

甘油二酯的降血脂及控制体质量作用机制研究进展

施丽娜¹, 王亚群², 王明星², 王月华², 程芳园², 金俊¹, 金青哲¹, 吴港城¹, 王兴国¹

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122; 2. 长寿花食品股份有限公司, 山东滨州 256209)

摘要: 甘油二酯(DAG)是甘油三酯中一个脂肪酸被羟基取代形成的酯,是膳食油脂中的天然成分之一。旨在为DAG油作为降脂减重功能性油脂的应用提供理论参考,介绍了DAG的降血脂及控制体质量功效,并综述了其作用机制。DAG因其自身的特异性结构而具有与TAG不同的消化特性,且DAG可以上调小肠中脂肪氧化、产热基因的表达,上调肝脏中 β -氧化相关基因表达,抑制脂质转运和增强血浆脂质清除作用。综上,基于DAG本身结构的特异性消化代谢途径以及DAG摄入后对脂质代谢相关基因的调控,DAG可有效降低餐后血脂水平并减少体内脂肪积累,达到控制体质量的效果,改善或预防肥胖的发生。

关键词: 甘油二酯;降血脂;控制体质量;减肥;机制

中图分类号:TS221;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)02-0080-07

Research progress on the mechanism of diacylglycerol on reducing blood lipid and controlling body weight

SHI Lina¹, WANG Yaqun², WANG Mingxing², WANG Yuehua², CHENG Fangyuan², JIN Jun¹, JIN Qingzhe¹, WU Gangcheng¹, WANG Xingguo¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
2. Changshouhua Food Company Limited, Binzhou 256209, Shandong, China)

Abstract: Diacylglycerol (DAG) is an ester formed by the substitution of a fatty acid by a hydroxyl group in triglycerides, and it is one of the natural components of dietary fats and oils. In order to provide a theoretical reference for the application of DAG oil as a functional blood lipid-lowering and weight-reducing oil, the blood lipid reduction and body weight control efficacy of DAG were introduced, and the mechanism of action was reviewed. DAG has different digestive properties from TAG due to its own specific structure, and DAG can up-regulate the expression of fat oxidation and thermogenesis genes in the small intestine, the expression of genes related to β -oxidation in the liver, inhibit lipid transport and enhance plasma lipid clearance. In conclusion, based on the specific digestive and metabolic pathways of DAG and the regulation of lipid metabolism-related genes after DAG intake, DAG can effectively reduce the postprandial lipid level and the accumulation of body fat to achieve the effect of controlling body weight and improving or preventing the occurrence of obesity.

Key words: diacylglycerol; blood lipid reduction; body weight control; antiobesity; mechanism

肥胖是一种代谢紊乱,表现为体内脂肪积累过多,可能对健康产生不利影响。据估计,2020年全

收稿日期:2023-08-17;修回日期:2024-09-02

作者简介:施丽娜(1999),女,硕士研究生,研究方向为油脂营养(E-mail)570697290@qq.com。

通信作者:吴港城,副教授(E-mail)gangcheng.wu@jiangnan.edu.cn。

球超重和肥胖[身体质量指数(BMI) ≥ 25 kg/m²]人数超过26亿,占世界人口的38%,而在2035年,该比例可能增加到50%^[1]。油脂是日常膳食的重要组成部分,中国营养学会建议膳食脂肪能量供给不超过总能量的30%,但调查显示我国67.9%的居民膳食脂肪供能比超过30%^[2]。天然膳食油脂的主要成分甘油三酯(TAG)在经过胃、肠的消化代谢

后,最终重新生成 TAG 进入血液循环运输到各组织器官中用于供能或储存。当人体摄入能量多于消耗所需能量时,多余的能量会以 TAG 的形式储存在脂肪组织中,体内脂肪的逐渐积累引起体质量不断增长进而导致超重和肥胖。节食和减肥药物可以在短时间内快速降低体质量,达到减肥效果,但往往也会对健康产生一定的损害^[3]。因此,具有降血脂和控制体质量作用的健康膳食油脂的研究应用存在非常大的发展空间。

甘油二酯(DAG)是膳食油脂中除 TAG 外含量最高的天然成分^[4],但常见天然食用油中 DAG 含量仍非常低,其含量范围为 0.8% (菜籽油)~9.5% (棉籽油)^[5]。根据脂肪酸酰基与甘油骨架上羟基连接位置的不同,DAG 有 1,2-DAG 和 1,3-DAG 两种异构体,分子间的空间位阻效应使 1,3-DAG 在热力学上更稳定,因此膳食油脂中 DAG 主要以 1,3-DAG 形式存在^[6]。我国卫生部在 2009 年将 DAG 油列为新资源食品。膳食油脂的特性可能会影响脂肪组织中脂肪滴的脂肪酸组成、脂肪细胞的质膜、血清中脂肪因子的分布、葡萄糖代谢和脂质代

谢^[7]。研究表明,1,3-DAG 具有不同于 TAG 的代谢通路,其摄入后不易在小肠上皮细胞中重新生成 TAG^[8],进而减少了进入脂肪细胞中储存的 TAG 脂滴,避免造成脂肪堆积。还有研究发现,DAG 可以降低脂质转运相关基因表达,增强小肠和肝脏中脂质的 β -氧化和血浆中脂质清除作用^[9-11]。因此,DAG 可以有效降低餐后血脂水平并减少体内脂肪积累,达到控制体质量的效果。

本文汇总整理了一些 DAG 抗肥胖功效及其机制研究的动物实验和人群实验,总结了 DAG 降低血脂及控制体质量的作用机制,以期 DAG 油作为功能性膳食油脂控制体质量的研究应用提供理论参考。

1 DAG 的降血脂及控制体质量功效

肥胖是指一定程度的明显超重与脂肪层过厚,是体内脂肪组织积蓄过剩的状态。当食物摄入过多或机体代谢的改变会导致体内脂肪积聚过多进而表现为体质量增长。动物脂肪主要积聚在腹股沟、附睾、肠系膜、肾周,所以测量这些部位的脂肪质量可以较好地反映体内脂肪堆积情况^[12]。DAG 降血脂和控制体质量相关的动物实验和人群实验见表 1。

表 1 DAG 降血脂和控制体质量相关的动物实验和人群实验

Table 1 Animal and population experiments related to DAG blood lipid-lowering and weight loss

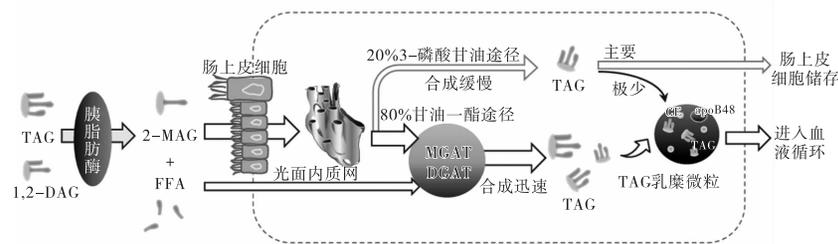
实验对象	实验周期	实验结果	参考文献
C57BL/6J ob/ob 雄性小鼠	5 周	DAG 降低血清中 TAG、葡萄糖、游离脂肪酸(FFA)、总胆固醇(TC)水平,降低了附睾脂肪质量	[13]
SD 雄性大鼠	8 周	DAG 显著降低体质量,降低腹部上皮组织、附睾、肠系膜、肾周脂肪质量和血清 TAG 水平	[14]
Wistar 雄性大鼠	12 周	DAG 浓度与其降脂效果相关,40% DAG 油比 20% DAG 油对脂质分布的影响更显著	[15]
C57BL/6J 雄性小鼠	8 周	DAG 降低了体质量和血脂水平	[16]
131 名超重人群	24 周	DAG 组体质量和脂肪质量的下降幅度明显高于 TAG 组	[17]
114 名超重人群	12 周	①DAG 组内脏脂肪面积和 BMI 显著降低,且存在时间-治疗交互作用 ②第 12 周时,DAG 组空腹血清 TAG 浓度显著降低	[18]
38 名健康男性	16 周	DAG 组体质量、BMI、腰围、总脂肪面积、内脏脂肪面积、皮下脂肪面积和内脏与皮下脂肪面积比的下降幅度均明显大于 TAG 组	[19]
177 名肥胖人群	12 周	DAG 组的体质量、腰围、内脏脂肪面积显著减少,其中内脏脂肪面积的减少与体质量减少显著相关	[20]
19 名健康人群	16 周	DAG 显著减少了体内脂肪的积累,尤其是内脏脂肪	[21]
114 名人群	1 年	膳食 DAG 自由摄入显著降低了体质量、腰围、皮肤褶皱厚度,血脂水平得到明显改善	[21]

DAG 能够降低动物血清 TAG 和 TC 水平,显著减少动物体质量和体内组织脂肪质量^[22-24]。人群实验结果表明,DAG 的摄入显著降低了体质量和体内脂肪含量^[17-19],且内脏脂肪面积的减少与体质量减少显著相关^[20]。

2 DAG 降血脂及控制体质量的作用机制

2.1 DAG 的消化特异性

天然食用油脂中 DAG 的两种异构体 1,3-DAG 与 1,2-DAG 的比例约为 7:3^[6],其中 1,2-DAG 与 TAG 的代谢途径相似,见图 1。



注: MAG. 单甘酯; MGAT. 单甘酯酰基转移酶; DGAT. 甘油二酯酰基转移酶; CE. 胆固醇; apoB48. 载脂蛋白 B48

Note: MAG. Monoacylglycerol; MGAT. Monoglyceride acyltransferase; DGAT. Diglyceride acyltransferase; CE. Cholesterol; apoB48. Apolipoprotein B48

图1 TAG与1,2-DAG的代谢途径

Fig.1 Metabolic pathways of TAG and 1,2-DAG

如图1所示, TAG与1,2-DAG在肠道中经sn-1,3特异性胰脂肪酶分解后产生2-单甘酯(2-MAG)和FFA。产物随后被吸收进小肠上皮细胞,在细胞内约80%的2-MAG相继在MGAT和DGAT的催化作用下生成新的TAG,再生的TAG以乳糜微粒(一种球形脂蛋白)的形式进入血液循环中^[25]。此外,约20%的2-MAG通过3-

磷酸甘油途径合成TAG,此过程非常缓慢,且合成的TAG极少形成乳糜微粒,大部分在小肠上皮细胞中储存^[8]。与TAG相比,由于1,2-DAG含量较低,因此以其为原料再生的TAG含量也相应较低。

1,3-DAG的代谢途径见图2。

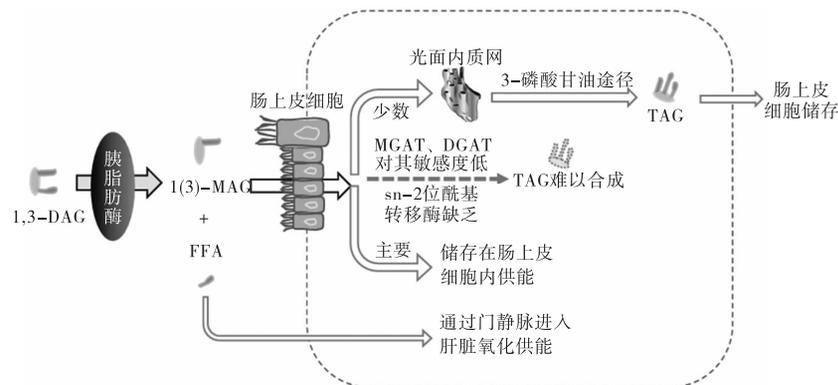


图2 1,3-DAG的代谢途径

Fig.2 Metabolic pathway of 1,3-DAG

如图2所示,1,3-DAG在小肠中被sn-1,3特异性胰脂肪酶分解后产生1-单甘酯(1-MAG)和FFA,由于MGAT和DGAT对1-MAG的敏感度低且体内缺少sn-2位特异性酰基转移酶,1-MAG很难转变为2-MAG,因而1-MAG很难进一步酯化生成TAG,大部分1-MAG直接储存在肠上皮细胞中^[26]。此外,少数1-MAG可以通过3-磷酸甘油途径合成TAG,但这部分TAG不易形成乳糜微粒,而是直接储存在肠上皮细胞中^[14]。1,3-DAG分解的另一产物FFA通过门静脉直接进入肝脏进行脂质氧化供能^[27]。

1-MAG再生TAG效率低的原因是DGAT的低底物特异性。Murase等^[9]分别将^{[14]C}标记的DAG和TAG注射进小鼠的管腔,结果发现,注射DAG的小鼠管腔内^{[14]C}脂肪酸的含量高于注射

TAG的小鼠,管腔中脂肪酸的大量产生和黏膜的吸收可能导致小肠黏膜中脂肪酸含量较高。与注射TAG的小鼠相比,注射DAG的小鼠黏膜中含有大量的^{[14]C}1,3-DAG。这说明由1-MAG与脂肪酸酯化再生成的1,3-DAG很少能够作为DGAT的底物,从而导致1,3-DAG滞留在黏膜中,因此黏膜中1,3-DAG的增加反映了DGAT的低底物特异性。Kondo等^[28]也报道称,当大鼠服用DAG油时,小肠上皮细胞中1,3-DAG的含量增加而TAG的产生量减少,这说明由1,3-DAG作为底物合成TAG的效率较低。以上结果表明1,3-DAG的消化特异性使再生的TAG减少,在能量优先用于耗能的原则下,运往脂肪组织储存的多余TAG减少,从而减少了脂肪堆积,长此以往当储存的TAG渐渐被消耗,就能够降低体质量,或维持体

质量不变,达到控制体质量的作用。

2.2 DAG 上调小肠中脂肪氧化、产热基因的表达

脂肪消耗主要通过各组织器官中的 β -氧化供

能,如小肠、肝脏、骨骼肌等。DAG 调控小肠脂质代谢机制见表 2。

表 2 DAG 调控小肠脂质代谢机制

Table 2 Mechanism of DAG regulation of small intestine lipid metabolism

实验对象	实验周期	实验结果	参考文献
C57BL/6N 雄性小鼠	16 周	①不同脂肪酸组成的 DAG 在抑制体质量增加和减少脂肪堆积方面作用相似 ②DAG 显著降低血清葡萄糖、TC、瘦素水平和胰岛素水平 ③棕榈油 - DAG 诱导小肠长链脂酰辅酶 A 合成酶 (ACSL) 和中链脂酰辅酶 A 合成酶的高表达,而(大豆油 - 菜籽油) - DAG 诱导肝脏和小肠中 ACSL 的高表达 ④DAG 减少载脂蛋白 (apo) B 基因表达,降低血清低密度脂蛋白 (LDL) 水平,棕榈油 - DAG 上调肝脏和小肠中的解偶联蛋白 (UCP) 基因表达	[29]
C57BL/6J 雄性小鼠	8 个月	①DAG 上调小肠中参与脂肪酸转运相关蛋白 [脂肪酸转运蛋白 (FAT) 和肝脂肪酸结合蛋白 (L-FABP)]、 α -氧化相关酶 [酰基辅酶 A 氧化酶 (ACO) 和中链酰基辅酶 A 脱氢酶 (MCAD)] 和产热蛋白 UCP-2 的 mRNA 水平 ②DAG 组小鼠的小肠黏膜中有更多的标记 1,3-DAG	[9]
Caco-2 细胞		DAG 摄入可使血浆血清素水平升高约 50%,1-MAG 使 Caco-2 细胞血清素水平升高 36.6%,同时观察到 ACO、FAT、UCP-2 的 mRNA 表达显著升高	[30]

DAG 能够刺激 β -氧化,且其脂肪酸组成的差异可能诱导在不同器官的 β -氧化^[29]。DAG 刺激了小肠中脂质氧化和脂质代谢相关基因的表达^[31],包括小肠中的 ACO、MCAD 和 UCP-2,但在骨骼肌或棕色脂肪组织中却没有^[9],这表明肠道脂质代谢增加在减少体内脂肪积累方面起到了很大作用。此外,Yanai 等^[30,32]研究发现 DAG 的摄入显著增加了血浆中的血清素(主要产生于肠道中),而血清素可以介导外周交感神经的产热作用,体外研究表明,DAG 的消化产物 1-MAG 增加了 Caco-2 细胞的血清素释放,进而增强了与 β -氧化、脂肪酸代谢和产热相关基因的表达,由此提出了 DAG 介导的抗肥胖作用的新分子机制。作为膳食脂肪消化和吸收的主要器官,小肠会最先也最容易受到膳食 DAG 影响。与具有相似脂肪酸组成的 TAG 相比,膳食 DAG 可上调参与小肠脂质代谢的基因,显著抑制体质量增加,导致体内脂肪积累明显减少。因此,即使在高脂饮食的条件下,DAG 也能够降低体内脂肪积累,减少体质量增加,从而可能达到预防肥胖的效果。

2.3 DAG 上调肝脏中 β -氧化相关基因表达

肝脏是人体内合成和转运内源性脂肪的最重要的场所,许多动物研究表明摄入高含量膳食 DAG 后,动物肝脏中脂肪含量和血清中 TC、LDL 水平降低^[33],说明 DAG 可能影响了肝脏脂质代谢相关基因的表达,增强肝脏中脂肪酸 β -氧化能力并减少了脂质的合成,从而减少了肝脏脂肪积累与分泌。

表 3 中列举了 DAG 调控肝脏脂质代谢机制的

相关实验结果。膳食 DAG 可使肝脏中与脂肪酸氧化相关的酶,如肉碱棕榈酰转移酶、酰基辅酶 A 脱氢酶、ACO、烯酰基辅酶 A 水合酶、3-羟酰基辅酶 A 脱氢酶、2,4-二烯酰基辅酶 A 还原酶和 $\delta 3/\delta 2$ -烯酰基异构酶的活性增强。同时,DAG 还通过降低脂肪酸合成所需的酶,如脂肪酸合成酶、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶和苹果酸酶的活性来抑制脂肪酸合成^[10]。Murase 等^[34]用高 DAG 饮食喂养小鼠 5 个月后,小鼠体内脂肪积累较少,且 ACO 和脂酰辅酶 A 合成酶 (ACS) 的 mRNA 水平升高,这表明 DAG 刺激了肝脏脂肪 β -氧化,使更多的脂肪被消耗,从而减少了肝脏中分泌入血液的 TAG,脂肪组织中可储存的脂肪相应减少,最终可起到降低体质量的作用。此外,DAG 还可与其他功能性脂质发挥协同作用, α -亚麻酸 (ALA) 作为多不饱和脂肪酸在抑制肥胖、肝脏脂肪堆积和降低血清脂质水平的作用已得到大量证实^[35-36],而摄入富含 ALA 的 DAG 能更有效地减少脂肪堆积从而控制体质量^[23]。

与动物实验结果相似,在人群实验中也发现了 DAG 摄入能够刺激脂肪氧化^[37],一项实验招募了 12 名女性,用 DAG 部分替代 TAG,结果表明,全身能量消耗在 DAG 组和 TAG 组之间没有明显差异,但 DAG 组女性血清中酮体浓度增加^[38],酮体是脂肪氧化代谢过程中的中间代谢产物,在肝细胞中的线粒体产生,这表明 DAG 刺激了肝脏的脂肪氧化^[39]。总之,以上结果均表明膳食 DAG 的摄入能够影响肝脏的脂质代谢,降低肝脏中脂质合成的同时上调脂肪酸 β -氧化,减少体内脂肪堆积,控制体质量。

表3 DAG 调控肝脏脂质代谢机制

Table 3 Mechanism of DAG regulation of liver lipid metabolism

实验对象	实验周期	实验结果	参考文献
棕色脂肪缺陷型小鼠	15 周	①在高脂饮食下,DAG 组体质量增加与内脏脂肪积累较少 ②DAG 抑制肝脏中的糖异生和刺激骨骼肌中的脂肪氧化	[22]
C57BL/6N 雄性小鼠	16 周	①不同脂肪酸组成的 DAG 在抑制体质量增加方面和减少脂肪堆积方面作用相似 ②棕榈油 - DAG 诱导小肠中 ACSL 的高表达,而(大豆油 - 菜籽油) - DAG 诱导肝脏和小肠中 ACSL 的高表达 ③DAG 减少 apoB 基因表达,降低 LDL 水平,棕榈油 - DAG 组上调肝脏和小肠中的 UCP 基因表达	[29]
Zucker 雄性肥胖大鼠	4 周	DAG 抑制肝脏 TAG 积累,上调 β -氧化活性以及 ACO 和 MCAD 的 mRNA 水平	[23]
C57BL/6J 雄性小鼠	5 个月	①DAG 组与 TAG 组在能量摄入和粪便脂质排泄之间没有显著差异 ②DAG 抑制了脂肪组织中瘦素 mRNA 表达的升高,上调肝脏中 ACO 和 ACS 的 mRNA 表达	[34]
C57BL/6J 雄性小鼠	8 周	①DAG 显著降低体质量、肾脏质量、血清 TAG 含量、肝脏脂肪酸合成酶和乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)水平 ②与长链 DAG 相比,中链 DAG 显著降低脾脏质量、肝脏 ACC 水平	[24]
SD 雄性大鼠	14 d	DAG 降低肝脏脂肪酸合成酶活性,增加脂肪酸氧化相关酶活性	[10]
12 名健康女性	3 d	①DAG 组的脂肪氧化率明显升高,呼吸熵降低,DAG 摄入后较高的 β -羟基丁酸浓度表明较高的肝脏脂肪氧化 ②第 1 天实验中,DAG 组和 TAG 组的食欲状况无明显差异;但在第 2 天实验中,DAG 组的饥饿感、食欲、预期食物摄入量估计量和进食欲望均明显降低	[38]
14 名健康人群	14 d	与消耗 TAG 油相比,消耗 DAG 油会刺激脂肪氧化和静息代谢率	[40]
16 名超重人群	14 d	DAG 显著降低体脂率和脂肪量,上调脂质代谢	[41]
11 名超重女性	4 d	①在超重受试者中,DAG 油组和 TAG 油组之间的总能量消耗和碳水化合物氧化没有显著差异 ②DAG 油增强了超重受试者的总脂肪氧化和膳食脂肪氧化	[42]
11 名健康人群	4 d	DAG 可增强脂肪利用率,摄入的 DAG 快速氧化	[43]

2.4 DAG 抑制脂质转运和增强血浆脂质清除作用

apo 是血浆脂蛋白中的蛋白质部分,其基本功能是运载脂类,主要有 apoA、apoB、apoC、apoD 和 apoE 5 大类。apoB 由于氨基酸组成的差异,可分为 2 个亚类 apoB48 和 apoB100。apoB48 是乳糜微粒的 apo 之一;apoB100 是极低密度脂蛋白(VLDL)和 LDL 的 apo 之一。表 4 列出了 DAG 抑制脂质转运及增强血浆脂质清除作用机制的相关实验结果。

Shoji 等^[44]发现,摄入 DAG 后乳糜微粒中 apoB48 的浓度显著降低,餐后血浆中 LDL - TAG 和 VLDL - TAG 的浓度也显著降低。在肠上皮细胞中再生的 TAG 需要以乳糜微粒的形式进入血液循环,故 apoB48 浓度的降低可能会阻碍乳糜微粒的形成,导致运输 TAG 的载体减少,从而降低小肠和肝脏分泌入血液的 TAG 水平,餐后血脂水平的降低有利于降低高脂血症、动脉粥样硬化等疾病的发生风险。

表4 DAG 抑制脂质转运及增强血浆脂质清除作用机制

Table 4 Mechanism of DAG inhibiting lipid transport and enhancing plasma lipid clearance

实验对象	实验周期	实验结果	参考文献
C57BL/6N 雄性小鼠	16 周	DAG 减少 apoB 基因表达,降低血清 LDL 水平,棕榈油 - DAG 组肝脏和小肠中的 UCP 基因表达上调	[29]
41 名空腹高 TAG 患者	6 h	①与 TAG 组相比,DAG 组餐后 TAG、VLDL - TAG 和 LDL - TAG 的浓度显著降低 ②与 TAG 组相比,DAG 组餐后 apoB48、高密度脂蛋白(HDL) - TAG 和胰岛素水平显著降低	[44]
C57BL/6J 雄性小鼠, apoE 缺陷小鼠		口服 DAG 和 TAG 以相同效率掺入乳糜微粒中,但 DAG 产生的乳糜微粒是脂蛋白脂肪酶(LPL)更好的底物,且被更有效地从血浆中清除	[11]

LPL 负责分解血浆中脂蛋白(主要是乳糜微粒和 VLDL)核成分的 TAG,其代谢产物 FFA 为组织提供能量,或再酯化为 TAG 储存在脂肪组织中。

Yasunaga 等^[11]发现 DAG 可以提高由 LPL 介导的脂肪分解和 apoE 介导的肝内吞作用,从而降低血清 TAG 水平。在小鼠灌胃 DAG 乳液后,乳糜微粒中

的 TAG 略微降低,但 MAG 和 DAG 增多。研究结果表明,餐后血清 TAG 水平的降低是由于 DAG 产生的乳糜微粒与 LPL 的相互结合能力更强,从而达到更高效的水解,并且乳糜微粒中 MAG 和 DAG 的适度增加可引发更好的脂解效果。LPL 对 DAG 的有效水解可能归因于其独特的物理化学性质。由于 LPL 的亲水性,更多的 DAG 分子可以在乳液表面分配,与 TAG 分子相比,LPL 更容易与 DAG 相互作用,从而使含有较多 DAG 的乳糜微粒清除率升高。

单一的肠上皮细胞和肝脏内脂质分泌抑制作用或脂质由血浆到组织器官的清除增强作用可能无法直接影响体内脂肪积累的减少,但与 DAG 刺激小肠和肝脏中脂质 β -氧化的作用结合后,DAG 在降低餐后血脂的同时还能减少体内脂肪积累最终达到控制体质量的效果。

3 结束语

DAG 作为膳食脂质能够有效降低餐后血脂水平和控制体质量。DAG 摄入能够减少体内脂肪积累,在正常饮食情况下降低体质量;在高脂饮食情况下显著抑制体质量增长,预防或改善肥胖。膳食中 DAG 油部分替代或全部替代 TAG 油均能显著发挥作用,且 DAG 含量越高,降脂减肥效果越好。对于超重或肥胖人群,短时间内的 DAG 摄入就可观察到体内脂肪积累的显著减少,与有损健康的节食或减肥药等方式相比,膳食 DAG 提供了一个健康且相对轻松的途径来减肥降重。基于 DAG 本身结构的特异性消化代谢途径以及 DAG 摄入后对脂质代谢相关酶基因的调控,DAG 可有效降低餐后血脂水平并减少体内脂肪积累,达到控制体质量的效果,改善或预防肥胖的发生。

参考文献:

- [1] World obesity atlas 2023 [EB/OL]. [2023 - 08 - 17]. <https://data.worldobesity.org/publications/?cat=19>.
- [2] 苏畅,张兵,王惠君,等. 2015 年中国十五省(区、市) 18~64 岁居民膳食脂肪摄入状况分析[J]. 营养学报, 2019, 41(2): 118 - 121.
- [3] RUDKOWSKA I, ROYNETTE C E, DEMONTY I, et al. Diacylglycerol: Efficacy and mechanism of action of an anti-obesity agent[J]. *Obes Res*, 2005, 13(11): 1864 - 1876.
- [4] BAILEY A E, SHAHIDI F. *Bailey's industrial oil & fat products*[M]. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- [5] FLICKINGER B D, MATSUO N. Nutritional characteristics of DAG oil[J]. *Lipids*, 2003, 38(2): 129 - 132.
- [6] LO S K, TAN C P, LONG K, et al. Diacylglycerol oil: Properties, processes and products: A review[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2008, 1(3): 223 - 233.
- [7] MARTINS S V, LOPES P A, ALFAIA C M, et al. Serum adipokine profile and fatty acid composition of adipose tissues are affected by conjugated linoleic acid and saturated fat diets in obese Zucker rats[J]. *Br J Nutr*, 2010, 103(6): 869 - 878.
- [8] 毛逸霖,周俊,陈凯,等. 甘油二酯的代谢机制及营养功能研究进展[J]. *中国油脂*, 2023, 48(11): 80 - 89.
- [9] MURASE T, AOKI M, WAKISAKA T, et al. Anti-obesity effect of dietary diacylglycerol in C57BL/6J mice: Dietary diacylglycerol stimulates intestinal lipid metabolism[J]. *J Lipid Res*, 2002, 43(8): 1312 - 1319.
- [10] MURATA M, IDE T, HARA K. Reciprocal responses to dietary diacylglycerol of hepatic enzymes of fatty acid synthesis and oxidation in the rat[J]. *Br J Nutr*, 1997, 77(1): 107 - 121.
- [11] YASUNAGA K, SAITO S, ZHANG Y L, et al. Effects of triacylglycerol and diacylglycerol oils on blood clearance, tissue uptake, and hepatic apolipoprotein B secretion in mice[J]. *J Lipid Res*, 2007, 48(5): 1108 - 1121.
- [12] 孟祥河. 功能性甘油二酯的酶促酯化合成及其减肥功能的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2004.
- [13] HUE J J, LEE K N, JEONG J H, et al. Anti-obesity activity of diglyceride containing conjugated linoleic acid in C57BL/6J ob/ob mice[J]. *J Vet Sci*, 2009, 10(3): 189 - 195.
- [14] MENG X, ZOU D, SHI Z, et al. Dietary diacylglycerol prevents high-fat diet-induced lipid accumulation in rat liver and abdominal adipose tissue[J]. *Lipids*, 2004, 39(1): 37 - 41.
- [15] ANIKSETTY M, GOPALA KRISHNA A G, PANNEERSELVAM V, et al. Diacylglycerol (DAG) rich rice bran and sunflower oils modulate lipid profile and cardiovascular risk factors in Wistar rats[J]. *J Funct Foods*, 2018, 40: 117 - 127.
- [16] EOM T, KONG C, BYUN H, et al. Lipase catalytic synthesis of diacylglycerol from tuna oil and its anti-obesity effect in C57BL/6J mice[J]. *Process Biochem*, 2010, 45(5): 738 - 743.
- [17] MAKI K C, DAVIDSON M H, TSUSHIMA R, et al. Consumption of diacylglycerol oil as part of a reduced-energy diet enhances loss of body weight and fat in comparison with consumption of a triacylglycerol control oil[J]. *Am J Clin Nutr*, 2002, 76(6): 1230 - 1236.
- [18] SAITO S, MORI A, OSAKI N, et al. Diacylglycerol enhances the effects of α -linolenic acid against visceral fat: A double-blind randomized controlled trial[J]. *Obesity*, 2017, 25(10): 1667 - 1675.
- [19] NAGAO T, WATANABE H, GOTO N, et al. Dietary diacylglycerol suppresses accumulation of body fat

- compared to triacylglycerol in men in a double – blind controlled trial[J]. *J Nutr*, 2000, 130(4) : 792 – 797.
- [20] SAITO S, FUKUHARA I, OSAKI N, et al. Consumption of *alpha* – linolenic acid – enriched diacylglycerol reduces visceral fat area in overweight and obese subjects: A randomized, double – blind controlled, parallel – group designed trial[J]. *J Oleo Sci*, 2016, 65(7) : 603 – 611.
- [21] YASUKAWA T, YASUNAGA K. Nutritional functions of dietary diacylglycerols[J]. *J Oleo Sci*, 2001, 50(5) : 427 – 432.
- [22] SAITO S, HERNANDEZ – ONO A, GINSBERG H N. Dietary 1, 3 – diacylglycerol protects against diet – induced obesity and insulin resistance[J]. *Metabolism*, 2007, 56(11) : 1566 – 1575.
- [23] MURASE T, AOKI M, TOKIMITSU I. Supplementation with *alpha* – linolenic acid – rich diacylglycerol suppresses fatty liver formation accompanied by an up – regulation of *beta* – oxidation in Zucker fatty rats[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2005, 1733(2/3) : 224 – 231.
- [24] LU H, GUO T, FAN Y, et al. Effects of diacylglycerol and triacylglycerol from peanut oil and coconut oil on lipid metabolism in mice [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(6) : 1907 – 1914.
- [25] 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]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(15) : 2509 – 2525.
- [26] 金青哲, 杜美军, 杨云翀, 等. 甘油二酯油的代谢特性及营养价值[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(5) : 40 – 43.
- [27] FRIEDMAN H I, NYLUND B. Intestinal fat digestion, absorption, and transport. A review[J]. *Am J Clin Nutr*, 1980, 33(5) : 1108 – 1139.
- [28] KONDO H, HASE T, MURASE T, et al. Digestion and assimilation features of dietary DAG in the rat small intestine[J]. *Lipids*, 2003, 38(1) : 25 – 30.
- [29] TANG T K, BEH B K, ALITHEEN N B M, et al. Suppression of visceral adipose tissue by palm kernel and soy – canola diacylglycerol in C57BL/6N mice[J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2013, 115(11) : 1266 – 1273.
- [30] YANAI H. A molecular mechanism for diacylglycerol – mediated promotion of negative caloric balance[J/OL]. *Diabetes Metab Syndr Obes Targets Ther*, 2009, 3: 1 – 6.
- [31] OSAKI N, MEGURO S, ONIZAWA K, et al. Effects of a single and short – term ingestion of diacylglycerol on fat oxidation in rats[J]. *Lipids*, 2008, 43(5) : 409 – 417.
- [32] YANAI H, YOSHIDA H, HIROWATARI Y, et al. Therapeutic application of diacylglycerol oil for obesity: Serotonin hypothesis[J/OL]. *Funct Foods Health Dis*, 2012, 2(1) : 1 [2023 – 08 – 17]. <https://doi.org/10.31989/ffhd.v2i1.103>.
- [33] 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 Chem*, 2018, 248: 210 – 216.
- [34] MURASE T, MIZUNO T, OMACHI T, et al. Dietary diacylglycerol suppresses high fat and high sucrose diet – induced body fat accumulation in C57BL/6J mice[J]. *J Lipid Res*, 2001, 42(3) : 372 – 378.
- [35] IDE T, KOBAYASHI H, ASHAKUMARY L, et al. Comparative effects of perilla and fish oils on the activity and gene expression of fatty acid oxidation enzymes in rat liver[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2000, 1485(1) : 23 – 35.
- [36] KUMAMOTO T, IDE T. Comparative effects of α – and γ – linolenic acids on rat liver fatty acid oxidation[J]. *Lipids*, 1998, 33(7) : 647 – 654.
- [37] TADA N. Physiological actions of diacylglycerol outcome [J]. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*, 2004, 7(2) : 145 – 149.
- [38] KAMPHUIS M M J W, MELA D J, WESTERTERP – PLANTENGA M S. Diacylglycerols affect substrate oxidation and appetite in humans[J]. *Am J Clin Nutr*, 2003, 77(5) : 1133 – 1139.
- [39] WATANABE H, ONIZAWA K, TAGUCHI H, et al. Effects of diacylglycerols on lipid metabolism in human [J]. *J Jpn Oil Chem Soc*, 1997, 46(3) : 309 – 314.
- [40] HIBI M, TAKASE H, YASUNAGA K, et al. Greater fat oxidation with diacylglycerol oil consumption for 14 days compared with triacylglycerol oil consumption in overweight men and women [J]. *Int J Obes (Lond)*, 2008, 32(12) : 1841 – 1847.
- [41] 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]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(2) : 181 – 185.
- [42] HIBI M, SUGIURA Y, YOKOYAMA R, et al. The short – term effect of diacylglycerol oil consumption on total and dietary fat utilization in overweight women[J]. *Obesity*, 2011, 19(3) : 536 – 540.
- [43] HIBI M, TAKASE H, YASUNAGA K, et al. Fat utilization in healthy subjects consuming diacylglycerol oil diet: Dietary and whole body fat oxidation [J]. *Lipids*, 2008, 43(6) : 517 – 524.
- [44] SHOJI K, MIZUNO T, SHIIBA D, et al. Effects of a meal rich in 1, 3 – diacylglycerol on postprandial cardiovascular risk factors and the glucose – dependent insulinotropic polypeptide in subjects with high fasting triacylglycerol concentrations [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(10) : 2490 – 2496.