

一种新型结构脂理化性质与功能特性的比较研究

曹昱

(华南理工大学生物科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文研究了一种新型 LSL 型结构脂。通过理化性能评价发现, 这种新型结构脂在外观、酸价、皂化价和折光指数等指标上与其长链脂肪酸的酰基供体油大豆油的相关指标十分接近, 但烟点比大豆油低, 新型结构脂分子量较小而具有更低的熔点。由此可见, 新型结构脂可对普通食用油脂进行全替代使用。随后通过餐后血脂实验和动物成长实验对新型结构脂进行了功能性评价。结果发现, 新型结构脂可使小鼠的餐后血液甘油三酯水平降低。在动物成长实验中, 对小鼠饲喂第 6 周时, 发现高剂量新型结构脂组的小鼠平均体重低于猪油组, 血脂分析结果显示新型结构脂组小鼠的血液总胆固醇浓度具有降低的趋势。肝脏病理学切片观察发现, 中剂量和高剂量新型结构脂组小鼠的肝脏中脂肪滴的数量和大小都会相对减少。以上结果说明新型结构脂具有控制血脂升高, 防止脂肪积累的功能, 并具有完全替代普通油脂使用的潜力。

关键词: 结构脂; 脂肪酶; 动物实验; 抑制肥胖

文章编号: 1673-9078(2017)8-51-57

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.009

Physicochemical and Functional Properties of a Novel LSL Type Structured Lipid

CAO Yu

(School of Bioscience and Bioengineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A novel long-short-long (LSL) type structured lipid was studied in this paper. The physicochemical properties of the LSL lipids were evaluated, and the results indicated that the appearance, acid value, saponification value, refractive index, and other indicators were very similar to those of soybean oil that served as the acyl donor for long-chain fatty acids of the structured lipid. However, compared to soybean oil, the structured lipid had a lower smoke point and melting point, and smaller molecular weight. Therefore, the ordinary edible oil could be completely replaced by the structured lipid. Subsequently, the functional properties of the new structured lipid were evaluated by postprandial blood lipid test and animal growth experiment. It was found that the novel structured lipid could reduce the postprandial blood triglyceride levels in mice. During the animal growth experiment, after feeding for six weeks, the group that received high fat diet containing high dosage of structured lipids had lower body weight, compared with the control group fed high fat diet containing high dosage of lard. The blood lipid levels, corresponding to the total cholesterol (TC) content of blood, in the group that received high fat diet containing medium and high dosages of structured lipid showed a decreasing trend compared with that of the control group. The observation of pathological liver slices showed that the number and size of fat droplets in the liver of medium- and high-dose groups were relatively reduced. In summary, our results showed that the novel low-calorie structured lipid could suppress the increase in the blood lipid level, prevent the accumulation of body fat, and have the potential to completely replace the ordinary edible oil.

Key words: novel structured lipid; lipase; animal experiment; obesity prevention

肥胖是世界上受到关注最广泛的慢性病之一, 因其可提高一系列的疾病的患病风险, 如: 糖尿病、高血压、心脏病、胆囊炎以及癌症等, 对人类的健康和寿命产生了严重威胁。科学家们已发现许多复杂的因素都可以引起肥胖, 其中饮食是最重要因素之一,

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2014AA093601)

作者简介: 曹昱 (1984-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 食品与油脂科学工程

而饮食构成中的脂肪具有非常关键的影响作用。因此, 低热量油脂和油脂替代物成为研究热门。目前已有许多商品化的产品在面市, 但其各自都存在缺陷, 市场需要一种更完善的产品。LSL 型结构脂就在这样的背景下被开发出来, 其分子结构是按照油脂在体内代谢的过程进行设计的, 能够完全替代普通油脂使用, 还能像普通油脂一样提供必需脂肪酸, 同时降低了使用时的安全风险^[1]。食物甘油三酯油脂在进入体内肠道后会先被胰脂肪酶作用水解掉 sn-1,3 位的脂肪酸, 产

生成两分子游离脂肪酸和一分子的单甘酯^[2]；脂肪酸和单甘酯通过主动运输作用被转运进入小肠绒毛细胞，在甘油三酯合成酶的作用下重新合成甘油三酯进入脂肪组织储存^[3]。而 LSL 型结构脂进入体内后会被胰脂肪酶水解成脂肪酸和短链单甘脂，其中中链单甘脂可迅速被代谢分解，从而使甘油三酯被小肠绒毛细胞的 TAG 合成酶重新合成时因缺少单甘酯作为底物模板而无法进行，这使得结构脂可以有效防止油脂在体内的积聚。

但目前针对此新型结构脂的研究较少，为使其能够进行有效的推广应用，有必要对其性质、性能及降脂功效进行深入研究。因此，本研究对 LSL 新型结构脂的基本理化性质和氧化稳定性等方面进行了深入探讨，为实际应用提供参考。通过餐后血脂实验和动物成长实验对新型 LSL 型结构脂进行了评价，对新型结构脂的降脂效果进行评估。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新型结构脂使用酶催化法，以大豆油和丁酸甘油酯为原料进行合成，并用分子蒸馏方法进行分离纯化^[1]；脂肪酸甲酯 (FAMES, 纯度≥98%)，用甲醇钠催化大豆油制取，并经过分子蒸馏精制而成；三丁酸甘油酯(CAS No. 60-01-5)，购自阿拉丁化学有限公司(上海)；固定化酶 Lipozyme RM IM(来源于 *Rhizomucor miehei*)购自 Novozymes A/S (Bagsvaerd, Denmark)；三油酸甘油酯标准品(CAS No.122-32-7)和三棕榈酸甘油酯标准品(CAS No.555-44-2)，购买于 Sigma-Aldrich(中国)公司；37 脂肪酸甲酯混合物标准品(CAS No.113 47885-U)；大豆油购自当地，购买金龙鱼大豆油；甘油二酯(DAG, 纯度≥95%)，使用大豆油和甘油的甘油解生产；甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、血尿素氮(BUN)和血液分析试剂盒购自中生北控生物科技股份有限公司。

1.1.1 实验动物

NIH 雄性小鼠 208 只，3 周龄，平均体重 25 g，由广东省医学实验动物中心提供，动物合格证号：GDMLAC 2007A056；实验动物使用许可证号：GDPUAEC No. 200902。

1.1.2 动物饲料

基础饲料使用 AIN-93G 饲料，其配方为：玉米淀粉 400 g/kg、酪蛋白 200 g/kg、麦芽糊精 132 g/kg、蔗糖 100 g/kg、膳食纤维 50 g/kg、矿物质 35 g/kg、维生

素 10 g/kg、L-胱氨酸 3 g/kg 和氯化胆碱 2.5 g/kg。高脂饲料不同种类和含量的油脂加入基础饲料制成。为减小误差，避免因高含量油脂对饲料气味、适口性的影响，所有油脂的添加量控制为 10 wt%，基础饲料和含高脂饲料由广东省动物实验中心配制。

1.2 主要仪器设备

高效液相色谱仪，Waters 公司；Agilent 7890A 气相色谱仪，安捷伦科技有限公司；743 食用油氧化稳定性测定仪，瑞士 Metrohm 公司；MD-S80-III 分子蒸馏装置，广州汉维机电有限公司；差示扫描量热仪 (DSC) Q100，美国 Thermo 公司；TDL-40B 台式离心机，上海安亭科学仪器厂；ML204 电子天平，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司；RH B 2 S25 加热磁力搅拌器，德国 IKA 公司；WSL-2 罗维朋比色计，上海精密科学仪器有限公司；Cobas 8000 自动血液分析仪，Roche 公司；荧光生物显微镜 40FL Axioskop，德国 Zeiss 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 油脂组成分析

从 Robert 等人所描述的方法改进而来^[4]。取样品 10 μ L，溶于 1 mL 正己烷中，混匀后用 0.2 μ m 滤膜过滤，最后用气相色谱检测。使用 Agilent 7890A GC 气象色谱仪和火焰离子检测器(FID)，分析条件为：色谱柱：DB-1HT (30 m \times 0.25 mm i.d., 0.1 μ m)；进样口温度，350 $^{\circ}$ C；检测器的温度，380 $^{\circ}$ C；柱前压，20 psi；压力，0.15 MPa；分流比，20:1；载气，N₂；载气流速，1.1 mL/min；进样量，1 μ L。升温方法：150 $^{\circ}$ C 维持 2 min，以 10 $^{\circ}$ C/min 的速度升温至 280 $^{\circ}$ C，维持 15 min。再以 10 $^{\circ}$ C/min 升至 350 $^{\circ}$ C，维持 20 min。因为在高温柱中，极性较弱，物质出峰保留时间与分子量成正比，便于物质的组成进行定性分析。通过三丁酸甘油酯、三油酸标准品和三棕榈酸标准品的测定对质量校正因子修正，用面积归一化法计算甘油三酯的含量。

1.3.2 脂肪酸组成分析

使用 Christopherson 和 Glass 的常温甲酯化法进行总脂肪酸分析^[5]。使用格式退化法 (Grignard degradation) 进行结构脂的脂肪酸组成分析^[6]。

1.3.3 油脂的理化指标测定

酸值按照 ISO 660:1996 进行测定；皂化值按照 ISO 3657:2002 进行测定；烟点按照 GB 7653-87B 进行测定；过氧化值按 ISO 3960:2001 进行测定；色值参考 ISO 15305-1998 动植物油脂罗维朋色泽的测定；折光指数按照 GB 5527-85 进行测定。

1.3.4 结构脂产品 DSC 融化曲线

使用差示扫描量热仪 (DSC) 测定不同油脂样品的熔点范围。称取 5 mg 样品于铝制坩埚内, 平铺压紧然后密封, 将坩埚放入量热池内, 以空的铝坩埚作为空白对照。升温程序为: 10 °C/min 的速度冷却至 -40 °C, 保持 30 min, 然后以 10 °C/min 的速度加热至 80 °C。

1.3.5 储存稳定性的研究

取油脂样品 50 g 分别添加各种抗氧化剂, 置于 100 mL 烧杯中, 充分混合后, 放入恒温箱内进行加速氧化, 恒温箱温度为 45±1 °C, 每 5 d 取一次样, 使用碘量滴定法测定样品的过氧化值 (POV), 通过过氧化值值升高的速度来衡量结构脂的抗氧化效果。

将结构油脂放置于室温和 45±1 °C 的烘箱内保存, 每周取样一次, 测定比较结构油脂的结构保存稳定性。

1.3.6 氧化稳定性的研究

取油脂样品 50 g 分别添加各种抗氧化剂, 置于 100 mL 烧杯中, 充分混合后, 各称取 3.0 g 样品置于 Rancimat 测量仪的反应池中, Rancimat 测量仪需先预热至 110 °C, 然后接好测量瓶, 调节空气流量为 20 L/h, 插上双铂电极, 记录不同时段样品的电导率变化情况, 计算求出诱导时间, 以诱导时间的长短衡量氧化稳定性^[7,8]。

1.3.7 小鼠降脂实验

将 160 只 NIH 小鼠随机分配于 32 个小鼠笼中, 每笼 5 只, 然后分为 8 组, 即空白组、高脂对照组和 6 个不同剂量的新型结构脂实验组和大豆油对照实验组, 每组 20 只, 分组规则见表 4 所示。其中, 除空白组以外, 所有高脂实验组的油脂添加量为 10%, 其余为 88.5%基础饲料、1%胆固醇、0.3%胆酸盐和 0.2%丙硫氧基嘧啶。实验期间各组小鼠自由饮水, 空白组饲喂基础饲料, 高脂对照组饲喂含 10%猪油的饲料, 新型结构脂实验组饲喂含 1%、5%和 10%新型结构脂的饲料, 大豆油对照组饲喂含 1%、5%和 10%大豆油的饲料。每笼小鼠每日的采食量限定为 50 g±1 g, 每周记录小鼠体重。6 周后, 所有小鼠断食 24 h 后进行称重; 眼角取血, 血液 4000 r/min 离心 2 min, 取上层血清用于血脂指标的测定; 取肝脏做显微病理观察。

1.3.8 肝脏切片观察

将小鼠的肝脏和肾脏清洗后至于 10%甲醛溶液中固定 24 h。肝脏器官切取右叶纵断面, 约 4~5 mm³; 肾脏纵向沿最大剖面切取一半。器官经固定后, 流水冲洗过夜。先依次使用不同浓度的乙醇溶液(70%、80%和 90%)脱水各 30 min, 再放入乙醇溶液(95%和 100%)各脱水两次, 每次 20 min。分别使用二甲苯酒

精溶液(混合比例 1:1)和二甲苯石蜡混合溶液(混合比例 1:1)各透明 15 min, 再放入 55 °C 石蜡溶液中进行蜡透 60 min。将石蜡模子在酒精灯上稍加热后置于桌面上, 倒入少许石蜡, 将器官材料切面朝下放入蜡模中, 再放上包埋盒, 轻轻倒入熔蜡。将已固定好的石蜡块置于切片机上, 切取 5~10 μm 厚度的组织切片, 在载玻片上展开贴好切片。将切片置于染色缸中 60 °C 复水, 倒入苏木精染液染色 20 min 清洗后脱水使用伊红乙醇液(0.5%)复染, 最后脱水、透明后用中性树胶封藏。细胞核会被苏木素染成蓝色, 细胞质被伊红染色呈粉红色。用荧光显微镜观察病理切片。

1.3.9 数据处理

使用 SPSS 17.0 统计学软件对数据进行方差分析 (ANOVA) 分析。方差分析采用 Tukey 检验, $p < 0.05$ 时为显著性差异。所有数据取 3 次测定的平均值。结果均以平均值±标准偏差的方式表示。

2 结果与讨论

2.1 结构脂与大豆油的脂肪酸组成比较

新型结构脂与大豆油的脂肪酸组成如表 1 所示, 可以发现除去丁酸后, 新型结构脂的脂肪酸组成与其脂肪酸供体大豆油的脂肪酸组成接近。说明新型结构脂可以提供与脂肪酸供体一致的必需脂肪酸, 此新型结构脂可以完全替代传统食用油脂长期使用, 避免了市面上部分油脂替代产品脂肪酸组成单一的缺点。

表 1 新型结构脂与大豆油的脂肪酸组成比较

Table 1 Triacylglycerol composition of structured lipid and soybean oil

脂肪酸	新型结构脂/(mol%)		大豆油/(mol%)
	Total	SN-2	
C4:0	32.14±0.84	81.83±0.21	ND*
C16:0	5.99±0.46	1.71±0.36	11.23±0.12
C18:0	3.17±0.14	1.06±0.28	4.24±0.26
C18:1	16.41±0.34	7.31±0.20	23.41±0.18
C18:2	38.52±0.76	5.15±0.24	53.26±0.30
C18:3	3.77±0.23	2.93±0.18	7.86±0.16

注: *ND 表示未检出。

2.2 结构脂与大豆油的理化指标比较

对新型结构脂和大豆油的一些理化指标进行了分析, 结果见表 2 所示。可以发现新型结构脂产品在外观、酸价、皂化价和折光指数等与大豆油的相关指标十分相近; 在过氧化值及色泽方面则比大豆油的指标高一些, 这是因为是在实验室制备小规模样品过程中,

因为无法形成规模，就无法避免部分金属离子等杂质的残留，而这些杂质会对油脂的色泽等方面造成一定的影响，尤其在温度较高时对产品的色泽影响较大。但成规模的批量化生产会使情况得到改善。与大豆油相比，新型结构脂产品的烟点较低。这是由新型结构脂甘油三酯的分子结构决定的，与大豆油相比，短链脂肪酸会使新型结构脂的分子量降低，导致油脂的沸

点比具有近似脂肪酸组成的甘油三酯低，所以会相对降低新型结构脂产品的烟点，导致新型结构脂在 220 °C 烟点实验中提前发烟，对其作为煎炸油的应用造成了一定影响。通过理化指标分析发现新型结构脂符合食用油脂国家标准，且可作为普通食用油脂替代使用。

表 2 新型结构脂和大豆油的理化指标

Table 2 Physicochemical indexes of novel structured lipid and soybean oil

检测项目	新型结构脂	大豆油	一级大豆油标准(GB 1535-2003)
透明度	澄清、透明	澄清、透明	澄清、透明
口感评价	无味、口感好	无味、口感好	无气味，口感好
色度(133.3 mm 比色槽)	Y 14.3±0.42, R 2.3±0.06	Y 9.2±0.06, R 0.16±0.00	Y≤20, R≤2
酸值/(mg KOH/g)	ND*	0.11±0.02	≤0.20
皂化值/(mg KOH/g)	189.37±1.07	193.26±1.63	189~195
过氧化值/(mmol/kg)	ND*	1.71±0.16	≤7.5
折光指数(20 °C)	1.47	1.47	1.466~1.470
烟点/°C	214.30±1.20	225±1.80	215

注：ND*表示未检出。

2.3 结构脂的稳定性研究

2.3.1 Rancimat 法测定不同抗氧化剂对新型结构脂的氧化稳定性影响

测定不同抗氧化剂对新型结构脂的氧化稳定性的影响，Rancimat 测试条件为：反应池温度 110 °C，空气流量 20 L/h，实验结果见表 3。发现当抗氧化剂的添加量为 0.02% (200×10⁻⁶) 时，对新型结构脂氧化程度具有较明显的抑制作用。其中 2-叔丁基对苯二酚 (TBHQ) 的抑制效果最明显，其次是茶多酚 (TPP)，最后是二丁基羟基甲苯 (BHT)、生育酚 (VE) 和二叔丁基羟基茴香醚 (BHA)。

表 3 不同抗氧化剂对新型结构脂产品诱导时间的影响

Table 3 Effect of different antioxidants on the time of oxidative induction of novel structured lipid

油样	空白	BHA	VE	BHT	TPP	TBHQ
诱导时间/h	1.52	2.43	2.51	2.73	4.07	5.96

2.3.2 不同抗氧化剂对结构脂的长期氧化稳定性影响

各抗氧化剂对新型结构脂的储存氧化稳定的影响见图 1 所示，可以看出，在抗氧化剂的添加量为 0.02% (200×10⁻⁶) 时，各抗氧化剂对新型结构脂的养护稳定性都具有较明显的促进作用。其中 TBHQ 的抑制效果最明显，其次 TPP，最后是 BHT、VE 和 BHA。

目前国内外有多达 30 余种可用于食品的抗氧化剂，按作用机理可分为供氢体抗氧化剂（链终止剂）、

过氧化物分解剂和增效剂。其中，受到国内外研究者的开发和使用的是酚型链终止剂型抗氧化剂，但随着研究的不断深入，近年来这类抗氧化剂品种的安全性开始受到质疑，目前世界卫生组织 (WHO) 和联合国粮农组织 (FAO) 已将 BHA、BHT 和 TBHQ 定义为 A2 类物质，即暂定安全物质，因此许多发达国家已开始禁用或限用这类抗氧化剂。天然抗氧化剂开始受到研究人员的关注和开发，如维生素 E 和茶多酚。维生素 E 又称为生育酚，是一种脂溶性维生素，中断氧化自由基的氧化作用，还能够结合单线态氧进行淬灭，从而提高油脂的抗氧化能力。茶叶中多酚类物质被总称为茶多酚，包括花青素及花白素、儿茶素、黄酮及其酮醇类、缩酚酸类及酚酸类等物质。

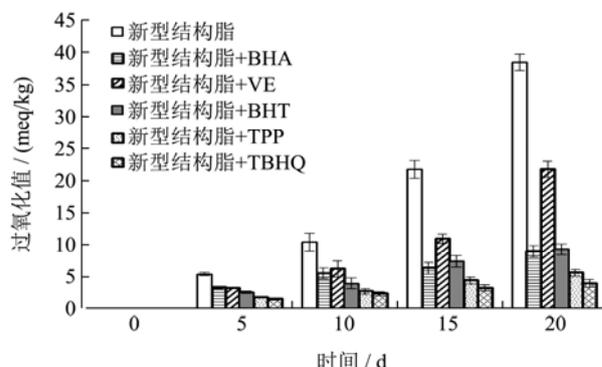


图 1 不同抗氧化剂对新型结构脂的储存氧化稳定的影响

Fig.1 Effect of different antioxidants on the oxidative stability of novel structured lipid

2.3.3 保存稳定性研究

通过计算酰基转移率判断新型结构脂在保存中的结构稳定性, 结果见图 2。发现偏高的保存温度会具有提高结构油脂中的长链脂肪酸的酰基转移率的趋势, 但没有显著性($p>0.05$)。已有研究发现, 甘油二酯油会在 1,2-DAG 和 1,3-DAG 间自动达到 3-4:7-6 的平衡^[9]。低热量油脂具有与甘油二酯接近的分子结构, 但由于封住了裸露的羟基, 使得低热量油脂在储存中的酰基转移发生程度要低于甘油二酯, 但是否会像甘油二酯一样达到类似的平衡比例仍需要更高温更长时间的实验确定。

喂养 6 周的体重记录结果见表 4 所示。由于丙硫氨基嘧啶样品的添加加速了小鼠代谢, 使所有实验组的小鼠的体重明显低于空白组。前 5 周内所有高脂实验组间体重没有明显差异($p>0.05$), 第 6 周时, 只有高剂量实验组的体重相比猪油组体重低, 具有显著性($p<0.05$), 但与高脂大豆油组相比没有显著性差异($p>0.05$)。从数据可以看出新型结构脂相比大豆油具有抑制体重增长的趋势, 说明新型结构脂具有一定降低

防止体重增加的功能, 即使食用过量也不会因为脂肪的蓄积而导致体重的过度增加, 这一结果提示了新型结构脂可提供大鼠生长所需的脂肪酸及能量, 但引起肥胖的可能性下降, 但是这一结论需要更长期的实验。

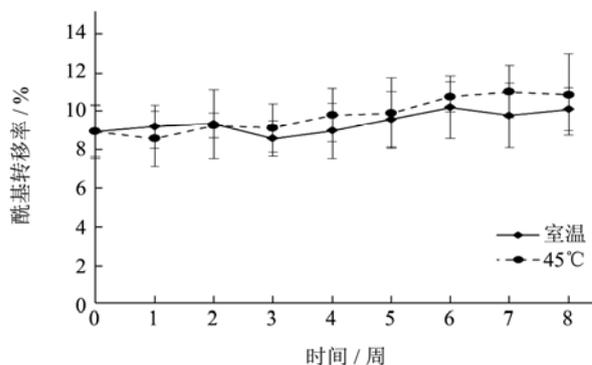


图 2 新型结构脂的保存结构稳定性

Fig.2 Structure stability of novel structured lipid during storage

2.4 结构脂对小鼠体重的影响

表 4 新型结构脂对 NIH 小鼠体重的影响 (g)

Table 4 Effect of structured lipid on the body weight of NIH mice (g)

时间/周	空白组	猪油	低量组		中量组		高量组	
			1%LSL 油	1%豆油	5%LSL 油	5%豆油	10%LSL 油	10%豆油
0	23.87±1.51	24.42±1.03	24.20±1.32	23.10±1.20	23.32±1.51	24.04±1.42	22.61±1.20	23.50±2.08
1	32.61±2.22 ^a	29.18±1.98	29.51±2.17	28.02±2.20	29.48±1.20	29.37±2.86	27.74±2.21	28.57±2.52
2	37.20±3.39 ^a	31.42±1.74	31.70±2.78	30.07±2.62	31.17±1.82	30.62±1.77	30.46±2.88	30.82±2.60
3	41.22±3.41 ^a	32.58±1.86	32.69±2.21	31.41±2.87	32.54±1.43	31.99±3.03	31.42±2.96	31.87±2.73
4	43.89±4.13 ^a	33.79±1.80	34.13±2.26	32.69±3.31	34.16±1.72	32.72±2.76	32.61±3.50	33.04±2.36
5	45.40±4.02 ^a	33.72±2.21	34.42±2.18	32.32±6.20	34.63±1.82	32.91±2.94	33.36±4.24	33.40±4.15
6	44.77±5.66 ^a	37.66±2.01	34.91±2.50	34.87±3.31	33.31±2.72	35.67±3.04	33.00±2.61 [*]	33.61±2.82 [*]

注: 用 t 检验进行分析, s 表示与其他组均有显著性差异, *表示与猪油组具有显著性差异 ($p<0.05$)。

2.5 结构脂对小鼠血脂的影响

对小鼠血液样品进行检测, 结果见表 5 所示。发现所有高脂实验组和空白组的血脂 TG、ALT、AST 和 BUN 指标没有明显差异($p>0.05$)。所有高脂饮食实验组的小鼠血液的 TC 浓度都高于空白组($p<0.05$)。低量高脂实验组的 LSL 脂组和大豆油组的小鼠血液的 TC 浓度与高脂猪油组相比无显著差异($p>0.05$)。然而, 中量和高量实验组的新型结构脂组的小鼠血液的 TC 浓度比高脂猪油组明显降低($p<0.05$), 但和大豆油组相比没有明显差异($p>0.05$)。说明新型结构脂具有缓解血液总胆固醇升高的趋势。人体摄入的甘油三酯, 主要在十二指肠和小肠的上半段消化, 在胆汁酸盐的作用下甘油三酯乳化被分散成细小的微团, 随后被胰

脂肪酶特异性水解掉甘油三酯的 1-3 位置脂肪酸, 产生 2-单甘酯和游离脂肪酸, 在被胆汁酸盐乳化后形成更小的油脂微团后被肠黏膜细胞吸收。小肠绒毛细胞内的甘油三酯主要为磷脂酸途径和 2-单甘酯途径, 肝细胞和脂肪细胞主要按磷脂酸途径合成甘油三酯, 但小肠黏膜细胞主要使用 2-单甘酯途径。基于此机理, 甘油二酯可以避免甘油三酯在体内的积聚。具有与甘油二酯相似结构的新型结构脂也应有类似的防止体内甘油三酯积聚的功能。上述的实验结果说明新型结构脂可以缓解由高脂肪摄取造成的高血脂症。同时, 本实验中高脂饲喂实验的小鼠 ALT、AST 和 BUN 水平在各组间没有明显的差异, 说明食用低热量油脂并不会对造成肝毒性和肾毒性反应。可以认为本实验生产的新型结构脂可以抑制小鼠体内的脂肪积聚。

表 5 新型结构脂对小鼠血脂的影响 (mmol/L)

Table 5 Effect of novel structured lipid on the blood lipid level in mice (mmol/L)

项目	空白组	高脂猪油组	低量组(1%)	
			结构油脂组	大豆油组
编号	Blank	A	B	C
TG	1.94±0.55	2.02±0.83	1.70±0.41	1.74±0.48
TC	3.60±0.72	8.35±1.24 ^a	7.64±1.04 ^a	8.09±1.06 ^a
AST	229.92±66.18	235.03±49.90	208.52±42.90	206.85±42.90
ALT	70.18±14.56	79.27±20.32	73.25±21.4	77.12±23.06
BUN	3.88±2.54	4.15±2.83	4.26±2.70	4.23±2.61

项目	中量组(5%)		高量组(10%)	
	结构油脂组	大豆油组	结构油脂组	大豆油组
编号	D	E	F	G
TG	1.73±0.47	1.95±0.53	1.88±0.60	1.66±0.46
TC	7.43±1.13 ^{ab}	8.02±1.43 ^a	7.12±1.20 ^{ab}	8.44±1.59 ^a
AST	206.85±44.87	211.20±43.71	198.74±47.54	209.69±45.66
ALT	76.49±34.06	77.00±22.26	68.76±19.73	70.73±19.15
BUN	3.73±2.61	4.07±2.70	3.71±2.65	4.01±2.46

注：用 t 检验进行分析，a 表示与空白组具有显著性差异，b 表示与猪油组具有显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.6 肝脏切片观察

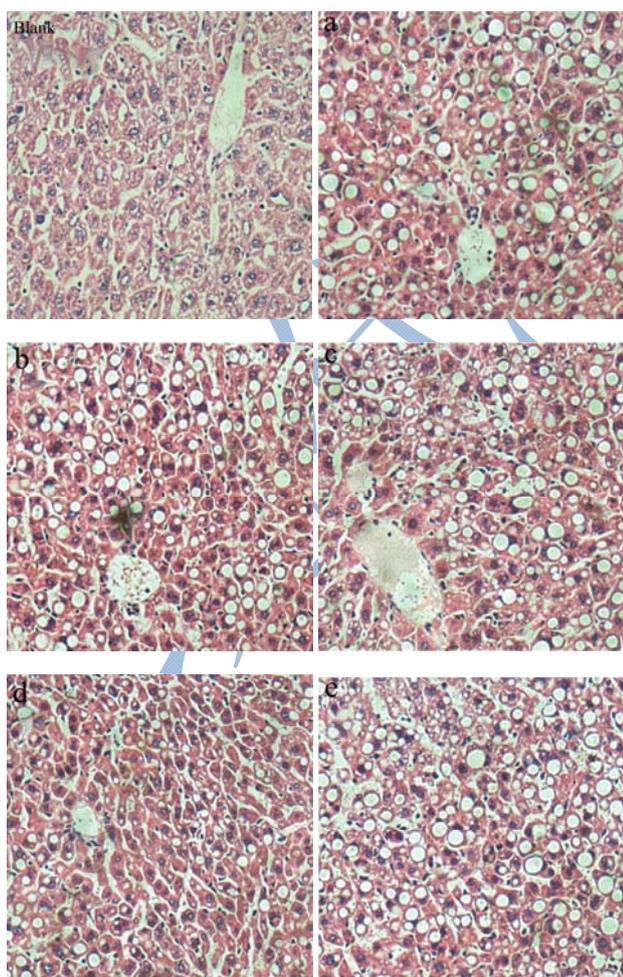


图 3 小鼠肝脏病理学切片

Fig.3 Pathological changes observed in the liver tissues of mice

注：Blank 为空白组；a 为猪油对照组；b 为低量结构油脂组；c 为低量大豆油组；d 为中量结构油脂组；e 为中量大豆油组；f 为高量结构油脂组；g 为高量大豆油组。

小鼠的肝脏的病理学切片见图 3 所示。可见空白组的肝脏病理切片中，肝细胞个体完整，界线清晰，细胞饱满、充实；核膜清楚光滑、完整；核仁清晰可见；肝细胞排列整齐；切片具有正常的肝小叶结构；胞浆染色新鲜均匀；肝窦大小正常；中央静脉及静脉窦状隙没有发现扩张和充血；汇管区状态正常，未见纤维组织增生和炎症细胞浸润。高脂饮食组中猪油组，肝细胞界线清晰；肝窦可见；肝脏细胞略微扩大；细胞核略微变小；核膜增厚；染色质变深；细胞质内充满大量大小不等的脂肪滴，将细胞核挤向一边，视野内脂肪滴数量较多；个别细胞疑似有轻微水肿；其他项目如肝窦大小、汇管区状态未见异常。低量组和中

量组大豆油组的病理切片观察结果与猪油组情况无明显区别。高量组中的大豆油组肝脏细胞病理切片中,肝细胞内脂肪滴大小相对较小,其他未见明显区别。中量组和高量组中的低热量脂肪酸组脂肪滴大小相对较小,数量相对较少,肝细胞界线清晰;肝窦可见,其他未见明显区别。从病理切片的观察结果中可发现,相比猪油和大豆油,肝细胞中脂肪滴的大小和数量有较明显的区别,说明肝细胞中甘油三酯的合成得到了控制,减少了甘油三酯在细胞内的聚积。

3 结论

新型结构脂除短链脂肪酸外具有和普通大豆油一致的脂肪酸组成,通过理化分析发现其可作为普通食用油使用;动物实验结果发现新型结构脂可显著减少脂肪积聚,具有抑制肥胖的功效。对此结构脂的研究增加了一种脂肪替代产品,提供了一种肥胖问题的解决方案;同时对结构脂及其应用研究具有指导意义。

参考文献

- [1] CAO Yu, QI Sui-jian, ZHANG Yang, et al. Synthesis of structured lipids by lipase-catalyzed interesterification of triacetin with camellia oil methyl esters and preliminary evaluation of their plasma lipid-lowering effect in mice [J]. *Molecules*, 2013, 18(4): 3733-3744
- [2] Morley N H, Kuksis A, Buchnea D. Hydrolysis of synthetic triacylglycerols by pancreatic and lipoprotein lipase [J]. *Lipids*, 1973, 9: 481-488
- [3] Mattson F H, Volpenhein R A. The digestion and absorption of triglycerides [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1964, 239: 2772-2777
- [4] Robert G, Harfmann, Samir J H, et al. Instability of hexane-acetonitrile mobile phases used for the chromatographic analysis of triacylglycerides [J]. *Journal of Separation Science*, 2008, 31(6-7): 915-920
- [5] Christopherson S W, Glass R L. Preparation of milk fat methyl esters by alcoholysis in an essentially nonalcoholic solution [J]. *Journal of Dairy Science*, 1969, 52(8): 1289-1290
- [6] Becker C C, Rosenquist A, Holmer G. Regiospecific analysis of triacylglycerols using allyl magnesium bromide [J]. *Lipids*, 1993, 28: 147-149
- [7] 张若梅. 油脂抗氧化稳定性测试[J]. *粮油食品科技*, 2001, 4(9):13-14
ZHANG Ruo-mei. The oxidative stability of oil test [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2001, 4(9): 13-14
- [8] 李彦萍. 乌柏类可可脂氧化稳定性机理的研究[D]. 南昌:南昌大学, 2002
LI Yan-ping. Study of CTCBE oxidation stability mechanism [D]. Nanchang: Nanchang University, 2002
- [9] Lo S K, Tan C P, Long K, et al. Diacylglycerol oil-properties, processes and products: a review [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2008, 1: 223