

马蹄多糖微波辅助提取工艺优化及其抗氧化活性研究

Study on microwave-assisted extraction and antioxidation of polysaccharides from water chestnut

张会香 杨世军 曾 金

ZHANG Hui-xiang YANG Shi-jun ZENG Jin

(桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西 桂林 541004)

(College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

摘要:以马蹄为原料,利用正交试验优化其多糖的微波辅助提取工艺,并对马蹄多糖的抗氧化性进行检测。结果表明:以蒸馏水为提取溶剂,马蹄多糖最佳提取工艺为微波功率 600 W,料液比 1:15(g/mL),提取时间 3 min,该条件下马蹄多糖提取率可达 8.12%,纯度达 83.2%。马蹄多糖有较强的还原力,在 0.01~0.10 mg/mL 质量浓度范围内与抗坏血酸相当;对羟自由基有较强的清除能力,在 0.10 mg/mL 时,马蹄多糖对羟自由基的清除率达到 46.18%。

关键词:马蹄;多糖;微波辅助提取;抗氧化活性

Abstract: The water chestnut as raw material, the extraction conditions of polysaccharide were studied by single factor and orthogonal experiment, antioxidant activity on polysaccharide from water chestnut was detected, respectively. The results showed that with distilled water as extraction solvent, extracting process of polysaccharide from water chestnut had microwave power of 600 W, solid-liquid ratio of 1:15, extracting time of 3 min, under these conditions, the extraction rate of polysaccharide could reach 8.12%, and the polysaccharide purity could up to 83.2%. The polysaccharide from water chestnut had strong reduction power and scavenging ability to hydroxyl radicals in the range of 0.01 ~ 0.10 mg/mL mass concentration, and the removal rate of hydroxyl radical reached 46.18% when the concentration of polysaccharide was 0.10 mg/mL.

Keywords: water chestnut; polysaccharide; microwave-assisted extraction; antioxidative activity

马蹄(*Eleocharis dulcis*),为莎草科多年生水生草本植物,有 2 000 余年的种植史。目前对马蹄皮中多糖的报道较多^[1-4],但是对于马蹄果肉中多糖的研究报道却较少,仅有

超声辅助提取法^[6]和热水浸提法^[5-6]的报道。热水浸提法时间久,提取率低;超声波提取法虽然可以起到破碎细胞壁的作用,但是提取温度较低,不利于多糖的溶解。而微波提取法可以快速均匀升温,极大地缩短萃取时间,提高萃取效率。因此,本研究拟采用微波辅助法对马蹄水溶性多糖进行提取,优化其提取工艺参数,并对马蹄多糖的抗氧化活性进行分析,旨在为马蹄资源的利用及新型抗氧化剂的开发提供理论依据。

1 仪器与试剂

1.1 材料与试剂

马蹄:购买于桂林市雁山镇菜市场;

无水乙醇、葡萄糖、抗坏血酸、硫酸、苯酚、三氯化钾、铁氰化钾、三氯乙酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、三氯化铁、硫酸亚铁:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

α -淀粉酶:生化纯,活性 ≥ 50 U/mg,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器

电脑微波超声波组合合成/萃取仪:XH-300A 型,北京祥鹄科技发展有限公司;

可见分光光度计:722PC 型,上海右科仪器仪表有限公司;

曲线控制十段编程鼓风干燥箱:ZXRD-B5110 型,郑州南北仪器设备有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-S2 型,金坛市医疗仪器厂;

离心机:CL-5-B 型,上海安亭科学仪器厂;

酸度计:PB-10 型,北京赛多利斯科学仪器有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52A 型,上海亚荣生化仪器厂;

循环水式多用真空泵:SHB-III 型,郑州长城科工贸有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 多糖提取工艺流程

新鲜马蹄→去皮、洗净、切片(2 mm)→干燥(80℃)→粉

基金项目:广西矿业与环境科学实验中心资助项目(编号:KH2011YB017);广西高校食品安全与检测重点实验室开放课题基金资助项目

作者简介:张会香(1975—)女,桂林理工大学副教授,硕士。

E-mail:2002093@glut.edu.cn

收稿日期:2016-02-01

碎(80目)→无水乙醇脱脂(料液比1:20[g/mL],常温,浸泡2h)→3倍体积蒸馏水浸泡清洗脱脂后的残渣3次→脱淀粉(α -淀粉酶添加量1%,料液比1:20[g/mL],温度60~70℃,pH 5.5~7.5,至碘液检测不含淀粉)→80℃干燥得马蹄粉末→微波辅助提取→离心(3 000 r/min,15 min)→上清液(粗提取液)→浓缩(60℃真空浓缩)→脱蛋白(Sevage法^[8])→离心(3 000 r/min,15 min)→上清液→醇析(加入4倍体积无水乙醇,静置2 h以上)→离心(4 000 r/min,20 min)→沉淀→真空干燥(60℃真空干燥10 h)→马蹄多糖

1.3.2 马蹄多糖含量的测定 采用苯酚—硫酸分光光度法^[9]。

(1) 葡萄糖标准曲线的绘制:精密称取干燥(105℃)至恒重的分析纯葡萄糖10.0 mg,用蒸馏水定容成0.1 mg/mL的葡萄糖标准液。分别吸取0.1 mg/mL葡萄糖标准液0.0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mL于不同具塞试管中,加蒸馏水至1.0 mL。向试管中加入6%苯酚溶液1.0 mL,摇匀后迅速加入浓硫酸5.0 mL。振摇5 min,置沸水浴中加热15 min,反应结束后迅速放入冰水浴中冷却至室温,于490 nm处测定其吸光值,以不加葡萄糖标准液的空白管调零。以葡萄糖浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线。

(2) 样品的测定:取一定量的马蹄多糖溶液加入干燥试管中,向试管中加入6%苯酚溶液1 mL,摇匀后迅速加入浓硫酸5 mL。振摇5 min,置沸水浴中加热15 min,反应结束后迅速放入冰水浴中冷却至室温,于490 nm处测定其吸光值,以加等量蒸馏水代替多糖溶液的空白管调零。根据标准曲线计算多糖的含量,再计算求得样品中多糖的提取率和纯度。

1.3.3 多糖提取率的测定 根据1.3.2方法测定,按式(1)计算出样品中多糖的质量,按式(2)计算多糖的提取率。

$$m_1 = \frac{c \times v \times f}{1\,000}, \tag{1}$$

$$x = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \tag{2}$$

式中:

m_1 ——样品中多糖的质量,g;

c ——葡萄糖浓度,mg/mL;

v ——多糖溶液体积,mL;

f ——稀释倍数;

x ——提取率,%;

m_1 ——样品中多糖的质量,g;

m_2 ——马蹄粉末原料的质量,g。

1.3.4 多糖纯度的测定 精密称取0.100 0 g马蹄多糖,用蒸馏水溶解于1 L容量瓶中,制成0.1 mg/mL的待测液。按照1.3.2的方法测定,按式(1)计算得出马蹄多糖的质量,按式(3)计算多糖纯度。

$$p = \frac{m_1}{m_3} \times 100\%, \tag{3}$$

式中:

p ——纯度,%;

m_1 ——样品中多糖的质量,g;

m_3 ——马蹄多糖样品的质量,g。

1.3.5 马蹄提取工艺的优化

(1) 提取温度对马蹄多糖提取率的影响:设定料液比1:20(g/mL),微波功率500 W,提取时间4 min,分别考察温度为60,70,80,90,100℃时马蹄多糖提取率的变化。

(2) 微波功率对马蹄多糖提取率的影响:设定料液比1:20(g/mL),提取时间4 min,温度100℃,分别考察微波提取功率300,400,500,600,700 W时马蹄多糖提取率的变化。

(3) 提取时间对马蹄多糖提取率的影响:设定料液比1:20(g/mL),微波功率500 W,提取温度100℃,分别考察提取3,4,5,6,7 min时马蹄多糖提取率的变化。

(4) 料液比对马蹄多糖提取率的影响:设定微波功率500 W,提取时间4 min,提取温度100℃,分别考察料液比1:10,1:15,1:20,1:25,1:30(g/mL)时马蹄多糖提取率的变化。

(5) 正交试验:在单因素试验结果的基础上以微波功率、提取时间、料液比为影响因素,选择 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行正交试验,确定马蹄多糖的最佳提取工艺参数。

1.3.6 多糖抗氧化性的研究

(1) 多糖样品溶液的配制:精密称取马蹄多糖样品配成1 mg/mL的待测储备液。分别取1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 mL待测储备液定容至100 mL,配置成浓度分别为0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0 mg/mL的待测液。抗坏血酸也配成相同浓度梯度的对照样液。

(2) 总还原能力的测定:采用普鲁士蓝法^[10]。

(3) 清除羟自由基的能力:采用水杨酸法。根据文献[11],修改如下:向25 mL具塞试管中分别加入6 mmol/L硫酸亚铁1 mL,6 mmol/L水杨酸—乙醇溶液1 mL,再加入样品溶液1 mL,最后加入6 mmol/L的双氧水溶液1 mL,加水定容至10 mL。摇匀后置于37℃水浴锅中反应30 min,反应结束后迅速在510 nm处测定其吸光度值。用蒸馏水调零。羟自由基清除率按式(4)计算:

$$C = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100\%, \tag{4}$$

式中:

C ——清除率,%;

A_i ——样品管的吸光度值;

A_j ——不加双氧水测定的吸光度值;

A_0 ——蒸馏水代替样品反应测定的吸光度值。

1.4 数据处理

试验数据均平行测定3次,以平均值±标准偏差表示,采用Excel、Spss 18.0软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 葡萄糖标准曲线的绘制

由图1可知,在0.0~0.1 mg/mL浓度范围内,葡萄糖标准液浓度与吸光值呈良好的线性关系。

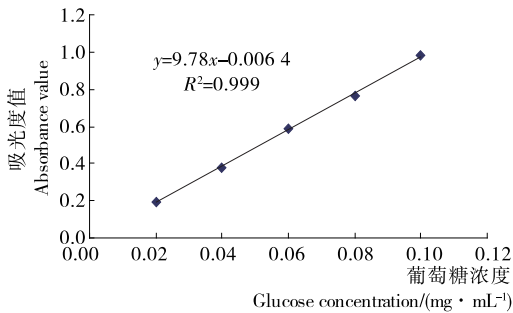


图 1 葡萄糖标准曲线

Figure 1 Standard curve of glucose

2.2 马蹄多糖提取工艺的优化

2.2.1 提取温度对马蹄多糖提取率的影响 由图 2 可知,随着提取温度的提高,马蹄多糖提取率不断升高,当温度达到 100 ℃时,提取率达到最高为 7.16%,说明温度的升高可以加速多糖从细胞中的浸出。由于试验中提取液的量较少,只有 50 mL 左右,在 400 W 以上的功率条件下提取时,温度在短时间内(30~50 s)会迅速升到所需温度,此后要维持温度就需一直维持在 100 W 左右的较低功率下进行加热。由于在 100 ℃提取率最高,所以在正交试验中,对温度因素不考虑。

2.2.2 提取时间对马蹄多糖提取率的影响 由图 3 可知,马蹄多糖的提取率随微波时间增加而提高,当提取时间为 4 min时,马蹄多糖提取率达到最大值为 7.05%。之后马蹄多糖的提取率稍微有所下降。这说明多糖浸出效果与时间是密切相关的,如果提取时间过短,则产物溶解不充分,但如果提取时间过长,则可能会引起产物结构的变化进而使提取

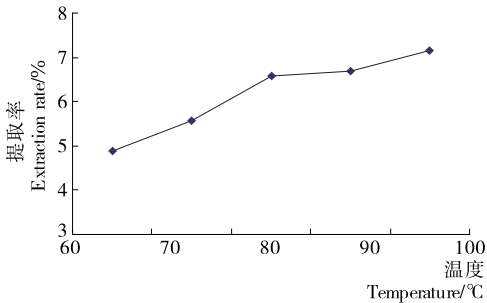


图 2 提取温度对马蹄多糖提取率的影响

Figure 2 The effect of temperature on the extraction rate of water chestnut polysaccharide

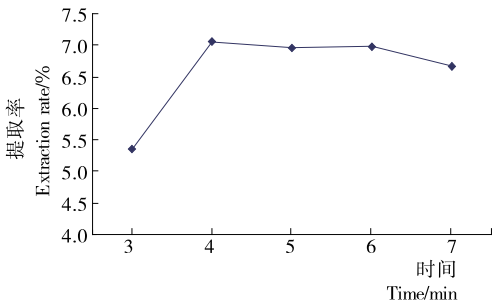


图 3 提取时间对马蹄多糖提取率的影响

Figure 3 The effect of time on the extraction rate of water chestnut polysaccharide

率降低。也可能是细胞内其他杂质的溶出量增加,从而影响了多糖的溶出。因此,马蹄多糖的最佳提取时间为 4 min。

2.2.3 微波功率对马蹄多糖提取率的影响 由图 4 可知,马蹄多糖的提取率随着微波功率的增大而升高,在功率达到 500 W 时提取率达到最大,之后提取率平缓且略微下降。说明在微波功率较低时,微波的能量不足以使多糖充分的溶出,提取率较低,随着微波功率增大,马蹄果肉细胞被破坏充分,提取率升高,但是当微波功率到达某一限定值时,对细胞壁的破坏力达到最大,因此提取率不再增加。因此,500 W 为最佳微波提取功率。

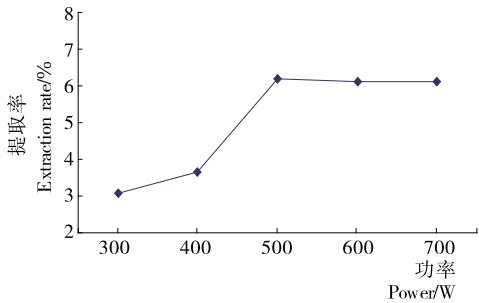


图 4 微波功率对马蹄多糖提取率的影响

Figure 4 The effect of microwave power on extraction rate of water chestnut polysaccharide

2.2.4 料液比对马蹄多糖提取率的影响 由图 5 可知,随着溶剂用量的提高,马蹄多糖提取率不断增大,在料液比达到 1:20(g/mL)时,马蹄多糖的提取率最高(7.23%),之后随着溶剂用量的提高,马蹄多糖的提取率下降。说明在相同的提取条件下,随着溶剂用量的增加,能够进入溶剂的多糖的溶解量也增加,但是当多糖已全部溶解,再增加溶剂的量,也不能使溶剂中的多糖量继续增加。并且溶剂用量太高,给后期的浓缩带来较大困难,也影响醇沉的浓度与用量。因此,选取 1:20(g/mL)作为最佳液料比。

2.2.5 正交试验 正交试验因素水平见表 1,试验结果见表 2,方差分析见表 3。

由表 2 可知,影响马蹄多糖提取率的主次因素顺序为 A>C>B,最佳工艺参数为 A₃B₁C₁,即微波功率 600 W,料液比为 1:15(g/mL),提取时间 3 min。通过表 3 方差分析可知,3个因素中微波功率对马蹄多糖提取率有极显著性的

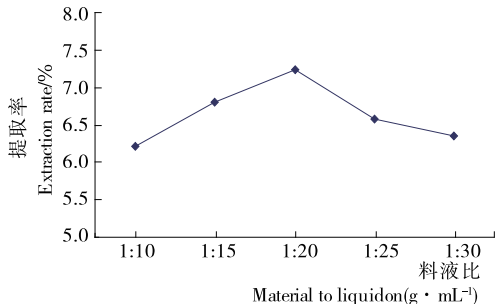


图 5 料液比对马蹄多糖提取率的影响

Figure 5 The effect of ratio of material to liquidon the extraction rate of water chestnut polysaccharide

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test table

水平	A 提取功率/W	B 提取时间/min	C 料液比(g · mL ⁻¹)
1	400	3	1 : 15
2	500	4	1 : 20
3	600	5	1 : 25

表 2 正交试验结果表

Table 2 Orthogonal test results and analysis table

试验号	A	B	C	D(空列)	提取率/%
1	1	1	1	1	4.32
2	1	2	2	2	3.72
3	1	3	3	3	3.27
4	2	1	2	3	7.80
5	2	2	3	1	7.25
6	2	3	1	2	7.72
7	3	1	3	2	7.80
8	3	2	1	3	7.88
9	3	3	2	1	7.38
k ₁	3.77	6.64	6.64	6.32	
k ₂	7.59	6.28	6.30	6.41	
k ₃	7.69	6.12	6.11	6.32	
R	3.92	0.52	0.53	0.09	

表 3 方差分析表[†]

Table 3 Variance analysis of orthogonal experiments

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	显著性
微波功率(A)	29.942	2	14.971	1 602.13	* *
微波时间(B)	0.420	2	0.210	22.46	*
料液比(C)	0.437	2	0.219	23.41	*
误差(空列 D)	0.019	2	0.009		

[†] $F_{0.01}(2,2)=99.00;F_{0.05}(2,2)=19.00$; * * 表示差异极显著($P<0.01$); * 表示差异显著($P<0.05$)。

影响,料液比和提取时间对马蹄多糖提取率有显著性的影响。

由于正交表中无 A₃C₁B₁试验组,进行 3 次平行验证实验,得出在微波功率 600 W,料液比 1 : 15(g/mL),提取时间 3 min 的最佳条件下马蹄多糖的提取率为(8.12±0.48)%,高于其他条件组。因此,正交试验所得参数确为最佳。

2.2.6 马蹄多糖纯度的检测 对得到的马蹄多糖样品进行观察,呈淡黄色,粉末状,无臭无味,无挥发性,置于空气中会吸潮,产生黏性,易溶于水,不溶于有机试剂。在最佳工艺条件下提取所得的马蹄多糖纯度为 83.2%。

2.3 马蹄多糖的抗氧化性研究

2.3.1 普鲁士蓝法测定总还原能力 由图 6 可知,马蹄多糖具有一定的还原能力,在 0.01~0.10 mg/mL 浓度范围内呈良好的线性关系。在 0.10 mg/mL 时,马蹄多糖的还原力逐渐接近抗坏血酸的,表明马蹄多糖具有较强的还原能力。

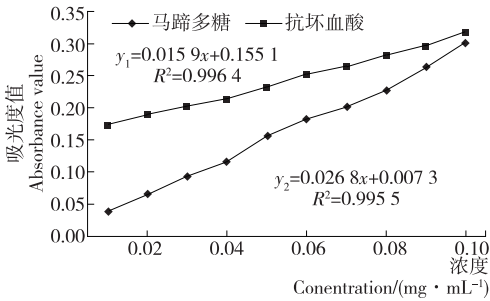


图 6 还原力测定结果

Figure 6 Reducing force determination results

2.3.2 清除羟自由基能力 由图 7 可知,羟自由基的清除能力随着马蹄多糖浓度的增大不断提高,当浓度上升到 0.10 mg/mL 时,羟自由基清除率达到 46.18%。从线性上观察,虽然马蹄多糖的羟自由基清除能力不及抗坏血酸,但是优于贾小丽等^[13]报道牛蒡多糖对羟自由基的清除率,其 IC₅₀(清除率达 50% 时多糖的质量浓度)为 3.99 mg/mL。说明马蹄多糖具有较强的羟自由基清除能力,是良好的羟自由基清除剂。

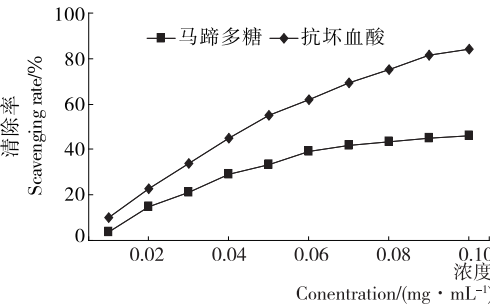


图 7 样品对羟自由基的清除率

Figure 7 The scavenging rate of the sample to hydroxyl radical

3 结论

本研究通过单因素试验和正交试验,确定了各因素对马蹄多糖提取率的影响顺序为微波功率>料液比>提取时间,最佳提取工艺参数为微波功率 600 W,料液比 1 : 15 (g/mL),提取时间 3 min,提取率可达 8.12%,纯度达 83.2%。本试验结果要优于王颖等^[6-8]报道的热水浸提法和超声波提取法,说明微波法是提取马蹄多糖的一种理想方法。

通过本试验证明马蹄多糖具有一定的抗氧化性。但由于本试验的马蹄多糖纯度只有 83.2%,还有一定的杂质存在,所以多糖的抗氧化抗坏血酸的,后续试验有必要对多糖继续纯化,并研究其结构与抗氧化性之间的相关性。

参考文献

[1] 李婕姝,贾冬英,姚开. 荸荠皮多糖体外清除自由基活性的研究[J]. 氨基酸和生物资源, 2008, 30(4): 7-9.
[2] 贾冬英,曹冬冬,姚开. 荸荠皮提取物对 DPPH 自由基清除活性[J]. 天然产物研究与开发, 2007, 19(5): 745-747.

(下转第 219 页)

167-171.

[36] 何余堂, 何婉莺, 刘贺, 等. 壳聚糖涂膜对鲜食玉米保鲜的技术研究[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2015, 33(4): 498-501.

[37] EISSA H A A. Effect of chitosan coating on shelf life and quality of fresh-cut mushroom[J]. Journal of Food Quality, 2007, 30(5): 623-645.

[38] 唐琳, 刘树, 海张娜. 壳聚糖涂膜技术对 MP 莴苣保鲜效果的研究[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2003, 18(4): 79-81.

[39] 于有伟, 李惠, 邸金花, 等. 壳聚糖植酸天然复合涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(3): 131-136.

[40] 余江涛, 谢晶. 生菜保鲜技术研究现状[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 226-229.

[41] 郭娟, 张进, 闫丹丹. 鲜切生菜联合保鲜技术研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 199-202.

[42] TECHAVUTHIPORN C, BOONYARITTHONGCHAI P. Effect of prestorage short-term Anoxia treatment and modified atmosphere packaging on the physical and chemical changes of green asparagus[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 117: 64-70.

[43] 高雪, 王然, 朱俊向, 等. 冰温结合自发气调包装贮藏对鲜切西兰花保鲜效果的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(12): 122-128.

[44] 徐长妍, 刘杰, 陈焕霓. 鲜切西兰花不同 PE 薄膜保鲜包装技术研究[J]. 食品科技, 2011, 36(7): 40-44.

[45] RODOV V, HOREV B, GOLDMAN G. et al. Model-driven development of micro perforated active modified atmosphere packaging for fresh-cut produce[J]. Acta Horticulturae, 2007, 746(746): 83-88.

[46] 孙炳新, 杨金玲, 赵宏侠, 等. 鲜切果蔬包装的研究现状与进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(7): 392-396, 400.

[47] 陈学红, 秦卫东, 马利华, 等. 高氧气调包装对鲜切莴苣抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(8): 313-317.

[48] 刘敏, 谢晶. 菠菜 MAP 保鲜及低温贮藏研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(9): 1 073-1 076.

[49] 余江涛, 谢晶. 臭氧水处理结合气调包装对鲜切生菜保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 111-115.

[50] TOMAS-CALLEJAS A, BOLUDA M, ROBLES P A, et al. Innovative active modified atmosphere packaging improves overall quality of fresh-cut red chard baby leaves[J]. LWT- Food Science and Technology, 2011, 44(6): 1 422-1 428.

[51] 庄荣福, 李金雨, 林光荣, 等. 金针菇的贮藏保鲜技术及其生理生化基础[J]. 福建农业大学学报, 2000, 29(3): 319-322.

[52] 张琪, 张伟阳, 陈晓东, 等. 聚乳酸薄膜真空包装对金针菇保鲜效果的研究[J]. 食品工业, 2014, 35(3): 91-95.

(上接第 167 页)

[3] 郭艳华, 胡思前. 马蹄皮提取物的抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(10): 128-130.

[4] 罗杨合. 马蹄皮资源化利用研究[J]. 应用化工, 2009, 38(9): 1 368-1 370.

[5] 王颖, 曾霞, 周天, 等. 荸荠多糖提取条件研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(10): 49-51.

[6] 王颖, 王国红, 曾霞, 等. 响应面法优化荸荠多糖的提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(6): 112-116.

[7] 王忠合, 王军, 黎建文. 荸荠多糖的提取及特性研究[J]. 食品科技, 2012, 37(7): 196-198, 205.

(上接第 170 页)

氧化活性的影响较大,其中采用超临界 CO₂ 萃取后脱色脱胶制备的辣椒籽油体外抗氧化性最好。但是还需经过细胞试验等来确定其体内抗氧化活性。

参考文献

[1] 王继榜. 我国辣椒产业现状及发展趋势综述[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(19): 64-78.

[2] 韩文杰, 张俊强, 袁新英, 等. 辣椒籽油的抗氧化性和生产方法的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(4): 149-152.

[3] 张甫生, 宁娜, 肖丽, 等. 精炼辣椒籽油的品质分析研究[J]. 食品工业, 2013, 34(5): 163-167.

[4] 朱姐. 辣椒籽综合开发利用前景分析[J]. 中国调味品, 2014, 39(1): 120-123.

[5] 张军, 韩伟, 马寅斐, 等. 辣椒籽油抗氧化降血脂保健功能研究[J]. 农产品加工: 创新版, 2009(6): 32-34.

[6] ZAMARIA N. Alteration of polyunsaturated fatty acid status

[8] 扈瑞平, 张兴夫, 杜玲, 等. 沙葱多糖 Seavage 法除蛋白工艺的研究[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2009, 50(6): 658-662.

[9] 梁艳, 应苗苗, 吕英华, 等. 微波辅助提取仙人掌多糖的工艺研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 159-162.

[10] HU Chun, CAI Yi-zhong, LI Wen-de, et al. Anthocyanin characterization and bioactivity assessment of a dark blue grained wheat extract[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 955-961.

[11] 郭晓青, 陈晓靓, 杨春梅, 等. 紫苏叶活性成分及抗氧化性研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 179-181, 185.

[12] 贾小丽, 程烨, 孙艳辉, 等. 牛蒡多糖的提取工艺及抗氧化性分析[J]. 粮食与食品工业, 2015, 22(6): 51-56.

andmetabolism in health and disease[J]. Reprod Nutr. Dev., 2004, 44(3): 273-282.

[7] 来伟旗, 张岭, 刘臻, 等. 多不饱和脂肪酸抗氧化功能的人体实验[J]. 职业与健康, 2011, 27(23): 2 707-2 708.

[8] 黄明亚, 陈祥贵, 何宇新, 等. 加工工艺对石榴浓缩汁抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 92-95.

[9] 李加兴, 余娇, 黄诚, 等. 猕猴桃籽油的体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2012, 35(23): 51-54.

[10] 杨宏志, 李静. 亚麻木酚素的抗氧化性能[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 27-29.

[11] 王静, 张京楼, 王铎喜, 等. 海参多肽的抗氧化性能研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 62-70.

[12] 张乔会, 王建中, 逢锦慧, 等. 杜香多糖的抗氧化活性及物理性质研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 206-209.

[13] 刘光宪, 冯建雄, 王辉, 等. 不同纯化方法对花生多糖抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 189-191.

[14] 李铨军, 崔胜云. 抗坏血酸清除 DPPH 自由基的作用机理[J]. 食品科学, 2011, 32(1): 86-90.