

# 全蛋及去蛋黄替代物摄入对代谢综合征小鼠脂代谢调控作用的比较分析

于智慧, 周丽媛, 朱迎春\*

(山西农业大学食品科学与工程学院, 山西太谷 030801)

**摘要:** 为研究全蛋及去蛋黄摄入对代谢综合征 (Metabolic syndrome, MetS) 小鼠脂代谢的影响, 该实验通过高脂喂养构建 MetS 小鼠模型。将 40 只 C57BL/6 雄性小鼠分成空白对照组 (Normal diet, ND)、模型组 (High-fat diet, HFD)、全蛋摄入组 (High-fat diet+egg, EGG)、去蛋黄替代物组 (High-fat diet+substitute of free egg yolk, SUB) 和洛伐他汀组 (Lovastatin, Lov)。实验周期为 60 d, 末期测定脏器指数、相关生化指标、组织切片及相关酶水平。结果显示, EGG 摄入显著抑制小鼠体重增长 ( $p<0.05$ )。EGG 血清中低密度脂蛋白胆固醇 (low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C) 和总胆固醇 (total cholesterol, TC) 含量分别为 HFD 组的 74.51% 和 77.03%。较 HFD 组, EGG 和 SUB 抑制了由 HFD 引起的肝脏中超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量上升, 且 EGG 组 SOD 和 MDA 含量分别比 HFD 显著降低了 24.90% 和 60.10%, 同时 SUB 组肝脏中 TC 和甘油三酯 (serum triglyceride, TG) 最低, 分别为 0.11 mmol/L 和 0.42 mmol/L。EGG 显著降低肝脏天冬氨酸转氨酶 (aspartate transaminase, AST) 和天冬氨酸转氨酶/丙氨酸转氨酶 (AST/ALT) 比值 ( $p<0.05$ ), 分别为 HFD 组的 44.99% 和 81.74%。此外, EGG 能显著抑制肝脏脂肪的形成和附睾脂肪细胞增大 ( $p<0.05$ )。因此, 较 SUB, EGG 能更好地调控 MetS 小鼠的脂代谢。

**关键词:** 全蛋; 去蛋黄替代物; 代谢综合征; 小鼠; 脂代谢

文章编号: 1673-9078(2022)06-37-45

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.6.0940

## Comparative Analysis of Effects of Whole Egg and Substitute of Egg Yolk Consumption on Lipid Metabolism in Mice with Metabolic Syndrome

YU Zhihui, ZHOU Liyuan, ZHU Yingchun\*

(School of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** In order to study the effects of whole egg and substitute of egg yolk consumption on lipid metabolism in mice with metabolic syndrome (MetS), a MetS mouse model was constructed through high-fat feeding in this experiment. Forty C57BL/6 male mice were divided into control group (normal diet, ND), model group (high-fat diet, HFD), whole egg consumption group (high-fat diet+egg, EGG), substitute of egg yolk consumption group (high-fat diet+substitute of free egg yolk, SUB) and lovastatin group (Lov). The organ index, biochemical indexes, tissue sections and enzyme levels were measured at the end of the experiment (60 d). The results showed that the weight gain was significantly reduced by the intake of EGG ( $p<0.05$ ). The levels of low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) and total cholesterol (TC) in EGG serum were significantly reduced by 74.51% and 77.03%, respectively, than HFD. The increase of superoxide dismutase (SOD) and malondialdehyde (MDA) enzyme activities in the liver caused by HFD were inhibited by EGG and SUB ( $p<0.05$ ). SOD and MDA in the liver of the EGG group were significantly lower than those of the HFD ( $p<0.05$ ) by 24.90% and 60.10%, respectively. The TC and serum triglyceride (TG) in the liver

引文格式:

于智慧, 周丽媛, 朱迎春. 全蛋及去蛋黄替代物摄入对代谢综合征小鼠脂代谢调控作用的比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(6): 37-45, +83

YU Zhihui, ZHOU Liyuan, ZHU Yingchun. Comparative analysis of effects of whole egg and substitute of egg yolk consumption on lipid metabolism in mice with metabolic syndrome [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(6): 37-45, +83

收稿日期: 2021-08-22

基金项目: 山西省面上青年基金项目 (201901D211381)

作者简介: 于智慧 (1991-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工与贮藏; E-mail: 961247368@qq.com

通讯作者: 朱迎春 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工; E-mail: yingchun0417@163.com

of the SUB group were the lowest, which were 0.11 mmol/L and 0.42 mmol/L, respectively. EGG significantly reduced the AST and AST/ALT ratios in serum and liver. The AST and AST/ALT ratios in liver of the EGG group were 44.99% and 81.74% of the HFD group, respectively. In addition, EGG can significantly inhibit the formation of lipolytic vacuoles in liver tissues and inhibit the enlargement of epididymal fat cells. Therefore, EGG can better regulate the lipid metabolism of MetS mice compared with SUB.

**Key words:** whole egg; substitute of free egg yolk; metabolic syndrome; mice; lipid metabolism

代谢综合征 (Metabolic syndrome, MetS) 是一种流行率较高的常见疾病<sup>[1]</sup>, 由遗传和环境多种因素引起, 是一组代谢紊乱性疾病的总称。常见临床症状有高血脂、肥胖症、胰岛素抵抗、慢性炎症、氧化应激、高血压和二型糖尿病等<sup>[2]</sup>。随着人民的生活水平在不断的提高, MetS 的患病率在逐年上升, 目前 MetS 已经成为典型慢性疾病的公共健康卫生问题。因此, 饮食调控对于 MetS 的预防和治疗具有重要意义。

我国是鸡蛋的生产和消费大国, 鸡蛋不仅营养丰富, 而且价格低廉, 是人们的日常生活中的重要营养来源。鸡蛋蛋黄所含有的胆固醇是人体内不可或缺的一种重要营养物质。主要参与细胞膜、各种激素、胆汁酸及维生素 D 的合成。胆固醇的含量与人的健康状况直接相关, 过高会导致动脉硬化并诱发一些综合并发症, 过低易导致血管壁脆性增加, 导致人体免疫力和应急能力降低<sup>[3]</sup>。在过去研究中, 鸡蛋以其高胆固醇含量受到人们饮食限制, 然而近些年许多国外研究表明蛋黄摄入可调控脂质代谢紊乱。研究表明, 健康人群食用鸡蛋可改善血清高密度脂蛋白 (high density lipoprotein, HDL) 功能, 增加血浆类胡萝卜素含量并维持低密度脂蛋白胆固醇 (Low density lipoprotein cholesterol, LDL-C) 与高密度脂蛋白胆固醇 (High density lipoprotein cholesterol, HDL-C) 比率<sup>[4,5]</sup>。此外, Lemos 等<sup>[6]</sup>研究表明健康人每日食用 3 枚鸡蛋可有效提高血清 HDL-C 含量, 但对于 LDL-C/HDL-C 比率无显著影响。Shin 等<sup>[7]</sup>研究表明, 每日摄入鸡蛋能够提高 MetS 患者血清中 HDL-C 含量水平, 并提高对胆固醇的运载能力。同时, 在超重和肥胖成年男性中进行的研究表明, 12 周适度限制碳水化合物化合物的饮食下, 每日食用 3 个鸡蛋不会影响血浆 LDL-C。较不含胆固醇的鸡蛋摄入组相比, 蛋黄摄入可有效提高血浆 HDL-C 含量<sup>[8]</sup>。

然而, 目前对于蛋黄摄入对于 MetS 的影响研究较少。蛋黄对 MetS 的作用机理不清楚。因此, 探究鸡蛋蛋黄对于人体的作用和影响对于人们日常饮食具有重要的指导意义。基于以上, 本实验通过高脂饲料建立 MetS 小鼠模型, 实验周期为 60 d, 比较探究全蛋 (EGG) 摄入与去蛋黄 (SUB) 摄入对 MetS 血脂代谢的影响。同时, 洛伐他汀类药物在 MetS 治疗中

应用具有广泛的积极作用, 能够改善患者血脂指标和心功能, 提高整体的治疗效果, 因此, 本实验设置诺伐洛伐药物作为阳性对照组。在实验周期中定期测定小鼠体重、摄食, 在实验末期测定主要脏器指标 (心脏、肝脏、脾脏、肾脏和附睾脂肪组织), 通过对血脂相关指标进行系统测定, 比较 EGG 和 SUB 摄入对 MetS 小鼠脂代谢的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

原料: C57BL/6 雄性小鼠 40 只、普通饲料 (D12450B)、高脂饲料 (D12492)、全蛋粉垫料购买于北京斯贝福生物技术有限公司, 合格证号: NO.110324200102532878, 动物许可证号: SCXK(京)2019-0010。其中去蛋黄代替物粉 (SUB) 由 (99%蛋清), 1%的瓜尔豆胶和黄原胶, 0.01%的  $\beta$ -胡萝卜素组成, 含有 0 mg 的胆固醇。

主要试剂: TC、TG、HDL-C、LDL-C、ALT 及 AST、SOD、MDA 检测试剂盒和总蛋白定量测定试剂盒 (BCA 法) 购买于南京建成生物工程研究所。洛伐他汀 (Lov) 购买于北京万生药业有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

SRH 高压均质机, 上海申鹿均质机有限公司; SPetraMax i3x 多功能酶标仪, 美国 Molecular Devices; 小鼠用灌胃针 12 号, 北京中科恒天科技有限公司; BSM 电子分析天平, 江苏灼卓精密仪器有限公司; BC/BD-20ZHT 冷冻冰箱, 青岛海尔特种电冰柜有限公司; BTP-8Z 冷冻干燥机, SP Scientific 公司; WFJT200 可见分光光度计, 尤尼柯仪器有限公司。

### 1.3 试验设计

实验经山西农业大学动物实验伦理委员会批准, 符合动物实验伦理。选择 40 只 C57BL/6 雄性小鼠作为实验对象, 体重 24.5~26 g 之间, 饲养于山西农业大学动物科学学院小鼠屏障房内, 进行一周的适应性实验。将小鼠放于层流架中喂养, 采用 12 h 采光/12 h 暗室采光循环条件, 控制动物房温度 21~23 °C 之间,

相对湿度在 40%，随机分配，分成五组，每组 8 只，分别为普通饲料组 (ND)、高脂饲料洛伐他汀组 (Lov)、高脂饲料组 (HFD)、高脂饲料去蛋黄鸡蛋代替物组 (SUB)、高脂饲料全蛋组 (EGG)。灌胃剂量按照 60 kg 成年人每日食用 3 个鸡蛋 (50 g 鸡蛋干重) 的剂量为 0.83 mg/g，按照小鼠剂量=人的剂量×9.1 换算成小鼠的剂量为 7.55 mg/g。ND、HFD 组每天灌胃等量生理盐水 Lov 组每天灌胃生理盐水 0.4 mL，在实验结束前十天，变更灌胃药品，Lov 的剂量为 0.3 mg/g。小鼠每天自由摄食，每 3 d 对饲料和小鼠进行称重，计算小鼠摄食量和体重变化。

## 1.4 试验方法

### 1.4.1 样本采集

#### 1.4.1.1 血清收集

实验结束前小鼠禁食 12 h。通过摘取小鼠眼球眼眶处取血，随后脊椎脱臼法处死小鼠。血液收集于离心管中，40 °C 静止 3 h 后，将血样在 3000 r/min，于 4 °C 离心 10 min，上层血清保存于 -80 °C 冰箱中。

#### 1.4.1.2 脏器收集

用棉球蘸取少许医用酒精来擦小鼠身体，切开腹腔，分别取出小鼠肝脏、肾脏、心脏脾及附睾脂肪，观察肝脏形态，将肝脏立即放置液氮中保存，并转移至 -80 °C 冰箱中保存用于生化指标测定。

### 1.4.2 指标测定

#### 1.4.2.1 脏器指数的测定

取小鼠肝组织、肾组织、脾组织、心脏组织以及附睾脂肪组织用生理盐水洗净，用滤纸擦干后称重，并且计算相关脏器指数<sup>[9]</sup>。

#### 1.4.2.2 血脂及肝脂指标的测定

血清和肝脏中的高密度脂蛋白胆固醇 (high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、甘油三酯 (Triglycerides, TG) 和总胆固醇 (Total cholesterol, TC) 均采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定，具体操作步骤根据试剂盒说明书进行操作。

1.4.2.3 天冬氨酸转氨酶 (aspartate transaminase, AST) 及丙氨酸转氨酶 (alanine transaminase, ALT) 指标的测定

血清和肝脏中的 AST 及 ALT 测定参考南京建成生物工程研究所试剂盒说明书利用分光光度法进行测定<sup>[10]</sup>。

1.4.2.4 肝脏超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 及丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 指标的测定

用分析天平准确称量 0.20 g 肝脏组织，按照重量体积比为 1:9 的比例加入事先准备好的 PBS 溶液

(0.01 mol/L)，利用组织匀浆机进行充分研磨，制备含量为 10% 的组织匀浆液，根据南京建成生物工程研究所试剂盒的操作步骤，分别测定肝脏组织匀浆中的 MDA 和 SOD 活力<sup>[11]</sup>。

#### 1.4.2.5 小鼠肝脏及脂肪组织切片分析

用 10% 甲醛溶液固定肝脏及附睾脂肪组织后冲洗 24 h，并用不同浓度梯度的乙醇脱水。二甲苯透明，浸蜡包埋后切片，厚度为 5 μm，经 HE 染色后，在显微镜下观察组织结构。

## 1.5 数据处理

试验均重复三次，结果表示为：平均值±标准偏差。用 Microsoft Excel 2016 计算各个指标的平均值与标准差；测定结果用使用 SPSS 26.0 进行数据处理， $p < 0.05$  为显著性差异， $p < 0.01$  为极显著性差异；利用 Origin 8.6 进行作图分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 EGG 及 SUB 对 MetS 小鼠摄食和体重的影响

影响

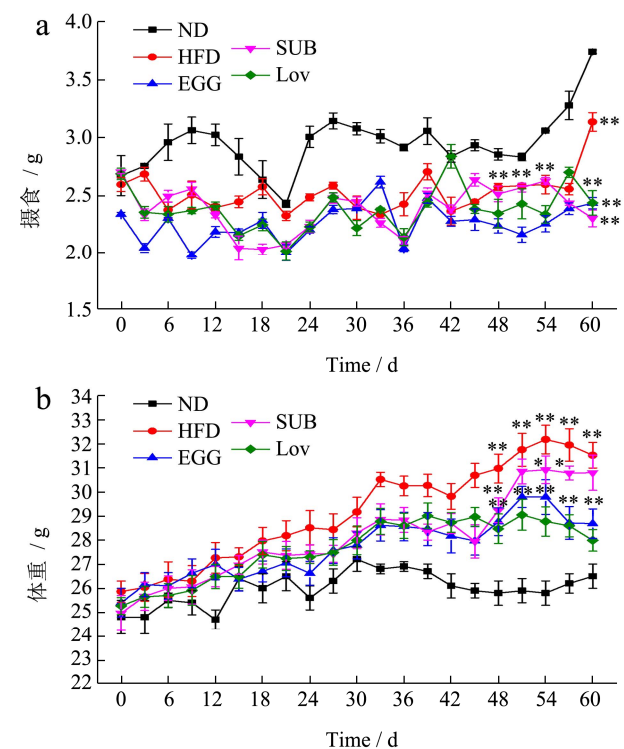


图1 各组小鼠摄食及体重变化

Fig.1 The food consumption and weight changes of mice in each group

注：“\*”和“\*\*\*”分别表示组间差异显著 ( $p < 0.05$ ) 和极显著 ( $p < 0.01$ )。

在实验开始初期, 各组小鼠摄食量均出现降低增加交替的现象, 这是由于初期灌胃小鼠产生的应急反应造成的。由图 1a 可知, 小鼠摄食量范围在 1.81~3.85 g 之间, HFD 组摄食量显著低于 ND 组 ( $p < 0.01$ ), 原因为高脂饲料为小鼠提供的能量 (5.24 kcal/g) 比普通饲料 (3.85 kcal/g) 多, 进而减少小鼠的摄食量。在实验周期后 10 d 后, EGG 和 SUB 组小鼠的摄食量显著低于 HFD 组 ( $p < 0.05$ )。由图 1b 可知, 为期 60 d 的饲养实验中, 小鼠的体重从 24.51~26.02 g 增加到 26.51~32.52 g, 各组小鼠总体呈现稳定增长趋势。这表明高脂饮食能够引起小鼠体重异常增长, 这与高脂诱导小鼠肥胖的研究一致<sup>[12]</sup>。同时 HFD 组小鼠体重的增加量显著高于 EGG 等其他组小鼠体重增加量, 表明 EGG 比 SUB 能更显著抑制 HFD 引起小鼠体重异常增长<sup>[13]</sup>。

## 2.2 EGG 及 SUB 对 MetS 小鼠主要脏器指数的影响

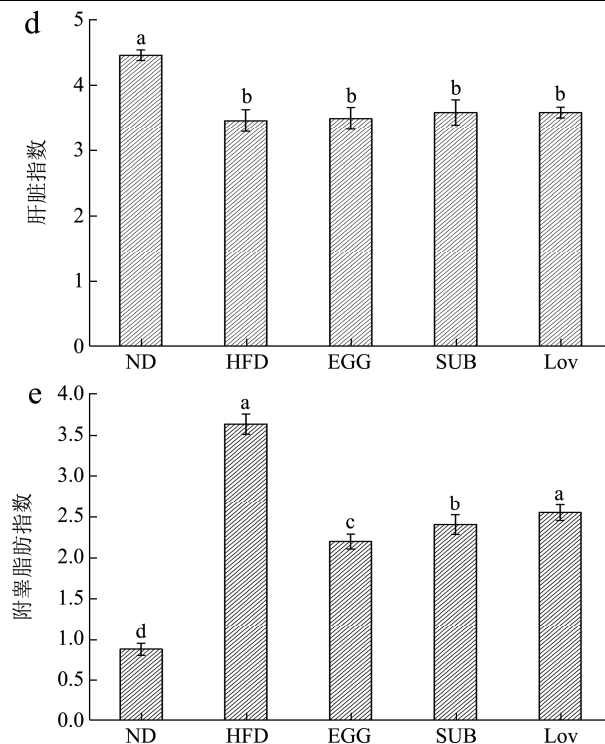
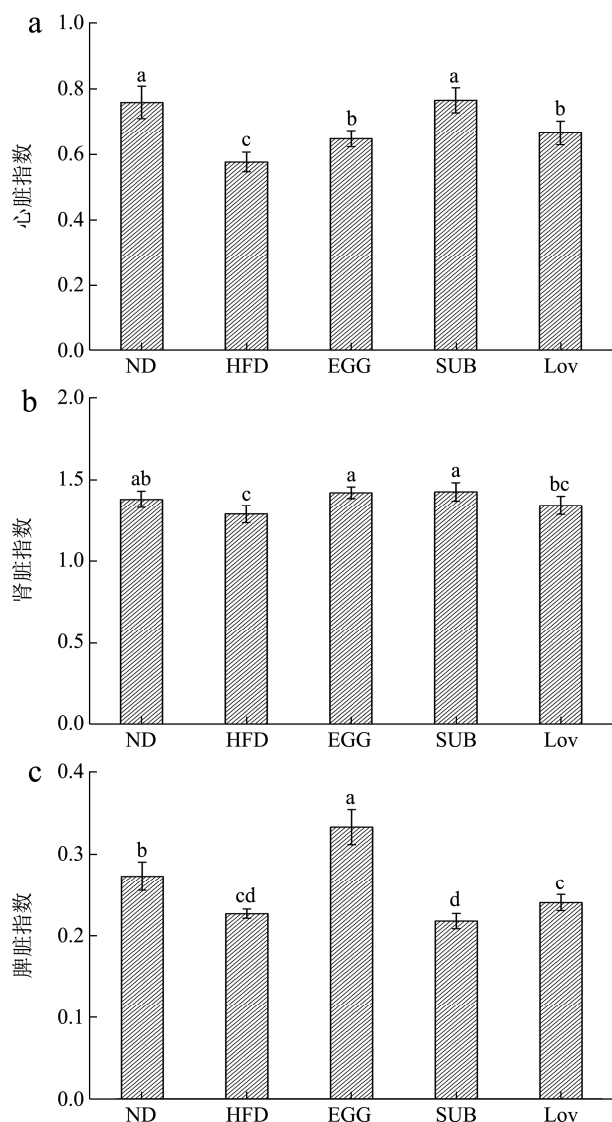


图 2 各组小鼠脏器指数

Fig.2 Organ index of mice in each group

注: 柱上不同小写字母表示组间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

由图 2a 可知, ND 组小鼠心脏指数最高为 0.75, Lov 组最低为 0.62, EGG 组小鼠的心脏指数显著高于 HFD 组 ( $p < 0.05$ )。由图 2b 可得, HFD 组小鼠肾脏指数最低为 1.27, EGG 组和 SUB 组都显著高于 HFD 组 ( $p < 0.05$ ), EGG 组和 SUB 组的肾脏指数无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 实验说明, HFD 能引起小鼠肾损伤, 而 EGG 和 SUB 能显著改善由 HFD 引起肾脏指数下降的结果, 对高脂饮食导致的肾损伤具有一定的修护作用<sup>[14]</sup>。

脾脏是机体内重要的淋巴器官, 其指数可以反映机体的免疫能力的强弱, 指数越大, 则表明机体的免疫能力越强<sup>[15]</sup>。由图 2c 可知, EGG 组显著高于 HFD 组和 SUB 组 ( $p < 0.05$ ), 而 SUB 组 HFD 组脾脏指数无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 数据表明 EGG 组在一定程度上提高了小鼠的免疫系统抵抗能力, 而 SUB 对于脾脏指数无明显作用效果。如图 2d 可得, ND 组小鼠肝脏指数均显著高于高脂各组, 且高脂各组间无显著差异 ( $p > 0.05$ )。由图 2e 可知, ND 组小鼠附睾脂肪指数最低为 0.88, HFD 组最高为 3.65。EGG 组和 SUB 组显著低于 HFD 组 ( $p < 0.05$ ), 而 SUB 组显著高于 EGG 组 ( $p < 0.05$ )。这与表明, EGG 摄入较 SUB 能更加显著降低由 HFD 引起的机体附睾脂肪的积累。Yu 等人<sup>[16]</sup>基于脂质组学分析长期食用蛋黄对高脂饮食小鼠的高脂血症的影响, 发现, 蛋黄摄入可显著降低肥胖小鼠腹部脂肪积累, 这与本研究结果相一致。

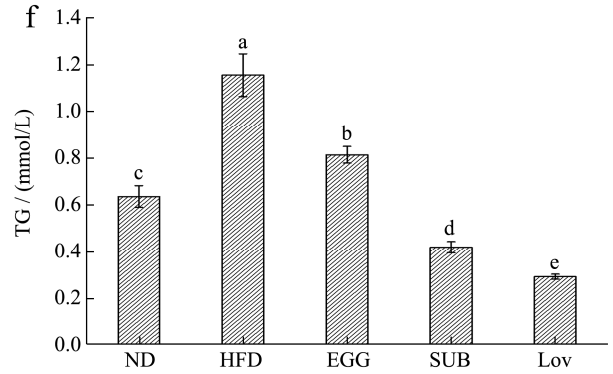
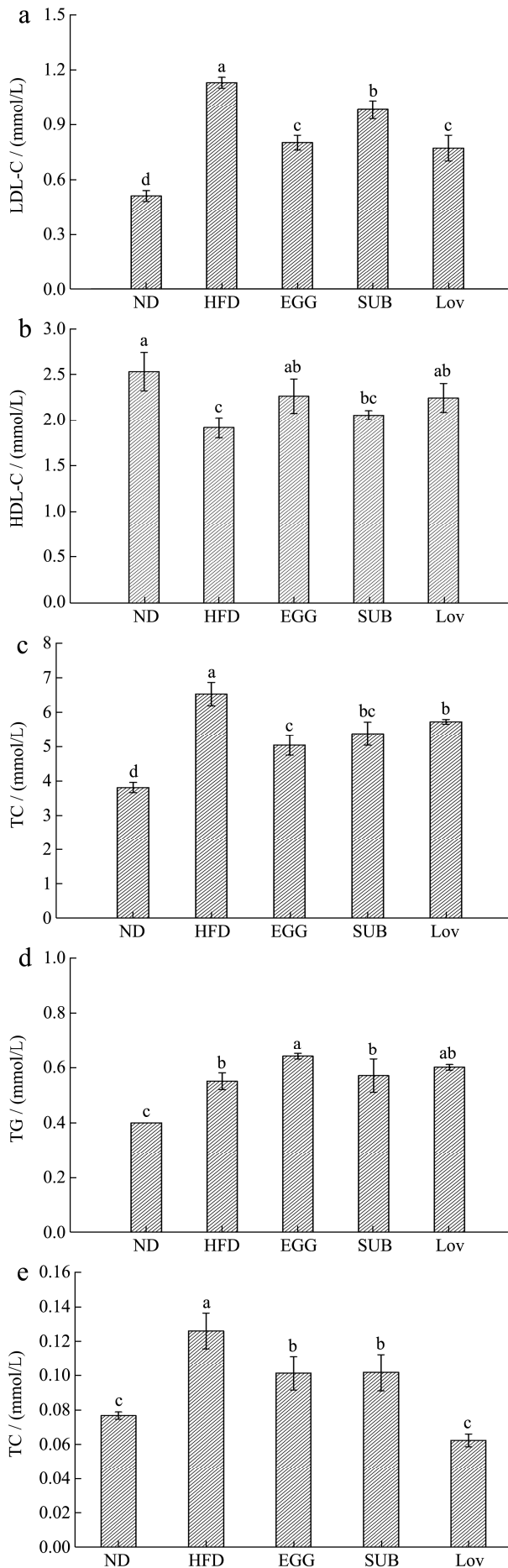


图3 各组小鼠血脂和肝脂水平变化

Fig.3 Changes of serum lipids and hepatic lipids of mice in each group

注: a-d 各组小鼠血清 LDL-C、HDL-C、TC、TG 水平变化; e-f 各组小鼠肝脏 TC 和 TG 水平变化。柱上不同小写字母表示组间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

### 2.3 EGG 及 SUB 对 MetS 小鼠血脂及肝脂的影响

研究表明,临床诊断中,通过血脂血清学指标的检测有助于明确脂肪肝疾病诊断,对及早确诊和接受治疗,具有良好促进作用<sup>[17]</sup>,血脂中重要的指标如 HDL-C、LDL-C、TC、TG 与 MetS 等疾病的相关性已经得到证实<sup>[18]</sup>。LDL-C 是胆固醇向肝外组织转运的主要载体工具,其含量与心血管疾病的发病率及病变程度相关,被认为是动脉粥样硬化的主要致病因子<sup>[19]</sup>。HDL-C 主要是将胆固醇从肝外组织转运到肝脏进行代谢,由胆汁排出体外,其含量的高低与动脉粥样硬化的发生呈负相关<sup>[20]</sup>。由图 3a 和 3b 可知,HFD 组 LDL-C 含量最高为 1.13 mmol/L,ND 组最低为 0.54 mmol/L。EGG 组和 SUB 组 LDL-C 含量显著低于 HFD 组 ( $p < 0.05$ ),为 HFD 的 74.51%。同时,HFD 显著抑制了血清中 HDL-C 水平,而 EGG 能显著改善由 HFD 引起的不良后果,使得血清中 HDL-C 上升到正常水平,而 SUB 对于 MetS 小鼠血清中 HDL-C 无显著作用,这与之前的研究一致<sup>[21]</sup>。Christopher 等<sup>[22]</sup>研究发现,较去蛋黄鸡蛋替代物,食用全蛋可改善代谢综合征患者脂蛋白分布,表现为增加 LDL-C 含量及 HDL 粒径,增强血清 HDL 运载胆固醇的能力,这与本研究结果相一致。图 3c 和 3d 为血清 TC 和 TG 水平,与 ND 组(3.80 mmol/L)相比,HFD 组(6.52 mmol/L)血清中 TC 含量显著升高 ( $p < 0.05$ ),EGG 组(5.02 mmol/L)和 SUB 组(5.37 mmol/L)的 TC 含量显著低于 HFD 组 ( $p < 0.05$ ),EGG 组和 SUB 组无显著差异( $p > 0.05$ )。由图 3d 可知,EGG 组 TG(0.64

mmol/L) 含量显著高于 HFD 组 (0.55 mmol/L) 和 SUB 组 (0.57 mmol/L) 水平 ( $p < 0.05$ )。图 3e 和 3f 为肝脏 TC 和 TG 水平, EGG 和 SUB 均可降低肝脏中 TC、TG 含量, SUB 肝脏 TC 和 TG 含量更低, 分别为 0.11 mmol/L 和 0.42 mmol/L。Samantha 等<sup>[23]</sup>表明食用全蛋可有效抑制 2 型糖尿病大鼠 TG 浓度, 与酪蛋白相比, 食用全蛋饮食导致大鼠血浆 TG 浓度降

低 52%。同时, Lisa 等<sup>[24]</sup>研究发现, 与 SUB 饮食相比, 食用 EGG 可增加超重妇女胆固醇外排能力, 对胆固醇代谢具有积极作用。这表明, EGG 显著抑制血清和肝脏中 TC 水平, 然而对血清 TG 并没有产生改善作用。

#### 2.4 各组小鼠血清及肝脏 ALT 和 AST 水平变化

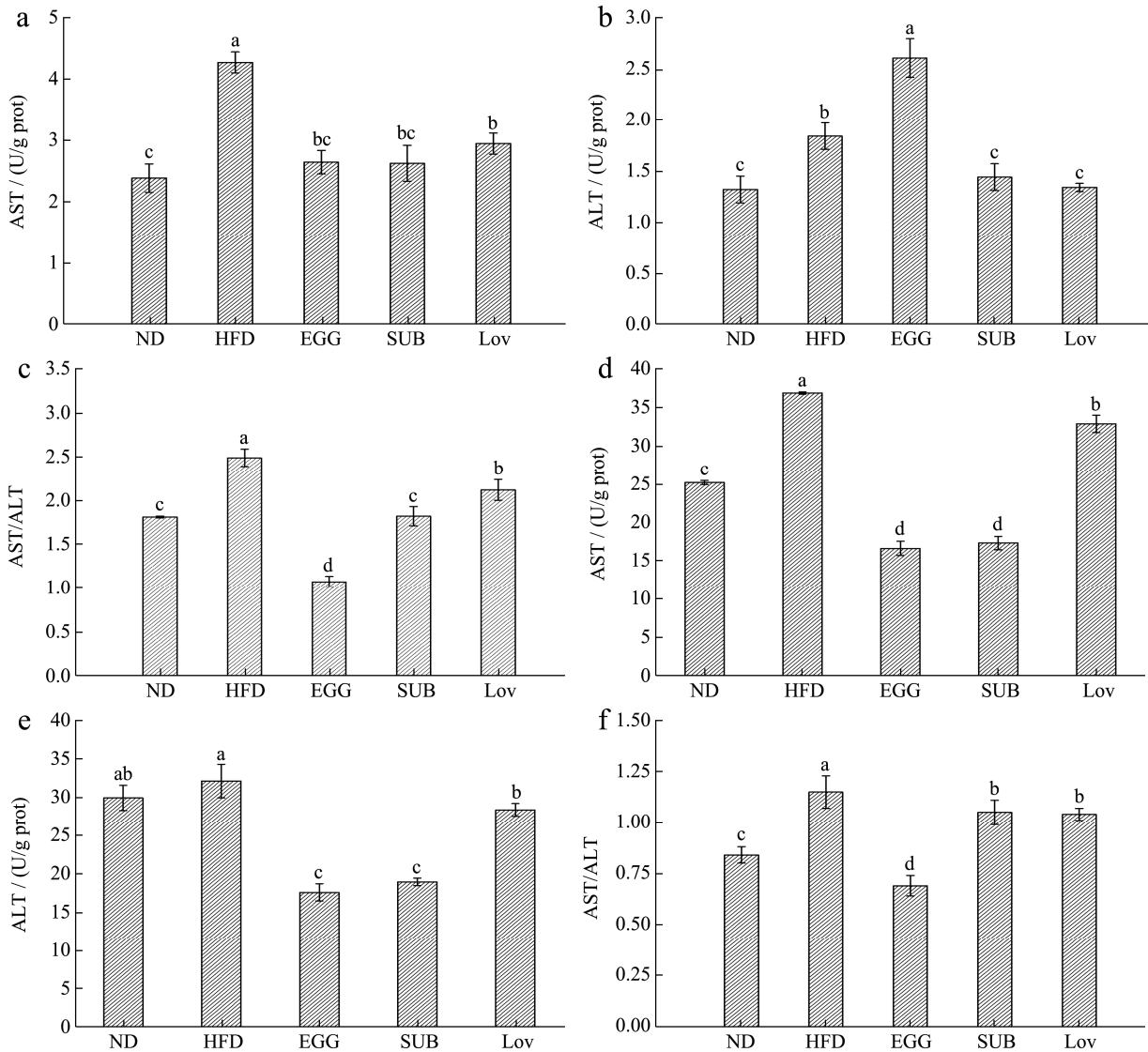


图 4 各组小鼠血清和肝脏中 AST、ALT、AST/ALT 水平变化

Fig.4 Changes of AST, ALT, AST/ALT in serum and liver of mice in each group

注: a~c 各组小鼠血清 AST、ALT、AST/ALT 水平变化; d~f 各组小鼠肝脏 AST、ALT、AST/ALT 水平变化。柱上不同小写字母表示组间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

由图 4a~c 可知, 与 ND 相比, HFD 组血清 ALT 和 AST 水平显著升高 ( $p < 0.05$ ), EGG 和 SUB 能够显著降低 MetS 小鼠血清 AST 水平。尽管 EGG 组 ALT 水平较 HFD 增加了 0.42 倍, 然而 EGG 可显著下调 AST/ALT 比例。由图 4d~e 可知, 相比于 HFD 组, EGG 和 SUB 均可显著降低肝脏 AST、ALT 和 AST/ALT 比值, 其中 EGG 组 AST、ALT 和 AST/ALT 比值分别为

HFD 组的 44.99%、54.79%和 81.74%。据有关研究证明, ALT 以及 AST 作为评价肝功能的重要指标, ALT 主要存在于肝细胞的细胞质中, 而 AST 主要存在于肝细胞的线粒体中, 受到细胞膜包被, 正常情况下, ALT 和 AST 不会在血液当中, 然而, 当肝脏组织发生破损或出现炎症时, 细胞膜的通透性就会发生改变, 会引起血清中 AST 和 ALT 水平上升。AST/ALT 比值上升

常见于重型肝炎、肝硬化、肝癌及酒精性肝病等肝脏疾病,AST/ALT 比值随着肝脏病变的加重而逐渐升高<sup>[25]</sup>。这表明 EGG 和 SUB 对高脂饮食引起的肝脏组织破损和炎症的发生有一定的改善作用。鸡蛋蛋黄中含有丰富的卵磷脂,蛋黄中的卵磷脂具有显著的抗氧化能力,研究表明摄入蛋黄卵磷脂可有效降低肝脏中 ALT 及 AST 水平,这解释了相对于 SUB,EGG 更能缓解由于高脂饮食而引起的肝损伤<sup>[26]</sup>。

## 2.5 各组小鼠肝脏 SOD 和 MDA 水平变化

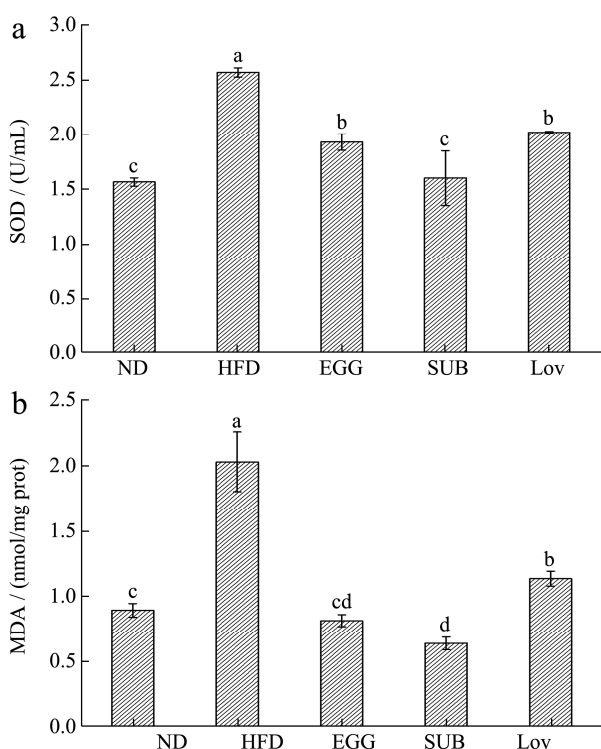


图5 各组小鼠肝脏中 SOD 和 MDA 水平变化

### Fig.5 Changes of SOD and MDA in liver of mice in each group

注:柱上不同小写字母表示组间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

MetS 常伴随着肝脏脂肪过度积累。肝脏氧化应激、肝脏脂质失调和促炎细胞因子的协同作用会导致肝脏脂肪堆积,并促进 MetS 发生<sup>[27]</sup>。史雅凝<sup>[28]</sup>研究表明,肝脏中包含的超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 等是重要的抗氧化酶,可以作为评价人体氧化还原状态的重要指标,可作为检测 MetS 疾病相关的抗氧化指标。有研究发现,高脂饮食可引起肝组织 SOD 使机体的抗氧化损伤的防御机制受损不能清除过多的自由基而导致肝损伤<sup>[29]</sup>。由图 5a 可知,HFD 组 SOD 酶活水平显著高于其他组,是 ND 组 SOD 酶活水平的 1.64 倍 ( $p < 0.05$ ),EGG 组和 SUB 组的 SOD 酶活水平均显著低于 HFD 组 ( $p < 0.05$ ),分别为 HFD 组的 75.10%和 62.26%。

MDA 含量是反映机体潜在抗氧化能力的重要参数,它能反映脂质过氧化速率和强度,间接反映组织过氧化损伤的程度,其含量与组织氧化程度呈正比<sup>[30]</sup>。研究发现,当肝脏组织中脂质含量过高时,会导致脂质过氧化反应加剧,使过氧化产物 MDA 增加,而 MDA 可与线粒体结合形成希夫氏碱化合物,使线粒体膜的流动性下降,干扰脂肪酸  $\beta$ -氧化,使脂肪在肝内积累,造成肝脏结构和功能损害<sup>[31]</sup>。由图 5b 可知,与 HFD 组相比,EGG (0.81 nmol/mg prot) 和 SUB 组 (0.63 nmol/mg prot) MDA 酶活含量水平显著低于 HFD 组 (2.03 nmol/mg prot) 水平 ( $p < 0.05$ ),EGG 组和 SUB 组组无显著差异 ( $p > 0.05$ )。这表明,EGG 和 SUB 都能显著抑制小鼠肝脏内过氧化,抑制机体炎症的发生,SUB 对调控肝氧化作用显著高于 EGG。相似的结果在之前研究中也报道过<sup>[24]</sup>。

## 2.6 各组小鼠病理学观察

机体中的肝脏是进行脂质代谢的主要场所,MetS 常常伴随着肝脏脂质代谢系统紊乱,从而诱发肝脏脂肪过度积累,肝细胞中脂肪发生变性等肝脏疾病<sup>[32]</sup>。图 6a 为各组小鼠的肝脏形态,ND 组小鼠肝脏颜色鲜艳红亮,表面有明亮光泽,质地较软。HFD 组小鼠肝脏颜色呈现红色略带黄色,质地稍微偏硬,在肝脏的表面带有脂肪颗粒,呈现病变状态,表明模型构建成功,与王宁等<sup>[33]</sup>研究结果一致。EGG 组、SUB 组和 Lov 组的肝脏表面颜色呈现红色略带黄色,其中 EGG 组肝脏表面略带光泽,并且没有脂肪的积累,不带有脂肪颗粒,而 SUB 组肝脏组织表面有轻微的脂肪颗粒,较 HFD 组数量较少。

观察图 6b 肝脏组织切片,发现 ND 组小鼠肝脏组织的表面结构完整清晰,肝细胞之间的界限清楚,细胞外形向周围呈现放射形态,细胞核清晰位于细胞中央,没有发现细胞炎症或细胞坏死等现象。HFD 组小鼠肝细胞具有一定程度的脂肪变性,排列结构是不规则的,细胞内出现明显的脂滴溶解后的空泡且大小不一致。在 EGG 组和 SUB 组中,脂滴空泡的分布较少。实验表明 EGG 组和 SUB 能够在一定程度上抑制肝组织中脂肪的积累,并且 EGG 能够显著降低肝细胞中脂解空泡的形成。相关实验研究表明 HFD 可引起的 TG 储存增加会导致脂肪细胞的体积增大,脂肪细胞体积的增大是 MetS 主要特征<sup>[34]</sup>。观察图 6c 得知,ND 组小鼠附睾脂肪细胞体积小、结构完整、形态清晰,HFD 组小鼠附睾脂肪细胞与 ND 组相比,体积显著增大。EGG 组、SUB 组小鼠脂肪细胞大小相对于 HFD 组明显变小,Lov 组脂肪细胞最小。实验说明,HFD

能够引起肝脏组织中脂肪细胞增大, EGG 和 SUB 摄入都显著减小了附睾脂肪细胞体积。

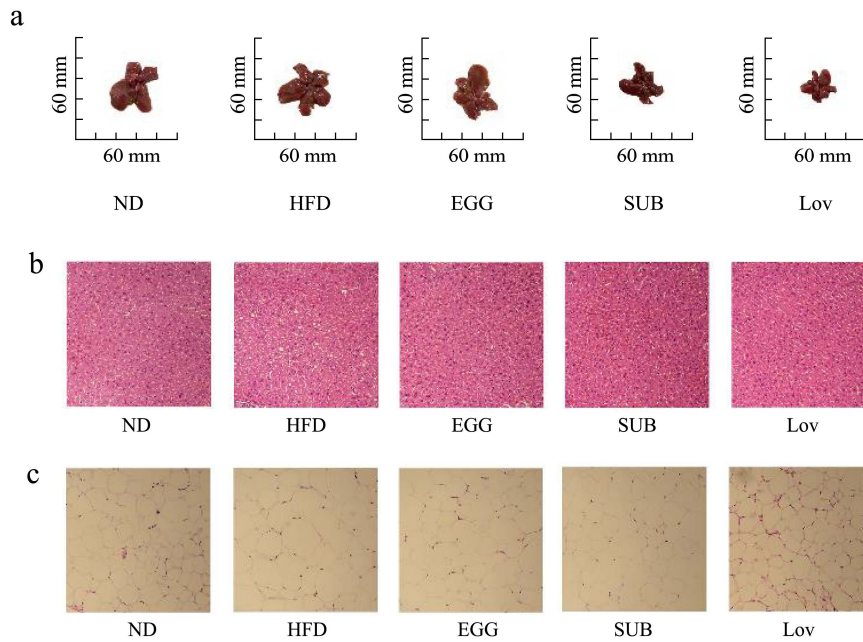


图6 各组小鼠病理学

Fig.6 Histopathological examinations of mice in each group

注: a 各组小鼠肝脏组织形态观察; b 各组小鼠肝脏组织切片; c 各组小鼠脂肪组织切片。

### 3 结论

本研究建立为期 60 d 的 MetS 小鼠模型, 研究 EGG 和 SUB 摄入对 MetS 小鼠血脂以及酶水平相关指标。EGG 和 SUB 能缓解高脂饮食所导致的脂质代谢紊乱, 主要表现在降低小鼠的体重、摄食量。EGG 和 SUB 都显著抑制了由 HFD 引起的肝脏中 SOD、AST、ALT 以及 MDA 酶活上升, 降低了肝脏中 TC 和 TG 的积累。相比于 SUB 组, EGG 摄入能够显著降低血清 TC 和 TG, LDL-C, 同时显著提高血清 HDL-C。组织病理学显示, 与 HFD 组相比, EGG 和 SUB 摄入具有减少肝脏脂肪空泡的功能, 对高脂饮食引起的脂代谢紊乱有良好的预防作用。

### 参考文献

[1] 刘苏慧, 周瑜, 唐雪莉, 等. 代谢综合征的饮食疗法研究进展 [J]. 现代医药卫生, 2021, 37(4): 595-598  
LIU Suhui, ZHOU Yu, TANG Xueli, et al. Research progress of diet therapy for metabolic syndrome [J]. Modern Medicine and Health, 2021, 37(4): 595-598

[2] Yang H, Xin Z, Feng J P, et al. Waist-to-height ratio is better than body mass index and waist circumference as a screening criterion for metabolic syndrome in Han Chinese adults [J]. Medicine, 2017, 96(39): e8192

[3] 谢绿绿. 鸡蛋黄中脂质成分及脂肪酸组成分析研究[D]. 武

汉: 华中农业大学, 2011

XIE Lyulyu. Analysis of lipid composition and fatty acid composition in egg yolk [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011

[4] Andersen C J, Blesso C N, Lee J, et al. Egg consumption modulates HDL lipid composition and increases the cholesterol-accepting capacity of serum in metabolic syndrome [J]. Lipids, 2013, 48(6): 557-567

[5] Clayton Z S, Fusco E, Kern M. Egg consumption and heart health: a review [J]. Nutrition, 2017, 37: 79-85

[6] Lemos B S, Medina-Vera I, Blesso C N, et al. Intake of 3 eggs per day when compared to a choline bitartrate supplement, downregulates cholesterol synthesis without changing the LDL/HDL ratio [J]. Nutrients, 2018, 10(2): 258

[7] Shin S, Lee H W, Kim C E, et al. Egg consumption and risk of metabolic syndrome in Korean adults: results from the health examinees study [J]. Nutrients, 2017, 9(7): 687

[8] Mutungi G, Ratliff J, Puglisi M, et al. Dietary cholesterol from eggs increases plasma HDL cholesterol in overweight men consuming a carbohydrate-restricted diet [J]. The Journal of Nutrition, 2008, 138(2): 272-276

[9] 于智慧. 鸡蛋高密度脂蛋白对脂质代谢的影响及机制研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019  
YU Zhihui. The effect of egg high-density lipoprotein on lipid metabolism and its mechanism [D]. Wuhan: Huazhong



- Agricultural University, 2019
- [10] 黄家丽.血清总胆汁酸及谷丙转氨酶测定在肝胆疾病中的意义[J].航空航天医学杂志,2014,25(6):781-782  
HUANG Jiali. Significance of serum total bile acid and alanine aminotransferase determination in hepatobiliary diseases [J]. Journal of Aerospace Medicine, 2014, 25(6): 781-782
- [11] 杨雨生.不同添加剂对黄颡鱼生长、消化、脂代谢及免疫机制的影响[D].天津:天津农学院,2019  
YANG Yusheng. Effects of different additives on growth, digestion, lipid metabolism and immune mechanism of *Pelteobagrus fulvidraco* [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural College, 2019
- [12] Porras D, Nistal E, Martínez-Flórez S, et al. Protective effect of quercetin on high-fat diet-induced non-alcoholic fatty liver disease in mice is mediated by modulating intestinal microbiota imbalance and related gut-liver axis activation [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2017, 102: 188-202
- [13] Clayton Z S, Fusco E, Kern M. Egg consumption and heart health: a review [J]. Nutrition, 2017, 37: 79-85
- [14] F Javier Pérez-Barberia, Mutuberria G, Nores C. Reproductive parameters, kidney fat index, and grazing activity relationships between the sexes in Cantabrian chamois *Rupicapra pyrenaica parva* [J]. Acta Theriologica, 1998, 43: 311-324
- [15] 张金堂.黑果腺肋花楸花色苷的脂代谢调节作用研究[D].延吉:延边大学,2019  
ZHANG Jintang. Study on Lipid Metabolism Regulation Effects of Anthocyanins of *Sorbus melanocarpa* [D]. Yanji: Yanbian University, 2019
- [16] Yu Z, Wang N, Dong U A, et al. Long term of egg yolk consumption alters lipid metabolism and attenuates hyperlipidemia in mice fed a high-fat diet based on lipidomics analysis [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2019, 121(8): 1800496
- [17] 唐明珠,陈琳.肝功能中 ALT、AST 及血脂中 TG、TC 在脂肪肝诊断中的应用价值[J].心理月刊,2018,10:168-169  
TANG Mingzhu, CHEN Lin. The application value of ALT and AST in liver function and TG and TC in blood lipids in the diagnosis of fatty liver [J]. Psychology Monthly, 2018, 10: 168-169
- [18] 蒋丹,戴丽芬,陈华忆.甘油三酯与高密度脂蛋白胆固醇比值的研究进展[J].中国老年保健医学,2020,18(5):102-104  
JIANG Dan, DAI Lifen, CHEN Huayi. Research progress on the ratio of triglyceride to high-density lipoprotein cholesterol [J]. Chinese Geriatric Healthcare Medicine, 2020, 18(5): 102-104
- [19] 王仲明,谢跃杰,李永红,等.鄂植 8 号、皮瓜尔油橄榄叶提取物对高血脂小鼠降血脂功效研究[J].食品与发酵工业,2021,47(7):123-129  
WANG Zhongming, XIE Yuejie, LI Yonghong, et al. Study on the effect of Ezhi No. 8 and Piguar olive leaf extract on hypolipidemic mice [J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(7): 123-129
- [20] Rosenson Robert S, Brewer H Bryan, Ansell Benjamin J, et al. Dysfunctional HDL and atherosclerotic cardiovascular disease [J]. Nature Reviews, Cardiology, 2016, 13(1): 48-60
- [21] Kalogeropoulos A P, Papanastasiou C A. Egg consumption: to eat or not to eat [J]. Journal of Thoracic Disease, 2019, 11(6): 2185-2187
- [22] Blesso C N, Andersen C J, Barona J, et al. Whole egg consumption improves lipoprotein profiles and insulin sensitivity to a greater extent than yolk-free egg substitute in individuals with metabolic syndrome [J]. Metabolism, 2013, 62(3): 400-410
- [23] Jones S K, Koh G Y, Rowling M J, et al. Whole egg consumption prevents diminished serum 25-hydroxycholecalciferol concentrations in type 2 diabetic rats [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(1): 120-124
- [24] Sawrey-Kubicek L, Zhu C, Bardagjy A S, et al. Whole egg consumption compared with yolk-free egg increases the cholesterol efflux capacity of high-density lipoproteins in overweight, postmenopausal women [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2019, 110(3): 617-627
- [25] 张效敏,芦瑞萍,海秀玲,等.浅析谷丙转氨酶水平与肝脏病理理性改变[J].医药前沿,2019,9(11):32-33  
ZHANG Xiaomin, LU Ruiping, HAI Xiuling, et al. Analysis of alanine aminotransferase levels and liver pathological changes [J]. Frontiers in Medicine, 2019, 9(11): 32-33
- [26] 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]. Foods, 2021, 10(7): 1569
- [27] Lasker S, Rahman M M, Parvez F, et al. High-fat diet-induced metabolic syndrome and oxidative stress in obese rats are ameliorated by yogurt supplementation [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 20026