

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90114

仙人掌多糖提取、纯化、结构表征及生物活性研究进展

Research progress on extraction, purification, analysis and biological activity of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw.

杨 艳¹ 周 欣^{1,2} 陈华国^{1,2}

YANG Yan¹ ZHOU Xin^{1,2} CHEN Hua-guo^{1,2}

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州师范大学贵州省药物质量控制及评价技术工程实验室, 贵州 贵阳 550001)

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. Guizhou Engineering Laboratory for Quality Control & Evaluation Technology of Medicine, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

摘要:文章对仙人掌多糖提取、纯化、结构表征及生物活性等方面的研究情况进行了综述,并对其未来发展方向进行了展望。

关键词:仙人掌;多糖;提取;纯化;结构表征;生物活性

Abstract: In this review, the extraction, purification, structural characterization and bioactivity of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw. were summarized. This review provides a theoretical basis for the in-depth development and utilization of the polysaccharides.

Keywords: *Opuntia dillenii* Haw.; polysaccharide; extraction; purification; structural characterization; biological activity

仙人掌(*Opuntia dillenii* Haw.)是仙人掌科缩刺仙人掌的变种,具有行气活血、清热解毒、消肿止痛、健脾止泻、安神利尿等功效,是一种药食两用植物^[1-2]。仙人掌含有多种化学物质,如生物碱、黄酮类、多糖、酚类、微量元素等^[3],其中多糖作为仙人掌的主要活性成分之一,可从仙人掌茎和果实中获取。根据提取方法不同,仙人掌多糖得率会有差异。近年来,仙人掌多糖因具有免疫调节、抗氧化、抗炎、保肝、抗肿瘤、降血脂血糖等生物活性备受科技工作者的关注。文章拟对仙人掌多糖提取、纯化、结构表征及生物活性等方面的研究情况进行综述,以期为其

其深度开发与利用提供依据。

1 仙人掌多糖的提取与分离纯化

多糖是一类大分子物质,具有良好的生物活性,且无明显毒副作用,因而具备良好的开发利用潜质,是新型保健食品和医药产品的潜在优质原料源^[4]。仙人掌多糖提取方法主要有热水法^[5]、酸法^[6]、酶法^[7]、超声波法^[8]、微波辅助法^[9]、微生物法^[10]等,各类提取方法的得率和优缺点见表 1。热水法与酸法的提取原理相似,通过热水或者酸性溶液使细胞壁破裂,释放多糖^[14]。焦伟艳等^[15]采用热水法浸提野生仙人掌多糖成分,冷冻干燥后多糖得率为 6.61%。酶法、超声波法及微波辅助法分别是通过酶破坏细胞壁和细胞膜、超声波破壁及微波加热破壁的原理提取仙人掌多糖^[16]。

通过表 1 中方法提取的仙人掌粗多糖中常含蛋白质、色素及小分子物质等杂质,需对其分别除去。仙人掌粗多糖中的蛋白常用 Sevag 法(氯仿-正丁醇)、三氯乙酸法、酶法、等电点法等除去^[17]。三氯乙酸法是仙人掌粗多糖中最常用的提取方法,具有效率高、用量少等优点,但高浓度的三氯乙酸会加快多糖的降解,破坏其结构,因此一般选择质量浓度为 3%~5% 比较合适。当使用 3% 的三氯乙酸时,多糖损失率仅为 5.98%;Sevag 法虽成本低、适用范围广,但需要重复多次才能除去多糖中的蛋白质,随着次数的增加多糖损失率也随之增加,处理 7 次多糖损失率高达 36.92%,此时蛋白仅除去了 58.30%,且氯仿有毒,溶剂残留物可能会造成多糖活性的下降;与前两种方法相比,等电点法反应条件较温和,当 pH 3.5 时多糖

基金项目:贵州省高层次创新人才培养项目(编号:黔科合人才[2015]4033 号)

作者简介:杨艳,女,贵州师范大学在读硕士研究生。

通信作者:陈华国(1981—),男,贵州师范大学教授,博士。

E-mail: chenhuaguo1981@163.com

收稿日期:2021-10-23

表 1 仙人掌多糖不同提取方法及其优缺点

Table 1 Different extraction methods of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharides and their advantages and disadvantages

提取方法	得率/%	提取条件	优点	缺点	参考文献
热水法	27.36	料液比 1 : 11.14 (g/mL), 提取时间 63.7 min, 提取温度 85 ℃	方便、经济	耗时、高温	[11]
酸法	39.90	料液比 1 : 20 (g/mL), 提取时间 2 h, 提取温度 70 ℃	能耗低、高效	引入杂质	[12]
酶法	20.08	果胶酶 0.7%, 纤维素酶 0.3%, 提取时间 2 h, 提取温度 40 ℃	条件温和、高效	纯度低	[7]
超声波法	27.98	料液比 1 : 40 (g/mL), 时间 25 min, 超声功率 70 W, 超声温度 50 ℃	操作简单、节能	破坏结构	[13]
微波辅助法	6.90	料液比 1 : 20 (g/mL), 微波时间 4 min, 微波功率 640 W	渗透力强、高选择性	设备昂贵	[9]
微生物法	0.53	料液比 1 : 25 (g/mL), 提取时间 48 h, pH 5	条件温和、能耗少	耗时	[10]

损失率仅为 1.67%，但仙人掌多糖的抗氧化活性却不及 Sevag 法和三氯乙酸法^[18]。相较其他 3 种方法，酶法虽然耗时，但其作用条件温和，不易破坏多糖活性，无有机试剂造成的危害，且随着酶浓度的增加，多糖损失变化不大^[19]，是一种较为理想的脱蛋白手段。仙人掌粗多糖脱色素一般可用双氧水脱色法和树脂脱色法，而不用活性炭，因为活性炭不仅吸附色素也会吸附多糖^[20]；石油醚一般用于脱脂，但也可除去部分色素；利用树脂可以除去仙人掌粗多糖中的色素，主要是因为其具有较强的吸附力，且多糖损失较少^[21]。

为了能够更准确分析仙人掌多糖的分子量、单糖组成及糖苷键构型等信息，在上述纯化的基础上需对仙人掌粗多糖进一步分离纯化，以获得均一多糖。通常情况下，仙人掌多糖可用离子交换层析法和凝胶层析分离法获取均一多糖。离子交换层析法主要是以 DEAE-52、DEAE-Sephacrose Fast Flow、DEAE-Sephacrose A-25 等为固定相，NaOH 溶液或者 NaCl 溶液为流动相，按 1 mL/min 的流速进行洗脱，使仙人掌多糖溶液中残留的蛋白、色素等杂质与多糖溶液分离，获得纯度较高的仙人掌多糖^[22]；凝胶层析分离法是以 SephadexG-75、SephadexG-100、SephadexG-

200、Sephadex S-400 等为固定相，NaOH 溶液或者 NaCl 溶液为流动相，18 mL/h 进行洗脱，使多糖大分子与无机盐等小分子进行分离，得到纯度更高的仙人掌多糖。朱苗^[17]采用水提法获得野生仙人掌粗多糖，通过 DEAE-Sephacrose Fast Flow(2.5 cm×30 cm)的离子交换层析柱，利用 NaCl 溶液进行连续梯度洗脱和分布洗脱的方式，得到多糖纯度高的仙人掌多糖溶液，浓缩，醇沉，沉淀冷冻干燥，得到多糖组分 ODP-II；ODP-II 溶液通过 Sephadex S-400(1.6 cm×100 cm)凝胶层析柱，0.05 mol/L NaCl 溶液分步洗脱后，得到分子量均一的多糖。林爱琴等^[23]将已脱蛋白的多糖溶液过 DEAE-Sephacrose A-25 柱(1.5 cm×30 cm)，采用 0.1 mol/L NaCl 溶液等度洗脱后再进行梯度洗脱，得到 OP_A、OP_B 两个级分，将其透析、醇沉后，沉淀经过无水乙醇和丙酮洗涤，干燥，得到纯度为 92.20% 和 86.91% 的 OP_A、OP_B 两个多糖组分。陶美华等^[24]将仙人掌粗多糖溶液先经过离子交换柱分离后，又利用 SephadexG-75、SephadexG-200 凝胶滤过柱再次分离，得到 ODP1、ODP2、ODP3、ODP4、ODP5 5 个多糖组分，通过醋酸纤维薄膜电泳法对其进行鉴定，发现电泳结果均为单一区带。仙人掌多糖提取与分离纯化的基本思路与流程图见图 1。

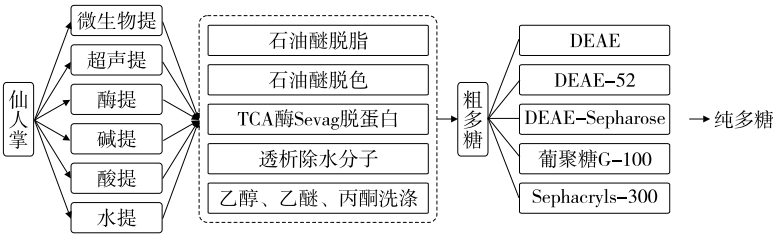


图 1 仙人掌多糖的提取纯化

Figure 1 Extraction and purification of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharides

2 仙人掌多糖的结构表征

多糖结构分为初级结构和高级结构,初级结构主要关注主链和支链的组成,而高级结构则涉及主链间的构象及多糖间非共价键作用^[25-26]等。目前,由于受分析手段与技术的限制,仙人掌多糖结构表征主要是从初级结构方面开展相关研究,即从总糖含量、杂质测定、分子量大小及分布、单糖组成及摩尔比、糖苷键类型等角度展开。涉及的方法和技术主要包括红外光谱(IR)、核磁共振波谱(NMR)、高效液相色谱(HPLC)、气相色谱(GC)、气相色谱-质谱(GC-MS)、甲基化分析、完全酸水解、部分酸水解和 Smith 降解^[27-28]等。高级结构主要涉及超分子结构、在溶液中构象、网状结构等方面,测定方法主要有 X 射线衍射法、荧光相关光谱、分子模型的构建、原子力显微镜法^[29-30]等。目前,关于仙人掌多糖高级结构的研究鲜有报道,为了更好、更全面地发挥仙人掌多糖的潜在价值,后续可对其进一步深入探讨。

2.1 含量测定

目前,多糖含量测定方法主要有蒽酮-硫酸法、苯酚-硫酸法、比色量法、原子吸收法、HPLC 法、酶法、DNS(还原)法、离子交换色谱法^[31]等。苯酚-硫酸法和蒽酮-硫酸法具有操作简单、检测速度快等特点,被广泛应用于各种研究中^[32-33]。何火聪等^[34]研究表明,苯酚-硫酸法的稳定性、精密性及回收率均高于蒽酮-硫酸法,是测定仙人掌多糖含量的理想方法,但苯酚易氧化,操作时应快速且避光保存。赵龙岩等^[8]采用双酶法提取仙人掌多糖,苯酚-硫酸法测定多糖含量,为 83.02%。Wu 等^[35]对热水法提取的仙人掌多糖除蛋白后,利用 5 000 Da 滤膜对仙人掌粗多糖进行过滤,苯酚-硫酸法测得其总糖含量为 91.46%。

2.2 杂质测定

仙人掌多糖常含有蛋白质、多酚、氨基酸、多肽、低聚糖、色素、生物碱、核酸等杂质,不仅对其质量和纯度有影响,还会影响后续的纯化、结构测定及生物活性。多糖中蛋白质含量一般可采用考马斯亮蓝 G-250 法和紫外检测法进行定量和定性测定,朱苗^[17]采用离子柱层析法除去仙人掌粗多糖中蛋白质后,经 SephacrylS-400 凝胶柱后,得到分子量均一的 ODP-II a 和 ODP-II b 两个多糖组分,且 260,280 nm 处均无特征峰出现,说明不含氨基酸、蛋白质、多肽等杂质。多酚作为仙人掌的主要活性成分之一,常采用溶剂提取法获得,仙人掌多糖提取过程中,石油醚脱脂时可除去大部分色素和多酚类物质,剩余部分多酚类物质可用分光光度法对其测定;严赞开^[36]采用分光光度法测得仙人掌中多酚含量为 71 mg/kg,目前,有关仙人掌多糖中多酚含量的测定尚未见报道;张郁松^[37]利用活性炭、Sevag 法、透析对仙人掌粗多糖中的色素、蛋白

质及小分子物质进行处理,经淀粉试验、双缩脲试验、茚三酮试验后发现,该样品中不含淀粉、多肽、氨基酸等杂质,含少量蛋白质,通过生物碱鉴定和甾体化合物鉴定后,发现不含生物碱和甾体化合物。陶美华等^[38]对仙人掌粗多糖进行杂质定性和定量测定,其蛋白质含量为 9.86%,核酸含量为 7.35%。

2.3 分子量测定

目前,测定多糖分子量的方法主要有 HPLC、高效凝胶色谱法(HPGPC)、高效凝胶过滤色谱法(HPGFC)、聚丙烯酰胺凝胶电泳法、超滤截留法^[39]等。金鑫等^[40]利用 SephacrylS-400 柱对水提仙人掌粗多糖进行纯化后,通过 HPGPC 测定其相对分子量为 1.25×10^5 Da;郭燕娇等^[41]采用 DEAE-纤维素离子交换层析柱对水提醇沉的多糖溶液进行分离纯化,得到 OPS-1、OPS-2、OPS-3 3 个多糖组分,经 HPGFC 检测到分子量分别为 1.25×10^5 , 1.98×10^5 , 4.31×10^4 Da;林爱琴等^[23]通过 DEAE-SephadexA-25 分离得到两个级分 OP_A、OP_B,经高效液相色谱和聚丙烯酰胺凝胶电泳发现两个级分均为单一组分,且分子量分别为 3.64×10^5 , 1.68×10^5 Da;Cai 等^[42]利用离子交换层析柱和凝胶层析柱分离纯化得到 3 个多糖组分,经 HPGFC 检测到 WSP-1、WSP-2a、WSP-3 重均分子量分别为 2.32×10^6 , 1.24×10^6 , 7.92×10^6 Da。

2.4 单糖组成及摩尔比

单糖组成常用的测定方法有 HPLC、GC、毛细管电泳法等;其中 GC 和 HPLC 是确定单糖组成和含量最有效的方法^[43]。仙人掌多糖主要由阿拉伯糖、木糖、甘露糖、果糖、葡萄糖、糖醛酸及鼠李糖等聚合而成^[42,44]。郭燕娇等^[41]通过 DEAE-纤维素柱分离仙人掌粉末得到 OPS-1、OPS-2、OPS-3 3 个多糖组分,其中 OPS-1 主要由葡萄糖、木糖、阿拉伯糖组成,其比例为 1.5 : 12.9 : 1.0;OPS-2 由甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、木糖、阿拉伯糖、葡萄糖组成,比例为 1.0 : 15.6 : 1.0 : 2.4 : 8.2 : 41.6 : 36.3;OPS-3 由葡萄糖、鼠李糖、木糖、阿拉伯糖组成,比例为 1.0 : 2.4 : 1.4 : 1.4。赵倩^[45]通过热水浸提法提取梨果仙人掌茎粗多糖,经 HPLC 发现梨果仙人掌多糖主要由葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖、鼠李糖、半乳糖醛酸、岩藻糖、甘露糖、葡萄糖醛酸、核糖、甘露糖醛酸、氨基葡萄糖、半乳糖胺、木糖组成。

2.5 结构测定

与其他植物多糖的测定类似,仙人掌多糖水解衍生化后,可利用 HPLC、UV、IR、GC-MS、¹H-NMR、原子力显微镜(AFM)等现代科学技术^[46],对其单糖组成、糖苷键构型及连接方式等结构进行表征。郭燕娇等^[41]发现仙人掌多糖的单糖组成和分子量受产地、提取方法以及纯化柱料影响,但通过 PMP 柱前衍生化、HPLC 法后,不同组分的仙人掌多糖中均含有葡萄糖、木糖、阿拉伯糖 3 种

单糖。朱苗^[17]将分离纯化后的仙人掌多糖-II a 进行碘—碘化钾反应,发现仙人掌多糖中分支少且侧链较短,刚果红试验表明,仙人掌多糖-II a 不具有三螺旋结构。Xlsabc 等^[30]通过 IR、NMR 及 GC-MS 等仪器分析,得到 WSP2a 的糖苷键构型主要是 β 型,单糖中以 1→2 或 1→4 键的糖基较多,鼠李糖则以 1→3 糖基存在,通过 AFM 观察到仙人掌粗多糖呈聚焦状态,部分呈丝网状,且具有良好的成膜性能。目前,针对仙人掌多糖结构表征的相关研究不多,但整体而言,多糖结构的测定仍处于探索阶段,手段还不够成熟,存在诸多不足,如多糖自身分子量较大,紫外吸收困难,纯化后缺乏定性定量分析的对照品等,这在一定程度上限制了仙人掌多糖的开发与利用。

3 仙人掌多糖的生物活性

近年来,多糖在食品、医药、农业和化妆品行业的发展中有着重要的应用前景。仙人掌作为一种可食用和药用的植物,其多糖成分具有多种重要的药用和食用价值。目前,对其关注的焦点主要在免疫调节^[47-48]、抗氧化^[11,49]、降血糖^[50]、降血脂^[51]、抗肿瘤^[52]、抑菌^[10]、抗炎^[53]及保肝^[54]等方面。由于受当前提取技术的限制,仙

人掌多糖纯度不高,即使是通过不同技术手段纯化后仍有少量杂质存在,这类杂质的存在是否影响仙人掌多糖的生物活性尚不明确。仙人掌多糖生物活性及其作用机制见图 2。

3.1 免疫调节作用

仙人掌多糖可以通过提高胸腺指数、脾脏指数和淋巴细胞转化率来增强免疫功能^[47],李恒等^[48]以 RAW264.7 细胞为研究对象,对 TLR4-My88 信号通路进行研究发现,仙人掌多糖可以促进 TLR4 高表达,活化 TRAF6、IKKb、MyD88 蛋白因子的表达,从而增强机体免疫力。张松莲等^[55]通过对糖尿病小鼠灌胃野生仙人掌多糖发现,野生仙人掌多糖能够通过减少小鼠血清 NO 含量,提高 IgM、IgG 含量和促进 T、B 淋巴细胞增殖,避免胰岛 β 细胞损伤,使 CD4+/CD8+T 细胞恢复正常比值,从而提高糖尿病小鼠免疫力。Schepetkin 等^[56]发现,多刺仙人掌多糖不仅无细胞毒性,还能激活巨噬细胞,将多刺仙人掌多糖作用于小鼠和人单核/巨噬细胞后,细胞活化产生的 TNF- α 和 iNOS 可进一步激活 NF- κ B 通路,通过激活 NO、活性氧及 NF- κ B,从而增强免疫能力。

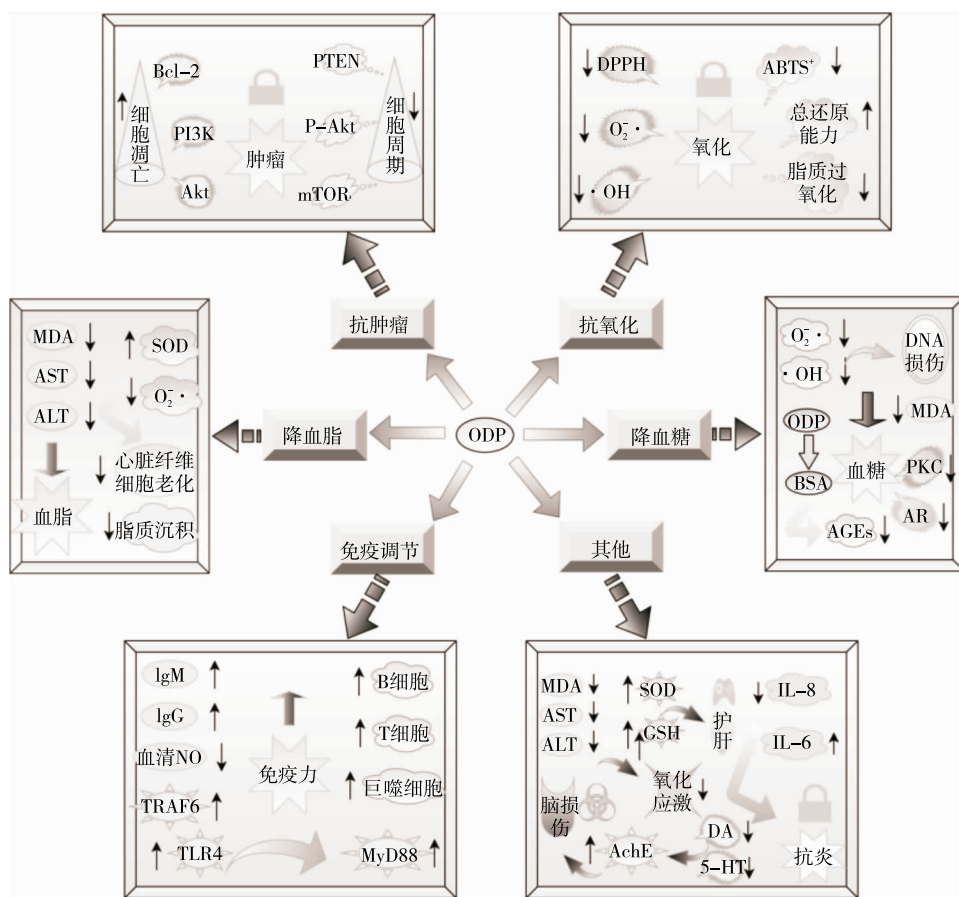


图 2 仙人掌多糖生物活性及其作用机制

Figure 2 Bioactivity and mechanism of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide

Zhao 等^[57]通过免疫抑制小鼠模型发现仙人掌多糖是一种良好的免疫调节剂,可以促进 IgM、IgG 的生成和降低 CD4⁺/CD8⁺ 的比值,使 T、B 淋巴细胞增殖能力恢复正常,增强小鼠的特异性免疫能力。

3.2 抗氧化作用

生物体代谢过程中会产生各种氧自由基,过多的氧自由基及其诱导的氧化反应会损害各个组织器官,诱导糖尿病、阿尔茨海默病和心脏病等疾病产生^[58-59]。目前,大部分抗氧化剂都是合成的,具有潜在的副作用,仙人掌多糖作为一种天然抗氧化剂,毒副作用小,深受研究者的欢迎。Yang 等^[11]利用 DPPH 法评价不同纯度仙人掌多糖的抗氧化能力,随着多糖纯度从 27.36% 增加到 90.12%,其 IC₅₀ 值显著下降,说明仙人掌多糖具有显著的抗 DPPH 自由基能力。Li 等^[49]证实了仙人掌多糖不仅可以显著清除 DPPH 自由基,对超氧阴离子自由基和羟自由基的清除效果也非常显著,且呈剂量关系。徐丛玥等^[60]对酶提取法、热水提取法及超声波提取法得到的仙人掌多糖进行体外抗氧化试验发现,不同提取方法间抗氧化能力差异较大,其中酶提取法的粗多糖得率为 10.14%,是超声波提取法和热水提取法的 5 倍;其抗肝组织自发性脂质过氧化能力、清除羟基自由基能力、清除超氧阴离子能力、清除 DPPH 自由基能力、总还原能力、总抗氧化能力均高于后两种方法,可能是不同提取方法获得的仙人掌多糖的单糖组成和结构存在差异性,导致多糖结构发生变化,进而影响其活性作用。

3.3 降血糖作用

糖尿病是现代社会最常见的代谢性疾病之一。中国糖尿病的预防及控制状况仍较为严峻^[61],用于治疗糖尿病的药物不仅昂贵还有潜在的副作用。近年来,许多天然植物源药物由于毒副作用小被广泛用于糖尿病的治疗中^[62]。马东升等^[60]以 2 型糖尿病大鼠为试验对象,灌胃仙人掌多糖后,大鼠摄食量和饮水量显著减少,随着多糖浓度增加,其体重与其他组存在显著性差异,通过对肝脏系数测定后发现,大鼠肝糖原分解代谢增加,肝脏系数相对减低,说明仙人掌多糖可能通过改善肠道的菌落生态环境,延迟肠道对碳水化合物的吸收和利用,从而显著降低糖尿病大鼠的血糖。Gao 等^[63]利用链脲佐菌素(STZ)诱导糖尿病小鼠,仙人掌多糖干预后,活性氧清除能力和抗氧化酶活性显著提高,保护肝组织免受过氧化损伤,显著控制小鼠的血糖和血脂水平。Li 等^[64]发现仙人掌多糖可以通过上调 Nrf2 及其下游蛋白的表达,降低氧化应激,使 INS-1 细胞活力和 SOD、GSH 活性显著恢复,乳酸脱氢酶(LDH)释放量和活性氧(ROS)、NO、MDA 水平显著降低,阻止了 β 细胞凋亡,有效预防与糖尿病相关的氧化应激。综上,仙人掌多糖是一种潜在的预防和治疗高血糖的天然药物源和功能食品。

3.4 降血脂作用

高血脂是人体内脂质代谢失常,血浆中某些脂质成分异常升高的一种疾病,严重可引起高血压、冠心病、脑血管病等^[65]。目前,西药已成为治疗高血脂疾病的常用药物,这些药物短时间内会有良好的治疗效果,但长期服用会出现抗药性、毒副作用等。而传统中草药却很少存在这样的问题,且在治疗高血脂症方面已有一定成就。Zhao 等^[51]对高血脂大鼠灌胃不同剂量的仙人掌多糖,当剂量为 400 mg/kg 时,抗氧化酶的活性显著提高,MDA 含量显著降低,可调节胆固醇酰基转移酶(LCAT)和 HMG-CoA 还原酶活性使胆固醇降低,大鼠肝脏总胆固醇(TC)和甘油三酯(TG)水平显著降低,推测仙人掌多糖降低大鼠血脂主要是通过提高抗氧化酶和还原酶的作用实现的。李莉梅等^[43]发现仙人掌多糖降血脂的机制可能是通过抑制 3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶(HMG-CoA 还原酶)活性,减少机体对脂类的吸收和脂质过氧化,从而达到降血脂作用。目前,针对仙人掌多糖降血脂的作用机制处于试验阶段,随着对仙人掌多糖结构的深入研究,可更深入研究其降血脂机理,拓展其应用领域。

3.5 抗肿瘤作用

目前,癌症的治疗主要通过手术和放射性治疗两种手段,这严重损害人体健康。天然药物因毒副作用小成为治疗肿瘤的研究热点,不同种类科属植物的抗肿瘤机制具有多面性,不同种属之间无显著差异^[66]。仙人掌作为天然药物历史悠久,其多糖对肿瘤具有较好的活性。殷姿等^[52]将仙人掌多糖对卵巢癌大鼠进行干预后,Bcl-2、PI3K、Akt、PTEN、p-Akt、mTOR 表达明显受到调控,当多糖剂量升至 60 mg/kg 时,可显著促进卵巢癌组织细胞凋亡,阻滞癌组织周期。车加祥等^[67]将仙人掌多糖作用于人肺癌 A549 细胞,测定 IC₅₀ 值和生长曲线发现,癌细胞凋亡数目有明显变化,当多糖质量浓度为 597.549 μg/mL 时,抑制 A549 细胞作用最强,能够显著诱导其发生细胞凋亡。孙超等^[68]发现仙人掌多糖还可以显著抑制胃癌 SGC-7901 细胞和大肠癌 Lovo 细胞增殖,当仙人掌多糖质量浓度为 20 μg/mL 时对其生长抑制率最高。李涛等^[69]通过 MTT 法测定仙人掌多糖对人乳腺癌 MCF-7 细胞增殖的抑制率,随着仙人掌多糖浓度增加,抑制率随之提高,当质量浓度为 40 mg/L 时,抑制率达 78.7%。吴迪等^[70]发现仙人掌多糖对 SK-MES-1 肺磷癌细胞具有一定的抑制作用。仙人掌多糖对 SK-MES-1 肺磷癌细胞抑制效率不高,可能与仙人掌多糖纯度、作用机制及细胞性质有关。大量研究表明,植物多糖对癌症患者具有较好的治疗效果,是目前较为理想的一种抗癌药物,与其他植物多糖相比,仙人掌拥有较长的药用历史,且其多糖成分对肺癌^[67,70]、胃癌^[68]、乳腺癌^[69]等癌细胞凋亡具有显著促进作用。

3.6 抑菌、抗炎作用

在民间,仙人掌常被用于外服消炎,而《本草纲目拾遗》中也有记载,其具有消肿止痛的功效。袁海娜^[71]采用水提醇沉法制备仙人掌多糖,通过管碟法和混合涂布法发现,仙人掌多糖对食品中常见的大肠杆菌(*E. coli*)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)、酿酒酵母(*S. cerevisiae*)、青霉(*P. frequentans*)具有抑制作用,受仙人掌形态的影响,抑制效果无差异。整体而言,仙人掌多糖可显著抑制 *S. aureus* 和 *S. cerevisiae* 的生长和发展,但对 *E. coli* 效果不明显。郭庆启等^[10]利用微波辅助提取仙人掌多糖发现,其对 *E. coli* 具有明显的抑制作用。不同的提取方式可能会使仙人掌多糖组成和结构存在差异,导致多糖抑菌机制不同,故出现了两者试验结果相反的情况,具体抑菌机制还需进一步阐明。戴小华等^[72]通过小鼠耳肿胀法和大鼠足肿胀法发现,仙人掌粗多糖可以显著抑制炎症反应,且高剂量的作用效果更加明显。程秀峰等^[53]将梨果仙人掌茎多糖作用于炎症小鼠,通过对小鼠足肿胀及血浆中炎症因子含量的测定发现,随着多糖剂量从 100 mg/kg 升至 400 mg/kg,IL-1 β 、IFN- γ 、TNF- α 炎症因子的表达水平降低,说明梨果茎多糖能有效抑制炎症发展,且呈一定的量效关系。

3.7 保肝作用

肝脏对机体尤为重要,长期的肝损伤可导致肝纤维化、肝癌,甚至肝功能衰竭。目前,治疗肝损伤的药物主要是核苷类、护肝降酶药等化学药物,患者服用后容易形成依赖且存在一定的副作用^[73]。因此,寻找一种安全、无毒副作用的药物成为目前治疗肝损伤的重点和难点。喻宁华等^[54]对 CCl₄ 造成的急性肝损伤小鼠灌胃仙人掌多糖,通过血清和肝组织病理学检测,小鼠血清中 ALT 和 AST 活性显著降低,可减轻肝组织的病理变化;肝匀浆后,仙人掌多糖可以提高 GR、GST、GSH-Px 等酶活性,维持细胞膜的正常结构,阻止脂质过氧化反应,从而有效发挥护肝作用。目前虽有报道称仙人掌多糖有显著的护肝功效^[74],但其作用机制不够成熟,后续可以增加肝损伤的其他模型,从多方面、多角度对仙人掌多糖进行研究,发展仙人掌多糖潜在的药理和功能食品的价值。

3.8 其他作用

仙人掌多糖除了具有免疫调节、抗氧化、抗肿瘤等作用外,在保护神经组织和 DNA 损伤领域也发挥重要作用。王海涛等^[75]通过红细胞(RBC)溶血试验及彗星试验对细胞膜和 DNA 损伤度进行测定,米帮塔仙人掌多糖干预后,抑制十二烷基硫酸钠(SOD)致损细胞膜和 DNA 损伤的作用与剂量呈明显的量效关系。杨钧勇等^[76]发现米帮塔仙人掌多糖对小鼠认知功能损伤有一定的改善作用,通过不同剂量的仙人掌多糖作用于小鼠慢性应激组,随着浓度增加,小鼠认知功能明显改善,同时 BDNF 蛋白的表达也明显增加,说明仙人掌多糖干预后,通过上调

BDNF 蛋白的表达可改善认知功能损伤。唐焜等^[77]对缺血一再灌注损伤的大鼠模型灌注仙人掌多糖,当仙人掌多糖剂量为 200 mg/kg 时,大鼠脑梗死体积减少,海马神经元丢失显著减少,减轻脑组织的形态学损伤,从而发挥神经保护作用。陈扬^[78]建立了整体脑缺血复灌模型和离体原代培养神经元氧糖剥夺(OGD)模型,仙人掌多糖干预后,对 OGD 引起的神经元损伤有一定的减轻作用;经神经行为学和组织学评价发现小鼠学习障碍得到改善,且 NMDAR2B、NMDAR1 和 BDNF 蛋白表达水平提高,从而对缺血性脑损伤起到保护作用。

4 结论及展望

近年来,仙人掌被国内外研究者日益重视,其多糖成分的许多生物活性及功能也逐渐进入大众视野。随着对仙人掌多糖的提取、分离纯化、结构表征及生物活性的深入研究,取得了很大的进展,同时也存在很多亟待解决的问题:① 目前仙人掌多糖的提取技术形式单一,不同提取方法得到的多糖分子量及单糖组成差异明显。② 仙人掌多糖的空间结构与其生物活性密切相关,其多糖结构与生物活性的构效关系尚需揭示。③ 尽管仙人掌多糖在体内、体外研究模型中表现出免疫调节、抗氧化、抗肿瘤、降血糖、血脂、保肝等多种生理功能,但其作用的量效关系及作用机制仍需深入研究。

参考文献

- [1] SHIRAZINIA R, RAHIMI V B, KEHKHAIE A R, et al. *Opuntia dillenii*: A forgotten plant with promising pharmacological properties[J]. *Journal of Pharmacopuncture*, 2019, 22(1): 16-27.
- [2] 张雷,邢成国,张万年,等.仙人掌药理作用研究进展[J]. *宁夏医科大学学报*, 2021, 43(1): 96-101.
ZHANG Lei, XING Cheng-guo, ZHANG Wan-nian, et al. Research progress on pharmacological effects of *Opuntia dillenii* Haw. [J]. *Journal of Ningxia Medical University*, 2021, 43(1): 96-101.
- [3] 王婧,郭阳,包怡红,等.仙人掌多酚超声辅助醇提工艺优化及抗氧化、降脂能力分析[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 177-178.
WANG Jing, GUO Yang, BAO Yi-hong, et al. Optimization of ultrasound-assisted ethanol extraction of Cactus polyphenols and its antioxidant and lipid lowering ability[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(8): 177-178.
- [4] 龚雯,唐婕,韦雅渊,等.金花茶多糖分离纯化、结构表征及其体外抗氧化性[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 184-185.
GONG Wen, TANG Jie, WEI Ya-yuan, et al. Isolation and purification, structure characterization and in vitro antioxidant activity of polysaccharides from *Camellia japonica* [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 184-185.
- [5] 虞旦,谢娅霏,苏宁,等.新鲜仙人掌多糖的提取及其抗氧化活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(19): 29-35.
YU Dan, XIE Ya-fei, SU Ning, et al. Study on extraction and antioxidant activity of polysaccharides from fresh Cacti[J]. *Food Re-*

- search and Development, 2017, 38(19): 29-35.
- [6] 韩宗鑫, 陈文, 王湘君, 等. 酸解法提取仙人掌多糖测定研究综述[J]. 内江科技, 2020, 41(11): 97-98.
HAN Zong-xin, CHEN Wen, WANG Xiang-jun, et al. Review on determination of Cactus polysaccharides by acid hydrolysis[J]. Neijiang Science and Technology, 2020, 41(11): 97-98.
- [7] 赵龙岩, 袁清霞, 李子娇, 等. 仙人掌多糖的双酶法提取及含量测定的优化[J]. 中国医药工业杂志, 2011, 42(2): 96-100.
ZHAO Long-yan, YUAN Qing-xia, LI Zi-jiao, et al. Extraction of polysaccharide from *Opuntia dillenii* Haw. by double enzyme method and optimization of content determination[J]. China Pharmaceutical Industry Journal, 2011, 42(2): 96-100.
- [8] 黄晓玲, 陈文, 王湘君, 等. 超声波辅助酶解法提取仙人掌多糖测定研究综述[J]. 内江科技, 2020, 41(11): 99-100.
HUANG Xiao-ling, CHEN Wen, WANG Xiang-jun, et al. Review on determination of polysaccharide from Cacti by ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis[J]. Neijiang Science and Technology, 2020, 41(11): 99-100.
- [9] 郭庆启, 张娜, 张岭. 微波辅助提取仙人掌多糖工艺条件及抑菌效果的研究[J]. 中国调味品, 2010, 35(10): 97-103.
GUO Qing-qi, ZHANG Na, ZHANG Ling. Microwave-assisted extraction of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide and its antibacterial effect[J]. China Condiment, 2010, 35(10): 97-103.
- [10] 平平, 李萌, 王昌涛, 等. 仙人掌多糖发酵提取工艺优化及其抗炎功效研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 216-221.
LIU Ping-ping, LI Meng, WANG Chang-tao, et al. Optimization of fermentation extraction technology of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide and its anti-inflammatory effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 216-221.
- [11] YANG Qin, CHEN Hua-guo, ZHOU Xin, et al. Optimum extraction of polysaccharides from *Opuntia dillenii* and evaluation of its antioxidant activities[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(2): 736-742.
- [12] 袁清霞, 赵龙岩, 李子娇, 等. 酸法提取仙人掌多糖工艺[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(3): 42-50.
YUAN Qing-xia, ZHAO Long-yan, LI Zi-jiao, et al. Extraction of polysaccharide from *Opuntia dillenii* Haw. by acid method[J]. Food Research and Development, 2012, 33(3): 42-50.
- [13] 田东起, 吕萍. 超声波辅助提取仙人掌多糖的工艺优化[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(8): 145-147.
TIAN Dong-qi, LU Ping. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polysaccharide from *Opuntia dillenii* Haw. [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2017(8): 145-147.
- [14] 王曼宇, 刘乃新, 张福顺. 植物源性多糖提取及生物活性研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(29): 34-41.
WANG Man-yu, LIU Nai-xin, ZHANG Fu-shun. Advances in extraction and bioactivity of plant-derived polysaccharides [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(29): 34-41.
- [15] 焦伟艳, 李莉梅. 响应面法优化野生仙人掌多糖提取工艺研究[J]. 广州化工, 2017, 45(13): 51-59.
JIAO Wei-yan, LI Li-mei. Optimization of extraction technology of polysaccharide from wild cacti by response surface methodology [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(13): 51-59.
- [16] 黎巧钢, 陈文, 王湘君, 等. 超声波结合酶法提取仙人掌多糖药理作用研究[J]. 内江科技, 2021, 42(9): 112-113.
LI Qiao-gang, CHEN Wen, WANG Xiang-jun, et al. Study on pharmacological action of polysaccharide extracted from cacti by ultrasonic combined with enzyme[J]. Neijiang Science and Technology, 2021, 42(9): 112-113.
- [17] 朱苗. 野生仙人掌多糖的分离纯化及结构初步分析[D]. 海口: 海南大学, 2014: 15-20.
ZHU Miao. Isolation, purification and structure analysis of polysaccharide from wild cacti [D]. Haikou: Hainan University, 2014: 15-20.
- [18] 朱苗, 袁清霞, 程杰, 等. 野生仙人掌粗多糖脱蛋白方法的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 229-231.
ZHU Miao, YUAN Qing-xia, CHENG Jie, et al. Study on deproteinization method of crude polysaccharide from wild cacti [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(24): 229-231.
- [19] 林款, 徐丛玥, 梁征, 等. 米邦塔仙人掌多糖的提取纯化及体外抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 140-144.
LIN Qian, XU Cong-yue, LIANG Zheng, et al. Extraction, purification and in vitro antioxidant activity of polysaccharides from *Opuntia milbonta* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(5): 140-144.
- [20] 韩雨露. 仙人掌果多糖的结构表征、理化性质及抗氧化活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 16-17.
HAN Yu-lu. Study on structure characterization, physical and chemical properties and antioxidant activity of polysaccharide from cacti fruit [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 16-17.
- [21] 高洁. 仙人掌果多糖的分离纯化、结构表征及生理活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 16-17.
GAO Jie. Isolation, purification, structure characterization and physiological activity of polysaccharide from Cacti fruit [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 16-17.
- [22] 赵龙岩. 仙人掌多糖提取工艺、分离纯化及理化性质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011: 16-18.
ZHAO Long-yan. Extraction, purification and physicochemical properties of polysaccharide from cacti [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011: 16-18.
- [23] 林爱琴, 方幼兰, 林曦. 仙人掌多糖的分离纯化与化学结构分析[J]. 食品研究与开发, 2008(9): 109-112.
LIN Ai-qin, FANG You-lan, LIN Xi. Isolation, purification and chemical structure analysis of Polysaccharide from cacti [J]. Food Research and Development, 2008(9): 109-112.
- [24] 陶美华, 曾富华, 章卫, 等. 仙人掌多糖的分离、纯化及性质研究[J]. 中草药, 2006(11): 1 641-1 645.

- TAO Mei-hua, ZENG Fu-hua, ZHANG Wei-min, et al. Isolation, purification and characterization of polysaccharide from cacti[J]. Chinese Herbal Medicine, 2006(11): 1 641-1 645.
- [25] 张蕊馨, 张彦华, 周迎春, 等. 中药多糖化学结构及药理作用研究进展[J]. 黑龙江中医药, 2018, 47(1): 88-89.
- ZHANG Rui-xin, ZHANG Yan-hua, ZHOU Ying-chun, et al. Research progress on chemical structure and pharmacological action of polysaccharides from traditional Chinese medicine [J]. Heilongjiang Traditional Chinese Medicine, 2018, 47(1): 88-89.
- [26] GONG Y, ZHANG J, GAO F. Structure features and in vitro hypoglycemic activities of polysaccharides from different species of *Maidong*[J]. Carbohydr Polym, 2017(173): 215-222.
- [27] ROMAN Y, IACOMINI M, SASSAKI G L. Optimization of chemical sulfation, structural characterization and anticoagulant activity of *Agaricus bisporus* fucogalactan, Carbohydr [J]. Polym, 2016 (146): 345-352.
- [28] YIN Xiu-lian, YOU Qing-hong, ZHOU Xing-hai. Complex enzyme-assisted extraction, purification, and antioxidant activity of polysaccharides from the button mushroom, *agaricus bisporus* (higher basidiomycetes) [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2015, 17(10): 987-996.
- [29] 刘贺, 张红运, 杨立娜, 等. 多糖化学结构解析研究进展[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 97-106.
- LIU He, ZHANG Hong-yun, YANG Li-na, et al. Advances in chemical structure analysis of polysaccharides[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 97-106.
- [30] XLSABC D, CYLBC D, HYDBC D, et al. Extraction, purification, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from wheat bran[J]. Journal of Molecular Structure, 2021 (1 233): 566-674.
- [31] ZHANG Shen, LI Xiang-zhou, WU Zhi-zing, et al. Research progress on extraction, purification and content determination of plant polysaccharides[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2009(29): 238-242.
- [32] 景永帅, 马云凤, 王非凡, 等. 丹参多糖的含量测定、结构表征及药理活性研究进展[J]. 中国药房, 2020, 31(16): 2 037-2 042.
- JING Yong-shuai, MA Yun-feng, WANG Fan-fei, et al. Research progress on content determination, structure characterization and pharmacological activity of polysaccharides from *Salvia miltiorrhiza*[J]. Chinese Pharmacy, 2020, 31(16): 2 037-2 042.
- [33] 张文森, 崔娜, 野津, 等. 生姜多糖提取分离及含量测定研究进展[J]. 化学工程师, 2020, 34(8): 54-56.
- ZHANG Wen-sen, CUI Na, YE Jin et al. Research progress in extraction, separation and content determination of polysaccharides from Ginger[J]. Chemical Engineer, 2020, 34(8): 54-56.
- [34] 何火聪, 郑荣珍, 倪莉, 等. 两种仙人掌多糖总量测定方法的比较分析[J]. 福建轻纺, 2003(Z1): 31-35.
- HE Huo-cong, ZHENG Rong-zhen, NI Li, et al. Comparative analysis of two kinds of cactus polysaccharide total determination methods[J]. Fujian Light Textile, 2003(Z1): 31-35.
- [35] WU Sheng-jun. Effect of *Opuntia dillenii* polysaccharide on gelling properties of *Trichiurus lepturus* myofibrillar protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019 (130): 636-639.
- [36] 严赞开. 仙人掌中多酚的分光光度法测定[J]. 安徽农业科学, 2006(13): 2 957-2 958.
- YAN Zan-kai. Determination of polyphenols in cacti by spectrophotometry[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006(13): 2 957-2 958.
- [37] 张郁松. “米邦塔”仙人掌粗多糖除杂及理化性质研究[J]. 食品科技, 2007(1): 96-98.
- ZHANG Yu-song. Purification and physicochemical properties of crude polysaccharides from Cacti "Mibangta"[J]. Food Science and Technology, 2007(1): 96-98.
- [38] 陶美华. 仙人掌多糖的分离、纯化及抗糖尿病机制研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2004: 32-33.
- TAO Mei-hua. Isolation, purification and anti-diabetes mechanism of polysaccharide from *Opuntia dillenii* Haw. [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2004: 32-33.
- [39] WU Ding-tao, LAM Shing-shung, CHEONG Kit-leong, et al. Simultaneous determination of molecular weights and contents of water-soluble polysaccharides and their fractions from *Lycium barbarum* collected in China[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2016, 129: 442-453.
- [40] 金鑫, 赖凤英. 仙人掌多糖的提取、分离纯化及 GPC 法测定其分子量[J]. 现代食品科技, 2006(2): 138-149.
- JIN Xin, LAI Feng-ying. Extraction, purification and determination of molecular weight of polysaccharides from *Phyllanthus chinensis* by GPC method[J]. Modern Food Science and Technology, 2006(2): 138-149.
- [41] 郭燕娇, 何钢, 颜军, 等. 仙人掌多糖的分子量及单糖组成分析[J]. 现代食品科技, 2012, 28(12): 1 696-1 726.
- GUO Yan-jiao, HE Gang, YAN Jun, et al. Molecular weight and monosaccharide composition analysis of polysaccharide from cacti[J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(12): 1 696-1 726.
- [42] CAI Wei-rong, GU Xiao-hong, TANG Jian, et al. Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 71(3): 403-410.
- [43] 李莉梅, 李恒, 朱苗, 等. 仙人掌多糖结构和降血脂作用的研究进展[J]. 湛江师范学院学报, 2013, 34(3): 98-102.
- LI Li-mei, LI Heng, ZHU Miao, et al. Research progress of polysaccharide structure and lipid lowering effect of cacti[J]. Journal of Zhanjiang Normal University, 2013, 34(3): 98-102.
- [44] ZHAO Mou-ming, YANG Ning, YANG Bao, et al. Structural characterization of water-soluble polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladodes in relation to their anti-glycated activities[J]. Food Chemistry, 2007, 105(4): 1 480-1 486.
- [45] 赵倩. 西藏梨果仙人掌基本营养成分分析及茎粗多糖活性效果评价[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2021: 29-35.

- ZHAO Qian. Analysis of basic nutritional components and evaluation of polysaccharides activity from stem of prickly pear cactus in Xizang[D]. Linzhi: Xizang Agricultural and Animal Husbandry College, 2021: 29-35.
- [46] 景永帅, 马云凤, 李明松, 等. 植物多糖结构解析方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 411-421.
- JING Yong-shuai, MA Yun-feng, LI Ming-song, et al. Advances in structural analysis of plant polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 411-421.
- [47] ALIMI H, HFAIEDH N, BOUONI Z, et al. Evaluation of antioxidant and antiulcerogenic activities of *Opuntia ficus indica* f. *inermis* flow-ers extract in rats[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2011, 32(3): 406-416.
- [48] 李恒, 李锐, 马景球. TLR4-MyD88 信号转导途径介导仙人掌多糖免疫调节的机制研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 419-423.
- LI Heng, LI Rui, MA Jing-qiu. Mechanism of TLR4-MyD88 signal transduction mediated immune regulation of cacti polysaccharides[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 47(4): 419-423.
- [49] LI Heng, YUAN Qing-xia, ZHOU Xian-jiao, et al. Extraction of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharides and their antioxidant activities[J]. Molecules, 2016, 21(12): 1 612-1 634.
- [50] 马东升, 关鹏, 高志伟, 等. 仙人掌多糖对糖尿病大鼠模型血糖及饮食等调控影响[J]. 海峡药学, 2019, 31(9): 34-37.
- MA Dong-sheng, GUAN Peng, GAO Zhi-wei, et al. Effects of cacti polysaccharide on blood glucose and diet in diabetic rats[J]. Taiwan Journal of Pharmacy, 2019, 31(9): 34-37.
- [51] ZHAO Long-yan, HUANG Wei, YUAN Qing-xia, et al. Hypolipidaemic effects and mechanisms of the main component of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharides in high-fat emulsion-induced hyperlipidaemic rats[J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 964-971.
- [52] 殷姿, 余贤军, 徐臣利. 仙人掌多糖对卵巢癌大鼠组织细胞凋亡的干预作用[J]. 现代食品科技, 2019, 35(9): 81-86.
- YIN Zi, YU Xian-jun, XU Chen-li. Effect of cactus polysaccharide on apoptosis of ovarian cancer tissue in rats[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(9): 81-86.
- [53] 程秀峰, 张金超, 赵倩, 等. 西藏梨果仙人掌茎粗多糖组分分析及抗炎效果评价[J/OL]. 食品工业科技. (2021-12-22) [2022-02-07]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080309>.
- CHENG Xiu-feng, ZHANG Jin-chao, ZHAO Qian, et al. Analysis of thick stem and polysaccharide composition from Tibet pear cactus and evaluation of anti-inflammatory effect[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2021-12-22) [2022-02-07]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080309>.
- [54] 喻宁华, 曾富华, 饶力群. 仙人掌多糖对小鼠急性肝损伤的保护作用[J]. 中国生化药物杂志, 2009, 30(4): 255-258.
- YU Ning-hua, ZENG Fu-hua, RAO Li-qun. Protective effects of cacti polysaccharide on acute liver injury in mice[J]. Chinese Journal of Biochemical Medicine, 2009, 30(4): 255-258.
- [55] 张松莲, 赵龙岩, 袁清霞, 等. 仙人掌多糖主要组分对糖尿病小鼠的免疫调节作用[J]. 中国生化药物杂志, 2012, 33(5): 532-536.
- ZHANG Song-lian, ZHAO Long-yan, YUAN Qing-xia, et al. Immunomodulatory effects of main components of cactus polysaccharide on diabetic mice[J]. Chinese Journal of Biochemical Medicine, 2012, 33(5): 532-536.
- [56] SCHEPETKIN Igor A, GANG Xie, KIRPOTINA Liliya N, et al. Macrophage immunomodulatory activity of polysaccharides isolated from *Opuntia polyacantha* [J]. International Immunopharmacology, 2008, 8(10): 1 455-1 466.
- [57] ZHAO Long-yan, ZHANG Song-lian, YUAN Qing-xia, et al. Immunomodulatory effects of *Opuntia dillenii* polysaccharides 9 on specific immune function of mice[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2012, 35(1): 98-102.
- [58] CHEN Guang-jing, LI Chang-feng, WANG Sha-sha, et al. Characterization of physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from shoot residues of bamboo (*Chimonobambusa quadrangularis*): Effect of drying procedures[J]. Food Che, 2019 (292): 281-293.
- [59] LI Jing-en, NIE Shao-ping, XIE Ming-yong, et al. Isolation and partial characterization of a neutral polysaccharide from *Mosla chinensis* maxim. Cv. Jiangxiangru and its antioxidant and immunomodulatory activities[J]. Funct Foods, 2014(6): 410-418.
- [60] 徐丛玥, 林款, 茹琴, 等. 米邦塔仙人掌多糖提取工艺的研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 927-931.
- XU Cong-yue, LIN Quan, RU Qin, et al. Study on extraction technology of polysaccharide from *Opuntia milpa alta* mibonta[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(5): 927-931.
- [61] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南(2020 年版)[J]. 中华糖尿病杂志, 2021, 13(4): 315-409.
- Diabetes Society of Chinese Medical Association. Chinese guidelines for prevention and treatment of type 2 diabetes mellitus (2020 edition)[J]. Chin J Diabetes, 201, 13(4): 315-409.
- [62] WU Jian-jun, SHI Song-shan, WANG Hui-jun, et al. Mechanisms underlying the effect of polysaccharides in the treatment of type 2 diabetes: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2016 (144): 474-494.
- [63] GAO Jie, HAN Yu-lu, ZHENG Yu-jin, et al. Protective effect of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw. fruits on streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2015(124): 25-34.
- [64] LI Wei-ling, LIN Kuan, ZHOU Mei, et al. Polysaccharides from *Opuntia milpa alta* alleviate alloxan-induced INS-1 cells apoptosis via reducing oxidative stress and upregulating Nrf2 expression[J]. Nutrition Research, 2020, 77: 5-6.
- [65] 梁秋云. 仙人掌果多糖抗高血压、高血脂和糖尿病及其机制的研究[D]. 南宁: 广西医科大学, 2008: 13-14.
- LIANG Qiu-yun. Study on antihypertensive, hyperlipidemia and Diabetes induced by cacti fruit polysaccharide and its mechanism[D]. Nanning: Guangxi Medical University, 2008: 13-14.

- [66] 边亮, 陈华国, 周欣. 植物多糖的抗肿瘤活性研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 275-282.
- BIAN Liang, CHEN Hua-guo, ZHOU Xin. Advances in antitumor activity of plant polysaccharides[J]. Food Science, 2020, 41(7): 275-282.
- [67] 车加祥, 邵淑丽, 徐君懿, 等. 仙人掌多糖对人肺癌 A549 细胞形态结构的影响[J]. 高师理科学刊, 2014, 34(5): 68-70.
- CHE Jia-xiang, SHAO Shu-li, XU Jun-yi, et al. Effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on cell morphology and structure of human lung cancer A549 cells[J]. Journal of Science of Normal University, 2014, 34(5): 68-70.
- [68] 孙超, 蔡文泳, 王一伊, 等. 仙人掌多糖对胃癌 SCG-7901 和大肠癌 Lovo 细胞生长抑制作用的研究[J]. 医学研究杂志, 2010, 39(7): 59-60.
- SUN Chao, CAI Wen-yong, WANG Yi-yi, et al. Study on the inhibitory effect of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on the growth of GASTRIC cancer SCG-7901 and colorectal cancer Lovo cells[J]. Journal of Medical Research, 2010, 39(7): 59-60.
- [69] 李涛, 孙超, 许晶, 等. 墨西哥仙人掌多糖对人乳腺癌 MCF-7 细胞生长抑制作用的研究[J]. 中国医药导报, 2011, 30(8): 15-17.
- LI Tao, SUN Chao, XU Jing, et al. Effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on the growth of human breast cancer MCF-7 cells[J]. China Medical Herald, 2011, 30(8): 15-17.
- [70] 吴迪, 魏斌, 王双, 等. 野生仙人掌多糖对肺鳞癌细胞 SK-MES-1 生长的抑制作用[J]. 现代生物医学进展, 2012, 12(9): 1 651-1 654.
- WU Di, WEI Bin, WANG Shuang, et al. Effects of wild *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on the growth of lung squamous cell carcinoma SK-Mes-1[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2012, 12(9): 1 651-1 654.
- [71] 袁海娜. 仙人掌及其多糖对几种食品污染菌的抑菌作用[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(8): 10-13.
- YUAN Hai-na. Bacteriostasis of *Opuntia dillenii* Haw. and its polysaccharides against several food-contaminated bacteria[J]. Food Research and Development, 2012, 33(8): 10-13.
- [72] 戴小华, 吕乐, 刘欢欢. 仙人掌多糖抗炎镇痛作用研究[J]. 畜牧与兽医, 2012, 44(S1): 286-287.
- DAI Xiao-hua, LU Le, LIU Huan-huan. Study on anti-inflammatory and analgesic effects of polysaccharide from cacti[J]. Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2012, 44(S1): 286-287.
- [73] WANG Yan, CHEN Qun, WENG Rui, et al. Pharmacological action and research progress of traditional Chinese medicine on liver injury[J]. Medicinal Plant, 2020(4): 85-87.
- [74] 喻宁华. 仙人掌多糖对小鼠急性肝损伤的保护作用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007: 14-17.
- YU Ning-hua. Protective effect of cactus polysaccharide on acute liver injury in mice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007: 14-17.
- [75] 王海涛, 何聪芬, 董银卯, 等. 米邦塔仙人掌多糖对 SDS 致细胞膜和 DNA 损伤的保护作用[J]. 食品科学, 2010, 31(11): 226-230.
- WANG Hai-tao, HE Cong-fen, DONG Yin-mao, et al. Protective effects of cacti mibonta polysaccharide on cell membrane and DNA damage induced by SDS[J]. Food Science, 2010, 31(11): 226-230.
- [76] 杨钧勇, 李祖铭, 余玲, 等. 米帮塔仙人掌多糖对小鼠慢性应激认知功能损伤的改善作用及机制探讨[J]. 神经损伤与功能重建, 2017, 12(5): 385-387.
- YANG Jun-yong, LI Zu-ming, YU Ling, et al. Effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on cognitive impairment in mice under chronic stress and its mechanism [J]. Neural Injury and Functional Reconstruction, 2017, 12(5): 385-387.
- [77] 唐焜, 谢小慧, 陈志达, 等. 仙人掌多糖对大鼠局灶性脑缺血的神经保护作用[J]. 医药导报, 2012, 31(9): 1 109-1 112.
- TANG Kun, XIE Xiao-hui, CHEN Zhi-da, et al. Neuroprotective effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on focal cerebral ischemia in rats[J]. Chinese Journal of Medicine, 2012, 31(9): 1 109-1 112.
- [78] 陈扬. 米邦塔仙人掌多糖提取鉴定及对缺血性脑损伤的保护作用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 53-71.
- CHEN Yang. Extraction and identification of polysaccharide from cacti mibonta and its protective effect on ischemic brain injury[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 53-71.

(上接第 215 页)

- [47] TEIXEIRA A, FERREIRA I, PEREIRA E, et al. Physicochemical composition and sensory quality of goat meat burgers effect of fat source[J]. Foods, 2021, 10(8): 1 824.
- [48] RIOS-MERA J D, SALDAÑA E, CRUZADO-BRAVO M L M, et al. Reducing the sodium content without modifying the quality of beef burgers by adding micronized salt[J]. Food Research International, 2019, 121: 288-295.
- [49] KUSTAR A, PATINO-ECHEVERRI D. A review of environmental life cycle assessments of diets: Plant-based solutions are truly sustainable, even in the form of fast foods[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9 926.
- [50] HE J, EVANS N M, LIU H Z, et al. A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2 639-2 656.
- [51] HE J, LIU H Z, BALAMURUGAN S, et al. Fatty acids and volatile flavor compounds in commercial plant-based burgers[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 293-305.
- [52] LOU W S. Recent trends in the chromatographic analysis of volatile flavor and fragrance compounds: Annual review 2020[J]. Analytical Science Advances, 2021, 2(3/4): 157-170.