

皱粒豌豆代餐粉对小鼠糖脂代谢紊乱及肠道菌群的影响

崔亚君¹ 洪凌宇¹ 周素梅¹ 何玉华² 么 杨³ 侯殿志¹

(1. 北京工商大学食品与健康学院老年营养与健康教育部重点实验室, 北京 100048; 2. 云南省农业科学院粮食作物研究所, 云南 昆明 650201; 3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: [目的] 探究皱粒豌豆代餐粉对糖脂代谢紊乱及肠道菌群结构失衡的影响。[方法] 利用高脂饲喂小鼠模型开展为期 12 周的干预试验, 系统监测小鼠表型、血生化、组织病理及肠道微生物组成等关键指标的变化情况。[结果] 皱粒豌豆代餐粉可显著降低高脂饲喂小鼠的空腹血糖, 血糖曲线下面积, 血清总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇水平 ($P < 0.05$); 有效缓解肝脂肪变性, 降低血清丙氨酸转氨酶水平 ($P < 0.05$), 显著减轻肝细胞损伤。此外, 皱粒豌豆代餐粉的摄入可显著调节高脂饮食导致的肠道微生态紊乱, 提高肠道微生物丰富度, 降低厚壁菌门/拟杆菌门比例, 增加 *norank_f_Muribaculaceae* 菌属、*norank_o_Clostridia* UCG-014 菌属和双歧杆菌属 (*Bifidobacterium*) 等有益菌的相对丰度。[结论] 皱粒豌豆代餐粉在改善糖脂代谢和调节肠道健康方面具有潜在应用价值。

关键词: 皱粒豌豆; 代餐粉; 高脂饮食; 糖脂代谢; 肠道菌群

Effects of wrinkled pea meal replacement powder on glucose and lipid metabolism disorders and gut microbiota in mice

CUI Yajun¹ HONG Lingyu¹ ZHOU Sumei¹ HE Yuhua² YAO Yang³ HOU Dianzhi¹

(1. Beijing Food Additives Engineering and Technology Research Centre, School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Institute of Grain Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650201, China; 3. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of wrinkled pea meal replacement powder on glucose and lipid metabolism disorders and gut microbiota. [Methods] A 12-week intervention experiment was conducted using a high-fat diet-fed mouse model. Changes in key indicators, including mouse phenotypes, blood biochemical parameters, histopathology, and gut microbial composition, were systematically monitored. [Results] Wrinkled pea meal replacement powder significantly reduced fasting blood glucose, area under the blood glucose curve, and serum levels of total cholesterol, triglycerides, and low-density lipoprotein cholesterol in high-fat-fed mice ($P < 0.05$). It effectively alleviated hepatic steatosis, reduced serum alanine aminotransferase levels ($P < 0.05$), and significantly mitigated hepatocyte damage. Additionally, consumption of wrinkled pea meal replacement powder significantly regulated gut microecological imbalance induced by a high-fat diet, increased gut microbial richness, decreased the *Firmicutes/Bacteroidetes* ratio, and increased the relative abundance of beneficial bacteria, including *norank_f_Muribaculaceae*, *norank_o_Clostridia* UCG-014, and *Bifidobacterium*. [Conclusion] Wrinkled pea meal replacement powder has potential application value in improving glucose and lipid metabolism and regulating gut health.

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系—食用豆 (编号: CARS-08-G19)

通信作者: 侯殿志 (1989—), 男, 北京工商大学副教授, 博士。E-mail: houdianzhi@btbu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-27 **改回日期:** 2026-03-18

引用格式: 崔亚君, 洪凌宇, 周素梅, 等. 皱粒豌豆代餐粉对小鼠糖脂代谢紊乱及肠道菌群的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 158-168.

Citation: CUI Yajun, HONG Lingyu, ZHOU Sumei, et al. Effects of wrinkled pea meal replacement powder on glucose and lipid metabolism disorders and gut microbiota in mice[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 158-168.

Keywords: wrinkled pea; meal replacement powder; high-fat diet; glucose-lipid metabolism; gut microbiota

糖脂代谢紊乱是由遗传、饮食、环境等多重因素引发的代谢性疾病^[1],以血糖异常和血脂紊乱为核心特征,已成为全球公共健康的重要威胁。不健康的饮食方式是诱发此类代谢异常的关键危险因素^[2]。Li等^[3-4]研究表明,肠道微生物群异常对高脂饮食诱发糖脂代谢紊乱的发生和进展有重要影响。值得注意的是,功能性食品可通过调节肠道微生物群进而发挥改善糖脂代谢紊乱的作用^[5]。目前,流行病学调查结果显示,增加豆类的摄入是降低糖脂代谢紊乱发生风险的一种安全策略^[6]。另外,豆类中丰富的膳食纤维、蛋白及多酚等功能活性成分也具有潜在的肠道菌群调控效果^[7]。

豌豆(*Pisum sativum* L.),作为豆类的一种代表性品类,在全球被广泛食用,是优质的膳食原配料^[8]。Wang等^[9-10]研究表明,豌豆糖蛋白和膳食纤维可通过抑制消化酶活性、促进胰岛素分泌等途径降低血糖。豌豆蛋白水解物能显著降低血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平,达到改善高脂血症的效果^[11]。豌豆白蛋白则能够有效抑制脂肪生成、促进脂肪酸氧化,并修复紊乱的肠道菌群结构^[12]。皱粒豌豆作为圆粒豌豆的天然变种,因淀粉分支酶I基因隐性突变,具有直链淀粉含量高、体外消化性低的特性,更适合开发为功能性食品^[13]。代餐粉作为一种冲调粉剂代餐产品,近年来广受消费者青睐。这类产品一般是以豆类、谷类、薯类食材等为主,已成为改善肥胖及其相关代谢紊乱的重要膳食策略^[14-15]。以皱粒豌豆为核心原料的功能性代餐粉因低能量和高营养密度等特点,具有潜在的糖脂代谢调控效果^[16]。

试验拟以皱粒豌豆为主要原料,复配异麦芽酮糖醇、黄豆粉、苦荞粉、燕麦麸皮等多种功能性配料制备出冲泡即食的代餐粉,以此为干预饲料,考察其对糖脂代谢紊乱模型小鼠的健康改善作用,旨在为高附加值豌豆基功能产品的开发提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

皱粒豌豆:19w10767-10770,国家食用豆产业技术体系;

C57BL/6J雄性小鼠:4周龄,体重16~22 g,生产许可证号SYXK(京)2025-0074,北京维通利华实验动物技术有限公司;

异麦芽酮糖醇:郑州裕和食品添加剂有限公司;

黄豆粉:黑龙江省农垦龙王食品有限责任公司;

苦荞粉:内蒙古粟丰工贸有限公司;

燕麦麸皮:桂林西麦食品股份有限公司;

圆苞车前子壳:临沂万嘉商贸有限公司;

魔芋胶:湖北强森魔芋科技有限公司;

对照饲料(D12450J)、高脂饲料(D12492):美国Research Diets公司;

无菌生理盐水:上海源叶生物科技有限公司;

葡萄糖粉:纯度≥99%,内蒙古阜丰生物科技有限公司;

甘油三酯(TG)试剂盒、总胆固醇(TC)试剂盒:碧云天生物技术有限公司;

低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)试剂盒:南京建成生物工程研究所有限公司;

丙氨酸转氨酶(ALT)试剂盒、天冬氨酸转氨酶(AST)试剂盒:上海酶联生物科技有限公司;

油红O:美国Sigma公司;

电子天平:SOP型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

万能粉碎机:FW80型,天津市泰斯特仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:SCIENTZ-18N型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

高速冷冻离心机:GL-16G-II型,北京天林恒泰科技有限公司;

拜耳康血糖仪:Contour TS型,德国拜耳公司;

全自动血生化仪:BS-1000M型,深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司;

分体式石蜡包埋机:EG1150H型,德国Leica公司;

烤片机:HI1220型,德国Leica公司;

荧光倒置显微镜:Axio observer型,卡尔蔡司集团;

-80℃低温冰箱:DW-86L486型,青岛海尔股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 皱粒豌豆代餐粉制备 参照《中国食物成分表》(6版)中的营养成分及血糖生成指数(GI)值筛选原料,并结合课题组前期相关产品研发经验,确定代餐粉的基础配方。按质量分数计,配方组成为皱粒豌豆粉50%,异麦芽酮糖醇30%,黄豆粉5%,苦荞粉5%,燕麦麸皮5%,圆苞车前子壳3%,魔芋胶2%。将上述原料混合调配后制成

皱粒豌豆代餐粉。

1.2.2 动物试验设计

(1) 动物饲料配方:包括正常饲料(D12450J)、高脂饲料(D12492)和干预饲料。根据《中国居民膳食指南(2022)》和 GB 14924.3—1010《实验动物配合饲料营养成分》,确定豌豆代餐粉在干预饲料中质量分数为 40%。豌豆代餐粉添加原则为以等营养素和等能量密度的形式替换高脂饲料中的部分营养成分。

(2) 动物试验分组:所有试验程序均经北京工商大学科学研究伦理委员会批准(2024 年第 238 号)。将 C57BL/6J 雄性小鼠饲养于标准 SPF 屏障环境,保持恒温(22℃)、恒湿(55%)、12 h 昼夜交替以及自由摄食和饮水。适应性饲养 1 周后,根据体重按照区组将 30 只小鼠随机分成 3 组:对照组(正常饲料)、模型组(高脂饲料)和代餐粉组(干预饲料)。干预周期 12 周。

1.2.3 体重、进食量测定及组织样品收集 每周同一时间称重每组小鼠体重和饲料剩余量。干预试验结束后,禁食 12 h,摘取小鼠眼球取血,4℃、3 000 r/min 离心 10 min 获得血清,于-80℃保存备用。以颈椎脱臼法处死小鼠,采集白色脂肪(主要为附睾、肾周、皮下和肠系膜脂肪)和肝脏组织,称重。用 4% 多聚甲醛溶液固定肝脏组织。

1.2.4 口服葡萄糖耐量试验 根据 Hou 等^[17]的方法,在干预试验的最后 1 周,对小鼠进行口服葡萄糖耐量测试。将小鼠禁食 6 h 后,以 2 g/kg 的剂量灌胃 25% 葡萄糖溶液,分别于灌胃 0, 15, 30, 60, 90, 120 min 尾静脉采血,采用血糖仪检测血糖水平,通过计算血糖一时间曲线下面积(AUC)评估葡萄糖耐量。

1.2.5 血生化分析 采用全自动血生化分析仪对小鼠空腹状态下的血清进行检测,以测定其中葡萄糖和血清脂质浓度,具体包括 TC、TG、HDL-C、LDL-C、ALT 和 AST。

1.2.6 组织病理学分析

(1) 肝脏苏木精与伊红(H&E)染色:根据 Zhou 等^[18]的方法并修改。将固定的组织经过脱水浸蜡后,在包埋机内包埋。将包埋好的组织放入切片机中切成 5 μm 的切片。石蜡切片依次进行脱蜡与复水操作,随后采用 H&E 进行染色处理,完成染色后,对切片进行脱水并封片。将切片于倒置荧光显微镜下进行拍照。

(2) 肝脏组织油红染色:根据朱珊等^[19]的方法并修改。从固定液中取出肝组织,放入梯度蔗糖—磷酸盐缓冲液中脱水,24 h 后置于 OCT 包埋剂中包埋,速冻。将肝组织置于降温至-20℃的冰冻切片机上,滴包埋剂并修

剪组织切面,将切片厚度调为 4~8 μm。切片自然晾干 20 min,水汽消失后进行 ORO 染色 8 min,用 PBS 润洗,乙醇分化,苏木精染色 90 s,最后封片。

1.2.7 小鼠肠道菌群分析

(1) 粪便微生物 DNA 的提取:采用腹部按摩法刺激小鼠排便,用无菌试管收集并立即投入液氮中,后转移至-80℃冰箱保存。对收集的粪便样本根据 FastPure Stool DNA Isolation Kit 说明书进行微生物群落总基因组 DNA 抽提,采用 1% 琼脂糖凝胶电泳分析基因组 DNA 提取物的完整性,通过分光光度计进行 DNA 浓度定量及纯度评估。

(2) 小鼠粪便微生物 16S rRNA 基因测序:以上述提取的 DNA 为模板,使用携带 Barcode 序列的上游引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和下游引物 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对 16S rRNA 基因 V3~V4 可变区进行 PCR 扩增。使用 2% 琼脂糖凝胶回收 PCR 产物,利用 DNA 凝胶回收纯化试剂盒进行回收产物纯化,并用 Qubit 4.0 对回收产物进行检测定量。使用 NEXTFLEX Rapid DNA-Seq Kit 对纯化后的 PCR 产物进行建库,随后利用 Illumina Nextseq2000 平台进行测序。

(3) 生物信息学分析:采用 fastp 软件(版本 0.19.6, <https://github.com/OpenGene/fastp>)对双端测序原始数据实施质量控制,利用 FLASH 软件(版本 1.2.11, <http://www.cbcb.umd.edu/software/flash>)进行序列拼接。质控后的数据通过 Qiime2 平台的 DADA2 插件(默认参数)完成降噪处理。基于 mothur 工具(<http://www.mothur.org/wiki/Calculators>)计算 α 和 β 多样性指数,组间差异分析采用 Wilcoxon 秩和检验。微生物群落结构解析通过 Bray-Curtis 距离矩阵的主坐标分析(PCoA)实现,结合 PERMANOVA 非参数检验评估组间差异显著性。采用 LEfSe 算法(<http://huttenhower.sph.harvard.edu/LEfSe>)识别门至属水平的差异菌属(LDA>2 且 $P<0.05$)。

1.3 数据处理

结果以平均值±标准误差的形式呈现。采用 IBM SPSS statistics 22.0 进行统计学分析。利用单因素方差分析(One-Way ANOVA, Duncan test)计算组间差异。 $P<0.05$ 代表存在显著性差异。采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 对高脂饲喂小鼠体重、摄食量和白色脂肪质量的影响

由图 1(a)可知,干预 1~5 周时,模型组和代餐粉组小

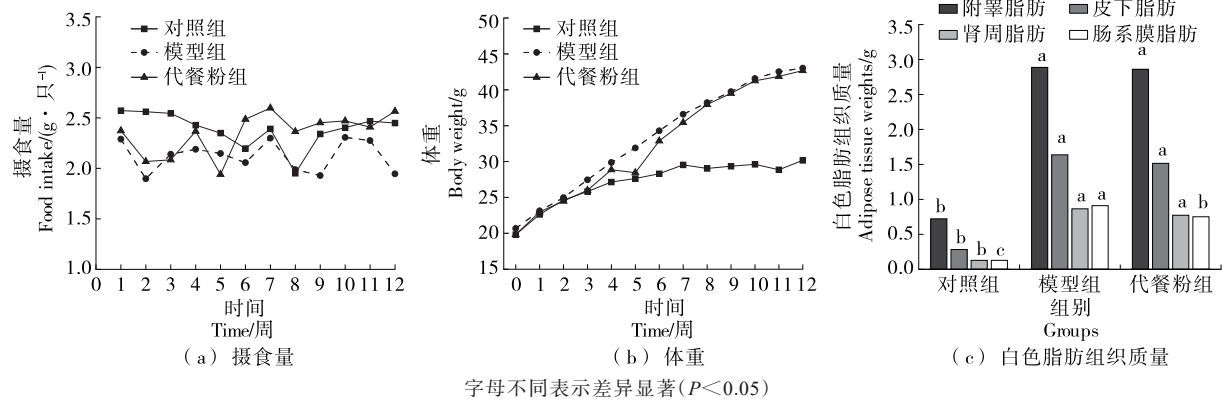


图1 皱粒豌豆代餐粉对高脂饲喂小鼠基本体征的影响

Figure 1 Effects of wrinkled pea meal replacement powder on basic physiological parameters in mice fed a high-fat diet

鼠的摄食量略低于对照组,推测可能与高脂饲料过于油腻、易产生饱腹感相关。皱粒豌豆代餐粉改善了高脂饲料的适口性,使小鼠适应后摄食意愿增强,因此在第6周后代餐粉组摄食量表现出上升的情况,且整体略高于模型组小鼠。由图1(b)可知,模型组和代餐粉组小鼠的体重显著高于对照组小鼠($P < 0.05$),证实高脂饮食可诱导小鼠体重增加,引发肥胖。值得注意的是,干预12周后未观察到代餐粉组与模型组之间的体重存在显著差异,表明尽管该代餐粉组小鼠摄食量相对较高,但其体重未继续上升,而是稳定在与模型组相近的水平,提示该代餐粉对体重异常增长具有潜在的调控效果。

小鼠的附睾、皮下、肾周和肠系膜脂肪是小鼠的主要白色脂肪组织,由图1(c)可知,模型组和代餐粉组小鼠的4种主要脂肪组织质量均显著高于对照组($P < 0.05$)。但与模型组相比,代餐粉组小鼠的肠系膜脂肪质量显著降低($P < 0.05$)。其他3种白色脂肪质量虽也呈下降趋势,

但未观察到显著性差异($P > 0.05$)。表明该代餐粉对白色脂肪组织异常堆积的改善作用呈现组织特异性,仅显著缓解肠系膜脂肪的堆积,对其他部位白色脂肪堆积的调控作用并不明显。

2.2 对高脂饲喂小鼠葡萄糖稳态的影响

由图2(a)可知,经12周的高脂饲养后,模型组小鼠空腹血糖水平显著高于对照组($P < 0.05$)。皱粒豌豆代餐粉干预后,小鼠空腹血糖显著下降($P < 0.05$),表明该代餐粉可有效缓解高脂饮食诱导的血糖升高。此外,口服糖耐量试验结果显示,代餐粉组小鼠在餐后15,30,120 min时的血糖水平均显著低于模型组($P < 0.05$),表明其对餐后血糖的调控具有持续性。糖耐量曲线下面积(AUC)能够反映机体对体内血糖浓度的调节能力,AUC值越低,说明机体血糖的调节能力越强^[20]。由图2(b)可知,代餐粉组小鼠的AUC显著低于模型组($P < 0.05$),表明其有助于改善机体对葡萄糖的代谢能力,提升血糖稳态调控水平。

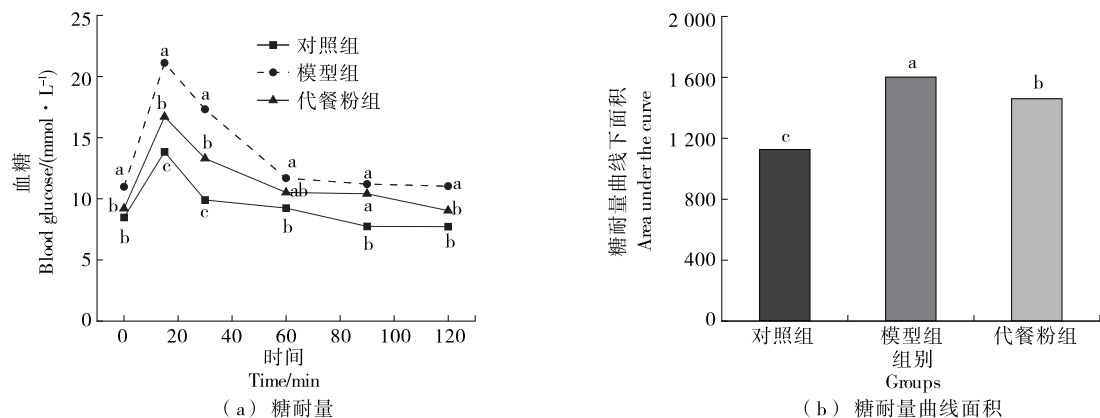
字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

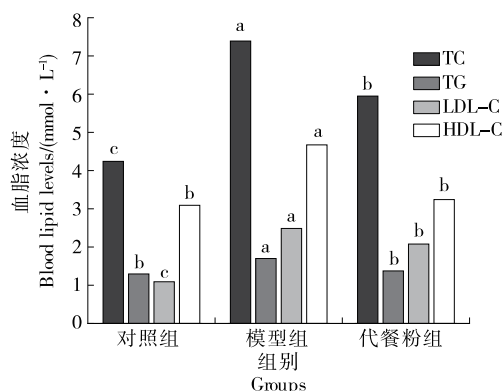
图2 皱粒豌豆代餐粉对高脂饲喂小鼠葡萄糖稳态的影响

Figure 2 Effects of wrinkled pea meal replacement powder on glucose homeostasis in high-fat-fed mice

一项单盲随机对照重复测量交叉设计的试验^[21]中,受试者摄入含 50 g 豌豆蛋白的葡萄糖后,AUC 增量面积下降 53%,胰岛素增量面积上升 40%,说明食用豌豆蛋白可降低健康成人餐后血糖并刺激胰岛素释放。同时,豌豆糖蛋白已被证实能以剂量依赖的方式降低糖尿病小鼠的空腹血糖水平^[22]。此外,动物试验也证实豌豆膳食纤维具有潜在的降血糖效应,能够降低血清葡萄糖水平并改善口服葡萄糖耐受度^[9, 23]。综上,皱粒豌豆基代餐粉可显著降低高脂饲喂小鼠的空腹血糖和 AUC 值,进而调控血糖稳态。

2.3 对高脂饲喂小鼠血脂水平的影响

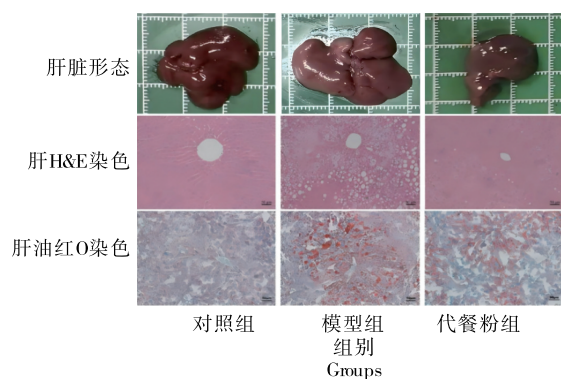
血脂异常是代谢综合征的常见症状,通常表现为高胆固醇血症、高甘油三酯血症、混合性高脂血症等^[24]。由图 3 可知,与对照组相比,模型组小鼠的 TC、TG 和 LDL-C 水平显著升高($P<0.05$)。表明长期的高脂饮食对小鼠的



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 3 皱粒豌豆代餐粉对高脂饲喂小鼠脂质代谢的影响

Figure 3 Effects of wrinkled pea meal replacement powder on serum lipids in high-fat-fed mice



(a) ALT和AST水平

字母不同表示差异显著($P<0.05$)

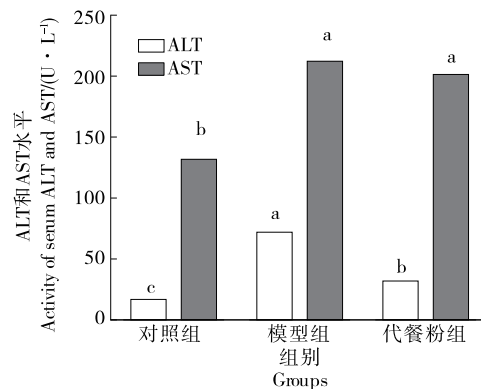
图 4 皱粒豌豆代餐粉对高脂饲喂小鼠肝脂肪变性的影响

Figure 4 Effects of wrinkled pea meal replacement powder on liver steatosis in high-fat-fed mice

血脂代谢水平产生了明显不良影响,导致血脂水平失衡。皱粒豌豆代餐粉的干预可以有效降低肥胖小鼠血清中 TC、TG 和 LDL-C 水平($P<0.05$),使各指标浓度更趋于对照组正常值,表明该代餐粉具有调节脂质代谢异常的作用。此外,模型组 HDL-C 的显著升高可能是机体应对脂质转运负荷增加的代偿性调节反应^[25],而皱粒豌豆代餐粉干预可显著降低这一代偿压力,有效减轻长期高脂饲喂对小鼠的代谢负担。此前在绿豆皮改善糖尿病小鼠糖脂代谢的相关研究中,也观察到类似的 HDL-C 上升现象^[26]。Inagaki 等^[27]研究了豌豆荚提取物(AE,主要成分为多酚和膳食纤维)对高蔗糖饮食诱发的高脂血症大鼠脂质水平的影响,发现 AE 能显著降低其血清中的 TG 和 TC 水平。张静静^[28]研究发现,不同剂量的汽爆豌豆肽干预均可以降低肥胖小鼠的 TC、TG 和 LDL-C 水平,有效缓解高脂血症,其脂质调节效应与该代餐粉的作用结果一致。综上,皱粒豌豆代餐粉对于脂质代谢紊乱具有显著改善作用。

2.4 对高脂饲喂小鼠肝脂肪变性的影响

肝脏是脂质代谢的重要器官,对于脂类的转运、消化、吸收、合成和分解等具有重要作用。由图 4(a)可知,对照组小鼠的肝脏呈红褐色,而模型组小鼠肝脏表面则可见大量白色脂粒沉积,出现了严重的脂肪变性。摄入该代餐粉后,小鼠的肝脏颜色有所恢复,表面脂粒沉积减少。对照组小鼠的肝脏组织显示出正常、清晰和排列整齐的肝细胞,而模型组小鼠的肝脏出现了严重的广泛细胞质空泡,细胞间界限模糊。与模型组相比,代餐粉组小鼠的肝脏细胞形态恢复正常,边界清晰、排列紧密、空泡也显著减少。模型组小鼠显示出严重的脂滴堆积,而经代餐粉干预后,小鼠肝内脂滴积聚程度明显减轻。



(b) ALT和AST水平

血清中的ALT和AST常被用来评估肝脏的损伤程度^[29]。当肝脏受到损伤,血清中的ALT和AST水平会出现异常升高^[30]。由图4(b)可知,长期高脂饮食饲喂使得小鼠血清中ALT和AST水平显著升高($P<0.05$)。经过该代餐粉的干预,小鼠血清中ALT水平显著低于模型组($P<0.05$),表明该代餐粉对高脂饮食诱导的肝细胞损伤具有一定的改善作用;而AST水平与模型组无显著差异。由于ALT主要富集于肝细胞内,AST则广泛分布于肝脏、心肌、骨骼肌、肾脏等多器官,因此ALT水平能够更精准、更特异地反映肝脏的损伤情况^[31]。基于上述结果,皱粒豌豆代餐粉可减轻高脂饲喂小鼠肝脏脂滴沉积与肝细

胞空泡化程度,并显著降低血清ALT水平,提示其对高脂诱导的肝损伤具有积极的干预作用。

2.5 对高脂饲喂小鼠肠道微生物的影响

2.5.1 微生物多样性

由图5(a)和图5(b)可知,随着随机选择测序量的增加,Sobs指数曲线和Shannon-Wiener曲线均趋于平坦。表明测序的数据量合理且足够大,能够对样本中的微生物多样性信息进行正确地反映^[32-33]。

微生物的 α 多样性能够反映一个局部区域内微生物群落的复杂程度和多样性状况。由图5(c)和图5(d)可知,经12周的高脂饲料喂养后,模型组小鼠的微生物丰富度与对照组小鼠相比显著降低($P<0.001$)。代餐粉的干

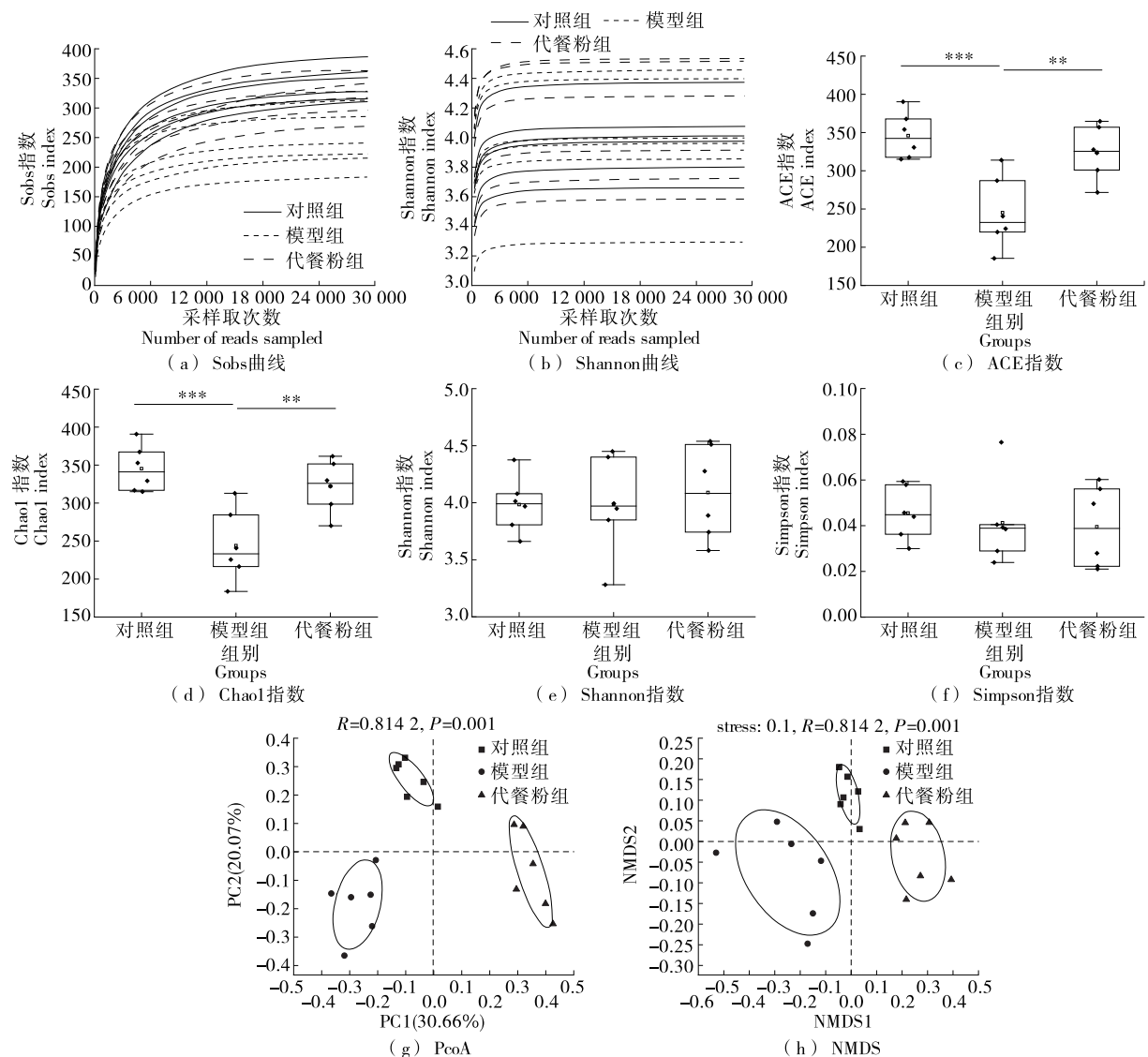


图5 皱粒豌豆代餐粉对高脂诱导肥胖小鼠肠道微生物多样性的影响

Figure 5 Effects of wrinkled pea meal replacement powder on the gut microbiota diversity of high-fat diet-induced obese mice

预使得小鼠的微生物丰富度显著提高($P<0.01$),表明其可恢复高脂所导致的群落丰富度下降,与 Liu 等^[12]的研究结果一致。由图 5(e)和图 5(f)可知,3 组小鼠的微生物多样性之间无显著差异($P>0.05$)。微生物 β 多样性有助于更直观地反映不同样本中肠道菌群的组成差异。基于 Unweighted UniFrac 距离算法,利用主坐标分析(PCoA)和非度量多维标度分析(NMDS)对微生物群落的 β -多样性进行评价。由图 5(g)和图 5(h)可知,对照组小鼠和模型组小鼠的肠道菌群簇明显分离,表明高脂饮食能改变小鼠的正常肠道菌群结构。代餐粉组与模型组小鼠明显分离,表明干预显著改变了小鼠的肠道菌群。NMDS 结果也显示,经代餐粉干预后的小鼠肠道菌群结构明显与模型组分离,证明了其对于肠道菌群调节的有效性。结合 α 和 β 多样性分析结果,皱粒豌豆代餐粉的干预可以改变肠道菌群结构,恢复微生物群落丰富度,对高脂饮食诱导的肠道微生物群落结构异常具有调控作用。

2.5.2 菌群组成 由图 6(a)可知,在门水平上,3 组小鼠的肠道菌群主要由厚壁菌门(*Firmicutes*)、拟杆菌门(*Bacteroidota*)和放线菌门(*Actinobacteriota*)组成,但丰度在不同组别中差异较大。其中,*Firmicutes* 和 *Bacteroidota* 之和占总菌群的 70% 以上,是动物体内的两个主要菌门。目前,*Firmicutes* 和 *Bacteroidota* 的比值(F/B)已被证明在反映人体健康状况、维持肠道微生态平衡等方面具有重要意义^[34-35]。Wang 等^[36]研究发现,肥胖者的肠道微生物群显示出比健康个体更高的 F/B 值,主要是由于 *Firmicutes* 具有较强的能量捕获能力,能够更有效地从食物中摄取能量。肥胖者摄入的热量往往较高,*Firmicutes* 可利用丰富的营养资源大量繁殖,而 *Bacteroidota* 则更倾向于利用膳食纤维等复杂多糖类物质,能量获取效率相对较低。由图 6(b)可知,与对照组相比,模型组小鼠肠道菌群的 *Firmicutes* 升高、*Bacteroidota* 降低,因而导致 F/B 值上升。皱粒豌豆代餐粉降低了 *Firmicutes* 水平,同时提高了 *Bacteroidota* 水平,使代餐粉组小鼠肠道菌群 F/B 比例显著下降。说明皱粒豌豆代餐粉能够逆转高脂饮食导致的小鼠菌群 F/B 值的升高,可作为一种潜在的干预方式,以改善高脂饮食对肠道菌群产生的不良影响。

由图 6(c)可知,在属水平上,代餐粉的干预可显著改变小鼠肠道菌群组成结构。由图 6(d)和图 6(e)可知,与对照组相比,模型组小鼠肠道内 *norank_f_Muribaculaceae* 菌属、*norank_o_Clostridia_UCG-014* 菌属和双歧杆菌属

(*Bifidobacterium*)的丰度均显著降低,而皱粒豌豆代餐粉的干预则可有效逆转这一趋势,显著提高 3 种菌属的丰度。*norank_f_Muribaculaceae* 菌属对脂代谢稳态有积极影响,可以通过产生代谢产物或与宿主细胞相互作用,影响肝脏或脂肪组织中脂质代谢相关信号通路的活性,如 AMPK/PPAR 通路^[37]。*norank_o_Clostridia_UCG-014* 菌属能够发酵膳食纤维等功能性碳水化合物,产生短链脂肪酸,如丁酸、丙酸等,进而参与机体能量代谢与脂质合成^[38]。*Bifidobacterium* 是菌属中的“明星菌属”,可以通过多种机制抑制胆固醇的吸收,促进胆固醇的转化,降低血液中的胆固醇含量;且可以恢复胰岛素的敏感性,调节血糖^[39-40]。此外,该代餐粉的干预还能显著上调阿克曼菌属(*Akkermansia*)的丰度,且该菌属对肥胖症及其相关的代谢紊乱存在潜在的治疗作用^[41-42];同时显著降低罗姆布茨菌(*Romboutsia*)和布劳氏菌属(*Blautia*)的丰度,这两种菌属丰度增加可显著促进肥胖的发生^[43-45]。综上,皱粒豌豆代餐粉可通过改变肠道菌群的组成结构,调节与糖脂代谢相关菌属的相对丰度,特别是促进有益菌的繁殖,进而参与机体糖脂代谢的调节过程。

2.5.3 菌群特征菌 采用 LEfSe 分析,在门、纲、目、科、属等系统发育水平上,识别到各组间具有显著差异的菌属。由图 7(a)可知,从门到属水平,每组的菌群在系统发育树上的分布存在特异性聚集。通过 LEfSe 分析的线性判别分析(LDA)得分(图 7(b)),清晰呈现了各组间差异丰富的菌群。进一步挖掘出代餐粉组的优势菌属为 *norank_f_Muribaculaceae* 菌属、*norank_o_Clostridia_UCG-014* 菌属和双歧杆菌属(*Bifidobacterium*),这些在糖脂代谢调控中表现优异的益生菌“明星菌属”。

3 结论

通过动物试验系统证实了以皱粒豌豆为核心原料的复合型代餐粉在调节糖脂代谢紊乱和保护肝脏功能上的有益作用,明确了其可作为改善糖脂代谢异常的功能性膳食补充剂。皱粒豌豆代餐粉对肠道菌群结构和组成的重塑可能是其发挥糖脂代谢调控功能的关键,其显著降低了 *Firmicutes/Bacteroidota* 比值,提升了 *norank_f_Muribaculaceae* 菌属、*norank_o_Clostridia_UCG-014* 菌属及双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)等有益菌的相对丰度。

与以往研究多聚焦于豌豆单一成分的健康效益不同,试验明确了豌豆以“全食物”的形式与异麦芽酮糖醇、黄豆

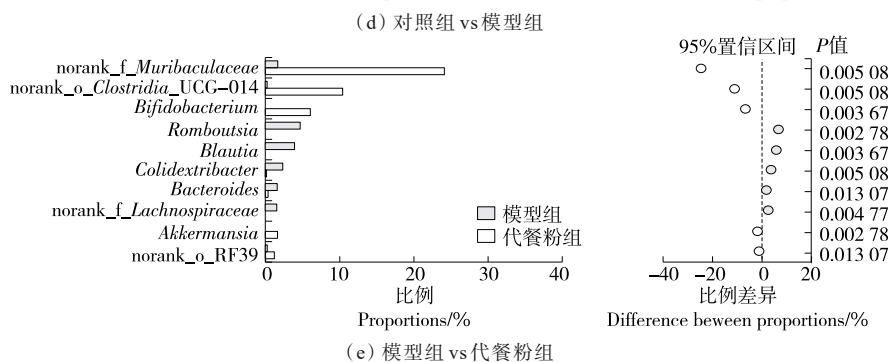
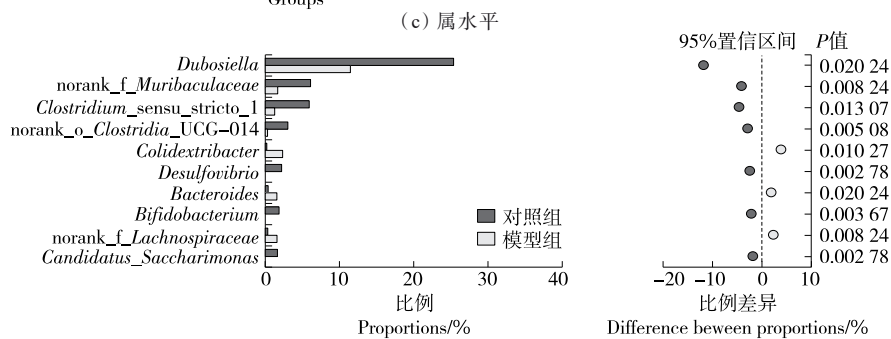
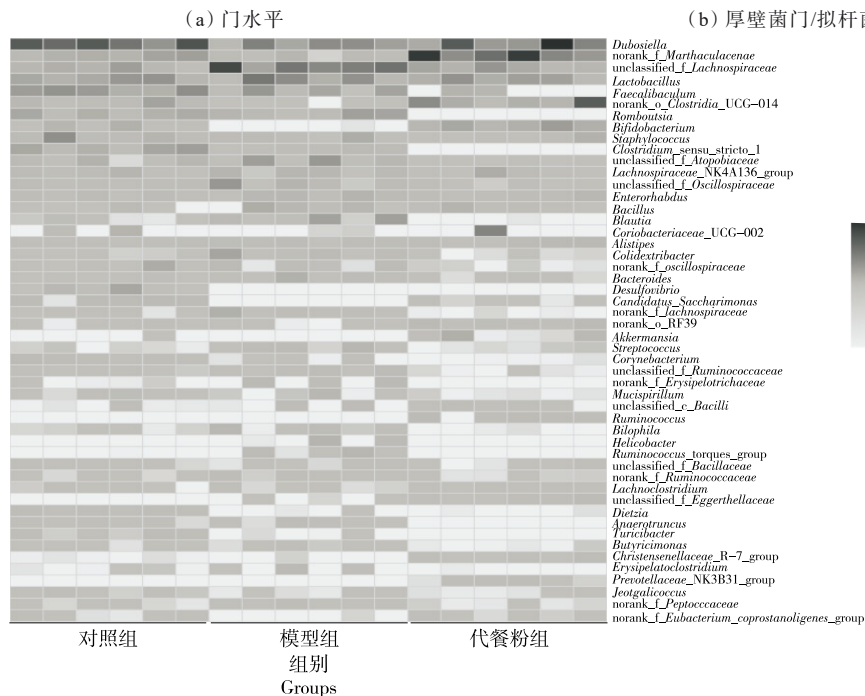
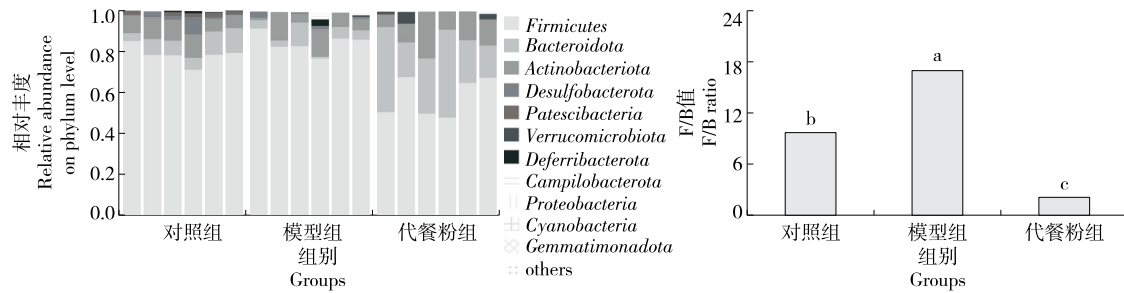


图6 门和属分类水平上的物种组成分析

Figure 6 Bacterial taxonomic profiling at the phylum and genus levels



Figure 7 Differences in gut microbiota composition and characteristic taxa

粉、苦荞粉等低血糖生成指数(GI)原料复配后,可通过代餐粉的形式发挥调控糖脂代谢的功效,更符合人类的膳食模式,具有重要的实际应用价值。未来研究需进一步通过不同剂量的皱粒豌豆基代餐粉干预试验阐明其是否存在剂量依赖性。此外,基于临床试验确证皱粒豌豆基代餐粉对于糖脂代谢紊乱人群和肠道菌群的改善效果。

参考文献

- [1] XIONG P J, ZHANG F, LIU F, et al. Metaflammation in glucolipid metabolic disorders: pathogenesis and treatment[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 161: 114545.

- [2] 晏樱豪, 张栢婧, 战丽彬. 基于“脾—肠”相关防治糖脂代谢性疾病[J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(6): 91-94.

- YAN Y H, ZHANG L J, ZHAN L B. Discussion on treatment of glycolipid metabolic diseases based on theory of spleen and intestine being correlated[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2024, 42(6): 91-94.

- [3] LI Y Q, MA Q T, WANG J K, et al. Relationship between hyperlipidemia and the gut microbiome of rats, characterized using high-throughput sequencing[J]. Journal of Traditional Chinese Medical Sciences, 2020, 7(2): 154-161.

- [4] YUAN X B, ZHENG J P, REN L S, et al. Glucosamine ameliorates symptoms of high-fat diet-fed mice by reversing

- imbalanced gut microbiota[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12: 694107.
- [5] APALOWO O E, BOATENG I D. Divergent roles of functional foods on anthropometric indices and gut microbiota in overweight and obese individuals: in silico approaches and multi-omics insights[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2025, 156: 104876.
- [6] RANDENI N, LUO J H, XU B J. Legumes and fermented legume products as dietary supplements: a focus on glucose and lipid metabolism mechanisms and product development[J]. *Food Research International*, 2026, 226: 118206.
- [7] 吴雪娇, 赵力超, 方祥, 等. 大豆活性组分和肠道菌群相互作用研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 265-272.
- WU X J, ZHAO L C, FANG X, et al. Progress in understanding the interaction between bioactive components of soybean and gut microbiota[J]. *Food Science*, 2021, 42(13): 265-272.
- [8] WU D T, LI W X, WAN J J, et al. A comprehensive review of pea (*Pisum sativum* L.): chemical composition, processing, health benefits, and food applications[J]. *Foods*, 2023, 12(13): 2527.
- [9] WANG M, CHEN X H, DONG L C, et al. Modification of pea dietary fiber by ultrafine grinding and hypoglycemic effect in diabetes mellitus mice[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(4): 1273-1282.
- [10] QIN G, XU W, LIU J P, et al. Purification, characterization and hypoglycemic activity of glycoproteins obtained from pea (*Pisum sativum* L.) [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2021, 10(3): 297-307.
- [11] YU T Q, SHANG N, CHEN L, et al. The regulatory effects of pea protein hydrolysate on lipid metabolism in gestational diabetic mice[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2025, 69(20): e70178.
- [12] LIU N, SONG Z, JIN W H, et al. Pea albumin extracted from pea (*Pisum sativum* L.) seed protects mice from high fat diet-induced obesity by modulating lipid metabolism and gut microbiota[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 97: 105234.
- [13] 洪凌宇, 王佳凯, 王立, 等. 不同加工方式对皱粒豌豆粉预估血糖生成指数的影响[J]. *粮油食品科技*, 2025, 33(6): 118-126.
- HONG L Y, WANG J K, WANG L, et al. Influence of different processing methods on the estimated glycemic index of wrinkled pea flour[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2025, 33(6): 118-126.
- [14] ZHAO X Y, TAN X G, SHI H F, et al. Nutrition and traditional Chinese medicine (TCM): a system's theoretical perspective [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2021, 75(2): 267-273.
- [15] 杨瑞芳, 白建江, 汤剑豪, 等. 谷物代餐粉的要素及开发趋势分析[J]. *食品与机械*, 2023, 39(12): 221-226.
- YANG R F, BAI J J, TANG J H, et al. Analysis of the elements and development trends of cereal meal replacement powder[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(12): 221-226.
- [16] KORIVI M, LIU B R. Novel and practical approaches to manage diet-induced metabolic disorders: part-I[J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2020, 26(39): 4953-4954.
- [17] HOU D Z, ZHAO Q Y, YOUSAF L, et al. Beneficial effects of mung bean seed coat on the prevention of high-fat diet-induced obesity and the modulation of gut microbiota in mice [J]. *European Journal of Nutrition*, 2021, 60(4): 2029-2045.
- [18] ZHOU X B, ZHANG J J, SUN Y T, et al. Glutamine ameliorates liver steatosis via regulation of glycolipid metabolism and gut microbiota in high-fat diet-induced obese mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(42): 15656-15667.
- [19] 朱珊, 夏勇军, 翟茜. 睡眠剥夺对小鼠肝脏脂肪代谢及肝功能的影响[J]. *西部医学*, 2026, 38(1): 27-31.
- ZHU S, XIA Y J, ZHAI Q. Effects of sleep deprivation on hepatic lipid metabolism and function in mice[J]. *Medical Journal of West China*, 2026, 38(1): 27-31.
- [20] 王彦美, 黄莉, 张韩杰, 等. 乌天麻代餐粉的制备及其对2-型糖尿病小鼠糖脂代谢紊乱的改善效果[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(23): 36-44.
- WANG Y M, HUANG L, ZHANG H J, et al. Preparation of meal replacement powder with *Gastrodia elata* BL.f. *glauca* and its ameliorative effect on glycolipid metabolic disorder in type 2 diabetes mice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(23): 36-44.
- [21] THONDRE P S, ACHEBE I, SAMPSON A, et al. Co-ingestion of NUTRALYS® pea protein and a high-carbohydrate beverage influences the glycaemic, insulinaemic, glucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) and glucagon-like peptide-1 (GLP-1) responses: preliminary results of a randomised controlled trial[J]. *European Journal of Nutrition*, 2021, 60(6): 3085-3093.
- [22] LIU J P, QIAN Y F, QIN G Y X, et al. Antidiabetic activities of glycoprotein from pea (*Pisum sativum* L.) in STZ-induced diabetic mice[J]. *Food & Function*, 2021, 12(11): 5087-5095.
- [23] ESLINGER A J, ELLER L K, REIMER R A. Yellow pea fiber improves glycemia and reduces *Clostridium leptum* in diet-induced obese rats[J]. *Nutrition Research*, 2014, 34(8): 714-722.
- [24] HONG L Y, FAN L L, WU J C, et al. Pulse proteins and their hydrolysates: a comprehensive review of their beneficial effects on metabolic syndrome and the gut microbiome[J]. *Nutrients*, 2024, 16(12): 1845.
- [25] WOLF G. High-fat, high-cholesterol diet raises plasma HDL cholesterol: studies on the mechanism of this effect[J]. *Nutrition Reviews*, 1996, 54(1): 34-35.
- [26] 侯殿志, 陈博睿, 王晗, 等. 绿豆皮对高脂饲料联合链脲佐菌素诱导的糖尿病小鼠糖脂代谢的改善作用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(7): 123-129.
- HOU D Z, CHEN B R, WANG H, et al. Improvement of mung

- bean seed-coat on glucose/lipid metabolism in diabetic mice induced by high-fat diet combined with streptozotocin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 123-129.
- [27] INAGAKI K, NISHIMURA Y, IWATA E, et al. Hypolipidemic effect of the autoclaved extract prepared from pea (*Pisum sativum* L.) pods *in vivo* and *in vitro*[J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2016, 62(5): 322-329.
- [28] 张静静. 汽爆豌豆肽对糖脂代谢紊乱和肠道健康的影响及机制研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2025: 31-32.
- ZHANG J J. Study on effects and mechanism of steam explosion modified pea peptides on glycolipid metabolism and intestinal health[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2025: 31-32.
- [29] 李钰, 苏新, 张俊慧, 等. 榆干离褶伞溶栓酶对高脂血症大鼠肝损伤的保护作用[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 156-162.
- LI Y, SU X, ZHANG J H, et al. Protective effect of *Lyophyllum ulmarium* fibrolytic enzyme on liver injury induced in hyperlipidemia rats[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 156-162.
- [30] 李楠, 赵雪, 郭少龙, 等. 基于肠 FXR-FGF15 通路探讨沙棘熊果酸对酒精性肝损伤小鼠的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(2): 9-15.
- LI N, ZHAO X, GUO S L, et al. Effect of ursolic acid in *Hippophae rhamnoides* L. on mice with alcoholic liver disease based on intestinal FXR-FGF15 pathway[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 9-15.
- [31] KWO P Y, COHEN S M, LIM J K. ACG clinical guideline: evaluation of abnormal liver chemistries[J]. The American Journal of Gastroenterology, 2017, 112(1): 18-35.
- [32] 唐雅园, 韦珍, 覃森, 等. 早藕高纤维代餐粉对高脂饮食诱导小鼠肥胖的干预作用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 400-407.
- TANG Y Y, WEI Z, QIN M, et al. Intervention effect of *Canna edulis* high fiber meal replacement powder on obesity induced by high-fat diet in mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 400-407.
- [33] 王利平, 赵声兰, 杨瑞, 等. 核桃酱对肾虚小鼠及其肠道微生物的作用[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 123-132.
- WANG L P, ZHAO S L, YANG R, et al. Effects of walnut paste on kidney-yang deficiency mice and their gut microbiota [J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 123-132.
- [34] STOJANOV S, BERLEC A, ŠTRUKELJ B. The influence of probiotics on the firmicutes/bacteroidetes ratio in the treatment of obesity and inflammatory bowel disease[J]. Microorganisms, 2020, 8(11): 1 715.
- [35] 徐嘉琦, 林以宁. 肠道菌群调控肥胖症脂质代谢机制的研究进展[J]. 药学研究, 2023, 42(7): 489-494.
- XU J Q, LIN Y N. Research progress on regulation of lipid metabolism by intestinal flora in obesity[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2023, 42(7): 489-494.
- [36] WANG X N, REN Y P, LI S Q, et al. Development of a polyphenol-enriched whole kiwifruit dietary supplement and its potential in ameliorating hyperlipidemia[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(4): 2 142-2 155.
- [37] YANG C W, HUANG S Y, LIN Z G, et al. Polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* alleviate hypercholesterolemia *via* modulating the gut microbiota and bile acid metabolism[J]. Food & Function, 2022, 13(23): 12 194-12 207.
- [38] LAI Y, CHEN Y Q, ZHENG J J, et al. Gut microbiota of white-headed black langurs (*Trachypithecus leucocephalus*) in responses to habitat fragmentation[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1126257.
- [39] LI R L, SHOKRI F, RINCON A L, et al. Bi-directional interactions between glucose-lowering medications and gut microbiome in patients with type 2 diabetes mellitus: a systematic review[J]. Genes, 2023, 14(8): 1 572.
- [40] 李静. 双歧杆菌的分离筛选及其调节脂代谢作用机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025: 5-7.
- LI J. Isolation and screening of *Bifidobacterium* and its regulation mechanism of lipid metabolism[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025: 5-7.
- [41] YU Y, LU J, SUN L, et al. Akkermansia muciniphila: a potential novel mechanism of nuciferine to improve hyperlipidemia[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 133: 111014.
- [42] 王紫轩, 薛琼雯, 罗亦轩, 等. 中药通过肠道菌群改善肥胖症及其相关代谢性疾病的作用机制研究进展[J]. 上海中医药杂志, 2023, 57(2): 1-7.
- WANG Z X, XUE Q W, LUO Y X, et al. Research progress on mechanisms of traditional Chinese medicine in improving obesity and its related metabolic diseases through gut microbiota[J]. Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine, 2023, 57(2): 1-7.
- [43] LI S Q, WANG M Q, LI C, et al. Beneficial effects of partly milled highland barley on the prevention of high-fat diet-induced glycometabolic disorder and the modulation of gut microbiota in mice[J]. Nutrients, 2022, 14(4): 762.
- [44] 汪洪涛. 肠道微生物与人体健康的关系及其影响因素研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 175-181.
- WANG H T. Research progress on the relationship between intestinal microorganisms and human health and its influencing factors[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(1): 175-181.
- [45] LI T T, HUANG Z R, JIA R B, et al. Spirulina platensis polysaccharides attenuate lipid and carbohydrate metabolism disorder in high-sucrose and high-fat diet-fed rats in association with intestinal microbiota[J]. Food Research International, 2021, 147: 110530.