

苦杏仁超声辅助快速脱苦工艺优化

Optimization on fast debitterizing technologies of apricot seed by ultrasound with response surface methodology

张 宁 张馨允 范学辉 张清安

ZHANG Ning ZHANG Xin-yun FAN Xue-hui ZHANG Qing-an

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西 西安 710119)

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

摘要:针对苦杏仁传统脱苦过程中能源及资源浪费问题,提出基于超声诱导的苦杏仁快速脱苦方法。对影响苦杏仁苷溶出的因素如超声温度、时间、频率、功率及料液比进行了单因素试验,并采用响应面优化了苦杏仁超声脱苦工艺条件。结果表明:最佳脱苦条件为超声温度 55 °C、功率 300 W、频率 59 kHz、超声时间 60 min、料液比 1:12 (g/mL),该条件下苦杏仁苷溶出率可达 63.17%。

关键词:超声波;苦杏仁;脱苦;苦杏仁苷

Abstract: To decrease the waste of energy and resource during the traditional debitterizing processing of apricot seeds, a rapid and novel method was proposed based on the principle of ultrasound-induced in this paper. Firstly, the parameters affecting the dissolution rate of amygdalin such as ultrasonic temperature, time, frequency, power and ratio of material to liquid, were tested by the method of single-factor experiment. Secondly, three parameters affecting the amygdalin dissolution rate were optimized by the response surface methodology, such as ultrasonic temperature, power and frequency, respectively. The results showed that the optimum conditions were ultrasonic temperature 55 °C, ultrasonic power 300 W, and frequency 59 kHz. Under the above optimal parameters, when the ultrasonic time was 60 min and ratio of material to liquid was 1:12 (g/mL), the practical dissolution rate of amygdalin was 63.17%, and the relative error between the predicted values of the secondary models was only 0.52%, indicating that this model can simulate the actual dissolution of amygdalin.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:31101324);中央高校基本科研业务费专项(编号:GK201602005);陕西省重点研发计划项目(编号:2017NY-167);西安市科技局高校院所人才服务企业工程项目(编号:SXSFO03)

作者简介:张宁,女,陕西师范大学在读硕士研究生。

通信作者:张清安(1976—),男,陕西师范大学副教授,博士后。

E-mail: qinganzhang@snnu.edu.cn

收稿日期:2018-06-05

Keywords: ultrasound; apricot; debitterizing; amygdalin

苦杏仁苷是苦杏仁中重要的组成成分,在与其共存的 β -葡萄糖甙酶的作用下会分解(水解)产生苯甲醛和氢氰酸(HCN)。当人食入过量 HCN 后会出现焦虑、头痛、头晕、瘫痪、昏迷及意识下降等中毒症状,严重时甚至会导致死亡^[1-2]。因此,在苦杏仁加工过程中,脱苦是必不可少的环节,即通过对苦杏仁的适当处理,使其苦杏仁苷含量降至苦味阈值范围以内。

目前,常用的苦杏仁脱苦方法有:冷水脱苦法^[3]、热水脱苦法^[4]、酸溶液脱苦法^[5-6]、酸-碱交替脱苦法^[7]、真空脱苦法^[6]和微波脱苦法^[8]等,但以上几种方法都存在能耗高(水、电消耗大)、耗时长(短则 6~7 h,长则需要 6~7 d)等问题。据估算^[9],加工 1 t 苦杏仁需排放 20 t 废水,其中含有 250 kg 左右的苦杏仁苷、蛋白质、黄酮、碳水化合物和膳食纤维等物质,不仅营养物质损失严重,还导致资源浪费和环境污染。因此,苦杏仁的快速、节能、高效脱苦成了苦杏仁加工领域亟待解决的瓶颈问题。超声波技术作为一种新的食品加工手段,近年来已被广泛应用于食品^[10-12]及医药^[13-14]等领域,并有良好的效果。如关于超声波在加速酒类陈化方面,结果显示超声波能够有效地加速红酒^[11]、白酒^[15]及果醋^[16]等的熟化。在苦杏仁加工方面,吕真真等^[17]和谢朝晖等^[18]研究表明,超声波可加快其中苦杏仁苷的萃取速率,但这些研究均是基于先破碎苦杏仁然后进行提取。本课题组^[19]前期研究发现,超声波可以促进整粒苦杏仁中苦杏仁苷的快速溶出,不仅可以达到快速脱苦的目的,还减少了因传统破碎处理而对后续加工产品种类的限制。

因此,本研究拟在单因素试验的基础上,采用响应面法对影响超声波脱苦效率的频率、功率和超声温度进行优化,并以苦杏仁苷的溶出率为响应值,进而筛选出最优脱苦条件,以便使其更加有效地应用于苦杏仁加工脱苦领域。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

苦杏仁:购于陕西省西安市西北药材市场;
 甲醇(99.9%):色谱纯,美国 Fisher Scientific 公司;
 苦杏仁苷标准品(98.42%):色谱纯,成都普菲德生物技术
 有限公司;
 纯净水:成都娃哈哈昌盛饮料有限公司。

1.1.2 试验仪器设备

电子天平:HANGPING JA 2003 型,上海仪器仪表厂;
 电热鼓风干燥箱:101 型,北京科伟永兴仪器有限公司;
 高效液相色谱仪:P230II 分析型,大连依利特分析仪器
 有限公司;
 色谱柱:TC-C18 型(250 mm×4.6 mm,5 μm),安捷伦
 科技有限公司;
 超声波多频清洗机:SB-500DTY 型,江苏省昆山市超声
 仪器有限公司;
 九阳料理机:JYL-C020E 型,九阳股份有限公司;
 循环水式多用真空泵:SHZ-D(III)型,郑州科丰仪器器
 设备有限公司;
 数显电热恒温水温箱:HH·W21·600S 型,上海跃进
 医疗器械厂。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备 选取颗粒饱满、无损坏的苦杏仁,用天平
 精确称量,按 1:1 (g/mL)加水浸泡 5 h 后去皮,为避免苦杏
 仁中内源酶对苦杏仁苷含量的影响,将所得脱皮苦杏仁按料
 液比 1:5 (g/mL)置于 100 °C 水中煮沸 10 min,再进行灭酶
 处理^[20],即得待测的苦杏仁样品,贮藏备用。

1.2.2 超声脱苦及苦杏仁中苦杏仁苷的测定 精密称取
 25.000 0 g 苦杏仁样品,按照一定的料液比加入水,在一定的
 温度、超声频率和超声功率下进行脱苦,经过一定时间的
 超声处理后取出苦杏仁,将其置于 70 °C 条件下干燥后粉碎。
 精密称取 1.000 0 g 苦杏仁粉末,加入 100 mL 甲醇,于超声
 功率 300 W、超声频率 59 kHz 条件下提取 45 min,冷却过滤
 即得苦杏仁中残留苦杏仁苷的提取液,供高效液相色谱法
 (HPLC)检测使用。

色谱柱为 TC-C₁₈(250 mm×4.6 mm,5 μm),流动相为
 水:甲醇=72:28 (mL/mL),柱温 35 °C,流速 1 mL/min,
 检测波长 214 nm,进样量 20 μL,所有样品均需经 0.45 μm
 滤膜,苦杏仁苷标准曲线及液相色谱图如图 1 所示。

1.2.3 苦杏仁苷溶出率 按式(1)的计算:

$$Y = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Y——苦杏仁苷溶出率,%;

A₀——未经超声处理苦杏仁中苦杏仁苷提取液的色谱
 峰面积;

A₁——经超声处理后苦杏仁中苦杏仁苷提取液的色谱
 峰面积。

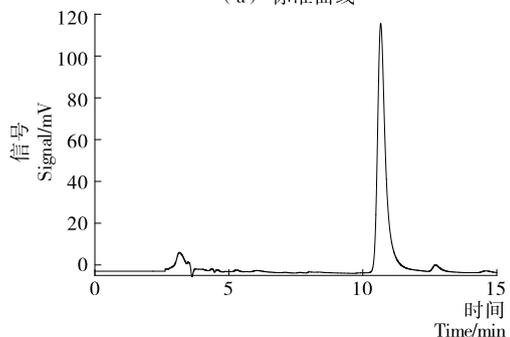
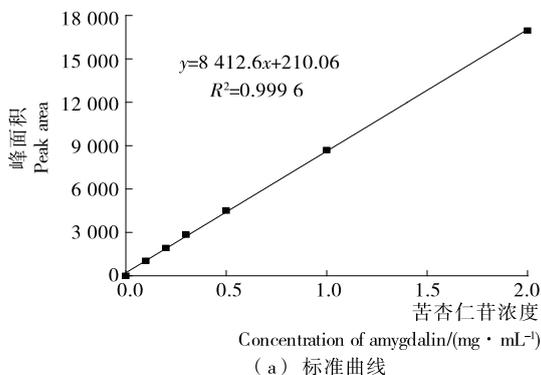


图 1 苦杏仁苷标准曲线及液相色谱图

Figure 1 Standard curve and liquid chromatogram of amygdalin

1.2.4 单因素试验设计

(1) 超声时间:固定料液比为 1:10 (g/mL),超声温度
 为 50 °C,超声功率为 250 W,超声频率为 28 kHz,分别在超
 声时间为 20,30,40,50,60 min 条件下,研究超声时间对苦
 杏仁中苦杏仁苷溶出率的影响。

(2) 超声温度:固定料液比为 1:10 (g/mL),超声时间
 为 40 min,超声功率为 250 W,超声频率为 28 kHz,分别在超
 声温度为 30,40,50,60,70 °C 条件下,研究超声温度对苦杏
 仁中苦杏仁苷溶出率的影响。

(3) 料液比:固定超声时间为 40 min,超声温度为 50 °C,
 超声功率为 250 W,超声频率为 28 kHz,分别在料液比为
 1:6,1:8,1:10,1:12,1:14 (g/mL)条件下,研究料液比
 对苦杏仁中苦杏仁苷溶出率的影响。

(4) 超声功率:固定料液比为 1:10 (g/mL),超声时间
 为 40 min,超声温度为 50 °C,超声频率为 28 kHz,分别在超
 声功率为 150,200,250,300,350 W 条件下,研究超声功率对
 苦杏仁中苦杏仁苷溶出率的影响。

(5) 超声频率:固定料液比为 1:10 (g/mL),超声时间
 为 40 min,超声温度为 50 °C,超声功率为 250 W,分别在超
 声频率为 25,28,40,59 kHz 条件下,研究超声频率对苦杏仁
 中苦杏仁苷溶出率的影响。

1.2.5 响应面试验 根据单因素试验的结果,固定超声时间
 为 60 min,料液比为 1:12 (g/mL),分别考察超声温度、频
 率及功率 3 个因素对苦杏仁超声脱苦的影响,以苦杏仁苷的
 溶出率为响应值,设计响应面优化试验。

1.3 数据分析

采用 Design Expert 8.0.6 软件进行响应面 Box-Behnken

优化设计,对所得试验结果建立二次回归模型,并进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

2.1.1 超声处理时间对苦杏仁苷溶出率的影响 由图 2 可知,在超声脱苦过程中,开始苦杏仁苷溶出率快速增大,但随着时间的延长,溶出率趋于稳定。在试验超声时间范围内,苦杏仁中苦杏仁苷并未完全迁移至水中,当超声时间为 60 min 时,苦杏仁苷溶出率虽只到达 55.99%,但此时苦味已经较弱。因此,在后续试验中,可以将超声时间固定为 60 min,进一步研究超声温度、功率、频率等参数变化对苦杏仁苷溶出率的影响,从而得到苦杏仁最佳超声快速脱苦工艺。

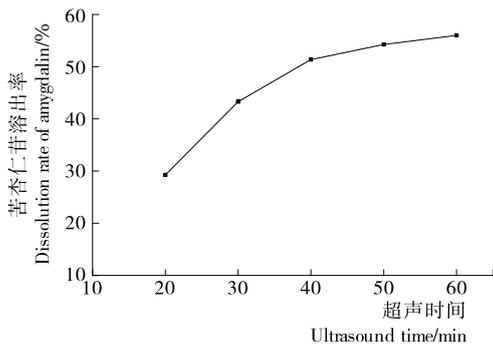


图 2 超声处理时间对苦杏仁苷溶出率的影响

Figure 2 Effect of ultrasonic time on the dissolution rate of amygdalin

2.1.2 超声温度对苦杏仁苷溶出率的影响 由图 3 可知,苦杏仁苷溶出率随超声温度的升高呈增大趋势,当超声温度为 60 °C 时,溶出率达到最大值。原因可能是,温度较低时脱苦液黏度较低,质点传质效果好,有利于苦杏仁苷溶出,温度升高分子内能增强,分子热运动逐渐加快,从而导致苦杏仁细胞组织间的疏水键可能被渗入的分子破坏,从而使得苦杏仁苷向水中的迁移扩散、溶出率增大^[21];但温度过高时会引起已溶出到脱苦液中苦杏仁苷快速降解,其降解速度大于溶出速度,最终导致苦杏仁苷溶出率有降低趋势,也不利于节能。考虑到苦杏仁苷溶出率为 50% 左右时已基本达到脱苦要求,

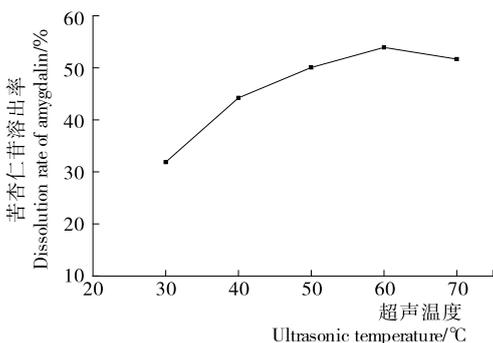


图 3 超声温度对苦杏仁苷溶出率的影响

Figure 3 Effect of ultrasonic temperature on the dissolution rate of amygdalin

因此响应面试验中超声温度选取 50, 55, 60 °C 3 个水平值。

2.1.3 料液比对苦杏仁苷溶出率的影响 由图 4 可知,当料液比在 1:6~1:8 (g/mL) 时,苦杏仁苷溶出率增加较快;料液比在 1:8~1:16 (g/mL) 时,苦杏仁苷溶出率的增长变得缓慢。但从总体上看,在试验范围内苦杏仁苷溶出率始终呈增加趋势。由文献^[22]可知,苦杏仁苷易溶于水,且传质动力也会随着苦杏仁脱苦体系中水比重的增加而增加。因此,苦杏仁苷向水中的迁移也会随之增强,超声处理的空化效应形成的微射流和局部热点也会使苦杏仁苷溶出率增加;但料液比为 1:16 (g/mL) 也会导致水温在相同的产热条件下有所降低,使固、液两相间的吸附作用增强^[23],从而导致苦杏仁苷溶出率减缓。同时,对于工业化的苦杏仁脱苦而言,过多的溶质也会造成资源浪费、能耗及成本增加。综合考虑,选择料液比 1:12 (g/mL) 作为苦杏仁超声快速脱苦工艺优化中最适条件。

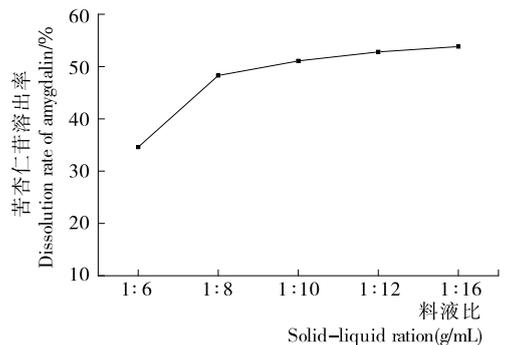


图 4 料液比对苦杏仁苷溶出率的影响

Figure 4 Effect of liquid ratio on the dissolution rate of amygdalin

2.1.4 超声功率对苦杏仁苷溶出率的影响 由图 5 可知,随着超声功率的增加苦杏仁苷的溶出率呈先增大后减小趋势,超声功率为 300 W 时,溶出率达到最大值。可能是超声功率较大时会产生大量气泡,减少了能量传递,同时功率过大还可能导致部分苦杏仁苷的降解^[24],使水中所能被检测到的苦杏仁苷含量减少。此外,功率过大也会加速苦杏仁中其他物质如蛋白质、碳水化合物等向水中迁移^[25-26],不仅会影响苦杏仁苷的迁移与扩散,而且会使水质变得浑浊,严重降低

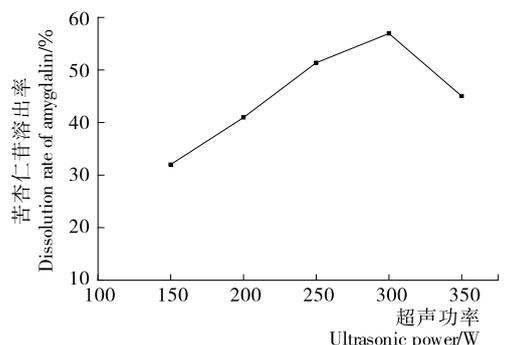


图 5 超声功率对苦杏仁苷溶出率的影响

Figure 5 Effect of ultrasound power on the dissolution rate of amygdalin

了苦杏仁的品质,同时也增加了能耗。因此响应面试验中超声功率选取 200,250,300 W 3 个水平值。

2.1.5 超声频率对苦杏仁苷溶出率的影响 由图 6 可知,超声频率越大,苦杏仁苷的溶出率越大。其原因是超声频率越高其空化效应也越强,苦杏仁受到水中空化泡崩溃瞬间巨大冲击力的作用细胞壁发生破裂^[24,27],从而加速了苦杏仁苷的迁移,使其溶出率增加,当超声频率为 59 kHz 时苦杏仁苷的溶出率最大。考虑到所用超声波的实际工况情况(在设定频率值上下有 1~2 kHz 的偏差波动),因此响应面试验中超声频率选取 28,40,59 kHz 3 个水平值。

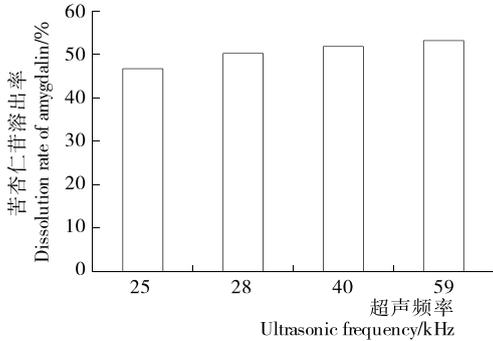


图 6 超声频率对苦杏仁苷溶出率的影响

Figure 6 Effect of ultrasound frequency on the dissolution rate of amygdalin

2.2 响应面优化设计试验

2.2.1 响应面试验结果 根据上述单因素试验,选取对超声诱导苦杏仁快速脱苦有重要影响的超声温度、频率及功率 3 个因素,以苦杏仁苷的溶出率为响应值,因素及水平的编码表如表 1 所示。采用 Design Expert 8.0.6 软件优化超声工作参数并对表 2 中结果进行回归分析。

采用响应面分析法对表 2 数据进行二次回归模型,得到交联度(Y)的二次回归模型:

$$Y = 59.42 + 1.88A + 4.94B + 5.42C - 1.31AB - 0.92AC + 3.36BC - 4.80A^2 - 5.42B^2 - 4.56C^2 \quad (2)$$

表 3 是响应面优化试验方差分析结果,其中,模型 P<0.000 1,表示模型差异极显著,而失拟项 P=0.626 7(>0.05),说明差异不显著,即该回归模型能够与实际情况较好地吻合,可反映出各因素响应值间的关系。因此,可根据该回归模型进行试验结果分析。

2.2.2 响应面结果的分析 由图 7 可见,A、B 两因素之间存在交互作用,且等值线趋于扁平,同时,结合表 3 结果可知 A 与 B 之间交互作用对苦杏仁苷溶出率存在显著影响。由响

表 1 响应面优化试验因素及水平编码表

Table 1 Factors and level of independent variables used for response surface design

水平编码	A 超声温度/°C	B 超声功率/W	C 超声频率/kHz
-1	50	200	28
0	55	250	40
1	60	300	59

表 2 响应面优化试验设计及结果

Table 2 Response surface optimization of experimental design and results

试验号	A	B	C	溶出率(Y)/%
1	0	-1	-1	54.60
2	0	1	-1	56.50
3	0	-1	1	61.25
4	0	1	1	47.35
5	-1	-1	0	62.49
6	-1	1	0	59.65
7	1	-1	0	45.10
8	1	1	0	41.77
9	-1	0	-1	54.14
10	-1	0	1	40.46
11	1	0	-1	46.88
12	1	0	1	58.72
13	0	0	0	58.43
14	0	0	0	59.05
15	0	0	0	47.07
16	0	0	0	55.31
17	0	0	0	43.11

表 3 响应面优化试验 ANOVA 分析表[†]

Table 3 The anova analysis of response surface optimization experimental

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
A	28.39	1	28.39	25.41	0.001 5	*
B	195.23	1	195.23	174.73	<0.000 1	***
C	234.69	1	234.69	210.05	<0.000 1	***
AB	6.89	1	6.89	6.17	0.042 0	*
AC	3.39	1	3.39	3.03	0.125 3	
BC	45.09	1	45.09	40.36	0.000 4	**
A ²	97.21	1	97.21	87.01	<0.000 1	***
B ²	123.58	1	123.58	110.60	<0.000 1	***
C ²	87.55	1	87.55	78.36	<0.000 1	***
模型	858.01	9	95.33	85.33	<0.000 1	***
残值	7.82	7	1.12			
失拟项	2.81	3	0.94	0.75	0.577 2	
纯误差	5.01	4	1.25			
总残差	865.83	16				

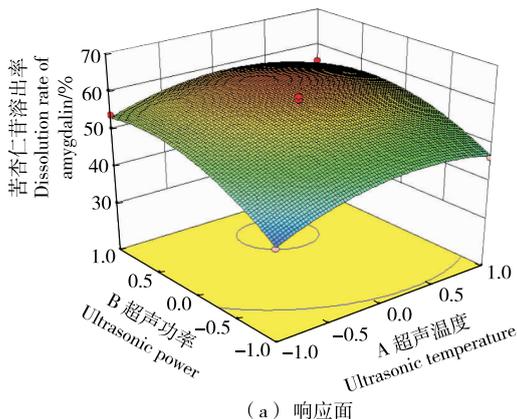
[†] * 表示差异显著(P<0.05), ** 表示差异高度显著(P<0.01), *** 表示差异极度显著(P<0.000 1)。

应面图可知,当 A 一定时,随着 B 的增加苦杏仁苷溶出率呈现先升高后略有降低,变化趋势较平缓;而当 B 一定时,随着 A 的增加溶出率呈较为平缓的先升后降趋势。同时还可看出,在 A、B 交互作用的等值线中,B 因素等值线的密集程度大于 A 因素,说明超声功率对苦杏仁苷溶出率的影响大于超声温度。

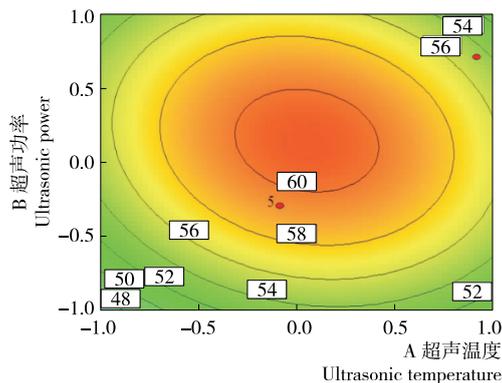
由图 8 可知,A、C 两因素间存在交互作用,但等值线趋于圆形,同时结合表 3 可知 A 与 C 交互作用对苦杏仁苷的溶出率影响不显著。由响应面图可知,当 A 一定时,随着 C 的增加溶出率不断升高后略有降低,但变化趋势较为平缓;而当 C 一定时,随着 A 的增加溶出率呈平缓的先升后降趋势。

在 A、C 交互作用等值线中,C 因素等值线的密集程度大于 A 因素,因此,超声频率对苦杏仁苷溶出率的影响大于超声温度。

由图 9 可见,B、C 两因素间存在交互作用,且等值线较扁平,结合表 3 可知 B 与 C 的交互作用对苦杏仁苷溶出率存



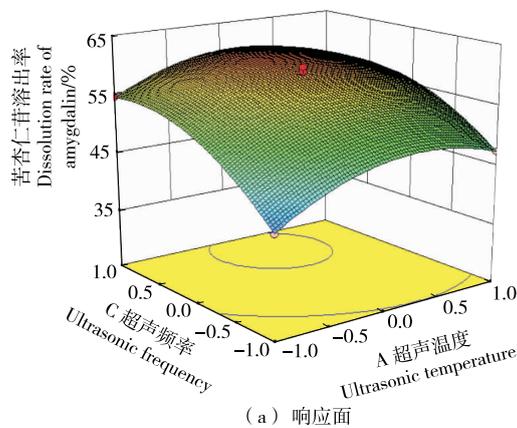
(a) 响应面



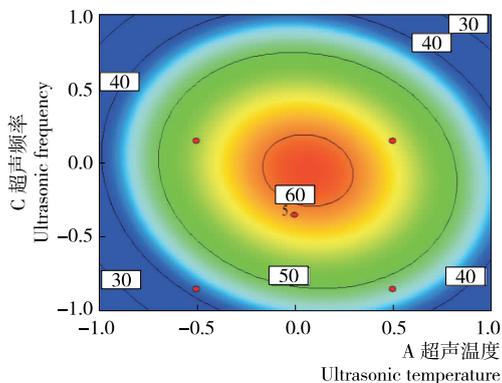
(b) 等高线

图 7 超声温度与功率对苦杏仁苷溶出率交互影响的响应面及等值线图

Figure 7 Response surface and contour plots for the effects of ultrasonic temperature and power on the dissolution rate of amygdalin



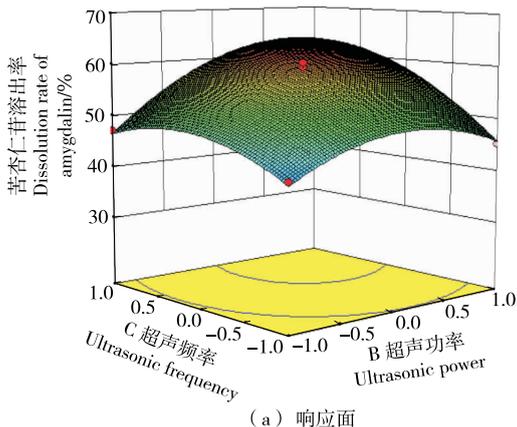
(a) 响应面



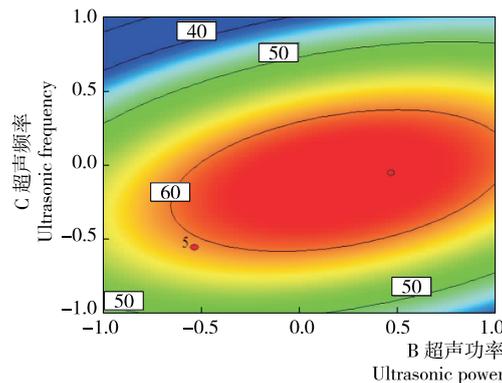
(b) 等高线

图 8 超声温度与频率对苦杏仁苷溶出率交互影响的响应面及等值线图

Figure 8 Response surface and contour plots for the effects of ultrasonic temperature and ultrasound frequency on the dissolution rate of amygdalin



(a) 响应面



(b) 等高线

图 9 超声功率与频率对苦杏仁苷溶出率交互影响的响应面及等值线图

Figure 9 Response surface and contour plots for the effects of Ultrasonic power and ultrasound frequency on the dissolution rate of amygdalin

在显著影响,且C因素等值线的密集程度大于B因素,表明超声频率对苦杏仁苷溶出率的影响大于超声功率。

综上可知,3个因素对苦杏仁苷溶出率影响为:超声频率>超声功率>超声温度。

2.3 最优预测工艺及验证实验

根据响应面优化试验二次回归模型的预测结果可知,苦杏仁苷的最优溶出理论条件为:超声温度 55.19 °C、功率 283.10 W 和频率 53 kHz,该条件下苦杏仁苷的理论溶出值可达 63.50%。考虑到所用超声仪器实际工况情况,因此将工艺调整为:超声温度 55 °C、功率 300 W 和频率 59 kHz,在此条件下进行 3 次重复实验,测得苦杏仁苷的含量为 24.00 mg/g,苦杏仁苷实际平均溶出值为 63.17%,与预测值间的相对误差为 0.33%,说明在合理的试验范围内,预测值与实测值的吻合性较好,该模型能够很好地对实际情况进行模拟。

3 结论

本研究在单因素试验的基础上,采用响应面法优化出苦杏仁苷超声脱苦的最佳工艺为:超声温度 55 °C、功率 300 W、频率 59 kHz、超声时间 60 min、料液比 1:12 (g/mL),该条件下苦杏仁苷的溶出率可达 63.17%,在此条件下苦杏仁已没有苦味。本研究以完整苦杏仁颗粒为研究对象,系统研究了超声波工作参数对脱苦效率的影响,结果表明超声波可将苦杏仁由传统的 6~7 h 热水脱苦时间缩短到 1 h,大大缩短了苦杏仁脱苦所需时间,大量减少废水排放和能源、资源浪费,该研究结果可为苦杏仁的快速、高效脱苦工艺优化提供理论依据;但其工业化应用参数尚需进一步优化修正。

参考文献

- [1] BOLARINWA I F, ORFILA C, MORGAN M R. Determination of amygdalin in apple seeds, fresh apples and processed apple juices[J]. Food Chemistry, 2015, 170: 437-442.
- [2] SAHIN S. Cyanide poisoning in children caused by apricot seeds[J]. Journal of Health & Medical Informatics, 2011, 2: 106.
- [3] 史清华. 苦杏仁的快速脱苦方法[J]. 陕西农业科学, 1997(2): 46-46.
- [4] 赵振甲, 马文锦, 彭涛, 等. 提高杏仁露产品蛋白含量及改善产品风味工艺的研究[J]. 食品科技, 2010, 35(17): 66-69.
- [5] ABRAHAM K, BUHRKE T, LAMPEN A. Bioavailability of cyanide after consumption of a single meal of foods containing high levels of cyanogenic glycosides: a crossover study in humans[J]. Archives of Toxicology, 2016, 90(3): 559-574.
- [6] 张乔会, 李军, 逢锦慧, 等. 响应面法优化山杏仁脱苦工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 248-253.
- [7] 朱海兰, 史清华, 唐德瑞. 苦杏仁脱皮去毒方法的研究[J]. 陕西林业科技, 2002(4): 4-6.
- [8] 张兵, 田兴旺, 王永平. 苦杏仁的微波脱苦法[J]. 陇东学院学报, 2003, 13(2): 39-40.
- [9] 柴广建, 张清安, 卫晨曦. 一种苦杏仁绿色去皮方法: 中国, CN 106538933 A[P]. 2017-03-29.
- [10] 胡爱军, 郑捷. 食品工业中的超声提取技术[J]. 食品与机械, 2004, 20(4): 57-60.
- [11] ZHANG Qing-an, WANG Ting-ting. Effect of ultrasound irradiation on the evolution of color properties and major phenolic compounds in wine during storage[J]. Food Chemistry, 2017, 234: 372-380.
- [12] 罗登林, 丘泰球, 卢群. 超声波技术及应用(II): 声化学技术在日化工业中的应用[J]. 日用化学工业, 2005, 35(6): 393-395.
- [13] 王晓, 孙靖中. 高能聚焦超声对恶性肿瘤细胞免疫功能的影响[J]. 中国超声医学, 2002, 18(7): 555-557.
- [14] CHAUSSY C, THÜROFF S. Results and side effects of high-intensity focused ultrasound in localized prostate cancer[J]. Journal of Endourology, 2001, 15(4): 437-440.
- [15] 向英, 丘泰球. 低频超声催陈致香型白酒的研究[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(11): 75-77.
- [16] 林晓姿, 李维新, 梁璋成, 等. 枇杷果醋的超声波催陈技术研究[J]. 中国调味品, 2009, 34(10): 43-46.
- [17] 吕真真, 焦中高, 刘杰超, 等. 响应面法优化苦杏仁粕中苦杏仁苷提取工艺及其高效离心分配色谱纯化[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 74-80.
- [18] 谢朝晖, 李鑫, 李文博, 等. 超声波法提取山杏仁中苦杏仁苷的单因素试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2012, 21(2): 31-38.
- [19] 张清安, 范学辉, 张扬俊娜, 等. 一种超声诱导苦杏仁快速脱苦的方法: 中国, ZL 201310376132.X[P]. 2016-02-03.
- [20] KOO J Y, HWANG E Y, CHO S, et al. Quantitative determination of amygdalin epimers from armeniaca semen by liquid chromatography[J]. Journal of Chromatography B, Analytical Technologies in the Biomedical & Life Sciences, 2005, 814(1): 69-73.
- [21] PRASAD K N, YANG En, YI Chun, et al. Effects of high pressure extraction on the extraction yield, total phenolic content and antioxidant activity of longan fruit pericarp[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(2): 155-159.
- [22] 吕秉森. 中药苦杏仁炮制质量的探讨[J]. 上海中医药杂志, 1980(6): 38-39.
- [23] 冯年平, 郁威. 中药提取分离技术原理与应用[M]. 北京: 中国医药科技出版, 2005: 4-12.
- [24] ZHANG Qing-an, SHEN Hui, FAN Xue-hui, et al. Changes of gallic acid mediated by ultrasound in a model extraction solution[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015(22): 149-154.
- [25] 宋曰钦, 叶双峰, 王建中. 超声处理对提取苦杏仁挥发油的研究[J]. 资源开发与市场, 2007, 23(11): 961-963.
- [26] 谢为峰, 罗丰收, 解超男, 等. 超声波处理对杏仁粕蛋白质理化和功能性质的改性研究[J]. 农产品加工, 2016, 9(17): 1-3.
- [27] 郭孝武. 用电导率法研究低频超声提取小檗碱成分的产额[J]. 天然产物研究与开发, 2001, 13(5): 57-59.