米糠脂肪烷醇对高脂高胆固醇日粮诱导大鼠脂质代谢的调节作用

胡林芳，王汝霞，涂越，郭雄昌，翟振亚，曾维荣，蔡力创，刘建平*

（江西省科学院生物制造研究所，江西南昌 330096）

摘要：为明确米糠脂肪烷醇（Policosanol From Rice Bran, PS）调节脂质代谢的效果，本研究采用细胞实验与动物实验对其开展系统研究：以油酸和棕榈酸诱导建立人正常肝细胞（L02 细胞）高脂模型，以高脂高胆固醇（High-Fat And High-Cholesterol, HFC）日粮诱导建立雄性 SD 大鼠高脂高胆固醇模型，分别给予不同剂量 PS 干预，检测脂质代谢相关指标。结果显示，PS 可显著降低 L02 细胞内甘油三酯（Triglyceride, TG）、总胆固醇（Total Cholesterol, TC）含量及脂质沉积；在 HFC 大鼠模型中，8 mg·kg^{-1} PS 可显著降低体质量（14.25%）、空腹血糖，改善葡萄糖耐量，减少皮下 / 腹部 / 棕色脂肪及肝脏重量，降低血清中 TG（67.57%）、TC（68.24%），降低肝脏中 TG（32.93%）、TC（21.43%），升高血清中高密度脂蛋白胆固醇（High-Density Lipoprotein Cholesterol, HDL-C）（59.57%），降低血清中低密度脂蛋白胆固醇（Low-Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C）（73.39%），并提高肝脏超氧化物歧化酶（Superoxide Dismutase, SOD）活性。结论：PS 对高脂高胆固醇诱导的细胞及动物模型具有改善脂质沉积、减轻体质量、降低血糖、调节血脂及保护肝脏（减轻肝脏脂质沉积、增强抗氧化能力）的作用，为其在食品药品领域的应用提供了实验依据。

关键词：米糠脂肪烷醇；脂质代谢；降血脂；肝脏保护

文章编号：1673-9078(2026)10-99-108 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1149

Regulatory Effect of Policosanol from Rice Bran on Lipid Metabolism in Rats Induced by High-fat and High-cholesterol Diet

HU Linfang, WANG Ruxia, TU Yue, GUO Xiongchang, ZHAI Zhenya, ZENG Weirong, CAI Lichuang, LIU Jianping*

(Institute of Bio-Manufacturing, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: To elucidate the regulatory effects of policosanol from rice bran (PS) on lipid metabolism, a systematic investigation was conducted through cell and animal experiments. A high-fat model was established in the human normal hepatocyte cell line (L02 cells) by treatment with oleic acid and palmitic acid, while a high-fat and high-cholesterol model was established in male SD rats with a high-fat and high-cholesterol (HFC) diet. Different doses of PS were administered, and lipid metabolism-related parameters were measured. The results showed that intracellular triglyceride (TG) and total cholesterol (TC) levels, as well as lipid accumulation, significantly decreased in L02 cells by PS treatment. In the HFC rat model, administration of 8 mg·kg^{-1} PS significantly reduced body weight (by 14.25%) and fasting blood glucose levels, while improving glucose tolerance. A marked decrease was observed in subcutaneous/abdominal/brown adipose tissue and liver weight. Serum TG and TC levels decreased by 67.57% and 68.24%, respectively, with corresponding decreases of 32.93% and 21.43% in liver TG and TC content. Furthermore, serum high-density lipoprotein cholesterol increased by 59.57%, whereas serum low-density lipoprotein cholesterol decreased by 73.39%. Additionally, liver superoxide dismutase activity was significantly enhanced. In conclusion, PS improved lipid accumulation, reduced body weight, lowered blood glucose levels, regulated blood lipid levels, and protected the liver (by alleviating

收稿日期：2025-08-13；修回日期：2025-09-25；接受日期：2025-10-15

基金项目：国家自然科学基金项目（32260593）；江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目（20223BBH80008）

作者简介：胡林芳（1996-），女，硕士，实习研究员，研究方向：食品科学，E-mail：18279181539@163.com

通讯作者：刘建平（1983-），男，硕士，研究员，研究方向：天然产物化学研究，E-mail：stephenlau1983@foxmail.com

liver lipid accumulation and enhancing antioxidant capacity) in high-fat and high-cholesterol-induced cell and animal models, thus providing experimental evidence for its application in food and pharmaceutical fields.

Key words: policosanol from rice bran; lipid metabolism; blood lipid-lowering; liver protection

引文格式：

胡林芳,王汝霞,涂越,等.米糠脂肪烷醇对高脂高胆固醇日粮诱导大鼠脂质代谢的调节作用[J].现代食品科技,2026,42(10):99-108.

HU Linfang, WANG Ruxia, TU Yue, et al. Regulatory effect of policosanol from rice bran on lipid metabolism in rats induced by high-fat and high-cholesterol diet [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 99-108.

随着当前饮食结构的变化，高脂肪、高糖饮食导致的肥胖及脂质代谢紊乱已成为威胁公众健康的重要问题[1,2]。肥胖易引起高脂血症、高血糖及非酒精性脂肪肝等并发症的发生[3-8]，为应对这一系列健康问题，国家卫健委已于 2024 年 6 月联合 16 部门印发《“体重管理年”活动实施方案》。在此背景之下，如何预防肥胖的发生并调节血脂异常和高血糖已成为当下的人们关注的热点。目前调节脂质代谢紊乱的治疗方法存在治疗效果有限、安全性不足等局限性[9,10]，因此，挖掘天然产物中高效安全的活性成分用于改善脂质代谢紊乱成为当下的研究热点。

我国是农业大国，米糠资源非常丰富，但根据当前的数据显示 2021 年我国米糠资源的利用率低于 20%，造成了米糠资源的浪费[11]。国务院发布的《关于加快推进农业供给侧结构性改革大力发展粮食产业经济的意见》、《关于坚持以高质量发展为目标加快建设现代化粮食产业体系的指导意见》等政策，鼓励粮食副产物包括米糠、麦麸等精深加工及综合利用，提高附加值和综合效益。米糠脂肪烷醇（Policosanol From Rice Bran, PS）是米糠资源的主要加工副产物之一米糠蜡的高附加值成分，已于 2017 年被国家卫健委列为新资源健康食品[7]，主要由二十二烷醇（C_{22}）、二十四烷醇（C_{24}）、二十六烷醇（C_{26}）、二十八烷醇（C_{28}）及三十烷醇（C_{30}）等高级脂肪烷醇组成，主要成分为 C_{28}[8,12]。PS 通常呈现为白色粉末或鳞片状晶体，溶于有机溶剂，不溶于水[13]。现已有研究证实 PS 具有增强耐力、抗疲劳、降血脂、护肝等生理功能[12,14-19]，在食品与药品领域应用前景广阔。

PS 中 C_{28} 的含量并非越高其生理功效就越好，需要和其它高级脂肪烷醇按照一定的质量比例构成特征指纹图谱时，才能达到最佳的生理功效[11]。此外，C_{28} 与其它高级脂肪烷醇按不同质量比例构成特征指纹图谱时生理功效存在不同。为初步研究 PS 的指纹图谱与其生理功效的关系，及明确 PS 的降脂调节作用，本研究通过选用人正常肝细胞（L02 细胞）和 SPF 级雄性 SD 大鼠为实验细胞和动物，系统探究其对高脂模型的干预效果，为其在食品药品中的潜在应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

米糠蜡，高安市清河油脂有限公司；米糠脂肪烷醇（质量分数为 0.11% C_{22}、0.84% C_{24}、1.97% C_{26}、67.95% C_{28}、12.52% C_{30}），实验室分离、乳化；人正常肝细胞（L02 细胞）属由 SV40 病毒大 T 抗原永生化的人正常肝细胞株，南昌大学惠赠；RPMI 1640，上海达特希尔生物科技有限公司；Oil Red O solution，Sigma-Aldrich；CCK-8，Glpbio Technology；甘油三酯、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇测试盒，南京建成生物工程研究所；谷丙转氨酶活性测定试剂盒、谷草转氨酶活性测定试剂盒、超氧化物歧化酶试剂盒、丙二醛含量试剂盒，苏州科铭生物技术有限公司。

Agilent 7890B GC 系统，美国 Agilent；WJ-80B-Ⅲ CO2 细胞培养箱，上海新苗医疗器械制造有限公司；CKX53 显微镜，日本奥林巴斯；ST-360 酶标仪，上海科华生物工程股份有限公司；安稳 + 血糖仪，三诺生物传感股份有限公司。

1.2 实验动物与日粮

30 只 6 周龄 SPF 级雄性 SD 大鼠，体质量（200±5）g，购自湖南斯莱克景达实验动物有限公司［许可证号：SCXK（湘）2019-0004］，饲养于清洁级动物房。动物实验经江西省科学院生物资源研究所动物伦理委员会批准（批准号：2025-66）。

基础饲料（对照组，饲料配方质量分数为 19% 酪蛋白 +33% 玉米淀粉 +16% 葡萄糖 +9% 蔗糖 +8% 麦芽糊精 +2% 大豆油 +2% 猪油 +11% 其它）；高脂高胆固醇（High-Fat And High-Cholesterol，HFC）饲料（高脂高胆固醇组、PS 低剂量组、PS 中剂量组、PS 高剂量组，饲料配方质量分数为 83% 基础饲料 +15% 棕榈油 +2% 胆固醇，用于高脂高胆固醇大鼠模型的构建）。

1.3 试验方法

1.3.1 米糠脂肪烷醇的制备与检测

1.3.1.1 米糠脂肪烷醇的制备

10 kg 米糠蜡，3 倍体积无水乙醇、7 倍体积 200 号溶剂油、0.12 倍质量的氢氧化钠，加热至沸，搅拌回流反应 4 h，5 倍体积热水洗 3 次，除下层水相，洗至 pH 值≈ 7，上层清液冷却过夜，真空抽滤，得滤饼，滤饼脱溶、烘干，得米糠蜡皂化粗醇；压力 50~100 Pa、釜温度 210~260 ℃、回流比 4:1~10:1，精馏粗醇，收集塔顶温度 234~236 ℃的馏分，得 PS。

1.3.1.2 米糠脂肪烷醇的检测

分别精确称取 C_{22}、C_{24}、C_{26}、C_{28}、C_{30} 标准品，以及 PS 各 5 mg，溶于正己烷中，用 10 mL 容量瓶定容，制得质量浓度为 500 μg·mL^{-1} 的溶液备用。将制备好的样品溶液注入 Agilent 7890B GC 系统，配氢火焰离子化检测器。色谱分离采用 Agilent DB-5HT（30 m×320 μm×0.1 μm）柱；柱温：260 ℃保持 1 min，5 ℃·min^{-1} 速度升至 300 ℃，保持 11 min；气化室温度：300 ℃；检测器温度：300 ℃；氮气流量：25.0 mL·min^{-1}；氢气流速：30.0 mL·min^{-1}；空气流量：400 mL·min^{-1}；进样量：1 μL；分流比：10:1；以高级脂肪烷醇标准品定性，采用面积归一法计算各峰的质量百分含量。PS 的气相图谱如图 1 所示：

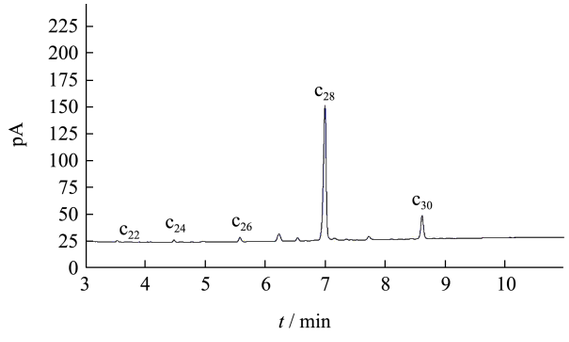


图 1 米糠脂肪烷醇的气相图谱

Fig.1 Gas chromatogram of policosanol from rice bran

1.3.2 细胞实验

1.3.2.1 米糠脂肪烷醇的乳化

精确称取 50 mg PS 和 125 mg 乳化剂吐温 80，准确量取 7.5 mL 无水乙醇，一起水浴加热溶解 2 min 后倒入 40 mL 沸水中继续水浴加热 2 min 后，高压灭菌，50 mL 容量瓶定容后备用。

1.3.2.2 L02细胞培养与传代

L02 细胞用含体积分数 10% 胎牛血清的 RPMI 1640 培养基培养，当 L02 细胞长至体积分数为 80% 时进行细胞传代培养。

1.3.2.3 L02细胞高脂模型的建立

L02 细胞高脂模型的建立参照王成等[20]的文献报道，L02 细胞长到体积分数为 80% 时，分为 2 组：对照组、高脂组。对照组采用基础培养基，高脂组在基础培养基的基础上添加不同浓度的油酸和棕榈酸（Oleic Acid And Palmitic Acid，OA+PA，摩尔比为 2:1，浓度为 0.3、0.6、0.9、1.2 mmol·L^{-1}），处理 24 h 后，采用 cck-8 法检测 L02 细胞的细胞活性，油红 O 染色观察 L02 细胞脂质沉积的情况。

1.3.2.4 米糠脂肪烷醇对L02细胞TG、TC和细胞内脂质沉积的影响

L02 细胞长至体积分数为 80% 时，分为 3 组：对照组、高脂组和米糠脂肪烷醇组。对照组采用基础培养基；高脂组在基础培养基的基础上添加 OA+PA（浓度为 0.3 mmol·L^{-1}）；米糠脂肪烷醇组在高脂组培养基的基础上添加米糠脂肪烷醇（质量浓度为 100 μg·mL^{-1}），继续培养 24 h，试剂盒测定甘油三酯（Triglyceride, TG0 和总胆固醇（Total Cholesterol, TC）含量，油红 O 染色观察 L02 细胞脂质沉积的情况。

1.3.3 动物实验

1.3.3.1 米糠脂肪烷醇的乳化

精确称取 0.5~2 g PS 和 5 g 乳化剂吐温 60，准确量取 10 mL 无水乙醇，一起水浴加热溶解后倒入 1 L 沸水中，加入 1 g 黄原胶，80 ℃水浴搅拌 3~4 h 后，1 L 容量瓶定容，放冰箱 4 ℃保存备用。

1.3.3.2 大鼠饲养与分组

大鼠高脂高胆固醇模型的建立参照王成等[20]的文献报道，30 只大鼠随机分为 5 组（n=6）：对照组（基础饲料 + 乳化剂灌胃）、高脂高胆固醇组（HFC 饲料 + 乳化剂灌胃）、PS 低剂量组（HFC 饲料 +2 mg·kg^{-1} PS 灌胃）、PS 中剂量组（HFC 饲料 +4 mg·kg^{-1} PS 灌胃）、PS 高剂量组（HFC 饲料 +8 mg·kg^{-1} PS 灌胃），连续饲养 10 周。

1.3.3.3 大鼠实验指标检测

每周对各组大鼠进行称重并记录各组大鼠的采食量；第 10 周检测各组大鼠的空腹血糖、葡萄糖耐量并计算曲线下面积（AUC）；称量各组皮下脂肪、腹部脂肪、棕色脂肪、肝脏及其他脏器重量；检测各组大鼠的血清指标：TG、TC、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）；检测各组大鼠的肝脏指标：TG、TC、超氧化物歧化酶（Superoxide Dismutase, SOD）、丙二醛（Malondialdehyde, MDA）、谷丙转氨酶（Alanine Aminotransferase, ALT）、谷草转氨酶（Aspartate

Aminotransferase, AST）。

1.4 数据统计分析

采用数据分析软件 SPSS 17.0 进行单因素方差分析，以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义，结果以“平均值 ± 标准误差”表示。采用作图软件 GraphPad Prism 9.0 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 细胞试验结果

2.1.1 L02细胞高脂模型的建立

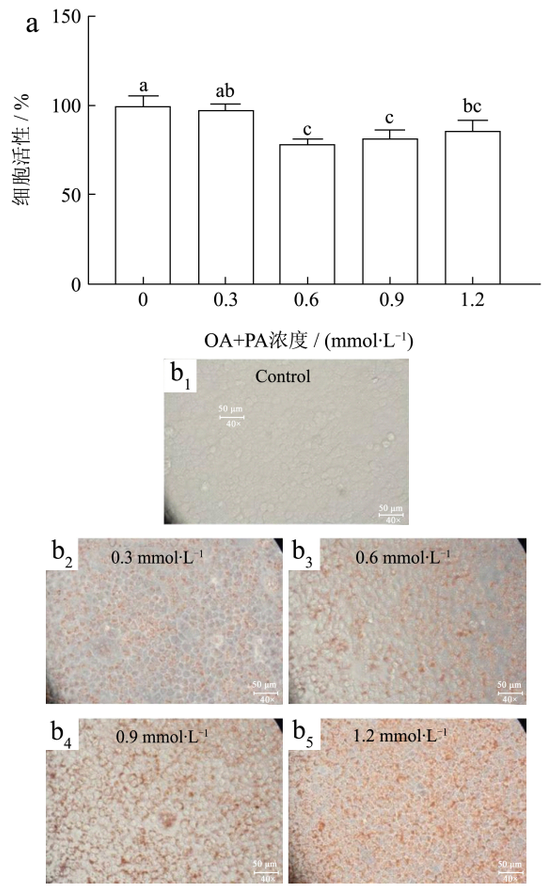


图 2 不同浓度的油酸和棕榈酸对 L02 细胞活性和脂质沉积的影响

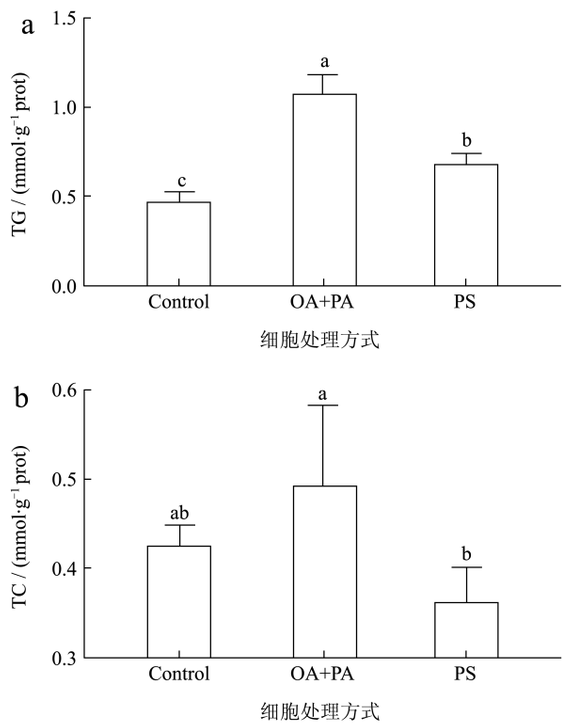
Fig.2 Effects of different concentrations of oleic acid and palmitic acid on L02 cell viability and lipid deposition

注：0：对照组。图中不同字母表示差异显著性（$P<0.05$）。图 b 采用油红 O 染色，放大倍数为 40 倍。图中所示图像为该组的代表性照片。对照组个体间存在轻微差异，但整体脂质沉积水平显著低于模型组。

采用浓度为 0.3~1.2 mmol·L^{-1} OA+PA 处理 L02 细胞后可以发现，浓度为 0.3 mmol·L^{-1} OA+PA 处理后，L02 细胞活性无显著下降（$P>0.05$，图 2a）。油红 O 染色液使细胞脂质着红色，颜色分布和程度可观察脂质沉积情况。图 2b 显示采用浓度为 0.3~1.2 mmol·L^{-1} OA+PA 处理 L02 细胞后，L02 细胞红色的着色程度随 OA+PA 的浓度增加而逐渐增加，这说明 OA+PA 使 L02 细胞脂质沉积程度逐渐增加，表明 L02 细胞高脂模型构建成功，结合 OA+PA 浓度对 L02 细胞活性的影响，最终确定浓度 0.3 mmol·L^{-1} 为 L02 细胞高脂模型建模浓度。

2.1.2 米糠脂肪烷醇对L02细胞内TG、TC和脂质沉积的影响

与高脂组（TG:1.07 mmol·g^{-1} prot、TC:0.49 mmol·g^{-1} prot）相比，PS 干预组（TG:0.68 mmol·g^{-1} prot、TC:0.36 mmol·g^{-1} prot）L02 细胞内 TG、TC 含量显著降低 36.45%、26.53%（$P<0.05$，图 3a、3b），同时，油红 O 染色显示 PS 干预组的 L02 细胞脂质沉积相比于高脂组存在明显的减少（图 3c）。这说明米糠脂肪烷醇可显著降低 L02 细胞内 TG、TC 含量并明显改善 L02 细胞内脂质沉积的情况。



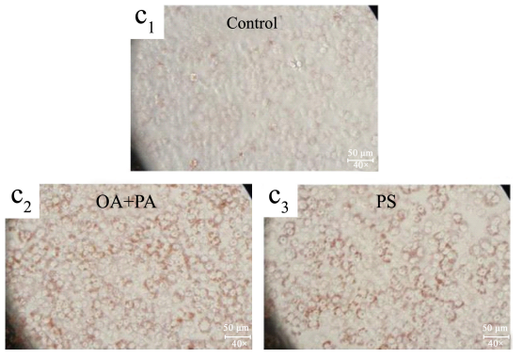


图 3 米糠脂肪烷醇对 L02 细胞内 TG、TC 和脂质沉积的影响

Fig.3 Effects of policosanol from rice bran on TG, TC, and intracellular lipid deposition in L02 cells

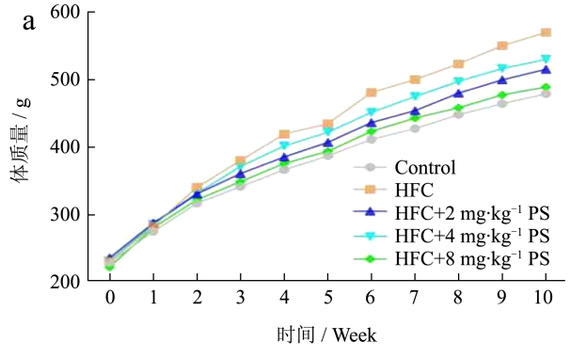
注：图中不同字母表示差异显著性（$P<0.05$）。图 b 采用油红 O 染色，放大倍数为 40 倍。图中所示图像为该组的代表性照片。对照组个体间存在轻微差异，但整体脂质沉积水平显著低于模型组。

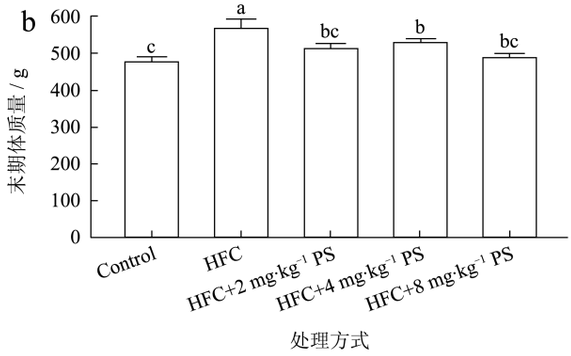
2.2 动物试验结果

2.2.1 米糠脂肪烷醇对大鼠生长性能的影响

实验初期各组大鼠的体质量没有存在明显的差异，从实验的第 2 周开始各组大鼠之间的体质量开始出现差异，这种体质量的差异一直持续到实验末期，同时，各组大鼠的体质量均一直呈现出增长的趋势（图 4a）。在实验末期，与对照组相（478.75 g）比，高脂高胆固醇组（569.92 g）体质量显著增加 19.04%（$P<0.05$）；与高脂高胆固醇组相比，PS 高剂量组（488.72 g）体质量显著降低 14.25%（$P<0.05$），且与高脂高胆固醇组相比，PS 高剂量组的日采食量显著降低（$P<0.05$）（图 4b、4c）。

有研究表明普利醇减轻体质量作用可能与其可以抑制食欲、减少能量摄入有关[21]。Kamchonemenukoo 等[22]的研究表明，二十八烷醇可以对高脂饮食导致的体质量增加起到显著的抑制作用。本研究结果也表明 PS 可以有效降低高脂高胆固醇饮食大鼠的日采食量，从而显著降低高脂高胆固醇大鼠的体质量（由 569.92 g 降低至 488.72 g）。





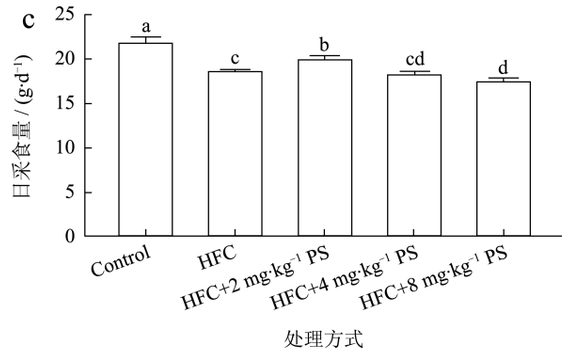


图 4 米糠脂肪烷醇对大鼠生长性能的影响

Fig.4 Effects of policosanol from rice bran on growth performance in rats

注：图中不同字母表示差异显著性（$P<0.05$）。下图同。

2.2.2 米糠脂肪烷醇对大鼠血糖的影响

高脂高胆固醇组（5.13 mmol·L^{-1}）空腹血糖较对照组（4.68 mmol·L^{-1}）升高 9.61%，同时，葡萄糖耐量 AUC 显著增加（$P<0.05$）；PS 高剂量组（4.13 mmol·L^{-1}）空腹血糖显著低于高脂高胆固醇组（$P<0.05$），同时，PS 高剂量组 AUC 与对照组无统计学差异（$P>0.05$）（图 5）。

糖耐量异常是指机体摄入葡萄糖后，血糖急剧上升，长时间未恢复至空腹水平的现象[23]。二十八烷醇可以改善糖耐量可能与其可以增强胰岛素敏感性有关，Ding 等[24]的实验显示，二十八烷醇可以以剂量依赖性方式改善高胆固醇日粮喂养小鼠的空腹血糖、葡萄糖耐量和胰岛素抵抗，可有效缓解高胆固醇日粮对胰岛素敏感性相关基因 mRNA 表达产生的影响。Sharma 等[21]的报道表明，高胆固醇日粮喂养的小鼠血浆胰岛素水平显著升高，表明产生了胰岛素抵抗，普利醇可以有效地减轻了高胆固醇饮食诱导的胰岛素抵抗。本研究的实验结果也进一步证实了 PS 可以有效降低高脂高胆固醇饮食大鼠的空腹血糖（由 5.13 mmol·L^{-1} 降低至 4.13 mmol·L^{-1}），并显著改善高脂高胆固醇饮食大鼠的葡萄糖耐量。

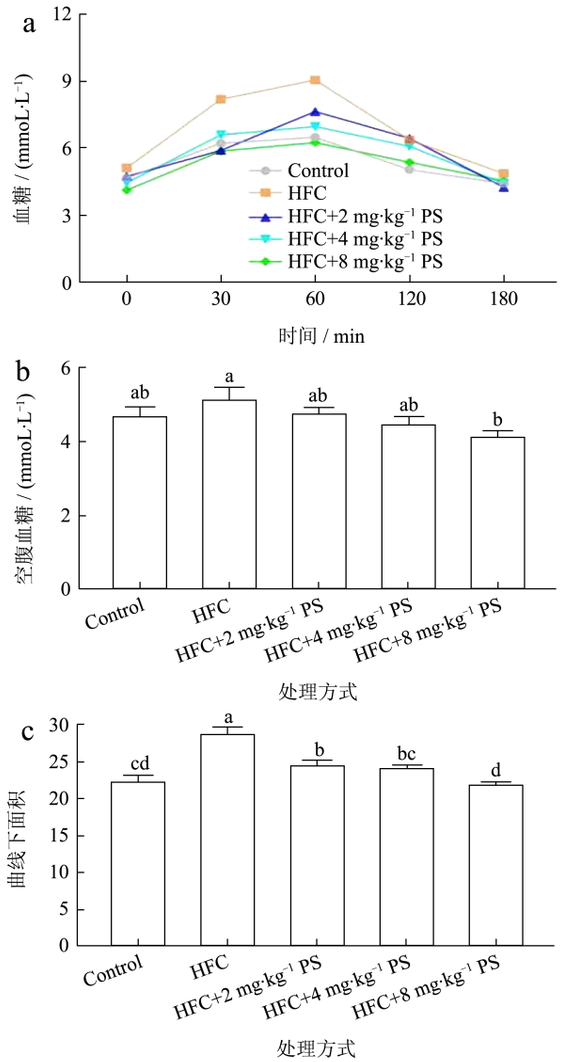


图 5 米糠脂肪烷醇对大鼠血糖的影响

Fig.5 Effects of policosanol from rice bran on blood glucose metabolism in rats

2.2.3 米糠脂肪烷醇对大鼠脂肪与脏器的影响

高脂高胆固醇组大鼠的皮下脂肪、腹部脂肪、棕色脂肪、肝脏及脾脏质量均显著高于对照组大鼠（$P<0.05$）；PS 高剂量组大鼠的上述脂肪组织及脏器质量均降至与对照组大鼠无统计学差异水平（$P>0.05$）（图 6、图 7）。

高脂高胆固醇日粮会导致实验动物脂肪质量的增加。白婕[25]的研究表明，二十八烷醇可以调控高脂饮食引起的小鼠肝脏组织脂代谢关键因子的表达改变，促使脂肪氧化，减少高脂饮食引起的脂肪的增加。Zhai 等[26]研究发现，米糠脂肪烷醇可以显著降低高脂饮食小鼠棕色脂肪组织的质量，降低了肥胖小鼠白色脂肪组织中的脂肪酸合酶，抑制脂肪酸的合成，促进脂肪分解和产热过程，包括三羧酸循环和丙酮酸循环，从而起到减轻脂肪质量的作用。

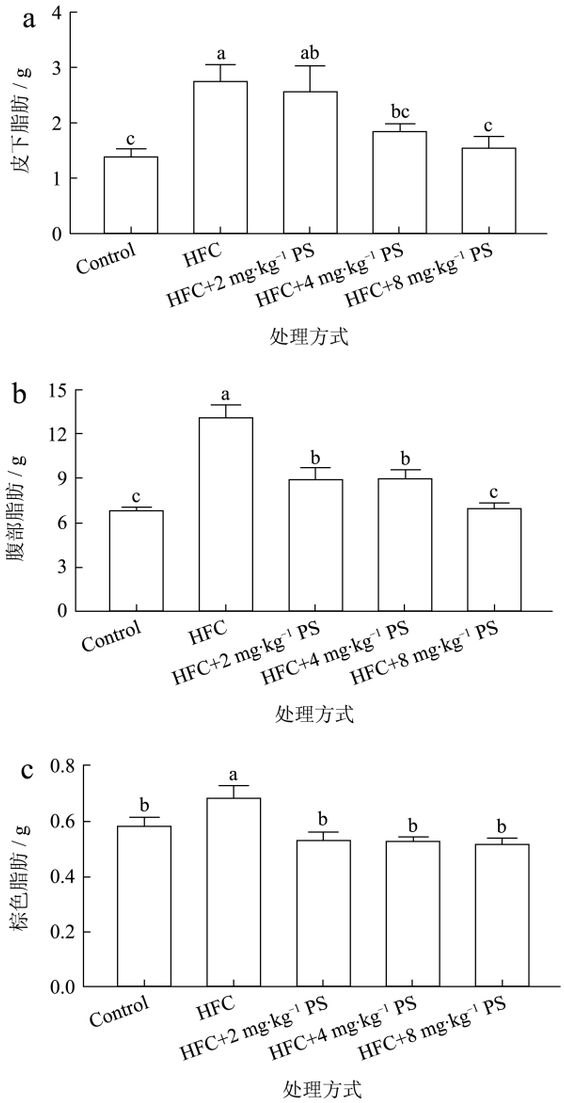


图 6 米糠脂肪烷醇对大鼠脂肪的影响

Fig.6 Effects of policosanol from rice bran on adipose tissue in rats

高脂高胆固醇日粮会导致肝脏质量的增加，主要与摄入高脂高胆固醇日粮会导致甘油三酯在肝脏堆积有关[27,28]。同时，肝脏质量的显著上升将导致肝脏解毒负荷的增加[23]。大量研究发现二十八烷醇能够缓解肝脏损伤。周亚萍[29]的研究发现，给予 CCl_4 诱导的小鼠肝损伤模型二十八烷醇的摄入可以减少肝脏组织和脂肪细胞中的脂滴大小，通过调节脂质代谢相关信号通路表现出降脂的作用，降低酒精饮食导致的小鼠肝脏系数的增加，并显著减缓肥胖对肝脏的损伤。Zhai 等[30]的研究表明米糠脂肪烷醇可以通过调节 AMPK-FXR-TGR5 的相互作用来促进胆汁酸的合成和脂肪分解从而减轻肝脏脂肪堆积对肝脏的损伤。此外，高脂饮食会引发机体的慢性

炎症，而免疫器官脾脏在持续的炎症浸润下会发生一定程度的肿大。白婕[25]的研究表明二十八烷醇可以降低高脂饮食小鼠的脾脏质量。周亚萍[29]的研究表明二十八烷醇可以降低长期饮酒导致的脾脏水肿，减轻小鼠的脾脏炎症。

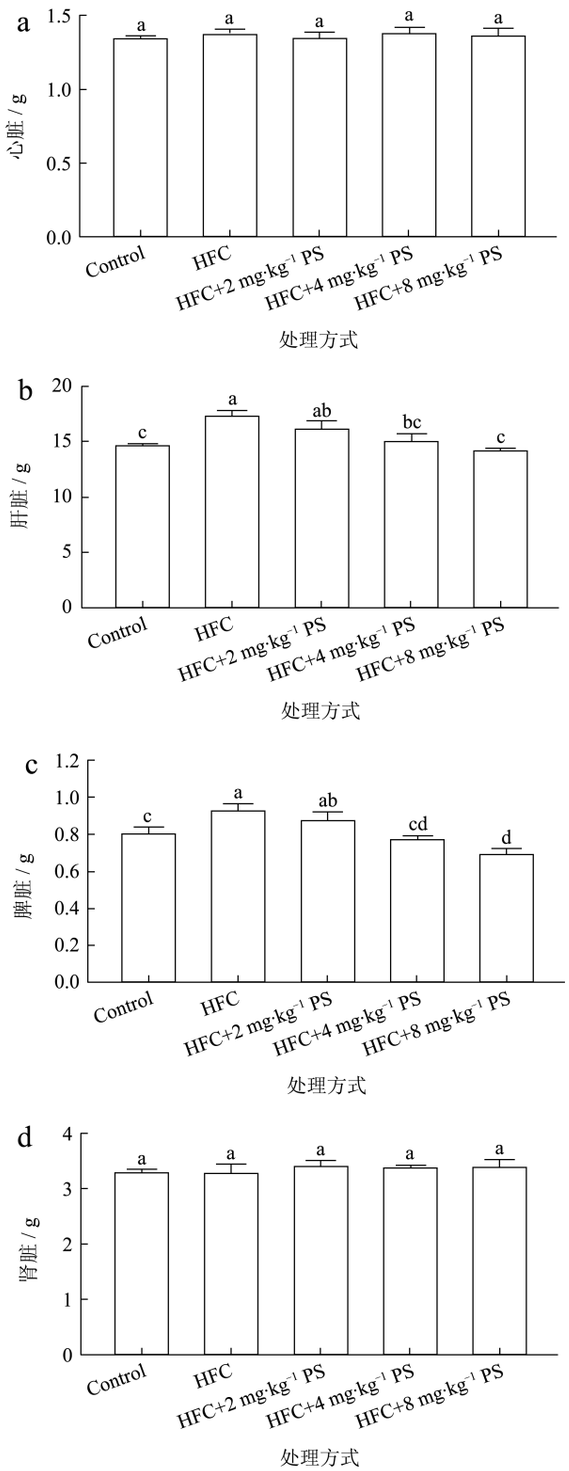


图 7 米糠脂肪烷醇对大鼠脏器的影响

Fig.7 Effects of policosanol from rice bran on visceral organs in rats

通过本研究的实验结果以及上述分析可以说明，PS 能够显著降低大鼠因高脂高胆固醇日粮导致的皮下脂肪、腹部脂肪、棕色脂肪、肝脏及脾脏质量的增加，进一步证明 PS 可以缓解高脂高胆固醇日粮导致的脂肪堆积以及脏器肿大。

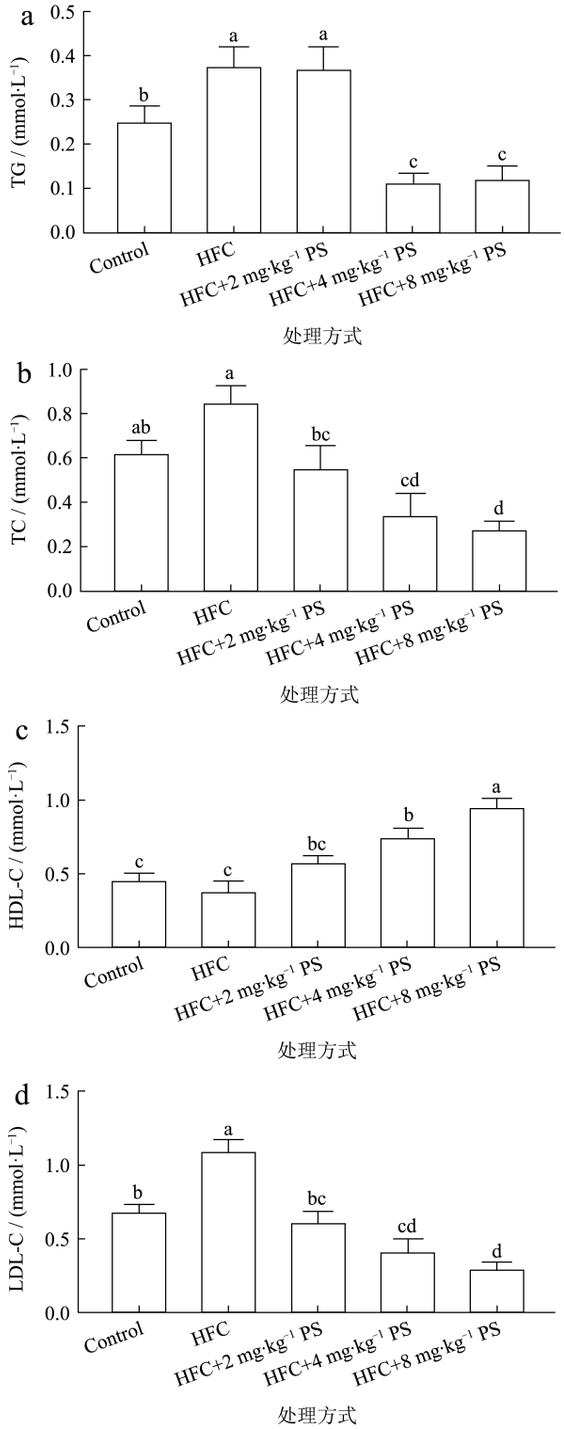


图 8 米糠脂肪烷醇对大鼠血脂水平的影响

Fig.8 Effects of policosanol from rice bran on serum lipid profiles in rats

2.2.4 米糠脂肪烷醇对大鼠血脂水平的影响

与高脂高胆固醇组（TG：0.37 mmol·L^{-1}、TC：0.85 mmol·L^{-1}、HDL-C：0.38 mmol·L^{-1}、LDL-C：1.09 mmol·L^{-1}）相比，PS 高剂量组（TG：0.12 mmol·L^{-1}、TC：0.27 mmol·L^{-1}、HDL-C：0.94 mmol·L^{-1}、LDL-C：0.29 mmol·L^{-1}）血清 TG、TC 分别显著降低 67.57%、68.24%，HDL-C 显著升高 59.57%，LDL-C 显著降低 73.39%（均 $P<0.05$）（图 8）。

高脂高胆固醇日粮促使血清中的 TG、TC 和 LDL-C 升高，HDL-C 降低，从而导致血脂代谢紊乱。杨倩等[31]的研究表明，多廿烷醇（约 60%~70% C_{28}）对胆固醇具有抑制吸收和促进排出的作用，高脂动物摄入多廿烷醇可以使胆固醇的排泄增加，血液中甘油三酯减少。Peng 等[32]的研究表明，在基础饲粮中添加 18~27 mg·kg^{-1} 二十八烷醇（纯度 53.7%）饲养 42 d 之后可以显著降低蛋鸡血清中 TG、TC 和 LDL-C 的含量。Cho 等[33]的研究表明，普利醇的摄入对高胆固醇饮食诱导的高脂血症斑马鱼有显著的血脂改善的效果，可降低高脂血症斑马鱼血清中 TG、TC 和 LDL-C 的含量，提高 HDL-C 的含量。Nam 等[34]的实验发现，在高脂高胆固醇饮食的大鼠日粮中添加 20 mg·kg^{-1} 的普利醇（8.15% C_{26}、65.04% C_{28}、14.64% C_{30}）可以显著降低大鼠血清中 TG、TC 和 HDL-C 的水平（分别由 183.6、160.3、132.6 mg·dL^{-1} 降低至 120.1、105.9、94.5 mg·dL^{-1}）。Lee 等[35]研究发现，在大鼠的高胆固醇饲粮中添加 8 mg·kg^{-1} 普利醇（0.8% C_{24}、9.2% C_{26}、0.9% C_{27}、62.3% C_{28}、0.1% C_{29}、13.3% C_{30}、8.4% C_{32}、1.5% C_{34}）饲喂 6 周可以显著降低大鼠血清中 TG、TC 和 LDL-C 的水平（分别由 101.19、204.93、111.15 mg·dL^{-1} 降低至 35.53、166.04、70.43 mg·dL^{-1}）。Zhai 等[26]的研究显示，高脂饮食小鼠日粮中添加米糠脂肪烷醇（2.48% C_{22}、4.19% C_{24}、4.33% C_{26}、64.16% C_{28}、15.51% C_{30}）可使小鼠血清中 TG、TC 和 LDL-C 显著降低，HDL-C 显著提高。本实验研究结果表明，大鼠在饲喂高脂高胆固醇日粮基础上灌胃 8 mg·kg^{-1} PS（质量分数为 0.11% C_{22}、0.84% C_{24}、1.97% C_{26}、67.95% C_{28}、12.52% C_{30}）可以显著降低高脂高胆固醇大鼠血清中的 TG（由 0.37 mmol·L^{-1} 降低至 0.12 mmol·L^{-1}）、TC（由 0.85 mmol·L^{-1} 降低至 0.27 mmol·L^{-1}）和 LDL-C（由 1.09 mmol·L^{-1} 降低至 0.29 mmol·L^{-1}）的水平，同时可以显著提高 HDL-C（由 0.38 mmol·L^{-1} 升高至 0.94 mmol·L^{-1}）的水平，进一步证实 PS 具有调节血脂代谢紊乱的作用。PS 具有调节血脂代谢紊乱的作用与其可以通过激活腺苷酸激酶途径，调节羟甲基戊二酰辅酶 A 的活性来抑制机体肝脏胆固醇的合成有关[8]。此外，C_{28} 可以通过降低固醇调节元件结合蛋白 2 和低密度脂蛋白受体的活性来抑制胆固醇的合成，这两种蛋白负责胆固醇的摄取等[22]。同时，普利醇还可以通过 AMPK-FXR-TGR5 交互作用促进胆汁酸合成和脂质分解来显著降低肝脏中 TG 和 TC 水平[30]。

与此同时，通过分析 Nam 等[34]、Lee 等[35]、Zhai 等[26]以及本研究的实验结果可以发现，这些实验中所使用的米糠脂肪烷醇其 C_{28} 含量是相近的，且这些实验中的 C_{28} 都与其他高级烷醇进行了配伍，根据分析文献报道以及本研究结论可以发现，以 C_{28} 为主要成分与其他高级烷醇按一定比例构成特定指纹图谱时对血脂代谢紊乱的调节效果是相近的。

2.2.5 米糠脂肪烷醇对大鼠肝脏指标的影响

高脂高胆固醇组（TG：1.64 mmol·g^{-1} prot、TC：1.14 mmol·g^{-1} prot）肝脏 TG、TC 含量显著高于对照组（TG：0.41 mmol·g^{-1} prot、TC：0.07 mmol·g^{-1} prot）（$P<0.05$）；与高脂高胆固醇组相比，PS 高剂量组（TG：1.10 mmol·g^{-1} prot、TC：1.11 mmol·g^{-1} prot）肝脏 TG、TC 分别显著降低 32.93%、21.43%（$P<0.05$，图 9a、9b）。各组间肝脏 ALT、AST 活性及 MDA 含量无显著差异（$P>0.05$，图 9c、9d）。高脂高胆固醇组（13.27 U·mg^{-1} prot）SOD 活性显著低于对照组（16.30 U·mg^{-1} prot）（$P<0.05$），PS 高剂量组（22.56 U·mg^{-1} prot）肝脏 SOD 活性较之高脂高胆固醇组显著升高（$P<0.05$，图 9e、9f）。

脂质代谢紊乱使肝脏 TG 和 TC 蓄积，发生脂肪变性，诱发脂肪肝病，因此 TG 和 TC 含量可反映肝脏病变情况[36]。Zhai 等[30]的研究表明米糠脂肪烷醇可以显著降低了高脂肪饮食诱导的肥胖小鼠肝脏中的 TG（降低 19.29%）和 TC（降低 30.38%）的含量从而减轻肝脏脂肪堆积对肝脏的损伤。ALT 和 AST 作为肝脏中重要的转氨酶是评价肝细胞受损的常用指标[37]。何文森等[16]的研究表明，二十八烷醇对大鼠血清 ALT 和 AST 活性无显著影响，表明其具有良好的安全性，不会损害大鼠的肝功能。此外，Lee 等[38]的实验发现，二十八烷醇能够显著提高肝脏 SOD 活性，表明其能增强肝脏抗氧化能力。本研究表明，PS 能够显著降低高脂高胆固醇大鼠肝脏中 TG（由 1.64 mmol·g^{-1} prot 降低至 1.10 mmol·g^{-1} prot）和 TC（由 1.14 mmol·g^{-1} prot 降低至 1.11 mmol·g^{-1} prot）的含量，对大鼠肝脏 ALT 和 AST 活性无显著影响，同时能够显著提高大鼠肝脏 SOD 活性（由 13.27 U·mg^{-1} prot 提高至 22.56 U·mg^{-1} prot）。

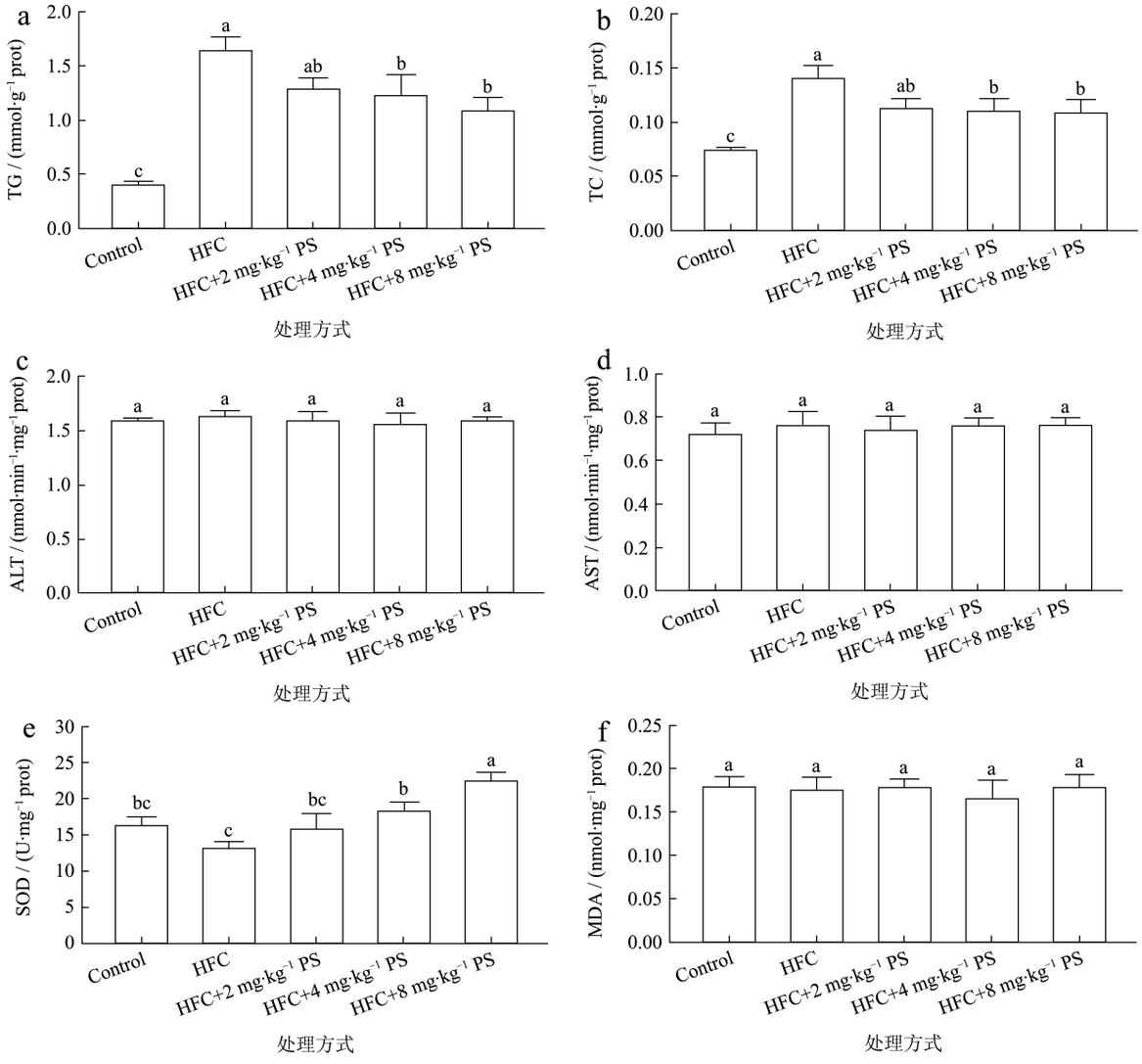


图 9 米糠脂肪烷醇对大鼠肝脏指标的影响

Fig.9 Effects of policosanol from rice bran on hepatic parameters in rats

本研究结果发现 PS 能够显著降低高脂高胆固醇大鼠肝脏中 TG 和 TC 的含量，改善高脂高胆固醇大鼠肝脏的脂质积聚从而达到保护肝脏的作用。此外，本实验发现高脂高胆固醇日粮没有造成 AST、ALT 两个指示肝损伤指标的显著变化。ALT 和 AST 其显著升高通常指示中到重度的肝细胞炎症、坏死或膜通透性改变。本研究的实验结果说明尽管高脂高胆固醇饮食成功诱导了严重的肝脏脂质代谢紊乱，但可能主要处于以脂肪变性为主的早期阶段，尚未引发大规模的肝细胞坏死性损伤。因此，AST、ALT 两个指示肝损伤指标没有发生显著变化，这与何文森等[16]的研究结果有类似之处。

3 结论

通过本研究与其他相关研究的对比分析可以发现，以 C_{28} 为主导成分与其它高级脂肪烷醇按照一定的比例构成特征指纹图谱时，指纹图谱相近的 PS 调节血脂代谢紊乱的效果是相类似的。此外，在本研究的高脂高胆固醇日粮诱导的 SD 大鼠模型中，PS（尤其是高剂量）表现出显著的减轻体质量、降低空腹血糖、调节血脂代谢紊乱（降低 TG、TC、LDL-C，升高 HDL-C）、减少脂肪堆积及保护肝脏（减轻肝脏脂质沉积、增强抗氧化能力）的作用。本研究的实验结果为 PS 在功能食品及降脂药物中的应用提供了重要的实验依据。

此外，本研究主要是观察了 PS 的表型效应，尚未深入探讨其调节脂质代谢的具体分子机制（如 AMPK、SREBP 等关键信号通路）。后续的实验研究可结合转录组学、蛋白组学等技术进行深入分析。

参考文献

[1] LIU D, HAO Y X, ZHAO T Z, et al. Childhood BMI and adult obesity in a Chinese sample: a 13-year follow-up study [J]. Biomed Environ Sci, 2019, 32(3): 162-168.

[2] WU X Y, LIN L, QI H Y, et al. Association between lipoprotein (a) levels and metabolic syndrome in a middle-aged and elderly Chinese cohort [J]. Biomed Environ Sci, 2019, 32(7): 385-477.

[3] TEMPLEMAN J R, HOGAN K, BLANCHARD A, et al. Effect of raw and encapsulated policosanol on lipid profiles, blood biochemistry, activity, energy expenditure and macronutrient metabolism of adult cats [J]. Journal of Feline Medicine and Surgery, 2022, 24(2): 177-184.

[4] 廖翠平,高雅,刘云璐,等.中医药及民族医药防治高脂血症临床研究进展[J].世界科学技术-中医药现代化,2025,27(3):658-667.

[5] 谷保双,赵彩琴,徐方方.肥胖、高血糖和高脂血症与子宫内膜癌患者临床特征的关系[J].新乡医学院学报,2025,42(2):133-137.

[6] ELNAGAR G M, ELSEWEIDY M M, ELKOMY N M I M, et al. Policosanol ameliorates renal inflammation and pyroptosis in hypercholesterolemic rabbits via modulation of HMGB1/PI3K/mTOR/NLRP3/Caspase-1 pathway [J]. Journal of Functional Foods, 2022, 97: 105250.

[7] 陈简,颜明丽,谭晓玉,等.基于米糠脂肪烷醇的中药复方对高脂血症大鼠肝脏胆固醇代谢的影响[J].云南中医药大学学报,2024,47(4):66-74.

[8] 刘建平,涂越,王汝霞,等.普利醇对蛋鸡生产性能、蛋品质及鸡蛋胆固醇含量的影响[J].饲料研究,2021,44(19):55-59.

[9] 焦文佳,石剑夫,黄志芬,等.植物甾醇纳米粒降低高胆固醇HepG2细胞内胆固醇的作用效果研究[J].食品安全导刊,2022,27:38-43.

[10] 苏天霞,袁敏兰,周艳,等.猕猴桃皮多酚对高脂膳食大鼠脂代谢紊乱的调节作用[J].食品科学,2020,41(17):196-201.

[11] 涂越,刘建平,胡林芳,等.米糠脂肪烷醇的组成、功能及物理化学修饰研究进展[J].现代食品科技,2023,39(12):62-69.

[12] SHEN J J, LUO F J, LIN Q L. Policosanol extraction and biological functions [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 57(2019): 351-360.

[13] 李元祥,雷素芳,陈桂,等.二十八烷醇的制备研究进展[J].化工科技,2025,33(1):80-86.

[14] CHO K, LEE Y, LEE S H, et al. Comparison of the in vivo efficacy of cuban (raydel®) and Chinese (BOC science) policosanol in alleviating dyslipidemia and inflammation via safeguarding major organs and reproductive health in hyperlipidemic zebrafish: a twelve-week consumption study [J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(8): 1103.

[15] 刘楚丹,李红飞,聂佳伟,等.二十八烷醇在动物机体中的生理调控功能研究进展[J].中国禽牧杂志,2021,57(7):48-53.

[16] 何文森,司晓静,王慧慧,等.二十八烷醇调节大鼠脂质代谢的研究[J].现代食品科技,2016,32(10):28-33.

[17] DEWALKAR L, DAHULE S, MASRAM S. Triticum aestivum octacosanol, a potential inhibitor of PCSK9 in fat diet-induced hypercholesteromia [J]. Revista Brasileira de Farmacognosia, 2024, 34(5): 1032-1045.

[18] OHASHI K, OHTA Y, ISHIKAWA H, et al. Orally administered octacosanol improves some features of high fructose-induced metabolic syndrome in rats [J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2021, 68(1): 58-66.

[19] YE Q, HONG L F, PAN K, et al. Study on the efficacy and safety of policosanol in the treatment of senile and elderly patients with hyperlipidemia [J]. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 4: 77-81.

[20] 王成,胡乃华,余琳媛,等.降脂模型研究进展[J].中国比较医学杂志,2020,30(4):121-130.

[21] SHARMA R, MATSUZAKA T, KAUSHIK M K, et al. Octacosanol and policosanol prevent high-fat diet-induced obesity and metabolic disorders by activating brown adipose tissue and improving liver metabolism [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 5169.

[22] KAMCHONEMENUKOO S, KOH Y, HO P, et al. Fatty acid esterification of octacosanol attenuates triglyceride and cholesterol synthesis in mice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(4): 2430-2442.

[23] 张晓云,傅栋桁,张一帆,等.植物甾醇纳米分散液对高脂膳食喂养小鼠血脂和血糖的影响[J].中国食品学报,2023,23(2):131-141.

[24] DING Y, FANG Y, PAN Y, et al. Orally administered octacosanol improves liver insulin resistance in high-fat diet-fed mice through the reconstruction of the gut microbiota structure and inhibition of the TLR4NF-κB inflammatory pathway [J]. Food & Function, 2023, 14(2): 769-786.

[25] 白婕.二十八烷醇降脂功能评估及其机制研究[D].长沙:中南林业科技大学,2022.

[26] ZHAI Z Y, LIU J P, NIU K M, et al. Integrated metagenomics and metabolomics to reveal the effects of policosanol on modulating the gut microbiota and lipid metabolism in hyperlipidemic C57BL/6 mice [J]. Frontiers in Endocrinology, 2021, 12: 722055.

[27] 陈鑫,王黎明,肖杰,等.高植物甾醇玉米油改善高脂血症金黄地鼠的胆固醇代谢[J].中国粮油学报,2022,37(11):133-142.

[28] FENG S M, DAI Z Q, LIU A B, et al. Intake of stigmasterol and β-sitosterol alters lipid metabolism and alleviates NAFLD in mice fed a high-fat western-style diet [J]. Bbamcb, 2018, 1863(10): 1274-1284.

[29] 周亚萍.二十八烷醇抗疲劳和抗肝损伤的功能评估及其机理研究[D].长沙:中南林业科技大学,2023.

[30] ZHAI Z Y, NIU K M, LIU H P, et al. Policosanol alleviates hepatic lipid accumulation by regulating bile acids metabolism in C57BL6/mice through AMPK-FXR-TGR5 cross-talk [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(12): 5466-5478.

[31] 杨倩,汤静洁,朱艳娇,等.多廿烷醇抑制高脂饮食动物肠道胆固醇吸收的研究[J].食品研究与开发,2021,42(7):50-55.

[32] PENG K, LONG L, WANG Y, et al. Effects of octacosanol extracted from rice bran on the laying performance, egg quality and blood metabolites of laying hens [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2016, 29(10): 1458-1463.

[33] CHO K, BAHUGUNA A, KIM J, et al. A comparative effect of 12-week dietary intervention of policosanol (raydel) and red yeast rice (RYR, kobayashi) in managing dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish [J]. Pharmaceuticals, 2025, 18(2): 200.

[34] NAM D, YUN J, KIM D, et al. Policosanol attenuates cholesterol synthesis via AMPK activation in hypercholesterolemic rats [J]. Journal of Medicinal Food, 2019, 22(11): 1110-1117.

[35] LEE J, CHOI H, KANG Y, et al. Effects of long-Term supplementation of policosanol on blood cholesterol/glucose levels and 3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme a reductase activity in a rat model fed high cholesterol diets [J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(3): 899-904.

[36] WANG M J, ZHAO R H, WANG W G, et al. Lipid regulation effects of polygoni multiflori radix, its processed products and its major substances on steatosis human liver cell line L02 [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2012, 139(2012): 287-293.

[37] WORETA T A, ALQAHTANI S A. Evaluation of abnormal liver tests [J]. Woreta & Alqahtani, 2014, 98(2014): 1-16.

[38] LEE S, SCOTT S D, PEKAS E J, et al. Improvement of lipids and reduction of oxidative stress with octacosanol after taekwondo training [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2019, 14(9): 1297-1303.