海洋植物多糖的化学结构表征及其药理活性研究进展

滕　浩[1]，李雪影[2]，孙　卉[1]，戴　瑞[1]，李才林[1]，何志贵[1*]

1. 桂林旅游学院休闲与健康学院，广西 桂林　541006
2. 合肥工业大学食品与生物工程学院，安徽 合肥　230009

摘　要：近些年来，海洋植物多糖的化学结构与药理活性已成为医药、食品领域的研究热点。纵观现有研究资料，海洋植物多糖具有抗衰老、抗氧化、免疫调节、抗肿瘤、抗凝血及保护肾脏等作用，在保健食品、医药和化妆品行业具有很大的应用前景。主要从化学结构表征和药理活性 2 个方面对海洋植物多糖进行综述，以期为海洋植物多糖的深度开发利用提供参考。

关键词：海洋植物；多糖；结构表征；抗衰老；抗氧化；免疫调节；抗肿瘤；功能食品

中图分类号：R282.71　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2022)13 - 4177 - 10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2022.13.031

Advances in studies on chemical structure characterization and pharmacological activities of polysaccharides from marine plants

TENG Hao[1], LI Xue-ying[2], SUN Hui[1], DAI Rui[1], LI Cai-lin[1], HE Zhi-gui[1]

1. School of Hospitality Management, Guilin Tourism University, Guilin 541006, China
2. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: In recent years, the chemical structure and pharmacological activities of polysaccharides from marine plant have become a research focus in the fields of medicine and food. Throughout the available research data, the polysaccharides from marine plant have a wide range of pharmacological activities, such as anti-aging, anti-oxidant, immunomodulation, antitumor, anticoagulant and renoprotective effects, and they have great application prospects in health food, medicine, and cosmetics industries. This review focuses on marine plant polysaccharides from the aspects of chemical structure characterization and pharmacological activity, with view to providing a reference for the deep exploitation and utilization of marine plant polysaccharides.

Key words: marine plants; polysaccharides; structure characterization; anti-aging activity; anti-oxidant activity; immunomodulation effect; antitumor activity; functional foods

多糖（polysaccharide）又称多聚糖，通常是指由 20 个以上单糖分子通过糖苷键连接而成的长链高分子聚合物[1]，广泛存在于草本植物的种子、茎和叶等组织及动物体液、细胞壁和细菌、酵母、真菌的细胞外液中[2]。天然来源的多糖因其具有丰富的生理活性，且不良反应少，广泛应用于医学、制药和生物技术领域，包括制备抗凝剂、抗炎剂、抗氧化剂、免疫刺激剂及抗肿瘤药物等[3-4]。

海洋植物以藻类为主，被认为是碳循环的重要来源，其通常分为 3 大类：褐藻、红藻和绿藻[5-6]。海洋植物长期以来被亚洲各国用作食物来源和膳食补充剂，其潜在的益处已引起许多西方国家的注意。从海洋植物中分离的多糖比动物多糖更具安全性，在功能性食品、药品等领域具有良好的应用前景[7]。多糖是海洋藻类细胞壁的主要成分，具有多种生理活性，如抗肿瘤、抗氧化、抗病毒和免疫调节等[8-11]。对多糖结构的科学认识，有助于进一步研究其药理活性和生物功能，对多糖的基础研究及其应用具有重要意义[1]。本文阐述了近年来海洋植物多糖的结构特征及其药理活性的研究进展，以期为海洋植物多糖在生物医药和功能性食品领域的深度开发利用提供依据。

收稿日期：2022-01-20

基金项目：2019 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2019KY0835）；2019 年桂林旅游学院校级重点项目（2019A02）

作者简介：滕　浩（1991—），男，硕士，讲师，研究方向为食品化学与分子营养。Tel: 13211531760　E-mail: tenghao0557@163.com

***通信作者：**何志贵（1980—），男，硕士生导师，教授，从事中草药与天然产物化学研究。E-mail: 906260300@qq.com

1 海洋植物多糖的结构表征

1.1 褐藻多糖

褐藻多糖是从褐藻植物中提取的一种水溶性硫酸多糖。研究者采用离子交换色谱和凝胶渗透色谱技术，从海带 *Laminaria japonica* Aresch. 中分离纯化获得了 4 种新的活性多糖均一组分，分别为 LJP11、LJP12、LJP31 和 LJP61A，确定其相对分子质量分别为 2.45×10^7、1.8×10^7、1.1×10^7 和 1.96×10^6，主要是由阿拉伯糖、木糖、葡萄糖、甘露糖、半乳糖等按不同比例构成的多糖硫酸酯，并进一步揭示了 LJP61A 结构的重复单元，主要包含→3,6)-α-*D*-Man*p*-(1→、→4)-α-*D*-Man*p*-(1→、→4)-2-*O*-acetyl-β-*D*-Glc*p*-(1→、→4)-β-*D*-Glc*p*-(1→、→6)-4-*O*-SO_3-β-*D*-Gal*p*-(1→、→6)-β-*D*-Gal*p*-(1→、→3)-β-*D*-Gal*p*-(1→和末端糖残基 α-*D*-Glc*p*-(1→[12-14]。Vishchuk 等[15]先后报道了 7 种从裙带菜 *Saccharina japonica* (Dashi Kombu) 和 *Undaria pinnatifida* (Harv.) Suringar 中分离纯化的褐藻多糖，分别为 Sj-E、Up-E、Sj-L、Sj-F1、Sj-F2、Up-F1 和 Up-F2，并分析了 Up-E 单糖组成，发现其主要由岩藻糖、半乳糖、甘露糖、木糖和葡萄糖组成，物质的量比为 Fuc-Gal-Man-Xyl-Glc＝53∶38∶5∶2∶2，结构解析表明其主链由 (1→3)-α-*L*-Fuc*p* 和(1→4)-α-*L*-Fuc*p* 构成；而 Sj-F1 主要由岩藻糖、半乳糖、甘露糖、木糖和鼠李糖组成，其物质的量比为 Fuc-Gal-Man-Xyl-Rha＝53∶29∶15∶1.3∶1.7。Hentati 等[16]从突尼斯褐藻囊藻 *Cystoseira compressa* (Esper) Gerloff & Nizamuddin 中纯化获得了多糖组分 CCF（*Cystoseira compressa* fucoidan），单糖组成分析发现 CCF 主要由岩藻糖（62.46%）、半乳糖（24.27%）、葡萄糖（7.68%）、木糖（4.49%）及葡萄糖醛酸（2.2%）组成，主链包含→3)-α-*L*-Fuc*p*(1→、→4)-α-*L*-Fuc*p*-(1，侧链包含 α-(1→4)-*L*-Fuc*p*、α-(1→3)-*L*-Fuc*p*、α-*L*-Fuc*p*、β-*D*-Gal*p*、β-*D*-Gal*p*-(1→3)-α-*L*-Fuc*p*、β-*D*-Gal*p*-(1→4)-α-*L*-Fuc*p* 等。Cui 等[17]从叉开网翼藻 *Dictyopteris divaricate* (Okam.) Okamura 中获得多糖组分 DDSP，其相对分子质量为 8.505×10^4，单糖组成分析结果表明，DDSP 主要由岩藻糖、木糖、甘露糖、葡萄糖及半乳糖组成，物质的量比为 Fuc-Xyl-Man-Glu-Gal ＝ 4.45 ： 2.74 ： 1.00 ： 2.94 ： 1.35 。Vaikundamoorthy 等[18]从褐藻属围氏马尾藻 *Sargassum wightii* (Turn.) C. Ag. 中提取粗多糖，采用 DEAE-52 和 Sephadex G-100 等色谱纯化方法，获得 2 种褐藻多糖均一组分 SWP1 和 SWP2，通过化学分析、气相色谱-质谱（gas chromatography-mass spectrometer，GC-MS）、^{1}H-NMR 和 ^{13}C-NMR 对产物进行了表征，得到了产率为 21.48%的 SWP1。所提取的多糖化学成分为中性多糖，总糖含量高，蛋白质、苯酚、黄酮类化合物含量低。GC-MS 分析显示其结构中含有半乳呋喃糖和阿拉伯糖，核磁共振光谱显示多糖的糖链中有 β-半乳糖存在。由此可见，结合多种分离纯化方法得到均一组分的多糖，然后利用化学分析和现代仪器分析方法对其结构进行解析和表征，是获得多糖一级结构信息的关键。一些典型海洋植物多糖的化学结构如图 1 所示。

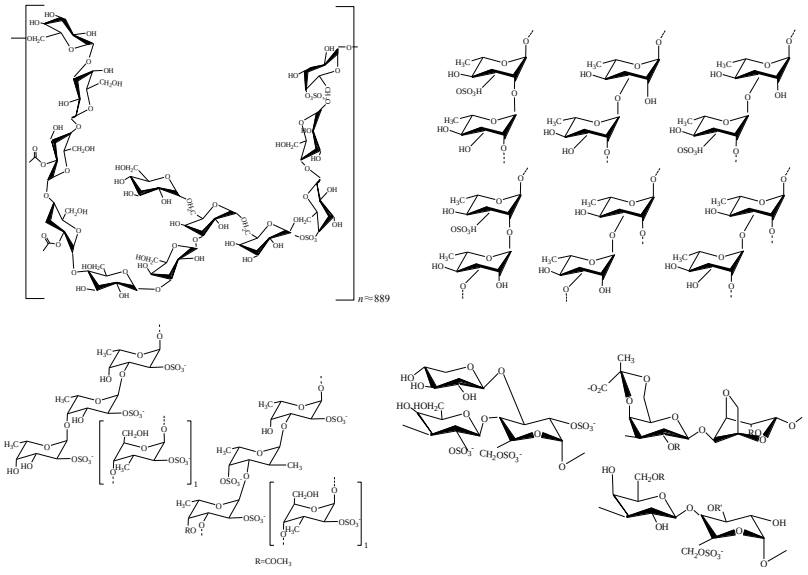


图 1 海洋植物多糖的化学结构特征

Fig. 1 Chemical structure characteristics of polysaccharides from marine plants

1.2 红藻多糖

在自然界中，红藻亦是海洋植物多糖开发应用的丰富资源之一。近年来，从红藻植物中提取、分离获得 12 种不同的多糖组分，并对其结构进行了分析和表征。Cui 等[19]从红藻属石花菜中分离纯化出一种相对分子质量为 2.88×10^4 的硫酸多糖，其单糖组成主要由木糖（7.1%）、半乳糖（59.7%）和半乳糖醛酸（19.76%）组成，其硫酸酯质量分数为 8.8%，结构分析表明，糖链包含 1,4-linked-α-*D*-Gal*p*3*S*,1,2-linked-α-*D*-Xyl*p* 以及 3-linked-β-*D*-Gal*p*A 残基。Ghannam 等[20]从红藻属乳头凹顶藻 *Laurencia papillosa* (Forssk.) Grev. 中得到 3 种硫酸多糖组分，分别为 LP-W1、LP-W2 和 LP-W3。Byankina 等[21]报道了从红藻属 *Tichocarpus crinitus* (Gmel.) Rupr.中分离纯化获得 3 种多糖组分 HT、AE 及 AM，它们的相对分子质量分别为 3.76×10^5、4.68×10^5 和 5.8×10^3。单糖组成分析结果表明，HT、AE 及 AM 的主要组成单糖有半乳糖和葡萄糖，其物质的量比分别为 Gal-Glc＝25.7∶1.9、Gal-Glc＝19.2∶23.0 和 Gal-Glc＝30.4∶4.9。Souza 等[22]从红藻属江蓠 *Gracilaria birdiae* (Plastino & Oliveira) 中分离纯化出硫酸多糖，其多糖的硫酸质量分数为 8.4%，主要由半乳糖（65.4%）、3,6-无水半乳糖（25.1%）和 6-*O*-甲基半乳糖（9.2%）组成。凝胶渗透色谱分析表明，其多糖是 1 个非均质体系，其主峰相对分子质量为 3.70×10^5。Jiang 等[23]从红藻 *Bangia fusco-purpurea* (Dillw.) Lyngb. 中分离获得 1 种多糖组分 BFP，通过化学分析结合核磁共振光谱，揭示多糖组分 BFP 由→3)-β-*D*-Gal*p*-(1→ 、 →3)-β-*D*-Galp6-*S*-(1→4)-α-*D*-Gal*p*-(1→、→4)-α-*D*-Gal*p*-(1→4)-α-*L*-AnGal*p*-(1→3)-β-*D*-Gal*p*-(1→和→4)-α-*D*-Gal*p*-(1→的线性重复交替序列构成其主链结构，物质的量比约为 13∶1∶1∶1。Canelón 等[24]从红藻 *Mastocarpus stellatus* (Stackhouse) Guiry 中分离纯化获得红藻多糖，结构解析发现，其糖链包含 3-linked β-*D*-galactose、3,6-anhydro-α-*L*-galactose 和 α-*L*-galactose 6-sulfate 等。Gómez-Ordóñez 等[25]报道了 5 个红藻多糖组分，相对分子质量分布于 8.000×10^3～1.425×10^6，具有显著差异，单糖组成分析结果发现，这些多糖主要由木糖、甘露糖、半乳糖和葡萄糖组成。

1.3 绿藻多糖

绿藻作为良好的营养来源已引起了人们的特别关注，其中一个特别有趣的特点是它们富含硫酸多糖[26]。Li 等[27]从海洋绿色藻类囊礁膜 *Monostroma angicava* Kjellm. 中分离纯化获得硫酸多糖 PF2，化学和光谱分析结果表明，PF2 分子的主链主要包含→3)-α-*L*-Rha*p*-(1→ 和→2)-α-*L*-Rha*p*-(1→，侧链主要有→3)-α-*L*-Rha*p*-(1→和→2)-α-*L*-Rha*p*-(1→等残基。Kolsi 等[28]从刺松藻 *Codium fragile* (Sur.) Hariot. 中分离纯化出硫酸多糖 CFSP，采用傅里叶变换红外光谱（fourier transform infrared spectroscopy，FTIR）、X 射线衍射（X-ray diffraction，XRD）、GC-MS 和 NMR 等多种方法对其结构进行解析，结果表明 CFSP 主要由半乳糖和 *D*-葡萄糖组成，分子中含有不同的糖苷键和官能团。Ciancia 等[29]从刺松藻 *Codium fragile* (Sur.) Hariot. 等绿藻中分离得到 4 种硫酸多糖组分 M1、M2、W1 和 W2。从多糖结构上来看，这 4 种多糖组分有相似的单糖组成和主要结构单位，但其组成的百分比存在差异。Arata 等[30]从 4 种绿藻中分离得到硫酸化半乳糖和丙酮酸半乳糖，它们是存在于海藻细胞壁中唯一重要的硫酸多糖，通过化学分析和 NMR 研究其结构特征发现，主链由 3-、6-和 3,6-键组成，主要由 3-链 4,6-*O*-(1′-羧基)乙基-*D*-半乳糖单元组成，部分硫酸化在 C-2 上。此外，还发现了由 4-、6-、4-、6-二聚半乳糖单元组成的复杂硫酸化模式。Shao 等[31]报道了海洋绿藻属 *Ulva fasciata* Delile 中分离纯化的 4 种不同相对分子质量的多糖硫酸酯 UFP_1、UFP_2、UFP_3 和 UFP_4，其相对分子质量分布在 2.00×10^3～2.64×10^5。单糖组成分析结果发现，UFP_1～UFP_3 主要由鼠李糖、木糖和葡萄糖组成，其物质的量比分别为 Rha-Xyl-Glc＝51.10∶27.17∶7.29、Rha-Xyl-Glc＝92.23∶2.47∶1.63 和 Rha-Xyl-Glc＝17.08∶9.91∶10.68[31]。

海洋植物多糖的化学结构表征见表 1。

2 药理活性

2.1 抗氧化活性

体内自由基的增加将导致 T 细胞损伤，致使免疫功能下降和机体的衰老，同时也带来心脑血管疾病的风险[39]。与此同时，过多的自由基也会引起几种慢性人类疾病，如癌症、动脉硬化等[40]。当细胞通过将分子氧还原为水而产生能量时，会生成主要由超氧阴离子、过氧化氢和羟基自由基组成的活性氧[41]。在正常情况下，自由基调节细胞生长并抑制病毒和细菌的生长[42]。在许多生化过程中，低水平的活性氧（reactive oxygen species，ROS）是必不可少的，如细胞分化中的细胞内信息传递、细胞进展

表 1 海洋植物多糖的化学结构表征

Table 1 Chemical structure characterization of polysaccharides from marine plants

藻类	植物	多糖组分	单糖组成	主链结构	支链结构	文献
红藻	*Gracilaria birdiae*	GBP	−	β-*D*-Gal*p*,3,6-anhydro-α-*L*-Gal*p*、α-*L*-Gal*p*-6 sulfate	−	32
	Gelidium pacificum	−	Xyl-Gal-Gal acid=1.00∶8.41∶2.78	1,4-linked α-*D*-Galp3S、1,2-linked-α-*D*-Xylp、1,3-linked-β-*D*-GalpA		19
	Gracilaria caudata	PGC	−	3-linked β-*D*-galactopyranose、4-linked 3,6-α-*L*-anhydrogalactose	−	33
	Laurencia papillosa	LP-W1 、 LP-W2、LP-W3	−	−	−	20
	Tichocarpus crinitus	HT	Gal-Glu=25.7∶1.9	1,3-linked β-*D*-galactopyranosyl-2,4-disulfate	−	21
		AE	Gal-Glu=19.2∶23	−	−	21
		AM	Gal-Glu=30.4∶4.9	−	−	21
	Gracilaria corticata	−	Glu-Xyl-Man=2.58∶1.08∶1.00	−	−	34
	Laurencia obtusa、*L. filiformis*	−	−	3-linked β-*D*-galactose、3,6-anhydro-α-*L*-galactose、α-*L*-galactose-6 sulfate	−	34
	Mastocarpus stellatus	F1	Xyl-Man-Gal-Glc=443∶24∶87.76∶541	−	−	35
		F2	Xyl-Gal-Glc=2.47∶95.19∶2.35	−	−	35
		F3	Xyl-Gal-Glc=3.86∶93.85∶2.29	−	−	35
		F4	Xyl-Gal-Glc=7.98∶70.17∶21.84	−	−	35
		F5	Xyl-Man-Gal-Glc=1.29∶2.31∶18.9∶77.5	−	−	35
绿藻	*Codium fragile*	M1	Gal-Ara-Man-Glc=10.5∶9.2∶50.1∶28.9	3-linked β-*D*-galactopyranose、β-*L*-arabinopyranose	−	29
		M2	Gal-Ara-Man-Glc-Fuc=17.9∶10.2∶ 36.6∶ 34.1∶1.2	3-linked β-*D*-galactopyranose、β-*L*-arabinopyranose	−	29
	Codium vermilara	W1	Gal-Ara-Man-Glc-Xyl-Rham = 25.6 ∶ 20.2 ∶ 30.7∶20.6∶1.7∶1.1	4-linked β-*D*-mannans	−	29
		W2	Gal-Ara-Man-Glc=17.6∶13.5∶60.7∶8.2	−	−	29
	Ulva fasciata	UFP_1	Rha-Xyl-Glc=51.10∶27.17∶7.29	−	−	31
		UFP_2	Rha-Xyl-Glc=92.23∶2.47∶1.63	−	−	31
		UFP_3	Rha-Xyl-Glc=17.08∶9.91∶10.68	−	−	31
		UFP_4	−	−	−	31
	Ulva lactuca	ULP1	Rha-Xyl-Glu=51.2∶12.3∶20.1	→4)-Rah*p*-(1→、	−	36
		ULP2	Rha-Xyl-Glu=60.8∶14.2∶8.2		−	36
	Ulva lactuca	ulvan	Rha-Gal-Xyl-Man-Glu = 1 ∶ 0.03 ∶ 0.07 ∶ 0.01∶0.06	→4)-β-*D*-GlcA-(1→ 、 →4)-α-*L*-Rha3S-(1→	−	37
	Monostroma angicava	PF2	−	→3)-α-*L*-Rha*p*-(1→ 、 →2)-α-*L*-Rha*p*-(1→	→3)-α-*L*-Rha*p*-(1→	27
	Codium decorticatum		−	β(3,6)-*D*-Gal*p*	−	27
	Penicillus capitatus 、*Udotea flabellum*		−	→3)-4,6-*O*-(1′-carboxy) ethylidene-*D*-Gal*p*	−	27
褐藻	*Laminaria japonica*	LJP11	Ara∶Man∶Glu=1∶1.16∶6.33	→1)-β-*D*-Glc*p*-(4→、→1)-β-*D*-Glc*p*Ac-(4→、→1)-β-*D*-Glc*p*Ac-(4→、→1)-β-*D*-Glc*p*Ac-(4→	β-*L*-Ara*f*-(1→	12

续表 1

藻类	植物	多糖组分	单糖组成	主链结构	支链结构	文献
褐藻		LJP12	Ara∶Xly∶Man∶Glu∶Gal＝1∶0.17∶1.54∶2.64∶0.18	→1)-α-*D*-Man*p*-(4→、→1)-α-*D*-Man*p*-(6→、→1)-β-*D*-Glc*p*-(4→、→1)-α-*D*-Man*p*-(4→、→1)-β-*D*-Glc*p*-(4→	α-*D*-Gal*p*-(1→、β-*L*-Ara*f*-(1→、→4)-β-*D*-Glc*p*-(1→6	12
		LJP31	Ara∶Man∶Glu∶Gal＝1∶7.8∶6.6∶0.8	→4)-*D*-Glc*p*-(1→、→4)-β-*D*-Man*p*-(1→、→4)-β-*D*-Glc*p*-(1→、→3)-α-*D*-Man*p*-(1→、→4)-β-*D*-Glc*p*-(1→、→6)-α-Gla*p*-*D*(1→	→1)-β-*L*-Ara*f*	13
		LJP61A	Man∶Glu∶Gal＝1∶1.85∶2.92	→3,6)-α-*D*-Man*p*-(1→、→4)-α-*D*-Man*p*-(1→、→4)-2-*O*-acetyl-β-*D*-Glc*p*-(1→、→4)-β-*D*-Glc*p*-(1→、→6)-4-*O*-SO_3-β-*D*-Gal*p*-(1→、→6)-β-*D*-Gal*p*-(1→、→3)-β-*D*-Gal*p*-(1→	α-*D*-Glc*p*-(1→	14
	Laurencia obtusa、*L. filiformis*	－	－	3-linked β-*D*-galactose、3,6-anhydro-α-*L*-galactose、α-*L*-galactose-6 sulfate	－	34
	Saccharina japonica	Sj-E	Fuc-Gal-Man-Glc＝47∶33∶6∶14	→3)-α-*L*-Fuc*p*-(1→	－	15
	Undaria pinnatifida	Up-E	Fuc-Gal-Man-Xyl-Glc＝53∶38∶5∶2∶2	→3)-α-*L*-Fuc*p*-(1→、→4)-α-*L*-Fuc*p*-(1→	－	
		Sj-L	Fuc-Gal-Man-Xyl-Rha-Glc＝3∶4∶4∶0.5∶1∶52	→3)-β-*D*-Glu*p*-(1→、→6)-β-*D*-Glu*p*-(1→	－	15
		Sj-F1	Fuc-Gal-Man-Xyl-Rha＝53∶29∶15∶1.3∶1.7	－	－	
		Sj-F2	Fuc-Gal-Man-Xyl-Rha=57∶31∶1∶2∶3	→3)-α-*L*-Fuc*p*-(1→	－	15
		Up-F1	Fuc-Gal-Man-Xyl-Glc=59∶30∶8∶2∶1	－	－	
		Up-F2	Fuc-Gal-Man-Xyl＝51∶48∶1	3)-α-*L*-Fuc*p*-(1→、→4)-α-*L*-Fuc*p*-(1→	－	15
	Alaria marginata、*A. angusta*	AmF1	Fuc-Gal-Man＝76.3∶8.3∶15.4	－	－	38
		AmF2	Fuc-Gal-Man＝80.6∶8.8∶10.6	－	－	38
		AmF3	Fuc-Gal-Xyl=47.5∶47.3∶5.2	Fuc-(1→2)-Gal-6-SO_3^-、Fuc-4-SO_3-(1→6)-Gal、Gal-(1→2)-Gal-2-SO_3^-、Gal-4-SO_3^-(1→6)-Gal、Gal-4-SO_3-(1→3)-Fuc-(1→3)-Fuc、Fuc-4-SO_3^-(1→、→6)-Gal-(1→4)-Gal、Gal-(1→4)-Gal-(1→3)-Fuc、Gal-2-SO_3^-(1→4)-Gal-(1→4)-Gal	→3)-*L*-Fuc*p*-(2,4-SO_3^-)-(1→	38
	Cystoseira compressa	CCF	Fuc-Gal-Glu-Xyl-Glu acid＝28.39∶11.03∶3.49∶2.04∶1	→3)-α-*L*-Fuc*p*(1→、→4)-α-*L*-Fuc*p*-(1	α-(1→4)-*L*-Fuc*p*、α-(1→3)-*L*-Fuc*p*、α-*L*-Fuc*p*、β-*D*-Gal*p*、β-*D*-Gal*p*-(1→3)-α-*L*-Fuc*p*、β-*D*-Gal*p*-(1→4)-α-*L*-Fuc*p*	16
	Dictyopteris divaricata	DDSP	Fuc-Xyl-Man-Glu-Gal＝4.45∶2.74∶1.00∶2.94∶1.35	－	－	17
	Codium fragile	CFSP	半乳吡喃糖、*D*-葡萄糖	－	－	17
	Sargassum wightii	SWP1	半乳呋喃糖、阿拉伯糖	－	－	18
		SWP2	－	－	－	18

或凋亡停止，而过高水平的 ROS 可攻击组织[43]。天然多糖是一种很有前途的抗氧化剂来源，具有一定的抗氧化和抗衰老活性。

多糖的抗氧化活性主要来自多糖分子链的递氢能力，其分子中羟基的数目和糖蛋白复合物含量起到关键性作用[44]。海洋植物多糖已被证明在体外作

为自由基保护剂在防止生物体氧化损伤方面发挥重要作用[45]。Hentati 等[16]从突尼斯褐藻囊藻中提取纯化出一种褐藻胶 CCF 和一种海藻酸钠 CCSA，这 2 种多糖通过亚铁离子螯合、铁离子还原和清除 DPPH 自由基等方式表现出有效的抗氧化活性，说明其作为天然添加剂的潜力。Souza 等[22]从红藻 *Gracilaria birdiae*（Gb）中分离得到一种硫酸多糖，单糖组成以半乳糖为主，结果发现，Gb 可有效清除 DPPH 自由基。

2.2 免疫调节作用

免疫系统在抵御病原体入侵和保持人体健康方面发挥着重要作用[46]。免疫刺激被认为是机体预防感染、炎症性疾病和癌症的重要防御策略之一。多糖主要通过 2 种途径调节免疫功能：一是直接杀死癌细胞，二是增强免疫系统，如增强巨噬细胞和 T 淋巴细胞的活性。多糖能够诱导免疫因子的产生，从而增强机体的免疫功能[47]。天然多糖的免疫调节作用成为研究的热点。一般认为，多糖保护细胞的主要机制是通过激活宿主的免疫反应[48]。其中一些多糖已显示出对免疫系统的多种药理作用。例如，Fang 等[13]从海带中分离纯化获得 1 种由阿拉伯糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成的新型水溶性均一多糖 LJP-31，相对分子质量为 2.24×10^6，实验发现 LJP-31 可增强 NO、肿瘤坏死因子-α（tumor necrosis factor-α，TNF-α）、白细胞介素-1β（interleukin-1β，IL-1β）、IL-6 和 IL-10 的分泌和表达，对巨噬细胞表现出明显的刺激作用。蛋白质免疫印迹、流式细胞术和共聚焦激光扫描显微镜分析结果提示 LJP-31 可能通过酪氨酸激酶（mitogen-activated protein kinase，MAPK）和核因子-κB（nuclear factor-κB，NF-κB）信号通路的 Toll 样受体 4（Toll-like receptor 4，TLR4）激活发挥其免疫刺激作用。Cui 等[17]从海藻 *Dictyopteris divaricate* (Okam.) Okamura 中分离出一种硫酸多糖 DDSP，主要有由岩藻糖、木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成，该多糖具有刺激 RAW264.7 细胞免疫应答的潜力，可作为功能性食品的天然成分。植物源性多糖是一种有效的免疫调节物质，可以直接激活巨噬细胞、T 细胞或 B 淋巴细胞、自然杀伤细胞以及补体的免疫功能。另一方面，通过促进细胞因子的产生，从而实现对免疫系统多途径、多层次的调节作用[49]。

2.3 抗肿瘤活性

癌症是目前最严重的疾病之一，是全球高发病率和高死亡率的主要原因[50]。癌症是涉及细胞生长失控的广泛疾病，因此难以治愈。化学疗法和放射疗法是众所周知的肿瘤主要治疗方法，但是由于其具有多种局限性，并且应用受到肿瘤细胞耐药性的增长和严重的不良作用的限制[51]。因此，寻找具有低毒、高效、不良反应少的新型抗肿瘤药物至关重要。近年来，通过细胞毒性或免疫调节机制开发具有抗癌特性的天然药物引起了广泛关注[52]。多糖的抗肿瘤作用机制在于抑制肿瘤细胞增殖和诱导肿瘤细胞凋亡。同时，其能激活免疫系统杀死肿瘤细胞[26,53]。最近的研究结果表明，植物多糖因其具有抗癌活性而备受研究者的青睐[54-56]。Vaikundamoorthy 等[18]从褐藻中分离纯化出 1 种褐藻 *Sargassum wightii* 多糖 SWP，使用 DEAE-52 纤维素和 Sephadex G-100 柱色谱从粗多糖中分离并纯化了 2 个多糖组分 SWP1 和 SWP2，并研究其对人乳腺癌细胞的抗癌活性。结果发现，该多糖以剂量相关性方式显著降低乳腺癌细胞（MCF7 和 MDA-MB-231）的增殖；此外，还可通过增加 ROS 的产生、切割线粒体膜、减轻细胞核损伤和增加半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶-3（cysteinasparate protease，Caspase-3）/9 的酶活性而诱导乳腺癌细胞凋亡。提示该多糖可能是天然抗乳腺癌剂的新来源，在保健品和药物的应用中具有潜在价值。Ghannam 等[20]以乳头凹顶藻为原料分离出了 3 种水溶性硫酸多糖 LP-W1、LP-W2 和 LP-W3，并对其在人乳腺癌细胞株 MCF-7 上的化学特性和生物学活性进行了研究。结果表明，LP-W2 和 LP-W3 对 MCF-7 细胞的存活有明显的抑制作用，且呈剂量相关性。乳头状乳杆菌的生物学效应表明，其可能是乳腺癌防治的一个有前途的候选药物。在过去的 10 年中，褐藻作为海藻多糖的主要来源，因其所含多糖具有多种结构和生物活性受到了广泛的关注。Vishchuk 等[15]从褐藻 *Saccharina japonica* 和 *Undaria pinnatifida* 中分离出了 7 种硫酸化多糖，并测试了它们对人乳腺癌 T-47D 和黑色素瘤 SK-MEL-28 细胞系的抗肿瘤活性，部分多糖以剂量相关的方式明显抑制乳腺癌和黑色素瘤细胞系的增殖和集落形成。这些结果表明，褐藻硫酸多糖可能是治疗癌症的潜在功能因子。陈健等[56]研究了海藻糖对骨肉瘤术后患者的抗肿瘤作用，发现海藻糖在体外对骨肉瘤的生长具有明显的抑制作用，并且可以通过增加血清超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）来改善骨肉瘤患者的

抗氧化性能和谷胱甘肽（glutathione，GSH）水平，并降低血清丙氨酸氨基转移酶（alanine aminotransferase，ALT）和天冬氨酸氨基转移酶（aspartate aminotransferase，AST）水平。不少研究结果提示，可以通过硫酸化修饰来改善多糖的理化性质，从而提高多糖的抗肿瘤活性[57-58]。随着现代制药技术的发展，可通过对海藻多糖进行结构修饰或者使其降解为活性低聚糖，从而发挥更大的药用价值，也将为癌症的预防和治疗提供新的思路。

2.4 抗凝血活性

凝血是生理止血的重要组成部分，其本质是血浆中可溶性的纤维蛋白原变成不溶性纤维蛋白的过程。凝血大致可分为凝血酶原激活剂的形成、凝血酶原向凝血酶的转化和纤维蛋白原向纤维蛋白的转化 3 个阶段。抗凝剂能预防血栓形成，维持脑血栓、肺栓塞和脑卒中患者的健康。目前，脑卒中、静脉血栓形成和肺栓塞的传统疗法通常具有不良反应，如出血和血小板减少症[59-60]。抗凝血活性是越来越受到更多关注的特殊生物活性[61]。Byankina 等[21]通过水浴浸提法从 1 种红藻 *Tichocarpus crinitus* 中分离得到 1 种硫酸化多糖 HT，通过纤维蛋白凝结和胶原蛋白诱导的血小板聚集测定结果显示，HT 具有较高的抗凝和抗血小板活性，该活性可能与分子结构的硫酸化度有关。Li 等[27]采用沸水从绿藻 *Monostroma angicava* 中提取出 1 种具有抗凝血活性的多糖 PF2，通过阴离子交换和尺寸排阻色谱法进一步纯化，结构分析显示 PF2 是 1 种新型的硫酸鼠李聚糖，相对分子质量约为 8.81×10^4，活性实验表明 PF2 介导的抗凝血活性机制主要归因于肝素辅因子 II 对凝血酶的强增效作用，同时也表现出对抗凝血酶依赖性凝血酶或 Xa 因子具有较弱的抑制作用。Ciancia 等[29]从绿藻中获得的多糖（水提取物）具有双重止血作用，研究结果显示，多糖可防止血液凝结，也会引起血小板聚集。来自 *Codium vermilara* (Sur.) Hariot. 的多糖抗凝血活性和血小板凝集性较高，其硫酸化程度和阿拉伯糖含量也较高。

2.5 肾脏保护作用

急性肾损伤（acute kidney injury，AKI）是一种肾脏疾病，其特点是肾功能在数小时或数天内突然恶化，伴有肾小球滤过率下降，尿量和肾溶质排泄变化[62]。根据国际肾脏病学会的报告，AKI 的病例每年达到 1330 万，全世界每年有 170 万人死于该病[63]。据报道，AKI 与慢性肾脏疾病、肾衰竭和心血管事件的发生和发展有直接关系[64]。近年来，一些研究发现海带多糖可以保护肾功能免受腺嘌呤损伤[65]。海带低相对分子质量硫酸多糖对甘油诱导的大鼠 AKI 具有肾脏保护作用[66]。为了探究高相对分子质量的海带多糖能否预防 AKI 的发生，Li 等[67]从海带 *Laminaria japonica* 中纯化获得均一组分海带多糖 LJP61A，探讨了 LJP61A 对小鼠 AKI 的影响及其机制，生化和病理分析结果表明，LJP61A 可明显抑制阿霉素诱导的 AKI 小鼠肾脏 p65、p38、细胞外信号调节激酶（extracellular signal-regulated kinase，ERK）1/2 和 c-jun 氨基端激酶（c-jun N-terminal kinase，JNK）的表达，转化生长因子-β1（transforming growth factor-β1，TGF-β1）和 Smad 3（small mothers against decapentaplegic 3）的蛋白和 mRNA 水平也有相似的变化，提示 LJP61A 可能通过调节 TGF-β1 介导的 Smad 3、MAPKs 和 NF-κB 信号通路来预防 AKI。

3 结语与展望

近几十年来，国内外对海洋植物多糖的提取、分离、纯化、结构鉴定及药理作用进行了大量的研究。结果表明，不同提取、分离和纯化所得的多糖结构不同，其化学成分、结构和构象在很大程度上决定了多糖的生物活性。海洋植物多糖具有广泛的生物活性，如抗衰老、抗氧化、抗肿瘤、抗凝血、免疫调节及肾脏保护作用等，在保健食品、医药和化妆品行业具有很大的应用前景。

目前，由于海洋植物多糖成分和结构的复杂性，其类型、分子结构、作用机制、最佳用量和途径尚不完全清楚。一些学者对海洋植物多糖的结构特征与各种活性之间的构效关系进行了初步的讨论，大多数研究仅限于体外和动物实验，尚缺乏临床相关研究。因此，进一步探索海洋植物多糖的化学结构，深入研究其药理活性，找出其物质基础、抗病机制和潜在的保健功能，仍是未来研究的方向。同时，提高海洋植物多糖的临床应用也是一个重要的研究方向。此外，对多糖进行分子修饰可以改变多糖的结构和一些理化性质，从而提高多糖的活性。因此，海洋植物多糖的分子修饰是研究其结构与活性之间构效关系的一个新方向，并且可以通过修饰海洋植物多糖的结构来增强其免疫和抗肿瘤活性。随着人们对海洋植物多糖化学结构、药理作用及作用机制研究的深入，来源于海洋植物的多糖也终将为人类的健康做出巨大贡献。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 谢明勇, 殷军艺, 聂少平. 天然产物来源多糖结构解析研究进展 [J]. 中国食品学报, 2017, 17(3): 1-19.

[2] Singh V, Kumar P, Sanghi R. Use of microwave irradiation in the grafting modification of the polysaccharides - A review [J]. *Prog Polym Sci*, 2012, 37(2): 340-364.

[3] 谢溢坤, 张静, 余茜, 等. 灵芝多糖类成分及其生物活性研究进展 [J]. 中草药, 2021, 52(17): 5414-5429.

[4] 陈丽叶, 常希光, 冯晓光, 等. 山药多糖的体外抗氧化活性 [J]. 食品科学, 2021, 42(19): 122-128.

[5] 凌娜, 李玮璐, 汲晨锋, 等. 海藻多糖的化学结构及生物活性研究新进展 [J]. 中国海洋药物, 2021, 40(1): 69-78.

[6] Pomin V H. Fucanomics and galactanomics: Marine distribution, medicinal impact, conceptions, and challenges [J]. *Mar Drugs*, 2012, 10(4): 793-811.

[7] Senni K, Pereira J, Gueniche F, *et al*. Marine polysaccharides: A source of bioactive molecules for cell therapy and tissue engineering [J]. *Mar Drugs*, 2011, 9(9): 1664-1681.

[8] Otterlei M, Ostgaard K, Skjåk-Braek G, *et al*. Induction of cytokine production from human monocytes stimulated with alginate [J]. *J Immunother*, 1991, 10(4): 286-291.

[9] Son E H, Moon E Y, Rhee D K, *et al*. Stimulation of various functions in murine peritoneal macrophages by high mannuronic acid-containing alginate (HMA) exposure *in vivo* [J]. *Int Immunopharmacol*, 2001, 1(1): 147-154.

[10] Kusaykin M, Bakunina I, Sova V, *et al*. Structure, biological activity, and enzymatic transformation of fucoidans from the brown seaweeds [J]. *Biotechnol J*, 2008, 3(7): 904-915.

[11] Luo M, Shao B, Nie W, *et al*. Antitumor and adjuvant activity of λ-carrageenan by stimulating immune response in cancer immunotherapy [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 11062.

[12] Peng F H, Zha X Q, Cui S H, *et al*. Purification, structure features and anti-atherosclerosis activity of a *Laminaria japonica* polysaccharide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2015, 81: 926-935.

[13] Fang Q, Wang J F, Zha X Q, *et al*. Immunomodulatory activity on macrophage of a purified polysaccharide extracted from *Laminaria japonica* [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 134: 66-73.

[14] Zha X Q, Xue L, Zhang H L, *et al*. Molecular mechanism of a new *Laminaria Japonica* polysaccharide on the suppression of macrophage foam cell formation via regulating cellular lipid metabolism and suppressing cellular inflammation [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2015, 59(10): 2008-2021.

[15] Vishchuk O S, Ermakova S P, Zvyagintseva T N. Sulfated polysaccharides from brown seaweeds *Saccharina japonica* and *Undaria pinnatifida*: Isolation, structural characteristics, and antitumor activity [J]. *Carbohydr Res*, 2011, 346(17): 2769-2776.

[16] Hentati F, Delattre C, Ursu A V, *et al*. Structural characterization and antioxidant activity of water-soluble polysaccharides from the Tunisian brown seaweed *Cystoseira compressa* [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 198: 589-600.

[17] Cui Y X, Liu X, Li S F, *et al*. Extraction, characterization and biological activity of sulfated polysaccharides from seaweed *Dictyopteris divaricata* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 117: 256-263.

[18] Vaikundamoorthy R, Krishnamoorthy V, Vilwanathan R, *et al*. Structural characterization and anticancer activity (MCF_7 and MDA-MB-231) of polysaccharides fractionated from brown seaweed *Sargassum wightii* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 111: 1229-1237.

[19] Cui M X, Wu J W, Wang S Y, *et al*. Characterization and anti-inflammatory effects of sulfated polysaccharide from the red seaweed *Gelidium pacificum* Okamura [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 129: 377-385.

[20] Ghannam A, Murad H, Jazzara M, *et al*. Isolation, Structural characterization, and antiproliferative activity of phycocolloids from the red seaweed *Laurencia papillosa* on MCF-7 human breast cancer cells [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 108: 916-926.

[21] Byankina Barabanova A O, Sokolova E V, Anastyuk S D, *et al*. Polysaccharide structure of tetrasporic red seaweed *Tichocarpus crinitus* [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 98(1): 26-35.

[22] Souza B W S, Cerqueira M A, Bourbon A I, *et al*. Chemical characterization and antioxidant activity of sulfated polysaccharide from the red seaweed *Gracilaria birdiae* [J]. *Food Hydrocoll*, 2012, 27(2): 287-292.

[23] Jiang Z D, He P P, Wu L, *et al*. Structural characterization and pro-angiogenic property of a polysaccharide isolated from red seaweed *Bangia fuscopurpurea* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 181: 705-717.

[24] Canelón D J, Ciancia M, Suárez A I, *et al*. Structure of highly substituted agarans from the red seaweeds *Laurencia obtusa* and *Laurencia filiformis* [J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 101: 705-713.

[25] Gómez-Ordóñez E, Jiménez-Escrig A, Rupérez P. Bioactivity of sulfated polysaccharides from the edible red

seaweed *Mastocarpus stellatus* [J]. *Bioact Carbohydr Diet Fibre*, 2014, 3(1): 29-40.

[26] Pangestuti R, Kurnianto D. Green seaweeds-derived polysaccharides ulvan: Occurrence, medicinal value and potential applications [A] // *Seaweed Polysaccharides* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2017: 205-221.

[27] Li N, Liu X, He X X, *et al*. Structure and anticoagulant property of a sulfated polysaccharide isolated from the green seaweed *Monostroma angicava* [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 159: 195-206.

[28] Kolsi R B A, Fakhfakh J, Sassi S, *et al*. Physico-chemical characterization and beneficial effects of seaweed sulfated polysaccharide against oxydatif and cellular damages caused by alloxan in diabetic rats [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 117: 407-417.

[29] Ciancia M, Quintana I, Vizcargüénaga M I, *et al*. Polysaccharides from the green seaweeds *Codium fragile* and *C. vermilara* with controversial effects on hemostasis [J]. *Int J Biol Macromol*, 2007, 41(5): 641-649.

[30] Arata P X, Quintana I, Canelón D J, *et al*. Chemical structure and anticoagulant activity of highly pyruvylated sulfated galactans from tropical green seaweeds of the order Bryopsidales [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 122: 376-386.

[31] Shao P, Chen M, Pei Y P, *et al*. In intro antioxidant activities of different sulfated polysaccharides from chlorophytan seaweeds *Ulva fasciata* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2013, 59: 295-300.

[32] Maciel J S, Chaves L S, Souza B W S, *et al*. Structural characterization of cold extracted fraction of soluble sulfated polysaccharide from red seaweed *Gracilaria birdiae* [J]. *Carbohydr Polym*, 2008, 71(4): 559-565.

[33] Barros F C N, da Silva D C, Sombra V G, *et al*. Structural characterization of polysaccharide obtained from red seaweed *Gracilaria caudata* (J. Agardh) [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 92(1): 598-603.

[34] Seedevi P, Moovendhan M, Viramani S, *et al*. Bioactive potential and structural chracterization of sulfated polysaccharide from seaweed (*Gracilaria corticata*) [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 155: 516-524.

[35] Gómez-Ordóñez E, Jiménez-Escrig A, Rupérez P. Bioactivity of sulfated polysaccharides from the edible red seaweed *Mastocarpus stellatus* [J]. *Bioact Carbohydr Diet Fibre*, 2014, 3(1): 29-40.

[36] Tian H, Yin X Q, Zeng Q H, *et al*. Isolation, structure, and surfactant properties of polysaccharides from *Ulva lactuca* L. from South China Sea [J]. *Int J Biol Macromol*, 2015, 79: 577-582.

[37] Thanh T T T, Quach T M T, Nguyen T N, *et al*. Structure and cytotoxic activity of ulvan extracted from green seaweed *Ulva lactuca* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 93: 695-702.

[38] Usoltseva Menshova R V, Anastyuk S D, Shevchenko N M, *et al*. The comparison of structure and anticancer activity *in vitro* of polysaccharides from brown algae *Alaria marginata* and *A. angusta* [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 153: 258-265.

[39] Yu Y, Shen M Y, Song Q Q, *et al*. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 183: 91-101.

[40] Pahlavani M, Harris M. Effect of *in vitro* generation of oxygen free radicals on T cell function in young and old rats [J]. *Free Radic Biol Med*, 1998, 25(8): 903-913.

[41] Xie J H, Xie M Y, Nie S P, *et al*. Isolation, chemical composition and antioxidant activities of a water-soluble polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja [J]. *Food Chem*, 2010, 119(4): 1626-1632.

[42] Chen Y, Yao F K, Ming K, *et al*. Polysaccharides from traditional Chinese medicines: Extraction, purification, modification, and biological activity [J]. *Molecules*, 2016, 21(12): 1705.

[43] Ghosh J, Myers C E. Inhibition of arachidonate 5-lipoxygenase triggers massive apoptosis in human prostate cancer cells [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1998, 95(22): 13182-13187.

[44] Wang J Q, Hu S Z, Nie S P, *et al*. Reviews on mechanisms of *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides [J]. *Oxidative Med Cell Longev*, 2016, 2016: 5692852.

[45] Diaz A C, Espino M L, Arzoz N S, *et al*. Free radical scavenging activity of extracts from seaweeds *Macrocystis pyrifera* and *Undaria pinnatifida*: Applications as functional food in the diet of prawn *Artemesia longinaris* [J]. *Lajar*, 2017, 45(1): 104-112.

[46] Zhao X N, Sun W J, Zhang S J, *et al*. The immune adjuvant response of polysaccharides from *Atractylodis macrocephalae* Koidz in chickens vaccinated against Newcastle disease (ND) [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 141: 190-196.

[47] Wang Y F, Peng Y H, Wei X L, *et al*. Sulfation of tea polysaccharides: Synthesis, characterization and hypoglycemic activity [J]. *Int J Biol Macromol*, 2010, 46(2): 270-274.

[48] Li Q M, Wang J F, Zha X Q, *et al*. Structural characterization and immunomodulatory activity of a new polysaccharide from jellyfish [J]. *Carbohydr Polym*, 2017,

159: 188-194.

[49] Yu Y, Shen M Y, Song Q Q, *et al*. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 183: 91-101.

[50] Li S H, Gao A, Dong S, *et al*. Purification, antitumor and immunomodulatory activity of polysaccharides from soybean residue fermented with *Morchella esculenta* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 96: 26-34.

[51] Wang Z H, Wu B J, Zhang X H, *et al*. Purification of a polysaccharide from *Boschniakia rossica* and its synergistic antitumor effect combined with 5-fluorouracil [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 89(1): 31-35.

[52] Choromanska A, Kulbacka J, Rembialkowska N, *et al*. Anticancer properties of low molecular weight oat beta-glucan-An *in vitro* study [J]. *Int J Biol Macromol*, 2015, 80: 23-28.

[53] Zong A Z, Cao H Z, Wang F S. Anticancer polysaccharides from natural resources: A review of recent research [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 90(4): 1395-1410.

[54] Yu Q, Nie S P, Wang J Q, *et al*. Toll-like receptor 4 mediates the antitumor host response induced by *Ganoderma atrum* polysaccharide [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(2): 517-525.

[55] Fan S R, Zhang J F, Nie W J, *et al*. Antitumor effects of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* against human hepatocellular carcinoma HepG2 cells [J]. *Food Chem Toxicol*, 2017, 102: 53-62.

[56] 陈健, 申超群, 贺婷, 等. 正红菇多糖的抗癌和免疫调节活性研究 [J]. 现代食品科技, 2016, 32(11): 16-21.

[57] Jiang J, Meng F Y, He Z, *et al*. Sulfated modification of longan polysaccharide and its immunomodulatory and antitumor activity *in vitro* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2014, 67: 323-329.

[58] Wang L, Li X X, Chen Z X. Sulfated modification of the polysaccharides obtained from defatted rice bran and their antitumor activities [J]. *Int J Biol Macromol*, 2009, 44(2): 211-214.

[59] Rodrigues J A G, de Sousa Oliveira Vanderlei E, Bessa É F, *et al*. Anticoagulant activity of a sulfated polysaccharide isolated from the green seaweed *Caulerpa cupressoides* [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 2011, 54(4): 691-700.

[60] Qi X H, Mao W J, Gao Y, *et al*. Chemical characteristic of an anticoagulant-active sulfated polysaccharide from *Enteromorpha clathrata* [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 90(4): 1804-1810.

[61] 陈观兰, 陈菁, 陈建平, 等. 不同分子质量海蚌肝素结构表征及抗凝血与纤溶活性的研究 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(17): 119-125.

[62] Chu R, Li C, Wang S X, *et al*. Assessment of KDIGO definitions in patients with histopathologic evidence of acute renal disease [J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 2014, 9(7): 1175-1182.

[63] Floege J, Mak R H, Molitoris B A, *et al*. Nephrology research: The past, present and future [J]. *Nat Rev Nephrol*, 2015, 11(11): 677-687.

[64] 代洪妍, 向述天, 邵举薇, 等. 功能 MRI 在评价对比剂诱导急性肾损伤中的研究进展 [J]. 国际医学放射学杂志, 2021, 44(5): 579-583.

[65] Long M, Li Q M, Fang Q, *et al*. Renoprotective effect of *Laminaria japonica* polysaccharide in adenine-induced chronic renal failure [J]. *Molecules*, 2019, 24(8): 1491.

[66] Li X P, Wang J, Zhang H, *et al*. Renoprotective effect of low-molecular-weight sulfated polysaccharide from the seaweed *Laminaria japonica* on glycerol-induced acute kidney injury in rats [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 95: 132-137.

[67] Li, X Y, Chen, H R, Zha, X Q, *et al*. Prevention and possible mechanism of a purified *Laminaria japonica* polysaccharide on adriamycin-induced acute kidney injury in mice [J]. *Inter J Bioll Macromol*, 2020, 148: 591-600.

[责任编辑 潘明佳]