

紫菜营养品质及食用价值研究进展

田雨¹, 江艳华², 郭莹莹², 赵艳芳², 李娜², 姚琳², 尹大芳³, 王联珠^{2*}

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 青岛 266101; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071;
3. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 近年来, 随着人们对健康饮食的重视程度逐渐提升, 海藻以其独特的营养保健功能逐渐成为国内外研究人员关注的重点。紫菜作为我国主要的食用藻类之一, 其蛋白质、矿物质和膳食纤维等营养物质含量丰富, 具有较高的食用价值, 且深受消费者的喜爱。因此本文综述了紫菜营养物质的生物可及性及其益生元潜力两方面的食用价值, 探究摄入的紫菜经人体胃肠道消化后其蛋白质、矿物质、脂肪酸和色素等营养物质的消化吸收情况, 以及紫菜中可以抵抗人体胃肠道消化酶作用的多糖和多酚类物质对人体肠道菌群结构的调节作用, 并对未来紫菜的研究及其行业发展方向提出相关建议, 以期对紫菜的营养研究、相关产品开发及其综合利用提供参考和借鉴。

关键词: 紫菜; 营养物质; 消化吸收; 益生元; 生物利用率

Research progress on nutritional quality and edible value of *Porphyra*

TIAN Yu¹, JIANG Yan-Hua², GUO Ying-Ying², ZHAO Yan-Fang², LI Na², YAO Lin²,
YIN Da-Fang³, WANG Lian-Zhu^{2*}

(1. College of Food Science and Technology, Ocean University of China, Qingdao 266101, China; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 3. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: In recent years, with the gradual increase of people's attention to healthy diet, seaweed has gradually become the focus of researchers at home and abroad for its unique nutritional and health care function. *Porphyra*, as one of the main edible algae in China, is a good source of nutrients such as protein, minerals and dietary fiber. It has high edible value and is deeply loved by consumers. This paper summarized the edible value of *Porphyra* from the aspects of bioaccessibility and prebiotics potential, explored the release of nutrients such as protein, minerals, fatty acids and pigments in the ingested *Porphyra* after digestion by human gastrointestinal tract, and the regulation effect of polysaccharides and polyphenols that can resist the action of digestive enzymes in human gastrointestinal tract on the structure of humangut microbiota, and put forward the suggestions on the future research of laver and the development direction of laver industry. In order to provide reference for the nutrition research, related product development and comprehensive utilization of *Porphyra*.

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助项目(CARS-50)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目资助项目(32061133008)、中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(2020TD71)

Fund: Supported by the China Agriculture Research System (CARS-50), National Natural Science Foundation of China International (Regional) Cooperation and Exchange Program (32061133008), and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD71)

***通信作者:** 王联珠, 研究员, 主要研究方向为水产品质量安全与标准研究。E-mail: wanglz@ysfri.ac.cn

***Corresponding author:** WANG Lian-Zhu, Professor, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China. E-mail: wanglz@ysfri.ac.cn

KEY WORDS: *Porphyra*; nutrients; digestive absorption; prebiotics; bioavailability

0 引言

紫菜(*Porphyra*)属于红藻纲,红毛菜科,紫菜属,是我国主要的经济藻类之一,其中含有大量的多糖、蛋白质、维生素及矿质元素等,具有较高的营养价值。食用紫菜对于预防心血管疾病、辅助降血糖^[1]、免疫调节^[2]等方面有重要作用。2019年我国的紫菜养殖产量21.23万t,占藻类总产量的8.36%^[3],虽然目前产量占据的份额并不大,但单位产量的紫菜产值却显著高于其他藻类,且其产量连续4年显著增长^[4-6],这表明紫菜在我国具有非常好的发展前景。

目前我国主要养殖的紫菜品种以坛紫菜(*Phaenocystis*)和条斑紫菜(*Pyezoensis*)为主,坛紫菜主要是加工成小饼紫菜作为汤料在国内销售,条斑紫菜大多是经粉碎、浇饼、干燥等工序加工成片状紫菜用于出口日韩等东南亚国家。其中福建霞浦的坛紫菜和江苏南通的条斑紫菜因其优越的品质成为国家地理标志产品。研究人员对坛紫菜^[7-8]和条斑紫菜^[9-10]主要营养成分进行测定:蛋白质31.33%~50.94%、总糖21.91%~32.95%、膳食纤维19.8%~25.2%、粗纤维4.7%~7.14%、脂肪0.34%~1.04%、灰分7.85%~12.4%,从其基本营养成分组成可以看出,紫菜是一种高蛋白、高膳食纤维和低脂肪含量的食物。紫菜作为我国主要的食用藻类之一,其蛋白质、矿物质和膳食纤维等营养物质含量丰富,具有较高的食用价值,且深受消费者的喜爱。本文综述了紫菜营养物质的生物可及性及多糖和多酚类物质益生元潜力,以期对紫菜的营养研究提供参考。

1 紫菜营养物质的生物可及性

食品中的营养物质往往不能被人体完全消化吸收。食物摄入后经口腔咀嚼、胃肠道蠕动及消化酶作用导致细胞破裂营养物质才会逐渐溶解进入消化液中,而这些进入消化液中的成分也只有一部分可被人体吸收利用。因此可以采用体外模型通过研究生物可及性(bioaccessibility)和生物利用度(bioavailability)研究营养物质在消化过程中的变化情况。生物可及性即摄入的营养成分在胃肠道消化过程中从食品基质中释放出来可供吸收的比例,常采用体外消化模型评估;而生物利用度还进一步包括了释放物质的利用,即摄入的营养成分中可被利用到达体循环的比例^[11]。陈再德等^[12]对比了不同焙烤温度对坛紫菜消化的影响,结果表明坛紫菜中可溶性糖和还原糖主要在胃中被消化,而蛋白质和游离氨基酸在肠道中大量消化,且发现180℃烘烤的坛紫菜更有利于消化吸收。

1.1 蛋白质

紫菜是一种高蛋白藻类,其氨基酸组成评分较高,属于优质蛋白质来源。PANGESTUTI等^[13]和DAWCZYNSKI等^[14]对不同藻类化学组成进行测定,发现红藻中蛋白质含量远高于褐藻和绿藻,一般可占干重的35%,必需氨基酸含量约为11.52%~12.27%,其中幼儿生长必需的精氨酸含量较高为1.98%~2.26%^[8]。此外牛磺酸作为一种非蛋白类氨基酸,对婴儿神经系统的发育有重要作用,研究表明三水的条斑紫菜中牛磺酸含量可高达1.3%^[15]。

评价一种蛋白质是否是优质蛋白质的标准不仅是具有良好的氨基酸组成,同时还要有较好的蛋白质消化率^[16]。GOÑI等^[17]采用体外消化模拟方法测定紫菜中可消化蛋白质含量为69%,显著高于其他藻类(15%~45%),这表明紫菜中蛋白质在胃肠道中具有较高的消化率。之后在消化残渣中接种大鼠粪便发酵24h,结果显示紫菜中可发酵蛋白质含量为28%显著低于其他藻类(41%~61%),这可能使紫菜在结肠发酵过程中因微生物代谢产生有害物质的几率降低^[18-19]。但海藻中丰富的多酚、多糖类物质及糖基化对蛋白质的保护作用都可能导致海藻中蛋白质的消化率降低。有研究表明藻蛋白提取物的存在会抑制胰蛋白酶^[20],胰凝乳蛋白酶和肠液对酪蛋白的水解作用,但对链霉蛋白酶的抑制作用非常有限,这表明藻蛋白提取物中可能存在某些物质会抑制胃肠道蛋白酶对蛋白的水解作用。URBANO等^[21]研究发现紫菜中的膳食纤维可能会阻止胃肠道消化酶的进入,从而导致蛋白质的表观消化率显著降低。由于紫菜基质的复杂性,紫菜蛋白质在体内的消化吸收情况还需要更多体内研究进行证实。

紫菜作为海洋植物其高蛋白含量可能成为生物活性多肽的天然来源。养殖紫菜在采收末期食用品质下降,但其蛋白质含量会有所提高^[17,9],可作为生物活性肽的廉价来源。胡晓等^[22]以末水坛紫菜作为来源制备抗氧化肽能显著提升HepG2细胞的细胞活力,增强其超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,并降低脂质氧化产物(malondialdehyde, MDA)的含量,具有明显修复HepG2细胞氧化损伤的能力。PIMENTEL等^[23]研究表明相较于完整的紫菜,紫菜蛋白提取物在经过体外消化模拟后在二苯代苦味酰基自由基(diphenyl-bitter acyl radical, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]清除率和Fe³⁺还原/抗氧化能力(Fe³⁺ reduction/antioxidant capacity, FRAP)方面表现出更高的抗氧化活性,这也可能是由于消化过程中蛋白酶将紫菜蛋白降解成具有抗氧化活性的多肽。

1.2 矿物质

紫菜中矿物质含量极为丰富,显著高于陆生植物^[24],这与其自身可吸收和积蓄海水中无机质有很大相关性,藻类多糖可以不同程度结合重金属,藻酸盐对其结合亲和力最高,角叉菜胶次之、琼脂最低^[25]。刘仙金^[26]和曾臻等^[27]对紫菜中矿物质元素含量进行测定,表明紫菜中富含对人体有益的 K、Na、P、Ca、Mg 等人体必需常量元素,以及 Fe、Cu、Zn、Mn、Co、Se、Mo、I 等人体必需微量元素。对人体有害的重金属元素 As、Ag、Cd、Hg、Pb 含量较低,但藻类中有毒重金属含量受其生长环境影响较大,因此只有确保海藻生长在能够确保维持安全矿物质水平的环境中。此外烹饪对海藻中矿物质含量也会有较大影响。有研究表明^[28-29]在蒸煮过程中,紫菜中的 70% 以上的砷和镍可被除去,并释放到蒸煮水中。在之后体外消化过程中,细胞的完整细胞壁、植酸和多糖等矿物质螯合剂和抗营养剂都有可能影响紫菜中的矿物质生物可及性^[30]。GARCÍA 等^[29]的研究表明由于蛋白质被水解成氨基酸导致离子强度提高,金属在水中溶解度降低,使海藻中大多数矿物质生物可及性与其蛋白质含量呈负相关,但却与碳水化合物含量之间呈正相关,这可能由于碳水化合物形成的胶束增加了水溶液中疏水分子的溶解度,此外海藻中碳水化合物大多是可溶性膳食纤维可作为肠道菌群发酵底物促进肠道菌群生长,微生物发酵产生的短链脂肪酸导致 pH 降低,可以增加二价阳离子在大肠中的溶解度,使吸收部位可能会从小肠转移到大肠,从而潜在地增强矿物质尤其是钙和镁的吸收能力^[21,31]。另有研究发现相较于菠菜,紫菜中铁元素具有良好的生物可及性,特别是当维生素 C 存在的情况下,不仅可以促进对紫菜中铁的生物可及性提高,也可提高对外源非血红素铁的消化吸收^[32]。

海藻中碘含量十分丰富, YEH 等^[33]研究测定紫菜中碘含量为 29.3~45.8 mg/kg,显著低于海带中(241~4921 mg/kg)的碘含量。每日仅摄入 3.28~5.12 mg 的紫菜就可达到膳食推荐的成人 150 µg/d 的碘摄入量,因此对海藻中碘的生物利用度研究显得尤为重要。有研究通过对海藻中碘的生物可及性、透析率和细胞培养率测定表明,可将碘物质归类为中度吸收或低吸收的化合物^[34],但体内研究却表明海藻中的 I⁻可几乎完成吸收^[35]。这可能是由于体外实验的细胞模型中细胞旁途径较人体小肠较为紧凑,使依靠此途径进行消化吸收的碘元素吸收利用率降低。

1.3 脂肪酸

紫菜中脂肪含量较低,但以多不饱和脂肪酸为主,对消费者来说紫菜是一种良好的脂质来源。紫菜中饱和脂肪酸以 16:0 为主,约占总脂肪酸含量的 30% 左右。多不饱和脂肪酸含量可达到 50% 以上,其中被誉为“脑黄金”的二十

碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)含量最高,占总脂肪酸的 32%~60%^[36-37],人体必需脂肪酸亚油酸(18:2)和亚麻酸(18:3)的含量分别为 7546 mg/kg 和 886 mg/kg 显著高于其他藻类^[38]。

有研究发现采用从海藻中提取的富含 EPA 的极性脂质对肥胖小鼠进行饲喂可以提高小鼠的脂肪酶活性和脂联素水平、抑制 mRNA 的表达^[39],对防止肥胖引起的脂肪变性的发生和发展有积极作用。SCHMID 等^[40]研究海藻中脂肪酸在 3 种不同温度(20、4 和 -20 °C)下存储时间 22 个月的变化,结果表明储存温度和时间会严重影响海藻的脂肪酸组成和含量。当在 -20 °C 下冷冻时,海藻中的脂肪酸含量和组成是稳定的,而较高的温度可能会导致海藻中多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)降解。曲兴源^[41]研究紫菜中提取的 EPA-DHA 在不同烹调条件下的热稳定性,虽然其结果表明热稳定性并不理想,但为日后利用紫菜生产 EPA-DHA 油和发挥其营养保健功能奠定基础。因此,虽然海藻可作为制备 EPA、DHA 等多不饱和脂肪酸的良好来源,但由于其 PUFA 含量较高,极易被氧化降解,因此在将紫菜作为 PUFA 摄入来源时应注意产品的贮藏条件及食用温度。

1.4 色素

紫菜中含有丰富的色素,主要可以分为 3 类:叶绿素、类胡萝卜素和藻胆蛋白。叶绿素是含有一个卟啉环的脂溶性色素,具有较强的抗氧化^[42]、抗突变^[43]和抗炎^[44]等生物活性。紫菜中主要以叶绿素 a 及其衍生物为主,其中脱镁叶绿素 a 为 48%,脱镁叶绿酸 a 为 50%,而叶绿素 a 含量不到 1%^[45]。叶绿素对极端 pH 和温度敏感,但研究发现烹饪对海藻中叶绿素的影响主要取决于海藻的种类。煮沸或微波处理,紫菜中总叶绿素含量仅略有减少,2 种处理方法主要引起紫菜中叶绿素 a 的完全降解和焦脱镁叶绿酸 a 的形成^[46]。研究发现在体外消化过程中,叶绿素 a 比叶绿素 b、c 更容易发生脱镁反应,而叶绿素比脱镁叶绿素更易氧化^[47]。受叶绿素的结构影响,叶绿素在人体的吸收与其他亲脂性微量元素一样,需掺入胶束中以形成水相,才能有利于肠道吸收。海藻中含有大量的纤维,可形成胶束促进叶绿素的消化吸收,这也表明食物基质的特性对海藻叶绿素的生物可及性有重要影响^[48]。类胡萝卜素是一种四萜化合物,主要包括胡萝卜素和叶黄素。类胡萝卜素与肽结合,在类囊体膜中形成色素-蛋白复合物。研究发现经过烹饪处理后,由于热诱导作用导致胡萝卜素结合蛋白变性和胡萝卜素氧化酶失活,从而使得海藻中的类胡萝卜素水平明显升高^[49]。藻红蛋白(phycoerythrin, PE)是红藻中特有的一类荧光蛋白,对短波长的蓝、绿光具有较强的吸收效率,使红藻和蓝藻能够在环境中高效地捕获和传递光能。PE

具有抗氧化及抗炎等生物活性^[50]，且由于 PE 的荧光特性，使其被开发作为荧光探针和进行光动力治疗^[51]。CHEN 等^[52]研究制备食品级藻红蛋白，并对其物理特性及抗氧化活性进行测定，认为其有潜力作为添加剂用于脂质体-肉类系统。

2 益生元潜力

益生元被定义为不易消化的食物成分，它可以选择性刺激结肠中的一种或少数几种细菌的生长或活性而对宿主产生有益影响，从而增进宿主健康^[53]。海藻中含有多种生物活性化合物，其中特别是多糖和酚类，可以抵抗人体胃肠道消化酶，从而选择性刺激肠道有益菌的生长和发酵产物(例如短链脂肪酸)的产生。BAJURY 等^[54]研究发现在红藻消化残渣中接种肠道菌群可使双歧杆菌水平和短链脂肪酸含量显著增加，这表明红藻可能具有作为益生元成分的潜力。但由于紫菜是一个复杂的体系，各物质间相互作用，如 TOMAS 等^[55]研究发现膳食纤维的添加可以促进多酚生物利用率的提高。因此以完整紫菜作为研究对象可能无法单纯的探究单一物质的益生元活性。

2.1 多 糖

目前大量研究表明肠道菌群健康与宿主的健康和饮食息息相关，因此可以通过饮食干预来调节和塑造肠道菌群^[53]。近年来，将摄入多糖作为饮食干预来调节肠道菌群已引起广泛关注。我们日常的饮食中常常含有种类繁多的多糖，而人体内至多仅能编码 17 种与消化多糖有关的糖苷水解酶(glucoside hydrolase, GHs)。因此，饮食中的这些多糖主要是由肠道微生物编码的碳水化合物活性酶(carbohydrate-active en-zymes, CAZymes)来消化。健康人体肠道菌群中拟杆菌门和厚壁菌门为两大主要优势菌群，而变形杆菌、放线菌以及疣微菌等相对

丰度较低。其中拟杆菌门细菌具有更多编码多糖利用位点和水解酶的基因^[56]，也有研究表明多糖片段的水解大多发生在拟杆菌的周质空间^[57]。通过摄入多糖可以选择性刺激肠道有益菌生长，并通过肠道菌群改善肠道通透性，控制进入血液的脂多糖含量。另一方面，肠道菌群产生 CAZymes 降解多糖产生乙酸、丙酸和丁酸等短链脂肪酸(short chain fatty acid, SCFA)可进一步调节糖代谢^[58-59]。SCFA 是肠道细胞主要的能量来源^[60]，同时还具有抗炎、抗凋亡、预防结直肠癌、结肠炎以及抑制肠道致病菌生长等重要作用^[61-62]。

紫菜多糖主要由 β -D-半乳糖和 3, 6-内醚- α -D-半乳糖交替连接的琼二糖组成^[63]，还含有岩藻糖、甘露糖、葡萄糖、阿拉伯糖和木糖等其他单糖，是一种糖醛酸含量较高的酸性杂多糖^[63]。研究人员深入研究发现紫菜多糖在抗氧化^[64]、辅助降血脂^[65]、辅助降血糖^[66]、免疫调节^[67]和抗肿瘤^[68]等方面有重要作用。紫菜中含有大量的多糖，其中大多数可抵抗人体胃和小肠的消化和吸收，并在结肠中与肠道菌群相互作用完全或部分发酵(表 1)。

随着紫菜多糖发酵的进行，拟杆菌门相对丰度显著增加，是紫菜多糖发酵过程的主要响应者^[69]。此外，普雷沃菌一直被认为与难消化碳水化合物水解有关，其含量的显著增加与紫菜多糖的难发酵特性是相符的^[70-71]。普雷沃菌相对丰度的增加可以改善糖代谢，促进粘蛋白合成，降低肠粘膜通透性，从而保护宿主免受细菌内毒素的侵害^[19]。MATEOS-APARICIO 等^[71]按顺序以 H₂O、HCl、KOH 分别提取紫菜多糖，获得的紫菜多糖分子量递减，YUAN 等^[72]发现多糖及其降解级分对肠道菌群具有相似的影响，但是适当的降解多糖级分可使其更易被肠道菌群发酵。但该实验结果表明多糖发酵的难易程度与其分子量大小并不完全相关，这可能是由于不同溶剂导致提取的多糖种类有所差异。因此不同的提取方法^[73]、分子量大小^[72]、海藻种类等都会影响多糖的发酵特性。

表 1 红藻多糖提取方法及益生元效应
Table 1 Extraction method and prebiotics effects of polysaccharide from red seaweed

多糖来源	提取方法	结肠发酵	参考文献
坛紫菜	超声辅助热水浸提	拟杆菌增加，变形杆菌、埃希氏菌-志贺氏菌减少	[69]
长心卡帕藻		双歧杆菌增加，乙酸盐、丙酸盐增加	[70]
江蓠	热水浸提	pH 下降、SCFA 浓度增加，厚壁菌门/拟杆菌门比值降低	[19]
伸长海条藻、雌蕊杉藻	水、酸、碱浸提、残渣	褐藻中水浸提多糖和残渣对 SCFA 产生尤为明显，红藻中的角叉菜胶其基本不具有发酵性能	[71]
海蒿子	超声降解	降解的多糖组分更容易被肠道细菌发酵利用，厚壁菌门/拟杆菌门比值降低；普雷沃菌、戴阿利斯特杆菌、考拉杆菌、瘤胃球菌和拟杆菌增加	[72]

2.2 多 酚

海藻中的酚类化合物主要以间苯三酚为基本结构单位, 通过芳基键或二芳基醚键连接的一类含有酚性羟基的植物次生代谢产物, 但受海藻种类、地理位置、生长环境和季节因素等的影响会导致多酚的间苯三酚数量和连接方式不同^[74-75], 其中紫菜中多酚主要以溴酚(bromphenol, BPs)为主^[76-77]。目前大量的研究表明多酚具抗氧化、抗癌、抗炎^[76,78]、预防糖尿病^[79]等多种生理活性。尽管多酚具有多种健康益处, 但它们的生物利用度很大程度限制了其功效的发挥^[61]。研究表明, 摄入的多酚中只有 5%~10%的结构简单的多酚(具有单体或二聚体结构)可以被小肠直接吸收, 通过肠上皮细胞进入肝脏进行 I 期的氧化、还原和水解, 再进入 II 期的生物转化代谢, 从而释放一系列水溶性共轭代谢物。剩余的 90%~95%的多酚尤其是分子量较高的多酚由于其化学复杂性而无法在小肠中吸收从而进入结肠, 通过肠道菌群的酶促作用转化为低分子量具有生物活性的代谢产物^[80-81], 从而提高多酚的生物利用率。此外多酚的结构和含量还会对肠道菌群生长和代谢产生影响, 促进有益细菌的生长并抑制有害细菌的生长, 从而改善宿主健康。CHAROENSIDDHI 等^[82]研究发现由于褐藻多酚的抗菌活性会导致其提取物经体外肠道菌群发酵后 SCFA 水平显著降低。目前关于海藻中多酚物质对肠道菌群影响的研究较少, 其具体的作用机制还有待进一步的研究。

3 展 望

紫菜在蛋白质品质、矿物质、色素、多不饱和脂肪酸含量以及多糖和多酚的益生元潜力方面有突出优势, 这使其具有作为功能性和药用食品的潜力, 此外紫菜还可以用来改善加工食品的品质。紫菜具有许多健康益处, 但其作为食物在我国的消费仍较少, 目前国内主要食用的是用作汤料的坛紫菜, 这种烹饪方法导致紫菜在日常饮食中的食用次数和摄入量较少, 大多数研究中都显示紫菜是较好的蛋白质来源, 但其消费量较常规蛋白质来源食物要小的多^[83]。因此虽然紫菜中营养物质丰富, 但受食物基质的影响, 紫菜中营养物质的含量并不能准确表示出其生物利用度, 因此研究关于完整紫菜的其营养物质的生物利用度才能更为准确的表示出紫菜的食用价值。

近年来, 由于保健食品行业迅猛发展, 消费者对海藻的生物活性成分的关注增强。紫菜中分离的多糖(例如半乳糖硫酸酯、琼胶)、蛋白质(例如藻胆蛋白、牛磺酸)和 n-3 不饱和脂肪酸(例如 EPA)等生物活性成分在食品及营养保健行业具有潜在的应用前景。并且紫菜的添加对加工食品质构、营养的改善也具有巨大的发展前景, 尤其是在肉制

品加工中用来改善肉制品质构、营养、功能特性及延长货架期^[84]。因此, 我们可以通过将紫菜直接或间接作为增值产品销售来提高紫菜的消费量。

参考文献

- [1] 王茵, 吴成业, 刘淑集, 等. 坛紫菜酶解产物对糖尿病模型小鼠的血糖调节作用[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(4): 118-124.
WANG Y, WU CY, LIU SJ, *et al.* Hypoglycemic effect of hydrolysate of *Porphyra haitanensis* on diabetic model mice [J]. Prog Fish Sci, 2013, 34(4): 118-124.
- [2] 刘亮, 钟云凯, 曹少谦, 等. 紫菜多糖抗氧化活性及体外免疫调节作用研究[J]. 核农学报, 2016, 30(12): 2355-2362.
LIU L, ZHONG YK, CAO SQ, *et al.* Antioxidant activity and immunomodulatory effects of *Porphyra* polysaccharide *in vitro* [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(12): 2355-2362.
- [3] 于秀娟, 徐乐俊, 吴反修. 中国渔业统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
YU XJ, XU LJ, WU FX. China fishery statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.
- [4] 郭云峰, 赵文武. 中国渔业统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
GUO YF, ZHAO WW. China fishery statistical yearbook 2017 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [5] 徐乐俊, 吕永辉. 中国渔业统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
XU LJ, LV YH. China fishery statistical yearbook 2018 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018.
- [6] 徐乐俊, 吴反修. 中国渔业统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
XU LJ, WU FX. China fishery statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [7] 陈胜军, 于娇, 胡晓, 等. 汕头地区不同采收期坛紫菜营养成分分析与评价[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 539-546.
CHEN SJ, YU J, HU X, *et al.* Nutritional analysis and evaluation of *Porphyra haitanensis* in Shantou area at different harvesting stages [J]. J Nucl Agric Sci, 2020, 34(3): 539-546.
- [8] 杨少玲, 戚勃, 杨贤庆, 等. 中国不同海域养殖坛紫菜营养成分差异分析[J]. 南方水产科学, 2019, 15(6): 75-80.
YANG SL, QI B, YANG XQ, *et al.* Comparison of nutritional composition of *Pyropia haitanensis* from different sea areas of China [J]. South China Fish Sci, 2019, 15(6): 75-80.
- [9] 仲明, 张锐. 条斑紫菜不同采收期主要营养成分变化情况[J]. 中国饲料, 2003, (23): 30-31.
ZHONG M, ZHANG R. The varieties of main nutrients of streak laver collected in different periods [J]. China Feed, 2003, (23): 30-31.
- [10] 赵玲, 曹荣, 王联珠, 等. 靖海湾条斑紫菜的营养及鲜味评价[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 134-140.
ZHAO L, CAO R, WANG LZ, *et al.* Nutritional analysis and umami assessment of *Pyropia yezoensis* from Jing Bay [J]. Prog Fish Sci, 2018, 39(6): 134-140.
- [11] BARBA FJ, MARIUTTI LRB, BRAGAGNOLO N, *et al.* Bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing [J]. Trends Food Sci Tech, 2017, 67: 195-206.

- [12] 陈再德, 骆其君, 见凯. 不同温度烘烤坛紫菜的体外模拟消化研究[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 547–555.
CHEN ZD, LUO QJ, JIAN K. Study on *in vitro* simulated digestion of baked *Pyropia haitanensis* at different temperature [J]. J Nucl Agric Sci, 2020, 34: 547–555.
- [13] PANGESTUTI R, KIM S. Chapter 6-seaweed proteins, peptides, and amino acids [M]. San Diego: Academic Press, 2015.
- [14] DAWCZYNSKI C, SCHUBERT R, JAHREIS G. Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products [J]. Food Chem, 2007, 103(3): 891–899.
- [15] 王芬. 条斑紫菜中牛磺酸提取分离纯化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
WANG F. Exteractin, isolation, purification of taurine in porphyraezoensis [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [16] FLEURENCE J, MORANÇAS M, DUMAY J. Proteins in food processing (second edition) [M]. England: Woodhead Publishing, 2018.
- [17] GOÑI I, GUDIEL-URBANO M, SAURA-CALIXTO F. *In vitro* determination of digestible and unavailable protein in edible seaweeds [J]. J Sci Food Agric, 2002, 82(15): 1850–1854.
- [18] CUMMINGS JH, MACFARLANE GT. The control and consequences of bacterial fermentation in the human colon [J]. J Appl Bacteriol, 1991, 70(6): 443–459.
- [19] DI T, CHEN G, SUN Y, *et al.* *In vitro* digestion by saliva, simulated gastric and small intestinal juices and fermentation by human fecal microbiota of sulfated polysaccharides from *Gracilaria rubra* [J]. J Funct Foods, 2018, 40: 18–27.
- [20] GALLAND-IRMOULI A, FLEURENCE J, LAMGHARI R, *et al.* Nutritional value of proteins from edible seaweed *Palmaria palmata* (dulse) [J]. J Nutr Biochem, 1999, 10(6): 353–359.
- [21] URBANO MG, GOÑI I. Bioavailability of nutrients in rats fed on edible seaweeds, Nori (*Porphyra tenera*) and Wakame (*Undaria pinnatifida*), as a source of dietary fibre [J]. Food Chem, 2002, 76(3): 281–286.
- [22] 胡晓, 于娇, 陈胜军, 等. 末水坛紫菜蛋白源抗氧化肽的制备、分离纯化与体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 37–44.
HU X, YU J, CHEN SJ, *et al.* Preparation and purification of antioxidant peptide from *Porphyra haitanensis* protein and its antioxidant activities *in Vitro* [J]. Food Sci, 2020, 41(16): 37–44.
- [23] PIMENTEL FB, CERMEÑO M, KLEEKAYAI T, *et al.* Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the antioxidant activity of the red seaweed *Porphyra dioica* [J]. Food Res Int, 2020, 136: 109309.
- [24] RAO PVS, MANTRI VA, GANESAN K. Mineral composition of edible seaweed *Porphyra vietnamensis* [J]. Food Chem, 2007, 102(1): 215–218.
- [25] ROLEDA MY, MARFAING H, DESNICA N, *et al.* Variations in polyphenol and heavy metal contents of wild-harvested and cultivated seaweed bulk biomass: Health risk assessment and implication for food applications [J]. Food Control, 2019, 95: 121–134.
- [26] 刘仙金. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定坛紫菜中矿物质元素含量[J]. 福建农业科技, 2019, (9): 36–39.
LIU XJ. Determination of mineral element contents in *Porphyra haitanensi* by using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. Fujian Agric Sci Tech, 2019, (9): 36–39.
- [27] 曾臻, 谭强来, 武晓丽, 等. 微波消解-ICP-MS 法同时测定干紫菜中 28 种元素[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(5): 30–33.
ZENG Z, TAN QL, WU XL, *et al.* Simultaneous determination on 28 elements in dried laver by microwave digestion and ICP-MS method [J]. Food Nutr China, 2019, 25(5): 30–33.
- [28] GARCÍA SC, BARCIELA-ALONSO MDC, BERMEJO-BARRERA P. Effect of the cooking procedure on the arsenic speciation in the bioavailable (dialyzable) fraction from seaweed [J]. Microchem J, 2012, 105: 65–71.
- [29] GARCÍA SC, BARCIELA-ALONSO MDC, MOREDA-PIÑEIRO A, *et al.* Study of cooking on the bioavailability of As, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Se and Zn from edible seaweed [J]. Microchem J, 2013, 108: 92–99.
- [30] ROUSSEAU S, PALLARES PA, VANCOILLIE F, *et al.* Pectin and phytic acid reduce mineral bioaccessibility in cooked common bean cotyledons regardless of cell wall integrity [J]. Food Res Int, 2020, 137: 109685.
- [31] YOUNES H, DEMIGNE C, REMESY C. Acidic fermentation in the caecum increases absorption of calcium and magnesium in the large intestine of the rat [J]. Brit J Nutr, 1996, 75(2): 301–314.
- [32] FLORES SRL, DOBBS J, DUNN MA. Mineral nutrient content and iron bioavailability in common and Hawaiian seaweeds assessed by an *in vitro* digestion/Caco-2 cell model [J]. J Food Compos Anal, 2015, 43: 185–193.
- [33] YEH TS, HUNG NH, LIN TC. Analysis of iodine content in seaweed by GC-ECD and estimation of iodine intake [J]. J Food Drug Anal, 2014, 22(2): 189–196.
- [34] DOMÍNGUEZ-GONZÁLEZ MR, CHIOCCHETTI GM, HERBELLO-HERMELO P, *et al.* Evaluation of iodine bioavailability in seaweed using *in vitro* Methods [J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(38): 8435–8442.
- [35] AQUARON R, DELANGE F, MARCHAL P, *et al.* Bioavailability of seaweed iodine in human beings [J]. Cell Mol Biol, 2002, 48(UNSP 0145-5680/025): 563–569.
- [36] 李微, 阿曼尼萨·买买提, 徐继林, 等. 不同收获期不同品系坛紫菜脂肪酸组成比较[J]. 生物学杂志, 2016, 33(1): 27–31.
LI W, OMANNISA M, XU JL, *et al.* Comparative study on fatty acid composition of *Porphyra haitanensis* at different harvest periods in different culture areas [J]. J Biol, 2016, 33(1): 27–31.
- [37] 马飞, 陆勤勤, 胡传明, 等. 多个条斑紫菜品系采收期内脂肪酸组成、含量的变化分析[J]. 水产学报, 2013, 37(10): 1551–1557.
MA F, LU QQ, HU CM, *et al.* The variation in fatty acids composition and content of ten *Pyropia yezoensis* cultivars during different harvest time periods [J]. J Fish China, 2013, 37(10): 1551–1557.
- [38] 黄俊辉, 曾庆孝, 余纲哲. 南海海域数种海藻总脂质及脂肪酸含量的比较[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, (2): 23–29.
HUANG JH, ZENG QX, YU GZ. Comparative studies on the contents of total lipids and fatty acids of several seaweeds in south China sea [J]. J Guangdong Ocean Univ, 2001, (2): 23–29.
- [39] YANAGITA T, TSUGE K, KOGA M, *et al.* Eicosapentaenoic acid-containing polar lipids from seaweed susabinori (*Pyropia yezoensis*) alleviate hepatic steatosis in obese db/db mice [J]. Arch Biochem Biophys, 2020, 691: 108486.
- [40] SCHMID M, GUIHÉNEUF F, STENGEL DB. Evaluation of food grade solvents for lipid extraction and impact of storage temperature on fatty acid composition of edible seaweeds *Laminaria digitata* (Phaeophyceae) and *Palmaria palmata* (Rhodophyta) [J]. Food Chem, 2016, 208: 161–168.
- [41] 曲兴源. 分离纯化渤海紫菜中 EPA-DHA 并对其加热稳定性进行评价 [D]. 锦州: 辽宁医学院, 2015.

- QU XY. Separation and purification of the Bohai sea laver EPA-DHA and evaluate its heat stability [D]. Jinzhou: Liaoning Medical University, 2015.
- [42] LANFER-MARQUEZ UM, BARROS RMC, SINNECKER P. Antioxidant activity of chlorophylls and their derivatives [J]. Food Res Int, 2005, 38(8): 885–891.
- [43] SIMONICH MT, EGNER PA, ROEBUCK BD, *et al.* Natural chlorophyll inhibits aflatoxin B₁-Induced multi-organ carcinogenesis in the rat [J]. Carcinogenesis, 2007, 28(6): 1294–1302.
- [44] SUBRAMONIAM A, ASHA VV, NAIR SA, *et al.* Chlorophyll revisited: Anti-inflammatory activities of chlorophyll a and inhibition of expression of TNF- α gene by the same [J]. Inflammation, 2012, 35(3): 959–966.
- [45] CHEN K, RÍOS JJ, PÉREZ-GÁLVEZ A, *et al.* Comprehensive chlorophyll composition in the main edible seaweeds [J]. Food Chem, 2017, 228: 625–633.
- [46] CHEN K, ROCA M. Cooking effects on chlorophyll profile of the main edible seaweeds [J]. Food Chem, 2018, 266: 368–374.
- [47] CHEN K, ROCA M. *In vitro* digestion of chlorophyll pigments from edible seaweeds [J]. J Funct Foods, 2018, 40: 400–407.
- [48] CHEN K, ROCA M. Cooking effects on bioaccessibility of chlorophyll pigments of the main edible seaweeds [J]. Food Chem, 2019, 295: 101–109.
- [49] PINA AL, COSTA AR, LAGE-YUSTY MA, *et al.* An evaluation of edible red seaweed (*Chondrus crispus*) components and their modification during the cooking process [J]. LWT, 2014, 56(1): 175–180.
- [50] ROMAY CH, GONZALEZ R, LEDON N, *et al.* C-Phycocyanin: A biliprotein with antioxidant, anti-inflammatory and neuroprotective effects [J]. Current Protein Pept Sci, 2003, 4: 207–216.
- [51] 臧帆, 秦松, 马丞博, 等. 藻类特有的捕光色素蛋白-藻红蛋白的结构、功能及应用[J]. 科学通报, 2020, 65(7): 565–576.
- ZANG F, QIN S, MA CB, *et al.* Structure, function and applications of phycoerythrin: A unique light harvesting protein in algae [J]. Chin Sci Bull, 2020, 65(7): 565–576.
- [52] CHEN X, WU M, YANG Q, *et al.* Preparation, characterization of food grade phycobilin proteins from *Porphyra haitanensis* and the application in liposome-meat system [J]. LWT, 2017, 77: 468–474.
- [53] PRAVEEN MA, PARVATHY KRK, BALASUBRAMANIAN P, *et al.* An overview of extraction and purification techniques of seaweed dietary fibers for immunomodulation on gut microbiota [J]. Trends Food Sci Tech, 2019, 92: 46–64.
- [54] BAJURY DM, RAWI MH, SAZALI IH, *et al.* Prebiotic evaluation of red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) using *in vitro* colon model [J]. Int J Food Sci Nutr, 2017, 68(7): 821–828.
- [55] TOMAS M, ROCCHETTI G, GHISONI S, *et al.* Effect of different soluble dietary fibres on the phenolic profile of blackberry puree subjected to *in vitro* gastrointestinal digestion and large intestine fermentation [J]. Food Res Int, 2020, 130: 108954.
- [56] KAOUTARI AE, ARMOUGOM F, GORDON JI, *et al.* The abundance and variety of carbohydrate-active enzymes in the human gut microbiota [J]. Nat Rev Microbiol, 2013, 11(7): 497–504.
- [57] MARTENS EC, KOROPATKIN NM, SMITH TJ, *et al.* Complex glycan catabolism by the human gut micro biota: The bacteroidetes sus-like paradigm [J]. J Biol Chem, 2009, 284(37): 24673–24677.
- [58] FANG Q, HU J, NIE Q, *et al.* Effects of polysaccharides on glycometabolism based on gut microbiota alteration [J]. Trends Food Sci Tech, 2019, 92: 65–70.
- [59] DE VADDER F, KOVATCHEVA-DATCHARY P, GONCALVES D, *et al.* Microbiota-generated metabolites promote metabolic benefits via gut-brain neural circuits [J]. Cell, 2014, 156(1): 84–96.
- [60] MCNEIL NI. The contribution of the large intestine to energy supplies in man [J]. Am J Clin Nutr, 1984, 39(2): 338–342.
- [61] CHAROENSIDDHI S, ABRAHAM RE, SU P, *et al.* Seaweed and seaweed-derived metabolites as prebiotics [J]. Adv Food Nutr Res, 2020, 91: 97–156.
- [62] SANNA S, VAN ZUYDAM NR, MAHAJAN A, *et al.* Causal relationships among the gut microbiome, short-chain fatty acids and metabolic diseases [J]. Nat Genet, 2019, 51(4): 600–605.
- [63] KHAN BM, QIU H, XU S, *et al.* Physicochemical characterization and antioxidant activity of sulphated polysaccharides derived from *Porphyra haitanensis* [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 145: 1155–1161.
- [64] 高洪峰, 纪明侯, 曹文达. 南、北方坛紫菜多糖结构特征的比较研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, (5): 541–549.
- GAO HF, JI MH, CAO WD. Comparative study on the structure characteristics of polysaccharides from north and south *Porphyra* [J]. J Oceanol Limnol, 1992, (5): 541–549.
- [65] 林宗毅. 海带多糖的提取工艺优化、酶解及结构特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- LIN ZY. Extraction process optimization, enzymatic hydrolysis and structural characteristics of *Laminaria japonica* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [66] CAO C, CHEN M, LIANG B, *et al.* Hypoglycemic effect of abandoned *Porphyra haitanensis* polysaccharides in alloxan-induced diabetic mice [J]. Bioact Carbohydrates Dietary Fibre, 2016, 8(1): 1–6.
- [67] LIU Q, XU S, LI L, *et al.* *In vitro* and *in vivo* immunomodulatory activity of sulfated polysaccharide from *Porphyra haitanensis* [J]. Carbohydr Polym, 2017, 165: 189–196.
- [68] CHEN Y, XUE Y. Optimization of microwave assisted extraction, chemical characterization and antitumor activities of polysaccharides from *Porphyra haitanensis* [J]. Carbohydr Polym, 2019, 206: 179–186.
- [69] XU S, CHEN X, LIU Y, *et al.* Ultrasonic/microwave-assisted extraction, simulated digestion, and fermentation *in vitro* by human intestinal flora of polysaccharides from *Porphyra haitanensis* [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 152: 748–756.
- [70] BAJURY DM, RAWI MH, SAZALI IH, *et al.* Prebiotic evaluation of red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) using *in vitro* colon model [J]. Int J Food Sci Nutr, 2017, 68(7): 821–828.
- [71] MATEOS-APARICIO I, MARTERA G, GOÑI I, *et al.* Chemical structure and molecular weight influence the *in vitro* fermentability of polysaccharide extracts from the edible seaweeds *Himathalia elongata* and *Gigartina pistillata* [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 83: 348–354.
- [72] YUAN D, LI C, YOU L, *et al.* Changes of digestive and fermentation properties of *Sargassum pallidum* polysaccharide after ultrasonic degradation and its impacts on gut microbiota [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 164: 1443–1450.
- [73] OKOLIE CL, MASON B, MOHAN A, *et al.* Extraction technology impacts on the structure-function relationship between sodium alginate

- extracts and their *in vitro* prebiotic activity [J]. Food Biosci, 2020, 37: 100672.
- [74] 袁圣亮, 段智红, 吕应年, 等. 海藻多酚类化合物及其抗氧化活性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 274–281.
- YUAN SL, DUAN ZH, LV YN, *et al.* Research progress on seaweed polyphenolic compounds and their antioxidant activities [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(5): 274–281.
- [75] 曾媛媛, 全涛, 黄昆仑. 石莼多酚的提取工艺、组成成分分析及生物活性评价的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 24: 1–13.
- ZENG YY, TONG T, HUANG KL. Advances in the extraction technology, composition analysis, and biological activity evaluation of polyphenols from *Ulva lactuca* [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 24: 1–13.
- [76] NAMVAR F, MOHAMED S, FARD SG, *et al.* Polyphenol-rich seaweed (*Eucheuma cottonii*) extract suppresses breast tumour via hormone modulation and apoptosis induction [J]. Food Chem, 2012, 130(2): 376–382.
- [77] LIU M, HANSEN PE, LIN X. Bromophenols in marine algae and their bioactivities: Marine drugs [Z].
- [78] 陈金梅. 紫菜多酚的分离纯化及其活性研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- CHEN JM. Purification and activity study of polyphenols extract from *Porphyra haitanensis* [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.
- [79] PARADA J, PÉREZ-CORREA JR, PÉREZ-JIMÉNEZ J. Design of low glycemic response foods using polyphenols from seaweed [J]. J Funct Foods, 2019, 56: 33–39.
- [80] CATALKAYA G, VENEMA K, LUCINI L, *et al.* Interaction of dietary polyphenols and gut microbiota: Microbial metabolism of polyphenols, influence on the gut microbiota, and implications on host health [J]. Food Front, 2020, 1(2): 109–133.
- [81] CARDONA F, ANDRÉS-LACUEVA C, TULIPANI S, *et al.* Benefits of polyphenols on gut microbiota and implications in human health [J]. J Nutr Biochem, 2013, 24(8): 1415–1422.
- [82] CHAROENSIDDHI S, CONLON MA, VUARAN MS, *et al.* Polysaccharide and phlorotannin-enriched extracts of the brown seaweed *Ecklonia radiata* influence human gut microbiota and fermentation *in vitro* [J]. J Appl Phycol, 2017, 29(5): 2407–2416.
- [83] CHERRY P, HARA C, MAGEE PJ, *et al.* Risks and benefits of consuming edible seaweeds [J]. Nutr Rev, 2019, 77(5): 307–329.
- [84] GULLÓN B, GAGAOUA M, BARBA FJ, *et al.* Seaweeds as promising resource of bioactive compounds: Overview of novel extraction strategies and design of tailored meat products [J]. Trends Food Sci Tech, 2020, 100: 1–18.

(责任编辑: 王 欣 张晓寒)

作者简介

田 雨, 硕士, 主要研究方向为水产品质量安全与标准研究。
E-mail: 359903649@qq.com

王联珠, 研究员, 主要研究方向为水产品质量安全与标准研究。
E-mail: wanglz@ysfri.ac.cn