

富含 α -亚麻酸的中长链脂肪酸结构脂的酶法合成与理化性质分析

陈福妮^{1,2}, 刘琛², 王卫飞², 钟赛意¹, 王思远², 穆利霞², 廖森泰², 邹宇晓²

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088; 2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东省农产品加工重点实验室, 农业农村部功能食品重点实验室, 广州 510610)

摘要:旨在为富含多不饱和脂肪酸(PUFA)的中长链脂肪酸甘油三酯(MLCT)产品的应用提供参考,采用脂肪酶Lipozyme TL IM催化精炼桑蚕蛹油(SPO)与三辛酸甘油酯(TRI)进行酯交换反应合成富含 α -亚麻酸(ALA)的MLCT(ALA-MLCT),考察了反应时间对ALA-MLCT合成的影响,并对合成的ALA-MLCT的甘油三酯组成、质量指标、氧化稳定性、乳液性能和体外消化特性进行了分析。结果表明:Lipozyme TL IM催化效率高,反应10 h TRI的转化率达到98%以上,反应12 h合成的产物ALA-MLCT中含有ALA的MLCT含量可以达到40.41%,且主要为LnCaCa(10.95%)、PLnCa(7.69%)和OLnCa(6.21%),其质量指标符合中长链脂肪酸食用油标准征求意见稿2022中的一级食用油标准;与SPO和酯交换反应底物物理混合物(SPO与TRI质量比1:4, SPO+TRI)相比,产物ALA-MLCT氧化稳定性显著提高,其乳液粒径较小且分布均匀,具有更好的物理稳定性;体外模拟消化实验表明,与SPO+TRI相比,ALA-MLCT更快达到消化平衡,但最终二者消化率均可以达到90%以上。综上,合成的ALA-MLCT结构脂有助于提高ALA的生物可及性,有望作为功能性食用油脂。

关键词:中长链脂肪酸结构脂; α -亚麻酸;酶法合成;氧化稳定性

中图分类号:O621.3;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)03-0066-06

Enzymatic synthesis and physicochemical properties of medium- and long-chain triacylglycerols rich in α -linolenic acid

CHEN Funi^{1,2}, LIU Chen², WANG Weifei², ZHONG Saiyi¹,
WANG Siyuan², MU Lixia², LIAO Sentai², ZOU Yuxiao²

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China; 2. Guangdong key Laboratory of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Functional Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to provide reference for the application of medium- and long-chain fatty acid triglycerides (MLCT) products enriched with polyunsaturated fatty acids (PUFA), lipase Lipozyme TL IM was employed to catalyze the transesterification of refined silkworm pupa oil (SPO) and tricaprylin (TRI) to synthesize MLCT rich in α -linolenic acid (ALA) (ALA-MLCT). The impact of reaction time on the synthesis of ALA-MLCT was studied, and the triglycerides composition, quality index, oxidative stability, emulsion performance, and *in vitro* digestion characteristics of the ALA-MLCT were analyzed. The results showed that Lipozyme TL IM had high catalytic efficiency,

收稿日期:2023-01-16;修回日期:2023-12-02

基金项目:财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助(CARS-18-ZJ0503);佛山市财政专项资金——高水平广东省农业科技示范市建设资金市院合作项目;广东省农业科学院地方分院和专家工作站工作经费项目(2023支撑01)

作者简介:陈福妮(1997),女,在读硕士,研究方向为油脂加工(E-mail)1309157370@qq.com。

通信作者:邹宇晓,研究员(E-mail)yuxiaozou@126.com。

and the conversion rate of TRI reached more than 98% after 10 h of reaction. The content of MLCT containing ALA in ALA - MLCT synthesized by transesterification reaction for 12 h reached 40.41%, and it was mainly composed of LnCaCa (10.95%), PLnCa (7.69%) and OLnCa (6.21%). The quality indexes of ALA - MLCT complied with the standards of first-class edible oil in the medium- and long-chain fatty acid edible oil standard draft 2022. Compared with SPO and the physical mixture of transesterification reaction substrate (SPO + TRI, in a 1:4 mass ratio), ALA - MLCT exhibited significantly improved oxidation stability, and its emulsion had better physical stability, with smaller and more evenly distributed particles size. *In vitro* simulated digestion experiments revealed that ALA - MLCT achieved a faster digestive balance compared with SPO + TRI, but the final digestibility of both could exceed 90%. In conclusion, the synthesized ALA - MLCT can help to improve the bioaccessibility of ALA and is expected to be used as functional edible oil.

Key words: medium- and long-chain triacylglycerols; α -linolenic acid; enzymatic synthesis; oxidative stability

中长链脂肪酸食用油,主要成分为中长链脂肪酸甘油三酯(MLCT),是由中链脂肪酸、长链脂肪酸结合在同一甘油骨架上形成的甘油三酯。MLCT无毒副作用,作为一种功能性结构脂,具有降低血脂水平、预防和缓解肥胖症、改善脂质代谢等生理功能^[1-2]。中长链脂肪酸食用油在2002年被日本批准为特定保健用食品,我国在2012年批准其为新资源食品,至今已被广泛应用于食品、医药工业。MLCT是多不饱和脂肪酸(PUFA)的良好载体,富含PUFA的中长链脂肪酸甘油三酯(PUFA-MLCT)具有MLCT的生理功能,同时还能提供甘油酯型的PUFA,近年来受到越来越多的关注^[3-4]。

MLCT的制备方法主要是化学法和酶法,PUFA-MLCT一般采用酶法合成^[5]。王小三等^[6]公开了一种利用两步酶法制备PUFA-MLCT的方法:首先采用含有PUFA的油脂、脂肪酸特异性脂肪酶、乙醇于反应器中选择性醇解去除油脂中饱和与单不饱和脂肪酸,得到高浓度的PUFA偏甘油酯;其次,将PUFA偏甘油酯与中链脂肪酸(MCFA)在脂肪酶催化下酯化合成MLCT,产物中饱和与单不饱和脂肪酸的含量很低。Zou等^[4]通过脂肪酶Lipozyme RM IM催化MCFA酸解裂殖壶藻油制备富含DHA的MLCT,所得产品中鉴定出59种甘油三酯(TAG),其中35种含有MCFA,含量占55.35%。Jiang等^[7]采用两步酶法合成了富含花生四烯酸(ARA)的MLCT,MLCT含量达93.60%,其中C10:0-C20:4-C10:0形式的MLCT(包括异构体)含量约为40.43%。Wang等^[8]以中链甘油三酯(MCT)和富含二十碳五烯酸(EPA)的鱼油(FO)为原料,通过酶促酯交换合成

富含EPA的MLCT,并使用体外消化模型考察了MCT、FO、MLCT、MCT和FO物理混合物(PM)4种油样在胃肠道中的消化特征,发现小肠消化120 min后,MLCT的水解程度高于其他3种油。 α -亚麻酸(ALA)是人体必需脂肪酸,是维持人体和动物体正常生理代谢必需的营养成分。富含ALA的MLCT(ALA-MLCT)既能满足人体对必需脂肪酸的需求,也可以提供特殊结构甘油酯改善脂质代谢的生理功能。黄昭先等^[9]通过Lipozyme RM IM催化紫苏油与MCT进行酯交换合成ALA-MLCT,MLCT得率超过70%,纯化产物中存在超过40%的ALA。刘琛等^[10]以桑蚕蛹油为底物,通过酶法催化其与三辛酸甘油酯进行酯交换反应制备ALA-MLCT,酯交换产物中MLCT含量达到98.73%,总脂肪酸组成中辛酸含量为20.00%,ALA含量为30.09%。目前,对以大豆油、棕榈油等普通植物油为原料制备的MLCT理化性质和应用研究较为充分,其已广泛应用于烹饪、烘焙、煎炸等食品加工中。但是,PUFA-MLCT的研究报道相对较少,且主要集中在合成与精制技术研究上,而对理化特性和应用的研究较少。

本研究以精炼桑蚕蛹油(SPO)为底物,通过酶法酯交换反应合成ALA-MLCT,在前期酶反应条件优化的基础上进行放大实验,并对酯交换产物的质量指标、氧化稳定性、乳化性能和消化特征进行了考察,以期PUFA-MLCT产品在食品和医药领域的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

脂肪酶Lipozyme TL IM(来源于*Thermomyces*

lanuginosus), Novozymes (Bagsvaerd, Denmark) 公司; 精炼桑蚕蛹油(SPO)[酸值(KOH)为 0.10 mg/g, 过氧化值为 0.02 mmol/kg, ALA 含量为 31.7%], 实验室自制; 三辛酸甘油酯(tricaprylin, TRI)、阿拉伯胶、三氟化硼-甲醇, 分析纯; 37 种脂肪酸甲酯标准品、 α -淀粉酶(A3176-1MU, ≥ 5 U/mg)、胃蛋白酶(P700-100G, ≥ 250 U/mg)、胰脂肪酶(P7545-100G, 8 USP), Sigma-Aldrich 公司; 猪胆盐, 上海源叶生物公司; 异丙醇、乙腈, 质谱纯, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; 正己烷, 色谱纯。

SQP 型电子天平; 6890N/5975B 型气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 科技有限公司; Triple TOF TM 5600 + 液相色谱-质谱联用仪, 美国 AB-Sciex 公司; AH-BASIC II 型高压均质机, ATS Engineering 公司; IKA T18 均质机, 德国 IKA 公司; Zetasizer Nano ZSE 型纳米粒度及 Zeta 电位分析仪, 英国 Malvern Panalytical 公司; AR1500EX 型流变仪, 美国 TA 公司; Rancimat 743 型油脂氧化稳定性测定仪, 瑞士 Metrohm 公司; 高效液相色谱仪(HPLC-RID), 美国 Waters 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 ALA-MLCT 的合成及 TRI 转化率的测定

以 SPO 和 TRI 为原料, 参考刘琛等^[10]建立的酶反应参数进行放大反应。称取 200 g TRI 和 800 g SPO, 置于 2 000 mL 具塞锥形瓶中, 混合均匀后, 加入 160 g 脂肪酶 Lipozyme TL IM, 充氮气保护条件下于 45 °C、120 r/min 的水浴恒温振荡器中进行酯交换反应, 反应 12 h 后过滤回收油相, 即得 ALA-MLCT。反应过程中每隔 2 h 取样, 离心除去反应液中的脂肪酶, 将获得的上层油样于 -20 °C 保存, 再参照刘琛等^[10]的方法测定 TRI 转化率。

1.2.2 ALA-MLCT 理化性质测定

1.2.2.1 甘油三酯组成测定

参考石威等^[11]的方法测定 ALA-MLCT 的甘油三酯组成。

1.2.2.2 质量指标测定

色泽的测定, 参考 GB/T 5009.37-2003; 透明度、气味和滋味的测定, 参考 GB/T 5525-2008; 不溶性杂质含量的测定, 参考 GB/T 15688-2008; 水分及挥发物含量的测定, 参考 GB 5009.236-2016; 过氧化值的测定, 参考 GB 5009.227-2016; 酸值的测定, 参考 GB 5009.229-2016; 脂肪酸组成的测定, 参考 GB 5009.168-2016。

1.2.2.3 氧化稳定性测定

采用 Rancimat 743 型油脂氧化稳定性测定仪检

测油脂氧化稳定性。分别将 3.0 g 样品放入试管中, 再置于恒温电加热块中, 在加速氧化温度分别为 100、110、120 °C, 空气流量为 10 L/h 条件下, 测定氧化诱导时间。

1.2.2.4 乳液性能测定

参考文献[12]的方法并稍作修改后制备水包油型乳液。分别将 SPO、SPO 与 TRI 物理混合油(SPO 与 TRI 质量比 1:4, SPO + TRI)、ALA-MLCT 3 种油样按油水体积比 70:30 加入 500 mL 的烧瓶中, 再加入底物总质量 2% 的阿拉伯胶, 将混合溶液在 6 000 r/min 的条件下均质 5 min, 随后经高压均质机在 30 MPa 下以 20 L/h 的流速均质 2 次, 得到水包油型乳液。将所得乳液稀释 100 倍后通过纳米粒度及 Zeta 电位分析仪测定其粒径大小。参考文献[12]方法并稍作修改检测乳液稳定性: 将 3 种待测乳液各取 15 mL 置于具塞刻度试管中, 分别静置 3、7、14、30 d 后观测乳液的分层情况, 并按式(1)计算其稳定性(Y)。

$$Y = H_1/H_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: H_1 为未分层乳液的高度, cm; H_0 为全部乳液的高度, cm。

1.2.2.5 体外消化率测定

参考 Brodkorb^[13]、Versantvoort^[14] 等方法, 对 SPO、SPO + TRI、ALA-MLCT 进行体外模拟消化实验。称取 1 g 油样和 2.5 mL 模拟口腔(SSF)消化液(含 α -淀粉酶, 75 U/mL)于 50 mL 离心管中, 置于 37 °C 恒温加热磁力搅拌器中模拟口腔消化 3 min, 之后用 6 mol/L HCl 溶液将 pH 调至 3.0, 加入 3 mL 模拟胃(SGF)消化液、2 mL 胃蛋白酶溶液(2 000 U/mL)、15 μ L CaCl₂ 溶液, 模拟胃消化 120 min, 再用 4 mol/L NaOH 溶液将 pH 调至 7.0 后, 加入 4 mL 模拟肠(SIF)消化液、5 mL 胰脂肪酶溶液(100 U/mL)、1 mL 胆盐溶液(133.6 mg/mL)、20 μ L CaCl₂ 溶液, 模拟小肠消化 0、30、60、90、120 min。消化结束后所有样品立即高温灭酶并置于 -20 °C 冰箱保存。参考文献[8]的方法提取消化后的油相, 再参考文献[15]分析其油脂组成, 按下式计算油脂消化率(D)。

$$D = (C_{\text{FFA}} + C_{\text{MAG}}) / (C_{\text{TAG}} + C_{\text{DAG}} + C_{\text{MAG}} + C_{\text{FFA}}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_{FFA} 为游离脂肪酸含量; C_{MAG} 为单甘油酯含量; C_{DAG} 为甘油二酯含量; C_{TAG} 为甘油三酯含量。

2 结果与讨论

2.1 反应时间对 ALA-MLCT 合成的影响

按 1.2.1 方法, 考察反应时间对 ALA-MLCT 合成的影响, 结果如图 1 所示。

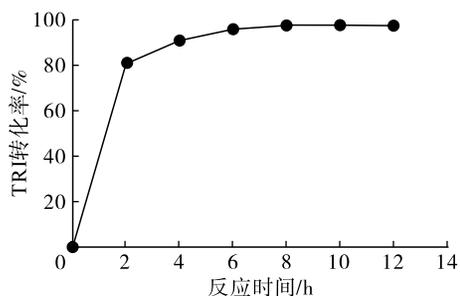


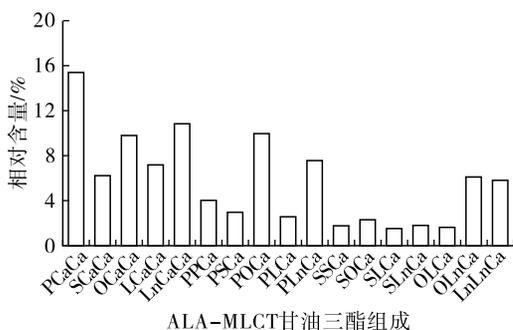
图1 反应时间对 ALA-MLCT 合成的影响

由图1可知,在1 kg底物的反应体系中,脂肪酶 Lipozyme TL IM 具有良好的催化效率,酶促反应8 h时酯交换反应基本达到平衡,酶促反应10 h时TRI的转化率可以达到98%以上,这与刘琛等^[10]报道的酶反应效果基本一致,说明该工艺在反应体系放大时具有良好的重现性。

2.2 ALA-MLCT 的理化性质

2.2.1 甘油三酯组成

ALA-MLCT中共鉴定出17种相对含量在1%以上的甘油三酯,如图2所示。



注:Ca. 辛酸;P. 棕榈酸;S. 硬脂酸;O. 油酸;L. 亚油酸;Ln. 亚麻酸

图2 ALA-MLCT 的甘油三酯组成

由图2可知:ALA-MLCT中相对含量较高的甘油三酯为PCaCa、LnCaCa、POCa,分别达到15.50%、10.95%、9.29%;含有ALA的MLCT相对含量为40.41%,主要为LnCaCa(10.95%)、PLnCa(7.69%)和OLnCa(6.21%)。

2.2.2 质量指标

对本研究中合成的ALA-MLCT的质量指标进行测定,并与中长链脂肪酸食用油标准征求意见稿2022和2012年第16号新资源食品公告进行比较,结果如表1所示。

由表1可知,合成的ALA-MLCT产品的质量指标均符合中长链脂肪酸食用油标准征求意见稿和新资源食品公告的要求,与Maruyama等^[16]报道的脂肪酶在有机溶剂中因没有油水界面而几乎没有活性不同,本研究中利用Lipozyme TL IM在非水相中

催化酯交换合成ALA-MLCT,不仅催化效率高,而且可以避免水解等副反应引起的酸值和过氧化值升高等问题,这与Utama等^[17]的报道一致。

表1 本研究中合成的ALA-MLCT的质量指标和理化指标

项目	ALA-MLCT	征求意见稿	食品公告
色泽	淡黄色	无色至黄色	淡黄色
气味、滋味	蚕蛹油固有的气味和滋味,无异味	具有固有的气味和滋味,无异味	
透明度	澄清、透明	澄清、透明	透明状液体
不溶性杂质/%	0.02	≤0.10	
水分及挥发物/%	0.02	≤0.10	
过氧化值/(mmol/kg)	0.31	≤5.0	
酸值(KOH)/(mg/g)	0.15	1(一级) 3(二级)	
中长链甘油三酯/(g/100g)	98.67	≥50(一级) ≥18(二级)	≥18
中链甘油三酯/(g/100g)	0.33	≤3	<3
长链甘油三酯/(g/100g)	0.94	≤77	≤77
中链脂肪酸/(g/100g)	20.1	≥11	≥11
α-亚麻酸/%	26.2		

2.2.3 氧化稳定性

氧化稳定性是食用油脂重要质量指标之一,与油脂的不饱和脂肪酸含量、分子结构有关。按1.2.2.3方法,比较了SPO、SPO+TRI、ALA-MLCT 3种油脂的氧化稳定性,结果如图3所示。

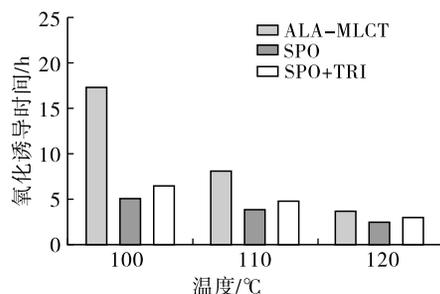


图3 SPO、SPO+TRI、ALA-MLCT 3种油脂的氧化稳定性

由图3可知:在加速氧化温度100°C时,ALA-MLCT的氧化诱导时间为17.24 h,而SPO+TRI的氧化诱导时间仅为6.41 h,SPO的氧化诱导时间为5.16 h;随着加速氧化温度的升高,3种油样的氧化诱导时间均有所下降,但是在加速氧化温度110、120°C时,ALA-MLCT的氧化诱导时间仍显著高于

SPO、SPO + TRI,这与 Akoh 等^[18]的报道不一致,可能是本研究中采用的酯交换反应条件温和,副反应少,不需要下游处理,所以没有造成原料油中维生素E、甾醇等天然抗氧化剂的损失所致。

为进一步分析 ALA - MLCT 氧化稳定性与其甘油三酯结构的关系,对3种油样甘油三酯组成中双键数目及含量进行了统计,结果如图4所示。

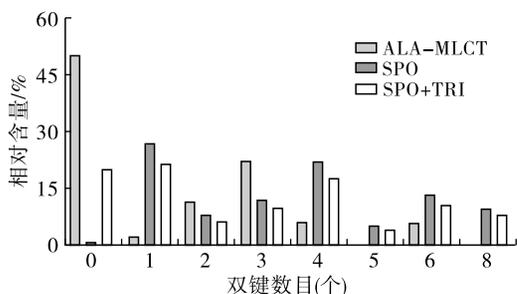
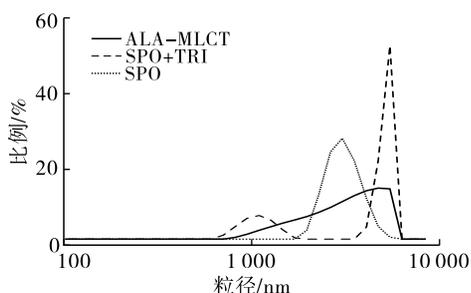


图4 SPO、SPO + TRI、ALA - MLCT 3种油脂甘油三酯分子中不同双键数目的含量

由图4可知,与原料相比,SPO与TRI酯交换反应后合成的ALA - MLCT中不含双键的甘油三酯分子比例显著增加,而含有4个、6个和8个双键的甘



油三酯分子比例显著减少($p < 0.05$),说明不饱和脂肪酸更分散地结合在不同的甘油三酯分子上。结果说明SPO与TRI酯交换后得到的ALA - MLCT氧化稳定性显著提高是由于甘油三酯的脂肪酸组成发生了重排所致。陆燕婷^[19]以亚麻籽油和精炼MCT进行化学酯交换后发现,酯交换产物的氧化诱导时间比未进行酯交换的物理混合物长,其原因是由于酯交换后亚麻籽油中较易氧化的不饱和脂肪酸在甘油三酯分子中的分布更加随机和均匀,导致氧化过程中自由基的传递效率降低,从而提高了酯交换产物的氧化稳定性。

2.2.4 乳液性能

乳液是PUFA和功能性油脂重要的使用方式之一。功能性油脂,特别是作为膳食补充剂使用的结构脂,其水包油型乳液性质是影响其应用和消化吸收的重要因素^[20]。本研究对ALA - MLCT、SPO、SPO + TRI形成的3种水包油型乳液在25℃条件下的粒径和稳定性进行了考察,结果如图5所示。

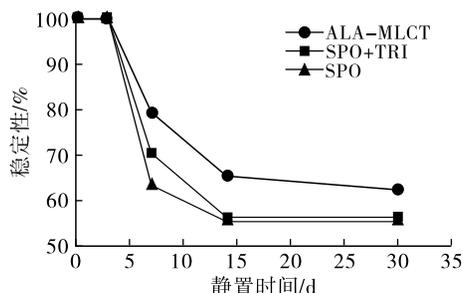


图5 SPO、SPO + TRI、ALA - MLCT 3种油脂的乳液性能

由图5可知,SPO乳液的平均粒径(3 634 nm)与SPO + TRI乳液的平均粒径(5 883 nm)之间存在显著差异($p < 0.05$),SPO乳液的平均粒径与ALA - MLCT乳液的平均粒径(3 088 nm)无显著差异($p > 0.05$)。在3种乳液中,ALA - MLCT乳液的液滴更小,且其粒度分布表现为单峰,在体系中的分布也更均匀,ALA - MLCT乳液不易发生聚集、分

层,与其他两组乳液相比有更高的稳定性,而SPO + TRI乳液不仅平均粒径较大,而且粒度分布还出现了双峰,分布较不均匀,易发生聚集,产生分层现象。

2.2.5 体外消化特性

采用体外模拟消化实验考察了SPO、SPO + TRI、ALA - MLCT 3种油脂的消化特性,结果如图6所示。

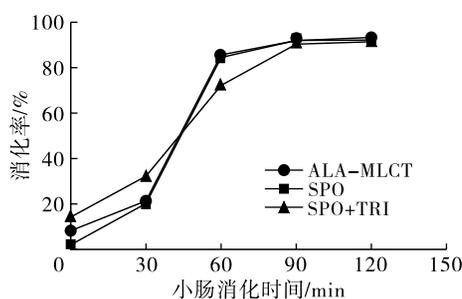
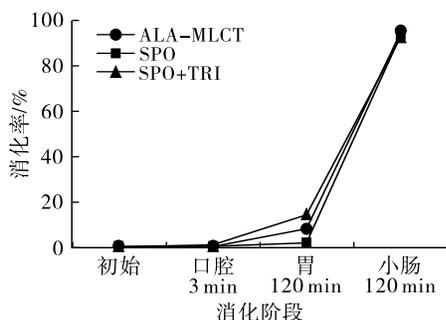


图6 SPO、SPO + TRI、ALA - MLCT 3种油脂的体外消化率

由图6可知,3种油脂在口腔中基本未被消化,

在模拟胃消化120 min后,SPO的消化率非常低,而

ALA-MLCT、SPO+TRI均有少量降解,可能是中链脂肪酸与甘油之间形成的酯键有少量水解所致,在模拟小肠消化120 min后,3种油脂的消化率均可以达到90%以上,且无显著差异。由图6还可知,在小肠消化的前30 min内,SPO与SPO+TRI消化速率较快,在30~60 min ALA-MLCT和SPO消化速率较快,最先达到平衡,这与Wang等^[8]的研究报道基本一致,是由于中链脂肪酸可以在胃消化阶段少量水解,在肠消化阶段迅速水解产生大量偏甘油酯,促进了消化体系中油水界面的增加,从而提高了油脂的消化效率。

3 结论

本研究以SPO和TRI为原料,通过酶法催化酯交换合成了ALA-MLCT,该结构脂的质量指标符合中长链脂肪酸食用油标准征求意见稿2022中的一级食用油标准,且比反应底物具有更好的氧化稳定性,其水包油型乳液的物理稳定性显著提高,经体外模拟消化后更快达到平衡。该研究合成的富含 α -亚麻酸的中长链脂肪酸桑蚕蛹油结构脂有助于提高 α -亚麻酸的生物可及性,有望作为功能性食用油脂,促进桑蚕蛹油的高值化开发和应用。

参考文献:

- [1] 杜映雪,李静,陈孙妮,等. 中长链甘油三酯对大鼠肝脏脂质代谢的调节作用[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 114-122.
- [2] LEE Y Y, TANG T K, CHAN E S, et al. Medium chain triglyceride and medium - and long chain triglyceride: Metabolism, production, health impacts and its applications: A review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(15): 4169-4185.
- [3] 姜萱,杨瑶,徐秀丽,等. 酶法合成sn-2位富含DHA的中长链结构脂[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 71-76, 99.
- [4] ZOU X, YE L, HE X, 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]. Appl Biochem Biotechnol, 2020, 191(3): 1294-1314.
- [5] 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.
- [6] 王小三,杨壮壮,江聪,等. 一种富含多不饱和脂肪酸的中长链甘油三酯的制备方法: CN112280810A [P]. 2021-01-29.
- [7] JIANG X, HUANG J H, LI Y R, et al. Synthesis of symmetrical medium - and long - chain triacylglycerols rich in arachidonic acid at sn - 2 position for infant formula[J/OL]. Food Biosci, 2021, 45: 101344 [2023-12-03]. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101344>.
- [8] WANG Y, CAO M, LIU R, 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 Funct, 2022, 13(1): 131-142.
- [9] 黄昭先,王满意,孙承国,等. 酶法催化紫苏油和MCT合成中长链甘油三酯研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 360-366, 359.
- [10] 刘琛,王卫飞,廖森泰. 酶催化桑蚕蛹油酯交换制备中长链脂肪酸甘油酯[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 108-111, 147.
- [11] 石威,庞道睿,邹宇晓,等. 柞蚕蛹油中的脂类物质组成分析[J]. 蚕业科学, 2019, 45(2): 269-277.
- [12] 杜明睿. 牡丹籽油微胶囊的制备及其生物学特性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [13] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nat Protoc, 2019, 14(4): 991-1014.
- [14] VERSANTVOORT C H, OOMEN A G, VAN DE KAMP E, et al. Applicability of an *in vitro* digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food[J]. Food Chem Toxicol, 2005, 43(1): 31-40.
- [15] LIU X, SHI W, XU L, et al. Two - step enzymatic synthesis of α - linolenic acid - enriched diacylglycerols with high purities from silkworm pupae oil [J]. Bioproc Biosyst Eng, 2021, 44(3): 627-634.
- [16] MARUYAMA T, NAKAJIMA M, UCHIKAWA S, et al. Oil - water interfacial activation of lipase for interesterification of triglyceride and fatty acid[J]. J Am Oil Chem Soc, 2000, 77(11): 1121-1127.
- [17] UTAMA Q D, SITANGGANG A B, ADAWIYAH D R, et al. Lipase - catalyzed interesterification for the synthesis of medium - long - medium (MLM) structured lipids: A review [J]. Food Technol Biotechnol, 2019, 57(3): 305-318.
- [18] AKOH C G, MOUSSATA C O. Characterization and oxidative stability of enzymatically produced fish and canola oil - based structured lipids [J]. J Am Oil Chem Soc, 2001, 78(1): 25-30.
- [19] 陆燕婷. 富含 α -亚麻酸的中长碳链结构甘油三酯合成及精制工艺研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [20] 徐雨茜. OPO结构脂的制备及其水包油乳液性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.