

梁美娜, 张立宁, 林振, 等. 不同海区养殖羊栖菜组成分析及多糖的抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 275–284. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020132

LIANG Meina, ZHANG Lining, LIN Zhen, et al. Composition Analysis of *Sargassum Fusiforme* in Different Marine Areas and Antioxidant Activity of Polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 275–284. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020132

· 分析检测 ·

不同海区养殖羊栖菜组成分析及多糖的 抗氧化活性研究

梁美娜¹, 张立宁², 林 振³, 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, 浙江温州 325035;

2.浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江温州 325005;

3.温州佳海食品有限公司博士创新站, 浙江温州 325700)

摘 要:羊栖菜富含多种营养素与活性物质, 是我国重要的经济海藻之一, 其品质易受海区等环境因素的影响。为了了解不同海区养殖羊栖菜营养组成和功能成分的差异, 本文以浙江 7 个海区养殖的羊栖菜为研究对象, 采用食品安全国家标准方法, 测定了 7 个海区养殖羊栖菜基本营养、氨基酸、脂肪酸等营养物质的组成。以 DPPH·和·OH 清除率为评价标准, 测定了 7 个海区养殖羊栖菜多糖的抗氧化活性, 并对 7 个海区养殖羊栖菜多糖的结构组成进行了初步分析。结果表明: 各海区羊栖菜含水量最多, 在 $(82.50 \pm 0.32) \sim (86.50 \pm 0.23)$ g/100 g 之间; 除水分外, 主要营养成分为多糖, 其中 7 号海区养殖羊栖菜的多糖含量最多 ($P < 0.05$), 为 2.51 g/100 g; 各海区羊栖菜脂肪含量都较少, 均在 $(0.30 \pm 0.01) \sim (0.40 \pm 0.01)$ g/100 g, 说明羊栖菜是一种典型的低脂食品; 羊栖菜的氨基酸含量差别较大且各海区羊栖菜 EAAI (Essential Amino Acid Index) 值均高于 0.9, 说明 7 个海区养殖羊栖菜均为优质蛋白质来源, 另外, 2 号和 6 号海区养殖的羊栖菜氨基酸组成比例较合理, 更接近 WHO/FAO 在 1937 年推荐的理想蛋白质模式; 7 个海区羊栖菜中共检出 8 种脂肪酸, 除了 2 号海区养殖羊栖菜外, 其余主要以多不饱和脂肪酸为主。羊栖菜重金属含量符合中国《食品安全国家标准 食品中的污染物限量》(GB 2762-2017) 要求; 4 号海区养殖的羊栖菜中钙、钾含量较高, 分别为 (131.44 ± 6.36) 与 (1687.63 ± 28.14) mg/100 g, 是一种良好的钙、钾来源; 各海区养殖羊栖菜多糖结构组成相似, 都含有硫酸根基团, 且都具有清除·OH 以及 DPPH·的活性, 其中 5 号海区养殖羊栖菜的多糖抗氧化活性最高, 清除·OH 和 DPPH·的 IC_{50} 分别为 0.534、0.236 mg/mL。本研究为羊栖菜的科学养殖、羊栖菜加工和质量等级的评定奠定了一定的基础。

关键词:羊栖菜, 不同海域, 营养组成, 多糖, 结构组成, 抗氧化活性

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0275-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020132



本文网刊:

Composition Analysis of *Sargassum Fusiforme* in Different Marine Areas and Antioxidant Activity of Polysaccharides

LIANG Meina¹, ZHANG Lining², LIN Zhen³, SU Laijin^{1,3,*}

(1. Key Laboratory of Water Environment and Marine Biological Resources Protection of Zhejiang Province, College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. Zhejiang Marine Aquaculture Research Institute, Wenzhou 325005, China;

3. Wenzhou Jiahai Food Company Limited Doctor Innovation Station, Wenzhou 325700, China)

Abstract: *Sargassum fusiforme* is rich in a variety of nutrients and active substances, and is one of the important economic

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 农业国家标准和行业标准修订项目 (NYB-22270); 温州市重大科技创新攻关项目 (ZN2022009); 温州市科技特派员项目 (X20210015)。

作者简介: 梁美娜 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生物资源开发及利用, E-mail: lmn19818149332@163.com。

* 通信作者: 苏来金 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 海洋生物资源开发及利用, E-mail: sulaijin@163.com。

seaweeds in China. Its quality could be easily affected by environmental factors such as marine areas. To figure out the differences in nutritional composition of *Sargassum fusiforme* cultivated in different marine areas, this paper used *Sargassum fusiforme* cultivated in seven marine areas in Zhejiang Province as the research object, and determined the basic nutrients, amino acids and fatty acids using the National Food Safety Standard. The antioxidant activities of the seven *Sargassum fusiforme* polysaccharides were determined using DPPH· and ·OH scavenging as evaluation criteria, and the structural composition of seven kinds of *Sargassum fusiforme* polysaccharides were preliminarily analyzed. The results showed that, the moisture content of seven *Sargassum fusiforme* was highest, between (82.50 ± 0.32) and (86.50 ± 0.23) g/100 g. In addition to moisture content, the other main nutrient component was polysaccharide. The polysaccharide content of *Sargassum fusiforme* cultivated in No.7 marine area was the highest ($P<0.05$), which was 2.51 g/100 g. The fat content of *Sargassum fusiforme* of each marine area was relatively low, which was $(0.30\pm0.01)\sim(0.40\pm0.01)$ g/100 g, indicating that *Sargassum fusiforme* was a kind of typically low-fat food. The amino acid content of *Sargassum fusiforme* varied greatly and the EAAI (Essential Amino Acid Index) values of *Sargassum fusiforme* in each marine area were all more than 0.9, indicating that *Sargassum fusiforme* in the seven marine areas were all high-quality protein sources. Furthermore, the amino acid composition ratios of *Sargassum fusiforme* cultivated in No.2 and No.6 marine areas were reasonable, which were closer to the ideal protein model recommended by WHO/FAO in 1937. A total of eight fatty acids were detected in *Sargassum fusiforme* from seven marine areas. Except for *Sargassum fusiforme* cultivated in No.2 marine area, the rest were mainly polyunsaturated fatty acids. The heavy metal content of *Sargassum fusiforme* complied with the requirements of in National food safety standard-Maximum levels of contaminants in foods (GB 2762-2017). The contents of Ca and K in *Sargassum fusiforme* cultivated in No.4 marine area were (131.44 ± 6.36) mg/100 g and (1687.63 ± 28.14) mg/100 g, respectively, which were good sources of Ca and K. The polysaccharide structures of *Sargassum fusiforme* in each marine area were similar, all of which contained sulfate groups and had the activity of scavenging ·OH and DPPH·. Among them, the polysaccharide of *Sargassum fusiforme* cultivated in No.5 marine area had the highest antioxidant activity, and the IC_{50} of scavenging ·OH and DPPH· were 0.534 and 0.236 mg/mL, respectively. This study laid a certain foundation for the scientific breeding, processing and quality grade evaluation of *Sargassum fusiforme*.

Key words: *Sargassum fusiforme*; different marine areas; nutritional composition; polysaccharide; structural components; antioxidant activity

羊栖菜(*Sargassum fusiforme*), 又名鹿角尖、海大麦等, 隶属于褐藻门、褐藻纲、墨角藻目、马尾藻科、马尾藻属的海洋植物^[1], 外观呈黄褐色, 藻体由假根、茎、叶片、气囊等四部分组成^[2], 广泛分布在我国辽东半岛至广东福建等地, 目前羊栖菜人工养殖的主产区在浙江洞头, 主要制成羊栖菜干品出口日本及韩国^[3], 是我国重要的出口创汇海藻。羊栖菜在我国的利用历史悠久, 在《本草纲目》、《药典本经》等药典中均有对羊栖菜药用价值的记载^[4], 近年来的研究表明, 羊栖菜营养丰富, 且富含多种功能活性物质, 是一种典型的药食两用的藻类^[5-6]。张晓梅等^[7]对渤海地区野生羊栖菜的营养成分进行了测定, 发现渤海地区羊栖菜主要成分为碳水化合物, 其含量占干物质的 45.77%, 其中蛋白与灰分含量略低于浙江洞头羊栖菜; 李丽等^[8]测定了大连海域的野生羊栖菜的营养组成, 发现维生素 C 含量与其他文献差异较大, 推测可能与羊栖菜生长季节以及海域有关; 李晓等^[9]对比分析了山东沿海四种藻类资源的分布与营养组成的关系, 发现不同种类海藻由于受生长周期、生长水温等影响, 其营养组成会有差异; 刘宇璇等^[10]测定了洞头羊栖菜不同部位的其营养组成, 发现羊栖菜不同部位的营养成分存在一定差异。然而, 随着羊栖菜养殖面积逐渐扩大, 养殖海区不断增加, 不同海区养殖的羊栖菜营养成分和活性物质的对比研究尚未见报道, 本研究对我国 7 个主要海区养殖的羊栖菜中营养活性

因子进行了对比分析, 以期为羊栖菜的科学养殖和资源的高值化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

羊栖菜 养殖主产区, 选择浙江省 7 个羊栖菜养殖海区作为羊栖菜样品的采样地点, 采样信息见表 1, 每个海区采集养殖羊栖菜 20 kg, 4 ℃ 汽车快速运输至实验室, 清洗沥干表面水分, -20 ℃ 冷冻保存, 备用; DPPH 自由基清除能力试剂盒 南京建成生物工程研究所; D-葡萄糖(≥98%) 美国 Sigma; 苯酚(≥99%) 无锡市佳妮化工有限公司; 浓硫酸(≥96%) 浙江中星化工试剂有限公司; 过氧化氢(≥96%)、水杨酸(≥99%)、硫酸亚铁(≥99%) 国药集团化学试剂有限公司; 溴化钾 光谱纯, 上海

表 1 不同海区养殖羊栖菜的样品信息

Table 1 Sample information of *Sargassum fusiforme* in different marine areas

样品号	采样坐标	养殖海区名称
1	N27°97', E121.21'	洞头北山
2	N28°01', E121.15'	洞头横址山
3	N27°87', E121.17'	洞头北沙
4	N27°82', E121.18'	洞头岙仔
5	N27°79', E121.15'	洞头半屏山
6	N27°84', E121.04'	洞头霓屿
7	N30°69', E122.47'	舟山嵎泗

生工生物工程有限公司;除去溴化钾外其余均为分析纯。

FD-1-50 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司;RE-200 型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;Sorvall ST 16R 高速冷冻离心机 美国 Thermo fisher scientific;Epoch 酶标仪 美国伯腾仪器有限公司;TENSOR27 红外光谱仪 Bruker 光谱仪器有限公司;T6 紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 羊栖菜营养成分测定

1.2.1.1 基本营养成分的测定 水分的测定参照 GB/T 5009.3-2016《食品中水分的测定》;灰分的测定,参照 GB/T 5009.4-2016《食品中灰分的测定》;蛋白质的测定参照 GB/T 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》;粗脂肪的测定参照 GB/T 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》;盐分的测定参照 SC/T 3011-2001《水产品中盐分的测定》。

羊栖菜多糖的制备:将不同海区养殖的羊栖菜用清水清洗,烘箱 60 ℃ 干燥至恒重,粉碎,过 100 目筛。称取不同海区养殖羊栖菜干粉 15 g,加入 95% 乙醇 100 mL,80 ℃ 回流脱脂 3 次(2 h/次),得到脱脂藻粉。然后按照料液比 1:50 水煮脱脂藻粉,80 ℃ 水煮 2 次(5 h/次),过滤,合并两次滤液,浓缩,加入 4 倍体积多糖溶液的 95% 乙醇,4 ℃ 过夜,10000 r/min 离心 10 min,冷冻干燥制得 7 个产地羊栖菜粗多糖,4 ℃ 冷藏备用^[11]。

羊栖菜多糖含量测定:采用苯酚-硫酸法^[12]测定羊栖菜多糖含量。称取 10 mg D-葡萄糖标准品并定容至 100 mL,分别吸取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 mL 的溶液于试管中,加去离子水补齐到 1 mL,然后分别加入 1 mL 6% 苯酚溶液和 5 mL 浓硫酸,振荡混匀,静止 30 min,测定 490 nm 处的吸光值。以吸收度为纵坐标,多糖含量(μg/mL)为横坐标,获得标准曲线。将 7 种羊栖菜粗多糖样品配制成 0.1 mg/mL 的浓度,按照上述步骤测定其吸光值,重复 3 次,并根据标准曲线计算多糖含量。

1.2.1.2 氨基酸含量测定及营养评价 氨基酸的测定参照 GB/T 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》。根据 FAO/WHO(1937)年的氨基酸评分标准模式(Amino Acid Score, AAS),化学评分(Chemical Score, CS)和必需氨基酸指数(Essential Amino Acid Index, EAAI)方式对 7 个海区养殖羊栖菜的氨基酸进行分析比较^[13],计算方式如下:

$$AAS = \frac{a}{A}$$

$$CS = \frac{a}{S}$$

$$EAAI(\%) = \sqrt[n]{\frac{a_1}{S_1} \times \frac{a_2}{S_2} \times \cdots \times \frac{a_i}{S_i}} \times 100$$

式中: a 表示羊栖菜样品中必需氨基酸含量, mg/g; A 为 FAO/WHO 评分标准模式中相应必需氨基酸含量, mg/g; S 为鸡蛋相应必需氨基酸含量, mg/g; n 为所比较的必需氨基酸个数。

1.2.1.3 脂肪酸的测定 脂肪酸的测定参照 GB/T 5009.168-2016《食品中脂肪酸的测定》。

1.2.1.4 重金属元素测定 铅的测定参照 GB/T 5009.268-2016《食品中多元素的测定》;镉的测定参照 GB/T 5009.15-2014《食品中镉的测定》;铬的测定参照 GB/T 5009.123-2014《食品中铬的测定》;总汞的测定参照 GB/T 5009.17-2014《食品中总汞及有机汞的测定》;总砷的测定参照 GB/T 5009.11-2016《食品中总砷及无机砷的测定》。

1.2.1.5 矿物质元素及部分维生素含量的测定 钙、铁、锌、钾的测定参照 GB 5009.268-2016《食品中多元素的测定》;碘的测定参照 GB/T 5009.267-2020《食品中碘的测定》。

维生素 A 的测定参照 GB/T 5009.82-2016《食品中维生素 A、D、E 的测定》;维生素 B₁ 的测定参照 GB/T 5009.84-2016《食品中维生素 B₁ 的测定》;维生素 B₂ 的测定参照 GB/T 5009.85-2016《食品中维生素 B₂ 的测定》;维生素 C 的测定参照 GB/T 5009.86-2016《食品中抗坏血酸的测定》。

1.2.2 羊栖菜多糖抗氧化活性测定 羊栖菜多糖清除 DPPH·活性^[14]:采用 DPPH 自由基清除能力试剂盒测定。吸取 100 μL 7 种系列浓度羊栖菜粗多糖溶液(0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 mg/mL)到 96 孔板中,加入 100 μL DPPH 工作液,室温避光 30 min,在 517 nm 处测定其吸光度,记为 A₁。用无水乙醇分别代替上述 DPPH 工作液和羊栖菜多糖样品溶液,进行上述操作,在 517 nm 处测定吸光度,分别记为 A₂ 和 A₀。每个孔重复 3 次,并根据以下的公式计算 DPPH·清除率:

$$DPPH \cdot \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中, A₁: 加入样品溶液反应后的吸光值; A₂: 不加 DPPH 试剂样品溶液的吸光值; A₀: 用无水乙醇代替羊栖菜多糖样品溶液的吸光值。

羊栖菜多糖清除·OH 活性^[15]:在 5 mL 试管中依次加入 0.5 mL 的 0.5 mg/mL 羊栖菜粗多糖溶液、0.5 mL 的 6 mmol/L 硫酸亚铁溶液、0.5 mL 的 6 mmol/L 的过氧化氢溶液,混匀,静止 10 min,再加入 6 mmol/L 的水杨酸钠溶液 0.5 mL,摇匀,静置 40 min 后,于 510 nm 处测定吸光值,每组重复三次。按以下公式计算各试样对羟基自由基的清除率:

$$\cdot OH \text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_n - A_k}{A_x}\right) \times 100$$

式中, A_n: 加入样品溶液反应后的吸光值; A_k: 不加水杨酸溶液时样品溶液的吸光值; A_x: 不加样品溶

液的吸光值。

1.2.3 羊栖菜多糖傅里叶红外光谱测定 取少量 7 种羊栖菜粗多糖干样品,加入适量 KBr 粉末,在干燥箱中充分研磨,压片机压成薄片,在 $4500\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 的范围内进行红外扫描^[16]。

1.3 数据处理

采用 GraphPad Prism 8(GraphPad Software, San Diego, CA, USA)统计软件进行分析,结果用于表示并对实验结果进行配对 t 检验, $P<0.05$ 为差异显著,有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同海区养殖羊栖菜营养成分分析

2.1.1 基本营养成分分析 由表 2 可知,新鲜羊栖菜中水含量最多,在 $82.50\sim 86.50\text{ g}/100\text{ g}$ 之间,除去水分之外,羊栖菜中含量最多的为多糖,表 2 中各海区养殖羊栖菜多糖含量由高到低依次为:7 号($2.51\text{ g}/100\text{ g}$)>5 号($1.90\text{ g}/100\text{ g}$)>3 号($1.74\text{ g}/100\text{ g}$)>4 号($1.66\text{ g}/100\text{ g}$)>1 号($1.59\text{ g}/100\text{ g}$)>2 号($1.25\text{ g}/100\text{ g}$)>6 号($1.24\text{ g}/100\text{ g}$),其中 7 号海区养殖羊栖菜多糖含量最高($P<0.05$),与以往多糖提取得率研究结果一致^[17],表明 7 号海区养殖羊栖菜是洞头海区提取羊

栖菜多糖的最佳选择。同时各海区养殖羊栖菜脂肪含量都在 $0.30\sim 0.40\text{ g}/100\text{ g}$,根据 GB 28050-2011《预包装食品营养标签通则》的规定,食品中脂肪含量 $\leq 0.5\text{ g}/100\text{ g}$ 则可标为零脂肪食品^[18],因此羊栖菜是一种相对健康的低脂产品。除此之外,与其他海区养殖羊栖菜相比,7 号海区养殖羊栖菜具有明显的蛋白质含量高的优势($P<0.05$),含量为 $2.40\text{ g}/100\text{ g}$ 。1 号和 2 号海区养殖羊栖菜盐分含量相似,在 $2.49\sim 2.50\text{ g}/100\text{ g}$ 之间,可能是因为这两个海区养殖羊栖菜采集地位置相近,使得二者的海水盐度相近。

2.1.2 氨基酸组成及分析 本研究测定了 7 种羊栖菜样品中的氨基酸,其组成及含量分析结果如表 3。由表 3 可知,7 种羊栖菜氨基酸总量差异较大,含量在 $1.318\sim 1.579\text{ g}/100\text{ g}$ 之间,其中 2 号海区养殖羊栖菜总氨基酸含量最高,1 号海区养殖羊栖菜总氨基酸含量最低。另外由于色氨酸实验过程中被酸水解破坏^[19],胱氨酸未检出以外,一共检测到 16 种氨基酸,其中必需氨基酸(Essential Amino Acid, EAA)含量为 $0.500\sim 0.618\text{ g}/100\text{ g}$,非必需氨基酸(Non-essential Amino Acid, NEAA)含量为 $0.818\sim 0.992\text{ g}/100\text{ g}$ 。另外,本研究 7 种羊栖菜 EAA/TAA 为 $36.49\%\sim$

表 2 不同海区养殖羊栖菜基本营养成分(g/100 g)

Table 2 Basic nutrients of *Sargassum fusiforme* in different marine areas (g/100 g)

基本营养成分	1	2	3	4	5	6	7
水分	86.50 ± 0.23^a	85.50 ± 0.27^{ab}	85.00 ± 0.15^b	86.00 ± 0.21^a	85.20 ± 0.21^b	86.00 ± 0.33^a	82.50 ± 0.32^b
灰分	4.40 ± 0.02	5.00 ± 0.05	4.60 ± 0.10	4.70 ± 0.05	4.70 ± 0.04	4.60 ± 0.06	4.60 ± 0.04
蛋白质	1.53 ± 0.05^d	1.81 ± 0.02^b	1.82 ± 0.04^b	1.81 ± 0.03^b	1.63 ± 0.05^c	1.72 ± 0.03^{bc}	2.40 ± 0.06^a
粗脂肪	0.40 ± 0.01	0.40 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.40 ± 0.01	0.40 ± 0.01	0.40 ± 0.01	0.40 ± 0.01
盐分	2.49 ± 0.05^a	2.51 ± 0.03^a	2.29 ± 0.04^c	2.34 ± 0.06^b	2.40 ± 0.03^{ab}	2.45 ± 0.02^a	2.06 ± 0.02^d
粗多糖	1.59 ± 0.05^c	1.25 ± 0.04^d	1.74 ± 0.05^c	1.66 ± 0.05^c	1.90 ± 0.05^b	1.24 ± 0.04^d	2.51 ± 0.06^a

注:小写英文字母表示同行数据存在显著性差异($P<0.05$);表3、表6~表8同。

表 3 不同海区养殖羊栖菜氨基酸组成及含量(g/100 g)

Table 3 Amino acid composition and content of *Sargassum fusiforme* in different marine areas (g/100 g)

氨基酸	1	2	3	4	5	6	7
天门冬氨酸Asp	0.18 ± 0.01^b	0.21 ± 0.01^a	0.20 ± 0.01^{ab}	0.21 ± 0.01^a	0.17 ± 0.01^b	0.19 ± 0.01^b	0.24 ± 0.01^a
苏氨酸Thr	0.070 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a	0.07 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a
丝氨酸Ser	0.06 ± 0.00^c	0.08 ± 0.00^a	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^a
谷氨酸Glu	0.21 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.24 ± 0.01
脯氨酸Pro	0.05 ± 0.00^b	0.06 ± 0.00^a	0.06 ± 0.00^a	0.06 ± 0.00^a	0.06 ± 0.00^a	0.06 ± 0.00^a	0.06 ± 0.00^a
甘氨酸Gly	0.08 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^a	0.09 ± 0.00^a	0.09 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^a	0.09 ± 0.00^a
丙氨酸Ala	0.11 ± 0.01^b	0.13 ± 0.01^{ab}	0.13 ± 0.01^{ab}	0.15 ± 0.01^a	0.16 ± 0.01^a	0.12 ± 0.01^{ab}	0.14 ± 0.01^a
缬氨酸Val	0.08 ± 0.00^c	0.10 ± 0.00^a	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b
蛋氨酸Met	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00
异亮氨酸Ile	0.06 ± 0.00^c	0.08 ± 0.00^a	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b
亮氨酸Leu	0.11 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.10	0.13 ± 0.10	0.12 ± 0.10	0.13 ± 0.10	0.12 ± 0.10
酪氨酸Tyr	0.04 ± 0.00^b	0.05 ± 0.00^a	0.05 ± 0.00^a	0.05 ± 0.00^a	0.04 ± 0.00^b	0.05 ± 0.00^a	0.05 ± 0.00^a
苯丙氨酸Phe	0.07 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a	0.07 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a
组氨酸His	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
赖氨酸Lys	0.08 ± 0.00^c	0.10 ± 0.00^a	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b	0.09 ± 0.00^b
精氨酸Arg	0.06 ± 0.00^c	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a	0.07 ± 0.00^b	0.07 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^a	0.08 ± 0.00^a
呈味氨基酸	0.68 ± 0.02^c	0.80 ± 0.01^a	0.76 ± 0.01^b	0.79 ± 0.01^{ab}	0.73 ± 0.01^b	0.73 ± 0.01^b	0.83 ± 0.01^a

续表 3

氨基酸	1	2	3	4	5	6	7
TAA	1.32±0.02 ^c	1.58±0.02 ^a	1.50±0.02 ^a	1.52±0.02 ^a	1.42±0.02 ^b	1.47±0.02 ^{ab}	1.56±0.02 ^a
EAA	0.50±0.00 ^c	0.62±0.00 ^a	0.58±0.00 ^b	0.57±0.00 ^b	0.54±0.00 ^{bc}	0.58±0.00 ^b	0.57±0.00 ^b
NEAA	0.82±0.01 ^b	0.96±0.01 ^a	0.92±0.01 ^a	0.94±0.01 ^a	0.88±0.01 ^b	0.89±0.01 ^b	0.99±0.01 ^a
EAA/TAA(%)	37.94	39.14	38.63	37.81	38.25	39.44	36.49
EAA/NEAA(%)	61.12	64.31	62.93	60.81	61.94	65.13	57.46

注: TFAA为氨基酸总量; EAA为必需氨基酸总量; NEAA为非必需氨基酸总量。

39.44%, EAA/NEAA 在 57.46%~65.13%, 而张晓梅等^[7]研究的渤海羊栖菜 EAA/TAA 为 45.01%, EAA/NEAA 为 81.84%, 可能是由于浙江洞头舟山区域羊栖菜水域受瓯江影响, 盐度较大, 进而影响羊栖菜生长^[20]。2 号和 6 号海区养殖羊栖菜的 EAA/TAA 分别为 39.14%、39.44%, EAA/NEAA 分别为 64.31%、65.13%, 接近 WHO/FAO 在 1937 年推荐的理想蛋白质模式(EAA/TAA 在 40% 左右, EAA/NEAA 在 60% 以上), 说明这两种海区养殖的羊栖菜氨基酸组成比例较为合理^[21]。同时, 各海区养殖羊栖菜氨基酸组成中, 谷氨酸含量最多, 在 0.200~0.240 g/100 g, 天门冬氨酸含量次之, 在 0.170~0.240 g/100 g, 这两种氨基酸是鲜味氨基酸, 表明羊栖菜具有丰富的鲜味, 可以用来制作具有独特风味的海藻食品。

2.1.3 必需氨基酸评价 表 4~表 5 所示是 7 个不同海区养殖羊栖菜的必需氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)、必需氨基酸指数(EAAI), 并评价 7 个不同

海区养殖羊栖菜的蛋白质营养价值。根据 AAS 和 CS 可知, 7 个海区养殖羊栖菜蛋氨酸的氨基酸评分最低, 为第一限制氨基酸, 其次较低的为赖氨酸, 为第二限制氨基酸。在蛋白源评价中, 当 n=6~12 时, 评价标准为: 当 0.8<EAAI≤0.9 时, 测定物质为良好蛋白源, EAAI>0.9 即为优质蛋白源, 营养价值越高^[22], 由于 7 个海区养殖羊栖菜的 EAAI 值均高于 0.9, 因此 7 个海区养殖的羊栖菜均为优质蛋白质来源。

2.1.4 脂肪酸组成及含量 由表 6 可知, 7 个不同海区养殖羊栖菜中共检测出 8 种脂肪酸, 其中, 饱和脂肪酸(Saturated Fatty Acid, SAFA)2 种, 含量占脂肪酸总量的 36.28%~51.94%, 单不饱和脂肪酸(Monounsaturated Fatty Acid, MUFA)2 种, 占脂肪酸总量的 9.72%~17.19%, 多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acid, PUFA)4 种, 占脂肪酸总量的 35.78%~50.10%, 均少于渤海羊栖菜脂肪酸含量^[7]。由上述数据可知, 除了 2 号海区养殖羊栖菜, 其他海区养殖羊

表 4 不同海区养殖羊栖菜必需氨基酸与鸡蛋蛋白及 FAO/WHO 标准模式对比(g/100 g)

Table 4 Comparison of essential amino acids of *Sargassum fusiforme* in different marine areas with egg proteins and FAO/WHO standard models (g/100 g)

必需氨基酸	1	2	3	4	5	6	7	FAO评分模式	鸡蛋模式
Thr	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	4	4.5
Val	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	5	5.4
Met	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	3.5	4.7
Ile	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	4	4.9
Leu	0.11	0.14	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	7	6.6
Phe	0.11	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13	6	8.6
Lys	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	5.5	6.6

表 5 不同海区养殖羊栖菜必需氨基酸营养评价

Table 5 Nutritional evaluation of essential amino acids of *Sargassum fusiforme* in different marine areas

项目	氨基酸	1	2	3	4	5	6	7
AAS	Thr	0.017	0.020	0.019	0.019	0.018	0.019	0.020
	Val	0.016	0.019	0.018	0.018	0.017	0.018	0.018
	Met	0.010	0.012	0.011	0.011	0.011	0.012	0.011
	Ile	0.016	0.020	0.018	0.018	0.017	0.018	0.017
	Leu	0.016	0.020	0.019	0.019	0.017	0.019	0.017
	Phe	0.018	0.023	0.021	0.021	0.019	0.021	0.021
	Lys	0.015	0.018	0.017	0.017	0.016	0.017	0.016
	Thr	0.015	0.018	0.017	0.019	0.016	0.017	0.018
CS	Val	0.015	0.018	0.017	0.018	0.016	0.017	0.017
	Met	0.007	0.009	0.009	0.011	0.008	0.009	0.008
	Ile	0.013	0.016	0.015	0.018	0.014	0.014	0.014
	Leu	0.017	0.021	0.020	0.019	0.018	0.020	0.018
	Phe	0.013	0.016	0.015	0.021	0.013	0.014	0.015
	Lys	0.012	0.015	0.014	0.017	0.013	0.014	0.014
	EAAI	1.273	1.570	1.491	1.728	1.363	1.462	1.442

表 6 不同海区养殖栖菜脂肪酸组成及含量(g/kg)

Table 6 Fatty acid composition and content of *Sargassum fusiforme* in different marine areas (g/kg)

脂肪酸(%)	1	2	3	4	5	6	7
C12:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C14:0	0.09±0.00	0.09±0.00	0.08±0.00	0.09±0.00	0.12±0.00	0.09±0.00	0.07±0.00
C15:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C16:0	0.46±0.01 ^b	0.46±0.01 ^b	0.39±0.01 ^c	0.40±0.01 ^b	0.50±0.01 ^a	0.44±0.01 ^b	0.50±0.01 ^a
C16:1	0.04±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00
C17:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C18:2n6c	0.06±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.06±0.00	0.08±0.00	0.07±0.00	0.12±0.00
C18:3n3	0.17±0.00 ^a	0.10±0.00 ^c	0.12±0.00 ^c	0.15±0.00 ^b	0.19±0.00 ^a	0.14±0.00 ^b	0.17±0.00 ^a
C18:1n9c	0.10±0.00 ^b	0.09±0.00 ^b	0.07±0.00 ^b	0.08±0.00 ^b	0.12±0.00 ^b	0.10±0.00 ^b	0.23±0.00 ^a
C18:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C20:4n6	0.31±0.00 ^a	0.17±0.00 ^c	0.25±0.00 ^b	0.25±0.00 ^b	0.33±0.00 ^a	0.27±0.00 ^b	0.30±0.00 ^a
C20:5n3	0.14±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	0.11±0.00 ^a	0.12±0.00 ^a	0.18±0.00 ^a	0.11±0.00 ^a	0.14±0.00 ^a
C20:2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C20:1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C20:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C22:1n9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C22:0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ΣSAFA	0.55±0.00 ^b	0.55±0.00 ^b	0.46±0.00 ^c	0.49±0.00 ^c	0.62±0.00 ^a	0.53±0.00 ^b	0.57±0.00 ^b
ΣMUFA	0.15±0.00 ^b	0.13±0.00 ^b	0.11±0.00 ^b	0.12±0.00 ^b	0.15±0.00 ^b	0.14±0.00 ^b	0.27±0.00 ^a
ΣPUFA	0.68±0.00 ^b	0.38±0.00 ^c	0.52±0.00 ^d	0.58±0.00 ^c	0.78±0.00 ^a	0.59±0.00 ^c	0.73±0.00 ^b

注: ND表示未检出; SAFA为饱和脂肪酸; MUFA为单不饱和脂肪酸; PUFA为多不饱和脂肪酸。

栖菜中的脂肪酸均以多不饱和脂肪酸为主。在 SAFA 中, 含量较多的为棕榈酸(C16:0), 其中 7 号海区养殖羊栖菜最多($P<0.05$), 含量为 0.50 ± 0.01 g/kg; 在 MUFA 中, 油酸(C18:1n9c)含量最高, 其中 7 号海区养殖羊栖菜的油酸含量占总脂肪酸含量的 14.58%($P<0.05$); 在 PUFA 中, 5 号海区养殖羊栖菜花生四烯(C20:4n6)和 α -亚麻酸(C20:5n3)含量最多($P<0.05$), 分别占总脂肪酸含量的 21.42% 与 12.17%, 已知花生四烯酸和 α -亚麻酸是人体必需脂肪酸, 且花生四烯酸是合成前列腺素等物质的重要前提物质^[23], 而 α -亚麻酸具有降血糖功效^[24], 因此食用 5 号海区养殖羊栖菜对于降低心血管疾病以及糖尿病等疾病的发生具有重要意义^[25]。虽然不同海区养殖的羊栖菜脂肪酸种类相同, 但其同一脂肪酸的含量却存在差异性, 这说明温度、海水盐度等可能通过影响羊栖菜生长来影响其脂肪酸的合成。

2.1.5 重金属含量的结果 研究表明海洋藻类可能富集了重金属离子, 其中常见的重金属污染物有铅、镉、铬、汞以及砷等^[26], 因此本文对 7 个海区养殖羊栖菜进行了重金属含量的测定。根据 GB 19643-

2016《藻类及其制品》^[27] 和 GB 2762-2017《食品中的污染物限量》^[28] 中对重金属污染物的限量要求, 藻类及其制品铅含量的限量为 1 mg/kg, 由表 7 可知, 7 个海区养殖的羊栖菜均符合标准限量要求。其他指标(镉、铬、总汞以及总砷)虽然没有限量要求, 通过与 GB 2762-2017《食品中的污染物限量》中其他水产动物的安全指标作为参照, 发现 7 个海区养殖羊栖菜中的镉、铬、总汞含量均符合限量要求, 其中, 2 号海区养殖羊栖菜的 Cd 的金属含量略高, 分析可能是由于该海区更靠近海岸, 海水更容易被污染, 从而使得羊栖菜中重金属含量增加^[29-31]。

2.1.6 矿物质元素及部分维生素含量的结果 由表 8 可知, 羊栖菜含有丰富的钙、钾, 二者是人体必需的常量元素, 其中 4 号海区养殖羊栖菜含钙、钾的量最多, 含量分别为 (131.44 ± 6.36) mg/100 g 与 (1687.63 ± 28.14) mg/100 g; 6 号海区养殖羊栖菜含钙量最少, 为 (120.01 ± 3.67) mg/100 g, 含钾量最少的为 7 号海区养殖羊栖菜, 含量为 (1470.12 ± 14.20) mg/100 g, 其均大于菠菜、芥菜、白菜等蔬菜的钙、钾含量^[32]。根据中国居民的具体情况, 成年人每日需要摄入 800 mg

表 7 不同海区养殖羊栖菜重金属元素含量(mg/kg)

Table 7 Contents of heavy metal elements of *Sargassum fusiforme* in different marine areas (mg/kg)

重金属元素	1	2	3	4	5	6	7
铅Pb	0.03±0.00	0.04±0.00	ND	0.03±0.00	ND	0.02±0.00	0.12±0.00
镉Cd	0.17±0.00 ^c	0.32±0.01 ^a	0.09±0.01 ^d	0.13±0.00 ^c	0.16±0.00 ^c	0.14±0.00 ^c	0.28±0.01 ^b
铬Cr	0.04±0.00 ^c	0.08±0.00 ^c	0.06±0.00 ^c	0.04±0.00 ^c	0.03±0.00 ^c	0.21±0.01 ^a	0.11±0.00 ^b
总汞Hg	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00	0.03±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	ND
总砷As	8.3±0.02 ^b	11.0±0.02 ^a	11.0±0.02 ^a	10.0±0.02 ^a	7.6±0.02 ^b	7.7±0.02 ^b	10.0±0.02 ^a

注: ND表示未检出。

表 8 不同海区养殖羊栖菜样品中 Ca、Fe、Zn、K 和 I 含量(mg/100 g)
Table 8 Contents of Ca, Fe, Zn, K and I of *Sargassum fusiforme* in different marine areas (mg/100 g)

矿物质元素	1	2	3	4	5	6	7
Ca	123.33±8.39	121.67±14.15	130.67±4.73	131.44±6.36	124.37±7.80	121.60±13.73	120.01±3.67
Fe	1.71±0.09	1.66±0.06	1.65±0.03	1.63±0.03	1.73±0.10	1.66±0.07	1.72±0.11
Zn	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K	1649.67±14.36 ^a	1661.67±11.24 ^a	1677.33±10.60 ^a	1687.63±28.14 ^a	1663.86±17.19 ^a	1661.10±10.21 ^a	1470.12±14.20 ^b
I	6.53±1.03	6.56±1.51	6.49±0.91	6.53±1.63	6.59±0.43	6.56±1.51	6.63±1.76

注: ND表示未检出。

钙和 3.5 g 钾,因此羊栖菜是一种良好的钙、钾来源的藻类。除此之外,5 号海区养殖羊栖菜含铁量最多,为(1.73±0.10)mg/100 g,7 号海区养殖羊栖菜含碘量最多,为(6.63±1.76)mg/100 g,羊栖菜中丰富的铁、碘微量元素,对于防止贫血以及甲状腺肿大具有重要作用^[33]。

维生素在人体生长发育起着重要作用,其中维生素 B₂ 参与机体三大生热营养素的代谢过程^[34];维生素 C 具有较强的抗氧化活性,可以清除体内的自由基,且人体内缺乏维生素 C 生物合成最后一步反应的关键酶,因而必须从食物中摄取维生素 C^[35],通过表 9 可知,各海区养殖羊栖菜含有少量的维生素 B₂ 与维生素 C,维生素 B₂ 含量在(6.50±0.12)~(6.94±0.08)μg/100 g,维生素 C 含量在(4.12±0.07)~(4.27±0.15)μg/100 g。

2.2 不同海区养殖羊栖菜多糖体外抗氧化活性评价

有研究表明羊栖菜具有良好的抗氧化活性,主要活性物质为羊栖菜多糖^[36-37],本文对 7 个海区养殖羊栖菜多糖抗氧化活性进行了测定。各海区养殖羊栖菜多糖对·OH 的清除能力见图 1,7 个海域养殖羊栖菜多糖在浓度为 0.2~1.0 mg/mL 内对·OH 清除率逐渐增加,并且当多糖浓度为 1 mg/mL 时,5 号海区养殖羊栖菜多糖的清除率最高,为 59.7%,清除·OH 的 IC₅₀ 为 0.534 mg/mL。各海区养殖羊栖菜糖对 DPPH·的清除能力见图 2:在浓度为 0.2~0.6 mg/mL 时,各海区养殖羊栖菜多糖对 DPPH·自由基清除率增长较快,随后减缓;另外,从图中可知,5 号海区养殖羊栖菜多糖对 DPPH·清除率最好,当浓度为 1 mg/mL 时,清除率为 70%,IC₅₀ 为 0.236 mg/mL,其清除 DPPH·能力高于唐炜等^[38]的测定数据,这可能是由于多糖更易溶解于水中,当提取试剂为乙醇而不是水时,使得多糖提取率降低且多糖中杂质含量较多,从而降低了多糖抗氧化活性。2 号海区养殖羊栖

菜多糖 DPPH·清除活性最差,当浓度为 1 mg/mL 时,清除率为 40%,IC₅₀ 为 1.166 mg/mL。7 个海区养殖羊栖菜多糖清除·OH 与 DPPH·活性大小存在差异,这主要与各个海区养殖羊栖菜多糖的纯度、硫酸根含量、分子量大小等有关^[39]。

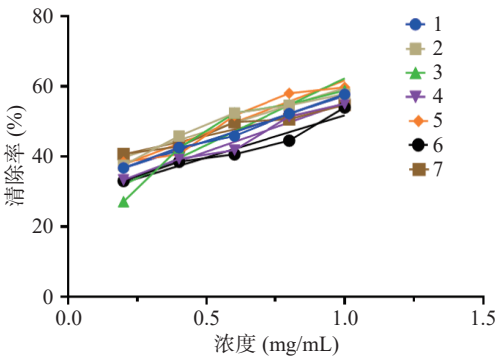


图 1 不同海区养殖羊栖菜多糖对·OH 的清除能力
Fig.1 Scavenging ability of *Sargassum fusiforme* polysaccharides in different marine areas on ·OH

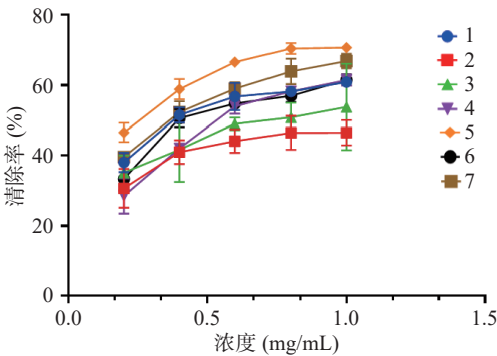


图 2 不同海区养殖羊栖菜多糖对 DPPH·的清除能力
Fig.2 Scavenging ability of *Sargassum fusiforme* polysaccharides in different marine areas on DPPH·

2.3 不同海区养殖羊栖菜多糖红外光谱分析

图 3 是不同海区养殖羊栖菜多糖红外光谱扫描

表 9 不同海区养殖羊栖菜维生素含量(μg/100 g)
Table 9 Vitamin content of *Sargassum fusiforme* in different marine areas (μg/100 g)

维生素	1	2	3	4	5	6	7
维生素A	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
维生素B ₁	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
维生素B ₂	6.87±0.09	6.72±0.33	6.85±0.15	6.87±0.15	6.94±0.08	6.72±0.34	6.50±0.12
维生素C	4.12±0.07	4.14±0.12	4.26±0.11	4.27±0.15	4.16±0.02	4.14±0.12	4.16±0.15

注: ND表示未检出。

图。由图可知,各海区养殖羊栖菜多糖主要吸收峰基本相同,说明构成各海区养殖羊栖菜多糖的主要有机官能团相似^[40]。3424 cm^{-1} 处的宽峰是由于糖环上的 O-H 伸缩振动引起的^[41];在 1612 cm^{-1} 附近有羰基非对称伸缩振动、酰胺基 N-H 变角振动,表明羊栖菜多糖中含有糖醛酸^[42];1250 cm^{-1} 处为 S=O 的伸缩振动峰,表明多糖上含有硫酸基团,说明羊栖菜多糖是硫酸化多糖^[43];1035 cm^{-1} 处是 C-O-C 的特征吸收峰,说明羊栖菜多糖构型为吡喃环型^[44]。研究表明南澳海域 7 种海藻多糖均为硫酸酯多糖,由于南澳海域 7 种海藻多糖的特征吸收峰与 7 个海区羊栖菜多糖吸收峰相似,因此 7 个海区养殖羊栖菜多糖也都是硫酸酯多糖^[45]。

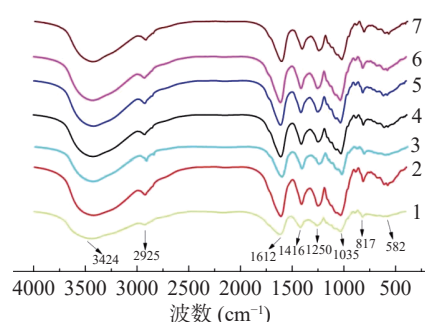


图3 不同海区养殖羊栖菜多糖红外光谱扫描图

Fig.3 Infrared spectrum of polysaccharides extracted from *Sargassum fusiforme* in different marine areas

3 结论

羊栖菜是我国重要的经济特色藻类之一,具有丰富的营养功效与经济价值,本研究首次以 7 个不同海区养殖羊栖菜原料为研究对象,对其营养成分以及多糖活性进行了对比分析,发现不同海区养殖的羊栖菜营养组分及多糖具有一定的差异。鲜羊栖菜除水分外,其主要的营养成分为多糖,其中,7 号海区养殖羊栖菜多糖含量最高($P < 0.05$);7 个海区养殖羊栖菜脂肪含量较低,而其氨基酸 EAAI 值均高于 0.9,表明了羊栖菜是一种低脂产品且为优质蛋白的良好来源,其中 2 号和 6 号海区养殖羊栖菜的 EAA/TAA 与 EAA/NEAA 最接近 WHO/FAO 在 1937 年推荐的理想蛋白质模式(EAA/TAA 在 40% 左右, EAA/NEAA 在 60% 以上),表明这两个海区养殖的羊栖菜氨基酸组成比例较为合理,可以作为人们日常低脂饮食的良好食物来源。除此之外,除了 2 号海区养殖的羊栖菜之外,其他海区养殖羊栖菜均以不饱和脂肪酸为主;7 个海区养殖羊栖菜的重金属均符合食品安全国家标准且是一种良好的钙、钾来源藻类。抗氧化活性实验结果表明,7 个海区养殖的羊栖菜多糖都具有清除·OH 以及 DPPH·活性,其中 5 号海区养殖的羊栖菜多糖抗氧化能力最佳,其清除·OH 与 DPPH·的 IC_{50} 分别为 0.534 与 0.236 mg/mL ,这可能与 5 号海区养殖的羊栖菜多糖中含有较多的硫酸根基团有关。本研究为羊栖菜的养殖及产品开发等

提供了良好的理论基础。

参考文献

- [1] ZUO J H, ZHANG Y, WU Y, et al. *Sargassum fusiforme* fucoidan ameliorates diet-induced obesity through enhancing thermogenesis of adipose tissues and modulating gut microbiota[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 216: 728–740.
- [2] ZHANG R, ZHANG X X, TANG X Y, et al. Composition, isolation, purification and biological activities of *Sargassum fusiforme* polysaccharides: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 228(C): 115381.
- [3] NIE J G, CHEN D T, YE J, et al. Preparative separation of three terpenoids from edible brown algae *Sargassum fusiforme* by high-speed countercurrent chromatography combined with preparative high-performance liquid chromatography[J]. *Algal Research*, 2021, 59: 102449.
- [4] 王思玉, 向俊, 汪玉梅, 等. 海藻羊栖菜全草化学成分研究[J]. *中草药*, 2019, 50(23): 5670–5676. [WANG S Y, XIANG J, WANG Y M, et al. Study on chemical constituents from of whole herbs of *Sargassum fusiforme*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, 50(23): 5670–5676.]
- [5] QIAN W W, YANG S Q, HU S M, et al. Enzymatic degradation, antioxidant and immunoregulatory activities of polysaccharides from brown algae *Sargassum fusiforme*[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021: 1–13.
- [6] LIU J, LUTHULI S, YANG Y, et al. Therapeutic and nutraceutical potentials of a brown seaweed *Sargassum fusiforme*. [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(10): 5195–5205.
- [7] 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 X M, GUO R, SU H, et al. Nutritional composition analysis and safety evaluation of *Sargassum fusiforme*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(4): 296–300, 311.]
- [8] 李丽, 安凤飞, 陶平. 羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)的营养组成分析[J]. *中国公共卫生管理*, 2002(6): 548–550. [LI L, AN F F, TAO P. Analysis on the nutrient composition of *Sargassum fusiforme*[J]. *Chinese Journal of Public Health Management*, 2002 (6): 548–550.]
- [9] 李晓, 王颖, 刘天红, 等. 荣成近岸海域四种褐藻营养成分分析及评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2020, 175(4): 147–155. [LI X, WANG Y, LIU T H, et al. An analysis and evaluation of nutrient composition of four brown algae along the coast of Rongcheng, Shandong Province[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020, 175(4): 147–155.]
- [10] 刘宇璇, 汪芷茵, 林振士, 等. 洞头羊栖菜不同部位的营养成分和物化性质分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(1): 216–223, 133. [LIU Y X, WANG Z Y, LIN Z S, et al. Analysis of nutritional components and physicochemical properties of different parts of *Sargassum fusiforme* [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(1): 216–223, 133.]
- [11] 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 B H, et al. Study on extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Sargassum fusiforme*[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(12): 24–29.]
- [12] 杨贤庆, 刘名求, 戚勃, 等. 龙须菜中多糖含量测定方法的比较研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(22): 54–57. [YANG X Q, LIU M Q, QI B, et al. Comparison of methods in determination of polysaccharide in *Gracilaria lemaneiformis*[J]. *Science and Tech-*

- nology of Food Industry, 2013, 34(22): 54–57.]
- [13] 李雪玲, 张东, 李思平, 等. 健康与肠炎灰海马不同部位营养及功能性组分比较[J]. 海洋渔业, 2022, 44(2): 228–241. [LI X L, ZHANG D, LI S P, et al. A comparative analysis of nutritional components and bio-functional composition in healthy and enteritis diseased *Hippocampus erectus* [J]. Marine Fisheries: 2022, 44(2): 228–241.]
- [14] 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 J Y, et al. Preliminary study on antioxidant and anti-aging activity of three seaweed polysaccharides[J]. Pharmaceutical Biotechnology, 2020, 27(1): 29–32.]
- [15] 赵佩佩, 王加祥, 齐君, 等. 几种海藻多糖的提取、成分分析及抗氧化活性比较[J]. 食品工业, 2017, 38(11): 144–148. [ZHAO P P, WANG J X, QI J, et al. Extraction, composition analysis and antioxidant activity comparison of polysaccharides from seaweeds [J]. The Food Industry, 2017, 38(11): 144–148.]
- [16] 马小双, 李程程. 不同种类铁皮石斛及其多糖的红外光谱测定分析[J]. 黑龙江农业科学, 2015(9): 116–118. [MA X S, LI C C. Determination and analysis of different species of dendrobium candidum and its polysaccharides by IR Spectra[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2015(9): 116–118.]
- [17] 卞俊, 吴越芳, 张吉德, 等. 羊栖菜多糖不同提取工艺的初步比较[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2002(3): 59–60. [BIAN J, WU Y F, ZHANG J D, et al. Preliminary comparison of different extraction processes of polysaccharides from *Sargassum fusiforme*[J]. Chinese Journal of Nautical Medicine and Hyperbaric Medicine, 2002(3): 59–60.]
- [18] 萧野. 教你读懂舌尖上的标签[J]. 环境与生活, 2013, 54(6): 68–69. [XIAO Y. Teaching you to read labels on the tip of your tongue[J]. Green Living, 2013, 54(6): 68–69.]
- [19] 区美怡. 高效液相色谱法测定饲料原料中色氨酸的含量[J]. 粮食与饲料工业, 2022, 405(5): 56–58. [QU M Y. Determination of tryptophan in feed ingredients by high performance liquid chromatography method[J]. Cereal & Feed Industry, 2022, 405(5): 56–58.]
- [20] 李生尧, 叶定书, 郭温林等. 羊栖菜栽培敌害生物调查及其防治[J]. 现代渔业信息, 2009, 24(9): 19–22. [LI S Y, YE D S, GUO W L, et al. Investigation and prevention of harmful organisms for the cultivation of *Sargassum fusiforme* (Harv.) Okam[J]. Fishery Information & Strategy, 2009, 24(9): 19–22.]
- [21] 姜芳燕, 宋文明, 杨宁, 等. 海南长茎葡萄蕨藻的营养成分分析及评价[J]. 食品工业科技, 2014, 35(24): 356–359. [JIANG F Y, SONG W M, YANG N, et al. Analysis and evaluation of nutrient content *Caulerpa lentillifera*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(24): 356–359.]
- [22] 李小波, 刘曼, 李培根, 等. 山黧豆蛋白质的提取及营养价值研究[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(6): 46–52. [LI X B, LIU M, LI P G, et al. Study on optimization of extraction process and nutritional value of proteins from *Lathyrus sativus* Linn[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(6): 46–52.]
- [23] OKTEM E K, AYDIN B, GULFISAN G, et al. A transcriptomic and reverse-engineering strategy reveals molecular signatures of arachidonic acid metabolism in 12 cancers[J]. Omics : A Journal of Integrative Biology, 2023, 27(3): 127–138.
- [24] 常松林, 高晓余, 柳双凤, 等. α -亚麻酸对高脂饮食和链脲佐菌素诱导 II 型糖尿病模型小鼠的降血糖作用[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 86–94. [CHANG S L, GAO X Y, LIU S F, et al. Hypoglycemic effect of α -linolenic acid on high-fat diet and streptozotocin-induced type II diabetes model mice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 86–94.]
- [25] GLADYSHEV M I. Fatty acids: Essential nutrients and important biomarkers[J]. *Biomolecules*, 2022, 12(9): 1250.
- [26] 靳贵英, 莫淑萍. 海藻羊栖菜质量研究综述[J]. 中国药品标准, 2018, 19(3): 165–170. [JIN G Y, MO Q P. A Review of the quality study of *Sargassum Fusiforme*[J]. Drug Standards of China, 2018, 19(3): 165–170.]
- [27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 中国国家食品药品监督管理总局. GB 19643-2016 食品安全国家标准 藻类及其制品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China National Food and Drug Administration. GB 19643-2016 National standard for food safety. Algae and their products[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
- [28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 中国国家食品药品监督管理总局. GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China National Food and Drug Administration. GB 2762-2017 National Food Safety Standard Limits of contaminants in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.]
- [29] PARK G Y, KANG D E, DAVAATSEREN M, et al. Reduction of total, organic, and inorganic arsenic content in *Hizikia fusiforme* (Hijiki) [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(2): 615–622.
- [30] WU F M, PENG J, RAN J F, et al. Quality evaluation of traditional chinese medicine mylabris based on heavy metal risk assessment and analysis of pharmacological component contents[J]. Chemistry & Biodiversity, 2023, 20(2): e202200563.
- [31] ZHU Y J, CHRISTAKOS G, WANG H W, et al. Distribution, accumulation and health risk assessment of trace elements in *Sargassum fusiforme*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 174: 113155.
- [32] 邓梦雅, 朱丽, 吴东慧, 等. 蔬菜中矿物质含量测定、营养评价及风险评估[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 97–102. [DENG M Y, ZHU L, WU D H, et al. Mineral content and nutritional value evaluation and risk assessment in vegetables[J]. Food Research and Development, 2018, 39(9): 97–102.]
- [33] 孟庆翔. 矿物质在肉牛饲养中的作用[J]. 饲料工业, 2022, 43(24): 1–8. [MENG Q X. The role of minerals in beef cattle feeding[J]. Feed Industry, 2022, 43(24): 1–8.]
- [34] 孙健慧. 食物治疗缺乏维生素 B₂ 引起的疾病[J]. 家庭医学, 2007, 333(11): 47. [SUN J H. Food treatment of diseases caused by vitamin B₂ deficiency[J]. *Family Medicine*, 2007, 333(11): 47.]
- [35] 吕凤. 维生素系列之维生素 C(抗坏血酸)[N]. 中国医药报, 2021-10-19(7). [LÜ F. Vitamin C (Ascorbic acid) in vitamin series[N]. China Medical Journal, 2021-10-19(7).]
- [36] 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 Z R, LI Z R, et al. Structure and antioxidant activity of polysaccharides extracted from *Sargassum fusiforme*[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(7): 842–851.]
- [37] NALIN S, YOU J J, SOO H K, et al. Enzymatic hydrolysis for effective extraction of antioxidative compounds from *Hizikia fusiformis*[J]. *Algae*, 2004, 19(1): 59.
- [38] 唐炜. 三种海藻体外抗氧化活性的研究[J]. 科技创新导报, 2012, 225(9): 5–6. [TANG W. *In vitro* antioxidant activity of three

- species of seaweeds[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012, 225(9): 5-6.]
- [39] SHAO P, CHEN X X, SUN P L. Improvement of antioxidant and moisture-preserving activities of *Sargassum horneri* polysaccharide enzymatic hydrolyzates[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 74: 420-427.
- [40] AN Y Z, LIU H T, LI X X, et al. Carboxymethylation modification, characterization, antioxidant activity and anti-UVC ability of *Sargassum fusiforme* polysaccharide[J]. Carbohydrate Research, 2022, 515.
- [41] JING Y S, CHENG W J, LI M S, et al. Structural characterization, rheological properties, antioxidant and anti-inflammatory activities of polysaccharides from *Zingiber officinale*[J]. Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands), 2023, 78(1): 160-165.
- [42] LIU X Y, CHEN S, LIU H J, et al. Structural properties and anti-inflammatory activity of purified polysaccharides from Hen-of-the-woods mushrooms (*Grifola frondosa*)[J]. Frontiers in Nutrition, 2023.
- [43] 吴兰兰, 吴钢, 谭强来, 等. 煮制对多花黄精多糖结构及其体外免疫刺激活性的影响[J/OL]. 中国食物与营养: 1-7[2023-03-03]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20230228.001>. [WU L L, WU G, TAN Q L, et al. Effect of cooking on the structure of polysaccharides of *Polygonum multiflorum* and their *in vitro* immunostimulatory activity [J/OL]. Food and Nutrition in China: 1-7 [2023-03-03]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20230228.001>.]
- [44] 侯萍, 马军, 陈燕等. 几种海藻粗多糖的理化性质及结构特征分析[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(2): 55-62. [HOU P, MA J, CHEN Y, et al. Analysis of physicochemical properties and structure characteristics of several crude algal polysaccharides[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(2): 55-62.]
- [45] 张颖, 黄日明, 洪爱华, 等. 南澳海域七种海藻的多糖组成分析[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2006(3): 455-459. [ZHANG Y, HUANG R M, HONG A H, et al. Study on monosaccharide composition of seven kinds of algae polysaccharides from the South China sea[J]. Journal of Jinan University(Natural Science & Medicine Edition), 2006(3): 455-459.]