

葛仙米多糖的提取、结构及生物活性研究进展

李珊瑜¹ 范新雨² 余湘乾³ 何秋星¹

(1. 广东药科大学医药化工学院, 广东 中山 528458; 2. 广州禾力生物科技有限公司, 广东 广州 510800;
3. 贵州科益创生物科技有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 葛仙米作为一种药食同源的淡水野生蓝藻, 因独特的营养价值和多种生物活性而备受关注。葛仙米含有多糖、蛋白质、氨基酸、脂肪酸、维生素以及矿质元素等多种营养成分, 具有抑菌、抑癌、降脂和抗氧化等功效。文章对葛仙米多糖的提取方法、结构特征、生物活性及应用进行了系统的综述, 并对其未来研究方向进行了展望。

关键词: 葛仙米; 多糖; 药食同源; 提取方法; 结构表征; 生物活性

Extraction, structure, and biological activities of polysaccharides from *Nostoc sphaeroides* kützing: a review

LI Shanyu¹ FAN Xinyu² SHE Xiangqian³ HE Qiuxing¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, GDPU, Zhongshan, Guangdong 528458, China;
2. Guangzhou Heli Biotechnology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510800, China;
3. Guizhou Keyichuang Biotechnology Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract: *Nostoc sphaeroides* kützing is a freshwater wild blue algae that has gained significant attention due to its unique nutritional value and multiple biological activities. *Nostoc sphaeroides* kützing contains a variety of nutritional components, including polysaccharides, proteins, amino acids, fatty acids, vitamins, and mineral elements. It has demonstrated antibacterial, anticancer, lipid-lowering, and antioxidant effects. This article systematically reviews the extraction methods, structural characteristics, biological activities, and applications of *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharides, and provides an outlook on its future research directions.

Keywords: *Nostoc sphaeroides* kützing; polysaccharides; homology of medicine and food; extraction methods; structural characteristics; biological activities

葛仙米学名拟球状念珠藻, 其与地木耳、发菜同属。目前, 中国湖北、湖南和四川等地还保留着葛仙米的自然分布, 在非洲的部分地区也有少量分布^[1-2]。葛仙米中含有丰富的化学成分, 主要包括蛋白质、氨基酸、多糖、脂肪、维生素、微量元素等^[3-5]。其中, 多糖作为葛仙米的主要生物活性成分之一, 具有抑菌、抑癌、抗肿瘤、抗氧化和免疫调节等功能, 因此葛仙米多糖具有重要的开发应用价值。目前关于葛仙米的综述主要聚焦于其生活史、繁殖方式、化学成分及生理活性等方面, 然而, 尚未有学者对葛仙米多糖的提取方法、纯化技术、结构表征及其生物

活性进行全面的综述分析。

鉴于近年来天然植物多糖在医药、食品与化妆品领域已成为热议话题, 文章拟阐述葛仙米多糖的提取方法、分离纯化与化学结构、生物活性, 并对其应用前景进行展望, 旨在为葛仙米多糖的深入开发与应用提供有力的参考依据。

1 葛仙米多糖的提取和分离纯化

1.1 葛仙米多糖的提取

植物多糖种类多样, 来源丰富, 高效的提取方法和分

基金项目: 广东药科大学企业产学研合作项目(编号: 24040102350); 省级大学生创新创业训练计划项目(编号: 202310573024)

通信作者: 何秋星(1969—), 男, 广东药科大学教授, 博士。E-mail: 123090561@qq.com

收稿日期: 2024-12-20 **改回日期:** 2025-08-05

引用格式: 李珊瑜, 范新雨, 余湘乾, 等. 葛仙米多糖的提取、结构及生物活性研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 199-208.

Citation: LI Shanyu, FAN Xinyu, SHE Xiangqian, et al. Extraction, structure, and biological activities of polysaccharides from *Nostoc sphaeroides* kützing: a review[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 199-208.

离纯化技术是深入研究分析多糖的产率、纯度、结构及生物活性的首要前提。目前,葛仙米多糖的提取方法主要有热水浸提法、稀碱提取法、微波辅助提取法、超声辅助提取法及酶辅助提取法等。提取葛仙米多糖时,通常以多糖得率或单糖含量作为评价标准,高效液相色谱法

(HPLC)、蒽酮比色法和苯酚—硫酸法是常用的含量检测方法。葛仙米多糖的结构因提取和纯化方法的不同而有所变化,而多糖结构的变化往往对其生物活性产生重要影响。现将近些年葛仙米多糖的不同提取方法进行总结分析,结果见表 1。

表 1 葛仙米多糖不同提取方法的优缺点比较

Table 1 Advantages and disadvantages of different extraction methods for <i>Nostoc sphaeroides</i> kützing polysaccharides				
提取方法	原理	优点	缺点	参考文献
热水提取 (HWE)	根据相似相溶原理,极性大分子多糖易溶于水等极性溶剂中,热水可破坏植物细胞壁、热力学作用可增加分子间运动,从而促进多糖从原料中提取出来	工艺、设备、操作简单;安全经济环保;适用性广,易于产业化	耗时长,能耗高,得率低,杂质多;长时间高温可能破坏多糖结构,从而影响其生物活性	[6]
稀碱提取 (ASE)	利用碱性溶剂对植物细胞壁的破坏效应以及对水不溶性多糖的溶解作用	耗时少,温度低,得率高;简单易行	衍生物多;碱浓度难控制,多糖易降解;需考虑成本及安全问题	[7]
微波辅助提取 (MAE)	利用高频率的电磁波穿透物料并产生热量,导致胞内水分快速汽化,压力增大,从而破坏细胞壁和细胞膜,促进多糖的释放	耗时少,能耗低,升温快;穿透力强,提取效率高;选择性、安全性高	加热不均匀;设备成本较高,不易实现工业化;功率过大、温度过高、时间过长均可影响多糖活性	[8]
超声辅助提取 (UAE)	基于超声波的物理效应,包括空化效应、机械效应和热效应;在液体溶剂中,会产生局部高压和高温,导致液体中形成微小的气泡,这些气泡在超声波的作用下会迅速膨胀并产生强烈的冲击波和剪切力	耗时少,速度快,温度低,得率高;活性成分损耗少;提取方便,操作简单	温度难控制;设备维护成本高	[6]
酶辅助提取 (EAE)	利用酶的专一性破坏植物细胞壁,促进多糖的释放	条件温和,多糖活性强、纯度高	操作复杂;酶对温度敏感,易失活;酶的价格较高,用量难控制	[9]
酶—碱辅助提取	利用酶的选择性分解作用和碱的溶胀、破壁作用	效率高、纯度高	操作复杂,处理条件严格	[9]
超声—酶法协同提取	通过超声波的物理破坏作用和酶的生物催化作用相结合	高效、温和且环保	操作条件难控制,设备成本高	[10]
低共熔—酶法协同提取	利用低共熔溶剂破坏细胞壁,提高酶的渗透性,从而增强酶对细胞壁的降解效果	条件温和,绿色环保	成本较高,溶剂残留问题	[11]

综合表 1 发现,不同的提取方法各有优缺点,采用多种方法协同提取葛仙米多糖的形式值得研究者深入研究。除了上述方法外,还有一些新技术也被逐渐应用于植物多糖的提取,如超临界流体萃取法^[12]、反复冻融法^[13]、离子液体提取法^[14]等,不过目前尚未应用于葛仙米多糖的提取中。

在提取温度、提取时间、提取次数和料液比的工艺条件中,热水提取对多糖得率影响较大的因素是提取温度和提取时间,提取温度在 90~100 ℃,提取时间在 2~6 h 时,多糖得率较高;同时其料液比在 1:90~1:500 (g/mL) 时提取效果较好,与其他植物多糖提取的料液比差异较大^[15-17]。据现有文献^[6-11]可知,其他提取方法的多糖得率均低于最佳工艺下的热水提取法,最高得率可达 53.96%,其次是低共熔—酶法协同提取的得率为 52.50%,酶—碱辅助法得率为 47.56%。此外,有研究团队^[7,9,18]将热水提取后所得的葛仙米残渣进行稀碱提取,得到碱提葛仙米多

糖,从而提高了葛仙米多糖的产率。酶法辅助其他提取技术在葛仙米多糖提取中表现出较好的效果,同时缩短提取时间和降低提取温度,展现了广阔的应用潜力。

1.2 葛仙米多糖的分离纯化

葛仙米多糖提取液中往往含有蛋白质、色素、无机盐、低聚糖等杂质,这些杂质的存在可能影响后续的结构分析和生物活性研究,因此需要对多糖提取液进行分离、纯化。表 2 总结了多糖提取液中常用的分离纯化技术,通过分析其作用原理与优缺点,为获得高均一性多糖组分提供理论依据。

1.2.1 脱蛋白方法 植物水提取物中多糖与蛋白质易通过非共价结合形成糖蛋白复合物,这会干扰其结构解析及生物活性,因此需高效脱蛋白技术以保留多糖。当前,粗多糖中脱蛋白方法主要有 Sevage 法、三氯乙酸(TCA)法、酶法等^[21,32-33]。苏靖颖等^[34]采用 Sevage 法、TCA 法和等电点法对水提法和碱法提取的莼菜多糖(WBSP、ABSP)

表 2 多糖提取液分离纯化方法对比

Table 2 Comparison of extraction and purification methods of polysaccharides

目标物质	常用方法	原理	优点	缺点	参考文献
蛋白质	Sevage法	利用氯仿—正丁醇混合体系使蛋白质变性,通过离心去除沉淀的蛋白质	条件温和,操作简单	有机溶剂用量大且有毒;需重复操作,效率低	[19]
	TCA法	三氯乙酸(强酸)使蛋白质羧基质子化,电荷中和后聚集沉淀	效率高	破坏多糖结构,多糖损耗大	[20]
	酶法	蛋白酶特异性水解蛋白质肽键,生成可溶性小分子肽	条件温和,选择性高,多糖活性保留好	酶种类、用量、时间需优化,成本较高,残留酶需灭活	[21]
	盐析法	高浓度盐(如硫酸铵)与蛋白质竞争水分子,降低蛋白质溶解度并沉淀	成本低,操作简便,适用于大规模处理	脱蛋白效果差	[22]
	反复冻融法	通过冻结—融化循环使蛋白质变性并聚集成沉淀	无需化学试剂,操作简单	耗时较长,效率低	[23]
	等电点法	利用蛋白质在其等电点时溶解度最低的特性,通过调节溶液pH至目标蛋白的等电点,使其沉淀析出	成本低廉,环保	适用范围受限,操作繁琐	[24]
色素	活性炭法	通过物理吸附作用选择性吸附色素分子	成本低,操作简单,条件温和	多糖损耗高	[25]
	过氧化氢法	通过氧化反应分解色素分子	脱色效率高	破坏多糖结构	[26]
	树脂吸附法	通过物理或化学作用来吸附化合物的表面	无需化学试剂,可重复使用,脱色率高	操作复杂,再生过程繁琐	[27]
各级多糖组分	分级醇沉法	基于多糖在不同乙醇浓度下溶解度的差异	操作简单,成本低廉	存在易燃风险,平均相对分子质量分布重叠	[28]
	盐析沉淀法	利用不同浓度盐溶液下,平均相对分子质量不同的多糖溶解度不同	成本低,操作简单,活性影响小	效率低,需后续处理	[29]
	离子交换层析法	利用多糖的电荷特性与固定相的静电作用差异	分离效果好,灵活性高	成本较高,再生过程复杂繁琐,处理量有限,耗时较长	[30]
	凝胶渗透层析法	利用多孔凝胶颗粒的孔径大小差异,按多糖平均相对分子质量大小进行分离			[31]

进行脱蛋白处理,研究结果显示,两者的脱蛋白效果均表现为TCA法>Sevage法>等电点法,而多糖保留率均为Sevage法>等电点法>TCA法,因此Sevage法更适用于莼菜多糖的脱蛋白处理。然而,经Sevage法脱蛋白后的多糖溶液需要进一步透析以去除残留的Sevage试剂和其他小分子杂质^[35-36]。Cao等^[37]通过小鼠巨噬细胞RAW 264.7对比了脱蛋白前后藜麦非淀粉多糖的免疫刺激作用,结果显示,与未经蛋白酶K酶解的藜麦非淀粉多糖(CQNP)相比,酶解后的藜麦非淀粉多糖(D-CQNP)处理的RAW 264.7细胞产生更高的NO,证明D-CQNP具有更强的免疫刺激功能。

1.2.2 脱色素方法 活性炭法、过氧化氢法、树脂吸附法是多糖提取液的常用脱色方法^[38]。树脂主要包括多孔树脂、聚酰胺树脂和离子交换树脂,吸附过程可分为静态和动态吸附。谭青云等^[39]对比了大孔树脂、活性炭和过氧化氢对铁皮石斛粗多糖的脱色效果,结果表明,3种方法对铁皮石斛粗多糖色素脱除率由高到低依次为大孔树

脂>过氧化氢>活性炭。Shao等^[40]比较了活性炭法和H₂O₂法对毛蕨多糖的脱色是否会影响脱色前后多糖的单糖组成类型和摩尔百分比,发现这两种脱色方法不会改变多糖的单糖组成,但它们的摩尔百分比会有所差异。

1.2.3 纯化方法 除了蛋白质和色素外,植物粗多糖中还包含一些低相对分子质量的杂质,这些杂质可以通过使用不同尺寸的透析袋去除。但经过除杂步骤所得到的多糖仍然是一种糖类混合物,可能具有不同的相对分子质量、单糖组成等等。因此为获得均一性的多糖组分,需要进一步纯化,粗多糖的分离纯化技术包括分级醇沉法、盐析沉淀法和色谱柱层析法等^[41]。目前,柱层析是多糖纯化最常用的方法,尤其是离子交换层析和凝胶渗透层析,这些技术可以进一步提高多糖提取物的纯度^[42]。阴离子柱层析通过水和氯化钠溶液洗脱后获得中性和酸性多糖,常用的填充材料有DEAE纤维素、DEAE Sephadex和DEAE Sepharose系列,而凝胶渗透层析法常用的凝胶是Sephadex G、Sephadex LH和Toyopearl HW。

2 葛仙米多糖的结构特征

葛仙米多糖的生物活性与其结构有着密切联系,提取方法的不同会导致多糖的结构不同。精确的现代分析设备是多糖结构分析的重要工具^[43]。多糖的结构特征通常由平均相对分子质量、单糖组成和化学结构来确定,主要结构表征方法包括化学分析法和仪器分析法。常用于多糖结构分析的化学法主要包括 Smith 降解、酸水解、高碘酸氧化法及甲基化分析等;而常用的仪器分析法主要有紫外—可见光谱(UV)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、气相色谱(GC)、气相色谱—质谱(GC-MS)、高效液相色谱

谱法(HPLC)、高效凝胶渗透色谱法(HPGPC)、核磁共振(NMR)、X 射线衍射分析(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)以及原子力显微镜(AFM)等^[44-48]。

目前葛仙米多糖的研究主要集中在其平均相对分子质量和单糖组成,对于葛仙米多糖的糖苷键类型、分子构型、构象及分子内成键的方式研究不足。表 3 整理出不同学者采用 Seville、木瓜蛋白酶等方法脱蛋白,通过 DEAE-Sepharose-A25、DEAE-650M、SephadexG-100、DEAE-C-52、DEAE-SepharoseFast Flow、SephadexG-150 等柱色谱从葛仙米多糖分离得到 GXM-1、GXM-2、GZT、NSKP、NSKP40、NSKP60、NSKP80、PSNSK 等均一多糖。

表 3 葛仙米多糖的结构表征[†]

Table 3 Structural characteristics of *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharides

多糖名称	提取方法	纯化方法	结构表征方法	单糖组成及摩尔比	平均相对分子质量	参考文献
GXM-1	超声波	Seville 法脱蛋白、分级醇沉、DEAE Sepharose A25 葡聚糖凝胶层析柱	HPGPC	NA	$M_w: 2.690 \times 10^6, 2.126 \times 10^4$	[10]
GXM-2	结合酶法	Seville 法脱蛋白、AB-8 大孔吸附树脂脱色、DEAE-650M 离子交换柱层析纯化、葡聚糖凝胶 G-100 柱层析纯化	FT-IR、GC-MS、SEM、HPGPC	$n_{Xyl}: n_{Man}: n_{Gal}: n_{Glc} = 2.22: 1.06: 1.00: 0.74$	$M_w: 2.562 \times 10^6$	[49]
GZT	水提醇沉法	Seville 法脱蛋白、80% 乙醇沉淀	FT-IR、GC、HPLC	$n_{Xyl}: n_{Man}: n_{Gal}: n_{Glc} = 1: 1: 1: 2$	NA	[50]
葛仙米多糖	水提醇沉法	Seville 法脱蛋白、60% 乙醇沉淀	HPLC、HPLC-MS	$n_{Man}: n_{GlcA}: n_{Glc}: n_{Gal}: n_{Ara} = 1.00: 1.12: 3.24: 1.72: 1.21$	NA	[51]
PSNSK	水提醇沉法	酶与 seville 法结合、DEAE-C-52 阴离子交换层析法	UV、FT-IR、NMR、XRD、HPLC、AFM	$n_{Man}: n_{Rha}: n_{GlcA}: n_{GalA}: n_{Glc}: n_{Gal}: n_{Ara} = 1.766: 1.208: 1.265: 1.418: 1.400: 1.733$	$M_w: 9.564 \times 10^6$ $M_n: 5.634 \times 10^6$	[52]
NSKP40	水提醇沉法	分级醇沉、DEAE-SepharoseFast Flow 阴离子交换层析、Sephacryl-500 凝胶层析	FT-IR、GC-MS、HPSEC-MALLS-RI	$n_{Ara}: n_{Gal}: n_{Glc}: n_{Xyl}: n_{Man}: n_{GlcA} = 1.00: 6.73: 10.84: 5.27: 4.88: 3.92$	$M_w: 1.31 \times 10^5, 3.71 \times 10^4$ 4.21×10^3 $M_n: 8.08 \times 10^4, 2.85 \times 10^4, 3.47 \times 10^3$	[53] ²²⁻⁴¹
NSKP60	水提醇沉法	40% 乙醇沉淀	HPLC、MALLS-RI	$n_{Ara}: n_{Gal}: n_{Glc}: n_{Xyl}: n_{Man}: n_{GlcA} = 1.00: 6.73: 10.84: 5.27: 4.88: 3.92$	$M_w: 1.324 \times 10^5$	[54]
NSKP	水提醇沉法	40% 乙醇沉淀	UV、FT-IR、GC-MS、NMR、HPSEC、甲基化分析	$n_{Man}: n_{Glc}: n_{Xyl}: n_{Gal}: n_{GlcA} = 1.00: 1.92: 0.97: 1.02: 0.91$	$M_w: 1.31 \times 10^5$	[55]
Nostoglycan	水提醇沉法	酶法脱蛋白、乙醇沉淀	FT-IR、GC-MS、SEM、HPGPC、甲基化分析	$n_{Man}: n_{Fru}: n_{Gal}: n_{Glc}: n_{Xyl}: n_{Rha}: n_{GalA} = 3.45: 2.18: 1.46: 1.77: 0.61: 0.22: 0.31$	$M_w: 1.99 \times 10^6$ $M_n: 0.99 \times 10^6$	[56]

[†] Xyl 表示木糖;Man 表示甘露糖;Gal 表示半乳糖;Glc 表示葡萄糖;Ara 表示阿拉伯糖;GlcA 表示葡萄糖醛酸;Rha 表示鼠李糖;GalA 表示半乳糖醛酸; M_w 表示重均相对分子质量; M_n 表示数均相对分子质量;NA 表示文献中未提及。

2.1 平均相对分子质量

平均相对分子质量是天然多糖化学表征和生物活性的关键因素^[57]。多糖的平均相对分子质量可通过高效尺寸排阻色谱法(HPSEC)测定^[58]。王帅等^[49]通过HPGPC测定从葛仙米中纯化的GZT重均相对分子质量为 2.562×10^6 。此外,苏攀峰^[53]将命名为NSKP40、NSKP60、NSKP80的葛仙米多糖,采用高效凝胶尺寸排阻色谱—多角度激光散射仪—示差折光检测仪联用法测定出的 M_w 分别为 1.31×10^5 , 3.71×10^4 , 4.21×10^3 。根据表3发现在不同的工艺条件下,多糖的平均相对分子质量主要分布在 $10^3 \sim 10^6$ 。

2.2 单糖组成

单糖组成分析涉及糖苷键构型、连接方式和顺序以及特定重复单元结构;此外,单糖组成可以反映出多糖结构的复杂程度^[59]。单糖组成的分析通常采用水解、衍生化,随后通过GC和HPLC检测确定糖苷键^[60]。由表3可知,研究者从葛仙米中分离得到12种多糖,并对其中7种葛仙米多糖的单糖组成进行了研究。葛仙米多糖主要由不同摩尔比的木糖(Xyl)、甘露糖(Man)、半乳糖(Gal)、葡萄糖(Glc)、阿拉伯糖(Ara)、鼠李糖(Rha)、果糖(Fru)、葡萄糖醛酸(GlcA)和半乳糖醛酸(GalA)组成,这些单糖通过各种方式结合在一起形成多糖链。初步分析可知,葛仙米多糖的主要成分为甘露糖、半乳糖和葡萄糖,并且单糖的摩尔比存在差异,这可能与原料来源、分离纯化条件或分析方法有关。

2.3 化学结构

葛仙米多糖为复杂且多样的高分子聚合物,因此需进一步研究其化学结构。苏攀峰^[53]通过FT-IR对NSKP40进行了官能团分析,发现其是一种含有羟基(—OH)、羧基(—COOH)、亚甲基(—CH₂—)、酚羟基(C—HO)等官能团以及 α 、 β 型糖苷键的酸性多糖。通过甲基化结合GC-MS确定和分析组成NSKP40的糖残基类型为T-linked Ara、4-linked Xyl、T-linked Gal、3-linked Ara、4-linked Man、4-linked Gal、6-linked Man、3, 4-linked Glc和4, 6-linked Glc。结合核磁共振波谱确定不同糖残基的连接顺序,最终推断出其主链由 $\rightarrow 4\text{-}\beta\text{-Manp-(1}\rightarrow 4\text{)-}\beta\text{-Xylp-(1}\rightarrow 4\text{)-}\beta\text{-Glc p-(1}\rightarrow 6\text{)-}\beta\text{-Glc p-1}$ 重复片段组成,化学结构见图1。王帅等^[49]从葛仙米中提取了一种名为GZT的中性多糖,并通过SEM分析了其形态和结构特征。结果表明,高倍镜下的GZT表面形态有孔状的疏松片状结构。

葛仙米多糖在其主链和侧链的单糖组成以及连接方式各有不同,许多精确结构和构象特征仍不清楚,可以运用新的表征技术进一步研究,如糖组学和聚糖数据库^[47]、原子分辨率晶体衍射^[61]、拉曼光谱技术^[62]、计算分子建模^[63]和显微成像技术^[64]等。

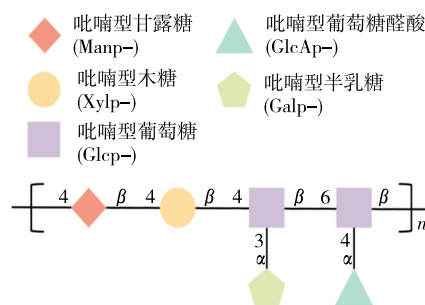


图1 NSKP40的重复单元结构

Figure 1 Repeating unit structure of NSKP40

3 葛仙米多糖的生物活性

多糖作为葛仙米中主要的化学成分,具有丰富的生物活性,如免疫调节、调节肠道菌群、抑菌、抑癌、降脂、抗氧化等。葛仙米的来源、提取方法等不同导致葛仙米多糖的生物活性具有一定的差异。葛仙米多糖的主要生物活性及作用机制见表4。

由表4可知,葛仙米多糖的生物活性研究广泛,涉及医药、食品和化妆品领域。葛仙米多糖的生物活性是通过多途径、多环节和多靶点实现的,如降脂活性,一方面,葛仙米多糖可以直接作用于肠道,通过减少肠道对胆固醇的吸收、促进甾醇的排除;另一方面,葛仙米多糖还可以作用于肝脏脂肪,通过减少脂肪合成从而达到降脂肪的效果。此外葛仙米多糖进行硫酸酯化修饰后,表现出较好的抗凝血作用。虽然相关活性研究均有所报道,但可以发现这些研究均不够深入,只停留在简单的药效学评价层面,缺乏对构效关系的研究。

4 葛仙米多糖的应用

4.1 医药领域

葛仙米是一种历史悠久的药食同源性植物,其多糖也具有丰富的药理活性。莫开菊等^[72]通过S₁₈₀小白鼠模型探讨了葛仙米水溶性多糖的体内抗肿瘤活性,结果显示,葛仙米多糖能够抑制S₁₈₀小白鼠肿瘤的生长,在50, 100, 200 mg/(kg·d) 3个剂量组中,其抑瘤率分别为29.91%, 38.24%, 64.08%。表明葛仙米多糖在体内具有显著抗肿瘤作用。通过体内外试验,Ku等^[74]发现,葛仙米中含有的粗纤维和植物甾醇能够显著降低血浆中的总胆固醇(TC)及甘油三酯(TG)水平,证明了葛仙米多糖具有降血脂的作用。陈盛等^[75]将一种葛仙米组合物用于缓解眼部疲劳和改善眼部黄斑病变。虽然目前关于葛仙米多糖的医药产品尚未得到应用,但葛仙米多糖所具有的抗肿瘤、降血脂等活性,使其可作为新型医药的研究对象。

4.2 食品领域

随着消费者对天然、健康、安全食品需求的增加,葛仙米多糖在食品领域的应用前景广阔。于迪等^[76]利用葛

表 4 葛仙米多糖的生物学活性

Table 4 Biological activities of *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharides

生物活性	作用机制	参考文献
免疫调节作用	提高免疫低下小鼠的免疫器官指数,提高巨噬细胞的吞噬指数和吞噬率,增加抗凋亡蛋白(Bcl-2)/促凋亡蛋白(Bax)的比值	[65]
肠道菌群调节作用	影响肠道微生物的组成,增加厚壁菌门的相对丰富度,降低变形菌门的相对丰富度	[66]
抑菌作用	抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、绿脓杆菌和霉菌的生长,其中对绿脓杆菌的抑制最明显	[67]
抑癌作用	抑制 HCT-116 细胞的增殖	[8]
降脂作用	改善肝脏脂肪合成和氧化应激,延缓长期高脂饮食小鼠肝纤维化	[68]
	减少肠道胆固醇吸收和促进粪便中性甾醇排泄	[69]
抗凝血作用	多糖硫酸酯延长人活化部分凝血活酶时间(APTT)和凝血酶时间(TT);抑制内源性凝血过程及共同凝血途径	[70]
抗氧化作用	影响 DPPH 自由基和 ABTS ⁺ 自由基的清除能力	[49]
	影响超氧阴离子自由基和羟自由基的清除能力	[71]
抗疲劳作用	抑制饮酒后血清尿素氮和乳酸水平升高	[10]
抗肿瘤作用	促进荷瘤小鼠胸腺指数降低	[72]
润肠通便作用	增加 PI3K/SCF/c-kit 信号通路间质细胞(ICC)的含量,促进结肠慢波的产生,调节平滑肌的收缩活动节律	[73]

仙米多糖提取物抑制高蛋白肉制食品热加工所产生的杂环胺(PhIP 致癌物质),其作用机制是通过抑制苯丙氨酸分解成苯乙醛,从而阻碍苯乙醛与肌酐之间的反应,最终达到抑制 PhIP 生成的效果。其中添加量为 50 μg 时抑制效果最佳,抑制率达 84.9%。说明葛仙米多糖有望开发为功能性调味品,以此减少食品热加工的致癌因子。周丰等^[77]将葛仙米多糖应用于饮料中,发现其能够提高饮料的悬浮性,还可降低食用胶和防腐剂的使用量,同时具有营养保健功效。说明葛仙米多糖可作为一种功能性成分加入到现有食品配方中,以此提升食品的营养价值。综上,葛仙米多糖在食品领域具有广泛的应用前景与价值。

4.3 化妆品领域

葛仙米多糖因其生物活性和多重功效,成为化妆品行业的研究热点。吴珊等^[78]的研究发现葛仙米多糖具有防晒、保湿以及抗氧化的护肤功效。史学东等^[11]制备出一种含葛仙米的植物精华液组合物,测试结果表明该精华液具有保湿、抑菌修护功效,有望被广泛应用于化妆品领域。王玉兰等^[79]以葛仙米提取物为原料制备了一种身体护理产品,该产品具有保湿、滋养和抗衰的特性,并能改善身体肌肤的干燥、粗糙和瘙痒问题。综上,葛仙米多糖在化妆品领域具有广泛应用的潜力。

5 结论与展望

目前,葛仙米多糖在抗氧化、抗肿瘤、免疫调节和抑菌等方面均有研究,在食品和药品等领域具有广泛的开发应用潜力。研究者在多糖领域已取得显著成就,但葛仙米多糖仍存在诸多亟待深入探讨与解决的问题。① 在提取工艺上,现有的提取方法存在操作复杂且产率

较低等问题,在纯化过程中需多次脱蛋白,造成有机试剂的浪费及多糖的损耗,故需思考如何提高葛仙米多糖产率、纯度以及有机溶剂回收再利用的问题;② 在结构表征中,大多只研究其相对分子质量和单糖组成,对构型、糖苷键类型、连接方式、完整的结构特征以及多糖构效关系的报道较少;③ 在活性研究中,现有研究多为体外试验,体内研究及临床试验数据较为缺乏;④ 在应用开发方面,葛仙米多糖因高相对分子质量的特点,在低浓度便呈凝胶状,使其未能充分应用于相关功能性食品、药品和化妆品领域中。因此,今后研究可联合不同的提取方法或结合新型技术以提高葛仙米多糖的提取率;深入探究多糖的一级结构和高级结构,进一步阐明构效关系;进行体内试验以全面阐明葛仙米多糖的生物活性及其作用机制。

参考文献

[1] 曾杰. 葛仙米的分布变迁及利用研究[J]. 信阳农林学院学报, 2022, 32(3): 90-95, 106.
ZENG J. Study on distribution change and utilization of Gexianmi[J]. Journal of Xinyang Agriculture and Forestry University, 2022, 32(3): 90-95, 106.
[2] 柳文录, 周金球, 孟祥生, 等. 国家地理标志农产品——走马葛仙米[J]. 长江蔬菜, 2018(6): 36-37.
LIU W L, ZHOU J Q, MENG X S, et al. National geographical indication agricultural product—Zouma *Nostoc sphaeroides* kützing[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2018(6): 36-37.
[3] 周贵华. 葛仙米藻蓝蛋白、多糖及其降解产物生理活性研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023: 1.

- ZHOU G H. Study on physiological activities of phycocyanin, polysaccharide and its degradation products of *Nostoc sphaeroides* kützing[D]. Enshi: Hubei Minzu University, 2023: 1.
- [4] 王卫. 翡翠绿葛仙米选育、特性与规模化培养[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020: 1.
- WANG W. The emerald green *Nostoc sphaeroides* selection, characteristics and large-scale cultivation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020: 1.
- [5] 汪兴平, 谢笔均, 潘思铁, 等. 葛仙米藻红蛋白体外抗活性氧自由基作用的研究[J]. 食品科学, 2005(8): 404-407.
- WANG X P, XIE B J, PAN S Y, et al. The studies on *in vitro* anti-oxygen free radical of *Nostoc sphaeroides* kütz phycoerythrin[J]. Food Science, 2005(8): 404-407.
- [6] 周熙, 柏玉冰, 申磊, 等. 单因素法考察葛仙米多糖提取工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 55-58.
- ZHOU X, BAI Y B, SHEN L, et al. Investigating the extraction process of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharides by the single factor method[J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 55-58.
- [7] 莫开菊, 谢笔均, 汪兴平, 等. 葛仙米多糖的提取、分离与纯化技术研究[J]. 食品科学, 2004(10): 103-108.
- MO K J, XIE B J, WANG X P, et al. Study on extraction, separation and purification of *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharide[J]. Food Science, 2004(10): 103-108.
- [8] 彭常安, 宋玉华, 李春雨. 微波提取葛仙米多糖及其抑癌作用研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(20): 10 606-10 608.
- PENG C A, SONG Y H, LI C Y. Research on the tumor suppressor role of *Nostoc sphaeroides* polysaccharide extracted by microwave[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(20): 10 606-10 608.
- [9] 莫开菊, 周志, 汪兴平, 等. 碱液和木瓜蛋白酶预处理对葛仙米多糖提取效果的影响[J]. 食品科学, 2007(11): 194-198.
- MO K J, ZHOU Z, WANG X P, et al. Effects of alkali and papain pretreatment on *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharides extraction[J]. Food Science, 2007(11): 194-198.
- [10] 陈阳, 潘凯进, 石万银, 等. 超声波结合酶法提取葛仙米多糖工艺优化及其在酒体中的抗疲劳活性[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 200-209.
- CHEN Y, PAN K J, SHI W Y, et al. Optimization of ultrasonic and enzymatic extraction process of polysaccharides from *Nostoc sphaeroides* kütz and its anti-fatigue activity in wine body[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 200-209.
- [11] 史学东, 王伟, 沈晓芬, 等. 一种葛仙米多糖及其制备方法: CN202211569003.8[P]. 2024-01-26.
- SHI X D, WANG W, SHEN X F, et al. A polysaccharide from *Nostoc sphaeroides* kützing and its preparation method: CN202211569003.8[P]. 2024-01-26.
- [12] NILMAT K, HUNSUB P, NGAMPASERTSITH S, et al. Effects of defatting pretreatment on polysaccharide extraction from rambutan seeds using subcritical water: optimization using the desirability approach[J]. Foods, 2024, 13(13): 1 967.
- [13] ANWAR M, MCCONNELL M, BEKHIT A E. New freeze-thaw method for improved extraction of water-soluble non-starch polysaccharide from taro (*Colocasia esculenta*): optimization and comprehensive characterization of physico-chemical and structural properties[J]. Food Chemistry, 2021, 349(1): 129210.
- [14] YANG P P, LU M Y, ZHAO J, et al. Efficient separation of proteins and polysaccharides from *Dendrobium huoshanense* using aqueous two-phase system with ionic liquids[J]. Molecules, 2022, 27(16): 5 284.
- [15] 张馨心, 王福玲. 红花多糖纯化工艺及体外抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 171-176.
- ZHANG X X, WANG F L. Purification process and antioxidant activity *in vitro* of polysaccharides from safflower[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 171-176.
- [16] 余梅, 焦迎春. 柴达木大肥菇多糖的体内外抗氧化活性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(12): 101-109.
- YU M, JIAO Y C. Study on *in vivo* and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) sacc[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(12): 101-109.
- [17] 李泓杭, 吴小勇, 梁键, 等. 两种诺尼果多糖的组成结构及体外降糖、降脂活性比较[J]. 食品与机械, 2025, 41(1): 165-171.
- LI H H, WU X Y, LIANG J, et al. Composition, structure and comparison of *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidemic activities of two polysaccharides extracted from Noni fruit[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 165-171.
- [18] 邓伊菱, 李冰冰. 葛仙米多糖的提取分离与纯化[J]. 中国民族民间医药, 2009, 18(14): 10.
- DENG Y L, LI B B. Extraction, separation and purification of polysaccharides from *Nostoc sphaeroides* kützing[J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 2009, 18(14): 10.
- [19] MA X N, WU Y, GAO P, et al. Optimization of the deproteinization process via response surface methodology, preliminary characterization, and the determination of the antioxidant activities of polysaccharides from *Vitis vinifera* L. Suosuo[J]. Molecules, 2024, 29(19): 4 734.
- [20] 查苏娜, 苏日娜, 齐和日玛, 等. 刺玫根多糖对环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠的免疫调节作用[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(2): 196-205, 292.
- CHA S N, SU R N, QI H R M, et al. Immunomodulatory effect of polysaccharides from *Rosa davurica* roots on immunosuppressed mice induced by cyclophosphamide[J]. Natural Product Research and Development, 2024, 36(2): 196-205, 292.
- [21] ZHONG W T, YANG C M, ZHANG Y Z, et al. Effects of different deproteinization methods on the antioxidant activity of polysaccharides from *Flos sophorae immaturus* obtained by

- ultrasonic microwave synergistic extraction[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2 740.
- [22] 程婷婷, 李月, 李倩倩, 等. 滇产玛卡多糖盐析法脱蛋白工艺研究[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(20): 127-131.
- CHENG T T, LI Y, LI Q Q, et al. Study on the deproteinization process by salting out method of Maca polysaccharides from Yunnan[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(20): 127-131.
- [23] 任洪飞, 逢梦玉, 隋昕怡, 等. 反复冻融法制备灵芝多糖工艺优化、结构表征及抗氧化活性分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(8): 11-20.
- REN H F, PANG M Y, SUI X Y, et al. Repeated freeze-thaw extraction optimization, structural features and antioxidant activity of polysaccharides from *ganoderma lucidum*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(8): 11-20.
- [24] LIU Y, HUANG G L, LV M J. Extraction, characterization and antioxidant activities of mannan from yeast cell wall[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118: 952-956.
- [25] 周彤, 闫寒汐, 朱李想, 等. 不同方法对蒲公英多糖脱色工艺条件优化的研究[J]. *农产品加工*, 2023(22): 29-35, 39.
- ZHOU T, YAN H X, ZHU L X, et al. Study on the optimization of dandelion polysaccharide decolorization process by different methods[J]. *Farm Products Processing*, 2023(22): 29-35, 39.
- [26] REN H, LI Z Y, GAO R, et al. Structural characteristics of *Rehmannia glutinosa* polysaccharides treated using different decolorization processes and their antioxidant effects in intestinal epithelial cells[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3 449-3 449.
- [27] HU Z Y, YU R Y, SUN J F, et al. Static decolorization of polysaccharides from the leaves of *Rhododendron dauricum*: process optimization, characterization and antioxidant activities [J]. *Process Biochemistry*, 2022, 121: 113-125.
- [28] DAI K Y, WANG R H, MU L, et al. Structural characteristics and anti-tumor activity of alcohol-precipitated polysaccharides from *Cordyceps militaris* under different ethanol concentrations[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 134784.
- [29] LI Y P, ZHAO X Y, WANG J, et al. Characterization and anti-aging activities of polysaccharide from *Rana dybowskii* Guenther[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2024, 15: 1370631.
- [30] HU Q, LIU Y, HAN L, et al. Physicochemical properties and anti-inflammatory and immunomodulatory effects of Shengfupian polysaccharides[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2023, 48(10): 2 757-2 766.
- [31] 肖付才, 李颖奎, 黄斐, 等. 山茱萸多糖提取工艺优化及结构表征[J]. *食品与机械*, 2024, 40(2): 161-167.
- XIAO F C, LI Y K, HUANG F, et al. Optimization of extraction process and structural characterization of polysaccharides from *Cornus officinalis*[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(2): 161-167.
- [32] 翁霞. 蓝莓多糖水提物脱蛋白工艺研究[J]. *中国农业科技导报(中英文)*, 2025, 27(4): 157-168.
- WENG X. Study on deproteinization process of blueberry polysaccharides water extract[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(4): 157-168.
- [33] YANG W J, YANG Z X, ZOU Y, et al. The extraction and deproteinization process of polysaccharide from purple sweet potato[J]. *Chemical Biology & Drug Design*, 2022, 99(1): 111-117.
- [34] 苏靖颖, 黄杉杉, 黄越, 等. 莼菜多糖脱蛋白和脱色对其结构和体外抗氧化活性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(16): 162-171.
- SU J Y, HUANG S S, HUANG Y, et al. The effects of deproteinization and decolorization on structure and *in vitro* antioxidant activity of *Brasenia schreberi* polysaccharides[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(16): 162-171.
- [35] DING S Y, YAN Z Q, LIU H P, et al. Structural characterization and antitumor activity of a polysaccharide extracted from *Perilla frutescens* var. *frutescens*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115334.
- [36] ZHANG H J, LI H Z, NETALA V R, et al. Optimization of complex enzymeultrasonic synergistic extraction of water-soluble polysaccharides from *Perilla frutescens* seed meal: purification, characterization and *in vitro* antioxidant activity [J]. *Food Process Preserv*, 2021, 46(1): e16201.
- [37] CAO R A, MA N, PALANISAMY S, et al. Structural elucidation and immunostimulatory activities of quinoa non-starch polysaccharide before and after deproteinization[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(6): 2 291-2 303.
- [38] TAO L, ZHANG J W, LAN W F, et al. Polysaccharide decolorization: methods, principles of action, structural and functional characterization, and limitations of current research [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 138: 284-296.
- [39] 谭青云, 袁永俊, 王丹, 等. 铁皮石斛多糖几种脱色方法的对比[J]. *食品工业*, 2019, 40(11): 43-47.
- TAN Q Y, YUAN Y J, WANG D, et al. Comparative on several decolorization methods of *Dendrobium candidum*[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(11): 43-47.
- [40] SHAO L J, SUN Y, LIANG J, et al. Decolorization affects the structural characteristics and antioxidant activity of polysaccharides from *Thesium chinense* Turcz: comparison of activated carbon and hydrogen peroxide decolorization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 155: 1 084-1 091.
- [41] MOHAMMED J K, ALI MAHDI A, AHMED M I, et al. Preparation, deproteinization, characterization, and antioxidant activity of polysaccharide from *Medemia argun* fruit[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020,

- 155: 919-926.
- [42] THIMMARAJU A, SEEDEVI P. Purification, chemical, structural characterization and biological activity of polysaccharide from blue oyster mushroom *Hypsizygus ulmarius*[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023, 14 (16): 19 889-19 899.
- [43] WANG H T, LI H L, HOU Y T, et al. Plant polysaccharides: sources, structures, and antidiabetic effects[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 51: 101013.
- [44] TALAPPHET N, PALANISAMY S, LI C S, et al. Polysaccharide extracted from *Taraxacum platycarpum* root exerts immunomodulatory activity via MAPK and NF- κ B pathways in RAW264. 7 cells[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 281: 114519.
- [45] SHENG K J, WANG C L, CHEN B T, et al. Recent advances in polysaccharides from *Lentinus edodes* (Berk.): isolation, structures and bioactivities[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129883.
- [46] WANG J Q, ZHAO J, NIE S P, et al. Mass spectrometry for structural elucidation and sequencing of carbohydrates[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2021, 144: 116436.
- [47] LIU Y N, HUANG Y J, ZHU R Y, et al. Structural elucidation approaches in carbohydrates: a comprehensive review on techniques and future trends[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134118.
- [48] AMICUCCI M, GALERMO A G, GUERRERO A, et al. Strategy for structural elucidation of polysaccharides: elucidation of a maize mucilage that harbors diazotrophic bacteria[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(11): 7 254-7 265.
- [49] 王帅, 赵冬雪, 韩成凤, 等. 6种活性多糖的结构、性质及其抗氧化活性的比较研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 7-15.
- WANG S, ZHAO D X, HAN C F, et al. A comparative study on the structure, properties and antioxidant activity of six active polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 7-15.
- [50] 钟国恒. 葛仙米群体不同生长阶段多糖的理化特征和生物活性研究[D]. 广州: 广东药科大学, 2020: 16-27.
- ZHONG G H. Studies on the physicochemical characteristics and biological activity of polysaccharides in *Nostoc sphaeroides* colony at different growth stages[D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University, 2020: 16-27.
- [51] 莫开菊, 赵娜, 朱照武, 等. 葛仙米多糖的单糖组成分析[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 89-92.
- MO K J, ZHAO N, ZHU Z W, et al. Analysis of monosaccharide composition of polysaccharide from *Nostoc sphaeroides* kützing[J]. Food Science, 2015, 36(18): 89-92.
- [52] 莫开菊. 葛仙米多糖的分离提取及功能性质研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 24-53.
- MO K J. Study on the extraction and function properties of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharides[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011: 24-53.
- [53] 苏攀峰. 葛仙米多糖的提取分离、结构和活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- SU P F. Study on extraction, structure and activity of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharide[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [54] 苏攀峰, 唐庆九, 陈盛, 等. 葛仙米多糖理化性质和流变学特性的研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(14): 39-43.
- SU P F, TANG Q J, CHEN S, et al. Physicochemical properties and rheological properties of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(14): 39-43.
- [55] LIU Y F, SU P F, XU J F, et al. Structural characterization of a bioactive water-soluble heteropolysaccharide from *Nostoc sphaeroides* kütz[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 200(22): 552-559.
- [56] LI H F, SU L N, CHEN S, et al. Physicochemical characterization and functional analysis of the polysaccharide from the edible microalga *Nostoc sphaeroides*[J]. Molecules, 2018, 23(2): 508.
- [57] ZHONG R T, WAN X Z, WANG D Y, et al. Polysaccharides from marine *Enteromorpha*: structure and function[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 11-20.
- [58] DING Z K, ZHAO M, LI X Y, et al. A novel polysaccharide from the fruits of *Cudrania tricuspidata* and its antioxidant and alcohol dehydrogenase activating ability[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 110: 105850.
- [59] TENG H, HE Z G, HONG C Z, et al. Extraction, purification, structural characterization and pharmacological activities of polysaccharides from sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): a review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 324: 117809.
- [60] LI L, XIE J C, ZHANG Z M, et al. Recent advances in medicinal and edible homologous plant polysaccharides: preparation, structure and prevention and treatment of diabetes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258(Part 2): 128873.
- [61] OGAWA Y, PUTAUX J L, NISHIYAMA Y. Crystallography of polysaccharides: current state and challenges[J]. Current Opinion in Chemical Biology, 2022, 70: 102183.
- [62] GUO P, CHEN M, WANG W Z, et al. Exploration of polysaccharides from *Phyllanthus emblica*: isolation, identification, and evaluation of antioxidant and anti-glycolipid metabolism disorder activities[J]. Molecules, 2024, 29(8): 1 751.
- [63] PEREZ S, MAKSHAKOVA O. Multifaceted computational modeling in glycoscience[J]. Chemical Reviews, 2022, 122 (20): 15 914-15 970.
- [64] WANG Y, ZHANG X S, XU J, et al. The development of microscopic imaging technology and its application in micro-

- and nanotechnology[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, 10: 931169.
- [65] 孙伟杰, 陈盛, 王玉兰, 等. 葛仙米多糖对白色念珠菌诱导的免疫低下小鼠免疫功能的影响[J]. *中国现代应用药学*, 2020, 37(21): 2 605-2 609.
- SUN W J, CHEN S, WANG Y L, et al. Effects of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharide on immune function of the immunosuppressed mice caused by *Candida albicans*[J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2020, 37(21): 2 605-2 609.
- [66] 杨丽涛, 刘银路, 张波. 葛仙米多糖对高脂小鼠血脂和肠道微生物的影响[J]. *微生物学报*, 2022, 62(3): 785-796.
- YANG L T, LIU Y L, ZHANG B. Effects of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharide on blood lipid and gut microflora in high-fat diet mice[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(3): 785-796.
- [67] 常向东, 李冰冰, 邓伊苓, 等. 葛仙米水溶性多糖的抗菌性实验研究[J]. *医学理论与实践*, 2009, 22(9): 1 032-1 034.
- CHANG X D, LI B B, DENG Y L, et al. The anti-bacterial research on the water-soluble polysaccharide within *Nostoc sphaeroides* kotzing[J]. *The Journal of Medical Theory and Practice*, 2009, 22(9): 1 032-1 034.
- [68] YANG L T, ZHANG B. Protective mechanism of *Nostoc sphaeroides* kütz. polysaccharide on liver fibrosis by HFD-induced liver fat synthesis and oxidative stress[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022(7): 1-11.
- [69] RASMUSSEN H E, BLOBAUM K R, JESCH E D, et al. Hypocholesterolemic effect of *Nostoc commune* var. *sphaeroides* kützing, an edible blue-green alga[J]. *European Journal of Nutrition*, 2009, 48: 387-394.
- [70] 朱玉婷, 袁杰, 杨洁, 等. 葛仙米多糖硫酸酯抗凝血活性研究[J]. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2014, 32(4): 368-370, 379.
- ZHU Y T, YUAN J, YANG J, et al. Study on anti-coagulant activity of sulfated *Nostoc sphaeroides* kützing polysaccharide[J]. *Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2014, 32(4): 368-370, 379.
- [71] 汤俊, 胡征宇. 3 种念珠藻多糖对自由基的清除作用[J]. *武汉植物学研究*, 2006(1): 63-66.
- TANG J, HU Z Y. Radical scavenging activities of polysaccharides in three *Nostoc species*[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2006(1): 63-66.
- [72] 莫开菊, 谢笔钧, 龚晨睿. 葛仙米多糖体内抑瘤及对免疫的影响[J]. *食品科学*, 2008(4): 392-396.
- MO K J, XIE B J, GONG C R. Effect of *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharides on tumor inhibition and immunity of mice *in vivo*[J]. *Food Science*, 2008(4): 392-396.
- [73] LIU Y L, YANG L T, BI C C, et al. *Nostoc sphaeroides* kütz polysaccharide improved constipation and promoted intestinal motility in rats[J]. *Evidence - Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 2021(1): 5596531.
- [74] KU C S, KIM B, PHAM T X, et al. Hypolipidemic effect of a blue-green alga (*Nostoc commune*) is attributed to its nonlipid fraction by decreasing intestinal cholesterol absorption in C57BL/6J mice[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2015, 18(11): 1 214-1 222.
- [75] 陈盛, 赵立彬, 祁明媛, 等. 葛仙米组合物及其在缓解眼部疲劳、改善眼部黄斑病变中的应用: CN201910722629.X[P]. 2019-11-05.
- CHEN S, ZHAO L B, QI M Y, et al. *Nostoc sphaeroides* kützing composition and its application in alleviating eye fatigue and improving macular degeneration: CN201910722629.X[P]. 2019-11-05.
- [76] 于迪, 李优优, 姜东华, 等. 葛仙米多糖提取物对模型体系中 PhIP 抑制效果研究[J]. *中国调味品*, 2024, 49(6): 9-14.
- YU D, LI Y Y, JIANG D H, et al. Study on inhibitory effect of *Nostoc sphaeroides* polysaccharide extracts on PhIP in model system[J]. *China Condiment*, 2024, 49(6): 9-14.
- [77] 周丰, 王卫, 易思富, 等. 一种葛仙米银耳羹饮料的制作方法: CN201910716453.7[P]. 2019-10-15.
- ZHOU F, WANG W, YI S F, et al. A preparation method of *Nostoc sphaeroides* kützing tremella soup beverage: CN201910716453.7[P]. 2019-10-15.
- [78] 吴珊, 韩意红, 王海英. 葛仙米活性成分的提取及护肤性能的研究[J]. *轻工科技*, 2017, 33(11): 26-27.
- WU S, HAN Y H, WANG H Y. Extraction of active components from *Nostoc sphaeroides* kützing and study on their skincare properties[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2017, 33(11): 26-27.
- [79] 王玉兰, 黄凤飞, 董明. 一种含有葛仙米提取物的身体乳及其制备方法: CN201510375673.X[P]. 2015-10-07.
- WANG Y L, HUANG F F, DONG M. A body lotion containing *Nostoc sphaeroides* kützing extract and its preparation method: CN201510375673.X[P]. 2015-10-07.