

天麻多糖的研究进展

张骁睿¹, 冯铭柯¹, 高芮晴¹, 赵永平², 陈琛^{1*}

1. 陕西省资源生物重点实验室, 陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心, 秦巴生物资源与生态环境省部共建国家重点实验室(培育), 陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西 汉中 723000
2. 商洛学院生物医药与食品工程学院, 陕西 商洛 726000

摘要: 天麻 *Gastrodiae Rhizoma* 已有两千多年的药用及食用历史, 是一种名贵的药食同源中药。多糖作为天麻中重要的活性成分之一, 具有抗氧化、抗衰老、抗炎、抑菌、抑制肿瘤、增强免疫、改善记忆、治疗心脑血管疾病、神经系统疾病、缓解非酒精性脂肪肝、缓解骨质疏松、调节肠道微生物等功效, 在食品、功能性食品、医药和化妆品领域有广阔的应用前景。通过中国知网、Web of Science 等数据库查阅国内外文献, 分析当前天麻多糖的研究现状及热点; 综述天麻多糖的提取纯化、结构表征、结构修饰、药理活性及其在食品、保健品、药品、化妆品等领域的应用进展, 为天麻多糖的深入研究和广泛应用提供理论基础。

关键词: 天麻; 多糖; 提取; 纯化; 抗氧化; 抗衰老; 抑制肿瘤

中图分类号: R285 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2025)17-6404-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.17.028

Research progress on *Gastrodia elata* polysaccharides

ZHANG Xiaorui¹, FENG Mingke¹, GAO Ruiqing¹, ZHAO Yongping², CHEN Chen¹

1. Shaanxi Province Key Laboratory of Bio-resources, Qinba Mountain Area Collaborative Innovation Center of Bioresources Comprehensive Development, Qinba Provincial and Ministerial Co-built State Key Laboratory of Biological Resources and Ecological Environment (Cultivation), College of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China
2. College of Biology Pharmacy and Food Engineering, Shangluo University, Shangluo 726000, China

Abstract: Tianma (*Gastrodiae Rhizoma*) boasts a history of over two thousand years for both medicinal and edible purposes, representing a precious dual-purpose medicinal and edible herb. Polysaccharides, as one of its key bioactive components, exhibit a wide range of pharmacological effects including antioxidant, anti-aging, anti-inflammatory, antibacterial, antitumor, immune-enhancing, memory-improving activities, along with therapeutic potential for cardiovascular and cerebrovascular diseases, neurological disorders, non-alcoholic fatty liver disease, osteoporosis, and the regulation of gut microbiota. Consequently, they hold promising application prospects in the fields of food, functional foods, medicine, and cosmetics. This review analyzes the current research status and hotspots concerning *Gastrodia elata* polysaccharides by examining domestic and international literature retrieved from databases such as CNKI and Web of Science. It further summarizes recent advances in the extraction, purification, structural characterization, structural modification, and pharmacological activities of *Gastrodia elata* polysaccharides, as well as their applications in food, health products, pharmaceuticals, and cosmetics. The aim is to provide a theoretical basis for the in-depth research and broader utilization of *Gastrodia elata* polysaccharides.

Key words: *Gastrodiae Rhizoma*; polysaccharides; extraction; purification; antioxidant; anti-aging; antitumor

天麻 *Gastrodiae Rhizoma* 是兰科多年生草本植物天麻的块茎, 距今已有两千多年的药用及食用历史, 是一种名贵的药食同源中药^[1]。天麻含有酚类、多糖、蛋白质、有机酸、类固醇等成分, 具有镇静

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 陕西省重点研发项目(2025NC-YBXM-308); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(23JY017); 陕西理工大学“市校共建”科研专项(SXC-2301); 陕西理工大学科研项目(SLGRCQD045)

作者简介: 张骁睿, 硕士研究生, 研究方向为天然产物生物技术。E-mail: 2629257193@qq.com

*通信作者: 陈琛, 教授, 从事天然产物研究与开发。E-mail: cchen@snut.edu.cn

催眠、镇痛、抗炎、抗惊厥、降血压、抑菌、延缓衰老、增强免疫、改善记忆等功能^[2]。2023 年 11 月，国家卫生健康委员会等部门将天麻纳入《按照传统既是食品又是中药材的物质目录》，正式批准天麻作为一种药食同源物质。目前已开发了多元化的天麻大健康产品，包括天麻酒、天麻茶、天麻口服液、天麻罐头、天麻蜜饯、天麻饮料、天麻糕、天麻饼干、天麻面条及天麻营养粉等^[3]。

天麻多糖 (*Gastrodia elata* polysaccharides, GEP) 是一种非淀粉类水溶性多糖，占天麻总体构成的 22% 左右^[4]，具有抗氧化、缓解衰老、调节肠道菌群、抗肿瘤、预防神经和心脑血管系统疾病等功效。目前，对天麻多糖的研究主要集中在工艺优化、药理活性及其分子机制等方面^[5]，缺乏全面系统的天麻多糖分离纯化、结构表征及其应用的综述。本文基于 CiteSpace 软件对中英文数据库中关于天麻多糖的文献进行可视化分析，分析了天麻多糖的研究现状及热点。同时，对天麻多糖的提取纯化、结构特征、修饰、构效关系、药理活性及其应用进行了全面的总结，为天麻多糖的深入研究和广泛应用提供理论基础。

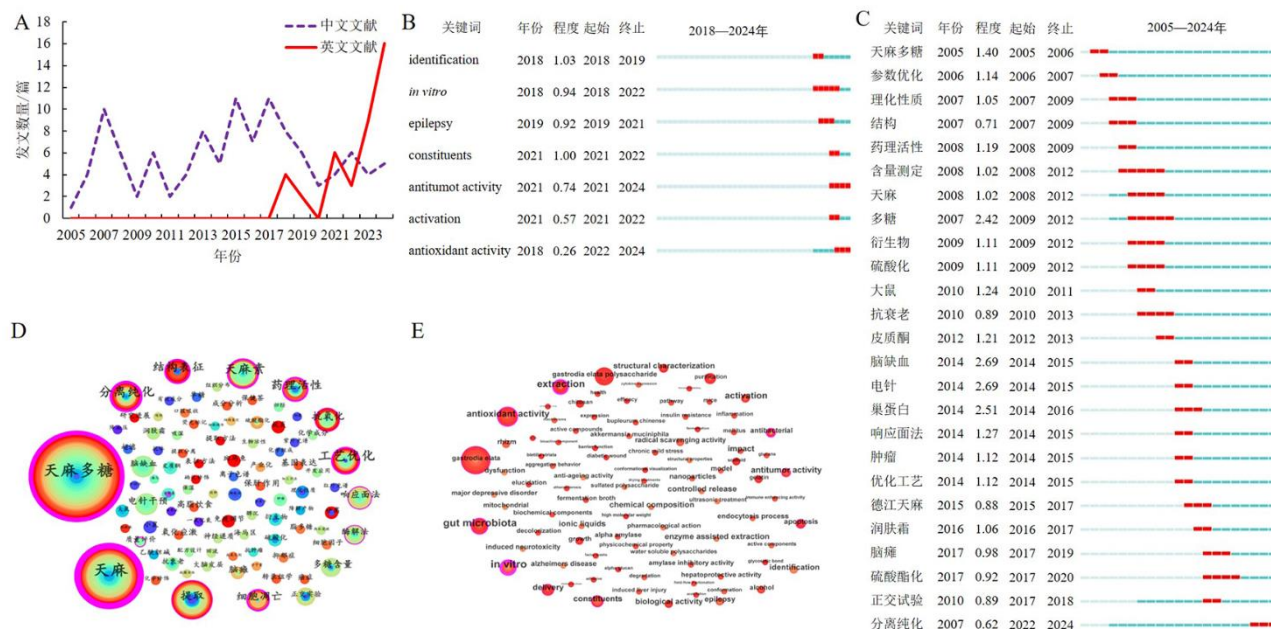
1 基于 CiteSpace 分析天麻多糖的研究现状

1.1 数据来源及处理

在中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI)、Web of Science (WOS) 等数据库中分别检索天麻多糖的中、英文文献。设置的检索条件分别为“主题=天麻多糖”和“Topic = *Gastrodia elata* polysaccharide” OR “Topic = *Gastrodiae Rhizoma* polysaccharide”。检索时间为 2005 年 1 月—2024 年 12 月。剔除无关、重复文献，最终纳入文献共计 153 篇，其中中文文献 113 篇，英文文献 40 篇。运用 CiteSpace 6.3.R1 软件分别对发文趋势、关键词共现、关键词突现等内容进行可视化分析，绘制相应的知识图谱，挖掘天麻多糖的研究热点及研究方向 (图 1)。

1.2 结果及趋势分析

在天麻多糖的研究中，中文文献年发文量呈波动增长的趋势，2015 年和 2017 年达到高峰，英文文献自 2020 年起显著增长，2024 年达到最高。目前中文文献占多数，但英文文献增长迅速，未来可能超越中文文献量，表明天麻多糖研究正逐渐受到国际关注 (图 1-A)。关键词共现分析显示，中英文



A-2005—2024 年天麻多糖研究的中、英文发文情况；B-天麻多糖英文文献相关研究关键词突现图；C-天麻多糖中文文献相关研究关键词突现图；D-天麻多糖中文文献相关研究关键词共现图；E-天麻多糖英文文献相关研究关键词共现图。

A-2005—2024 Chinese and English publication status of GEP research; B-burst detection map of research keywords associated with GEP in English literature; C-burst detection map of research keywords associated with GEP in Chinese literature; D-co-occurrence network map of research keywords related to GEP in Chinese literature; E-co-occurrence network map of research keywords related to GEP in English literature.

图 1 基于 CiteSpace 的天麻多糖可视化分析图谱

Fig. 1 Visualization analysis map of GEP based on CiteSpace

文献均聚焦于提取、结构表征、抗氧化等研究热点(图 1-D、E)。中文文献的突现词分析表明研究重点从生物活性转向提取工艺,再到分离纯化;而英文文献则从分离纯化和结构鉴定转向体外药理作用(图 1-B、C)。由此可见,天麻多糖在国际上的影响力正在逐步提升,未来研究将更多的集中在构效关系解析及药理机制的探索。根据可视化分析得到的天麻多糖研究热点,本文以天麻多糖的提取纯化、结构表征、药理活性及其应用作为重点内容。

2 天麻多糖的提取和分离纯化

2.1 提取

在进行天麻多糖提取前,往往对天麻原料进行预处理,如清洗、干燥等步骤。方伟等^[6]发现低温干燥能够提高天麻多糖的含量。李刚凤等^[7]比较了 6 种干燥方法,发现 60 °C 热风干燥得到天麻多糖含量高达 39.93%。天麻中含有大量脂溶性杂质,影响后续结构表征及活性研究,一般选择石油醚^[8]、乙醇^[9]、乙醚^[10]等有机溶剂进行多次浸泡脱脂,减少对后续多糖提取及纯化的干扰。此外,采用醇沉可使多糖充分凝聚、沉淀,提高多糖的回收率。李俊杰等^[9]采用 55%、65%、75%和 85%的乙醇分别进行醇沉,发现多糖得率与乙醇体积分数呈正相关。

目前,天麻多糖具有多元化的提取方法,包括水提法、酶解法、超声提取法、亚临界水萃取法和微波提取法等,并衍生出各种联用提取技术(表 1)。其中,水提法是应用最为广泛的提取方法。提取效率受提取时间、温度、料液比、提取次数和 pH 值等因素的影响,提取率为 8.73%~28.66%。相比于水提法,碱提法和酸提法的提取率更高,但过高的 pH 值会导致糖苷键断裂、促进多糖水解,反而降低提取率^[37]。为了缩短提取时间、降低成本并提高提取率,采用超声波辅助提取、微波辅助提取、酶解提取、亚临界水萃取法等对水提法进行优化。酶解提取法条件温和、损耗低,常用的酶包括复合酶^[38]、 α -淀粉酶^[39]、纤维素酶^[40]等。胡云飞等^[39]使用酶解法提取天麻多糖时发现加入 α -淀粉酶,酶解后多糖的溶解率提高了 12.29%,从而提高了天麻多糖的提取率。超声提取法通常使用水、乙醇、柠檬酸盐酸性缓冲溶液^[41]作为浸提溶剂,张双奇等^[42]发现在提取过程中加入超声波辅助,天麻多糖的得率可达到 30%。亚临界水萃取法操作简单、环保且提取效率高于水提法^[43]。微波辅助提取虽然提取效率高,但其效果受温度、时间和功率等因素的影响,李志英

等^[44]研究指出微波提取时功率过高(>500 W),可能会导致多糖结构发生变化,进而降低提取率。提取得到的天麻粗多糖存在大量蛋白质杂质,需要除去天麻多糖中的游离蛋白。目前脱蛋白的方法有很多,如 Seavage 法、酶法、三氯三氟乙烷法、三氯乙酸法等。这些方法的优点是其与多糖具有相容性^[45]。其中 Seavage 法操作简单、反应条件温和,但多糖的损失过多。酶法反应温和,多糖损失较低,除杂效果好。此外,还可将 Seavage 法和酶法相结合,该方法提取效率高,但步骤复杂,成本较高。朱晓霞等^[46]研究发现酶解结合 Seavage 法再醇沉后,蛋白脱出率为 76.8%,在增加多糖得率的同时降低了洗脱次数和损耗。去除蛋白质杂质后可通过透析进一步去除小分子杂质得到粗多糖。

2.2 分离纯化

天麻多糖的分离纯化是将不同相对分子质量的混合多糖进行分离,得到低分散性、电荷均一的天麻多糖。常见的分离纯化方法有分级沉淀和柱色谱法^[47],其中天麻多糖常见的纯化色谱技术为离子交换柱色谱和凝胶柱色谱法,通常采用阴离子交换柱色谱法分离天麻多糖中的酸性、中性多糖^[48](图 2)。天麻多糖的最佳分离纯化工艺可归纳为预处理、粗分级、离子交换与凝胶滤过等(表 1)。孙亚男^[49]用 DEAE-52 纤维素柱色谱、Sephadex G-100 凝胶滤过色谱对天麻多糖进行纯化,得到 WPGB-A-H 均一多糖。天麻粗多糖用阴离子交换色谱法纯化后,还需要用凝胶滤过色谱进一步纯化,常用于多糖纯化的凝胶滤过介质有 Sephadex、Sephacryl、Superdex 和 Superose 等。张格超^[50]将粗多糖经过除色素、脱蛋白质和透析后,再使用 DEAE-52 纤维素柱色谱和 Sephadex G-100 凝胶滤过色谱进一步纯化后得到了相对分子质量均一的天麻多糖。此外,还可使用大孔吸附介质进行纯化。课题组前期比较了 8 种不同的大孔树脂纯化天麻多糖的效果,发现大孔树脂 D101 在吸附温度 20 °C,上样速率 1 BV/h,解析液为 60%的乙醇溶液,解吸速率为 2 BV/h,解析液体积为 3 BV 时,纯化效率最高^[51]。

3 天麻多糖的结构表征、结构修饰及构效关系

多糖的结构解析对生物活性的研究极其重要。目前,主要使用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱(gas chromatography, GC)、高效凝胶渗透色谱法(high

表 1 天麻多糖的提取分离纯化工艺

Table 1 Extraction, separation and purification process of GEP

序号	时间/min	温度/℃	料液比及其他条件	得率/%	多糖组分	纯化方法	文献
1	120	96	—	6.50	GEP1-G 、 GEP2-G	D101 大孔树脂、DEAE-52、Sephadex G-100 纯化	11
2	120	80	1 : 30	13.46	—	—	12
3	180	60	1 : 60	28.66	—	Sevage 法脱蛋白、无水乙醇和丙酮冲洗、去离子水透析	13
4	60	50	1 : 60, pH 4, 重复 2 次	29.48	—	Sevage 法脱蛋白、无水乙醇和丙酮冲洗、去离子水透析	13
5	180	60	1 : 10, 重复 3 次	9.25	WTM-1~6	中空纤维超滤膜、DEAE-52、Sephadex G-100 纯化	14
6	15~60	70	160 W, 提取 3 次	—	—	95%乙醇和丙酮洗涤 3 次, 非对称场流分离	15
7	48.06	78.54	1 : 16.04	17.25	—	三氯甲烷-正丁醇 3 : 2 萃取和 95%乙醇脱蛋白、脱色	16
8	36	56	1 : 59, 重复 3 次	10.90	—	Sevage 法脱蛋白、透析、80%乙醇沉淀	17
9	180	80	1 : 30	13.97	—	Sevage 法脱蛋白、80%无水乙醇沉淀	18
10	66	74	1 : 60	29.48	—	—	19
11	55	55	脱脂后添加复合酶 0.9 g, pH 4.37	38.34	—	—	20
12	35	40	1 : 25	33.40	—	减压浓缩、80%乙醇醇沉	21
13	30	60	过 200 目筛, 1 : 40, 功率 250 W	71	—	—	22
14	55	55	天麻粉加复合酶 0.9 g, pH 4.80	35.86	—	浓缩、乙醇醇析	23
15	60	50	天麻粉加复合酶 20 mg, pH 4	2.48	—	Sevage 法脱蛋白、80%乙醇醇沉	24
16	30	60	1 : 40, 超声回流提取 3 次	42.60	GEPI、GEPII	脱蛋白、乙醇醇沉、Sephadex G-100 纯化	25
17	120	40	60~80 目过筛, 1 : 15, 功率 300 W	—	—	Sevage 法脱蛋白、Sephacrose 6 FF 纯化	26
18	240	100	1 : 40	—	—	氯仿-正丁醇 5 : 1 脱蛋白、80%无水乙醇沉淀	27
19	—	—	—	—	GEP2-6	DEAE-52 纯化	28
20	32	64	1 : 17, 重复 3 次	25.67	NSGCP1~4	DEAE-52、Sephadex G-50 纯化	29
21	15~60	70	1 : 30, 超声功率 80%, 提取 3 次	—	—	95%乙醇、丙酮洗涤	30
22	240	90	1 : 20	—	GaE-B、GaE-R	无水乙醇醇沉、洗涤、Sevage 法脱蛋白、透析 72 h	31
23	—	—	—	—	GEP-1	DEAE-Sephacrose FF、Sephacryl S-400HR 纯化	32
24	240	70	1 : 30	—	GEP-3、GEP-4	DEAE-52、Sephacryl 200 纯化、膜分离	33
25	240	70	1 : 30, 重复 3 次	—	GEP-1	截留相对分子质量 1×10^4 的膜分离	34
26	—	—	—	—	WTMA	DEAE-52、Bio-Gel P-2 纯化	35
27	—	—	—	—	GEP-1~3	Sephadex G-75 纯化	36

performance gel permeation chromatography , HPGPC)、质谱 (mass spectrometry, MS)、傅里叶变换红外光谱法 (Fourier transform infrared spectrometer , FT-IR)、紫外光谱 (UV-visible spectroscopy, UV)、核磁共振波谱 (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)、尺寸排阻色谱法 (size exclusion chromatography, SEC)、多角度光散

射 (multiangle light scattering, MALS) 等对天麻多糖进行结构表征。近年来, 从天麻中分离得到的 GEP-1、GEP-3、GEP-4、WGEW 等^[33-34]均一多糖的结构已明晰。对其结构解析主要集中在单糖组成、相对分子质量、糖苷键等层面的结构表征上, 但对其高级结构表征和结构与功能的关系研究仍不够深入, 有待进一步研究。

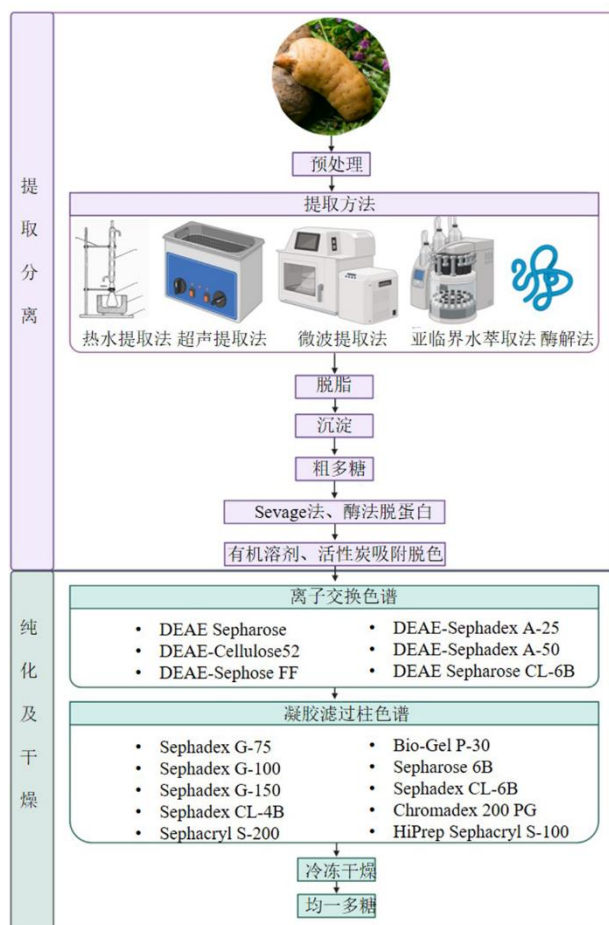


图 2 天麻多糖的提取纯化工艺流程

Fig. 2 Extraction and purification process of GEP

3.1 单糖组成和相对分子质量

天麻多糖是一种非还原性的非淀粉类多糖，其结晶呈粉末状，具有水溶性。通过单糖组成、相对分子质量的测定可以获得大量关于天麻多糖的重要信息。单糖是构成多糖的基本单元，通过研究多糖的单糖组成分析其一级结构，是解析多糖结构的第 1 步。在进行单糖组成测定前，常使用稀盐酸或三氟乙酸对多糖进行酸水解，使糖苷键断裂，进一步使用 GC、HPGPC、HPLC 等方法分析其组成及比例。研究发现，天麻多糖由葡萄糖 (glucose, Glc)、半乳糖 (galactose, Gal)、木糖 (xylose, Xyl)、阿拉伯糖 (arabinose, Ara)、甘露糖 (mannose, Man)、果糖 (fructose, Fru)、鼠李糖 (rhamnose, Rha)、葡萄糖醛酸 (glucuronic acid, GlcA) 等单糖组成。其中，Gal 和 Xyl 可能是影响多糖活性的因素，其含量越高，抗氧化活性越强^[31]。此外，还会使用 SEC、MALS 等方法测定其相对分子质量，从而明确分子链的长短或聚合度。Guan 等^[32]通过高效阴

离子交换色谱、体积排阻色谱-多角度激光光散射-示差折光检测系统分析 GEP-1 的单糖组成和相对分子质量，结果显示其相对分子质量为 76 444，主要由 Glc、Gal 和 Ara 组成。朱晓霞等^[52]通过 HPLC 对川产天麻进行定量分析，发现天麻多糖的单糖含量比例为 Rha-Man-Glc1 : 1.07 : 67.24。张梦娟^[53]研究表明天麻多糖由 Rha、Gal、Glc、Xyl、Man 5 种单糖组成，其比值为 29 : 1 : 42 : 11 : 2。Dai 等^[54]使用 AF4-MALS-dRI 联用技术对天麻多糖进行分离并测定其相对分子质量，结果表明其的相对分子质量为 1.16×10^5 。Zhu 等^[55]发现天麻多糖相对分子质量为 1.54×10^5 ，由 1→3 和 1→4,6 支链的吡喃葡萄糖构成，由 1→4 连接的 D-Glc 的线性骨架作为支撑。

3.2 糖苷键和高级结构

糖苷键是连接单糖单元形成多糖链的关键化学键，与单糖组成、相对分子质量共同构成多糖结构研究的 3 大基础，多使用 FT-IR、NMR 等技术对糖苷键进行测定。在天麻多糖中常见的糖苷键型包括 α -(1→4)、 α -(1→6)、 α -(1→2)、 β -(1→6) 等。Chen 等^[28]发现 GEP2-6 是一种由 α -(1→4) 和 α -(1→6) 糖苷键连接的葡聚糖，包含了 α -1,4-Glc、 α -1,6-Glc、 α -1,4,6-Glc 和 α -1-Glc 结构单元，物质的量比为 31.27 : 1.32 : 1.08 : 0.93。Huo 等^[33]使用 LC-MS 技术发现天麻多糖 (GEP-4) 中存在对羟基苯甲醇柠檬酸钠复合物，连接在 $\rightarrow 3,4$ - α -Glc p-(1→糖苷键的 O-1 位。除初级结构中的单糖组成和糖苷键类型等，天麻多糖的高级构象也是化学结构的重要组成部分。高级结构包括多糖链的折叠、螺旋等。不同的提取方法对天麻多糖高级结构的影响不同。有研究表明，随着超声提取时间的增加，天麻多糖的链构象由松散的超支化链转变为紧密的球状链^[30]。亦有研究表明，酶解会改变天麻多糖的微观结构。胡云飞等^[39]研究发现酶解前天麻多糖为网状结构，酶解后天麻多糖的孔隙更大，呈片状结构。此外，不同品种的天麻提取得到的天麻多糖结构也有所不同。Ji 等^[31]对乌天麻、红天麻、乌红杂交天麻和绿天麻分别进行结构解析，发现天麻多糖为杂多糖，由 Man、Rha、Glc、Gal 和 Xyl 组成，乌天麻、红天麻和乌红杂交天麻多糖主要为片状结构，绿天麻为丝状结构。

3.3 天麻多糖的结构修饰

为了获得功能更强且符合目标活性的天麻多

糖,研究者通常会对其进行结构修饰。常见的修饰方法有化学、物理和生物修饰。化学修饰通过化学反应引入不同的官能团,改变多糖的理化性质,具有选择性强、反应条件温和、修饰效果可控等优点^[56]。目前,多糖化学修饰方法有硫酸化、磷酸化、硒化、乙酰化、酸降解、碱降解等。温启华等^[57]研究发现硒化修饰使天麻多糖的抗氧化活性增强。Qiu 等^[58]从天麻多糖中分离得到 WEGW 和 AGEW 2 种均一多糖,使用氯磺酸-吡啶法对天麻多糖进行修饰,得到 WSS25、WSS45、ASS25、ASS45 4 种硫酸化衍生物,发现其取代位点在 O-6 上,并且具有很强的抗登革热病毒活性。此外,亦有研究发现 WSS25、WSS45 的抗登革热病毒活性与硫酸化程度有关。Chen 等^[59]通过酸解从 WGEW 分解得到 7 种不同相对分子质量的葡聚糖,当相对分子质量 $>4.1 \times 10^4$ 时,其硫酸化衍生物具有抗血管生成的功效,其抑制作用取决于硫酸根基团的存在。通过物理条件和处理手段也能改变多糖的物理性质和结构。常见的物理修饰有热处理、超声处理、放射线辐照等。其中,超声处理时间越长,多糖溶出越快,相对分子质量越低^[30]。张双奇等^[42]发现超声处理的天麻多糖具有更好的抗氧化活性。此外,利用特定的酶对多糖进行酶法修饰,如酶解、酶解酶聚合、糖链修饰等可以改变多糖的相对分子质量、链长、分支度^[60]。胡云飞等^[39]用 α -淀粉酶对天麻多糖进行修饰,发现其相对分子质量降低,抗氧化活性提高。

3.4 天麻多糖的构效关系

天麻多糖的结构特征如单糖组成、相对分子质量、官能团、糖苷键类型、位置、连接方式等对其药理活性具有重要影响。近年来,天麻多糖的结构解析已取得一定的进展。研究表明天麻多糖的单糖组成、相对分子质量不同,功能也有所差异。Ji 等^[31]发现葡萄糖含量较低的天麻多糖具有较好的体外抗氧化和糖苷酶抑制活性。戴珊珊^[61]通过对比水提醇沉和超声辅助提取 2 种方法,发现超声处理的天麻多糖抑制人乳腺癌 MCF-7 细胞增殖的能力更强;并且在一定范围内,天麻多糖的相对分子质量越高,结构越紧密,支化度越高,对 MCF-7 细胞的抑制率越高。程素盼^[44]采用水提醇沉法提取天麻多糖,发现在一定范围内,相对分子质量高的多糖抑制肿瘤的能力较强。此外,不同的官能团也会影响天麻多糖的功能。窦雨薇^[30]研究发现乙酰化是将乙酰基连接到糖链的羟基上,使天麻多糖与细胞膜结

合进入细胞内实现抗肿瘤的功效。

4 天麻多糖的药理活性研究

研究表明天麻多糖具有延缓衰老、预防心脑血管疾病、调节肠道菌群、免疫调节、抗肿瘤、神经保护、缓解非酒精性脂肪肝、抑菌、预防骨质疏松等药理活性。天麻多糖能高效清除自由基,减轻氧化应激对细胞的损伤,从而发挥延缓衰老的作用;在免疫调节方面,天麻多糖通过激活免疫细胞、提高血清免疫球蛋白水平等机制增强机体免疫功能,并能调节免疫失衡状态;在神经保护方面,通过改善神经功能为神经系统疾病防治提供新策略;在抑制肿瘤活性方面,通过激活半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶(cystein-aspartate protease, Caspase)系统、促进微小 RNA 表达等方式破坏肿瘤细胞增殖,诱导肿瘤细胞凋亡等。上述研究结果表明,天麻多糖对维持身体健康具有重要的应用价值。

4.1 抗氧化和抗衰老

天麻多糖在多种氧化应激模型中均表现抗氧化和延缓衰老的生物功能。天麻多糖可通过清除自由基、抑制脂质过氧化等途径拮抗氧化损伤。Ji 等^[31]从天麻中提取到 GaE-B、GaE-R、GaE-Hyb、GaE-G 4 种多糖,其中 GaE-B 和 GaE-Hyb 具有较高的抗氧化性。通过天麻多糖体外抗氧化活性测定发现天麻多糖对 2,2'-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]、二苯基苦基肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基 ($\text{O}_2^{\cdot-}$) 等均具有清除作用,并且其抗氧化活性受天麻品种、样品浓度、多糖制备方法等因素的影响^[62]。Du 等^[17]发现当多糖浓度为 1.0 mg/mL 时,天麻多糖对 DPPH 和 ABTS 自由基的清除率 $>80\%$ 。此外,在血清、肝、脑等组织中,天麻多糖也能够增加超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 的含量,并通过降低丙二醛含量保护细胞膜免受自由基的攻击^[63]。此外,有研究表明天麻多糖具有抗衰老的功能。王新梅等^[64]利用 D-半乳糖诱导的小鼠骨骼肌萎缩模型,发现天麻多糖能够抑制骨骼肌纤维的氧化应激,下调凋亡因子 Caspase-3、泛素化因子中肌肉萎缩 F-box (muscle atrophy F-box, MAFbx) 和肌肉特异性环指蛋白-1 (muscle-specific RING finger protein-1, MuRF-1) 水平,从而延缓 D-

半乳糖诱导的小鼠骨骼肌衰老。

4.2 预防心脑血管疾病

高血压、高血脂等都是常见的心脑血管疾病，二者对血管壁都有一定的伤害。天麻多糖通过维持血管基础张力、降低总胆固醇、血脂水平等功效预防高血压、高血脂等心脑血管疾病。缪化春等^[65]发现天麻多糖能促进内源性舒血管物质的生成并且抑制内源性缩血管物质的释放，维持血管基础张力。Kim 等^[66]通过构建高脂大鼠模型发现天麻粗多糖和酸性多糖提取物通过抑制总胆固醇和低密度脂蛋白水平来降低心血管疾病和动脉粥样硬化的发病率。Lee 等^[67]通过对高血压大鼠喂食天麻酸性多糖发现酸性多糖能够降低三酰甘油和低密度脂蛋白胆固醇水平，缓解动脉粥样硬化，最终降低高血压。

4.3 免疫调节

天麻多糖具有增加衰老小鼠的胸腺指数和脾脏指数、促进细胞增殖、吞噬活性、抗体水平等增强免疫调节的功能。Guan 等^[32]发现 GEP-1 具有促进巨噬细胞的增殖和吞噬活性、诱导一氧化氮释放并调节核因子- κ B (nuclear factor- κ B, NF- κ B) 信号通路激活免疫调节的功能。Li 等^[68]发现天麻多糖能够缓解环磷酰胺诱导的胸腺脾脏器官指数降低，促进血清中免疫相关细胞因子和免疫球蛋白的分泌。Bao 等^[69]发现天麻多糖通过提高机体免疫球蛋白 A (immunoglobulin A, IgA)、IgG 和 IgM 的抗体水平来提高体液免疫。此外，天麻多糖还通过减轻机体局部水肿、改善机体代谢反应、改善肠道菌群等方式抑制炎症。Xu 等^[70]通过构建结肠炎小鼠模型发现天麻多糖可显著增加具有潜在抗炎作用的细菌的相对丰度，并降低与促炎反应相关的细菌的水平来缓解炎症。Wang 等^[71]研究发现天麻多糖具有上调葡萄糖转运蛋白 4、抑制白色脂肪组织中受体 4-NF- κ B 信号通路的功能，并由此改善高脂饮食引发的炎症。亦有研究表明天麻多糖通过抑制胶质纤维酸性蛋白的升高、抑制白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)、IL-8、IL-1 β 、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、NOD 样受体热蛋白结构域 3 和高迁移率族蛋白 B1 的释放，从而减轻了神经炎症并缓解了其诱导的神经性疼痛^[72]。目前关于天麻多糖免疫调节作用的研究大多停留在初步研究，对具体作用机制的研究仍有欠缺，未来可继续对其作用机制进行探索。

4.4 神经保护

神经细胞的损伤是引起细胞凋亡、神经系统错乱的重要原因之一，该过程与脑细胞炎症反应、神经元增殖和凋亡基因的表达相关。天麻多糖通过提高 B 淋巴细胞瘤-2 (B-cell lymphoma-2, Bcl-2)/Bcl-2 相关 X 蛋白 (Bcl-2 associated X protein, Bax) 蛋白的比例、抑制 Caspase 蛋白酶的活性、增加巢蛋白和脑源性神经营养因子的表达、加速杏仁核基底外侧神经干细胞的生长等相关途径来改善脑缺血后的神经系统^[73]。Zhang 等^[74]通过小鼠缺血性脑卒中模型发现天麻多糖可上调谷胱甘肽过氧化物酶 4 (glutathione peroxidase 4, GPX4) 水平，降低活性氧、丙二醛和 Fe²⁺ 的过度囤积，从而缓解神经元铁死亡减轻小鼠的神经功能缺损、脑梗死面积和脑水肿。此外，亦有研究发现天麻多糖可通过缓解多巴胺能神经元损伤等方式缓解阿尔茨海默病 (Alzheimer's disease, AD)、帕金森病 (Parkinson disease, PD) 等神经退行性疾病。李光美等^[75]基于 AD 小鼠模型研究发现，天麻多糖在降低磷酸化 Tau 蛋白阳性表达的同时，增强 CA1、CA3 和 DG 3 个亚区中 p-Tau 蛋白的表达，从而改善 AD 小鼠焦虑的症状。Gan 等^[76]通过构建 PD 小鼠模型发现天麻多糖能够减少脑内多巴胺能神经元的损伤，降低 Bcl-2/Bax 的值、Caspase-3 水平阻止线粒体凋亡和调节肠道菌群的平衡等方面来缓解 PD 导致的运动障碍。此外，天麻多糖亦具有改善脑瘫引起的大脑损伤的功能。史华等^[77]研究发现天麻多糖在神经递质层面通过抑制乙酰胆碱酯酶 (acetylcholinesterase, AchE) 活性增加乙酰胆碱含量，增加 5-羟色胺 (5-hydroxytryptamine, 5-HT)、去甲肾上腺素 norepinephrine, NE) 和 γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 水平，从而抑制谷氨酸过高产生的大脑毒性作用，进一步缓解脑瘫引起的记忆力功能障碍。天麻多糖对记忆、焦虑等行为同样具有改善作用。明建等^[78]研究发现天麻水溶性多糖通过提高脑内乙酰胆碱含量改善东莨菪碱导致的记忆损伤。在血管保护层面，通过增加内皮型一氧化氮合酶 (endothelial nitric oxide synthase, eNOS) 表达，促进血管舒张因子一氧化氮的释放，从而改善脑瘫幼鼠大脑损伤。综上所述，天麻多糖可通过调节炎症、肠道菌群、缓解细胞凋亡等方面进行神经保护的功，但具体机制仍未进行深入研究，未来可结合微生物-脑-肠轴等角度进一步对其

机制进行研究。

4.5 抑制肿瘤活性

肿瘤是指自身细胞在基因水平上的调控失衡,从而导致细胞发生病变,开始恶性增生形成的新生物。近几年研究发现,天麻多糖通过诱导细胞晚期凋亡、形成炎性浸润、激活 Caspase 系统、影响细胞周期分布、促进微小 RNA 表达、抑制 B7-H3 的表达等方式破坏肿瘤细胞增殖,诱导肿瘤细胞凋亡。叶伟等^[79]研究发现天麻多糖通过促进 miR-27a-3p 的表达进而抑制 B7-H3 表达,从而抑制肿瘤暴露下结肠癌细胞增殖和侵袭,促进结肠癌细胞凋亡。此外,血管生成在肿瘤的生长、扩散过程中,也起重要作用,天麻多糖能抗血管生成和细胞迁移来抑制肿瘤。章柏钰等^[80]研究发现硫酸酯化的天麻多糖能够抑制神经胶质瘤细胞生长活性和迁移。Chen 等^[59]从天麻中提取到一种新型多糖 WGEW,研究发现 WGEW 通过抑制骨形态发生蛋白 2/Smad/分化抑制因子 1 信号通路抑制血管生成作用。虽然现有研究已证明天麻多糖具备抑制肿瘤活性的功效,但其作用靶点及分子机制尚未完全阐明,仍需通过体内外模型验证等手段进行系统解析,以明确其药效物质基础及作用网络。

4.6 调节肠道菌群

天麻多糖主要由回肠吸收,穿过小肠绒毛和黏膜屏障进入血液,通过网格蛋白和巨噬细胞作用介导的内吞过程在机体内部转运^[81]。研究发现天麻中 GRP-1、GRP-3、GRP-4 等均一多糖能促进肠道嗜黏蛋白阿克曼菌的生长来维持肠道稳定。Li 等^[68]发现天麻多糖能够提高肠道紧密连接蛋白和紧密连接蛋白-1(zonula occludens-1, ZO-1)表达,增加结肠中短链脂肪酸(short chain fatty acids, SCFAs)的含量,从而恢复肠道屏障、肠道微生物群的组成和丰度。令博等^[81]发现天麻多糖对肠道内的乙酸、丙酸等 SCFAs 有较大影响。Gan 等^[82]研究发现 GEP 的消化产物为多糖(GEP-i),能够积极参与粪便发酵过程,并且随着发酵时间的延长,微生物群对 GEP-i 的利用率逐渐增加。此外,它还能够促进双歧杆菌、柯林斯氏菌等益生菌的丰度,抑制致病性志贺氏菌、脱硫弧菌等细菌丰度。Liu 等^[83]采用大鼠在体单向灌肠流试验发现天麻和葛根结合使用能增加血液中的生物活性成分水平,抑制 P-糖蛋白和多药耐药相关蛋白-2 介导的外排,促进葛根素和大豆苷的肠吸收。

4.7 其他

天麻多糖对骨骼、心肌、肝脏、血管等均具有一定的保护作用。Chen 等^[84]发现 WSS25 可呈剂量相关性抑制破骨细胞分化因子诱导的 RAW264.7 细胞中的易位子相关蛋白、活化 T 细胞核因子 1、基质金属蛋白酶 9 和组织蛋白 K 的表达,从而抑制破骨细胞生成,降低去卵巢小鼠的骨丢失,进一步抑制骨质疏松症的产生。李佳等^[85]发现天麻多糖通过减轻心肌膜过氧化损伤和降低缺血性心肌酶释放来提高心肌耐缺氧能力,从而心肌缺血性损伤具有一定的保护作用。樊荣等^[86]发现天麻多糖通过上调 Nrf2/GPX 信号途径来改善非酒精性脂肪性肝病引起的氧化应激损伤和炎症因子的过度表达,通过下调 SREBP-1c 及其下游靶基因 FAS 和 HMGCR 的表达来降低机体胆固醇含量。亦有研究表明天麻多糖具有广谱抑菌活性,无论是对真菌、革兰阳性菌还是革兰阴性菌都具有明显的抑制作用^[87]。

天麻多糖的生物活性见图 3。

5 天麻多糖的应用

随着天麻多糖研究的不断深入,市场上逐渐涌现了以天麻多糖为原料的多样化产品(图 4)。在食品领域,天麻多糖可制成酒、挂面等产品。朱思洁等^[88]采用超声辅助浸泡法研制酱香天麻健康酒,其中天麻多糖质量浓度为 3.58 mg/mL,具有祛风通络、治疗腰肌损伤、关节炎、头痛等功效。在保健品领域,含天麻的保健食品共有 9 种剂型、11 种功能。在护肤品领域,天麻多糖可制成面膜、润肤霜等产品。王宇等^[89]将天麻多糖制成润肤霜,其具有促使皮肤角质层降解与新陈代谢等功能。Wang 等^[90]将天麻多糖加入到纳米纤维膜上制成固体面膜,具有保湿、抗氧化的功效。在医药领域,天麻多糖可制成水凝胶、滴眼液等产品。Yu 等^[91]以氧化天麻多糖与羧甲基壳聚糖作为原料,负载天麻素制成一种具有生物相容性、生物降解、自修复的抗紫外线的水凝胶材料。Xin 等^[92]将天麻素接枝到壳聚糖主链上获得共聚物,再与天麻多糖交联成水凝胶,最后将葛根素由明胶微球包载嵌入水凝胶实现缓释,从而起到复合水凝胶有效降低了伤口部位组织细胞的氧化应激并抑制了细菌生长。它还可以减少炎症,促进血管生成,并增强胶原蛋白沉积的功效。高青青^[93]将质量浓度为 1.68 mg/mL 的天麻多糖与大豆卵磷脂以 1:3.2 的比例混合,制成凝胶滴眼液,可用于缓解干眼症。综上,天麻多糖已用于保健食品、普通

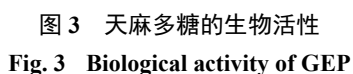


Fig. 3 Biological activity of GEP



Fig. 4 Application of GEP

随着天麻正式纳入“药食同源”物质目录，天麻的功效及价值将逐步得到开发利用，而多糖作为

天麻中的天然高分子化合物，具有抗氧化和抗衰老、抗炎、神经保护、抗肿瘤、改善肠菌群等生物活性，在食品、药品及化妆品领域都展现出广阔的应用前景^[94]。本文通过文献计量学系统分析了天麻多糖研究领域的中英文文献，梳理了当前的研究现状与研究热点；综述了天麻多糖的研究进展，通过对天麻多糖提取纯化工艺、多糖结构解析和分子构效关系的分析发现，不同的提取纯化工艺能够获得不同种类及活性的天麻多糖，而化学修饰、合成生物学策略能优化其理化特性并增强生物活性，为拓展其在功能食品、医药载体等领域的应用提供支撑；在构效关系方面，已有研究表明单糖组成与生物活性密切相关，为进一步开发天麻多糖产品提供依据。然而，仍存在一些值得继续深入研究的问题，如对天麻多糖结构的修饰、构效关系的解析等方面还需进一步研究。同时，天麻多糖已有在药物纳米递送系统中作为纳米水凝胶的研究，可进一步研究天麻多糖作为纳米纤维等多样化载体的可能性，旨在克服体内吸收屏障，实现精准药物递送。此外，还可使用基因组、代谢组和转录组等多组学技术进一步深入解析天麻多糖通过微生物-脑-肠轴调控疾病的分子机制，为跨系统疾病治疗提供新策略。未

来, 期待能够更深入地揭示天麻多糖的作用机制, 推动天麻多糖与其他领域的融合, 拓展其应用的广度和深度。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 杨艺娜, 王蓓蓓, 金徽, 等. 天麻素的结构修饰及生物活性研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(23): 8245-8255.
- [2] 贾凡凡, 王蓓蓓, 康思锐, 等. 天麻镇静催眠作用研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(13): 4555-4564.
- [3] 陈琛, 蔺蓓蓓, 吴伟, 等. 6 种保鲜剂对天麻保鲜效果的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(9): 112-119.
- [4] Zhan H D, Zhou H Y, Sui Y P, *et al.* The rhizome of *Gastrodia elata* Blume—An ethnopharmacological review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 189: 361-385.
- [5] 石新卫, 王璐, 张胜, 等. 天麻的化学成分及其抗氧化和抑制 α -葡萄糖苷酶活性研究 [J]. 中草药, 2024, 55(19): 6474-6481.
- [6] 方伟, 胡慧, 刘慧芹, 等. 不同干燥温度对天麻主要成分含量的影响 [J]. 怀化学院学报, 2019, 38(11): 1-5.
- [7] 李刚凤, 黎光富, 康明, 等. 不同加工方法对德江天麻多糖含量的影响 [J]. 食品工业, 2017, 38(9): 21-24.
- [8] 刘益红, 周建军, 徐顶巧. 不同精制方法对天麻多糖抗氧化活性的影响 [J]. 中成药, 2013, 35(4): 838-841.
- [9] 李俊杰, 黄艳, 亢凯杰, 等. 不同 pH 值溶剂对昭通乌天麻多糖提取率及抗氧化能力研究 [J]. 农产品加工, 2024(5): 18-21.
- [10] Lou X J. Polysaccharides from *Portulaca oleracea* (purslane) supplementation lowers acute exercise induced oxidative stress in young rats [J]. *Afr J Pharm Pharmacol*, 2011, 5(3): 381-385.
- [11] 陈琛, 李鑫鑫, 徐尤美, 等. 天麻多糖的分离纯化与抗氧化活性研究 [J]. 中国临床药理学杂志, 2018, 34(18): 2203-2206.
- [12] 郑捷, 孙朋朋, 胡爱军, 等. 天麻多糖的提取及其饮料的研制 [J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 123-129.
- [13] 张家义. 天麻素和天麻多糖的提取工艺及应用 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [14] 程素盼. 天麻多糖分离纯化、结构表征及抗肿瘤活性研究 [D]. 济南: 山东中医药大学, 2019.
- [15] 王沐, 张西瑞, 窦雨薇, 等. 基于非对称场流分离技术分离表征天麻多糖: 空间位阻转变效应 [J]. 色谱, 2023, 41(8): 714-721.
- [16] 马彦江, 于兰兰, 刘瑞霞, 等. 响应面法优化天麻多糖的超声提取工艺 [J]. 中国现代中药, 2018, 20(5): 599-603.
- [17] Du C J, Liu X Y, Algadi H, *et al.* Polysaccharide extraction optimization, monosaccharide composition, and antioxidant activity analysis of different varieties of *Gastrodia elata* Bl aerial parts [J]. *Biomass Convers Biorefin*, 2024, 14(23): 29353-29365.
- [18] 王锐, 熊汝琴. 4 种天麻变型多糖的提取及含量测定 [J]. 天津农业科学, 2017, 23(2): 12-15.
- [19] Chen J C, Tian S, Shu X Y, *et al.* Extraction, characterization and immunological activity of polysaccharides from *Rhizoma Gastrodiae* [J]. *Int J Mol Sci*, 2016, 17(7): 1011.
- [20] 叶文斌. 效应面法与酶法联用提取天麻素和天麻多糖的优化工艺研究 [J]. 食品研究与开发, 2015, 36(12): 25-30.
- [21] 杨天友, 刘金涛, 李刚凤. 超声波辅助提取德江天麻多糖工艺优化 [J]. 中国酿造, 2015, 34(12): 117-121.
- [22] 汪瑞敏, 朱秋劲, 张春花, 等. 不同提取方法对天麻多糖抗氧化活性的影响 [J]. 食品科技, 2015, 40(3): 208-213.
- [23] 兰金荣, 叶文斌. 响应面法与正交设计法比较研究天麻多糖提取优化工艺 [J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 10-15.
- [24] 王勋, 罗珊珊, 蒋嘉烨, 等. 酶解法提取天麻多糖的研究 [J]. 中药材, 2013, 36(1): 137-140.
- [25] 刘明庆, 罗洁丽. 天麻多糖提取工艺及纯化研究 [J]. 中国药师, 2011, 14(11): 1593-1596.
- [26] 朱晓霞, 张勇. 天麻多糖的纯化工艺研究 [J]. 中国民族民间医药, 2010, 19(14): 102-103.
- [27] 任守利, 刘塔斯, 刘宇婧, 等. 天麻多糖提取工艺的研究 [J]. 湖南中医药大学学报, 2010, 30(1): 37-40.
- [28] Chen J Q, Miao W, Liu Y, *et al.* Structural characterization, molecular dynamic simulation, and conformational visualization of a water-soluble glucan with high molecular weight from *Gastrodia elata* Blume [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 263(Pt 1): 130207.
- [29] 徐婷婷. 硫磺熏蒸对天麻多糖结构及抗氧化活性影响研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [30] 窦雨薇. 天麻多糖及其衍生物的结构表征及抗乳腺癌活性研究 [D]. 保定: 河北大学, 2022.
- [31] Ji N, Liu P, Zhang N, *et al.* Comparison on bioactivities and characteristics of polysaccharides from four varieties of *Gastrodia elata* Blume [J]. *Front Chem*, 2022, 10: 956724.
- [32] Guan H, Ling X, Xu J, *et al.* Structural characterization of polysaccharide derived from *Gastrodia elata* and its immunostimulatory effect on RAW264.7 cells [J]. *Molecules*, 2022, 27(22): 8059.
- [33] Huo J Y, Lei M, Zhou Y, *et al.* Structural characterization of two novel polysaccharides from *Gastrodia elata* and their effects on *Akkermansia muciniphila* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 186: 501-509.
- [34] Huo J Y, Lei M, Li F F, *et al.* Structural characterization of a polysaccharide from *Gastrodia elata* and its bioactivity on gut microbiota [J]. *Molecules*, 2021, 26(15): 4443.

- [35] Chen X, Cao D X, Zhou L, *et al.* Structure of a polysaccharide from *Gastrodia elata* Bl., and oligosaccharides prepared thereof with anti-pancreatic cancer cell growth activities [J]. *Carbohydr Polym*, 2011, 86(3): 1300-1305.
- [36] 周本宏, 杨兰, 袁怡, 等. 天麻中一种酸性杂多糖的分离纯化和结构鉴定 [J]. 中国医院药学杂志, 2009, 29(23): 2002-2006.
- [37] 徐珊. 多糖结构变化与食品功能特性的相关性研究 [J]. 中国食品工业, 2024(21): 122-124.
- [38] 谭沙, 朱仁威, 张静, 等. 酶法提取天麻多糖工艺优化 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(15): 50-53.
- [39] 胡云飞, 周德, 曾青兰, 等. 天麻多糖酶解工艺优化、结构表征及其抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 205-214.
- [40] 王庆, 李丹丹, 潘芸芸, 等. 提取方法对天麻多糖提取率及其抗氧化活性的影响 [J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 146-150.
- [41] 曹小燕, 杨海涛. 缓冲溶液浸提天麻多糖工艺的优化及抗氧化性研究 [J]. 应用化工, 2016, 45(8): 1461-1465.
- [42] 张双奇, 刘琳, 何念武, 等. 超声辅助提取陕产天麻多糖的工艺优化及抗氧化活性研究 [J]. 中国农学通报, 2021, 37(9): 131-136.
- [43] Wu G Z, Dong H J, Ding M G, *et al.* Subcritical water extraction of polysaccharides from *Gastrodiae Rhizoma*: Optimization, characterization and *in vitro* hepatoprotective activity [J]. *Prep Biochem Biotechnol*, 2024, 54(5): 612-621.
- [44] 李志英, 双少敏, 张海容, 等. 微波法提取天麻多糖的研究 [J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 573-576.
- [45] Zhu H D, Liu C, Hou J J, *et al.* *Gastrodia elata* Blume polysaccharides: A review of their acquisition, analysis, modification, and pharmacological activities [J]. *Molecules*, 2019, 24(13): 2436.
- [46] 朱晓霞, 罗学刚. 天麻多糖水提及脱蛋白工艺优化 [J]. 中药材, 2007, 30(6): 724-726.
- [47] 赵宁, 韩著, 简颖琳, 等. 中药多糖结构表征及质量评价研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(21): 7491-7506.
- [48] 林彦. 黄芩茎叶多糖的提取分离纯化、体外抗氧化与醒酒代谢指标测定及其结构鉴定 [D]. 承德: 承德医学院, 2024.
- [49] 孙亚男. 天麻多糖分离纯化及理化性质研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [50] 张格超. 天麻多糖分离纯化及其抗氧化活性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [51] 陈琛, 李鑫鑫, 魏唯, 等. 大孔树脂纯化天麻多糖的工艺研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55(5): 1109-1115.
- [52] 朱晓霞, 张勇, 罗学刚. 天麻多糖的结构表征 [J]. 食品研究与开发, 2010, 31(9): 52-56.
- [53] 张梦娟. 天麻多糖的提取、纯化及活性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [54] Dai S S, Zhang W H, Dou Y W, *et al.* Towards a better understanding of the relationships between the structure and antitumor activity of *Gastrodia elata* polysaccharides by asymmetrical flow field-flow fractionation [J]. *Food Res Int*, 2021, 149: 110673.
- [55] Zhu Z Y, Chen C J, Sun H Q, *et al.* Structural characterisation and ACE-inhibitory activities of polysaccharide from *Gastrodia elata* Blume [J]. *Nat Prod Res*, 2019, 33(12): 1721-1726.
- [56] 张娜, 刘扬, 陈小强, 等. 化学修饰植物多糖的生物活性及其在食品领域中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 375-384.
- [57] 温启华, 陆逸昊, 杨露芳, 等. 硒化天麻多糖的制备、结构表征及其抗氧化活性评价 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 18-30.
- [58] Qiu H, Tang W, Tong X K, *et al.* Structure elucidation and sulfated derivatives preparation of two α -d-glucans from *Gastrodia elata* Bl. and their anti-dengue virus bioactivities [J]. *Carbohydr Res*, 2007, 342(15): 2230-2236.
- [59] Chen X, Xiao F, Wang Y, *et al.* Structure-activity relationship study of WSS25 derivatives with anti-angiogenesis effects [J]. *Glycoconj J*, 2012, 29(5/6): 389-398.
- [60] 刘珮瑶, 王琨, 梁杉, 等. 茯苓多糖组成结构及生物活性研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(1): 380-391.
- [61] 戴珊珊. 天麻多糖的提取、表征及抗人乳腺癌 MCF-7 细胞的研究 [D]. 保定: 河北大学, 2020.
- [62] 张庚, 徐长远, 余苗, 等. 天麻多糖的提取及抗氧化活性研究 [J]. 农业开发与装备, 2019(6): 118-119.
- [63] 李峰, 朱洁平, 王艳梅, 等. 大别山区天麻多糖的抗衰老作用研究 [J]. 皖西学院学报, 2013, 29(5): 12-14.
- [64] 王新梅, 刘坤祥. 天麻多糖对小鼠骨骼肌衰老作用的实验研究 [J]. 遵义医学院学报, 2019, 42(2): 135-140.
- [65] 缪化春, 沈业寿. 天麻多糖的降血压作用 [J]. 高血压杂志, 2006, 14(7): 531-534.
- [66] Kim K J, Lee O H, Han C K, *et al.* Acidic polysaccharide extracts from *Gastrodia Rhizomes* suppress the atherosclerosis risk index through inhibition of the serum cholesterol composition in Sprague Dawley rats fed a high-fat diet [J]. *Int J Mol Sci*, 2012, 13(2): 1620-1631.
- [67] Lee O H, Kim K I, Han C K, *et al.* Effects of acidic polysaccharides from *Gastrodia rhizome* on systolic blood pressure and serum lipid concentrations in spontaneously hypertensive rats fed a high-fat diet [J]. *Int J Mol Sci*, 2012, 13(1): 698-709.
- [68] Li N, Wang D, Wen X J, *et al.* Effects of polysaccharides

- from *Gastrodia elata* on the immunomodulatory activity and gut microbiota regulation in cyclophosphamide-treated mice [J]. *J Sci Food Agric*, 2023, 103(7): 3390-3401.
- [69] Bao Q W, Qian L, Gong C, et al. Immune-enhancing activity of polysaccharides from *Gastrodia elata* [J]. *J Food Process Preserv*, 2017, 41(4): e13016.
- [70] Xu D, Wu Q Y, Liu W Y, et al. Therapeutic efficacy and underlying mechanisms of *Gastrodia elata* polysaccharides on dextran sulfate sodium-induced inflammatory bowel disease in mice: Modulation of the gut microbiota and improvement of metabolic disorders [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 248: 125919.
- [71] Wang D Q, Wang J X, Yan C R, et al. *Gastrodia elata* Blume extract improves high-fat diet-induced type 2 diabetes by regulating gut microbiota and bile acid profile [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 1091712.
- [72] Xie H T, Chen Y Y, Wu W, et al. *Gastrodia elata* Blume polysaccharides attenuate vincristine-evoked neuropathic pain through the inhibition of neuroinflammation [J]. *Mediators Inflamm*, 2021, 2021: 9965081.
- [73] 王新琳, 刘沛东, 张亮, 等. 天麻多糖对脑瘫幼鼠模型脑组织神经细胞凋亡基因表达的影响 [J]. 中国临床药理学杂志, 2019, 35(18): 2062-2064.
- [74] Zhang Y G, Ye P, Zhu H, et al. Neutral polysaccharide from *Gastrodia elata* alleviates cerebral ischemia-reperfusion injury by inhibiting ferroptosis-mediated neuroinflammation via the Nrf2/HO-1 signaling pathway [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(3): e14456.
- [75] 李光美, 王朝群, 唐超, 等. 天麻多糖对阿尔茨海默症小鼠焦虑行为及记忆功能的影响 [J]. 遵义医科大学学报, 2023, 46(3): 227-233.
- [76] Gan Q X, Peng M Y, Wei H B, et al. *Gastrodia elata* polysaccharide alleviates Parkinson's disease via inhibiting apoptotic and inflammatory signaling pathways and modulating the gut microbiota [J]. *Food Funct*, 2024, 15(6): 2920-2938.
- [77] 史华, 何琦, 娄元俊, 等. 天麻多糖对脑瘫幼鼠脑内神经递质的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(23): 140-145.
- [78] 明建, 曾凯芳, 吴素蕊, 等. 天麻多糖 PGEB-3-H 对东莨菪碱所致小鼠学习记忆障碍的影响 [J]. 食品科学, 2010, 31(3): 246-249.
- [79] 叶伟, 张曦. 天麻多糖经 miR-27a-3p/B7-H3 通路对肿瘤暴露下结肠癌细胞增殖、侵袭、凋亡的影响 [J]. 职业与健康, 2023, 39(12): 1596-1603.
- [80] 章柏钰, 谭珺, 郭咸希, 等. 硫酸酯化天麻多糖抗脑胶质瘤活性的研究 [J]. 中国药师, 2020, 23(2): 227-231.
- [81] 令博, 赵国华, 明建. 天麻多糖 PGEB-3-H 对大鼠肠道内短链脂肪酸的影响 [J]. 食品科学, 2011, 32(11): 284-287.
- [82] Gan Q X, Chen L L, Xian J C, et al. Digestive characteristics of *Gastrodia elata* Blume polysaccharide and related impacts on human gut microbiota *in vitro* [J]. *J Ethnopharmacol*, 2024, 328: 118064.
- [83] Liu C S, Liang X, Wei X H, et al. Comparative pharmacokinetics of major bioactive components from *Puerariae Radix-Gastrodiae Rhizome* extracts and their intestinal absorption in rats [J]. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 2019, 1105: 38-46.
- [84] Chen C, Qin Y, Fang J P, et al. WSS25, a sulfated polysaccharide, inhibits RANKL-induced mouse osteoclast formation by blocking SMAD/ID1 signaling [J]. *Acta Pharmacol Sin*, 2015, 36(9): 1053-1064.
- [85] 李佳, 李红磊, 唐慧慧. 天麻多糖对垂体后叶素致急性心肌缺血大鼠的保护作用 [J]. 中国医院用药评价与分析, 2010, 10(9): 818-820.
- [86] 樊荣, 马国华, 于珊珊. 天麻多糖对高脂饮食诱导的非酒精性脂肪肝的保护作用 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 381-391.
- [87] 陈琛, 李鑫鑫, 付昀东, 等. 汉中天麻多糖抗菌活性研究 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 156-159.
- [88] 朱思洁, 刘良禹, 田多, 等. 酱香天麻健康酒制备工艺 [J]. 食品研究与开发, 2024, 45(5): 171-177.
- [89] 王宇, 咎丽霞, 胡琳琳, 等. 天麻多糖润肤霜工艺配方研究 [J]. 亚太传统医药, 2016, 12(17): 21-23.
- [90] Wang Y, Wang N, Liu W C, et al. Preparation and evaluation of *Gastrodia elata* polysaccharide loaded electrospinning nanofiber facial mask [J]. *J Appl Polym Sci*, 2024, 141(45): e56199.
- [91] Yu W M, Zhao Y, Jia P H, et al. Preparation and evaluation of gastrodin microsphere-loaded *Gastrodia elata* polysaccharides composite hydrogel on UVB-induced skin damage *in vitro* and *in vivo* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 277(Pt 2): 134303.
- [92] Xin C R, Jia P H, Zhao Y, et al. Antioxidant effects of *Gastrodia elata* polysaccharide-based hydrogels loaded with puerarin/gelatin microspheres for D-galactose-induced aging-skin wound healing [J]. *Int J Biol Macromol*, 2025, 296: 139809.
- [93] 高青青. 天麻多糖磷脂复合物眼用凝胶研究 [D]. 天津: 天津中医药大学, 2023.
- [94] 冯铭柯, 杨艺娜, 田文豪, 等. 基于文献和专利计量的天麻食品研发态势分析 [J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 163-171.

[责任编辑 赵慧亮]