

不同葛根多糖结构特征及生物活性研究

祝森根^{1,2}, 何玮宁¹, 胡雨¹, 刘青林¹, 王淑慧¹, 童桦¹, 李秋^{1*}

(1. 青岛农业大学 化学与药学院 农用生物药物创制技术国家地方联合工程实验室, 山东 青岛 266109;
2. 浙江红盖头农业科技有限公司, 浙江 江山 324109)

摘要: 葛根中富含多糖、黄酮、皂苷、有机酸、生物碱、维生素、酚类等多种活性成分, 近年来, 多糖作为葛根的主要活性成分之一, 对其研究不断深入, 发现其具有免疫调节、降血糖、抗氧化等多种生物活性。该文对葛根多糖近年来的研究成果进行整理, 综述了葛根多糖的提取分离、结构及生物活性的研究进展, 以期为葛根多糖的综合利用提供借鉴指导。

关键词: 葛根多糖; 结构; 免疫调节; 降血糖; 抗氧化

Structural Characteristics and Biological Activities of Different *Pueraria lobata* Polysaccharides

ZHU Sengen^{1,2}, HE Weining¹, HU Yu¹, LIU Qinglin¹, WANG Shuhui¹, TONG Hua¹, LI Qiu^{1*}

(1. National Joint Local Engineering Laboratory of Agricultural Bio-Pharmaceutical Laboratory, College of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China;
2. Zhejiang Honggaitou Agricultural Technology Co., Ltd., Jiangshan 324109, Zhejiang, China)

Abstract: *Pueraria lobata* exhibits a wide range of pharmacological activities and holds significant potential for development and utilization. *Pueraria lobata* is rich in various bioactive compounds, including polysaccharides, flavonoids, saponins, organic acids, alkaloids, vitamins, and phenolic compounds. In recent years, polysaccharides have been identified as one of the main active components in *Pueraria lobata*, and extensive research has been conducted to explore their properties. These studies have revealed that *Pueraria lobata* polysaccharides possess multiple biological activities, such as immunomodulation, hypoglycemic effects, and antioxidant properties. In this study, recent research progress on *Pueraria lobata* polysaccharides was reviewed, focusing on their extraction, isolation, structural characteristics, and biological activities, and a reference was expected to be provided for the comprehensive utilization of *Pueraria lobata* polysaccharides.

Key words: *Pueraria lobata* polysaccharide; structure; immunomodulation; hypoglycemic; antioxidant

引文格式:

祝森根, 何玮宁, 胡雨, 等. 不同葛根多糖结构特征及生物活性研究[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(2): 208-216.

ZHU Sengen, HE Weining, HU Yu, et al. Structural Characteristics and Biological Activities of Different *Pueraria lobata* Polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 208-216.

葛根(*Pueraria lobata*)是一种多年生草质藤本植物, 别称葛条、甘葛、葛藤等, 长约 20 cm, 形状呈长圆柱形, 表面不平滑, 具有特别的褐色, 在我国广泛种植。葛根中含有大量淀粉、糖分、蛋白质、胡萝卜素、维生素和多种其他营养成分, 在食品工业中, 由于其高黏稠度以及良好乳化性能, 常将葛根添加到饮料、冰激凌等产品中作为稳定剂或增稠剂。在保健领域, 有人将葛根应用于功能性食品和健康膳食补充剂中, 如汤、果汁、葡萄酒、茶和各种固体食品。此外, 摄入或使用含有葛根提取物的产品能够改善皮肤质感、减少皱纹并增加

皮肤弹性^[1]。作为药材, 其以皮入药, 味甘、辛, 性凉, 2000 年国家卫生部正式将葛根列入药食名录, 具有重要的生态、药用和营养价值^[2]。

多糖具有重要的生物活性, 且相对安全无毒副作用, 近年来逐步成为研究热点。多糖作为葛根主要活性成分之一, 具有良好的降血糖、抗炎、抗氧化、降压、调节免疫^[3-4]等作用。本文综述近几年对葛根多糖提取、分离纯化、结构表征及生物活性等方面的研究, 并汇总分析, 以期为葛根多糖的后续研究与开发利用提供新的思路和技术参考。

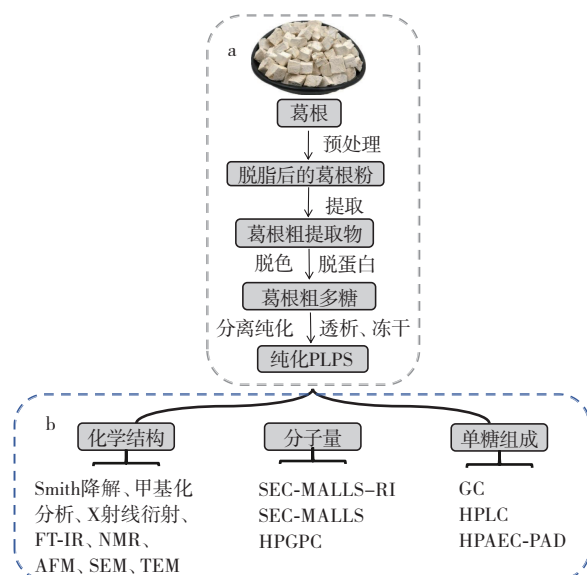
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(82003922); 山东省中草药产业体系(SDAIT-20-05)

作者简介: 祝森根(1971—), 男(汉), 高级农艺师, 本科, 研究方向: 天然药物化学。

*通信作者: 李秋(1988—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 天然药物化学。

1 葛根多糖(*Pueraria lobata* polysaccharide, PLPS)提取

葛根多糖提取、纯化及结构表征见图1。



傅立叶变换红外光谱(Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR);核磁共振波谱(nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR);原子力显微镜(atomic force microscope, AFM);扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM);透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM);多角度激光散射和折射率检测的尺寸排阻色谱(size-exclusion chromatography-differential refractive index-multi-angle laser light scattering, SEC-MALLS-RI);尺寸排阻色谱与多角度光散射(size-exclusion chromatography-multi-angle laser light scattering, SEC-MALLS);高效凝胶渗透色谱(high-performance gel permeation chromatography, HPGPC);气相色谱(gas chromatography, GC);高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC);高效阴离子交换色谱(high performance anion exchange chromatography-pulsed amperometric detector, HPAEC-PAD)。a. 葛根多糖提取、纯化;b. 葛根多糖结构表征。

图1 葛根多糖提取、纯化及结构表征

Fig.1 Extraction, purification, and structural characterization of *Pueraria lobata* polysaccharides

葛根多糖提取涉及多个复杂处理过程(图1a),在提取环节,传统的热热水提取法操作简单、应用广泛,但存在效率低、能耗高、高温不稳定的缺点,使得其在食品工业中的应用受到一定限制。近年来,辅助提取法成为葛根多糖提取的新型技术手段,包括微波辅助(microwave-assisted extraction, MAE)法、超声波辅助(ultrasound-assisted extraction, UAE)法、超微粉碎辅助法、超高压技术提取和酶联合超声辅助法^[5]。黄琨等^[6]采用微波辅助(MAE)提取葛根多糖,以多糖提取率为指标,优化得出在浸泡25 min、功率800 W、浸取温度100℃、料液比1:20(g/mL)的条件下,提取效果最好,得率为57.74%。赵鹏等^[7]运用响应面方法优化了超声波提取条件,发现最佳条件为提取时间41 min、提取温度85℃、料液比1:15(g/mL),此条件下,得率为13.97%。超微粉碎对于大分子多糖提取物非常重要,张加梅等^[8]将葛根饮片粉碎过300目和400目筛,用乙醇浸泡1.5 h,回流1.5 h,加乙醇减压浓缩,过滤、洗涤获得多糖,对比发现超微粉碎处理后多糖得率远高于

粗粉提取。郭怡等^[9]运用超高压法提取葛根中多糖,通过对压力条件的单因素和正交试验得出在料液比1:50(g/mL)、超高压水平300 MPa、保压时长3 min、浸泡时间90 min的条件下,得率最高,为23.81 mg/g。多种提取法联用也被用于多糖有效成分提取,酶法结合超声辅助法,在缩短提取时间、提高提取率方面取得了积极成果。王崑仑等^[10]采用纤维素酶辅助超声法提取葛根多糖,最优条件为纤维素酶6%、超声功率280 W、超声时间52 min,超声温度65℃,得率为(4.93±0.02)%。以上方法中,以MAE法提取效果最好、得率最高,可作为新型辅助手段得以推广应用。

2 葛根多糖(PLPS)分离纯化

PLPS的纯化过程主要涉及色素、蛋白质等杂质去除^[11]。方法包括使用活性炭、过氧化氢和大孔树脂等^[12]。过氧化氢效果虽好但易引发多糖氧化降解,需严格控制条件。活性炭对多糖结构影响小但吸附量大,导致保留率低^[13]。大孔树脂因高物理稳定性、选择性吸附和可重复使用性,成为合适的脱色方法,且对保持PLPS结构有利,色素吸附能力优于活性炭。朱家庆等^[14]比较了9种不同类型大孔树脂吸附率、解吸率及其主要影响因素等,发现诸多因素影响下D101的比表面积和孔径都在其他树脂大小之上,吸附能力和解吸能力也相对较强,是PLPS脱色的最佳选择。除色素后,需对PLPS粗提物去除蛋白。目前,PLPS粗提物去除蛋白的方法包括三氯乙酸法、Sevag试剂法(氯仿与正丁醇体积比为5:1或4:1)等。其中,三氯乙酸在蛋白去除与多糖保留上表现最优,但高酸度易致PLPS降解^[15]。Sevag试剂则因其操作条件温和,常用于PLPS脱蛋白,然其脱蛋白效率较低,需重复操作,导致多糖保留率降低,且残留大量有毒化学试剂^[16]。因此可综合考虑采用多种方法进行PLPS脱蛋白。

将脱色、脱蛋白后的多糖粗提物多次醇沉,去除有机试剂,烘干复溶,观察溶解情况,利用离子交换柱色谱法和凝胶色谱法获取不同性质葛根多糖。一般来说,PLPS先经阴离子交换柱分离,再经凝胶过滤柱纯化^[16],不同类型阴离子交换树脂[如二乙氨基乙基纤维素(diethylaminoethyl cellulose, DEAE-Cellulose)^[17]与DEAE Sepharose Fast Flow树脂^[18]],能够用于酸性多糖与中性多糖的分离。此外,Sephacryl S-100、Sephacryl S-400、Sephacryl S-200 HR或Sephadex G-100柱也可用于PLPS纯化^[10,12,15,19],常用去离子水、超纯水或三羟甲基氨基甲烷盐酸盐[tri(hydroxymethyl)aminomethane hydrochloride, Tris-HCl]缓冲溶液洗脱。最终,经浓缩、透析与冻干,获得纯化PLPS,纯化后PLPS多糖含量通过苯酚-硫酸法定量^[20]。表1总结了近年来关于部分地区的葛根多糖采用的分离纯化方法、单糖组成等相关研究。

3 葛根多糖(PLPS)的结构表征

多糖结构特征包括单糖组成、相对分子质量、糖苷键序列、分支结构、链构象等^[18],葛根多糖结构表征如图1(b)所示,因其不同产地和不同提取方法,多糖的单糖组成也存在差异,目前发现葛根多糖主要由葡萄糖、果糖、木糖、阿拉伯糖、甘露糖、鼠李糖、半乳糖、半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸构成^[31]。分子量是影响 PLPS 生物活性的另一个关键参数^[32],由表 1 可知,葛根多糖的分子量普遍集中在 10~100 kD,但不同分子量文献中报道有差异:最高为 385 kD,最低为 2.3 kD,如陈兵兵^[25]用 DEAE-52 柱纯化得到的葛根多糖组分 PS-D3,测得其分子量为 385 kD。此外,部分葛根多糖中葡萄糖为主要成分,Rao 等^[15]使用 DEAE-52 柱对葛根粗多糖溶液进行处理,随后使用 SephadexG-100 凝胶柱层析纯化得到 PL-S2,平均分子量为 18.73 kD,主要由葡萄糖组成。Cai 等^[13]采用 DEAE Sepharose Fast Flow 柱和 Sephadex G-100 凝胶层析柱纯化得到葛根多糖,主要由果糖(0.09%)、阿拉伯糖(1.25%)、半乳糖(2.19%)、葡萄糖(95.74%)、木糖(0.43%)、甘露糖

(0.30%)组成。董洲^[16]从云南葛根粗提物中层析纯化得到两种多糖,主要单糖组成为葡萄糖,也有研究人员对产于河北的葛根粗提物进一步分离纯化得到 PS-2 多糖,主要含葡萄糖和鼠李糖^[21-22],产地差异对葛根多糖单糖组成有一定影响。目前,国内外对于葛根多糖的结构研究并不深入,解析得到的多糖组成各异,其结构示意图见图 2 和图 3。

不同提取方法对于获得的葛根多糖组成也有影响,例如超声辅助提取获得 α -吡喃糖与 β -吡喃糖^[21-22],热水提取则仅得 α -吡喃糖^[29]。陈兵兵^[25]使用一种通过工艺优化的超声辅助法提取的水溶性葛根多糖 PLPS(图 2),由葡萄糖、果糖等单糖组成,并且多糖主链由 $\rightarrow 4$ - α -D-Glcp 连接的葡萄糖组成。超声波辅助提取法能够提高多糖的提取效率,缩短提取时间,同时减少热损伤。但过高的超声波强度可能会导致多糖分子的降解,影响其组成和结构。总之,不同的提取方法会对葛根多糖的组成产生显著影响,包括分子量、多糖链的长短、支链结构、单糖组成等,这些变化直接影响多糖的溶解性、黏度、稳定性和生物活性。

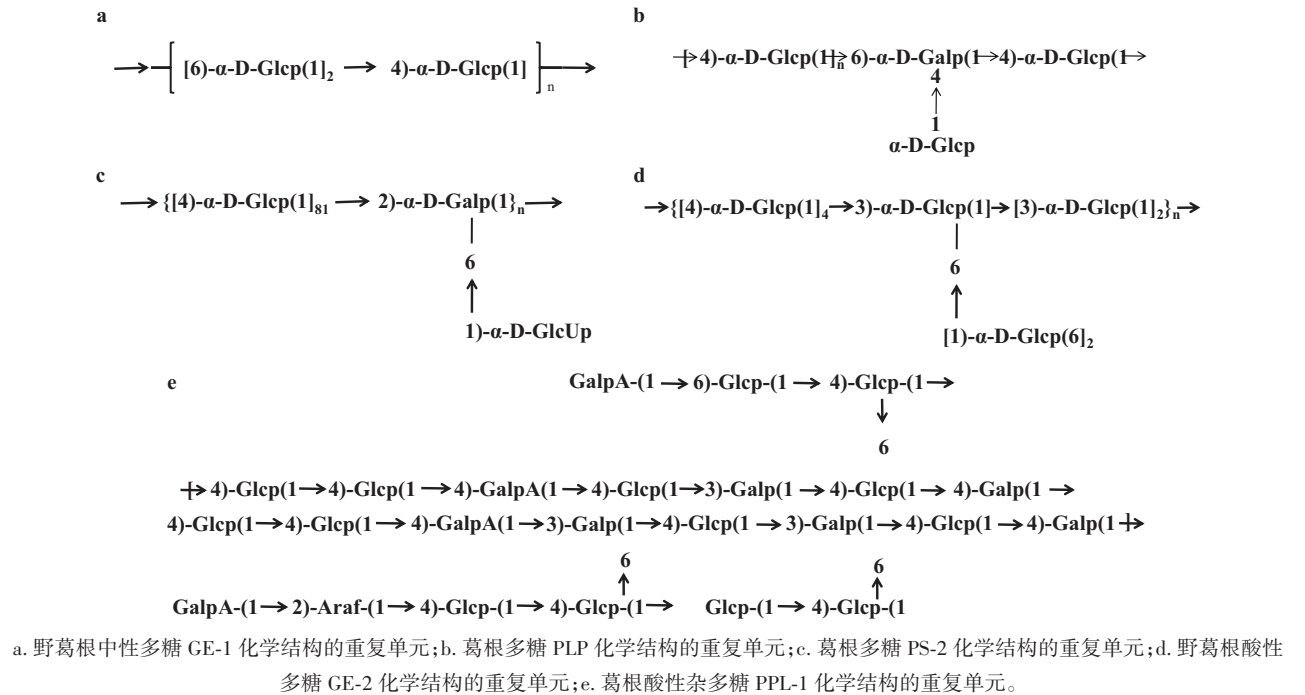
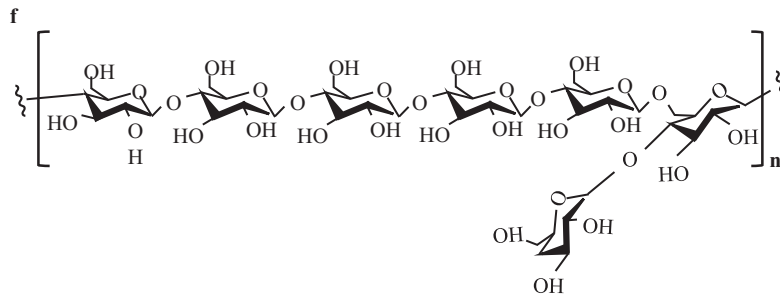
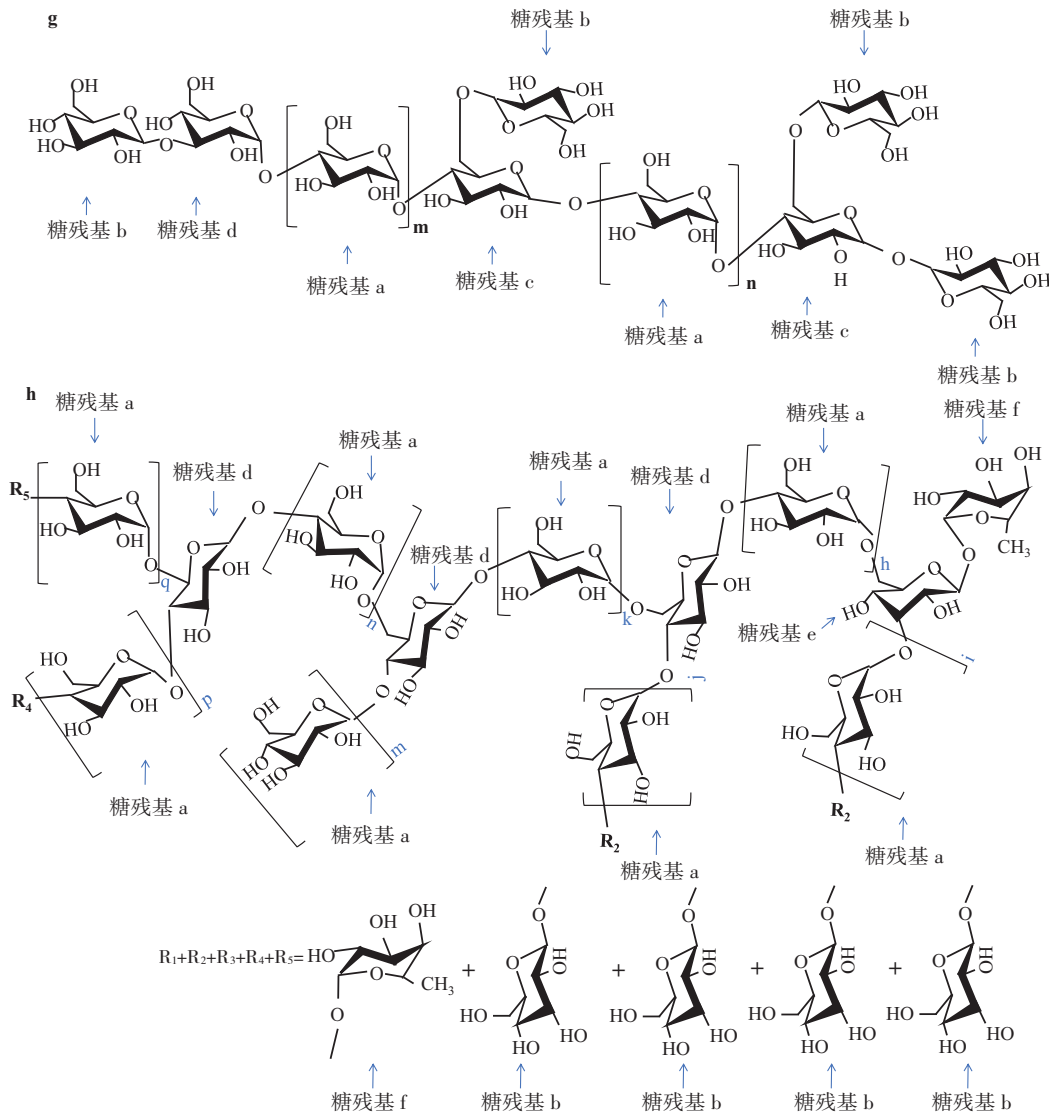


图 2 葛根多糖的化学结构

Fig.2 Chemical structures of *Pueraria lobata* polysaccharides





f. 葛根新型水溶性多糖 PLP1 化学结构;g. 葛根多糖 PLB-1-1 化学结构;h. 葛根多糖 PLB-1-2 化学结构。

图3 葛根多糖的化学结构

Fig.3 Chemical structure of *Pueraria lobata* polysaccharides

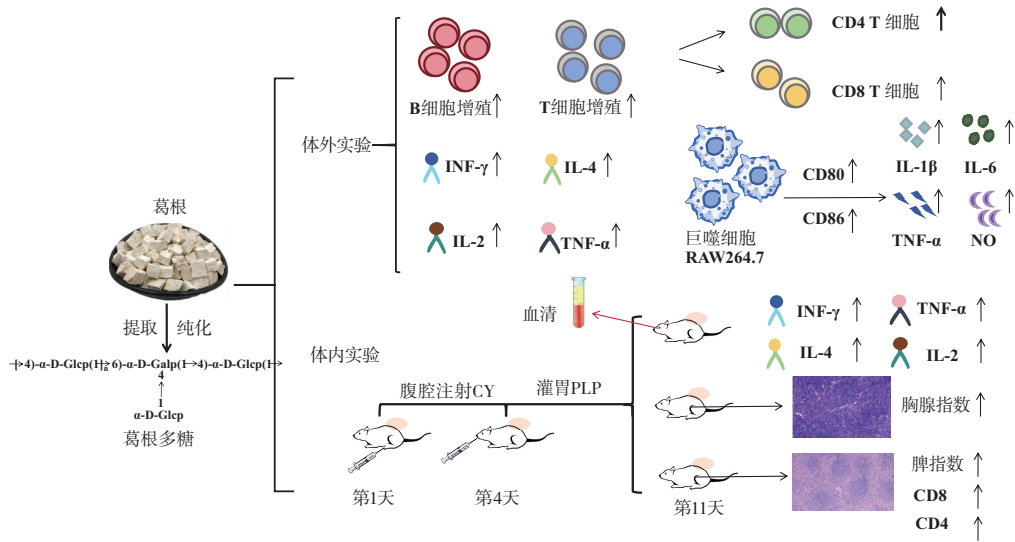
除研究多糖一级结构外,葛根多糖空间构象也是研究的热点,常用的方法包括扫描电镜、刚果红染色、原子力显微镜等。扫描电镜 SEM 能揭示多糖表面形态和三螺旋结构是否存在^[16]。例如,扫描电镜结果表明产于江苏的葛根多糖呈交叉的纤维树枝状,表面光滑^[23-25];产于云南的葛根多糖颗粒具有微孔表面网状,结构细小不规则^[19];产于河北葛根多糖为触角状结构,散乱不易成型^[21-22];酶法提取的多糖表面不规则,表面粗糙,有多孔颗粒^[10]。刚果红试验显示,河北、江苏等地的葛根多糖均不具有三螺旋结构^[25,29]。

4 葛根多糖(PLPS)的生物活性

4.1 葛根多糖的免疫调节活性

葛根多糖对小鼠 T 细胞、B 细胞和巨噬细胞的免疫调节活性见图 4。

葛根多糖具有显著的免疫调节活性,通过多种途径发挥免疫调节作用,包括激活巨噬细胞、促进淋巴细胞增殖、调节细胞因子、增强 NK 细胞活性、抗肿瘤免疫、抗氧化和抗炎作用以及改善肠道微生态。葛根纯化后的水溶性多糖具有明显的免疫调节作用,董洲^[16]从葛根中分离纯化得到两种活性多糖 GE-1 和 GE-2,均能促进小鼠巨噬细胞分泌炎症因子 TNF- α 和 IL-6,且 GE-2 与其表达量成剂量线性关系,并提出 GE-2 可能是通过与小鼠巨噬细胞表面受体 SR、GR 和 TLR4 抗体结合来发挥免疫活性。与此同时,在环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠体内实验中,葛根多糖可改善免疫器官指数、细胞因子水平和 T 淋巴细胞亚群。这些数据表明,葛根多糖可作为一种有效的免疫调节剂,提高 RAW264.7、T 和 B 细胞的免疫活性,改善环磷酰胺治疗小鼠的免疫功能^[13](图 4)。免疫调节中,树突状细胞成熟是免疫反应启动的标志, Kim



白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β);白介素-6(interleukin-6, IL-6);白介素-4(interleukin-4, IL-4);白介素-2(interleukin-2, IL-2);肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor-alpha, TNF- α);一氧化氮(nitric oxide, NO);干扰素- γ (interferon-gamma, INF- γ)。

图4 葛根多糖对小鼠 T 细胞、B 细胞和巨噬细胞的免疫调节活性

Fig.4 Immunomodulatory activity of *Pueraria lobata* polysaccharides on mouse T cells, B cells and macrophages

等^[33]发现葛根多糖通过膜受体 TLR4 诱导 DC 成熟,增加了 TLR4 下游的信号分子(ERK、JNK 和 p38 丝裂原活化蛋白激酶)的磷酸化、组织相容性复合体 I/II 表达。

4.2 葛根多糖对肝脏的保护

肝损伤是由酒精、生物和化学试剂、药物滥用和病毒感染等多种因素引起的肝脏疾病,天然多糖可用于预防肝损伤^[34-35]。Li 等^[36-37]通过使用高脂饮食(high fat diet, HFD)诱导建立非酒精性脂肪肝小鼠模型,研究了一种以 α -D-1,3 葡聚糖为主链的葛根多糖,并评估了其在肝保护方面的活性,结果表明葛根多糖可以减少炎症、糖代谢和脂质沉积,并可减少高脂饮食诱发

的肝损伤和改善非酒精性脂肪肝的进展。Dou 等^[22]通过超声降解葛根多糖,使羟基、羧基等活性基团暴露,不仅激活了 Nrf2/Keap1 信号通路,还增强 *HO-1*、*NQO-1*、 γ -*GCL* 基因的表达,促进了超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活性,从而保护肝细胞免受 PA 诱导的氧化应激和脂毒性。Cao 等^[11]从葛根中分离纯化出一种具有潜在活性的水溶性多糖(PLP1),该多糖可预防酒精引起的肝损伤。Yang 等^[38]发现葛根多糖还能减轻因高脂肪、高胆固醇饮食而患上非酒精性脂肪肝(non-alcoholic fatty liver disease, NAFLD)的小鼠的炎症、肝脏脂肪变性和血脂异常症状。超声后的葛根多糖保护肝细胞免受 PA 诱导的氧化应激和脂毒性见图 5。

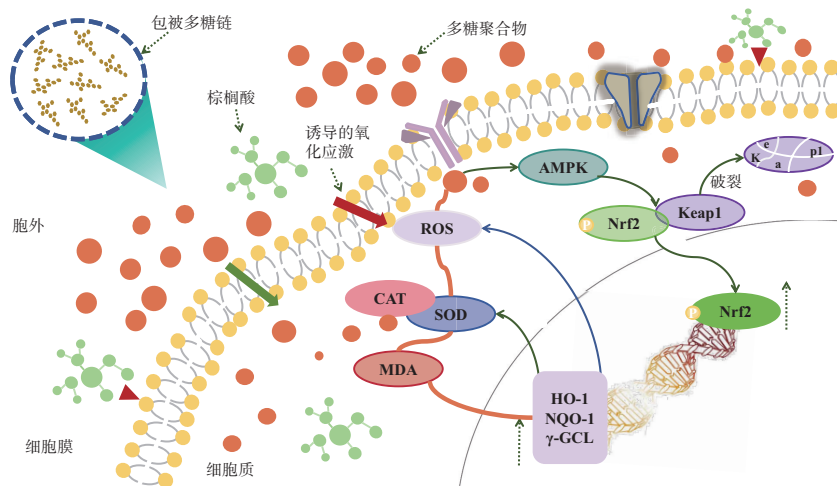


图5 超声后的葛根多糖保护肝细胞免受 PA 诱导的氧化应激和脂毒性

Fig.5 *Pueraria lobata* polysaccharide after sonication protects hepatocytes from PA-induced oxidative stress and lipotoxicity

4.3 葛根多糖降血糖作用

糖尿病(diabetes mellitus, DM)是一种以高血糖为

特征的代谢性疾病。研究发现葛根可以调节糖尿病大鼠的血脂水平,提高抗氧化能力和胰岛素敏感性,从而

控制高血糖和改善高脂血症。王秋丹等^[39]发现葛根多糖能有效减少链脲佐菌素(streptozocin, STZ)诱导的T1DM大鼠体重下降,显著降低血糖水平($P<0.05$),显著提高口服葡萄糖耐量试验(oral glucose tolerance test, OGTT)水平($P<0.05$)。高剂量的葛根多糖可明显降低总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglycerides, TG)、低密度脂蛋白(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)的水平,而高密度脂蛋白(high-Density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽(glutathione, GSH)和过氧化氢酶(catalase, CAT)的水平则明显升高($P<0.05$),所有参数均呈剂量依赖性。Li等^[40]发现葛根多糖可以改善db/db小鼠的T2DM症状、代谢紊乱和肠道微生物群失衡,并在某些指标上优于二甲双胍。Luo等^[41]、Wang等^[42]建立了C57BL/KsJ-db/db小鼠模型,开展代谢组学研究得出葛根多糖改善糖尿病小鼠的代谢谱,发现多糖通过调节PPAR信号通路调节小鼠胰岛素,从而减轻糖尿病症状。此外,葛根还能调节肠道微生物群的结构,改善与糖尿病相关的代谢途径。Qian等^[43]发现葛根多糖可上调胰岛素抵抗细胞中PI3K和AKT的表达,下调FoxO1、PCK2和G6Pase的表达来降低葡萄糖浓度。Cai等^[26]发现葛根多糖通过抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶并降低葡萄糖吸收,具有血糖控制能力。综上,葛根多糖具有显著降血糖活性,可开发为潜在的膳食补充剂或降血糖剂。葛根多糖降血糖机制见图6。

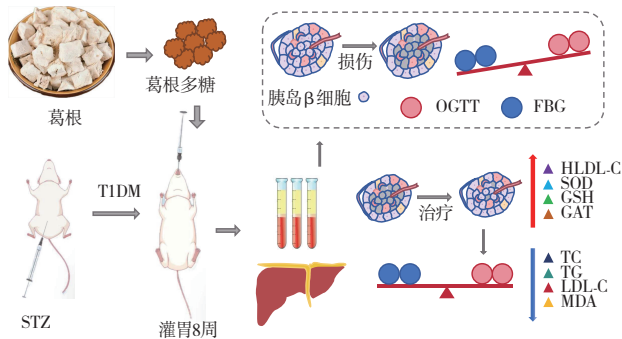


图6 葛根多糖降血糖机制
Fig.6 Hypoglycaemic mechanism of *Pueraria lobata* polysaccharides

4.4 葛根多糖调控肠道微生物

肠道微生物群,作为人体内部的关键生态系统,与宿主维持着动态平衡,对整体健康至关重要,其在优化肠道微环境和产生有益健康的短链脂肪酸方面扮演重要角色。近年来,葛根多糖(PLPS)作为潜在的益生元,在缺血性卒中和结肠炎治疗中的潜在作用备受关注。在缺血性卒中的研究中,Yang等^[44]通过大鼠模型发现,葛根多糖能显著提高阿克曼氏菌和双歧杆菌的丰度,改善肠道菌群失调,并通过粪菌移植减轻大脑和

结肠的损伤。进一步研究揭示,在连续补充葛根多糖21 d后,对正常小鼠的肠道微生物群具有显著的调节作用,并有效缓解DSS诱导的结肠炎。这一功效主要归功于其直链淀粉组分,通过减轻炎症、维护屏障功能、防止菌群失调、增加短链脂肪酸的产生以及抑制NF- κ B/IL-1 β 通路发挥作用,葛根多糖调控肠道微生物见图7。

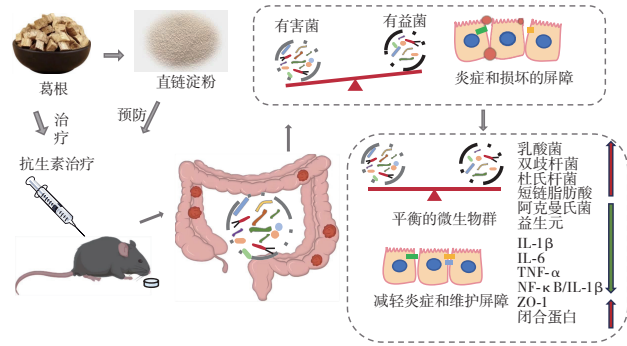


图7 葛根多糖调控肠道微生物
Fig.7 Regulate intestinal microbes of *Pueraria lobata* polysaccharides

4.5 其他活性

葛根多糖除上述作用外,还具有降血脂、抗氧化、抗菌、抗肿瘤活性^[45-48]。阚晓月^[29]研究了两种葛根多糖(PLR1和PLR2)对高脂诱导的高血脂ICR小鼠的降血脂作用。PLR1和PLR2通过降低血清LDL-C、TG和TC改善脂肪代谢并发挥降血脂作用。Shen等^[46]发现葛根多糖可降低腹泻犍牛血清中IL-1 β 、TNF- γ 和丙二醛的浓度,还能提高超氧化物歧化酶的水平,葛根多糖可通过缓解肠道炎症和调节肠道微生物群来发挥治疗活性,具有很强的抗氧化和免疫调节活性。葛根多糖在体外表现出显著的抗氧化活性,对超氧阴离子自由基、2,2'-氮-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸根阳离子(2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS⁺)自由基和2,2-二苯基-1-苦肟基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)自由基均有明显的清除作用^[39]。严娅娟等^[48]采用氯磺酸-吡啶法修饰葛根多糖,并用硫酸酯对建模H22荷瘤小鼠灌胃,结果显示小鼠经喂食葛根多糖后,体内H22肿瘤细胞的增殖被明显抑制,血清中IL-2、TNF- α 的含量升高,证实葛根多糖有显著的抗氧化、抗肿瘤活性,且两者存在明显关联。

5 总结与展望

集药、食、补三大功能于一体的葛根,具有抗氧化、抗肿瘤、降血糖等多种生物活性,是一种市场应用潜力巨大的生物活性成分之一。本文从葛根多糖的提取、分离纯化、结构组成及生物活性方面进行归纳总结,发现葛根多糖的研究及开发应用依然不够充分,主要问

题包括:1)应用于葛根多糖提取的辅助手段偏少,目前依然以热水提取法最常用,新技术手段的对比及应用较少,未来可以考虑其他绿色提取技术,如超临界流体萃取和微波辅助萃取,以便更好地进行结构解析。2)葛根多糖主要是杂多糖,其结构受分离纯化方法和条件的影响,现有的研究主要集中在从江苏一带提取的多糖,没有系统地研究不同地区、不同方法纯化的葛根多糖其生物活性的差异。3)对于葛根多糖的结构研究不够深入,对其结构与活性之前的关联性研究较少,对其构效关系的深入解析与探讨偏少,特别是针对葛根多糖高级构象的研究非常缺乏。应深入研究葛根多糖的不同组分的一级结构,并探讨结构与生物活性之间的关联关系。4)在葛根多糖的生物活性方面,动物实验和细胞试验虽证实了葛根多糖的功效,但潜在作用机制尚不明确,应进行更加深入的试验研究,获得更多的科学数据用于解析其生物活性的确切作用机制。

综上,葛根多糖的多种生物活性有较多报道,但对于葛根多糖相关产品的开发和应用依然缺乏,未来的研究应着重于其提取与纯化技术的优化升级、结构与功能关系的研究、生物活性及机制的探索、多元化产品的开发、应用领域的拓展、临床研究与应用、多糖改性及衍生物研究等方面,尽早实现葛根多糖相关产品的产业化。

参考文献:

- [1] 冯利,任燕飞,胡鸾雷.基于社会网络分析的葛根产品现状分析[J].世界科学技术-中医药现代化,2020,22(4):1185-1192.
FENG Li, REN Yanfei, HU Yuanlei. Current status analysis of *Pueraria lobata* products based on social network analysis[J]. Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology, 2020, 22(4): 1185-1192.
- [2] WEI L T, ZHU P C, CHEN X Q, et al. An ultra high performance liquid chromatography with tandem mass spectrometry method for simultaneous determination of thirteen components extracted from *Radix Puerariae* in rat plasma and tissues: Application to pharmacokinetic and tissue distribution study[J]. Journal of Separation Science, 2020, 43(2): 418-437.
- [3] ZHAO W J, PENG D, LI W J, et al. Probiotic-fermented *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi alleviates alcoholic liver injury by enhancing antioxidant defense and modulating gut microbiota[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(15): 6877-6888.
- [4] DONG Z, ZHANG M M, LI H X, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of a novel polysaccharide from *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi root[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 1556-1564.
- [5] 董宇,林翰清,缪松,等.酶法提取多糖的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(3)351-358.
DONG Yu, LIN Hanqing, MIAO Song, et al. Research progress in enzymatic extraction of polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3) 351-358.
- [6] 黄琨,黄少伟,池汝安.微波辅助提取葛根多糖工艺研究[J].中国民族民间医药,2008,(2):1-3,25.
HUANG Kun, HUANG Shaowei, CHI Ru'an. Study on the microwave-assisted extraction process of polysaccharides from *Pueraria lobata*[J]. Chinese Ethnic Medicine and Ethnopharmacology, 2008, (2): 1-3, 25.
- [7] 赵鹏,欧莉,张丽华,等.超声辅助提取葛根多糖工艺研究[J].医药导报,2009,28(10):1338-1339.
ZHAO Peng, OU Li, ZHANG Li Hua, et al. Study on ultrasonic-assisted extraction of *Pueraria lobata* polysaccharides[J]. Herald of Medicine, 2009, 28(10): 1338-1339.
- [8] 张加梅,陈光芝,褚新红.超微粉碎对提取葛根药材中总黄酮、多糖的影响[J].中国药业,2008,17(10)45-46.
ZHANG Ja Mei, CHEN Guang Zhi, CHU Xin Hong. Effect of ultra-fine grinding on the extraction of total flavonoids and polysaccharides from *Pueraria lobata*[J]. China Pharmaceuticals, 2008, 17(10): 45-46.
- [9] 郭怡,于晶晶,肖萍.超高压法提取葛根多糖的工艺研究[J].天津农学院学报,2020,(3):66-69.
GUO Yi, YU Jingjing, XIAO Ping. Study on the extraction process of *Puerariae lobatae* polysaccharides using ultra-high pressure method [J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2020, (3): 66-69.
- [10] 王崑仑,李家磊,谢学军,等.纤维素酶辅助超声法提取葛根多糖及其 DPPH 自由基清除能力[J].食品工业科技,2019,40(20):174-179,187.
WANG Kunlun, LI Jialei, XIE Xuejun, et al. Extraction of *Puerariae lobatae* polysaccharides assisted by cellulase and ultrasonic method and its DPPH radical scavenging ability[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 174-179, 187.
- [11] CAO W, WU J P, ZHAO X Y, et al. Structural elucidation of an active polysaccharide from *Radix Puerariae lobatae* and its protection against acute alcoholic liver disease[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 325: 121565.
- [12] FAN Y M, HUANG G L. Preparation, structural analysis and antioxidant activity of polysaccharides and their derivatives from *Pueraria lobata*[J]. Chemistry & Biodiversity, 2023, 20(4): 1-14.
- [13] CAI G F, WU C H, ZHU T Y, et al. Structure of a *Pueraria* root polysaccharide and its immunoregulatory activity on T and B lymphocytes, macrophages, and immunosuppressive mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 230: 123386.
- [14] 朱家庆,唐婷范,刘新梅,等.葛根多糖纯化工艺及其抗氧化性能研究[J].食品工业科技,2020,41(24):131-136.
ZHU Jiaqing, TANG Tingfan, LIU Xinmei, et al. Purification process and antioxidant properties of *Pueraria lobata* polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 131-136.
- [15] RAO Y F, WEN Q, LIU R H, et al. PL-S2, a homogeneous polysaccharide from *Radix Puerariae lobatae*, attenuates hyperlipidemia via farnesoid X receptor (FXR) pathway - modulated bile acid metabolism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 1694-1705.
- [16] 董洲.野葛根多糖的提取、分离纯化、结构鉴定及对小鼠巨噬细胞 RAW_{264.7} 的免疫调节活性研究[D].广州:华南理工大学,2018.
DONG Zhou. Study on extraction, isolation, purification, structural identification of polysaccharides from *Pueraria lobata* and its immunomodulatory activity on mouse macrophage RAW_{264.7} cells[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [17] FAN Y M, HUANG G L. Preparation and analysis of *Pueraria lobata* polysaccharides[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2023, 9(5): 2329-2334.
- [18] XU C, QIN N B, YAN C Y, et al. Isolation, purification, characterization and bioactivities of a glucan from the root of *Pueraria lobata* [J]. Food & Function, 2018, 9(5): 2644-2652.
- [19] 钱凯.葛根多糖的分离、结构表征及其降糖活性研究[D].南昌:江西中医药大学,2020.
QIAN Kai. Research on the isolation, structural characterization, and hypoglycemic activity of *Puerariae lobatae* polysaccharides[D]. Nanchang: Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine,

- 2020.
- [20] 陈融, 刘博, 陈凯, 等. 不同浓度的葛根多糖对小鼠肠道菌群的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(5): 226-231, 236.
CHEN Rong, LIU Bo, CHEN Kai, et al. The impact of different concentrations of *Puerariae lobatae* polysaccharides on the gut microbiota of mice[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(5): 226-231, 236.
- [21] 许歆瑶. 糖类化合物分析新方法研究及中药葛根多糖的提取、纯化与结构鉴定[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
XU Xinyao. Research on new methods for the analysis of carbohydrate compounds and the extraction, purification, and structural identification of *Puerariae lobatae* polysaccharides from traditional Chinese medicine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [22] DOU Z M, ZHANG Y L, TANG W J, et al. Ultrasonic effects on the degradation kinetics, structural characteristics and protective effects on hepatocyte lipotoxicity induced by palmitic acid of *Pueraria lobata* polysaccharides[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106652.
- [23] WANG Z B, CHEN B B, LUO L, et al. Fractionation, physicochemical characteristics and biological activities of polysaccharides from *Pueraria lobata* roots[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 67: 54-60.
- [24] ZOU Y, ZHAO T, MAO G H, et al. Isolation, purification and characterisation of selenium-containing polysaccharides and proteins in selenium-enriched *Radix puerariae*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(2): 349-358.
- [25] 陈兵兵. 葛根多糖的提取分离、理化特性及生物活性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
CHEN Bingbing. Study on extraction, isolation, physicochemical properties, and biological activities of polysaccharides from *Pueraria lobata*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [26] CAI J L, ZHONG X T, LIANG J Y, et al. Structural characterization, anti-inflammatory and glycosidase inhibitory activities of two new polysaccharides from the root of *Pueraria lobata*[J]. RSC Advances, 2021, 11(57): 35994-36006.
- [27] CAI G F, WU C H, MAO N N, et al. Isolation, purification and characterization of *Pueraria lobata* polysaccharide and its effects on intestinal function in cyclophosphamide-treated mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 218: 356-367.
- [28] 王蕊霞. 葛根多糖的提取、理化性质及生物活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
WANG Ruixia. Study on extraction, physicochemical properties, and biological activities of *Pueraria lobata* polysaccharides[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [29] 阚晓月. 葛根多糖降血脂活性及其脂质体的制备研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
KAN Xiaoyue. Study on the hypolipidemic activity of *Pueraria lobata* polysaccharides and the preparation of its liposomes[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [30] ZHAO S F, XUE H L, TAO Y J, et al. An acidic heteropolysaccharide isolated from *Pueraria lobata* and its bioactivities[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(7): 6247.
- [31] XIONG Q P, SONG Z Y, HU W H, et al. Methods of extraction, separation, purification, structural characterization for polysaccharides from aquatic animals and their major pharmacological activities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(1): 48-63.
- [32] MUKHERJEE S, JANA S, KHAWAS S, et al. Synthesis, molecular features and biological activities of modified plant polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 289: 119299.
- [33] KIM H S, SHIN B R, LEE H K, et al. A polysaccharide isolated from *Pueraria lobata* enhances maturation of murine dendritic cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 52: 184-191.
- [34] QU J L, HUANG P, ZHANG L, et al. Hepatoprotective effect of plant polysaccharides from natural resources: A review of the mechanisms and structure-activity relationship[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 24-34.
- [35] YANG Y, JI J, DI L Q, et al. Resource, chemical structure and activity of natural polysaccharides against alcoholic liver damages[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116355.
- [36] LI Q, LIU W J, FENG Y L, et al. *Radix Puerariae thomsonii* polysaccharide (RPP) improves inflammation and lipid peroxidation in alcohol and high-fat diet mice by regulating gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 858-870.
- [37] LI Q, LIU W J, ZHANG H, et al. α -D-1, 3-glucan from *Radix Puerariae thomsonii* improves NAFLD by regulating the intestinal flora and metabolites[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120197.
- [38] YANG Y F, LI M X, WANG Q, et al. *Pueraria lobata* starch regulates gut microbiota and alleviates high-fat high-cholesterol diet induced non-alcoholic fatty liver disease in mice[J]. Food Research International, 2022, 157: 111401.
- [39] 王秋丹, 赵凯迪, 林长青. 葛根多糖抗氧化性及其降血糖作用研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 381-388.
WANG Qiudan, ZHAO Kaidi, LIN Changqing. Study on the antioxidant activity and hypoglycemic effect of *Pueraria lobata* polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 381-388.
- [40] LI J R, ZHANG H, OUYANG H, et al. *Pueraria thomsonii* Radix water extract alleviate type 2 diabetes mellitus in db/db mice through comprehensive regulation of metabolism and gut microbiota [J]. Molecules, 2023, 28(22): 7471.
- [41] LUO D, DONG X K, HUANG J, et al. *Pueraria lobata* root polysaccharide alleviates glucose and lipid metabolic dysfunction in diabetic db/db mice[J]. Pharmaceutical Biology, 2021, 59(1): 380-388.
- [42] WANG Z J, DU H, PENG W Q, et al. Efficacy and mechanism of *Pueraria lobata* and *Pueraria thomsonii* polysaccharides in the treatment of type 2 diabetes[J]. Nutrients, 2022, 14(19): 3926.
- [43] QIAN K, TAN T, OUYANG H, et al. Structural characterization of a homopolysaccharide with hypoglycemic activity from the roots of *Pueraria lobata*[J]. Food & Function, 2020, 11(8): 7104-7114.
- [44] YANG Y F, LI M X, LIU Q S, et al. Starch from *Pueraria lobata* and the amylose fraction alleviates dextran sodium sulfate induced colitis in mice[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 302: 120329.
- [45] LI X, JI W, WU S Y, et al. The isolation, characterization and biological activities of the non-glucan polysaccharides from the high-starch-content plant *Pueraria mirifica*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129709.
- [46] SHEN L H, SHEN Y, YOU L C, et al. *Pueraria lobata* polysaccharides alleviate neonatal calf diarrhea by modulating gut microbiota and metabolites[J]. Frontiers in Veterinary Science, 2023, 9: 1024392.
- [47] 冀晓龙, 郭建行, 田静源, 等. 植物多糖降解方法及降解产物特性研究进展[J]. 轻工学报, 2023, 38(3): 55-62.
JI Xiaolong, GUO Jianxing, TIAN Jingyuan, et al. Research progress on degradation methods of plant polysaccharides and characteristics of degradation products[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(3): 55-62.
- [48] 严妮娟, 陈新利, 杨涛, 等. 葛根多糖抗氧化及抗肿瘤活性研究 [J]. 世界最新医学信息文摘, 2021, 21(17): 7-9.
YAN Yajuan, CHEN Xinli, YANG Tao, et al. Research on antioxidant and antitumor activities of *Pueraria lobata* polysaccharide[J]. World Latest Medicine Information (Electronic Version), 2021, 21(17): 7-9.