

中长链甘油三酯的研究进展

张灵群

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年6月20日; 录用日期: 2023年7月29日; 发布日期: 2023年8月10日

摘要

中长链甘油三酯(MLCT)是一种由中链脂肪酸(MCFA)和长链脂肪酸(LCFA)组成的高营养价值的新型功能性结构脂质, 在促进脂质代谢、改善胰岛素抵抗等方面作用显著, 广泛应用于食品、医疗等领域。本文主要对MLCT的代谢机制、功能特性及应用以及合成方法进行综述, 讨论了超临界CO₂介导下酶促强化MLCT合成的可行性, 对提高传统食用油的营养价值, 维护生态环境具有重要意义。

关键词

中长链甘油三酯, 超临界CO₂, 功能, 合成反应

Research Progress of Medium-and-Long Chain Triglycerides

Lingqun Zhang

College of Life Science, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Jun. 20th, 2023; accepted: Jul. 29th, 2023; published: Aug. 10th, 2023

Abstract

Medium-and-long chain triglyceride (MLCT) is a novel functional lipid with high nutritional value, which is composed of medium chain fatty acid (MCFA) and long chain fatty acid (LCFA). It plays a significant role in promoting lipid metabolism and improving insulin resistance, and is widely used in food, medical and other fields. In this paper, the metabolic mechanism, functional properties, applications and synthetic methods of MLCT were reviewed, and the feasibility of enzymatic enhancement of MLCT synthesis under supercritical CO₂ mediation was discussed, which is of great significance for improving the nutritional value of traditional edible oils and maintaining the ecological environment.

文章引用: 张灵群. 中长链甘油三酯的研究进展[J]. 食品与营养科学, 2023, 12(3): 227-234.

DOI: 10.12677/hjfn.2023.123028

Keywords

MLCT, Supercritical CO₂, Function, Synthetic Reaction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中长链甘油三酯(Medium-and-Long-Chain Triacylglycerols, MLCT)是一种由中链脂肪酸(MCFA, C6~C12)和长链脂肪酸(LCFA, C16~C22)结合在甘油骨架上合成的新型功能性结构脂质[1], MCFA 代谢快, 不易造成脂肪堆积, LCFA 可以提供能量和必需脂肪酸, 可有效的预防和治疗肥胖症、高血压等慢性疾病[2], 在食品、医药、临床治疗等领域具有广阔的应用前景。MLCT 的合成方法主要包括化学合成和酶法合成。目前产业化生产 MLCT 主要采用化学法合成, 但是在生产中可能会出现目标脂肪酸随机分布, 产物中游离脂肪酸的含量增加等问题, 后续精炼流程繁琐[3], 而且残留的催化剂对人体有害。脂肪酶法使用生物催化剂、反应条件温和、具有选择性, 但是存在生产时间长的缺点[4]。近年来, 绿色溶剂在亲脂性化合物的酶催化反应中的应用引起了人们的关注, 超临界 CO₂ 流体介导下的酶促反应可以克服脂质在常规溶剂中溶解度低、底物混溶性差的问题, 在保留了酶促反应原有优点的基础上, 进一步加快了反应速率, 提高产物纯度, 能够有效地促进 MLCT 的强化合成, 此外 CO₂ 可循环使用, 不易造成环境污染, 有望成为生产 MLCT 的主流方法。

本文主要综述了 MLCT 的代谢机制、功能特性及应用和制备方法, 讨论了超临界 CO₂ 应用于酶促合成反应的可行性, 为超临界 CO₂ 介导下强化 MLCT 的合成提供理论依据, 对提高传统食用油的营养价值, 维护生态环境具有重要意义。

2. MLCT 的代谢机制

研究表明, LCFA 能提供维持身体正常生理功能所需的能量和必需脂肪酸, 但普通膳食摄入的 LCFA 代谢速度较慢, 需要循环回肠道淋巴管, 作为乳糜微粒进入系统循环后被氧化, 从而释放能量[5]。与 LCFA 相比, MCFA 体积小、溶解度大, 具有较低的亲脂性, 经肠道吸收后以非酯化的形式通过门静脉循环直接输送到肝脏, 进行 β -氧化, 产生酮, 从而提供快速的能量来源[6] [7], 减少了脂肪组织摄取的机会[8], 因此, MCFA 对于改善 MLCT 的营养成分和代谢特性非常重要。

3. MLCT 的功能特性和应用

3.1. 促进脂肪代谢

近年来, 肥胖已经成为重大的公共卫生问题之一, 增加了患高血压、2 型糖尿病、癌症等慢性疾病的风险[9]。MLCT 具有易消化吸收, 可被身体快速代谢的特性, 各种临床研究发现其具有明显的抗肥胖作用, 展现了减脂食品开发的发展前景。Hu 等[10]人以茶油和香樟籽油为原料通过酯交换反应合成含有 MLCT 的新型结构脂质, 喂养小鼠 6 周后可观察到小鼠体重降低, 脂肪沉积减少, 并推测 MLCT 可能通过提高脂肪组织中脂肪动员相关酶的水平来促进脂肪变性, 从而减少体脂沉积。分别用三种 MCFA 含量不同(10%~30%)的 MLCT 喂养小鼠, 发现三个治疗组体内内脏脂肪、肝脏重量以及肝脏甘油三酯均低于

肥胖对照组[11]。以菜籽油(RO)为原料合成可食用的 MLCTs 输送至高脂饮食(HFD)诱导的肥胖大鼠体内[12],与 RO 相比,MLCT 可明显改善 HFD 肥胖大鼠的脂质代谢,对降低小鼠体重和组织增重、血浆 TG 和总胆固醇(TC)水平以及改善肝脏 TG、TC、脂肪酸合酶、乙酰辅酶 A 羧化酶和脂蛋白脂肪酶含量均具有更好的效果。此外相关研究表明,摄入约为 30%的 MCFA 时,体重减少最为显著[13]。

3.2. 改善胰岛素抵抗

MLCT 的消耗不仅可以降低机体脂肪的积累,而且可以通过改善胰岛素敏感性来缓解 2 型糖尿病[14]。Lee 等[1]证实酶促酯交换合成的 MLCT 能够缓解小鼠的胰岛素抵抗,有效地调节血糖水平。Terada 等[15]发现,在高脂饮食诱导的肥胖大鼠中,饮食摄入 6 周的 MLCT 可增加脂联素浓度并改善胰岛素抵抗,MLCT 可通过降低雄性大鼠肠系膜脂肪量,使脂联素浓度升高,以改善胰岛素抵抗。此外 MLCT 可能会刺激肠促胰岛素激素如胰高血糖素样肽-1 (GLP-1)和葡萄糖依赖性促胰岛素多肽(GIP)等分泌,从而诱导胰岛素分泌增加[16]。

3.3. 其他营养特性

与物理混合物相比,MLCT 表现出更好的脂肪酸代谢,使其更快地从血液中清除,并显示出可以改善氮平衡[17] [18] [19] [20]的特性。Wu 等[21]发现与 MCT/LCT 相比,术后接受 MLCT 乳剂的患者氮平衡更好,患高甘油三脂血症的风险更低,还能改善肝功能和免疫功能,缩短住院时间。Shinohara 等[22]发现 MLCT 可以通过降低海马的 pERK1/2 水平,减轻小鼠因长期强迫游泳而暴露在压力下的抑郁行为。此外 Yue 等[23]发现 MLM 型的 MLCT 结构脂类可以调节 ApoE(-/-)小鼠的细菌组成,降低了厚壁菌门/拟杆菌门比例,增加了短链脂肪酸生产菌的相对丰度同时,还降低了转瘤胃球菌的相对丰度。

3.4. 应用

MLCT 除了具有相关的功能上的优越性外,还有良好的感官性状和理化性质,在食品行业拥有广泛的应用前景。MLCT 可作为油炸介质,有效地改善了 MCT 烟点低、起泡多的缺点。MLCT 作为人造奶油的组成部分,不仅可以降低反式脂肪含量,而且可以促进人造奶油中 β 脂肪晶体的发生。Arifin 等[24]定量分析表明,用 MLCT 油制作的马德拉蛋糕比商业起酥油有更好的口感和香气,更受人们喜爱。MLCT 可作为人乳脂肪替代品,用于婴儿配方奶粉的生产,不仅可以促进婴儿的代谢,还可以给婴儿提供能量需求。袁婷兰等[25]研究发现母乳脂肪天然富含中长链甘油三酯,MLCT 是母乳中含量最丰富的一类甘油三酯,其质量约占总甘油三酯的 30%。MLCT 不仅对婴儿配方奶粉的研发有重要意义,还可作为肠外营养剂,为危重症患者提供更好的,更安全有效的营养支持。此外 MLCT 在被人体快速吸收的同时,还可为患有肝脏疾病、脂肪吸收不良、动脉粥样硬化、传染病患者提供必需脂肪酸[26] [27],对于减少患者术后的感染和胃肠道并发症的出现具有重要作用[28],对于缓解术后可能出现的高血糖和肌肉萎缩至关重要。

4. MLCT 的制备方法

根据反应催化剂不同,可以通过化学合成或脂肪酶催化来改变甘油骨架上的脂肪酸组成和分布。

4.1. 化学合成法

采用化学方法制备 MLCT 的具体过程是将两种或两种以上不同种类的油(如 LCT 和 MCT)混合后添加化学催化剂,在无水条件下进行酯交换反应,优化反应过程的主要参数,可以提高 MLCT 收率。最常用的化学催化剂是甲醇钠。Xu 等[29]利用甲醇钠(0.2% w/w)催化乳木果苷和棕榈仁硬酯(质量比为 2:3 w/w)在 105℃下酯交换反应 30 min,可得到 53.0%的 MLCT。然而,化学合成法需要使用化学催化剂,可能会

产生严重的环境污染，并且催化剂在化学催化过程中容易失活，难以重复使用，甚至产生不易去除的副产物，已经不能满足 MLCT 生产和健康功能的要求[30]。为此需要寻找一种绿色、环保、高效的 MLCT 制备工艺，在提高 MLCT 产率、提升产品品质的同时，避免有害废物的产生，减少环境污染。

4.2. 酶法合成

与传统的化学方法相比，酶法合成以脂肪酶为催化剂，反应条件温和，催化效率高，反应具有选择性，专一性强。根据底物类型和反应机理的不同，脂肪酶催化反应可分为酯交换、酯化和酸解反应。

4.2.1. 酯交换

酯交换法是指不同构型的甘油三酯之间或脂肪酸酯与甘油三酯之间通过酰基交换而合成结构脂类的反应。脂肪酸在反应过程中会与甘油主链的不同位置结合，产物复杂且与催化合成所用的脂肪酶有关，不适合分子结构确定的结构脂类。但由于其价格低廉、来源广泛，特别适用于分子构型不确定的油的改性和结构脂类的合成，是目前最简单的用于生产 MLCT 的方法，产生的副产物少。Zhao 等[31]以脂肪酶 Lipozyme RM IM 催化樟树籽仁油和茶油进行酯交换，摩尔比(樟树籽仁油/大豆油)为 1:1.5，加酶量 10% (w/w)，于 60℃ 下反应 3 h，MLCT 产率为 55.81%。Khodadadi 等[32]在 *sn*-1, 3 特异性酶 TL IM 的作用下催化三辛酸甘油酯及亚麻籽仁油合成 MLCT，在响应面优化的最佳反应条件下，产物中 C_{Ln} C、CLaC 和 COC 构型产率将分别达到 35.34%~35.45%，4.09%~4.19%，8.44~8.53%。

4.2.2. 酯化

酯化法是脂肪酸和甘油分子在脂肪酶催化下结合生成结构脂类和水反应。Yang 等[33]采用 Novozyme 435，在无溶剂存在下制备 MLCT，脂肪酸(辛酸:癸酸 = 1.1:1):甘油 = 3:1，加酶量为 4.8% (w/w)，90℃，反应时间为 12.37 h 的反应条件下，经过纯化后得到 MLCT 纯度为 72.19%。Koh 等[34]利用响应面优化 Lipozyme RM IM 催化甘油、辛酸和油酸制备 MLCT，最终产率高达 70.43%。但是反应过程中水的生成会影响酶的活性，促进水解，导致结构脂质的产率下降。因此，酯化反应中需要不断除去产生的水。此外，底物应为高纯度脂肪酸，成本较高，限制了该方法的生产和应用[33]。

4.2.3. 酸解

酸解法是最常见的制备 MLCT 的方法，可通过脂肪酶催化脂肪酸和甘油三酯之间的酰基交换，生成新的结构脂质和脂肪酸[35]。平衡时的反应产率取决于脂肪酸与甘油三酯的比例，及时将产物转移出反应体系，可使反应向合成产物的方向移动，有效地提高产物产率，并且酸解合成的产物更易纯化，因此酸解法被广泛应用于结构脂类的制备。Abed 等[36]通过脂酶 RM IM 催化制备了富含 1, 3-二油酰基-2-花生四烯酰甘油结构脂质(SLs)，在最佳条件下 SLs 中 *sn*-1, 3 位的不饱和脂肪酸含量高达 84.00%。惠菊[37]等以共轭亚油酸和葵花籽油为底物，选用 Novozyme 435 催化酸解反应制备富含共轭亚油酸(CLA)的结构脂，在酶用量为 10%，55℃ 下反应 36h，产物中的 CLA 含量为 15.7%。

5. 超临界 CO₂ 介导下合成 MLCT

酶促反应过程中，油脂的粘度较大，底物混溶性差、传质性能弱，产物的合成速率有待进一步提高。超临界流体是物质的压力和温度同时超过它的临界压力和临界温度的状态下兼有气体和液体相近特性的一类物质，近年来，随着可持续发展战略的推进，研究发现超临界二氧化碳流体(Supercritical Carbon Dioxide, SC-CO₂)可以作为酶催化反应的介质，强化亲脂性化合物的酶促反应[38]。CO₂ 是一种无毒、不易燃的“绿色”溶剂，在超临界的状态下，CO₂ 流体相较于有机溶剂，具有溶解能力好、粘度低、传质高、表面张力低、无毒等优点[39]。CO₂ 的临界温度为 31.1℃，低于脂肪酶的变性温度，在适宜的温度和

压力下脂肪酶在超临界 CO₂ 流体中的脂肪酶保持着一定的催化活性, 并且超临界 CO₂ 可改善反应物的混溶性和反应介质的传质性能, 进一步提升反应速率[40], 此外 SC-CO₂ 隔绝了氧气得到的油脂具有色泽透明, 酸价低, 抗氧化能力好的品质[41]。

瞿佳政[42]在 SC-CO₂ 介质下用棕榈酸、甘油酶促合成甘油二酯, 相较于普通的酶合成工艺, SC-CO₂ 不仅可以提升酶的稳定性, 还提高了棕榈脂转化率、二酯收率、二酯选择性。齐颖等[43]在 SC-CO₂ 介质中用玉米油、辛酸合成辛酸甘油酯玉米油, 研究表明在酶用量为 5%, 60℃ 及 11 MPa 下反应 24 h, 辛酸的酯化率可达 90.73%, 具有生物活性的中链脂肪酸含量高达 32.00%。

超临界 CO₂、离子液体(Ionic Liquids, ILs)和深共晶溶剂(Deep Eutectic Solvent, DES)都是目前常用的绿色溶剂。但在 ILS 的实际应用中, 其所含的一些阴离子和阳离子对细胞具有毒性, 且生物降解性差, 无法长期使用, 其废弃物的处理也可能会对环境造成影响。经研究表明, 大量未处理的白细胞介素的释放将导致生态系统的变化, 其可以通过影响土壤中的微生物来改变土壤的 pH 值[44]。深共晶溶剂成本低、易制造且化学原理与离子液体相似, 但是其是一种潜在的化学物质, 在应用处理中存在一定的毒性[45]。与 ILS 和 DES 不同的是, 流体 CO₂ 廉价易得, 性质稳定, 常压下为气体, 无毒, 超临界下其具有溶解能力强、扩散系数大、黏度小和萃取温度低等优点, 所得产物中无溶剂残留, 解决了有毒溶剂残留的问题, 且提高了产物的抗氧化能力, 可适用于酶法生产结构脂质。

6. 展望

化学合成法是生产 MLCT 最常见的工艺方法, 但是制备的过程中需要使用大量的有机溶剂、能耗大、环境污染严重, 不能满足 MLCT 绿色、环保生产的要求。脂肪酶法与传统的化学方法相比, 有效避免了有机化合物的使用, 具有反应条件温和、能耗低、高效、选择性等优势, 但存在着油溶性底物混溶性差等问题。超临界 CO₂ 流体是一种新型环境友好的绿色溶剂, 无毒无害、无溶剂残留, 具有低表面张力、低粘度、高扩散性、高传质等特性, 已经被运用于亲脂性化合物的酶催化反应中, 在保留了常规酶促反应优点的基础上, 能够有效提高底物混溶性, 加快反应速率。此外, 超临界 CO₂ 环境隔绝了氧气, 可减少脂质氧化, 提高产品品质。但是目前超临界 CO₂ 介质下生产 MLCT 的研究较少, 若对其强化合成的机理进一步探究, 有望形成一条生产高营养价值结构脂质的绿色、高效的合成工艺, 对促进油脂的精深加工、提高油脂的附加值和保护生态环境具有重要意义。

参考文献

- [1] Lee, Y.-Y., Tang, T.-K., Phuah, E.-T., *et al.* (2018) Structural Difference of Palm Based Medium- and Long-Chain Triacylglycerol (MLCT) Further Reduces Body Fat Accumulation in DIO C57BL/6J Mice When Consumed in Low Fat Diet for a Mid-Term Period. *Food Research International*, **103**, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.022>
- [2] Zhang, Y., Liu, Y., Wang, J., *et al.* (2010) Medium- and Long-Chain Triacylglycerols Reduce Body Fat and Blood Triacylglycerols in Hypertriacylglycerolemic, Overweight but Not Obese, Chinese Individuals. *Lipids*, **45**, 501-510. <https://doi.org/10.1007/s11745-010-3418-z>
- [3] Huang, J., Lu, Y., Jin, J., *et al.* (2021) Chemical Transesterification of Flaxseed Oil and Medium-Chain Triacylglycerols: MLCT Yield, DAG Content, Physicochemical Properties, Minor Compounds and Oxidation Stability. *International Journal of Food Science & Technology*, **56**, 5160-5167. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15173>
- [4] Kim, B.H. and Akoh, C.C. (2015) Recent Research Trends on the Enzymatic Synthesis of Structured Lipids. *Journal of Food Science*, **80**, 1713-1724. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12953>
- [5] Zhou, S.M., Wang, Y.Q., Jiang, Y.R., Zhang, Z.F., Sun, X.G. and Yu, L.L. (2017) Dietary Intake of Structured Lipids with Different Contents of Medium-Chain Fatty Acids on Obesity Prevention in C57BL/6J Mice. *Journal of Food Science*, **82**, 1968-1977. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13789>
- [6] Guillot, E., Vaugelade, P., Lemarchali, P. and Re Rat, A. (1993) Intestinal Absorption and Liver Uptake of Me-

- dium-Chain Fatty Acids in Non-Anaesthetized Pigs. *British Journal of Nutrition*, **69**, 431-442. <https://doi.org/10.1079/BJN19930045>
- [7] Schönfeld, P. and Wojtczak, L. (2016) Short- and Medium-Chain Fatty Acids in Energy Metabolism: The Cellular Perspective. *Journal of Lipid Research*, **57**, 943-954. <https://doi.org/10.1194/jlr.R067629>
- [8] Poppitt, S.D., Strik, C.M., MacGibbon, A.K., McArdle, B.H., Budgett, S.C. and McGill, A.T. (2010) Fatty Acid Chain Length, Postprandial Satiety and Food Intake in Lean Men. *Physiology & Behavior*, **101**, 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2010.04.036>
- [9] Deedwania, P. and Lavie, C.J. (2018) Dangers and Long-Term Outcomes in Metabolically Healthy Obesity: The Impact of the Missing Fitness Component. *Journal of the American College of Cardiology*, **71**, 1866-1868. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.02.057>
- [10] Hu, J.N., Shen, J.R., Xiong, C.Y., *et al.* (2018) 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. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **66**, 1990-1998. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05659>
- [11] Shi, J., Wang, Q., Li, C., *et al.* (2023) Effects of the Novel LaPLa-Enriched Medium-and Long-Chain Triacylglycerols on Body Weight, Glycolipid Metabolism, and Gut Microbiota Composition in High Fat Diet-Fed C57BL/6J Mice. *Molecules*, **28**, Article No. 722. <https://doi.org/10.3390/molecules28020722>
- [12] Du, Y.X., Chen, S.N., Zhu, H.L., *et al.* (2020) Consumption of Interesterified Medium- and Long-Chain Triacylglycerols Improves Lipid Metabolism and Reduces Inflammation in High-Fat Diet-Induced Obese Rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **68**, 8255-8262. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c03103>
- [13] Zhou, S., Wang, Y., Jacoby, J., Jiang, Y., Zhang, Y. and Yu, L.L. (2017) Effects of Medium- and Long-Chain Triacylglycerols on Lipid Metabolism and Gut Microbiota Composition in C57BL/6J Mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **65**, 6599-6607. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01803>
- [14] Lee, Y.Y., Tang, T.K., Chan, E.S., Phuah, E.T., Lai, O.M., Tan, C.P., *et al.* (2021) Medium Chain Triglyceride and Medium- and Long Chain Triglyceride: Metabolism, Production, Health Impacts and Its Applications—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **62**, 4169-4185.
- [15] Terada, S., Yamamoto, S., Sekine, S. and Aoyama, T. (2012) Dietary Intake of Medium- and Long-Chain Triacylglycerols Ameliorates Insulin Resistance in Rats Fed a High-Fat Diet. *Nutrition*, **28**, 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.04.008>
- [16] Min, X., Yie, J., Wang, J., Chung, B.C., Huang, C.S., Xu, H., *et al.* (2020) Molecular Mechanism of an Antagonistic Antibody against Glucose-Dependent Insulinotropic Polypeptide Receptor. *MAbs*, **12**, Article ID: 1710047. <https://doi.org/10.1080/19420862.2019.1710047>
- [17] Rubin, M., Moser, A., Vaserberg, N., Greig, F., Levy, Y., Spivak, H., Ziv, Y. and Lelcuk, S. (2000) Structured Triacylglycerol Emulsion, Containing both Medium- and Long-Chain Fatty Acids, in Long-Term Home Parenteral Nutrition: A Double-Blind Randomized Cross-Over Study. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, **16**, 95-100. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(99\)00249-X](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(99)00249-X)
- [18] Kruimel, J.W., Naber, T.H., der Vliet, J.A.V., Carneheim, C., Katan, M.B. and Jansen, J.B. (2001) Parenteral Structured Triglyceride Emulsion Improves Nitrogen Balance and Is Cleared Faster from the Blood in Moderately Catabolic Patients. *JPEN. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, **25**, 237-244. <https://doi.org/10.1177/0148607101025005237>
- [19] Piper, S., Mengistu, A., Wolf, M., Suttner, S., Boldt, J., *et al.* (2006) Utilisation of Structured Triglycerides (Structolipid®) in Surgical ICU Patients Receiving Parenteral Nutrition. *Critical Care*, **10**, P206. <https://doi.org/10.1186/cc4553>
- [20] Tang, Y., Wu, X.S., Zhang, D.W., Wei, B., Chen, L. and Li, R. (2011) The Comparative Study of Structured Triglyceride and Physical Mixed MCT/LCT on Fatty Acid Metabolism in Healthy Subjects. *Parenteral & Enteral Nutrition*, **4**, 196-199.
- [21] Wu, G.H., Zaniolo, O., Schuster, H., *et al.* (2017) Structured Triglycerides versus Physical Mixtures of Medium- and Long-Chain Triglycerides for Parenteral Nutrition in Surgical or Critically Ill Adult Patients: Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical Nutrition*, **36**, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2016.01.004>
- [22] Shinohara, H., Fukumitsu, H., Seto, A. and Furukawa, S. (2013) Medium-Chain Fatty Acid-Containing Dietary Oil Alleviates the Depression-Like Behaviour in Mice Exposed to Stress Due to Chronic Forced Swimming. *Journal of Functional Foods*, **5**, 601-606. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.12.006>
- [23] Yue, C., Li, M., Li, J., Han, X., Zhu, H., Yu, G., *et al.* (2020) Medium-Long- and Medium-Chain-Type Structured Lipids Ameliorate High-Fat Diet-Induced Atherosclerosis by Regulating Inflammation, Adipogenesis, and Gut Microbiota in ApoE(-/-) Mice. *Food & Function*, **11**, 5142-5155. <https://doi.org/10.1039/D0FO01006E>
- [24] Arifin, N., Cheong, L.-Z., Koh, S.-P., *et al.* (2011) Physicochemical Properties and Sensory Attributes of Medium- and

- Long-Chain Triacylglycerols (MLCT)-Enriched Bakery Shortening. *Food and Bioprocess Technology*, **4**, 587-596. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0204-0>
- [25] Yuan, T., Wei, W., Zhang, X., *et al.* (2021) Medium- and Long-Chain Triacylglycerols Composition in Preterm and Full-Term Human Milk across Different Lactation Stages. *LWT*, **142**, Article ID: 110907. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110907>
- [26] Kim, I.H., Kim, H., Lee, K.T., *et al.* (2002) Lipase-Catalyzed Acidolysis of Perilla Oil with Caprylic Acid to Produce Structured Lipids. *Journal of the American Oil Chemists Society*, **79**, 363-367. <https://doi.org/10.1007/s11746-002-0489-3>
- [27] Mascioli, E.A., Bistrrian, B.R., Babayan, V.K. and Blackburn, G.L. (1987) Medium Chain Triglycerides and Structured Lipids as Unique Nonglucose Energy Sources in Hyperalimentation. *Lipids*, **22**, 421-423. <https://doi.org/10.1007/BF02537272>
- [28] Kenler, A.S., Swails, W.S., Driscoll, D.F., *et al.* (1996) Early Enteral Feeding in Postsurgical Cancer Patients. Fish Oil Structured Lipid-Based Polymeric Formula versus a Standard Polymeric Formula. *Annals of surgery*, **223**, 316-333. <https://doi.org/10.1097/0000658-199603000-00013>
- [29] Xu, Z., Jin, J., Adhikari, P., *et al.* (2016) Sheaolein-Based Cold-Soluble Powder Fats with Medium- and Long-Chain Triacylglycerol: Production via Chemical Interesterification Using Sheaolein and Palm Kernel Stearin. *RSC Advances*, **6**, 18632-18640. <https://doi.org/10.1039/C5RA27824D>
- [30] Mensink, R.P., Sanders, T.A., Baer, D.J., Hayes, K.C., Howles, P.N. and Marangoni, A. (2016) The Increasing Use of Interesterified Lipids in the Food Supply and Their Effects on Health Parameters. *Advances in Nutrition*, **7**, 719-729. <https://doi.org/10.3945/an.115.009662>
- [31] Zhao, M.L., Hu, J.N., Zhu, X.M., *et al.* (2014) Enzymatic Synthesis of Medium- and Long-Chain Triacylglycerols-Enriched Structured Lipid from *Cinnamomum camphora* Seed Oil and Camellia Oil by Lipozyme RM IM. *International Journal of Food Science, & Technology*, **49**, 453-459. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12322>
- [32] Khodadadi, M. and Kermasha, S. (2014) Modeling Lipase-Catalyzed Interesterification of Flaxseed Oil and Tricaprylin for the Synthesis of Structured Lipids. *Journal of Molecular Catalysis B Enzymatic*, **102**, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2014.01.011>
- [33] Yang, K., Bi, Y., Sun, S., *et al.* (2014) Optimisation of Novozym-435-Catalysed Esterification of Fatty Acid Mixture for the Preparation of Medium- and Long-Chain Triglycerides (MLCT) in Solvent-Free Medium. *International Journal of Food Science, & Technology*, **49**, 1001-1011. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12393>
- [34] Koh, S.P., Tan, C.P., Lai, O.M., *et al.* (2010) Enzymatic Synthesis of Medium- and Long-Chain Triacylglycerols (MLCT): Optimization of Process Parameters Using Response Surface Methodology. *Food & Bioprocess Technology*, **3**, 288-299. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0073-y>
- [35] 高向阳, 陈昊, 富校轶, 等. 低热量功能性油脂——结构脂质的研究与开发前景[J]. 大豆科技, 2012(3): 39-43. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3547.2012.03.011>
- [36] Abed, S.M., Zou, X., Ali, A.H., *et al.* (2017) Synthesis of 1,3-Dioleoyl-2-arachidonoylglycerol-Rich Structured Lipids by Lipase-Catalyzed Acidolysis of Microbial Oil from *Mortierella alpina*. *Bioresource Technology*, **243**, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.090>
- [37] 惠菊, 单良, 金青哲, 等. 无溶剂体系酶法催化酸解合成共轭亚油酸甘油酯[J]. 中国油脂, 2009, 34(7): 26-29. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1003-7969.2009.07.008>
- [38] Vázquez, L., Bañares, C., Torres, C.F., *et al.* (2020) Green Technologies for the Production of Modified Lipids. *Annual Review of Food Science and Technology*, **11**, 319-337. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032519-051701>
- [39] 潘见, 杨克, 张文成, 等. 超临界 CO₂ 萃取天然产物技术及发展[J]. 精细与专用化学品, 2001(14): 8-9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1100.2001.14.001>
- [40] Lisboa, P., Rodrigues, A.R., Martin, J.L., *et al.* (2014) Economic Analysis of a Plant for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil via Enzymatic Transesterification Using Supercritical Carbon Dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, **85**, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.10.018>
- [41] Rebolleda, S., Rubio, N., Beltrán, S., *et al.* (2012) Supercritical Fluid Extraction of Corn Germ Oil: Study of the Influence of Process Parameters on the Extraction Yield and Oil Quality. *Journal of Supercritical Fluids*, **72**, 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.10.001>
- [42] 瞿佳政. SCCO₂ 介质中棕榈酸甘油二酯酶促合成反应的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2009. <https://doi.org/10.7666/d.y1674421>
- [43] 齐颖, 陈晓慧, 李越, 等. 超临界 CO₂ 状态下酶法合成富含中链脂肪酸的玉米油[J]. 食品工业科技, 2012, 33(2): 300-302. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2012.02.044>

- [44] Gulhane, P.A., Gomashe, A.V. and Deo, N.V. (2014) Influence of Ionic Liquid 1-Butyl-3-methylimidazolium Chloride on the Soil Micro-Ecological System. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, **3**, 805-813.
- [45] Zhang, Q., De Oliveira Vigier, K., Royer, S., *et al.* (2012) Deep Eutectic Solvents: Syntheses, Properties and Applications. *Chemical Society Reviews*, **41**, 7108-7146. <https://doi.org/10.1039/c2cs35178a>