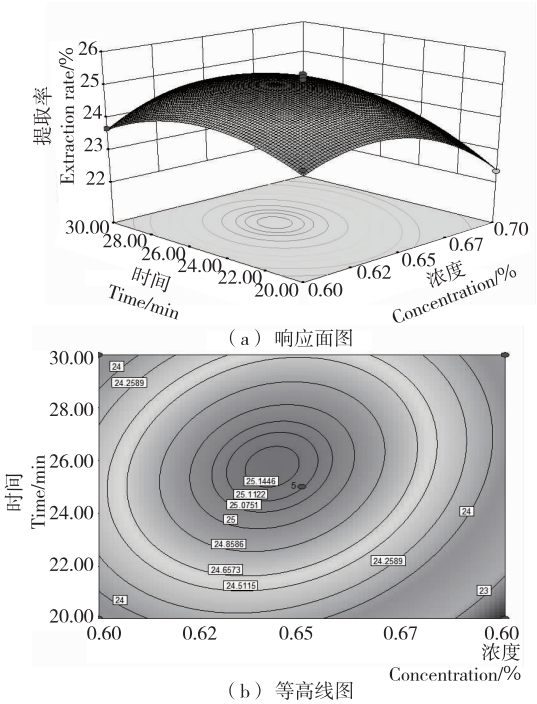


图 11 乙醇浓度和超声时间交互作用的响应面图和等高线图

Figure 11 Contour map of the interaction between ethanol concentration and ultrasonic time

2.5 最佳提取条件的验证

根据模型,预测 $X_1=26.54$, $X_4=68$,此时 $Y=24.63$ 。将单因素试验所得最佳条件与响应面预测所得最佳条件结合,以乙醇为溶剂、溶剂浓度 68%、超声时间 26.54 min、超声温度 55 ℃、料液比 1 : 30(g/mL)进行验证实验,重复 3 次。考虑到实验的可行性,调整超声时间为 27 min。验证实验最终得到花生红衣色素的总提取率为 21.6%,色价为 34.6,原花色色素得率为 17.77 mg/g,综合提取效果值为 24.65。与预测值相近,从而证实该模型合理。

3 结论

通过单因素试验、Plackett-burman 试验、最陡爬坡试验和中心组合试验的优化后,得到超声辅助提取花生红衣色素的最佳工艺为:乙醇浓度 68%,料液比 1 : 30(g/mL),超声时间 26.54 min,超声温度 55 ℃。结合实际,调整时间为 27 min,在此条件下,花生红衣色素的总提取率为 21.6%,色价为 34.6,原花色色素得率为 17.77 mg/g,综合提取效果值为 24.65。本试验得到了超声辅助提取花生红衣色素的一个较好的工艺。但本试验在花生红衣色素提取效果评价值时采用了最常规的各占均值求权重的计算,并未采用熵值求权

(下转第 236 页)

2017 年征订启事

轻工机械

欢迎订阅 ● 欢迎刊登广告 ● 欢迎赐稿

《轻工机械》杂志(刊号:CN 33-1180/TH, ISSN 1005-2895),创刊于 1983 年,由中国轻工机械协会、中国联合装备集团有限公司与轻工业杭州机电设计研究院联合主办,是一份在国内有较高影响力、历史悠久的轻工机械领域的专业性科技期刊。以报道轻工机械、自动化技术、机电一体化、工艺设计及其应用为特色。

● 双月刊,大 16 开,每册定价 10.00 元,全年 60.00 元。

● 邮局订阅(代号 32-39),也可直接向本编辑部邮购(另加邮费 2 元/本)。

● 编辑部地址:杭州体育场路 71 号 邮编:310004

● 电话:(0571)85186130 85187520

E-mail: qgjxzz@126.com 网址: www.qgjxzz.com

● 开户银行:工行建国北路支行处

● 户头:轻工业杭州机电设计研究院 帐号:1202022209014428297

本刊系中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”、“万方数据资源系统”、“中文科技期刊数据库”,并被《中国学术期刊文摘》、英国《科学文摘》(SA, INSPEC)、美国化学文摘(CA)、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国乌利希期刊指南(Ulrich)等收录

(上接第 176 页)

重进行准确比重分析,今后可采用 matlab 软件编写代码,得到综合评价公式,并加以实验验证,得到更加可靠的试验结果。

参考文献

- [1] 温志英,曹妍. 响应面法优化花生红衣原花青素微波辅助提取工艺[J]. 中国粮油报, 2011, 26(6): 98-101.
- [2] 李雨辉,张礼红,周文化. 花生红衣色素提取工艺条件的研究[J]. 热带农业工程, 2008, 32(1): 5-7.
- [3] 李晓翠. 花生红衣中原花青素的超声波辅助提取工艺研究[J]. 德邦专栏, 2013(11): 18-20.

(上接第 212 页)

- [37] VILLENA G K, GUTIÉRREZ-CORREA M. Morphological patterns of *Aspergillus niger* biofilms and pellets related to lignocellulolytic enzyme productivities[J]. Applied Microbiology, 2007, 45(3): 231-237.
- [38] 赵龙,蒋雪薇,边佳为,等. 玉米芯载体吸附法固定化米根霉发酵 L-乳酸的工艺条件[J]. 食品科学, 2013(7): 201-205.
- [39] ESPINOSA-ORTIZ E J, RENE E R, PAKSHIRAJAN K, et al. Fungal pelleted reactors in wastewater treatment: Applications and perspectives [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 553-571.

中国油脂 (月刊)

国内邮发代号 52-129 国外发行代号 M5889

追踪学科发展动态 报道行业最新成果 关注油脂发展热点 共谋行业创新未来



主要栏目

油脂加工/油料蛋白/油脂化学/油脂储藏/油脂营养/新油源/特种油脂/油脂化工/生物柴油/综合利用/实用技术/检测分析/标准规范/食品安全/节能减排/环境保护/纵横信息/特色专栏/产品广告等。

发行对象

从事油脂及相关行业规划、决策、咨询、研究、开发、生产、检测、工程服务、项目管理、工厂管理、设备运行、维修等组织和个人。

各地邮局均可订阅, 我社常年办理邮购及逾期补订

大 16 开本 每本 10 元 全年 120 元

- 邮局订阅: 邮发代号 52-129
- 邮局汇款: 710082 西安市劳动路 118 号 《中国油脂》杂志社
- 银行转账: 开户单位: 西安中粮工程研究设计院有限公司
账号: 3700021709088100275
开户行: 工行陕西省分行营业部西安西关支行



地址: 陕西省西安市劳动路 118 号 邮编: 710082
电话: 029-88653157/88621360 传真: 029-88625310
E-mail: zyzzoil@163.com 网址: www.chinaoils.cn

- [4] 翟硕莉. 花生衣红色素提取及抗氧化作用研究进展[J]. 农业科技与装备, 2013(9): 64-65.
- [5] 管文荻,路鑫,文连奎. 响应面法优化超声波辅助提取花生红衣原花青素的研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2013(5): 6-9.
- [6] 李颖. 超声波辅助提取花生衣红色素研究[J]. 粮食与油脂, 2009(10): 30-31.
- [7] 童愈元. 花生红衣中红色素、原花青素的提取及分离纯化的研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2011: 12-21.
- [8] PORTET L J, HRSTICH I L N, CHAN B G. The conversion of procyanidins and prodelphinidins to cyaniding and delphinidin[J]. Phytochemistry, 1986, 25(1): 223-230.

- [40] YU Mei-ching, WANG R C, WANG Chung-yih, et al. Enhanced production of L(+)-lactic acid by flocc-form culture of *Rhizopus oryzae* [J]. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2007, 38(3/4): 223-228.
- [41] 蒋雪薇,罗晓明,盛灿梅,等. 米根霉 L-乳酸发酵菌丝球形成条件的研究[J]. 食品科学, 2010(15): 216-220.
- [42] YANG Jun, JIAO Rui-hua, YAO A Ling-yun, et al. Control of fungal morphology for improved production of a novel antimicrobial alkaloid by marine-derived fungus *Curvularia* sp. IFB-Z10 under submerged fermentation[J]. Process Biochemistry, 2016, 51: 185-194.