

# 外源核苷酸对水产动物营养生理作用的研究进展

许丹丹<sup>1,2</sup>, 曹俊明<sup>2</sup>, 黄燕华<sup>2</sup>, 蓝汉冰<sup>2</sup>, 严晶<sup>2</sup>, 陈晓瑛<sup>1,2</sup>, 张荣斌<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学 动物科学学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省农业科学院 畜牧研究所, 广东 广州 510640)

关键词: 核苷酸; 水产动物; 营养; 生理

中图分类号: S963.73

文献标识码: C

文章编号: 1003-1111(2011)11-0716-05

核苷酸(Nucleotide, NT)是细胞的主要组分, 又是构成 DNA 和 RNA 的单体, 具有调节生物体内能量代谢、参与遗传信息编码、传递细胞信号等重要的生理和生化功能<sup>[1]</sup>。由于动物机体能合成各种核苷酸, 而且又没有特异的缺乏症, 因而长期以来人们一直将其视为非必需的营养素。研究发现, 虽然大部分细胞能利用体内的一些简单化合物从头合成核苷酸, 但是某些与营养吸收代谢有关的肠细胞及参与免疫过程的淋巴细胞、红细胞和白细胞等, 却无法从头合成核苷酸, 因此这些组织细胞必须依靠外源核苷酸来维持细胞分裂和生长<sup>[2]</sup>。由于核苷酸的特殊作用, 其被认为是一种半必需营养素。近年来, 随着对核苷酸饲料添加剂研究的不断深入, 发现饲料中核苷酸具有促进动物生长, 增强机体免疫力, 并且对动物胃肠道发育、肝功能、脂代谢等有重要作用<sup>[3-5]</sup>。但核苷酸作为一种新型饲料添加剂在水产养殖中的研究还处于探索阶段。

## 1 外源核苷酸的生长调节作用

核苷酸作为激素的介导—第二信使, 参与各种酶及生长因子的代谢过程, 对细胞的分裂、分化和发育有重要作用。对哺乳动物及畜禽的研究发现, 饲料核苷酸影响肠、肝、脾、骨等组织中核苷酸、DNA 和 RNA 的含量<sup>[6]</sup>。饲料核苷酸、核苷可以加快动物生长速度, 提高动物生产性能<sup>[7-8]</sup>, 增加肠黏膜的核酸和蛋白质含量以及肝脏的核酸含量, 并能促进肠绒毛生长, 增加肠壁厚度<sup>[9-10]</sup>。在水产动物研究中也发现了核苷酸类似的功能。对鲤科幼鱼的研究表明, 外源核苷酸能促进水产动物早期阶段的生长<sup>[5]</sup>。Li 等<sup>[11]</sup>对美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)的研究发现, 添加核苷酸的饲料饲喂, 前期(0

~1周)能显著促进鱼的生长, 降低饲料系数。此外, 据报道, 饲料中添加外源核苷酸能提高点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)<sup>[12]</sup>、大西洋鲑(*Salmo salar*)<sup>[13]</sup>、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)<sup>[14]</sup>和锦鲤(*Brocarded carp*)幼鱼<sup>[15]</sup>的质量增加率, 降低饲料系数, 增加体长和肠褶皱。在基础饲料中添加核苷酸粗提物(有效成分>75%)<sup>[16]</sup>或者酵母核苷酸<sup>[17]</sup>, 可显著提高凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的质量增加率、全虾粗蛋白、粗脂肪及水分含量, 降低饲料系数。

然而, Peres 等<sup>[18]</sup>对欧洲海鲈(*Centrarchus labrax*)的研究却得到了不同的结果, 外源核苷酸无显著的促生长作用; Li 等<sup>[19]</sup>在饲料中添加 0.5% 核苷酸饲喂杂交柳鲈(*Morone chrysops* × *M. saxatilis*), 结果表明外源核苷酸对鱼的生长及体成分均无影响。这可能是由于体内从头合成的核苷酸能够满足动物日常生活所需的缘故<sup>[1]</sup>。出现这些差异, 可能与试验动物营养状况和饲料的营养水平有关, 也可能与养殖环境有一定的关系。

核苷酸为含氮化合物, 对水产动物的味觉、嗅觉神经及化学感受器有特定作用, 所以可作为水产动物诱食剂的主要有效成分。含肌苷酸的诱食剂能提高条纹鲈(*M. saxatilis*)的摄食率, 从而提高其质量增加率<sup>[20-21]</sup>。张海明等<sup>[22]</sup>报道, 5'-三磷酸腺苷和 5'-腺苷酸对鳖(*Trionyx sinensis*)有明显的诱食作用, 5'-鸟苷酸对鳗鲡(*Anguilla japonica*)有强烈的诱食作用。Rumsey 等<sup>[23]</sup>研究发现, 饲料中分别添加 4.1% 的酵母核酸提取物、1.85% 的鸟嘌呤、2.17% 的黄嘌呤, 在 12 周的试验期中均可显著提高虹鳟(*Onchyrhynchus mykiss*)的摄食量。核苷酸促进生长的机制可能是在饲喂的初始阶段, 通过提

收稿日期: 2011-01-17; 修回日期: 2011-04-06。

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(10351064001000000); 广东省中科院合作项目(2009B091300136)。

作者简介: 许丹丹(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产经济动物营养生理; E-mail: dandxu2008@163.com。通讯作者: 曹俊明(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 水产动物营养与饲料; E-mail: junmcao@163.com。

高水产动物的摄食速率,减少饲料中营养物质的溶失,以更多的用于体内营养物质的代谢过程<sup>[24]</sup>。外源核苷酸还可作为蛋白激酶使代谢活性增强,诱导体内激素或代谢酶的合成,促进蛋白质的合成,从而使体质量增加<sup>[25]</sup>。

## 2 外源核苷酸对肝脏功能的影响

动物肝脏所需核苷酸可以由氨基酸从头合成供给,但通过饲料途径满足肝脏核苷酸具有节约能量的优势。研究饲料核苷酸对成年鼠肝脏形态的影响时发现,缺乏核苷酸饲料导致肝细胞中核仁区明显缩小,粗面内质网减少,核染色质缩合并与核糖体相连的地方出现脂肪沉积<sup>[26]</sup>。邬小兵等<sup>[9]</sup>研究发现,饲料中添加 0.2% 核苷酸能显著提高雏鸡肝脏核酸含量。研究表明,以 D-半乳糖胺致小鼠肝损伤后,饲喂无核苷酸和补充核苷酸及核苷混合物的饲料,结果发现添加核苷酸能显著降低丙氨酸氨基转移酶和天门冬氨酸氨基转移酶活性<sup>[27]</sup>。有关外源核苷酸对水产动物肝脏功能的作用仅有少数报道,王锐等<sup>[28]</sup>研究发现外源核苷酸可显著提高异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)幼鱼肝胰腺中淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶的活性。Gonzalez-Vecino 等<sup>[29]</sup>在处于产卵期鳊鱼(*Melanogrammus aeglefinus*)饲料中添加核苷酸发现,添加核苷酸组幼鱼的内脏发育和个体大小比未添加核苷酸组的好。

## 3 外源核苷酸对肠道的营养作用

### 3.1 外源核苷酸对肠道生长和发育的影响

肠道是营养物质消化吸收的主要场所,其中含有多类消化酶。快速生长的动物肠细胞周转较快,对核苷酸需求较多,但是体内和体外试验发现,小肠细胞缺乏利用氨基酸从头合成核苷酸的能力,因此小肠中嘌呤和嘧啶核苷酸的合成主要以补救合成途径进行<sup>[30]</sup>。饲料核苷酸对肠细胞生理生化、形态学及细胞成熟起重要作用。研究显示,核苷酸能够显著提高刚断奶小鼠<sup>[27,31]</sup>和雏鸡<sup>[9]</sup>肠道黏膜蛋白、RNA 和 DNA 含量,显著增加肠绒毛高度和肠壁厚度,提高小肠黏膜的麦芽糖酶、乳糖酶、蔗糖酶等酶,特别是对十二指肠和空肠近端酶的活性影响较大。试验显示,肠道酶活性与肠道 mRNA 含量变化相一致,补充核苷酸或核苷后可提高肠中碱性磷酸酶、麦芽糖酶、蔗糖酶和乳糖酶的活性<sup>[10,32]</sup>,而这些酶是肠细胞成熟的标志。有学者研究发现,在初生动物正常肠细胞发育阶段,核苷酸可能是作为半必需营养物,通过满足 DNA 和 RNA 合成的需要而发挥其促进肠道快速生长和机

能成熟的功能<sup>[33]</sup>。离体试验表明,外源核苷酸可以加速人体小肠上皮隐窝细胞系(IEC-6)细胞的增殖、分化及细胞功能的完善<sup>[34]</sup>。外源核苷酸对水产动物肠道功能亦有类似的作用。Burrells 等<sup>[13]</sup>报道,在大西洋鲑饲料中添加 0.3% 核苷酸混合物,可明显增加肠皱褶高度,并且显著提高肠皱褶基底膜厚度和肠道表面积。纯合饲料中添加酵母核苷酸可显著提高鲤鱼中肠后段肠绒毛高度,并且能使肠上皮吸收空泡向肠绒毛边缘集中<sup>[35]</sup>。王锐等<sup>[28]</sup>给异育银鲫幼鱼投喂添加核苷酸混合物的饲料,发现该饲料能显著提高肠道蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶活性。尖鳍鲤(*C. acutidorsalis*)幼鱼饲料中补充核苷酸可显著改善肠道的健康状况,可能是因为肠是鱼类机体重要的免疫器官,其黏膜相关淋巴组织可以优先利用肠细胞吸收的核苷酸物质,从而维持肠道的正常功能<sup>[5]</sup>。

### 3.2 外源核苷酸对肠道微生态区系的影响

动物的肠道中存在大量的细菌。正常情况下,生物体与正常菌群之间保持着动态的微生态平衡,而且正常菌群之间也保持恒定的比例关系,它们构成肠道的生物学屏障。肠道中稳定的常驻益生菌能够阻止非常驻菌在肠道中定殖和优势繁殖,可以帮助消化食物,产生一些必需的氨基酸和维生素,对机体的生长及抵御病害有一定的促进作用<sup>[36]</sup>。试验表明,在婴儿饮食中添加核苷酸,有利于优化婴儿肠道微生态区系的组成<sup>[37-38]</sup>。Barness<sup>[39]</sup>发现,喂养补充核苷酸的商业配方奶的婴儿,粪便中双歧杆菌属(*Bifidobacteria*)细菌浓度较高,接近于人奶喂养组。双歧杆菌在肠道中有潜在的益处,能将糖水解为乳酸,降低肠中 pH 值,从而抑制肠道病原微生物的增殖,减少肠道疾病的发生。尽管双歧杆菌作为水产动物肠道益生菌的研究尚少见报道,但有关饲料核苷酸对水产动物肠道微生态区系的作用值得深入研究。

## 4 外源核苷酸对免疫和抗应激能力的影响

### 4.1 外源核苷酸与免疫

免疫系统是动物机体执行防御功能的机构,机体依靠免疫系统来抵御病害生物的入侵和感染疾病后的康复。研究表明,饲料核苷酸能增强巨噬细胞的吞噬作用以及强化自然杀伤细胞的活力<sup>[40]</sup>。对鱼类<sup>[41]</sup>和虾类<sup>[42]</sup>的研究显示,核苷酸可以影响先天免疫系统的激素分泌和细胞组成。外源核苷酸能够提高鲤鱼<sup>[43]</sup>、石斑鱼<sup>[12]</sup>体内血清补体和溶菌酶活性,巨噬细胞的吞噬作用和肾脏超氧阴离子合成;增加条纹鲈<sup>[19]</sup>血液嗜中性氧化因子含量。

Low 等<sup>[44]</sup>检测了以核苷酸饲料饲喂 15 周的大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)的非特异免疫相关基因的表达量,发现脾脏和鳃中的 IgM 和 RAG-1 基因表达量显著高于未添加组,但是肾脏中的表达量与之相反;另外与对照组相比,肾脏中的白介素-1 $\beta$ 的表达量显著升高。给罗非鱼(*Tilapia*)<sup>[45]</sup>和条纹鲈<sup>[19]</sup>分别注射灭活的嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)和灭活的病原体 *Streptococcus iniae*,发现添加了核苷酸组的 2 种鱼产生的抗体显著高于未添加组。这些研究表明,饲料中添加核苷酸可以增强水产动物免疫因子在应激时快速增长和快速应答的能力。

#### 4.2 外源核苷酸与抗应激

在水产养殖中添加核苷酸的最大益处是能增强鱼虾对环境的耐受性。集约化、规模化和设施化的养殖模式使养殖水产动物面临更为复杂的自然和人为干扰,复杂的应激因子给养殖动物带来不同程度的胁迫,致使鱼类对病原的敏感性增强,而这常常成为鱼类疾病发生和流行的重要诱因。研究发现,受到应激或者感染疾病后的免疫细胞需要额外补充核苷酸。添加核苷酸的饲料饲喂虹鳟 90~120 d 后,可以减少健康和感染传染性胰坏死病毒鱼的血清皮质醇水平,这可能是由于外源核苷酸提高了应激条件下鱼的抗病力<sup>[46]</sup>。王广军等<sup>[17]</sup>报道,添加酵母核苷酸可以提高凡纳滨对虾耐低氧和低温的能力,344 mg/kg 组和 516 mg/kg 组比对照组出现死亡一半时的温度下降了 1  $^{\circ}\text{C}$ 。许群<sup>[47]</sup>研究发现,给凡纳滨对虾饲喂添加外源核苷酸的饲料,可提高 pH、盐度和氨氮胁迫下对虾的非特异性免疫能力。然而, Li 等<sup>[11]</sup>在研究美国红鱼幼鱼时却得到了不一致的结果。目前,对于外源核苷酸是否会参与到应激反应的信号通路中,或者大量的应激因子是否会特异性的影响核苷酸的代谢途径尚不清楚,有待进一步研究。

#### 4.3 外源核苷酸与抗病力

饲料中添加核苷酸可以增强鱼虾对疾病的抵抗力。Burrells 等<sup>[48]</sup>用添加了核苷酸的商品化鲑鱼饲料饲喂感染鳃弧菌(*Vibrio anguillarum*)的虹鳟、感染传染性鲑鱼贫血症病毒(infectious salmon anaemia, ISA)和鱼虱子(*Lepeophtheirus salmo*)的大西洋鲑鱼、感染鲑立克次氏体属微生物(*Piscirickettsia salmonis*)的银大麻哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*),结果显示核苷酸能显著降低虹鳟、大西洋鲑和银大麻哈鱼的死亡率;Leonardi 等<sup>[46]</sup>向虹鳟鱼体内注射胰腺坏死病毒后饲养 60 d,发现未添加核

苷酸组的鱼全部死亡,而饲料中添加核苷酸组的鱼仍然存活。饲料中添加外源核苷酸可显著提高斑节对虾(*Penaeus monodon*)在周期性和极端盐度应激条件下的成活率<sup>[49]</sup>。

关于外源核苷酸影响机体免疫机能的机理尚不清楚,可能是由于白细胞在体内的代谢周期短,因而对核苷酸的需求量大,外源核苷酸进入体内的核苷酸池供白细胞利用,从而提高了免疫力;还可能通过促进骨髓内巨噬细胞的发育,以提高细胞核体液免疫反应能力,从而增强了免疫作用<sup>[50]</sup>。

## 5 结语

有关核苷酸添加剂在水产养殖中的应用研究表明,外源核苷酸对养殖鱼虾具有较好的促生长作用,可以保护肝脏功能和肠道的生长发育,并提高机体免疫力。但是,由于研究所用的核苷酸来源多样,核苷酸产品的成分、各成分的比例等信息不够明确,因此尚难准确评估核苷酸对各种水产动物的作用。关于核苷酸对水产动物营养及免疫调控作用的机理、动物在不同发育阶段对核苷酸的需要量和最大耐受量及其量效关系,以及核苷酸的添加方式及添加周期等问题都有待深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Cosgrove M. Nucleotides[J]. Nutrition, 1998, 14(10):748-751.
- [2] Gil A. Modulation of the immune response mediated by dietary nucleotides[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2002,56(3):1-4.
- [3] Klaus H. The use of nucleotides in animal feed[J]. Feed Mix, 2007, 15(5):14-16.
- [4] Martinez-Puig D, Manzanilla E G, Morales J, et al. Dietary nucleotide supplementation reduces occurrence of diarrhoea in early weaned pigs[J]. Livestock Science, 2007(108):276-279.
- [5] Borda E, Martinez-Puig D, Cordoba X. A balanced nucleotide supply makes sense[J]. Feed Mix, 2003, 11(6):24-26.
- [6] Lopez-navarro A T, Ortera M A, Peragon J, et al. Deprivation of dietary nucleotides decreases protein synthesis in the liver and small intestine in rats[J]. Gastroenterology, 1996, 110(6):1760-1769.
- [7] 牛淑玲, 刘静波, 侯万文, 等. 外源性环核苷酸对肉鸡性能及胴体品质的影响[J]. 中国家禽, 1998, 20(3):10-12.
- [8] 王友明, 许梓荣. 酵母核苷酸对肉鸡生长性能和胴体组成的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学学报, 2002, 28(3):309-313.

- [9] 鄢小兵, 乐国辉, 施用晖. 肉仔鸡日粮外源核苷酸营养作用初探[J]. 中国畜牧杂志, 2001, 17(5):15-17.
- [10] Uauy R, Stringel G, Thomas R, et al. Effect of dietary nucleosides on growth and maturation of the developing gut in the rat[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology Nutrition, 1990, 10(4):497-503.
- [11] Li P, Delbert M, Gatlin III. Dietary supplementation of a purified nucleotide mixture transiently enhanced growth and feed utilization of juvenile red drum, *Sciaenops ocellatus*[J]. Journal of The World Aquaculture Society, 2007, 38(2):281-286.
- [12] Lin Y H, Wang H, Shiao S Y. Dietary nucleotide supplementation enhances growth and immune responses of grouper, *Epinephelus malabaricus* [J]. Aquaculture Nutrition, 2009, 15(2):117-122.
- [13] Burrels C, Williams P D, Southage P J, et al. Dietary nucleotides; a novel supplement in fish feeds 2: Effects on vaccination, salt water transfer, growth rate and physiology of Atlantic salmon[J]. Aquaculture, 2001, 199(1/2):171-184.
- [14] 苟德明, 鲁安太, 王智新. CNT 组合剂对鲤鱼的增重试验[J]. 畜牧兽医杂志, 1995, 8(4):5-8.
- [15] 周兴华, 石芸, 罗孟川, 等. 酵母核苷酸对锦鲤幼鱼生长、体组成及饲料利用影响[J]. 粮食与饲料工业, 2009(2):36-40.
- [16] 蓝汉冰, 曹俊明, 许丹丹, 等. 饲料中添加核苷酸粗提物对凡纳滨对虾生长性能的影响[J]. 广东农业科学, 2009, 31(10):143-145.
- [17] 王广军, 朱旺明, 谭永刚, 等. 酵母核苷酸对凡纳滨对虾生长、免疫及抗应激影响的研究[J]. 饲料工业, 2006, 27(8):29-32.
- [18] Peres H, Oliva-Teles A. The effect of dietary ribonucleic acid incorporation in performance of European sea bass (*Centrarchus labrax*) juveniles[J]. Aquaculture, 2003, 215(1/4):245-253.
- [19] Li P, Lewis D H, Gatlin III, et al. Dietary oligonucleotide from yeast RNA influences immune responses and resistance of hybrid striped bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*) to *Streptococcus iniae* infection[J]. Fish and Shellfish Immunology, 2004, 16(5):561-569.
- [20] Papatryphon E, Joseph H, Soares Jr. The effect of dietary feeding stimulants on growth performance of striped bass, *Morone saxatilis*, fed a plant feedstuff-based diet[J]. Aquaculture, 2000, 185(3/4):329-338.
- [21] Papatryphon E, Joseph H, Soares J. Optimizing the levels of feeding stimulants for use in high-fish meal and plant feedstuff-based diets for striped bass, *Morone saxatilis*[J]. Aquaculture, 2001, 202(3/4):279-288.
- [22] 张海明, 林可椒. 单核苷酸等纯化学制剂对鳖的诱食效果[J]. 淡水渔业, 2003, 33(6):20-22.
- [23] Rumsey G L, Winfree R A, Hughes S G. Nutritional value of dietary nucleic acids and purine bases to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 1992, 108(1/2):97-110.
- [24] Li P, Gatlin III. Nucleotide nutrition in fish; current knowledge and future applications[J]. Aquaculture, 2006, 251(2/4):141-152.
- [25] 咎林森, 邱怀. 关于环核苷酸与家畜生长之调控[J], 甘肃畜牧兽医, 1994, 24(5):27-28.
- [26] Lepez-navarro A T, Bueno J D, Gil A, et al. Morphological changes in hepatocytes of rats deprived of dietary nucleotides[J]. British Journal of Nutrition, 1996, 76(4):579-589.
- [27] Ogoshi S, Iwasa M, Kitagawa S, et al. Effects of total parenteral nutrition with nucleoside and nucleotide mixture on D-galactosamine-induced liver injury in rats[J]. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition, 1988, 12(1):53-57.
- [28] 王锐, 王春维, 李星燕, 等. 外源核苷酸对异育银鲫幼鱼消化酶活性的影响[J]. 中国水产, 2008(3):70-72.
- [29] Gonzalez-Vecino J L, Cutts C J, Batty R S, et al. The effects of nucleotide-enriched broodstock diet on first feeding success and survival of haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) larvae[R]. Phuket Island, Thailand; Abstract Book of 11<sup>th</sup> International Symposium on Nutrition and Feeding in Fish, 2004:268.
- [30] Tsujinaka T, Kishibuchi M, Iijima S, et al. Nucleotides and intestine[J]. Japanese of Parenter Enteral Nutrition, 1999, 23(1):74-77.
- [31] 王兰芳, 乐国伟, 施用晖, 等. 日粮核苷酸对早期断奶小鼠生长发育的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 2003, 22(4):18-22.
- [32] Nunez M C, Ayudarte M V, Morales D, et al. Effect of dietary nucleotides on intestinal repair in rats with experimental chronic diarrhea[J]. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition, 1990, 14(6):598-604.
- [33] Elisabeth H, Roland J. Dietary nucleotides and intestinal cell lines; I. Modulation of growth [J]. Nutrition Research, 2004, 24(3):197-207.
- [34] Tanaka M, Lee K, Martinez-Augustin O, et al. Exogenous nucleotides alter the proliferation, differentiation and apoptosis of human small intestinal epithelium[J]. Nutrition, 1996, 126(2):424-433.
- [35] 朱天和, 吉红, 王丽宏, 等. 酵母核苷酸对鲤鱼生长性能、生化指标和肠道发育的影响[J]. 饲料研究, 2010, 33(9):1-4.

- [36] Chadwick R W, George S E, Claxton L D. Role of the gastrointestinal mucosa and microflora in the bio-activation of dietary and environmental mutagens or carcinogens[J]. *Drug Metabolism Reviews*, 1992, 24(4):425-429.
- [37] Yau K T, Huang C B, Chen W, et al. Effect of nucleotides on diarrhea and immune responses in healthy term infants in Taiwan[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology & Nutrition*, 2003, 36(1):37-43.
- [38] Atul S, George M, Sandra M, et al. Dietary nucleotides and fecal microbiota in formula-fed infants; a randomized controlled trial[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2008, 87(6):1785-1792.
- [39] Barness L A. Dietary sources of nucleotides from breast milk to weaning [J]. *Journal of Nutrition*, 1994, 124(1):128-130.
- [40] Grimble G K, Westwood O M R. Nucleotides as immunomodulators in clinical nutrition[J]. *Current Opinion Clinical Nutrition*, 2000, 4(1):57-64.
- [41] 魏文志, 罗方妮, 杨成, 等. 酵母核苷酸对异育银鲫生长和免疫酶活性的影响[J]. *淡水渔业*, 2007, 37(4):57-60.
- [42] Devresse B. Nucleotides—a key nutrient for shrimp immune system[J]. *Feed Mix*, 2000, 8(3):20-22.
- [43] Sakai M, Taniguchi K, Mamoto K, et al. Immunostimulant effects of nucleotide isolated from yeast RNA on carp, *Cyprinus carpio* L[J]. *Journal of Fish Disease*, 2001, 24(8):433-438.
- [44] Low C, Wadsworth S, Burrells C, et al. Expression of immune genes in turbot (*Scophthalmus maximus*) fed a nucleotide-supplemented diet[J]. *Aquaculture*, 2003, 221(1/4):23-40.
- [45] Ramadan A, Afifi N A, Moustafa M, et al. The effect of ascogen on the immune response of tilapia fish to *Aeromonas hydrophila* vaccine[J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 1994, 4(3):159-165.
- [46] Leonardi M, Sandino A M, Klempau A. Effect of a nucleotide-enriched diet on the immune system, plasma cortisol levels and resistance to infectious pancreatic necrosis (IPN) in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*, 2003, 23(2):52-59.
- [47] 许群. 饵料中添加核苷酸对凡纳滨对虾免疫功能的影响[D]. 广州:华南师范大学, 2004.
- [48] Burrells C, Williams P D, Forno P F. Dietary nucleotides; a novel supplement in fish feeds; 1. Effects on resistance to disease in salmonids[J]. *Aquaculture*, 2001, 199(1/2):159-169.
- [49] Joachim W H, Shravan K M. Benefits of nucleotides in shrimp farming[J]. *Feed Technology*, 2006, 10(9):27-30.
- [50] 许群, 王安利. 核苷酸对动物摄食、生长与免疫功能的影响[J]. *动物营养学报*, 2004, 16(4):13-17.

## Advances in Nutritional and Physiological Effects of Exogenous Nucleotides in Aquatic Animals

XU Dan-dan<sup>1,2</sup>, CAO Jun-ming<sup>2</sup>, HUANG Yan-hua<sup>2</sup>,  
LAN Han-bing<sup>2</sup>, YAN Jing<sup>2</sup>, CHEN Xiao-ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Rong-bin<sup>2</sup>

(1. College of Animal Science, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China;

2. Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Key words:** nucleotide; aquatic animal; nutrition; physiology