

几种油脂对高脂饲料诱导的 C57BL/6J 肥胖小鼠脂代谢的影响



杨帆 张永 徐庆 李瑞生¹ 杨雪艳 刘英华
王颢 于晓明 薛长勇²
解放军总医院营养科 北京 100853

摘要:目的 观察几种油脂对高脂肪饲料诱导的 C57BL/6J 肥胖小鼠脂代谢的影响。方法 选择 4~5 周龄 C57BL/6J 雄性小鼠 75 只,随机分为 5 组,每组 15 只,分别喂饲含 2% 大豆油、中链甘油三酯(MCT)、花生油、橄榄油和茶油的高脂饲料,喂养 12 周,观察和比较各组小鼠体重、体脂、饲料消耗量、血脂和脂肪组织脂代谢相关酶以及白色脂肪组织和肝脏病理变化。结果 实验结束时,MCT、花生油、橄榄油及茶油组小鼠的体重、体脂重均显著低于大豆油组($P < 0.05$)。MCT 组血清 TG、TC、LDL-C 和肝脏 TG、TC 显著低于大豆油组($P < 0.05$),白色脂肪组织中 cAMP、PKA、HSL 和 ATGL 显著高于大豆油组($P < 0.05$)。MCT、橄榄油和茶油组小鼠肝脏未见脂肪浸润,而大豆油和花生油组可见明显的脂肪浸润。结论 与大豆油相比,MCT、花生油、橄榄油及茶油均可降低肥胖小鼠的体重和体脂,MCT 还能降低血清 TG、TC、LDL-C 和促进白色脂肪组织的脂肪动员;在改善血脂方面,橄榄油和茶油的作用没有 MCT 明显,但与大豆油和花生油相比不会导致明显的脂肪肝。

关键词: 中链甘油三酯 油脂 体重 体脂 甘油三酯
中图分类号: R151.2 Q591 **文献标志码:** A

Effects of oils on lipid metabolism in obese C57BL/6J mice induced by a high fat diet

YANG Fan, ZHANG Yong, XU Qing, LI Ruisheng, YANG Xueyan, LIU Yinghua,
WANG Jin, YU Xiaoming, XUE Changyong

Department of Nutrition, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Abstract: Objective To investigate and compare the effects of oils on lipid metabolism in obese C57BL/6J fed a high fat diet. **Methods** 75 male C57BL/6J mice (4-5 weeks old) were used and randomly divided into 5 groups, 15 mice in each group, and were fed a high fat diets with 2% soybean oil, medium-chain triglyceride (MCT), peanut oil, olive oil and tea seed oil respectively for 12 weeks. Body weight, body fat, diet intake, blood lipid profiles and enzymes relevant to lipid metabolism in white adipose tissue (WAT) as well as pathologic changes in WAT and livers from all groups were observed and compared. **Results** At the end of study, the body weight and body fat

基金项目: 国家自然科学基金(No. 81172667)

作者简介: 杨帆,女,硕士研究生,E-mail: michelleone@163.com

¹ 解放军第 302 医院动物实验中心

² 通信作者: 薛长勇,男,主任医师,硕士生导师,研究方向: 营养支持与慢性病代谢,E-mail: cnxcy@163.com

weight were significantly lower in MCT, peanut oil, olive oil, tea oil groups than in soybean oil group ($P < 0.05$). The mice in MCT group showed significantly lower TG, TC, LDL-C in serum and lower TG, TC in liver than those in soybean oil group ($P < 0.05$). The cAMP, PKA, HSL, ATGL in WAT in MCT group showed higher than those in soybean oil group ($P < 0.05$). There was no fatty infiltration in the livers of mice fed MCT, olive oil and tea oil group, but visible fatty liver in soybean oil and peanut oil group were found. **Conclusion** Compared to soybean oil, MCT, peanut oil, olive oil and tea oil could reduce body weight and body fat weight in obese mice fed a high fat diet, MCT also decreased TG, TC, LDL-C in serum and promote lipid mobilization in WAT. As to improving blood lipids, olive oil and tea oil were less obvious than MCT was, and both oils did not induce significant fatty liver when compared with soybean oil and peanut oil.

Key words: medium-chain triglyceride, oils, body weight, body fat, triglyceride

研究发现膳食因素特别是膳食中的脂肪影响血液胆固醇和甘油三酯的水平 and 代谢^[1]。通常人类每日从膳食中摄入的脂肪约有一半来自食用油,不同种类的食用油对脂代谢的影响不尽相同,这主要与其脂肪酸组成、含量、比例以及所含有的植物化学物有关。以橄榄油为主要食用油的地中海地区,其冠心病发生率较低,研究认为橄榄油阻断了脂质条纹形成和动脉粥样硬化过程中内皮细胞的炎性过程,从而减少粒细胞对受损的上皮细胞的粘附^[2]。花生油富含油酸(oleic acid, OA),能够降低血液胆固醇含量,减少其在血管上的沉积,具有预防心血管疾病的作用^[3]。茶油富含维生素 E、胡萝卜素、磷脂、角鲨烯等生物活性成分^[4],长期食用可以延缓动脉硬化,减少肝细胞空泡样改变^[5]。20 世纪 50 年代,中链甘油三酯(medium-chain triglyceride, MCT)在临床上用于吸收障碍综合征患者的营养支持。MCT 可以快速水解释放中链脂肪酸(medium-chain fatty acids, MCFA),MCFA 直接经门静脉进入肝脏氧化^[6],由于其在人体内独特的转运、代谢机制,可以减少体内脂质蓄积,防治肥胖^[7]。但是不同的食用油还有不同甚至矛盾的研究结果报道,为进一步探索几种食用油对脂代谢的影响,本研究选择最常用的大豆油作为对照油脂,使用相同的高脂肪饲料诱导的小鼠肥胖模型,在限量给予大豆油、MCT、花生油、橄榄油和茶油的情况下,比较研究这些油脂对脂代谢的影响和作用机制。

1 材料与方法

1.1 实验动物及肥胖模型建立

SPF 级 4 ~ 5 周龄 C57BL/6J 雄性小鼠 200 只,平均体重 15 g,由中国医学科学院实验动

物研究所提供,许可证号[SCXK 京 2009-0007]。给予普通饲料适应喂养 1 周后,随机选取 15 只继续喂给普通饲料,其余喂饲高脂饲料,高脂饲料配方为:普通饲料 79%、猪油 10%、蛋黄粉 10%、胆固醇 1%、能量 18.42 kJ/g。饲料中含蛋白质 18.01%、脂肪 19.42%、碳水化合物 48.47%、水分及纤维 14.10%^[8]。

4 周后,从高脂饲料组选取空腹体重高于普通饲料组平均体重 10% 的个体作为肥胖模型。肥胖模型动物按空腹体重随机分为 5 组,每组 15 只,分别给予含有 2% 的大豆油、MCT、花生油、橄榄油、茶油的高脂饲料喂养 12 周,饲料由北京市营养源研究所检测,饲料配方及营养素组成见表 1。

表 1 含有 2% 不同油脂的高脂饲料配方

配方	大豆油	MCT	花生油	橄榄油	茶油
高脂饲料/%	90	90	90	90	90
实验用油/%	2	2	2	2	2
酪蛋白/%	8	8	8	8	8
能量/(kJ/g)	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81
营养素比例/%					
蛋白	17.65	17.65	17.65	17.65	17.65
脂肪	21.03	21.03	21.03	21.03	21.03
碳水化合物	47.50	47.50	47.50	47.50	47.50
矿物质	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
维生素	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
纤维	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
水	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50
其他	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52

1.2 油脂

MCT 由上海某油脂有限公司提供,大豆油、花生油、橄榄油、茶油均购自超市,其脂肪酸分

析由谱尼测试(北京)公司承担,脂肪酸组成见表 2。

表 2 实验用油脂脂肪酸组成

Table 2 Fatty acid composition of the experimented oils

脂肪酸	大豆油	MCT	花生油	橄榄油	茶油
C8:0		75.4			
C10:0		24.6			
C16:0	6.2		12.5	12.6	8.5
C16:1	0.2		0.1		
C18:0	2.5		3.6	2.4	1.5
C18:1	48.8		40.4	70.9	78.8
C18:2	30.2		37.9	9.8	10.0
C18:3	9.4		0.4	0.5	1.1
C20:0	0.6		1.0	0.23	
C20:1	1.1		0.3	0.36	
C22:0	0.4		1.4		
C22:1	0.2				
C24:0	0.2				
C24:1	0.2				
其他			2.4	3.2	0.1
合计	100	100	100	100	100

1.3 空腹体重、Lee 氏指数及饲料消耗量

各组小鼠每周称量体重 1 次,称重前一夜禁食不禁水,第 2 天清晨称量空腹体重并记录,每隔 1 d 更换饲料和水,称量饲料消耗量。饲料消耗量按 g/只统计,并计算饲料食物功效比,即小鼠体重平均每增长 1 g 所消耗饲料的能量(kJ/g)。

$$\text{Lee 氏指数} = \sqrt[3]{\frac{\text{体重(g)}}{\text{身长(cm)}}}$$

1.4 血清指标

小鼠麻醉后,取腹主动脉采集血样,3000 ~ 4000 r/min 离心,上清液待测。检测指标包括:甘油三酯(triglyceride, TG),采用 GPO-PAP 酶法;总胆固醇(TC),采用 CHOD-PAP 酶法;高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-

C),均采用 PEG-6000 沉淀法。

1.5 肝脏和体脂肪重量

小鼠处死后立即分离肝脏和两侧附睾白色脂肪垫并称量。

1.6 肝脏和白色脂肪组织(white adipose tissue, WAT)相关指标

取各组肝脏和附睾脂肪组织 100 mg,用 0.9% 氯化钠注射液按 10% 浓度制作组织匀浆,700 r/min 离心 15 min,去除沉淀,取上清液待测。蛋白浓度测定采用 BCA 法,小牛血清白蛋白为标准品。肝脏中 TG、TC、HDL-C、LDL-C、磷脂(phosphoglycerides, PL)测定方法同血清。附睾脂肪垫中 cAMP、蛋白激酶 A (protein kinase A, PKA)、激素敏感脂酶(hormone sensitive lipase, HSL)及甘油三酯脂酶(adipose triglyceride lipase, ATGL)浓度或活性采用 ELISA 法测定。

1.7 肝脏和白色脂肪形态学观察

取不同组别的小鼠肝脏和附睾脂肪垫组织于 10% 福尔马林溶液固定,经脱水、漂洗、包埋、切片、HE 染色、封片干燥后,于 400 倍显微镜下观察并照相。对于脂肪组织切片,随机选择左上、左下、右上、右下 4 个视野,计数完整脂肪细胞数量,目镜测微尺测量细胞长径和短径,取各视野观察值的均值代表每个切片 400 倍视野下脂肪细胞数量。

1.8 白色脂肪组织中 ATGL 和 HSL mRNA 水平检测

采用实时荧光定量(real-time)PCR 法检测,按 Trizol 试剂的使用操作步骤经总 RNA 提取、反转录 PCR、引物合成以及相应的 real-time PCR 反应程序及反应体系进行实验,引物设计采用升级版的 Primer 6.0 和 Oligo 6 软件包设计。各基因扩增引物序列见表 3。

表 3 基因扩增引物序列

Table 3 Sequence of primers for quantitative real-time PCR

基因	Accession No.	序列	产物长度/bp
β-actin	NM_007393	上游	5'-GAGACCTTCAACACCCCAGC-3'
		下游	5'-ATGTCACGCACGATTTC-3'
HSL	NM_001039507	上游	5'-CAGAAGGCACTAGGCGTGATG-3'
		下游	5'-GGGCTFGCGTCCACTTACTTC-3'
ATGL	NM_001163689	上游	5'-GGTGCCAACATTATTGAGGT-3'
		下游	5'-GTCACCTCTGCCTGAGAATTG-3'

反应条件:预变性 95 °C、2 min,变性 95 °C、20 s,退火 58 °C、25 s,延伸 72 °C、30 s,共 45 个循环。目的基因表达采用 Ct 值法,即根据各样品基因扩增过程中荧光信号强度达到临界域所需要的

循环数(threshold cycle, Ct),为排除操作过程中加样等误差所引起的起始 mRNA 拷贝数不同,以各样品基因的 Ct 值与其相应内参照 β-actin 基因的 Ct 值之差(ΔCt)来表示,表示方法 2^{-ΔΔCt},即

为 $2^{\Delta Ct(\text{actin}) - \Delta Ct(\text{target gene})}$ 。

1.9 统计学分析

采用 SPSS 13.0 统计软件包进行数据处理, 所有数据均采用 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 方差齐时组间比较采用 LSD 法, 方差不齐时组间比较采用秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

表 4 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠体重及体脂的影响

Table 4 Effects of oils on body weight and body fat in C57BL/6J mice fed high fat diet ($n=15, \bar{x} \pm s$)

组别	初始体重/g	终体重/g	体重增长量/g	肝脏重/g	附睾脂肪垫重/g	体脂比/%	Lee 氏指数
大豆油	26.64 ± 0.61	36.39 ± 3.08	9.76 ± 3.03	1.52 ± 0.21	1.81 ± 0.52	4.86 ± 1.20	1.54 ± 0.04
MCT	26.60 ± 0.59	33.64 ± 2.99 ⁽¹⁾	7.10 ± 3.02 ⁽¹⁾	1.45 ± 0.13	1.05 ± 0.50 ⁽¹⁾	3.24 ± 1.25 ⁽¹⁾	1.50 ± 0.06 ⁽¹⁾
花生油	26.63 ± 0.62	34.24 ± 2.40 ⁽¹⁾	7.61 ± 2.24 ⁽¹⁾	1.34 ± 0.12 ^(1,2)	1.25 ± 0.48 ⁽¹⁾	3.86 ± 1.41	1.51 ± 0.04 ⁽¹⁾
橄榄油	26.61 ± 0.61	34.20 ± 2.20 ⁽¹⁾	7.59 ± 2.63 ⁽¹⁾	1.42 ± 0.08	1.40 ± 0.44 ⁽¹⁾	3.64 ± 1.34 ⁽¹⁾	1.51 ± 0.03 ⁽¹⁾
茶油	26.61 ± 0.60	34.03 ± 2.23 ⁽¹⁾	7.52 ± 2.08 ⁽¹⁾	1.42 ± 0.13	1.39 ± 0.51 ⁽¹⁾	3.55 ± 1.57 ⁽¹⁾	1.51 ± 0.03 ⁽¹⁾
P	>0.05	0.032	0.045	0.021	0.009	0.046	0.027

注: 经 ANOVA 检验 (1) 与大豆油比较 $P < 0.05$; (2) 与 MCT 比较 $P < 0.05$

2.2 食物功效比

由表 5 可见, MCT、花生油、橄榄油及茶油组与大豆油组相比, 小鼠饲料消耗量、能量摄入量及食物功效比差异均无统计学意义。

2.3 血脂变化

由表 6 可见, 研究结束时, MCT 组血清 TG、TC、LDL-C 均显著低于大豆油组 ($P < 0.05$)。茶油组血清 TG 显著低于大豆油组 ($P < 0.05$)。其余各组血脂指标与大豆油组相比差异均无统计学意义。

2 结果

2.1 体重及体脂

由表 4 可见, 各组小鼠初始体重无显著性差异, 研究结束时, MCT、花生油、橄榄油及茶油组小鼠终体重、体重增长量、附睾脂肪垫重量及 Lee 氏指数均显著低于大豆油组 ($P < 0.05$)。MCT、橄榄油组及茶油组小鼠体脂比显著低于大豆油组 ($P < 0.05$)。

表 5 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠食物摄入量的影响

Table 5 Effects of oils on diet intake in C57BL/6J mice fed high fat diet ($n=15, \bar{x} \pm s$)

组别	饲料消耗量/(g/d)	能量摄入量/(kJ/d)	食物功效比/(kJ/g)
大豆油	4.30 ± 0.97	80.83 ± 18.23	600.05 ± 38.59
MCT	4.92 ± 1.83	92.53 ± 34.49	868.77 ± 140.19
花生油	4.34 ± 1.65	81.66 ± 30.95	616.01 ± 102.50
橄榄油	5.52 ± 3.01	103.92 ± 56.68	672.08 ± 152.80
茶油	4.56 ± 1.35	85.83 ± 25.36	767.47 ± 188.62

表 6 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠血脂的影响

Table 6 Effects of oils on blood lipids in C57BL/6J mice fed high fat diet ($n=15, \bar{x} \pm s$) mmol/L

组别	TG	TC	HDL-C	LDL-C
大豆油	0.79 ± 0.11	3.70 ± 0.39	2.96 ± 0.54	0.86 ± 0.24
MCT	0.65 ± 0.10 ⁽¹⁾	3.21 ± 0.27 ⁽¹⁾	2.84 ± 0.42	0.65 ± 0.12 ⁽¹⁾
花生油	0.76 ± 0.11	3.62 ± 0.38	2.88 ± 0.40	0.75 ± 0.10
橄榄油	0.78 ± 0.15	3.38 ± 0.34	2.65 ± 0.38	0.70 ± 0.16
茶油	0.66 ± 0.09 ⁽¹⁾	3.55 ± 0.26	2.76 ± 0.35	0.70 ± 0.11
P	0.003	0.024	>0.05	0.028

注: 经 ANOVA 检验 (1) 与大豆油比较 $P < 0.05$

2.4 肝脏脂质指标

由表 7 可见, 研究结束时, MCT 组肝脏 TG、

TC 均显著低于大豆油组 ($P < 0.05$)。其余各组与大豆油组相比差异没有统计学意义。

表 7 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠肝脏脂质的影响

Table 7 Effects of oils on liver lipids in C57BL/6J mice fed high fat diet ($n=15, \bar{x} \pm s$) $\mu\text{mol/g pro}$

组别	TG	TC	HDL-C	LDL-C	PL
大豆油	25.24 ± 3.91	2.92 ± 0.30	0.33 ± 0.03	0.37 ± 0.19	6.59 ± 0.68
MCT	20.34 ± 5.91 ⁽¹⁾	2.60 ± 0.25 ⁽¹⁾	0.37 ± 0.10	0.25 ± 0.09	6.30 ± 0.46
花生油	26.54 ± 2.6	2.75 ± 0.63	0.40 ± 0.10	0.28 ± 0.13	6.04 ± 0.68
橄榄油	24.32 ± 4.75	2.84 ± 0.40	0.35 ± 0.04	0.29 ± 0.10	6.60 ± 0.61
茶油	26.0 ± 5.86	3.06 ± 0.53	0.38 ± 0.05	0.29 ± 0.10	6.69 ± 0.76
P	0.043	0.017	>0.05	>0.05	>0.05

注: 经 ANOVA 检验 (1) 与大豆油比较 $P < 0.05$

2.5 脂肪动员相关酶

由表 8 可见, 研究结束时, MCT 组白色脂肪组织中 cAMP、PKA、HSL 及 ATGL 均显著高于大

豆油组 ($P < 0.05$)。花生油组白色脂肪组织中 PKA 显著高于大豆油组 ($P < 0.05$)。

表 8 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠脂肪动员相关酶的影响

Table 8 Effects of oils on enzyme activity of lipid mobilization in C57BL/6J mice fed high fat diet ($n = 15 \bar{x} \pm s$)

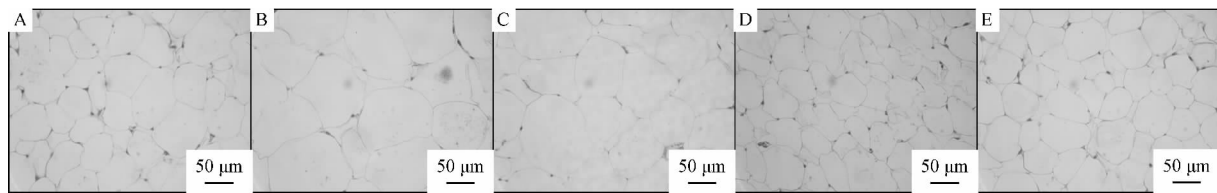
组别	ATGL/(ng/mg pro)	HSL/(ng/mg pro)	PKA/(ng/mg pro)	cAMP/(pg/mg pro)
大豆油	0.47 ± 0.12	0.36 ± 0.17	14.30 ± 4.68	31.28 ± 6.35
MCT	0.62 ± 0.14 ⁽¹⁾	0.92 ± 0.53 ⁽¹⁾	19.99 ± 4.13 ⁽¹⁾	47.14 ± 11.52 ⁽¹⁾
花生油	0.54 ± 0.13	0.48 ± 0.13	18.53 ± 3.77 ⁽¹⁾	40.09 ± 25.68
橄榄油	0.49 ± 0.14	0.28 ± 0.07	13.00 ± 2.80	36.85 ± 10.12
茶油	0.54 ± 0.17	0.38 ± 0.16	18.06 ± 7.65	36.02 ± 20.24
P	0.040	0.019	0.000	0.026

注: 经 ANOVA 检验, (1) 与大豆油比较 $P < 0.05$

2.6 白色脂肪和肝脏形态学变化

由图 1 可见, 研究结束后, MCT、花生油、橄榄油和茶油组的白色脂肪组织单个视野的脂肪细胞

长径、短径均显著低于大豆油组 ($P < 0.05$)。由表 9 可见, 同时, MCT 组又显著低于花生油和茶油组 ($P < 0.05$)。



A: MCT; B: 大豆油; C: 花生油; D: 橄榄油; E: 茶油

图 1 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠脂肪细胞体积的影响 (×400)

Figure 1 Effects of oils on size of adipocytes in C57BL/6J mice fed high fat diet (×400)

表 9 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠脂肪细胞体积的影响

Table 9 Effects of oils on size of adipocytes in C57BL/6J mice fed high fat diet ($n = 15, \bar{x} \pm s$) μm

组别	长径	短径
大豆油	130.80 ± 13.88	79.23 ± 12.28
MCT	62.04 ± 8.83 ⁽¹⁾	46.06 ± 9.25 ⁽¹⁾
花生油	93.12 ± 11.77 ^(1, 2)	71.06 ± 9.86 ^(1, 2)
橄榄油	62.81 ± 5.10 ⁽¹⁾	43.76 ± 3.34 ⁽¹⁾
茶油	63.77 ± 9.06 ^(1, 2)	52.30 ± 8.28 ⁽¹⁾
P	0.000	0.000

注: 经 ANOVA 检验, (1) 与大豆油比较, $P < 0.05$; (2) 与 MCT 比较 $P < 0.05$

由图 2 可见, MCT、橄榄油和茶油组小鼠肝脏

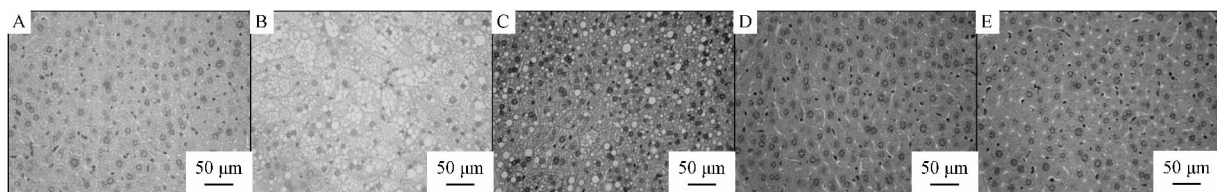
未见脂肪组织浸润, 而大豆油和花生油组的小鼠肝脏可见明显的脂肪组织浸润。

2.7 白色脂肪中 ATGL 及 HSL mRNA 变化

由表 10 可见, 研究结束时, MCT 组白色脂肪组织中 ATGL mRNA 及 HSL mRNA 的相对表达量均显著高于大豆油组 ($P < 0.05$), 其余各组与大豆油组相比差异均无统计学意义。

3 讨论

食用油是人类膳食脂肪的重要来源之一, 占人体每天摄入总脂肪的一半左右, 它不仅提供人体需要的能量、必需脂肪酸、脂溶性维生素以及磷脂等, 还含有少量或微量的植物化学物, 例如甾



A: MCT; B: 大豆油; C: 花生油; D: 橄榄油; E: 茶油

图 2 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠肝脏脂肪浸润的影响 (×400)

Figure 2 Effects of oils on fatty infiltration in the livers in C57BL/6J mice fed high fat diet (×400)

表 10 几种油脂对高脂肪饲料喂养的 C57BL/6J 小鼠白色脂肪中 ATGL 和 HSL 表达的影响

Table 10 Effects of oils on expressions of ATGL and HSL mRNA in adipocytes in C51BL/6J mice fed high fat diet (n = 15 $\bar{x} \pm s$)

组别	ATGL	HSL
大豆油	1.48 ± 0.28	0.85 ± 0.47
MCT	4.92 ± 0.13 ⁽¹⁾	6.62 ± 0.77 ⁽¹⁾
花生油	2.06 ± 1.75 ⁽²⁾	2.55 ± 2.30
橄榄油	3.50 ± 2.89	4.08 ± 3.41
茶油	2.34 ± 2.05 ⁽²⁾	3.62 ± 3.00
P	0.044	0.035

注: 经 ANOVA 检验, (1) 与大豆油比较, $P < 0.05$; (2) 与 MCT 比较, $P < 0.05$

醇、角鲨烯、多酚类物质等, 由于油脂种类的不同, 上述营养素或植物化学物的种类、含量也不尽相同。

大豆油是世界上产量最多, 同时也是我国居民最主要的烹调用油之一。COSTA 等^[9]的研究显示摄入大豆油高脂组的 SD 大鼠在连续喂养 60 d 以后, 腹部内侧脂肪垫脂肪细胞形态显著增大。随着现代高热量食物的多样化, 油脂摄入渐渐超标, 所以在本实验中用肥胖模型模拟人类肥胖的自然进程, 并将大豆油列为研究油脂, 且作为对照油脂进行研究。橄榄油在心血管疾病的控制中有着重要的作用, 以橄榄油为主要食用油的地中海地区的人群, 虽然其体重、BMI、腰围等指标与北美例如美国人等相近, 但是其心血管疾病的发病率和死亡率仅为北美的 1/10^[2]。花生油富含油酸, 属于单不饱和脂肪酸 (MUFA), 适量摄入能够降低血清 TC 含量, 升高 HDL 水平, 减少其在血管上的沉积, 具有预防心血管疾病的作用^[3]。黄翠莉等^[4]研究表明茶油能够改善 SD 大鼠的血脂谱, 显著降低 TG、TC 水平, 但升高 HDL-C 不如橄榄油明显。MCT 油脂是将中链脂肪酸导入菜籽油产生的含有中长链脂肪酸的新型健康食用油。

本研究利用高脂肪饲料诱导 C57BL/6J 小鼠肥胖模型, 比较不同油脂的作用。根据 AOYAMA 等^[6]和 XUE 等^[10]在人群研究中得出每日摄入约 25 ~ 30 g 中长链甘油三酯可以改善脂代谢, 相当于每日摄入约 3.25 ~ 3.9 g MCFA, 按照每只小鼠平均体重 35 g 推算, 确定 2% 的干预剂量。实验开始时购买 4 ~ 5 周龄的幼鼠, 用高脂饲料进行干预, 4 周后选择体重高于普通饲料喂养组小鼠体重 10% 的个体作为肥胖模型, 这个期间是小鼠的生长旺盛时期, 体重增长较快, 约 11 g; 将肥胖模型中的小鼠按每组 15 只随机分为 5 组, 初始体重并

无显著性差异, 此后平均体重增加 7 g 左右, 实验干预造成组间体重的差异结果, 由于小鼠已经在成年期, 没有生长期增长迅速。

本实验观察到 MCT、花生油、橄榄油及茶油组小鼠的体重、体脂肪重及白色脂肪细胞的体积 (长径、短径) 均显著低于大豆油对照组, 提示这 4 种油脂可减少高脂肪饲料导致的体脂肪聚集。此外, 血清指标结果显示 MCT 组的 TG 浓度降低, 提示 MCT 能快速氧化, 并促进了脂肪动员, 同时 MCT 组血清 TC、LDL-C 均显著低于大豆油组, 与临床研究结果一致^[10]。研究结果还显示 MCT 组白色脂肪组织的脂肪动员相关酶包括 cAMP、PKA、HSL 及 ATGL 水平均显著高于大豆油组, 提示 MCFA 通过 cAMP 的调节, 增加 PKA 水平, 从而增加 HSL 磷酸化, 促进脂肪动员。另外, MCT 组小鼠白色脂肪组织中的 ATGL 和 HSL 的 mRNA 表达量均显著高于大豆油组, 从转录水平证实了 MCT 增加体内脂肪动员很可能是通过 ATGL、HSL 等发挥作用的。

从本研究的结果来看, MCT 具有降低体重、体脂和改善血脂的作用。虽然 MCT 能够快速被氧化、减少体脂肪积累、改善脂代谢等, 但其具有低发烟点及容易起泡的特性, 不宜直接用作烹调油^[11]。因此, 将 MCT 通过酯交换技术生产中链脂肪酸甘油三酯作为食用油保留了 MCT 的功能和作用, 且克服了上述缺陷。

综上所述, 与大豆油相比, MCT、花生油、橄榄油及茶油可降低高脂饲料诱导的肥胖小鼠的体重和体脂, MCT 还能降低血清 TG、TC、LDL-C 和激活脂肪动员相关酶系。在改善血脂方面, 橄榄油和茶油没有 MCT 明显, 但与大豆油和花生油相比也并不会导致明显的肝脏脂肪变性, 是值得推荐的食用油。

参考文献

- [1] NISHINA P M, LOWE S, VERSTUYFT J, et al. Effects of dietary fats from animal and plant sources on diet-induced fatty streak lesions in C57BL/6J mice [J]. *J Lipid Res*, 1993, 34: 1413-1422.
- [2] WARDHANA, SURACHMANTO E E, DATAU E A. The Role of omega-3 fatty acids contained in olive oil on chronic inflammation [J]. *Acta Med Indones-Indones J Int Med*, 2011, 43: 138-143.
- [3] KRIS-ETHERTON P M, PEARSON T A, WAN Y, et al. High-monounsaturated fatty acid diets lower both plasma cholesterol and triacylglycerol concentrations [J]. *Am J Clin Nutr*, 1999, 70: 1009-1015.

(下转第 914 页)

- plasma by liquid chromatography-electrochemical detection with multi-wall carbon nanotube-modified glassy carbon electrode [J]. *Biomed Chromatogr*, 2011, 25(8): 938-942.
- [12] TODOROVSKI T, FEDOROVA M, HOFFMANN R. Mass spectrometric characterization of peptides containing different oxidized tryptophan residues [J]. *J Mass Spectrom*, 2011, 46(10): 1030-1038.
- [13] FLOEGEL A, STEFAN N, YU Z, et al. Identification of serum metabolites associated with risk of type 2 diabetes using a targeted metabolomic approach [J]. *Diabetes*, 2013, 62(2): 639-648.
- [14] YUAN Kailong, KONG Hongwei, GUAN Yufeng, et al. A GC-based metabolomics investigation of type 2 diabetes by organic acids metabolic profile [J]. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 2007, 850(1-2): 236-240.
- [15] DAYER M R, SAFARI I, DAYER M S. New evidence on hypoglycemic effect of quinolinic acid in diabetic rats [J]. *Pak J Biol Sci*, 2009, 12(14): 1025-1030.
- [16] HUO Taoguang, CAI Shuang, LU Xiumei, et al. Metabonomic study of biochemical changes in the serum of type 2 diabetes mellitus patients after the treatment of metformin hydrochloride [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2009, 49(4): 976-982.
- [17] 彭全辉, 王之盛, 周安国. 色氨酸分解代谢对 T 细胞分化增殖的影响 [J]. *中国饲料*, 2007(18): 4-6.
- [18] CALLE M C, FERNANDEZ M L. Inflammation and type 2 diabetes [J]. *Diabetes Metab*, 2012, 38(3): 183-191.
- [19] KOENIG P, NAGL C, NEURAUER G, et al. Enhanced degradation of tryptophan in patients on hemodialysis [J]. *Clin Nephrol*, 2010, 74(6): 465-470.
- [20] SCHOR J M, FRIEDEN E. Induction of tryptophan peroxidase of rat liver by insulin and alloxan [J]. *J Biol Chem*, 1958, 233(3): 612-618.
- [21] ALLEGRI G, RAGAZZI E, BERTAZZO A, et al. Tryptophan metabolism along the kynurenine pathway in rats [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2003, 527: 481-496.
- [22] ALLEGRI G, ZACCARIN D, RAGAZZI E, et al. Metabolism of tryptophan along the kynurenine pathway in alloxan diabetic rabbits [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2003, 527: 387-393.

收稿日期: 2013-05-13

(上接第 906 页)

- [4] 黄翠莉, 吴苏喜, 刘瑞兴, 等. 油茶籽油对大鼠降血脂和预防脂肪肝的影响 [J]. *食品科学*, 2011, 32: 332-335.
- [5] 尹岭, 张笑明, 李莉, 等. 茶油对兔血脂及动脉粥样硬化的影响 [J]. *食品科学*, 2011, 32: 289-292.
- [6] AOYAMA T, NOSAKA N, KASAI M. Research on the nutritional characteristics of medium-chain fatty acids [J]. *J Med Invest*, 2007, 54: 385-388.
- [7] 张永, 刘英华, 张新胜, 等. 中链甘油三酯对 C57BL/6J 小鼠棕色脂肪组织的影响 [J]. *军医进修学院学报*, 2011, 32: 1155-1157.
- [8] 申瑞玲, 马婧. 四种肥胖动物造模方法的比较 [J]. *动物医学进展*, 2007, 28: 105-108.
- [9] COSTA C A, CARLOS A S, DOS SANTOS ADE S, et al. Abdominal adiposity, insulin and bone quality in young male rats fed a high-fat diet containing soybean or canola oil [J]. *Clinics (Sao Paulo)*, 2011, 66: 1811-1816.
- [10] XUE C, LIU Y, WANG J, et al. Chinese hypertriglyceridemic subjects of different ages responded differently to consuming oil with medium- and long-chain fatty acids [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2009, 73: 1711-1717.
- [11] 薛长勇, 吴坚. 生物活性脂类: 中链脂肪酸及其与脂代谢和糖代谢 [J]. *临床药物治疗杂志*, 2011, 9: 4-7.

收稿日期: 2013-05-29