

蛋白质在鱼虾免疫能力中的作用

高婷婷^{1,2} 李勇^{2*} 张家国¹ 孙国祥² 柳阳²

(1. 上海海洋大学水产与生命科学学院, 上海 201306; 2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要: 鱼虾对蛋白质的需要量较大, 蛋白质是机体生长、繁育、代谢和维持健康等环节中至关重要的营养物质, 与机体免疫能力的关系也十分密切。本文对近 10 年来蛋白质营养对鱼虾免疫能力的作用及其机理的研究进展进行了综述, 旨在为鱼虾蛋白质营养与免疫能力关系的深层次研究与实践应用提供依据。

关键词: 鱼; 虾; 蛋白质; 免疫能力; 作用机理

中图分类号: S963

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2011)09-1459-07

高密度养殖引起的爆发性病害带来了巨大经济损失, 成为了制约水产养殖业发展的瓶颈。早在 1968 年, 人们就开始注意到饲料对养殖鱼虾抗病力的影响, 饲料中营养的全面和平衡都能够显著提高鱼虾的免疫能力和生产力, 相应地, 鱼虾的健康状况也会影响机体对营养物质的需求量^[1]。蛋白质是鱼虾必需的核心营养物质, 直接地影响其生长、繁育、生理、代谢和抗病力, 但同时也是鱼虾氮排泄及养殖水环境自污染的主要因素^[2-4]。因此, 有关蛋白质营养与鱼虾免疫能力的研究显得尤为重要。本文对近 10 年来蛋白质营养对鱼虾免疫能力的作用及其机理的研究进展进行了综述, 旨在为鱼虾蛋白质营养与免疫能力关系的深层次研究与实践应用提供依据和参考。

1 蛋白质对鱼虾免疫能力作用的研究进展

1.1 饲料蛋白质水平对鱼虾机体免疫能力的影响

蛋白质是水产动物生存的重要物质, 它不仅是构成机体细胞、组织、器官的物质基础, 也是动物合成各种酶类和抗体所必需的原料, 因此蛋白质和机体免疫能力有着密切的关系^[5]。前人研究表明, 饲料中适宜的蛋白质水平对鱼类免疫能力

具有明显的增强效应, 当饲料中蛋白质缺乏时, 鱼的溶菌酶(LZM)和超氧化物歧化酶(SOD)活性、C-反应蛋白含量、抗体水平以及抗细菌感染力显著下降, 饲料蛋白质含量过高时也表现出一定程度的免疫抑制^[6-8]。

Kiron 等^[6]在不同蛋白质水平(10%、35%和 50%)对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)免疫能力影响的研究中发现: 添加 35% 蛋白质虹鳟感染病毒后未出现死亡, 其死亡率分别极显著低于高蛋白质组和低蛋白质组的 15% 和 20%; 血清中 LZM 活性 $[(63.88 \pm 7.01)\%]$ 和 C-反应蛋白的含量 $[(11.0 \pm 3.3) \mu\text{g}/\text{mL}]$ 比低蛋白质组 $[(29.96 \pm 4.59)\%]$ 、 $[(7.2 \pm 2.2) \mu\text{g}/\text{mL}]$ 分别有显著提高, 但相对于高蛋白质组 $[(59.63 \pm 6.70)\%]$ 、 $[(10.8 \pm 2.6) \mu\text{g}/\text{mL}]$ 却无显著差异。王美琴等^[7]在工厂化循环水养殖条件下研究了 5 种不同饲料蛋白质水平(43%、46%、49%、52%和 56%)对半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis günther*)免疫能力的影响, 结果发现 49% 蛋白质组的死亡率最低, 比其他组降低 50%~75%, 且该组 LZM 和 SOD 活性最高, 分别比其他组极显著提高 4.61%~18.07% 和 4.20%~34.79%; 补体 3(C3)、补体 4(C4)活性随蛋白质水平的提高缓慢

收稿日期: 2011-03-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(2006AA100305)资助

作者简介: 高婷婷(1984—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 从事水产动物营养与免疫研究。E-mail: gtt0508@163.com

* 通讯作者: 李勇, 研究员, 博士生导师, E-mail: lyzhy678@hotmail.com

升高,但差异不显著。蔡春芳等^[8]对异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 的试验也表明不同饲料蛋白质水平(10%、20%、30%、40%和50%)对异育银鲫 SOD 活性和白细胞吞噬率有显著的影响,蛋白质水平为20%~40%时二者的活性达到峰值,但20%、30%、40% 3组之间差异不显著,蛋白质水平过低(10%)或过高(50%)会使二者活性分别显著降低 32.09%~35.82%和 24.39%~28.88%。杨严鸥等^[9]用蛋白质水平分别为26%、32%、38%和44%的4种等能饲料投喂黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 显示:随着饲料蛋白质水平的提高,SOD 和 LZM 活性都显著提高,其中44%和38%组分别显著高于32%和26%组 11.94%和14.62%,而44%组与38%组之间无显著差异。张桐等^[10]设计18、22、26℃3个温度水平与30%、33%、36%、39%、42%5个饲料蛋白质水平来研究不同温度下不同蛋白质水平对德国镜鲤 (*Cyprinus carpio* L.) 非特异性免疫的影响,结果显示:在较低温度下(18℃),镜鲤肝脏 SOD 活性随饲料蛋白质水平的升高而逐渐提高且各组差异显著,但是随着温度的提高,高蛋白质组的这种促进作用逐渐减弱,到26℃时,42%组与36%、39%组的肝脏 SOD 活性已无显著差异。

与鱼类相似,Goimier 等^[11]的研究表明,55%饲料蛋白质水平饲喂的凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 血细胞总浓度、透明细胞浓度、颗粒细胞浓度均显著高于饲料蛋白质水平为35%和45%时。Pascual 等^[12]使用3种蛋白质水平(5%、15%和40%)的饲料饲喂凡纳滨对虾幼虾50d后,试验虾呼吸爆发活性随饲料蛋白质水平的提高显著增加;而15%组酚氧化酶活性与总血细胞的比值最高,40%组酚氧化酶活力与总血细胞的比值最低;试验虾的血细胞凝集素活性也与饲料的蛋白质水平存在依赖关系,即:15%组凝集素活性最高,5%及15%组均比40%组显著增高。夏苏东等^[13]在对凡纳滨对虾幼体采食不同蛋白质饲料免疫特征的研究中得出:随着饲料蛋白质水平由31%、35%、39%、43%、47%的逐渐增加,对虾血清 SOD 活性先升高后降低,在43%时达到最大值,显著高于31%和35%组,但是与39%、47%2组差异不显著。

可见,适当增加饲料蛋白质含量能够提高鱼虾机体免疫能力,含量过低则表现出蛋白质缺乏

症状,过高则造成蛋白质浪费甚至有副作用。

1.2 氨基酸对鱼虾机体免疫能力的影响

蛋白质的营养作用的本质是氨基酸营养。饲料中氨基酸种类、含量不足或者不平衡所引发的“木桶效应”直接影响到蛋白质的整体利用,造成鱼类生长缓慢、抗病力差和死亡率高^[9]。

刘波等^[14]报道氨基酸对动物体液免疫功能有显著影响,其中以支链氨基酸(BCAA)的亮氨酸、异亮氨酸及缬氨酸和芳香族氨基酸的苯丙氨酸和酪氨酸的作用更为明显。Buentello 等^[15]试验研究了精氨酸对斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*) 抗病力的影响,发现在含有28%粗蛋白质的纯化饲料中添加0~4%(占饲料蛋白质的百分数)的精氨酸对鱼类抗病力的影响差异显著,随着添加量的增加,鱼类抗病力呈先上升后下降的趋势,其中2%精氨酸水平的试验鱼抗病力显著高于0~4%各组。

氨基酸对虾类也有一定的免疫作用。韩阿寿等^[16]的研究表明,饲料中蛋氨酸的添加量能显著影响对虾增重率、成活率和烂尾率,当蛋氨酸占饲料质量的1.45%时,能获得最大的增重率(120.0%)和成活率(93.3%)并消除烂尾,此时低蛋氨酸组(0.72%)的增重率、成活率和烂尾率分别为70.0%、60.0%和65.0%;此外还发现饲料色氨酸含量低时(0.20%~0.33%)烂尾率高达18.0%~40.0%,色氨酸含量为0.46%时能获得最大的增重率和存活率并消除烂尾。朱春华等^[17]用添加不同剂量(0.5%、1.0%、1.5%)L-精氨酸的饲料投喂凡纳滨对虾后测定其对免疫因子及对病原体的抗病力的影响,结果显示:L-精氨酸显著提高血淋巴液中一氧化氮(NO)含量、一氧化氮合成酶(NOS)、酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)和SOD活力;1.0%组L-精氨酸显著提高血淋巴液中SOD和ACP活性,但1.5%组和0.5%组L-精氨酸对血淋巴液中SOD和ACP活性影响不显著;人工染菌后,低剂量组对虾死亡率最高,高剂量组次之,中剂量组最低。

总之,在适宜的饲料蛋白质水平下,氨基酸的含量、种类以及它们之间的配比仍会显著影响鱼虾的免疫功能,然而针对特定氨基酸和鱼虾机体免疫的相关性仅有少量报道,且多数研究集中在特定氨基酸营养对鱼虾生长效果的作用方面。

1.3 小肽(酶解蛋白)对鱼虾机体免疫能力的影响

小肽一般是由 2~3 个氨基酸组成,生物效价比氨基酸和大分子蛋白质高,很多试验证实,一些蛋白质水解产生的小肽对动物的体液免疫和细胞免疫可产生有利影响。

Krogdahl 等^[18]研究发现,小肽可提高大西洋鲑头肾白细胞的呼吸爆发能力,增加超氧阴离子的产量,加强对异物的杀灭作用。Tang 等^[19]对大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)的试验研究表明,当饲料中添加 0、5%、10%、15% 的鱼肉蛋白质水解物(FPH)时,血清 LZM 活性和免疫球蛋白 M(IgM)含量随添加量的增加而显著提高,10% 和 15% 组没有显著差异;C3、C4 活性随添加量提高先升高后缓降,添加 10% 时,活性最高。柳旭东等^[20]在半滑舌鲷饲料中添加 0、20%、40%、60% 4 种水平的水解鱼蛋白,结果显示:试验鱼的存活率为 64.44%~78.88%,其中 20% 与 40% 组存活率显著高于其他 2 组;鱼体 AKP 活性大小顺序为 20% 组、40% 组、对照组、60% 组,且各组间均差异显著。

许培玉等^[21]在凡纳滨对虾试验饲料中添加 0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 的小肽制品发现,试验虾 LZM 和 SOD 的活性随小肽添加量的增加呈先升高后下降的趋势,在添加量为 1.0% 时达到最大;而成活率是在添加量为 1.5% 时达到最高。林启存等^[22]在基础饲料中分别添加 0(对照组)、1%、2%、3% 小肽以研究小肽对凡纳滨对虾幼体非特异性免疫能力的影响,结果表明:小肽能显著增强凡纳滨对虾的非特异性免疫能力,各试验组抗菌活性比对照组显著提高了 10.53%~42.10%;血清 LZM 活性比对照组提高了 15.54%~24.56%;酚氧化酶活性比对照组提高了 24.02%~41.90%。

由此表明,小肽对鱼虾的免疫能力方面影响显著,随着蛋白质和氨基酸营养研究的深入,人们已逐渐认识到肽营养的重要性。

1.4 不同蛋白质来源对鱼虾免疫能力的影响

Burrells 等^[23]以大豆蛋白不同程度替代鱼粉(0~89%),结果表明:随着替代水平升高,虹鳟的非特异性免疫能力和生长率均受到不同程度的影响,当替代水平达到 60%~70% 时生长率、吞噬细胞吞噬指数和呼吸暴发活性均极显著低于全鱼粉

组和替代水平较低组。王文娟等^[24]用豆粕替代饲料中 30% 的鱼粉饲喂异育银鲫用以研究豆粕对鱼免疫因子的影响,结果 30% 豆粕组试验鱼血清总胆固醇及高密度脂蛋白胆固醇含量显著低于全鱼粉组,SOD、LZM 活性亦有明显降低。王崇等^[25]以豆粕分别替代异育银鲫饲料中 0、20%、80% 和 100% 的鱼粉蛋白质,结果显示:随着豆粕添加量的增加,试验鱼血清 LZM 活性显著降低。同样,在大西洋鲑(*Salmo salar* L.) 试验中,Krogdahl 等^[18]发现,几种不同的大豆产品均显著影响了试验鱼体内 LZM 活性和抗体水平。

植物性蛋白质较鱼粉除含有抗营养因子之外,主要存在氨基酸种类、含量不足及鱼虾必需氨基酸比例不平衡方面的问题,因此国内外至今未完全攻破鱼粉替代的技术难关,然而对植物性蛋白质源进行一定的加工或者在饲料中添加适当比例的必需氨基酸会提高鱼虾的免疫能力。陈萱等^[26]将豆粕经微生物发酵后与未经处理的豆粕混合后添加到异育银鲫饲料中,投喂后随着发酵豆粕添加比例的增加,试验组鱼的血清 LZM 活性及白细胞吞噬活性逐渐增加,且均显著高于对照组。王吉桥等^[27]以不同比例的玉米蛋白粉、棉籽粕和豆粕为蛋白质源部分替代饲料中的鱼粉,并按比例添加晶体赖氨酸、蛋氨酸和精氨酸,配制成 5 种等蛋白质和等脂水平的饲料,结果表明:摄食用植物蛋白质添加晶体氨基酸替代鱼粉饲料的鱼血清 SOD 的活性各组间差异显著,且都显著高于对照组。

2 蛋白质影响鱼虾免疫能力的机理

关于饲料蛋白质水平对养殖鱼类免疫能力的影响机理,学者们从不同角度进行了相关研究。张勇等^[28]研究报道,凡纳滨对虾的机体缺乏蛋白质时抗体、补体等的合成量受影响,导致动物免疫能力降低:中(18%)、高(26%)蛋白质组的 IgM 浓度比低(10%)蛋白质组分别显著提高 25.12% 和 38.24%,C3 浓度分别显著提高 19.69% 和 32.23%;C4 浓度分别提高 16.67% 和 27.77%。蔡春芳等^[8]用不同蛋白质含量的饲料喂养异育银鲫 6 周后,SOD 活性随蛋白质含量升高(10%~20%)而逐渐升高,但在蛋白质含量进一步提高至 40%、50% 时活性下降;饲养 14 周后 SOD 活性以 20% 组最高,40% 组显著低于 20%、10% 组,50%

组显著低于40%组;同时,数据显示SOD活性与体脂含量呈强相关,白细胞吞噬率虽然与体脂相关性不显著,但相关系数也较大。因而蛋白质不足或过剩导致动物免疫能力降低与内脏脂肪如肝脂肪的含量等具有显著的相关性。艾庆辉等^[29]总结前人研究结果得出:饲料中适宜的蛋白质含量对鱼类的免疫能力具有明显改善作用,而过高的蛋白质含量会使鱼体内蛋白质代谢紊乱,从而阻碍了正常免疫能力的发挥。鄢华等^[1]研究指出,在蛋白质不足或过剩的饲料中,能量相对过剩,这些过剩的能量被鱼类利用后主要以脂肪的形式沉积于体内,尤其是内脏器官。

李勇等^[30]从水生态角度的研究发现,饲料中过高蛋白质含量不仅会加重动物机体代谢负担,抑制免疫活性的发挥,而且会大大增加鱼类的氮排泄量,导致水体污染,进而降低免疫能力、提高感染疾病的几率。因此提出“蛋白质生态营养需要量”概念,并试验得出保证大菱鲂(*Scophthalmus maximus* L.)增重率、免疫能力、氮排泄量均达到适宜水平时的蛋白质生态需要量为50%,此时增重率是最大增重组(蛋白质54%)的95.3%,而粪氮排泄量和水氨氮含量分别降低17.6%和31.5%^[31]。夏苏东^[32]报道,高密度养殖凡纳滨对虾的生态营养需要量为40.42%,此时对虾增重率是最大增重(高蛋白组)的96.7%,但氨氮降低了38.8%,亚硝氮降低了55.6%,显著降低因水质恶化间接影响对虾免疫能力的程度。

3 与鱼虾免疫机制有关的蛋白质分子营养学

从分子水平来讲,蛋白质不足将影响到遗传物质合成速度,即蛋白质摄入量不足时,会导致动物脱氧核苷酸激酶活性下降,导致脱氧核苷酸合成数量减少,mRNA合成速度减慢,进而影响到mRNA的加工、修饰和转移,以致动物的生理机能的损伤^[14,33]。鱼类蛋白质分子营养学研究刚刚起步,从分子水平探究饲料蛋白质与鱼虾免疫能力关系的研究,主要集中在间接影响机体免疫能力的蛋代谢相关基因表达方面。

血蓝蛋白是一种蓝色、含铜、不含血红素的携氧蛋白质,存在于许多软体动物和节肢动物体内,具有广谱抗细菌、真菌、病毒功能及独特的作用机理。Rosas等^[34]给凡纳滨对虾分别投喂低淀粉高蛋白饲料和低蛋白质高淀粉饲料,结果发现:低

淀粉高蛋白组试验虾的血蓝蛋白质表达量显著高于低蛋白质高淀粉组,说明饲料蛋白质营养从分子基因层面影响着血蓝蛋白等具有免疫调节活性的蛋白质类因子。

脂蛋白酯酶通过其在脂肪组织与其他组织器官作用水平的高低直接决定组织器官脂质底物的相对量,从而间接决定动物从食物中摄取的脂类在体内是以体脂的形式贮备起来或作为能源底物消耗掉。如脂类物质在动物免疫器官和组织内沉积过多,将对机体的免疫能力产生决定性影响^[35-36]。Liang等^[37-38]克隆了真鲷LPL基因cDNA全序列,并证实真鲷LPL基因在肝脏存在营养诱导性表达,饥饿、高脂食物均是其表达诱导因子。当给真鲷喂食低蛋白质高脂肪食物时,肝脏LPL基因表达水平显著升高,诱导产生的大量肝脏LPL将为肝脏提供更多的来源于食物的游离脂肪酸,故有可能出现肝脏营养诱导性脂肪蓄积,这种肝脏中大量脂肪囤积必将对机体免疫能力产生负面影响。此外,梁旭方等^[33]挑选出对动脉粥样硬化表现抗性的真鲷,克隆了其LPL基因cDNA全序列,并向其投喂2种不同脂肪蛋白质比的饲料,比较不同处理的试验鱼肝脏和腹腔肠系膜脂肪组织的相对水平,以探讨动脉粥样硬化形成机理,结果表明,真鲷对动脉粥样硬化的抗性可能与鱼类优先使用脂类作为能源有关。由此可见,饲料蛋白质水平可以通过调控鱼类能量代谢关键酶基因的表达来影响鱼体脂沉积,进而间接影响鱼类的免疫能力正常发挥,但这方面的深入报道并不多见。

脂肪酸合成酶是除脂蛋白酯酶之外另一决定动物体脂沉积的重要酶类,它是脂肪酸合成的关键酶,其多寡、活性对控制动物体脂沉积具有重要意义^[39]。目前已有的证据表明,适当提高饲料蛋白质水平可抑制养殖动物脂肪组织中FAS基因表达,使脂肪组织中FAS基因mRNA表达量显著下降,但不影响肝脏组织FAS基因mRNA表达量^[40],这就使得保持肝脏不缺乏脂肪酸的同时减少体脂肪的沉积成为可能,既保证了养殖水产品优良的品质,又不会使动物因为脏器脂肪沉积过多影响其正常功能而导致机体免疫能力的低下。与脂蛋白酯酶相似,脂肪酸合成酶也可以间接影响动物的免疫能力,但其对鱼类等水产动物免疫能力的作用机理尚不明确。

目前国内外关于蛋白质对鱼虾基因表达调控方面的研究,大部分集中在生长、采食、脂肪沉积等方面^[41-46],蛋白质营养与鱼虾免疫能力直接相关基因调控方面的研究较为鲜见。

4 小 结

饲料蛋白质的数量、质量和来源,氨基酸的数量、种类及配比,均会显著影响鱼虾免疫能力。目前,国内外对于鱼虾蛋白质营养与免疫的研究多数集中在饲料蛋白质、氨基酸、小肽、蛋白质源等对死淘率、血液理化及免疫指标等的影响,从机体内环境(生理、代谢等)与水质外环境方面进行机理探寻的较少,从分子水平研究蛋白质营养与免疫效果的关系或机理的研究更为鲜见,这些均有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 鄢华,汪开毓. 营养素对水生动物免疫功能的影响[J]. 水利渔业,2006,20(5):88-91.
- [2] 蒋克勇,李勇,李军,等. 大菱鲂幼鱼蛋白质的生态营养需要量探寻[J]. 海洋科学,2005,29(9):65-70.
- [3] MATHIS N, FEIDT C, BRUN-BELLUT J. Influence of protein/energy ratio on carcass quality during the growing period of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) [J]. Aquaculture, 2003, 217:453-464.
- [4] BURFFORD M A, SMITH D M, TABRETT S J, et al. The effect of dietary protein on the growth and survival of the shrimp *Penaeus monodon* in outdoors tanks[J]. Aquaculture Nutrition, 2004, 10:15-23.
- [5] 张瑞莉,李术. 饲料营养与免疫[J]. 饲料博览,2001(4):28-30.
- [6] KIRON V, WATANABE T, FUKUDA H, et al. Protein nutrition and defense mechanisms in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 1995, 111(3):351-359.
- [7] 王美琴,李勇,车向荣,等. 蛋白质与饱食度对工厂化养殖半滑舌鳎生长与免疫的影响[J]. 渔业科学进展,2009,30(4):27-37.
- [8] 蔡春芳,吴康,潘新法,等. 蛋白质营养对异育银鲫生长和免疫力的影响[J]. 水生生物学报,2001,25(6):590-595.
- [9] 杨严鸥,周黎. 饲料蛋白质水平对黄颡鱼生长、ATP酶活性和免疫力的影响[J]. 饲料广角,2006,14:41-45.
- [10] 张桐,徐奇友,许红,等. 不同温度下不同蛋白水平对镜鲤(*Cyprinus carpio* L.)非特异性免疫的影响[J]. 东北农业大学学报,2010,41(12):80-85.
- [11] GOIMIER Y, PASCUAL C, SÁNCHEZ A, et al. Relation between reproductive, physiological, and immunological condition of *Litopenaeus setiferus* pre-adult males fed different dietary protein levels (Crustacea; Penaeidae) [J]. Animal Reproduction Science, 2006, 92:193-208.
- [12] PASCUAL C, ZENTENO E, CUZON G, et al. *Litopenaeus vannamei* juveniles energetic balance and immunological response to dietary protein[J]. Aquaculture, 2004, 236:431-450.
- [13] 夏苏东,李勇,王文琪,等. 蛋白质营养对高密度养殖凡纳滨对虾生长与免疫力的影响[J]. 海洋科学,2009,33(5):51-58.
- [14] 刘波,章世元,姜德兴,等. 蛋白质氨基酸营养免疫研究[J]. 动物科学与动物医学,2002,19(8):38-41.
- [15] BUENTELLO A J, GATLIN III D M. Effects of elevated dietary arginine on resistance of channel catfish to exposure to *Edwardsiella ictaluri* [J]. Journal of Aquaculture Animal Health, 2001, 13(3):194-201.
- [16] 韩阿寿,梁亚全,高淳仁,等. 斑节对虾的精氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、色氨酸的需求量研究[J]. 中国水产科学,1995,2(2):7-14.
- [17] 朱春华,李广丽,吴天力,等. L-精氨酸对凡纳滨对虾体液免疫因子的影响[J]. 海洋科学,2009,33(2):55-59.
- [18] KROGDAHL A, BAKKE-MCKELLEP A M, ROED K H, et al. Feeding Atlantic salmon *Salmo salar* L. soybean products: effects on disease resistance (furunculosis), and lysozyme and IgM levels in the intestinal mucosa[J]. Aquaculture Nutrition, 2000, 6(2):77-84.
- [19] TANG H G, WU T X, ZHAO Z Y, et al. Effect of fish protein hydrolysate on growth performance and humoral immune response in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea* R.) [J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2008, 9(9):684-690.
- [20] 柳旭东,梁萌青,张利民,等. 饲料中添加水解鱼蛋白对半滑舌鳎稚鱼生长及生理生化指标的影响[J]. 水生生物学报,2010,34(2):242-249.
- [21] 许培玉,周洪琪. 小肽制品对南美白对虾生长及非特异性免疫力的影响[J]. 中国饲料,2004(17):

- 13 - 15.
- [22] 林启存, 方长富, 钟国防, 等. 小肽对凡纳滨对虾幼体生长性能及非特异性免疫能力的影响[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(5): 590 - 595.
- [23] BURRELLS C, WILLAMS P D, SOUTHGATE P J, et al. Immunological, physiological and pathological responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to increasing dietary concentrations of soybean proteins [J]. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 1999, 72: 277 - 288.
- [24] 王文娟, 叶元土, 蔡春芳, 等. 豆粕及其抗营养因子对异育银鲫血清生化和非特异性免疫指标的影响[J]. 中国饲料, 2010(18): 30 - 33.
- [25] 王崇, 雷武, 解绶启, 等. 饲料中豆粕替代鱼粉蛋白对异育银鲫生长、代谢及免疫功能的影响[J]. 水生生物学报, 2009, 33(4): 740 - 747.
- [26] 陈萱, 梁运祥, 陈昌福. 发酵豆粕饲料对异育银鲫非特异性免疫功能的影响[J]. 淡水渔业, 2005, 35(2): 6 - 8.
- [27] 王吉桥, 程爱香, 闫有利, 等. 混合植物蛋白添加晶体氨基酸替代鱼粉的饲料对花(鲢)鱼种生长和免疫指标的影响[J]. 水产学杂志, 2010, 23(1): 15 - 23.
- [28] 张勇, 朱宇旌, 付丽, 等. 不同蛋白质水平饲料对生长育肥猪生长性能、免疫机能及臀中肌中 u-calpain 表达量的影响[J]. 中国饲料, 2008(23): 18 - 20.
- [29] 艾庆辉, 麦康森. 鱼类营养免疫研究进展[J]. 水生生物学报, 2007, 31(3): 425 - 430.
- [30] 李勇, 王雷, 蒋克勇, 等. 水产动物营养的生态适宜与环保饲料[J]. 海洋科学, 2004(3): 76 - 78.
- [31] 蒋克勇, 李勇, 李军, 等. 大菱鲆幼鱼蛋白质的生态营养需要量探寻[J]. 海洋科学, 2005, 29(9): 65 - 70.
- [32] 夏苏东. 蛋白质营养对高密养殖凡纳滨虾的效应机制与生态需要量[D]. 硕士学位论文. 青岛: 青岛农业大学, 2009.
- [33] 梁旭方, OKU H, OGATA H Y, 等. 海水鱼真脂蛋白脂肪酶基因 cDNA 序列与组织表达[J]. 生物化学与分子生物学报, 2002, 18(6): 712 - 719.
- [34] ROSAS C, CUZON G, TABOADA G, et al. Effect of dietary protein and energy levels on growth, oxygen consumption, haemolymph and digestive gland carbohydrates, nitrogen excretion and osmotic pressure of *Litopenaeus vannamei* (Boone) and *L. setiferus* (Linne) juveniles (Crustacea; Decapoda; Penaeidae) [J]. *Aquaculture Research*, 2001, 32(7): 531 - 547.
- [35] AUWERX J, LEROY P, SCHOONJANS K. Lipoprotein lipase: recent contributions from molecular biology [J]. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 1992(29): 243 - 268.
- [36] ZECHNER R. The tissue specific expression of lipoprotein lipase: implications for energy and lipoprotein metabolism [J]. *Current Opinion in Lipidology*, 1997(8): 77 - 88.
- [37] LIANG X F, OKU H, OGATA H Y. The effects of feeding condition and dietary lipid level on lipoprotein lipase gene expression in liver and visceral adipose tissue of red seabream *Pagrus major* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2002, 131(2): 335 - 342.
- [38] LIANG X F, OGATA H Y, OKU H. Effect of dietary fatty acids on lipoprotein lipase gene expression in the liver and visceral adipose tissue of fed and starved red seabream *Pagrus major* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2002, 132: 913 - 919.
- [39] 颜新春. 日粮对脂肪酸合成酶(FAS)基因的表达调控及其应用[J]. 饲料研究, 2000(7): 5 - 7.
- [40] 刘世杰, 宋代军, 刘作华. 日粮因素对脂肪酸合成酶(FAS)基因表达的影响[J]. 饲料工业, 2004, 25(11): 27 - 29.
- [41] 张军霞, 李发弟. 营养对动物基因表达的调控[J]. 家畜生态学报, 2005, 26(6): 103 - 105.
- [42] 艾春香. 水产动物分子营养学研究进展[J]. 福建农业学报, 2005, 20(增刊): 46 - 50.
- [43] 华益民, 林浩然. 营养状况对幼鲤鱼肝脏 IGF- I mRNA 表达的影响[J]. 动物学报, 2001, 47(1): 94 - 100.
- [44] 石和荣, 张勇, 张为民, 等. 半胱胺盐酸盐和 LHRH-A 对黄鳍鲷 IGF- I 基因表达和生长的影响[J]. 动物学报, 2005, 51(1): 108 - 116.
- [45] 滕勇, 杨海明, 经荣斌. 主要营养物质对基因表达的调控[J]. 饲料广角, 2003(18): 24 - 26.
- [46] 熊刚. 营养素对水产动物营养基因表达调控研究进展[J]. 湖南饲料, 2008(1): 37 - 39.

Roles of Dietary Protein in Immunity of Fish and Shrimp

GAO Tingting^{1,2} LI Yong^{2*} ZHANG Jiaguo¹ SUN Guoxiang² LIU Yang²

(1. *College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

Abstract: Fish and shrimp have large requirements for protein, which is a major and essential nutrient for growth, reproduction, metabolism and health maintenance, and protein also has close relation with immunity. In order to lay a foundation for practical application and advance research on relationship between protein nutrition and immunity in fish and shrimp, this paper mainly reviews effects of feed protein on fish immunity and its mechanism of action in the recent decade. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(9):1459-1465]

Key words: fish; shrimp; protein; immunity; mechanism of action