

卢金华, 袁清霞, 杨珍珍, 等. 甘蔗叶、渣多糖提取、分离纯化、结构表征及生物活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 458–472. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090025

LU Jinhua, YUAN Qingxia, YANG Zhenzhen, et al. Research Progress on Extraction, Isolation, Purification, Structure Characterization, and Bioactivities of Polysaccharides from Sugarcane Leaves and Bagasse[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 458–472. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090025

· 专题综述 ·

甘蔗叶、渣多糖提取、分离纯化、结构表征及生物活性研究进展

卢金华^{1,2}, 袁清霞³, 杨珍珍^{1,2}, 黄春秀¹, Pei Ling Tang⁴, 李 政⁵, 廖耀文⁵, 张 健⁵,
赵龙岩^{3,*}, 侯小涛^{1,2,*}, 邓家刚²

(1. 广西中医药大学药学院, 广西南宁 530200;

2. 广西中医药大学广西中药药效研究重点实验室, 中药资源循环利用广西高校工程研究中心,
广西中医湿病方药理论与转化重点实验室, 广西南宁 530200;

3. 广西中医药大学海洋药物研究院, 广西南宁 530200;

4. 马来西亚拉曼理工大学应用科学学院生物科学系, 马来西亚吉隆坡 53300;

5. 广西凤糖生化股份有限公司, 广西柳州 545002)

摘 要: 甘蔗叶和甘蔗渣是食品和经济作物甘蔗的两种主要废弃物, 资源丰富, 富含多种生物活性成分, 具有开发保健食品和功能性食品的潜力。多糖是甘蔗叶、渣的主要活性成分, 提取方法分为水、碱等溶液为溶剂的传统提取法和基于传统提取法的酶、超声、微波、高温高压等辅助提取法, 其中, 破坏木质素-碳水化合物复合体 (Lignin-Carbohydrate Complex, LCC) 是提高多糖提取率的关键。甘蔗叶、渣主要含有纤维素、半纤维素及水溶性多糖, 纤维素是主要以 β -1,4-葡萄糖为主链构成的葡聚糖, 半纤维素类多糖主要以 β -1,4-木糖为主链构成的木聚糖为主, 水溶性多糖的结构较复杂, 包含甘露糖、葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖等多种单糖和多种类型糖苷键。甘蔗叶、渣多糖具有丰富生物活性, 如: 抗氧化、抗菌、抗肿瘤、改善糖尿病、抗心血管疾病、免疫调节和胃保护等作用, 在食品、保健品、医药等领域应用潜力大。尽管甘蔗叶、渣多糖在理化性质及活性等方面有广泛研究, 但在结构解析、构效关系及机制等方面研究仍需加深。本文在全面梳理相关文献资料的基础上, 系统综述了甘蔗叶、渣多糖在上述各方面研究取得的重要进展, 并简述了甘蔗叶、渣多糖的改性和应用现状, 以期为甘蔗叶、渣多糖的进一步研究和开发应用提供参考。

关键词: 甘蔗废弃物, 甘蔗叶, 甘蔗渣, 多糖, 提取, 结构, 生物活性

中图分类号: TS249

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)14-0458-15

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090025

本文网刊:



Research Progress on Extraction, Isolation, Purification, Structure Characterization, and Bioactivities of Polysaccharides from Sugarcane Leaves and Bagasse

LU Jinhua^{1,2}, YUAN Qingxia³, YANG Zhenzhen^{1,2}, HUANG Chunxiu¹, Pei Ling Tang⁴, LI Zheng⁵,
LIAO Yaowen⁵, ZHANG Jian⁵, ZHAO Longyan^{3,*}, HOU Xiaotao^{1,2,*}, DENG Jiagang²

(1. College of Pharmacy, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Efficacy Study on Chinese Materia Medica, University Engineering Research Center of

收稿日期: 2024-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (82060762); 广西科技重大专项 (2022AA01016); 广西中医药大学“桂派中医药传承创新团队”资助项目 (2022A005)。

作者简介: 卢金华 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 中药分析学, E-mail: 1179262451@qq.com。

* 通信作者: 赵龙岩 (1983-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 海洋糖类药物, E-mail: zly15717157200@sina.com。

侯小涛 (1969-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 中药物质基础与质量控制研究, E-mail: xthou@126.com。

Reutilization of Traditional Chinese Medicine Resources, Guangxi, Guangxi Key Laboratory of TCM Formulas Theory and Transformation for Damp Diseases, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China;

3. Institute of Marine Drugs, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China;

4. Department of Bioscience, Faculty of Applied Sciences, Tunku Abdul Rahman University of Management and Technology, Kuala Lumpur 53300, Malaysia;

5. Guangxi Fengtang Biochemical Co., Ltd., Liuzhou 545002, China)

Abstract: The leaves and bagasse of sugarcane, an important food and economically significant crop, are recognized as two major residues. These materials are abundant in resources and rich in bioactive compounds, and their significant potential for the development of functional foods and health products is acknowledged. Polysaccharides are recognized as the main active components of sugarcane leaves and bagasse. Extraction is performed using traditional techniques with water and alkaline solutions as solvents, as well as auxiliary methods such as enzymatic, ultrasonic, microwave, and high-temperature-high-pressure extraction, which are based on the traditional techniques. Among these, the disruption of the lignin-carbohydrate complex (LCC) is recognized as key to improving polysaccharide extraction efficiency. Sugarcane leaves and bagasse are mainly composed of cellulose, hemicellulose, and water-soluble polysaccharides. Cellulose is mainly composed of β -glucans possessing a β -1,4-glucose main chain, and hemicellulose is generally composed of xylan with a β -1,4-xylopyranose main chain. The structures of water-soluble polysaccharides are considered more complex, being composed of various monosaccharides, such as mannose, glucose, galactose, and arabinose, along with various glycosidic linkages. Sugarcane leaves and bagasse polysaccharides are known to possess rich biological activities, including antioxidant, antibacterial, anti-tumor, diabetes-improving, anti-cardiovascular disease, immune-regulating and gastric-protective effects. They are considered to have great application potential in the fields of food, health products, and medicine. Although the physicochemical properties and activities of polysaccharides from sugarcane leaves and bagasse have been extensively studied, further investigation is warranted regarding their structural elucidation, structure-activity relationships, and underlying mechanisms. Building upon a comprehensive review of relevant literature, this paper systematically summarizes recent advances in these areas. The current status of polysaccharide modification and application is also briefly analyzed, with the aim of providing a useful reference for further research and development of these polysaccharides.

Key words: sugarcane residues; sugarcane leaves; sugarcane bagasse; polysaccharide; extraction; structure; bioactivities

甘蔗叶是禾本科植物甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)采收后剩余的叶片,甘蔗渣则是甘蔗榨汁后残留的固体渣滓,二者是甘蔗产业的主要废弃物。在甘蔗作为食品食用及生产蔗糖的过程中,通常伴随着大量的甘蔗叶和甘蔗渣产生,被视为废弃物进行焚烧或丢弃,未得到充分的研究与利用^[1]。近年来的研究表明,甘蔗叶、渣富含多种营养活性成分,如多糖、黄酮、酚酸等,这些成分具有重要的食品营养价值和保健功能开发潜力^[2]。因此,合理地利用甘蔗叶、渣,不仅可以减少废弃物,推动绿色可持续发展,还能为甘蔗产业增加经济附加值,具有重要的社会意义和经济价值。

多糖是甘蔗叶、渣的主要活性成分,包括半纤维素、纤维素及水溶性多糖^[3-4]。研究表明,甘蔗叶、渣多糖具有丰富的生物活性和健康益处,如抗氧化^[5-6]、抗菌^[6-7]、抗肿瘤^[8-9]、改善糖尿病^[10-11]、抗心血管疾病^[12-14]、免疫调节^[15]和胃保护^[16]等作用,在食品、保健品以及医药卫生等领域展现了广泛应用潜力。此外,多糖的化学结构与其生物活性密切相关,而提取与分离纯化方法在一定程度上决定了多糖的结构特性。这些特性不仅是探索多糖功能性机制的基础,也是指导多糖类健康食品开发的重要前提。本文主要从甘蔗叶、渣多糖的提取、分离纯化、结构特性及生物活性等方面进行综述,旨在为甘蔗叶、渣

多糖的进一步研究和开发应用提供理论支持和研究参考。

1 甘蔗叶、渣多糖的制备

甘蔗叶、渣中主要含水溶性多糖,碱溶性多糖(半纤维素)和不溶于水、稀碱(酸)等常规溶剂的难溶性多糖(纤维素)三类多糖,其中水溶性和碱溶性多糖一般是将其溶于提取溶剂中,通过醇沉、低温干燥获得,属于可溶性多糖;难溶性多糖主要通过除去杂质和可溶性多糖,再干燥获得,图 1 总结了这三类多糖的主要制备流程。本部分主要对可溶性多糖制备方法进行综述,目前,甘蔗叶、渣可溶性多糖的制备方法主要有传统提取法:水提法、碱提法;辅助提取法:酶、超声、微波、高温高压等辅助提取法。

1.1 甘蔗叶、渣的预处理

甘蔗叶、渣提取多糖前的预处理主要有净检、干燥、粉碎过筛、脱脂和脱木质素等,预处理的目的是增加多糖的溶出或除去非多糖类杂质,提高多糖的得率和纯度。甘蔗叶、渣富含纤维素,木质素,半纤维素^[17-18],在自然界中它们常以木质素-碳水化合物复合体(Lignin-Carbohydrate Complex, LCC)的形式存在,LCC 结构大大阻碍了多糖的溶出,破坏 LCC 结构可有效增加多糖溶出^[18-20]。木质素是半纤维素和纤维素的主要杂质,常用亚氯酸钠^[21]、碱性过氧化物^[22]等试剂除去或先破坏 LCC 结构,再使用相应试

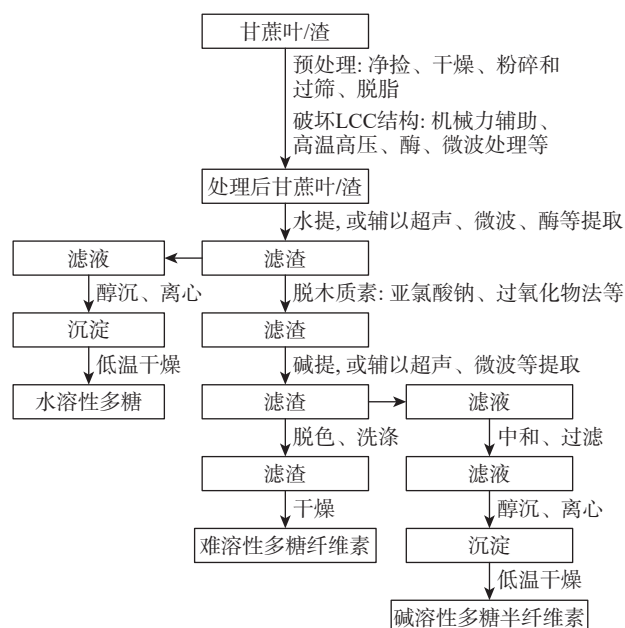


图1 甘蔗叶、渣中多糖的一般制备流程

Fig.1 General preparation process of polysaccharides from sugarcane leaves and bagasse

剂除去^[23-25]。另外,碱溶性多糖溶液中的木质素可使用酸沉淀、选择性树脂吸附或结合超滤等方法除去^[26-27]。此外,由于LCC结构复杂,除去木质素会损失部分多糖,过度追求木质素的脱除会损失过多的多糖,而影响多糖结构和活性^[28]。

1.2 甘蔗叶、渣可溶性多糖的提取

1.2.1 传统提取法 甘蔗叶、渣可溶性多糖的传统提取法主要是水提法和碱提法。吴金松等^[29]结合单因素实验和正交试验,确定了提取甘蔗渣水溶性多糖的最佳提取条件:料液比 1:30 (g:mL),温度 70 ℃,时间 3 h,醇沉乙醇终浓度为 90%,提取率为 1.03%。王萱萱等^[30]采用响应面试验优化碱提甘蔗皮多糖工艺,确定最佳提取条件:提取温度 37 ℃、NaOH 浓度 5%、料液比 1:46 (g:mL)、提取 4 次,得率达 10.84%。陈赵杰等^[31]将甘蔗叶粉末按照液料比 1:30 (g:mL),NaOH 浓度 0.45 mol/L,提取温度 70 ℃,提取时间 2 h,多糖提取率为 7.716%。碱提法的甘蔗叶、渣多糖提取率远高于水提法,原因是甘蔗叶、渣中富含半纤维素,碱溶液可使半纤维素充分溶出,从而提高多糖得率^[32]。传统提取法提取甘蔗叶、渣可溶性多糖,具有设备要求低、操作简单、成本低等优点。但也有其局限性,包括提取效率低,耗时长等,在实际应用中,结合超声波提取、微波提取等辅助提取技术可有效提高提取效率和多糖纯度。

1.2.2 辅助提取法

1.2.2.1 酶辅助提取 酶辅助提取法是通过添加特定酶特异性降解细胞壁,促进多糖溶出,具有较强的选择性,可根据目标多糖选择合适的酶。吴金松等^[33]通过最优工艺对比实验(果胶酶、纤维素酶、中性蛋白酶)筛选出果胶酶是甘蔗渣中水溶性粗多糖提取率

最高的一种酶,并根据单因素实验和正交试验优化,得到最佳工艺条件:酶解温度 50 ℃,酶解 pH5.0,酶用量 2.0%,酶解时间 50 min,提取率为 1.09%。Tang 等^[34]先高温处理甘蔗叶,破坏 LCC 结构,再使用纤维素等混合酶处理,最后再进行水提,有效增加多糖的得率。Faria 等^[35]利用半纤维素酶混合物,成功从蒸汽爆破预处理的甘蔗渣中回收阿拉伯木聚糖。酶的成本是限制酶辅助提取法工业化生产的主要原因,解决这一问题可有效促进酶辅助提取的工业化进程。

1.2.2.2 超声辅助提取 超声辅助提取是通过超声波的空化效应破坏细胞壁和 LCC 结构,增加甘蔗叶、渣中多糖的溶出。陈赵杰等^[36]采用响应面试验确定了超声辅助热水提取甘蔗叶多糖的最优条件为:超声功率 360 W、温度 60 ℃、时间 60 min 及液料比 1:40 (g:mL),提取率较传统热水提取法提高了约 120%。严鹤松等^[37]通过单因素实验、正交试验得出最优的超声辅助碱法提取甘蔗渣多糖条件为:超声功率 240 W、料液比为 1:25 (g:mL)、超声时间 25 min、超声温度 60 ℃、13% NaOH,最高提取率为 36.91%。何雪梅等^[38]以多糖提取率和 DPPH 自由基清除率为指标,采用响应面试验确定了超声波提取蔗梢多糖最佳工艺为:超声功率 640 W、提取温度 69 ℃、提取时间 29 min,在此条件下,其多糖提取率为 4.68%,DPPH 自由基清除率为 74.89%。与传统提取法相比,超声辅助提取甘蔗叶、渣多糖可有效提高多糖的得率,且还可能具有更优的生物活性^[7]。另外,超声辅助提取还可与酶辅助提取结合,增强酶对植物组织的渗透和酶的催化活性,增加多糖的溶出^[39],但该方法需要严格根据酶和底物的特性优化超声波的功率和处理时间,以避免酶失活或底物降解。

1.2.2.3 微波辅助提取 微波辅助提取通过迅速加热溶剂及样品,使植物细胞内的水分子快速振动,从而引起细胞结构的破裂,增加多糖的溶出^[40]。陈赵杰等^[31]通过响应面试验优化微波热碱提取甘蔗叶多糖,结果表明微波辅助热碱甘蔗叶多糖提取率为 13.283%,热碱提取法提取率为 7.716%。另外,还有研究人员先用微波处理甘蔗渣,有效地破坏了甘蔗渣细胞壁并降低了屏蔽效应,再使用微波辅助热碱提取,可有效促进半纤维素的溶解和扩散,增加半纤维素的提取率^[41]。与传统提取法相比,微波辅助提取可有效缩短甘蔗叶、渣多糖的提取时间,提高提取率^[42-43],且与热碱提取法相比,微波辅助热碱提取的甘蔗叶多糖具有更好的生物活性^[44]。

1.2.2.4 高温高压辅助提取 高温辅助提取利用高温高压环境破坏 LCC 结构,提高溶剂的渗透性,加快多糖的溶解速率和扩散速度,从而释放出细胞内的多糖。王星圆等^[45]将碱性过氧化氢预处理后的甘蔗叶置于高温反应釜中加入 30 倍量水,于 150 ℃下提取 3 次,得到的甘蔗叶多糖总糖含量达 76.38%。严

鹤松等^[37]使用高压灭菌锅以 6% NaOH 为提取溶剂, 提取温度 121 ℃, 提取时间 30 min, 料液比 1:39 (g:mL) 的条件高温高压提取甘蔗渣木聚糖, 得率达 14.97%, 与超声辅助热碱提法得到的甘蔗渣木聚糖得率接近。适当的高温可有效增加甘蔗叶、渣多糖提取率, 但达到高温并控制比较苛刻, 还可能造成多糖的降解而降低生物活性, 相较于其他辅助提取法, 高温辅助提取法缺点明显。

1.2.2.5 其他提取方法 除上述提取方法外, 董思琦^[46]首次利用液相脉冲放电等离子体技术提取甘蔗渣多糖, 综合考察了以去离子水和碱溶液为液化溶剂时, 甘蔗渣的液化率、多糖回收率和提取率以及提取甘蔗渣多糖时的能耗分析等内容, 发现液相脉冲放电法是一种低能耗、高产率、条件温和、对环境影响小的绿色生物质提糖技术, 为木质素纤维素生物质废弃物资源再利用的提供新思路。

表 1 归纳总结了甘蔗叶、渣可溶性多糖的不同提取方法及其优缺点。目前甘蔗叶、渣可溶性多糖的提取方法正向多元化和高效化发展。在传统的水提、碱提法基础上, 结合超声波、微波、酶解、高温高压以及新兴的液相脉冲放电等离子体法等辅助提取技术, 可显著增加多糖的溶出, 提高多糖的提取率。从表 1 可以看出, 辅助提取技术的工业化应用尚需进一步探索和优化, 特别是在设备成本、能耗控制和规模化可操作性等方面。在现有技术中, 碱溶液提取法凭借其高提取率和适用性, 是甘蔗叶、渣半纤维素类多糖工业化应用的主要研究方向。未来需加强对传统方法与新兴技术结合的研究, 为甘蔗叶、渣多糖的高效利用和产业化发展提供技术支撑。

1.3 甘蔗叶、渣难溶性多糖的提取

甘蔗叶、渣纤维素的制备一般基于其不溶于水、稀碱(酸)和一般有机溶剂的特性, 除去脂溶性、水溶性、碱溶性(木质素和半纤维素)等非纤维素物质, 再对其进行漂白, 最后干燥获得。

周永升等^[47]将甘蔗叶粉碎后, 用酶(蛋白酶、淀粉酶、)除去蛋白、淀粉和脂肪, 再先后用碱性过氧化

氢法、乙酸和亚氯酸钠除去木质素和半纤维素, 制备纤维素。Chandrakant 等^[48]先使用亚氯酸钠和冰醋酸处理甘蔗叶除去木质素, 再使用 10% 氢氧化钠和 1% 硼酸混合溶液, 60 ℃ 下搅拌提取 3 h 使半纤维素充分溶解于稀碱溶液中, 滤渣使用自来水和纯水洗涤至中性, 干燥即得纤维素, 纤维素回收率达 85%。有效地破坏 LCC 结构, 有利于除去半纤维素和木质素, 获得高纯度的纤维素。龚映雪等^[49]使用高温高压先破坏 LCC 结构, 再使用氨基磺酸显著提高了半纤维素和木质素的去除率, 纤维素损失率仅 7.56%。为拓宽应用范围, 纤维素常被转化为可溶性的葡聚糖。目前, 主要的制备方法包括酸水解法和酶解法, 其中酶解法因其温和的反应条件、强选择性以及几乎无副产物产生等优点而被更广泛地应用^[48,50]。

2 甘蔗叶、渣多糖的分离与纯化

对甘蔗叶、渣多糖进行分离纯化是获得高纯度均一多糖的必经步骤, 有效的分离纯化直接影响均一性多糖的获取及后续的结构解析、活性研究及构效分析。目前甘蔗叶、渣多糖的分离纯化主要是分离除多糖以外的杂质得到高纯度多糖和纯化得到均一性较好的纯化多糖两个部分。表 2 总结了近年来甘蔗叶、渣多糖提取分离纯化、不同程度的结构表征和部分生物活性等内容。

提取得到的甘蔗叶、渣多糖常含有蛋白质、色素、小分子物质等非糖类杂质, 常用 Sevag 法、等电点法、三氟乙酸(TCA)法、酶解法等脱蛋白^[51], 活性炭、大孔树脂、过氧化氢等脱色素^[52], 小分子物质常基于半透膜原理用超滤和透析法除去^[7,53]。除去杂质后的甘蔗叶、渣多糖, 还需进一步纯化, 才可获得均一性纯化多糖。常用的方法有分级醇沉、超滤、透析、离子交换柱层析和凝胶柱层析等。

分级醇沉是利用不同分子在醇溶液中的溶解性差异, 通过逐步增加醇浓度, 从而得到分子量不同的多糖, 如: Jiang 等^[43]使用分级醇沉得到 3 种酸性甘蔗叶片多糖 ASLP-50(195.88 kDa)、ASLP-70(94.62 kDa)和 ASLP-90(16.37 kDa), 分子量随乙醇浓度升高而降低, 升高乙醇浓度可以沉淀分子量更小

表 1 甘蔗叶、渣可溶性多糖提取方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of extraction methods of soluble polysaccharides from sugarcane leaves and bagasse		
提取方法	优点	缺点
水提法	操作简单, 设备成本低, 环保, 可工业化生产	对LCC破坏有限, 提取率低, 提取时间较长, 能耗较高, 经济效益较低
碱提法	提取率较高, 适合半纤维素等碱性多糖, 工艺成熟, 易工业化, 设备需求较低, 成本适中	需要除去木质素, 中和除碱液, 长时间高温碱提可能导致多糖降解, 废液处理有环境问题
超声波辅助提取	提取时间短, 效率高, 与传统提取法结合效果显著, 较好保护多糖活性	设备投资和运行成本高, 易磨损, 工业化连续生产难度大, 工艺参数需优化
微波辅助提取	提取时间短、效率高, 溶剂使用量少, 能耗低, 可较好保护多糖的活性和结构	设备成本较高, 可能导致多糖降解
酶辅助提取	条件温和, 保护多糖活性, 高选择性, 适合特定多糖提取, 环保, 可与超声等方法结合增强提取效率	酶成本有待进一步评估, 受温度和pH影响, 提取速度较慢, 工业化还需进一步探索
高温高压辅助提取	提取率较高, 时间短, 可高效破坏LCC, 减少化学试剂使用	高温可能导致多糖降解, 设备投资高, 工艺条件需优化以避免影响多糖结构
液相脉冲放电等离子体法	高效破坏LCC, 提取率高, 环保, 提取时间短, 技术潜力大	工业化技术尚在探索, 设备成本高, 能耗大, 对多糖结构和活性的影响需进一步研究

表 2 不同提取分离纯化方法得到的甘蔗叶、渣多糖的部分化学研究及其部分生物活性

Table 2 Partial chemical studies and partial biological activities of polysaccharides from sugarcane leaves and bagasse obtained by different extraction, separation and purification methods

多糖来源	提取、分离纯化	单糖组成	分子量 (kDa)	结构解析结果	活性	参考文献
叶	水提,木瓜蛋白酶除蛋白, H ₂ O ₂ 脱色, DEAE-纤维素柱分离水洗脱组分、Sephadex G-100纯化	—	—	—	体外抗肿瘤	[8]
叶	水提, 80%乙醇醇沉, Sevag法除蛋白, 3.5 kDa透析	Man: Rha: GlcA: GalA: Glc: Gal: Xyl: Ara=3.87: 7.13: 2.29: 10.46: 11.1: 29.92: 8.77: 26.47	33.59	存在吡喃糖, α 、 β -葡聚糖, 可能含 α -D-(1-4)和 α -D-(1-6)链接糖苷键。具有三螺旋结构, 内部晶体无定形。呈大小不均一的碎片, 表面粗糙, 有许多微小的孔隙	体外抗菌作用	[7]
叶	水提, Q-Sepharose Fast Flow离子交换柱分离水洗脱组分, Sepharcryl S-300	Man: Rha: GlcA: Glc: Gal: Xyl: Ara=9.4: 1.2: 1.0: 33.3: 29.1: 4.0: 14.5	10.7	$\rightarrow$ 4)-D-Glc-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6)-D-Gal-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 2)-D-Man-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,6)-D-Glc-(1 $\rightarrow$, D-Gal-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3)-L-Ara-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 2,4)-L-Ara-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,4,6)-D-Glc-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 2,6)-D-Gal-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4,6)-D-Man-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4,6)-D-Gal-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,4)-D-Glc-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3)-D-Glc-(1 $\rightarrow$, D-Xyl-(1 $\rightarrow$	—	[3]
叶	水提, Q-Sepharose Fast Flow柱分离0.3 mol/L NaCl洗脱组分, Sepharcryl S-300	Man: Rha: GlcA: Glc: Gal: Xyl: Ara=2.4: 2.2: 1.0: 7.3: 15.5: 3.6: 9.4	59.8	—	—	—
渣	水提, Sevage法除蛋白, H ₂ O ₂ 脱色, 3.5 kDa透析, 柱层析纯化; DEAE-52纤维素分离水洗脱组分、Sephadex G100、Sephadex G300纯化	Man: Glc: Ara=15: 9: 9	1.934	由 $\rightarrow$ 1)-Ara、 $\rightarrow$ 1,3)-Ara、 $\rightarrow$ 1)-Gal、 $\rightarrow$ 1,3)-Gal、 $\rightarrow$ 1,3)-Man和 $\rightarrow$ 1,3,6)-Man组成, 比例为3:1:1:1:1:4	降脂护肝作用	[4]
渣	水提, Sevage法除蛋白, H ₂ O ₂ 脱色, 3.5 kDa透析, 柱层析纯化; DEAE-52纤维素柱分离NaCl梯度洗脱组分、Sephadex G100、Sephadex G300纯化	Man: Glc: Gal=9: 10: 8	7.5232	由 $\rightarrow$ 1)-Gal、 $\rightarrow$ 1,3)-Gal、 $\rightarrow$ 1,3)-Glc、 $\rightarrow$ 1,3)-Man、 $\rightarrow$ 1,3,6)-Glc组成, 比例为2:1:1:3:2	—	—
渣	水提	Man: Rha: Glc: Gal: Xyl: Ara=5.62: 0.89: 8.15: 22.07: 51.65: 11.61	8.08	均由阿拉伯木聚糖和果胶多糖组成	—	[18]
渣	水提	Man: Rha: Glc: Gal: Xyl: Ara=5.10: 1.01: 7.04: 21.10: 53.46: 12.30	8.56	—	—	—
渣	水提, 15%乙醇醇沉	Man: Rha: Uronic acid: Glc: Gal: Xyl: Ara=9.17: 1.83: 5.06: 38.27: 19.23: 27.65: 3.85	12.82	存在 β -糖苷键, 含有少量的乙酰基、糖醛基和酯基或阿魏酸和/或对香豆酸羧基的酯结合	—	[55]
渣	水提, 60%乙醇醇沉	Man: Rha: Uronic acid: Glc: Gal: Xyl: Ara=17.95: 4.56: 4.38: 46.68: 18.59: 6.80: 5.42	23.77	存在 β -糖苷键, 含有少量的乙酰基、糖醛基和酯基或阿魏酸和/或对香豆酸羧基的酯结合	—	—
叶	超声辅助水提, 80%乙醇醇沉, Sevag法除蛋白, 3.5 kDa透析	Man: Rha: GlcA: GalA: Glc: Gal: Xyl: Ara=1.31: 5.82: 1.31: 3.10: 16.69: 31.27: 10.62: 17.87	13.08	可能存在吡喃糖, α 、 β -葡聚糖, 可能含 α -D-(1 $\rightarrow$ 4)和 α -D-(1 $\rightarrow$ 6)链接糖苷键。具有三螺旋结构, 内部晶体无定形。呈片状, 具有松散的表面, 有较大孔隙和网状形态	体外抗菌作用	[7]
叶	超声辅助水提, Sevag法除蛋白, 大孔吸附树脂脱色素, DEAE-52纤维素柱分离水洗脱组分、DEAE-琼脂糖凝胶FF离子柱	—	—	含有吡喃糖环	体外抗氧化及抗菌作用	[5]
叶	超声辅助水提, Sevag法除蛋白, 大孔吸附树脂脱色素, DEAE-52纤维素柱分离0.1 mol/L NaCl洗脱组分、DEAE-琼脂糖凝胶FF离子柱	—	—	含有吡喃糖环、糖醛酸	—	—
叶	超声辅助水提, Sevag法除蛋白, 3.5 kDa透析, DEAE-52柱分离水洗脱组分, Sephadex G-75	Man: Glc: Gal=1.00: 1.89: 2.83	3.23	$\rightarrow$ 4)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4)- α -D-Glcp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 2)- β -D-Manp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3)- β -D-Galp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4,6)- β -D-Galp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,6)- α -D-Glcp-(1 $\rightarrow$ 和 α -D-Glcp-(1 $\rightarrow$, 支链上是 $\rightarrow$ 4)- α -D-Glcp-(1 $\rightarrow$ 和 $\rightarrow$ 6)- α -D-Galp-(1 $\rightarrow$	体外抗肿瘤	[9]
叶	碱性过氧化氢预处理, 高温高压辅助水提取	Man: Rha: GlcA: GalA: Glc: Gal: Xyl: Ara=0.43: 1: 0.46: 0.99: 3.55: 6.31: 68.17: 30.85	30.0	—	对高糖损伤细胞具有一定修复和保护作用	[45]
叶	NaOH提, Sevag法除蛋白, 70%乙醇醇沉, 3.5 kDa透析	Man: GlcA: Glc: Ara: Fuc=7.21: 3.26: 4.41: 64.19: 20.94	142.23	具有 α -糖苷键, 内部晶体无定形	体外降血糖、降血脂、抗氧化和抗菌作用	[44]
皮	NaOH提, Sevage法除蛋白, AB-8树脂除色素	Man: Rha: Glc: Gal: Xyl: Ara=1.00: 0.47: 3.22: 2.32: 15.47: 5.75	3.03 $\times$ 10 ³	含 α 或 β 吡喃糖	体外降血糖	[30]

续表 2

多糖来源	提取、分离纯化	单糖组成	分子量(kDa)	结构解析结果	活性	参考文献
茎尖	KOH和DMSO法提	GlcA:Glc:Gal:Xyl:Ara:Fuc=1.53:6.12:0.71:75.13:14.20:2.30	—	线性(1→4)-β-D-Xyl为主链,在支链上连接着Ara、乙酰基和GlcA等	—	[56]
茎中	KOH和DMSO法提	GlcA:Glc:Gal:Xyl:Ara:Fuc=0.22:2.96:1.03:83.50:10.45:1.84	27.35			
茎基	KOH和DMSO法提	GlcA:Glc:Gal:Xyl:Ara:Fuc=0.25:3.92:0.63:82.07:11.75:1.38	40.07			
渣	10% KOH提	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.50:1.40:4.62:82.18:11.29	53.18	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-Xyl	—	[18]
渣	10% NaOH提	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.69:1.36:5.76:82.47:9.71	50.70			
渣	NaOH提、酸沉淀(pH2)除木质素, XAD-16N树脂、超滤法	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.92:3.49:3.78:56.97:14.00	85.4	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-Xyl	—	[27]
渣	NaOH提、酸沉淀(pH3)除木质素, XAD-16N树脂、超滤法	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.86:2.46:1.70:56.93:11.11	—	—	—	
渣	NaOH提、酸沉淀(pH4)除木质素, XAD-16N树脂、超滤法	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=2.66:3.63:3.69:51.61:11.07	—	—	—	
渣	NaOH提、酸沉淀(pH5)除木质素, XAD-16N树脂、超滤法	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=2.27:2.86:1.94:52.96:9.06	—	—	—	
渣	NaOH提、酸沉淀(pH6)除木质素, XAD-16N树脂、超滤法	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.69:2.54:3.39:38.70:11.58	64.7	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	KOH提得到粗多糖,用纯水溶解,加3倍量乙醇醇沉,上清液浓缩冻干得AX-SET	Glc:Gal:Xyl:Ara=91:1:2:6	—	—	—	[16]
渣	KOH提取得到粗多糖,用纯水溶解,加3倍量乙醇醇沉,沉淀冻干得AX-PET	Glc:Xyl:Ara=4:88:8	—	线性1,4-β-D-Xyl为主链,含Araf-(1→、Xylp-(1→、→2)-Araf-(1→、Glc-(1→、→3,4)-Xylp-(1→、→4)-Glc-(1→等糖苷键	有效预防乙醇致大鼠急性胃黏膜损伤	
渣	3.7% KOH提	GlcA:GalA:Glc:Gal:Xyl:Ara=2.98:1.17:10.51:3.43:71.35:9.38	31.585	—	—	[57]
渣	3.7% KOH提	GlcA:GalA:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.52:0.72:5.32:0.63:86.18:5.05	75.991	—	—	
渣	5% NaOH提,15%乙醇醇沉	Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=2.30:0.25:0.02:95.56:4.17	42.43	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	[58]
渣	5% NaOH提,30%乙醇醇沉	Uronic acid:Glc:Xyl:Ara=1.53:0.42:95.05:4.53	74.43	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	5% NaOH提,60%乙醇醇沉	Man:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.20:1.05:6.20:1.41:84.75:7.44	85.51	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	8% NaOH提,15%乙醇醇沉	Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.78:1.08:0.15:94.99:3.78	46.13	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	8% NaOH提,30%乙醇醇沉	Uronic acid:Glc:Xyl:Ara=1.23:3.62:92.29:4.09	60.76	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	8% NaOH提,60%乙醇醇沉	Man:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=3.19:0.98:15.38:2.42:72.61:6.40	64.07	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	1% NaOH提,15%乙醇醇沉	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.35:0.15:2.33:0.49:0.16:93.25:5.60	40.77	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	[55]
渣	1% NaOH提,30%乙醇醇沉	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.25:0.11:2.14:1.11:1.33:91.05:6.49	70.080	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	1% NaOH提,60%乙醇醇沉	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.53:0.13:1.98:5.20:2.77:79.24:12.13	86.72	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	3% NaOH提,15%乙醇醇沉	Man:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.13:2.20:0.26:0.25:96.70:2.75	37.48	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	3% NaOH提,30%乙醇醇沉	Uronic acid:Glc:Xyl:Ara=2.45:1.35:92.89:5.61	57.56	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	3% NaOH提,60%乙醇醇沉	Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.75:3.33:1.10:87.72:7.85	77.14	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	15% KOH提2 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.1:2.5:5.0:10.8:5.8:61.5:18.4	25.0	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	[21]

续表 2

多糖来源	提取、分离纯化	单糖组成	分子量(kDa)	结构解析结果	活性	参考文献
渣	18% KOH提2 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.2:1.5:2.7:13.5:4.1:68.3:12.3	22.4	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	15% NaOH提2 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.9:2.6:4.8:12.8:5.2:62.0:16.5	23.1	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	18% NaOH提2 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.3:1.2:2.8:14.1:3.9:68.6:12.0	21.7	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	15% KOH提15 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.3:2.1:5.8:14.6:8.7:57.4:15.8	34.5	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	18% KOH提15 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.6:2.0:3.5:12.4:7.3:63.9:13.9	28.7	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	15% NaOH提15 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.1:1.9:5.2:13.6:8.2:58.9:16.3	33.0	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	18% NaOH提15 h	Man:Rha:Uronic acid:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.3:1.6:2.8:11.8:6.9:65.7:13.8	26.6	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	NaOH提	主要含Man、Glc、Gal、Xyl、Ara, 其中Xyl占比最大	77.1	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	[26]
渣	NaOH提, 芳香树脂纯化(除木质素)	主要含Man、Glc、Gal、Xyl、Ara, 其中Xyl占比最大	60.0	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	
渣	NaClO ₂ /DMSO法提	Man:GlcA:GalA:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.9:1.2:0.4:7.3:0.7:82.4:5.7	35.3	乙酰化的Xyl的O-2连接GlcA、O-3连接t-Ara, Xyl的O-3、O-2上均连接有乙酰基	—	[59]
渣	PAA/DMSO法提	GlcA:GalA:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.9:0.3:5.0:1.0:88.0:4.7	40.9	乙酰化的Xyl、O-2连接GlcA和O-3连接t-Ara, 摩尔比为10:0.1:0.5。每个Xyl含有0.33个乙酰基, 其中约53%的乙酰基位于Xyl的O-3位, 约37%位于O-2位, 10%位于同一Xyl的O-2和O-3位	—	
叶	微波辅助NaOH提, Sevag法除蛋白, 70%乙醇醇沉, 3.5 kDa透析	Man:GlcA:GalA:Glc:Ara:Fuc=3.18:2.42:12.22:1.80:65.14:15.25	98.86	具有 α -糖苷键, 内部晶体无定形	降血糖、降血脂、抗氧化和抗菌作用	[44]
叶	微波辅助NaOH提, 分级醇沉(50%乙醇), Sevag法除蛋白, 3.5 kDa透析	Man:Glc:Ara:Fuc=1.8:0.81:72.47:24.91	195.88	由 α -L-Araf-(1)→主链组成的无定形多糖, 其分支点由Arap和GalpA残基组成	抗氧化、降血糖、降血脂和抗菌活性	[43]
叶	微波辅助NaOH提, 分级醇沉(70%乙醇), Sevag法除蛋白, 3.5 kDa透析	Man:GlcA:GalA:Glc:Ara:Fuc=1.42:0.78:15.21:0.41:68.13:14.05	94.62			
叶	微波辅助NaOH提, 分级醇沉(90%乙醇), Sevag法除蛋白, 3.5 kDa透析	Man:GalA:Glc:Ara:Fuc=28.1:5.66:6.02:33.43:26.78	16.37			
渣	碱性H ₂ O ₂ 法提	GalA:Glc:Xyl:Ara=0.12:0.76:88.67:5.73	7.5234	主要含L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-xyl	—	[60]
渣	超声联合3.7% KOH提	GlcA:GalA:Glc:Gal:Xyl:Ara=2.76:1.19:10.11:3.51:69.05:10.36	29.923	—	—	[57]
渣	超声联合3.7% KOH提	GlcA:GalA:Glc:Gal:Xyl:Ara=1.46:0.72:4.34:0.84:85.83:5.47	74.872	—	—	
叶(纤维素)	NaClO ₂ 脱木质素, 碱性H ₂ O ₂ 除半纤维素	Glc:Xyl:Ara=91:7.5:1.5	—	—	—	[48]
渣(纤维素)	高温蒸煮提	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.19:42.60:0.19:24.30:0.68	—	—	—	[61]
渣(纤维素)	高温蒸煮联合4.5% H ₂ SO ₄ 提	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.56:58.74:0.03:0.31:0.10	—	—	—	
渣(纤维素)	高温蒸煮联合15% NaOH提	Man:Glc:Gal:Xyl:Ara=0.42:62.92:0.12:28.48:1.79	—	—	—	
渣(纤维素)	NaOH提	Glc:Gal:Xyl:Ara=76.07:0.46:21.51:1.96	—	—	—	[58]
渣(纤维素)	NaOH提	Glc:Gal:Xyl:Ara=64.98:0.33:32.56:2.07	—	—	—	[55]

注:—表示未提及;甘露糖(Man)、鼠李糖(Rha)、半乳糖醛酸(GalA)、葡萄糖醛酸(GlcA)、葡萄糖(Glc)、半乳糖(Gal)、阿拉伯糖(Ara)、木糖(Xyl)、岩藻糖(Fuc);多糖来源项未标注(纤维素)的均为可溶性多糖。

的多糖。该方法得到的多糖分子量通常分布不均一, 还需进一步纯化, 才可得到纯化多糖, 如: Mo 等^[9]先用分级醇沉获得 70% 乙醇部位多糖, 再用柱色谱法纯化获得纯化多糖。

超滤、透析法基于半透膜原理, 使用特定孔径半透膜, 根据分子大小差异进行分离, 从而实现溶液中对不同组分的有效分离。闫超等^[53]使用不同分子量的滤膜使用超滤法对甘蔗叶多糖分离纯化, 得到不同分子量的甘蔗叶多糖, 该方法是一种高效且相对简单的多糖纯化方法, 但也存在膜污染和选择性限制等问题。在实际应用中, 选择超滤法时需综合考虑其优缺点, 以获得最佳的纯化效果。透析法常与其他纯化方法联合使用, 用于除去小分子物质。

离子交换柱层析和凝胶柱层析是目前多糖分离纯化使用最多的方法, 通常先用阴离子交换柱分离出中性多糖以及酸性多糖, 再用凝胶柱基于分子筛的原理将多糖纯化成分子量相对均一的纯化多糖, 柱层析法常用氯化钠、氯化钾、磷酸盐等作为洗脱溶液, 故常与透析法联用除去氯化钠、氯化钾等小分子物质。由表 2 可知, 甘蔗叶、渣多糖常用 DEAE-52 纤维素、DEAE Fast Flow、Sephadex G 系列凝胶等柱子进行纯化。得到均一性纯化多糖后, 便可进一步使用物理化学方法对其进行结构解析, 并进行生物活性研究, 从而探讨多糖结构与生物活性间的构效关系, 如: Mo 等^[9]先后用 DEAE 52 阴离子交换柱, Sephadex G-75 凝胶柱对甘蔗叶多糖进行纯化, 最终得到纯化多糖。

3 甘蔗叶、渣多糖的结构特征

多糖结构表征主要包括一级结构和高级结构, 一级结构主要包括: 单糖组成、分子量、糖苷键的连接方式、多糖重复结构单元等; 高级结构是指在一级结构基础上, 多糖分子所形成的更复杂的空间构型^[54]。不同原料、提取和分离纯化方法得到结构组成不同的多糖, 而多糖的生物活性与结构密切相关, 故对多糖结构进行深入研究十分必要。此部分主要是对甘蔗叶、渣多糖的一级结构研究进行总结, 表 2 总结了近年来不同提取纯化方法得到的甘蔗叶、渣多糖的不同程度结构表征。

3.1 分子量

目前, 甘蔗叶、渣多糖常用的纯度检验及分子量测定方法有高效凝胶渗透色谱法 (HPGPC)、多角度激光光散射法 (MALLS)、超速离心法、旋光测定法以及粘度法等, 超速离心法适用于密度分离, 旋光测定法和粘度法则提供特定的分子特性信息。HPGPC 凭借高分辨率、高灵敏度、操作简便、重复性高、无需复杂样品前处理以及可以直接提供分子量和分布趋势等特点, 是目前应用最多检测分子量的方法^[62]。MALLS 是一种较为先进的测定多糖分子量方法, 常与 GPC-示差检测器联用, 具有 HPGPC 的优点, 且可同时得到多糖的分子量分布、分子粒径和分子聚集

态等, 获得更为真实可靠的多糖分子量数据^[63], 但因仪器相对昂贵, 数据分析需要专业知识等原因, 目前尚未得到有效普及, 应用较少。

由表 2 可知, 甘蔗叶、渣多糖的分子量分布较广, 不同的提取和分离纯化方法得到的甘蔗叶、渣多糖的分子量分布有一定区别。醇沉时乙醇含量会影响多糖分子量的分布, 分级醇沉法得到的甘蔗叶、渣多糖, 多糖分子量随醇沉溶液含醇量的提高而降低^[43]。超声、微波等辅助提取可以得到分子量偏低的甘蔗叶、渣多糖, 其原因可能是超声、微波干预会加速分子间的运动, 增加了碰撞概率, 破坏了多糖的分子链, 使得多糖分解成小分子, 从而降低了分子量^[44,57]。热碱提取的甘蔗渣半纤维素多糖分子量较水提取的甘蔗渣半纤维素多糖的大, 且分子量分散范围更广^[18], 其原因可能是碱溶液可有效破坏木质纤维之间的共价酯键, 使半纤维素溶出提高^[32]。

3.2 单糖组成

单糖组成分析是多糖结构解析的基础, 能够特异性地反映多糖的结构特征, 尤其是单糖的组成和摩尔比。目前测定单糖组成常用的方法有三种: 高效液相色谱法 (HPLC)、气相色谱法 (GC) 和高效阴离子交换色谱安培检测法 (HPAEC-PAD), 其中 HPLC 和 GC 需对多糖样品衍生化后才可进行检测, 衍生化方法较为成熟, 是目前常用方法。HPAEC-PAD 法无需衍生化, 且具有高灵敏度, 效率高, 操作简单以及重复性好等优点, 未来会逐渐成为主流^[64]。由表 2 可知, 甘蔗叶、渣多糖含有甘露糖 (Man)、鼠李糖 (Rha)、半乳糖醛酸 (GalA)、葡萄糖醛酸 (GlcA)、葡萄糖 (Glc)、半乳糖 (Gal)、阿拉伯糖 (Ara)、木糖 (Xyl)、岩藻糖 (Fuc) 等 9 种多糖, 不同的预处理、提取和分离纯化方法所得到的甘蔗叶、渣多糖的单糖组成和摩尔比会有差异, 除了难溶性多糖是主要由 Glc 组成的纤维素外, 甘蔗叶、渣的多糖大致可分为 2 种: 一种是水溶性多糖, 其主要含有 Man、Glc、Gal、Ara、Xyl 以及少量 Rha; 另一种是碱溶性多糖, 主要是半纤维素, 其单糖组成主要为 Xyl 和 Ara, 其他单糖含量较低的木聚糖或阿拉伯木聚糖, 这 2 种可溶性多糖的糖醛酸含量均较低^[18]。

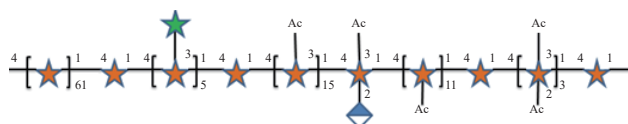
3.3 糖链结构

目前, 甘蔗叶、渣多糖化学结构采用液相色谱、紫外和红外光谱、核磁共振、甲基化和气质联用等分析方法对结构进行综合表征, 检测多糖的主要结构的糖苷键类型、链接方式和重复结构单元等结构信息。

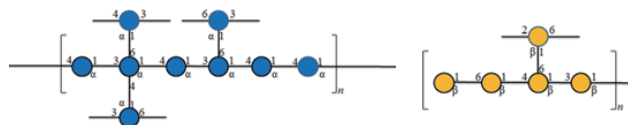
由表 2 可知, 甘蔗叶、渣中可提取到由 β -D-Glc 通过 β -1,4 糖苷键线性连接的纤维素^[65-66]。以碱提取溶剂可稳定从甘蔗叶、渣中获得由 Xyl 通过 β -1,4 糖苷键连接而成的木聚糖, 木聚糖是甘蔗叶、渣半纤维素的主要组成部分, 其侧链上还会与 Ara、乙酰基和 GlcA 等连接^[56], 其主要由 L-Ara-(4-O-methyl-D-GlcA)-D-Xyl 的重复结构组成。Carvalho 等^[59]

使用过氧乙酸(PAA)/DMSO 法从甘蔗渣中得到了乙酰化葡萄糖醛酸阿拉伯木聚糖(glucuronoarabinoxylan, GAX), 结合糖苷键连接分析、 ^1H NMR 和乙酰基定量分析结果, 确定乙酰化的木糖、O-2 连接的葡萄糖醛酸和 O-3 连接的末端阿拉伯糖的摩尔比为 10:0.1:0.5。甘蔗渣木聚糖每个木糖单位含有 0.33 个乙酰基, 其中约 53% 的乙酰基位于木糖的 O-3 位, 约 37% 位于 O-2 位, 10% 位于同一木糖残基的 O-2 和 O-3 位, 并预测了乙酰化 GAX 的结构(图 2A)。以水为提取溶剂得到的甘蔗叶、渣多糖中 Man、Glc、Ara、Gal 等糖苷键类型较多。侯小涛^[3]从甘蔗叶中分离纯化得到 2 个纯化多糖组分(SLP0A 和 SLP3A), 通过单糖组成、GC-MS 以及 NMR 等方法分析, 预测了 SLP0A 含有的 4 种糖苷键连接结构单元(图 2B)。张斌^[4]从甘蔗渣液中提取, 并分离纯化得到两种具有护肝降脂活性的纯化多糖 SRP1 和 SRP2, 通过部分酸水解、高碘酸氧化、Smith 降解和甲基化等一系列化学处理, 并结合高效离子色谱、气相色谱、红外吸收色谱、核磁共振色谱等分析仪器推导出多糖 SRP1、SRP2 的一级结构单元(图 2C)。Mo 等^[9]从甘蔗叶中分离纯化得到一种新型多糖 SLP70-1, 其是由 Man、Glc 和 Gal 组成的均质杂多糖, 经过单糖组成、GC-MS 以及 NMR 等物理化学方法分析后得到其预测结构(图 2D)。由于多糖分子量大, NMR 图谱信号重叠严重, 难以解析其确切结构, 甘蔗叶、渣多糖中结构新颖的多糖结构仍待进一

A 乙酰化GAX



B SLP0A



C SRP1



SRP2



D SLP70-1

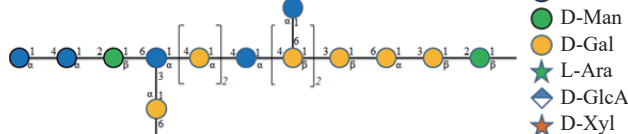


图 2 乙酰化 GAX^[59](A), SLP0A^[3](B), SRP1, SRP2^[4](C) 和 SLP70-1^[9](D) 的预测结构

Fig.2 Predicted structures of acetylated GAX^[59] (A), SLP0A^[3] (B), SRP1, SRP2^[4] (C) and SLP70-1^[9] (D)

步阐明, 目前已提出的多糖结构模型仍需进一步验证。随着 AI 等新技术的发展, 结构更复杂的甘蔗叶、渣多糖的精细结构解析将有新的突破。

4 甘蔗叶、渣多糖的生物活性

近年来专家学者发现甘蔗叶、渣多糖具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤, 改善糖尿病, 抗心血管疾病, 免疫调节和胃保护作用等生物活性。

4.1 抗氧化

氧化应激和自由基失衡是导致老化、炎症和癌症等疾病的主要因素。抗氧化剂能够通过捕捉活性氧的自由基, 减少或中和其反应活性, 保护细胞免受氧化损伤, 抑制体内的氧化应激反应^[67]。桂意云等^[68]研究发现, 甘蔗叶多糖有很强的清除 OH 自由基能力, 对由 OH 自由基引起的 DNA 损伤有明显的抑制保护作用。甘蔗叶纯化多糖(SCLP-1 和 SCLP-5)均具有清除 DPPH、OH、 O_2^- 自由基的能力, 但均略弱于 V_C , 其中 SCLP-5 的抗氧化能力强于 SCLP-1, 可能与其含有糖醛酸有关^[5]。甘蔗叶多糖也具有良好抗氧化能力(清除 DPPH、OH 自由基以及总还原能力), 呈剂量依赖性, 其抗氧化作用可能与甘蔗叶多糖的分子量及其所含硫酸盐、糖醛酸含量相关^[43]。甘蔗叶、渣多糖主要通过抑制相关自由基发挥抗氧化效果, 且与分子量及多糖连接基团含量密切相关。

4.2 抗菌

甘蔗叶、渣多糖主要通过破坏细菌细胞壁和细胞膜, 抑制细菌生长等方式来发挥抗菌效果。甘蔗叶、渣多糖对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、沙门氏菌等细菌的生长均有一定程度的抑制作用^[6-7, 43]。超声辅助提取的甘蔗叶多糖(SLU)的抗菌作用优于热水浸提法得到甘蔗叶多糖(SLW), 可能与 SLU 具有较小的分子量分布相关^[7]; 微波辅助热碱提取的甘蔗叶多糖的抗菌作用优于热碱提取的甘蔗叶多糖, 其抗菌效果可能与含高硫酸盐和糖醛酸及具有较小的分子量有关^[44], 但也有研究表明高分子量的甘蔗叶多糖的抗菌作用更好^[43]。抗菌活性与分子量密切相关, 可能是发挥抗菌作用的机制不同, 高分子量和低分子量的多糖均具有良好抗菌作用, 还需要进一步考证。

4.3 抗肿瘤

江恒等^[8, 69]发现甘蔗叶多糖能明显抑制人鼻咽癌 CNE₂ 细胞增殖, 并在 10~160 $\mu\text{g/mL}$ 的浓度范围内呈剂量依赖性, 还可以诱导细胞凋亡, 可能是通过提高 Bax 表达及降低 Bcl-2 的表达, 从而发挥抗肿瘤作用。甘蔗叶中性多糖 SLP70-1 能不同程度地抑制五种癌细胞(H460、HCT-8、HeLa、Ketr3 和 MCF-7 细胞)的增殖, 并呈剂量依赖性, SLP70-1 的抗肿瘤作用可能与高 α -D-Glcp 糖苷键含量有关^[9]。甘蔗叶、渣多糖主要通过抑制癌细胞增殖和诱导癌细胞凋亡等途径发挥抗肿瘤作用, 其作用机制可能与多糖调控相关蛋白的表达密切相关, 另外, 多糖的结构, 比

如某些糖苷键的含量,也可能在其抗肿瘤活性中起到关键作用。甘蔗叶、渣多糖抗肿瘤研究较浅,其具体作用机制仍需进一步研究和验证。

4.4 改善糖尿病

甘蔗叶多糖可促进胰岛素分泌,进而降低血糖,且在降低血糖基础上一定程度上改善大鼠体内的炎症水平,其机制可能是通过抑制 Th1 和 Th17 型细胞因子的基因表达,阻断 Th1 和 Th17 型细胞及相关细胞因子所介导的胰岛自身免疫反应发挥治疗糖尿病的作用^[3]。甘蔗叶多糖可降低非肥胖性糖尿病(NOD)小鼠的体内抗氧化能力,促进机体清除氧化自由基,改善胰岛 β 细胞的氧化应激状况,保护胰岛 β 细胞,从而预防糖尿病的发生^[10]。通过对 NOD 小鼠给予环磷酸腺苷造成 1 型糖尿病 NOD 小鼠,发现甘蔗叶多糖可降低 NOD 小鼠 1 型糖尿病的发病率,其机制可能与减少胰岛 β 细胞凋亡、增加胰岛素分泌量、改善糖脂代谢、平衡脾淋巴 T 细胞有关,且甘蔗叶多糖还能在一定程度上预防糖尿病心脏病、肾病等并发症的发生,从而起到治疗糖尿病作用^[11]。甘蔗皮多糖(SPAP)对 α -葡萄糖苷酶具有良好的抑制作用,且呈剂量依赖性^[30]。甘蔗叶多糖对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用呈显著的剂量依赖性,同时对糖胆酸盐和牛磺胆酸盐也表现出较强的剂量依赖性吸附效果。这些结果表明,甘蔗叶多糖具有良好的降血糖和降血脂潜力,其作用机制可能与其较低的分子量以及较高的硫酸盐和糖醛酸含量密切相关^[43]。脂质代谢异常常常被认为与糖尿病相关^[70],甘蔗渣滓粗多糖能明显降低高血脂模型大鼠血清中甘油三酯含量,一定程度降低总胆固醇含量、低密度脂蛋白水平,具有良好的降血脂效果;还能降低 CCl_4 致急性肝损伤模型小鼠血清的谷丙转氨酶、谷草转氨酶含量,对肝损伤具有一定保护作用^[4,71]。甘蔗叶、渣多糖改善糖尿病的机制复杂,其可能是降血糖、降血脂、肝保护、抗炎抗氧化和免疫保护等多种作用联合作用的结果,且与分子量及多糖连接基团类型和含量密切相关。

4.5 抗心血管疾病

甘蔗叶、渣多糖对心肌梗死和心脏缺血再灌注等心血管疾病有良好的防治效果。甘蔗叶多糖可促进血管内皮生长因子的表达及微血管的生成,增加毛细血管密度,改善大鼠心肌梗死 24 h 内的心电图表现及其心功能,其机制可能与提高 SOD 活性、清除氧自由基、提高机体的抗氧化能力有关^[72-73];还可以抑制以结扎大鼠冠状动脉左前降支造成的大鼠心肌梗死后心肌细胞凋亡和减轻大鼠心肌梗死后梗死周边区心肌间质纤维化,其机制可能与增加抑制凋亡基因 BCL-2 的表达,减少促凋亡基因 BAX、Caspase3 的表达,上调 p-AKT/AKT、p-PI3K/PI3K 蛋白的表达,下调 pERK1/2/ERK1/2 蛋白的表达,抑制促纤维化基因 TGF- β 1、NF- κ B 的 mRNA 表达有关^[13-14]。

张丽君等^[74]发现甘蔗叶多糖对大鼠急性血瘀证下的心肌梗死具有保护作用,可能与其增强抗氧化酶活性、抑制体外二磷酸腺苷诱导的血小板聚集及改善细胞膜结构有关。此外,在体外细胞(H9c2 心肌细胞)实验中,甘蔗叶多糖(SLP)通过激活 Nrf2/HO-1 和抑制 RIP1/RIP3/MLKL 信号通路,减轻了叔丁基过氧化氢(TBHP)刺激的细胞坏死、MMP 丢失、ROS 生成和氧化应激;在 SD 大鼠实验中,SLP 通过减少氧化应激和坏死下垂来改善心肌梗死面积来减轻心脏缺血再灌注(MI/R)损伤;增加髓过氧化物酶和超氧化物歧化酶水平;降低丙二醛、白细胞介素-6 和肿瘤坏死因子- α 水平^[12]。综上所述,甘蔗叶、渣多糖通过多途径(抗氧化、抗炎、抗纤维化、抗细胞凋亡)对心血管疾病发挥保护作用,尤其在心肌梗死和心肌缺血再灌注损伤方面显示出显著疗效。其作用机制与调节抗氧化酶活性、清除自由基、调控信号通路及相关基因表达密切相关。

4.6 其他生物活性

除以上生物活性外,甘蔗叶、渣多糖还具有免疫调节、胃保护及益生元等作用。甘蔗渣多糖能显著提高环磷酸腺苷诱导的免疫低下小鼠的免疫器官重量,增强小鼠巨噬细胞的吞噬功能,提高 DTH 和促进 IgM、溶血空斑形成并且增加 T 细胞百分比和淋巴细胞转化率,显著提高免疫抑制小鼠的免疫功能的作用^[15]。甘蔗渣阿拉伯木聚糖(X-PET)可使以乙醇致胃损伤的雌性 Wistar 大鼠胃损伤面积减少 50% 以上,并补充乙醇引起的谷胱甘肽耗竭,使黏液产生增加 70% 以上,减少氧化应激,对实验性胃溃疡具有良好保护作用^[16]。另外,甘蔗叶、渣多糖还具备益生元活性^[75-76]。

5 甘蔗叶、渣多糖的改性与应用

甘蔗叶、渣多糖本身具有多种生物活性和生理功能,适当的改性还能增加其生物活性和可塑性,从而拓宽其应用范围,如:羧甲基化木聚糖-锌络合物具有更优诱导肠道微生物群的特定调节功能,而发挥更好的调控肠道菌群作用^[77];乙酰化木聚糖基生物塑料良好的机械强度和水蒸气阻隔性能,使其具有更优的成膜性^[78]。

甘蔗叶、渣多糖及其改性多糖,在食品及食品相关领域应用具有很大潜力。甘蔗叶、渣多糖可开发成代糖食品,甘蔗渣纤维添加到面包中,可改善面包的质感和口感,还显示出较低的体外血糖反应,具有低于参考值的升糖指数^[79],且还可作为抗氧化纤维添加剂,赋予烘焙产品一定的功能性^[80]。甘蔗叶、渣多糖及其改性多糖制备的水凝胶还是功能性食品和保健品的良好载体。研究表明,甘蔗叶多糖制备的生物活性共混水凝胶不仅具有良好的凝胶强度和溶胀指数,还表现出显著地消化后白蛋白变性抑制活性,可作为功能性食品中传递活性成分的理想载体^[81];高羧甲基取代甘蔗渣木聚糖(LDCBX)与丝胶/明胶制备

的复合水凝胶,展现出优异的亲水性、热稳定性和生物相容性^[82]。Pan等^[83]开发的基于定制改良甘蔗渣纤维素(SBC)的多响应纳米凝胶,具有较高的载药能力和多重响应特性。Jiang等^[84]制备的酸性甘蔗叶脂质体则显示出良好的缓释效果,能够有效减缓ASLP在体内的消化过程,从而延长其作用持续时间。这些研究进一步表明,甘蔗叶、渣多糖在功能性食品和保健品开发中具有重要的应用价值。

甘蔗叶、渣多糖还可制备成絮凝剂,用于蔗汁、果汁等食品加工过程中的澄清处理,这种应用不仅能够改善食品加工中的清洁生产工艺,还能够替代传统化学絮凝剂,减少化学残留,提升产品的安全性和环保性^[85-86]。此外,甘蔗叶、渣多糖通过加工改性制备成的薄膜,是理想的食物包装材料,具有良好的机械性能、生物相容性和可降解性,这种多糖基薄膜能有效延长食品的保质期,还能减少对环境的污染,是传统塑料包装的绿色替代品^[87-88]。最后,甘蔗叶、渣多糖还可作为原料,通过酶解、酸水解等技术制备低聚糖、寡糖和单糖^[89-90],它们在食品领域同样具有广泛的应用潜力^[91-93]。

除了食品领域,甘蔗叶、渣多糖在医药、环境、造纸等其他轻工业领域也有广泛的应用,除了制成良好的药物载体水凝胶外,还可以制备成止血敷料^[25,94]、纸张施胶,改善纸张的力学性能和阻隔性能^[95]。此外,还可作为碳源生产酶^[85,96]和微生物多糖^[97]以及作为生物乙醇的原料^[98]。

6 结论和展望

甘蔗叶、渣多糖的提取方法较为成熟,有效破坏LCC结构能使甘蔗叶、渣多糖充分溶出,提高多糖提取率,还有利于非多糖类杂质的除去(主要是木质素),提高甘蔗叶、渣多糖的纯度。未来甘蔗叶、渣多糖提取的工业化生产以及新技术开发都将基于这一前提进一步推进。

甘蔗叶、渣多糖的分离纯化主要是对粗多糖进行脱蛋白和脱色素等除去非糖类杂质,提高多糖纯度,较少研究对其进一步纯化得到均一性纯化多糖。目前,甘蔗叶、渣多糖化学结构较少,虽大部分研究仅停留在理化检测、分子量和单糖组成,未进一步研究糖链结构,但也取得一定进展,基本确定了纤维素、半纤维素的主要糖苷键主链链接方式,以及部分水溶性多糖的主要糖苷键,但多糖链链接复杂,更全面更完整的多糖结构还有待进一步的揭示。

甘蔗叶、渣多糖的生物活性作用机制研究较少,主要集中在改善糖尿病和抗心血管疾病方面,且大多活性实验采用粗多糖给药,不能较好明确多糖与活性之间的构效关系,虽然有研究表明甘蔗叶、渣多糖的生物活性与其分子量、支链基团、糖醛酸含量、单糖组成等密切相关,但未进一步明确,生物活性与多糖结构的关系还需进一步研究。另外,还可以通过对多糖改性的方法可以有效提高多糖的功能适用性和生

物活性,对甘蔗叶、渣多糖的改性研究是拓宽其应用范围的重要手段。

甘蔗叶、渣的多糖及改性多糖广泛应用于食品、保健品、医药及材料学等领域,甘蔗叶、渣多糖相关产品的研发还可进一步深入,拓宽甘蔗叶、渣多糖的应用。

综上所述,甘蔗叶、渣多糖在提取、分离纯化和生物活性等方面的研究取得了一定的进展,后续的研究可关注以下几个方面:优化多糖的提取和纯化工艺,实现高纯度多糖的工业化生产;深入探讨多糖的化学结构与生物活性之间的关系;开发新的改性方法以提升多糖的功能性;基于甘蔗叶、渣多糖的特性,开发创新型的功能性产品。这些研究不仅能够推动甘蔗叶、渣多糖的应用,还对增加甘蔗产业的经济效益具有重要意义。另外,还能对其他类似植物多糖(特别是木质纤维素类植物)的研究提供借鉴。

© The Author(s) 2025. 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] IHSAN H, WILTON S D, SAMAN S, et al. Value proposition of different methods for utilisation of sugarcane wastes[J]. *Energies*, 2021, 14(17): 5483-5483.
- [2] 潘王芸, 邓家刚, 侯小涛, 等. 四种禾本科农作物的废弃物化学成分及药理作用[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(10): 214-225. [PAN Wangyun, DENG Jiagang, HOU Xiaotao, et al. Chemical constituents of agricultural residues producing from 4 kinds of granineous crops and pharmacological effects[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2019, 25(10): 214-225.]
- [3] 侯小涛. 甘蔗叶化学成分及药效学研究[D]. 南宁: 广西医科大学, 2014. [HOU Xiaotao. Research on the chemical constituents and pharmacodynamics of sugarcane leaves[D]. Nanning: Guangxi Medical University, 2014.]
- [4] 张斌. 甘蔗滓多糖的提取分离、纯化、结构鉴定及降脂护肝活性研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2013. [ZHANG Bin. Structure characterization and activity studies of polysaccharide isolated from sugarcane residue[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2013.]
- [5] 韦巧艳, 严德林, 陈远菲, 等. 甘蔗叶多糖的分离纯化及其体外活性分析[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, 49(6): 1022-1028. [WEI Qiaoyan, YAN Delin, CHEN Yuanfei, et al. Isolation, purification and *in vitro* activity analysis of polysaccharides from sugarcane leaves[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2022, 49(6): 1022-1028.]
- [6] 陈远菲, 严德林, 莫雪婷, 等. 甘蔗叶多糖提取工艺优化及生物活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(19): 155-165. [CHEN Yuanfei, YAN Delin, MO Xueting, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from sugarcane leaves and characterization of biological activities[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(19): 155-165.]
- [7] MO Mengmiao, CHEN Weiming, JIANG Fengyu, et al. Effect of ultrasonic treatment on structure, antibacterial activity of sugarcane leaf polysaccharides[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2023, 20

- (9): e202300006.
- [8] 江恒, 方锋学, 王仁君, 等. 甘蔗叶多糖对 CNE₂ 细胞的体外抑制作用研究[J]. 中华中医药杂志, 2014, 29(1): 259–262. [JIANG Heng, FANG Fengxue, WANG Renjun, et al. Inhibition *in vitro* of human nasopharyngeal carcinoma cell CNE₂ proliferation by polysaccharide from sugarcane leaves[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine, 2014, 29(1): 259–262.]
- [9] MO Mengmiao, WANG Feilin, SHENG Yunhao, et al. Purification, structural elucidation and *in vitro* antitumor activity of a novel polysaccharide from sugarcane leaves[J]. Industrial Crops & Products, 2024, 209: 117989.
- [10] 郝二伟, 何耀涛, 侯小涛, 等. 甘蔗叶多糖对非肥胖性糖尿病小鼠的预防作用及其机制[J]. 华西药理学杂志, 2018, 33(5): 481–484. [HAO Erwei, HE Yaotao, HOU Xiaotao, et al. Preventive effects and the mechanism of the polysaccharide from sugarcane leaves on non-obese diabetic mice[J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018, 33(5): 481–484.]
- [11] 吴悠. 甘蔗叶多糖对 NOD 小鼠 I 型糖尿病的预防作用及其机制研究[D]. 南宁: 广西中医药大学, 2020. [WU You. Sugarcane leaf polysaccharide prevents the development of type I diabetes in NOD mice[D]. Nanning: Guangxi University of Chinese Medicine, 2020.]
- [12] SUN Kaili, YUN Renyikun, HE Jia, et al. Sugarcane leaf polysaccharide exerts a therapeutic effect on cardiovascular diseases through necroptosis[J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): e21889.
- [13] 刘丹, 林锬, 侯小涛, 等. 甘蔗叶多糖对心肌梗死大鼠心肌细胞凋亡的抑制作用及其机制[J]. 山东医药, 2018, 58(17): 5–8. [LIU Dan, LIN Kun, HOU Xiaotao, et al. Inhibitory effects of sugarcane leaf polysaccharides on cardiomyocyte apoptosis in rats with myocardial infarction[J]. *Shandong Medical Journal*, 2018, 58(17): 5–8.]
- [14] 刘丹, 林锬, 侯小涛, 等. 甘蔗叶多糖对大鼠心肌梗死后心肌纤维化的影响[J]. 广西医科大学学报, 2021, 38(11): 2058–2063. [LIU Dan, LIN Kun, HOU Xiaotao, et al. Effects of sugarcane leaf polysaccharide on myocardial fibrosis after myocardial infarction in rats[J]. Journal of Guangxi Medical University, 2021, 38(11): 2058–2063.]
- [15] 刘强, 宋雨鸿, 李慧, 等. 甘蔗渣多糖对免疫抑制小鼠免疫功能的影响[J]. 南方医科大学学报, 2008, 28(10): 1911–1913. [LIU Qiang, SONG Yuhong, LI Hui, et al. Effects of bagasse polysaccharide on the immune functions of immunosuppressed mice[J]. *Journal of Southern Medical University*, 2008, 28(10): 1911–1913.]
- [16] MELLINGER-SILVA C, SIMAS-TOSIN F F, SCHIAVINI N D, et al. Isolation of a gastroprotective arabinoxylan from sugarcane bagasse[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(22): 10524–10528.
- [17] BHARDWAJ K N, KAUR D, CHAUDHRY S, et al. Approaches for converting sugarcane trash, a promising agro residue, into pulp and paper using soda pulping and elemental chlorine-free bleaching[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 225–233.
- [18] GENG C Z, SUN X J, LIANG F S, et al. Characterization of water- and alkali-soluble hemicellulosic polymers from sugarcane bagasse[J]. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2006, 11(3): 209–226.
- [19] YANG Wenjin, CHEN Yu, LI Kai, et al. Optimization of microwave-expanding pretreatment and microwave-assisted extraction of hemicellulose from bagasse cells with the exploration of the extracting mechanism[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 330: 121814.
- [20] 蒙丽霞, 梁欣泉, 李敏, 等. 高温蒸煮预处理甘蔗叶制备木聚糖[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(1): 105–108. [MENG Lixia, LIANG Xinquan, LI Min, et al. Study on preparation of xylan from high-temperature boiled pretreated sugarcane leaves[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(1): 105–108.]
- [21] REN Juili, GENG Zengchao, LIU Chanfu, et al. Fractional isolation and structural characterisation of hemicellulosic polymers from delignified and ultrasonic irradiated sugarcane bagasse[J]. *e-Polymers*, 2013, 6(1): 855–866.
- [22] BRIENZO M, CARVALHO W, MILAGRES A M F. Xylooligosaccharides production from alkali-pretreated sugarcane bagasse using xylanases from *Thermoascus aurantiacus*[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, 162(4): 1195–1205.
- [23] 杨淑娟, 游艳芝, 张威伟, 等. NaOH-乙醇预处理提高甘蔗渣酶法制备低聚木糖效率[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 114–120. [YANG Shujuan, YOU Yanzhi, ZHANG Weiwei, et al. NaOH-ethanol pretreatment increasing preparation efficiency of xylo-oligosaccharide from sugarcane bagasse with enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 114–120.]
- [24] 余强, 庄新姝, 元伟, 等. 高温液态水耦合氨法预处理提高甘蔗渣酶解率[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4): 991–996. [YU Qiang, ZHUANG Xinshi, QI Wei, et al. Combined pretreatment of sugarcane bagasse with liquid hot water and aqueous ammonia to enhance enzymatic digestibility cellulose[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2016, 37(4): 991–996.]
- [25] MALONE S, YEGAPPAN R, KIJAS W A, et al. The potential of sugarcane waste-derived cellulose fibres as haemostatic agents[J]. *Polymers*, 2024, 16(12): 1654.
- [26] YOU Xin, WANG Xiao, LIANG Chen, et al. Purification of hemicellulose from sugarcane bagasse alkaline hydrolysate using an aromatic-selective adsorption resin[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 225: 115216.
- [27] 杜娟, 龚志强, 黄曹兴, 等. 树脂吸附-超滤协同分离甘蔗渣碱法半纤维素[J]. 化工学报, 2021, 72(4): 2139–2147. [DU Juan, GONG Zhiqiang, HUANG Caoxing, et al. Resin adsorption-ultrafiltration synergistic separation of alkaline extracted hemicellulose from bagasse[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(4): 2139–2147.]
- [28] 陈海珊, 张国柱, 王磊, 等. 木聚糖的提取分离和应用研究进展[J]. 广西科学, 2022, 29(2): 209–220. [CHEN Haishan, ZHANG Guozhu, WANG Lei, et al. Research progress on the extraction, separation, and application of xylan[J]. *Guangxi Sciences*, 2022, 29(2): 209–220.]
- [29] 吴金松, 马志伟, 陈光静, 等. 甘蔗渣中水溶性多糖的提取工艺优化[J]. 中国调味品, 2018, 43(8): 42–46. [WU Jinsong, MA Zhiwei, CHEN Guangjing, et al. Optimization of extraction technology of water-soluble polysaccharide from bagasse[J]. *China Condiment*, 2018, 43(8): 42–46.]
- [30] 王莹莹, 刘春宇, 谢贝昱, 等. 碱提甘蔗皮多糖提取工艺、初步结构及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2653–2665. [WANG Xuanxuan, LIU Chunyu, XIE Beiyu, et al. Extraction technology, preliminary structure and α -glucosidase inhibition of polysaccharide with alkaline-extracted from sugarcane peel[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(12): 2653–2665.]
- [31] 陈超杰, 江凤玉, 莫萌苗, 等. 响应面法优化微波辅助热碱提取甘蔗叶多糖工艺研究[J]. 广东化工, 2023, 50(22): 39–42, 45. [CHEN Zhaojie, JIANG Fengyu, MO Mengmiao, et al. Optimization of microwave assisted hot alkali extraction of polysaccharides

- from sugarcane leaves by response surface methodology[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(22): 39–42,45.]
- [32] CHEN Shuai, QIN Li, XIE Liuming, et al. Physicochemical characterization, rheological and antioxidant properties of three alkali-extracted polysaccharides from mung bean skin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 132: 107867.
- [33] 吴金松, 陈光静, 马志伟, 等. 酶法辅助提取甘蔗渣中水溶性多糖的工艺优化[J]. *中国调味品*, 2019, 44(2): 70–74,79. [WU Jinsong, CHEN Guangjing, MA Zhiwei, et al. Optimization of enzymatic assisted extraction of water-soluble polysaccharides from bagasse[J]. *China Condiment*, 2019, 44(2): 70–74,79.]
- [34] TANG L P, HAO E W, DU Z C, et al. Polysaccharide extraction from sugarcane leaves: Combined effects of different cellulolytic pretreatment and extraction methods[J]. *Cellulose*, 2019, 26(18): 9423–9438.
- [35] FARIA P S, MELO D R G, CINTRA C L, et al. Production of cellulases and xylanases by *Humicola grisea* var. *thermoidea* and application in sugarcane bagasse arabinoxylan hydrolysis[J]. *Industrial Crops Products*, 2020, 158: 112968.
- [36] 陈赵杰, 陈伟明, 莫萌苗, 等. 响应面法优化超声提取甘蔗叶多糖工艺研究[J]. *甘蔗糖业*, 2023, 52(5): 52–57. [CHEN Zhaojie, CHEN Weiming, MO Mengmiao, et al. Optimization of ultrasonic extraction of sugarcane leaf polysaccharides via response surface method[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2023, 52(5): 52–57.]
- [37] 严鹤松, 何旻熹, 李婵娟. 超声辅助碱法提取甘蔗渣木聚糖的条件优化[J]. *广州化工*, 2024, 52(8): 60–63. [YAN Hesong, HE Minxi, LI Chanjuan. Optimization of conditions for ultrasonic assisted alkaline extraction of sugarcane bagasse xylan[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(8): 60–63.]
- [38] 何雪梅, 孙健, 李丽, 等. 响应面法优化蔗梢多糖超声波提取工艺[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(3): 458–462. [HE Xuemei, SUN Jian, LI Li, et al. Optimization on ultrasonic extraction of polysaccharides from sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) tops by response surface analysis[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(3): 458–462.]
- [39] 吴金松, 许美娟, 耿广威, 等. 超声结合酶法辅助提取甘蔗渣中水溶性多糖的工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(18): 92–99. [WU Jinsong, XU Meijuan, GENG Guangwei, et al. Optimization of extraction technology of water-soluble polysaccharide from bagasse by ultrasonic and enzyme-assisted extraction[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(18): 92–99.]
- [40] MONIRSADAT M, ALI L K, LEILA K. Plant/algal polysaccharides extracted by microwave: A review on hypoglycemic, hypolipidemic, prebiotic, and immune-stimulatory effect[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 266: 118134.
- [41] WEN Jin, HU Jianquan, LI Kai, et al. Mass transfer and diffusion mechanisms of hemicellulose from microwave expansion pretreated sugarcane bagasse[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 15(6): 1–11.
- [42] 翁艳英. 正交优化甘蔗渣多糖的解吸-微波提取工艺[J]. *广东化工*, 2016, 43(6): 50–51,70. [WENG Yanying. The orthogonal optimization of polysaccharides from bagasse by desorption-microwave extraction[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(6): 50–51,70.]
- [43] JIANG Fengyu, SHENG Yuanhao, WANG Feilin, et al. Characterization and biological activity of acidic sugarcane leaf polysaccharides by microwave-assisted hot alkali extraction[J]. *Food Bioscience*, 2023, 54: 102852.
- [44] JIANG Fengyu, ZHONG Jinhong, HU Huizhong, et al. Comparison of physicochemical properties and biological activities between two acidic sugarcane leaf polysaccharides[J]. *Process Biochemistry*, 2024, 139: 10–21.
- [45] 王星圆, 张帆, 黄建朝, 等. 甘蔗叶多糖提取工艺的优化及其心肌细胞保护作用的研究[J]. *华西药学杂志*, 2023, 38(6): 621–627. [WANG Xingyuan, ZHANG Fan, HUANG Jianchao, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from sugarcane leaves and its cardiomyocyte protective effects study[J]. *West China Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2023, 38(6): 621–627.]
- [46] 董思琦. 液相脉冲放电法处理甘蔗渣废弃物及提取多糖的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023. [DONG Siqi. Study on the treatment of bagasse waste and polysaccharide extraction by liquid phase pulse discharge[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.]
- [47] 周永升, 莫小群, 张文婷, 等. 超声辅助纤维素酶法制备蔗叶膳食纤维及其理化特性分析[J]. *中国饲料*, 2022(22): 107–113. [ZHOU Yongsheng, MO Xiaoqun, ZHANG Wenting, et al. Ultrasonic-assisted cellulase preparation of dietary fiber from sugarcane leaves and its physicochemical properties[J]. *China Feed*, 2022(22): 107–113.]
- [48] CHANDRAKANT K K, SURYAKANT V M, ARUN G. Separation and characterization of cellulose from sugarcane tops and its saccharification by recombinant cellulolytic enzymes[J]. *Preparative biochemistry & biotechnology*, 2020, 51(8): 11–18.
- [49] 裴映雪, 唐平安, 张赛, 等. 氨基磺酸应用于甘蔗渣预处理的研究[J]. *基因组学与应用生物学*, 2019, 38(7): 3208–3212. [GONG Yingxue, TANG Ping'an, ZHANG Dou, et al. Study on the application of sulfamic in pretreatment of bagasse[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2019, 38(7): 3208–3212.]
- [50] 孙帅豪, 安风平, 沈凡樱, 等. 高速剪切辅助碱提取甘蔗渣纤维素及其理化分析[J]. *包装与食品机械*, 2024, 42(3): 45–51,67. [SUN Shuaihao, AN Fengping, SHEN Fanying, et al. High-speed shear assisted alkaline extraction of cellulose from sugarcane bagasse and its physicochemical analysis[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2024, 42(3): 45–51,67.]
- [51] 侯小涛, 赵超超, 邓家刚. 甘蔗叶多糖除蛋白工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(20): 240–244,247. [HOU Xiaotao, ZHAO Chaochao, DENG Jiagang. Study on deproteinization-technology of polysaccharides in sugarcane leaf[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(20): 240–244,247.]
- [52] 王许聪, 刘莉, 张璐, 等. 甘蔗渣多糖的纯化工艺[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2010, 16(14): 31–34. [WANG Xucong, LIU Li, ZHANG Lu, et al. Study on purification process of polysaccharides from sugarcane bagasse[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2010, 16(14): 31–34.]
- [53] 闫超, 黄建城, 刘昔辉, 等. 超滤法提取分离甘蔗叶多糖的研究[J]. *生物技术*, 2008(3): 49–51. [YAN Chao, HUANG Jiancheng, LIU Xihui, et al. Study on ultrafiltration in extracting and separating polysaccharide from sugarcane leaves[J]. *Biotechnology*, 2008(3): 49–51.]
- [54] ZHANG Jixian, ZHAO Jiayin, LIU Guoyan, et al. Advance in *Morchella* sp. polysaccharides: Isolation, structural characterization and structure-activity relationship: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 247: 125819.
- [55] PENG Feng, REN Junli, XU Feng, et al. Comparative study of hemicelluloses obtained by graded ethanol precipitation from sugarcane bagasse[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(14): 6305–6317.

- [56] YANG Haoqiang, YI Na, ZHAO Shuai, et al. Characterization of hemicelluloses in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids) culm during xylogenesis[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 165: 1119–1128.
- [57] XIE Yitong, GUO Xin, MA Zhiyu, et al. Efficient extraction and structural characterization of hemicellulose from sugarcane bagasse pith[J]. *Polymers*, 2020, 12(3): 608.
- [58] PENG Feng, REN Junli, XU Feng, et al. Fractional study of alkali-soluble hemicelluloses obtained by graded ethanol precipitation from sugarcane bagasse[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(3): 1768–1776.
- [59] CARVALHO D M D, MARTÍNEZ-ABAD A, EVTUGUIN V D, et al. Isolation and characterization of acetylated glucuronoxarabinosyl from sugarcane bagasse and straw[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 156: 223–234.
- [60] CHEN Yanjun, SUN Xiangxiang, SHAN Jjunqiang, et al. Flow synthesis, characterization, anticoagulant activity of xylan sulfate from sugarcane bagasse[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 155: 1460–1467.
- [61] CARVALHO D M D, SEVASTYANOVA O, PENNA S L, et al. Assessment of chemical transformations in eucalyptus, sugarcane bagasse and straw during hydrothermal, dilute acid, and alkaline pretreatments[J]. *Industrial Crops & Products*, 2015, 73: 118–126.
- [62] ZHU Lixia, WANG Xu, LI Sinchuang, et al. Qualitative and quantitative characterization of carbohydrate profiles in three different parts of *Poria cocos*[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2020, 179: 113009.
- [63] 邹剑, 杨蕾, 林涛, 等. SEC-RI-MALLS 测定甘露聚糖肽分子量与分子量分布[J]. *药物分析杂志*, 2024, 44(2): 256–263.
- [ZOU Jian, YANG Lei, LIN Tao, et al. Determination of molecular weight and distribution of mannate by means of SEC-RI-MALLS[J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2024, 44(2): 256–263.]
- [64] 赵宁, 韩著, 简颖琳, 等. 中药多糖结构表征及质量评价研究进展[J]. *中草药*, 2024, 55(21): 7491–7506.
- [ZHAO Ning, HAN Zhu, JIAN Yinglin, et al. Research progress on structural characterization and quality evaluation of traditional Chinese medicine polysaccharides[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2024, 55(21): 7491–7506.]
- [65] RIBEIRO M, OIKAWA H, MORI M, et al. Degradation mechanism of polysaccharides on irradiated sugarcane bagasse[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, 84: 115–118.
- [66] NOSRI W, SUKSOMSAK K, SANGJAN A, et al. Production of cellooligosaccharides from oil palm bunch in bio-based choline chloride deep eutectic solvents and MALDI-TOF MS analysis of COS mixture[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2024, 180: 107005.
- [67] BARRY H. Reactive oxygen species (ROS), oxygen radicals and antioxidants: where are we now, where is the field going and where should we go?[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2022, 633: 17–19.
- [68] 桂意云, 贤武, 梁强, 等. 甘蔗叶片多糖的提取及体外抗氧化作用[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(4): 1218–1221.
- [GUI Yiyun, XIAN Wu, LIANG Qiang, et al. Extraction and antioxidant activity of polysaccharide from sugarcane leaves[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(4): 1218–1221.]
- [69] 江恒, 苏纪平, 方锋学, 等. 甘蔗叶多糖的提取分离及体外抗肿瘤作用研究[J]. *临床合理用药杂志*, 2012, 5(15): 28–29.
- [JIANG Heng, SU Jiping, FANG Fengxue, et al. Study on the extraction and separation of polysaccharides from sugarcane leaves and their *in vitro* antitumor effects[J]. *Chinese Journal of Clinical Rational Drug Use*, 2012, 5(15): 28–29.]
- [70] MARIE-CHRISTINE S, LENA A R, CORINNA W, et al. Distinct alterations of gut morphology and microbiota characterize accelerated diabetes onset in nonobese diabetic mice[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2020, 295(4): 969–980.
- [71] 张斌, 李沙沙, 江晓, 等. 甘蔗渣多糖降脂护肝活性研究[J]. *辽宁中医药大学学报*, 2014, 16(8): 55–58.
- [ZHANG Bin, LI Shasha, JIANG Xiao, et al. Study on antilipemic and hepatic-protection functions of sugarcane residue polysaccharide[J]. *Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine*, 2014, 16(8): 55–58.]
- [72] 何涛, 胡珊, 侯小涛, 等. 甘蔗叶多糖对大鼠心肌梗死心电图及微血管生成的影响[J]. *广西医科大学学报*, 2016, 33(2): 229–231.
- [HE Tao, HU Shan, HOU Xiaotao, et al. The effects of sugarcane leaves polysaccharide on the ECG and angiogenesis in rats with myocardial infarction[J]. *Journal of Guangxi Medical University*, 2016, 33(2): 229–231.]
- [73] 林锐, 刘丹, 何涛, 等. 甘蔗叶多糖对大鼠心肌梗死后动态心电图和心功能的影响及机制研究[J]. *广西医科大学学报*, 2018, 35(5): 640–643.
- [LIN Kun, LIU Dan, HE Tao, et al. The effect and mechanism of sugarcane leaves polysaccharide on dynamic electrocardiogram and cardiac function in rats with myocardial infarction[J]. *Journal of Guangxi Medical University*, 2018, 35(5): 640–643.]
- [74] 张丽君, 康效嘉, 闻宇, 等. 甘蔗叶多糖对血瘀证下急性心肌梗死模型大鼠的治疗作用及其机制[J]. *延边大学医学学报*, 2019, 42(3): 163–166.
- [ZHANG Lijun, KANG Xiaojia, WEN Yu, et al. Therapeutic effects of sugarcane leaf polysaccharide on acute myocardial infarction model rats with blood stasis syndrome and its mechanism[J]. *Journal of Medical Science Yanbian University*, 2019, 42(3): 163–166.]
- [75] SHINDE T, VEMURI R, SHASTRI S, et al. Modulating the microbiome and immune responses using whole plant fibre in synbiotic combination with fibre-digesting probiotic attenuates chronic colonic inflammation in spontaneous colitic mice model of IBD[J]. *Nutrients*, 2020, 12(8): E2380.
- [76] NA S N, PHITCHAYAKON P, WICHANEE B, et al. Xylooligosaccharides produced from sugarcane leaf arabinosyl using xylanase from *Aureobasidium pullulans* NRRL 58523 and its prebiotic activity toward *Lactobacillus* spp.[J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): e22107.
- [77] ZHANG Guozhu, GUAN Yuan, ZHANG Xin, et al. Chemical modifications of xylan from sugarcane bagasse and their regulatory effects on gut microbiota in mice[J]. *Journal of Carbohydrate Chemistry*, 2024, 43(3): 90–111.
- [78] MARTINS R J, LLANOS R H J, ABE M M, et al. New blend of renewable bioplastic based on starch and acetylated xylan with high resistance to oil and water vapor[J]. *Carbohydrate Research*, 2024, 537: 109068.
- [79] HALIM A B N F, TAHERI A, DU J. Textural enhancement and glycemic potency reduction of sugarcane fiber-incorporated white bread with ascorbic acid and xanthan gum[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 281(P4): 136560.
- [80] ATHITAYA H, GAWISARA V, NAIYASIT Y, et al. Microcrystalline cellulose isolation and impregnation with sappan wood extracts as antioxidant dietary fiber for bread preparation[J]. *ACS omega*, 2023, 8(34): 31100–31111.

- [81] TANG P L, CHEW S Y, HOU X T, et al. Novel use of sugarcane leaf polysaccharide in κ -carrageenan blend hydrogel[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 14(4): 5489–5503.
- [82] 鲍滨雨. 酶法交联制备丝胶/明胶/蔗渣木聚糖复合水凝胶及其性能研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023. [BAO Binyu. Enzymatic crosslinking of sericin/gelatin/bagasse xylan composite hydrogel and its properties[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.]
- [83] PAN Yunfeng, LIU Junren, YANG Kunni, et al. Novel multi-responsive and sugarcane bagasse cellulose-based nanogels for controllable release of doxorubicin hydrochloride[J]. *Materials Science & Engineering C*, 2021, 118: 111357.
- [84] JIANG Fengyu, WANG Feilin, SHENG Yuanhao, et al. Characterization, bioactivity, sustained release capacity and digestive stability of acidic sugarcane leaf polysaccharide liposomes[J]. *Food Bioscience*, 2024, 57: 103364.
- [85] EJAZ U, TAJ A, SOHAIL M, et al. Toward a zero waste approach: Utilization of sugarcane bagasse for dye removal and multienzymes production[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2024, 64(2): e2300529.
- [86] YANG Jinwen, ZHANG Xinyu, LU Qimeng, et al. Preparation, flocculation and application in sugar refining of eco-friendly dextran-polylysine complex flocculant[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 306: 122673.
- [87] BRAGA S D R, POLETTO M. Preparation and characterization of hemicellulose films from sugarcane bagasse[J]. *Materials*, 2020, 13(4): 941.
- [88] SHIVA H, DODAMANI S, KOLIWAD R, et al. Biodegradable hybrid biopolymer film based on carboxy methyl cellulose and selenium nanoparticles with antifungal properties to enhance grapes shelf life[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 237: 124076.
- [89] SHAHROOZ R, LUQMAN A, K. D A D, et al. A green process for producing xylooligosaccharides via autohydrolysis of plasma-treated sugarcane bagasse[J]. *Industrial Crops & Products*, 2023, 198: 116690.
- [90] PEREIRA, SALUSTIANO B, FREITAS D, et al. Enzymatic production of xylooligosaccharides from xylan solubilized from food and agroindustrial waste[J]. *BioEnergy Research*, 2022, 15(2): 1–9.
- [91] BALAGUER E M, BERTA S, ORDEÑANA J M, et al. Enzymatic hydrolysis cocktail optimization for the intensification of sugar extraction from sugarcane bagasse[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242(3): 125051.
- [92] MANOELA M, GUEDES C K S, FÉLIX P Á, et al. Xylooligosaccharide microparticles with synbiotic potential obtained from enzymatic hydrolysis of sugarcane straw[J]. *Food Research International*, 2020, 140: 109827.
- [93] ÁVILA PATRÍCIA F., DE MELLO ALLAN H. F., FORTE MARCUS B. S., et al. Fractionation of functional oligosaccharides produced from sugarcane straw using serial nanofiltration membranes and their influence on prebiotic potential[J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113175.
- [94] BARBOSA M L, OLIVEIRA D L M L, QUEIROZ V P C, et al. The effect of biopolymer gel derived from sugarcane on healing of traumatic oral ulcers: An experimental study[J]. *Acta Cirurgica Brasileira*, 2024, 39: e390724.
- [95] HOANG C N, LE D Q. Nanocellulose preparation from sugarcane bagasse and its application for paper sizing[J]. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition*, 2023, 42(1): 27–37.
- [96] ROZINA R, UROOSA E, IMRAN F A, et al. Combined pretreatment of sugarcane bagasse using alkali and ionic liquid to increase hemicellulose content and xylanase production[J]. *BMC Biotechnology*, 2020, 20(1): 64.
- [97] TAGNE T F R, SANTOS C M M, ANTUNES F A F, et al. Pullulan production from sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate by *Aureobasidium pullulans* ATCC 42023 in bubble column reactor[J]. *Fermentation*, 2024, 10(6): 322–322.
- [98] KLEY K D V, LUCIANA V S D P, ALBERTO L T Z, et al. Imidazole green solvent pre-treatment as a strategy for second-generation bioethanol production from sugarcane bagasse[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 420(2): 127708.