

刘元法教授主持“未来粮油食品”特约专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.01.003

王秀秀, 贾敏, 宗爱珍, 等. 中国结构脂产业现状与发展对策建议[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 12-20.

WANG X X, JIA M, ZONG A Z. Status and development proposals of structure lipid industry in China[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 12-20.

中国结构脂产业现状与发展对策建议

王秀秀¹, 贾敏¹, 宗爱珍¹, 李欣容^{1,2}, 黄凤洪¹, 徐同成¹✉

- (1. 山东省农业科学院 农产品加工与营养研究所/山东省特殊医学用途配方食品工程技术研究中心/山东省农产品精深加工技术重点实验室/农业农村部新食品资源加工重点实验室, 山东 济南 250100;
2. 山东师范大学 生命科学院, 山东 济南 250399)

摘要: 油脂、蛋白质、碳水化合物三大宏量营养素与人体健康密切相关, 供给基本充足。但是随着高血脂、肥胖等疾病人群的数量增加和老龄化进程的不断加深, 传统营养素已不能满足这些特殊人群的营养需求, 亟需通过质构重组等精深加工技术对其进行改造, 赋予其新的营养特性、加工特性和感官特性。现今, 蛋白质、碳水化合物质构重组产业在国内已经得到长足发展, 但是油脂质构重组产业却处于起步阶段。据此, 简要概括了国内结构脂产业的现状以及面临的发展机遇和挑战; 就几种主要结构脂的健康效应机制进行了阐述, 并对其功效探索和加工制备方面的最新研究进展作了介绍。此外, 还针对结构脂产业存在的问题, 从理论突破、技术创新、产业升级等多个维度提出了未来的发展建议, 以期为推动我国结构脂产业发展提供有价值的参考。

关键词: 结构脂; 制备; 功效; 应用; 产业化; 发展趋势

中图分类号: TS221 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)01-0012-09

网络首发时间: 2022-09-16 12:19:45

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20220915.1313.002.html>

Status and Development Proposals of Structure Lipid Industry in China

WANG Xiu-xiu¹, JIA Min¹, ZONG Ai-zhen¹, LI Xin-rong^{1,2}, HUANG Feng-hong¹, XU Tong-cheng¹✉

- (1. Institute of Agro-Food Science and Technology, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Shandong Engineering Research Center of Food for Special Medical Purpose/Key Laboratory of Agro-Products Processing Technology of Shandong Province/Key Laboratory of Novel Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan, Shandong 250100, China;
2. College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250399, China)

Abstract: The three macronutrients of lipid, protein and carbohydrate are closely related to human health,

收稿日期: 2022-07-04

基金项目: 山东省泰山学者工程(黄凤洪); 济南市“新高校 20 条”资助项目(自主培养创新团队)(2021GXRC025)

Supported by: The Taishan Scholar Project (Feng-Hong Huang) of Shandong province, China; Ji Nan Science and Technology Bureau (No.2021GXRC025)

作者简介: 王秀秀, 女, 1993 年出生, 博士, 助理研究员, 研究方向为粮油加工与特医食品创制。E-mail: wangxx2589@163.com.

通讯作者: 徐同成, 男, 1980 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮油加工与特医食品创制。E-mail: xtc@live.com.

and their supply is basically sufficient. However, with the increasing number of patients suffered from hyperlipidemia, obesity, etc., as well as the deepening of the aging process, traditional nutrients can not fulfill the nutritional needs of these people anymore. Therefore, nutritional, processing and organoleptic properties of these three major nutrients need to be enhanced by the deep-processing. Nowadays, the recombinant protein and carbohydrate industries have made great progress in China, but the recombinant lipid industry is just in its infancy. Hence, this paper briefly introduced the status, development opportunities and challenges of domestic structure lipid industry, and expounded the underlying efficacy mechanisms of several main structure lipids. The latest research progress on the health effects and preparation technology of structure lipid were also presented. In addition, in view of the existing problems, future development advices are proposed from the perspectives of theoretical breakthrough, technological innovation, and industrial upgrading, aiming to provide valuable references for the development of domestic structure industry.

Key words: structure lipid; preparation; efficacy; application; industrialization; development trend

油脂、蛋白质和碳水化合物是维持人体健康所需的三大类宏量营养素。上世纪 90 年代, 经过中国农业科技工作者的不懈努力, 高产优质农产品新品种不断被培育, 栽培与养殖水平不断提升, 农产品初加工产能不断扩大, 自动化程度不断提高, 我国植物油、小麦粉、肉蛋奶等农牧产品产量大幅提升, 三大宏量营养素供给充足, 基本满足了我国居民“吃饱”这一基本需求。

党的十九大报告指出, 我国社会的主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。新时代背景下, 我国糖尿病、高血脂、肥胖、炎性肠病等患者数量急剧增加, 老龄化进程不断加深, 传统的营养素已不能满足这些特殊人群的营养需求^[1-2]。因此, 亟需通过质构重组等精深加工技术对三大营养素进行改造, 赋予其新的加工特性、感官品质和营养价值, 才能满足人民的健康需求。

三大营养素中, 蛋白质和碳水化合物的质构重组产业已经得到长足发展: 我国是世界上最大的蛋白肽、深度水解蛋白和氨基酸生产国, 为术后患者、肿瘤患者、过敏儿童等提供了精准营养支持^[3-4]; 我国也是世界上最大的变性淀粉、淀粉糖、功能糖、麦芽糊精、味精的生产国, 为糖尿病、肥胖、炎性肠病等患者提供了精准营养支持^[5]。

然而, 与蛋白质和碳水化合物相比, 国内结构脂产业却仍处于起步阶段, 市场占有率低, 不能满足大量肥胖、高血脂、糖尿病等糖脂代谢异

常患者的特殊营养需求。因此, 本文就我国结构脂产业现状, 存在的问题及未来的发展趋势进行探讨, 以期为推动我国结构脂产业的发展提供有价值的参考。

1 结构脂产业现状

1.1 我国特殊人群数量众多, 结构脂市场空间巨大

油脂在体内具有氧化供能、构成细胞膜主要成分、储能、促进脂溶性维生素吸收等作用, 对维持机体正常的生理机能和生化过程至关重要。据统计, 2021 年我国油脂总产量为 4 200 万 t, 主要包括 1 800 万 t 大豆油, 730 万 t 菜籽油, 700 万 t 棕榈油, 380 万 t 花生油, 150 万 t 玉米油, 150 万 t 葵花籽油等。2021 年我国消费食用油 4 250 万 t, 人均 30 kg。根据《中国居民膳食指南(2022)》的推荐, 油脂供能比不得超过日常膳食总能量的 30%, 但是早在 2002 年的居民膳食调查就发现, 我国居民膳食中油脂的供能比已达 35%。

近 30 年来, 中国人群的血脂水平逐步升高, 血脂异常患病率明显增加。《中国成人血脂异常防治指南(2021 年修订版)》数据显示, 成人高胆固醇患病率为 4.9%, 高甘油三酯血症患病率 13.1%, 低密度脂蛋白胆固醇患病率为 33.9%。《中国居民营养与慢性病状况报告(2020)年》显示, 城乡各年龄段居民超重肥胖率持续上升, 超重及肥胖形势严峻: 成年居民超重肥胖率超过 50%, 其中 6 岁至 17 岁的儿童青少年占比近 20%, 6 岁

以下的儿童占比达 10%。同时,高血脂和肥胖的高发,又大幅增加了机体患心血管疾病、糖尿病、肿瘤等疾病的风险。针对这些特殊人群,传统的甘油三酯已不能满足其营养需求,亟需甘油二酯、中链甘油三酯等结构脂产品在维持油脂提供能量来源、必需脂肪酸等功能的基础上,改善其健康水平。

1.2 我国结构脂市场被跨国公司垄断

目前中国市场销售使用的结构脂产品主要有 OPO(1,3-dioleoyl-2-palmitoyl triglyceride, OPO), MCT(medium chain triglycerides)、MLCT(medium and long-chain Triacylglycerols)等,这些产品大多被跨国公司所垄断。OPO 特有的 Sn-2 位棕榈酸结构,使其消化时不易形成钙皂,从而避免引发婴儿便秘,利于脂肪酸和钙的消化吸收。目前全球 OPO 主要生产企业为美国的邦吉洛德斯、新加坡的益海嘉里与瑞典的阿胡斯卡尔斯等。此外,邦吉洛德斯开展了 OPL(1-palmitoyl-2-oleoyl-3-linoleoylglycerol)结构脂的生产。MCT 方面,益海嘉里、AAK 和马来西亚的欧利安为全球最主要的生产商,这些跨国公司在实现 MCT 规模化、商业化生产之后,也在逐步开展 MLCT 的生产与销售业务。DAG(Diglycerides)方面,日本花王公司是全球最早实现 DAG 工业化生产的企业,通过了日本的 GRAS 认证,并在日本和美国上市销售。目前,国内有青岛海智源、大连医诺、浙江贝家等企业开展了结构脂生产销售方面的业务,近期,广州永华特医食品有限公司投产建设了年产 10 万 t DAG 的生产线,但是总体来讲,跨国公司占据了国内结构脂市场的绝大部分份额,处于垄断地位。

1.3 我国结构脂产业正进入蓬勃发展期

我国科研人员很早就注重结构脂的研究工作,江南大学、南昌大学、华南理工、暨南大学、山东农科院等高校和科研院所,在结构脂的酶法制备^[6-9]、化学合成及微生物合成^[10-11]、分离纯化^[12-14]、功效评价^[15-22]等领域系统开展了大量工作,取得了一大批科技成果。近年来随着国家日益重视科技成果转化工作,在科研人员兼职、成果收益分配、知识产权确权等方面出台了一系列

的支持政策,越来越多的科研人员通过校企合作、个人兼职,甚至是自主创业等方式,助力我国结构脂产业的发展。青岛海智源、大连医诺是我国较早开展 MCT 生产的企业,通过与江南大学、大连海洋大学等高校合作,产品品质大幅提升,市场占有率稳步提高,已经成为国产结构脂产业的核心力量。华南理工王永华教授创办了广州永华特医营养科技有限公司并建成了国内首条年产 10 万 t 甘油二酯的生产线,填补了国内甘油二酯市场的空白。

2 主要产品及其功效

2.1 1,3-甘油二酯(1,3-diacylglycerol, 1,3-DAG)

1,3-DAG 由脂肪酸在甘油的 Sn-1 和 Sn-3 位上酯化生成,天然油脂中存在一定数量的 1,3-DAG,但含量极低。与常见的甘油三酯(TAG)相比,1,3-DAG 因其健康功效备受研究者的关注。已有研究证明,1,3-DAG 可显著改善血脂、血糖代谢疾病,改善肥胖^[23-25],并能够通过改善血流动力学、调节细胞代谢水平,从而降低晚期糖基化终产物在肾组织中的沉积,下调转化生长因子- β 1 和结缔组织生长因子的表达,发挥肾脏保护作用^[17]。1,3-DAG 的健康功效主要归因于体内 Sn-2 位特异性酰基转移酶的缺乏导致 1,3-DAG 被水解后不遵循经典的 2-MAG 再酯化途径,减少了脂肪堆积^[26]。

1,3-DAG 在健康领域中的应用前景推动了其制备工艺的发展,其中酶法制备工艺的应用最为广泛。日本 Kao 公司最早通过酶法加精炼工艺,开发了 DAG 含量大于 80% 的食用油,其中 1,3-DAG 含量占比约 70%。随着对 1,3-DAG 制备工艺的优化及新制备策略的出现,使得 1,3-DAG 的低成本、高效率制备成为可能。Song 等以磷脂酶 A1 为催化剂,在无溶剂体系中水解大豆油并通过二次蒸馏制得 DAG 含量达 78.68% 的油,其中 1,3-DAG 含量为 49.10%,该方法具有成本低、单酰甘油副产物少的优点^[27]。Cosimo 等通过固体碱促进植物油的甘油解反应,显著缩短反应达到平衡的时间,提高了反应速度,最终合成 1,3-DAG 含量在 36% 以上的食用油^[28],并以同样

的制备思路,在非均相体系中,以粗甘油为原料,得到 36wt% 的 1,3-DAG,为提高生物柴油副产品的附加值提供了一种启发性的思路^[29]。Wu 等通过固定化工艺,将脂肪酶固定在磁纳米粒子上,使脂肪酶的酯化活性提高了 2.6 倍,并以油酸和甘油为原料高效制得 1,3-DAG 浓度达 95% 的产物^[8]。

1,3-DAG 因其特殊的分子结构带来的系列健康功效,使其十分适合作为慢性代谢性疾病患者的日常使用油,也可将其进行微胶囊化处理,用于制备满足特定患者健康所需的全营养配方食品。此外,1,3-DAG 也可在食品加工领域用于改善食品的加工特性和感官品质,或者作为辅料、原料被应用于医药、化工领域^[30]。

2.2 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯(1,3-diioleoyl-2-palmitoyl triglyceride, OPO)

组成 OPO 的脂肪酸在种类及甘油骨架上的分布与母乳十分相似,是婴儿配方奶粉中广泛使用的结构脂。虽然牛乳的脂肪酸组成也与母乳相似,但牛乳中的棕榈酸主要位于 Sn-1 和 Sn-3 位,被脂肪酶水解成游离形式后易与 Ca^{2+} , Mg^{2+} 发生皂化反应,导致机体缺钙,引发便秘。而 OPO 在肠道中被水解后,Sn-1、Sn-3 位上的油酸以游离脂肪酸的形式被吸收,满足婴幼儿对于不饱和脂肪酸摄取的需要;Sn-2 上的棕榈酸以棕榈酸酯的形式存在,最终以乳糜微粒的形式被小肠吸收,减少了不溶性钙皂的形成。因此,OPO 是可以同时满足婴幼儿对于能量代谢以及营养健康需求的乳脂替代品^[31-32]。

除了避免形成不溶性的钙皂,OPO 还可通过多种途径与肠道菌群相互作用,促进宿主肠道健康:富含 Sn-2 棕榈酸酯的 OPO 与二十二碳六烯酸或花生四烯酸存在协同改善肝脏脂质代谢的作用,并通过促进乳杆菌的生长调节肠道菌群组成,抑制条件致病菌的生长^[33];OPO 通过使肠道中短链脂肪酸、乳酸含量增加从而促进双歧杆菌生长,抑制有害肠杆菌的生长^[34];OPO 能与可溶性膳食纤维协同作用,增加双歧杆菌的数量,调节肠道菌群平衡,提高婴幼儿的固有免疫力^[31]。

OPO 的制备方法通常是采用 Sn-2 上富含棕榈酸的 TAG 以及游离的多不饱和脂肪酸为底物,

在 Sn-1,3 位专一性脂肪酶的催化作用下,将多不饱和脂肪酸结合到甘油三酯的 Sn-1,3 位上^[35]。近期,Yan 等设计了一种 OPO 合成的新策略:将脂肪酶吸附在磁性多壁碳纳米管上,并通过两步酶解反应合成 OPO,所得产物中 Sn-2 位棕榈酸的含量和 Sn-1、3 位油酸的含量分别达到 92.93% 和 57.82%。该方法制备的固定化酶比商业化脂肪酶 RMIM 有更好的催化活性和重复使用性,并且,利用纳米管的磁性,通过外加磁场即可实现产物与酶的分选^[36]。

OPO 与母乳在结构组成上的相似性使其十分适合婴儿配方奶粉的生产,用作婴儿的营养替代品,但是其添加量应该满足婴儿在不同时期的营养需求,以缩小母乳和配方奶粉之间的营养差距。例如,研究表明,母乳中近一半的三酰甘油是 MLCT,同时,从初乳到过渡乳,中链脂肪酸和 MLCT 含量都有所增加^[37]。

2.3 中链甘油三酯(medium chain triglycerides, MCT)

MCT 从化学组成上看,其特征是甘油上三个酯化位点所连接的脂肪酸的碳原子个数在 6~12 之间,可被快速消化吸收,直接为身体提供能量^[38-39]。因其代谢高效,不易转化为脂肪储存,MCT 在体重控制上的作用效果显著^[40]。MCT 最初是作为一种用于治疗吸收不良并发症的营养性药物进入公众视野。目前对 MCT 发挥健康功效的机制探索主要集中在体重控制以及生酮饮食两方面。研究发现,饱腹感的增加^[41-42]和脂肪氧化的增强^[43-44]是 MCT 抑制体重增长的两个主要因素。生酮饮食以 MCT 油为主,MCT 产生的酮体可以替代葡萄糖供给神经细胞能量,减轻大脑因葡萄糖供应不足而造成的能量代谢受损^[45-46]。因 MCT 的健康功效,通常将 MCT 加入到糖果饼干等烘焙产品中,用于快速的能量补充。在保健品中,MCT 通过与脂乳剂混合,用作肠外的营养支持,在临床上取得了一些积极的作用效果^[47]。此外,有研究发现 MCT 有助于预防或治疗病毒感染,推测其原因是膳食补充 MCT 可以使宿主的脂质代谢过程向生酮途径转换,从而抑制病毒合成过程,改善机体免疫功能^[48]。

原料油水解酯化是 MCT 的传统制备方法, 该方法产率稳定但不高。后来, 生物催化剂的使用, 如脂肪酶, 提高了 MCT 的制备效率, 且相比于化学催化剂, 反应条件更温和, 因此得到广泛应用^[49]。最新合成进展表明, 将超临界二氧化碳技术用于 MCT 的合成, MCT 产率高达 97%, 约为传统技术的 3 倍^[50]。

2.4 中长链甘油三酯 (medium- and long-chain triacylglycerols, MLCT)

MLCT 是中链脂肪酸 (MCFA) 和长链脂肪酸 (LCFA) 结合在一个甘油骨架上的结构脂。MLCT 中的中链脂肪酸吸收、代谢速度快, 具有预防肥胖的作用; 其中的长链脂肪酸可以维持人体对某些必需脂肪酸的需求, 也能够增加 MLCT 的烟点, 使其适用于高温烹饪^[51-52]。

研究表明, 相比于长链甘油三酯 (LCT), 膳食补充 MLCT 8 周之后可以有效减少皮下和内脏脂肪含量以及血清中 TAG 含量^[53]。但是 MLCT 的健康益处受脂肪酸组成与受试者性别、年龄、体重的影响^[49], 因此, 明确长期摄入特定 MLCT 对不同人群的健康影响及效应机制还有待更多的研究。Lai 等研究了 MLCT 的结构差异对小鼠低脂饮食过程中脂肪积累的影响, 发现虽然有相似的脂肪酸组成, 但是 MCT 和 LCT 的混合油在降低肝脏脂肪堆积方面的作用效果不如酶法制备得到的 MLCT, 表明脂肪酸在甘油上的酯化位点能够影响 MLCT 结构脂的健康功效^[54]。Wang 等研究了结构脂的脂肪酸组成及其健康功效之间的联系。结果表明, 相比于 MLCT 结构脂, MCT / LCT 混合油可导致线虫体内脂肪的积累、体内氧化应激水平的增加, 最终降低其寿命。探讨其原因, 是由于在混合油中, 不饱和脂肪酸往往位于同一个甘油三酯分子上, 因此一旦不饱和脂肪酸产生氧自由基, 就很容易引发自由基链式反应, 而在 MLCT 结构脂中, 脂肪酸被重新分布, 自由基链式反应较温和。该研究进一步通过突变体筛选试验发现油脂通过 *aak-2* 途径调节线虫的寿命^[15]。最新的一项研究表明, 通过酶促酯交换方法, 制备出富含二十碳五烯酸 (EPA) 的 MLCT 在体外消化实验中的水解度 (102.79%) 高于 MCT

(95.20%) 和富含 EPA 的鱼油 (74.18%), 这是由于 EPA 在 MLCT 中主要以 Sn-2 单甘酯的形式存在, 从而促进其后续以乳糜微粒的形式被吸收、利用。该研究为合理设计 MLCT 结构从而最大限度提高油脂的营养价值提供了参考^[6]。

常见的 MLCT 合成方法有酯交换法和酸解法。酸解法成本较低, 制备工艺简单。Zhang 等利用酸解法制备出富含 DHA 的 MLCT, 其中 Sn-1,3 位上 MCFA 含量为 95.29%, Sn-2 位上 DHA 含量为 44.70%, 该产品可改善消化系统对 DHA 的消化和吸收, 提高 DHA 的生物利用度^[52]。Yu 等在酸解法制备 MLCT 之前通过超声预处理减少脂肪酶催化反应的传质限制, 增加酶与底物的接触面积, 从而使辛酸的酯化效率较常规方法提高了 12.8%^[55]。酯交换法的优势在于副产物较少。Wang 等利用填充床反应器通过酯交换反应得到 MLCT 含量为 76.61wt% 的产物, 再经过分子蒸馏和萃取工艺, MLCT 含量达到 80.07wt%, 且填充床在经过 25 次循环使用后, 催化效率没有显著降低^[56]。

MLCT 因其代谢特点和营养特性, 最初被用作肠外营养制剂使用, 类似 MCT。最近几年, MLCT 作为低热量脂肪, 被广泛用于食品加工和油炸油中, 并具有改善产品加工特性的优点, 但为了降低成本, 通常与其他植物油混合使用^[49]。

3 存在的问题及对策建议

3.1 基于机体脂类结构、生理功能, 开展结构脂研究

关于机体甘油三酯组成、脂肪酸种类和分布特点已有大量文献报道, 但关于饮食油脂对体内脂质组成、代谢的影响机制依然解析不足。在后续研究过程中, 通过探索导致不同人群脂质组成、分布差异的具体机制, 可为靶向性地开发具有特殊功能的结构脂产品提供生理、健康依据。

(1) 母乳脂质需全面解析。明确不同地域 (南方、北方、沿海地区、内陆地区等)、不同经济水平 (城镇、乡村) 对应的不同妊娠期 (早产: <37 周、足月: ≥ 37 周)、不同哺乳期 (初乳: 产后 1~5 天、过渡乳: 产后 7~15 天、成熟乳: 产后

30~45 天) 母乳中甘油三酯种类、脂肪酸酯化位置、乳磷脂等的组成、变化规律, 综合考虑不同月龄婴幼儿生理特点设计配方奶粉, 满足婴幼儿营养需求。

(2) 体内脂质剖析深度不足。生物膜和细胞内的脂滴是细胞内脂质的主要存在形式, 目前, 由于技术条件的限制, 在脂质分析过程中常将二者混为一谈。然而, 脂滴和生物膜中脂质的组成和分布情况对机体的健康状态有决定性影响, 尤其是细胞膜、亚细胞器等生物膜上的脂质组成决定了膜的流动性、跨膜蛋白的活性、脂筏的位移能力等, 进而影响信号传导过程和机体健康。在后续研究过程中, 可以通过创新分离技术手段, 发展高时空分辨率的原位表征技术等, 明确脂质的分布和组成规律, 从而有助于实现精准营养递送, 改善机体的健康状况。

3.2 脂肪酶的挖掘、改造及高表达生产

脂肪酶生物催化法是目前结构脂制备的主要方法之一, 与化学法相比, 脂肪酶催化具有反应条件温和、选择性高、产物可控、副产物少、环境友好等优点, 是未来工业应用的主要方向。然而, 我国脂肪酶领域发展时间较短, 目前尚存在 2 位专一性水解酶缺乏、催化效率低、易发生酰基迁移等副反应、生产成本低、稳定性差等问题, 限制了结构脂领域的发展。因此, 应重点开展以下方面的研究: (1) 建立高通量的产脂肪酶微生物筛选方法, 挖掘具有优良特性的新型脂肪酶; (2) 采用诱变育种、模式微生物基因重组等基因工程, 提高脂肪酶的活力和表达效率; (3) 优化菌株的发酵工艺和产物的分离纯化工艺, 提高脂肪酶的得率和纯度; (4) 研究脂肪酶分子结构改造、酶固定化等方法, 优化脂肪酶耐酸碱性、热稳定性等理化性质和专一性、效率等催化性质, 提高酶的回收利用效率等, 降低生产成本。

3.3 结构脂的模块化设计与规模化生产

我国糖尿病、高血脂、肥胖、术后等特殊人群多, 因其病理特征不同, 对结构脂产品的需求也各有不同。结构脂产业原料来源复杂, 包括大豆油、葵花籽油等长链脂肪酸供体植物油, 以及

椰子油、樟树籽油等中链脂肪酸供体植物油。结构脂产品制备技术种类也非常多, 既有核心产品所需的甘油解、定向酯化合成、可控水解等关键技术, 又包括产品的纯化、精制、副产物循环酯化等辅助技术。对产业来讲, 提高生产线的利用效率, 是提升产业经济效益的重要手段。鉴于结构脂产业原料来源、制备技术和目标产品的复杂性, 建议搭建结构脂智能化生产平台, 涵盖酶解、酯化合成、分子蒸馏、油脂精制、品质监控等多个模块, 从而实现多种结构脂的智能化、定制化、高效化生产。

3.4 基于消化、转运、吸收器官对话, 解析体内脂质对膳食脂质的应答规律

油脂经口腔舌脂酶、胃脂肪酶、小肠胰脂肪酶消化, 可影响肠道菌群生成短链脂肪酸; 再由小肠上皮细胞吸收, 从门静脉或经脂蛋白运输, 进入脂质代谢器官, 比如肝脏与肌肉, 或脂质贮存器官, 比如白色脂肪; 经脂肪酸跨膜转运蛋白 (FATPs)、脂肪酸结合蛋白 (FABPs) 等转运至细胞内。

在以上消化吸收途径中, 相关细胞、组织受饮食刺激, 会通过释放内分泌因子(肽 adipokine、脂质 lipokine、外泌体 microRNA) 影响生理反应, 比如食欲控制、能量消耗、葡萄糖稳态、胰岛素敏感性、炎症、组织修复等^[57]。而脂质被吸收后, 能够使细胞乃至器官的代谢、功能发生改变, 甚至重塑。比如, 棕色脂肪的激活产热、白色脂肪从储存脂质转向燃烧脂质的米色脂肪等等。

通过结构设计, 改变脂肪酸组成及酯化位置, 赋予结构脂调节消化吸收的功能, 并基于肠道菌群、肝脏、脂肪、肌肉多器官串联分析, 系统研究饮食脂质对血液脂质、肝脏脂质、脂肪组织等器官的脂质组成及生理功能的调节机制, 从而通过营养干预有效改善机体的健康水平。

3.5 强化多元投入机制

结构脂产业技术含量高, 所需技术开发、生产装备、市场营销、员工培训等投入巨大, 技术应用后企业效益增长相对较慢。而我国传统油脂加工企业, 如大豆油、花生油、葵花籽油、菜籽

油等加工企业，产业链较短、净利润率较低（约 2%~3%），且盈利易受原料价格波动、疫情反复、国际贸易与运输等因素影响。这种现状导致油脂加工企业向结构脂产业转型升级的动力不足，因此，亟需政府加大投入力度，如通过设立各级各类科技项目，加大结构脂相关基础研究与关键生产技术研发，还可通过立项相关建设项目，解决企业转型升级时的资金压力。此外，政府投入还能够吸引更多金融资本、工商资本、营销结构等进入结构脂产业，形成推动产业发展的合力。

参考文献:

- [1] LUO Y N, SU B B, ZHENG X Y. Preplanned studies trends and challenges for population and health during population aging — China 2015–2050[R]. Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2021.
- [2] 侯清华, 韩娟. 人口老龄化现状、衰老研究进展及食物营养支撑作用[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(2): 61-67.
HOU Q H, HAN J. Current situation of population aging, research progress of aging and the role of food nutrition support[J]. Food and Nutrition in China, 2021, 27(2): 61-67.
- [3] 杨晓东, 张杨, 张寿. 胶原蛋白肽的提取及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 469-476.
YANG X D, ZHANG Y, ZHANG S. Research progress in extraction and application of collagen peptide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 469-476.
- [4] 郭顺堂, 徐婧婷, 刘欣然, 等. 我国植物蛋白资源高效利用途径与技术创新[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 8-15.
GUO S T, XU J T, LIU X R, et al. Efficient utilization and technological innovation of plant protein resources in China[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 8-15.
- [5] 王奕娇, 张庆栓, 朱金鸣. 我国玉米深加工现状及其发展建议[J]. 农机化研究, 2010, (9): 245-248.
WANG Y J, ZHANG Q S, ZHU J M. Current status and development suggestions of maize deep processing in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, (9): 245-248.
- [6] 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 & Function, 2022, 13(1): 131-142.
- [7] LIAN W, WANG W, 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.
- [8] ZHAO J F, TAO W, LIN J P, et al. Preparation of high-purity 1,3-diacylglycerol using performance-enhanced lipase immobilized on nanosized magnetite particles[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2019, 24(2): 326-336.
- [9] PENG B, LUO T, CHEN F, et al. Stability comparison of four lipases and catalytic mechanism during the synthesis of 1,3-di-oleic-2-medium chain triacylglycerols in a trace water-in-oil system: experimental analyses and computational simulations[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(5): e13667.
- [10] ZHANG L S, CHU M Y, ZONG M H, et al. Efficient production of 1,3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol through rhodococcus opacus fermentation[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(8): 851-860.
- [11] HUANG J, LU Y, JIN J, et al. Chemical transesterification of flaxseed oil and medium-chain triacylglycerols: MLCT yield, DAG content, physicochemical properties, minor compounds and oxidation stability[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(10): 5160-5167.
- [12] WANG S L, LEE W J, WANG Y, et al. Effect of purification methods on the physicochemical and thermodynamic properties and crystallization kinetics of medium-chain, medium-long-chain, and long-chain diacylglycerols[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(31): 8391-8403.
- [13] CAO L, PANG M, WU X, et al. Purification of low-calorie structured lipids by molecular distillation[J]. Food Science, 2015, 36(6): 6-11.
- [14] PAN X, WANG Y, LIU J, et al. Purification of structured lipids by KOH-hydroalcoholic solution[J]. China Oils and Fats, 2012, 37(8): 39-42.
- [15] CHANG M, YANG J, GUO X, et al. Medium/long-chain structured triglycerides are superior to physical mixtures triglycerides in caenorhabditis elegans lifespan through an AMPK modified pathway[J]. Food Bioscience, 2021, 39: 100815.
- [16] DU Y X, CHEN S N, ZHU H L, et al. Consumption of interesterified medium-and long-chain triacylglycerols improves lipid metabolism and reduces inflammation in high-fat diet-induced obese rats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(31): 8255-8262.
- [17] LI J, YAN Y, LI D, et al. Nephroprotective effects of diacylglycerol on diabetic nephropathy in type 2 diabetic rats[J]. Experimental & Therapeutic Medicine, 2018, 15(2): 1918-1926.
- [18] XU T, LI J, ZOU J, et al. Rat small intestinal mucosal epithelial cells absorb dietary 1,3-diacylglycerol via phosphatidic acid pathways[J]. Lipids, 2018, 53(3): 335-344.
- [19] ZHANG N, ZENG J P, WU Y P, et al. Human milk sn-2 palmitate triglyceride rich in linoleic acid had lower digestibility but higher absorptivity compared with the sn-2 palmitate triglyceride rich in oleic acid in vitro[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 9137-9146.
- [20] ZENG J, CHEN X, HUANG X, et al. Evaluation of fat substitute mimicking Chinese human milk by its physicochemical properties

- and oxidative stability[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 45(2): e15137.
- [21] WU Y, ZHANG N, DENG Z Y, et al. Effects of the major structured triacylglycerols in human milk on lipid metabolism of hepatocyte cells in vitro[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32): 9147-9156.
- [22] WANG W, XU T, LI X, et al. Effect of diacylglycerol supplementation on fasting serum triacylglycerol concentration: a meta-analysis[J]. *Lipids*, 2010, 45(12): 1139-46.
- [23] AGAPAY R C, JU Y H, TRAN-NGUYEN P L, et al. Synthesizing precursors for functional food structured lipids from soybean oil deodorized distillates[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 12(7): 3899-3911.
- [24] ANDO Y, SAITO S, YAMANAKA N, et al. Alpha linolenic acid-enriched diacylglycerol consumption enhances dietary fat oxidation in healthy subjects: a randomized double-blind controlled trial[J]. *Journal of Oleo Science*, 2017, 66(2): 181-185.
- [25] PRABHAVATHI DEVI B L A, GANGADHAR K N, PRASAD R B N, et al. Nutritionally enriched 1,3-diacylglycerol-rich oil: low calorie fat with hypolipidemic effects in rats[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248: 210-216.
- [26] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. Production, safety, health effects and applications of diacylglycerol functional oil in food systems: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(15): 2509-2525.
- [27] YONG WANG M Z, OU S Y, SONG K K. Partial hydrolysis of soybean oil by phospholipase A1 to produce diacylglycerol-enriched oil[J]. *Journal of Food Lipids*, 2009, 16(1): 113-132.
- [28] FERRETTI C A, SPOTTI M L, DI COSIMO J I. Diglyceride-rich oils from glycerolysis of edible vegetable oils[J]. *Catalysis Today*, 2018, 302: 233-241.
- [29] DOSSO L A, LUGGREN P J, DI COSIMO J I. Synthesis of edible vegetable oils enriched with healthy 1,3-diglycerides using crude glycerol and homogeneous/heterogeneous catalysis[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2020, 97(5): 551-561.
- [30] 钱风华. 1,3-甘油二酯的功效评价及其微胶囊的制备研究[D]. 山东农业大学, 2021.
- QIAN F H. Efficacy evaluation and preparation of 1, 3-glycerol diester microcapsules [D]. Shandong Agricultural University, 2021.
- [31] 王海燕, 贾艾铃, 曹进. 人乳脂替代品 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(7): 2503-2508.
- WANG H Y, JIA A L, CAO J. Research progress of 1, 3-dioleic acid-2-palmitate triglyceride as human milk fat substitute[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(7): 2503-2508.
- [32] MILES E A, CALDER P C. The influence of the position of palmitate in infant formula triacylglycerols on health outcomes[J]. *Nutrition Research*, 2017, 44: 1-8.
- [33] WAN J, HU S, JACOBY J J, et al. The impact of dietary sn-2 palmitic triacylglycerols in combination with docosahexaenoic acid or arachidonic acid on lipid metabolism and host faecal microbiota composition in Sprague Dawley rats[J]. *Food & Function*, 2017, 8(5): 1793-1802.
- [34] HOU A, XIAO Y, LI Z. Effects of 1, 3-dioleoyl-2-palmitoylglycerol and its plant-oil formula on the toddler fecal microbiota during in vitro fermentation[J]. *CyTA - Journal of Food*, 2019, 17(1): 850-863.
- [35] 万建春, 徐振波. 酶法合成食品营养强化剂 1,3-二油酸-2-棕榈酸甘油三酯研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(7): 1-4.
- WAN J C, XU Z B. Synthesis of 1, 3-dioleic acid, 2-palmitic acid triglyceride by enzymatic method[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(7): 1-4.
- [36] GHIDE M K, LI K, WANG J, et al. Effective production of human milk fat substitutes rich in 1,3-dioleoyl-2-palmitoyl glycerol (OPO) via a new strategy[J]. *Food Biophysics*, 2022.
- [37] YUAN T, WEI W, ZHANG X, et al. Medium- and long-chain triacylglycerols composition in preterm and full-term human milk across different lactation stages[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2021, 142: 110907.
- [38] NORTON J. GREENBERGER J B R, KURT J. Isselbacher. absorption of medium and long chain triglycerides factors influencing their hydrolysis and transport[J]. *Journal of Clinical Investigation*, 1966, 45: 217-227.
- [39] ACQUISTAPACE S, PATEL L, PATIN A, et al. Effects of interesterified lipid design on the short/medium chain fatty acid hydrolysis rate and extent (in vitro)[J]. *Food & Function*, 2019, 10(7): 4166-4176.
- [40] MUMME K, STONEHOUSE W. Effects of medium-chain triglycerides on weight loss and body composition: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Journal of the Academy of Nutrition & Dietetics*, 2015, 115(2): 249-263.
- [41] MAHER T, CLEGG M E. Dietary lipids with potential to affect satiety: mechanisms and evidence[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(10): 1619-1644.
- [42] ST-ONGE M P, MAYRSOHN B, O'KEEFFE M, et al. Impact of medium and long chain triglycerides consumption on appetite and food intake in overweight men[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2014, 68(10): 1134-40.
- [43] CLEGG M E, GOLSORKHI M, HENRY C J. Combined medium-chain triglyceride and chilli feeding increases diet-induced thermogenesis in normal-weight humans[J]. *European Journal of Nutrition*, 2013, 52(6): 1579-85.
- [44] ZHANG Y, XU Q, LIU Y H, et al. Medium-chain triglyceride activated brown adipose tissue and induced reduction of fat mass in C57bL/6J mice fed high-fat diet[J]. *Biomed Environmental Science*, 2015, 28(2): 97-104.
- [45] FORTIER M, CASTELLANO C A, CROTEAU E, et al. A ketogenic drink improves brain energy and some measures of

- cognition in mild cognitive impairment[J]. *Alzheimers Dement*, 2019, 15(5): 625-634.
- [46] KRİKORIAN R, SHIDLER M D, DANGELO K, et al. Dietary ketosis enhances memory in mild cognitive impairment[J]. *Neurobiol Aging*, 2012, 33(2): 425 e19-27.
- [47] LI C, NI Q, PEI Y, et al. Meta-analysis of the efficacy and safety of structured triglyceride lipid emulsions in parenteral nutrition therapy in China[J]. *Clinical Nutrition*, 2019, 38(4): 1524-1535.
- [48] SOLIMAN S, FARIS M E, RATEMI Z, et al. Switching host metabolism as an approach to dampen SARS-COV-2 infection[J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2020, 76(5): 297-303.
- [49] 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]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(15): 4169-4185.
- [50] MORE S B, WAGHMARE J S, GOGATE P R, et al. Improved synthesis of medium chain triacylglycerol catalyzed by lipase based on use of supercritical carbon dioxide pretreatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1977-1987.
- [51] PANTH N, ABBOTT K A, DIAS C B, et al. Differential effects of medium- and long-chain saturated fatty acids on blood lipid profile: a systematic review and meta-analysis[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2018, 108(4): 675-687.
- [52] 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]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2020, 191(3): 1294-1314.
- [53] XUE C, LIU Y, WANG J, et al. Consumption of medium- and long-chain triacylglycerols decreases body fat and blood triglyceride in Chinese hypertriglyceridemic subjects[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2009, 63(7): 879-886.
- [54] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. 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[J]. *Food Research International*, 2018, 103: 200-207.
- [55] YUE C, BEN H, WANG J, 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.
- [56] ZHANG Z, ZHANG S, LEE W J, 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.
- [57] SCHEJA L, HEEREN J. The endocrine function of adipose tissues in health and cardiometabolic disease[J]. *Nature Reviews Endocrinology*, 2019, 15(9): 507-524. 