

魏炳琦, 高小雨, 刘延鑫, 等. 红枣多糖的结构、生物学活性及产品开发进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 1-9. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080051

WEI Bingqi, GAO Xiaoyu, LIU Yanxin, et al. Research Progress on Structure, Biological Activity and Product Development of *Ziziphus jujuba* Polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 1-9. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080051

· 特邀主编专栏—枸杞、红枣、沙棘等食药同源健康食品研究与开发 (客座主编: 方海田、田金虎、龚桂萍) ·

红枣多糖的结构、生物学活性及产品 开发进展

魏炳琦¹, 高小雨², 刘延鑫², 王义翠^{1*}

(1. 河南中医药大学药学院, 河南郑州 450046;

2. 河南中医药大学医学院, 河南郑州 450046)

摘要: 红枣是我国常用的药食同源植物。红枣多糖是红枣的主要活性成分之一, 经药理学研究证实具有多种活性。目前红枣多糖的结构研究多集中一级结构的修饰方式、单糖组成成分、分子量及糖苷键连接方式。生物学活性研究表明, 红枣多糖具有抗氧化、保肝护肝、降糖、降脂、调节菌群丰度、免疫调节、抗癌、抗凝等生物活性, 可应用于抗氧化膜, 抗衰老、降糖、代糖、降脂产品, 抑菌剂, 免疫调节剂, 抗癌营养食品等产品中。本文基于此进行总结和展望, 以期对未来进一步深入探究红枣多糖的结构, 规范红枣多糖的制备提取流程, 明确红枣多糖生物活性作用机制机理, 增加红枣多糖产品多样性提供理论基础。

关键词: 红枣多糖, 结构, 分子量, 生物活性, 产品开发

中图分类号: TS255.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2024)12-0001-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080051



本文网刊:

Research Progress on Structure, Biological Activity and Product Development of *Ziziphus jujuba* Polysaccharide

WEI Bingqi¹, GAO Xiaoyu², LIU Yanxin², WANG Yicui^{1*}

(1. School of Pharmacy, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China;

2. School of Medicine, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: *Ziziphus jujuba* is a commonly used medicinal and edible plant in China. *Ziziphus jujuba* polysaccharide is one of the main active component of *Ziziphus jujuba*, and has been confirmed by pharmacological studies with a variety of biological activities. The research on the structure of *Ziziphus jujuba* polysaccharide is mostly focused on modification method, monosaccharide constitutes, molecular weight and glycosidic bond type. Extensive studies have shown that *Ziziphus jujuba* polysaccharide exert multiple biological activities, such as antioxidant, hepatoprotective, hypoglycemic, lipid-lowering, bacterial abundance regulation, immune regulation, anti-cancer and anticoagulant. *Ziziphus jujuba* polysaccharide can be used in anti-oxidation film, anti-aging, hypoglycemic, sugar replacement, lipid-lowering products, bacteriostatic agent, immunomodulators, anti-cancer nutrition food and other products. Based on these findings, this article summarizes and prospects, in order to provide a theoretical basis for further explore the structure of *Ziziphus jujuba* polysaccharides, standardize the preparation and extraction process of *Ziziphus jujuba* polysaccharides, clarify the biological activity mechanism of *Ziziphus jujuba* polysaccharides, and increase the diversity of *Ziziphus jujuba*

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 河南省中医药科学研究专项普通课题 (2022ZY2062); 2022 年度河南省自然科学基金 (222300420484); 河南省高等学校重点科研项目 (23B360002)。

作者简介: 魏炳琦 (2002-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 中医学, E-mail: 415306947@qq.com。

* 通信作者: 王义翠 (1978-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向: 中药制药工程, E-mail: wangyicui@126.com。

polysaccharide products.

Key words: *Ziziphus jujuba* polysaccharide; structure; molecular weight; biological activity; product development

红枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)为一种鼠李科植物,俗称“百果之王”,广泛分布于中国,在韩国、印度、日本、欧洲、美国等其它国家也有分布^[1]。我国陕西省清涧县所产的清涧红枣,皮薄、肉厚、核小,为中国国家地理标志产品。红枣作为药食同源植物,常取用干燥成熟果实。据《中华人民共和国药典(2020年版)》等记载,红枣归脾、胃、心经,味甘,性温,具有补中益气,养血安神的功效。现代研究表明,红枣功效的发挥与其富含的糖类、氨基酸、黄酮类、多酚类等多种活性成分具有密切联系^[2-3]。

红枣多糖作为红枣的主要活性成分之一,经研究表明具有抗氧化^[4-6]、保肝护肝^[7]、降糖^[8]、降脂^[9]、菌群调节^[10]、免疫调节^[11]、抗癌^[12]、抗凝^[13]等多种生物活性。目前,红枣多糖已在食品及相关领域有较为广泛的应用,如抗氧化膜,抗衰老、降糖、代糖、降脂产品,益生菌/抗菌剂,免疫调节剂,抗癌营养食品等,应用前景广阔,但仍存在一定的不足:如在制备时存在红枣多糖结构、成分不统一等问题;在制作研发过程中,仍存在产品研发深度不足,作用机制不明确等问题。

基于此,本文通过查阅国内外近年来有关红枣多糖的公开报道,并对所获资料进行整理汇总,从结

构、生物学活性和产品开发这三个方面展开综述,以便深入认识红枣多糖,为红枣及红枣多糖的深入开发和利用提供参考依据。

1 红枣多糖的结构

多糖在结构上可分为一级、二级、三级和四级结构。一级结构的研究多集中于多糖分子量大小、构成多糖的单糖组成及摩尔比、糖苷键连接方式等,而二级结构、三级结构、四级结构则为多糖的高级结构,主要是针对多糖构象开展研究^[14]。多糖的结构比蛋白质和DNA的结构更复杂^[15]。因此,从化学角度来看,针对多糖的结构分析具有一定的挑战性。

如表1所示,红枣多糖的结构研究多集中于一级结构,即以分子量、单糖组成、糖苷键的连接方式^[16-21]等为主开展研究,缺乏深入探究。红枣多糖作为一种大分子,其表面不光滑,呈凹凸不平,颗粒大小不均一。根据不同研究制备的红枣多糖可知,红枣多糖的糖苷键连接方式以 α -吡喃糖、 β -吡喃糖糖苷键连接为主,不具备三螺旋结构,多由葡萄糖(Glucose, GLC)、半乳糖(Galactose, GAL)、半乳糖醛酸(D-Galacturonic acid)、阿拉伯糖(Arabinose, Ara)等组成(图1)^[16-21]。

红枣多糖的结构受到多种因素的影响,在多糖

表1 红枣多糖经不同修饰方式修饰后的结构表征

Table 1 Structural characterization of *Ziziphus jujuba* polysaccharides modified by different modification methods

修饰方式	是否具备三螺旋结构	分子量(Da)	糖苷键	形态	组成成分及摩尔百分比	参考文献
未修饰	否	4865	α -吡喃糖 β -吡喃糖	排列疏松,颗粒大小不均一,有明显凸起,表面呈颗粒状。	Man(0.45%)、Rib(0.24%)、Rha(0.06%)、GlcA(1.27%)、GalA(0.23%)、Glc(96.24%)、Gal(0.31%)、Xyl(0.08%)、Ara(1.06%)、Fuc(0.06%)	[16]
未修饰	-	32500	α -吡喃糖	表面呈凹凸不平的沟壑且朝四方延伸,四周镶嵌着形状不规则的孔状结构	Rha(1.19%)、Ara(7.49%)、Gal(7.23%)、Glc(4.48%)、Xyl(1.17%)、Man(0.44%)、GalA(1.65%)	[16]
未修饰	-	136413	-	呈不规则片状,表面相对平整光滑,结构致密	Rha(0.44%)、Ara(33.83%)、Gal(10.54%)、Glc(2.39%)、Xyl(2.06%)、Man(0.59%)、Fru(1.98%)、GalA(48.17%)	[18]
未修饰	否	-	α -吡喃糖 β -吡喃糖	不规则的大块片状结构	Glc(68.78%)、Gal(3.56%)、Ara(22.64%)、GalA(1.42%)	[19]
未修饰	-	185978	α -吡喃糖	表面光滑,有少量凹凸不平	Glc(70.05%)、GalA(10.88%)、Ara(10.63%)、Gal(5.06%)、Fuc(1.39%)、GlcA(1.04%)、Xyl(0.95%)	[20]
未修饰	否	-	α -吡喃糖	-	Ara(45.90%)、Gal(19.72%)、Glc(19.88%)、Xyl(3.03%)、Fru(10.37%)、GalA(1.10%)	[21]
硫酸化	否	7426	α -吡喃糖 β -吡喃糖	分子排列较密集,颗粒较小且较均一,表面比较平整	Man(0.14%)、Rib(0.27%)、Rha(0.10%)、GlcA(1.43%)、GalA(0.67%)、Glc(96.06%)、Gal(0.29%)、Xyl(0.08%)、Ara(0.94%)、Fuc(0.03%)	[16]
硫酸化	-	9970	-	表面不平整,粗糙	Ara(21.31%)、Gal(27.38%)、Glc(7.22%)、Fru(13.58%)、GalA(30.57%)	[18]
硫酸化	-	6149	-	表面不平整,粗糙	Ara(21.31%)、Gal(27.38%)、Glc(7.22%)、Fru(13.58%)、GalA(30.57%)	[18]
硫酸化	否	未阐述	α -吡喃糖 β -吡喃糖	不规则小块片状结构	Glc(46.35%)、Gal(2.45%)、Ara(18.44%)、GalA(0.98%)	[19]
羧甲基化	-	46637	-	分散,单片状分布,其表面有形状规则的圆形小孔	Ara(38.03%)、Gal(22.37%)、GalA(39.60%)	[18]
晒化	-	136153	-	有许多条形宽度不一的条形弯曲,放大后表面光滑,观察到圆形空洞	Ara(22.28%)、Gal(16.00%)、Glc(2.38%)、Xyl(3.32%)、Man(0.70%)、Fru(2.09%)、GalA(53.23%)	[18]

注:“-”表示未有相关阐述;甘露糖(Mannose, Man)、核糖(Ribose, Rib)、鼠李糖(L-rhamnose monohydrate, Rha)、葡萄糖醛酸(Glucuronic acid, GlcA)、木糖(Xylose, Xyl)、岩藻糖(Fucose, Fuc)、果糖(Fructose, Fru)。

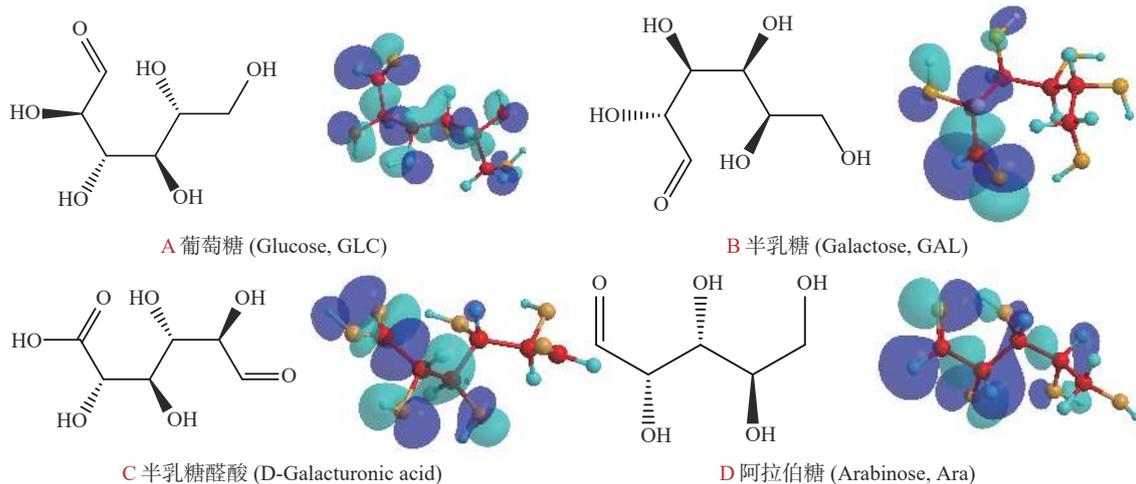


图 1 红枣多糖主要成分结构

Fig.1 Structure of main components of *Ziziphus jujuba* polysaccharide

提取过程中,不同的提取方法可能会造成多糖结构表征的差异,且多糖修饰方式的不同也会造成结构差异^[22]。如符玉霞等^[16]的研究表明,相对于未修饰过的红枣多糖,经过硫酸修饰的红枣多糖的分子量由 4.865×10^3 Da,变为 7.426×10^3 Da,单糖组成成分相同,占比不同,一级结构特征改变。杨燕敏等^[18]对比未修饰、硫酸化、羧甲基化、硒化修饰后的红枣多糖,结果发现几种多糖的分子量均不相同,相较于未修饰红枣多糖,硒化修饰后的红枣多糖形态表面光滑,不粗糙。以上均提示对红枣多糖修饰可以改变红枣多糖的结构,而多糖作为天然物质,其结构发生改变,可能弥补天然多糖的缺陷,有利于多糖活性的发挥^[23-25]。如 Fernandes 等^[25]、Cheng 等^[26]的研究证实了修饰方式对于多糖活性具有影响,研究发现经过硒化修饰后的红枣多糖具有更强的抗氧化活性,且其活性优于未修饰红枣多糖或硒。综上,这也提示未来应明确红枣多糖结构和活性间的联系,为红枣多糖深加工产品的开发与利用奠定基础。

2 红枣多糖的生物学活性

红枣多糖具有抗氧化^[4-6]、保肝护肝^[7]、降糖^[8]、降脂^[9]、菌群调节^[10]、免疫调节^[11]、抗癌^[12]、抗凝血^[13]等多种生物学活性,其生物学活性间也具有密切联系,如图 2 所示。具体生物学活性特征及活性间的联系阐述如下。

2.1 抗氧化活性

研究表明红枣多糖可通过清除自由基来发挥抗氧化活性。红枣多糖对于多种自由基都具有清除活性,且对不同种自由基的清除活性存在差异。如红枣多糖的浓度由 1 mg/mL 增加到 5 mg/mL,对 DPPH 自由基清除率由 29.37% 增至 63.02%,羟基自由基清除率由 23.05% 增至 60.32%,提示红枣多糖对自由基的清除率具有浓度依赖性^[17]。呼凤兰等^[27]的研究发现,红枣多糖对超氧阴离子自由基也具有清除活性,且与浓度成正相关^[28]。综上,未来可对比分析红枣多糖与其它抗氧化剂功能间的差异性,以便针对

不同种自由基,研发出更有针对性的、更高性价比的抗氧化剂。

相较于红枣多糖,红枣硒多糖具有更优的抗氧化活性。如多糖质量浓度在 20~80 $\mu\text{g/mL}$ 时,红枣硒多糖对羟基自由基和超氧阴离子自由基的清除率均高于相同质量浓度的红枣多糖,且在较低质量浓度下即可达到清除率的最大值,具有更强的自由基清除活性和还原能力^[29]。又如张越锋等^[30]对红枣硒多糖进行抗氧化活性测定,红枣多糖和红枣硒多糖的羟基自由基半抑制浓度分别为 1360 和 88 $\mu\text{g/mL}$,且在红枣多糖和红枣硒多糖浓度均为 72 $\mu\text{g/mL}$ 时,两者对超氧阴离子自由基清除率分别达到 42.62% 和 45.38%。硒化后的红枣多糖对于羟基自由基和超氧阴离子自由基的清除活性更强,以上表明红枣硒多糖较红枣多糖在抗氧化活性上具有一定的优势。因此,以上均表明在未来的抗氧化产品开发上,可将红枣多糖与硒等矿物质相结合,以便制备出活性更强的抗氧化新产品。

2.2 保肝护肝活性

现有研究证明红枣多糖具有保肝护肝的生物学活性。注射四氯化碳是动物模型中模拟慢性肝损伤的最常用方法^[31]。经过四氯化碳干预后的小鼠血清中天冬氨酸氨基转移酶 (Aspartate transaminase, AST)、丙氨酸氨基转移酶 (Alanine aminotransferase, ALT) 和乳酸脱氢酶 (Lactate dehydrogenase, LDH) 的含量升高,但给予 200 和 400 mg/kg 红枣多糖进行治疗后,结果表明红枣多糖能显著降低四氯化碳导致的 AST、ALT 和 LDH 的升高 ($P < 0.01$),具有一定的降低肝毒性、保肝的活性^[32]。

目前可知谷胱甘肽过氧化物酶 (Glutathione peroxidase, GSH-Px) 具有防止过度产生活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS),能维持细胞氧化还原稳态;超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 是抗氧化酶,可协同将自由基转化为水和分子氧;而丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 是一种脂质过氧化的

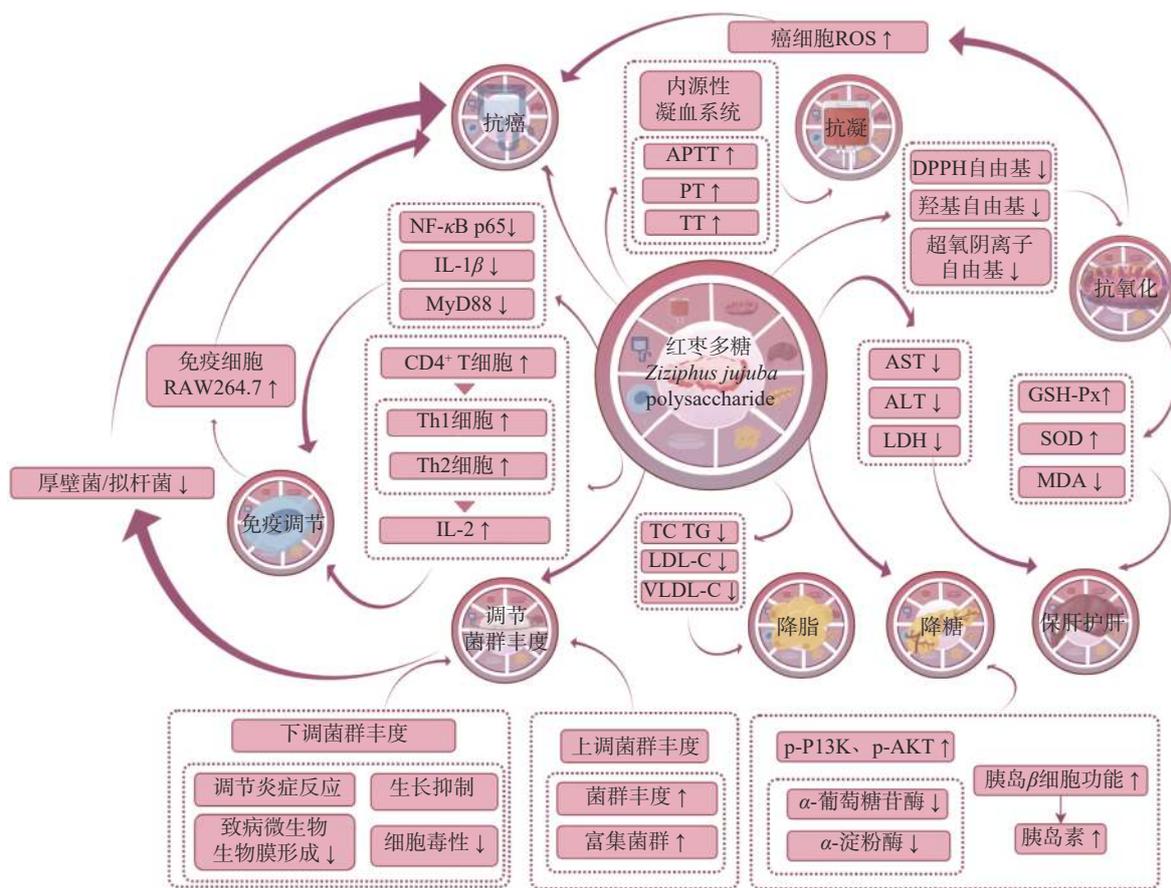


图2 红枣多糖的生物活性及作用机制(由 Figdraw 绘制)

Fig.2 Biological activities and mechanisms of *Ziziphus jujuba* polysaccharides (by Figdraw)

产物^[33-35]。如 Liu 等^[32] 给予四氯化碳诱导肝损伤小鼠 200、400 mg/kg 红枣多糖干预后, GSH-Px、SOD 水平极显著上升($P<0.01$), MDA 含量极显著降低($P<0.01$), 提示红枣多糖保肝机制通过上调 GSH-Px、SOD 水平, 降低机体氧化应激水平, 减少肝损伤。

2.3 降血糖活性

红枣多糖具有降血糖的生物学活性。给予糖尿病模型小鼠 800、400 mg/kg 红枣多糖灌胃处理, 结果发现小鼠的血糖水平分别下降了 30.76%、28.54%, 两组小鼠血糖均显著低于糖尿病模型组($P<0.05$), 证实了红枣多糖具有降糖活性^[36]。而红枣多糖可通过抑制碳水化合物吸收和促进胰岛素分泌两个途径来发挥降血糖活性^[37-38]。龚频等^[37] 采用体外实验研究发现, 随着红枣多糖浓度的增高, 其对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制活性呈现上升趋势。红枣多糖可抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的活性, 进而抑制机体对碳水化合物吸收, 发挥降血糖的功效。并且对胰岛素抵抗 HepG2 细胞检测可知, 红枣多糖降糖机制与 PI3K/Akt 通路的激活有关, 通过上调 P-PI3K 和 P-AKT, 可缓解胰岛素抵抗, 发挥降糖活性。而罗依扎等^[38] 对四氧嘧啶诱导建立糖尿病小鼠进行测定发现, 红枣多糖可通过恢复胰岛 β 细胞功能, 促进胰岛素分泌, 提高胰岛素水平, 进而发挥降糖活性。

2.4 降血脂活性

红枣多糖具有降血脂的生物学活性。给予小鼠 20% 高果糖水灌胃处理, 小鼠可出现高血糖, 高胰岛素血症和血脂异常。而后经 200 mg/kg 红枣多糖干预处理, 结果发现小鼠总胆固醇(Total cholesterol, TC)、甘油三酯(Triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇(Low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、极低密度脂蛋白胆固醇(Very low density lipoprotein cholesterol, VLDL-C)水平均显著降低($P<0.05$)^[39]。未来可针对红枣多糖降脂活性的作用靶点及信号通路进行深入研究, 以便明确机理, 有利于更好地利用红枣多糖降血脂的功能活性, 开发新型降血脂产品。

2.5 调节菌群丰度

红枣多糖对于肠道菌群、口腔菌群等菌群具有调节作用, 尤其是在肠道菌群丰度的调节上具有一定的优势。红枣多糖能提高肠道菌群中的厚壁菌门丰度, 并对 *Roseburia* 和 *Faecalibacterium* 具有富集作用, 对大肠杆菌的丰度具有抑制作用, 有利于肠道内微生物的恢复^[40]。周文君等^[20] 发现随着红枣多糖浓度的增加, 培养基内菌密度 OD₆₀₀ 值增大, 提示红枣多糖对菌群丰度的调节具有一定的浓度依赖性。而对比分析红枣多糖、枸杞多糖、龙眼多糖相同浓度下对菌群的调节作用, 结合微观结构分析, 发现红枣多糖在菌群丰度的调节上具有一定的优势^[20]。这提示

未来可依据红枣多糖制备天然的菌群丰度调节剂,开发天然、绿色、稳定的菌群调节产品。而 Xu 等^[41]发现红枣多糖能通过生长抑制、防止致病微生物生物膜的形成、降低细胞毒性、调节炎症反应等,对口腔细菌病原体变形链球菌、MRSA、牙龈卟啉单胞菌表现出较好的抑制作用,能下调菌群丰度,具有防治口腔感染的作用。因此,以上提示未来可在抗菌、抗感染产品中适当加入红枣多糖,如在牙膏等日用品中适当添加红枣多糖,增添口味丰富度的同时,还具有抑制菌斑,保护牙齿的作用,但仍需进行安全性研究。综上,为更好利用红枣多糖对菌群丰度的调节作用,且更好地安全、灵活应用。在未来的研究中,可进一步明确红枣多糖的菌群丰度调节的内在机理,增加循证研究。

2.6 免疫调节

红枣多糖可通过保护免疫屏障进而发挥免疫调节活性。牛佳卉等^[42]给予免疫屏障小鼠 300 和 600 mg/kg 红枣多糖干预,结果发现 p65、IL-1 β 、MyD88 水平极显著下调($P<0.01$),派尔集合淋巴结数量极显著增加($P<0.01$),经 600 mg/kg 红枣多糖干预后的小鼠胸腺指数显著增加($P<0.05$),这表明红枣多糖对于免疫屏障具有保护作用,其免疫调节活性的发挥与 NF- κ B 等信号通路具有密切关系。

CD4T 细胞在人体免疫中发挥着重要的作用,其分为 Th1、Th2 等亚群。Th1 细胞可通过激活 1 型巨噬细胞(M1)诱导 1 型反应,预防细菌、病毒和原生动物等细胞内病原体;Th2 细胞参与 2 型反应,可通过激活 2 型微噬细胞(M2)来对抗蠕虫等寄生虫的感染;Th1 细胞分泌的 IL-2,能激活 T 细胞增殖和 NK 细胞活性^[43-44]。给予慢性疲劳大鼠 400 mg/kg 红枣多糖干预后,结果发现红枣多糖能显著提高大鼠 IL-2 水平及 CD4⁺T 细胞数量($P<0.05$),且极显著提高 CD4⁺/CD8⁺比值($P<0.01$)^[45]。综上,可知红枣多糖对于免疫系统具有一定的调节作用,这也提示在未来可进一步深入研究其免疫调节机制,开展大样本的动物实验和临床研究,以便为新型免疫调节剂的制备及临床应用奠定基础。

2.7 抗癌活性

红枣多糖可通过调节肠道菌群、诱导细胞凋亡、免疫调节、抗氧化等多种途径发挥其抗癌活性。Ji 等^[46]采用高通量测序分析方法,对红枣多糖干预结肠癌小鼠肠道菌群结构进行测定,结果发现小鼠厚壁菌/拟杆菌减少。这提示红枣多糖可通过恢复肠道菌群丰度,进而达到预防结肠癌的功效。除了通过调节肠道菌群发挥抗癌活性,红枣多糖还可激活免疫细胞 RAW264.7,诱导细胞凋亡,阻止 G0/G1 中的细胞周期,增加细胞内 ROS 积累,进而达到抑制结肠癌细胞增殖的效果^[47]。这提示在未来抗癌药物的研发制备上,可适当在药物中添加红枣多糖,以便提高药物的抗癌活性。

红枣多糖与其它物质联合使用时,能发挥抗癌

的协同作用。如 800 μ g/mL 红枣多糖和 160 μ g/mL 姜辣素联合使用时,对人结肠癌 SW620 细胞的抑制率为 75.5% \pm 1.1%。而两者单独使用,抑制率则分别为 54.0% \pm 1.5%、64.9% \pm 1.3%,抗癌活性差^[48]。因此,这也提示未来在红枣多糖抗癌产品的研发上,可考虑将红枣多糖与其它物质联合使用,以便更好地发挥其抗癌活性。

综上,红枣多糖具有抗癌的功能活性,但现有研究缺乏红枣多糖抗癌广谱性研究,未来可针对多种癌症给予红枣多糖干预,以便探究红枣多糖的抗癌广谱性,也可结合生物信息学等技术探究红枣多糖的抗癌活性靶点。

2.8 抗凝血活性

红枣多糖对于凝血也具有一定的影响,且其抗凝血活性的发挥与内源性凝血系统有关。以活化部分凝血活酶时间(Activated partial thromboplastin time, APTT)、凝血酶原时间(Prothrombin time, PT)及凝血酶时间(Thrombin time, TT)作为凝血活性评判指标。在血浆中添加 5 mg/mL 红枣多糖,测定发现血浆 APTT 为(118.53 \pm 0.55)s,PT 为(14.33 \pm 0.35)s,TT 为(28.30 \pm 0.36)s,相较添加等量生理盐水的血浆,凝血用时长,这提示红枣多糖具有抗凝血活性^[13],而 APTT 是分析内源性凝血系统的常用指标,故红枣多糖抗凝血功效与内源性凝血系统有关。Cai 等^[49]的研究进一步证明了红枣多糖的抗凝与内源性凝血系统有关,其团队研究发现与生理盐水对照组相比,50 μ g/mL 红枣多糖可极显著增加抗凝时 APTT 及 TT 时长($P<0.01$),PT 时长增加但差异不明显,具有抗内源凝血活性。

综上,红枣多糖抗凝活性的发挥与内源性凝血系统有关,红枣多糖可通过增加 APTT、TT、PT 时长来发挥抗凝活性,未来可针对此特性来开发新型抗凝剂。

3 红枣多糖产品的开发

3.1 抗氧化产品

某些食品,尤其是新鲜瓜果类,常要求保鲜储存,而利用红枣多糖所具有的抗氧化活性,可保鲜贮藏食物。如利用红枣多糖涂膜的抗氧化活性来保鲜贮藏吊干杏,49 d 后发现该贮藏方式下吊干杏的腐烂率为 6%,相较于冰温贮藏效果更好($P<0.05$)。且吊干杏失重率为 11.06%,优于单独冰温贮藏^[50]。除了将红枣多糖的抗氧化活性应用于保鲜涂膜上,还能将红枣多糖添加至食品中,如在乳制品^[51]中按照 5~15 份红枣多糖、80~90 份生牛乳、5~15 份白砂糖、1~20 份水苏糖等配比添加红枣多糖,制备出的发酵乳营养丰富、风味优良、口感绵软,同时该产品还具有一定的抗氧化活性,能延缓乳制品变质。又如将红枣多糖添加至菜籽油中,红枣多糖能促使抗坏血酸成为脱氢抗坏血酸,降低菜籽油氧浓度,发挥抗氧化的功能活性,有利于菜籽油的储存^[27]。以上提示未来在红

枣多糖抗氧化产品类研发上应进一步多样化,生产上研发规范的添加使用流程,以便于形成产业化链条。

3.2 抗衰老产品

衰老时,机体内线粒体功能则会出现失调的情况,并伴有 ROS 累积和 DNA 损伤的现象,因此衰老的标志之一便是机体内氧化应激水平升高^[52]。红枣多糖所具有的抗氧化活性,为红枣多糖抗衰老产品的研发提供了理论依据,如将红枣多糖按照(0.1~12) g:100 mL 的比例添加至葡萄酒之中,制备出的葡萄酒口感醇厚,风味优良,同时该葡萄酒还具有一定的抗衰老、养血安神、舒肝解郁的功效^[53]。又如在护肤品中加入 1%~2% 的红枣多糖,制备出的护肤品具有养颜美容、抗衰老的功效,这也与红枣多糖的抗氧化活性具有一定的关系^[54]。

综上,目前红枣多糖在抗衰老产品的研发上存在着较大的空间。未来的研发过程中,不仅对产品的多样性开展研究开发工作,还应对已有产品进行机制上的深入探究,以便安全生产应用。

3.3 降糖、代糖产品

红枣多糖具有降糖的功能活性,如将红枣多糖添加至杂粮中,利用红枣多糖对胰岛素分泌的促进作用,可降低血糖水平^[55]。这不仅有利于增加糖尿病患者可食用食物的多样性,还有利于糖尿病患者的饮食护理。又如将红枣多糖添加入面条中,将 6% 的红枣多糖、2% 的番茄粉和 10% 的塔尔米粉等进行混合,最终结果表明该款食物对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的 IC_{50} 为 4.27 ± 0.76 mg/mL,而未添红枣多糖组 IC_{50} 值为 111.20 ± 16.19 mg/mL,对比可知红枣多糖可通过抑制 α -葡萄糖苷酶发挥降糖功效,为糖尿病患者新型面条的制备提供了可行性参考^[56]。除了利用红枣多糖的降糖活性来制备新型食品,还可将其作为一种代糖应用于水果馅料制备中。如用红枣多糖代替部分白砂糖。依据白砂糖和红枣多糖 5:3 的比例制成新型低甜度水果馅料,这种新型水果馅料改变了传统水果馅料口感甜腻,具有降糖、代糖功效,还有利于戒糖、减脂人群食用^[57]。以上也提示在未来食品研究开发时,尤其是一些高糖分的饮品,可适当地选用红枣多糖来代替白砂糖,不仅能增加营养,还有利于新口味的研发与应用。

3.4 降脂产品

除了降血糖产品外,还能利用红枣多糖所具有的降脂的生物学活性,将红枣多糖应用于降脂食品的开发应用中。如将红枣多糖添加至含片中,按照红枣多糖 1~20 份,柠檬酸 1~15 份,糖粉 5~60 份,脱脂奶粉 5~30 份等来进行配备,不仅具有降血脂功能,还具有口感优良,营养丰富等优点^[58]。除了降脂含片,还可将红枣多糖添加到米粉中,如按照大米米粉 15~40 份、大枣多糖 1~3 份、大豆蛋白粉 15~35 份等进行配制,制备出的米粉也具有降脂功效^[59]。综

上,在大健康背景下,伴随着人们对于健康的愈发重视,对于身材管理需求逐渐增多。未来红枣多糖降脂产品研发,可从代餐、轻食入手,保证营养均衡的同时,还能充分发挥其降脂功效。

3.5 抑菌剂

红枣多糖具有调节菌群丰度的作用,因此可针对某些菌种制成抑菌剂。如将红枣多糖添加应用于酸奶的发酵与储存中,可发挥益菌剂的功效。在酸奶中添加 1% 红枣多糖时,乳酸菌即具有较好的长势,且乳酸菌含量在 $3.2 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^8$ CFU/mL 之间,符合我国酸奶乳酸菌含量规范。而酸奶持水力可达到 77%,较未添加红枣多糖酸奶显著提高($P < 0.05$),乳清的析出率低至 4.4%,有效提高酸奶品质^[60]。又如齐威等^[61]将红枣多糖作为益菌剂,添加 0.2%~0.6% 质量浓度的红枣多糖于发酵乳酸菌上清液,饮品口感增强,还利用红枣多糖的益菌活性,利于乳酸菌的生长。除将红枣多糖应用于酸奶外,还可将其应用于发酵饲料。红枣多糖可促进植物乳杆菌代谢,促进产生有机酸,具有调节益生菌作用。如在植物乳杆菌和鼠李糖乳杆菌培养基中添加 2% 红枣多糖,48 h 培养后发现红枣多糖与添加葡萄糖相比,可有效提高糖异生、脂代谢及丁酸和丙酸含量,并对乙酸具有正向调节作用($P < 0.05$),有利于饲料的制备^[62]。

在红枣多糖抑菌抗菌产品应用研发上,Gharib-zahedi 等^[63]将红枣多糖与乳清蛋白分离物等相混合,制备成没有任何孔隙或裂缝且低表面粗糙度的新型生物纳米复合薄膜,红枣多糖占比 1.59%~18.41%,结果发现对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有抑制作用,有利于香蕉等果实的贮藏过程。

综上,目前红枣多糖作为抑菌剂,其剂型上以生物膜、粉剂、液剂为主。未来可结合喷涂技术,通过雾化红枣多糖液体,使其快速附着在物体表面,形成致密的抗菌膜,便于红枣多糖菌群调节活性的快速、便捷、高效应用。

3.6 免疫调节产品

根据已有研究可知,红枣多糖具有免疫调节的活性,这也为将红枣多糖制备成新型天然免疫调节剂提供了思路。红枣多糖可诱导 RAW264.7 细胞产生一氧化氮,在 10~200 μ g/mL 浓度梯度下,红枣多糖能显著提高 RAW264.7 细胞的一氧化氮生成量($P < 0.05$)^[64]。而一氧化氮在病理过程中发挥诱导细胞凋亡及免疫调节作用,因此这提示红枣多糖可作为一种免疫刺激剂来使用。除此之外,还可将红枣多糖添加至口含片中,将红枣多糖、糊精、木糖醇等按照大约 1:7:6 进行配制,制备出的含片口味佳,便于出行携带和食用,还具有提高肌体免疫的功效^[65]。石聚彬等^[66]将红枣多糖添加至泡腾片中,同样便于携带,具有提高免疫力功效,还具备一定的保健功效。因此,以上红枣多糖的免疫调节产品提示未来在红枣多糖的研发上,可考虑从产品样式的多样性入手,兼顾便

携性。

3.7 抗癌营养产品

红枣多糖在癌症治疗的康养环节中发挥着重要的作用。申培红等^[67]将红枣多糖应用于营养液中,一方面可以发挥红枣多糖的抗癌活性,辅助治疗胃癌;另一方面将红枣多糖与其它食物相搭配,营养均衡,有利于为胃癌患者提供必需的营养物质。除了胃癌营养液的配制,还可将其应用于肝癌营养液。同样将红枣多糖加入营养液中,发挥红枣多糖的免疫调节功能,提升患者的免疫能力,有利于肝癌患者的康养^[68]。这也提示未来针对红枣多糖抗癌营养产品的研发,不能仅仅局限于肝癌、胃癌,可利用红枣多糖的抗癌活性,针对不同种类癌症,不同体质等开展个性化定制。

4 结论与展望

红枣多糖作为一种天然活性物质,具有复杂的分子结构,多样的功能活性,这使红枣多糖的开发具有优势的同时,也存在着一定的挑战。本文综述了红枣多糖的结构,其抗氧化、保肝护肝、降糖、降脂、调节菌群丰度、免疫调节、抗癌、抗凝等方面的功能活性,同时还回顾总结了红枣多糖在抗氧化膜、降糖、代糖、降脂、抑菌剂、免疫调节剂、抗癌营养食品及相关产品的应用。结果发现红枣多糖在食品领域有广阔的研发应用前景,但针对其开展的相关研究仍存在一定的问题,故本文在此研究背景下提出如下展望,以期对红枣多糖的进一步开发利用提供可行性参考依据。a.从红枣多糖的结构研究角度来看,目前存在因提取提纯工艺不同,存在提取出的多糖结构功能不一问题。故未来可将红枣多糖的提取提纯工艺进一步规范,可从不同品种的红枣中提取红枣多糖,开展结构及活性差异性研究;b.从红枣多糖所具有的多种功能活性来看,目前针对红枣多糖的研究,还较多地集中于细胞实验和动物实验研究,对于其功能活性的机制探究较少,缺少结构与功能间影响的探究。故未来可从结构与功能之间的联系入手,深入探究红枣多糖作用机制,不局限于动物和细胞实验,可开展高质量的、多中心的、大样本的循证研究;c.从红枣多糖在食品相关领域的应用来看,虽然红枣多糖在食品及相关领域已有较多的应用,但仍存在产品研发深度不足等问题。而目前肠道菌群的调节作用受到较多学者的重视,故未来在红枣多糖及相关产品的深入探究挖掘时,可从红枣多糖所具有的菌群调节活性入手,深入探究红枣多糖对于肠道菌群调节作用的机制机理,研发出以红枣多糖为原料的、安全的、可靠的肠道菌群调节剂。

综上,针对红枣多糖的相关研究还有很多地方需要优化,未来可从红枣多糖的制备、结构、功能及应用等多个领域开展深入的研究,以便形成一条理论扎实、品质优良、安全可靠的红枣多糖的产品链、市场链。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] CHEN J P, TSIM K W K. A review of edible jujube, the *Ziziphus jujuba* fruit; A health food supplement for anemia prevalence [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2020, 11: 593655.
- [2] 张开平, 刘玫梅, 刘燕丽, 等. 响应面法优化大果山楂红枣复合果酒发酵工艺及其抗氧化活性分析 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44(23): 184–193. [ZHANG K P, LIU M M, LIU Y L, et al. Optimization of fermentation technology of *malus doumeri*(bois) chevalier and *Zizyphus jujube* Mill. compound fruit wine by response surface methodology and its antioxidant activity analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(23): 184–193.]
- [3] CHEN J P, LIU X Y, LI Z G, et al. A review of dietary *Ziziphus jujuba* fruit (jujube): developing health food supplements for brain protection [J]. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*: eCAM, 2017, 2017: 3019568.
- [4] ROSTAMI H, GHARIBZAHEDI S M. Microwave-assisted extraction of *Jujube* polysaccharide: optimization, purification and functional characterization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 143: 100–107.
- [5] LI J W, AI L Z, HANG F, et al. Composition and antioxidant activity of polysaccharides from *Jujuba* by classical and ultrasound extraction [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 63: 150–153.
- [6] JI X L, HOU C Y, YAN Y Z, et al. Comparison of structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Jujube* (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 1008–1018.
- [7] LU Y, BAO T, MO J L, et al. Research advances in bioactive components and health benefits of *Jujube* (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2021, 22(6): 431–449.
- [8] JI X L, ZHANG F, ZHANG R, et al. An acidic polysaccharide from *Ziziphus Jujuba* cv. Muzao: purification and structural characterization [J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 494–499.
- [9] JI X L, PENG Q, YUAN Y P, et al. Isolation, structures and bioactivities of the polysaccharides from *Jujube* fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.): A review [J]. *Food Chemistry*, 2017, 227: 349–357.
- [10] LI Z W, WU M L, WEI W L, et al. Fingerprinting evaluation and gut microbiota regulation of polysaccharides from *Jujube* (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(8): 7239.
- [11] JIAO R, LIU Y X, GAO H, et al. The anti-oxidant and antitumor properties of plant polysaccharides [J]. *The American Journal of Chinese Medicine*, 2016, 44(3): 463–488.
- [12] HE Z X, ZHU Y L, BAO X Y, et al. Optimization of alkali extraction and properties of polysaccharides from *Ziziphus jujuba* cv. residue [J]. *Molecules*, 2019, 24(12): 2221.
- [13] 王娜, 马琳, 谢新华, 等. 红枣多糖初步纯化及其对体外抗凝活性的影响 [J]. *中国食品学报*, 2015, 15(10): 141–146. [WANG N, MA L, XIE X H, et al. The effect of extraction and purification process on anticoagulant activity of polysaccharide of *Jujube* [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(10): 141–146.]
- [14] 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 Y S, MA Y F, LI M S, et al. Research progress in analytical methods for structures of phytogetic polysaccharides [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(3): 411–421.]

- [15] ZENG P J, LI J, CHEN Y L, et al. The structures and biological functions of polysaccharides from traditional Chinese herbs[J]. *Progress in Molecular Biology and Translational Science*, 2019, 163: 423-444.
- [16] 符玉霞, 郭欣, 魏亚博, 等. 红枣多糖的硫酸酯化修饰及其结构特性的研究[J]. *食品工业*, 2022, 43(8): 33-38. [FU Y X, GUO X, WEI Y B, et al. Study on sulfated modification and structural properties of *Jujube* polysaccharides[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(8): 33-38.]
- [17] 赵建成, 刘慧燕, 方海田. 骏枣多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(23): 71-78. [ZHAO J C, LIU H Y, FANG H T. Study on isolation, purification, structure characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Zizyphus jujuba* cv. junzao[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(23): 71-78.]
- [18] 杨燕敏, 郑振佳, 李桂芹, 等. 改性红枣多糖的制备和结构表征[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(9): 8-14. [YANG Y M, ZHENG Z J, LI G Q, et al. Preparation and structure characterization of modified jujube polysaccharides[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(9): 8-14.]
- [19] 巩晓佩, 张建, 郭筱兵, 等. 硫酸化修饰对红枣多糖结构及抗氧化活性的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 29-34, 120. [GONG X P, ZHANG J, GUO X B, et al. Effect of sulfate modification on the structure and antioxidant activity of jujube polysaccharide[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(4): 29-34, 120.]
- [20] 周文君, 池建伟, 易阳, 等. 龙眼、枸杞和红枣多糖的理化性质及其协同益生活性[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(11): 58-67. [ZHOU W J, CHI J W, YI Y, et al. Physicochemical properties and synergistic prebiotic activities of polysaccharides from longan fruits, goji berries, and jujube fruits[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(11): 58-67.]
- [21] 杨燕敏, 郑振佳, 高琳, 等. 红枣多糖超声波提取、结构表征及抗氧化活性评价[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(5): 120-126. [YANG Y M, ZHENG Z J, GAO L, et al. Ultrasonic extraction of jujube polysaccharide and its structure and antioxidant activity characterization[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 120-126.]
- [22] HUANG H L, HUANG G L. Extraction, separation, modification, structural characterization, and antioxidant activity of plant polysaccharides[J]. *Chemical Biology & Drug Design*, 2020, 96(5): 1209-1222.
- [23] BENCHAMAS G, HUANG S Y, HUANG G L. The influence of traditional and new processing technologies on the structure and function of food polysaccharide[J]. *Food & Function*, 2020, 11(7): 5718-5725.
- [24] LUO M C, ZHANG X Y, WU J, et al. Modifications of polysaccharide-based biomaterials under structure-property relationship for biomedical applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 266: 118097.
- [25] FERNANDES P, COIMBRA M. The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 314: 120965.
- [26] CHENG L Z, WANG Y F, HE X X, et al. Preparation, structural characterization and bioactivities of Se-containing polysaccharide: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 82-92.
- [27] 呼凤兰, 胡诗琪. 吕梁红枣多糖的提取及其抗氧化性研究[J]. *北方园艺*, 2022, 517(22): 91-96. [HU F L, HU S Q. Extraction and antioxidant activity of lyuliang jujube polysaccharides[J]. *Northern Horticulture*, 2022, 517(22): 91-96.]
- [28] WANG B. Chemical characterization and ameliorating effect of polysaccharide from chinese jujube on intestine oxidative injury by ischemia and reperfusion[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 48(3): 386-391.
- [29] 丁慧萍, 秦少伟, 吴丽明, 等. 红枣硒多糖的合成及性质研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(6): 220-225. [DING H P, QIN S W, WU L M, et al. Synthesis and properties of selenium red jujube polysaccharides[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(6): 220-225.]
- [30] 张越锋, 李福燕, 吴瑛. 红枣多糖及红枣硒多糖抗氧化活性的比较研究[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(3): 4-9. [ZHANG Y F, LI F Y, WU Y. Comparatively study on antioxidant activity of jujube polysaccharide and its se-polysaccharide[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(3): 4-9.]
- [31] ZHAI H B, ZHANG J M, SHANG D B, et al. The progress to establish optimal animal models for the study of acute-on-chronic liver failure[J]. *Frontiers in Medicine*, 2023, 10: 1087274.
- [32] LIU G P, LIU X Q, ZHANG Y C, et al. Hepatoprotective effects of polysaccharides extracted from *Zizyphus jujube* cv. huanghetanzao[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 76: 169-175.
- [33] WANG J H, HWANG S J, SON C G. Comparative analysis of the antioxidative and hepatoprotective activities of dimethyl diphenyl bicarboxylate in four animal models of hepatic injury[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(10): 1508.
- [34] ELNEWARY S A, ISMAIL R F, SHAFFIE N M, et al. Hepatoprotective effects of tagetes lucida root extract in carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in wistar albino rats through amelioration of oxidative stress[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2021, 59(1): 986-997.
- [35] CHEN Y R, QUE R Y, LIN L B, et al. Inhibition of oxidative stress and NLRP3 inflammasome by Saikosaponin-d alleviates acute liver injury in carbon tetrachloride-induced hepatitis in mice[J]. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 2020, 34: 36-45.
- [36] 谢雨彤, 罗依扎·瓦哈甫, 杨洁. 红枣多糖对链脲佐菌素诱导的糖尿病小鼠的降血糖作用[J]. *食品科技*, 2018, 43(9): 244-250. [XIE Y T, LUOYIZHA·W, YANG J. Hypoglycemic effects of jujube polysaccharide in diabetic mice induced by streptozotocin[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(9): 244-250.]
- [37] 龚频, 王佩佩, 同美霖, 等. 红枣多糖的提取工艺及药理活性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(13): 198-207. [GONG P, WANG P P, TONG M L, et al. Study on extraction technology and pharmacological activities of polysaccharide from *Zizyphus jujube* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(13): 198-207.]
- [38] 罗依扎·瓦哈甫, 骆新, 谢飞, 等. 红枣多糖对小鼠血糖及血清胰岛素水平影响的初步研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(22): 369-371, 374. [LUOYIZHA·W, LUO X, XIE F, et al. Influence of jujube polysaccharide on blood glucose and serum insulin of mice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(22): 369-371, 374.]
- [39] ZHAO Y, YANG X B, REN D Y, et al. Preventive effects of jujube polysaccharides on fructose-induced insulin resistance and dyslipidemia in mice[J]. *Food & Function*, 2014, 5(8): 1771-1778.
- [40] 贾丽娜, 马倩, 王新月, 等. 基于体外发酵模型分析植物多糖对 T2DM 患者肠道菌群及代谢的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(2): 248-261. [JA L N, MA Q, WANG X Y, et al. Effects of plant polysaccharides on intestinal flora and metabolism in patients Investigated using invitro fermentation model[J]. *Food Science*, 2023, 44(2): 248-261.]
- [41] XU D, XIAO J, JIANG D Z, et al. Inhibitory effects of a water-soluble jujube polysaccharide against biofilm-forming oral patho-

- genic bacteria[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 208: 1046–1062.
- [42] 牛佳卉, 袁静, 魏然, 等. 红枣多糖对小鼠肠道免疫屏障的保护作用及机制研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 295–300, 306. [NIU J H, YUAN J, WEI R, et al. Protective effect and mechanism study of jujube polysaccharides on Intestinal Immune barrier in mice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 295–300, 306.]
- [43] NGUYEN Q P, DENG T Z, WITHERDEN D A, et al. Origins of CD₄⁺ circulating and tissue-resident memory T-cells[J]. *Immunology*, 2019, 157(1): 3–12.
- [44] FAKHOURY H M A, KVIETYS P R, ALKATTAN W, et al. Vitamin D and intestinal homeostasis: Barrier, microbiota, and immune modulation[J]. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2020, 200: 105663.
- [45] CHI A P, KANG C Z, ZHANG Y, et al. Immunomodulating and antioxidant effects of polysaccharide conjugates from the fruits of *Ziziphus Jujube* on chronic fatigue syndrome rats[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 122: 189–196.
- [46] JI X L, HOU C Y, GAO Y G, et al. Metagenomic analysis of gut microbiota modulatory effects of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) polysaccharides in a colorectal cancer mouse model[J]. *Food & Function*, 2020, 11(1): 163–173.
- [47] LIANG Q, WANG X Y, YANG S, et al. Characterization of the antioxidant polysaccharides from *Ziziphus jujube* cv. Goutouzao and its tumor-inhibitory effects on human colorectal carcinoma LoVo cells via immunocyte activation[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(11): e13462.
- [48] WU Z, GAO R P, LI H, et al. New insight into the joint significance of dietary jujube polysaccharides and 6-gingerol in antioxidant and antitumor activities[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(53): 33219–33234.
- [49] CAI Y Q, CHEN P, WU C Y, et al. Sulfated modification and biological activities of polysaccharides derived from *Ziziphus jujuba* cv. jinchangzao[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 1149–1155.
- [50] 布丽根·加冷别克, 马爱霞, 任建业, 等. 红枣多糖涂膜协同冰温贮藏对杏果采收后品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(8): 37–42. [BULIGEN-J, MA A X, REN J Y, et al. Effect of jujube polysaccharide coating combined with near-freezing temperature on postharvest storage quality of apricot fruits[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(8): 37–42.]
- [51] 魏立华, 朱宏, 荀一萍, 等. 具有抗氧化功能的复合发酵乳及其制备方法: 中国, 201910343176. X[P]. 2019-08-16. [WEI L H, ZHU H, XUN Y P, et al. Compound fermented milk with antioxidant function and its preparation method: China, 201910343176. X[P]. 2019-08-16.]
- [52] YU C, XIAO J H. The Keap1-Nrf2 system: a mediator between oxidative stress and aging[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021, 2021: 6635460.
- [53] 不公告发明人. 一种红枣多糖葡萄酒: 中国, 201610061695.3 [P]. 2016-06-22. [NA. A jujube polysaccharide wine: China, 201610061695.3 [P]. 2016-06-22.]
- [54] 崔曦方. 一种天然抗衰老红石榴护肤品及其制备方法: 中国, 201610189191. X[P]. 2018-11-20. [CUI X F. A natural anti-aging red pomegranate skin care product and its preparation method: China, 201610189191. X[P]. 2018-11-20.]
- [55] 宋向飞, 雷雅坤, 刘宁, 等. 特色杂粮对糖尿病的保健功效及机制研究进展[J]. *华北农学报*, 2020, 35(S1): 441–447. [SONG X F, LEI Y K, LIU N, et al. Advances on health care effect and mechanism of characteristic coarse cereals on diabetes[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(S1): 441–447.]
- [56] 吴飞虎, 敬思群, 王晓芸, 等. 杂粮果蔬复合鲜面条的配方优化及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 125–130, 136. [WU F H, JING S Q, WANG X Y, et al. Formulation optimization and inhibitory effect on α -glucosidase activity of fresh noodles prepared by combination with grain, fruit and vegetable[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(24): 125–130, 136.]
- [57] 洗锦军, 伍俊荣. 一种低甜度水果馅料的制备方法: 中国, 202111509234.5 [P]. 2022-03-22. [XIAN J J, WU J R. A preparation method of low sweetness fruit fillings: China, 202111509234.5 [P]. 2022-03-22.]
- [58] 杨存. 一种红枣多糖含片及其制备方法: 中国, 201310423540.6 [P]. 2013-12-25. [YANG C. A jujube polysaccharide lozenge and its preparation method: China, 201310423540.6 [P]. 2013-12-25.]
- [59] 刘佳峰. 一种具有降血脂功效的米粉及其制备方法: 中国, 201810809451.8 [P]. 2018-12-11. [LIU J F. A rice flour with hypolipidemic effect and its preparation method: China, 201810809451.8 [P]. 2018-12-11.]
- [60] 崔国庭, 李沁沛, 王缎, 等. 红枣多糖对乳酸菌发酵及酸奶品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(19): 203–207. [CUI G T, LI Q P, WANG D, et al. Effect of jujube date polysaccharide on the fermentation of lactic acid bacteria and the quality of yogurt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(19): 203–207.]
- [61] 齐威, 贾丽娜, 马倩, 等. 一种含有乳酸菌发酵上清液的功能性饮料的制备方法: 中国, 202110878532.5 [P]. 2021-12-10. [QI W, JIA L N, MA Q, et al. A preparation method of a functional beverage containing lactic acid bacteria fermentation supernatant: China, 202110878532.5 [P]. 2021-12-10.]
- [62] 赵建英, 李祥, 薛博文, 等. 红枣多糖对益生菌生长代谢的研究[J]. *饲料研究*, 2022, 45(23): 73–77. [ZHAO J Y, LI X, XUE B W, et al. Effect of jujube polysaccharide on growth and metabolism of probiotics[J]. *Feed Research*, 2022, 45(23): 73–77.]
- [63] GHARIBZAHEDI S M T, AHMADIGOL A, KHUBBER S, et al. Whey protein isolate/jujube polysaccharide-based edible nanocomposite films reinforced with starch nanocrystals for the shelf-life extension of banana; Optimization and characterization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 222: 1063–1077.
- [64] CUI G T, ZHANG W X, WANG Q J, et al. Extraction optimization, characterization and immunity activity of polysaccharides from *Fructus jujubae*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 111: 245–255.
- [65] 石聚彬, 纵伟, 石聚领, 等. 一种红枣多糖口含片及其制备方法: 中国, 201010268063.7 [P]. 2013-04-24. [SHI J B, ZONG W, SHI J L, et al. A jujube polysaccharide buccal tablet and its preparation method: China, 201010268063.7 [P]. 2013-04-24.]
- [66] 石聚彬, 纵伟, 石聚领, 等. 一种红枣多糖泡腾片及其制备方法: 中国, 201010268066.0 [P]. 2013-04-24. [SHI J B, ZONG W, SHI J L, et al. A jujube polysaccharide effervescent tablet and its preparation method: China, 201010268066.0 [P]. 2013-04-24.]
- [67] 申培红, 蔡小平, 汪晟坤, 等. 一种辅助胃癌治疗的营养液配方及制作工艺: 中国, 202111035340.4 [P]. 2022-01-28. [SHEN P H, CAI X P, WANG S K, et al. A nutrient solution formula and production process for adjuvant treatment of gastric cancer: China, 202111035340.4 [P]. 2022-01-28.]
- [68] 申培红, 蔡小平, 汪晟坤, 等. 一种辅助肝癌治疗的营养液配方及制作工艺: 中国, 202111312011. X [P]. 2022-01-11. [SHEN P H, CAI X P, WANG S K, et al. A nutrient solution formula and production process for assisting liver cancer treatment: China, 202111312011. X [P]. 2022-01-11.]