

# 洞头羊栖菜不同部位的营养成分和物化性质分析

刘宇璇<sup>1</sup>, 汪芷因<sup>1</sup>, 林振士<sup>2</sup>, 李昌达<sup>2</sup>, 朱姚稼<sup>1</sup>, 李丹<sup>1\*</sup>, 吴嘉平<sup>1</sup>

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021) (2. 洞头海洋与渔业发展研究中心, 浙江温州 325700)

**摘要:** 羊栖菜作为海洋藻类具有重要的食用价值。为了探究羊栖菜不同部位营养成分和物化性状是否有差异, 该研究以温州洞头羊栖菜为研究对象, 分析了其茎、侧枝、气囊、生殖托等部位的基本营养成分、氨基酸组成、物化性质差异, 评价了蛋白质的营养价值以及理化性质间的相关性。结果表明, 羊栖菜不同部位营养成分、物化性质存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。相较其它部位, 生殖托中蛋白质、脂质、碳水化合物含量更高, 分别为 15.64 g/100 g、5.77 g/100 g、50.03 g/100 g; 而侧枝中粗纤维、灰分含量更高, 分别为 10.27 g/100 g、26.86 g/100 g; 气囊各营养成分含量处在中间水平。各部位均检测出 17 种氨基酸, 其中必需氨基酸含量丰富, 占总氨基酸的 40% 左右。枝干氨基酸组成更为均衡, 必需氨基酸指数 (EAAI) 最高为 96.73, 气囊、生殖托平均 EAAI 为 89.31。在物化性质方面, 侧枝持水性最强 (11.96 g/g), 气囊持油性最强 (1.98 g/g); 蛋白质、粗纤维、脂质与羊栖菜的物化性质显著相关 ( $p < 0.05$ )。综上, 羊栖菜不同部位营养成分和物化性状存在差异, 可为拓展羊栖菜国内外市场, 以及对羊栖菜不同部位进行有选择性的开发利用提供基础数据。

**关键词:** 羊栖菜; 营养成分; 物化性质; 不同部位

文章编号: 1673-9078(2022)01-216-223

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.0438

## Analysis of Nutritional Components and Physicochemical Properties of Different Parts of *Sargassum fusiforme*

LIU Yuxuan<sup>1</sup>, WANG Zhiyin<sup>1</sup>, LIN Zhenshi<sup>2</sup>, LI Changda<sup>2</sup>, ZHU Yaojia<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1\*</sup>, WU Jiaping<sup>1</sup>

(1. College of Ocean, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

(2. Dongtou Research & Development Center for Marine and Fishery, Wenzhou 325700, China)

**Abstract:** In this study, *Sargassum fusiforme* was used as the research object, the basic nutrient components, amino acid composition and physicochemical properties of the stem, branches, pneumatocyst, and reproductive receptacles of *Sargassum fusiforme* were analyzed, in order to explore whether there are differences in the physical and chemical properties of different parts of *Sargassum fusiforme*. The nutritional value of protein and the correlation between physical and chemical properties were also evaluated. The results showed that compared with other parts, the protein, lipid, and carbohydrate contents in the reproductive receptacle were higher (i.e. 15.64 g/100 g, 5.77 g/100 g, and 50.03 g/100 g, respectively); the crude fiber and ash contents in the lateral branches were higher (i.e. 10.27 g/100 g and 26.86 g/100 g, respectively). The content of each nutrient in the pneumatocyst was at an intermediate level. Totally 17 kinds of amino acids were detected in each part, with essential amino acids accounting for about 40% of the total amino acids (indicating the abundance of essential amino acids). The amino acid composition of the branches and stems was more balanced, with the highest essential amino acid index (EAAI) reaching 96.73. The pneumatocyst and reproductive receptacle had an EAAI of 89.31. In terms of physicochemical properties, the lateral branches had the strongest water holding capacity (11.96 g/g), and the pneumatocyst had the strongest oil holding capability (1.98 g/g). The protein, crude fiber and lipid contents were significantly correlated ( $p < 0.05$ ) with the physicochemical properties of *Sargassum fusiforme*. In summary, there were differences

引文格式:

刘宇璇,汪芷因,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 Yuxuan, WANG Zhiyin, LIN Zhenshi, 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

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1405402); 浙江省科技厅重点项目 (2016C04004); 浙江省属基本科研业务费专项资金 (#2021XZZX012)

作者简介: 刘宇璇 (1996-), 女, 在读硕士生, 研究方向: 海洋资源与环境, E-mail: lyxuan@zju.edu.cn

通讯作者: 李丹 (1985-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 海洋环境生态, E-mail: Danl@zju.edu.cn

in the physicochemical properties of different parts of *S. fusiforme*. The results can provide basic data for expanding domestic *S. fusiforme* markets and utilizing selectively the different parts of *S. fusiforme*.

**Key words:** *Sargassum fusiforme*; nutrient; physicochemical properties; different parts

羊栖菜 (*Sargassum fusiforme* (Harv.) Setch) 为褐藻门、马尾藻属的一种暖温带型经济海藻, 藻体由假根、茎、叶、气囊、生殖托构成, 主要分布于西北太平洋地区, 在辽东、山东、浙江、福建、广东沿海, 以及日本、韩国比较常见<sup>[1]</sup>。养殖羊栖菜是浙江温州市洞头区的支柱产业之一, 2019年, 我国羊栖菜总产量约  $2.7 \times 10^4$  t, 洞头产羊栖菜就占了 70% 以上, 产值达 1.503 亿元<sup>[2,3]</sup>。洞头羊栖菜幼苗从 9 月开始培养, 10~11 月下苗, 次年 4~5 月完成采收。

羊栖菜在我国有着悠久的食用、药用历史, 甚至早于海带、紫菜, 据《本草纲目》记载, 羊栖菜咸能润下, 寒能泄热引水, 有消癭瘤、结核, 除水肿, 利小便等功效<sup>[4,5]</sup>。一直以来, 洞头羊栖菜主要出口到日本, 最多时有 90%。近年来随着养殖面积逐年增加, 以及与韩国产羊栖菜的竞争、日方的压价, 目前洞头羊栖菜正在探索向国内市场转型<sup>[1,6]</sup>。

现已有较多关于整株羊栖菜营养成分、活性物质的研究, 动物实验以及人体细胞体外实验也证实羊栖菜具有调节肠道菌群、抗肿瘤、抗氧化以及改善 Alzheimer 症状的功能<sup>[7-9]</sup>。在羊栖菜不同部位研究方面, 崔海峰<sup>[10]</sup>比较了羊栖菜上、中、下 (各取了 10 cm) 3 段的营养成分差异, 李红等<sup>[11]</sup>分析了羊栖菜分枝、叶、气囊的挥发性成分, 林立东等<sup>[12]</sup>分析了羊栖菜受精卵的营养成分、活性物质。羊栖菜气囊、生殖托、叶口感更为柔嫩, 枝干则更有嚼劲, 因而在日本有长羊栖菜 (由枝干组成) 和芽羊栖菜 (由气囊、生殖托、叶组成) 两种销售形式, 但这些部位之间营养成分是否有差异未见报导。物化性质方面, 韩国产羊栖菜价格高于国产羊栖菜, 与前者溶胀性更佳有关, 溶胀、持水、持油性也影响着食品的口感和质地<sup>[13,14]</sup>。目前, 国外有较多关于海藻物化性质的研究, 而国内较为缺乏, 至于羊栖菜, 仅高长颢等<sup>[14]</sup>对两种羊栖菜气囊、叶、茎的复水率、溶胀能力进行了研究。

因此, 本文对洞头羊栖菜的茎、侧枝、气囊、生殖托等 4 个部位的营养成分、蛋白营养价值、物化性质以及营养成分与物化性质间的相关性进行了分析, 以为消费者在羊栖菜不同部位的膳食选择上提供参考, 为开拓国内市场、提高产品附加值、延伸产业链提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 原料

所用羊栖菜于 2020 年 5 月 14 日采自浙江洞头五屿头海域 (27.76 °N, 121.18 °E), 采集时海表面温度为 20.0 °C, 羊栖菜为养殖品种。

#### 1.1.2 主要试剂

浓硫酸、浓盐酸、95%乙醇、30%过氧化氢, 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 17 种氨基酸混合标准品溶液 (天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、甘氨酸、组氨酸、精氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸、缬氨酸、甲硫氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、盐酸赖氨酸、胱氨酸溶解于 0.1 mol/L 盐酸中), 中国计量科学研究院。

### 1.2 主要仪器设备

Milli-Q 超纯水机, 美国默克; Allegra X-30R 高速冷冻离心机, 美国贝克曼库尔特; MM400 冷冻混合型研磨仪, 德国莱驰; SXL-1008 程控箱式电炉, 上海精宏; Cary-100 紫外分光光度计, 美国安捷伦; Kjeltac™ 8400 自动蒸馏装置, 丹麦福斯; 高效液相色谱仪、Shim-pack GIST C<sub>18</sub> 色谱柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm), 日本岛津。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 海藻前处理

用去离子水冲洗海藻表面泥沙等杂物, 并将藻体分为茎、侧枝、气囊、生殖托四个部位, 叶片太少不参与成分测定, 茎上的假根也不保留; 分离完成, 于 55 °C 烘干, 测定并记录各部位干重, 样品粉碎后过 40 目筛, 于干燥器中保存待用。

#### 1.3.2 营养成分测定

灰分测定参照 GB 5009.4-2016 第一法; 粗纤维测定参照 GB/T 8310-2013。

碳水化合物测定: 总糖测定参照 Kumar 等<sup>[15]</sup>的方法, 将样品中的糖类物质经 2.5% 的硫酸水解为游离糖后, 再用苯酚-硫酸法<sup>[16]</sup>进行测定; 多糖测定根据 SN/T 4260-2015, 先用 80% 乙醇去除样品中的单糖, 再经苯酚-硫酸法进行测定; 所选标准物质为葡萄糖, 标准曲线:  $y=0.1386x-0.0001$  ( $R^2=0.9997$ )。

脂质测定: 参照 Gosch 等<sup>[17]</sup>、Cequier-SáNchez 等

[18]的方法,采用二氯甲烷-甲醇溶剂对脂质进行提取,提取后在真空下减压蒸干,称重。

蛋白质测定:参照 GB 5009.5-2016 第一法,向凯氏定氮管中依次加入硫酸铜、硫酸钾、样品、浓硫酸,静置过夜后,在福斯消解仪中进行样品消解;考虑到海藻中含有大量糖类物质,消解时样品易溅到定氮管壁上造成损失,先于 120 °C 消解 15 min,添加 2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>再消解 15 min 后,缓慢升温至 420 °C,继续消解 1 h 至定氮管中的液体为澄清的浅绿色,取出冷却;后续测定操作于自动蒸馏装置中进行。

氨基酸测定:参照卫阳飞等[19]的方法,氨基酸经 PITC 衍生化后进 HPLC 检测。

氨基酸评价:参照 FAO/WHO 提出的氨基酸评分模式、全蛋模式,计算羊栖菜氨基酸比值(RAA)、氨基酸比值系数(RC)、蛋白质的比值系数分(SRC)以及必需氨基酸指数(EAAI)[20,21]:

$$RAA = \frac{S}{R} \quad (1)$$

$$RC = \frac{RAA}{RAA} \quad (2)$$

$$SRC = 100 \times \left(1 - \frac{RC \text{标准差}}{RC}\right) \quad (3)$$

$$EAAI = 100 \times \sqrt{\frac{S_1 \times S_2 \times \dots \times S_7}{R_1 \times R_2 \times \dots \times R_7}} \quad (4)$$

式中:

S——样品中待评价氨基酸的含量, mg/g 蛋白质;

R——FAO/WHO 推荐模式或全蛋模式中相应必需氨基酸的含量, mg/g 蛋白质;

S<sub>1</sub>~S<sub>7</sub>——7 种待测必需氨基酸的含量, mg/g 蛋白质(色氨酸在酸水解中被破坏因而不参与计算);

R<sub>1</sub>~R<sub>7</sub>——全蛋模式中对应 7 种待测必需氨基酸的含量, mg/g 蛋白质。

### 1.3.3 物理性质测定

溶胀能力(SC)测定:参照 Chan 等[22]的方法并有调整,向 25 mL 量筒中加入 0.5 g 样品、20 mL 水,搅拌均匀,于 25 °C 静置过夜后读取量筒中剩余水的体积。

$$SC / (\text{mL} / \text{g}) = \frac{\text{初始水体积} / \text{mL} - \text{溶胀后剩余水体积} / \text{mL}}{\text{样品干重} / \text{g}} \quad (5)$$

持水能力(WHC)、持油能力(OHC)测定:参照 Chan 等[22]的方法并有调整,向 50 mL 离心管中加入 0.5 g 样品、20 mL 水或玉米油,搅拌均匀,于 25 °C 静置过夜后,3000 ×g 离心 25 min,去上清,用滤纸吸干沾在管壁的水或玉米油,计算样品湿重。

$$WHC(OHC) / (\text{mL} / \text{g}) = \frac{\text{样品湿重} / \text{g} - \text{样品干重} / \text{g}}{\text{样品干重} / \text{g}} \quad (6)$$

## 1.4 数据处理与分析

所有实验设置 3 次平行,数据分析在 SPSS Statistics 20 中进行,显著性差异分析采用 ANOVA、Tukey 检验,结果以均值±标准偏差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 营养成分

茎、侧枝、气囊、生殖托占整体比例分别为 0.15、0.10、0.46、0.29,整株羊栖菜的营养成分数据按各部位所占比例加和计算。由表 1 可知,碳水化合物是羊栖菜干基中最主要的营养物,所占比重大于 45%,其中大部分为粗多糖,占比超过 90%,不同部位粗多糖含量差异不显著(p>0.05)。不同部位中灰分含量为 20.4~26.86 g/100 g,其中侧枝灰分最高、生殖托则最低。羊栖菜不同部位的蛋白质、氨基酸含量均存在显著差异(p<0.05),生殖托在这两种营养成分含量上有明显优势,分别为 15.64、12.01 g/100 g;其次是气囊(12.44、10.36 g/100 g)、侧枝(8.35、7.05 g/100 g),茎蛋白质、氨基酸含量最低(6.65、6.18 g/100 g)。蛋白质在气囊和生殖托中分布多于粗纤维,而在茎与侧枝中刚好相反。有研究表明植物粗纤维含量与嫩度呈负相关[23],在羊栖菜的 4 个部位中,生殖托粗纤维含量最低(5.12 g/100 g)口感最嫩,气囊、茎次之(8.76、9.22 g/100 g),侧枝粗纤维含量最高(10.27 g/100 g),纤维感较明显。

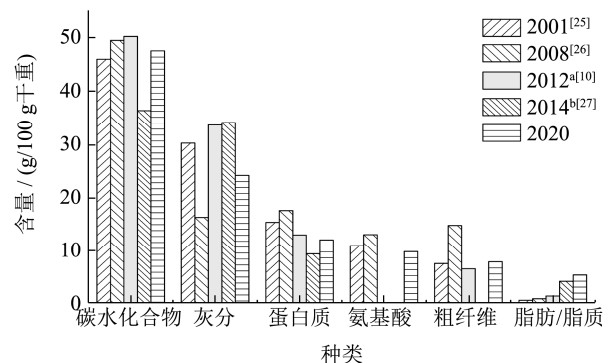


图 1 不同采样年份洞头羊栖菜营养成分含量比较

Fig.1 Nutritional contents of Dongtou *S. fusiforme* in different sampling years

注: a: AA 未检测,各含量为两个检测样本均值;b: 粗纤维、AA 未检测,各含量为三个检测样本均值。

表1 羊栖菜各部位及整株的营养成分比较 (g/100 g, 干重)

Table 1 Comparison of nutritional components of various parts and whole thallus (g/100 g, dry weight)

营养成分	茎	侧枝	气囊	生殖托	整株
碳水化合物	47.32±0.13 <sup>bc</sup>	49.06±0.58 <sup>ab</sup>	45.84±0.04 <sup>c</sup>	50.03±0.74 <sup>a</sup>	47.69±0.29
粗多糖	46.45±1.83	47.19±0.75	44.43±0.22	46.87±0.12	45.71±0.30
灰分	24.46±0.13 <sup>ab</sup>	26.86±1.51 <sup>a</sup>	25.93±1.29 <sup>ab</sup>	20.40±0.50 <sup>b</sup>	24.23±0.63
蛋白质	6.65±0.09 <sup>d</sup>	8.35±0.08 <sup>c</sup>	12.44±0.05 <sup>b</sup>	15.64±0.02 <sup>a</sup>	12.07±0.03
氨基酸	6.18±0.13 <sup>d</sup>	7.05±0.04 <sup>c</sup>	10.36±0.04 <sup>b</sup>	12.01±0.09 <sup>a</sup>	9.87±0.04
粗纤维	9.22±0.15 <sup>ab</sup>	10.27±0.77 <sup>a</sup>	8.76±0.18 <sup>b</sup>	5.12±0.19 <sup>c</sup>	7.94±0.13
脂质	5.10±0.33 <sup>b</sup>	5.30±0.16 <sup>ab</sup>	5.40±0.30 <sup>ab</sup>	5.77±0.18 <sup>a</sup>	5.45±0.16

注: 英文字母为同行数据的显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 下同。

表2 羊栖菜各部位及整株的氨基酸组成 (mg/g, 干重)

Table 2 Amino acid components of various parts and whole thallus (mg/g, dry weight)

氨基酸种类	茎	侧枝	气囊	生殖托	整株
精氨酸	8.98±0.05 <sup>d</sup>	9.59±0.08 <sup>c</sup>	12.88±0.04 <sup>b</sup>	14.52±0.26 <sup>a</sup>	12.43±0.08
谷氨酸	7.05±0.08 <sup>d</sup>	7.6±0.07 <sup>c</sup>	10.84±0.06 <sup>b</sup>	12.76±0.13 <sup>a</sup>	10.50±0.05
缬氨酸*	3.96±0.05 <sup>d</sup>	5.22±0.09 <sup>c</sup>	9.43±0.17 <sup>b</sup>	11.92±0.44 <sup>a</sup>	8.90±0.15
异亮氨酸*	5.35±0.16 <sup>b</sup>	6.04±0.07 <sup>ab</sup>	9.21±0.02 <sup>ab</sup>	10.15±0.07 <sup>a</sup>	8.58±0.03
胱氨酸	4.41±0.16 <sup>b</sup>	5.08±0.17 <sup>ab</sup>	8.00±0.12 <sup>ab</sup>	9.47±0.53 <sup>a</sup>	7.59±0.16
亮氨酸*	5.18±0.32 <sup>b</sup>	6.25±0.19 <sup>b</sup>	7.46±0.18 <sup>a</sup>	8.43±0.09 <sup>a</sup>	7.27±0.10
天冬氨酸	3.56±0.09 <sup>d</sup>	4.16±0.04 <sup>c</sup>	6.54±0.07 <sup>b</sup>	7.83±0.16 <sup>a</sup>	6.22±0.06
脯氨酸	3.83±0.02 <sup>d</sup>	4.22±0.11 <sup>c</sup>	6.3±0.03 <sup>b</sup>	7.03±0.14 <sup>a</sup>	5.93±0.04
组氨酸	3.26±0.07 <sup>d</sup>	3.85±0.09 <sup>c</sup>	6.24±0.04 <sup>b</sup>	7.27±0.13 <sup>a</sup>	5.84±0.04
赖氨酸*	3.44±0.01 <sup>d</sup>	3.90±0.01 <sup>c</sup>	5.79±0.08 <sup>b</sup>	6.33±0.01 <sup>a</sup>	5.40±0.05
苏氨酸*	3.09±0.00 <sup>b</sup>	3.59±0.02 <sup>ab</sup>	5.51±0.05 <sup>ab</sup>	6.36±0.05 <sup>a</sup>	5.20±0.03
苯丙氨酸*	2.42±0.15 <sup>d</sup>	2.85±0.07 <sup>c</sup>	4.52±0.05 <sup>b</sup>	5.17±0.20 <sup>a</sup>	4.22±0.07
酪氨酸	2.43±0.04 <sup>d</sup>	2.74±0.08 <sup>c</sup>	3.70±0.09 <sup>b</sup>	4.11±0.02 <sup>a</sup>	3.53±0.04
丙氨酸	1.63±0.02 <sup>d</sup>	1.85±0.03 <sup>c</sup>	2.55±0.18 <sup>b</sup>	3.00±0.43 <sup>a</sup>	2.47±0.15
甘氨酸	1.05±0.03 <sup>d</sup>	1.29±0.04 <sup>c</sup>	2.13±0.02 <sup>b</sup>	2.77±0.02 <sup>a</sup>	2.07±0.01
丝氨酸	0.86±0.01 <sup>b</sup>	0.96±0.01 <sup>ab</sup>	1.28±0.01 <sup>ab</sup>	1.66±0.04 <sup>a</sup>	1.30±0.01
甲硫氨酸*	1.27±0.02	1.27±0.03	1.23±0.04	1.29±0.04	1.26±0.03
总计/TAA	61.79±0.33 <sup>d</sup>	70.48±0.46 <sup>c</sup>	103.60±0.37 <sup>b</sup>	120.08±0.38 <sup>a</sup>	98.70±0.33
EAA	24.71±0.86 <sup>d</sup>	29.13±0.29 <sup>c</sup>	43.14±0.25 <sup>b</sup>	49.44±0.18 <sup>a</sup>	40.83±0.20
NEAA	37.07±0.42 <sup>d</sup>	41.35±0.52 <sup>c</sup>	60.46±0.32 <sup>b</sup>	70.42±0.77 <sup>a</sup>	57.87±0.26
EAA/TAA/%	40.00	41.33	41.64	41.35	41.36
EAA/NEAA/%	66.66	70.45	71.34	70.51	71.47

注: “\*”为必需氨基酸。

养殖羊栖菜的生殖托在4月中旬萌发、5月上旬逐渐成熟,是4个部位中最晚出现的,其所含蛋白质、氨基酸、碳水化合物、脂质最高,可能跟该部位细胞分裂较多、生长相对旺盛有关,Kumar等<sup>[15]</sup>在围氏马尾藻的研究中发现类似情况:较嫩的叶片比老叶片所含蛋白质、脂质更高;另外,其营养成分一部分也可能由其它部位迁移而来,崔海峰<sup>[10]</sup>的研究表明,羊栖菜中的蛋白质、脂肪、灰分含量会随着生殖托的出现

开始下降;这种迁移在陆生植物中也存在<sup>[24]</sup>。

将2001~2014年间<sup>[10,25-27]</sup>洞头产羊栖菜营养成分数据与本研究(2020整株)的进行对比,如图1所示,2002~2012年测出的脂肪含量(0.69~1.49 g/100 g)低于2014(4.14~4.40 g/100 g)、2020年的值(5.45 g/100 g),可能是由于2002~2012均采用索式提取法,只能提取出样品中游离态的脂肪(GB 5009.6-2016),而2014与本研究采用三氯甲烷/二氯甲烷-甲醇法,还提

取出了样品中的结合态脂质,因而测定出的结果更高。此外,本研究样品氨基酸总量(9.87 g/100 g),略低于2001、2008 的值(10.97~13.07 g/100 g),可能与羊栖菜品种、生长环境、检测方法不同有关,其余营养成分在文献值范围中。与其他种类海藻相比,羊栖菜生殖托蛋白质含量高于海带、石莼、江蓠、裙带菜(6.68~15.47 g/100 g),低于紫菜(28.29~36.38 g/100 g),但灰分含量高于紫菜(7.89~24 g/100 g),有较好的营养价值;羊栖菜脂质含量较高,通常来说褐藻类脂质含量本身要高于其余种类海藻<sup>[28-32]</sup>。

## 2.2 羊栖菜不同部位氨基酸组成及评价

### 2.2.1 氨基酸组成

待测 17 种氨基酸在羊栖菜中均被检出,其中必须氨基酸(EAA)有 7 种,非必需氨基酸(NEAA) 11 种。羊栖菜各部位含量最高的 2 种氨基酸为精氨酸和谷氨酸,排第三位的氨基酸在气囊、生殖托、整株中均为缬氨酸,而茎为异亮氨酸,侧枝为亮氨酸。茎、侧枝中含量最低的为丝氨酸;气囊、生殖托、整株则为甲硫氨酸。羊栖菜中 EAA 含量较为丰富,占总氨基酸比为 40.00%~41.64%,EAA/NEAA 为 66.66%~71.34%,与已有文献的研究结果相近<sup>[26,33,34]</sup>;且气囊、生殖托、侧枝的这两项比值均分别高于 FAO/WHO 的推荐值:40%和 60%,2.1 中提到紫菜蛋白质含量高于羊栖菜,但紫菜中 EAA 占比仅在 38%左右。

### 2.2.2 氨基酸评价

表 3 羊栖菜各部位及整株必需氨基酸 RC、SRC

**Table 3 RC, SRC of essential amino acids in various parts and whole thallus**

氨基酸	FAO/WHO 模式	茎	侧枝	气囊	生殖托	整株
异亮氨酸	40	1.41	1.37	1.39	1.32	1.36
亮氨酸	70	0.78	0.81	0.64	0.63	0.66
赖氨酸	55	0.66	0.64	0.64	0.60	0.62
苏氨酸	40	0.81	0.81	0.83	0.83	0.82
缬氨酸	50	0.84	0.95	1.14	1.24	1.13
含硫氨基酸 Met+Cys-Cys	35	1.64	1.58	1.54	1.58	1.60
芳香族氨基酸 Tyr+Phe	60	0.85	0.84	0.83	0.80	0.82
SRC	100	65.74	68.47	66.59	64.90	65.60

表 4 羊栖菜各部位及整株必需氨基酸 RC、SRC、EAAI

**Table 4 RC, SRC, EAAI of essential amino acids in various parts and whole thallus**

氨基酸	全蛋模式	茎	侧枝	气囊	生殖托	整株
异亮氨酸	54	1.44	1.39	1.41	1.34	1.38
亮氨酸	86	0.88	0.90	0.72	0.70	0.74
赖氨酸	70	0.72	0.69	0.69	0.65	0.67
苏氨酸	47	0.95	0.95	0.97	0.97	0.96
缬氨酸	66	0.87	0.98	1.18	1.29	1.17
含硫氨基酸 Met+Cys-Cys	57	1.38	1.33	1.30	1.33	1.35
芳香族氨基酸 Tyr+Phe	93	0.76	0.75	0.73	0.71	0.73
SRC	100	72.89	75.14	72.12	70.47	71.88
EAAI	100	100.02	93.43	93.27	85.35	91.43

蛋白质被人体摄入后,需要转变为氨基酸才能被重新吸收利用,因此,摄入蛋白质的氨基酸组成与人体所需的越一致,该蛋白质被利用的可能性越高,营养价值也越高<sup>[21]</sup>。本研究根据 FAO 推荐的氨基酸模式计算了羊栖菜各部位、整体的 RC、SRC,并根据全蛋氨基酸模式计算了 RC、SRC、EAAI,共同用于羊栖菜蛋白质营养价值的评价。RC、SRC 评价体系由朱圣陶等<sup>[21]</sup>于 1988 年提出,旨在评价各必需氨基酸组成是否均衡,若待评价样品中各氨基酸的 RC 值越接

近,表示氨基酸的均衡性较好, SRC 值越大。氨基酸指数(EAAI)评价法由 Oser<sup>[35]</sup>于 1959 年提出,旨在考虑各种必需氨基酸整体对蛋白质营养价值的贡献,参照为全蛋模式。

RC 值最小的是限制性氨基酸,根据表 3、表 4 的结果可以看出,参照不同模式计算所得的各项数值虽有所差异,但在两种参照模式下,羊栖菜的限制性氨基酸均为赖氨酸,与已有文献研究结果一致<sup>[10,36]</sup>;另外,各部位中苏氨酸、缬氨酸值接近 1,说明与参照

模式相应氨基酸组成较为接近; 异亮氨酸、含硫氨基酸 RC 值较大, 表明含量相对过剩; 茎、侧枝中亮氨酸含量也比较合理, 而气囊、生殖托中亮氨酸则略为缺乏; 羊栖菜中芳香族氨基酸以 FAO 为参照, RC 值接近 1, 含量合理, 而相比鸡蛋含量相对缺乏。

各部位必需氨基酸指数, 茎最高为 100.02, 侧枝、气囊、整体次之, 在 86~95 之间, 生殖托为 85.35; 而紫菜必需氨基酸指数不到 25<sup>[32]</sup>, 相比之下羊栖菜蛋白质质量更好。各部位 SRC 值中, 侧枝最高为 75.14, 表明侧枝各氨基酸组成最接近参照模式, 均衡性最好。

### 2.3 物化性质

4 个部位中, 茎与侧枝溶胀能力最优分别为 12.71 mL/g、12.53 mL/g, 气囊最弱 (7.89 mL/g)。在持水能力方面, 茎与侧枝无显著差异 ( $p>0.05$ ), 气囊与生殖托无显著差异 ( $p>0.05$ ), 而前两者 WHC 值均显著大于后两者 ( $p<0.01$ ); 羊栖菜各部位的持油能力在 1.80 g/g 左右, 其中气囊与生殖托达到了显著差异 ( $p=0.01$ )。综合来看, 侧枝结合水的能力最强, 茎次之, 气囊最弱; 而气囊结合油脂的能力最强。

表 5 羊栖菜、其它藻类及植物的 SC、WHC、OHC (干重)

Table 5 SC, WHC, OHC of *S. fusiforme*, other seaweeds and

plants (dry weight)

部位	SC/(mL/g)	WHC/(g/g)	OHC/(g/g)
茎	12.71±0.31 <sup>a</sup>	11.93±0.21 <sup>a</sup>	1.85±0.01 <sup>ab</sup>
侧枝	12.53±0.16 <sup>a</sup>	11.96±0.10 <sup>a</sup>	1.90±0.01 <sup>ab</sup>
气囊	7.89±0.15 <sup>c</sup>	8.19±0.15 <sup>b</sup>	1.98±0.02 <sup>a</sup>
生殖托	9.96±0.14 <sup>b</sup>	8.21±0.28 <sup>b</sup>	1.78±0.01 <sup>b</sup>

注: 英文字母为同列数据的显著性差异 ( $p<0.05$ )。

表 6 各营养成分与物化性质间 Pearson 相关性分析

Table 6 Pearson correlation coefficients between nutrients and physical properties

项目	蛋白质	灰分	碳水化合物	多糖	脂质	粗纤维	SC	WHC
SC	-0.75**	0.16	0.33	0.67	-0.42	0.39		
WHC	-0.92**	0.49	0.02	0.47	-0.60*	0.70*	0.93*	
OHC	-0.53	0.53	-0.46	0.06	-0.32	0.61*	0.19	0.41

## 3 结论

3.1 羊栖菜各部位中最主要的营养成分均为碳水化合物, 含量占干重的 45.84%~50.03%; 灰分次之, 为 20.4%~26.86%。蛋白质含量为 6.65%~15.64%, 氨基酸为 6.18%~12.01%, 其中必需氨基酸含量较为丰富, 占总氨基酸的 40.00%~41.64%; 枝干氨基酸平均 SRC 值, 分别为 67.11/74.02 (FAO/全蛋), 平均 EAAI 为 96.73; 气囊、生殖托平均 SRC 值为 65.75/71.30 (FAO/全蛋), 平均 EAAI 为 89.31; 总的来说羊栖菜蛋白质

本文所研究的羊栖菜气囊 SC 值高于红藻门的江蓠 (5 mL/g)、绿藻门的石莼 (0.3 mL/g), 但持油性低于江蓠 (3.11 g/g), 而略高于石莼 (1.68 g/g)<sup>[22,37]</sup>; 侧枝 SC 比同为褐藻的海带略高 (10.20 mL/g)。羊栖菜枝干的持水能力在 11 g/g 以上, 比海带、紫菜、裙带菜等常见食用海藻高 (5.12~10.96 g/g)<sup>[28,38]</sup>, 但在 Fernández-Segovia 等<sup>[29]</sup>的研究中海带、裙带菜 WHC 在 11.8~13 g/g, 可能与测定前的静置时间较长有关 (24 h)。一些纯化的膳食纤维、商用纤维素溶胀能力在 0.54~27.61 mL/g, 持水能力在 2.17~12.42 g/g, 持油能力 0.98~9.29 g/g<sup>[39-43]</sup>, 总的来看, 羊栖菜物化性质较为优良。

### 2.4 理化性状相关性分析

根据表 6 的相关性分析可以看出, 蛋白质和粗纤维对羊栖菜物化性质影响较大。WHC 与蛋白质、脂质、粗纤维含量均有相关性; 蛋白质、脂质含量越高, WHC 反而越低; 蛋白质通常具有一定持水能力, 本研究中蛋白质与 WHC 呈负相关 ( $r=-0.92$ ,  $p<0.01$ ), 与 SC 也呈负相关 ( $r=-0.75$ ,  $p<0.01$ ); 可能由于羊栖菜蛋白质溶解性较高, 在结合水上发挥的作用较小<sup>[44]</sup>; 粗纤维与 WHC 呈正相关 ( $r=0.70$ ,  $p<0.05$ ), 可能由于纤维具有网状结构以及大量亲水基团, 纤维含量越高, 结合的水也就越多<sup>[30]</sup>。在持油能力方面, 粗纤维也与 OHC 呈正相关 ( $r=0.61$ ,  $p<0.05$ ), 由于毛细作用, 纤维的网状结构除了能够吸附水分子, 也可以吸附油脂, 因而有利于油脂的结合<sup>[43]</sup>。溶胀与持水能力呈正相关 ( $r=0.93$ ,  $p<0.01$ ), 与 Wong 等<sup>[30]</sup>的研究结果相似。

量较好。脂质含量为 5.10%~5.77%。在膳食选择上, 追求供能更多, 优选生殖托; 要补充更多粗纤维、多糖, 希望摄入热量更低, 优选枝干。

3.2 物化性质方面, 五屿头羊栖菜各部位溶胀能力在 7.18~10.32 mL/g, 持水性在 8.19~11.96 g/g, 持油性在 1.78~1.98 g/g, 其物化性质整体来说较为优良。各部位中, 侧枝结合水的能力较强, 可以运用到面包等食品的生产加工过程中, 延缓产品脱水老化, 改善和稳定产品质地; 而结合水能力稍弱, 但持油能力较强的气囊可以添加到油脂含量较丰富或对乳化作用有要求

的产品中;添加羊栖菜到产品中除了在物理层面上可以发挥作用,也能够丰富产品营养,提高产品营养价值。

### 参考文献

- [1] 何培民,张泽宇,张学成,等.海藻栽培学[M].北京:科学出版社,2018  
HE Peimin, ZHANG Zeyu, ZHANG Xuecheng, et al. Seaweed Cultivation [M]. Beijing: Science Press, 2018
- [2] 于秀娟,徐乐俊,吴反修.中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2020  
YU Xiujuan, XU Lejun, WU Fanxiu. China Fishery Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020:
- [3] 曾焕定.洞头年鉴[M].北京:方志出版社,2020  
ZENG Huanding. Dongtou Yearbook [M]. Beijing: China Local Records Publishing, 2020
- [4] 曾呈奎,张峻甫.中国北部的经济海藻[J].山东大学学报, 1952,1:57-82  
ZENG Chengkui, ZHANG Junfu. Economic algae in northern China [J]. Journal of Shandong University, 1952, 1: 57-82
- [5] 李时珍.本草纲目[M].天津:天津科学技术出版社,2018  
LI Shizhen. Compendium of Materia Medica [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2018
- [6] 曾焕定主编.洞头年鉴[M].北京:方志出版社,2019  
ZENG Huanding. Dongtou Yearbook [M]. Beijing: China Local Records Publishing, 2019
- [7] You Young Choi, Shin Ja Lee, Ye Jun Lee, et al. New challenges for efficient usage of *Sargassum fusiforme* for ruminant production [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-13
- [8] Jeroen Bogie, Cindy Hoeks, Melissa schepers, et al. Dietary *Sargassum fusiforme* improves memory and reduces amyloid plaque load in an Alzheimer's disease mouse model [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-16
- [9] WU Xiaodan, WEI Jiang, LU Jiajia, et al. Analysis of the monosaccharide composition of water-soluble polysaccharides from *Sargassum fusiforme* by high performance liquid chromatography/electrospray ionisation mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2014, 145: 976-983
- [10] 崔海峰.不同品系羊栖菜形态和营养成分的初步分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2013  
CUI Haifeng. The preliminary analysis of the morphology and nutrient in differentstrain of *Sargassum fusiforme* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013
- [11] 李红,党晨阳,张金荣.三种马尾藻不同部位挥发性成分的比较分析[J].食品工业科技,2018,39(24):281-288,293  
LI Hong, DANG Chenyang, ZHANG Jinrong. Comparative analysis of volatile components in different parts of three species of *Sargassum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 281-288, 293
- [12] 林立东,尚天歌,陈斌斌,等.经济海藻羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)受精卵生物活性物质及矿质元素成分分析[J].海洋与湖沼,2019,50(2):197-204  
LIN Lidong, SHANG Tiange, CHEN Binbin, et al. Analysis of biologically active substances and mineral elements in fertilized eggs of economic seaweed *Sargassum fusiforme* [J]. Ocean and Limnology, 2019, 50(2): 197-204
- [13] M Garcia Vaquero, M Lopez Alonso, M Hayes. Assessment of the functional properties of protein extracted from the brown seaweed *Himanthalia elongata* (Linnaeus) S. F. Gray [J]. Food Research International,2017, 99(pt.3): 971-978
- [14] 高长颢,骆其君,张立宁.羊栖菜"浙海1号"复水性及膨胀率的初步研究[J].宁波大学学报(理工版),2017,30(4):42-46  
GAO Changhao, LUO Qijun, ZHANG Lining. Rehydration rate and the expansibility of two strains of *Hizikia fusiforme* [J]. Journal of Ningbo University (Science and Technology Edition), 2017, 30(4): 42-46
- [15] Savindra Kumara, Dinabandhu Sahoo, Ira Levine. Assessment of nutritional value in a brown seaweed *Sargassum wightii* and their seasonal variations [J]. Algal Research, 2015, 9: 117-125
- [16] Michel Dubois, K A Gilles, J K Hamilton, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356
- [17] Björn Gosch, Marie Magnusson, Nicholas Paul, et al. Total lipid and fatty acid composition of seaweeds for the selection of species for oil-based biofuel and bioproducts [J]. GCB Bioenergy, 2012, 4(6): 919-930
- [18] Elena Cequier SáNchez, Covadonga Rodríguez, Ángel G Ravelo, et al. Dichloromethane as a solvent for lipid extraction and assessment of lipid classes and fatty acids from samples of different natures [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(12): 4297-4303
- [19] 卫阳飞,宋海,岳国仁,等.6种葡萄籽中水解氨基酸和游离氨基酸含量测定及比较[J].食品与机械,2018,34(9):77-82  
WEI Yangfei, SONG Hai, YUE Guoren, et al. Determination and comparison of hydrolyzed amino acids and free amino acids in six kinds of grape seeds [J]. Food and Machinery, 2018, 34(9): 77-82

- [20] 冯耐红,侯东辉,杨成元,等.不同品种小米主要营养成分及氨基酸组分评价[J].食品工业科技,2020,41(8):230-235  
FENG Naihong, HOU Donghui, YANG Chengyuan, et al. Evaluation of main nutrients and amino acid components of different varieties of foxtail millet [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 230-235
- [21] 朱圣陶,吴坤.蛋白质营养价值评价-氨基酸比值系数法[J].营养学报,1988,2:187-190  
ZHU Shengtao, WU Kun. Evaluation of protein nutritional value-amino acid ratio coefficient method [J]. Chinese Journal of Nutrition, 1988, 2: 187-190
- [22] Pei Teng Chan, Patricia Matanjun. Chemical composition and physicochemical properties of tropical red seaweed, *Gracilaria changii* [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 302-310
- [23] 戴凡炜,李智毅,王振江,等.桑树嫩芽营养成分含量及与口感的相关性分析[J].蚕业科学,2018,44(6):154-158  
DAI Fanwei, LI Zhiyi, WANG Zhenjiang, et al. Contents of nutritional components in mulberry bud and their correlation with taste [J]. Sericulture Science, 2018, 44(6): 154-158
- [24] 孙勃,方莉,刘娜,等.芥蓝不同器官主要营养成分分析[J].园艺学报,2011,38(3):541-548  
SUN Bo, FANG Li, LIU Na, et al. Studies on main nutritional components of chinese kale among different organs [J]. Chinese Journal of Horticulture, 2011, 38(3): 541-548
- [25] 戴志远,洪泳平,张燕平,等.羊栖菜的营养成分分析与评价[J].水产学报,2002,26(4):382-384  
DAI Zhiyuan, HONG Yongping, ZHANG Yanping, et al. Evaluation on nutritional components of *Sargassum fusiforme* [J]. Journal of Fisheries of China, 2002, 26(4): 382-384
- [26] 张燕平,洪泳平,张虹,等.脱砷羊栖菜的营养分析评价[J].食品研究与开发,2009,30(1):129-132  
ZHANG Yanping, HONG Yongping, ZHANG Hong, et al. Evaluation on nutritional components of obviation arsenic of *sargassum fusiforme* [J]. Food Research and Development, 2009, 30(1): 129-132
- [27] LI Yajing, FU Xiaoting, DUAN Delin, et al. Comparison study of bioactive substances and nutritional components of brown algae *Sargassum fusiforme* strains with different vesicle shapes [J]. J Appl Psychol 2018, 30(6): 1-13
- [28] Pilar Rupérez, Fulgencio Saura Calixto. Dietary fibre and physicochemical properties of edible Spanish seaweeds [J]. European Food Research and Technology, 2001, 212(3): 349-354
- [29] Isabel Fernández Segovia, María Jesús Lerma García, Ana Fuentes, et al. Characterization of Spanish powdered seaweeds: composition, antioxidant capacity and technological properties [J]. Food Research International, 2018, 111(9): 212-219
- [30] K H Wong, Peter C K Cheung. Nutritional evaluation of some subtropical red and green seaweeds Part I - proximate composition, amino acid profiles and some physicochemical properties [J]. Food Chemistry, 2000, 71(4): 475-482
- [31] Ravi Sakthivel, Kasi Pandima Devi. Evaluation of physicochemical properties, proximate and nutritional composition of *Gracilaria edulis* collected from Palk Bay [J]. Food Chemistry, 2015, 174: 68-74
- [32] 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 Shaoling, QI Bo, YANG Xianqing, et al. Comparison of nutritional composition of *Pyropia haitanensis* from different sea areas of China [J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(6): 75-80
- [33] 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,2020,4:147-155  
LI Xiao, WANG Ying, LIU Tianhong, et al. Analysis and evaluation of four types of brown algae in the coastal waters of Rongcheng [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020, 4: 147-155
- [34] 林建云,林涛,林丽萍,等.福建近海几种海藻的营养成分与饲用安全评价分析[J].福建农业学报,2011,26(6):997-1002  
LIN Jianyun, LIN Tao, LIN Liping, et al. Nutrition and feed safety of seaweeds from Fujian coastal waters [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(6): 997-1002
- [35] Oser B L. Protein and Amino Acid Nutrition [M]. Academic Press, 1959: 281-295
- [36] 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 Xiaomei, GUO Rui, SU Hong, et al. Nutritional composition analysis and safety evaluation of *Sargassum fusiforme* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 296-300, 311
- [37] Hela Yaich, Haikel Garna, Souhail Besbes, et al. Chemical composition and functional properties of *Ulva lactuca* seaweed collected in Tunisia [J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 895-901

(下转第 133 页)