

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*

林立东¹ 尚天歌² 陈斌斌² 张旭² 马增岭²

(1. 温州市洞头区水产科学技术研究所博士后工作站 温州 325700; 2. 浙江省水环境和海洋生物资源保护重点实验室(温州大学) 温州 325035)

摘要 为了综合评价经济海藻羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)受精卵的营养价值及开发利用前景, 本文检测了羊栖菜受精卵碳水化合物、膳食纤维、氨基酸、脂肪酸等生物活性物质与矿质元素成分, 并与文献报道的孢子体相应成分进行了比较。结果发现: 羊栖菜受精卵富含碳水化合物、蛋白质、氨基酸及膳食纤维, 其含量分别为(20.4±0.07)、(22.7±0.03)、(16.7±0.04)和(39.2±0.03)g/100g DW; 谷氨酸、维生素 E 和 β-类胡萝卜素含量尤其高, 分别达到(9.82±0.05)g/100g DW、(11.8±0.01)mg/100g DW 和(3.0×10³±7.07)μg/100g DW; 而脂肪含量偏低, 只有 1.03%。矿质元素中微量元素铁、钙和镁的含量较高, 分别为(4.54×10³±49.50)、(1.83×10³±7.78)和(1.40×10³±28.28)mg/100g DW。通过与文献报道的羊栖菜孢子体生化成分相比较, 羊栖菜受精卵中蛋白质、氨基酸、β-类胡萝卜素、钾、钠、磷、铁、钙、锌、锰及铜元素的含量均高于羊栖菜孢子体。说明羊栖菜受精卵具有更高的天然产物提取、开发和利用价值。

关键词 羊栖菜; 受精卵; 孢子体; 生物活性物质; 矿质元素

中图分类号 Q946; S968.4 doi: 10.11693/hyh20181000259

羊栖菜(*Sargassum fusiforme* 或 *Hizikia fusiformis*) 属褐藻门(Phaeophyta), 圆子纲(Cyclosporeae), 墨角藻目(Fucales), 马尾藻科(Sargassaceae), 为太平洋西北部近岸海域特有的多年生大型褐藻(曾呈奎等, 2000)。羊栖菜具有性繁殖和无性繁殖两种生活史, 在大型海藻的自然进化系统中属于高等类型, 孢子体世代明显, 雌雄异株, 生殖器官为生殖托(孙建璋等, 1996)。羊栖菜药用历史悠久, 始载于秦汉时期的《神农本草经》, 后明朝《本草纲目》详细记载了羊栖菜的药用价值, 有主治“瘦瘤结气”、“利小便”、“奔豚气”、“脚气”、“水气浮肿”、“消食不安”等药用价值(阮积惠等, 2001)。近年来, 有关羊栖菜生化成分分析和天然产物提取与利用的文献报道主要集中于褐藻硫

酸多糖(褐藻酸、褐藻糖胶和褐藻淀粉)、甾醇类化合物、岩藻黄质色素、微量元素、蛋白质和氨基酸等方面(王百龙等, 2015), 上述文献报道均以羊栖菜孢子体为实验材料。有关羊栖菜受精卵的研究报道, 仅限于精卵形态与同步释放、受精卵萌发、低温保存和发育特征等方面(Pang *et al*, 2005, 2006, 2008), 而关于羊栖菜受精卵的生化成分和含量特征, 至今未被揭示和认知。

羊栖菜地缘不同总砷和有机砷含量不同(Ma *et al*, 2018), 品系不同褐藻胶结构不同(李雅静等, 2017), 器官不同微量元素亚细胞含量不同(赵艳芳等, 2013)。同一植物不同发育期、不同器官有益矿质元素含量不同, 一般情况下, 生长相对旺盛的组织或器官含量较丰富(朱金霞等, 2009)。羊栖菜受精卵是羊栖菜有性

* 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项项目, 2018YFD0901500 号; 国家自然科学基金项目, 41876124 号, 41706147 号; 浙江省水环境与海洋生物资源保护重点实验室开放基金项目, ZK2015-01 号; 温州市洞头区重大渔农业科技项目, N2018Y03A 号。林立东, 博士, 高级工程师, E-mail: rsclinlidong@126.com

通信作者: 马增岭, 博士, 副教授, E-mail: mazengling@wzu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-31, 收修改稿日期: 2018-12-08

繁殖的胚胎,个体小(直径:80—210 μm)经人工培养可生长发育成叶状体植株(Pang *et al.*, 2008)。与植物的营养器官相比,生殖器官和细胞通常具有更高的营养物质含量,而羊栖菜受精卵因为不具类似孢子体的皮层细胞结构,因此其天然产物应该更容易提取。但是其是否比孢子体具备较高的营养价值或者更具开发价值尚未可知。因此,为了探明羊栖菜受精卵主要生化成分特征并评价其营养价值,本研究检测了羊栖菜受精卵的碳水化合物、蛋白质、氨基酸、膳食纤维、维生素E、 β -类胡萝卜素及微量元素等生化组分含量,以期对羊栖菜受精卵的营养价值评判和天然产物开发利用提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 羊栖菜受精卵收集、保存与提存

1.1.1 羊栖菜受精卵的获取 本研究以“一种羊栖菜的品系鉴别和分类方法”(ZL201511004442.4)国

家发明专利为依据,选取东海2号羊栖菜(暂命名)为种菜样本,于2017年5月10日采集于温州市洞头区仙叠岩海区科研实验田,共采集羊栖菜种菜420kg,雌株:雄株 $\approx 7.5:1$ 。种菜运至温州市洞头区繁盛海珍品养殖场育苗池暂养,2017年5月11日,种菜精卵集中释放,2017年5月12日4:00完成全部受精,人工收集受精卵,共回收新鲜受精卵初品10.8kg。

1.1.2 羊栖菜受精卵收集 人工去除育苗池内暂养种菜(图1a),70目纱绢网袋(去除沟虾、气囊等杂质)与280目纱绢网袋(回收羊栖菜受精卵)由内至外,套固于受精卵收集池排水管口,搅动池水,使沉降池底受精卵悬浮于池水中,同时,打开放水阀门,回收受精卵。清水冲洗280目纱绢网袋,使羊栖菜受精卵集中纱绢网袋底部,过滤新鲜海水多次冲洗受精卵,至洗水清澈,人工旋拧纱绢网袋至无海水排出,镜检判断羊栖菜卵细胞受精卵(图1b)状况。

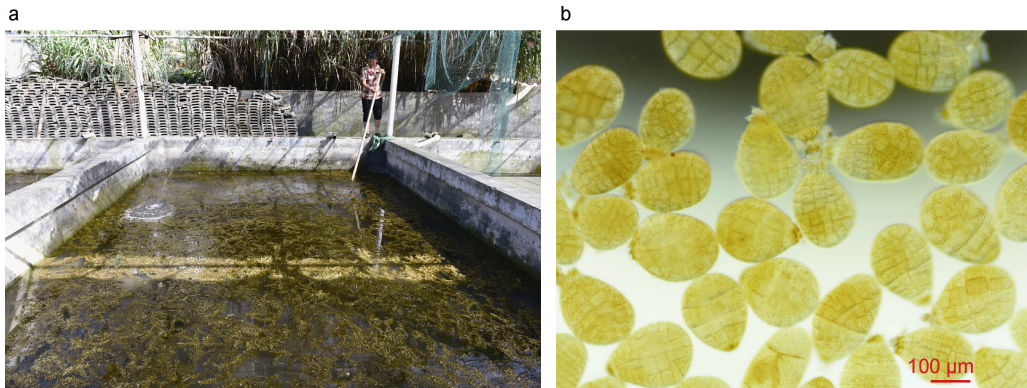


图1 育苗池暂养的羊栖菜种菜(a)和所收集的受精卵(b)

Fig.1 Mature sporophytes of *S. fusiforme* kept in ponds temporary for fertilization (a) and the fertilized eggs (b)

1.1.3 羊栖菜受精卵保存 以500g为定量单位称取羊栖菜受精卵鲜品,置封口袋封装、展平;将装有羊栖菜受精卵的封口袋置液氮中充分速冻,后转置 -80°C 超低温冰箱中冷藏待用。

1.1.4 羊栖菜受精卵提存 取出 -80°C 超低温冰箱中冷藏羊栖菜受精卵,按 -80°C 、 -40°C 、 -20°C 、 4°C 和 20°C 梯度缓慢升温,梯度间隔时间分别为24h、24h、24h和6h,其中,4— 20°C 期间需缓慢搅动海水(4°C ,海水冰与新鲜过滤海水混合,下同)和羊栖菜受精卵冻块混合体,每隔20min自然沉降5min,弃上层混有勾虾、藻体表皮和气囊等杂质混合液,重新加入 4°C 海水后再次搅动,重复6—8次,至上层海水无

肉眼可见杂质,且海水呈现清澈状态,最后,使用去离子水充分清洗2—3次;280目纱绢网回收羊栖菜受精卵并脱水至恒重,以500g为定量单位称取羊栖菜受精卵鲜品,置封口袋封装、展平;将装有羊栖菜受精卵的封口袋置液氮中充分速冻,后转置真空冷冻干燥机中(-110°C)冻干至恒重。220目纱绢网筛滤羊栖菜受精卵干品(图2a),弃220目以上颗粒杂质(图2b),回收羊栖菜合子干品粉末,再经300目纱绢网筛滤,分离羊栖菜受精卵干品(图3a)和假根丝状体干品(图3b),以50g为定量单位,将羊栖菜受精卵干品和假根丝状体干品分装置封口袋中,置 -80°C 超低温冰箱中冷藏待用。

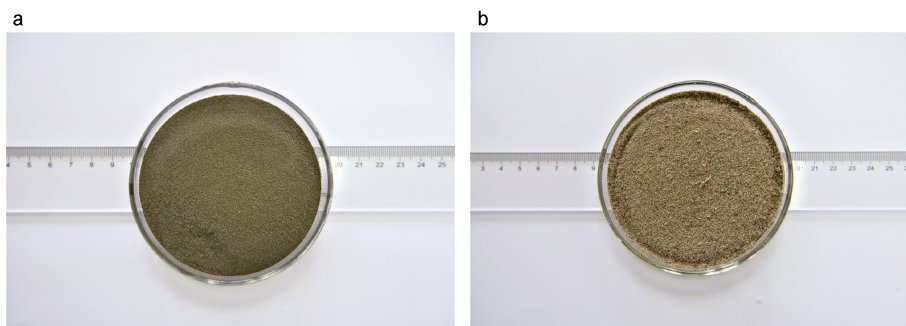


图 2 冷冻干燥后收集的羊栖菜受精卵(a)和 220 目以上颗粒杂质(b)

Fig.2 Fertilized eggs of *S. fusiforme* after freeze drying (a) and particle substances harvested by 200 mesh filter (b)

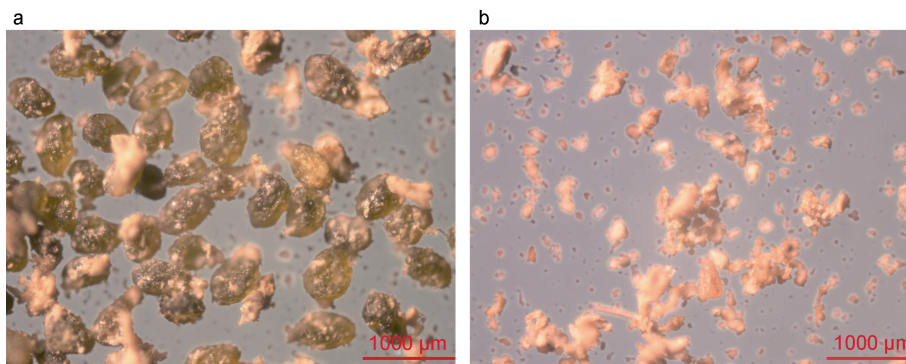


图 3 冷冻干燥后的羊栖菜受精卵(a)和假根丝状体(b)形态

Fig.3 Morphology of fertilized eggs (a) and filamentous rhizoids (b) of *S. fusiforme* after freeze drying

1.2 羊栖菜受精卵营养成分检测

按 GB 2762-2017 方法检测羊栖菜受精卵碳水化合物、膳食纤维、灰分、蛋白质、氨基酸、脂肪酸、微量元素(铁、镁和钙等)、重金属(汞、铅和铬等)、类重金属(砷和硒)和碘(I)等成分。

1.3 统计分析

利用均值±标准差(mean±SD)描述实验数据的数字特征, 并采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 检验进行差异性分析, 显著水平设定为 $P=0.05$ 。数据处理及分析采用的软件为 SPSS 19.0 和 Excel 2017。

2 结果

2.1 羊栖菜受精卵主要生化成分

羊栖菜受精卵碳水化合物、膳食纤维、水分、脂肪、总蛋白质、总氨基酸和灰分等主要生化成分含量如表 1 所示。以 g/100g DW(干重)计, 其主要成分含量从高至低依次为膳食纤维(39.20 ± 0.03)>总蛋白质(22.7 ± 0.03)>碳水化合物(20.40 ± 0.07)>总氨基酸(16.7 ± 0.04)>灰分(12.4 ± 0.14)>水分(3.87 ± 0.07)>脂肪

(1.40 ± 0.02)。膳食纤维中粗纤维含量低($2.30\pm 0.05\%$), 不溶性膳食纤维含量高($27.0\pm 0.05\%$)。

2.2 羊栖菜受精卵氨基酸组分与含量

根据 GB 5009.124-2016 标准(Trp 和 Phe 不适用于本实验样品), 本实验检测分析了 12 种脂肪族氨基酸(谷氨酸、天门冬氨酸、精氨酸、赖氨酸、亮氨酸、丙氨酸、缬氨酸、甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸、异亮氨酸和甲硫氨酸)、1 种杂环氨基酸(组氨酸)、1 种杂环亚氨基酸(脯氨酸)和 2 种芳香族氨基酸(苯丙氨酸和酪氨酸)含量, 结果如表 2 所示。

以 g/100g DW(干重)计, 羊栖菜受精卵中各种氨基酸含量从高至低依次为: 谷氨酸(9.82 ± 0.05)>天门冬氨酸(0.98 ± 0.007)>精氨酸(0.69 ± 0.007)>赖氨酸(0.60 ± 0.001)>亮氨酸(0.57 ± 0.007)>丙氨酸(0.55 ± 0.007)>缬氨酸(0.50 ± 0.001)>甘氨酸(0.45 ± 0.001)=脯氨酸(0.45 ± 0.001)>丝氨酸(0.40 ± 0.001)>苏氨酸(0.39 ± 0.001)>苯丙氨酸(0.34 ± 0.001)>组氨酸(0.31 ± 0.001)>异亮氨酸(0.30 ± 0.007)>甲硫氨酸(0.20 ± 0.001)>酪氨酸(0.11 ± 0.007)。上述各种氨基酸含量检测值均高于标准限量对照值。

表 1 羊栖菜受精卵基本组分和含量

Tab.1 Basic components and contents in fertilized eggs of *S. fusiforme*

序号	名称	含量(g/100g DW)	标准限量
1	碳水化合物	20.40±0.07	/
2	膳食纤维	39.20±0.03	/
3	粗纤维	2.30±0.05(%)	/
4	不溶性膳食纤维	27.0±0.05(%)	/
5	水分	3.87±0.07	/
6	脂肪	1.40±0.02	/
7	总蛋白质	22.7±0.03	/
8	总氨基酸	16.7±0.04	/
9	灰分	12.4±0.14	/

2.3 羊栖菜受精卵 β -胡萝卜素、维生素 C、维生素 E 和脂肪酸组分与含量

羊栖菜受精卵 β -胡萝卜素、维生素 E 和维生素 C 含量分别为 $(3.0 \times 10^3 \pm 7.07) \mu\text{g}/100\text{g DW}$, $(11.8 \pm 0.01) \text{mg}/100\text{g}$, $(2.29 \pm 0.01) \text{mg}/100\text{g DW}$, 上述色素和维生素含量, 均高于标准限量值。脂肪酸中十六碳酸(C16:0)、顺-5, 8, 11, 14, 17-二十二碳五烯酸(C20:5n3)和顺, 顺, 顺-9, 12, 15-十八碳三烯酸(C18:3n3)等 7 种脂肪

酸含量也均高于标准限量对照值。

2.4 羊栖菜受精卵矿质元素组分和含量

根据羊栖菜养殖的海域环境、GB 2762-2017 标准和温州市洞头区近岸海域典型重金属种类(2013—2017 年温州市海洋环境公报)(温州市海洋与渔业局, 2015, 2016, 2017, 2018), 本实验选择测定了羊栖菜受精卵 3 种大量元素(钠、钾和磷)、7 种微量元素(铁、钙、镁、锌、碘、锰和铜)、4 种重金属元素(铜、铅、铬和镉)和 2 种类重金属元素(砷和硒)的含量, 结果如表 4 所示。

以 $\text{mg}/\text{kg DW}$ (干重)计, 羊栖菜受精卵大量元素从高至低依次为: 钾 $(1.34 \times 10^3 \pm 5.65) >$ 钠 $(1.18 \times 10^3 \pm 77.78) >$ 磷 $(1.04 \times 10^3 \pm 1.01)$; 微量元素含量从高至低依次为: 铁 $(4.54 \times 10^3 \pm 49.50) >$ 钙 $(1.83 \times 10^3 \pm 7.78) >$ 镁 $(1.40 \times 10^3 \pm 28.28) >$ 锌 $(118 \pm 1.41) >$ 碘 $(85.8 \pm 0.01) >$ 锰 $(67.2 \pm 0.28) >$ 铜 (12.4 ± 0.35) ; 重金属含量从高至低依次为: 铅 $(8.50 \pm 0.59) >$ 铬 $(5.80 \pm 0.08) >$ 镉 $(3.3 \pm 0.19) >$ 汞 (0.047 ± 0.007) ; 类重金属含量从高至低依次为: 总砷 $(15.0 \pm 0.42) >$ 硒 (0.235 ± 0.003) , 总砷中无机砷含量为 0.81 ± 0.007 。上述各种微量元素、重金属元素和类重金属元素含量检测值均高于标准限量对照值。

表 2 羊栖菜受精卵的氨基酸含量

Tab.2 Amino acid contents in fertilized eggs of *S. fusiforme*

序号	名称	类别	含量(g/100g DW)	标准限量
1	谷氨酸/Glu	脂肪族氨基酸	9.82±0.05	7.0×10^{-4}
2	天门冬氨酸/Asp	脂肪族氨基酸	0.98±0.007	3.6×10^{-4}
3	精氨酸/Arg	脂肪族氨基酸	0.69±0.007	6.5×10^{-3}
4	赖氨酸/Lys	脂肪族氨基酸	0.60±0.001	4.4×10^{-4}
5	亮氨酸/Leu	脂肪族氨基酸	0.57±0.007	3.6×10^{-3}
6	丙氨酸/Ala	脂肪族氨基酸	0.55±0.007	9.7×10^{-3}
7	缬氨酸/Val	脂肪族氨基酸	0.50±0.001	3.2×10^{-4}
8	甘氨酸/Gly	脂肪族氨基酸	0.45±0.001	8.4×10^{-4}
9	丝氨酸/Ser	脂肪族氨基酸	0.40±0.001	6.0×10^{-4}
10	苏氨酸/Thr	脂肪族氨基酸	0.39±0.001	4.8×10^{-4}
11	异亮氨酸/Ile	脂肪族氨基酸	0.30±0.007	1.3×10^{-3}
12	甲硫氨酸/Met	脂肪族氨基酸	0.20±0.001	7.5×10^{-3}
13	组氨酸/His	杂环氨基酸	0.31±0.001	2.0×10^{-3}
14	脯氨酸/Pro	杂环亚氨基酸	0.45±0.001	8.7×10^{-3}
15	苯丙氨酸/Phe	芳香族氨基酸	0.34±0.001	8.3×10^{-3}
16	酪氨酸/Tyr	芳香族氨基酸	0.11±0.007	9.5×10^{-3}

表 3 羊栖菜受精卵 β -胡萝卜素、抗坏血酸和各类脂肪酸含量
Tab.3 Contents of β -carotene, ascorbic acid and fatty acids in fertilized eggs of *S. fusiforme*

序号	名称	含量	标准限量	单位
1	β -胡萝卜素	$3.0 \times 10^3 \pm 7.07$	1.5	$\mu\text{g}/100\text{g}$
2	维生素 E	11.8 ± 0.01	0.12	$\text{mg}/100\text{g}$
3	维生素 C (抗坏血酸)	2.29 ± 0.01	2.0	$\text{mg}/100\text{g}$
4	十六碳酸(C16:0)	0.399 ± 0.009		
5	顺-5, 8, 11, 14, 17-二十二碳五烯酸(C20:5n3)	0.174 ± 0.0042		
6	顺, 顺, 顺-9, 12, 15-十八碳三烯酸(C18:3n3)	0.141 ± 0.0014	0.05	%
7	顺-9-十八碳一烯酸(C18:1n9c)	0.103 ± 0.0014		
8	十四碳酸(C14:0)	0.08 ± 0.003		
9	十八碳酸(C18:0)	0.071 ± 0.0007		
10	顺, 顺-9, 12-十八碳二烯酸(C18:2n6c)	0.0562 ± 0.0011		

表 4 羊栖菜受精卵矿质元素组分和含量
Tab.4 Composition and content of mineral elements in fertilized eggs of *S. fusiforme*

序号	名称	种类	含量(mg/kg DW)	标准限量
1	钾/K	大量元素	$1.34 \times 10^3 \pm 5.65$	0.5
2	钠/Na	大量元素	$1.18 \times 10^3 \pm 77.78$	3.0
3	磷/P	大量元素	$1.04 \times 10^3 \pm 1.01$	60.0
4	铁/Fe	微量元素	$4.54 \times 10^3 \pm 49.50$	3.0
5	钙/Ca	微量元素	$1.83 \times 10^3 \pm 7.78$	1.5
6	镁/Mg	微量元素	$1.40 \times 10^3 \pm 28.28$	2.0
7	锌/Zn	微量元素	118 ± 1.41	2.0
8	碘/I	微量元素	85.8 ± 0.01	1.4
9	锰/Mn	微量元素	67.2 ± 0.28	0.3
10	铜/Cu	微量元素, 重金属	12.4 ± 0.35	0.2
11	铅/Pb	重金属	8.50 ± 0.59	0.04
12	铬/Cr	重金属	5.80 ± 0.08	0.03
13	镉/Cd	重金属	3.3 ± 0.19	0.003
15	汞/Hg	重金属	0.047 ± 0.007	0.01
16	总砷/As & As(, V)	类重金属	15.0 ± 0.42	0.01
17	无机砷/As	类重金属	0.81 ± 0.007	0.05
18	硒/Se	类重金属	0.235 ± 0.003	0.03

3 讨论

3.1 羊栖菜受精卵的碳水化合物、膳食纤维、脂肪酸和蛋白质等活性成分特征

羊栖菜受精卵生化成分含量分析及其与羊栖菜孢子体相应成分含量的比对既是羊栖菜受精卵在食药两用应用前景的认知基础,也是羊栖菜受精卵的生物学特征的认知基础。碳水化合物、膳食纤维、脂肪酸和蛋白质等是羊栖菜藻体的主要构成成分,也是解析羊栖菜国药“海藻”(国家药典委员会, 2015)和天然产物开发的重要评价指标,深度分析、分离和开

发应用这些主要生化成分,是羊栖菜产业系统化发展的主要趋势。羊栖菜受精卵碳水化合物含量为20.4%(表 1)显著低于羊栖菜孢子体 35.12%—61.85%的水平(Hwang *et al*, 2008; Choi *et al*, 2009; Zhu *et al*, 2010); 粗纤维含量为2.3%(表 1)显著低于羊栖菜孢子体 33.17%—40.42%的水平(尤瑜敏等, 2002); 羊栖菜受精卵脂肪含量(1.4%)略低于羊栖菜孢子体 1.6%—1.79%的水平(Li *et al*, 2006; Hwang *et al*, 2008; Zhu *et al*, 2010); 而蛋白质含量(22.7%)显著高于羊栖菜孢子体 10.3%—12.94%的水平(Hwang *et al*, 2008; Choi *et al*, 2009; Zhu *et al*, 2010)。

3.2 羊栖菜受精卵的氨基酸组分和含量特征

氨基酸是构成动物营养所需蛋白质的基本构成单位,人体必需氨基酸是指人体不能合成或合成速度远不适应机体的需要,必需由食物蛋白供给的氨基酸。主要包括赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、甲硫氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和缬氨酸。必需氨基酸是人体必需的营养物质,其组成和含量是评价药用植物营养价值的主要依据(陈绍瑗等,1998)。羊栖菜受精卵的谷氨酸含量最高,为(9.82±0.05)g/100g DW,高于羊栖菜孢子体 2.44—5.2g/100g DW 的含量水平(李丽等,2002;戴志远等,2002),在提取和开发方面特征优良。有文献报道,羊栖菜孢子体 8 种人体必需氨基酸含量分别为: Thr(0.63%)、Val(0.90%)、Ile(0.68%)、Leu(1.12%)、Arg(0.63%)和 Lys(0.68%)。在上述氨基酸中,羊栖菜受精卵中除精氨酸和赖氨酸含量差异不显著外,其他四种氨基酸含量均低于羊栖菜孢子体氨基酸含量(陈群等,2005)。羊栖菜受精卵的谷氨酸含量显著高于孢子体水平,这一特征说明羊栖菜受精卵的光呼吸氮代谢作用和脯氨酸生物合成作用较为突出(周青,1986),但是其受精卵内是否还有其它生物学功能尚不清楚。

洞头羊栖菜孢子体总氨基酸含量差异很大,现有研究结果分别为 0.15%—1.75% (陈帆等,2002)、13.18% (陈绍瑗等,1998)和 15.38% (戴志远等,2002)。而我们测定的羊栖菜受精卵总氨基酸含量为 16.7%,高于现有报道的羊栖菜孢子体氨基酸含量最高值。羊栖菜受精卵灰分含量为 12.4%,显著低于羊栖菜孢子体 15.4%—35.80%的水平(Li *et al*, 2006; Zhu *et al*, 2010)。国内外文献报道均以羊栖菜野生孢子体或人工养殖孢子体为实验材料,结果表明,材料不同,相同检测指标的差异较大。羊栖菜受精卵的膳食纤维、总氨基酸和总蛋白含量占总干重的 78.6%(表 1),是 3 个含量最高的生化组分,显著高于已报道的羊栖菜孢子体中相应组分的含量水平(尤瑜敏等,2002;李八方,2003)。

3.3 羊栖菜受精卵的脂肪酸组分和含量特征

羊栖菜受精卵的脂肪酸种类主要包括十四碳酸(C14:0)等 7 种,尤以棕榈酸(C16:0)脂肪酸含量最丰富。同孢子体相比,各组均低于羊栖菜孢子体 C14:0、C16:0、C18:0、C18:1n9c、C18:2n6c、C18:3n3 和 C20:5n3 对应的 5.43%、39.30%、1.78%、11.76%、3.70%、6.58%和 5.39%含量水平(夏静芬等,2009)。可见羊栖菜受精卵脂肪酸总量最低,属低脂肪样品,但

是棕榈酸(C16:0)含量丰富这一特征与羊栖菜孢子体氨基酸组分结构特征是相似的(李丽等,2002)。

3.4 羊栖菜受精卵的铁、钙、镁、钾、钠、磷、锌和锰等必需元素含量特征

羊栖菜受精卵微量元素含量最高的微量元素为铁元素,其次为钙元素和镁元素,均高于羊栖菜孢子体(赵进沛等,2000),保健因子和有效中药成分突出。羊栖菜受精卵钾、钠和磷的含量高于标准限量值,但均低于孢子体内 1%—3%、2.85%、0.3%的含量水平(陈耀祖等,1996;骆其君等,2013)。羊栖菜受精卵中铁的含量最高,为(4.54×10³±49.50)mg/kg DW(表 3),高于羊栖菜孢子体 55—84.3mg/kg(茎)、97.1mg/kg(叶)的含量值(赵艳芳等,2013;骆其君等,2013);钙、锌和锰含量也均显著高于羊栖菜孢子体内 1.46×10³、3.79 和 24.6mg/kg 的含量水平(赵艳芳等,2013);而碘和镁含量分别为(85.8±0.01)mg/kg DW 和(1.40×10³±28.28)mg/kg DW(表 3),分别低于羊栖菜孢子体内 241.4mg/kg 和 7.31×10³mg/kg 的水平。上述微量元素含量特征表明,羊栖菜受精卵所含人体必需的微量元素比孢子体丰富,具有高品质保健食品开发价值。

3.5 羊栖菜受精卵的铜、铅、铬、镉、汞、硒和砷等重金属元素含量特征

马尾藻(*S. wightii*)、羊栖菜、蕨藻(*Caulerpa racemosa*)和石花菜(*Gelidium*)等大型海藻对重金属吸附的研究报道表明,它们在生长发育过程中,可以吸附环境中的 Cd²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺、Pb²⁺、Cr³⁺、As⁵⁺和 Hg²⁺等重金属(Davis *et al*, 2003; Vilar *et al*, 2007; Narayanaswamy *et al*, 2012; Ma *et al*, 2018)。羊栖菜受精卵是雌雄生殖托生长、发育和成熟的结果,其体内能够检测到铅、铬和镉等重金属的存在,可能是雌雄生殖托生长发育过程中长期富集和积累重金属的结果。

羊栖菜受精卵铜含量(12.4±0.35mg/kg DW,表 3)高于羊栖菜孢子体 1.75—5.0mg/kg 的含量值(赵艳芳等,2013;胡敏等,2017)。羊栖菜受精卵铅、铬、镉和汞的含量分别为(8.50±0.59)、(5.80±0.08)、(3.3±0.19)和(0.047±0.007)mg/kg DW(表 3)。其中,铅和镉的含量分别高于孢子体 0.83mg/kg 的铅含量和 0.38mg/kg 的镉含量水平(赵艳芳等,2013);而有关羊栖菜孢子体汞和铬含量尚无专项研究报道。正常生活状态下,植物体内的无机硒含量较少,被消化吸收的硒主要以 Se(IV)态呈现,并以硒蛋白、硒多糖、硒核酸、硒代氨基酸、硒多肽、硒 RNA、甲基硒化物、硒果胶、硒多酚、硒黄酮及硒类胡萝卜素等多种有机

硒形式存在, 占总硒含量的 80%以上(毛文君等, 1995; 郑立等, 2005; 朱金霞等, 2009)。硒元素是浙江产羊栖菜特殊的营养成分(戴志远等, 2002), 羊栖菜受精卵硒含量丰富, 硒含量高于孢子体 0.074mg/kg 的水平(骆其君等, 2013), 但它的价态和硒化物存在形式, 还有待于进一步检测分析。

羊栖菜对重金属砷具有富集特性(Laparra *et al*, 2004; Rose *et al*, 2007; 高杨等, 2009; Ma *et al*, 2018)。羊栖菜受精卵的总砷含量为(15.0±0.42)mg/kg DW (表 3), 低于孢子体 21.5—124mg/kg 含量水平(陈帆等, 2002; 刘红英等, 2003; Laparra *et al*, 2004; 李卫华等, 2006; Rose *et al*, 2007; 高杨等, 2009; Ma *et al*, 2018), 无机砷的含量为(0.81±0.007)mg/kg DW (表 3), 也低于羊栖菜孢子体 41.6—96mg/kg 的含量水平(Laparra *et al*, 2004; Rose *et al*, 2007; Ma *et al*, 2018)。

4 结论

羊栖菜受精卵具有低脂肪、高膳食纤维、高蛋白和高人体必需氨基酸等生化组份特征。膳食纤维、蛋白质和氨基酸含量占羊栖菜受精卵干品质量的 78.6%。羊栖菜受精卵中谷氨酸含量最高, 占氨基酸总量的 9.82%, 此外, 还含有人体不能自身合成的 8 种必需氨基酸。与羊栖菜孢子体相比, 羊栖菜受精卵矿质元素组成特点表现为低大量元素、高微量元素、含典型重金属和类重金属, 也具有羊栖菜孢子体富集重金属和类重金属的特征。羊栖菜受精卵脂肪酸总量低, 且棕榈酸(C16:0)含量最为丰富。总之, 与羊栖菜孢子体相比, 羊栖菜受精卵保健因子和有效中药成分特征更加明显, 极具天然产物提取、开发和利用价值。

参 考 文 献

王百龙, 孙稚颖, 周凤琴, 2015. 羊栖菜成分以及药理研究进展. 山东中医杂志, 34(9): 722—725
 尤瑜敏, 许时婴, 2002. 羊栖菜中褐藻糖胶的提取工艺. 无锡轻工大学学报, 21(3): 233—238
 毛文君, 管华诗, 1995. 12 种海藻硒含量及其分布特点的研究. 中国海洋药物杂志, 14(1): 27—30
 朱金霞, 周文生, 郭生虎, 2009. 植物中微量元素硒的研究进展. 安徽农业科学, 37(13): 5844—5845
 刘红英, 薛长湖, 江艳华等, 2003. 我国部分经济海产食品中砷、铅、镉、汞含量的测定与分析. 中国食品学报, (S1): 175—179
 阮积惠, 徐礼根, 2001. 羊栖菜 *Sargassum fusiforme* Setch 繁殖与发育生物学的初步研究. 浙江大学学报(理学版), 28(3): 315—320
 孙建璋, 方家仲, 朱植丰等, 1996. 羊栖菜 *Sargassum fusiforme*

(Harve) Setch 繁殖生物学的初步研究. 浙江水产学报, 15(4): 243—249
 李 丽, 陶 平, 安风飞, 2002. 羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)的营养组成分析. 中国公共卫生管理, 18(6): 548—550
 李八方, 2003. 羊栖菜功能多糖化学及其生物活性研究. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文
 李卫华, 王雅珍, 刘玉海, 2006. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱检测海藻中的砷. 陕西师范大学学报(自然科学版), 34(4): 65—68
 李雅静, 范家兴, 程柳坤等, 2017. 两个品系羊栖菜褐藻胶与褐藻糖胶的联合提取及理化性质测定. 食品工业科技, 38(6): 90—95, 100
 陈 帆, 陈世理, 2002. 海洋药用羊栖菜中总砷含量的分析. 温州师范学院学报(自然科学版), 23(6): 37—39
 陈 群, 许 宁, 2005. 羊栖菜活性成分和药理作用研究进展. 中国药业, 14(6): 95—96
 陈绍瓓, 陈耀祖, 莫卫民, 1998. 海洋药物研究()——羊栖菜中蛋白质和氨基酸分析. 浙江工业大学学报, 26(1): 45—48
 陈耀祖, 潘远江, 莫卫民, 1996. 东海药用海藻化学成份分析研究(I)羊栖菜中微量元素分析. 浙江大学学报(自然科学版), 30(4): 471—473
 国家药典委员会, 2015. 中华人民共和国药典 2015 年版 一部. 北京: 中国医药科技出版社
 周 青, 1986. 植物中氨基酸的生理作用. 生物学通报, (8): 7—9
 郑 立, 严小军, 孙 建等, 2005. 日本真海带对硒的积累和生物转化. 海洋学报, 27(5): 119—125
 赵进沛, 刘 卫, 陈连庆, 2000. 微量元素在保健食品研制开发中的应用. 广东微量元素科学, 7(7): 11—14
 赵艳芳, 尚德荣, 宁劲松等, 2013. 羊栖菜中微量元素元素的亚细胞分区分布. 渔业科学进展, 34(3): 118—123
 胡 敏, 于凤文, 洪机剑等, 2017. 5 种生物物质基本性质分析. 西北林学院学报, 32(3): 52—55
 骆其君, 林少珍, 2013. 羊栖菜——海岛洞头的金名片. 北京: 海洋出版社
 夏静芬, 汪财生, 钱国英, 2009. 羊栖菜和海带脂肪酸组成的比较分析. 食品研究与开发, 30(12): 5—8
 高 杨, 曹 焯, 余晶晶等, 2009. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术测定干海产品中砷化学形态. 分析化学, 37(12): 1738—1742
 曾呈奎, 陆保仁, 2000. 中国海藻志 第三卷 褐藻门 第二册 墨角藻目. 北京: 科学出版社
 温州市海洋与渔业局, 2015. 2014 年温州市海洋环境公报. <http://xxgk.wenzhou.gov.cn>
 温州市海洋与渔业局, 2016. 2015 年温州市海洋环境公报. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA4ODY2NzYyMQ%3D%3D&idx=1&mid=401850591&sn=e0ad7362e3b756aef72a4d2baf388b20
 温州市海洋与渔业局, 2017. 2016 年温州市海洋环境公报. http://wzhy.wenzhou.gov.cn/art/2017/3/8/art_1252564_5868666.html
 温州市海洋与渔业局, 2018. 2017 年温州市海洋环境公报. <http://xxgk.wenzhou.gov.cn>
 戴志远, 洪泳平, 张燕平等, 2002. 羊栖菜的营养成分分析与

- 评价. 水产学报, 26(4): 382—384
- Choi E Y, Hwang H J, Kim I H *et al*, 2009. Protective effects of a polysaccharide from *Hizikia fusiformis* against ethanol toxicity in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 47(1): 134—139
- Davis T A, Volesky B, Mucci A, 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37(18): 4311—4330
- Hwang H J, Kim I H, Nam T J, 2008. Effect of a glycoprotein from *Hizikia fusiformis* on acetaminophen-induced liver injury. *Food and Chemical Toxicology*, 46(11): 3475—3481
- Laparra J M, Vélez D, Montoro R *et al*, 2004. Bioaccessibility of inorganic arsenic species in raw and cooked *Hizikia fusiforme* seaweed. *Applied Organometallic Chemistry*, 18(12): 662—669
- Li B, Wei X J, Sun J L *et al*, 2006. Structural investigation of a fucoidan containing a fucose-free core from the brown seaweed, *Hizikia fusiforme*. *Carbohydrate Research*, 341(9): 1135—1146
- Ma Z L, Lin L D, Wu M J *et al*, 2018. Total and inorganic arsenic contents in seaweeds: absorption, accumulation, transformation and toxicity. *Aquaculture*, 497: 49—55
- Pang S J, Chen L T, Zhuang D G *et al*, 2005. Cultivation of the brown alga *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura: enhanced seedling production in tumbled culture. *Aquaculture* 245(1—4): 321—329
- Pang S J, Gao S Q, Sun J Z, 2006. Cultivation of the brown alga *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura: controlled fertilization and early development of seedlings in raceway tanks in ambient light and temperature. *Journal of Applied Phycology*, 18(6): 723—731
- Pang S J, Shan T F, Zhang Z H *et al*, 2008. Cultivation of the intertidal brown alga *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura: mass production of zygote-derived seedlings under commercial cultivation conditions, a case study experience. *Aquaculture Research*, 39(13): 1408—1415
- Rose M, Lewis J, Langford N *et al*, 2007. Arsenic in seaweed-forms, concentration and dietary exposure. *Food and Chemical Toxicology*, 45(7): 1263—1267
- Tamilselvan N, Saurav K, Kannabiran K, 2012. Biosorption of Cr (VI), Cr (III), Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions by *Sargassum wightii* and *Caulerpa racemosa* algal biomass. *Journal of Ocean University of China*, 11(1): 52—58
- Vilar V J P, Botelho C M S, Boaventura R A R, 2007. Copper desorption from *Gelidium* algal biomass. *Water Research*, 41(7): 1569—1579
- Zhu T, Heo H J, Row K H, 2010. Optimization of crude polysaccharides extraction from *Hizikia fusiformis* using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 82(1): 106—110

ANALYSIS OF BIOACTIVE SUBSTANCES AND MINERAL ELEMENTS IN FERTILIZED EGGS OF ECONOMIC SEAWEED *SARGASSUM FUSIFORME*

LIN Li-Dong¹, SHANG Tian-Ge², CHEN Bin-Bin², ZHANG Xu², MA Zeng-Ling²

(1. Post-Doctor Workstation of Dongtou Fisheries Science and Technology Research Institute, Dongtou, Wenzhou 325700, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory for Water Environment and Marine Biological Resources Protection, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract To comprehensively evaluate the nutritional values and development prospects of fertilized eggs of *Sargassum fusiforme*, the mineral elements, bioactive substances such as carbohydrates, dietary fibers, amino acids and fatty acids in the fertilized eggs were determined and compared with the corresponding components in the sporophytes based on literatures. The results showed that the fertilized eggs of *S. fusiforme* were rich in carbohydrates, proteins, amino acids and dietary fibers, and the corresponding contents were (20.4±0.07), (22.7±0.03), (16.7±0.04) and (39.2±0.03)g/100g DW, respectively. In addition, the contents of glutamic acid, vitamin E and β-carotene were particularly high, reaching (9.82±0.05)g/100g DW, (11.8±0.01)mg/100g DW and (3.0×10³±7.07)μg/100g DW, respectively. However, the content of fat was low, only 1.03%. For the mineral elements, the contents of trace elements iron, calcium and magnesium were high, reaching (4.54×10³±49.50), (1.83×10³±7.78) and (1.40×10³±28.28)mg/100g DW, respectively. In conclusion, compared with the biochemical components in sporophytes of *S. fusiformis* reported in the literatures, the fertilized eggs contain higher contents of proteins, amino acids, β-carotene, potassium, sodium, phosphorus, iron, calcium, zinc, manganese and copper. It indicates that the fertilized eggs of *S. fusiforme* is better than the sporophytes in extraction, development and utilization of the natural products.

Key words *Sargassum fusiforme*; fertilized eggs; sporophyte; bioactive substances; mineral elements