

牡丹籽油乙酯化处理优化研究

蒋丹丹, 赵悦菡, 侯召华*

(齐鲁工业大学(山东省科学院)食品科学与工程学院, 济南 250353)

摘 要: **目的** 优化牡丹籽油乙酯化处理的工艺条件。**方法** 利用油脂醇解法对牡丹籽油进行乙酯化, 单因素实验和响应面实验相结合, 以混合脂肪酸乙酯得率为响应值, 对乙酯化过程中催化剂种类(NaOH 和 KOH)、催化剂浓度、反应时间、反应温度、物料比、醇水比 6 个因素进行分析, 优化得到牡丹籽油的最佳乙酯化条件。**结果** 催化剂选用 KOH。最佳乙酯化条件为: 物料比 4.3:1, 反应时间 50.88 min, 催化剂浓度 1.45 mol/L, 反应温度 74.78 °C, 牡丹籽油乙酯化得率预测值为 85.09%, 实际值为 84.06%。**结论** 该条件能有效进行乙酯化, 为牡丹籽油开发利用提供了理论基础。

关键词: 牡丹籽油; 乙酯化; 油脂醇解法; 混合脂肪酸乙酯; 响应面法

Optimization of ethyl esterification of peony seed oil

JIANG Dan-Dan, ZHAO Yue-Han, HOU Zhao-Hua*

(College of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the technological conditions of ethyl esterification of peony seed oil. **Methods** The peony seed oil was esterified by alcohol hydrolysis. The single factor experiment and response surface experiment were combined, and the yield of mixed fatty acid ethyl ester was used as the response value. Six factors, such as ethyl ester type catalyst (NaOH and KOH), catalyst concentration, reaction time, reaction temperature, material ratio were analyzed to optimize the optimal ethylation conditions for peony seed oil. **Results** Catalyst was KOH. The optimal conditions of etherification of peony seed oil were as follows: solid-liquid ratio was 4.3:1, reaction time was 50.88 min, catalyst concentration was 1.45 mol/L, and reaction temperature was 74.78 °C. The predicted and actual esterification rate of peony seed oil was 85.09% and 84.06%, respectively. **Conclusion** This condition can effectively carry out ethyl esterification, which provides a theoretical basis for the development and utilization of peony seed oil.

KEY WORDS: peony seed oil; ethyl ester; oil alcoholysis method; mixed fatty acid ethyl ester; response surface methodology

基金项目: 济宁市重点研发计划(2018NYNS004)、济南市农业局科技创新项目(201713)

Fund: Supported by the Key Research and Development Projects of Jining (2018NYNS004), Project of Agricultural Science and Innovation of Jinan (201713)

*通讯作者: 侯召华, 讲师, 主要研究方向为农产品深加工。E-mail: houzhao-hua@qlu.edu.cn

*Corresponding author: HOU Zhao-Hua, Lecturer, College of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China. E-mail: houzhao-hua@qlu.edu.cn

1 引言

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)为毛茛科芍药属木本植物, 大约有 33 个种类, 分布在阿富汗、中国、印度、日本、韩国、巴基斯坦和越南等国家^[1], 被誉为“花中之王”^[2]。牡丹不仅可作为观赏性植物, 而且具有医用价值, 研究发现牡丹皮(芍药科)具有镇痛、镇静、抗炎的作用, 可以用于治疗心血管外渗性血液和女性生殖器疾病^[3]。牡丹酚含有多酚化合物、黄酮类化合物等药物成分, 具有血管舒张和抗炎作用^[4]。随着牡丹籽油被批准为新资源食品, 并被列为可用化妆品目录, 油用牡丹作为一种新生事物近年来进入快速发展时期^[5]。油用牡丹种子的含油量高, 含油率高达 30%以上, 相对于高含油率的亚麻籽油, 略低于亚麻籽油。但牡丹籽油中富含多种营养物质。油脂中不饱和脂肪酸含量达 90%以上^[6], 富含 α -亚麻酸、亚油酸、油酸等不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA), 主要脂肪酸为亚麻酸(41%~46%)和亚油酸(19%~27%)^[7]。牡丹籽油中, 含有亚麻酸和亚油酸 2 种是人体必需的两种脂肪酸, α -亚麻酸(α -linolenic acid, ALA)是一种组成人体各组织生物膜结构的 ω -3 必需脂肪酸, 具有广泛的生理活性和明显的药理作用, 不仅具有调节血脂、预防梗塞、降血压等作用^[8], 而且还具有治疗心脑血管疾病、糖尿病、肥胖症等功效^[9]。但是这 2 种脂肪酸人体自身并不能够合成, 需要从外界获取。另外, 牡丹籽油含有丰富的甾醇类化合物、维生素 E 以及角鲨烯等^[10]。目前, 以牡丹籽油为原料提纯不饱和脂肪酸的研究较少。由于对 α -亚麻酸等多不饱和脂肪酸进行分离富集较为困难, 因此需要乙酯化处理为其提供原料。目前, 以牡丹籽油为原料提纯不饱和脂肪酸的研究较少。乙酯化的方法主要有 3 种: 酶催化法、酸催化法和碱催化法。酶催化法价格昂贵, 不适合规模化生产^[11]。碱催化法的具有物料比小, 反应时间短、转化率高等优点, 然而在反应过程中易发生皂化反应, 相较于碱催化法, 酸催化法的物料比较大、反应时间长、转化率低, 但是酸催化法受游离脂肪酸和水的影响较小^[12]。综合考虑, 所以选用价格低廉的碱催化法^[13], 本实验采用碱催化法中的油脂醇解法, KOH 和 NaOH 作为催化剂, 对牡丹籽油乙酯化处理进行优化, 以期对牡丹籽油开发利用提供了理论基础。

2 材料与方法

2.1 材料、仪器与试剂

牡丹籽油: 山东鲁油牡丹科技有限公司。
RE-2000A 旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂); SHZ-D(III)循环水式多用真空泵(上海亚荣生化仪器厂); BCD-185TMPQ 电子天平(上海越平科学仪器有限公司); SHZ-C 恒温水浴锅(常州赛普实验仪器厂); DHG-9140A 干

燥箱(常州赛普实验仪器厂); MDF-U3386S 超低温冰箱[松下健康医疗器械(上海)有限公司]。

KOH、NaOH、无水乙醇、无水硫酸钠、盐酸、石油醚(沸程 30~60 °C)(分析纯, 国药集团试剂有限公司); 实验室用水为 Milli-Q 超纯水。

2.2 实验方法

2.2.1 牡丹籽油乙酯化过程

牡丹籽油(记为 W_1)与一定体积 1 mol/L KOH-乙醇溶液混合在 250 mL 具塞三角瓶中, 容器冲入氮气, 75 °C 水浴 60 min, 冷却至室温。用盐酸调溶液 pH 至 2~3, 加入适量的石油醚(30~60 °C沸程)萃取 3 次, 静置分层, 上层油相为粗脂肪酸乙酯、过量乙醇。下层为水相, 不皂化物、甘油; 最后合并 3 次萃取有机相, 用 15%氯化钠溶液洗 3 次。加入无水硫酸钠除去有机相中的水, 过滤; 旋蒸除去有机溶剂, 得到混合脂肪酸乙酯(记为 W_2)。

混合脂肪酸乙酯得率= W_2/W_1

式中: W_1 为油脂质量, g; W_2 为混合脂肪酸乙酯质量, g。

2.2.2 催化剂种类的影响

反应温度 75 °C, 反应时间 60 min, 物料比 15:1, NaOH-无水乙醇和 KOH-无水乙醇浓度均为 1 mol/L 时, 分别研究醇水比为 1:0 和 0.8:0.2 时, 2 种催化剂对混合脂肪酸乙酯得率的影响, 实验设计见表 1。

表 1 2 种催化剂实验
Table 1 The experiments of two kinds of catalysts

催化剂种类	催化剂浓度/(mol/L)	醇水比	物料比/(m:l)	反应时间/min	反应温度/°C
KOH	1mol/L	1:0	15:1	60	75
NaOH	1mol/L	1:0	15:1	60	75
KOH	1mol/L	0.8:0.2	15:1	60	75
NaOH	1mol/L	0.8:0.2	15:1	60	75

2.2.3 单因素实验

以反应温度、反应时间、物料比、催化剂浓度、醇水比为单因素, 以混合脂肪酸乙酯得率为评价指标, 通过单因素实验, 从而确定各因素的最佳实验范围, 参考其他多个实验的实验范围^[14-16], 单因素实验设计如表 2 所示。

表 2 单因素实验设计
Table 2 Single factor experiment design

因素	水平
反应温度/°C	40、50、60、70、80 °C
反应时间/min	30、50、70、90、110 min
物料比/(m:l)	5:1、10:1、15:1、20:1、25:1
催化剂浓度/(mol/L)	0.5、1、1.5、2、2.5 mol/L
醇水比	1:0、0.95:0.05、0.9:0.1、0.85:0.15、0.8:0.2

2.2.4 响应面实验

根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理, 以反应时间、反应温度、物料比以及催化剂浓度为自变量, 以混合脂肪酸乙酯得率为响应值, 通过 Design Expert 8.0 软件设计 4 因素 3 水平响应面实验, 优化乙酯化工艺, 实验因素水平设置如表 3 所示。

表 3 响应面实验因素水平表
Table 3 The experimental factors and levels of response surface methodology

项目	实验水平		
	-1	0	1
物料比/(m:V)	1:3	1:5	1:7
反应时间/min	30	50	70
催化剂浓度/(mol/L)	1	1.5	2
反应温度/°C	70	75	80

2.3 数据分析

利用 Excel 作图并对数据处理分析。每组实验进行 3 次平行实验, 取平均值±标准差。本实验采用平行实验取平均值的方法, 均值的差异性通过标准偏差的计算来实现的。

3 结果与分析

3.1 催化剂种类对混合脂肪酸乙酯得率的影响

反应温度 75 °C, 反应时间 60 min, 物料比 15:1, 醇水

比 0.8:0.2, KOH、NaOH 浓度为 1 mol/L 时, 研究催化剂种类对混合脂肪酸乙酯得率的影响, 结果见表 4。

如表 4 所示, 当醇水比为 1:0 时, NaOH 和 KOH 无显著性差异。在醇水比为 0.8:0.2 时, KOH 显著高于 NaOH($P<0.05$), 在其他相关乙酯化实验中, 余瑶盼等^[17]在石榴籽油乙酯化过程中采用 NaOH 作为催化剂, 红花籽油采用 KOH 作为催化剂, 由于本实验所需催化剂量过多, 并且 KOH 效果比 NaOH 好。综上, 本实验选用 KOH 作为催化剂。

3.2 单因素分析

3.2.1 醇水比对混合脂肪酸乙酯得率影响结果分析

反应温度 75 °C, 反应时间 60 min, 物料比 15:1, KOH 浓度 1 mol/L 时, 研究了醇水比为 1:0、0.95:0.05、0.9:0.1、0.85:0.15 和 0.8:0.2 时, 醇水比对混合脂肪酸乙酯得率影响结果, 结果见图 1。

如图 1 所示, 随着 KOH 乙醇溶液中水分含量的增加, 混合脂肪酸乙酯得率持续上升, 当醇水比为 0.85:0.15 时提取率最高, 继续增加水分含量, 提取率趋于稳定。所以得到反应的最佳醇水比为 0.85:0.15。

3.2.2 催化剂浓度对牡丹籽油乙酯化的影响结果分析

反应温度 75 °C, 反应时间 60 min, 物料比 15:1, 醇水比 0.85:0.15, 研究了不同 KOH 浓度(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mol/L)对牡丹籽油混合脂肪酸乙酯得率的影响, 结果见图 2。

表 4 催化剂种类对混合脂肪酸乙酯得率的影响
Table 4 The effect of catalyst types on the yield of ethyl esterification

催化剂种类	醇水比	物料比/(m:V)	反应时间/min	反应温度/°C	催化剂浓度/(mol/L)	混合脂肪酸乙酯得率/%
NaOH	1:0	15:1	60	75	1	63.93±0.85
KOH	1:0	15:1	60	75	1	64.95±2.56
NaOH	0.8:0.2	15:1	60	75	1	44.05±0.77
KOH	0.8:0.2	15:1	60	75	1	68.75±2.74

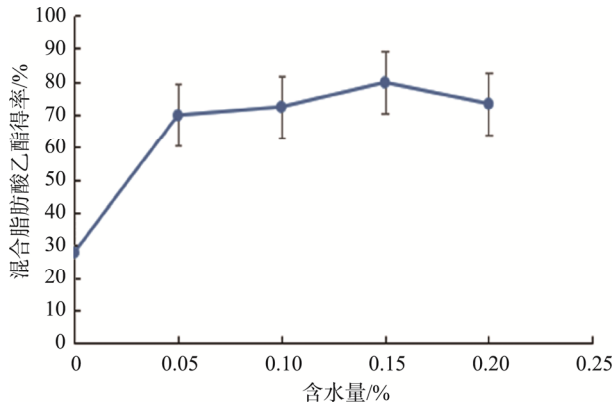


图 1 醇水比对混合脂肪酸乙酯得率的影响($n=3$)
Fig.1 Effect of water content on yield of esterification ($n=3$)

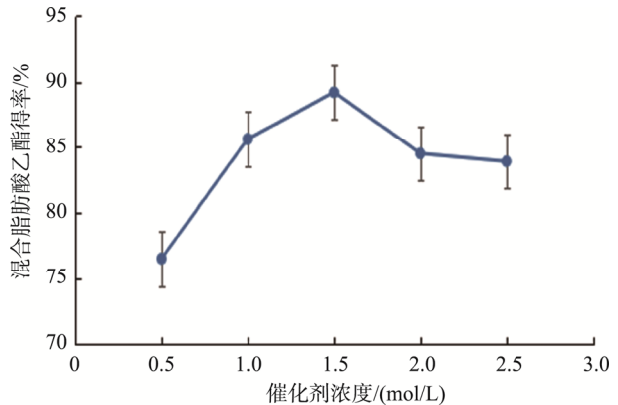


图 2 催化剂浓度对混合脂肪酸乙酯得率的影响($n=3$)
Fig.2 Effect of catalyst concentration on the yield of ethyl esterification ($n=3$)

如图2所示,随着催化剂添加量增加,乙酯得率先增加后降低;当KOH浓度达到1.5 mol/L时,牡丹籽油酯化程度、混合脂肪酸乙酯得率最高。此时,反应液中甘油层自然沉降,便于反应产物分离。在反应过程中反应液呈固液混合状态,混匀后,有些许白色絮状物质在混合在黄色液体中。在KOH浓度达到乙酯化得率上升趋势趋于平缓,甚至出现下降趋势。这是由于当碱性催化剂过多时,过量催化剂会与甘油三酯脂肪酸发生皂化反应,增加催化剂耗用量,使得乙酯得率降低。因此在实验过程中,应选择较为适当的催化剂浓度,综上,本实验选用KOH的浓度为1.5 mol/L。

3.2.3 物料比的影响

反应温度75℃,反应时间60 min, KOH-乙醇水溶液浓度为1 mol/L,醇水比为0.85:0.15时,考察了5个物料比水平物料比分别为5:1、10:1、15:1、20:1、25:1时对混合脂肪酸乙酯得率的影响,结果见图3。

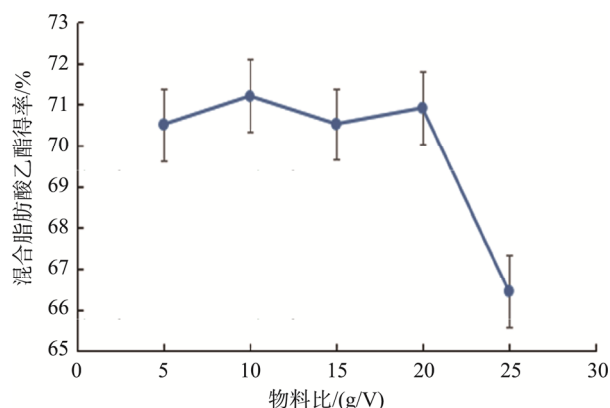


图3 物料比对混合脂肪酸乙酯得率的影响($n=3$)

Fig.3 Effect of material ratio on yield of esterification ($n=3$)

如图3所示,随着物料比的增加,混合脂肪酸乙酯得率增加,当物料比为10:1时,混合脂肪酸乙酯得率达到最大值,随后趋于平缓。然而当物料比达到5:1与10:1,混合脂肪酸乙酯得率并无明显增加,因为乙酯化反应是一个可逆过程,过量的无水乙醇用量能推动反应向正反应方向进行,从而提高乙酯率,因此但无水乙醇用量过大时,会稀释反应体系。因此考虑到实际应用,趋于对乙酯化效果以及无水乙醇用量成本等因素的考量,以及张蒙娜等^[18]关于沙丁鱼油脂乙酯化所需乙醇用量为60 g、邵佩霞等^[19]关于鱼油乙酯化物料比为1:1,而牡丹籽油乙酯化最佳物料比为5:1时,乙酯化程度较高。综上,本实验确定最佳的反应物料比为5:1。

3.2.4 反应温度的影响

反应温度75℃,反应时间60 min,物料比15:1, KOH-乙醇水溶液浓度为1 mol/L,考察了5个温度水平 $T=40$ 、50、60、70、80℃时对牡丹籽油乙酯化得率的影响,结果见图4。

如图4所示,随着反应温度的增加,混合脂肪酸乙酯得率先增加后趋向于平衡,升高温度有利于反应的进行。当

温度达到75℃时,混合脂肪酸乙酯得率达到最高点,随后开始降低,由于常压下无水乙醇沸点为78.3℃。反应温度过高容易造成无水乙醇挥发,温度过高反而不利于反应的进行。所以反应温度范围设置在40~80℃之间, Gabriela等^[20]的有关硬脂酸乙酯的最佳反应温度为60℃以及李江等^[21]关于红花籽油则在室温条件下就能反应完全,而牡丹籽油中混合脂肪酸乙酯最佳反应温度为75℃,反应的最佳温度与原料性质有关。综上所述,本实验确定最佳的反应温度为75℃。

3.2.5 反应时间的影响

反应温度75℃,物料比15:1,醇水比0.85:0.15, KOH-乙醇水溶液浓度为1 mol/L,考察了5个反应时间 $t=30$ 、50、70、90、110 min时对混合脂肪酸乙酯得率的影响,结果见图5。

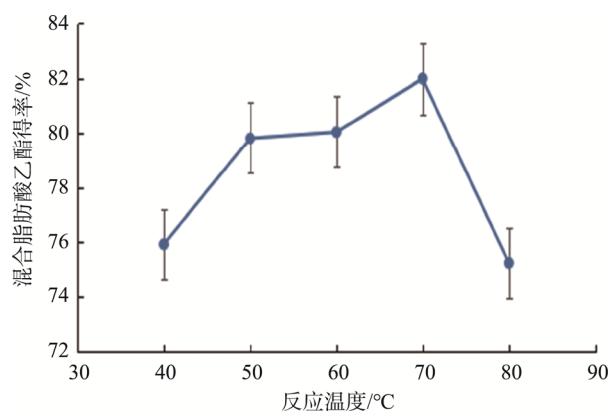


图4 反应温度对混合脂肪酸乙酯得率的影响($n=3$)

Fig.4 Effect of reaction temperature on yield of ethyl esterification ($n=3$)

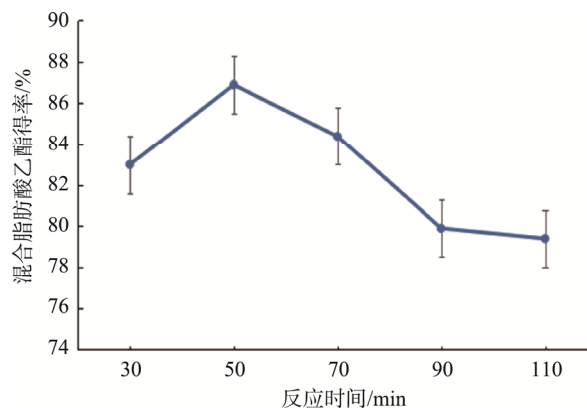


图5 反应时间对混合脂肪酸乙酯得率的影响($n=3$)

Fig.5 Effect of reaction time on yield of ethyl esterification ($n=3$)

如图5所示,随反应时间增加,混合脂肪酸乙酯得率先增加后趋向于平衡,当反应时间为50 min时,混合脂肪酸乙酯得率为86.9%,刘润泽等^[22]在红花籽油醇解法制备脂肪酸乙酯时,最佳反应时间为60 min,而牡丹籽油在反应时间50 min以后,延长反应时间对乙酯化得率影响不大,

乙酯化得率并无明显增长,甚至有所下降。考虑到延长反应时间,对乙酯得率影响不大,反而耗时耗能,因此,本实验选择 50 min 作为乙酯化反应最佳时间。

综上,单因素实验设计,得出乙酯化反应的较佳工艺参数分别为反应温度 75 ℃,反应时间 50 min,物料比为 5:1, KOH 的浓度为 1.5 mol/L,醇水比为 0.85:0.15。

3.3 响应面分析

3.3.1 结果分析

选用了中心复合模型,做 4 因素 3 水平共 29 个实验点(5 个中心点)的响应面分析实验。这 29 个实验点可以分为 2 类: 其一是析因点,自变量取值在各因素所够成的三

维顶点,共有 24 个析因点;其二是零点,为区域的中心点,零点重复 5 次,用于估计实验误差,以混合脂肪酸乙酯得率为响应值。

本实验混合脂肪酸乙酯得率为最终响应值,无水乙醇用量、反应时间、KOH 浓度与反应温度 4 因素 3 水平的 29 个组合及相应的响应面试验结果如表 5 所示:

3.3.2 模型建立及显著性分析

应用 Design Expert 8.0 软件进行多元回归拟合分析,得到混合脂肪酸乙酯得率与各因素变量的二次方程模型为 $Y=84.71-1.96A+0.16B-0.49C-0.48D+1.000E-002AB+0.16AC-0.59AD-2.17BC+1.06BD+0.54CD-2.78A^2-3.72B^2-3.39C^2-3.17D^2$ 。

表 5 牡丹籽油乙酯化得率的响应面实验方案及结果
Table 5 Design and results of response surface experiment

实验号	A 物料比/(m:V)	B 反应时间/min	C 催化剂浓度/(mol/L)	D 反应温度/℃	混合脂肪酸乙酯得率/%
1	3.00	30.00	1.50	75	78.32
2	7.00	30.00	1.50	75	75.35
3	3.00	70.00	1.50	75	80.65
4	7.00	70.00	1.50	75	77.72
5	5.00	50.00	1.00	70	81.66
6	5.00	50.00	2.00	70	76.90
7	5.00	50.00	1.00	80	77.91
8	5.00	50.00	2.00	80	75.32
9	3.00	50.00	1.50	70	80.32
10	7.00	50.00	1.50	70	77.31
11	3.00	50.00	1.50	80	81.73
12	7.00	50.00	1.50	80	76.36
13	5.00	30.00	1.00	75	75.77
14	5.00	70.00	1.00	75	78.45
15	5.00	30.00	2.00	75	81.44
16	5.00	70.00	2.00	75	75.43
17	3.00	50.00	1.00	75	81.35
18	7.00	50.00	1.00	75	76.44
19	3.00	50.00	2.00	75	80.42
20	7.00	50.00	2.00	75	76.14
21	5.00	30.00	1.50	70	78.98
22	5.00	70.00	1.50	70	77.15
23	5.00	30.00	1.50	80	76.44
24	5.00	70.00	1.50	80	78.84
25	5.00	50.00	1.50	75	85.86
26	5.00	50.00	1.50	75	84.96
27	5.00	50.00	1.50	75	84.60
28	5.00	50.00	1.50	75	83.73
29	5.00	50.00	1.50	75	84.41

由表 6 软件分析和回归方程模拟寻优结果及方差分析表明,该模型的 $P < 0.0001$,说明模型回归高度显著。各项系数的 P 值越小,说明该项越显著,因此对于该模型来说, A 、 B 、 BD 是对该模型影响较为显著的 3 项。该实验条件下物料比、反应时间、催化剂浓度和反应温度等 4 因素对提取混合脂肪酸乙酯得率的影响主次顺序依次为:物料比>反应时间>反应温度>催化剂浓度。其中物料比($P=0.0001$)影响最为显著。对回归方程的相关系数(r^2)为 0.8963,说明模型响应值的变化 89.63%来自所选考察变量。因此,回归方程可以较好地描述考察因子与响应值之间的关系。失拟(lack-of-fit)检验可以用来检验模型对观察数据描述的准确性。失拟值为 0.0807,表明该模型的拟合结果较好。

3.3.3 两因素间的交互作用分析

将 A 、 B 、 C 、 D 因素中的任意 2 个因素固定在零水平,

可得到其他 2 个因素之间的交互效应对混合脂肪酸乙酯得率提取效果的影响,根据回归方程做出响应面图(见图 6),考察所拟合的响应曲面的形状,分析物料比、反应时间、催化剂浓度、反应温度对混合脂肪酸乙酯得率的影响。

如图 6 所示,反应温度和反应时间 2 个因素表现的曲面较为陡峭,由等值线图可以看出存在极值的条件应该在圆心处。根据方程预测提取混合脂肪酸乙酯的最佳条件为:液料比 4.3:1,反应时间 50.88 min, KOH 浓度 1.45 mol/L,反应温度 74.78 °C,预测提取混合酸乙酯的得率为 85.09%。

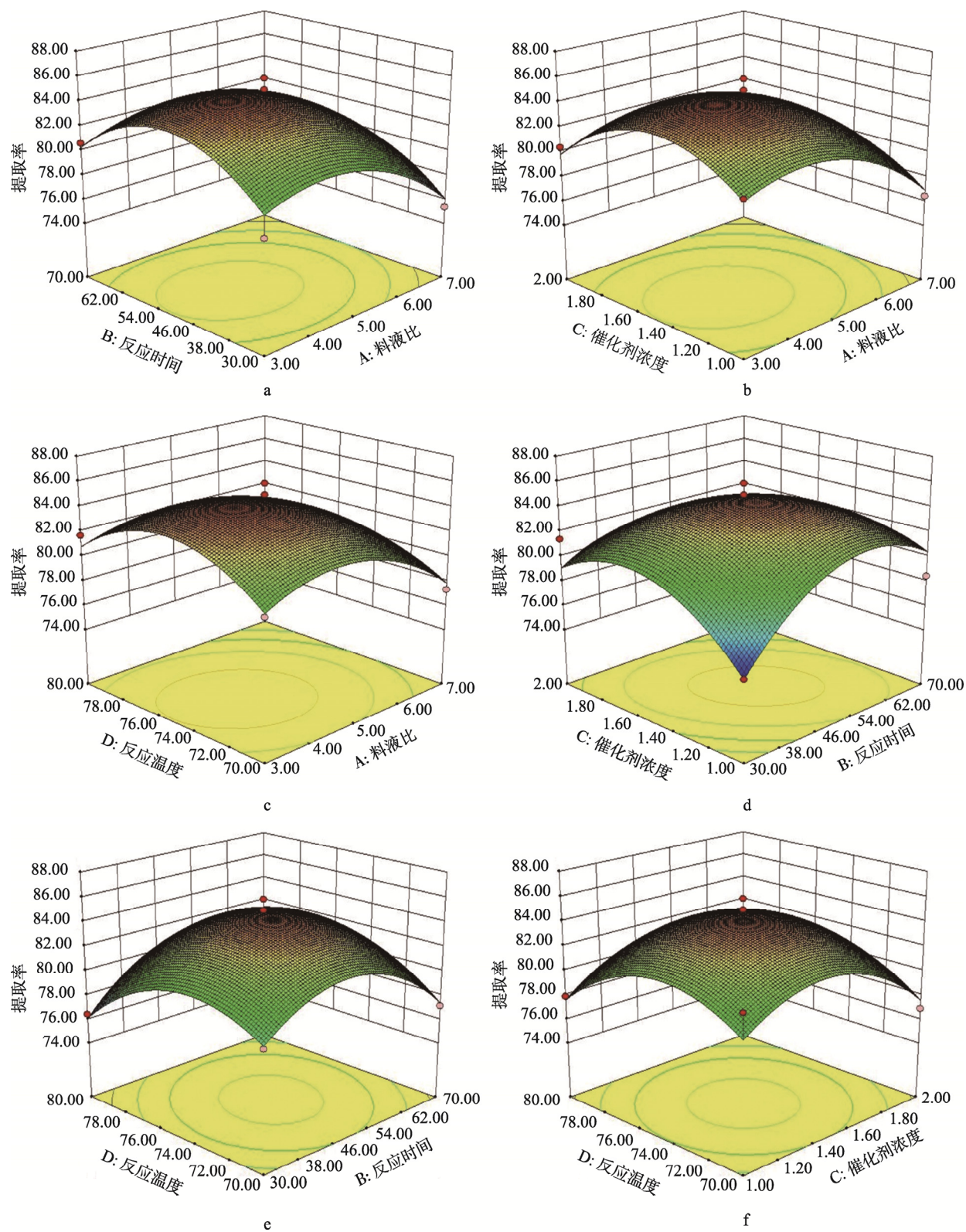
3.4 回归模型的验证

为验证响应面优化的条件的可靠性,采用上述条件做 3 次平行实验,实际测得的平均得率为 84.06%,如表 7。实测值与预测值非常接近,偏差较小,说明此回归模型方程可用来预测混合脂肪酸乙酯的提取效果,具有使用价值。

表 6 回归模型方差分析表
Table 6 Variance analysis of regression model

来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
Model	14	258.04	18.43	8.64	0.0001
A	1	45.90	45.90	21.52	0.0004
B	1	0.31	0.31	0.15	0.7072
C	1	2.93	2.93	1.37	0.2608
D	1	2.73	2.73	1.28	0.2773
AB	1	4.000E-004	4.000E-004	1.875E-004	0.9893
AC	1	0.099	0.099	0.047	0.8324
AD	1	1.39	1.39	0.65	0.4327
BC	1	18.88	18.88	8.85	0.0100
BD	1	4.47	4.47	2.10	0.1696
CD	1	1.18	1.18	0.55	0.4699
A^2	1	49.97	49.97	23.42	0.0003
B^2	1	89.85	89.85	42.12	< 0.0001
C^2	1	74.35	74.35	34.85	< 0.0001
D^2	1	65.36	65.36	30.64	< 0.0001
残差	14	29.87	2.13		
误差	10	2.45	0.61		
失拟项	4	27.42	2.74	4.48	0.0807
Cor Total	28	287.90			
回归系数 r^2			0.8963		

注: $P < 0.05$ 表示差异显著; $P \leq 0.0001$ 表示差异极显著。



注: a 料液比和反应时间对提取率的交互作用; b 料液比和催化剂浓度对提取率的交互作用; c 料液比和反应温度对提取率的交互作用; d 反应时间和催化剂浓度对提取率的交互作用; e 反应时间和反应温度随提取率的交互作用; f 催化剂浓度和反应温度对提取率的交互作用。

图 6 响应曲面图

Fig.6 The figure of Box-Behnken

表 7 验证试验结果(% , n=3)
Table 7 The result of proof test (% , n=3)

试验号	1	2	3
混合脂肪酸乙酯得率	84.42	83.25	84.52
平均提取率		84.06	
RSD		0.84	
理论得率		85.09	
相对误差		1.20	

4 结 论

本研究以牡丹籽油为原料,采用油脂醇解法,对反应温度、反应时间、醇水比、物料比、催化剂浓度进行单因素以及响应面分析,对乙酯化条件进行优化。牡丹籽油乙酯化最优条为件为料液比 4.3:1,反应时间 50.88 min,催化剂浓度 1.45 mol/L,反应温度 74.78 °C,牡丹籽油乙酯化得率预测值为 85.09%,实际值为 84.06%。

参考文献

[1] Geonseek R, Eun KP, Jeong HJ, *et al.* A new antioxidant monoterpene glycoside from *Paeonia suffruticosa* [J]. Arch Pharm Res, 2001, 24(2): 105–108.

[2] 方晴, 晋晓峰, 高传忠, 等. 不同产地牡丹籽油脂肪酸成分检测[J]. 粮油加工, 2014, (7): 41–43.

Fang Q, Jin XF, Gao CZ, *et al.* Determination of fatty acid composition of peony seed oil from different habitats [J]. Grain Oil Process, 2014, (7): 41–43.

[3] An RB, Kim HC, Lee SH, *et al.* A New monoterpene glycoside and antibacterial monoterpene glycosides from *Paeonia suffruticosa* [J]. Arch Pharm Res, 2006, 29(10): 815–820.

[4] Yen PH, Kiem PV, Nhiem NX, *et al.* A new monoterpene glycoside from the roots of *Paeonia lactiflora* increases the differentiation of osteoblastic MC3T3-E1 cells [J]. Arch Pharm Res, 2007, 30(10): 1179–1185.

[5] 程安玮, 孙金月, 王维婷, 等. 牡丹籽油的研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(3): 79–84.

Cheng AW, Sun JY, Wang WT, *et al.* Research progress of peony seed oil [J]. J Food Sci Technol, 2016, 34(3): 79–84.

[6] 张俊. 油用牡丹种植现状及发展对策研究[J]. 农民致富之友, 2019, (3): 45.

Zhang J. Study on planting status and development countermeasures of oil peony [J]. Friend Rich, 2019, (3): 45.

[7] 李加兴, 陈双平, 黄诚, 等. 湘西野生牡丹籽油脂肪酸组成及体内辅助降血脂作用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 15–16.

Li JX, Chen SP, Huang C, *et al.* Study on fatty acid composition and

assisting for lipid lowering of wild peony seed oil from western Hunan [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(8): 15–16.

[8] Mieke C, Marjan A. Circulating linoleic acid and alpha-linolenic acid and glucose metabolism: the hoorn study [J]. Original Contribution, 2017, 56: 2171–2180.

[9] Bemelmans WJ, Broer J, Feskens EJ, *et al.* Effect of an increased intake of alpha-inolenic acid and group nutritional education on cardiovascular risk factors: the mediterranean alphalinolenic enriched groningen dietary intervention (MARGARIN) study [J]. Am J Clin Nutr, 2002, 75: 221–227.

[10] 樊永康, 项婷, 王薇, 等. 牡丹籽油营养成分及加工工艺研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 196–198.

Fan YK, Xiang T, Wang W, *et al.* Research progress on nutrients and processing technology of peony seed oil [J]. Food Mach, 2018, 34(10): 196–198.

[11] Wendy MW, Alejandro GM. Food lipids. Enzymatic interesterification [M]. USA: Mamel Dekker INC, 2000.

[12] 邹鸿. 生物柴油制备方法概述[J]. 广东化工, 2015, 42(298): 18.

Zou H. Introduction of biodiesel production [J]. Guangdong Chem Ind, 2015, 42(298): 18.

[13] Roberto EA, Mircea V, Adam MB, *et al.* Transesterification of fish oil to produce fatty acid ethyl esters using ultrasonic energy [J]. J Am Oil Chem Soc, 2007, 84: 1045 – 1052.

[14] 徐水祥, 周淡宜, 徐飞鹤, 等. 甲鱼油中多不饱和脂肪酸的提取与纯化研究[J]. 食品科学, 2004, 25(11): 44–46.

Xu SX, Zhou DY, Xu FH, *et al.* Study on extareting and purifacation PUFA form turtle oil [J]. Food Sci, 2004, 25(11): 44–46.

[15] 傅红, 裘爱泳. 鱼油脂肪酸乙酯化工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2004, (5): 27–30.

Fu H, Qiu AY. Study on ethyl esterification of fish oil [J]. J Cere Oils, 2004, (5): 27–30.

[16] Rajneesh K, Anoop D, Shashi KS, *et al.* Production and characterization of ethyl ester from *CrudeJatropha curcas* oil having high free fatty acid content [J]. J Inst Eng, 2015, 96(3): 229–235.

[17] 余瑶盼, 唐年初, 赵晨伟. 石榴籽油脂脂肪酸乙酯化工艺研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(10): 31–33.

Yu YP, Tang NC, Zhao CW. Ethyl esterification of fatty acids of pomegranate seed oil [J]. China Oils Fats, 2017, 42(10): 31–33.

[18] 张蒙娜, 宋恭帅, 彭茜, 等. 响应面法优化精制沙丁鱼油乙酯化工艺[J]. 食品工业科技, 2018, 39(20): 122–127.

Zhang MN, Song GS, Peng X, *et al.* Optimization of ethyl esterification process of refined sardine oil by response surface methodology [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(20): 122–127.

[19] 邵佩霞. 富含多不饱和脂肪酸甘油酯的酶法制备[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

Shao PX. Enzymatic preparation of glycerides rich in polyunsaturated fatty acids [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[20] Gabriela N, Pereira, Jefferson P, *et al.* Enzymatic esterification for the synthesis of butyl stearate and ethyl stearate [J]. Biocatal Agric Biotechnol, 2018, 16: 373–377.

- [21] 李江, 单幸福, 刘发义, 等. 红花籽油醇解乙酯化工艺优化[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 185–188, 195.

Li J, Shan XF, Liu FY, *et al.* Optimization of preparation conditions of fatty acid ethyl esters from safflower seed oil by ethanolysis [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(10): 185–188, 195.

- [22] 刘润哲, 毕艳兰, 杨国龙, 等. 红花籽油醇解法制备脂肪酸乙酯[J]. 中国油脂, 2009, 34(1): 50–53.

Liu RZ, Bi YL, Yang GL, *et al.* Fatty acid ethyl ester was prepared from safflower seed oil by alcoholysis [J]. China Oils Fats, 2009, 34(1): 50–53.

(责任编辑: 武英华)

作者简介

蒋丹丹, 主要研究方向为农产品深加工。

E-mail: 1226807870@qq.com



侯召华, 博士, 主要研究方向为农产品深加工。

E-mail: houzhaozhuo@qlu.edu.cn