

# 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯的 干法分提富集工艺优化

吕晓雅,袁曼雨,从艳霞,齐玉堂,张维农

(武汉轻工大学 食品科学与工程学院,武汉 430023)

**摘要:**为提高1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(OPO)的含量,以化学酯交换联合酶法酸解反应制备的OPO为原料,采用单因素实验和正交实验考察干法分提条件(结晶温度、冷却速率、养晶时间)对OPO含量及提升率、sn-2位棕榈酸(PA)占总PA含量及提升率和分提液油得率的影响,确定干法分提的最优工艺条件。结果表明,干法分提的最优工艺条件为结晶温度6℃、冷却速率4℃/h、养晶时间3h,在此条件下OPO含量为(38.84±0.39)%,OPO含量提升率为(46.07±1.47)%,sn-2位PA占总PA含量为(91.08±0.16)%,sn-2位PA占总PA含量提升率为(47.61±0.25)%,分提液油得率为(31.26±0.34)%。综上,通过干法分提可以获得OPO纯度更高的甘油三酯。

**关键词:**1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯;干法分提;结晶

中图分类号:TS225.6;TQ641 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)05-0056-07

## Optimization of dry fractionation process for enrichment of 1,3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol

LYU Xiaoya, YUAN Manyu, CONG Yanxia, QI Yutang, ZHANG Weinong

(College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** In order to improve the content of 1,3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol (OPO), OPO prepared by chemical transesterification combined with enzymatic acid digestion reaction was used as raw material, the effects of dry fractionation conditions (crystallization temperature, cooling rate and crystal raising time) on the content and enhancement rate of OPO, the content and enhancement rate of sn-2 palmitic acid (PA) in total PA and the liquid oil yield of fraction were investigated by single factor experiment and orthogonal experiment. The results showed that the optimal conditions of the dry fractionation were as follows: crystallization temperature 6℃, cooling rate 4℃/h and crystal raising time 3 h. Under these conditions, the content and enhancement rate of OPO was (38.84±0.39)% and (46.07±1.47)% respectively, the content and enhancement rate of sn-2 PA in total PA was (91.08±0.16)% and (47.61±0.25)% respectively, and the liquid oil yield was (31.26±0.34)%. In conclusion, triglyceride with higher purity of OPO can be obtained by dry fractionation.

**Key words:** 1,3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol; dry fractionation; crystallization

收稿日期:2022-03-03;修回日期:2023-01-08

基金项目:湖北省重大科技创新专项“米糠油精深加工关键技术研发”(2019ABA105)

作者简介:吕晓雅(1996),女,硕士研究生,研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程(E-mail)360755465@qq.com。

通信作者:从艳霞,讲师(E-mail)congyanxia\_1@163.com。

天然油脂是由多种甘三酯组成的混合物。油脂分提就是在一定温度下利用组成油脂的各种甘三酯熔点及溶解度的差异,把油脂分为固、液两部分,以满足不同加工需求的方法<sup>[1-2]</sup>。目前,常用的油脂分提方法有干法分提、溶剂法分提和表面活性剂法分提等<sup>[3-4]</sup>。干法分提是先将油脂在控制条件下冷却结晶,然后通过固液分离技术,将固

脂与液油分离的一种方法,干法分提不附加其他措施及试剂,较其他方法所得产品更为纯净<sup>[5-6]</sup>。溶剂法分提和表面活性剂法分提生产成本高,尤其是固液分离时离心设备投资较大,对设备要求高。因此,国内油脂分提普遍采用操作简便、经济实用的干法分提工艺<sup>[7]</sup>。1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(OPO)是母乳脂肪的重要组成部分,具有多种生理功能。本课题组前期采用两步法合成了OPO,即首先以棕榈硬脂和高油酸葵花籽油为原料经化学酯交换法得到化学酯交换油脂,再与油酸通过酶法酸解反应得到OPO,但反应后体系复杂,OPO纯度较低,还需进一步对目的产物OPO进行富集。

本文采用干法分提工艺对OPO进行富集,对干法分提条件(结晶温度、冷却速率、养晶时间)进行了优化,以进一步提升OPO含量,为提升其利用价值提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

棕榈硬脂,东海粮油工业(张家港)有限公司;高油酸葵花籽油,中粮悠采厨房食品有限公司;油酸、猪胰脂肪酶,阿拉丁试剂有限公司;Lipozyme RM IM 脂肪酶,诺维信(中国)投资有限公司;甲醇钠(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;异丙醇(色谱纯),天津市科密欧化学试剂有限公司;1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯标准品(纯度 $\geq 99.9\%$ ),西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

7890A型气相色谱仪(配FID检测器)、1260型液相色谱仪(配蒸发光散射检测器),美国安捷伦科技有限公司;高低温程控冷却循环机,宁波新芝生物科技股份有限公司;分析天平,上海浦春计量仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 OPO的制备

参照文献[8]的方法,首先以棕榈硬脂与高油酸葵花籽油为原料制备化学酯交换油脂,再在化学酯交换油脂与油酸质量比1:1.5、反应温度50℃、Lipozyme RM IM 脂肪酶添加量(以底物总质量计)5%、反应时间8 h条件下进行酶法酸解反应,得到富含OPO的酶法酸解产物。将酶法酸解产物于60℃水浴锅中完全熔化,按料液比1:5加入甲醇搅拌均匀,静置5 min,回收下层,再按料液比1:2继续

加入甲醇萃取两次,分层后用圆底烧瓶回收下层,旋蒸除去多余甲醇,得到OPO粗品。

#### 1.2.2 OPO的干法分提

参考文献[9-10]的方法采用干法分提富集OPO。将10 g OPO粗品于55℃完全熔化,5 min后降至45℃并保持30 min。以一定速率缓慢冷却至结晶温度,并养晶一定时间,然后快速抽滤分离,得到分提液油和固脂,冷藏保存。按公式(1)计算分提液油得率( $Y_1$ )。

$$Y_1 = (m - m_1) / m \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m$ 为OPO粗品质量,g; $m_1$ 为固脂质量,g。

#### 1.2.3 脂肪酸组成测定

参考文献[11]的方法测定脂肪酸组成。取0.1 g分提液油于试管中,加入2 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠-甲醇溶液,涡旋混匀,65℃水浴30 min,立即加入1 mL 三氟化硼-甲醇溶液,65℃水浴3 min,待冷却后加入2 mL 正己烷,涡旋混匀,静置分层,取上清液过滤膜后进行气相色谱检测分析。气相色谱条件:Sopelco sp-2560 石英毛细管色谱柱(100 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.2  $\mu$ m);载气为高纯氮气,恒压0.22 Pa,分流比20:1;进样口温度250℃;检测器温度250℃;升温程序为柱温100℃保持4 min,以3℃/min升至230℃,保持20 min。采用面积归一化法定量。

#### 1.2.4 sn-2位脂肪酸组成测定

参照GB/T 24894—2010方法测定sn-2位脂肪酸组成。取0.1 g分提液油于试管中,加入2 mL 1 mol/L的缓冲溶液、0.5 mL 1 g/L胆酸钠溶液、0.2 mL 220 g/L氯化钙溶液,再快速加入30 mg猪胰脂肪酶,在40℃下剧烈手摇3 min,然后加入1 mL 6 mol/L盐酸和1 mL无水乙醚,涡旋混匀,离心,收集上层有机相进行薄层色谱分离。以石油醚-无水乙醚-甲酸(体积比70:30:1)作为展开剂,碘作为显色剂,刮下2-甘油一酯条带,用无水乙醚萃取3次,挥干溶剂后测定样品脂肪酸组成。除分流比模式调整为不分流外,脂肪酸组成测定方法同1.2.3。

分别按公式(2)和公式(3)计算sn-2位棕榈酸(PA)占总PA含量( $w$ )及干法分提后sn-2位PA占总PA含量提升率( $Y_2$ )。

$$w = W_{p_2} / (3 \times W_p) \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_2 = (y - y_0) / y_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: $W_{p_2}$ 为样品sn-2位PA含量,%; $W_p$ 为样品总PA含量,%;3为换算系数; $y$ 为分提后sn-2位PA占总PA含量,%; $y_0$ 为分提前sn-2位PA占总PA含量,%。

### 1.2.5 OPO 含量测定

参照文献[12-16],使用反相高效液相色谱仪(RP-HPLC)测定 OPO 含量。高效液相色谱条件:Wondasil C18 Superb 色谱柱(250 mm × 4.6 mm × 5 μm),柱温 30 ℃,洗脱流速 0.8 mL/min,进样量 10 μL,蒸发光检测器温度 70 ℃,氮气流速 2.0 mL/min,增益值 1,流动相洗脱程序见表 1。

表 1 流动相洗脱程序

时间/min	乙腈/%	异丙醇/%
0	70	30
30	60	40
40	55	45
60	55	45
65	70	30

OPO 标准曲线绘制:使用乙腈与异丙醇(体积比 7:3)混合液分别配制质量浓度为 0.05、0.20、0.30、0.40 mg/mL 和 0.50 mg/mL 的 OPO 标准液,测定各标准液的色谱峰峰面积。以峰面积的常用对数值( $y$ )为纵坐标,标准液质量浓度的常用对数值( $x$ )为横坐标绘制标准曲线,经回归拟合得到标准曲线方程( $y = 1.8415x + 4.9172, R^2 > 0.999$ )。

样品测定:在分提液油中加入乙腈与异丙醇(体积比 7:3)配制质量浓度为 1 mg/mL 的溶液,过有机滤膜,进高效液相色谱仪检测,再根据标准曲线方程计算 OPO 含量。

按公式(4)计算干法分提后 OPO 含量提升率( $X$ )。

$$X = (x - x_0) / x_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中: $x$  为分提后 OPO 含量,%; $x_0$  为分提前 OPO 含量,%。

### 1.2.6 统计分析

所有数据均采用 Origin 2018 软件处理,采用 SPSS 19.0 进行显著性分析, $p < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干法分提原料指标

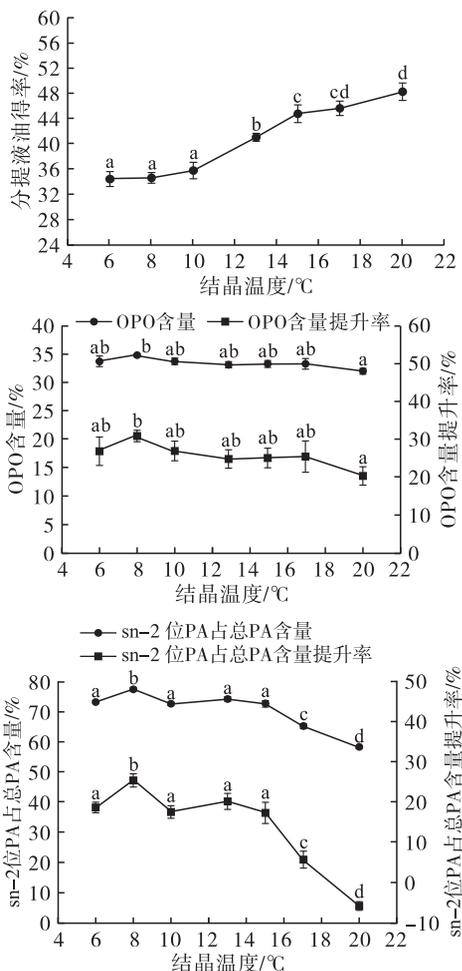
经检测,干法分提原料中 OPO 含量为(26.59 ± 0.35)%,sn-2 位 PA 占总 PA 含量为(61.70 ± 0.81)%。

### 2.2 干法分提单因素实验

#### 2.2.1 结晶温度对分提效果的影响

在冷却速率 6 ℃/h 和养晶时间 5 h 条件下,考察结晶温度(6、8、10、13、15、17、20 ℃)对分提液油得率、液油中 OPO 含量及提升率和 sn-2 位 PA 占

总 PA 含量及提升率的影响,结果如图 1 所示。



注:不同小写字母代表差异显著( $p < 0.05$ )。下同

图 1 结晶温度对分提液油得率、OPO 含量及提升率和 sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率的影响

由图 1 可知,随着结晶温度的升高,分提液油得率不断增大,结晶温度与液油得率呈正相关。这是因为结晶温度升高,油脂中部分低熔点组分熔化变为液态油,故分提液油得率不断增加。由图 1 还可知:当结晶温度从 6 ℃ 升至 8 ℃ 时,sn-2 位 PA 占总 PA 含量显著增加,OPO 含量也呈现增加的趋势;结晶温度从 8 ℃ 升高到 20 ℃ 时,sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量先减少再基本保持不变然后继续减少。这是因为结晶温度较低时,可能部分 OPO 存在于分提固脂中,导致分提液油中 sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量较低;在结晶温度升高的过程中,分提液油中 OPO 不断累积,导致 sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量开始上升;继续升高结晶温度,OPO 不断向液油富集,可能其他甘油三酯组分也不断熔化变为液油,使 OPO 含量的增加和总液油含量的升高呈平衡状态,导致 sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量基本保持不变;再继续升高结晶温度,液油总量增加的速率高于 OPO 含量增加的速

率,从而导致 sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量减少。在结晶温度为 8℃ 时,sn-2 位 PA 占总 PA 含量最高,为(77.43±0.68)%,提升率为(25.49±1.11)%,OPO 含量也最高,为(34.84±0.18)%,提升率为(31.02±0.68)%。综合考虑,选择结晶温度为 8℃。

### 2.2.2 冷却速率对分提效果的影响

在结晶温度 8℃ 和养晶时间 5 h 条件下,考察冷却速率(2、3、4、5、6、7、8℃/h)对分提液油得率、液油中 OPO 含量及提升率和 sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率的影响,结果如图 2 所示。

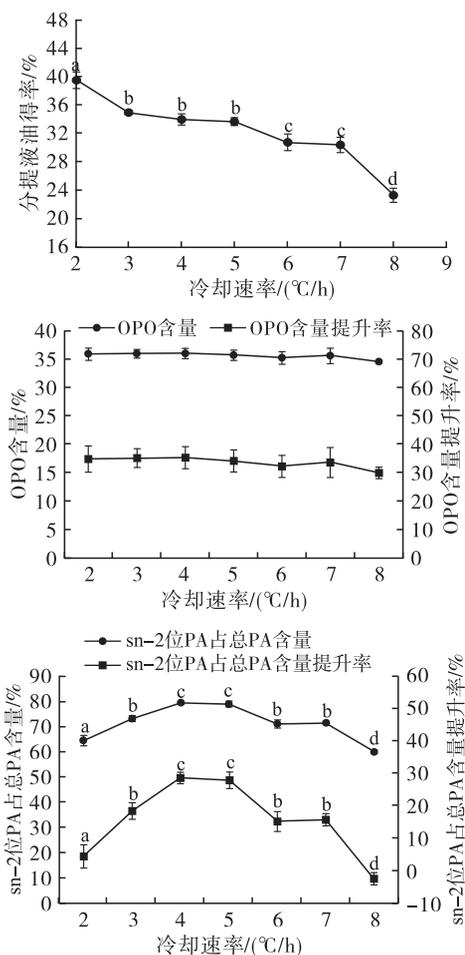


图 2 冷却速率对分提液油得率、OPO 含量及提升率和 sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率的影响

由图 2 可知,随着冷却速率的增加,液油得率不断减少。当冷却速率从 2℃/h 增加到 4℃/h 时,sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量均增大;继续增加冷却速率,sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量开始下降。这可能因为分提速率较低时,分提液油得率较高,其中夹杂的其他甘油酯成分较多,因此 sn-2 位 PA 占总 PA 含量较低;当冷却速率增大时,液油得率不断减少,夹杂的其他低熔点甘油酯成分逐渐减少使 sn-2 位 PA 占总 PA 含量增加;继续增

加冷却速率,在快速冷却的条件下,部分 OPO 进入固脂中,使 sn-2 位 PA 占总 PA 含量减少。当冷却速率为 4℃/h 时,sn-2 位 PA 占总 PA 含量最高,为(79.46±0.48)%,提升率为(28.78±0.77)%。就 OPO 含量而言,随着冷却速率的增加其基本保持不变,在 4℃/h 时相对最高,为(36.01±0.91)%,提升率为(35.44±3.41)%。这可能是因为在实验中 RP-HPLC 不能区别同分异构体,在缓慢冷却下液油中可能富集了更多的 OPO 和 POO,在中速冷却下液油中可能富集了更多的 OPO,在快速冷却下液油中可能富集了更多的 OPO、PLS 和 PSL。因此导致不同冷却速率下 sn-2 位 PA 占总 PA 含量有差异,而 OPO 含量差别不明显。综合考虑,选择冷却速率为 4℃/h。

### 2.2.3 养晶时间对分提效果的影响

在结晶温度 8℃ 和冷却速率 4℃/h 条件下,考察养晶时间(1、3、5、7、9 h)对分提液油得率、液油中 OPO 含量及提升率和 sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率的影响,结果如图 3 所示。

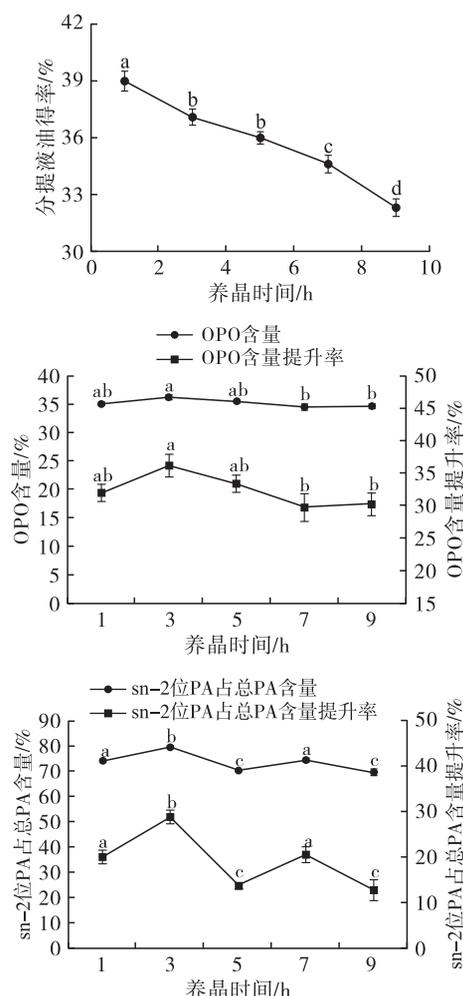


图 3 养晶时间对分提液油得率、OPO 含量及提升率和 sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率的影响

由图 3 可知,随着养晶时间的不断延长,液油得率不断减少。在养晶时间为 3 h 时,sn-2 位 PA 占总 PA 含量最高,为  $(79.48 \pm 0.49)\%$ ,提升率为  $(28.82 \pm 0.79)\%$ ,此时 OPO 含量也最高,为  $(36.22 \pm 0.43)\%$ ,提升率为  $(36.21 \pm 1.61)\%$ 。这是由于养晶时间较短时,形成的晶核较小且不稳定,在抽滤过程中容易被破坏,从而使更多的非 OPO 组分进入液油中,造成 sn-2 位 PA 占总 PA 含量和 OPO 含量较低;油脂中甘三酯组分复杂,且每种甘三酯结晶速率、晶型都有所差异,足够的养晶时间有助于不同的低熔点组分充分结晶和长大,分提效果更好;但是养晶时间过长,固脂裹挟液油程度加剧,固脂中 OPO 含量增加,导致液油中 OPO 含量降低,分提效果变

差。综合考虑,选择养晶时间为 3 h。

### 2.3 干法分提正交实验

以结晶温度(A)、冷却速率(B)、养晶时间(C)为因素,以 OPO 含量及提升率、sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率和分提液油得率为指标,根据单因素实验结果进行三因素三水平的  $L_9(3^4)$  正交实验,正交实验因素水平如表 2 所示,正交实验设计与结果如表 3 所示,正文实验结果分析如表 4 所示。

表 2 正交实验因素水平

水平	结晶温度/℃	冷却速率/(℃/h)	养晶时间/h
1	6	3	1
2	8	4	3
3	10	5	5

表 3 正交实验设计与结果

实验号	A	B	C	空列	OPO 含量/%	OPO 含量提升率/%	sn-2 位 PA 占总 PA 含量/%	sn-2 位 PA 占总 PA 含量提升率/%	分提液油得率/%
1	1	1	1	1	32.01	20.38	76.99	24.78	37.43
2	1	2	2	2	40.89	53.78	90.36	46.45	31.43
3	1	3	3	3	33.51	26.02	75.13	21.77	28.29
4	2	1	2	3	36.49	37.23	87.62	42.01	33.71
5	2	2	3	1	35.90	35.01	79.47	28.80	29.71
6	2	3	1	2	30.37	14.22	74.19	20.24	40.86
7	3	1	3	2	31.76	19.44	74.58	20.88	31.29
8	3	2	1	3	34.57	30.01	76.71	24.33	44.14
9	3	3	2	1	33.68	26.66	80.21	29.99	35.43

表 4 正交实验结果分析

项目	A	B	C	空列
OPO 含量				
$k_1$	35.47	33.42	32.32	33.86
$k_2$	34.25	37.12	37.02	34.34
$k_3$	33.34	32.52	33.72	34.86
R	2.13	4.60	4.70	0.99
OPO 含量提升率				
$k_1$	33.39	25.68	21.54	27.35
$k_2$	28.82	39.60	39.22	29.15
$k_3$	25.37	22.30	26.82	31.09
R	8.02	17.30	17.69	3.74
sn-2 位 PA 占总 PA 含量				
$k_1$	80.83	79.73	75.96	78.89
$k_2$	80.43	82.18	86.06	79.71
$k_3$	77.17	76.51	76.39	79.82
R	3.66	5.67	10.10	0.93
sn-2 位 PA 占总 PA 含量提升率				
$k_1$	31.00	29.22	23.12	27.86
$k_2$	30.35	33.19	39.48	29.19
$k_3$	25.07	24.00	23.82	29.37
R	5.93	9.19	16.37	1.51

续表 4

项目	A	B	C	空列
分提液油得率				
$k_1$	32.38	34.14	40.81	34.19
$k_2$	34.76	35.09	33.52	34.53
$k_3$	36.95	34.86	29.76	35.38
R	4.57	0.95	11.05	1.19

由表 4 可知,养晶时间和冷却速率对 OPO 含量及提升率影响较大,各因素影响主次顺序为养晶时间 > 冷却速率 > 结晶温度,较优提取工艺为  $A_1B_2C_2$ ,即结晶温度 6℃、冷却速率 4℃/h、养晶时间 3 h。养晶时间和冷却速率对 sn-2 位 PA 占总 PA 含量及提升率影响较大,各因素影响主次顺序为养晶时间 > 冷却速率 > 结晶温度,较优提取工艺为  $A_1B_2C_2$ ,与 OPO 含量及提升率的较优提取工艺一致。养晶时间和结晶温度对液油得率影响较大,各因素影响主次顺序为养晶时间 > 结晶温度 > 冷却速率,较优提取工艺为  $A_3B_2C_1$ ,即结晶温度 10℃、冷却速率 4℃/h、养晶时间 1 h。

对 OPO 含量及提升率、sn-2 位 PA 占总 PA 含

量及提升率和分提液油得率进行方差分析,结果分别见表5~表9。

表5 OPO含量方差分析

差异源	平方和	自由度	均方	F	p
A	3.43	2	1.72	4.64	0.177 3
B	17.83	2	8.92	24.08	0.039 9*
C	17.48	2	8.74	23.61	0.040 6*
D(误差)	0.74	2	0.37		
总和	39.49	8			

注:\*代表影响显著( $p < 0.05$ )。下同

表6 OPO含量提升率方差分析

差异源	平方和	自由度	均方	F	p
A	97.19	2	48.60	4.64	0.177 3
B	504.36	2	252.18	24.08	0.039 9*
C	494.58	2	247.29	23.61	0.040 6*
D(误差)	20.94	2	10.47		
总和	1 117.08	8			

表7 sn-2位PA占总PA含量方差分析

差异源	平方和	自由度	均方	F	p
A	24.21	2	12.10	15.56	0.060 4
B	48.55	2	24.27	31.22	0.031 0*
C	195.64	2	97.82	125.79	0.007 9**
D(误差)	1.56	2	0.78		
总和	269.95	8			

注:\*\*代表影响极显著( $p < 0.01$ )。下同

表8 sn-2位PA占总PA含量提升率方差分析

差异源	平方和	自由度	均方	F	p
A	63.59	2	31.79	15.56	0.060 4
B	127.53	2	63.77	31.22	0.031 0*
C	513.90	2	256.95	125.79	0.007 9**
D(误差)	4.09	2	2.04		
总和	709.11	8			

表9 分提液油得率方差分析

差异源	平方和	自由度	均方	F	p
A	31.34	2	15.67	13.88	0.067 2
B	1.47	2	0.74	0.65	0.605 6
C	189.26	2	94.63	83.83	0.011 8*
D(误差)	2.26	2	1.13		
总和	224.33	8			

由表5、表6可知,B、C对OPO含量及提升率影响显著( $p < 0.05$ ),A对OPO含量及提升率影响不显著( $p > 0.05$ )。由表7、表8可知,B对sn-2位PA占总PA含量及提升率影响显著( $p < 0.05$ ),C对sn-2位PA占总PA含量及提升率影响极显著( $p < 0.01$ ),A对sn-2位PA占总PA含量及提升

率影响不显著( $p > 0.05$ )。由表9可知,C对分提液油得率影响显著( $p < 0.05$ ),A、B对分提液油得率影响不显著( $p > 0.05$ )。综合考虑,最优工艺条件选择为A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>,即结晶温度6℃、冷却速率4℃/h、养晶时间3h。

为验证工艺的准确性和合理性,以最优条件进行验证实验,结果显示,OPO含量为(38.84 ± 0.39)%,OPO含量提升率为(46.07 ± 1.47)%,sn-2位PA占总PA含量为(91.08 ± 0.16)%,sn-2位PA占总PA含量提升率为(47.61 ± 0.25)%,分提液油得率为(31.26 ± 0.34)%。结果说明该工艺能达到很好的分提效果,且得率较高,具有工业生产可行性。

### 3 结论

为提高OPO含量,本研究以化学酯交换联合酶法酸解反应制备的OPO为原料进行干法分提富集OPO。通过单因素实验和正交实验得到干法分提的最优工艺条件为结晶温度6℃、冷却速率4℃/h、养晶时间3h,在此条件下获得的OPO含量为(38.84 ± 0.39)%,OPO含量提升率为(46.07 ± 1.47)%,sn-2位PA占总PA含量为(91.08 ± 0.16)%,sn-2位PA占总PA含量提升率为(47.61 ± 0.25)%,分提液油得率为(31.26 ± 0.34)%。本研究为OPO的富集提供了一种简便、切实可行的方法,有助于OPO产品的多样化开发。

### 参考文献:

- [1] 王宏平,徐斌,李健. 油脂分提工艺的进展与应用[J]. 中国油脂,2004,29(7):23-25.
- [2] 蔡丽丽,钱林. 油脂分提工艺研究进展与应用[J]. 粮食与油脂,2006(10):22-25.
- [3] SHAHIDI F. 贝雷油脂化学与工艺学[M]. 6版. 王兴国,金青哲,译. 北京:中国轻工业出版社,2001:159-162.
- [4] ZALIHA O, CHONG C L, CHEOW C S, et al. Crystallization properties of palm oil by dry fractionation [J]. Food Chem, 2004, 86(2):245-250.
- [5] 司欣,张书文,逢晓阳,等. 天然牛乳脂肪分离及应用研究进展[J]. 中国粮油学报,2022,37(7):172-178.
- [6] LOPEZ C, BOURGAUX C, LESIEUR P, et al. Milk fat and primary fractions obtained by dry fractionation 1. Chemical composition and cry stallisation properties [J]. Chem Phys Lipids, 2006, 144(1): 17-33.
- [7] 马传国. 油脂深加工与制品[M]. 北京:中国商业出版社,2002.
- [8] 吕晓雅,齐玉堂,张维农,等. 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油酯的合成[J]. 中国油脂,2023,48(2):117-122,152.

(下转第68页)