

# 月桂酸酸解棕榈硬脂合成中长链脂肪酸甘油三酯的工艺优化及其理化性质分析

李 闯<sup>1</sup>, 赵国群<sup>1</sup>, 李 阳<sup>2</sup>, 张 辉<sup>2</sup>, 冯凤琴<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学 生物科学与工程学院, 石家庄 050000; 2. 浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310000)

**摘要:**为制得富含月桂酸的 MLM 型中长链脂肪酸甘油三酯 (MLCT), 以月桂酸酸解棕榈硬脂合成富含 1,3-二月桂酸-2-棕榈酸甘油三酯 (LaPLa) 的 MLCT。以 LaPLa 含量为指标, 比较了固定化脂肪酶 AO IM、RM IM、TL IM 的催化性能, 同时对反应温度、酶载量、底物摩尔比、反应时间进行优化, 对合成的 MLCT 的理化性质进行了测定。结果表明, 固定化脂肪酶 AO IM 具有良好的催化性能, 在反应温度 65℃、底物 (棕榈硬脂与月桂酸) 摩尔比 1:10、酶载量 10%、反应时间 2.5 h 的条件下, LaPLa 含量可达到 40.59%。与棕榈硬脂相比, 纯化后的 MLCT 酸价 (KOH) (0.19 mg/g) 降低, 过氧化值 (4.85 mmol/kg) 升高, 碘值 (I) (37.35 g/100 g) 降低, 结晶起始温度 (17.58℃) 和熔融起始温度 (23.97℃) 都有所降低。该 MLCT 具有潜在的结构和功能优势, 为开发新型 MLCT 提供了研究思路。

**关键词:** 中长链脂肪酸甘油三酯; 月桂酸; 棕榈硬脂; 1,3-二月桂酸-2-棕榈酸甘油三酯; 理化性质  
中图分类号: R589.2; TS221 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2020)11-0088-06

## Process optimization and physicochemical properties of medium – and long – chain triacylglycerols synthesized by reaction of palm stearin and lauric acid

LI Chuang<sup>1</sup>, ZHAO Guoqun<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, FENG Fengqin<sup>2</sup>

(1. School of Biological Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China; 2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In order to prepare a MLM (Medium – long – medium, MLM) type medium – and long – chain triacylglycerols (MLCT) rich in lauric acid, the MLCT rich in 1,3 – lauric – 2 – palmitoylglycerol (LaPLa) were synthesized by lauric acid hydrolyzing palm stearin. Using LaPLa content as an index, the performance of AO IM (lipase) was compared with the commercial enzymes RM IM and TL IM. At the same time, the reaction temperature, enzyme loading, substrate molar ratio and reaction time were optimized. The physicochemical properties of the MLCT were determined. The results showed that AO IM had good catalytic performance, and under the conditions of reaction temperature 65℃, substrate molar ratio (molar ratio of palm stearin to lauric acid) 1:10, enzyme loading 10% and reaction time 2.5 h, the LaPLa content reached 40.59%. The physicochemical properties analysis showed that compared with palm stearin, the acid value (0.19 mgKOH/g) and iodine value (37.35 gI/100 g) of purified MLCT decreased and

its peroxide value (4.85 mmol/kg) increased. Both the initial crystallization temperature (17.58℃) and the initial melting temperature (23.97℃) decreased. This kind of MLCT with specific structure had potential structural and functional advantages, and provided research ideas for

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400600)

作者简介: 李 闯 (1989), 男, 在读硕士, 研究方向为油脂及发酵工程 (E-mail) jiashuo0369@163.com。

通信作者: 赵国群, 教授, 硕士生导师 (E-mail) gqzhao18@126.com。

developing new MLCT.

**Key words:** medium - and long - chain triacylglycerols; lauric acid; palm stearin; 1,3 - lauric acid - 2 - palmitoylglycerol; physicochemical property

油脂是食品的重要组成部分,作为机体不可缺少的营养元素之一,一方面要为机体提供能量,另一方面发挥着特殊的健康作用。随着人们生活水平的提高,过多摄入油脂导致的肥胖和不良的生活方式已经成为了心血管疾病的重要危险因素<sup>[1]</sup>。中长链脂肪酸甘油三酯(MLCT)是一类结构脂质(SLs),因其同时具备中链和长链脂肪酸,在为机体供能的同时避免了脂肪堆积,从而利于健康,在食品工业中应用越来越广<sup>[2]</sup>。根据甘油三酯(TAGs)在体内代谢的特点,MLM型MLCT位于sn-1,3位的中链脂肪酸可以快速水解代谢<sup>[3]</sup>,具有更好的代谢优势,一直以来都是MLCT的主要研究方向。

月桂酸是一种特殊的脂肪酸,在中链脂肪酸中其碳链最长,虽然属于饱和脂肪酸,但不具有心血管疾病风险。研究表明,月桂酸占脂肪酸50%左右的椰子油具有很好的健康功能,南亚等一些地区使用椰子油作为主要的食用油脂,其心血管疾病风险降低<sup>[4-5]</sup>。除此之外,椰子油还有一些特殊功能,如抑菌、消炎<sup>[6-7]</sup>,而且在对结肠癌细胞的诱导凋亡中月桂酸表现出了很好的效果<sup>[8]</sup>。在MLCT的研究中,月桂酸越来越受到重视,一方面富含月桂酸的中链脂肪酸甘油三酯被引入市场,用于色拉油和烹饪,具有很好的功能优势,如促进心脑血管的健康。另一方面,相较于利用传统的辛酸和癸酸合成的MLCT,富含月桂酸的MLCT烟点更高,应用范围更广<sup>[9]</sup>。这些研究表明,月桂酸作为中链脂肪酸合成MLCT具有很好的应用前景。人乳脂中有20%左右的棕榈酸,且主要位于TAGs sn-2位,研究表明sn-2棕榈酸油脂可以促进钙的吸收,预防因sn-1,3位棕榈酸与钙离子结合造成的便秘<sup>[10-11]</sup>。除此之外,sn-2棕榈酸油脂还可以提高骨骼生长速度,有利于肠道益生菌群生长,提高骨矿物质含量及密度,促进大脑发育等<sup>[12]</sup>。所以,LaPLa(La,月桂酸;P,棕榈酸)型甘油三酯具有很好的结构优势。虽然椰子油中含有大量月桂酸和部分棕榈酸,但是分子中同时含有两个月桂酸和一个棕榈酸的TAGs含量很低,约为1.51%,并且月桂酸和棕榈酸并没有特定位点<sup>[13]</sup>。富含LaPLa的MLCT具有典型的代谢和功能优势,一方面含有较多具有健康功能的中链脂肪酸月桂酸,另一方面含有较多的sn-2位棕榈酸,具有很好的应用前景。

国内对于MLCT的研究相对较晚,最常用的方法是酶催化中链脂肪酸甘油三酯与长链脂肪酸甘油三酯反应的酯交换法。这种方法原料利用率高,易于实现工业化,但合成的目的产物脂肪酸位置特异性差。随着对MLM型MLCT的深入研究,酸解法在追求脂肪酸位置特异性方面表现出了更大的优势。本研究设计了一种以月桂酸为酰基供体合成的新型MLCT,即以sn-1,3位特异性脂肪酶催化月桂酸酸解棕榈硬脂合成富含LaPLa的MLCT,筛选了脂肪酶,对合成工艺进行了优化,检测了合成的MLCT理化性质,为开发新型功能性MLCT奠定了一定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

固定化脂肪酶RM IM、TL IM,诺维信(中国)生物技术有限公司;固定化脂肪酶AO IM,杭州康源食品科技有限公司;58℃棕榈硬脂(PS),南京新实力食品科技有限公司;月桂酸,阿拉丁公司;脂肪酸甲酯混标,美国Sigma公司;正己烷,气相色谱纯,阿拉丁公司;其他试剂均为分析纯或色谱纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

GC-2014气相色谱仪,日本岛津;7890A-5975C气质联用仪,美国安捷伦;THZ-82水浴恒温振荡器,金坛市精达仪器制造有限公司;RE-52AA旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;DSC Q200差示扫描量热仪,美国TA公司;BSA224S分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司;L600-A离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 月桂酸酸解棕榈硬脂合成MLCT

在100 mL圆底烧瓶中加入一定摩尔比的PS和月桂酸,充入氮气,盖上翻口塞,置于一定温度恒温水浴振荡器一段时间,待反应底物混合均匀且呈液态后,加入一定量的固定化脂肪酶,再次充入氮气保护,盖上翻口塞,200 r/min条件下反应一定时间,得到产物。每个试验做3组平行。根据产物中LaPLa含量对合成条件进行优化。

#### 1.2.2 MLCT的纯化

MLCT的纯化在潘向昆等<sup>[14]</sup>的方法基础上进行了修改,具体为酸解反应结束后,过滤掉固定化酶,收集混合物料于分液漏斗中,加入混合物料12

倍体积的正己烷和5倍体积的95%乙醇,加3滴酚酞试剂混匀,滴加0.5 mol/L KOH溶液并不断摇晃,直到溶液出现粉红色且30 s内不褪色,振摇1 min,静置收集正己烷相,重复操作,合并两次收集的正己烷相,用饱和NaCl溶液洗涤,旋蒸除去有机溶剂得较为纯净的MLCT。

### 1.2.3 脂肪酸组成的测定

参照GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》以及GB/T 24894—2010《动植物油脂 甘三酯分子2-位脂肪酸组分的测定》进行脂肪酸甲酯化和气相色谱分析。以标准品保留时间定性,面积归一法定量,确定脂肪酸组成及含量。

GC条件:GC-2014气相色谱仪;DB-23毛细管色谱柱(60 m×0.25 mm,0.25 μm)(美国安捷伦);FID检测器;进样口温度250℃;检测器温度300℃;载气为氮气;分流比10:1;进样量1 μL;柱温程序为初始温度100℃,保持2 min,以10℃/min升至160℃,保持4 min,以10℃/min升至210℃,保持5 min,再以10℃/min升至240℃,保持10 min,整个分析时长35 min。

### 1.2.4 甘油三酯分析及LaPLa含量测定

取10 μL样品两份,分别加入1 mL正己烷,混匀后过0.22 μm有机膜,进气质联用仪检测和气相色谱仪检测。

对甘油酯和游离脂肪酸通过气质联用定性并确定其出峰顺序。对比出峰顺序,结合气相色谱图,不积分游离脂肪酸峰面积,采用面积归一化法计算对应甘油三酯含量。每个试验做3组平行。LaPLa(参照GB 30604—2015《食品营养强化剂1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯》,以C<sub>40</sub>甘油三酯计)含量按下式计算。

$$X = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:X为LaPLa的含量;S<sub>1</sub>为气相色谱图中LaPLa对应的峰面积;S<sub>2</sub>为气相色谱图中所有甘油酯对应的峰面积总和。

GC-MS条件:7890A-5975C气质联用仪;DB-1HT色谱柱(15 m×0.25 mm×0.10 μm)(美国安捷伦);进样口温度320℃;进样量1 μL;分流比10:1;恒流模式,柱流速1 mL/min;柱温程序为初始温度200℃,以5℃/min升到350℃,保持5 min;EI离子源;离子源温度300℃;四级杆温度200℃;质量数(m/z)扫描范围33~1 000 u。

GC条件:GC-2014气相色谱仪;DB-1HT色谱柱(15 m×0.25 mm×0.10 μm)(美国安捷伦);进样

口温度320℃;FID检测器温度370℃;进样量1 μL;分流比10:1;柱压力200 kPa;柱温程序为初始温度200℃,以8℃/min升到350℃,保持5.25 min。

### 1.2.5 结晶熔融特性分析

用DSC Q200差示扫描量热仪,参照Korma等<sup>[15]</sup>的方法测定甘油三酯的熔融起始温度和结晶起始温度。首先,称量8~12 mg的样品置铝盒并密封。样品在30℃/min下快速从室温加热至80℃,并保持10 min,破坏原有的晶体结构。然后以10℃/min冷却至-40℃,保温30 min。最后,以10℃/min加热至80℃。所有样品重复测定3次,取平均值。

### 1.2.6 理化性质检测

酸价测定参照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》;过氧化值测定参照GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》;碘值测定参照GB/T 5532—2008《动植物油脂 碘值的测定》。

### 1.2.7 数据处理

试验所得的数据采用SPSS Statistics进行显著性分析,P<0.05为显著性差异。使用OriginPro 8.0和GraphPad Prism 6.0进行绘图分析。数据表示为“x±s”(n=3)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PS脂肪酸组成(见表1)

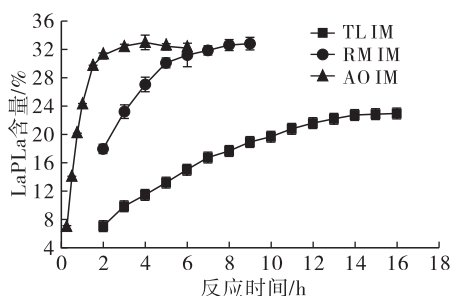
脂肪酸	总脂肪酸含量	sn-2位脂肪酸含量	%
C <sub>14:0</sub>	0.90±0.02	-	
C <sub>16:0</sub>	73.71±0.13	66.83±0.24	
C <sub>18:0</sub>	4.41±0.03	2.84±0.04	
C <sub>18:1</sub>	17.12±0.05	22.64±0.14	
C <sub>18:2</sub>	3.52±0.06	7.69±0.06	
其他	0.25±0.02	-	

PS是从棕榈油中分提出来的一种油脂,其特点是含有大量的棕榈酸和部分油酸,且sn-2位棕榈酸含量很高,这种特殊的组成结构使其成为合成结构脂质的很好的天然原料<sup>[16-17]</sup>。由表1可以看出,PS中脂肪酸种类较少,不含月桂酸,棕榈酸含量达到73.71%,sn-2位棕榈酸含量也达到了66.83%。这种sn-2位含有大量棕榈酸的特殊结构,成为合成高含量LaPLa的基础。

### 2.2 固定化脂肪酶对合成LaPLa的影响(见图1)

原料中使用的是熔点为58℃的棕榈硬脂,所以将3种酶的反应温度都设在60℃。由图1可以看出,3种酶表现出了不同的活力和反应程度,即反应

速率和终产物中 LaPLa 含量。其中 TL IM 的活力和反应程度最低, LaPLa 含量上升速度较慢, 在最后反应达到平衡时, 其 LaPLa 含量较低, 为  $(22.51 \pm 0.41)\%$ 。RM IM 和 AO IM 两种酶在反应达到平衡时, 其 LaPLa 含量没有显著性差异, 分别是  $(32.78 \pm 0.50)\%$  和  $(32.38 \pm 0.30)\%$ , 但前者的反应时间 (8 h) 要远远长于后者 (4 h), AO IM 表现出了很高的催化效率。需要注意的是, AO IM 随着反应的进行, LaPLa 含量会下降, 这是因为有三月桂酸甘油酯 (LaLaLa) 的生成。试验中, 当 LaPLa 含量趋于平衡时, 随着反应继续进行, LaLaLa 开始生成且含量越来越高, 这可能是因为反应后期酰基迁移的影响, 以及过高的月桂酸影响了脂肪酶特异性, 这与 Zhang 等<sup>[18]</sup>的试验结果相符合。因此, 控制好反应时间, AO IM 可以满足此合成工艺, 后续工艺优化选取 AO IM 作为生物催化剂。

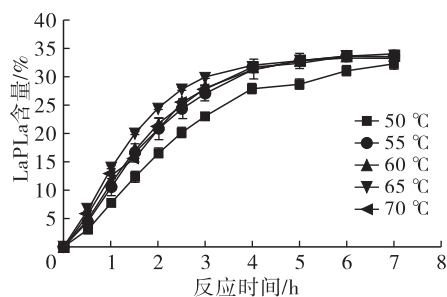


注: 反应条件为反应温度  $60^\circ\text{C}$ , 底物 (棕榈硬脂与月桂酸, 下同) 摩尔比 1:8, 酶载量 8% (相对于底物质量, 下同)。

图1 3种固定化脂肪酶对合成 LaPLa 的影响

## 2.3 AO IM 催化合成 MLCT 工艺优化

### 2.3.1 反应温度对合成 LaPLa 的影响 (见图 2)



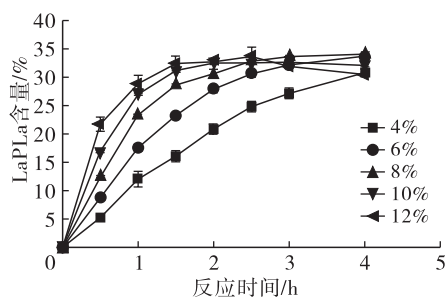
注: 反应条件为底物摩尔比 1:8, 酶载量 4%。

图2 反应温度对合成 LaPLa 的影响

在 PS 的基础上, 因为有月桂酸的存在, 使整个反应体系熔点降低, 在  $50^\circ\text{C}$  下也能熔融。温度一方面会影响体系的黏度, 进而影响分子之间的相互作用, 另一方面会影响酶的活力<sup>[19]</sup>。由图 2 可以看出, 随着反应温度从  $50^\circ\text{C}$  不断地升高, 酶的活力越来越强, 反应达到平衡所用的时间越来越短,  $65^\circ\text{C}$  时最短, 为 3 h。当反应温度达到  $70^\circ\text{C}$  时酶的活力

下降, 反应达到平衡的时间延长, 反应速率降低。这可能是因为温度过高, 使部分酶失活, 整体催化能力降低。所以, 选择  $65^\circ\text{C}$  作为酶催化合成试验的下一步优化基础。

### 2.3.2 酶载量对合成 LaPLa 的影响 (见图 3)

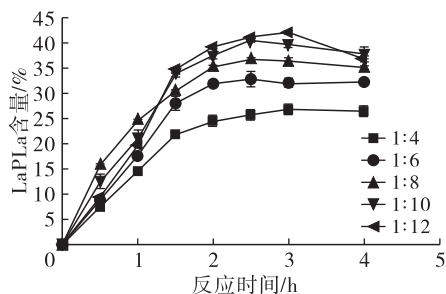


注: 反应条件为反应温度  $65^\circ\text{C}$ , 底物摩尔比 1:8。

图3 酶载量对合成 LaPLa 的影响

通常情况下, 反应速率会随着酶载量的升高而升高, 直到达到过载点为止, 过高的酶载量会促进底物扩散, 继而抑制酶的活性<sup>[20]</sup>。由图 3 可以看出, 随着酶载量的不断升高, 反应速率越来越快, 达到平衡时间越来越短, 但是反应达到平衡时 LaPLa 含量没有显著性差异, 说明酶载量对 LaPLa 合成速率影响大, 对反应程度影响小, 即对终产物含量影响小, 这与 Araújo 等<sup>[21]</sup>报道的结果吻合。12% 酶载量合成反应最先达到平衡, 1.5 h 时 LaPLa 含量可达到  $(32.43 \pm 0.87)\%$ , 与 10% 酶载量合成反应 1.5 h 的结果  $(31.19 \pm 0.03)\%$  没有显著性差异, 而与 8% 酶载量合成反应 1.5 h 的结果  $(28.76 \pm 0.16)\%$  有显著性差异。这说明, 酶载量从 10% 提高到 12% 已经不能显著提高反应速率, 过高的酶载量使反应快速平衡, 同时加快了酰基迁移<sup>[22]</sup>。另外, 考虑到脂肪酶的成本, 选择 10% 为最适酶载量, 作为酶催化合成试验的下一步优化基础。

### 2.3.3 底物摩尔比及反应时间对合成 LaPLa 的影响 (见图 4)



注: 反应条件为反应温度  $65^\circ\text{C}$ , 酶载量 10%。

图4 底物摩尔比及反应时间对合成 LaPLa 的影响

由图 4 可以看出, 随着底物摩尔比的不断升高, 反应平衡时 LaPLa 含量越来越高, 反应在 2.5 h 时

基本都达到了平衡,说明底物摩尔比对 LaPLa 合成速率影响小,对终产物含量影响大。底物摩尔比为 1:12 时反应 2.5 h 时达到平衡,LaPLa 含量为  $(41.12 \pm 0.18)\%$ ,反应 3 h LaPLa 含量升高但没有显著性差异。底物摩尔比为 1:10 反应 2.5 h 达到平衡且终产物含量最高,为  $(40.59 \pm 0.29)\%$ ,与底物摩尔比 1:12 的 LaPLa 含量相比没有显著性差异,而与底物摩尔比 1:8 的相比有显著性差异,故 1:10 是该酶促合成反应的底物摩尔比饱和值。同时,当底物摩尔比增加到 1:10 和 1:12 时,在反应的起始阶段反应速率较慢,这可能是过高的底物摩尔比导致 pH 过低,影响了酶的活性<sup>[23-24]</sup>,而随着反应的进行反应速率又逐渐加快。故底物摩尔比和反应时间的优化结果分别为 1:10 和 2.5 h。

综上所述,月桂酸酸解棕榈硬脂合成富含 LaPLa 的 MLCT 的最佳条件为:底物摩尔比 1:10,反应温度 65 °C,酶载量 10%,反应时间 2.5 h。在最佳条件下,LaPLa 的含量为 40.59%。

#### 2.4 纯化后 MLCT 脂肪酸和甘油三酯组成

在最佳工艺条件下合成并纯化 MLCT,测定其脂肪酸组成,结果见表 2。

表 2 纯化后 MLCT 脂肪酸组成 %

脂肪酸	总脂肪酸含量	sn-2 位脂肪酸含量
C <sub>12:0</sub>	50.88 ± 0.18	18.56 ± 0.11
C <sub>14:0</sub>	0.58 ± 0.03	-
C <sub>16:0</sub>	34.41 ± 0.45	59.91 ± 0.59
C <sub>18:0</sub>	2.47 ± 0.05	1.09 ± 0.03
C <sub>18:1</sub>	9.06 ± 0.22	15.03 ± 0.17
C <sub>18:2</sub>	2.60 ± 0.07	5.68 ± 0.09

由表 2 可以看出,纯化后 MLCT 月桂酸的掺入率达到了 50%,同时反应中发生了酰基迁移,部分月桂酸掺入到了 sn-2 位。sn-2 位棕榈酸含量有所下降,但仍达到了 59.91%。

反应后的混合物经脱酸纯化后,其甘油三酯组成和含量与纯化前基本吻合。纯化后 LaPLa 的含量为  $(41.64 \pm 0.51)\%$ ,LaLaLa 的含量低于 8%,PPP 的含量低于 1%。

#### 2.5 纯化后 MLCT 的熔融特性(见图 5)

油脂的熔融特性与脂肪酸和甘油三酯的类型有关,短链、中链脂肪酸和不饱和脂肪酸含量高的油脂比长链脂肪酸含量高的油脂熔融温度低<sup>[25]</sup>。由图 5A 可以看出,MLCT 结晶起始温度(17.58 °C)较 PS (42.04 °C)低,在 14.71 °C 处观察到结晶峰,说明 MLCT 具有更低的结晶点,这些都与月桂酸的掺入有关。由图 5B 可以看出,MLCT 熔融温度较 PS 大

幅降低,熔融峰从 58.24 °C 降为 33.74 °C,熔融起始温度为 23.97 °C,曲线的基线相对平滑,这说明经酶促酸解反应后形成了新的甘油三酯分子(MLCT),且该油脂成分组成相对单一。熔融峰为 33.74 °C,低于人体温度(36 ~ 37 °C),这一特性有助于其在婴幼儿食品中的应用,可在体温下完全融化进入人体代谢,有利于消化吸收。

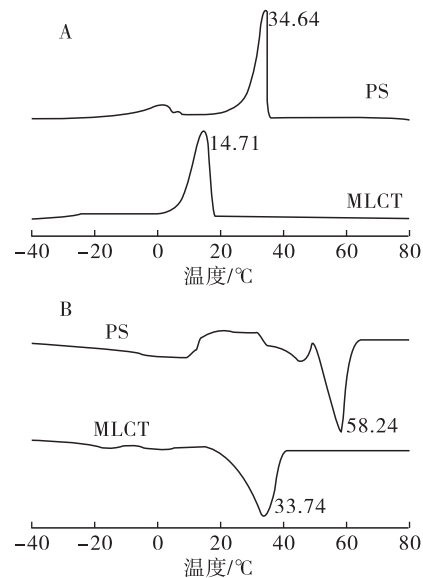


图 5 PS 和 MLCT 结晶(A)和熔融(B)曲线

#### 2.6 纯化后 MLCT 的理化性质

在最佳工艺条件下合成并纯化 MLCT,测定其理化性质,结果见表 3。

表 3 PS 和 MLCT 理化性质

项目	PS	MLCT
酸价(KOH)/(mg/g)	0.25 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>a</sup>
过氧化值/(mmol/kg)	4.13 ± 0.15 <sup>b</sup>	4.85 ± 0.21 <sup>a</sup>
碘值(I)/(g/100 g)	51.50 ± 1.12 <sup>a</sup>	37.35 ± 0.85 <sup>b</sup>

注:同一行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

由表 3 可以看出,合成的 MLCT 经纯化后酸价有所下降,但和 PS 相比没有显著性差异( $P > 0.05$ )。过氧化值表示油脂的氧化程度,是衡量油脂品质的一个重要指标。MLCT 较 PS 过氧化值显著( $P < 0.05$ )升高,这可能是因为在试验过程中高温和酸性环境等加快了油脂的氧化,使过氧化值升高。碘值是衡量油脂不饱和度的指标,PS 中部分不饱和脂肪酸被月桂酸取代,造成 MLCT 碘值显著( $P < 0.05$ )低于 PS。

### 3 结论

本研究通过月桂酸酸解 PS 合成一种结构相对单一的 MLCT,即富含 LaPLa 的 MLCT,优化了合成工艺,检测了纯化后 MLCT 的理化性质。结果表明:固定化脂肪酶 AO IM 具有良好的催化性能,在反应

温度 65 °C、酶载量 10%、底物摩尔比 1:10、反应时间 2.5 h 的工艺条件下, LaPLa 的含量可达到 40.59%; 与 PS 相比, 纯化后的 MLCT 酸价和碘值有所降低, 过氧化值显著升高, 结晶起始温度和熔融起始温度都有所降低。合成的富含 LaPLa 的 MLCT 具有典型的结构特点, 即尽可能将月桂酸的功能与 MLM 型 MLCT 代谢优势结合起来, 同时 sn-2 位保留大量棕榈酸, 有利于在婴幼儿食品中的应用, 为新型 MLCT 的合成提供了研究思路。

#### 参考文献:

- [1] FORMIGUERA X, CANTON A. Obesity: epidemiology and clinical aspects [J]. *Best Pract Res Cl Ga*, 2004, 18(6): 1125-1146.
- [2] LEE Y Y, TANG T K, SCIENCE 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(8): R137-R144.
- [3] MU H L, HØY C E. The digestion of dietary triacylglycerols [J]. *Prog Lipid Res*, 2004, 43(2): 105-133.
- [4] PEHOWICH D J, GOMES A V, BARNES J A. Fatty acid composition and possible health effects of coconut constituents [J]. *West Indian Med J*, 2000, 49(2): 128-133.
- [5] DEBMANDAL M, MANDAL S. Coconut (*Cocos nucifera* L.: Arecaceae): in health promotion and disease prevention [J]. *Asian Pac J Trop Med*, 2011, 4(3): 241-247.
- [6] PEEDIKAYIL F C, SREENIVASAN P, NARAYANAN A. Effect of coconut oil in plaque related gingivitis—a preliminary report [J]. *Niger Med J*, 2015, 56(2): 143-147.
- [7] OGBOLU D O, ONI A A, DAINI O A, et al. In vitro antimicrobial properties of coconut oil on *Candida species* in Ibadan, Nigeria [J]. *J Med Food*, 2007, 10(2): 384-387.
- [8] FAUSER J K, MATTHEWS G M, CUMMINS A G, et al. Induction of apoptosis by the medium-chain length fatty acid lauric acid in colon cancer cells due to induction of oxidative stress [J]. *Chemotherapy*, 2013, 59(3): 214-224.
- [9] MCCARTY M F, DINICOLANTONIO J J. Lauric acid-rich medium-chain triglycerides can substitute for other oils in cooking applications and may have limited pathogenicity [J/OL]. *Open Heart*, 2016, 3(2): e000467 [2019-12-20]. <http://dx.doi.org/10.1136/openhrt-2016-000467>.
- [10] BRACCO U. Effect of triglyceride structure on fat absorption [J]. *Am J Clin Nutr*, 1994, 60(6 Suppl): 1002S-1009S.
- [11] LIEN E L. The role of fatty acid composition and positional distribution in fat absorption in infants [J]. *J Pediatr*, 1994, 125(5): S62-S68.
- [12] 杨普煜, 张虹, 刘浚辰, 等. Sn-2 棕榈酸酯对婴幼儿健康的促进作用 [J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(4): 41-45.
- [13] 邹建凯. 椰子油甘油三酯的高温气相色谱/质谱分析 [J]. *分析化学研究简报*, 2002, 30(4): 428-431.
- [14] 潘向昆, 王瑛瑶, 刘建学, 等. KOH 醇水溶液分离纯化结构脂质条件研究 [J]. *中国油脂*, 2012, 37(8): 39-42.
- [15] 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.
- [16] GHOSH M, SENGUPTA A, BHATTACHARYYA D K, et al. Preparation of human milk fat analogue by enzymatic interesterification reaction using palm stearin and fish oil [J]. *J Food Sci Technol*, 2016, 53(4): 2017-2024.
- [17] OLIVEIRA P D, RODRIGUES A M C, BEZERRA C V, et al. Chemical interesterification of blends with palm stearin and patawa oil [J]. *Food Chem*, 2017, 215:369-376.
- [18] ZHANG Y, WANG X S, ZUO Q, et al. Synthesis of 2-docosahexaenoylglycerol by enzymatic ethanolysis [J]. *Bioresour Technol*, 2018, 251: 334-340.
- [19] WANG J, WANG X D, ZHAO X Y, et al. From microalgae oil to produce novel structured triacylglycerols enriched with unsaturated fatty acids [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 184:405-414.
- [20] MENG Z, GENG W X, LI J W, et al. Enzymatically catalyzed synthesis of anti-blooming agent 1,3-dibehenoyl-2-oleoyl glycerol in a solvent-free system: optimization by response surface methodology [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(45): 10798-10806.
- [21] ARAÚJO M E M B D, CAMPOS P R B, ALBERTO T G, et al. Synthesis of structured triacylglycerols enriched in n-3 fatty acids by immobilized microbial lipase [J]. *Braz J Microbiol*, 2016, 47(4): 1006-1013.
- [22] RODRÍGUEZ A, ESTEBAN L, MARTÍN L, et al. Synthesis of 2-monoacylglycerols and structured triacylglycerols rich in polyunsaturated fatty acids by enzyme catalyzed reactions [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2012, 51(3): 148-155.
- [23] 寿佳菲, 潘丽军, 操丽丽, 等. 酶催化菜籽油酸解制备结构脂质工艺 [J]. *食品科学*, 2012, 33(10): 37-40.
- [24] 黄璜, 李宗军, 侯爱香. 酶催化酸解棉籽油分提产物合成结构脂质研究 [J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(11): 86-92.
- [25] ÁLVAREZ C A, AKOH C C. Preparation of infant formula fat analog containing capric acid and enriched with DHA and ARA at the sn-2 position [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 93(4): 531-542.