

# 微藻及其生物活性成分在水产养殖中的营养价值、 生理功能和抗病活性

■ 赵伟 高保燕 黄罗冬 王飞飞 张成武\*

(暨南大学生态学系 水生生物研究中心,广东广州 510632)

**摘要:**随着水产养殖规模的不断扩大和集约化程度的不断提高,水环境被广泛的工业发展所破坏,水质不断恶化,由此导致爆发性疾病频发,给我国乃至全球水产养殖经济带来了巨大的损失。同时由于世界范围内水产养殖业的快速增长,鱼粉和鱼油的需求也在增加,鱼粉和鱼油市场价格也在不断上涨。寻找鱼粉和鱼油的替代原料以及生产无毒、无污染、高效代替抗生素使用的生物制剂已成为水产养殖研究的主要发展目标。微藻富含蛋白质、长链多不饱和脂肪酸、类胡萝卜素、多糖、维生素、牛磺酸、甾醇及矿物质等多种营养成分和生物活性物质。水产动物摄食微藻,能够促进养殖动物的营养循环、降低饲料系数、提高成活率和抗病力,微藻可以作为鱼粉和鱼油良好的替代原料。长链多不饱和脂肪酸是水产动物的关键营养成分;多糖特别是硫酸酯多糖可提高水产动物的免疫功能,具有抗菌、抗病毒的能力;虾青素作为着色剂已被用于水产养殖,它是鱼类维生素A的前体,同时作为鱼类和虾、蟹类的免疫增强剂,促进生长和存活率;甾醇在水产软体动物、甲壳类和鱼类的生长、性腺发育中具有重要作用;牛磺酸是一种非蛋白磺酸,它是水产肉食动物的一种重要营养成分。本文主要对微藻及其生物活性成分在水产养殖中的应用情况和动态进行了分析。

**关键词:**微藻;水产养殖;长链多不饱和脂肪酸;多糖;类胡萝卜素;生物活性物质

**doi:**10.13302/j.cnki.fi.2019.08.002

**中图分类号:**S816.15

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-991X(2019)08-0009-08

## Nutritional value, physiological function and disease resistance activity of microalgae and their bioactive components in aquaculture

Zhao Wei, Gao Baoyan, Huang Luodong, Wang Feifei, Zhang Chengwu

**Abstract:** The scale and intensive degree of aquaculture are constantly increasing. At the same time, the water environment is destroyed by extensive industrial development, and the water quality is deteriorating. It has led to frequent outbreaks of diseases and resulted in huge losses to aquaculture economy in China and even in the world. Due to the rapid growth of aquaculture worldwide, the demand for fish meal and fish oil is also increasing, which leads to the rising market prices of fish meal and fish oil. Therefore, searching for alternative raw materials for fish meal and fish oil, and producing non-toxic, non-polluting and highly effective biological agents to replace antibiotics have become the main development goals of aquaculture research. Microalgae are rich in protein, long-chain polyunsaturated fatty acids, carotenoids, polysaccharides, vitamins, sulfuric acid, sterols, minerals and other nutrients and bioactive substances. Feeding aquatic animals by microalgae helps to promote the nutrient cycle of cultured animals, reduce feed coefficient, improve disease resistance and survival rate, and can be used as a good substitute for fish meal and fish oil. Long-chain poly-

unsaturated fatty acids, carotenoids, polysaccharides, vitamins, sulfuric acid, sterols, minerals and other nutrients and bioactive substances. Feeding aquatic animals by microalgae helps to promote the nutrient cycle of cultured animals, reduce feed coefficient, improve disease resistance and survival rate, and can be used as a good substitute for fish meal and fish oil. Long-chain poly-

作者简介:赵伟,博士,研究方向为微藻资源利用与水产动物营养免疫。

通讯作者:张成武,教授,博士生导师。

收稿日期:2019-03-03

基金项目:国家“863”计划[2013AA065805];国家自然科学基金[31170337];广东省教育部产学研结合项目[2010A090200008];珠海市科技重点项目[PC20081008]资助项目;中石化技术开发项目[218017-2]

unsaturated fatty acids are important nutritional components of aquatic animals. Polysaccharides, especially sulfated polysaccharides, can improve the immune function of aquatic animals and have the ability of anti-bacterial and anti-virus. Astaxanthin can be used as a colouring agent for aquatic animals and a precursor of fish vitamin A. Astaxanthin as an immunostimulant can increase the growth and survival rate of fish, shrimp and crabs. Sterols play an important role in the growth and gonad development of aquatic mollusks, crustaceans and fishes. Taurine is a non-protein sulfonic acid and an important nutritional ingredient in aquatic carnivorous animals. In this paper, the application and development of microalgae and their bioactive components in aquaculture were reviewed.

**Key words:** microalgae; aquaculture; long-chain unsaturated fatty acids; polysaccharides; carotenoids; bioactive substances

免疫刺激剂能够调节动物免疫系统并激活免疫功能、增强机体对细菌和病毒等传染性病原体的抵抗力已经被广泛关注,主要包括多糖、激素、维生素、生物活性物质、中草药等物质。微藻是一类在陆地、海洋分布广泛、营养丰富的单细胞藻类。微藻富含多不饱和脂肪酸、蛋白质、类胡萝卜素、多糖、微量元素、矿物质等多种营养和生物活性物质,具有天然的抗菌活性。微藻或其生物活性物质作为免疫刺激剂已在水产养殖中被广泛应用。目前,应用于水产养殖中的微藻主要包括普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)和蛋白核小球藻(*C. pyrenoidosa*)、钝顶节旋藻(*Arthrospira platensis*)和极大节旋藻(*A. maxima*,原名:钝顶螺旋藻)和极大螺旋藻(*Spirulina platensis*, *S. maxima*)、裂壶菌(藻)(*Schizochytrium sp.*)、三角褐指藻(*Phaeodactylum tricorutum*)、牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)、拟纳绿球藻(*Nannochloropsis spp.*)和拟微绿球藻(*Microchloropsis spp.*)、盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*)、雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)等。

本文将近年来微藻及其生物活性物质在水产养殖中的营养价值和抗病活性进行了概括总结,为开发微藻功能性饲料提供新的思路。

## 1 微藻在水产养殖中的应用

### 1.1 替代鱼粉和鱼油

鱼粉和鱼油由于含有高质量的蛋白质和有益的n-3长链多不饱和脂肪酸(LC-PUFA)而被广泛用于水产饲料中。随着世界范围内水产养殖业的快速增长,鱼粉的需求也在增加,而野生鱼类的捕捞限制也给鱼粉产量带来了不确定性,鱼粉市场价格在过去的十年间上涨了近300%。鱼粉和鱼油仍被视为养殖鱼类饲料中营养最丰富、消化率最高的成分。因为鱼粉和鱼油的供给量是不可持续的,水产饲料工业的发展

需要寻找鱼粉和鱼油的替代原料。目前鱼粉和鱼油可被其他植物蛋白或动物蛋白所替代,使其在水产养殖配合饲料中的添加率呈明显下降趋势。然而,非鱼粉蛋白源(特别是植物蛋白)因营养限制,如氨基酸组成不平衡、抗营养化合物的存在和其它因素,实际应用效果并不理想。

微藻富含多不饱和脂肪酸,是鱼粉和鱼油的良好替代源,确保水产养殖的可持续性发展。微藻最高可含有70%的蛋白质、15%~30%的碳水化合物、30%~50%的脂质(n-3、n-6不饱和脂肪酸)和1%~14%的类胡萝卜素。微藻替代鱼粉和鱼油的研究已经被广泛报道。Ju等研究显示,利用雨生红球藻(*H. pluvialis*)脱脂后的藻粉替代12.5%的鱼粉,使凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长性能、饲料利用效率、游离和酯化虾青素含量均显著高于全鱼粉组。Macias-Sancho等研究表明,钝顶螺旋藻(*S. platensis*)粉替代75%的鱼粉,对凡纳滨对虾(*L. vannamei*)的生长性能和存活率并未造成不利影响,而替代25%的鱼粉展示出了更好的免疫性能。Pakravan等也获得了与Macias-Sancho等相似的结果,利用钝顶节旋藻(*A. platensis*)部分替代鱼粉并不会对凡纳滨对虾生长性能、消化性能产生不利影响,且在低氧胁迫后存活率显著高于全鱼粉组。Qiao等研究表明,利用拟纳绿球藻(*Nannochloropsis sp.*)替代100%的鱼油,使牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)的生长性能、饲料利用效率、肌肉的脂肪含量与全鱼油组相比无显著性差异,且提高了n-3/n-6多不饱和脂肪酸的比值。Sarker等研究表明,裂壶菌(藻)(*Schizochytrium sp.*)替代100%的鱼油,使尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的增重率、蛋白利用效率、饲料转化效率、摄食率、鱼肉中的DHA含量和鱼肉中DHA/EPA比值均显著高于全鱼油

组。Perez-Velazquez 等研究显示,节旋藻(*Arthrospira sp.*)和湖生裂壶菌(藻)(*Schizochytrium limacinum*)替代50%饲料蛋白(鱼粉、大豆蛋白)并不会对美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)生长性能和鱼体成分造成不利影响,美国红鱼饲料中50%的蛋白可以被28.87%节旋藻和6.72%裂壶藻所替代。

目前,微藻替代鱼粉和鱼油的研究多集中于科研试验阶段,在实际生产应用中并不多见。水产养殖业中用微藻代替鱼粉和鱼油仍存在一些缺陷和挑战,如微藻生产成本高,一些微藻可能具有难以消化的细胞壁,微藻大规模培养效率不高,室外培养条件下容易受到污染影响等。随着技术发展,微藻的商业应用主要集中于微藻作为微饲料成分,侧重于微藻生物活性分子(类胡萝卜素、多不饱和脂肪酸、多糖)的利用,而不是利用微藻的总体营养。

## 1.2 疾病防控

### 1.2.1 抗细菌

细菌是水产动物集约化养殖中的主要致病菌,而耐药细菌病原体的数量在不断增加。微藻和其含有的天然活性成分都具有抗菌活性,在鱼虾养殖过程中可以用来杀灭病原菌。弧菌病是海水鱼类和甲壳动物最常发生的细菌性疾病,主要的致病弧菌包括溶藻弧菌(*Vibrio alginolyticus*)、坎氏弧菌(*Vibrio campbellii*)、哈维氏弧菌(*Vibrio harveyi*)、副溶血弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)、创伤弧菌(*Vibrio vulnificus*)和鳗弧菌(*Vibrio anguillarum*)等。Molina-Cárdenas 等研究表明,球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)能够合成抗菌脂肪酸来抑制溶藻弧菌(*V. alginolyticus*)、坎氏弧菌(*V. campbellii*)和哈维氏弧菌(*V. harveyi*)的生长,然而对副溶血弧菌(*V. parahaemolyticus*)无明显抑制作用。眼点拟纳绿球藻(*Nannochloropsis oculata*)也已经被报道能够抑制鳗弧菌(*V. anguillarum*)的生长。其他常用作水产养殖饲料的微藻在体外实验中也同样显示出对特定虾和鱼类病原体的抗菌活性。这些微藻主要包括微小小球藻(*Chlorella minutissima*)、朱氏四角藻(*Tetraselmis chui*)、钝顶节旋藻(*A. platensis*)、罗氏角毛藻(*Chaetoceros lauderi*)、三角褐指藻(*P. tricornutum*)和绿色裸藻(*Euglena viridis*)。目前的研究结果表明,微藻能够分泌一些具有抗菌作用的胞外物质,最终杀灭或者抑制致病菌的生长。

从微藻中提取的活性成分具有抗菌活性也已经被报道。群体感应是细胞间通讯的一种机制,在细菌毒力中起着关键作用。从微藻中提取的活性成分可

以通过调控细菌间的群体感应而抑制细菌生长。Natrash 等研究表明,利用乙酸乙酯提取的几种淡水微藻和海洋微藻提取物能够调控群体感应信号分子(酰基高丝氨酸内酯)从而影响病原菌的群体感应,最终抑制病原菌生长。Gastineau 等研究显示,哈氏藻(*Hautea karadagensis*)中提取的一种蓝灰色色素物质能够抑制北极海洋细菌(*Polaribacter irgensii*)、河口弧菌(*Vibrio aestuarianus*)和假交替单胞菌(*Pseudoalteromonas elyakowii*)的生长。从三角褐指藻(*P. tricornutum*)中分离的二十碳五烯酸(EPA)能够抑制革兰氏阴性菌[如鳗利斯顿氏菌(*Listonella anguillarum*)、发光杆菌(*Photobacterium sp.*)]和革兰氏阳性菌[如膝黄微球菌(*Micrococcus luteus*)、蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、韦氏芽孢杆菌(*Bacillus weihenstephanensis*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)]的生长。Santoyo 等研究表明,利用乙醇从雨生红球藻(*H. pluvialis*)中提取的短链脂肪酸(丁酸和乳酸甲酯)能够抑制大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的生长。现有研究结果表明,微藻及其提取物具有良好的防治水产动物细菌性疾病的能力,然而抗菌机制并不十分清楚,未来应加强有关微藻及其提取物抗菌机制的研究。

### 1.2.2 抗病毒

在水产养殖中存在着大量的病毒性疾病,这些疾病会影响水产动物的健康和存活率,给水产养殖产业带来了巨大的经济损失。目前,尚未形成非常有效的水产动物病毒性疾病的防治方法。植物和中草药提取物具有抗病毒活性已经被报道,从植物中提取的活性物质无毒害、无残留、对环境无污染作用,因此具有良好的替代化学药物的潜力。Balasubramanian 等研究表明,狗牙根(*Cyanodon dactylon*)提取物在体外实验中具有显著的抗白斑综合征病毒(WSSV)活性,斑节对虾摄食添加有狗牙根提取物的饲料后进行WSSV攻毒实验,结果表明斑节对虾抗WSSV能力显著高于空白组。Micol 等研究显示,橄榄树叶子(*Olea europaea*)中提取的橄榄苦甙能够显著降低鲑鱼弹状病毒的感染性,结果表明橄榄苦甙与病毒包膜之间存在相互作用,橄榄苦甙能够抑制病毒和未感染细胞之间的细胞膜融合,从而降低病毒感染活力。Citarasu 等研究表明,斑节对虾(*Penaeus monodon*)摄食含有五种印度草药提取物的饲料,对虾抗WSSV能力显著高于对照组。植物和草药提取物具有抗水产动物致病病毒的能力也已经被报道。

相比于植物和草药提取物的研究,微藻及其提取物在水产养殖中杀灭或抑制病毒活性的研究并未见大量报道。斑节对虾(*P. monodon*)摄食含有盐生杜氏藻(*D. salina*)提取的 $\beta$ -胡萝卜素的饲料后,对虾抗WSSV活性显著高于对照组。Katharios等研究发现,微小小球藻(*C. minutissima*)培养液能够显著提高患有病毒性脑病和视网膜病的东大西洋石斑鱼(*Epinephelus marginatus*)的存活率,微小小球藻(*C. minutissima*)培养液具有一定的抗病毒活性。存在于藻类上清液中的水溶性化合物可能是有价值的抗病毒药物的替代物。微藻提取物能够抗人类致病性病毒的研究已经被大量报道。然而,多种微藻提取物对水产致病性病毒的杀灭效果并不清楚,微藻提取物在水产养殖中用做抗病毒药物的研究仍需加强。

## 2 类胡萝卜素在水产养殖中的应用

类胡萝卜素是一类重要的脂溶性色素,易溶于丙酮、乙醇、乙醚、氯仿等非极性溶剂中。只有植物、细菌、真菌和藻类可以在体内合成类胡萝卜素,而动物自身无法合成它们,必须从饮食中获得类胡萝卜素。类胡萝卜素作为动物体内的维生素A前体具有重要的生理功能,具有抗氧化、免疫调节、抗癌、延缓衰老等功效。类胡萝卜素因其安全无毒且纯天然的特性,被广泛应用于食品、饲料、化妆品和医药等领域。

随着人民生活水平的提高,水产品品质和安全越来越受到人们关注。消费者认为水产动物颜色与其营养价值、健康、新鲜度和味道有关。色泽是影响水产品价格和购买欲望的重要因素。水产动物呈现出的各种色彩主要受类胡萝卜素的影响。人工配合饲料的原料中含有的类胡萝卜素量很少,养殖的水产品体色往往缺乏天然水产品所具有的健康色泽,从而影响其商品价值。目前,水产养殖所添加的类胡萝卜素主要有两种来源,一类是来源于微藻,另一类来源于人工合成。雨生红球藻(*H. pluvialis*)、盐生杜氏藻(*D. salina*)和普通小球藻(*C. vulgaris*)是微藻类胡萝卜素的主要来源。

### 2.1 人工合成类胡萝卜素在水产养殖中的应用

目前,水产养殖所需的类胡萝卜素主要来源于人工合成。人工合成类胡萝卜素在水产养殖中的应用已被广泛报道。Meilisza等研究显示,虹银汉鱼(*Melanotaenia parva*)饲料中分别添加虾青素、角黄素和叶黄素,虾青素组的存活率、肌肉和皮肤中的类胡萝卜素总量显著高于其他组,而虾青素组、角黄素组和叶黄素组的类胡萝卜素的表观消化率显著高于对照

组。Zhang等和Rahman等研究表明,虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)饲料中添加虾青素,肌肉的红色度、虾青素含量和抗氧化性能显著高于对照组。Niu等研究显示,斑节对虾(*P. monodon*)饲料中添加虾青素或 $\beta$ -胡萝卜素能够显著提高生长性能和抗氧化性能,类胡萝卜素的表观消化率也显著高于无色素组,虾青素组抗氧化性能和生长性能显著高于 $\beta$ -胡萝卜素组。Niu等研究显示,斑节对虾(*P. monodon*)饲料中分别添加虾青素和角黄素,虾青素组和角黄素组的抗氧化性能显著高于对照组,而虾青素组的生长性能和虾青素的表观消化率显著高于角黄素组和对照组,低氧胁迫下,虾青素组和角黄素组的存活率显著高于对照组。Han等研究发现,三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)饲料中添加虾青素能够显著减少氧化应激,同时提高虾青素在肌肉和甲壳中的含量,增红效果明显,肌肉中的不饱和脂肪酸含量也显著高于无色素组。Wang等研究表明,中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)饲料中添加虾青素能够显著增加甲壳中虾青素的含量,在高pH值胁迫后能够显著缓解氧化损伤。

### 2.2 微藻类胡萝卜素在水产养殖中的应用

在微藻中富含的类胡萝卜素主要包括虾青素、角黄素、 $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素、玉米黄素等。雨生红球藻(*H. pluvialis*)是虾青素的最主要来源,而洛夫小球藻(*Chlorella zofingiensis*)、绿球藻(*Chlorococcum* sp.)、魏氏新绿藻(*Neochloris wimmeri*)、葡萄链藻(*Catenella repens*)、条纹腔星藻(*Coelastrella striolata*)也已经被报道含有虾青素,但虾青素含量远远少于雨生红球藻。盐生杜氏藻(*D. salina*)和巴氏杜氏藻(*Dunaliella bardawil*)是 $\beta$ -胡萝卜素的最主要来源,而亚莱梅栅藻(*Scenedesmus almeriensis*)和四片藻(*Tetraselmis* sp.)也含有 $\beta$ -胡萝卜素。角黄素主要存在于小球藻属(*Chlorella*)中,而雨生红球藻(*H. pluvialis*)、拟纳绿球藻(*Nannochloropsis* sp.)也含有角黄素。

在水产饲料中通过添加类胡萝卜素来增加鱼体体色已被广泛报道。Pham等研究显示,饲料中添加100 mg/kg类胡萝卜素(雨生红球藻提取物)能够促进类胡萝卜素在牙鲆(*P. olivaceus*)肌肉中的沉积。Young等研究发现,虹鳟鱼(*O. mykiss* L.)摄食富含虾青素的雨生红球藻,肌肉中类胡萝卜素的含量显著高于对照组。Gomes等研究表明,饲料中添加40 mg/kg的虾青素(雨生红球藻提取物)能够显著增加类胡萝卜素在金头鲷(*Sparus aurata*)肌肉中的含量。类胡萝卜素能够增加甲壳动物体色的研究也已被报道。Angell

等和Wade等研究发现,饲料中添加虾青素(雨生红球藻提取物)能够显著增加斑节对虾(*P. monodon*)的色素沉积,起到明显的增红效果。Wu等研究表明,饲料中添加富含虾青素的雨生红球藻,中华绒螯蟹(*E. sinensis*)甲壳中类胡萝卜素含量显著高于对照组。

类胡萝卜素作为一种免疫增强剂也已经被报道,类胡萝卜素在鱼类细胞介导的宿主防御和体液免疫机制中起着重要作用,类胡萝卜素能够提高虾、鱼以及其他甲壳动物受到疾病感染时的存活率。Li等研究发现,大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)摄食含有雨生红球藻和虾青素(雨生红球藻提取物)的饲料,显著降低了超氧化物歧化酶、过氧化物酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性,而溶菌酶活性显著高于对照组,结果表明虾青素和雨生红球藻显著地提高了大黄鱼的生长、抗氧化和免疫性能。Pham等研究显示,牙鲆(*P. olivaceus*)摄食含有类胡萝卜素(雨生红球藻提取物)或雨生红球藻粉的饲料,饲料的转化效率、蛋白质利用效率和抗氧化性能显著高于对照组。Wade等研究表明,饲料中添加虾青素(雨生红球藻提取物)能够显著提高斑节对虾(*P. monodon*)的生长性能。

目前,水产饲料中添加的类胡萝卜素多为人工合成,然而人工合成类胡萝卜素没有顺或反异构体存在,天然类胡萝卜素含有相当比例的异构体,异构体具有特定的生物学功能,因此动物对天然类胡萝卜素的吸收和利用效率要显著高于人工合成类胡萝卜素。从微藻中提取的类胡萝卜素在水产饲料中的应用研究有待加强。近年来类胡萝卜素对鱼和甲壳动物作用效果的研究逐渐深入,但对于相关分子机制与调控机理仍缺乏深入认识。

### 3 多糖在水产养殖中的应用

一般来说,微藻多糖糖残基中多含有硫酸酯类基团,属于硫酸酯多糖。多糖的生物活性与其分子大小和结构、糖残基的连接以及硫酸盐的含量和位置有关。对大多数硫酸酯多糖,若除去硫酸基团,则其生物活性消失。微藻多糖因其具有抗炎、抗氧化、抗病毒、抗凝血、抗癌、免疫调节等生物活性,在制药和生物医药工业中具有广泛的应用前景。Sun等研究发现球等鞭金藻(*I. galbana*)多糖具有清除超氧自由基、羟基自由基和适当的还原能力。眼点小球藻(*Chlorella stigmatophora*)和三角褐指藻(*P. tricornutum*)多糖具有抗炎和免疫调节作用也已经被Guzman等报道。Sadovskaya等研究表明球等鞭金藻(*I. galbana*)多糖能够抑制淋巴瘤细胞的增殖,因此具有潜在的抗肿瘤活

性。Hasui等研究发现多环旋沟藻(*Cochlodinium polykrioides*)多糖能够完全抑制包膜性病毒对宿主的侵入而对宿主细胞无毒害作用。目前,微藻提取的多糖在水产养殖中的应用并不多见。Ozorio等研究显示,饲料中添加从紫球藻(*Porphyridium cruentum*)中提取的多糖,能够显著提高凡纳滨对虾(*L. vannamei*)的消化性能和生长性能。Carballo等研究发现,向塞内加尔鲷鱼(*Senegalese sole*)注射从三角褐指藻(*P. tricornutum*)中提取的金藻昆布多糖,能够显著提高塞内加尔鲷鱼的抗氧化和免疫调控性能。

多糖能够与病毒粒子结合阻止病毒的复制,抑制病毒对宿主细胞的攻击。多糖还能够抑制病原菌与细胞的粘连,阻止病原菌对宿主细胞的感染。因此多糖作为一类免疫增强剂已经被广泛应用于水产养殖中。目前,水产养殖饲料中所添加的多糖多来源于酵母、植物、大型海藻提取的多糖。Zhao等研究发现刺参(*Apostichopus japonicus*)在盐度或者pH胁迫下免疫能力显著降低,提高了对疾病的敏感性,而添加酵母多糖能显著缓解刺参的应激压力。Wang等研究表明,点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)摄食从当归(*Angelica sinensis*)中提取的多糖,呼吸爆发指数和噬菌活性显著高于对照组,在被爱德华氏菌(*Edwardsiella tarda*)感染后点带石斑鱼的存活率显著提高。Chang等研究显示,凡纳滨对虾(*L. vannamei*)摄食0.2 g/kg黄芪多糖,抗氧化酶和溶菌酶活性显著高于对照组。Yang等研究结果显示,无花果(*Ficus carica*)多糖能显著上调草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)免疫相关基因的表达水平,激活免疫防御能力,提高对疾病的抵御能力。Morales-Lange等研究表明,从掌状海带(*Laminaria digitata*)中提取的海藻多糖无论是注射或者投喂均能显著提高虹鳟鱼(*O. mykiss*)头肾巨噬细胞的噬菌能力和鳃组织的促炎细胞因子(TNF $\alpha$ 、IL-8)的基因表达水平,结果表明,海藻多糖能够激活虹鳟鱼的天然免疫反应。Chotigeat等研究发现,斑节对虾(*P. monodon*)摄食从匍枝马尾藻(*Sargassum polycystum*)中提取的岩藻多糖,对虾在感染白斑综合症病毒的存活率显著高于对照组,且岩藻多糖能够显著抑制鳃弧菌(*V. harveyi*)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和大肠杆菌(*E. coli*)的生长。Sivagnanavelmurugan等研究显示,饲料中添加从马尾藻(*Sargassum wightii*)中提取的多糖显著提高了斑节对虾(*P. monodon*)的生长性能和在副溶血弧菌(*V. parahaemolyticus*)感染下的存活率,马尾藻多糖能够显著抑制副溶血弧

菌的生长。

多糖对水产动物作用效果的研究多集中于生理生化水平,缺乏分子机制与调控机理研究。从微藻中提取的多糖在水产饲料中的应用研究并不多见。多糖作为一种新的免疫刺激剂具有替代生物活性药物潜力,可能会取代传统的抗生素,未来的研究可能为其应用提供新的思路。

#### 4 多不饱和脂肪酸在水产养殖中的应用

近年来,微藻脂质作为生物燃料生产的原料和具有重要的生物活性而受到大家的广泛关注。微藻脂质通常含有多不饱和脂肪酸,如隐甲藻(*Cryptocodinium sp.*)和裂壶菌(藻)(*Schizochytrium sp.*)富含二十二碳六烯酸(DHA),眼点拟纳绿球藻(*N. oculata*)、三角褐指藻(*P. tricornutum*)、新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)、球等鞭金藻(*I. galbana*)富含二十碳五烯酸(EPA),紫球藻(*Porphyridium sp.*)富含花生四烯酸(ARA)。脊椎动物缺乏 $\omega 6$ 或 $\omega 3$ 去饱和酶,因此不能由18:1n-9脂肪酸脱饱和而获得多不饱和脂肪酸(DHA、EPA、ARA),必须从饮食中获得。目前,鱼粉和鱼油是多不饱和脂肪酸的主要来源,然而由于海洋环境污染和鱼类的过度捕捞,导致鱼粉和鱼油质量和数量不断下降。微藻因具有合成和积累大量多不饱和脂肪酸的能力和高营养价值,已成为水产养殖中最重要的饲料来源。

多不饱和脂肪酸在生长性能、膜渗透性、酶活性、免疫功能等方面具有独特的调控作用。多不饱和脂肪酸能够提高水产动物的存活率、抗氧化能力、抗应激和抵御疾病的能力已经被报道。Chen等研究发现饲料中添加4 g/kg的n-3多不饱和脂肪酸能够显著增加异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)的生长性能和n-3多不饱和脂肪酸在肌肉中的积累量,过高的n-3多不饱和脂肪酸会抑制异育银鲫的生长。Jin等研究表明,饲料中含有1.34%~1.80%的n-3多不饱和脂肪酸能够显著提高黑棘鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)的生长、饲料利用率和抗氧化性能。饲料中最适的n-3多不饱和脂肪酸的需求量在欧洲海鲈(*Dicentrarchus labrax*)、大黄鱼(*L. crocea*)、大西洋鲑鱼(*Salmo salar*)、刺参(*A. japonicus*)中也已经被报道。

由于多不饱和脂肪酸(DHA、EPA、ARA)在多种生理生化反应中存在竞争性相互作用,在研究鱼类对膳食所需营养研究中,不能孤立的考虑鱼类对DHA、EPA、ARA的需求。对于多不饱和脂肪酸的营养需求

研究中应该以DHA:EPA:AA的最适比值来考虑。Zuo等研究显示,DHA:EPA比值为2.17~3.04时可显著提高大黄鱼(*L. crocea*)的生长性能,提高非特异性免疫力,增强对寄生虫感染的保护作用。Xu等研究表明,饲料DHA:EPA比值为1.53~2.08时显著提高了花鲈(*Lateolabrax japonicus*)的生长性能,激活了先天免疫系统,提高了应激耐受性。Chen等研究显示,饲料DHA:EPA比值为1:1或者2:1,n-3多不饱和脂肪酸含量为1.83%时,点带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)的生长性能、免疫性能和肌肉中多不饱和脂肪酸的含量显著高于其他实验组。Jin等研究表明,不同的DHA:EPA比值对黑棘鲷(*A. schlegelii*)的生长性能和饲料利用效率没有显著性影响,然而不同的DHA:EPA比值对组织脂肪酸组成、抗氧化能力、脂肪合成和分解代谢相关基因的表达水平均产生了显著性影响。

目前,有关不饱和脂肪酸在水产动物中的研究多集中于确定饲料中EPA和DHA的最佳添加量,而ARA的重要性被忽略了。ARA属于极性脂质家族,作为类二十烷酸生物合成的前体,在细胞凋亡、细胞分化、炎症、脂质合成和代谢等生物过程中具有重要的调控作用。饲料中缺乏ARA会干扰肝脏功能,降低对营养物质的利用效率,从而抑制生长。饲料中添加过高的ARA,会抑制EPA的生物转化,从而抑制生长。过高水平的ARA还会导致过量的类二十烷酸产生,从而导致释放了过量的炎症因子,造成自身免疫功能异常。ARA能够通过改变两种前列腺素的比率来起到调控生长的作用,前列腺素 $E_2$ 能够抑制肌肉纤维的形成,促进蛋白质的降解,而前列腺素 $F_2\alpha$ 则起相反作用。Ma等研究发现,饲料中添加0.6%~0.9%的ARA能够显著提高黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的生长性能和抗氧化性能,肝脏中与脂肪代谢相关的基因表达水平出现变化,结果表明ARA对脂肪代谢起到调控作用。Xu等研究表明,饲料中添加0.22%~0.56%ARA能够显著提高花鲈(*L. japonicus*)的生长性能和免疫性能。Tian等研究发现,草鱼(*C. idellus*)饲料中添加0.30%ARA能有效抑制脂质积累,改变脂肪代谢的关键基因表达水平,通过降低血清中转氨酶活性及促炎细胞因子浓度,提高草鱼肾脏中免疫相关基因的表达水平而改善草鱼的健康状况。Shahkar等研究显示,饲料中添加0.71%的ARA能够显著提高日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)的生长性能和饲料转化效率,

抗氧化酶和溶菌酶活性也显著高于对照组。饲料中添加ARA对生长、存活、免疫、脂肪酸组成和脂质代谢的影响也已经在日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)、河豚(*Siganus rivulatus*)、欧洲海鲈(*D. labrax*)、海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)、大西洋鲑鱼(*S. salar*)中被报道。关于ARA的研究多集中于鱼类,而对甲壳动物的研究较少。现有研究多集中于研究ARA对鱼类的生长性能、抗氧化性能以及脂肪酸合成和分解代谢有关基因表达的影响,对免疫功能的研究并不多见,尤其缺乏转录组和代谢组数据。只依靠脂肪酸合成和分解代谢相关基因的表达水平来证明ARA对机体脂肪酸代谢的影响并不准确。

### 5 牛磺酸

牛磺酸是含硫氨基酸代谢的最终产物,广泛分布于哺乳动物、鸟类、鱼类和水生无脊椎动物的组织中。在哺乳动物中,牛磺酸涉及许多生物学功能,包括渗透调节、抗氧化和解毒、胆汁酸代谢、免疫调节、钙转运、视网膜发育等。牛磺酸在动物体内的合成能力主要与半胱氨酸脱羧酶活性有关。海洋鱼类,如真鲷(*Pagrus major*)、鲷鱼(*Seriola quinqueradiata*)、牙鲆(*P. olivaceus*)等由于缺乏半胱氨酸脱羧酶或活性低,导致牛磺酸合成能力很低,因此必须从饲料中补充牛磺酸。淡水鱼类,如虹鳟(*O. mykiss*)、大西洋鲑鱼(*S. salar*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)等可通过转硫途径合成牛磺酸。动物肌肉组织中含有高水平的牛磺酸,特别是海洋动物,如鱼、虾、蟹、贝类等。藻类也含有牛磺酸,如海带(*Laminaria japonica*)、扁平石花菜(*Gelidium subcostatum*)、椭圆蜈蚣藻(*Grateloupia elliptica*)、裸甲藻(*Gymnodinium smaydae*)、亚历山大藻(*Alexandrium andersonii*)、异囊藻(*Heterocapsa rotundata*)。然而高等植物(如大豆)通常缺乏牛磺酸。

目前,天然来源的牛磺酸提取效率较低,成本较高,且牛磺酸的来源物质有限并不能满足市场的需求,所以大多数牛磺酸是通过化学合成法生产的。水产饲料中添加化学合成的牛磺酸能够提高水产动物的生长和免疫性能的研究已经被报道。Tan等研究显示,杂交鳢(*Channa maculatus* ♀ × *Channa argus* ♂)饲料中添加牛磺酸能够显著提高鱼体的抗应激能力,减少活性氧自由基的产生和血细胞的凋亡率,提高鱼体在氨胁迫中的存活率。Zheng等研究表明,半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)饲料中添加1%的牛磺酸,生长性能、存活率、消化酶活性显著高于对照组,而饲料

中添加2%的牛磺酸则产生相反的结果,结果表明饲料中适当添加牛磺酸对半滑舌鳎的生长和消化性能产生有利影响。Shen等研究表明,补充牛磺酸能显著调节尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的生理状态,如碳水化合物、氨基酸、脂质和核苷酸的代谢变化,促进其生长发育。Dong等研究显示,饲料中添加0.4%~0.8%的牛磺酸能够显著提高中华绒螯蟹(*E. sinensis*)的生长性能、抗氧化能力和免疫能力。补充牛磺酸能够提高生长性能、消化性能或免疫性能的研究在鲤鱼(*C. carpio*)、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)、真鲷(*P. major*)、牙鲆(*P. olivaceus*)中也已经被报道。

目前,水产养殖饲料中鱼粉是牛磺酸的主要来源,然而利用豆粕等植物蛋白替代鱼粉已成为饲料行业的主流趋势,因此造成饲料中的牛磺酸含量显著降低,而缺乏牛磺酸对水产动物的生长和免疫等性能造成了不良影响。在植物蛋白源替代鱼粉的饲料中补充添加牛磺酸的研究已经被报道。Zhang等研究显示,利用豆粕部分替代鱼粉而没有添加牛磺酸,青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)的增重率、抗氧化酶和消化酶活性显著低于鱼粉组,血清中胆固醇、甘油三酯和丙二醛含量显著升高;而在替代鱼粉组中添加0.1%牛磺酸,青鱼的增重率、抗氧化酶和消化酶活性显著高于无牛磺酸添加组,血清中胆固醇、甘油三酯和丙二醛含量显著降低,结果表明,在豆粕替代鱼粉饲料中添加牛磺酸对青鱼的生理性能产生有利影响。Peterson等也得到了相似的结果,基于植物蛋白源的饲料中添加0.2%的牛磺酸,能够显著提高斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)的增重率和饲料转化效率,而0.5%的牛磺酸组与对照组相比增重率和饲料转化效率无显著性差异。在低鱼粉饲料或高植物蛋白饲料中补充牛磺酸能够提高生长或免疫性能的研究在石斑鱼(*Epinephelus Aeneus*)、欧洲海鲈(*D. labrax*)、尼罗罗非鱼(*O. niloticus*)、凡纳滨对虾(*L. vannamei*)中也已经被报道。牛磺酸可作为一种诱食剂的研究已经被Hu等报道,研究发现全植物蛋白饲料中添加3.5%的牛磺酸能够显著引诱大黄鱼(*L. crocea*)的摄食,转录组测序结果表明,与嗅觉感受器相关基因的表达水平发生显著变化,牛磺酸能够作为一种诱食剂被应用于水产饲料中。

牛磺酸具有多种生理功能,在水生动物中被广泛用作促生长添加剂和抗氧化剂。然而,有关牛磺酸的研究多集中于鱼类,对甲壳动物的作用效果研究较

少。微藻是天然牛磺酸的来源之一,且微藻富含其他营养和生物活性物质,微藻作为水产饲料中良好的添加剂来源具有广阔的应用前景。

## 6 甾醇

动物中最主要的甾醇是胆固醇,而植物中很少发现胆固醇。相反,植物中含有多种植物甾醇,它们具有与胆固醇相类似的结构和功能。植物甾醇是植物细胞膜的重要结构成分,不仅在调节膜流动性和渗透性方面具有重要作用,它们也作为激素或激素前体存在,参与生物体内的信号转导。植物甾醇能够降低血清和血浆总脂质、胆固醇和低密度脂蛋白的含量,从而降低患心血管疾病和中风的风险。植物甾醇还具有免疫调节、抗癌和抗炎活性也已经被报道。目前,产业化生产的植物甾醇主要来源于高等植物,如植物油、豆类、坚果、谷物、蔬菜和水果。然而,植物甾醇并不是高等植物所特有的,微藻也含有植物甾醇,如朱氏四片藻(*T. chui*)、拟纳绿球藻(*Nannochloropsis*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、牟氏角毛藻(*C. muelleri*)、球等鞭金藻(*I. galbana*)、紫球藻(*P. cruentum*)、三角褐指藻(*P. tricornutum*)、裸甲藻(*Gymnodinium sp.*)、席藻(*Phormidium sp.*)、裂壶菌(藻)(*Schizochytrium sp.*)等。

来源于微藻的植物甾醇能够降低膳食胆固醇吸收,同时减少胃肠道内源胆固醇的产生,从而降低胆固醇的含量。普通小球藻(*C. vulgaris*)和特氏杜氏藻(*Dunaliella tertiolecta*)提取的植物甾醇能够抑制促炎因子的产生,减少炎症性疾病引起的免疫反应,具有一定的抗炎活性。舟形藻(*Navicula incerta*)中提取的豆甾醇能够上调促细胞凋亡基因的表达水平而诱导肝癌细胞凋亡也已经被Kim等报道。Prakash等研究显示,球等鞭金藻(*I. galbana*)提取的甾醇具有抗结核分枝杆菌(*Mycobacterium tuberculosis*)的活性。

鱼粉和鱼油是水产饲料的主要蛋白质和脂质来源,然而鱼粉和鱼油的供应量有限,各种植物(大豆、油菜、羽扇豆、棉籽、豌豆)作为水产饲料的替代蛋白质和脂质来源变得越来越普遍。植物中含有一些抗营养因子,对水产动物的摄食、消化率、生长和免疫性能造成不良影响。植物中的植物甾醇也被认为是一种抗营养因子成分。Couto等研究发现,植物甾醇降低了欧洲海鲈幼鱼(*D. labrax*)肠道的麦芽糖酶活力,造成肠道炎症反应。相似的结果在金头鲷(*S. aurata*)中也已经被报道,植物甾醇造成金头鲷肠黏膜结构紊

乱,可能造成其抗菌功能异常,提高致病菌侵入的机会。然而,Couto等发现植物甾醇并未对欧洲海鲈(*D. labrax*)的生长性能、消化性能和免疫性能造成不利影响。目前,纯化的植物甾醇对水产动物影响的研究并不多见,已有研究表明,来源于高等植物的植物甾醇对水产动物并未出现有利影响。大豆油中主要的植物甾醇包括菜油甾醇、豆甾醇和 $\beta$ -谷甾醇,其中 $\beta$ -谷甾醇的含量最高。然而,并不清楚哪些甾醇对水产动物会造成不利影响,需要进一步的研究来解决这个问题。微藻来源的植物甾醇比高等植物来源的植物甾醇结构更具多样性。微藻能够提供不同类型的植物甾醇和其它高价值化合物,且其效率远高于陆生植物。目前,关于微藻来源的植物甾醇的研究多集中于鉴定植物甾醇的结构组成,大多数来源于微藻的植物甾醇的生物活性并不清楚。微藻来源的植物甾醇对水产动物影响的研究还未见报道,其是否会与高等植物来源的植物甾醇一样,对水产动物产生不利影响还需要进一步确认。然而,已有大量研究发现微藻粉部分替代鱼粉和鱼油对鱼类和甲壳动物均产生了有利影响。由此可以推断,来源于微藻的植物甾醇可能并不会对水产动物造成不利影响,可能还具有一定的免疫调控能力。当然,这个推断还需要进一步的实验来验证。

## 7 总结

微藻及其生物活性物质已被证明具有提高水产养殖产量的潜力。利用微藻作为饲料中的蛋白质、脂质和必需微量营养素的来源的益处已被证实。微藻及其生物活性物质具有抗菌、抗病毒和免疫调控能力,保护水产动物免受病原菌侵害,能够作为一种免疫增强剂来预防水产病害的发生。然而,大多数微藻及其生物活性物质对水产动物的作用效果及相关分子机制与调控机理仍缺乏深入认识。目前所获得的数据多是碎片化的,但随着测序技术的发展与完善,越来越多的水产动物基因组测序工作已经完成,转录组、蛋白组和代谢组学的兴起为微藻及其生物活性物质对水产动物的作用机制与调控机理的研究提供了有利条件。微藻及其生物活性物质在水产养殖中的利用有助于水产养殖业的可持续发展,促进全球粮食安全。



(参考文献155篇,扫码关注获取)

(编辑:沈桂宇,guiyush@126.com)