

微藻生物分子在动物和水产养殖饲料中的应用

苏 怡 高保燕 张成武*

暨南大学生态学系 / 水生生物研究中心, 广州 510632

摘要 微藻生物作为生物燃料的研究已很普遍,而微藻生物用于动物饲料也获得了大量关注。藻类可以在陆地上培养,也可以通过其他合适的方式获得藻类产品。本文是关于藻类满足动物和水产养殖饲料中的营养物质的最新概括性报道。除了应用在动物或水产养殖饲料中,藻类还能产生许多生物分子(包括虾青素、叶黄素、 β -胡萝卜素、叶绿素、藻胆蛋白、多不饱和脂肪酸(PUFAs)和 β -1,3-葡聚糖),在药物及营养食品方面亦具有重要的商业价值。本文主要讲述了藻类产品作为动物及水产养殖饲料添加剂在家畜、家禽饲养和水产养殖方面的应用。

关键词 微藻;生物分子;营养物质;类胡萝卜素;水产养殖;动物饲料

藻类的营养组成已经被充分了解,主要含有蛋白质、碳水化合物、脂肪和微量营养成分(包括维生素、抗氧化剂和微量元素)。藻类中的这些天然成分可以替代人类食品和动物饲料中的人工合成成分或可以满足人们对这些添加成分日益增长的需求。动物蛋白的消耗逐渐增长,人类对于高质量的鱼和动物蛋白的需求也不断加大。考虑到鱼粉这一传统水产品的蛋白质来源的有限性和昂贵性,藻类的营养成分被视为一种新的能代替传统水产和动物饲料的资源而迅速获得重视。藻类是一类多样化的生物体,大小范围从微小的单细胞到大型的海藻。它们大多是光合自养的种类,包括真核生物和原核的蓝藻和细菌。根据体积大小和形状,藻类可分为微藻(藻类的形态需要通过显微镜才能观察到)和大型藻(肉眼可见)^[1]。藻类培养开始于 19 世纪末 20 世纪初,微藻的大量培养开始于 1910 年,ALLEN 和 NELSON 培养小球藻(*Chlorella* sp.)用于水产养殖(德国柏林)^[2]。目前,微藻似乎在解决能源、环境和食品危机方面扮演关键角色。

本文涉及的藻类生物分子产品包括虾青素、叶

黄素、 β -胡萝卜素、叶绿素、藻胆蛋白、多不饱和脂肪酸(PUFAs)和 β -1,3-葡聚糖,以及可用于药物及营养食品的化合物。本文也强调了生物分子在家畜、家禽和水产养殖尤其是虾类养殖中的应用^[3]。微藻在动物和水产饲料中扮演了重要的角色,营养学和毒理学的评估表明了藻类生物质可作为一种有价值的饲料添加剂替代传统的动物饲料来源。因此,本文将讨论微藻生物质用作饲料产品可能会促使微藻的大量培养以用于商业的趋势。

1 虾青素

虾青素是一种在紫罗酮环 3 和 3' 两端具有两个不对称羟基的分子,由于其天然的抗氧化特性被认为是超级维生素 E^[4-8]。作为一种天然的色素,虾青素的主要市场是在水产养殖中作为色素来源^[9]。天然的虾青素可以由雨生红球藻(*Haematococcus*)、小球藻(*Chlorococcum* sp.)和法夫酵母(*Xanthophyllomyces dendrorhous*)产生^[10-13]。关于其油脂代谢和抗氧化防御机制的研究表明虾青素可以降低血脂

收稿日期:2015-11-25

苏 怡,女,1991 年生,在读硕士研究生。

* 通讯作者

译文来源于:YAAKOB Z,ALI E,ZAINAL A,et al. An overview:biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture [J].Journal of Biological Research-Thessaloniki,2014,21(1): 6.

增加抗氧化性。虾青素被认为是鲑和虹鳟最重要的类胡萝卜素来源,并且鲑无法合成虾青素必须通过饲料提供^[14]。因而随着鲑养殖量的增加,虾青素来源的需求也不断增大^[15]。虾青素作为类胡萝卜素中的一种,具有重要的应用价值,经常被用于营养产品、化妆品、食品和饲料行业。在水产养殖中,它被用于饲养鲑鱼、虾类、观赏性鱼和海鲷。最新报告表明,在饲料中添加雨生红球藻,尤其是添加 3 g/kg 剂量的饲料中更加能提高虹鳟鱼的抗氧化性和其他一些生化参数^[16]。虾青素不只是可以提供色素,且一直被认为有保护机体免受各种疾病的能力,有相当大应用于人类健康的潜力。天然虾青素也被发现有治疗由幽门螺杆菌引发的功能性消化不良的作用^[17]。太阳光的紫外线辐射是引发皮肤癌的主要环境因素,虾青素已被证明能在人类皮肤纤维细胞中作为防止紫外线诱导 DNA 损伤的物质^[18]。

流行病学研究已经证明了类胡萝卜素摄入量的增加与减少冠心病的发病率、某些癌症病变率和黄斑病病变率以及增加抗病毒、细菌、真菌和寄生虫感染能力有关^[19]。虾青素市场价格的变化主要取决于其在藻类中所占的百分比,然而,整体而言虾青素含量为 5% 的藻粉售价大约为 1 900 美元/kg^[20]。

2 叶黄素

叶黄素是存在于藻类中另一种重要的类胡萝卜素。它在人类血清和食物中含量显著^[21]。叶黄素被用于动物组织和产品的天然颜色来源。它被认为是食品、药品和化妆品中的重要天然色素。也被证明在延缓慢性病、刺激免疫反应、预防白内障及早期动脉粥样硬化、防止失明或视力下降和与年龄相关的黄斑性病变等方面有重要作用^[22-24]。2004 年叶黄素全球市场销售额有 1.39 亿美元,并认为是预计消费量最快的单一类胡萝卜素。叶黄素的最近市场价值为 2.33 亿美元(2010 年),预计将达到 3.09 亿美元(2018 年),复合增长率约为 3.6%^[23]。法国万寿菊 (*Tagetes patula* L.) 是目前世界上叶黄素最主要的来源,在美国,两种包含叶黄素的产品 Aztec Marigold 和 Tagetes 已经被产业化^[24]。叶黄素经常从三种不同的万寿菊(红色、黄色和橘色)中提取,橘色的万寿菊是叶黄素含量最高的。然而大规模种植万寿菊需占用大面积的土地,而且其生长也易受到季节和气候变化的影响^[25]。虽然还没有建立起微藻

生产叶黄素的商业系统,但是栅藻 (*Scenedesmus* sp.) 生产叶黄素的户外生产试点已经建立^[3]。有报道指出,类胡萝卜素具有抗氧化特性和降低一些慢性病发病率的能力,可能是类胡萝卜素抑制了单氧原子受损保护细胞不被氧化^[26]。因此,藻类中的类胡萝卜素可以成为一种引领天然资源潜力开发的原料。绿藻被认为是叶黄素主要来源,尤其是小球藻和栅藻 (*Scenedesmus* sp.)。研究表明,异养培养的小球藻能够积累可观的叶黄素。在发酵罐中培养异养生长的小球藻给产业化生产小球藻提供了可选择的方法^[27]。

3 β -胡萝卜素

β -胡萝卜素是一种需求量大、市场应用广泛的色素。作为食用色素、维生素 A 源(视黄醇)在食品和动物饲料中广泛应用,也可以作为化妆品添加剂和复合维生素制剂和抗氧化剂类的健康食品。在 2009 年, β -胡萝卜素的市场价值估计是 2.53 亿美元^[3]。有报告指出,在 2018 年 β -胡萝卜素市场价值将达到 3.34 亿美元,复合年增长率为 3%^[3]。

由于天然的资源供应有限,许多公司已经推出了类胡萝卜素的综合生产以满足全球市场的高需求。 β -胡萝卜素作为一种维生素 A 源,是唯一能产生两分子维生素 A 的类胡萝卜素^[28]。天然的 β -胡萝卜素可以由盐生杜氏藻 (*Dunaliella* sp.) 产生,盐生杜氏藻在生长后期藻液的颜色从绿色变成橙色,可能就是由于产生了大量的 β -胡萝卜素^[29]。盐生杜氏藻分布在海洋、咸水湖、盐沼等含有超过 2 mol/L 盐度和高镁浓度的水体中。盐生杜氏藻被认为是最耐盐的真核光合生物,它对盐的耐受度为 0.1 ~ 4.0 mol/L^[30]。单细胞真核的巴氏杜氏藻 (*Dunaliella bardawil*) 也具有高含量的 β -胡萝卜素,由顺式异构体和反式异构体组成。 β -胡萝卜素是维生素 A 的结构类似物,它可以有效地治疗皮肤黄褐斑^[31]。据报道,盐生杜氏藻产生的 β -胡萝卜素可以通过体内抗氧化效应抵抗运动诱发的哮喘^[32]。年龄相关性黄斑变性是一种很普遍的眼疾,可导致永久性的失明,一种由高剂量的抗氧化性维生素 C、维生素 E、 β -胡萝卜素和锌组成的抗氧化剂可以治疗该类病变^[33-34]。

4 叶绿素

叶绿素是一种绿色的色素,是极其重要的生物分子,也是光合作用的关键组成成分,能使植物吸

收光能固定 CO₂。叶子最绿的部分约包含 0.3% 的叶绿素,用传统方法提取出来的仅占 0.005%^[35]。叶绿素的来源十分廉价,如草和紫花苜蓿。在较彻底的抽提过程中,通常用有刺的和老的树叶,而藻类和蚕蛹的粪便也被认为是好的选择^[36]。

从结构上看,叶绿素分子可分为两个部分:核心部分是一个卟啉环,另一部分是一个很长的脂肪烃侧链,称为植醇,叶绿素用这种侧链插入到类囊体膜^[37]。食用的叶绿素主要由叶绿素 a 和叶绿素 b 组成的亲脂性衍生品^[38]。叶绿素钠 / 铜的衍生物经常被用作食品或饮料的添加剂,叶绿素铜钠盐在美国就是一种批准使用的色素^[39]。此外,它还可以修复细胞、增加血红蛋白在血液中的含量、促进细胞生长^[5]。至于叶绿素的细胞毒性衍生物——脱镁叶绿酸和脱镁叶绿素,研究发现它们具有抑制肿瘤细胞生长的能力,从细胞吸收和抑制骨髓瘤细胞的多样性方面来看,脱镁叶绿酸比脱镁叶绿素要强,这些研究结果表明叶绿素的衍生物可能在防癌方面起重要作用^[28]。此外,慢性复发性胰腺炎可以用叶绿素 a 治疗,并且无不良副作用^[40]。

叶绿素同时也被作为潜在的化妆品添加色素在进行研究,棕色和红色的微藻是最多被用于化妆品行业的藻类。此外在食品行业中,叶绿素也作为食品加工中的天然色素,因为它是强烈的绿色色素并且也可以满足消费者对天然食品的需求,所以叶绿素成为了重要的食品添加剂^[5]。这样反过来也鼓励食品加工从添加人工色素转变为添加以叶绿素为基础的天然色素。然而这需要从藻类中获取更多纯的叶绿素 a 和叶绿素 b^[5]。

5 藻胆蛋白

藻胆蛋白是一种高潜能的生物分子,在商业上已被使用,作为一种染料和制药工业上的一种应用物质。根据紫外可见光吸收值可分为藻蓝蛋白、藻红蛋白和别藻蓝蛋白。每年藻蓝蛋白市场大约在 500 万 ~ 1 000 万美元^[41]。蓝藻(蓝细菌)门中的螺旋藻属(*Spirulina* sp.)是 C-藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白的重要来源,且含有较低的核酸成分,细胞主要生化组成成分为 55% ~ 70% 的蛋白质、6% ~ 9% 的脂肪和 15% ~ 20% 的碳水化合物,还有丰富的矿物质、维生素、纤维素和色素^[42]。另一种类型的微藻也是藻胆蛋白的重要来源——丝囊藻属^[43]。节旋藻

(*Arthrospira* sp.)是一种蓝藻(蓝细菌),其特点是由松散的螺旋状藻殖段排列在一个开放的螺旋粘鞘内。节旋藻通常存在于碱性水、咸水和盐水水域中,它们通常是形成水华的主要物种^[44]。藻胆蛋白可以绑定在生物活性分子上,在抗体标记方面有着潜在的应用,比如绑定免疫球蛋白、生物素或其他蛋白质^[45]。研究表明,多复合的协同抗氧化剂比单一的抗氧化剂要好,天然的抗氧化剂有更高的生物利用率,相对于人工合成的抗氧化剂而言有更好的防护能力^[46-47]。据报道,藻胆蛋白作为一种具有去除氧化自由基能力的分子表现出较强的化学防癌功能。据证明,藻胆蛋白在抵抗人类红细胞中由过氧化氢自由基引发的溶血现象的能力是抗坏血酸的 20 倍。

6 多不饱和脂肪酸

多不饱和脂肪酸包括二十二碳六烯酸(DHA)、二十碳五烯酸(EPA)、花生四烯酸(AA)和 γ -亚麻酸等,被认为对人体十分有益^[48]。在 2011 年天然的脂肪酸市场达到了 7 200 万美元,预计在 2017 年将达到 1 亿 300 万美元^[28]。

天然的多不饱和脂肪酸可以从鱼或鱼油中提取。然而,有报道称从鱼类资源中提取的多不饱和脂肪酸可能会积累毒素。此外,还有难闻的味道、品感和氧化稳定性较弱的特点。这些都限制了鱼油作为食品添加剂的应用。而 EDTA 的应用就是通过加铁来抑制鱼或藻类中长链不饱和脂肪酸的氧化^[49]。此外,最近的一项研究表明,人类大多数在饮食中摄入的不饱和脂肪酸还不足 450 mg/d。这意味着成年人摄入的不饱和脂肪酸大约为 282 mg/d(主要是 DHA 和 EPA)。不可否认,藻类可以作为天然的不饱和脂肪酸的来源,鱼类中含有的不饱和脂肪酸其根源都是来自于藻类。而 DHA 是唯一一种在市场上可以买得到的从藻类中获得的以 ω -3 脂肪酸形式存在的多不饱和脂肪酸,并且被证明是主要的存在于大脑灰质中的结构性脂肪酸^[50]。DHA 对于婴儿的大脑和眼睛的发育具有重要作用,同时也被证明对于成年人的心血管健康有重要作用^[51]。DHA 可以协助身体抵抗疾病,最近的研究表明不饱和脂肪酸在免疫系统中也具有重要意义^[52]。

海洋微藻中富含的 DHA 比淡水微藻中多很多。DHA 存在于有限的食物类型中如多脂鱼类和有机肉类,也存在于天然的母乳中,但是在母乳中的

浓度受到环境因素的影响,因而奶牛奶中的 DHA 无法使用^[53]。自 1990 年以来,许多健康组织和营养组织特别推荐含 DHA 的早产儿及足月婴儿的婴儿配方奶粉^[54]。DHA 是寇氏隐甲藻(*Cryptocodinium cohnii*)的特色多不饱和脂肪酸,其接近 30%~50% 的脂肪酸成分是 DHA,其他多不饱和脂肪酸不超过 1%。所以很容易把 DHA 从其他混合的多不饱和脂肪酸中提取出来^[55]。由于这个原因,寇氏隐甲藻是一种很有价值用于商业生产 DHA 的资源^[56]。

拟微绿球藻(*Nannochloropsis* sp.)由于其具有较高的 EPA 产量也被认为是多不饱和脂肪酸的重要来源^[57]。因此拟微绿球藻产品被用作轮虫的饵料^[58]。EPA 不仅用于水产养殖业也被用作营养补充剂。硅藻是微藻 EPA 的主要来源比如三角褐指藻(*Phaeodactylum tricorutum*)等^[59]。牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)和球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)含有较丰富的 DHA 和 EPA,它们的最高 EPA 含量可分别达到干重的 3.5%和 4.8%^[60]。EPA 是一种 n-3 不饱和脂肪酸,在日常生活中有重要的生物学功能,能防治人类疾病,如心脏病和炎症^[61]。类花生酸包括前列腺素类、凝血恶烷类和白细胞三烯类的化合物都可以作为拟激素类药品。AA 和 EPA 都是类花生酸化合物的前体物质。然而,这两种脂肪酸构成的类花生酸在结构和功能上都不相同,有时甚至有完全相反的作用。均衡的摄取 EPA 和 AA 能预防类花生酸机能障碍,可以预防或治疗大量的疾病及代谢失调。紫球藻(*Porphyridium*)是一种单细胞红藻,因其含有相当高浓度的 EPA 和 AA 所以被大量培养。紫球藻的生物物质中还富含蛋白质(34.1%)、碳水化合物(32.1%)和主要的矿物质^[62]。AA 在作为营养物质被用于婴幼儿(足月婴儿及早产儿)配方奶粉中也非常有潜力。

除富含藻胆蛋白外,节旋藻(*Arthrospira*)被认为是最富含 γ -亚麻酸(GLA)的藻类资源。GLA 是足月产儿的奶粉配方中重要的成分,而且具有降低低密度脂蛋白的功能,它对高胆固醇血症患者的治疗有潜在的作用,并能缓解经前综合症、治疗局部湿疹^[63-64]。GLA 也能减缓炎症,如缓解风湿性关节炎和过敏性皮肤炎症。从动物及人体试验都表明在饮食中补充 GLA 能缓解炎症^[65]。

7 β -1,3-葡聚糖

β -1,3-葡聚糖被认为是负责启动主体进行防

御反应以应对病原体表面分子的物质。小球藻中最重要的成分除了油脂之外就是 β -1,3-葡聚糖。小球藻的全球年销售量超过 380 亿美元^[66]。在最初的 19 世纪 40 年代, β -1,3-葡聚糖在挪威被命名为酵母聚糖,因其最初是被发现于面包酵母的细胞壁中。1961 年 RIGGI & DI LUUZIO 在意大利进行进一步研究,此后,该生物活性物质被更名为 β -1,3-葡聚糖^[66]。19 世纪 70 年代,关于 β -1,3-葡聚糖的进一步研究在日本进行。 β -1,3-葡聚糖对人类的健康十分重要。给健康的鱼类喂食 β -1,3-葡聚糖免疫刺激剂能提高非特异性和特异性免疫水平,并且能够防止细菌感染^[67]。 β -1,3-葡聚糖在降低炭疽在鼠类中的传染有显著的预防性作用。同时也具有抑制癌细胞在体内生长的作用,包括刺激三种重要的细胞激素,在病人进行心肺分流术后、病毒活性的抑制和 HIV 感染的治疗中都有积极作用。此外, β -1,3-葡聚糖通常用于病人的肿瘤免疫治疗^[68]。 β -1,3-葡聚糖对经过化疗和放射性治疗的病人特别有好处,在射线致死和未致死的鼠类中, β -1,3-葡聚糖都表现出了明显的加速造血干细胞恢复的能力^[69-70]。还可刺激化疗后骨髓的恢复,这在治疗期间限制肿瘤生长和防止感染性并发症是非常重要的^[71]。AMPARYUP 等人认为模式识别蛋白(包括脂多糖和 β -1,3-葡聚糖结合蛋白(LGBP))可以提高虾的化酵素活性^[72]。

8 药物和营养食品

藻类有潜力成为抗生素和抗癌物质的化合物来源。微藻能产生多种抗生素,已知的包括有脂肪酸、其他有机酸、溴酚、酚类抑制剂、单宁、类萜、多糖和其他碳水化合物及酚类^[5]。多种多样的蓝藻产生的化合物包括硫脂质能有效地抵抗疱疹病毒、肺炎病毒和艾滋病毒^[73-74]。蓝藻能产生单歧藻毒素,是一种抗真菌的抗生素且对鼠类有高毒性^[75-76]。海洋蓝藻——巨大鞘丝藻(*Lyngbya majuscula*),能产生抗人类肺癌细胞和鼠类神经母细胞瘤细胞系的物质^[77-78]。此外,微藻可产生对生物神经系统或心血管系统具有高特异性作用的毒素^[9]。因此,藻类中一旦识别出有用的药用化合物且该化合物能被提取、纯化及销售,便可以大规模培养。某些微藻种类正被开发为皮肤护理的主要市场,主要包括节旋藻(*Arthrospira* sp.)和小球藻。许多化妆师甚至在自己

投资进行微藻生产。商业上有 2 个案例,声称可以利用他们公司的微藻产品对皮肤进行护理:1)从节旋藻中提取蛋白质丰富的物质,可以修复早期的皮肤老化现象,使皮肤紧致,防止形成皱纹^[6];2)从普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)中提取的物质可刺激皮肤胶原蛋白的形成,从而支持组织再生,减少皱纹。最近,彭塔法姆有限公司推出 2 个新产品,从拟微绿球藻(*Nannochloropsis* sp.)中提取出的一种化合物可以使皮肤紧缩,从盐生杜氏藻(*D. salina*)中提取出的原料被认为具有明显的刺激细胞增殖、影响皮肤代谢的作用^[6]。

9 家畜饲料

螺旋藻由于其优质的营养成分和可消化性被广泛用作饲料添加剂。家畜饲料是可以从藻类中制得的另一个有用的产品,对许多藻类物种进行生化组分测定后,确认为其具有替代家畜饲料中主要的成分适宜性^[79]。螺旋藻是一个含有独特营养物质的混合物,其营养物质包括复合维生素 b 族、矿物质、蛋白质、 γ -亚麻酸、超级氧化剂和许多未知的生物活性物质^[80]。相较于其他微生物,螺旋藻可以在高碱性条件下培养,对于作为家畜饲料的原料来说是一有利条件^[81]。最近,关于身体生长和构造的研究表明螺旋藻能增加生物的体重、生长同时对身体构象有显著影响^[82]。喂养胶囊化脂质的藻类添加产品可能会在对牛奶脂肪产量没有不良影响的情况下增加牛奶脂肪中的 n-3 脂肪酸的含量^[83]。

在牲畜饲料中补充 10 g/kg 的藻类物质可以有效降低牛奶中的脂肪含量,且可以改变牛奶中的脂肪酸组成,增加共轭亚麻酸(CLA)和二乙醇胺(DEA)的浓度^[84]。一个相关的研究表明,在泌乳早期的奶牛饮食中补充鱼粉和 n-3 不饱和脂肪酸,可以在不影响牛奶成分的情况下显著增加牛奶的产量^[86]。此外,一些海藻如红藻和褐藻,常被用于人类食品和牲畜饲料。每年全球的紫菜收获量估计达到 25 亿美元,紫菜藻(*Porphyra* sp.)中主要含有维生素 A、维生素 B、维生素 C、 β -胡萝卜素及主要的矿物质,包括碘。此外,一个关于昆布属藻(*Laminaria digitata*)类的研究表明,用藻类辅以饲料喂养,可使猪的体重每日增重达 10%^[1-5]。

10 家禽饲料

每年鸡的饲养量超过 500 亿只,它们的肉和

蛋,都被用作食物来源。全面的分析及营养学研究表明藻类中含有丰富的蛋白质,而且这些高质量的蛋白质比得上蔬菜中的蛋白质^[87]。GINZBERG 等人研究了紫球藻(*Porphyridium* sp.)作为饲料添加剂在鸡的新陈代谢中的作用^[88]。研究表明,蛋黄的胆固醇含量约减少 10%,且蛋黄的颜色变得更暗,有更高的类胡萝卜素含量^[89]。在家禽的饲料中,藻类的用量达到 5%~10%时可以安全地部分替代传统的蛋白质原料。但是长期较高浓度的喂养藻类可能会造成不良影响,喂食藻类可能对肉质尤其是小腿肉和蛋黄的颜色产生明显的影响。此外,德国一所研究所研究了一种喂养天然小球藻和节旋藻的方法,被称为藻类喂养^[90]。

11 水产养殖

由于在开放海域捕鱼的环境问题及人类对鱼的消费需求不断上升,2008 年全球养殖鱼类和水生食用植物市场总值为 1 060 亿美元^[91]。从捕捞鱼类和水产养殖相结合的产品中向世界市场提供的蛋白质量每年达到 1.42 亿 t(1980-2010 年),世界水产养殖的食用鱼量增加了近 12 倍,年均增长量为 8.8%。水产养殖品在 2010 年创造了历史新高达到 6 000 万 t,总价值约为 1 190 亿美元。无毒海洋藻类包括不等鞭毛藻类的球等边金藻(*Isochrysis galbana*)、拟微绿球藻(*Nannochloropsis* sp.)以及各种各样的硅藻,这些微藻代表了大部分饲养海洋动物在不同生命周期的主要食物来源^[1]。因此,未来藻类生物物质将在鱼饲料和水产养殖市场中有较高的需求量,为藻类产业提供充足的收入^[91]。

在鱼类营养学中的一个挑战是随着高水平的促进健康的 ω -3 长链脂肪酸被消费者日渐青睐,鱼油的使用不断减少。 ω -3 油在人类营养食品和动物饲料产业中有很高的市场需求。这种增长趋势对于非海洋形成的 ω -3 油和可代替饲料原料市场是一个额外的动力。藻类富含高质量蛋白质、维生素、微量元素、类胡萝卜素和长链不饱和脂肪酸,尤其是 n-3 和 n-6 系列。例如 EPA、DHA 和 AA 都被认为在药物和营养学方面有重要作用。藻粉富含高质量蛋白质、维生素、微量元素和类胡萝卜素,可以直接用于水产饲料^[90]。此外,鱼的甘油磷脂一般占其总脂肪酸含量的 50%左右,在 n-3 系列不饱和脂肪酸中 22:6(n-3)和 20:5(n-3)的比例约为 2:1^[92],

在鱼和蛋的甘油磷脂中能明显观察到。此外,在培养罗非鱼的时候发现用藻类作为饲料的营养来源能更好地增加鱼的体重和蛋白质含量^[5]。硅藻中,海链藻属(*Thalassiosira pseudonana*)被广泛用来喂养各种软体动物,包括太平洋牡蛎和岩石扇贝^[1]。此外,长链不饱和脂肪酸非常易被氧化,因为其天然的不饱和性,而在高不饱和的鱼油中添加天然的抗氧化剂可以有效地防止其被氧化^[92]。

12 虾类饲养

在 2003 年,全球养殖虾的总产量超过 160 万 t,总价值近 90 亿美元。虾类养殖量在 1998 年达 737 200 t,比 1997 年增长了 12%,这些增长量主要是在美国亚热带地区和东南亚地区^[59]。根据美国佛罗里达大学食品与资源经济系的虾类生产回顾中报道养殖虾的量在 2013 年估计有 400 万 t,每年的增长率约为 10.3%。然而,近年来疾病暴发影响了智利的大西洋鲑养殖、欧洲的牡蛎养殖、若干亚洲、南美洲和非洲国家的水产养殖,导致部分甚至全部虾类的死亡^[5]。在 2010 年,中国的水产养殖由于自然灾害、疾病和污染遭受了 170 万 t 的生产损失。2011 年,疾病的暴发几乎摧毁了整个莫桑比克的海水虾类养殖。鹿角沙菜(*Hypnea cervicornis*)和海萝属(*Cryptonemia crenulata*)尤其富含蛋白质,在虾类饮食中进行测试,在鱼粉中添加藻类可使虾类的增长率明显增加。在海洋鱼类和虾类养殖中喂食含 DHA 和 AA 的饲料使其营养中富含 DHA 已成为了一种模式。结果表明,在 DHA 和 AA 含量高的虾中表现出了高的免疫参数,如总的血细胞量、酵素活性、超氧化物活性和杀菌能力增强。最近,有报道指出,在虾的饲料中添加 5% 的螺旋藻和 14% 的秘鲁鱼粉是一种高营养效率的饲料。有两种海藻产品分别被命名为 MAP3 和 MAP48,在三种著名的养殖品种中被发现是十分合适替代饲料中蛋白质的来源。关于利用鱼油和藻类作为不饱和脂肪酸的来源的研究,现在的趋势更偏向于研究藻类产品^[89]。鲱鱼鱼油也可以用作饲料膳食中脂肪酸的来源,能影响太平洋白对虾的肌肉系统化合物结构,虾肌肉中 DHA 水平表现出显著的增加。鱼粉中含有的 DHA 是蜕皮、生长和产卵过程中蜕皮素形成所必需的,这种机制涉及到富含两个 DHA 分子的甘油磷脂的生物膜,构成相对稳定的环境,如温度、压力和盐度^[59]。

13 结 论

微藻具有产生多种昂贵产品的潜力,利用这些生物分子来满足世界人口日益增长的需求意识迫切需要被普及。大部分的这些生物分子至关重要但又不能被动物或者人类直接产生。因此,强烈建议将这些生物分子添加到食品或饲料中,来满足人类及动物的需求。然而从藻类中生产这些生物分子需要在技术方面进一步提高,在市场意识上不断加强。研究表明,可以利用藻类小规模或大规模的潜在生产资源。市场对于这些生物分子的需求刺激相关组织对藻类产品研究的兴趣。藻类因其可作为生物燃料的特征得到了广泛关注,但关于其培养技术的不断加强也可能引发利用其生物分子活性物质作为药物或营养产品的趋势。同时,一些生物分子可以来源于藻类制备生物燃料后的副产品。用藻类制备生物分子产品及其随后在动物饲养和水产养殖方面的应用可能可以扩大国内藻类的工业化规模。世界 82% 的鱼类资源被过度开发甚至濒临灭绝,但对鱼类蛋白质的需求却是爆炸式的。到 2050 年世界人口预计达到 90 亿,对蛋白质的需求将持续供不应求,开发新的蛋白质来源十分有必要。

参 考 文 献

- [1] GRAHAM J E, WILCOX W, GRAHAM L E. Introduction to the Algae—Occurrence, Relationships, Nutrition, Definition, General Features[M]. Algae San Antonio: Pearson Education, 2009: 1–14.
- [2] PREISIG H R, ANDERSEN R A. Historical review of algal culturing techniques. In Algal Culturing Techniques Edited by Andersen RA[M]. London: Elsevier Academic Press, 2005: 1–12.
- [3] DEL CAMPO J A, GARCÍA A-GONZÁLEZ M, GUERRERO M G. Outdoor cultivation of microalgae for carotenoid production: current state and perspectives[J]. Appl Microbiol Biot, 2007(74): 1163–1174.
- [4] SPOLAORE P, JOANNIS-CASSAN C, DURAN E, et al. Commercial applications of microalgae [J]. Biosci Bioeng, 2006 (101): 87–96.
- [5] HARUN R, SINGH M, FORDE G M, et al. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products[J]. Renew Sust Energ Rev, 2010(14): 1037–1047.
- [6] NAGUIB YMA. Antioxidant activities of astaxanthin and related carotenoids[J]. Ag Food Chem 2000(48): 1150–1154.
- [7] KUPCINSKAS L, LAFOLIE P, LIGNELL Å, et al. Efficacy of the natural antioxidant astaxanthin in the treatment of functional

- dyspepsia in patients with or without *Helicobacter pylori* infection: A prospective, randomized, double blind, and placebo-controlled study[J]. *Phytomedicine*, 2008(15):391-399.
- [8] NAKAGAWA K, KIKO T, MIYAZAWA T, et al. Antioxidant effect of astaxanthin on phospholipid peroxidation in human erythrocytes[J]. *Bri J Nutr*, 2011(105):1563-1571.
- [9] CANALES-GÓMEZ E, CORREA G, VIANA M T. Effect of commercial carotene pigments (astaxanthin, cantaxanthin and β -carotene) in juvenile abalone *Haliotis rufescens* diets on the color of the shell or nacre [J]. *Vet Mexico*, 2010(41):191-200.
- [10] DEL CAMPO J A, RODRÍGUEZ H, MORENO J, et al. Accumulation of astaxanthin and lutein in *Chlorella zofingiensis* (Chlorophyta)[J]. *Appl Microbiol Biot* 2004(64):848-854.
- [11] ZHAO L Y, CHEN G, ZHAO G, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* by response surface methodology and antioxidant activities of the extracts[J]. *Separ Sci Technol*, 2009(44):243-262.
- [12] RODRÍGUEZ-SÁIZ M, DE LA FUENTE J L, BARREDO J L. *Xanthophyllomyces dendrorhous* for the industrial production of astaxanthin[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2010(88):645-658.
- [13] YUAN J P, PENG J, YIN K, et al. Potential health-promoting effects of astaxanthin: a high-value carotenoid mostly from microalgae[J]. *Mol Nutr Food Res*, 2011(55):150-165.
- [14] YANG Y, SEO J M, NGUYEN A, et al. Astaxanthin-rich extract from the green alga *Haematococcus pluvialis* lowers plasma lipid concentrations and enhances antioxidant defense in apolipoprotein E knockout mice[J]. *Nutr*, 2011(141):1611-1617.
- [15] TOLASA S, CAKLI S, OSTERMEYER U. Determination of astaxanthin and canthaxanthin in salmonid[J]. *Eur Food Res Technol*, 2005(221):787-791.
- [16] DOMINGUEZ A, FERREIRA M, COUTINHO P, et al. Delivery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* to the aquaculture food chain[J]. *Aquaculture*, 2005(250):424-430.
- [17] GUERIN M, HUNTLEY M E, OLAIZOLA M. *Haematococcus astaxanthin*: applications for human health and nutrition[J]. *Trends Biotechnol*, 2003(21):210-216.
- [18] SHEIKHZADEH N, TAYEFI-NASRABADI H, OUSHANI A K, et al. Effects of *Haematococcus pluvialis* supplementation on antioxidant system and metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Fish Physiol Biochem*, 2012 (38):413-419.
- [19] LYONS N M, O'BRIEN N M. Modulatory effects of an algal extract containing astaxanthin on UVA-irradiated cells in culture [J]. *Dermatol Sci*, 2002(30):73-84.
- [20] CYSEWSKI G R, LORENZ R T. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products - species of high Potential; *Haematococcus* In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2004:281-288.
- [21] LANDRUM J T, BONE R A. Lutein, zeaxanthin, and the macular pigment[J]. *Arch Biochem Biophys*, 2001(385):28-40.
- [22] SHI X M, CHEN F, YUAN J P, et al. Heterotrophic production of lutein by selected *Chlorella* strains [J]. *Appl Phycol*, 1997(9):445-450.
- [23] ZHANG X W, SHI X M, CHEN F. A kinetic model for lutein production by the green microalga *Chlorella protothecoides* in heterotrophic culture[J]. *Ind Microbiol Biot*, 1999(23):503-507.
- [24] WU Z Y, SHI C L, SHI X M. Modeling of lutein production by heterotrophic *Chlorella* in batch and fed-batch cultures[J]. *World J Microb Biot*, 2007(23):1233-1238.
- [25] BHATTACHARYYA S, DATTA S, MALLICK B, et al. Lutein content and in vitro antioxidant activity of different cultivars of Indian marigold flower (*Tagetes patula* L.) extracts[J]. *Agr Food Chem*, 2010(58):8259-8264.
- [26] CHRISTAKI E, BONOS E, GIANNENAS I, et al. Functional properties of carotenoids originating from algae[J]. *Sci Food Agr*, 2012(93):5-11.
- [27] WEI D, CHEN F, CHEN G, et al. Enhanced production of lutein in heterotrophic *Chlorella protothecoides* by oxidative stress[J]. *Sci China Ser C* 2008, 51:1088-1093.
- [28] BECKER W. Microalgae in human and animal nutrition In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2004:312-351.
- [29] LERS A, BIENER Y, ZAMIR A. Photoinduction of massive β -carotene accumulation by the alga *Dunaliella bardawil*: Kinetics and dependence on gene activation [J]. *Plant Physiol*, 1990(93):389-395.
- [30] BEN-AMOTZ A. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products - major industrial species *Dunaliella* In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. UK: Blackwell Publishing Ltd, 2004:273-280.
- [31] KAR H K. Efficacy of beta-carotene topical application in melasma: an open clinical trial [J]. *Indian Dermatol Ve*, 2002(68):320-322.
- [32] NEUMAN I, NAHUM H, BEN-AMOTZ A. Prevention of exercise-induced asthma by a natural isomer mixture of β -carotene[J]. *Ann Allerg Asthma Im*, 1999(82):549-553.
- [33] HR T, TIKELLIS G, ROBMAN L D, et al. Vitamin E supplementation and macular degeneration: randomized controlled trial [J]. *BMJ*, 2002(325):11-14.
- [34] HALL N F. Prevention of age related, macular degeneration [J]. *BMJ*, 2002(325):1-2.
- [35] HUMPHREY A M. Chlorophyll[J]. *Food Chem*, 1980(5):57-67.
- [36] HUMPHREY A M. Chlorophyll as a color and functional ingredient[J]. *Food Sci*, 2004(69):C422-C425.
- [37] FERRUZZI M G, BLAKESLEE J. Digestion, absorption, and cancer preventative activity of dietary chlorophyll derivatives[J]. *Nutr Res*, 2007(27):1-12.

- [38] GANDUL R B, GALLARDO G L, M í NGUEZ-MOSQUERA I M. Influence of the chlorophyll pigment structure on its transfer from an oily food matrix to intestinal epithelium cells [J]. *Agr Food Chem*, 2009(57):5306-5314.
- [39] SCOTTER M J, CASTLE L, ROBERTS D. Method development and HPLC analysis of retail foods and beverages for copper chlorophyll (E141[i]) and chlorophyllin (E141[ii]) food colouring materials [J]. *Food Addit Contam*, 2005(22):1163-1175.
- [40] YOSHIDA A, YOKONO O, ODA T. Therapeutic effect of chlorophyll-a in the treatment of patients with chronic pancreatitis [J]. *Gastroenterol Jpn*, 1980(15):49-61.
- [41] SEKAR S, CHANDRAMOHAN M. Phycobiliproteins as a commodity: trends in applied research, patents and commercialization [J]. *Appl Phycol*, 2008(20):113-136.
- [42] BOUSSIBA S, RICHMOND A E. Isolation and characterization of phycocyanins from blue green algae *Spirulina platensis* [J]. *Arch Microbiol*, 1979(120):155-159.
- [43] BENEDETTI S, BENVENUTI F, PAGLIARANI S, et al. Antioxidant properties of a novel phycocyanin extract from the blue-green alga *Aphanizomenon flosaquae* [J]. *Life Sci*, 2004(75):2353-2362.
- [44] HU Q. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products- major industrial species *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2004:264-272.
- [45] SHAPIRO H M, GLAZER A N, CHRISTENSON L, et al. Immunofluorescence measurement in a flow cytometer using low-power helium-neon laser excitation [J]. *Cytometry* 1983, 4: 276-279.
- [46] PATEL A, MISHRA S, GHOSH P K. Antioxidant potential of C-phycocyanin isolated from cyanobacterial species *Lyngbya*, *Phormidium* and *Spirulina* spp [J]. *Indian J Biochem Bio*, 2006(43):25-31.
- [47] CHEN T, WONG Y S. *In vitro* antioxidant and antiproliferative activities of selenium-containing phycocyanin from selenium-enriched *Spirulina platensis* [J]. *Agr Food Chem*, 2008(56):4352-4358.
- [48] GIVENS D I, GIBBS R A. Very long chain n-3 polyunsaturated fatty acids in the food chain in the UK and the potential of animal-derived foods to increase intake [J]. *Nutrition Bull*, 2006(31):104-110.
- [49] FRANKEL E N, SATU é -GRACIA T, MEYER A S, et al. Oxidative stability of fish and algae oils containing long-chain polyunsaturated fatty acids in bulk and in oil-in-water emulsions [J]. *J Agri Food Chem*, 2002(50):2094-2099.
- [50] BRADBURY J. Docosahexaenoic Acid (DHA): an ancient nutrient for the modern human brain [J]. *Nutrients*, 2011(3):529-554.
- [51] COTTIN S C, SANDERS T A, HALL W L. The differential effects of EPA and DHA on cardiovascular risk factors [J]. *P Nutr Soc*, 2011(70):215-231.
- [52] TANIGAI T, UEKI S, KIHARA J, et al. Docosahexaenoic Acid exerts anti-inflammatory action on human eosinophils through peroxisome proliferator-activated receptor-independent mechanisms [J]. *Int Arch Allergy Imm*, 2012(158):375-386.
- [53] THIOMBIANO C N, ROCQUELIN G, EYMARD D S, et al. Seasonal and environmental effects on breast milk fatty acids in Burkina Faso and the need to improve the omega 3 PUFA content [J]. *Acta Paediatr*, 2003(92):1388-1393.
- [54] DA SILVA T L, MENDES A, MENDES R L, et al. Effect of n-dodecane on *Cryptocodinium cohnii* fermentations and DHA production [J]. *Ind Microbiol Biot*, 2006(33):408-416.
- [55] JIANG Y, CHEN F, LIANG S Z. Production potential of docosahexaenoic acid by the heterotrophic marine dinoflagellate *Cryptocodinium cohnii* [J]. *Process Biochem*, 1999(34):633-637.
- [56] MILLEDGE J J. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review [J]. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2011(10):31-41.
- [57] ZITTELLI G C, RODOLFI L, TREDICI M R. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products - species of high potential: mass cultivation of *Nannochloropsis* in Closed Systems In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd; 2004:298-303.
- [58] ZAMORA O, RICHMOND A. Microalgae production for aquaculture In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2004:365-379.
- [59] HEMAISWARYA S, RAJA R, KUMAR R R, et al. Microalgae: a sustainable feed source for aquaculture [J]. *World J Microb Biot*, 2011(27):1737-1746.
- [60] ZHANG C W, RICHMOND A. Sustainable, high-yielding outdoor mass cultures of *Chaetoceros muelleri* var *subsalsum* and *Isochrysis galbana* in vertical plate reactors [J]. *Mar Biotechnol*, 2003(5):302-310.
- [61] WEN Z-Y, CHEN F. Heterotrophic production of eicosapentaenoic acid by microalgae [J]. *Biotechnol Adv*, 2003, 21:273-294.
- [62] ARAD S, RICHMOND A. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products - Species of high potential: *Porphyridium* sp In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2004:289-297.
- [63] JOHNSON M M, SWAN D D, SURETTE M E, et al. Dietary supplementation with g-linolenic acid alters fatty acid content and eicosanoid production in healthy humans [J]. *Nutr*, 1997(127):1435-1444.
- [64] FAN Y Y, CHAPKIN R S. Importance of dietary g-linolenic acid in human health and nutrition [J]. *Nutr*, 1998(128):1411-1414.
- [65] YAMAGUCHI K. Recent advances in microalgal bioscience in

- Japan, with special reference to utilization of biomass and metabolites: a review[J]. *Appl Phycol*, 1997(8):487-502.
- [66] RIGGI S J, DI LUZIO N R. Identification of a reticuloendothelial stimulating agent in zymosan [J]. *Am J Physiol*, 1961(200):297-300.
- [67] SAHOO P K, MUKHERJEE S C. Effect of dietary beta-1,3 glucan on immune responses and disease resistance of healthy and aflatoxin B1-induced immunocompromised rohu (*Labeo rohita* Hamilton) [J]. *Fish Shellfish Immun*, 2001(11):683-695.
- [68] IWAMOTO H. Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products - major industrial species *Chlorella* In *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* [M]. Edited by Richmond A. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2004:255-263.
- [69] VETVICKA V, YVIN J C. Effects of marine β -1,3 glucan on immune reactions [J]. *International immunopharmacology* 2004, 4(6):721-730.
- [70] BLAYLOCK R L. Yeast β -1,3-glucan and its use against anthrax infection and in the treatment of cancer [J]. *Am Nutraceutical Assoc*, 2002(5):3-4.
- [71] VETVICKA V, TERAYAMA K, MANDEVILL R, et al. Pilot study: orally-administered yeast β 1,3-glucan prophylactically protects against anthrax infection and cancer in mice [J]. *Am Nutraceutical Assoc*, 2002(5):1-5.
- [72] AMPARYUP P, SUTTHANGKUL J, CHAROENSAPSRI W, et al. Pattern recognition protein binds to lipopolysaccharide and beta-1,3-glucan and activates shrimp prophenoloxidase system [J]. *Biol Chem*, 2012, 287:10060-10069.
- [73] GUSTAFSON K R, CARDELLINA J H 2ND, FULLER R W, et al. AIDS-antiviral sulfolipids from cyanobacteria (blue-green algae) [J]. *Natl Cancer I*, 1989(81):1254-1258.
- [74] ARCHER S D, MCDONALD K A, JACKMAN A P. Effect of light irradiance on the production of sulfolipids from *Anabaena* 7120 in a fed-batch photobioreactor [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 1997(67):139-152.
- [75] CARMELI S, MOORE R E, PATTERSON G M L. Tolytoxin and new scytonophycins from three species of *Scytonema* [J]. *Nat Prod*, 1990(53):1533-1542.
- [76] PATTERSON G M L, CARMELI S. Biological effects of tolytoxin (6-hydroxy-7-O-methyl-scytonophycin b), a potent bioactive metabolite from cyanobacteria [J]. *Arch Microbiol*, 1992(157):406-410.
- [77] HAN B, GROSS H, GOEGER D E, et al. Aurilides B and C, cancer cell toxins from a Papua New Guinea collection of the marine cyanobacterium *Lyngbya majuscula* [J]. *Nat Prod*, 2006(69):572-575.
- [78] GROSS H, GOEGER D E, HILLS P, et al. Lophocladines, bioactive alkaloids from the red alga *Lophocladia* sp [J]. *Nat Prod*, 2006(69):640-644.
- [79] SINGH J, GU S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production [J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2010(14):2596-2610.
- [80] KULSHRESHTHA A, ZACHARIA A J, JAROULIYA U, et al. *Spirulina* in health care management [J]. *Curr Pharm Biotechnol*, 2008(9):400-405.
- [81] COSTA J A, DE MORAIS M G, DALCANTON F, et al. Simultaneous cultivation of *Spirulina platensis* and the toxigenic cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* [J]. *Z Naturforsch C*, 2006(61):105-110.
- [82] HOLMAN B, KASHANI A, MALAU-ADULI A E O. Growth and body conformation responses of genetically divergent Australian sheep to *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) supplementation [J]. *Am J Experiment Agric*, 2012(2):160-173.
- [83] STAMEY J A, SHEPHERD D M, DE VETH M J, et al. Use of algae or algal oil rich in n-3 fatty acids as a feed supplement for dairy cattle [J]. *Dairy Sci*, 2012, 95:5269-5275.
- [84] BOECKAERT C, VLAEMINCK B, DIJKSTRA J, et al. Effect of dietary starch or micro algae supplementation on rumen fermentation and milk fatty acid composition of dairy cows [J]. *Dairy Sci*, 2008(91):4714-4727.
- [85] SUBHADRA B, GRINSON G. Algal biorefinery-based industry: an approach to address fuel and food insecurity for a carbon-smart world [J]. *Sci Food Agr*, 2011(91):2-13.
- [86] QIN S, JIANG P, TSENG C. Transforming kelp into a marine bioreactor [J]. *Trends Biotechnol*, 2005(23):264-268.
- [87] BECKER E W. Micro-algae as a source of protein [J]. *Biotechnol Adv*, 2007(25):207-210.
- [88] GINZBERG A, COHEN M, SOD-MORIAH U A, et al. Chickens fed with biomass of the red microalga *Porphyridium* sp have reduced blood cholesterol level and modified fatty acid composition in egg yolk [J]. *Appl Phycol*, 2000(12):325-330.
- [89] KIRON V, PHROMKUNTHONG W, HUNTLEY M, et al. Marine microalgae from biorefinery as a potential feed protein source for Atlantic salmon, common carp and whiteleg shrimp [J]. *Aquacul Nutr*, 2012(18):521-531.
- [90] PULZ O, GROSS W. Valuable products from biotechnology of microalgae [J]. *Appl Microbiol Biot*, 2004(65):635-648.
- [91] ANEMAET I G, BEKKER M, HELLINGWERF K J. Algal photosynthesis as the primary driver for a sustainable development in energy, feed, and food production [J]. *Mar Biotechnol*, 2010(12):619-629.
- [92] KEITHLY J I, KOTT R W, BERARDINELLI J G, et al. Thermogenesis, blood metabolites and hormones, and growth of lambs born to ewes supplemented with algae-derived docosahexaenoic acid [J]. *Anim Sci*, 2011(89):4305-4313.