

# 元宝枫籽油对高脂膳食小鼠脂代谢及肠道健康的影响

安玉红<sup>1</sup>, 关天琪<sup>1</sup>, 郭艳红<sup>1</sup>, 李慧<sup>1</sup>, 梁世康<sup>2</sup>, 黄涛<sup>2</sup>

(1. 贵州食品工程职业学院 食品工程系, 贵阳 551499; 2. 贵州玄德生物科技股份有限公司, 贵阳 550016)

**摘要:** 为了进一步开发与应用元宝枫籽油, 研究了元宝枫籽油对高脂膳食小鼠脂代谢及肠道健康的影响。将 60 只小鼠分为空白组、模型组、元宝枫籽油高剂量组[1 200 mg/(kg·d)]和低剂量组[600 mg/(kg·d)], 连续灌胃 60 d。实验结束后, 测定小鼠生长状况、血脂水平、盲肠微环境指标和盲肠内容物短链脂肪酸及微生物菌群。结果表明: 与模型组相比, 元宝枫籽油高剂量组能显著降低小鼠体质量、腰围、Lee's 指数、腹腔脂肪质量, 显著降低小鼠盲肠内容物中游离氨、氨态氮、硫化氢和 pH, 显著增加盲肠内容物中丁酸、戊酸和丙酸的含量; 元宝枫籽油高、低剂量组可显著降低小鼠血清中甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的水平, 显著升高高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)水平, 显著促进肠道有益微生物的生长, 抑制有害菌的生长。因此, 元宝枫籽油具有改善因高脂膳食引起的小鼠脂代谢紊乱和促进肠道健康的作用。

**关键词:** 元宝枫; 元宝枫籽油; 脂代谢; 肠道健康

中图分类号: R285.5; TS225.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)08-0103-06

## Effects of *Acertruncatum* seed oil on lipid metabolism and intestinal health of high-fat diet mice

AN Yuhong<sup>1</sup>, GUAN Tianqi<sup>1</sup>, GUO Yanhong<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, LIANG Shikang<sup>2</sup>, HUANG Tao<sup>2</sup>

(1. Department of Food Engineering, Guizhou Vocational College of Food Engineering, Guiyang 551499, China; 2. Guizhou Xuande Biotechnology Co., Ltd., Guiyang 550016, China)

**Abstract:** In order to further develop and applicate *Acertruncatum* seed oil, the effects of *Acertruncatum* seed oil on lipid metabolism and intestinal health of high-fat diet mice were studied. The mice were divided into blank group, model group, high dose group [1 200 mg/(kg·d)] and low dose group [600 mg/(kg·d)], and were gavaged continuously for 60 d. After the experiment, the growth status, lipid level in serum, caecal metabolites microenvironmental indexes, short chain fatty acids content and microflora of the mice were measured. The results showed that compared with the model group, high dose group of *Acertruncatum* seed oil could significantly reduce the body weight, waist circumference, Lee's index, abdominal fat mass, the contents of free ammonia, ammonia nitrogen, hydrogen sulfide and pH in caecum metabolites, and remarkably increase the contents of butyric acid, valerate acid and propionic acid in caecum metabolites. The low and high dose groups of *Acertruncatum* seed oil could significantly decrease the contents of serum triglyceride (TG) and total cholesterol (TC) and low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), remarkably increase the content of high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), beneficial microorganisms and inhibit the effect of harmful bacteria in intestinal tract.

Therefore, *Acertruncatum* seed oil can improve the derangement of lipid metabolism and promote intestinal health in mice caused by high-fat diet.

**Key words:** *Acertruncatum*; *Acertruncatum* seed oil; lipid metabolism; intestinal health

收稿日期: 2021-12-17; 修回日期: 2022-03-29

基金项目: 贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2022]重点 005 号)

作者简介: 安玉红(1982), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为食品化学与营养(E-mail)304672741@qq.com。

通信作者: 梁世康, 工程师(E-mail)409152912@qq.com;

黄涛, 工程师(E-mail)529556172@qq.com。

元宝枫(*Acer truncatum*)属槭树科(Aceraceae)槭属落叶乔木,为我国特有的木本油料作物,广泛分布于辽宁、内蒙古、陕西、贵州等地,是集食用油、观赏、木材于一体的具有较高经济价值的树种<sup>[1]</sup>。魏伊楚等<sup>[2]</sup>对内蒙古、辽宁、山东、陕西等9个产地的元宝枫籽油进行检测发现,元宝枫籽的平均含油率为43.30%,元宝枫籽油不饱和脂肪酸含量为87.05%~90.16%,其中亚油酸含量为32.28%,油酸含量为25.36%,神经酸含量为5.25%。2011年我国批准元宝枫籽油为新资源食品<sup>[3]</sup>,使元宝枫籽油正式进入人们的日常生活。

随着人们生活水平的不断提高,功能性油脂具有的保健和药用功能越来越被认可,功能性油脂的需求量持续增长。元宝枫籽油是目前陆地上已知的食用油脂中神经酸含量较高的功能性油脂,神经酸具有保护和修复脑神经损伤、改善老年痴呆、促进大脑发育等功效<sup>[4-5]</sup>。但在如今普遍处于高脂、高蛋白膳食的情况下,若将元宝枫籽油作为功能性油脂直接饮用或食用,是否会进一步促进肥胖的加剧,还未见报道。研究表明,摄入大量油脂会影响机体的脂代谢、肠道微生物菌群及肠道微环境<sup>[6-8]</sup>。目前关于元宝枫籽油作为功能性油脂在改善正常机体肠道菌群,调节肠道菌群的动态平衡方面有一些研究,如:孙朋浩等<sup>[9]</sup>研究表明,在正常小鼠饲料中添加元宝枫籽可降低小鼠肠道中葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和放线杆菌门(*Acinetobacter*)的丰度,说明元宝枫籽有抑制肠道有害菌的作用;梁婵华等<sup>[10]</sup>研究表明,元宝枫籽油能改善脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)诱导的肠道损伤小鼠结肠组织上皮细胞凋亡和黏膜损伤,其机制与下调Nod样受体蛋白3[NLRP3炎性小体相关分子NLR家族Pyrin域蛋白3(pyrin domain contain - ning 3, Nlrp3)]、半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶-1(cysteine - aspartic proteases - 1, Caspase1)和凋亡相关斑点样蛋白(apoptosis - associated speck - like protein containing CARD, ASC)等的mRNA表达有关;陈显扬等<sup>[11]</sup>研究表明,元宝枫籽油可显著降低正常大鼠肠道厚壁菌门、疣微菌门、放线菌门、艾克曼菌和*Paramuri baculum*等的丰度,显著增加拟杆菌门和普雷沃氏菌属NK3B31等的丰度,另外,对连续7d服用元宝枫籽油的10名健康志愿者服用前后的粪便进行16S rDNA测序,结果表明,元宝枫籽油可显著降低健康志愿者粪便厚壁菌门、放线菌门、变形菌门等的丰度,显著升高拟杆菌门、乳酸菌的丰度。但元宝枫籽油对高脂膳食机体脂代谢和肠道健康的影

响还未见报道。

因此,本文采用高脂膳食诱导小鼠模拟营养过剩诱发的机体肥胖,从小鼠生长状况、生理生化、盲肠微环境和微生物群等指标研究元宝枫籽油对高脂膳食机体脂代谢和肠道健康的影响,以期为消费者食用元宝枫籽油及元宝枫籽油的开发与应用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

元宝枫籽油(油酸含量为24.2%,亚油酸含量为31.7%,神经酸含量为4.38%),贵州玄德生物科技股份有限公司;60只SPF级昆明种雄性小鼠[生产许可证号SCXK(辽)2015-0001],体质量18~20g,辽宁长生生物科技股份有限公司;基础饲料,重庆腾鑫生物技术有限公司;DNA凝胶回收试剂盒,德国Qiagen公司;粪便DNA提取试剂盒,天根生化科技有限公司;荧光定量试剂盒,宝生物工程(大连)有限公司;总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)试剂盒,南京建成生物工程研究所;丙酸(纯度>99.0%)、丁酸(纯度>99.0%)、异丁酸(纯度>99.0%)、戊酸(纯度>98.0%)、巴豆酸(纯度>98%)、丙氨酸(纯度>98%)标准品, Sigma公司;己酸标准品(纯度≥99.5%),阿拉丁试剂公司;其他试剂均为分析纯。

Thermo TRACE 1310-ISQ LT气相色谱-质谱联用仪、Nano Drop 1000微量紫外分光光度计,美国Thermo公司;SG8200HPT超声波清洗仪;H1-16KR高速冷冻离心机;Light Cycler Nano荧光定量PCR仪,美国罗氏公司;SpectraMax190连续波长多功能酶标仪,美国Molecular Devices公司;L5S紫外-可见分光光度计;CTFD-12S真空冷冻干燥机。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 动物饲养与样品采集

将60只昆明种雄性小鼠适应性喂养1周后,按体质量随机分为空白组、模型组、元宝枫籽油低剂量组和元宝枫籽油高剂量组,每组15只,每5只1笼。其中元宝枫籽油高剂量组灌胃剂量为1200 mg/(kg·d),元宝枫籽油低剂量组灌胃剂量为600 mg/(kg·d)元宝枫籽油和600 mg/(kg·d)大豆油(灌胃剂量参考余德林等<sup>[12]</sup>的方法改进),而空白组和模型组灌胃1200 mg/(kg·d)大豆油。模型组和元宝枫籽油组小鼠在实验期间一直给予高脂饲料饲养,而空白组小鼠给予基础饲料饲养,每天早上8:30—9:00进行灌胃,实验期间自由饮水,每3d

称1次体质量,并调整灌胃量,实验时间60 d。实验最后1 d禁食不禁水12 h,乙醚麻醉后,采用钢尺和软尺分别测定体长和腰围;然后眼眶取血,于4℃、4 000 r/min离心15 min, -80℃保存,备用;快速解剖出肝脏、脂肪、盲肠等,称量质量、分装, -80℃保存,备用。高脂饲料配方参照美国营养学会AIN-93G标准<sup>[13]</sup>配制,配方为:基础饲料78.8%,蛋黄粉10%,猪油10%,胆固醇1%,胆酸盐0.2%。

### 1.2.2 Lee's 指数的计算

Lee's 指数( $x_1$ )按式(1)计算。

$$x_1 = \sqrt[3]{m \times 1\ 000 / l} \quad (1)$$

式中: $m$ 为体质量,g; $l$ 为体长,cm。

### 1.2.3 生理生化指标的测定

参考试剂盒说明书,分别测定血清TC、TG、HDL-C和LDL-C水平。

### 1.2.4 肠道指标的测定

#### 1.2.4.1 盲肠及其微环境指标测定

盲肠内容物pH和水分的测定参考夏雪娟<sup>[14]</sup>的方法进行;盲肠内容物硫化氢( $H_2S$ )的测定参照郑扬等<sup>[15]</sup>的方法进行;盲肠内容物氨态氮( $NH_3-N$ )的测

定参照蒲万霞等<sup>[16]</sup>的方法进行;盲肠壁表面积和游离氨含量的测定参照游玉民等<sup>[17]</sup>的方法进行。

#### 1.2.4.2 盲肠内容物短链脂肪酸(SCFA)的测定

参照李明泽等<sup>[18]</sup>的方法测定盲肠内容物的SCFA。

GC条件:Agilent HP-INNOWAX毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样量1 μL,分流比10:1;进样口温度250℃;升温程序为起始温度90℃,然后以10℃/min升温至120℃,再以5℃/min升温至150℃,最后以25℃/min升温至250℃,保持2 min;载气(氮气)流速1.0 mL/min。

MS条件:电子轰击电离(EI)源,SIM扫描方式,电子能量70 eV,离子源温度230℃,传输线温度250℃,四极杆温度150℃。

#### 1.2.4.3 盲肠内容物微生物测定

按照粪便DNA提取试剂盒提取DNA后,进行纯度检测。各肠道菌群特异性PCR引物由上海生物工程股份有限公司合成,引物序列见表1。采用实时荧光定量聚合酶链反应测定各肠道菌群表达量,以各肠道菌群标准为内参计算其表达量<sup>[19-20]</sup>。

表1 各细菌引物序列及产物大小

肠道菌群	引物序列		产物大小/bp
	正向引物	反向引物	
肠球菌	TCCACGCCGTAACGATGAG	GACACGAGCTGACGACAACC	274
梭菌	GCACAAGCAGTGGAGT	CTTCTCCGTTTTGTCAA	239
拟杆菌	GAGAGGAAGGTCCCCAC	CGTACTTGGCTGGTTCAG	106
乳酸杆菌	ACGGGAGGCAGCAGTAGGGA	AGCCGTGACTTTCTGGTTGATT	165
双歧杆菌	CTCCTGGAACGGGTGG	GGTGTCTTCCCAGATATCTACA	550
肠杆菌	GGAGCAAACAGGATTAGATACCC	AACCCAACATTTACAACACC	317

### 1.2.5 数据处理

实验数据以“平均值±标准差”表示,采用SPSS 21.0及Origin 8.1进行数据统计处理,两组间比较采用Student's *t* 检验,多组间比较采用One-Way ANOVA进行Duncan分析,以 $p < 0.05$ 为存在统计

学差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 元宝枫籽油对小鼠生长状况的影响

元宝枫籽油对小鼠生长状况的影响如表2所示。

表2 元宝枫籽油对小鼠生长状况的影响( $n=15$ )

组别	初体质量/g	终体质量/g	摄食量/(g/周)	腰围/cm	Lee's 指数/(g/cm)	腹腔脂肪质量/g
空白组	25.38 ± 1.34 <sup>a</sup>	39.87 ± 2.31 <sup>c</sup>	182.37 ± 10.91 <sup>a</sup>	8.06 ± 0.32 <sup>d</sup>	2.94 ± 0.09 <sup>e</sup>	1.24 ± 0.11 <sup>c</sup>
模型组	24.71 ± 1.21 <sup>a</sup>	52.32 ± 1.98 <sup>a</sup>	147.06 ± 9.17 <sup>b</sup>	10.34 ± 0.19 <sup>a</sup>	3.77 ± 0.16 <sup>a</sup>	2.13 ± 0.14 <sup>a</sup>
高剂量组	25.04 ± 1.29 <sup>a</sup>	46.22 ± 2.13 <sup>b</sup>	145.58 ± 8.66 <sup>b</sup>	9.56 ± 0.25 <sup>c</sup>	3.39 ± 0.12 <sup>b</sup>	1.88 ± 0.09 <sup>b</sup>
低剂量组	25.94 ± 1.30 <sup>a</sup>	49.11 ± 2.11 <sup>a</sup>	141.31 ± 12.42 <sup>b</sup>	9.82 ± 0.28 <sup>b</sup>	3.62 ± 0.15 <sup>ab</sup>	2.04 ± 0.13 <sup>ab</sup>

注:同列不同字母表示存在显著差异( $p < 0.05$ )。下同

由表 2 可知:与空白组相比,在初体质量差异不显著的情况下,经过 60 d 高脂饲养,模型组小鼠终体质量、腰围、Lee's 指数和腹腔脂肪质量均显著增加 ( $p < 0.05$ ),分别增加了 31.23%、28.29%、28.23% 和 71.77%;与空白组相比,模型组摄食量显著降低 ( $p < 0.05$ ),降低了 19.36%;与模型组相比,元宝枫籽油高、低剂量组小鼠摄食量减少,但不

显著 ( $p > 0.05$ ),小鼠体质量、腰围、Lee's 指数和腹腔脂肪质量降低,其中高剂量组作用显著 ( $p < 0.05$ )。以上结果说明元宝枫籽油具有一定的减肥作用,但其作用效果有一定的量效关系。

## 2.2 元宝枫籽油对小鼠血清脂质水平的影响

元宝枫籽油对小鼠血清脂质水平的影响如表 3 所示。

表 3 元宝枫籽油对小鼠血清脂质水平的影响 ( $n = 15$ )

组别	mmol/L			
	TG	TC	LDL-C	HDL-C
空白组	1.33 ± 0.12 <sup>d</sup>	3.48 ± 0.14 <sup>d</sup>	0.61 ± 0.09 <sup>d</sup>	1.59 ± 0.05 <sup>a</sup>
模型组	2.31 ± 0.08 <sup>a</sup>	5.66 ± 0.12 <sup>a</sup>	1.76 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.81 ± 0.06 <sup>d</sup>
高剂量组	1.81 ± 0.14 <sup>bc</sup>	4.61 ± 0.16 <sup>c</sup>	1.09 ± 0.12 <sup>c</sup>	1.23 ± 0.90 <sup>b</sup>
低剂量组	2.08 ± 0.15 <sup>b</sup>	5.11 ± 0.12 <sup>b</sup>	1.43 ± 0.10 <sup>b</sup>	0.99 ± 0.08 <sup>c</sup>

由表 3 可知,与空白组相比,模型组小鼠血清中 TG、TC、LDL-C 水平显著升高 ( $p < 0.05$ ),分别升了 73.68%、62.64% 和 188.52%,而 HDL-C 水平显著降低 ( $p < 0.05$ ),下降了 49.06%。与模型组相比,元宝枫籽油高、低剂量组小鼠血清中 TG、TC、LDL-C 水平均显著降低 ( $p < 0.05$ ),HDL-C 水平显著升高 ( $p < 0.05$ ),其中,高剂量组小鼠血清中 TG、TC、LDL-C 的水平降幅分别为 21.65%、18.55% 和 38.07%,而低剂量组小鼠血清中 TG、TC、LDL-C 的水平降幅分别为 9.96%、9.72% 和 18.75%,高、低剂量组 HDL-C 水平增幅分别为

51.85% 和 22.22%。以上结果表明,元宝枫籽油具有改善因高脂膳食诱导的小鼠血清脂代谢紊乱的作用,但不能将高脂膳食小鼠恢复到正常水平,具体作用机制还有待进一步研究。

## 2.3 元宝枫籽油对小鼠盲肠及其微环境的影响

肠道是机体主要的消化吸收场所,盲肠和结肠是肠道微生物最密集和多样的区域。盲肠作为小肠的末端,连接着大肠,此区域是最早接触到大肠方向来源的微生物群落,因而国内外以盲肠研究肠道健康的报道<sup>[17,21-24]</sup>较多。元宝枫籽油对小鼠盲肠及其微环境的影响分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 元宝枫籽油对小鼠盲肠的影响 ( $n = 15$ )

组别	盲肠总质量/g	盲肠壁质量/g	盲肠内容物质量/g	盲肠表面积/cm <sup>2</sup>
空白组	0.38 ± 0.06 <sup>c</sup>	0.11 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.27 ± 0.03 <sup>c</sup>	4.61 ± 0.15 <sup>a</sup>
模型组	0.72 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.14 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>b</sup>	4.72 ± 0.12 <sup>a</sup>
高剂量组	0.86 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.69 ± 0.05 <sup>a</sup>	4.82 ± 0.11 <sup>a</sup>
低剂量组	0.78 ± 0.08 <sup>ab</sup>	0.15 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.63 ± 0.03 <sup>ab</sup>	4.78 ± 0.12 <sup>a</sup>

表 5 元宝枫籽油对小鼠盲肠微环境的影响 ( $n = 15$ )

组别	游离氨/(mg/g)	氨态氮/(μg/100 μL)	硫化氢/(μmol/g)	pH	水分/%
空白组	0.46 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.42 ± 0.02 <sup>d</sup>	3.90 ± 0.06 <sup>c</sup>	6.89 ± 0.09 <sup>c</sup>	86.33 ± 3.92 <sup>a</sup>
模型组	1.26 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.03 <sup>a</sup>	4.62 ± 0.05 <sup>a</sup>	7.72 ± 0.08 <sup>a</sup>	74.19 ± 4.12 <sup>b</sup>
高剂量组	0.89 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.05 <sup>c</sup>	4.39 ± 0.03 <sup>b</sup>	7.41 ± 0.10 <sup>b</sup>	80.21 ± 3.88 <sup>ab</sup>
低剂量组	1.03 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.73 ± 0.02 <sup>b</sup>	4.48 ± 0.05 <sup>a</sup>	7.65 ± 0.12 <sup>ab</sup>	79.56 ± 3.19 <sup>b</sup>

由表 4 可知,与空白组相比,模型组小鼠盲肠总质量和盲肠内容物质量显著增加 ( $p < 0.05$ ),分别增加了 89.47% 和 114.81%。与模型组相比,元宝枫籽油低、高剂量组小鼠盲肠总质量和盲肠内容物质量增加,且高剂量组增加显著 ( $p < 0.05$ )。可能是元宝枫籽油中活性物质对小鼠肠道产生了刺激作用,增大了盲肠表面积,加强了小鼠盲肠对营养物质的吸收所致<sup>[25]</sup>。肠道 pH 的降低能降低肠癌等肠

道类疾病发生的概率<sup>[26]</sup>,游离氨、硫化氢( $H_2S$ )、氨态氮( $NH_3 - N$ )是肠道健康的重要生物标志物。由表 5 可知,与空白组相比,模型组小鼠盲肠内容物游离氨、氨态氮、硫化氢和 pH 显著增加 ( $p < 0.05$ ),分别增加了 173.91%、109.52%、18.46%、12.05%,而盲肠内容物水分显著降低 ( $p < 0.05$ ),降低了 14.06%。与模型组相比,元宝枫籽油高、低剂量组小鼠游离氨和氨态氮含量显著降低 ( $p < 0.05$ ),高

剂量组硫化氢含量和 pH 显著降低 ( $p < 0.05$ )。以上结果说明,高脂膳食会影响小鼠盲肠及其微环境,而元宝枫籽油可降低因高脂膳食造成的小鼠盲肠代谢产物的毒害损伤。

#### 2.4 元宝枫籽油对小鼠盲肠内容物 SCFA 的影响

肠道 SCFA 可以反映机体肠道内厌氧菌的数量

和代谢情况,其组成和含量与肠道微生物菌群存在一定的相关性,如乙酸、丁酸和丙酸与瘤胃球菌属 (*Ruminococcus*) 和乳酸菌 (*Lactobacillus*) 呈正相关,而丁酸与双歧杆菌 (*Bifidobacterium*) 和阿克曼氏菌 (*Akkermansia*) 呈正相关<sup>[27]</sup>。元宝枫籽油对小鼠盲肠内容物 SCFA 的影响如表 6 所示。

表 6 元宝枫籽油对小鼠盲肠内容物 SCFA 的影响 ( $n = 15$ )

组别	丁酸	异丁酸	戊酸	丙酸	SCFA 总量
空白组	25.44 ± 1.12 <sup>a</sup>	2.05 ± 0.12 <sup>a</sup>	8.41 ± 0.09 <sup>a</sup>	1.91 ± 0.05 <sup>a</sup>	37.81 ± 1.11 <sup>a</sup>
模型组	17.11 ± 1.20 <sup>c</sup>	1.82 ± 0.07 <sup>b</sup>	6.84 ± 0.19 <sup>c</sup>	1.42 ± 0.06 <sup>c</sup>	27.19 ± 1.19 <sup>c</sup>
高剂量组	21.48 ± 1.29 <sup>b</sup>	1.93 ± 0.06 <sup>ab</sup>	7.52 ± 0.15 <sup>b</sup>	1.68 ± 0.07 <sup>b</sup>	32.61 ± 1.09 <sup>b</sup>
低剂量组	18.41 ± 1.11 <sup>c</sup>	1.86 ± 0.10 <sup>b</sup>	7.03 ± 0.08 <sup>c</sup>	1.76 ± 0.09 <sup>ab</sup>	29.06 ± 1.01 <sup>bc</sup>

由表 6 可知,与空白组相比,模型组小鼠盲肠内容物中 SCFA 总量、丁酸、异丁酸、戊酸和丙酸含量显著降低 ( $p < 0.05$ ),分别降低了 28.09%、32.74%、11.22%、18.67% 和 25.65%。与模型组相比,元宝枫籽油可增加小鼠盲肠内容物中 SCFA 总量、丁酸、戊酸、丙酸和异丁酸含量,其中:元宝枫籽油高剂量组小鼠盲肠内容物中 SCFA 总量、丁酸、戊酸和丙酸的含量显著增加 ( $p < 0.05$ ),分别增加了 19.93%、25.54%、9.94% 和 18.31%;而低剂量组小鼠盲肠

内容物中丙酸含量显著增加 ( $p < 0.05$ ),增加了 23.94%。以上结果表明,元宝枫籽油具有促进高脂膳食机体肠道内的发酵反应,改善肠道菌群稳态失调的作用。

#### 2.5 元宝枫籽油对小鼠盲肠内容物中微生物的影响

元宝枫籽油对小鼠盲肠内容物中微生物的影响如表 7 所示。

表 7 元宝枫籽油对小鼠盲肠内容物中微生物的影响 ( $n = 15$ )

组别	乳酸杆菌	肠杆菌	双歧杆菌	肠球菌	梭菌	拟杆菌
空白组	6.44 ± 0.18 <sup>a</sup>	5.77 ± 0.09 <sup>c</sup>	12.11 ± 0.15 <sup>a</sup>	9.17 ± 0.16 <sup>d</sup>	13.91 ± 0.22 <sup>a</sup>	10.55 ± 0.17 <sup>c</sup>
模型组	4.58 ± 0.17 <sup>d</sup>	7.16 ± 0.12 <sup>a</sup>	9.88 ± 0.18 <sup>c</sup>	11.81 ± 0.18 <sup>a</sup>	9.77 ± 0.19 <sup>c</sup>	12.21 ± 0.19 <sup>a</sup>
高剂量组	5.71 ± 0.13 <sup>b</sup>	6.26 ± 0.18 <sup>b</sup>	11.16 ± 0.12 <sup>b</sup>	9.55 ± 0.18 <sup>c</sup>	12.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	11.65 ± 0.26 <sup>b</sup>
低剂量组	5.24 ± 0.10 <sup>c</sup>	6.58 ± 0.15 <sup>b</sup>	10.85 ± 0.22 <sup>b</sup>	10.14 ± 0.10 <sup>b</sup>	11.81 ± 0.25 <sup>b</sup>	11.82 ± 0.15 <sup>b</sup>

由表 7 可知,与空白组相比,模型组小鼠盲肠内容物中乳酸杆菌、双歧杆菌和梭菌的量显著降低 ( $p < 0.05$ ),分别下降了 28.88%、18.41% 和 29.76%,而肠杆菌、肠球菌和拟杆菌的量显著升高 ( $p < 0.05$ ),分别上升了 24.09%、28.79% 和 15.73%。与模型组相比,元宝枫籽油高、低剂量组小鼠盲肠内容物中乳酸杆菌、双歧杆菌和梭菌的量均显著增加 ( $p < 0.05$ ),而肠杆菌、肠球菌和拟杆菌的量显著减少 ( $p < 0.05$ )。以上结果表明,元宝枫籽油可改善因高脂膳食造成的小鼠盲肠代谢产物的毒害损伤,增加有益微生物,促进肠道健康。

### 3 结论

以高脂膳食小鼠模拟机体营养过剩,从生长状况、血脂、肠道微环境 3 个方面研究元宝枫籽油对高脂膳食小鼠脂代谢和肠道健康的影响。结果表明:元宝枫籽油直接饮用或食用,并未加重高脂膳食小

鼠脂代谢紊乱,以及促进肥胖的发生;但元宝枫籽油并不能将高脂膳食小鼠恢复到正常水平。此外,元宝枫籽油可改善因高脂膳食造成的小鼠盲肠代谢产物的毒害损伤,增加有益微生物量,具有一定的维持肠道健康的作用。后续将采用 16S rDNA 测序、代谢组学、转录组学及网络药理等进一步探明元宝枫籽油对高脂膳食机体脂代谢和肠道健康的影响机制。

#### 参考文献:

- [1] 王性炎. 中国元宝枫 [M]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学出版社,2013.
- [2] 魏伊楚,樊金拴,李娟娟,等. 不同产地元宝枫种仁油脂含量及脂肪酸成分研究 [J]. 中国粮油学报,2018,33(12):69-73.
- [3] 中华人民共和国卫生部. 卫生部关于批准元宝枫籽油和牡丹籽油作为新资源食品的公告(2011年第9号) [EB/OL]. (2011-03-29) [2021-11-20]. <http://wsjkw.hebei.gov.cn/html/tzgg/20110329/29397.html>.

- [4] YANG R N, ZHANG L X, LI P W, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China[J]. *Trends Food Sci Tech*, 2018 (4): 26 – 32.
- [5] 王性炎, 谢胜菊, 王高红. 中国富含神经酸的元宝枫籽油应用研究现状及前景[J]. *中国油脂*, 2018, 43(12): 93 – 95, 104.
- [6] YANG Z, MI J Y, WANG Y, et al. Effects of low – carbohydrate diet and ketogenic diet on glucose and lipid metabolism in type 2 diabetic mice [J/OL]. *Nutrition*, 2021, 89: 111230 [2021 – 12 – 01]. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2021.111230>.
- [7] TANG C, KONG L Y, SHAN M Y, et al. Protective and ameliorating effects of probiotics against diet – induced obesity: a review [J/OL]. *Food Res Int*, 2021, 147: 110490 [2021 – 12 – 01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110490>.
- [8] DUAN R Q, GUAN X, HUANG K Z, et al. Flavonoids from whole – grain oat alleviated high – fat diet – induced hyperlipidemia via regulating bile acid metabolism and gut microbiota in mice [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(27): 7629 – 7640.
- [9] 孙朋浩, 薛玉环, 吴永继, 等. 元宝枫籽对小鼠肠道菌群生态的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 184 – 193.
- [10] 梁婵华, 黄妍, 莫敏敏, 等. 元宝枫籽油改善脂多糖诱导的小鼠肠道炎症[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(10): 37 – 45, 6.
- [11] 陈显扬, 宋王婷, 韩佳睿, 等. 元宝枫籽油在用于制备改善肠道菌群药物中的应用: CN111714529A [P]. 2020 – 09 – 29.
- [12] 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.
- [13] REEVES P G, NIELSEN F H, FAHEY G C. AIN – 93 purified diets for laboratory rodents: final report of the American Institute of Nutrition Ad Hoc Writing Committee on the reformulation of the AIN – 76A rodent diet [J]. *J Nutr*, 1993, 123(11): 1939 – 1951.
- [14] 夏雪娟. 青稞全谷粉对高脂膳食大鼠胆固醇肝肠代谢的影响机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [15] 郑扬, 廖锋, 杜军保, 等. 改良亚甲基蓝法测定血浆硫化氢[J]. *生理学报*, 2012, 64(6): 681 – 686.
- [16] 蒲万霞, 魏云霞, 孟晓琴, 等. 靛酚蓝 – 分光光度法测定胃肠道内容物中氨态氮含量研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2008(5): 13 – 17.
- [17] 游玉明, 任亨, 张世奇, 等. 花椒麻味物质对糖尿病大鼠肠道微生态的影响[J]. *营养学报*, 2017, 39(2): 170 – 176.
- [18] 李明泽, 苏昕峰, 彭林, 等. 辣椒素剂量对大鼠肠道发酵产物的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(7): 258 – 261.
- [19] 曾德力. I型大麻素受体拮抗剂对II型糖尿病治疗作用的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [20] MALENCZYK K, JAZUREK M, KEIMPEMA E, et al. CB1 cannabinoid receptors couple to focal adhesion kinase to control insulin release [J]. *J Biol Chem*, 2013, 288(45): 32685 – 32699.
- [21] MA C, HAN M, HEINRICH B, et al. Gut microbiome – mediated bile acid metabolism regulates liver cancer via NKT cells [J/OL]. *Science*, 2018, 360(6391): e5931 [2021 – 12 – 01]. <https://doi.org/10.1126/science.aan5931>.
- [22] ROTHSCHILD D, WEISSBROD O, BARKAN E, et al. Environment dominates over host genetics in shaping human gut microbiota [J]. *Nature*, 2018, 555(7695): 210 – 215.
- [23] 孙笑非, 孙冬岩, 王文娟. 肠道微生物菌群的生态位和功能的研究进展[J]. *饲料研究*, 2016(13): 24 – 27.
- [24] 王敏, 帅天罡, 秦清娟, 等. 魔芋葡甘低聚糖对大鼠肠道环境的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(7): 197 – 203.
- [25] 周丽媛, 李成良, 李四元, 等. 胃肠道生物标志物与动物健康[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(12): 5476 – 5484.
- [26] 周兴婷, 于雷雷, 翟齐啸, 等. 益生菌复配富铬酵母缓解2型糖尿病的作用机制涉及调节肠道菌群失调[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(23): 29 – 36.
- [27] 陈康. 长链菊粉对1型糖尿病小鼠保护作用的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.