

不同浓度 DAG 食用油对肥胖小鼠 代谢调控及肝脏功能的影响

程芳园¹, 杨新月¹, 刘晓鹏², 王秀华¹, 李文娟¹, 韩娜¹, 宋秋月¹

(1. 长寿花食品股份有限公司, 山东 滨州 256209; 2. 滨州市检验检测中心, 山东 滨州 256600)

摘要:旨在为甘油二酯(DAG)在健康管理和疾病预防中的优化应用提供参考,通过饲喂雄性C57BL/6J系SPF级小鼠高脂高糖饲料建立肥胖小鼠模型,将肥胖模型组小鼠随机分为3组,分别以玉米油、40% DAG 玉米油和80% DAG 玉米油替代高脂高糖饲料中的猪油,饲喂16周,研究DAG食用油对肥胖小鼠体质量、血脂、肝脏功能的影响。结果表明:不同浓度的DAG食用油均能有效抑制小鼠体质量增加,减少白色脂肪积累,降低血清总胆固醇、甘油三酯及低密度脂蛋白胆固醇水平,同时提升高密度脂蛋白胆固醇水平,减少肝细胞脂肪变性,减轻小鼠肝脏损伤,还可以降低小鼠血清中葡萄糖含量,而且40% DAG 食用油展现出相对于80% DAG 食用油更优的效果。综上,DAG食用油可有效改善肥胖小鼠脂质代谢和肝脏功能,且在长期干预策略中,40% DAG 食用油可能是更佳的选择。

关键词:甘油二酯;脂质代谢;抑制体质量增加;降低血糖;肝脏功能

中图分类号:TS225.6;Q591.5 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)08-0088-05

Impact of different concentrations of diacylglycerol edible oil on metabolic regulation and liver function in obese mice

CHENG Fangyuan¹, YANG Xinyue¹, LIU Xiaopeng², WANG Xiuhua¹,
LI Wenjuan¹, HAN Na¹, SONG Qiuyue¹

(1. Changshouhua Food Company Limited, Binzhou 256209, Shandong, China;

2. Binzhou Inspection and Testing Center, Binzhou 256600, Shandong, China)

Abstract: To provide a reference for the optimized application of diacylglycerol (DAG) in health management and disease prevention, an obese mice model was established by feeding male C57BL/6J SPF grade mice with a high-fat and high-sugar diet. The obese model group mice were randomly divided into three groups and fed for 16 weeks with high-fat and high-sugar diet where lard was replaced by corn oil, 40% DAG-enriched corn oil, and 80% DAG-enriched corn oil, respectively. The effects of DAG edible oils on body weight, blood lipids, and liver function in obese mice were investigated. The results demonstrated that different concentrations of DAG edible oils effectively inhibited body weight gain, reduced white adipose tissue accumulation, lowered serum levels of total cholesterol, triglycerides, and low-density lipoprotein cholesterol levels, and increased high-density lipoprotein cholesterol levels. Additionally, DAG edible oils alleviated hepatic steatosis, mitigated liver damage, and decreased serum glucose content in mice. Notably, 40% DAG-enriched edible oil exhibited superior effects compared to 80% DAG-enriched edible oil. In conclusion, DAG-enriched edible oils can significantly improve lipid metabolism and liver function in obese mice, and in the long-term intervention strategy, 40% DAG-enriched

oil may be a better choice.

Key words: diacylglycerol; lipid metabolism; inhibition of body weight gain; reduction in blood glucose level; liver function

收稿日期:2024-04-26;修回日期:2025-03-05

作者简介:程芳园(1986),女,高级工程师,主要从事食用植物油精深加工、油脂副产品的高值化利用技术研究(E-mail:15006304875@163.com)。

肥胖是全球性的公共卫生问题,与多种慢性疾病的风险增加有关,包括心血管疾病、2 型糖尿病、高血压等^[1]。糖尿病是以高血糖为特征的代谢性疾病,长期高血糖会导致多种并发症,如心脏病、肾病、视网膜病变和神经病变^[2]。因此,控制体质量和改善胰岛素敏感性对于预防上述疾病至关重要。

甘油二酯(DAG)是食用油脂中除三酰基甘油(TAG)外存在最多的天然组分,同时也是人体内油脂代谢的中间产物^[3],近年来受到了广泛关注。大量研究表明,DAG 具有减肥^[4]、降低血脂^[5-7]、改善血糖^[8-10]、降低血压^[11]等功效。鉴于这些健康效益,DAG 已被开发成为一种新型的健康食用油,在日本等地得到了广泛应用和推广。在中国,也有一些科研团队成功研发出 DAG 食用油产品^[12-16]。

然而,目前关于 DAG 含量与健康效益之间关系的系统研究较少。本研究旨在通过数据分析和对比,探讨含有不同浓度 DAG(40% 与 80%)的食用油在连续服用过程中健康效益变化,特别是在抑制体质量、降低血脂及血糖等方面的功效,以期 DAG 在健康管理和疾病预防中的优化应用策略提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

玉米油、40% DAG 玉米油(DAG 含量 40%)、80% DAG 玉米油(DAG 含量 80%),长寿花食品股份有限公司;雄性 C57BL/6J 系 SPF 级小鼠(5 周龄,初始体质量无显著差异),斯贝福(苏州)生物技术有限公司;小鼠饲料,由南通特洛菲有限公司定制;总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)试剂盒,上海康朗生物科技有限公司;血糖试剂盒(GOPOD 酶法),苏州格锐思生物科技有限公司。

高速离心机、电子天平、一次性注射器、分光光度计、涡旋混合器等。

1.2 实验方法

1.2.1 肥胖模型建立

60 只 5 周龄小鼠给予普通饲料,在温度(23 ± 2)℃、湿度(60 ± 5)%、光照 12 h(8:00—20:00)的动物房内,自由进食、饮水,每 3 d 更换一次垫料条件下适应喂养 1 周后,随即从中随机选取一定数量的小鼠,分为空白组和肥胖模型组,其中空白组小鼠继续饲喂普通饲料(脂肪供能占比 10%),肥胖模型组小鼠饲喂高脂高糖饲料[其中脂肪(猪油)供能占比 45%,蔗糖供能占比 13%],实验期间每周称量小

鼠的体质量,以监控小鼠体质量的变化。经过 6 周的喂养后,肥胖模型组小鼠的空腹体质量相比空白组的高 20%,说明肥胖模型建立成功。

1.2.2 动物分组与给药

将肥胖模型组小鼠按空腹体质量随机分为 3 组,分别为 TAG 组、40% DAG 组和 80% DAG 组,每组 15 只,其中 TAG 组饲喂用玉米油替代猪油的高脂高糖饲料,40% DAG 组饲喂用 40% DAG 玉米油替代猪油的高脂高糖饲料,80% DAG 组饲喂用 80% DAG 玉米油替代猪油的高脂高糖饲料。空白组小鼠(1.2.1 中饲喂 6 周的)继续饲喂普通饲料。连续饲喂 16 周。

1.2.3 监测指标分析

实验期间,每日监测小鼠的进食量,每 4 周固定时间点称量小鼠体质量,并进行尾静脉采血(采血前小鼠禁食 8 h),采用血糖试剂盒对小鼠血液中的葡萄糖(GLU)含量进行测定。

实验结束后,小鼠禁食不禁水 12 h,摘眼球取血,脱颈椎处死,取小鼠的 3 个主要白色脂肪垫(腹部、附睾和肾周),同时摘取肝脏。所取血液离心后取血清,使用试剂盒检测血清中的 TG、TC、LDL-C、HDL-C 含量,以及 AST 和 ALT 活性。称取所取白色脂肪垫质量。摘取的肝脏用棉球去除多余血液称其质量后,放入液氮速冻,随后转移至 -80 ℃ 冰箱中贮存待组织病理学观察。

1.2.4 肝脏组织病理学观察

小鼠肝脏固定于 4 g/100 mL 多聚甲醛溶液中 24 h,石蜡包埋制作切片,苏木精-伊红(H&E)染色后,利用光学显微镜分析病理特征并采集图像。

1.2.5 数据处理

实验结果以“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示,组间差异采用一元方差分析,然后采用 SPSS 23.0 软件进行显著性检验,显著性水平最小以 $p < 0.05$ 记。采用 GraphPad Prism 8.02 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度的 DAG 食用油对体脂的影响

不同浓度的 DAG 食用油对小鼠体质量与进食量的影响如图 1 所示,对小鼠白色脂肪质量的影响如表 1 所示。

由图 1 可知,3 组肥胖模型小鼠的初始体质量相近,不存在显著差异,说明实验分组合理。在实验周期内,各组小鼠体质量呈现出不同的变化趋势。在 0~12 周内,TAG 组小鼠体质量增长速度较快,而 40% DAG 组和 80% DAG 组小鼠体质量增长速度较慢且较为接近;在 12~16 周,TAG 组小鼠体质量

仍保持较高增长速度,而 80% DAG 组小鼠的体质量增速也提升,超过了 40% DAG 组,但仍低于 TAG 组。整体来看,40% DAG 组在整个实验期间对肥胖小鼠体质量增加的抑制作用相对稳定且较为明显,这表明在长期连续服用过程中,40% DAG 食用油在

抑制肥胖小鼠体质量增加方面效果可能更好。由图 1 还可知,各组小鼠的平均日进食量并没有明显差异,表明小鼠体质量变化与摄食量无关,进一步支持 DAG 可能通过调节脂质代谢或能量消耗发挥作用^[17]。

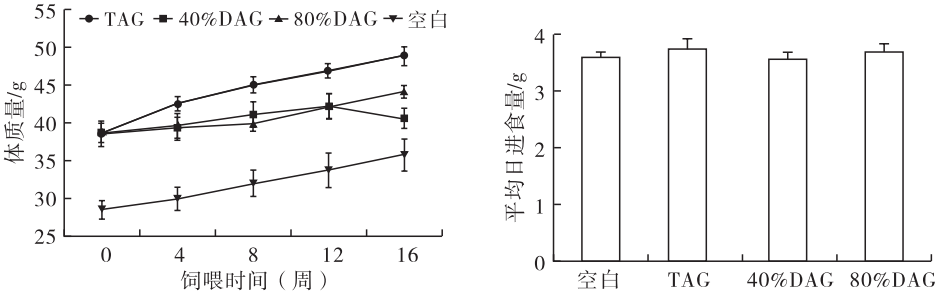


图 1 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠体质量与进食量的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of DAG edible oil on body weight and food intake in mice

表 1 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠白色脂肪质量的影响
Table 1 Effects of different concentrations of DAG edible oil on white adipose tissue mass in mice g

组别	附睾	肾周	腹部
空白	0.55 ± 0.16 ^c	0.13 ± 0.08 ^c	0.34 ± 0.18 ^c
TAG	2.27 ± 0.40 ^a	0.88 ± 0.33 ^a	2.66 ± 0.93 ^a
40% DAG	1.65 ± 0.45 ^b	0.56 ± 0.18 ^b	1.02 ± 0.38 ^b
80% DAG	1.73 ± 0.56 ^b	0.65 ± 0.22 ^b	1.61 ± 0.72 ^b

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同
Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

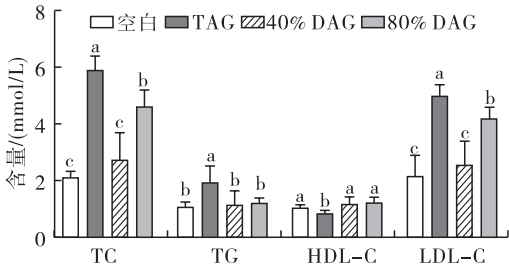
由表 1 可知,40% DAG 组和 80% DAG 组小鼠的附睾、肾周和腹部白色脂肪的质量均显著低于 TAG 组的,40% DAG 组与 80% DAG 组小鼠的白色脂肪质量虽然不具有显著差异,但是 40% DAG 组的白色脂肪质量均低于 80% DAG 组的。上述结果说明,40% DAG 食用油在减少肥胖小鼠白色脂肪积累方面有更显著的效果。

2.2 不同浓度的 DAG 食用油对血脂的影响

不同浓度的 DAG 食用油对小鼠血脂(TC、TG、HDL-C、LDL-C 含量)的影响见图 2。

由图 2 可知,40% DAG 组小鼠的 TC、TG 和 LDL-C 含量均显著低于 TAG 组的,说明 40% DAG 食用油对降低这些不良血脂指标有积极影响。80% DAG 组小鼠的 TC、TG 和 LDL-C 含量也显著低于 TAG 组的,但降低幅度不如 40% DAG 组的,尤其是

在 LDL-C 和 TC 方面,虽其含量低于 TAG 组的,但显著高于 40% DAG 组的。与 TAG 组相比,40% DAG 组和 80% DAG 组小鼠的 HDL-C 含量均显著提升。综上,不同浓度的 DAG 食用油对血脂调控的影响有所不同,就降低肥胖小鼠血脂而言,长期服用 40% DAG 食用油可能是一个比服用 80% DAG 食用油更为有效的营养干预手段。



注:同一指标不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同
Note: Different letters for the same indicator indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图 2 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠血脂的影响
Fig. 2 Effects of different concentrations of DAG edible oil on blood lipids in mice

2.3 不同浓度的 DAG 食用油对肝脏的影响

2.3.1 对肝脏病理形态的影响

通过对小鼠肝脏进行 H&E 染色,研究了不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝脏病理形态的影响,结果如图 3 所示。

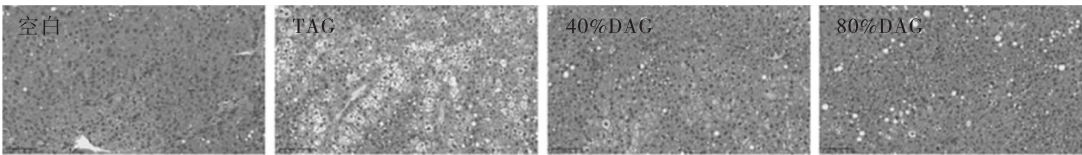


图 3 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝脏病理形态的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of DAG edible oil on the pathological morphology of mice liver

由图 3 可知:空白组小鼠肝细胞整体结构正常,而 TAG 组小鼠肝细胞表现出特征性的脂肪变性,肝脏内脂滴大量积聚,有炎症细胞浸润;相比于 TAG 组,DAG 组小鼠肝细胞形态显著改善,脂肪变性显著减少;尽管 40% DAG 组和 80% DAG 组都显示了对肝细胞脂肪变性和肝脏损伤的缓解作用,但 40% DAG 组小鼠的肝细胞形态更接近空白组,这表明较低浓度的 DAG 食用油可有效减轻肥胖小鼠的肝脏问题。此外,40% DAG 组还表现出较轻的炎症细胞浸润现象,这进一步证明了其在保护肝脏免受肥胖相关损害方面的有效性。综上,40% DAG 食用油可能是治疗肥胖相关肝脏疾病的理想选择。

为了进一步评估 DAG 对肝脏的影响,测定了各组小鼠的肝脏质量,结果如表 2 所示。

表 2 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝脏质量的影响
Table 2 Effects of different concentrations of DAG edible oil on the liver mass of mice

组别	肝脏质量/g
空白	0.93 ± 0.11 ^b
TAG	1.51 ± 0.35 ^a
40% DAG	1.27 ± 0.30 ^{ab}
80% DAG	1.36 ± 0.46 ^a

由表 2 可知:与空白组相比,TAG 组小鼠的肝脏质量显著增加,这与组织学观察到的肝细胞脂肪变性程度一致;与 TAG 组相比,DAG 组小鼠的肝脏质量均出现下降趋势,这与组织学观察到的肝细胞脂肪变性减少相符;40% DAG 组小鼠的肝脏质量降低幅度大于 80% DAG 组的,说明 40% DAG 食用油在减轻肥胖小鼠肝脏负担方面效果较优。

2.3.2 对肝细胞损伤的影响

在肝脏病理生理学中,ALT 和 AST 作为敏感的肝细胞损伤标志物,其活性升高通常反映肝细胞损伤或炎症,其活性下降则反映肝细胞损害减轻或肝功能改善。测定了各组小鼠血清中 AST 和 ALT 活性,以考察不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝细胞损伤(AST、ALT 活性)影响,结果见图 4。

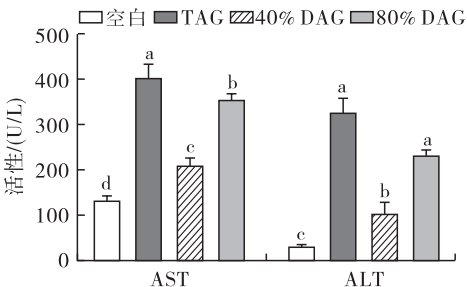


图 4 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝细胞损伤的影响
Fig.4 Effects of different concentrations of DAG on the liver cell damage of mice

由图 4 可知,相较于 TAG 组,40% DAG 组和 80% DAG 组小鼠 ALT 和 AST 活性均降低,且 40% DAG 组的 ALT 和 AST 活性降低幅度高于 80% DAG 组的,说明 40% DAG 食用油和 80% DAG 食用油都能够在一定程度上有效减轻肝脏损伤,且 40% DAG 食用油的效果优于 80% DAG 食用油的。

2.3.3 对肝脏糖代谢的影响

鉴于肝脏在血糖调控中的核心作用,通过测定各组小鼠血清中葡萄糖(简称“血糖”)含量,探究不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝脏糖代谢(葡萄糖含量)的影响,结果见图 5。

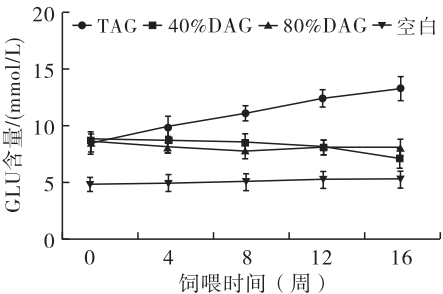


图 5 不同浓度的 DAG 食用油对小鼠肝脏糖代谢的影响
Fig.5 Effects of different concentration of DAG edible oil on the glucose metabolism in liver of mice

由图 5 可知:与空白组相比,随着饲喂时间的推移,TAG 组小鼠血糖含量不断增加,40% DAG 组和 80% DAG 组小鼠的血糖含量则总体呈下降趋势;DAG 组小鼠血糖含量高于空白组的,但始终低于 TAG 组的,提示 DAG 可能具有降低血糖的作用。在前 12 周,40% DAG 组小鼠的血糖含量高于 80% DAG 组的,但 12 周以后,40% DAG 组小鼠的血糖含量低于 80% DAG 组的。因此,在本实验条件下,长期服用 40% DAG 食用油可能具有更为理想的降低肥胖小鼠血糖的效果。

3 结 论

对比饲喂不同浓度 DAG 食用油的肥胖小鼠模型,揭示了 40% DAG 食用油在多方面的显著益处,如有效抑制小鼠体质量增加,减少白色脂肪蓄积,并在调节血脂、改善肝脏损伤、减轻肝脏脂肪累积、调控血糖方面展示了优势。为了更准确地评估不同浓度的 DAG 食用油对血脂、血糖控制的影响,需要进行更多的研究和比较,另外,鉴于动物实验与人体实际情况存在的差异,未来还需进一步开展临床研究以验证 DAG 对人体健康的实际效果和适宜剂量。

参考文献:

[1] 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.

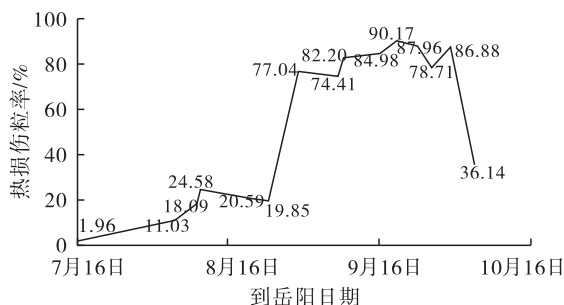


图1 某货轮大豆运至岳阳时的热损伤粒率

Fig.1 Heat-damaged kernel rate of soybeans in a certain shipment to Yueyang

由图1可知,7月中旬运至岳阳的大豆热损伤粒率为1.96%,在正常范围内,在镇江码头仓库储存半个月后,大豆开始出现明显热损,8月上旬运至岳阳的大豆,热损伤粒率升至11.03%,并随时间的推移呈现继续升高的趋势,8月中旬提高至24.58%,8月22日及其后运至岳阳的大豆发生了的严重热损,部分大豆热损伤粒率高达90%。

油脂厂每日加工热损大豆的原油得率如图2所示。由图2可知,油脂厂每日加工热损大豆的原油得率在15.8%~23.8%,油脂得率与加工工艺、提取温度、提取时间和设备性能直接相关^[2],因此原油得率有一定波动。然而,即使在加工严重热损的大豆期间,原油得率仍比较稳定,在20%左右。由此可见,原油得率与大豆是否热损以及热损粒率高

低无直接关系。

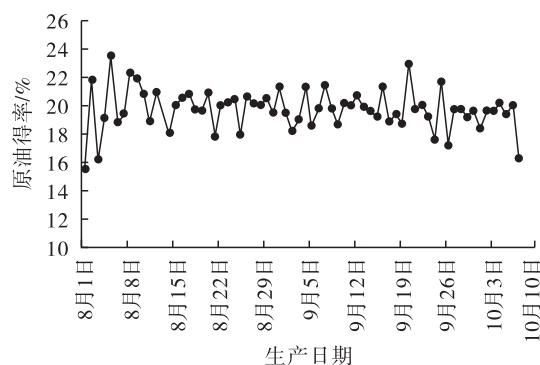


图2 每日加工热损大豆的原油得率

Fig.2 Crude oil yield of heat-damaged soybeans processed daily

3 结 语

进口南美大豆粗脂肪检测数据和工厂每日大豆油加工记录数据表明,大豆粗脂肪含量和原油得率与大豆是否热损无直接关系。尽管如此,在大豆海上运输过程中,要控制好航期,尽量缩短运输时间,及时关注最新天气预报,防止运输途中的高温高湿环境导致大豆热损。

参考文献:

- [1] 迟维念,于承东,崔晓光. 进口散装大豆残损贬值要素分析[J]. 检验检疫科学,2002,12(4):36-37.
- [2] 吴道银,蔡树元. 大豆粕残油高低不稳定原因与对策[J]. 粮食与油脂,2000(8):43-44.
- [3] 杨盛谊,丁晓宇,杨卓乔,等. 杭州市中老年人群2010—2018年“三高”指标变化趋势分析[J]. 中国全科医学,2020,23(18):2235-2241.
- [4] 黄莉莉,苏宜香. 甘油二酯的功能及安全性研究现状[J]. 国外医学:卫生学分册,2007,34(2):94-98.
- [5] 任蕊雯,王琳. 甘油二酯的制备及应用研究进展[J]. 广东化工,2023,50(14):97-98,90.
- [6] 邹冬芽,孟祥河,段作营,等. 1,3-甘油二酯的功能性研究[J]. 中国油脂,2004,29(2):51-54.
- [7] 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.
- [8] 徐蕊. 1,3-甘油二酯对肥胖小鼠减脂机制的研究[D]. 济南: 山东师范大学,2023.
- [9] HAN L, SUN R, WANG Y, et al. Soybean diacylglycerol regulates lipid metabolism in D-galactose-induced aging rats by altering gut microbiota and gene expression of colonic epithelial cells[J]. Food Funct, 2022, 13(3): 1437-1446.
- [10] 徐同成. 1,3-甘油二酯对2型糖尿病的影响及选择性水解甘油三酯sn-2位酯键酶的克隆与表达[D]. 杭州: 浙江大学,2008.
- [11] 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.
- [12] 钟碧莹,丁懿宁,吴炳鑫,等. 甘油二酯油对代谢综合征影响的研究进展[J]. 中国油脂,2022,47(10):66-71.
- [13] 王明星,王亚群,刘晓鹏,等. 玉米油中1,3-甘油二酯的制备及工艺研究[J]. 粮食与食品工业,2023,30(5):6-12.
- [14] 孙晓雪. 亚麻籽油基甘油二酯油的酶法催化甘油解制备及其稳定性研究[D]. 广州: 暨南大学,2023.
- [15] 王熠璠,刘柯纓,黄雅祺,等. 低温化学甘油解法制备1,3-甘油二酯工艺优化[J]. 中国油脂,2023,48(8):41-44,89.
- [16] 连伟帅. 甘油二酯、LML型结构脂的酶法制备与应用研究[D]. 广州: 华南理工大学,2019.
- [17] 李道明,王卫飞,蓝东明,等. Lipzyme TL 100L的固定化及其催化甘油解制备甘油二酯的研究[J]. 中国油脂,2014,39(11):36-39.
- [18] 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.

(上接第91页)