

# 微量营养素对鱼类肠道健康影响的研究进展

吴彦呈<sup>1,2</sup> 黎德兵<sup>2</sup> 李思明<sup>1\*</sup> 阮征<sup>3</sup>

(1.江西省农业科学院,南昌 330200;2.四川农业大学动物科技学院,成都 611130;

3.南昌大学食品学院,食品科学与技术国家重点实验室,南昌 330047)

**摘要:** 微量营养素主要分为微量元素和维生素,在机体内含量较低,参与体内多项重要生理过程。鱼类肠道健康是保证鱼类正常生长发育的前提,运用免疫营养调控方式来提高鱼类肠道免疫力和抗病力,是实现健康养殖的重要途径。本文就微量营养素对鱼类肠道健康的影响做一综述,以期改善鱼类肠道健康提供参考。

**关键词:** 鱼类;肠道健康;微量元素;维生素

**中图分类号:** S963

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-267X(2019)10-4488-06

微量营养素包括微量元素和维生素,既不是机体的能量来源,也不是构成组织器官的原料,但更是维持机体正常生命活动及代谢功能所必需的营养物质<sup>[1]</sup>。肠道是鱼类营养物质的主要吸收和消化场所,对鱼类发育至关重要,肠道健康有利于鱼类生理功能的正常行使,如营养物质的吸收代谢和免疫功能的发挥<sup>[2]</sup>。缺少微量营养素会扰乱机体正常生理功能及代谢,导致如肠道炎症<sup>[3]</sup>、肠道结构损伤<sup>[4]</sup>、氧化应激<sup>[5]</sup>以及蛋白质损伤<sup>[6]</sup>等病理过程的发生,进而影响鱼类的正常生长发育。本文就微量营养素与鱼类肠道健康的关系做一综述,以期改善鱼类肠道健康提供理论依据。

## 1 微量营养素概述

微量元素在机体内含量较少,主要以金属酶的形式参与机体生理过程<sup>[1]</sup>,如超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)以及细胞色素氧化酶等,在机体能量代谢<sup>[7]</sup>、抗氧化功能<sup>[4]</sup>以及生长与繁殖性能<sup>[8]</sup>上发挥重要作用,如铁(Fe)能通过影响肠道菌群结构来抵御外界细菌的入侵<sup>[9]</sup>,Fe和铜(Cu)与机体造血能力密切相关<sup>[10]</sup>。

维生素按其溶解性可分为水溶性维生素和脂溶性维生素,维生素的主要作用是作为辅酶参与和保护细胞和器官组织的正常结构和生理功能<sup>[2]</sup>,如维生素C具有还原性,能够保护细胞膜免受氧化损伤,同时还能够缓解重金属Cu、硒(Se)等的毒性作用<sup>[11]</sup>;维生素E作为断链抗氧化剂的同时还是机体维持生育所必不可少的元素<sup>[12]</sup>。

有研究表明,微量营养素之间存在明显的协同及拮抗作用<sup>[2]</sup>,例如添加过量锌(Zn)会影响Cu的吸收<sup>[13]</sup>,饲料中补Zn对Fe和钙(Ca)的肠道吸收具有促进作用<sup>[14]</sup>,又如维生素C能够利用细胞膜和脂蛋白上的 $\alpha$ -生育酚基再生 $\alpha$ -生育酚<sup>[15]</sup>。同时,微量元素与维生素之间也存在着复杂的相互作用,如维生素A能够与过渡金属结合,防止其催化自由基产生活性氧(ROS),危害机体健康<sup>[16]</sup>,又如维生素C能够促进鱼类对Fe的吸收,能够有效防止鱼类出现贫血症<sup>[11]</sup>。

## 2 微量营养素对鱼类肠道健康的影响

### 2.1 微量营养素对鱼类抗氧化功能的影响

微量营养素能够以辅酶或抗氧化酶活性中心的形式参与到机体抗氧化系统,使得微量营养素

收稿日期:2019-04-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0901703);江西省特种水产产业技术体系项目(JXARS-10-岗位)

作者简介:吴彦呈(1995—),男,四川绵阳人,硕士研究生,从事特种经济动物养殖研究。E-mail:18683666143@163.com

\*通信作者:李思明,研究员,硕士生导师,E-mail:lisiming16@126.com

能够直接或间接地清除机体 ROS、活性氮及丙二醛(MDA)等<sup>[4]</sup>,如 Zn 抑制促氧化酶活性,降低机体 ROS 含量;维生素 A 和维生素 E 作为脂质过氧化过程中的断链抗氧化剂,可直接清除肠道超氧化物、过氧亚硝酸盐和羟基自由基等<sup>[17]</sup>。超氧化物是一种弱氧化剂,可被 SOD 歧化成过氧化氢( $H_2O_2$ ), $H_2O_2$  可穿过细胞膜与 Fe、Cu 及超氧化物反应,导致羟基自由基形成,破坏 DNA 和脂质, $H_2O_2$  等过氧化物会被 CAT 以及 GSH-Px 等抗氧化酶清除。有研究报道,添加适量的微量营养素如维生素 E、维生素 A 及维生素 C 等能够提高 SOD、CAT 及 GSH-Px 等抗氧化酶的活性,该结果在草鱼<sup>[18-19]</sup>、建鲤<sup>[20]</sup>、黄颡鱼<sup>[21]</sup>、武昌鲮<sup>[22]</sup>以及大口黑鲈<sup>[23]</sup>上均有报道。Chen 等<sup>[23]</sup>对大口黑鲈的研究发现,添加 148 mg/kg 维生素 C 能够减少肠系膜中的脂质积累,同时还能够提高维生素 E 的利用率,进而保护肠道内多不饱和脂肪酸免受过氧化,降低肠道 MDA 含量,与 Liang 等<sup>[21]</sup>对黄颡鱼的研究结果一致。同时,Chen 等<sup>[23]</sup>还发现,添加高剂量(1 042 mg/kg)维生素 C 并未对大口黑鲈产生毒性作用。但也有学者认为,过量微量营养素会对机体抗氧化功能造成损伤,张清雯等<sup>[24]</sup>对条纹锯鲈的研究显示,添加 1.05 mg/kg 硒代蛋氨酸(Se-Met)会降低其抗氧化相关酶的活性。金属硫蛋白(MT)是体内最有效的自由基清除剂,其能够与蛋白质巯基结合,保护其不被氧化损伤。Koekkoek 等<sup>[17]</sup>研究发现,Zn 能够增加 MT 的表达量,同时 Zn 还能与 Fe、Cu 等竞争某些位点,从而阻止其催化自由基形成和脂质的过氧化。近年来,国内外学者对微量营养素的抗氧化机制进行了深入研究,发现抗氧化酶主要受核因子 E2 相关因子 2(Nrf2)-抗氧化反应元件(ARE)信号通路调控,Keap1-Nrf2-ARE 信号通路在受到外界刺激时,主要通过改变 Keap1 构象或使 Nrf2 磷酸化来激活下游靶向通路[热休克蛋白泛素化系统及谷胱甘肽(GSH)/谷胱甘肽硫转移酶(GST)系统],进而发挥抗氧化作用<sup>[25]</sup>。Chen 等<sup>[4]</sup>对草鱼的研究还表明,添加 3.96 g/kg 磷(P)能够提高 Nrf2 mRNA 的表达量,进而促进抗氧化酶的表达,保护草鱼肠道免受氧化损伤。以上结果表明,微量营养素能够通过调控抗氧化酶参与鱼类肠道抗氧化防御,但不同微量营养素的具体作用机制及作用效果存在明显差异,同时不同鱼类对微量营养

素的需求量尚不明确,还有待进一步研究确定。

## 2.2 微量营养素对鱼类肠道结构的影响

微量营养素能够通过影响紧密连接复合物(TJs)、诱导细胞凋亡<sup>[26]</sup>以及影响上皮细胞完整性<sup>[27]</sup>等多种途径影响鱼类肠道结构完整性。微量营养素主要通过 p38 丝裂原活化蛋白激酶(p38MAPK)通路及肌球蛋白轻链激酶(MLCK)通路来发挥抗凋亡作用,该结果在维生素 E<sup>[19]</sup>、Se<sup>[28]</sup>、P<sup>[4]</sup>及 Fe<sup>[29]</sup>上均有报道。MLCK 是一种钙调素(CaM)依赖酶,是细胞收缩的关键调控因子,其主要通过介导肌球蛋白 20 ku 轻链(MLC)磷酸化来影响肠上皮 TJs 屏障功能,在调节肠道通透性上发挥重要作用。Pan 等<sup>[19]</sup>对草鱼的研究发现,缺少维生素 E 会导致肠道 MLCK 通路表达上调,进而导致如闭合小环蛋白 1(ZO-1)、闭合蛋白 12(claudin-12)及咬合蛋白(occludin)等紧密连接蛋白基因表达下调,最终损伤肠道上皮细胞完整性,使肠道通透性增加。p38MAPK 通路是丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)信号系统的一员,其主要通过介导 MLC 的磷酸化来激活 MLCK 通路,进而影响肠道屏障功能的完整性。大量研究表明,p38MAPK 的磷酸化会导致 MLCK 基因表达量上升<sup>[30]</sup>。Guo 等<sup>[29]</sup>对草鱼的研究发现,Fe 能够通过 p38MAPK 通路来调节凋亡蛋白基因[半胱氨酸水解酶(caspase)-2、-3、-7、-8、-9 以及凋亡相关因子配体(Fasl)、B 淋巴细胞瘤-2 相关蛋白基因(Bax)、凋亡酶激活因子(Apaf-1)]和凋亡蛋白抑制基因[B 淋巴细胞瘤-2 基因(Bcl-2)、髓样细胞白血病基因-1b(Mcl-1b)和凋亡抑制因子(IAP)]的表达来影响肠道上皮细胞结构完整性,与 Li 等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。以上结果表明,微量营养素能够通过影响 p38MAPK 磷酸化水平来调节 MLCK 基因的表达,进而影响 TJs 的表达量,影响肠道结构的完整性。目前有关微量营养素对鱼类肠道结构相关信号转导通路的研究较少,且不同微量营养素作用形式不同,其作用的信号通路不尽相同,还需深入探索微量营养素的具体作用机制,为找到合适添加量提供理论依据。

## 2.3 微量营养素对鱼类免疫功能的影响

微量营养素主要通过提高鱼类先天性免疫能力来增强鱼类的免疫功能。鱼类的肠道是一种重要的免疫器官,具有很强的抗原清除能力,肠道免疫功能的正常行使与肠道健康密切相关。鱼类免

疫功能与先天免疫成分密切相关,如补体 3(C3)、补体 4(C4)、抗菌肽、免疫球蛋白 M(IgM)以及细胞因子等<sup>[32]</sup>。众多学者对草鱼的研究发现,添加适量的微量营养素如维生素 E<sup>[19]</sup>、Fe<sup>[29]</sup>、Se<sup>[6]</sup>及维生素 B<sub>6</sub><sup>[18]</sup>等,能够有效提高鱼类先天性免疫因子的含量,从而增强鱼类的免疫功能,该结果与 Puangkaew 等<sup>[33]</sup>在虹鳟上及 Jiang 等<sup>[20]</sup>在建鲤上的研究结果一致。Davis<sup>[34]</sup>对杂交条纹鲈的研究发现,红细胞能通过增殖分化和成熟来诱导 B 细胞产生免疫球蛋白;Liu 等<sup>[22]</sup>对武昌鲮的研究发现,添加 3 914 IU/kg 维生素 A 能够提高肠道补体(C3、C4)含量以及红细胞数量,增强免疫能力。上述结果表明,添加微量营养素可能通过增强红细胞增殖分化来诱导 B 细胞产生免疫球蛋白,进而提高鱼类免疫功能。张清雯等<sup>[24]</sup>研究发现,添加 0.77 mg/kg 硒代蛋氨酸(Se-Met)能显著提高条纹锯鲈血清 IgM 含量及溶菌酶(LZM)活性,提高鱼类免疫能力。但也有研究表明,过高或过低的微量营养素均会导致鱼类免疫功能下降,如添加 1.05 mg/kg Se-Met 会影响条纹锯鲈的正常免疫功能<sup>[24]</sup>,又如过高或过低的维生素 A 水平会影响谷草转氨酶和谷丙转氨酶的活性,该结果与 Behera 等<sup>[35]</sup>添加 0.5 mg/kg 纳米铁对罗伊塔野鲮的研究结果类似。目前有关鱼类肠道健康影响的研究主要集中在微量营养素的缺乏症上,对其过量影响的研究较少,且以重金属元素为主。以上结果表明,微量营养素能够通过影响鱼类肠道先天性免疫功能来影响肠道健康,但不同微量营养素对不同先天性免疫因子的作用机制及最适添加量尚不明确,还有待后续研究来证明。

## 2.4 微量营养素对鱼类肠道炎症的影响

肠道炎症受到多种细胞因子的调控,包括促炎细胞因子和抗炎细胞因子,细胞因子间的稳态在维持机体正常生理功能上发挥重要作用。促炎细胞因子如肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )、白细胞介素-1 $\beta$ (IL-1 $\beta$ )及白细胞介素-6(IL-6)等,其主要通过与病原体相互作用进而激活机体的免疫系统;而抗炎细胞因子如转化生长因子-1 $\beta$ (TGF-1 $\beta$ )及白细胞介素-10(IL-10)等主要作用是促进机体恢复常态<sup>[19]</sup>。近年来研究表明,微量营养素能够通过抑制促炎细胞因子<sup>[14,26,29]</sup>及增强巨噬细胞活性来影响由哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mTOR)<sup>[19,29]</sup>、Toll 样受体 4(TLR4)<sup>[20]</sup>及核因子

$\kappa$ B(NF- $\kappa$ B)<sup>[4,31]</sup>所介导的炎症反应。Guo 等<sup>[29]</sup>对草鱼的研究发现,缺 Fe 会抑制肠道 mTOR 信号通路正常表达,致使其下游因子核糖体激酶 1(S6K1)和真核转译起始因子 4e- 绑定蛋白(4E-BP)表达量减少,导致抗炎细胞因子 IL-10 等表达量减少,致使肠道炎症发生。TLR4 介导的信号传导可导致炎性细胞活化,表达和分泌多种促炎细胞因子,其能够诱导核因子  $\kappa$ B 抑制蛋白(I $\kappa$ B)磷酸化并使其降解,进而激活 NF- $\kappa$ B。NF- $\kappa$ B 是一个二聚体,在细胞因子诱导的基因表达中起关键性调控作用,参与机体多项生理过程,是 TLR4 的下游信号通路,是炎症级联反应的重要始动因素<sup>[20,36]</sup>。Hu 等<sup>[36]</sup>研究发现,壳聚糖锌螯合物(CS-Zn)通过抑制肠道 TLR4/髓样分化因子 88(MyD88)/NF- $\kappa$ B p65 信号通路,下调了细胞凋亡相关蛋白[酵母自噬基因哺乳动物同源基因-1(beclin-1)和 caspase-3]及 NF- $\kappa$ B 的表达,降低了促炎细胞因子 IL-2、TNF- $\alpha$  以及  $\gamma$ -干扰素(IFN- $\gamma$ )含量,进而发挥抗炎作用,与 Jiang 等<sup>[20]</sup>在建鲤上的研究结果一致。有研究表明,Se 能够促进巨噬细胞产生 15d-前列腺素 J2(15d-PGJ2)和  $\Delta$ 12-前列腺素 J2( $\Delta$ 12-PGJ2)来抑制 NF- $\kappa$ B 的活性<sup>[3]</sup>,同时 Se 还能以蛋白形式通过氧化还原信号传导来抑制 NF- $\kappa$ B 通路,抑制促炎细胞因子的产生,减少肠道炎症的发生<sup>[6]</sup>。Du 等<sup>[37]</sup>研究表明,肠炎发生时补 Fe 会导致肠炎反应加重,与 Ganz 等<sup>[38]</sup>的研究结果一致。以上结果表明,微量营养素能够通过影响肠道炎症通路来影响机体炎症因子间的稳态,进而影响肠道健康,但其具体作用形式及机制等尚不明确,且作为药剂在治疗肠炎方面的效果还需进一步研究确认。

## 2.5 微量营养素对鱼类肠道微生物的影响

微量营养素能够通过影响肠道菌群结构来影响肠道健康,肠道微生态紊乱与吸收代谢,免疫功能及炎症密切相关,因此保证肠道微生态的稳定有利于机体的正常生长发育。肠道微生物能够为宿主提供能量和营养物质,如 B 族维生素及维生素 K 等<sup>[39]</sup>,肠道微生物还能够通过双歧杆菌等拟杆菌属对难消化的碳水化合物进行发酵产生短链脂肪酸(SCFAs)。丁酸盐是肠上皮细胞的主要能量来源,而 SCFAs 主要由丁酸盐、乙酸盐及丙酸盐构成<sup>[40]</sup>。Yu 等<sup>[41]</sup>研究发现,Fe 能够通过小肠絮凝和改变肠道微生物结构来降低对有害物质如砷

(As)等的代谢,提高双歧杆菌等活性,有利于肠道上皮细胞发育。肠道微生物与宿主免疫功能是相互作用的,即肠道微生物影响机体免疫功能,而机体免疫功能又会影响肠道微生物的结构与功能。肠道共生菌能够通过直接或间接的方式来清除肠道病原体,例如,多形拟杆菌等通过竞争营养物质或诱导抑制物质的产生来清除肠道病原体,共生菌及其产物通过再生蛋白 III  $\gamma$  (Reg III  $\gamma$ ) 激活免疫功能来清除肠道病原体<sup>[2]</sup>。Ringø 等<sup>[42]</sup> 研究发现,部分微量营养素具有较强的抗菌性,能够清除肠道内的致病菌,如铜离子 ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 对嗜水气单胞菌、荧光假单胞菌、副溶血性弧菌和大肠杆菌有很强的清除能力。孟晓林等<sup>[43]</sup> 对鲤鱼的研究发现,暴露于 0.14、0.28 mg/L 水体 Cu 中的鲤鱼肠道菌群  $\alpha$  多样性显著下降,优势菌群结构发生改变,肠道结构受到损伤。但也有研究发现,以硅酸盐为载体的  $\text{Cu}^{2+}$ ,能提高乳酸杆菌的丰度,保护肠道免受病原体侵入。目前有关鱼类微量营养素对肠道微生物结构影响的研究尚处于起步阶段,且主要集中在重金属元素上。以上结果表明,微量营养素能够通过影响肠道微生物结构来影响肠道健康,但不同微量营养素对肠道微生物的作用机制及作用方式尚不明确,亟需更加深入的研究。

### 3 小 结

综上所述,微量营养素能够从抗氧化、肠道上皮细胞结构完整性、免疫功能、肠道微生物及肠道炎症等方面影响鱼类肠道健康。由于不同鱼类对微量营养素的需求量不尽相同,不同形式的微量营养素在鱼类肠道的吸收效果亦有所不同,且微量营养素间存在明显的相互作用,因此还需要深入研究微量营养素对鱼类肠道健康影响的具体作用机制,为合理配制饲料提供科学依据。目前关于微量营养素对鱼类肠道健康的影响主要集中在抗氧化、抗炎及机体免疫方面,对抗菌及肠道微生物结构方面的研究较少。今后,应从肠道微生物方面来探究微量营养素对肠道健康的影响,利用营养干预手段保障鱼类肠道健康,促进鱼类正常生长发育,为减少抗生素的使用提供理论依据。

### 参考文献:

[ 1 ] NRC. Nutrient requirements of fish and shrimp [ S ]. Washington, D. C. : National Academy Press, 2011:

206-207.

- [ 2 ] NISHIDA A, INOUE R, INATOMI O, et al. Gut microbiota in the pathogenesis of inflammatory bowel disease [ J ]. Clinical Journal of Gastroenterology, 2018, 11(1) : 1-10.
- [ 3 ] KUDVA A K, SHAY A E, PRABHU K S. Selenium and inflammatory bowel disease [ J ]. American Journal of Physiology: Gastrointestinal and Liver Physiology, 2015, 309(2) : G71-G77.
- [ 4 ] CHEN K, ZHOU X Q, JIANG W D, et al. Impaired intestinal immune barrier and physical barrier function by phosphorus deficiency: regulation of TOR, NF- $\kappa$ B, MLCK, JNK and Nrf2 signalling in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) after infection with *Aeromonas hydrophila* [ J ]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 74: 175-189.
- [ 5 ] 叶元土, 蔡春芳, 许凡, 等. 氧化鱼油对草鱼肠道黏膜抗氧化应激通路基因表达水平的影响 [ J ]. 水生生物学报, 2016, 40(4) : 758-766.
- [ 6 ] ZHENG L, FENG L, JIANG W D, et al. Selenium deficiency impaired immune function of the immune organs in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [ J ]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 77: 53-70.
- [ 7 ] SMITH A D, PANICKAR K S, URBAN J F, Jr, et al. Impact of micronutrients on the immune response of animals [ J ]. Annual Review of Animal Biosciences, 2018, 6: 227-254.
- [ 8 ] CHEN K, JIANG W D, WU P, et al. Effect of dietary phosphorus deficiency on the growth, immune function and structural integrity of head kidney, spleen and skin in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [ J ]. Fish & Shellfish Immunology, 2017, 63: 103-126.
- [ 9 ] PEREIRA D I A, ASLAM M F, FRAZER D M, et al. Dietary iron depletion at weaning imprints low microbiome diversity and this is not recovered with oral nano Fe ( III ) [ J ]. Microbiology Open, 2015, 4(1) : 12-27.
- [ 10 ] 朱叶萌, 饶子亮, 谭巧燕, 等. 铜的生物学功能及其在畜禽生产中的应用研究进展 [ J ]. 饲料研究, 2014(23) : 9-11, 19.
- [ 11 ] DAWOOD M A O, KOSHIO S. Vitamin C supplementation to optimize growth, health and stress resistance in aquatic animals [ J ]. Reviews in Aquaculture, 2018, 10(2) : 334-350.
- [ 12 ] NOGUCHI N. Action of vitamin E against lipid peroxidation and cell death [ M ] // ETSUKO N. Vitamin E: chemistry and nutritional benefits. [ s. n. ] : Royal Soci-

- ety of Chemistry, 2019; 165–174.
- [13] CABALLERO E, DE CISNEROS C J. Partitioning of minor, trace elements and rare earth elements in bentonite affecting by thermal alteration [J]. Applied Clay Science, 2017, 147: 143–152.
- [14] BARMAN S, SRINIVASAN K. Enhanced intestinal absorption of micronutrients in streptozotocin-induced diabetic rats maintained on zinc supplementation [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 50: 182–187.
- [15] BERGER M M, OUDEMANS-VAN STRAATEN H M. Vitamin C supplementation in the critically ill patient [J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2015, 18(2): 193–201.
- [16] BURTON G W, INGOLD K U. Beta-carotene: an unusual type of lipid antioxidant [J]. Science, 1984, 224(4649): 569–573.
- [17] KOEKKOEK W A C K, VAN ZANTEN A R H. Antioxidant vitamins and trace elements in critical illness [J]. Nutrition in Clinical Practice, 2016, 31(4): 457–474.
- [18] WU P, ZHENG X, ZHOU X Q, et al. Deficiency of dietary pyridoxine disturbed the intestinal physical barrier function of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 74: 459–473.
- [19] PAN J H, FENG L, JIANG W D, et al. Vitamin E deficiency depressed gill immune response and physical barrier referring to NF- $\kappa$ B, TOR, Nrf2 and MLCK signalling in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) under infection of *Flavobacterium columnare* [J]. Aquaculture, 2018, 484: 13–27.
- [20] JIANG J, SHI D, ZHOU X Q, et al. Vitamin D inhibits lipopolysaccharide-induced inflammatory response potentially through the Toll-like receptor 4 signalling pathway in the intestine and enterocytes of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. British Journal of Nutrition, 2015, 114(10): 1560–1568.
- [21] LIANG X P, LI Y, HOU Y M, et al. Effect of dietary vitamin C on the growth performance, antioxidant ability and innate immunity of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson) [J]. Aquaculture Research, 2017, 48(1): 149–160.
- [22] LIU B, ZHAO Z X, BROWN P B, et al. Dietary vitamin A requirement of juvenile *Wuchang* bream (*Megalobrama amblycephala*) determined by growth and disease resistance [J]. Aquaculture, 2016, 450: 23–30.
- [23] CHEN Y J, YUAN R M, LIU Y J, et al. Dietary vitamin C requirement and its effects on tissue antioxidant capacity of juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. Aquaculture, 2015, 435: 431–436.
- [24] 张清雯, 陈超, 邵彦翔, 等. 硒代蛋氨酸对条纹锯鲂生长性能、组织硒含量、抗氧化能力及血清生化指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2018, 30(11): 4746–4756.
- [25] SECZYK Ł, SWIECA M, GAWLIK-DZIKI U. Soymilk enriched with green coffee phenolics—antioxidant and nutritional properties in the light of phenolic-food matrix interactions [J]. Food Chemistry, 2017, 223: 1–7.
- [26] SHI L, FENG L, JIANG W D, et al. Immunity decreases, antioxidant system damages and tight junction changes in the intestine of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) during folic acid deficiency: regulation of NF- $\kappa$ B, Nrf2 and MLCK mRNA levels [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 51: 405–419.
- [27] WEI S P, JIANG W D, WU P, et al. Dietary magnesium deficiency impaired intestinal structural integrity in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12705.
- [28] ZHENG L, JIANG W D, FENG L, et al. Selenium deficiency impaired structural integrity of the head kidney, spleen and skin in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 82: 408–420.
- [29] GUO Y L, WU P, JIANG W D, et al. The impaired immune function and structural integrity by dietary iron deficiency or excess in gill of fish after infection with *Flavobacterium columnare*: regulation of NF- $\kappa$ B, TOR, JNK, p38MAPK, Nrf2 and MLCK signalling [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 74: 593–608.
- [30] 王梦雅, 高民, 徐明, 等. 肌球蛋白轻链激酶介导肠黏膜上皮屏障功能变化的研究进展 [J]. 动物营养学报, 2018, 30(12): 4835–4841.
- [31] LI L, FENG L, JIANG W D, et al. Dietary pantothenic acid depressed the gill immune and physical barrier function via NF- $\kappa$ B, TOR, Nrf2, p38MAPK and MLCK signaling pathways in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2015, 47(1): 500–510.
- [32] HEINECKE R D, CHETTRI J K, BUCHMANN K. Adaptive and innate immune molecules in developing rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* eggs and larvae:

- expression of genes and occurrence of effector molecules[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, 38(1): 25–33.
- [33] PUANGKAEW J, KIRON V, SATOH S, et al. Antioxidant defense of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in relation to dietary n-3 highly unsaturated fatty acids and vitamin E contents[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2005, 140(2): 187–196.
- [34] DAVIS K B. Temperature affects physiological stress responses to acute confinement in sunshine bass (*Morone chrysops*×*Morone saxatilis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2004, 139(4): 433–440.
- [35] BEHERA T, SWAIN P, RANGACHARULU P V, et al. Nano-Fe as feed additive improves the hematological and immunological parameters of fish, *Labeo rohita* H[J]. *Applied Nanoscience*, 2014, 4(6): 687–694.
- [36] HU L S, CHENG S S, LI Y, et al. Chitosan-Zn chelate downregulates TLR4-NF-κB signal pathway of inflammatory response and cell death-associated proteins compared to inorganic zinc[J]. *Biological Trace Element Research*, 2018, 184(1): 92–98.
- [37] DU L J, XIANG K, LIU J H, et al. Intestinal injury alters tissue distribution and toxicity of ZnO nanoparticles in mice[J]. *Toxicology Letters*, 2018, 295: 74–85.
- [38] GANZ T, NEMETH E. Iron homeostasis in host defence and inflammation[J]. *Nature Reviews Immunology*, 2015, 15(8): 500–510.
- [39] MARCHESI J R, ADAMS D H, FAVA F, et al. The gut microbiota and host health: a new clinical frontier [J]. *Gut*, 2016, 65(2): 330–339.
- [40] SUN M M, WU W, LIU Z J, et al. Microbiota metabolite short chain fatty acids, GPCR, and inflammatory bowel diseases[J]. *Journal of Gastroenterology*, 2017, 52(1): 1–8.
- [41] YU H Y, WU B, ZHANG X X, et al. Arsenic metabolism and toxicity influenced by ferric iron in simulated gastrointestinal tract and the roles of gut microbiota [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 7189–7197.
- [42] RINGØ E, ZHOU Z, VECINO J L G, et al. Effect of dietary components on the gut microbiota of aquatic animals. A never-ending story? [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(2): 219–282.
- [43] 孟晓林, 朱振祥, 李帅, 等. 水体铜对鲤肠道菌群结构及免疫力的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 85–90.

## Research Progress in Effect of Micronutrient on Fish Gut Health

WU Yancheng<sup>1,2</sup> LI Debing<sup>2</sup> LI Siming<sup>1\*</sup> RUAN Zheng<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. College of Animal Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3. State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science & Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** Micronutrients, including trace elements and vitamins, which have low concentrations in the body, but participate in many important physiological processes in the body. Fish gut health is the premise to ensure normal growth and development of fish. Using immune nutrition regulation to improve the immunity and disease resistance of fish gut is an important way to achieve healthy breeding. This article reviewed the effects of micronutrients on fish gut health in order to provide a reference for improving fish gut health. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(10): 4488-4493]

**Key words:** fish; gut health; trace elements; vitamins