DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251111010
引用格式: 周凯, 钟雨, 曾建国. 湖北海棠叶-人参复合固体饮料的降血糖活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 242–251.
ZHOU K, ZHONG Y, ZENG JG. Study on hypoglycemic activity of *Malus hupehensis-Panax ginseng* composite solid beverage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 242–251. (in Chinese with English abstract).

湖北海棠叶-人参复合固体饮料的降血糖活性研究

周 凯[1], 钟 雨[1], 曾建国[2*]

(1. 长沙世唯生物科技有限公司, 长沙 410125; 2. 湖南农业大学动物医学院, 长沙 410128)

摘 要: 目的 研究以湖北海棠叶提取物和人参提取物为主要原料的复合固体饮料的体内外降血糖作用。**方法** 通过抑制 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶活性来评价体外降血糖作用, 通过正常小鼠口服淀粉耐量实验和高糖高脂饮食联合链脲佐菌素(streptozocin, STZ)诱导的 2 型糖尿病小鼠模型评价体内降血糖作用。**结果** 复合固体饮料对 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶活性具有一定的抑制作用, 半抑制浓度(semi-inhibitory concentration, IC_{50})分别为(2.50±0.32) mg/mL、(0.36±0.03) mg/mL。正常小鼠口服淀粉耐量实验中, 与空白对照组相比, 固体饮料高、低剂量组小鼠餐后 30 min 血糖上升幅度分别降低 79.64%和 51.27% (P<0.05), 血糖曲线下面积分别下降 24.72%、11.20% (P<0.05); 对 2 型糖尿病小鼠给药 4 周后, 与模型组相比, 固体饮料高、低剂量组小鼠空腹血糖分别降低 27.92%、16.48% (P<0.05), 糖化血清蛋白水平分别降低 19.46% (P<0.05)、8.60%, 血清胰岛素水平分别降低 28.84%、18.57% (P<0.05), 肝脏指数分别降低 13.59% (P<0.05)、6.04%, 肾脏指数分别降低 18.67% (P<0.05)、10.22%。**结论** 湖北海棠叶-人参复合固体饮料具有良好的体内外降血糖作用, 能显著降低小鼠餐后血糖和空腹血糖水平, 其机制可能与抑制淀粉消化酶活性, 增加胰岛素敏感性和保护肝肾组织有关。

关键词: 湖北海棠叶; 人参; 固体饮料; 降血糖活性

Study on hypoglycemic activity of *Malus hupehensis-Panax ginseng* composite solid beverage

ZHOU Kai[1], ZHONG Yu[1], ZENG Jian-Guo[2*]

(1. *World-way Biotechnology Incorporated of Changsha*, *Changsha* 410125, *China*;
2. *College of Veterinary Medicine*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the *in vitro* and *in vivo* hypoglycemic function of composite solid beverage with extract of *Malus hupehensis* and *Panax ginseng* as the main raw material. **Methods** The *in vitro* hypoglycemic activity was evaluated by inhibiting the activity of *α*-amylase and *α*-glucosidase, the *in vivo* hypoglycemic activity was evaluated in mice with oral starch tolerance test and model of type 2 diabetes induced by high sugar and high fat diet combined with streptozotocin (STZ). **Results** The composite solid beverage had a certain inhibitory effect on *α*-amylase and *α*-glucosidase activity, with semi-inhibitory concentration (IC_{50}) of (2.50±0.32) mg/mL and

收稿日期: 2025-11-11
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-21-02A)
第一作者: 周凯(1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为天然植物提取及功能活性评价。E-mail: cdzhoukai2012@163.com
***通信作者:** 曾建国(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为天然产物和中兽药开发。E-mail: zengjianguo@hunau.edu.cn

(0.36±0.03) mg/mL, respectively. In the oral starch tolerance test of normal mice, when the high and low dose composite solid beverage group compared with the blank control group, the amplitude of blood glucose increase at 30 min was reduced by 79.64% and 51.27% (P<0.05), respectively, the area under the blood glucose curve was decreased by 24.72% and 11.20% (P<0.05), respectively. After 4 weeks of drug administration in type 2 diabetic mice, when the high and low dose composite solid beverage group compared with the model group, the fasting blood glucose was decreased by 27.92% and 16.48% (P<0.05), respectively, glycosylated serum protein levels was decreased by 19.46% (P<0.05) and 8.60%, respectively, serum insulin levels was decreased by 28.84% and 18.57% (P<0.05), respectively, liver index was decreased by 13.59% (P<0.05) and 6.04%, respectively, kidney index was decreased by 18.67% (P<0.05) and 10.22%, respectively. **Conclusion**　*Malus hupehensis-Panax ginseng* composite solid beverage has a good hypoglycemic activities *in vitro* and *in vivo*, which can significantly reduce postprandial and fasting blood glucose levels in mice, the mechanism may be related to inhibiting the activity of starch digestase, increasing insulin sensitivity and protecting liver and kidney tissue.

KEY WORDS: *Malus hupehensis*; *Panax ginseng*; solid beverage; hypoglycemic activity

0　引　言

全球成人糖尿病患者数量在过去 30 余年间迅速增长, 糖尿病已成为世界性的公共卫生问题。由国际糖尿病联盟(International Diabetes Federation, IDF)发布的第 11 版《IDF 全球糖尿病地图》显示, 2024 年全球成人糖尿病患者总数约为 5.89 亿, 预测到 2050 年将飙升至 8.53 亿。我国成人糖尿病患者数量位居世界首位, 总数约为 1.48 亿, 预测 2050 年将达到 1.68 亿, 另外还有 2.74 亿人处于糖尿病前期(空腹血糖受损和糖耐量减低), 这类人群已成为糖尿病患者的“后备军”[1]。糖尿病是一种长期存在的代谢紊乱疾病, 主要特征是持续高血糖水平, 其表现出的典型症状为“三多一少”, 长期的高血糖状态可导致多种慢性并发症, 主要包括肾脏、视网膜、足、周围神经和下肢动脉的病变, 并增加脑卒中和心血管疾病的发病风险[2]。

在糖尿病患者中, 2 型糖尿病患者占比超 90%。口服降糖药是临床上治疗 2 型糖尿病最常用的降糖方案, 依据作用机制不同可分为 2 大类: (1)通过促进胰岛素的分泌, 主要包括格列奈类、磺脲类、二肽基肽酶IV抑制剂; (2)通过延缓碳水化合物消化吸收、改善胰岛素抵抗和减少肾脏对葡萄糖重吸收等其他机制, 主要包括 α-葡萄糖苷酶抑制剂、双胍类、噻唑烷二酮类、钠-葡萄糖协同转运蛋白 2 抑制剂等[3]。然而, 这些药物虽然控制血糖效果好, 却存在低血糖、胃肠道不良反应、体重增加、肝功能异常及溶血性贫血等副作用。因此, 针对我国丰富的药食两用植物资源, 研发具有低毒、高效的天然降血糖成分成为当前的热点研究领域[4]。

湖北海棠(*Malus hupehensis*)又名茶海棠, 是蔷薇科苹果属植物, 为中国特有物种。湖北海棠是特色鲜明的药食两用植物, 嫩叶加工后可作代用茶, 味微苦涩, 其毒性极低, 作为药用和保健食品使用是安全可靠的[5], 2014 年国家卫生和计划生育委员会已批准湖北海棠(茶海棠)叶为新食品原料, 食用量不超过 15 g/d。湖北海棠叶富含黄酮类物质, 主要成分为根皮苷和 3-羟基根皮苷[6], 具有抗氧化[7]、降血糖[8–11]、抗肥胖[12–13]、护肝[14]、调节雌激素[15]、心脏保护[16]等药理活性。人参为五加科植物人参(*Panax ginseng* C. A. Mey)的干燥根和根茎, 其药用历史悠久, 自古被誉为“百草之王”, 人参最主要的活性成分包括人参皂苷和多糖, 具有心血管保护、免疫调节、神经保护、抗糖尿病、抗肿瘤等药理作用[17–19]。目前, 大量 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的天然抑制剂研究集中于体外实验(如作用位点和酶抑制动力学探究), 能够推进到体内降低餐后血糖的功效验证并阐明其作用机制的研究较少; 针对单种植物提取物降低 2 型糖尿病小鼠血糖的研究已较为丰富, 但多种植物提取物复配的协同降血糖研究相对较少。本研究以湖北海棠叶和人参等提取物为主要原料制备湖北海棠叶-人参复合固体饮料, 评价其对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性的抑制作用, 对正常小鼠餐后血糖抑制以及高糖高脂饮食联合链脲佐菌素诱导的 2 型糖尿病小鼠的降血糖作用, 以期为辅助降血糖功能性食品的开发提供实验依据, 同时为解决湖北海棠叶等农产品的资源浪费问题提供新的思路。

1　材料与方法

1.1　实验动物

无特定病原体(specefic pathogen free, SPF)昆明雄性小鼠 100 只, 体质量 24~30 g, 5 周龄, 由湖南斯莱克景达试验动物有限公司提供, 许可证号 SCXK(湘)2021-0002。动物实验经湖南农业大学生物医学研究伦理委员会批准。动物饲养于湖南农业大学动物实验实训中心, 饲养环境条件为洁净环境, 小鼠每 5 只/笼, 温度 23~27 ℃, 相对湿度

45%~70%, 人工光暗周期为 12 h/12 h, 保证环境通风, 隔天更换 1 次垫料, 适当添加饲料和高压灭菌处理的饮水。

1.2 材料与试剂

湖北海棠叶提取物(含 12%根皮苷)、黄芪提取物(含 30%多糖)(长沙世唯生物科技有限公司); 陈皮提取物(浓缩质量比例 10:1)(陕西新天域生物科技有限公司); 人参提取物(含 10%人参总皂苷)(长春人民药业集团中药科技有限公司); 罗汉果提取物(含 30%罗汉果甜苷 V)(湖南绿蔓生物科技股份有限公司)。

对硝基苯基-*α*-*D*-吡喃葡萄糖苷(p-nitrophenyl-*α*-*D*-glucopyranoside, PNPG, 纯度 99%)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); *α*-淀粉酶(猪胰腺, 11 U/mg)、*α*-葡萄糖苷酶(酿酒酵母, 28 U/mg)、3,5-二硝基水杨酸试剂(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)、根皮苷(纯度≥98%)、橙皮苷(纯度≥98%)、人参皂苷(Rg_1、Re、Rb_1、Rb_2、Rc、Rd, 纯度≥98%)(上海源叶生物科技有限公司); 链脲佐菌素(streptozocin, STZ, 纯度 99%)(大连美伦生物技术有限公司); 小鼠胰岛素酶联免疫吸附测定(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒、糖化血清蛋白试剂盒(生物试剂, 果糖胺法)(南京建成生物工程研究所); 阿卡波糖(纯度 99%)(德国拜耳公司); 二甲双胍恩格列净片(I)(每片含盐酸二甲双胍 500 mg 与恩格列净 5 mg)(杭州中美华东制药有限公司); 十二水合磷酸氢二钠、二水合磷酸二氢钠、二水合柠檬酸三钠、一水合柠檬酸、无水碳酸钠、可溶性淀粉(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 甲醇、乙腈[色谱纯, 霍尼韦尔贸易(上海)有限公司]。

实验鼠维持饲料(湖南嘉泰实验动物有限公司); 1135DM 高糖高脂饲料(北京博爱港生物技术有限公司)。

1.3 仪器与设备

Accu-Chek Activ 血糖仪(含配套血糖试纸)(德国罗氏公司); Waters e2695 高效液相色谱仪(配 2998 二极管阵列检测器)、Waters symmetry-C_{18} 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)[沃特世科技(上海)有限公司]; ME204E 电子分析天平(精度 0.0001 g)、FE28 pH 计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; UV2400 紫外-可见分光光度计(上海瞬宇恒平科学仪器有限公司); Infinite E Plex 酶标仪(瑞士帝肯实验器材有限公司); H1750R 高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); AWT-TOC-20L 超纯水仪(四川优普越纯科技有限公司); ZNCL-GS 水浴锅(巩义市中天仪器科技有限公司); KQ5200DE 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); 5L 型实验室用小型鼓式混合机(河南启能机械设备有限公司)。

1.4 实验方法

1.4.1 湖北海棠-人参复合固体饮料的制备

按质量比例(10:10:3:2:0.5)分别称取湖北海棠叶提取物、人参提取物、黄芪提取物、陈皮提取物和罗汉果提取物, 在小型鼓式混合机中充分混匀 30 min, 得到湖北海棠叶-人参复合固体饮料。

1.4.2 固体饮料活性成分分析

(1)供试样品溶液的配制

精密称取样品约 0.3 g 至 50 mL 容量瓶中, 精密加入 80%甲醇 40 mL, 超声处理(功率 300 W、频率 40 kHz) 40 min 后加 80%甲醇定容, 用 0.45 μm 有机微孔滤膜过滤, 所得滤液即为供试品溶液。

(2)混合对照品溶液的配制

精密称取适量的橙皮苷、根皮苷和人参皂苷 Rg_1、Re、Rb_1、Rb_2、Rc、Rd 对照品, 分别置于 10 mL 容量瓶中, 加入适量甲醇, 超声处理 10 min 使其充分溶解并定容。分别准确吸取上述 8 种溶液各适量, 再用 80%甲醇定容至 10 mL, 使上述对照品溶液的质量浓度依次为 79.84、199.60、208.94、209.15、209.48、200.65、201.23、199.82 μg/mL。

(3)色谱条件

色谱柱: Waters symmetry-C_{18} (4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流动相: 乙腈(A), 水(B); 流速: 1.0 mL/min, 柱温: 25 ℃, 进样体积: 10 μL, 检测波长: 203 nm, 运行时间为 100 min。洗脱条件参考 2025 年版《中国药典》人参方法, 梯度洗脱程序详见表 1。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Program of gradient elution

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0	20	80
35	20	80
55	29	71
70	29	71
100	40	60

(4)含量计算

使用单一浓度的对照品进行定量分析(单点外标法), 并按公式(1)计算固体饮料中各活性成分的含量。

$$W_{样}/\%=[(A_{样}\times C_{对}\times 50)/(A_{对}\times M_{样}\times 1000000)]\times 100\% \quad (1)$$

式中: $W_{样}$为供试品目标成分的含量, %; $A_{样}$为供试品目标成分的峰面积; $A_{对}$为对照品的峰面积; $C_{对}$为对照品的质量浓度, μg/mL; $M_{样}$为供试品的质量, g; 50 为供试品的定容体积, mL。

1.4.3 *α*-淀粉酶活性抑制实验

参照蓝小河等[20]方法并稍作改变, 取已配成一定质量浓度的复合固体饮料溶液、0.5 mg/mL 的 *α*-淀粉酶溶液各 0.5 mL 混合, 于 37 ℃水浴 10 min 后, 加入 0.5 mL 的 1%淀粉溶液继续水浴 10 min, 最后加 1 mL DNS 试剂并煮沸反应 10 min, 冷却后加 10 mL 纯水稀释, 于 540 nm 测定吸光度, 以此为实验组。以磷酸缓冲液(pH 6.9, 0.1 mol/L)代

替 α-淀粉酶溶液为实验空白组、代替复合固体饮料溶液为对照组、代替复合固体饮料溶液和 α-淀粉酶溶液 2 种溶液为背景组。阿卡波糖作为阳性对照, 实验重复测定 3 次取其平均值。按公式(2)计算 α-淀粉酶活性抑制率, 用 Excel 2021 软件做拟合曲线计算半抑制浓度 (semi-inhibitory concentration, IC_{50})。

$$\alpha\text{-淀粉酶活性抑制率}/\% = (1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4})\times 100\% \quad (2)$$

式中: A_1 为实验组吸光度; A_2 为实验空白组吸光度; A_3 为对照组吸光度; A_4 为背景组吸光度。

1.4.4　α-葡萄糖苷酶活性抑制实验

参照潘玥等[21]方法并稍作改变, 取已配成一定质量浓度的复合固体饮料溶液、1 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液各 0.5 mL 混合, 于 37 ℃水浴 15 min 后加入 1 mL 的 1.5 mmol/L PNPG 底物溶液继续水浴反应 25 min, 最后加 10 mL 0.2 mol/L 碳酸钠溶液终止反应, 于 405 nm 测定吸光度, 以此为实验组。以磷酸缓冲液(pH 6.8, 0.1 mol/L)代替 α-葡萄糖苷酶为实验空白组、代替复合固体饮料溶液为对照组、代替复合固体饮料溶液和 α-葡萄糖苷酶溶液 2 种溶液为背景组。阿卡波糖作为阳性对照, 实验重复测定 3 次取其平均值。按公式(3)计算 α-葡萄糖苷酶活性抑制率, 用 Excel 2021 软件做拟合曲线计算 IC_{50}。

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶活性抑制率}/\% = (1-\frac{B_1-B_2}{B_3-B_4})\times 100\% \quad (3)$$

式中: B_1 为实验组吸光度; B_2 为实验空白组吸光度; B_3 为对照组吸光度; B_4 为背景组吸光度。

1.4.5　小鼠淀粉耐量实验

参照宋光明等[22]方法并稍作改变。小鼠适应性喂养 5 d 后随机分为对照组、阿卡波糖组和固体饮料低、高剂量组, 每组小鼠 7 只。实验前小鼠在夜间禁食不禁水, 12 h 后测体质量并尾尖采血测空腹血糖, 然后各组分别灌胃糊化淀粉溶液(质量分数 13.4%)、含有阿卡波糖或固体饮料的糊化淀粉溶液, 给药体积 15 mL/kg, 淀粉剂量为 2 g/kg, 阿卡波糖和固体饮料低、高剂量分别为 15、200、400 mg/kg。于灌胃后 30、60 和 120 min 尾尖采血测定血糖, 并计算各组小鼠餐后 30 min 血糖上升幅度及血糖曲线下面积(area under the curve, AUC)。

1.4.6　小鼠降血糖实验

(1)动物分组及模型建立

小鼠适应性喂养 5 d 后, 随机选择 15 只和 57 只小鼠分别饲喂实验鼠维持饲料(对照组)、高糖高脂饲料(造模组)。饲喂 4 周后所有小鼠夜间禁食不禁水 12 h, 将溶解于 0.1 mmol/L 柠檬酸盐缓冲液(pH 4.2)的 STZ(质量浓度 10 mg/mL)按照 60 mg/kg 剂量对造模组腹腔注射, 对照组腹腔注射柠檬酸盐缓冲液, 注射体积均为 6 mL/kg, 1 次/d, 持续 3 d。4 d 后, 造模组夜间禁食不禁水, 尾尖采血测定空腹血糖, 将空腹血糖小于 11.1 mmol/L 的小鼠补注一次 60 mg/kg STZ; 3 d 后再次测定空腹血糖, 若空腹血糖大于 11.1 mmol/L, 则表明 2 型糖尿病小鼠模型建造成功。从饲喂维持饲料的小鼠中随机选取 10 只作为正常对照组, 造模成功的小鼠中随机选取 40 只, 分为模型组、阳性对照组, 固体饮料低、高剂量组, 每组 10 只, 继续喂养 4 周并给予药物干预。每天上午灌胃给药 1 次, 具体操作见表 2。

(2)指标测定

常规观察指标: 每天观察各组小鼠的毛色、精神状态及排泄变化等情况, 并记录每天的采食量和饮水量。小鼠体质量每周测定一次。

空腹血糖测定: 各组小鼠夜间禁食不禁水 12 h, 次日上午使用罗氏血糖仪于第 0、1、2、3、4 周进行尾尖采血测定空腹血糖。

口服糖耐量(oral glucose tolerance test, OGTT)测定: 灌胃给药 25 d 后, 夜间禁食不禁水 12 h, 次日上午尾尖采血测定给予葡萄糖前(即 0 min)的血糖值, 然后口服灌胃 2 g/kg 的 20%葡萄糖溶液, 分别测定给予葡萄糖后 30、60、120 min 的血糖, 并计算 AUC。

脏器指数测定: 末次给药后小鼠夜间禁食不禁水 12 h, 取血解剖前首先记录小鼠体重; 眼眶取血后迅速解剖取出肝脏、肾脏、脾脏, 用预冷的生理盐水冲洗干净, 再用滤纸擦去多余水分, 准确称量各器官重量并计算各脏器指数。

胰岛素及糖化血清蛋白测定: 末次给药后小鼠夜间禁食不禁水 12 h, 眼眶取血, 血液于室温阴凉处静置 1.5 h 后, 在冷冻离心机中 4000 r/min 离心 10 min, 转移上层淡黄色血清备用。血清胰岛素按照小鼠胰岛素 ELISA 试剂盒

表 2　动物分组及给药剂量

Table 2　Animal grouping and dosage of medication

组别	数量/只	喂养饲料	灌胃样品	剂量/(mg/kg)
正常对照组	10	维持饲料	等体积超纯水	/
模型组	10	高糖高脂饲料	等体积超纯水	/
阳性对照组	10	高糖高脂饲料	二甲双胍恩格列净片	150
低剂量组	10	高糖高脂饲料	湖北海棠叶-人参复合固体饮料	300
高剂量组	10	高糖高脂饲料		600

注: /表示正常对照组和模型组只灌胃超纯水。

方法测定, 糖化血清蛋白按照试剂盒方法测定。分别按公式 (4) 和 (5) 计算胰岛素抵抗指数(homeostatic model assessment of insulin resistance, HOMA-IR)及胰岛素敏感指数(insulin sensitivity index, ISI)。

$$\text{HOMA-IR}=\left(\frac{\text{FINS}\times\text{FBG}}{22.5}\right) \quad (4)$$

$$\text{ISI}=\text{Ln}\left(\frac{1}{\text{FINS}\times\text{FBG}}\right) \quad (5)$$

式中: FINS 为空腹血清胰岛素(fasting insulin), mIU/L; FBG 为空腹血糖(fasting blood glucose), mmol/L; 系数 22.5 为校正因子, 是指在正常/理想个体中 5 μIU/mL 血浆胰岛素对应 4.5 mmol/L 的血糖水平。

1.5 数据处理

使用 Excel 2021、SPSS 19.0 统计软件进行数据分析, 结果以平均值±标准偏差表示, 单因素方差分析检验差异显著性, 并用 Duncan 氏法进行多重比较, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 固体饮料活性成分的含量测定

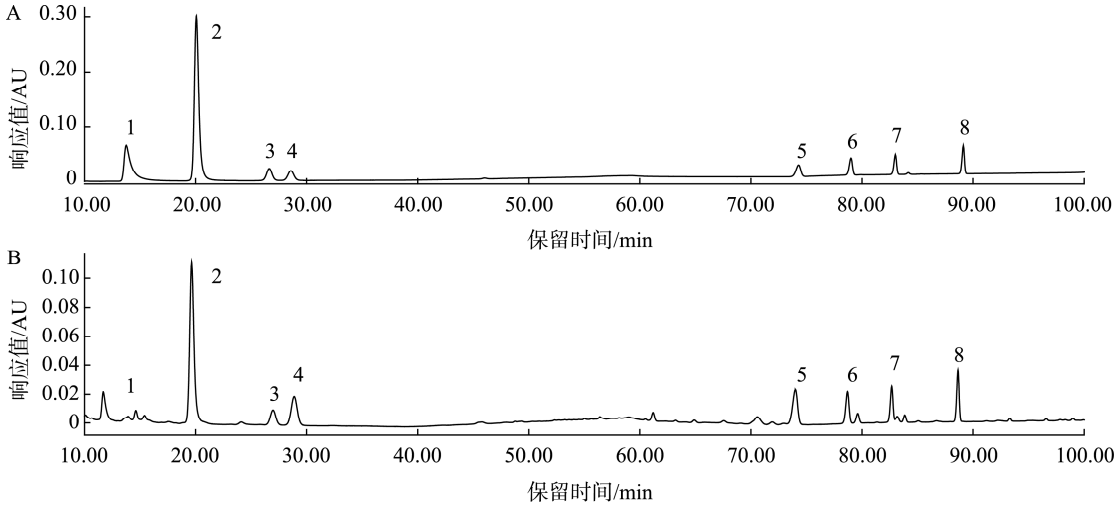
由图 1 可知, 在混合对照品和固体饮料的色谱图中各化合物色谱峰均获得较好的分离, 该色谱条件能基本满足 8 种待测成分的同时定量分析。采用单点外标法定量计算固体饮料中各活性成分的含量, 结果显示该固体饮料含有 0.11% 橙皮苷、4.52%根皮苷, 人参皂苷 Rg_1、Re、Rb_1、Rc、Rb_2、Rd 含量分别为 0.35%、0.85%、0.96%、0.65%、0.51%、0.58%, 表明了根皮苷和人参皂苷为固体饮料的主要活性成分。

2.2 固体饮料对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制作用

α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶是人体内消化淀粉、糊精、蔗糖等碳水化合物的关键酶。通常抑制这两种消化酶的活性可以减缓碳水化合物的消化和吸收, 减轻餐后血糖的升高, 增加胰岛素敏感性, 从而预防糖尿病。由图 2 可知, 固体饮料对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率随浓度升高而增强, 在实验浓度范围内呈剂量-效应相关性, 最大抑制率分别可达 71.52%和 83.21%。固体饮料抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 分别为(2.50±0.32) mg/mL、(0.36±0.03) mg/mL, 阿卡波糖的 IC_{50} 分别为(26.10±4.05) μg/mL、(1.51±0.08) μg/mL。以上结果表明固体饮料对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性均具有一定的抑制作用, 但抑制 α-淀粉酶的 IC_{50} 明显高于 α-葡萄糖苷酶, 该结果与王伟等[23]和 ZHANG 等[24]的研究结果一致, 其原因可能是 α-淀粉酶与固体饮料活性物质的亲和能力比 α-葡萄糖苷酶更弱。

2.3 固体饮料对正常小鼠餐后血糖反应的影响

目前, 天然产物仍然被认为是药物发现的潜在资源, 不仅副作用小, 且具有多种药理活性, 在降血糖功能/保健食品开发过程中, 研发人员已聚焦于天然食物来源 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制剂的筛选、提取及分离纯化和降糖功效研究[25–26]。由图 3 及表 3 可知, 空白对照组灌胃糊化淀粉后的血糖迅速升高, 在 30 min 时血糖上升幅度为 9.48 mmol/L, 到达餐后血糖峰值, 而阿卡波糖组、固体饮料高和低剂量组的血糖上升幅度均显著低于空白对照组, 分别降低 72.78%、79.64%和 51.27% ($P<0.05$), 且 AUC 值显著性下降, 与空白对照组相比分别降低 27.96%、24.72%和 11.20%



注: A. 混合对照品; B. 固体饮料; 1. 橙皮苷; 2. 根皮苷; 3. 人参皂苷 Rg_1; 4. 人参皂苷 Re; 5. 人参皂苷 Rb_1; 6. 人参皂苷 Rc; 7. 人参皂苷 Rb_2; 8. 人参皂苷 Rd。

图 1 高效液相色谱图

Fig.1 High performance liquid chromatogram

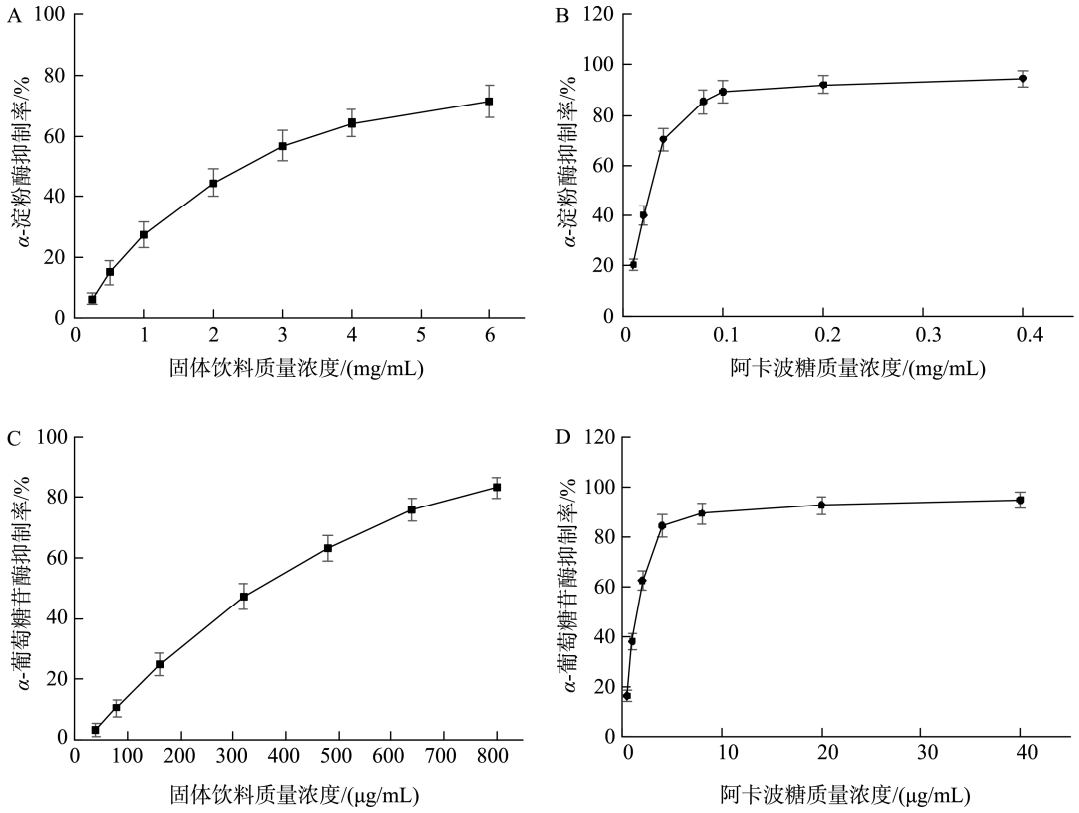


图 2　固体饮料和阿卡波糖对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性的抑制作用

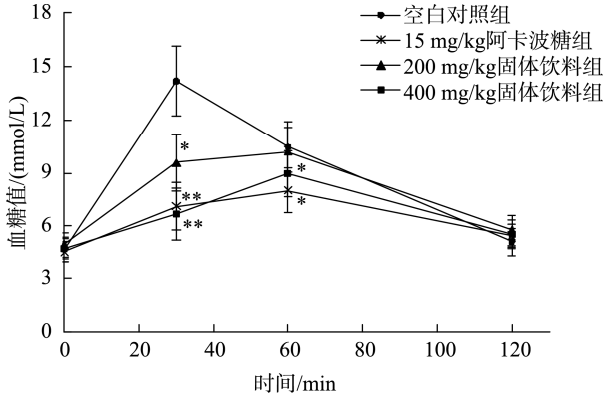
Fig.2　Inhibitory effects of solid beverages and acarbose on the activities of α-amylase and α-glucosidase

(P<0.05)。这可能是由于固体饮料中的多酚物质与淀粉消化酶存在非竞争性抑制, 以及直接与淀粉相互作用来降低淀粉对消化酶的敏感程度, 减少葡萄糖的生成, 并通过抑制葡萄糖转运蛋白活性来降低肠道葡萄糖的吸收速度[27−29], 以实现餐后血糖的变化趋势保持相对平缓。

2.4　固体饮料对 2 型糖尿病小鼠的降血糖活性

2.4.1　对糖尿病小鼠体质量、采食量和饮水量的影响

正常对照组小鼠皮毛光亮, 精神好, 反应迅速, 饮食和饮水量正常。造模成功后, 其他组与正常对照组比较, 小鼠体毛粗糙无光泽, 精神萎靡, 反应迟缓, 多饮、多食、多尿, 体质量减轻, 明显呈“三多一少”症状。由图 4 显示, 经 4 周饲养, 正常对照组小鼠体质量逐渐增加, 模型组、阳性对照组、固体饮料高、低剂量组体质量逐渐降低, 4 组小鼠体质量分别较各自第 0 周(初期)分别降低 9.89%、



注: 与空白对照组比较, *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01)。

图 3　固体饮料和阿卡波糖对正常小鼠餐后血糖的影响

Fig.3　Effects of solid beverage and acarbose on postprandial blood glucose response curve in normal mice

表 3　各组 30 min 血糖上升幅度及血糖 AUC (n=7)

Table 3　Amplitude of blood glucose increase at 30 min and the AUC in each group (n=7)

组别	灌胃剂量/(mg/kg)	餐后 30 min 血糖上升幅度/(mmol/L)	AUC/(mmol/L・min)
空白对照组	/	9.48±1.82	1120.24±148.65
阿卡波糖组	15	2.58±0.67**	806.97±76.50**
固体饮料低剂量组	200	4.62±1.05*	994.74±114.32*
固体饮料高剂量组	400	1.93±0.81**	843.36±97.85**

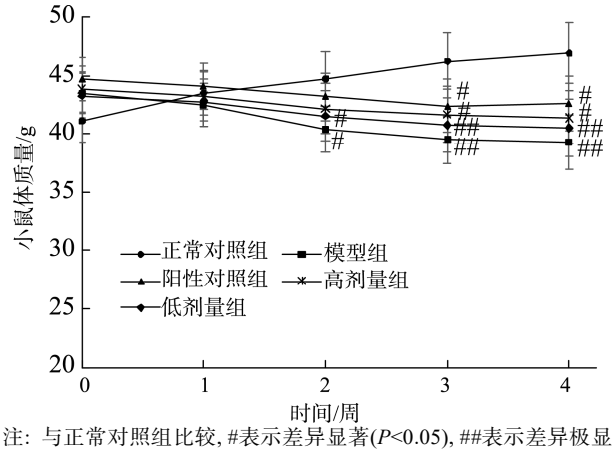
注: /表示空白对照组只灌胃糊化淀粉溶液; 与空白对照组比较, *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01)。

4.61%、5.54%、6.38%, 在第 3 周和第 4 周, 这 4 组小鼠体质量显著低于正常对照组(P<0.05 或 P<0.01)。固体饮料高、低剂量组小鼠体质量降低幅度低于模型组, 但无显著性差异。结果表明固体饮料对糖尿病小鼠体质量下降的抑制作用不明显。

由图 5~6 所示, 从第 0 周到第 4 周, 模型组、阳性对照组、固体饮料高、低剂量组与正常对照组相比摄食量无明显变化, 但各组饮水量均明显高于正常对照组(P<0.01)。经固体饮料干预 4 周后, 与模型组相比, 高、低剂量组小鼠每天饮水量分别降低 33.69% (P<0.01)和 23.30% (P<0.05), 尽管小鼠采食量出现不同程度的减少, 但没有显著性差异。结果表明固体饮料可使糖尿病引起的小鼠口渴和多食症状得到改善。

2.4.2 对糖尿病小鼠空腹血糖和糖化血清蛋白的影响

干预期间各组小鼠空腹血糖变化如图 7 所示, 模型组空腹血糖在干预 1~3 周呈增长趋势, 第 4 周后空腹血糖稍有回落, 但一直保持较高水平。固体饮料干预 1~2 周后, 高、低剂量组的空腹血糖与模型组相比增长较为缓慢; 固



注: 与正常对照组比较, #表示差异显著(P<0.05), ##表示差异极显著(P<0.01), 图 6 同。

图 4 各组糖尿病小鼠体质量的变化

Fig.4 Changes in body weight of each group of diabetic mice

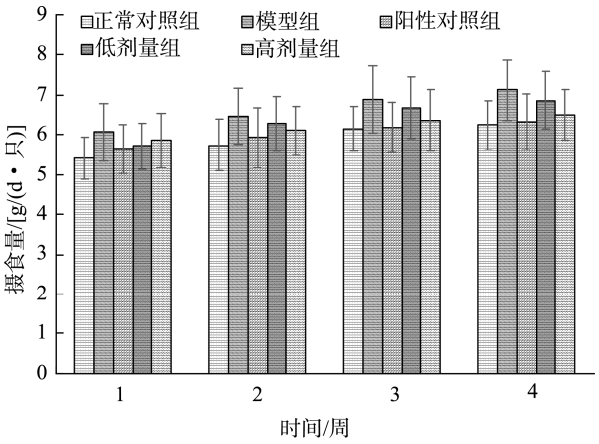
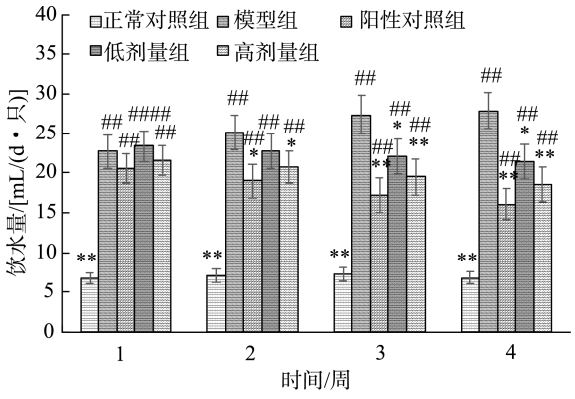


图 5 各组糖尿病小鼠采食量的变化

Fig.5 Changes in food intake of each group of diabetic mice



注: 与模型组比较, *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01), 图 7~9 同。

图 6 各组糖尿病小鼠饮水量的变化

Fig.6 Changes in water intake of each group of diabetic mice

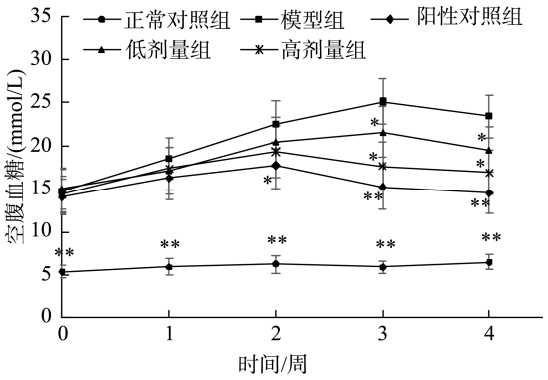


图 7 各组糖尿病小鼠空腹血糖的变化

Fig.7 Changes in fasting blood glucose of each group of diabetic mice

体饮料干预 4 周后, 高、低剂量组的空腹血糖显著低于模型组, 分别下降 27.92%和 16.48% (P<0.05)。以上结果表明, 固体饮料能有效缓解 2 型糖尿病小鼠的空腹血糖持续性升高。

在糖尿病初期, 高血糖水平会引发氧化应激, 持续的高血糖可促使血红蛋白、血清蛋白等生物大分子的 N 末端与葡萄糖发生非酶促反应, 最终形成晚期糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs), AGEs 的积累可导致各种糖尿病慢性并发症发生[30]。糖化血清蛋白(glycosylated serum protein, GSP)是血清中的各种蛋白质与葡萄糖发生缓慢的非酶促糖化反应的产物, 又称果糖胺, 它能反映机体过去 2~3 周内的平均血糖水平, 且不受临时血糖浓度波动的影响, 故可作为短期血糖监测的良好指标。连续灌胃给药 4 周后, 各组小鼠的 GSP 含量结果如图 8 所示, 与正常对照组相比, 模型组的 GSP 含量显著性升高 72.66% (P<0.01)。与模型组比较, 阳性对照组、固体饮料高、低剂量组均能不同程度地降低糖尿病小鼠的 GSP 含量, 分别降低 29.41%、19.46% (P<0.05)、8.60%。柑橘类黄酮(如橙皮苷)可通过多种机制有效抑制 AGEs 的形成, 一项利用人血清白蛋白进行的体外研究发现, 50 μmol/L 的橙皮苷

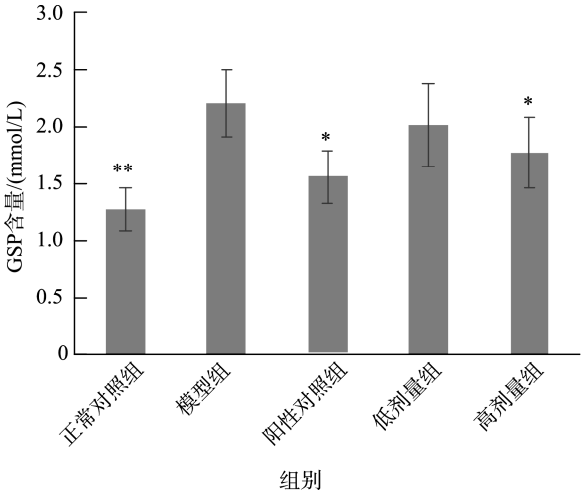


图 8　固体饮料对糖尿病小鼠 GSP 的影响
Fig.8　Effects of solid beverage on GSP in diabetic mice

可使果糖胺含量降低 40%, 减少 71% AGEs 的形成, 表明橙皮苷通过降低果糖胺含量在糖尿病并发症管理方面具有潜在的作用[31]。

2.4.3　对糖尿病小鼠糖耐量的影响

OGTT 是评价机体血糖调节能力的标准方法, 并可了解胰岛 β 细胞的功能, 在糖尿病及糖耐量受损诊断中具有重要临床价值。由图 9A 可知, 0 min 时, 模型组、阳性对照组和固体饮料高、低剂量组小鼠空腹血糖均明显高于正常对照组, 30 min 时, 各组小鼠血糖浓度均达到峰值, 然后逐渐开始下降。120 min 后正常对照组、阳性对照组和固体饮料高剂量组小鼠血糖水平基本恢复到 0 min 血糖水平, 而模型组小鼠 120 min 后血糖值明显高于 0 min 血糖值, 且在 OGTT 测试期间血糖维持较高水平。由图 9B 可知, 模型组小鼠 AUC 显著高于正常对照组(P<0.01), 升高 207.76%; 阳性对照组和固体饮料高剂量组小鼠 AUC 均显著低于模型组(P<0.05), 分别下降 33.29%、20.86%, 固体饮料低剂量组 AUC 下降 9.62%, 但无显著性差异。结果表明固体饮料能降低糖尿病小鼠葡萄糖负荷后的血糖值, 降低血糖 AUC, 改善糖尿病小鼠的葡萄糖耐量能力。

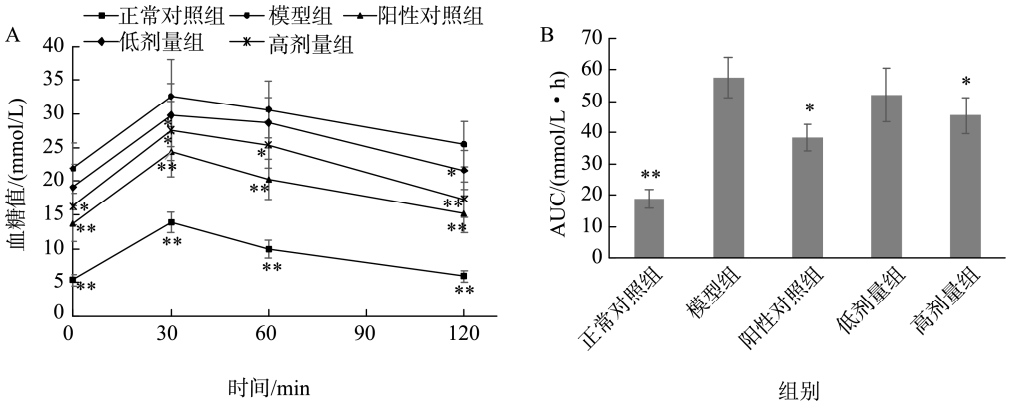


图 9　固体饮料对糖尿病小鼠 OGTT 的影响
Fig.9　Effects of solid beverage on OGTT in diabetic mice

2.4.4　对糖尿病小鼠脏器指数的影响

从表 4 可看出, 与正常对照组比, 模型组小鼠肝脏指数和肾脏指数极显著升高(P<0.01), 脾脏指数显著升高(P<0.05), 说明糖尿病小鼠各脏器受到损伤后产生一定病变。经阳性药物和固体饮料干预 4 周后, 与模型组比较, 阳性对照组和固体饮料高剂量组小鼠的肝脏指数分别降低 18.46%、13.59% (P<0.05), 肾脏指数分别降低 23.56%、18.67% (P<0.05), 而固体饮料低剂量组小鼠肝脏和肾脏指数分别下降 6.04%、10.22%, 但无显著性差异。固体饮料高、低剂量组小鼠脾脏指数均低于模型组, 但无显著性差异。结果表明固体饮料可在一定程度上减轻小鼠由糖尿病引起的肝脏、肾脏和脾脏组织损伤。

表 4　固体饮料对糖尿病小鼠脏器指数的影响(n=10)
Table 4　Effects of solid beverage on organ index in diabetic mice (n=10)

组别	肝脏指数/%	肾脏指数/%	脾脏指数/%
正常对照组	4.35±0.28**	1.43±0.12**	0.25±0.03*
模型组	5.96±0.32	2.25±0.37	0.36±0.05
阳性对照组	4.86±0.67*	1.72±0.26*	0.29±0.03*
低剂量组	5.60±0.91	2.02±0.43	0.35±0.06
高剂量组	5.15±0.79*	1.83±0.35*	0.32±0.04

注: 与模型组比较, *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01), 表 5 同。

2.4.5　对糖尿病小鼠血清胰岛素和胰岛素敏感性的影响

由表 5 可以发现, 相比于正常对照组, 模型组小鼠血清胰岛素含量显著升高 72.52% (P<0.01), 说明模型组小鼠出现胰岛素抵抗, 具有高胰岛素血症。与模型组比较, 阳性对照组和固体饮料高、低剂量组小鼠血清胰岛素含量分别降低 35.72% (P<0.01)、28.84%、18.57% (P<0.05)。由各组小鼠 HOMA-IR 和 ISI 结果可以看出, 模型组与正常对照

组相比，HOMA-IR 显著升高(P<0.01)，而 ISI 显著降低(P<0.01)。各给药组小鼠HOMA-IR显著低于模型组(P<0.05 或 0.01)，且阳性对照组和固体饮料高剂量组小鼠 ISI 显著高于模型组(P<0.05)。结果表明固体饮料可以降低 2 型糖尿病小鼠胰岛素抵抗程度，增加胰岛素敏感性，缓解糖代谢异常。根皮苷和人参皂苷是固体饮料中的主要活性成分，近年来有报道它们在细胞模型和动物模型中可通过改善胰岛素抵抗，增加胰岛素敏感性来促进组织细胞对葡萄糖的吸收和利用，从而降低血糖水平。李新明等[32]和华桦等[33]分别报道含有根皮苷的苹果多酚和变叶海棠能显著降低糖尿病 KK-Ay 小鼠中的空腹血糖、FINS 水平和 HOMA-IR，提高 ISI，差异均有统计学意义(P<0.05)。潘峰等[34]研究发现木姜叶柯来源的根皮苷能提高胰岛素抵抗 L-O2 细胞模型中的葡萄糖消耗和糖原水平，表明其具有改善肝细胞胰岛素抵抗的作用。朱谋等[35]采用高糖高脂饮食联合腹腔注射 STZ 构建 2 型糖尿病大鼠模型，研究发现不同剂量的人参皂苷 Rb_1 给药组均能降低 2 型糖尿病大鼠的空腹血糖，显著降低 FINS 水平和 HOMA-IR (P<0.05)，表明人参皂苷 Rb_1 能有效改善胰岛素抵抗，缓解 2 型糖尿病大鼠的糖代谢异常。

表 5 固体饮料对糖尿病小鼠胰岛素功能的影响(n=10)
Table 5 Effects of solid beverage on insulin function in diabetic mice (n=10)

组别	血清胰岛素/(mIU/L)	HOMA-IR	ISI
正常对照组	6.15±0.78**	1.77±0.21**	–3.68±0.18**
模型组	10.61±1.07	10.68±1.29	–5.48±0.32
阳性对照组	6.82±0.82**	4.39±0.82**	–4.59±0.21*
低剂量组	8.64±1.18*	7.37±1.18*	–5.11±0.36
高剂量组	7.55±0.96*	5.56±0.97**	–4.83±0.27*

3 结 论

本研究以湖北海棠叶提取物和人参提取物为主要原料，与黄芪、陈皮等药食两用植物进行科学配伍制成复合固体饮料，含有根皮苷、人参皂苷、黄芪多糖和橙皮苷等多种活性成分，从多个方面探究了该复合固体饮料的体内外降血糖活性。体外实验结果表明，湖北海棠叶-人参复合固体饮料能够抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性，呈剂量依赖效应。动物实验结果表明，该复合固体饮料能显著降低正常小鼠的餐后血糖峰值，改善血糖波动；并且有效提高 2 型糖尿病小鼠的葡萄糖耐受能力和胰岛素敏感性，降低空腹血糖和糖化血清蛋白水平，减轻肝肾组织损伤及“三多一少”症状。上述结果为证明该复合固体饮料作为一种降血糖功能食品提供了有力的理论基础，为高血糖人群的干预提供了新的途径，也为由药食两用植物资源组成的降血糖产品开发提供了技术支撑。但是存在缺少酶抑制动力学及降低 2 型糖尿病小鼠血糖的协同作用机制研究等不足，该复合固体饮料具体通过哪些分子机制起到降血糖作用，仍需深入研究与探索，以进一步明确和解析其降血糖效果及作用机理。

参考文献

[1] International Diabetes Federation. IDF diabetes atlas, 11th edition [EB/OL]. (2025-04-07) [2025-09-10]. https: //diabetesatlas. org/

[2] 朱旭, 王新蕊, 文毅, 等. 黄芪葛根汤治疗糖尿病及其并发症的研究进展[J]. 中草药, 2025, 56(15): 5699–5708.
ZHU X, WANG XR, WEN Y, *et al*. Research progress on treatment of diabetes mellitus and its complications with Huangqi Gegen decoction [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2025, 56(15): 5699–5708.

[3] 中华医学会糖尿病学分会. 中国糖尿病防治指南(2024 版)[J]. 中华糖尿病杂志, 2025, 17(1): 16–139.
Chinese diabetes society. Guideline for the prevention and treatment of diabetes mellitus in China (2024 edition) [J]. Chinese Journal of Diabetes Mellitus, 2025, 17(1): 16–139.

[4] 曹蓉, 柴洋洋. 食药资源成分降血糖作用及机理研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 373–384.
CAO R, CHAI YY. Research progress on the hypoglycemic effect and mechanism of the components from food and medicinal resources [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 373–384.

[5] 郭婕, 张天亮, 卢连华, 等. 湖北海棠的毒性研究[J]. 预防医学论坛, 2008, 14(11): 1004–1008.
GUO J, ZHANG TL, LU LH, *et al*. Study on the toxicity of *Malus hupehensis* [J]. Preventive Medicine Tribune, 2008, 14(11): 1004–1008.

[6] 谭哲谞. 湖北海棠化学成分的研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2018.
TAN ZX. Study on the chemical composition of *Malus hupehensis* (Pamp.) Rehd. [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2018.

[7] LIU J, GUO D, FAN Y, *et al*. Experimental study on the antioxidant activity of *Malus hupehensis* (Pamp.) Rehd extracts *in vitro* and *in vivo* [J]. Journal of Cellular Biochemistry, 2019, 120(7): 11878–11889.

[8] YUAN LL, SHI BB, FENG T, *et al*. α-Glucosidase inhibitory phenylpropanoid-dihydrochalcone hybrids from the leaves of medicinal plant *Malus hupehensis* (Pamp.) Rehder [J]. Phytochemistry, 2022, 204: 113421.

[9] LV QY, LIN YS, TAN ZX, *et al*. Dihydrochalcone-derived polyphenols from tea crab apple (*Malus hupehensis*) and their inhibitory effects on α-glucosidase *in vitro* [J]. Food & Function, 2019, 10(5): 2881–2887.

[10] 汪鋆植, 边宇, 邓改改, 等. 3-羟基根皮苷对小鼠血糖及糖异生关键酶 G-6-Pase 的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 106–112.
WANG JZ, BIAN Y, DENG GG, *et al*. Effects of 3-hydroxyphloridin on blood glucose and gluconeogenesis key enzyme G-6-Pase in mice [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(4): 106–112.

[11] LI P, TAN J, XIAO M, *et al*. Bioactive substances and biological functions in *Malus hupehensis*: A review [J]. Molecules, 2023, 28(2): 658.

[12] SHIN SK, CHO SJ, JUNG UJ, *et al*. Phlorizin supplementation attenuates obesity, inflammation, and hyperglycemia in diet-induced obese mice fed a high-fat diet [J]. Nutrients, 2016, 8(2): 92.

[13] ZHANG XY, CHEN J, YI K, *et al*. Phlorizin ameliorates obesity-associated endotoxemia and insulin resistance in high-fat diet-fed mice by targeting the gut microbiota and intestinal barrier integrity [J]. Gut Microbes, 2020, 12(1): 11–18.

[14] 冯天艳, 汪鋆植, 周继刚, 等. 湖北海棠叶总黄酮抗 CCl_4 所致大鼠肝

纤维化作用研究[J]. 中药药理与临床, 2012, 28(2): 72–76.
FENG TY, WANG JZ, ZHOU JG, *et al*. Inhibitory action of total flavonoids of *Malus hupehensis* on hepatic fibrosis induced by CCl_4 in rats [J]. Pharmacology and Clinics of Chinese Materia Medica, 2012, 28(2): 72–76.

[15] 郭东艳, 范妤, 程江雪, 等. 湖北海棠总黄酮对卵巢早衰大鼠卵巢功能及骨代谢的影响[J]. 中国骨质疏松杂志, 2020, 26(2): 214–220.
GUO DY, FAN Y, CHENG JX, *et al*. Effect of total flavonoids of malus hupehensis on ovarian function and bone metabolism in rats with premature ovarian failure [J]. Chinese Journal of Osteoporosis, 2020, 26(2): 214–220.

[16] 刘兰庆, 汪鋆植, 邓改改, 等. 湖北海棠水提物减轻乌头对心脏毒性的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 100–106.
LIU LQ, WANG JZ, DENG GG, *et al*. Study on water extracts from *Malus hupehensis* to reduce cardiotoxicity of *Aconitum* toxicity [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(2): 100–106.

[17] LIU YG, ZHANG H, DAI X, *et al*. A comprehensive review on the phytochemistry, pharmacokinetics, and antidiabetic effect of *Ginseng* [J]. Phytomedicine, 2021, 92: 153717.

[18] 杜莹, 邸晴, 赵相轩. 人参化学成分与药理作用研究进展[J]. 药学前沿, 2025, 29(9): 1576–1592.
DU Y, DI Q, ZHAO XX. Research progress on chemical composition and pharmacological effects of ginseng [J]. Frontiers in Pharmaceutical Sciences, 2025, 29(9): 1576–1592.

[19] 睢大筠, 徐华丽, 付雯雯, 等. 人参皂苷的现代药理学研究[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2022.
SUI DY, XU HL, FU WW, *et al*. Modern pharmacological research of ginsenosides [M]. Changchun: Jilin University Press, 2022.

[20] 蓝小河, 吴雪辉, 陈嘉慧, 等. 金花茶叶皂苷对 α-淀粉酶抑制机制及效果[J]. 食品工业, 2022, 43(8): 188–191.
LAN XH, WU XH, CHEN JH, *et al*. Inhibitory mechanism and effect of *Camellia nitidissima* Chi saponins on α-amylase [J]. The Food Industry, 2022, 43(8): 188–191.

[21] 潘玥, 刘小莉, 王英, 等. 蓝莓叶多酚对 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶的体外抑制活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(4): 579–587.
PAN Y, LIU XL, WANG Y, *et al*. Inhibitory effect of polyphenols from blueberry leaves on the activity of *α*-amylase and *α*-glucosidase *in vitro* [J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(4): 579–587.

[22] 宋光明, 申竹芳. 淀粉糊化有利于淀粉耐量实验结果的显现[J]. 中国药理学通报, 2008, 24(2): 277–278.
SONG GM, SHEN ZF. Gelatinized starch is more feasible for starch tolerance test [J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2008, 24(2): 277–278.

[23] 王伟, 崔妍, 郑明珠, 等. 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷对 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶的抑制动力学[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 185–191.
WANG W, CUI Y, ZHENG MZ, *et al*. Inhibitory kinetics of cyanidin-3-o-glucoside against *α*-amylase and *α*-glucosidase [J]. Food Science, 2023, 44(16): 185–191.

[24] ZHANG YY, YANG ZL, LIU GG, *et al*. Inhibitory effect of chestnut (*Castanea mollissima* Blume) inner skin extract on the activity of *α*-amylase, *α*-glucosidase, dipeptidyl peptidase IV and in vitro digestibility of starches [J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126847.

[25] 钟颖颖, 何绮怡, 冯俊超, 等. 白芸豆中 *α*-淀粉酶抑制剂的提取纯化及活性测定条件优化[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 254–260, 225.
ZHONG YY, HE QY, FENG JC, *et al*. Extraction and purification and activity determination conditions optimization of *α*-amylase inhibitor in white kidney bean [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(8): 254–260, 225.

[26] YIN ZH, ZHANG W, FENG FJ, *et al*. *α*-Glucosidase inhibitors isolated from medicinal plants [J]. Food Science and Human Wellness, 2014, 3(3-4): 136–174.

[27] 任顺成, 陈佳乐, 陶华. 多酚对淀粉慢消化作用及其生物利用率研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 133–140.
REN SC, CHEN JL, TAO H. Research progress on the effect of polyphenols on slow digestion of starch and its bioavailability [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 133–140.

[28] SUN L, MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(4): 541–555.

[29] 宋金凤, 张瑞芬, 张名位, 等. 米根霉发酵对米糠酚类物质及其降糖活性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(6): 42–52.
SONG JF, ZHANG RF, ZHANG MW, *et al*. Effects of *Rhizopus oryzae* fermentation on phenolics and hypoglycemic activity of rice bran [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(6): 42–52.

[30] 于家敏, 王亚昕, 周健. 晚期糖基化终末产物与糖尿病慢性并发症的研究进展[J]. 中华糖尿病杂志, 2023, 15(11): 1146–1151.
YU JM, WANG YX, ZHOU J. Research progress in clinical research on advanced glycation end products with chronic diabetes complications [J]. Chinese Journal of Diabetes Mellitus, 2023, 15(11): 1146–1151.

[31] XIAO YL, SHEN JF, ZHAN JF, *et al*. Antiglycating effects of citrus flavonoids and associated mechanisms [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(5): 2363–2372.

[32] 李新明, 李群, 高忠东, 等. 苹果多酚及其活性单体的降血糖作用研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(2): 148–149, 152.
LI XM, LI Q, GAO ZD, *et al*. Study on the effect of reducing blood sugar by apple polyphenol and its active monomer [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 148–149, 152.

[33] 华桦, 刘芳, 刘俐, 等. 藏药俄色对自发性 2 型糖尿病 KK-Ay 小鼠胰岛素抵抗作用[J]. 中国药理学通报, 2022, 38(8): 1252–1259.
HUA H, LIU F, LIU L, *et al*. Effect of Tibetan medicine E-se on insulin resistance in KK-Ay mice with spontaneous type II diabetes [J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2022, 38(8): 1252–1259.

[34] 潘峰, 赵恒, 吴雪, 等. 木姜叶柯中根皮苷的超声波辅助提取及其改善胰岛素抵抗研究[J]. 林产化学与工业, 2025, 45(4): 10–18.
PAN F, ZHAO H, WU X, *et al*. Ultrasonic-assisted extraction of phlorizin from *Lithocarpus litseifolius* and the effect on alleviating insulin resistance in hepatocytes [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2025, 45(4): 10–18.

[35] 朱谋, 巩晓晨, 刘冬阳, 等. 人参皂苷 Rb_1 对改善 2 型糖尿病大鼠糖脂代谢紊乱的作用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 367–373.
ZHU M, GONG XC, LIU DY, *et al*. Effect of *Ginsenoside* Rb_1 on the disorder of glucose and lipid metabolism in type II diabetic mice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 367–373.

(责任编辑: 安香玉　韩晓红)