

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80841

车前子多糖结构表征及抗氧化与降血糖活性研究

刘东来 王 鹏 彭欣宇 沙旖璇 尹星福

(延边大学农学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: [目的] 研究车前子多糖 (*Plantago seed polysaccharides*, PSP) 的结构特性、体外抗氧化活性及其对 2 型糖尿病 (T2DM) 大鼠的降血糖作用。[方法] 采用紫外光谱、高效凝胶渗透色谱 (HPGPC)、离子色谱 (IC) 等方法分析 PSP 结构; 通过 DPPH 自由基、ABTS 自由基和羟自由基清除率评估其抗氧化能力; 建立链脲佐菌素 (STZ) 诱导的 T2DM 大鼠模型, 测定 PSP 对空腹血糖 (FBG)、血脂和氧化应激指标的影响。[结果] PSP 是一种无定型多糖, 相对分子质量为 1.42×10^4 , 主要由葡萄糖 (Glc)、甘露糖 (Man)、半乳糖 (Gal) 和阿拉伯糖 (Ara) 组成, 热稳定性良好。PSP 对 DPPH 自由基、ABTS 自由基和羟自由基清除率分别为 77.50%, 57.76%, 39.71%。动物试验显示, PSP 能显著降低 T2DM 大鼠 FBG、总胆固醇 (TC) 和甘油三酯 (TG) 水平 ($P < 0.01$), 提升超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 降低丙二醛 (MDA) 含量。[结论] PSP 具有明确的结构和良好的抗氧化与降血糖活性, 具备开发为糖尿病辅助功能成分的潜力。

关键词: 车前子; 多糖; 抗氧化; 降血糖

Structural characterization, antioxidant activity, and hypoglycemic effects of *Plantago seed polysaccharides*

LIU Donglai WANG Peng PENG Xinyu SHA Yixuan YIN Xingfu

(College of Agriculture, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China)

Abstract: [Objective] To investigate the structural characteristics, *in vitro* antioxidant activity, and hypoglycemic effects of *Plantago seed polysaccharides* (PSP) on type 2 diabetes mellitus (T2DM) rats. [Methods] The structure of PSP is analyzed via ultraviolet (UV) spectroscopy, high-performance gel permeation chromatography (HPGPC), and ion chromatography (IC). Antioxidant activity is assessed by DPPH, ABTS, and hydroxyl free radical scavenging rates. Then, a T2DM rat model is established using streptozotocin (STZ) to assess the effects of PSP on fasting blood glucose (FBG), blood lipids, and oxidative stress markers. [Results] In an amorphous structure, PSP has a molecular weight of 1.42×10^4 , primarily composed of glucose (Glc), mannose (Man), galactose (Gal), and arabinose (Ara). Additionally, it exhibits high thermal stability. The DPPH, ABTS, and hydroxyl free radical scavenging rates of PSP are 77.50%, 57.76%, and 39.71%, respectively. In animal experiments, PSP significantly reduces FBG, total cholesterol (TC), and triglyceride (TG) levels in T2DM rats ($P < 0.01$), increases superoxide dismutase (SOD) activity, and decreases malondialdehyde (MDA) content. [Conclusion] PSP exhibits clear structural characteristics alongside potent antioxidant and hypoglycemic activities, suggesting its potential as an adjunctive functional ingredient for diabetes management.

Keywords: *Plantago*; polysaccharide; antioxidant; hypoglycemic

糖尿病已成为全球重大健康问题, 预计到 2045 年, 全球糖尿病患者将达到 6.93 亿, 占总人口的 12.2%, 其中 90%~95% 为 2 型糖尿病 (T2DM), 且其发病机制复杂^[1-2]。随着糖尿病患病率的逐年上升, 传统抗糖尿病药

物常有一定的副作用, 或者对患者的依从性较差, 不能完全满足患者的需求^[3]。因此, 开发新的降糖治疗策略显得尤为重要。近年来, 越来越多的研究发现, 许多功能植物成分具有显著的降糖作用, 并且长期使用对身体的损

通信作者: 尹星福 (1984—), 女, 延边大学讲师, 博士。E-mail: yinxingfu@ybu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-10 改回日期: 2026-03-03

引用格式: 刘东来, 王鹏, 彭欣宇, 等. 车前子多糖结构表征及抗氧化与降血糖活性研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 138-148.

Citation: LIU Donglai, WANG Peng, PENG Xinyu, et al. Structural characterization, antioxidant activity, and hypoglycemic effects of *Plantago seed polysaccharides*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 138-148.

伤较小^[4]。与传统药物相比,天然植物产品及其生物活性成分不仅在降血糖方面表现出良好的效果,还因其较低的毒性和较少的不良反应,成为了糖尿病治疗中的有力替代或辅助治疗手段^[5]。

车前子(*Plantago seed*),又称大粒车前或平车前的干燥成熟种子,具有药食两用的功效^[6]。2012年,中国将其列入可用于保健食品的成分^[7]。车前子具有甘凉的气味,无毒副作用,能够缓解疼痛、促进排便、清目、止泻等功效,对治疗赤痛有显著作用,同时也具备保健和调理生机的功能^[8]。其主要活性成分包括苯乙醇苷类、环烯醚萜类、黄酮以及多糖等^[9]。多糖是一类结构和活性复杂的生物大分子^[10]。近年来,车前子多糖(*Plantago seed polysaccharides*, PSP)因其良好的生物活性受到广泛关注。PSP是一种主要由阿拉伯糖、半乳糖、甘露糖等物质构成的半发酵型膳食纤维^[11],具有较强的抗氧化活性^[12]、抗炎^[13]、降血糖^[14]作用,能够改善糖尿病引起的代谢紊乱。

研究旨在对PSP的结构特征进行分析,并结合体外抗氧化试验与体内T2DM大鼠模型,明确其调节糖脂代谢及改善氧化应激的作用,以期为PSP在功能性食品中的应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 主要材料与试剂

车前子:产自浙江省;

SD大鼠:SPF级,雄性,体质量(200±20)g,延边大学实验动物饲养中心;

高脂高糖饲料:基础饲料66.5%、猪油10%、糖20%、胆酸钠1.0%、胆固醇2.5%,南京盛民科研动物养殖场;

乙醇、丙酮、石油醚:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

DPPH、ABTS、维生素C(V_c)、单糖标准品(阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、甘露糖醛酸、葡萄糖醛酸):纯度≥98%,上海源叶生物科技有限公司;

α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶:生化试剂,上海源叶生物科技有限公司;

链脲佐菌素(STZ):纯度≥98%,美国Sigma-Aldrich公司;

盐酸二甲双胍缓释片:中美上海施贵宝制药有限公司;

阿卡波糖:纯度≥98%,江苏酶联生物科技有限公司;

总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)测定试剂盒:南京建成生物工程研究所。

1.2 主要仪器与设备

血糖仪:AG-605型,天津九安医疗电子股份有限公司;

离心机:TDZ5-WS型,湖南湘仪离心机仪器有限公司;

酶标仪:Multiskan型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

超低温冰箱:DW-86L405型,广州傲雪制冷设备有限公司;

电子天平:LC-FA2004型,上海力辰科学仪器有限公司;

冷冻干燥机:YTLG-12D型,上海叶拓试验仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 PSP制备 将车前子烘干、粉碎后过80目筛,得到车前子干粉。根据赵凯迪等^[15]的方法修改如下,取适量车前子干粉与蒸馏水充分混合,在90℃下提取2h。提取液冷却至室温后,离心收集上清液(4000 r/min, 10 min)。向上清液中加入4倍体积的95%乙醇,醇沉过夜,再次离心以收集多糖沉淀。沉淀物依次用无水乙醇、丙酮和石油醚洗涤,离心(4000 r/min, 10 min)后收集多糖沉淀,并进行冻干(冷阱温度-50℃,真空度<10 Pa,干燥48 h)处理,得到车前子粗多糖。根据Chen等^[16]的方法,将粗多糖冻干粉溶解于蒸馏水中,加入1/4体积的Sevage试剂($V_{\text{氯仿}}:V_{\text{正丁醇}}=4:1$),振荡后离心(4000 r/min, 10 min),收集上清液,重复操作直至无明显蛋白质层。去蛋白后的溶液经72 h透析,除去小分子杂质。最终收集透析后的溶液,并进行冻干(冷阱温度-50℃,真空度<10 Pa,干燥48 h)处理,得到纯化后的PSP,密封保存备用。

1.3.2 总糖、蛋白质和糖醛酸测定

(1)总糖:采用苯酚硫酸法^[17]。

(2)蛋白质:采用考马斯亮蓝法^[17]。

(3)糖醛酸:采用间羟基苯法^[18]。

1.3.3 紫外吸收光谱分析 采用紫外-可见分光光度计,在200~400 nm范围内对适量质量浓度的PSP溶液进行扫描,以获取其紫外吸收光谱。

1.3.4 相对分子质量测定 根据闫光玲等^[19]的方法,采用HPGPC测定分级组分多糖的平均相对分子质量(M_n)及分布均一性。将适量PSP溶液离心取上清、过滤后作为样品溶液;同时将5 mg葡聚糖标准品溶于流动相(0.05 mol/L NaCl溶液)配制成5 mg/mL的标准品溶液。色谱条件:串联凝胶柱BRT105-103-101(8 mm×300 mm),流动相0.05 mol/L NaCl溶液,流量0.6 mL/min,柱温40℃,进样量25 μ L,分析时间70 min,使用示差检测器RID-20A进行检测。

1.3.5 单糖组成分析 根据石越等^[20]的方法,采用离子色谱(IC)对PSP的单糖组成进行定性与定量分析。标准品处理:取适量16种单糖标准品,加入2 mL 3 mol/L TFA于120℃水解3 h,氮吹干燥后以去离子水复溶,配成标准液并精确稀释为混标用于建立标准曲线。样品处理:精确称取5 mg PSP样品,加入2 mL 3 mol/L TFA于120℃水解3 h,氮吹干燥后用5 mL去离子水复溶并涡旋混匀;分别取此溶液50 μ L(加950 μ L水)和200 μ L(加800 μ L水)稀释成两份待测液,离心取上清进样。色谱条件:色谱柱Dionex CarboPac™ PA20(3 mm×150 mm);流动相A为超纯水,B

为 15 mmol/L NaOH, C 为 15 mmol/L NaOH & 100 mmol/L NaAc; 流量 0.3 mL/min; 进样量 25 μL; 柱温 30 °C。

1.3.6 X 衍射分析 将 PSP 样品置于样品池内, 随后进行 X 射线衍射分析。测试条件设置: 采用铜靶 (Cu-Kα 射线, λ=0.154 06 nm), 管电压 40 kV, 扫描范围为 3°~90°(2θ), 扫描速度 5(°)/min。

1.3.7 热重分析 采用 TGA-1 热重分析仪对 PSP 样品进行热重 (TG) 及其导数 (DTG) 分析。取样品约 5 mg, 测试温度范围为 20~800 °C, 在氮气气氛 (流量 20 mL/min) 下进行, 升温速率设定为 20 °C/min。

1.3.8 刚果红试验 根据熊善强^[21]的方法, 配制 2 mg/mL 的 PSP 溶液、1 mol/L 氢氧化钠溶液及 0.2 mmol/L 刚果红溶液。取 PSP 溶液 1 mL, 加入刚果红溶液 1 mL、蒸馏水 4 mL, 并按不同浓度 (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mol/L) 加入 NaOH 溶液。混合均匀后, 静置 5 min。使用酶标仪进行全波长扫描, 记录各 NaOH 浓度下的最大吸收波长并绘制图表。

1.3.9 碘-碘化钾反应 配制 1 mg/mL 的 PSP 溶液, 加入 1.2 mL 含 0.02% I₂ 和 0.2% KI 的碘试剂, 混匀后稀释 1 倍。于 300~700 nm 范围内进行紫外光谱扫描。

1.3.10 PSP 体外抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除能力: 根据杨薇^[22]⁴⁸⁻⁴⁹的方法修改如下, 配制浓度为 0.2 mmol/L 的 DPPH 无水乙醇溶液 (溶液 A), 摇匀, 避光保存。将 PSP 溶液与 DPPH 溶液混合, 在 517 nm 处测定吸光度。以 V_c 溶液为对照试验。

(2) ABTS 自由基清除能力: 根据杨薇^[22]⁵⁰⁻⁵¹的方法修改如下, 将 ABTS 溶液与过硫酸钾溶液按一定比例混合, 生成 ABTS 自由基母液, 静置避光反应 12~16 h。使用 PBS 缓冲液稀释 ABTS 母液, 调节其吸光度在 734 nm 处为 0.70±0.02。将 PSP 溶液与稀释后的 ABTS 溶液混合, 反应一定时间后, 在 734 nm 处测定其吸光度。V_c 溶液为对照试验。

(3) 羟自由基清除能力: 根据王炬等^[23]的方法修改如下, 将 PSP 溶液与硫酸亚铁、水杨酸和过氧化氢溶液混合并进行水浴反应, 于 510 nm 处测定吸光度。以 V_c 溶液作为对照试验。

体外抗氧化试验中的自由基清除率按式 (1) 计算。

$$R_s = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_s——自由基清除率, %;

A₁——反应体系的吸光度 (PSP 溶液与各反应体系工作液混合);

A₂——样品本底的吸光度 (以对应溶剂代替反应工作液);

A₃——空白对照的吸光度 (以对应溶剂代替 PSP 溶液)。

1.3.11 PSP 体外降血糖活性

(1) 对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用: 根据 Yang 等^[24]的

方法, 将 α-葡萄糖苷酶溶液与等体积的 PSP 溶液混合, 加入 pNPG 溶液和碳酸钠溶液并进行水浴处理, 于 405 nm 下测定吸光度。以阿卡波糖作为对照试验。

(2) 对 α-淀粉酶的抑制作用: 根据 Meng 等^[25]的方法, 将 PSP 溶液与等体积的 α-淀粉酶溶液混合并水浴处理, 加入淀粉溶液继续水浴后, 再加入 DNS 指示剂并进行处理和稀释, 于 540 nm 处测定吸光度。以阿卡波糖作为对照试验。

按式 (2) 计算酶抑制率。

$$R_i = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R_i——酶抑制率, %;

A₁——反应体系的吸光度 (PSP 溶液与酶溶液作用);

A₂——样品本底的吸光度 (以 PBS 缓冲液代替酶溶液);

A₃——空白对照的吸光度 (以 PBS 缓冲液代替 PSP 溶液)。

1.3.12 PSP 体内降血糖活性

(1) 试验动物及条件: 试验动物均饲养在单独的笼子中, 环境温度为 (22±2) °C、环境湿度为 (50±10)%, 12 h 昼夜交替。研究所涉及的动物试验均已获得延边大学实验动物伦理委员会的批准 (伦理审批号: YD20250909001)。

(2) 大鼠糖尿病模型建立: 除空白对照组以外, 其余大鼠均喂养高脂高糖饲料, 4 周后, 对高脂高糖饲料喂养的大鼠进行腹腔注射 STZ 溶液 (50 mg/kg)。3 d 后, 测定空腹血糖 (FBG), FBG>11.1 mmol/L 则认为 STZ 诱导的糖尿病大鼠模型建造成功^[26]。

(3) 试验分组及处理: 试验分为 5 组, 分别为空白对照组 (NC)、模型组 (DM)、PSP 低剂量组 (PSP-L)、PSP 高剂量组 (PSP-H) 和二甲双胍阳性对照组 (PC)。于每天早上 9:00—11:00 给药 1 次, 连续给药 8 周, 每周观察各组大鼠状态及摄食状态, 记录各组大鼠的体质量并测量血糖。根据张晨^[27]的方法修改如下, 各组灌胃处理和饲料给予如表 1 所示。

(4) 大鼠口服葡萄糖耐量 (OGTT) 测定: 灌胃结束后进行 OGTT 试验。各组大鼠于试验前 12 h 禁食。配制 20% 葡萄糖溶液, 每只 SD 大鼠按 1 g/kg·BW 灌胃处理, 分

表 1 动物灌胃处理方法
Table 1 Animal gavage methods

动物分组	给药剂量	饲料
空白对照组 (NC)	等量生理盐水	基础标准饲料
模型组 (DM)	等量生理盐水	高脂高糖饲料
PSP 低剂量组 (PSP-L)	200 mg/kg·BW	高脂高糖饲料
PSP 高剂量组 (PSP-H)	400 mg/kg·BW	高脂高糖饲料
二甲双胍阳性对照组 (PC)	200 mg/kg·BW	高脂高糖饲料

别于 0, 30, 60, 90, 120 min 取血测定血糖浓度。根据式(3)计算血糖曲线下面积^[28]。

$$A_{uc} = 0.5 \times [(A + B) \times 0.5 + (B + C) \times 0.5 + (C + D) \times 0.5 + (D + E)], \quad (3)$$

式中:

A_{uc} ——血糖曲线下面积, $h \cdot mmol/L$;

A, B, C, D ——0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 h 的血糖值, $mmol/L$ 。

(5) 血清样本的采集与制备: 眼球取血, 离心取上清液即为血清样本, $-80^\circ C$ 保存, 用于生化指标的测定。

(6) 脏器指数测定: 大鼠处死后, 取其心脏、肝脏、肾脏及脾脏, 经生理盐水洗净并拭干后称重, 根据式(4)计算脏器指数。

$$I_o = \frac{m_o}{m_b} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

I_o ——脏器指数, %;

m_o ——大鼠对应脏器质量, g;

m_b ——大鼠空腹体质量, g。

(7) 血清生化指标测定: 采用酶促反应法及比色法测定并计算大鼠血清中 TC、TG、SOD 和 MDA 水平。

1.4 数据统计及分析

每个样品进行 3 次平行试验, 体内动物试验每组 6 只大鼠 ($n=6$); 使用 Origin 2018 和 GraphPad Prism 8.0 进行绘制图表; 使用 SPSS 22.0 对试验数据进行单因素方差分析, 检验各组数据的显著性, $P < 0.05$ 表示具有统计学意义; 结果均以均数 ± 标准差表示。

2 结果分析

2.1 PSP 结构表征

2.1.1 总糖、蛋白质和糖醛酸测定分析 试验测得 PSP 纯度为 65.48%, 蛋白质质量分数为 2.35%, 糖醛酸质量分数为 17.45%。这表明 PSP 样品具有较高的纯度, 且含有一定量的糖醛酸。

2.1.2 紫外吸收光谱分析 如图 1 所示, PSP 在 260, 280 nm 处未见明显吸收峰, 表明其基本不含核酸及蛋白质成分^[29]。这一结果进一步确认了 PSP 的高纯度, 且没有核酸和蛋白质成分的干扰, 有助于保证后续功能活性试验的准确性与可靠性。

2.1.3 相对分子质量分析 如图 2 所示, 图中仅出现一个单一且对称的峰, 表明 PSP 的相对分子质量分布较为均匀。采用葡聚糖为标准品绘制的多糖相对分子质量标准曲线为 $y = -0.205x + 11.91$, $R^2 = 0.993$ ($y = \lg M_r, x = Rt$)。根据 PSP 的出峰时间 37.84 min, 计算其相对分子质量为 1.42×10^4 。赵宏等^[30]采用水提醇沉法得到 PSP-B9 的相对分子质量为 7.69×10^5 , 龚璐^[31]通过碱提醇沉法得到 PSP 的相对分子质量为 1.15×10^6 。不同提取方法导致 PSP 相对分子质量差异, 可能与提取介质对 PSP 分子结构及理

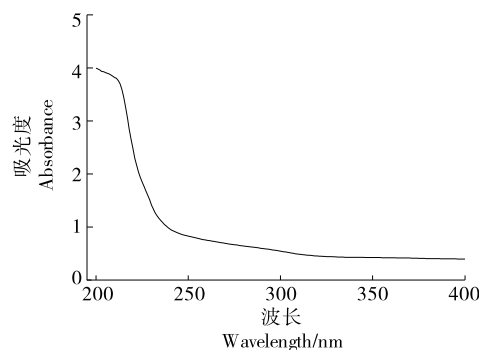


图 1 PSP 紫外光谱图

Figure 1 UV spectrum of PSP

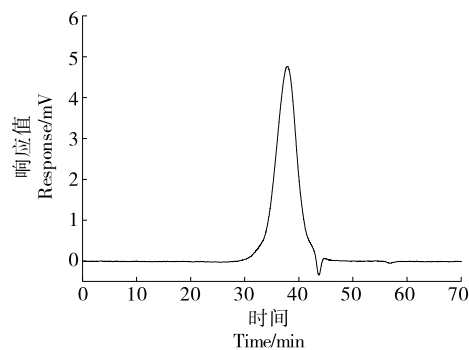


图 2 PSP 相对分子质量分布图

Figure 2 Molecular weight distribution of PSP

化性质的影响有关, 进而影响其组成、相对分子质量和溶解度^[31]。相对分子质量对 PSP 在体内的分布和生物利用度有显著影响, 较低的相对分子质量可能使其在血液中快速代谢, 从而有助于在抗糖尿病治疗中的潜在应用。

2.1.4 单糖组成分析 PSP 的 IC 检测结果如图 3 所示。根据图 4 中各单糖标准品的保留时间对比分析, PSP 主要由葡萄糖 (Glc)、甘露糖 (Man)、半乳糖 (Gal)、阿拉伯糖 (Ara)、鼠李糖 (Rha)、木糖 (Xyl)、半乳糖醛酸 (GalA)、葡萄糖醛酸 (GlcA) 和氨基葡萄糖 (GlcN) 组成, 各糖的摩尔百分比分别为 36.0%, 20.5%, 16.6%, 15.7%, 3.7%, 3.4%, 2.8%, 1.1%, 0.3%。结果表明, PSP 是一种以 Glc、Man、Gal 和 Ara 为主要组分的杂多糖。彭东辉等^[32]发现, 盐炙 PSP 的主要单糖为木糖、葡萄糖和阿拉伯糖。这种特定的单糖组成特征可能是 PSP 抗氧化及调节血糖作用的基础。

2.1.5 X 衍射分析 如图 5 所示, PSP 在衍射角约 20° 处呈现一宽而弱的弥散峰, 未见明显尖锐衍射峰, 表明其结晶度较低, 具有典型的无定形特征^[33]。这种无定形特性可能与其多糖分子链间排列无规则、分子间作用力较弱有关, 在降血糖和抗氧化活性方面, 无定形结构可能加速了 PSP 的生物利用率, 从而提高其药理活性。因此, PSP 的结构特性可能为其良好的功能活性提供一定的结构基础。

2.1.6 热重分析 如图 6 所示, PSP 在热重过程中有 3 个明显热重的台阶, 显示了失重的 3 个主要阶段。DTG 曲

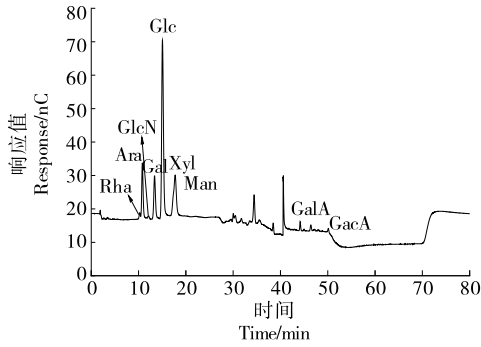


图 3 PSP 离子色谱图

Figure 3 Ion chromatogram of PSP

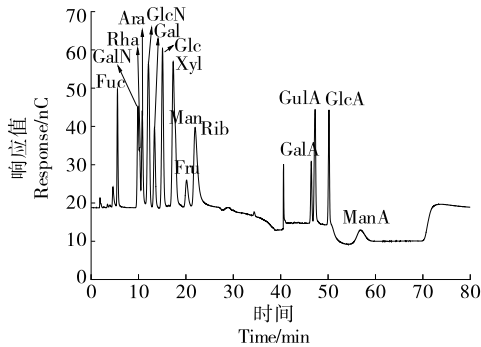


图 4 混合单糖标准品离子色谱图

Figure 4 Ion chromatogram of mixed monosaccharide standard

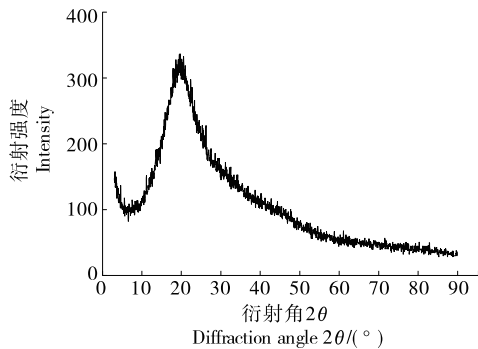


图 5 PSP 的 X 衍射图

Figure 5 X-ray diffraction of PSP

线上观测到 97 °C 附近出现的失重峰归属于 PSP 表面水分的挥发所导致,当温度上升到 160 °C 后,水分物质全部挥发,脱去的水分是 6.201%,有一个小的热失重台阶也印证了这一点。持续升温使 PSP 进一步失重,失重为 4.637%,归因于分解过程中 PSP 糖苷键的断裂引起^[34],220 °C 附近出现尖锐的失重峰也证明了这一点。当热解温度达到 326 °C 时,观察到质量分数急剧下降,在 DTG 曲线上出现表征最大分解速率的失重峰为 26.258%/min,多糖的主要热失重阶段失重为 74.498%,表明 PSP 的降解。较相关研究^{[14][71]}得出的最大分解速率温度有所后移,可能是分子内与分子间氢键作用加强使分子链的热触发运动性降低从

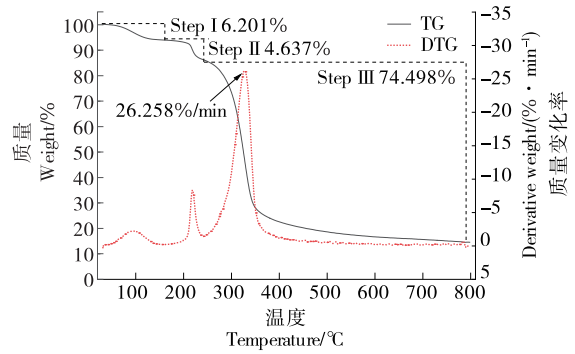


图 6 PSP 热重曲线图

Figure 6 Thermogravimetric curves of PSP

而对热降解有阻碍作用,使降解温度后移。此外,PSP 在 700 °C 时未完全分解,残余质量分数为 14.664%。PSP 降解温度为 326 °C,且在 700 °C 时还有残余组分存在,表明 PSP 具有较好的热稳定性。该稳定性有助于 PSP 作为功能性食品成分的长期应用。

2.1.7 刚果红试验 如图 7 所示,加入 PSP 后,刚果红溶液的最大吸收波长未发生变化,与初始溶液对比无明显红移现象,说明 PSP 在溶液中未形成三股螺旋构象^[35]。这一发现为 PSP 的生物相容性和稳定性提供了支持,意味着它能够在不改变生物大分子构象的情况下发挥其生物学活性。

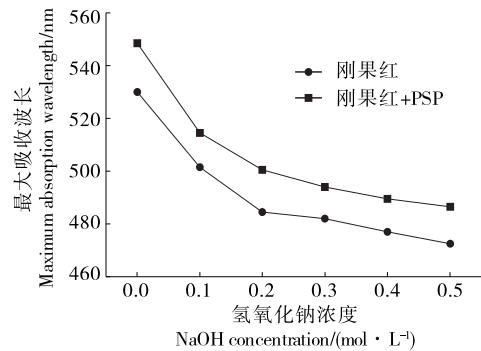


图 7 PSP 和刚果红在不同浓度 NaOH 下的最大波长

Figure 7 Maximum wavelength of PSP and Congo red at different concentrations of NaOH ($n=3$)

2.1.8 碘—碘化钾反应 如图 8 所示,PSP 与碘—碘化钾溶液反应的最大吸收峰出现在 350 nm 处,而非 565 nm,表明 PSP 分子结构中可能存在较多的分支和较长的侧链。进一步的试验结果显示,多糖溶液与碘试剂反应呈阴性,表明 PSP 中不含淀粉成分^[36]。

2.2 PSP 体外抗氧化活性

2.2.1 DPPH 自由基清除能力 如图 9 所示,随着 PSP 质量浓度的增加,其 DPPH 自由基清除率也逐渐升高,表明 PSP 质量浓度与自由基清除能力之间存在明显的正相关关系。在质量浓度为 4 mg/mL 时, V_c 清除率为 97.1%,而

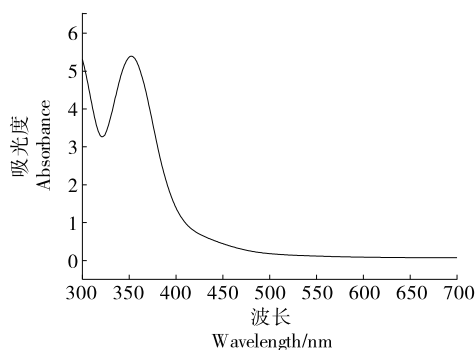


图8 PSP 碘—碘化钾反应

Figure 8 Iodine-potassium iodide reaction of PSP

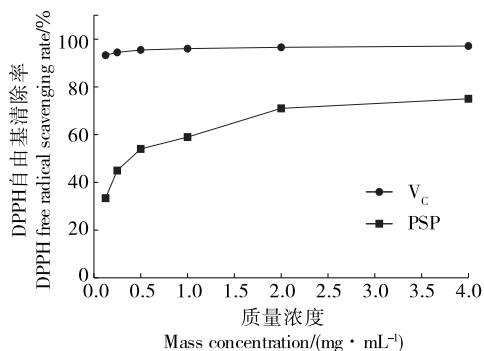


图9 PSP对DPPH自由基的清除率

Figure 9 DPPH free radical scavenging rate of PSP ($n=3$)

PSP的清除率为77.5%。以上结果表明,PSP在一定范围内具有较强的抗氧化活性。尽管在高浓度下其清除效果仍低于 V_c ,但整体趋势表明PSP具备潜在的自由基清除能力,可能与其所含的功能性单糖结构有关。

2.2.2 ABTS 自由基清除能力 如图10所示,随着PSP质量浓度的增加,其ABTS自由基清除率也逐渐升高,表明PSP质量浓度与自由基清除能力之间存在明显的正相关关系。在质量浓度为4 mg/mL时, V_c 和PSP的清除率分别为95.01%和57.76%。以上结果表明,PSP对ABTS自由基具有较强的清除作用。虽然其清除率低于 V_c ,但仍表现出较强的抗氧化潜力。

2.2.3 羟自由基清除能力 如图11所示,随着PSP质量浓度的增加,其对羟自由基的清除率逐渐升高,表明PSP质量浓度与羟自由基清除能力之间存在明显的正相关关系。在质量浓度为4 mg/mL时, V_c 和PSP的清除率分别为97.82%和39.71%。以上结果表明,PSP对羟自由基具有一定的清除作用。尽管其清除效率明显低于 V_c ,但仍表现出一定的羟自由基清除潜力,提示PSP在减缓氧化损伤方面具有积极作用。

2.3 PSP体外降血糖活性

2.3.1 对 α -葡萄糖苷酶的抑制率 如图12所示,随着PSP质量浓度的增加,其对 α -葡萄糖苷酶的抑制率逐渐升高,表明PSP质量浓度与 α -葡萄糖苷酶抑制作用之间存在

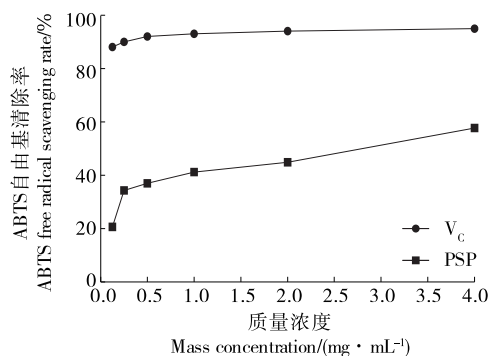


图10 PSP对ABTS自由基的清除率

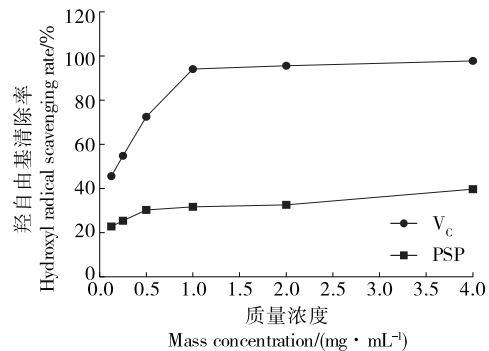
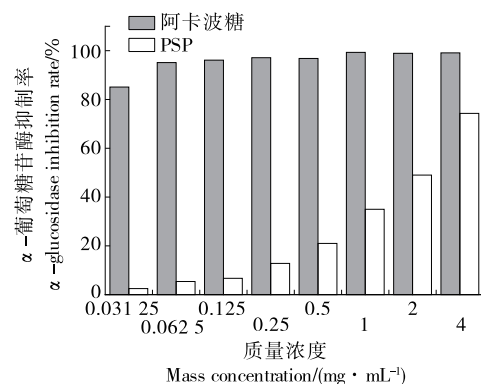
Figure 10 ABTS free radical scavenging rate of PSP ($n=3$)

图11 PSP对羟自由基的清除率

Figure 11 Hydroxyl free radical scavenging rate of PSP ($n=3$)图12 PSP对 α -葡萄糖苷酶的抑制率Figure 12 α -Glucosidase inhibition rate of PSP ($n=3$)

明显的正相关关系。在质量浓度为4 mg/mL时,抑制率达到73.23%。以上结果表明,PSP对 α -葡萄糖苷酶具有显著的抑制作用。这一现象可能与PSP中活性结构单元与酶分子结合能力增强有关,从而干扰酶的正常催化功能。显示出其在调控糖代谢及降低血糖方面的潜在应用价值。

2.3.2 对 α -淀粉酶的抑制率 如图13所示,随着PSP质量浓度的增加,其对 α -淀粉酶的抑制率逐渐升高,表明PSP质量浓度与 α -淀粉酶抑制能力之间存在明显的正相关关系。当PSP质量浓度超过2 mg/mL时,其抑制率的上

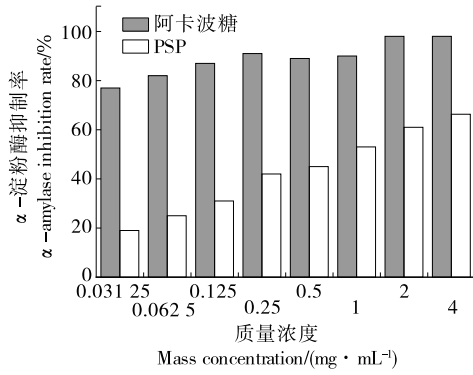


图 13 PSP 对 α -淀粉酶的抑制率

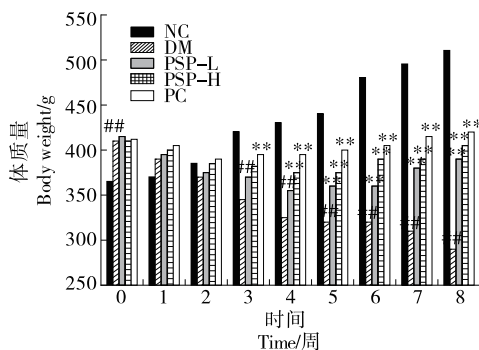
Figure 13 α -Amylase inhibition rate of PSP ($n=3$)

升趋势趋于平缓,增长幅度不再显著。在质量浓度为 4 mg/mL 时,阿卡波糖和 PSP 的抑制率分别为 98.33% 和 65.77%。以上结果表明,PSP 对 α -淀粉酶具有一定的抑制作用,但其效果相较于阿卡波糖仍存在一定差距^[37]。因此,PSP 在 α -淀粉酶抑制领域仍具备开发潜力,可作为功能性食品或辅助降糖剂的候选成分。

2.4 PSP 体内降血糖活性

2.4.1 对糖尿病大鼠体质量的影响 如图 14 所示,NC 组大鼠体质量在整个试验期间增长较快。与 NC 组相比,DM 组大鼠体质量显著降低($P<0.01$),至试验结束时减少 29%。相较于 DM 组,各药物干预组大鼠体质量在初期均出现下降,之后逐渐恢复;其中 PSP-H 组和 PC 组回升最为明显,分别增加 1.22% 和 4.33%。表明 PSP 在改善体质量减轻方面具有一定的作用。这与尹红力等^[38]的研究结果基本一致,表明 PSP 在改善糖尿病相关体质量变化方面具有潜在的干预效果。此外,体质量的恢复可能与 PSP 调节糖代谢和脂质代谢的作用密切相关,这为进一步理解其调节代谢紊乱的机制提供了线索。

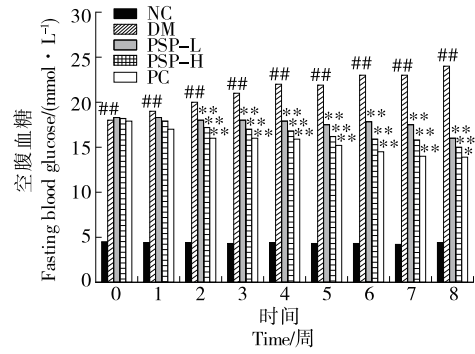
2.4.2 对 T2DM 大鼠 FBG 的影响 如图 15 所示,与 NC 组相比,DM 组大鼠 FBG 显著升高($P<0.01$),并持续维持于高水平,表明 T2DM 造模成功。干预 8 周后,与 DM 组相比,PC 组及各剂量 PSP 组 FBG 均显著降低($P<0.01$);



与 NC 组比较,## $P<0.01$;与 DM 组比较,** $P<0.01$

图 14 PSP 对 T2DM 大鼠体质量的影响

Figure 14 Effects of PSP on body weight in T2DM rats ($n=6$)



与 NC 组比较,## $P<0.01$;与 DM 组比较,** $P<0.01$

图 15 PSP 对 T2DM 大鼠空腹血糖的影响

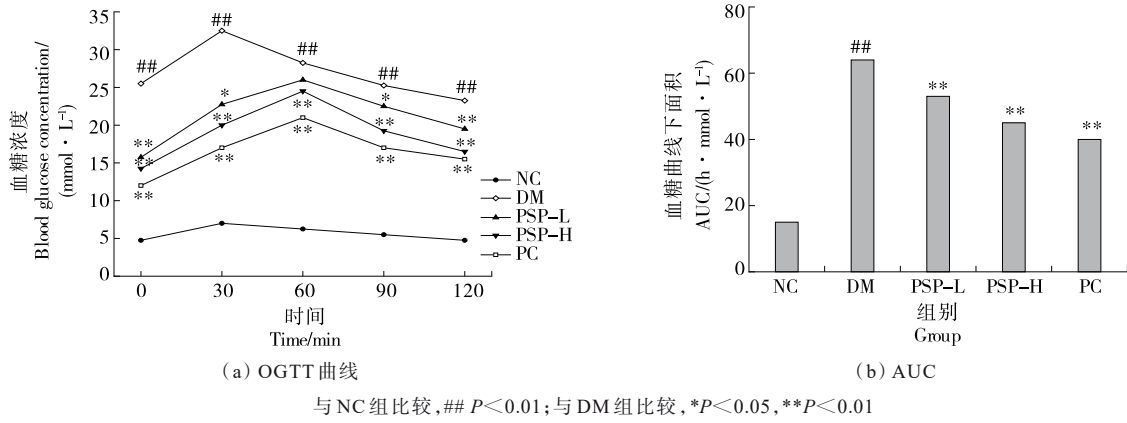
Figure 15 Effects of PSP on fasting blood glucose in T2DM rats ($n=6$)

其中 PC 组血糖降低幅度最为显著(33.98%),PSP-H 组与 PSP-L 组分别降低 23.51% 和 16.13%,结果表明 PSP 具有一定的降血糖作用,且高剂量 PSP-H 效果尤为显著,与尹红力等^[38]的研究结果基本一致,进一步支持 PSP 在 T2DM 血糖调控中的潜在应用价值。这一降糖效果与随后 OGTT 试验中的结果相一致,PSP 在多个方面改善糖代谢异常,为调节血糖提供了有力的证据。

2.4.3 对 T2DM 大鼠 OGTT 的影响 如图 16 所示,与 NC 组相比,DM 组大鼠血糖达峰值后持续处于较高水平,表明其糖耐量明显受损。各给药组血糖达峰值时间较 DM 组延迟约 30 min,之后血糖逐渐下降,其中 PSP-H 组和 PC 组血糖下降较快^[39]。

各给药组的 AUC 值均显著低于 DM 组($P<0.01$)。这一结果表明,PSP 可能通过增强外周组织对胰岛素的敏感性或保护胰岛 β 细胞功能,从而调节血糖水平^[39]。进一步分析表明,PSP 干预可有效改善 T2DM 大鼠的糖耐量异常,其中 PSP-H 组效果最为显著,表现出较强的抗高血糖潜力。这些结果与 FBG 试验的降糖作用相呼应,表明 PSP 不仅在空腹血糖水平上表现出显著的调控作用,也在糖耐量方面展现出良好的改善效果,进一步支持了 PSP 作为潜在治疗糖尿病药物的价值。

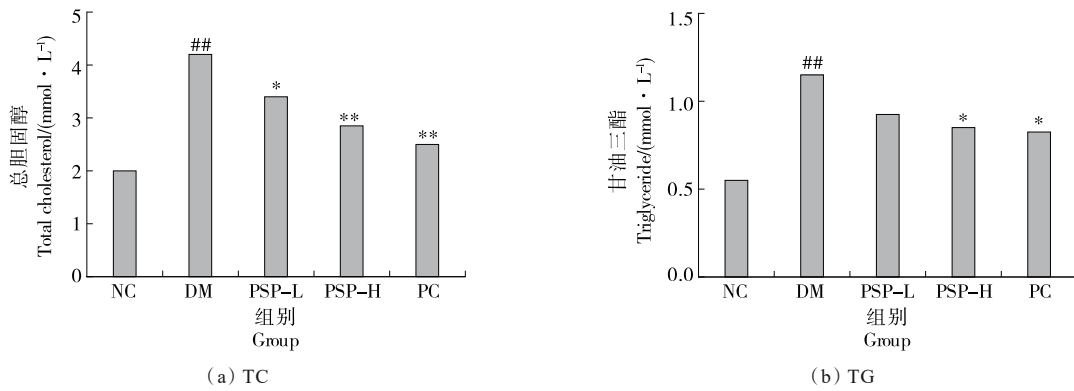
2.4.4 对 T2DM 大鼠 TC、TG 水平的影响 如图 17 所示,与 NC 组相比,DM 组大鼠的 TC 和 TG 含量均显著升高($P<0.01$),表明糖尿病诱发了脂质代谢紊乱。各给药干预组均表现出一定的调节作用,其中 PSP-H 组的 TC 和 TG 分别较 DM 组降低 32.86% 和 26.50%。该结果与 Yang 等^[40]的研究结果基本一致,进一步证明了 PSP-H 能够有效改善 T2DM 大鼠的血脂异常,并对糖尿病引起的脂质代谢紊乱具有缓解作用。这一发现与前述 FBG 和 OGTT 试验结果相呼应,表明 PSP 不仅能够调节血糖,还在脂质代谢方面发挥显著作用,进一步支持了 PSP 在糖尿病综合治疗中的潜在价值。



与NC组比较,## $P < 0.01$;与DM组比较,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$

图 16 PSP对T2DM大鼠OGTT的影响

Figure 16 Effects of PSP on OGTT in T2DM rats ($n=6$)



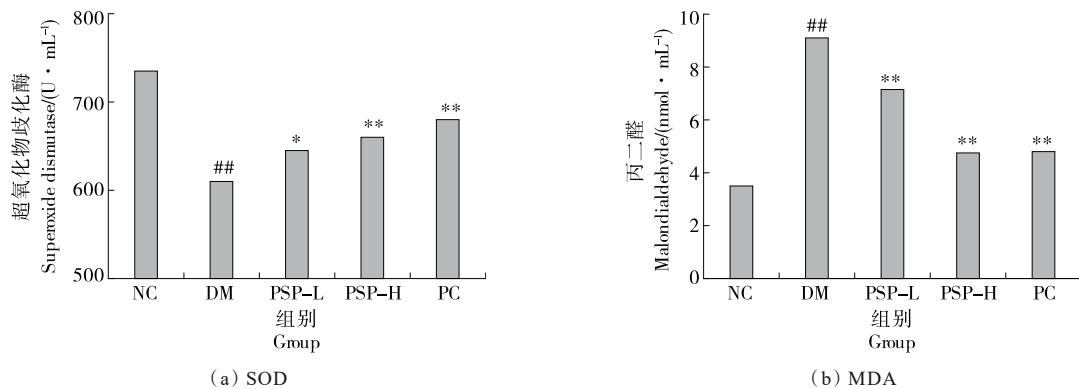
与NC组比较,## $P < 0.01$;与DM组比较,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$

图 17 PSP对T2DM大鼠TC、TG水平的影响

Figure 17 Effects of PSP on TC and TG levels in T2DM rats ($n=6$)

2.4.5 对T2DM大鼠SOD、MDA水平的影响 如图18所示,与NC组相比,DM组SOD活性显著下降($P < 0.01$),提示抗氧化能力受损。各PSP干预组及PC组均能显著提高SOD活性($P < 0.05$)。DM组MDA含量较NC组显著升高($P < 0.01$),表明脂质过氧化反应增强;经PSP及PC

干预后,MDA含量均显著降低($P < 0.05$),其中PSP-H组效果最为显著。这一结果与前述体外抗氧化试验的结果相呼应,进一步证明了PSP在体内外均能有效增强抗氧化能力,减轻氧化应激损伤,从而发挥保护作用。该结果与Olatunji等^[41]的研究结果基本一致,表明PSP可有效增



与NC组比较,## $P < 0.01$;与DM组比较,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$

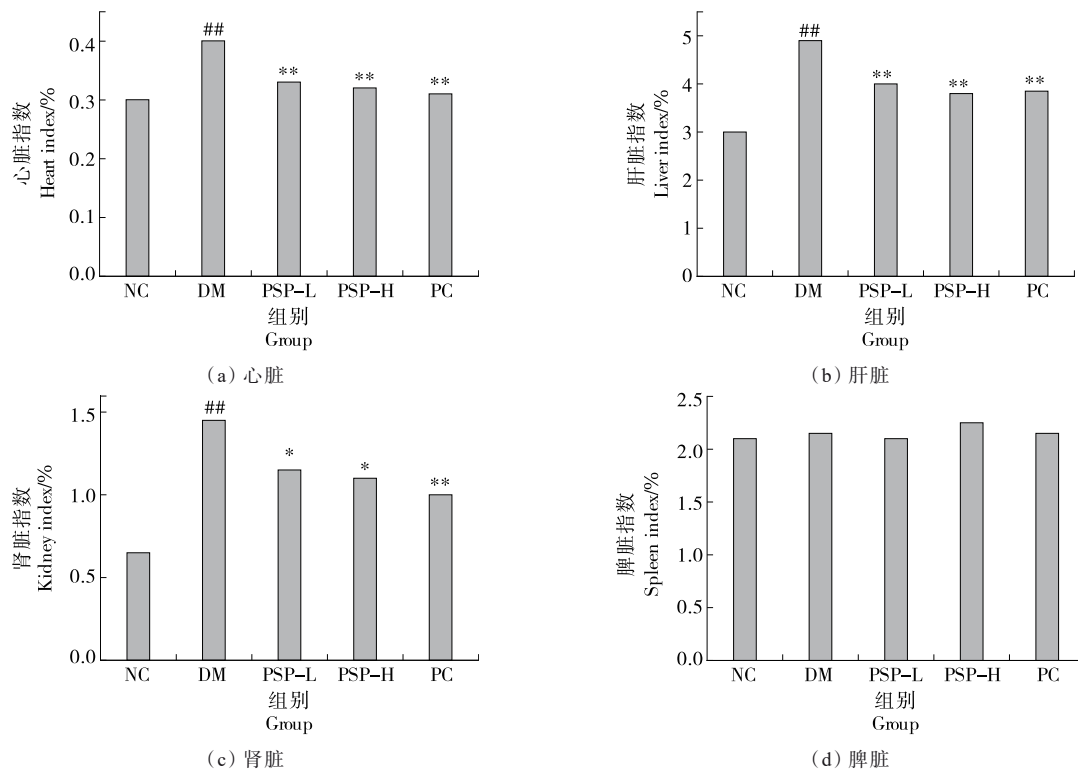
图 18 PSP对T2DM大鼠SOD、MDA水平的影响

Figure 18 Effects of PSP on SOD and MDA levels in T2DM rats ($n=6$)

强机体抗氧化能力并减轻氧化应激损伤。

2.4.6 对大鼠脏器指数的影响 如图 19 所示,与 NC 组相比,DM 组大鼠的心脏、肝脏及肾脏指数均显著升高($P < 0.01$),提示 T2DM 可能导致多器官损伤及肿大。经 8 周 PSP 及二甲双胍干预后,各给药组上述脏器指数均较 DM

组显著降低($P < 0.05$),表明 PSP 干预可减轻 T2DM 相关器官损伤。糖尿病对大鼠脾脏指数影响不显著。该结果与吴慧娟^[42]的研究结果基本一致,进一步说明 PSP 不仅具有降糖作用,还可能通过缓解代谢紊乱和氧化应激,在多器官保护中发挥积极作用。



与 NC 组比较,## $P < 0.01$;与 DM 组比较,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$

图 19 PSP 对大鼠脏器指数的影响

Figure 19 Effects of PSP on organ indexes in rats ($n=6$)

3 结论

车前子多糖是一种无定型多糖,重均相对分子质量为 1.42×10^4 ,主要由葡萄糖(Glc)、甘露糖(Man)、半乳糖(Gal)和阿拉伯糖(Ara)组成,具有良好的热稳定性和多分支长侧链结构,不含淀粉、蛋白质和核酸,未观察到三股螺旋结构。车前子多糖可改善糖尿病大鼠体重减轻、降低空腹血糖并提升口服葡萄糖耐量,显著降低总胆固醇(32.86%)和甘油三酯(26.5%)水平。其在 4 mg/mL 的质量浓度下对 DPPH 自由基、ABTS 自由基和羟自由基的清除率分别为 77.50%, 57.76%, 39.71%,同时能提高超氧化物歧化酶活性、降低丙二醛水平,显示出良好的抗氧化活性。这些结果表明车前子多糖的多糖结构可能通过调节血糖、脂质代谢和氧化应激相关途径,发挥其生物活性,进一步支持了其作为糖尿病功能性食品成分的潜力。此外,车前子多糖的抗氧化活性与其在减轻糖尿病相关代谢紊乱中的作用相辅相成,可能通过减少氧化损伤来改善糖尿病大鼠的整体健康状况。综上所述,车前子多

糖具有良好的降血糖、调脂及抗氧化活性,具备作为糖尿病功能性食品成分的潜力。未来应进一步探索其作用机制及长期使用的安全性,推动其在功能性食品领域的开发与应用。

参考文献

- [1] WEN X N, LV C H, ZHOU R Z, et al. The molecular mechanism underlying the therapeutic effect of dihydromyricetin on type 2 diabetes mellitus based on network pharmacology, molecular docking, and transcriptomics[J]. Foods, 2024, 13(2): 344.
- [2] SAEEDI P, SALPEA P, KARURANGA S, et al. Mortality attributable to diabetes in 20~79 years old adults, 2019 estimates: results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas, 9th edition[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2020, 162: 108086.
- [3] 何俊叶, 刘成, 于宠洋, 等. 黄皮不同部位多糖的结构特性及体外降血糖活性[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 156-164.

- HE J Y, LIU C, YU C Y, et al. Structural characteristics and hypoglycemic activity of polysaccharides from different parts of wampee[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 156-164.
- [4] SINGH S, BHAT J, WANG P H. Cardiovascular effects of anti-diabetic medications in type 2 diabetes mellitus topical collection on diabetes and cardiovascular disease[J]. Current Cardiology Reports, 2013, 15(1): 327.
- [5] 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 Y Y. Research progress on the hypoglycemic effect and mechanism of the components from food and medicinal resources[J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(2): 373-384.
- [6] 吴伟都, 欧凯, 冯玉红, 等. 车前子溶液流变学特性及凝胶特性研究[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 250-255.
- WU W D, OU K, FENG Y H, et al. Study on rheological properties and gel properties of *Plantago asiatica* solutions[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(11): 250-255.
- [7] 于新, 李小花. 药食同源物品使用手册. 可用于保健食品的物品[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012: 80-82.
- YU X, LI X H. Handbook of food and medicinal homologous substances[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2012: 80-82.
- [8] 郑秀棉, 杨莉, 王峥涛. 车前子的化学成分与药理活性研究进展[J]. 中药材, 2013, 36(7): 1 190-1 196.
- ZHENG X M, YANG L, WANG Z T. Chemical composition and pharmacological activity of plantain[J]. Journal Chinese Medicinal Materials, 2013, 36(7): 1 190-1 196.
- [9] 朱盈徽, 杨丹阳, 吴晓莹, 等. 车前子炮制研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(8): 187-191.
- ZHU Y H, YANG D Y, WU X Y, et al. Processing of cheqianzi (*Plantaginis semen*): a review[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2023, 41(8): 187-191.
- [10] 张迪, 付美玲, 费丛璇, 等. 多糖-植物蛋白复合物的制备及特性研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 227-232.
- ZHANG D, FU M L, FEI C X, et al. Research progress on preparation and characteristics of polysaccharide plant protein complex[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 227-232.
- [11] GAHRTZ M, STOLZ J, SAUER N. A phloem-specific sucrose- H^+ symporter from *Plantago major* L. supports the model of apoplastic phloem loading[J]. Plant Journal, 2010, 6(5): 697-706.
- [12] 曹磊, 刘伟, 王俊龙, 等. 硫酸化制备圆苞车前子低黏多糖及其结构表征和抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(1): 26-36.
- CAO L, LIU W, WANG J L, et al. Preparation of low viscosity polysaccharide from *Plantago ovata* Forsk by sulfation method and its structural characterization and antioxidant activities[J]. Natural Product Research and Development, 2024, 36(1): 26-36.
- [13] 李芬芬. 大粒车前子多糖抗炎与缓解壬基酚毒性作用及其机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 94.
- LI F F. Study on protective effects of polysaccharide from seeds of *Plantago asiatica* L. against inflammation and nonylphenol exposure[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 94.
- [14] 周超. 车前子多糖的分离纯化及其功能性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- ZHOU C. The isolation, purification and functional properties of polysaccharides in *Semen plantaginidis*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [15] 赵凯迪, 王秋丹, 林长青. 菊花多糖对2型糖尿病大鼠的降血糖作用[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 168-174.
- ZHAO K D, WANG Q D, LIN C Q. Study on the effect of chrysanthemum polysaccharide on hypoglycemic in type 2 diabetic rats[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 168-174.
- [16] CHEN G, LI C, WANG S, et al. Characterization of physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from shoot residues of bamboo (*Chimonobambusa quadrangularis*): effect of drying procedures[J]. Food Chemistry, 2019, 292: 281-293.
- [17] 张馨心, 王福玲. 红花多糖纯化工艺及体外抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 171-176.
- ZHANG X X, WANG F L. Purification process and antioxidant activity *in vitro* of polysaccharides from safflower[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 171-176.
- [18] 覃引, 徐文慧, 吴凯, 等. 不同提取方法对黄精多糖理化特性和生物活性的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 142-152.
- QIN Y, XU W H, WU K, et al. Effects of the physicochemical properties and biological activities of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides extracted by different extraction methods[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(3): 142-152.
- [19] 闫光玲, 张锋, 金娟, 等. 金银花多糖分子量及单糖组成研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2019, 26(2): 97-101.
- YAN G L, ZHANG F, JIN J, et al. Study on molecular weight and monosaccharide composition of polysaccharide from *Lonicerae japonicae flos*[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine Information, 2019, 26(2): 97-101.
- [20] 石越, 张玲赫, 努尔买买提, 等. 元蘑多糖分离纯化和结构表征及体外降血糖活性[J]. 食用菌学报, 2023, 30(4): 59-66.
- SHI Y, ZHANG L H, NUR M M, et al. Isolation, purification, structural characterization and *in vitro* hypoglycemic activity of *Hohenbuehelia serotina* polysaccharide[J]. Acta Edulis Fungi, 2023, 30(4): 59-66.
- [21] 熊善强. 滑菇多糖的结构与理化特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022: 16.
- XIONG S Q. Study on the structure and physicochemical properties of polysaccharides from *Pholiota nameko*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022: 16.
- [22] 杨薇. 车前草抗氧化抗炎谱效关系研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- YANG W. Study on the relationship of anti-oxidation and anti-inflammatory spectrum effect of *Plantago asiatica*[D].

- Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [23] 王炬, 张秀玲, 高宁, 等. 老山芹全株及其不同部位酚类物质含量及抗氧化能力分析[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 54-59.
WANG J, ZHANG X L, GAO N, et al. Polyphenolic content and antioxidant capacity of whole plants and different parts of *Heracleum dissectum*[J]. Food Science, 2019, 40(7): 54-59.
- [24] YANG B, WU Q J, SONG X, et al. Physicochemical properties and bioactive function of Japanese grape (*Hovenia dulcis*) pomace insoluble dietary fibre modified by ball milling and complex enzyme treatment[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(7): 2363.
- [25] MENG Y H, SU A P, YUAN S, et al. Evaluation of total flavonoids, myricetin, and quercetin from *Hovenia dulcis* thunb. as inhibitors of α -amylase and α -glucosidase[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2016, 71(4): 444-449.
- [26] OBAFEMI T O, ALFA J A, OBAFEMI B A, et al. Comparative effect of metformin and gliclazide on expression of some genes implicated in oxidative stress, endoplasmic reticulum stress, and inflammation in liver and pancreas of type 2 diabetic rats[J]. Comparative Clinical Pathology, 2024, 33(1): 115-125.
- [27] 张晨. 杏鲍菇菌丝体多糖的分离纯化及抗衰老、抗糖尿病活性分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2025: 26.
ZHANG C. Purification, anti-aging and anti-diabetic effects of mycelia polysaccharides from *Pleurotus eryngii*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2025: 26.
- [28] 朱小花. 香蕉粉对 II 型糖尿病胰岛素抵抗的改善作用及其机制研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 25.
ZHU X H. Research the improvement and mechanism on insulin resistance of raw banana powder in type II diabetic mellitus[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016: 25.
- [29] 黄越, 周春晖, 黄惠华. 不同提取方法猴头菇粗多糖的表征及其抗氧化活性的比较[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 80-86.
HUANG Y, ZHOU C H, HUANG H H. Characterization and antioxidant activity analysis on the crude *Hericium erinaceus* polysaccharides extracted by different methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 80-86.
- [30] 赵宏, 柴桂芳, 孙延平, 等. 车前子多糖 PSP-B9 的结构及抑制 RAW 264.7 产生 NO 活性研究[J]. 辽宁中医杂志, 2019, 46(3): 598-601.
ZHAO H, CHAI G F, SUN Y P, et al. Structural study and inhibitory activity of plantain polysaccharides (PSP-B9) on NO production in RAW 264.7 cells[J]. Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 46(3): 598-601.
- [31] 龚璐. 车前子多糖的分离纯化、结构分析及生物活性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016: 20.
GONG L. Isolation, purification, structural analysis, and functional properties of a polysaccharide from *Plantago asiatic* L. seeds[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016: 20.
- [32] 彭东辉, 张志宏, 王洋洋, 等. 盐炙车前子多糖抗痛风性肾病作用研究[J]. 广东药科大学学报, 2022, 38(4): 72-77, 83.
PENG D H, ZHANG Z H, WANG Y Y, et al. Study on anti-gouty nephropathy effect of polysaccharides from salt-processed plantain seeds[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2022, 38(4): 72-77, 83.
- [33] BEN JEDDOU K, CHAARI F, MAKTOUF S, et al. Structural, functional, and antioxidant properties of water-soluble polysaccharides from potatoes peels[J]. Food Chemistry, 2016, 20(5): 97-105.
- [34] LEONE G, CONSUMI M, LAMPONI S, et al. New hyaluronan derivative with prolonged Half-life for ophthalmological Formulation[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(3): 799-808.
- [35] 仇玉洁. 菱角多糖的超声提取、结构表征及其对巨噬细胞免疫激活效应的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023: 25-26.
QIU Y J. Preparation, structure characterization and immunostimulatory activity of polysaccharide from *Trapa bispinosa* L[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023: 25-26.
- [36] 马素云. 银耳多糖提取纯化、结构特征及溶液性质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 23.
MA S Y. Research on isolation, purification, structure characteristics and solution properties of the polysaccharide from *Tremella fuciformis*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 23.
- [37] ZHAO C C, LI X, MIAO J, et al. The effect of different extraction techniques on property and bioactivity of polysaccharides from *Dioscorea hemslayi*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 102: 847-856.
- [38] 尹红力, 赵鑫, 佟丽丽, 等. 黑木耳多糖体外和体内降血糖功能[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 221-226.
YIN H L, ZHAO X, TONG L L, et al. *In vitro* and *in vivo* anti-hyperglycemic effects of polysaccharides from *Auricularia auricular*[J]. Food Science, 2015, 36(21): 221-226.
- [39] BARTOLI E, FRA G P, CARNEVALE SCHIANCA G P. The oral glucose tolerance test (OGTT) revisited[J]. European Journal of Internal Medicine, 2011, 22(1): 8-12.
- [40] YANG Z W, WANG J, LI J G, et al. Antihyperlipidemic and hepatoprotective activities of polysaccharide fraction from *Cyclocarya paliurus* in high-fat emulsion-induced hyperlipidaemic mice[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 183: 11-20.
- [41] OLATUNJI O J, FENG Y, OLATUNGI O O, et al. Polysaccharides purified from *Cordyceps cicadae* protects PC12 cells against glutamate-induced oxidative damage[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 153: 187-195.
- [42] 吴慧娟. 黄精复方口服液的开发及其降血糖功能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 62.
WU H J. Development of polygonatum compound oral liquid and research on its hypoglycemic function[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 62.