

# 基于核桃油的中长链甘油三酯的酶法制备及纯化

邹孝强<sup>1</sup>, 高盼<sup>2</sup>, 徐林海<sup>1</sup>, 张四红<sup>2</sup>, 何东平<sup>2</sup>

(1. 江南大学 食品学院, 国家功能食品工程技术研究中心, 粮食发酵工艺与技术国家工程实验室, 江苏 无锡 214122;  
2. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023)

**摘要:**利用脂肪酶催化中链甘油三酯(MCT)与核桃油发生酯交换反应,利用分子蒸馏脱除产物中的游离脂肪酸(FAA),再用乙醇萃取MCT制备高含量中长链甘油三酯(MLCT)的结构脂产品。对酶催化酯交换反应条件进行优化,对乙醇萃取条件进行优化,并对结构脂产品的脂肪酸组成及分布进行测定。结果表明:最佳酯交换反应条件为以Novozym 435为催化用酶,加酶量10%、MCT与核桃油摩尔比2:1、反应温度55℃、反应时间9 h,在此条件下反应并通过分子蒸馏脱除FAA后所得产品的MLCT含量为76.2%,MCT含量为14.3%,长链甘油三酯(LCT)含量为9.5%;最佳乙醇萃取条件为乙醇体积分数85%、底物(分子蒸馏脱除游离脂肪酸后产物)与乙醇溶液的比例1:3,在最佳条件下所得产品的MLCT含量为85.4%,MCT含量为3.7%,LCT含量为10.8%,产品得率为80.8%。制备的产品中MLCT含量高,富含亚油酸与亚麻酸,其含量比值为5.8,可作为消化系统缺陷患者补充必需脂肪酸的油脂来源。

**关键词:**核桃油; 中长链甘油三酯; 脂肪酶; 酯交换; 乙醇萃取

中图分类号:TS225.1;Q814.9 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)04-0058-06

## Lipase-catalyzed preparation of medium- and long-chain triglycerides based on walnut oil

ZOU Xiaoqiang<sup>1</sup>, GAO Pan<sup>2</sup>, XU Linhai<sup>1</sup>, ZHANG Sihong<sup>2</sup>, HE Dongping<sup>2</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology, National Engineering Research Center for Functional Food, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Bulk Grain and Oil Intensive Processing of Ministry of Education, College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** The product with high content of medium- and long-chain triglycerides (MLCT) was prepared by using lipase to catalyze the transesterification of medium-chain triglycerides (MCT) with walnut oil, using molecular distillation to remove the free fatty acid (FFA), and using ethanol to extract the MCT from the product. The enzyme-catalyzed transesterification reaction conditions and ethanol extraction conditions were optimized, and the fatty acid composition and distribution of the product were determined. The results showed that the optimal transesterification reaction conditions were obtained as follows: Novozym 435 dosage 10%, molar ratio of MCT to walnut oil 2:1, reaction temperature 55°C and reaction time 9 h. After reaction under these conditions and removal of FFA with molecular distillation, the contents of MLCT, MCT and long-chain triglycerides (LCT) were 76.2%, 14.3% and 9.5%, respectively. The optimal ethanol extraction conditions were obtained as follows: ethanol volume fraction 85%, and ratio of substrate (the transesterification product after molecular distillation) to ethanol

solution 1:3. Under these conditions, the contents of MLCT, MCT and LCT were 85.4%, 3.7% and 10.8%, respectively, and the product yield was 80.8%. This product with high content of MLCT was rich in linoleic acid and linolenic

收稿日期:2021-04-06;修回日期:2021-08-17

基金项目:国家自然科学基金(31601433)

作者简介:邹孝强(1983),男,副教授,博士,研究方向为功能性脂质制造与营养(E-mail)xiaoqiangzou@163.com。

通信作者:何东平,教授(E-mail)hedp123456@163.com。

acid, and the content ratio of linoleic acid to linolenic acid was 5.8, which could be used as a source of oil to supplement essential fatty acids for patients with digestive system defects.

**Key words:** walnut oil; medium - and long - chain triglycerides; lipase; transesterification; ethanol extraction

中长链甘油三酯 (MLCT) 是一类在甘油骨架上同时包含中链脂肪酸 (MCFA) 和长链脂肪酸 (LCFA) 的结构脂。MLCT 作为一种特殊的功能性油脂,一方面利用中链脂肪酸提供即时能量<sup>[1-2]</sup>,另一方面利用长链脂肪酸提供营养<sup>[3-4]</sup>。因此,反应基料油的脂肪酸组成对于 MLCT 的营养价值具有重要意义。但是,目前大部分研究主要关注 MLCT 的功能性,忽略其营养性,缺乏对 MLCT 生产的基料油的筛选。就脂肪酸组成而言,核桃油作为一种重要的木本油脂,饱和脂肪酸含量高达 90% 以上,亚油酸含量为 51.2% ~ 68.9%, $\alpha$ -亚麻酸含量为 6.82% ~ 15.01%,其  $\omega$ -6/ $\omega$ -3 脂肪酸比例在世界卫生组织推荐摄入的比例范围之内 (5:1 ~ 10:1),是补充  $\omega$ -6 和  $\omega$ -3 脂肪酸的良好油脂来源<sup>[5]</sup>。因此,以核桃油为基料油生产 MLCT 对于提升其营养价值具有重要意义。

目前,文献报道合成 MLCT 的方法主要有酯交换法<sup>[6-7]</sup>、酸解法<sup>[8-9]</sup>等。其中,采用中链甘油三酯 (MCT) 与食用油脂直接进行反应获得 MLCT 的酯交换法,因其工艺过程简单易行,被广泛应用于工业生产中。但是,该方法制备的产物中含有一定量的 MCT 和长链甘油三酯 (LCT),MLCT 含量相对较低。MCT 消化及吸收速率过快,容易在小肠管腔造成较高的渗透压,大量食用可能会造成腹泻、呕吐、腹胀等肠胃不适症状<sup>[10]</sup>。因此,在合成 MLCT 反应后需要通过一定方法脱除体系中的 MCT。

本研究利用脂肪酶催化 MCT 与核桃油进行酯交换反应,将核桃油转化为富含亚油酸与亚麻酸的 MLCT,通过分子蒸馏脱除游离脂肪酸后,利用 MCT 与 MLCT、LCT 极性的差异,采用乙醇萃取酯交换产物中的 MCT,降低产物中 MCT 的含量,从而获得高 MLCT 含量的产品。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

核桃油,重庆市九重山实业有限公司提供,脂肪酸组成与分布如表 1 所示;辛癸酸甘油三酯 (MCT),浙江建德千岛化工有限公司,脂肪酸组成与分布如表 2 所示;脂肪酶 NS40086 (酶活 275 IUN/g)、Novozym 435 (酶活 10 000 PLU/g)、Lipozyme RM IM (酶活 275 IUN/g),诺维信(中国)投资有限公司;

Supelco 37 种脂肪酸甲酯混标, Sigma - Aldrich (上海) 贸易有限公司; TLC 硅胶板 60G (10 cm × 20 cm), 烟台江友硅胶有限公司; 色谱纯正己烷、乙腈、异丙醇、甲醇、1 mol/L 烯丙基溴化镁溶液, 百灵威科技有限公司 (上海); 浓盐酸、冰醋酸、硼酸, 分析纯。

表 1 核桃油的脂肪酸组成与分布 %

脂肪酸	总脂肪酸含量	sn-2 位含量	sn-1,3 位含量
C16:0	5.4	2.9	6.7
C18:0	2.3	1.0	2.9
C18:1	20.7	27.8	17.1
C18:2	61.0	53.2	64.9
C18:3	10.5	15.1	8.2

表 2 MCT 的脂肪酸组成与分布 %

脂肪酸	总脂肪酸含量	sn-2 位含量	sn-1,3 位含量
C8:0	57.4	58.9	56.7
C10:0	42.6	41.1	43.4

GC-14B 气相色谱仪, 日本岛津公司; Waters 高效液相色谱仪, 美国 Waters 公司; JJ-1B 强力恒速搅拌器; GT16-3 高速台式离心机; AR2140 电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅; DL-180A 超声波清洗仪; R-501 低压旋转蒸发器; 定时恒温磁力搅拌反应器; KDL1 短程分子蒸馏设备, 德国 UIC 公司; MixPlus 旋涡振荡器。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 MLCT 的制备

将 MCT 与核桃油以一定摩尔比混合, 向其中加入一定量 (以底物质量计) 的脂肪酶, 充氮, 并在一定温度下, 转速 600 r/min 的条件下反应一定时间, 得到反应产物。

#### 1.2.2 分子蒸馏脱除游离脂肪酸

采用分子蒸馏除去反应体系中的游离脂肪酸。分子蒸馏条件: 蒸发器温度 185 °C, 冷凝器温度 40 °C, 换热器温度 60 °C, 旋转刮膜速率 120 r/min, 进料速度 2 mL/min, 绝对压力 2 Pa。蒸发器的加热源来自于夹套中循环的加热硅油。

#### 1.2.3 乙醇萃取纯化 MLCT

向分子蒸馏重相中添加一定量的乙醇溶液, 充分搅拌、振荡并离心, 取出油相, 采用低压蒸馏脱除乙醇, 获得脱除 MCT 的结构脂产品。

### 1.2.4 反相高效液相色谱分析结构脂 TAG 组成

采用配备有蒸发光散射检测器(ELSD)的反相高效液相色谱分析结构脂 TAG 组成。分析条件:ELSD 温度 55 °C,氮气(雾化气)流速 1.8 mL/min,增益 1; Lichrospher C18 色谱柱(5  $\mu$ m,4.6 mm  $\times$  250 mm);流动相为乙腈和异丙醇,流速 0.8 mL/min,洗脱程序为 30 min 内将乙腈从 70%降至 60%,再在 10 min 内将乙腈降至 55%,保持 20 min,最后在 5 min 内将其升高至 70%;进样质量浓度 20 mg/mL,进样量 10  $\mu$ L。

### 1.2.5 脂肪酸组成分析

采用配备火焰离子化检测器的 GC-14B 气相色谱仪分析脂肪酸组成。气相色谱条件:PEG-20M 熔融石英毛细管柱(30 m  $\times$  0.32 mm  $\times$  0.5  $\mu$ m);柱升温程序为初温 100 °C,保留 4 min,以 15 °C/min 升温至 180 °C,保留 4 min,再以 4 °C/min 升温至 215 °C;进样口温度及检测器温度均为 250 °C。

### 1.2.6 TLC 薄板分离 TAG

从反应体系中取出 50  $\mu$ L 样品,采用 TLC 薄板分离纯化得到 TAG,展开剂为正己烷-乙醚-乙酸(体积比 80:20:1)。分离结束后,在薄板上均匀喷洒 0.2% 的 2,7-二氯荧光素的甲醇溶液并进行紫外显色。将 TAG 条带刮下,并用 2 mL 乙醚萃取两次,用无水硫酸钠干燥,并用氮气吹扫除去乙醚。加入 50  $\mu$ L 2 mol/L 甲醇氢氧化钾溶液甲酯化反应 3 min,再用 2 mL 正己烷萃取脂肪酸甲酯两次,用无水硫酸钠干燥,最后使用氮气浓缩,进气相色谱仪按 1.2.5 方法进行脂肪酸组成分析。

### 1.2.7 sn-2 脂肪酸组成分析

将 30 mg 样品溶解于 10 mL 乙醚中,添加 0.3 mL 烯丙基溴化镁,剧烈搅拌 1 min 后,加入 8 mL 酸缓冲液(0.27 mol/L HCl 溶于 0.4 mol/L 硼酸)终止反应<sup>[11]</sup>。除去水相,将乙醚萃取液用硼酸洗涤两次,并用无水硫酸钠干燥。采用氮气将乙醚相浓缩至 150  $\mu$ L,以氯仿-丙酮(体积比 90:10)为展开剂,在硼酸浸渍的 TLC 板上分离。将 sn-2 MAG 条带刮下,并用 2 mL 乙醚萃取两次。用无水硫酸钠干燥,并采用氮气浓缩,最后按 1.2.6 方法对残余物进行甲酯化后,进气相色谱按 1.2.5 方法分析脂肪酸组成。

### 1.2.8 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果以“平均值  $\pm$  标准差”表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 酶催化酯交换反应条件的优化

#### 2.1.1 脂肪酶种类的影响

脂肪酶作为催化剂影响酯交换反应的因素主要

有两个:一是酶的活力,二是酶的选择性。脂肪酶的活力影响酯交换反应的速率,即达到反应平衡所需的时间,酶的选择性影响反应产物的组成。在加酶量 8%、反应时间 9 h、MCT 与核桃油摩尔比 1:1、反应温度 55 °C 条件下,选择 3 种常用的商业性脂肪酶 Novozym 435、NS40086、Lipozyme RM IM 研究脂肪酶种类对酯交换反应的影响,结果如图 1 所示。

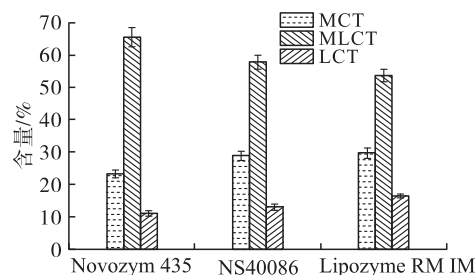


图 1 脂肪酶种类对酯交换反应产物组成的影响

由图 1 可以看出,相对于其他两种脂肪酶,Novozyym 435 催化的反应产物中 MLCT 的含量最高,达到 65.4%,同时反应产物中所含的 LCT 及 MCT 含量也最低。原因可能是,一方面 Novozym 435 对于此反应体系的活力较高,另一方面 Novozym 435 是一种非位置选择性脂肪酶,在反应过程中可以作用于 TAG 的 3 个位置,因此 TAG 3 个位置上的脂肪酸均参与反应,从而可获得较高的 MLCT 含量;而 NS40086 和 Lipozyme RM IM 为 sn-1,3 位选择性脂肪酶,反应过程中仅作用于 TAG 的 sn-1,3 位脂肪酸,从而导致产物中 MLCT 含量相对较低,而 LCT 和 MCT 含量相对较高。因此,选择 Novozym 435 作为催化用酶。

#### 2.1.2 MCT 与核桃油摩尔比的影响

在反应过程中 LCT 既是反应原料,也是反应产物,因此反应产物中不可避免有一定含量的 LCT。但是,根据酯交换反应脂肪酸平衡分布理论可推测,越高的 MCT 与核桃油摩尔比,有利于反应向生成 MLCT 方向进行,且最终产物中 LCT 含量越低;而过量的 MCT 可通过一定浓度乙醇进行分离。因此,考虑高 MCT 与核桃油摩尔比进行反应,同时采用 MLCT/(MLCT + LCT) 值作为反应优化的一个指标。在加酶量 8%、反应温度 55 °C 条件下,研究 MCT 与核桃油摩尔比对酯交换反应的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,MCT 与核桃油摩尔比越高反应产物中 MCT 含量越高,而 LCT 含量越低。但对于 MLCT 而言,当反应时间短于 3 h,产物中 MLCT 的含量随着 MCT 与核桃油摩尔比的升高而升高,但当反应时间超过 3 h,MCT 与核桃油摩尔比为 2:1 的反应产物中 MLCT 的含量最高,直到反应达到平衡。原因可能是反应产物中 MLCT 含量是以反应产

物中总 TAG 含量为基数进行计算的,反应物中 MCT 含量越高,反应产物中剩余的 MCT 含量也越高,影响体系中 MLCT 含量。通过比较  $MLCT/(MLCT + LCT)$  值发现,MCT 与核桃油摩尔比越高,反应产物中  $MLCT/(MLCT + LCT)$  值越高。原因是越高的 MCT 与核桃油摩尔比,参与反应的 MCT 含量也越

高,反应达到平衡后,LCT 含量也越低,最终  $MLCT/(MLCT + LCT)$  值越高。但是,由图 2 可知,当 MCT 与核桃油摩尔比由 1:1 增加至 2:1 时, $MLCT/(MLCT + LCT)$  值增加较快,但当 MCT 与核桃油摩尔比大于 2:1 时, $MLCT/(MLCT + LCT)$  值增加速率较慢。因此,选择 MCT 与核桃油摩尔比为 2:1。

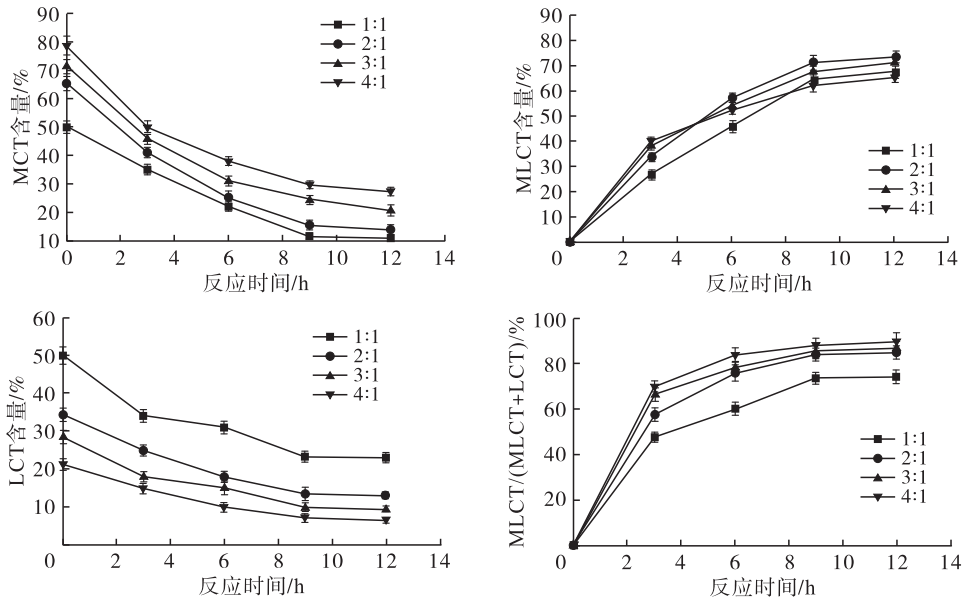


图2 MCT与核桃油摩尔比对酶催化酯交换反应的影响

### 2.1.3 加酶量的影响

在 MCT 与核桃油摩尔比 2:1、反应温度 55 °C 条

件下,研究加酶量对酯交换反应的影响,结果如图 3 所示。

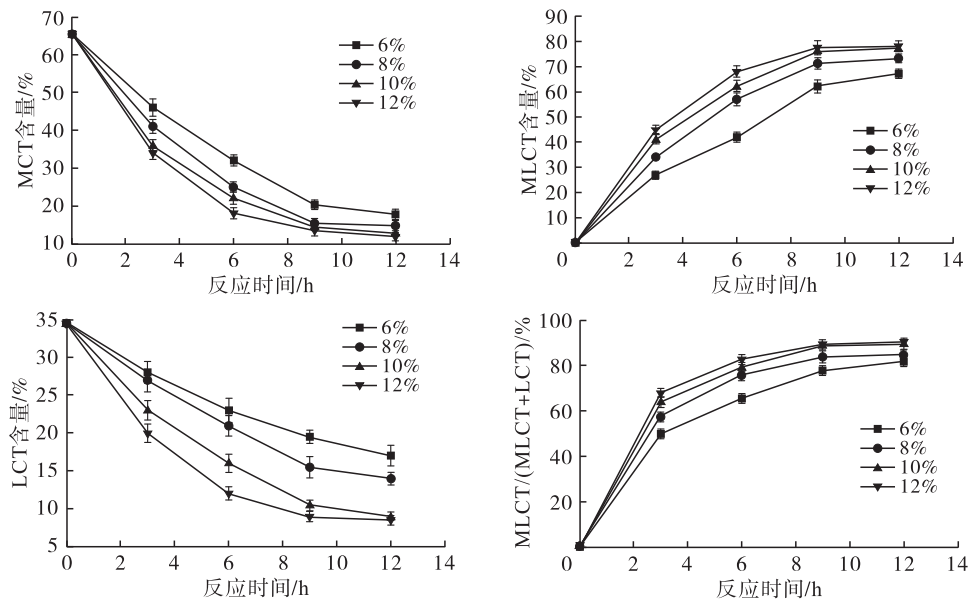


图3 加酶量对酶催化酯交换反应的影响

由图 3 可以看出,随着加酶量的增加,在不同反应时间下,反应体系中 MCT 含量和 LCT 含量逐渐降低,MLCT 含量逐渐升高。但是,当加酶量由 6% 增加至 10% 时,MLCT 的增加量较高,而 LCT 降低量也较高,当加酶量由 10% 增加至 12% 时,两者变化幅度不大。不同加酶量下不同时间点  $MLCT/(MLCT +$

$LCT)$  值与 MLCT 和 LCT 的变化类似,当加酶量由 6% 增加至 10% 时, $MLCT/(MLCT + LCT)$  值增加较快,而当加酶量由 10% 增加至 12% 时, $MLCT/(MLCT + LCT)$  值变化不大。因此,选择加酶量为 10%。

### 2.1.4 反应温度的影响

本反应体系中,由于 MCT 与核桃油的极性差异

影响了两种油脂的相容性,而较高的温度能够增加 MCT 与核桃油的相容性,从而提高反应效率。另外,温度影响酶的活力,合适的反应温度下,酶具有较好

的活力,但较高的反应温度将会导致酶不可逆失活。在 MCT 与核桃油摩尔比 2:1、加酶量 10% 条件下,研究反应温度对酯交换反应的影响,结果如图 4 所示。

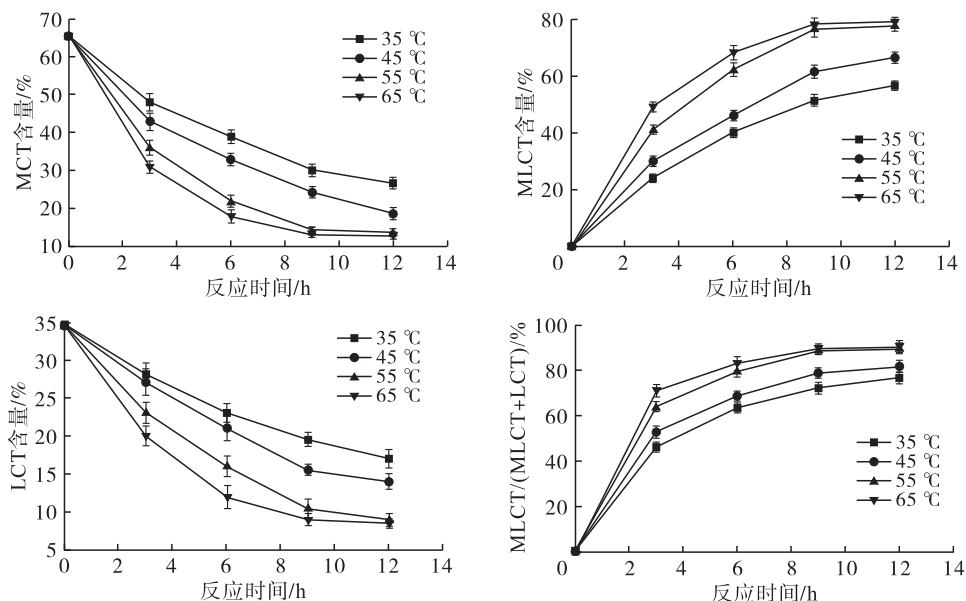


图 4 反应温度对酶催化酯交换反应的影响

由图 4 可以看出,随着反应温度的升高,在不同反应时间下,体系中 MCT 含量与 LCT 含量不断降低,而 MLCT 含量不断增加。但是,当反应温度由 35 °C 升高至 55 °C 时,体系中 MCT、LCT 降低量以及 MLCT 的增加量均较高,当温度由 55 °C 升高至 65 °C 时,体系中 MCT、LCT 降低量以及 MLCT 的增加量均较低。不同反应温度下不同反应时间点 MLCT/(MLCT + LCT) 值与 MLCT 含量的变化类似,当反应温度由 35 °C 升高至 55 °C 时,MLCT/(MLCT + LCT) 值增加量较高,而当反应温度由 55 °C 升高至 65 °C 时,MLCT/(MLCT + LCT) 值变化不大。因此,选择反应温度为 55 °C。

改变其极性。因此,以萃取产物中 MLCT 含量及产品得率为指标进行优化。在底物(分子蒸馏重相,下同)与乙醇溶液比例 1:1 条件下,考察乙醇体积分数对萃取效果的影响,结果如图 5 所示。

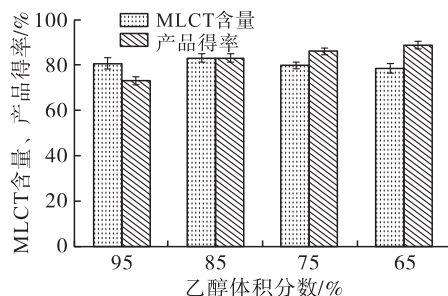


图 5 乙醇体积分数对萃取效果的影响

由图 5 可知,随着乙醇体积分数的降低,产品得率逐渐升高,而 MLCT 含量先增高后降低。当乙醇体积分数为 85% 时,MCT 溶解量最高,有利于产物中 MCT 的脱除,最终使萃取产物中 MLCT 含量最大。因此,选择乙醇体积分数为 85%。

通过单因素实验,得到 Novozym 435 酶催化 MCT 与核桃油酯交换制备 MLCT 的优化条件:加酶量 10%,MCT 与核桃油摩尔比 2:1,反应温度 55 °C,反应时间 9 h。在优化条件下反应并通过分子蒸馏脱除游离脂肪酸后,所得产品中 MLCT 含量为 76.2%,MCT 含量为 14.3%,LCT 含量为 9.5%。

## 2.2 乙醇萃取条件的优化

### 2.2.1 乙醇体积分数的影响

由于 MCT 中脂肪酸碳链较短,极性相对较高,易溶于乙醇,但 LCT 中脂肪酸碳链较长,难溶于乙醇,因此可用乙醇作为 LCT 与 MCT 的分离溶剂。为改变产物中 MCT、MLCT 以及 LCT 在萃取溶液中的分布比例,以获得最高含量的 MLCT 以及最高的产品得率,实验通过向乙醇中添加不同比例的水来

### 2.2.2 底物与乙醇溶液比例的影响

乙醇溶液用量会影响萃取过程中各种成分在溶液中的含量,从而影响产品得率及萃取产物中 MLCT 含量。在乙醇体积分数 85% 的条件下,研究底物与乙醇溶液比例对萃取效果的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,随着乙醇溶液用量的增加,产品得率逐渐减小,而萃取产物中 MLCT 含量逐渐增加。当底物与乙醇溶液比例由 1:1 增加至 1:3 时,萃取

产物中 MLCT 含量由 83.1% 增加至 85.4%, 但是当底物与乙醇溶液比例由 1:3 增加至 1:9 时, 萃取产物中 MLCT 含量变化较小, 但是产品得率降低幅度较大。因此, 为获得相对较高的 MLCT 含量以及较高的产品得率, 选择底物与乙醇溶液比例为 1:3。

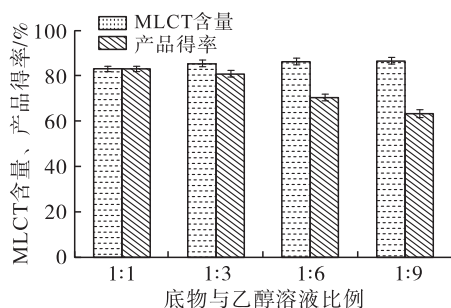


图6 底物与乙醇溶液比例对萃取效果的影响

经过乙醇萃取, 所得结构脂产品中 MLCT 含量为 85.4%, MCT 含量为 3.7%, LCT 含量为 10.8%, 产品得率为 80.8%。

结构脂产品的脂肪酸组成及分布如表3所示。

表3 产品的脂肪酸组成及分布 %

脂肪酸	总脂肪酸含量	sn-2 位含量	sn-1,3 位含量
C8:0	28.4 ± 1.2	26.1 ± 1.4	29.5 ± 1.1
C10:0	21.0 ± 0.7	18.9 ± 0.9	22.0 ± 0.9
C16:0	2.7 ± 0.1	1.7 ± 0.0	3.2 ± 0.1
C18:0	1.1 ± 0.1	0.7 ± 0.0	1.4 ± 0.0
C18:1	10.5 ± 0.5	12.9 ± 0.8	9.3 ± 0.6
C18:2	30.9 ± 1.5	31.5 ± 1.5	30.7 ± 1.3
C18:3	5.3 ± 0.2	8.2 ± 0.6	3.9 ± 0.1

注: sn-1,3 位含量 =  $(3 \times \text{总脂肪酸含量} - \text{sn-2 位含量}) / 2 \times 100\%$ 。

由表3可知, 产品中 C18:2 与 C18:3 的比值为 5.8, 在世界卫生组织推荐摄入的比例范围之内, 中链脂肪酸含量为 49.4%, 对于消化缺陷患者而言, 可提升脂肪的消化吸收效率, 同时, 产品中 sn-2 位 C18:2 和 C18:3 的总含量达到 39.7%, 有利于人体对两种必需脂肪酸的吸收和利用。

### 3 结论

本研究利用脂肪酶催化 MCT 与核桃油的酯交换反应, 利用分子蒸馏脱除产物中的游离脂肪酸, 再用乙醇萃取获得高 MLCT 含量的结构脂产品。结果表明: 最佳酶催化酯交换反应条件为以 Novozym 435 为催化用酶, 加酶量 10%、MCT 与核桃油摩尔比 2:1、反应温度 55 °C、反应时间 9 h, 在此条件下反应并通过分子蒸馏脱除游离脂肪酸后, 所得产物中 MLCT 含量为 76.2%, MCT 含量为 14.3%, LCT 含量为 9.5%。最佳乙醇萃取条件为乙醇体积分数 85%、底物与乙醇溶液比例 1:3, 在此条件下所得结

构脂产品中 MLCT 含量为 85.4%, MCT 含量为 3.7%, LCT 含量为 10.8%, 产品得率为 80.8%。本产品 MLCT 含量高, 富含亚油酸与亚麻酸, 且两种脂肪酸的含量比值为 5.8, 比例合理, 可作为消化系统缺陷患者补充必需脂肪酸的油脂来源。

### 参考文献:

- [1] LIU W, LIU W L, LIU C M, et al. Medium - chain fatty acid nanoliposomes for easy energy supply [J]. Nutrition, 2011, 27: 700 - 706.
- [2] OSBORN H T, AKOHO C C. Structured lipids - novel fats with medical, nutraceutical, and food applications [J]. Compr Rev Food Sci F, 2002, 1: 110 - 120.
- [3] LEE Y Y, TANG T K, LAI O M. Health benefits, enzymatic production, and application of medium - and long - chain triacylglycerol (MLCT) in food industries: a review [J]. J Food Sci, 2012, 77: 137 - 144.
- [4] HU J N, SHEN J R, XIONG C Y, et al. Investigation of lipid metabolism by a new structured lipid with medium - and long - chain triacylglycerols from *Cinnamomum camphora* seed oil in healthy C57BL/6J mice [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66: 1990 - 1998.
- [5] MARCELA L M, MIGUEL A M, DAMIÁN M M. Pressing and supercritical carbon dioxide extraction of walnut oil [J]. J Food Eng, 2008, 88: 399 - 404.
- [6] KORMA S A, ZOU X, ALI A H, et al. Preparation of structured lipids enriched with medium - and long - chain triacylglycerols by enzymatic interesterification for infant formula [J]. Food Bioprod Process, 2018, 107: 121 - 130.
- [7] XU X, BALCHEN S, HØY C E, et al. Pilot batch production of specific - structured lipids by lipase - catalyzed interesterification: preliminary study on incorporation and acyl migration [J]. J Am Oil Chem Soc, 1998, 75(2): 301 - 308.
- [8] ZOU X G, HU J N, ZHAO M L, et al. Lipozyme RM IM - catalyzed acidolysis of *Cinnamomum camphora* seed oil with oleic acid to produce human milk fat substitutes enriched in medium - chain fatty acids [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(43): 10594 - 10603.
- [9] WANG Y, XIA L, XU X, et al. Lipase - catalyzed acidolysis of canola oil with caprylic acid to produce medium -, long - and medium - chain - type structured lipids [J]. Food Bioprod Process, 2012, 90(4): 707 - 712.
- [10] BERIT M, MARIA P, JÜRGEN S. Medium - chain triglycerides [J]. Int Dairy J, 2006, 16: 1374 - 1382.
- [11] XU X, SKANDS A R H, HØY C E, et al. Production of specific - structured lipids by enzymatic interesterification: elucidation of acyl migration by response surface design [J]. J Am Oil Chem Soc, 1998, 75(12): 1179 - 1186.