

蛋黄磷脂与紫苏籽油复配对维持大鼠 血脂健康水平的影响

黄淑贞, 刘雨菲, 王 靛, 汪小雅, 倪梦梅, 李晓蒙, 张立实, 陈锦瑶

(四川大学 华西公共卫生学院/华西第四医院, 成都 610041)

摘要:旨在为动物源性与植物源性脂质复配保健品的研发提供参考,以高脂饮食诱导建立SD大鼠混合型高脂血症动物模型,揭示蛋黄磷脂与紫苏籽油复配对维持大鼠血脂健康水平的影响。将50只雄性SD大鼠随机分为空白对照组,模型对照组和蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物低、中、高剂量组,分析大鼠的体质量、肝脏指数、血脂水平、体成分以及肝脏中脂滴含量。结果表明:给予蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物45 d,各组大鼠的体质量无显著差异,但受试物中、高剂量组大鼠的肝脏指数,各剂量组大鼠的血清总胆固醇(TC)水平以及高剂量组大鼠血清的甘油三酯(TG)水平均显著低于模型对照组,且TC和TG水平的降低趋势与受试物剂量之间存在显著的剂量-效应关系,而各剂量组大鼠血清的高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)无显著变化;各剂量组大鼠体内的脂肪占比较模型对照组均下降,瘦体质量占比上升,但均无显著差异;各剂量组大鼠的肝脏脂滴含量较模型对照组均极显著降低。综上,蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物有助于维持大鼠的血脂健康水平。

关键词:蛋黄磷脂;紫苏籽油;高脂血症;大鼠;降血脂

中图分类号:TS225;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)10-0056-06

Effect of combination of egg yolk phospholipid and perilla seed oil on maintaining healthy blood lipid level in rats

HUANG Shuzhen, LIU Yufei, WANG Liang, WANG Xiaoya, NI Mengmei,
LI Xiaomeng, ZHANG Lishi, CHEN Jinyao

(West China School of Public Health/West China Fourth Hospital,
Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to provide reference for the research and development of health care products with animal and plant derived lipids, the mixed hyperlipidemia animal model of SD rats was established by the high-fat diet, and the effects of the combination of egg yolk phospholipid and perilla seed oil on blood lipid health level was revealed. 50 Male SD rats were divided into blank control group, model control group, high, medium and low dose groups of combination of egg yolk phospholipid and perilla seed oil, and the changes of body weight, liver index, blood lipid level, body composition and liver lipid droplet content in rats were analyzed. The results showed that after 45 d of administration of the test substance, the body weight of the rats in each group did not change significantly, but the liver index of the medium and high dose groups, the TC levels in each dose group, and the TG levels in the high dose group were significantly lower than those in the model control group. There was a significant dose-effect relationship between the decreasing trend of TC and TG levels and the dose of the test substance, while there was no

收稿日期:2023-12-16;修回日期:2024-05-25

作者简介:黄淑贞(1998),女,在读硕士,研究方向为食品安全与风险评估(E-mail)huangshuzhen@hunnu.edu.cn。

通信作者:陈锦瑶,副教授(E-mail)umbrellayy@163.com。

significant change in HDL-C and LDL-C levels in each dose group. The proportion of body fat in the body composition of rats in each dose group decreased compared with the model control group,

and the proportion of lean body mass increased, but there was no significant difference between them. The content of liver lipid droplets in each dose group was very significantly lower than that in the model control group. In summary, the combination of egg yolk phospholipid and perilla seed oil is helpful in maintaining the healthy blood lipid level of rats.

Key words: egg yolk phospholipid; perilla seed oil; hyperlipidemia; rat; lipid-lowering

长期摄入高脂食物会使脂质代谢紊乱,进而导致代谢综合征^[1-2],其中高脂血症是血脂代谢异常最常见的症状之一^[3]。高脂血症还是多种疾病的危险因素,如非酒精性脂肪肝、动脉粥样硬化、炎症和糖尿病等^[4-6]。功能性油脂对改善高脂血症具有一定作用,功能性油脂中的多不饱和脂肪酸可通过抑制内源性总胆固醇(TC)和甘油三酯(TG)的合成,增加脂蛋白脂肪酶活性,促进周围组织对极低密度脂蛋白胆固醇(V-LDL-C)的清除,提高高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)的含量来改善高脂血症,在抗心血管疾病方面具有重要作用^[7-8]。

紫苏籽油的不饱和脂肪酸含量在90%以上,其中 α -亚麻酸占55%~65%,是迄今发现的种子油中 α -亚麻酸含量最高的,其在改善高脂血症方面备受关注^[8-9]。 α -亚麻酸是一种重要的 ω -3多不饱和脂肪酸, ω -3/ ω -6多不饱和脂肪酸比例适宜时,可使过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 表达上调、主动脉活性氧(ROS)和TC水平降低,从而改善脂质代谢、炎症和氧化应激^[10-12]。磷脂是用途广泛的生物大分子物质^[13],通过增强胆汁中胆固醇的排泄以及调节胆固醇酯转移蛋白(CETP)和脂蛋白代谢来发挥脂质代谢调节功能,蛋黄磷脂是动物源磷脂的典型代表,具有独特的组成,其含有高水平的磷脂酰胆碱(PC),其次是磷脂酰乙醇胺(PE)、鞘磷脂、缩醛磷脂和磷脂酰肌醇等。有研究提示蛋黄磷脂比大豆磷脂在降血脂方面更有效^[14]。研究发现,长期喂养富含 α -亚麻酸、二十二碳六烯酸(DHA)等多不饱和脂肪酸植物油的母鸡,所产鸡蛋蛋黄中的多不饱和脂肪酸含量显著增加,说明 ω -3多不饱和脂肪酸能够在蛋黄中很好地富集^[15]。

蛋黄磷脂与紫苏籽油具有不同的脂肪酸谱^[9,14,16],理论上蛋黄磷脂与紫苏籽油复配后发挥作用途径更为全面,可能有更好的血脂调节作用;另外,植物油与动物源磷脂有益成分差异大^[9,17],降血脂机制不完全相同,动物源磷脂可弥补植物油部分营养素不足的缺点,因此蛋黄磷脂与紫苏籽油联用的功能可能更全面。目前有关紫苏籽油调节血脂的

研究主要集中于单品或与其他植物油复配^[18-19],而蛋黄磷脂对脂代谢的功能性研究则鲜有报道。

本研究首次将动物来源的蛋黄磷脂与植物来源的紫苏籽油复配应用于探究二者复配对大鼠血脂健康水平的影响。本研究采用《保健食品功能检验与评价方法(2023年版)》中有助于维持血脂(血清胆固醇及TG)健康水平的检验方法,以高脂饮食诱导建立混合型高脂血症动物模型,分析比较不同剂量蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物对大鼠血清血脂水平、体成分及肝脏脂质累积的影响,探索复配受试物在维持大鼠血脂健康水平方面的功效,为后续动物源性植物源性脂质复配保健品的研发提供研究思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

50只健康SPF级雄性SD大鼠[体质量(200±20)g],由广东维通利华实验动物技术有限公司提供,动物合格证号SCXK(粤)2022-0063。动物饲养于四川大学华西公共卫生学院屏障级动物房,合格证号SYXK(川)2023-0011。实验经过四川大学华西第四医院/华西公共卫生学院伦理委员会审查批准。

维持饲料(参照GB 14924.3—2010《实验动物配合饲料营养成分》)配制,以鱼粉和豆粕作为主要蛋白源,以玉米和小麦作为碳水化合物源,脂肪不足部分由大豆油补足,高脂饲料(20.0%蔗糖,15%猪油,1.2%胆固醇,0.2%胆酸钠,适量的酪蛋白、磷酸氢钙、石粉等,其余成分均达到维持饲料的国家标准),由四川省医学科学院四川省人民医院实验动物研究所提供;蛋黄磷脂(PC含量≥20.0%,PE含量≥4.0%),食品级;紫苏籽油(α -亚麻酸含量≥50%),压榨一级;玉米胚芽油,压榨一级。本实验受试物由蛋黄磷脂与紫苏籽油按质量比1:2复配,溶于玉米胚芽油所得。

1.1.2 仪器与设备

BK-200全自动生化分析仪, Biobase 集团公司; TEK-VET5 血液细胞分析仪, 江西特康科技有限公司; Echo MRI 小动物体成分分析仪; RM2016

病理切片机,上海徕卡仪器有限公司;Cryostar NX50 冰冻切片机,Thermo 公司;Pannoramic MIDI II 数字切片扫描仪,3D-Histech 公司。生化检测项目所用试剂盒均产自长春汇力公司。

1.2 实验方法

1.2.1 受试物剂量

蛋黄磷脂、紫苏籽油的人体推荐摄入量(以体质量 60 kg 计)分别为 1.2、2.4 g/d,则每日推荐剂量分别为 0.02、0.04 g/kg。分别以人体推荐摄入量的 5、10、20 倍计算低、中、高剂量组中蛋黄磷脂-紫苏籽油复配受试物剂量为 0.3、0.6、1.2 g/kg,大鼠灌胃量为 0.5 mL/100 g。

1.2.2 造模及受试物干预

(1)适应期:大鼠于屏障系统下以维持饲料适应性喂养 5 d。

(2)造模期:50 只大鼠随机分成 2 组,一组(10 只)给予维持饲料作为空白对照组,一组(40 只)给予高脂饲料作为模型组,每周称量体质量 2 次,饲养 30 d 后,空白对照组和模型对照组大鼠不禁食眼内眦采血,采血后尽快分离血清,采用全自动生化分析仪测定血清 TC、TG、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、HDL-C 水平。根据《保健食品功能检验与评价方法(2023 年版)》中有助于维持血脂健康水平的动物实验部分,以模型组的 TC、TG 和 LDL-C 水平均显著高于空白对照组判定混合型高脂血症动物模型成立。模型建立成功后,根据 TC 水平将模型组随机分为 1 个模型对照组和 3 个剂量组,每组 10 只大鼠,保证各组间 TC、TG、LDL-C 和 HDL-C 水平无显著差异。

(3)受试物给予:模型成立后,3 个剂量组分别按照 1.2.1 每天灌胃低、中、高剂量的蛋黄磷脂-紫苏籽油复配受试物,空白对照组和模型对照组同时给予同体积的玉米胚芽油,空白对照组继续给予维持饲料,模型对照组及剂量组继续给予高脂饲料,连续干预 45 d。

1.2.3 大鼠一般情况观察及指标测定

1.2.3.1 一般情况观察、体质量及肝脏指数的测定

实验期间,每天观察大鼠的表现、行为、生长发育等一般情况,如发现异常应及时记录并采取必要的措

施,每周称量 2 次大鼠体质量并记录。干预期结束时,检查大鼠眼部及体格,每组选取 6 只大鼠,处死后,取新鲜肝脏组织,冰生理盐水冲洗,滤纸吸干表面水分后称质量,按公式(1)计算肝脏指数(X)。

$$X = m_1/m_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为大鼠肝脏湿质量,g; m_2 为大鼠给予受试物 45 d 后的体质量,g。

1.2.3.2 血清血脂测定

造模期结束时,即饲养 30 d 后,大鼠不禁食眼内眦采血,置于 1.5 mL 无抗凝剂离心管中,4℃下静置约 8 h,3 500 r/min 离心 15 min,取上清,采用全自动生化分析仪测定血清血脂水平。干预期结束时,即灌胃 45 d 后,以戊巴比妥钠腹腔注射麻醉大鼠,用 5 mL 无抗凝剂采血管进行腹主动脉取血,按照上述步骤测定血清血脂水平。

1.2.3.3 体成分测定

干预期结束前 1 d,即给予受试物 44 d 时,采用 Echo MRI 小动物体成分分析仪测定大鼠体内脂肪、瘦体质量及总水分占比。

1.2.3.4 肝脏组织脂滴含量测定

将 1.2.3.1 已称质量的大鼠肝脏立即投入组织固定液内固定 24 h 以上,进行石蜡包埋和切片后,油红 O 染色,镜检观察肝脏组织中脂滴分布情况。每张切片先于低倍镜下观察全部组织,再分别选取 3 个视野采集 200 倍显微图像。采用 Image-ProPlus 图像分析系统测定所采集全部图像的累计光密度和面积,以累计光密度与面积比值计算每张图像的平均光密度(IOD),每例样本的 IOD 为 3 张图像的平均值。组织中脂滴含量以 IOD 表征,IOD 越高,表明组织中脂滴含量越高。

1.2.4 数据处理

结果均用“平均值 ± 标准差”表示,采用 SPSS 26.0 统计软件进行分析。采用单因素方差分析和 Dunnett 检验进行差异性检验。

2 结果与讨论

2.1 混合型高脂血症动物模型的建立

动物饲养 30 d 后,给予受试物前,空白对照组及模型组大鼠的血脂水平见表 1。

表 1 给予受试物前大鼠的血脂水平

Table 1 Lipid levels in rats before administration of the subjects

组别	体质量/g	TC/(mmol/L)	TG/(mmol/L)	HDL-C/(mmol/L)	LDL-C/(mmol/L)
空白对照组	383.57 ± 20.56	1.41 ± 0.15	1.06 ± 0.29	1.12 ± 0.18	0.23 ± 0.11
模型组	390.74 ± 31.02	2.80 ± 1.41 ^a	1.80 ± 0.89 ^a	1.15 ± 0.19	0.81 ± 0.26 ^a

注:a 表示与空白对照组比较具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: "a" indicates a significant difference ($p < 0.05$) compared with the blank group. The same below

由表1可知,造模期结束时,与空白对照组相比,模型组大鼠的体质量无显著差异($p > 0.05$),但TC、TG、LDL-C水平显著升高($p < 0.05$)。依据《保健食品功能检验与评价方法(2023年版)》的评价标准,可判定SD大鼠混合型高脂血症模型成功建立。根据TC水平将模型组随机分为1个模型对照组和3个剂量组,经分析模型对照组和3个剂量

组间的TC、TG、HDL-C和LDL-C水平均无显著差异($p > 0.05$)。

2.2 受试物对大鼠一般情况、体质量及肝脏指数的影响

整个实验期间,动物表现和行为均无异常,生长发育良好,其余均无异常。实验前后,大鼠眼部检查及体格检查均未见异常。受试物对各组大鼠体质量及肝脏指数的影响见表2。

表2 给予受试物45 d后各组大鼠肝脏指数及体质量变化

Table 2 Changes in liver index and body weight of rats in each group after 45 d of administration of the test substance

组别	初始体质量/g	最终体质量/g	体质量增量/g	肝脏质量/g	肝脏指数/%
空白对照组	383.57 ± 20.56	525.43 ± 39.92	141.86 ± 22.87	11.89 ± 1.49	2.26 ± 0.33
模型对照组	404.89 ± 29.71	545.22 ± 42.91	140.33 ± 26.95	21.90 ± 3.38 ^b	4.02 ± 0.69 ^b
低剂量组	392.78 ± 25.18	515.56 ± 40.76	122.78 ± 19.96	19.85 ± 2.39 ^b	3.85 ± 0.55 ^b
中剂量组	389.71 ± 40.92	503.71 ± 42.75	114.00 ± 22.18	18.71 ± 1.82 ^{bc}	3.71 ± 0.48 ^{bc}
高剂量组	367.67 ± 18.18	496.33 ± 33.68	128.67 ± 30.98	18.99 ± 0.79 ^{bc}	3.83 ± 0.30 ^{bc}

注:b表示与空白对照组比较具有极显著差异($p < 0.01$);c表示与模型对照组比较具有显著差异($p < 0.05$)。下同

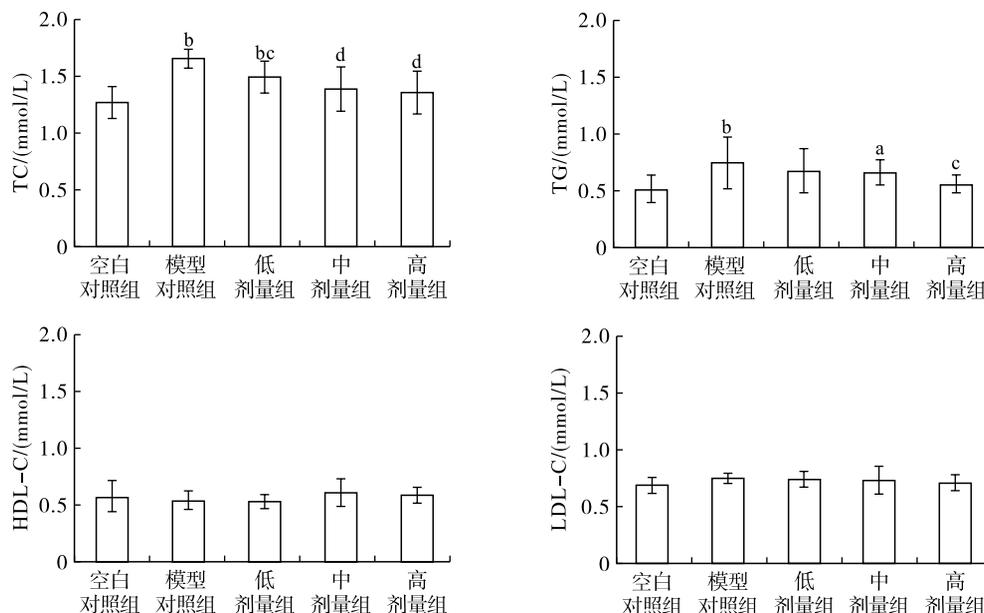
Note: "b" indicates a highly significant difference ($p < 0.01$) compared with the blank group; "c" indicates a significant difference compared with the model control group ($p < 0.05$). The same below

由表2可知,给予受试物45 d后,各组大鼠体质量及其增量均无显著差异($p > 0.05$)。但与空白对照组相比,模型对照组及各剂量组大鼠的肝脏质量及肝脏指数极显著上升($p < 0.01$),其中中、高剂量组大鼠的肝脏质量及肝脏指数显著低于模型对照组($p < 0.05$)。说明蛋黄磷脂-紫苏籽油复配受试物在一定

程度上具有减少大鼠肝脏质量增加和保肝的功能,文献报道蛋黄磷脂含有DHA^[16]、花生四烯酸等多不饱和脂肪酸,在预防肝细胞变性、改善脂肪堆积^[14]和稳定血糖变化^[16]等方面比大豆磷脂更有效。

2.3 受试物对大鼠血脂的影响

受试物对SD大鼠血脂水平的影响如图1所示。



注:d表示与模型对照组比较具有极显著差异($p < 0.01$)。下同

Note: "d" indicates a highly significant difference compared with the model control group ($p < 0.01$). The same below

图1 给予受试物45 d后各组大鼠的血脂水平

Fig. 1 Lipid levels of rats in each group after 45 d of administration of the test substance

由图1可知,给予受试物45 d后,模型对照组大鼠血清的TC与TG水平均极显著高于空白对照

组($p < 0.01$)。与模型对照组相比,3个剂量组大鼠血清的TC水平以及高剂量组的TG水平均显著或

极显著降低($p < 0.05, p < 0.01$),而3个剂量组的HDL-C和LDL-C水平则与模型对照组无显著差异($p > 0.05$)。依据《保健食品功能检验与评价方法(2023年版)》的评价标准,可认为蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物可降低大鼠血清TC与TG水平,且不使LDL-C水平升高,有助于维持大鼠血脂健康水平。趋势性检验结果显示,TC和TG水平的降低趋势与受试物剂量之间分别存在极显著或显著的剂量-效应关系($p < 0.01, p < 0.05$),在降低大鼠血

脂水平,维持血脂健康功能上表现为受试物剂量越高,作用越明显。高脂血症通常伴有TG、TC、LDL-C水平升高和HDL-C水平降低。蛋黄磷脂和紫苏籽油二者都有改善脂质代谢作用,二者复配使大鼠TG、TC水平降低,维持HDL-C水平,更好地发挥降低血脂水平的作用。

2.4 受试物对大鼠体成分的影响

受试物对大鼠体成分的影响如图2所示。

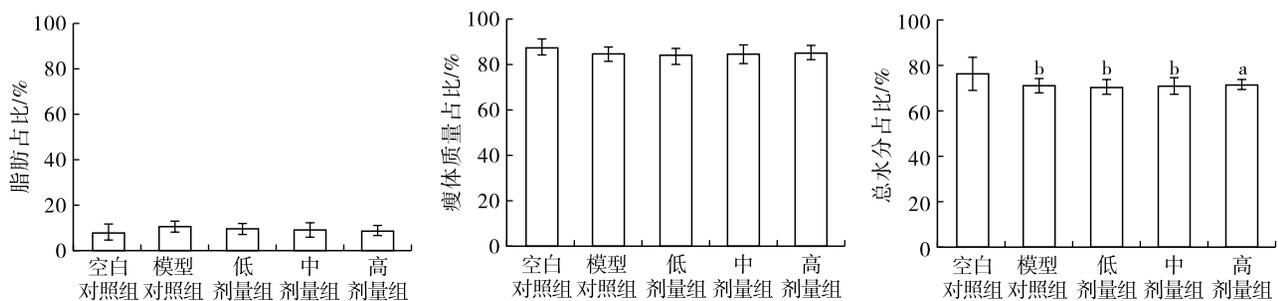


图2 给予受试物45 d后各组大鼠体成分

Fig. 2 Body composition of rats in each group after 45 d of administration of the test substance

由图2可知:给予受试物45 d后,与空白对照组相比,模型对照组和低、中剂量组大鼠体内的总水分占比极显著下降($p < 0.01$),高剂量组大鼠体内总水分占比显著下降($p < 0.05$),模型对照组和各剂量组大鼠体内脂肪占比上升($p > 0.05$),瘦体质量占比下降($p > 0.05$);与模型对照组相比,3个剂量组大鼠体内脂肪占比均有所下降,瘦体质量占比上升,但均无显著差异($p > 0.05$)。

2.5 受试物对大鼠肝脏组织脂滴含量的影响

给予受试物45 d后大鼠肝脏组织中的脂滴含量见表3。

表3 受试物对大鼠肝脏组织脂滴含量的影响

Table 3 Effects of the test substance on lipid droplet content in the liver of rats

组别	IOD
空白对照组	0.004 2 ± 0.003 7
模型对照组	0.264 0 ± 0.040 5 ^b
低剂量组	0.177 4 ± 0.380 6 ^{bd}
中剂量组	0.085 5 ± 0.031 6 ^{bd}
高剂量组	0.034 5 ± 0.008 3 ^d

由表3可知,给予受试物45 d后,模型对照组大鼠的肝脏脂滴含量极显著高于空白对照组($p < 0.01$)。3个剂量组大鼠的肝脏脂滴含量均极显著低于模型对照组($p < 0.01$),且剂量越高,作用越明显。提示蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物可减少肝脏脂肪沉积,从而减轻高脂血症大鼠的肝损伤。

3 结论

通过饲喂高脂饲料诱导建立SD大鼠混合型高脂血症动物模型,分别用人体推荐摄入量5、10倍和20倍的蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物(蛋黄磷脂与紫苏籽油质量比为1:2),即0.3、0.6、1.2 g/kg灌胃给予45 d。结果发现,蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物可显著降低高脂血症大鼠血清TC、TG水平,并且维持HDL-C水平,且受试物剂量越高,大鼠血清中TC、TG降低作用越明显。蛋黄磷脂与紫苏籽油复配受试物可极显著降低大鼠肝脏脂滴含量,减少肝脏脂肪沉积。因此,将蛋黄磷脂与紫苏籽油联用能起到良好的维持血脂健康水平的作用。

参考文献:

- [1] ZHANG L, LIU Y, WANG X, et al. Physical exercise and diet: Regulation of gut microbiota to prevent and treat metabolic disorders to maintain health[J/OL]. *Nutrients*, 2023, 15(6): 1539 [2023-12-16]. <https://doi.org/10.3390/nu15061539>.
- [2] LIN M, ZHOU H, LI J, et al. The model of rat lipid metabolism disorder induced by chronic stress accompanying high-fat diet[J/OL]. *Lipids Health Dis*, 2011, 10: 153 [2023-12-16]. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-10-153>.
- [3] EL-TANTAWY W H, TEMRAZ A. Natural products for controlling hyperlipidemia: Review [J]. *Arch Physiol Biochem*, 2019, 125(2): 128-135.
- [4] CHEN T, WU Y, GU W, et al. Response of vascular

- mesenchymal stem/progenitor cells to hyperlipidemia [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2018, 75(22): 4079–4091.
- [5] BEDOGNI G, GASTALDELLI A, FOSCHI F G. Fatty liver, cardiometabolic disease and mortality [J]. *Curr Opin Lipidol*, 2020, 31(1): 27–31.
- [6] BEVERLY J K, BUDOFF M J. Atherosclerosis: Pathophysiology of insulin resistance, hyperglycemia, hyperlipidemia, and inflammation [J]. *J Diabetes*, 2020, 12(2): 102–104.
- [7] ELAGIZI A, LAVIE C J, O'KEEFE E, et al. An update on ω -3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health[J/OL]. *Nutrients*, 2021, 13(1): 204 [2023–12–16]. <https://doi.org/10.3390/nu13010204>.
- [8] 杨敏, 魏冰, 孟橘, 等. ω -3 多不饱和脂肪酸的来源及生理功能研究进展[J]. *中国油脂*, 2019, 44(10): 110–115.
- [9] 许春芳, 董喆, 郑明明, 等. 不同产地的紫苏籽油活性成分检测与主成分分析 [J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(2): 275–282.
- [10] FADWA E O, AMSSAYEF A, EDDOUKS M. Antihyperglycemic and antidyslipidemic activities of the aqueous *Salvia hispanica* extract in diabetic rat [J]. *Cardiovasc Hematol Agents Med Chem*, 2022, 20(1): 60–66.
- [11] CHEN X, RAN J, MAZHAR M, et al. The balanced unsaturated fatty acid supplement constituted by woody edible oils improved lipid metabolism and gut microbiota in high-fat diet mice[J/OL]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1203932 [2023–12–16]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1203932>.
- [12] YANG L G, SONG Z X, YIN H, et al. Low n -6/ n -3 PUFA ratio improves lipid metabolism, inflammation, oxidative stress and endothelial function in rats using plant oils as n -3 fatty acid source[J]. *Lipids*, 2016, 51(1): 49–59.
- [13] ALI A H, ZOU X, ABED S M, et al. Natural phospholipids: Occurrence, biosynthesis, separation, identification, and beneficial health aspects [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(2): 253–275.
- [14] YIN M, MATSUOKA R, XI Y, et al. Comparison of egg yolk and soybean phospholipids on hepatic fatty acid profile and liver protection in rats fed a high-fructose diet [J/OL]. *Foods*, 2021, 10(7): 1569 [2023–12–16]. <https://doi.org/10.3390/foods10071569>.
- [15] NGO NJEMBE M T, DEJONGHE L, VERSTRAELEN E, et al. The egg yolk content in ω -3 and conjugated fatty acids can be sustainably increased upon long-term feeding of laying hens with a diet containing flaxseeds and pomegranate seed oil [J/OL]. *Foods*, 2021, 10(5): 1134 [2023–12–16]. <https://doi.org/10.3390/foods10051134>.
- [16] 尹明雨, 刘启军, 张宗毅, 等. 蛋黄磷脂与大豆磷脂调节失血应激性糖脂紊乱作用比较[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(23): 35–40.
- [17] 王国财, 袁诚, 唐顺之, 等. 蛋黄卵磷脂中两种溶血磷脂的分离与结构鉴定[J]. *中国油脂*, 2019, 44(3): 158–160.
- [18] 申思洋, 裴建峰, 柴逸飞, 等. 红花籽油和紫苏籽油不同配比降血脂作用研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(2): 106–110.
- [19] 余德林, 马超英, 宋磊, 等. 紫苏籽油与红花籽油联合使用降血脂研究[J]. *中国油脂*, 2014, 39(12): 35–38.
- (上接第 39 页)
- [31] JANSSEN C I, ZERBI V, MUTSAERS M P, et al. Impact of dietary n -3 polyunsaturated fatty acids on cognition, motor skills and hippocampal neurogenesis in developing C57BL/6J mice[J]. *J Nutr Biochem*, 2015, 26(1): 24–35.
- [32] KODAS E, GALINEAU L, BODARD S, et al. Serotonergic neurotransmission is affected by n -3 polyunsaturated fatty acids in the rat [J]. *J Neurochem*, 2004, 89(3): 695–702.
- [33] CAO D, KEVALA K, KIM J, et al. Docosahexaenoic acid promotes hippocampal neuronal development and synaptic function[J]. *J Neurochem*, 2009, 111(2): 510–521.
- [34] LAURITZEN L, BRAMBILLA P, MAZZOCCHI A, et al. DHA effects in brain development and function[J/OL]. *Nutrients*, 2016, 8(1): E6 [2024–04–07]. <https://doi.org/10.3390/nu8010006>.
- [35] LAGARDE M, BERNOUD N, BROSSARD N, et al. Lysophosphatidylcholine as a preferred carrier form of docosahexaenoic acid to the brain [J]. *J Mol Neurosci*, 2001, 16(2): 201–204.
- [36] 王琦. 海产动物来源 n -3 PUFA 磷脂的提取及生物活性研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [37] CHEN S, SUBBAIAH P V. Phospholipid and fatty acid specificity of endothelial lipase: Potential role of the enzyme in the delivery of docosahexaenoic acid (DHA) to tissues[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2007, 1771(10): 1319–1328.
- [38] CHEN S, SUBBAIAH P V. Regioisomers of phosphatidylcholine containing DHA and their potential to deliver DHA to the brain: Role of phospholipase specificities[J]. *Lipids*, 2013, 48(7): 675–686.
- [39] 许铁军, 陈超, 李晓东. 婴幼儿配方奶粉脂肪酸母乳化调制的研究现状[J]. *中国乳业*, 2009(4): 37–39.
- [40] 冯纳, 钟海雁, 周波, 等. 不同物种茶油脂肪酸组成及其在 Sn-2 位上的分布[J]. *食品与机械*, 2016, 32(3): 20–23.
- [41] LING P R, ISTFAN N W, LOPES S M, et al. Structured lipid made from fish oil and medium-chain triglycerides alters tumor and host metabolism in Yoshida-sarcoma-bearing rats [J]. *Am J Clin Nutr*, 1991, 53(5): 1177–1184.