竹笋纤维联合益生菌改善小鼠肥胖和血脂异常

张敏，皇水芝，朱雨博，赵冰，田洋，李秀芬*

（云南农业大学食品科学技术学院，食药同源资源开发与利用教育部工程研究中心，云南昆明 650201）

摘要：为了探究竹笋纤维以及竹笋纤维联合益生菌对高脂饮食小鼠肥胖和血脂异常的预防作用。将 C57BL/6J 小鼠分为正常组（CL）、高脂纤维素组（HFC）、高脂竹笋纤维组（HFF）、高脂纤维素联合益生菌组（HFCB）和高脂竹笋纤维联合益生菌组（HFFB），饮食干预 12 周。基于体质量、脏器质量、血液生化和组织病理学分析了各饮食干预处理对肥胖小鼠的影响。通过高通量测序技术分析结肠菌群组成以及多样性，代谢组学定量分析粪便中短链脂肪酸的水平。结果表明，与 HFC 组相比，HFF 和 HFFB 饮食干预组小鼠的体质量、肝和脂肪组织质量、血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平明显降低，脂肪细胞体积恢复。HFF 组和 HFFB 组小鼠肠道中厚壁菌与拟杆菌的比例分别下降 39.67% 和 34.78%，菌群多样性显著增加。与 HFC 相比，竹笋纤维干预显著提高了粪便中乙酸（从 1.17 提升至 2.17 μg·mg^{-1}）、丁酸（从 0.05 提升至 0.17 μg·mg^{-1}）和总短链脂肪酸（从 1.71 提升至 2.83 μg·mg^{-1}）的含量。综上，竹笋纤维及其联合益生菌饮食通过增加肠道菌群物种多样性，促进短链脂肪酸生成，改善血脂异常及脂质积累，从而预防高脂饮食小鼠肥胖。该研究为进一步开发竹笋纤维相关功能食品和药品提供实验基础和理论参考。

关键词：竹笋纤维；益生菌；肥胖；血脂异常；小鼠

文章编号：1673-9078(2026)10-141-150 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1025

Bamboo Shoot Fiber with Probiotics Improves Obesity and Dyslipidemia

ZHANG Min, HUANG Shuizhi, ZHU Yubo, ZHAO Bing, TIAN Yang, LI Xiufen*

(Engineering Research Center of Development and Utilization of Food and Drug Homologous Resources, Ministry of Education, College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The preventive effects of bamboo shoot fiber and bamboo shoot fiber combined with probiotics on obesity and dyslipidemia in mice fed with a high-fat diet were investigated. C57BL/6J mice were divided into the normal group (CL), high-fat microcrystalline cellulose group (HFC), high-fat bamboo shoot fiber group (HFF), high-fat microcrystalline cellulose+probiotic group (HFCB), and high-fat bamboo shoot fiber+probiotic group (HFFB), with the dietary intervention lasting for 12 weeks. The effects of each dietary intervention on obese mice were analyzed based on body weight, organ mass, blood biochemical parameters, and histopathology. The composition and diversity of the colonic microbiota were analyzed using high-throughput sequencing, and fecal short-chain fatty acids were quantified by metabolomics. The results showed that the body, liver, and adipose tissue weights of the mice, as well as serum total cholesterol and low-density lipoprotein cholesterol levels, were significantly reduced, while adipocyte volume was restored in both HFF and HFFB dietary intervention groups compared to that in the HFC group. The ratio of Firmicutes to Bacteroidetes in the intestines of the HFF and HFFB groups decreased by 39.67% and 34.78%, respectively, and the diversity of the microbiota was significantly enhanced. Compared with HFC, the bamboo shoot fiber intervention significantly promoted the levels of acetate (from 1.17 to 2.17 μg·mg^{-1}), butyrate (from 0.05 to 0.17 μg·mg^{-1}), and total short-chain fatty acids (from 1.71 to 2.83 μg·mg^{-1}) in feces. In conclusion, bamboo shoot fiber combined with probiotics can prevent high-fat diet-induced obesity in mice by increasing gut microbiota diversity, promoting short-chain fatty acid production, and improving dyslipidemia and lipid accumulation. This study provides an experimental foundation and a theoretical framework for the further development of bamboo

收稿日期：2025-07-22；修回日期：2025-10-13；接受日期：2025-10-19

基金项目：云南省基础研究计划面上项目（202401AT070241）

作者简介：张敏（2002-），女，硕士研究生，研究方向：食品资源挖掘与利用，E-mail：2973272699@qq.com

通讯作者：李秀芬（1987-），女，博士，副教授，研究方向：高原特色食品加工与资源挖掘，E-mail：orangexiufen@163.com

shoot fiber-based functional foods and medicines.

Key words: bamboo shoot fiber; probiotics; obesity; dyslipidemia; mice

引文格式:

张敏,皇水芝,朱雨博,等.竹笋纤维联合益生菌改善小鼠肥胖和血脂异常[J].现代食品科技,2026,42(10):141-150.

ZHANG Min, HUANG Shuizhi, ZHU Yubo, et al. Bamboo shoot fiber with probiotics improves obesity and dyslipidemia [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 141-150.

世界卫生组织的报告指出，肥胖现已演变为一项严峻的公共健康挑战，全球范围内肥胖人群的规模正呈现出急剧扩张的态势[1,2]，由肥胖引起的并发症也日益增多，如Ⅱ型糖尿病、血脂异常、心血管疾病等。长期以来，膳食纤维在保持体质量和整体健康方面的重要作用逐渐被大众认识，其对预防和控制肥胖、II型糖尿病、心脏病和癌症等慢性疾病及代谢综合征非常重要[3-5]。膳食纤维摄入量的增加与心血管疾病、糖尿病、肥胖和胃肠道疾病的发病率降低呈正相关[6-8]。膳食纤维可以通过调节食物的摄入、消化和吸收来降低高脂血症、高胆固醇血症以及高血糖症的发病风险[9,10]。

竹笋是优质膳食纤维的来源[11]。竹笋膳食纤维约占竹笋干重的40%[1]。竹笋膳食纤维主要成分为纤维素、半纤维素和木质素，富含非淀粉多糖、结构紧致，复杂的分支结构和高结晶度使其能够抵抗消化酶的降解[12]。竹笋膳食纤维的空间网络结构复杂，BSDF表面呈现微小孔洞和紧密的小颗粒状态，其空间结构影响膳食纤维的生理功能，促进水分子的吸附和滞留，从而可以提高其持水性，膨胀力和持油性[13]。目前已有研究表明，竹笋膳食纤维（BSDF）具有抗氧化、抗炎、抗糖尿病以及预防肥胖等多种生物学功能[14]。竹笋膳食纤维不被肠道消化吸收，其可以作为细菌发酵碳源，从而改变肠道菌群，并产生短链脂肪酸，影响机体的代谢[5]。研究表明，竹笋膳食纤维在控制小鼠体质量、调节血脂代谢，提高胰岛素敏感性方面的作用效果显著，是潜在的益生元。与单独使用益生菌或单独益生元相比，使用合生元能更好的促进健康[15]。合生元是能对机体产生有益作用的益生菌和益生元的组合，其作用机制在于协同促进益生菌在机体肠道内的定植与增殖。在此过程中，益生元发挥其选择性促生长效能，而益生菌则贡献其固有的生物活性作用。这种协同效应有助于优化宿主肠道微生态稳态，从而更有效地支持宿主机体健康[16]。

本研究通过高脂饮食诱导小鼠的体质量增加，采用等能量饲料，对比研究竹笋纤维与微晶纤维素、竹笋纤维联合益生与微晶纤维素联合益生菌对小鼠的体质量、血脂、肝脏和脂肪组织以及肠道菌群的影响。旨在为进一步开发竹笋膳食纤维联合益生菌相关功能食品和药品提供实验基础和理论参考，推动竹笋膳食纤维的深度开发利用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

植物乳杆菌PC170、乳双歧杆菌BB19（两种菌株活力均为1×10^{11} CFU/g），四川益动源生物科技有限公司；血糖试纸（100片/盒），德国罗氏诊断公司；10%福尔马林固定液，武汉同和生物技术有限公司；甘油三酯（TG）测定试剂盒、总胆固醇（TC）测定试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）试剂盒，南京建成生物工程研究所；丙酸（99.5%），北京沃凯生物科技有限公司；乙酸（99.7%）、异丁酸（99.5%）、丁酸（99%）、异戊酸（99%）、戊酸（99%）、异己酸（99%）、己酸（99%），西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司；基础饲料、高脂饲料、含竹笋纤维的高脂饲料（详见表1；其中，竹笋纤维为实验室自提，总膳食纤维为77.69%，不溶性膳食纤维占76.30%，含半纤维素40.35%，纤维素28.84%，木质素1.10%），江苏省协同生物有限公司；DNA提取试剂盒，天跟生化科技（北京）有限公司。无水乙醇，永华化学股份有限公司；磷酸盐缓冲液，北京兰杰柯科技有限公司；其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TY2017000236台式离心机，德国艾本德公司；FD-1A-50冷冻干燥机，上海比朗仪器有限公司；SX-700高压灭菌锅，上海坦尔生物科技有限公司；FA1004分析天平，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；NanoDrop2000微量分光光度计，美国Thermo Scientific公司；EPOCH2酶标仪，美国伯腾仪器有限公司；GDO-2小鼠固定器，北京恒奥生物科技有限公司；8890B-7000D GC/MSD气质联用仪；安捷伦（中国）科技有限公司；Evident BX43光学显微镜，伊维登特科技有限公司；Leica RM2235组织切片机，徕卡生物系统（努斯洛赫）有限公司；Illumina MiSeq PE300测序平台，因美纳（中国）科学器材有限公司。

表 1 饲料配方

Table 1 Feed formula

分组	配料	CL 组	HFC 组	HFCB 组	HFF 组	HFFB 组
成分 /(g·kg^{-1})	酪蛋白	200	200	200	200	200
	L-胱氨酸	3	3	3	3	3
	玉米淀粉	506.2	0	0	0	0
	麦芽糊精	125	125	125	125	125
	蔗糖	73	72.8	72.8	72.8	72.8
	微晶纤维素	50	100	100	—	—
	竹笋膳食纤维	—	—	—	100	100
	大豆油	25	25	25	25	25
	猪油	20	245	245	245	245
	叔丁基对二苯酚	0.008	0	0	0	0
	混合矿物质	50	50	50	50	50
	混合维生素	1	1	1	1	1
	酒石酸氢胆碱	2	2	2	2	2
营养素/%	蛋白质	20	20	20	20	20
	碳水化合物	70	20	20	20	20
	脂肪	10	60	60	60	60
	能量/(kcal·g^{-1})	3.85	5.22	5.22	5.22	5.22

1.3 实验方法

1.3.1 动物分组与处理

体质量在 20±2 g，6 周龄 C57BL/6J 雄性小鼠 50 只，购自北京斯贝福生物技术有限公司（动物生产许可证号：SYXK（京）2024-0010）。适应一周后，分为 5 组，每组 10 只，分别为：正常对照组（CL）给予低脂饲料（质量分数 10% 的脂肪，质量分数 5% 微晶纤维素）；高脂微晶纤维素组（HFC）给予高脂微晶纤维素饲料（质量分数 60% 的脂肪，质量分数 10% 微晶纤维素），并灌胃生理盐水；高脂竹笋纤维组（HFF）给予高脂竹笋纤维饲料（质量分数 60% 的脂肪，质量分数 10% 竹笋纤维）；高脂微晶纤维素益生菌组（HFCB）给予高脂微晶纤维素益生菌饲料，并灌胃植物乳杆菌和乳双歧杆菌的 1:1 混悬液；高脂竹笋纤维联合益生菌组（HFFB）给予高脂竹笋纤维联合益生菌饲料，并灌胃植物乳杆菌和乳双歧杆菌的 1:1 混悬液，每日灌胃 1 次（1×10^9 CFU/kg）。饲料配方如表 1 所示。动物饲养 12 周，实验期间自由饮水、摄食，每周称量体质量。动物照顾和实验过程得到云南农业大学动物伦理委员会的许可（202001AT070469）。

1.3.2 小鼠血脂四项分析

小鼠尾尖采血，4 ℃静置 2 h，3 500 r·min^{-1} 离心 15 min，取上清，按照血脂测定试剂盒说明书的操作步骤测定小鼠 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 的水平[17]。

1.3.3 动物处理

饲养 12 周后，小鼠禁食 12 h，经二氧化碳麻醉后摘眼球采血，分离小鼠的血清样品。收集肝脏、附睾和肾周脂肪、盲肠并称重并分装。取出盲肠中的粪便，并将其置于无菌离心管中。所有样品经液氮速冻后转移至 −80 ℃冰箱保存[18]。肝脏和脂肪组织固定于福尔马林溶液中，用于 H&E 染色。动物尸体装入专用处理袋，高压灭菌后与生石灰混合后深埋。

1.3.4 病理切片制作及染色

将固定的肝脏和脂肪组织取出，洗净固定液，依次放入脱蜡液Ⅰ 20 min-脱蜡液Ⅱ 20 min-无水乙醇Ⅰ 5 min-无水乙醇Ⅱ 5 min-体积分数 75% 的乙醇 5 min，用自来水冲洗。组织固定液固定 15 min 后，流水冲洗。切片依次放入苏木精－伊红染液中染色，在光学显微镜下观察组织形态（100×）并采集图像[19]。

1.3.5 16S rDNA序列测定及肠道菌群分析

从盲肠粪便中提取小鼠总 RNA，反转录后进行 16S rDNA 测序，分析菌群组成和多样性[11]。抽提细菌基因组总 DNA，质量分数 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的质量，使用 NanoDrop 2000 测定 DNA 浓度和纯度。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’）PCR 扩增 16S rRNA 基因 V3-V4 区。使用 PICRUSt2（version 2.2.0）软件进行功能预测分析。对样本进行物种注释与评估，在 OTU 水平上计算 Sobs、Ace、Chao、Shanon、Simpson 指数，用 Kruskal-Wallis 秩和检验分析组间显著性差异，用 False Discovery Rate 多重检验对检验结果进行校正。

1.3.6 粪便中短链脂肪酸的测定

称取 20 mg 粪便样品于 2 mL 研磨管中，加入 800 μL、体积分数 0.5% 磷酸盐缓冲液（含 10 μg·mL^{-1} 内标 2-乙基丁酸），冰浴研磨 3 min（50 Hz），然后超声提取 10 min（4 ℃）、13 000 r·min^{-1} 离心 15 min。取上清 200 μL，加入 200 μL 正丁醇，涡旋 10 s，再 4 ℃超声 10 min，13 000 *g* 离心 5 min。取上清液装入进样瓶，采用 8890B-7000D GC/MSD 气质联用仪分析粪便短链脂肪酸的含量[20]。

1.4 统计分析

结果以平均值 ± 标准差表示。用 SPSS 26.0 软件进行统计分析，用 One-way ANOVA 分析组间差异是否显著。P＜0.05 认为差异显著。与 CL 组相比，* 表示 P ＜0.05；** 表示 P ＜0.01；*** 表示 P ＜0.001。处理组与 HFC 组相比，$^{\#}$ 表示 P ＜0.05；$^{\#\#}$ 表示 P ＜0.01；$^{\#\#\#}$ 表示 P ＜0.001。用 Graphpad Prism 8.0.2 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 竹笋纤维联合益生菌对小鼠体质量的影响

如图 1 所示，饮食干预 4 周后，与 CL 组相比，HFC 组小鼠的体质量显著增加，12 周后各组小鼠体质量达到最大值；饮食干预期间，与 HFC 组相比，HFCB 组小鼠体质量无显著差异。第 5 周起，HFF 组和 HFFB 组小鼠的体质量分别与 HFC 和 HFCB 组相比均显著降低（P＜0.01）。第 12 周 HFF 组小鼠体质量（29.85 g）比 HFC（36.54 g）降低 18.32%，HFFB 组（30.84 g）比 HFCB 组（34.94 g）降低了 11.72%。这说明竹笋纤维饮食干预和竹笋纤维联合益生菌饮食干预均能有效控制高脂饮食引起的小鼠体质量增加。已有的研究显示，高纤维代餐粉对高脂饮食引起的肥胖干预效果明显，膳食纤维和生物活性成分的摄入增加了饱腹感，稀释了食物的能量密度，从而有效控制了小鼠体质量[21]。与小麦纤维、大豆纤维、水果纤维相比，竹笋纤维对体质量的控制作用最明显，这种体质量控制作用与竹笋纤维独特的结构特征相关[11]。与微晶纤维素相比，竹笋纤维中的半纤维素组分在胃内遇水分易形成疏松凝胶，使胃排空速度比纯纤维素组慢，从而延长胃内容物的滞留时间，使其增强饱腹感的效果比纤维素更强[22]。虽然补充益生菌的可能存在多种潜在的有益作用，本研究中在微晶纤维素或竹笋纤维的基础上增补益生菌都没有观察到更明显的体重控制作用，可能和益生菌产生多种消化酶的能力以及帮助分解和释放食物中的营养物质相关，提高了营养物质的吸收率，促使抑制体质量增加的效果没有相应膳食纤维组明显。

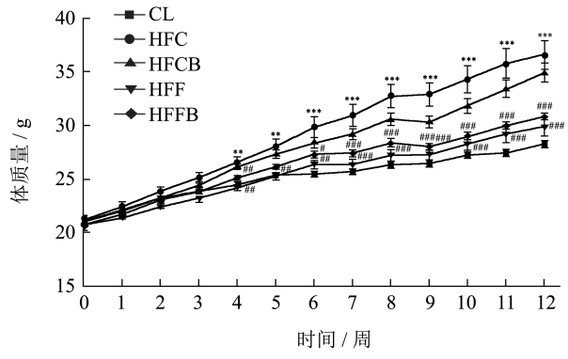


图 1 饮食干预期间小鼠的体质量变化

Fig.1 Changes of mice body weight during dietary intervention

注：CL，正常对照组；HFC，高脂微晶纤维素组；HFF，高脂竹笋纤维组；HFCB，高脂微晶纤维素益生菌组；HFFB，高脂竹笋纤维联合益生菌组。下同。与 CL 组相比，* 表示 P ＜0.05；** 表示 P ＜0.01；*** 表示 P ＜0.001。处理组与 HFC 组相比，# 表示 P ＜0.05；## 表示 P ＜0.01；### 表示 P＜0.001。图 2、3、7 同。

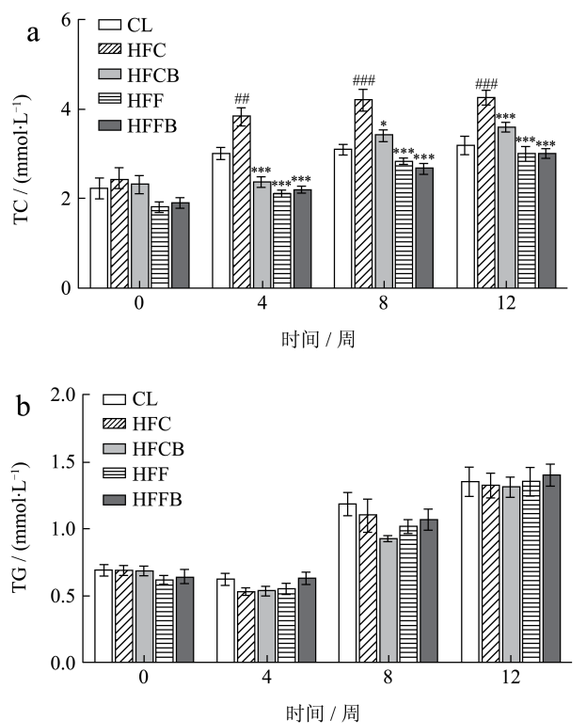
2.2 竹笋纤维联合益生菌对小鼠血脂水平的影响

如图 2a，饮食干预 4~12 周期间，与 CL 组（2.24 mmol·L^{-1}）相比，HFC 组小鼠的血清总胆固醇水平显著升高（P ＜0.01）。12 周后，与 HFC 组（4.28 mmol·L^{-1}）相比，HFCB 组、HFF 组和 HFFB 组血清总胆固醇水平均分别降低至 3.63、3.02、3.03 mmol·L^{-1}（P ＜0.001），说明补充益生菌、增加竹笋膳食纤维、竹笋膳食纤维联合益生菌三种饮食干预都能预防高脂饮食引起的小鼠血中胆固醇水平升高。饮食干预 8 周后，各组小鼠血清中总甘油三酯水平明显升高（图 2b），但不同处理组间未出现显著差异。图 2c 和 2d 显示，饮食干预 4 周后，HFC 组小鼠的血清 HDL-C 和 LDL-C 水平显著高于 CL 组（0.48、0.63 mmol·L^{-1}）；与 HFC 组（1.75 mmol·L^{-1}）相比，HFF 组和 HFFB 组的 LDL-C 水平显著降低到 0.77、0.71 mmol·L^{-1}（P＜0.001），说明竹笋纤维或竹笋纤维联合益生菌干预均降低了小鼠血清中的 LDL-C 水平。研究表明，菊粉联合人源乳

杆菌干预，显著改善了Ⅱ型糖尿病小鼠的高血糖症状，并调节了血脂代谢[23]。联合补充可溶性和不溶性竹笋纤维后，高脂饮食引起的大鼠血中总胆固醇、甘油三酯和 LDL-C 水平均降低[19]。本研究中，竹笋纤维中不溶性成分占 76.3%（质量分数），可能由于不溶性组分与乳杆菌的共同作用改善了高脂饮食引起的血脂升高。竹笋纤维的油脂结合能力是纤维素的 2.0~3.3 倍[13]。因此，在小鼠胃肠道内竹笋纤维可能通过吸附脂质，尤其是胆酸盐和胆固醇，促使二者脱离肝肠循环排出体外[22]。

2.3 竹笋纤维联合益生菌对小鼠肝脏和脂肪质量的影响

高脂饮食引起的肥胖主要表现为肝脏中脂肪堆积及脂肪组织质量增加。如图 3a~3c 所示，与 CL 组（0.99、0.63、0.23 g）相比，饮食干预后 HFC 组（1.11、2.22、1.23 g）的小鼠肝脏、附睾脂肪和肾周脂肪质量显著增加；HFCB 组（0.93、1.67、0.88 g）、HFF 组（0.82、1.03、0.56 g）和 HFFB 组（0.83、1.08、0.60 g）小鼠肝脏和脂肪组织质量均明显低于 HFC 组（1.11、2.22、1.23 g）（$P<0.01$ 或 $P<0.001$）。这说明竹笋膳食纤维或其与乳杆菌的共同作用改善了高脂饮食小鼠脏器中脂肪堆积。此外，HFF 组和 HFFB 组之间并无显著差异，说明在抑制脂质积累方面，竹笋纤维与益生菌联合未表现出更明显的协同增效作用。



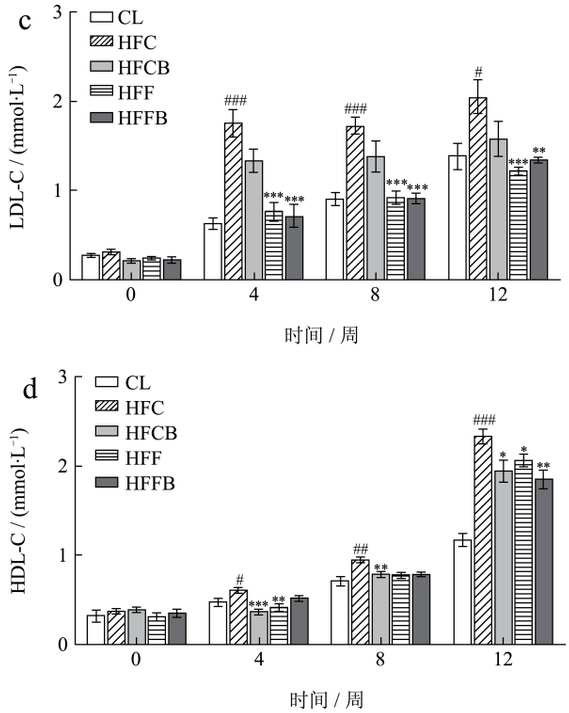


图 2 饮食干预期间小鼠血脂水平的变化

Fig.2 Changes of lipid levels in mice serum during dietary intervention

注：TC，总胆固醇水平；TG，总甘油三酯水平；HDL-C，高密度脂蛋白胆固醇水平；LDL-C，低密度脂蛋白胆固醇水平。

肝脏和附睾脂肪组织细胞形态特征见图 4。CL 组小鼠肝组织中细胞结构完整、形态正常。与 CL 组相比，HFC 组小鼠肝组织中可见大量弥漫性脂肪浸润和大小不等的空泡，表明该组小鼠肝脏中积累了更多脂质成分。与 HFC 组相比，HFCB 组、HFF 和 HFFB 组中小鼠肝脏脂肪病变有所改善，尤其 HFF 和 HFFB 组小鼠的肝细胞形态规则、排列均匀，未见明显脂滴或脂肪变性。这与血脂四项结果相符合。

CL 组小鼠附睾脂肪细胞形态较规则，多呈圆形或椭圆形，大小相对均匀，边界较清晰。与 CL 组相比，HFC 组附小鼠睾脂肪细胞明显增大，体积增大数倍。与 HFC 组相比，HFF 组和 HFFB 组脂肪细胞直径明显减小，尤其是 HFFB 组细胞直径变小更明显。这表明摄入竹笋纤维及竹笋纤维联合益生菌都能减小高脂饮食诱导的小鼠附睾脂肪细胞过度增大。研究显示，在高脂饮食诱导的高脂血症模型中，可溶性纤维联合不溶性纤维干预，大鼠体重和脂肪组织质量显著降低[19]。高脂饮食诱导的小鼠脂肪肝的研究中，乳杆菌联合甘露寡糖干预明显减轻了由高脂饮食引起的小鼠肝损伤和肝细胞脂肪变

性[24]。与微晶纤维素相比，摄入竹笋纤维能调节肝脏中脂质积累相关基因的表达水平，抑制 PPARα 的表达，降低肝脏中脂肪酸合成[11]，从而抑制肝脏和脂肪组织中的脂质积累。

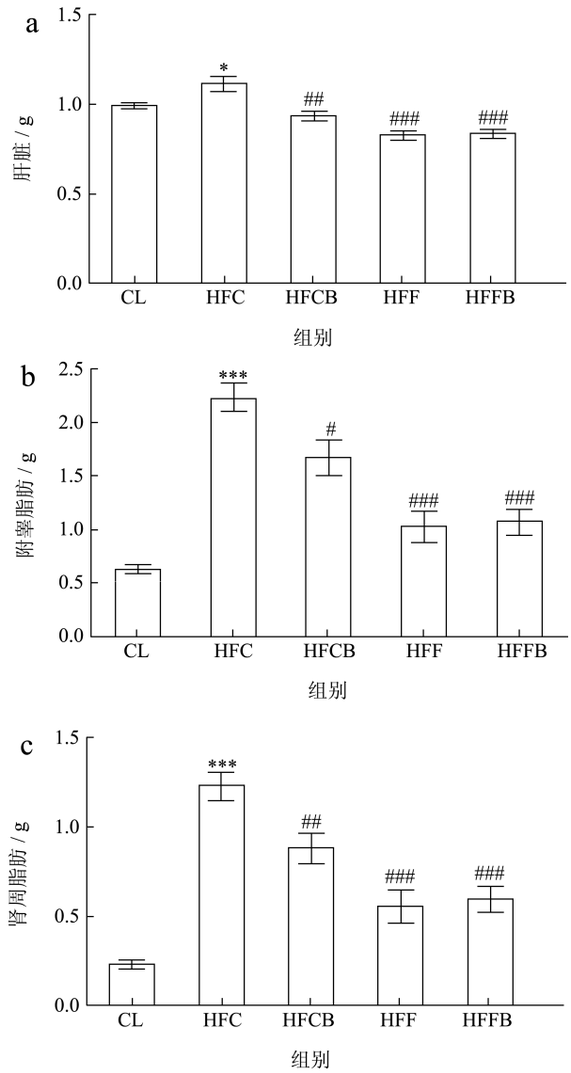
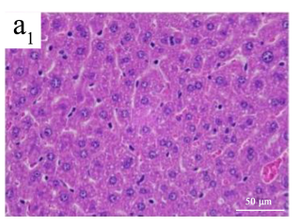


图 3 饮食干预后小鼠脂肪组织的质量

Fig.3 Weight of adipose tissues in mice after dietary intervention

注：CL，正常对照组；HFC，高脂微晶纤维素组；HFF，高脂竹笋纤维组；HFCB，高脂微晶纤维素益生菌组；HFFB，高脂竹笋纤维联合益生菌组。与 CL 组相比，* 表示 $P<0.05$；*** 表示 $P<0.001$。处理组与 HFC 组相比，# 表示 $P<0.05$；## 表示 $P<0.01$；### 表示 $P<0.001$。



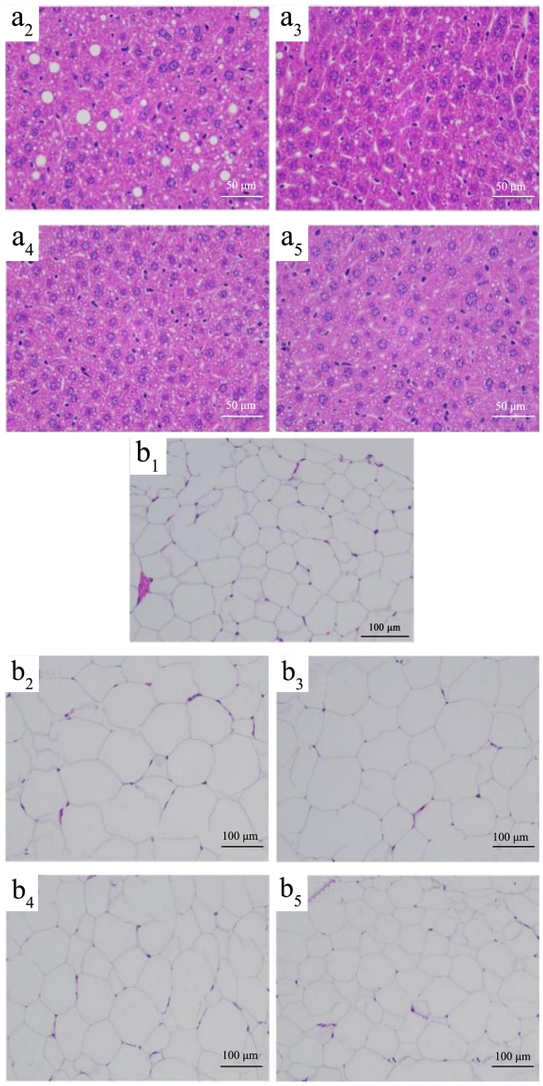


图 4 小鼠肝脏和附睾脂肪组织的 H&E 染色图

Fig.4 Images of mouse liver and epididymal adipose tissue after H&E staining

注：(a) 肝脏，(b) 附睾。下标 1~5 分别为 CL、HFC、HFCB、HFF、HFFB 组。

2.4 竹笋纤维联合益生菌对小鼠肠道菌群的影响

肠道微生物群已成为肥胖和代谢紊乱发展的一个重要因素[25,26]。小鼠盲肠粪便菌群在不同水平的相对丰度如图 5 所示。各组小鼠盲肠菌群中都以厚壁菌（Firmicutes）为优势菌群，相对丰度大于 82%（质量分数），其次为拟杆菌门（Bacteroidetes），放线菌门（Actinobacteria），脱硫杆菌门（Desulfbacterota）和疣微菌门（Verrucomicrobita）。CL 组小鼠盲肠内厚壁菌门（Firmicutes）与拟杆菌门（Bacteroidetes）总丰度占 86%（质量分数），二者相对丰度比值为 42:1。与 CL 组相比，HFC 组和 HFCB 组小鼠盲肠内的厚

壁菌（Firmicutes）和疣微菌门（Verrucomicrobita）丰富度显著升高，HFF 组小鼠肠道中脱硫杆菌门（Desulfbacterota）丰度显著增加，而拟杆菌门（Bacteroidetes）和放线菌门（Actinobacteria）的丰富度显著降低。厚壁菌与拟杆菌的比值大小顺序为：HFF 组（111:1）＜HFFB 组（120:1）＜HFC 组（184:1）＜HFCB 组（193:1）。Firmicutes/Bacteroidetes 被视为反映肠道菌群结构平衡、关联宿主代谢健康、免疫功能甚至疾病风险，比值升高常与肥胖、Ⅱ型糖尿病及代谢紊乱相关。高脂饮食导致的厚壁菌过度增殖会破坏肠道屏障，导致内毒素进入血液，引发代谢性炎症，进而损伤胰岛素敏感性、促进肝脏脂肪堆积。相对而言，Firmicutes/Bacteroidetes 值下降有益于维持体重和正常血脂。HFC 组、HFF 组和 HFCB 组中疣微菌门（Verrucomicrobita）的丰富度显著增加，而 HFFB 组的丰富度显著降低，HFF 组的脱硫杆菌（Desulfbacterota）的丰富度显著升高，竹笋纤维和益生菌的联合下疣微菌门的丰度减少。Verrucomicrobita 的丰度增加反映了肠道屏障完整性提升以及血糖、血脂代谢改善。

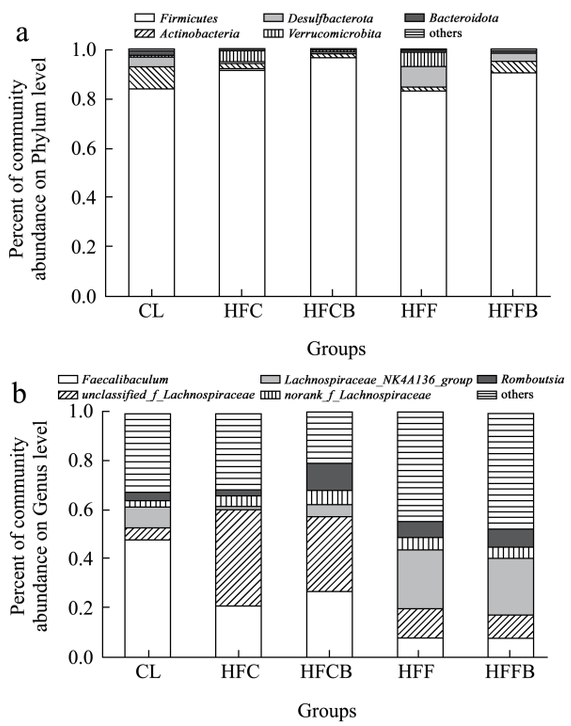
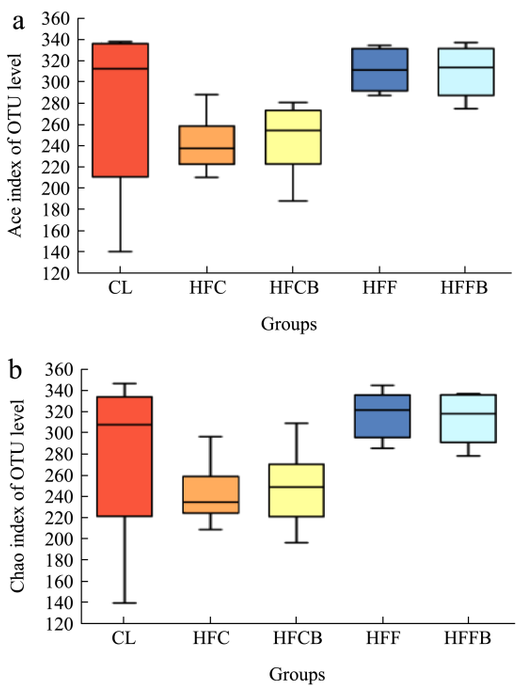


图 5 小鼠盲肠粪便菌群在门水平（a）和属水平（b）的相对丰度

Fig.5 Relative abundance of fecal flora in cecum of mice at Phylum (a) and Genus level (b)

属水平上，粪杆菌属（*Faecalibaculum*）、*unclassified_f_Lachnospiraceae* 和 *Lachnospiraceae_*NK4A136_group 是小鼠盲肠中的优势菌属。与 CL 组相比，HFC 组 *unclassified_f_Lachnospiraceae* 显著增加（P ＜0.05）。与 HFC 相比，HFF 和 HFFB 组中粪杆菌属和 *unclassified_f_Lachnospiraceae* 含量明显减少，*Lachnospiraceae*-NK4A136-group 显著增加。Lachnospiraceae-NK4A136-group 是主要的短链脂肪酸产生菌，也是主要产生丁酸盐的细菌之一[27]，丁酸盐可促进肠道上皮细胞分泌饱腹信号分子（胰高血糖素样肽-1 和酪酪肽），能维持肠道屏障功能，影响脂质代谢。竹笋纤维显著促进 Lachnospiraceae-NK4A136-group 的增殖，可能有益于体质量控制和血脂平衡。此外，HFFB 组中 *Lactobacillus* 的丰度也显著增加，尽管它不是优势菌。

小鼠盲肠菌群的 Alpha-多样性指数（Ace、Chao、Sobs、Shannon、Simpson）分析如图 6 所示。不同处理组间的 Ace、Chao、Sobs 指数没有显著差异（图 6a-c），Shannon 指数呈现阶梯式升高（图 6d），而 Simpson 指数出现阶梯式降低（图 6e）。CL 组、HFC 组与 HFCB 组、HFF 组与 HFFB 组呈现出三种不同的多样性趋势：CL 组呈现出正常饮食的菌群特征，HFC 和 HFCB 组表现出微晶纤维素干预的相似特征，HFF 组和 HFFB 组表现出竹笋纤维干预的相似特征。Shannon 和 Simpson 指数表明（图 6d 和 6e），竹笋纤维干预比微晶纤维素干预的小鼠肠道菌群具有更高的多样性，表明竹笋纤维差异化的组分进一步提高了高脂饮食小鼠肠道菌群的多样性，促进小鼠肠道菌群的平衡，通过肠道菌群的作用改善血脂组成及体质量。



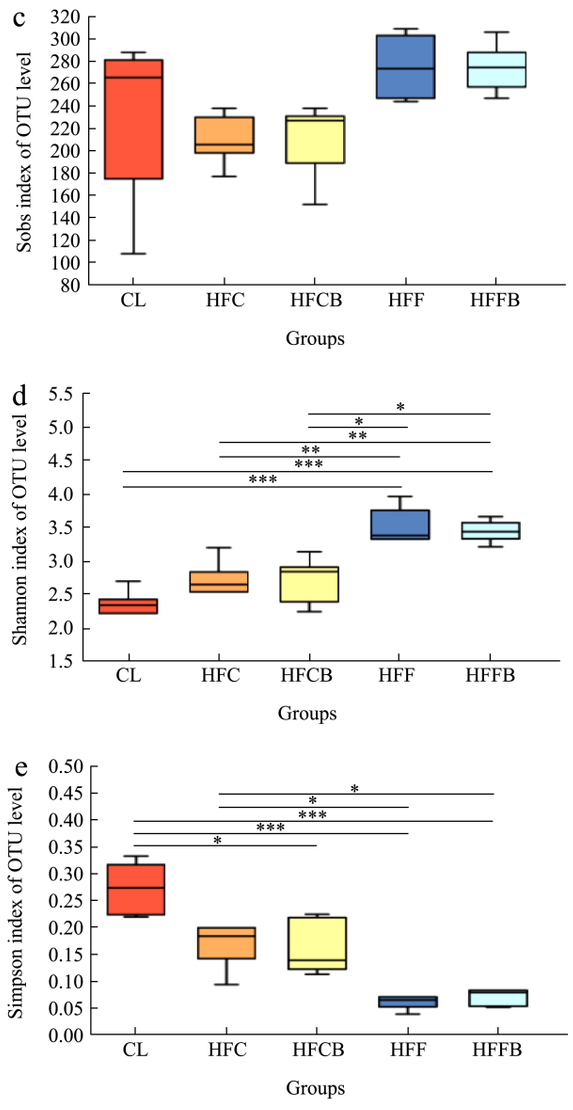


图 6 小鼠盲肠粪便菌群的 Alpha 多样性指数

Fig.6 Alpha diversity index of fecal flora in cecum of mice

注：* 表示 $P<0.05$；** 表示 $P<0.01$；*** 表示 $P<0.001$。

无论 HFCB 与 HFC 组相比，或 HFFB 和 HFF 组比较，增补益生菌都未表现出协同作用。本研究中，补充膳食纤维比补充益生菌对肠道菌群的调节作用更明显，益生菌改善了小鼠的血脂水平，但没有明显提高肠道微生物的多样性。膳食纤维和益生菌联合后形成合生元制剂能增强小鼠的抗氧化能力，并调节肠道菌群的相对丰度。据报道，补充含有鼠李乳杆菌、植物乳杆菌、干酪乳杆菌、乳双歧杆菌与低聚果糖的合生元制剂增加了小鼠肠道中双歧杆菌和乳杆菌等有益微生物的相对丰度[16]。本研究中，不溶性组分为主的竹笋纤维与植物乳杆菌和乳双歧杆菌联合在调节小鼠肠道菌群方面，未表现出显著的协同作用的原因可能有三个方面：（1）可能由于口服益生菌在肠道定殖和增殖的比例有限；（2）益生菌的相对丰度较低，没有形成优势种群。（3）两种益生菌未能充分利用竹笋纤维，竹笋纤维主要通过增加饱腹感和调节肠道菌群组成和多样性发挥群体效应。

2.5 竹笋纤维干预对小鼠短链脂肪酸的影响

短链脂肪酸是肠道菌群的重要代谢产物，小鼠粪便中短链脂肪酸的含量与维持肠道健康密切相关[28,29]。由图 7 可知，饮食干预 12 周后，与 CL 组（0.65、0.16、0.03、0.02、0.02、0.01、0.97 μg·mg^{-1}）相比，HFC 组小鼠粪便中的乙酸、丙酸、异丁酸、戊酸、异戊酸、己酸和总短链脂肪酸的含量分别显著增加到 1.17、0.30、0.06、0.04、0.06、0.01、1.71 μg·mg^{-1}），丁酸的含量没有显著变化，异己酸含量降低。与 HFC 组（1.17、0.05、0.02、1.71 μg·mg^{-1}）相比，HFF 组小鼠粪便中的乙酸、丁酸、异己酸和总短链脂肪酸的含量均显著增加至 2.17、0.17、0.06 和 2.83 μg·mg^{-1}（$P<0.05$），说明竹笋膳食纤维主要促进盲肠内容物中乙酸、丁酸和总短链脂肪酸的分泌。此前，Zhou 等[30]的研究中也发现饮食中增加竹笋膳食纤维后，小鼠粪便中的乙酸和丙酸、丁酸、戊酸和异己酸的浓度显著增加，这可能由于肠道微生物将竹笋膳食纤维作为碳源利用，发酵后增加了短链脂肪酸的生成量。据报道，以乙酸、丙酸和丁酸为代表的短链脂肪酸增加有益于抑制过度肥胖，尤其是丁酸[31]。丁酸是结肠细胞的主要能量来源，丁酸刺激丁酸敏感元件过氧化物酶增生激活受体 γ 降低肠上皮信号，驱动结肠上皮细胞能量代谢转向 β-氧化，从而减少脂肪生成[32,33]。与微晶纤维素相比，竹笋纤维更增强了小鼠盲肠中乙酸、丁酸和总短链脂肪酸的分泌，这可能与竹笋纤维特殊的复杂结构相关，竹笋纤维表面多孔的结构使其比表面积更大，微生物利用后表现出益生作用[20]。

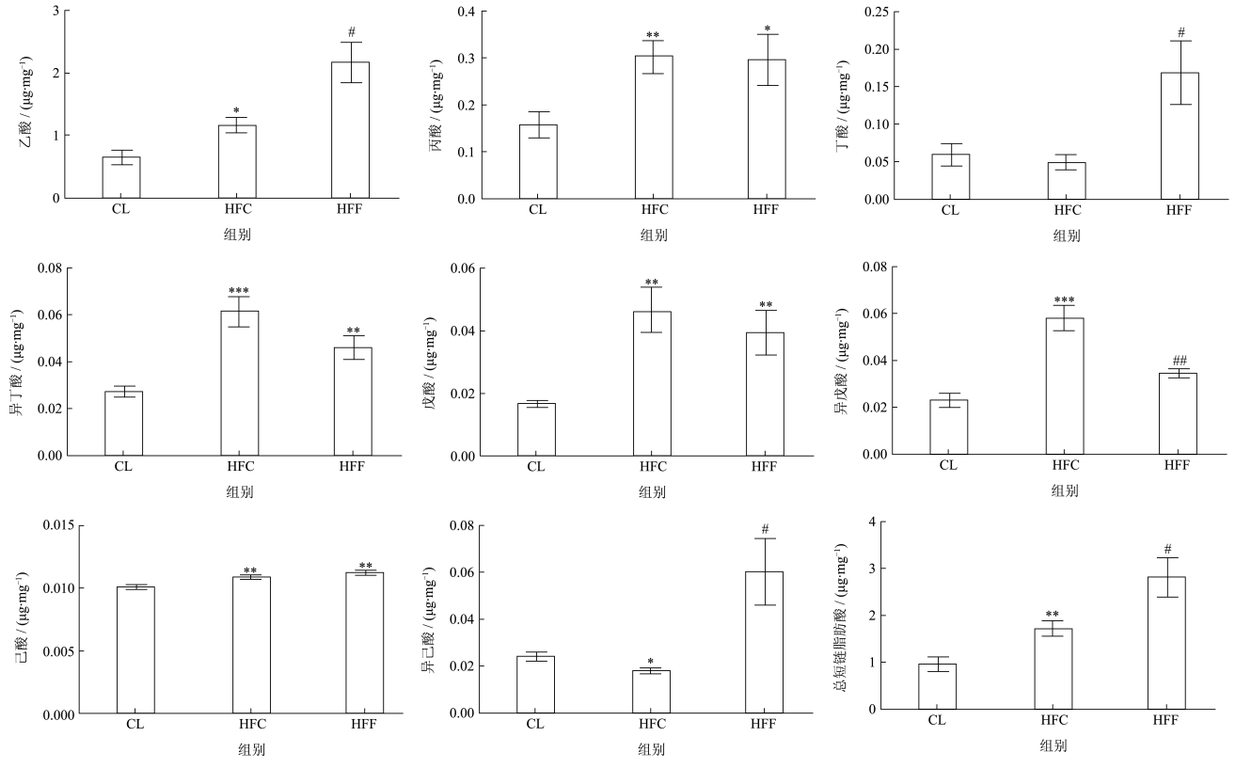


图 7 小鼠粪便短链脂肪酸水平

Fig.7 Fecal short-chain fatty acid levels in mice

3 结论

竹笋纤维和竹笋纤维联合益生菌饮食干预能显著降低高脂饮食小鼠的体重、肝脏和脂肪组织质量增加，抑制血清总胆固醇和 LDL-C 的升高，减轻肝细胞脂肪浸润和脂肪细胞肥大。竹笋纤维和竹笋纤维联合益生菌饮食干预提高了小鼠肠道菌群的多样性。竹笋纤维和竹笋纤维联合益生菌饮食干预相比，联合饮食干预没有显示出更高的菌群多样性差异，推断益生作用主要来源于竹笋纤维。研究表明，竹笋膳食通过降低肠道菌群中 Firmicutes/Bacteroidetes 值、增加菌群多样性，促进短链脂肪酸产生菌的增殖，增加粪便中乙酸、丁酸和总短链脂肪酸的含量，预防高脂饮食小鼠的血脂异常和肥胖。因此，开发富含竹笋纤维的代餐粉或其他类型食品，能有效预防血脂异常和肥胖，促进功能性膳食纤维产品的开发，推动竹笋产业发展，丰富竹笋加工制品的形式。

参考文献

[1] ZHENG Y, WANG Q, HUANG J, et al. Hypoglycemic effect of dietary fibers from bamboo shoot shell: An *in vitro* and *in vivo* study [J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 127: 120-126.

[2] WEICKERT M O. What dietary modification best improves insulin sensitivity and why? [J]. Clinical Endocrinology, 2012, 77(4): 508-512.

[3] ZHAO L, ZHANG F, DING X, et al. Gut bacteria selectively promoted by dietary fibers alleviate type 2 diabetes [J]. Science, 2018, 359(6380): 1151-1156.

[4] PAPATHANASOPOULOS A, CAMILLERI M. Dietary fiber supplements: Effects in obesity and metabolic syndrome and relationship to gastrointestinal functions [J]. Gastroenterology, 2010, 138(1): 65-72.

[5] LI X, FU B, GUO J, et al. Bamboo shoot fiber improves insulin sensitivity in high-fat diet-fed mice [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 49: 510-517.

[6] CHANDALIA M, GARG A, LUTJOHANN D, et al. Beneficial effects of high dietary fiber intake in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. New England Journal of Medicine, 2000, 342(19): 1392-1398.

[7] LI M M, ZHOU Y, ZUO L, et al. Dietary fiber regulates intestinal flora and suppresses liver and systemic inflammation to alleviate liver fibrosis in mice [J]. Nutrition, 2021, 81: 110959.

[8] GALISTEO M, DUARTE J, ZARZUELO A. Effects of dietary fibers on disturbances clustered in the metabolic syndrome [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2008, 19(2): 71-84.

[9] CÁRDENAS-CASTRO A P, BIANCHI F, TALLARICO-ADORNO M A, et al. *In vitro* colonic fermentation of Mexican “taco” from corn-tortilla and black beans in a simulator of human microbial ecosystem (SHIME®) system [J]. Food Research International, 2019, 118: 81-88.

[10] 李文青,祝孙婷,李圣洁,等.羊栖菜多糖及辅助超声降解对高脂斑马

鱼的降血脂作用[J].食品与生物技术学报,2024,43(5):156-163.

[11] LI X, GUO J, JI K, et al. Bamboo shoot fiber prevents obesity in mice by modulating the gut microbiota [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 32953.

[12] FANG L, LI J, CHEN X, et al. How lignocellulose degradation can promote the quality and function of dietary fiber from bamboo shoot residue by *Inonotus obliquus* fermentation [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139479.

[13] 李秀芬,赵冰,赵一鹤,等.不同处理对版纳甜龙竹竹笋膳食纤维结构与功能特性的影响[J].竹子学报,2022,40(4):61-68.

[14] 刘欣,姜鹏飞,傅宝尚.竹笋膳食纤维的提取,生理功能特性及其在食品中的应用[J].食品与发酵工业,2023,49(3):354-362.

[15] SAULNIER D M, GIBSON G R, KOLIDA S. *In vitro* effects of selected synbiotics on the human faecal microbiota composition [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, 66(3): 516-527.

[16] 王涵,刘倩,郭子晨,等.合生元制剂对小鼠抗氧化能力和肠道菌群的影响[J].食品研究与开发,2022,43(7):1-8.

[17] 焦亚婷,张雯姝,潘珊珊,等.金丝桃苷对高脂饮食小鼠脂代谢调节作用的多组学分析[J].生理学报,2022,74(6):970-978.

[18] 张子怡,刘航,张晨虹.高膳食纤维饮食对肥胖小鼠代谢健康和肠道菌群的影响[J].基因组学与应用生物学,2021,40(4):3717-3728.

[19] LI Q, FANG X, CHEN H, et al. Retarding effect of dietary fibers from bamboo shoot (*Phyllostachys edulis*) in hyperlipidemic rats induced by a high-fat diet [J]. Food & Function, 2021, 12(10): 4696-4706.

[20] WU W, HU J, GAO H, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics [J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.

[21] 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):105-110.

[22] LUO X, WANG Q, ZHENG B, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017,109: 1003-1009.

[23] 牛晓辉,佟童,李雨欣,等.人源乳杆菌联合菊粉对2型糖尿病小鼠的改善作用[J].食品科学,2022,43(21):209-217.

[24] 李亚男,马晓峰,王小英,等.乳杆菌联合甘露寡糖对非酒精性小鼠脂肪肝的影响[J].广东医学,2019,40(3):344-347.

[25] COX L M, CHO I, YOUNG S A, et al. The nonfermentable dietary fiber hydroxypropyl methylcellulose modulates intestinal microbiota [J]. The FASEB Journal, 2013, 27(2): 692-702.

[26] EVERARD A, LAZAREVIC V, DERRIEN M, et al. Responses of gut microbiota and glucose and lipid metabolism to prebiotics in genetic obese and diet-induced leptin-resistant mice [J]. Diabetes, 2011, 60(11): 2775-2786.

[27] ZHU X, CAI J, WANG Y, et al. A high-fat diet increases the characteristics of gut microbial composition and the intestinal damage associated with non-alcoholic fatty liver disease [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(23): 16733.

[28] 梁荫基,林琛莅,王少娜,等.肥胖相关非酒精性脂肪性肝病防治的新靶点:短链脂肪酸及其受体信号通路的保护作用[J].重庆医科大学学报,2016,41(6):628-631.

[29] SCHWIERTZ A, TARAS D, SCHäFER K, et al. Microbiota and SCFA in lean and overweight healthy subjects [J]. Obesity, 2010, 18(1): 190-195.

[30] ZHOU X, MA L, DONG L, et al. Bamboo shoot dietary fiber alleviates gut microbiota dysbiosis and modulates liver fatty acid metabolism in mice with high-fat diet-induced obesity [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 161698.

[31] LIU R, HONG J, XU X, et al. Gut microbiome and serum metabolome alterations in obesity and after weight-loss intervention [J]. Nature Medicine, 2017, 23(7): 859-868.

[32] BYNDLOSS M X, OLSAN E E, RIVERA-CHÁVEZ F, et al. Microbiota-activated PPAR-γ signaling inhibits dysbiotic Enterobacteriaceae expansion [J]. Science, 2017, 357(6351): 570-575.

[33] DEN BESTEN G, BLEEKER A, GERDING A, et al. Short-chain fatty acids protect against high-fat diet-induced obesity *via* a PPARγ-dependent switch from lipogenesis to fat oxidation [J]. Diabetes, 2015, 64(7): 2398-2408.