杨凯舟, 魏征, 朱建宇, 等. 中长碳链甘三酯产业化发展研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 484−497. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010257

YANG Kaizhou, WEI Zheng, ZHU Jianyu, et al. Research Progress on Industrialization Development of Medium and Long Chain Triglycerides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 484−497. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010257

· 专题综述 ·

中长碳链甘三酯产业化发展研究进展

杨凯舟[1], 魏　征[1], 朱建宇[2], 段章群[1,*], 薛雅琳[1]

（1.国家粮食和物资储备局科学研究院粮油加工研究所, 北京 102209;
2.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319）

摘　要: 中长碳链甘三酯（MLCTs）是一类甘油三酯分子同时含有中碳链脂肪酸（MCFAs）和长碳链脂肪酸（LCFAs）且具有特殊理化性质和营养功能的结构脂质。从 2002 年日本日清奥利友株式会社推出第一款中长碳链甘三酯食用油及相关产品专利以来，中长碳链甘三酯产业经历了 20 多年的发展历程，近年来中长碳链甘三酯在特医食品、医药保健品、母乳脂、替代传统脂肪等行业的需求不断增加。本文对近年来国内外对于中长碳链甘三酯的合成工艺、分离纯化、反应设备、标准专利、产品和应用等领域的研究进展进行了概括总结，以期为国内中长碳链甘三酯产业的高质量发展提供一定的技术参考。

关键词: 中长碳链甘三酯, 合成工艺, 反应装备, 分离纯化, 检测分析, 产业化

中图分类号: TS225.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0484−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010257　　本文网刊:

Research Progress on Industrialization Development of Medium and Long Chain Triglycerides

YANG Kaizhou[1], WEI Zheng[1], ZHU Jianyu[2], DUAN Zhangqun[1,*], XUE Yalin[1]

（1.Institute of Cereal & Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102209, China;
2.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China）

Abstract: Medium and long chain triglycerides (MLCTs) are a kind of structured lipids with special physical and chemical properties and nutritional functions, which contain both medium chain fatty acids (MCFAs) and long chain fatty acids (LCFAs). Since the first patent of MLCTs edible oil and related products are launched by Nisshin OilliO Corporation in Japan in 2002. The MLCTs industry has undergone a transformative developmental history over two decades. The acidolysis process is applicable for the production of MLCTs products with relatively high added value. Composite enzyme design and novel reaction systems including the reverse micelles and the Pickering emulsions have gained significant research attention as emerging approaches. Fixed-bed reactors currently represent the most promising enzymatic equipment for the synthesis of industrial-scale MLCTs, though intensified investigations on industry implementation are still required. Molecular distillation demonstrates superior separation efficiency and product purity, positioning it as the most industrially viable purification technology, but its widespread application necessitates technological advancements to address inherent limitations of high capital investment and energy intensity. While conventional analytical methodologies including gas chromatography (GC), high-performance liquid chromatography with evaporative light scattering detection (HPLC-ELSD), and ultra-performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF-MS) remain practically effective, future efforts shall prioritize establishing the triacylglycerols molecular databases for liquid chromatography-mass spectrometry to achieve precise qualitative and quantitative analysis of triglycerides isomers.

收稿日期: 2025−01−23

基金项目: 2013 年粮食公益性行业科研专项结余资金（JY2313）; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（ZX2446）。

作者简介: 杨凯舟（1986−）, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 油脂精深加工与产业化, E-mail: ykz@ags.ac.cn。

*** 通信作者:** 段章群（1981−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 油脂化学与加工技术, E-mail: dzq@ags.ac.cn。

Standardization works urgently require the establishment of authoritative national standards and certified analytical protocols to regulate MLCTs industry development. From the perspectives of the products and applications, strategic priorities shall encompass 1) the market education and promotion activities, 2) the innovative product development and application, 3) studying on the interaction mechanisms of nutrient substances, and 4) the fundamental research in the metabolic pathway. These efforts will establish a robust scientific foundation for advancing the commercialization and application of MLCTs products in the food industry.

Key words: medium and long-chain triglycerides (MLCTs); synthesis process; reaction equipments; separation and purification; detection and analysis; industrialization

随着社会经济水平的提升，公众对于食用油的健康效益及其营养价值的关注度正逐渐上升。《“健康中国 2030”规划纲要》中要求[1]，针对关键区域和特定人群实施营养干预措施，以解决部分人群摄入油脂过量等高热量食物的问题，逐步改善居民面临的营养不足与过剩并存的状况。中国科学技术协会在《2022-2023 粮油科学技术学科发展报告》中也指出，推进油脂加工核心向定制化、精准化、个性化方向发展，大力开发适合不同消费群体的功能性油脂[2]。

中长碳链甘三酯（MLCTs）是一类甘油三酯分子同时含有中碳链脂肪酸和长碳链脂肪酸的结构脂质，能从分子层面用中碳链脂肪酸代替部分长碳链脂肪酸，降低长碳链脂肪的过度摄入，快速提供能量以及人体必需脂肪酸，实现 Sn-2 位特殊脂肪酸递送以及抑制甘油三酯体内蓄积。MLCTs 能够满足不同消费群体的个性化和特殊化需求，具有提高免疫力、降低炎症反应、降低糖尿病和心血管疾病，以及降低癌症发生风险等诸多保健功能[3]。MLCTs 目前主要有 4 种产物形式，分别是中-长-中型（MLM）、长-中-长型（LML）、中-中-长型（MML）和长-长-中型（LLM），目前主流的是 MLM 和 LML[4]。MLCTs 中的 LCFA 可以提供足够的能量和维持身体正常生理功能所必需的脂肪酸，普通膳食摄入的 LCFA 代谢速率较慢，需要循环回到肠道淋巴管，并作为乳糜微粒运输到系统循环，然后被氧化释放能量。MLCTs 中的 MCFA 由于体积小和溶解度大，可迅速吸收和代谢，然后经门静脉循环直接转运到肝脏进行 β 氧化过程产生酮类，从而快速提供能量，转运和代谢过程如图 1 所示[5]。

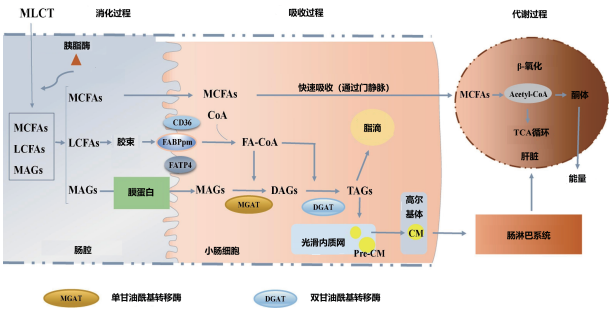


图 1　MLCTs 消化后在人体内的转运和代谢过程[5]

Fig.1　Transport and metabolic processes in humans after digestion of MLCTs[5]

注：TAGs 代表甘三酯；DAGs 代表甘二酯；MAGs 代表甘一酯；CD36 为跨膜糖蛋白；FABPpm 为质膜脂肪酸结合蛋白；FATP4 为脂肪酸转运蛋白 4；CoA 为辅酶 A；FA-CoA 为脂肪酸辅酶 A。

MLCTs 以其独特的理化性质和生理功能广泛应用于食品[6−8]、医药[9−12]、临床营养[13] 等领域。在食品行业，可用于做替代传统脂肪[14−16] 如食用油、起酥油、黄油等，也可作为母乳替代脂补充婴儿必需营养[7]，也可作为功能食品[17] 为运动员或体育爱好者快速提供能量；在医药行业，MLCTs 可以作为脂肪乳剂为糖尿病、体弱婴幼儿等临床患者提供肠外营养支持[10,13,18]。由于天然油脂中 MLCTs 含量较低，MLCTs 一般通过化学法或酶法进行合成，化学法一般采用碱金属、强酸等作为催化剂，虽反应迅速，但反应随机性强，产品纯度不高，同时过程耗能高，会产生大量废水[19]。酶法具有反应条件温和、产品纯度高、副产物少、绿色安全等优点，逐渐成为近年来产业化合成工艺的发展趋势，但存在生产成本高和酶易失活等产业化问题[20]。随着生物技术的发展，合成生物学[21] 开始应用于 MLCTs 的合成上。与国外相比，我国对于 MLCTs 的研究相对起步较晚，但发展迅速，从原先的引进吸收转化到近年来在基础研究、设备研发、专利申请以及产品开发上都取得了较大的进步。本文综述了近年来国内外对于中长碳链甘三酯的酶法合成工艺、反应装备、分离纯化、标准和专利、产品以及应用等领域的研究进展，以期为国内中长碳链甘三酯产业的高质量发展提供一定的技术参考。

1　MLCTs 合成工艺

常见的 MLCTs 酶法合成工艺如图 2 所示，主要是酯交换、酸解和酯化 3 种。表 1 分别从反应器、反应底物、酶催化剂、反应条件、产品指标、纯化及分析方法等方面汇总了国内外近年来典型 MLCTs 酶法合成工艺研究。

MLCTs 酶法催化合成工艺主要是酯交换工艺和酸解工艺。酯交换工艺目前研究中多采用植物油脂如棕榈油[22]、大豆油[10,23−24] 和亚麻籽油[17,25] 与中碳链甘油三酯（MCT）或富含 MCT 的油脂如樟树籽油[26−28] 和椰子油[7,11,29] 等作为底物。随着我国木本油料产业发展和国家蓝色粮仓战略的实施，油茶籽油[30−32]、牡丹籽油[6] 以及富含多不饱和脂肪酸（PUFA）的鱼油[13]、藻油[8] 和微生物油脂[33] 等高品质

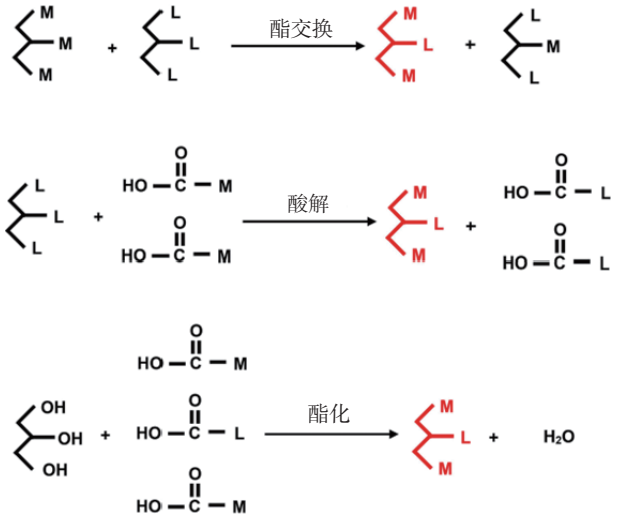


图 2 常见的 MLCTs 酶法合成工艺[16]

Fig.2 Common enzymatic synthesis process of MLCTs[16]

注: M 代表中碳链脂肪酸, L 代表长碳链脂肪酸。

食用油也开始用于合成 MLCTs 中。酯交换法反应速度快, 副产物少, 但是产物成分复杂, 包括 MML、MLM、LLM、LML 等, 很难获得特定构型的 MLCTs 产品, 目前主要应用在替代传统脂肪如食用油和特种用油如起酥油和黄油等制备上, 也可用作制备母乳替代脂补充婴儿必需营养。Zhang 等[6] 采用 Lipozyme TL IM 催化牡丹籽油、棕榈硬脂和椰子油酯交换合成零反式脂肪和含有 α-亚麻酸的功能性人造黄油, MLCTs 总量从 2.92% 提高到 11.38%。Zou 等[8] 采用 NS40086 催化富含 DHA 的微藻油和 MCT 酯交换合成婴儿奶粉的中 MLCTs 配料, MLCTs 得率 62.8%, 大大提高 DHA 的生物利用度。脂肪酶主要以 Lipozyme TL IM(9 篇)、Lipozyme RM IM(10 篇)和 NS40086(5 篇)等, 近年来有学者[30] 采用复合酶如 Lipozyme TLIM/RMIM 用于油茶籽油与 MCT 酯交换反应中, MLCTs 得率达到 70.32%, MLM-

表 1 国内外生物酶法合成 MLCTs 文献研究

Table 1 Literature research on enzymatic synthesis of MLCTs at home and abroad

工艺	反应器	反应底物	酶催化剂	反应条件(温度、加酶量、时间和底物比等)	产品指标	纯化及分析方法	参考文献
酯交换	烧瓶	鱼油+MCT	Lipozyme RM IM	60 ℃、8%、6 h、1∶3	MLCTs得率(MML+MLL) 75%	分子蒸馏, UPLC-Q-TOF-MS	Wang等[13]
	烧瓶	微藻油+MCT	NS40086	60 ℃、8%、8 h、1∶1 氮气环境	MLCTs得率62.8%	碱中和纯化, HPLC-ELSD和UPLC-Q-TOF-MS	Zou等[8]
	烧瓶	鱼油+MCT	生物印迹脂肪酶	70 ℃、4%、3 h、1∶1.5 氮气环境	MLCTs得率56.19%	碱中和纯化, HPLC-ELSD	Zou等[9]
	烧瓶	巴沙猫鱼油+椰子油	NS40086	65 ℃、10%、4 h、1∶1	MLCTs得率64.14%, MLL得率39.85%	乙醇净化, UPLC-Q-TOF-MS	Yuan等[7]
	烧瓶	ARA真菌油+MCT	Lipozyme 435	90 ℃、8%、3 h、1∶1, 500 r/min	MLCTs得率53.75%	碱液中和溶剂纯化, RP-HPLC-ELSD	Korma等[33]
	填充床	大豆油+MCT	Lipozyme TL IM	75 ℃、10.0%、MCT∶大豆油=45∶55、16 min	MLCTs得率80.07%	分子蒸馏和甲醇纯化, HPLC-ELSD	Zhang等[23]
	填充床	三辛酸甘油酯+棕榈液油	Lipozyme TL IM	50 ℃、4.5 g、15 min、1∶1	MLM-MLCTs得率16.75%	无, HPLC-RID	Utama等[15]
	烧瓶	三辛酸甘油酯和亚油酸乙酯	Talaromyces thermophilus lipase	60 ℃、6%、6 h、1∶6、200 r/min	LML-MLCTs得率52.86% 纯化后85.24%	分子蒸馏, GC	Lian等[57]
	锥形瓶	樟树籽油+油茶籽油	Lipozyme RM IM	60 ℃、10%、3 h、1∶1.5、200 r/min	MLCTs得率55.81%	无, HPLC-ELSD	Zhao等[26]和Hu等[27]
	烧瓶	大豆油+MCT	Lipozyme 435	90 ℃、8%、6 h、40∶60、180 r/min	MLCTs得率74.9%	碱中和和柱层析纯化, HPLC-ELSD	Lu等[10]
	搅拌釜	棕榈油+棕榈仁油	Lipozyme TLIM	50 ℃、5%、7.26 h、10∶90、350 r/min	MLCTs得率61%	分子蒸馏, HPLC-ELSD	Lee等[22]
	烧瓶	三辛酸甘油酯+亚麻籽油	Lipozyme TLIM	41.5~50.0 ℃、1.5%、4 h、1∶5、260~300 r/min、正己烷	无, MLCTs得率48.17%	无, HPLC-ELSD和ACPI/MS	Khodadadi等[25]
	填充床	大豆油+MCT	Lipozyme TL IM	55 ℃、3 g脂肪酶、33.42 min、质量比50∶50, 物料流速0.426 mL/min	无, 酯交换程度59.18%	无, HPLC-ELSD	Yang等[24]
	烧瓶	椰子油+高油酸菜籽油	Lipozyme RM IM	60 ℃、12%、2 h、质量比50∶50、水分活度0.07	LML-MLCTs得率45.65%	无, HPLC-ELSD和APCI-MS	Peng等[11]
	填充床	鱼油+MCT	Lipozyme TL IM	60 ℃、45 min	无, 酯交换度达到95%	无, HPLC-ELSD	Xu等[58]
	烧瓶	高油酸葵花籽油+椰子油	Lipozyme RM IM	60.99 ℃、9.29%、6.21 h、6∶4	MLCTs得率75.98%	无, UPLC-Q-TOF-MS	吴凡等[29]
	烧瓶	亚麻籽油+椰子油	Lipozyme RM IM	40 ℃、25 U g^{-1}、10 h、1∶1	MLCTs得率76.59%、ALA-MLCTs得率45.03%	无, UPLC-Q-TOF-MS	Liu等[17]
	锥形瓶	橡胶籽油+MCT	NS40086	40 ℃、7%、12 h、1∶0.7	MLCTs得率75.4%	碱中和纯化, GC	Liu等[59]
	烧瓶	油茶籽油+MCT	Lipozyme TLIM/RMIM复合酶	55 ℃、6%、12 h、1∶2	MLCT得率70.32%	无, HPLC-ELSD	Tian等[30]
	烧瓶	油茶籽油+MCT	NS40086	60 ℃、10%、2 h、1∶1, 皮克林乳液反应体系	MLCTs得率77.5%	无, HPLC-ELSD和UPLC-Q-TOF-MS	Dong等[31]

续表 1

工艺	反应器	反应底物	酶催化剂	反应条件(温度、加酶量、时间和底物比等)	产品指标	纯化及分析方法	参考文献
	烧瓶	油茶籽油+MCT	Lipozyme TL IM/RM IM复合酶1∶2	55 ℃、6%、12 h、3∶5(m/m)	MLM-MLCTs得率52.71%	无, HPLC-ELSD和UPLC-HESI-MS/MS	Huang等[32]
	烧瓶	牡丹籽油+棕榈硬脂+椰子油	Lipozyme TL IM	60 ℃、5%、4 h、40∶60∶10(m/m/m)	黄油替代型MLCTs得率11.38%	无, LC-MS	Zhang等[6]
	烧瓶	椰子油+高油酸菜籽油	Lipozyme RM IM	60 ℃、12%、2 h、1∶1, a_W0.07, 250 r/min	OMO-MLCTs得率45%, Sn-MCFA=43%	无, HPLC-ELSD和HPLC-APCI-MS	Peng等[11]
	锥形瓶	椰子油+芝麻油	Lipozyme RM IM	57 ℃、0.2%、16 h、1∶1(m/m), 150 r/min, 0.5%Tween 40	酯交换度24.62%, MUFA∶LCFA=1.47	无, GC	Sivakanthan等[60]
	反应釜	OPO+OPL+椰子油	NS40086	65 ℃、8%、6 h、0.8∶1, 350 r/min	MLCTs得率74.82%	分子蒸馏, UPLC-Q-TOF-MS	徐文迪[61]
	锥形瓶	樟树籽油+大豆油	Lipozyme RM IM	45 ℃、10%、20 h、1∶1, 加水量10%	MLCTs得率55.1%	碱液中和溶剂纯化, RP-UPLC-ELSD	候俊青[28]
	烧瓶	微藻油+辛酸	Lipozyme TL-IM、Lipozyme RM-IM	37 ℃、14.7%、1∶6、IOT=9.02 g 酶时间/g、正己烷体系	DHA-MLCTs辛酸插入率55.8%	碱液中和溶剂纯化, GC	Delgado等[62]
	烧瓶	微藻油+月桂酸	Lipozyme AOAB8	65 ℃、12%、2.5 h、1∶8, 150 r/min	MLCTs中LA30.91%, DHA44.68%	碱中和溶剂纯化, HPLC-ELSD	Li等[44]
	烧瓶	亚麻籽油+月桂酸	Lipozyme AOAB8	44.6 ℃、9.11%、1 h、1∶12	MLCT得率65.53%, Ln-La型MLCTs得率26.75%	分子蒸馏, UPLC-Q-TOF-MS	Huang等[45]
	烧瓶	棕榈液油+辛酸	Lipozyme TL IM	50.0 ℃、10%、20 h、1∶1	MLCTs得率16.28%(ECN32)	无, HPLC-RID	Utama等[15,63]
	三角瓶	高油酸花生油+辛酸	Lipozyme RM IM	45.8 ℃、11.97%、20 h、1∶3.41, 加水量11.85%	辛酸插入率43.14%	碱中和和尿素包合, GC	马敏[42]
	烧瓶	高油酸花生油+癸酸	Lipozyme RM IM、Lipozyme TL IM和NS40086复合酶	53.4 ℃、11%、19 h、1∶10.5	癸酸插入率57.64%	碱中和纯化, GC	张丽霞等[43]
	烧瓶	微藻油+辛酸	Lipozyme RM IM	55 ℃、18%、6 h、1∶3, 氮气环境	辛酸插入率27.53%, MLCTs得率55.35%	无, UPLC-Q-TOF-MS	Zou等[52]
	离心管	玉米油和辛酸	NS40086	40 ℃、12%, 6 h、1∶8, 超声功率200 W, 处理10 min	MLCTs(MLM+MLL)得率89.50%	分子蒸馏, UPLC-ELSD	Yue等[36−37]
	圆柱玻璃反应器	葡萄籽油+癸酸	Lipozyme RM IM	45 ℃、5%, 24 h、1∶2、400 r/min	癸酸插入率34.53%	无, GC	Bassan等[46]
	烧瓶	氢化大豆油+辛酸	Thermomyces lanuginosus lipase	60 ℃、15%、60 min、1∶3	辛酸插入率45.16%	碱中和纯化, UPLC-ELSD	Kavadia等[34]
	烧瓶	芒果籽油+癸酸	Lipozyme IM	55 ℃、10%、24 h、1∶5、150 r/min, 正己烷体系,	MLCTs得率49.2%, 癸酸插入率43.5%	碱中和纯化, HPLC-RID和LC-MS/MS	Sneha等[47]
	圆柱玻璃容器	南瓜籽油+癸酸	Lipozyme TL IM	55 ℃、5%、48 h、1∶2、150 r/min, 正己烷体系	癸酸插入率34.7%	碱中和溶剂纯化, GC	Sousa等[48]
酸解	烧瓶	富含ARA微生物油脂+辛酸	Lipozyme RM IM	60 ℃、6%、6 h、1∶3、300 r/min	辛酸插入率20.14%, MLCTs得率35.28%	碱中和溶剂纯化, UPLC-Q-TOF-MS	Abed等[53]
	填充床	芥菜籽油+辛酸/癸酸/月桂酸	NS 435	60 ℃、20 g脂肪酶、1∶2, 正己烷溶剂	MCFAs插入率30%~33%	水蒸汽脱酸, GC	Sengupta等[64]
	圆柱玻璃容器	牛油果油+辛酸	Lipozyme TL IM	30 ℃、10%、24 h、1∶2、400 r/min	辛酸插入率29.2%	无, GC	Caballero等[49]
	烧瓶	蓝莓籽油+月桂酸	Lipozyme RM IM	50 ℃、10%、4 h、1∶5、200 r/min, 正己烷	月桂酸插入率43.3%	碱中和溶剂纯化, GC	Gökçe等[50]
	锥形瓶	大豆油+月桂酸	Lipozyme RM IM	45 ℃、13%、24 h、1∶6、180 r/min, 正己烷	月桂酸插入率29.26%	碱中和溶剂纯化, GC	王博等[35]
	烧瓶	菜籽油+辛酸	Lipozyme RM IM	50~60 ℃、10%、15 h、1∶4	辛酸插入率44.27%	碱中和溶剂纯化, UPLC-ELSD	Wang等[39]
	烧瓶	樟树籽油+油酸	Lipozyme RM IM	60 ℃、12.5%、28 h、1∶5	油酸插入率59.68%, Sn-2-MCFAs78.69%, LML-MLCTs得率65.11%	尿素包合法, HPLC-ELSD	Zou等[65]
	圆柱形玻璃容器	橄榄油+辛酸/癸酸	Lipozyme RM IM Novozym 435	45 ℃、5%、24 h、1∶2, 200 r/min	辛酸插入率25.5%~25.7%, 癸酸插入率27.1%~30.4%	无, GC	Nunes等[66]
	螺旋盖反应瓶	肉桂籽油+油酸	Lipozyme RM IM	60 ℃、10%、24 h、1∶4, 250 r/min, 氮气环境	MLCTs(OMO)得率64.45%	柱层析纯化, UPLC-ELSD和HPLC-APCI-MS	Peng等[51]
	烧瓶	单细胞油脂+癸酸	NS40086	60 ℃、6%、6 h、1∶3, 300 r/min	癸酸插入率23.12%; MLCTs得率67.10%	无, UPLC-Q-TOF-MS	Abed等[54]
	锥形瓶	玉米胚芽油+辛酸	Lipozyme RM IM	50 ℃、12%、16 h、1∶4, 300 r/min	辛酸插入率47.28%	碱中和溶剂纯化, HPLC-ELSD	王强等[38]
	填充床	菜籽油和辛酸	Lipozyme IM	60 ℃、10%、1∶6、水分含量0.09%、流速4.6×10^{-5} m/s	辛酸插入率71.5%~71.8%	无, GC	Xu等[40]
	填充床	菜籽油和辛酸	Lipozyme RM IM	60 ℃、10 g、2 h、1∶4.5, 水分含量0.15%	MLM-MLCTs得率46.2%	碱中和溶剂纯化, UPLC-ELSD	潘向昆等[41]

续表 1

工艺	反应器	反应底物	酶催化剂	反应条件(温度、加酶量、时间和底物比等)	产品指标	纯化及分析方法	参考文献
酯化	烧瓶	微藻油+乙醇+辛酸	Lipozyme TL IM	微藻油+乙醇: 25 ℃、10%, 12 h、1∶24、加水量5%, 300 r/min; 2-MAG+辛酸: 40 ℃、10%, 24 h、1∶4、300 r/min, 正己烷体系	2-MAG得率31.44%~36.08%; MLCTs得率90%, Ca-ω-3 PUFAs–Ca=40.58%	碱中和溶剂纯化; TLC-FID	He等[12]
	烧瓶	辛酸+癸酸+油酸+甘油	Novozymes 435	90 ℃、4.80%、12.37 h、3∶1、MCFA∶LCFA=1.10∶1, 真空脱水	MLCTs得率72.19% MLCTs中辛酸、癸酸和油酸分别为24%, 10%和66%	无, HPLC-ELSD	Yang等[18]
	烧瓶	辛酸+油酸+甘油	Lipozyme RM IM	70 ℃、10%、14 h、3.5∶1、MCFA∶LCFA=1∶1, 真空脱水	MLCTs得率59.75%	物理精炼(脱色脱臭), HPLC-ELSD	Koh等[67]
	玻璃反应釜	混合油(微藻油、菜籽油、椰子油、棕榈油)+乙醇+辛酸	Lipozyme RM IM和Lipozyme TL-IM	混合油+乙醇: 40 ℃、2.5%、5 h、1∶3(m/m); 2-MAG+辛酸: 35 ℃、10%、2 h、1∶4, 超声功率150 W, 正己烷体系, 分子筛除水	P-MLCTs得率85%、S-MLCTs得率85%、O-MLCTs得率53%、L-MLCTs得率46%、Ln-MLCTs得率38%	柱层析纯化, HPLC-UV	Wang等[68]
	玻璃管	富含ARA微生物油脂+乙醇+辛酸	Lipozyme 435和Lipozyme RM IM	微生物油脂+乙醇: 25 ℃、7.5%、3 h、1∶3(m/m), 350 r/min; 2-MAG+辛酸: 25 ℃、8%、5 h、1∶3, 350 r/min, 真空脱水	2-MAG得率81.72%; MLCTs得率93.60%, Ca-ARA-Ca得率40.43%	碱中和溶剂纯化; HPLC-ELSD和UPLC-Q-TOF-MS	Jiang等[56]
	锥形瓶	樟树籽油+乙醇+油酸	Lipozyme TL-IM和Lipozyme RM IM	樟树籽油+乙醇: 40 ℃、8%、24 h、2-MAG+油酸: 1∶4; 45 ℃、10%、16 h、1∶6	2-MAG得率38.82%; MLCTs得率60.48%	分子蒸馏和柱层析, GC	万正浩[69]

MLCTs 得率达到 52.71%, 同时采用生物印记制备的脂肪酶[9] 也开始应用于 MLCTs 的合成中。生物印迹是一种通过模拟抗原-抗体间相互作用来专一性识别目标分析物的技术, 进而提高脂肪酶催化活性和选择性。Zou 等[9] 采用脂肪酸作为印记分子模版对 Lipozyme RM IM 制备生物印记脂肪酶, 催化鱼油和 MCT 反应酯交换效率是未生物印记酶的 1.47 倍, 催化富含 DHA 的单细胞油脂和辛酸酸解反应效率是未生物印记酶的 2.17 倍。酯交换法一般采用无溶剂体系, Dong 等[31] 采用皮克林乳液界面催化体系(PE)对进行了探索, 发现 PE 体系展现出卓越的催化效率, 30 min 内 MLCTs 得率达到 77.5%, 比无溶剂体系高出 26%, 具有较好的应用潜力。

酸解工艺是目前研究中采用的主流工艺, 一般采用植物油脂如大豆油[34−35]、玉米油[36−38]、菜籽油[39−41] 和高油酸花生油[42−43] 等油酸、亚油酸含量高的油脂与辛酸/癸酸为底物, 也有学者[44−45] 采用月桂酸作为酰基供体进行合成。近年来富含 PUFA 的小品种特色油料如亚麻籽油[45]、葡萄籽油[46]、芒果籽油[47]、南瓜籽油[48]、牛油果油[49]、蓝莓籽油[50] 和肉桂籽油[51] 等、以及微藻油[52] 和微生物油脂[53−54] 等酸解合成 MLCTs 逐渐成为研究的热点。酸解反应一般用于纯度较高和高附加值 MLM 和 LML 型 MLCTs 的合成, 多应用在医药行业如脂肪乳剂和运动营养领域如功能性饮料, 为糖尿病、体弱婴幼儿等临床患者和运动人士提供肠外营养和快速供能支持。酸解反应中存在过量的游离脂肪酸, 反应过程也会置换下来新的脂肪酸, 反应时间相对较长, 产物也需要耗费大量资源和能源来分离游离脂肪酸制备高纯度 MLCTs 产品, 同时过量的脂肪酸也会导致体系 pH 降低, 影响酶的催化效率。Huang 等[45] 采用 Lipozyme AOAB8 脂肪酶催化亚麻籽油和月桂酸酸解反应制备富含亚麻酸型的功能性油脂, MLCTs 得率 65.53%, 其中亚麻酸(Ln)-月桂酸(La)型 MLCTs 得率 26.75%。Peng 等[51] 在氮气环境下采用 Lipozyme RM IM 催化肉桂籽油和油酸酸解反应合成 MLCTs, 油酸-中碳链脂肪酸-油酸(OMO)型 MLCTs 得率 64.45%, 同样 Zou 等[55] 采用 Lipozyme RM IM 催化樟树籽油和油酸酸解制备的产品纯化后 LML-MLCTs 得率 65.11%。Abed 等[54] 采用 NS40086 催化富含 ARA 的单细胞油脂和癸酸酸解合成 MLCTs, 癸酸插入率 23.12%, MLCT 得率 67.10%。酸解反应脂肪酶主要以 Lipozyme RM IM(14 篇)、Lipozyme TL IM(5 篇)和 NS40086(3 篇)为主, 辛酸或癸酸的插入率为 23.12%~71.80%, MLCTs 的得率 16.28%~67.10%。近年来, 有学者尝试用复合酶用于酸解反应合成 MLCTs, 张丽霞等[43] 采用 Lipozyme RM IM、Lipozyme TL IM 和 NS40086 复合酶(8∶3∶14)催化高油酸花生油和癸酸酸解制备高值化花生油 MLCTs, 癸酸插入率 57.64%, Sn-2 位油酸含量为 75.13%, Sn-1,3 位癸酸含量达到 77.65%。酸解工艺相比较于酯交换工艺, 脂肪酸的熔点以及黏度会降低底物与酶之间的传质效率, 因此溶剂体系在酸解工艺中应用相对较多。Sousa 等[48] 研究了正己烷溶剂体系和无溶剂体系下 Lipozyme TL IM 催化南瓜籽油和癸酸酸解制备 MLCTs, 发现反应 48 h 溶剂体系下癸酸的插入率比无溶剂体系提高了 18%。

酯化工艺一般常用于高纯度 MLCTs 的合成, 如肠外营养支持产品结构脂肪乳剂、Sn-2 脂肪酸靶向药物等制备, 主要分为两步法和直接酯化法。两步法是油脂首先醇解生成 2-MAG, 2-MAG 再与中碳链脂肪酸或长碳链脂肪酸酯化合成 MLCTs; 直接酯化法是中长碳链脂肪酸混合物与甘油直接酯化合成。由于反应需要较高的反应温度(70~90 ℃)和真空条件, 反应生成的水需要及时脱除, 反应步骤较繁琐, 目前研究文献较少(6 篇)。脂肪酶一般采用 Lipozyme

TL-IM(3 篇)、Lipozyme RM IM(4 篇)、Novozym 435(2 篇)，多采用无溶剂体系，MLCTs 得率在 70% 以上。Jiang 等[56] 采用 Lipozyme 435 室温下乙醇解富含 ARA 微生物油脂合成 2-MAG，2-MAG 得率 81.72%，然后采用 Lipozyme RM IM 室温催化 2-MAG 和辛酸酯化，纯化后 MLCTs 得率 93.60%，CA-ARA-CA 得率 40.43%。Yang 等[18] 在真空条件下采用 Novozym 435 脂肪酶催化辛酸、癸酸、油酸混合物和甘油酯化合成结构脂肪乳基料油，纯化后 MLCTs 得率 72.19%，MLCTs 中辛酸、癸酸和油酸分别为 24%、10% 和 66%，循环利用 14 次，酶活性无显著下降。

2　MLCTs 合成装备

目前，国内外对于酶法合成 MLCTs 的反应装备主要分为 4 种，示意图如图 3 所示[4]。第一种主要存在于实验室小批量间歇式阶段，采用的反应器 95% 以上为间歇式搅拌反应设备如烧瓶[13]、圆柱形玻璃反应器[46,48,49,66]、搅拌罐[22]、反应釜[68] 等，该类反应器可实现固定化酶周期性回收，但由于搅拌桨剪切力大，易打破酶颗粒导致酶失活，从而降低效率，大大限制了工业化连续生产，也有报道[70] 对酶进行溶剂激活处理，但是效果并不明显。

第二种采用的反应器为填充床或固定床，该类反应器目前广泛应用在工业规模的固液界面非均相催化系统中，具有设计简单、效率高、固定化酶稳定性好、反应条件温和、可回收性高等优点[15,23,24,41]，是一种最有希望实现工业化酶法制备 MLCTs 的反应装备，但是目前产业化应用研究相对较少[58,64]。Xu 等[40] 首次在研究中采用固定床酶反应柱对酶法催化酸解反应和酯交换反应[58] 制备 MLCTs，并对固定床的基础理论进行了研究[40,72]，发现孔隙率取决于酶柱的填充方法和底物与酶的溶解度；反应时间越长，酰基位移相对越高；内传质对于酶柱的效率影响较大(推荐流速 4.6×10^{-5} m/s)；一定水分含量可恢复酶的活度(从 0.03% 增加到 0.09%)；酶床顶部可增加柔性层来减小压降，为后期产业化应用奠定了坚实的理论基础。Yang 等[24] 采用固定床反应器(ID 1.15 mm，长 20 cm)对 Lipozyme TL IM 大豆油和 MCT 酯交换制备 MLCTs，3 g 脂肪酶，在物料流速 0.426 mL/min 下，144 h 左右酶活降低为 0，MLCTs 得率高达 94%。Zhang 等[23] 采用填充量 5 kg 的中试固定床(ID 60 mm，长 48 cm)对 Lipozyme TL IM 催化大豆油和 MCT 酯交换制备 MLCTs 研究发现，在孔隙率 0.76±0.01、物料流速 90 mL/min(保留时间 16 min)、反应温度 75 ℃、酶质量 783.0 g、MCT 和大豆油底物质量比 45∶55 条件下，MLCTs 粗产品得率 76.61%，分子蒸馏和甲醇净化后，MLCTs 得率 80.07%，Sn-2 饱和酸含量为 82.74%，酶循环利用 25 次后 MLCTs 粗产品得率依然维持在 75% 左右，可实现 100 kg/d 的 MLCTs 生产量，将 MLCTs 的酶法酯交换合成工艺逐渐推向产业化，反应装备如图 4 所示。Sengupta 等[64] 采用填充床反应器(ID 10 mm，长 50 cm)对 NS 435 催化芥籽油与辛酸/癸酸/月桂酸混合物酸解反应发现，在少许溶剂体系下，20 g 脂肪酶，物料流速

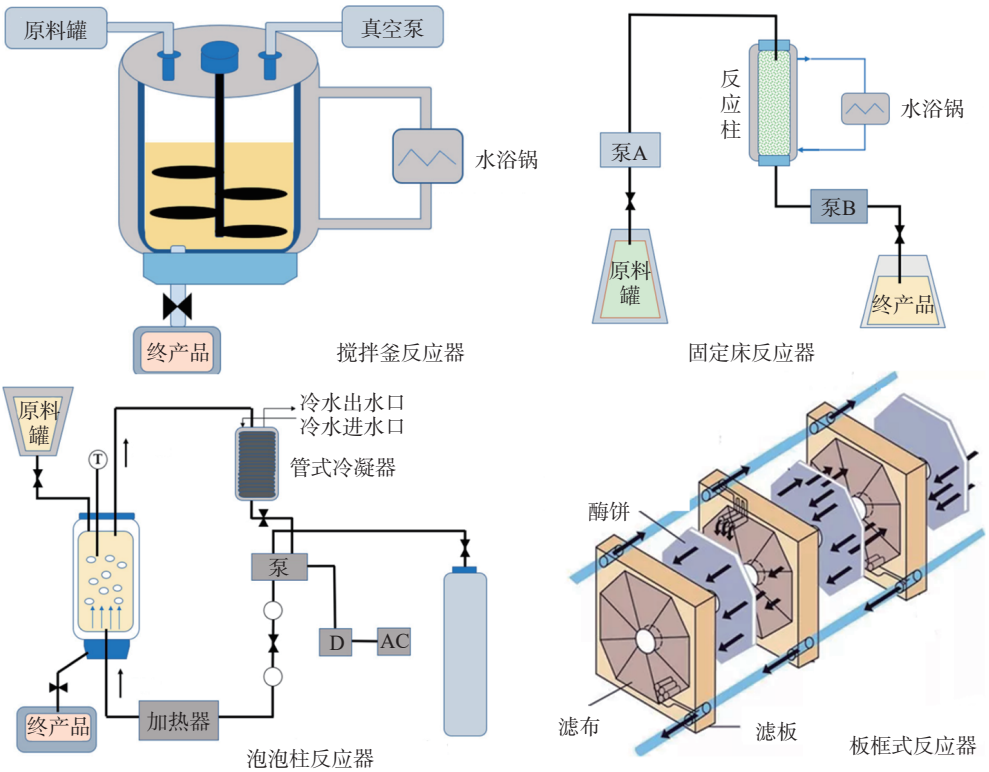


图 3　酶催化反应器示意图[4]

Fig.3　Schematic diagram of enzyme catalytic reactors[4]



图 4 100 kg/d 实验室级别酶法酯交换合成 MLCTs 小试线[23]

Fig.4 100 kg/d laboratory-scale enzymatic interesterification synthesis of MLCTs[23]

0.27 mL/min, 6 h 收集 100 mL MLCTs 产品, MCFAs 插入率 30%~33%, 后期需要进一步放大实验探索酶法酸解产业化合成 MLCTs 的可行性。

微流体反应器属于较小尺度的固定床, 以其较小的尺寸、较大的表面体积比和明确定义的反应时间使得固定在微流体反应器中的酶可以表现出更快速的反应速度和更高的稳定性。Li 等[73] 采用微流体酶反应器(含填充床反应器)对 Lipozyme RM IM 催化桑葚油和 α-亚麻酸酸解反应发现, 加酶量 1/3 g/cm^3, 物料流速 2 μL/min, Lipozyme RM IM 在微反应器中的活性在 18 次运行后仍然保持在大约 80%, 最高 Ln 插入率为 42%, 而在批式反应器中, Lipozyme RM IM 在 8 次运行后仅保持了大约 90%, 反应装备设计图如图 5 所示, 目前微流体反应器在 MLCTs 合成工艺研究中还未见报道。

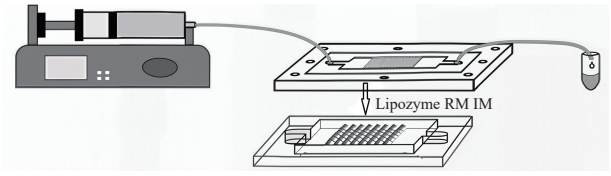


图 5 微流体反应器设计图[73]

Fig.5 Design diagram of microfluidic reactor[73]

第三种采用的反应器为泡泡(N_2)柱反应器, 主要是解决反应体系高黏度或反应物不相溶, 具有传热传质效率好, 酶载体破坏低, 催化剂耐久性高, 特别适用于异相体系和放热反应如 DAG 酯化反应等[71], 目前在 MLCTs 酶法制备中未见报道, 对于酯化工艺合成 MLCTs 具有很好的应用前景。

第四种采用反应器为板框式过滤器, 板框起到固定负载酶和过滤的作用, 这种反应器一般适用于粉末化酶的催化反应, 目前只在部分企业中使用, 如中粮日清(大连)等。

3 MLCTs 分离纯化工艺

酶法制备 MLCTs 过程中常见的副产物主要有游离脂肪酸、甘一酯和甘二酯, 为了得到理想的产物, 需要对反应粗产品分离纯化进行精制, 目前主要的分离纯化方法有碱炼脱酸[44−56]、分子蒸馏[23,45,57,69] 和柱层析[10,51]。为了获取更高纯度产品, 溶剂结晶法[56] 和尿素包合法[65] 也在研究中使用。

3.1 碱炼脱酸

碱炼脱酸是目前实验室研究中常用的脱酸方法, 主要是利用酸碱中和原理达到脱酸的目的。酸解工艺和酯化工艺中脂肪酸都过量, 一般常用碱炼脱酸法脱除过多的脂肪酸。Li 等[44] 将微藻油和月桂酸酸解反应的产物与正己烷、95% 乙醇和 0.8 mol/L 的氢氧化钾(30% 乙醇)混合脱除多余的脂肪酸, 然后旋蒸得到含有 MLCTs 的甘油酯混合物。Jiang 等[56] 将醇解制备的 2-MAG 混合物与乙腈水(95∶5)混合脱除乙酯, 然后与三氯甲烷和乙醇水溶液(9∶1)混合脱除甘油, 2-MAG 与辛酸反应后的混合物与正己烷、0.8 mol/L 的氢氧化钾(30% 乙醇)混合脱除多余的脂肪酸。碱炼脱酸法简便易行, 应用范围广, 但工业化生产会造成脂肪酸的浪费和产生大量的含皂废水。

3.2 分子蒸馏

分子蒸馏是一种在高真空条件下根据不同物质分子平均自由程的差异实现物质分离的方法。分子蒸馏不仅可以脱除游离脂肪酸, 也可以对甘一酯、甘二酯和甘三酯进行分离纯化。Zhang 等[23] 对大豆油和 MCT 酯交换后的 MLCTs 采用分子蒸馏脱酸, 酸价从 9.47 mg KOH/g 降低到 0.48 mg KOH/g, 加入甲醇脱除 MCT、甘一酯和甘二酯, 产品中 MLCTs 达到 80.07%。Lian 等[57] 通过二级短程分子蒸馏对三辛酸甘油酯和亚油酸乙酯酯交换粗产品中 MLL 型 MLCTs 进行富集纯化, 三辛酸甘油酯含量从 5.67% 降低到 0.97%, MML 型 MLCTs 从 33.01% 降低到 1.34%, MLL 型 MLCTs 从 53.19% 升高到 85.24%, 三亚油酸甘油酯从 8.13% 增加到 12.44%。Huang 等[45] 对亚麻籽油和月桂酸酶法酸解后的产物进行分子蒸馏纯化, MLCTs 含量为 40.82%, 其中同时含有月桂酸和亚麻酸的 MLCTs 含量为 26.75%。万正浩[69] 采用二级分子蒸馏法纯化樟树籽油醇解反应产物, 经过二级蒸馏得到的 2-MAG 纯度高于 96%, 后续可用于合成高纯度的 MLCTs 产品。分子蒸馏分离效果好, 产品纯度高, 目前已经在甘二酯行业得到一定的应用[74], 由于设备投资较大, 耗能较高, 在 MLCTs 工业化生产领域还未见报道, 需要进一步加大技术研发。

3.3 柱层析

柱层析法是根据物质在硅胶或氧化铝上吸附能力不同而实现分离。Lu 等[10] 首先采用酸碱中和法对大豆油和 MCT 酯交换的产物进行脱酸，然后采用硅胶吸附层析法脱除甘二酯和降低过氧化值，以正己烷为洗脱剂精制 MLCTs 粗产品，纯化后产品中 MLCTs 含量为 75.10%，酸价降低到 0.11 mg KOH/g，过氧化值降低到 1.5 mmol/kg，甘二酯含量降低到 1.2%。Peng 等[51] 采用正己烷-乙醚（85∶15）为洗脱剂，对肉桂籽油和油酸酸解后的粗产品通过柱层析法进行了精制，所得产品酸价降低到 0.98 mg KOH/g，过氧化值降低到 3.79 mmol/kg，MLCTs 纯度超过 95%。柱层析法不仅可以脱除副产物，同时也能降低产品的酸价和过氧化值，具有较好的应用前景，但柱层析法需要用到大量的试剂并且难以形成规模化，需要进一步研究。

4 MLCTs 检测分析

目前国内外针对 MLCTs 的检测分析研究主要有脂肪酸组成（全样脂肪酸和 Sn-2 脂肪酸组成）、甘油酯（甘一酯、甘二酯和甘三酯）组成以及甘三酯组成（定性和定量）等。

4.1 脂肪酸组成

脂肪酸组成绝大多数采用经典气相色谱法进行分析，一般分析 MCFA 的插入率和位置分布，也有研究采用气质联用分析，相对气相色谱脂肪酸种类更加丰富。Huang 等[32] 采用气质联用（GC-MS）的 SIM 模式对月桂酸插入率和亚麻酸置换率进行分析，月桂酸 SIM 离子为 129 和 157，亚麻酸 SIM 离子为 79 和 249，同时痕量脂肪酸如 C11:0 和 C13:0 也被检测出来。

4.2 甘油酯组成

甘油酯组成分析主要采用气相色谱、液相色谱和棒状薄层色谱/氢火焰离子化检测器（TLC-FID）方法。Lian 等[57] 采用 DB-1HT 高温柱通过气相色谱对三辛酸甘三酯和亚油酸乙酯酯交换产品进行分析，产品中的辛酸乙酯、棕榈酸乙酯、三辛酸甘三酯、MML、LLM 和三亚油酸甘三酯可实现较好分离和定性半定量。Liu 等[59] 采用 DB-1 高温柱对橡胶籽油和 MCT 酯交换产品分析也得到很好的效果。Jiang 等[56] 采用 HPLC-ELSD 配置 Li Chrospher 硅胶柱对二步醇解-酯化工艺合成 MLCTs 中甘油酯组成进行分析，20 min 内可实现 MAG、DAG 和脂肪酸乙酯（FAEE）的定性定量（标曲）分析。TLC/FID 作为一种定性定量分析手段可以有效地应用于对脂肪酸、油脂酯交换产物和甘油酯等简单脂质的分离分析。He 等[12] 采用 TLC-FID 对醇解和酯化产品中 MAG、DAG、TAG 和脂肪酸乙酯（FAEE）进行分析，可在 25 min 实现各组分的定性和半定量分析。

4.3 甘三酯的组成

甘三酯的组成一般采用高效液相色谱配置 ELSD 检测器测定，也有配置示差检测器[15,63] 或紫外检测器[68] 进行测定，文献中占比接近 60%。示差检测器和紫外检测器的峰型和分离效果不如 ELSD 检测器，该方法一般需要标样比对保留时间和甘三酯分子的当量碳数（ECN）来进行定性和定量，甘三酯分子的信号较少，多适用于某一特定 ECN 甘三酯分子的鉴定和分析。Tian 等[30] 采用 HPLC-ELSD 对油茶籽油和 MCT 酯交换产品中 MLCTs 组成进行分析，MLM 代表的是 ECN=30~36 的甘三酯分子，LML 代表的是 ECN=38~40 的甘三酯分子，MLCTs 得率为 70.32%，其中 MLM 得率为 53.32%，LML 得率为 17%。近年来随着检测水平的发展，液质联用技术[13,45,56] 开始大量应用到 MLCTs 甘三酯分子构型的鉴定与分析，文献中占比达到 30% 以上，该方法可以实现甘三酯分子的定性和半定量，还需进一步构建甘三酯标样数据库实现精准定量。Wang 等[13] 采用 UPLC-Q-TOF-MS 对鱼油和 MCT 酯交换的产物中的甘三酯分子进行鉴定分析，共鉴定出甘三酯分子 24 种，相对含量较高的是甘三酯是 Ca-Cy-EPA（15.64%）、Ca-Ca-EPA（12.56%）和 Cy-Cy-EPA（9.89%）。Huang 等[45] 采用 UPLC-Q-TOF-MS 对亚麻籽油和月桂酸酸解后纯化后的产品进行分析，共鉴定出甘三酯分子 35 种，MLCTs 相对含量为 40.82%，其中同时含有月桂酸和亚麻酸的 MLCTs 相对含量为 26.75%，产品符合中长碳链食用油和新资源食品的标准要求。Jiang 等[56] 采用 UPLC-Q-TOF-MS 对富含 ARA 的甘一酯与辛酸酯化后纯化后的 MLCTs 进行分析，共鉴定出甘三酯分子 21 种，其中相对含量较高的甘三酯是 ARA-CA-CA（40.43%）、L-CA-CA（18.40%）、Ln-CA-CA（12.61%）和 Ei-CA-CA（10.90%）。

5 MLCTs 标准和专利

5.1 标准

自从 2012 年 8 月国家卫生健康委员会原卫生部正式批准了“中长链脂肪酸食用油”作为新资源食品[75]，中长链脂肪酸食用油标准化研究开始在国内逐渐发展。2019 年 3 月国家粮食和物资储备局发布国家粮食行业标准《中长链脂肪酸食用油》征求意见稿[76]，标准中在原来酯交换工艺基础上增加了食用植物油和中碳链脂肪酸酸解合成工艺，同时涵盖了化学酯交换工艺，规定中碳链脂肪酸（g/100 g）≥11，中长碳链甘油三酯（g/100 g）≥18，中碳链甘油三酯（g/100 g）≤3，长碳链甘油三酯/（g/100 g）≤77。2021 年广州华汇生物实业有限公司[77] 和秦皇岛金海特种食用油工业有限公司[78] 分别发布了食品安全企业标准，标准规定一级中长链脂肪酸食用油中长链脂肪酸甘油三酯（g/100 g）≥50，二级中长链脂肪酸食用油中长链脂肪酸甘油三酯（g/100 g）≥18。2022 年 2 月，中国粮油学会发布了团体标准《中长链脂肪酸食用油》征求意见稿[79]，对上述标准进行了概括汇总。目前国家粮食行业标准《中长链脂肪酸食用油》

和团体标准《中长链脂肪酸食用油》均处于报批阶段，国内还未有官方认可的执行标准。

5.2 专利

近年来国内外涉及 MLCTs 制备工艺的相关授权专利共 18 件，具体如表 2 所示。专利中采用的合成工艺主要为酯交换工艺，共 13 件，酸解工艺为 3 件，酯化工艺为 2 件。采用酶法催化的专利有 12 件，采用化学催化的专利有 6 件。采用固定床反应器的有 3 家，分别为国家粮食与物资储备局科学研究院[80]、暨南大学[81] 和河北康睿达脂质公司[82]，同时酶的循环利用时间可达到一个半月，大大降低了生产成本，其余的多采用实验室烧瓶或反应器皿，对进一步产业化应用具有一定局限性。酶法合成工艺得率较高，MLCTs 得率为 30%~95%，MCFAs 插入率为 35.95%，化学合成工艺 MLCTs 得率为 40%~80.5%，酶法具有较大的优势；也有专利[83] 对于新的合成体系进行了探索，发现采用反胶束酶体系催化樟树籽油+菜籽油酯交换反应，粗产品经分子蒸馏后 MLCTs 含量为 74.39%~92.40%，大大提高合成效率。目前专利中采用酯交换工艺合成 MLCTs 占到 70% 以上，但酯交换工艺产物成分复杂，多适用于对于产品纯度要求不高的替代传统脂肪领域；酸解工艺产物纯度较高，后续需加强对于副产物脂肪酸的循环利用以及分离纯化工艺的研究；酯化工艺产物纯度更高，产品立体专一性更高，适用于更高附加值的医药和临床营养领域，但目前国内相关标准中对于酯化工艺并未归纳其中，未来在标准化研究中需要进一步推进。

6 MLCTs 产品和应用

通过文献收集和网络调研，国内外上具有一定规模产能的商业化 MLCTs 企业主要有 5 家，具体见表 3 所示。

2002 年，日本日清奥利友食品公司推出了世界上第一款商业化的 MLCTs 产品-中长链脂肪酸食用

表 2 国内外 MLCTs 合成工艺专利现状

Table 2 Patent status of MLCTs synthesis process at home and abroad

专利号	专利名称	单位	技术要点	产品指标	参考文献
CN201911095355.2	一种在反胶束酶体系中合成中长链甘油三酯的方法	南昌大学	樟树籽油+菜籽油; 反胶束酶体系; 分子蒸馏	MLCTs含量 74.39%~92.40%	邓泽元等[83]
CN202210183617.6	一种酶法制备中长碳链甘油三酯的方法	江南大学	天然油脂+乙醇+癸酸乙烯酯; 酶法醇解+酶法酯化	MLL得率87.6%	王小三等[84]
CN202110472560.7	一种酶法制备富含中长碳链甘油三酯的火锅底料油脂的方法	江南大学; 广汉市迈德乐食品有限公司	中碳链甘油三酯+长碳链甘油三酯; 酶催化酯交换	MLCTs含量 59.20%~70.30%	王兴国等[85]
CN202011356514.2	一种用于母乳替代脂的中长碳链甘油三酯及其制备方法	江南大学	富含OPL/OPO的鱼油+富含MCFA油脂; 酶催化酸解	MLCTs含量 50.42%~70.33%	王小三等[86]
CN202010198634.8	一种含多不饱和脂肪酸的中长碳链甘油三酯的制备方法及其产品	伽力森食品生物科技(江苏)有限公司	PUFA-油脂+乙醇+MCFA; 酶法醇解+酶法酯化; 间歇式反应器	Sn-2-PUFA≥70%, MLM-MLCTs≥85%	邹孝强等[87]
CN202010139402.5	一种富含α-亚麻酸优质中长碳链结构甘油三酯的制备方法和产品	江南大学	MCT+精炼亚麻籽油; 化学酯交换	MLCTs 40%~75%, α-亚麻酸20%~40%	黄健花等[88]
CN201910311784.2	一种中长碳链甘油三酯的油脂组合物及其制备方法	江南大学	富含中碳链甘油三酯+长碳链甘油三酯的油脂; 酶法酯交换; 玻璃反应釜	LaPO10%~45% LaOO5%~25% LaOL5%~20%	王兴国等[89]
CN201510540665.6	一种利用填充床反应器制备中长链甘油三酯	暨南大学	MCT+大豆油或葵花油; 酶法酯交换; 固定床; 乙醇-减压蒸馏	MLCTs≥70% 酶循环20次	汪勇等[81]
CN201210571974.6	一种含中长碳链甘油三酯的油脂组合物及其制备方法	中粮营养健康研究院有限公司; 中粮集团有限公司	MCT+富含长碳链甘油三酯的油脂; 化学酯交换	MLL得率15%~40%; MMM%<2%	陆健等[90]
CN201811316699.7	一种高纯度中长链脂肪酸油脂的制备方法	河北康睿达脂质有限公司	MCT+LCT; 酶法酯交换; 固定床; 水蒸气蒸馏	MLCTs30-95% MCFA12%-60%	刘宪军等[82]
CN201510606202.5	中长链脂肪酸油脂的制备方法	河南工业大学	MCFA+食用油; 化学催化酸解; 烧瓶; 乙醇纯化	MCFA结合率80.5%	谢文磊等[91]
CN201711336904.1	一种混合催化合成中长链结构甘油三酯的方法	广州白云山汉方现代药业有限公司	MCT+长碳链甘油三酯; 脂肪酶+酸饱和氧化铝; 密闭容器	MLCTs78.15%, DAG6.72%	蔡鸿飞等[92]
CN201410638705.6	油脂组合物以及油脂组合物的制备方法	丰益(上海)生物技术研发中心有限公司	植物油脂+MCT; 脂肪酶; 脱色和脱臭	MLCTs70%~98%	杨武林等[93]
CN201110052579.2	一种中/长链结构甘油三酯的合成方法	四川国瑞药业有限责任公司 江南大学	MCT+LCT; 化学酯交换; 水洗离心干燥	MLCTs70%~80%,	王兴国等[94]
CN201010104448.X	一种茶油酶催化改性制备功能性油脂的方法	国家粮食和物资储备局科学研究院	MCFA+茶油; 酶催化酸解; 固定床; 分子蒸馏	辛酸插入率45%, 酶循环利用1.5个月	王瑛瑶等[80]
US6369252B1	Structured lipid	UNIV GEORGIA	癸酸和三油酸甘油酯; 酶法酸解; 具塞试管; 正己烷溶剂体系; 柱层析	癸酸插入率31.6%	Akoh等[95]
US8158184B2	Structured lipid containing compositions and methods with health and nutrition promoting characteristics	Bunge Oils, Inc.	MCT+植物油; 化学酯交换; 具备加热、搅拌和真空装置的反应器; 柠檬酸终止反应; 脱色	MCFAs插入率35.95%	Nakhasi等[96]
US8486478	Structured lipid composition	International Great Brands LLC	三丁酸甘油酯+全氢化大豆油; 化学酯交换; 分子蒸馏	LLS56%, LSL28%, LSS11.5%, SLS5%	Klemann等[97]

表 3　国内外主要的 MLCTs 产品研究现状

Table 3　Research status of MLCTs products at home and abroad

品牌	产品	厂家	制备工艺	市场规模	国家
日清	MLCTs	日清奥利友	酯交换	3600万美元	日本
轻怡	MLCTs	益海嘉里	物理混合	刚上市	中国
NuliGo	MLCTs	Bunge Loders Croklaan	酯交换	暂未上市	美国
Konrida	MLCTs	康睿达	酯交换	150万美元	中国
力文	MLCTs	费卡华瑞	酯化&酸解	4.2亿美元	中德合资

注：以上市场规模根据有关企业年报进行测算。

油，该产品是由大豆油或棉籽油或棕榈仁油与椰子油酶法催化酯交换工艺制备，主要由 LLL（49.5%~52.7%）、LLM 或 LML（37.3%~39.63%）、LMM 或 MLM（8.6%~9.34%）以及 MMM（0.1%~0.2%）脂质[98]。2007 年日清公司申请的中国专利 CN00819840-油脂组合物获得授权（2022 年已到期）[99]。2013 年中粮控股有限公司收购日清奥利友旗下的大连日清制油有限公司，并获得 MLCTs 产品专利，但目前产品线处于停滞状态。国际上具有商业化 MLCTs 产品的企业主要有美国的 Bunge Loders Croklaan 和中德合资的费卡华瑞。Bunge Loders Croklaan 在 2021年 10 月发布了公司第一款 MLCTs 产品 NuliGo，主要定位方向是运动营养、老龄化和医疗食品，通过为肌肉快速提供能量，节省蛋白质以增强肌肉并支持运动后恢复，目前该产品只在欧洲市场销售，国内暂未上市。费卡华瑞（费卡 51% 股份）作为国际领先临床营养支持的德国费森尤斯卡比的子公司，目前肠外营养支持产品已从早期的物理混合型脂肪乳剂发展到结构型脂肪乳剂，产品有力文、力能和力卡文等，2022 年销售额 4.1 亿美元。

国内 MLCTs 产业仍处于探索发展阶段，除了受产品专利的限制外，只有少数企业掌握核心技术和具备规模产能。2022 年益海嘉里有限公司旗下子公司金龙油推出了“轻怡”MLCTs 食用油，但仍为物理混合型，目前为山姆线下定制产品。河北康睿达脂质有限公司从 2008 年开始深耕 MLCTs 国产化研究，2015 年推出系列化的 MLCTs 产品如养之利多、靓之利多和防之利多等，2016 年获国内唯一的中长链脂肪酸 SC 食品生产许可证，但市场规模依旧很小。中粮日清（大连）有限公司虽获得产品专利，但生产处于停滞状态。荣海生物与江南大学合作开展化学法酶法酯交换合成 MLCTs，但企业因诸多问题处于破产整合阶段。

根据 MLCTs 的功能特性，目前国内外研究产品的潜在应用主要集中在婴儿配方奶粉补充婴儿必需营养、减肥食品、运动食品为运动员或体育爱好者快速提供能量、临床营养支持为脂肪乳剂为糖尿病、体弱婴幼儿等临床患者提供肠外营养支持以及替代传统脂肪如食用油、起酥油、黄油等，目前大部分研究仍处于实验室阶段，进一步产业化转化还有较大差距。

7　结语

从中长碳链甘三酯食用油诞生以来，国内外中长碳链甘三酯产业经历了 20 多年的发展。合成工艺上，酸解工艺适用于相对较高附加值 MLCTs 产品，但副产物脂肪酸的循环利用是亟待解决的问题，酯交换工艺适用于对于产品纯度要求不高的替代传统脂肪领域，酯化工艺产品立体专一性更高，适用于更高附加值的医药和临床营养领域，其次复配酶以及新的反应体系如反胶束和皮克林体系也逐渐成为研究热点。合成装备上，固定床具有诸多优点，如效率高、反应条件温和、可回收性高等，是一种最有希望实现工业化酶法制备 MLCTs 的反应装备，未来仍需加强产业化应用研究。分离纯化上，分子蒸馏分离效果好，产品纯度高，是最具有工业化潜力的技术手段，但由于投资大和耗能高，需进一步加大技术研发。检测分析上，GC、HPLC-ELSD 和 UPLC-Q-TOF-MS 依然是切实可行的检测手段，但未来需进一步构建甘三酯分子的液质数据库，实现甘三酯分子及异构体间定性和精准定量。标准和专利上，应尽快推出国家层面权威的产品标准和检测方法，推动 MLCTs 产业规范化发展，此外要进一步加强产学研对接，推动专利的产业化转化力度。MLCTs 产品和应用上，应该进一步加强市场宣传培育、新产品开发及应用、营养素之间的互作机制以及代谢过程中物质基础研究，为产品研发和应用奠定坚实的基础。

MLCTs 产业化作为油脂行业高质量发展的必然要求，再一次处于行业发展的关键节点。应加强亟待解决的关键环节如国产酶替代、反应装备化、产品标准化和新产品开发如神经酸等超长碳链脂肪酸产品等领域的研发投入力度，切实弥补我国在 MLCTs 领域上产业化研究转化的不足，补齐短板弱板，为实现中国油脂加工产业高质量发展水平，提升人民群众营养健康水平贡献持久动力。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 中共中央 国务院印发《“健康中国 2030”规划纲要》[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635233.htm.

[2] 中国粮油学会. 2022-2023 粮油科学技术学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2024: 110. [Chinese Cereals and Oils Association. 2022-2023 report on advances in cereals and oils science and technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2024: 110.]
[3] CHENG Xinyi, JIANG Chenyu, JIN Jun, et al. Medium- and long-chain triacylglycerol: Preparation, health benefits, and food utilization[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2024, 15(1): 381−408.
[4] ZHOU J, LEE Y Y, MAO Y L, et al. Future of structured lipids: Enzymatic synthesis and their new applications in food systems[J]. Foods, 2022, 11(16): 2400.
[5] WANG Yandan, ZHANG Tao, LIU Ruijie, et al. Reviews of medium- and long-chain triglyceride with respect to nutritional benefits and digestion and absorption behavior[J]. Food Research International, 2022, 155: 111058.
[6] ZHANG Man, XU Baocheng, ZHAO Dongkun, et al. Production of margarine fat containing medium- and long-chain triacylglycerols by enzymatic interesterification of peony seed oil, palm stearin and coconut oil blends[J]. Foods, 2024, 13(9): 1405.
[7] YUAN Tinglan, WEI Wei, WANG Xingguo, et al. Biosynthesis of structured lipids enriched with medium and long-chain triacylglycerols for human milk fat substitute[J]. LWT, 2020, 128: 109255.
[8] ZOU Xiaoqiang, ZHANG Shiqun, CHENG Yang, et al. Lipase-catalyzed interesterification of *Schizochytrium* sp. oil and medium-chain triacylglycerols for preparation of DHA-rich medium and long-chain structured lipids[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2021, 98(3): 253−267.
[9] ZOU X Q, KHAN I, WANG Y X, et al. Preparation of medium- and long-chain triacylglycerols rich in n-3 polyunsaturated fatty acids by bio-imprinted lipase-catalyzed interesterification[J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139907.
[10] LU Jiyuan, JIN Qingzhe, WANG Xingguo, et al. Preparation of medium and long chain triacylglycerols by lipase-catalyzed interesterification in a solvent-free system[J]. Process Biochemistry, 2017, 54: 89−95.
[11] PENG Bin, CHEN Fang, LIU Xianbiao, et al. Trace water activity could improve the formation of 1, 3-oleic-2-medium chain-rich triacylglycerols by promoting acyl migration in the lipase RM IM catalyzed interesterification[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126130.
[12] HE Yongjin, LI Jingbo, GUO Zheng, et al. Synthesis of novel medium-long-medium type structured lipids from microalgae oil *via* two-step enzymatic reactions[J]. Process Biochemistry, 2018, 68: 108−116.
[13] WANG Yandan, CAO Minjie, LIU Ruijie, et al. The enzymatic synthesis of EPA-rich medium- and long-chain triacylglycerol improves the digestion behavior of MCFA and EPA: Evidence on *in vitro* digestion[J]. Food & Function, 2022, 13(1): 131−142.
[14] ZHANG Zhen, YE Jing, LEE Wan jun, et al. Modification of palm-based oil blend via interesterification: Physicochemical properties, crystallization behaviors and oxidative stabilities[J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129070.
[15] UTAMA Q D, SITANGGANG A B, ADAWIYAH D R, et al. The synthesis of medium-long-medium structured lipid (MLM-SL) by lipase-catalyzed transesterification using palm olein and tricaprylin in packed-bed reactor (PBR)[J]. Research Square Preprint, 2020, 3: 1−26.
[16] LEE Y Y, TANG T K, CHAN Engseng, et al. Medium chain triglyceride and medium-and long chain triglyceride: Metabolism, production, health impacts and its applications - a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(15): 4169−4185.
[17] LIU Xuan, HE Shi, MU Lixia, et al. Enzymatic synthesis of structured lipids rich in *α*-linolenic acid: Impacts of triacylglycerol profile on physicochemical characteristics[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(10): 7301−7313.
[18] YANG Kaizhou, BI Yanlan, SUN Shangde, et al. Optimisation of Novozym-435-catalysed esterification of fatty acid mixture for the preparation of medium- and long-chain triglycerides (MLCT) in solvent-free medium[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(4): 1001−1011.
[19] 赖运栋, 张逸, 谢礼文, 等. 中长链甘油三酯的酶法制备研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(4): 719−727. [LAI Yundong, ZHANG Yi, XIE Liwen, et al. Research progress in enzymatic preparation of medium and long-chain triacylglycerols[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(4): 719−727.]
[20] 王苑力, 李桐, 郭咪咪, 等. 中长链脂肪酸结构脂质及其制备工艺研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 195−202. [WANG Yuanli, LI Tong, GUO Mimi, et al. Research progress of medium- and long-chain triacylglycerols and its preparation technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 195−202.]
[21] ZHANG Linshang, CHU Meiyun, ZONG Minhua, et al. Facile and green production of human milk fat substitute through *Rhodococcus opacus* fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(35): 9368−9376.
[22] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. Palm-based medium-and-long-chain triacylglycerol (P-MLCT): Production *via* enzymatic interesterification and optimization using response surface methodology (RSM)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(2): 685−696.
[23] ZHANG Zhen, ZHANG Siwen, LEE Wanjun, et al. Production of structured triacylglycerol via enzymatic interesterification of medium-chain triacylglycerol and soybean oil using a pilot-scale solvent-free packed bed reactor[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(3): 271−280.
[24] YANG Hongli, MU Ying, CHEN Hongtao, et al. Sn-1, 3-specific interesterification of soybean oil with medium-chain triacylglycerol catalyzed by lipozyme TL IM[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, 22(9): 1016−1020.
[25] KHODADADI M, KERMASHA S. Modeling lipase-catalyzed interesterification of flaxseed oil and tricaprylin for the synthesis of structured lipids[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2014, 102: 33−40.
[26] ZHAO Manli, HU Jiangning, ZHU Xuemei, et al. Enzymatic synthesis of medium- and long-chain triacylglycerols–enriched structured lipid from *Cinnamomum camphora* seed oil and *Camellia* oil by lipozyme RM IM[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(2): 453−459.
[27] HU Jiangning, SHEN Jinrong, XIONG Chaoyue, 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]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(8): 1990−1998.
[28] 侯俊青. 固定化脂肪酶催化樟树籽仁油和大豆油制备中长碳链结构脂质[D]. 南昌: 南昌大学, 2014: 38, 47. [HOU Junqing. The production of medium-and long-chain structured lipids from camphor tree seed oil and soybean oil catalyzed by immobilized li-

pase[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014: 38, 47.]
[29] 吴凡, 杨博, 郭嘉. 高油酸葵花籽油酶促酯交换制备中长链甘油三酯的工艺研究[J]. 中国油脂, 2025, 50(2): 76−79,107. [WU Fan, YANG Bo, GUO Jia. Preparation of medium-and long-chain triglycerides by enzymatic transesterification of high oleic acid sunflower seed oil[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(2): 76−79, 107.]
[30] TIAN Yunong, ZHOU Yanhui, LI Lu, et al. Effect of substrate composition on physicochemical properties of the medium-long-medium structured triacylglycerol[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(2): 942−955.
[31] DONG Zhe, CUI Ziheng, JIN Jun, et al. Enzymatic synthesis of structured lipids enriched with medium- and long-chain triacylglycerols via Pickering emulsion-assisted interfacial catalysis: A preliminary exploration[J]. Molecules, 2024, 29(4): 915.
[32] HUANG Chuanqing, ZHOU Yanhui, LI Lu, et al. Insight into the medium-long-medium structured lipids made from *Camellia* oil: Composition–structure relationship[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(8): 3384−3397.
[33] KORMA S A, ZOU Xiaoqiang, ALI A H, et al. Preparation of structured lipids enriched with medium- and long-chain triacylglycerols by enzymatic interesterification for infant formula[J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 107: 121−130.
[34] KAVADIA M R, YADAV M G, ODANETH A A, et al. Synthesis of designer triglycerides by enzymatic acidolysis[J]. Biotechnology Reports, 2018, 18: e00246.
[35] 王博, 鞠兴荣, 周润松, 等. 大豆油和月桂酸制备 MLM 型结构脂质工艺优化及其性质分析[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 249−254. [WANG Bo, JU Xingrong, ZHOU Runsong, et al. Optimized preparation and characterization of MLM-type structured lipids from soybean oil and lauric acid[J]. Food Science, 2018, 39(18): 249−254.]
[36] YUE Chonghui, LI Ming, LI Jing, et al. Medium-, long- and medium-chain-type structured lipids ameliorate high-fat diet-induced atherosclerosis by regulating inflammation, adipogenesis, and gut microbiota in ApoE−/− mice[J]. Food & Function, 2020, 11(6): 5142−5155.
[37] YUE Chonghui, BEN Hongyan, WANG Junwen, et al. Ultrasonic pretreatment in synthesis of caprylic-rich structured lipids by lipase-catalyzed acidolysis of corn oil in organic system and its physicochemical properties[J]. Foods, 2019, 8(11): 566.
[38] 王强, 贺稚非, 李贵节, 等. 脂肪酶催化玉米胚芽油与辛酸制备 MLM 型结构脂质[J]. 中国食品学报, 2017, 17(1): 77−83. [WANG Qiang, HE Zhifei, LI Guijie, et al. Lipase-catalyzed acidolysis of maize germ oil with caprylic acid to produce MLM-type structured lipids[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(1): 77−83.]
[39] WANG Yingyao, XIA Luan, XU Xuebing, et al. Lipase-catalyzed acidolysis of canola oil with caprylic acid to produce medium-, long- and medium-chain-type structured lipids[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(4): 707−712.
[40] XU X, BALCHEN S, HØY C E, et al. Production of specific-structured lipids by enzymatic interesterification in a pilot continuous enzyme bed reactor[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1998, 75(11): 1573−1579.
[41] 潘向昆, 王瑛瑶, 魏翠平, 等. 响应面法优化填充床反应器固定化酶催化制备 MLM 型结构脂质[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(12): 101−107. [PAN Xiangkun, WANG Yingyao, WEI Cuiping, et al. Response surface methodology applied to optimize immobilized lipase-catalyzed making MLM-type structured lipids in packed bed reactor[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(12): 101−107.]
[42] 马敏. 中长链脂肪酸甘油三酯的酶法制备技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020: 7, 41. [MA Min. Study on enzymatic synthesis technology of medium/long chain fatty acids triglycides [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020: 7, 41.]
[43] 张丽霞, 金璐, 孙强, 等. 高油酸花生油酶促酸解制备中长链甘三酯的研究[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 277−285. [ZHANG Lixia, JIN Lu, SUN Qiang, et al. Preparation of medium-and long-chain triglycerides from high oleic acid peanut oil by enzymatic acidic hydrolysis[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(4): 277−285.]
[44] LI Yang, LI Chuang, FENG Fengqin, et al. Synthesis of medium and long-chain triacylglycerols by enzymatic acidolysis of algal oil and lauric acid[J]. LWT, 2021, 136: 110309.
[45] HUANG Ying, LIU Wangxin, LUO Xianliang, et al. Synthesis and characterization of medium- and long-chain structural lipid rich in α-linolenic acid and lauric acid[J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102363.
[46] BASSAN N, RODRIGUES R H, MONTI R, et al. Enzymatic modification of grapeseed (*Vitis vinifera* L.) oil aiming to obtain dietary triacylglycerols in a batch reactor[J]. LWT, 2019, 99: 600−606.
[47] SNEHA R, JEYARANI T. Lipase-catalysed acidolysis of mango kernel fat with capric acid to obtain medium- and long-chain triacylglycerols[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(6): 1527−1534.
[48] SOUSA V, CAMPOS V, NUNES P, et al. Incorporation of capric acid in pumpkin seed oil by sn-1, 3 regioselective lipase-catalyzed acidolysis[J]. Ocl, 2018, 25(3): A302.
[49] CABALLERO E, SOTO C, OLIVARES A, et al. Potential use of avocado oil on structured lipids MLM-type production catalysed by commercial immobilised lipases[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e107749.
[50] GÖKÇE J, ŞAHIN YEŞILÇUBUK N, ÜSTÜN G. Enzymatic production of low-calorie structured lipid from *Echium* seed oil and lauric acid: Optimisation by response surface methodology[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(7): 1383−1389.
[51] PENG Bin, YANG Jianyuan, LIU Xianbiao, et al. Enzymatic synthesis of 1, 3-oleic-2-medium chain triacylglycerols and strategy of controlling acyl migration: Insights from experiment and molecular dynamics simulation[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1082−1096.
[52] ZOU Xiaoqiang, YE Linfeng, HE Xuechun, et al. Preparation of DHA-rich medium- and long-chain triacylglycerols by lipase-catalyzed acidolysis of microbial oil from *Schizochytrium* sp. with medium-chain fatty acids[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2020, 191(3): 1294−1314.
[53] ABED S M, WEI W, ALI A H, et al. Synthesis of structured lipids enriched with medium-chain fatty acids via solvent-free acidolysis of microbial oil catalyzed by *Rhizomucor miehei* lipase[J]. LWT, 2018, 93: 306−315.
[54] ABED S M, ELBANDY M, ABDEL-SAMIE M A, et al. Screening of lipases for production of novel structured lipids from single cell oils[J]. Process Biochemistry, 2020, 91: 181−188.
[55] ZOU Xiaoqiang, HUANG Jianhua, JIN Qingzhe, et al. Preparation of human milk fat substitutes from lard by lipase-catalyzed in-

teresterification based on triacylglycerol profiles[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2014, 91(12): 1987−1998.
[56] JIANG Xuan, HUANG Jianhua, LI Yaru, et al. Synthesis of symmetrical medium- and long-chain triacylglycerols rich in arachidonic acid at sn-2 position for infant formula[J]. Food Bioscience, 2022, 45: 101344.
[57] LIAN W S, WANG W F, TAN C P, et al. Immobilized *Talaromyces thermophilus* lipase as an efficient catalyst for the production of LML-type structured lipids[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2019, 42(2): 321−329.
[58] XU X B, PORSGAARD T, ZHANG H, et al. Production of structured lipids in a packed-bed reactor with *Thermomyces lanuginosa* lipase[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2002, 79(6): 561−565.
[59] LIU Jiahao, ZHENG Yinghui, ZHANG Renwei, et al. A novel synthesis method of medium- and long-chain triglyceride lipids from rubber seed oil catalyzed by enzymatic interesterification and its metabolism mechanism[J]. Food & Function, 2024, 15(19): 9903−9915.
[60] SIVAKANTHAN S, JAYASOORIYA A P, MADHUJITH T. Optimization of the production of structured lipid by enzymatic interesterification from coconut (*Cocos nucifera*) oil and sesame (*Sesamum indicum*) oil using response surface methodology[J]. LWT, 2019, 101: 723−730.
[61] 徐文迪. 富含中长碳链甘油三酯的人乳替代脂的酶法制备[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 12, 39. [XU Wendi. Enzymatic preparation of human milk fat substitutes rich in medium and long chain triacylglycerols[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 12, 39.]
[62] DELGADO N J M, JIMÉNEZ C M J, PEÑUELA VÁ M, et al. Optimization of the enzymatic synthesis of structured triacylglycerols rich in docosahexaenoic acid at Sn-2 position by acidolysis of *Aurantiochytrium limacinum* SR21 oil and caprylic acid using response surface methodology[J]. Journal of Applied Phycology, 2021, 33(4): 2031−2045.
[63] UTAMA Q D, SITANGGANG A B, ADAWIYAH D R, et al. Lipase-catalyzed synthesis of medium-long-medium-type of structured lipids from refined bleached deodorized olein[J]. Applied Food Biotechnology, 2020, 7(2): 85−94.
[64] SENGUPTA A, ROY S, MUKHERJEE S, et al. Production of medium chain fatty acid rich mustard oil using packed bed bioreactor[J]. Journal of Oleo Science, 2015, 64(2): 153−159.
[65] ZOU Xianguo, HU Jiangning, ZHAO Manli, 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]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(43): 10594−10603.
[66] NUNES P A, PIRES-CABRAL P, FERREIRA-DIAS S. Production of olive oil enriched with medium chain fatty acids catalysed by commercial immobilised lipases[J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 993−998.
[67] KOH S P, TAN C P, LAI O M, et al. Enzymatic synthesis of medium- and long-chain triacylglycerols (MLCT): Optimization of process parameters using response surface methodology[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(2): 288−299.
[68] WANG Qiang, XIE Yuejie, JOHNSON D R, et al. Ultrasonic-pretreated lipase-catalyzed synthesis of medium–long–medium lipids using different fatty acids as Sn-2 acyl-site donors[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(7): 2361−2373.
[69] 万正浩. 两步酶法催化樟树籽仁油合成结构脂质及分离纯化[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 41−41, 49. [WAN Zhenghao. Using two-step enzymic method catalyzes camphor seed kernel oil to compose structured lipid and purification the products[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015: 41−41, 49.]
[70] NUNES P A, PIRES-CABRAL P, GUILLÉN M, et al. Production of MLM-type structured lipids catalyzed by immobilized heterologous *Rhizopus oryzae* lipase[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(4): 473−480.
[71] CHEN Jiazi, LEE Wanjun, QIU Chaoying, et al. Immobilized lipase in the synthesis of high purity medium chain diacylglycerols using a bubble column reactor: Characterization and application[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, 8: 466.
[72] 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]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1998, 75(2): 301−308.
[73] LI Wenjing, LIU Xi, WANG Jinzheng, et al. Synthesis and characterization of structural lipids with a balanced ratio of n-6/n-3 from mulberry seed oil and *α*-linolenic acid using a microfluidic enzyme reactor[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 120: 21−32.
[74] ZHANG Zhen, KE Wanting, LEE Y Y, et al. Enzymatic glycerolysis production of flaxseed oil-based diacylglycerol in a bubble column reactor and its heat treatment stability[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2025, 102(1): 83−98.
[75] 关于批准中长链脂肪酸食用油和小麦低聚肽作为新资源食品等的公告(2012 年 第 16 号)[EB/OL]. https://zwfw.nhc.gov.cn/kzx/tzgg/xspylsp_225/202410/t20241012_2924.html.
[76] 国家粮食和物资储备局. 国家粮食行业标准《中长链脂肪酸食用油》征求意见稿[EB/OL]. https://www.lswz.gov.cn/html/zmhd/yjzj/2019-04/11/content_244038.shtml.
[77] 广州海莎生物科技有限公司. 中长链脂肪酸食用油[S]. 广东: 2022: 3. [Guangzhou Hisoya Biological Science & Technology Co., Ltd. Medium- and long-chain triacylglycerol oil[S]. Guangdong: 2022: 3.]
[78] 秦皇岛金海特种食用油工业有限公司. 中长链脂肪酸食用油[S]. 河北: 2021: 4. [Goldensea Speciality Oils & Fats Industries Co., Ltd. Medium- and long-chain triacylglycerol oil[S]. Hebei: 2021: 4.]
[79] 中国粮油学会.《中长链脂肪酸食用油》征求意见稿[EB/OL]. https://ttbz.ccoaonline.com/index/standard/76.html.
[80] 王瑛瑶, 栾霞, 陈翔, 等. 一种茶油酶催化改性制备功能性油脂的方法: CN201010104448. X[P]. 2013-01-23. [WANG Y Y, LUAN X, CHEN X, et al. A method for preparing functional lipids by enzymatic modification of tea oil: CN201010104448. X[P]. 2013-01-23.]
[81] 汪勇, 刘蔓蔓, 滕英来, 等. 一种利用填充床反应器制备中长链甘油三酯的方法: CN201510540665.6[P]. 2019-02-12. [WANG Y, LIU M M, TENG Y L, et al. A method for preparing medium- and long-chain triglycerides using a packed bed reactor: CN201510540665.6[P]. 2019-02-12.]
[82] 刘宪军, 来创业, 苑洪德, 等. 一种高纯度中长链脂肪酸油脂的制备方法: CN201811316699.7[P]. 2019-12-24. [LIU X J, LAI C Y, YUAN H D, et al. A method for preparing method for high-purity medium- and long-chain fatty acid oil: CN201811316699.7[P]. 2019-12-24.]
[83] 邓泽元, 张兵, 陈孙妮, 等. 一种在反胶束酶体系中合成中长链甘油三酯的方法: CN201911095355.2[P]. 2024-08-13. [DENG

Z Y, ZHANG B, CHEN S N, et al. A method for synthesizing medium- and long-chain triglycerides in a reverse micellar enzyme system: CN201911095355.2[P]. 2024-08-13.]
[84] 王小三, 刘柯缨, 黄卓能, 等. 一种酶法制备中长碳链甘油三酯的方法: CN202210183617.6[P]. 2024-04-30. [WANG X S, LIU K Y, HUANG Z N, et al. A method for enzymatic preparation of medium-and long-chain triacylglycerols: CN202210183617.6[P]. 2024-04-30.]
[85] 王兴国, 邹硕, 杨礼学, 等. 一种酶法制备富含中长碳链甘油三酯的火锅底料油脂的方法: CN202110472560.7[P]. 2023-04-18. [WANG X G, ZOU S, YANG L X, et al. An enzymatic method for preparing hotpot base oil rich in medium- and long-chain triglycerides: CN202110472560.7[P]. 2023-04-18.]
[86] 王小三, 程昕祎, 杨壮壮, 等. 一种用于母乳替代脂的中长碳链甘油三酯及其制备方法: CN202011356514.2[P]. 2023-04-18. [WANG X S, CHENG X W, YANG Z Z, et al. A medium long carbon chain triglyceride used for breast milk fat replacement and its preparation method: CN202011356514.2[P]. 2023-04-18.]
[87] 邹孝强, 张晖, 金青哲. 一种含多不饱和脂肪酸的中长碳链甘油三酯的制备方法及其产品: CN202010198634.8[P]. 2023-04-11. [ZOU X Q, ZHANG H, JIN Q Z, et al. A preparation method and product of medium-and-long chain triglycerides containing polyunsaturated fatty acids: CN202010198634.8[P]. 2023-04-11.]
[88] 黄健花, 陆燕婷, 宋志华, 等. 一种富含 α-亚麻酸中长碳链结构甘油三酯的制备方法和产品: CN202010139402.5[P]. 2023-04-11. [HUANG J H, LU Y T, SONG Z H, et al. A method and product for preparing triglycerides with long carbon chain structures rich in α-linolenic acid: CN202010139402.5[P]. 2023-04-11.]
[89] 王兴国, 韦伟, 袁婷兰, 等. 一种中长碳链甘油三酯的油脂组合物及其制备方法: CN201910311784.2[P]. 2021-09-07. [WANG X G, WEI W, YUAN T L, et al. An oil composition containing medium and long chain triglycerides and its preparation method: CN201910311784.2[P]. 2021-09-07.]
[90] 陆健, 刘新旗, 王凤艳, 等. 一种含中长碳链甘油三酯的油脂组合物及其制备方法: CN201210571974.6[P]. 2015-09-30. [LU J, LIU X Q, WANG F Y, et al. A lipid composition containing medium to long carbon chain triglycerides and its preparation method: CN201210571974.6[P]. 2015-09-30.]
[91] 谢文磊, 张弛, 王宏雁. 中长链脂肪酸油脂的制备方法: CN201510606202.5[P]. 2018-08-28. [XIE W L, ZHANG C, WANG H Y, et al. A preparation method of medium- and long-chain fatty acid oils: CN201510606202.5[P]. 2018-08-28.]
[92] 蔡鸿飞, 许文东, 唐顺之, 等. 一种混合催化合成中长链结构甘油三酯的方法: CN201711336904.1[P]. 2021-04-20. [CAI H F, XU W D, TANG S Z, et al. A method for synthesizing medium to long chain triglycerides using mixed catalysis: CN201711336904.1[P]. 2021-04-20.]
[93] 杨武林, 郑妍, 辛本荣. 油脂组合物以及油脂组合物的制备方法: CN201410638705.6[P]. 2020-11-10. [YANG W L, ZHENG Y, XIN B R, et al. Oils compositions and methods for the preparation of oils compositions: CN201410638705.6[P]. 2020-11-10.]
[94] 王兴国, 宋志华, 彭亮, 等. 一种中/长链结构甘油三酯的合成方法: CN201110052579.2[P]. 2012-11-14. [WANG X G, SONG Z H, PENG L, et al. A method for synthesizing medium/long-chain structured triglycerides: CN201110052579.2[P]. 2012-11-14.]
[95] AKOH C C. Structured lipids: US6369252[P]. 2002-04-09.
[96] NAKHASI D K, DANIELS R L. Structured lipid containing compositions and methods with health and nutrition promoting characteristics: US8158184[P]. 2012-04-17.
[97] KLEMANN L P, DINWOODIE R C. Structured lipid compositions: US8911813(B2)[P]. 2005-09-08.
[98] 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]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): R137−R144.
[99] 竹内弘幸, 板仓惠, 久保田文江, 等. 油脂组合物: CN00819840.3[P]. 2007-01-03. [TAKESHI T, MEGUMI I, FUMIE K, et al. Oils compositions: CN00819840.3[P]. 2007-01-03]