

莲藕多酚浸提工艺优化及其抗氧化活性研究

Study on extraction technology and antioxidant activity of polyphenols from lotus root

徐燕燕 孙杰 陈雅卉 王宏勋 闵婷 周敏

XU Yan-yan SUN Jie CHEN Ya-hui WANG Hong-xun MIN Ting HZOU Min

(武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023)

(College of Food Science & Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

摘要:采用匀浆法浸提莲藕中的多酚,以多酚提取得率和提取液 DPPH 自由基清除率为指标分别优化浸提工艺参数,并比较分析提取液的酚类物质组成及抗氧化活性。结果表明:以多酚提取得率为指标的优化工艺 A 参数为酸醇比 22 : 78 (V : V)、均质时间 6.8 min 和均质转速 10 500 r/min;而以提取液 DPPH 自由基清除率为指标优化所得工艺 B 参数为酸醇比 19 : 81 (V : V)、均质时间 8.6 min 和均质转速 9 100 r/min;各因素对多酚提取得率和 DPPH 自由基清除率的影响均为酸醇比 > 均质时间 > 均质转速;工艺 A 的多酚提取得率 (165.85 mg GAE/100 g · FW) 显著高于工艺 B ($P < 0.05$),其 DPPH 自由基清除 IC_{50} 值分别为 4.75, 6.83 $\mu\text{g GAE/mL}$ 。工艺 A 较适用于莲藕抗氧化活性多酚的提取制备。

关键词: 莲藕;多酚;匀浆浸提;组成;抗氧化

Abstract: To establish the extraction technology of polyphenols from lotus root, the polyphenol yield and DPPH free radical scavenging rate were investigated to optimize the technological parameters. Then, the polyphenol composition and antioxidant activity of extracts were comparatively analyzed. The parameters of technology A optimized by polyphenol extraction yield were as follows: volume ratio of hydrochloric acid to methanol was 22 : 78 (V : V), homogenization time was 6.8 min and homogenization speed was 10 500 r/min. Those of technology B optimized by DPPH free radical scavenging rate were as follows: volume ratio of hydrochloric acid to methanol was 19 : 81 (V : V), homogenization time was 8.6 min and homogenization speed was 9 100 r/min. The effects of experimental factors on polyphenol extraction yield and DPPH free radical scavenging rate could be both ordered as: hydrochloric acid to methanol > homoge-

nization time > homogenization speed. Technology A showed a higher extraction yield (165.85 mg GAE/100 g · FW) than technology B ($P < 0.05$), and their IC_{50} values of DPPH free radical scavenging were 4.75 and 6.83 $\mu\text{g GAE/mL}$, respectively. The results indicate that technology A better fits the extraction of antioxidant polyphenols from lotus root.

Keywords: lotus root; polyphenols; homogenization extraction; composition; antioxidant activity

莲藕 (*Nelumbo nucifera* G.) 是睡莲科莲属的肥大根茎,作为中国产量最高的水生蔬菜,其主要分布于湖北、湖南、浙江和广东等省^[1]。除了具备营养丰富、风味独特等品质外,莲藕的抗氧化功效尤引人注目。研究^[2-4]表明,莲藕在数十种常见蔬菜中表现出较强的抗氧化活性,且活性强弱与酚类物质含量成显著正相关。目前,莲藕产业主要依赖于传统加工方式,如藕汁、藕粉、盐渍藕和水煮藕等,并未充分发挥其资源特色。鉴于植物多酚在食品、医药和化妆品等领域的市场需求日益增加,多酚的提取开发有望成为莲藕精深加工的创新途径。

原料粒度对植物多酚提取率有显著影响^[5-7],高速匀浆法能通过强的机械和液力剪切作用将大颗粒鲜物料直接破碎,广泛应用于植物活性成分(如茶醌、生物碱和酚类物质)的提取制备,具有提取速度快、温度低、能耗低和目标物质得率高的特点^[8-10],但在莲藕多酚提取中的应用尚未见报道。莲藕中酚类物质主要为酚酸类和黄酮类极性分子,浸提溶剂有甲醇、乙醇和丙酮^[11-12],但已报道的莲藕功效成分多为甲醇提取物^[13-15]。另外,莲藕多酚浸提的适宜 pH 值为 2~3,酸性条件有利于抑制多酚氧化酶酶活、增强多酚稳定性、促进多酚的释放^[12,16]。故本研究拟选取酸性甲醇作为浸提溶剂,采用响应面法优化其高速匀浆浸提工艺参数,通过高效液相色谱法(HPLC)分析多酚提取物的单体酚组成,并进一步评价其抗氧化活性,以期对莲藕多酚的应用开发提供参考。

基金项目:湖北省科技支撑计划项目(编号:2015BBA203)

作者简介:徐燕燕,女,武汉轻工大学在读硕士研究生。

通讯作者:周敏(1976-),女,武汉轻工大学副教授,博士。

E-mail: mzhou268@163.com

收稿日期:2015-11-18

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜莲藕:武汉世林福幸科技发展有限公司;

没食子酸(Gallic acid)、水溶性维生素 E(Trolox)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):东京化成工业株式会社;

绿原酸、儿茶素、香豆酸、咖啡酸、表儿茶素、芦丁、白藜芦醇、槲皮素:美国 Sigma 公司;

乙腈和冰乙酸:色谱纯,美国 Fisher 公司;

福林酚试剂、甲醇、盐酸等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

高速分散器:XHF-D 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV-1800 型,日本岛津有限公司;

高效液相色谱仪:LC 1260 型,美国 Agilent 公司;

色谱柱:Extend-C₁₈(4.6 mm×250 mm,5 μm),美国 Agilent 公司;

粉碎机:HR2168 型,飞利浦公司。

1.2 莲藕多酚匀浆浸提方法

新鲜莲藕经洗净后切块,采用粉碎机粉碎至约 5~20 目,碎渣混匀后称取 8.0 g 置于烧杯中,加入一定料液比($m:V$)的 4℃预冷酸性甲醇溶剂(1 mol/L 盐酸与无水甲醇按一定体积比配制),在设定转速和时间下匀浆浸提。抽滤分离滤液,用少量酸性甲醇洗涤滤渣,收集滤液定容至 250 mL,混匀后分析多酚含量。

1.3 单因素试验

1.3.1 溶剂酸醇比对多酚提取效果的影响 分别采用酸醇比(1 mol/L HCl 与无水甲醇的体积比)5:95,10:90,15:85,20:80,25:75 的溶剂,在料液比 1:15($m:V$),均质时间 6 min,均质转速 8 000 r/min 条件下,研究溶剂酸醇比对多酚提取得率和 DPPH 自由基清除率的影响。

1.3.2 料液比对多酚提取效果的影响 分别采用 1:5,1:10,1:15,1:20,1:25($m:V$)的料液比,在酸醇比 15:85($V:V$),均质时间 6 min,均质转速 8 000 r/min 条件下,研究料液比对多酚提取得率和 DPPH 自由基清除率的影响。

1.3.3 均质时间对多酚提取效果的影响 分别采用 2,4,6,8,10 min 的均质时间,在酸醇比 15:85($V:V$),料液比 1:15($m:V$),均质转速 8 000 r/min 条件下,研究均质时间对多酚提取得率和 DPPH 自由基清除率的影响。

1.3.4 均质转速对多酚提取效果的影响 分别采用 4 000,6 000,8 000,10 000,12 000 r/min 的均质转速,在酸醇比 15:85($V:V$),料液比 1:15($m:V$),均质时间 6 min 条件下,研究均质转速对多酚提取得率和 DPPH 自由基清除率的影响。

1.4 响应面试验

在单因素试验的基础上,采用 Box-Behnken 中心组合设计开展三因素三水平试验,优化确定莲藕多酚的最佳浸提工艺条件,并加以验证。

1.5 分析方法

1.5.1 多酚测定 参照文献[17]。多酚提取得率以每 100 g 鲜样中所含没食子酸当量表示(mg GAE/100 g·FW)。

1.5.2 DPPH 自由基清除率测定 莲藕多酚提取液经甲醇梯度稀释后,取 50 μL 稀释样液加入 0.7 mL DPPH 溶液(100 μmol/L)混匀作为试验组,以甲醇代替稀释样液作为空白对照,另以甲醇代替 DPPH 溶液作为样液对照。混合液避光保存 30 min 后于 517 nm 处测定吸光值。DPPH 自由基清除率按式(1)计算:

$$S = (1 - \frac{A_s - A_c}{A_b}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

S——DPPH 自由基清除率,%;

A_s ——试验组吸光值;

A_c ——样品对照组吸光值;

A_b ——空白对照吸光值。

计算 DPPH 自由基清除率为 50%时的多酚浓度,即半数抑制浓度(IC_{50})值。

1.5.3 多酚组成分析 采用 HPLC 结合外标法。测定条件^[18]:流动相 A 为乙腈,B 为 0.4%冰乙酸;流速为 1.0 mL/min;柱温为 30℃;紫外检测器检测波长为 280 nm;进样量为 20 μL。线性梯度洗脱程序为:0~40 min,5%~25%流动相 A;40~50 min,25%~50%流动相 A;50~55 min,50%~5%流动相 A。配制浓度为 1 mg/mL 的没食子酸、绿原酸、儿茶素、香豆酸、咖啡酸、表儿茶素、芦丁、白藜芦醇和槲皮素的标准品甲醇溶液,-20℃保存备用。

1.6 数据处理

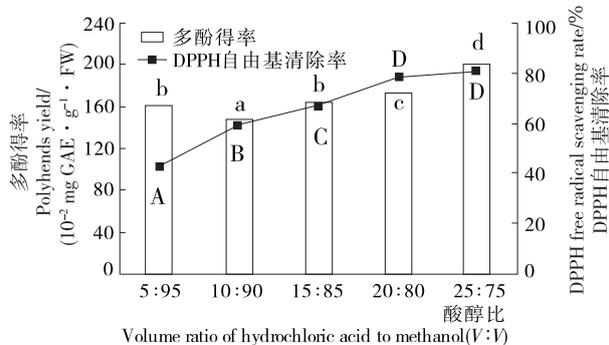
试验数据采用 SAS(V8)和 SPSS17.0 软件进行处理,响应面分析由 Rsreg Procedure 完成,响应曲面图由 Response Surface Design 完成。组间差异比较采用 S-N-K 检验完成,显著性水平为 $P < 0.05$,并以不同大写或小写字母表征组间差异。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

2.1.1 酸醇比对莲藕多酚提取得率及提取液清除 DPPH 自由基效果的影响 由图 1 可知,酸醇比值由 5:95($V:V$)增大至 10:90($V:V$)过程中,莲藕多酚提取得率显著降低($P < 0.05$),分析其原因可能是水体积比增大后蛋白质和多糖溶出量增加,同时因电荷作用发生沉淀,而沉淀过程中会结合部分多酚,故导致其提取得率降低。而随着酸醇比值逐渐增大,酸度增加有利于结合态多酚释放,其提取得率随之显著增加($P < 0.05$)。提取液的 DPPH 自由基清除率随着酸醇比值的增大而增大,但当酸醇比值达 20:80($V:V$)后清除率增加不显著($P > 0.05$)。由此确定莲藕多酚浸提溶剂酸醇比为 25:75($V:V$)。

2.1.2 料液比对莲藕多酚提取得率及提取液清除 DPPH 自由基效果的影响 由图 2 可知,莲藕多酚提取得率在料液比 1:5~1:15($m:V$)范围内无显著差异($P > 0.05$),但均显著高于料液比 1:20 和 1:25($m:V$)时的提取得率($P < 0.05$)。当料液比为 1:20($m:V$)时,莲藕多酚提取液的 DPPH

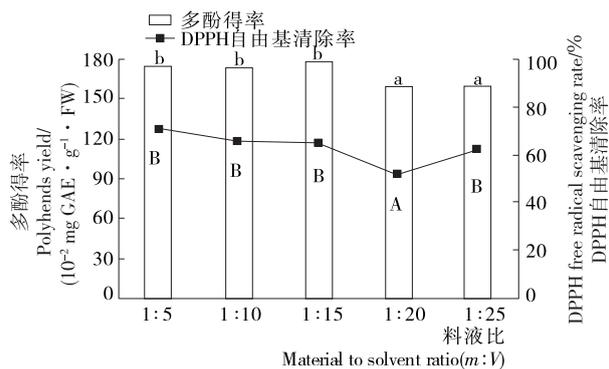


不同大、小写字母分别表示 0.05 水平的显著性差异

图 1 酸醇比对莲藕多酚提取得率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 1 Effect of volume ratio of hydrochloric acid to methanol on the extraction yield and DPPH free radical scavenging rate of lotus root polyphenols

自由基清除率最低,而其他料液比间的清除率无显著差异($P>0.05$)。溶剂添加量增大后,高速均质过程中物料所受的剪切作用变弱,导致多酚提取得率减少,同时提取液的自由基清除能力减弱。但当料液比达 1:25($m:V$)后,多酚溶出量虽无显著变化($P>0.05$),但其他抗氧化成分溶出量可能增加,从而导致自由基清除率增大。莲藕多酚提取的料液比介于 1:5~1:15($m:V$)为宜,但在此范围内的因素变化对多酚提取效果无显著影响,考虑到减少溶剂消耗以及其它因素水平调整后可能产生的多酚溶出量增加,固定莲藕多酚浸提的料液比为 1:10($m:V$)。

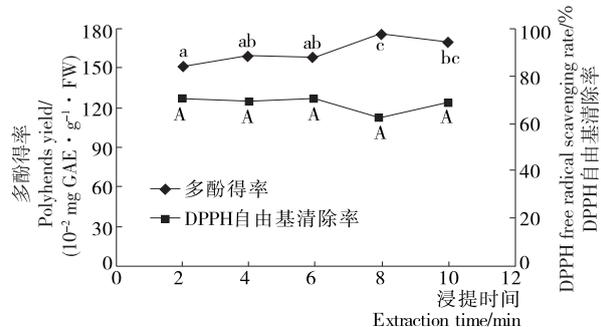


不同大、小写字母分别表示 0.05 水平的显著性差异

图 2 料液比对莲藕多酚提取得率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 2 Effect of material-to-solvent ratio on the extraction yield and DPPH free radical scavenging rate of lotus root polyphenols

2.1.3 均质时间对莲藕多酚提取得率及提取液清除 DPPH 自由基效果的影响 由图 3 可知,随着均质处理时间的延长,多酚提取得率逐渐增加,并在 8 min 时达最大。当时间超过 8 min 后,多酚提取得率呈现下降趋势,可能由于体系摩擦产生的聚热效应使热敏性的酚类物质部分降解。然而,多酚提取液的 DPPH 自由基清除率随均质时间的延长并未发生显著变化($P>0.05$)。确定莲藕多酚的均质浸提时间为 8 min。

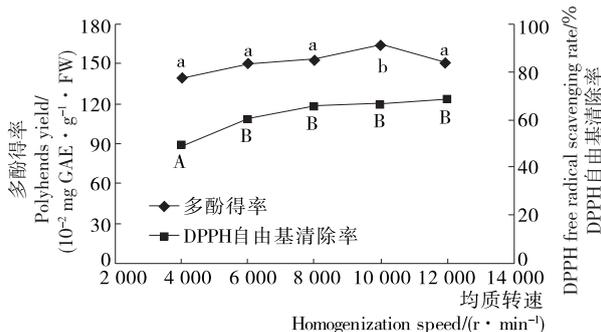


不同大、小写字母分别表示 0.05 水平的显著性差异

图 3 均质时间对莲藕多酚提取得率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 3 Effect of homogenization time on the extraction yield and DPPH free radical scavenging rate of lotus root polyphenols

2.1.4 均质转速对莲藕多酚提取得率及提取液清除 DPPH 自由基效果的影响 由图 4 可知,莲藕多酚提取得率在均质转速 10 000 r/min 时最大,并显著高于其他转速下的提取得率($P<0.05$)。均质转速越大,物料所受机械剪切作用越强,多酚提取效果越好,但转速过高所产生的摩擦热效应可能导致酚类物质降解。多酚提取液的 DPPH 自由基清除率随着均质转速的增加而增大,但转速在 6 000~12 000 r/min 的清除率无显著差异($P>0.05$)。莲藕多酚提取的均质转速以 10 000 r/min 为宜。



不同大、小写字母分别表示 0.05 水平的显著性差异

图 4 均质转速对莲藕多酚提取得率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 4 Effect of homogenization speed on the extraction yield and DPPH free radical scavenging rate of lotus root polyphenols

2.2 响应面试验结果

2.2.1 回归模型检验 在单因素试验的基础之上,采用响应面法设计优化莲藕多酚匀浆浸提工艺,试验因素及水平取值见表 1,试验设计与结果见表 2。

以酸醇比、均质时间和均质转速为试验因素,建立以莲藕多酚得率和提取液 DPPH 自由基清除率为考察指标的回归模型:

$$Y_1 = 158.79 + 5.69X_1 + 5.23X_2 + 2.95X_3 - 6.37X_1^2 - 1.02X_1X_2 + 2.87X_1X_3 - 5.82X_2^2 - 1.24X_2X_3 - 7.66X_3^2 \quad (1)$$

表1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of experiment designed by response surface methodology

编码	X ₁ 酸醇比 (V : V)	X ₂ 均质时间/ min	X ₃ 均质转速/ (r · min ⁻¹)
-1	15 : 85	4	8 000
0	20 : 80	6	10 000
1	25 : 75	8	12 000

表2 莲藕多酚浸提的响应面试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results of polyphenol extraction from lotus root

序列	X ₁	X ₂	X ₃	多酚得率 Y ₁ /%	DPPH 自由基 清除率 Y ₂ /%
1	-1	-1	0	132.99	65.53
2	-1	1	0	146.67	77.19
3	1	-1	0	148.57	74.72
4	1	1	0	158.17	77.76
5	0	-1	-1	136.93	64.26
6	0	-1	1	144.40	75.66
7	0	1	-1	148.70	74.53
8	0	1	1	151.20	73.69
9	-1	0	-1	139.61	70.73
10	1	0	-1	143.10	71.73
11	-1	0	1	140.68	64.96
12	1	0	1	155.66	79.75
13	0	0	0	157.74	77.00
14	0	0	0	159.17	77.57
15	0	0	0	159.46	78.57

$$Y_2 = 77.71 + 3.19X_1 + 2.88X_2 + 1.60X_3 - 2.08X_1^2 - 2.16X_1X_2 + 3.45X_1X_3 - 1.83X_2^2 - 3.06X_2X_3 - 3.84X_3^2 \quad (2)$$

方差分析结果表明(表3),多酚得率和 DPPH 自由基清除率的决定系数 R² 值分别为 98.51% 和 94.64%, 模型回归分别达极显著(P<0.01)和显著(P<0.05)水平。逐项显著性检验的结果显示:线性项和平方项对多酚得率和 DPPH 自由基清除率均有显著影响(P<0.05),而交互项仅对 DPPH 自由基清除率有显著影响(P<0.05);各因素对多酚提取率均有极显著影响(P<0.01),而仅酸醇比和均质时间对提取液的 DPPH 自由基清除能力有极显著影响(P<0.01),各因素对考察指标的影响均为酸醇比>均质时间>均质转速。酸醇比和均质转速对多酚得率和 DPPH 自由基清除能力均有显著交互影响(P<0.05),而均质浸提时间和均质转速对 DPPH 自由基清除能力有显著交互影响(P<0.05)。

2.2.2 最佳工艺条件的优化 采用 RSREG Procedure 分析莲藕多酚提取率和 DPPH 自由基清除率的回归模型分别得到一个极值点(X₁=0.47、X₂=0.38、X₃=0.25)和一个稳定点(X₁=-0.28、X₂=1.32、X₃=-0.44)。获得最大提取量的莲藕多酚浸提条件为:酸醇比 22.36 : 77.64(V : V),均质时间 6.76 min,均质转速 10 500 r/min。而获得最佳 DPPH

表3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance with regression model

方差来源	自由度	平方和		F 值		P 值	
		Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂
X ₁	1	259.35	81.60	84.15	20.86	0.000 3	0.006 0
X ₂	1	218.93	66.13	71.04	16.90	0.000 4	0.009 3
X ₃	1	69.62	20.51	22.59	5.24	0.005 1	0.070 7
X ₁ X ₁	1	149.70	15.94	48.57	4.08	0.000 9	0.099 5
X ₁ X ₂	1	4.16	18.58	1.35	4.75	0.297 7	0.081 2
X ₁ X ₃	1	33.01	47.54	10.71	12.15	0.022 1	0.017 5
X ₂ X ₂	1	125.17	12.44	40.62	3.18	0.001 4	0.134 7
X ₂ X ₃	1	6.18	37.45	2.00	9.57	0.216 1	0.027 0
X ₃ X ₃	1	216.65	54.53	70.30	13.94	0.000 4	0.013 5
线性	3	547.90	168.24	59.26	14.33	0.000 2	0.006 9
平方	3	427.42	73.78	46.23	6.29	0.000 5	0.037 8
交互	3	43.34	103.57	4.69	8.82	0.064 7	0.019 3
回归	9	1 018.66	345.58	36.72	9.82	0.000 5	0.010 8
失拟项	3	13.71	18.30	5.39	9.66	0.160 4	0.095 3
纯误差	2	1.70	1.26				
残差	5	15.41	19.56				
总离差	14	1 034.07	365.14				

自由基清除率的莲藕多酚浸提条件为:酸醇比 18.60 : 81.40 (V : V),均质时间 8.63 min,均质转速 91 116 r/min。为便于实际应用,将试验参数整化,确定两套莲藕多酚的均质浸提工艺。工艺 A:酸醇比 22 : 78(V : V)、均质时间 6.8 min,均质转速 10 500 r/min,多酚提取率的预测值为 161.5 mg GAE/100 g · FW,实际多酚提取率和 DPPH 自由基清除率分别为(165.85±5.47) mg GAE/100 g · FW 和(88.74±0.89)%;工艺 B:酸醇比 19 : 81(V : V)、均质时间 8.6 min,均质转速 9 100 r/min,DPPH 自由基清除率的预测值为 78.8%,实际多酚提取率和 DPPH 自由基清除率分别为(156.05±3.81) mg GAE/100 g · FW 和(88.78±0.31)%。莲藕多酚提取率的回归模型的拟合程度较高,同时预测结果也较为准确。工艺 A 的多酚提取率显著高于工艺 B(P<0.05),而两者的 DPPH 自由基清除率无显著差异(P>0.05)。

2.3 莲藕多酚提取液的 DPPH 自由基清除能力

莲藕经浸提工艺 A 和工艺 B 分别得到提取液 A 和提取液 B,提取液中多酚浓度与 DPPH 自由基清除率均呈指数相关,见图 5。提取液 A 的 IC₅₀ 值为 4.75 μg GAE/mL,而提取液 B 的 IC₅₀ 值为 6.83 μg GAE/mL。说明采用工艺 A(酸醇比 22 : 78(V : V)、均质时间 6.8 min 和均质转速 10 500 r/min)浸提得到的提取物的多酚含量较高,且 DPPH 自由基清除能力较强。

2.4 莲藕多酚提取液的组成分析

通过标准品比对(图 6)分析发现:在工艺 A 的浸提条件下,提取液中主要成分的保留时间为 7.069 min(未知物质),香豆酸含量小于 1 mg/100 g · FW;在工艺 B 的浸提条件下,提取液中主要成分的保留时间为 8.106 min(未知物质),没

食子酸提取量达 4.31 mg/100 g · FW, 而咖啡酸含量小于 1 mg/100 g · FW。由此说明, 不同浸提工艺条件下的多酚提取液的酚类物质组成存在显著差异, 并可能导致 DPPH 自由基清除能力有所差异。莲藕多酚组成分析结果与李清章等^[19]的研究报道有所差异, 可能因浸提溶剂的极性不同所致。

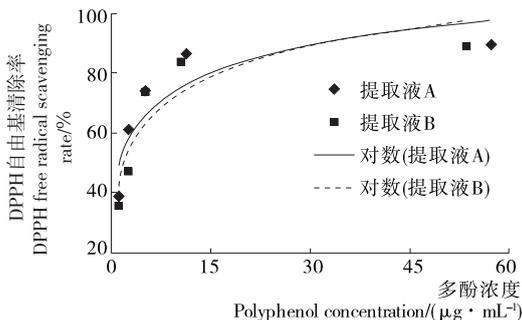


图 5 莲藕多酚提取液 DPPH 自由基清除能力
Figure 5 DPPH free radical scavenging abilities of polyphenol extracts of lotus root

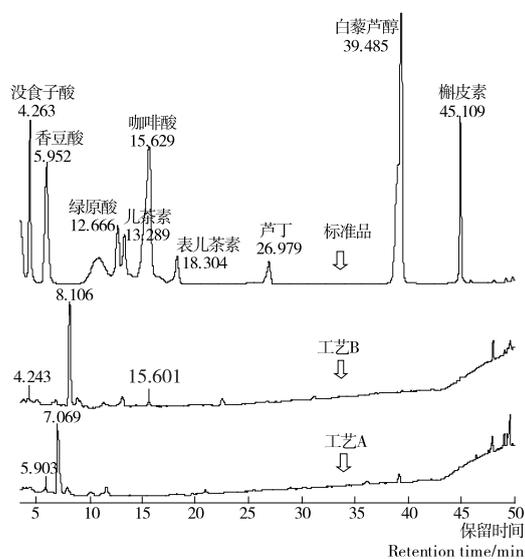


图 6 莲藕多酚提取液的 HPLC 图谱

Figure 6 HPLC spectrograms of polyphenol extracts of lotus root

3 结论

在单因素试验的基础之上, 采用响应面法优化了匀浆法浸提莲藕多酚的最佳工艺: 酸醇比 22 : 78 (V : V), 料液比 1 : 10 (m : V), 均质时间 6.8 min, 均质转速 10 500 r/min。该条件下, 多酚提取率可达 165.85 mg GAE/100 g · FW, 提取液的 DPPH 自由基清除能力 (IC_{50} 值) 达 4.75 μ g GAE/mL。不同浸提工艺参数下的多酚提取得率、单体酚组成及自由基清除能力均存在显著差异, 相关的理论机制可能涉及 3 个方面: ① 基于“相似相溶”原理不同极性溶剂的选择性差异; ② 酚类物质的存在状态及与其它成分的相互作用在不同提取工艺参数下的稳定性差异; ③ 酚类物质不同结构特征及组成与抗氧化活性的相关性。下一步需针对上述问题开展研究, 而关键技术在于主要酚类组分的结构解析, 预期结合

制备液相、液相-质谱联用和核磁共振等方法解决。

参考文献

- [1] 熊桂云, 童军, 刘冬碧, 等. 湖北省莲藕生产与施肥现状调查[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3 934-3 939.
- [2] Kaur C, Kapoor H C. Anti-oxidant activity and total phenolic content of some Asian vegetables[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(2): 153-161.
- [3] 郭长江, 韦京豫, 杨继军, 等. 66 种蔬菜、水果抗氧化活性的比较研究[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 203-207.
- [4] Hu M, Skibsted L H. Antioxidative capacity of rhizome extract and rhizome knot extract of edible lotus (*Nelumbo nucifera*) [J]. Food Chemistry, 2002, 76(3): 327-333.
- [5] 李佩, 沈佩仪, 吴华星, 等. 超声波提取菠萝皮渣中多酚类物质的研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 55-58.
- [6] 王宗举, 唐春红. 均匀设计法优化橄榄叶多酚提取工艺[J]. 中国食品添加剂, 2010(3): 166-170.
- [7] 尚丹. 香蕉皮中多酚和果胶物质分步提取纯化的工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 15-17.
- [8] 张琳, 杨磊, 贾佳, 等. 匀浆法提取长春花中长春碱、文多灵和长春质碱[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(5): 768-773.
- [9] 杨磊, 刘婷婷, 卫蔚, 等. 响应面法优选新疆紫草总萘醌的匀浆提取工艺研究[J]. 中草药, 2010, 41(4): 568-573.
- [10] Ti Hui-hui, Li Qing, Zhang Rui-fen, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China[J]. Food Chemistry, 2014, 159(13): 166-174.
- [11] 刘焕云, 刘月英, 陈延峰, 等. 莲藕皮多酚的提取及抗氧化性能研究[J]. 林产化学与工业, 2011, 31(2): 87-90.
- [12] 严守雷, 王清章, 彭光华, 等. 莲藕多酚浸提工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(4): 55-58.
- [13] Yang Woong Mo, Shim Kyung Jun, Choi Moon Jung, et al. Novel effects of *Nelumbo nucifera* rhizome extract on memory and neurogenesis in the dentate gyrus of the rat hippocampus [J]. Neuroscience Letters, 2008, 443(2): 104-107.
- [14] Mukherjee Pulok K, Saha Kakali, Balasubramanian R, et al. Studies on psychopharmacological effects of *Nelumbo nucifera* Gaertn. rhizome extract[J]. Journal of Ethnopharmacology, 1996, 54(2/3): 63-67.
- [15] Chanda S, Dave R. In vitro models for antioxidant activity evaluation and some medicinal plants possessing antioxidant properties: An overview[J]. African Journal of Microbiology Research, 2009, 3(13): 981-996.
- [16] 李爱珍, 邵秀芝, 严奉伟. 莲藕中多酚类物质的提取工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2009(5): 80-83.
- [17] Guo Xu-dan, Wu Chun-sen, Ma Yu-jie, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties[J]. Food Research International, 2012, 49(1): 53-59.
- [18] 孙杰, 陆双双, 徐艳艳, 等. 莲藕不同部位酚类物质含量、组成及抗氧化活性比较[J]. 武汉轻工大学学报, 2015, 34(2): 20-25.
- [19] 王清章, 彭光华, 金悠, 等. 莲藕中酚类物质的提取分析及酶促褐变底物的研究[J]. 分析科学学报, 2004, 20(1): 38-40.