DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251205006
引用格式: 李辉, 林文梁, 刘振杰, 等. 水果多糖的提取、生物活性、构效关系及应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 155–166.
LI H, LIN WL, LIU ZJ, *et al*. Research progress on the extraction, bioactivity, structure-activity relationship and applications of fruit polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 155–166. (in Chinese with English abstract).

水果多糖的提取、生物活性、构效关系及应用研究进展

李 辉[1], 林文梁[1], 刘振杰[2], 杨 毅[1*]
(1. 河北中烟工业有限责任公司, 石家庄 050051; 2. 河北省农林科学院石家庄果树研究所, 石家庄 050061)

摘 要: 水果多糖是存在于水果果肉、果皮及种子等多种组织中的重要生物活性成分。由于水果多糖具备抗氧化、抗炎、抗肿瘤以及降血糖等多种生理功能, 因此被看作是功能性食品与药品领域中极具开发潜力的天然活性物质。不过, 目前针对水果多糖的提取技术、生物活性以及构效关系等方面的研究, 仍缺少较为系统的梳理与总结。本文系统阐述了水果多糖从传统低效提取技术向高效、环保方向发展的研究现状, 介绍了其主要生物活性与相关作用机制, 并进一步重点探讨了水果多糖的分子量、单糖组成以及结构修饰等关键结构特征与生物活性之间的构效关系。此外, 本文还总结了水果多糖在食品工业中的应用现状, 并对未来的研究方向与产业化开发前景进行了展望, 以期为水果多糖的深入研究与实际应用提供参考。

关键词: 水果多糖; 提取技术; 生物活性成分; 构效关系

Research progress on the extraction, bioactivity, structure-activity relationship and applications of fruit polysaccharides

LI Hui[1], LIN Wen-Liang[1], LIU Zhen-Jie[2], YANG Yi[1*]
(1. *China Tobacco Hebei Industrial Co*., *Ltd*., *Shijiazhuang* 050051, *China*; 2. *Shijiazhuang Institute of Fruit Trees*, *Hebei Academy of Agriculture and Forestry*, *Shijiazhuang* 050061, *China*)

ABSTRACT: Fruit polysaccharides are pivotal bioactive components found in various tissues of fruits, including the pulp, peel and seeds. They possess multiple physiological functions, such as antioxidant, anti-inflammatory, antitumor and hypoglycemic effects, establishing them as one of the natural bioactive substances with considerable development potential in the fields of functional foods and pharmaceuticals. However, there is still a lack of systematic analysis and summarization regarding the extraction techniques, biological activities, structure-activity relationships and other related aspects of fruit polysaccharides. This paper systematically elaborated on the progression of extraction techniques for fruit polysaccharides from traditional low-efficiency methods to

收稿日期: 2025-12-05
基金项目: 基于多源材料的烟用保润剂研发及在烟草中的应用项目(2025130000340503)
第一作者: 李辉(1982—), 男, 工程师, 主要研究方向为烟草香精香料研究。E-mail: 307191435@qq.com
***通信作者:** 杨毅(1992—), 男, 工程师, 主要研究方向为烟草香精香料研究。E-mail: 946905091@qq.com

high-efficiency and environmentally friendly approaches, reviewed the research advances in their main biological activities and mechanisms of action, and further focused on discussing the structure-activity relationships between key structural characteristics and their corresponding biological activities. In addition, the paper summarized the current applications of fruit polysaccharides in the food industry and provided an outlook on future research and industrial development directions, aiming to offer insights for further study and practical utilization of these compounds.

KEY WORDS: fruit polysaccharides; extraction techniques; bioactive components; structure-activity relationship

0 引 言

中国是世界上最大的水果生产国与消费国，水果产业的规模已经跃居到种植业的第 3 位，成为了能有效促进农民增收的重要支柱产业之一[1]。据最新统计数据能看出，近年来我国水果产业一直保持着增长的态势，2024 年全国水果的总产量已经达到了 3.35 亿吨[2]。不过，在产量连年提升的背景下，我国水果产业也面临诸多的发展难题，一方面是市场的消费能力逐渐趋于饱和，鲜果本身容易腐烂、难以长期储存，另一方面是加工转化的能力相对不足，这些问题共同造成了区域性、季节性的滞销现象会频繁出现，也让整个产业的可持续发展遭遇到了明显的瓶颈[3]。

水果不仅能为人体提供必需的维生素、矿物质和膳食纤维，还富含多糖、多酚等各类生物活性成分，具有重要的营养与功能价值。近年的相关研究发现，从水果中提取到的多糖具备抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、降血糖、保肝和保湿等多种生物活性，被广泛应用到食品、护肤品和生物医药等各类产品当中[4]。此外，由于水果的品种存在明显差异，不同种类水果多糖在含量与提取率上也会有显著的不同，比如红心火龙果多糖的得率就能达到 30.43%[5]，而猕猴桃多糖的得率则大概在 1.21%~9.8%之间[6]。结合我国水果产业的发展现状来看，深入开展水果多糖的系统研究是有着重要现实意义的，一方面，建立高效且低成本的提取技术，能够把过剩的水果资源转化为高价值的产品，实现资源的高值化利用；另一方面，阐明多糖的构效关系，会有助于进一步拓展它的应用领域[7]。本文旨在对水果多糖的最新研究进展进行综述，重点讨论其提取技术、生物活性、构效关系及在食品和医药产业中的相关应用，同时分析当前研究中存在的不足，并对未来的研究方向提出合理展望，以期能为水果多糖的理论研究与产业化开发提供有价值的参考，进而助力我国水果产业的转型升级。

1 水果多糖的提取技术

提取和纯化是获得多糖的关键步骤，不同提取方法会导致多糖结构和成分的差异，进而对其生物活性产生重要影响[8]。多糖常见的提取方法对比如表 1 所示。

1.1 溶剂提取

溶剂提取是从水果中提取多糖最常用的方法之一。传统的多糖溶剂提取包括热水提取、酸提取和碱提取[9]。热水提取是将原料与蒸馏水按特定液固比混合后，加热至预设温度并维持特定时间以实现多糖溶出[10]。酸提取和碱提取法则是通过在原料中添加酸性溶液或碱性溶液，以此来水解植物细胞壁的复合结构，从而促进胞内多糖的溶解与释放[11]。

不同的提取介质不仅会影响多糖得率，还会改变多糖的结构特征，从而影响多糖的生物活性。DOU 等[12]对比了不同提取方法对黑莓多糖得率和生物活性的影响。结果表明：利用氢氧化钠提取的多糖得率最高，而热水和氯化钠提取的多糖具有更高的分子量和更好的抗氧化活性和降血糖活性。类似的，LI 等[13]发现用氢氧化钠提取的沙棘多糖得率最高、分子量最低且抗氧化作用最明显，而用盐酸提取的多糖对胆汁酸的结合能力最显著，降血脂活性最强。碱提法取得较高得率的原因可能在于，碱液破坏了纤维素和半纤维素之间的氢键，促进细胞壁中不溶性多糖的有效释放，并将其转化为可溶性多糖，从而提高了多糖的最终得率[14]。相比之下，酸提法得率较低，则可能是酸处理会裂解多糖中的糖苷键，导致长链多糖发生一定程度的降解，甚至生成更多不易被乙醇沉淀的游离糖，从而造成多糖得率下降[15]。

近年来，低共熔溶剂因具备制备简单、可生物降解、可再生、生物相容性好、提取率高等优点，被广泛应用于天然产物特别是多糖的提取中，是一种具有优良性质的新型绿色提取溶剂[16]。低共熔溶剂的内部结构通过分子间氢键形成类似基质的聚合物，溶质分子可以溶入这种分子网络的空穴中，从而提高溶解度，可用于植物中活性成分的高效提取[17]。例如，王艳艳等[18]以低共熔溶剂为提取溶剂，采用单因素实验和响应面法优化了酸枣多糖最佳的提取方案，其多糖含量可达到 571.31 mg/g。同时，酸枣多糖体外降糖实验结果显示，酸枣多糖的 α-淀粉酶抑制率为 76.08%，显示出较强的降血糖活性。

表 1　多糖的不同提取技术
Table 1　Different extraction techniques of polysaccharides

提取方法	原理简述	主要优点	主要缺点	对多糖结构/活性的潜在影响
热水浸提	利用温水(60~100 ℃)浸提多糖	设备简单、成本低、操作简便	时间长、能耗高、得率较低、选择性差、可能降解热敏多糖	可能导致部分降解, 分子量降低
酸/碱提取	利用酸/碱破坏细胞壁/果胶酯键, 释放多糖	得率较高, 成本低	强酸/碱可能破坏多糖结构(如脱酯、糖苷键断裂), 产生废水	显著改变酯化度、分子量, 可能影响凝胶性/活性
酶法提取	使用特定酶(果胶酶、纤维素酶等)降解细胞壁成分, 释放多糖	条件温和、选择性好、得率较高、环保	成本较高、反应时间需优化、酶稳定性差	对结构破坏较小, 能获得更接近天然状态的多糖
低共熔溶剂	氢键驱动溶解, 破坏植物细胞壁中纤维素/半纤维素的氢键, 溶解多糖	绿色环保、可设计性强、提取效率高、条件温和	高黏度、回收困难	温和条件减少链断裂, 利于保留大分子量多糖
超声波辅助提取	利用超声波空化效应破坏细胞壁, 加速溶剂渗透和物质溶出	显著缩短时间、提高得率、降低能耗/溶剂用量	设备操作复杂、长时间超声可能导致局部过热降解多糖	可能轻微降低分子量, 但对活性影响相对较小
微波辅助提取	利用微波能快速加热物料内部, 破坏细胞结构	提取速度快、效率高、溶剂用量少	控温要求高、可能因过热导致多糖降解	可能降低分子量, 影响流变性质
组合提取	组合两种或多种方法(如酶+超声, 微波+酸)	协同增效, 克服单一方法缺点, 进一步提高得率/效率	工艺更复杂, 成本可能增加	取决于组合方式, 需优化避免过度降解

1.2　辅助提取

在多糖溶剂提取的基础上, 辅助其他技术不仅能够大幅提高多糖得率和提取速度, 还可使反应条件更加温和。因此, 辅助提取在多糖提取中的应用越来越广泛。

1.2.1　酶辅助提取

部分植物多糖会存在于细胞壁和细胞质当中, 而细胞壁本身难以被降解, 酶则能够破坏细胞壁的致密结构, 让细胞壁与细胞间质的结构产生局部疏松、膨胀等一系列变化, 减少传质过程中的阻力, 从而提高多糖的提取效率, 因此在提取植物多糖的时候, 可添加纤维素酶、果胶酶或者几种蛋白酶来进行辅助提取[19]。酶辅助提取技术具备提取时间短、反应特异性强、得率高、操作条件温和、环境友好以及节能等多项优势[20]。YULIARTI 等[21]对多种提取方法做了比较, 还通过单因素实验优化了中华猕猴桃多糖的提取参数, 最终确定当在 25 ℃下利用纤维素酶辅助提取 30 min, 采用中等浓度的果浆与酶液比例时, 就能获得 9.91%的最高提取得率, 该得率明显高于酸提法所得的 6.71%和热水提取法所得的 6.12%。此外, 和单一酶相比, 混合酶在酶辅助提取中有着更广泛的应用前景, 比如采用 1%混合酶(纤维素酶:果胶酶质量比=1:1)提取得到的红火龙果多糖, 其得率能达到 4.60%, 这一数值要高于酸提法的 3.78%[22]。这些研究都表明了酶辅助提取法在水果多糖工业化提取中的可行性。不过, 酶辅助提取法固有的缺点仍然不可避免, (1)因添加酶而导致提取成本有所增加, (2)对底物的要求相对较高, (3)存在酶的稳定性不佳等问题[23]。今后, 一方面可以通过固定化酶技术来实现酶的循环重复利用[24], 另一方面还能采用酶分子修饰方法或者微胶囊技术来保护酶的活性中心, 以此解决酶稳定性差的问题, 也可以优化反应体系, 从而最大限度减少大规模生产中环境波动对酶活性产生的影响[25]。

1.2.2　超声辅助提取

超声辅助提取法是指利用超声波的空化效应来快速破坏植物细胞壁的结构, 从而促进多糖组分释放出来的过程[26]。在某些特定情况下, 超声辅助提取法能通过物理作用的方式提高提取效率, 进而减少对酶的依赖程度, 还能把提取成本降低[27]。CHEN 等[28]研究发现, 在超声辅助提取的条件下, 山楂多糖的提取率能达到 7.47%, 这一数值较传统热水浸提法的 5.88%提升了 26%; TANG 等[29]从山竹中提取到了多糖, 还利用单因素实验和响应面法优化了相关提取工艺, 最终确定的最佳提取条件为料液比 1:30 (*m*:*V*)、超声功率 288 W、提取时间 65 min, 在这样的提取条件下山竹多糖的得率可达到 14.73%。因此, 在提取多糖的时候, 超声辅助提取法不仅能显著缩短提取所需的时间, 还能在相对较低的温度环境中, 保留住所提取化合物原有的生物活性[30]。

超声波辅助提取法在多糖提取领域已经显示出了诸多优势, 但在实际应用过程中仍然会面临各种挑战, (1)热效率相对较低, (2)超声波的作用可能会破坏多糖本身的结构, (3)设备的操作流程较为复杂以及适用范围存在一定局限性[31]。未来的相关研究工作, 应侧重于通过设备创新的方式, 解决传统单频超声波所存在的能量损耗问题; 还可通过建立自动化生产线和制定标准化操作规程, 来简化该技术在工业化应用中的流程。

1.2.3　微波辅助提取

微波辅助提取是一种借助微波来提高多糖提取效率的新型技术, 其作用机制主要是建立在微波的热效应基础之上[32]。目前, 研究人员已经成功运用微波辅助提取技术, 从多种不同的水果中提取到了多糖。例如李乐等[33]就利用该技术从无花果中成功提取出多糖, 还通过响应面法优化出了最佳提取条件, 具体为料液比 1:40 (*m*:*V*)、微波功率 600 W、提取时间 40 min、提取温度 70 ℃, 在这样

的提取条件下，多糖的得率能够达到 12.17%; CHEN 等[34]则采用响应面法对橘皮果胶多糖的微波辅助提取工艺做了优化，在其确定的最优条件下，多糖的得率可达到 19.9%。和传统提取方法相比，微波辅助提取技术会具备不少优势，(1)有着良好的经济可行性和环保性，(2)提取溶剂的用量能做到最少，(3)耗时更短、能耗更低，还能让得率得到显著提升[35]。且微波辅助提取技术也存在一定的局限性，比如需要专用的微波设备，而这类设备通常价格昂贵，还得有专业人员来操作和维护，此外微波加热可能会出现不均匀的情况，尤其是在处理大体积或异质性样品的时候，容易导致局部过热[6]。未来的研究中，可通过把微波辅助提取法与其他预处理技术(比如超声处理或机械破碎)结合起来的方式，提高在复杂基质中的提取效率，这样既能克服微波辅助提取法现有的局限，也能进一步拓展它的应用范围。

1.3 组合提取

基于溶剂提取与辅助提取工艺的持续创新，组合提取技术也得到了相应的发展，提取方法的组合应用，其核心目的是突破并解决单一提取技术在得率、提取时间和成本控制方面存在的各类问题。不同提取技术之间产生的协同效应，不仅能把多糖的提取得率显著提高，还能节省提取过程中消耗的时间，让反应条件变得更为温和，这对于保护提取产物中不稳定的物质是极为有利的[20]。热水提取与超声波辅助提取的组合是目前应用较为广泛的方式，相关研究已经表明，采用热水提取与微波辅助提取相结合的方法从番石榴中提取出的多糖得率要明显优于单一使用其中任意一种提取方法[36]。另有研究显示，当分别用酶辅助提取法和热水提取法从斐油果中提取多糖时，这两种单一方法下的多糖得率均低于微波辅助提取与酶辅助提取组合使用所得到的结果[37]。这些研究结果都充分表明组合提取技术在工艺设计上具有显著的先进性，是适用于水果多糖提取的高效技术路径。未来水果多糖提取技术的发展趋势，要求在实现高产率提取的同时，不能对产物原有的生物活性造成影响，当传统单一提取方法难以满足这一核心需求时，组合提取技术便成为了一种合理且有效的选择。因此，组合提取技术的进一步发展是符合当前及未来水果多糖提取领域实际需要的。

2 水果多糖的生物活性

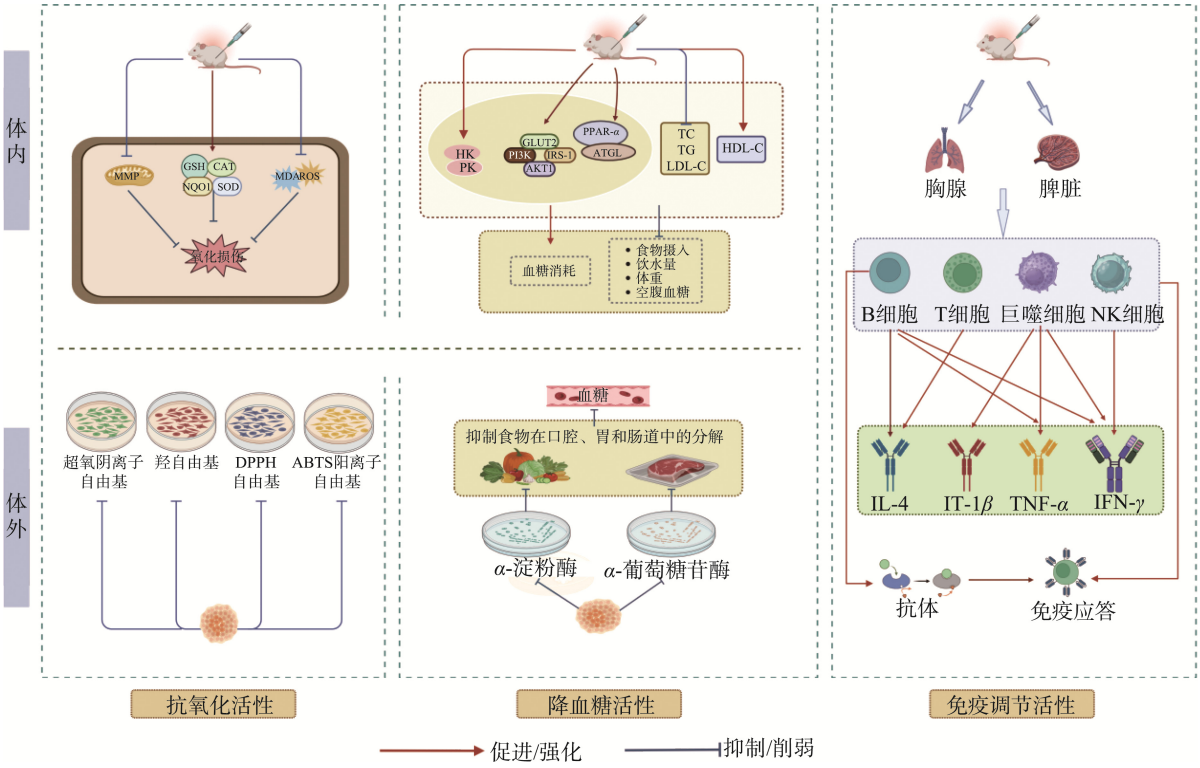
天然多糖及其改性产物通常会表现出多种生物活性。近年研究显示，水果多糖作为天然多糖的重要类别也具有免疫调节、抗氧化、降血糖及抗癌等多重功效[38]。主要生物活性的作用机制如图 1 所示。

2.1 免疫调节活性

免疫应答是指机体受抗原刺激后，免疫细胞对抗原分子识别、活化、增殖及分化，产生免疫物质以发挥特异性免疫，维持机体内环境稳定的过程，是人体重要生理功能之一[39]。评估免疫调节活性的主要指标包括免疫细胞的增殖、免疫相关细胞因子的水平、细胞活力和吞噬功能[40]。研究表明，龙眼果肉多糖能以细胞因子 IFN-γ 的形式激活下游信号转导，促进小鼠巨噬细胞活化，刺激 T、B 淋巴细胞增殖，并增强 NK 细胞对 YAC-1 淋巴瘤细胞的杀伤作用。柑橘多糖则能够增强巨噬细胞的活力，并提高一氧化氮(NO)以及 TNF-α 和白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)等细胞因子的水平[41]。此外，WANG 等[42]通过荷瘤小鼠实验证实，从沙棘中分离得到的多糖组分，不仅能促进淋巴细胞的增殖，还能有效增强巨噬细胞的吞噬活性。这些结果共同说明，水果多糖在体内与体外的实验中均能表现出优异的免疫调节活性，具备被开发为新型免疫调节剂的良好潜力。然而，目前针对水果多糖免疫调节活性的多数研究，仍偏重于表型层面的观察，在受体结合、信号转导等分子机制方面的直接证据仍较为缺乏，未来还需要开展更为深入的分子机制研究，系统阐明多糖与特定免疫受体之间的相互作用，以及对下游信号通路的调控网络。

2.2 抗氧化活性

氧化应激是机体内氧化与抗氧化作用出现失衡后，会使得中性粒细胞产生炎性浸润、蛋白酶分泌增加，进而能促使大量 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基及羟自由基等氧化中间产物不断生成[43]，这些氧化产物在体内的过度积累，会诱发机体出现慢性疾病并加快机体的衰老进程[44]。通过测定多糖对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基及羟自由基等多种自由基的清除能力，可以评估多糖的体外抗氧化能力。多项研究证实，水果多糖对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基及羟自由基等均能表现出显著的清除效果。例如火龙果皮多糖 DFPWSP-1 对 DPPH 自由基、超氧阴离子和羟基自由基的清除率能分别达到 70.17%、80.52%和 78.61%[45]。此外，陆杰等[46]以自由基清除率为评价指标发现，树莓多糖(raspberry polysaccharide, RPP-6)在 10~360 μg/mL 的质量浓度范围内，对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基的清除能力会与质量浓度呈正相关关系，当质量浓度达到 320 μg/mL 时，DPPH 自由基清除率可达 36%, ABTS 阳离子自由基清除率更能达到 86%，这也说明 RPP-6 具备较为优良的抗氧化活性。水果多糖的体内抗氧化能力，通常可以通过 SOD、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-px)、CAT 和 MDA 等与氧化应激相关的指标来进行评估。沙棘多糖能够显著提升 CCl_4 诱导的小鼠体内 SOD 和 GSH-px 的活性水平，同时还能抑制 MDA 的生成，这证实水果多糖可以通过激活内源性的抗氧化系统来发挥出相应的抗氧化作用[47]；类似的，荔枝多糖同样在小鼠体内展现出了十分优异的抗氧化活性[48]。



注:蛋白激酶 B (akt serine/threonine kinase 1, AKT1); 脂肪甘油三酯脂肪酶(adipose triglyceride lipase, ATGL); 过氧化氢酶(catalase, CAT); 葡萄糖转运蛋白 2 (glucose transporter type 2, GLUT2); 谷胱甘肽(glutathione, GSH); 高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C); 己糖激酶(hexokinase, HK); 干扰素-γ (interferon-γ, IFN-γ); 白细胞介素-1β (interleukin-1β, IL-1β); 白细胞介素-4 (interleukin-4, IL-4); 胰岛素受体底物 1 (insulin receptor substrate 1, IRS-1); 低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C); 丙二醛(malondialdehyde, MDA); 基质金属蛋白酶(matrix metalloproteinase, MMP); 自然杀伤细胞(natural killer cell, NK); 醌氧化还原酶-1 [NAD(P)H quinone dehydrogenase 1, NQO1]; 磷脂酰肌醇 3-激酶(phosphatidylinositol 3-kinase, PI3K); 丙酮酸激酶(pyruvate kinase, PK); 过氧化物酶体增殖物激活受体 α (peroxisome proliferator-activated receptor-α, PPAR-α); 活性氧(reactive oxygen species, ROS); 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD); 总胆固醇(total cholesterol, TC); 甘油三酯(triglycerides, TG); 肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor-α, TNF-α); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH); 2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]。

图 1　水果多糖主要活性作用基本机制示意图

Fig.1　Schematic diagram of the basic mechanism of the main bioactive functions of fruit polysaccharides

综上，多种水果多糖都具备一定的抗氧化效应，不过目前的相关研究大多还集中在体外化学模型上，针对体内的系统研究仍相对不足；另一方面，体内实验所采用的氧化应激模型也较为单一，多数依赖于 CCl_4 等化学诱导方式，缺少了在多种病理生理条件下对抗氧化效应开展的系统考察。未来的研究应进一步拓展体内模型的应用，构建出更多元、也更贴近人类慢性疾病真实状态的氧化应激模型，从而更为全面地评估多糖在体内发挥的抗氧化功效与相关作用机制。

2.3　降血糖活性

糖尿病是由胰岛素分泌不足或是利用障碍所引发的，以高血糖为主要特征的一类慢性代谢疾病[49]。当前临床上主要还是依靠胰岛素、阿卡波糖等常规药物来进行干预与治疗，而积极寻找安全有效的膳食替代方案，会有助于提升糖尿病的治疗效果，并进一步改善患者的整体生活质量[50]。水果多糖具备独特的生物活性与良好的安全性，在机体血糖调控与稳定方面，展现出了十分可观的应用前景[51]。通过抑制 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的活性，来延缓碳水化合物的消化速度以及葡萄糖的吸收效率，已经成为了控制餐后血糖升高的常用且有效的策略。端木传宇等[52]采用 α-葡萄糖苷酶抑制实验，对黑莓多糖的降糖活性进行了系统评价，结果可以表明，黑莓多糖对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶均能表现出较好的抑制效果，其对应的半抑制质量浓度分别为 0.061 mg/mL 和 0.36 mg/mL；与此类似，桑葚多糖对这两种关键消化酶也能产生显著的抑制作用[53]。此外，也有不少学者通过体内实验来进一步探究水果多糖的降糖活性，HUANG 等[54]的研究结果显示，荔枝多糖能有效改善糖尿病小鼠的葡萄糖耐量水平；韩著等[55]则借助四氧嘧啶诱导的糖尿病小鼠模型证实，枸杞多糖可以显著降低模型小鼠的空腹血糖浓度。这些研究成果都为水果多

糖所具备的降糖效应提供了扎实可靠的体外和体内实验证据，所以水果来源的多糖可开发为一类降血糖的新型天然辅助治疗剂。

2.4 其他活性

除了上述提到的几种生物活性之外，水果多糖还能表现出抗炎、神经调节、抗疲劳等多种潜在的生物活性。已有研究结果显示，草莓多糖能够有效降低 TNF-α/白细胞介素-10(促炎/抗炎)细胞因子的分泌比值，表明草莓多糖具备较为优良的抗炎潜力[56]；此外，RJEIBI 等[57]通过利用角叉菜胶诱导的小鼠炎症模型开展实验，成功证实了枸杞多糖不仅具有良好的抗炎作用，还能发挥出显著的抗氧化能力，具备被开发为功能性代谢物的价值。阿尔茨海默病是目前临床上最常见的神经退行性疾病，它的主要特征是淀粉样 β 蛋白(amyloid β-protein, Aβ)在体内出现异常积累，进而导致神经发生受损以及认知功能出现损伤[58]。WU 等[59]通过体外实验证实，从枸杞中分离并纯化得到的水溶性多糖 (lycium barbarum polysaccharide-3, LBP-3)，能够在 N2a/APP695 细胞中，诱导 Aβ_{42}/Aβ_{40} 水平呈浓度依赖性降低，同时还能提高细胞内与氧化还原相关的酶活性，保护神经细胞免受损伤，这表明 LBP-3 可能具备治疗阿尔茨海默症的潜在价值。在抗疲劳方面，BO[60]专门探究了蓝莓多糖对 *D*-半乳糖致衰老年小鼠的运动能力、抗疲劳作用，以及相关生理指标所产生的影响，结果显示，草莓多糖能有效延长小鼠的力竭游泳时间，降低其体内血尿素氮、血乳酸和 MDA 的含量，还能显著提高肝糖原、肌糖原、SOD 和乳酸脱氢酶的储备量，表明 BPs 具备良好的抗疲劳作用。

3 水果多糖的构效关系

水果多糖的结构特征和其生物活性之间有着密切的关联，这些特征主要包含分子量、单糖组成以及化学修饰这几个方面[61]。目前，有关各类水果中新型多糖的分子量及单糖组成的研究数据已经积累得较为完善。要设计出具有潜在活性的水果多糖，就必须深入研究它的结构与生物活性之间的内在关联，进而用这些研究结果去指导多糖的结构修饰工作，本节会对现有相关研究进行系统综述，以期能为水果多糖构效关系的深入研究提供可参考的依据。

3.1 分子量

相对分子量是能表明多糖结构与功能关系的一个重要特征，只有多糖的相对分子量处在合适的范围之内，才能让它发挥出最佳的生物活性[62]。迄今为止，已经从多种水果中成功分离出了许多不同类型的多糖。如表 2 所示，这些水果多糖的分子量分布相当宽泛，其平均分子量在 6.99 kDa 至 760 kDa 之间。

研究发现，许多低分子量的水果多糖，往往能表现出更为优异的抗氧化活性。例如通过不同提取方法获得的猕猴桃多糖样品(KPS-M、KPS-U 和 KPS-H)中，分子量最小的 KPS-M (168.9 kDa)对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基的清除效果与还原能力均是最强的[63]。同样，在对蓝莓果胶的研究中，分子量较小的 BP1 (90.27 kDa)与 BP2 (93.13 kDa)对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基的清除能力也明显优于高分子量的 BP3 (1223 kDa)[64]。出现这些现象的原因，很可能是低分子量的水果多糖拥有更多可还原的羟基末端，能够更好地接受并清除自由基[61]；同时，较低分子量的多糖在黏度与溶解度方面也更具优势，这会进一步增强它的抗氧化活性。在免疫调节领域，分子量较高的多糖能更有效地与免疫细胞或受体结合，触发相关的信号通路，因此往往表现出更强的免疫调节作用[65]。FENG 等[66]通过超滤技术将提取获得的枸杞多糖分离为两个组分，其中高分子量组分(27.7 kDa)能显著增强 RAW264.7 巨噬细胞的活力，诱导细胞极化，并调节 NO、TNF-α、IL-6 以及 ROS 在细胞中的产生；相比之下，低分子量组分(6.99 kDa)则对 RAW264.7 细胞的增殖与极化未显示出显著影响。

水果多糖降血糖活性与其分子量之间的关系较为复杂。一些研究发现，分子量较小的水果多糖具有更好的降血糖活性。在 AN 等[67]制备的 5 种荔枝多糖样品 LPPA (85.6 kDa)、LPPI (85.1 kDa)、LPPH (82.1 kDa)、LPPFH (80.7 kDa)和 LPPF (72.9 kDa)中，对 α-糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制活性顺序为: LPPF>LPPFH>LPPH>LPPI>LPPA。然而, DOU 等[12]研究发现，高分子量黑莓多糖对 α-葡萄糖苷酶活性抑制作用要强于低分子量的黑莓多糖[12]，这可能是因为高分子量多糖的黏度会更大，这种较高的黏度能减缓葡萄糖从 α-葡萄糖苷酶活性位点的扩散速度，进而增强其降糖作用[68]。所以多糖的分子量和它的生物活性之间，并不存在简单的正相关或负相关关系，其对不同生物活性的影响是各不相同的。未来的研究中，可以通过控制多糖的提取和加工条件，来获得具有特定分子量的水果多糖，进而优化它在食品、药品以及保健品等领域的实际应用效果。

3.2 单糖组成

单糖的组成与比例能够直接影响多糖的理化性质，进而对其生物活性产生重要影响[69]。如表 2 所示，水果多糖几乎均为杂多糖，通常由 Rha、Ara、Man、Gal、Xyl、Glu 和 Fuc 以不同比例构成。此外，有些水果多糖中还含有 GalA 与 GlcA。

糖醛酸作为水果多糖的主要酸性单糖，其含量可影响到多糖的多种生物活性。LI 等[70]探究了通过不同提取技术制备的 4 种桑葚多糖的构成组分。与其他组分相比，通过高速剪切均质辅助热水提取法获得的多糖(HSEHE-100) GalA 含量最高，对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基的清除能力也最强。类似的，在分析枣多糖抗氧化活性时发现，各组分的 DPPH 自由基清除能力与 GalA 含量正相关[71]。

表 2　不同水果多糖的分子量、单糖组成及生物活性汇总表

Table 2　Summary of molecular weight, monosaccharide composition, and bioactivity of polysaccharides from different fruits

水果种类	多糖组分	分子量/kDa	单糖组成/%或摩尔比	生物活性	参考文献
黑莓	Na	527.39	Man:Rha:GalA:Glu:Gal:Ara (1.69:7.05:49.02:6.29:8.92:27.04)	抗氧化活性(Na>Hw>Al>Ac) 降血糖活性(Hw≈Na>Ac>Al)	[12]
	Hw	436.59	Man:Rha:GalA:Glu:Gal:Ara (1.49:6.15:55.18:5.45:7.90:23.82)		
	Al	57.34	Man:Rha:GalA:Glu:Gal:Ara (1.74:8.05:48.36:4.61:9.87:27.36)		
	Ac	24.25	Man:Rha:GalA:Glu (0.77:2.88:92.29:4.07)		
火龙果	PSP-H	354.41	Gal:Glu:Rha:Ara:Xyl:GalA (29.03:43.76:15.20:3.98:1.09:6.95)	降血糖活性:(PSP-h>PSP-a> PSP-c>PSP-e) 抗氧化活性:(PSP-h>PSP-u> PSP-e>PSP-i>PSP-a>SP-c)	[22]
	PSP-a	210.73	Gal:Glu:Rha:Ara:Xyl:GalA (57.49:6.68:15.16:11.61:3.70:5.35)		
	PSP-i	186.40	Gal:Glu:Rha:Ara:Xyl:GalA (57.49:6.68:19.98:5.10:1.62:9.32)		
	PSP-e	71.05	Gal:Glu:Rha:Ara:Xyl:GalA (44.78:5.14:28.36:9.59:1.18:10.96)		
	PSP-u	80.82	Gal:Glu:Rha:Ara:Xyl:GalA (52.51:6.50:19.40:10.07:3.63:7.89)		
	PSP-c	327.10	Gal:Glu:Rha:Ara:Xyl:GalA (32.76:39.21:13.63:5.75:1.71:6.94)		
猕猴桃	KPS-M	168.9	Man:Rha:GalA:Glu:Gal:Xyl:Ara (0.36:0.23:3.28:1.00:1.69:0.24:0.93)	抗氧化活性 (KPS-M>KPS-U>KPS-H)	[63]
	KPS-U	168.9~195.5	Man:Rha:GalA:Glu:Gal:Xyl:Ara (0.77:0.47:5.16:1.00:2.91:0.36:1.86)		
	KPS-H	195.5	Man:Rha:GalA:Glu:Gal:Xyl:Ara (0.25:0.35:4.07:1.00:1.24:0.24:1.01)		
蓝莓	BP1	90.27	Rha:GalA:Gal:Ara (3.86:3.92:46.06:39.72)	抗氧化活性(BP1/BP2>BP3) 抗菌活性(BP1/BP2>BP3))	[64]
	BP2	93.13	Rha:GalA:Gal:Ara (9.50:37.49:27.59:20.76)		
	BP3	122.30	Rha:GalA:Gal:Ara (19.78:32.21:23.80:19.72)		
罗汉果	SGP-C2	500	GlcA:Rha:GalA:Glu:Gal:Ara (0.78:1.84:26.57:1.31:0.49:0.06)	免疫调节活性 (SGP-D1>SGP-C2)	[65]
	SGP-D1	760	(1.37:2.00:20.79:0.61:0.12:0.25)		
枸杞	LBP-1	6.99	Man:Glu:GalA:Gal:Xyl:Ara:Fuc:Rha (1.28:47.27:0.39:1.20:0.73:0.81:1.81:0.82)	免疫调节活性 (LBP-2>LBP-1)	[66]
	LBP-2	27.7	Man:Glu:GalA:Gal:Xyl:Ara:Fuc:Rha (1.28:11.68:1.46:13.37:1.91:27.76:0.62:1.67)		

表 2(续)

水果种类	多糖组分	分子量/kDa	单糖组成/%或摩尔比	生物活性	参考文献
荔枝	LPPA	85.6	Rib:Rha:Ara:Xyl:Man:Glu:Gal (1.99:5.09:15.22:0.51:11.35:25.63:40.21)	降血糖活性 (LPPF>LPPFH>LPPH> LPPI>LPPA)	[67]
	LPPI	85.1	Rib:Rha:Ara:Xyl:Man:Glu:Gal (2.23:7.26:13.46:0.63:9.12:22.32:44.48)		
	LPPH	82.1	Rib:Rha:Ara:Xyl:Man:Glu:Gal (3.70:6.10:14.88:2.19:10.72:26.37:36.04)		
	LPPFH	80.7	Rib:Rha:Ara:Xyl:Man:Glu:Gal (3.91:5.39:14.41:4.11:11.70:34.28:26.20)		
	LPPF	72.9	Rib:Rha:Ara:Xyl:Man:Glu:Gal (3.31:9.92:24.21:1.25:9.955:20.60:30.76)		

注: Ara: 阿拉伯糖(arabinose); Fuc: 岩藻糖(fucose); Gal: 半乳糖(galactose); Glu: 葡萄糖(glucose); Man: 甘露糖(mannose); Rha: 鼠李糖(rhamnose); Rib: 核糖(ribose); Xyl: 木糖(xylose); GalA: 半乳糖醛酸(galacturonic acid); GlcA: 葡萄糖醛酸(glucuronic acid)。

这可能是因为多糖抗氧化能力与其提供电子或氢原子的能力相关, 而酸性多糖中酮或醛等亲电基团的存在有助于氢从 O-H 键中释放出来, 增强多糖的电子供给能力, 从而提升其提升抗氧化活性[63]。此外, 糖醛酸含量也影响水果多糖的降血糖活性。HUANG 等[72]发现, 几种桑葚多糖组分对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制能力与糖醛酸含量有关。

除糖醛酸外, 特定中性单糖的组成也对多糖活性具有关键影响。TANG 等[22]通过相关性分析发现红火龙果茎多糖的 Ara、Gal、Glc 和 Xyl 的组成与 α-葡萄糖苷酶抑制活性(α-glucosidase inhibitory, AGI)相关(相关系数依次为 r=–0.904, r=–0.587, r=–0.507, r=–0.911), 表明这 4 种单糖的高含量可能较其他组分对降血糖活性的贡献更大。CHEN 等[73]探究了无花果中提取的两种多糖组分 FPs-1-1 和 FPs-2-1 对免疫活性的影响。结果表明, 阿拉伯糖含量较高的 FPs-2-1 能更显著地增强脾淋巴细胞增殖及巨噬细胞吞噬功能。荔枝多糖含有较高的阿拉伯糖和半乳糖, 能促进 CD103 树突状细胞(dendritic cells, DCs)和调节性 T 细胞反应, 从而预防食物过敏, 并通过增加肠道菌群总量和维持微生物群稳态发挥肠道免疫活性[74]。这些结果表明, 水果多糖的单糖组成与其诸多生物活性相关, 但其中的相关作用机制尚不明确, 有必要进一步探究哪种组成更有利于生物活性。

3.3 结构修饰

修饰技术能够有针对性地去改变多糖的结构, 让它更好地满足一些特定的功能需求。到目前为止, 多糖领域里用到的修饰方法, 主要有物理修饰、化学修饰和生物修饰这几种[75]。在这些方法当中, 化学修饰研究较多、应用也较广的一种, 它可以把硫酸基、磷酸基、含硒基团等新的化学基团, 直接引入到多糖分子里面, 进而增强多糖的原有活性或诱导其产生新的活性[76]。

天然硫酸化多糖通常具备重要的生物活性, 而通过人工方式向多糖分子中引入硫酸基团, 还能够进一步提升多糖的生物活性[77]。例如相较于未进行修饰的多糖样品, 经过硫酸化修饰后的柠檬多糖则会表现出更强的抗氧化与降血糖活性[78]。这是由于硫酸基的引入能够让多糖分子带上负电荷, 在适宜的分子量范围内可以有效提高多糖的水溶性[79]; 此外, 硫酸化修饰还会使多糖的表面形态由规则结构转变为不规则的多孔结构, 这一变化同样有助于提升多糖的溶解性, 进而增强多糖的生物活性[80]。与之类似, 磷酸基团所携带的负电荷也能够提高多糖的水溶性, 促进免疫细胞与其表面受体相结合, 从而有效激活细胞产生相应的免疫应答[81]。李艾莲等[82]研究发现, 经过磷酸化修饰的苹果渣多糖, 能够显著提升巨噬细胞 RAW264.7 的细胞活力与吞噬能力。硒修饰主要是利用硒原子取代多糖吡喃环上的氧原子, 由于含硒基团在多糖链上的取代位点存在差异, 修饰后的多糖可与多种受体发生特异性相互作用, 从而表现出差异性的生物活性[83]。当在龙眼多糖中引入含硒基团后, 其抗癌活性增强, 并且会随着硒化程度的不断提高而表现出更强的抗癌效果[84]。不过也有部分研究指出, 与天然多糖相比, 经过结构修饰的多糖在生物活性上未必会提高, 这也说明修饰过程并非总能让多糖的活性达到预期的增强效果。TAN 等[85]发现, 与硫酸化修饰的桑葚多糖相比, 未经过修饰的桑葚多糖组分在小鼠体内表现出更强的抗氧化活性, 同时还具备最强的抗急性酒精性肝损伤活性。因此,有必要对结构修饰所涉及的分子机制, 以及其对多糖理化性质与生物活性产生的具体影响展开更为深入的探索[86–87]。

综上所述, 水果多糖的分子量、单糖组成和结构修饰与其生物活性密切相关。目前, 关于水果多糖构效关系的研究主要集中在初级结构与其免疫调节、降血糖和抗氧化活性之间的联系上。然而, 水果多糖的空间结构与其他生物活性

之间的关系仍不清楚。因此, 迫切需要进一步的科学研究来阐明水果多糖的高级结构与生物活性之间的关系。

4　水果多糖在食品行业的应用

水果多糖在食品领域中的应用已经得到了广泛的研究, 其中最为常见的应用之一, 便是将其作为增稠剂与乳化剂使用, 以此提高食品的黏度与乳化性能, 进而改善食品的质地与口感[88]。例如在果冻的生产过程中, 果胶常被用于提升体系的黏度和胶凝性, 从而赋予产品更加理想的口感与质构状态[89]。CHEN 等[90]发现, 从火龙果皮中提取得到的果胶具备优异的乳化能力, 能够作为天然乳化剂, 在食品工业中替代传统的乳化剂来源。此外, 多糖还可以作为抗菌剂、抗氧化剂、着色剂以及调味剂等活性组分添加到食品包装膜中, 用以制备可生物降解的包装材料, 这些活性成分能够与被包装食品发生相互作用, 减缓并平衡食品内部发生的生理变化, 进而延长食物的保质期并维持其新鲜度[91]。NGUYEN 等[92]以百香果皮果胶与壳聚糖为原料, 通过交联方式制备出可生物降解的复合薄膜, 并将其应用于紫茄的保鲜研究中。形态表征结果显示, 所得薄膜显示出组织良好的均质结构, 无裂纹; 此外, 随着蒌叶提取物质量浓度的不断提高, 该薄膜对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、蜡样芽孢杆菌以及肺炎克雷伯菌均表现出逐步增强的抗菌效果。HAN 等[93]观察到, 在含有猕猴桃皮提取物的西瓜皮果胶薄膜包裹的鸡腿中, 过氧化物和硫代巴比妥酸反应化合物的量在储存 9 d 后低于未包裹的样品, 表明该薄膜是潜在的功能性包装材料, 可以延缓食品中的脂质氧化。多糖还可作为益生元, 能促进有益菌生长, 维持菌群平衡, 增强免疫力[94]。ISLAMOVA 等[95]发现, 来自柑橘皮和苹果渣的果胶多糖对鼠李糖乳杆菌、长双歧杆菌和贪婪丙酸杆菌的几种益生菌培养物具有益生元作用。以上研究表明, 水果多糖在食品加工中展现出广泛的应用, 未来的研究可以更深入地探索多糖在食品加工中的应用, 开发更多功能性的多糖, 为食品行业的持续发展做出贡献。

5　结束语

本文系统综述了水果多糖的提取技术、生物活性、构效关系及其在食品领域中的应用进展。传统的热水提取、酸碱提取等方式, 正逐步被超声辅助、微波辅助、酶法提取以及低共熔溶剂法等高效绿色的提取技术所替代或联合使用, 这些新型提取方式在提升多糖得率的同时, 也会对多糖的精细结构与最终生物活性产生影响。水果多糖具有抗氧化、免疫调节与降血糖等多样化的生物活性, 而这些生物活性与多糖的分子量大小、单糖组成以及化学修饰等结构特征密切相关, 这也构成了多糖“构效关系”研究的核心内容。

然而, 当前该领域的研究仍存在许多不足: (1)实验室研究与产业化应用之间存在明显瓶颈, 多数高效提取技术仅停留在实验室小试阶段, 其规模化生产过程中的成本控制、工艺稳定性与产品标准化问题仍面临较大挑战; (2)作用机制的研究深度有待加强, 多数活性研究仍停留在表型观察与体外化学评价层面, 缺少在分子与细胞水平上的深入解析; (3)构效关系的阐释不够系统全面, 现有研究多集中于多糖初级结构与活性之间的关联, 而对多糖高级空间结构如三维构象、分子链构象等与生物功能之间的内在联系揭示不足, 进而限制了多糖的定向修饰与功能化设计。未来, 水果多糖的研究与开发, 一方面要持续优化并开发绿色高效的制备与分离技术, 建立以水果副产物为原料、高纯度标准化多糖为产品的完整产业链; 另一方面还要深入解析多糖的多维结构特征, 梳理多糖结构特征同复杂生物活性之间的内在关联。只有深化基础研究、突破关键技术瓶颈, 拓展应用场景, 才能充分挖掘水果多糖的应用潜力, 为健康产业发展与农业资源的高值化利用提供新的动力与支撑。

参考文献

[1] 廖紫如, 李梅芳. 我国水果生产现状及其产业集聚度分析[J]. 中国果树, 2023(3): 129–134.
LIAO ZR, LI MF. Analysis on current situation and industrial agglomeration degree of fruit production in China [J]. China Fruits, 2023(3): 129–134.

[2] 王芸娟, 赵俊晔, 侯煜庐. 水果产量和消费量稳中略增进出口贸易规模扩大[J]. 农产品市场, 2025(9): 27.
WANG YJ, ZHAO JY, HOU YL. Fruit production and consumption increased steadily, import and export trade scale expanded [J]. Agricultural Products Market, 2025(9): 27.

[3] JAGTAP UB, BAPAT VA. Wines from fruits other than grapes: Current status and future prospectus [J]. Food Bioscience, 2015, 9: 80–96.

[4] SHI LT, HE Q, LI J, *et al*. Polysaccharides in fruits: Biological activities, structures, and structure-activity relationships and influencing factors-A review [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139408.

[5] CHEN RZ, LUO SJ, WANG CX, *et al*. Effects of ultra-high pressure enzyme extraction on characteristics and functional properties of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel pectic polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107016.

[6] WANG LH, DONG CQ, WANG Q, *et al*. Polysaccharides from *Actinidia* Lindl.: Extraction, bioactivities, and emerging applications in food and pharmaceutical industries [J]. Trends in Food Science and Technology, 2025, 165: 105334.

[7] HUANG GL, HUANG SY. The structure-activity relationships of natural glucans [J]. Phytotherapy Research, 2021, 35(6): 2890–2901.

[8] XUE HK, GAO YC, WU L, *et al*. Research progress in extraction, purification, structure of fruit and vegetable polysaccharides and their interaction with anthocyanins/starch [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(7): 1235–1260.

[9] YANG J, SONG Y, YU YH, *et al*. Research progress on extraction techniques, structure-activity relationship, and biological functional mechanism of berry polysaccharides: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 137155.

[10] MA ZY, SUN QY, CHANG LL, *et al*. A natural anti-obesity reagent derived from sea buckthorn polysaccharides: Structure characterization

and anti-obesity evaluation *in vivo* [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131884.

[11] CUI JF, ZHAO CY, FENG LP, *et al*. Pectins from fruits: Relationships between extraction methods, structural characteristics, and functional properties [J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 110(29): 39–54.

[12] DOU ZM, CHEN C, HUANG Q, *et al*. Comparative study on the effect of extraction solvent on the physicochemical properties and bioactivity of blackberry fruit polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183(1): 1548–1559.

[13] LI QY, DOU ZM, DUAN QF, *et al*. A comparison study on structure-function relationship of polysaccharides obtained from sea buckthorn berries using different methods: Antioxidant and bile acid-binding capacity [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(1): 494–505.

[14] LAHAYE M, ROBIC A. Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds [J]. Biomacromolecules, 2007, 8(6): 1765–1774.

[15] SUN YJ, HOU ST, 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.

[16] 裴龙英, 刘伟, 王思丹, 等. 低共熔溶剂在食用菌多糖提取中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 198–206.
PEI LY, LIU W, WANG SD, *et al*. Advances in application of deep eutectic solvents for extraction of polysaccharides from edible fungi [J]. Food and Machinery, 2025, 41(5): 198–206.

[17] 任蕊蕊, 孙建瑞, 范嘉琦, 等. 基于深共晶溶剂的桔梗多糖提取、表征及抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 299–308.
REN RR, SUN JR, FAN JQ, *et al*. Extraction, characterization and antioxidant activity of *Platycodon grandiflorum* polysaccharides based on deep eutectic solvent [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 299–308.

[18] 王艳艳, 汪子皓, 李奕萱, 等. 酸枣多糖低共熔溶剂提取工艺优化及体外降糖活性[J]. 医药导报, 2025, 44(6): 928–933.
WANG YY, WANG ZH, LI YX, *et al*. Optimization of deep eutectic solvent extraction process for *Ziziphus jujuba var*. spinosa polysaccharides and their hypoglycemic activity *in vitro* [J]. Herald of Medicine, 2025, 44(6): 928–933.

[19] YIN XL, YOU QH, JIANG ZH. Optimization of enzyme assisted extraction of polysaccharides from *Tricholoma matsutake* by response surface methodology [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(3): 1358–1364.

[20] MOHAN K, MURALISANKAR T, UTHAYAKUMAR V, *et al*. Trends in the extraction, purification, characterisation and biological activities of polysaccharides from tropical and sub-tropical fruits-a comprehensive review [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116185.

[21] YULIARTI O, MATIA-MERINO L, GOH KKT, *et al*. Characterization of gold kiwifruit pectin from fruit of different maturities and extraction methods [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 479–485.

[22] TANG YY, HE XM, LIU GM, *et al*. Effects of different extraction methods on the structural, antioxidant and hypoglycemic properties of red pitaya stem polysaccharide [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134804.

[23] JING YS, YAN M, LIU DB, *et al*. Research progress on the structural characterization, biological activity and product application of polysaccharides from *Crataegus pinnatifida* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125408.

[24] COWAN DA, FERNANDEZ-LAFUENTE R. Enhancing the functional properties of thermophilic enzymes by chemical modification and immobilization [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, 49(4): 326–346.

[25] JI LR, CHEN M, ZHANG W, *et al*. Comprehensive applications of ionic liquids in enzyme immobilization: Current status and prospects [J]. Molecular Catalysis, 2024, 552: 113675.

[26] SHEN LP, PANG SX, ZHONG MM, *et al*. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106646.

[27] SUN ML, ZHUANG YL, GU Y, *et al*. A comprehensive review of the application of ultrasonication in the production and processing of edible mushrooms: Drying, extraction of bioactive compounds, and post-harvest preservation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 102: 106763.

[28] CHEN X, ZHANG HB, DU WQ, *et al*. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from *Crataegus pinnatifida* Bunge [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 1011–1019.

[29] TANG ZJ, WANG YR, HUANG GL, *et al*. Ultrasound-assisted extraction, analysis and antioxidant activity of polysaccharide from the rinds of *Garcinia mangostana* L [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 97: 106474.

[30] YU PL, ZHOU Y, LIU J, *et al*. Extraction methods, structural features and bioactivity diversity of polysaccharides from the genus *Chrysanthemum*: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 293: 139423.

[31] SUN L, LU JJ, WANG BX, *et al*. Polysaccharides from *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg: Optimum extraction, monosaccharide compositions, and antioxidant activity [J]. Preparative Biochemistry and Biotechnology, 2022, 52(4): 383–393.

[32] YANG Y, LI M, SUN JW, *et al*. Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from *Hippophae rhamnoide* L.: Modeling, characterization and gypoglycemic activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127626.

[33] 李乐, 陈本寿, 袁莹. 无花果多糖的微波提取工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 215–220.
LI L, CHEN BS, YUAN Y. Optimization of microwave extraction process of polysaccharides from *Ficus carica* L. [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 215–220.

[34] CHEN RZ, JIN CG, TONG ZG, *et al*. Optimization extraction, characterization and antioxidant activities of pectic polysaccharide from tangerine peels [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 187–197.

[35] LIN YY, PI JY, JIN PY, *et al*. Enzyme and microwave co-assisted extraction, structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from purple-heart radish [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131274.

[36] ARASI M, RAO MG, BAGYALAKSHMI J. The comparison and analysis of two extraction methods for polysaccharides in *Psidium guajava* L. fruits [J]. Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research, 2016, 50(3): 218–224.

[37] WANG D, WANG BQ, JIN XJ, *et al*. Microwave-enzyme-assisted extraction of pectin from feijoa (*Acca sellowiana*) fruit: Extraction optimization, physicochemical and functional properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 204: 116445.

[38] YUE X, CHEN ZJ, ZHANG JM, *et al*. Extraction, purification, structural features and biological activities of longan fruit pulp (Longyan) polysaccharides: A review [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 914679.

[39] ALSAFFAR RM, ALI S, RASHID S, *et al*. Immunomodulation: An immune regulatory mechanism in carcinoma therapeutics [J]. International Immunopharmacology, 2021, 99: 107984.

[40] XU W, ZHAO M, FU XY, *et al*. Molecular mechanisms underlying macrophage immunomodulatory activity of *Rubus chingii* Hu polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 907–916.

[41] YI Y, LIAO ST, ZHANG MW, *et al*. Physicochemical characteristics and immunomodulatory activities of three polysaccharide-protein complexes of longan pulp [J]. Molecules, 2011, 16(7): 6148–6164.

[42] WANG HL, GAO TT, DU YZ, *et al*. Anticancer and immunostimulating activities of a novel homogalacturonan from *Hippophae rhamnoides* L. berry [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 131: 288–296.

[43] SIES H, BERNDT C, JONES DP. Oxidative stress [J]. Annual Review of Biochemistry, 2017, 86: 715–748.

[44] YU Y, SHEN MY, SONG QQ, *et al*. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 183: 91–101.

[45] QIAN SQ, FANG XH, DAN DM, *et al*. Ultrasonic-assisted enzymatic extraction of a water soluble polysaccharide from dragon fruit peel and its antioxidant activity [J]. RSC Advances, 2018, 8(73): 42145–42152.

[46] 陆杰, 杨永晶, 尹星星, 等. 树莓多糖组分 RPP-6 的分离、结构表征及其体外免疫和抗氧化活性研究[J]. 西北农业学报, 2024, 33(3): 477–489.
LU J, YANG YJ, YIN XX, *et al*. Isolation, structural characterization, and immunomodulatory and antioxidant activities *in vitro* of polysaccharide fraction RPP-6 from raspberry [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(3): 477–489.

[47] ZHANG W, ZHANG XH, ZOU K, *et al*. Seabuckthorn berry polysaccharide protects against carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in mice via anti-oxidative and anti-inflammatory activities [J]. Food and Function, 2017, 8(9): 3130–3138.

[48] HUANG F, ZHANG RF, LIU Y, *et al*. Dietary litchi pulp polysaccharides could enhance immunomodulatory and antioxidant effects in mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 1067–1073.

[49] GUO YH, QIN WP, HOU YX, *et al*. Extraction, purification, structural characteristics and biological properties of the polysaccharides from *Rubus* L: A review [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143711.

[50] SHAW JE, SICREE RA, ZIMMET PZ. Global estimates of the prevalence of diabetes for 2010 and 2030 [J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2010, 87(1): 4–14.

[51] 邵庆辉, 谢志平, 梁嘉伟, 等. 番荔枝多糖药理功能研究进展[J]. 中国食品工业, 2025(4): 112–114.
SHAO QH, XIE ZP, LIANG JW, *et al*. Research progress on pharmacological functions of *Annona squamosa* polysaccharides [J]. China Food Industry, 2025(4): 112–114.

[52] 端木传宇, 孙洋, 张瑜, 等. 黑莓多糖酶法提取工艺优化及体外降血糖活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 200–207.
DUANMU CY, SUN Y, ZHANG Y, *et al*. Optimization of enzymatic extraction process and study on hypoglycemic activity *in vitro* of blackberry polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 200–207.

[53] CHEN C, YOU LJ, ABBASI AM, *et al*. Optimization for ultrasound extraction of polysaccharides from mulberry fruits with antioxidant and hyperglycemic activity *in vitro* [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 130: 122–132.

[54] HUANG LL, QIAO F, PENG G, *et al*. Effect of two drying methods on antioxidant activity and hypoglycemic action of polysaccharides in three cultivars of lychee pulp [J]. Drying Technology, 2017, 35(16): 1994–2001.

[55] 韩著, 简颖琳, 刘建飞, 等. 枸杞多糖稳态宏量制备及体内外降血糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(22): 395–403.
HAN Z, JIAN YL, LIU JF, *et al*. Steady-state macro-preparation of *Lycium* barbarum polysaccharides and analysis of their hypoglycemic activity *in vitro* and *in vivo* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(22): 395–403.

[56] LIU CJ, LIN JY. Anti-inflammatory and anti-apoptotic effects of strawberry and mulberry fruit polysaccharides on lipopolysaccharide-stimulated macrophages through modulating pro-/anti-inflammatory cytokines secretion and Bcl-2/Bak protein ratio [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(9): 3032–3039.

[57] RJEIBI I, FERIANI A, BENSAAD A, *et al*. *Lycium europaeum* Linn as a source of polysaccharide with *in vitro* antioxidant activities and *in vivo* anti-inflammatory and hepato-nephroprotective potentials [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2018, 225: 116–127.

[58] AMBESKOVIC M, HOPKINS G, HOOVER T, *et al*. Metabolomic signatures of Alzheimer's disease indicate brain region-specific neurodegenerative progression [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(19): 14769.

[59] WU JX, CHEN T, WAN FQ, *et al*. Structural characterization of a polysaccharide from *Lycium barbarum* and its neuroprotective effect against *β*-amyloid peptide neurotoxicity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 176: 352–363.

[60] BO B. Research on the influence of anti-fatigue effect and movement ability of blueberry polysaccharides on aged mice [J]. The Open Biomedical Engineering Journal, 2015, 9: 314–317.

[61] XUE HK, LIANG BM, JI LH, *et al*. The structure-activity relationship of polysaccharides in fruits and vegetables and interaction between polysaccharides and anthocyanins/ proteins: A review [J]. Food Research International, 2025, 211: 116371.

[62] 王彤羽, 车环宇, 王欢, 等. 天然多糖结构与降血糖活性作用关系的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2025, 32(2): 23–28.
WANG TY, CHE HY, WANG H, *et al*. Research progress on relationship between structure of natural polysaccharides and hypoglycemic activity [J]. Cereal & Food Industry, 2025, 32(2): 23–28.

[63] HAN QH, LIU W, LI HY, *et al*. Extraction optimization, physicochemical characteristics, and antioxidant activities of polysaccharides from kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) [J]. Molecules, 2019, 24(3): 461.

[64] QIAO YY, SHEN YX, JIANG HZ, *et al*. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activity of three pectin polysaccharides from blueberry [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 129707.

[65] 张巧铃, 蒋小华, 张洁, 等. 罗汉果干果多糖的分离纯化、结构表征及其体外免疫调节活性[J]. 食品科学, 2025, 46(4):10–20.
.ZHANG QL, JIANG XH, ZHANG J, *et al*. Isolation, Purification and Structural Characterization of Polysaccharides from Dried *Siraitia grosuenorii* Fruits and Their Immunodulatory Activity *in Vitro*[J]. Food Science, 2025, 46(4): 10–20.

[66] FENG L, XIAO X, LIU J, *et al*. Immunomodulatory effects of *Lycium barbarum* polysaccharide extract and its uptake behaviors at the cellular level [J]. Molecules, 2020, 25(6): 1351.

[67] AN KJ, WU JJ, XIAO HW, *et al*. Effect of various drying methods on the physicochemical characterizations, antioxidant activities and hypoglycemic activities of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pulp polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 510–519.

[68] CHEN C, WANG PP, HUANG Q, *et al*. A comparison study on polysaccharides extracted from *Fructus mori* using different methods: Structural characterization and glucose entrapment [J]. Food and Function, 2019, 10(6): 3684–3695.

[69] HU BB, ZHANG SL, WANG ZY, *et al*. Degradation method, structural characteristics, biological activity and structure-activity relationship of degraded polysaccharides [J]. Food Reviews International, 2024, 40(8): 2378–2407.

[70] LI M, LI T, HU XY, *et al*. Structural, rheological properties and antioxidant activities of polysaccharides from mulberry fruits (*Murus alba* L.) based on different extraction techniques with superfine grinding pretreatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1774–1783.

[71] LIU XX, LIU HM, YAN YY, *et al*. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides extracted from jujube using subcritical water [J]. LWT, 2020, 117: 108645.

[72] HUANG YY, XIE W, TANG T, *et al*. Structural characteristics, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Mori fructus* based on different extraction methods [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1125831.

[73] CHEN RZ, LI HP, LI SZ, *et al*. Extraction optimization, preliminary characterization and immunological activity of polysaccharides from figs [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 185–194.

[74] HUANG F, LIU Y, ZHANG RF, *et al*. Structural characterization and *in vitro* gastrointestinal digestion and fermentation of litchi polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 140: 965–972.

[75] AHMAD MM, CHATHA SAS, HUSSAIN AI, *et al*. Chemical modification and antioxidant activities of *Carissa carandas* fruit polysaccharides [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(2): 1175–1185.

[76] LI SJ, XIONG QP, LAI XP, *et al*. Molecular modification of polysaccharides and resulting bioactivities [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(2): 237–250.

[77] LIU TB, REN QQ, WANG S, *et al*. Chemical modification of polysaccharides: A review of synthetic approaches, biological activity and the structure-activity relationship [J]. Molecules, 2023, 28(16): 6073.

[78] WU WJ, CHEN RZ, GAO M, *et al*. Effects of extraction and modifications on physicochemical characteristics and bioactivities of lemon (*Citrus limon* L.) polysaccharides [J]. Food Bioscience, 2025, 65: 105943.

[79] LIANG L, AO L, MA T, *et al*. Sulfated modification and anticoagulant activity of pumpkin (*Cucurbita pepo*, Lady Godiva) polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 447–455.

[80] FENG RF, WANG N, KOU JJ, *et al*. Sulfated modification, characterization and potential bioactivities of polysaccharide from *Ziziphus jujuba* cv. Jinsixiaozao [J]. Natural Product Communications, 2021, 16(10): 1934578X211033673.

[81] 林建翠, 倪艳, 吴琼, 等. 多糖化学修饰的方法及其对抗肿瘤活性影响的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1261–1266.
LIN JC, NI Y, WU Q, *et al*. Research progress on methods of chemical modification of polysaccharides and their effects on anti-tumor activity [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1261–1266.

[82] 李艾莲, 陈雪峰, 蔡露阳, 等. 磷酸化苹果渣多糖的体外抗氧化、免疫调节活性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 197–204.
LI AIL, CHEN XF, CAI LY, *et al*. Study on antioxidant and immunomodulatory activities *in vitro* of phosphorylated apple pomace polysaccharides [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 197–204.

[83] MALINOWSKA E, KLIMASZEWSKA M, STRĄCZEK T, *et al*. Selenized polysaccharides-biosynthesis and structural analysis [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 407–417.

[84] YU YH, TANG ZM, XIONG C, *et al*. Enhanced growth inhibition and apoptosis induction in human colon carcinoma HT-29 cells of soluble longan polysaccharides with a covalent chemical selenylation [J]. Nutrients, 2022, 14(9): 1710.

[85] TAN X, CHEN HG, ZHOU X. Study on the activity of mori fructus polysaccharides and its derivatives against acute alcoholic liver injury in mice [J]. Journal of Carbohydrate Chemistry, 2020, 39(9): 450–471.

[86] XU YQ, NIU XJ, LIU NY, *et al*. Characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of degraded polysaccharides from blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) fruits [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 26–35.

[87] FAN RY, XIE YM, ZHU CY, *et al*. Structural elucidation of an acidic polysaccharide from *Citrus grandis* 'Tomentosa' and its anti-proliferative effects on LOVO and SW620 cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138: 511–518.

[88] WANG ZC, WANG L, YU XX, *et al*. Effect of polysaccharide addition on food physical properties: A review [J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137099.

[89] THAKUR BR, K. SINGH RK, HANDA AK, *et al*. Chemistry and uses of pectin—a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1997, 37(1): 47–73.

[90] CHEN HR, LIU YY, ZHANG JK, *et al*. Pectin extracted from dragon fruit peel: an exploration as a natural emulsifier [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 221: 976–985.

[91] OZCAN BE, TETIK N, ALOGU HS. Polysaccharides from fruit and vegetable wastes and their food applications: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 134007.

[92] NGUYEN TTT, LE TQ, NGUYEN TTA, *et al*. Characterizations and antibacterial activities of passion fruit peel pectin/chitosan composite films incorporated *Piper betle* L. leaf extract for preservation of purple eggplants [J]. Heliyon, 2022, 8(8): e10096.

[93] HAN HS, SONG KB. Antioxidant properties of watermelon (*Citrullus lanatus*) rind pectin films containing kiwifruit (*Actinidia chinensis*) peel extract and their application as chicken thigh packaging [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100636.

[94] XU BW, LI SS, DING WL, *et al*. From structure to function: A comprehensive overview of polysaccharide roles and applications [J]. Food Frontiers, 2025, 6(1): 15–39.

[95] ISLAMOVA ZI, OGAI DK, ABRAMENKO OI, *et al*. Comparative assessment of the prebiotic activity of some pectin polysaccharides [J]. Pharmaceutical Chemistry Journal, 2017, 51(4): 288–291.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)