

碱异构化花生油制备共轭亚油酸工艺优化

Optimization of preparation of conjugated linoleic acid by alkali isomerization of peanut oil

申秋云 彭清净

SHEN Qiu-yun PENG Qing-jing

(吉首大学食药两用资源研究与高值化利用湖南省重点实验室, 湖南 吉首 416000)

(Hunan Provincial Key Laboratory of Research, Resource Mining and High-valued Utilization on Edible and Medicinal Plant, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

摘要:目的:为了获得具有工业化前景的共轭亚油酸 (Conjugated linoleic acid, CLA) 制备工艺。**方法:**以花生油为原料,采用碱异构化法制备 CLA。测定了花生油中的亚油酸相对含量,考察了反应时间、反应温度、醇油比、催化剂 KOH 用量等因素对 CLA 转化率的影响,并通过 Box-Behnken 试验优化制备条件。**结果:**花生油富含亚油酸(相对含量达 27.85%),是制备 CLA 的良好原料;碱异构化花生油制备 CLA 的最优条件为:反应温度 200 °C,反应时间 2.6 h,醇油比($m_{1,2}$ -丙二醇 : $m_{\text{亚油酸}}$) 22 : 1, KOH 用量(质量分数) 7%。在该条件下,CLA 转化率为 89.81%。**结论:**采用碱异构化花生油制备 CLA 的工艺可行,在最优工艺条件下,CLA 转化率高。

关键词:花生油;亚油酸;共轭亚油酸;碱异构化

Abstract: Objective: To obtain a promising production technique of conjugated linoleic acid (CLA). **Methods:** The alkali isomerization was used to prepare CLA from peanut oil. The relative content of linoleic acid in peanut oil was determined, and the effects of reaction time, reaction temperature, ratio of alcohol to oil and KOH dosage on the conversion of CLA were investigated. The preparation conditions were optimized by Box-Behnken test. **Results:** The peanut oil was rich in linoleic acid with a relative content of 27.85%. Therefore, peanut oil was a good raw material for the preparation of CLA. For the conversion of CLA, reaction temperature, reaction time and KOH dosage were the most significant factors ($P < 0.01$), while ratio of propylene glycol to oil was the significant factor ($P < 0.05$). There existed interaction between reaction time and ratio of

propylene glycol to oil. The best conditions for preparation of CLA by alkali isomerization of peanut oil were as followed: the reaction temperature of 200 °C, the reaction time of 2.6 h, the ratio of propylene glycol to oil of 22 to 1, the KOH dosage of 7% (mass fraction). Under determined conditions, the conversion of CLA was 89.81%. **Conclusion:** It is workable to prepare CLA by alkali isomerization of peanut oil, and the conversion of CLA is high under the optimal conditions.

Keywords: peanut oil; linoleic acid; conjugated linoleic acid; alkali isomerization

共轭亚油酸 (Conjugated linoleic acid, CLA) 是含有顺式或反式共轭双键的十八碳二烯酸,与亚油酸是位置和构象上的异构体,其中 c9, t11-CLA 和 t10, c12-CLA 具有多种生物学功能,如降脂、抗氧化、抗癌、促进骨骼健康、提高免疫力、防治糖尿病、抗动脉粥样硬化等^[1]。但是,天然 CLA 只少量的存在于反刍动物或植物油脂中,远不能满足需求。

CLA 的合成方法主要有生物法和化学法^[2-3]。生物法是利用微生物或亚油酸异构酶将非共轭多烯酸转化为共轭多烯酸,如赵微等^[4]用植物乳杆菌 P-8 将亚油酸转化为 CLA, Lian 等^[5]利用固定化的突变脂肪酶 MAS1-H108A 高效合成 CLA, 但是生物法存在微生物及酶的活性受底物抑制而致转化率较低的缺点,目前尚无法工业化生产。从天然不饱和脂肪酸改性合成 CLA 的化学法是目前的主流方法,包括Ⅷ族金属催化共轭法、亚油酸碱催化异构化法等。Ⅷ族金属催化共轭法存在反应过程复杂、反应时间较长、反应条件苛刻、产物中反式结构所占比例较大、过渡金属催化剂价格昂贵且有较大毒性等问题^[6]。尽管亚油酸碱催化异构化法还存在产物提纯困难、提取成本较高等不足,但该法过程简单、催化剂易得且无需特别处理、CLA 转化率较高,是目前最有希望工业

基金项目:湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划项目(编号:JDCX2018038)

作者简介:申秋云,女,吉首大学本科生。

通信作者:彭清净(1962—),男,吉首大学教授,博士。

E-mail: binliangpeng@yahoo.com.cn

收稿日期:2022-07-30 **改回日期:**2022-12-08

化的方法,科研人员对其开展了大量研究^[7-10]。但是,目前亚油酸碱催化异构化法主要是以纯亚油酸为底物,底物成本较高,需寻找能够大量廉价制取 CLA 的原料资源。山茶油、芝麻油、菜籽油、花生油、葵花籽油等食用油中广泛存在亚油酸^[11]。已有以葵花油^[12]、辣椒籽油^[13]等植物油为原料经碱异构化方法制备 CLA 的研究。相比其他食用油,花生油具有亚油酸含量较高、产量大、价格相对低廉的优点,且目前尚未有以花生油为原料开展碱异构化制备 CLA 的报道。研究拟采用花生油制备 CLA,分析碱异构化制备花生油共轭亚油酸的主要影响因素,探讨各试验因素对转化率的影响,并通过响应面法优化花生油 CLA 转化条件,以期对 CLA 的工业化开发提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

花生油:实验室自制;

亚油酸、CLA 标准品:美国 Sigma 公司;

KOH、1, 2-丙二醇、BF₃·CH₃OH、HCl、Na₂SO₄、NaCl、正庚烷、正己烷等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高压反应釜: NSC100-P5-T3-SS1-SV 型,安徽科霖机械科技有限公司;

旋转蒸发器: RE-52CS 型,上海医科大学仪器厂;

循环水式多用真空泵: SHK-III S 型,郑州科泰实验设备有限公司;

电子分析天平: ALB-124 型,北京赛多利斯科学仪器有限公司;

气相色谱—质谱联用仪: GC-MS TQ8050 型,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 CLA 制备方法 将 1.0 g 亚油酸标准品置于高压反应釜中,加入 20 mL 1,2-丙二醇(含质量分数 6% 的 KOH),充入氮气排空釜中空气,然后密闭系统,加热到 180 °C 反应 3 h,反应结束后,冷却至室温,移入烧杯,加 HCl 调 pH 至 2~3,用正己烷萃取 2 次,水洗至中性,加 Na₂SO₄,用玻璃棒搅拌至溶液澄清,静置 2 min,过滤,旋转蒸发去除多余溶剂,得到产品用于 CLA 含量分析。

1.3.2 花生油转化单因素试验 将 1.0 g 花生油置于高压反应釜中,按 1.3.1 中方法进行转化。设定单因素试验中的常规量为:反应时间 3 h,反应温度 180 °C,醇油比(*m*_{1,2-丙二醇}:*m*_{亚油酸})20:1,KOH 用量 6%。依次考察醇油比(*m*_{1,2-丙二醇}:*m*_{亚油酸})分别为 10:1,15:1,20:1,25:1,30:1、KOH 用量(4%,5%,6%,7%,8%)、反应时间(1,2,3,4,5 h)、反应温度(120,150,180,210,240 °C)对 CLA 转化率的影响。

CLA 转化率按式(1)计算:

$$R = \frac{Y_{\text{CLA}}}{Z} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R——CLA 转化率,%;

Y_{CLA}——异构化后花生油中 CLA 的相对含量,%;

Z——异构前花生油中亚油酸的相对含量,%。

1.3.3 响应面优化试验 根据单因素试验分析结果,利用 Design-Expert 8.0.6 软件,以 CLA 转化率为响应值,通过四因素三水平 Box-Behnken 试验来优化反应条件。

1.3.4 脂肪酸组成及相对含量测定 按 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》中的归一化法执行。

1.3.5 数据处理方法 所有试验重复 3 次,用 Design-Expert 8.0.6 软件分析 Box-Behnken 试验结果,SPSS 23.0 软件进行 ANOVA 多重比较分析(Turkey 法,显著性水平为 0.05),Origin 2019b 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 花生油主要脂肪酸含量

试验所用花生油主要脂肪酸相对含量组成:棕榈酸(11.87±0.47)%,亚油酸(27.85±0.53)%,油酸(59.64±0.57)%。因产地、榨油工艺等不同,花生的亚油酸含量会有所差异,有研究^[14]发现,花生油中的亚油酸含量最高可达 41.66%,说明花生油中亚油酸含量较高,具有作为原料开发 CLA 的前景。

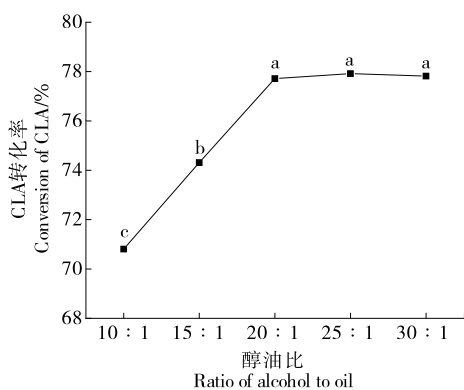
2.2 亚油酸异构化前后 CLA 含量变化

对亚油酸进行碱异构化处理后,生成的 CLA 百分含量达到了 65.87%。说明试验所用的碱催化异构化方法能将亚油酸转化成 CLA。

2.3 花生油转化单因素试验

2.3.1 醇油比对 CLA 转化率的影响 图 1 显示,随醇油比不断增大,CLA 转化率增大,当醇油比(*m*_{1,2-丙二醇}:*m*_{亚油酸})为 20:1 时,转化率达到最大值。继续增大醇油比,CLA 转化率开始减小。这是因为溶剂量过少,反应体系的黏度过大,产生的泡沫过多,反应在不均一体系中进行,体系传质阻力过大,导致共轭化不完全,共轭化速度相对较低;而溶剂过多,催化剂浓度降低,分子间的有效碰撞机会减少,间隔双键生成共轭双键的机率降低,共轭化效率也相应降低^[15],同时增大了后期溶剂回收处理的难度与能耗。因此,醇油比(*m*_{1,2-丙二醇}:*m*_{亚油酸})控制在 20:1 左右为宜。

2.3.2 KOH 用量对 CLA 转化率的影响 图 2 显示,随 KOH 用量不断增加,CLA 转化率增大。当 KOH 用量达到 6% 时,CLA 转化率达到最大值,此后继续增加 KOH,对 CLA 转化率影响不大。这是由于在强碱的作用下,仅碳原子上的氢容易失去,生成碳负离子中间体,该碳负离



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

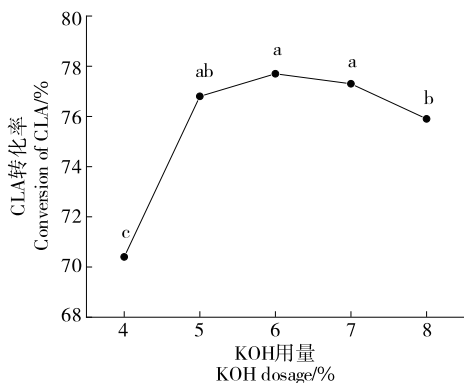
图1 醇油比对CLA转化率的影响

Figure 1 Effects of ratio of propylene glycol to oil on conversion rates of CLA

子的负电荷在2个C=C双键间离域,增大了体系分子的有效碰撞,有利于共轭化进行^[16]。但催化剂用量到达一定量后,与反应分子有效碰撞的机会基本不再发生变化,同时会使反应体系中泡沫过多,造成分离困难及随之而来的CLA损失,产物的颜色也明显加深。因此,KOH用量控制在6%左右为宜。

2.3.3 反应时间对CLA转化率的影响 图3显示,随反应时间延长,CLA转化率呈上升趋势,在3h时,转化率进入平台期,继续延长反应时间,转化率增加不大,到达5h时,转化率下降。这是因为延长反应时间,各物质充分接触,有利于亚油酸共轭化,但CLA不稳定,长时间的高温反应容易发生降解或其他副反应,使得转化率降低,与之前相关研究^[8-9]结果一致。虽然适当延长反应时间会提高CLA转化率,但会极大地增大设备的运行成本和设备损耗,因此以2.0,2.5,3.0h的反应时间进行响应面试验。

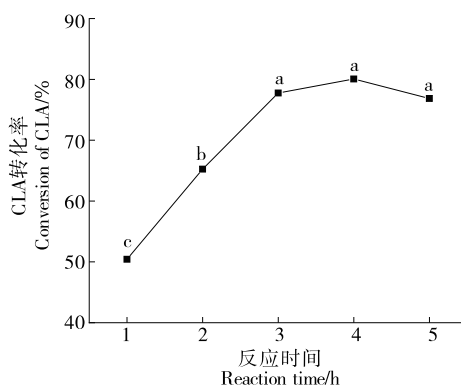
2.3.4 反应温度对CLA转化率的影响 图4显示,随反



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图2 KOH用量对CLA转化率的影响

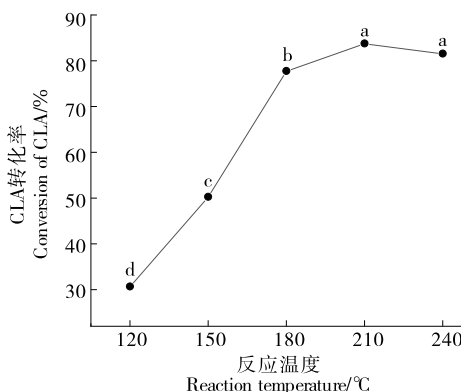
Figure 2 Effects of KOH dosage on conversion rates of CLA



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 反应时间对CLA转化率的影响

Figure 3 Effects of reaction time on conversion rates of CLA



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 反应温度对CLA转化率的影响

Figure 4 Effects of reaction temperature on conversion rates of CLA

应温度升高,CLA转化率呈现上升趋势,在210℃达到最大值,之后转化率小幅度减少。主要是因为升温过高,亚油酸容易发生聚合、分解以及环化反应,不利于CLA的生成,同时导致副产物增多^[17]。并且丙二醇的沸程为186~188℃,温度过高易引起溶剂的挥发或达到沸程不利于操作,故反应温度选180℃左右较适宜。

2.4 响应面试验

2.4.1 试验结果与分析 响应面试验因素水平设计见表1,试验结果见表2。

对试验结果(表2)进行二次多项式回归拟合,得到关于CLA转化率(Y)影响因素的多元二次回归方程:

$$Y = 83.92 + 8.19A + 6.13B + 3.65C + 6.06D - 1.3AB + 0.034AC + 0.15AD + 5.91BC - 2.58BD - 1.12CD - 8.58A^2 - 12.28B^2 - 4.88C^2 + 1.89D^2 \quad (2)$$

由回归方程可知,因素重要性为反应温度>反应时间>KOH用量>醇油比,对回归方程进行方差分析,结

表 1 响应面试验因素水平设计

Table 1 Factors and levels of response surface test

水平	A 反应温度/℃	B 反应时间/h	C 醇油比	D KOH 用量/%
-1	150	2.0	15 : 1	5
0	180	2.5	20 : 1	6
1	210	3.0	25 : 1	7

表 2 响应面试验结果

Table 3 Resultsof response surface test

试验号	A	B	C	D	CLA 转化率/%
1	-1	1	1	-1	64.77
2	1	0	0	1	83.78
3	0	0	0	-1	76.98
4	-1	-1	1	-1	36.07
5	-1	0	-1	-1	56.77
6	1	1	1	1	83.88
7	0	1	0	0	81.61
8	0	0	0	0	77.60
9	0	1	0	0	81.73
10	1	0	0	0	83.31
11	1	0	-1	1	84.32
12	0	0	-1	0	71.44
13	1	0	1	-1	83.48
14	0	-1	0	1	72.93
15	0	0	0	-1	76.83
16	1	-1	1	0	57.47
17	-1	-1	-1	0	41.94
18	0	0	-1	0	82.59
19	-1	1	-1	1	51.84
20	1	-1	-1	-1	56.61
21	1	1	-1	-1	56.49
22	0	-1	0	1	81.69
23	-1	0	0	0	68.73
24	-1	0	1	1	73.53
25	0	0	1	0	81.05

果见表 3。根据 P 值判断,CLA 转化率的回归模型方程达到极显著水平 ($P < 0.01$),失拟项 P 值不显著 ($P > 0.05$),拟合度 $R^2 = 0.9454$, $CV\% = 7.31\%$,信噪比 $S/N = 12.724$ ($S/N > 4$),表明该模型响应效果良好,模型预测值与实测值能够很好地拟合,试验结果可靠。同时,由表 4 可知,方程一次项中 A、B、D 和二次项中 A^2 、 B^2 均极显著 ($P < 0.01$),而一次项 C 和交互项 BC 均显著 ($P < 0.05$),表明反应温度、反应时间、KOH 用量对转化率的

表 3 响应面试验结果方差分析[†]

Table 3 Variance analysis on results of response surface test

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	4 529.80	14	323.56	12.37	0.000 2
A	941.22	1	941.22	35.98	0.000 1
B	451.54	1	451.54	17.26	0.002 0
C	186.77	1	186.77	7.14	0.023 4
D	481.54	1	481.54	18.41	0.001 6
AB	11.50	1	11.50	0.44	0.522 3
AC	0.01	1	0.01	5.00×10^{-4}	0.983 3
AD	0.17	1	0.17	6.40×10^{-3}	0.937 7
BC	239.51	1	239.51	9.15	0.012 8
BD	44.76	1	44.76	1.71	0.220 1
CD	9.75	1	9.75	0.37	0.555 1
A^2	304.86	1	304.86	11.65	0.006 6
B^2	871.16	1	871.16	33.30	0.000 2
C^2	98.62	1	98.62	3.77	0.080 9
D^2	17.93	1	17.93	0.69	0.427 0
残差	261.62	10	26.16		
失拟项	160.96	5	32.19	1.60	0.309 5
纯误差	100.66	5	20.13		
总和	4 791.41	24			

[†] $R^2 = 0.9454$, $CV\% = 7.31\%$, $S/N = 12.724$ 。

影响达到极显著水平 ($P < 0.01$),而醇油比的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.4.2 因素间交互作用 将两个因素固定在 0 水平,其余两因素间的交互作用对 CLA 转化率的影响见图 5。图 5(d)的响应面坡度较陡,说明反应时间与醇油比之间交互作用明显,与之前相关研究^[18]结果一致。而其他图的响应面坡度较小,即反应温度与其他因素之间、KOH 用量与其他因素之间的交互作用不明显。

2.4.3 工艺优化及验证 由 Design-Expert 8.0.6 软件优化得出最优反应条件为:反应温度 200.00 ℃,反应时间 2.59 h,醇油比 ($m_{1,2-丙二醇} : m_{亚油酸}$) 21.87 : 1, KOH 用量 7.00%。在此条件下,转化率预测值为 92.3%。为方便操作,将最优条件调整确定为:反应温度 200 ℃,反应时间 2.6 h,醇油比 ($m_{1,2-丙二醇} : m_{亚油酸}$) 22 : 1, KOH 用量 7%,在此条件下开展 3 组验证实验,转化率实测值为 (89.81 ± 1.64)%,与预测值接近,说明采用响应面法优化该工艺条件可行。

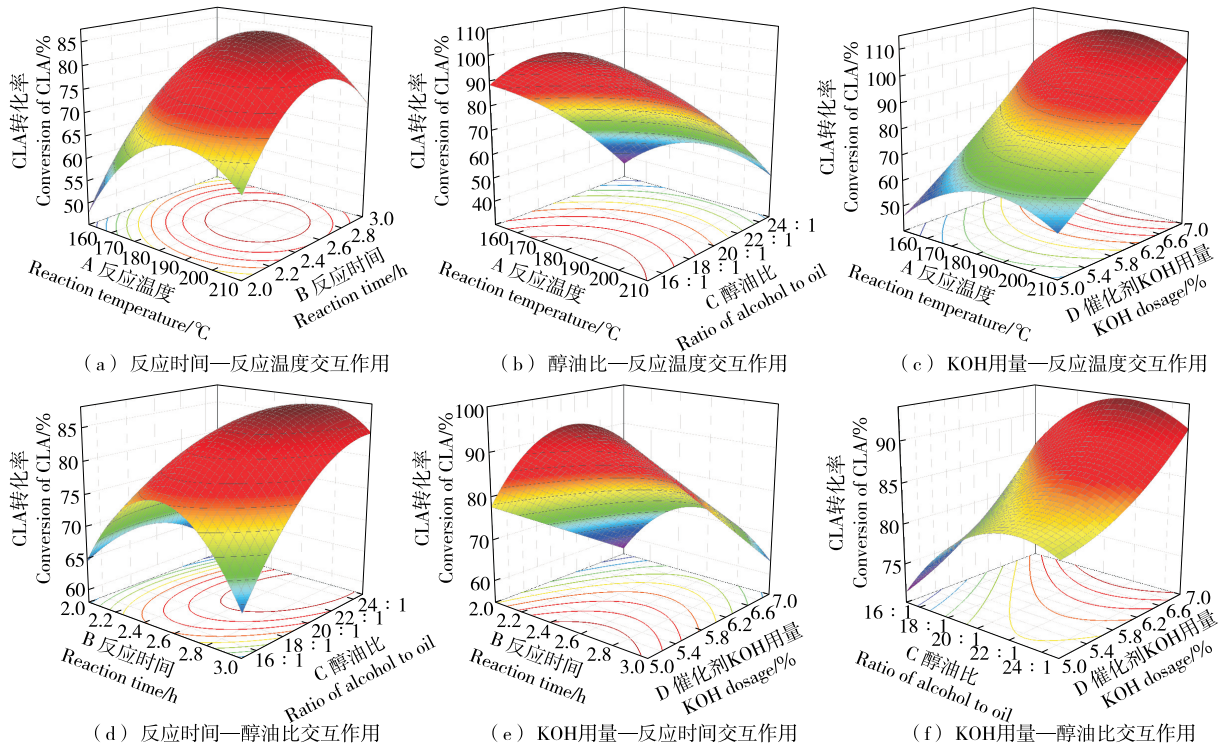


图5 因素交互作用对CLA转化率的影响

Figure 5 Interactions on CLA conversion rate among factors

3 结论

研究发现,花生油中亚油酸相对含量为 27.85%,具有利用其开发共轭亚油酸的前景。碱异构化花生油制备共轭亚油酸的最优工艺条件为:反应温度 200 ℃,反应时间 2.6 h,醇油比($m_{1,2\text{-丙二醇}} : m_{\text{亚油酸}}$)22 : 1, KOH 用量 7%。在该条件下,共轭亚油酸转化率为 89.81%。由于碱异构化方法还会有约 5%~10%的其他异构体生成,因此碱异构化后具有生理活性共轭亚油酸的提纯工艺及其他非生理活性成分的安全性还有待研究。

参考文献

- [1] 杨媚, 马杰, 杨泰, 等. 共轭亚油酸的生物学功能及其在动物生产中的应用[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(11): 3 216-3 224.
YANG M, MA J, YANG T, et al. Biological function of conjugated linoleic acid and its application in animal production [J]. China Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2019, 46(11): 3 216-3 224.
- [2] SALSINHA A S, PIMENTEL L L, FONTES A L, et al. Microbial production of conjugated linoleic acid and conjugated linolenic acid relies on a multi-enzymatic system[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2018, 82(4): e00019-18.
- [3] 刘华翾, 张萌, 唐小月, 等. 茶籽油制备共轭亚油酸的工艺优化及分离纯化研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(11): 51-55.
LIU H N, ZHANG M, TANG X Y, et al. Study on process optimization and separation and purification of conjugated linoleic acid from camellia seed oil[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(11): 51-55.
- [4] 赵薇, 张峰, 张和平, 等. 植物乳杆菌 P-8 转化亚油酸为共轭亚油酸的分析[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 94-103.
ZHAO W, ZHANG F, ZHANG H P, et al. Conversion of linoleic acid to conjugated linoleic acid by *Lactobacillus plantarum* p-8[J]. Food Science, 2021, 42(10): 94-103.
- [5] LIAN W, LI D, ZHANG L, et al. Synthesis of conjugated linoleic acid-rich triacylglycerols by immobilized mutant lipase with excellent capability and recycl ability [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2018, 117: 56-63.
- [6] 刘书来, 张生, 王勇, 等. Ru/Al₂O₃催化植物油异构化制备共轭亚油酸的研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 70-75.
LIU S L, ZHANG S, WANG Y, et al. Conjugated linoleic acid formation by isomerization of cottonseed oil over Ru/Al₂O₃ catalyst[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(11): 70-75.
- [7] 马琳, 樊晔, 吴业帆, 等. 天然不饱和脂肪酸改性制备共轭亚油酸[J]. 大豆科学, 2012, 31(5): 846-851.
MA L, FAN Y, WU Y F, et al. Preparation of conjugated linoleic acids from natural unsaturated fatty acids[J]. Soybean Science, 2012, 31(5): 846-851.
- [8] SAN K N E, FAN Y, FANG Y, et al. A soap-free strategy for one-pot synthesizing conjugated linoleic acid: Alkali isomerization of linoleic acid through preferential esterification pathway[J]. Journal

- of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(9): 1 021-1 028.
- [9] ALAALVAR H, ERINC H, SALUR F, et al. Production of conjugated linoleic acid by microwave-assisted and ultrasound-assisted alkali isomerization: Effects of microwave power and ultrasound amplitude[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2019, 96(7): 839-846.
- [10] SILVA-RAMIREZ A S, ROCHA-URIBE A, GONZALEZ-CHAVEZ M M, et al. Synthesis of conjugated linoleic acid by microwave-assisted alkali isomerization using propylene glycol as solvent[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(4): 1600079.
- [11] 李静, 王永, 杨耀东, 等. 棕榈油与常见食用油脂脂肪酸组分的比较分析[J]. 南方农业学报, 2016, 47(12): 2 124-2 128.
LI J, WANG Y, YANG Y D, et al. Comparison of fatty acid component between palm oil and common edible oils[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(12): 2 124-2 128.
- [12] NIEZGODA N, GLISZCZYNSKA A, GLADKOWSKI W, et al. Production of concentrates of CLA obtained from sunflower and safflower and their application to the lipase-catalyzed acidolysis of egg yolk phosphatidylcholine [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2016, 118(10): 1 566-1 578.
- [13] 马燕, 许铭强, 李喜弟, 等. 响应面法优化辣椒籽油碱异构化制备共轭亚油酸工艺及其氧化稳定性[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 908-915.
MA Y, XU M Q, LI X D, et al. Optimization of preparation of conjugated linoleic acid by alkali isomerization of pepper seed oil by response surface methodology and its oxidation stability[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(4): 908-915.
- [14] 张鹤. 花生脂肪酸近红外模型的建立及高油酸种质的筛选[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017: 22-23.
ZHANG H. The establishment of near-infrared model of peanut fatty acids and the screening of high oleic acid germplasm[J]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017: 22-23.
- [15] 郑云武, 杨晓琴, 黄元波, 等. 橡胶籽油碱催化异构化合成共轭亚油酸的制备工艺研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(16): 253-258.
ZHENG Y W, YANG X Q, HUANG Y B, et al. Study on preparation technology of conjugated linolenic acid of rubber seed oil by alkali catalytic isomerization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(16): 253-258.
- [16] 彭永健, 许新德, 张莉华, 等. 红花籽油制备共轭亚油酸工艺优化及其组成分析[J]. 中国油脂, 2015, 40(6): 72-76.
PENG Y J, XU X D, ZHANG L H, et al. Optimization of preparation of conjugated linoleic acid from safflower seed oil and its composition analysis[J]. China Oils and Fats, 2015, 40(6): 72-76.
- [17] 刘芸, 苏平, 宋思圆. 响应面法优化黄秋葵籽油中亚油酸的共轭转化率[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 273-277.
LIU Y, SU P, SONG S Y. Optimization of conjugate conversion rate of linoleic acid in okra seed oil by response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 273-277.
- [18] 张绍绍, 张慧, 李昊昊, 等. 葵花油碱异构化法制备共轭亚油酸研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(9): 100-105.
ZHANG S S, ZHANG H, LI H H, et al. Study on preparation of conjugated linoleic acid by alkali isomerization of sunflower oil[J]. China Food Additives, 2019, 30(9): 100-105.
- (上接第 138 页)
- [27] CHANG M, ZHANG T, FENG W H, et al. Preparation of highly pure stigmasteryl oleate by enzymatic esterification of stigmasteryl enriched from soybean phytosterols[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 128: 1-9.
- [28] MARITIM S, BOULAS P, LIN Y Q. Comprehensive analysis of liposome formulation parameters and their influence on encapsulation, stability and drug release in glibenclamide liposomes[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 592: 1-13.
- [29] 侯丽芬, 宗珊盈, 张海臣, 等. β -谷甾醇乙酸酯对脂质膜结构稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 20-25.
HOU L F, ZONG S Y, ZHANG H C, et al. Effect of β -sitosterol acetate ester on the structural stability of lipid membrane[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 20-25.
- [30] 郑景霞. β -胡萝卜素-薏苡仁油复合脂质体的制备及功能特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 1-2.
ZHENG J X. Preparation and functional properties of β -carotene-coix seed oil composite liposomes [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018: 1-2.
- [31] 沈雪. 乳清蛋白的超声改性及其包埋体系的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 71-72.
SHEN X. Effects of ultrasound on functional properties of whey proteins and whey protein-based delivery system for functional ingredients[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 71-72.
- [32] LUO M, ZHANG R F, LIU L, et al. Preparation, stability and antioxidant capacity of nano liposomes loaded with procyanidins from lychee pericarp[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 284: 1-10.
- [33] TAMJIDI F, SHAHEDI M, VARSHOSAZ J, et al. Design and characterization of astaxanthin-loaded nanostructured lipid carriers[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 366-374.
- [34] 彭盛峰. pH 驱动法制备姜黄素食品运载体及其生物利用率[D]. 南昌: 南昌大学, 2019: 28-29.
PENG S F. The preparation and bioavailability of curcumin loaded food delivery system by pH-driven method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019: 28-29.
- [35] ZHAO L S, TEMELLI F, CURITS J M, et al. Preparation of liposomes using supercritical carbon dioxide technology: Effects of phospholipids and sterols[J]. Food Research International, 2015, 77: 63-72.