

紫甘薯渣紫色素的微波提取及精制工艺研究

李 帅, 叶玲玲, 张 晨, 张应烙*

(浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江金华 321004)

摘 要:以新鲜紫甘薯渣为原料,采用微波萃取法对其紫色素的提取工艺进行了研究。分析了提取溶剂、料液比、提取温度、提取时间及微波功率等因素对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响,在单因素实验基础上利用 $L_9(3^4)$ 正交实验得到紫甘薯渣紫色素的最佳提取工艺为:提取溶剂pH2盐酸水溶液,料液比1:5(g/mL),提取温度70℃,提取时间5min,微波功率600W。采用树脂法对色素进行精制,在供试的14种树脂中,大孔树脂AB-8的精制效果最好;通过静态吸附、解吸实验以及动态吸附实验,确定AB-8大孔吸附树脂精制紫甘薯渣紫色素的工艺条件为:紫甘薯渣紫色素吸光度0.5~0.7、吸附时间1h、色素pH2~3、温度30℃左右、上样流速1mL/min,洗脱液95%乙醇,经上述条件精制紫甘薯渣紫色素色价(524nm)为41.3。

关键词:紫甘薯渣, 紫色素, 微波萃取, 树脂, 纯化

Study on the microwave-assisted extraction and purification technology of purple pigment from *Ipomoeas batatas* L. pomace

LI Shuai, YE Ling-ling, ZHANG Chen, ZHANG Ying-lao*

(College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Using fresh *Ipomoeas batatas* L. pomace as material, the technology of microwave-assisted extraction of purple pigment (PP) was studied. The effects of main factors such as extraction solvents, ratio of solid to liquid, temperature and time of microwave extraction, microwave power were investigated. On the basis of single factor test, the optimized extraction conditions of purple pigments from *I. batatas* L. pomace obtained with an orthogonal design $L_9(3^4)$ were solid/liquid ratio, extraction temperature, time and microwave power as 1:5 (g/mL), 70℃, 5min and 600W, respectively. The PP were then purified by resin and the resin AB-8 showed the best adsorption and desorption effect among the tested 14 kinds of resins. Its optimized purification conditions obtained by static adsorption, desorption and dynamic adsorption experiments were the absorbance, adsorption time, temperature, pH of PP, feeding flow rate, eluent as 0.5~0.7, 1h, about 30℃, 2~3, 1mL/min, and 95% ethanol, respectively. Under this condition, the color scale E(524nm) of purificatory PP was 41.3.

Key words: *Ipomoeas batatas* L. pomace; purple pigment; microwave-assisted extraction; resin; purification

中图分类号: TS202.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2014)20-0269-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2014.20.050

紫甘薯 (*Ipomoeas batatas* L.) 又名山川紫, 为旋花科根茎类一年生草本植物^[1]。紫甘薯肉质紫色至深紫色, 含有丰富的碳水化合物、纤维素、矿物质及花青素类色素, 具有防癌抗癌^[2]、清除自由基、防止动脉硬化^[3]、改善肝功能^[4]等多种生理活性, 是当前农产品开发的热点^[5]。紫甘薯渣是紫甘薯淀粉提取过程中产生的副产品, 含水量大, 极易腐败, 日常生活中除作为饲料加以简单利用外^[6], 通常被当作废弃物丢弃, 既

浪费资源又破坏环境。如何开发和利用紫甘薯渣资源, 提高紫甘薯附加值, 是紫甘薯加工相关企业迫切需要解决的问题。相比于合成色素, 天然色素具有较高的安全性和一定的生理活性, 是色素开发的总趋势^[7-8]。紫甘薯渣含有丰富的紫色素, 因此, 可以从紫甘薯渣中制取天然紫色素, 以增加其附加值。

微波提取是近年来发展的一门新提取技术, 其具有选择性好、加热速度快、受热体系温度均匀、节约能量等优点^[9], 在食品色素提取方面得到了广泛的应用^[10-11]。关于紫甘薯肉质紫色素的溶剂、超声、索氏提取等方法的工艺已有报道^[12-14], 但利用微波法提取紫甘薯渣紫色素的工艺未见报道。本研究以紫甘薯渣为原料, 利用微波辅助萃取法对紫甘薯紫色素提取工艺进行了初步探索, 并采用树脂法对其进行纯

收稿日期: 2014-02-17

作者简介: 李帅 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 天然药物化学。

* 通讯作者: 张应烙 (1976-), 男, 副教授, 研究方向: 天然药物化学。

基金项目: 浙江省大学生新苗人才计划项目 (2013R404069)。

化, 以期为紫甘薯的深加工和综合利用奠定一定的基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫甘薯 购自于金华市兰溪门农贸市场, 模拟工厂流程, 切块, 打浆, 沉淀, 去淀粉得到紫甘薯渣^[5], 含水量74%; 树脂(D201, D301, D113, 001×7, 201×7, D001, HPD100, HPD400, HPD600, HPD722, AB-8, X-5, NKA-9, D101) 河北沧州宝恩化工有限公司; 95%乙醇、柠檬酸、盐酸、冰醋酸 均为分析纯; 水 去离子水。

MDS-8G多通道密闭微波化学工作站 上海新仪微波化学科技有限公司; UV-7504紫外可见分光光度计 上海欣茂仪器有限公司; UV-2550紫外可见分光光度计 日本岛津公司; JA3003A电子分析天平 上海精天电子仪器有限公司; 高速离心机 德国Hettich公司; HH-4数显恒温水浴锅 山东鄞城科源仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 紫甘薯渣紫色素的微波提取工艺

1.2.1.1 紫甘薯渣紫色素最大吸收波长及最佳提取溶剂的确定 实验以紫甘薯渣提取液在最大吸收波长处的吸光度值表示待测液中色素的含量, 从而确定紫甘薯渣紫色素微波提取的最佳工艺条件。

取紫甘薯渣5.0g于4支锥形瓶中, 分别加入pH2的95%乙醇, pH2的柠檬酸水, pH2的盐酸水, pH2的醋酸水各20mL, 在温度为60℃, 功率为500W的条件下微波萃取5min, 离心(5000r/min, 5min), 分别以上述溶剂为参比溶液, 利用UV-2550紫外可见分光光度计在200~800nm波长下进行扫描, 确定其最大吸收波长。同时, 在最大吸收波长处测定各浸提液色素吸光度, 确定最佳提取溶剂。每处理设置3个重复。

1.2.1.2 单因素实验设计 以下单因素实验中每个处理均设置3个重复。

料液比对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响: 分别称取定量紫甘薯渣于锥形瓶中, 各加入25、50、75、100mL pH2盐酸水溶液, 在温度为60℃, 功率为500W的条件下微波萃取5min, 离心(5000r/min, 5min), 上清液用pH2盐酸水溶液定容至100mL, 测定吸光度。

提取时间对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响: 分别称取紫甘薯渣5.0g于6支锥形瓶中, 各加入pH2盐酸水溶液25mL, 在温度为60℃, 功率为500W的条件下微波萃取3、4、5、6、7、8min, 离心(5000r/min, 5min), 取上清液测定吸光度。

提取温度对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响: 分别称取紫甘薯渣5.0g于6支锥形瓶中, 各加入pH2盐酸水溶液25mL, 分别在温度为30、40、50、60、70、80℃, 功率为500W的条件下微波萃取5min, 离心(5000r/min, 5min), 取上清液测定吸光度。

微波功率对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响: 分别称取紫甘薯渣5.0g于6支锥形瓶中, 各加入pH2盐酸水溶液25mL, 分别在温度为60℃, 功率为300、400、500、600、700、800W的条件下微波萃取5min, 离

心(5000r/min) 5min, 取上清液测定吸光度。

1.2.1.3 正交实验 在单因素实验结果的基础上选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行实验方案设计, 确定微波提取紫甘薯渣紫色素的最佳工艺参数, 因素及水平见表1。

表1 紫甘薯渣紫色素微波提取工艺条件正交实验设计
Table 1 The orthogonal array design of extraction conditions of purple pigment from *I. batatas* L. pomace

水平	因素			
	A 料液比 (g/mL)	B 提取温度 (℃)	C 提取时间 (min)	D 微波功率 (W)
1	1:5	50	4	400
2	1:10	60	5	500
3	1:15	70	6	600

1.2.2 紫甘薯渣紫色素的精制

1.2.2.1 树脂预处理 取定量供试树脂于锥形瓶中, 95%乙醇浸泡24h, 去掉上层悬浮物, 蒸馏水反复洗涤至流出液澄清。50℃烘箱烘干, 备用。

1.2.2.2 树脂筛选实验 分别取1.0g经过预处理的各种树脂(D201, D301, D113, 001×7, 201×7, D001, HPD100, HPD400, HPD600, HPD722, AB-8, X-5, NKA-9, D101)于14支250mL锥形瓶中, 加入吸光度为0.493, pH2的色素溶液30mL, 28℃恒温振荡器(170r/min)振荡吸附24h, 吸附平衡后取上清液于524nm处测定吸光度, 计算吸附率。将吸附平衡的各型号树脂, 置于含同体积、同浓度乙醇的锥形瓶中, 重复上述操作, 计算解吸率。每处理设置3个重复实验。

$$\text{吸附率}(\%) = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100$$

$$\text{解吸率}(\%) = A_2 V_2 / (A_0 - A_1) V_1 \times 100$$

式中: A_0 为树脂吸附前色素液吸光度; A_1 为树脂吸附后上清液的吸光度; A_2 为树脂解吸后上清液的吸光度; V_1 为原色素液的体积; V_2 为解吸液的体积。

1.2.2.3 树脂吸附、解吸静态实验 分别取1.0g树脂, 加入30mL紫甘薯渣色素溶液, 恒温振荡器(170r/min)振荡吸附, 吸附平衡后于524nm处测定上清液吸光度。在固定其他条件不变的情况下, 分别考察紫色素初始吸光度(0.5~1.3), 吸附时间(1~4h), pH(1~4), 温度(20~40℃)等因素对树脂吸附率的影响, 确定树脂吸附的最佳条件。

同样条件下, 将吸附平衡的树脂分别置于含50mL不同浓度乙醇的锥形瓶中解吸。解吸1h后, 将解吸液稀释至乙醇浓度20%, 调节至相同pH后于524nm处测定上清液吸光度, 计算解吸率。确定树脂解吸的最佳解吸液浓度。

1.2.2.4 树脂吸附动态实验 将30mL经预处理的AB-8树脂湿法装柱(21mm×450mm), 室温下用吸光度为1.169的紫甘薯渣紫色素分别以1、2、3mL/min的流速通过树脂柱, 收集流出液(50mL/管), 测定吸光度, 得到动态吸附曲线。选择泄漏点^[6]出现较晚的流速确定为最佳吸附流速。

1.2.3 紫甘薯渣紫色素色价测定 按上述实验优化条件提取精制紫甘薯渣紫色素, 计算精制后色素的

色价: 色价E (524nm) = $A_f / (100 \times m)$ (公式中A为吸光度、m为样品的质量、f为测定吸光度时所吸取样品的稀释倍数)。

2 结果与分析

2.1 最大吸收波长及提取溶剂的确定

表2 不同溶剂对紫甘薯渣紫色素的提取效果

Table 2 Extraction effects of purple pigment from *I. batatas* L. pomace by different solvents

提取液	pH2 95%乙醇	pH2 柠檬酸水	pH2 盐酸水	pH2 醋酸水
λ_{\max}	524	524	523	525
吸光度	0.507±0.005	0.313±0.003	0.626±0.002	0.252±0.003

不同提取溶剂对紫甘薯渣紫色素的提取效果如表2所示, 结果表明, 在实验选定的4种提取溶剂中, pH2盐酸水的提取效果最好, 吸光度为0.626, 优于其他供试溶剂的提取效果(吸光度均小于0.55)。因此, 本实验选定pH2盐酸水为最佳提取溶剂。

2.2 单因素实验结果及分析

2.2.1 料液比对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响 不同料液比对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响如图1所示。结果表明, 在选定的料液比范围内, 浸提液的吸光度先随提取溶剂用量的增加而升高, 当料液比为1:10时, 色素的吸光值达到最大, 提取效果最好。之后随着提取溶剂用量的增加, 浸提液的吸光度逐渐下降。因此选用料液比1:10提取较好。

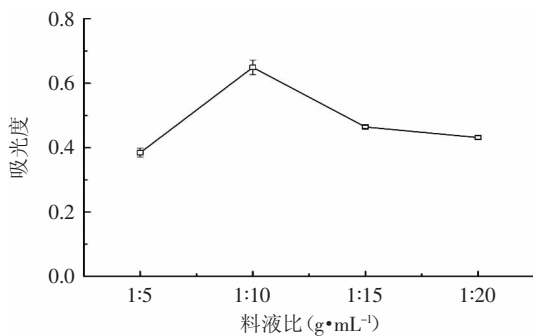


图1 料液比对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

Fig.1 Effect of ratio of material to solvent on the extraction of purple pigment from *I. batatas* L. pomace

2.2.2 提取时间对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

不同提取时间对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响如图2所示, 结果表明在实验选取时间范围内随微波提取时间延长, 浸提液的吸光度逐渐增加, 但5min后开始降低, 原因可能是随着时间的延长, 色素发生分解^[7]。因此, 选择提取时间为5min较好。

2.2.3 提取温度对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

不同提取温度对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响如图3所示, 结果表明, 浸提液吸光度值随着温度升高, 先逐渐增大, 在60℃时达到最高值。然后随温度的升高, 吸光度逐渐降低, 其原因可能是某些糖苷降解, 使花青素类色素含量下降^[7]。所以, 选择提取温

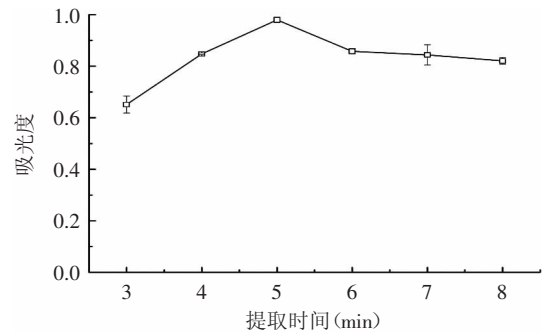


图2 提取时间对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

Fig.2 Effect of time on the extraction of purple pigment from *I. batatas* L. pomace

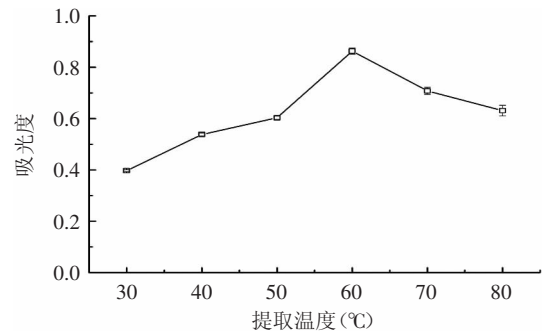


图3 提取温度对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

Fig.3 Effect of temperature on the extraction of purple pigment from *I. batatas* L. pomace

度60℃较好。

2.2.4 微波功率对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

微波功率对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响如图4所示, 结果表明, 浸提液吸光度值随着微波功率的增加, 先逐渐升高, 在500W时达到最大值, 600W时缓慢降低, 至700W时明显降低。微波功率过大, 导致色素受热分解^[8], 考虑到提高效率和能源消耗, 选择微波功率500W时较好。

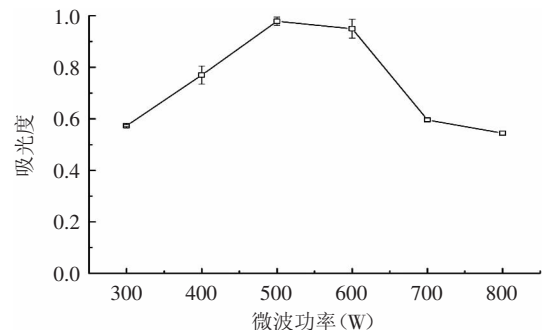


图4 微波功率对紫甘薯渣紫色素提取效果的影响

Fig.4 Effect of temperature on the extraction of purple pigment from *I. batatas* L. pomace

2.3 正交实验结果与分析

采用 $L_9(3^4)$ 正交设计确定了微波提取紫甘薯渣紫色素的工艺参数, 结果见表3和表4。根据方差分析结果可知, 料液比和微波功率是影响色素提取的主要因素, 达到极显著水平 ($p < 0.01$), 提取时间和

提取温度对色素提取的影响也较大,达到显著水平($p < 0.05$);四个因素影响程度的大小依次是A(料液比) $>$ D(微波功率) $>$ C(提取时间) $>$ B(提取温度)。极差分析表明,最佳工艺条件为A₁D₃C₂B₃,即料液比1:5(g/mL),微波功率600W,提取时间5min,提取温度70℃。按照上述最优条件进行验证实验,平行三次,紫甘薯渣紫色素的吸光度平均值为0.791,RSD为0.8%,优于正交实验及单因素中任何一组实验。

表3 正交实验结果分析表

Table 3 Results and analysis of orthogonal test

实验号	A	B	C	D	吸光度
1	1	1	1	1	0.573±0.004
2	1	2	2	2	0.614±0.011
3	1	3	3	3	0.722±0.023
4	2	1	2	3	0.581±0.001
5	2	2	3	1	0.550±0.025
6	2	3	1	2	0.475±0.005
7	3	1	3	2	0.454±0.017
8	3	2	1	3	0.526±0.010
9	3	3	2	1	0.546±0.005
k ₁	0.636	0.536	0.525	0.556	
k ₂	0.535	0.563	0.580	0.514	
k ₃	0.509	0.581	0.575	0.610	
R	0.127	0.045	0.055	0.096	

表4 方差分析结果

Table 4 Results of the analysis variance

影响因素	平方和	自由度	均方	F值	显著性
A	0.82	2	0.41	215.46	**
B	0.09	2	0.05	23.93	*
C	0.17	2	0.08	44.21	*
D	0.41	2	0.21	108.38	**
误差	0.03	2	0.00		

注: $F_{0.05}(2,2)=19$, $F_{0.01}(2,2)=99$; *表示差异显著,**表示差异极显著。

2.4 树脂的确定

14种供试树脂的吸附率和解吸率见表5,其中D201、D301、D113、001×7、201×7、D001为离子交换树脂,其余为大孔吸附树脂。各型号树脂对紫甘薯渣色素液的吸附、解吸能力表现各异,其中D301、001×7、AB-8三种树脂对紫甘薯渣紫色素的吸附率均大于80%,但D301、001×7解吸率仅为6.0%和7.6%,远小于AB-8的解吸率(84.7%)。因此AB-8大孔树脂的纯化效率最高,可以选择它用于精制紫甘薯渣紫色素。

2.5 树脂吸附、解吸静态实验

2.5.1 不同色素吸光度对树脂吸附率的影响 不同色素吸光度对树脂吸附率的影响见图5,由图5可知,随色素溶液吸光度值增大,经树脂吸附后的色素液中残留的色素越多,可能是由于多糖竞争吸附树脂,影响了色素物质在树脂内部的扩散^[19]。当色素溶液的吸光度在0.5~0.7时,树脂的吸附率较高。因此,在

表5 不同型号树脂对紫甘薯渣紫色素的吸附率和解吸率

Table 5 The purple pigment absorption and desorption rate of different resins

树脂类型	吸附率(%)	解吸率(%)
D201	73.1±0.5	6.7±0.6
D301	96.5±0.7	6.0±0.7
D113	46.7±0.7	24.2±2.2
001×7	85.7±0.2	7.6±0.2
201×7	54.0±3.1	7.9±1.4
D001	65.8±0.4	12.6±1.3
HPD100	68.9±0.9	60.1±3.6
HPD400	55.6±0.8	78.0±2.1
HPD600	77.5±1.3	73.1±2.8
HPD722	50.2±1.8	70.5±4.0
AB-8	80.6±0.1	84.7±4.0
X-5	76.1±0.9	69.1±2.1
NKA-9	60.3±1.7	82.8±2.2
D101	61.3±0.8	73.2±3.9

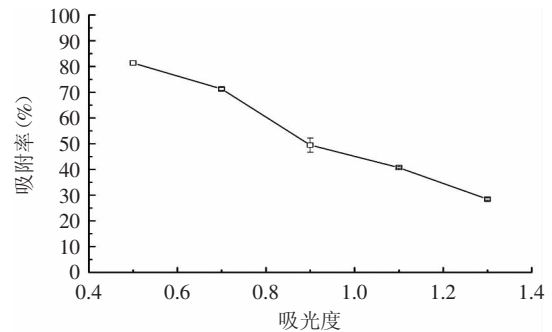


图5 不同色素吸光度对树脂吸附率的影响

Fig.5 Effect of pigment absorbance on the resin absorption rate

实验选定的条件下,色素溶液吸光度在0.5~0.7时吸附效果较好。

2.5.2 吸附时间对树脂吸附率的影响 不同吸附时间对树脂吸附率的影响见图6,由图可知,随着时间的延长,树脂吸附率逐渐增加,1h时趋于平衡。因此,选择吸附时间为1h,既可以节省时间,又可以取得最佳吸附效果。

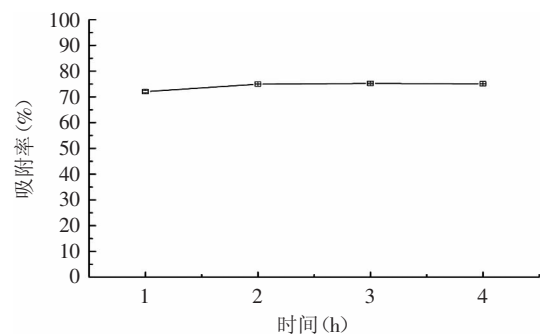


图6 吸附时间对树脂吸附率的影响

Fig.6 Effect of time on the resin absorption rate

2.5.3 不同色素pH对树脂吸附率的影响 溶液pH的变化可以改变紫甘薯渣紫色素中花色苷的存在形

式,花色苷在酸性条件下以稳定的形式存在,而在碱性条件下则迅速降解^[20]。因此,本实验主要考察酸性条件下的吸附。不同色素pH对树脂吸附率的影响见图7,由图7可知,随着pH的增大,树脂吸附率略呈上升趋势,在pH 2~3间的吸附率最高,约80%左右;随后随pH的升高,树脂吸附率降低。因此,色素溶液pH在2~3时吸附效果较好。

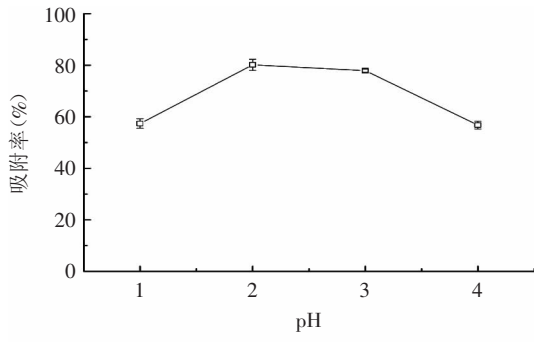


图7 不同色素pH对树脂吸附率的影响
Fig.7 Effect of pH on the resin absorption rate

2.5.4 不同温度对树脂吸附率的影响 不同吸附温度对树脂吸附率的影响见图8,由图8可知,在实验选定的条件下,随温度的升高色素的吸附效果呈上升趋势。但高温和低温的吸附率相差无几。因此选用30℃左右即可。

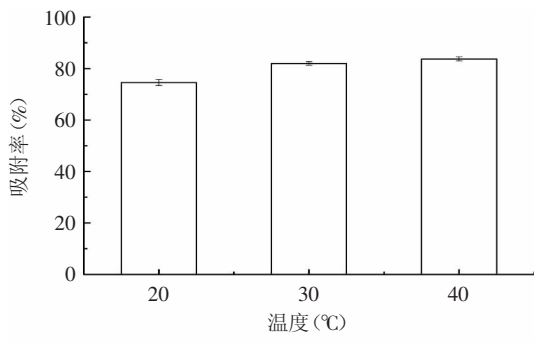


图8 不同温度对树脂吸附率的影响
Fig.8 Effect of temperature on the resin absorption rate

2.5.5 不同乙醇浓度对树脂解吸率的影响 不同乙醇浓度对树脂解吸率的影响见图9,由图9可知,乙醇

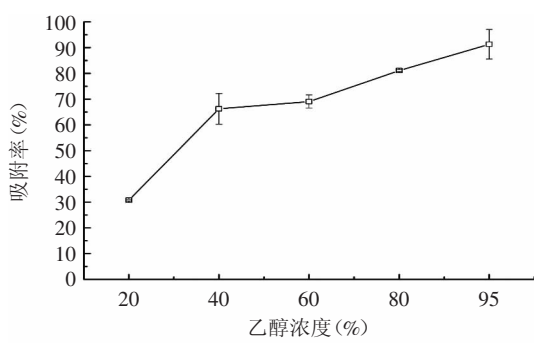


图9 不同乙醇浓度对树脂解吸率的影响
Fig.9 Effect of ethanol concentration on the resin desorption rate

浓度对树脂解吸率有明显影响。在实验选取范围内,随乙醇浓度的增加树脂的解吸率逐渐升高。当乙醇浓度为95%时,树脂解吸效果最好,解吸率为88.2%。因此选用浓度为95%的乙醇溶液为解吸液。

2.6 树脂吸附动态实验

上柱液不同流速对AB-8树脂动态吸附性能的影响见图10,由图10可知,流速为1mL/min时泄露点出现较晚,色素吸附效果最佳。色素溶液流速越慢,色素成分在树脂床中粒扩散和膜扩散越充分,吸附效果越好。

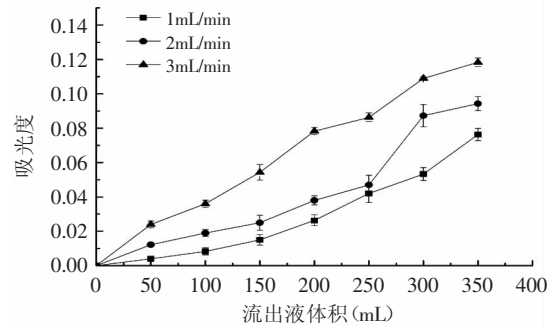


图10 上柱液不同流速对AB-8树脂动态吸附性能的影响
Fig.10 Effect of different feeding flow rate on the absorption of resin AB-8

2.7 色价测定

根据上述最佳条件精制并干燥的紫甘薯渣紫色素,按照色价计算公式,计算精制后紫色素色价为41.3,高于文献报道值^[24],色价较高。

3 结论

3.1 本实验以pH2盐酸水溶液为提取溶剂,采用单因素实验和正交实验设计优化了微波提取紫甘薯渣紫色素的工艺,结果表明,微波提取紫甘薯渣紫色素的4个因素影响顺序为:料液比、微波功率、提取时间、提取温度;最佳工艺条件为:料液比1:5(g/mL),微波功率600W,提取时间5min,提取温度70℃。在此提取条件下,紫甘薯渣紫色素的平均吸光度值为0.791。

3.2 通过对供试的14种树脂进行筛选,发现AB-8大孔树脂对紫甘薯渣紫色素的精制效果较好,其纯化紫甘薯渣紫色素的工艺条件为紫甘薯渣紫色素吸光度0.5~0.7、吸附时间1h、色素pH2~3、温度30℃左右、上样流速1mL/min,洗脱液95%乙醇。经上述条件精制紫甘薯渣紫色素色价为41.3。

参考文献

[1] 肖素荣,李京东. 新型天然色素—紫甘薯色素[J]. 中国食物与营养,2009(6):29-31.
[2] 赵婧,阮红,高秋萍,等. 紫心甘薯多糖的分离及组分抑癌活性研究[J]. 浙江大学学报:医学版,2011,40(4):365-373.
[3] Zhu Hongmei, Zhao Meng. Study on chemical constituents and antioxidant activity of anthocyanins from *Ipomoea batatas* L. (purple sweet potato) [J]. Chemistry and Industry of Forest (下转第279页)

表6 产物C方差分析结果

Table 6 Orthogonal test analysis of variance table of product C

因素	平方和	自由度	均方	F值	p值	显著性
A	95.009	2	47.504	72.961	0.000	**
B	8.762	2	4.381	6.729	0.016	*
C	3.082	2	1.541	2.367	0.149	
D	7.132	2	3.566	5.477	0.028	*
误差	5.860	9	0.651			
	129768.018	18				

3 结论

通过改变投料比例、反应物浓度、反应温度、催化剂种类以及滴加速度等手段,对已有合成方法的工艺改进,所得产物产率均得到5%以上的提高,方便了后续纯化过程,为产物的大量合成进行了有效的探索。

首次将微波辅助技术应用于这三种重要的甘露糖衍生物合成中,减少了有毒试剂的使用,实验发现三种产物的产率均得到提高,尤其减少了一些副产物的产生,方便了柱纯化过程,同时大幅减少了反应时间,三个产物的反应速度是传统反应速度的5、11、14倍,产率分别提高5.7%、6.3%、11.5%。可见,与传统方法相比,微波辅助法是一种绿色、高产、快速、简便的合成方法。

参考文献

[1] 谷惠琦,赵君. 甘露聚糖医药用价值研究进展[J]. 黑龙江医药,2012,25(1):110-111.

[2] Rodriguez E U, Satoh S, Haga Y, *et al.* Effect of inactivated enterococcus faecalis and mannan oligosaccharide and their combination on growth, immunity, and disease protection in rainbow trout[J]. North American Journal of Aquaculture, 2013, 75(3):416-428.

[3] Crich D, Banerjee A, Yao Q. Direct chemical synthesis of the β -D-mannans: the β -(1 \rightarrow 2) and β -(1 \rightarrow 4) series[J]. J AM CHEM SOC, 2004, 126(45):14930-14934.

[4] Zhu Y, Kong F. Highly efficient synthesis of the mannose nonasaccharide of the N-glycan expressed on the HIV glycoprotein Gp 120[J]. Synlett, 2001, 65(8):1217-1220.

[5] 张建军. 寡糖合成的方法学研究及具有重要生物活性的寡糖合成[D]. 北京:中国科学院,2002.

[6] 周中振,何彦祯,曹敏,等. 微波辅助组合合成的研究进展[J]. 有机合成,2006,26(11):1500-1507.

[7] Manvar A, Shah A. Microwave-assisted chemistry of purines and xanthines[J]. Tetrahedron, 2013, 69(38):810581-810627.

[8] 黄建颖. 寡糖合成新方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[9] 赵晋忠. 苜蓿基甘露糖原酸酯的开环研究[J]. 化学与生物工程, 2011, 28(4):42-44.

[10] Ella M J R, Nie X, Wang G. Synthesis of octahydropyrano [3,2-b]pyrrole-2-carboxylic acid derivatives from D-mannose [J]. Carbohydr Res, 2008, 342(10):1743-1753.

[11] Kartha K P R, Jennings H J. A simplified, one-pot preparation of acetobromosugars from reducing sugars[J]. Carbohydr Chem, 1990, 9(5):777-781.

[12] Kong F. Recent studies on reaction pathways and applications of sugar orthoesters in synthesis of oligosaccharides[J]. Carbohydr Res, 2007, 342(3):345-373.

[13] Zhu Y, Chen L. A facile regio- and stereoselective synthesis of mannose octasaccharide of the N-Glycan in human CD₂ and mannose hexasaccharide antigenic factor 13b[J]. Carbohydr Res, 2002, 337(3):207-215.

[14] Zhao J, Wei S. Environmentally benign synthesis of sugar orthoesters promoted by anhydrous sodium acetate and ultrasound [J]. Chinese Journal of Chemistry, 2012, 30(3):627-633.

[15] 程林润,郭入安,朱璞,等. 紫甘薯色素的提取及纯化研究[J]. 浙江农业科学,2011(1):89-91.

[16] 王文君,向灿辉,王江,等. 超声波法提取紫番薯原花青素的工艺条件研究[J]. 食品科技,2011,36(2):179-182.

[17] 刘蔚,王征,丰来,等. 灵芝菌发酵紫甘薯渣获得可溶性膳食纤维的工艺优化[J]. 食品与发酵工业,2012,38(2):131-134.

[18] 上官新晨,沈勇根,徐明生,等. 大孔树脂对紫红薯色素吸附和解吸的特性研究[J]. 食品科技,2006,31(7):117-120.

[19] 袁旭红,张磊,徐雅琴,等. 响应面法优化微波辅助提取红树莓果实色素[J]. 食品工业,2011(7):7-9.

[20] 贾士芳,董洪霞,董树亭,等. 微波辅助法提取紫玉米植株花青素工艺条件优化研究[J]. 中国食物与营养,2011,17(2):56-60.

[21] 王丽玲. 药桑红色素纯化工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2010(2):78-81.

[22] 王锋,谭兴和,郭时印,等. 大孔树脂纯化黑花生衣色素的研究[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2007,33(4):500-505.

[23] 陈杰. 紫甘薯色素提取、纯化及稳定性研究[D]. 无锡:江南大学,2011.

(上接第273页)

Products, 2009, 29(1):39-45.

[4] 曹东旭,董海叶,李妍,等. 紫甘薯花色苷对人肝癌细胞 HepG2的作用[J]. 天津科技大学学报,2011,26(6):9-12.

[5] 温桃勇,刘小强. 紫色甘薯营养成分和药用价值研究进展[J]. 安徽农业科学,2009,37(5):1954-1956.

[6] 梁陈冲,于会民,王月超. 甘薯渣的饲用价值及应用[J]. 饲料与畜牧:新饲料,2012(12):34-36.

[7] 王桃云,王飞,万承永. 我国天然植物色素研究与开发探索[J]. 食品工业,2001,22(3):32-33.

[8] 惠秋沙. 天然色素的研究概况[J]. 北方药学,2011,8(5):3-4.

[9] 陈亚妮,张军民. 微波萃取技术研究进展[J]. 应用化工, 2010, 39(2):270-272.

[10] 陈明俊. 色素提取方法的研究进展[J]. 山东化工,2011,40(5):34-36.

[11] 李巧玲. 微波萃取技术在天然食用色素提取上的应用[J]. 中国食品添加剂,2003(4):105-107.

[12] 刘永练,张新强,毛桃嫣,等. 微波-表面活性剂协同提取番薯天然紫色素的研究[J]. 食品工业科技,2007,28(7):180-183.