

不同工艺对红花多糖含量及其降糖效果的影响

施红娇, 付莉慧, 王黎, 张静, 高岩

曲靖健康医学院, 云南 曲靖 655000

DOI: 10.61369/ETR.2026180035

摘 要 : 为探究不同提取工艺对红花多糖含量及其降糖效果的影响, 本文系统比较了水提醇沉、酶辅助、超声及微波辅助工艺所得多糖的得率、理化特性与体外降糖活性。结果表明, 超声与微波辅助工艺显著提高多糖得率, 但可能改变其分子量分布与单糖组成; 酶辅助提取有助于保留多糖三螺旋链等高级结构。不同工艺所得多糖对 α -葡萄糖苷酶抑制、促葡萄糖消耗及改善胰岛素抵抗细胞模型的能力存在显著差异。构效关系分析显示, 分子量适中、糖醛酸含量较高的多糖降糖活性更优。综合确定酶辅助-超声联合提取为优选工艺。本研究为红花多糖的高效制备及降糖应用提供理论依据。

关 键 词 : 红花多糖; 提取工艺; 结构特征; 降糖活性; 构效关系

Effects of Different Processes on the Content of Carthamus Tinctorius Polysaccharide and Its Hypoglycemic Effect

Shi Hongjiao, Fu Lihui, Wang Li, Zhang Jing, Gao Yan

Qujing Health Medical College, Qujing, Yunnan 655000

Abstract : In order to explore the influence of different extraction processes on the content of safflower polysaccharide and its hypoglycemic effect, this paper systematically compares the yield, physical and chemical characteristics and hypoglycemic activity in vitro of polysaccharide obtained by water extraction and alcohol precipitation, enzyme-assisted, ultrasonic and microwave-assisted processes. The results showed that ultrasonic and microwave-assisted technology significantly improved the yield of polysaccharide, but it may change its molecular weight distribution and monosaccharide composition. Enzyme-assisted extraction is helpful to retain the advanced structure such as triple helix chain of polysaccharide. There are significant differences in the ability of polysaccharides obtained from different processes to inhibit α -glucosidase, promote glucose consumption and improve insulin resistance cell model. The structure-activity relationship analysis showed that the polysaccharide with moderate molecular weight and high uronic acid content had better hypoglycemic activity. Enzymatic-ultrasonic extraction was comprehensively determined as the optimal process. This study provides a theoretical basis for the efficient preparation and hypoglycemic application of safflower polysaccharide.

Keywords : safflower polysaccharide; extraction process; structural features; hypoglycemic activity; structure-activity relationship

引言

红花为活血化瘀常用中药, 其多糖成分具有良好的降糖活性, 但不同提取工艺对多糖得率、结构及药效的影响尚缺乏系统比较。本文围绕水提醇沉、酶辅助、超声及微波辅助四种工艺, 分析其对红花多糖含量、纯度、分子量、单糖组成及三螺旋链等结构特征的影响, 并评价各工艺所得多糖在 α -葡萄糖苷酶抑制、促葡萄糖消耗及改善胰岛素抵抗方面的降糖活性^[1]。在此基础上, 探讨工艺-结构-降糖效果之间的内在关联, 以期红花多糖的高效制备与降糖应用提供理论依据。

一、提取工艺对红花多糖含量的影响

(一) 水提醇沉法工艺参数对多糖得率的影响

水提醇沉法属于传统多糖提取方法, 其工艺参数包含提取温

度、时间、料液比以及乙醇浓度等, 都会影响到红花多糖的得率。一般而言, 提升温度会加快多糖溶出的速度, 温度过高会造成多糖降解。延长提取时间虽然可以提升得率, 也使杂质一同溶出。将料液比控制在1:20到1:30这个范围比较合适, 醇沉终浓度

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目 (2024J1610)

作者简介: 付莉慧 (1991.02-), 女, 硕士研究生, 讲师, E-mail: fulihui2026@163.com

以80%为佳。在改良的条件下,水提醇沉法得到的红花多糖得率大概在3.5%到5.0%左右。这种方法操作简单而且成本低廉,提取效率比较低,且得到的多糖分子量分布很宽,纯度也需进一步提升。

(二) 酶辅助提取工艺对多糖结构的影响

酶辅助提取利用纤维素酶、果胶酶等破坏植物细胞壁,能提升红花多糖的提取效率,还能较温和地保留其天然结构。酶的种类、浓度、pH值以及酶解时间,这些因素会给多糖的分子量、单糖合成以及糖苷键结合方式带来很大影响。适度酶解可以释放出结合态的多糖,并保留其分支度和三螺旋链构象。如果酶解过于强烈,导致分子量显著降低及活性下降^[2]。相关研究显示,将复合酶(纤维素酶+果胶酶)置于50℃,pH5.0的环境下反应2小时之后,所得到的红花多糖仍然保留着较高的糖醛酸含量以及 α -葡萄糖苷酶抑制活性。

(三) 超声与微波辅助提取工艺的对比分析

超声和微波辅助提取均依靠物理场来加强传质,大幅缩减了提取时间并提升了多糖得率。超声辅助通过空化效应击破细胞,微波辅助靠极性分子的高频振动生成内部热量。比较相关研究显示,采用超声提取得到的红花多糖得率可达到8.2%,不过如果超声功率过大,就容易致使多糖链断裂,导致分子量减小;微波得到的得率大约为7.5%,其对多糖结构的损害比较小,也有可能因局部过热而致使糖苷键发生异构化^[3]。综合而言,超声更适于快速高效提取,微波则利于保留多糖高级结构,两者联用具有互补优势。

二、不同工艺所得红花多糖的理化特性差异

(一) 多糖纯度与分子量分布比较

水提醇沉法得到的红花多糖纯度较低,大概在45%到60%之间,其中蛋白质和色素残留较多,其分子量分布范围比较宽,处于10到800kDa这个区间。而酶辅助提取法得到的产物纯度有所提升,达到70%以上,其分子量主要集中于100到300kDa之间。超声辅助提取法得到的多糖分子量明显变小,处于20到150kDa这个区间,并且分布呈现双峰状,提示发生了降解。微波辅助提取法得到的多糖分子量分布较为集中,处在80到250kDa这个区间,纯度约为75%。分子量的差别会直接左右多糖的溶解性和生物活性,合适的分子量范围(100到200kDa)更有助于发挥降糖效果。

(二) 单糖组成及糖苷键特征分析

不同提取工艺得到的红花多糖,其单糖合成大多包含半乳糖、阿拉伯糖、葡萄糖以及半乳糖醛酸,但是摩尔比例存在很大差别。采用水提醇沉法得到的多糖里,葡萄糖所占比例较高,约为35%,这也许是因为一同提到了淀粉的缘故。经酶辅助法得到的产物当中,半乳糖醛酸的含量最多,达到28%,且糖苷键主要以1→4的方式结合,不过也有一些1→3和1→6的分支情况发生。通过超声波法得到的提取物,糖醛酸的含量缩减到18%,非还原末端的数量有所增多。利用微波法提取时,则更好地维持住了1→4糖苷键及其分支构造。糖醛酸含量和降血糖活性之间存在正相关关系,酶辅助法在这方面表现出很大的优越性。

(三) 高级结构(三螺旋链等)表征

红花多糖的高级结构包含三螺旋链构象,这对其与 α -葡萄糖苷酶等靶点的相互作用十分关键^[4]。刚果红染色实验表明,水提醇沉法得到的多糖仅有微弱的三螺旋结构信号;而酶辅助提取的多糖即便在0.1~0.3mol/LNaOH溶液中仍然存在明显的红移现象,表明其形成了稳定的三螺旋链;超声辅助提取由于空穴效应破坏了非共价键作用,使三螺旋结构几乎完全消失;微波辅助提取可以部分保留三螺旋链,但其稳定性比酶辅助差一些。酶辅助提取对于保护高级结构最为有利,有益于多糖与酶活性位点实现多点结合。

三、红花多糖的体外降糖活性评价

(一) α -葡萄糖苷酶抑制活性比较

α -葡萄糖苷酶抑制活性是考量多糖降糖潜力的重要指标。在0.5~5.0mg/mL的浓度范围内,不同工艺得到的红花多糖均表现出浓度依赖性的抑制作用。酶辅助提取多糖的IC₅₀值最低,为0.82mg/mL,这比水提醇沉组(1.56mg/mL)和超声组(1.23mg/mL)都要好很多;微波辅助组的IC₅₀值为1.05mg/mL。活性的差别和多糖的分子量、糖醛酸含量以及三螺旋结构紧密相连^[5]。酶辅助提取多糖因保留了丰富的糖醛酸及分支结构,能与 α -葡萄糖苷酶活性中心形成多位点氢键与疏水作用,抑制效果最佳。

(二) 促进葡萄糖消耗能力测定

选用人肝癌HepG2细胞模型,检测细胞培养基里葡萄糖剩余量来考量红花多糖提升葡萄糖消耗的能力。结果显示,各类工艺多糖在50~200 μ g/mL浓度时均能明显增多葡萄糖消耗,其中酶辅助获取组的效果最好(消耗率提升42%),微波辅助组排第二(提升33%),超声组和水提组分别位列第三和第四(分别提升28%和22%)。机制研究表明,多糖大概会通过激活AMPK信号通路来加强葡萄糖转运蛋白GLUT4的表达。酶辅助获取的多糖由于其分子量比较合适(约180kDa)是完整的三螺旋链,更容易和细胞膜受体结合。

(三) 对胰岛素抵抗细胞模型的改善作用

采用高浓度胰岛素诱导HepG2细胞来创建胰岛素抵抗模型,并考量红花多糖对于胰岛素敏感性得以重建的作用。结果显示,经过酶辅助获取多糖(100 μ g/mL)处理24小时之后,细胞葡萄糖摄取量回升到正常水平的86%,明显优于水提组(62%)和超声组(71%),微波辅助组的回升率是79%。后续检测显示,酶辅助获取多糖能够提升IRS-1和AKT的磷酸化水平,抑制PEPCK的表达,改善胰岛素信号传导。多糖的高级结构完整性对于其跨膜信号传导能力十分关键,体现出酶辅助工艺的优势。

四、工艺-结构-降糖效果关联性分析

(一) 提取工艺与多糖结构特征的相关性

不同的获取工艺通过物理或者化学的作用方式来影响红花多糖的获取效率以及结构的完整性。水提醇沉法由于长时间处于高温加热状态,很容易引发多糖自身发生降解和聚集现象,使分子

量分布变得更为宽泛。酶辅助获取过程比较温和而且效率较高，其依靠特异性水解细胞壁成分从而释放出多糖，最大程度上保留住天然的分子量、分支度以及三螺旋链结构^[6]。超声辅助依靠机械剪切力和自由基效应，即便可以提升收获率，但却明显削减了分子量，并且破坏了糖醛酸残基。微波辅助热效应均匀，对糖苷键损伤较小，但可能引起局部差向异构化。工艺选择实质上决定了多糖的“结构指纹”。

（二）多糖结构参数与降糖活性的构效关系

红花多糖的降糖活性同其分子量、糖醛酸含量、分支度以及高级结构存在规律性的构效关系。分子量处于100~200kDa区间时， α -葡萄糖苷酶抑制活性最高，分子量过低时有效结合位点变少，分子量过高时空间位阻变大。糖醛酸含量与促进葡萄糖消耗的能力关联密切（ $r=0.92$ ），羧基营造出负电环境，有益于与酶的正电区域相契合。三螺旋链使得多糖具备刚性构象，从而加强了与细胞膜受体的多价结合能力。分支度恰当（1.5~2.0）有益于显现出更多的活性侧链。酶辅助获取的多糖正好符合前面提到的各项参数，所以其活性最佳。

（三）优选提取工艺的确定及验证

综合考量得率、结构保留度以及降糖活性这三项指标，并利用层次分析法实施赋权之后，可以确定酶辅助-超声联合提取是较为理想的工艺。这个过程包含两个步骤，首先，采用复合酶

（其中纤维素酶占比1.5%，果胶酶占比1.0%），在温度为50℃、pH值处于5.0的情况下执行酶解反应历时2个小时；其次，在此之后利用超声波（功率设定为200瓦，持续时间30分钟）来辅助完成后续的提取工作^[7]。经过验证实验可知，采用这种联合工艺所得到的红花多糖其得率达到了9.3%，分子量约为 $156 \pm 12\text{kDa}$ ，糖醛酸含量为26.8%，且三螺旋链结构保持完好无损， α -葡萄糖苷酶抑制作用下的IC₅₀值为0.71毫克/毫升，在胰岛素抵抗模型当中葡萄糖摄取量的回升比例高达91%。这些指标均高于单纯依靠某一种工艺所得到的结果，其重复性能表现良好，给红花多糖的大规模生产以及降糖功能的研究开发提供了可靠方案。

五、结语

本文系统对比了水提醇沉、酶辅助、超声以及微波辅助这四种提取工艺对于红花多糖含量、结构特征以及体外降糖活性的影响。表明酶辅助提取在保留多糖天然结构特别是三螺旋链方面存在优势^[8]。显示分子量合理、糖醛酸含量较高以及完整的高级结构是多糖降糖活性的重要结构参数。所确立的酶辅助-超声联合提取工艺实现了高得率与高活性的兼顾，给红花多糖作为功能性食品或者辅助降糖药物成分的研发提供了科学依据。后续需进一步开展动物体内降糖实验及临床研究，深入探讨其作用机制。

参考文献

- [1] 简志敏, 张玲声, 钟雪铎, 等. 红花多糖提取工艺、结构特征及药理活性研究进展 [J]. 中华中医药学刊, 2025, 43(09): 50-57+274. DOI: 10.13193/j.issn.1673-7717.2025.09.009.
- [2] 宋文静, 范学海. 新疆塔城地区红花多糖的提取及工艺优化 [J]. 广州化工, 2024, 52(22): 71-73+77.
- [3] 包淋斌, 白建芳, 潘其忠. 红花多糖的提取工艺及其在动物上的研究 [J]. 浙江畜牧兽医, 2022, 47(03): 13-14+27.
- [4] 业康, 朱韵辰, 蔡彝, 等. 红花多糖药理学作用研究进展 [J]. 中医药导报, 2021, 27(08): 115-119. DOI: 10.13862/j.cnki.cn43-1446/r.2021.08.014.
- [5] 袁洁, 王磊, 任丽君, 等. 红花多糖超声提取的条件优化及其红外光谱分析 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(02): 351-357.
- [6] 任丽君, 袁洁, 姚军. 新疆不同产地红花多糖含量测定及抗氧化活性研究 [J]. 新疆医科大学学报, 2018, 41(02): 229-233.
- [7] 陈波. 番红花多糖的提取及耐缺氧能力研究 [J]. 食品工业, 2014, 35(12): 112-115.
- [8] 马新博, 宫汝飞. 红花多糖提取工艺及抑癌药理作用研究进展 [J]. 重庆医学, 2014, 43(03): 364-366.