

白刺属植物多糖的研究进展

阿衣吐逊·阿布都外力^{1,2}, 高彦华¹, 热合巴提·努尔夏提^{1,2}, 排合尔丁·穆太力甫^{1,2}, 阿布力米提·伊力^{1*}

(1. 中国科学院新疆理化技术研究所新疆特有药用资源利用重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 白刺富含多糖、生物碱、黄酮、维生素及多种矿物质等化学成分。多糖类成分作为白刺属植物的特征成分, 具有抗氧化、抗疲劳、降血糖、降血脂、保肝及改善机体免疫功能等一系列保健功能和药理活性。近年来, 白刺属植物多糖的提取分离、结构分析及其功能活性研究取得了较好的进展。该文基于最近国内外白刺属植物多糖的研究, 主要从提取分离、结构鉴定及生物活性等层面进行综述, 为白刺属植物新药活性成分发现及资源开发提供依据。

关键词: 白刺; 多糖; 提取分离; 结构; 活性

Research Progress on the Polysaccharide Composition of *Nitraria*

AYITUXUN Abuduwaili^{1,2}, GAO Yan-hua¹, REHEBATI Nuerxiaty^{1,2}, PAIHEERDING Mutailifu^{1,2},

ABULIMITI Yili^{1*}

(1. State Key Laboratory Basis of Xinjiang Indigenous Medicinal Plants Resource Utilization, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: *Nitraria* is rich in polysaccharides, alkaloids, flavonoids, vitamins, and minerals. Polysaccharides are the main bioactive compounds found in plants of the *Nitraria* genus and have numerous functional properties and activities, including antioxidant, anti-fatigue, hypoglycemic, hypolipidemic, liver protection, and immune regulation. In recent years, progress has been made towards the isolation, structural characterization, and bioactivities of polysaccharides from *Nitraria sibirica*. This paper summarized the research progress of extraction and separation methods, structural identification, and biological activity of *Nitraria* polysaccharide, with the aim of provided the basis for the discovery of new bioactive medicinal ingredients and resource development of *Nitraria*.

Key words: *Nitraria*; polysaccharide; isolation; structure; bioactivity

引文格式:

阿衣吐逊·阿布都外力, 高彦华, 热合巴提·努尔夏提, 等. 白刺属植物多糖的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 181-188.

AYITUXUN Abuduwaili, GAO Yanhua, REHEBATI Nuerxiaty, et al. Research Progress on the Polysaccharide Composition of *Nitraria*[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 181-188.

白刺(*Nitraria*)是蒺藜科白刺属植物, 本属全世界约有 11 种, 分布于亚洲、欧洲、非洲和澳洲, 我国有 6 种和 1 个变种^[1]。白刺属植物是一种药食同源的野生

植物, 其浆果是沙漠里罕见的野生水果, 被美誉为“沙漠樱桃”, 具有潜在的开发应用价值。白刺的种子、叶和果实均可入药, 目前已开发制成了果酒、果汁和果醋等多种保健产品。《本草纲目》中记载: 白刺“气味辛, 寒, 无毒, 能治痛肿溃脓, 补肾气, 益精髓”。它是蒙古族、藏族、维吾尔族等少数民族的习用药材, 具有健脾胃、滋补强壮、调经活血的功能。白刺果实常用于改善脾胃虚弱、消化不良、神经衰弱、感冒等症状^[2]。同时,

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX09301045)

作者简介: 阿衣吐逊·阿布都外力(1991—), 女(维吾尔), 博士研究生, 研究方向: 天然产物的提取分离及活性筛选。

* 通信作者: 阿布力米提·伊力(1970—), 男(维吾尔), 研究员, 博士, 研究方向: 天然药物物质基础研究。

现代药理学研究证明,白刺属植物具有降血压、降血脂、扩张冠状动脉、抑菌、抗肿瘤、抗疲劳及免疫调节等功效^[3-4]。至今,已从白刺属植物中分离鉴定出多种生物活性物质,包括生物碱、黄酮、多糖、蛋白质、酚类、维生素、矿物质及氨基酸等多种营养物质^[5];其中,多糖作为白刺属植物主要营养成分之一,具有多种生物活性^[6],也是众多生物医学研究领域的基础研究内容,有至关重要的科研价值和广泛的应用需求。

多糖广泛存在于动物、植物、藻类、细菌及真菌等多种生物体中。与蛋白质和核酸类化合物一样,多糖也是生命活动中必不可少的重要组成部分,在细胞交流及分子识别中有至关重要的作用。多糖因其独特的理化性质及广泛的生物活性,已引起了越来越多领域的关注,成为了当今研究热点^[7-8]。多糖的结构和组成较为复杂,由于提取分离方法的不同,多糖的结构包括化学组成、单糖比例、分子量及糖链结构等也会有所差异,这都会影响多糖的生物活性、作用机制和临床上的应用^[9-10]。已有大量研究表明,以天然药用植物为来源的多糖具有抗氧化、抗肿瘤、抑菌、降血糖、抗炎、改善肠道菌群、免疫调节等多种功能^[11-14]。研究表明,各类多糖所具有的特定生物功能与其结构、属性等有着紧密地联系。多糖不仅参与生物体的物质组成和跨膜运输,调节生物体内各种生化反应,同时还具有诸如抗体、受体、激素等许多生物学功能。因此研究多糖的构效关系对于研究其在生物体内作用机理、新药研究与开发以及多糖结构与功能研究均具有十分重要的意义。鉴于此,近年来对多糖的结构与功能关系研究引起了国内外化学、药学、生物及医学等工作者的极大关注和浓厚兴趣。本文在国内外白刺属植物文献整理及评价的基础上,分别从白刺属植物多糖

的提取分离、结构鉴定及生物活性等方面进行了归纳综述,可为其在功能性食品、保健品及医药行业中的应用开发提供参考依据。

1 白刺多糖的提取与纯化

研究发现不同的提取方法对多糖的理化性质、结构及生物活性等均产生较大的影响^[15]。因此,选择一个适当的提取方法对多糖的后续研究、工业化生产及特色食品的开发是至关重要的。经不同提取方法得到的粗多糖中常含有单糖、低聚糖、蛋白、脂类及色素等杂质,因此需要去除这些影响多糖含量、活性和功效的干扰物质^[16]。同时,多糖本身是由多种均一组分聚合而成的大分子化合物。因此,其分离纯化过程首先需要将杂质尽可能地去除干净,再将混合多糖分离成不同的均一组分。目前为止白刺属植物多糖常用的提取方法有水提法、超声辅助提取法及酶法辅助提取等。

由于白刺果实颜色较深,在提取之前需要对其进行脱脂脱色处理。第一步将白刺果实晒干后磨成粉末,加入适当比例的石油醚或正己烷脱脂,可通过常温浸提法或索氏提取等方法脱脂。第二步再利用脱色方法,比如:氯仿与乙醇体积比 1:4 搅拌脱色或无水乙醇回流脱色等方法进行色素的去除,经脱脂脱色后的白刺粉末用于提取多糖。

有关白刺属植物多糖提取方法研究进展如表 1 所示,水提醇沉法是植物多糖最常用的提取方法之一,提取过程中提取温度、料液比、提取时间及次数均影响白刺多糖提取率及含量,尤其是提取温度的影响较大,若温度过低,导致溶液中多糖不能全部溶出,温度过高,将破坏多糖结构,影响生物活性;其次是提取时间。因此,需要通过工艺优化对白刺多糖的提取条件

表 1 白刺属植物多糖提取方法研究进展
Table 1 Research progress on the isolation of the polysaccharides from genus *Nitraria*

植物	部位	提取方法	考察方式	考察因素	提取条件	提取率/ %	参考文献
唐古特白刺	果实	水提	单因素+正交试验	温度、料液比、时间、提取次数	94 ℃、1:5(g/mL)、2 h、3 次	48.24	[18]
			单因素+响应面法	温度、料液比、时间	60 ℃、1:15(g/mL)、7 h	14.01	[19]
			单因素+响应面法	温度、料液比、时间	79 ℃、1:15(g/mL)、1.5 h	39.67	[17]
		酶法	单因素+响应面法	酶用量、pH 值、时间、温度	2.5%、pH 3、58 min、40 ℃	39.57	[17]
		微波+超声	单因素+正交试验	料液比、温度、时间、次数	微波功率 1 000 W、时间 5 min 超声: 1:5(g/mL)、95 ℃、1 h、3 次	33.87	[20]
西伯利亚白刺	果实	硫酸铵提取	-	-	水(温度 70 ℃、时间 3 h)和草酸铵(0.7% 硫酸铵、时间 5 h、温度 70 ℃)、连续提取	2.0	[21]
<i>Nitraria retusa</i>	果实	水提	-	-	温度 100 ℃、时间 2 h	8.65	[22]
	叶子	-	-	-	温度 100 ℃、时间 2 h、料液比 1:9(g/mL)	4.0	[23]

注:-表示无此项。

进行研究。除了传统热水提取法外,近年来也常使用一些辅助提取法,比如超声波、微波及酶解等辅助手段提取白刺多糖。马群^[17]通过不同型号的大孔树脂(AB-8、X-5、D101、NKA-9、XDA-6、HPD-100、HPD-100A、LS-305、HYA-508、LS-30)对酶解法制备的唐古特白刺多糖进行了脱色处理,选用 HPD-100A 型大孔树脂纯化白刺粗多糖的脱色率为 74.78%、脱蛋白率为 70.96%、多糖的回收率为 86.31%。今后可以利用此类大孔树脂来纯化白刺多糖,为提高其纯度提供便利。

综上,白刺属植物中唐古特白刺多糖提取率较高,同时白刺果实中多糖比其叶子丰富。

从表 1 可知,不同提取方法对白刺属植物多糖提取率的影响较大。从水提醇沉到微波、超声波辅助提取及纯化方法的筛选是为了提高多糖提取率及含量。虽然水提醇沉法所得的多糖提取率比微波、超声波等辅助提取高,但其所需时间较长、温度较高,且多糖含量较低。与传统热水提取法相比,辅助提取方法的使用可能会加快细胞壁结构的破坏速度,使白刺中的多糖类成分更快地通过细胞膜进入溶剂中。这些方法条件更温和,可避免因提取过程中温度过高而导致的多糖结构破坏,具有耗时少、无污染、高效率及减少多糖

空间结构破坏等特点。由于白刺多糖颜色较深,往往通过一些物理及化学手段对其进行脱色,众多方法中大孔树脂脱色效果较好,纯化后脱色率及多糖保留率等指标均较高。经脱色后的多糖通过离子交换、凝胶柱层析等现代分离手段纯化得到均一多糖,纯化后的白刺多糖含量较高,为研究其结构及生物活性等提供试验基础。

2 白刺多糖的结构鉴定

多糖的生物活性与其结构紧密相连,多糖的单糖组成、分子量、单糖链接方式、糖苷键及构型等均影响生物活性的强弱。因此,阐明多糖的结构特征和生物活性在研究其构效关系方面起重要作用,且此方面的研究已成为了当今碳水化合物领域的研究热点^[27-28]。不同品种的白刺多糖在其结构方面具有相似之处,同时也存在一定的差异。产地、地形及气候等因素对同属植物多糖结构的影响较大。预处理、提取、纯化方法及所用的溶剂等的不同均导致各多糖表现出不同的结构信息^[29-30]。本文对白刺多糖的结构特征进行系统概述,总结了白刺多糖结构表征的方法学研究进展,具体见表 2。

表 2 白刺属植物多糖结构研究进展
Table 2 Research progress on the structure of the polysaccharides from genus *Nitraria*

植物	含量/%			单糖组成(摩尔比)								参考文献
	多糖	蛋白	糖醛酸	Xyl	Man	Glc	GalA	GlcA	Gal	Ara	Rha	
西伯利亚白刺	53.30	20.47	15.84	1.50	2.90	28.71	11.94	0.94	23.25	23.29	6.29	[24]
	-	-	-	-	9.20	1	1.10	-	1.90	2.30	3.30	[25]
	-	4.3	62.5	0.10	0.20	0.50	-	-	3.60	19.90	3.10	[21]
唐古特白刺	98	1.90	2.60	-	3.90	70.60	3.30	0.20	7.60	13.10	1.80	[26]
	94.30	2.22	-	-	3.00	2.69	-	-	5.28	2.50	1.14	[19]
	51.18	0.88	21.09	-	3.0	7.0	9.5	3.7	73.0	50.6	14.5	[17]
<i>Nitraria retusa</i>	69.14	18.67	23.14	-	-	41.40	30.50	-	12.60	11.80	3.70	[22]
	59.70	17.28	17.97	3.79	-	13.34	15.03	2.83	18.05	13.30	33.66	[23]

注:-表示无。Xyl. 木糖;Man. 甘露糖;Glc. 葡萄糖;GalA. 半乳糖醛酸;GlcA. 葡萄糖醛酸;Gal. 半乳糖;Ara. 阿拉伯糖;Rha. 鼠李糖。

如表 2 所示,目标植物的种类及其多糖的提取分离方法对多糖含量、分子量及单糖组成等均有显著的差异。

目前,以唐古特白刺为原料对白刺多糖进行结构及生物活性研究较多。Zhao 等^[19]从唐古特白刺中分离得到了分子量为 229 kDa 酸性多糖,该多糖是含有 α -构型的吡喃多糖,主链由 (1-3)- β -Gal 组成,支链由 (1-3)-链接的 α -Man、 α -Ara 和 β -Gal (1/3) 和端基- α -Glc 组成。Ni 等^[26]从唐古特白刺中分离得到了鼠李半乳糖醛酸聚糖,其 Rha/GalUA 比例为 0.38,是 RG-I

型果胶类多糖;凝胶色谱分析说明该多糖可能含有 3 种不同分子量的组分,分子量分别为 >1 000 kDa、79.7 kDa 及 <10.0 kDa。同为唐古特白刺多糖,因纯化方法的不同,所得多糖在含量、单糖组成及分子量等方面均存在较大差异。马群^[17]对酶法提取制备的唐古特白刺多糖进行了羧甲基化修饰,得到了取代度为 0.36 的羧甲基化产物,红外特征吸收峰也证实羧甲基化的成功。羧甲基化前后多糖的含量均发生了显著性变化,单糖组成方面,Man、GlcA、GalA 及 Rha 等所占比例增加,而 Glc、Gal 及 Ara 等所占比例降低,羧甲基化虽然

对唐古特白刺多糖的单糖种类没有显著影响,但其中各个单糖的比例发生了明显的变化。分子量分布由原来的 74 359 Da~438 665 Da 降低为 11 459 Da~80 385 Da,可能是羧甲基化过程中多糖的降解导致的。同时,刚果红试验说明唐古特白刺多糖及羧甲基化修饰的唐古特白刺多糖均具有三螺旋结构。王凌云等^[21]对唐古特白刺粗多糖中的矿质元素进行了测定,结果得出,唐古特白刺粗多糖不仅含有较多的人体必需的常量元素(K、Ca 和 Na),而且还含有较多的人体必需微量元素(Fe、Zn 和 Mn),尤其以 Fe 的含量居高。

除了唐古特白刺外,还有少量有关西伯利亚白刺及 *Nitraria retusa* 多糖结构的研究报道。Golovchenko 等^[22]通过水及草酸铵连续提取,从西伯利亚白刺中分离了果胶类多糖,重均分子量为 556 kDa,数均分子量为 38 kDa、分散度为 14.6。然而,同作为白刺属果胶类多糖,西伯利亚白刺多糖的糖醛酸含量显著高于唐古特白刺多糖,中性单糖组成方面西伯利亚白刺多糖以 Ara 为主,而唐古特白刺多糖以 Glc 为主,且两者在分子量之间也相差较大^[26]。

Rjeibi 等^[22-23]分别研究了 *Nitraria retusa* 果实多糖及叶子多糖,得出不同部位的 *Nitraria retusa* 多糖在化学组成及结构等方面均存在差异。其中,果实多糖是含有 β -构型的吡喃多糖,由 1,3-链接的 Glcp (26.30%)、1,4-链接的 Galp (28.7%)、1,3,6-链接的 Glcp (10.2%)、端基 Galp (9.33%)、端基 Glcp (8.72%)以及 Araf (9.41%)和 Rhap (4.48%)组成,主链由 1,3-链接的-D-Glcp 葡聚糖以及 HGA、RG-I 等组成,属于果胶类多糖;重均分子量 66.50 kDa,数均分子量 56.20 kDa,分散度 1.18。除此,X-射线粉末衍射(X-ray diffraction, XRD)研究显示果实多糖在 15°、27.51°、32.12°、40.91°、46.58°及 56.54°处有明显的衍射峰,说明果实多糖中可能含有晶体结构。然而,其叶子多糖基本理化性质及结构等与果实多糖差距较大,叶子多糖是含有 α -构型的吡喃多糖,重均分子量 23.06 kDa,数均分子量 13.90 kDa,分散度 1.66;果实多糖的糖含量、蛋白含量、糖醛酸含量及分子量均高于叶子多糖,表明白刺果实是提取多糖的有效部位之一。

综上所述,有关白刺属植物多糖的研究正不断深入,但主要集中于其提取分离及结构初探;虽然 3 种不同品种的白刺属植物多糖在其化学组成、单糖含量、分子量及其它结构特征方面存在一定的差异,但也有一定的共同点。目前,有关唐古特白刺多糖的研究报道较多,但仍需进一步开展关于结构信息等的基础研究;同时,有关其糖链精细结构及化学结构修饰等方面的研

究尚处于初始阶段,仍需进行大量的基础试验深入的探究构效和量效关系,为白刺的综合利用奠定基础。

3 白刺多糖的生物活性

白刺属植物在民间药用历史悠久,有健脾胃、助消化、安神解表、下乳之功效;民间用于治疗脾胃虚弱、消化不良、神经衰弱、感冒等症。现代药理学研究已证实白刺属植物多糖具有多种生物活性,包括抗氧化、抗疲劳、免疫调节、抗衰老、降糖、降血脂、抗炎、镇痛、抗应激及保肝作用等。根据被研究的广泛性,下面将讨论 4 种主要的生物活性。

3.1 抗氧化活性

抗氧化是植物多糖最广泛的生物活性,病理状态下自由基活动会失去控制,在体内细胞内积存,使生物体受损伤^[32]。同时,市场上大部分抗氧化剂都是通过合成而来的,会引起肝损伤、癌症^[33]。因此,从天然植物中筛选清除体内自由基的天然抗氧化剂具有重要的实际意义。前期研究报道显示白刺属植物多糖具有广泛的体内外抗氧化活性。

唐古特白刺、西伯利亚白刺及 *Nitraria retusa* 果实多糖均具有较强的体外清除自由基能力^[19,22,24,34]。宋永朋^[20]体内抗氧化活性结果显示唐古特白刺多糖能够显著地提高小鼠血清超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活力、降低丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量。这表明唐古特白刺多糖通过调节体内抗氧化酶的活力显示出较强的抗氧化活性,是一种极具开发潜力的天然抗氧化剂。今后可对其它白刺属植物多糖进行体内抗氧化活性检测试验,进一步明确生物活性,从而提高相关领域中的应用。

3.2 免疫调节作用

研究发现多种植物多糖具有不同的免疫促进作用,是天然的免疫调节剂,具有促进机体免疫器官的生长、激活免疫细胞、补体系统及促进释放细胞因子等免疫功能^[35]。白刺属多糖的免疫调节功能是其生物学功能中研究较多的一个方面,尤其是唐古特白刺多糖。在动物水平上,西伯利亚白刺多糖能够显著增强小鼠腹腔巨噬细胞的 NO 分泌水平^[24]。唐古特白刺多糖能够显著提高环磷酰胺诱导的免疫受抑制小鼠的胸腺指数和脾脏指数及小鼠血清干扰素- γ (interferon- γ , IFN- γ)和白细胞介素-4(interleukin-4, IL-4)水平,改善 Th1/Th2 免疫平衡失衡状况,且经过羧甲基化修饰后,其免疫调节活性有所提高^[17],使小鼠脾脏组织中淋巴细胞数量增多,增强 IFN- γ mRNA 的表达,使参与细胞免疫的 CD3、CD4、CD8 及 NK(CD 49b)细胞数

量增加^[36]。同时,唐古特白刺粗多糖在 0.70 g/kg 的剂量下可以显著增强小鼠单核巨噬细胞吞噬功能,提高模型小鼠迟发型超敏反应,提高模型小鼠血清溶血素生成能力^[37]。因此,白刺属多糖具有一定的改善机体免疫功能的作用。

3.3 抗疲劳活性

疲劳可使机体出现疾病症状,导致机体发生内分泌紊乱、免疫力下降等。研究表明,白刺属植物提取物具有较好的抗疲劳活性^[38]。唐古特白刺多糖的抗疲劳活性可能是因其在运动过程中参与脂肪动员或者经调节酶活性来防止脂质氧化保护红细胞膜而实现的。宋永朋^[20]的体内抗疲劳活性实验表明唐古特白刺多糖能够延长小鼠游泳时间,提高其运动耐力;同时,能够降低小鼠血清中乳酸(lactic acid,LD)含量和尿素氮(blood urea nitrogen,BUN)浓度,增加肝糖原含量,从而达到延缓疲劳的效果。Ni等^[20]从唐古特白刺分离的多糖能够明显延长小鼠的游泳时间,并在一定程度上增加了肝脏/体重比例,降低脾脏/体重比例;血清生化指标结果表明其能够降低血清中BUN、甘油三酯(triacylglycerol,TG)、肌酸激酶(creatine kinase,CK)、乳酸脱氢酶(lactic dehydrogenase,LDH)及MDA水平,提高Glc、SOD和谷胱甘肽过氧化物酶(glutathion peroxidase,GSH-Px)水平。唐古特白刺的抗疲劳活性可能基于其提高小鼠抗氧化能力及改善免疫调节等功能,作用机制还需要进一步研究。

3.4 抗炎及镇痛活性

研究发现动植物多糖主要通过抑制趋化因子与黏附因子的表达、抑制炎症发展过程中的关键酶的活性调节各种细胞因子的生成,从而影响白细胞向炎症部位的募集、黏附以及渗出,发挥抗炎作用^[39]。敖亮等^[40]研究得出唐古特白刺叶提取物通过抑制肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α ,TNF- α)和白介素-6(interleukin-6,IL-6)起抗炎作用。*Nitraria retusa*叶子多糖通过改善角叉菜胶诱导小鼠的血清素、组胺、激肽、环氧合酶-2(cyclooxygenase-2,COX-2)及前列腺素(prostaglandin,PGE-2)的水平起到抗炎活性^[23];该研究结果表明*Nitraria retusa*叶子多糖的抗炎作用可能与其抑制组胺和PGE-2的合成以及COX-2的诱导等有关。

*Nitraria retusa*叶子多糖能够延长小鼠的响应时间,其可能通过中枢神经机制发挥镇痛作用;扭体法实验结果说明*Nitraria retusa*叶子多糖的镇痛作用可能与在化学刺激过程中各类因子的释放受阻有关。除此,

*Nitraria retusa*叶子多糖能显著抑制福尔马林所致的神经源性和炎症性疼痛,抑制率分别为60.0%和76.4%,证实了该生物活性多糖的中枢和外周镇痛作用^[23]。

除此之外,白刺属植物多糖通过延长小鼠在高温、低温及缺氧环境中的存活时间来显出抗应激活性^[20];通过抑制模型小鼠血清中的谷丙转氨酶和谷草转氨酶显出保肝作用^[20];通过降低血清总胆固醇(total cholesterol,TC)、甘油三酯(triacylglycerol,TG)及低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol,LDL-C)水平,提高高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol,HDL-C)水平,显出降血脂活性^[23],及降血糖^[23]、抗衰老^[41]等活性。

综上所述,白刺属植物多糖因具有上述多种生物活性及安全、高效和低毒等优势受到广泛的关注,但目前有关的深入研究主要集中在其免疫调节方面的作用,相对于其余的生物活性还处于初级研究阶段。历来,白刺属植物在中医药中常被用于治疗脾胃虚弱、消化不良、神经衰弱、感冒等。现代药理学试验研究证明其具有较好的抗炎、镇痛及改善机体免疫等功能,具有广泛的应用前景和开发价值。因此,需要通过大量的相关功能验证试验来更深入地探究白刺属植物多糖的药理活性。这将为以白刺属植物作为原料开发药物或保健品的研发提供参考。

4 讨论

4.1 提取分离与结构鉴定

白刺属植物富含各类活性成分,其中多糖是其主要活性成分之一。目前,多糖类化合物在抗病毒、抗肿瘤、糖尿病的治疗及机体免疫调节等方面显出较好的应用前景。至今,有关白刺属植物多糖的研究仅限于其提取分离、初级结构鉴定及生物活性等方面,分离得到的均一多糖较少。

目前,白刺属植物多糖提取分离研究主要集中在唐古特白刺方面,也取得了相关进展。唐古特白刺多糖按提取方法和条件的不同,产率在14.01%~48.24%。其中水提法所得多糖提取率较高,但含量较低;超声辅助等新型提取方法能够在更温和的条件下达到较好的提取效果。各类纯化方法中,大孔吸附树脂和柱层析的协同使用能够快速提高白刺多糖的纯度。因此,后期研究开发中利用已有的基础对其它品种的白刺多糖进行提取分离工艺优化,延伸整个产业链,促进白刺属植物多糖的进一步开发利用,才能保证这一宝贵资源的有效转化和提质增效。

有关上述3种白刺品种结构鉴定方面的研究主要集中于其初级结构的鉴定,包括含量、分子量及单糖组成等的测定,关于多糖中单糖重复单元的链接方式、构型等活性成分的精细结构尚未深入研究,构效关系尚未明确。近年来,结构修饰的多糖引起了广泛的青睐,多糖类化合物由于其分子量过大而未能顺利进入细胞,导致不能发挥活性;因此,可通过化学修饰的方法对其进行改性来提高其生物活性^[42]。化学结构修饰能够提高多糖的生物活性,甚至产生一些新的活性。常见的化学修饰法主要有硫酸化、磷酸化、羧甲基化及乙酰化等,也包括一些多糖-锌、多糖-铬、多糖-硒等多糖-金属络合物的制备、多糖纳米粒的制备及其结构鉴定等。羧甲基化修饰后的唐古特白刺多糖清除羟基、超氧阴离子自由基的能力和对环磷酸腺苷诱导免疫抑制小鼠的免疫改善功能均显著高于原多糖^[17]。同时,研究发现多种经结构修饰后的多糖显出多种生物活性,如经硫酸化修饰的青蒿多糖显出显著的体内外抗肿瘤活性^[43];经修饰后生物刺糖多糖聚乳酸-羟基乙酸共聚物[poly(lactic-co-glycolic acid, PLGA)]纳米粒显出较强的免疫增强活性^[44]。此外,与金属元素形成络合物后,在金属元素与多糖的双重作用之下多糖可能会显出更为显著的生物活性,如桑葚多糖-锌络合物显出更强的抗氧化及降血糖等活性^[45]。因此,从结构修饰角度去研究白刺属植物多糖,制备其各类衍生物并解析其结构将更有助于发现新的活性多糖。

4.2 生物活性

多糖的提取分离方式、含量及结构等与其生物活性的强弱息息相关。酸性多糖往往由于其较高的糖醛酸含量,生物活性比中性多糖强^[46]。白刺多糖含有较高的半乳糖醛酸。当前,白刺属多糖在抗氧化、免疫调节、抗疲劳及抗炎活性方面显出广阔的前景。其中,免疫调节活性比较显著,大量体内外实验证实白刺属植物多糖能够作用于多种免疫细胞、促进细胞分化与增殖、调节关键蛋白mRNA表达水平。免疫系统是人体抵抗疾病的第一道屏障,因此免疫调节剂在现代保健品行业中占有重要的地位。免疫调节剂不仅用于临床疾病的治疗,也被用作膳食补充剂在亚健康人群中使用^[47]。白刺属多糖因其具有多种较强的生物活性,在开发增强机体免疫功能的食品补充剂方面具有明显的优势。因此,今后需要通过细胞及动物水平探讨白刺属植物多糖的生物活性,在其临床应用与文献记载相结合的基础上发现并筛选出更多的药理活性,进一步探讨作用机制,筛选不同白刺属植物多糖的多种生物活性,并选出最佳品种,评价活性高低,验明其构效关系。

5 结论

综上,从白刺属植物中提取分离得到了多种不同的多糖组分,尤其是唐古特白刺果实多糖的研究较多,但对其他品种开展的相关结构和生物活性研究较少,这方面需要进一步研究,加大其资源有效利用率。同时,由于目前白刺多糖的研究仅限于唐古特白刺等的初级结构,而有关糖苷键连接方式、药理活性、构效关系及药效物质基础等方面还未深入,导致白刺属植物未能有效开发利用,因此白刺多糖研究方面存在较大空间。今后分别从不同品种、不同部位多糖的提取分离、结构鉴定、结构修饰及药理活性等方面进行深入的研究,阐明构效关系,进一步挖掘白刺多糖的药理作用,为现代多糖类保健食品或药物的开发奠定技术和理论基础,为提高白刺属整体植物多糖类化合物的有效开发提供依据。

参考文献:

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Editorial Board of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [2] 赵建强, 辛海量, 蒋益萍, 等. 唐古特白刺叶的化学成分研究[J]. 中草药, 2016, 47(7): 1090-1093.
ZHAO Jianqiang, XIN Hailiang, JIANG Yiping, et al. Chemical constituents from leaves of *Nitraria tangutorum*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(7): 1090-1093.
- [3] SENEJOUX F, GIRARD C, AISA H A, et al. Vasorelaxant and hypotensive effects of a hydroalcoholic extract from the fruits of *Nitraria sibirica* Pall. (Nitrariaceae)[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2012, 141(2): 629-634.
- [4] TURGHUN C, BAKRI M, ABUDULLA R, et al. UHPLC-MSn-assisted characterization of bioactive alkaloids extracted from *Nitraria sibirica* leaves and enriched using response surface method and adsorption on macroporous resin[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 125: 529-536.
- [5] 杨仁明, 索有瑞, 王洪伦. 唐古特白刺果实化学成分和功效作用研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(7): 985-989, 1005.
YANG Renming, SUO Yourui, WANG Honglun. Studies on chemical constituents and pharmacological effects of *Nitraria tangutorum* Bobr.fruit[J]. Natural Product Research and Development, 2012, 24(7): 985-989, 1005.
- [6] 耿庆祯, 都恕兴, 尚艳霞, 等. 西伯利亚白刺与唐古特白刺果实营养成分比较分析[J]. 食品科技, 2008, 33(3): 101-104.
GENG Qingzhen, DU Shuxing, SHANG Yanxia, et al. Compared analysis of the nourishment composition in the fruits of *Nitraria sibirica* pall. and *Nitraria tangutorum* bobr[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(3): 101-104.
- [7] 刘朋月, 许鹏飞, 宋辉, 等. 决明子多糖的研究进展[J]. 食品研究

- 与开发, 2020, 41(1): 201–206.
- LIU Pengyue, XU Pengfei, SONG Hui, et al. Research progress on semen cassiae polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 201–206.
- [8] 彭新, 牛乐, 周宁, 等. 山药多糖功能活性及新产品开发研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(17): 204–209.
- PENG Xin, NIU Le, ZHOU Ning, et al. Research progress in functional activity and new product development of Chinese yam polysaccharide[J]. Food Research and Development, 2020, 41(17): 204–209.
- [9] 鹿士峰, 田淑雨, 吴杨洋, 等. 香菇多糖不同提取方式的比较研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 81–87.
- LU Shifeng, TIAN Shuyu, WU Yangyang, et al. Comparative study on different extraction methods of *Lentinus edodes* polysaccharides [J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 81–87.
- [10] CHEN G J, FANG C C, RAN C X, et al. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 903–914.
- [11] YU Y, SHEN M Y, SONG Q Q, et al. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 183: 91–101.
- [12] YUE H, ZENG H, DING K. A review of isolation methods, structure features and bioactivities of polysaccharides from *Dendrobium* species[J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2020, 18(1): 1–27.
- [13] 董文南, 李克招, 张文婷, 等. 多糖降血糖作用及其机制研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(19): 219–225.
- DONG Wennan, LI Kezhao, ZHANG Wenting, et al. Progress in hypoglycemic effect and mechanism of polysaccharides[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, 25(19): 219–225.
- [14] 庞丹清, 阙祖亮, 陈勇, 等. 响应面法优化当归藤多糖提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(1): 22–25.
- PANG Danqing, QUE Zuliang, CHEN Yong, et al. Optimization in extraction process of polysaccharides from *Embelia parviflora* by response surface methodology and their antioxidant activities [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2019, 30(1): 22–25.
- [15] YUAN Q, LIN S, FU Y, et al. Effects of extraction methods on the physicochemical characteristics and biological activities of polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus*)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 127: 178–186.
- [16] SHI L. Bioactivities, isolation and purification methods of polysaccharides from natural products: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 37–48.
- [17] 马群. 唐古特白刺多糖提取、修饰及免疫活性研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018: 14–52.
- MA Qun. Extraction, modification and immunity activity of polysaccharide from *Nitraria tangutorum* bobr[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018: 14–52.
- [18] 王凌云, 丁晨旭, 王洪伦, 等. 唐古特白刺果实多糖的提取工艺研究[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 233–236.
- WANG Lingyun, DING Chenxu, WANG Honglun, et al. Extraction process of polysaccharide from *Nitraria tangutorum* bobr[J]. Food Science, 2008, 29(3): 233–236.
- [19] ZHAO B T, LIU J, CHEN X, et al. Purification, structure and anti-oxidation of polysaccharides from the fruit of *Nitraria tangutorum* Bobr[J]. RSC Advances, 2018, 8(21): 11731–11743.
- [20] 宋永朋. 唐古特白刺果实多糖的提取及其药理活性研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2015: 24–49.
- SONG Yongpeng. The polysaccharide extract and pharmacological activity study of *Nitraria tangutorum* bobr fruit[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2015: 24–49.
- [21] GOLOVCHENKO V V, KHRAMOVA D S, SHASHKOV A S, et al. Structural characterisation of the polysaccharides from endemic Mongolian desert plants and their effect on the intestinal absorption of ovalbumin[J]. Carbohydrate Research, 2012, 356: 265–272.
- [22] RJEIBI I, FERIANI A, HENTATI F, et al. Structural characterization of water-soluble polysaccharides from *Nitraria retusa* fruits and their antioxidant and hypolipidemic activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 422–432.
- [23] RJEIBI I, HENTATI F, FERIANI A, et al. Novel antioxidant, anti- α -amylase, anti-inflammatory and antinociceptive water-soluble polysaccharides from the aerial part of *Nitraria retusa*[J]. Foods, 2019, 9(1): 28.
- [24] 张庆琳, 高慧琴, 凌丽君, 等. 青海产三种特色果实多糖及其活性比较[J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29(1): 34–39.
- ZHANG Qinglin, GAO Huiqin, LING Lijun, et al. Crude polysaccharides extracted from three characteristic plants in Qinghai Province and their activities[J]. Natural Product Research and Development, 2017, 29(1): 34–39.
- [25] 张玲, 吉爽爽, 王苏, 等. 白刺果实水溶性多糖的单糖组成研究[J]. 食品工业, 2013, 34(11): 170–172.
- ZHANG Ling, JI Shuangshuang, WANG Su, et al. Study of monosaccharide composition of *Nitraria* fruit water soluble polysaccharide[J]. The Food Industry, 2013, 34(11): 170–172.
- [26] NI W H, GAO T T, WANG H L, et al. Anti-fatigue activity of polysaccharides from the fruits of four Tibetan Plateau indigenous medicinal plants[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2013, 150(2): 529–535.
- [27] XU Y, WU Y J, SUN P L, et al. Chemically modified polysaccharides: Synthesis, characterization, structure activity relationships of action[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 970–977.
- [28] ZHONG R T, WAM X Z, WANG D Y, et al. Polysaccharides from marine enteromorpha: structure and function [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 11–20.
- [29] ROZI P, ABUDUWAILI A, MUTAILIFU P, et al. Sequential extraction, characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Fritillaria pallidiflora* Schrenk[J]. International Journal of Bio-

- logical Macromolecules, 2019, 131: 97–106.
- [30] SHANG H M, CHEN S L, LI R, et al. Influences of extraction methods on physicochemical characteristics and activities of *Astragalus cicer* L. polysaccharides[J]. Process Biochemistry, 2018, 73: 220–227.
- [31] 王凌云, 索有瑞. 唐古特白刺粗多糖矿质元素分析[J]. 食品工业, 2015, 36(2): 253–255.
- WANG Lingyun, SUO Yourui. Analysis of mineral elements in crude polysaccharides from *Nitraria tangutorum* bobr[J]. The Food Industry, 2015, 36(2): 253–255.
- [32] SUN Y J, HOU S T, SONG S, et al. Impact of acidic, water and alkaline extraction on structural features, antioxidant activities of *Laminaria japonica* polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 985–995.
- [33] 张占军, 王富花, 曾晓雄. 薤白多糖体外抗氧化活性及其对小鼠急性肝损伤的保护作用研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 1–6.
- ZHANG Zhanjun, WANG Fuhua, ZENG Xiaoxiong. *In vitro* antioxidant activities and hepatoprotective effects of polysaccharides from *Allium macrostemon bunge*[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 1–6.
- [34] 谢瑞, 魏艳霞, 丁玉竹, 等. 不同处理方法对白刺多糖抗氧化活性的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(1): 41–45, 130.
- XIE Rui, WEI Yanxia, DING Yuzhu, et al. Effects of different processing methods on the antioxidant activity of polysaccharide from *Nitraria sibirica* pall[J]. Natural Product Research and Development, 2016, 28(1): 41–45, 130.
- [35] 吴梦琪, 夏玮, 徐志珍, 等. 植物多糖的分离纯化、结构解析及生物活性研究进展[J]. 化学世界, 2019, 60(11): 737–747.
- WU Mengqi, XIA Wei, XU Zhizhen, et al. Review on isolation and purification, structural elucidation and biological activity of botanical polysaccharides[J]. Chemical World, 2019, 60(11): 737–747.
- [36] 秀仁杰, 索有瑞, 耿排力. 唐古特白刺果多糖对免疫受抑小鼠 IFN- γ 及 T/NK 细胞亚群的影响 [J]. 青海医学院学报, 2015, 36(3): 176–182.
- XIU Renjie, SUO Yourui, GENG Paili. Effect of *Nitraria tangutorum* bobr polysaccharide on ifn- γ and t / nk subsets in immunosuppressed mice[J]. Journal of Qinghai Medical College, 2015, 36(3): 176–182.
- [37] 王凌云. 柴达木唐古特白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)活性多糖的研究[D]. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2009: 1–16.
- WANG Lingyun. Study on active polysaccharide of *Nitraria tangutorum* Bobr. in Chaidam[D]. Xining: Northwest Institute of Plateau Biology Chinese Academy of Sciences, 2009: 1–16.
- [38] 苏琳, 张建秋, 张玉玲, 等. 西伯利亚白刺果实活性物质研究进展概述[J]. 生物技术世界, 2014, 11(12): 123.
- SU Lin, ZHANG Jianqiu, ZHANG Yuling, et al. Advances in bioactive substances from *Nitraria sibirica* fruit[J]. Biotech World, 2014, 11(12): 123.
- [39] 关欣, 刘玮, 姚文兵. 抗炎多糖研究进展 [J]. 药学与临床研究, 2012, 20(4): 335–338.
- GUAN Xin, LIU Wei, YAO Wenbing. Research progress on anti-inflammatory activities of polysaccharides[J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2012, 20(4): 335–338.
- [40] 敖亮, 李静, 刘宇宏. 唐古特白刺叶化学成分及其抗炎活性研究[J]. 中国现代中药, 2018, 20(2): 169–172.
- AO Liang, LI Jing, LIU Yuhong. Study on chemical components from leaves of *Nitraria tangutorum* and its anti-inflammatory bioactivity[J]. Modern Chinese Medicine, 2018, 20(2): 169–172.
- [41] 杨艳. 补充白刺多糖联合有氧运动对衰老大鼠心肌和骨骼肌的保护作用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(9): 11–16.
- YANG Yan. On protective effect of supplement of polysaccharides from *Nitraria tangutorum* Bobr on myocardium and skeletal muscle during incremental aerobic exercise in aging rats[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2016, 41(9): 11–16.
- [42] HUANG S Y, CHEN F, CHENG H, et al. Modification and application of polysaccharide from traditional Chinese medicine such as *Dendrobium officinale*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 385–393.
- [43] WANG J L, BAO A J, WANG Q, et al. Sulfation can enhance antitumor activities of *Artemisia sphaerocephala* polysaccharide *in vitro* and *vivo*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 502–511.
- [44] WUSIMAN A, XU S W, NI H Y, et al. Immunomodulatory effects of *Alhagi* honey polysaccharides encapsulated into PLGA nanoparticles[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 211: 217–226.
- [45] WANG P P, HUANG Q, CHEN C, et al. The chemical structure and biological activities of a novel polysaccharide obtained from *Fructus Mori* and its zinc derivative[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 54: 64–73.
- [46] ZHANG B R, LI Y Y, ZHANG F M, et al. Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 1342–1347.
- [47] HUANG L X, SHEN M Y, MORRIS G A, et al. Sulfated polysaccharides: Immunomodulation and signaling mechanisms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 92: 1–11.

加工编辑:冯娜

收稿日期:2020-09-21