

仙人掌多酚超声辅助醇提工艺优化及抗氧化、降脂能力分析

Optimization of ultrasonic assisted alcohol extraction of polyphenols from *opuntia milpa* and its antioxidant and hypolipidemic activities

王 婧 郭 阳 包怡红 田 雪 李 欢 邱隽蒙

WANG Jing GUO Yang BAO Yi-hong TIAN Xue LI Huan QIU Jun-meng

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

摘要:采用超声波辅助方法制备仙人掌多酚提取物,以多酚含量和DPPH自由基清除率为指标,利用正交试验确定最佳提取工艺,并对仙人掌多酚提取物的抗氧化活性与降血脂能力进行评价。结果表明,仙人掌多酚最佳提取工艺为:料液比1:15(g/mL),乙醇浓度65%,超声温度65℃,超声时间45 min,该条件下,多酚含量为20.51 μg/mL, DPPH自由基清除率为87.59%。仙人掌多酚提取物具有良好的抗氧化活性,浓度为10 mg/mL时,其羟基自由基清除能力与超氧阴离子清除能力分别达到93.35%, 59.83%。仙人掌多酚提取物在pH 2和pH 7条件下与胆固醇的吸附能力分别为(10.46±0.78), (14.65±0.82) mg/g;在浓度为25 mg/mL时,与甘氨酸钠和牛磺胆酸钠结合率分别为34.13%, 28.34%。表明米邦塔仙人掌多酚提取物具有较好的抗氧化活性和降血脂能力。

关键词:仙人掌;多酚;抗氧化;降血脂

Abstract: The extraction of polyphenols from *opuntia milpa* was prepared by ultrasound-assisted method. The optimum extraction process was determined by orthogonal experiment with the content of polyphenols and DPPH free radical scavenging rate as indicators. The antioxidant and hypolipidemic activities of polyphenol extract from *opuntia milpa* were evaluated. The results showed that the optimum extraction technology of *opuntia milpa* was solid-liquid ratio 1:15, ethanol concentration 65%, at 65℃ for 45 min. Under the control of these conditions, the con-

tent of polyphenols was 20.51 μg/mL, and DPPH clearance rate was 87.59%. The polyphenol extract of *opuntia milpa* has good antioxidant activity. The scavenging ability of hydroxyl radical and superoxide anion reached 93.35% and 59.83% respectively at the concentration of 10 mg/mL. The adsorption capacity of cactus polyphenol extract with cholesterol at pH 2 and 7 was (10.46±0.78) mg/g and (14.65±0.82) mg/g, respectively. At 25 mg/mL, the binding rates with sodium glycocholate and sodium taurocholate were 34.13% and 28.34%, respectively. **CONCLUSION:** The ultrasonic-assisted extraction process is stable and feasible, and the polyphenol extract has good antioxidant activity and hypolipidemic ability.

Keywords: *opuntia milpa*; polyphenol; antioxidant; lowering blood fat

米邦塔仙人掌是一种原产于墨西哥的食用性仙人掌,中国农业部优质产品开发中心自1998年引进米邦塔仙人掌以来,在国内进行了引种及推广,目前作为一种新型保健蔬菜已逐步进入消费者的餐桌^[1]。高翔等^[2-4]的研究显示,米邦塔仙人掌中含有丰富的营养成分,包括矿物质、蛋白质、纤维素及多种维生素,同时富含镁、锰、铜、锌等微量元素,是一种营养丰富的优质蔬菜。季慧等^[5]研究表明,米邦塔仙人掌中含有多种活性功能成分,如多糖、多酚、黄酮、超氧化物歧化酶(SOD)、生物碱类化合物和有机酸类等。已有徐丛玥等^[6-8]、朱凯等^[9]分别研究了米邦塔仙人掌中的多糖和黄酮。

植物多酚又称植物单宁。研究^[10]表明:植物多酚具有抗氧化、抑菌消炎、抗病毒、抗癌等多种生物学功能,因此植物多酚作为天然抗氧化剂及食品功能成分,一直是研究的热点。然而已有的文献对米邦塔仙人掌中多酚的研究较少,Andreu等^[11]曾对西班牙地中海仙人掌枝叶和

基金项目:大学生创新训练项目(编号:201710225029);国家重点研发计划(编号:2017YFC1601901)

作者简介:王婧,女,东北林业大学在读本科生。

通信作者:包怡红(1970—),女,东北林业大学教授,博士。

E-mail: baoyihong@163.com

收稿日期:2019-01-25

果实的总酚含量及理化性质进行分析,但未对其生理活性如体外降脂功能进行测定。试验以米邦塔仙人掌为原料,拟采取超声波辅助法制备多酚提取物,以多酚含量及 DPPH 自由基清除力为指标,通过正交试验优化最佳工艺条件,并对其抗氧化活性及其降血脂能力进行评价,为米邦塔仙人掌的开发应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

米邦塔仙人掌:产于江苏宿迁;

胃蛋白酶(30 000 U/mg)、胰蛋白酶(250 U/mg)、甘氨酸钠、牛磺胆酸钠:生化试剂,北京博奥拓达有限公司;

无水乙醇、没食子酸、抗坏血酸、1,1-二苯-2-苦基肼、水杨酸、邻苯三酚、水杨酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

电子天平:YP2002 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

高速万能粉碎机:PW-100 型,天津泰斯特仪器有限公司;

数控超声波清洗器:KQ-300DE 型,300 W,昆明市超声仪器有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9240 型,上海一恒科技有限公司;

台式离心机:TGL-16G 型,上海安亭科学仪器厂;

可见分光光度计:722 型,上海光谱仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:TU-1810 型,北京善析通用仪器有限公司;

旋转蒸发器:RE-52A 型,上海亚荣生化仪器厂;

三孔电热恒温水槽:DK-8D 型,上海一恒科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 原料处理 取新鲜米邦塔仙人掌,去皮,切块(1 cm×1 cm×1 cm),60 °C 恒温干燥至恒重,粉碎过 60 目筛,备用。

1.2.2 多酚含量测定 采用紫外分光光度法。配制质量浓度分别为 1,5,10,15,20,25 μg/mL 的没食子酸标准液,在 190~400 nm 波长下进行光谱扫描,重复操作 3 次,测定 266 nm 波长处的吸光值绘制标准曲线。在 0~25 μg/mL 浓度范围内线性回归方程为: $Y=0.0477x-0.0029$, $R^2=0.9997$ 。将上清液稀释 20 倍,测定其吸光度并计算多酚含量,重复 3 次^[12-13]。

1.2.3 DPPH 自由基清除率测定 根据文献[14]的方法进行测定,按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$Q = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Q ——清除率,%;

A_0 ——2 mL 无水乙醇加 2 mL DPPH 溶液的吸光度值;

A_1 ——2 mL 待测液加 2 mL DPPH 溶液的吸光度值;

A_2 ——2 mL 待测液加 2 mL 无水乙醇的吸光度值。

1.2.4 提取工艺单因素试验设计

(1) 乙醇浓度对多酚提取率及 DPPH 自由基清除能力的影响:在料液比 1:20(g/mL),乙醇浓度(体积分数)分别为 50%,60%,70%,80%,90%,温度 50 °C 条件下超声 50 min,将提取液在 4 000 r/min 下离心 20 min,取上清液测定其多酚含量及 DPPH 自由基清除能力。

(2) 超声温度对多酚提取率及 DPPH 自由基清除能力的影响:料液比 1:20(g/mL),乙醇浓度 70%,分别在 30,40,50,60,70 °C 条件下超声 50 min,将提取液在 4 000 r/min 下离心 20 min,取上清液测其多酚含量及 DPPH 自由基清除能力。

(3) 超声时间对多酚提取率及 DPPH 清除能力的影响:在料液比 1:20(g/mL),乙醇浓度 70%,温度 50 °C 条件下分别超声 20,30,40,50,60 min,将提取液在 4 000 r/min 下离心 20 min,取上清液测其多酚含量及 DPPH 自由基清除能力。

(4) 料液比对多酚提取率及 DPPH 清除能力的影响:分别以 1:5,1:10,1:15,1:20,1:25(g/mL)的料液比,在乙醇浓度 70%,温度 50 °C 条件下超声 50 min,将提取液在 4 000 r/min 下离心 20 min,取上清液测其多酚含量及 DPPH 自由基清除能力。

1.2.5 正交试验优化 选取乙醇浓度、超声温度、超声时间、料液比为考察因素,每个因素选取 3 个水平,以综合评分为指标,用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验。

1.2.6 综合评分 以多酚含量和 DPPH 自由基清除率为双指标,将所得数据进行归一化处理、统一数量级,利用综合评分值对试验结果进行评价^[15-16]。代入式(2)计算各指标综合评分 Y_{ij}' 。

$$Y_{ij}' = \frac{Y_{ij} - Y_{j\min}}{Y_{j\max} - Y_{j\min}}, \quad (2)$$

式中:

Y_{ij}' ——综合评分;

Y_{ij} ——第 j 列的指标数据值,%;

$Y_{j\min}$ ——第 j 列中指标最小值,0;

$Y_{j\max}$ ——第 j 列中指标最大值,100。

对两个指标进行加权分配,设定多酚含量和 DPPH 自由基清除率的权重系数分别为 0.5,0.5,即多酚含量和 DPPH 自由基清除率的加权值 W_j 分别为 $W_1=0.5$, $W_2=0.5$,将 Y_1 、 Y_2 代入式(2)得到 Y_1' 、 Y_2' 即加权综合评分值

$$Y = 0.5Y_1' + 0.5Y_2'.$$

1.2.7 米邦塔仙人掌多酚提取物抗氧化性 将仙人掌粉按照最佳提取工艺条件提取得到上清液,再将上清液经旋蒸浓缩后干燥得到样品,配制不同浓度的样液进行试验,以抗坏血酸为对照。

(1) 对羟基自由基的清除能力:根据文献[17]的方法进行测定。

(2) 对超氧阴离子自由基的清除能力:根据文献[18]的方法进行测定。

1.2.8 米邦塔仙人掌多酚提取物降血脂能力 将仙人掌粉按照最佳提取工艺条件提取得到上清液,再将上清液经旋蒸浓缩后干燥得到样品,配制不同浓度的样液进行试验。

(1) 体外胆固醇吸附能力测定:参照文献[19]的方法修改如下,取新鲜鸡蛋的蛋黄,加入 9 倍量的蒸馏水,搅打成乳液。分别取 10 g 稀释蛋黄液于两个 200 mL 的三角瓶中,并加入 0.5 g 样品,调节 pH 至 2.0 和 7.0,37 °C 下恒温振荡 2 h,4 000 r/min 离心 20 min,吸取 0.04 mL 上清液,在波长 550 nm 条件下比色测定胆固醇含量。代入式(3)计算胆固醇的吸附量。

$$X = \frac{A_1 - A_2}{m}, \quad (3)$$

式中:

X ——吸附量,mg/g;

A_1 ——吸附前蛋黄胆固醇量,mg/g;

A_2 ——吸附后蛋黄胆固醇量,mg/g;

m ——样品质量,g。

(2) 体外胆酸盐吸附能力测定:参照文献[20]的方法修改如下,分别取 3 mL 不同浓度的样液于 100 mL 三角瓶中,加入 0.01 mol/L 的 HCl 溶液 1 mL,10 mg/mL 胃蛋白酶(以 pH 6.3 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液配制) 3 mL,37 °C 下恒温振荡消化 1 h,模拟胃环境;以 0.1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 6.3,加入 10 mg/mL 胰蛋白酶(以 pH 6.3 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液配制) 4 mL,37 °C 下恒温振荡消化 1 h,模拟肠道环境。分别加入 4 mL 0.4 mmol/L 甘氨酸钠及 4 mL 0.5 mmol/L 牛磺胆酸钠(以 pH 6.3 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液配制),37 °C 下恒温振荡 1 h 后转移至离心管中,4 000 r/min 离心 20 min,取上清液测定胆酸盐含量,代入式(4)计算胆酸盐结合率。

$$S = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

S ——胆酸盐结合率,%;

A_1 ——胆酸盐加入量, μmol ;

A_2 ——剩余量, μmol 。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 进行数据分析,Origin 8.0 绘图,SPSS 19.0

进行方差分析,每组试验重复 3 次,结果表示为(平均值 $\pm$ 标准差)。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 乙醇浓度对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响 由图 1 可知,随着乙醇浓度升高,多酚含量与 DPPH 自由基清除率不断升高,当浓度达到 70% 时多酚含量与清除率最高,之后均有所下降。严赞开^[21]研究发现 80% 乙醇提取米邦塔仙人掌中多酚效率最高,与本研究结果相似。这是因为有一部分植物多酚以与蛋白质结合的形式存在,乙醇浓度过高会使蛋白质变性,影响与蛋白质结合的多酚溶出,从而导致多酚提取率下降^[22-23]。

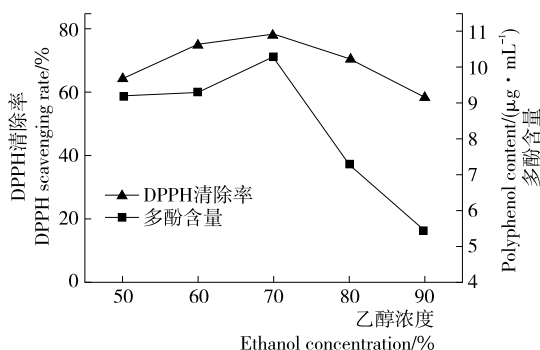


图 1 乙醇浓度对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 1 Effect of ethanol concentration on extraction rate of polyphenols and DPPH radical scavenging rate

2.1.2 超声温度对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响 由图 2 可知:随着温度升高,多酚含量与 DPPH 自由基清除率不断升高,当温度达到 60 °C 时,多酚含量与清除率达到最高,之后均有所下降。一般温度高有利于

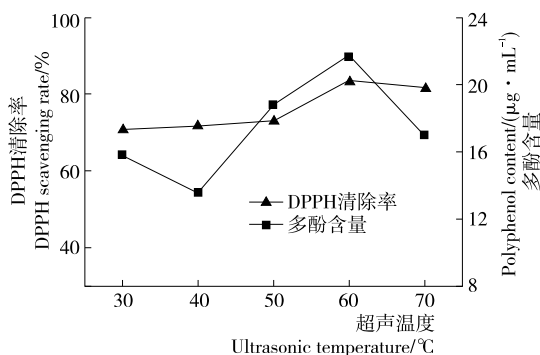


图 2 超声温度对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 2 Effect of ultrasound temperature on extraction rate of polyphenols and DPPH radical scavenging rate

植物多酚的提取^[24],但高温使超声空化效果受到了影响,而且高温条件下会使乙醇挥发,从而使料液比改变,影响多酚的提取^[25]。

2.1.3 超声时间对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响 由图 3 可知,随着时间增加,DPPH 自由基清除率有所升高,当时间达到 50 min 时清除率达到最高,之后清除率有所下降;多酚含量随着时间增加不断升高,当时间达到 40 min 时达到最高点,之后多酚含量有所下降,可能是长时间超声振动导致多酚结构被破坏^[26-27]。

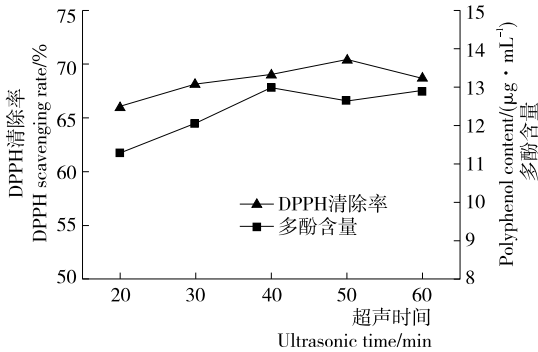


图 3 超声时间对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 3 Effect of ultrasonic time on extraction rate of polyphenols and DPPH radical scavenging rate

2.1.4 料液比对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响 由图 4 可知,随着料液比增加,多酚含量与 DPPH 自由基清除率有所升高,当料液比为 1 : 15(g/mL)时多酚含量与清除率达到最高,之后均逐渐下降。从节约溶剂的角度考虑,将料液比的范围定为 1 : 10 ~ 1 : 20 (g/mL)。

2.2 最佳提取工艺条件的确定

单因素的试验基础上,确定各因素的水平取值见表 1。正交试验设计及结果见表 2,方差分析见表 3。

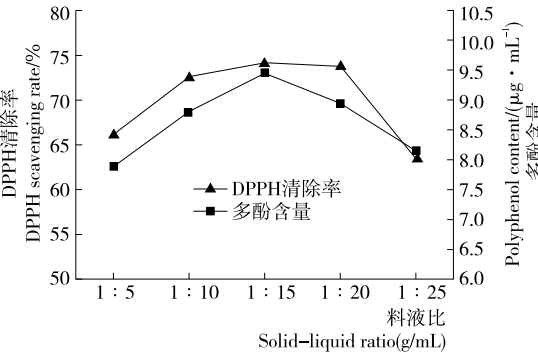


图 4 料液比对多酚提取率及 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 4 Effect of solid-liquid ratio on extraction rate of polyphenols and DPPH radical scavenging rate

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels used for orthogonal array experiments

水平	A 乙醇浓度/%	B 超声温度/℃	C 超声时间/min	D 料液比(g/mL)
1	65	55	35	1 : 10
2	70	60	40	1 : 15
3	75	65	45	1 : 20

表 2 L₉(3⁴)正交试验设计及结果

Table 2 L₉(3⁴) orthogonal experimental design and results

试验号	A	B	C	D	Y 综合评分
1	1	1	1	1	79.68±0.02
2	1	2	2	2	83.43±0.23
3	1	3	3	3	100.00±0.11
4	2	3	1	2	93.57±0.60
5	2	1	2	3	79.19±0.15
6	2	2	3	1	86.77±0.32
7	3	2	1	3	77.05±0.18
8	3	3	2	1	88.28±0.15
9	3	1	3	2	85.71±0.21
K ₁	87.70	81.53	83.43	84.91	
K ₂	86.51	82.42	79.89	87.57	
K ₃	83.68	93.95	90.83	85.41	
R	4.02	12.42	10.94	2.66	

表 3 综合评分方差分析表

Table 3 Comprehensive score variance analysis table

变异来源	偏差平方和	自由度	F 值	P 值
A	70.843	2	8.985	0.002 0
B	706.207	2	89.572	0.000 0
C	375.994	2	47.689	0.000 0
D	7.157	2	0.908	0.421 0
误差	70.958	18		
总和	1 231.159	26		

由表 2 可知,以综合评分为评价指标时,用直观分析法分析各因素的主次为超声温度>超声时间>乙醇浓度>料液比,最佳提取方案为乙醇浓度 65%,超声温度 65℃,超声时间 45 min,料液比 1 : 15(g/mL)。由表 3 可知,乙醇浓度,超声温度和超声时间对综合评分影响显著,料液比对综合评分影响不显著。

准确称取仙人掌粉末 1 g,按照正交试验优化的最佳方案进行 3 次验证实验,结果提取液中多酚含量平均值为 20.51 μg/mL,DPPH 自由基清除率平均值为 87.59%。

最终得到仙人掌多酚提取物的最佳提取工艺为乙醇浓度 65%, 超声温度 65 °C, 超声时间 45 min, 料液比 1:15 (g/mL)。

2.3 米邦塔仙人掌多酚提取物抗氧化性

2.3.1 对羟基自由基的清除能力 由图 5 可知:米邦塔仙人掌多酚提取物对羟基自由基的清除率随质量浓度的增加而增强。当质量浓度为 10 mg/mL 时,米邦塔仙人掌多酚提取物的清除率为 $(93.35 \pm 0.42)\%$,抗坏血酸的清除率为 $(96.64 \pm 0.57)\%$,可见米邦塔仙人掌多酚提取物对羟基自由基有较强的清除能力。

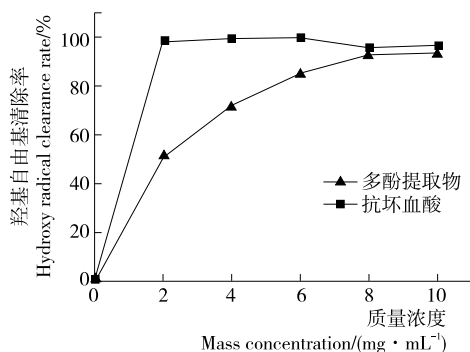


图 5 米邦塔仙人掌多酚提取物对羟基自由的清除能力
Figure 5 Scavenging effect of polyphenol extract from *Opuntia milpa* on hydroxyl free radicals

2.3.2 对超氧阴离子自由基的清除能力 由图 6 可知:米邦塔仙人掌多酚提取物对超氧阴离子自由基的清除率随质量浓度的增加而增强。当质量浓度为 25 mg/mL 时,米邦塔仙人掌多酚提取物的清除率为 $(91.79 \pm 0.38)\%$,抗坏血酸的清除率为 $(97.65 \pm 0.73)\%$,可见米邦塔仙人掌多酚提取物对超氧阴离子自由基有较强的清除能力。

2.4 米邦塔仙人掌多酚提取物降血脂能力

2.4.1 体外胆固醇吸附能力 试验结果显示:米邦塔仙人掌多酚提取物在 pH 2 条件下与胆固醇的吸附能力为

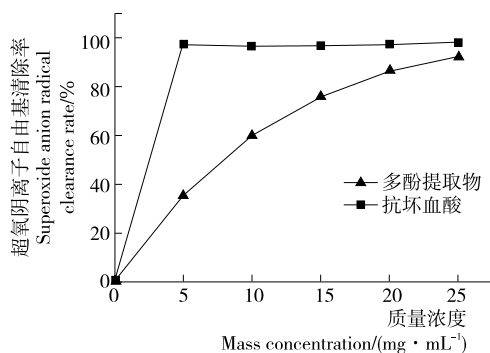


图 6 米邦塔仙人掌多酚提取物对超氧阴离子自由基的清除能力

Figure 6 Scavenging effect of polyphenol extract from *Opuntia milpa* on superoxide anion free radicals

(10.46 ± 0.78) mg/g, 在 pH 7 条件下与胆固醇的吸附能力为 (14.65 ± 0.82) mg/g, 与张煜等^[28]对扁枝槲寄生乙醇粗提物的体外胆固醇吸附能力相比,仙人掌多酚提取物的胆固醇吸附量显著提升。

2.4.2 体外胆酸盐吸附能力 由图 7 可知:米邦塔仙人掌多酚提取物与胆酸盐结合能力随质量浓度的增加而增强,当质量浓度为 25 mg/mL 时,米邦塔仙人掌多酚提取物与甘氨酸胆酸钠结合率为 $(34.13 \pm 0.37)\%$,与牛磺胆酸钠结合率为 $(28.34 \pm 0.64)\%$,说明多酚提取物与甘氨酸胆酸钠的结合能力更强。与夏雨等^[29]对佛手果提取物的研究相比,仙人掌多酚提取物的胆酸钠吸附能力要显著高于佛手果提取物的胆酸钠吸附能力,说明仙人掌多酚提取物具有较好的降血脂能力。

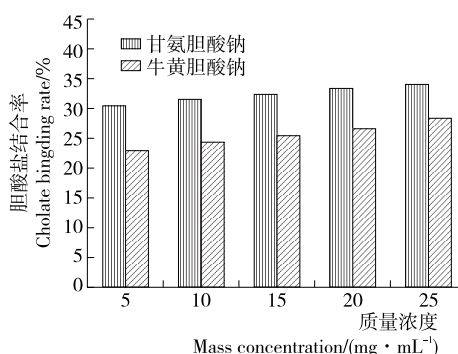


图 7 米邦塔仙人掌多酚提取物胆酸盐结合能力
Figure 7 The binding capacity of polyphenol extract from *Opuntia milpa* on bile salts

3 结论

试验采用超声波辅助法提高米邦塔仙人掌多酚得率,以多酚含量和 DPPH 自由基清除率为指标,选择料液比、乙醇浓度、超声温度、超声时间为单因素,并通过正交试验进行提取条件的优化,得到的最佳提取工艺为料液比 1:15(g/mL),乙醇浓度 65%,超声温度 65 °C,超声时间 45 min,在此条件下,多酚含量为 20.51 μg/mL, DPPH 清除率为 87.59%。米邦塔仙人掌多酚提取物具有良好的抗氧化活性,在其浓度为 10 mg/mL 时,羟基自由基清除能力与超氧阴离子清除能力分别达到 93.35%, 59.83%。体外降血脂试验结果表明米邦塔仙人掌多酚提取物在 pH 2 和 pH 7 条件下与胆固醇的吸附能力分别为 10.46, 14.65 mg/g;在其浓度为 25 mg/mL 时与甘氨酸胆酸钠和牛磺胆酸钠结合率分别为 34.13%, 28.34%,表明多酚提取物具有体外降血脂能力。后续将对米邦塔仙人掌提取物在体内的抗氧化、降脂功能及其作用机理作进一步的研究与探讨。

参考文献

[1] 沈文, 单承莺, 张卫明. 米邦塔仙人掌的研究进展与开发应

- 用[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(1): 4-8.
- [2] 高翔, 王蕊. 仙人掌的保健功能及其产品的开发研究[J]. 粮食与食品工业, 2003(2): 31-34.
- [3] 雷中英, 雷泽湘. 新型蔬菜食用仙人掌的开发利用[J]. 湖北农业科学, 2001(5): 66-67.
- [4] 李玉萍. 仙人掌及其开发利用[J]. 热带农业科学, 2001(6): 58-62, 68.
- [5] 季慧. “米邦塔”仙人掌成分分析及产品开发[D]. 无锡: 江南大学, 2006: 1-30.
- [6] 徐丛玥, 林款, 梁征, 等. 不同提取方法对米邦塔仙人掌粗多糖体外抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 56-60.
- [7] 徐丛玥, 林款, 茹琴, 等. 米邦塔仙人掌多糖提取工艺的研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 927-931.
- [8] 方涛, 褚翠翠, 陆宁. 食用仙人掌功能性成分研究进展[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 148-150.
- [9] 朱凯, 梁桂英. 米邦塔仙人掌黄酮提取物的急性毒性试验研究[J]. 吉林农业科技学院学报, 2014, 23(4): 8-10.
- [10] 南楠. 植物多酚的生物学功能及其在动物生产中的应用[J]. 饲料博览, 2017(5): 37-39, 43.
- [11] ANDREU L, NUNCIO-JÁUREGUI N, CARBONELL-BARRACHINA Á A, et al. Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(4): 1 566-1 573.
- [12] 张丽莹. 紫外分光光度法测定水中酚[J]. 光谱实验室, 2006(4): 890-892.
- [13] 谢倩, 王威, 陈清西. 橄榄多酚含量测定方法的比较[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 204-207.
- [14] 朱力国, 郭阳, 唐思媛, 等. 不同品种蓝靛果化学成分及抗氧化活性比较[J]. 中国酿造, 2018, 37(10): 158-162.
- [15] 杜迎翔, 王慧, 朱粉霞, 等. 双指标正交实验结合超高效液相色谱测定优选胆木提取工艺[J]. 时珍国医国药, 2015, 26(6): 1 288-1 290.
- [16] 刘瑜, 黄文, 王益, 等. 桑葚果粉的制备工艺及其稳定性研究[J/OL]. 食品工业科技. [2019-01-25]. <http://210.41.165.2:9053/kcms/detail/11.1759.ts.20181011.1053.012.html>.
- [17] 冷梅, 刘荣. 紫叶稠李果实花色苷的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 67-71.
- [18] 王鑫, 包怡红, 张宁, 等. 固态发酵法制备榛仁肽工艺优化及其生物活性[J]. 经济林研究, 2018, 36(1): 131-136, 140.
- [19] 孙凯峰, 包怡红. 微生物发酵对黑木耳总糖含量和体外调脂活性的影响[J]. 中草药, 2018, 49(16): 3 781-3 787.
- [20] 冯雁波, 包怡红. 超微粉碎对松仁膳食纤维体外降血糖、降血脂功能的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 342-346, 350.
- [21] 严赞开. 仙人掌中多酚的分光光度法测定[J]. 安徽农业科学, 2006(13): 2 957-2 958.
- [22] 陈晨, 胡文忠, 田沛源, 等. 超声辅助提取香蕉皮多酚工艺优化及其抗氧化性的分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 12-17.
- [23] YANG Li, JIANG Jian-guo, LI Wei-feng, et al. Optimum extraction process of polyphenols from the bark of *Phyllanthus emblica* L. based on the response surface methodology[J]. Journal of Separation Science, 2009, 32(9): 1 437-1 444.
- [24] HARBOURNE N, JACQUIER J C, O'RIORDAN D. Optimisation of the aqueous extraction conditions of phenols from meadowsweet (*Filipendula ulmaria* L.) for incorporation into beverages[J]. Food Chemistry, 2009, 116(3): 722-727.
- [25] 令博, 王捷, 等. 葡萄皮渣多酚超声波辅助提取工艺响应面法优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(18): 24-29.
- [26] CARRERA C, RUIZ-RODRÍGUEZ A, PALMA M, et al. Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from grapes[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 732: 100-104.
- [27] 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.
- [28] 张煜. 扁枝槲寄生提取物体外抗氧化、降糖、降脂效应研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2016: 62-68.
- [29] 夏雨, 王雁胜, 张延杰, 等. 佛手果营养与活性成分测定及降血脂功能研究[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 70-73.

(上接第 142 页)

- [22] FERNANDEZ-DIAZ C, KOPECKA J, CANAVATE J P, et al. Variations on development and stress defences in *Solea senegalensis* larvae fed on live and microencapsulated diets[J]. Aquaculture, 2006, 251(2/3/4): 573-584.
- [23] ALMEIDA J A, DINIZ Y S, MARQUES S F G, et al. The use of the oxidative stress responses as biomarkers in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to in vivo cadmium contamination[J]. Environment. International., 2002, 27(8): 673-679.
- [24] 孙鹏, 柴学军, 尹飞, 等. 运输胁迫下日本黄姑鱼肝脏抗氧化系统的响应[J]. 海洋渔业, 2014, 36(5): 469-474.
- [25] 吴波, 谢晶. 鱼类保活运输中应激反应诱发因素及其影响研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 169-172, 203.
- [26] 刘旭佳, 黄国强, 彭银辉. 不同溶解氧水平对鲮生长、能量代谢和氧化应激的影响[J]. 南方水产科学, 2015, 11(4): 88-94.
- [27] 常志成, 温海深, 张美昭, 等. 溶解氧水平对花鲈幼鱼氧化应激与能量利用的影响及生理机制[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2018, 48(7): 20-28.
- [28] 李洁, 唐夏, 张灵燕, 等. 溶解氧水平对褐牙鲈幼鱼能量代谢和氧化应激的影响研究[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(1): 22-27.