

DOI:10.3969/j.issn.1672-5425.2022.04.007

侯敏娜,侯少平,王泽坤,等.响应面法优化红薯叶多酚超声辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J].化学与生物工程,2022,39(4):33-39.

HOU M N, HOU S P, WANG Z K, et al. Optimization in ultrasonic-assisted extraction process of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves by response surface methodology and their antioxidant activity[J]. Chemistry & Bioengineering, 2022, 39(4): 33-39.

## 响应面法优化红薯叶多酚超声辅助提取工艺 及其抗氧化活性研究

侯敏娜,侯少平,王泽坤,赖普辉\*  
(陕西国际商贸学院,陕西 咸阳 712046)

**摘 要:**以红薯叶多酚提取率为评价指标,以提取温度、乙醇体积分数、料液比、提取时间为考察因素,在单因素实验的基础上,采用响应面法优化红薯叶多酚的超声辅助提取工艺,并通过测定红薯叶多酚对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除能力,评价其抗氧化活性。确定红薯叶多酚的最佳提取工艺为:提取温度 61 ℃、乙醇体积分数 72%、料液比 1 : 21(g : mL)、提取时间 33 min,在此条件下,红薯叶多酚提取率为 0.9066%,与理论值 0.91006% 接近。红薯叶多酚具有一定的抗氧化活性,但在实验浓度范围内,其对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除率均低于 VC。

**关键词:**红薯叶;多酚;响应面法;超声辅助提取工艺;抗氧化活性

**中图分类号:**O629.12 R284.2

### Optimization in Ultrasonic-Assisted Extraction Process of Polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. Leaves by Response Surface Methodology and Their Antioxidant Activity

HOU Minna, HOU Shaoping, WANG Zekun, LAI Puhui\*

(Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang 712046, China)

**Abstract:** Using the extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves as an evaluation index, and extraction temperature, ethanol volume fraction, solid-liquid ratio, and extraction time as evaluation factors, we optimized the ultrasonic-assisted extraction process of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves by response surface methodologies on the basis of single-factor experiments. Moreover, we evaluated the antioxidant activity of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves by investigating their scavenging abilities against DPPH free radicals and ABTS free radicals. The optimal extraction conditions can be determined as follows: the extraction temperature of 61 ℃, the ethanol volume fraction of 72%, the solid-liquid ratio of 1 : 21(g : mL), and the extraction time of 33 min. Under above conditions, the extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves can reach 0.9066%, which is close to the theoretical value of 0.91006%. Polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves have certain antioxidant activity, but the scavenging rates of DPPH free radicals and ABTS free radicals by polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves are lower than those by VC in the experimental concentration range.

**基金项目:**科技部重大新药创制科技重大专项(2018ZX09721005-009-013),陕西省科技厅项目(2020SF-323),陕西国际商贸学院中药质量标志物创新团队项目(SSY18TD02),陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202013123043, S202013123037)

**收稿日期:**2021-09-17

**作者简介:**侯敏娜(1981—),女,陕西咸阳人,副教授,主要从事中药药效物质基础的研究,E-mail:276149134@qq.com;通讯作者:赖普辉(1960—),男,陕西汉中,教授,主要从事天然药物活性成分研究,E-mail:471601688@qq.com。

**Keywords:** *Ipomoea batatas* Lam. leaf; polyphenols; response surface methodology; ultrasonic-assisted extraction process; antioxidant activity

红薯(*Ipomoea batatas* Lam.)又称甘薯、番薯、红苕、地瓜等,属于旋花科番薯属草本植物,在我国各地都有种植<sup>[1-2]</sup>。研究表明,红薯叶中含有黄酮类、多酚类及类胡萝卜素等多种成分,具有降低胆固醇、防止血管脂质沉积、防止动脉硬化、降血糖、抗氧化、抗肿瘤、促进新陈代谢等药理作用,是一种优质的天然食品<sup>[3-6]</sup>。我国是世界上红薯种植面积最大的国家,红薯叶资源十分丰富,除少量红薯叶作为蔬菜食用外,大多被丢弃或用作家畜饲料,造成巨大的资源浪费。因此,加强对红薯叶资源的开发利用,具有重要的经济效益和社会效益。作者采用超声辅助法提取红薯叶多酚,以红薯叶多酚提取率为评价指标,以提取温度、乙醇体积分数、料液比、提取时间为考察因素,在单因素实验的基础上,采用响应面法<sup>[7-8]</sup>优化红薯叶多酚的超声辅助提取工艺,并通过测定红薯叶多酚对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除能力,评价其抗氧化活性。

## 1 实验

### 1.1 材料、试剂与仪器

红薯叶,2020年9月采摘于陕西省咸阳市乾县,品种为济薯25号,经陕西国际商贸学院中药学教研室雷国莲教授鉴定为旋花科番薯属植物红薯(*Ipomoea batatas* Lam.)的干燥叶。

没食子酸标准品(批号110831-201906),中国食品药品检定研究院;DPPH(批号S18M11M109858)、ABTS(批号C10947528),上海麦克林生物科技有限公司;福林酚,上海荔达生物科技有限公司;乙醇,成都科隆化学有限公司;无水碳酸钠,天津天力化学试剂有限公司;实验所用试剂均为分析纯。

TU-1810型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;CP225D型电子分析天平,赛多利斯;KQ5200DE型数控超声波提取仪,昆山超声仪器有限公司;FW100型高速万能粉碎机,北京科伟永兴仪器有限公司;HG-9075L型立式鼓风干燥箱,北京亚太科隆技术有限公司。

### 1.2 红薯叶多酚的提取

将晒干的红薯叶除去茎和叶柄后于粉碎机中粉碎,置于干燥阴凉处保存<sup>[7]</sup>。称取红薯叶粉末1.0 g,置于100 mL锥形瓶中,按一定料液比加入一定体积分数的乙醇,超声一定时间,过滤,收集滤液,即为红薯叶多酚提取液。

### 1.3 红薯叶多酚提取率的测定

#### 1.3.1 没食子酸标准曲线的绘制<sup>[8-11]</sup>

准确称取5 mg干燥的没食子酸标准品,用纯化水制成浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的没食子酸标准溶液。分别移取没食子酸标准溶液0.2 mL、0.4 mL、0.6 mL、0.8 mL、1.0 mL于10 mL容量瓶中,加入1 mL福林酚溶液和2 mL碳酸钠溶液,用纯化水定容至刻度,避光反应1 h,以纯化水为空白,测定765 nm处吸光度。以没食子酸浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线(图1),拟合得线性回归方程为: $y = 0.836x + 0.0624$ ,  $R^2 = 0.9967$ 。

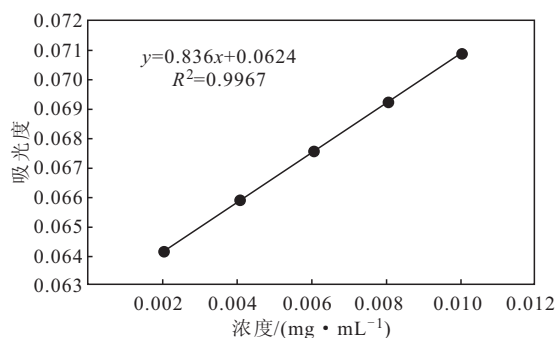


图1 没食子酸标准曲线

Fig. 1 Standard curve of gallic acid

#### 1.3.2 多酚提取率的测定

移取1 mL红薯叶多酚提取液,置于10 mL容量瓶中,用乙醇定容至刻度,按1.3.1测定吸光度,按式(1)计算多酚提取率:

$$\text{多酚提取率} = \frac{c \times V \times n}{1000 \times m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $c$ 为经标准曲线方程计算得到的多酚浓度, $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ;  $V$ 为提取液体积,mL;  $n$ 为稀释倍数;  $m$ 为红薯叶粉末质量,g。

### 1.4 提取工艺优化

采用单因素实验,考察乙醇体积分数(50%、60%、70%、80%、90%)、料液比(1:10、1:15、1:20、1:25、1:30,g:mL,下同)、提取温度(40℃、50℃、60℃、70℃、80℃)、提取时间(30 min、35 min、40 min、45 min、50 min)对红薯叶多酚提取率的影响。

在单因素实验的基础上,以红薯叶多酚提取率为评价指标,以提取温度、乙醇体积分数、料液比、提取时间为自变量,利用Design-Expert 8.0.6软件进行4因素3水平响应面实验设计,以进一步优化红薯叶多酚

的超声辅助提取工艺。

### 1.5 抗氧化活性评价<sup>[9-12]</sup>

#### 1.5.1 红薯叶多酚对 DPPH 自由基清除率的测定

分别配制浓度为  $4 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $8 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $12 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $16 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $20 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的红薯叶多酚溶液和 VC 对照溶液。准确移取各浓度待测溶液 2 mL, 加入 DPPH 自由基溶液 2 mL, 摇匀, 暗处反应 1 h, 测定 517 nm 处吸光度, 按式(2)计算 DPPH 自由基清除率:

$$\text{DPPH 自由基清除率} = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $A_0$  为 2 mL DPPH 自由基溶液 + 2 mL 72% 乙醇的吸光度;  $A_1$  为 2 mL DPPH 自由基溶液 + 2 mL 待测溶液的吸光度;  $A_2$  为 2 mL 72% 乙醇 + 2 mL 待测溶液的吸光度。

#### 1.5.2 红薯叶多酚对 ABTS 自由基清除率的测定

参考文献<sup>[10,12]</sup>方法测定 734 nm 处吸光度, 按式(3)计算 ABTS 自由基清除率:

$$\text{ABTS 自由基清除率} = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $A_0$  为 2 mL ABTS 自由基溶液 + 2 mL 72% 乙醇的吸光度;  $A_1$  为 2 mL ABTS 自由基溶液 + 2 mL 待测溶液的吸光度;  $A_2$  为 2 mL 72% 乙醇 + 2 mL 待测溶液的吸光度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素实验结果

#### 2.1.1 乙醇体积分数的选择

在料液比为 1:25、提取时间为 30 min、提取温度为 60 °C 的条件下, 考察乙醇体积分数对红薯叶多酚提取率的影响, 结果见图 2。

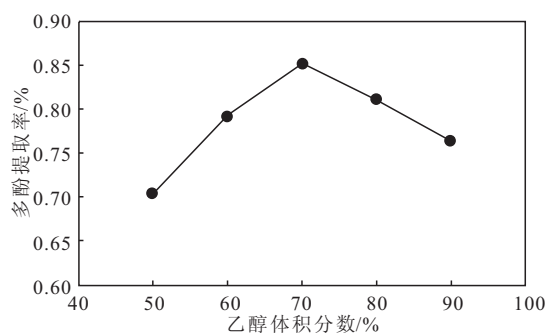


图2 乙醇体积分数对红薯叶多酚提取率的影响

Fig. 2 Effect of ethanol volume fraction on extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves

由图 2 可知, 随着乙醇体积分数的增大, 红薯叶多酚提取率先升高后降低, 当乙醇体积分数为 70% 时,

多酚提取率达到最高。这是因为, 乙醇体积分数过小时, 溶剂极性较大, 而多酚不易溶于强极性溶剂, 导致多酚提取率较低; 乙醇体积分数过大时, 溶剂极性变小, 多酚也不易溶于弱极性溶剂, 且会引入较多弱极性杂质, 导致多酚提取率下降。故选择乙醇体积分数 70% 作为响应面实验的中心点。

#### 2.1.2 料液比的选择

在乙醇体积分数为 70%、提取时间为 30 min、提取温度为 60 °C 的条件下, 考察料液比对红薯叶多酚提取率的影响, 结果见图 3。

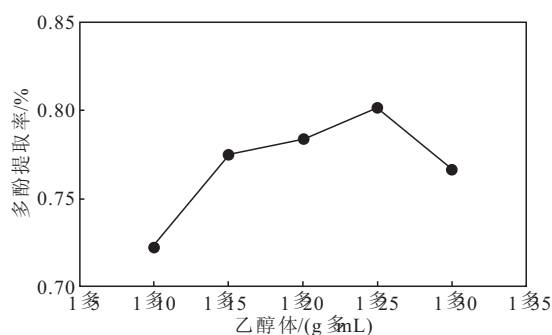


图3 料液比对红薯叶多酚提取率的影响

Fig. 3 Effect of solid-liquid ratio on extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves

由图 3 可知, 随着料液比的减小, 即溶剂用量的增加, 红薯叶多酚提取率先逐渐升高而后降低, 当料液比为 1:25 时, 多酚提取率达到最高。这是因为, 当料液比为 1:25 时, 大部分目标成分已从红薯叶中溶出, 达到动态平衡即饱和状态, 再增加溶剂用量, 反而会引入更多的杂质, 使得后续过滤、纯化工序不但难度加大, 还会将目标成分包裹在内而除掉, 导致多酚提取率降低。故选择料液比 1:25 作为响应面实验的中心点。

#### 2.1.3 提取温度的选择

在料液比为 1:25、乙醇体积分数为 70%、提取时间为 30 min 的条件下, 考察提取温度对红薯叶多酚提取率的影响, 结果见图 4。

由图 4 可知, 随着提取温度的升高, 红薯叶多酚提取率先升高后降低, 当提取温度为 60 °C 时, 多酚提取率达到最高。可能是由于, 提取温度过低时提取程度不够; 但是提取温度过高时, 会导致红薯叶多酚分解, 多酚提取率降低。故选择提取温度 60 °C 作为响应面实验的中心点。

#### 2.1.4 提取时间的选择

在料液比为 1:25、乙醇体积分数为 70%、提取温度为 60 °C 的条件下, 考察提取时间对红薯叶多酚提取率的影响, 结果见图 5。

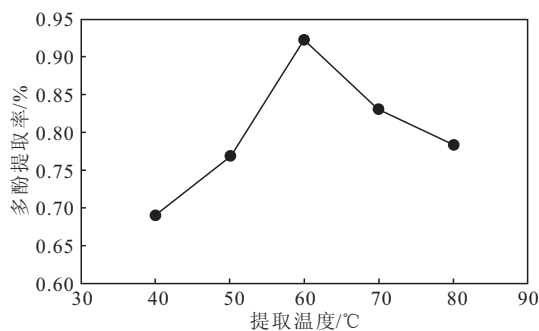


图4 提取温度对红薯叶多酚提取率的影响

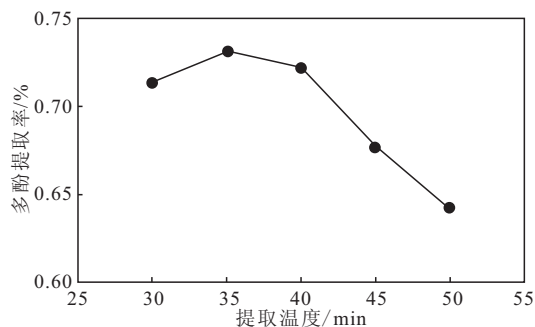
Fig. 4 Effect of extraction temperature on extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves

图5 提取时间对红薯叶多酚提取率的影响

Fig. 5 Effect of extraction time on extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves

由图5可知,随着提取时间的延长,红薯叶多酚提取率先缓慢升高而后急剧降低,当提取时间为35 min时,多酚提取率达到最高。故选择提取时间35 min作为响应面实验的中心点。

## 2.2 响应面实验结果

### 2.2.1 响应面实验设计及结果(表1)

### 2.2.2 回归模型的建立与方差分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对实验结果进行分析,得到多元回归方程: $Y=0.90-(5.500E-003)A+0.012B-0.018C-(8.750E-003)D+0.025AB-(5.500E-003)AC+(4.250E-003)AD+0.014BC-0.021BD+0.034CD-0.012A^2-0.028B^2-0.018C^2-0.055D^2$ 。

回归模型的方差分析见表2。

由表2可知,模型的 $P<0.0001$ ,呈高度显著性;失拟项 $F=0.16$ , $P=0.9919$ ,不显著。表明预测的实验结果与实际相吻合,说明该模型可用于优化红薯叶多酚提取工艺。模型精度较好,局部调整比例( $R_{adj}^2$ )为0.9599,表明模型与响应值95.99%一致,可以解释95.99%响应值的变化;变异系数(CV)为92%,说明该模型设计与主要实验结果相关,且基本保持一致。

表1 响应面实验设计及结果

Tab. 1 Design and results of response surface methodologies

| 序号 | A. 提取温度 | B. 乙醇体积分数 | C. 料液比 | D. 提取时间 | Y. 多酚提取率 |
|----|---------|-----------|--------|---------|----------|
|    | °C      | %         | g : mL | min     | %        |
| 1  | 60      | 70        | 1 : 25 | 35      | 0.788462 |
| 2  | 60      | 70        | 1 : 30 | 30      | 0.942308 |
| 3  | 60      | 80        | 1 : 25 | 40      | 0.807692 |
| 4  | 70      | 60        | 1 : 25 | 35      | 0.721154 |
| 5  | 70      | 70        | 1 : 25 | 30      | 1.000000 |
| 6  | 70      | 80        | 1 : 25 | 35      | 0.826923 |
| 7  | 60      | 70        | 1 : 25 | 35      | 0.759615 |
| 8  | 60      | 80        | 1 : 30 | 35      | 0.971154 |
| 9  | 60      | 70        | 1 : 25 | 35      | 0.903846 |
| 10 | 50      | 70        | 1 : 30 | 35      | 0.730769 |
| 11 | 50      | 70        | 1 : 25 | 30      | 0.894231 |
| 12 | 70      | 70        | 1 : 20 | 35      | 0.836538 |
| 13 | 70      | 70        | 1 : 30 | 35      | 0.740385 |
| 14 | 60      | 80        | 1 : 20 | 35      | 0.951923 |
| 15 | 60      | 60        | 1 : 25 | 30      | 0.884615 |
| 16 | 60      | 70        | 1 : 30 | 40      | 0.923077 |
| 17 | 70      | 70        | 1 : 25 | 40      | 0.923077 |
| 18 | 60      | 70        | 1 : 20 | 40      | 0.894231 |
| 19 | 60      | 70        | 1 : 25 | 35      | 0.730769 |
| 20 | 60      | 60        | 1 : 25 | 40      | 0.769231 |
| 21 | 60      | 70        | 1 : 20 | 30      | 0.980769 |
| 22 | 60      | 70        | 1 : 25 | 35      | 0.692308 |
| 23 | 50      | 60        | 1 : 25 | 35      | 0.836538 |
| 24 | 50      | 70        | 1 : 20 | 35      | 0.788462 |
| 25 | 60      | 60        | 1 : 20 | 35      | 0.855769 |
| 26 | 50      | 80        | 1 : 25 | 35      | 0.798077 |
| 27 | 50      | 70        | 1 : 25 | 40      | 0.711538 |
| 28 | 60      | 80        | 1 : 25 | 30      | 0.979986 |
| 29 | 60      | 60        | 1 : 30 | 35      | 0.730769 |

其中,一次项A、B、C、D对红薯叶多酚提取率的影响显著;交互项AB、BC、BD、CD,二次项 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$ 对红薯叶多酚提取率的影响极显著。从F值可知,4个因素对红薯叶多酚提取率的影响大小依次为:C(料液比)>B(乙醇体积分数)>D(提取时间)>A(提取温度)。

### 2.2.3 响应面分析

各因素交互作用对红薯叶多酚提取率影响的响应面图如图6所示。

由图6可知:乙醇体积分数的曲线平缓(图6a),变化幅度不大,说明乙醇体积分数对多酚提取率的影



表 2  
Tab. 2 方差分析  
Analysis of variance

| 来源             | 平方和        | 自由度 | 均方         | F 值    | P 值     | 显著性 |
|----------------|------------|-----|------------|--------|---------|-----|
| 模型             | 0.039      | 14  | 2.763E-003 | 44.33  | <0.0001 | *** |
| A              | 3.630E-004 | 1   | 3.630E-004 | 5.82   | 0.0301  | *   |
| B              | 1.801E-003 | 1   | 1.801E-003 | 28.89  | <0.0001 | *** |
| C              | 3.745E-003 | 1   | 3.745E-003 | 60.09  | <0.0001 | *** |
| D              | 9.188E-004 | 1   | 9.188E-004 | 14.74  | 0.0018  | **  |
| AB             | 2.550E-003 | 1   | 2.550E-003 | 40.92  | <0.0001 | *** |
| AC             | 1.210E-004 | 1   | 1.210E-004 | 1.94   | 0.1852  |     |
| AD             | 7.225E-005 | 1   | 7.225E-005 | 1.16   | 0.2998  |     |
| BC             | 8.123E-004 | 1   | 8.123E-004 | 13.03  | 0.0028  | **  |
| BD             | 1.806E-003 | 1   | 1.806E-003 | 28.98  | <0.0001 | *** |
| CD             | 4.556E-003 | 1   | 4.556E-003 | 73.10  | <0.0001 | *** |
| A <sup>2</sup> | 8.867E-004 | 1   | 8.867E-004 | 14.23  | 0.0021  | **  |
| B <sup>2</sup> | 5.110E-003 | 1   | 5.110E-003 | 81.98  | <0.0001 | *** |
| C <sup>2</sup> | 2.030E-003 | 1   | 2.030E-003 | 32.58  | <0.0001 | *** |
| D <sup>2</sup> | 0.020      | 1   | 0.020      | 315.59 | <0.0001 | *** |
| 残差             | 8.726E-004 | 14  | 6.233E-005 |        |         |     |
| 失拟项            | 2.458E-004 | 10  | 2.458E-005 | 0.16   | 0.9919  |     |
| 纯误差            | 6.268E-004 | 4   | 1.567E-004 |        |         |     |
| 总变异            | 0.040      | 28  |            |        |         |     |

注:\*\*\*表示  $P < 0.001$ , 差异高度显著; \*\*表示  $P < 0.01$ , 差异极显著; \*表示  $P < 0.05$ , 差异显著。

响较弱,当升高提取温度时,多酚提取率降低,影响较为明显;提取温度与料液比的曲线比较平缓(图 6b),没有明显的升高或者降低,并且三维图接近于圆形,故对多酚提取率的影响不显著;提取时间的坡面较陡(图 6c),说明提取时间对多酚提取率的影响大于提取温度,与方差分析结果一致;乙醇体积分数与提取时间均对多酚提取率的影响很大(图 6e),这与方差分析中 BD 交互高度显著性相吻合;随着料液比的减小及提取时间的延长,多酚提取率均呈下降趋势,且幅度很大,提取时间的曲线不平滑(图 6f),说明对多酚提取率的影响显著。

综上,红薯叶多酚提取工艺各参数的适宜范围为:提取温度 58~62 °C、乙醇体积分数 70%~74%、料液比 1:(20~22)、提取时间 30~35 min。经软件分析得到红薯叶多酚的最佳提取工艺为:提取温度 60.97 °C、乙醇体积分分数 71.98%、料液比 1:21.17、提取时间 33.25 min,在此条件下,红薯叶多酚提取率可达 0.91006%。

### 2.3 工艺验证

考虑实际操作性,将红薯叶多酚的提取工艺调整为:提取温度 61 °C、乙醇体积分分数 72%、料液比 1:21

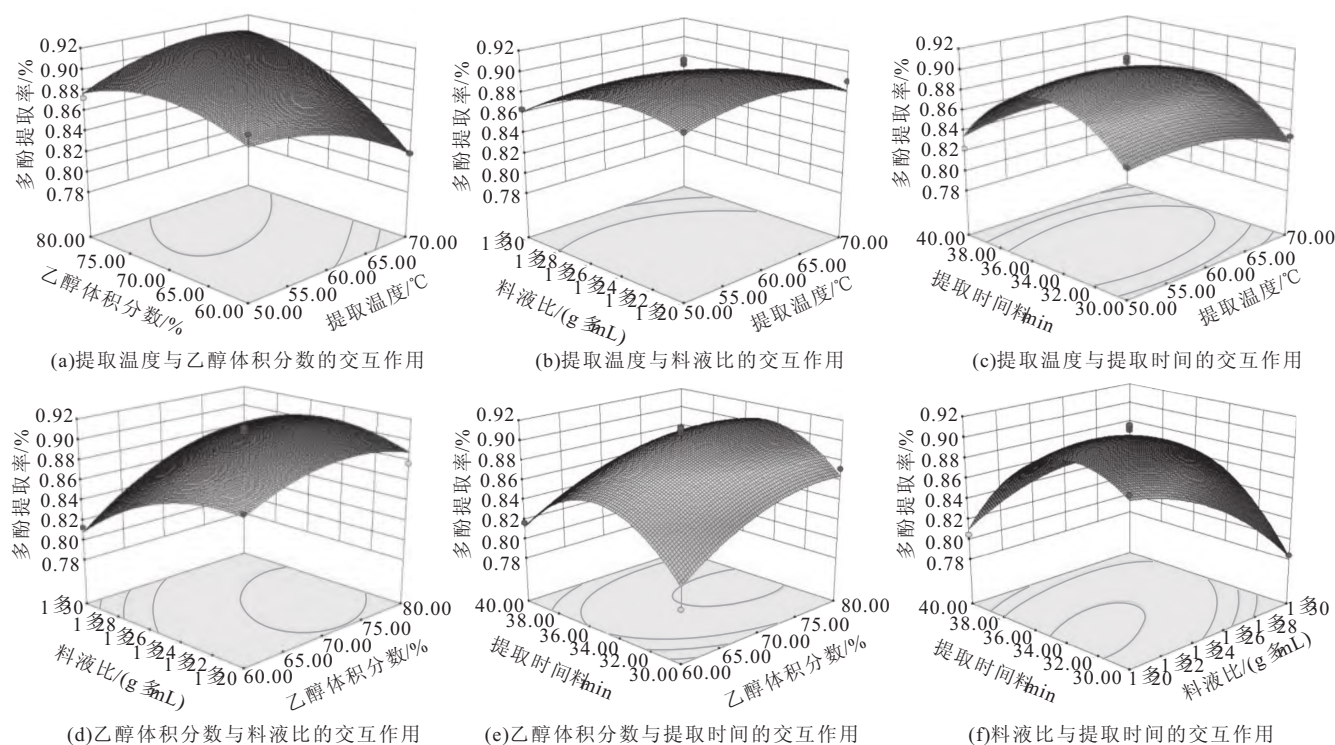


图 6 各因素交互作用对红薯叶多酚提取率影响的响应面图

Fig. 6 Response surface plots for effect of interaction between various factors on extraction rate of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves

(g : mL)、提取时间 33 min。在此条件下进行 3 次平行验证实验,红薯叶多酚提取率分别为:0.9081%、0.9072%、0.9048%,平均值为 0.9066%,与理论值 0.91006% 很接近。说明响应面法优化得到的提取工

艺可行。

## 2.4 抗氧化活性

红薯叶多酚对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除能力见图 7。

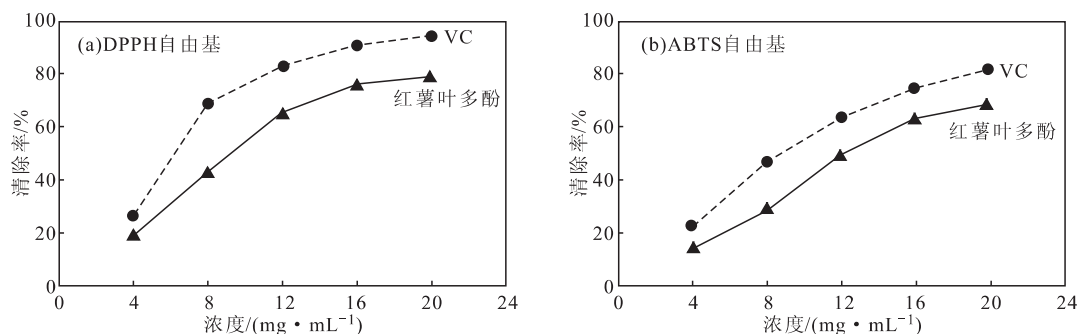


图 7 红薯叶多酚对 DPPH 自由基(a)、ABTS 自由基(b)的清除能力

Fig. 7 Scavenging ability of polyphenols from *Ipomoea batatas* Lam. leaves against DPPH free radicals(a) and ABTS free radicals(b)

由图 7 可知,随着红薯叶多酚和 VC 浓度的增大,两者对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除率均呈上升趋势,且 VC 的清除率始终大于红薯叶多酚的。当红薯叶多酚和 VC 的浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  时,两者对 DPPH 自由基的清除率分别为 78%、93%,对 ABTS 自由基的清除率分别为 69%、82%。说明红薯叶多酚对 DPPH 自由基和 ABTS 自由基有较强的清除能力,但均弱于 VC。

## 3 结论

以红薯叶多酚提取率为评价指标,以提取温度、乙醇体积分数、料液比、提取时间为考察因素,在单因素实验的基础上,采用响应面法优化红薯叶多酚的超声辅助提取工艺,并通过测定红薯叶多酚对 DPPH 自由基及 ABTS 自由基的清除能力,评价其抗氧化活性。确定红薯叶多酚的最佳提取工艺为:提取温度  $61^\circ\text{C}$ 、乙醇体积分数 72%、料液比 1 : 21(g : mL)、提取时间 33 min,在此条件下,红薯叶多酚提取率为 0.9066%,与理论值 0.91006% 接近。红薯叶多酚具有一定的抗氧化活性,但在实验浓度范围内,其对 DPPH 自由基及 ABTS 自由基的清除率均低于 VC。本研究为红薯叶资源的进一步开发利用提供了依据。

## 参考文献:

- [1] 黄盛蓝,张家豪,梁冰雪,等. 红薯叶应用价值及开发利用现状[J]. 现代农业科技,2014(19):309-311,313.
- [2] 张立明,王庆美,王荫嫔. 甘薯的主要营养成分和保健作用[J]. 中国食物与营养,2003(7):44-47.

ZHANG L M, WANG Q M, WANG Y C. Main nutritional com-

ponents of *Ipomoea batatas* and its healthy functions[J]. Food and Nutrition in China, 2003(7):44-47.

- [3] 傅志丰. 红薯叶多酚的溶剂提取、消化性及体内降血脂作用研究[D]. 南昌:南昌大学,2016.
- [4] 高荫榆,张戎,季玲. 红薯叶茎系统溶剂提取物抑菌作用研究[J]. 食品科学,2006,27(1):174-176.
- [5] 延永,李玉萌,张亦琳,等. 红薯叶总黄酮的提取工艺优化及其抑菌、抗氧化活性研究[J]. 广西林业科学,2018,47(3):311-315.
- [6] 刘捷,张体祥,于立芹,等. 红薯叶多糖的分离纯化及其结构鉴定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2010,31(5):46-50.
- [7] 张迎敏,任飞跃,屈展平,等. 超声和烫漂预处理对红薯叶热风干燥的影响[J]. 食品与机械,2019,35(12):194-201.
- [8] 李海平,高艳芳,姚宇,等. 响应面法优化超声辅助提取壶瓶枣多酚工艺研究[J]. 食品研究与开发,2019,40(6):139-144.

LI H P, GAO Y F, YAO Y, et al. The optimization of ultrasonic-assisted extraction of polyphenols from Huping jujube by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2019,

- 40(6):139-144.
- [9] 曹艳华,程丽丽,张小芳. 响应面法优化洋葱多酚的提取工艺及抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12):164-170.  
CAO Y H, CHENG L L, ZHANG X F. Study on extraction of polyphenol from onion by response surface methods and antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2020, 41(12):164-170.
- [10] 马金爽, 韦少铮, 王潇哲, 等. 蛋黄果多酚的提取工艺及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13):137-144.  
MA J S, WEI S Z, WANG X Z, et al. Extraction and antioxidant of polyphenols from *Pouteria campechiana* [J]. Food Research and Development, 2021, 42(13):137-144.
- [11] 闫旭宇, 李娟, 任潘, 等. 银杏叶多酚超声辅助提取工艺及其对羟自由基的清除作用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19):99-104.  
YAN X Y, LI J, REN P, et al. Optimization of polyphenols from *Ginkgo biloba* leaves by ultrasound-assisted extraction and its scavenging capacity on hydroxyl free radicals[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19):99-104.
- [12] 钟伟, 曹双, 郑必胜. 红薯叶不同极性溶剂提取物的体外抗氧化活性[J]. 食品工业, 2015, 36(4):207-209.  
ZHONG W, CAO S, ZHENG B S. Antioxidant activities of different solvent extracts from *Ipomoea batatas* leaves [J]. The Food Industry, 2015, 36(4):207-209.
- 
- (上接第5页)
- [40] SGROI M, ANUMOL T, VAGLIASINDI F G A, et al. Comparison of the new  $\text{Cl}_2/\text{O}_3/\text{UV}$  process with different ozone- and UV-based AOPs for wastewater treatment at pilot scale: removal of pharmaceuticals and changes in fluorescing organic matter[J]. Science of the Total Environment, 2021, 765:142720.
- [41] HASSANSHAHI N, KARIM-JASHNI A. Comparison of photo-Fenton,  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$  and photocatalytic processes for the treatment of gray water[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161:683-690.
- [42] SRITHEP S, PHATTARAPATTAMAWONG S. Kinetic removal of haloacetonitrile precursors by photo-based advanced oxidation processes( $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{UV}/\text{O}_3$ , and  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ ) [J]. Chemosphere, 2017, 176:25-31.
- [43] 宋武昌, 杜振齐, 李桂芳, 等.  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  高级氧化技术降解藻源 NDMA 前体物特性研究[J]. 给水排水, 2021, 47(5):27-33.  
SONG W C, DU Z Q, LI G F, et al. Degradation of NDMA precursors from algae by  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$  advanced oxidation technology[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5):27-33.
- [44] ACHARYA S M, CHAKRABORTY R, TRINGE S G. Emerging trends in biological treatment of wastewater from unconventional oil and gas extraction [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11:569019.
- [45] MIRNASAB M A, HASHEMI H, SAMAEI M R, et al. Advanced removal of water NOM by pre-ozonation, enhanced coagulation and bio-augmented granular activated carbon [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021, 18(3):3143-3152.
- [46] WANG X Y, XIA J H, DING S X, et al. Removing organic matters from reverse osmosis concentrate using advanced oxidation-biological activated carbon process combined with  $\text{Fe}^{3+}$ /humus-reducing bacteria [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 203:110945.
- [47] DU Z Q, JIA R B, LI C C, et al. Pilot-scale  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ -BAC process for drinking water treatment-analysis and comparison of different activated carbon columns [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382:123044.
- [48] TAK S, VELLANKI B P. Comparison of  $\text{O}_3$ -BAC,  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ -BAC, and  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ -BAC treatments for limiting the formation of disinfection byproducts during drinking water treatment in India[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5):104434.

## 版权声明

为适应我国信息化建设的需要,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已许可《中国学术期刊网络出版总库》、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社、中国知网(CNKI)系列数据库、《万方数据——数字化期刊群》、《中文科技期刊数据库(全文版)》、超星域出版平台等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意论文被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《化学与生物工程》编辑部