

核桃油的降血脂作用及其机制

谢珊珊¹ 陈文礼^{2,3} 崔澍春⁴

(1. 濮阳医学高等专科学校, 河南 濮阳 457000; 2. 中山大学医学院, 广东 深圳 518107;

3. 中山大学附属第五医院, 广东 珠海 519000; 4. 濮阳市人民医院, 河南 濮阳 457000)

摘要: [目的] 探究核桃油对脂质代谢的影响及其作用机制。[方法] 通过高脂饮食建立 SD 大鼠高脂模型, 使用 500, 1 000, 1 500 mg/kg 未经稀释的核桃油进行分组灌胃干预试验, 检测干预 8 周后 SD 大鼠体重和脏器指数、血清血脂生化指标含量以及血清抗氧化相关指标, 分析核桃油对 SD 大鼠的脏器、血脂以及抗氧化系统的影响; 采用 QPCR 法检测大鼠肝脏 ABCA1 mRNA、ABCG1 mRNA 表达、SREBP2-HMGCR 信号途径和 PPAR α -LXR α -CYP7A1 信号通路基因表达情况, 分析核桃油调节肝脏胆固醇代谢机制。[结果] 与高脂模型组相比, 核桃油可以显著降低 SD 大鼠体重和肝脏指数 ($P < 0.05$), 对心脏指数、肾脏指数和脾脏指数无影响。核桃油可以显著降低 SD 大鼠血清中的 TC、TG 及 LDL ($P < 0.05$), 还可显著提高 HL 和 LPL 含量来调节 LDL 和 HDL ($P < 0.05$)。此外, 核桃油可显著升高 SOD、GSH-Px、CAT 和 T-AOC 含量 ($P < 0.05$), 显著降低 MDA 含量 ($P < 0.05$)。核桃油可显著上调 ABCA1 mRNA 与 ABCG1 mRNA 表达量 ($P < 0.05$) 和下调 SREBP2 mRNA 与 HMGCR mRNA 表达量, 以及上调 PPAR α mRNA、LXR α mRNA 与 CYP7A1 mRNA 表达量。[结论] 核桃油可通过降低肝脏 TC 的生物合成和增强肝脏 TC 细胞摄取和分解排泄而降低血清 TC 水平, 还可以通过增加抗氧化系统酶类表达来改善抗氧化系统的失衡。

关键词: 核桃油; SD 大鼠; 高血脂; 降血脂; 机制

Lipid-lowering effect and mechanism of walnut oil

XIE Shanshan¹ CHEN Wenli^{2,3} CUI Shuchun⁴

(1. Puyang Medical College, Puyang, Henan 457000, China; 2. School of Medicine, Sun Yat-sen University,

Shenzhen, Guangdong 518107, China; 3. The Fifth Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Zhuhai,

Guangdong 519000, China; 4. Puyang People's Hospital, Puyang, Henan 457000, China)

Abstract: [Objective] To study the effect of walnut oil on lipid metabolism and elucidate its mechanism of action. [Methods] A high-fat diet is used to establish a high-fat model of SD rats, and 500, 1 000, and 1 500 mg/kg undiluted walnut oil is used for gavage intervention experiments. After 8 weeks of intervention, the changes in body weight, organ indexes, serum lipid biochemical indicators, and serum antioxidant related indicators of SD rats are measured to observe the effects of walnut oil on organs, blood lipids, and antioxidant capacity. The expression of ABCA1 mRNA, ABCG1 mRNA, and SREBP2-HMGCR signaling pathway and PPAR α -LXR α -CYP7A1 signaling pathway genes in rat liver are measured by using the QPCR method to explore the mechanism by which walnut oil regulates liver cholesterol metabolism. [Results] Compared with the high-fat model group, walnut oil can significantly reduce the body weight and liver index of SD rats ($P < 0.05$), but has no effect on the heart index, kidney index, and spleen index. Walnut oil significantly reduces TC, TG, and LDL in the serum of SD rats ($P < 0.05$). It can also significantly increase HL and LPL content to regulate LDL and HDL ($P < 0.05$). In addition, walnut oil significantly increases the content of SOD, GSH-Px, CAT, and T-AOC ($P < 0.05$) and significantly reduces the content of MDA ($P < 0.05$). Walnut oil significantly upregulates the expression of ABCA1 mRNA and ABCG1 mRNA ($P < 0.05$), downregulates the expression of SREBP2 mRNA and HMGCR mRNA, and upregulates the expression of PPAR α mRNA, LXR α mRNA and CYP7A1 mRNA.

基金项目: 河南省教育厅高等学校重点科研项目 (编号: 23B350006)

通信作者: 陈文礼 (1987—), 男, 中山大学医学院副教授, 博士。E-mail: xs.shan.123@163.com

收稿日期: 2024-11-12 **改回日期:** 2025-04-11

引用格式: 谢珊珊, 陈文礼, 崔澍春. 核桃油的降血脂作用及其机制[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 168-174.

Citation: XIE Shanshan, CHEN Wenli, CUI Shuchun. Lipid-lowering effect and mechanism of walnut oil[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 168-174.

[Conclusion] Walnut oil can reduce serum TC levels by reducing liver TC biosynthesis and enhancing liver TC cell uptake, decomposition, and excretion and also improves the imbalance of the antioxidant system by increasing the expression of antioxidant system enzymes.

Keywords: walnut oil; SD rats; hyperlipidemia; lipid-lowering; mechanism

核桃,又称胡桃,为胡桃科植物,其核果与扁桃、腰果、榛子并称为“四大干果”^[1]。核桃中油脂含量高达65%以上,具有“树上油库”美誉。核桃油中不仅含有丰富的不饱和脂肪酸,还含有多酚、生育酚、角鲨烯以及植物甾醇等微量成分,被称为“东方橄榄油”^[2]。目前,核桃油中多种活性成分已被证实有一定的降血脂活性,如亚麻酸、亚油酸等多不饱和脂肪酸和植物甾醇等,且核桃油中其他成分还具有抗氧化、抗炎、抗癌和护肤等功效^[3-4]。

高脂血症为血浆中血脂异常,主要表现为总甘油三酯和(或)总胆固醇、低密度脂蛋白升高,高密度脂蛋白降低,其可以引发动脉粥样硬化、黄色瘤、眼底病变等疾病,是无声的健康杀手^[5]。目前,常用的降血脂药物有他汀类、贝特类等,但其容易诱发胃肠道毒性等不良反应^[6]。天然油脂无任何毒性,生物利用度高,具有一定的降血脂活性,是目前研究的热点^[7],且已有关于核桃油^[8]、榛子油^[9]、紫苏籽油^[10]等油脂的小鼠模型的降血脂活性研究,其可降低总甘油三酯、总胆固醇和低密度脂蛋白水平,提高高密度脂蛋白含量,但有关核桃油大鼠模型的降血脂研究尚未见报道。降血脂活性物质可通过降低总甘油三酯、总胆固醇和低密度脂蛋白水平,提高高密度脂蛋白含量来调节高脂血症,也可以通过调节超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等抗氧化酶活性增加机体抗氧化能力,从而改善高脂血症造成的抗氧化系统失衡。其主要涉及脂质转运、合成和代谢,分别可由ABC家族蛋白转运蛋白[如脂质转运ATP结合盒转运子A1 mRNA(ABCA1 mRNA)和ATP结合盒转运子G1 mRNA(ABCG1 mRNA)]、胆固醇调节元件结合蛋白2-HMG-CoA还原酶(SREBP2-HMGCR)通路和过氧化物酶体增殖物激活受体 α -肝X受体 α -细胞色素P450亚型7A1(PPAR α -LXR α -CYP7A1)通路调节,但目前未见有关核桃油降血脂机制途径研究的报道。试验拟通过高脂饮食建立SD大鼠高脂模型,采用核桃油进行灌胃干预试验,分析其对SD大鼠高脂大鼠体重、脏器指数、血脂和抗氧化活性的影响,并通过脂质转运水平调控以及胆固醇合成代谢过程中相关基因表达量来分析降血脂作用机制,旨在为核桃油的深度开发利用和降血脂功效开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

核桃:杭州临安卓熙食品有限公司;

SD级雄性大鼠:210~230 g,许可证编号为SYXK(苏)2021-0023,赛业(苏州)生物科技有限公司;

AIN.93M饲料:山东凯晟饲料有限公司;

总胆固醇(TC)、总甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白(LDL)和高密度脂蛋白(HDL)试剂盒:武汉赛培生物科技有限公司;

脂蛋白脂酶(LPL)、肝脂酶(HL)试剂盒:上海群己生物科技有限公司;

超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)、总抗氧化能力(T-AOC)、丙二醛(MDA)试剂盒:上海康朗生物科技有限公司;

RNA提取试剂盒、反转录试剂等:上海生工生物工程技术服务有限公司。

1.2 仪器与设备

多通道自动酶标仪:HM-SY96S型,山东博冠生物技术有限公司;

全自动生化分析仪:BS-350S型,南京贝登医疗股份有限公司;

荧光定量PCR仪:R32-Z-MyGo Pro ESR型,广州虹科电子科技有限公司;

水浴锅:JC-HH-8型,青岛精诚仪器仪表有限公司;

水分测定仪:KOLAB型,科西精密仪器(上海)有限公司;

台式鼓风干燥箱:DHG-9013A型,上海善志仪器设备有限公司;

家用智能微波炉:NN-DS57M型,松下电器(中国)有限公司;

小型榨油机:ZY-22A型,广州市大祥电子机械设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 核桃油制备 称取200 g新鲜去壳去皮后的核桃仁,于800 W、2 450 MHz微波下预处理6 min,冷却,通过螺旋榨油机进行二次冷榨,过滤,得到的油相为核桃油,−4℃贮藏备用^[3]。

1.3.2 SD大鼠分组和处理 SD雄性大鼠适应性饲养7 d后,将其随机分为正常组(M)、高脂模型组(P)、核桃油低剂量组(WOL)、核桃油中剂量组(WOM)和核桃油高剂量组(WOH),每组各12只,饲养周期8周,每周进行称重。正常组和高脂模型组每日用AIN.93MH饲料饲养,核桃油低、中、高剂量组除每日使用AIN.93MH饲料饲养外,分别灌胃1.0 mL质量浓度为500,1 000,1 500 mg/kg未经稀释的核桃油,其中核桃油灌胃质量以大鼠体重计,正常组和高脂模型组使用等体积的生理盐水代替核桃油,每日灌胃1次^[9-10]。饲养结束后,摘取大鼠眼睛,取其眼后血液,

分离制备血清后处死 SD 大鼠,分别摘取肝脏、心脏、肾脏和脾脏,用冷冻生理盐水冲洗后,滤纸吸干,备用。

1.3.3 SD 大鼠生化指标检测

(1) 脏器指数:称取各组 SD 大鼠脏器质量,按式(1)计算脏器指数。

$$Y = \frac{M_i}{m} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y ——SD 大鼠脏器指数,%;

M_i ——大鼠对应脏器湿质量,g;

m ——大鼠最终质量,g。

(2) 生化指标:取各组大鼠血清 1 份,分别参照相应试剂盒说明书测定血清 TC、TG、LDL、HDL、LPL 和 HL 含量。

1.3.4 核桃油降血脂机制

(1) 大鼠体内抗氧化能力:取各组大鼠血清 1 份,分别参照相应试剂盒说明书测定血清 T-AOC、SOD、GSH-Px、CAT 及 MDA 含量。

(2) 大鼠血脂调控相关基因相对表达量:取各组小鼠肝脏,液氮冷冻研磨,采用 Trizol 法提取 RNA 后,以 β -tubulin 基因作为内标,采用荧光定量 PCR 法测定 ABCA1 mRNA、ABCG1 mRNA、PPAR α mRNA、LXR α mRNA、CYP7A1 mRNA、SREBP2 mRNA、HMGCR mRNA 表达量^[11-13]。

1.4 数据处理

试验结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,组间采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

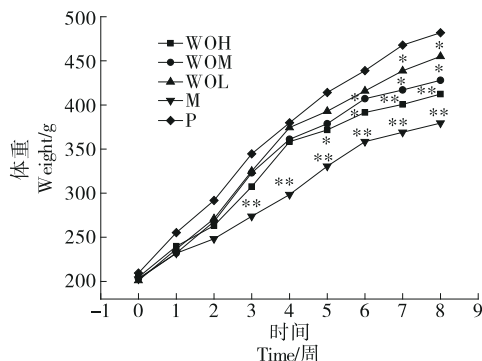
2 结果与讨论

2.1 对大鼠体重的影响

肥胖与高脂血症及其产生的并发症有着紧密的联系,体重可直接反映肥胖程度^[14]。由图 1 可知,前 2 周,核桃油高、中、低剂量组和正常组 SD 大鼠体重均与高脂模型组无显著差异。第 3~8 周,高脂模型组 SD 大鼠体重极显著高于正常组($P < 0.01$),说明高脂模型构建成功。核桃油高剂量组 SD 大鼠体重在第 5 周显著高于正常组,而核桃油中、低剂量组 SD 大鼠体重分别在第 6、7 周才显著高于正常组,说明高剂量核桃油的效果最好。第 8 周,与高脂模型组相比,核桃油高、中、低剂量组的 SD 大鼠体重均显著减少($P < 0.05$),说明核桃油可改善因高血脂引起的肥胖。

2.2 对大鼠脏器指数的影响

一般来说,脏器指数是基本稳定的,只有当器官受伤时才会有所改变。例如,在脏器指数上升的情况下,可能代表某器官出现了肥大、肥厚或充血水肿等情况;反之,

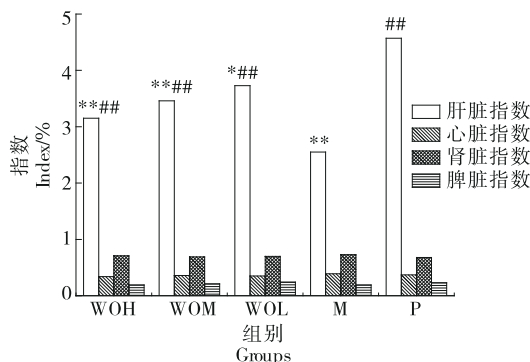


*表示与高脂模型组差异显著($P < 0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P < 0.01$)

图 1 核桃油对 SD 大鼠体重的影响

Figure 1 Effect of walnut oil on body weight of SD rats in each group

脏器指数降低可能说明该器官有萎缩或者退化的可能^[15]。由图 2 可知,与正常组相比,高脂模型组肝脏指数增长了 79.22%($P < 0.01$);核桃油各剂量组的肝脏指数极显著高于正常组($P < 0.01$),但随着剂量的增大,肝脏指数从 3.73 ± 0.15 降至 3.15 ± 0.13 ,说明肝脏指数的降低与剂量呈正相关。与高脂模型组相比,核桃油中、高剂量组的肝脏指数降低达极显著水平($P < 0.01$),核桃油低剂量组的肝脏指数降低达显著水平($P < 0.05$),说明核桃油对高血脂 SD 大鼠具有降低肝脏指数的作用。在心脏指数、肾脏指数和脾脏指数上,高脂模型组、核桃油各剂量组与正常组均无明显差异,说明高脂血症并未对其他器官造成影响^[16]。



*表示与高脂模型组差异显著($P < 0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P < 0.01$);##表示与正常组差异极显著($P < 0.01$)

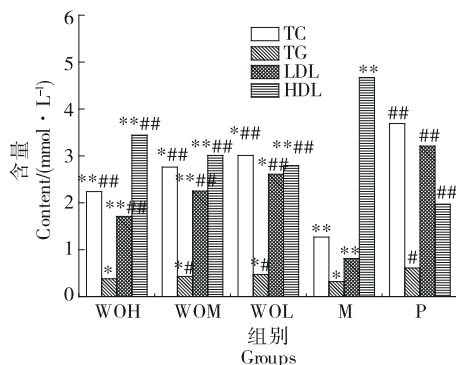
图 2 核桃油对 SD 大鼠脏器指数的影响

Figure 2 Effect of walnut oil on organ indexes of SD rats in each group

2.3 对高脂血症 SD 大鼠血脂的影响

由图 3 可知,与高脂模型组相比,核桃油低、中剂量组 SD 大鼠 TC 含量显著降低($P < 0.05$),核桃油高剂量组极

显著降低($P<0.01$),说明核桃油能够调节TC含量,且存在剂量效应,但核桃油各剂量组仍极显著高于正常组($P<0.01$)。与高脂模型组相比,核桃油各剂量组TG含量均显著降低($P<0.05$);与正常组相比,核桃油高剂量组无显著差异,但核桃油低、中剂量组显著高于正常组($P<0.05$),说明核桃油能够降低TG含量,且存在剂量效应。就LDL而言,与高脂模型组相比,核桃油低剂量组差异显著($P<0.05$),核桃油中、高剂量组差异极显著($P<0.01$),但核桃油各剂量组均极显著高于正常组($P<0.01$),表明核桃油剂量组能够下调LDL含量。与高脂模型组相比,核桃油中、高剂量组HDL含量显著增加($P<0.05$),而核桃油低剂量组无显著差异,但核桃油各剂量组均极显著低于正常组($P<0.01$),表明核桃油对LDL和HDL含量的干预呈现一定的剂量效应。综上,核桃油具有一定调节血脂代谢的能力,其可通过降低TC、TG和LDL水平、提高HDL含量来调节血脂异常。



*表示与高脂模型组差异显著($P<0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P<0.01$);#表示与正常组差异显著($P<0.05$),##表示与正常组差异极显著($P<0.01$)

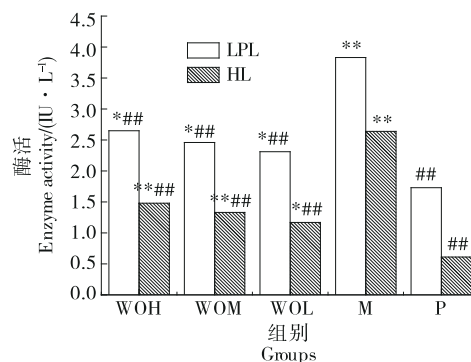
图3 核桃油对SD大鼠血脂的影响

Figure 3 Effect of walnut oil on blood lipids in SD rats of each group

2.4 对高脂血症SD大鼠脂酶的影响

LPL是脂质代谢关键酶,主要水解甘油三酯,该酶的缺乏或活力异常与血脂异常、代谢综合征、动脉粥样硬化等疾病有一定关系^[17]。HL是一种与血液循环中内源性TG代谢有关的酶,其在血浆脂蛋白的代谢中发挥重要作用,影响血浆中HDL和LDL^[16]。由图4可知,与高脂模型组LPL酶活相比,核桃油低、中、高剂量组分别提高了50.98%,60.78%,73.20%($P<0.05$),而核桃油各剂量组仍极显著低于正常组($P<0.01$)。与高脂模型组HL酶活相比,核桃油低剂量组差异显著($P<0.05$),核桃油中、高剂量组差异极显著($P<0.01$),但核桃油各剂量组均极显著低于正常组($P<0.01$)。核桃油各剂量组可增强LPL和HL酶活,且高剂量组的效果最好,可缓解高脂血症。血

管生成素样蛋白4为脂质代谢的强效调节因子,其影响脂质氧化、合成和过氧化的关键酶(如脂蛋白脂酶、肝脂酶、内皮脂酶和乙酰辅酶A羧化酶等)的表达,增大其表达量,也会增大LPL和HL酶的表达量^[18]。黄酮类化合物可促进血管生成素样蛋白4表达以提高LPL和HL酶活性^[19],核桃油中也含有黄酮类化合物^[20],其可能有相似的功效。



*表示与高脂模型组差异显著($P<0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P<0.01$);##表示与正常组差异极显著($P<0.01$)

图4 核桃油对高脂血症SD大鼠脂酶的影响

Figure 4 Effect of walnut oil on lipase in SD rats with hyperlipidemia

2.5 核桃油的高脂血症脂质代谢机制

2.5.1 对高脂血症SD大鼠抗氧化系统的影响 脂质代谢异常往往会造成抗氧化系统失衡,提高机体抗氧化能力对调节血脂有积极作用^[9-10,16]。由表1可知,在抗氧化能力指标上,正常组均极显著高于高脂模型组($P<0.01$),说明高脂血症造成了抗氧化系统失衡。与高脂模型组相比,核桃油低、中、高剂量组SD大鼠的T-AOC、SOD含量均出现显著差异($P<0.05$)。在GSH-px和CAT酶活上,与高脂模型组相比,核桃油中、高剂量组均显著提高($P<0.05$),但核桃油低剂量组无显著性差异。在MDA含量上,与高脂模型组相比,核桃油低、中、高剂量组血清中MDA含量均显著降低($P<0.05$),且与核桃油高剂量组差异极显著($P<0.01$)。综合5个抗氧化指标,核桃油可提高SD大鼠体内抗氧化能力,且存在一定的剂量效应。与正常组相比,核桃油各剂量组的指标均极显著低于正常组($P<0.01$),说明核桃油在试验周期内并不能完全修复抗氧化系统。因此,核桃油能够增强抗氧化酶活性,减少MDA生成,改善机体抗氧化系统。

2.5.2 对高脂血症SD大鼠脂质转运水平的影响

ABCA1蛋白是一种膜整合蛋白,其以ATP为能源,促进细胞内游离胆固醇和磷脂的流出,在胆固醇逆转运和HDL生成的起始步骤中起重要作用^[11]。ABCG1在胆固醇的单向流出中发挥着关键作用,并进一步促进细胞

表 1 核桃油对高脂血症 SD 大鼠血清抗氧化活性的影响[†]

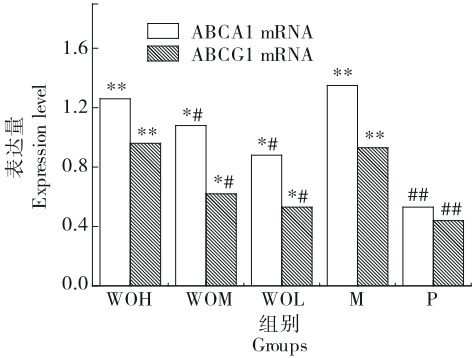
组别	T-AOC/(U·mL ⁻¹)	SOD/(U·mL ⁻¹)	GSH-px/(U·mL ⁻¹)	CAT/(U·mL ⁻¹)	MDA/(nmol·mL ⁻¹)
WOH	10.87±0.26 ^{***}	146.28±23.92 ^{***}	664.45±4.51 ^{***}	3.21±0.19 ^{***}	10.75±0.16 ^{***}
WOM	10.50±0.17 ^{***}	141.04±15.23 ^{***}	659.54±3.82 ^{***}	2.98±0.11 ^{***}	11.17±0.18 ^{***}
WOL	10.31±0.14 ^{***}	132.82±6.06 ^{***}	645.98±3.38 ^{***}	2.59±0.14 ^{##}	11.66±0.21 ^{***}
正常组	11.28±0.18 ^{**}	206.51±23.62 ^{**}	682.75±5.64 ^{**}	4.60±0.24 ^{**}	8.25±0.18 ^{**}
高脂模型组	9.54±0.13 ^{##}	101.32±10.51 ^{##}	641.28±4.01 ^{##}	2.31±0.16 ^{##}	13.43±0.31 ^{##}

[†] *表示与高脂模型组差异显著($P<0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P<0.01$);##表示与正常组差异极显著($P<0.01$)。

内 TC 和氧化甾醇远离内质网的运输,调节细胞胆固醇稳态^[21]。由图 5 可知,与高脂模型组相比,核桃油低、中、高剂量组的 ABCA1 mRNA 和 ABCG1 mRNA 基因表达量均显著提高($P<0.05$),说明核桃油能够上调 SD 大鼠 ABCA1 以及 ABCG1 的表达。与正常组相比,核桃油高剂量组的 ABCG1 mRNA 和 ABCA1mRNA 表达量无显著性差异,其他组差异显著($P<0.05$),说明存在一定的剂量效应。因此,核桃油能够根据增强 ABCA1 mRNA 和 ABCG1 mRNA 表达量,从而达到高脂摄食过程中正向调控脂质转运水平的目的。

2.5.3 对高脂血症 SD 大鼠胆固醇合成代谢途径的影响

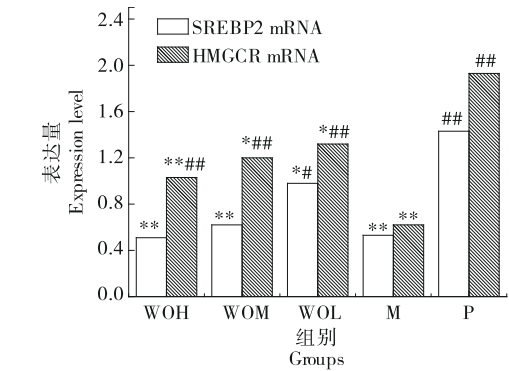
SREBP2 是一个位于内质网上的跨膜蛋白,当 TC 在内质网膜上的水平低于细胞内部时,SREBP2 受胆固醇调节元件结合蛋白裂解激活蛋白(SCAP)的引导,发送至高尔基体,随后被位点蛋白酶 1(S1P)和位点蛋白酶 2(S2P)剪裁,揭露出位于细胞质一侧的 N 端肽链以产生具有转录活动的 SREBP2m,SREBP2m 进入细胞核,强化 3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶(HMGCR)基因的表达,驱动胆固醇的生成^[11-19,21-24]。此外,胆固醇 7 α 羟化酶(CYP7A1)在胆固醇转化为胆酸过程中发挥关键作用,PPAR α 作为配体激活的转录因子与 LXR α 的调节元件



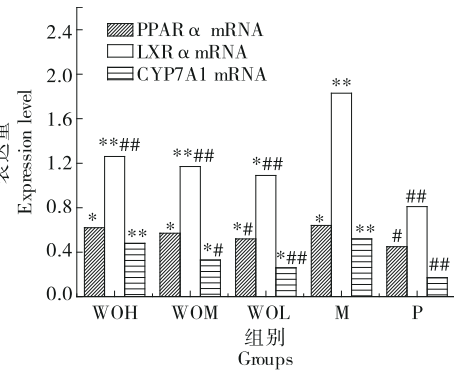
*表示与高脂模型组差异显著($P<0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P<0.01$);#表示与正常组差异显著($P<0.05$),##表示与正常组差异极显著($P<0.01$)

图 5 核桃油对高脂血症 SD 大鼠脂质转运水平的调控
Figure 5 Regulation of lipid transport levels in SD rats with hyperlipidemia by walnut oil

(PPRE)结合,进一步提高 LXR α 基因的转录,从而触发 CYP7A1 的表达,使胆固醇转化为胆酸,最终缓解肝脏损伤^[25-27]。由图 6 可知,在 TC 合成途径的 SREBP2 mRNA 和 HMGCR mRNA 表达上,与高脂模型组相比,核桃油各剂量组 SD 大鼠均显著降低($P<0.05$),说明核桃油能够降



(a) 核桃油对胆固醇合成途径相关基因 mRNA 表达的影响



(b) 核桃油对胆固醇代谢途径相关基因 mRNA 表达的影响

*表示与高脂模型组差异显著($P<0.05$),**表示与高脂模型组差异极显著($P<0.01$);#表示与正常组差异显著($P<0.05$),##表示与正常组差异极显著($P<0.01$)

图 6 核桃油对高脂血症 SD 大鼠胆固醇合成代谢途径的影响

Figure 6 Effect of walnut oil on cholesterol synthesis and metabolic pathways in SD rats with hyperlipidemia

低TC合成。此外,与正常组相比,核桃油中、高剂量组在SREBP2 mRNA表达量上无显著性差异,说明存在剂量效应。进一步研究核桃油摄食对SD大鼠TC代谢途径相关基因表达的影响,与高脂模型组相比,核桃油各剂量组的SD大鼠PPAR α mRNA、LXR α mRNA和CYP7A1 mRNA表达量均显著提高($P<0.05$)。与正常组相比,核桃油高剂量组的CYP7A1 mRNA和PPAR α mRNA无显著性差异($P>0.05$),核桃油中剂量组的PPAR α mRNA无显著性差异($P>0.05$),其余各剂量组各基因表达均显著低于正常组,说明存在剂量效应。因此,核桃油可通过抑制TC合成途径过程中相关基因表达和正向调控TC代谢途径过程中的相关基因表达量来减少TC积累。

3 结论

研究了核桃油的降血脂活性及其机制,通过高脂饮食建立了SD大鼠高血脂模型。结果表明,与高脂模型组相比,核桃油各剂量组能显著降低SD大鼠体重、肝脏指数和血清中总胆固醇、总甘油三酯、低密度脂蛋白含量($P<0.05$),提高血清中高密度脂蛋白含量、脂蛋白脂酶和肝脂酶酶活,对心脏指数、肾脏指数和脾脏指数无影响。此外,核桃油可显著升高超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶含量和总抗氧化能力($P<0.05$),显著降低丙二醛含量($P<0.05$)。核桃油可显著上调ABCA1 mRNA以及ABCG1 mRNA表达量($P<0.05$),下调SREBP2 mRNA以及HMGCR mRNA表达量,上调PPAR α mRNA、LXR α mRNA以及CYP7A1 mRNA表达量,说明核桃油可以改善高血脂症SD大鼠血脂情况。因此,核桃油降血脂作用机理可能与改善肝脏功能、脂质代谢,促进胆固醇、甘油三酯的分解有关。后续可进一步结合基因组学和蛋白组学技术完善核桃油的降血脂作用机理。

参考文献

- [1] HUSSAIN M, SUN Y, PAN Y, et al. Formulation, invitro digestive study, and comparative fatty acid analysis of walnut oil-based infant formula, with human milk, animal milk, and commercial infant formula[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103279.
- [2] MA X, HUANG C B, ZHENG C, et al. Effect of oil extraction methods on walnut oil quality characteristics and the functional properties of walnut protein isolate[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 138052.
- [3] 吴史博, 刘延奇, 李超, 等. 气相色谱结合化学计量在核桃油、菜籽油掺伪混合物含量判别分析中的应用[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 63-68, 73.
WU S B, LIU Y Q, LI C, et al. Application of gas chromatography combined with stoichiometry in discriminant analysis of pseudo mixtures of walnut oil and rapeseed oil[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 63-67, 73.
- [4] XI B N, ZHANG J J, XU X, et al. Characterization and metabolism pathway of volatile compounds in walnut oil obtained from various ripening stages via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137547.
- [5] 吕静, 杨洁茹, 朱静, 等. 核桃青皮果胶提取工艺优化及其体外降脂、抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 155-162, 182.
LU J, YANG J R, ZHU J, et al. Optimization of ultrasound assisted acid extraction of pectin from walnut green husk and analysis of its in vitro lipid-lowering and antioxidant activities[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 155-162, 182.
- [6] DENG X J, HOU Y, ZHOU H J, et al. Hypolipidemic, anti-inflammatory, and anti-atherosclerotic effects of tea before and after microbial fermentation[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(2): 1160-1170.
- [7] GUO W L, PAN Y Y, LI L, et al. Ethanol extract of *Ganoderma lucidum* ameliorates lipid metabolic disorders and modulates the gut microbiota composition in high-fat diet fed rats[J]. Food & Function, 2018, 9(6): 3419-3431.
- [8] 戚登斐, 张润光, 潘建龙, 等. 核桃油微胶囊制备及其生理功能评价[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 24-31, 47.
QI D F, ZHANG R G, PAN J L, et al. Preparation and physiological function evaluation of walnut oil microcapsules[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(1): 24-31, 47.
- [9] 张维. 榛子油微胶囊的制备及其降血脂功能的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021: 64-76.
ZHANG W. Study on the preparation of hazelnut oil microcapsules and its hypolipidemic function[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022: 64-76.
- [10] 王文璐. 紫苏籽油降血脂作用研究及其微胶囊的制备[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2022: 20-27.
WANG W L. Study on hypidemic effect of *Perilla* seed oil and preparation of microcapsule[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2022: 20-27.
- [11] 吴志焕, 曹丹丹, 刘利敏. 三七丹参片调节高脂血症小鼠脂质转运的机制[J]. 中成药, 2022, 44(3): 965-968.
WU Z H, CAO D D, LIU L M. Mechanism of sanqi danshen tablets in regulating lipid transport in hyperlipidemic mice[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2022, 44(3): 965-968.
- [12] 毛雨, 胡勤, 苏新良. SREBP2m通过胆固醇代谢损伤促进肝癌细胞增殖和迁移并抑制细胞凋亡[J]. 肿瘤, 2018, 38(4): 318-328.
MAO Y, HU Q, SU X L. SREBP2m promotes proliferation and migration of hepatocarcinoma cells and inhibits apoptosis through cholesterol metabolism damage[J]. Tumor, 2018, 38(4): 318-328.
- [13] 罗纲, 向露, 姚平, 等. 槲皮素调控巨噬细胞胆固醇稳态改善载脂蛋白E敲除小鼠动脉粥样硬化[J]. 中国药理学通报, 2024, 44(7): 1155-1162, 1170.

- 2022, 38(9): 1 395-1 400.
- LUO G, XIANG L, YAO P, et al. Quercetin attenuates atherosclerosis in ApoE KO mice by regulating macrophage cholesterol homeostasis[J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2022, 38(9): 1 395-1 400.
- [14] 张宗峰, 买热排提·哈力木拉提, 苏米亚·艾合买提江, 等. 燕麦麸皮对糖脂代谢紊乱大鼠血糖血脂的作用[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(1): 64-69.
- ZHANG Z F, MAIREPAITI H, SUMIYA A, et al. Effects of oat bran on blood glucose and lipid in rats with glycolipid metabolism disorder[J]. Food and Nutrition in China, 2023, 29(1): 64-69.
- [15] 曾桥. 杜仲叶茯茶品质形成机制及其降血脂作用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022: 138-166.
- ZENG Q. Mechanism of quality formation of *Eucommia ulmoides* leaves Fu tea and its hypolipidemic effect[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2022: 138-166.
- [16] LI Y X, HAN T T, LIU Y, et al. Insulin resistance caused by lipotoxicity is related to oxidative stress and endoplasmic reticulum stress in LPL gene knockout heterozygous mice[J]. Atherosclerosis, 2015, 239(1): 276-282.
- [17] HIME N J, BLACK A S, BONNET D J, et al. Bone marrow-derived HL mitigates bone marrow-derived CETP-mediated decreases in HDL in mice globally deficient in HL and the LDLr[J]. Journal of Lipid Research, 2014, 55(9): 1 864-1 875.
- [18] ZHANG Y Q, LIANG J W, DAI L, et al. ANGPTL4-the link binding lipid metabolism and inflammation[J]. Current Medicinal Chemistry, 2024, 32(15): 2 931-2 949.
- [19] 王兆丹. 菊花黄酮的提取、分析及其降血脂作用机制研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- WANG Z D. Extractoion and analysis of flavonoide from chrysanthemum and its mechanism of reducing blood lipid[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [20] 黄崇博, 黄颖, 马旋, 等. 核桃制油及其饼粕蛋白利用技术研究进展[J/OL]. 中国油料作物学报. (2024-11-05) [2024-12-09]. <https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2024131>.
- HUANG C B, HUANG Y, MA X, et al. Progress in walnut oil extraction technology and comprehensive utilization of its meal cake[J/OL]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences. (2024-11-05) [2024-12-09]. <https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2024131>.
- [21] KIM Y K, HONG H K, YOO H S, et al. AICAR upregulates ABCA1/ABCG1 expression in the retinal pigment epithelium and reduces Bruch's membrane lipid deposit in ApoE deficient mice[J]. Experimental Eye Research, 2021, 213: 108854.
- [22] DU Y, XI M, LI Y H, et al. Tilianin improves lipid profile and alleviates atherosclerosis in ApoE $-/-$ mice through up-regulation of SREBP2-mediated LDLR expression[J]. Phytomedicine, 2023, 109: 154577.
- [23] ZUO H, SU X H, JIN Y X, et al. Transthyretin regulated by linc00657/miR-205-5p promoted cholesterol metabolism by inducing SREBP2-HMGCR and inhibiting LXR α -CYP7A1[J]. Archives of Medical Research, 2020, 51(4): 317-326.
- [24] 肖铭慧, 黄敏婕, 董捷, 等. 香榧籽油对高脂膳食 SD 大鼠脂质代谢的影响及机理[J]. 中国油脂, 2022, 47(3): 71-77.
- XIAO M H, HUANG M J, DONG J, et al. Effect of *Torreya grandis* cv. Merrillii seed oil on lipid metabolism in SD rats fed with high fat diet[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(3): 71-77.
- [25] 李亚婷. 牛油果油对高脂饮食诱导的肥胖小鼠胆固醇代谢的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023: 33-39.
- LI Y T. Effect of avocado oil on cholesterol metabolism in obese mice induced by high-fat diet[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023: 33-39.
- [26] SUN Y Y, LI X C. Cholesterol efflux mechanism revealed by structural analysis of human ABCA1 conformational states[J]. Nature Cardiovascular Research, 2022, 1(3): 238-245.
- [27] ZENG M, QIN X Y, YI T, et al. Integration of pharmacodynamics, metabolomics and network pharmacology to elucidate the effect of *Prunella vulgaris* seed oil in the treatment of hyperlipidemia[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024, 17(2): 105486.