

甘蔗纤维对高脂膳食诱导肥胖模型雌性大鼠体重、血糖和脂肪组织的影响

黄金连, 周立红*

广西中医药大学公共卫生与管理学院/预防医学系/营养与食品卫生学教研室, 广西 南宁

收稿日期: 2025年12月19日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月22日

摘要

为研究甘蔗纤维对高脂模型大鼠的体重、脂肪组织、空腹血糖及糖耐量的影响, 将36只雌性大鼠随机分为对照组(普通饲料)、模型组(喂养高脂饲料)、全甘蔗组(高脂饲料 + 全甘蔗粉)、甘蔗渣组(高脂饲料 + 甘蔗渣粉)、不溶性甘蔗纤维组(高脂饲料 + 不溶性甘蔗纤维粉)、可溶性甘蔗纤维组(高脂饲料 + 可溶性甘蔗纤维粉), 共干预45天, 分别在第18天、31天进行口服葡萄糖耐量和胰岛素耐量测定, 实验结束后采集各器官并称重记录。结果显示: 在实验期间, 对照组总摄食量全程显著高于各处理组($P < 0.0001$), 可溶性纤维组在实验早期(第18天)糖耐量试验过程中葡萄糖灌胃后60分钟血糖显著低于甘蔗渣组($P < 0.05$), 提示其短期控糖潜力; 干预结束后不溶性纤维组总脂肪、皮下脂肪及腹股沟脂肪沉积均显著高于对照组及其他处理组(均 $P < 0.05$), 盲肠长度缩短($P < 0.05$); 模型组虽总脂肪指数低于对照组($P = 0.025$), 但内脏脂肪优先积累且盲肠发育抑制($P = 0.011$), 揭示高脂饮食诱导的代谢紊乱特征; 可溶性纤维组脂肪沉积显著低于不溶性纤维组($P < 0.001$), 但长期糖耐量调控效果减弱。综上, 可溶性甘蔗渣通过抑制脂肪沉积与短期血糖调控展现抗肥胖潜力, 而不溶性纤维可能增加代谢风险。研究为膳食纤维在肥胖干预中的差异化应用提供了实验依据, 未来需结合代谢标志物与肠道菌群深入解析其机制。

关键词

甘蔗渣, 高脂膳食, 肥胖模型, 膳食纤维, 营养干预

The Effect of Sugarcane Fiber on Body Weight, Blood Glucose, and Adipose Tissue of Female Model Rats with High-Fat Diet Induced Obesity

Jinlian Huang, Lihong Zhou*

*通讯作者。

文章引用: 黄金连, 周立红. 甘蔗纤维对高脂膳食诱导肥胖模型雌性大鼠体重、血糖和脂肪组织的影响[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(1): 80-92. DOI: 10.12677/hjfn.2026.151010

Teaching and Research Office for Nutrition and Food Hygiene, Department of Preventive Medicine, School of Public Health and Management, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning Guangxi

Received: December 19, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 22, 2026

Abstract

The aim of this study was to investigate the effects of sugarcane fiber on body weight, adipose tissue, fasting blood glucose, and glucose tolerance in high-fat induced obesity model rats. Thirty six female rats were randomly divided into a control group (fed with regular feed), a model group (fed with high-fat feed), a whole sugarcane group (fed with high-fat diet + whole sugarcane flour), a sugarcane bagasse group (fed with high-fat diet + sugarcane bagasse flour), an insoluble sugarcane fiber group (fed with high-fat diet + insoluble sugarcane fiber flour), and a soluble sugarcane fiber group (fed with high-fat diet + soluble sugarcane fiber flour). The intervention lasted for 45 days, and oral glucose tolerance and insulin tolerance were measured on days 18 and 31, respectively. The organs were collected and weighted by the end of the study. The results showed that during the experimental period, the total food intake of the control group was significantly higher than that of each treatment group ($P < 0.0001$), and the soluble fiber group had significantly lower blood glucose levels than the sugarcane bagasse group 60 minutes after gastric lavage in the early stage of the experiment (day 18) ($P < 0.05$), indicating its short-term sugar control potential; The total fat, subcutaneous fat, and inguinal fat deposition in the insoluble fiber group were significantly higher than those in the control group and other treatment groups (all $P < 0.05$), and the cecal length was shortened ($P < 0.05$); Although the total fat index of the model group was lower than that of the control group ($P = 0.025$), visceral fat preferentially accumulated and cecal development was inhibited ($P = 0.011$), revealing the metabolic disorder characteristics induced by high-fat diet; The fat deposition in the soluble fiber group was significantly lower than that in the insoluble fiber group ($P < 0.001$), but the long-term effect of glucose tolerance regulation was weakened. In summary, soluble sugarcane fiber exhibits anti obesity potential by inhibiting fat deposition and short-term blood glucose regulation, while insoluble fiber may increase metabolic risk. The study provides experimental evidence for the differential application of bagasse in obesity intervention, and in the future, it is necessary to further analyze its mechanism by combining metabolic markers with gut microbiota.

Keywords

Sugarcane Bagasse, High-Fat Diet, Obesity Model, Dietary Fiber, Nutritional Intervention

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

肥胖是由于过度脂肪积累而导致的一系列健康问题,已经成为一种全球流行性代谢疾病[1][2]。全球已有近三分之一的人口被归类为超重或肥胖,预计到 2030 年,超重和肥胖成年人的预计人数将分别为 13.5 亿和 5.73 亿人[3],同时肥胖与糖尿病、心血管疾病、脂肪肝等多种慢性病密切相关[4]。研究表明,膳食纤维通过减少进食量、吸附脂质、降低肠道脂代谢相关酶活性以及与磷脂亲和等机制,有效调节脂质代谢,降低血脂胆固醇水平[5]。甘蔗渣富含膳食纤维,目前主要用于制备生物复合材料、吸附剂以及能源燃料等[6],其影响肥胖及调节发生肥胖过程中的空腹血糖、口服糖耐量和脂肪组织含量及肠道健康的潜力尚待深入研究[7][8]。多数研究关注膳食纤维通过调节肠道菌群和肠道屏障功能对肥胖的积极作

用, 但对于农业副产物甘蔗渣膳食纤维的系统研究较少[9] [10]。

膳食纤维通过调节能量代谢、肠道菌群及炎症反应等途径发挥抗肥胖效应。可溶性膳食纤维(如枣纤维、 β -葡聚糖)通过形成黏性凝胶延缓胃排空, 降低营养素消化吸收效率, 显著改善肥胖模型动物的体重、血脂(总胆固醇、甘油三酯)及血糖水平, 效果可与药物奥利司他相媲美[9] [10]。不可溶性膳食纤维(如纤维素、木质素)则通过增加粪便体积、加速肠道运输, 减少热量滞留, 对空腹血糖偏高及肥胖人群的代谢指标改善有积极作用[11]。此外, 膳食纤维通过刺激饱腹激素分泌抑制食欲, 并抑制肠道炎症、减少内毒素入血, 成为预防肥胖及相关代谢疾病(如 2 型糖尿病、心血管疾病)的重要膳食干预手段[9] [11]。甘蔗渣纤维被广泛研究用于食品工业中, 包括作为脂肪替代品、增稠剂和膳食纤维补充剂。例如, 甘蔗渣纤维还被用于固体饮料配方中, 提高了产品的吸水性和口感[12]。甘蔗渣纤维被用于开发功能性食品, 如降血糖饼干和固体饮料。研究表明, 甘蔗渣膳食纤维饼干具有较低的血糖生成指数(glycemic index, GI), 有助于控制血糖[13]。此外, 甘蔗渣纤维固体饮料配方表现出良好的口感和营养特性[12]。目前探究甘蔗渣膳食纤维对高脂饮食诱导的肥胖症的改善作用效果的研究较少, 仍处于起步阶段, 有关实验及人群研究较少[7] [14] [15], 尚缺乏针对甘蔗渣膳食纤维对肥胖直接影响的人体或动物实验, 其具体功效(如对体重、代谢指标及肠道菌群的作用)尚未明确。因此, 本研究通过构建肥胖动物模型, 探究甘蔗渣膳食纤维对高脂饮食诱导的肥胖症的改善作用效果, 为后续甘蔗渣膳食纤维的研究以及功能产品的研发提供数据支持与理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

实验动物为 4~6 周龄的 SPF 级 36 只雌性大鼠。甘蔗粉、甘蔗渣粉(生产批号: WTLS220915)、不溶性甘蔗纤维粉(生产批号: WTLS220928)、可溶性甘蔗纤维粉(生产批号: WTLS220906)购于兰州沃特莱斯生物科技有限公司。实验膳食成分参见表 1。各种膳食除了膳食纤维成分有差异外, 其他营养成分尽可能一致, 尽量提高膳食的健康合理性。采用饲料机自制实验饲料, 购买基础饲料粉, 然后按照配方添加干预物质后压制饲料。

Table 1. Experimental diet composition and energy supply ratio
表 1. 试验饲料组成及供能比例

成分	空白对照组	高脂模型组	全甘蔗组	甘蔗渣组	不溶甘蔗纤维组	可溶甘蔗纤维组
总脂肪	17.50%	35%	35%	35%	35%	35%
大豆油	45.5	91	91	91	91	91
猪油	77	77	77	77	77	77
甘蔗粉	-	-	150	-	-	-
甘蔗渣粉	-	-	-	100	-	-
不溶性甘蔗粉	-	-	-	-	100	-
可溶性甘蔗粉	-	-	-	-	-	100
总脂肪	17.50%	35%	35%	35%	35%	35%

2.2. 营养干预实验

实验环境每天昼夜循环光照 12 h, 环境温度为 22℃~24℃, 相对湿度为 50%~55%, 用低脂普通维持饲料适应性喂养 16 天之后禁食 24 h, 在第 17 天凌晨放进代谢笼进行差异糖吸收试验, 在第 17 天的中午从代谢笼中取出后按第 16 天大鼠体重增加值, 分别取前 36 只(肥胖易感)雌鼠随机分为空白对照组、高脂

模型组、全甘蔗组、甘蔗渣组、不溶性甘蔗渣膳食纤维组和可溶性甘蔗渣膳食纤维组共 6 组(各组 6 只), 剔除 4 只肥胖抵抗的大鼠。分组后低脂对照组喂养基础饲料, 其他组继续喂养高脂饲料, 在第 26 天时禁食过后测空腹血糖, 高脂模型组和低脂对照组饲料不变, 全甘蔗组、甘蔗渣组、不溶性甘蔗渣膳食纤维组和可溶性甘蔗渣膳食纤维组则在高脂饲料上分别添加甘蔗粉、甘蔗渣粉、不溶性甘蔗纤维粉和可溶性甘蔗纤维粉, 大鼠两只一笼, 每周更换垫料, 每周记录采食量和体重。分别在第 17 天、第 30 天禁食过夜后鼠尾采血测定空腹血糖, 采用代谢笼收集基础状态尿和粪标本。45 天后, 大鼠摘眼球取血并脱颈处死, 收集肝脏、附睾脂肪等器官组织和结肠内容物。计算脏器指数与脂肪系数公式为[16]: 脏器指数/% = (脏器质量/g)/(大鼠体质量/g) × 100; 脂肪系数/% = (脂肪质量/g)/(大鼠体质量/g) × 100。

分别在第 17 天和第 30 天采用口服葡萄糖耐量试验(oral glucose tolerance test, OGTT)和胰岛素耐量(insulin tolerance test, ITT)评价胰岛素敏感性[17]。将大鼠分为两批, 每批在 9:00~12:00 间完成实验以避免大鼠的生活周期对血糖和胰岛素的影响, 两批大鼠连日完成实验。 $t=0$ 时, 灌胃 1.5 mg 葡萄糖/g 体重。在葡萄糖注射前、在 $t=15$ 、30、60 和 90 分钟时, 从尾静脉血中测量血糖浓度, 记录每只大鼠实验开始时间。根据每个时间点的绝对葡萄糖浓度、 $t=0$ 的葡萄糖浓度变化以及曲线下总面积(area under the curve, AUC)分析数据。进行 ITT 试验时, 腹腔注射胰岛素, 其他操作与 OGTT 一样。

实验结束后, 隔夜禁食, 异氟烷麻醉动物, 腹主动脉采血, 测定空腹血糖。过量失血处死动物, 测定身长和尾长, 测量肠道组织长度, 收集肝脏、各脂肪组织、肌肉、肠道组织和肠道粘膜、盲肠内容物等组织并记录质量, 除病理切片组织以外, 所有组织放入液氮快速冷冻保存。

尽可能收集所有脂肪组织并称重记录, 包括肠系膜脂、子宫附着脂、腹膜后脂肪、腹股沟脂、臀脂、甲状腺旁脂、甲状腺下脂、腋下脂、肩甲下脂、肩甲间脂和棕色脂, 皮下各脂肪组织在剥下整个皮后按部位逐个收集。

2.3. 数据统计分析

数据统计分析采用 SPSS 27 进行统计分析, 使用 GraphPad Prism 软件进行绘制, 多组之间的比较采用单因素方差分析或非参数检验, 显著性水平取 $\alpha=0.05$ 。

3. 结果

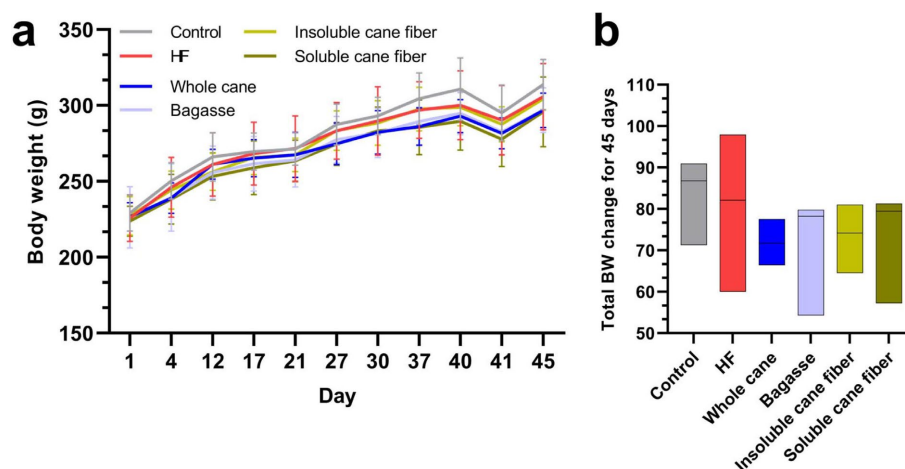
3.1. 体重变化

随机分组后除对照组喂养普通饲料, 其余组均喂养高脂饲料, 在之后的 10 天高脂模型建立期间各组体重变化无显著区别。经过 45 天试验饲料饲养, 对照组大鼠体质量从 (229 ± 11.93) g 增长到 (313.67 ± 16.6) g (图 1(a), 图 1(b)), 各组大鼠体重变化之间没有显著差异($P>0.05$)。模型组体重增幅最大, 其次是对照组; 甘蔗渣组、不溶性甘蔗纤维组和可溶性甘蔗纤维组增长速度相对平缓、稳定, 折线图中曲线上趋势较缓, 表明体重是较为匀速、缓慢地增加, 处于中等水平(图 1(a))。全甘蔗组体重增幅相对较小, 在各组中处于较低水平。

3.2. 饲料摄入量变化

高脂模型建立期间各组摄食量比较无显著差异。如图 2(a)所示, 在实验饲料喂养过程中, 各组饲料总摄入量整体变化趋势相似, 均在第 12 天、第 27 天、第 37 天左右出现峰值, 第 21、30、40 天左右为低谷, 但甘蔗渣组波动相对平缓, 第 12 天达高峰后逐渐下降, 后续有小幅度回升与下降。

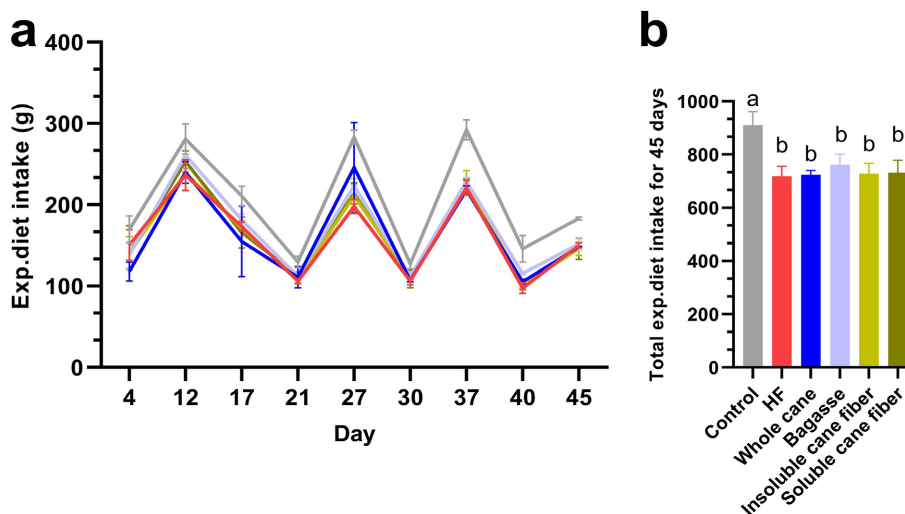
在 45 天的实验饲料喂养过程中, 对照组的总摄食量明显高于其他处理组($P<0.0001$, 图 2(b)), 而各处理组之间除了对照组外, 差异大多不显著。全甘蔗组在第 1 天到第 4 天期间实验饲料摄入与对照组相比摄食量较少($P=0.018$, 见图 3(a))。第 4 到 12 天期间对照组摄食量显著高于其余组, 而甘蔗渣组摄食



注: a 为实验期间生长趋势变化折线图; b 为实验期间总体重变化量。

Figure 1. Growth curve and body weight changes

图 1. 生长曲线和体重变化



注: (a)为实验期间总实验饲料摄入量变化折线图; (b)为实验期间总实验饲料摄入量变化, 字母相同表示组间无统计学差异, 字母不同表示组间有统计学差异($P \leq 0.05$), 下同。

Figure 2. Food intake

图 2. 饲料摄入量

量亦高于模型组和不溶性甘蔗纤维组($P=0.001$, 图 3(b))。前 12 天期间对照组摄食量显著高于其余五组, 全甘蔗组摄食量低于甘蔗渣组和可溶性甘蔗纤维组($P < 0.0001$, 见图 3(c))。第 12 天到 17 天期间对照组摄食量与全甘蔗组相当并显著高于其余四组($P=0.003$, 见图 3(d))。第 17 天到 21 天对照组摄食量显著高于其余五组($P < 0.0001$, 图 3(e))。前 21 天期间对照组摄食量显著高于其余五组, 甘蔗渣组与对照组相比摄食量较少, 与整个全甘蔗组相比摄食量较多($P < 0.0001$, 图 3(f))。第 21 天到 27 天期间模型组相比于对照组摄食量较高($P=0.003$, 图 4(g))。第 27 天到 30 天以及第 30 天到 37 天期间对照组摄食量均显著高于其余五组(均 $P < 0.0001$, 图 4(h), 图 4(i))。第 37 天到 40 天期间除甘蔗渣组外, 对照组与其余四组相比摄食量较高($P < 0.0001$, 图 4(j))。前 40 天、第 40 天到 45 天期间对照组摄食量显著高于其余五组(均 $P < 0.0001$, 图 4(k), 图 4(l))。

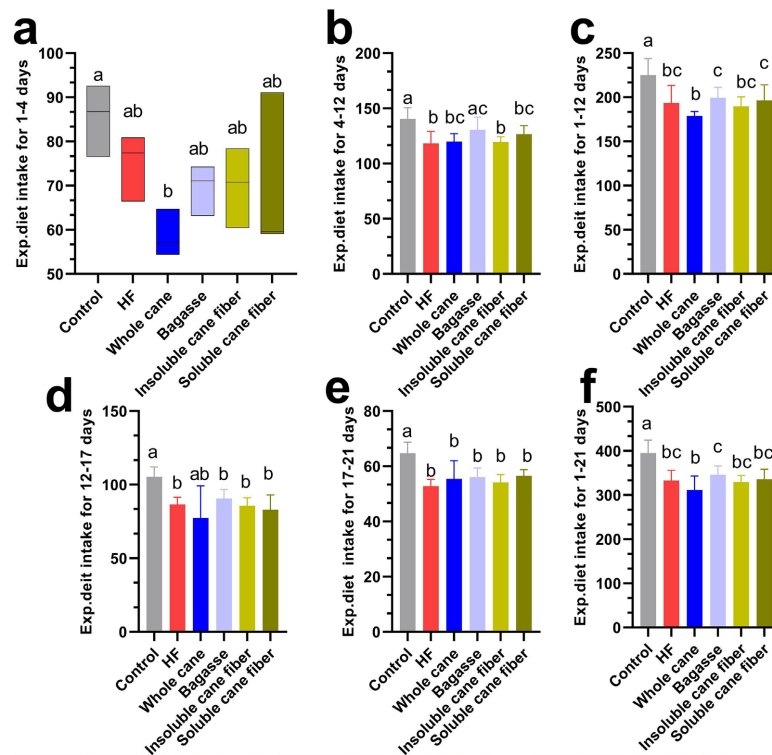


Figure 3. Comparative analysis of feed intake

图 3. 饲料摄入量比较分析

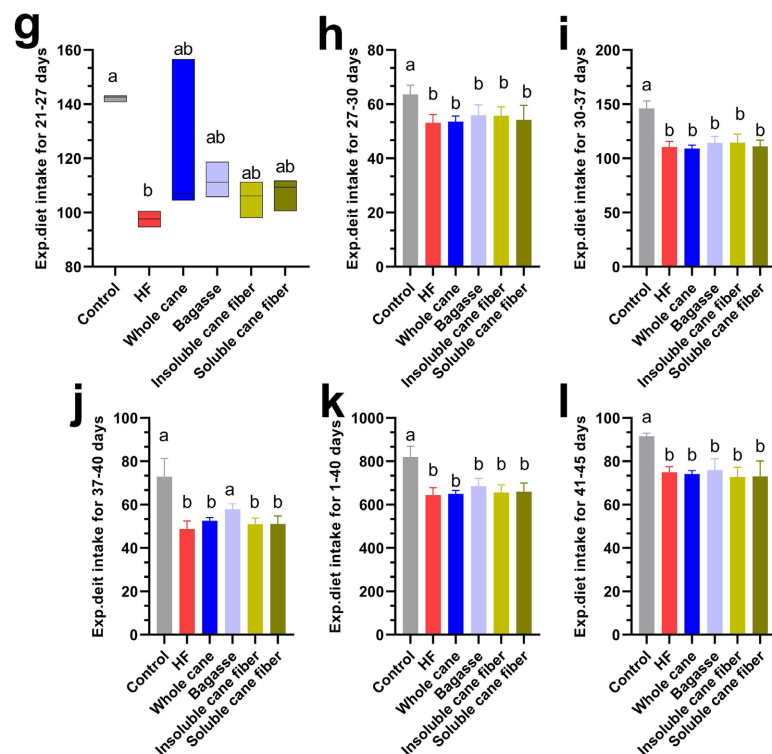


Figure 4. Comparative analysis of feed intake

图 4. 饲料摄入量比较分析

3.3. 脂肪组织重量

6组大鼠的总脂肪重量显著不同($P=0.001$, 图 5(a)); 不溶性甘蔗纤维组的总脂肪指数显著高于对照组($P<0.001$)、模型组($P=0.049$)及其他甘蔗处理组(均 $P<0.01$)。可溶性纤维组总脂肪指数最低, 且低于不溶性纤维组($P<0.001$); 模型组低于对照组($P=0.025$), 但高于可溶性纤维组($P=0.005$); 而甘蔗处理组间无差异, 且与模型组无差异, 但均高于可溶性纤维组(均 $P<0.05$, 图 5(b))。不可溶性甘蔗纤维组与可溶性甘蔗纤维组相比皮下脂肪较多($P=0.002$, 图 5(c)); 不溶性甘蔗纤维组的皮下脂肪指数显著高于对照组、全甘蔗组及可溶性纤维组(均 $P<0.001$)。不溶性甘蔗纤维组除了与模型组、甘蔗渣的皮下脂肪指数没有明显差异外均显著高于其余组(均 $P<0.05$), 可溶性甘蔗纤维组除了与对照组、全甘蔗组的皮下脂肪指数没有明显差异外均低于其余组(均 $P<0.05$, 图 5(d))。各组间内脏脂肪重量比较

具有统计学意义($P=0.003$, 图 5(e)); 不溶性甘蔗纤维组与模型组的内脏脂肪指数显著高于对照组但与其余组并无显著差异(均 $P<0.05$, 图 5(f))。不溶性甘蔗纤维组的甲状腺下脂显著多于可溶性干甘蔗纤维组($P<0.05$, 图 5(g)); 不溶性甘蔗纤维组的甲状腺下脂肪指数除了与模型组甘蔗渣组没有显著差异(均 $P>0.05$)外均高于其余组(均 $P<0.05$), 可溶性甘蔗纤维组的甲状腺下脂肪指数除了与对照组、全甘蔗组没有显著差异外均高于其余组(均 $P<0.05$, 图 5(h))。可溶性甘蔗纤维组的腋下脂肪重量及其指数均显著低于不溶性甘蔗纤维组和模型组(均 $P<0.05$, 图 5(i)、图 6(j))。

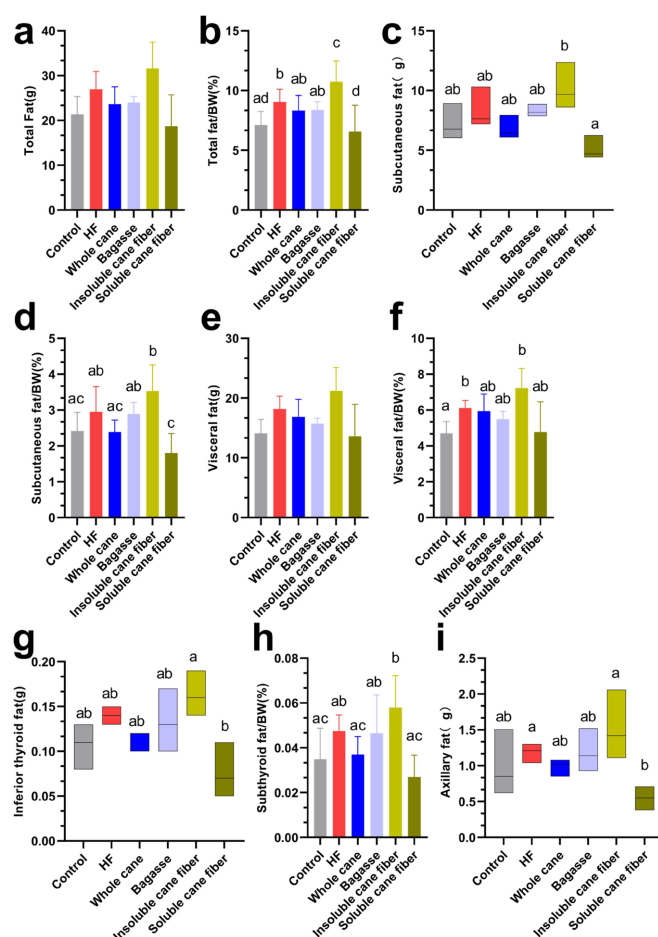


Figure 5. Adipose tissue weight and organ index
图 5. 脂肪组织重量与器官指数

不溶性甘蔗纤维的棕色脂肪重量及其指数显著高于对照组(均 $P < 0.05$, 图 6(k)、图 6(l))。不溶性甘蔗纤维组的腹膜后脂肪显著多于对照组($P < 0.05$, 图 6(m)); 对照组的腹膜后脂肪指数除了与全甘蔗组和可溶性甘蔗纤维组没有明显差异外均显著低于其余 3 组($P < 0.05$, 图 6(n))。不溶性甘蔗纤维组的腹股沟脂肪重量除了与模型组没有明显差别外均多于其余 5 组(均 $P < 0.05$), 而可溶性甘蔗纤维与甘蔗渣组无明显差异外均显著少于其余组(均 $P < 0.05$), 同时全甘蔗组少于模型组($P < 0.05$), 见图 6(o); 不溶性甘蔗纤维组的腹股沟脂肪指数显著高于其余 5 组(均 $P < 0.05$), 而可溶性甘蔗纤维组除了与对照组、全甘蔗组无明显差别外均显著低于其余 3 组(均 $P < 0.05$), 见图 6(p)。不溶性甘蔗纤维组的腹股沟脂肪 + 臀脂肪重量除了与模型组无明显差异外均显著高于其余 4 组(均 $P < 0.05$), 可溶性甘蔗纤维组除了与全甘蔗组无明显差别外均明显高于其余组(均 $P < 0.05$), 全甘蔗组显著低于甘蔗渣组和模型组(均 $P < 0.05$), 见图 6(q)。不溶性甘蔗纤维组的腹股沟脂肪 + 臀脂肪指数除了与甘蔗渣组无明显差异外均显著高于其余 4 组(均 $P < 0.05$), 可溶性甘蔗纤维组除了与全甘蔗组无明显差别外均明显低于其余组(均 $P < 0.05$), 全甘蔗组显著低于甘蔗渣组和模型组(均 $P < 0.05$), 见图 6(r)。

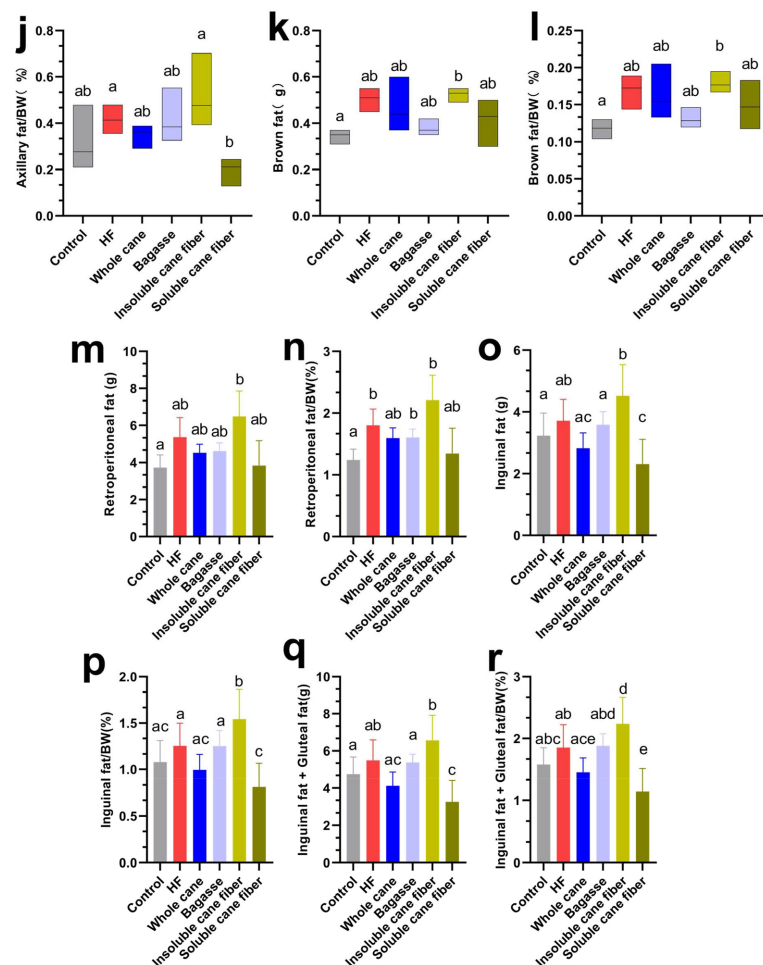


Figure 6. Adipose tissue weight and organ index
图 6. 脂肪组织重量与器官指数

各组间肠系膜脂肪重量比较具有显著差异($P < 0.05$), 见图 7(s); 不溶性甘蔗纤维组的肠系膜脂肪指数除了与模型组无明显差异外均显著高于其余 4 组(均 $P < 0.05$), 可溶性甘蔗纤维组除了低于模型组与不溶性

甘蔗纤维组(均 $P < 0.05$)外均与其他组无明显差异(均 $P > 0.05$), 见图 7(t)。各组间子宫脂肪重量比较具有显著差异($P < 0.05$), 见图 7(u); 不溶性甘蔗纤维组的子宫脂肪指数除了高于对照组($P = 0.017$)外与其他组均无明显差别(均 $P > 0.05$), 见图 7(v)。不溶性甘蔗纤维组的臀脂肪重量除了与模型组、甘蔗渣组无明显差异外均显著高于其余 3 组(均 $P < 0.05$), 可溶性甘蔗纤维除了与全甘蔗组无明显差别外均明显低于其余组(均 $P < 0.05$), 全甘蔗组除了与对照组和可溶性甘蔗纤维组无明显差异外均显著少于其余组(均 $P < 0.05$), 见图 7(w); 可溶性甘蔗纤维组的臀脂肪指数显著低于甘蔗渣组和不溶性甘蔗纤维组(均 $P < 0.05$), 见图 7(x)。

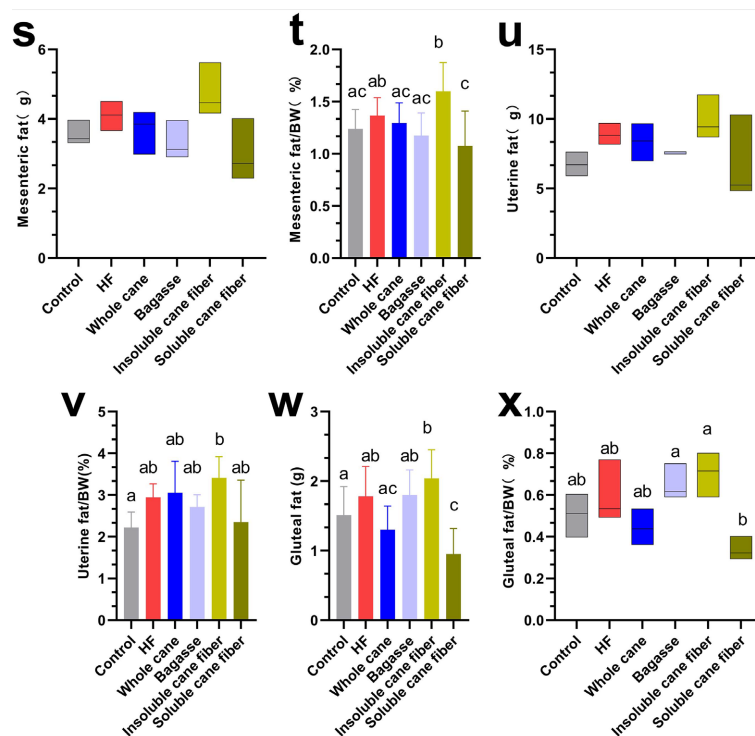


Figure 7. Adipose tissue weight and organ index
图 7. 脂肪组织重量与器官指数

3.4. 肠道器官重量及器官指数

甘蔗渣组的盲肠长度除了与模型组和可溶性甘蔗纤维组无明显差异外均短于其余 3 组(均 $P < 0.05$), 模型组明显短于对照组($P = 0.011$)见图 8(a)。各组间盲肠组织指数比较具有显著差异($P = 0.023$), 见图 8(b)。

3.5. 口服糖耐量和胰岛素耐量试验

糖耐量是反应糖代谢的重要指标, 在第 18、31 天对大鼠进行口服葡萄糖耐量试验(OGTT)和口服胰岛素耐量试验(ITT), 结果如图 9、图 10 所示, 各组大鼠的口服糖耐量和胰岛素耐量及其血糖曲线下面积均没有显著差别(均 $P > 0.05$)。但是在 18 天的口服葡萄糖耐量试验(OGTT)中发现, 对照组灌胃后 60 min 血糖除了与全甘蔗组、可溶性甘蔗纤维组没有显著差异外均显著高于模型组、甘蔗渣组、不溶性甘蔗纤维组(均 $P < 0.05$), 甘蔗渣组灌胃后 60 min 血糖除了与模型组、不溶性甘蔗纤维组没有明显差异外均显著高于对照组、全甘蔗组、可溶性甘蔗纤维组(均 $P < 0.05$)。说明甘蔗渣可能未改善糖代谢, 而甘蔗和可溶性纤维可能具有潜在调控作用。第 32 天、41 天的各组空腹血糖没有显著差异(均 $P > 0.05$)。

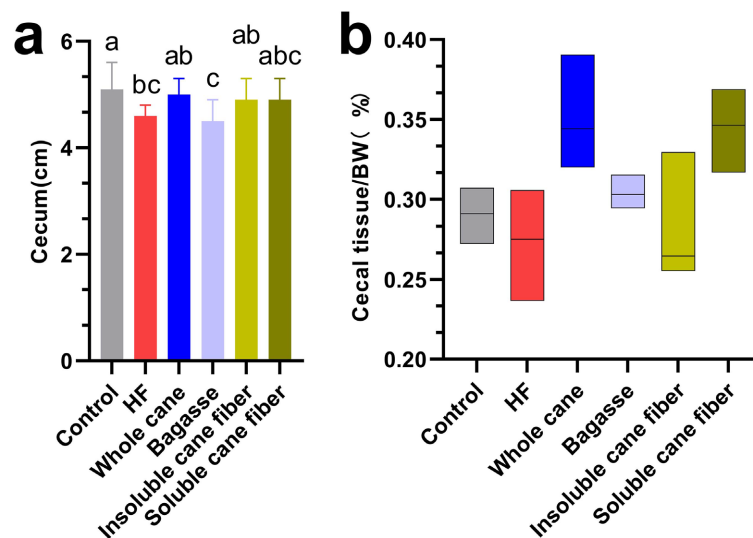
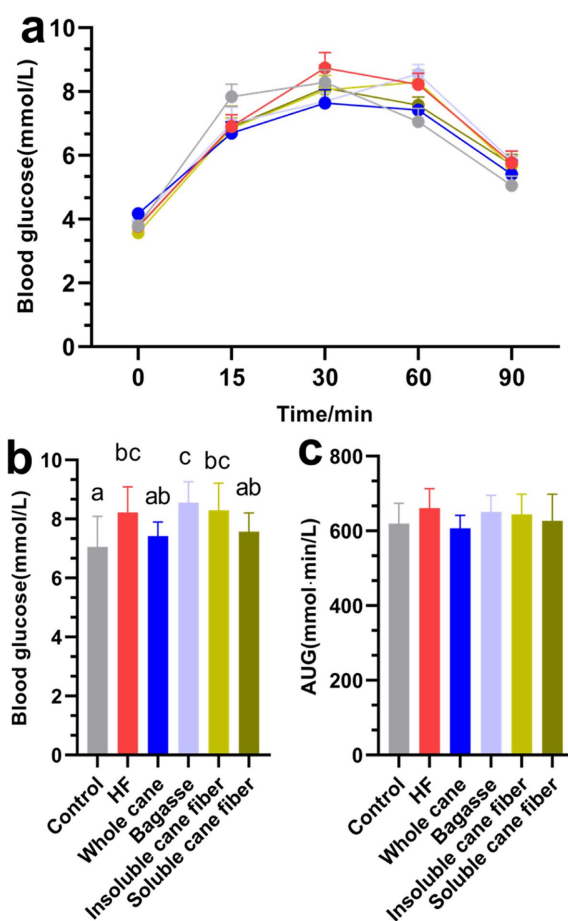
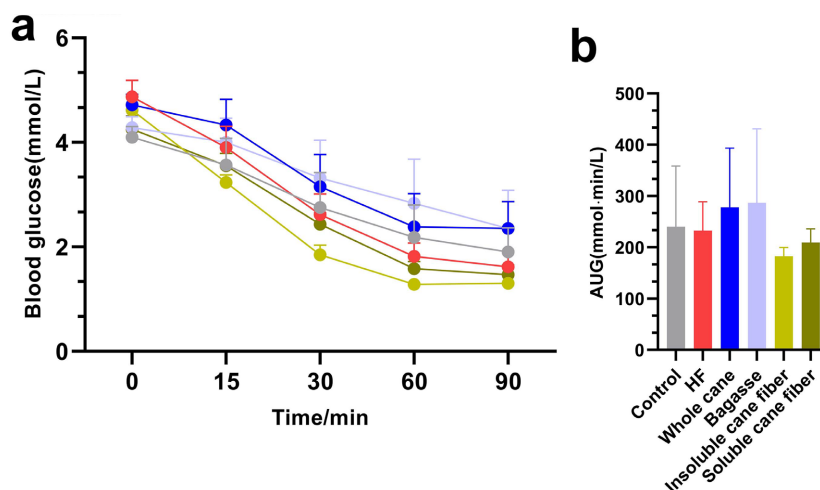


Figure 8. Cecum length and cecal organ index
图 8. 盲肠长度与盲肠器官指数



注: a 为第 18 天葡萄糖耐量试验(OGTT); b 为第 18 天灌胃后 60 min 血糖; c 为血糖曲线下面积(AUC)。

Figure 9. Oral glucose tolerance of rats in each group on day 18
图 9. 第 18 天各组大鼠口服葡萄糖耐量情况



注: a 为第 31 天胰岛素耐量试验(ITT); b 为第 31 天血糖曲线下面积(AUC)。

Figure 10. On the 31st day, insulin tolerance status of rats in each group

图 10. 第 31 天各组大鼠胰岛素耐量情况

3.6. 尿量和粪便粒数

第 32 天、41 天的各组放入代谢笼前后的体重对比无明显差异(均 $P > 0.05$), 24 小时总尿量以及从代谢笼取出的粪便粒数组间比较均无显著差异(均 $P > 0.05$)。

4. 讨论

甘蔗渣纤维富含不溶性膳食纤维, 可通过增加肠道体积、促进短链脂肪酸发酵及调节菌群结构(如提升乳杆菌属、调节拟杆菌属比例)来改善肠道微生态平衡, 进而优化消化功能与营养吸收效率。其高吸附特性可结合胆固醇、脂肪及糖类, 延缓碳水化合物消化速率以稳定血糖, 并通过抑制胆固醇吸收(依赖植物甾醇、多酚及黄酮类活性成分)降低血脂浓度, 协同减轻代谢负担。同时, 纤维膨胀性可增强饱腹感以减少能量摄入, 而发酵代谢过程可能提升能量消耗, 双重作用助力体重控制。此外, 甘蔗渣中的抗炎抗氧化成分(如多酚、黄酮)能抑制炎症因子与氧化应激, 减少脂肪沉积及代谢紊乱, 综合发挥抗肥胖、护心血管及促代谢健康的多重效益, 在动物模型中已观察到其提升消化率、降低料重比等应用潜力[7][14][15][18][19]。

本研究结果表明, 甘蔗渣、不溶性甘蔗纤维和可溶性甘蔗纤维没有显著改变高脂膳食背景下大鼠的体重增长, 全甘蔗组体重增幅最小。这与张倩倩等人的研究结果相似, 柚皮不溶性膳食纤维和果胶可以有效预防高脂饮食所导致的小鼠体质量增加[16]。全甘蔗组体重增幅最小可能是因为富含膳食纤维、矿物质及维生素等其他营养物质, 调节体重的效果会比分别单独添加不溶性甘蔗纤维、可溶性甘蔗纤维、甘蔗渣干预好一些。

在摄食量方面, 前期(1~12 天)对照组摄食量显著高于所有处理组, 其中全甘蔗组前 4 天抑制效果最明显, 但甘蔗渣组摄食量仍高于其他纤维组。中期(12~21 天)全甘蔗组与对照组摄食量趋近, 其余处理组仍显著低于对照组, 模型组在 21 天后出现短暂摄食量反弹。后期(21~45 天)对照组持续维持高摄食量, 模型组中期反超后回落, 甘蔗渣组抑制效果减弱, 而纤维组长期效果更稳定。这与刘丽萍的研究结果相似[20], 模型组由于喂养高脂饲料能量密度高动物需摄入更少的量即可满足能量需求。所有处理组均能显著抑制摄食量, 但甘蔗渣组效果较弱且波动, 可溶性/不溶性纤维组抑制作用更持久。甘蔗成分短期抑制显著, 长期效果下降; 模型组中期反弹提示代谢适应性可能与肥胖机制相关。与对照组稳定的高摄食量

相比, 甘蔗纤维类成分在长期控食中更具潜力。

不溶性甘蔗纤维显著增加总脂肪、皮下脂肪、甲状腺下脂肪、腹股沟脂肪及肠系膜脂肪的沉积, 这可能与通过延缓消化或者影响肠道菌群促进脂肪积累有关, 与王璐璐等人的研究结果相似[21]。可溶性纤维组对脂肪积累的影响显著低于不溶性纤维组, 这可能与通过增强饱腹感或调节代谢抑制脂肪沉积有关[22]。全甘蔗组与甘蔗渣组对脂肪沉积的影响较弱, 可能因其纤维结构未被充分提取或生物利用率较低。模型组盲肠长度显著短于对照组, 这可能是由于高脂饮食显著缩短小肠和结肠长度, 并减少盲肠重量[23]。甘蔗渣组盲肠长度显著短于对照组、全甘蔗组及不溶性甘蔗纤维组, 这可能是由于不溶性膳食纤维可以通过加速肠道转运、改变微生物代谢(部分不溶性纤维可被盲肠微生物发酵产生短链脂肪酸如丁酸)及触发进化适应性机制, 可能导致盲肠长度缩短[24]。可溶性纤维组盲肠长度与甘蔗渣组、模型组无差异, 过高的纤维会减低消化率, 从而影响盲肠结构[25]。全甘蔗和可溶性纤维可能在实验早期(第 18 天)通过延缓葡萄糖吸收或增强胰岛素敏感性改善血糖动态, 但未显著改变整体糖耐量。这与赵曼曼的研究结果相似[26], 甘蔗纤维的调控作用可能随干预时间延长减弱。

本研究首次建立了系统性采集全身各部位脂肪组织的方法, 基本覆盖了大鼠所有主要脂肪库。通过获取全面的脂肪库重量数据, 可为定量分析营养干预对脂肪组织的宏观影响提供重要依据。该方法具有较高的成本效益, 具备良好的实验应用与推广价值。鉴于营养干预可能对全身多器官系统产生广泛影响[27][28][29][30], 开展多器官系统、多指标的全面评估, 将有助于更客观、系统地解析营养干预的效应机制。

5. 结论与展望

可溶性甘蔗纤维通过抑制脂肪沉积与短期血糖调控展现抗肥胖潜力, 而不溶性甘蔗纤维可能增加代谢风险。本研究为甘蔗渣纤维在肥胖干预中的差异化应用提供了实验依据, 未来需结合代谢标志物与肠道菌群深入解析其机制。本研究初步确定了甘蔗渣的安全性和临床应用前景, 但甘蔗渣作为食品原料单独使用其口感和味道需要优化, 可考虑与其他原料联合应用开发保健功能食品。

基金项目

广西中医药大学校级重点项目(2021ZD004)。

参考文献

- [1] 张丽娜, 潘琦. 肥胖及相关疾病的研究进展[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2025, 17(1): 86-87.
- [2] Arndt, M.B., Abate, Y.H., Abbasi-Kangevari, M., Abd ElHafeez, S., Abdelmasseh, M., Abd-Elsalam, S., *et al.* (2024) Global, Regional, and National Progress towards the 2030 Global Nutrition Targets and Forecasts to 2050: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, **404**, 2543-2583. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(24\)01821-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)01821-x)
- [3] Chooi, Y.C., Ding, C. and Magkos, F. (2019) The Epidemiology of Obesity. *Metabolism*, **92**, 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2018.09.005>
- [4] 马静, 杨维杰, 罗蕾. 肥胖发病机制与中西医治疗研究进展[J]. 亚太传统医药, 2025, 21(3): 246-250.
- [5] 史志瑛. 膳食纤维对人体疾病作用的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(2): 40-46.
- [6] 庞彩卫, 周芹. 糖料副产物的加工利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(24): 17-22.
- [7] 赖安强, 金亚东, 陈彬龙, 等. 发酵甘蔗渣对肉牛生长性能、养分表观消化率、瘤胃发酵特性和瘤胃菌群的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(3): 1685-1697.
- [8] 杨佳桦, 王亮, 郭灿, 等. 蔗渣应用研究进展[J]. 中外能源, 2025, 30(3): 77-84.
- [9] Waddell, I.S. and Orfila, C. (2023) Dietary Fiber in the Prevention of Obesity and Obesity-Related Chronic Diseases: From Epidemiological Evidence to Potential Molecular Mechanisms. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,

- 63, 8752-8767. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2061909>
- [10] Aljutaily, T., Elbeltagy, A., Ali, A.A., Gadallah, M.G.E. and Khalil, N.A. (2022) Anti-Obesity Effects of Formulated Biscuits Supplemented with Date's Fiber; Agro-Waste Products Used as a Potent Functional Food. *Nutrients*, **14**, Article 5315. <https://doi.org/10.3390/nu14245315>
- [11] Dayib, M., Larson, J. and Slavin, J. (2020) Dietary Fibers Reduce Obesity-Related Disorders: Mechanisms of Action. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, **23**, 445-450. <https://doi.org/10.1097/mco.0000000000000696>
- [12] 曹惠华, 李浩洋, 聂梅, 等. 蔗渣膳食纤维固体饮料配方研究[J]. 饮料工业, 2013, 16(7): 27-29.
- [13] 张志平, 吴怡, 吴铁, 等. 黄芪、甘蔗渣膳食纤维饼干对血糖生成指数的影响[J]. 临床和实验医学杂志, 2007, 6(7): 50-51.
- [14] 柴修杰. 发酵甘蔗渣对肉鸭生长性能、血清生化指标及肠道形态的影响[J]. 中国饲料, 2024(6): 64-67.
- [15] 岳海林, 陈慧婵, 管文菲, 等. 甘蔗渣和菠萝渣对黑水虻幼虫生长发育和肠道微生物的影响[J]. 环境昆虫学报, 2024, 46(5): 1245-1254.
- [16] 张倩倩, 袁林, 王雪儿, 等. 柚皮纤维调节高脂饮食小鼠血脂与肥胖及其与肠道菌群的关系[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 131-139.
- [17] Zhou, A.L., Hergert, N., Rompato, G. and Lefevre, M. (2015) Whole Grain Oats Improve Insulin Sensitivity and Plasma Cholesterol Profile and Modify Gut Microbiota Composition in C57BL/6J Mice. *The Journal of Nutrition*, **145**, 222-230. <https://doi.org/10.3945/jn.114.199778>
- [18] Huang, R., Zhang, B., Wang, J., Zhao, W., Huang, Y., Liu, Y., *et al.* (2024) Effect of Dietary Sugarcane Bagasse on Reproductive Performance, Constipation, and Gut Microbiota of Gestational Sows. *Animals*, **14**, Article 2523. <https://doi.org/10.3390/ani14172523>
- [19] 张智, 闫建英, 冯丽荣, 等. 响应面法优化发酵蔗渣制备膳食纤维工艺及结构特性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 176-184.
- [20] 刘丽萍. 不同杂粮中可溶性膳食纤维对肥胖小鼠的干预作用[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [21] 王璐璐, 张名位, 叶佳敏, 等. 沙田柚果肉可溶和不溶性膳食纤维对肠道菌群的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(20): 4119-4129.
- [22] 尚学钰, 美合日班, 苏玲, 等. 黑木耳可溶性膳食纤维功能特性和降脂活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 112-121.
- [23] Ageeli, R.Y., Sharma, S., Puppa, M., Bloomer, R.J., Buddington, R.K. and van der Merwe, M. (2023) Fasting Protocols Do Not Improve Intestinal Architecture and Immune Parameters in C57BL/6 Male Mice Fed a High Fat Diet. *Medicines*, **10**, Article 18. <https://doi.org/10.3390/medicines10020018>
- [24] Liu, T., Zhen, X., Lei, H., Li, J., Wang, Y., Gou, D., *et al.* (2024) Investigating the Physicochemical Characteristics and Importance of Insoluble Dietary Fiber Extracted from Legumes: An In-Depth Study on Its Biological Functions. *Food Chemistry: X*, **22**, Article 101424. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101424>
- [25] Pu, G., Hou, L., Du, T., Zhou, W., Liu, C., Niu, P., *et al.* (2023) Increased Proportion of Fiber-Degrading Microbes and Enhanced Cecum Development Jointly Promote Host to Digest Appropriate High-Fiber Diets. *mSystems*, **8**, e0093722. <https://doi.org/10.1128/msystems.00937-22>
- [26] 赵曼曼. 亚麻籽粕膳食纤维对肥胖小鼠糖脂代谢的影响及其机制研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [27] Ye, Y., Deng, Y., Yi, R., *et al.* (2025) Anthocyanin-Enriched Purple Potato Flour Modulates Gut Microbiota and Short-Chain Fatty Acids to Prevent Hypertension: Insights from Preclinical Models and Mendelian Randomization Analysis. *Food Function*, **16**, 8359-8377. <https://doi.org/10.1039/D5FO03028E>
- [28] Zhou, A.L. and Ward, R.E. (2019) Milk Polar Lipids Modulate Lipid Metabolism, Gut Permeability, and Systemic Inflammation in High-Fat-Fed C57BL/6J ob/ob Mice, a Model of Severe Obesity. *Journal of Dairy Science*, **102**, 4816-4831. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15949>
- [29] Zhou, A.L. and Ward, R.E. (2024) Dietary Milk Polar Lipids Modulate Gut Barrier Integrity and Lipid Metabolism in C57BL/6J Mice during Systemic Inflammation Induced by Lipopolysaccharide. *Journal of Dairy Science*, **107**, 7578-7593. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24759>
- [30] Zhou, A.L. and Ward, R.E. (2024) Dietary Milk Phospholipids Increase Body Fat and Modulate Gut Permeability, Systemic Inflammation, and Lipid Metabolism in Mice. *Journal of Dairy Science*, **107**, 10190-10202. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25235>