

海藻主要活性物质及其生物功能研究进展

刘楠, 孙永, 曾帅, 周德庆*

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要: 海藻是一类品种极其丰富的海洋植物, 是海洋生物资源的重要组成部分。近年来, 随着人们对海洋生物资源研究的逐渐深入, 海藻中的生物活性物质及其生物学功能越来越受到人们的重视, 成为国内外研究的热点。海藻中富含多糖类、多酚类、萜类、蛋白质、氨基酸、多不饱和脂肪酸等活性物质, 为海藻提供了多种的生物学功能, 如抗氧化活性、抗菌活性、调节免疫活性、抗肿瘤活性、抗凝血活性、降低血脂活性、降血糖活性等。为了更好地利用海藻生物资源, 为海藻资源在食品、医药等领域有更广阔的利用空间, 本文就海藻的主要生物活性物质及其生物学功能的研究进展进行综述, 详细阐述了海藻主要活性物质的组成、生物学功能及其作用机制, 为海洋资源的进一步开发研究提供参考。

关键词: 海藻; 生物活性物质; 生物功能; 海洋生物资源

Research progress on bioactive substances and its biological activity of algae

LIU Nan, SUN Yong, ZENG Shuai, ZHOU De-Qing*

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: Seaweed is a kind of extremely rich variety of species of marine plants, which is an important part of marine biological resources. In recent years, with the gradual deepening of the research on marine biological resources, the biological active substances and their biological functions in the seaweed have been paid more and more attention, and have become a hot spot in the domestic and foreign research. Seaweed is rich in polysaccharide, polyphenols, protein, amino acids, polyunsaturated fatty and other active substances, to provide a variety of biological functions, such as antioxidant activity, antibacterial activity, regulation of immune activity, antitumor activity, anticoagulation activity, reducing blood lipid activity, hypoglycemic activity, etc. In order to make use of the resources of marine algae, the algae resources in food, medicine and other fields have more extensive use of space, this paper summarized the main biological active substances and their biological functions.

KEY WORDS: seaweed; bioactive substances; biological activity; marine biological resources

1 引言

海藻(algae)是一类品种极其丰富的海洋植物, 是海洋

生物资源的重要组成部分, 主要包括褐藻、红藻、蓝藻、绿藻, 另外还包括微藻中的硅藻、甲藻、金藻等。通过对海藻类植物的有效化学成分研究, 发现藻类中的活性物质

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费(20603022015001)、青岛市市南区科技发展资金项目(2014-14-008-SW)

Fund: Supported by the Special Scientific Research Funds for Central Non-profit Institutes, Yellow Sea Fisheries Research Institutes (20303022015001) and the Science and Technology Development of Shinan District, Qingdao (2014-14-008-SW)

*通讯作者: 周德庆, 研究员, 主要研究方向为水产品加工与质量安全。E-mail: zhouqd@ysfri.ac.cn

*Corresponding author: ZHOU De-Qing, Professor, Yellow Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, No. 106, Nanjing Road, Qingdao 266071, China. E-mail: zhouqd@ysfri.ac.cn

主要分为多糖类、萜类、蛋白类、多酚类、甾醇类、环状多硫化物、大环内酯类、微量元素等^[1]。藻类作为一种优良生物活性物质的重要天然资源,其市场前景十分广阔。本文对海藻中重要的活性物质及其生物功能进行了综述,为海洋资源的进一步开发研究提供参考。

2 海藻主要的活性物质

目前从海藻中已经分离出大量的生物活性物质,主要包括多糖、蛋白质、萜类、甾醇类、多酚类、环状多硫化物、大环内酯类等。海藻活性物质具有天然、新型、独特等优势,越来越受到人们广泛关注。以下对海藻中主要生物活性物质的研究进展进行简要概述。

2.1 多糖类

多糖是所有生命机体的重要组分,在控制细胞分裂、调节细胞生长以及维持生命机体正常代谢方面具有重要作用。海藻多糖是海藻中的重要结构物质,是构成海藻的主要成分,在维持海藻的生理生态方面起着重要作用。海藻多糖成分复杂,是由多个相同或者不同的单糖基通过糖苷键(一般为 C1,3-和 C1,4-键)相连形成的高分子碳水化合物^[2]。目前已从海藻中分离纯化得到多种海藻多糖,主要包括褐藻多糖、红藻多糖、绿藻多糖和蓝藻多糖等。褐藻多糖主要来自海带、鼠尾藻、昆布、羊栖菜等,是一类含有一定数量岩藻糖和硫酸基的水溶性杂聚糖,是褐藻特有的一种化学组分^[3]。红藻多糖主要有琼胶、卡拉胶、紫菜多糖等,均是以半乳糖为单位结合的半乳聚糖。绿藻多糖主要存在于细胞壁中,不易溶于水;少量存在于细胞质中,主要为水溶性的硫酸多糖^[4]。蓝藻多糖主要是指螺旋藻多糖,是从螺旋藻藻体、螺旋藻培养液中提取分离出来的水溶性多糖,是由多种单糖基通过 β -型糖苷键连接组成的复杂多糖^[5]。

2.2 多酚类

海藻多酚是海藻中主要的具有生物活性的一种天然功能因子,近年来成为酚类领域的研究热点。随着研究的逐渐深入,海藻多酚独特的生物学活性越来越受到人们的关注,成为海洋天然药物及生物功能性制品的重要来源。海藻多酚按其酚性羟基的数量可分为简单酚类和多酚类^[6]。简单酚类为单酚类化合物,主要包括卤代单酚和不含卤素的单酚。目前已经明确的卤代多酚有 30 多种,主要为溴代单酚、溴代单酚衍生物和溴代二酚化合物^[3]。不含卤素的单酚主要是从一些红藻和褐藻中分离出的简单酚的衍生物和带有脂肪链的酚类,主要为羟基苯乙酸、烷化间苯三酚和烷化间苯二酚等^[6]。海藻多酚中重要的成分为间苯三酚及其衍生物^[7]。由于酚类的特殊性质,其在藻类体内极易进行聚合形成极其复杂的多酚化合物。多酚的聚合方式主要有环对环 C-C 链相连的多羟基联苯酚、醚链链接的

多羟基苯醚、多羟基二联苯和多羟基苯醚混合型多羟基联苯多苯醚、多邻位羟基苯醚^[8]。

2.3 萜类

萜类化合物是海藻的次生代谢物,种类繁多,是近年来海洋化合物的研究热点^[3]。国内外大量研究表明,海藻中含有丰富的萜类化合物,根据其化学结构主要分为卤代萜类化合物和芳香族萜类化合物^[1]。杨军丽^[9]从蜈蚣藻中分离出萜类化合物,包括 20 个新结构的倍半萜、6 个新结构三萜化合物;董春景等^[10]从凹顶藻属海藻中提取到具有抗乳腺癌作用的萜类化合物;张艾玲等^[11]研究表明凹顶藻萜类化合物对酒精性肝损伤起到有效的保护作用。

2.4 蛋白、氨基酸类

海藻是丰富的蛋白质来源,海藻蛋白的氨基酸组成与陆生植物大豆的基本一致,有利于人体的消化吸收^[12]。藻类蛋白大多具有降压、调节血脂平衡及促进免疫系统的功能。目前研究较多的是藻蓝蛋白。藻蓝蛋白是一种水溶性蛋白,存在于蓝藻、红藻等海藻中,是重要的捕光色素蛋白藻胆蛋白的组成部分^[13]。海藻中存在一些以游离或小肽的形式存在的非蛋白质类氨基酸。海藻非蛋白质氨基酸根据结构可分为酸性、碱性、中性氨基酸和含硫氨基酸^[13]。

2.5 多不饱和脂肪酸

多不饱和脂肪酸(PUFA)指由 18~22 个碳原子组成的直链脂肪酸,含有两个或两个以上双键。其中最具有代表性的是二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA),近年来越来越受到人们的重视。有研究表明 PUFA 大量存在于藻类中,是优秀的饱和脂肪酸的重要来源。吴庆^[14]采用人工培育的方法培养微藻,并从微藻中提取出大量饱和脂肪酸;杜玉兰^[15]优化了鼠尾藻中提取多饱和脂肪酸的工艺,多饱和脂肪酸的纯度可达 85%以上;陶平等^[16]分析了大连沿海 3 中大型速生海藻的营养成分分析,其中 3 中海藻的不饱和脂肪酸含量很高,平均占脂肪酸含量的 61%。

2.6 其他

除了目前研究较多的海藻多糖类、蛋白类、多酚类、萜类和不饱和脂肪酸类外,海藻中还含有许多其他的有效化学成分,比如王秀英用高效液相色谱法测得海藻中含有丰富的水溶性维生素^[17];有研究者在藻类中分离出具有降低胆固醇浓度的生物碱类^[3],此外还在藻类中发现了硫杂环类、大环内酯类、甾醇类等物质,这些结构特殊的化合物存在于藻类中,有着广泛的生物功能。

3 海藻活性物质的主要生物学功效

3.1 抗氧化活性

海藻中的褐藻多糖和多酚具有较强的抗氧化活性,能抑制活性氧自由基的产生并促进其清除^[18]。研究表明褐

藻多糖硫酸酯对超氧离子具有一定的抑制作用^[19]; Kang 等^[20]通过试验证明褐藻多酚具有较强的抗氧化能力,能够清除 DPPH 和提高三价铁的还原抗氧化能力。海藻多酚能够通过降低小鼠的体内丙二醛(MDA)的含量,提高超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性,提高小鼠抗氧化能力^[21]。褐藻多酚具有明显的抗氧化活性^[22];海藻酸钠寡糖具有较好的抗氧化活性,能够清除超氧离子和羟自由基,并且有较好的剂量效应^[23]。

3.2 抗菌活性

郭奇等^[24]对不同分子量的多酚抗菌活性进行了研究,结果表明其抗菌活性与分子量有关,低分子量的海藻多酚具有较高的抗菌活性。Stabili 等^[25]在长松龙须菜中提取出的不饱和脂肪酸(主要成分是棕榈酸)具有很强的抗菌效果,是天然的抗生素来源。Rechter 等^[26]从节螺旋藻粉分离出具有明显抗病毒活性的海藻多糖。Sarah 等研究了海藻提取物的抗菌活性,研究表明海藻提取物对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等都具有良好的抗菌效果^[27];酸藻的水相提取物和孔石莼的有机相提取物对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有抑制作用^[22]。海藻酸钠寡糖对肠炎沙门氏菌、绿脓假单胞菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、嗜水气单胞菌、白色念珠菌、鳃弧菌等都具有良好的抑菌效果^[23,28]。

3.3 免疫调节与抗肿瘤活性

海藻中的活性物质具有免疫调节活性与抗肿瘤活性。活性物质与巨噬细胞和脾细胞作用产生细胞因子和趋化因子,增强机体的免疫功能,从而间接抑制肿瘤细胞的生长^[29]。巨噬细胞是先天免疫系统中重要的免疫细胞,具有强大的吞噬活性,对机体内稳态具有调节作用^[30]。海藻多糖可以促进免疫细胞活化和成熟,诱导巨噬细胞、中性粒细胞产生肿瘤坏死因子,发挥抑制肿瘤生长的作用^[31]。研究表明褐藻多糖硫酸酯通过增强细胞与分子免疫应答水平,调节细胞因子分泌,从而抑制小鼠肝癌细胞的生长^[32]。试验表明海藻酸钠寡糖可诱导细胞 20 种细胞因子分泌的增加,提高机体的免疫能力^[33];徐秀丽等^[22]研究发现枝状软骨藻、松节藻、鸭毛藻、小粘膜藻、点叶藻的甲醇提取物对 KB 细胞和 HT-29 细胞具有选择性细胞毒活性,其中小粘膜藻具有最高的抗肿瘤活性。三叉仙菜、龙须菜、海萝和小粘膜藻的提取物具有较好的免疫增强活性^[22]。除了通过提高机体免疫功能来实现抗肿瘤的功效外,海藻功能因子还可以直接抑制一些肿瘤细胞的生长。Hyun 等^[34]研究发现,褐藻多糖硫酸酯处理的细胞出现了 DNA 断裂、染色体凝聚、G1 期亚二倍体细胞增加等细胞凋亡的情况,表明其能抑制 HCT-15 结肠癌细胞的生长。Iwamoto 等^[35]发现海藻酸钠寡糖可诱导人白血病 U-937 细胞形态的变化,产生细胞凋亡。

3.4 抗凝血活性

抗凝血剂通过灭活或抑制凝血因子的激活,从而实现延迟或阻止血液的凝固^[36]。藻类是天然的抗凝血剂,目前已经广泛受到人们的关注^[37,38]。研究表明海藻的抗凝血活性主要表现在褐藻中的硫酸酯多糖可激活抗凝血酶 III,从而抑制抗凝血因子的活性^[39]。褐藻多糖的抗凝血活性与硫酸基含量和相对分子量(M_r)有关,并且不同来源的褐藻多糖硫酸酯的抗凝血活性也存在很大的差异^[40]。彭波等^[41]证实褐藻多糖硫酸酯能有效延长小鼠凝血时间,且存在剂量依赖性。汪艳秋等^[42]研究表明刺松藻多糖能显著延长家兔的凝血时间,抑制血小板的凝集。

3.5 调节血脂和血糖的功能

海藻中的活性物质具有明显的降低血脂和血糖的作用,其有效成分可作为降血脂和降血糖的药物,对高血脂引起的动脉粥样硬化、肥胖、冠心病和高血糖都有显著的效果。熊霜等^[43]研究表明海藻膳食纤维能显著降低小鼠血清中总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇的水平,升高高密度脂蛋白胆固醇的水平;褐藻多糖硫酸酯具有显著降低血脂^[44]、血糖^[45]的功效。褐藻(*Ecklonia stolonifera*)中的多酚物质可以有效抑制血糖和油脂氧化水平^[46],并通过抑制淀粉酶和葡萄糖酶,协同作用控制淀粉分解和血糖水平^[47]。松节藻、肠浒苔和扁江蓠的提取物能有效抑制 β -葡萄糖苷酶的活性^[22]。

3.6 其他活性

海藻生物活性物质除了具有上述的生物活性外,还具有很多生物活性。Lee 等研究表明,来源于褐藻的硫酸酯多糖对人的成纤维细胞具有抗 γ 射线的作用^[48];Jung 等将红藻中的多酚提取物作用于小鼠哮喘模型,发现具有良好的效果^[49];常秀莲等报道了海藻吸附重金属离子的机理,表明其具有良好的重金属吸附能力^[50];Grünewald 等研究表明红藻中分离出的多糖类物质具有消炎抗氧化的作用等^[51]。

4 展 望

海藻是一种富含多种生物活性物质,且具有广泛生物功能的海洋生物资源。我国海藻资源极其丰富,有效利用海藻资源这一优势,关注海藻中的活性成分和生物功能,研究和开发新型的海洋功能食品和生物功能性制品将成为今后的研究热点。目前对海藻活性物质的分离纯化及生物功能的研究较为广泛,但对其化学结构与生物活性的关系、生物活性的作用机理、分子水平的调控机制尚不完全清楚,还有待进一步的研究。此外如何有效利用海藻生物资源,开发藻类天然药物、功能性食品和生物制品的研究具有重要的意义。

参考文献

- [1] 韩玲, 张淑平, 刘晓慧. 海藻生物活性物质应用研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(8): 1794–1800.
- Han L, Zhang SP, Liu XH. Research on bioactive substances in algae [J]. Chem Ind Eng Prog, 2012, 31(8): 1794–1800.
- [2] 罗先群, 王新光, 杨东升. 海藻多糖的结构、提取和生物活性研究新进展[J]. 中国食品添加剂, 2006, (4): 100–105.
- Luo XQ, Wang XG, Yang DS. Recent advances in seaweeds polysaccharide-survey on structure, extraction and biological activity [J]. China Food Add, 2006, (4): 100–105.
- [3] 潘敏翔, 马天翔, 郭丽, 等. 海藻活性物研究概况及抗辐射研究进展[J]. 解放军药学报, 2010, 26(2): 165–169.
- Pan MX, Ma TX, Guo L, *et al.* Research on marine algae active substances and its anti-radiation activity [J]. Pharm J Chin PLA, 2010, 26(2): 165–169.
- [4] 周华杰, 马兴亮, 崔秀花, 等. 海藻粉及其活性多糖的研究进展[J]. 中国饲料添加剂, 2013, 129(3): 9–13.
- Zhou HJ, Ma XL, Cui XH, *et al.* Research and advancement of seaweed powder and its active polysaccharide [J]. Chin Feed Add, 2013, 129(3): 9–13.
- [5] 刘晋, 郭长江, 刘嘉喜. 海藻多糖免疫调节作用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2007, 5: 49–51.
- Liu J, Guo CJ, Liu JX. Research on the immune regulation of seaweed polysaccharide [J]. Food Nutr China, 2007, 5: 49–51.
- [6] 李冰心, 李颖畅, 励建荣. 海藻多酚的提取及其生物活性研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2012, 48(5): 12–15.
- Li BX, Li YC, Li JR. The research progress of extraction and biological activity of algae polyphenols [J]. Food Ferm Technol, 2012, 48(5): 12–15.
- [7] 杨会成, 董士远, 刘尊英, 等. 海藻中多酚类化学成分及其生物活性研究进展[J]. 中国海洋药物, 2007, 26(5): 53–59.
- Yang HC, Dong SY, Liu ZY, *et al.* Research on chemical constituents and biological activity of polyphenols in algae [J]. Chin J Mar Drugs, 2007, 26(5): 53–59.
- [8] Keusgen M, Glombitza KW. Phloretols, fuhalsols, and their derivatives from the brown alga *Sargassum spinulligerum* [J]. Phytochemistry, 1995, 38(4): 975–985.
- [9] 杨丽军, 四种重要的萜类化学成分研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- Yang JL. Phytochemical studies on terpenoids from four traditional chinese medicines [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [10] 董春景, 梁惠, 贺娟, 等. 海藻萜类化合物对二甲基苯蒽诱导的大鼠乳腺癌的抑制作用[J]. 营养学报, 2007, 29(2): 197–199.
- Dong CJ, Liang H, He J, *et al.* The antitumor effects of *Laurencia Terpenoids* extract on breast carcinoma induced by DMBA in rats [J]. Acta Nutr Sin, 2007, 29(2): 197–199.
- [11] 张艾玲, 梁惠, 逢丹, 等. 海藻萜类化合物对大鼠记忆酒精肝损伤的保护作用[J]. 中国食品学报, 2008, 8(3): 23–27.
- Zhang AL, Liang H, Pang D, *et al.* Prevention and treatment of acute alcoholically hepatic injury with laurencia extract in rats [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2008, 8(3): 23–27.
- [12] 陶冉, 位正鹏, 崔荣, 等. 藻类色素蛋白的资源开发和应用研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(4): 377–380.
- Tao R, Wei ZP, Cui R, *et al.* Resource development and application of algal pigment protein [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, 31(4): 377–380.
- [13] 荣辉, 林祥志. 海藻非蛋白质氨基酸的研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2013, 35(3): 52–57.
- Rong H, Lin XZ. Progress on non-protein amino acids from marine algae [J]. Amino Acids Bio Res, 2013, 35(3): 52–57.
- [14] 吴庆. 微藻 *Nannochloropsis* SP. 的培养和海藻多不饱和脂肪酸提取的初步研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
- Wu Q. The primary research of microalgae *Nannochloropsis* SP. culture and extraction of its' PUFAs [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004.
- [15] 杜玉兰. 鼠尾藻中多不饱和脂肪酸分离与纯化的初步研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
- Du YL. Study on enrichment to PUFAs of *Sargassum Thumbergii*. [D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [16] 陶平, 何凤伟. 大连沿海3中大型速生海藻的营养组成分析[J]. 中国水产科学, 2001, 7(4): 60–63.
- Tao P, He FW. An analysis of nutrient components in kinds of quickly-growing big seaweeds along Dalian coastal waters [J]. J Fish Sci China, 2011, 7(4): 60–63.
- [17] 王秀英. 高效液相色谱法测定天然海藻中的多种水溶性维生素[J]. 色谱, 1993, (6): 364–366.
- Wang XY. The determination of the water-soluble vitamins in natural seaweed by high performance liquid chromatography [J]. Chin J Chromatogr, 1993, (6): 364–366.
- [18] 刘振峰, 戴圣佳, 吕卫金, 等. 褐藻多糖硫酸酯的生物活性与提取技术研究进展[J]. 食品与药品, 2015, 17(1): 71–75.
- Liu ZF, Dai SJ, Lv WJ, *et al.* Research progress on biological activity and extraction technology of fucoidan [J]. Food Drug, 2015, 17(1): 71–75.
- [19] 冯珍鸽, 王力, 吴永沛, 等. 褐藻中岩藻聚糖的化学成分及其对超氧离子的抑制作用[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(3): 66–68.
- Feng ZG, Wang Li, Wu YP, *et al.* Study on chemical composition and dismutation to O₂- free radical of fucoidan in brown algae [J]. Food Res Dev, 2010, 31(3): 66–68.
- [20] Kang K, Park Y, Hwang HJ, *et al.* Antioxidative properties of brown algae polyphenolics and their perspectives as chemopreventive agents against vascular risk factors [J]. Arch Pharm Res, 2003, 26(4): 286–293.
- [21] 康静, 李萌, 冯冲, 等. 海带多酚的分离提取及对小鼠抗氧化能力的影响[J]. 食品科技, 2011, 36(7): 178–181.
- Kang J, Li M, Feng C, *et al.* Isolation of phorotannins from *Laminaria Japonica* and antioxidative effects on mice [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(7): 178–181.
- [22] 徐秀丽, 范晓, 宋福行. 中国经济海藻提取物生物活性[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 55–63.
- Xu XL, Fan X, Song FH. Study on bioactivity of chinese marine algae extracts [J]. Ocean Limn Sin, 2004, 35(1): 55–63.
- [23] 张玉娟, 罗福文, 姚子昂, 等. 海藻酸钠寡糖生物活性的研究进展[J]. 中国酿造, 2014, 33(1): 5–8.
- Zhang YJ, Luo FW, Yao ZA, *et al.* Research progress about biological activity of sodium alginate oligosaccharides [J]. China Brew, 2014, 33(1): 5–8.
- [24] 郭奇, 魏玉西, 殷邦忠, 等. 鼠尾藻多酚分级组分的抑菌活性研究[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(1): 117–121.

- Guo Q, Wei YX, Yin BZ, *et al.* Study on the antimicrobial activity of different fractions of phlorotannins from *Sargassum thunbergii* kuntze [J]. Prog Fish Sci, 2010, 31(1): 117–121.
- [25] Stabili L, Acquaviva MI, Biandolino F, *et al.* The lipidic extract of the seaweed *Gracilariopsis longissima* (Rhodophyta, Gracilariiales): a potential resource for biotechnological purposes [J]. New Biotechnol, 2012, 29(3): 443–450.
- [26] Rechter S, König T, Auerochs S, *et al.* Antiviral activity of *Arthrospira*-derived spirulan-like substances [J]. Ant Res, 2006, 72(3): 197–206.
- [27] Sarah SA, Nevein AR, Hend AE, *et al.* Antibacterial substances from marine algae isolated from Jeddah coast of Red Sea, Saudi Arabia [J]. Sad J Bio Sci, 2014, 21(1): 57–64.
- [28] Yan GL, Guo YM, Yuan JM, *et al.* Sodium alginate oligosaccharides from brown algae inhibit *Salmonella enteritidis* colonization in broiler chickens [J]. Poultry Sci, 2011, 90(7): 1441–1448.
- [29] 陈宏硕, 李晓颖, 冯鹏棉, 等. 螺旋藻多糖抗 H22 肿瘤作用研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 35(5): 120–123.
- Chen HS, Li XY, Feng PM, *et al.* Study on anti-tumor effect of spirulina polysaccharide on H22 in mice [J]. Food Res Dev, 2008, 35(5): 120–123.
- [30] 李文武, 殷光文, 黄志坚. 海藻多糖生物活性的研究进展[J]. 福建畜牧兽医, 2014, 36(4): 19–22.
- Lee WW, Yin GW, Huang ZJ. Advances in the biological activity of seaweed polysaccharides [J]. Fujian J Anim Hus Veter Med, 2014, 36(4): 19–22.
- [31] 孙抗, 林江, 张婷, 等. 海藻多糖抗肿瘤机制研究综述[J]. 广西中医学院报, 2012, 15(2): 103–105.
- Sun K, Lin J, Zhang T, *et al.* Study on the anti-tumor mechanism of seaweed polysaccharide [J]. J Guangxi Tradit Chin Med Univ, 2012, 15(2): 103–105.
- [32] 刘宪丽, 刘东颖, 汪艳秋, 等. 褐藻多糖硫酸酯免疫调节和抗肿瘤活性研究[J]. 中国微生物学杂志, 2010, 22(12): 1074–1076.
- Liu XL, Liu DY, Wang YQ, *et al.* Immunomodulation and antitumor activity of Fucoidan from *Undaria pinnatifida* in vitro [J]. Chin J Microecol, 2010, 22(12): 1074–1076.
- [33] Yamamoto Y, Kurachi M, Yamaguchi K, *et al.* Stimulation of multiple cytokine production in mice by alginate oligosaccharides following intraperitoneal administration [J]. Carbohydr Res, 2007, 342(8): 1133–1137.
- [34] Hyun JH, Kim SC, Kang JI, *et al.* Apoptosis Inducing activity of fucoidan in HCT-15 colon carcinoma cells [J]. Biol Pharm Bull, 2009, 32(10): 1760–1764.
- [35] Iwamoto Y, Xu X, Tamura OT, *et al.* Enzymatically depolymerized alginate oligomers that cause cytotoxic cytokine production in human mononuclear cells [J]. Biosci, Biotech Bioch, 2003, 67(2): 258–263.
- [36] Jung WK, Je JY, Kim HJ, *et al.* A novel anticoagulant protein from *Scapharca broughtonii* [J]. J Biochem Mol Biol, 2002, 35(2): 199–205.
- [37] 李敬, 魏玉西, 杜桂彩, 等. 鼠尾藻多酚的抗凝血活性研究[J]. 中药新药与临床药理, 2007, (93): 97–101.
- Li J, Wei YX, Du GC, *et al.* Anticoagulant activities of phlorotannins from *Sargassum thunbergii* Kuntze [J]. Tradit Chin Drug Res Clin Pharm, 2007, (93): 97–101.
- [38] 程忠玲. 褐藻糖胶的结构表征与体外抗凝血活性[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2007, 31(6): 787–790.
- Cheng ZL. Structural characterization and antithrombogenicity in vitro of fucoidan [J]. J Hebei Norm Univ (Nat Sci Ed), 2007, 31(6): 787–790.
- [39] 李哲, 罗静海, 杜晓俊, 等. 海带褐藻多糖提取方法改进及抗凝血探究[J]. 江苏农业科学, 2010, (4): 297–298.
- Li Z, Luo JH, Du XJ, *et al.* Research on alginic polysaccharide extraction and anticoagulation [J]. Jiangsu Agric Sci, 2010, (4): 297–298.
- [40] Morozov GE, Ustiuzhanina NE, Bilan MI, *et al.* Anticoagulant activity of fucoidans from brown algae [J]. Biomed Khim, 2007, 54(5): 597–606.
- [41] 彭波, 赵金华. 褐藻多糖硫酸酯的抗凝和纤溶活性[J]. 中草药, 2001, 32(11): 1015–1018.
- Peng B, Zhao JH. Anticoagulation and fibrinolysis activity of fucoidan [J]. Chin Trad Herb Drug, 2001, 32(11): 1015–1018.
- [42] 汪艳秋, 刘宪丽, 刘东颖, 等. 刺松藻多糖抗凝血及抗血栓作用的研究[J]. 安徽医药, 2011, 15(7): 804–806.
- Wang YQ, Liu XL, Liu DY, *et al.* Anticoagulant and antithrombotic effect of polysaccharide of *Codium fragile* [J]. Anhui Med Pharm J, 2011, 15(7): 804–806.
- [43] 熊霜, 肖美添, 叶静. 复合型海藻膳食纤维功能食品的降血脂作用[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 220–225.
- Xiong S, Xiao MT, Ye J. Hypolipidemic effect of functional foods containing dietary fiber from edible seaweeds [J]. Food Sci, 2014, 35(17): 220–225.
- [44] Philippis DE, Paperi R, Sili C. Heavy metal sorption by released polysaccharides and whole cultures of two exopolysaccharide-producing cyanobacteria [J]. Biodegradation, 2007, 18(2): 181–187.
- [45] 李涛, 吉爱国. 褐藻多糖硫酸酯的药理活性及作用机制研究进展[J]. 中国生化药物杂志, 2008, 29(3): 216–219.
- Li T, Ji AG. Research progress on pharmacological activities and mechanism of sulfated fucan [J]. Chin J Biochem Pharm, 2008, 29(3): 216–219.
- [46] Iwa K. Antidiabetic and antioxidant effects of polyphenols in brown alga *Ecklonia stolonifera* in genetically diabetic KK-A^y Mice [J]. Plant Food Hum Nut, 2008, 63(4): 163–169.
- [47] Nwosu F, Morris J, Lund VA, *et al.* Anti-proliferative and potential anti-diabetic effects of phenolic-rich extracts from edible marine algae [J]. Food Chem, 2011, 126(3): 1006–1012.
- [48] Lee KH, Bae SW, Cho CH, *et al.* Fucoidan protects human skin fibroblast cell line HS68 against γ -radiation-induced damage [J]. J Micro Biotechnol, 2009, 2(1): 38–41.
- [49] Jung WK, Choi I, Oh S, *et al.* Anti-asthmatic effect of marine red alga (*Laurenciaudulata*) polyphenolic extracts in a murine model of asthma [J]. Food Chem Toxicol, 2009, 47(2): 293–297.
- [50] 常秀莲, 王文华, 冯永梅. 海藻吸附重金属离子的研究[J]. 海洋通报, 2003, 22(2): 39–44.
- Chang XL, Wang WH, Feng YM. Investigation of heavy metal biosorption on algae [J]. Mar Sci Bull, 2003, 22(2): 39–44.
- [51] Grinewald N, Alban S. Optimized and standardized isolation and structural characterization of anti-inflammatory sulfated polysaccharides from the red alga *Delesseriasanguinea* (Hudson) Lamouroux (Ceramiaceae, Delesseriaceae) [J]. Biomacromolecules, 2009, 10(11): 2998–3008.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



刘楠, 助理研究员, 主要研究方向
为海洋功能食品与生物制品。
E-mail: liunan@ysfri.ac.cn



周德庆, 博士, 研究员, 博士生导师,
主要研究方向为水产品加工与质量安全。
E-mail: zhouqd@ysfri.ac.cn

补充说明

本刊 2015 年第 7 期(2015, (7): 2863-2868)罗佳等作者“液相色谱-串联质谱法测定大米中异噁唑草酮及代谢物残留量”一文中做如下更改:

罗佳¹, 沈睿至², 杨长志^{2*}

LUO Jia¹, SHRN Rui-Zhi², YANG Chang-Zhi^{2*}

更改为

罗佳¹, 李苏龙², 沈睿至², 杨长志^{2*}

LUO Jia¹, LI Su-Long², SHRN Rui-Zhi², YANG Chang-Zhi^{2*}

《食品安全质量检测学报》编辑部