

# 竹叶多糖的提取纯化、结构解析及 生物活性研究进展

曹文丹<sup>1</sup>, 韦佳汝<sup>1</sup>, 李圣淇<sup>1</sup>, 邵瑞祥<sup>1</sup>, 应苗苗<sup>2\*</sup>, 陈小强<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 武汉 430070;

2. 温州科技职业学院园林与水利工程学院, 温州 325006)

**摘要:** 竹叶富含多种生物活性成分, 如多糖、多酚及黄酮类物质等。竹叶多糖作为竹叶提取物中的重要生物活性成分, 具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤和降血脂等功效。近年来, 为提高纯度、提高产率和保留生物活性, 竹叶多糖的提取和纯化技术有了许多创新。其次, 对竹叶多糖的复杂结构, 结构与生物活性的关系及生物活性的作用机制等方面的研究也逐渐加深。本文综述了竹叶多糖在提取纯化、结构解析和生物活性等方面的研究进展, 并展望了未来的研究方向, 旨在为深入研究竹叶多糖提供一个全面的认识, 推动竹叶多糖的进一步开发和利用, 为后续开展对竹叶多糖进行结构修饰等相关研究提供新思路, 以增强生物活性, 并为其在食品、医药和工业领域的应用提供科学依据, 进而推动竹叶资源的充分利用。

**关键词:** 竹叶多糖; 提取纯化; 结构解析; 生物活性

## Research progress on the extraction and purification, structure analysis and biological activity of bamboo leaf polysaccharides

CAO Wen-Dan<sup>1</sup>, WEI Jia-Ru<sup>1</sup>, LI Sheng-Qi<sup>1</sup>, SHAO Rui-Xiang<sup>1</sup>,  
YING Miao-Miao<sup>2\*</sup>, CHEN Xiao-Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. College of Landscape and Hydraulic Engineering, Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 325006, China)

**ABSTRACT:** Bamboo leaves are rich in many bioactive components, such as polysaccharides, polyphenols, and flavonoids. Bamboo leaf polysaccharide, an essential bioactive component in bamboo leaf extract, has antioxidant, immunomodulatory, antitumor, and hypolipidemic effects. Recently, there have been many innovations in the extraction and purification techniques for bamboo leaf polysaccharides to improve purity, increase yield, and retain biological activity. Secondly, research on the complex structure of bamboo leaf polysaccharides, the relationship between structure and bioactivity, and the mechanism of action of bioactivity has been gradually deepened. This paper reviewed the research progress of bamboo leaf polysaccharides in terms of extraction, purification, structure analysis, and biological activity, and prospected the future research direction, aiming to provide a comprehensive understanding of bamboo leaf polysaccharides for in-depth research, promoting the further development and utilization

基金项目: 浙江省科技厅项目(2023C35040)

Fund: Supported by the Zhejiang Science and Technology Department Project (2023C35040)

\*通信作者: 应苗苗, 教授, 主要研究方向为食品精深加工。E-mail: mmying0210@163.com

\*Corresponding author: YING Miao-Miao, Professor, College of Landscape and Hydraulic Engineering, Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 325006, China. E-mail: mmying0120@163.com

of bamboo leaf polysaccharides, and providing a new idea for the subsequent structural modification of bamboo leaf polysaccharides in order to enhance the biological activity of bamboo leaf polysaccharides and provide a scientific basis for the application in food, medicine, and industry, and thus promoting the full utilization of bamboo leaf resources.

**KEY WORDS:** bamboo leaf polysaccharide; extraction and purification; structural analysis; biological activity

## 0 引言

竹子是禾本科竹亚科植物之一, 在我国的栽种和利用具有悠久的历史。竹叶是竹类植物整体生长和生态适应的重要组成部分, 它作为一种药食同源、储量巨大、价格低廉的天然产物资源, 因具有清热除烦、生津止渴、明目解毒的良好药用功效而成为近年来研究的热点<sup>[1-2]</sup>。竹叶中富含多种生物活性成分, 包括多糖、黄酮、多酚、氨基酸以及矿物质等<sup>[3-4]</sup>。已有研究证实, 竹叶提取物中众多化合物的存在是竹叶具有多种生理活性的物质基础<sup>[5-7]</sup>。

竹叶多糖是竹叶提取物中含量较高的成分, 具有良好的抗癌、抗氧化和免疫调节作用<sup>[8]</sup>, 在食品、医药及保健品领域具有潜在的应用价值。因此, 竹叶多糖作为竹叶提取物中重要组成部分, 受到了众多国内外学者的青睐。近年来, 关于竹叶多糖的研究日益增多, 对其复杂结构的解析也逐渐加深。基于此, 本文对竹叶多糖提取纯化、结构解析和生物活性方面的研究进行了综述, 旨在总结当前研究现状, 明确后续研究方向, 推动竹叶资源的深加工开发和利用。

## 1 竹叶多糖提取及纯化技术

### 1.1 竹叶多糖的提取技术

天然植物多糖的提取技术主要有热水浸提法、酶提取法、酸碱提取法、超滤膜提取法、超声波提取法、微波提取法、超高压萃取法、亚临界水提取法和超临界流体萃取法等<sup>[9-11]</sup>。目前, 竹叶多糖的常用提取技术有热水浸提法、酶提取法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法和超临界流体萃取法等。

#### 1.1.1 热水浸提法

热水浸提法是根据相似相溶的原理, 通过控制温度和时间实现对多糖的溶出, 具有操作便捷、成本低廉的特点。因此, 热水浸提法是工业中提取植物多糖的一种常见技术。但也要注意过高的温度可能会破坏多糖的结构<sup>[12]</sup>。殷军<sup>[13]</sup>发现在料液比 1:39.03 ( $m/V$ )、提取温度 97.09°C、提取时间 2.11 h 的条件下, 竹叶多糖最佳提取率为 5.73%, 料液比和提取时间对提取率的影响效果强于提取温度。戴天伦<sup>[14]</sup>和赵丽莉<sup>[15]</sup>均采用了 3 种方法提取竹叶多糖, 发现热水浸提法的提取率最低(1.12%、3.95%)、时间最长(2 h、1.5 h), 且需重复提取(2 次)。该方法放大工艺的产率(0.52%)低于小试工艺的产率(1.12%), 这可能是由于规模效应、温度、时

间和其他条件的微小变化影响了提取效率。因此, 放大工艺的操作条件还需要进一步的优化和调整, 包括对温度、时间、原料的选择等方面进行更细致的调整和控制, 以提高竹叶多糖的得率。

#### 1.1.2 酶提取法

酶提取法是通过降解细胞壁和细胞膜中纤维素和果胶等主要成分, 减少溶剂提取时的阻力, 使有效成分得到释放, 同时酶的使用可将部分多糖降解为更小分子量的片段, 从而更有利于多糖从细胞内分离出来。与传统的热热水浸提法相比, 酶提取法的时间短、效率高, 反应温度较温和, 有助于保持多糖结构和生物活性<sup>[16]</sup>。因此通过优化工艺条件, 达到最佳提取效果。如王文渊等<sup>[17]</sup>发现使用纤维素酶与果胶酶(1:1)提取的最佳工艺条件为: 酶解 pH 5.0、酶浓度为 0.8%、酶解温度 55°C、酶解时间 80 min, 此方法的提取率(3.47%)高于热水浸提法的提取率(2.48%)。赵秀玲等<sup>[18]</sup>研究发现通过酶法提取竹叶多糖的最优条件是纤维素酶添加量 0.2 g、酶解时间 55 min、酶解温度 45°C, 提取到的多糖含量最高(11.7%)且具有较好的抗氧化能力。但酶的价格昂贵, 且需要特定的反应条件, 对温度、pH 等条件敏感, 这使生产成本大幅上升。因此, 酶提取法的大规模应用受限。

#### 1.1.3 超声波和微波辅助提取法

超声波和微波提取法均为辅助提取方式。超声波产生的高频机械波可越过介质的阻挡, 并瞬时破坏植物及其细胞壁, 使胞内有效成分释放。声波的震动也加速胞内物质的均匀扩散和溶解, 使效率和产率得到提高。此外, 超声波辅助提取过程中的温度低<sup>[19]</sup>。微波加热可以快速使多糖物质内部温度升高, 破坏细胞壁、细胞膜等结构, 并改变多糖物质中的分子交互作用, 使多糖分子从细胞中释放出来。微波辅助提取法比热水浸提法的加热速度快, 时间短, 得率高<sup>[20]</sup>。但超声波功率和微波功率过高均可能会破坏多糖的结构<sup>[21-22]</sup>。秦明有<sup>[23]</sup>采用超声波辅助提取法提取竹叶多糖, 当超声功率在 100~200 W 时, 提取得率与超声功率成正比, 当超声功率大于 200 W 时, 多糖结构会被破坏, 使提取率降低。喻谨等<sup>[24]</sup>采用微波辅助法提取竹叶多糖, 发现功率在 1200 W 时, 多糖被破坏, 得率降低。另外, 目前超声波和微波辅助提取法在大规模生产应用方面还面临着设备标准化未统一等困难<sup>[25]</sup>。

#### 1.1.4 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法是一种新型、高效的植物多糖提取

技术。超临界流体在超临界状态下具有液体和气体的性质,其密度和溶解能力随温度和压力的变化而变化,从而可以调控对不同化合物的溶解性,根据待分离物中有效成分的沸点、极性依次萃取分离<sup>[26]</sup>。超临界流体较高的扩散性和低粘度,使其能够快速渗透植物细胞,促进多糖等目标成分的迅速释放。整个萃取过程在相对温和的条件下进行,有助于保持多糖的天然结构和活性<sup>[27]</sup>。CO<sub>2</sub>是常用的萃取剂之一,临界温度为 31.1℃,临界压力为 7.4 MPa,因对设备的要求不高,超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取法被广泛应用于工业生产中<sup>[28]</sup>。天然植物多糖是极性大分子化合物,在非极性 CO<sub>2</sub>的作用下溶解度较低,所以通常选择引入乙醇作为夹带剂,提高 CO<sub>2</sub>流体对多糖的溶解能力,从而提高选择性和提取效率<sup>[29]</sup>。ZOU 等<sup>[30]</sup>通过正交试验得出超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取毛竹叶多糖的最佳工艺条件为:萃取温度 50℃、压力 40 MPa、提取时间 2 h、乙醇改性剂 30 mL,提取率为 2.47%。通过比较任美玲<sup>[31]</sup>和周跃斌等<sup>[32]</sup>的研究结果发现,从毛竹叶中采用不同方法提取多糖,超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取法的提取率最高(4.28%),微波提取法的提取率最低(0.66%)。总之,后续需进一步研究和优化关键参数,探究温度、压力、流体流速、夹带剂的添加量等对提取率和多糖结构的影响,以达到最优提取效果。

### 1.1.5 复合提取法

目前,研究者们倾向于用多种技术复合的方式提取植物多糖,当传统与现代技术相辅相成,可达到更高的提取效率。如酸和超声波的协同作用可以增强提取效果。酸可以削弱细胞壁的结构,而超声波可以加速物质的传递和释放,从而使得多糖更有效地被提取,进而缩短提取时间,提高效率<sup>[33]</sup>。张强等<sup>[34]</sup>采用磷钨酸与超声波耦合的方式提取毛竹叶多糖,在超声温度 80℃、提取时间 2 h、料液比 1:20 (g/mL)、磷钨酸质量分数 4.50%、超声功率 300 W 的最佳工艺条件下,提取得率达 9.89%。与超声波提取法和水提取法相比,超声波辅助低共熔溶剂法对箬竹叶多糖的提取率最高,且多糖中的糖醛酸含量最高、分子量最大,多糖清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)和 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]阳离子自由基的活性最强<sup>[35]</sup>。这是由于超声波的物理效应促进了细胞壁的破裂和多糖的释放,还有助于提高低共熔溶剂与植物细胞的接触表面积,促进多糖的扩散,从而提高提取率,缩短提取时间,并可减少溶剂使用量<sup>[36]</sup>。由此可知,复合提取法在未来有着许多潜在的发展和前景。

## 1.2 竹叶多糖的纯化技术

为获得纯度高的竹叶多糖,需要进行脱蛋白、脱色及进一步的纯化处理。脱除蛋白的常用方法主要有 Sevage 法、三氯乙酸法和酶法等<sup>[37]</sup>。由于 Sevage 法的操作容易、

简单便捷,是竹叶多糖的脱蛋白的主要方法。周先泰等<sup>[38]</sup>采用 Sevage 法对水提醇沉得到的竹叶粗多糖进行脱蛋白处理,发现脱蛋白之后多糖含量由 0.525%降低为 0.327%,粗多糖中蛋白含量占粗多糖的 37.71%。脱色常用方法主要有氧化法、吸附法、金属络合法和离子交换法等<sup>[39]</sup>。其中离子交换树脂法不仅具有经济性,而且可以选择性地去除与多糖一起存在的杂质或色素,是竹叶多糖脱色的有效方法。WANG 等<sup>[40]</sup>对比了 3 种离子交换树脂(D941、D860021 和 DM-2)对竹叶粗多糖的脱色效果。D941、D860021 和 DM-2 的脱色率分别为 70.30%、42.85%、19.93%,弱碱性阴离子 D941 树脂对粗多糖进行脱色时表现出色,多糖的留存率达到 86.37%,脱色效果最佳,这与它易与有色杂质多为阳离子化的多酚分子交换形成离子键有关。

天然植物多糖的纯化主要采用柱层析法、有机膜超滤法、膜分离法、有机溶剂沉淀法、季胺盐沉淀法和金属络合物法等<sup>[41]</sup>。对于竹叶粗多糖的纯化,目前主要使用柱层析法,包括离子交换柱层析、凝胶柱层析、大孔树脂柱层析。离子交换柱层析是通过树脂表面的带电离子基团与多糖的带电基团相互吸附,利用离子交换过程实现选择性分离和纯化<sup>[42]</sup>。凝胶柱层析是利用凝胶柱的孔隙结构,基于多糖分子的大小和形状差异实现分离和纯化,操作方便,但由于分离速度相对较慢且自动化难度大,不能实现大规模应用<sup>[43]</sup>。大孔树脂是通过多糖与树脂相互作用,实现选择性吸附分离,实现多糖的纯化。此方法的选择性好,但对于一些结构相似或分子量相近的多糖,分辨效果不够理想,导致得到的多糖纯度不高<sup>[44]</sup>。ZOU 等<sup>[30]</sup>发现使用 DEAE-52 纤维素柱纯化后的竹叶多糖主要由葡萄糖组成,该纯化方法可以有效地去除粗多糖提取物中的杂质。邢慧珍等<sup>[45]</sup>发现使用 Sephadex G-200 凝胶柱纯化后的淡竹叶多糖为均一组分,总糖含量达到 93%,具有显著的抗氧化活性。邓云兵等<sup>[46]</sup>采用 AB8 型大孔树脂进行纯化,发现多糖纯度由 16.39%提高至 57.37%。目前,多种纯化方法联用是提高多糖纯度的一种趋势。如离子交换树脂分离带电多糖,凝胶柱分离不同分子大小的多糖,通过联合使用,实现对多糖的综合纯化,确保高纯度和结构完整性。WANG 等<sup>[40]</sup>证实了联合使用 DEAE-52 纤维素柱和 Sephadex G-100 柱分离纯化后的竹叶多糖纯度较高。综上,将离子交换柱层析法和凝胶柱层析法联合使用,具有高度选择性的优势,且可有效提高多糖纯度,未来可进一步对其他多种纯化方法联用进行研究,筛选高效竹叶多糖分离和纯化方法。

## 2 竹叶多糖的结构解析

多糖是由多个单糖分子经过脱水缩合连接而成,分子结构庞大而复杂,其结构决定生物活性,因此分析多糖的结构组成能更好的探索其生物活性<sup>[47]</sup>。竹叶多糖的结构解析方法主要有紫外可见光谱扫描<sup>[48]</sup>、傅里叶红外光谱扫

描<sup>[49]</sup>、相对分子质量大小及分布和单糖组成测定<sup>[50]</sup>、扫描电子显微镜<sup>[51]</sup>、原子力显微镜<sup>[52]</sup>等。目前,对竹叶多糖的研究大都集中在初级结构,对其分子结构、空间构象、聚合度和链长等高级结构的研究仍有所欠缺。

竹叶种类的多样性、提取及纯化方法的不同使多糖结构存在显著性差异,包括单糖组成、连接方式、分子量大小等。如表1所示,不同竹叶多糖的单糖组成中都含有半乳糖、葡萄糖和木糖,但单糖含量和分子量大小具有明显的差异。此外,不同竹叶多糖的分子结构、空间构象等也有差异。ZHANG等<sup>[56]</sup>通过傅里叶红外光谱分析毛竹叶多糖的化学基团组成,发现在约900 cm<sup>-1</sup>处有吸收信号峰,说明多糖主要由 $\beta$ -糖苷键组成。张强等<sup>[34]</sup>通过扫描电子显微镜发现竹叶多糖的微观结构呈块状和蜂窝状,这可能与多糖分子链间形成细微的多孔结构有关。CHEN等<sup>[48]</sup>发现竹叶多糖的原子力显微镜3D图像显示出规则的针状和棒状形态,说明多糖分子的聚集,从二维图像中发现竹叶多糖具有分支随机链的构象。总之,未来还需要对竹叶多糖结构的深入研究,进一步理解多糖的结构组成与生物活性的关系。

### 3 竹叶多糖的生物活性

随着生物化学研究的不断深入和各种高新技术的应用,竹叶多糖的复杂结构和多样性逐渐被认识,对其生物活性

的研究也取得了更多进展。竹叶多糖具有抗氧化、增强免疫力、抗肿瘤、降血脂、抑菌等能力。目前,对于竹叶多糖的研究主要集中在抗氧化、免疫调节及抗肿瘤等方面,然而对于竹叶多糖活性的作用机制研究还有待进一步加强。

#### 3.1 抗氧化活性

由于生物体在新陈代谢过程中会产生一类化学性质相当活跃的具有不成对电子的原子或基团-自由基<sup>[57]</sup>,而自由基具有强氧化性,故能够在一定情况下引起机体的功能障碍甚至疾病,竹叶多糖对自由基的良好抑制作用则表现为抗氧化活性。根据张强等<sup>[34]</sup>和邢慧珍等<sup>[45]</sup>的研究发现竹叶多糖具有一定的清除ABTS阳离子自由基、羟基自由基和DPPH自由基的能力,说明竹叶多糖具有良好的抗氧化活性。MAO等<sup>[55]</sup>发现毛竹叶多糖表现出较高的清除羟基自由基的能力,其作用机制包括两方面,一是清除产生的羟基自由基,二是抑制羟基自由基的产生。此外,毛竹叶多糖清除DPPH自由基的效果显著,其清除能力与供氢能力有关,多糖分子中的官能团提供氢原子,与DPPH自由基发生氢键反应,导致DPPH自由基的还原。比较多糖对羟基自由基的清除能力发现,分子量最大的毛竹叶多糖(WB1)的清除能力最强,分子量最小的毛竹叶多糖(WB3)的清除能力最弱,说明多糖的分子量在其清除羟基自由基的能力方面起着重要作用<sup>[55]</sup>。GE等<sup>[58]</sup>证实了竹叶多糖的

表1 竹叶多糖的结构解析  
Table 1 Structural analysis of bamboo leaf polysaccharides

竹叶种类	多糖名称	结构解析	参考文献
箬竹叶	ICP	U-DES-ICP、UICP和WICP主要单糖组成均为半乳糖、葡萄糖和阿拉伯糖,糖醛酸相对含量分别为8.364%、4.012%和3.194%,最大分子量为6.201×10 <sup>3</sup> kDa、1.684×10 <sup>3</sup> kDa和995.4 kDa。	[35]
紫竹、乌哺鸡竹、方竹、斑竹	PBLPS	PN、PV、CQ和PB的总多糖含量在4.2%~5.4%之间,单糖组成主要为木糖、半乳糖和葡萄糖,半乳糖含量在21.5%~34.1%之间。PBLPS-1均为分子量为10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup> Da的均质多糖,而PBLPS-2为两种或三种多糖的异质多糖。PB-PBLPS-1是 $\alpha$ -吡喃半乳糖键和 $\beta$ -D-吡喃葡萄糖键与 $\alpha$ -(1→6)或 $\beta$ -(1→6)糖苷键的混合物,而PN-PBLPS-1、PV-PBLPS-1和CQ-PBLPS-1仅是 $\alpha$ -(1→6)糖苷键的 $\alpha$ -吡喃半乳糖键。	[40]
毛竹叶	BLHP	BLHP-A1和BLHP-B1中的主要单糖均为D-木糖,且D-木糖醛基的连接归因于 $\beta$ -构型。BLHP-A1和BLHP-B1的平均分子量分别为8.53 kDa和6.37 kDa。	[53]
毛竹叶	NPs	NPs的主链主要由1,4- $\beta$ -连接的木糖组成,侧链由葡萄糖、半乳糖、岩藻糖、鼠李糖和阿拉伯糖等单糖组成。NPs的平均分子量为5.77×10 <sup>3</sup> Da,NPs-A和NPs-B的平均分子量分别为4.30×10 <sup>3</sup> Da和8.53×10 <sup>3</sup> Da。	[54]
毛竹叶	WB1、WB2、WB3	WB1的中性单糖主要为葡萄糖,WB2和WB3单糖组成中岩藻糖和半乳糖含量较高。WB1,WB2和WB3的分子量分别为13.4×10 <sup>4</sup> 、2.8×10 <sup>4</sup> 和1.9×10 <sup>4</sup> Da。	[55]
毛竹叶	BLPs	BLPs的单糖组成为鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖,平均分子量为5.05×10 <sup>4</sup> Da。	[30]

注: ICP: 箬竹叶多糖, *I. tessellatus* leaves polysaccharides; U-DES-ICP: 超声波辅助深共熔溶剂法提取箬竹叶多糖, ultrasonic-assisted deep eutectic solvent extraction of *I. tessellatus* leaves polysaccharides; UICP: 超声波提取箬竹叶多糖, ultrasonic extracted *I. tessellatus* leaves polysaccharides; WICP: 水提箬竹叶多糖, water extracted *I. tessellatus* leaves polysaccharides; PN: 紫竹, *P. nigra* (Lodd.) Munro; PV: 乌哺鸡竹, *P. vivax* McClure; CQ: 方竹, *Chimonobambusa quadrangularis* (Fenzi) Makino; PB: 斑竹, *P. bambusoides* cv. Tanakae; PBLPS: 纯化的竹叶多糖, purified bamboo leaves polysaccharides; BLHP: 竹叶杂多糖, bamboo leaves hetero-polysaccharides; NPs: 中性多糖, neutral polysaccharides; WB1: 30%乙醇沉淀; WB2: 60%乙醇沉淀; WB3: 80%乙醇沉淀; BLPs: 竹叶多糖, bamboo leave's polysaccharide。

抗氧化活性与分子量大小及单糖组成有关。通过提取及纯化得到 4 个多糖馏分(BLF80-A、BLF80-B、BLF80-C 和 BLF80-D), 其中, 平均分子量(average molecular weight, Mw)最大的 BLF80-D 表现出最强的清除 DPPH 自由基和羟基自由基活性。BLP80-B 与 BLP80-C 的单糖组成相似, 但由于 BLP80-C 的 Mw 大于 BLP 80-B, BLP 80-C 清除超氧阴离子的活性较强。XIAO 等<sup>[53]</sup>发现, 从毛竹叶中提取及纯化得到的两种多糖(BLHP-A1 和 BLHP-B1)均可以增强超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px) 3 种抗氧化酶的活性, 进而阻止体内自由基的积累, 起到对 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 诱导的 HepG2 细胞氧化损伤的保护作用。BLHP-B1 的保护作用比 BLHP-A1 强, 这可能与 BLHP-B1 结构中含有  $\rightarrow 6$ - $\beta$ -D-Galp-(1 $\rightarrow$ 糖苷键和 3-O 乙酰基有关。综上, 竹叶多糖主要是通过清除产生的自由基及抑制自由基的产生来发挥抗氧化活性, 且多糖的抗氧化活性与其分子量、单糖组成及分子构象有关, 后续还需要进一步的研究来验证竹叶多糖分子的构象与抗氧化活性的关系。

### 3.2 免疫调节活性

免疫因子对维持肠道内的菌群平衡和提高人体抗病能力具有重要作用, 竹叶多糖拥有促进免疫因子生成和激活的功能, 因此其在免疫调节方面表现出显著的促进作用。天然多糖的免疫调节作用机制包括: (1)通过与单核细胞、吞噬细胞、抗原呈递细胞的结合进而激活细胞内信号传导途径, 从而促进免疫细胞的增殖与活化; (2)直接作用于免疫细胞, 各种免疫细胞相互作用, 形成免疫调节网络<sup>[59]</sup>。唐莉莉等<sup>[60]</sup>发现在竹叶多糖的作用下, 正常小鼠和荷瘤小鼠的脾指数及胸腺指数有所提升, 证实了竹叶多糖具有增强免疫能力的作用。张亚兰<sup>[61]</sup>选用小鼠巨噬细胞 RAW 264.7 作为细胞模型, 发现纯化后的箬竹叶多糖不仅可通过刺激 p38 磷酸化激活 MAPKs 信号传导, 而且对 NF- $\kappa$ B 信号通道有较强的促进效果, 从而有效提高了免疫小鼠巨噬细胞的免疫活性。说明竹叶多糖主要通过增强巨噬细胞的增殖和吞噬活性来发挥免疫调节活性。

### 3.3 抗肿瘤活性

肿瘤的形成源于细胞基因突变, 恶性肿瘤可侵犯周围组织, 产生远处转移, 从而对人体造成危害, 竹叶多糖表现出显著的抗肿瘤活性。天然多糖通过抑制肿瘤细胞增殖、促使凋亡以及调节免疫功能等机制, 显示出抗肿瘤的潜力<sup>[62]</sup>。唐莉莉等<sup>[60]</sup>研究发现竹叶多糖在 100 mg/kg 的剂量下对 S<sub>180</sub> 肿瘤生长的抑制率为 50%, 这说明竹叶多糖具有显著的抗肿瘤功效。TAKAHIRO 等<sup>[63-64]</sup>通过构建小鼠肿瘤模型(S-180、C38 和 Meth-A)发现, 竹叶多糖对 S-180 和 C38 肿瘤模型中的肿瘤生长有明显的抑制作用。研究表明竹叶多糖的抗肿瘤功效由免疫增强介导, 竹叶多糖中的

1,3- $\beta$ -葡聚糖可能是抑制癌症的主要免疫增强因子, 它具有激活巨噬细胞和 NK 细胞的作用, 通过增强吞噬能力从而抑制肿瘤的生长。潘静等<sup>[65]</sup>发现苦竹叶多糖能够抑制子宫颈癌 HeLa 细胞、肺癌 A549 细胞和人胃癌 SGC7901 细胞的生长, 且随着多糖浓度的增加及作用时间的延长, 其对胃癌 SGC7901 细胞的生长抑制效果可达到最强。综上, 竹叶多糖的抗肿瘤作用与免疫调节功能相关, 其他潜在的作用机制有待进一步研究。

### 3.4 降血脂活性

高血脂是脂肪代谢或运转异常引起血浆脂质浓度过高而表现为高胆固醇血症、高甘油三酯血症或两者兼有, 竹叶多糖在降血脂方面具有良好的效果。研究表明, 天然多糖可通过对外源性脂质的吸收抑制、内源性胆固醇合成的抑制、胆固醇代谢的促进、肠道微生物的调节、胰岛素信号传导途径的影响等发挥降血脂的功效<sup>[66]</sup>。周路坦等<sup>[67]</sup>通过测定箬竹叶中性多糖和酸性多糖与甘氨酸胆酸钠和牛磺胆酸钠的结合率探究其降血脂活性。发现两种多糖均具有甘氨酸胆酸钠和牛磺胆酸钠结合能力, 结合率与多糖浓度呈正相关, 且酸性多糖的降血脂能力强于中性多糖, 这与酸性多糖的多糖含量高有关。说明竹叶多糖通过抑制对脂类的吸收和促进胆固醇的代谢来发挥降血脂作用。此外, 竹叶多糖可能是通过清除羟基自由基、过氧化氢阴离子、过氧化氢来减少细胞膜的脂质过氧化、提高抗氧化酶(SOD、CAT、GSH-Px)的活性来减少自由基的产生和丙二醛的形成, 从而降低血脂<sup>[68]</sup>。目前, 对竹叶多糖降血脂活性的作用机制还不明确, 需要进一步的深入研究。

### 3.5 其他生物活性

竹叶多糖具有抗疲劳的功效。多糖的抗氧化能力可能是具有抗疲劳功效的重要机制<sup>[69]</sup>。丁红秀等<sup>[70]</sup>通过测定小鼠运动后与疲劳有关的生化指标, 发现毛竹叶多糖具有显著的抗疲劳作用, 其在降低血尿素氮增量的同时提高了血清乳酸脱氢酶活力。

竹叶多糖具有抑菌的作用。陈致印等<sup>[71]</sup>发现早竹竹叶多糖具有抑制细菌菌株生长的能力, 对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑菌圈直径平均为 10.98 nm 和 9.85 nm, 大肠杆菌的最低抑制浓度(minimum inhibitory concentration, MIC) 值为 12.5 mg/mL, 枯草芽孢杆菌的 MIC 值为 25 mg/mL, 说明其对大肠杆菌的抑制效果强于枯草芽孢杆菌。XIAO 等<sup>[54]</sup>证实了毛竹叶多糖对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌有不同的抑制效果, 对大肠杆菌的生长抑制效果显著, 而当多糖质量浓度范围在 0.5~50 mg/mL 时, 对枯草芽孢杆菌的抑制作用则最强。

## 4 总结与展望

竹叶种类、提取及纯化方法显著影响着多糖的结构及

生物活性。基于对多糖结构和生物活性的保护,目前倾向于使用复合方式提取法及多种纯化方法联用的方式。竹叶多糖具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤、降血脂、抗疲劳及抑菌等生物活性,在功能食品开发领域和医药行业具有广阔的应用前景。但是,在竹叶多糖高级结构的研究方面仍存在欠缺,导致结构与生物活性的关系不够明确,未来该方面仍需要深入研究。在生物活性方面,未能全面揭示竹叶多糖的抗氧化、免疫调节、降血脂等活性的分子作用机制,后续需进一步的研究及深入剖析。未来,对竹叶多糖的研究新方向可聚焦于对其结构的修饰以增强生物活性。总之,随着对竹叶多糖的提取、结构和生物活性的深入研究,能够推动其在食品、医药及日化等行业的应用,进而推动竹叶资源的充分利用。

### 参考文献

- [1] VERMA S, MILI M, HADA V, *et al.* Bamboo leaves: Sustainable feedstock in pharmaceuticals, food, and agricultural sector [J]. *Environ Technol Rev*, 2022, 11(1): 266–281.
- [2] XIE Q, SUN YT, CAO LL, *et al.* Antifatigue and antihypoxia activities of oligosaccharides and polysaccharides from *Codonopsis pilosula* in mice [J]. *Food Funct*, 2020, 11(7): 6352–6362.
- [3] CHENG YQ, WAN SQ, YAO LN, *et al.* Bamboo leaf: A review of traditional medicinal property, phytochemistry, pharmacology, and purification technology [J]. *J Ethnopharmacol*, 2023, 306: 116166.
- [4] TUNDIS R, AUGIMERI G, VIVACQUA A, *et al.* Anti-inflammatory and antioxidant effects of leaves and sheath from bamboo (*Phyllostachys edulis* J. Houz) [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2023, 12(6): 1239.
- [5] MA YL, WU ZF, LI Z, *et al.* *In vitro* digestibility and hepato-protective potential of *Lophatherum gracile* Brongn. leave extract [J]. *Food Chem*, 2023, 433: 137336.
- [6] KIMURA I, KAGAWA S, TSUNEKI H, *et al.* Multitasking bamboo leaf-derived compounds in prevention of infectious, inflammatory, atherosclerotic, metabolic, and neuropsychiatric diseases [J]. *Pharmacol Ther*, 2022, 235: 108159.
- [7] LIAW CC, LIN YC, WU SY, *et al.* Anti-inflammatory constituents from *Phyllostachys makinoi* Hayata [J]. *Nat Prod Res*, 2022, 36(6): 1425–1432.
- [8] 邓巧平, 王龙. 竹叶提取物竹叶多糖的研究进展[J]. *中国食品工业*, 2022, (23): 80–82.
- DENG QP, WANG L. Progress in the study of bamboo leaf polysaccharides from bamboo leaf extracts [J]. *China Food Ind*, 2022, (23): 80–82.
- [9] NIYIGABA T, LIU D, HABIMANA JD. The extraction, functionalities and applications of plant polysaccharides in fermented foods: A review [J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3004.
- [10] AHMAD MM, CHATHA SAS, IQBAL Y, *et al.* Recent trends in extraction, purification, and antioxidant activity evaluation of plant leaf-extract polysaccharides [J]. *Biofuel Bioprod Bior*, 2022, 16(6): 1820–1848.
- [11] HUANG HL, HUANG GL. Extraction, separation, modification, structural characterization, and antioxidant activity of plant polysaccharides [J]. *Chem Biol Drug Des*, 2020, 96(5): 1209–1222.
- [12] 申鑫玉, 黄悦同, 阿依江·特列吾汗, 等. 金针菇多糖的提取纯化及生物活性研究进展[J]. *食品工业*, 2023, 44(2): 235–240.
- SHEN XY, HUANG YT, AYIJIAN TLWH, *et al.* Research progress on extraction, purification methods and bioactivities of flammulina velutipes polysaccharides [J]. *Food Ind*, 2023, 44(2): 235–240.
- [13] 殷军. 竹叶多糖的提取纯化、结构分析及活性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
- YIN J. Extraction and purification, structure analysis and study active of bamboo leaf polysaccharide [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.
- [14] 戴天伦. 赤水麻竹叶多糖的制备工艺及抗氧化性能研究[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2021.
- DAI TL. Study on preparation technology and antioxidant activity of polysaccharides from *Dendrocalamus latiflorus* Munro leaves in Chishui County [D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2021.
- [15] 赵莉莉. 竹叶多糖的提取分离、抗氧化性及竹叶调味茶饮料工艺研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- ZHAO LL. Study on extraction and separation of bamboo polysaccharides and the processing technology of compound beverage of the bamboo leaves [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2007.
- [16] 董宇, 林翰清, 缪松, 等. 酶法提取多糖的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 351–358.
- DONG Y, LIN HQ, MIAO S, *et al.* Advances in enzymatic extraction of polysaccharides [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(3): 351–358.
- [17] 王文渊, 周振华, 黄宁江, 等. 高压脉冲电场协同酶法提取竹叶中活性成分的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2014, (6): 95–101.
- WANG WY, ZHOU ZH, HUANG NJ, *et al.* Extraction of active ingredients in bamboo leaves by enzyme combined with high pulse electric field [J]. *China Food Addit*, 2014, (6): 95–101.
- [18] 赵秀玲, 陶文东. 竹叶多糖提取工艺及体外抗氧化性研究[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 33(5): 92–116.
- ZHAO XL, TAO WD. Extraction and antioxidant *in vitro* of polysaccharide from bamboo leaves [J]. *J Guizhou Norm Univ (Nat Sci)*, 2015, 33(5): 92–116.
- [19] 陈淇, 李湘鑫, 曾晓房, 等. 砂仁多糖提取及其生物活性研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(4): 232–238.
- CHEN Q, LI XL, ZENG XF, *et al.* Progress on the extraction of polysaccharide from *Amomum villosum* Lour. and its biological activity [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(4): 232–238.
- [20] MIRZADEH M, KESHAVARZ LA, KHEDMAT L. Plant/algal polysaccharides extracted by microwave: A review on hypoglycemic, hypolipidemic, prebiotic, and immune-stimulatory effect [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 266: 118134.
- [21] CUI R, ZHU F. Ultrasound modified polysaccharides: A review of structure, physicochemical properties, biological activities and food applications [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 107: 491–508.
- [22] CHEN X, YANG J, SHEN M, *et al.* Structure, function and advance application of microwave-treated polysaccharide: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 123: 198–209.
- [23] 秦明有. 竹叶多糖超声提取工艺研究[J]. *皮革与化工*, 2018, 35(1): 25–28.
- QIN MY. Study on ultrasonic extraction of polysaccharide from bamboo leaves [J]. *Leather Chem Ind*, 2018, 35(1): 25–28.
- [24] 喻谨, 岳永德, 汤锋, 等. 响应面法优化微波辅助提取竹叶多糖工艺研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2012, 39(3): 401–406.
- YU J, YUE YD, TANG F, *et al.* Optimization of microwave-assisted extraction of polysaccharides from bamboo leaves by response surface

- analysis [J]. *J. Anhui Agric Univ*, 2012, 39(3): 401–406.
- [25] 许梦粤, 曾长立, 王红波. 药食同源植物多糖提取方法、结构解析和生物活性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(19): 216–224.  
XU MY, ZENG CL, WANG HB. Advances in extraction method, structural analysis and bioactivity of polysaccharides from medicinal and edible homologous plants [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(19): 216–224.
- [26] 干森钰, 田方, 曹爱玲, 等. 超临界流体技术在鱼油加工中应用的研究进展[J/OL]. *中国油脂*: 1–15. [2024-01-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230264>  
GAN MY, TIAN F, CAO AIL, *et al.* Research progress on the application of supercritical fluid technology in fish oil processing [J/OL]. *China Oils Fats*: 1–15. [2024-01-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230264>
- [27] 徐慧婷, 王颖, 张玉国, 等. 发酵液多糖提取方法的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(1): 351–356.  
XU HT, WANG Y, ZHANG YG, *et al.* Research progress in extraction methods of polysaccharides from fermentation broth [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(1): 351–356.
- [28] 杨科. 超临界流体萃取技术在化工生产中的应用[J]. *山西化工*, 2023, 43(8): 109–111.  
YANG K. Application of supercritical fluid extraction technology in chemical production [J]. *Shanxi Chem Ind*, 2023, 43(8): 109–111.
- [29] 任美玲, 吕兆林, 欧阳屹林, 等. 气相色谱柱前衍生化测定竹叶多糖超临界 CO<sub>2</sub> 提取物[J]. *食品科学*, 2012, 33(6): 215–219.  
REN ML, LV ZL, OUYANG YL, *et al.* Supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction and pre-column derivatization GC analysis of polysaccharides bamboo leaf polysaccharides in a static-dynamic mode [J]. *Food Sci*, 2012, 33(6): 215–219.
- [30] ZOU XL, LIU YX, TAO C, *et al.* CO<sub>2</sub> supercritical fluid extraction and characterization of polysaccharide from bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) leaves [J]. *J Food Meas Charact*, 2017, 12(1): 35–44.
- [31] 任美玲. 竹叶多糖的提取制备及生物活性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.  
REN ML. Study on isolation, preparation and biological activity of bamboo leaves polysaccharides [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [32] 周跃斌, 王伟, 李适, 等. 竹叶多糖提取条件的优化[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 32(2): 206–209.  
ZHOU YB, WANG W, LI S, *et al.* Study on extraction of polysaccharide from bamboo [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci)*, 2006, 32(2): 206–209.
- [33] 祝方清, 孟迎平, 刘娜, 等. 超声波辅助酸法提取橙皮果胶的工艺研究[J]. *中国调味品*, 2023, 48(9): 138–142.  
ZHU FQ, MENG YP, LIU N, *et al.* Study on extraction process of pectin from orange peel by ultrasonic-assisted acid method [J]. *China Cond*, 2023, 48(9): 138–142.
- [34] 张强, 蒋立新, 周燕, 等. 超声波辅助杂多酸提取竹叶多糖工艺优化及其生物活性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(6): 185–209.  
ZHANG Q, JIANG LX, ZHOU Y, *et al.* Optimization of preparation and its biological evaluations of bamboo leaves polysaccharides extracted by ultrasonic extraction assisted by heteropoly acid [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(6): 185–209.
- [35] ZHANG YL, HE L, LI Q, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted deep eutectic solvent for the extraction of polysaccharides from *Indocalamus tessellatus* leaves and their biological studies [J]. *Sustain Chem Pharm*, 2022, 30: 100855.
- [36] LANJEKAR KJ, RATHOD VK. Application of ultrasound and natural deep eutectic solvent for the extraction of glycyrrhizic acid from *glycyrrhiza glabra*: Optimization and kinetic evaluation [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2021, 60(26): 9532–9538.
- [37] HUANG GL, CHEN F, YANG WJ, *et al.* Preparation, deproteinization and comparison of bioactive polysaccharides [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 109: 564–568.
- [38] 周先泰, 陈蓉, 齐娜. 竹叶多糖提取分离及体外抗氧化自由基的研究[J]. *广州化工*, 2021, 49(6): 80–111.  
ZHOU XT, CHEN R, QI N. Extraction and separation of polysaccharides from bamboo and study on antioxidant free radicals *in vitro* [J]. *Guangzhou Chem Ind*, 2021, 49(6): 80–111.
- [39] TAO L, ZHANG JW, LAN WF, *et al.* Polysaccharide decolorization: Methods, principles of action, structural and functional characterization, and limitations of current research [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 138: 284–296.
- [40] WANG CZ, ZHANG HY, LI WJ, *et al.* Chemical constituents and structural characterization of polysaccharides from four typical bamboo species leaves [J]. *Molecules*, 2015, 20(3): 4162–4179.
- [41] REN Y, BAI YP, ZHANG ZD, *et al.* The preparation and structure analysis methods of natural polysaccharides of plants and fungi: A review of recent development [J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3122.
- [42] 徐涵, 刘云, 阚欢. 天然多糖提取纯化及生理功能活性研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(5): 1382–1390.  
XU H, LIU Y, KAN H. Research progress on extraction, purification and physiological activity of natural polysaccharides [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(5): 1382–1390.
- [43] 马向前, 夏苏东, 王苹, 等. 海参多糖的提取纯化、化学分析方法和生物活性研究进展[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–11. [2024-01-15]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035296>  
MA XQ, XIA SD, WANG P, *et al.* Research progress in extraction, purification, chemical analysis, and biological activity of sea cucumber polysaccharides [J/OL]. *Food Ferment Ind*: 1–11. [2024-01-15]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035296>
- [44] 桑雨梅, 高郁超, 武济萍, 等. 食用真菌多糖提取、纯化及结构表征研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(13): 210–218.  
SANG YM, GAO YC, WU JP, *et al.* Extraction, purification and structural characteristics of polysaccharides from edible fungi [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(13): 210–218.
- [45] 邢慧珍, 张玉梅, 刘会平, 等. 淡竹叶多糖的制备、热稳定性及其抗氧化活性[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(19): 86–96.  
XING HZ, ZHANG YM, LIU HP, *et al.* Preparation, thermal stability and antioxidant activity of polysaccharide from *Lophatherum gracile* Brongn. [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(19): 86–96.
- [46] 邓云兵, 黄冬琴, 岳天翔. 淡竹叶多糖的大孔吸附树脂纯化工艺及对小鼠运动耐力的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 169–174.  
DENG YB, HUANG DQ, YUE TX. Purification technology of polysaccharides from *Lophatherum gracile* Brongn. by macroporous resin adsorption and its effect on athletic endurance of mice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(14): 169–174.
- [47] 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.
- [48] CHEN XQ, SUN FJ, TAN QY, *et al.* High internal phase emulsions stabilized solely by alkali-extracted bamboo leaf polysaccharide conjugates [J].

- Ind Crops Prod, 2023, 201: 116932.
- [49] HONG T, YIN JY, NIE SP, *et al.* Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective [J]. Food Chem: X, 2021, 12: 100168.
- [50] LI ZG, AN LJ, ZHANG SJ, *et al.* Structural elucidation and immunomodulatory evaluation of a polysaccharide from *Stevia rebaudiana* leaves [J]. Food Chem, 2021, 364: 130310.
- [51] TAN JQ, CUI PS, GE SQ, *et al.* Ultrasound assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from *Cornus officinalis* fruit: Modeling, optimization, purification, and characterization [J]. Ultrason Sonochem, 2022, 84: 105966.
- [52] JOSHI J, HOMBURG SV, EHRMANN A. Atomic force microscopy (AFM) on biopolymers and hydrogels for biotechnological applications-possibilities and limits [J]. Polymers (Basel), 2022, 14(6): 1267.
- [53] XIAO ZQ, LI JJ, WANG HP, *et al.* Hemicellulosic polysaccharides from bamboo leaves promoted by phosphotungstic acids and its attenuation of oxidative stress in HepG2 cells [J]. Front Nutr, 2022, 9: 917432.
- [54] XIAO ZQ, ZHANG Q, DAI J, *et al.* Structural characterization, antioxidant and antimicrobial activity of water-soluble polysaccharides from bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel) leaves [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 142: 432–442.
- [55] MAO JW, YIN J, GE Q, *et al.* *In vitro* antioxidant activities of polysaccharides extracted from Moso bamboo-leaf [J]. Int J Biol Macromol, 2013, 55: 1–5.
- [56] ZHANG XD, LI MF, ZHONG LX, *et al.* Microwave-assisted extraction of polysaccharides from bamboo (*Phyllostachys acuta*) leaves and their antioxidant activity [J]. Bioresources, 2016, 11(2): 5100–5112.
- [57] ADHIKARI D, GHOSH T. Structural insight and *in vitro* free radical scavenging capacity of arabinogalactan polysaccharides from the peels of *Punica granatum* [J]. Asian J Chem, 2021, 33(4): 873–880.
- [58] GE Q, MAO JW, GUO XQ, *et al.* Composition and antioxidant activities of four polysaccharides extracted from herba lophatheri [J]. Int J Biol Macromol, 2013, 60: 437–441.
- [59] ESWAR K, MUKHERJEE S, GANESAN P, *et al.* Immunomodulatory natural polysaccharides: An overview of the mechanisms involved [J]. Eur Polym J, 2023, 188: 111935.
- [60] 唐莉莉, 丁霄霖. 竹叶多糖的分离提取及其生物活性研究[J]. 食品研究与开发, 2000, 21(1): 8–10.
- TANG LL, DING XL. Separation, extraction and biological activity of polysaccharides from bamboo leaves [J]. Food Res Dev, 2000, 21(1): 8–10.
- [61] 张亚兰. 箬竹叶多糖分离纯化、结构表征及免疫活性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- ZHANG YL. Isolation and purification, structure characterization and immunoreactivity of polysaccharides from *Indocalamus* leaves [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [62] 王文丽, 张金玲, 魏亚宁, 等. 天然多糖提取、纯化及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 470–480.
- WANG WL, ZHANG JL, WEI YN, *et al.* Extraction, purification and bioactivity of natural polysaccharides: A review [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(22): 470–480.
- [63] TAKAHIRO S, KENJI K, HIROSHI M. Immunostimulation-mediated anti-tumor activity of bamboo (*Sasa senanensis*) leaf extracts obtained under ‘vigorous’ condition [J]. Evid-Based Compl Alt, 2010, 7(4): 447–457.
- [64] TAKAHIRO S, HIROSHI M. Cancer preventive effect of Kumaizasa bamboo leaf extracts administered prior to carcinogenesis or cancer inoculation [J]. Anticancer Res, 2010, 30: 111–118.
- [65] 潘静, 杨人泽, 钟斌. 苦竹叶多糖体外抗肿瘤活性研究[J]. 药品评价, 2021, 18(23): 1432–1435.
- PAN J, YANG RZ, ZHONG B. Study on the antiproliferative effect of polysaccharide from *Pleuroblastus amarus* leaves [J]. Drug Eval, 2021, 18(23): 1432–1435.
- [66] JING YS, MA YF, PAN FB, *et al.* An insight into antihyperlipidemic effects of polysaccharides from natural resources [J]. Molecules, 2022, 27(6): 1903.
- [67] 周路坦, 鲁晓娟. 箬竹叶中性多糖及酸性多糖理化特性及生物活性比较研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(12): 255–262.
- ZHOU LT, LU XJ. Comparative study on physicochemical properties and bioactivities of neutral and acidic polysaccharide from *Indocalamus* leaves [J]. China Food Addit, 2022, 33(12): 255–262.
- [68] KALITA P, AHMED AB, SEN S, *et al.* A comprehensive review on polysaccharides with hypolipidemic activity: Occurrence, chemistry and molecular mechanism [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 206: 681–698.
- [69] 高蔚娜, 边祥雨, 徐勤高, 等. 辣木叶黄精多糖组合物的抗疲劳作用及其机制研究[J]. 中国应用生理学杂志, 2022, 38(4): 308–312.
- GAO WN, BIAN XY, XU QG, *et al.* Antifatigue effects of the composition of *Moringa oleifera* leaves and *Polygonatum* polysaccharide and its mechanisms [J]. Chin J Appl Physiol, 2022, 38(4): 308–312.
- [70] 丁红秀, 高荫榆, 晁红娟, 等. 毛竹叶多糖抗疲劳作用研究[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 389–391.
- DING HX, GAO YY, CHAO HJ, *et al.* Study on anti-fatigue effect of polysaccharide from Moso bamboo leaves [J]. Food Sci, 2008, 29(4): 389–391.
- [71] 陈致印, 许译文, 何佳慧, 等. 早竹竹叶多糖的提取及其抑菌作用[J]. 现代化农业, 2017, (2): 35–38.
- CHEN ZY, XU ZW, HE JH, *et al.* Extraction of polysaccharides from the leaves of *Phyllostachys praecox* and their antibacterial effects [J]. Mod Agric, 2017, (2): 35–38.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

## 作者简介



曹文丹, 硕士研究生, 主要研究方向为食品精深加工。  
E-mail: wdcao814@163.com

应苗苗, 教授, 主要研究方向为食品精深加工。  
E-mail: mmying0210@163.com