

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.07.035

花生壳木犀草素蒸汽爆破预处理工艺 优化及结构分析

Optimization of steam explosion pretreatment of peanut shell and
its effect on physicochemical properties of luteolin

赵鹏成¹ 易军鹏¹ 李欣² 杨亚皇¹ 贺健¹

ZHAO Peng-cheng¹ YI Jun-peng¹ LI Xin² YANG Ya-huang¹ HE Jian¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 河南科技大学化工与制药学院, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. College of Chemical Engineering and Pharmacy, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:采用响应面分析法优化花生壳蒸汽爆破预处理工艺,利用扫描电镜对花生壳爆破前后的表皮微观结构进行观察,以大孔吸附树脂 AB-8 为载体,对花生壳木犀草素粗提物过柱纯化,通过分光光度法、红外光谱和高效液相色谱对纯化后的木犀草素进行定量定性分析。结果表明:爆破压强 1.25 MPa, 维压时间 46.0 s, 含水率 16%, 该条件下木犀草素得率为 0.926%, 约为未处理的 1.9 倍;扫描电镜显示,蒸汽爆破后花生壳的表皮层受到破坏,网状纤维消失,促使纤维素析出并附着在物料表面呈细丝状;蒸汽爆破处理后,纯化产品中木犀草素含量达到 32.81%, 远高于未爆破处理的产品。蒸汽爆破预处理技术能够明显增加花生壳提取物中木犀草素的提取率。

关键词:蒸汽爆破;花生壳;木犀草素;树脂纯化;红外光谱分析

Abstract: Box-Behnken design and response surface methodology were employed to optimize the steam explosion process of peanut shell. The microstructure of peanut shell before and after blasting was observed by SEM. Luteolin was further purified by AB-8 macroporous adsorption resin and subsequently analyzed by FT-IR and HPLC, while quantified by UV-Vis spectrophotometry method. The results showed that the optimal steam explosion pressure was 1.25 MPa, and the optimal residence time was 46.0 s, with optimal water content of 16%. Under these condi-

tions, the yield of luteolin was 0.926%, which was 1.9 times that of the untreated peanut shell. The SEM microphotographs showed that the surface layer of peanut shell was broken by the pretreatment of steam explosion, while the lattice-like structure in the shell was removed with the cellulose macro fibers floating above the surface in a smooth pattern. After steam blasting, the content of luteolin in the purified product reached 32.81%, which was much higher than that of the unexploded product. The extraction rate of luteolin from peanut shell extract was significantly increased by steam blasting pretreatment.

Keywords: steam explosion; peanut shell; luteolin; resin purification; infrared spectroscopic analysis

花生 (*Arachis hypogaea*) 亦名落花生, 来源于豆科一年生草本油料植物, 是人类重要的食用植物油资源^[1]。中国是花生生产大国之一, 2017 年产量已达 1 709.23 万 t, 花生壳按 30% 计算, 其产量约 500 万 t^[2-3]。花生壳黄酮组分的主要物质为木犀草素^[4], 从黄酮类物质中分离得到的木犀草素在临床上具有止咳、祛痰及消炎的作用^[5-6], 在体内具有抗菌、抗病毒、抗癌以及降低血脂等作用^[7-10]。因此以木犀草素为代表的花生壳中黄酮类化合物也受到空前的重视。

目前, 黄酮的提取方法主要有溶剂浸提法、超声辅助提取技术、微波辅助法和酶辅助提取法^[11-14]。传统的提取方法存在得率较低的问题, 微波辅助法和超声波辅助法能耗和成本较高, 酶辅助提取法操作繁琐, 不适于工业生产。蒸汽爆破 (Steam Explosion Pre-treatment, SEP) 常用于处理中草药和动物饲料等^[15-16]。木质原料在高温、

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:182102110085)

作者简介:赵鹏成,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:易军鹏(1976—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail: yijunpeng@126.com

收稿日期:2019-02-25

高压蒸汽作用下,纤维素聚合度下降,半纤维素部分降解,木质素软化,横向联结强度下降。当充满压力蒸汽的物料瞬时(0.087 5 s)泄压,孔隙中的水气剧烈膨胀,产生“爆破”效果,可部分剥离木质素,并将原料撕裂为细小纤维,原料中的细胞壁和表层纤维被不同程度的打破,使目标成分从细胞内部溶出进入提取介质中。研究^[17-19]表明,蒸汽爆破技术可以使原料提取率明显提高,该预处理技术已广泛应用于油脂、粮食和中草药等行业。

本研究拟以花生壳为原料,以蒸汽爆破压力、维压时间、含水率等因素对木犀草素得率影响,通过响应面法优化蒸汽爆破预处理的最优工艺,并利用大孔吸附树脂对木犀草素粗品进行纯化,通过紫外分光光度法和红外图谱对纯化后的木犀草素进行定量定性分析,为今后对花生壳木犀草素的更深入研究以及花生壳资源综合开发利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

带壳花生:鲁花 11 号,产地河南洛阳;

大孔吸附树脂:AB-8 型,东鸿化工有限公司;

木犀草素标品:96%,上海源叶生物科技有限公司;

无水乙醇、石油醚、盐酸、氢氧化钠、溴化钾等:分析纯,天津德恩化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

间歇式蒸汽爆破机:QBS-80 型,鹤壁正道生物能源有限公司;

冷冻干燥机:SCIENTZ-10N 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

分析天平:FA-1005 型,上海仪器有限公司;

PH 计:PHS-3C 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52A 型,上海亚荣生化仪器厂;

电子扫描显微镜:JSM-5610LV 型,日本电子株式会社;

紫外可分光光度计:UV-4800 型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;

气浴恒温振荡器:ZD-85 型,常州金坛精达仪器制造有限公司;

傅里叶红外变换光谱仪:TENSPOR27 型,德国 BRUKER 仪器公司;

高效液相色谱仪:E2695 型,美国 Waters 公司。

1.3 方 法

1.3.1 花生壳蒸汽爆破预处理 将花生壳清洗干净,置于 45 °C 烘箱内干燥 24 h,将干燥的花生壳用等梯度的去离子浸泡 12 h,放入 QBS-80 型蒸汽爆破机物料仓中,通入饱和蒸汽,选取不同梯度维压时间和蒸汽爆破压

力,在微秒内(0.087 5 s)完成释压,预处理后的花生壳置于 45 °C 干燥箱内干燥至恒重,装密封袋后避光保存。

1.3.2 蒸汽爆破预处理工艺优化

(1) 单因素试验:根据文献^[20]可知,蒸汽爆破预处理对活性物质提取的主要影响因素为爆破压强、维压时间和含水率。因此本试验对以上 3 个工艺参数分别设计 5 个梯度,通过控制变量法进行试验。即爆破压强因素选取 0.4,0.8,1.2,1.6,2.0 MPa;维压时间因素选取 15,30,45,60,75 s;含水率因素选取 5%,10%,15%,20%,25%。固定参数为爆破压强 1.2 MPa,含水率 15%,维压时间 45 s,比较不同爆破条件对木犀草素提取率的影响。

(2) 响应面试验设计:通过单因素试验,确定预原料含水率、蒸汽爆破压力和维压时间 3 个独立变量,以木犀草素提取率为响应值,根据 Box-Behnken 试验的设计原理,对花生壳蒸汽爆破参数采用三因素三水平响应面分析法进行试验设计,建立数学模型,并对各因素间的相互作用,以及各因素与响应值之间的关系进行分析。单次试验重复 3 次,试验结果取平均值。

1.3.3 木犀草素标准曲线的绘制 精密称取木犀草素标准品 5 mg,用 70%乙醇溶解并定容至 100 mL,吸取木犀草素标准溶液 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mL 分别加 70%乙醇定容至 10 mL,混匀,利用紫外分光光度计测定 352 nm 处吸光度^[21-23]。以吸光度值为纵坐标,木犀草素质量浓度为横坐标,绘制标准曲线,得回归方程: $y = 0.1658x + 0.0186$ ($R^2 = 0.9998$)。

1.3.4 花生壳木犀草素提取工艺 将未处理及蒸汽爆破预处理后的花生壳粉碎过 60 目筛。称量花生壳粉末 3 g,加入 10 倍体积的石油醚萃取脱脂 3 次。向脱脂后的花生壳粉末按 1:15(g/mL)加入 70%乙醇,70 °C 回流提取 1 h,抽滤得滤液^[24]。残渣按上述方法重复提取 1 次,合并两次滤液作为提取液,取 1/5 提取液用 70%乙醇稀释 30 倍并测定其吸光度,结合木犀草素标准曲线,按式(1)进行木犀草素提取率测定。

$$S = \frac{cvD}{1000m} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——木犀草素提取率,%;

c——木犀草素提取液浓度,mg/mL;

v——提取液体积,mL;

D——稀释倍数;

m——花生壳粉末样品质量,g。

1.3.5 木犀草素的纯化 按 1.3.3 制备木犀草素提取液,置于 50 °C 真空旋转蒸发仪中,旋蒸至水浸膏,加入 10 倍量的去离子水进行洗涤,8 000 r/min 离心取沉淀,并重复洗涤沉淀两次。加入无水乙醇溶解沉淀物,离心取上清液,旋蒸至近干,加入 70%乙醇 30 mL 进行洗涤,重复洗

涤两次,合并两次洗涤液调整成 pH 为 6 的静态吸附样品液待用。

AB-8 大孔吸附树脂经无水乙醇、酸、碱预处理后,洗涤至中性^[23]。称取预处理好的 AB-8 湿树脂 20 g,装入 100 mL 具塞锥形瓶中,加入 60 mL 样品液,密封后放入摇床中 25 °C,150 r/min 振摇 6 h,取出静置 24 h,过滤取充分吸附后的树脂进行动态解吸。将吸附后的树脂进行湿法装柱,用 70%乙醇进行动态洗脱,流速 2.0 BV/h,洗脱液总量 200 mL。利用紫外分光光度计对洗脱液进行木犀草素含量测定。取 1/2 洗脱液置于 50 °C 真空旋转蒸发仪中,旋蒸至水浸膏,去离子水洗出并定容至 20 mL,真空冷冻干燥成粉末,得木犀草素纯化样品,准确称量样品重量并计算木犀草素纯度。剩余 1/2 洗脱液进行高效液相色谱定性分析。

1.3.6 花生壳微观结构观察 将干燥至恒重的花生壳样品用导电胶带粘到样品台上,用扫描电子显微镜分别观察不同汽爆参数预处理和未经汽爆预处理的花生壳微观结构的变化。

1.3.7 木犀草素红外光谱分析 对木犀草素标准品、未处理的木犀草素样品和汽爆处理的木犀草素样品采用溴化钾压片法制样。将溴化钾粉末在红外干燥箱内干燥,取 2 mg 木犀草素样品与 40 mg 左右的溴化钾粉末在研钵中充分研磨,使用压片机制成薄片后在 4 000 ~ 400 cm^{-1} 波长范围内进行红外光谱扫描,用不加样品的溴化钾薄片进行背景扫描。

1.3.8 花生壳木犀草素高效液相色谱分析 同时对纯化后样品进行高效液相检测,色谱条件为:Diamondsil-C₁₈ (4.6 mm×250 mm, 5 μm) 色谱柱,甲醇-0.5%磷酸(70:30,体积比)作为流动相,流速 1.0 mL/min,柱温 35 °C,进样量 10 μL ,检测波长 352 nm。

1.4 数据分析

以上所有试验重复 3 次,采用 DPS 9.50 数据处理软件,对试验结果进行单因素试验统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 物料含水率对花生壳木犀草素得率的影响 由图 1 可知,控制维压时间及蒸汽爆破压强相同的条件下,木犀草素得率随物料含水率提高先增加后降低,在含水率为 15% 条件下木犀草素得率达到最高。由于适当的水分能够使物料充分溶胀,提高蒸汽渗透效率,进而增强蒸汽爆破效果,提高木犀草素得率。当物料水分过饱和,多余的水分占据物料内部间隙,阻碍蒸汽渗透,降低蒸汽爆破效果^[25]。

2.1.2 爆破压强及维压时间对花生壳木犀草素得率的影响 由图 2、3 可知,随着蒸汽爆破压力的升高和维压时间的延长,花生壳木犀草素得率均呈先增加后减少趋势,

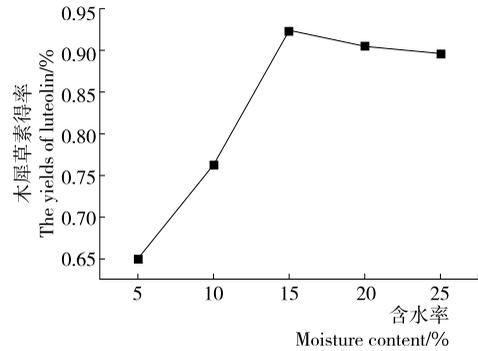


图 1 含水率对木犀草素得率的影响

Figure 1 Effect of water content on the extraction yields of luteolin from peanut shell

在蒸汽爆破压强 1.2 MPa 及维压时间 45 s 条件下木犀草素得率达到最高。这是由于黄酮成分大部分被包裹在细胞壁中^[26],随着爆破强度的增强,有效地打破花生壳内部细胞壁的阻碍作用,促进其中的黄酮类物质提取率增加^[27]。但当爆破压力和维压时间继续增大和延长时,木犀草素提取率反而出现降低,与张琪等^[28]蒸汽爆破预处理对粉葛总黄酮及抗氧化性的影响结果一致。由于在高温高压条件下可能会促使花生壳中活性成分发生化学变

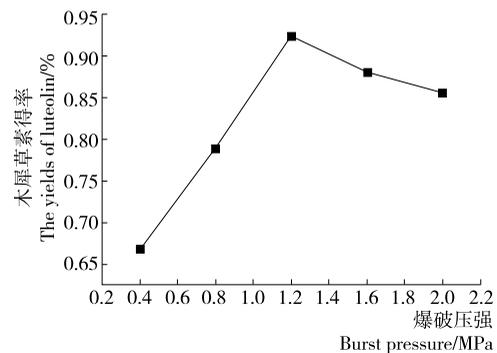


图 2 爆破压强对木犀草素得率的影响

Figure 2 Effect of steam explosion pressure on the extraction yields of luteolin from peanut shell

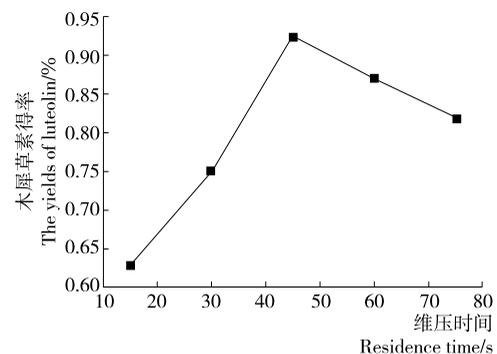


图 3 维压时间对木犀草素得率的影响

Figure 3 Effects of residence time on the extraction yields of luteolin from peanut shell

化,导致黄酮类物质发生降解,另外细胞内部溶出的黄酮类物质又重新聚合形成不溶性物质^[29],最终致使木犀草素提取率随压强和时间的变化先增后减。因此适当的爆破压力和维压时间可以对木犀草素得率起到促进作用。

2.2 响应面结果分析

2.2.1 试验设计与结果分析 根据 Box-Behnken 试验设计原理,通过响应面分析法对花生壳蒸汽爆破技术的提取工艺进行优化。试验因素和水平见表 1,响应面设计方案及结果见表 2。

采用 Design Expert 分析软件进行回归拟合分析,分析得到多元二次回归模型方程:

$$Y=0.92+0.03X_1+0.022X_2+0.033X_3-5.5X_1X_2-0.04X_1X_3+5.75X_2X_3-0.12X_1^2-0.13X_2^2-0.083X_3^2 \quad (2)$$

为检验回归方程中各因素对木犀草素得率的影响程度以及有效性,对式(2)中的回归方程进行方差分析,结果见表 3。由表 3 可知,模型 $P<0.01$ (极显著),失拟项 $P=0.1088>0.05$ (不显著),说明模型对试验有较好的拟合性,试验误差较小。相关系数 $R^2=0.9991$ 和调整系数

表 1 Box-Behnken 试验因素和水平表

Table 1 Coded levels of independent variables used in Box-Behnken design

水平	X ₁ 爆破压强/MPa	X ₂ 维压时间/s	X ₃ 含水率/%
-1	0.8	30	10
0	1.2	45	15
1	1.6	60	20

表 2 响应面设计方案及结果

Table 2 Box-Behnken design with independent variables and response values

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	得率/%
1	-1	-1	0	0.609
2	1	-1	0	0.683
3	-1	1	0	0.671
4	1	1	0	0.723
5	-1	0	-1	0.621
6	1	0	-1	0.756
7	-1	0	1	0.764
8	1	0	1	0.741
9	0	-1	-1	0.662
10	0	1	-1	0.687
11	0	-1	1	0.717
12	0	1	1	0.765
13	0	0	0	0.921
14	0	0	0	0.923
15	0	0	0	0.922
16	0	0	0	0.921
17	0	0	0	0.929

$R_{Adj}^2=0.9980$ 也表明模型模拟程度较好,即该模型是稳定的,能够较好地优化花生壳木犀草素蒸汽爆破预处理的条件。

对各项方法的进一步分析可知,X₁、X₂、X₃、X₁X₃ 的交互项及X₁²、X₂²、X₃²的二次项对花生壳木犀草素提取率

表 3 回归模型方差分析及显著性检验

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for the regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.210 000	9	0.023 000	907.00	< 0.000 1	**
X ₁	0.007 081	1	0.007 081	279.15	< 0.000 1	**
X ₂	0.003 828	1	0.003 828	150.93	< 0.000 1	**
X ₃	0.008 515	1	0.008 515	335.71	< 0.000 1	**
X ₁ X ₂	0.000 121	1	0.000 121	4.77	0.065 2	
X ₁ X ₃	0.006 241	1	0.006 241	246.05	< 0.000 1	**
X ₂ X ₃	0.000 132	1	0.000 132	5.21	0.056 4	
X ₁ ²	0.060 000	1	0.060 000	2 369.56	< 0.000 1	**
X ₂ ²	0.074 000	1	0.074 000	2 902.29	< 0.000 1	**
X ₃ ²	0.029 000	1	0.029 000	1 149.80	< 0.000 1	**
残差	0.000 177	7	0.000 025			
失拟项	0.000 132	3	0.000 044	3.95	0.108 8	不显著
净误差	0.000 044	4	0.000 011			
总误差	0.210 000	16				

† * 表示 P<0.05 水平显著; ** 表示 P<0.01 水平极显著;R²=0.9991;R_{Adj}²=0.9980。

的影响达到了极显著的水平 ($P < 0.0001$), $X_1 X_2$ 和 $X_2 X_3$ 的交互项对花生壳木犀草素提取量的影响不显著 ($P > 0.05$)。

2.2.2 试验因素间的相互作用 为更直观说明交互影响作用,对交互项作响应面图和等高线图。其中含水率和蒸汽爆破压力的交互项呈现出典型的椭圆形(见图4),说明两因素交互作用显著。

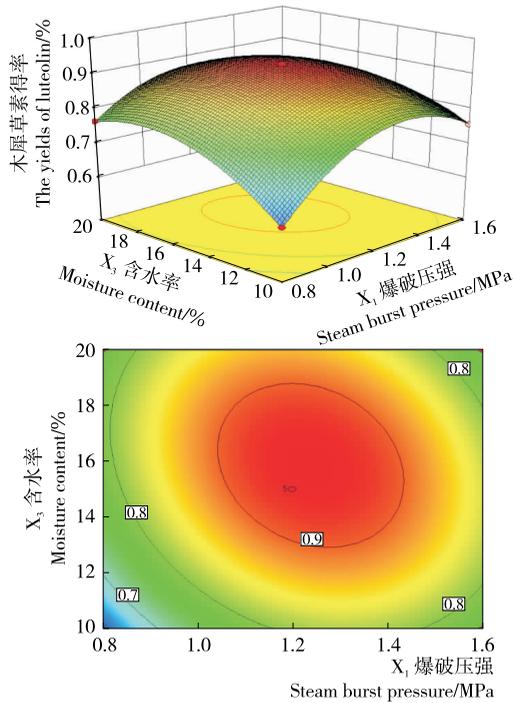


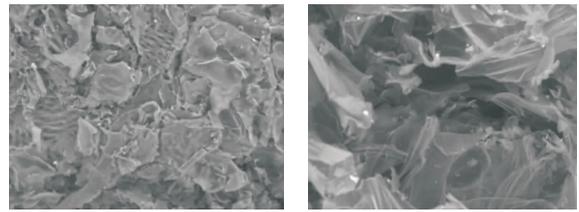
图4 含水率和爆破压强对花生壳木犀草素得率的交互影响

Figure 4 Interaction effects of water content and blasting pressure on yield of luteolin from peanut shell

2.2.3 最佳工艺参数优化 根据 DPS 9.50 软件预测,得到蒸汽爆破工艺的最佳参数组合为蒸汽爆破压力 1.24 MPa, 维压时间 46.27 s, 预浸泡含水率 15.89%, 在相同提取条件下,木犀草素得率为 0.928%。考虑到现实操作性,蒸汽爆破工艺参数校正为蒸汽爆破压力 1.25 MPa, 维压时间 46 s, 预浸泡含水率 16%, 在此条件下木犀草素得率为 0.926%, 实际提取率与理论值接近, 差异不显著。未经爆破处理的花生壳在相同提取条件下木犀草素得率仅为 0.472%。本试验经过蒸汽爆破处理后的样品, 在相同提取条件下最终提取量高出未经爆破处理的样品近 1 倍。说明该模型的拟合程度较好, 校正后的蒸汽爆破参数准确可靠, 具有一定实用价值。

2.3 蒸汽爆破对花生壳的微观结构影响

图5 对比了未经汽爆处理和蒸汽爆破压力 1.25 MPa, 维压时间 46 s, 预浸泡含水率 16% 的条件下处



(a) 未蒸汽爆破处理 (b) 蒸汽爆破处理

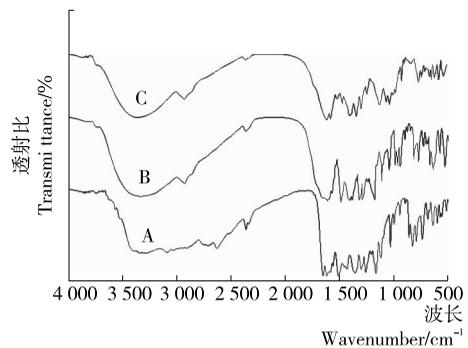
图5 未处理和蒸汽爆破处理花生壳的扫描电镜图

Figure 5 Scanning electron micrographs of untreated peanut shell and steam-exploded peanut shell ($\times 1000$)

理的花生壳的扫描电镜图。未经汽爆处理的花生壳虽然表面也有许多沟壑和坑壑, 未经处理的花生壳表面是由长纤维形成的规则的网状结构, 并覆盖着均一光滑的片状结构。而经汽爆处理后, 蒸汽爆破花生壳的表皮层受到破坏, 出现了很大程度的断裂及较深的孔洞, 网状纤维消失, 取而代之的是熔融态的片层状结构。片层表面的细长丝状突起可能是由于汽爆造成花生壳木质素和半纤维素的降解, 从而使纤维素析出并附着在物料表面, 呈细丝状。花生壳的熔融变化也说明了在汽爆中发生了一些化学变化, 可能是木犀草素提取率提高的原因。

2.4 红外光谱分析

由于天然黄酮类化合物母核上常含有炔氧基、甲氧基、异戊烯氧基和羟基等基团, 其红外光谱在 $3400, 1660 \text{ cm}^{-1}$, 以及 $1450, 1100 \text{ cm}^{-1}$ 附近的振动峰可代表黄酮类化合物的特征峰^[30]。由图6可知, 爆破处理样品和未爆破处理样品经纯化后在 $3400, 1650 \text{ cm}^{-1}$ 处附近均出现与木犀草素标品类似的强吸收峰, 分别为 -OH 的伸缩振动和 C=O 振动引起的强峰, 以上两组特征峰为黄酮结构特征吸收峰, 因此判断该提取物为黄酮类物质; 爆破处理及未处理样品与木犀草素标品相比, $3000 \sim 3800 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收峰变宽变弱, 可能是提取物中



A. 木犀草素标品 B. 爆破处理纯化后样品 C. 未爆破处理纯化后样品

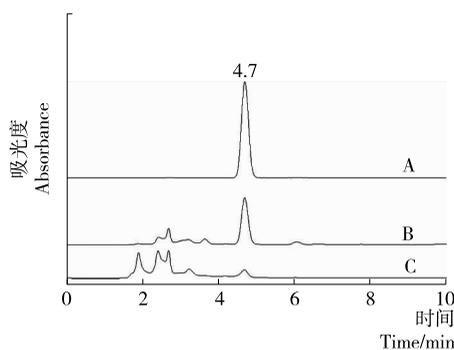
图6 木犀草素标品及纯化后样品红外图谱

Figure 6 FT-IR spectra of Luteolin standard and purified samples

的杂质造成的木犀草素分子间的氢键减弱。爆破处理使样品在波长 1 650 (C=O), 1 500 (C=C), 1 165 (C—O—C) cm^{-1} 处的吸收加强, 说明提取物中木犀草素增多。综上, 两种提取物的红外光谱图均出现木犀草素特征峰, 说明提取物中主要物质为木犀草素, 但与标准品相比部分吸收峰不太一致, 说明纯化后的木犀草素仍含有杂质。

2.4 高效液相色谱分析

木犀草素标品的出峰时间为 4.7 min, 两个提取纯化样品中均含有木犀草素。由图 7 可知, 本研究提取纯化得到的木犀草素仍含有部分杂质, 与红外光谱分析一致。经爆破处理后, 纯化样品中的木犀草素含量显著增加, 与紫外分光光度法检测的结果一致, 测得木犀草素含量在纯化后冻干品中达到 32.81%。说明蒸汽爆破预处理, 可以显著提高木犀草素的提取率。



A. 木犀草素标品 B. 爆破处理纯化后样品 C. 未爆破处理纯化后样品

图 7 木犀草素标准品、未爆破处理纯化后样品和爆破处理纯化后样品 HPLC 图

Figure 7 Luteolin standard, unexploded purified sample and exploded purified sample HPLC diagram

3 结论

将花生壳进行蒸汽爆破预处理, 花生壳木犀草素得率显著提高。经响应面分析以及回归模型预测, 蒸汽爆破预处理的最佳条件为蒸汽爆破压强 1.25 MPa, 维压时间 46.0 s, 含水率 16%。在该条件下, 木犀草素提取率为 0.926%, 约为未处理的 2 倍。蒸汽爆破预处理后的花生壳木质素、纤维素发生断裂和降解, 表面结构变得松弛有空隙, 溶剂渗透加快, 促使木犀草素提取率增加。通过分析红外光谱图和 HPLC 图谱得出, 蒸汽爆破纯化后样品中主要物质为木犀草素, 其含量在纯化后冻干品中达到 32.81%, 远高于未蒸汽爆破处理样品。因此, 蒸汽爆破预处理能够明显增加花生壳提取物中木犀草素的提取率。本研究发现蒸汽爆破技术使花生壳中木犀草素的结构发生了一定程度的改变, 但具体改变的方向和影响值得进一步探讨。

参考文献

- [1] 郭曼莉, 李晓彤, 吴澎, 等. 花生加工副产物的综合利用及精深加工[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 27-31.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 12-10.
- [3] 赵星, 李云建, 韩伟, 等. 分光光度法测定花生壳中总黄酮的研究[J/OL]. 食品工业科技. (2018-12-12) [2019-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.ts.20181211.1404.043.html>.
- [4] 丁佳, 曾珊, 潘浪胜, 等. 响应曲面优化花生壳中木犀草素的提取工艺研究[J]. 现代化工, 2017, 37(8): 121-126.
- [5] 赵健荣, 郭美仙, 刘晓波. 花生壳醇提物镇咳、祛痰及平喘作用研究[J]. 中国民族民间医药, 2014, 23(10): 11-12, 18.
- [6] 黄程程, 高翔, 孙婷婷, 等. 木犀草素对 4 种细菌体外抗菌活性研究[J]. 中国兽医学报, 2017, 37(8): 1 558-1 561.
- [7] 王后苗, 雷永, 晏立英, 等. 花生及其他植物中木犀草素的研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(3): 383-393.
- [8] 邓东沅. 木犀草素对流感病毒 H1N1 感染 A549 细胞的作用及免疫调节机制的研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2017, 55-65.
- [9] KATARINA H, IVANC, DARINAT, et al. Protective effect of quercetin and luteolin in human melanoma HMB-2 cells[J]. Mutation Research, 2005, 565(2): 105-112.
- [10] 闫庆峰, 杨达宽, 黄云超, 等. 木犀草素对高脂血症大鼠血脂的影响[J]. 昆明医学院学报, 2007, 28(1): 23-26.
- [11] 姜红宇, 谭捷雄, 殷素芳, 等. 花生壳中黄酮含量比较及工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 40-45.
- [12] 萨如拉, 彭晓亮, 饶德英. 超声波辅助提取花生壳总黄酮的工艺研究[J]. 赤峰学院学报: 自然科学版, 2018, 34(10): 32-35.
- [13] 樊牡丹, 屈攀, 杨凡. 微波辅助提取花生壳总黄酮的工艺优化[J]. 安徽化工, 2015, 41(4): 13-15.
- [14] 李林, 李明华. 酶法辅助提取花生壳总黄酮的研究[J]. 化工时刊, 2016, 30(4): 20-23.
- [15] 刘东波, 王秀然, 陈珊, 等. 蒸汽爆破处理的玉米秸秆饲料饲用安全性的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(6): 657-660.
- [16] 李力, 李东亮, 冯广林, 等. 蒸汽爆破技术在烟梗加工中的应用[J]. 烟草科技, 2013(1): 42-45.
- [17] 陈洪章, 彭小伟. 汽爆技术促进中药资源高值化利用[J]. 化学进展, 2012, 24(9): 1 857-1 864.
- [18] CHEN Guo-zhong, CHEN Hong-zhang. Enhancement of oil extraction from sumac fruit using steam-exlosion pretreatment[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2010, 88(1): 151-156.
- [19] ZHAO Wei, YANG Rui-jin, ZHANG Yi-qi, et al. Sustainable and practical utilization of feather keratin by an innovative physicochemical pretreatment: High density steam flash-explosion[J]. Green Chemistry, 2012, 14(12): 3 352.

(下转第 192 页)

- 145-170.
- [2] LEE L S, CHOI E J, KIM C H, et al. Contribution of flavonoids to the antioxidant properties of common and tartary buckwheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 68: 181-186.
- [3] ZHOU Yi-ming, WANG Hong, CUI Lin-lin, et al. Evolution of nutrient ingredients in tartary buckwheat seeds during germination [J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 244-248.
- [4] LYU Chang-jiang, HU Sheng, HUANG Jun, et al. Contribution of the activated catalase to oxidative stress resistance and gamma-aminobutyric acid production in *Lactobacillus brevis*[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 238: 302-310.
- [5] CHO Y H, SHIN S, HONG S M, et al. Production of functional high-protein beverage fermented with lactic acid bacteria isolated from Korean traditional fermented food[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2015, 35(2): 189-196.
- [6] 王振斌, 王晴, 刘加友, 等. 葛根汁发酵前后营养及风味成分变化研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(7): 93-98.
- [7] 李俊, 卢阳, 刘永翔, 等. 乳酸菌发酵对苦荞芽苗饮料品质和营养成分的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(12): 195-199.
- [8] GUO Xu-dan, WU Chun-sen, MA Yu-jie, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties[J]. *Food Research International*, 2012, 49: 53-59.
- [9] 黄萍, 何兵, 刘艳, 等. 不同来源的苦荞茶中 4 种黄酮的含量测定[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(1): 135-138.
- [10] 陈中爱, 董楠, 陈朝军, 等. 含不同粗粮粉面包的营养、质构特性、风味化合物[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(4): 21-27, 32.
- [11] YANG Xiao-xing, ZHOU Jia-chun, FAN Li-qiang, et al. Antioxidant properties of a vegetable-fruit beverage fermented with two *Lactobacillus plantarum* strains[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(6): 1 719-1 726.
- [12] GUO Xu-dan, MA Yu-jie, PARRY J, et al. Phenolics content and antioxidant activity of tartary buckwheat from different locations[J]. *Molecules*, 2011, 16(12): 9 850-9 867.
- [13] SHYU Yung-shi, LU Tzu-chi, LIN Chuan-chuan. Functional analysis of unfermented and fermented citrus peels and physical properties of citrus peel-added doughs for bread making [J]. *J Food Sci Technol*, 2014, 51(12): 3 803-3 811.
- [14] CHEN Xu, GEUN-EGO Ji. Bioconversion of flavones during fermentation in milk containing scutellaria baicalensis extract by *Lactobacillus brevis*[J]. *J Microbiol. Biotechnol*, 2013, 23(10): 1 422-1 427.
- [15] FAO/WHO. Energy and protein requirements[R]. Geneva: World Health Organization, 1973: 63.
- [16] 王灼琛, 余丽, 程江华, 等. 苦荞粉、苦荞壳及苦荞麸皮挥发性成分分析[J]. *食品科技*, 2014, 39(11): 172-177.
- [17] 余丽, 王灼琛, 程江华, 等. SDE/SPME-GC-MS 分析苦荞的挥发性香气成分[J]. *中国酿造*, 2015, 34(2): 148-152.
- [18] 刘磊, 汪浩, 张名位, 等. 龙眼乳酸菌发酵工艺条件优化及其挥发性风味物质变[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(20): 4 147-4 158.
- [19] 卢晓丹, 张敏. 豆汁的风味物质分析[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(12): 164-172.
- [20] 蔺志颖. 乳酸发酵杏鲍菇酱的加工及其风味物质研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 36-43.
- [21] 贾红玲. 全稻芽发酵饮料的研制[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 58-59.
- [22] 梁斐, 李元晓, 丁轲, 等. 发酵方式对葎草总黄酮含量及抗氧化活性的影响[J]. *河南科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 39(6): 79-83.

(上接第 186 页)

- [20] 孙俊良, 杜寒梅, 吴黎明, 等. 响应面法优化蒸汽爆破技术提取苹果果胶工艺[J]. *食品科学*, 2017, 38(14): 270-275.
- [21] 崔建强, 唐静, 王燕, 等. 响应曲面法优化花生壳中木犀草素的微波提取工艺[J]. *化学与生物工程*, 2017, 34(4): 42-46.
- [22] 张艳. 花生壳中木犀草素的分离纯化及其化学合成[D]. 西安: 西安理工大学, 2010: 15-18.
- [23] 杨剑, 覃梅. 花生壳中木犀草素的提取与含量测定[J]. *应用化工*, 2013, 42(5): 899-900, 920.
- [24] 聂静然. 花生壳中木犀草素的分离提纯及其抑菌性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008: 17-19.
- [25] 王鑫. 蒸汽爆破预处理技术及其对纤维乙醇生物转化的研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2010, 30(4): 119-125.
- [26] 王星敏, 殷钟意, 郑旭煦, 等. 微生物酶解破壁提制葛根黄酮的工艺[J]. *食品科学*, 2011, 32(2): 28-31.
- [27] LIN Ben-guo, CHEN Yong-sheng, MO Hai-zhen, et al. Catalyst steam explosion significantly increases cellular antioxidant and anti-proliferative activities of *Adinandra nitida* leaves[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 23(6): 423-431.
- [28] 张棋, 易军鹏, 李欣, 等. 蒸汽爆破预处理对粉葛总黄酮及抗氧化性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(9): 40-44.
- [29] SONG Hong-dong, YANG Rui-jin, ZHAO Wei, et al. Innovative assistant extraction of flavonoids from pine (*Larix olgensis* Henry) needles by high-density steam flash-explosion[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(17): 3 806-3 812.
- [30] 豆婵婵, 宋继赟, 何笑天, 等. 花生壳的红外光谱分析[C]//第十六届全国分子光谱学学术会议论文集. 北京: 中国光学学会光谱专业委员会, 2010: 121-122.