

文章编号: 1000-0615(2019)10-2093-09

DOI: 10.11964/jfc.20190811925

· 综述 ·

## 对虾微量元素研究进展

焦乐飞, 代恬梦, 金敏, 孙蓬, 周歧存\*

(宁波大学海洋学院, 浙江宁波 315211)

**摘要:** 微量元素作为多种酶的辅助因子或结构成分, 参与机体多种新陈代谢过程, 在维持动物健康和正常生理功能中发挥着极其重要的作用。动物对微量元素营养需求极少, 但缺乏、过量或摄入不平衡都会对动物机体生长代谢、免疫、繁殖等带来严重不良影响。本文较详细、系统地总结了国内外关于微量元素在对虾生长代谢、免疫、疾病预防、性腺发育等方面的作用, 以及对虾对无机和有机微量元素的吸收、转运和代谢机理, 为今后开展对虾优质配合饲料研发提供理论依据。

**关键词:** 对虾; 微量元素; 营养; 吸收转运

**中图分类号:** S 963

**文献标志码:** A

我国是世界对虾养殖第一大国, 2018年养殖总量为130万t, 占据全球对虾总产量的26%<sup>[1]</sup>。在整个对虾养殖过程中, 营养全面的优质高效配合饲料是对虾稳产高产的重要保障。目前, 对虾饲料研发工作多集中在蛋白质、脂质、糖类等主要营养素, 而对微量元素研究相对较少。微量元素作为饲料添加剂的研究和应用一直是动物营养领域研究的热点课题之一。微量元素是动物必需的一种营养元素, 主要以多种酶的必需组成部分(辅酶、辅基等)或激活剂形式参与机体内一系列生理、生化反应, 在动物营养物质代谢、生长发育、疾病预防、免疫功能等方面发挥着重要的作用<sup>[2]</sup>。对虾无法体内合成微量元素<sup>[3]</sup>, 其对微量元素的利用需依赖于外源饲料和水摄入吸收。因此, 阐明在海水养殖条件下, 微量元素在对虾中[凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)、斑节对虾(*Penaeus monodon*)等]的营养生理作用, 为今后微量元素应用于生产实际以满足对虾基础营养需要, 并能有效改善对虾生长、免疫等功能具有重要意义。

### 1 对虾需要的微量元素种类及功能

微量元素是动物体内数百种细胞酶或转录

因子的基本辅因子, 参与多种生物化学过程, 如生长、免疫、繁殖、骨骼发育、抗氧化应激等。缺乏、过量或摄入不平衡都会造成不良影响<sup>[4]</sup>。目前, 对虾矿物质预混料中添加的微量元素为铁、铜、锌、锰、硒、钴、碘。

#### 1.1 铜的营养生理和毒理作用

**铜的营养生理作用** 研究发现, 日粮中添加适量铜元素对对虾生长、免疫、肠道菌群、繁殖机能等具有调节作用。以增重率为判据, 经多项式回归得出以羟基蛋氨酸铜、碱式氯化铜和五水合硫酸铜为铜源时, 凡纳滨对虾幼虾铜的需要量分别为14.42、22.14和26.40 mg/kg<sup>[5]</sup>。生物利用率从高到低排序, 依次为羟基蛋氨酸铜、五水合硫酸铜和碱式氯化铜<sup>[6-7]</sup>。日粮中添加铜还能增强对虾自身免疫力、提高抗病力。饲料中添加25~55 mg/kg铜(五水合硫酸铜)提高斑节对虾血细胞酚氧化酶活性, 上调酚氧化酶原系统相关基因(pro PO1、pro PO2、PE和PPAF)表达<sup>[8]</sup>。养殖水体中添加0.2 mg/L铜加快了凡纳滨对虾蜕壳速率, 提高繁殖性能(蜕壳前期: 雌性, 50%; 雄性, 40%), 同时增加了卵母细胞直径<sup>[9]</sup>。另外, 有报道指出饲料中铜添加可

收稿日期: 2019-08-28 修回日期: 2019-09-29

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900400)

通信作者: 周歧存, E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

通过调节和控制对虾某些激素合成和分泌,从而促进对虾的生长发育。铜对凡纳滨对虾的促生长作用可能与促进血清生长激素分泌有关<sup>[10]</sup>。

**铜的毒理作用** 当环境中铜含量超过一定浓度时,会对对虾的营养物质吸收、生长发育、免疫功能和虾体成色造成影响。

当水体中铜含量超标时,过量铜摄入会导致铜在对虾胃、肠、鳃、肝胰腺等组织中快速积累,影响其他营养物质蓄积。外源铜浓度为0.10 mg/L会导致凡纳滨对虾体内铜蓄积和营养成分流失,其中受外源铜环境影响程度为磷>肌苷酸>灰分>铁>钙<sup>[11]</sup>。凡纳滨对虾幼虾暴露在26 μg/L铜浓度的水体中会发育迟缓、无法形成胚胎;成虾在26 μg/L铜浓度的水体中暴露3 d就会导致胚胎无法存活<sup>[12]</sup>。0.675 mg/L铜胁迫会导致凡纳滨对虾出现鳃组织增生,血淋巴腔变窄;当水体浓度增加至1.325 mg/L后,会进一步出现血淋巴腔坏死症状<sup>[13]</sup>。1 mg/L铜会导致凡纳滨对虾胚胎出现畸形眼斑,而未发育完全的刚毛则出现在整个或仅在发育后半期卵孵化的幼虫中<sup>[14]</sup>。3.5 mg/L铜暴露45 h诱导斑节对虾氧化应激引起的细胞凋亡,抑制吞噬活性,提高细胞质钙离子浓度<sup>[15]</sup>。长期水体铜胁迫会影响凡纳滨对虾对栖息地的选择,导致群体数量急剧减少<sup>[16]</sup>。水体铜胁迫还会影响对虾的免疫功能,当水体铜浓度超过1 mg/L,凡纳滨对虾对溶藻弧菌(*Vibrio alginolyticus*)感染的敏感性增加,免疫能力下降<sup>[17]</sup>。水体铜胁迫会导致凡纳滨对虾体色变红(铜离子可与虾青素末端环己烯环上的2个氧原子络合形成外观更红的新型络合物),该结果质疑了普遍认可的高色素虾比浅色虾更健康的观点<sup>[18]</sup>。

## 1.2 锌的营养生理和毒理作用

**锌的营养生理作用** 锌参与近300种金属酶的合成与激活,并辅助调控2 000多种转录因子<sup>[19]</sup>。据报道,日粮中添加锌元素对对虾生长、免疫、性腺发育等功能具有调节作用。以增重率、全虾和肌肉中锌含量为判据,凡纳滨对虾在以鱼粉、豆粕等为蛋白源的饲料中锌的需求量为71.48~95.06 mg/kg(硫酸锌形式),58.69~69.29 mg/kg(蛋氨酸锌形式)<sup>[20]</sup>。经溶藻弧菌人工急性感染后,添加50 mg/kg锌组(锌含量为73.25 mg/kg饲料)凡纳滨对虾鳃组织中Toll受体和溶菌酶mRNA表达量增加,肌肉、肝胰腺和血淋巴中溶

菌酶活性增加,半致死时间延长<sup>[21]</sup>。斑节对虾实验中也发现,添加35~48 mg/kg锌对斑节对虾非特异性免疫反应具有调节作用<sup>[22]</sup>。锌在凡纳滨对虾卵巢发育过程中不断积累,与卵黄形成期和前卵黄形成期相比,卵巢锌含量在皮质期显著增加<sup>[23]</sup>。

**锌的毒理作用** 对虾对锌的摄取有一定限度,当水体环境中锌元素富集时易造成毒性作用。研究发现,水体中2 mg/L锌胁迫导致圣保罗对虾(*Penaeus paulensis*)耗氧量抑制25%,铵排泄量升高51.85%;在低盐环境中会加剧耗氧量的抑制和铵排泄量的升高<sup>[24]</sup>。急性暴露3 mg/L锌48 h会导致鳃组织病理学改变,表现为鳃丝上皮水肿和细胞增殖明显,导致鳃丝表面粗糙<sup>[25]</sup>。

## 1.3 锰的营养生理作用

锰是精氨酸酶、丙酮酸羧化酶及超氧化物歧化酶等的活性基团或辅助因子,也是水解酶、肽酶、激酶、脱羧酶和转移酶等的激活剂<sup>[26]</sup>。研究发现,锰对动物机体的免疫功能、细胞能量、繁殖、消化骨骼生长、对抗自由基等具有调节作用<sup>[27]</sup>。

目前,对虾锰元素研究主要围绕在基础营养需要量、促生长、免疫调节作用。据报道,对虾在不同生长发育阶段对锰的需求量存在差异;以硫酸锰与蛋氨酸锰为锰源时,凡纳滨对虾幼虾饲料中锰的适宜添加量分别为33.00和24.77 mg/kg;饲料添加锰可提高血清碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、酚氧化物酶及总超氧化物歧化酶活性<sup>[28]</sup>。凡纳滨对虾亚成虾饲料锰适宜添加量为150~200 mg/kg;当凡纳滨对虾实验进入后期(第8周,末体质量7.86 g),由于低水平的锰能满足对虾的生长需要,对生长性能无显著影响<sup>[29]</sup>。

## 1.4 铬的营养生理作用

铬在自然界中最常见的价态呈现三价和六价,其中三价铬是生物体中发现的最稳定的氧化态,协助胰岛素发挥作用,并通过激活某些酶参与脂质、碳水化合物、蛋白质和核酸等营养代谢<sup>[30]</sup>。已证实,日粮中添加三价铬在调节动物的生长性能、葡萄糖代谢、免疫、繁殖等方面具有积极作用<sup>[31-32]</sup>。特别是在动物处于应激状态时,需适当补充铬元素<sup>[33]</sup>。但也有研究指出,铬只能被认为具有药理作用,而不是一种必需元素<sup>[34]</sup>。

据报道,凡纳滨对虾的铬适宜添加量为1.33 mg/kg(三氯化铬)、1.27 mg/kg(吡啶甲酸铬)、1.04 mg/kg(蛋氨酸铬)<sup>[28]</sup>;铬源、铬添加水平以及二者之间的交互作用对凡纳滨对虾全虾粗脂肪和粗灰分、非特异性免疫酶活性、肌肉中鲜味氨基酸含量等有显著影响;当水体铬含量过高时,过量铬暴露会导致凡纳滨对虾胚胎畸形,死亡率增加<sup>[35-36]</sup>。

### 1.5 硒的营养生理作用

硒在构成蛋白质及其在催化活性方面发挥重要作用,在对虾营养生理方面也具有重要作用。硒作为5'-脱碘酶的组成成分,催化甲状腺素(T4)转换为三碘甲腺原氨酸(T3),促进生长激素的合成和分泌<sup>[37]</sup>。硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性中心,参与过氧化氢和脂质氢过氧化物分别转化为水和脂类、醇类的过程,从而保护细胞免受过氧化物在体内的积累而导致中毒<sup>[38]</sup>。

研究发现,饲料中添加0.30 mg/kg硒,能显著增强机体免疫力,提高凡纳滨对虾幼虾的生长性能、抗氧化酶活性和抗亚硝酸盐胁迫的能力;在相同硒添加剂量时,蛋氨酸硒效果优于酵母硒和亚硒酸钠<sup>[39-40]</sup>。硒与维生素E存在相互作用,在抗氧化作用上起着补偿和协同的作用。当在基础饵料中分别添加维生素E和硒在400和0.4 mg/kg时,凡纳滨对虾机体抗氧化能力整体达到平衡,能有效抵制氧自由基的损伤<sup>[41]</sup>。此外,关于硒与其他微生态制剂联合添加对对虾的影响也有报道。 $\beta$ -葡聚糖与硒联合添加能一定程度提高凡纳滨对虾幼虾生长性能、降低饵料系数、提高免疫防御功能<sup>[42]</sup>。也有报道指出,在饲料总蛋白为38%时,凡纳滨对虾饲料中添加1%的酵母硒可提高豆粕替代鱼粉的水平,替代比例为48%~72%<sup>[43]</sup>。

### 1.6 钴的营养生理作用

钴作为维生素B<sub>12</sub>的组成成分,还能以辅酶的形式参与许多生化反应,如促进蛋白质的同化作用,合成血红蛋白和肌肉蛋白<sup>[44]</sup>。另外,钴作为胰岛细胞合成胰岛素的必需微量元素参与控制血糖水平<sup>[45]</sup>。

目前,对虾钴元素研究主要围绕在基础营养需要量和其促生长、提高免疫作用方面。饲

料中添加15 mg/kg蛋氨酸钴可提高凡纳滨对虾幼虾0~8周增重率,而15 mg/kg氯化钴对0~8周增重率无影响<sup>[46]</sup>。随着凡纳滨对虾体长的增加,保持凡纳滨对虾最佳免疫机能的钴需求量随之增加,体长分别为1~5、5~8、8~10和10 cm以上时,肌肉中超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、碱性磷酸酶和血清中溶菌酶活性最强时钴含量分别为25、50、50~75和150 mg/kg<sup>[47]</sup>。当饲料中的钴添加量超过150 mg/kg,则会对中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)产生毒性,抑制其生长<sup>[48]</sup>。

### 1.7 碘的抗菌杀毒作用

碘是防治水产养殖动物病害的有效抗菌消毒剂。碘离子能氧化细菌的细胞浆、与蛋白质的氨基相结合;能氧化病毒蛋白质的活性基团,通过改变其细胞膜的通透性和使细胞内物质外渗、凝固蛋白质,阻断其繁殖或直接将其灭杀;碘离子在与各种细菌接触时,能通过电位差和级差保留有益菌,杀灭有害菌<sup>[49]</sup>。拌料投喂和全塘泼洒聚维酮碘能有效杀灭常见水产致病细菌如副溶血弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)、拟态弧菌(*V. mimicus*)、无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*),降低凡纳滨对虾偷死综合征发病率<sup>[50]</sup>。碘作为消毒剂有2种添加形式:无机碘(碘、碘酊)、有机碘(聚维酮碘、季铵盐络合碘、四环铵络合碘等)<sup>[51]</sup>。在实际养殖生产中,碘用量存在一定的盲目性,需考虑到其安全浓度。

## 2 有机微量元素

近年来,随着精准饲养技术理念的提出,如何提高饲料营养物质利用率、降低营养浪费和减少养分排泄等是目前动物营养领域的研究热点。多年来对虾饲料中以传统无机盐来提供微量元素营养,但长期使用出现的弊端不容忽视,如适口性差、生物利用率低、生产和使用过程中存在的安全隐患(有毒有害物质残留)、矿物元素拮抗、破坏营养成分、污染环境等。有机微量元素因其具有稳定的化学性能、较高的生物学效价、无毒副作用等特点,已成为养殖行业日益关注的焦点<sup>[52-53]</sup>。

有机微量元素是指微量元素添加剂中的金属离子与有机物及其分解产物(如氨基酸、小肽、有机酸、多糖衍生物等配位体)通过共价键

或离子键的结合形成的络合物或螯合物,目前主要以氨基酸为配体的螯合物研究较多。目前在对虾养殖实验中,以生长需要量为评价指标,发现饲料中有机铜、锌、锰、铬、硒、钴需要量低于其无机形式<sup>[6,20,28,40,46]</sup>。特别是在植物性蛋白源饲料中,添加蛋氨酸螯合形式的铜、锌、锰微量矿物预混料能改善植酸等拮抗因子引起的对微量元素生物利用率低的情况,同时提高凡纳滨对虾生长性能<sup>[54]</sup>。而在畜禽微量元素研究中,有机微量元素的应用效果报道不一致;前人总结了国内外65篇报道,发现29%的论文报道有机微量元素优于无机形态,63%的论文表明有机微量元素与无机形态间无明显差异<sup>[55]</sup>。大量研究发现,有机微量元素生物学利用率与其络(螯)合强度、络(螯)合有机种类、饲料组成、添加水平等密切相关<sup>[56]</sup>。因此,有机微量元素在对虾中的推广使用仍需大量实验论证。

### 2.1 无机微量元素吸收代谢机理

对虾主要从饲料、水环境中摄入微量元素。无机微量元素在对虾肠道内经肠黏膜上皮细胞吸收,通过金属转运蛋白调控金属离子在细胞内的吸收、排泄、细胞内转运及储存。

参与金属离子转运的转运蛋白有自然抗性相关巨噬细胞蛋白(Nramps)、金属离子转运蛋白家族SLC39(又名ZIP家族,包含14个成员)和SLC30、P型ATP酶、ABC转运蛋白、阳离子扩散蛋白。Nramps是一个高度保守的跨膜蛋白家族,参与大多数有机体的金属离子运输过程<sup>[57]</sup>。金属离子转运蛋白家族SLC39和SLC30(又名ZnT家族,包含10个成员)除了负责锌离子进出细胞,还参与铁、锰、铜等离子稳态维持<sup>[58]</sup>。P型ATP酶是与ATP结合的蛋白质,其功能在于介导二价金属阳离子转入或排出细胞<sup>[59]</sup>。ABC转运蛋白是一类超家族膜整合蛋白,通过结合和水解ATP来获得能量,将无机金属离子转移出(入)细胞或细胞器<sup>[60]</sup>。阳离子扩散蛋白(CDFs)的蛋白家族突变或是调控变化会改变对细胞功能至关重要的金属离子的浓度<sup>[61]</sup>。

### 2.2 有机微量元素吸收、代谢机理

生物学利用率为能被动物代谢利用的吸收的特定养分包括消化、吸收和吸收后被组织利用情况。有机微量元素的生物学利用率优于无机微量元素的一个关键因素是因为其吸收利用

好,与其吸收机制有密切关系。

有机微量元素的利用在很大程度上依赖于配体,其中氨基酸和其他易于接近肠细胞的小分子被认为是动物更好吸收利用微量元素的媒介物。现在,越来越多的人接受有机微量元素利用配体的吸收,而并非小肠中普通金属吸收机制。在金属氨基酸螯合物中,氨基酸配位体与金属离子的共价键和离子结合,将金属离子保护在螯合物的核心,从而保护金属氨基酸螯合物以整体的形式穿过黏膜细胞膜、黏膜细胞和基底细胞膜进入血浆<sup>[62]</sup>。近年来,体外利用人结肠Caco-2细胞构建肠上皮吸收模型实验证实了这一观点。氨基酸转运体可促进铜、锌离子在体外肠上皮细胞的吸收,并且锌吸收不受拮抗剂(钙、铜、植酸和叶酸)影响<sup>[63-64]</sup>。但是,不同氨基酸在促进微量元素吸收途径方面存在差异,如蛋氨酸促进铜在肠细胞顶膜侧吸收,而赖氨酸促进铜在基底端流出速率<sup>[63]</sup>。有机微量元素在被肠道吸收后发挥特定的代谢生理效应,且作用效果优于无机铜。日粮中添加氨基酸螯合铜可改善凡纳滨对虾幼虾肠道菌群结构,提高菌群丰富度和多样性,同时降低条件致病菌弧菌属的相对丰度<sup>[65]</sup>。饲料中添加30、50 mg/kg铜(蛋氨酸铜)可提高凡纳滨对虾超氧化物歧化酶活性和Toll受体mRNA表达水平,从而提高机体的抗弧菌能力<sup>[66]</sup>。另外,日粮中添加氨基酸螯合锌(蛋氨酸锌、赖氨酸锌、甘氨酸锌)可促进凡纳滨对虾生长、增强非特异性免疫应答和对哈维氏弧菌(*V. harveyi*)的抗感染能力,其中蛋氨酸螯合锌作用效果最优<sup>[67]</sup>。

## 3 总结与展望

目前对虾微量元素营养停留在满足基础营养需要的层级上,其具体作用机理仍未深入挖掘。未来仍有许多问题有待研究,主要归纳为如下2个方面:①研究集中在单一微量营养素需求,实验设计单一,未考虑其他因素干扰,微量元素间的协同与拮抗、微量元素与常量元素或者其他营养成分的协同与拮抗尚未研究;②对有机微量元素的研究仅仅停留在与无机元素的作用比较中,没有更深层次地从有机微量元素结构、理化性质、在胃肠道中的消化吸收和作用特点等方面去剖析其具体作用机理。

## 参考文献:

- [1] 中国水产频道. 2019年我国对虾总进口量或超80万吨 [EB/OL]. <http://www.fishfirst.cn/article-112950-1.html>, 2019-05-19/2019-08-28.  
www.fishfirst.cn. China's total imports of shrimp may exceed 800, 000 tons in 2019[EB/OL]. <http://www.fishfirst.cn/article-112950-1.html>, 2019-05-19/2019-08-28 (in Chinese).
- [2] Prashanth L, Kattapagari K K, Chitturi R T, et al. A review on role of essential trace elements in health and disease[J]. *Journal of Dr. NTR University of Health Sciences*, 2015, 4(2): 75-85.
- [3] National Research Council. Committee on the nutrient requirements of fish and shrimp. Nutrient requirements of fish and shrimp[M]. National Academies Press, 2011.
- [4] Soetan K O, Olaiya C O, Oyewole O E. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants: a review[J]. *African Journal of Food Science*, 2010, 4(5): 200-222.
- [5] 周双艳. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)幼虾铜、硒、钴营养生理研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.  
Zhou S Y. Study on nutrient physiology of copper, selenium and cobalt in *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [6] Bharadwaj A S, Patnaik S, Browdy C L, et al. Comparative evaluation of an inorganic and a commercial chelated copper source in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) fed diets containing phytic acid[J]. *Aquaculture*, 2014, 422-423: 63-68.
- [7] Zhou Y G, Allen Davis D, Rhodes M A. Comparative evaluation of copper sulfate and tribasic copper chloride on growth performance and tissue response in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* fed practical diets[J]. *Aquaculture*, 2014, 434: 411-417.
- [8] 洗健安, 王安利, 苗玉涛, 等. 饲料铜水平对斑节对虾血细胞中酚氧化酶原系统相关基因表达的影响[J]. *四川动物*, 2015, 34(2): 270-275.  
Xian J A, Wang A L, Miao Y T, et al. Effects of dietary copper levels on expression of prophenoloxidase system-related genes in haemocyte of *Penaeus monodon*[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2015, 34(2): 270-275(in Chinese).
- [9] Rao M S, Anjaneyulu N. Effect of copper sulfate on molt and reproduction in shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *International Journal of Biological Chemistry*, 2008, 2(1): 35-41.
- [10] 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(*Penaeus 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): 577-582.  
Zhou M, Wang A L, Cao J M. Effects of different forms of copper and supplement on growth performance, serum ceruloplasmin, and growth hormone level of *Penaeus vannamei*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(4): 577-582(in Chinese).
- [11] 林俊良, 张亚丽, 李素霞. 外源铜胁迫下茅尾海南美白对虾营养成分变化分析[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(23): 183-186.  
Lin J L, Zhang Y L, Li S X. Changes of nutritional components of *Penaeus vannamei* in Maowei Sea under exogenous copper stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(23): 183-186(in Chinese).
- [12] Manyin T, Rowe C L. Reproductive and life stage-specific effects of aqueous copper on the grass shrimp, *Palaemonetes pugio*[J]. *Marine Environmental Research*, 2010, 69(3): 152-157.
- [13] Soegianto A, Irawan B, Usman N. Effects of sublethal copper concentrations on gills of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*, Boone 1931)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 91(6): 630-634.
- [14] López Greco L S, Rodríguez E M, Bolaños J, et al. Toxicity of copper sulphate during early and late embryonic development of a *Palaemonid* shrimp (Crustacea)[J]. *Invertebrate Reproduction & Development*, 2002, 41(1-3): 165-170.
- [15] Xian J A, Wang A L, Ye C X, et al. Hagocytic activity, respiratory burst, cytoplasmic free-Ca<sup>2+</sup> concentration and apoptotic cell ratio of haemocytes from the black tiger shrimp, *Penaeus monodon* under acute copper stress[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2010, 152(2): 182-188.
- [16] Araújo C V M, Cedeño-Macías L A, Vera-Vera V C, et al. Predicting the effects of copper on local population decline of 2 marine organisms, cobia fish and whiteleg shrimp, based on avoidance response[J]. *Environmental*

- Toxicology and Chemistry*, 2016, 35(2): 405-410.
- [17] Yeh S T, Liu C H, Chen J C. Effect of copper sulfate on the immune response and susceptibility to *Vibrio alginolyticus* in the white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2004, 17(5): 437-446.
- [18] Martínez A, Romero Y, Castillo T, *et al.* The effect of copper on the color of shrimps: redder is not always healthier[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e107673.
- [19] Stefanidou M, Maravelias C, Dona A, *et al.* Zinc: a multipurpose trace element[J]. *Archives of Toxicology*, 2006, 80(1): 1-9.
- [20] 张海涛. 锌源、锌水平对凡纳滨对虾生长性能、生化和免疫指标及组织锌含量的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- Zhang H T. Effect of Zn sources and dietary Zn levels on growth performance, biochemical and immunity indices and tissue Zn content for *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [21] 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.
- Guo T F, Huang X X, Su M, *et al.* Effects of zinc supplementation in diet on the immunity, *Vibrio*-resistant ability, lysozyme mRNA and Toll receptor mRNA expressions in the white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(7): 1081-1089(in Chinese).
- [22] Shiau S Y, Jiang L C. Dietary zinc requirements of grass shrimp, *Penaeus monodon*, and effects on immune responses[J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1-4): 476-482.
- [23] Méndez L, Racotta I S, Acosta B, *et al.* Mineral concentration in tissues during ovarian development of the white shrimp *Penaeus vannamei* (Decapoda: Penaeidae)[J]. *Marine Biology*, 2001, 138(4): 687-692.
- [24] Barbieri E. Effects of zinc and cadmium on oxygen consumption and ammonium excretion in pink shrimp (*Farfantepenaeus paulensis*, Pérez-Farfante, 1967, Crustacea)[J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18(3): 312-318.
- [25] Wu J P, Chen H C, Huang D J. Histopathological alterations in gills of white shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone) after acute exposure to cadmium and zinc[J]. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2009, 82(1): 90-95.
- [26] Aschner J L, Aschner M. Nutritional aspects of manganese homeostasis[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2005, 26(4-5): 353-362.
- [27] Andreini C, Bertini I, Cavallaro G, *et al.* Metal ions in biological catalysis: from enzyme databases to general principles[J]. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2008, 13: 1205-1218.
- [28] 蔡海瑞. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)幼虾铬和锰营养生理研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016.
- Cai H R. Study on nutrient physiology of chromium and manganese for juvenile *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [29] 鲁耀鹏, 陈晓丹, 张秀霞, 等. 饲料锰含量对凡纳滨对虾亚成虾生长及抗氧化活力的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(2): 391-396.
- Lu Y P, Chen X D, Zhang X X, *et al.* Effects of dietary manganese amount on growth and antioxidant activities of sub-adult *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(2): 391-396(in Chinese).
- [30] Bhandari B M, Garg M R, Goswami A. Chromium-a new essential trace mineral for dairy animals: a review[J]. *Livestock Research International*, 2016, 4(3): 94-103.
- [31] Haq Z, Jain R K, Khan N, *et al.* Recent advances in role of chromium and its antioxidant combinations in poultry nutrition: a review[J]. *Veterinary World*, 2016, 9(12): 1392-1399.
- [32] Farag M R, Alagawany M, Abd El-Hack M E, *et al.* Role of chromium in poultry nutrition and health: beneficial applications and toxic effects[J]. *International Journal of Pharmacology*, 2017, 13(7): 907-915.
- [33] Sahin N, Hayirli A, Orhan C, *et al.* Effects of the supplemental chromium form on performance and oxidative stress in broilers exposed to heat stress[J]. *Poultry Science*, 2017, 96(12): 4317-4324.
- [34] Vincent J B. New evidence against chromium as an essential trace element[J]. *The Journal of Nutrition*, 2017, 147(12): 2212-2219.
- [35] Rayburn J R, Aladdin R K. Developmental toxicity of copper, chromium, and aluminum using the shrimp embryo teratogenesis assay: palaemonid with artificial

- seawater[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 71(3): 481-488.
- [36] Frías-Espericueta M G, Voltolina D, Osuna-López I, *et al.* Toxicity of metal mixtures to the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* postlarvae[J]. *Marine Environmental Research*, 2009, 68(5): 223-226.
- [37] Brown K M, Arthur J R. Selenium, selenoproteins and human health: a review[J]. *Public health nutrition*, 2001, 4(2b): 593-599.
- [38] Rayman M P. Selenium and human health[J]. *The Lancet*, 2012, 379(9822): 1256-1268.
- [39] 李小霞, 陈锋, 潘庆, 等. 硒源对凡纳滨对虾生长、体组成和抗氧化能力的影响[J]. *水产科学*, 2016, 35(03): 199-203.
- Li X X, Chen F, Pan Q, *et al.* Effects of dietary selenium sources on growth, body composition and antioxidant performance of juvenile pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(03): 199-203(in Chinese).
- [40] 李晓丽. 饲料中添加羟基蛋氨酸硒对凡纳滨对虾生长、抗氧化和抗亚硝酸盐胁迫的影响[D]. 厦门: 集美大学, 2017.
- Li X L. The effects of hydroxyl methionine selenium on growth, antioxidant ability, nitrite stress resistance for pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[D]. Xiamen: Jimei University, 2017(in Chinese).
- [41] 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(01): 68-74.
- Hu J R, Wang A L, Cao J M. Effects of dietary vitamin E and selenium on the antioxidant system of shrimp *Litopenaeus Vannamei*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(01): 68-74(in Chinese).
- [42] 刘群芳, 曹俊明, 黄燕华, 等.  $\beta$ -葡聚糖与硒, 维生素E联合添加对凡纳滨对虾生长, 血清免疫和抗氧化指标及抗病力的影响[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(5): 997-1006.
- Liu Q F, Cao J M, Huang Y H, *et al.* The combined effects of  $\beta$ -glucan with selenium and vitamin E on the growth performance, serum immune and antioxidant indexes, and disease resistance of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(5): 997-1006(in Chinese).
- [43] 王美雪, 路晶晶, 郭冉, 等. 不同水平豆粕替代鱼粉的饲料中添加酵母硒对凡纳滨对虾的影响[J]. *饲料工业*, 2017, 38(2): 30-34.
- Wang M X, Lu J J, Guo R, *et al.* Effects of dietary selenium yeast product on the *Litopenaeus vannamei* fed with different replacement levels of fish meal by soybean meal[J]. *Feed Industry*, 2017, 38(2): 30-34(in Chinese).
- [44] Yoshimatsu T, Higuchi T, Zhang D, *et al.* Effect of dietary cobalt supplementation on the population growth of rotifer *Brachionus rotundiformis*[J]. *Fisheries Science*, 2006, 72: 214.
- [45] Watanabe T, Kiron V, Satoh S. Trace minerals in fish nutrition[J]. *Aquaculture*, 1997, 151(1-4): 185-207.
- [46] 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(自然科学版)*, 2006, 6: 8-12.
- Dong X H, Yang Y Z, Zheng S X, *et al.* Effect of cobalt sources and its supplemental level on growth of *Penaeus vannamei* and Co concentration in selected organs of the Shrimp[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University(Nature Science Edition)*, 2006, 6: 8-12(in Chinese).
- [47] 许安阳. 硒钴锰对南美白对虾不同生长阶段免疫机能的影响[D]. 广州: 华南师范大学, 2005.
- Xu A Y. Effect of Se, Co, and Mn supplemented in the formulated diets on immune function of *Panaeus vannamei* in different grow periods[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2005(in Chinese).
- [48] 梁德海, 刘发义, 孙凤, 等. 中国对虾对Co需要量的研究[J]. *海洋科学*, 1991, 3: 12-14.
- Liang D H, Liu F Y, Sun F, *et al.* Study on Co requirement of *Penaeus chinensis*[J]. *Marine Sciences*, 1991, 3: 12-14(in Chinese).
- [49] Hosaka Y, Saito A, Maeda R. Antibacterial activity of povidone-iodine against an artificial biofilm of *Porphyromonas gingivalis* and *Fusobacterium nucleatum*[J]. *Archives of Oral Biology*, 2012, 57(4): 364-368.
- [50] 吴岗, 周启良, 郭秀玲, 等. 聚维酮碘对凡纳滨对虾偷死综合征的防治研究[J]. *水产养殖*, 2016, 37(10): 23-28.
- Wu G, Zhou Q L, Guo X L, *et al.* The prevention of povidone iodine to *Litopenaeus vannamei* AHNS[J]. *Journal of Aquaculture*, 2016, 37(10): 23-28(in Chinese).

- [51] 王民权, 房文红. 碘制剂在水产上的应用[J]. *渔业现代化*, 2005, 2: 26-27.  
Wang M X, Fang W H. The application of iodine preparation in aquatic products[J]. *Fishery Modernization*, 2005, 2: 26-27(in Chinese).
- [52] Acda S P, Chae B J. A review on the applications of organic trace minerals in pig nutrition[J]. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2002, 1(1): 25-30.
- [53] Richards J D, Zhao J M, Harrell R J, *et al.* Trace mineral nutrition in poultry and swine[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2010, 23(11): 1527-1534.
- [54] Katya K, Lee S, Yun H, *et al.* Efficacy of inorganic and chelated trace minerals (Cu, Zn and Mn) premix sources in Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone) fed plant protein based diets[J]. *Aquaculture*, 2016, 459: 117-123.
- [55] 罗绪刚. 动物有机微量元素营养研究及应用新进展[J]. *北方牧业*, 2017(9): 25.  
Luo X G. Recent advances in the research and application of animal organic micronutrients[J]. *Northern Animal Husbandry*, 2017(9): 25(in Chinese).
- [56] 冯定远. 多元螯合与多重螯合微量元素的理论及其在饲料业中的应用[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(10): 2956-2963.  
Feng D Y. Theory of polychelate and mutiplechelate and their application in feed industry[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(10): 2956-2963(in Chinese).
- [57] Ludwiczek S, Theurl I, Muckenthaler M U, *et al.* Ca<sup>2+</sup> channel blockers reverse iron overload by a new mechanism via divalent metal transporter-1[J]. *Nature Medicine*, 2007, 13: 448-454.
- [58] Jeong J, Eide D J. The SLC39 family of zinc transporters[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2013, 34(2-3): 612-619.
- [59] Argüello, J M, Eren E, González-Guerrero M. The structure and function of heavy metal transport PIB-ATPases[J]. *BioMetal*, 2007, 20: 233.
- [60] Rees D C, Johnson E, Lewinson O. ABC transporters: the power to change[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2009, 10: 218-227.
- [61] Krämer U, Talke I N, Hanikenne M. Transition metal transport[J]. *FEBS letters*, 2007, 581(12): 2263-2272.
- [62] 计峰, 罗绪刚, 李素芬, 等. 动物有机微量元素吸收机制及吸收研究方法的进展[J]. *动物营养学报*, 2003, 15(2): 1-5.  
Ji F, Luo X G, Li S F, *et al.* Advances in study on methods of mineral absorption and absorption mechanisms of organic minerals[J]. *Acta Zoonutrimenta Sinica*, 2003, 15(2): 1-5(in Chinese).
- [63] Gao S, Yin T J, Xu B B, *et al.* Amino acid facilitates absorption of copper in the Caco-2 cell culture model[J]. *Life Science*, 2014, 109(1): 50-56.
- [64] Sauer A K, Pfaender S, Hagemeyer S, *et al.* Characterization of zinc amino acid complexes for zinc delivery *in vitro* using Caco-2 cells and enterocytes from hiPSC[J]. *Biometals*, 2017, 30(5): 643-661.
- [65] Yuan Y, Jin M, Luo J X, *et al.* Effects of different dietary copper sources on the growth and intestinal microbial communities of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, 25(4): 828-840.
- [66] 郭腾飞, 黄旭雄, 苏明, 等. 饲料中铜水平对凡纳滨对虾免疫相关基因表达和抗菌能力的影响[J]. *水生生物学报*, 2012, 36(5): 809-816.  
Guo T F, Huang X X, Su M, *et al.* Effect of dietary copper level on the immunity, *vibrio*-resistant ability, lysozyme mRNA and toll receptor mRNA expressions in the white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(5): 809-816(in Chinese).
- [67] Lin S M, Lin X, Yang Y, *et al.* Comparison of chelated zinc and zinc sulfate as zinc sources for growth and immune response of shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture*, 2013, 406-407: 79-84.



## Effects and research progress of trace mineral nutrition in shrimp

JIAO Lefei, DAI Tianmeng, JIN Min, SUN Peng, ZHOU Qicun \*

(School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Trace elements, as cofactors or structural components of various enzymes, participate in various metabolic processes and play a key role in maintaining animal health and normal physiological function. Although trace elements requirements for animals are very small, lack, excess or imbalance of intake will bring serious adverse effects on animal growth, metabolism, immunity and reproduction. In this review, the effects of trace elements on growth and metabolism, immunity, disease prevention, gonadal development and other aspects of shrimp, and the mechanism of absorption, transport and metabolism of inorganic and organic trace elements were systematically summarized, which might provide theoretical basis for the development of shrimp feed in the future.

**Key words:** shrimp; trace elements; nutrition; absorption and transport

**Corresponding author:** ZHOU Qicun. E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

**Funding projects:** National Key R & D Program of China (2018YFD0900400)