

复合酶法优化毛竹笋壳多糖提取工艺 及其抗氧化活性研究

刘焕燕¹, 杨波¹, 李琴², 杨光¹

(1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 浙江省林业科学研究院 竹类研究所, 杭州 310023)

摘要: 为研究复合酶法提取毛竹笋壳多糖的最优工艺, 在单因素试验的基础上, 以多糖得率为响应值, 利用响应面优化法对酶添加量、酶解时间和酶解温度进行优化, 以确定其最佳工艺条件。用 Sevag 试剂法对提取的多糖进行纯化, 并对其单糖组成、抗氧化活性进行研究。结果表明, 复合酶法提取毛竹笋壳多糖的最优工艺参数为: 复合酶添加量 1.6%, 酶解时间 105 min, 酶解温度 51 ℃。在最优条件下多糖得率为 1.98%, 与模型预测值的相对误差为 2.94%。主要单糖组分半乳糖醛酸、半乳糖、木糖、阿拉伯糖的摩尔比为 15.35:32.82:6.45:39.13。采用体外抗氧化体系评价毛竹笋壳多糖的抗氧化效果, 发现其具有良好的抗氧化活性, 清除 DPPH 自由基和羟自由基的能力均表现出一定剂量效应。

关键词: 毛竹笋壳; 多糖; 复合酶提取; 单糖组成; 抗氧化

中图分类号: Q 71 **文献标志码:** A

Optimal Extraction of Polysaccharide from Bamboo Shoot Shells by Multi-Enzyme Method and Its Antioxidant Activity

LIU Huanyan¹, YANG Bo¹, LI Qin², YANG Guang¹

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Institute of Bamboo Shoot Research, Zhejiang Forestry Academy, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The paper concerns the optimal process for extracting polysaccharide from bamboo shoot shells by using the multi-enzyme method. The extraction rate was selected as an indicator for the evaluation of antioxidant activity of polysaccharide. Single factor tests were carried out and the optimum process conditions, such as the optimal enzyme concentration, enzymatic time and temperature, were acquired by using the response surface methodology. The extracted polysaccharide was purified with Sevag reagent, and its monosaccharide composition and antioxidant activity were studied. The results show that the optimal process parameters are as follows: enzyme concentration 1.6%, enzymatic time 105 min, enzymatic temperature 51 ℃. The extraction rate of polysaccharide under the optimal conditions is 1.98%, and the average relative error between the experimental and

收稿日期: 2018-03-15

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2016F50020)

第一作者: 刘焕燕(1990-), 女, 硕士研究生。研究方向: 天然产物化学。E-mail: lhy010129@163.com

通信作者: 杨波(1968-), 女, 副教授。研究方向: 食品生物技术。E-mail: yangbo6899@126.com

predicted values is 2.94%. The mole ratio among the main monosaccharide composition, including the galacturonic acid, galactose, xylose and Arabia sugar is 15.35 : 32.82 : 6.45 : 39.13. The purified polysaccharide extracted from bamboo shoot shells has good antioxidant activity, and the ability of scavenging DPPH radicals and hydroxyl radicals is of a certain concentration dependence.

Keywords: bamboo shoot shells; polysaccharide; multi-enzyme method; monosaccharide composition; antioxidant activity

竹笋属于禾本科竹亚科，是一种快速增长的多功能林业植物。在中国、日本和其他亚洲国家，竹笋栽培及食用的历史悠久，被广泛应用于建材、家具、纸张、筷子和食物来源等方面^[1-3]。浙江是竹子大省，盛产毛竹笋、雷竹。近年来，竹笋的加工模式主要集中在传统笋保鲜食品和风味笋加工等方面，其利用率仅在 30% 左右，剩余部分大多被作为废弃物^[4]。研究发现，笋壳中含有丰富的活性成分，包括多糖、黄酮、色素、甾醇和过氧化物酶等天然产物，笋壳作为竹笋加工剩余物，大量被废弃，造成了资源的极大浪费，同时带来了环境压力。开发再利用笋壳资源，提取其有效活性多糖物质，不仅能够实现笋壳资源的高值化利用，同时在保健食品和医药研究等方面也具有广阔的应用前景^[5-8]。目前，关于植物多糖的提取工艺已有较多研究，其中，热水浸提法、酸提法、碱提法、酶解法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法等是常用的方法^[9]。传统的热水浸提法多糖得率较低，一定程度上制约了其开发利用；酸、碱提取法对实验设备要求较高，易引起多糖结构的改变；物理仪器辅助法操作复杂；酶解法具有专一性强、条件温和的特点，采用复合酶协同作用于植物多糖的提取过程，能够较好地促进多糖的溶出，可极大地提高多糖得率^[10-11]。

目前，尚未有关于复合酶法提取毛竹笋壳多糖的相关报道。本研究拟采用响应面优化法对复合酶法提取毛竹笋壳多糖的工艺进行优化，确定最佳提取工艺，并对其单糖组成、体外抗氧化活性进行探究，以期能够最大限度地开发利用笋壳资源，提高产品的附加值，实现生物质资源的高值化，为毛竹笋壳多糖的工业提取及功能活性的深入研究提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

毛竹笋壳(*P. heterocycla*)：源自浙江省杭州市

径山镇。

1.2 仪器与设备

试剂及药品：葡萄糖标准品、苯酚、三氟乙酸、单糖标品、浓硫酸、95% 的乙醇等试剂，均为分析纯，购于成都市科龙化工试剂厂；2,2-联苯基-1-苦基肼基(DPPH)、1-苯基-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)、维生素 C(Vc)购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司；蛋白质酶(10⁴U/g)、纤维素酶(3 000 U/g)、果胶酶(2 000 U/g)购于忆诺联创生物科技有限公司。

仪器及设备：FW 型高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)、HH-ZK6 型恒温水浴锅(巩义市予华仪器有限公司)、KQ-300DE 型数控超声波清洗器(宁波新芝生物科技股份有限公司)、R-501 型旋转蒸发器(上海一科仪器有限公司)、U-1900 型可见分光光度计(日本 Hitachi 公司)、DZF-6020 型真空干燥箱(上海博迅实业有限公司)、DGX-9140 型烘箱(太仓市华利达实验设备有限公司)、冷冻干燥机(美国 Labconco 公司)、CL31R 型多功能高速离心机(美国 Thermo 公司)、Sartorius BSA224S 型电子分析天平(北京赛多利斯科学仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 毛竹笋壳的预处理

用自来水将新鲜的毛竹笋壳清洗干净，将其置于 55 ℃ 的烘箱中干燥，之后粉碎，过 80 目筛，备用。

1.3.2 毛竹笋壳多糖的复合酶法提取工艺

准确称取 5.0 g 笋壳粉末，在预试验的基础上，按照料液比 1 : 30(m/V)，在设定的不同复合酶添加量(蛋白质酶 : 纤维素酶 : 果胶酶=1 : 1 : 1)、酶解时间和酶解温度下进行酶解提取试验。酶解后得到的多糖浸提液，沸水浴 10 min 灭酶，抽滤，混合全部滤液，60 ℃ 减压浓缩，浓缩液加入 4 倍体积的 95% 乙醇于 4 ℃ 静置过夜，5 000 r/min 离心 10 min，收集沉淀并经冻干得笋壳粗多糖。

1.3.3 多糖得率的测定

采用苯酚硫酸^[12]比色法，得到葡萄糖标准曲线为 $y = 19.59x - 0.0216$ ，调节系数 $R^2 = 0.9973$ 。式中： y 为吸光度； x 为葡萄糖质量浓度 (mg/mL)。准确称取 2.0 g 粗多糖蒸馏水定容至 100 mL，按照上述标准曲线的操作步骤测定吸光度，根据标准曲线方程，多糖得率计算公式为

多糖得率 = $\frac{m_1 \times w}{m_0} \times 100\%$ (1)

式中： m_1 为冻干样品的质量； m_0 为毛竹笋壳质量； w 为多糖含量。

1.3.4 单因素试验

在自然 pH 条件下，按照 1:30(m/V)料液比加入蒸馏水，探究不同复合酶添加量、酶解时间、酶解温度对毛竹笋壳多糖得率的影响，提取工艺按照 1.3.2 所述。

1.3.5 响应面试验设计

在单因素试验的基础上，利用 Box-Benhknen 原理设计三因素三水平的响应面试验，三因素分别为复合酶添加量、酶解时间、酶解温度，以多糖得率为响应指标，确定复合酶法提取笋壳多糖的最佳工艺。各因素及水平编码见表 1。

表 1 响应面试验因素与水平
Tab.1 Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	复合酶添加量/%	酶解时间/min	酶解温度/℃
-1	1.0	60	40
0	1.5	90	50
1	2.0	120	60

1.3.6 毛竹笋壳多糖初步纯化

将笋壳粗多糖配成 1.5 mg/mL 的溶液，加入等体积的 Sevag 试剂(氯仿:正丁醇=4:1)充分振摇 20 min 后，4 000 r/min 离心 10 min，弃去下层有机相，上层水相继续进行上述脱蛋白操作，重复 4~5 次，直至无明显的白色沉淀产生^[13]。最后收集水相于透析袋(4~6k Da)中，透析 2 d 后冻干得到笋壳精制多糖。

1.3.7 毛竹笋壳多糖的单糖组成分析

笋壳多糖的单糖组成采用柱前衍生化反相高效液相色谱法(HPLC)进行分析鉴定^[14]。测定条件：检测波长 245 nm；柱温 30 ℃；柱子 APS-2 HYPERSIL(4.6×250 mm，5 μm，Thermo，MSA)；

流速 1.0 mL/min；进样体积 10 μL；流动相乙腈：流动相磷酸缓冲液(0.05 M，pH6.8)=17:83^[15]。

1.3.8 毛竹笋壳多糖抗氧化活性测定

用蒸馏水配置不同浓度的笋壳多糖待测溶液，取待测溶液 1.0 mL 置于试管中，再添加 3.0 mL 溶于 95% 乙醇的 DPPH 溶液(0.075 mmol/L)，均匀混合，黑暗处放置 30 min 后，在波长 517 nm 处测吸光值，Vc 溶液为阳性对照^[16]。DPPH 自由基清除率的计算式为

清除率 = $\left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%$ (2)

式中： A_0 为空白样品的吸光值； A_1 为样品溶液的吸光值； A_2 为以蒸馏水代替 DPPH 的吸光值。

羟自由基清除率的测定参考祁小妮等^[13]、Mao 等^[17]的方法稍作修改。取 2.0 mL 不同浓度的笋壳多糖待测溶液与 2.0 mL FeSO₄ 溶液(9.0 mmol/L)混匀，加入 2 mL H₂O₂ 溶液(8.8 mmol/L)，摇匀，加入 2.0 mL 水杨酸乙醇液(9.0 mmol/L)，振荡混匀后立刻在 37 ℃ 水浴锅中放置 30 min，测定不同质量浓度多糖样品液在波长 510 nm 处的吸光值，Vc 溶液为阳性对照。羟自由基的清除率计算同式(2)，其中 A_2 为不加显色剂 H₂O₂ 的吸光值。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 复合酶添加量对多糖得率的影响

准确称取 10 g 粉碎的毛竹笋壳，按照 1:30 (m/V)料液比添加蒸馏水，提取温度为 50 ℃，分别添加 0.5%，1.0%，1.5%，2.0%，2.5% 的复合酶，酶解 60 min，比较复合酶不同的添加量对多糖得率的影响，结果如图 1 所示。

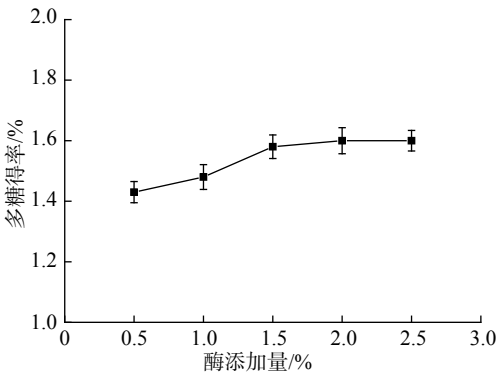


图 1 酶添加量对多糖得率的影响
Fig.1 Effect of enzyme concentration on the extraction rate of polysaccharide

由图 1 可以看出, 随着酶添加量的增加, 多糖得率逐渐增加; 当添加量达到 1.5% 后, 继续增大添加量, 多糖得率没有显著增加, 这可能是在一定提取浓度下, 酶浓度已经趋于饱和, 多糖几乎全部溶出, 继续增加酶用量, 对多糖得率没有显著影响。因此, 在后续试验中选取 1.5% 作为适宜的复合酶添加量。

2.1.2 酶解时间对多糖得率的影响

准确称取 10 g 粉碎的毛竹笋壳, 按照 1 : 30(m/V)料液比添加蒸馏水, 提取温度为 50 ℃, 复合酶添加量为 1.5%, 分别酶解 30, 60, 90, 120, 150 min, 探究酶解时间对多糖得率的影响, 结果如图 2 所示。当酶解时间小于 90 min 时, 随着时间的延长, 多糖得率逐渐增加, 且增加速率较大; 当酶解时间超过 90 min 后, 多糖得率不再增加, 反而出现较小程度的下降, 这可能是酶解时间过长, 少部分多糖出现了分解现象, 同时酶的催化活性会降低, 不能继续增大多糖得率。因此, 选取 90 min 作为适宜的酶解时间。

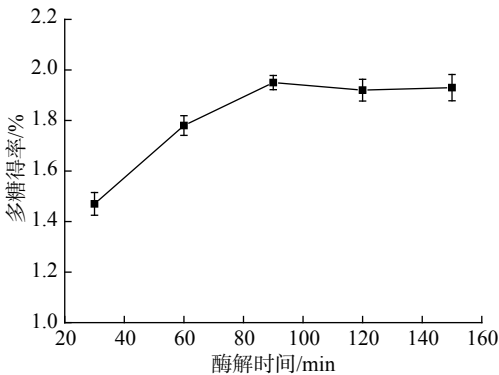


图 2 酶解时间对多糖得率的影响
Fig.2 Effect of enzymatic time on the extraction rate of polysaccharide

2.1.3 酶解温度对多糖得率的影响

准确称取 10 g 粉碎的毛竹笋壳, 按照 1 : 30(m/V)料液比添加蒸馏水, 添加 1.5% 的复合酶, 分别在 30, 40, 50, 60, 70 ℃ 条件下酶解 90 min, 探究酶解温度对多糖得率的影响, 结果如图 3 所示。当酶解温度在 30~50 ℃ 范围内, 多糖得率逐渐上升, 在 50 ℃ 时多糖得率达到最高; 温度高于 50 ℃ 后, 多糖得率随着温度升高呈现明显的下降趋势, 这种现象可能是由于酶本身的特性引起的, 酶具有最适反应温度, 温度过低会抑制其活性, 温度过高会导致其失去活性。因此, 确定出适宜的酶解温度为 50 ℃。

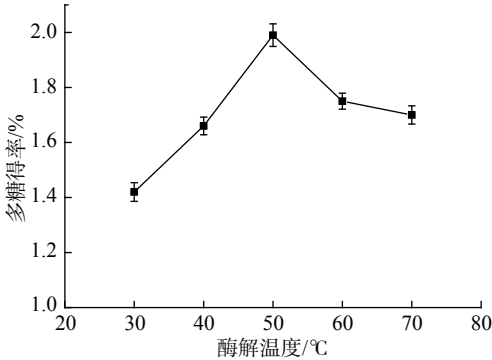


图 3 酶解温度对多糖得率的影响
Fig.3 Effect of enzymatic temperature on the extraction rate of polysaccharide

2.2 响应面试验设计与结果分析

2.2.1 响应面试验结果与分析

通过响应面法, 对复合酶添加量 *A*、酶解时间 *B*、酶解温度 *C* 3 个单因素进行分析, 得到的试验方案及数据结果见表 2, 共有 17 个试验点, 其中 5 个中心点试验。利用 Design-Expert 软件对响应面数据进行多元回归拟合, 得到多糖得率 *Y* 的二次回归拟合曲线方程为

$$Y = 2.00 + 0.100A + 0.091B + 0.065C + 0.053AB - 0.088AC - 0.028BC - 0.29A^2 - 0.10B^2 - 0.14C^2$$

模型的方差与显著性分析结果如表 3 所示。

表 2 响应面试验设计与结果
Tab.2 Design and results of response surface test

试验号	A	B	C	Y/%
1	0	0	0	2.08
2	0	0	0	1.94
3	-1	-1	0	1.44
4	-1	1	0	1.57
5	1	0	1	1.64
6	0	-1	1	1.79
7	1	1	0	1.88
8	0	0	0	1.99
9	1	-1	0	1.54
10	0	1	-1	1.79
11	0	0	0	1.97
12	0	1	1	1.87
13	-1	0	1	1.63
14	-1	0	-1	1.32
15	1	0	-1	1.70
16	0	0	0	2.02
17	0	-1	-1	1.60

表3 回归方程的方差分析

Tab.3 Variance analysis of the regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.750	9	0.084	35.12	<0.000 1**
A	0.080	1	0.080	33.42	0.000 7**
B	0.067	1	0.067	27.95	0.001 1**
C	0.034	1	0.034	14.29	0.006 9**
AB	0.011	1	0.011	4.70	0.066 8*
AC	0.031	1	0.031	12.91	0.008 8**
BC	3.070×10 ⁻³	1	3.070×10 ⁻³	1.29	0.293 7
A ²	0.360	1	0.360	151.81	<0.000 1**
B ²	0.044	1	0.044	18.65	0.003 5**
C ²	0.079	1	0.079	33.20	0.000 7**
残差	0.017	7	2.383×10 ⁻³		
失拟项	4.158×10 ⁻³	3	1.386×10 ⁻³	0.44	0.735 3
纯误差	0.013	4	3.130×10 ⁻³		
总和	0.770	16			

注: $R^2=0.978\ 3$, $R_{adj}^2=0.950\ 5$
**表示极显著($P<0.01$), *表示显著($0.01<P<0.05$)

可以看出, 该模型概率值 $P<0.000\ 1$, 说明该模型极显著; 失拟项不显著($P=0.735\ 3$), 说明外界未知因素对试验的干扰较小; 模型决定系数 $R^2=0.978\ 3$, 调整决定系数 $R_{adj}^2=0.950\ 5$, 表示该响应面试验的设计比较合理, 建立的模型能够解释 95.05% 响应值的变化, 说明毛竹笋壳多糖得率的预测值与实际值能够较好拟合, 试验误差较小, 可以用此

模型对复合酶法提取毛竹笋壳多糖的工艺条件进行分析和预测^[18]。比较 F 值大小可以发现, 各因素对多糖提取效果的影响程度顺序为复合酶添加量>酶解时间>酶解温度, 且在本研究所选取的因素水平范围内, 3 个单因素对多糖得率均有极显著的影响。

2.2.2 两因素交互作用分析

复合酶法提取毛竹笋壳多糖工艺中酶添加量、酶解时间和酶解温度之间的交互作用对多糖得率的影响结果如图 4 所示。一般来讲, 响应曲面图的抛物面开口向下, 说明具有极大值点; 响应曲面图的陡缓及其等高线图的形状可以反映因素两两交互效应的强弱, 曲面越陡且等高线为椭圆形表示两因素交互作用显著, 反之则说明交互作用不显著^[13, 19]。从图 4 中可以看出, 固定任意 1 个因素为零水平, 改变其余 2 个因素时, 随着二者水平的提高, 多糖得率均呈现先上升后下降的趋势。相比较而言, 随着酶解时间的延长, 多糖得率下降的幅度较小, 说明酶解时间对多糖得率的影响不显著。因素 A 与 B, A 与 C 交互作用的曲面图较为陡峭, 且等高线呈密集的椭圆形, 表明酶添加量和酶解时间、酶添加量和酶解温度之间均有较强的交互作用; 因素 B 与 C 交互作用的曲面图较缓, 等高线趋向圆形, 表明酶解时间与酶解温度之间的交互作用不显著。以上结果与方差分析结果基本一致。

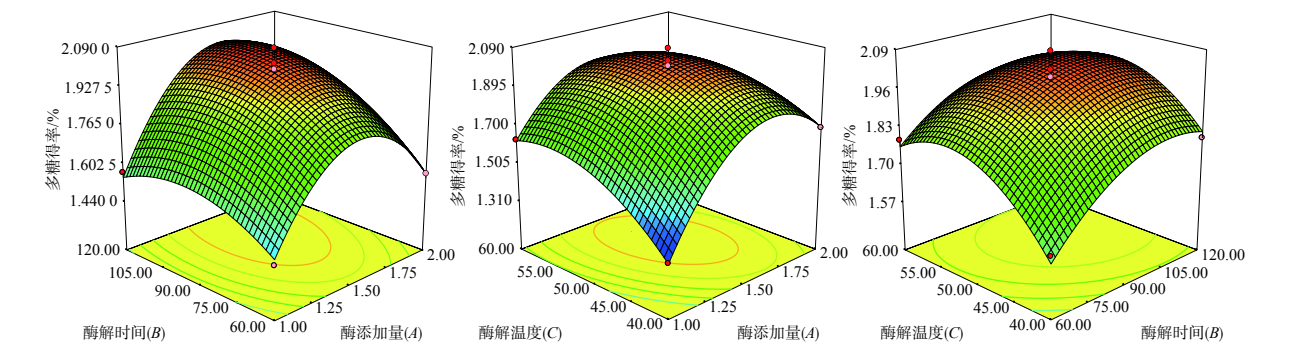


图 4 各因素交互作用对多糖得率的影响

Fig.4 Effect of the interaction between various factors on the extraction rate of polysaccharide

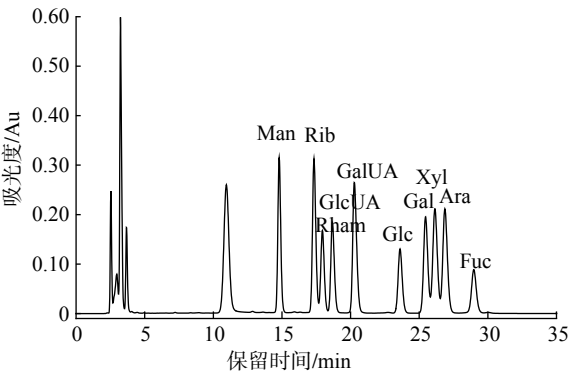
2.2.3 最优工艺验证试验

利用 Design Expert 7.0 软件对复合酶法提取毛竹笋壳多糖的最佳工艺进行优化, 得到最佳工艺参数为: 复合酶添加量 1.6%, 酶解时间 104.30 min, 酶解温度 51.29 °C。为检验响应面法优化笋壳多糖提取工艺的可靠性, 考虑到实际操作的可行性,

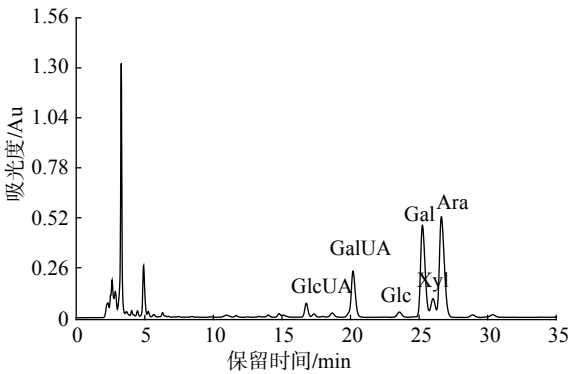
调整参数为复合酶添加量 1.6%, 酶解时间 105 min, 酶解温度 51 °C, 进行验证试验。结果发现, 在该调整工艺条件下多糖得率为 1.98%, 与模型预测值没有明显差异, 相对误差为 2.94%。这说明本次研究建立的响应面模型得到的最优工艺参数准确性较强。

2.3 笋壳精制多糖的单糖组成

采用 HPLC 测定笋壳精制多糖水解产物及 10 种单糖标准品, 通过比较 10 种单糖标准品和样品衍生物在色谱图中的保留时间和峰面积, 分析确定单糖组成, 以及各单糖组成的摩尔比, 结果如图 5 所示。笋壳多糖能够在上述色谱条件下得到有效的分离, 其中, Man 为甘露糖; Rib 为核糖; Rham 为鼠李糖; GlcUA 为葡萄糖醛酸; GalUA 为半乳糖醛酸; Glc 为葡萄糖; Gal 为半乳糖; Xyl 为木糖; Ara 为阿拉伯糖; Fuc 为岩藻糖。根据色谱图中的保留时间与峰面积, 可以确定该多糖含有 GalUA, Gal, GlcUA, Xyl, Ara 和 Glc。其中, Glc 和 GlcUA 的含量较低, 主要单糖组分 GalUA, Gal, Xyl, Ara 的摩尔比为 15.35 : 32.82 : 6.45 : 39.13, 可见毛竹笋壳多糖是一种酸性多糖。



(a) 10 种单糖标准品 PMP 衍生物的 HPLC 色谱图



(b) 笋壳的单糖组成 HPLC 色谱图

图 5 笋壳多糖的单糖组成分析

Fig.5 Analysis of the monosaccharide composition of the polysaccharide

2.4 抗氧化活性结果与分析

2.4.1 DPPH 自由基清除率

毛竹笋壳精制多糖和 Vc 对 DPPH 自由基的清除效果比较如图 6 所示。可以看出, 毛竹笋壳精

制多糖具有显著的清除 DPPH 自由基的能力, 且随着浓度的增加, 清除能力逐渐增强; 但是 Vc 清除 DPPH 自由基的效果基本保持稳定。当质量浓度为 0.50 mg/mL 时, 精制多糖对 DPPH 的清除率已达到 50% 以上, 但 Vc 对 DPPH 的清除率已高达 96.67%。精制多糖的半抑制浓度 IC_{50} 值为 0.47 mg/mL, 可见一定质量浓度范围内的 Vc 和笋壳多糖对 DPPH 自由基都具有一定的清除效果, 且毛竹笋壳精制多糖对 DPPH 的清除效果低于相同浓度条件下的 Vc。

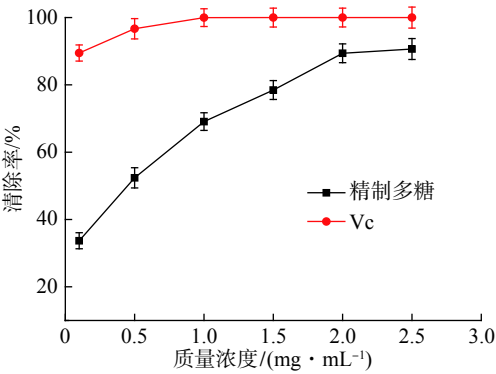


图 6 笋壳多糖对 DPPH 自由基的清除率

Fig.6 DPPH scavenging rate of the purified polysaccharide

2.4.2 羟自由基清除率

笋壳精制多糖和 Vc 对羟自由基的清除效果比较结果如图 7 所示。

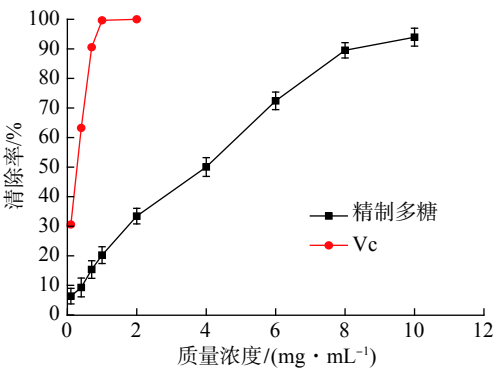


图 7 笋壳多糖对羟自由基的清除率

Fig.7 Hydroxyl radical scavenging rate of the purified polysaccharide

由图 7 可知, 在质量浓度低于 2.0 mg/mL 范围内, 二者对羟自由基的清除能力随浓度的增大而增大, Vc 清除效果增大的速度较快; 当多糖、Vc 质量浓度为 2.0 mg/mL 时, Vc 对羟自由基的清除效果基本保持稳定, 已达到最大值; 精制多糖对羟自由基的清除率为 33.42%, 且随着浓度的增

大,清除效果持续提高。笋壳精制多糖和 Vc 对羟自由基的半抑制浓度 IC_{50} 值分别为 4.00, 0.35 mg/mL。综上分析可以看出,笋壳精制多糖对羟自由基的清除效果稍弱,且呈现出较明显的质量浓度依赖关系。

3 结 论

选用复合酶法提取毛竹笋壳的多糖,在单因素试验结果的基础上,通过 Design-Expert 软件对提取工艺进行了优化设计,并建立了数学模型,获得了笋壳多糖的最佳提取工艺条件:复合酶添加量 1.6%,酶解时间 105 min,酶解温度 51 ℃。在最优条件下的多糖得率为 1.98%,与模型预测值基本吻合。通过高效液相色谱分析发现,笋壳精制多糖是一种酸性多糖,主要单糖组分半乳糖醛酸、半乳糖、木糖、阿拉伯糖的摩尔比为 15.35:32.82:6.45:39.13。抗氧化活性试验结果表明,毛竹笋壳多糖具有一定的 DPPH 自由基和羟自由基清除能力,其清除能力与多糖的质量浓度有明显的量效关系。

参考文献:

- [1] ZHANG Z S, WANG X M, YU S C, et al. Isolation and antioxidant activities of polysaccharides extracted from the shoots of *Phyllostachys edulis* (Carr.)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 49(4): 454–457.
- [2] SINGHAL P, BAL L M, SATYA S, et al. Bamboo shoots: a novel source of nutrition and medicine[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(5): 517–534.
- [3] AZMI A F M N, MUSTAFA S, HASHIM D M, et al. Prebiotic activity of polysaccharides extracted from *Gigantochloa levis* (*Buluh beting*) shoots[J]. *Molecules*, 2012, 17(2): 1635–1651.
- [4] 苏雅静. 竹笋壳黄酮的高效提取及其对酪氨酸酶活性影响的动力学研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [5] 林良美. 笋壳活性膳食纤维的提取及降糖降脂功能特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [6] ZHENG Y F, ZHANG S, WANG Q, et al. Characterization

and hypoglycemic activity of a β -pyran polysaccharides from bamboo shoot (*Leleba oldhami* Nakal) shells[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 144: 438–446.

- [7] CHANG R. Bioactive polysaccharides from traditional Chinese medicine herbs as anticancer adjuvants[J]. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 2002, 8(5): 559–565.
- [8] LEE K Y, LEE M H, CHANG I Y, et al. Macrophage activation by polysaccharide fraction isolated from *Salicornia herbacea*[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2006, 103(3): 372–378.
- [9] 原菲. 银杏多糖的提取分离、结构鉴定及活性测定[D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [10] 苑璐, 冷凯良, 周余航, 等. 复合酶解法优化黄精多糖提取工艺[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(9): 996–1001.
- [11] 黎英, 陈雪梅, 张灵, 等. 复合酶法提取漳平水仙饼茶多糖的工艺优化[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(4): 443–447.
- [12] 朱彩平, 张声华. 枸杞子水提物中多糖含量的测定[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(2): 111–113.
- [13] 祁小妮, 林楠楠, 李振亮, 等. 生地黄多糖提取工艺的优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(2): 231–235.
- [14] 邵双双, 贺亮, 韦朝阳, 等. 新型中国被毛孢胞内多糖 HSIPS2 链构象及抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(4): 200–204, 227.
- [15] 韦朝阳. 蝉拟青霉深层发酵及其胞内多糖的结构研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] WANG J H, XU J L, ZHANG J C, et al. Physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharide from floral mushroom cultivated in Huangshan Mountain[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 131: 240–247.
- [17] MAO G H, ZOU Y, FENG W W, et al. Extraction, preliminary characterization and antioxidant activity of Sen-enriched Maitake polysaccharide[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 101: 213–219.
- [18] 李明华, 陆正清, 孟秀梅, 等. 金针菇多糖闪式提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(10): 216–221.
- [19] 喻俊, 王涛, 贾春红, 等. 响应面优化牛蒡子多糖的提取及其抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(6): 207–212.

(编辑: 董 伟)