

藻蛋白质的研究与应用进展

梁克红*

(农业部食物与营养发展研究所,北京 100081)

摘要: 评述了藻蛋白质的营养价值,以及抗氧化、抗凝血、抗菌、抗肿瘤等多种保健功能;藻蛋白质是藻类重要的组分,具有多种生物活性。综述了藻蛋白质在食品、药品及化妆品领域的应用,为藻蛋白质功能的进一步开发和深入研究提供参考。

关键词: 藻蛋白质;营养价值;药理价值

中图分类号: TS201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2015)06—0569—06

Progress in Studies and Application of the Algae Protein

LIANG Kehong

(Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture, Beijing 100080, China)

Abstract: The algae protein has a variety of biological activities. This article reviewed its nutritional values and health effects including antioxidant, anticoagulant, antibacterial, antitumor and other functions. Its application in food, medicine and cosmetics was also concluded herein. This paper would arouse further research and development of algae protein.

Keyword: algae protein, nutritional values, pharmacological values

海洋约占世界70%以上的地表面积,蕴含着丰富的生物资源^[1]。藻类作为海洋生物中的一个大家族,可以在高盐、极端温度、弱光和营养缺乏等极端环境中生存^[2]。藻的形态多种多样,根据色素沉淀主要分为蓝藻、褐藻、红藻和绿藻4类^[3]。

大多数藻蛋白质营养价值较高,富含天冬氨酸、谷氨酸和亮氨酸等氨基酸。近年来,从藻细胞中分离出大量的蛋白质类生物活性物质,这些物质具有抗氧化^[4]、降压^[5]、免疫调节^[6]、抗肿瘤^[7]、保肝、抗凝血等作用,被广泛应用于食品、医药、化工等领域。

1 藻类中蛋白质含量

藻类含有丰富的蛋白质资源,有些藻中的蛋白质品质优于常规富含蛋白质的食物,如大豆、谷物、鸡蛋、鱼^[8]等。由于藻种和季节的不同,藻中的蛋白质含量也有所差异。蓝藻中的蛋白质含量较高,螺旋藻中的蛋白质质量分数可高达71%(见表1),绿藻和红藻次之,褐藻中的蛋白质含量较低。藻中蛋白质含量随着季节的改变而变化,通过对法国大西洋沿岸的掌形藻(*Palmaria palmata*)进行全年蛋白质水平监测,发现掌形藻的蛋白质质量分数最高值

收稿日期: 2014-09-23

作者简介: 梁克红(1984-),女,河北石家庄人,工学博士,助理研究员,主要从事食物营养研究。E-mail: liangkehong@caas.cn

出现在冬末春初(25%),而最低值则在夏季(9%),类似结果也在其它藻种中发现,如掌状海带(*Laminaria digitata*)、石莼(*Ulva lactuca*)^[9]。

表1 藻类的蛋白质含量

Table 1 Protein content of algae

| 藻种类 | 蛋白质质量分数 | 参考文献 |
|--|-----------|------|
| 蓝藻门 | | |
| 柱胞鱼腥藻(<i>Anabaena cylindrica</i>) | 43% ~ 56% | [10] |
| 螺旋藻(<i>Spirulina maxima</i>) | 60% ~ 71% | |
| 聚球藻(<i>Synechococcus</i> sp.) | 63% | |
| 绿藻门 | | |
| 菜茵衣藻(<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>) | 48% | [10] |
| 小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>) | 51% ~ 58% | |
| 杜氏盐藻(<i>Dunaliella salina</i>) | 57% | |
| 斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>) | 50% ~ 56% | |
| 石莼(<i>Ulva lactuca</i>) | 10% ~ 21% | [9] |
| 红藻门 | | |
| 紫球藻(<i>Porphyridium cruentum</i>) | 28% ~ 39% | [10] |
| 皱波角叉菜(<i>Chondrus crispus</i>) | 20.10% | [11] |
| 掌形藻(<i>Palmaria palmata</i>) | 8% ~ 35% | [12] |
| 褐藻门 | | |
| 裙带菜(<i>Undaria pinnatifida</i>) | 11% ~ 24% | [13] |
| 掌状海带(<i>Laminaria digitata</i>) | 15.9% | [14] |
| 墨角藻(<i>Fucus vesiculosus</i>) | 5% ~ 10% | [11] |

2 藻蛋白质的营养价值和应用

人类食用发菜、螺旋藻和束丝藻等蓝绿藻已经有上千年的历史。实验证明,螺旋藻比牛奶含有更多的钙、磷、钾、镁,并含有丰富的微量元素、酶和天然色素,并且胆固醇含量很低。螺旋藻(*Spirulina platensis*)蛋白质中赖氨酸的含量是50~55 mg/g,蛋氨酸+半胱氨酸的含量是15~20 mg/g,苏氨酸含量是45~50 mg/g,这些值均高于FAO和WHO的推荐值,因此螺旋藻被世界粮农组织推荐为21世纪人类最理想的保健食品^[15]。目前,据不完全统计,全世界螺旋藻年产达到5 000 t以上。由于亚洲拥有很多规模较小的生产厂家,数据很难准确计算,这一市场正在迅速扩大^[16]。除了作为一种优良的蛋白质源,有些藻蛋白质也被用于做乳化剂应用到食品生产中,Schwenzfeier等从融合微藻(*Tetraselmis* sp.)中分离得到一种可溶性藻蛋白质,在pH5~7范围内

形成稳定乳状^[17-18]。藻类除了用于食品,也可以作为各种动物包括鱼类(水产养殖)和畜禽的饲料。当前,世界藻类产量的30%都用于动物饲料,螺旋藻产量的50%用于饲料添加剂^[10]。Guil等研究发现,拟微球藻(*Nannochloropsis* spp.)和三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)的蛋白质总量低于大豆粉的,但是拟微球藻(*Nannochloropsis* spp.)的疏水氨基酸和亲水氨基酸质量分数分别是41.6%和22.9%,三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)的疏水氨基酸和亲水氨基酸质量分数分别是40.7%和21%,均高于大豆粉的,这些藻可以作为生产高蛋白质产品的原料^[19]。

藻胆蛋白质是存在于某些藻类(主要是红藻、蓝藻)的藻胆体中的一类色素复合蛋白质^[20]。按光谱特性可把藻胆蛋白质分为藻蓝蛋白质、别藻蓝蛋白质和藻红蛋白质等^[21]。日本油墨化学工业公司使用藻蓝蛋白质开发了一种叫丽娜蓝的产品,用于口香糖、冰冻果子露、冰棍、糖果、饮料、乳制品和芥末产品中。藻蓝蛋白质由于具有抗氧化功能,常常被用于保健食品^[22]。牛磺酸是一种含硫的非蛋白质氨基酸,与胱氨酸、半胱氨酸的代谢关系密切。扁平石花菜(*Gelidium subcostatum*)和椭圆蜈蚣藻(*Grateloupia elliptica*)中的牛磺酸含量分别高达998.7 nmol/g和198.2 nmol/g^[23]。最近,牛磺酸已经开始用于保健食品、饮料和膳食补充剂中。

3 藻蛋白质的药理价值与应用

3.1 抗氧化活性

抗氧化剂可以捕获并中和自由基,祛除自由基对人体的损害。海洋的低光强和高氧环境,特别是夏季时强紫外线辐射使海藻成为天然的抗氧化剂^[24]。海洋中的氧浓度随着海洋温度、营养素、光照强度的季节性变化而变化,这种天然的氧化环境使藻细胞中形成自由基和其他活性氧来保护自己^[25]。Sheil等人研究发现,某些氨基酸序列之间的共价键和相应的热稳定性具有抗氧化性^[26]。大量的研究表明,海藻蛋白质水解产物都具有抗氧化活性。Heo和Jeon发现,铁钉菜(*Ishige okamurae*)的酶水解物可以消除过氧化氢,碱性蛋白酶、复合风味蛋白酶、Kojizyme酶、Protamex蛋白酶的水解产物均表现出较高的过氧化氢消除活性,当质量浓度达140 μg/mg时,它们的活性分别是91.62%、93.41%、96.27%和

93.71%。Kojizyme 酶解产物有较高的热稳定性, 100 °C加热 24 h 后过氧化氢消除活性保留率仍能达到 70%。微劳马尾藻(*Sargassum fulvellum*)、鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)、铜藻(*Sargassum homeri*)的碱性蛋白酶、复合风味蛋白酶、Protamex 蛋白酶的酶解产物也表现出显著的过氧化氢消除活性^[27]。小球藻蛋白质废液经过胃蛋白酶水解后, 分离纯化得到一个相对分子质量是 1 309 的肽(VECYGPNRPQF), 这个肽显示出较高的 ABTS 自由基消除和超氧阴离子自由基消除活性^[28]。

红藻、褐藻等大型经济海藻中广泛存在一类低分子水溶性紫外线吸收物质——类菌孢素氨基酸, 有报道称这一物质可以抑制活性氧自由基的产生^[29]。Brown 先后在红藻中发现了一种肌肽, 这是一种组氨酸二肽, 可以螯合过渡金属并具有抗氧化作用^[30]。多肋菜(*Castaria costata*)、浒苔(*Enteromorpha prolifera*)、蜈蚣藻(*Grateloupia filicina*)和紫菜(*Porphyra tenera*)的胃蛋白酶的水解产物不仅表现出抗氧化活性, 而且具有抑制血管紧张素转化酶(ACE)和抗肿瘤活性。浒苔(*Enteromorpha prolifera*)和紫菜(*Porphyra tenera*)的酶水解产物具有抑制酪氨酸酶的活性。酪氨酸酶是一种含有铜离子的多功能酶, 它能够造成皮肤色素沉淀, 并且对帕金森病和其他神经退行性疾病的治疗有重要作用^[26]。

3.2 抗凝血活性

目前, 关于藻蛋白质或多肽抗凝血活性的研究较少。Guru 等从褐藻软叶马尾藻(*Sargassum tenerimum*)、围氏马尾藻(*Sargassum wightii*)、小叶喇叭藻(*Turbinaria conoides*)、喇叭藻(*Turbinaria ornata*)和四迭团扇藻(*Padina tetrastratica*)中提取到粗硫酸化多糖(Crude sulphated polysaccharides, SPS), 具有抗凝血活性。研究发现, SPS 含有糖、硫酸盐和蛋白质的成分^[31]。Matsubara 等从冻沙菜(*Hypnea japonica*)中分离出一种可以抑制血小板凝集的糖蛋白质, 这种糖蛋白质可以抑制 ADP、胶原引起的人血小板凝集^[32]。Athukorala 等通过热提取法从韩国济州岛地区的 22 种绿藻和褐藻中分离出具有抗凝血活性的糖蛋白质, 其中最高的是刺松藻(*Codium fragile*)和铜藻(*Sargassum horneri*)^[33]。目前发现的具有抗凝血活性的多为糖蛋白质。

3.3 抗菌活性

研究发现, 铁钉菜(*Ishige okamutae*)和羊栖菜

(*Sargassum fusiforme*)的蛋白质提取物对红色链孢霉的菌丝生长和孢子萌发有一定的抑制作用。岗村凹顶藻的蛋白质提取物对圆弧青霉、绿色木霉、红色链孢霉、玉米大斑病菌和稻瘟病菌均表现出抑制作用^[34]。在塞内加尔海岸的红藻中分离出一种新的二肽衍生物, 结果发现这种二肽衍生物对沙雷式菌和伤寒杆菌均表现出抑菌性。螺旋藻蛋白质中分离纯化得到一种相对分子质量是 36 000 的多肽, 对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌均有抑菌活性, 该肽对大肠杆菌的最小抑菌浓度比山梨酸的还要小^[35]。

3.4 抗肿瘤活性

锯齿麒麟菜(*Euclima serra*)中含有一种糖蛋白质, 对癌症细胞群(如结肠癌 Colo201 细胞和宫颈癌 Hela 细胞)具有细胞毒性^[36]。ESA-2 另一种从锯齿麒麟菜中分离出来的凝集素, 可以抑制小鼠的结肠癌。羽藻属绿藻(*Bryopsis* sp.)中分离到一种环缩肽(Kahalalide F), 可控制肺癌、结肠癌、前列腺癌等多种肿瘤^[37-38]。Subhashini 等发现, 50 μmol 藻蓝蛋白质处理慢性粒细胞白血病细胞系(K562)48 h, 使其增殖速度显著降低。除此之外, 通过流式细胞仪发现分别使用 25、50 μmol 的藻蓝蛋白质处理 K562 48 h 后, 分别有 14.11% 和 20.93% 的细胞处于 sub-G0/G1 期, 藻蓝蛋白质使细胞色素 c 从线粒体进入到细胞质中从而使 K562 细胞凋亡^[39]。Dolastatin-10 最早是从截尾海兔(*Dolabella auricularia*)中分离出的一种 18 元环六肽, 对肿瘤细胞有弱细胞毒性。Luesch 等发现, Dolastatin-10 其实是源于海兔的食物来源之一的束藻(*Symploca* sp.)^[40]。这些结果说明, 藻类可以用于开发治疗癌症的药物。

3.5 免疫刺激活性

Arya 和 Gupta 报道了一种从巨大鞘丝藻中分离出的结构新颖的脂肽(Microcolin-A), 具有很强的免疫抑制活性^[41]。王连芬等采用胰蛋白酶对螺旋藻作蛋白酶解得到蛋白质水解物, 将所得的水解物对 Balb/c 小鼠进行灌胃, 腹腔注射和尾静脉注射, 采用 ELISA 试剂盒测定小鼠血清中 IL-10、TGF-α、IL-4、IL-6、THF-α、IFN-γ、IL-1β 细胞因子变化情况。从实验结果发现, 这些细胞因子水平均有所提高, 说明螺旋藻蛋白质水解产物通过对细胞因子水平的调节, 进而对机体免疫功能发挥重要的调节作用^[42]。

3.6 降压活性

心血管疾病被认为是导致死亡的重要因素之一,与高血压有着密切的关系。血管紧张素转化酶抑制剂(ACEI)可以用于高血压的治疗。王韵等从一种富硒螺旋藻中提取到含硒蛋白质,利用胃蛋白酶-胰蛋白酶-胰凝乳蛋白酶联合酶水解含硒蛋白质,得到的多肽对血管紧张素转化酶(ACE)的抑制效率高达89.47%^[43]。Sheih等从小球藻的蛋白质废液中分离出一个具有11个氨基酸的多肽(Val-Glu-Cys-Tyr-Gly-Pro-Asn-Arg-Pro-Gln-Phe),有ACEI抑制活性(IC₅₀值是29.6 μmol)。纯化出的多肽在pH 2~10之间、温度40~100℃之间仍然表现出抑制活性,具有较好的热稳定性和pH稳定性^[28]。关于从藻中分离出具有ACEI抑制活性多肽的研究已有较多,有关ACEI的长期疗效以及安全性的研究还较少。因此,关于具有生物活性的藻多肽在预防和治疗高血压方面的作用还需要作更多研究。

4 藻蛋白质在化妆品行业中的应用

在过去的数10年,由于藻类富含对人体有益的成分,作为食物被大众所接受。近几年,藻类也开始应用于化妆品,目前主要是螺旋藻和小球藻。藻蛋白质可以保湿,还可以治疗和修复受损的皮肤,向皮肤提供营养,主要用于皮肤、头发保养产品,如抗衰老、修复、润肤面霜。Protulines是一种螺旋藻蛋白质提取物,可以修复早期皮肤老化,紧缩皮肤,防止皱纹形成。小球藻的提取物(Dermochlorella)可以刺激皮肤的胶原蛋白合成,从而可以使组织再生并减少皱纹^[44]。欧盟将这些产品纳入到欧盟化妆品法规1223/2009的管理中。陆续也出现了一些

其它藻种(如紫菜 *Porphyra spp.*、裙带海藻等)的藻蛋白质化妆品。

红藻和蓝藻中含有的藻胆蛋白质,其天然的色素可以作为多种化妆品色彩来源。蓝藻含有大量的藻蓝蛋白质,具有天然的蓝色,是化妆品中蓝色的来源^[45]。藻红蛋白质具有热稳定性和pH耐受性特性,可以用于口红、眼线膏等化妆品的自然粉色和紫色来源。

类菌胞素氨基酸(Mycosporine-like amino acids, MAAs)是以环己烯酮为基本骨架,与不同类型氨基酸通过胺缩合作用形成的水溶性物质,在蓝藻和真核藻类中广泛存在。MAAs在310~360 nm的紫外光区具有强的吸收能力,对紫外光UV-A和UV-B具有较高的吸收率,可以用作防晒产品的原料^[46-47]。MAAs的主要种类有asterina-330、mycosporine-gly、porphyra-334和shinorine。目前,市场上已有化妆品中含有从脐形紫菜(*Porphyra umbilicalis*)中提取的porphyra-334和shinorine^[48]。可见,藻蛋白质在化妆品领域亦具有广阔的应用前景。

5 展望

目前,已经发现有上万种藻,但是只有其中几千种被收集,几百种在研究其化学成分,少量的用于工业化生产。藻蛋白质对人体具有多种有益的功能,我国对藻蛋白质的开发利用时间也不长,大多还处于实验室研究阶段,应用开发正在起步。为了提高藻蛋白质的利用率,降低生产成本,有必要在藻种选育、培养条件和培养方法的改进,在提取、分离和纯化的工艺优化方面等进行进一步深入研究。

参考文献

- [1] Haefner B. Drugs from the deep: Marine natural products as drug candidates[J]. **Drug Discovery Today**, 2003, 8(12): 536-544.
- [2] Plaza M, Cifuentes A, Ibáñez E. In the search of new functional food ingredients from algae[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2008, 19(1): 31-39.
- [3] Samarakoon K, Jeon Y J. Biofunctionalities of proteins derived from marine algae — A review[J]. **Food Research International**, 2012, 48(2): 948-960.
- [4] Klein B C, Walter C, Lange H A, et al. Microalgae as natural sources for antioxidative compounds[J]. **Journal of Applied Phycology**, 2012, 24(5):1133-1139.
- [5] Fitzgerald R J, Murray B A. Bioactive peptides and lactic fermentations[J]. **International Journal of Dairy Technology**, 2006, 59(2): 118-125.
- [6] Morris H J, Carrillo O, Almarales A, et al. Immunostimulant activity of an enzymatic protein hydrolysate from green microalga

- Chlorella vulgaris on undernourished mice[J]. **Enzyme and Microbial Technology**, 2007, 40(3): 456–460.
- [7] Sheih I C, Fang T J, Wu T K, et al. Anticancer and antioxidant activities of the peptide fraction from algae protein waste[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2010, 58(2): 1202–1207.
- [8] Fleurence J. Seaweed proteins: Proteins in food processing[M]. [S.I.]: Woodhead Publishing Ltd, 2004: 197–213.
- [9] Fleurence J. Seaweed proteins: Biochemical, nutritional aspects and potential uses[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 1999, 10(1): 25–28.
- [10] Becker W. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology[M]. New York: Wiley, 2004: 312–351.
- [11] Ruperez P, Saura C F. Dietary fibre and physicochemical properties of edible spanish seaweeds[J]. **European Food Research and Technology**, 2001, 212(3): 349–354.
- [12] Harnedy P A, Fitzgerald R J. Bioactive proteins, peptides, and amino acids from macroalgae[J]. **Journal of Phycology**, 2011, 47(2): 218–232.
- [13] Yada R Y. Proteins in food processing [M]. [S.I.]: Woodhead Publishing Ltd, 2004: 686.
- [14] Marsham S, Scott G W, Tobin M L. Comparison of nutritive chemistry of a range of temperate seaweeds[J]. **Food Chemistry**, 2007, 100(4): 1331–1336.
- [15] Morist A, Montesinos J L, Cusido J A, et al. Recovery and treatment of *Spirulina platensis* cells cultured in a continuous photobioreactor to be used as food[J]. **Process Biochemistry**, 2001, 37: 535–547.
- [16] Lu Y M, Xiang W Z, Wen Y H. *Spirulina* (Arthrospira) industry in inner monogolia of China : current status and prospects[J]. **Journal of Applied Phycology**, 2011, 23(2): 265–269.
- [17] Schwenzfeier A, Wierenga P A, Gruppen H. Isolation and characterization of soluble protein from the green microalgae *Tetraselmis* sp. [J]. **Bioresourch Technology**, 2011, 102:9121 – 9127.
- [18] Schwenzfeier A, Helbig A, Wierenga P A, et al. Emulsion properties of algae soluble protein isolate from *Tetraselmis* sp.[J]. **Food Hydrocolloids**, 2013, 30:258 – 263.
- [19] Guil G J L, Navarro J R, Lopez M J C, et al. Functional properties of the biomass of three microalgal species[J]. **Journal of Food Engineering**, 2004, 65(4): 511–517.
- [20] 彭卫民, 唐莉, 经莉莉, 等. 螺旋藻与藻胆蛋白[J]. 资源开发与市场, 2000 (4): 206–207.
PENG Weimin, Tang Li, JING Lili, et al. *Spirulina* and phycobiliproteins[J]. **Resource Development & Market.**, 2000 (4):206–207.(in Chinese)
- [21] Niu J F, Wang G C, Tseng C K. Method for large-scale isolation and purification of R-phycoerythrin from red alga *Polysiphonia urceolata* grev[J]. **Protein Expression and Purification**, 2006, 49(1): 23–31.
- [22] Eriksen N T. Production of phycocyanin – a pigment with applications in biology, biotechnology, foods and medicine[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2008, 80(1): 1–14.
- [23] Dawczynski C, Schubert R, Jahreis G. Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products[J]. **Food Chemistry**, 2007, 103(3): 891–899.
- [24] Ngo D H, Wijesekara I, Vo T S, et al. Marine food-derived functional ingredients as potential antioxidants in the food industry: An overview[J]. **Food Research International**, 2011, 44(2): 523–529.
- [25] Guedes A C, Amaro H M, Malcata F X. Microalgae as sources of high added-value compounds—a brief review of recent work[J]. **Biotechnology Progress**, 2011, 27(3): 597–613.
- [26] Sheih I C, Wu T K, Fang T J. Antioxidant properties of a new antioxidative peptide from algae protein waste hydrolysate in different oxidation systems[J]. **Bioresourch Technology**, 2009, 100(13): 3419–3425.
- [27] Heo S J, Jeon Y J. Radical scavenging capacity and cytoprotective effect of enzymatic digests of *Ishige okamurae*[J]. **Journal of Applied Phycology**, 2008, 20(6): 1087–1095.
- [28] Sheih I C, Fang T J, Wu T K. Isolation and characterisation of a novel angiotensin I-converting enzyme (ACE) inhibitory peptide from the algae protein waste[J]. **Food Chemistry**, 2009, 115(1): 279–284.
- [29] Cardozo K H M, Guaratini T, Barros M P, et al. Metabolites from algae with economical impact[J]. **Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology**, 2007, 146: 60–78.
- [30] Brown C E. Interactions among carnosine, anserine, ophidine and copper in biochemical adaptation[J]. **Journal of Theoretical**

- Biology**, 1981, 88: 245–256.
- [31] Guru M M S, Kumar P S M, Vasanthi M, et al. Anticoagulant property of sulphated polysaccharides extracted from marine brown algaecollected from Mandapam Island, India[J]. **African Journal of Biotechnology**, 2013, 12(16):1937–1945.
- [32] Matsubara K, Sumi H, Hori K. Platelet aggregation is inhibited by phycolectins[J]. **Experientia**, 1996, 52(6): 540–543.
- [33] Athukorala Y, Lee K W, Kim S K, et al. Anticoagulant activity of marine green and brown algae collected from Jeju Island in Korea [J]. **Bioresource Technology**, 2007, 98: 1711–1716.
- [34] 陈国强, 郑怡, 林勇, 等. 3种海藻的粗蛋白对植物病原真菌的抑制作用[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008, 24(2):67–70.
CHEN Guoqiang, ZHEN Yi, LIN Yong, et al. Inhibition of plant pathogenic fungi by crude proteins from three marine algae[J]. **Journal of Fujian University: Natural Science Edition**, 2008, 24(2):67–70. (in Chinese)
- [35] 刘士伟. 螺旋藻降解肽的分离制备及其抑菌性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [36] Kawakubo A, Makino H, Ohnishi J I, et al. The marine red alga *Eucheuma serra* J. Agardh, a high yielding source of two isolectins [J]. **Journal of Applied Phycology**, 1997, 9(4): 331–338.
- [37] Hamman M T, Otto C S, Scheuer P J, et al. ChemInform abstract: Kahalalides: Bioactive peptides from a marine mollusk *Elysia rufescens* and its algal diet *Bryopsis* sp. [J]. **Journal of Organic Chemistry**, 1998, 63(14): 4856–4856.
- [38] Suarez Y, Gonzalez L, Cuadrado A, et al. Kahalalide F, a new marine-derived compound, induces oncosis in human prostate and breast cancer cells[J]. **Molecular Cancer Therapeutics**, 2003, 2(9): 863–872.
- [39] Subhashini J, Mahipal S V K, Reddy M C, et al. Molecular mechanisms in C-Phycocyanin induced apoptosis in human chronic myeloid leukemia cell line-K562[J]. **Biochemical Pharmacology**, 2004, 68(3): 453–462.
- [40] Anusheel V, Vijayata S. Effects of algal compounds on cancer cell line[J]. **Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences**, 2013, 1(5): 337–352.
- [41] Vikrant A, Gupta V K. A review on marine immunomodulators[J]. **International Journal of Pharmacy and Life Sciences** , 2011, 2(5): 751–758.
- [42] 王连芬, 庞广昌, 米小媛. 螺旋藻蛋白水解物对小鼠血清中细胞因子的影响[J]. 海洋科学, 2008, 32(10): 51–55.
WANG Lianfen, PANG Guangchang, Mi Xiaoyuan. The effect of spirulina protein hydrolysates on cytokines in the serum of mice [J]. **Marine Sciences**, 2008, 32(10):51–55. (in Chinese)
- [43] 王韵, 蔡智辉, 张逸波, 等. 富硒螺旋藻蛋白水解多肽的制备及其对 ACE 活性的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2013, 29(7): 1574–1579.
WANG Yun, CAI Zhihui, ZHANG Yibo, et al. Preparation of polypeptides by hydrolysis of selenium-enriched spirulina protein and their inhibitory activity for angiotensin-converting enzyme[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2013, 29(7):1574–1579.(in Chinese)
- [44] Spolaore P, Joannis C C, Duran E, et al. Commercial applications of microalgae[J]. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 2006, 101(2): 87–96.
- [45] Kuddus M, Singh P, Thomas G, et al. Recent developments in production and biotechnological applications of C-phycoyanin[M]. [S.L.]: BioMed Research International, 2013.
- [46] Balskus E P, Walsh C T. The genetic and molecular basis for sunscreen biosynthesis in cyanobacteria[J]. **Science**, 2010, 329 (5999): 1653–1656.
- [47] Llewellyn C A, Airs R L. Distribution and abundance of MAAs in 33 species of microalgae across 13 Classes[J]. **Marine Drugs**, 2010, 8(4): 1273–1291.
- [48] Borowitzka M A. High-value products from microalgae- their development and commercialisation[J]. **Journal of Applied Phycology**, 2013, 25(3):743–756.