

结构脂质

中长碳链甘油三酯的研究进展

周 飞¹, 王建宇¹, 白雪斐¹, 万国权¹, 王翠翠¹, 宦凌霄¹, 曾哲灵^{1,2,3}

(1. 南昌大学 资源环境与化工学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047;
3. 江西省食用药食同源植物资源高值化利用重点实验室, 南昌 330031)

摘要: 中长碳链甘油三酯 (MLCT) 是一类天然油脂的改性产品, 因其既可快速高效地为机体提供能量而不造成脂肪累积, 又可为人体提供必需脂肪酸而成为油脂研究领域的焦点。对 MLCT 的理化性质、代谢特性、制备方法以及在食品、医药工业中的应用等方面进行了综述, 以期为进一步研究 MLCT 提供有益参考。

关键词: 中长碳链甘油三酯; 理化性质; 代谢特性; 制备方法; 应用

中图分类号: TS218; TQ641 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2018)07-0067-06

Progress in medium – and long – chain triacylglycerolZHOU Fei¹, WANG Jianyu¹, BAI Xuefei¹, WAN Guoquan¹,
WANG Cuicui¹, HUAN Lingxiao¹, ZENG Zheling^{1,2,3}

(1. School of Resource, Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;
3. Jiangxi Province Key Laboratory of Edible and Medicinal Plant Resources, Nanchang 330031, China)

Abstract: Medium – and long – chain triacylglycerol (MLCT) is a kind of modified product of natural oil. Because MLCT not only provides energy quickly and efficiently for the body without causing fat accumulation, but also provides essential fatty acid (EFA), it has become the research focus in the oil field. Physicochemical properties, metabolism characteristics, preparation methods and the application in food and pharmaceutical industries of MLCT were described, in order to provide useful reference for further research of MLCT.

Key words: medium – and long – chain triacylglycerol; physicochemical property; metabolism characteristics; preparation method; application

油脂是机体不可缺少的三大营养素之一, 对机体的健康发育至关重要, 其所具备的最重要生理功能是为机体供给能量和必需脂肪酸。随着人们消费水平的提高, 与油脂的消化、吸收及代谢等有关的疾病日益增多, 研究发现高脂肪膳食通常伴随着肥胖症、糖尿病、高血脂及某些癌症等疾病^[1], 因此人们

开始关注对天然油脂进行改性来生产中长碳链甘油三酯 (MLCT), MLCT 既可以保持其天然油脂的营养价值又可以降低油脂的热量, 同时拓展了其在食品及医药行业的应用, 已成为油脂研究领域的一个焦点^[2]。

结构脂质是由天然油脂通过改性或结构重组而制得, 主要通过脂肪酸构成的转变及其在甘油三酯中所处位置的转变来实现人工合成, 但其并不是几种甘油酯简单的物理混合, 而是平衡各类脂肪酸, 使其除了保留天然油脂全部或部分特性外, 还具备特殊的生理功能和营养价值^[3-4]。MLCT 是一类新型的结构脂质, 由中碳链脂肪酸 (MCFA) 和长碳链脂肪酸 (LCFA) 结合于同一甘油分子上而形成^[5]。根

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2018-03-26

基金项目: 国家国际科技合作专项项目 (2011DFA32770); 食品科学与技术国家重点实验室目标导向项目 (SKLF-ZZA-201303)

作者简介: 周 飞 (1991), 男, 硕士研究生, 研究方向为油脂化学 (E-mail) 13672243289@163.com。

通信作者: 曾哲灵, 教授, 博士 (E-mail) zzhenglx@163.com。

据甘油三酯分子骨架上酰化的3个脂肪酸碳链的长短差异,可分为MLM型、MML型、LML型、LLM型,其中M代表了MCFA($C_{8:0} \sim C_{12:0}$),L代表了LCFA($C_{14:0}$ 以上)^[5]。

MLCT在控制体重、体脂肪和改善载脂蛋白代谢方面具有重大意义,是一类兼预防和控制肥胖症等慢性疾病的保健食品。Kishi等^[6]探究了食用含有中链脂肪酸和亚油酸的4种不同构型的MLCT对大鼠血清甘油三酯清除率的作用,证明了大鼠食用这4种构型的油脂,体内甘油三酯的清除速率更快且不易产生脂肪累积。近年来,发达国家对MLCT做了大量的基础和临床研究,商业化产品的研发日趋成熟,基本进入市场化阶段,而国内尚处于发展阶段,仍有待进一步完善。本文就MLCT的理化性质和代谢特征、制备方法以及在食品及医药工业中的应用等方面进行综述,以期为我国MLCT产品的研发提供参考,推动我国MLCT及其加工产业的发展。

1 MLCT的理化性质与代谢特性

长碳链甘油三酯(LCT)通常富含于绝大部分食用油脂中,为机体正常生长发育提供必需的脂肪酸,但LCT在血清中水解速率及清除速率都相对较

慢^[7],不利于机体健康发育。中碳链甘油三酯(MCT)消化吸收速率是LCT的4倍,代谢速率则是其10倍,能够提高机体对葡萄糖的利用率并快速供应能量,但是MCT不含人体必需脂肪酸,摄入过量后产生的大量酮体物质将造成中毒,因此从营养学角度考虑不宜长期食用^[2,8]。

MLCT的理化性质及代谢特性与MCT、LCT相比差异很大^[9-11](见表1、图1)。MLCT克服了MCT不含必需脂肪酸的缺陷,同时兼备了其快速供能的优点^[12];MLCT可以实现脂肪酸的同步运输,且避免了酮体过量中毒;与传统的LCT、MCT相比,MLCT在营养代谢方面存在诸多优势:如降低血清甘油三酯、胆固醇含量,弱化蛋白质代谢,促进氮平衡、抑制体内脂肪蓄积、提高免疫功能、降低癌症风险等^[13-14]。莫玉稳等^[15]通过餐后血脂试验和小鼠成长试验对中长碳链甘油三酯进行了检测,结果表明:长期饲喂MLCT可以降低小鼠的TG(甘油三酯)、TC(总胆固醇)、LDL-C(低密度脂蛋白胆固醇)水平,具有降低血脂的功效。临床研究也表明,MLCT可降低血脂、体脂积聚,长期食用可起到减肥作用^[16]。

表1 MLCT与MCT、LCT理化性质与代谢特性的比较

项目	MCT	LCT	MLCT
熔点	低	高	较高
烟点	低	高	较高
有无必需脂肪酸	无	有	有
水解速率	快速,可被脂蛋白脂肪酶水解,没有脂肪酶也可被水解	慢,可被脂蛋白脂肪酶水解	快速,可被脂蛋白脂肪酶水解,没有脂肪酶也可被水解
吸收途径	可进入门静脉吸收	与乳糜微粒结合,通过淋巴系统转运进入循环系统	可通过门静脉吸收或者与乳糜微粒结合,再经淋巴系统转运至循环系统
转运	不必通过转运蛋白转运	高度依赖转运蛋白,如脂蛋白或清蛋白	不依赖转运蛋白或者其他蛋白转运
吸收速率	快速,不依赖肉碱转运系统	慢,高度依赖肉碱转运系统	快速,不依赖肉碱转运系统

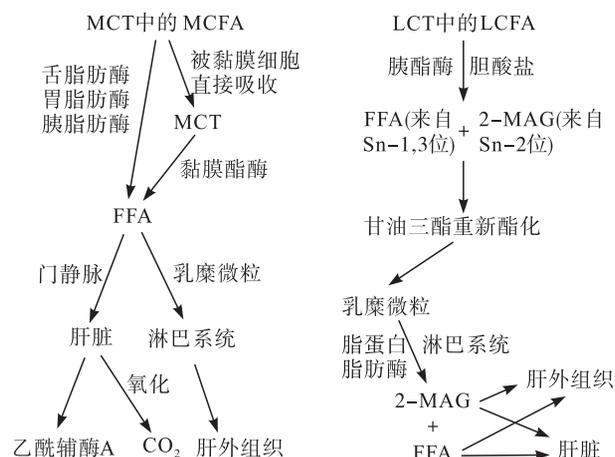


图1 MCFA与LCFA体内代谢途径

2 MLCT的制备方法

MLCT作为一种新型的结构脂质制备方法较多。根据反应催化剂的差异,可将MLCT制备方法分为化学法和酶法。

2.1 化学法

化学法制备MLCT,主要是利用化学催化剂催化目标中链油脂和具有特殊生理功能的长链油脂进行随机酯交换。其中甲醇钠具有反应温度低、催化效率高等优点,因此常被用作化学酯交换催化剂^[17]。化学法具有催化剂成本低、操作简单、易实现工业化生产等优点。但化学法制备MLCT亦存在较多不足,比如反应温度高、脂肪酸结构特异差、产

品成分复杂且不可控、产品不易分离纯化、甚至可能生成有害物质等。

2.2 酶法

与化学法相比,酶法制备 MLCT 优势突出。酶法不仅催化性能好、选择性高、反应条件温和,而且所得产品原有的营养成分未被破坏且纯度高、无残留污染物、副产物少、脂肪酶可重复利用^[18]。依据不同的反应机理,可将酶法分为直接酯化法、醇解酯化法、酸解法和酯-酯交换法。

2.2.1 直接酯化法

直接酯化法是以 MCFA、LCFA 和甘油为原料,在适宜的底物比例下,采用脂肪酶直接催化酯化合成 MLCT 的方法。

Yang 等^[19]采用 Novozyme 435 酶为催化剂,在无溶剂存在下催化辛酸、癸酸、油酸和甘油制备医用 MLCT,在脂肪酸与甘油摩尔比 3:1,加酶量 4.8%,反应温度 90℃ 及反应时间 12.37 h 的条件下反应并经过纯化后得到 MLCT 纯度为 72.19%。国外学者生物酶的直接酯化法制备 MLCT 的研究主要集中在酶法一步酯化和先酶法后化学法两步法两个方面。Koh 等^[20]利用响应面优化 Lipozyme RM IM 酶催化甘油和混合酸(辛酸和油酸)制备 MLCT,使其最终产率高达 70.43%。Iwasaki 等^[21]分两步酯化辛酸、EPA 与甘油生成 MLM 型 MLCT。首先,在酶的作用下,甘油和辛酸合成纯度为 80% 的 1,3-甘二酯;其次,采用化学法酯化 1,3-甘二酯和 EPA 合成纯度为 90% 的 MLM 型 MLCT。

直接酯化法操作便捷,一步完成,目标产物含量高且易分离。但由于原料是纯度较高的脂肪酸,导致生产成本相对较高,不适用于大规模工业化生产。

2.2.2 醇解酯化法

醇解酯化法主要是催化剂催化 LCT 或 MCT 和甘油反应,使之醇解得到单甘酯或甘二酯,再与游离脂肪酸酯化合成 MLCT。

Muñio 等^[22]采用醇解酯化法在 1,3-特异性酶催化下研究制备了 MLM 型结构脂质。首先醇解鳕鱼肝油和金枪鱼油合成 2-单甘酯,其次分离纯化使其纯度达到 87%,最后将其和辛酸在 1,3-特异性酶的催化下反应合成 MLCT,经过纯化使得 MLCT 纯度高达 95%。

醇解酯化法涉及两步酶法,制备途径烦琐且产品不易分离纯化,导致生产费用高,因而仅适用于制备杂质较少且高附加值的结构脂质,较少用于 MLCT 的合成。

2.2.3 酸解法

酸解法是指 LCT 和 MCFA 或者 MCT 和 LCFA 在酶的作用下,使其所含酰基互置,生成 MLCT 的过程。酸解主要分两步,首先是甘油三酯在酶的催化作用下水解生成甘二酯以及少量单甘酯,然后再与新的脂肪酸反应。

Wang 等^[23]研究了在 1,3-特异性 Lipozyme RM IM 酶的作用下,酸解菜籽油和辛酸合成 MLCT,结果表明菜籽油与辛酸摩尔比 1:4,加酶量 10%,在 50~60℃ 下作用 15 h,此时辛酸插入率最高并且酰基转移率最低。Kim 等^[24]分别采用 Lipozyme RM IM 和 Lipozyme TL IM 脂肪酶对紫苏油与辛酸进行酸解合成 MLCT,研究发现以正己烷为溶剂时,在最佳条件下,辛酸的插入率最高,分别为 48.5% 和 51.4%,从而证明在正己烷为溶剂时的酰基转移率比无溶剂体系下高。

酸解法特异性强,作用部位专一,并且能使油品成分基本保持不变,避免温度过高影响油脂的稳定性,因此是合成 MLCT 的主要方法。但是酶法酸解会产生大量的单甘酯和甘二酯等副产物,从而影响产品的纯度和后续的分选纯化。

2.2.4 酯-酯交换法

酯-酯交换法是指将 MCT 与 LCT 之间或者与脂肪酸酯(通常为脂肪酸乙酯)的酰基进行重新排布和位置互换的过程^[1]。

Zhao 等^[25]以脂肪酶 Lipozyme RM IM 催化樟树籽仁油和茶油进行酯-酯交换,樟树籽仁油与茶油摩尔比为 1:1.5 的底物,10% 加酶量,于 60℃ 下反应 3 h,MLCT 产率为 55.81%。Khodadadi 等^[26]在 1,3-特异性酶 Lipozyme TL IM 的作用下对三辛酸甘油酯及亚麻籽仁油进行催化合成 MLCT,MLCT 产物中 CLnC、CLaC 和 COC 构型得率分别达到 35.34%~35.45%,4.09%~4.19%,8.44%~8.53%。

酯-酯交换法最早用于生产 MLCT,此法反应原料来源广泛、成本低,因而被广泛应用于脂质改性和 MLCT 的合成,然而所得产物的位置特异性较差,因此不适宜于制备已知化学结构的 MLCT。

3 MLCT 的应用

MLCT 作为一种特殊的结构脂质,长期临床实验研究表明对人体无毒副作用^[27],已被广泛应用于食品、医药工业,并且国外已经出现了不少商业化的 MLCT 产品。

3.1 食品工业的应用

3.1.1 烹饪油方面的应用

Resetta 是第一个商业化的 MLCT 产品,是由日

本 Nisshin Oillio 公司生产的一种 MLCT 油,并于 2006 年被美国食品药品监督管理局 (FDA) 认证为安全食品。该产品通过菜籽油、椰子油或棕榈仁油的酯交换反应产生了甘三酯随机组合的 MLCT (49.5% ~ 52.7% 的 LLL、37.3% ~ 39.6% 的 LLM 或 LML、8.6% ~ 9.34% 的 LMM 或 MLM 和 0.1% ~ 0.2% 的 MMM), 烟点较高,在 200℃ 下保持 30 min 依然稳定,作为烹饪油畅销于日本和美国^[5]。Koh 等^[28]以大豆油与棕榈油为原料合成了适用于烹饪的 MLCT,研究表明来自大豆油的长链脂肪酸(油酸,亚油酸和亚麻酸)提高了 MLCT 的烟点。Koh 等^[20]还研究了加入抗氧化剂的 MLCT,其抗氧化强度明显增强并且烟点在 180℃ 以上,因此具有烹饪油所需的特性,感官试验表明马铃薯片分别以 MLCT 油或棕榈油煎炸味道并无差异。

3.1.2 人造奶油、起酥油方面的应用

MLCT 中反式脂肪酸含量较低,并且理化性质类似于人造奶油和起酥油,因此也被逐渐用于人造奶油和起酥油等烘焙油中。Adhikari 等^[29]通过酶促酯交换技术,以完全氢化大豆油与椰子油、米糠油为原材料合成 MLCT,制备过程中脂肪酸位置、固体脂肪含量及其熔点均发生了改变,同时反式脂肪酸含量也得以降低,因此合成的 MLCT 可用于人造奶油的生产配方中。

Caprenin 是由美国 Procter & Gamble 公司开发的低能量脂肪,于 1996 年被公认为安全物质,将椰子油、棕榈仁油和菜籽油通过化学酯交换制备而得。在 Caprenin 中辛酸含量约为 45%,辛酸含量为 20% ~ 25%,癸酸含量为 25% ~ 30%,花生酸含量约为 4%,另外还含有少量的月桂酸、棕榈酸、花生四烯酸、二十四碳烷酸等^[30]。Caprenin (1-辛酸-2-癸酸-3-二十二烷酸甘油酯)分子中含有 3 个脂肪酸,分别为中碳链脂肪酸和超长碳链脂肪酸 ($C_{22:0}$),中碳链脂肪酸,即辛酸和癸酸的代谢与碳水化合物相似,不如长碳链脂肪酸有效;二十二碳酸只能少量地被人体吸收,大部分直接通过肠胃而不产生能量,因而 Caprenin 能量只有普通脂肪的一半,约 19.25 kJ/g^[31]。Caprenin 口味清淡,热稳定性强,所含能量低,特别适用于制作巧克力奶油蛋糕、糖果等,但其熔点较高,吸收性较差,为避免有蜡的口感,产品中高熔点的 LLM、LML、LLL 的含量应保持在较低的水平。Mcneill 等^[32]通过化学法和酶法两步催化合成 Caprenin,首先通过芥酸、辛酸和一定量的水化学合成 1(3)单芥酸甘油酯,然后选用对芥酸酯键没有活性的脂肪酶把中碳链脂肪酸酯化到剩

余的羟基上,在 50℃、初始含水量 5.5% 并选用来源于 *Geotrichum Candidum* 的脂肪酶时可以促进酯交换,得到纯度大于 75% 的 LMM,然后再将其溶于无水乙醇,短暂旋转后加入 PtO_2 ,过滤,加入新鲜催化剂,并在约 2 MPa 压力下氢化 0.5 h,用水和乙醚萃取,干燥浓缩,即得 Caprenin。

3.2 医药工业的应用

脂肪乳剂作为一种静脉注射乳剂,被广泛应用于临床肠外营养,主要用于肝功能不全、肾功能不全、糖尿病酮中毒等患者,体弱婴幼儿,危重病人等^[14]。第一代脂肪乳剂是以大豆油为原料制备而成的,在 20 世纪 60 年代初就已经应用于临床。但后来研究表明,以大豆油为基料油的脂肪乳剂存在过多的多不饱和脂肪酸,易对机体免疫功能造成损伤,甚至可能导致脂质过氧化危害^[33]。近年来 MLCT 应用于脂肪乳剂是一项重大的成就。长期的肠外营养研究表明,MLCT 的脂肪乳剂可安全有效地为手术后病人提供能量,故以 MLCT 为基料油的结构脂肪乳剂具备成为未来静脉肠外营养主力军的潜力^[34]。

Yang 等^[19]采用生物酶合成技术催化甘油和中、长碳链脂肪酸直接酯化制备医用 MLCT 脂肪乳,研究证明合成的 MLCT 与瑞典生产的 FE73403 结构脂肪乳剂中的脂肪酸组成基本一致。目前,在医学上国外普遍使用的以 MLCT 为基料油的结构脂肪乳产品主要有瑞典的 Structolipid 20%^[18]和 FE73403, Structolipid 20% - 250 mL 价格高达 285 元, FE73403 价格则更高。国内的相关脂肪乳产品主要有华瑞制药的力文 (Structolipid, 技术来自于德国费森尤斯卡比公司)。Structolipid 已经在瑞典、丹麦、英国、法国、荷兰、德国等 18 个欧洲国家注册上市,于 2007 年 8 月在中国上市。Structolipid 作为肠外营养 (PN) 的重要组成部分,除了提供机体代谢所需的能量外,还为机体提供生物膜和生物活性物质代谢所需的多不饱和脂肪酸,防止机体必需脂肪酸的缺乏。临床研究显示,Structolipid 连续使用两周后肝功能等均无变化,安全性良好,血液中的总游离脂肪酸 (FFAs) 及 MCFA 浓度均较低,表明其水解、氧化率高,清除快。双盲、随机的临床研究表明,Structolipid 的累计氮平衡优于物理混合型乳剂^[35]。

虽然国内有部分 MLCT 的脂肪乳剂在售,但其主要功能成分都由国外进口,有关生产工艺等核心技术对我国完全保密,并且相关研究大多数还停留在食品级,在结构甘油三酯含量及其酸值、过氧化值等理化指标方面还远远达不到“结构甘油三酯进口

药品注册标准”^[24]。由于国内企业在结构脂肪乳工业化生产技术和产品进口方面严重依赖于国外,极大地限制了国内临床医学营养的发展和以中长碳链结构型甘三酯混合物为基料油的结构脂肪乳剂在医学临床上的应用,寻找一种更切实可行的合成工艺刻不容缓。

4 结束语

MLCT与MCT、LCT相比,其独特的理化性质和代谢特性不仅具备为人体提供必需脂肪酸的营养特性,并且可以具备减少体内脂肪积累从而达到减肥的效果。相较于化学法合成MLCT,酶法具有明显的优势,但是酶的价格昂贵且重复利用率较低,目前能够真正应用于工业化生产的酶极少。因此,更多的研究应该致力于寻找实际可行的生物酶来生产MLCT并将其更加广泛地应用于食品与医药工业。

参考文献:

- [1] 毕艳兰. 油脂化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- [2] 夏秋瑜, 赵松林, 李从发, 等. 中碳链脂肪酸甘油三酯的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(7): 150-153.
- [3] 杨宏黎, 杨天奎, 牟英. 酶催化酯交换制备MLM型结构脂的研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(4):39-42.
- [4] HAMAM F. Specialty lipids in health and disease[J]. Food Nutr Sci, 2013, 4(9):63-70.
- [5] LEE Y Y, TANG T K, LAI O M. Health benefits, enzymatic production, and application of medium- and long-chain triacylglycerol (MLCT) in food industries: a review[J]. J Food Sci, 2012, 77(8):137-144.
- [6] KISHI T, CARVAJAL O, TOMOYORI H, et al. Structured triglycerides containing medium-chain fatty acids and linoleic acid differently influence clearance rate in serum of triglycerides in rats[J]. Nutr Res, 2002, 22(11):1343-1351.
- [7] 赵明利, 于健春, 康维明. 脂肪乳剂的研究进展[J]. 中华临床营养杂志, 2008, 16(3):184-191.
- [8] 钟凯, 葛赞, 计晓黎, 等. 结构脂质的合成及应用[J]. 化学与生物工程, 2015(8):1-4.
- [9] JEUKENDRUP A E, ALDRED S. Fat supplementation, health, and endurance performance[J]. Nutrition, 2004, 20(7):678-688.
- [10] 寿佳菲. 中长链脂肪酸甘油三酯的酶法制备与分离纯化研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012.
- [11] 何健. 中链甘油三酯在动物体内的代谢及应用研究[J]. 中国油脂, 2004, 29(1):14-18.
- [12] KOH S P, LONG K, TAN C P, et al. The use of enzymatically synthesized medium- and long-chain triacylglycerols (MLCT) oil blends in food application[J]. Food Res Int, 2011, 18(1):355-366.
- [13] MU H, PORSGAARD T. The metabolism of structured triacylglycerols[J]. Prog Lipid Res, 2005, 44(6):430-448.
- [14] RUBIN M, MOSER A, VASERBERG N, et al. Structured triacylglycerol emulsion, containing both medium- and long-chain fatty acids, in long-term home parenteral nutrition: a double-blind randomized cross-over study[J]. Nutrition, 2000, 16(2):95-100.
- [15] 莫玉稳, 潘丽军, 姜绍通, 等. 中长链脂肪酸甘油三酯降血脂作用研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(7):53-56.
- [16] MATSUO T, MATSUO M, KASAI M, et al. Effects of a liquid diet supplement containing structured medium- and long-chain triacylglycerols on bodyfat accumulation in healthy young subjects[J]. Asia Pac J Clin Nutr, 2001, 10(1):46-50.
- [17] 唐传核, 彭志英. 浅谈构造脂质开发[J]. 粮食与油脂, 2001(6):36-38.
- [18] 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.
- [19] YANG K Z, BI Y L, SUN S D, 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]. Int J Food Sci Technol, 2014, 49(4):1001-1011.
- [20] 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 Bioprocess Technol, 2010, 3(2):288-299.
- [21] IWASAKI Y, YAMANE T. Enzymatic synthesis of structured lipids[J]. J Mol Catal B-Enzym, 2000, 10(1):129-140.
- [22] MUÑO M D M, ROBLES A, ESTEBAN L, et al. Synthesis of structured lipids by two enzymatic steps: ethanolysis of fish oils and esterification of 2-monoacylglycerols[J]. Process Biochem, 2009, 44(7):723-730.
- [23] WANG Y, XIA L, XU X, et al. Lipase-catalyzed acidolysis of canola oil with caprylic acid to produce medium-, long- and medium-chain-type structured lipids[J]. Food Bioprod Process, 2012, 90(4):707-712.
- [24] KIM I H, KIM H, LEE K T, et al. Lipase-catalyzed acidolysis of perilla oil with caprylic acid to produce structured lipids[J]. J Am Oil Chem Soc, 2002, 79(4):363-367.
- [25] ZHAO M L, HU J N, LI H Y, et al. Enzymatic synthesis of medium- and long-chain triacylglycerols-enriched

也较强,因而 PSP-3 的还原力高于不含大于 6 kDa 相对分子质量肽段的 PSP-2。

3 结论

通过碱性蛋白酶酶解得到的桃仁多肽 PSP,经 6 kDa 和 1 kDa 的超滤膜超滤后得到 3 种相对分子质量分布不同的多肽 PSP-1、PSP-2 和 PSP-3。桃仁多肽各组分在体外抗氧化实验中均表现出抗氧化能力,且其抗氧化能力与其相对分子质量分布密切相关,其中相对分子质量小于 1 kDa 的多肽具有最强的抗氧化能力。因此,通过超滤技术可有效截留大分子肽段,富集相对分子质量小于 1 kDa 的抗氧化活性多肽,这一结果可为桃仁的综合利用提供依据。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:中国医药科技出版社,2015:277.
- [2] 陈晓燕. 桃仁、桑叶化学成分及生物活性研究[D]. 北京:北京协和医学院,2014.
- [3] 方美善,张红英. 桃仁提取物对痴呆模型小鼠脑组织 SOD、GSH-Px 活性和 MDA 含量的影响[J]. 中国实验方剂学杂志,2012,18(16):236-238.
- [4] 林小明. 桃仁化学成分和药理作用研究进展[J]. 蛇志,2007,19(2):130-132.
- [5] 颜永刚,雷国莲,刘静,等. 中药桃仁的研究概况[J]. 时珍国医国药,2011,22(9):2262-2264.
- [6] YOLANDA S V, ALBERTINA C, JUAN A R R, et al. Supercritical fluid extraction of peach (*Prunus persica*) seed oil using carbon dioxide and ethanol[J]. J Supercrit Fluid, 2009,49(2):167-173.
- [7] 易建华,李静娟,朱振宝,等. 桃仁清蛋白与大豆分离蛋白功能特性比较研究[J]. 中国油脂,2011,36(3):28-32.
- [8] 郭婷婷,万楚筠,黄凤洪,等. 油料饼粕中活性肽的提取及生理功能研究进展[J]. 中国油脂,2017,42(2):120-124.
- [9] 唐蔚,宁奇,孙培冬. 南瓜籽抗氧化肽的制备及分离纯化[J]. 中国油脂,2016,41(2):20-24.
- [10] CRISTINA T F, MARÍADEL M C, ISIDRA R, et al. Identification and characterization of antioxidant peptides from chickpea protein hydrolysates[J]. Food Chem,2015,180:194-202.
- [11] SHANMUGAMABV P, KAPILAA S, SONFACKA T K, et al. Antioxidative peptide derived from enzymatic digestion of buffalo casein[J]. Int Dairy J,2015,42:1-5.
- [12] TODD S. Isolated ultrafiltration: its origin and early development[J]. Artif Organs,2013,37(10):841-847.
- [13] PANSARE V J, TIEN D, THONIYOT P, et al. Ultrafiltration of nanoparticle colloids[J]. J Membrane Sci,2017,538:41-49.
- [14] 邓成萍,薛文通,孙晓琳,等. 超滤在大豆多肽分离纯化中应用[J]. 食品科学,2006,27(2):192-195.
- [15] 王才立,张志国,王成忠,等. 不同分子量小麦胚芽多肽的体内抗氧化活性[J]. 食品科学,2013,34(7):275-278.
- [16] WIRIYAPHAN C, XIAO H, DECKER E A, et al. Chemical and cellular antioxidative properties of threadfin bream (*Nemipterus spp.*) surimi byproduct hydrolysates fractionated by ultrafiltration[J]. Food Chem,2015,167:7-15.
- [17] 齐希光,陆晓婷,张晖,等. 不同相对分子量黑籽瓜种子多肽抗氧化能力的研究[J]. 食品工业科技,2016,37(9):74-80.
- [18] LIU J B, YAN J, JIN Y, et al. Purification and identification of novel antioxidant peptides from egg white protein and their antioxidant activities[J]. Food Chem,2015,175:258-266.
- [19] 郭婷婷,万楚筠,黄凤洪,等. 油料饼粕中活性肽的提取及生理功能研究进展[J]. 中国油脂,2017,42(2):120-124.
- [20] 唐蔚,宁奇,孙培冬. 南瓜籽抗氧化肽的制备及分离纯化[J]. 中国油脂,2016,41(2):20-24.
- [21] CRISTINA T F, MARÍADEL M C, ISIDRA R, et al. Identification and characterization of antioxidant peptides from chickpea protein hydrolysates[J]. Food Chem,2015,180:194-202.
- [22] SHANMUGAMABV P, KAPILAA S, SONFACKA T K, et al. Antioxidative peptide derived from enzymatic digestion of buffalo casein[J]. Int Dairy J,2015,42:1-5.
- [23] TODD S. Isolated ultrafiltration: its origin and early development[J]. Artif Organs,2013,37(10):841-847.
- [24] PANSARE V J, TIEN D, THONIYOT P, et al. Ultrafiltration of nanoparticle colloids[J]. J Membrane Sci,2017,538:41-49.
- [25] 邓成萍,薛文通,孙晓琳,等. 超滤在大豆多肽分离纯化中应用[J]. 食品科学,2006,27(2):192-195.
- [26] 王才立,张志国,王成忠,等. 不同分子量小麦胚芽多肽的体内抗氧化活性[J]. 食品科学,2013,34(7):275-278.
- [27] WIRIYAPHAN C, XIAO H, DECKER E A, et al. Chemical and cellular antioxidative properties of threadfin bream (*Nemipterus spp.*) surimi byproduct hydrolysates fractionated by ultrafiltration[J]. Food Chem,2015,167:7-15.
- [28] 齐希光,陆晓婷,张晖,等. 不同相对分子量黑籽瓜种子多肽抗氧化能力的研究[J]. 食品工业科技,2016,37(9):74-80.
- [29] LIU J B, YAN J, JIN Y, et al. Purification and identification of novel antioxidant peptides from egg white protein and their antioxidant activities[J]. Food Chem,2015,175:258-266.
- [30] drogenated soybean oil, and coconut oil through lipase-catalyzed reaction[J]. Food Bioprocess Technol, 2012,5(6):2474-2487.
- [31] 赵国志,刘喜亮,中里真人,等. 中碳链脂肪酸甘油酯的研究概况(II)以 MCT 为主要构成成分的结构油脂的合成[J]. 粮油加工与食品机械,2005(3):17-20.
- [32] 吴炜亮. 固定化脂肪酶促酯交换反应制备低能量可脂的研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [33] MCNEILL G P, SONNET P E. Low-calorie triglyceride synthesis by lipase-catalyzed esterification of monoglycerides[J]. J Am Oil Chem Soc, 1995,72(11):1301-1307.
- [34] 林海冠,李宁. 静脉用脂肪乳剂的应用进展[J]. 肠外与肠内营养,2011,18(4):244-246.
- [35] CHAMBRIER C, LAUVERJAT M, BOULETREAU P. Structured triglyceride emulsions in parenteral nutrition[J]. Nutr Clin Pract, 2006,21(4):342-350.
- [36] 吴肇汉. 脂肪乳剂的应用现状及其进展[J]. 中华临床营养杂志,2001,9(4):203-204.

(上接第 71 页)

structured lipid from *Cinnamomum camphora* seed oil and camellia oil by Lipozyme RM IM[J]. Int J Food Sci Technol, 2014,49(2):453-459.

- [26] KHODADADI M, KERMASHA S. Modeling lipase-catalyzed interesterification of flaxseed oil and tricaprilyn for the synthesis of structured lipids[J]. J Mol Catal B-Enzy, 2014,102(4):33-40.
- [27] ZHOU S, WANG Y, JIANG Y, et al. Safety assessment of medium- and long-chain triacylglycerols containing 30% (w/w) medium-chain fatty acids in mice and rats[J]. Regul Toxicol Pharm, 2017,86:42-48.
- [28] KOH S P, ARIFIN N, LAI O M, et al. Oxidative stability of palm- and soybean-based medium- and long-chain triacylglycerol (MLCT) oil blends[J]. J Sci Food Agric, 2009,89(3):455-462.
- [29] ADHIKARI P, SHIN J A, LEE J H, et al. Crystallization, physicochemical properties, and oxidative stability of the interesterified hard fat from rice bran oil, fully hy-