

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.01.027

玉米须多酚预热结合超声辅助提取工艺及抗氧化性研究

Study on preheating and ultrasound-assisted extraction of polyphenols from corn silk and their antioxidant activities

许英一¹ 徐艳霞² 王宇² 林巍¹ 吴红艳¹ 孟祥雯¹

XU Ying-yi¹ XU Yan-xia² WANG Yu² LIN Wei¹ WU Hong-yan¹ MENG Xiang-wen¹

(1. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006;

2. 黑龙江省畜牧研究所, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

(1. College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China;

2. Heilongjiang Province Institute of Animal Science, Qiqihar, Heilongjiang 161005, China)

摘要:采用先加热浸提后超声波辅助乙醇提取玉米须多酚,在单因素试验基础上,对超声波辅助提取玉米须多酚进行了响应面优化试验,并对玉米须多酚抗氧化活性进行了研究。结果表明:最佳提取条件为料液比 1:22 (g/mL),乙醇体积分数 60%,超声时间 32 min,超声温度 60 °C,该条件下玉米须多酚提取率为(6.49±0.23)%。玉米须多酚对 DPPH 自由基、羟自由基和 ABTS 自由基清除率相当于还原型谷胱甘肽的量分别为 0.917, 0.809, 0.881 mg/mg。

关键词:玉米须;预热;超声波辅助提取;多酚;抗氧化

Abstract: Ultrasonic-assisted ethanol extraction after heating was used to extract polyphenols from corn silk. On the basis of single factor test, the response surface optimization test was carried out on polyphenols by ultrasonic-assisted ethanol extractions, and the antioxidant activity of the extracted polyphenols was studied. The results showed that the optimum extraction conditions were as follows: the ratio of solid to liquid 1:22 (g/mL), the volume fraction of ethanol 60%, the ultrasonic time 32 min, and the ultrasonic temperature 60 °C, the extraction rate of the polyphenol from corn silk was (6.49 ± 0.23)%. The scavenging rates of DPPH, hydroxyl and ABTS free radicals by corn silk polyphenols were equivalent to the reduced glutathione, which were detected to be 0.917, 0.809, 0.881 mg/mg, respectively.

Keywords: corn silk; preheating; ultrasonic-assisted extraction;

基金项目:黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(编号:135209274);黑龙江省自然科学基金项目(编号:C201456)

作者简介:许英一(1971—),女,齐齐哈尔大学教授,硕士。

E-mail: wxyy-1@163.com

收稿日期:2018-09-03

polyphenols; antioxidant activity

玉米须为禾本科玉蜀黍属植物玉米的花柱和花头,常集集成疏松团簇,花柱线状或须状,淡绿色、黄绿色至棕红色,有光泽,略透明,具有消肿、利尿、平肝、利胆之功效^[1]。作为玉米的副产物,玉米须来源丰富,含有多酚类等多种有机物质。据临床研究证明玉米须多酚具有抗菌^[2]、降血糖^[3]、抗氧化^[4-6]、预防心血管疾病^[7]等方面的药理功效。

植物多酚的提取方法很多,如醇提法、超声波辅助法、酶提法、超临界萃取^[8-9]等。醇提法操作简便、成本低廉,但试剂耗量大、提取率较低;酶提法提取率高,但提取费用也高;超临界萃取操作较繁琐,且存在安全性问题;超声提取是一种高效节能的提取活性物质的新技术^[10],其原理是利用超声波机械振动产生的空化作用增加物质的提取率^[11]。赵丽等^[12]采用超声波、微波和摇床振荡等辅助提取方法对 3 种叶菜多酚进行提取,结果表明超声波辅助提取法显著增加了叶菜的多酚提取量,较微波辅助提取法 3 种叶菜多酚增加了 3.20%~6.00%,较摇床辅助提取法增加了 10.00%~15.00%。张素霞^[13]采用超声波法和醇法 2 种工艺提取茶多酚,发现超声波法提取效果更佳。林枫雨等^[14]分别采用醇提、超声波法和微波法 3 种工艺提取甜玉米芯多酚,发现超声波法效果更佳。蒋丽等^[15]采用超声波、酶法、30 °C 水提、热回流水提以及纤维素酶辅助超声波提取法 5 种工艺提取茶多酚,发现超声波法提取率和产品纯度较高,且其抗氧化活性最强。邓义书等^[16]采用超声波法、微波法、索氏提取法和超临界萃取法 4 种工艺提取桑葚果渣中总多酚,发现

超声波法效果最佳。侯敏娜等^[17]采用超声波辅助提取玉米须多酚,得率为 4.45%。

采用先加热后再辅助超声波提取的提取方式还未见报道。热处理既可杀菌,又在一定程度上增加了多酚与有机溶剂的结合,增大多酚物质的溶出率。本研究拟采用先加热后超声波辅助乙醇提取玉米须多酚,在单因素试验的基础上,以玉米须多酚提取率为评价指标,利用响应面法进行优化,同时测定了玉米须多酚的抗氧化活性,为玉米须多酚作为添加剂应用于食品行业提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

玉米须:黑龙江畜牧研究所实验基地;

没食子酸标准品:中国药品生物制品检定所;

乙醇、碳酸钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁、水杨酸、硫酸亚铁、双氧水、DPPH、ABTS、过硫酸钾:分析纯,天津市光复科技发展有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

高速药物粉碎机:WK-600A 型,青州市精诚机械有限公司;

超声波药品处理机:JBT/C-YCL 型,济宁金百特工程机械有限公司;

台式低速离心机:TDL-5-A 型,上海安亭科学仪器有限公司;

水浴恒温振荡器:SHA-C 型,金坛市天竟实验仪器有限公司;

可见分光光度计:722S 型,上海菁华科技仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 玉米须多酚的提取 准确称取干燥玉米须粉末 5.0 g,按照试验方案加入一定料液比一定体积分数的乙醇,先加热浸提 40 min 后,再超声辅助提取一定时间,过滤,取滤液即为多酚提取液。

1.2.2 玉米须多酚含量与提取率的测定

(1) 绘制标准曲线:准确称取 20 mg 没食子酸标准品,于 200 mL 容量瓶中,加去离子水定容至刻度,得到浓度为 0.1 mg/mL 标准溶液。分别移取没食子酸标准溶液 0.0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mL 于 6 支 10.0 mL 容量瓶中,用去离子水定容至 10 mL。按文献^[11]方法在 760 nm 处测定吸光度。标准曲线方程为 $y=0.078x+0.0019$,相关系数 $R^2=0.9994$,线性相关性好。

(2) 多酚含量测定:取多酚提取液 2 mL,按照 1.2.2(1)方法显色,在 760 nm 处测定样品吸光度,根据标准曲线方程得到玉米须多酚质量,按式(1)计算提取率。

$$c = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

c ——玉米须多酚提取率,%;

m_1 ——玉米须多酚质量,g;

m_2 ——玉米须质量,g。

1.2.3 单因素试验 准确称取干燥玉米须粉末 5.0 g,单因素试验的基本条件为料液比 1:20 (g/mL),乙醇体积分数 60%,浸提温度 50 °C,浸提时间 40 min,超声时间 40 min。本试验只研究某单一因素条件的变化。料液比分别为 1:10,1:15,1:20,1:25,1:30 (g/mL),乙醇体积分数分别为 40%,50%,60%,70%,80%,浸提温度分别为 40,45,50,55,60 °C,超声时间分别为 10,20,30,40,50 min,按上述设计做单因素试验。测定多酚提取率,每组 3 次重复。

1.2.4 响应面试验设计 根据中心设计试验原理,在单因素试验基础上,固定浸提温度 50 °C,浸提时间 40 min,考察料液比、乙醇体积分数和超声时间对玉米须多酚提取率的影响,确定最佳提取工艺。

1.2.5 DPPH 自由基的清除率的测定 根据文献^[18]。

1.2.6 羟自由基清除率的测定 根据文献^[19]。

1.2.7 ABTS 自由基清除率的测定 根据文献^[20]。

1.3 数据分析

运用 Excel、Design-Expert 8.0.6 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 料液比 由图 1 可知,玉米须多酚提取率随溶剂量的增加而上升,料液比为 1:20 (g/mL) 达到最大值,后稍有下降。可能是增大溶剂量,使提取过程中溶剂与玉米须多酚溶质间的浓度差增大,有利于传质,因此提高了提取率;到达峰值后,随着溶剂量的继续增大,反而起到稀释的效果。因此选择最适料液比为 1:20 (g/mL)。

2.1.2 乙醇体积分数 由图 2 可知,玉米须多酚提取率随乙醇体积分数的增加先上升后下降,当乙醇体积分数

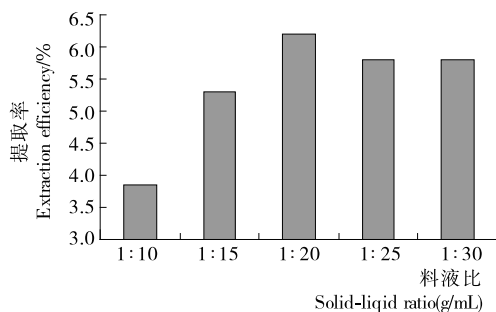


图 1 料液比对玉米须多酚提取率的影响

Figure 1 Impact analysis of solid-liquid ratio

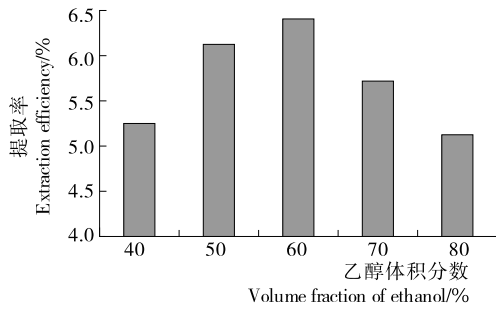


图2 乙醇体积分数对玉米须多酚提取率的影响

Figure 2 Impact analysis of volume fraction of ethanol

为60%时最高。可能是多酚中含有酚酸类物质,具有一定极性,根据相似相溶原理,多酚易溶出,当乙醇体积分数增加到一定值后,因水量减少,乙醇量增多,导致非极性强乙醇溶液对具有一定极性多酚的提取率下降。因此选择最适乙醇体积分数为60%。

2.1.3 浸提温度 由图3可知,玉米须多酚提取率随浸提温度的增加先上升后下降,当温度为50℃时最高。可能是温度升高,乙醇的黏度降低,分子间的热运动增大,多酚类物质的溶解和扩散速度加快,使提取率提高^[21];当温度升高到50℃以上,长时间加热会破坏多酚结构而导致提取率下降。因此选择最适浸提温度为50℃。

2.1.4 超声时间 由图4可知,玉米须多酚提取率随超声时间的延长先上升后稍有下降,当超声40 min时最大。可能是超声波通过机械效应、空化效应和热效应,提高了

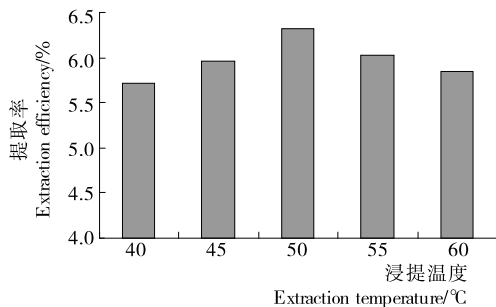


图3 浸提温度对玉米须多酚提取率的影响

Figure 3 Impact analysis of extraction temperature

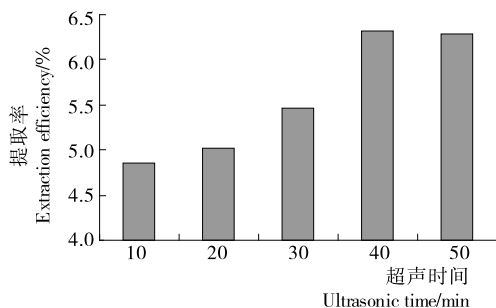


图4 超声时间对玉米须多酚提取率的影响

Figure 4 Impact analysis of ultrasonic time

乙醇分子的运动速度,增大了溶剂的穿透能力,从而提高了多酚提取率;超声40 min时,溶解在溶剂中的多酚类物质的浓度与细胞外液的浓度基本达到平衡,之后,多酚提取率稍有下降。因此选择最适超声时间为40 min。

2.2 响应面优化试验

2.2.1 试验设计及结果 在单因素试验基础上,应用三因素三水平的中心组合试验设计优化玉米须多酚提取的最佳条件。因素水平见表1,试验设计与结果见表2。

表1 试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of experiment

水平	A 料液比(g/mL)	B 乙醇体积分数/%	C 超声时间/min
1	1:25	70	40
0	1:20	60	35
-1	1:15	50	30

表2 试验设计与结果

Table 2 Design and results of experiment

序号	A	B	C	Y 提取率/%
1	1	-1	0	6.21
2	-1	1	0	5.64
3	0	0	0	6.51
4	0	-1	1	5.90
5	-1	0	-1	5.28
6	0	-1	-1	6.12
7	0	0	0	6.34
8	-1	0	1	5.62
9	-1	-1	0	5.02
10	0	1	-1	6.32
11	0	1	1	6.02
12	0	0	0	6.39
13	1	0	1	5.91
14	0	0	0	6.45
15	1	1	0	6.06
16	1	0	-1	6.35
17	0	0	0	6.48

2.2.2 建立模型与数据分析 采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行统计分析,得到玉米须多酚提取率与提取工艺参数的二次回归方程为:

$$Y = 6.43 + 0.37A + 0.099B - 0.078C - 0.19AB - 0.20AC - 0.020BC - 0.50A^2 - 0.20B^2 - 0.14C^2 \quad (2)$$

对该模型进行回归分析,得出分析结果见表3。从表3可以看出,回归模型的 $P < 0.0001$,说明该模型具有统计学意义,可以用来分析和预测超声波辅助法提取玉米须多酚的效果。同时模型失拟项(0.2188)不显著,模型

R^2 为 0.982 8, $adj-R^2$ 为 0.960 6, 说明回归方程拟合度良好。根据回归系数的显著性分析可知, 一次项料液比、乙醇体积分数、超声时间均对玉米须多酚提取率的影响达到显著效应。交互项中料液比与超声时间的交互作用、

料液比与乙醇体积分数的交互作用极显著 ($P < 0.01$), 而乙醇体积分数和超声时间没有交互作用, 二次项对玉米须多酚提取率的影响均达显著效应。

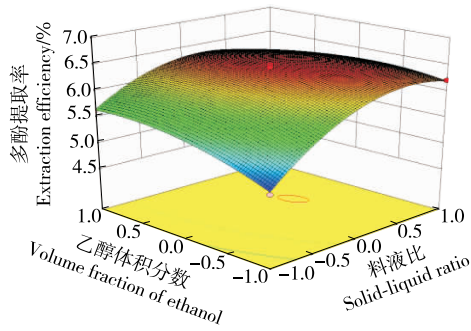
从图 5、6 可知, 料液比与超声时间两因素之间具有

表 3 响应面模型方差分析[†]

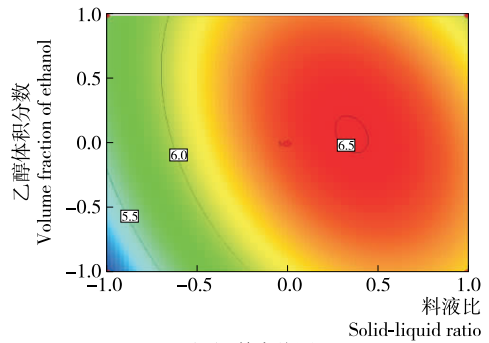
Table 3 ANOVA for the response surface quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P>F	显著性
模型	2.94	9	0.33	44.39	<0.000 1	**
A	1.10	1	1.10	149.59	<0.000 1	**
B	0.078	1	0.078	10.58	0.014 0	*
C	0.048	1	0.048	6.52	0.037 9	*
AB	0.15	1	0.15	20.11	0.002 9	**
AC	0.15	1	0.15	20.64	0.002 7	**
BC	1.60×10^{-3}	1	1.60×10^{-3}	0.22	0.655 4	
A ²	1.06	1	1.06	143.24	<0.000 1	**
B ²	0.17	1	0.17	23.02	0.002 0	**
C ²	0.086	1	0.086	11.72	0.011 1	*
残差	0.052	7	7.37×10^{-3}			
失拟项	0.033	3	0.011	2.30	0.218 8	不显著
纯误差	0.019	4	4.73×10^{-3}			
总和	3.00	16				

† * 表示影响显著; ** 表示影响极显著。



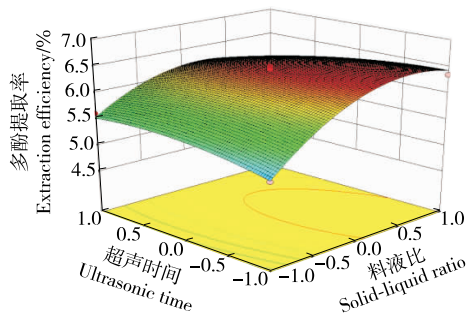
(a) 响应面图



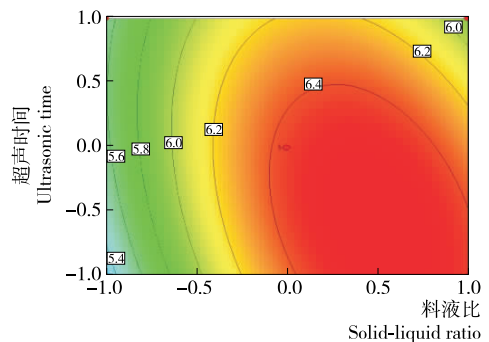
(b) 等高线图

图 5 料液比和乙醇体积分数交互作用等高线图和响应面图

Figure 5 Response surface and contour plots for the interaction effects of solid-liquid ratio and volume fraction of ethanol



(a) 响应面图



(b) 等高线图

图 6 料液比和超声时间交互作用等高线图和响应面图

Figure 6 Response surface and contour plots for the interaction effects of solid-liquid ratio and ultrasonic time

显著的交互作用,其次是料液比与乙醇体积分数两因素之间具有显著的交互作用,与表1结果一致。采用Design-Expert 8.0.6软件分析得到超声波辅助提取玉米须多酚的最佳工艺条件:料液比1:22.39(g/mL),乙醇体积分数60.00%,超声时间32.00 min,该条件下提取率为6.55%。为验证响应面优化结果的正确性,将试验条件调整为料液比1:22(g/mL),乙醇体积分数60%,超声时间32 min,进行3次平行实验,得玉米须多酚提取率为 $(6.49 \pm 0.23)\%$,与理论预测值基本一致,进一步验证了回归模型的适合性。玉米须多酚提取率高于侯敏娜等^[17]采用超声提取的玉米须多酚提取率(4.45%)。

2.3 玉米须多酚抗氧化能力

2.3.1 玉米须多酚对DPPH自由基清除作用 玉米须多酚及还原型谷胱甘肽对DPPH自由基清除率结果如图7所示。从图7可以看出,玉米须多酚和还原型谷胱甘肽均对DPPH自由基具有清除能力,且都与其浓度呈正相关,具有显著的剂量依赖效应。多酚质量浓度与清除率的回归方程为 $y = 120.15x + 30.903 (R^2 = 0.9961)$,其半抑制浓度(IC_{50} 值)为0.337 mg/mL;阳性对照还原型谷胱甘肽的质量浓度与清除率的回归方程为 $y = 52.3x + 74.208 (R^2 = 0.9903)$,其 IC_{50} 值为0.309 mg/mL。玉米须多酚对DPPH自由基清除率相当于还原型谷胱甘肽的量为0.917 mg/mg。

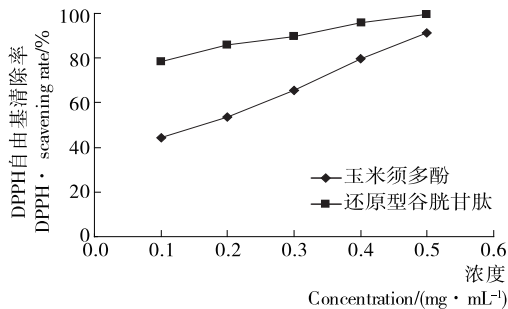


图7 玉米须多酚对DPPH自由基清除率的影响

Figure 7 Effect of polyphenols from corn silk on DPPH radical scavenging rate

2.3.2 玉米须多酚对羟自由基清除作用 玉米须多酚及还原型谷胱甘肽对羟自由基清除率结果如图8所示。从图8可以看出,玉米须多酚和还原型谷胱甘肽均对羟自由基具有清除能力,且都与其浓度呈正相关,具有显著的剂量依赖效应。多酚质量浓度与清除率的回归方程为 $y = 146.96x + 11.022 (R^2 = 0.9786)$,其 IC_{50} 值为0.288 mg/mL;阳性对照还原型谷胱甘肽的质量浓度与清除率的回归方程为 $y = 139.1x + 31.322 (R^2 = 0.9537)$,其 IC_{50} 值为0.233 mg/mL。玉米须多酚对羟自由基清除率相当于还原型谷胱甘肽的量为0.809 mg/mg。

2.3.3 玉米须多酚对ABTS自由基清除作用 玉米须多

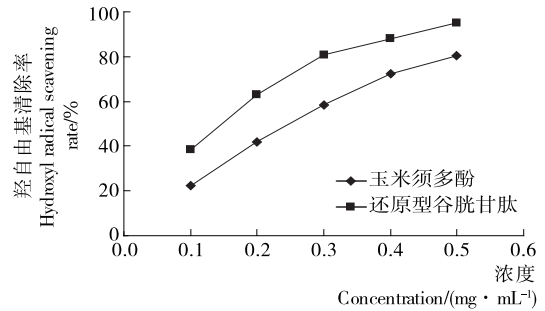


图8 玉米须多酚对羟自由基清除率的影响

Figure 8 Effect of polyphenols from corn silk on hydroxyl radical scavenging rate

酚及还原型谷胱甘肽对ABTS自由基清除率结果如图9所示。从图9可以看出,玉米须多酚和还原型谷胱甘肽均对ABTS自由基具有清除能力,且都与其浓度呈正相关,具有显著的剂量依赖效应。多酚质量浓度与清除率的回归方程为 $y = 752.4x + 9.078 (R^2 = 0.9967)$,其 IC_{50} 值为0.067 mg/mL;阳性对照还原型谷胱甘肽的质量浓度与清除率的回归方程为 $y = 231.2x + 79.046 (R^2 = 0.9339)$,其 IC_{50} 值为0.059 mg/mL。玉米须多酚对ABTS自由基清除率相当于还原型谷胱甘肽的量为0.881 mg/mg。

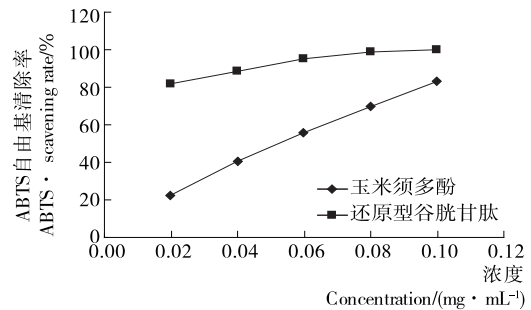


图9 玉米须多酚对ABTS自由基清除率的影响

Figure 9 Effect of polyphenols from corn silk on ABTS radical scavenging rate

3 结论

(1) 采用超声波辅助法提取玉米须多酚的最佳工艺条件为:料液比1:22(g/mL),乙醇体积分数60%,超声时间32 min,超声温度60℃,在此条件下玉米须多酚提取率为 $(6.49 \pm 0.23)\%$ 。

(2) 对优化得到的玉米须多酚进行抗氧化活性测定。试验结果表明:在同质量的条件下玉米须多酚的抗氧化抑制率虽然略低于还原型谷胱甘肽的,但均具有明显的抗氧化活性。对DPPH自由基清除率、羟自由基清除率和ABTS自由基清除率而言,玉米须多酚相当于还原型谷胱甘肽的量分别为0.917,0.809,0.881 mg/mg。

(3) 本研究与传统的乙醇浸提法、超声波辅助提取法相比,预热结合超声波辅助提取显著提高了玉米须多酚

提取率,后续如能对提取的玉米须多酚进一步分离纯化,将会提高其抗氧化活性。

参考文献

- [1] 王元清, 严建业, 陈志文, 等. 均匀设计优选玉米须中总黄酮和多糖的水提工艺[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 104-106.
- [2] 洪秋菊, 任远. 玉米须的化学成分与药理研究[J]. 甘肃中医学院学报, 2010, 4(6): 74-77.
- [3] 陈耀章, 马琴国. 玉米须降糖、降压、降脂、保肝作用研究[J]. 中医研究, 2014, 27(3): 78.
- [4] 柏桦, 海春旭, 梁欣, 等. 玉米须提取物清除自由基和抑制脂质过氧化作用[J]. 癌变·畸变·突变, 2007, 20(1): 36-40.
- [5] 吴亚楠, 鲁晓翔, 连喜军. 玉米须黄酮清除自由基活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(1): 5-8.
- [6] 邵芳芳, 尹卫平, 梁菊. 重要的植物多酚及其抗氧化性能的研究概况[J]. 西北药学杂志, 2010, 25(1): 66-68.
- [7] 李健, 杨昌鹏, 李群梅, 等. 植物多酚的应用研究进展[J]. 广西轻工业, 2008(12): 1-3.
- [8] 伍鹤, 王远亮, 赵琳, 等. 蓝莓多酚提取方法及功能活性研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 257-261.
- [9] 冯丽, 宋曙辉, 赵霖, 等. 植物多酚及其提取方法的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2007(10): 39-41.
- [10] 石峰, 陈雨, 张亚琴, 等. 泽泻总三萜超声辅助提取工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 170-174.
- [11] WU Zhen, LI Hong, YANG Yong, et al. Ultrasonic extraction optimization of *L. macranthoides* polysaccharides and its physicochemical properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 74: 224-231.
- [12] 赵丽, 顾燕雯, 赵忆菲, 等. 3 种叶菜多酚提取条件的研究[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2017, 35(5): 89-94.
- [13] 张素霞. 不同方法提取茶多酚比较研究[J]. 粮食与油脂, 2009(7): 42-44.
- [14] 林枫雨, 马永强, 王鑫, 等. 不同方法提取甜玉米芯多酚对比研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(24): 58-63.
- [15] 蒋丽, 王雪梅, 全学军, 等. 不同提取方法对茶多酚理化性质的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(14): 136-139.
- [16] 邓义书, 包海蓉, 齐知耕. 桑葚果渣中总多酚的不同提取方法比较研究[J]. 湖南农业科学, 2010(15): 106-108.
- [17] 侯敏娜, 侯少平. 响应面法优化超声辅助提取玉米须多酚工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 46-50.
- [18] XIE Xing, TU Zong-cai, ZHANG Lu, et al. Antioxidant activity, α -glucosidase inhibition, and phytochemical fingerprints of *Anoectochilus roxburghii* formula tea residues with HPLC-QTOF-MS/MS[J]. J Food Biochem, 2017, 41(6): e12402.
- [19] 王羚佳, 舒晓梦, 辛文, 等. 雅津蛋白桑多糖的分离纯化及生物活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 175-179.
- [20] ZENG Di, ZHU Si-ming. Purification, characterization, antioxidant and anticancer activities of novel polysaccharides extracted from *Bachu* mushroom[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 107(Pt A): 1 086-1 092.
- [21] 王红. 燕麦麸皮多酚类物质的提取、抗氧化性及稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2013: 20.
- (上接第 152 页)
- [7] NUTAKOM T, YOSHILO H. Development of a mathematical model for simulating gas and water vapor exchanges in modified atmosphere packaging with macroscopic perforations[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 94-104.
- [8] 张长峰, 徐步前, 吴光旭. 更接近于气调包装条件下薄膜透气系数的测算方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 15-18.
- [9] 周晓龙, 吕恩利, 陆华忠, 等. 基于 Linux 的车载气调保鲜运输控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 155-160.
- [10] 吕恩利, 陆华忠, 罗锡文, 等. 果蔬气调保鲜运输车的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 9-16.
- [11] 何媛, 南晓红. 三维 CFD 模型预测热压作用下冷库门的冷风渗透率[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 26-30.
- [12] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 液氮充气调保鲜开门时 O₂ 体积分数预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2015(3): 223-227.
- [13] FOSTER A M, SWAIN M J, BARRETT R, et al. Effectiveness and optimum jet velocity for a plane jet air curtain used to restrict cold room infiltration[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(5): 692-699.
- [14] 刘广海, 谢如鹤, 屈睿玲. 冷链运输装备渗风模型构建与实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 30-34.
- [15] 高甫生, 崔宇捷. 用于建筑渗风动态能耗分析的气象模型研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(3): 17-20.
- [16] 梁志滔, 张小英. 自然通风条件下轻钢活动板房热环境计算研究[J]. 新型建筑材料, 2009(9): 44-47.
- [17] 贺平. 供热工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 29-30.
- [18] 杨帆, 胡阳洋, 王建华. 重型卡车风阻优化[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 54-56.
- [19] 董重成, 李春刚, 张思思. 塑钢窗冷风渗透耗热量计算[J]. 暖通空调, 2009, 39(9): 104-107.
- [20] 丁力行, 高甫生. 空气渗透计算中风压与热压的叠加问题[J]. 暖通空调, 2001, 31(1): 25-26.
- [21] 建设部. GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 168.
- [22] 韩谓, 吕恩利, 陆华忠, 等. 液氮充气调保鲜环境数学模型[J]. 广东农业科学, 2012, 39(17): 178-180.
- [23] 吕恩利, 陆华忠, 罗锡文, 等. 果蔬气调保鲜运输车的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 9-16.
- [24] 王靖宇, 胡兴军, 田华, 等. 导流罩对轻型厢式货车气动特性影响的数值模拟[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(1): 12-16.