

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.034

# 纤维素酶协同超声波辅助乙醇提取 红肉火龙果色素工艺的优化

Optimization on extracting process for red meat pitaya pigment assisted  
with enzymatic-ultrasonic by response surface methodology

田 艳      段晓嫣      邓放明

TIAN Yan    DUAN Xiao-yan    DENG Fang-ming

(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

(College of Food Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha, Hunan 410128, China)

**摘要:** 分别以火龙果果皮、果肉冻干样品为原料, 采用响应面法优化纤维素酶协同超声波辅助乙醇提取火龙果果皮、果肉色素工艺。火龙果果皮色素的最佳提取工艺为超声时间 24 min、超声温度 39 °C、超声功率 325 W、乙醇浓度 23%, 得率为(81.661 3±0.762 0) mg/100 g; 火龙果果肉色素的最佳提取工艺条件为超声时间 34 min、超声温度 41 °C、超声功率 315 W、乙醇浓度 23%, 得率为(278.660 4±1.084 2) mg/100 g。

**关键词:** 火龙果; 色素; 纤维素酶; 超声波

**Abstract:** Using freeze-dried pitaya peel and pulp samples as raw materials, response surface methodology was used to optimize the cellulase-ultrasonic extraction process of pigment from pitaya peel and pulp. The optimal extraction process of pigment from pitaya pericarp was as followed: extraction time 24 min, extraction temperature 39 °C, ultrasonic power 325 W, ethanol concentration 23%, the yield was (81.661 3±0.762 0) mg/100 g; The optimum extraction conditions of pigment from pitaya pulp were as follows: extraction time 34 min, extraction temperature 41 °C, ultrasonic power 315 W, ethanol concentration 23%, and the yield was (278.660 4±1.084 2) mg/100 g.

**Keywords:** dragon fruit; pigment; cellulase; ultrasonic wave

火龙果 (*Hylocereus undulatus* Britt), 仙人掌科植物<sup>[1-2]</sup>, 植物性蛋白与膳食纤维含量丰富<sup>[3-4]</sup>, 经常食用可以改善便秘, 对糖尿病患者及高血脂症患者有辅助治

疗作用<sup>[5-7]</sup>。红心火龙果果皮和果肉色泽艳丽, 富含甜菜苷类色素, 是制备天然色素的优良资源<sup>[8-11]</sup>。

目前, 国内外火龙果色素主要采用溶剂提取法, 所得火龙果色素产品纯度低, 耗时较长, 且存在提取剂残留、色素产品中含有果胶等问题<sup>[12-14]</sup>。超声波可与媒质产生热作用、机械作用和空穴作用, 在一定程度上破坏细胞壁结构, 使细胞内物质快速溢出, 从而使溶剂更易进入细胞内。应用超声波技术提取天然活性成分能够有效提高提取率, 并利于生物活性的保留<sup>[15-18]</sup>。酶解法主要利用果胶酶、纤维素酶等软化或分解植物细胞壁, 促进胞内成分流出, 增加待提取物与提取剂接触机会, 有效提高生物活性成分的提取率<sup>[19-21]</sup>。

试验拟采用酶协同超声波辅助溶剂提取红肉火龙果果皮、果肉色素, 应用响应面法优化其提取工艺条件, 为火龙果色素的制备及资源的综合利用提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

红肉火龙果: 湖南天和盛业农业开发有限公司;  
无水乙醇、丙酮: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

柠檬酸、柠檬酸钠: 食品级, 华兴生物制剂有限公司;  
纤维素酶(2 113 U/mL)、果胶酶(2 096 U/mL): 华兴生物制剂有限公司。

### 1.2 仪器与amp;设备

分析天平: AUY2200 型, 日本 SHAMADZV 公司;  
真空冷冻干燥机: FDU-1200 型, 日本 EYELA 公司;  
旋转蒸发器: RV10 型, 德国 IKA 公司;  
紫外分光光度计: WFJ7200 型, 尤尼柯(上海)仪器有限公司;

**基金项目:** 湖南省研究生科研创新项目(编号: CX2017B353); 国家现代农业特色蔬菜产业技术体系专项(编号: CARS-24-E-02)

**作者简介:** 田艳, 女, 湖南农业大学在读博士研究生。

**通信作者:** 邓放明(1962—), 男, 湖南农业大学教授, 博士。

E-mail: fmdenghnan@sina.com

收稿日期: 2019-05-08

离心机:TDL-5 型,上海安亭科学仪器厂;

超声波清洗仪:KM-400DE 型,昆山美美超声仪器有限公司;

高速中药粉碎机:400Y 型,旭曼有限公司;

水浴锅:YLJYE-100 型,艾本德(中国)有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 工艺流程

火龙果→清洗、去除表面鳞片、晾干→果皮、果肉分离→果皮切条、果肉打浆→冻干→粉碎过 40 目筛→取粉末,加入提取剂提取→3 800 r/min 离心 15 min→取上清液减压旋转蒸发去除溶剂、浓缩→红色素粗提液

#### 1.3.2 酶—超声波法提取色素的单因素试验设计

(1) 酶种类:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比 1:200(g/mL)溶解于 pH 4.5 20% 乙醇中,按照表 1 加入不同酶种类及体积,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

表 1 不同酶种类提取红肉火龙果果皮与果肉色素<sup>†</sup>

Table 1 Extraction of red meat dragon fruit peel and pulp pigment with different enzyme types

酶种类	酶用量/mL
空白组(KB)	0
果胶酶(a)	0.25
纤维素酶(b)	0.25
果胶酶(A)	0.50
纤维素酶(B)	0.50
果胶酶+纤维素酶(a+b)	0.25+0.25
果胶酶+纤维素酶(A+B)	0.50+0.50

<sup>†</sup> 果胶酶液为固体酶稀释 250 倍,纤维素酶为固体酶稀释 200 倍。

(2) 酶添加量:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比 1:200(g/mL)溶解于 pH 4.5 20% 乙醇中,分别添加 0.20, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 mL 辅助酶,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(3) 提取溶剂种类:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比 1:200(g/mL)分别加入 pH 4.5 蒸馏水、30% 丙酮、30% 甲醇、30% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(4) 浸提液 pH:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比 1:200(g/mL)溶解于不同 pH 的 20% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(5) 浸提液浓度:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比 1:200(g/mL)分别溶解于 pH 4.5 的 10%, 20%, 40%, 60%, 80% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(6) 料液比:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,分别按照料液比为 1:50, 1:100, 1:150, 1:200, 1:250, 1:300(g/mL)溶解于 pH 4.5 的 20% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(7) 超声功率:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比为 1:200(g/mL)加入 pH 4.5 的 20% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,分别在超声功率 50, 100, 200, 300, 400 W, 超声温度 40 ℃ 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(8) 超声温度:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比为 1:200(g/mL)加入 pH 4.5 的 20% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,分别在超声温度 20, 40, 60, 80 ℃,超声功率 200 W 条件下提取 30 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

(9) 超声时间:准确称取火龙果果皮(或果肉)冻干样品 0.250 0 g,按料液比为 1:200(g/mL)加入 pH 4.5 的 20% 乙醇,添加 0.5 mL 纤维素酶,在超声温度 40 ℃,超声功率 200 W 条件下分别超声 10, 20, 30, 40, 50 min,离心取上清液,浓缩处理后定容至 100 mL,于 538 nm 处测定吸光度,计算火龙果红色素得率。

1.3.3 响应面优化试验设计 根据单因素试验结果,应用 Box-Behnken 中心组合的试验设计原理,选取火龙果果皮(果肉)色素得率为响应值,超声时间、超声温度、超声功率和乙醇浓度为因素进行四因素三水平的响应面分析试验。

#### 1.3.4 指标测定

(1) 纤维素酶活力测定:按 NY/T 912—2004 执行。经测定,试验中所用纤维素酶稀释液活力为 2 113 U/mL。

(2) 果胶酶活力测定:参照张飞等<sup>[22]</sup>、王小敏等<sup>[23]</sup>,采用 DNS 比色法。经测定,试验中所用果胶酶稀释液活力为 2 096 U/mL。

(3) 火龙果甜菜苷得率:火龙果色素粗提取液定容至 100 mL,于 538 nm 处测得相应吸光度,按式(1)计算总甜菜苷得率。

$$X = \frac{A_{\lambda} \times M_w \times n \times V \times 100}{\epsilon \times L}, \quad (1)$$

式中:

X——总甜菜苷含量,mg/100 g;

$A_{\lambda}$ ——总甜菜苷吸光值;

$M_w$ ——标准甜菜苷摩尔质量分数,550.46;

$n$ ——稀释倍数;

V——提取液体积,mL;

$\epsilon$ ——标准甜菜苷摩尔消光系数,61 600;

L——通路长度,1.0 cm。

#### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 制作图表,利用 Design Expert 8.0 软件进行试验设计、分析和建模。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

综合图 1 及色素提取效果与性价比可知,红色火龙果果皮色素提取的工艺条件为纤维素酶 0.7 mL、20%乙醇浓度、pH 5.0、料液比 1:200(g/mL)、超声功率 300 W、超声温度 40 °C、超声时间 20 min;红色火龙果果肉色素提取的工艺条件为纤维素酶 0.5 mL、20%乙醇浓度、pH 5.0、料液比 1:200(g/mL)、超声功率 300 W、超声温度 40 °C、超声时间 30 min。

### 2.2 火龙果果皮色素提取工艺优化

2.2.1 Box-Behnken 试验设计及结果 根据单因素试验结果,选取超声时间、超声温度、超声功率、乙醇浓度为自变量,以火龙果色素得率为响应值,利用 Design Expert 8.0 软件中的 Box-Behnken 设计四因素三水平响应面优化试验,试验因素水平见表 2,试验设计及结果见表 3。

2.2.2 回归方程方差分析 对表 3 的试验数据进行多元二次回归拟合,得到应变量对自变量的关系为:

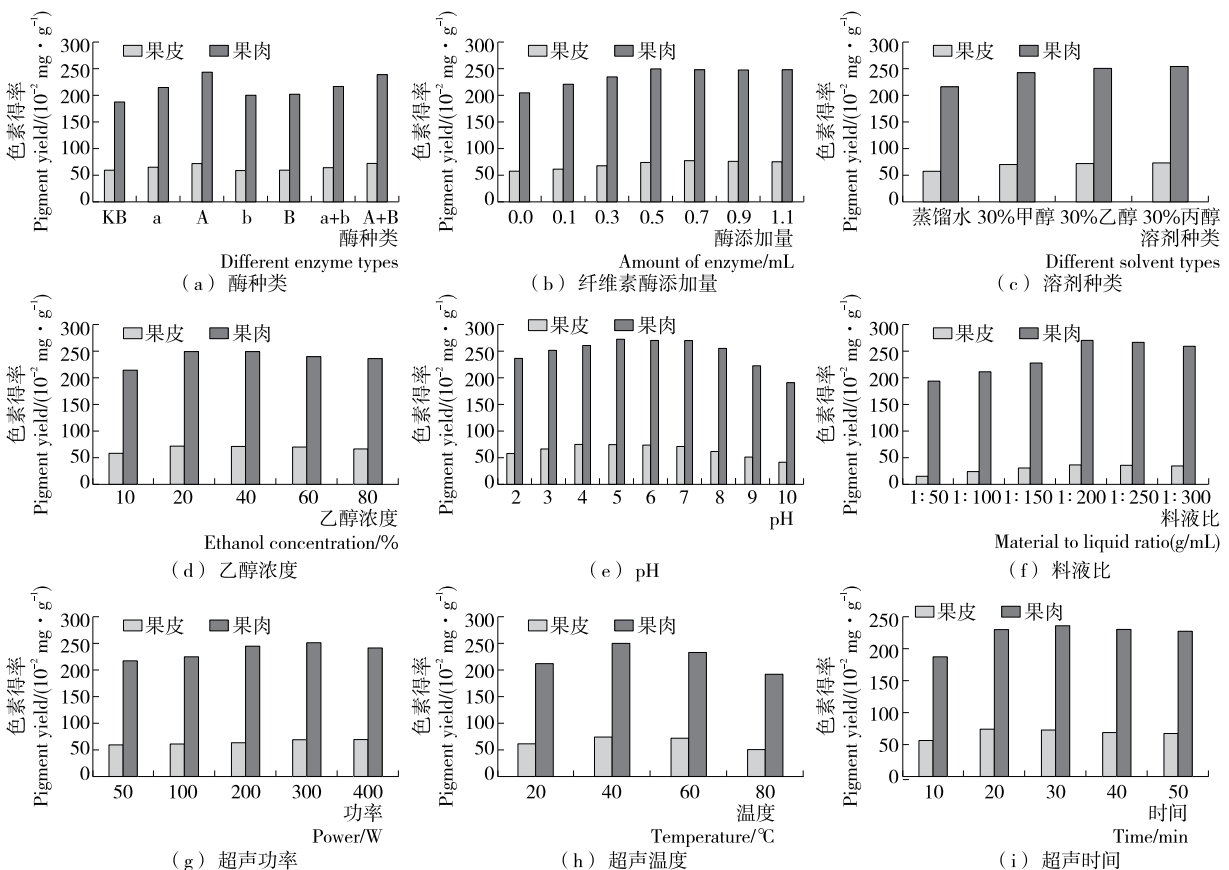


图 1 不同因素对火龙果红色素得率的影响

Figure 1 Effect of different factors on the yield of red pigment in pitaya

表 2 酶—超声波辅助乙醇提取火龙果果皮(肉)色素响应面试验因素水平表

Table 2 Extraction of pigments from pitaya fruit peel (meat) by enzyme-ultrasound assisted method

水平	A 超声时间/min	B 超声温度/℃	C 超声功率/W	D 乙醇浓度/%
-1	10(20)	20(20)	200(200)	10(10)
0	20(30)	40(40)	300(300)	20(20)
1	30(40)	60(60)	400(400)	30(30)

表 3 酶—超声波辅助乙醇提取火龙果果皮色素响应面分析法试验设计及结果

Table 3 Ultrasonic-assisted enzymatic extraction of pitaya pericarp pigment by response surface methodology design and results

试验号	A	B	C	D	色素得率/ (10 <sup>-2</sup> mg · g <sup>-1</sup> )
1	-1	1	0	0	58.119
2	-1	-1	0	0	54.703
3	-1	0	1	0	57.339
4	0	0	1	-1	64.210
5	0	0	0	0	78.390
6	1	-1	0	0	65.188
7	-1	0	-1	0	57.812
8	0	0	0	0	76.447
9	0	1	0	1	65.110
10	0	0	-1	1	66.089
11	0	-1	0	-1	61.247
12	0	-1	1	0	66.808
13	0	1	-1	0	64.919
14	1	0	1	0	74.393
15	-1	0	0	1	58.528
16	0	0	0	0	79.134
17	1	0	0	1	76.231
18	1	0	-1	0	67.121
19	-1	0	0	-1	56.937
20	0	0	-1	-1	63.690
21	0	1	1	0	67.348
22	0	-1	-1	0	61.069
23	0	0	1	1	71.607
24	0	-1	0	1	66.809
25	0	0	0	0	78.688
26	1	0	0	-1	65.109
27	0	0	0	0	78.540
28	0	1	0	-1	63.085
29	1	1	0	0	67.070

$$Y = 78.24 + 5.97A + 0.82B + 1.75C + 2.51D - 0.38AB + 1.94AC + 2.38AD - 0.83BC - 0.88BD + 1.25CD - 8.49A^2 - 8.12B^2 - 5.51C^2 - 5.98D^2 \quad (2)$$

由表 4 可知,模型  $P < 0.000 1$ ,该模型具有统计学意义。失拟项  $P$  为  $0.336 7 (> 0.1)$ ,模型失拟项不显著,说明此模型拟合度较好。方程中的一次项 A、C、D 对响应值  $Y$  的影响极显著 ( $P < 0.001$ ),B 对响应值  $Y$  的影响显著 ( $P < 0.05$ );二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  对  $Y$  的影响极显著 ( $P < 0.001$ );交互项 AC、AD 对响应值  $Y$  的影响显著 ( $P < 0.05$ ),AB、BD、BC、CD 对响应值  $Y$  的影响不显著。由此可以得出,各试验因素与响应值之间并非简单的线性关系。响应值的相关系数  $R^2 = 0.985 2$ ,说明火龙果果皮色素得率的试验值和预测值之间有较好的一致性;模型的修正决定系数  $R_{adj}^2 = 0.970 5$ ,说明火龙果果肉色素的模型能够在 97.05% 的程度解释试验。 $CV = 1.88\%$ ,说明模型方程能较好地反映试验真实值。

综上所述,该回归模型拟合度良好,试验误差小,能准确分析和预测酶—超声波同步辅助提取火龙果果皮色素的得率。

表 4 酶—超声波辅助乙醇提取火龙果果皮色素影响因素响应面回归模型的方差分析<sup>†</sup>

Table 4 Variance analysis on regression model of enzyme-ultrasonic method for extraction of pitaya pericarp pigments

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 469.72	14	104.98	66.77	<0.000 1	***
A	428.09	1	428.09	272.26	<0.000 1	***
B	8.05	1	8.05	5.12	0.040 1	*
C	36.76	1	36.76	23.38	0.000 3	***
D	75.48	1	75.48	48.00	<0.000 1	***
AB	0.59	1	0.59	0.37	0.550 6	
AC	15.00	1	15.00	9.54	0.008 0	**
AD	22.71	1	22.71	14.44	0.001 9	**
BC	2.74	1	2.74	1.74	0.208 2	
BD	3.13	1	3.13	1.99	0.180 4	
CD	6.25	1	6.25	3.97	0.066 1	
A <sup>2</sup>	467.60	1	467.60	297.39	<0.000 1	***
B <sup>2</sup>	428.18	1	428.18	272.32	<0.000 1	***
C <sup>2</sup>	196.82	1	196.82	125.18	<0.000 1	***
D <sup>2</sup>	231.78	1	231.78	147.41	<0.000 1	***
残差项	22.01	14	1.57			
失拟项	17.68	10	1.77	1.63	0.336 7	不显著
误差项	4.33	4	1.08			
综合	1 491.74	28				

<sup>†</sup> \*\*\* 表示极显著,  $P < 0.001$ ; \*\* 表示非常显著,  $P < 0.01$ ; \* 表示显著,  $P < 0.05$ ;  $R^2 = 0.985 2$ ;  $R_{adj}^2 = 0.970 5$ ;  $CV = 1.88\%$ 。

2.2.3 响应曲面分析 由图 2(a)、(b)可知,A 与 B 对 Y 的交互作用不显著,A 与 C 对 Y 存在交互作用。随着超声时间和超声功率的增加,火龙果果皮色素得率逐渐升高,但当超声时间和超声功率增大到一定值后,火龙果果皮色素的得率却随超声时间的增加和超声功率的增大而降低。同理,由图 2(c)~(f)可得,A 与 D 所对应的响应曲面图形坡度陡峭,等高线形状趋于椭圆形且排列紧密,说明超声时间和乙醇浓度对火龙果果皮色素得率的响互影响较大,而 A 与 B、B 与 C、C 与 D 对 Y 的响应面图形坡度相对平缓,等高线排列较稀疏,表明超声温度与超声时间、超声时间与超声功率、超声时间与乙醇浓度对火龙果果皮色素得率的交互影响相对较弱。

2.2.4 提取参数优化及模型验证运用 根据所得模型,预测出在稳定状态下最佳提取工艺参数为超声时间 24.28 min、超声温度 39.18 °C、超声功率 326.97 W、乙醇

浓度 23.23%。在此条件下,火龙果果皮色素得率为 80.161 2 mg/100 g。考虑到实际操作及设备参数调整可行性,调整最优提取工艺参数为提取时间 24 min、提取温度 39 °C、超声功率 325 W、乙醇浓度 23%。在此条件下采用酶—超声波同步辅助提取火龙果果皮色素( $n=3$ ),得到火龙果果皮色素得率为  $(81.661 3 \pm 0.762 0)$  mg/100 g,与预测值接近,说明优化结果可行。

### 2.3 火龙果果肉色素提取工艺优化

2.3.1 Box-Behnken 试验设计及结果 试验设计与火龙果果皮色素提取的方法一致,试验设计及结果见表 5。

2.3.2 回归方程方差分析 对表 5 的试验数据进行多元二次回归拟合,获得应变量对自变量的关系为:

$$Y = 276.79 + 12.42A + 3.31B + 2.07C + 4.70D - 0.65AB + 2.00AC + 2.12AD - 2.08BC - 2.19BD + 2.68CD - 20.04A^2 - 15.58B^2 - 12.23C^2 - 13.44D^2. \quad (3)$$

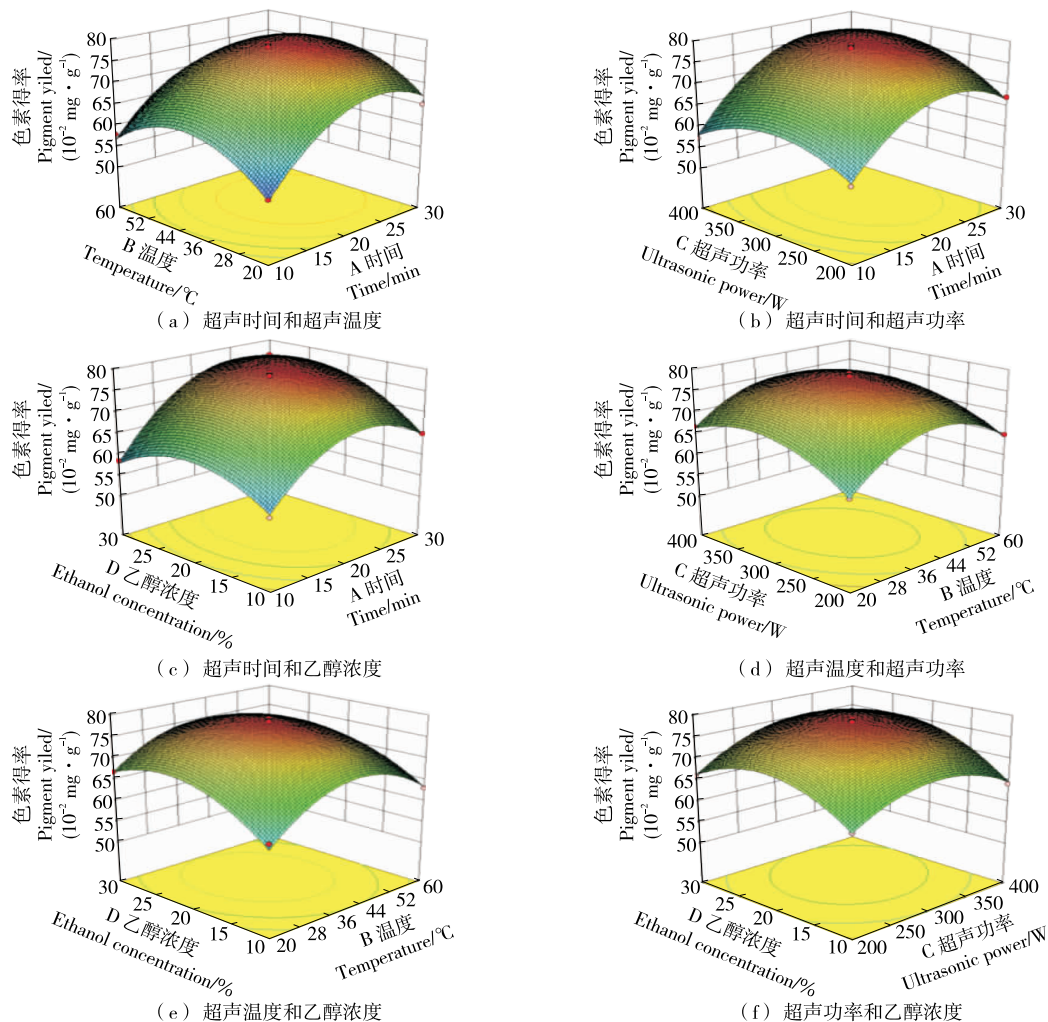


图 2 各因素交互作用对火龙果果皮色素得率的影响

Figure 2 The interaction of various factors on pigment yield of pitaya pericarp

表 5 酶—超声波辅助乙醇提取火龙果果肉色素响应面分析法试验设计及结果

Table 5 Ultrasonic-assisted enzymatic extraction of pitaya pulp pigment by response surface methodology design and results

试验号	A	B	C	D	色素得率/ (10 <sup>-2</sup> mg · g <sup>-1</sup> )
1	0	-1	1	0	249.818
2	0	-1	-1	0	240.261
3	-1	0	0	-1	225.830
4	-1	0	-1	0	232.005
5	0	0	1	-1	245.917
6	1	-1	0	0	248.452
7	0	0	-1	1	252.353
8	-1	1	0	0	236.594
9	0	0	1	1	262.885
10	0	1	0	1	249.234
11	0	-1	0	-1	240.651
12	1	0	-1	0	253.913
13	0	1	0	-1	248.257
14	-1	0	0	1	232.811
15	1	0	0	-1	249.427
16	0	1	1	0	253.394
17	1	0	1	0	259.764
18	1	1	0	0	256.059
19	1	0	0	1	264.874
20	0	-1	0	1	250.403
21	0	0	0	0	278.857
22	0	0	0	0	278.639
23	0	0	0	0	278.083
24	0	0	-1	-1	246.112
25	0	1	-1	0	252.171
26	0	0	0	0	278.285
27	-1	0	1	0	229.847
28	-1	-1	0	0	226.388
29	0	0	0	0	270.101

由表 6 可知,模型  $P < 0.000 1$ ,说明该模型具有统计学意义。失拟项  $P$  为  $0.767 9 (> 0.1)$ ,模型失拟项不显著,说明此模型拟合度较好。方程的一次项中 A、B、D 对响应值  $Y$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ ),C 对响应值  $Y$  的影响显著 ( $P < 0.05$ );二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  对  $Y$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ );交互项 AC、AD 对响应值  $Y$  的影响显著 ( $P < 0.05$ ),AB、BD、BC、CD、对响应值  $Y$  的影响不显著。由此可以得出,各试验因素与响应值之间并非简单的线性关系。响应值的相关系数  $R^2 = 0.978 6$ ,说明火龙果果肉色

表 6 酶—超声波辅助乙醇提取火龙果果肉色素影响因素响应面回归模型的方差分析†

Table 6 Variance analysis on regression model of enzyme-ultrasonic method for extraction of pitaya pulp pigments

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	6 569.83	14	469.27	46.72	<0.000 1	***
A	1 850.43	1	1 850.43	184.24	<0.000 1	***
B	131.59	1	131.59	13.10	0.002 8	*
C	51.29	1	51.29	5.11	0.040 3	***
D	264.74	1	264.74	26.36	0.000 2	***
AB	1.69	1	1.69	0.17	0.687 9	
AC	16.03	1	16.03	1.60	0.227 0	*
AD	17.92	1	17.92	1.78	0.203 0	*
BC	17.37	1	17.37	1.73	0.209 7	
BD	19.25	1	19.25	1.92	0.187 9	
CD	28.77	1	28.77	2.86	0.112 7	
$A^2$	2 605.89	1	2 605.89	259.46	<0.000 1	***
$B^2$	1 574.28	1	1 574.28	156.75	<0.000 1	***
$C^2$	970.85	1	970.85	96.67	<0.000 1	***
$D^2$	1 172.51	1	1 172.51	116.74	<0.000 1	***
残差项	140.61	14	10.04			
失拟项	84.26	10	8.43	0.60	0.767 9	不显著
误差项	56.35	4	14.09			
综合	6 710.44	28				

† \*\*\* 表示极显著,  $P < 0.001$ ; \*\* 表示非常显著,  $P < 0.01$ ; \* 表示显著,  $P < 0.05$ ;  $R^2 = 0.978 6$ ;  $R_{adj}^2 = 0.957 3$ ;  $CV = 2.31\%$ 。

素得率的试验值和预测值之间有较好的一致性;模型的修正决定系数  $R_{adj}^2 = 0.957 3$ ,说明火龙果果肉色素的模型能够在 95.73% 的程度解释试验。 $CV = 2.31\%$ ,说明模型方程能较好地反映试验真实值。

2.3.3 响应面曲面分析 由图 3(a)、(b)可知,A 与 B 对 Y 的交互作用不显著,A 与 C 对 Y 存在交互作用。随着超声时间和超声功率的增加,火龙果果肉色素得率逐渐升高,但当超声时间和超声功率增大到一定值后,火龙果果肉色素的得率却随超声时间的增加和超声功率的增大而降低。同理可得,A 与 D 所对应的响应曲面图形坡度陡峭,等高线形状趋于椭圆形且排列紧密,说明超声时间和乙醇浓度对火龙果果肉色素得率的相互影响较大,而 A 与 B、B 与 C、C 与 D 对 Y 的响应面图形坡度相对平缓,等高线排列较稀疏,表明超声温度与超声时间、超声时间与超声功率、超声时间与乙醇浓度对火龙果果肉色素得率的交互影响相对较弱。

2.3.4 提取参数优化及模型验证运用 据所得模型预测

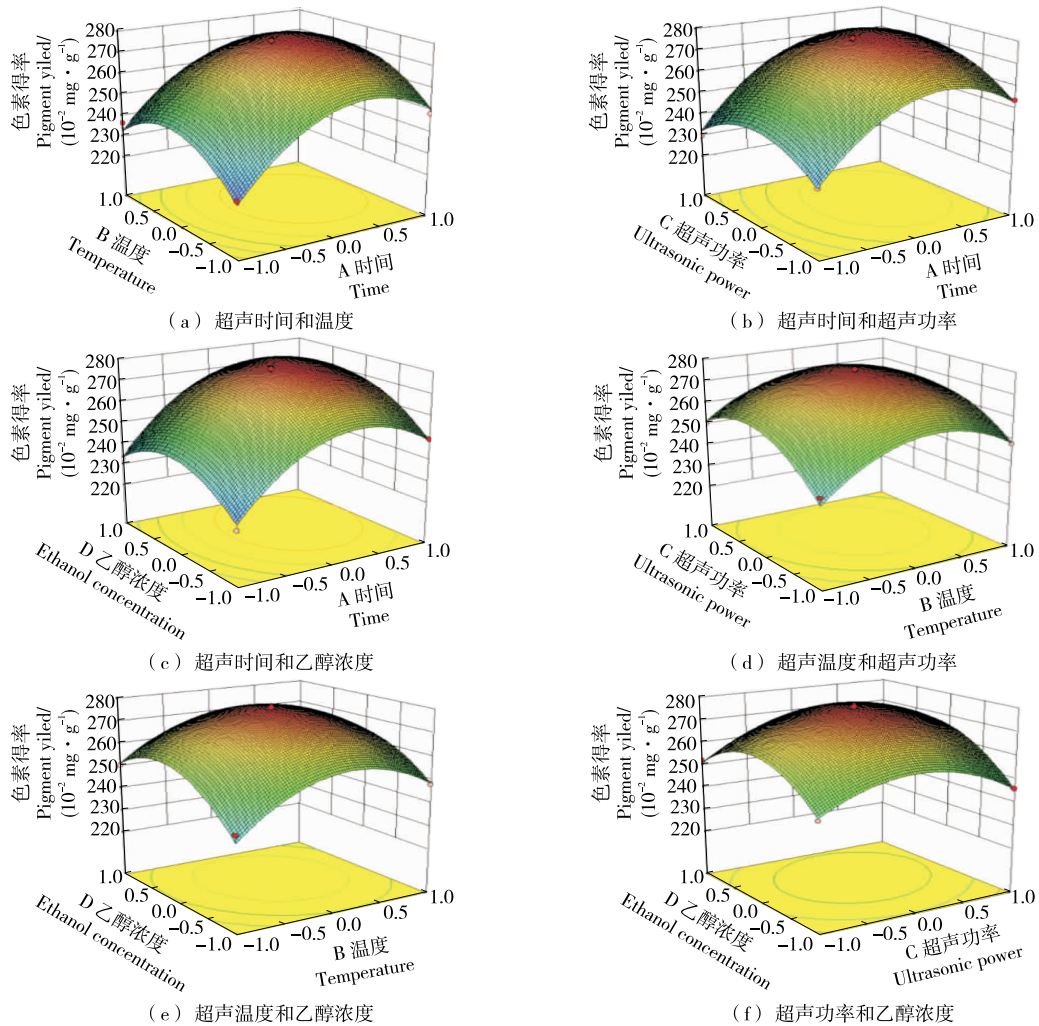


图3 各因素交互作用对火龙果果肉色素得率的影响

Figure 3 The interaction of various factors on pigment yield of pitaya pulp

出在稳定状态下最佳提取工艺参数为提取时间 34.27 min、提取温度 40.50 °C、超声功率 312.72 W、乙醇浓度 22.93%，此条件下，火龙果色素得率为 279.560 2 mg/100 g。考虑到实际操作及设备参数调整可行性，调整最优提取工艺参数为提取时间 34 min、提取温度 41 °C、超声功率 315 W、乙醇浓度 23%，此条件下采用酶—超声波同步辅助提取火龙果果肉色素 ( $n=3$ )，得到火龙果果肉色素得率为  $(278.660 4 \pm 1.084 2)$  mg/100 g，与预测值接近，说明优化结果可行。

### 3 结论

以红色火龙果果皮、果肉冻干样为原料，采用四因素三水平响应面分析法对纤维素酶—超声波辅助乙醇提取火龙果果皮、果肉色素进行优化，得到红色火龙果果皮色素提取的最优工艺为料液比 1 : 200 (g/mL)、pH 5.0、乙醇浓度 23%、纤维素酶 0.7 mL (2 133 U/mL)、超声时间

24 min、超声温度 39 °C、超声功率 325 W，此条件下火龙果色素得率为  $(81.661 3 \pm 0.762 0)$  mg/100 g；红色火龙果果肉色素提取的最优工艺条件为料液比 1 : 200 (g/mL)、pH 5.0、乙醇浓度 23%、纤维素酶 0.5 mL (2 133 U/mL)、超声时间 34 min、超声温度 41 °C、超声功率 315 W，此条件下火龙果色素得率为  $(278.660 4 \pm 1.084 2)$  mg/100 g。红色火龙果果肉色素明显高于果皮，是工业化提取色素的优质原料，但果皮是火龙果食用后的废弃物，提取色素也是其综合利用的有效途径之一。纤维素酶—超声波辅助乙醇提取火龙果色素具有条件温和、处理时间短、提取物食用安全性高和提取率高等特点，优于高治平等<sup>[24]</sup>、王娅玲等<sup>[19]</sup>采用的超声波辅助乙醇提取法和陈艳红等<sup>[25]</sup>采用的微波提取工艺。但其工业化应用还有待于进一步完善。

## 参考文献

- [1] 许伟东, 廖剑锹, 刘加健. 龙果引种初报[J]. 中国南方果树, 2002, 31(1): 33-34.
- [2] 赵志平, 杨春霞. 火龙果的开发与发展前景[J]. 中国种业, 2006, 24(2): 13-14.
- [3] 申世辉, 马玉华, 蔡永强. 火龙果研究进展[J]. 中国热带农业, 2015, 62(1): 48-51
- [4] 吴修仁. 广东药用植物简编[M]. 广州: 广东教育出版社, 1992: 306.
- [5] CAI Yi-zhong, SUN Mei, HAROLD C. Identification and distribution of simple and acylated betacyanins in the Amaranthaceae[J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(4): 1 971-1 976.
- [6] 陈冠林, 邓晓婷, 胡坤, 等. 火龙果的营养价值、生物学活性及其开发应用[J]. 现代预防医学, 2013, 4(11): 2 030-2 033.
- [7] CAI Yi-zhong, SUN Mei, HAROLD C. Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(8): 2 288-2 294.
- [8] STINTZING F C, ANDREAS S. Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, *Hylocereus polyrhizus*(Weber) Britton & Rose[J]. Food Chemistry, 2002, 77(1): 101-106.
- [9] HERBACH K M, STINTZING F C, CARLE R. Betalain stability and degradation: Structural and chromatic aspects[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(4): 41-50.
- [10] STRACK D, VOGT T, SCHLIEMANN W. Recent advances in betalain research[J]. Phytochemistry, 2003, 62(3): 247-269.
- [11] 张玉霜, 许庆轩, 李红侠, 等. 甜菜色素种类分布和应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 149-156.
- [12] 段晓嫣, 田艳, 邓放明. 火龙果色素生物活性及其提取纯化研究进展[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 214-219.
- [13] 宋珊珊, 谭沙, 蔡国跃, 等. 火龙果果皮色素提取工艺及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 121-125.
- [14] 周俊良, 沈佳奇, 韩秀梅, 等. 提取火龙果果皮色素主要工艺的比较研究[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(1): 110-114.
- [15] 刘东红. 液态食品超声传播特性及品质超声检测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 35-39.
- [16] 谷勋刚. 超声波辅助提取新技术及其分析应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 17-26.
- [17] CHENDKE P K, FOGLER H S. Macrosonics in industry: 4 Chemicalprocessing [J]. Ultrasonics, 1975, 13(1): 431-37.
- [18] GONG Cui-ling, HART D P. Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(5): 2 675-2 682.
- [19] 王娅玲, 李维峰, 曹海燕. 超声辅助提取火龙果果皮色素的研究[J]. 云南化工, 2015, 42(2): 14-17.
- [20] 杨晓伟, 薛红玮, 牟德华. 酿酒葡萄皮渣中花色苷提取工艺的优化[J]. 食品与机械, 2009, 25(2): 130-132.
- [21] 张慢, 潘丽军, 姜绍通, 等. 响应面法优化酶—超声波辅助同步提取紫薯花青素工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 23-28.
- [22] 张飞, 岳田利, 费坚, 等. 果胶酶活力的测定方法研究[J]. 西北农业学报, 2004, 13(4): 134-137.
- [23] 王小敏, 吴文龙, 闫连飞, 等. 分光光度计法测定果胶酶活力的方法研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(5): 227-229.
- [24] 高治平, 丁岚, 刘映, 等. 正交实验优化火龙果果皮红色素超声辅助醇提工艺[J]. 应用化工, 2015, 44(12): 2 199-2 201.
- [25] 陈艳红, 陈慧蓉, 李爱贞, 等. 火龙果果皮红色素的微波提取工艺及其应用[J]. 激光生物学报, 2013, 22(2): 185-191.
- [16] LAN Wei-qing, CHE Xu, XU Qiao-ling, et al. Effect of slurry ice made with Ginkgo biloba leaf extract or BambooVinegar on the quality of Pomfret(*Pampus argenteus*) during ice storage[J]. Food Science, 2017, 18(3): 30-37.
- [17] 周宏. 肉品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 76-116.
- [18] 高昕, 韩芳, 许加超, 等. 微冻贮藏条件下鲈鲜度和质构变化[J]. 水产学报, 2010, 34(8): 1 294-1 302.
- [19] 岑剑伟. 冰温气调结合高压静电场对罗非鱼片保鲜及其机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 20-21.
- [20] FUKUMA Y, YAMANE A, ITOHT, et al. Application of supercooling to long-term storage of fish meat[J]. Fisheries Science, 2012, 78(2): 451-461.
- [21] 郭全友, 许钟, 杨宪时. 冷藏养殖大黄鱼品质变化特征及细菌相分析[J]. 上海海洋大学学报, 2006, 15(2): 216-221.
- [22] 蓝蔚青, 谢晶, 周会, 等. 不同时期鲟鱼冷藏期间优势腐败菌的多样性变化[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 226-231.
- [23] 郭学骞, 冯爱国, 熊铭, 等. 速冻温度对罗非鱼片品质的影响[J]. 渔业现代化, 2017, 44(3): 59-64.
- [24] AUBOURG S P, LAGO H, SAYAR N, et al. Lipid damage during frozen storage of Gadiform species captured in different seasons[J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2010, 109(6): 608-616.
- [25] 鲁耀彬, 熊光权, 李新, 等. 葡聚糖延缓草鱼肌原纤维蛋白冷冻变性的机理分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 289-294.
- [26] 袁丽, 纪秀, 石彤, 等. 拉曼光谱法分析凡纳滨对虾冻藏过程蛋白质与水分结构变化[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 202-207.

(上接第 140 页)