DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2020.14.030

海带多糖的功能活性及应用研究进展

林慧婷[1],王培鑫[1],赖斌[1],周凤[1],胡嘉淼[1,2,3],张怡[1,2,3,4,*]

(1. 福建农林大学 食品科学学院,福建 福州 350002;2. 福建省海洋生物技术重点实验室,福建 福州 350002;3. 福建农林大学 福建省特种淀粉品质科学与加工技术重点实验室,福建 福州 350002;4. 福建农林大学 中爱国际合作食品物质学与结构设计研究中心,福建 福州 350002)

摘　要:海带多糖作为重要的天然生物活性产物,已有大量研究证明其具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、调节血脂血糖代谢、预防动脉粥样硬化、抗疲劳、抗皮肤光老化及益生元作用等多种天然生物活性,显示其在功能食品开发中的潜在应用前景。由于多糖组分结构上的差异与其所在发挥的不同功能活性之间具有重要相关性。因此,对海带多糖的提取分离、化学结构、生理活性及其功能食品开发 4 个方面的研究现状进行综述,为开发基于海带多糖的新型功能食品提供理论依据。

关键词:海带;多糖;活性;功能食品;应用

Research Progress on Functional Activity and Application of Laminarin

LIN Hui-ting[1], WANG Pei-xin[1], LAI Bin[1], ZHOU Feng[1], HU Jia-miao[1,2,3], ZHANG Yi[1,2,3,4,*]

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Marine Biotechnology of Fujian Province, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Quality Science and Processing Technology in Special Starch, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 4. China-Ireland International Cooperation Centre for Food Material Science and Structure Design, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: As an important bioactive natural product, laminarin has been proved to possess a range of biological activities, such as antioxidant, anti-tumor, immunoregulatory, blood lipid and sugar regulatory, anti-atherosclerosis, anti-fatigue, anti-skin photoaging and probiotic activities, highlighting its great nutritive potential to be developed as functional foods. Studies have demonstrated the association between the structural differences of polysaccharide components and their various functional activities. Therefore, in this review, the research progress of extraction, separation, chemical structure, and physiological activity of laminarin, as well as its application as functional food ingredients was summarized, which may provide theoretical basis for the development of novel functional foods based on laminarin.

Key words: laminarin; polysaccharide; activity; functional food; application

引文格式:

林慧婷,王培鑫,赖斌,等. 海带多糖的功能活性及应用研究进展[J].食品研究与开发,2020, 41(14):188-195

LIN Huiting, WANG Peixin, LAI Bin, et al. Research Progress on Functional Activity and Application of Laminarin [J]. Food Research and Development,2020,41(14):185-195

海带(*Laminaria japonica*)又名昆布、纶布和江白菜等,属于褐藻门(Phaeophyta)、褐藻纲(Phaeospolgeae)、海带目(Laminariales)、海带科(Laminariaceae)、海带属(*Laminaria*)。该属中有 50 多个种,是多年生大型食用藻类。海带叶片呈带状,叶片中带部较厚,柄为

基金项目:福建农林大学国际合作与交流项目(KXGH17001)

作者简介:林慧婷(1996—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品化学与营养。

* 通信作者:张怡(1975—),女,教授,博士,研究方向:食品科学与工程。

圆柱形或扁圆柱形[1]。藻体褐色，扁平成带状，最长的可达7米，基部有固着器-树状分枝，用以附着海底岩石，我国北部沿海及浙闽沿海有大量养殖[2]。海带属冷水性海藻，喜生活在水流通畅和海水清澈的海区，原产于北方高纬度海域，1956年开始南移养殖。作为我国重要的经济海藻之一，我国海带养殖业已形成了完整的技术链条和产业链条[3]。目前，我国的海带产量位居世界前列，市场前景广阔，然而生产方式仍主要以初级加工为主，产量大，但附加值低，高附加值的海带深加工产品偏少[4]。这种现状造成了海带资源的严重浪费，同时也阻碍了海带产业的发展提升[5]。海带多糖是存在于海带中的一类天然生物大分子物质[6]，已有临床试验证实海带大部分功能活性与其主要成分多糖密切相关[7]，在研发新型功能性保健食品方面有良好的应用前景，如海带多糖饮品[8]、食品级保鲜涂膜[9]及海带多糖饼干[10]等。因此，基于海带功能性成分进行高附加值产品开发已成为提升海带产业迈向高端产业的重要途径之一，可满足精深加工品和功能性食品等高端需求。

1　海带多糖提取、分离方法和结构解析研究进展

1.1　海带多糖提取方法研究进展

海带是我国重要的经济海藻，来源丰富，价格低廉。优化海带多糖的提取方法有利于提高海带资源的利用率和市场经济价值。目前海带多糖的提取方法主要可分为：水提法、酶提取法、酸处理法、碱处理法、超声波法、微波法等（见图1）。

这些方法既可以单独使用也可以进行联用以达到更好的分离提取效果，尽可能的使多糖最大程度化从细胞溶出。具体而言，水提取法作为传统方法，成本低且操作简便，但是耗时长、提取效率低，可能会影响单糖组分无法充分溶出。而酶法通常具有高效、专一、条件温和等优点，如杨晓雪等以复合酶（纤维素酶、果胶酶、木聚糖酶、α-淀粉酶和酸性蛋白酶的质量比为25∶10∶10∶1∶5）提取海带中褐藻糖胶，与传统水提法和普通酶法相比，产率得到很大的提高[11]，并用高效液相色谱法证实了复合酶法比热水浸提法提取褐藻糖胶中L-岩藻糖和D-半乳糖的得率高[12]。但是酶的成本昂贵，不利于工业化生产。酸处理法及碱处理法也广泛应用于海带多糖的分离提取。如周裔彬等[13]建立了一套用酸化法提取、纯化海带多糖类化合物的方法。另有研究通过酸法制备日本厚叶海带褐藻多糖，并由高效液相色谱分析得其组分F2-a由甘露糖和葡萄糖醛酸组成，F2-b由由甘露糖、葡萄糖醛酸和岩藻糖组成，而F2-c仅由岩藻糖组成，说明酸法会造成不同程度的单糖组分的损失[14]。Yujiao Sun等[15]则发现碱法萃取的海带多糖得率明显高于酸法和水提，但是和水提的多糖相比，多糖表面呈现碎片状且形成大小不一的孔隙，说明溶剂通过破坏细胞壁使多糖溶出。与以上较为传统的海带多糖提取方法相比，超声波法、微波法等方法的单独或联合运用可以有效提高海带多糖提取的效率和纯度。如超声波辅助提取的海带多糖大分子杂质明显减少，糖含量明显增多[16]。这很可能是超声技术的空化作用使多糖更多地溶出，可以有效实现提取效率的提高。娄翠等[17]对广东海带岩藻多糖的研究表明：微波法比酸法的海带多糖得率更高。任

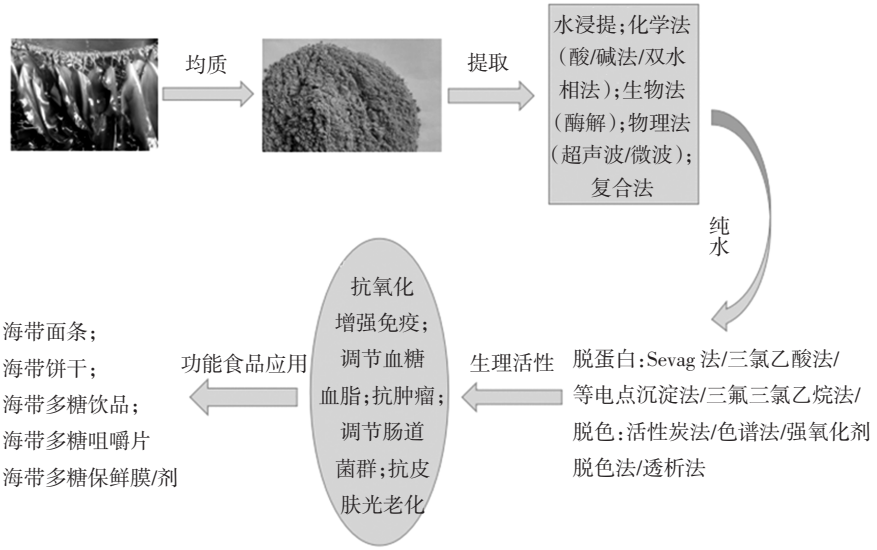


图1　常见的海带多糖提取纯化流程图

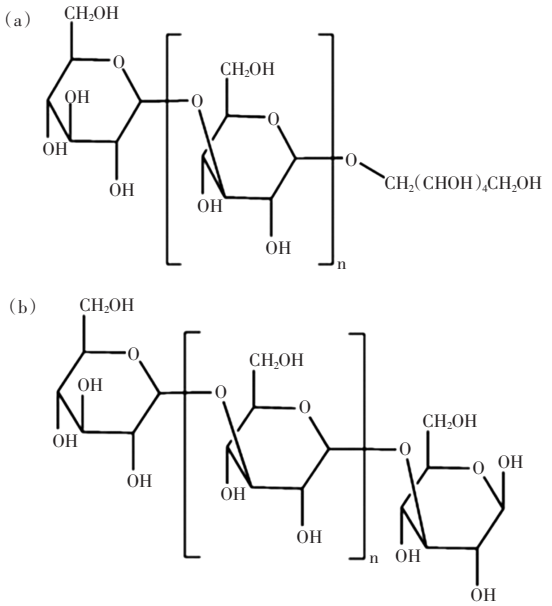
Fig.1　Flow charts of extraction and purification process of laminarin

壮等[18]用超声波协同复合酶法提取海带多糖。徐扬等[19]用超声波辅助酶法提取海带多糖并应用化学改性法得到氧化降解多糖和乙酰化海带多糖，研究表明化学改性后的多糖对供试细菌有较强的抑制作用。海带多糖结构的差异性，不仅与海带的来源和提取方法相关，也与纯化方法存在一定的关系。粗提的海带多糖往往残留有蛋白质、色素和其它小分子物质。为了获得纯度较高的多糖，通常采用 Sevag、三氟三氯乙烷、三氯乙酸、鞣酸法等去除蛋白质。过氧化剂、大孔吸附树脂、活性炭去除色素，透析除盐。余华[20]研究了 4 种脱蛋白的方法，结果表明蛋白酶解法、三氯乙酸沉淀法、鞣酸沉淀法和 Sevag 法脱蛋白的效果依次递减。而初步纯化的多糖还是由不同分子量多糖构成的混合物，目前常采用纤维素柱层析和凝胶柱层析进一步除杂，离子交换层析是按电荷极性不同分离，利用多糖分子和离子交换剂基团的结合能力差异达到分离目的；而凝胶层析的原理是按分子量不同分离，多糖在柱子上经过的路径长短差异而达到分离效果。而极少有学者使用中低压制备色谱或者高效液相制备色谱分离纯化多糖组分。这很可能由于制备色谱得到的多糖产率太低，与实际的科学研究相悖，故无法得到推广。综上所述，不同方法提取纯化的多糖必然存在优缺点，应结合实际的科学研究和生产应用采取合适的多糖提取方法。

1.2 海带多糖结构解析研究进展

海带作为一种资源丰富的可食物种，海带多糖是其最主要的生物活性成分之一，对其结构及单糖组成的解析已吸引国内外广大学者的关注和重视。多糖是一类复杂的大分子物质，通常采用扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）、傅立叶红外光谱（fourier transform infrared，FT-IR）、核磁共振（nuclear magnetic resonance，NMR）、紫外光谱（ultraviolet spectroscopy，UV）技术分析多糖的构象，高效凝胶渗透色谱检测多糖的分子量及分子分布，色谱法、电泳法和指纹图谱检测单糖组成及含量。李林等[6]用乙酸纤维素膜电泳法和葡聚糖凝胶 G-75 柱层析法鉴定褐藻酸钠和褐藻糖胶的纯度，结果表明两者均为均一组分。董学前等[21]用 DEAE-Sepharose Fast Flow 离子交换柱和 Sephadex G-150 凝胶柱高效液相色谱分析得出分级纯化后的海带多糖组分（LP-21、LP-22 和 LP-3）主要由 L-岩藻糖、D-半乳糖组成，还有少量 D-葡萄糖、D-甘露糖、D-氨基葡萄糖、L-鼠李糖、D-木糖和 D-葡萄糖醛酸组成。而红外光谱分析得出 LP-21 和 LP-22 的硫酸根主要结合在岩藻糖 C4 位，LP-3 硫酸根主要结合在岩藻糖 C2 或 C3 位上。张文清等[22]通过凝胶过滤色谱和 DEAE 纤维素柱层析得到的均一多糖 TC-1 主要由岩藻糖构成，还有少量的木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成的结构复杂的硫酸酯多糖。其中岩藻糖糖基以 1,4-、1,3-连接方式存在，木糖以 1,3-连接方式存在，甘露糖以 1,3-、1,6-连接方式存在，葡萄糖以 1,3,4-、1,2,4,6- 连接方式存在，半乳糖以 1,6-、1,3,6-、1,3,4,6- 等连接方式存在。

海带作为一种重要的褐藻（brown algae），迄今已经发现其中含有 3 种褐藻多糖，它们分别是褐藻胶（algin）、褐藻糖胶（fucoidin）及褐藻淀粉（laminarin）。其中，褐藻胶是褐藻共有的一种细胞间多糖，亦称褐藻酸，通常存在于褐色海藻细胞壁中，由 α-1,4- L-古罗糖醛酸（G）和 β-1,4- D-甘露糖醛酸（M）为单体构成的嵌段共聚物[23]。糖醛酸通常与褐藻酸的存在有很大关系。褐藻胶主要包括水不溶性的褐藻酸及各种水溶性和水不溶性的褐藻酸盐类，如褐藻酸钠，褐藻酸铵，褐藻酸钙[24]；褐藻糖胶主要成分是 α-L-岩藻糖 4-硫酸酯的多聚物，同时还含有不同比例的半乳糖、木糖、葡萄糖醛酸和少量结合蛋白质[25]。李林等[26]对海带中的褐藻糖胶进行色谱分析和氨基酸分析，研究表明含有鼠李糖、岩藻糖、半乳糖等中性糖及部分蛋白质；褐藻淀粉是由 β-(1,3)-连接的葡聚糖和具有不同长度的 β-(1,6)-侧链组成的水溶性多糖，图 2 展示了分别以甘露醇残基（M）结尾和以葡萄糖残基（G）结尾的海带多糖构式[27]。



（a）多糖的 M 链结构；（b）多糖的 G 链结构。

图 2 多糖的 M 链结构和 G 链结构

Fig.2 M-chain and G-chain structure of polysaccharides

2 海带多糖的功能活性研究进展

海带多糖的诸多功能活性已通过体内和体外试验得到证实，如抗氧化[28]、降血糖血脂[29]、抗肿瘤[14]、免疫调节[30]、抗疲劳等[31]，而功能活性与海带多糖组成和结构特征、硫酸盐的含量以及纯化程度紧密相联。

2.1 抗氧化

活性氧自由基是机体代谢过程中常见的产物，一旦在体内蓄积就会与细胞成分反应，从而引起 DNA 和 RNA 损伤，蛋白质失活，是机体衰老的重要原因之一[32]。从常见的食品资源中筛选对自由基有良好清除能力的清除剂，被认为是预防疾病、延缓衰老的有效策略。已有大量研究证明了海带多糖具有出色的抗氧化能力。并且其抗氧化活力同其分子量、单糖组成及结构具有较为密切的关系。如研究显示水提法获得的海带多糖具有较高的糖醛酸和分子量，然而超氧化物和羟基自由基清除能力没有柠檬酸提取海带获得的多糖高。这可能与柠檬酸提取所获得的多糖分子量较小，硫酸根含量高有极大关联[15]。Yun Hou 也认为分子量越小的海带多糖通常具有越好的羟自由基及超氧阴离子清除活性和还原能力。这可能是由于低分子量致多糖结构不紧密，使得更多的硫酸盐和羟基与自由基反应达到抗氧化效果[33]。除此之外，海带多糖浓度与 DPPH 自由基、羟自由基清除能力和铁还原能力活性呈正相关，且多糖的组成和结构对自由基清除能力起关键作用[34]。海带多糖能显著提高过氧化氢酶、谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性，降低脂质过氧化的最终产物丙二醇的浓度和 caspase-3 的活性[35]。有趣的是，Chang-Hu Xue 等[36]则发现多糖的组成及结构相较多糖分子量对多糖的抗氧化能力具有重要的影响，不同分子量的海带多糖都在低密度脂蛋白体系起明显的抗氧化作用，但它们同时富含半乳糖。譬如主链含有→3)-Galp-(1→的海带多糖组分可能具有相当大的抗氧化活性。且主链由 1,3-连接的半乳糖基、1,3-连接和 1,3,6-连接的甘露糖基构成的海带多糖具有更强的羟自由基清除活性。Chun Cui[37]的研究表明硫酸根和半乳糖含量是氧自由基和阳离子自由基清除能力的最关键因素。富含硫酸根的海带多糖具有很强的抗氧化活性，很可能是由于硫酸盐基团具有亲电性，有利于分子内氢的提取。在此研究基础上，谢瑾等[38]用酶解法再次处理酸提的海带多糖得到的降解产物明显增强了抗氧化性能，这是由于酶自身催化活性及酶解位点不同，使得水解后的多糖分子结构和分子量大小存在差异，因此表现出不同的抗氧化能力。

2.2 调节血糖血脂代谢

氧化应激、糖尿病及其并发症之间关系密切相关。机体内自由基增多引起的抗氧化防御系统紊乱被认为是诱发糖尿病的重要因素之一。通过胰岛素耐量和口服葡萄糖耐量试验已证实了海带多糖可以有效改善胰岛素敏感性和葡萄糖耐受性，同时显著降低肝脏组织与脂肪组织中 p-AKT、p-IRSl 的蛋白表达水平[39]。海带多糖可通过增强超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性，进而减少体内脂质过氧化产物的含量，从而发挥抗氧化作用达到降血糖的作用[29]。此外，海带多糖还可以刺激回肠中胰高血糖素样肽-1（glucagon-like peptide-1，GLP-1）的分泌，提高胰高血糖素和回肠促激素转化酶 1 的 mRNA 表达水平，进而实现海带多糖调节血糖[40]。通过四氧嘧啶选择地损伤多种动物胰岛 β 细胞构建的糖尿病动物模型也显示海带多糖还能够调节糖尿病小鼠的蛋白质代谢起到降糖作用[41]。

2.3 调节动脉粥样硬化

血脂异常是动脉粥样硬化（atherosclerosis，AS）及冠心病最为密切的易患因素，血脂代谢异常可促进冠心病和高血压病的发生和发展，且动脉粥样硬化会随着年龄增长加大患病概率，严重危害人类健康。目前临床用于抗动脉粥样硬化的药物大都昂贵且不良反应居多，长期服用患者不能耐受。因此开发来源广泛，副作用较低的保健食品成为热门课题[42]。动脉粥样硬化被认为是病原脂蛋白在动脉壁引起的巨噬细胞炎性反应。受氧自由基氧化的影响，低密度脂蛋白水平升高后会引发巨噬细胞胆固醇聚集和泡沫细胞形成[43]，而泡沫化的巨噬细胞在体内富集会加快动脉粥样斑块的形成。薛磊等[44]研究表明极低密度脂蛋白的过度分泌是动脉粥样硬化发生和发展的主要成因之一，通过诱导泡沫化巨噬细胞模型证实了海带多糖对抑制细胞内脂质聚集有显著作用，而通过海带多糖调控胰岛素信号通路可以显著抑制低密度脂蛋白过度分泌。陈浩然[45]采用高脂饮食诱导低密度脂蛋白受体敲除（$LDLr^{-/-}$）小鼠动脉粥样硬化模型，验证了海带多糖（LJP61A）可以通过减轻血管炎症干预动脉粥样硬化。Fuhua Peng 等[46]从日本海带中分离得到分子量为 2.31×10^6 Da 的均相多糖组分，并发现这种海带多糖组分有效减少动脉粥样硬化形成的斑块和抑制血脂水平的剂量依赖性。

2.4 抗肿瘤

近年来，海洋药物研究和开发兴起，抗肿瘤药物

昂贵且常伴副作用，海带多糖已成为国内外肿瘤学家关注的热点。据报道，海带多糖对多种肿瘤具有抑制作用，包括肝癌、乳腺癌、宫颈癌、人白血病细胞等。海带多糖对宫颈癌 U14 细胞生长的抑制作用最强，且对正常器官不产生任何毒性[47]。丛瑶等[14]选取肝癌、乳腺癌、肺癌、宫颈癌、结肠癌和小鼠腹腔巨噬细胞 RAW264.7 进行体外肿瘤抑制试验，研究结果表明海带多糖对肝癌、肺癌、宫颈癌、结肠癌和小鼠腹腔巨噬细胞 RAW264.7 等都有显著的抑制效果。徐中平等[48]研究了海带多糖组分之岩藻-半乳多糖硫酸酯（fucoidan-galactosan sulfate，FGS）对两株人癌细胞体外增殖和对荷瘤小鼠存活期的影响，研究表明：FGS 抑制了癌细胞的体外增殖，并延长了荷瘤小鼠存活期。除此之外，超氧自由基和羟自由基的清除作用与对 A375 细胞的抗增殖作用呈正相关。故具有较强羟自由基清除能力的海带多糖组分可作为抗肿瘤药物的开发对象[49]。另有研究证实了一定浓度的海带多糖可以抑制人鼻咽癌细胞凋亡[50]和 H22 肝癌细胞[51]。海带多糖跟其他生物活性成分相比易于分离，开发成功能食品既能减少癌症发病率又不易产生毒副作用，大规模生产既可持续发展又节约成本。虽然以上的研究皆表明海带多糖在肿瘤治疗中的安全性，仍有必要进一步确定硫酸化的海带多糖的分子靶点，以阐明海带多糖抗肿瘤作用的具体机制。

2.5 免疫调节作用

免疫刺激是人体用来对抗和预防感染、炎症和癌症的反应机制。免疫系统的防御机制在疾病预防和健康促进中的作用具有重要意义。海带多糖一方面可以直接激活巨噬细胞、B 淋巴细胞、T 淋巴细胞。肝脏组织内炎症介质的分泌受海带多糖的制约[52]。宋剑秋等[30]研究表明海带多糖可以激活小鼠腹腔巨噬细胞从而发挥抗肿瘤的作用。詹林盛等[53]研究发现海带多糖对正常及免疫低下小鼠的免疫功能具有促进作用。Ji Young Lee 等[54]发现在海带多糖的作用下，可以刺激巨噬细胞的转录因子通路增强免疫反应。Taohua Sun 等[55]发现海带多糖通过提高免疫细胞的吞噬作用和体液免疫实现了体内外抗病毒活性。Hungsheng Shang 等[56]使用不同剂量的海带多糖对白血病小鼠进行灌胃，研究发现海带多糖通过增加 B 细胞、T 细胞和巨噬细胞的数量来调节小鼠的免疫反应，保护肝脏免受损伤。这些影响可能是由于 β-葡聚糖直接刺激免疫细胞活化，或是由于其膳食纤维性质的间接影响。然而在研究海带多糖对小鼠免疫应答的影响时，发现海带多糖虽然降低了单核细胞巨噬细胞的吞噬作用，却不影响腹腔巨噬细胞的吞噬作用[57]。另一方面海带多糖可以促进细胞因子的产生，实现对免疫系统的调控。海带多糖可以增加细胞因子和 TLR2 的表达，可作为促进石斑鱼生长和增强免疫力的添加剂[58]，Jianbin Lin 等[59]也发现海带多糖可以有效增强石斑鱼的养殖性能和免疫功能。海带多糖充当抗生素在饲料中起作用，不但可以改善鱼类生产，还不会危害环境，导致鱼类产生抗生素耐药性。但今后的研究还应关注提取方法对海带多糖的免疫潜能的影响。

2.6 益生元作用

粮农组织（Food and Agriculture Organization，FAO）把不被消化且对宿主健康有益的食物成分定义为益生元[60]，这是由于益生元通过调节肠道微生物活性、产生短链脂肪酸。海带多糖不仅不易被人体内源性消化酶水解，而且在体外和体内颇具刺激肠道微生物群活性的潜力，故常被用作发酵过程中有益细菌种群生长的碳源[61-62]。海带多糖的益生元特性引起了不同领域的广泛关注，其中对海带多糖通过益生元作用以调控能量稳态的研究最为深入[63-64]。众多研究表明肥胖患者和高脂饮食小鼠的异常肠道菌群变化通常伴随着厚壁菌门的增加和拟杆菌门的减少[65-66]。在海带多糖的干预过程中，观察到厚壁菌门显著降低，拟杆菌门增加，尤其是类杆菌属[67]。而且，低分子量岩藻聚糖硫酸酯比高分子量岩藻聚糖硫酸酯更有利于人体肠道的健康[68]。说明海带多糖的干预可能可以通过增加消化膳食中多糖的细菌和减少潜在致病细菌来改变肠道微生物群，有效改善由高脂饮食引起的肠道微生物群失调，提示海带多糖可以作为改善能量稳态平衡的食品补充剂。

2.7 抗皮肤光老化

从可药可食的动植物资源，尤其是传统食物中开发出具有抗辐射作用的天然活性物质的研究目前逐渐得到重视。Olesya S. Vishchuk 等[69]比较了天然海带多糖和硫酸化的海带多糖，研究结果表明硫酸修饰的海带多糖对 X-射线有较好的防护作用且明显抑制了癌细胞生成。李德远等[70]则发现从海带中提取的岩藻糖胶及褐藻胶纯品有较好的光老化防护作用。黎静等[71]证实海带多糖可以增强受紫外线辐射皮肤的抗氧化能力，保护皮肤胶原蛋白及微血管内皮细胞，调节皮肤胶原蛋白的合成。以上证据均显示海带多糖具有较好的抗皮肤光老化特性。

2.8 抗疲劳

随着都市生活节奏的加快，越来越多亚健康人群存在工作压力大、生活方式不良等问题，而疲劳就是

亚健康最常见的临床症状,严重影响人们的生活质量和工作状态[72]。疲劳又分为运动疲劳、精神疲劳及慢性疲劳[73]。而运动性疲劳是指由于运动引起身体工作能力下降的现象,天然补益性抗疲劳药物或食品逐渐受到人们的关注,已有研究表明海带多糖可增加小鼠的负重游泳时间,有效降低游泳后血乳酸的含量($P<0.01$),表明还带多糖可推迟运动性疲劳出现并促进疲劳后的恢复[74]。此外,阎俊等对小鼠进行抗疲劳及密闭缺氧试验也表明海带多糖显著提高受试小鼠负重游泳时间和常压缺氧下存活时间,并且明显升高受试小鼠的血红蛋白以达到缓解疲劳的效果[31]。

3 海带多糖在功能食品中的应用进展

3.1 海带多糖饮品

吴晓青等[75]采用复合酶法提取海带多糖,并将提取的海带浓缩后与菊花和甘草配伍,用喷揉法制成的复方海带多糖袋泡茶具有降脂功能。胡志和等[76]以海带为主要原料,采用乳酸菌发酵生产富含海带多糖的饮料。程伟青等[8]采用复合酶法提取海带多糖,将海带多糖提取浓缩液与铁观音茶末和甘草配伍,保存了海带和茶的清香,味道柔和适口,还含有海带多糖和茶多酚等功效成分,具有较好的保健效果。

3.2 基于海带多糖开发食品保鲜膜/剂

程丽林等[9]研究发现海带多糖复合膜可显著缓解辣椒的失重和腐烂率,降低过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性,并保持有较高的叶绿素和 V_C 含量。李春海等[77]从海带中提取了褐藻胶,通过固液分离、沉淀、漂白、转化、脱水等方法对其进行纯化,研究出一种断裂强度非常高的可食用膜。Nima 等[78]研究的海藻酸钠复合保鲜溶液(12.98 g/L 海藻酸钠+0.25 g/L 葵花籽油+11.6 g/L 甘油+3 g/L 柠檬精油),显著抑制了微生物的活性,改善了菠萝的理化性质及感官特性。孙协军等[79]研究发现使用高浓度复合多糖保鲜剂(盐藻多糖 0.06 %、海带多糖 0.03 %和螺旋藻多糖 0.02 %)处理干制中国对虾保鲜和护色效果最好。

3.3 其他

海带是富含海藻多糖、碘质、甘露糖等活性成分的海洋蔬菜,颜玉虾等[80]结合乳酸菌发酵多糖产生大量乳酸这一特点,以海带冻干粉、填充剂、风味调节剂和润滑剂压制成海带乳酸咀嚼片。褐藻酸钠是亲水性的高分子化合物,具有稳定性、薄膜成型性等独特性质。范素琴等[81]在肉制品中添加凝胶型海藻酸钠可提高产品的弹性和脆性。有研究表明在面包、蛋糕、饼干中添加褐藻酸钠,能使饼干和蛋卷的破碎率降低 70 %~80 %,提高蛋糕韧性,防止面包老化并减少切割时产生的碎屑[82]。王庆佳等[83]研究发现在饼干中添加海带有效减缓了淀粉的水解速率,降低食品的血糖生产指数。

4 结语

我国是世界上最主要的海带养殖基地,资源丰富,逐渐成为海洋重要的开发来源,海带加工产业已从海带的初级加工产品逐步转移到更丰富的品种,并实现了基于海带多糖等海带活性物质开发的膜材料等新品种,可为海带加工企业增加经济效益,提高了海带的经济效益和社会效益。此外,海带兼具食用价值和药用价值,利用海带的生物活性和药理作用,进一步在临床试验中对其进行评估,开发满足人们对营养素的需求,能成为大众消费者日常食用的保健品,具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] 贾立军, 郭丹霄. 海带加工制品应用于调味盐产品可行性研究[J]. 盐业与化工, 2015, 44(4): 4–6
[2] 潘春华. 长寿菜海带[J]. 开卷有益–求医问药, 2018(2): 67–67
[3] 刘福利, 梁洲瑞, 张朋艳, 等. 中国海带养殖向离岸深水区发展的初步探讨[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(1): 163–168
[4] 于竹芹, 帅莉, 李晓丹,等. 海带多糖对糖尿病小鼠胰岛素受体表达的影响[J]. 青岛大学医学院学报, 2015(2): 141–145
[5] 郭鸿华. 即食海带产品开发及其生产线设计[D].福州:福建农林大学,2017
[6] 李林, 罗琼, 张声华. 海带多糖的分类提取、鉴定及理化特性研究[J]. 食品科学, 2000, 21(4): 28–32
[7] 许凤清, 吴皓. 海带多糖的研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2005, 12(6): 106–108
[8] 吴晓青, 程伟青, 郭丹霞. 海带多糖降脂袋泡茶的研制[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(5): 70–72
[9] 程丽林, 聂小宝, 王庆国,等. 海带多糖复合涂膜对辣椒保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 342–345
[10] 朱康佳, 张平平, 柴诗缘, 等. 海带鱼骨复合粉饼干的研制[J]. 食品科技, 2015 (10): 160–164
[11] 杨晓雪, 董学前, 张永刚,等. 复合酶法高效提取海带中褐藻糖胶[J]. 食品工业科技, 2017(6): 100–104
[12] 杨晓雪. 海带多糖综合提取纯化工艺的研究[D].泰安:山东农业大学,2017
[13] 周裔彬, 汪东风, 杜先锋,等. 酸化法提取海带多糖及其纯化的研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 103–107
[14] 丛瑶. 厚叶海带 Fucoidan 结构及其寡糖抗肿瘤活性研究[D].大连:大连海洋大学,2017
[15] YUJIAO SUN,SHUTING HOU,SHUANG SONG,et al. Impact of acidic, water and alkaline extraction on structural features, antioxidant activities of *Laminaria japonica* polysaccharides[J].International Journal of Biological Macromolecules, 2018,112(7): 985–995

[16] WAN PENG, YANG XIAO MAN, CAI BING NA, et al. Ultrasonic Extraction of Polysaccharides from *Laminaria japonica* and Their Antioxidative and Glycosidase Inhibitory Activities[J]. 中国海洋大学学报(英文版), 2015, 14(4): 651–662

[17] 娄翠. 广东海带岩藻多糖的分离纯化、结构鉴定及生物活性研究[D].广州:暨南大学, 2012

[18] 任壮, 赵基思, 郑钧源, 等. 超声波协同酶法提取海带多糖工艺优化及海带饮料配制[J]. 现代化工, 2018,38(3): 182–186

[19] 徐扬, 杨保伟, 柴博华, 等. 超声波—酶法提取海带多糖及其抑菌活性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(13): 356–362

[20] 余华.海带多糖中蛋白质去除方法的对比研究[J].成都大学学报(自然科学版),2005(4): 265–268

[21] 董学前, 张艳敏, 张永刚,等. 海带中褐藻糖胶分级纯化及结构分析[J]. 食品工业, 2018,39(6): 182–186

[22] 张文清,左萍萍,徐辰, 等.海带中岩藻多糖的分离纯化与结构分析[J].食品科学,2012,33(1): 68–71

[23] Fertah M, Belfkira A, Dahmane E M, et al. Extraction and characterization of sodium alginate from *Moroccan Laminaria digitata brown seaweed*[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10(S2): s3707–s3714

[24] 李德远, 徐现波, 熊亮,等. 海带的保健功效及海带生理活性多糖研究现状[J]. 食品科学, 2002, 23(7): 151–154

[25] 钱风云, 傅德贤, 欧阳藩. 海带多糖生物功能研究进展[J]. 中国海洋药物, 2003,22(1): 55–59

[26] 李林, 罗琼, 张声华. 海带中褐藻糖胶的组成分析[J]. 中国食品学报, 2001, 1(1): 46–49

[27] Okolie C L, Rajendran S R C K, Udenigwe C C, et al. Prospects of brown seaweed polysaccharides (BSP) as prebiotics and potential immunomodulators[J]. Journal of Food Biochemistry, 2017, 41(5): 1–12

[28] 帅莉,徐新颖,郭云良,等.海带在高脂血症大鼠中的抗氧化作用研究[J].中国海洋药物,2010,29(5): 44–47

[29] 王亚男, 于竹芹, 李晓丹, 等. 海带对小鼠四氧嘧啶糖尿病模型的降血糖作用研究[J]. 临床医学工程, 2012, 19(7): 1063–1065

[30] 宋剑秋, 徐誉泰, 张华坤, 等. 海带硫酸多糖对小鼠腹腔巨噬细胞的免疫调节作用[J]. 中国免疫学杂志, 2000, 16(2): 70

[31] 阎俊, 李林, 谭晓东, 等. 海带多糖对小鼠耐缺氧效应及抗疲劳作用[J]. 公共卫生与预防医学, 2002, 13(3): 7–8

[32] 张翠利, 付丽娜, 杨小云, 等. 活性氧自由基与细胞衰老关系的研究进展[J]. 广州化工, 2015(19): 5–7

[33] HOU Y , WANG J , JIN W , et al. Degradation of *Laminaria japonica fucoidan* by hydrogen peroxide and antioxidant activities of the degradation products of different molecular weights[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 153–159

[34] 张加幸, 苗钧魁, 冷凯良, 等. 收获期内不同品种鲜海带中岩藻多糖含量、组成及其抗氧化活性研究[J]. 应用化工, 2016, 45(11): 2186–2189

[35] CHENG D , LIANG B , LI M , et al. Influence of *Laminarin polysaccahrides* on oxidative damage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 48(1): 63–66

[36] XUE C H, FANG Y, LIN H, et al. Chemical characters and antioxidative properties of sulfated polysaccharides from *Laminaria japonica*[J]. Journal of Applied Phycology, 2001, 13(1): 67–70

[37] CUI C, LU J, SUN–WATERHOUSE D, et al. Polysaccharides from *Laminaria japonica*: Structural characteristics and antioxidant activity[J]. LWT – Food Science and Technology, 2016, 73: 602–608

[38] 谢瑾,林宗毅,王智荣,等.海带多糖酶法降解及其产物生物活性的研究[J].食品研究与开发,2016,37(20): 23–27

[39] 张伟男. 肠道菌群介导海带多糖干预高脂饮食诱导小鼠胰岛素抵抗的调控机制[D].合肥:合肥工业大学,2017

[40] YANG L, WANG L, ZHU C, et al. *Laminarin* counteracts diet–induced obesity associated with glucagon–like peptide–1 secretion[J]. Oncotarget, 2017, 8(59): 99470–99481

[41] 王庭欣,赵文,蒋东升,等.海带多糖对糖尿病小鼠血糖的调节作用[J].营养学报,2001,23(2): 137–139

[42] 黄荣, 王玉琴. 海带多糖对实验性大鼠动脉粥样硬化的预防作用[J]. 南通大学学报:医学版, 2008,28(5): 351–353

[43] 李春梅, 高永林, 李敏, 等. 海带多糖对实验性高血脂鹌鹑的降脂及抗动脉粥样硬化作用[J]. 中药材, 2005, 28(8): 676–679

[44] 薛磊. 海带多糖干预高脂暴露诱发 LDLr(–/–)小鼠动脉粥样硬化发生的调控机制[D].合肥:合肥工业大学, 2015

[45] 陈浩然. 海带多糖 LJP61A 对动脉粥样硬化的调控机制研究[J]. 安徽农业科学,2018,46(21):158–161,171

[46] PENG F H, ZHA X Q, CUI S H, et al. Purification, structure features and anti–atherosclerosis activity of a *Laminaria japonica* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015(81): 926–935

[47] ZhAI Q, LI X, YANG Y, et al. Antitumor activity of a polysaccharide fraction from *Laminaria japonicaon* U14 cervical carcinoma–bearing mice[J]. Tumor Biology, 2014, 35(1): 117–122

[48] 徐中平, 孙卫东, 姜振芳. 海带多糖 FGS 体内外抗癌作用的研究[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2006, 32(2): 103–106

[49] PENG Z, LIU M, FANG Z, et al. Composition and cytotoxicity of a novel polysaccharide from brown alga (*Laminaria japonica*)[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(4): 1022–1026

[50] ZENG M , WU X , LI F , et al. *Laminaria Japonica* Polysaccharides effectively inhibited the growth of nasopharyngeal carcinoma cells *in vivo* and *in vitro* study[J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2017,69(7): 527–532

[51] ZHU Q, ChEN J, LI Q, et al. Antitumor activity of polysaccharide from *Laminaria japonica* on mice bearing H22 liver cancer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016(92): 156–158

[52] NEYRINCK A M, MOUSON A, DELZENNE N M. Dietary supplementation with laminarin, a fermentable marine β (1–3) glucan, protects against hepatotoxicity induced by LPS in rat by modulating immune response in the hepatic tissue[J]. 2007, 7(12): 1497–1506

[53] 詹林盛,张新生,吴晓红,等.海带多糖的免疫调节作用[J].中国生化药物杂志,2001(3): 116–118

[54] YOUNG L J, YOUNG–JIN K, JOO K H, et al. Immunostimulatory Effect of Laminarin on RAW 264.7 Mouse Macrophages[J]. Molecules,

2012, 17(5): 5404–5411

[55] TAOHUA S, XINHUI Z, YING M, et al. Studies on Antiviral and Immuno–Regulation Activity of Low Molecular Weight Fucoidan from *Laminaria japonica*[J]. Journal of Ocean University of China, 2018, v.17(3): 260–266

[56] HUNG–SHENG S, YUNG–LUEN S, CHAO–PING C, et al. Laminarin Promotes Immune Responses and Normalizes Glutamic Oxaloacetic Transaminase and Glutamic Pyruvic Transaminase Levels in Leukemic Mice\r, *In Vivo*[J]. In Vivo, 2018, 32(4): 783–790

[57] SHIH Y, HSUEH S, CHEN Y, et al. Laminarin Promotes Immune Responses and Reduces Lactate Dehydrogenase But Increases Glutamic Pyruvic Transaminase in Normal Mice *In Vivo*[J]. Vivo, 2018, 32(3):523–529

[58] YIN G, LI W, LIN Q, et al. Dietary administration of laminarin improves the growth performance and immune responses in Epinephelus coioides[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2014, 41(2): 402–406

[59] JIANBIN L, PING L, QINGGUO Z, et al. Effect of Laminarin on Growth and Immunity of Pearl Gentian Grouper[J]. 动物与饲料科学(英文版), 2017, 9(4): 259–262

[60] PINEIRO M, ASP N G, REID G, et al. FAO Technical Meeting on Prebiotics[J]. Journal of Clinical Gastroenterology, 2008, 42(8): S156–S159

[61] WANG X, WANG X, JIANG H, et al. Marine polysaccharides attenuate metabolic syndrome by fermentation products and altering gut microbiota: An overview[J]. Carbohydrate Polymers, 2018,195: 601–612

[62] WALSH A M, SWEENEY T, O´Shea C J, et al. Effect of dietary laminarin and fucoidan on selected microbiota, intestinal morphology and immune status of the newly weaned pig.[J]. British Journal of Nutrition, 2013, 110(9): 1630–1638

[63] NGUYEN S G, KIM J, GUEVARRA R B, et al. Laminarin favorably modulates gut microbiota in mice fed a high–fat diet[J]. Food & Function, 2016, 7(10): 4193–4201

[64] 段萌萌, 艾春青. 海带多糖通过调节肠道微生物群正常化来减轻小鼠肥胖[C].青岛:中国食品科学技术学会第十五届年会,2018

[65] GAO JIE,LIN LIANZHU,CHEN ZIJIE,et al. In Vitro Digestion and Fermentation of Three Polysaccharide Fractions from *Laminaria japonica* and Their Impact on Lipid Metabolism–Associated Human Gut Microbiota.[J]. Journal of agricultural and food chemistry,2019, 67(26): 7496–7505

[66] DR CHRISTELLE DEVILLE, MYRIAM GHARBI, GUY DANDRIFOSSE, et al. Study on the effects of laminarin, a polysaccharide from seaweed, on gut characteristics[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2007,87(9):1717–1725

[67] AI CHUNQING, JIANG PINGRUI, LIU YILI, et al. The specific use of alginate from *Laminaria japonica* by Bacteroides species determined its modulation of the Bacteroides community.[J]. Food & function,2019,10(7): 4304–4314

[68] 谢洁玲, 史晓翀, 史姣霞,等. 人肠道微生物对海带岩藻聚糖硫酸酯及其寡糖的降解利用[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(1): 50–56

[69] 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]. carbohydrate research, 2011, 346(17): 2769–2776

[70] 李德远, 徐战, 王海滨,等. 海带岩藻糖胶及褐藻胶抗辐射效应研究[J]. 武汉轻工大学学报, 1999(2): 18–22

[71] 黎静, 李冠虹, 石殿春,等. 海带多糖对紫外线辐射小鼠皮肤胶原蛋白及微血管内皮细胞的影响[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(3): 198–201

[72] WANG WEI, RUSSELL ALYCE, YAN YUXIANG. Traditional Chinese medicine and new concepts of predictive, preventive and personalized medicine in diagnosis and treatment of suboptimal health.[J]. The EPMA journal,2014,5(1): 1878–5077

[73] 鲍德国.疲劳的概念和分类[J].全科医学临床与教育,2005,3(3): 135–138

[74] 胡建英, 李八方, 李志军, 等. 八种海洋生药抗疲劳作用的初步研究[J]. 中国海洋药物, 2000, 19(2): 56–58

[75] 吴晓青, 吴水华, 钟碧萍, 等. 复方海带多糖袋泡茶的研制[J]. 食品研究与开发, 2017(17): 81–84

[76] 胡志和,韩宝丽,贾嘉,等.富含海带多糖的乳酸发酵饮料的研究[J].食品科学,2007,28(9): 364–368

[77] 李春海, 王婕, 刘泽姿, 等. 褐藻胶提取及制备可食性膜工艺研究[J]. 广东石油化工学院学报, 2016, 26(3): 22–24

[78] AZARAKHSH N, OSMAN A, GHAZALI H M, et al. Lemongrass essential oil incorporated into alginate–based edible coating for shelf–life extension and quality retention of fresh –cut pineapple [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88(2): 1–7

[79] 孙协军,范靖晗,李秀霞,等.复合海藻多糖对干制中国对虾新鲜度及色泽的影响[J].食品工业,2018,39(2): 91–94

[80] 颜玉虾. 海带乳酸菌咀嚼片的研制[D]. 福州:福建农林大学,2016

[81] 范素琴, 陈鑫炳, 张娟娟, 等. 海藻酸钠的添加方式对肉丸品质的影响[J]. 肉类工业, 2013(9): 33–35

[82] 赵明军. 褐藻胶在食品工业上的应用[J]. 食品科学, 1986, 7(8): 38–40

[83] 王庆佳, 李智, 郑宝东,等. 海带酥性饼干的研制及血糖生成指数评价[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(7): 184–188

收稿日期:2019–08–11