

南极磷虾油不同极性脂质的提取工艺优化

罗静茹, 杨云云, 王太伟, 谢亮亮, 朱西平, 朱秀灵,

张瑞涛, 张 恒, 郭玉宝, 谢 丹

(安徽工程大学 生物与食品工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:旨在为南极磷虾油的开发利用提供参考, 以南极磷虾粉为试验材料, 首先采用超临界 CO₂ 萃取中性脂质, 再以乙醇提取极性脂质, 通过单因素试验与响应面试验优化南极磷虾油不同极性脂质的提取工艺, 并对两种脂质的组分进行测定。结果表明: 超临界 CO₂ 萃取中性脂质的最佳工艺条件为萃取压力 45 MPa、萃取温度 45 °C、萃取时间 1.75 h, 在此条件下中性脂质中甘油三酯含量为 73.68%, 虾青素、生育酚和维生素 A 含量分别为 74.91、44.96、448.31 mg/kg, 脂质提取率为 40.81%; 乙醇提取极性脂质的最佳工艺条件为料液比 1:3、提取温度 57 °C、提取时间 3 h, 在此条件下极性脂质中磷脂含量为 80.19%, EPA 和 DHA 含量分别为 20.74% 和 11.43%, 脂质提取率为 58.37%。综上, 采用超临界 CO₂ 萃取和乙醇提取相结合的方法可有效分离南极磷虾油中性脂质与极性脂质。

关键词: 南极磷虾油; 脂质提取; 中性脂质; 极性脂质; 响应面法

中图分类号: TS224.4; TS222+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2025)05-0043-06

Optimization of extraction process of different polar lipids in Antarctic krill oil

LUO Jingru, YANG Yunyun, WANG Taiwei, XIE Liangliang, ZHU Xiping, ZHU Xiuling, ZHANG Ruitao, ZHANG Heng, GUO Yubao, XIE Dan

(College of Biological and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: In order to provide a reference for the development and utilization of Antarctic krill oil, with Antarctic krill powder as material, the neutral lipids were extracted by supercritical CO₂ and then polar lipids were extracted by ethanol. The extraction process of different polar lipids in Antarctic krill oil were optimized by single factor experiment and response surface methodology, and the components of the two lipids were determined. The results showed that the optimal extraction conditions of neutral lipids by the combination of supercritical CO₂ were extraction pressure 45 MPa, extraction temperature 45 °C and extraction time 1.75 h. Under these conditions, the content of triglyceride in neutral lipids was 73.68%, the contents of astaxanthin, tocopherol and vitamin A were 74.91, 44.96 mg/kg and 448.31 mg/kg, respectively, and the extraction rate of lipids was 40.81%. The optimal extraction conditions of polar lipids by ethanol were solid-liquid ratio 1:3, extraction temperature 57 °C and extraction time 3 h. Under these conditions, the content of phospholipid in polar lipids was 80.19%, the contents of EPA and DHA were

20.74% and 11.43%, respectively, and the extraction rate of lipids was 58.37%. In conclusion, the combination of supercritical CO₂ extraction and ethanol extraction can effectively separate neutral lipids and polar lipids in Antarctic krill oil.

Key words: Antarctic krill oil; lipid extraction; neutral lipids; polar lipids; response surface methodology

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(32102046); 海南省食品营养与功能食品重点实验室开放课题(KF2022010); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202210363241, S202110363246)

作者简介: 罗静茹(1998), 女, 在读硕士, 研究方向为粮油工程(E-mail) 17335082356@163.com。

通信作者: 谢 丹, 副教授, 博士(E-mail) xdwawj@163.com; 郭玉宝, 教授, 博士(E-mail) gyb3465@163.com。

南极磷虾含油量较高,南极磷虾油中富含 $n-3$ 多不饱和脂肪酸($n-3$ PUFA), 有较高的营养价值^[1]。近年来,南极磷虾油被认为是一种极具潜力的海洋鱼油替代资源,受到学术界及产业界广泛关注。南极磷虾油中的 $n-3$ PUFA 主要存在于极性脂质(如磷脂)中,而鱼油中的 $n-3$ PUFA 主要存在于中性脂质(如甘油三酯)中^[2],这种结构差异使得南极磷虾油比鱼油更容易被人体吸收,有着较高的生物利用度。此外,虽然南极磷虾油中性脂质中 $n-3$ PUFA 含量不高,但其含有一些微量功能性成分,如虾青素、生育酚、维生素 A 等^[3]。这些功能性成分对人体健康具有诸多益处,如预防心脑血管疾病、促进生长发育、治疗代谢综合征和非酒精性脂肪肝等^[4]。

南极磷虾油的氧化稳定性取决于其中的脂质组成,一般来讲,磷脂较稳定^[5],而在同等储藏条件下,虾青素、维生素 A 和生育酚等微量成分最先被氧化降解^[6],这会大大降低南极磷虾油的营养价值。若能将南极磷虾油中的中性脂质与极性脂质分别提取并储存,则不仅可以提高产物的功能性脂质成分,还能将其应用于多种领域,扩大南极磷虾油产品的应用范围。

在油脂提取方法中:超临界 CO_2 萃取法具有安全、环保等特点,并且不会破坏油脂成分,所得产品品质较高^[7],此外超临界 CO_2 对磷脂的溶解性极低^[8];有机溶剂提取法具有成本低、操作简单、易于产业化等优点。在南极磷虾油的提取中,与其他有机溶剂相比,乙醇能获得更高的油脂得率和磷脂含量^[3]。采用超临界 CO_2 萃取与乙醇提取相结合的方法可以最大程度地分离南极磷虾油中不同极性的脂质成分。因此,本文以南极磷虾粉为试验材料,采用超临界 CO_2 萃取其中的中性脂质,然后以乙醇提取粕中的极性脂质,通过单因素试验与响应面试验优化南极磷虾油不同极性脂质提取工艺,并对所得两种脂质的组分进行分析,以期南极磷虾油的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

南极磷虾粉,山东农场生物技术有限公司;无水乙醇、丙酮、二氯甲烷、氢氧化钠、甲醇、无水硫酸钠、氯仿、正庚烷、无水乙醚、甲酸均为分析纯,乙腈、二氯甲烷、甲醇均为色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;甘油三酯标准品、虾青素标准品、维生素 A 标准

品,阿拉丁生化科技股份有限公司;生育酚混合标准品、磷脂标准品,上海默克公司。

1.1.2 仪器与设备

SFE220-50-0.5 型超临界 CO_2 萃取设备,南通仪创实验仪器有限公司;2695 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;Trace GC Ultra 气相色谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;Iatroscan MK-7S 棒状薄层色谱仪,日本雅特隆公司。

1.2 试验方法

1.2.1 超临界 CO_2 萃取南极磷虾油中性脂质

将南极磷虾粉于 60°C 烘箱干燥至恒重后,放入超临界 CO_2 萃取设备中,在一定温度和压力下萃取一定时间,萃取结束后减压分离,得到南极磷虾油中性脂质。将萃取得到的南极磷虾粕于 60°C 烘干 3 h 备用,作为下一步提取的原料。

1.2.2 乙醇提取南极磷虾油极性脂质

称取 200 g 1.2.1 得到的南极磷虾粕,按一定料液比加入乙醇,在一定温度下提取一定时间后,使用真空泵抽滤,得到提取液,滤渣继续用 20 mL 乙醇冲洗抽滤,合并滤液。采用真空旋转蒸发器于 50°C 、0.1 MPa 下脱除滤液中乙醇,得到南极磷虾油极性脂质。

1.2.3 甘油三酯含量和磷脂含量的测定

参考文献[9]采用棒状薄层色谱仪检测脂质中甘油三酯含量和磷脂含量。将脂质样品溶解于三氯甲烷溶液中,将样品溶液点在各色谱棒的零点位置,把点样好的色谱棒架竖直放在装有正庚烷、无水乙醚、甲酸混合溶液的展开槽中进行展开。展开结束后将色谱棒架放入棒状薄层色谱仪中进行扫描,得各个样品脂质组成的棒状薄层色谱图。依据以甘油三酯和磷脂标准品绘制的标准曲线计算甘油三酯和磷脂含量。

1.2.4 脂质提取率的计算

参考文献[10]采用 Folch 提取法提取南极磷虾粉中的总脂。脂质提取率为提取得到的脂质与南极磷虾粉中总脂质量的比。

1.2.5 微量成分含量的测定

参考谢丹^[10]的方法,采用高效液相色谱仪测定南极磷虾油不同极性脂质中虾青素、维生素 A、生育酚含量。

1.2.6 脂肪酸组成与含量的测定

参考谢丹^[10]的方法,采用气相色谱仪测定南极磷虾油不同极性脂质的脂肪酸组成与含量。

1.2.7 数据统计与分析

所有试验均设置 3 组平行,采用 Design-Expert

13 和 SPSS 软件进行数据分析处理,采用 Duncan 多重比较进行显著性分析,显著性检验水平 $p < 0.05$ 表示差异显著,采用 Origin 软件绘制图表。

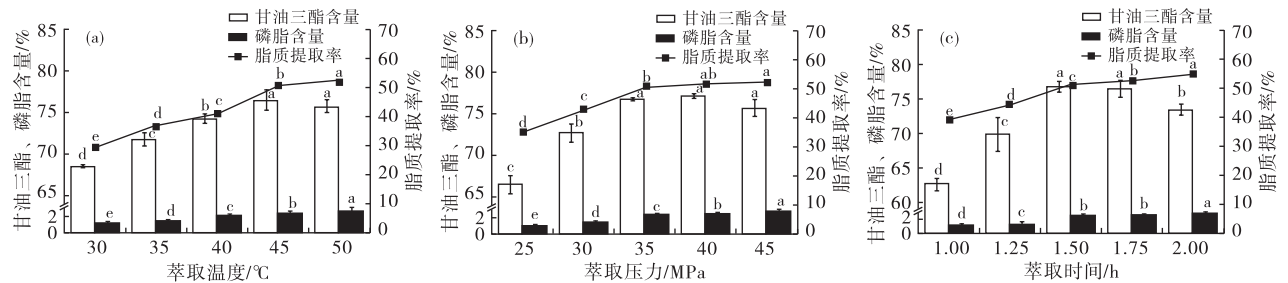
2 结果与讨论

2.1 超临界 CO₂ 萃取南极磷虾油中性脂质的工艺优化

2.1.1 单因素试验

以甘油三酯含量为主要评价指标,结合脂质

提取率和磷脂含量,在萃取压力 35 MPa、萃取时间 1.5 h 下考察萃取温度对南极磷虾油中性脂质提取的影响,在萃取温度 45 ℃、萃取时间 1.5 h 下考察萃取压力对南极磷虾油中性脂质提取的影响,在萃取温度 45 ℃、萃取压力 40 MPa 下考察萃取时间对南极磷虾油中性脂质提取的影响,结果如图 1 所示。



注:不同字母表示组内差异显著 ($p < 0.05$)

Note: Different letters indicate significant differences within the group ($p < 0.05$)

图 1 各因素对超临界 CO₂ 萃取南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量、磷脂含量以及脂质提取率的影响

Fig. 1 Effect of factors on triglyceride content, phospholipid content and lipid extraction rate of neutral lipids in Antarctic krill oil by supercritical CO₂ extraction

由图 1a 可以看出,南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量随着萃取温度的升高而增加,在 45 ℃ 时达到最高,之后随着萃取温度升高,甘油三酯含量下降。这可能是由于一方面萃取温度的升高可增大溶剂的扩散系数,使甘油三酯在超临界 CO₂ 中的溶解度上升,有利于萃取;另一方面,过高的萃取温度下,超临界 CO₂ 流体密度会显著降低,这会降低 CO₂ 流体的溶剂化效应,最终导致甘油三酯在 CO₂ 流体中的溶解度下降,不利于萃取^[11]。因此,综合脂质提取率与磷脂含量,选择最佳萃取温度为 45 ℃。

由图 1b 可以看出,当萃取压力小于 40 MPa 时,南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量随萃取压力增加而增加,萃取压力为 40 MPa 时,甘油三酯含量最高,继续增大萃取压力,甘油三酯含量略有下降。这是因为随着萃取压力增大,CO₂ 流体对溶质溶解能力增加,甘油三酯含量增加,但继续增加萃取压力,高压下流体可压缩性小,溶解度受到限制,萃取的选择性降低,导致甘油三酯含量下降^[12]。因此,综合脂质提取率与磷脂含量,选择最佳萃取压力为 40 MPa。

由图 1c 可以看出,随着萃取时间的延长,南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量、磷脂含量及脂质提取率持续增加,但当萃取时间超过 1.75 h 后甘油三酯含量下降,这是由于随着萃取时间的延长,除甘油三酯以外其他脂质成分在超临界 CO₂ 中的溶解率增大,从而导致甘油三酯的含量相对下降。由于萃取

时间 1.50 h 与 1.75 h 时所提取的中性脂质中甘油三酯含量无显著差异 ($p > 0.05$),同时考虑到萃取时间过长会导致成本增加以及效率下降,因此综合脂质提取率与磷脂含量,选择最佳萃取时间为 1.50 h。

2.1.2 响应面试验

在单因素试验的基础上,以南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量 (Y) 为响应值,萃取时间 (A)、萃取温度 (B)、萃取压力 (C) 为因素,使用 Design - Expert 13 软件进行三因素三水平 17 个试验点的响应面试验,响应面试验因素与水平见表 1,响应面试验设计与结果见表 2。

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface methodology

水平	A 萃取时间/h	B 萃取温度/℃	C 萃取压力/MPa
-1	1.25	40	35
0	1.50	45	40
1	1.75	50	45

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface methodology

试验号	A	B	C	Y/%
1	0	0	0	76.86
2	0	0	0	75.66
3	-1	0	-1	68.79
4	0	0	0	76.01
5	0	0	0	76.12
6	0	-1	1	73.95
7	1	1	0	74.56

续表 2

试验号	A	B	C	Y/%
8	0	1	1	73.69
9	-1	-1	0	67.06
10	-1	1	0	68.86
11	0	1	-1	73.89
12	0	0	0	75.74
13	-1	0	1	70.29
14	1	-1	0	73.26
15	0	-1	-1	73.24
16	1	0	-1	75.66
17	1	0	1	74.62

使用 Design - Expert 13 软件对表 2 试验结果进行多元回归拟合,得超临界 CO₂ 萃取南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量与各因素的二次多项式回归模型为 $Y = 76.08 + 2.89A + 0.44B + 0.12C - 0.13AB - 0.64AC - 0.23BC - 3.25A^2 - 1.90B^2 - 0.49C^2$ 。对回归模型进行方差分析,结果见表 3。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	135.21	9	15.02	55.75	<0.000 1	**
A	66.70	1	66.70	247.51	<0.000 1	**
B	1.52	1	1.52	5.65	0.049 1	*
C	0.12	1	0.12	0.44	0.530 0	
AB	0.06	1	0.06	0.23	0.644 8	
AC	1.61	1	1.61	5.98	0.044 3	*
BC	0.21	1	0.21	0.77	0.409 8	
A ²	44.41	1	44.41	164.80	<0.000 1	**
B ²	15.12	1	15.12	56.12	0.000 1	**
C ²	1.01	1	1.01	3.76	0.093 8	
残差	1.89	7	0.27			
失拟项	0.98	3	0.33	1.44	0.356 0	
纯误差	0.91	4	0.23			
总和	137.10	16				

注: * 为差异显著 ($p < 0.05$); ** 为差异极显著 ($p < 0.01$)。下同

Note: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$. The same below

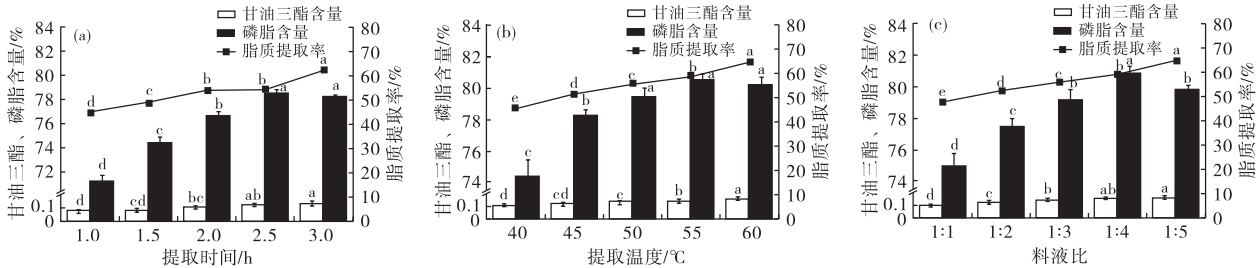


图 2 各因素对乙醇提取南极磷虾油极性脂质中磷脂含量、甘油三酯含量以及脂质提取率的影响

Fig. 2 Effect of factors of ethanol extraction on phospholipid content, triglyceride content and lipid extraction rate of polar lipids in Antarctic krill oil

由图 2b 可知,南极磷虾油极性脂质中磷脂含量随着提取温度的升高而增加,这可能是由于温度升

由表 3 可知,该回归模型极显著 ($p < 0.000 1$),模型的决定系数 (R^2) 为 0.986 2,校正决定系数 (R^2_{Adj}) 为 0.968 5,表明该模型可以解释 96.85% 响应值的变化,能够较好地反映真实的试验值。失拟项 p 值为 0.356 0,不显著,表明模型与实际情况拟合良好。模型一次项 A ,二次项 A^2 、 B^2 影响极显著 ($p < 0.01$),一次项 B 和交互项 AC 影响显著 ($p < 0.05$)。根据 F 值大小可知,各因素对甘油三酯含量影响程度的大小依次是萃取时间 (A) > 萃取温度 (B) > 萃取压力 (C)。

使用 Design - Expert 13 软件,采用 Box - Behnken 对各因素进行优化,得到超临界 CO₂ 萃取南极磷虾油中性脂质的最佳工艺条件为萃取时间 1.75 h、萃取温度 45 °C、萃取压力 45 MPa。在最佳条件下预测甘油三酯含量为 74.71%。采用上述优化条件进行 3 次验证试验,南极磷虾油中性脂质中甘油三酯含量实测值为 $(73.68 \pm 0.71)\%$,与预测值基本吻合,表明该模型可用于超临界 CO₂ 萃取南极磷虾油中性脂质的工艺优化,此时脂质提取率为 $(40.81 \pm 0.56)\%$ 。

2.2 乙醇提取南极磷虾油极性脂质的工艺优化

2.2.1 单因素试验

以磷脂含量为主要评价指标,结合脂质提取率和甘油三酯含量,基础条件为料液比 1:3、萃取时间 2.5 h、萃取温度 50 °C (考察某一因素时,其他因素条件不变),探究乙醇提取条件对南极磷虾油极性脂质提取的影响,结果如图 2 所示。

由图 2a 可知,南极磷虾油极性脂质中磷脂含量随提取时间的延长而增加,在提取时间超过 2.5 h 后,磷脂含量略有降低但与提取时间 3 h 时磷脂含量无显著差异 ($p > 0.05$),由于提取时间直接关系到生产成本,因此综合脂质提取率与甘油三酯含量,选择最佳提取时间为 2.5 h。

高使得分子的热运动加剧,溶剂和油的黏度下降,二者的扩散速率加快,此外,乙醇对极性脂质的溶解能

力也随温度升高而增大^[13],从而磷脂含量增加。当提取温度超过 50 ℃ 后,磷脂含量变化趋于平缓。因此,综合脂质提取率与甘油三酯含量,选择最佳提取温度为 50 ℃。

由图 2c 可知,南极磷虾油极性脂质中磷脂含量随着料液比的减小而增加,在料液比为 1:4 时磷脂含量达到最高,且与料液比 1:3 和 1:5 时有显著差异($p < 0.05$)。因此,综合脂质提取率与甘油三酯含量,选择最佳料液比为 1:4。

2.2.2 响应面试验

在单因素试验的基础上,以磷脂含量(Y)为响应值,提取时间(A)、提取温度(B)、料液比(C)为因素,使用 Design - Expert 13 软件进行三因素三水平 17 个试验点的响应面试验,响应面试验因素与水平见表 4,响应面试验设计与结果见表 4。

表 4 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface methodology

水平	A 提取时间/h	B 提取温度/℃	C 料液比
-1	2.0	50	1:3
0	2.5	55	1:4
1	3.0	60	1:5

表 5 响应面试验设计与结果

Table 5 Design and results of response surface methodology

试验号	A	B	C	Y/%
1	0	0	0	81.3
2	0	0	0	80.4
3	-1	0	-1	77.8
4	0	0	0	79.4
5	0	0	0	81.8
6	0	-1	1	77.7
7	1	1	0	78.6
8	0	1	1	77.9
9	-1	-1	0	75.9
10	-1	1	0	77.2
11	0	1	-1	80.3
12	0	0	0	80.8
13	-1	0	1	78.4
14	1	-1	0	76.5
15	0	-1	-1	76.5
16	1	0	-1	79.8
17	1	0	1	79.8

使用 Design - Expert 13 软件对表 5 试验结果进行多元回归拟合,得乙醇提取南极磷虾油极性脂质中磷脂含量与各因素的二次多项式回归模型为 $Y = 80.74 + 0.68A + 0.93B - 0.08C + 0.20AB - 0.15AC - 0.90BC - 1.42A^2 - 2.27B^2 - 0.37C^2$ 。对回归模型

进行方差分析,结果见表 6。

表 6 回归模型方差分析

Table 6 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	47.14	9	5.24	9.06	0.004 1	**
A	3.66	1	3.66	6.33	0.040 1	*
B	6.85	1	6.85	11.84	0.010 8	*
C	0.05	1	0.05	0.08	0.784 9	
AB	0.16	1	0.16	0.28	0.615 0	
AC	0.09	1	0.09	0.15	0.709 5	
BC	3.24	1	3.24	5.61	0.049 8	*
A ²	8.51	1	8.51	14.71	0.006 4	**
B ²	21.67	1	21.67	37.50	0.000 5	**
C ²	0.58	1	0.58	1.00	0.349 7	
残差	4.05	7	0.58			
失拟项	0.69	3	0.23	0.28	0.840 7	
纯误差	3.35	4	0.84			
总和	51.18	16				

由表 6 可知,该回归模型极显著($p < 0.01$),模型的 R^2 为 0.921 0, R^2_{Adj} 为 0.819 3,表明该模型可以解释 81.93% 响应值的变化,能够较好地反映真实的试验值。失拟项 p 值为 0.840 7,不显著,表明模型与实际情况拟合很好。模型一次项 A 、 B ,交互项 BC 影响显著($p < 0.05$);二次项 A^2 、 B^2 影响极显著($p < 0.01$)。根据 F 值大小可知,各因素对磷脂含量影响程度的大小依次是提取温度(B) > 提取时间(A) > 料液比(C)。

使用 Design - Expert 13 软件,采用 Box - Behnken 对各因素进行优化,得到乙醇提取南极磷虾油极性脂质的最佳工艺条件为提取时间 3 h、提取温度 57 ℃、料液比 1:3。在最佳条件下预测磷脂含量为 80.31%。采用上述优化条件进行 3 次验证试验,南极磷虾油极性脂质中磷脂含量实测值为 $(80.19 \pm 0.68)\%$,与预测值基本吻合,表明该模型可用于乙醇提取南极磷虾油极性脂质的工艺优化,此时脂质提取率为 $(58.37 \pm 0.69)\%$ 。

2.3 南极磷虾油不同极性脂质的组分

对最佳工艺条件下提取得到的南极磷虾油中性脂质和极性脂质组分进行测定,结果如表 7 所示。

由表 7 可知,采用超临界 CO_2 萃取的南极磷虾油中性脂质中富含甘油三酯的同时还含有丰富的虾青素、维生素 A 和生育酚,这些有益脂质组分增加了南极磷虾油中性脂质的功能性。采用乙醇提取的南极磷虾油极性脂质中富含磷脂,微量成分含量较低,但其含有丰富的多不饱和脂肪酸,EPA($C_{20:5n-3}$)

和 DHA (C22:6n-3) 含量分别高达 20.74% 和 11.43%, 是一种具有保健作用的潜在油脂资源。

表 7 南极磷虾油不同极性脂质的组分
Table 7 Components of different polar lipids in Antarctic krill oil

项目	中性脂质	极性脂质
磷脂/%	1.72 ± 0.02	80.19 ± 0.81
虾青素/(mg/kg)	74.91 ± 1.10	3.29 ± 0.09
生育酚/(mg/kg)	44.96 ± 0.18	4.22 ± 1.28
维生素 A/(mg/kg)	448.31 ± 2.12	221.55 ± 1.74
甘油三酯/%	73.68 ± 0.83	0.14 ± 0.01
脂肪酸/%		
C12:0	0.70 ± 0.02	0.05 ± 0.03
C14:0	14.83 ± 1.82	4.13 ± 0.21
C15:0	1.20 ± 0.05	0.34 ± 0.01
C16:0	21.52 ± 1.45	26.24 ± 0.88
C16:1	7.13 ± 0.12	2.17 ± 0.11
C17:0	2.69 ± 0.01	0.61 ± 0.02
C18:0	1.31 ± 0.03	1.07 ± 0.01
C18:1t	13.24 ± 1.08	7.21 ± 0.01
C18:1	7.88 ± 0.89	7.07 ± 0.42
C18:2	2.59 ± 0.59	2.26 ± 0.11
C18:3n-6	0.49 ± 0.09	0.19 ± 0.02
C18:3n-3	2.64 ± 0.17	2.29 ± 0.05
C20:1	0.52 ± 0.02	0.39 ± 0.01
C20:2	0.32 ± 0.02	—
C20:3n-6	0.28 ± 0.01	—
C20:4n-6	0.30 ± 0.03	0.69 ± 0.04
C20:3n-3	0.50 ± 0.05	0.45 ± 0.04
C20:5n-3	7.68 ± 0.12	20.74 ± 0.05
C22:1	0.26 ± 0.06	0.71 ± 0.01
C24:0	0.88 ± 0.07	0.58 ± 0.04
C24:1	10.82 ± 0.27	11.38 ± 1.22
C22:6n-3	2.22 ± 0.20	11.43 ± 0.08

3 结 论

经过单因素试验以及响应面优化试验,并结合成本、能耗等因素,确定超临界 CO₂ 萃取南极磷虾油中性脂质的最佳工艺条件为萃取时间 1.75 h、萃取温度 45℃、萃取压力 45 MPa,在此条件下甘油三酯含量为 73.68%,确定乙醇提取南极磷虾油极性脂质的最佳工艺条件为提取时间 3 h、提取温度 57℃、料液比 1:3,在此条件下磷脂含量高达 80.19%。经过超临界 CO₂ 萃取和乙醇提取,可实现南极磷虾油中性脂质与极性脂质最大程度的提取分离。南极磷虾油中性脂质中的功能性微量成分含量较高,虾青素、生育酚和维生素 A 的含量分别高达 74.91、44.96、448.31 mg/kg;而南极磷虾油极性脂质中则富含多不饱和脂肪酸,其中 EPA 含量高

达 20.74%,DHA 含量为 11.43%。超临界 CO₂ 萃取与乙醇提取可作为提取南极磷虾油不同极性脂质的有效方法,有利于扩展南极磷虾油作为保健食品开发的重要价值。

参考文献:

[1] CASTRO - GÓMEZ M P, HOLGADO F, RODRÍGUEZ - ALCALÁ L M, et al. Comprehensive study of the lipid classes of krill oil by fractionation and identification of triacylglycerols, diacylglycerols, and phospholipid molecular species by using UPLC/QTOF - MS[J]. Food Anal Meth, 2015, 8: 2568 - 2580.

[2] FRICKE H, GERCKEN G, SCHREIBER W, et al. Lipid, sterol and fatty acid composition of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana)[J]. Lipids, 1984, 19: 821 - 827.

[3] XIE D, MU H, TANG T, et al. Production of three types of krill oils from krill meal by a three - step solvent extraction procedure[J]. Food Chem, 2018, 248: 279 - 286.

[4] XIE D, GONG M, WEI W, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil: A comprehensive review of chemical composition, extraction technologies, health benefits, and current applications[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2019, 18(2): 514 - 534.

[5] GIGLIOTTI J C, DAVENPORT M P, BEAMER S K, et al. Extraction and characterisation of lipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Food Chem, 2011, 125 (3): 1028 - 1036.

[6] SONG G, WANG H, ZHANG M, et al. Real - time monitoring of the oxidation characteristics of Antarctic krill oil (*Euphausia superba*) during storage by electric soldering iron ionization mass spectrometry - based lipidomics[J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(5): 1457 - 1467.

[7] 宋泽宇. 南极磷虾油绿色提取工艺研究[D]. 辽宁 大连:大连工业大学,2014.

[8] 刘芸杭,林伟,胥亚夫,等. 南极磷虾油的分级制备及其品质分析[J]. 水产学报,2022,46(3):457 - 465.

[9] 赵泓博. 南极磷虾油分级制备及其品质分析[D]. 辽宁 大连:大连工业大学,2019.

[10] 谢丹. 南极磷虾油的分级制备及功能评价[D]. 江苏 无锡:江南大学,2019.

[11] 吴晓宗,郝莉花,赵光远,等. 响应面法优化超临界 CO₂ 萃取金花葵籽油工艺[J]. 中国油脂,2017,42(7): 15 - 18.

[12] 宋玉卿,张雪,李钊等. 稻米胚芽油的超临界 CO₂ 萃取工艺优化[J]. 中国油脂,2019,44(12):20 - 24.

[13] 王玥玮,张斌,温禄云,等. 南极磷虾油提取工艺的优化[J]. 食品研究与开发,2016,37(4): 105 - 107.