

超声辅助酶法提取山药皮水溶性多糖的工艺优化

吴金松, 耿广威, 任聪, 徐军, 杨新玲, 丁德刚*
(河南牧业经济学院 理学部, 河南 郑州 450046)

摘要:以铁棍山药皮为原材料,采用单因素试验和正交试验对山药皮中水溶性多糖的提取条件进行优化,后对其进行紫外吸收扫描和红外光谱分析。先用果胶酶、纤维素酶、中性蛋白酶进行辅助提取,结果表明,纤维素酶的提取率最高。以纤维素酶作为辅助酶结合超声进行优化试验,通过极差和方差分析,得到最佳优化工艺条件:纤维素酶加酶量5.0%、超声功率350 W、酶解-超声时间60 min,料液比1:50 (g/mL),该条件下提取率为10.98%。紫外吸收图谱显示,在波长260 nm~280 nm无特征吸收峰,即山药皮粗多糖中不含核酸和蛋白质,通过红外光谱检测官能团的伸缩振动峰图谱表明,提取物质符合多糖的基本特征。

关键词:山药皮水溶性多糖;超声结合酶法;正交试验优化;紫外吸收;红外光谱

Optimization of Enzymolysis-Ultrasonic Assisted Extraction of Water-soluble Polysaccharides from Peel of *Rhizoma dioscoreae*

WU Jin-song, GENG Guang-wei, REN Cong, XU Jun, YANG Xin-ling, DING De-gang*
(Department of Science, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: This paper aims to optimize the extraction conditions of water-soluble polysaccharides from peel of *Rhizoma dioscoreae* by single factor experiment and orthogonal experiment, followed by ultraviolet scanning and infrared spectroscopy. To be specific, the extraction rate with the help of pectinase, cellulase, and neutral protease was respectively determined, and the results showed that the highest extraction rate was achieved by cellulase. Thus, cellulase was used as auxiliary enzyme for the following optimization. According to the result of range analysis and variance analysis, the optimal conditions are as below: cellulase added at 5.0%, ultrasonic power of 350 W, enzymolysis-sonication duration of 60 min, and material-to-liquid ratio of 1:50 (g/mL). Under these conditions, the extraction rate was 10.98%. The ultraviolet spectrum showed no characteristic absorption peak at 260 nm-280 nm. Therefore, the extracted crude polysaccharide contained no nucleic acid or protein. According to the infrared spectrum (stretching vibration of functional groups), the extracted substance had the basic characteristics of polysaccharide.

Key words: water-soluble polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*; ultrasound combined with enzymolysis; optimization by orthogonal experiment; ultraviolet absorption; infrared spectrum

引文格式:

吴金松, 耿广威, 任聪, 等. 超声辅助酶法提取山药皮水溶性多糖的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 90-97.
WU Jinsong, GENG Guangwei, REN Cong, et al. Optimization of Enzymolysis-Ultrasonic Assisted Extraction of Water-soluble Polysaccharides from Peel of *Rhizoma dioscoreae*[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 90-97.

基金项目: 河南省自然科学基金(212300410351)

作者简介: 吴金松(1988—), 男(汉), 讲师, 硕士, 研究方向: 食品加工技术、食品化学与营养学。

* 通信作者: 丁德刚(1978—), 男(回), 副教授, 博士, 研究方向: 分子荧光识别和光催化制氢研究。

山药是薯蓣的干燥块根,既可以用作药材,也可以直接食用,主要产于河南焦作、温县,山西太谷、介休,河北安国、保安,陕西大荔、渭南、汉中等地^[1]。最初记载于《神农本草经》,山药的营养成分主要有淀粉、维生素、粗纤维、糖蛋白、脂肪、矿物质等,还具有多糖、黄酮、尿素囊等活性成分。山药具有抗氧化、祛湿气、滋养脾肺、养胃等功效,可用于食欲不振、脾胃虚弱、腹泻、高血糖等症^[2-4],具有良好的作用。目前市场上不断涌现出各种各样以山药为原料制成的食品及零食,如山药粉、山药薯片等,这些产品在加工削皮过程中,产生约20%的副产物,其中大量副产物被视为垃圾直接丢弃,不仅造成了资源浪费而且还会污染环境,因此如何将山药皮再利用具有重要的科研价值。

山药皮成分与山药肉基本一致,富含皂苷、多酚、多糖、黄酮、糖蛋白和粗纤维等营养成分^[5-10]。山药多糖具有抗氧化、降低血糖、解酒等功效,其在食品加工和生物材料领域有着广泛的应用^[11-14]。周庆峰等^[15]建造小鼠急性酒精中毒模型,通过观察给药后醉酒小鼠入睡潜伏期和醉酒时间,以及血清和肝组织中反应肝功能的生化指标变化,探究山药多糖的解酒护肝作用,为研制解酒药物新品种作参考。然而,国内外对于山药皮水溶性多糖的分离提取工艺研究报道较少,相较于传统多糖提取工艺方法的水煮醇沉法、酸碱水解法、酶辅助法、超声辅助法和微波辅助法等^[16-19],超声辅助酶法利用超声破坏细胞,结合酶水解作用,使多糖成分扩散释放,提高提取效率。为提高山药皮的利用价值,本研究主要通过单因素和正交试验,优化超声结合酶法提取山药皮中水溶性多糖的提取工艺,以期对山药皮的综合开发以及在食品添加剂中的应用提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 原料与试剂

铁棍山药:河南温县。

无水乙醇(分析纯):河南新乡市三伟消毒制剂有限公司;葡萄糖标品、苯酚、溴化钾(均为分析纯):天津科密欧化学试剂有限公司;硫酸(分析纯):洛阳昊华化学试剂有限公司;盐酸(分析纯):开封市盛源化工有限公司,以上试剂均为分析纯;果胶酶(食品级,≥100 000 U/g):上海士锋生物科技有限公司;中性蛋白酶(食品级,≥100 000 U/g)、纤维素酶(食品级,≥100 000 U/g):南宁庞博生物工程有限公司。

1.2 仪器与设备

FA3204B型分析天平(感量0.0001g):上海佑科

仪器仪表有限公司;BJ-150型多功能粉碎机:德清拜杰电器有限公司;Hanon i2型可见光分光光度计:济南海能仪器股份有限公司;TU-1901型双光束紫外可见光光度计:北京普析通用仪器有限责任公司;is10型红外傅里叶变换红外光谱仪:美国尼高力公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验流程

新鲜的铁棍山药→去皮、榨汁→收集山药皮→烘干→粉碎→过筛(50目)→得到山药皮粉→准确称取3.000g山药皮粉→调节酶解pH值→酶解-超声→抽滤→稀释滤液→测量吸光值→计算粗多糖提取率→滤液浓缩→醇沉→抽滤→干燥→紫外吸收扫描→红外光谱测定。

1)把新鲜的铁棍山药去皮保留干净的山药皮,放入电热鼓风干燥箱中,调节温度为60℃,烘干6h~8h,将山药皮取出来,把干燥后的山药皮放进粉碎机粉碎成粉末,将粉碎后的山药皮粉过筛(50目),将得到的山药皮粉放入密封袋中备用。

2)准确称取3.000g山药皮粉,配制一定的料液比(山药皮粉和蒸馏水比例),通过pH计对溶液进行酶解pH值的调节,调节pH值所用的缓冲溶液为1:50(体积比)的乙酸分析纯稀释液,调节到所需的酶解pH值。调好pH值后,加入一定比例的酶,进行充分搅拌。

3)将溶液按照不同参数条件进行超声处理。

4)将酶解-超声后的溶液进行抽滤,收集滤液。

5)将得到的滤液放入旋转蒸发仪中进行抽滤,调制旋转蒸发仪参数为温度60℃,转速70r/min,将滤液旋转蒸发至10mL~20mL。

6)将旋转蒸发后的滤液,按照1:5的体积比加入95%乙醇,将混匀的溶液放置在4℃的冰箱中静置醇沉12h。

7)将醇沉后的溶液进行抽滤,将得到的粗多糖放入鼓风干燥箱中进行干燥,设置参数为温度60℃,干燥4h,得到干燥后的粗多糖。

1.3.2 超声辅助酶法提取山药皮粗多糖的单因素试验

根据相关文献^[20-23]得到影响植物多糖提取的主要因素有辅助酶的种类、加酶量(%)、酶解pH值、料液比(g/mL)、酶解-超声时间(min)、酶解-超声温度(℃)、超声功率(W),本研究选择以上单因素进行试验。具体单因素提取条件:山药皮粉3.000g,按1:30(g/mL)料液比加入蒸馏水,醋酸调节pH值至5.0,分别加入4.0%3种酶,设置超声功率300W,酶解-超声温度50℃,酶解-超声时间40min为基准,变换各单因素水平,进行酶解-超声辅助提取,并测定山药皮粗多糖提取率,每

组平行测定3次。

1.3.3 超声辅助酶法提取山药皮粗多糖的正交试验优化

以单因素试验结果为依据,选定纤维素酶为辅助提取酶,酶解 pH 值为 5.0,酶解-超声温度为 55 ℃,选取料液比(g/mL)、加酶量(%)、酶解-超声时间(min)、超声功率(W)4个因素,以山药皮粗多糖提取率为指标,设计四因素三水平 $L_9(3^4)$ 的正交试验,优化超声结合酶法辅助提取铁棍山药皮多糖的工艺。因素选取及水平安排见表1。

表1 正交试验因素水平

Table 1 Levels of factors in orthogonal experiment

水平	A 料液比/(g/mL)	B 加酶量/%	C 酶解-超声时间/min	D 超声功率/W
1	1:30	4.0	40	300
2	1:40	4.5	50	350
3	1:50	5.0	60	400

1.3.4 山药皮粗多糖提取率的测定

1.3.4.1 葡萄糖含量标准曲线的绘制

采用硫酸-苯酚法^[24]绘制葡萄糖溶液标准曲线。准确称取 0.100 0 g 无水葡萄糖,用蒸馏水将其溶解并定容于 100 mL 容量瓶中,配制成 1.0 mg/mL 的葡萄糖标准溶液,用 5.0 mL 的移液管吸取 5.0 mL 1.0 mg/mL 的葡萄糖溶液放入 50 mL 的容量瓶中,配制成 0.1 mg/mL 的葡萄糖溶液,以备后续试验使用。用移液管分别吸取 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 0.1 mg/mL 的葡萄糖溶液放入对应试管中,再用移液管分别吸取 1.0、0.8、0.6、0.4、0.2、0.0 mL 的蒸馏水使其总体积为 1.0 mL,再用移液管吸取 1.0 mL 配制好的 5% 的苯酚溶液,移液管吸取 5.0 mL 的硫酸,立即振荡均匀,静置 30 min,设置可见光分光光度计 490 nm 的波长,测量吸光值,根据每组测出的吸光值绘制葡萄糖标准曲线,回归方程: $y=0.0105x+0.0008$,相关系数 $R^2=0.9986$ 。

1.3.4.2 超声辅助酶法提取山药皮粗多糖提取率的测定

根据测量溶液的吸光值,计算出粗多糖浓度,再根据以下公式^[25]计算粗多糖的提取率。

$$\text{粗多糖提取率}/\% = \frac{C \times V \times D \times 10^{-6}}{m}$$

式中: C 为从葡萄糖标准曲线上计算得到的浓度, $\mu\text{g/mL}$; V 为过滤后的滤液体积, mL ; D 为取一定滤液稀释的倍数; m 为称取山药皮的质量, g 。

1.3.5 山药皮粗多糖的紫外全波段扫描

称取最优试验方案提取的山药皮粗多糖 0.500 0 g,加入蒸馏水,定容于 100 mL 容量瓶,配制成 5 mg/mL

溶液,设置波长范围为 190 nm~400 nm,通过双光束紫外可见分光光度计测量吸收峰,观察图谱^[26]。

1.3.6 山药皮粗多糖的红外光谱测定

称取最优试验方案提取的山药皮粗多糖 0.010 0 g,放在表面皿上放入红外干燥箱中,干燥后将其放在研钵中,按质量比 1:100 加入溴化钾晶体进行研磨。将研磨后的粉末进行压片,傅里叶变换红外光谱仪测量官能团的伸缩振动峰^[27]。

1.4 试验数据分析方法

利用 Origin 8.6 和 Excel 2010 软件对数据进行制图,采用正交表对试验数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 单因素对山药皮多糖提取率的影响

2.1.1 不同辅助酶对山药皮粗多糖提取率的影响

不同种类酶对山药皮粗多糖提取率的影响见图1。

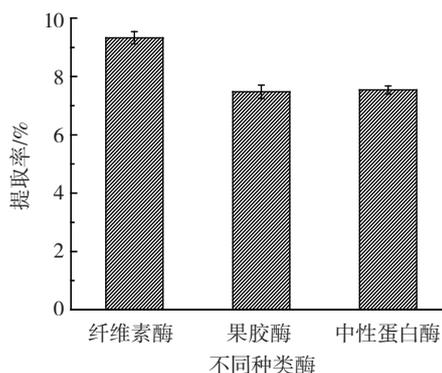


图1 酶种类对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.1 Extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae* with different enzymes

由图1可知,添加纤维素酶的山药皮样品粗多糖提取率为 9.26%,添加果胶酶的山药皮样品粗多糖提取率为 7.35%,添加中性蛋白酶的山药皮样品粗多糖提取率为 7.43%。由于山药皮中含有较多的粗纤维,因此使用纤维素酶作为辅助酶提取粗多糖时,提取率明显高于果胶酶和中性蛋白酶,故本试验采用纤维素酶作为辅助酶提取山药皮粗多糖。

2.1.2 料液比对山药皮粗多糖提取率的影响

料液比对山药皮粗多糖提取率的影响见图2。

由图2可知,山药皮粗多糖提取率随溶剂添加量增加,呈现先增后减的趋势。溶剂添加量较低,样品稠度过大,多糖浸提不完全,因而提取率较低,随着溶液中水分的增加,粗多糖提取率也逐渐增大,至料液比为 1:40 (g/mL) 时,粗多糖几乎被完全浸提,提取率可达 10.30%,溶剂添加量增加,无利于提取率的提高^[28]。

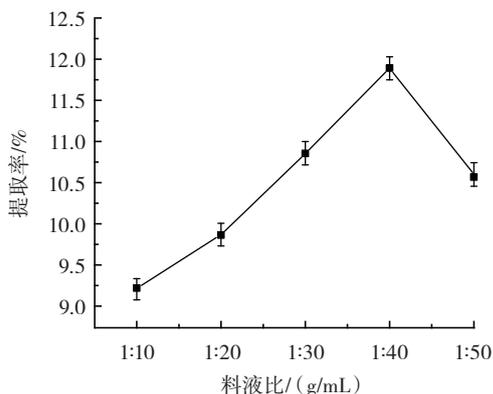


图2 料液比对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.2 Effect of material-to-liquid ratio on extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

因此选择料液比 1:30、1:40、1:50 (g/mL) 进行正交试验。

2.1.3 加酶量对山药皮粗多糖提取率的影响

加酶量对山药皮粗多糖提取率的影响见图 3。

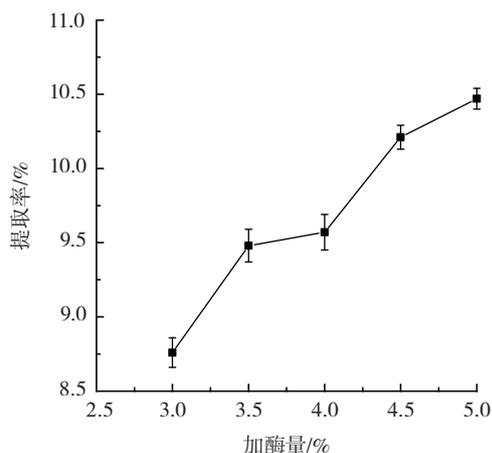


图3 不同加酶量对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.3 Effect of enzyme addition on the extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

由图 3 可知,随着加酶量的增大,山药皮粗多糖提取率也随之增大,呈不断增加趋势,加酶量为 5.0% 时,粗多糖提取率最高,达到 10.40%。其原因是在加酶量较低时,溶液中酶含量过少,不能与样品充分接触,随着加酶量的增大,酶与样品充分接触,提取率逐渐上升^[29],考虑到加酶量过高会增加后续纯化的难度,因此正交试验选取加酶量 4.0%、4.5%、5.0% 3 个水平。

2.1.4 超声功率对山药皮粗多糖提取率的影响

超声功率对山药皮粗多糖提取率的影响见图 4。

由图 4 可知,山药皮粗多糖提取率随超声功率的增大呈先增大后减小的趋势,超声功率为 350 W 时,山药皮粗多糖提取效果最佳,可达 9.69%。出现此现象可能是因为超声功率过低时,山药皮中的活性成分结

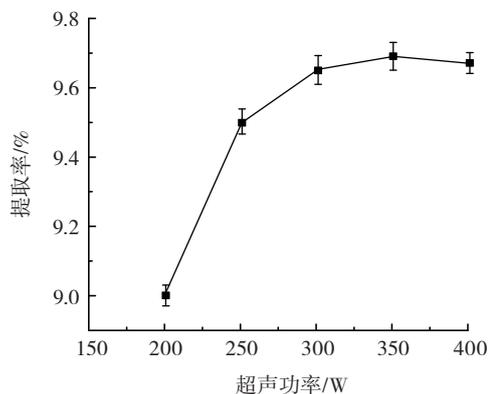


图4 超声功率对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic power on the extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

构不能被破坏,导致提取率较低,当提取率达到最大后,细胞被完全破坏,粗多糖已被全部提出,继续增加超声功率,超声对提取出的粗多糖也会产生影响,提取率反而降低^[28],因此进行正交试验所选取的超声功率的水平为 300、350、400 W。

2.1.5 酶解-超声时间对山药皮粗多糖提取率的影响

酶解-超声时间对山药皮粗多糖提取率的影响见图 5。

图 5。

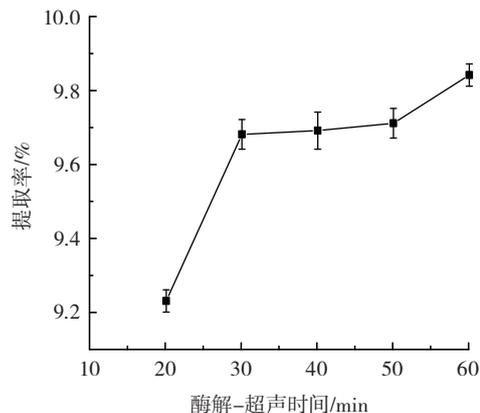


图5 酶解-超声时间对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.5 Effect of enzymolysis-sonication duration on the extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

由图 5 可知,随着酶解-超声时间的延长,山药皮粗多糖提取率呈上升趋势,60 min 时,粗多糖提取率最高为 9.85%。当时间较短时,酶解超声对样品作用时间过短,因此提取率较低,随着时间的延长,样品被充分溶解破坏,提取率逐渐增大,作用 50 min 和 60 min 对提取率增加的影响较大,更容易控制,因此正交试验选取的酶解-超声时间水平为 40、50、60 min。

2.1.6 酶解 pH 值对山药皮粗多糖提取率的影响

酶解 pH 值对山药皮粗多糖提取率的影响见图 6。

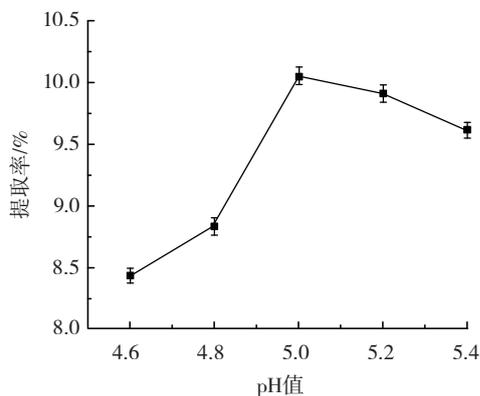


图6 酶解 pH 值对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.6 Effect of pH for enzymolysis on extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

由图6可知, 山药皮粗多糖提取率随 pH 值的增大呈现先增大后减小的趋势, 在 pH 值为 5.0 时提取率最大, 达 10.05%。在 pH 值较小时, 酸性纤维素酶活性低, 反应缓慢, 随着 pH 值的增大, 当 pH 值为 5.0 时, 酸性纤维素酶活性达到最大, 分子运动加快, 此时发挥作用最大, 粗多糖提取率最高, 继续增大 pH 值, 酶活力下降, 影响山药皮粗多糖的提取^[29]。pH 值由 5.0 到 5.2 时, 提取率减少, 因此, 固定 pH 值为 5.0 进行正交试验。

2.1.7 酶解-超声温度对山药皮粗多糖提取率的影响

酶解-超声温度对山药皮粗多糖提取率的影响见图7。

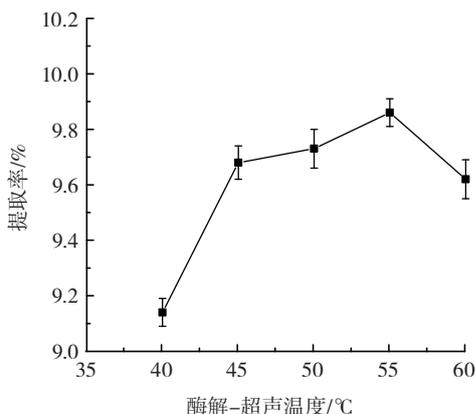


图7 酶解-超声温度对山药皮粗多糖提取率的影响

Fig.7 Effect of temperature for enzymolysis-ultrasonic on the extraction rate of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

由图7可知, 随着酶解-超声温度的增大, 山药皮粗多糖提取率先增后减, 酶解-超声温度为 55 °C 时, 粗多糖提取率最高, 达到 9.86%。原因是在温度较低时, 酶和超声波均不能完全发挥作用, 提取率较低, 随着

温度的增加, 酶和超声同时发挥更大作用, 提取率也随之增加。温度上升至 55 °C 时, 酶的活性最高, 因此提取率达到最大, 继续增加温度, 酶活性反而降低, 提取率也降低。酶解-超声温度从 45 °C 上升至 60 °C, 需消耗大量时间, 根据图7粗多糖提取率基本维持在 9.7% 左右可知, 酶解-超声温度对山药皮粗多糖影响较小, 因此为节约成本正交试验时温度设置为 55 °C。

2.2 正交试验结合方差分析结果

正交试验结果见表2, 方差分析见表3。

表2 正交试验结果及极差分析

Table 2 Result of orthogonal experiment and range analysis

试验号	A	B	C	D	提取率/%	
					I 组	II 组
1	1	1	1	1	8.52	8.64
2	1	2	2	2	10.21	10.19
3	1	3	3	3	10.75	10.68
4	2	1	2	3	8.55	8.47
5	2	2	3	1	10.18	10.22
6	2	3	1	2	10.90	10.94
7	3	1	3	2	10.30	10.28
8	3	2	1	3	9.87	9.91
9	3	3	2	1	10.19	10.17
K ₁	58.99	54.76	58.82	57.92		
K ₂	59.30	60.58	57.78	62.86		
K ₃	60.72	63.67	62.41	58.23		
k ₁	9.83	9.13	9.80	9.65		
k ₂	9.88	10.10	9.63	10.48		
k ₃	10.12	10.61	10.40	7.71		
R	1.73	8.91	4.63	4.94		

表3 方差分析

Table 3 Variance analysis

差异源	偏差平方和 SS	自由度	均方	F 值	显著性
A	0.29	2	0.145	72.5	**
B	6.83	2	3.415	1 572.5	**
C	1.97	2	0.985	492.5	**
D	2.56	2	1.280	640	**
误差 e	0.02	9	0.002		

注:**表示差异极显著($p < 0.01$)。

由自由度分布查临界值可得, $F_{0.05}(2, 9) = 4.26$, $F_{0.01}(2, 9) = 8.02$, 所以因素 A、B、C、D 对试验结果影响显著。结合极差分析和方差分析可知, 影响山药皮粗多糖提取率的因素主次顺序为 B>D>C>A, 即加酶量>超声功率>酶解-超声时间>料液比。不考虑交互作用, 根据表2中 K 值可得, 山药皮粗多糖提取最优方案为

A₃B₃C₃D₂,即加酶量 5.0%、超声功率 350 W、酶解-超声时间 60 min,料液比 1:50 (g/mL)。以此条件做验证试验,山药皮粗多糖提取率分别为 10.98%、10.95%、

11.00%,平均提取率为 10.98%。

2.3 山药皮粗多糖紫外吸收曲线

山药皮粗多糖紫外吸收曲线见图 8。

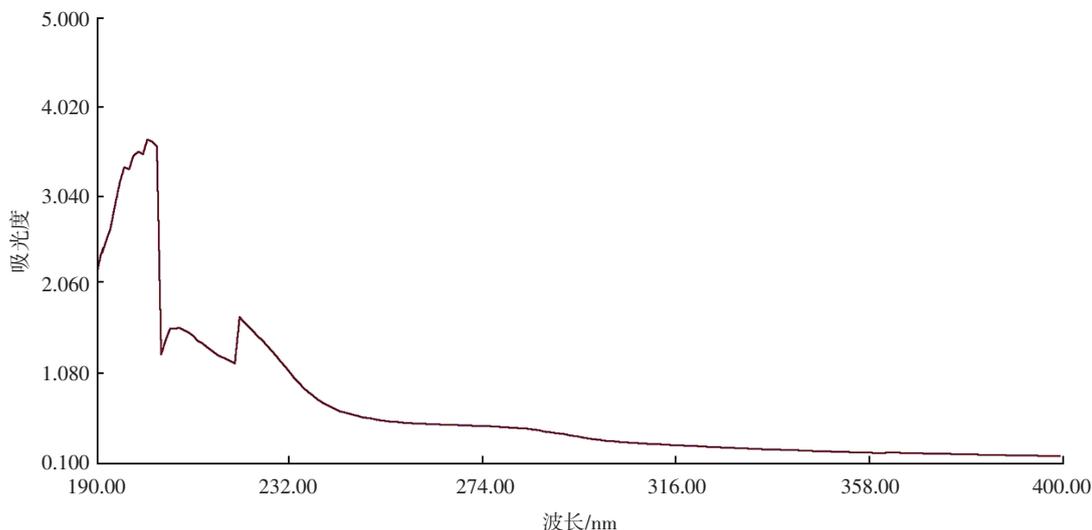


图 8 山药皮粗多糖紫外吸收曲线

Fig.8 Ultraviolet spectrum of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

粗多糖中蛋白或核酸含量较高时,会在 260 nm~280 nm 出现吸收峰^[26],由图 8 可知,山药皮粗多糖在 260 nm~280 nm 处没有吸收峰,说明山药皮粗多糖含

极少量或不含有蛋白质、核酸等杂质,提取效果较好。

2.4 山药皮粗多糖红外光谱

山药皮粗多糖红外光谱见图 9。

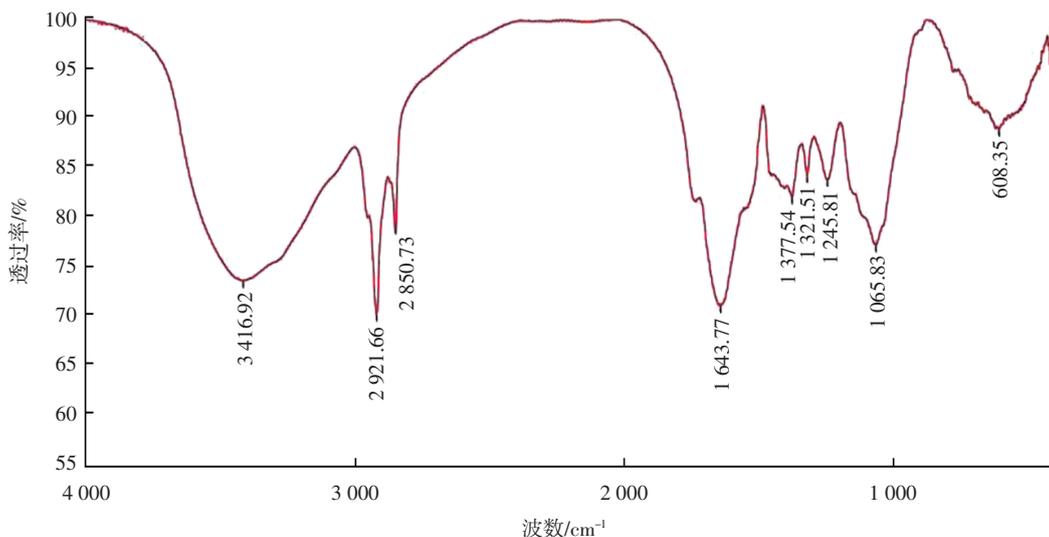


图 9 山药皮粗多糖红外光谱

Fig.9 Infrared spectrum of crude polysaccharide from peel of *Rhizoma dioscoreae*

通过文献^[27]可知,对糖类进行红外扫描,不同类型基团振动会产生不同波峰,3 416.92 cm⁻¹对应的是 O-H 和 N-H 的伸缩振动,2 921.66 cm⁻¹、2 850.73 cm⁻¹对应的 C-H 伸缩振动,1 643.77 cm⁻¹对应的是双键的伸缩振动,由图 9 山药皮粗多糖红外光谱及分析可知,用超声结合酶法辅助提取的山药皮粗多糖符合多糖基本特征。

3 结论

以铁棍山药皮粉末为样品,采用超声结合酶法提取山药皮粗多糖。根据单因素试验结果,固定酶解 pH 值为 5.0,酶解-超声温度为 55 ℃,选取料液比、加酶量、酶解-超声时间、超声功率 4 个因素做正交试验,在不考虑交互作用的情况下,得到最佳提取方案为加酶量 5.0%、超声功率 350 W、酶解-超声时间 60 min,

料液比 1:50 (g/mL),再通过验证试验粗多糖提取率为 10.98%。结合紫外和红外分析可知,铁棍山药皮粗多糖中不含或含有极少量杂质,符合多糖基本特征。因此用超声结合酶法辅助提取铁棍山药皮多糖具有操作简便,提取效率高且杂质少等优点,本研究为山药皮的综合开发及其在食品功能因子的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 颜腾龙. 八种药食同源中药降血脂和抗氧化作用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 17-19.
YAN Tenglong. Progress of the lipid-lowering and antioxidation on eight kinds of medicinal and edible medicine[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014: 17-19.
- [2] 李敏. 山药活性成分提取技术及药理功能的研究进展[J]. 南方农业学报, 2013, 44(7): 1184-1190.
LI Min. Overview on extractive techniques and pharmacological functions of active constituents in *Rhizoma dioscoreae*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(7): 1184-1190.
- [3] 马艳弘, 殷剑美, 魏建明, 等. 山药皮多糖超声辅助提取工艺及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(19): 34-39.
MA Yanhong, YIN Jianmei, WEI Jianming, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from Chinese yam peel and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2016, 37(19): 34-39.
- [4] 吕鹏, 贾秀梅, 张振凌, 等. 怀山药及非药用部位总黄酮含量测定[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(2): 65-68.
LV Peng, JIA Xiumei, ZHANG Zhenling, et al. Content determination of total flavonoids in *Dioscorea opposita* and non-medicinal parts[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2012, 18(2): 65-68.
- [5] 赵立庭, 赵华, 刘阳, 等. 铁棍山药皮中黄酮化合物提取工艺条件优化[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(4): 59-63.
ZHAO Liting, ZHAO Hua, LIU Yang, et al. Optimization of extract process conditions for flavonoids in the peel of Henan tiegun yam[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(4): 59-63.
- [6] 颜雪琴, 蔡金燕, 马彩梅, 等. 山药皮糖蛋白提取工艺的研究[J]. 食品工业, 2017, 38(12): 8-10.
YAN Xueqin, CAI Jinyan, MA Caimei, et al. Glycoprotein extraction technology research in yam peel[J]. The Food Industry, 2017, 38(12): 8-10.
- [7] 檀朝立. 山药皮生物转化饲料的研究及年产 5000 吨产品的工厂设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 1-68.
TAN Chaoli. The research of yam skin biological transform feed and A plant design about annual output of 5000 t products line process [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015: 1-68.
- [8] LIU Y X, LI H F, FAN Y Y, et al. Antioxidant and antitumor activities of the extracts from Chinese yam (*Dioscorea opposita* thunb.) flesh and peel and the effective compounds[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(6): H1553-H1564.
- [9] LI Q, ZHANG C R, DISSANAYAKE A A, et al. Phenanthrenes in Chinese yam peel exhibit antiinflammatory activity, as shown by strong *in vitro* cyclooxygenase enzyme inhibition[J]. Natural Product Communications, 2016, 11(9): 1313-1316.
- [10] MENG X L, HU W P, WU S K, et al. Chinese yam peel enhances the immunity of the common carp (*Cyprinus carpio* L.) by improving the gut defence barrier and modulating the intestinal microflora[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 95: 528-537.
- [11] 王玉欣. 山药皮醋及其饮料的工艺技术研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2017: 1-9.
SHI Yuxin. Study on the technology of yam skin vinegar and its beverage[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2017: 1-9.
- [12] 余华喜. 山药多糖提取及其废弃物制备可降解液体地膜研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017: 1-55.
YU Huaxi. Extraction of the yam polysaccharide and preparation of biodegradable liquid mulching film from the yam residues[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017: 1-55.
- [13] 武文起, 孙振刚, 冯永强, 等. 淮山药复合乳饮料的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(16): 73-77.
WU Wenqi, SUN Zhengang, FENG Yongqiang, et al. Research of yam-milk beverage[J]. Food Research and Development, 2015, 36(16): 73-77.
- [14] 段伟萍, 李新蕊, 司明东, 等. 山药多糖提取工艺的响应面法优化及其功能活性分析[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 118-123.
DUAN Weiping, LI Xinrui, SI Mingdong, et al. Optimization of extraction technology for Chinese yam polysaccharides by response surface method and its hypoglycemic and antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2020, 41(7): 118-123.
- [15] 周庆峰, 康洁, 马亢, 等. 山药多糖对急性酒精中毒小鼠的解酒作用[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 113-117.
ZHOU Qingfeng, KANG Jie, MA Kang, et al. Anti-alcoholism effects of rhizoma dioscoreae polysaccharide on acute alcohol intoxic mice[J]. Food Research and Development, 2019, 40(19): 113-117.
- [16] CHEN Z Y, CHEN S H, CHEN C H, et al. Polysaccharide extracted from *Bletilla striata* promotes proliferation and migration of human tenocytes[J]. Polymers, 2020, 12(11): 2567.
- [17] YUAN S, XU C Y, XIA J, et al. Extraction of polysaccharides from *Codonopsis pilosula* by fermentation with response surface methodology[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(12): 6660-6669.
- [18] KANG Q Z, CHEN S S, LI S F, et al. Comparison on characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* by ultrasound and conventional extraction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 1137-1144.
- [19] CAI C Y, WANG Y N, YU W, et al. Temperature-responsive deep eutectic solvents as green and recyclable media for the efficient extraction of polysaccharides from *Ganoderma lucidum*[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123047.
- [20] 苗敬芝, 冯金和, 董玉玮. 超声结合酶法提取生姜中水溶性膳食

- 纤维及其功能性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 120-125.
- MIAO Jingzhi, FENG Jinhe, DONG Yuwei. Ultrasonic-aided extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from ginger[J]. Food Science, 2011, 32(24): 120-125.
- [21] 吴金松, 马志伟, 陈光静, 等. 甘蔗渣中水溶性多糖的提取工艺优化[J]. 中国调味品, 2018, 43(8): 42-46.
- WU Jinsong, MA Zhiwei, CHEN Guangjing, et al. Optimization of extraction technology of water-soluble polysaccharide from bagasse [J]. China Condiment, 2018, 43(8): 42-46.
- [22] 郑永飞. 活性多糖的保健功能及其应用 [J]. 粮食与食品工业, 2009, 16(4): 22-25.
- ZHENG Yongfei. Health function and application of active polysaccharide[J]. Cereal & Food Industry, 2009, 16(4): 22-25.
- [23] ZHANG Y Y, LI S, WANG X H, et al. Advances in lentinan: Isolation, structure, chain conformation and bioactivities[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 196-206.
- [24] 刘婷, 周光明. 多糖的提取和分析方法[J]. 化工时刊, 2008, 22(3): 66-70.
- LIU Ting, ZHOU Guangming. Extraction and analytical method of polysaccharides[J]. Chemical Industry Times, 2008, 22(3): 66-70.
- [25] 王彦平, 宿时, 陈月英. 紫山药多糖超声结合酶法提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 189-192, 198.
- WANG Yanping, XU Shi, CHEN Yueying. Study on optimization of ultrasonic-enzymatic extraction of polysaccharides from purple yam and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(8): 189-192, 198.
- [26] 李慧, 韩卓, 曹珂珂, 等. 酶法协同超声提取虫草花多糖及其抗氧化活性研究[J]. 蚌埠学院学报, 2020, 9(2): 12-17.
- LI Hui, HAN Zhuo, CAO Keke, et al. Enzyme assistance ultrasonic extract the polysaccharide of *Cordyceps sinensis* and its anti-oxidation research[J]. Journal of Bengbu University, 2020, 9(2): 12-17.
- [27] 王嘉铭, 雷于国, 胡国元, 等. 香菇多糖纯化前后结构和生物活性的比较[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(1): 99-106.
- WANG Jiaming, LEI Yuguo, HU Guoyuan, et al. Comparison of the structural characteristics and biological activity of before and after purification polysaccharides of *Lentinula edodes*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(1): 99-106.
- [28] 徐守梁, 黄荣. 超声辅助酶法提取黑豆水溶性膳食纤维的工艺研究及理化性质分析[J]. 广东化工, 2020, 47(5): 41-43.
- XU Shouliang, HUANG Rong. Ultrasonic assisted enzymatic extraction of water-soluble dietary fiber from black bean and analysis of its physical and chemical properties[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(5): 41-43.
- [29] 吕品, 宋慧慧, 李朋伟. 超声波-酶法提取莽吉柿果壳原花青素的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 193-197, 214.
- LV Pin, SONG Huihui, LI Pengwei. Optimization of ultrasonic enzymatic extraction of procyanidins from *Garcinia mangostana* L. pericarp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 193-197, 214.

加工编辑: 孟琬星

收稿日期: 2021-04-20