

凡纳滨对虾的维生素和矿物质营养需求研究进展

唐媛媛 陈曦飞 艾春香

(厦门大学海洋与地球学院,福建厦门 361005)

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei* Boone,1931)也称南美白对虾,自然分布于太平洋沿岸水域的秘鲁北部至墨西哥桑诺拉一带,已成为世界上养殖规模最大、产量最高的对虾品种(Liao等,2011)。2010年,仅我国凡纳滨对虾养殖产量就达134.8万吨(2011年渔业统计年鉴)。随着甲壳动物养殖业的不断推进,对凡纳滨对虾养殖技术研究以及其饲料研发工作也随之增多,但多集中在对凡纳滨对虾蛋白质、脂肪、脂肪酸、

糖类等营养素的营养需求方面,而对维生素和矿物质营养生理研究相对较少(Cuzon等,2004)。由于大部分维生素和全部矿物质在凡纳滨对虾体内不能合成,依赖于饲料供给,因此研究凡纳滨对虾对维生素和矿物质的营养需求尤为重要,已成为其营养学研究的热点,研究成果对研发高效环境友好型凡纳滨对虾配合饲料具有重要的理论意义和广阔的应用前景。为此,本文简要综述国内外凡纳滨对虾维生素和矿物质营养研究进展,以期开展凡纳滨对虾健康养殖及其优质配合饲料开发提供借鉴。

作者简介:唐媛媛,硕士,研究方向为水产动物营养与饲料。

通讯作者:艾春香,博士,教授。

收稿日期:2012-04-05

基金项目:福建省科技重大专项“环境友好型饲料关键技术集成及其产业化开发[2010NZ0002-2]”资助

1 凡纳滨对虾对维生素的营养需求

维生素是维持凡纳滨对虾的正常生长、发育、繁殖和健康所必需的一类低分子有机化合物,作为酶的重要协同因子,常以辅酶的形式发挥重要作用,每一种维生素对于凡纳滨对虾的生长、发育及其生理代谢

势,其中0.025%添加组对盲肠中双歧杆菌浓度影响差异显著($P<0.05$),0.05%添加组对结肠中双歧杆菌浓度影响差异显著($P<0.05$),对直肠中双歧杆菌浓度的影响也较大,但差异不显著($P>0.05$)。添加 β -葡聚糖对结肠、盲肠和直肠中乳酸杆菌浓度的影响也呈提高趋势,但与对照组相比差异不显著($P<0.05$)。

3 讨论与结论

动物体内的正常菌群维持着动物体的健康、生长和发育。机体中的有益和有害菌群相互制约、相互依存。如果它们之间的比例发生改变,动物体内的生态环境就会失调,很可能引起各种疾病,特别当一些兼性细菌菌群异常增殖时情况更容易发生。

健康动物体内大肠杆菌的浓度相对稳定,但随着日龄、疾病、饲养状态及抗生素的使用而变化,破坏了需氧菌与厌氧菌的平衡。当发生疾病时,尤其在下痢状况下,大肠杆菌数值显著上升,如仔猪下痢,大肠杆菌数值在空肠中由 $10^{5.5}$ 个/g上升到 $10^{6.4}$ 个/g,直肠中由 $10^{7.0}$ 个/g上升到 $10^{7.7}$ 个/g,而乳酸杆菌、双歧杆菌等厌氧菌数相对下降,表现为菌群比例失调、消化机能紊乱(何明清,2004)。本试验结果表明,不同剂量 β -葡聚糖在一定程度上抑制结肠、盲肠和直肠中大肠杆菌的增殖。

双歧杆菌是动物消化道有益的正常菌群,对动物机体的生理作用主要表现为拮抗致病微生物、建立生态平衡、合成多种维生素、激活机体的吞噬细胞、增强机体的非特异性和特异性免疫反应、控制内毒素血症、提高宿主对放射线的耐受性和延缓机体的衰老,它是维持肠道健康的重要优势菌群。本试验结果表明,添加一定剂量的 β -葡聚糖在一定程度上促进了结肠、盲肠和直肠中双歧杆菌的增殖。

乳酸杆菌能在肠道内正常无害地定植,对动物的生理作用比较明显,能合成维生素,辅助消化食物,帮助营养吸收,促进宿主代谢,抑制腐败过程,降低宿主血胆固醇,增强宿主对乳酸的耐力。对猪而言,乳酸杆菌在盲肠和直肠定植最多。疾病如肠炎、腹泻、脱水以及盲目应用抗菌药物时,会导致乳酸杆菌数量减少。本试验结果表明,不同剂量的 β -葡聚糖不同程度地提高了盲肠、结肠和直肠中乳酸杆菌的数量。

综合本试验,早期断乳仔猪基础日粮中添加 β -葡聚糖,提高了肠道中乳酸杆菌、双歧杆菌等有益菌群数量,降低了大肠杆菌的数量,改善了断奶后仔猪肠道菌群构成。

(参考文献若干篇,刊略,需者可函索)

(编辑:刘占, laramie_liu@139.com)

活动都起着其它物质所不能代替的特殊生理作用。由于凡纳滨对虾体内不能由其他物质合成维生素或合成维生素的量很少而不能满足机体正常的生理需求,因而必须通过摄食食物获取。尽管凡纳滨对虾对维生素的需求量很少,但如果长期摄入不足,就会导致其物质代谢障碍,对虾生长迟缓、免疫力降低、对疾病的抵抗力下降等维生素缺乏症,某些维生素过多也将对对虾的生长不利。

1.1 凡纳滨对虾脂溶性维生素的营养需求

凡纳滨对虾对维生素 A(Vitamin A,VA)、维生素 D(Vitamin D,VD)、维生素 E(Vitamin E,VE)和维生素 K(Vitamin K,VK)等脂溶性维生素(fat-soluble vitamins)的营养需求研究发现,VA、VD 和 VE 是其正常生长发育所必需的,而 VK 是非必需的(He 等,1992)。饲料中添加 VA,养殖凡纳滨对虾 4 周时显著促其生长($P<0.05$),提高其对饲料利用效率($P<0.05$),而对其成活率影响不显著($P>0.05$);养殖进行到第 11 周时,饲料中添加 VA 并不能显著影响凡纳滨对虾的生长、饲料利用效率和成活率($P>0.05$);VA 对对虾体脂肪、蛋白质含量的影响显著($P<0.05$),而对对虾体水分和灰分含量影响不显著($P>0.05$);VA 对对虾血清中溶菌酶活力、酚氧化酶活力和血液红细胞数量的影响显著($P<0.05$),凡纳滨对虾饲料中未添加 VA 或过量添加(超过 36 mg/kg)均显著降低其非特异性免疫力($P<0.05$)。用折线回归模型分析饲料 VA 添加量与对虾增重率的变化关系,表明在试验前 4 周,凡纳滨对虾饲料中 VA 的适宜添加量为 22.50 mg/kg;11 周试验期间,凡纳滨对虾饲料 VA 适宜添加量为 18 mg/kg;以溶菌酶、酚氧化酶活力为指标,凡纳滨对虾饲料中 VA 最适添加量为 59.51 mg/kg(杨奇慧等,2007)。研究凡纳滨对虾对 VE 需求量时发现,饲料中 VE 对其有明显的增重效果,但当含量达 100 mg/kg 时,增重效果则不再明显,凡纳滨对虾 VE 的适宜添加量为 90~100 mg/kg(He 等,1993)。饲料中添加 5% 的鱼油时,同时添加 VE 200 mg/kg,凡纳滨对虾的生长良好(Ruff 等,2001)。VE 不仅具有促生长作用,还可以有效改善机体的抗氧化能力和抗应激能力。研究显示,投喂添加了 VE 饲料的凡纳滨对虾抗氧化酶能力(SOD、CAT、GPX、GST)和抗盐度突变的能力显著高于摄食未添加 VE 饲料组(Liu 等,2007)。VE 表现出较强的抗氧化作用,且与硒有显著的动态互作效应(胡俊茹等,2010)。

虾青素对凡纳滨对虾生长、健康和体色等的影响

开展了一些有益的工作。研究表明,在未添加虾青素饲料组的凡纳滨对虾体色是淡蓝色,而添加虾青素的饲料组中的对虾体色是深蓝色或深褐色,在添加量为 0.4% 的饲料组的虾体色是最深的,饲料中添加 0.1% 的虾青素已能满足仔虾的生长需求;此外,对于凡纳滨对虾仔虾的成活率、特别是恶劣情况下来说,饲料中的虾青素添加量不能低于 0.2%(牛津,2009);凡纳滨对虾基础饲料中添加从雨生红球藻中提取虾青素可提高凡纳滨对虾的存活率、特定生长率(SGR)、总抗氧化能力(T-AOC)($P<0.05$)。以凡纳滨对虾生长、存活和抗氧化能力为指标,凡纳滨对虾饲料中虾青素的最适添加量为 80 mg/kg,最佳投喂时间为 4 周。此外,饲料中添加虾青素能显著提高凡纳滨对虾抗氨氮胁迫能力(裴素蕊,2009)。凡纳滨对虾饲料中添加 80 mg/kg 虾青素可显著改善其血液学指标($P<0.05$),降低感染 WSSV 的凡纳滨对虾累计死亡率(为 76.3%),提高机体的免疫保护率(为 23.7%),明显提高凡纳滨对虾抗氧化酶系统包括 SOD、CAT、GPX 的 mRNA 水平($P<0.05$)(王慧春,2010)。

1.2 凡纳滨对虾水溶性维生素的营养需求

水溶性维生素(water-soluble vitamins)主要包括维生素 C(Vitamin C,VC)和 B 族维生素等。研究表明,VC(又称抗坏血酸)有助于提高凡纳滨对虾存活率,缺乏 VC,其存活率明显降低,而且体重小的虾比体重大的对 VC 的缺乏更敏感;同时,VC 影响凡纳滨对虾蜕壳。研究发现,凡纳滨对虾体内 VC 含量在蜕壳前急剧升高(He 等,1993a)。凡纳滨对虾饲料中 VC 缺乏或不足时,将延长其蜕壳周期,降低其增重率。对 0.1 g 的稚虾,其饲料中 VC 的最低含量为 120 mg/g,随着体重的增加,饲料中 VC 添加量可以适当降低(Cuzon 等,2004)。研究凡纳滨对虾幼体(PL10)VC 的需求量时发现,饲料中添加 VC 能促进对虾幼体生长,而饲料中不添加 VC,则凡纳滨对虾生长迟缓,以增重率作为评价指标,并依据折线模型得出 130 mg/kg 是凡纳滨对虾幼体饲料中 VC 适宜需求量(Lavens 等,1999)。饲料中添加 5% 的鱼油时,添加 VC 100 mg/kg,凡纳滨对虾的生长状况良好(Ruff 等,2001)。利用增重率通过折线模型显示凡纳滨对虾饲料中最适的 VC 含量应为 19.09 mg/kg 饲料,但是如果考虑到恶劣环境下的压力刺激,饲料中 VC 的含量不能低于 36.02 mg/kg 饲料(牛津,2009);维持凡纳滨对虾幼虾正常的生长和成活所需要的 VC-2-多磷酸盐形式(AAPP)的抗坏血酸的需求量为 31~62 mg/kg 饲料;同时表明饲料中含有 15 mg/kg 或者

25 mg/kg 的 AAPP, 凡纳滨对虾幼虾的生长和成活差异不显著($P>0.05$)。测定饲料中的抗坏血酸活力的结果表明, 饲料经过加工和储存后抗坏血酸的活力为 90%; 虾体组织中抗坏血酸的活力和饲料中 AAPP 的水平成正比。组织抗坏血酸活力表明, 饲料中两种不同水平的 AAPP(15 和 25 mg/kg) 对对虾体中抗坏血酸生物合成的能力是不同的(Cuzon 等, 2004)。对凡纳滨对虾仔虾来说, 用盐度耐受力 and 弧菌感染耐受力来作为评价标准时, 含有抗坏血酸(2 000 mg/kg) 的微粒饲料能够全面改善对虾的生理状况(Kontara 等, 1997)。然而对第 36 d 的后期凡纳滨对虾仔虾来说, 食用 130 mg/kg 的抗坏血酸(单磷酸盐形式), 在盐度耐受力方面没有任何改善(Lavens 等, 1999)。凡纳滨对虾饲料中添加 VC 能显著促进对虾幼体生长, 提高其免疫机能, VC 且与 β -葡聚糖具有互作效应(López 等, 2003)。饲料中添加以不同水平维生素 C-2-磷酸酯(添加量分别为 0、75、150、300 和 600 mg/kg) 喂养凡纳滨对虾 10 周, 饲养试验进行到第 4 周发现, 投喂添加了 VC-2-磷酸酯饲料的凡纳滨对虾生长显著优于未添加组, 但却未显著影响凡纳滨对虾的成活与饲料利用($P>0.05$)。饲养到第 10 周时发现, 投喂添加了 VC-2-磷酸酯饲料的凡纳滨对虾生长未得到改善, 但其成活率却显著提高了($P<0.05$)。凡纳滨对虾的体水分、脂肪、蛋白质和维生素 C 在肝胰脏中的积累量受到 VC-2-磷酸酯的影响显著($P<0.05$)。VC 缺乏或过量(超过 300 mg/kg 饲料)均显著降低凡纳滨对虾非特异性免疫力。综合考察凡纳滨对虾的生长、成活以及血清中酚氧化酶活力得出 150 mg/kg 为其饲料中 VC 适宜添加量(周歧存等, 2004a)。饲料中不添加 VC 时, 凡纳滨对虾体重增长随着饲料中免疫多糖添加量的升高而显著提高($P<0.05$); 而当饲料中 VC 浓度增加到 120 mg/kg 饲料, 凡纳滨对虾体重增长却并不随免疫多糖添加量的升高而显著上升($P>0.05$), 饲料中添加 VC 的各组对虾体重增长显著高于未添加 VC 组($P<0.05$) (周歧存等, 2004b)。研究表明, 凡纳滨对虾投喂 VC 磷酸酯强化培育的轮虫后的抗氧化能力(SOD、CAT、GPX、GST)提高, 抗水环境中氨氮能力增强(Wang 等, 2006)。当用抗坏血酸多磷酸盐(L-ascorbyl-2-polyphosphate, LAPP)作为饲料中的 VC 源, 用增重率作为评价标准时, 凡纳滨对虾仔虾的最适 VC 需求量为 191 mg/kg; 当用低溶氧耐受力作为评价标准时, 凡纳滨对虾仔虾的饲料中的 VC 含量不应低于 360 mg/kg(Niu 等, 2009)。生产实践中, 凡纳滨对虾饲料中的 VC 营养需求量应根据养殖模式、环境因子、凡纳滨对虾发育阶段与健康情况等

不断调整。

有关凡纳滨对虾 B 族维生素营养生理需求近几年开展了一系列研究。研究表明, 在初始体重(0.55±0.03) g 的凡纳滨对虾半纯化日粮中添加维生素 B₁(Vitamin B₁, VB₁) 19.70~50.80 mg/kg 能显著提高其特定生长率和饲料效率($P<0.05$), 但添加 VB₁ 对凡纳滨对虾的体成分和肝胰脏中的淀粉酶活性影响不显著($P>0.05$)。添加 VB₁ 50.80 mg/kg 日粮组的凡纳滨对虾血清转酮醇酶(TKA)活性最高, 显著高于未添加 VB₁(0.83 mg/kg) 组($P<0.05$), 与其他添加组间差异不显著($P>0.05$)。在本试验条件下研究得出, 以凡纳滨对虾生长性能和血清 TKA 为评价指标, 通过折线模型分析得到凡纳滨对虾仔虾 VB₁ 需求量分别为 23.90 和 23.70 mg/kg 日粮(何志交等, 2010)。低盐度(为 3)时, 凡纳滨对虾仔虾饲料中维生素 B₆(Vitamin B₆, VB₆) 适宜营养需求量为 106.95~151.92 mg/kg(Li 等, 2010)。低盐度(为 3)下饲料蛋白质和 VB₆ 水平对凡纳滨对虾生长、成活率和肌肉中转氨酶活力影响的结果表明, 饲料中添加 200 mg/kg VB₆ 可以显著提高凡纳滨对虾的增重率、成活率、肥满度及天门冬氨酸转氨酶和丙氨酸转氨酶活力($P<0.05$)。同时还得出, 饲料中 VB₆ 和蛋白质对低盐度下凡纳滨对虾各项测定指标均无显著交互作用($P>0.05$)。这提示配制饲料时应同时满足凡纳滨对虾对蛋白质和 VB₆ 的营养需求量, 期望只满足或提高其中的一种而节约另外一种营养素以获得凡纳滨对虾的最佳生长和成活率的方式是不可行的(李二超等, 2010)。

目前关于凡纳滨对虾的维生素营养需求的研究还较少, 主要集中在凡纳滨对虾幼体和幼虾对 VE、VA、VC、VB₁ 和 VB₆ 的研究; 有关凡纳滨对虾养成期维生素需求量的研究更是缺乏, 而且对其维生素的相互作用及其作用机制研究较少。凡纳滨对虾对维生素的需求量受其生长阶段、生理状况、饲料组成和品质、营养素间的相互关系、环境因子以及养殖模式等因素影响, 其精准的需求量难以确定, 研究结果表明, 除生物素等少数维生素外, 凡纳滨对虾对维生素的需求量普遍高于鱼类。目前, 凡纳滨对虾配合饲料中维生素的推荐量见表 1。

2 凡纳滨对虾对矿物质的营养需要

矿物质(Minerals)包含常量元素(Macro elements)和微量元素(Micro elements), 与凡纳滨对虾物质代谢、渗透调节、酸碱平衡等生理过程有密切的关系, 对维持凡纳滨对虾的正常生长、发育、健康和繁殖具有重要的意义。尽管凡纳滨对虾能通过鳃、体表和肠等直

接从养殖水体中重吸收部分矿物质,但集约化养殖、淡化甚至淡水养殖模式下的凡纳滨对虾以重吸收方式获得足够的矿物质难以满足其机体的营养需要,必须摄取饲料中的矿物质。饲料中的矿物质应维持适量,否则将影响凡纳滨对虾生长与安全品质、养殖环境的安全,进而危害人类健康,故要在探明凡纳滨对虾矿物质营养需求量的基础上,选用利用率高的剂型,以促进高效环境友好型凡纳滨对虾配合饲料的研发。此外,海水养殖和淡化养殖甚至淡水养殖条件下的凡纳滨对虾饲料中的矿物质含量应该区别对待,因为海、淡水水体中矿物质的含量和种类存在显著差异。

表1 凡纳滨对虾配合饲料中维生素的推荐量

维生素	用量	维生素	用量
维生素 A	10 000 IU/kg	维生素 B ₆	5 mg/kg
维生素 D	5 000 IU/kg	维生素 B ₁₂	0.1 mg/kg
维生素 E	300 mg/kg	生物素	1 mg/kg
维生素 K	5 mg/kg	肌醇	300 mg/kg
维生素 B ₁	50 mg/kg	胆碱	400 mg/kg
维生素 B ₂	40 mg/kg	维生素 C	1 000 mg/kg
泛酸	75 mg/kg	叶酸	10 mg/kg
烟酸	200 mg/kg		

2.1 凡纳滨对虾常量元素的营养需求

凡纳滨对虾对常量元素的营养需求,目前主要是关于饲料中钙(Ca)、磷(P)、钠(Na)、钾(K)等的适宜含量的报道。钙、磷对维持凡纳滨对虾的生产、发育和健康具有重要的作用。研究表明,钙离子不仅参与构成虾体的外壳,且是许多酶的激活剂,对激素、神经和肌肉的正常功能的发挥起着非常重要的作用,磷除了构成虾体外壳和细胞膜的组分外,以磷酸根形式参与氧化磷酸化等过程,和RNA与Co₀、Co₁的合成有关,因而对虾类的蛋白质合成、饲料转化率等有重要的影响。有关饲料中钙、磷对凡纳滨对虾生长、发育和健康的影响的研究取得了较多的成果。研究报道,凡纳滨对虾饲料中不需添加钙,但P添加量与饲料中含Ca量密切相关。凡纳滨对虾基础饲料中未添加钙时,P含量为0.35%时就足够维持其正常生长和存活,而Ca含量为0.5%~1.0%时则应添加1.0%的P,当Ca为1.0%~2.0%时应添加2.0%的P。此外,Ca、P没有固定的最佳比例,但Ca比P不应大于2(Davis,1990)。研究不同钙(0%、0.75%、1.5%)、磷(0%、0.75%、1.5%)含量的配合饲料在不同的盐度(分别为4、17、30)水体中对凡纳滨对虾幼虾影响的结果表明,各因素对凡纳滨对虾幼虾体质量日增率、饲料系数、成活率的影响大小为:盐度>磷>钙,对饲料蛋白质效率的影响大小为:盐度>钙>磷。盐度为4时,不添加钙的试验组凡纳滨对虾日

增重率、成活率以及饲料系数和蛋白质效率最差,盐度为17时,饲料中磷的添加非常重要。凡纳滨对虾幼虾最适生长盐度为17,钙和磷的添加量均为1.5%(黄凯等,2004)。采用钙含量(0%、1%、2%)和磷含量(0%、0.5%、1%、1.5%、2%)配制的15种等氮、等能配合饲料饲喂凡纳滨对虾幼虾8周的试验结果表明,饲料中磷含量显著影响凡纳滨对虾幼虾的成活率、肝胰腺中碱性磷酸酶活性和肌肉中蛋白质含量,而饲料中钙、磷含量及其相互作用显著影响凡纳滨对虾的体重增长。添加钙(饲料中的钙含量为0.77%)的凡纳滨对虾饲料中磷为0.93%就能很好地满足其生理需求,若饲料中添加1%钙,则饲料中总磷含量2%时,凡纳滨对虾生长性能较好,饲料中的磷含量取决于饲料中的钙含量,饲料中添加2%的钙显著抑制凡纳滨对虾的生长,减少饲料中的钙含量有助于减少饲料中磷含量(Cheng等,2006)。研究表明,KH₂PO₄·2H₂O是凡纳滨对虾仔虾的最适磷源,饲料中的总磷含量应控制在2.09%~2.20%的范围内,KH₂PO₄·2H₂O在饲料中的添加量应小于1.0%(牛津,2009)。

钠、钾对维持凡纳滨对虾的生长、发育、健康和虾的品质也是非常重要的。研究表明,饲料中添加氯化钠(0%、0.05%、0.10%、0.20%、0.40%、0.80%、1.60%、3.20%、6.40%和12.80%)显著影响凡纳滨对虾幼虾[初始体湿质量为(1.041~1.104)g]存活率、特定生长率和饲料转换效率(P<0.05),而对凡纳滨对虾幼虾摄食量和吸收效率的影响不显著(P>0.05);在0.80%氯化钠水平,凡纳滨对虾的特定生长率显著高于0%、3.20%、6.40%和12.80%氯化钠水平,但与其它处理差异不显著(王兴强等,2006)。饲养在低盐条件下的凡纳滨对虾饲料中添加食盐(0%、1%、2%和4%),其虾体蛋白质和灰分含量随着饲料中食盐添加量升高而升高,虾体水分和脂肪则随着饲料中盐添加量升高而降低。其中,凡纳滨对虾虾体蛋白质含量在4%食盐添加量组增加极显著(P<0.01)。随着饲料中食盐添加量的增加,除凡纳滨对虾肌肉黏性下降外,肌肉硬度、内聚性、弹性、胶黏性、耐咀性和回复性等质构参数都逐渐升高,而且添加4%盐的凡纳滨对虾肌肉的硬度、弹性、胶黏性、耐咀性和回复性显著优于其他组(P<0.05),但各组的内聚性差异不显著(P>0.05)。由此可见,低盐条件下的凡纳滨对虾饲料中添加4%食盐可以改善其肌肉的质构(吴新颖等,2008)。饲养在低盐条件下的凡纳滨对虾分别投喂在基础饲料中添加0%(对照组)、1%、2%和4%的食盐的4种试验饲料40d后发现,凡纳滨对虾的肌原纤维直径、实心粗肌丝直径、空心粗肌丝直

径、暗带长度和H带长度之间受饲料中食盐添加量的影响不显著($P>0.05$) (吴新颖等, 2009)。饲养在盐度分别为1.5和30的凡纳滨对虾[初始体重为 (5.27 ± 0.20) g]分别投喂基础饲料中添加食盐量为0%(对照组)、0.5%、1.0%和2.0%的4种试验饲料50 d后发现,在低盐度(1.5)时,各试验组凡纳滨对虾的特定增长率(SGR)均显著高于对照组($P<0.05$),饲料系数(FCR)均显著低于对照组($P<0.05$),且在2.0%食盐添加组的饲料系数(FCR)最低($P<0.05$),同时发现,试验组的凡纳滨对虾成活率显著高于对照组($P<0.05$);凡纳滨对虾体蛋白质含量、肌肉游离氨基酸中必需氨基酸、非必需氨基酸及游离氨基酸总量均随着饲料中食盐添加量的增加而升高,且呈鲜味氨基酸(甘氨酸、丙氨酸和谷氨酸)含量均大幅度升高,虾体脂肪和水分含量则随着饲料中食盐添加量的增加而降低,适量添加食盐有助于改善饲养在低盐度下的凡纳滨对虾的综合感官指标,且以2.0%食盐添加组最优;凡纳滨对虾肝胰脏碱性磷酸酶活性随饲料中盐的添加量的增加而显著升高($P<0.05$);而饲养在盐度为30的凡纳滨对虾饲料中添加食盐则显著降低其特定增长率(SGR)($P<0.05$)(食盐添加越多影响越显著),且降低饲料转化率($P<0.05$) (梁萌青等, 2009)。低盐度养殖下的凡纳滨对虾配合饲料中添加 K^+ 10 g/kg能促进其生长,而添加 Na^+ 却对凡纳滨对虾生长和存活影响不显著(Roy等, 2007)。

2.2 凡纳滨对虾微量元素的营养需求

微量元素营养需求研究对凡纳滨对虾的代谢、生理、病理及疾病防治均有重大理论意义和应用价值,对科学配制凡纳滨对虾专用配合饲料以及研制微量元素添加剂是非常必要的。

铜(Cu)是凡纳滨对虾血蓝蛋白的重要组成成分,作为血液中的氧载体参与氧的运输,同时作为许多金属酶组成部分直接参与体内代谢,促进机体生长和维持机体健康。凡纳滨对虾对铜的需求量高于鱼类,凡纳滨对虾饲料中Cu含量为34 mg/kg时能满足其营养需求,但达到120 mg/kg时也未表现出毒副作用(Davis等, 1993)。在商业饲料配方中以硫酸铜形式添加30 mg/kg铜时发现凡纳滨对虾生长最好,且对虾血淋巴中酚氧化酶和超氧化物歧化酶(SOD)活力都显著升高(郭志勋等, 2003),饲料中蛋氨酸铜的添加量为10 mg/kg时,即可满足凡纳滨对虾生长、免疫的需要(董晓慧等, 2007)。不同铜源及添加量对初重为 (0.74 ± 0.01) g凡纳滨对虾生长性能、血清铜蓝蛋白和生长激素水平影响的结果表明,饲料中添加3种铜源均能不同程度提高凡纳滨对虾的特定增长率(SGR)、存活率

(Survival)和蛋白质效率(PER),降低饲料系数(FCR)等生产性能指标,但相同浓度的有机铜离子的生物利用率优于无机铜,其顺序为:蛋氨酸铜>富马酸铜>硫酸铜。不同铜源对凡纳滨对虾的体组成影响不显著($P>0.05$);各组间血清铜蓝蛋白(CER)含量差异不显著($P>0.05$),Met-16和Fum-32组的生长激素(GH)含量则显著高于对照组($P<0.05$),饲料铜对凡纳滨对虾的促生长作用可能是通过提高体内相关抗氧化酶的活性及刺激生长激素的分泌来实现(周萌等, 2010)。

锌(Zn)是凡纳滨对虾一种必需营养素,其生理作用是通过体内某些酶的作用而发挥的,锌不仅参与动物体内蛋白质、碳水化合物、脂肪、核酸、维生素以及微量元素等营养物质的代谢,而且还在生物膜稳定、胰岛素及其他激素的合成与代谢等生理机能中担负起重要角色,锌在动物繁殖免疫方面也具有重要的作用。推荐凡纳滨对虾对Zn需求量为110 mg/kg (Davis等, 1993)。凡纳滨对虾配合饲料中分别添加20、40、60、80和100 mg/kg硫酸锌和蛋氨酸锌,饲养4周和10周后称虾体质量,并采集对虾血清、肝胰脏和肌肉,测定血清中酚氧化酶(PO)和碱性磷酸酶(AKP)活性及肝胰脏和肌肉中的锌含量。试验结果表明,锌源和锌水平影响对虾4周末体质量,但对10周末的体质量影响不显著。锌源和锌水平不影响血清中的PO活性,但硫酸锌组凡纳滨对虾血清AKP活性表现出随添加量的升高而显著提高,蛋氨酸锌组AKP差异不显著。2种锌源的添加水平对肌肉中的锌含量影响不显著,但对肝胰脏中锌含量影响显著。生长、酶活和组织锌含量的统计结果表明,锌源之间存在显著差异,蛋氨酸锌的营养效果好于硫酸锌。饲料中蛋氨酸锌的添加量为40~60 mg/kg时,凡纳滨对虾的生长和免疫效果最好(杨原志等, 2006)。郭腾飞等(2011)研究蛋氨酸锌(添加水平分别为0.50、150 mg/kg)对凡纳滨对虾免疫抗菌机能和溶菌酶mRNA及Toll受体mRNA表达影响的结果表明,饲料中锌添加水平对凡纳滨对虾的免疫抗病机能及Toll受体mRNA和溶菌酶mRNA表达具有显著影响,相比未添加锌组饲料和添加150 mg/kg组饲料,凡纳滨对虾的免疫抗病机能在摄取添加50 mg/kg(饲料锌含量在73.25 mg/kg)饲料时得到改善,Toll受体mRNA和溶菌酶mRNA表达量最高。

镁(Mg)是多种辅基和激活剂。研究表明,凡纳滨对虾对Mg的营养需求量较高,为0.12%(Liu等, 1996)。如果淡化养殖,饲料中的Mg添加量还要增加。但也有研究表明,低盐度养殖下的凡纳滨对虾配合饲料中添加Mg却对生长和存活影响不显著(Roy等, 2007)。

尽管低盐度条件下的凡纳滨对虾配合饲料中添加 Mg^{2+} 对其生长、存活影响不显著,但适量添加能促进凡纳滨对虾生长和提高其存活率(Roy 等,2009)。

硒(Se)是动物生命活动中所必需的微量元素,它是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组成成分,能防止细胞线粒体的脂质过氧化,保护细胞膜不受脂质代谢副产物的破坏。Se 对于维持凡纳滨对虾的生长、发育和健康也是非常重要的。饲料中硒含量为 0.2~0.4 mg/kg 时,凡纳滨对虾生长最好(Davis,1990)。凡纳滨对虾饲料中适量添加 Se 和还原型谷胱甘肽(GSH)显著影响其生长性能、机体抗氧化能力和抗硝基氮应激能力,提高凡纳滨对虾的成活率,并得出凡纳滨对虾饲料中 Se 和 GSH 添加量分别为 0.1 mg/kg 和 120 mg/kg 时,其生长性能最佳(储霞玲,2009)。在一定剂量范围内,凡纳滨对虾饲料中的 Se 和 VE 之间具有动态抗氧化交互作用,当凡纳滨对虾饲料中 VE 和 Se 添加量分别为 400 mg/kg、0.4 mg/kg 时,其抗氧化交互作用显著(胡俊茹等,2010)。

铁(Fe)作为动物的必需微量元素参与载体组成、转运和贮存营养素以及体内物质代谢和机体生理防御功能。测定结果表明,凡纳滨对虾体内铁贮存量可达 180 mg/kg(干重),其量随着凡纳滨对虾的生长而逐渐减少(Páez-Osuna 等,1995)。尽管有研究表明对虾的饲料中不需要添加铁(Kanazawa 等,1984;Davis 等,1992),且饲料中铁的含量超过 60 mg/kg 会抑制日本对虾的生长(Kanazawa 等,1984),但当凡纳滨对虾商品配合饲料中铁添加量高达 80 mg/kg 时未显著影响其生长与成活率。

锰(Mn)是迄今已经确认的动物营养必需的微量元素之一,广泛分布于动物组织中,是激酶、磷酸转移酶、水解酶和脱羧酶等许多酶的激活剂,可激活特定酶,如糖基转移酶;非特定酶,如激酶、水解酶、脱羧酶等,Mn 也是精氨酸、丙酮酸羧化酶及超氧化物酶等的活性基团或辅助因子,在三羧酸循环中起重要作用,是生物体内重要的微量成分,具有促生长、增强免疫力和提高动物繁殖性能等作用。然而有研究表明,凡纳滨对虾饲料中不需要加 Mn(Liu 等,1997)。

3 展望

完善凡纳滨对虾维生素和矿物质营养需求研究,对开发高效环境友好型凡纳滨对虾配合饲料极其重要,然而现有相关研究成果不满足其配合饲料生产需求,不利于推进凡纳滨对虾“标准化、规模化、集约化和产业化”发展。今后应加强对凡纳滨对虾维生素和矿物质的营养生理及其代谢研究,以期为进一步

优化高效饲料配方,提高饲料的转化率提供科学依据。

① 研究凡纳滨对虾各生长发育阶段的维生素和矿物质营养生理及其代谢规律,探讨不同饲养环境和养殖模式下凡纳滨对虾各生长阶段维生素和矿物质适宜营养需求量;

② 研究各种维生素或矿物质之间相关关系,以发挥各种维生素或矿物质的生理作用;

③ 研究维生素和矿物质对凡纳滨对虾的交互作用;

④ 研究维生素或矿物质对凡纳滨对虾免疫、繁殖、营养品质的影响及其作用机制。

参考文献

- [1] 牛津. 凡纳滨对虾仔虾对部分营养素的营养需求及其营养生理研究[D].广州:中山大学,2009.
- [2] 王兴强,马甦,董双林,等.饲料中添加氯化钠对凡纳滨对虾存活、生长和能量收支的影响[J].海洋科学,2006,30(11):64-68.
- [3] 王慧春. 虾青素对凡纳滨对虾的免疫防护及对虾养殖的水质监测和 WSSV 检测[D].保定:河北大学,2010.
- [4] 何志交,曹俊明,陈冰,等.凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)维生素 B₁ 需求量的研究[J].动物营养学报,2010,22(4):977-984.
- [5] 吴新颖,梁萌青,方伟,等.饲料中添加食盐对低盐养殖凡纳滨对虾肌肉组织形态结构的影响[J].渔业科学进展,2009,30(5):40-46.
- [6] 吴新颖,梁萌青,薛长湖,等.饲料中添加盐对低盐养殖凡纳滨对虾肌肉常规营养成分及质构的影响[J].海洋水产研究,2008,29(6):84-89.
- [7] 李二超,曾嶂,禹娜,等.饲料蛋白质和维生素 B₆ 对低盐度下凡纳滨对虾生长和转氨酶活力的影响[J].动物营养学报,2010,22(3):634-639.
- [8] 杨奇慧,周歧存,迟淑艳,等.饲料中维生素 A 水平对凡纳滨对虾生长、饲料利用、体组成成分及非特异性免疫反应的影响[J].动物营养学报,2007,19(6):698-705.
- [9] 杨原志,董晓慧.锌源对凡纳滨对虾生长免疫的影响[J].饲料研究,2007(1):1-4.
- [10] 陈亚坤. VC 对拥挤胁迫下的南美白对虾免疫机能的影响[D].保定:河北农业大学,2011.
- [11] 周歧存,丁燊,郑石轩,等.维生素 C 对凡纳滨对虾生长及抗病力的影响[J].水生生物学报,2004a,28(6):592-598.
- [12] 周歧存,郑艾,阳会军,等.维生素 C 和免疫多糖对凡纳滨对虾生长、饲料利用和虾体主要成分的影响[J].海洋科学,2004b,28(8):9-13.
- [13] 周萌,王安利,曹俊明.饲料中不同形式的铜及添加量对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长性能、血清铜蓝蛋白和生长激素水平的影响[J].海洋与湖沼,2010,41(4):577-583.
- [14] 胡俊茹,王安利,曹俊明.维生素 E 和硒互作对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)抗氧化系统的调节作用[J].海洋与湖沼,2010,41(1):68-84.
- [15] 郭志勋,陈毕兰,徐力文,等.饲料中铜的添加量对凡纳滨对虾生

- 长、血液免疫因子及组织铜的影响[J].中国水产科学,2003, 10 (6): 526-528.
- [16] 郭志勋,陈毕生,徐力文,等.蛋氨酸铜和硫酸铜在凡纳对虾饲料中的应用效果比较[J].南方水产,2005, 1(2): 56-60.
- [17] 郭腾飞,黄旭雄,苏明,等.饲料锌添加水平对凡纳滨对虾免疫抗菌机能和溶菌酶 mRNA 及 Toll 受体 mRNA 表达的影响[J].水产学报,2011,35(7):1081-1089.
- [18] 梁萌青,王士稳,王家林,等.饲料中添加食盐对凡纳滨对虾生长及风味的影响[J].渔业科学进展,2009, 30(3): 117-124.
- [19] 黄凯,王武,卢洁,等.饲料中钙、磷和水体盐度对南美白对虾幼虾生长的影响[J].海洋科学,2004,28(2):21-26.
- [20] 储霞玲.硒和谷胱甘肽联合作用对凡纳滨对虾生长及抗氧化功能的影响[D].广州:中山大学, 2009.
- [21] 董晓慧,杨原志,郑石轩,等.不同形式钴对凡纳滨对虾生长和组织钴含量的影响[J].湛江海洋大学学报, 2006(6): 8-12.
- [22] 董晓慧,杨原志,郑石轩,等.饲料中不同铜源和水平对凡纳滨对虾生长、免疫和组织铜含量的影响[J].大连水产学院学报,2007, 22(5): 377-383.
- [23] 裴素蕊.饲料中添加虾青素对凡纳滨对虾的影响及作用机理[D].保定:河北大学, 2009.
- [24] Cheng K M, Hu C Q, Liu Y N, et al.Effects of dietary calcium, phosphorus and calcium / phosphorus ratio on the growth and tissue mineralization of *Litopenaeus vannamei* reared in low - salinity water[J]. Aquaculture, 2006, 251: 472-483.
- [25] Cuzon G, Lawrence A, Gaxiola G, et al. Nutrition of *Litopenaeus vannamei* reared in tanks or in ponds [J]. Aquaculture, 2004,235 (1/4):513-551.
- [26] Davis D A, Boyd C E, Rouse D B.Effects of Potassium, Magnesium and Age on Growth and Survival of *Litopenaeus vannamei* Post-Larvae Reared in Inland Low Salinity Well Waters in West Alabama [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2005,36 (3):416-419.
- [27] Davis D A,Gatlin D M.Evaluation of the dietary zinc requirement of *Penaeus vannamei* and effects of phytic acid on zinc and phosphorus bioavailability[J]. J World Aquac Soc, 1993,241(1):40-47.
- [28] Davis D A, Lawrence A L, Gatlin III D.Dietary copper requirement of *P. vannamei*[J]. Bull. Jpn. Soc. Sci.Fish., 1993,59(1):117-122.
- [29] Davis D A, Lawrence A L, Gatlin III D M. Mineral requirements of *Penaeus vannamei*: a preliminary examination of the dietary essentiality for thirteen minerals[J]. J. World Aquac. Soc., 1992, 23 (1):8-14.
- [30] He H, Lawrence A L, Liu R Y. Evaluation of dietary essentiality of fat-soluble vitamins, A, D, E and K for penaeid shrimp (*Penaeus vannamei*)[J]. Aquaculture ,1992. 103,177-185.
- [31] He H, Lawrence A L. Vitamin E requirement of *Penaeus vannamei*[J]. Aquaculture,1993a, 118:245-255.
- [32] He H,Lawrence A L. Vitamin C requirements of the shrimp *Penaeus vannamei*[J].Aquaculture, 1993b,114:305- 316.
- [33] Kanazawa A,Teshima S,Sasald M.Requirements of juvenile prawn for ealdum,phosphorus, magnesium, potassium, copper,manganese and iron[J]. Mem. Fac. Fish Kagoshima. Univ., 1984,33:63-71.
- [34] Kontara E K M, Merchie G, Lavens P, et al. Improved production of postlarval white shrimp through supplementation of L-ascorbyl-2-polyphosphate in their diet[J]. Aquacult Int., 1997, 5:127-136.
- [35] Lavens P, Merchie G, Ramos X, et al.Supplementation of ascorbic acid 2-monophosphate during the early postlarval stages of the shrimp *Penaeus vannamei*[J]. Aquac. Nutr., 1999,5(3):205-209.
- [36] Li E, Yu N, Chen L Q, et al. Dietary Vitamin B₆ Requirement of the Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at Low Salinity [J]. Journal of the World Aquaculture Society,2010, 41(5):756-763.
- [37] Liao I C, Chien Y H. The Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in Asia: The World's Most Widely Cultured Alien Crustacean. In the Wrong Place - Alien Marine Crustaceans: Distribution, Biology and Impacts Invading Nature - Springer Series in Invasion Ecology, 2011, Volume 6, Part 4, 489 -519, DOI: 10.1007/978-94-007-0591-3_17.
- [38] Liu Y, Wang W N, Wang A L, et al. Effects of dietary vitamin E supplementation on antioxidant enzyme activities in *Litopenaeus vannamei* (Boone,1931) exposed to acute salinity changes [J]. Aquaculture, 2007, 265(1/4): 351-358.
- [39] López N, Cuzon G, Gaxiola G. Physiological, nutritional, and immunological role of dietary β 1-3 glucan and ascorbic acid 2-monophosphate in *Litopenaeus vannamei* juveniles [J]. Aquaculture, 2003, 224(1/4):223-243.
- [40] Pérez-Osuna F,A C Ruiz-Fernández.Trace metals in the Mexican shrimp *Penaeus vannamei* from estuarine and marine environments[J]. Environmental pollution, 1995,87(2) 243-247.
- [41] Roy L A, Davis D A, Nguyen T N, et al. Supplementation of Chelated Magnesium to Diets of the Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, Reared in Low-salinity Waters of West Alabama [J]. Journal of the World Aquaculture Society,2009, 40 (2):248-254.
- [42] Roy L A, Davis D A, Saoud I P, et al.Supplementation of potassium, magnesium and sodium chloride in practical diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters[J]. Aquaculture Nutrition,2007,13(2):104-113.
- [43] Ruff N, Lavens P, Huo J Z,et al. Antioxidant effect of dietary tocopherol and ascorbic acid on growth and survival of *Litopenaeus vannamei* postlarvae[J]. Aquaculture International,2001,9(2):115-126.
- [44] Saoud I P, ROY L A, DAVIS D A. Chelated Potassium and Arginine Supplementation in Diets of Pacific White Shrimp Reared in Low-Salinity Waters of West Alabama [J].North American Journal of Aquaculture,2007, 69: 265-270.
- [45] Wang W N, Wang Y, Wang A L. Effect of supplemental L-ascorbyl-2-polyphosphate (APP) in enriched live food on the immune response of *Penaeus vannamei* exposed to ammonia-N[J].Aquaculture,2006, 256 552-557.

(编辑 沈桂宇 guiyush@126.com)