

羊栖菜多糖的提取纯化及功能活性研究进展

梁美娜¹, 吴明江¹, 陈 胜², 苏来金^{1,3*}

(1. 温州大学生命与环境科学学院, 浙江省水环境与海洋生物资源保护重点实验室, 温州 325035;
2. 浙江金海蕴生物股份有限公司, 温州 325700; 3. 温州市特色食品资源工程技术研究中心, 温州 325006)

摘 要: 羊栖菜是一种重要的经济藻类, 主要分布在我国浙江、福建等地。羊栖菜含有丰富的多糖, 主要包括褐藻胶、褐藻多糖硫酸酯以及褐藻淀粉等, 是一种可溶于水的酸性多糖, 具有良好生物活性。羊栖菜多糖的制备可以通过水提醇沉、酸提、酶提及超声波辅助等提取方法获得, 然而不同提取方法制备的多糖得率、结构及功能活性不尽相同。目前对羊栖菜多糖的药理活性研究主要集中在抗肿瘤、抗氧化、降血糖、抗衰老、调节肠道菌群、抗病毒等方面, 提示羊栖菜多糖在医药、功能食品领域有着良好的前景。本文就国内外羊栖菜多糖的提取纯化及功能活性研究进行了系统的归纳和总结, 旨在为羊栖菜多糖的靶向功能提取纯化研究提供参考。

关键词: 羊栖菜多糖; 分离纯化; 功能活性

Research progress on extraction, purification and functional activity of *Sargassum fusiforme* polysaccharides

LIANG Mei-Na¹, WU Ming-Jiang¹, CHEN Sheng², SU Lai-Jin^{1,3*}

(1. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Zhejiang Provincial Key Laboratory for Water Environment and Marine Biological Resources Protection, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. Zhejiang Jinhaiyun Biological Co., Ltd., Wenzhou 325700, China; 3. Wenzhou Characteristic Food Resources Engineering and Technology Research Center, Wenzhou 325006, China)

ABSTRACT: *Sargassum fusiforme* is an important economic algae, mainly distributed in Zhejiang, Fujian and other places. *Sargassum fusiforme* contains more polysaccharides, which mainly include alginate, alginate polysaccharide sulfate and alginate starch. It is an acidic polysaccharide soluble in water and has good biological activity. The preparation of polysaccharides from *Sargassum fusiforme* can be obtained by water extraction and alcohol precipitation, acid extraction, enzyme extraction and ultrasonic-assisted extraction. However, the yield, structure and functional activity of polysaccharides prepared by different extraction methods are different. At present, people mainly studied the anti-tumor, anti-oxidation, hypoglycemic, anti-aging, regulating intestinal flora, antiviral and other pharmacological activities of polysaccharides from *Sargassum fusiforme*, indicating that polysaccharides from *Sargassum fusiforme* have good prospects in the field of medicine and functional food. Therefore, this paper systematically summarized the extraction, purification and functional activities of polysaccharides from *Sargassum*

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876197)、温州市重点实验室(工程中心)建设项目(ZD202003)、温州市科技特派员专项项目(2021100617)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41876197), and Key Laboratory Construction Project of Wenzhou (ZD202003), and the Project of Wenzhou Scientific Special Commissioner (2021100617)

*通信作者: 苏来金, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。E-mail: sulaijin@163.com

*Corresponding author: SU Lai-Jin, Ph.D, Associate Professor, Wenzhou University, No.70, Chashan Road, Ouhai District, Wenzhou 325035, China. E-mail: sulaijin@163.com

fusiforme in China and abroad, aiming to provide reference for the extraction and purification of targeted functions of polysaccharides from *Sargassum fusiforme*.

KEY WORDS: polysaccharides from *Sargassum fusiforme*; separation and purification; functional activity

0 引言

羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)是一种藻类植物,又名玉海草、六角菜、药茶等,隶属褐藻门墨角藻目马尾藻科。藻的整体为黄褐色,包含茎、假根、气囊和叶片4部分,一般株高30~50 cm,广泛分布于中国、韩国、日本沿海等地,是一种重要的经济藻类^[1],具有较大地开发利用的价值。在我国浙江洞头等地对羊栖菜进行了大量的人工养殖,并将其干制品出口日本,成为浙江洞头的一个特色产业。

羊栖菜营养成分丰富,鲜羊栖菜中含水量约为83.16%,在干基中成分主要包括蛋白质、碳水化合物、灰分以及纤维等,分别占15%、46%、30%、7%,是一种脂肪和热量较低天然食品,具有较高营养价值,既可以做蔬菜,也可以入药。近年来研究表明,羊栖菜多糖主要包括褐藻胶、褐藻多糖硫酸酯以及褐藻淀粉等,具有良好的抗肿瘤^[2]、抗病毒^[3]、抗氧化^[4]、调节血糖^[5]、提高记忆力^[6]、抗衰老^[7]等多种生物活性。褐藻胶,是细胞壁的主要组成物质,在羊栖菜中含量占11.1%~28.4%,主要是以 β -1,4键相结合的D-甘露糖醛酸聚合物,常用于调节人体糖类和脂类的代谢,对于高血糖高血脂的人群有一定疗效^[8];褐藻多糖硫酸酯是一种天然硫酸化多糖,存在于褐藻的间质组织或黏液基质中,主要由岩藻糖、糖醛酸以及甘露糖等组成,含量一般在3.7%,其分子量随提取方法不同变化较大,一般为24~299 kDa,有研究证实其硫酸根含量大小与降血糖、抗氧化以及抗病毒等生物活性相关^[8];褐藻淀粉的含量较低,是一种水溶性D-葡聚糖,具有减少人体对脂肪的吸收、增强人体免疫力的功效^[8]。

由于羊栖菜多糖具有良好的生物活性,因此其在治疗患有肺癌、膀胱癌等疾病的小鼠上显示出了显著效果,为人类治疗癌症等疾病提供了一种新的天然产物^[9],成为医药领域开发研究的一个热点。目前,羊栖菜多糖提取方法有水提醇沉法、酸提法、酶提取法及超声波辅助提取等方法,不同提取纯化方法和多糖的结构功能密切相关。本文对国内外羊栖菜多糖的提取纯化及功能活性研究进行了系统地归纳和总结,旨在为羊栖菜多糖的靶向功能提取纯化研究提供参考。

2 羊栖菜多糖的提取分离

羊栖菜富含对人体有益的蛋白质和膳食纤维等,是一种既可以食用又可以药用的植物,对人体的健康产生有益的作用^[10]。据报道,从羊栖菜中提取的多糖具有多种生

物活性^[11],由于该多糖的组成成分复杂,同时不同的提取与纯化工艺导致了多种多样的药理活性^[12],因此羊栖菜多糖的提取分离工艺的选择具有重要意义。

2.1 羊栖菜多糖的提取

目前植物多糖的提取方法主要有水提法、酶解法、酸碱式浸提法、微波辅助提取法、超声辅助提取法^[13-14]等。采用不同的方法提取羊栖菜多糖得率不同,根据文献报道,其中水提法多糖得率约为4%~10%,酶法粗糖得率约为8%~19%,超声以及微波辅助提取羊栖菜粗糖得率约为6%~20%,同时,由于存在羊栖菜海域的差异性以及多糖提取过程中条件的不同,导致不同方法以及同种方法之间粗糖分子结构以及分子量分布都有较大差异,但提取主要成分仍是岩藻多糖,分子量大约在30~300 kDa之间。

2.1.1 水提法

水提醇沉法原理是利用多糖溶解于水而不溶乙醇来进行提取^[15],用该方法得到的羊栖菜多糖提取率较低,但能保持褐藻多糖硫酸酯等大分子的结构,具有较好的抗氧化活性。参照季德胜^[16]方法,并做修改,即将一定量的羊栖菜粉末先在乙醇中脱脂^[17],之后加入50倍的水进行水煮,然后进行醇沉干燥。例如何丹等^[18]用冷水浸提和热水煮提羊栖菜多糖,粗糖得率分别为6.6%与1.8%,所得多糖的单糖组成基本相同,但冷水提取的多糖中的糖醛酸含量较高,具有较高的清除1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)活性,而热水提取的多糖则是硫酸根含量高,清除羟自由基效果更好。水提法是一种传统的提取多糖的方法,与其他方法相比,其操作简单、所需成本不高,但需要的时间长、提取率也比较低,且提取温度对多糖结构活性也有影响。因此,冷提取羊栖菜多糖方法可能是一种更理想的羊栖菜多糖制备方法。宋彦显等^[19]直接利用乙醇从海藻中提取多糖,多糖提取率可达6%,且具有良好的抑制 α -淀粉酶活性,为冷提取羊栖菜多糖提供了一种思路。

2.1.2 酶提法

酶解法是一种利用酶降解褐藻细胞壁,从而使得细胞内的多糖、蛋白等物质流出,进而提取多糖的方法。实验中最常用的酶是纤维素酶或者果胶酶。孔秋红等^[10]以羊栖菜为原料,分析了热水提取、超声辅助提取法和纤维素酶解法所得多糖的理化性质,结果显示酶解法所得多糖的得率最高,为14.02%,3种多糖的平均分子量在200~245 ku之间,主要由岩藻糖、葡萄糖、半乳糖、甘露糖和木糖组成,岩藻糖和半乳糖是主要成分,其中酶解法得到

的多糖的单糖组成中葡萄糖的含量较其他 2 个多糖的高, 达到了 19.57%, 并且其促乳杆菌增殖作用效果最佳; 符颢瑜等^[20]利用酶解法提取羊栖菜多糖, 并对使用的纤维素酶的用量、时间和温度等条件进行了优化, 最终得到提取最佳条件, 即纤维素酶量为 20 U/g、温度为 80 °C、时间为 120 min 时, 羊栖菜多糖的提取率最高, 为 6.70%±0.30%, 较以往的酶提法与普通水提醇沉效果更佳。PEI 等^[21]在提取羊栖菜多糖时, 加入酶试剂和纤维素酶, 并用凝胶过滤色谱进行洗脱, 最后冻干得到 2 种同质多糖。与传统的水提法相比较, 其操作时间短、多糖得率高, 但由于生产过程中酶的成本较高, 因此该方法不适宜工业生产中大量羊栖菜多糖。

2.1.3 酸提法

稀酸或者稀碱法提取多糖是利用酸碱破坏藻类细胞壁进而使得胞内物质流出, 从而获得多糖的一种方法。酸碱式提取法与水提法类似, 只是在水煮时加入相应的酶或者是通过酸碱改变 pH 来提高羊栖菜多糖的提取率, 与水提法相比, 酸提法得到的羊栖菜多糖的褐藻多糖硫酸酯粘性和分子量均低于水提法, 但褐藻多糖硫酸酯得率高于水提法^[22]; 王勤等^[23]对水、酸提取和 CaCl₂ 浸提 3 种工艺条件分析比较羊栖菜多糖的提取, 对羊栖菜多糖提取率和多糖中岩藻糖所占的比例进行对比, 结果表明酸提效果最好可获多糖 39.3%, 且岩藻糖占多糖的 17.3%, 与其他 2 种糖相比有较好的抗氧化、降血糖等活性; 吴娟等^[24]利用稀酸提取羊栖菜多糖, 多糖的得率比水提醇沉法高, 多糖的抗氧化活性也较好。同时, 还通过不同浓度的乙醇沉淀羊栖菜多糖证明不同浓度的乙醇醇沉会影响羊栖菜多糖的结构。但稀酸或稀碱提取多糖时 pH 难以调控, 易破坏多糖结构、降低多糖提取率, 适合少量羊栖菜多糖的提取, 在工业生产中, 大量提取可能会破坏多糖的生物活性。

2.1.4 辅助提取法

近些年来, 微波技术被用来提取羊栖菜多糖。其中, 使用微波的水提取方法有利于通过微波加热破坏羊栖菜的细胞壁并促进多糖从细胞内的流出。与传统的水提取相比, 它具有高效、安全、快速、提取率高等特点^[25]。刘洪超等^[26]用响应面法, 优化该藻类多糖的提取工艺, 并采用超滤膜分离多糖, 发现当微波功率为 385 W 时, 液料比 34 (mL/g)、微波时间 8 min、水提取温度 95 °C 和提取时间 2.1 h, 在此条件下, 羊栖菜多糖的得率为 11.51%±0.12%。

超声辅助提取多糖是利用超声波破坏羊栖菜细胞壁, 进而提高多糖提取率的一种方法, 与水提、酶提和酸提相比, 它降低了提取温度, 缩短了提取的时间, 并确保了提取物活性。LI 等^[27]将含有 2000 mL 纯水的羊栖菜粉末 (100 g) 在 400 W 的超声波功率下处理 30 min, 随后在 90 °C 的温度下 2 h, 提取后, 离心获得上清液, 随后进行超滤浓缩, 并在 4 °C 下保持 24 h, 然后再离心、超滤、除蛋白、

冷冻干燥, 最终多糖提取率为 14.53%±0.98%。WANG 等^[28]发现, 超声功率为 100~500 W 时, 羊栖菜多糖的提取率先增加后降低, 在 300 W 时达到最大的 23.9%。如果超声功率一定时, 则超声时间对羊栖菜多糖提取率的影响也倾向于首先增加后减少, 并且如果超声时间为 20 min 时, 则最大提取率为 23.4%。

上述 2 种提取方法与水提多糖法相比, 都节省了时间, 提高了多糖提取率, 但是用微波与超声提取羊栖菜多糖时, 需要严格控制提取条件, 进而避免多糖结构的破坏, 从而影响羊栖菜多糖的得率。

2.2 羊栖菜多糖的分离纯化

通过上述步骤提取出的多糖成分较为复杂, 含有大量的蛋白与其他杂多糖, 因此可以通过纯化手段得到所需多糖^[29]。羊栖菜多糖的分离方法主要有柱层析法、沉淀法等^[30]。

2.2.1 柱层析法

柱层析法又称为色谱法, 是利用极性大的分子容易被吸附在固定相上, 极性小的分子不容易被固定来进行分离^[31]。经过脱色和脱蛋白处理后的羊栖菜多糖仍是混合物, 可以利用离子交换柱层析或者凝胶过滤柱层析进行分级。阴离子交换层析柱常用的填料是 DEAE-纤维素, 其原理是根据羊栖菜多糖与填料的吸附力不同, 通过调节洗脱剂的浓度, 实现分离的目的, 一般含有的酸性基团越多与 DEAE-纤维素的填料的吸附力越强; 凝胶过滤柱层析法又称分子筛过滤, 是根据多糖分子量的不同进行分离。小分子的多糖会先流出, 大分子的多糖最后流出, 实验中跟踪监测绘制洗脱曲线, 分管收集, 得到分子量均一的多糖片段。JIANG 等^[32]对酶降解羊栖菜多糖多糖进行了分离纯化, 主要采用 DEAE-52 柱层析法, 用不同浓度的 NaCl 和去离子水洗脱分离羊栖菜多糖, 共获得 4 种纯化组分, 其中组分 1 的糖醛酸含量最高, 而组分 4 的硫酸盐含量最高, 说明了羊栖菜多糖由多种成分组成, 并都含有糖醛酸与硫酸盐基团。

2.2.2 沉淀法

沉淀法是利用样品在液体中产生沉淀, 利用重力而进行固液分离的操作, 羊栖菜多糖可以通过乙醇、氯化钙等物质除去一些杂质。例如 ZHANG 等^[33]将羊栖菜进行脱脂水提后, 利用乙醇对浓缩液进行沉淀, 褐藻糖胶在乙醇浓度为 70%~80% 时容易析出, 而褐藻酸、褐藻淀粉在更低浓度的乙醇中容易析出。因此可以用 70%~80% 来分离纯化出褐藻多糖硫酸酯^[34]。脱蛋白的方法较多, 常用的脱蛋白的方法有 Savag 法、三氯乙酸法等。其中 Savag 法和三氯乙酸法都是利用蛋白质在溶剂中易变性析出的性质来去除蛋白质的, 但三氯乙酸法的作用条件剧烈, 可能使多糖结构遭到破坏, 而 Savag 法的作用条件相对温和, 对多糖的破坏性也较小, 因而广泛用于分离植物多糖, 是一种经典

且高效的脱蛋白质方法。WU等^[34-36]通过水提醇沉得到粗糖后,将粗糖溶解并与Sevage试剂(丁醇:氯仿, $V:V=1:4$)混合,用以除去蛋白质,检测发现蛋白含量低于0.7%。

2.2.3 膜滤法

膜滤法的原理是由于不同的滤膜具有不同的分子量截留孔径,将待分离样品在一定的操作压力下循环分离,从而达到目的分离效果^[26]。刘洪超等^[26]在采用响应面法优化微波提取羊栖菜多糖时,利用超滤膜对提取多糖进行了分离纯化,发现羊栖菜多糖分子量小于等于5000 u时,自由基清除能力最强。过菲等^[37]发现利用超滤技术可以脱去粗糖中的盐分,脱除率达到了99.9%,并且浓缩了羊栖菜多糖提取液,保留了粗糖中的主要成分褐藻酸与褐藻多糖硫酸酯。两种方法都表明了膜滤法可以用来除去羊栖菜多糖中的一些杂质,有利于多糖的进一步纯化。

综上所述,采用不同的方法提取羊栖菜多糖得率不同,其中水提法多糖得率约为6%~10%,酶法粗糖得率约为8%~15%,超声以及微波辅助提取羊栖菜粗糖得率约为8%~20%,表明与传统水提法相比,其他几种方法都提高了羊栖菜多糖的得率;除此之外,用不同的方法分离羊栖菜多糖,其在抗氧化、降血糖等生物活性也存在差异^[38],羊栖菜多糖的化学性质以及相关产品的开发以及生产尤为重要^[39],但由于目前分离纯化技术的限制,很难得到单一的羊栖菜多糖,因此想要深入了解羊栖菜多糖发挥生物活性的机制,需要进一步深入的研究。

3 羊栖菜多糖的功能活性研究

3.1 抗肿瘤活性

近年来的研究表明,癌症是一种严重的、威胁人类健康的,且导致人类死亡率较高的重要疾病^[40]。尽管人们一直在研发合成类的抗癌的药物,但由于其存在一些毒副作用,大大降低了他们的治疗效果。天然多糖因其丰富的生物活性而引起人们的广泛关注^[41],其中羊栖菜是一种天然的海藻植物,其主要成分包括蛋白质、多糖以及部分微量元素等,同时羊栖菜多糖还具有良好的抗肿瘤、调节免疫的活性^[42]。

有研究表明,羊栖菜多糖中褐藻多糖硫酸酯具有多种抗肿瘤生物活性,例如SONG等^[43]研究了羊栖菜岩藻多糖在治疗膀胱癌上的作用,利用酶解法并调节pH从羊栖菜中提取出含有岩藻糖的硫酸化多糖,让异种移植EJ肿瘤的小鼠每天按20~200 mg/kg口服,发现该多糖可以利用p21WAF1使得细胞周期G1期停滞,还通过抑制MMP-9的表达来抑制EJ细胞的迁移和侵袭进而抑制该癌细胞的增殖,并获得膀胱癌治疗的效果,说明羊栖菜中的硫酸化多糖在治疗膀胱癌上面具有一定发展潜力。已有报道称羊栖菜是治疗肺癌的潜在天然产物^[44],研究者将羊栖菜通过

阴离子交换色谱进行分离纯化^[45-47],最终得到3种多糖成分:HFSGF、HFSGF-S和HFSGF-L,其中HFSGF-S是一种硫酸化半乳糖-岩藻低聚物的混合物、HFSGF-L是一种硫酸化的半乳呋喃、HFSGF-H主要是由半乳糖和岩藻糖组成的多糖,研究者将A549细胞分别暴露于HFSGF-H和HFSGF-L中24 h和48 h,采用3-(4,5-二甲基噻唑-2-基)-2,5-二苯基四氮唑[3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl-2H-tetrazolium bromide, MTT]法测定细胞活力,评估了这3种多糖成分对肺癌A549细胞的抑制情况^[46],发现当HFSGF-H浓度为12 mg/mL,将肺癌A549细胞培养12 h和48 h后,HFSGF-H的抑制率达到50%,显著地抑制了肺癌细胞增殖,进而达到抗癌作用^[46]。鼻咽癌是颈部与头部出现鳞状细胞癌的一种疾病^[48],且鼻咽癌在东南亚以及中国南部地区患有鼻咽癌的概率较大^[49]。因此有研究通过建立小鼠鼻咽癌模型,研究羊栖菜硫酸化多糖对鼻咽癌细胞的抑制作用^[50],发现羊栖菜硫酸化多糖是通过提高鼻咽癌小鼠血清中一些细胞因子增强小鼠的免疫反应^[51],从而抑制了肿瘤细胞的生长,达到抗癌作用,由此可见,羊栖菜硫酸化多糖有可能会成为预防或者治疗鼻咽癌的候选药物^[52],说明羊栖菜多糖有很好的抗肿瘤效果,为治疗癌症提供了潜在天然产物。

3.2 抗氧化活性

自由基,是一个化合物的共价键断裂时形成的一个原子或一组未配对电子^[53]。有研究表明羊栖菜硫酸多糖在体内体外具有很好的抗氧化活性^[54]。例如王胜男等^[55]利用羊栖菜褐藻多糖硫酸酯,对AAPH诱导的斑马鱼氧化应激模型的保护作用进行研究,发现羊栖菜褐藻多糖硫酸酯对DPPH、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS]自由基清除的半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})值能够分别达到0.59、0.69 mg/mL,并证明了羊栖菜多糖对AAPH诱导的引起斑马鱼的氧化损伤起到了一定的保护作用;王雪等^[56]对比研究了3种海藻多糖的抗氧化活性,发现羊栖菜粗多糖含量最高且对羟自由基、DPPH等的清除活性呈现浓度依赖性。刘剑等^[11]利用综合加权评分法考察了不同提取介质以及温度等对褐藻多糖硫酸酯得率及DPPH清除率的影响,结果显示在80 °C条件下,液料比为20:1 ($m:V$),用蒸馏水提取1 h时,褐藻多糖硫酸酯得率为7.37%,硫酸根含量为17.1%,此时其DPPH清除率最好,达到84.13%,进一步证明羊栖菜硫酸化多糖具有良好的抗氧化活性。

3.3 降血糖活性

II型糖尿病是一种代谢异常疾病,通常由胰岛素分泌不足或胰岛素抵抗引起^[57]。患者通常不能合理利用葡萄糖,致使其临床表现为血糖长期处于一种高血糖状态^[58]。尽管现在

临床上有许多降血糖的药物,但由于其具有一定的副作用,因此不适合长期服用,这就迫使我们寻找一种效果好、副作用低的新的天然物质来代替现有的药物^[59]。羊栖菜是一种良好的天然产物,其中羊栖菜多糖具有降血糖活性。王俊等^[60]以四氧嘧啶诱导的大鼠为研究对象,将提取出的羊栖菜多糖溶液给大鼠灌胃,显著抑制了大鼠体重减轻和饮水量增加,并通过比色法测量其空腹血糖,结果显示大鼠的空腹血糖值降低,说明了羊栖菜多糖可以降低四氧嘧啶诱导的糖尿病大鼠的血糖。郭勇等^[61]用羊栖菜多糖处理小鼠时,发现羊栖菜多糖对正常小鼠的血糖无影响,但可以降低四氧嘧啶诱导的糖尿病小鼠的血糖,进一步表明羊栖菜多糖降血糖机制并不是刺激胰岛素分泌。张杰^[62]等研究了羊栖菜多糖对于有链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠的降血糖机制,发现羊栖菜多糖可以升高胰腺组织中葡萄糖转运蛋白-2 的表达,使葡萄糖对胰岛刺激分泌反应增强,进而降低血糖。

3.4 抗衰老

衰老是指生物体生长发育到成熟期以后,随着年龄的增长,生物体在形态结构和生理功能方面出现的一系列退行性变化。近些年来,人们发现抗氧化活性较好的羊栖菜多糖具有抗衰老活性,如王雪等^[56]发现 3 中海藻多糖都具有较好抗氧化活性,进而利用秀丽隐杆线虫研究羊栖菜多糖抗衰老功能,结果证实了羊栖菜多糖对线虫的寿命具有一定的延长效果,特别是在 8~10 d 区间效果显著;何丹等^[63]对羊栖菜多糖通过 Nrf 2 (nuclear factor erythroid 2-related factor 2)信号通路发挥抗衰老作用的活性进行了研究,即用抗氧化活性较好的羊栖菜硫酸多糖灌胃 9 月龄衰老小鼠,发现灌胃后自然衰老小鼠的肝脏 Nrf 2 通路相关蛋白的表达和抗氧化酶类活性都有提升,例如总超氧化物歧化酶活力、总抗氧化能力和过氧化氢酶活力等,证明羊栖菜硫酸化多糖通过提升衰老小鼠体内防御系统的抵抗能力进而起到延迟衰老的作用。

3.5 调节肠道菌群

肠道菌群是一群存在于肠道中的微生物,它们不仅和肠道消化吸收有关,还和机体的免疫防御机制有关。据报道,羊栖菜褐藻多糖硫酸脂能够通过影响肠道菌群的结构,进而调节机体代谢功能^[64]。例如 LIU 等^[65]研究了一种新型结构的羊栖菜褐藻多糖硫酸脂对高脂饮食的大鼠的肠道菌群的影响,结果表明,高剂量的羊栖菜褐藻多糖硫酸脂可以降低大鼠的血脂,并通过提高拟杆菌门/厚壁门菌比例,从而调节了大鼠由于高脂饮食引起的肠道菌群的失调,提高了大鼠的代谢,起到调节菌群的作用。

3.6 抗菌抗病毒活性

除了上述活性之外,羊栖菜多糖还体现出了抗菌与抗病毒活性。例如李银停等^[66]通过羧甲基化修饰降解羊栖

菜多糖,得到 354 kDa 的羧甲基化多糖,进一步修饰得到 375 kDa 的异羟肟酸化多糖,并通过抑菌圈和最小抑菌浓度法评价羧甲基化和异羟肟酸化多糖对枯草芽孢杆菌等 5 个菌株的抑菌效果,发现经过降解修饰的羧甲基化和异羟肟酸化多糖具有明显的抗菌能力,而降解的羊栖菜多糖没有表现出这种作用。岳路路等^[67]将分离纯化得到的羊栖菜多糖提取物进行了体外抗病毒实验,即将羊栖菜多糖提取物加入到感染病毒后的 MA104、RD 以及 Hep-2 细胞中,并通过 MTT 法等检测药物细胞毒性等指标,结果发现,加入羊栖菜提取物之后细胞病变明显减弱,甚至未显现细胞病变,表明羊栖菜多糖具有良好的抗病毒活性;岑颖洲等^[68]采用体外细胞培养法研究羊栖菜多糖对单纯疱疹病毒 1 型 (HSV-1)和柯萨奇病毒(CVB3)的抑制作用,结果发现羊栖菜多糖对 HSV-1 和 CVB3 均有明显的抗病毒作用,且随着纯度的提高,样品抗病毒作用随之增强,同时证明了羊栖菜多糖样品不仅具有直接杀灭病毒作用,而且还可进入细胞或吸附在细胞表面,从而达到抑制或杀伤病毒的效果。

4 展 望

我国羊栖菜资源丰富,营养和药用价值较高,其组成多糖近些年来成为研究的热点。尽管与传统水提法相比,通过酶提法、超声辅助法等方法提高了羊栖菜多糖的提取率,并通过层析法、沉淀法等分离纯化羊栖菜多糖,但想要得到活性高、成分均一的羊栖菜多糖仍需要继续研究其提取纯化方法。羊栖菜多糖具有抗氧化、抗病毒、抗衰老、抗肿瘤、增强免疫力以及降血糖等功能活性,被越来越多的研究人员和消费者关注。随着对羊栖菜多糖的深入研究,其在医疗保健、食品、肥料等方面也将会有广阔的应用前景,未来如何获得纯度更高、活性更好的多糖,并且进一步解析羊栖菜多糖的核心功能成分等内容仍需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] 张晓梅, 郭芮, 苏红, 等. 羊栖菜营养成分分析与安全性评价[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 296-300, 311.
ZHANG XM, GUO R, SU H, et al. Nutritional composition analysis and safety evaluation of *Sargassum fusiforme* [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(4): 296-300, 311.
- [2] 季宇彬, 高世勇, 张秀娟. 羊栖菜多糖体外抗肿瘤作用及其诱导肿瘤细胞凋亡的研究[J]. 中草药, 2003, (7): 65-67.
JI YB, GAO SY, ZHANG XJ. Studies on anti-tumor activities and apoptosis inducement of *Sargassum fusiforme* polysaccharide *in vitro* [J]. Chin Tradit Herb Drug, 2003, (7): 65-67.
- [3] 王长云, 管华诗. 多糖抗病毒作用研究进展II. 硫酸多糖抗病毒作用[J]. 生物工程进展, 2000, (2): 3-8.
WANG CY, GUAN HS. Advances of researches on antiviral activities of polysaccharides II. antiviral activities of polysaccharides [J]. Prog Biotechnol, 2000, (2): 3-8.
- [4] 董乐, 董笑瀛, 王芳, 等. 羊栖菜硫酸多糖的超声辅助提取工艺优化及

- 抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 265–269, 273.
- DONG L, DONG XY, WANG F, *et al.* Optimization of extraction and antioxidative activity *in vitro* of sulfated polysaccharides from *Sargassum fusiforme* (Hary) Setch [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(12): 265–269, 273.
- [5] 吴越. 羊栖菜生物活性成分研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- WU Y. The bioactive compounds from *Hizikia fusiformis* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [6] HU P, LI Z, CHEN M, *et al.* Structural elucidation and protective role of a polysaccharide from *Sargassum fusiforme* on ameliorating learning and memory deficiencies in mice [J]. *Carbohydr Polym*, 2016. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.12.019
- [7] 赵萍. 羊栖菜多糖的分离纯化以及抗衰老活性的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- ZHAO P. The Purification and anti-aging activities of polysaccharides from *Hizikia fusiforme* [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015.
- [8] 何丹. 利用羊栖菜开发生物有机肥及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HE D. Development and application of bio-organic fertilizer from *Sargassum fusiforme* [D]. Hangzhou: Zhejiang University.
- [9] NIE J, CHEN D, LU Y, *et al.* Effects of various blanching methods on fucoxanthin degradation kinetics, antioxidant activity, pigment composition, and sensory quality of *Sargassum fusiforme* [J]. *LWT-Food Sci Technol Res*, 2021, 143(7): 111179.
- [10] 孔秋红, 张瑞芬, 曾新安, 等. 不同方法提取的羊栖菜多糖理化性质及益生活性 [J/OL]. 现代食品科技: 1-7[2021-05-11].
- KONG QH, ZHANG RF, ZENG XAN, *et al.* Physicochemical properties and prebiotic activity of *Sargassum fusiforme* polysaccharides obtained by different extraction methods [J/OL]. *Mod Food Sci Technol*: 1-7. [2021-05-11].
- [11] 刘剑, 杨亚彪, 程阳, 等. 羊栖菜褐藻糖胶的提取工艺优化及理化性质分析[J]. 温州大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 26–33.
- LIU J, YANG YB, CHENG Y, *et al.* The extraction process optimization and physicochemical property analysis from *Sargassum fusiforme* fucoidan [J]. *J Wenzhou Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 39(4): 26–33.
- [12] 丁浩森, 孙弢, 夏彭奎, 等. 羊栖菜组分多糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 核农学报, 2019, 33(2): 297–304.
- DING HS, SUN T, XIA PK, *et al.* Inhibition of polysaccharide fraction of *Sargassum fusiforme* on the α -glucosidase [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2019, 33(2): 297–304.
- [13] 胡俊飞. 高压均质降解黑木耳多糖硫酸酯化衍生物抗辐射作用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- HU JF. The radioprotective effect of sulfated *auricularia auricula* polysaccharide degraded by high pressure homogenization [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [14] LIU X, XI X, JIA A, *et al.* A fucoidan from *Sargassum fusiforme* with novel structure and its regulatory effects on intestinal microbiota in high-fat diet-fed mice [J]. *Food Sci*, 2021, 358(7484): 129908.
- [15] 刘冰月. 羊栖菜岩藻多糖的提取分离及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- LIU BY. Extraction, separation and application of fucoidan from *Sargassum fusiforme* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [16] 季德胜. 羊栖菜多糖分离纯化、结构鉴定及拮抗UVB辐射造成的皮肤光老化损伤研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Ji DS. Isolation, purification and structural identification of polysaccharides from *Sargassum Fusiforme* and against UVB-induced skin photoaging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [17] LIU J, WU SY, LI QY, *et al.* Different extraction methods bring about distinct physicochemical properties and antioxidant activities of *Sargassum fusiforme* fucoidans [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 155: 1385–1392.
- [18] 何丹, 张旭, 肖保衡, 等. 羊栖菜多糖的提取和抗氧化活性研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(12): 24–29.
- HE D, ZHANG X, XIAO BH, *et al.* Extraction and antioxidative activity of fucoidan from *Sargassum fusiforme* [J]. *Mar Sci*, 2016, 40(12): 24–29.
- [19] 宋彦显, 闵玉涛, 陶敬, 等. 醇提法提取海藻多糖及其 α -淀粉酶的抑制活性研究[J]. 食品科技, 2014, 39(10): 232–234.
- SONG YX, MIN YT, TAO J, *et al.* Extraction of seaweed polysaccharide by ethanol and inhibitory activity of α -amylase [J]. 2014, 39(10): 232–234.
- [20] 符灏瑜, 周定鹏, 刘静, 等. 羊栖菜多糖的提取、理化性质研究及其应用[J]. 轻工科技, 2021, 37(3): 7–9.
- FU HY, ZHOU DP, LIU J, *et al.* Study on the extraction, physicochemical properties and application of polysaccharides from *Sargassum fusiforme* [J]. *Light Ind Sci Technol*, 2021, 37(3): 7–9.
- [21] PEI H, RUI X, LI Z, *et al.* Structural investigation and immunological activity of a heteropolysaccharide from *Sargassum fusiforme* [J]. *Carbohydr Res*, 2014, 390(1): 28–32.
- [22] 李波, 许时婴. 羊栖菜中褐藻糖胶的提取纯化研究[J]. 食品工业, 2004, (2): 40–42.
- LI B, XU SY. Study on extraction and purification of alginose gum from *Sargassum fusiforme* [J]. *Food Ind*, 2004, (2): 40–42.
- [23] 王勤, 宁准梅, 林之川. 羊栖菜多糖提取工艺的研究[J]. 食品工业, 2007, (6): 11–12.
- WANG Q, NING ZM, LIN ZC. Study on extraction technics of *Sargassum fusiforme* polysaccharide [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2007, (6): 11–12.
- [24] 吴娟, 欧志荣, 李昭蓉, 等. 稀酸提取羊栖菜多糖的结构及其抗氧化特性研究[J]. 福建农业学报, 2019, 34(7): 842–851.
- WU J, OU ZY, LI SR, *et al.* Structure and antioxidant activity of polysaccharides extracted from *Sargassum fusiforme* [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2019, 34(7): 842–851.
- [25] 杨嘉丹, 刘婷婷, 张闪闪, 等. 微波辅助提取银耳多糖工艺优化及其流变、凝胶特性[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 289–295.
- YANG JD, LIU TT, ZHANG SS, *et al.* Optimization of microwave-assisted extraction and rheological and gelling properties of polysaccharide from *Tremella fuciformis* [J]. *Food Sci*, 2019, 40(14): 289–295.
- [26] 刘洪超, 应苗苗, 周雨曦, 等. 羊栖菜多糖提取条件优化及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 245–249, 255.
- LIU HC, YING MM, ZHOU YM, *et al.* Optimization of extraction process of *Sargassum fusiforme* polysaccharide and antioxidant activity [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(6): 245–249, 255.
- [27] LI ZR, JIA RB, WU J, *et al.* *Sargassum fusiforme* polysaccharide partly replaces acarbose against type 2 diabetes in rats [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.126
- [28] WANG T, ZHAO H, BI Y, *et al.* Preparation and antioxidant activity of selenium nanoparticles decorated by polysaccharides from *Sargassum fusiforme* [J]. *Food Sci*, 2021, 86(3): 977–986.

- [29] CHEN LJ, CHEN, PC, LIU J, *et al.* *Sargassum fusiforme* polysaccharide SFP-F2 activates the NF- κ B signaling pathway via CD14/IKK and P38 axes in RAW264.7 cells [J]. *Mar drugs*, 2018, 16(8): 264.
- [30] 何鹏飞. 猪苓菌核多糖的分离纯化、结构鉴定和溶液构象研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- HE PF. Purification, structural characteristics and conformation in solution of polysaccharide from sclerotia of polyporus umbellatus [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [31] 柳杨, 衣怀峰, 陈宇, 等. 酯交换生物柴油的柱层析分离纯化与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, (2): 505–509.
- LIU Y, YI HF, CHEN Y, *et al.* Column chromatography purification and analysis of biodiesel by transesterification [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2012, 32(2): 505–509.
- [32] JIANG H, YANG SQ, QIAN WW, *et al.* Purification and biological activities of enzymatically degraded *Sargassum fusiforme* polysaccharides [J]. *Chem Biodiversity*, 2021, 18(3): e2000930.
- [33] ZHANG Y, XU M, HU C, *et al.* *Sargassum fusiforme* fucoidan SP2 Extends the lifespan of drosophila melanogaster by upregulating the Nrf2-mediated antioxidant signaling pathway [J]. *Oxid Med Cell Longevity*, 2019, 2019: 1–15.
- [34] WU QF, WU SY, CHENG Y, *et al.* *Sargassum fusiforme* fucoidan modifies gut microbiota and intestinal metabolites during alleviation of hyperglycemia in type 2 diabetic mice [J]. *Food Funct*, 2021, 12(8): 3572–3585.
- [35] CHEN P, YANG S, HU C, *et al.* *Sargassum fusiforme* polysaccharide rejuvenates the small intestine in mice through altering its physiology and gut microbiota composition [J]. *Curr Mol Med*, 2017. DOI: 10.2174/1566524018666171205115516
- [36] RBJA C, ZRLA C, JWA C, *et al.* Physicochemical properties of polysaccharide fractions from *Sargassum fusiforme* and their hypoglycemic and hypolipidemic activities in type 2 diabetic rats-science direct [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 147: 428–438.
- [37] 过菲, 许时婴, 林之川. 超滤技术在羊栖菜粗多糖提取工艺中的应用[J]. *食品工业科技*, 2002, (10): 50–51.
- GUO F, XU SY, LIN ZC. The application of ultra-filtration technology in the extraction of *Sargassum fusiforme* polysaccharide [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2002, (10): 50–51.
- [38] 陈利华, 王欣, 成家杨. 不同方法提取海洋硅藻粗多糖的比较[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(2): 280–289.
- CHEN LH, WANG X, CHENG JY. Comparison of crude polysaccharides extraction from marine diatom under different methods [J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2018, 30(2): 280–289.
- [39] ZHANG R, ZHANG XX, TANG YX, *et al.* Composition, isolation, purification and biological activities of *Sargassum fusiforme* polysaccharides: A review [J]. *Carbohydrate Polym*, 2020, 228.
- [40] YANG Y, SUN X, ZHAO Y, *et al.* Anti-tumor activity and immunogenicity of a succinoglycan riclin [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 255: 117370.
- [41] FAN S, ZHANG J, NIE W, *et al.* Antitumor effects of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* against human hepatocellular carcinoma HepG2 cells [J]. *Food Chem Toxicol*, 2017, 102: 53–62.
- [42] DAI YL, JIANG YF, LEE HG, *et al.* Characterization and screening of anti-tumor activity of fucoidan from acid-processed *Sargassum fusiforme* (*Hizikia fusiforme*) [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 139: 170–180.
- [43] SONG JH, WON SY, HWANG B, *et al.* *In vitro* and *in vivo* antitumor efficacy of *Hizikia fusiforme* celluclast extract against bladder cancer [J]. *Nutrients*, 2020, 12(7): 2159.
- [44] 冯骁, 仓顺东. 中国肺癌筛查标准(T/CPMA 013-2020)解读[J]. *中华实用诊断与治疗杂志*, 2021, 35(3): 217–219.
- FENG X, CANG SD. Interpretation of lung cancer screening guideline of China (T/CPMA 013-2020) [J]. *J Chin Pract Diagn Thera*, 2021, 35(3): 217–219.
- [45] WU L, SUN J, SU X, *et al.* A review about the development of fucoidan in antitumor activity: Progress and challenges [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 154: 96–111.
- [46] CHEN H, LING Z, LONG X, *et al.* *Sargassum fusiforme* polysaccharides inhibit VEGF-A-related angiogenesis and proliferation of lung cancer *in vitro* and *in vivo* [J]. *Biomed Pharmacother*, 2017, 85: 22–27.
- [47] JIN W, TANG H, ZHANG J, *et al.* Structural analysis of a novel sulfated galacto-fuco-xylo-glucurono-mannan from *Sargassum fusiforme* and its anti-lung cancer activity [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 149: 450–458.
- [48] LEE A, NG W, CHAN J, *et al.* Management of locally recurrent nasopharyngeal carcinoma [J]. *Cancer Treat Rev*, 2019. DOI: 10.1016/j.ctrv.2019.101890
- [49] CHEN YP, CHAN ATC, LE QT, *et al.* Nasopharyngeal carcinoma [J]. *Lancet*, 2019, 394(10192): 64–80.
- [50] LEE HM, OKUDA KS, GONZALEZ FE, *et al.* Current perspectives on nasopharyngeal carcinoma [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2019, 1164: 11–34.
- [51] FAN SR. Antitumor activity and underlying mechanism of *Sargassum fusiforme* polysaccharides in CNE-bearing mice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.01.168
- [52] CHUA ML, SUN Y, SUPPIOT S. Advances in nasopharyngeal carcinoma-“West meets East” [J]. *Br J Radiol*, 2019, 92(1102): 20199004.
- [53] 李渊, 顾守美, 张素琴, 等. 自由基在白血病干细胞衰老进程中的作用研究进展[J]. *现代医药卫生*, 2021, (9): 1498–1501.
- LI Y, GU SM, ZHANG SQ, *et al.* Research progress on the role of free radicals in the aging process of leukemia stem cells [J]. *J Mod Med Health*, 2021, (9): 1498–1501.
- [54] 石宝明, 迟子涵. 自由基对动物的危害及消除技术研究进展[J]. *饲料工业*, 2021, 42(9): 1–6.
- SHI BM, CHI ZH. Research progress on harm of free radical to animals and its elimination technology [J]. *Feed Ind*, 2021, 42(9): 1–6.
- [55] 王胜男, 付晓婷, 许加超, 等. 羊栖菜褐藻糖胶对AAPH诱导的斑马鱼氧化应激模型的保护作用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 356–365.
- WANG SN, FU XT, XU JC, *et al.* Protective effects of fucoidan Isolated from *Sargassum fusiforme* on AAPH-induced antioxidant response in zebrafish model [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(18): 356–365.
- [56] 王雪, 兰丽, 原晶莹, 等. 3种海藻多糖抗氧化及其抗衰老活性的初步研究[J]. *药物生物技术*, 2020, 27(1): 29–32.
- WANG X, LAN L, YUAN JY, *et al.* Preliminary studies on antioxidant and anti-aging activity of three seaweed polysaccharides [J]. *Pharm Biotechnol*, 2020, 27(1): 29–32.
- [57] 刘莉, 龙虹宇, 辜敏, 等. 糖尿病药物联合医用三氧减轻2型糖尿病患者胰岛素抵抗疗效观察[J]. *中国药师*, 2021, 24(5): 902–905.
- LIU L, LONG HY, GU M, *et al.* Therapeutic effect of diabetes drugs combined with medical ozone on Insulin resistance in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. *China Pharm*, 2021, 24(5): 902–905.
- [58] 何静, 高婉婷, 明亮, 等. 驼乳对II型糖尿病小鼠的糖脂代谢及胰岛素抵抗的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(3): 115–120.
- HE J, GAO WT, MING L, *et al.* Effects of camel milk on glucose and

- lipid metabolism and Insulin resistance in a mice model of typeII diabetes mellitus [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(3): 115–120.
- [59] 李敏, 刘畅. 不同益生菌发酵玉米须产物对体内外降糖作用的影响[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(2): 16–17, 23.
- LI M, LIU C. Effects of different probiotics fermented corn whisker products on *in vivo* and *in vitro* hypoglycemic [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2021, 27(2): 16–17, 23.
- [60] 王俊, 柯珂, 覃佑康, 等. 羊栖菜褐藻多糖的提取及抗肿瘤活性[J]. *化工技术与开发*, 2020, 49(7): 26–31.
- WANG J, KE K, QIN YK, *et al.* Extraction and antitumor activity of fucoidan from *Sargassum fusiforme* [J]. *Technol Dev Chem Ind*, 2020, 49(7): 26–31.
- [61] 郭勇, 汲晨峰. 羊栖菜成分以及药理研究进展[J]. *民营科技*, 2017, (3): 16.
- GUO Y, JI CF. Research progress on components and pharmacology of *Sargassum fusiforme* [J]. *Privat Sci Technol*, 2017, (3): 16.
- [62] 张杰, 杨旭东, 杨骄霞, 等. 羊栖菜多糖对糖尿病大鼠胰岛 β 细胞葡萄糖转运蛋白-2表达的影响[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(9): 76–78.
- ZHANG J, YANG XD, YANG JX, *et al.* Effects of *Sargassum fusiforme* polysaccharide on the expression of glucose transporter-2 in pancreatic β cells of diabetic rats [J]. *Chin Food Nutr*, 2014, 20(9): 76–78.
- [63] 何丹. 羊栖菜多糖通过 Nrf2/ARE 信号通路发挥抗衰老作用的初步研究[D]. 温州: 温州大学, 2016.
- HE D. The Involvement of Nrf2/ARE signaling pathway in the protection *Sargassum fusiforme* polysaccharide against aging [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2016.
- [64] 黄小流, 罗辉, 黄玉珊, 等. 马齿苋多糖对断奶大鼠肠道菌群影响的研究[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(8): 4694–4707.
- HUANG XL, LUO H, HUANG YS, *et al.* Effects of *Portulaca oleracea* L polysaccharide on intestinal flora in weaned rats [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2021, 33(8): 4694–4707.
- [65] LIU X, XI X, JIA A, *et al.* A fucoidan from *Sargassum fusiforme* with novel structure and its regulatory effects on microbiota in high-fat diet-fed mice [J]. *Food Chem*, 2021, 358: 129908.
- [66] 李银停, 周涛. 羧甲基化和异羟肟酸羊栖菜降解多糖的体外抗氧化活性及抗菌活性的研究[A]. 中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集[C]. 中国食品科学技术学会: 中国食品科学技术学会, 2018.
- LI YT, ZHOU T. Hydroxamated degraded polysaccharides from *Sargassum fusiforme*: preparation, *in vitro* antioxidant activity and antimicrobial evaluation [A]. *J Chin Inst Food Sci Technol. The 15th Annual Meeting of the Chinese Association of Food Science and Technology* [C]. Chinese Institute of Food Science and Technology: Chinese Association of Food Science and Technology, 2018.
- [67] 岳路路, 高敏, 张秋红, 等. 羊栖菜提取物的体外抗病毒作用[J]. *世界中医药*, 2018, 13(1): 199–201, 206.
- YUE LL, GAO M, ZHANG QH, *et al.* Antivirus effects of the extract from *Sargassum fusiforme in vitro* [J]. *World J Tradit Chin Med*, 2018, 13(1): 199–201, 206.
- [68] 岑颖洲, 王凌云, 马夏军, 等. 羊栖菜多糖体外抗病毒作用研究[J]. *中国病理生理杂志*, 2004, (5): 64–67.
- CENG YZ, WANG LY, MA XJ, *et al.* Study on antiviral effect of Polysaccharide from *Sargassum fusiforme in vitro* [J]. *Chin J Pathophysiol*, 2004, (5): 64–67.

(责任编辑: 于梦娇 郑丽)

作者简介



梁美娜, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。

E-mail: 1905283360@qq.com



苏来金, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发及利用。

E-mail: sulaijin@163.com