

大孔树脂分离纯化霍山石斛多酚及其抗氧化活性研究

Purification of polyphenols from *Dendrobium huoshanense* by macroporous resin and its antioxidant activity

陈明威 魏明 陶良凡 钱森和

CHEN Ming-wei WEI Ming TAO Liang-fan QIAN Sen-he

(安徽工程大学生物与化学工程学院, 安徽 芜湖 241000)

(College of Biological and Chemical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

摘要:比较了不同大孔树脂对霍山石斛多酚的吸附和解吸特性,筛选出较适宜的吸附剂,研究了大孔树脂的纯化工艺条件,并探讨了多酚的抗氧化活性。结果表明,AB-8树脂是较为适宜的石斛多酚吸附剂,最佳纯化条件:静态吸附 150 min 即达到饱和,多酚溶液 pH 4.0,浓度 2.0 mg/mL,上样流速 1.0 mL/min;洗脱流速 1.0 mL/min,总酚纯度为 76.2%。通过乙醇溶液的梯度洗脱,获得了 4 个洗脱组分,分别为 DHP-1、DHP-2、DHP-3、DHP-4,其含量分别为 16.3%, 14.8%, 20.9%, 26.2%。总的抗氧化能力依次为 DHP-3 > DHP-4 > DHP-1 > DHP-2 > 粗多酚。

关键词:霍山石斛;多酚;大孔树脂;分离纯化;抗氧化性

Abstract: In this study, the ideal adsorbent for *Dendrobium huoshanense* polyphenols were obtained, after the comparison test for the adsorption-desorption properties of different types of resins. The purification parameters were optimized by adsorption and desorption tests. The antioxidant activities of polyphenols were evaluated in vitro. The results showed that AB-8 macroporous resin was considered as suitable material for purifying and separating *Dendrobium huoshanense* polyphenols. And the macroporous resin reached equilibrium within 150 min. The optimal processing parameters were as follows: an initial polyphenol concentration of 2.0 mg/mL, pH 4.0, a flow rate of 1.0 mL/min for feeding and a flow rate of 1.0 mL/min for eluting. The total polyphenols purity reached 76.2%. Four groups of polyphenol components were obtained by dynamic elution with different ethanol concentrations, which were named DHP-1, DHP-2, DHP-3 and

DHP-4, respectively. The contents of them were 16.3%, 14.8%, 20.9% and 26.2%, respectively. The total antioxidant capacity of them indicated that DHP-3 > DHP-4 > DHP-1 > DHP-2 > crude polyphenols.

Keywords: *Dendrobium huoshanense*; polyphenols; macroporous resin; purification; antioxidation

霍山石斛(*Dendrobium huoshanense* C. Z. Tang et S. J. Cheng)俗称米斛,为兰科石斛属植物,是珍稀药用植物,具有滋阴养胃、清音明目和养颜驻容等功效^[1]。大量研究^[2-5]表明,石斛含有多糖、石斛碱和酚类物质等有效成分,具有抗癌、抗白内障、抗氧化、降血糖等作用。酚类物质是植物的次生代谢产物,具有抗肿瘤、抗菌、抗病毒、抗氧化等活性^[6-7]。目前,对石斛多糖、石斛碱等活性成分研究较多,但对石斛中酚类物质的研究较少。

石斛中含有大量酚类物质。体外试验表明,石斛中的酚类物质具有较强的抗氧化活性^[8-10]。目前已从霍山石斛^[10]、铁皮石斛^[9]和金钗石斛^[8]中提取了石斛粗多酚酚类物质,粗多酚含有糖类、蛋白质等成分,这些成分对其活性研究会造成干扰。植物多酚的分离纯化常用的方法有溶剂萃取、离子沉淀、膜分离、超临界萃取和层析分离等。其中大孔树脂具有良好的选择性、吸附量大、操作简便且成本低等特点,被广泛用于天然产物的分离^[11]。目前,利用大孔树脂分离纯化霍山石斛多酚还未见报道。

树脂极性、颗粒大小以及表面积大小均能影响酚类物质的分离效果^[12]。研究拟以霍山石斛粗多酚为原料,通过比较不同树脂对石斛中酚类物质吸附和解吸特性,筛选适合的树脂,优化分离工艺参数,并探讨多酚的抗氧化性,旨在为石斛多酚的分离纯化和结构鉴定以及功能性食品的开发提供理论依据。

基金项目:安徽省高校自然科学基金项目(编号: KJ2017A101)

作者简介:陈明威,男,安徽工程大学在读硕士研究生。

通信作者:魏明(1969—),男,安徽工程大学教授,博士。

E-mail: wmrainbow69@126.com

收稿日期:2020-05-09

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

霍山石斛:安徽工程大学组培室;

D101 型、AB-8 型、HZ-841 型、NKA-9 型、ADS-7 型大孔树脂:郑州和成新材料科技有限公司;

L-抗坏血酸、铁氰化钾、磷酸缓冲液、三氯化铁、Tris-HCl、邻苯三酚、三氯甲烷、无水乙醇、无水碳酸钠、盐酸和氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

Folin-Ciocalteu 酚试剂:国药集团化学试剂有限公司;

没食子酸:分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司。

1.2 仪器设备

电子天平:ZA2204B 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

循环水式多用真空泵:SHB-III S 型,郑州长城科工贸有限公司;

紫外可见分光光度计:UV745 型,上海光谱仪器有限公司;

旋转蒸发器:RE52-AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

高速冷冻离心机:TGL-16M 型,湖南湘仪离心机仪器有限公司;

恒流泵:BT1-100 型,上海琪特分析仪器有限公司;

自动部分收集器:BSZ-100 型,上海琪特分析仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:LGJ 型,北京松源华兴科技发展有限公司;

高效液相色谱仪:LC-20A 型,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 霍山石斛粗多酚的制备 霍山石斛鲜条研磨后,用蒸馏水以料液比 $m_{\text{料}}:m_{\text{水}}=1:60$ (g/mL)、提取温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下浸提 40 min,抽滤后浓缩,浓缩液用 80% 乙醇溶液醇沉除去多糖、蛋白,抽滤,取上清液浓缩后备用。

1.3.2 多酚的测定 参照文献[13]。以没食子酸标准溶液浓度(mg/mL)为横坐标,没食子酸与福林酚试剂在碱性条件下反应后的吸光度($A_{765\text{ nm}}$)为纵坐标,建立没食子酸浓度与吸光度的标准曲线,得标准曲线方程为: $Y=9.36X+0.0042$, $R^2=0.9993$ 。通过标准曲线计算其多酚类化合物质量浓度。

1.3.3 大孔树脂的筛选 所有树脂在使用前参照文献[14]的方法进行预处理。分别称取经预处理后的 D101、AB-8、HZ-841、NKA-9、ADS-7 型大孔树脂各 1.0 g 于 100 mL 锥形瓶中,加入 15 mL 浓度为 2.0 mg/mL 的霍山石斛多酚粗提液,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 120 r/min 恒温振荡静态吸附 4 h,然后吸取上清液测定多酚的量,并计算其吸附量和吸附率。将吸附饱和的大孔树脂过滤,然后放入到三角瓶中,加入 50% 的乙醇 15 mL,用保鲜膜将锥形瓶瓶口封住避免乙醇挥发,放入恒温振荡培养箱在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 120 r/min 条件下振荡解吸 4 h,然后吸取上清液测定多

酚的量,并计算解吸率。通过不同树脂的吸附率和解吸率确定适合的树脂。

$$Q = \frac{(C_0 - C_1) \times V}{m}, \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{C_2}{C_0 - C_1} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

Q ——大孔树脂对多酚的吸附量,mg/g;

R_1 ——大孔树脂对多酚的吸附率,%;

R_2 ——洗脱液对大孔树脂中多酚的解吸率,%;

C_0 ——多酚初始浓度,mg/mL;

C_1 ——静态吸附完全后上清液中多酚的浓度,mg/mL;

C_2 ——解吸完全后乙醇溶液中的多酚浓度,mg/mL;

V ——加入的多酚溶液体积,mL;

m ——锥形瓶中加入大孔树脂的质量,g。

1.3.4 静态吸附和解吸试验

(1) 大孔树脂静态吸附的动力学试验:分别称取 AB-8 型大孔树脂 1.0 g 于 6 个 100 mL 的锥形瓶中,各加入多酚粗提液 15 mL,每 30 min 测定一次上清液中多酚的浓度,计算其吸附量、吸附率。

(2) 多酚样品浓度对吸附量的影响:分别称取 AB-8 型大孔树脂 1.0 g 于 6 个 100 mL 的锥形瓶中,依次加入 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 mg/mL 的多酚粗提液 15 mL,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 120 r/min 恒温振荡静态吸附 150 min,然后测定多酚含量,并计算其吸附量和吸附率。

(3) 样品 pH 对树脂吸附量的影响:分别称取 AB-8 型大孔树脂 1.0 g 于 6 个 100 mL 的锥形瓶中,依次加入 15 mL 的不同 pH 的多酚粗提液(pH 3.0,4.0,5.0,6.0,7.0,8.0),在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 120 r/min 恒温振荡静态 150 min,然后测定多酚含量,并计算其吸附量和吸附率。

(4) 乙醇体积分数对树脂静态解吸率的影响:按上述最佳条件吸附多酚至饱和,并计算其吸附量,然后抽滤,分别加入体积分数为 10%,20%,30%,40%,50%,60% 的乙醇溶液进行洗脱,测定上清液中多酚含量,计算其解吸率。

1.3.5 动态吸附和解吸试验

(1) 上样流速对大孔树脂吸附量的影响:将经过预处理后的 AB-8 型大孔树脂填充到 $1.6\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的色谱柱中,填充后树脂床直径为 1.6 cm,高 50 cm。平衡后,多酚的浓度为 2.0 mg/mL,分别以 1.0,2.0,3.0,4.0 mL/min 的流速进行上样吸附,收集流出液,每一管 4 mL,测定流出液的体积和多酚浓度。检测流出液中多酚的泄漏量,泄漏量达到进样浓度的 10% 为吸附终点,计算其最大吸附量。

(2) 乙醇流速对大孔树脂动态洗脱的影响:吸附饱和的 AB-8 大孔树脂,用 50% 的乙醇溶液分别以 1.0,2.0,3.0,4.0 mL/min 的流速进行洗脱,收集洗脱液,每一管

4 mL,测定流出液的体积和多酚浓度,并计算解吸率。

1.3.6 AB-8 型大孔树脂梯度洗脱

(1) 将经过预处理后的 AB-8 型大孔树脂填充到 1.6 cm×60 cm 的色谱柱中,按上述条件,对霍山石斛多酚进行上样处理,再用蒸馏水洗脱,洗去粗多酚中残留的还原糖等杂质,之后用乙醇进行梯度洗脱,洗脱梯度设置 10% 为一个梯度,收集并测定流出液多酚的浓度,直至霍山石斛多酚洗脱完全。

(2) 梯度洗脱组分高效液相色谱分析:Zorbox SB-C₁₈ 柱(150 mm×4.6 mm,5 μm);柱箱温度 30 ℃;检测波长 280 nm;进样量 10 μL。流动相 A 为 100% 甲醇,流动相 B 为 0.2% 乙酸水溶液;流速 1 mL/min。梯度洗脱条件为:0~8 min 流动相 A 5%~8%,8~12 min 流动相 A 8%~15%,12~17 min 流动相 A 15%~22%,17~25 min 流动相 A 22%~50%,25~33 min 流动相 A 50%~60%,33~50 min 流动相 A 60%~5%,总的运行时间 51 min。

1.3.7 霍山石斛多酚的体外抗氧化试验

(1) 超氧阴离子清除能力测定:参照文献[15],按式(4) 计算超氧阴离子的清除率。

$$Q_1 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

Q_1 ——超氧阴离子的清除率,%;

A_1 ——三(羧甲基)氨基甲烷+样品+邻苯三酚+盐酸的吸光度;

A_2 ——三(羧甲基)氨基甲烷+样品+盐酸的吸光度;

A_3 ——三(羧甲基)氨基甲烷+邻苯三酚+盐酸的吸光度。

(2) 总还原力测定:参照文献[16],按式(5)计算总还原力。

$$A_0 = A_1 - A_2, \quad (5)$$

式中:

A_0 ——样品的总还原力;

A_1 ——样品+磷酸盐缓冲液+铁氰化钾+三氯乙酸+三氯化铁的吸光度;

A_2 ——蒸馏水+磷酸盐缓冲液+铁氰化钾+三氯乙酸+三氯化铁的吸光度。

1.4 数据处理

试验重复 3 次,采用 SPSS 软件进行统计分析,并比较所得数据之间的显著差异性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 大孔树脂的筛选

如表 1 所示,5 种大孔树脂对石斛多酚具有较强的吸附能力,弱极性大孔树脂 AB-8 和 HZ-841 型对石斛多酚

的吸附量较高,随着树脂极性的增强,其吸附率有所下降,说明大孔树脂对石斛多酚具有较好的选择性。大部分的树脂解吸率较高,其中 AB-8 树脂解吸率达到 94.08%。综合各型号树脂的吸附—解吸结果,选用 AB-8 型大孔树脂对霍山石斛多酚进行纯化。

2.2 静态吸附和解吸试验

2.2.1 AB-8 大孔树脂静态吸附霍山石斛多酚的动力学

由图 1 可知,大孔树脂对霍山石斛多酚的吸附量随着时间的延长而增加,在 30~150 min 时,大孔树脂对多酚的吸附量逐渐增加,在 150 min 时吸附量达到最大,说明在该时间段内,树脂对多酚类的吸附仍处在持续进行的状态,在 150 min 之后继续吸附,吸附量不再增加,说明大孔树脂对多酚的吸附已经达到饱和。

2.2.2 pH 对大孔树脂静态吸附的影响 多酚类化合物含有羟基^[17],pH 值影响酚类物质在溶液中的状态,进而影响其与溶剂间的作用。如图 2 所示,在一定 pH 值范围内,随着 pH 值的增大,大孔树脂的吸附量呈增长趋势,当 $pH>4$ 时,大孔树脂的吸附量逐渐降低。这是由于在弱酸性环境下,多酚类化合物以分子状态存在,而当 pH 值过高时,加速了酚羟基电离,产生了相应的阴离子,导致酚类物质与大孔树脂间的氢键作用减弱,从而降低了大

表 1 大孔树脂型号对石斛多酚的静态吸附和解吸的影响

Table 1 The effect of macroporous resin type on static adsorption and desorption of *Dendrobium polyphenols*

树脂型号	吸附量/(mg·g ⁻¹)	吸附率/%	解吸率/%
D101	23.62±0.08	78.73±0.41	91.62±0.75
AB-8	26.13±0.09	87.10±0.48	94.08±0.29
HZ-841	25.27±0.42	84.23±2.11	91.42±1.66
NKA-9	24.83±0.45	82.77±2.21	85.45±1.79
ADS-7	20.32±0.06	67.73±0.32	83.45±1.06

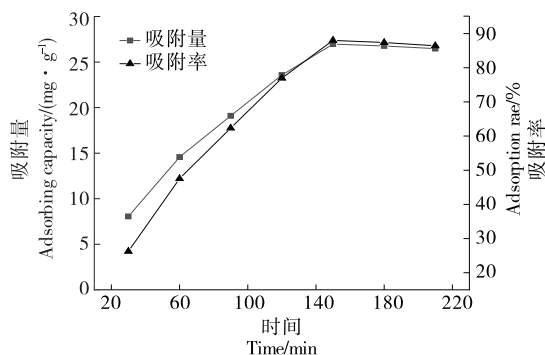


图 1 AB-8 树脂吸附霍山石斛多酚的动力学曲线

Figure 1 The adsorption dynamics of AB-8 resin to *Dendrobium huoshanense* polyphenols

孔树脂对多酚的吸附能力,导致吸附量减少^[18]。

2.2.3 多酚浓度对大孔树脂静态吸附的影响 如图3所示,多酚浓度对树脂吸附性能具有显著影响,当多酚浓度为0.5~2.0 mg/mL时,随着多酚浓度的增加,AB-8树脂吸附能力增强。这可能因为在一定浓度下,大孔树脂更有利于与酚类化合物分子接触,从而能够吸附更多的酚类化合物。而当多酚浓度>2.0 mg/mL时,随着多酚浓度的增加,大孔树脂的吸附量反而减少,这是由于当溶液中酚类化合物浓度过高,酚类化合物分子间相互作用产生絮凝现象,阻塞树脂孔洞,不利于树脂对酚类化合物的吸附,因此,多酚浓度为2.0 mg/mL较为适宜。

2.2.4 乙醇体积分数对 AB-8 大孔树脂静态解吸霍山石斛多酚的影响 由图4可知,乙醇溶液可从 AB-8 树脂中有效地将霍山石斛多酚解吸出来,且其对霍山石斛多酚的解吸性能与乙醇溶液的体积分数有关,随着乙醇溶液体积分数的增长,其对霍山石斛多酚的解吸率亦呈现增长趋势,当乙醇体积分数为40%时,对霍山石斛多酚的解吸率最大为94.56%,继续增大乙醇溶剂的体积分数,解吸率略有降低。这是因为乙醇溶液的体积分数较低时,其相对极性较强,解吸率较低,当乙醇体积分数为40%时,极性较为适中,解吸率最高;随着乙醇体积分数的增加,极性降低,解吸率又有所下降。

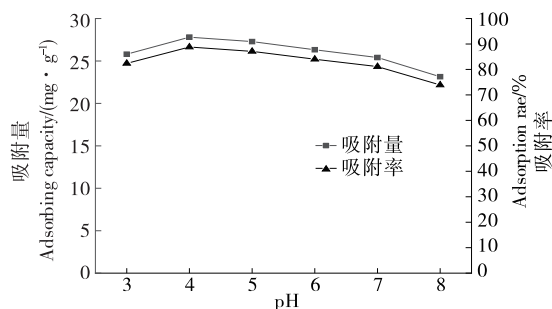


图2 样品 pH 值对 AB-8 树脂吸附能力的影响

Figure 2 The influence of sample pH on the adsorption capacity of AB-8 resin

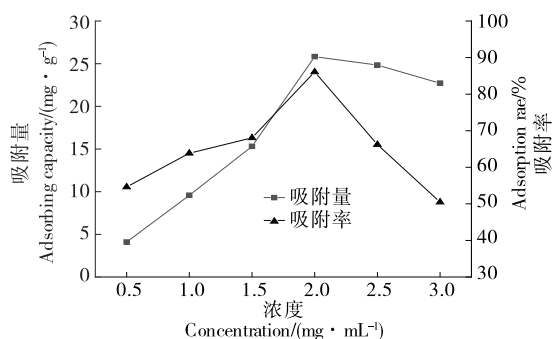


图3 样品浓度对大孔树脂吸附能力的影响

Figure 3 Effect of sample concentration on the adsorption capacity of macroporous resin

2.3 动态吸附和解吸试验

2.3.1 上样流速对大孔树脂吸附性能的影响 如图5所示,上样流速对 AB-8 吸附多酚影响较大,当上样浓度一定时,随着上样流速的增大,则泄漏点出现得越早。当上样流速分别为1.0,2.0,3.0,4.0 mL/min时,泄漏点分别出现在276,260,248,236 mL附近。此时的吸附量分别为537.83,507.05,482.73,460.04 mg。样品流速越慢,泄漏点出现的越晚,吸附量也较大,但上样时间过长,工作效率降低。综合考虑,上样流速为1.0~2.0 mL/min时较为适宜。

2.3.2 乙醇洗脱流速对解吸的影响 由图6可知,随着洗脱液的流出,多酚逐渐被洗脱出来,乙醇溶液在不同流速下对多酚的洗脱效果均较好。流速越快,多酚越早被洗出,但洗脱峰有拖尾现象,流速慢,洗脱曲线峰较为集中,多酚溶液浓度较高,洗脱液收集区间为100~200 mL。因此,洗脱流速为1 mL/min较为适宜。

2.4 乙醇梯度洗脱和高效液相色谱分析

如图7所示,蒸馏水洗脱未检测到酚类物质,而在10%,20%,30%和40%浓度下得到了4个洗脱组分,分别为DHP-1,DHP-2,DHP-3和DHP-4。通过高效液相色谱分析(图8),4个洗脱组分的含量分别为16.3%,14.8%,20.9%,26.2%,经树脂处理后4个组分的总多酚纯度为76.2%。

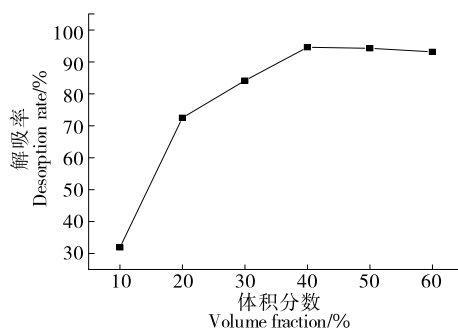


图4 乙醇体积分数对 AB-8 树脂解吸多酚的影响

Figure 4 Effect of ethanol concentration on the desorption properties of AB-8 resin to polyphenols

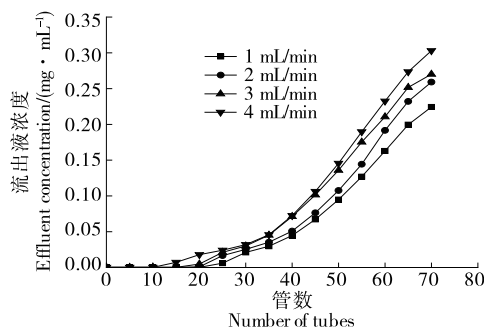


图5 上样流速对 AB-8 树脂吸附能力的影响

Figure 5 Effect of sampling rate on the adsorption capacity of AB-8 resin

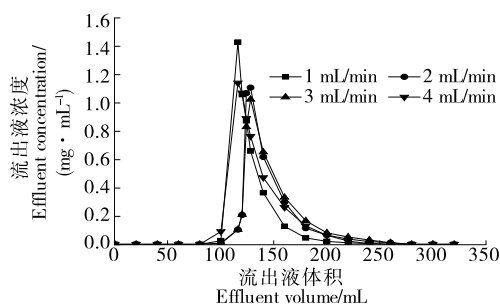


图 6 乙醇流速对动态解吸 AB-8 树脂中霍山石斛多酚的影响

Figure 6 Effect of ethanol flow rate on dynamic desorption of polyphenols from *Dendrobium huoshanense* in AB-8 resin

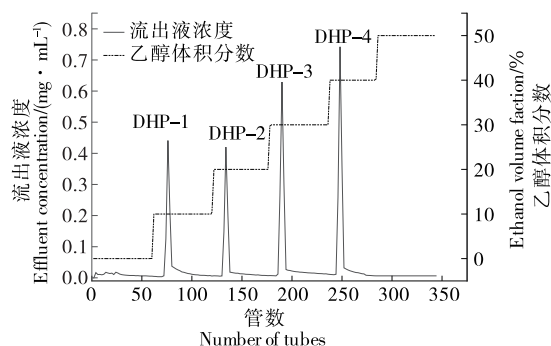


图 7 AB-8 树脂的乙醇梯度洗脱图谱

Figure 7 Stepwise elution of ethanol on a AB-8 resin chromatography

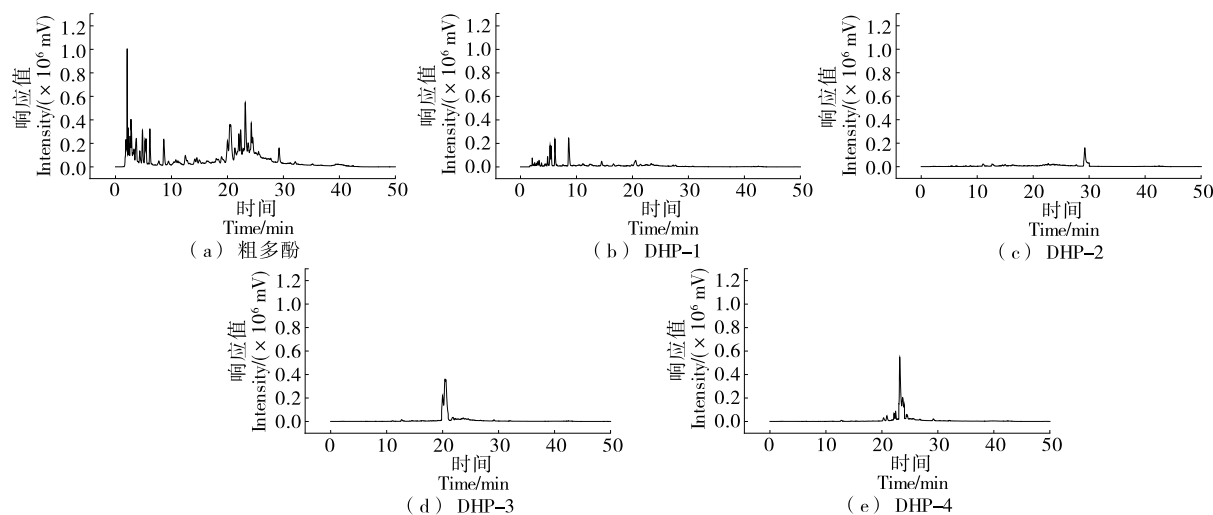


图 8 粗多酚和梯度洗脱组分的高效液相色谱图谱

Figure 8 HPLC chromatography of crude polyphenols and its fractions

2.5 霍山石斛多酚的体外抗氧化能力

2.5.1 超氧阴离子的清除 超氧阴离子过多会对机体的 DNA 和蛋白质等造成损伤^[19],有效清除机体中过多超氧阴离子等活性氧是开发功能性食品的关键。如图 9 所示,随着样品浓度的增加,多酚各个组分对超氧阴离子的清除能力也越强,当浓度达到 0.4 mg/L 时,各个多酚组分之间的清除能力差异较为明显,且趋于稳定,其中 DHP-1 组分与同浓度的维生素 C 相比,差异性不显著 ($P>0.05$),说明霍山石斛多酚组分具有较强的清除超氧阴离子的能力,且其清除能力依次为 DHP-3>DHP-4>DHP-1>DHP-2>粗多酚。DHP-3 对超氧阴离子能力接近维生素 C,可以作为很好的抗氧化剂,开发功能性食品。

2.5.2 霍山石斛多酚总还原力的比较 如图 10 所示,在整个还原力指标中,4 个多酚分离组分之间的还原力差异较为明显,且其还原力大小依次为 DHP-3>DHP-4>DHP-1>DHP-2>粗多酚。相比于维生素 C,还原力的差异性较为显著。

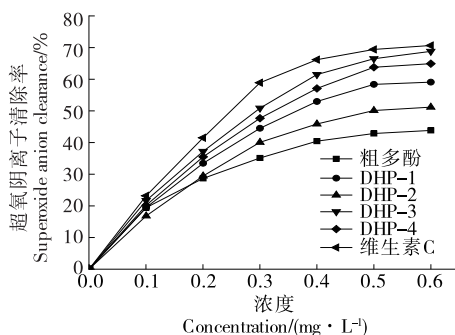


图 9 多酚组分对超氧阴离子的清除率

Figure 9 The scavenging rate of polyphenols components to superoxide anions

3 结论

通过静态吸附和解吸试验筛选出了适于霍山石斛多酚分离纯化的树脂 AB-8,其最佳分离纯化工艺条件为:静态吸附 150 min 即达到饱和,多酚溶液 pH 4.0,浓度

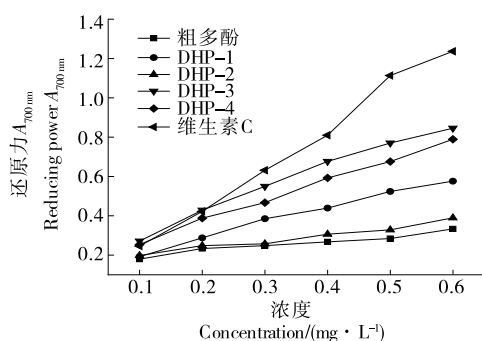


图 10 多酚总还原力的比较

Figure 10 Comparison of total reducing power of polyphenols

2.0 mg/mL, 上样流速 1.0 mL/min; 洗脱流速 1.0 mL/min。通过 10%, 20%, 30%, 40% 的乙醇溶液的梯度洗脱, 获得了 4 个洗脱组分, 分别为 DHP-1、DHP-2、DHP-3、DHP-4, 其含量分别为 16.3%, 14.8%, 20.9%, 26.2%, 总酚的纯度达到 76.2%; 霍山石斛多酚的抗氧化能力较为显著, 各组分抗氧化活性由大到小依次为 DHP-3 > DHP-4 > DHP-1 > DHP-2 > 粗多酚, 且随着样品浓度的增加, 总的还原力和对超氧阴离子清除能力逐渐增加, 呈明显的浓度相关性。但 4 个洗脱组分的多酚具体成分组成还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 包雪声, 顺庆生, 张申洪. 中国药用石斛图志[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005: 32.
- [2] WU Chin-tung, HUANG Keng-shiang, YANG Chih-hui, et al. Inhibitory effects of cultured *Dendrobium tosaense* on atopic dermatitis murine model[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2014, 463(2): 193-200.
- [3] LUO Ao-xue, HE Xing-jin, ZHOU Song-dong, et al. Purification, composition analysis and antioxidant activity of the polysaccharides from *Dendrobium nobile* Lindl[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79: 1 014-1 019.
- [4] LUO Jian-ping, DENG Yuan-yuan, ZHA Xue-qiang. Mechanism of polysaccharides from *Dendrobium huoshanense* on streptozotocin-induced diabetic cataract[J]. Pharmaceutical Biology, 2008, 46(4): 240-249.
- [5] XING Xiao-hui, STEVE W C, NIE Shao-ping, et al. A review of isolation process, structural characteristics, and bioactivities of water-soluble polysaccharides from *Dendrobium* plants[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2013, 1(2): 131-147.
- [6] 尹志娜. 植物多酚分离提取方法和生物功能研究进展[J]. 生命科学仪器, 2010, 8(7): 43-49.
- [7] MANACH C, SCALBERT A, MORAND C, et al. Polyphenols: Food sources and bioavailability[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2004, 79(5): 727-747.
- [8] 费雯, 淳泽, 何沁凝, 等. 金钗石斛总多酚提取工艺及体外抗氧化活性[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(4): 623-628.
- [9] 黄琴, 沈杨霞, 张成静, 等. 铁皮石斛多酚和黄酮含量及与抗氧化活性的相关性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3): 438-442.
- [10] 魏明, 刘艳艳, 蔡为荣, 等. 霍山石斛多酚超声波辅助提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 136-140.
- [11] 马乐, 韩军岐, 张润光, 等. 大孔吸附树脂在植物多酚分离纯化中的应用现状[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 364-368.
- [12] XI Li-sha, MU Tai-hua, SUN Hong-nan. Preparative purification of polyphenols from sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves by AB-8 macroporous resins [J]. Food Chemistry, 2015, 172(4): 166-174.
- [13] LUENGO E, ÁLVAREZ I, RASO J. Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 79-84.
- [14] 艾志录, 王育红, 王海, 等. 大孔树脂对苹果渣中多酚物质的吸附研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 245-248.
- [15] 崔洁, 潘倩, 张乔会, 等. 山杏仁种皮多酚的闪式提取工艺优化及体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 273-277.
- [16] 于亚莉, 高峰, 刘静波, 等. 超声波法提取花生壳中多酚类物质的研究[J]. 食品科学, 2007(11): 257-261.
- [17] WANG Chong, XIE Yun-ting, WANG Hui-yuan, et al. Phenolic compounds in beer inhibit formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from charcoal-grilled chicken wings[J]. Food Chemistry, 2019, 294(10): 578-586.
- [18] SUN Li-jun, GUO Yu-rong, FU Cheng-cheng, et al. Simultaneous separation and purification of total polyphenols, chlorogenic acid and phlorizin from thinned young apples[J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 1 022-1 029.
- [19] 唐又周. IgA 肾病人腭扁桃体单个核细胞培养上清对人肾小管上皮细胞株(HK-2)超氧阴离子型活性氧调控及凋亡影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 13.