

TG-DHA 高含量脱腥鱼油 对脂代谢的调节作用

杨瑞利, CHAKKAPAT Aenglong, 曹婉秀, 张 慧, 唐庆娟*
(中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266003)

摘要:目的:探究 TG-DHA 高含量脱腥鱼油的制备及对高脂饮食小鼠脂代谢的调节作用。方法:脂质体包埋技术制备 TG-DHA 高含量脱腥鱼油。将雄性 C57BL/6J 小鼠(6 周龄)随机分为对照组(C)、模型组(M)、TG-DHA 高含量鱼油组(O-DHA)、TG-DHA 高含量脱腥鱼油组(L-DHA)。连续灌胃 8 周后,检测小鼠血清、肝脏脂质水平;测定肝脏脂代谢相关基因脂肪酸合成酶(Fatty acid synthase, FAS)、固醇调节元件结合蛋白 1c(Sterol regulatory element binding protein-1c, SREBP-1c)、肉碱棕榈酰转移酶 1(Carnitine palmitoyl transferase, CPT1)、脂蛋白脂酶(Lipoprotein lipase, LPL)mRNA 表达量。结果:脂质体包埋掩盖了己醛、2,4-庚二烯醛等鱼油中的腥味物质。TG-DHA 高含量脱腥鱼油中的 DHA 含量为 73.74%,粒径为 159.50 nm, Zeta 电位为 -43.10 mV, 稳定性良好,且在动物体内易于被消化吸收。L-DHA 可显著改善高脂饮食小鼠血清和肝脏脂质水平($P < 0.05$), O-DHA 可显著改善高脂饮食小鼠血清水平和肝脏中的 TG 含量($P < 0.05$),二者均能极显著降低 FAS mRNA 表达($P < 0.01$),显著上调 CPT1 mRNA 表达($P < 0.05$),且 L-DHA 效果更好。结论: TG-DHA 高含量脱腥鱼油可改善高脂饮食导致的脂代谢紊乱,其机制与下调肝脏脂肪酸合成,促进脂肪酸分解代谢有关。

关键词: TG-DHA, 脂质体, 脱腥鱼油, 高脂饮食, 脂质代谢

Regulation of High Content of TG-DHA Deodorized Fish Oil on Lipid Metabolism

YANG Ruili, CHAKKAPAT Aenglong, CAO Wanxiu, ZHANG Hui, TANG Qingjuan*

(College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Objective: To investigate the effect of deodorized Triglyceride type-Docosahexaenoic acid (TG-DHA) fish oil on lipid metabolism in mice fed with high-fat diet. Methods: The deodorized TG-DHA fish oil was prepared by liposome embedding technology. Male C57BL/6J mice (6 weeks old) were housed and randomly divided into control group (C), model group (M), TG-DHA fish oil group (O-DHA), deodorized TG-DHA fish oil group (L-DHA). After 8 weeks, blood and liver were collected for lipid accumulation analysis. For gene expression mRNA was extracted from liver for fatty acid synthase (FAS), sterol regulatory element binding protein 1c (SREBP 1c), carnitine palmitoyl transferase 1 (CPT1), lipoprotein lipase (LPL). Results: Liposome embedding could mask the fishy odour in fish oil such as hexanal, 2,4-heptadienal. The content of DHA was 73.74%, the particle size was 159.50 nm, and the zeta potential was -43.10 mV. The liposome was stable and easy to be digested and absorbed in animals. L-DHA significantly improved the serum and hepatic lipid levels in mice fed with a high-fat diet ($P < 0.05$), O-DHA significantly improved the serum level and liver TG content of mice fed with high-fat diet ($P < 0.05$). Both of them significantly decreased FAS mRNA expression ($P < 0.01$), and significantly increased CPT1 mRNA expression ($P < 0.05$). The effects of L-DHA seemed to be better. Conclusion: Deodorized TG-DHA fish oil can improve lipid metabolism by high-fat diet. The mechanism is related to the down-regulation of liver fatty acid synthesis and the promotion of fatty acid catabolism.

Key words: TG-DHA; liposomes; deodorized fish oil; high-fat diet; lipid metabolism

中图分类号: TS221 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)03-0290-10

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050008

引文格式: 杨瑞利, CHAKKAPAT Aenglong, 曹婉秀, 等. TG-DHA 高含量脱腥鱼油对脂代谢的调节作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 290-298, 303.

收稿日期: 2020-05-06

作者简介: 杨瑞利(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 海洋功能食品, E-mail: 1043237934@qq.com.

* 通信作者: 唐庆娟(1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 海洋功能食品, E-mail: tangqingjuan@ouc.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0311201)。

YANG Ruili, CHAKKAPAT Aenglong, CAO Wanxiu, et al. Regulation of High Content of TG-DHA Deodorized Fish Oil on Lipid Metabolism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 290-298, 303. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

随着居民膳食结构中高热量饮食比例不断增高,超重率与肥胖率不断上升^[1]。研究报道,长期高脂饮食会导致机体的能量摄入大于能量消耗,多余的能量会以脂肪的形式储存在体内,最终导致肥胖和脂代谢紊乱^[2]。脂代谢的稳态调控是维持机体基本生命活动的基础,脂代谢紊乱与糖尿病、肥胖、脂肪肝、心血管疾病及细胞异常增殖的发生和发展密切相关^[3]。因此,如何有效预防和改善脂代谢紊乱成为现代社会的焦点。

深海鱼油是指从深海鱼类动物体中提炼出来的不饱和脂肪成分。据文献报道,富含 n-3 多不饱和脂肪酸(n-3 PUFA)的鱼油具有调控糖脂代谢紊乱等功能^[4]。二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic acid, DHA),是 n-3 PUFA 家族中的重要成员,具有抗炎、抗癌、调节免疫力、预防心血管疾病等特性,因而受到广泛关注^[5]。Manickam、Barber、Kim 等^[6-8]用 DHA (25~200 μm)作用于脂肪细胞,发现能抑制其分化,减少细胞中脂滴数量和体积大小。Fan 等^[9]的研究表明,DHA 可以通过上调脂肪分解基因,下调脂肪合成基因来调节高脂饮食导致的脂代谢紊乱。

近年来,人们对 n-3 PUFA 重要性的认识日益提升,大量商业机构开始开发该类补充品。但是鱼油令人难以接受的腥味,这在很大程度上限制了其开发利用^[10]。因此,研发相关的高附加值产品是一个亟需解决的问题。目前研究较多的是 DHA 微胶囊,工业生产中普遍使用蛋白质、明胶等作为壁材,但是包埋率仅为 10% 左右,且溶于水后仍有鱼腥味,影响了其在液体食品中使用。脂质体包埋是一种新型微胶囊制备方法,所用组分与细胞膜近似,且能够有效提高 DHA 等的水溶性和消化吸收特性^[11]。有文献报道,利用脂质体法包埋还可以掩盖鱼油的不良气味,且抗氧化性能更佳^[12-14]。脂质体制备时,考虑到性价比以及在水中的分散性等,一般会选用大豆磷脂作为壁材。杨梅^[15]的实验结果表明,磷脂酰胆碱(PC)含量在 85%~99% 的高 PC 磷脂比其他磷脂更适宜制备脂质体。目前研究中报道的主要是鱼油脂质体的制备,对其生物活性的探究相对较少,不利于鱼油 DHA 精深加工产品的开发。

本文中选取 98% 大豆磷脂酰胆碱作为壁材,制备 TG-DHA 高含量脱腥鱼油,并探究其对高脂饮食小鼠脂代谢的调节作用,以期开发相应的高附加值产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

10/70 TG-DHA 金枪鱼油 浙江舟山新诺佳生物技术有限公司;98% 大豆磷脂酰胆碱 西安艾诺医药科技有限公司;SPF 级 6 周龄雄性 C57BL/6J 小鼠 济南朋悦实验动物繁育有限公司;甘油三酯(Triglyceride, TG)、总胆固醇(Total Cholesterol, TC)

试剂盒 中生北控生物科技股份有限公司;低密度脂蛋白胆固醇(Low Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C)试剂盒 南京建成生物工程研究所;TRIZOL 试剂 美国 Invitrogen 公司;RNA 纯化试剂盒 天根生化科技有限公司;5X All-In-One RT 裂解反转录一体试剂盒、EvaGreen Express 2X qPCR MasterMix abm;10% 低脂饲料(饲料代码 TP23522)、45% 高脂饲料(饲料代码 TP23220) 南通特洛菲饲料科技有限公司;其他试剂 均为国产分析纯。

DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器 上海力辰邦西仪器科技有限公司;RE-2000A 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;Model680 型酶标仪 美国 BioRAD 产品;Agilent7820 型气相色谱仪 美国 Agilent 科技公司;19091N-113 型 HP-INNOWAX 石英毛细管柱 美国 Agilent 科技公司;气相色谱质谱联用仪(7980A/5975C) 美国 Agilent 公司;Nano ZS90 纳米粒度仪 英国马尔文公司;NIKON/Ni-E 电子荧光显微镜 南京伊若达仪器设备有限公司;TGL-16G 型台式离心机 上海安亭科学仪器厂;IQ5 Realtime PCR 仪 美国 Bio-RAD。

1.2 实验方法

1.2.1 TG-DHA 高含量脱腥鱼油的制备 称取质量比为 1:4 的 98% 大豆磷脂酰胆碱和金枪鱼油溶于 95% 的食用酒精中,然后在 40 $^{\circ}\text{C}$ 条件下旋转蒸发(转速 100 r/min)除去有机试剂,直至蒸馏烧瓶中形成一层薄膜。将其冷却 30 min,加入超纯水振荡混匀,然后过 200 nm 聚碳酸酯膜,即为 TG-DHA 高含量脱腥鱼油脂质体浑浊液^[16]。

1.2.1.1 鱼油与脱腥鱼油 DHA 含量的检测 鱼油原料甲酯化:取 5 mg 鱼油于 10 mL 尖头具塞试管中,再加入内标(C19:0)约 500 μg ,用氮气缓慢吹干内标中的有机试剂。再向试管中加入 2 mL HCL:甲醇(1:5 V/V)溶液,再充入氮气拧紧管口防止氧化,而后再将试管置于 90 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中加热 1 h,期间不断摇匀以确保甲酯化完全。冷却至室温加入 2 mL 正己烷,涡旋振荡,静置分层。取上层(正己烷层)溶液 1 μL 进行气相色谱分析^[17]。

气相色谱分析条件:Supelcowax 石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm,0.25 μm ,载气为高纯氮气,模式为恒定压力(10.9 psi),分流比 20:1;柱箱升温程序为 170 $^{\circ}\text{C}$ (0 min) \rightarrow 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ \rightarrow 240 $^{\circ}\text{C}$ (22 min),平衡时间为 1 min;检测器为火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID),进样口温度为 260 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度为 260 $^{\circ}\text{C}$,氢气流量 30 mL/min,空气流量 400 mL/min,氮气尾吹流量:25 mL/min^[18]。

1.2.1.2 脂质体粒径和 Zeta 电位的检测 用 ZS90 纳米激光粒度分析仪测定。将最佳工艺制备的纳米脂质体悬浮液稀释 100 倍,测定平均粒径和 Zeta 电位,样品平行测定 3 次^[19]。

1.2.1.3 TG-DHA 高含量脱腥鱼油的挥发性成分分析 顶空固相萃取条件:取 3 g 鱼油和脂质体包埋的鱼油样品置于 15 mL 顶空瓶中,将老化后的 75 μm Carboxen/PDMS(50/30 μm DVB/Car/PDMS) 萃取头插入样品瓶顶空部分,60 $^{\circ}\text{C}$ 下吸附 30 min,吸附后的萃取头取出后插入气相色谱进样口,于 250 $^{\circ}\text{C}$ 解吸 5 min,同时启动仪器采集数据^[20]。

色谱柱为 HP-5;进样口温度:250 $^{\circ}\text{C}$;程序升温:柱初温 40 $^{\circ}\text{C}$,恒温 3 min,以 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 200 $^{\circ}\text{C}$,再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$,保持 10 min;载气:氦气,流速 1.0 mL/min;不分流进样。电离源为电喷雾电离,离子阱温度 150 $^{\circ}\text{C}$,GC-MS 传输线温度 250 $^{\circ}\text{C}$,质量扫描范围 33~300 u,扫描速率 0.220 s/scan;电喷雾电离电子能量 70 eV。

GC-MS 采用 NIST02.L 标准图库对挥发性成分进行定性分析(匹配度大于 80,最大值为 100)。通过 Excel 数据处理系统统计挥发性成分总面积(除去其他非嗅感物质杂峰),采用面积归一化法求得各挥发性成分的相对含量百分比^[21]。

1.2.2 动物饲养与取样 将 40 只 SPF 级的雄性 C57BL/6J 小鼠普通饲料暂养一周后,按体重随机分为两组,一组 10 只,喂养 10% 低脂饲料,另一组 30 只,喂养 45% 高脂饲料。4 周后,将喂养高脂饲料的小鼠随机分为 3 组,模型组(M 组),TG-DHA 高含量鱼油组(O-DHA 组),TG-DHA 高含量脱腥鱼油组(L-DHA 组)。分别灌胃生理盐水、TG-DHA 高含量鱼油(DHA 含量 76.87%)、TG-DHA 高含量脱腥鱼油(DHA 含量 73.74%),连续灌胃 8 周,灌胃剂量为 1000 mg/kg 体重。小鼠养在动物专门饲养笼内,单笼单只,饲养环境为普通环境,室温(23 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$,湿度 55%~58%,12 h/12 h 光暗循环,饲养期间所有动物均自由摄食和饮水。12 周后,实验结束,小鼠处死前禁食 12 h,摘眼球取血,室温静置 30 min 后入冰,7500 r/min,离心 15 min,取上层血清,-80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。脱颈椎处死取脏器,称重,-80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。由于附睾脂肪体积较大,取附睾脂肪组织切片做代表,取肝脏切片浸入 4% 多聚甲醛中固定。

1.2.3 小鼠生长指标的测定 计算公式如下:

$$\text{Lee's 指数} = \frac{\text{体重}(\text{g})^{1/2} \times 10}{\text{体长}(\text{cm})}$$

$$\text{体脂率}(\%) = \frac{\text{总脂肪质量}}{\text{终体质量}(\text{g})} \times 100$$

其中,脂肪总重(g) = 附睾脂肪重量 g + 肾周脂

肪重量 g + 皮下脂肪重量 g。

1.2.4 脂肪组织形态学(HE 染色) 取上述各组小鼠甲醛固定超过 24 h 以上的脂肪组织进行乙醇梯度脱水,二甲苯透明,浸入石蜡包埋,预冷后切片(厚度 5 μm)^[22]。严格按照试剂盒说明书将切片进行 H&E 染色,滴少许中性树胶封片,自然通风晾干,收集并镜检(100 \times),观察脂肪细胞的大小和数量。

1.2.5 血清生化水平的测定 取上述各组小鼠血清,试剂盒法测定血清中 TC、TG、LDL-C 的浓度,具体方法按照试剂盒说明书进行操作。

1.2.6 肝脏指标的测定

1.2.6.1 肝脏生化水平的测定 取上述各组小鼠肝脏样品,Floch 法提取肝脏脂质,试剂盒法测定肝脏中 TC、TG 的浓度,具体方法按照试剂盒说明书进行。

1.2.6.2 肝脏组织形态学(油红染色) 取各组小鼠肝脏切片于多聚甲醛中固定,并制作冰冻切片,厚度 10 μm ,将切片置于涂有多聚赖氨酸的载玻片上,并放入 10% 的甲醛固定液中,固定 10 min;用蒸馏水稍洗,待切片干燥,将切片置于油红工作液中浸染 8~10 min;用 60% 乙醇分色;蒸馏水稍洗;苏木素淡染细胞 30 s,自来水泛蓝;用滤纸把周围水分吸干,甘油明胶封片;在光学显微镜下观察各组肝组织中脂滴的变化。

1.2.6.3 肝脏脂代谢相关基因 mRNA 表达量测定 Trizol 法提取肝脏中的总 RNA,用 RNA 纯化试剂盒去除蛋白质、无机盐离子和有机杂质等,具体方法按照 RNA 纯化试剂盒说明书进行。加入适量 DEPC 水稀释,通过测定溶液吸光 A260 nm/A280 nm 比值确定所得 RNA 的纯度,比值 1.8~2.0 时用于下一步实验。用 5X All-In-One RT 裂解反转录一体试剂盒进行反转录,将 RNA 反转成 cDNA,具体步骤按照试剂盒说明书进行。按照 EvaGreen Express 2X qPCR MasterMix 试剂盒说明书在冰上配制 20 μL 反应体系,该体系包括 2 \times MasterMix 10 μL ,PCR Forward、Reverse Primer 各 0.6 μL ,cDNA 溶液 4 μL ,无菌水 4.8 mL。设置 2 个复孔,使用 IQ5 型荧光定量 PCR 仪进行测定,扩增条件:95 $^{\circ}\text{C}$,10 min;95 $^{\circ}\text{C}$,15 s,60 $^{\circ}\text{C}$,20 s,95 $^{\circ}\text{C}$,15 s(45 个循环);65 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 95 $^{\circ}\text{C}$ (0.5 $^{\circ}\text{C}/10$ s),以 β -actin 为内参基因,mRNA 相对表达量用 2- $\Delta\Delta\text{CT}$ 法计算^[23]。引物由上海生工生物工程有限公司合成;引物序列见表 1:

1.3 数据处理

所有实验数据均用 SPSS 25.0 软件进行统计分

表 1 引物设计序列表

Table 1 Primer sequences used for PCR

基因名称	上游引物序列(5'-3')	下游引物序列(5'-3')
FAS	ATATCACCGTGTTCAGGAAC	GGAATCCAGATCAAGATGGCTC
SREBP-1c	TCTGGAGACATCGCAAACAAG	AGGTGGCCGATGAGGTTTC
CPT-1	AGATCAATCGGACCCTAGACAC	CAGCGAGTAGCCCATAGTCA
LPL	TTGCCCTAAGGACCCCTGAA	TTGAAGTGGCAGTTAGACACAG
PPAR α	GTACGGTGTGTATGAAGCCATCTT	GCCGTACCGGATCAGCAT
PGC-1	AGAACGTGACCTTATCACCCC	GCACCTCAACCCGACTACTT
β -actin	GTACCACCATGTACCCAG GC	AACGCAGCTCAGTAACAGTCC

析,结果以平均值 ± SD 表示,组间差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),以 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。所有实验均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 TG-DHA 高含量脱腥鱼油参数检测

2.1.1 两种鱼油中 DHA 含量检测 气相色谱法检测到 TG-DHA 高含量鱼油中的 DHA 含量高达 76.87%,而 TG-DHA 高含量脱腥鱼油中的 DHA 含量为 73.74%,因此在制备 TG-DHA 高含量脱腥鱼油脂质体时通过控制鱼油的添加量来保证 O-DHA 组与 L-DHA 组小鼠摄入 DHA 量相一致。

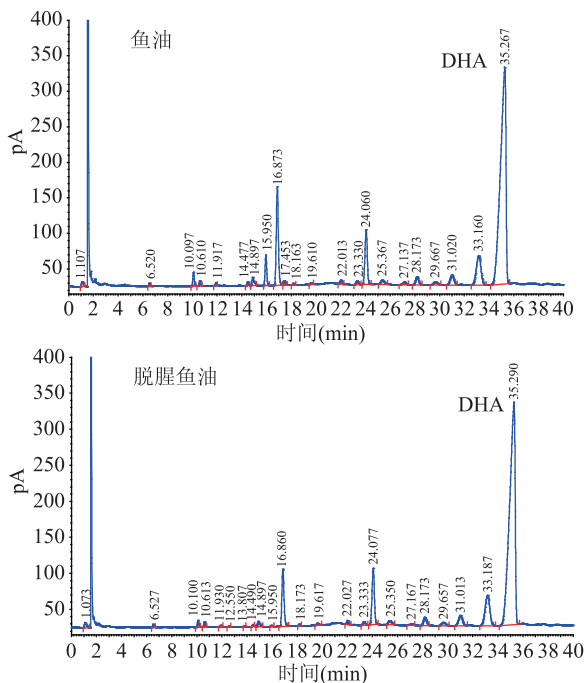


图1 鱼油脂肪酸组分色谱图

Fig.1 Chromatogram of fatty acids in fish oil

2.1.2 粒径、Zeta 电位 粒径分布通常作为脂质体稳定性的一个重要指标。由表 2 可见,脱腥鱼油脂质体的平均粒径 159.50 nm, PDI 为 0.23。PDI 值越小,表明粒径分布范围越狭窄,粒度的均匀性也越好,在动物体内越易消化吸收。脱腥鱼油脂质体的 Zeta 电位为 -43.10 mV, Zeta 电位大意味着脂质体双分子膜表面带有的电荷越多,聚集时需要克服的静电斥力就越大,较大的 Zeta 电位可以阻碍脂质体溶液中的微粒发生凝聚。因此,根据粒径、PDI 和 Zeta 电位的测定结果,可以推断脱腥鱼油脂质体具有较好的稳定性。

表2 脱腥鱼油脂质体的粒径、Zeta 电位

Table 2 Particle size, zeta potential of deodorized fish oil liposomes

样品	PDI (聚合物 分散性指数)	Z-Average (平均粒径) (nm)	Zeta 电位 (mV)
脱腥鱼油脂质体	0.23 ± 0.15	159.50 ± 1.72	-43.10 ± 1.05

2.1.3 挥发性成分分析 通过 GC-MS 检测,并经 NIST02.L 标准图库分析,得到 TG-DHA 高含量鱼油

与 TG-DHA 高含量脱腥鱼油挥发性风味成分鉴定结果,见表 3、表 4。在 TG-DHA 高含量鱼油中鉴定出 40 多种挥发性风味物质成分,主要由醛类、烃类、酸类、酯类、杂环类及其他化合物组成,其中对鱼油腥味影响较大的是醛类,共有 4 种。而在 TG-DHA 高含量脱腥鱼油中仅鉴定出 27 种挥发性风味物质成分,醛类物质减少至 1 种。己醛、2,4-庚二烯醛等通常会产生令人不愉快的鱼油腥味^[24]。由表 4 可见,在 TG-DHA 高含量脱腥鱼油中并未检测到 2,4-庚二烯醛,而已醛的相对含量也由原来的 1.24% 降低到 0.42%。相比于 TG-DHA 高含量鱼油, TG-DHA 高含量脱腥鱼油中的烷烃类、烯烃类、酸类、杂环类物质均有所减少,且在 TG-DHA 高含量脱腥鱼油中并未检测到酸类物质,但酯类化合物明显增多。酸类物质大多带有腐败,汗味,令人反感的气味,阈值较高,对鱼油的整体风味有不良影响^[25]。而酯类化合物多呈果香和花香味,且阈值较低,能赋予 TG-DHA 高含量脱腥鱼油水果香、花香等香甜气味^[26]。上述结果表明,脂质体包埋后可以改变鱼油中挥发性成分的组成,尤其是降低腥味物质的含量,这可能是脂质体包埋掩盖鱼油不良气味的原因。

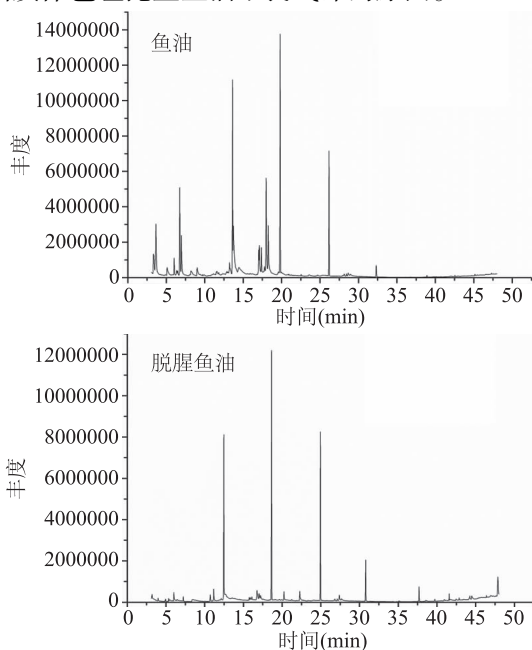


图2 鱼油挥发性成分色谱图

Fig.2 Chromatogram of volatile components in fish oil

表3 鱼油挥发性物质种类

Table 3 Types of volatile substances in fish oil

化合物	鱼油	脱腥鱼油
醛类	4	1
烷烃类	13	7
烯烃类	11	4
酸类	2	-
酯类	4	10
杂环化合物	3	1
其他化合物	3	4
总和	40	27

表4 鱼油挥发性成分组成及相对含量
Table 4 Composition and relative contents of volatile components in fish oil

化合物	中文名称	鱼油相对含量(%)	脱腥鱼油相对含量(%)
醛类	己醛	1.24	0.42
	2-戊烯醛	1.55	-
	2,4,6-辛三烯二醛	0.06	-
	2,4-庚二烯醛	4.79	-
	(E,Z)-4-亚乙基环己烷	1.23	-
	壬烷	0.09	-
	1,1-二乙氧基-2-甲基丁烷	-	0.6
	1,4-双(亚甲基)环己烷	0.03	-
	三环辛烷	0.24	-
	六甲基环三硅氧烷	-	0.89
烷烃类	八甲基环四硅氧烷	12.18	9.42
	4-环丙基去甲烷	22.29	-
	十二烷	-	0.96
	环十五烷	0.07	-
	十四烷	-	1.04
	十六烷	-	0.15
	三十四烷	0.04	-
	十七烷	0.05	0.13
	2,6,10,14-四甲基十五烷	0.07	-
	二十烷	6.58	-
烯烃类	2,21-二甲基二十二烷	0.12	-
	二十二烷	1.11	-
	苯乙烯	-	0.21
	4-甲基-1-环己烯	3.36	-
	2-辛烯	0.23	-
	(Z,Z)3,5-辛二烯	6.29	-
	1,3,5-辛三烯	1.63	0.21
	1-乙基-1,4-环己二烯	0.13	-
	2,3-二甲基环己-1,3-二烯(E,E,E)-2,4,6-辛三烯	0.04	-
	(E,E,E)2,4,6-辛三烯	0.59	-
酯类	3-亚乙基-1-甲基-环戊烯	0.35	-
	1,3,6-辛三烯	0.24	-
	2,3-二甲基环己-1,3-二烯	0.19	-
	4,4-二甲基-1-(2,7-辛二烯基)-环丁烯	0.22	-
	柠檬烯	-	0.5
	1,4,8-十二碳三烯	-	0.37
	2,9-十一碳酸	0.94	-
	十八碳-9-烯酸	0.57	-
	甲基苯甲基乙酸酯	0.06	-
	5,8,11-庚三烯基硫酸甲酯	0.03	-
酸类	十四烷酸乙酯	0.09	0.31
	十六烷酸乙酯	0.07	1.32
	1,2-笨二甲酸-丁基-2-甲基丙酯	-	0.38
	邻苯二甲酸二丁酯	-	0.38
	油酸乙酯	-	1.44
	9-十八碳烯酸甲酯	-	1.44
	十八烷酸乙酯	-	1.19
	5,8,11,14,17-十二碳五烯酸乙酯	-	3.23
	4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸甲酯	-	3.23
	5,8,11,14,17-二十碳五烯酸甲酯	-	3.23
酯类	2-乙基咪喃	3.36	0.53

续表

化合物	中文名称	鱼油相对含量(%)	脱腥鱼油相对含量(%)
杂环化合物	2-(2-戊烯基)呋喃	0.33	-
	3-十二碳烯-1-炔	0.09	-
	对二甲苯	0.15	-
	邻二甲苯	0.15	-
	丙基苯	0.57	-
其他化合物	1,3-双(1,1-二甲基乙基)苯	-	0.82
	丁基化羟基甲苯	-	0.12
	4,6-二(1,1-二甲基乙基)-乙-甲基苯酚	-	0.12
	油酸氯化物	-	1.44

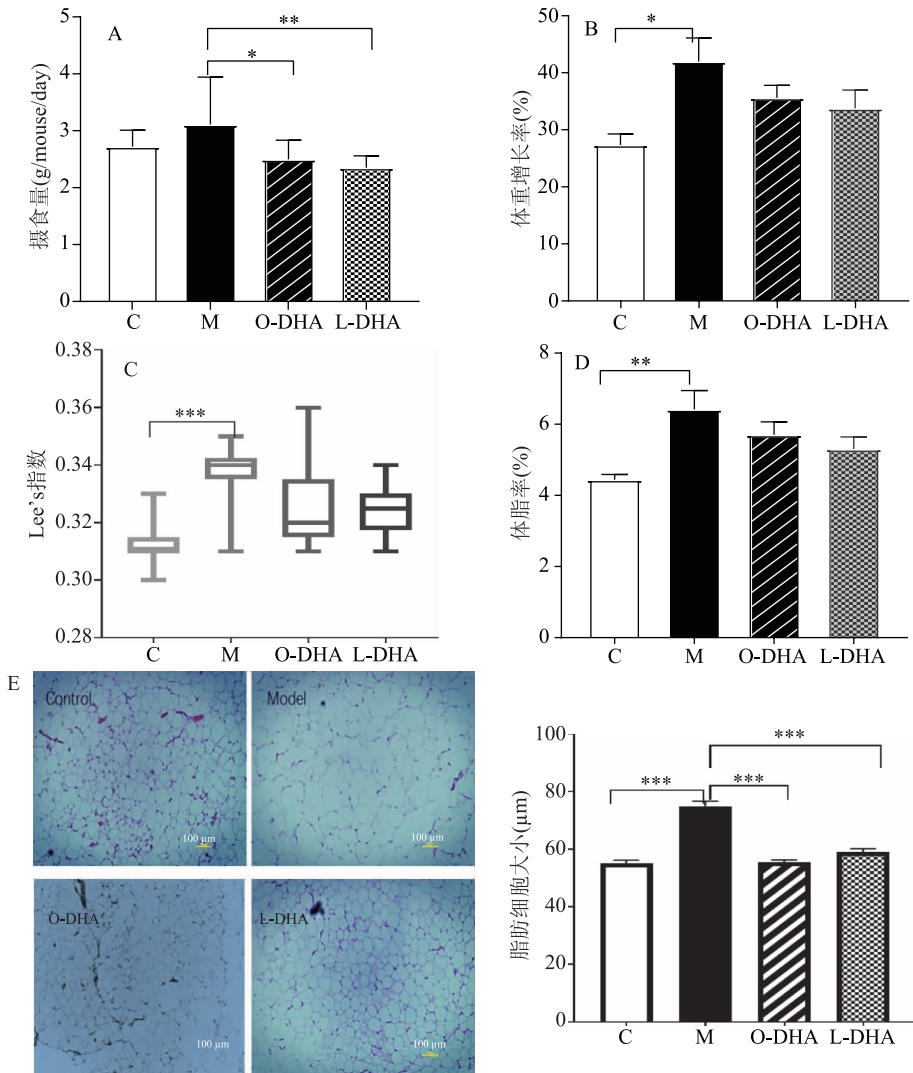


图3 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对高脂饮食小鼠体脂含量的影响

Fig.3 Effect of deodorized fish oil with high content of TG-DHA on body fat content of mice fed with high-fat diet
 注:A:摄食量;B:体重增长率;C:Lee's 指数;D:体脂率;E:附睾脂肪组织 HE 切片。* 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示差异非常显著, $P < 0.01$, *** 表示差异极显著, $P < 0.001$;图4、图5、图7同。

2.2 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对小鼠摄食量及体脂含量的影响

由图3A可见,与M组相比,O-DHA组小鼠与L-DHA组小鼠摄食量显著下降($P < 0.05$),但O-DHA组小鼠与L-DHA组小鼠的摄食量并无显著性差异($P > 0.05$)。由图3B、C可见,与C组相比,M

组小鼠体重增加率显著升高($P < 0.05$),Lee's 指数极显著升高($P < 0.001$),而O-DHA与L-DHA的摄入均可降低由于高脂饮食导致的体重增加和Lee's 指数增长,但并未达到显著性水平($P > 0.05$)。由图3D可见,与C组相比,M组小鼠体脂率非常显著增长($P < 0.01$),O-DHA与L-DHA的摄入均可降低由高

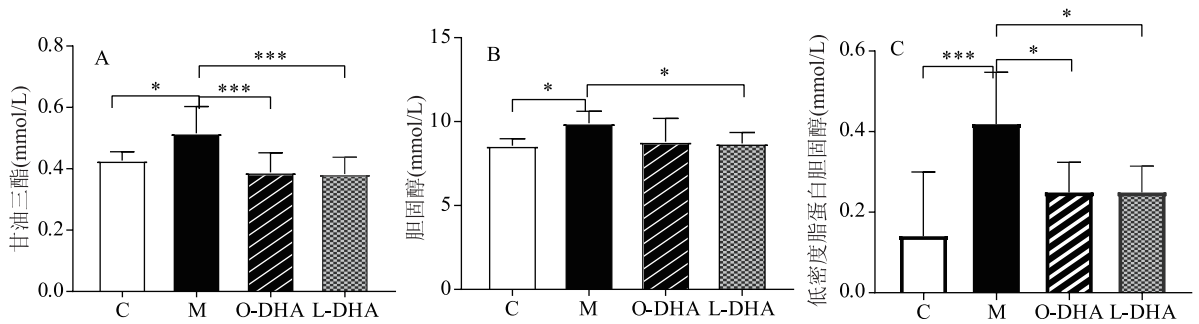


图4 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对高脂饮食小鼠血清生化水平的影响

Fig.4 Effects of deodorized fish oil with high content of TG-DHA on serum biochemical levels in mice fed with high-fat diet
注:A:甘油三酯(TG);B:胆固醇(TC);C:低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)。

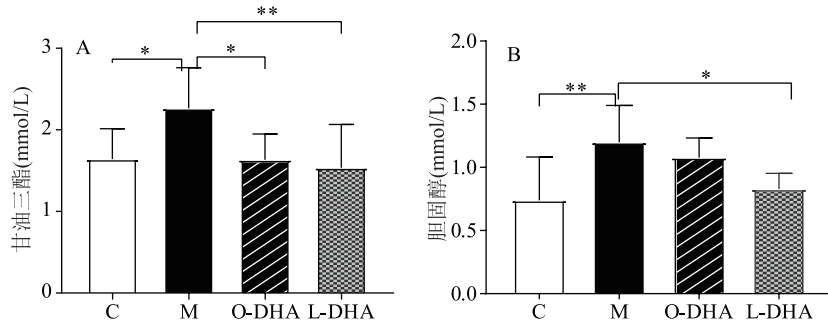


图5 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对高脂饮食小鼠肝脏生化水平的影响

Fig.5 Effects of deodorized fish oil with high content of TG-DHA on liver biochemical level in mice fed with high-fat diet
注:A:肝脏甘油三酯(TG);B:肝脏胆固醇(TC)。

脂饮食导致的体脂率增长,虽然未达到显著性水平($P > 0.05$),但可以极显著降低附睾脂肪组织中脂肪细胞的大小($P < 0.001$),且L-DHA组与O-DHA组相比,并无显著性差异(图3E)。以上结果说明,TG-DHA高含量鱼油在脱腥处理后,仍具有降低高脂饮食小鼠体脂含量的作用。

2.3 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对小鼠血清生化水平的影响

脂代谢紊乱的最直观表现就是血脂异常。由图4可以看出,与C组相比,高脂饮食会导致M组小鼠血清中的TG($P < 0.05$)、TC($P < 0.05$)、LDL-C($P < 0.001$)水平显著升高。O-DHA和L-DHA的摄入则极显著降低了高脂饮食小鼠血清TG($P < 0.001$)和显著降低LDL-C($P < 0.05$)水平;L-DHA的摄入显著降低了高脂饮食小鼠血清TC($P < 0.05$)和LDL-C($P < 0.05$)水平。结果表明,TG-DHA高含量脱腥鱼油可以有效改善高脂饮食小鼠的血清脂质水平。

2.4 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对肝脏生化水平的影响

肝脏是脂质代谢的重要场所。由图5可见,与C组相比,高脂饮食会导致M组小鼠肝脏中的TG($P < 0.05$)和TC($P < 0.01$)水平显著升高。O-DHA的摄入仅显著降低了高脂饮食小鼠中TG水平($P < 0.05$),而L-DHA的摄入则显著降低高脂饮食小鼠肝脏中TG($P < 0.01$)和TC($P < 0.05$)水平,表明TG-DHA高含量脱腥鱼油可以有效改善高脂饮食小鼠的肝脏脂质水平。

2.5 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对肝脏组织形态的影响

油红染色是观察肝细胞内脂肪含量高低的常用方法之一。由图6可见,与C组相比,M组小鼠出现肝脏脂质沉积明显增多的现象。而与M组相比,O-DHA组与L-DHA组的脂质沉积均有所减少,肝脂细胞形态趋于一致。而与O-DHA组相比,

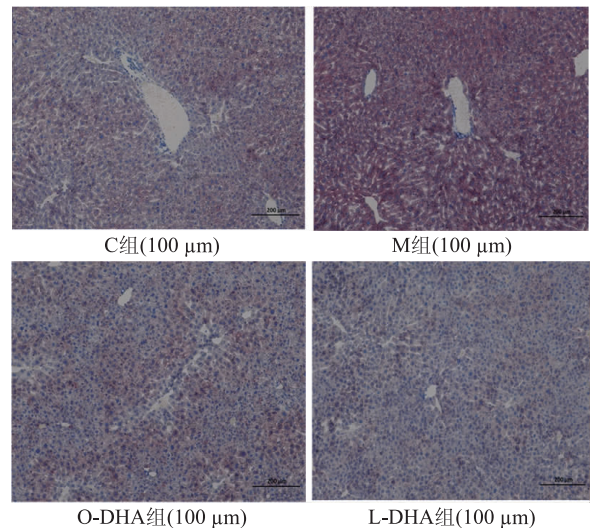


图6 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对高脂饮食小鼠肝脏组织形态学的影响

Fig.6 Effect of deodorized fish oil with high content of TG-DHA on liver histomorphology of mice fed with high-fat diet

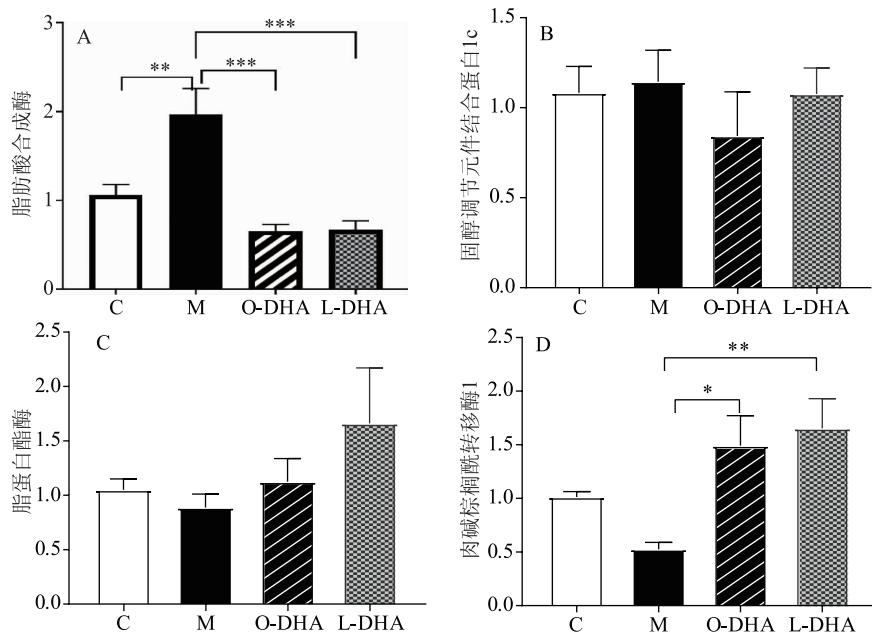


图7 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对高脂饮食小鼠肝脏脂代谢相关基因 mRNA 表达水平的影响

Fig.7 Effect of deodorized fish oil with high content of TG-DHA on mRNA expression of lipid metabolism related genes in liver of mice fed with high-fat diet

注:A:脂肪合成酶(FAS);B:固醇调节元件结合蛋白1c(SREBP-1c);C:脂蛋白酯酶(LPL);D:肉碱棕榈酰转移酶1(CPT-1)。

L-DHA组小鼠肝脏细胞排列更加紧密。结合上述肝脂水平结果,表明TG-DHA高含量脱腥鱼油可以有效改善高脂饮食小鼠肝脂脂质蓄积,且效果可能优于TG-DHA高含量鱼油。

2.6 TG-DHA 高含量脱腥鱼油对小鼠脂代谢相关基因 mRNA 表达水平的影响

如图7可见,与C组相比,M组小鼠肝脏合成基因FAS mRNA显著上调($P < 0.01$),脂肪氧化分解相关的基因CPT-1 mRNA表达下调($P > 0.05$)。当O-DHA和L-DHA摄入后,与M组相比,O-DHA组与L-DHA组小鼠肝脏脂肪合成相关基因FAS mRNA极显著下调($P < 0.001$),而SREBP1c mRNA也有下调趋势,而脂肪氧化分解相关基因CPT-1 mRNA表达显著上调($P < 0.05$),而LPL的mRNA表达也具有上调的趋势。且L-DHA与O-DHA对高脂饮食小鼠脂代谢相关基因的调控没有显著性差异($P < 0.05$)。这些结果表明,TG-DHA高含量脱腥鱼油能够调控肝脏中脂肪合成和氧化分解相关基因的表达,从而改善高脂饮食导致的脂代谢紊乱。

3 讨论

本研究显示,利用脂质体技术包埋后的鱼油可以掩盖鱼油中的腥味物质。这与Ghorbanzade等^[13]的研究结果相一致。动物实验研究结果显示,O-DHA与L-DHA均有降低高脂饮食小鼠体质量、Lee's指数、体脂率的趋势,且均可明显降低附睾脂肪细胞的大小。长时间的高脂饮食是脂代谢紊乱的重要原因。脂代谢紊乱的最直观表现就是血脂异常。肝脏在脂质代谢中也起着特别重要的作用,它能合成脂蛋白,有利于脂质运输,也是脂肪酸氧化和酮体形成的主要场所^[27]。一般来说,血脂的变化经常会预示着肝脂的变化,大量研究表明,n-3 PUFA

可以显著改善高脂饮食小鼠机体内的血脂水平,对肝脏脂质沉积也有一定的改善作用^[28]。本实验研究结果发现,O-DHA与L-DHA的摄入,显著降低了高脂饮食小鼠血清中的TG、TC、LDL-C($P < 0.05$)。L-DHA的干预显著降低了高脂饮食小鼠肝脏中的TG、TC含量($P < 0.05$),而O-DHA仅显著降低了高脂饮食小鼠肝脏中的TG含量($P < 0.05$)。与O-DHA相比,L-DHA对高脂饮食小鼠的改善作用更加明显,但无显著性差异。

多数研究表明,n-3 PUFA能通过调控脂肪酸合成和分解的相关基因,来调控肝脏脂代谢紊乱^[29]。Xiong等^[30]的实验结果表明,富含橄榄油和鲱鱼油的饮食均可降低JCR:LA-cp大鼠肝脂中FAS、ACC-1、SREBP-1的表达,且富含鲱鱼油的饮食比富含橄榄油的饮食效果更加明显。朱翌哲等^[31]发现高含量DHA/EPA-TG鱼油明显抑制脂肪肝大鼠肝脏中的SREBP-1c、FSA、ME、G6PDH等脂肪合成相关基因mRNA表达,有效上调PPAR- α 、CPT-1等脂肪分解相关基因mRNA表达。FAS是脂肪酸合成关键酶,催化乙酰辅酶A和丙二酰辅酶A而生成长链脂肪酸,在肝脏组织中表达较高^[32]。本研究中O-DHA与L-DHA的干预极显著下调高脂饮食小鼠FAS的mRNA表达($P < 0.001$)。说明TG-DHA高含量脱腥鱼油可以通过下调肝脏合成相关基因,在基因水平上抑制肝脏基因合成,从而调节脂质代谢。CPT-1是脂肪酸 β 氧化的限速酶,它可使长链的乙酰辅酶A进入线粒体基质内,参与三羧酸循环,促进脂肪酸 β 氧化^[33]。本研究发现O-DHA与L-DHA摄入均可通过显著上调CPT-1的mRNA表达($P < 0.05$),在转录水平通过促进肝脏脂肪酸 β 氧化来抑制TG合成,调节脂代谢。此外两种鱼油的干预有下调高脂

饮食小鼠肝脏中 SREBP-1, 上调 LPL mRNA 表达的趋势, 但并未达到显著水平。与 TG-DHA 高含量鱼油干预相比, TG-DHA 高含量脱腥鱼油的干预并不会影响 TG-DHA 在调节高脂饮食小鼠脂代谢中的作用。

综上所述, 本研究从动物实验水平上表明, TG-DHA 高含量脱腥鱼油具有改善脂代谢紊乱的作用, 其作用机制通过抑制脂肪合成基因的表达, 同时促进脂肪分解基因的表达来起作用。脱腥后的 TG-DHA 高含量鱼油既可以掩盖鱼油的腥味物质, 又不会影响鱼油中 TG-DHA 的生物活性作用。本研究为深海鱼油的开发利用提供了依据。

参考文献

- [1] Wu X Y, Lin L, Qi H Y, et al. Association between lipoprotein (a) levels and metabolic syndrome in a middle-aged and elderly Chinese cohort [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2019, 32(7): 477-485.
- [2] 洪煜, 张茜. 青少年单纯性肥胖的诱因与现状分析[J]. *科技信息*, 2011(29): 274, 281.
- [3] 何李琳, 陈晓倩, 章宇. n-3 多不饱和脂肪酸改善糖脂代谢的研究进展[J]. *天然产物研究与开发*, 2018, 30(9): 1655-1661.
- [4] Bellenger J, Bellenger S, Escoula Q, et al. N-3 polyunsaturated fatty acids: an innovative strategy against obesity and related metabolic disorders, intestinal alteration and gut microbiota dysbiosis [J]. *Biochimie*, 2019, 159: 66-71.
- [5] 代荣阳, 陈润, 周志远. DHA 和 EPA 的抗炎及免疫调节功能[J]. *泸州医学院学报*, 2004, 27(1): 83-84.
- [6] Manickam E, Sinclair A J, Cameron-Smith D. Suppressive actions of eicosapentaenoic acid on lipid droplet formation in 3T3-L1 adipocytes [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2010, 9: 57.
- [7] Barber E, Sinclair A J, Cameron-Smith D. Comparative actions of Omega-3 fatty acids on in-vitro lipid droplet formation [J]. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 2013, 89(5): 359-366.
- [8] Kim H K, Della-Fera M, Lin J, et al. Docosahexaenoic acid inhibits adipocyte differentiation and induces apoptosis in 3T3-L1 preadipocytes [J]. *The Journal of Nutrition*, 2006, 136(12): 2965-2969.
- [9] Fan Y X, Ren C F, Meng F X, et al. Effects of algae supplementation in high-energy dietary on fatty acid composition and the expression of genes involved in lipid metabolism in Hu sheep managed under intensive finishing system [J]. *Meat Science*, 2019, 157: 107872.
- [10] Chen Q, McGillivray D, Wen J Y, et al. Co-encapsulation of fish oil with phytosterol esters and limonene by milk proteins [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 117(4): 505-512.
- [11] 李鹤, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 不同来源 DHA 提取技术及其在食品工业中的应用进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(7): 390-394.
- [12] Karim F T, Ghafoor K, Ferdosh S, et al. Microencapsulation of fish oil using supercritical antisolvent process [J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2017, 25(3): 654-666.
- [13] Ghorbanzade T, Jafari S M, Akhavan S, et al. Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt [J]. *Food Chemistry*, 2017, 216: 146-152.
- [14] 涂宗财, 马达, 王辉, 等. 薄膜-探头式超声法和注乙醇-DHPM 法制备的鱼油脂质体的理化性质研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 127-130.
- [15] 杨梅. 高磷脂酰胆碱(PC)含量的大豆磷脂及果酸脂质体的制备研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.
- [16] 何玉宁, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 不同尺度鱼油脂质体对酸奶品质的影响[J]. *中国乳品工业*, 2019, 47(8): 17-21.
- [17] 崔洁. 不同分子形式 n-3 系列长链多不饱和脂肪酸的消化吸收特性及其对脂质代谢的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [18] 赵英才, 于竹林, 李榕, 等. 二十二碳六烯酸营养强化鸡蛋及蛋黄粉中脂质分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(15): 5052-5057.
- [19] 涂宗财, 张朋, 王辉, 等. 鱼油纳米脂质体的制备及其性质测定[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(2): 50-55.
- [20] 陈娜, 陈小娥, 方旭波, 等. 基于电子鼻和气质联用技术分析鱼油挥发性成分[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(10): 179-184.
- [21] 王玉, 王睿迪, 薛勇, 等. 传统加工咸鲑鱼的挥发性风味成分[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(9): 268-276.
- [22] 王雅楠, 张佳红, 郭海涛, 等. 蛋氨酸限制和胶原蛋白肽对高脂饮食小鼠脂代谢和氧化应激的联合作用[J]. *食品科学*, 2018, 39(9): 108-115.
- [23] 刘芳, 曹婉秀, 李兆杰, 等. 硫酸软骨素二糖对疲劳致小鼠肾脏炎症的改善作用[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(18): 285-288, 293.
- [24] 张迪. 美拉德反应改良南极磷虾酶解产物风味的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2017.
- [25] 史笑娜, 黄峰, 张良, 等. 红烧肉加工过程中脂肪降解、氧化和挥发性风味物质的变化研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(3): 257-265.
- [26] 李莹, 吕欣然, 马欢欢, 等. 应用顶空-固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术分析传统锦州虾酱中挥发性物质[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(9): 210-216.
- [27] Ponziani F R, Pecere S, Gasbarrini A, et al. 肝脏脂质代谢的生理与病理生理[J]. *胃肠病学和肝病专家评论*, 2015, 9(8): 1055-1067.
- [28] 崔洁, 丁宁, 韩秀清, 等. 鲑鱼卵 DHA 磷脂对高脂饮食诱导小鼠代谢综合征的改善作用[C]//2014 年中国水产学会学术年会论文集. 长沙, 2014: 413.
- [29] 周晶晶, 李家速, 王奇金. Omega-3 多不饱和脂肪酸对脂肪代谢调节作用研究进展[J]. *第二军医大学学报*, 2019, 40(1): 68-73.
- [30] Deng X, Elam M B, Wilcox H G, et al. Dietary olive oil and menhaden oil mitigate induction of lipogenesis in hyperinsulinemic corpulent JCR:LA-cp rats: Microarray analysis of lipid-related gene expression [J]. *Endocrinology*, 2004, 145(12): 5847-5861.
- [31] 朱昱哲, 王静凤, 毛磊, 等. 高含量 DHA/EPA 甘油三酯鱼

(下转第 303 页)

Table 7 Content of other nutrients in *Akebia trifoliata*

序号	指标	果皮	果肉
1	果胶含量(g/kg)	8.37	/
2	蛋白质(g/100 g)	0.45	0.32
3	脂肪(g/100 g)	0.2	0.1
4	黄酮(mg/100 g)	未检出	15.57

注:/是指未检测该指标。

由表7可知,果皮果胶含有量为8.39 g/kg,蛋白质含量为0.45 g/100 g,脂肪含量为0.2 g/100 g;果肉蛋白质含量为0.32 g/100 g,脂肪含量0.1 g/100 g,黄酮含量15.57 mg/kg。

3 结论

矿物元素是人体结构的组成部分并参与人体的生命活动,氨基酸是人体蛋白质的基本组成单位,维生素是人为维持正常的生理功能而必须从食物中获得的一类微量有机物质,脂肪酸可以帮助人体补充人体活动所必要的营养物质。八月瓜矿质元素种类齐全、含量丰富,氨基酸总量丰富,人体必需氨基酸、药用氨基酸含量较高,不饱和脂肪酸含量较高。本文通过研究分析,可以得出以下结论:

八月瓜果皮含有锰、钾矿物质营养成分,含有16种氨基酸,其中必需氨基酸7种,必需氨基酸含量比重达到WHO/FAO提出理想蛋白质,必需氨基酸含量不及果肉均衡,氨基酸营养价值比果肉低,含较高量的鲜味氨基酸和药用基酸,含有少量的维生素E,含有一定量的果胶、蛋白质和脂肪。

八月瓜种子含有多种矿物质营养成分(钾、磷、钙、铁),富含锰、铜矿物质营养成分,含有丰富的脂肪酸,不饱和酸含量比重较高。

八月果肉含有铜矿质营养成分,富含锰矿物质营养成分,含有16种氨基酸,其中必需氨基酸8种,必需氨基酸含量比重达到WHO/FAO提出理想蛋白质,必需氨基酸含量均衡,营养价值高,含有较高量的鲜味氨基酸和药用基酸;含有少量的维生素C,可视为不含维生素B₁、维生素B₂、维生素B₆,含有一定量的蛋白质、脂肪和黄酮。

参考文献

- [1]田定科.野生果树-八月瓜在湘西的人工栽培研究初探[J].黑龙江农业科学,2008(4):92-94.
- [2]温建荣.八月瓜的营养价值与栽培技术要点阐述[J].南方农业,2017(23):27-28.
- [3]Jiang Y, Du Y, Zhu X, et al. Physicochemical and comparative properties of pectins extracted from *Akebia trifoliata* var. *australis* peel[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1663-1669.
- [4]Wen-Li, Lu, Tao, et al. *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz seed

extract inhibits human hepatocellular carcinoma cell migration and invasion *in vitro* [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2019, 234(24):204-215.

[5]苑翠柳.抗癌食果研究的新进展[J].林业科技通讯,1999(6):3-5.

[6]王勇.晋南地区三叶木通的开发利用[J].山西农业:致富科技,2005(8):10.

[7]Jiang Y, Du Y, Zhu X, et al. Physicochemical and comparative properties of pectins extracted from *Akebia trifoliata* var. *australis* peel[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1663-1669.

[8]Cai T M, Xiao P, Yu N X, et al. A novel pectin from *Akebia trifoliata* var. *australis* fruit peel and its use as a wall-material to coat curcumin-loaded zein nanoparticle [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 40-49.

[9]符智荣,李雪峰,欧阳玉祝,等.八月瓜果皮挥发油的GC-MS分析[J].广东化工,2014,41(15):42-43,59.

[10]张晓旭.八月瓜果皮总三萜的分离分析研究[D].吉首:吉首大学,2017

[11]符智荣,李雪峰,欧阳玉祝,等.HPLC法测定八月瓜果皮中齐墩果酸含量[J].贵州农业科学,2018,46(9):139-141.

[12]Gao H, Wang Z. Triterpenoid saponins and phenylethanoid glycosides from stem of *Akebia trifoliata* var. *australis* [J]. Phytochemistry (Amsterdam), 2006, 67(24): 2697-2705.

[13]Du Y, Jiang Y, Zhu X, et al. Physicochemical and functional properties of the protein isolate and major fractions prepared from *Akebia trifoliata* var. *australis* seed [J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 923-929.

[14]吴莹,张百忍.八月瓜果实香气的GC-MS分析[J].中国酿造,2012,31(6):169-171.

[15]徐娟,郑志锋,刘祥义,等.8种谷类食物中矿质元素的测定分析[J].西部林业科学,2016,45(5):140-143.

[16]李磊,刘文政,张权,等.贵州产区稻谷中17种氨基酸含量分析[J].微量元素与健康研究,2020,37(2):2.

[17]周丹蓉,王小安,叶新福,等.辣木氨基酸分析与营养评价研究[J].热带作物学报,2017,38(2):278-282.

[18]孙锐,贾明,杨莉,等.山东引种无花果氨基酸及矿物元素成分分析与评价[J].食品工业科技,2015,36(19):352-356.

[19]辅宏璞,蒋小松,徐亚欧,等.不同品系优质鸡胸肌肌苷酸和鲜味氨基酸含量的比较[J].四川畜牧兽医,2009,36(5):31-33.

[20]黄梅桂,余龙霞,赵静雯,等.甜面酱中氨基酸营养价值及甜味分析[J].中国调味品,2017(7):11-15.

[21]林香信,颜孙安,钱爱萍,等.花鳢鱼体肌肉的氨基酸分析研究[J].中国农学通报,2012,28(29):131-136.

[22]程小军.中国油脂植物种子脂肪酸数据库的建立及数据分析[D].咸阳:西北农林科技大学,2015.

[23]石兵艳,赵飞,王芸,等.八月瓜果胶的性能测试研究[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2019,37(3):39-46.

(上接第298页)

油改善脂肪肝大鼠脂质代谢作用的研究[J].营养学报,2013,35(4):332-337.

[32]Ting Y W, Chang W T, Shiau D K, et al. Antiobesity efficacy of quercetin-rich supplement on diet-induced obese rats: Effects on body composition, serum lipid profile, and gene expression [J].

Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(1): 70-80.

[33]Chen L Y, Yang B S, Zhou L, et al. Promotion of mitochondrial energy metabolism during hepatocyte apoptosis in a rat model of acute liver failure [J]. Molecular Medicine Reports, 2015, 12(4): 5035-5041.