

超临界CO₂法脱除油脂制备磷脂工艺优化

霍志伟, 王彬, 刘艳坤, 张森, 赵修华*

东北林业大学化学化工与资源利用学院森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年5月21日; 录用日期: 2025年7月3日; 发布日期: 2025年7月11日

摘要

针对传统超临界CO₂萃取磷脂工艺中丙酮夹带剂残留及直接处理浓缩磷脂导致设备堵塞的问题, 本研究提出一种绿色协同工艺: 首先通过水代法对浓缩磷脂进行预处理, 显著降低物料粘稠度; 随后引入耐高压PP球填料以改善传质效率, 最终采用超临界CO₂脱脂。通过单因素实验与响应面优化, 确定最佳工艺参数为萃取压力30 MPa、温度40℃、时间3 h、填料比例1:1。验证实验表明, 该工艺油脂萃取率达98.51% ± 1.37%, 且全过程无有机溶剂参与。该方法有效解决了设备堵塞与溶剂残留问题, 为高纯度粉末磷脂的绿色工业化生产提供了可靠技术方案。

关键词

超临界CO₂萃取, 粉末磷脂, 水代法, 工业生产

Optimizing Phospholipid Preparation via Supercritical CO₂ Lipid Removal

Zhiwei Huo, Bin Wang, Yankun Liu, Sen Zhang, Xiuhua Zhao*

Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, School of Chemistry, Chemical Engineering and Resource Utilisation, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: May 21st, 2025; accepted: Jul. 3rd, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

In response to the problems of acetone cosolvent residue in the traditional supercritical CO₂ extraction process of phospholipids and equipment blockage resulting from the direct treatment of concentrated phospholipids, this study presents a novel green and synergistic process. Initially, the concentrated phospholipids are pretreated using the water displacement method, which significantly reduces the viscosity of the material. Subsequently, high-pressure-resistant PP ball packing

*通讯作者。

文章引用: 霍志伟, 王彬, 刘艳坤, 张森, 赵修华. 超临界 CO₂ 法脱除油脂制备磷脂工艺优化[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(4): 222-231. DOI: 10.12677/hjct.2025.154021

is introduced to enhance the mass transfer efficiency. Finally, supercritical CO₂ degreasing is implemented. Through single-factor experiments and response surface optimization, the optimal process parameters are ascertained as follows: an extraction pressure of 30 MPa, a temperature of 40°C, a time duration of 3 h, and a packing ratio of 1:1. The verification experiments demonstrate that the oil extraction rate of this process reaches 98.51% ± 1.37%, and no organic solvents are employed throughout the entire process. This approach effectively resolves the issues of equipment blockage and solvent residue, offering a reliable technical solution for the green industrial production of high-purity powdered phospholipids.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide Extraction, Powdered Phospholipid, Water Displacement Method, Industrial Production

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1812年,人们首次在人脑中发现了磷脂的存在,随后在1844年,首次在蛋黄中成功分离出磷脂。1930年,德国发现并开始商业化生产大豆磷脂,被认为是迄今为止最丰富的磷脂种类。自20世纪70年代以来,欧美等国开始广泛使用磷脂类保健品[1]。在美国,磷脂类保健品的总销量仅次于复合维生素和维生素E,位居保健品销售排行榜第三。据数据显示,全球大豆磷脂的年产量约为14万吨,其中美国和西欧占据了60%的市场份额。1961年,日本批准了大豆磷脂的使用,自此以后,日本的磷脂制品公司进入了快速发展阶段,各种大豆磷脂制品层出不穷。今天磷脂已经发展成为人们生活中必不可少的物质,应用于各个行业。

高纯度粉末大豆磷脂[2]是微黄色的粉末状混合磷脂产品,由于大豆磷脂所特有的化学结构该产品具有乳化特性、润湿特性、抗氧化特性等生理活性已经广泛应用于食品[3]、医药[4]、饲料[5]、化妆品[6]等行业。工业生产一般采用溶剂萃取法,但溶剂萃取法会有一定的溶剂残留,影响粉末磷脂的品质。水代法[7]生产植物油的核心在于利用油料中非油成分与油、水之间的亲和力差异以及油水比重不同,从而实现油水的有效分离,与Xingyu Li等人[7]的预处理种子油相比,本方法是一个绿色提取工艺,无溶剂残留。

超临界CO₂萃取技术[8]是以超临界状态下的CO₂为萃取溶剂,利用其高渗透力[9]和强溶解力[10]来萃取分离混合物的过程,是近20年来发展起来的新型提取分离技术,在石油、化工、医药、食品、农产品等加工行业得到广泛应用[11]。在实验过程中萃取温度,萃取时间,萃取压力以及填料比对粉末磷脂的萃取影响比较大,因此考虑了这几种因素对制备粉末磷脂的影响。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

2.1.1. 主要试剂

无水乙醇、氯化镉、硝酸、铋硝酸、碘化钾、正己烷、石油醚、氢氧化钠、酚酞、氢氧化钾、冰醋酸、三氯甲烷、硫代硫酸钠均来自天津市富宇精细化工有限公司;卵磷脂来自上海源叶技术有限公司;浓缩磷脂来自伊春中盟生物科技股份有限公司,以上试剂均为分析纯。

2.1.2. 主要仪器

电子分析天平(Startorius1721)德国赛多利斯集团;超临界 CO₂ 萃取设备(HA121-50-01)江苏高科制药设备有限公司;气相色谱仪(7890A)美国 Agilent 公司;紫外分光光度计(UV-1700)日本岛津公司;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9030)上海一恒科学仪器有限公司;高速离心机(Sorvall ST8R) Sorvall ST8RSigma;超声波仪(KQ2200B)昆山市超声仪器有限公司;恒温搅拌水浴锅(B-491)美国 Agilent 公司;高速万能粉碎机(FW100)天津泰斯特仪器有限公司。

2.2. 方法

2.2.1. 浓缩磷脂前处理

利用水代法对浓缩磷脂进行超临界萃取前的处理。为使后续的超临界萃取更顺利进行。首先是对浓缩磷脂进行水代法萃取油脂,使磷脂的流动性降低,更利于下一步的超临界萃取,采用精制温度 40℃、静置时间 12 h、液料比 1:8 处理浓缩磷脂。水代法萃取完的磷脂流动性比之前降低,但粘稠度增加,影响流体与磷脂的接触面积,导致萃取效率降低,为了提高萃取效率,本实验选择耐高温高压的 pp 球作为填料与磷脂进行混合后,再进行萃取。

2.2.2. 超临界 CO₂ 萃取高纯度粉末磷脂

将浓缩磷脂与 pp 球混合加入萃取釜中,打开 CO₂ 钢瓶和制冷机,待设备和制冷机温度到达设定值,依次开启阀门,CO₂ 流量稳定后开始萃取并计时,萃取结束后在分离釜I和分离釜II处收集萃取物,按式(1)计算萃取物得率。

$$\text{磷脂得率}\% = 1 - \frac{\text{萃取得到油质量}}{\text{原料质量}} \times 100\% \quad (1)$$

2.2.3. 单因素实验设计

以处理后液态浓缩磷脂为原料,在实验过程中萃取温度,萃取时间,萃取压力以及填料比对粉末磷脂的萃取影响比较大,因此考虑了这几种因素对制备粉末磷脂的影响。因此采用单因素试验研究超临界 CO₂ 萃取卵磷脂不同因素对提取率的影响,考察萃取四个因素对提取率的影响,按表 1 进行试验。

(1) 萃取温度对超临界 CO₂ 提取卵磷脂提取率的影响:固定萃取压力为 30 Mpa,萃取时间为 3 h,料液比为 1:1,研究萃取温度(35℃, 40℃, 45℃, 50℃, 55℃)对提取率的影响。

(2) 萃取时间对超临界 CO₂ 提取卵磷脂提取率的影响:固定萃取温度 40℃,萃取压力 30 Mpa 料液比为 1:1,研究萃取时间(2, 2.5, 3, 3.5, 4 h)对提取率的影响。

(3) 萃取压力对超临界 CO₂ 提取卵磷脂提取率的影响:固定萃取温度 40℃,萃取时间为 3 h,料液比为 1:1,研究萃取压力(15, 20, 25, 30, 35 Mpa)对提取率的影响。

(4) 料液比(pp 球:浓缩磷脂)对超临界 CO₂ 提取卵磷脂提取率的影响:固定萃取温度 40℃,萃取时间为 3 h,萃取压力 30 Mpa,研究料液比(3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3)对提取率的影响。

Table 1. Single factor experimental conditions

表 1. 单因素实验条件

实验因素	实验条件				
萃取温度(℃)	35	40	45	50	55
萃取时间(h)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
萃取压力(Mpa)	15	20	25	30	35
料液比	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3

2.2.4. 响应面实验设计

以单因素试验结果为基准,采用表2重点因素,水平,利用 Design-Expert10 软件及其 Box-Benknken 制定试验方案,以卵磷脂提取率为指标,进行响应面优化实验。

Table 2. Factors and levels used in response surface analysis

表 2. 响应面分析的因素水平设计

水平	因素			
	萃取温度 B/°C	萃取压力 C/Mpa	萃取时间 A/min	填料比 C
-1	38	28	2.8	0.8
0	40	30	3.0	1.0
1	42	32	3.2	1.2

3. 结果与讨论

3.1. 单因素试验结果

随着温度的上升,分离组分的挥发度和扩散能力确实会有所增强,但这也导致了 CO₂ 密度的降低,进而削弱了其溶解性能。然而,在高压条件下,CO₂ 的密度较大,此时即便温度上升,其密度变化并不显著,反而能够提升溶质的溶解能力。从图 1(a)可见,在不同萃取温度下,粉末磷脂的萃取率呈现出明显的变化。在某一温度范围内,随着萃取温度的上升,油萃取率也呈现出逐渐上升的趋势。具体来说,当温度达到 40°C 时,油脂的萃取率达到了最高点,即 31%。然而,当萃取温度继续上升时,油萃取率却开始显著下降。这一现象的原因可能在于,在一定的压力下,随着萃取温度的适度升高,油脂在超临界 CO₂ 流体中的溶解度会不断上升,从而使得萃取率增加。但当温度超出某一范围后,超临界 CO₂ 的密度会开始下降,导致浓缩磷脂中的油在超临界 CO₂ 流体中的溶解度降低,进而使得萃取率下降。因此,40°C 被认为是超临界 CO₂ 萃取油脂的适宜温度。

萃取时间越长,萃取率越高,但达到一定程度后,随着萃取时间的延长,萃取率增加放缓。但由图 1(b)可见,在保持其他条件恒定的情况下,随着萃取时间的增长,大豆油脂萃取率显著升高,可能是因为萃取时间的延长,物料接触的超临界 CO₂ 增多,磷脂在超临界 CO₂ 中溶解得更多更充分,所以出油率上升。但当萃取时间高于 3.5 h,出油率的变化趋于平稳,变化差异不大,而且萃取时间的延长会影响粉末磷脂的品质,使粉末磷脂颜色加深、过氧化值增高且萃取时间过长,动力消耗增加,生产成本也会增加。兼顾经济效益,以及产品质量的最佳萃取时间可选择 3.5 h。

由图 1(c)可见,处理后的磷脂流动性降低,但粘度增加,为了使 CO₂ 流体与磷脂充分的接触,更高效地萃取出油脂,可以选择磷脂与填料进行混合来进行萃取。保持其他实验条件一致时,当磷脂与填料高于 1:1 时间出油率基本平缓,这是因为 CO₂ 流体与磷脂的接触达到饱和,而且当填料过多时,一次萃取的浓缩磷脂的质量大大降低,影响经济效益,因此最佳的填料比选择 1:1。

由图 1(d)可见,萃取压力在超临界 CO₂ 萃取技术中扮演着重要角色。在其他条件保持不变的情况下,提升压力能增强 CO₂ 气体的密度,并降低萃取传递的阻力,从而有助于从浓缩磷脂中萃取油脂。同时,随着超临界 CO₂ 密度的增加,浓缩磷脂中的油脂溶解度也会相应提高,进而提升出油率。图中展示了不同萃取压力下浓缩磷脂中的油出油率变化。从图中可以看出,在固定其他条件的情况下,随着萃取压力的提升,浓缩磷脂中的油出油率呈上升趋势。当萃取压力低于 45 MPa 时,萃取率随压力升高而显著上升。特别地,在萃取压力为 30 MPa 时,出油萃取率达到最大值。然而,当继续增加萃取压力时,出油率却开始下降。这可能是因为当压力增加到一定范围后,虽然超临界 CO₂ 的密度进一步增加,但其可压缩

性减小, 导致溶质与溶剂间的传质效率降低。此外, 过高的压力不仅会增加设备的损耗, 还可能提高操作的危险性。因此, 并不是萃取压力越高越好。综合考虑, 我们选择了 30 MPa 作为合适的萃取压力。

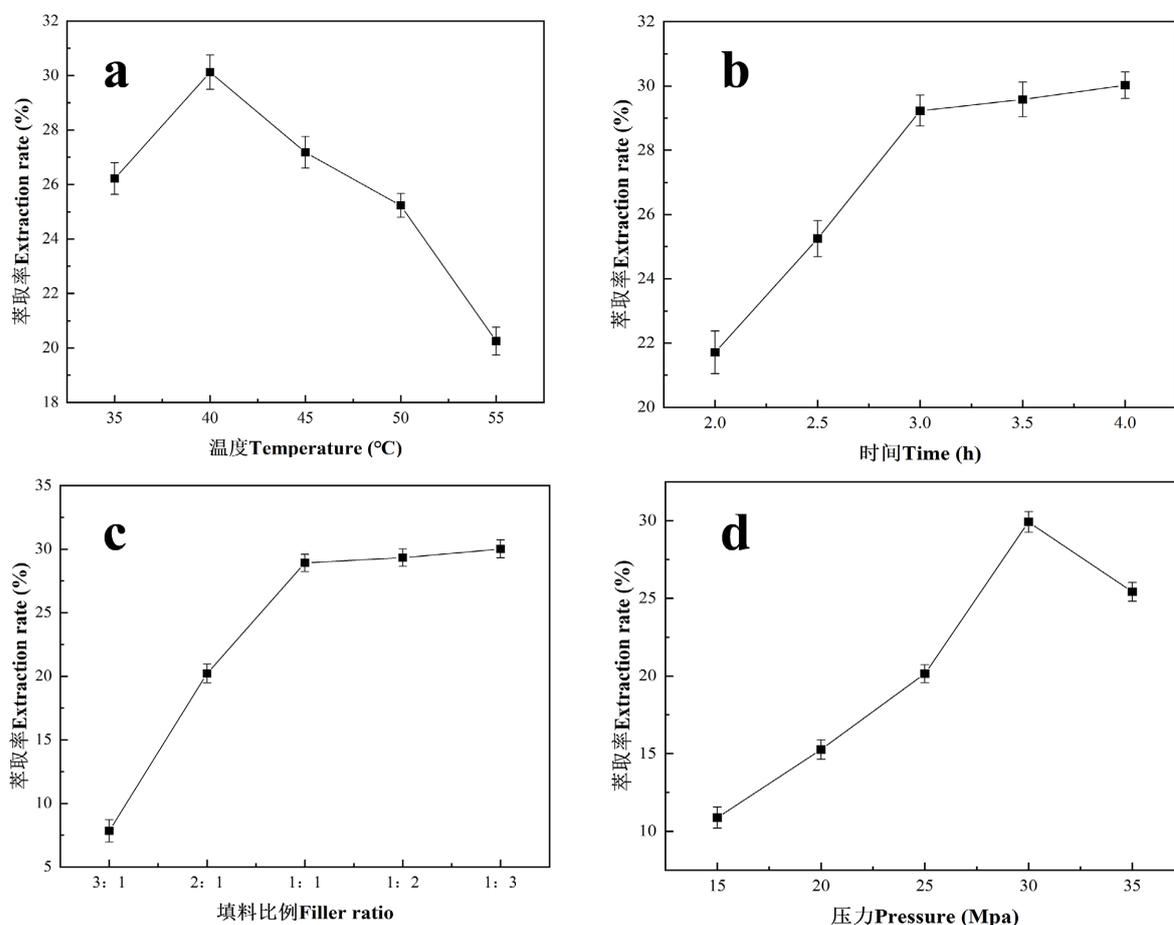


Figure 1. The results of the single-factor experiment
图 1. 单因素实验结果图

3.2. 响应面优化结果

为探求超临界 CO₂ 提取磷脂中油脂的最佳条件, 通过 Disign-Expert13.0.1.0 版本中的中心组合设计法 (CCD) 对提取磷脂中油脂进行响应面实验工艺优化。结合单因素优化结果, 选择最适合萃取粉末磷脂中的油脂的可控变量, 优化了萃取温度 X₁(A)、萃取压力 X₂(B)、萃取时间 X₃(C)、以及浓缩磷脂与填料的比比例 X₄(D), 其它影响因素条件均为单因素优化最优结果并以液态磷脂的出油率为实验的选择条件, 得出 29 次实验结果如表 3。

Table 3. Response surface optimization result Response value (n = 3)
表 3. 响应面优化结果响应值(n = 3)

序号 Std	A: 温度 Temperature (°C)	B: 压力 Pressure (Mpa)	C: 时间 Time (h)	D: 填料比例 Packing ratio	出油率 Oil extraction rate (%)
1	42	32	3.0	1.0	26.37
2	42	30	3.0	1.2	26.23

续表

3	38	30	3.0	0.8	25.86
4	40	30	3.2	0.8	27.61
5	38	30	2.8	1.0	26.21
6	38	30	3.0	1.2	27.53
7	42	30	3.2	1.0	27.31
8	40	28	2.8	1.0	27.68
9	40	28	3.2	1.0	27.31
10	42	28	3.0	1.0	25.33
11	38	30	3.2	1.0	26.77
12	40	30	3	1.0	29.81
13	42	30	2.8	1.0	27.62
14	42	30	3.0	0.8	27.61
15	40	30	3.0	1.0	30.51
16	40	32	2.8	1.0	26.86
17	40	28	3.0	0.8	27.23
18	40	30	3.0	1.0	29.77
19	40	30	2.8	1.2	27.89
20	40	30	2.8	0.8	28.19
21	40	32	3.2	1.0	27.17
22	40	30	3.0	1.0	29.87
23	40	32	3.0	1.2	27.56
24	38	32	3.0	1.0	26.51
25	38	28	3.0	1.0	26.34
26	40	30	3.0	1.0	30.21
27	40	28	3.0	1.2	27.66
28	40	32	3.0	0.8	26.65
29	40	30	3.2	1.2	28.68

进一步通过 Disign-Expert13.0.1.0 版本对超临界 CO₂ 提取粉末磷脂中萃取温度 X₁(A)、萃取压力 X₂(B)、萃取时间 X₃(C)、以及浓缩磷脂与填料的比例 X₄(D) 四个因素影响结果进行方差分析, 结果如表 4 所示。

Table 4. ANOVA for quadratic model

表 4. 二次模拟的方差分析

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	48.05	14	3.43	19.24	<0.0001
A-Temperature	0.1302	1	0.1302	0.7297	0.4074
B-Pressure	0.0154	1	0.0154	0.0864	0.7732
C-Time	0.0133	1	0.0133	0.0747	0.7886
D-Packing ratio	0.48	1	0.48	2.69	0.1232
AB	0.1892	1	0.1892	1.06	0.3206

续表

AC	0.1892	1	0.1892	1.06	0.3206
AD	2.33	1	2.33	13.03	0.0028
BC	0.1156	1	0.1156	0.6479	0.4343
BD	0.0576	1	0.0576	0.3228	0.5789
CD	0.4692	1	0.4692	2.63	0.1272
A ²	29.89	1	29.89	167.5	<0.0001
B ²	20.42	1	20.42	114.41	<0.0001
C ²	5.8	1	5.8	32.49	<0.0001
D ²	6.75	1	6.75	37.85	<0.0001
Residual	2.5	14	0.1784		
Lack of Fit	2.09	10	0.2094	2.07	0.2517
Pure Error	0.4043	4	0.1011		
Cor Total	50.55	28			

Table 5. Reliability analysis of response surface fitting regression equation Fit Statistics
表 5. 响应面拟合回归方程可信度分析

Index mark	Model
Std. Dev.	0.4224
Mean	27.6
C.V. %	1.53
R ²	0.9506
Adjusted R ²	0.9012
Predicted R ²	0.7489
Adeq Precision	14.0823

表 5 分析结果表明 $F = 19.24$, $p < 0.0001$ 说明从整体角度看, 超临界 CO_2 萃取粉末磷脂的实验模型结果显著。失拟项中 $F = 2.07$, $p = 0.2517$, 表明失拟项拟合与纯误差不显著。通过两种数据得出实验结果与理论模型之间有很高的拟合度, 能够通过二次项拟合方程预测油脂提取率提取结果。通过 F 值可得提取影响因素主次顺序为: 浓缩磷脂与填料的比例(D) > 萃取温度(A) > 萃取压力(B) > 萃取时间(C)。该模型的 $R^2 = 0.9506$, 调整 $R^2 = 0.9012$, 表明响应值变化的 95.06% 能用此模型解释, 模型拟合度极高; 变异系数为 1.53%, 置信度高。综上所述, 该模型能够充分预测萃取温度(A)、萃取压力(B)、萃取时间(C)及填料比例(D)等四个因素相互交替对萃取磷脂中油脂出油率的影响之间的内在关系。

如图 2(a)所示, 在特定萃取压力下, 油脂的提取率随着萃取温度的增加而增加, 而后出现平缓的趋势。但相比较萃取温度, 提取率随着萃取压力变化没有很大明显变化, 这表明萃取温度和萃取压力存在的条件下, 萃取温度对浓缩磷脂的油的提取率增加起到主要影响作用。但总体来看, 在浓度与压力交互作用下, 都能够促进提高油的提取率。

如图 2(b)所示, 在特定萃取时间下, 油脂的提取率随着萃取温度的增加而增加, 而后出现平缓的趋势。但相比较萃取温度, 提取率随着萃取时间变化没有很大明显变化, 这表明萃取温度和萃取压力存在的条件下, 萃取温度对浓缩磷脂的油的提取率增加起到主要影响作用。但总体来看在浓度与压力交互作用下, 都能够促进提高油的提取率。

如图 2(c)所示, 在特定萃取温度下, 油脂的提取率随着填料比例的增大而增加, 而后出现平缓的趋

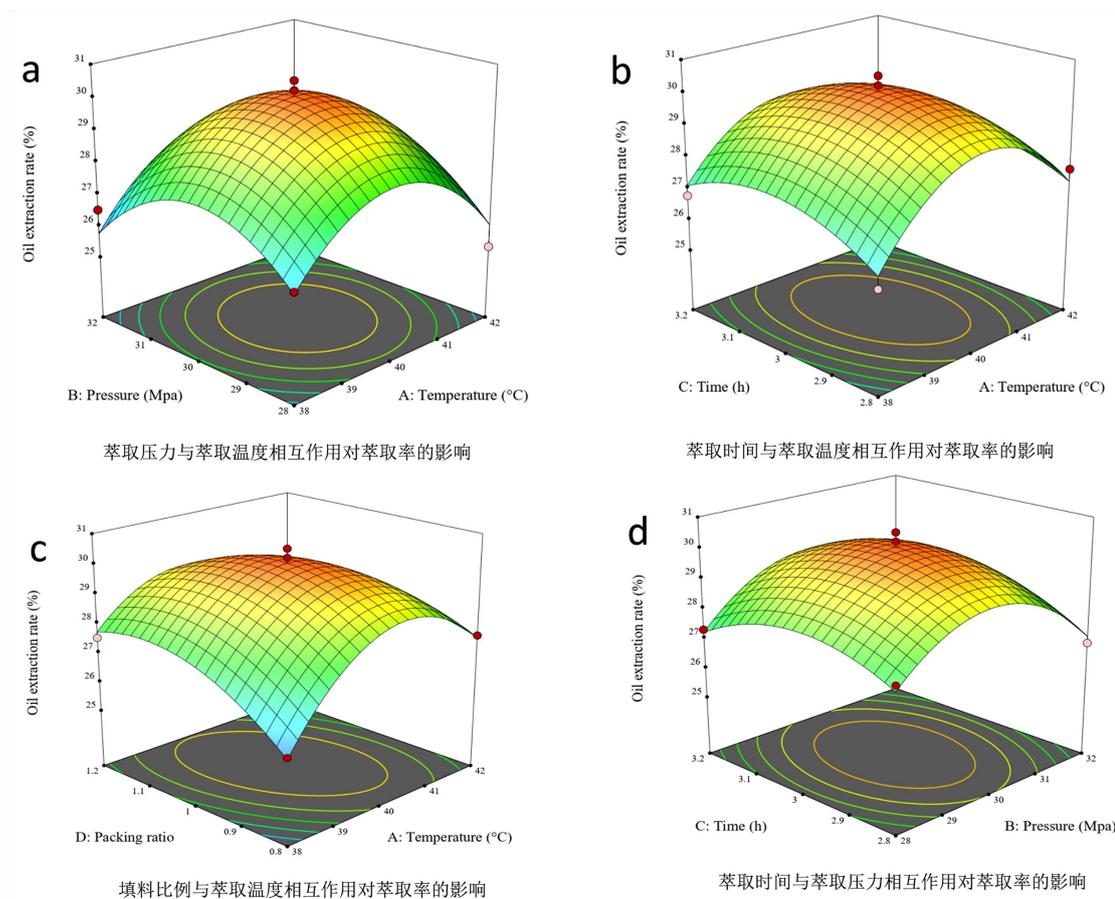
势。但相比较填料比例，提取率随着萃取温度变化没有很大明显变化，这表明萃取温度和填料比例存在的条件下，填料比例对浓缩磷脂的油的提取率增加起到主要影响作用。但总体来看在萃取温度与填料比例交互作用下，都能够促进提高油的提取率。

如图 2(d)所示，在特定萃取时间下，油脂的提取率随着萃取压力增大而增加，而后出现平缓的趋势。但相比较萃取压力，提取率随着萃取时间变化没有很大明显变化，这表明萃取温度和填料比例存在的条件下，萃取压力对浓缩磷脂的油的提取率增加起到主要影响作用。但总体来看在萃取时间与萃取压力交互作用下，都能够促进提高油的提取率。

如图 2(e)所示，在特定萃取压力下，油脂的提取率随着填料比例的增大而增加，而后出现平缓的趋势。但相比较填料比例，提取率随着萃取压力变化没有很大明显变化，这表明萃取温度和填料比例存在的条件下，填料比例对浓缩磷脂的油的提取率增加起到主要影响作用。但总体来看在萃取压力与填料比例交互作用下，都能够促进提高油的提取率。

如图 2(f)所示，在特定萃取时间下，油脂的提取率随着填料比例的增大而增加，而后出现平缓的趋势。但相比较填料比例，提取率随着萃取时间变化没有很大明显变化，这表明萃取温度和填料比例存在的条件下，填料比例对浓缩磷脂的油的提取率增加起到主要影响作用。但总体来看在萃取压力与填料比例交互作用下，都能够提高油的提取率。

响应面优化结果揭示温度-填料比协同效应是提升萃取效率的主导机制，其本质在于填料(PP球)通过构建微传质通道破解磷脂高粘度壁垒，而 40℃的优化温度则显著降低界面能垒，两者协同使有效扩散系数提升；压力与时间表现为辅助性参数，填料的存在可将萃取周期缩短，并且能达到最大的出油率。



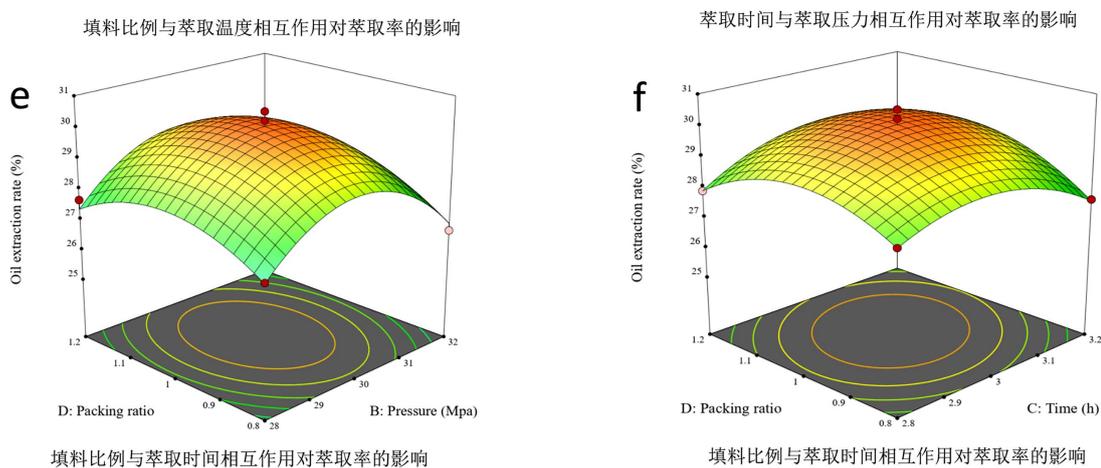


Figure 2. 3D response surface plots (a)~(f)
图 2. 和三维响应面图(a)~(f)

4. 结论

本研究针对超临界 CO₂ 提取粉末磷脂工艺开展系统性优化研究。通过筛选确定填料比例、萃取时间、萃取压力及萃取温度四个关键工艺参数，采用 Design-Expert 10 软件平台的中心组合设计(CCD)构建四因素响应面模型，系统分析各参数对提取效率的作用规律。实验结果表明，各因素影响显著性顺序为：浓缩磷脂与填料比例 > 萃取温度 > 萃取压力 > 萃取时间。

基于响应面交互作用解析及工艺参数优化，确定最优提取条件为：萃取压力 30 MPa、浓缩磷脂与填料比例 1:1、萃取温度 40℃、萃取时间 3 h。经三次重复实验验证，实际提取得率平均值为 98.51% ± 1.37%，与模型预测值吻合度良好。该研究建立的工艺优化模型具有较高可靠性，为超临界 CO₂ 萃取技术在磷脂类活性成分工业化生产中的参数调控提供了理论依据和实践参考。

基金项目

中央财政林草科技推广示范项目(黑[2024]TG08 号)。

参考文献

- [1] 李国辉, 钟其顶, 王道兵, 等. HPLC 法测定大豆磷脂及其保健品中 PC、PI、PE [J]. 食品研究与开发, 2015, 36(6): 67-70.
- [2] Sun, L.B., Li, J.W., Wu, D.Y., Wang, H. and Yu, D.Y. (2025) Enzymatic Preparation of Structured Phospholipids from Soybean Phosphatidylcholine and Investigation of Their Phase Behavior. *Food Chemistry*, **489**, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144969>
- [3] 周洋, 管军军, 路新开, 等. 基于运动食品的蛋白-磷脂聚集体及其乳液的液滴特性[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 103-113.
- [4] 李云亮, 栾艺, 严子华, 等. 复合抑菌型卵磷脂脂质体缓解猫口腔异味效果研究[J]. 中国动物保健, 2024, 26(12): 172-175.
- [5] 李彦先, 胡海滨, 张健, 等. 饲料中鸡肉粉替代鱼粉、磷脂油替代鱼油对大成阶段线鳢生长、饲料利用和体组成的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(6): 1335-1344.
- [6] 郝留成, 徐振山. 天然磷脂在化妆品中的应用[J]. 粮油加工, 2008(10): 87-89.
- [7] Evangelista, R.L., Isbell, T.A., Todd, J. and Cermak, S.C. (2022) Euphorbia Lagascae Seed Oil Obtained by Pre-Pressing and Solvent Extraction. *Industrial Crops and Products*, **180**, Article 114799. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114799>

-
- [8] Zheng, W., Liu, Z., Ding, R., Dai, Y., Li, X., Ruan, X., *et al.* (2022) Constructing Continuous and Fast Transport Pathway by Highly Permeable Polymer Electrospun Fibers in Composite Membrane to Improve CO₂ Capture. *Separation and Purification Technology*, **285**, Article 120332. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120332>
- [9] Díaz-Suárez, P., Rosales-Quintero, A., Fernandez-Lafuente, R., Pola-Sánchez, E., Hernández-Cruz, M.C., Ovando-Chacón, S.L., *et al.* (2021) Aqueous Enzymatic Extraction of Ricinus Communis Seeds Oil Using Viscozyme L. *Industrial Crops and Products*, **170**, Article 113811. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113811>
- [10] Lyu, S., Chen, X., Shah, S.M. and Wu, X. (2019) Experimental Study of Influence of Natural Surfactant Soybean Phospholipid on Wettability of High-Rank Coal. *Fuel*, **239**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.005>
- [11] 郑晨明, 徐庆松, 李春胜, 等. 超临界 CO₂ 流体萃取技术应用综述[J]. 低温与特气, 2024, 42(1): 12-16+23.