

牡丹籽油高温碱煮—蒸汽爆破辅助水酶法 提取工艺优化及其品质分析

Optimization of aqueous enzymatic extraction process assisted by
high-temperature alkaline liquor cooking and steam explosion
for peony seed oil and its quality analysis

王欣¹ 孟玉倩¹ 徐宝成^{1,2,3} 罗登林^{1,2,3}

WANG Xin¹ MENG Yu-qian¹ XU Bao-cheng^{1,2,3} LUO Deng-lin^{1,2,3}

付元哲¹ 李梦杰¹ 韦玉花¹ 焦玉曼¹

FU Yuan-zhe¹ LI Meng-jie¹ WEI Yu-hua¹ JIAO Yu-man¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 食品加工与安全国家级实验教学
示范中心, 河南 洛阳 471000; 3. 河南省食品原料工程技术研究中心, 河南 洛阳 471000)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000,
China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Food Processing and Safety, Luoyang,
Henan 471000, China; 3. Henan Engineering Research Center of Food Material, Luoyang, Henan 471000, China)

摘要:为提高水酶法萃取牡丹籽油的出油率及油脂品质, 利用高温碱煮结合蒸汽爆破对脱壳牡丹籽进行预处理, 并对碱煮和蒸汽爆破参数进行优化。结果表明:将脱壳牡丹籽按1:5 (g/mL)的料液比与0.05 mol/L碳酸氢钠溶液混合均匀后,在105℃蒸煮40 min,然后再对其进行蒸汽爆破(0.3 MPa保持30 s)处理,可显著提高淀粉酶和糖化酶的酶解效果,更有利于油脂释放,出油率可达82.07%,且营养和品质俱佳,符合中国粮食行业标准牡丹籽油(GB/T 3242—2014)一级指标要求。

关键词:牡丹籽油;高温碱煮;蒸汽爆破;水酶法;出油率;品质分析

Abstract: To obtain a higher yield and high quality of peony seed oil, unshelled peony seeds were pretreated with high-temperature alkaline liquor cooking and steam explosion, and the parameters

were also optimized. The results were as follows. Firstly, peony seeds were subjected to cook at 105℃ for 40 min in an alkaline liquor with the concentration of sodium bicarbonate being 0.05 mol/L, and the material-liquid ratio (g/mL) was 1:5. Then the precooked peony seeds were further processed by steam explosion with a pressure of 0.3 MPa, holding for 30 s. After pre-treating, the enzymolysis efficiency of peony seed powder by using amylase and glucoamylase was significantly improved, which were more favorable to the release of peony seed oil, and with an oil yield of being 82.07%. Peony seed oil extracted by this method had high quality and nutrition, which meet the first-level indexes of peony seed oil (GB/T 3242—2014) reported in the grain association standard of the People's Republic of China.

Keywords: peony seed oil; high-temperature alkaline liquor cooking; steam explosion; aqueous enzyme method; oil yield; quality analysis

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31772094);河南省高校国家级大学生创新创业训练计划(编号:201910464021);河南科技大学大学生研究训练计划(编号:2019164);河南科技大学博士科研启动基金(编号:13480057)

作者简介:王欣,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:徐宝成(1976—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail: xbc76@163.com

罗登林(1976—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: luodenglin@163.com

收稿日期:2020-04-01

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)是毛茛科、芍药属植物,盛产于河南洛阳,除具有观赏价值外,凤丹(*Paeonia ostia*)和紫斑(*Paeonia rockii*)等油用牡丹的种籽还含有丰富的油脂,其中 α -亚麻酸含量高达41%、油酸和亚油酸约占25%^[1-3]。此外,牡丹籽油中还含有丰富的功能活性成分,如植物甾醇、生育酚、牡丹酚等,具有降血糖、降血脂、预防心血管疾病、抗癌等功效,备受消费者青睐^[4-6]。

目前提取牡丹籽油常用的方法有物理压榨法、溶剂浸出法、超临界 CO_2 萃取法以及水酶法等^[7-8]。物理压榨法是一种传统的制油方法,工艺相对简单,所制得的油脂无溶剂残留,但存在出油率低、饼粕中残油量高、能耗高的缺点^[9]。溶剂浸出法提油得率虽高,但流程复杂,所得油脂需要经过脱溶及一系列复杂的精炼工序,不仅造成植物甾醇、生育酚等活性成分的大量损失,而且还存在溶剂残留的风险,对人体健康不利。超临界 CO_2 萃取法虽然无毒无害无残留,但其使用的设备昂贵,生产成本低,工业化应用受到极大限制^[10-12]。而水酶法作用条件温和,可避免高温等极端条件对热敏性功能物质的破坏,所得油脂营养价值高、口感好^[13]。目前,有关水酶法提油主要集中于酶的选择^[14]、加酶量^[14-15]、基质浓度^[15-16]、反应温度和时间^[14,16]、体系 pH^[16]等方面的研究,可实现从多种油料种子或组织结构中提取油脂,出油率为 28.8%~78.5%。在水酶法提取牡丹籽油方面,一些学者已开展了相关研究,如通过超声波预处理^[17]、高温蒸煮^[18]、微波^[19]辅助等手段来提高水酶法提取牡丹籽油的得率。然而,从现有研究^[20-21]来看,水酶法提取牡丹籽油的得率和油脂品质仍有进一步提高的空间。目前,影响水酶法提油得率进一步提高的关键因素是如何在牡丹籽预处理时充分破坏其细胞结构,暴露更多的酶促反应位点,从而提高酶解效率和出油率。高温碱煮和蒸汽爆破技术目前已在食品原料预处理中得到了应用,可以充分溶胀和破坏原料的组织结构,有利于人体消化和营养成分的吸收^[22]。然而,这两项技术在水酶法提油原料预处理上的应用尚未见报道。

为了进一步提高水酶法提取牡丹籽油的出油率及油脂品质,研究拟在水酶法提取牡丹籽油的基础上,采用高温碱煮联合蒸汽爆破技术对牡丹籽原料进行预处理,以期进一步提高牡丹籽油的出油率及油脂品质。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

牡丹籽:凤丹,2019 年产于河南洛阳;

商品牡丹籽油 1:菏泽超临界初萃油,市售;

商品牡丹籽油 2:瑞璞压榨油,市售;

α -淀粉酶:酶活力 4 000 U/g,上海源叶生物科技有限公司;

糖化酶:酶活力 1.0×10^5 U/g,上海源叶生物科技有限公司;

柠檬酸、碳酸氢钠、无水乙醇、盐酸、氢氧化钠、氢氧化钾、石油醚、正己烷、乙醚、异丙醇、冰乙酸、三氯甲烷、碘化钾、硫代硫酸钠、1-甲基咪唑等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

胆固醇:纯度 99%,美国 Sigma-Aldrich 公司;

菜油甾醇:纯度 98%,美国 Sigma-Aldrich 公司;

β -谷甾醇:纯度 $\geq 97\%$,美国 Sigma-Aldrich 公司;

豆甾醇:纯度 95%,美国 Sigma-Aldrich 公司;

37 种脂肪酸甲酯混标、胆甾烷醇、*N*-甲基-*N*-三甲基硅烷七氟丁酰胺:分析纯,美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.1.2 主要仪器设备

蒸汽爆破机:QB-200 型,河南省鹤壁正道生物能源有限公司;

电热鼓风干燥箱:WGL-230B 型,天津泰斯特仪器有限公司;

手提式压力蒸汽灭菌器:DSX-280B 型,上海申安医疗器械厂;

pH 计:PHS-25 型,上海仪电科学仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-4 型,常州天瑞仪器有限公司;

台式高速离心机:TG16-WS 型,湖南湘仪仪器开发有限公司;

高速多功能粉碎机:CS-700 型,武义海纳电器有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

电子天平:XBS320M-SCS 型,瑞士 Precisa 公司;

干式氮吹仪:YY-N100 型,上海允延仪器有限公司;

气相色谱仪:7890A 型,配备 FID 检测器,美国安捷伦科技有限公司;

毛细管色谱柱:SP-2560(100 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.2 μm) 型,美国 Sigma 公司;

毛细管色谱柱:HP-5(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm) 型,美国安捷伦科技有限公司。

1.2 高温碱煮辅助水酶法提取牡丹籽油

1.2.1 提取工艺路线

牡丹籽 $\rightarrow$ 脱壳 $\rightarrow$ 高温碱煮 $\rightarrow$ 过滤 $\rightarrow$ 烘干 $\rightarrow$ 粉碎 $\rightarrow$ 两步酶解 $\rightarrow$ 灭酶 $\rightarrow$ 乙醇辅助提取 $\rightarrow$ 去醇 $\rightarrow$ 离心 $\rightarrow$ 冷冻破乳 $\rightarrow$ 清油

1.2.2 操作要点及参数

(1) 高温碱煮:取 100 g 脱壳牡丹籽加入到 1 L 锥形瓶中,按一定料液比,分别加入一定浓度的碳酸氢钠溶液,于 0.02 MPa、105 $^{\circ}\text{C}$ 的高压灭菌锅中处理 40 min 后取出。

(2) 过滤、烘干、粉碎:收集预碱煮后的牡丹籽,置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥箱干燥 5 h,然后粉碎过 40 目筛,所得牡丹籽粉密封后避光置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱,待处理。在粉碎过程中应注意防止粉碎机温度过高造成牡丹籽油氧化。

(3) 酶解、灭酶:根据文献^[23]修改如下,取 20.00 g 牡丹籽粉,以料液比 1:7 (g/mL) 加入蒸馏水混合均匀,加入 2.75% (基于牡丹籽粉的质量浓度) α -淀粉酶,调整 pH 至 5.5,于 70 $^{\circ}\text{C}$ 酶解 1 h;然后再加入 2.50% (基于牡丹籽粉的质量浓度) 糖化酶,调整 pH 至 4.5,于 60 $^{\circ}\text{C}$ 酶解

1 h。结束后,直接升温至 90 ℃,处理 15 min 灭酶。

(4) 乙醇辅助提取及去醇:按料液比 1:5 (g/mL) 加入一定体积分数的乙醇水溶液,调整 pH 至 9.0,于 60 ℃ 提取 1 h。然后于 60 ℃ 旋转蒸发 1.5 h 去醇。

(5) 离心、破乳:将去醇后的试样分至离心管中,于 5 000 r/min 离心 15 min,得到清油、乳相、水相和渣相。收集第一次离心所得乳相,于 -20 ℃ 冷冻 18 h,再在 50 ℃ 解冻破乳 2 h,而后于 3 000 r/min 离心 20 min,取出上层清油。合并两次离心得到的清油,计算出油率。

1.2.3 高温碱煮条件优化

(1) 碱液浓度:称取 100 g 脱壳牡丹籽,固定料液比 1:5 (g/mL),乙醇体积分数为 35%,考察碳酸氢钠溶液浓度(0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09 mol/L)对出油率的影响。

(2) 料液比:称取 100 g 脱壳牡丹籽,固定碳酸氢钠溶液浓度 0.05 mol/L,乙醇体积分数为 35%,考察料液比[1:3, 1:5, 1:7 (g/mL)]对出油率的影响。

(3) 乙醇体积分数:称取 100 g 脱壳牡丹籽,固定料液比 1:5 (g/mL),碳酸氢钠溶液浓度为 0.05 mol/L,考察乙醇体积分数(30%, 35%, 40%, 45%)对出油率的影响。

以上试验均平行 3 次。

1.3 高温蒸煮方式对出油率的影响

试验比较高温碱煮、高温水煮和高温酸煮 3 种预处理方法对水酶法提取牡丹籽油出油率的影响。其中,高温碱煮工艺参数参照研究优化结果,高温水煮和高温酸煮分别参照文献[18]和[23]的具体工艺流程,即分别选取去离子水、0.05 mol/L 柠檬酸溶液作为牡丹籽预处理时的高温蒸煮溶剂,其中高温水煮温度为 115 ℃、时间 60 min^[18],高温酸煮温度为 110 ℃、时间 30 min^[23],其余参数同 1.2.2。

1.4 高温碱煮联合蒸汽爆破预处理牡丹籽的条件优化

1.4.1 提取工艺路线

牡丹籽→脱壳→高温碱煮→过滤→蒸汽爆破→烘干→粉碎→两步酶解→灭酶→乙醇辅助提取→去醇→离心→冷冻破乳→清油

1.4.2 操作要点及参数

(1) 高温碱煮:取 100 g 脱壳牡丹籽加入到 1 L 锥形瓶中,按料液比 1:5 (g/mL) 加入 0.05 mol/L 的碳酸氢钠溶液,于 0.02 MPa、105 ℃ 的高压灭菌锅中处理 40 min 后取出。

(2) 过滤、蒸汽爆破:过滤并收集预碱煮后的牡丹籽,然后置于蒸汽爆破机中,通入饱和水蒸汽,在一定的爆破压力下维压一定时间,保压完成后在极短时间内(0.093 5 s)完成释压,实现蒸汽爆破。

(2) 烘干、粉碎、两步酶解、灭酶、乙醇辅助提取、去

醇、离心、冷冻破乳等步骤的操作要点及参数同 1.2.2。

1.4.3 蒸汽爆破参数优化 为进一步破坏牡丹籽的细胞结构,暴露更多的酶促反应位点,提高后续酶解效果,将牡丹籽在最优条件下先进行高温碱煮,经冷却过滤后,再进行蒸汽爆破处理。试验参数设置:

(1) 蒸汽爆破压力:将经过碱煮的牡丹籽置于蒸汽爆破机中,通入饱和水蒸汽,分别选取 0.3, 0.5, 0.7 MPa 的压力,维压 30 s,保压完成后完成释压,实现蒸汽爆破。将经过蒸汽爆破的牡丹籽烘干、粉碎后,完成后续水酶法提油,考察不同爆破压力对出油率的影响。

(2) 蒸汽爆破维压时间:固定蒸汽爆破压力为 0.3 MPa,考察维压时间(0.5, 1.0, 3.0, 5.0 min)对出油率的影响;其余流程同 1.4.3(1)。

以上试验均平行 3 次。

1.5 相关指标的测定方法

1.5.1 出油率计算

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

式中:

c ——出油率, %;

m_1 ——所得清油的质量, g;

m_2 ——牡丹籽中粗脂肪的质量, g。

1.5.2 牡丹籽脂肪含量 参照 GB/T 5512—2008。

1.5.3 折光系数 参照 GB/T 5527—2010。

1.5.4 相对密度 参照 GB/T 5526—1985。

1.5.5 碘值 参照 GB/T 5532—2008。

1.5.6 皂化值 参照 GB/T 5534—2008。

1.5.7 透明度和色泽 参照 GB/T 5525—2008。

1.5.8 酸价 参照 GB 5009.229—2016。

1.5.9 过氧化值 参照 GB 5009.227—2016。

1.5.10 脂肪酸 参照 GB 5009.168—2016。

1.5.11 植物甾醇 参照 GB/T 25223—2010。

1.6 统计分析

所有试验均进行 3 次独立平行测定,其结果以平均值±标准偏差表示。采用 Origin 8.5 软件对试验数据进行分析处理和作图。

2 结果与分析

2.1 牡丹籽高温碱煮预处理对出油率的影响

2.1.1 碱液浓度 由图 1 可知,牡丹籽油的出油率随碱液浓度的升高呈先增后降的趋势。其中,当碳酸氢钠浓度从 0.01 mol/L 提高至 0.05 mol/L 时,出油率从 31.92% 增加到 74.55%,可能是由于随着碱液浓度的增加,牡丹籽细胞晶体结构被破坏的程度越来越大,利于后续酶促反应时酶与底物的接触,从而加速油脂的释放量。然而,随着碱液浓度的进一步提高,出油率则出现下降的趋势,如碱液浓度为 0.09 mol/L 时,出油率下降为 52.14%,可

能是由于过高的碱液浓度增加了淀粉的糊化,并在后续干燥过程中脱水老化,与酯类和蛋白质等形成老化复合物,包裹了酶促反应位点,使后续酶解反应效率下降,阻碍油脂的释放。因此,高温碱煮预处理时碳酸氢钠最佳浓度为 0.05 mol/L。

2.1.2 料液比 当牡丹籽与碳酸氢钠溶液的料液比为 1:3 (g/mL) 时,牡丹籽细胞结构不能被充分溶胀破坏,糖酯、糖蛋白和淀粉颗粒的酶反应位点不能完全暴露,导致后续酶促反应效率下降,油脂释放量也随之减少,出油率为 58.12%。当料液比上升至 1:5 (g/mL) 时,牡丹籽能够充分溶胀,细胞晶体结构被破坏,利于后续酶解反应和油脂的释放,出油率提高至 74.55% (图 2)。当液料比进一步提高到 1:7 (g/mL) 时,出油率则下降至 65.37%,可能是由于碳酸氢钠溶液的进一步增加,导致加热过程中释放过多的二氧化碳气体,使得实际蒸煮温度低于 105 °C,降低了牡丹籽细胞结构的破坏程度,导致后续酶解反应效率下降,出油率降低。另外,过高的料液比也需要相应增加高温热处理设备的容量,热能消耗也随之增加。因此,较优的料液比为 1:5 (g/mL)。

2.1.3 乙醇体积分数 如图 3 所示,牡丹籽的出油率随着乙醇体积分数的增大呈先上升后下降的趋势。当乙醇体积分数为 30% 时,出油率为 63.63%;当乙醇体积分数

提高到 35% 时,出油率增加到 74.55%,表明乙醇起到了良好的破乳效果,其主要机理:乙醇具有较强的极性,加入到酶解后的溶液中可使体系中原本稳定的水包油型乳状液失稳,促使油滴释放和聚集,从而提高出油率^[24-25]。然而,随着乙醇体积分数的进一步增加,牡丹籽的总出油率出现下降趋势,如乙醇体积分数为 45% 时,牡丹籽出油率仅为 65.38%。说明乙醇体积分数也并非越高越好,过高浓度的乙醇不仅不能提高出油率而且还会增加后续乙醇的回收难度,增加能耗。因此,选取的最佳乙醇体积分数为 35%。

2.2 不同高温蒸煮方式比较

由图 4 可知,高温水煮预处理,牡丹籽水酶法提油率明显低于酸煮或碱煮方式,其中碱煮法出油率最高,为 74.55%。这可能与高温碱煮条件下牡丹籽细胞结构更易被溶胀破坏,暴露更多的酶促反应位点,利于后续酶解反应和油脂的释放有关。

2.3 高温碱煮联合蒸汽爆破处理对牡丹籽出油率的影响

2.3.1 蒸汽爆破压力 如图 5 所示,当蒸汽爆破压力从 0.0 MPa (未经爆破处理) 增加到 0.3 MPa 时,牡丹籽的出油率显著增加,从 74.55% 增加到 82.07%,可能是由于爆破进一步破坏了牡丹籽的细胞结构,暴露了更多的酶促反应位点,提高了后续酶解效果和油脂释放量。然而,进

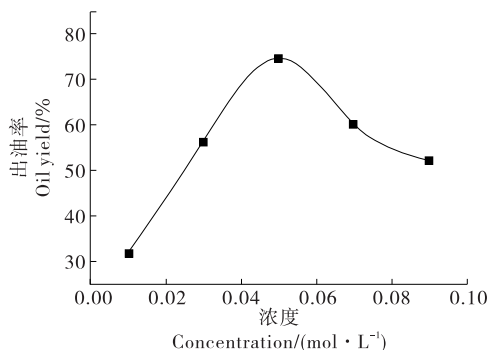


图 1 碳酸氢钠浓度对出油率的影响

Figure 1 Effect of sodium bicarbonate concentration on oil yield

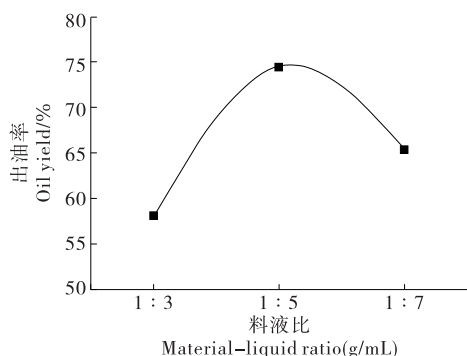


图 2 料液比对出油率的影响

Figure 2 Effect of material-liquid ratio on oil yield

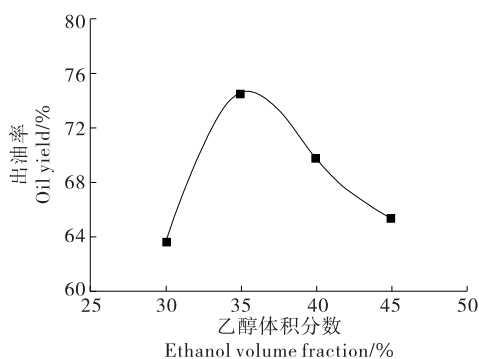


图 3 乙醇体积分数对出油率的影响

Figure 3 Effect of ethanol fraction on oil yield

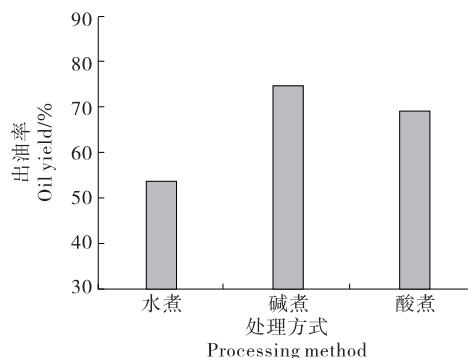


图 4 蒸煮方式对出油率的影响

Figure 4 Effect of different stewing method on oil yield

一步增加爆破压力(0.3~0.7 MPa),牡丹籽的出油率则呈逐渐下降的趋势,如爆破压力提高至 0.7 MPa 时,牡丹籽的出油率仅为 67.84%,可能是过高的爆破压力使牡丹籽中的蛋白质发生变性和交联,同时导致淀粉发生糊化并在后续干燥过程中发生老化和交联,隐藏酶反应位点,使包裹其中的油脂不易释放出来。因此,选择的最优蒸汽爆破压力为 0.3 MPa。

2.3.2 蒸汽爆破维压时间 如图 6 所示,当维压时间从 0 s 增加到 30 s 时,能显著提高牡丹籽的出油率,但继续增加维压时间则会导致出油率的下降,并且维压时间越长,出油率越低,如当维压时间为 5 min 时,出油率仅为 67.19%。这主要是由于维压时间过长导致牡丹籽中的淀粉发生糊化并在后续干燥时发生老化和交联,同时还会使蛋白质发生变性和交联,隐藏酶反应位点,使包裹其中的油脂不易释放出来,导致出油率下降。因此,最优的蒸汽爆破维压时间为 30 s。

综上,原料经高温碱煮联合蒸汽爆破处理后,牡丹籽水酶法提油的出油率得到显著提高,最高为 82.07%。

2.4 牡丹籽油的品质

2.4.1 牡丹籽油的质量和特征指标 高温碱煮联合蒸汽爆破辅助水酶法提取所得牡丹毛油与 2 种商品牡丹籽油的主要质量和特征指标检测结果如表 1 所示。3 种牡丹籽油在 4℃ 均呈金黄色、透明、液态状,相对密度(20℃)为 0.913~0.933,过氧化值和酸值均符合中国粮食行业标准牡丹籽油(LS/T 3242—2014)一级标准的要求(过氧化值 ≤ 6.0 mmol/kg,酸值 ≤ 2.0 mg/g),证明油脂质量好,

这主要与试验选用的牡丹籽新鲜度高(2019 年产)和水酶法提油条件温和有关^[26]。3 种牡丹籽油的皂化值和碘值均符合牡丹籽油的典型特征,其中试验所得牡丹籽油的碘值高于 2 种商品牡丹油的碘值,表明试验所得牡丹籽油的不饱和度要比所选商品牡丹油的高,可能与牡丹籽的品种、产地等有关。

2.4.2 牡丹籽油的脂肪酸和植物甾醇组成 高温碱煮联合蒸汽爆破辅助水酶法提取所得牡丹毛油与 2 种商品牡丹籽油的脂肪酸及植物甾醇组成和含量如表 2、3 所示。牡丹籽油中含量最为丰富的是 α -亚麻酸,其次是亚油酸和油酸。试验中,牡丹籽油总不饱和脂肪酸含量为 88.57%~92.18%,其中单不饱和脂肪酸为 23.14%~25.13%,多不饱和脂肪酸为 63.82%~67.93%,而饱和脂肪酸含量仅为 7.82%~11.43%,与文献^[27-28]报道中有关牡丹籽油脂肪酸组成和含量相似。由于含有丰富的 α -亚麻酸、亚油酸和油酸,牡丹籽油被认为具有重要的营养和生理调节功能^[29]。

牡丹籽油中含量最多的甾醇是 Δ^5 -燕麦甾烯醇,其次是 β -谷甾醇和 24-亚甲基环木菠萝烷醇,它们在降低血清胆固醇水平、预防心血管病和抗癌方面具有有效的作用^[30]。此外,水酶法所得牡丹籽油在甾醇总量和主要单个甾醇含量上均比商品牡丹籽油要高,可能与榨油所用牡丹籽的品种、产地以及提油方法有关。试验所用水酶法条件温和,未经高温精炼,对油中甾醇的保护具有重要的作用。总之,高温碱煮—蒸汽爆破辅助水酶法所得的

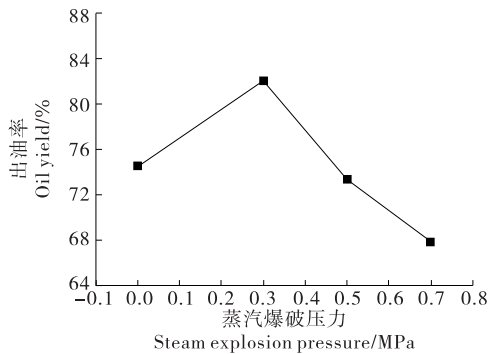


图 5 蒸汽爆破压力对出油率的影响

Figure 5 Effect of steam explosion pressure on oil yield

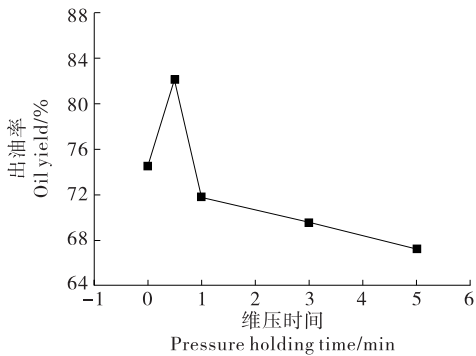


图 6 蒸汽爆破处理时间对出油率的影响

Figure 6 Effect of pressure holding time of steam explosion on oil yield

表 1 牡丹籽油的主要质量和特征指标

Table 1 The main quality and characteristic indexes of peony seed oil (n=3)

样品	透明度	相对密度 d_{20}^{20}	碘值(以 I 计)/ ($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)	皂化值(以 KOH 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	酸值(以 KOH 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	过氧化值/ ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
牡丹毛油	澄清、透明	0.933 ± 0.011	185.87 ± 5.01	193.55 ± 4.45	0.95 ± 0.05	1.47 ± 0.12
商品油 1	澄清、透明	0.913 ± 0.009	173.36 ± 3.64	194.16 ± 5.24	1.42 ± 0.06	4.76 ± 0.34
商品油 2	澄清、透明	0.929 ± 0.008	177.91 ± 4.27	194.69 ± 3.70	0.49 ± 0.03	3.97 ± 0.30

表 2 牡丹籽油脂肪酸组成

Table 2 Fatty acids composition of peony seed oil (n=3)						%
样品	棕榈酸	十七烷酸	十七碳一烯酸	硬脂酸	油酸	亚油酸
牡丹毛油	5.53±0.04	0.38±0.01	0.23±0.00	1.91±0.02	23.75±0.13	26.29±0.13
商品油 1	7.89±0.05	0.60±0.01	0.46±0.01	2.94±0.02	22.48±0.14	26.93±0.13
商品油 2	6.92±0.06	0.55±0.01	0.29±0.00	3.58±0.04	24.42±0.11	24.07±0.10
样品	α-亚麻酸	花生一烯酸	饱和脂肪酸	单不饱和脂肪酸	多不饱和脂肪酸	总不饱和脂肪酸
牡丹毛油	41.64±0.12	0.27±0.00	7.82±0.07	24.25±0.09	67.93±0.27	92.18±0.35
商品油 1	38.50±0.12	0.20±0.00	11.43±0.11	23.14±0.14	65.43±0.26	88.57±0.28
商品油 2	39.75±0.12	0.42±0.01	11.05±0.11	25.13±0.10	63.82±0.24	88.95±0.36

表 3 牡丹籽油主要植物甾醇的含量

Table 3 Content of main phytosterols in peony seed oil (n=3) mg/kg				
样品	胆固醇	菜油甾醇	β-谷甾醇	△ ⁵ -燕麦甾烯醇
牡丹毛油	2.04±0.18	2.01±0.20	1 686.72±32.05	2 392.01±50.23
商品油 1	1.98±0.18	3.95±0.35	1 543.93±33.97	2 136.91±38.46
商品油 2	2.32±0.17	3.04±0.25	1 609.37±28.97	2 018.93±48.45
样品	△ ⁷ -豆甾烯醇	环木菠萝烯醇	24-亚甲基环木菠萝烷醇	甾醇总量
牡丹毛油	54.21±1.84	36.09±1.05	431.20±9.92	4 604.28±110.50
商品油 1	49.37±1.53	33.62±1.14	419.04±8.38	4 188.79±108.91
商品油 2	56.31±1.63	30.68±0.95	400.83±10.02	4 121.48±111.28

牡丹籽油品质优良,植物甾醇等功能物质保留率高,具有很高的营养价值。该毛油只需要经过简单脱水处理即可达到牡丹籽成品油一级标准,无需再经过复杂的精炼工序。

3 结论

脱壳牡丹籽在料液比为 1 : 5 (g/mL),碳酸氢钠浓度为 0.05 mol/L 的碱液中经高温碱煮再联合蒸汽爆破(爆破压力 0.3 MPa,维压时间 30 s)处理后,其细胞晶体结构能被充分溶胀和破坏,暴露更多的酶促反应位点,利于后续酶解反应的发生,可加速淀粉、糊精和糖酯等物质的水解,使油脂更易从结合和被包裹状态中快速释放出来,完成牡丹籽油的提取。该工艺条件下,牡丹籽精油得率为 82.07%,油品质高,符合中国粮食行业标准牡丹籽油(LS/T 3242—2014)一级指标要求。同时,所得牡丹籽油中植物甾醇的含量显著高于 2 种商品牡丹油的甾醇含量,具有更优的保健功能作用。另外,试验在酶解反应时只使用了 α-淀粉酶和糖化酶,后续可以进一步研究淀粉酶、糖化酶、纤维素酶和蛋白酶的不同组合对酶解效果的影响,以考察能否进一步提高出油率和油脂品质。

参考文献

[1] LIU Pu, ZHANG Li-na, WANG Xin-sheng, et al. Characterization of *Paeonia ostii* seed and oil sourced from different cultivation areas in China[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 133: 63-71.

[2] YAN Zhen-guo, XIE Li-hang, WANG Ning, et al. Phenotypic characteristics and fatty acid composition of seeds from

different herbaceous peony species native to China[J]. Chemistry & Biodiversity, 2019, 16(3): 1-11.

[3] 毛善巧, 李西俊. 牡丹籽油的研究进展及油用牡丹综合利用价值分析[J]. 中国油脂, 2017, 42(5): 123-126.

[4] TIAN Xiao, GUO Sen, ZHANG Shan-shan, et al. Chemical characterization of main bioactive constituents in *Paeonia ostii* seed meal and GC-MS analysis of seed oil[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(1): 1-12.

[5] 朱献标, 翟文婷, 董秀勋, 等. 牡丹籽油化学成分及功能研究进展[J]. 中国油脂, 2014, 39(1): 88-91.

[6] 袁琴琴, 刘文营. 牡丹籽中营养和功能性成分研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 333-339.

[7] 王喜波, 王海晴, 李秋慧, 等. 不同方法提取牡丹籽油品质差异[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(9): 46-51.

[8] 冯贞, 方晓璞, 任春明. 不同提取方法对牡丹籽油品质和微量活性成分的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 17-19.

[9] 赵优萍, 张沙沙, 张婷, 等. 不同提取方法对牡丹籽油品质与抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 11-16, 22.

[10] ALADIC K, JARNI K, BARBIR T, et al. Supercritical CO₂ extraction of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 76: 472-478.

[11] 邓瑞雪, 刘振, 秦琳琳, 等. 超临界 CO₂ 流体提取洛阳牡丹籽油工艺研究[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 142-145.

[12] 王昌涛, 张萍, 董银卯. 超临界 CO₂ 提取牡丹籽油的工艺以及成分分析[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(8): 96-99, 107.

[13] 荣辉, 吴兵兵, 杨贤庆, 等. 水酶法提取生物油脂的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 374-378.

[14] ZHANG Ying-lao, LI Shuai, YIN Cai-ping, et al. Response surface optimisation of aqueous enzymatic oil extraction from bayberry (*Myrica rubra*) kernels[J]. Food Chemistry, 2012, 135(1): 304-308.

[15] OENNING RIBEIRO S A, NICACIO A E, ZANQUI A B, et al. Improvements in the quality of sesame oil obtained by a green extraction method using enzymes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 464-470.

[16] JIANG Li-hua, HUA Di, WANG Zhang, et al. Aqueous enzymatic extraction of peanut oil and protein hydrolysates[J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(C2/C3): 233-238.

[17] 江连洲, 王海晴, 陈思, 等. 响应面法优化超声波辅助水酶法提取牡丹籽油工艺研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 247-251.

[18] 宋媛媛. 乙醇辅助水酶法提取牡丹籽油工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 12.

[19] 笕丽霞, 陈君红, 霍科科, 等. 微波复合酶法水萃牡丹籽油工艺研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 16-19.

[20] 杨瑞金, 倪双双, 张文斌, 等. 水媒法提取食用油技术进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 308-314.

[21] 陈选, 周波, 汪周俊, 等. 水酶法制备牡丹籽油的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 246-250.

[22] 张君仪, 刘飞, 徐虹. 蒸汽爆破技术在食品原料预处理中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 331-334.

[23] 宋媛媛, 杨瑞金, 张文斌, 等. 牡丹籽油乙醇辅助水酶法提

取工艺优化及品质分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 180-185.

[24] SONG Yuan-yuan, ZHANG Wen-bin, WU Jing, et al. Ethanol-assisted aqueous enzymatic extraction of peony seed oil[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2019, 96(5): 595-606.

[25] 倪双双, 杨瑞金, 张文斌, 等. 乙醇水溶液提取玉米胚芽油的工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 283-289.

[26] POLMANN G, BADIA V, FRENA M, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction combined with experimental designs allow the obtaining of a high-quality and yield pecan nut oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 1-7.

[27] HAO Qing, PENG Li-ping, LI Zhen, et al. Paternal effects on fatty acid composition of tree peony seed oil[J]. Euphytica, 2019, 215(7): 1-12.

[28] 史国安, 郭香凤, 金宝磊, 等. 牡丹籽油超临界 CO₂ 萃取工艺优化及抗氧化活性的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(4): 47-50, 107.

[29] JANG H, PARK K. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids and metabolic syndrome: A systematic review and meta-analysis[J]. Clinical Nutrition, 2020, 39(3): 765-773.

[30] GYLLING H, PLAT J, TURLEY S, et al. Plant sterols and plant stanols in the management of dyslipidaemia and prevention of cardiovascular disease[J]. Atherosclerosis, 2014, 232(2): 346-360.

(上接第 128 页)

表 3 分级检测结果

Table 3 Classification test results

等级	样本数	分级正确数	分级正确率/%
特级果	50	48	96
一级果	50	47	94
二级果	50	49	98
等外果	50	49	98

题,在传送带两侧放置机械臂与摄像头,摄像头采集机械臂抓举后苹果的侧面与底面图像,提升系统的分级准确性。

3 结论

文章提出了基于机器视觉的苹果在线分级方法,通过对预处理图像采取泛洪填充+自适应 Ostu 阈值分割算法提取苹果轮廓,采用改进的粒子群优化的 SVM 决策树模型对采集的苹果进行分级。结果表明,苹果分级的平均准确率和效率分别达到了 96.5% 和 4 个/s,证明了试验方法的可行性。但分级过程中仍存在个别误判现象,为后续研究的改进之处。

参考文献

[1] 黄辰, 费继友. 基于图像特征融合的苹果在线分级方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 285-291.

[2] YANG Yu, SERGIO A Velastin, FEI Yin. Automatic grading of apples based on multi-features and weighted K-means clustering algorithm[J]. Information Processing in Agriculture, 2019, DOI: 10.1016/j.inpa.2019.11.003.

[3] LI Xiang-feng, ZHU Wei-xing. Apple grading method based on features fusion of size, shape and color[J]. Procedia Engineering, 2011. DOI:10.1016/j.proeng.2011.08.543.

[4] 王阳阳, 黄勋, 陈浩, 等. 基于同态滤波和改进 K-means 的苹果分级算法研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 47-51, 112.

[5] 石瑞瑶, 田有文, 赖兴涛, 等. 基于机器视觉的苹果品质在线分级检测[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(3): 80-86.

[6] 于蒙, 李雄, 杨海潮. 基于图像识别的苹果等级分级研究[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(7): 39-43, 47.

[7] 汪烨. 陕西打造千亿苹果产业[J]. 农经, 2019(12): 56-59.

[8] 封居强, 杨伟虎, 张星. 基于 HSV 颜色空间的自适应多尺度 Retinex 算法[J]. 新乡学院学报, 2020, 37(3): 36-40.

[9] 汪慧玲. 关于支持向量机的分类优化算法研究[J]. 科技创新导报, 2019, 16(7): 3-5.

[10] 杨咪, 王安丽, 胡正. 基于 SVM 决策树的数据链识别分类[J]. 兵工自动化, 2019, 38(12): 54-57, 63.

[11] 王敏洁, 艾红. 改进粒子群算法优化 SVM 的水泥烧成系统故障诊断[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(12): 983-987, 1 006.