罗钧匀, 马文聪, 文艺涵, 等. 广佛手多糖对酸奶品质特性及降血糖活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 148−158. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080242

LUO Junyun, MA Wencong, WEN Yihan, et al. Effects of Polysaccharide of Finger Citron from Guangdong Province on the Quality Characteristics and Hypoglycemic Activity of Yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 148−158. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080242

· 研究与探讨 ·

广佛手多糖对酸奶品质特性及降血糖活性的影响

罗钧匀, 马文聪, 文艺涵, 王　叶, 周爱梅*

（华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642）

摘　要: 随着健康意识提升，添加植物成分的功能性酸奶日益受到市场青睐。在此背景下，本研究考察了广佛手多糖对酸奶品质特性及降血糖活性的影响。首先探究不同广佛手多糖添加量对酸奶发酵 pH 和乳酸菌数的影响，并测定 *α*-淀粉酶与 *α*-葡萄糖苷酶的抑制率，以确定适宜的广佛手多糖添加量；在此基础上，对最佳添加量的广佛手多糖酸奶进行品质特性分析；最后采用动物模型探究广佛手多糖酸奶的体内降血糖活性。研究发现，广佛手多糖添加量为 1 mg/mL 时能显著加快酸奶的发酵，使其 pH 更快到达发酵终点（pH4.6）（$P<0.05$），并在发酵过程中使酸奶的乳酸菌数显著提高（$P<0.05$）；且此添加量下，广佛手多糖酸奶对 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶的抑制率分别达到 78.48% 和 57.47%，显示出良好的降血糖潜力。品质特性分析显示，添加 1 mg/mL 广佛手多糖的酸奶的流变特性与未添加多糖的普通酸奶类似，且在 10.34 mm/s 速度下的口腔摩擦系数和粒径与未添加多糖的普通酸奶也无显著差异（$P>0.05$），说明广佛手多糖的添加不会改变酸奶的原有质构特性。动物实验证实，广佛手多糖酸奶能有效缓解糖尿病小鼠症状，显著改善多项生理指标。本研究首次将广佛手多糖应用于酸奶开发，证明了其在酸奶中的降血糖活性，为开发功能性降血糖酸奶提供了理论依据。

关键词: 广佛手多糖, 酸奶, 发酵过程, 品质特性, 降血糖活性

中图分类号: TS252.54　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0148−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080242　　本文网刊:

Effects of Polysaccharide of Finger Citron from Guangdong Province on the Quality Characteristics and Hypoglycemic Activity of Yogurt

LUO Junyun, **MA Wencong**, **WEN Yihan**, **WANG Ye**, **ZHOU Aimei***

（Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China）

Abstract: With the increasing emphasis on health consciousness, the market is progressively favoring functional yogurt enriched with plant-based ingredients. In this context, the present study examined the impact of polysaccharide of finger citron from Guangdong Province (FCP) on the quality characteristics and hypoglycemic activity of yogurt. Initially, the effects of different addition levels of the polysaccharide on yogurt fermentation pH and lactic acid bacteria count were explored, and the inhibition rates of *α*-amylase and *α*-glucosidase were measured to determine the optimal addition level. Subsequently, a quality characteristic analysis was performed on yogurt containing the optimal polysaccharide level. Finally, animal models were employed to investigate the *in vivo* hypoglycemic activity of the yogurt enriched with polysaccharides. The study demonstrated that the incorporation of 1 mg/mL of FCP markedly expedited yogurt fermentation, allowing the pH to reach the endpoint of 4.6 more swiftly ($P<0.05$), and significantly enhanced the proliferation of lactic acid bacteria during the fermentation process ($P<0.05$). At this concentration, the yogurt exhibited inhibition rates of

收稿日期: 2025−08−22

基金项目: 广东省省级科技计划项目（2023B0202010022）。

作者简介: 罗钧匀（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学与功能食品活性物, E-mail: 2724904509@qq.com。

*** 通信作者:** 周爱梅（1971−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与功能食品活性物, 农产品与水产品精深加工与综合利用, E-mail: zhouam@scau.edu.cn。

78.48% and 57.47% against α-amylase and α-glucosidase, respectively, indicating a promising hypoglycemic potential. An analysis of the quality characteristics revealed that yogurt with 1 mg/mL FCP addition maintained rheological properties comparable to those of plain yogurt without polysaccharide, with no significant differences observed in oral friction coefficient and particle size at a velocity of 10.34 mm/s (P>0.05), suggesting that FCP addition did not alter the inherent textural attributes of the yogurt. Animal experiments had confirmed that the yogurt enriched with FCP could effectively alleviate the symptoms of diabetic mice and significantly improve multiple physiological indicators. This investigation represents the inaugural application of FCP in the development of yogurt, highlighting its hypoglycemic properties and providing a theoretical foundation for the creation of functional hypoglycemic yogurt.

Key words: polysaccharide of finger citron from Guangdong Province; yogurt; fermentation process; quality characteristics; hypoglycemic activity

随着消费者健康意识的提升，功能性食品市场需求持续增长。现代消费者不仅关注食品的基础营养价值，更追求其附加的健康功效[1−3]。这类食品相比普通食品具有更高的活性价值，如改善血糖、增强免疫力、预防心血管等慢性疾病[4−6]。在功能性食品开发中，植物来源的功能成分因其天然安全性和多样生物活性正成为研究热点。此外，酸奶作为重要的功能性乳制品之一，过去十年间通过添加益生菌、益生元、植物来源活性物等多元功能成分实现产品升级[7−10]，形成了丰富的功能性酸奶产品种类。

佛手（*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle），属于芸香科柑橘属，又名佛手香橼、佛手柑，是我国传统药食同源植物。我国佛手资源存在显著地域性差异[11]，以广佛手（主要产于广东、广西）、川佛手（主要产于四川、云南）、金佛手（主要产于浙江金华）和闽佛手（主要产于福建）为代表，其中广佛手因生长周期短、果品优良、果实硕大及高产特性而备受关注[12]。课题组前期创新性地采用连续相变萃取法提取广佛手多糖（Finger citron polysaccharide, FCP），该方法所得多糖含量显著高于传统提取方法，为佛手活性成分的高效利用提供了新思路[13]；在此基础上，课题组进一步分离纯化获得了 FCP 的主要活性组分 FCP-2-1 并完成结构鉴定[13]，且研究发现 FCP-2-1 可显著缓解糖尿病小鼠症状，展现出良好的降血糖作用[14]；但其在酸奶中的应用研究鲜见报道，多糖酸奶的体内降血糖活性研究也鲜见报道。

鉴于此，本研究以广佛手多糖为原料，首先探究不同广佛手多糖添加量对酸奶发酵 pH 和乳酸菌数的影响，并测定 α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶的抑制率，以确定适宜的广佛手多糖添加量；在此基础上，对最佳添加量的广佛手多糖酸奶进行流变特性、口腔摩擦系数和粒径的测定，研究广佛手多糖对酸奶品质特性的影响；最后，采用链脲佐菌素（Streptozotocin, STZ）诱导胰岛损伤高血糖小鼠模型，探究广佛手多糖酸奶的体内降血糖活性。本研究不仅为广佛手多糖在功能性食品中的应用提供了理论依据，更为开发具有降血糖功效的酸奶产品奠定了科学基础，有望拓展功能性食品在糖尿病等慢性病膳食管理中的应用前景。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

广佛手多糖（主要成分为 FCP-2-1，纯度>95%，重均相对分子质量为 1.503×10^4 g/mol，半乳糖醛酸、半乳糖、阿拉伯糖的物质的量比为 0.685∶0.032∶0.283）　实验室自制[14]；纯牛奶　内蒙古蒙牛乳业股份有限公司；蔗糖　食品级，浙江天禾食品生物有限公司；酸奶发酵剂（L903）　丹麦科汉森（中国）有限公司；蔗糖　山东星光糖业有限公司；MRS 培养基、MC 培养基　青岛海博生物技术有限公司；雄性 C57BL/6N 小鼠　清洁级，体重 23±2 g，北京维通利华实验动物技术有限公司上海分公司提供，许可证号为 SCXK（浙）2024-0011；普通饲料（2530 kcal/kg）、高脂饲料（4057 kcal/kg）　常州鼠一鼠二生物科技有限公司；阿卡波糖、α-淀粉酶（8×10^5 U/mg）、α-葡萄糖苷酶（26.5 U/mg）、柠檬酸缓冲液（pH4.5）、STZ、二甲双胍　上海源叶生物科技有限公司；小鼠胰岛素 ELISA 试剂盒　武汉基因美科技有限公司；甘油三酯（Triglycerides, TG）试剂盒、总胆固醇（Total cholesterol, TC）试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇（Low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C）试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇（High-density lipoprotein cholesterol, HDL-C）试剂盒　南京建成生物工程研究所；其他所用化学试剂均为国产分析纯。

数显电热恒温水浴锅　巩义予华仪器有限公司；pH 计　上海梅特勒托利多科技（中国）有限公司；PL203 千分之一电子天平　上海梅特勒托利多科技（中国）有限公司；Enspire2003 多功能酶标仪　美国 pE 公司；5417R 高速冷冻离心机　德国 Eppendorf 公司；HAAKE ARS40/60 流变仪　美国 Thermo 公司；Zetasizer Nano 90s 纳米激光粒度仪　英国马尔文仪器有限公司；罗氏 ACCU-CHEK 血糖仪及试纸　上海罗氏诊断产品有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　广佛手多糖酸奶的制备　参考常旭龙等[15] 的方法，在纯牛奶中添加 7% 蔗糖，广佛手多糖添加量为 0、0.25、0.5、1、2、4 mg/mL，其中广佛手多糖添加量为 0 mg/mL 的酸奶称为普通酸奶（SY）。将混

合好的乳液迅速转移至经过灭菌处理的玻璃瓶中，放入 95 ℃ 水浴锅中灭菌 5 min，取出降温后，在无菌条件下添加 0.03 g/L 酸奶发酵剂 L903，然后放入培养箱中 43 ℃ 发酵 4 h 后取出，在超净台中进行搅拌破乳，将破乳后的乳液重新密封好，放入 4 ℃ 冰箱中冷藏 24 h，进行后熟处理，制得广佛手多糖酸奶（FCP-SY）。

1.2.2 不同添加量的广佛手多糖对酸奶发酵过程 pH 的影响 参考 pH 计使用说明，测定不同酸奶样品的 pH，每个样品重复测定三次，取平均值。

1.2.3 不同添加量的广佛手多糖对酸奶乳酸菌数的影响 根据 GB 4789.35-2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》[16] 对不同广佛手多糖添加量的酸奶进行乳酸菌数的测定。精确称取不同酸奶样品各 25 g，将其与 225 mL 无菌生理盐水充分混匀后，转移至经严格灭菌处理的锥形瓶中。把锥形瓶置于振荡培养箱内，振荡 30 min 后制成稀释度为 10^{-1} 的样品稀释液。吸取 1 mL 10^{-1} 的样品稀释液，加入含有 9 mL 无菌生理盐水的试管中，混匀后制成稀释度为 10^{-2} 的样品稀释液。按照此方法，依次进行梯度稀释，共完成 6 次稀释操作。

分别取 10^{-6}、10^{-7} 两个梯度稀释液各 1 mL，加入无菌培养皿中，随后向每个培养皿加入约 15 mL 已冷却的 MRS 培养基并混匀，每个稀释度设置 3 个平行，置于 36±1 ℃ 厌氧培养 72±2 h，培养结束后挑选菌落数处于 30~300 CFU 范围内的平板，根据检验标准要求进行乳杆菌计数。同时，另取 10^{-6}、10^{-7} 两个梯度的稀释液各 1 mL，加入无菌培养皿中，随后向每个培养皿加入约 15 mL 已冷却的 MC 培养基并混匀，每个稀释度设置 3 个平行，置于 36±1 ℃ 需氧培养 72±2 h，培养结束后挑选菌落数处于 30~300 CFU 范围内的平板，根据检验标准要求进行嗜热链球菌计数。乳杆菌数和嗜热链球菌数之和即为乳酸菌数。

1.2.4 广佛手多糖酸奶的体外酶活力抑制率测定 根据文献方法[14,17−18]，分别测定不同广佛手多糖添加量的酸奶的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制率，以等同于广佛手多糖添加量的阿卡波糖酸奶（A-Y）作为阳性对照。分别配制 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液（pH6.8）、5% 淀粉溶液、2 U/mL α-淀粉酶溶液、1% 3,5-二硝基水杨酸溶液、7.5 mmol/L 对硝基苯酚-α-D-吡喃半乳糖苷溶液、0.2 U/mL α-葡萄糖苷酶溶液和 0.1 mol/L 碳酸钠溶液。

α-淀粉酶测定：在样品试管中加入 300 μL 样品和 400 μL α-淀粉酶溶液，样品空白试管中以磷酸缓冲液替代 α-淀粉酶溶液，空白试管中以磷酸缓冲液替代样品，37 ℃ 孵育 10 min 后，各试管中加入 300 μL 的可溶性淀粉溶液，振荡后以 37 ℃ 孵育 15 min，再往各试管中加 2 mL 3,5-二硝基水杨酸溶液，煮沸 10 min，冷却后定容至 10 mL，于 540 nm 波长处测定吸光值。用式（1）计算 α-淀粉酶抑制率：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad 式（1）$$

式中：A_0 表示以磷酸缓冲液代替样品测得吸光值（空白试管吸光值）；A_1 表示样品试管吸光值；A_2 表示以磷酸缓冲液代替 α-淀粉酶测得吸光值（样品空白试管吸光值）。

α-葡萄糖苷酶测定：在样品孔中加入 50 μL 样品和 100 μL α-葡萄糖苷酶溶液，样品空白孔中以磷酸缓冲液替代 α-葡萄糖苷酶溶液，空白孔中以磷酸缓冲液替代样品，37 ℃ 孵育 10 min 后，各孔中加入 50 μL 的对硝基苯酚-α-D-吡喃半乳糖苷溶液，振荡后以 37 ℃ 孵育 25 min，再往各孔中加 50 μL 碳酸钠溶液，于 405 nm 波长处测定吸光值。用式（2）计算 α-葡萄糖苷酶抑制率：

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad 式（2）$$

式中：A_0 表示以磷酸缓冲液代替样品测得吸光值（空白孔吸光值）；A_1 表示样品孔吸光值；A_2 表示以磷酸缓冲液代替 α-葡萄糖苷酶测得吸光值（样品空白孔吸光值）。

1.2.5 广佛手多糖酸奶品质特性的测定

1.2.5.1 广佛手多糖酸奶流变特性的测定 参考 ZHANG 等[19] 的方法，采用流变仪对广佛手多糖酸奶的流变特性进行测定。P20/Ti-01170847 转子，间隙为 0.05 mm。在 25 ℃ 下对酸奶进行剪切扫描，剪切频率为 0.1~10 s^{-1}，时间为 180 s。频率扫描在 0.1~10 Hz 的范围内进行，恒定应变为 0.5%，每次测定重复三次。

1.2.5.2 广佛手多糖酸奶口腔摩擦系数的测定 参考常旭龙[20] 的方法，采用流变仪对广佛手多糖酸奶样品进行口腔摩擦学测定分析。打开流变仪内置软件“HAAKE RheoWin Job Manager”，确认探头 TR 13 45°，选择“Tribology measuring”程序，设定速率范围为 0~300 mm/s，温度为 37 ℃，调零，加样至配件 2/3 高度处，点击“Continue”开始测定，测定时间为 6 min，每次测定重复三次。

1.2.5.3 广佛手多糖酸奶粒径的测定 参考张丽静等[21] 的方法，使用纳米激光粒度仪测定广佛手多糖酸奶粒径，检测参数为：颗粒折射率 1.450，分散剂折射率 1.330，平衡时间 60 s。

1.2.6 广佛手多糖酸奶的体内降血糖活性测定

1.2.6.1 2 型糖尿病小鼠模型建立 采用 STZ 诱导建立胰岛损伤高血糖小鼠模型[14,22]。将 60 只 C57BL/6N 雄性小鼠适应性喂养 1 周，光暗循环为 12 h，温度为 22~28 ℃，空气湿度为 60%~70%；小鼠随机分为 6 组，每组 10 只，一组为正常组（Con），喂食普通饲料（2530 kcal/kg），其余 5 组为造模组，喂食高脂饲料（4057 kcal/kg）。按照 1%（w/v）的浓度，使

用 0.1 mol/L 的柠檬酸缓冲液（pH4.5）配制 STZ 溶液，各造模组小鼠均禁食不禁水 12 h 后进行腹腔注射 50 mg/kg 体重（Body weight, BW）的 STZ 溶液，而正常组小鼠腹腔注射 0.1 mol/L 柠檬酸缓冲液。造模成功的标准是各造模组小鼠的空腹血糖（Fasting blood glucose, FBG）不低于 11.1 mmol/L[14,22]，不合格的小鼠于 2 d 后再次注射 STZ，直至 FBG 符合标准。

待各造模组小鼠 FBG 达到预设标准后（记为第 0 d），随即对各组小鼠实施灌胃操作，给予相应受试物以开展后续干预研究，每日单次灌胃剂量的设置参考袁蜜等[23]的方法并进行改进。按照成年人（以体重 60 kg 计）每日食用 100 g 酸奶计算，小鼠的推荐食用量为人摄入量的 9.1 倍，即普通酸奶组（SY）、广佛手多糖酸奶组（FCP-SY）的小鼠灌胃剂量为 15.2 g/kg·BW 的普通酸奶或广佛手多糖酸奶；进而以酸奶中广佛手多糖的添加量计算得广佛手多糖组（FCP）小鼠灌胃剂量为 15.2 mg/kg·BW 广佛手多糖；而阳性（二甲双胍）组（Dix）小鼠灌胃剂量为 50 mg/kg·BW 二甲双胍；正常组与模型组（Model）小鼠灌胃物质为无菌生理盐水。连续灌胃 28 d 后，将小鼠禁食 12 h，随后使用乙醚对小鼠进行麻醉处理，采用摘眼球取血法取小鼠全血。本实验方案已获得动物伦理委员会批准（许可证号：SYXK（粤）2024-0136）。

1.2.6.2　小鼠生长情况及血糖测定　在 0~28 d 期间，每天记录一次小鼠是否存在异常状态，并称量记录小鼠体重。同时，每周测定各组小鼠的摄食量、饮水量及空腹血糖。空腹血糖测定在小鼠禁食不禁水 12 h 后进行，测试过程按照血糖仪说明书操作。

1.2.6.3　口服葡萄糖耐量试验（Oral glucose tolerance test, OGTT）　实验结束前 1 d（灌胃第 27 d）进行 OGTT。参考 LI 等[24]的方法，将各组小鼠禁食不禁水 12 h，按 2 g/kg·BW 灌胃给予浓度为 50% 的葡萄糖溶液，于 0、30、60、120 min 测定小鼠血糖值，记为 BG_0、BG_{30}、BG_{60}、BG_{120}。按式（3）计算小鼠血糖浓度曲线下面积（Areas under the glucose curve, AUC）：

$$AUC[mmol/(L\cdot h)] = \frac{(BG_0+BG_{30})\times 0.5+(BG_{30}+BG_{60})\times 0.5+BG_{60}+BG_{120}}{2} \quad 式（3）$$

1.2.6.4　血清胰岛素含量的测定与胰岛素抵抗指数、胰岛素敏感性指数的计算　将小鼠全血在 4 ℃、1000×g 下离心 10 min。按照 ELISA 试剂盒要求对血清中胰岛素进行检测。

胰岛素抵抗指数（Homeostasis model assessment of insulin resistancc, HOMA-IR）按式（4）计算：

$$HOMA\text{-}IR = \frac{\text{血清胰岛素浓度 (mU/L)}\times\text{空腹血糖浓度 (mmol/L)}}{22.5} \quad 式（4）$$

胰岛素敏感性检测指数（Quantitative insulin sensitivity check index, QUICKI）按式（5）计算：

$$QUICKI = \frac{1}{\log(\text{血清胰岛素浓度(mU/L)})+\log(\text{空腹血糖浓度(mg/dL)})} \quad 式（5）$$

1.2.6.5　血清血脂水平的测定　将小鼠全血在 4 ℃、1000×g 下离心 10 min。按照对应试剂盒要求对各组小鼠血清中的 TG、TC、LDL-C 与 HDL-C 水平进行检测。

1.3　数据处理

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行显著性分析，$P<0.05$ 表示存在显著差异，$P<0.01$ 表示存在极显著差异，$P>0.05$ 则无统计学意义。以上实验重复三次，实验结果用均值±标准差表示，使用 Origin 2022 软件进行分析作图。

2　结果与分析

2.1　不同添加量的广佛手多糖对酸奶发酵过程 pH 的影响

如图 1（a）所示，各组酸奶的 pH 随着发酵时间的增加而降低，呈现出酸奶所特有的发酵特征。在发酵 4 h 时，各组广佛手多糖酸奶的 pH 均显著低于相同时间下普通酸奶的 pH（$P<0.05$），此时广佛手多糖添加量为 1 mg/mL 的酸奶的 pH 为 4.53，显著低于其他添加量的多糖酸奶组（$P<0.05$）。一般认为 pH 为 4.6 时为酸奶发酵的终点，在此 pH 下，酪蛋白达到等电点，酪蛋白微粒会最大限度地凝聚，形成强度最高、最稳定的凝胶结构[25−26]。实验结果表明广佛手多糖添加量为 1 mg/mL 的酸奶最先达到发酵终点，该添加量的广佛手多糖能缩短酸奶的发酵时间。多糖对酸奶发酵过程 pH 的影响与多糖的浓度有关，DU 等[27]的研究也发现，添加 0.5%~1.5% 的桑葚渣多糖会使酸奶发酵体系的 pH 降低更快，表明该多糖是一种益生元，可以增加微生物的数量，促进乳酸菌的活力，加快发酵速度，从而加速酸奶中有机酸的积累。多糖对酸奶发酵过程 pH 的影响还与多糖的种类有关[28]，如研究发现，从蘑菇中分离出的 β-D-葡聚糖不会对酸奶发酵的 pH 产生影响[29]。

2.2　不同添加量的广佛手多糖对酸奶乳酸菌数的影响

如图 1（b、c）所示，在酸奶发酵至 4 h 时，广佛手多糖添加量为 2 mg/mL 的酸奶中的乳杆菌数最高，其次是广佛手多糖添加量为 1 mg/mL 的酸奶，两组间无显著差异（$P>0.05$）且显著高于其他各组（$P<0.05$）；而在酸奶发酵至 4 h 时，广佛手多糖添加量为 0.5 mg/mL 的酸奶中嗜热链球菌数显著高于其他各组（$P<0.05$）。

乳酸菌数为乳杆菌数与嗜热链球菌数之和，各组酸奶的乳酸菌数均随着发酵时间的增加而增加。如图 1（d）所示，在酸奶发酵 4 h 时，添加量为 1 mg/mL

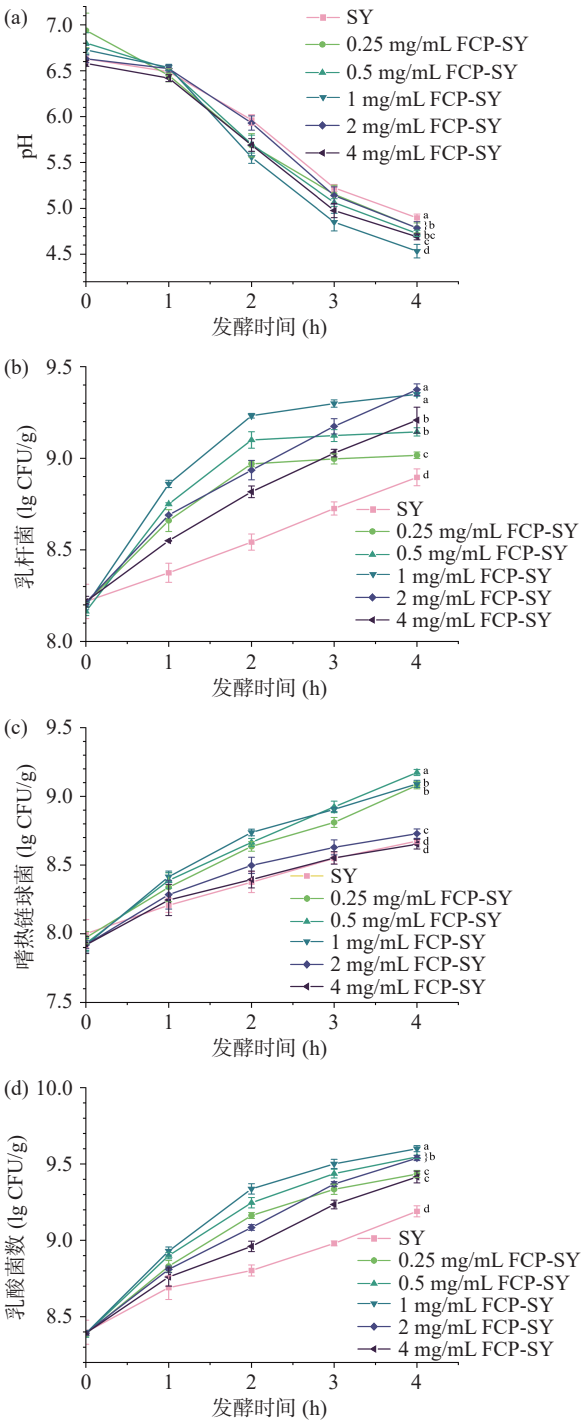


图 1 广佛手多糖酸奶发酵过程中 pH(a)、乳杆菌数(b)、嗜热链球菌数(c)、乳酸菌数(d)的变化

Fig.1 Changes in pH (a), the counts of *Lactobacillus* (b), *Streptococcus thermophilus* (c), and total lactic acid bacteria (d) during the fermentation process of FCP-SY

注: 不同小写字母表示各组间有显著差异(P<0.05)。

广佛手多糖的酸奶的乳酸菌数显著高于其他添加量的多糖酸奶(P<0.05), 且比普通酸奶增加了 157.40%(P<0.05)。说明广佛手多糖对酸奶中乳酸菌具有明显的促进增殖作用, 且添加量为 1 mg/mL 时效果优于其他添加量。

结果表明, 不同添加量的广佛手多糖对酸奶中乳酸菌数均有积极影响, 但广佛手多糖的添加量并非越高效果就越好。ALJEWICZ 等[28] 和 YANG 等[30] 的研究也报告了类似的趋势, 这些研究也发现, 当多糖浓度过高时, 酸奶中的发酵菌计数反而会减少。推测其原因可能是在蔗糖含量固定的情况下, 多糖浓度的增加会降低酸奶的水分活性[30], 或导致酸奶中的蛋白质发生变性现象, 使蛋白质三维结构改变; 这些变化会影响乳酸菌对营养物质的吸收利用以及乳酸的转化效率[31−32]。

2.3 广佛手多糖酸奶体外酶活力抑制率测定

如图 2 所示, 与普通酸奶相比, 广佛手多糖酸奶和阿卡波糖酸奶都极显著提高了 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率(P<0.01)。广佛手多糖或阿卡波糖在酸奶中的添加量为 0.25~4 mg/mL 时, 对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率均呈现出先上升后下降的变化趋势, 且都在 1 mg/mL 的添加量下达到最高活性(P<0.05)。酸奶中广佛手多糖添加量为 1 mg/mL 时对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率分别为 78.48% 和 57.47%, 依次比普通酸奶增加了 337.95% 和 76.78%(P<0.05)。

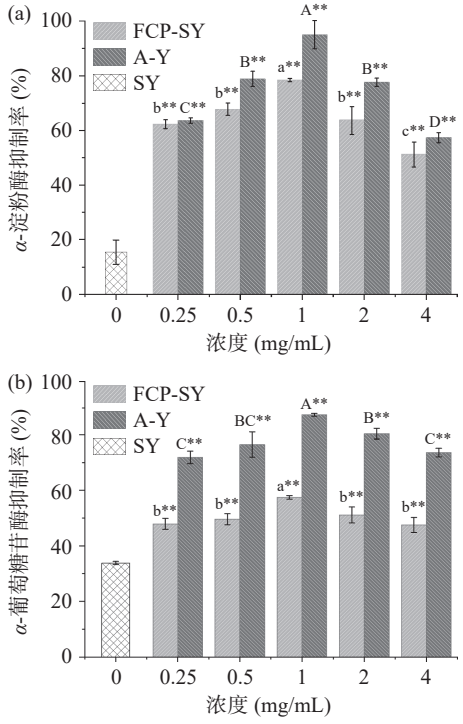


图 2 广佛手多糖酸奶与阿卡波糖酸奶对 α-淀粉酶(a)和 α-葡萄糖苷酶(b)抑制率的影响

Fig.2 Effects of FCP-SY and A-Y on the inhibition rates of α-amylase (a) and α-glucosidase (b)

注: 不同小写字母表示 FCP-SY 组间有显著差异(P<0.05); 不同大写字母表示 A-Y 组间有显著差异(P<0.05); *表示与 SY 的差异显著(P<0.05); **表示与 SY 的差异极显著(P<0.01)。

α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶作为关键消化酶, 在人体糖代谢过程中发挥着重要作用。它们能够通过水解体内的碳水化合物、降解糖原生成葡萄糖, 进而影响血糖水平。因此, 通过抑制这两种酶的活性, 可有效减少机体内的葡萄糖含量, 增强胰岛素敏感性, 从而达到调控血糖的目的[33−34]。如郝绍杰等[35] 在酸奶

中添加荷叶粉水提液，结果表明该酸奶的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制率分别达到 46.37% 和 25.72%，显著性高于普通酸奶（P<0.05）。本研究的结果也表明，在酸奶中添加广佛手多糖能够显著提升其对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制活性。结合以上实验结果，确定广佛手多糖在酸奶中的最适添加量为 1 mg/mL，并以此添加量进行后续研究。

2.4　广佛手多糖酸奶品质特性的测定

2.4.1　广佛手多糖酸奶的流变特性　如图 3（a）所示，普通酸奶和广佛手多糖酸奶均表现出假塑性流体行为，即随着剪切速度的增加，酸奶的粘度明显降低。这是因为在剪切速率大于 0.1 s^{-1} 时，酸奶中蛋白质分子间的交联缠结会在形变力的作用下减弱[36]。在剪切速率小于 0.2 s^{-1} 时，广佛手多糖酸奶的粘度高于普通酸奶。FENG 等[37] 研究指出，高粘度的食品具有延缓胃内容物排空和增强饱腹感的作用，从而可以缓和餐后血糖水平的升高。

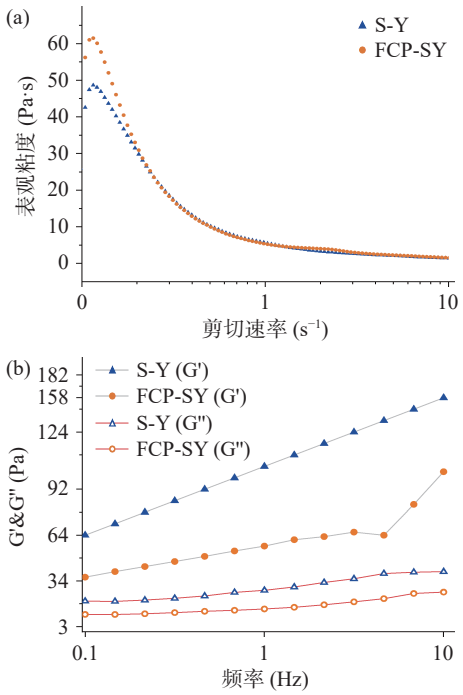


图 3　普通酸奶和广佛手多糖酸奶的剪切粘度流动曲线（a）、G'和 G"随频率扫描的变化（b）

Fig.3　Shear viscosity flow curves (a) and variations of G' and G" with frequency sweep (b) of SY and FCP-SY

频率扫描中储能模量（G'）和损耗模量（G"）可分别反映酸奶的弹性、粘性，因此可用于研究酸奶在逐渐升高载荷时的粘弹性响应[38]。G'和 G"越大，说明凝胶蛋白之间形成的凝胶网络结构越稳定。如图 3（b）所示，两种酸奶均呈现出线性粘弹性行为。YU 等[39] 的研究指出，G'大于 G"表示酸奶具有弱凝胶性，会形成粘弹性的凝胶网络结构。本研究发现，在低幅振荡下，两种酸奶的 G'均大于 G"，且普通酸奶的 G'和 G"与广佛手多糖酸奶相比更大，表明普通酸奶形成的凝胶网络结构比添加广佛手多糖的酸奶更稳定。类似的结果在 BRÜLS 等[40] 的研究中也有报道，多糖的加入可能会干扰蛋白质之间的交联或改变水合作用，从而导致酸奶形成的凝胶网络强度低于未添加多糖的普通酸奶。

2.4.2　广佛手多糖酸奶的口腔摩擦系数　口腔摩擦系数是反映酸奶界面性质的重要指标，可用于预测酸奶的口感，其数值与顺滑感呈负相关[41]。如图 4 所示，在速度 0~300 mm/s 的测试范围内，两种酸奶的摩擦系数较为接近（P>0.05），提示在此速度范围内，广佛手多糖酸奶与普通酸奶的顺滑感差异不大。口腔加工食物过程中，舌头表面运动的平均速度约为 10.34 mm/s[42]。经测定，在 10.34 mm/s 的速度下，普通酸奶和广佛手多糖酸奶的口腔摩擦系数依次为 0.19±0.05、0.23±0.07，两者无显著差异（P>0.05），表明广佛手多糖酸奶仍能提供与普通酸奶相近的顺滑口感，兼顾了功能性与食用接受度。

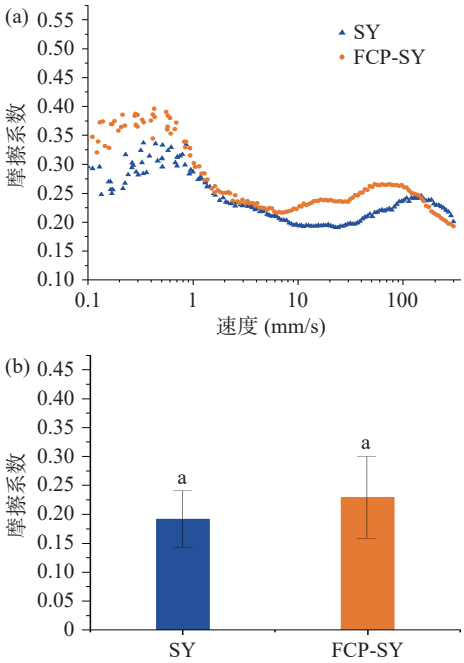


图 4　普通酸奶和广佛手多糖酸奶的口腔摩擦系数图（a）、摩擦速度在 10.34 mm/s 时的口腔摩擦系数（b）

Fig.4　Oral friction coefficient plots of SY and FCP-SY (a), oral friction coefficients of SY and FCP-SY at a friction speed of 10.34 mm/s (b)

注：相同字母表示各组间无显著差异（P>0.05）；图 5 同。

2.4.3　广佛手多糖酸奶的粒径　酸奶中颗粒的粒径与酸奶的稳定性和口感密切相关，粒径越小，酸奶的体系稳定性越好[43]。大蛋白质颗粒会赋予酸奶一种颗粒状的质地，从而降低消费者的喜爱程度[44]。由图 5 可知，普通酸奶的蛋白质胶束直径在 2500~6440 nm 之间，呈现两个峰值，平均粒度为 3975±1083.12 nm，其中第二个峰值较高，颗粒度较大；广佛手多糖酸奶的蛋白质胶束直径在 3000~5600 nm 之间，呈现单峰值，平均粒度为 4176.67±610.44 nm，高于普通酸奶，但差异不显著（P>0.05）。由此可知，在

粒径方面，广佛手多糖酸奶和普通酸奶不存在显著差异。多糖对酸奶粒径的影响可能与多糖种类和浓度等因素有关。如研究发现，添加 0.025% 百香果皮果胶多糖会使酸奶粒径增大，可能原因是多糖和酪蛋白形成聚集体[45]；而添加 0.6 g/L 山楂叶多糖则会使酸奶粒径减小，可能是因为山楂叶多糖带负电荷，从而与带正电的酪蛋白之间产生静电引力，导致多糖与酸奶粒子间距变短，粒径减小[43]。推测广佛手多糖对酸奶粒径的影响同样并非单一因素所能决定。

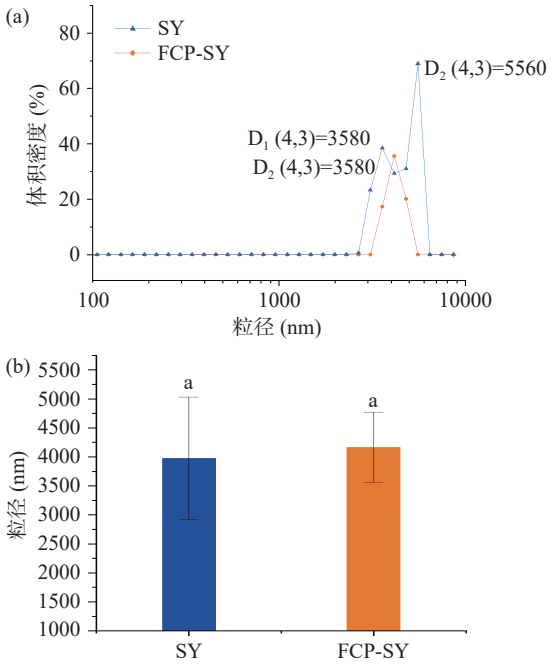


图 5 普通酸奶和广佛手多糖酸奶的粒径图(a)与平均粒径(b)

Fig.5 Particle size distribution diagrams (a) and average particle size values (b) of SY and FCP-SY

2.5 广佛手多糖酸奶的体内降血糖活性

2.5.1 广佛手多糖酸奶对糖尿病小鼠体重、摄食量和饮水量的影响 如表 1 所示，第 28 d 时普通酸奶组和模型组小鼠的体重极显著低于干预前(即第 0 d，各造模组小鼠 FBG 达到预设标准时)(P<0.01)，同时显著低于其他实验组(P<0.05)；阳性组和广佛手多糖酸奶组小鼠的体重在第 28 d 时显著高于干预前(分别为 P<0.01 和 P<0.05)，两组间没有显著差异(P>0.05)。高脂高糖饮食结合 STZ 造模方法会增加小鼠的摄食量和饮水量[46]。与正常组小鼠相比，各造模组小鼠的摄食量和饮水量显著增加(P<0.05)，表明造模已影响小鼠的生理活动。在第 28 d 时，模型组小鼠的摄食量和饮水量显著高于其他各组(P<0.05)；普通酸奶组和模型组小鼠的摄食量和饮水量在第 28 d 时极显著高于干预前(P<0.01)。经二甲双胍、广佛手多糖和广佛手多糖酸奶干预后，小鼠摄食量和饮水量的增加情况得到抑制，且阳性组与广佛手多糖酸奶组间无显著差异(P>0.05)。此规律与相关研究结果类似，例如黄芪多糖干预糖尿病小鼠后也可使小鼠体重增加并控制小鼠摄食量和饮水量的增加[47]。上述结果表明，广佛手多糖酸奶在促进小鼠体重增长、控制摄食量和饮水量方面的效果与阳性药物相当。

2.5.2 广佛手多糖酸奶对糖尿病小鼠空腹血糖的影响 如图 6 所示，正常组小鼠的平均空腹血糖处于正常生理范围，而各造模组小鼠的空腹血糖均显著升高(P<0.05)。在干预过程中，普通酸奶组和模型组小鼠的空腹血糖呈现上升趋势，在第 28 d 时均极显著高于第 0 d(P<0.01)，且两组间无显著差异(P>0.05)，表明普通酸奶没有降血糖的作用，反而可能由于配方中含蔗糖而推动血糖的升高。ASSIS 等[48] 的研究中也发现了类似现象，该研究也发现普通酸奶本身无降血糖作用，甚至会导致大鼠血糖水平逐渐升高。阳性组、广佛手多糖组和广佛手多糖酸奶组小鼠的空腹

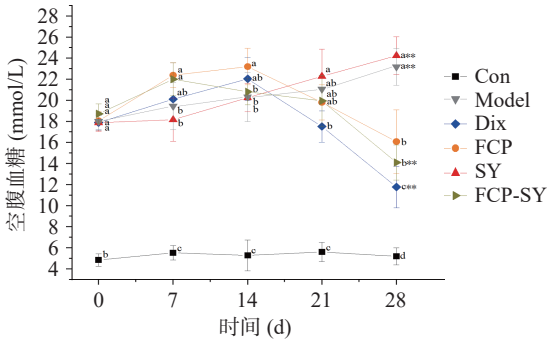


图 6 广佛手多糖酸奶对 2 型糖尿病小鼠空腹血糖的影响

Fig.6 Effects of FCP-SY on fasting blood glucose in type 2 diabetic mice

注：不同小写字母表示各组间有显著差异(P<0.05)；**表示第 28 d 与第 0 d 时小鼠空腹血糖差异极显著(P<0.01)。

表 1 广佛手多糖酸奶对 2 型糖尿病小鼠体重、摄食量和饮水量的影响

Table 1 Effects of FCP-SY on body weight, food consumption, and water intake in type 2 diabetic mice

组别	体重(g)		摄食量(kcal)		饮水量(g)	
	第0 d	第28 d	第0 d	第28 d	第0 d	第28 d
Con	24.11±0.80^{a}	27.68±1.39^{a**}	7.05±1.00^{b}	7.87±0.23^{d}	5.44±0.11^{b}	5.40±0.11^{d}
Model	21.89±1.54^{b}	20.41±1.04^{d**}	13.10±1.43^{a}	22.27±1.89^{a**}	10.30±2.24^{a}	17.90±4.13^{a*}
Dix	22.52±1.18^{b}	24.25±1.15^{b**}	11.81±0.86^{a}	12.66±0.92^{c}	10.93±2.73^{a}	7.83±1.32^{c}
FCP	22.04±0.74^{b}	23.04±1.17^{c}	12.90±1.49^{a}	14.79±0.63^{c}	11.54±1.33^{a}	12.81±0.92^{b}
SY	23.00±1.23^{b}	20.69±0.70^{d**}	13.76±2.43^{a}	19.72±1.72^{b**}	9.94±0.65^{a}	14.98±1.02^{b**}
FCP-SY	22.42±0.91^{b}	23.41±0.59^{bc*}	13.02±0.86^{a}	12.82±1.95^{c}	9.44±1.16^{a}	9.22±0.74^{c}

注：不同小写字母表示各组间有显著差异(P<0.05)；*表示第28 d与第0 d的差异显著(P<0.05)，**表示第28 d与第0 d的差异极显著(P<0.01)。

血糖值在 28 d 内呈现出先上升后下降的变化趋势。在第 28 d 时，二甲双胍降血糖效果最优，小鼠的空腹血糖与模型组相比下降了 49.18%，其次是广佛手多糖酸奶，小鼠的空腹血糖与模型组相比下降了 39.17%，且阳性组和广佛手多糖酸奶组小鼠的空腹血糖都与干预前有极显著差异（P<0.01），分别下降了 34.15% 和 24.72%，表明广佛手多糖酸奶能有效降低糖尿病小鼠的空腹血糖水平。

2.5.3　广佛手多糖酸奶对糖尿病小鼠口服葡萄糖耐量的影响　临床上会结合 OGTT 进一步确定患者是否患有糖尿病，这是因为部分患者空腹血糖虽处于正常范围，但其糖耐量却表现异常[49]。如图 7 所示，给予葡萄糖后，各组小鼠平均血糖水平升高，除模型组外各组血糖值在 30 min 时达到峰值，然后逐渐下降。普通酸奶组小鼠和模型组小鼠的 AUC 值最高，组间无显著差异（P>0.05），分别为 41.07 mmol/(L·h) 和 40.80 mmol/(L·h)，较正常组小鼠的 AUC 值分别升高 181.17% 和 179.29%，说明普通酸奶对糖尿病小鼠的糖耐量无改善作用。与模型组小鼠相比，阳性组、广佛手多糖组和广佛手多糖酸奶组小鼠的 AUC 值分别降低 19.44 %、13.17% 和 16.08%，均呈现显著下调（分别为 P<0.01、P<0.05 和 P<0.01），且三者的 AUC 值无显著差异（P>0.05），提示三种干预方式对糖耐量受损的改善效果相当。上述结果表明，广佛手多糖酸奶干预在一定程度上可以改善糖尿病小鼠葡萄糖不耐受的情况。类似的结果在 BAN 等[50] 的研究中也有发现。该研究用罗汉果提取物制备合生元酸奶，结果发现，添加 30 mg/mL 罗汉果提取物的酸奶组大鼠的葡萄糖耐量增强，AUC 值显著低于模型组（P<0.05），且与二甲双胍阳性组无显著差异（P>0.05）。

2.5.4　广佛手多糖酸奶对糖尿病小鼠血清胰岛素含量、胰岛素抵抗指数和胰岛素敏感性指数的影响　胰岛素是由胰岛 β 细胞分泌的蛋白质激素，主要参与机体糖代谢调节及血糖平衡维持。2 型糖尿病患者因胰岛素抵抗，常出现代偿性胰岛素过度分泌，导致血清胰岛素含量升高[51]。通过计算胰岛素含量、HOMA-IR 和 QUICKI，可以评估广佛手多糖酸奶对糖尿病小鼠胰岛素抵抗的干预效果。如图 8(a)所示，模型组小鼠的血清胰岛素含量较正常组极显著升高（P<0.01）；广佛手多糖酸奶组小鼠的血清胰岛素含量较广佛手多糖组、普通酸奶组和模型组极显著降低 34.68%、48.53% 和 69.53%（P<0.01），表明广佛手多糖酸奶可有效降低糖尿病小鼠胰岛素含量，且其

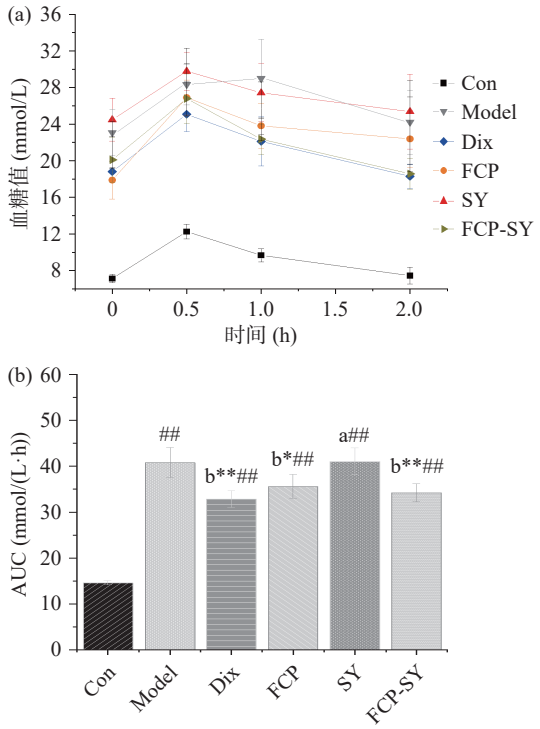


图 7　广佛手多糖酸奶对 2 型糖尿病小鼠糖耐量的影响

Fig.7　Effects of FCP-SY on glucose tolerance in type 2 diabetic mice

注：(a)OGTT 血糖曲线图；(b)AUC 值；不同小写字母表示各干预组间有显著差异（P<0.05）；#表示与 Con 组的差异显著（P<0.05），##表示与 Con 组的差异极显著（P<0.01）；*表示与 Model 组的差异显著（P<0.05），**表示与 Model 组的差异极显著（P<0.01）；图 8、图 9 同。

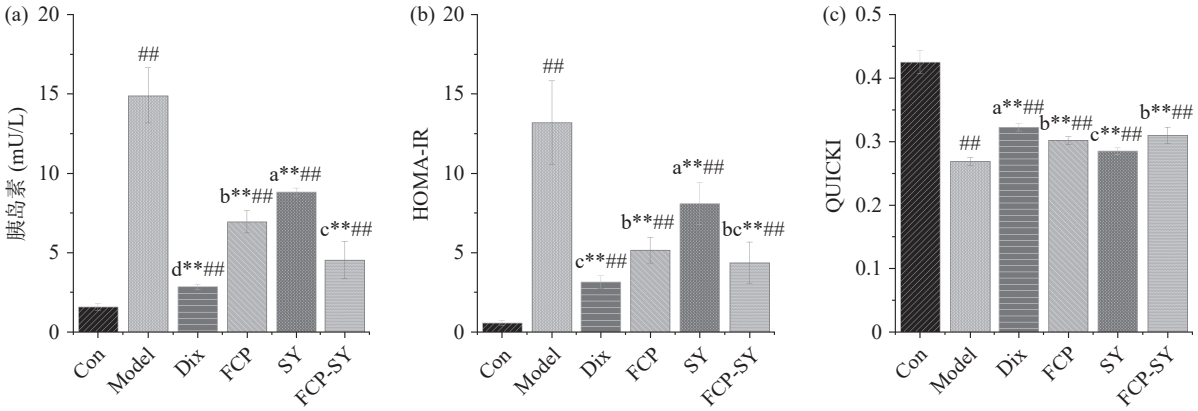


图 8　广佛手多糖酸奶对 2 型糖尿病小鼠血清胰岛素含量(a)、胰岛素抵抗指数(b)和胰岛素敏感性指数(c)的影响

Fig.8　Effects of FCP-SY on serum insulin levels (a), insulin resistance index (b), and insulin sensitivity index (c) in type 2 diabetic mice

效果优于单纯广佛手多糖干预。图 8(b、c)表明,模型组小鼠与正常组小鼠相比,HOMA-IR 极显著提高(P<0.01),QUICKI 则极显著降低(P<0.01);广佛手多糖酸奶组小鼠的 HOMA-IR 比模型组小鼠极显著降低 66.99%(P<0.01),QUICKI 较模型组极显著提升 15.28%(P<0.01),这两项结果与广佛手多糖组相比无显著差异(P>0.05)。结果显示,广佛手多糖酸奶可显著缓解胰岛素抵抗,有效提升胰岛素敏感性。李海珊[52] 的研究也发现,婺源绿茶多糖可通过降低 HOMA-IR、提高 QUICKI 缓解糖尿病大鼠胰岛素抵抗。本研究结果与之一致,经广佛手多糖酸奶干预后,HOMA-IR 和 QUICKI 两项指标较模型组均有显著改善,表明无论是多糖还是以其为核心开发的功能性食品,均可通过调节 HOMA-IR 与 QUICKI 指标,实现降低胰岛素抵抗、提升胰岛素敏感性的生物学效应。

2.5.5 广佛手多糖酸奶对 2 型糖尿病小鼠血脂水平的影响 DIAMOND 等[53] 研究指出,高血糖与血脂代谢紊乱密切相关,且 2 型糖尿病并发症常伴随血脂异常,因此血脂水平可作为反映血糖控制情况的关键指标之一。

如图 9 所示,模型组小鼠与正常组小鼠相比,血清中 TG、TC 和 LDL-C 含量极显著升高(P<0.01),HDL-C 含量极显著降低(P<0.01),说明糖尿病小鼠出现较严重的脂代谢异常。广佛手多糖酸奶组小鼠血清 TG、TC 和 LDL-C 含量较模型组小鼠分别极显著降低 80.52%、44.70% 和 60.16%(P<0.01),较普通酸奶组小鼠分别显著降低 66.67%、33.56% 和 50.91%(P<0.05),其中广佛手多糖酸奶组小鼠血清 TG 含量还显著低于广佛手多糖组(降低 44.49%,P<0.05),而 TC 和 LDL-C 含量降幅与广佛手多糖组无显著差异(P>0.05);广佛手多糖酸奶组小鼠血清 HDL-C 含量较广佛手多糖组、普通酸奶组和模型组小鼠显著升高 28.16%、61.97% 和 167.67%(P<0.05)。上述结果表明,广佛手多糖酸奶可有效抑制糖尿病小鼠血清 TC、TG 和 LDL-C 含量的异常升高以及 HDL-C 的异常降低,且在改善 TG 和 HDL-C 方面效果优于单纯广佛手多糖干预。OBAROAKPO 等[54] 的研究也表明,具有降糖活性的藜麦酸奶可显著降低糖尿病小鼠血清 TC、TG 和 LDL-C 的含量,同时增加 HDL-C 的含量(P<0.05)。

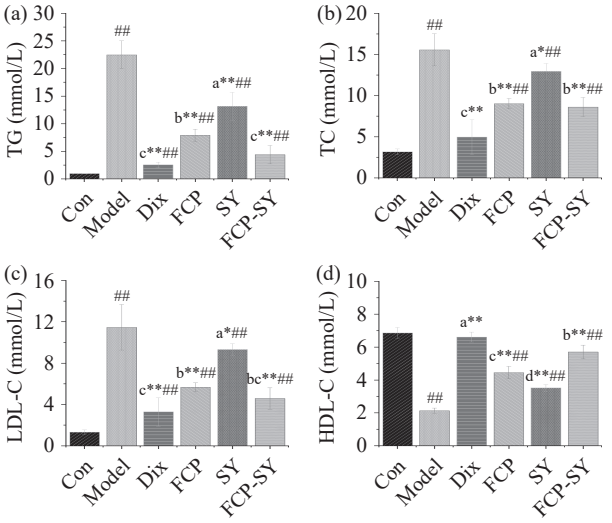


图 9 广佛手多糖酸奶对 2 型糖尿病小鼠 TG(a)、TC(b)、LDL-C(c)和 HDL-C(d)的影响

Fig.9 Effects of FCP-SY on TG (a), TC (b), LDL-C (c), and HDL-C (d) in type 2 diabetic mice

3 结论

本研究系统探究了添加广佛手多糖对酸奶品质和降血糖活性的影响。当广佛手多糖添加量为 1 mg/mL 时,能加快酸奶的发酵,促进乳酸菌增殖,且可显著提升酸奶对 α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶的抑制活性,表明该剂量下广佛手多糖酸奶具备良好降糖潜力。品质特性分析显示,添加 1 mg/mL 广佛手多糖的酸奶的流变特性与普通酸奶相近,口腔摩擦系数在关键速度(10.34 mm/s)也无显著差异,表明其能提供与普通酸奶相近的顺滑口感。此外,添加 1 mg/mL 广佛手多糖的酸奶的粒径分布也与普通酸奶无显著差异,表明广佛手多糖的添加未破坏酸奶基础品质,兼顾功能性与食用接受度。动物实验表明,在干预 28 d 后,与模型组相比,广佛手多糖酸奶组小鼠空腹血糖下降 39.17%,糖耐量受损显著改善,血清胰岛素含量减少 69.53%,HOMA-IR 降低 66.99%,QUICKI 提升 15.28%,胰岛素敏感性明显提高,同时血脂水平也得到改善,其中血清 TG、TC 和 LDL-C 含量较模型组小鼠分别显著降低 80.52%、44.70% 和 60.16%,而 HDL-C 升高 167.67%。表明添加 1 mg/mL 广佛手多糖的酸奶可有效缓解糖尿病症状,且与广佛手多糖相比有更好的效果。

综上,本研究首次将广佛手多糖应用于酸奶开发,并证明该多糖原有的降血糖活性在酸奶这一载体中能够得以有效发挥。这一成果不仅拓展了佛手资源的功能化利用途径,也为功能性酸奶在糖尿病膳食管理中的应用提供了理论支持。

© The Author(s) 2026. 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] DELGADO-FERNÁNDEZ P, MORENO F J, CORZO N, et al. Physical properties of synbiotic yogurts as affected by the acidification rate[J]. International Dairy Journal, 2020, 105: 104665.

[2] GHADERI-GHAHFAROKHI M, YOUSEFVAND A, AHMADI GAVLIGHI H, et al. Developing novel synbiotic low - fat yogurt with fucoxylogalacturonan from tragacanth gum: Investigation of quality parameters and *Lactobacillus casei* survival[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4491−4504.

[3] SARITAS S, DUMAN H, KARAV S. Nutritional and functional aspects of fermented algae[J]. International Journal of Food

Science and Technology, 2024, 59(8): 5270−5284.
[4] ALEMAN R S, PAGE R, CEDILLOS R, et al. Influences of yogurt with functional ingredients from various sources that help treat leaky gut on intestinal barrier dysfunction in Caco-2 cells[J]. Pharmaceuticals, 2023, 16(11): 1511.
[5] HOXHA R, EVSTATIEVA Y, NIKOLOVA D. Physicochemical, rheological, and sensory characteristics of yogurt fermented by lactic acid bacteria with probiotic potential and bioprotective properties[J]. Foods, 2023, 12(13): 2552.
[6] LUO H, BAO Y, ZHU P. Development of a novel functional yogurt rich in lycopene by *Bacillus subtilis*[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135142.
[7] TAYYEBYMOGHADAM S, EHSANI M. Comparison of the effect of extracted inulin from native chicory root with commercial inulin on the viability of probiotics and physicochemical, rheological and sensory properties of synbiotic yogurt[J]. Food Science and Technology, 2020, 17(99): 91−109.
[8] POURRAJAB B, NADERI N, JANANI L, et al. The impact of probiotic yogurt versus ordinary yogurt on serum sTWEAK, sCD163, ADMA, LCAT and BUN in patients with chronic heart failure: a randomized, triple-blind, controlled trial[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(13): 6024−6035.
[9] ESSAWY M A, BADR E A, ABOHADIDA R M. Effect of mothers' application of yogurt probiotic bacteria on relieving their young children's acute gastroenteritis[J]. Egyptian Journal of Health Care, 2024, 15(1): 1153−1169.
[10] RAHMAN M S, EMON D D, NUPUR A H, et al. Isolation and characterization of probiotic lactic acid bacteria from local yogurt and development of inulin-based synbiotic yogurt with the isolated bacteria[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100457.
[11] XU Y, WANG Y, LI R, et al. Characteristic aroma analysis of finger citron in four different regions based on GC-MS-HS-SPME and ROAV[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(12): 1.
[12] 马文聪, 吴宇箫, 钟诚, 等. 基于网络药理学和分子对接探究广佛手成分的降血糖作用机制[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 10−18. [MA Wencong, WU Yuxiao, ZHONG Cheng, et al. Exploration on hypoglycemic mechanism of components in Guangdong finger citron based on network pharmacology and molecular docking[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 10−18.]
[13] WANG S, YANG Y, WANG Q, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of a polysaccharide from finger citron extracted by continuous phase-transition extraction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124491.
[14] YANG Y, LUO J, WANG S, et al. A water-soluble polysaccharide from finger citron ameliorates diabetes mellitus via gut microbiota-GLP-1 pathway in high-fat diet and streptozotocin-induced diabetic mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140126.
[15] 常旭龙, 宋卓森, 詹圳铭, 等. 广佛手黄酮对酸奶凝胶特性、抗氧化活性及代谢产物的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 66−78. [CHANG Xulong, SONG Zhuomiao, ZHAN Zhenming, et al. Effects of flavonoids of finger citron from Guangdong Province on the gel properties and antioxidant activity of yogurt, and the analysis of their metabolites[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 66−78.]
[16] 国家卫生健康委员会 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验 GB 4789.35-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard-Food microbiological examination-Examination of lactic acid bacteria GB 4789.35-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.]
[17] DENG Y, HUANG L, ZHANG C, et al. Novel polysaccharide from *Chaenomeles speciosa* seeds: structural characterization, alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibitory activity evaluation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 755−766.
[18] NAKASHIMA Y, YAMAMOTO N, TSUKIOKA R, et al. *In vitro* evaluation of the anti-diabetic potential of soymilk yogurt and identification of inhibitory compounds on the formation of advanced glycation end-products[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102051.
[19] ZHANG X, LAPOINTE G, LIU Y, et al. Comparative analysis of exopolysaccharide-producing *Lactiplantibacillus plantarum* with ropy and non-ropy phenotypes on the gel properties and protein conformation of fermented milk[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136117.
[20] 常旭龙. 佛手精油和黄酮酸奶的制备及其生物活性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2025. [CHANG Xulong. Preparation and biological activity of yogurt containing bergamot essential oils and flavonoids[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2025.]
[21] 张丽静, 华欲飞, 张彩猛, 等. 蛋白质含量对搅拌型大豆酸奶质构、流变特性和微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 118−124. [ZHANG Lijing, HUA Yufei, ZHANG Caimeng, et al. Effects of protein content on the texture, rheological properties and microstructure of stirred soy yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 118−124.]
[22] 黄雅晨, 李瑶, 李振港, 等. 植物复合饮料对Ⅱ型糖尿病小鼠的降糖作用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(6): 1−8,39. [HUANG Yachen, LI Yao, LI Zhengang, et al. Hypoglycemic effect of plant compound beverage on type Ⅱ diabetic mice[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 1−8,39.]
[23] 袁蜜, 敬磊, 陈乐乐, 等. 原花青素微胶囊酸奶片对 D-gal 致衰老小鼠的体内抗氧化作用[J/OL]. 食品工业科技. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024120411. [YUAN Mi, JING Lei, CHEN Lele, et al. *In vivo* antioxidant effects of proanthocyanidin microencapsulated yogurt tablets in D-galactose-induced aging mice[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024120411.]
[24] LI S, WANG M, LI C, et al. Beneficial effects of partly milled highland barley on the prevention of high-fat diet-induced glycometabolic disorder and the modulation of gut microbiota in mice[J]. Nutrients, 2022, 14(4): 762.
[25] LEE W J, LUCEY J A. Formation and physical properties of yogurt[J]. Animal Bioscience, 2010, 23(9): 1127−1136.
[26] ZHAO L, WANG X, LIU Z, et al. Effect of α-lactalbumin hydrolysate-calcium complexes on the fermentation process and storage properties of yogurt[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 88: 35−42.
[27] DU H, WANG X, YANG H, et al. Effects of mulberry pomace polysaccharide addition before fermentation on quality characteristics of yogurt[J]. Food Control, 2023, 153: 109900.
[28] ALJEWICZ M, MAJCHER M, NALEPA B. A comprehensive study of the impacts of oat *β*-glucan and bacterial curdlan on the activity of commercial starter culture in yogurt[J]. Molecules, 2020, 25(22): 5411.

[29] HOZOVÁ B, KUNIAK L, KELEMENOVÁ B. Application of *β*-D-glucans isolated from mushrooms *Pleurotus ostreatus* (pleuran) and *Lentinus edodes* (lentinan) for increasing the bioactivity of yoghurts[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2004, 22(6): 204−214.
[30] YANG J, SUN J, YAN J, et al. Impact of *Potentilla anserine* polysaccharide on storage properties of probiotic yak yoghurt[J]. International Dairy Journal, 2023, 141: 105585.
[31] MUSUNURU K, KATHIRESAN S. Surprises from genetic analyses of lipid risk factors for atherosclerosis[J]. Circulation Research, 2016, 118(4): 579−585.
[32] PETROGLOU D, KANELLOS I, SAVOPOULOS C, et al. The LDL-receptor and its molecular properties: from theory to novel biochemical and pharmacological approaches in reducing LDL-cholesterol[J]. Current Medicinal Chemistry, 2020, 27: 317−333.
[33] AMAMOU S, LAZREG H, HAFSA J, et al. Effect of extraction condition on the antioxidant, antiglycation and *α*-amylase inhibitory activities of *Opuntia macrorhiza* fruit peels polysaccharides[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 127: 109411.
[34] CHEN S, WANG X, GUO Y, et al. Exploring the partial degradation of polysaccharides: Structure, mechanism, bioactivities, and perspectives[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(6): 4831−4870.
[35] 郝绍杰, 周旭, 王梓菡, 等. 荷叶酸奶品质特性与功能活性研究[J/OL]. 食品与发酵工业. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043971. [HAO Shaojie, ZHOU Xu, WANG Zihan, et al. Study on the quality characteristics and functional activity of lotus leaf yogurt[J/OL]. Food and Fermentation Industries. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043971.]
[36] LEE Y, YOO S, CHUNG J, et al. Hypoglycemic effect of soluble polysaccharide and catechins from green tea on inhibiting intestinal transport of glucose[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100: 3979−3986.
[37] FENG J, QIN Z, FARMANFARMAEE A, et al. Comparing gastric emptying of cellulose nanocrystals with sodium alginate and pectin using a dynamic *in vitro* stomach model[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135892.
[38] PÉREZ-OROZCO J P, SÁNCHEZ-HERRERA L M, ORTIZ-BASURTO R I. Effect of concentration, temperature, pH, co-solutes on the rheological properties of *Hyptis suaveolens* L. mucilage dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 297−306.
[39] YU D, CHANG X, ZENG Q, et al. Egg white protein-mediated modulation of yogurt gel properties: physicochemical attributes, structural evolution, and network formation mechanisms[J]. International Dairy Journal, 2025, 106355.
[40] BRÜLS M, FOROUTANPARSA S, MERLAND T, et al. Quantitative image analysis of influence of polysaccharides on protein network formation in GDL-acidified milk gels[J]. Food Structure, 2023, 38: 100352.
[41] MEHTA A, KUMAR L, SERVENTI L, et al. Exploring the textural dynamics of dairy and plant-based yoghurts: a comprehensive study[J]. Food Research International, 2023, 171: 113058.
[42] PENG C L, JOST-BRINKMANN P G, MIETHKE R R, et al. Ultrasonographic measurement of tongue movement during swallowing[J]. Journal of Ultrasound in Medicine, 2000, 19: 15−20.
[43] 赵龙岩, 袁孝瑞, 刘玉, 等. 山楂叶多糖和 γ-聚谷氨酸对酸奶品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(10): 9−13. [ZHAO Longyan, YUAN Xiaorui, LIU Yu, et al. Effect of polysaccharides from hawthorn leaves and γ-polyglutamic acid on the quality of fermented milk[J]. The Food Industry, 2021, 42(10): 9−13.]
[44] KEUM D H, LEE H J, RYOO J H, et al. Enhancing the texture of fat-free yogurt with *Panax ginseng* leaf-stem extract and casein: focusing on their softening effect[J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102242.
[45] YU Y H, WU L B, LI L Q, et al. Effect of pectic polysaccharides from fresh passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* L.) peel on physicochemical, texture and sensory properties of low-fat yoghurt[J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143801.
[46] LI J, YUAN Y, ZHANG W, et al. Effect of Radix isatidis polysaccharide on alleviating insulin resistance in type 2 diabetes mellitus cells and rats[J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2018, 71: 220−229.
[47] LIU M, WU K, MAO X, et al. Astragalus polysaccharide improves insulin sensitivity in KKAy mice: Regulation of PKB/GLUT4 signaling in skeletal muscle[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 127(1): 32−37.
[48] ASSIS R P, ARCARO C A, GUTIERRES V O, et al. Combined effects of curcumin and lycopene or bixin in yoghurt on inhibition of LDL oxidation and increases in HDL and paraoxonase levels in streptozotocin-diabetic rats[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(4): 332.
[49] 冯长菊, 江玉蓉. 有氧运动对空腹血糖正常的脑梗死患者糖耐量的影响[J]. 心血管康复医学杂志, 2016, 25(4): 352−355. [FENG Changju, JIANG Yurong. Influence of aerobic exercise on glucose tolerance in patients with cerebral infarction and normal FBG[J]. Chinese Journal of Cardiovascular Rehabilitation Medicine, 2016, 25(4): 352−355.]
[50] BAN Q, CHENG J, SUN X, et al. Effects of a synbiotic yogurt using monk fruit extract as sweetener on glucose regulation and gut microbiota in rats with type 2 diabetes mellitus[J]. Journal of Dairy Science, 2020, 103(4): 2956−2968.
[51] XU F X, ZHOU X, SHEN F, et al. Decreased peripheral blood mitochondrial DNA content is related to HbA_{1c}, fasting plasma glucose level and age of onset in Type 2 diabetes mellitus[J]. Diabetic Medicine, 2011, 29(7): e47−e54.
[52] 李海珊. 婺源绿茶多糖改善Ⅱ型糖尿病的作用机制[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [LI Haishan. Action mechanisms of Wuyuan green tea polysaccharides on type 2 diabetes mellitus[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.]
[53] DIAMOND D M, ALABDULGADER A A, DE LORGERIL M, et al. Dietary recommendations for familial hypercholesterolaemia: An evidence-free zone[J]. BMJ Evidence-Based Medicine, 2021, 26(6): 295−301.
[54] OBAROAKPO J U, NAN W, HAO L, et al. The hyperglycemic regulatory effect of sprouted quinoa yoghurt in high-fat-diet and streptozotocin-induced type 2 diabetic mice via glucose and lipid homeostasis[J]. Food & Function, 2020, 11(9): 8354−8368.