

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090347

TANG Yayuan, WEI Zhen, QIN Miao, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090347

· 营养与保健 ·

早藕高纤维代餐粉对高脂饮食诱导小鼠肥胖的干预作用

唐雅园¹, 韦珍^{1,*}, 覃森¹, 邓中霖¹, 卢历², 廖艳婷¹, 饶川艳¹, 谢立朵², 叶冬青¹, 王振兴³,
蓝亦锐², 何雪梅^{1,*}

(1. 广西农业科学院, 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007;

2. 广西北投兴农食品科技有限公司, 广西河池 530899;

3. 西南林业大学生命科学学院, 云南昆明 650224)

摘要:目的: 研究早藕高纤维代餐粉对高脂饮食小鼠肥胖的干预效果。方法: 将 40 只小鼠随机分为空白组、高脂饮食组、阳性对照组、低剂量代餐粉组和高剂量代餐粉组, 干预 8 周, 称重小鼠体质量、脏器质量, 记录小鼠食物摄入量, 测定脂质水平、肝损伤水平及抗氧化水平。结果: 早藕代餐粉具有高膳食纤维和高蛋白的特征, 每 100 g 代餐粉中含有膳食纤维 (24.03±0.07) g 和蛋白质 (12.80±0.02) g。经过 8 周干预实验发现, 与高脂饮食组相比, 代餐粉干预能显著降低高脂小鼠体质量和腹部脂肪质量 ($P<0.05$), 但其降脂功效呈现高剂量-效应关系, 表明适宜的食物摄入量与营养成分协同改善机体肥胖状态。与高脂饮食组相比, 代餐粉干预能显著降低小鼠的血清胆固醇和谷草转氨酶含量 ($P<0.05$), 低剂量和高剂量代餐粉组的低密度脂蛋白含量相比高脂饮食组分别降低了 44.60% 和 39.92% ($P<0.05$)、高密度脂蛋白含量相比高脂饮食组分别提高了 21.30% 和 61.19% ($P<0.05$)。另外, 与高脂饮食组相比, 代餐粉的摄入能增加小鼠粪便水分含量, 降低小鼠粪便 pH, 改善小鼠肠道微生态紊乱。代餐粉还能正向调节小鼠肝组织中超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等抗氧化酶活性和丙二醛等脂质过氧化物含量, 显著减少高脂饮食引起的肝组织氧化损伤 ($P<0.05$)。结论: 本代餐粉通过改善机体脂质水平、肠道微生态紊乱和氧化应激损伤, 进而干预饮食性肥胖。可见, 早藕高纤维代餐粉可作为一种功能性食品, 以辅助改善高脂饮食带来的损伤。本文将为早藕代餐粉的开发和利用提供理论依据。

关键词: 早藕, 膳食纤维, 代餐粉, 肥胖, 脂质代谢

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)18-0400-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090347

本文网刊:



Intervention Effect of *Canna edulis* High Fiber Meal Replacement Powder on Obesity Induced by High-fat Diet in Mice

TANG Yayuan¹, WEI Zhen^{1,*}, QIN Miao¹, DENG Zhonglin¹, LU Li², LIAO Yanting¹, RAO Chuanyan¹,
XIE Liduo², YE Dongqing¹, WANG Zhenxing³, LAN Yirui², HE Xuemei^{1,*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-processing Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;

2. Guangxi Beitou Xingnong Food Technology Co., Ltd., Hechi 530899, China;

3. School of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

收稿日期: 2024-09-28 +并列第一作者

基金项目: 广西农产品贮藏保鲜与加工科技成果转化中试研究基地 (桂科 AD23023014); 广西自然科学基金 (2025GXNSFAA069644); 广西农业科学院企业合作科研项目 (JGSHX2023-03); 广西农业科学院基本科研业务费项目 (2021YT116)。

作者简介: 唐雅园 (1991-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 食品营养, E-mail: tangyayuan@gxaas.net。

韦珍 (1992-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 天然产物化学, E-mail: zhenwei@gxaas.net。

* 通信作者: 何雪梅 (1981-), 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xuemeihegx@gxaas.net。

Abstract: Objective: The intervention effect of *Canna edulis* high fiber meal replacement powder(CMRP) on the obesity in high-fat diet-induced hyperlipidemic mice was explored in this paper. Methods: Forty mice were randomly divided into control group, high-fat diet group, positive group, low-dose CMRP group, and high-dose CMRP group. The intervention was carried out for 8 weeks. Body weight, organ weight, and weekly food intake, lipid levels, liver injury levels and antioxidant levels of mice were measured. Results: The characteristics of high dietary fiber and protein contents were possessed by CMRP, with dietary fiber content quantified as (24.03 ± 0.07) g/100 g CMRP and protein content as (12.80 ± 0.02) g/100 g CMRP, respectively. After intervention trial for 8 weeks, compared with high-fat diet group, it was found that high-dose CMRP group could significantly reduce the body weight and abdominal fat weight of mice ($P < 0.05$). It was indicated that a synergistic effect on weight reduction was exhibited by appropriate food intake and nutritional components. Compared with high-fat diet group, CMRP intervention reduced significantly the serum cholesterol and aspartate aminotransferase contents ($P < 0.05$) of mice. The low-density lipoprotein content in low-dose and high-dose CMRP groups was significantly reduced by 44.60% and 39.92% ($P < 0.05$), as well as their high-density lipoprotein content was significantly increased by 21.30% and 61.19% ($P < 0.05$), compared with high-fat diet group. Additionally, compared with high-fat diet group, the fecal moisture content in CMRP groups was increased, and their pH was decreased, leading to improve intestinal microecology system of high-fat diet-induced hyperlipidemic mice. Liver antioxidant enzymatic activity and lipid hydroperoxide content were also positively regulated by the CMRP diet, resulting in a significant decrease in oxidative damage to liver tissue induced by a high-fat diet ($P < 0.05$). Conclusion: A significant obesity-intervention effect on high-fat diet was demonstrated by the formula powder in this study, through positive regulation of lipid levels and intestinal microecology, combined with a reduction in oxidative damage. Consequently, CMRP could be utilized as a functional food for auxiliary reduction of high-fat diet-induced damage. Practical guidance for the development of *Canna edulis* replacement powder (CMRP) was provided by this research.

Key words: *Canna edulis*; dietary fiber; meal replacement powder; obesity; lipid metabolism

肥胖是当前全球威胁人类健康最严重的慢性内分泌代谢紊乱性疾病。近 30 年来,我国肥胖问题日益严峻,18 岁以上人群肥胖率约占总人口基数 35.6%^[1],且肥胖呈年轻化趋势。因此,《“健康中国 2030”规划纲要》已将“降低肥胖发病风险”列为一项重要目标。通过队列研究、横断面研究等发现,不合理的膳食模式已成为肥胖发生发展的关键直接因素^[2]。“寓医于食”健康理念在我国有悠久历史,也是我国传统医药文化的重要组成部分。通过多种天然食物合理搭配后,常常产生互补或协同的健康功效,进而可预防和缓解肥胖等代谢紊乱性疾病^[3]。临床上常用降脂药物(如奥利司他等)干预肥胖,奥利司他是一种强效的特异性胃肠道脂肪酶抑制剂,通过抑制脂肪酶的活性,使失活的脂肪酶不能将食物中的脂肪水解,从而减少脂肪吸收、控制体重^[4]。此类药物会引起恶心、腹泻、呼吸道感染、头疼等副作用^[5]。可见,食疗可成为定向干预饮食性肥胖和健康管理关口前移的关键策略,以实现“健康中国 2030”战略目标。

代餐粉是一种或多种原辅料按照不同比例及工艺调配而成的冲调类产品,目前已成为通过饮食干预改善高脂饮食诱发肥胖的重要策略^[6]。近年来,减肥类代餐粉产品为兼顾减重效果与营养均衡,通常需复配杂粮、谷物、果蔬等多种原料。刘殊凡等^[7]明确玉米荞麦复配代餐粉能改善高脂饮食大鼠脂质代谢水平,修复肝损伤。王彦美等^[8]以乌天麻、葛根、荞麦等为主要原料,开发了具有降脂功效的乌天麻代餐粉。

膳食纤维(如抗性淀粉)是一类“能抵抗小肠消化吸收、被大肠菌群发酵利用而产生健康功效”的营养素^[9]。早藕(*Canna edulis*)又称为芭蕉芋、蕉藕、

姜芋,属于美人蕉科美人蕉属的多年生草本植物^[10]。早藕块茎中淀粉约占 60%,其中直链抗性淀粉含量为 17.5%~27%,是一种新型抗性淀粉^[11]。据报道,其能够通过调节宿主-微生物群互作以改善肥胖等代谢性疾病^[12],还能作为功能性膳食纤维发挥改善脂代谢异常作用^[13]。可见,以早藕块茎作为原料,制备得到富含抗性淀粉的早藕粉^[14],具有作为食品配方原料开发成代餐粉的潜在价值。然而目前,关于早藕代餐粉的报道鲜少。本文拟从“食疗”理念出发,开发早藕高纤维代餐粉产品,并就其对高脂饮食小鼠肥胖的干预作用进行研究,为早藕代餐粉的开发和利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

健康雄性 C57BL/6J 小鼠 6 周龄,40 只,体重 (20 ± 2) g,购于广西医科大学实验动物中心(实验动物生产许可证号: SCXK 桂 2020-0003);早藕粉(抗性淀粉含量为 $5.42\% \pm 0.56\%$) 由广西大化北投兴农食品科技有限公司提供;羽衣甘蓝粉、白芸豆粉 兴化市绿帅食品有限公司;燕麦麸皮粉、即食燕麦片 张家口北燕燕麦食品开发有限公司;圆苞车前子壳 陕西元贝贝生物科技有限公司;冻干苹果粒、芋头粉 兴化市味承食品有限公司;大豆蛋白粉、低聚果糖 宁波鼎元食品科技有限公司;燕麦 β -葡聚糖 西安秋禾生物科技有限公司;普通饲料(水分 $\leq 10\%$ 、粗灰分 $\leq 8\%$ 、粗蛋白 $\geq 18\%$ 、粗脂肪 $\geq 4\%$ 、粗纤维 $\leq 5\%$ 、钙 $1.0\% \sim 1.8\%$ 、总磷 $0.6\% \sim 1.2\%$ 等) 北京科奥协力饲料有限公司;高脂饲料(普通饲料

58.8%、猪油 20%、胆固醇 1%、胆盐 0.2%、糖 20%)

南京盛民科研动物养殖场; 奥利司他胶囊 杭州中美华东制药有限公司; 总胆固醇测定试剂盒(A111-1-1)、低密度脂蛋白胆固醇测定试剂盒(A113-1-1)、高密度脂蛋白胆固醇测定试剂盒(A112-1-1)、天门冬氨酸氨基转移酶(谷草转氨酶)测试盒(C010-2-1) 南京建成生物科技公司; 丙二醛含量测定试剂盒(BC0025)、超氧化物歧化酶活性测定试剂盒(BC5165)、过氧化氢酶活性测定试剂盒(BC0205) 北京索莱宝科技有限公司。

BSA124s 型电子天平 北京赛多利斯科学仪器有限公司; S32 试验型双螺杆挤出机 山东济南赛信有限公司; 3-18KS 型高速冷冻离心机 德国 Sigma 公司; EPOCH 型全波长酶标仪 美国 BioTek 公司; SCIENTZ-IIID 型超声波细胞粉碎机 宁波新芝生物科技股份有限公司; 雷磁 PHS-3C pH 计 上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 早藕高纤维代餐粉的制备 根据《中国食物成分表》(第六版)中的营养成分筛选降脂原料,并参考《中国居民膳食指南 2022 版》推荐的能量值以及蛋白质、脂肪和碳水化合物的供能占比,设计早藕代餐粉配方。结合课题组前期代餐粉配方开发和多次感官性状评价的基础上,确定早藕粉添加量 $\leq 12\%$,不影响代餐粉的风味和冲调性,同时保持口感细腻滑润。代餐粉配方含有早藕粉、燕麦麸皮粉、芋头粉、冻干苹果粒、羽衣甘蓝粉、即食燕麦片、大豆蛋白粉、白芸豆粉、圆苞车前子壳、低聚果糖、燕麦 β -葡聚糖,其中富含膳食纤维的原料为早藕粉(12%)、燕麦麸皮粉(12%)、即食燕麦片(12%)、冻干苹果粒(11%)、羽衣甘蓝粉(12%)、圆苞车前子壳(1.5%)、低聚果糖(11%)和燕麦 β -葡聚糖(3%)。除此之外,其余原料占比分别是 12% 芋头粉、7.5% 白芸豆粉和 6% 大豆蛋白粉。按配比混匀上述物料,制得早藕代餐粉。

1.2.2 早藕高纤维代餐粉营养成分测算 水分、灰分、蛋白质、脂肪、膳食纤维、钠含量分别按照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》第一法、GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》第一法、GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》第一法、GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》第二法、GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》和 GB 5009.91-2017《食品中钾、钠的测定》第四法进行测定,总碳水化合物按照 GB 28050-2011《预包装食品营养标签通则》计算。能量(kcal)根据公式(1)计算:

$$\text{能量(kcal)} = (\text{蛋白质含量} \times 17 + \text{脂肪含量} \times 37 + \text{总碳水化合物含量} \times 17) \times 0.2389 \quad \text{式(1)}$$

1.2.3 饲料设计与制备 结合早藕高纤维代餐粉营

养成分研究结果以及 GB 14924.3-2010《实验动物配合饲料营养成分》,并参考齐广海等^[15]方法,最终确定早藕高纤维代餐粉饲料的配方。低剂量代餐粉饲料由 1/3 早藕代餐粉和 2/3 高脂饲料组成,高剂量代餐粉饲料由 2/3 早藕代餐粉和 1/3 高脂饲料组成。将高脂饲料粉碎,加入相应比例的代餐粉,混匀后,制粒成型,各饲料具体营养成分见表 1。

表 1 基础饲料及特征饲料的营养成分
Table 1 Nutritional components of normal diet and characteristic diets

项目	普通饲料	高脂饲料	低剂量代餐粉饲料	高剂量代餐粉饲料
水分含量(g/kg)	100.00	100.00	89.43	78.87
蛋白含量(g/kg)	180.00	250.00	209.33	168.67
脂肪含量(g/kg)	40.00	187.00	138.67	90.33
总碳水化合物含量(g/kg)	600.00	413.00	521.33	629.67
膳食纤维含量(g/kg)	50.00	50.00	113.33	176.67
灰分含量(g/kg)	80.00	50.00	41.33	32.67
能量(kcal)	3521.39	4345.59	4192.70	4039.80

1.2.4 动物饲养条件、建模与分组 C57BL/6J 小鼠饲养温度控制在 $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $60\% \pm 10\%$,12 h 昼夜交替,自由饮食饮水。本实验中动物实验遵循动物伦理委员会原则(批准号 SWFU-20230232)。

小鼠肥胖模型建立与分组参考霍瑞等^[16]的方法并略作改动,C57BL/6J 小鼠适应性喂养 1 周后,随机抽取 8 只作为空白组(C 组)饲以普通饲料,余下作为肥胖模型组饲以高脂饲料。造模 6 周后,小鼠体重超过空白组体重 20% 认为造模成功。筛选成模小鼠 32 只,随机分为 4 组,每组 8 只,即高脂饮食组(N 组,高脂饲料)、阳性对照组(P 组,高脂饲料+灌胃 60 mg/kg/d 奥利司他胶囊)、低剂量代餐粉组(L 组,低剂量早藕代餐粉饲料)、高剂量代餐粉组(H 组,高剂量早藕代餐粉饲料)。每日饲料量限定为 $(5 \pm 1)\text{g/只}$ 。干预实验周期为 8 周,小鼠同室分笼饲养,每笼 4 只,自由饮水采食。

1.2.5 小鼠粪便水分和 pH 测定 代餐粉干预后,每隔 1 周收集各组小鼠的粪便。按固液比 1:20(m/v)将小鼠粪便溶于蒸馏水中,搅拌直至粪便完全溶解后,立即用 pH 计测定。称取 0.5 g 粪便样品在 105°C 烘箱中干燥至恒重,粪便含水量(%)根据公式(2)计算:

$$\text{粪便含水量}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: A_1 为干燥前粪便质量(g); A_2 为干燥后粪便质量(g)。

1.2.6 小鼠体质量和食物摄入量测定 实验期间,每周记录小鼠体质量。每天记录喂养饲料重量和饲料剩余量,实验结束后,计算各组小鼠每周食物摄入量。

1.2.7 小鼠血清生化指标分析 小鼠禁食 12 h 后,

将其麻醉, 眼球取血, 置于无菌 EP 管中, 在 4 ℃ 下, 以转速为 3000 r/min 离心 15 min 分离得到血清, 立即保存于-80 ℃。总胆固醇(TC)、低密度脂蛋白(LDL-C)、高密度脂蛋白(HDL-C)和谷草转氨酶(AST)指标按南京建成试剂盒说明书进行操作。

1.2.8 小鼠腹部脂肪质量和脏器系数测定 解剖小鼠时取出腹部脂肪并称重, 同时摘取肝脏、脾脏、胰腺、心脏和肾脏, 分别用生理盐水洗涤, 滤纸吸干, 立即称量, 记录每只小鼠的各脏器质量, 小鼠脏器指数根据公式(3)计算:

$$\text{脏器指数}(\%) = \frac{\text{器官质量}(\text{g})}{\text{小鼠体质量}(\text{g})} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

1.2.9 肝脏氧化水平测定 将储存在-80 ℃ 条件下的肝组织取出, 进行肝组织匀浆, 采用北京索莱宝科技有限公司试剂盒说明书检测肝组织的超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量。

1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示。采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件绘图, IBM SPSS 26 软件分析数据, 通过单因素方差分析(ANOVE)和 Duncan 多重比较确定显著性差异, 当 $P<0.05$ 时, 认为有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 早藕高纤维代餐粉营养成分分析

代餐粉作为一种新型的食物替代品, 其营养成分与价值深受人们的关注。合理的配方不仅能提供全面、均衡的营养素, 还具有一定的功能效果。由表 2 可知, 本文制备的早藕代餐粉具有高膳食纤维和高蛋白的特点。以早藕为天然配方原料开发的代餐粉可视为一种植物性饮食^[17], 食用早藕代餐粉能提

表 2 早藕高纤维代餐粉营养成分

Table 2 Nutritional components of meal replacement powder			
项目	含量	项目	含量
能量	388.83±0.05 kcal/100 g	灰分	2.40±0.05 g/100 g
水分	6.83±0.04 g/100 g	蛋白质	12.80±0.02 g/100 g
总碳水化合物	73.80±0.08 g/100 g	脂肪	4.20±0.06 g/100 g
膳食纤维	24.03±0.07 g/100 g	钠	114.00±0.02 mg/100 g

表 3 代餐粉对高脂小鼠食物摄入量的影响

Table 3 Effects of meal replacement powder on food intake in high-fat mice

组别	食物摄入量(g)			
	第2周	第4周	第6周	第8周
空白组(C)	128.24±7.88 ^c	149.87±9.78 ^b	136.36±6.20 ^d	153.86±5.04 ^c
高脂饮食组(N)	166.39±2.09 ^c	157.67±3.17 ^b	170.10±3.99 ^b	180.21±4.55 ^a
阳性对照组(P)	148.82±3.71 ^d	149.25±2.60 ^b	160.14±2.31 ^c	164.41±4.94 ^b
低剂量代餐粉组(L)	216.42±4.42 ^a	169.73±5.66 ^a	178.62±3.14 ^a	175.31±3.49 ^a
高剂量代餐粉组(H)	191.29±6.69 ^b	172.49±3.88 ^a	179.09±4.23 ^a	174.35±5.03 ^a

注: 同列的不同字母之间表示差异显著($P<0.05$)。

高膳食纤维、减少饱和脂肪的摄入。此外, 高膳食纤维和高蛋白饮食已被证实具有调节血脂等功效^[18]。张李等^[19]发现复方海带高纤维代餐粉具有辅助降血脂作用。霍瑞等^[16]明确复合燕麦高纤维杂粮粉对饮食性肥胖有干预作用。因此, 本文初步推测早藕高纤维代餐粉具有调节血脂的功效, 可用于预防和缓解脂代谢紊乱等疾病^[20]。

2.2 早藕高纤维代餐粉对高脂小鼠体质量及摄食量的影响

体质量可直观体现减肥效果, 食物摄入量也是饮食性肥胖的关键因素之一。由图 1 和表 3 可知, 与 C 组相比, N 组小鼠体质量和食物摄入量均显著增加($P<0.05$), 说明小鼠体质量的增加与高脂饮食有关。与 N 组相比, P 组和 H 组的体质量分别显著降低了 10.82% 和 8.98%($P<0.05$), L 组的体质量降低了 1.86%。进一步比较发现, H 组与 P 组体质量无显著性差异($P>0.05$), 表明早藕高纤维代餐粉具有降低高脂小鼠体质量的作用。L 组和 H 组小鼠每周食物摄入量均较高, 说明此代餐粉适口性较好。然而由于 L 组小鼠饲料中早藕高纤维代餐粉占比较低, 导致“L 组小鼠体质量无显著性降低”现象。可见, 食物摄入量与营养成分共同影响小鼠体质量。早藕高纤维代餐粉因富含膳食纤维和蛋白质, 从而可降低高脂小鼠体质量, 但其降脂功效呈现高剂量-效应关系。

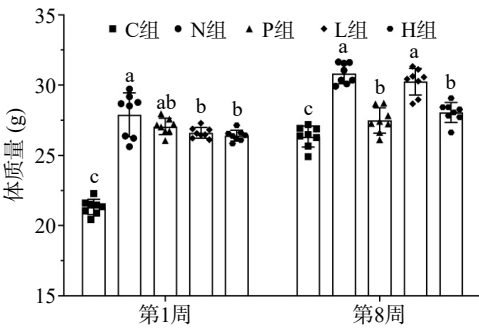


图 1 代餐粉对高脂小鼠体质量的影响

Fig.1 Effects of meal replacement powder on body mass in high-fat mice

注: C 组: 空白组; N 组: 高脂饮食组; P 组: 阳性对照组; L 组: 低剂量代餐粉组; H 组: 高剂量代餐粉组; 同周数不同字母之间表示差异显著($P<0.05$); 图 2~图 5 同。

2.3 早藕高纤维代餐粉对高脂小鼠粪便水分和 pH 的影响

高糖高脂饮食会破坏肠道微生态的平衡。粪便含水量可反映肠道健康,粪便 pH 则可作为肠道微生态平衡的指标^[21]。由图 2A 可知,随着干预周期延长,C 组、N 组和 P 组小鼠粪便水分含量有一定程度的波动,但是整体来看变化不明显,然而经代餐粉干预后,小鼠粪便水分含量呈上升趋势。经代餐粉干预 8 周后,与 N 组相比,L 组和 H 组小鼠粪便水分含量分别升高了 12.75% 和 0.14%,P 组降低了 19.37%。这可能与代餐粉富含膳食纤维有关。膳食纤维可通过发酵形成粘弹性物质,进而机械性刺激肠道粘膜,以改善粪便稠度和重量^[22]。

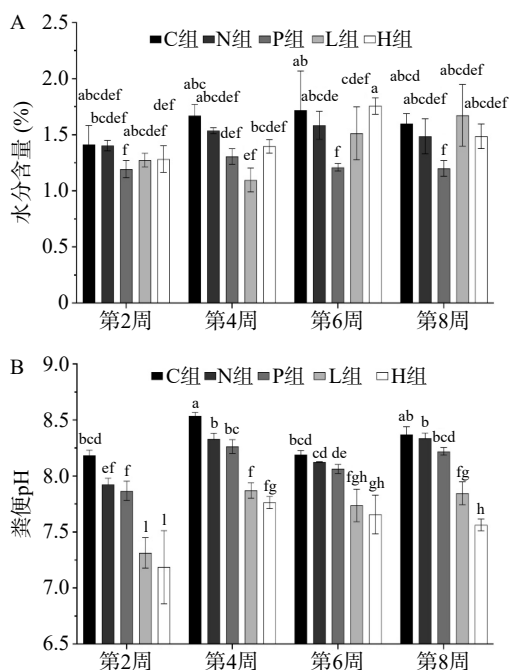


图2 代餐粉对高脂小鼠粪便水分含量(A)和 pH(B)的影响
Fig.2 Effects of meal replacement powder on fecal moisture content (A) and pH (B) in high-fat mice

由图 2B 可知,不同饲料干预下,各组小鼠粪便 pH 之间有显著差异($P<0.05$)。经代餐粉干预 8 周后,与 N 组相比,L 组和 H 组粪便 pH 均显著降低($P<0.05$),表明代餐粉可提高小鼠肠道健康。这可能与代餐粉富含抗性淀粉、树胶、纤维素等膳食纤维有关。膳食纤维对肠道菌群具有广泛的调节作用^[23]。

摄入富含膳食纤维的食物,有利于有益细菌增殖、增加短链脂肪酸等有益代谢产物含量,从而调节肠道环境 pH,改善肠道微生态紊乱^[24]。综上,早藕高纤维代餐粉可通过改善肠道微生态紊乱,进而干预饮食性肥胖。

2.4 早藕高纤维代餐粉对高脂小鼠腹部脂肪质量的影响

腹部脂肪组织是脂质储存部位,也是分泌脂联素、瘦素等多种脂肪细胞因子的活性内分泌器官^[25]。腹部脂肪质量可间接反映小鼠肥胖程度。由图 3 可知,与 C 组相比,N 组腹部脂肪质量显著增加了 1.1 倍($P<0.05$)。与 N 组相比,P 组和 H 组的腹部脂肪质量分别显著降低了 31.43% 和 38.33%($P<0.05$),而 L 组腹部脂肪质量较 N 组无显著性差异($P>0.05$)。这变化趋势与小鼠体质量的结论相似。进一步比较发现,H 组与 P 组腹部脂肪质量无显著性差异($P>0.05$),提示高剂量的代餐粉的减重效果与奥利司他的药效基本一致。这可能与代餐粉富含膳食纤维和蛋白质有关。富含膳食纤维的食物能增强饱腹感,增加优质植物蛋白的摄入量也可促进体重减少和腹部脂肪堆积。Edwards 等^[26]发现特定膳食纤维饮食策略可改善脂代谢功能障碍和降低整体肥胖。

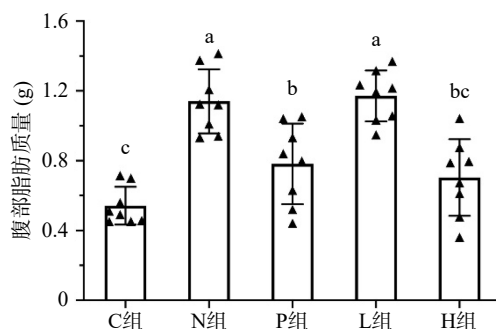


图3 代餐粉对高脂小鼠腹部脂肪质量的影响
Fig.3 Effects of meal replacement powder on abdominal fat mass in high-fat mice

2.5 早藕高纤维代餐粉对高脂小鼠脏器指数的影响

脏器指数异常反映脏器可能存在充血、水肿、增生及肥大等病理变化。由表 4 可见,与 C 组相比,N 组肝脏、脾脏的脏器指数分别显著升高了 13.10% 和 18.84%($P<0.05$),而胰腺、心脏、肾脏的脏器指数

表 4 各组小鼠脏器指数的变化(n=8)

Table 4 Changes in organ indices in various groups of mice (n=8)

组别	脏器指数(%)				
	肝脏	脾脏	胰腺	心脏	肾脏
空白组(C)	3.79±0.22 ^b	0.22±0.01 ^b	0.57±0.08 ^a	0.50±0.02 ^a	1.23±0.04 ^a
高脂饮食组(N)	4.28±0.28 ^a	0.26±0.03 ^a	0.59±0.11 ^a	0.50±0.03 ^a	1.21±0.05 ^a
阳性对照组(P)	3.40±0.10 ^c	0.19±0.01 ^c	0.54±0.08 ^a	0.47±0.02 ^b	1.23±0.05 ^a
低剂量代餐粉组(L)	3.09±0.17 ^d	0.18±0.01 ^c	0.46±0.06 ^b	0.43±0.02 ^c	1.07±0.05 ^b
高剂量代餐粉组(H)	3.33±0.19 ^c	0.18±0.01 ^c	0.41±0.06 ^b	0.49±0.04 ^{ab}	1.19±0.02 ^a

注: 同列的不同字母之间表示差异显著($P<0.05$)。

没有显著性差异($P>0.05$),提示高脂饮食会导致小鼠肝脏和脾脏肿大。与 N 组比较,P 组、L 组和 H 组肝脏的脏器指数分别显著降低了 20.66%、27.85% 和 22.38%($P<0.05$),脾脏的脏器指数分别显著降低了 25.94%、30.17% 和 28.28%($P<0.05$),说明代餐粉可有效缓解高脂饮食诱导的肝脏和脾脏肿大,具有预防脂肪肝、提高机体免疫等潜在功效^[27]。此外,与 N 组相比,L 组和 H 组胰腺的脏器指数分别显著降低了 30.17% 和 28.28%($P<0.05$),L 组心脏和肾脏的脏器指数分别显著降低了 14.72% 和 11.14%($P<0.05$),说明代餐粉可改善高脂饮食诱导的胰腺、心脏和肾脏病变。代餐粉在改善胰腺、心脏和肾脏的脏器指数方面均优于阳性药奥利司他,这可能与代餐粉富含膳食纤维有关。膳食纤维可改善高脂小鼠的肝脏和脾脏肿大^[28],降低小鼠血脂水平,逆转小鼠肝损伤^[29]。

2.6 早藕高纤维代餐粉对高脂小鼠血清生化指标的影响

血清脂质含量可直接反映出脂质在体内的代谢情况。由图 4A 所示,P 组、L 组和 H 组 TC 含量较 N 组分别显著降低了 12.44%、23.89% 和 26.24%($P<0.05$)。L 组和 H 组在降低 TC 含量方面优于 P 组($P<0.05$),且二组 TC 含量更接近正常值(C 组)。早藕高纤维代餐粉原料中含有大量益生物质,其中早藕抗性淀粉^[30]、燕麦 β -葡聚糖^[31]、低聚果糖^[32] 等膳食纤维具有改善总胆固醇的作用。

HDL-C 和 LDL-C 可反映胆固醇在体内的代谢情况。由图 4B 和图 4C 所知,P 组、L 组和 H 组 LDL-C 含量较 N 组降低了 12.26%、44.60% 和 39.92%($P<0.05$),而三者的 HDL-C 含量升高了 0.94%、21.30% 和 61.19%($P<0.05$)。与奥利司他相比,摄入代餐粉的小鼠血清 LDL-C 和 HDL-C 含量更趋于空白组小鼠正常值,这与代餐粉中的膳食纤维含量有关。相关研究表明膳食纤维能够显著降低 LDL-C 含量,并对 HDL-C 含量有一定提升作用^[33],LDL-C 通过胞吞作用将胆固醇转运至外周组织溶酶体中降解或将其返回肝脏,在酶的作用下转化为胆汁酸;HDL-C 在肝脏和小肠中合成,可摄取外周细胞的胆固醇,并将游离胆固醇酯化生成胆固醇酯,从而降低血浆中游离胆固醇的比例^[34]。因此,降低 LDL-C 含量和提高 HDL-C 含量有利于清除血液中的胆固醇。

此外,肝脏是重要的脂质代谢器官。高脂饮食容易导致肝脏的脂质代谢紊乱,造成肝损伤,进而诱发非酒精性脂肪性肝病。AST 是评判肝功能损伤的关键指标之一,其水平升高反映肝脏损伤^[35]。由图 4D 可知,P 组、L 组和 H 组 AST 活力较 N 组分别显著降低了 24.54%、42.56% 和 20.74%($P<0.05$),且与正常值无显著性差异($P>0.05$),说明早藕高纤维代餐粉能降低血清中 AST 水平,改善肝功能损伤。这可能与代餐粉原料中富含膳食纤维有关。Liu 等^[36]

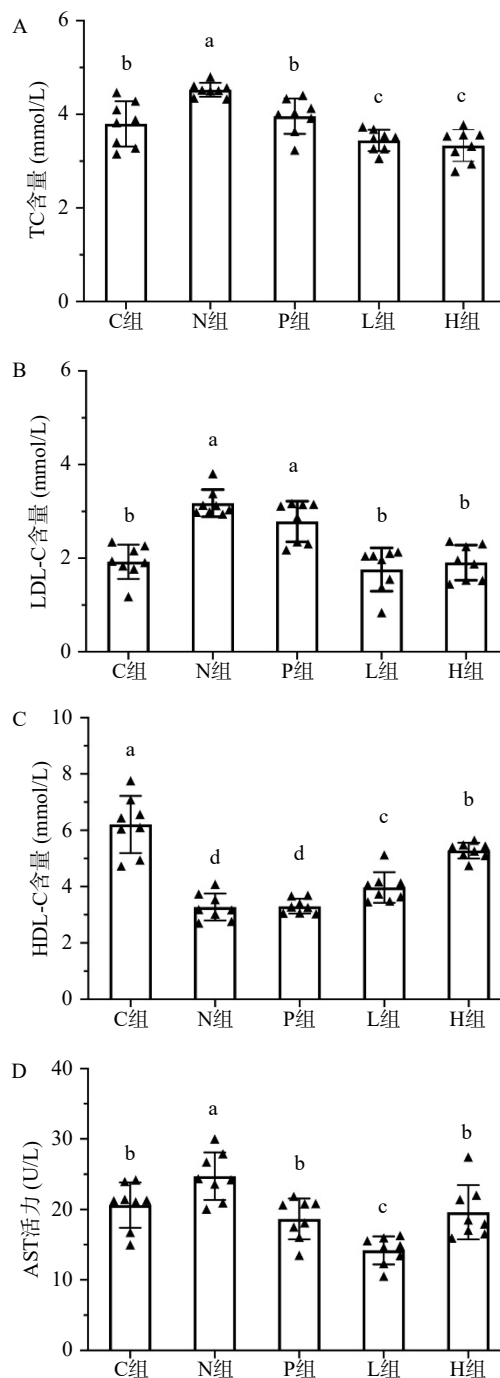


图 4 代餐粉对高脂小鼠血清生化指标 TC(A)、LDL-C(B)、HDL-C(C)和 AST(D)含量的影响

Fig.4 Effects of meal replacement powder on serum biochemical indices TC (A), LDL-C (B), HDL-C (C), and AST (D) in high-fat mice

发现燕麦复合膳食纤维可通过降低 AST 活力,改善小鼠肝损伤。综上,早藕高纤维代餐粉可通过降低 TC、LDL-C 和 AST 水平以及提高 HDL-C 水平,来干预高脂饮食诱导的肥胖症。

2.7 早藕高纤维代餐粉对高脂小鼠肝脏中 SOD、CAT 和 MDA 的影响

组织中 SOD、CAT 活性和 MDA 含量是体现机体抗氧化潜在能力的重要参数,可反映机体脂质过氧化速率和强度,也能间接反映组织过氧化损伤程

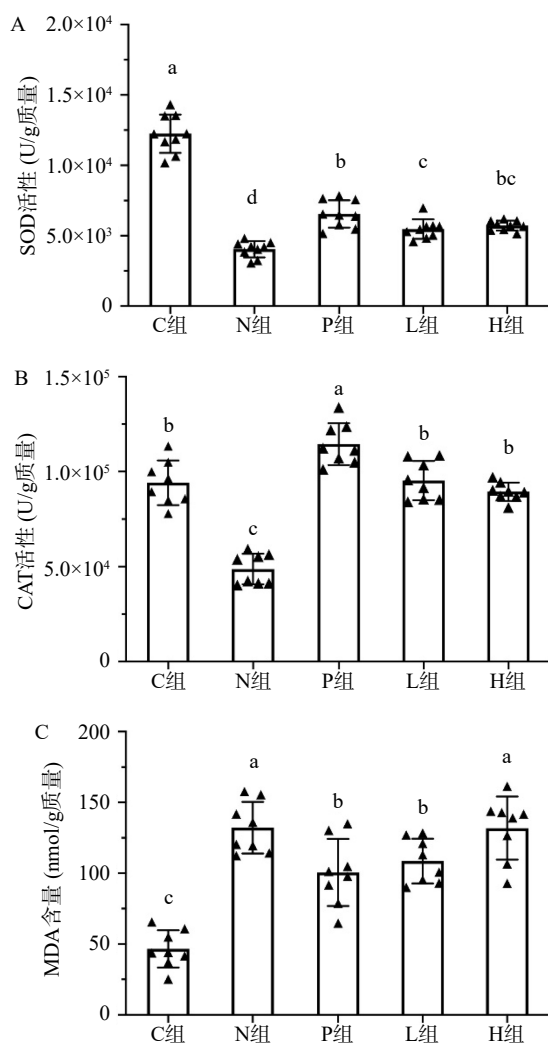


图5 代餐粉对高脂小鼠肝脏中SOD(A)、CAT(B)和MDA(C)的影响

Fig.5 Effects of meal replacement powder on SOD (A), CAT (B) and MDA (C) in liver of high-fat mice

度^[37]。可见,分析肝脏中的SOD、CAT活性和MDA含量对调节机体氧化应激水平、控制脂代谢紊乱具有重要意义。如图5所示,与C组相比,N组小鼠肝脏SOD和CAT活性分别显著降低了67.03%和48.23% ($P < 0.05$),MDA含量显著升高了1.84倍 ($P < 0.05$),说明肝脏抗氧化能力有较大损伤。与N组相比,L组和H组SOD活性分别显著升高了35.39%和41.69% ($P < 0.05$),CAT活性分别显著升高了95.56%和83.62% ($P < 0.05$),MDA含量分别降低了17.84% ($P < 0.05$)和0.26%,且接近空白组小鼠正常值,表明代餐粉可改善肝组织脂质过氧化损伤。综上,早藕高纤维代餐粉可在体内发挥良好的抗氧化功效,通过正向改善肝组织SOD和CAT活性以及MDA含量,修复血脂异常引发的肝组织氧化损伤,从而干预饮食性肥胖。

3 结论

本研究探究了早藕高纤维代餐粉对高脂饮食诱导的肥胖小鼠的影响。本文制备的早藕高纤维代餐粉具有高膳食纤维和高蛋白等特点,可有效调节肥胖

小鼠血脂异常,降低血清总胆固醇、低密度脂蛋白含量,回调高密度脂蛋白含量,差异有显著性 ($P < 0.05$)。同时,代餐粉的摄入能增加小鼠粪便水分含量、降低粪便pH,从而改善小鼠肠道微生态紊乱。此外,代餐粉的摄入还有效降低了血液中谷草转氨酶活力,表明其修复了小鼠肝脏损伤。进一步通过分析肝脏中抗氧化酶活性和脂质过氧化物含量,明确代餐粉的摄入能提高肝脏抗氧化能力。综上,早藕高纤维代餐粉能预防和改善饮食性肥胖,可以有效抑制肥胖小鼠脂质指标异常、改善肠道微生态紊乱和保护肝脏组织,具有作为降脂食品的应用价值。后续将对该产品降脂作用机理进行深入研究,以期对相关功能性食品的研发提供依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 中国血脂管理指南修订联合专家委员会. 中国血脂管理指南(基层版 2024年)[J]. 临床心血管病杂志, 2024, 40(4): 249–256. [Joint Committee on the Chinese Guide lines for Lipid Management. Chinese guide line for lipid management (primary care version 2024)[J]. Journal of Clinical Cardiology (China), 2024, 40(4): 249–256.]
- [2] TAKEUCHI T, KAMEYAMA K, MIYAUCHI E, et al. Fatty acid overproduction by gut commensal microbiota exacerbates obesity[J]. *Cell Metabolism*, 2023, 35(2): 361–375.
- [3] HU Y, CHNE X J, HU M, et al. Medicinal and edible plants in the treatment of dyslipidemia: Advances and prospects[J]. *Chinese Medicine*, 2022, 17: 113.
- [4] CHAKHTOURA M, HABER R, GHEZZAWI M, et al. Pharmacotherapy of obesity: An update on the available medications and drugs under investigation[J]. *EClinical Medicine*, 2023, 58: 101882.
- [5] TSUI L, YE P Y, XU S L, et al. Adverse drug reactions of statin therapy in China from 1989 to 2019: A national database analysis[J]. *European Journal of Hospital Pharmacy*, 2023, 30: e82–e89.
- [6] 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: 267–273.
- [7] 刘殊凡, 迟晓星, 王鹤霖, 等. 玉米、荞麦复配粉对高脂血症大鼠的降血脂作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 337–345. [LIU Shufan, CHI Xiaoxing, WANG Helin, et al. Hypolipidemic effect of maize and buckwheat complex powder in hyperlipidemic rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 337–345.]
- [8] 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 Yanmei, HUANG Li, ZHANG Hanjie, 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.]
- [9] NIE Q X, SUN Y G, LI M Z, et al. Targeted modification of gut microbiota and related metabolites via dietary fiber[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 316: 120986.
- [10] 樊吴静, 李丽淑, 杨鑫, 等. 广西早藕产业现状分析及其发展建议[J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1492–1500. [FAN Wujing, LI Lishu, YANG Xin, et al. Development status and countermeasures of early lotus root industry in Guangxi[J]. Southern Agricultural Science, 2021, 52(6): 1492–1500.]

- tures of *Canna edulis* industry in Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(6): 1492–1500.]
- [11] MIAO T T, ZHANG X S, ZHANG C J, et al. Type 3 resistant starch from *Canna edulis* reduce lipid levels in patients with mild hyperlipidemia through altering gut microbiome: A double-blind randomized controlled trial[J]. *Pharmacological Research*, 2024, 205: 107232.
- [12] WU J H, QIU M Y, ZHANG C, et al. Type 3 resistant starch from *Canna edulis* modulates obesity and obesity-related low-grade systemic inflammation in mice by regulating gut microbiota composition and metabolism[J]. *Food & Function*, 2021, 12(23): 12098–12114.
- [13] ZHANG C, MA S S, WU J H, et al. A specific gut microbiota and metabolomic profiles shifts related to antidiabetic action: The similar and complementary antidiabetic properties of type 3 resistant starch from *Canna edulis* and metformin[J]. *Pharmacological Research*, 2020, 159: 104985.
- [14] 邱敏懿, 晋小雁, 张彩娟, 等. RS3 型芭蕉芋抗性淀粉的减肥降脂作用及急性毒性分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(1): 149–156. [QIU Minyi, JIN Xiaoyan, ZHANG Caijuan, et al. Effect of *Canna edulis* type 3 resistant starch in reducing body weight, serum lipid and acute toxicity[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2019, 25(1): 149–156.]
- [15] 齐广海, 武书庚. 安全高效预混合饲料配制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. [QI Guanghai, WU Shugeng. Safe and efficient premixed feed formulation technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.]
- [16] 霍瑞, 张美莉, 张亚琨. 复合燕麦高纤维杂粮粉对高脂饮食诱导的小鼠肥胖的干预作用[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 105–112. [HUO Rui, ZHANG Meili, ZHANG Yakun. Intervention effect of oat high-fiber multi-grain powder on obesity induced by high-fat diet in mice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(5): 105–112.]
- [17] ZHANG J, WANG Z W. Soluble dietary fiber from *Canna edulis* Ker by-product and its physicochemical properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(1): 289–296.
- [18] PAVLIDON E, PAPADOPOULOU S K, FASOULAS A, et al. Diabesity and dietary interventions: Evaluating the impact of mediterranean diet and other types of diets on obesity and type 2 diabetes management[J]. *Nutrients*, 2023, 16(1): 34.
- [19] 张李, 聂诗明, 陈运中, 等. 复方海带代餐粉的辅助降血脂作用[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 178–182. [ZHANG Li, NIE Shiming, CHEN Yunzhong, et al. Auxiliary hypolipidemic effect of compound kelp meal substitute powder[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(11): 178–182.]
- [20] THOMAS M S, CALLE M, FERNANDEZ M L. Healthy plant-based diets improve dyslipidemias, insulin resistance, and inflammation in metabolic syndrome: A narrative review[J]. *Advances in Nutrition*, 2023, 14(1): 44–54.
- [21] 许女, 王超宇, 李雅茹, 等. 山西老陈醋源植物乳杆菌 CP234 对大鼠非酒精性脂肪肝的保护作用及机制[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(11): 26–34. [XU N, WANG C Y, LI Y R, et al. Protective effect of *Lactobacillus plantarum* CP234 isolated from Shanxi aged vinegar on nonalcoholic fatty liver disease in rats[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(11): 26–34.]
- [22] GILL S K, ROSSI M, BAJKA B, et al. Dietary fibre in gastrointestinal health and disease[J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2021, 18(2): 101–116.
- [23] WANG X Z, LI X, ZHANG L Y, et al. Recent progress in plant-derived polysaccharides with prebiotic potential for intestinal health by targeting gut microbiota: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 64(33): 12242–12271.
- [24] DEEHAN E C, MOCANU V, MADSEN K L. Effects of dietary fibre on metabolic health and obesity[J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2024, 21: 301–318.
- [25] TANG S F, SHI Z J, QIAO X L, et al. *Carya cathayensis* leaf extract attenuates ectopic fat deposition in liver, abdomen and aortic arch in ovariectomized rats fed a high-fat diet[J]. *Phytomedicine*, 2021, 82: 153447.
- [26] EDWARDS C A, XIE C R, GARCIA A L. Dietary fibre and health in children and adolescents[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2015, 74(3): 292–302.
- [27] ZHOU X, ZHOU J, BAN Q F, et al. Effects of metformin on the glucose regulation, lipid levels and gut microbiota in high-fat diet with streptozotocin induced type 2 diabetes mellitus rats[J]. *Endocrine*, 2024, 23: 1–10.
- [28] 阴龙飞, 常子晨, 范颖颖, 等. 盐地碱蓬膳食纤维对高脂血症大鼠的降血脂作用[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(12): 7–12, 212. [YIN Longfei, CHANG Zichen, FAN Yingying, et al. Hypolipidemic effects of dietary fiber from *Suaeda salsa* in hyperlipidemic rats[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(12): 7–12, 212.]
- [29] ZHENG Z, GAO W L, ZHU Z Z, et al. Complexes of soluble dietary fiber and polyphenols from lotus root regulate high-fat diet-induced hyperlipidemia in mice[J]. *Antioxidants*, 2024, 13(4): 466.
- [30] ZHANG C, QIU M Y, WANG T, et al. Preparation, structure characterization, and specific gut microbiota properties related to anti-hyperlipidemic action of type 3 resistant starch from *Canna edulis*[J]. *Food Chemistry*, 2021, 351: 129340.
- [31] MATHEWS R, KAMIL A, CHU Y F. Global review of heart health claims for oat beta-glucan products[J]. *Nutrition Reviews*, 2020, 78(Sup_1): 78–97.
- [32] DALLALI D, FAKHFAKH J, PARIS C, et al. Fructooligosaccharides from *Cynoglossum tubiflorus*: Effect of the molecular size on their antidiabetic activity in high-fat diet and alloxan induced diabetic rats[J]. *Bioorganic Chemistry*, 2024, 143: 107100.
- [33] CICERO A, FOGACCI F, VERONESI M, et al. A randomized placebo-controlled clinical trial to evaluate the medium-term effects of oat fibers on human health: The beta-glucan effects on lipid profile, glycemia and intestinal health (BELT) study[J]. *Nutrients*, 2020, 12(3): 686.
- [34] HE S Q, XIONG Z X, LI L X, et al. Lotus seed resistant starch ameliorates high-fat diet induced hyperlipidemia by fatty acid degradation and glycerolipid metabolism pathways in mouse liver[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 215: 79–91.
- [35] IWADARE T, KIMURA T, KUNIMOTO H, et al. Long-term pemafibrate treatment exhibits limited impact on body fat mass in patients with hypertriglyceridemia accompanying NAFLD[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2024, 15: 1329294.
- [36] LIU Z R, DAI J, LIU R J, et al. Complex insoluble dietary fiber alleviates obesity and liver steatosis, and modulates the gut microbiota in C57BL/6J mice fed a high-fat diet[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(9): 5462–5473.
- [37] SONG W, WANG T Y, CUI X L, et al. *Lactobacillus coryniformis* subsp. *torquens* T3 alleviates non-alcoholic fatty liver disease via reconstruction of the gut microbiota and redox system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(14): 6814–6825.