

水产养殖动物营养与饲料工程发展战略研究

解绶启¹, 张文兵², 韩冬¹, 麦康森²

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国海洋大学水产学院, 山东青岛 266003)

摘要: 本文综述了我国水产养殖动物营养学研究和饲料工程方面近期的研究, 分析了产业发展的问题, 探讨了下一步的政策措施。可以发现, 过去 10 多年里, 水产动物营养与饲料的发展在营养素需求、动物的摄食与投喂、仔稚鱼饲料、亲本营养、添加剂等方面取得了重要的进展, 但仍然存在饵料系数高、环境排放大、饲料成本高、效益不稳定等问题。下一步的研究应该以“安全高效, 节约环保”为目标, 引入生态学和现代组学理念, 开展水产动物营养代谢的分子机理、动物的营养需要与精准饲料配方技术、饲料质量控制与加工工艺、精准投喂技术、品质调控技术等方面的研究, 同时在政策上应该扩大学科交流、实行长期稳定支持等。

关键词: 水产养殖; 动物营养; 饲料; 发展策略

中图分类号: S963.16 **文献标识码:** A

Study on the Developmental Strategies for the Engineering of Aqua Nutrition and Feed

Xie Shouqi¹, Zhang Wenbing², Han Dong¹, Mai Kangsen²

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China)

Abstract: This paper reviews the research in nutrition and feed development in aquaculture animals in recent years, and analyzes the problem and future development of feed industry. In past 10 years, great advances have been achieved in aquaculture animal nutrient requirements, feeding, larval feed, broodstock nutrition, additives etc. But there are still some problems regarding aquafeed including high feed conversion ratio, high environmental discharge, high feed cost and unstable profit. In the near future, the research and development of aquaculture nutrition and feed should focus on “high efficiency, safety, economic and environmental neutral”. New concepts from ecology and genomics technologies should be applied in the study on molecular mechanism of nutrition and metabolism, nutrient requirements and accurate feed and feeding, feed quality control and processing, animal quality regulation, etc. The government should provide more opportunities for cooperation between scientists from different areas and long term support.

Key words: aquaculture; aqua nutrition; feed; developmental strategy

一、前言

我国是世界水产大国, 水产养殖产量从 1978 年

的 2.33×10^6 t 上升到 2014 年的 4.748×10^7 t, 36 年间增加约 20 倍(数据来源于《中国渔业统计年鉴》)。水产养殖业的快速发展对营养饲料科技进步的依赖

收稿日期: 2016-05-03; 修回日期: 2016-05-18

作者简介: 解绶启, 中国科学院水生生物研究所, 研究员, 研究方向为水产动物营养与饲料; E-mail: sqxie@ihb.ac.cn

基金项目: 中国工程院重点咨询项目“水产养殖业十三五规划战略研究”(2014-XZ-19-3)

本刊网址: www.enginsci.cn

越来越大。没有现代的饲料工业，就没有现代的水产养殖业（见图1）。在这期间，我国水产动物营养研究与饲料开发应用在养殖业中的贡献率在40%左右，对我国水产养殖业的健康快速发展起到了决定性作用并占有不可替代的地位。饲料成本占养殖成本的60%~70%^[1]，因此，营养与饲料的科技贡献率占有更加重要的地位。

20世纪80年代是我国水产饲料工业的萌芽期，到1991年我国水产饲料产量仅为 7.5×10^5 t，2013年达到 1.9×10^7 t，22年间增加了约24倍，占世界水产饲料总产量的41%（见图1），也产生了世界最大的水产饲料生产企业，逐步建立了较为完整的水产饲料工业体系。一些饲料品种质量达到世界领先水平，已成为有40余万人就业、年产值达800多亿元的产业，推动了我国水产动物营养研究与水产饲料工业的高速发展。现在，我国已经成为国际上一个全新的水产动物营养研究中心、水产饲料生产中心，走出了一条符合我国国情、独具中国特色的发展道路，发展为世界第一水产饲料生产大国。

从2013年的养殖产量来看，按70%精养投喂饲料（即 3.183×10^7 t水产品需使用饲料）估算，扣除30%滤食性鱼类的鲢鱼、鳙鱼等，即 2.228×10^7 t水产品需用饲料，饲料系数按1.5计算，估计需要饲料约 3.342×10^7 t，而2013年水产配合饲料总产量约为 1.9×10^7 t，缺口还比较大（数据来源于《2013中国渔业统计年鉴》）。由此可见，我国的水产饲料工业在数量上还需要跨越式的发展。目前的饲料技术仍然不能满足快速增长的产业发展需求，出现饲料系数偏高、饲料成本高、饲料利用效率低、废物

排放高等问题。因此，水产养殖产业的发展对饲料的需求和营养学研究有着迫切的需求。

二、我国水产养殖动物营养与饲料工程发展现状

（一）水产动物营养需要与高效饲料配制技术研究

我国的水产养殖在世界上具有显著的特殊性，地域分布、养殖种类、食性类型、养殖模式等都具有高度的多样性，种类更替也非常快^[2]。我国的水产动物营养与饲料利用的研究比国外起步晚了近半个世纪、投入又相对有限，难以短期内完善诸多养殖种类的营养需要参数。

近年来，通过国家攻关（支撑）、产业技术体系建设、农业行业专项及国家“863”“973”等相关科技计划，完成了草鱼、异育银鲫、罗非鱼、团头鲂、中华绒螯蟹、对虾、大黄鱼、鲈鱼、军曹鱼、大菱鲆、牙鲆和半滑舌鳎等养殖鱼类不同生长阶段营养素的需要参数及常规水产饲料主要原料的利用研究，逐步完善我国主要水产养殖动物的营养参数公共平台，为饲料企业的配方设计提供了科学依据，为我国水产饲料工业的兴起与发展奠定了基础。同时，部分大型饲料企业自行开展了主要养殖品种商业配方的营养需求研究，为商业配方的应用提供了科学数据。

（二）水产动物摄食与饲料投喂技术的研究

水产动物的摄食较为复杂，不仅与其本身的遗传背景有关，还随年龄、环境因子，如季节、食物

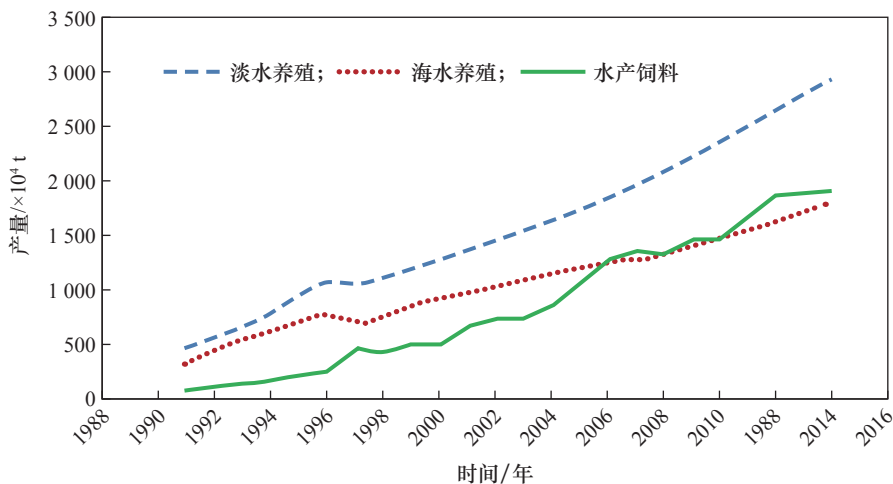


图1 我国水产养殖产量与水产饲料产量的关系（数据来源于《中国渔业统计年鉴》，1988—2016）

丰度等发生变化。研究发现饲料的营养水平会影响到水产动物的摄食率,动物循环系统中的代谢产物水平、摄食节律及禁食均会通过一系列与食欲控制有关的调节控制摄食。脑神经肽 Y (NPY) 的水平已经被证实受到常量营养素的影响。饲料的营养成分如氨基酸等会影响生长激素、胰岛素样生长因子 1 (IGF-1) 的分泌^[3,4],从而影响到鱼类的摄食,而不同营养素之间还存在着复杂的交互作用。前期摄食印记及补偿期摄食特征得到证明,消化道中食物的刺激也可以通过神经和化学信号传送到脑的食欲控制中心而调节摄食。

科学投喂能够显著提高饲料效率、养殖效益和环境效益。最佳投喂频率和投喂量与养殖品种、不同生长阶段、养殖环境及气候变化密切相关。合理的投喂可以显著降低饲料消耗,提高饲料转化率,降低成本,改善产品品质^[5]。通过改变投喂频率,可以提高部分鲤科鱼类对晶体氨基酸和蛋白质的利用效率^[6,7]。

(三) 仔稚鱼营养及微颗粒饲料的研发

我国在仔稚鱼的摄食行为、消化生理和营养需要方面的研究相对薄弱。研究发现不同的饵料选择、粒径大小和投喂技术对仔稚鱼的存活、生长、消化酶发育等影响较大^[8,9]。蛋白源对仔稚鱼的影响很大^[10]。饲料中添加外源性消化酶可以显著提高半滑舌鳎仔稚鱼的生长,对于体内消化酶的影响却不显著^[11]。低分子量小肽对于鱼体的生长和消化道发育起到一定促进作用^[12]。饲料中适宜含量的脂肪水平、磷脂可以改善半滑舌鳎仔稚鱼的生长、存活及酶活力,饲料脂肪和脂肪酸水平还能够在转录水平上不同程度地影响脂肪合成及分解代谢相关基因的表达^[13,14]。一些添加剂可促进消化道发育和提高免疫力^[15]。

但我国已有的人工微颗粒饲料,其品质与国外知名品牌相比,存在较大差距,主要表现在水中稳定性、诱食性、可消化率等方面,还有待提高。因此,加工工艺的改进是亟待解决的重要问题。

(四) 亲鱼营养与繁殖性能和幼体质量

亲鱼的营养和幼苗开口后的营养摄入对鱼虾幼苗的成活率和质量起着决定性的作用。为获得大量的优质苗种,亲鱼的培育显得尤为重要,而使亲鱼获得足够的营养物质又是关键。近年来对有关必需脂肪

酸和抗氧化物质对于鲆鲽类亲鱼的影响进行了研究,在饲料中添加维生素 A、E、C,牛磺酸以及适宜的 n-3/n-6 多不饱和脂肪酸等均可以有效提高大菱鲆和半滑舌鳎等亲鱼性腺发育,如提高相对产卵量、受精率、产卵次数和孵化率,以及提高子代质量等^[16,17]。饲料特定的氨基酸(如精氨酸)和蛋白质会影响异育银鲫亲鱼的生长、代谢和饲料效率^[2,3]。饲料豆粕的添加会使鱼类成熟的时间提前^[18]。而有些有毒有害物质,如藻毒素会明显影响鱼类的繁殖能力^[19]。

(五) 饲料添加剂研制技术

饲料添加剂工业是饲料工业发展水平的一个重要标志。进入 21 世纪以来,饲料添加剂工业有了长足发展。品种大幅度增加,质量提高,产量快速增长,改变了完全依赖进口的局面,许多产品还进入了国际市场。近年来,开发了环境友好的非抗生素类微生物(态)饲料添加剂,或水环境质量调节剂——益生菌和益生菌制剂及免疫增强剂,以调节养殖消化道的微生态平衡,或通过免疫增强剂激活免疫系统提高养殖动物的健康水平,实行健康养殖管理,减少乃至停止抗生素的使用^[20-22]。此外,光合细菌、拮抗菌(如 *Pseudoalteromonas* sp., *Flavobacterium* sp., *Alteromonas* sp., *Phaeobacter* sp., *Bacillus* sp., *Bdellovibrio* sp. 等)、产酶或分泌营养物质的微生物(如乳酸菌、酵母等)和微生物发酵产物等一些益生菌类物质、植酸酶、免疫增强剂等对提高我国健康养殖水平,保证水产品安全起到越来越重要的作用。

(六) 水产饲料加工工艺与装备技术研究

我国水产饲料机械设备在改革开放后才逐步发展起来。直到 20 世纪 80 年代中期我国尚无真正适用的水产饲料机械设备。即使从美国、荷兰、法国以及我国台湾地区引进的设备,在熟化调质、制粒、干燥等技术环节也不能完全符合我国实际情况的要求。近 10 多年来微粉碎设备和膨化成套设备的国产化逐步普及,对提高我国水产饲料加工工艺水平和饲料质量起到重要的作用。

三、国外水产养殖动物营养与饲料工程发展现状

随着科技发展和产业需要,先进国家的水产

动物营养调控已经超越传统的仅仅对养殖产量的追求,现在的目标更加多元化,要求调控更加精准化。基于对营养物质(或可通过饲料途径的非营养成分)的调控机制的详尽研究,就可能通过营养饲料学途径对养殖动物的繁殖、生长、营养需要、健康、行为、对环境的适应能力、养殖产品质量、安全性、甚至养殖环境的持续利用等都可以精准地调控。

(一) 繁殖性能和幼体质量的营养调控

已经发现适量和比例适当的长链多不饱和脂肪酸,磷脂,胆固醇和维生素 A、E、C 对鱼类和甲壳动物的繁殖性能及早期幼体质量都有重要的调控作用,能显著改善性激素合成、性成熟、繁殖力、受精率、孵化率和仔稚鱼的质量。类胡萝卜素、虾青素等色素不仅影响水产养殖动物的体色,而且对其卵子质量和早期幼体的健康有显著的改善作用。

(二) 营养素定量需要的调控

国际上近来的研究更加关注营养素代谢的生理生化过程及其分子生物学调控基础。开始更加关注系统性,关注营养素之间的相互作用及与环境因子的关系,如在研究必需氨基酸作用的同时,开展了条件性必需氨基酸或非必需氨基酸(如牛磺酸、谷氨酰胺、脯氨酸、甘氨酸等)功能的研究。新的生物技术手段如组学(基因组、转录组、蛋白组、代谢组等)等技术及模式水生动物研究的引入,使得对水产动物的营养代谢机制的了解更深入、更准确、更全面^[23~25]。

(三) 动物健康的营养调控

近 10 多年来,基因组学、蛋白质组学等生物技术的进步,对营养素与动物的免疫功能、抗病力的关系及作用机制的阐明起到了巨大的推动作用,为动物免疫力和疾病预防及治疗的营养调控提供了科学依据。考虑到增强免疫功能,饲料维生素 C 和 E 的含量往往是满足其生长需要量的 10~100 倍。而有些无机盐如铁、锌等在饲料中含量的适当提高,对鱼抗病能力的提高有一定的效果。为了提高越冬鱼类对病害的抵抗能力,适当投喂具有明显的效果,不仅可以保证养殖鱼类的体重,还可以有效提高攻毒后的存活率及对爱德华氏菌的抗体滴度和吞噬细

胞指数。饲料中葡聚糖和核苷酸的添加可降低虹鳟感染鳃弧菌后的累积死亡率。近期对益生菌与抗病的关系研究也成为热点^[26]。

(四) 动物行为的营养调控

动物行为尤其是摄食行为调控机制的研究对养殖管理十分重要。国际上的研究发现,摄食调控的内在因素包括激素、神经和代谢(营养素),外部调节因子包括环境因子和食物(饲料)。饲料的营养水平会影响到水产动物的摄食率,动物循环系统中的代谢产物水平、摄食节律及禁食均会通过一系列与食欲控制有关的调节控制摄食。

根据动物行为的营养调控原理,我们可以通过饲料配方的调整,以改变动物一些不良的行为,为生产服务。如果在其饲料中适当提高色氨酸的含量,就可能减少相残行为,提高成活率。例如,在饲料中适量添加 L-色氨酸能有效地抑制虹鳟幼鱼的自相残杀行为,并能减少应激反应的负面影响。

(五) 动物对环境适应能力的营养调控

良好的营养状态能提高养殖动物的抗环境应激能力,如适当提高饲料中维生素 C 的含量,长吻鲢可以有效地应付环境中的高浓度氨和氮^[27]。通过不同环境因子对营养代谢影响的研究,可以更为有效地结合养殖环境的变化,精确研究鱼类的营养需求和饲料技术。

(六) 养殖动物产品质量与安全的营养调控

发达国家早在 10 多年前就开始研究养殖产品的调控问题了,对大西洋鲑和虹鳟等的研究也证明了营养与饲料对其颜色、外观、风味、口感、质地、营养价值和食用安全的直接影响。替代蛋白源和脂肪源取代日益短缺的鱼粉、鱼油后对水产养殖产品的风味、营养价值的影响也受到广泛关注,国外的研究者特别关注鱼肉产品中脂肪酸组成的变化,并深入到分子层面,探讨替代油脂对去饱和酶和碳链延长酶基因表达的影响^[28]。

研究有毒有害物质在养殖动物体内的代谢、积累、排出规律和动物的解毒机制,将为通过饲料途径添加螯合剂、促解毒剂等手段以达到营养调控主动排毒的目的提供科学依据。

(七) 养殖环境持续利用的营养调控

保护养殖环境、保证养殖业的可持续发展是当今人们追求的另一个重要目标。水产养殖的自身污染是养殖业可持续发展重要的限制因素之一。为了保护环境,丹麦早在1989年就限制饵料系数不得超过1.2,1992年就限制饵料系数不得超过1.0。并且对饲料中氮、磷最高含量均有限制。通过科学的配方、提高饲料效率,减少氮、磷、硫的排出,是实现营养调控,保证养殖环境可持续利用的重要途径。

四、我国水产饲料产业发展存在的问题

(一) 配合饲料使用比例不高, 饲料系数偏高、浪费严重、环境排放大

我国水产饲料生产发展很快,但是目前的配合饲料使用比例仍然不超过40%,海水鱼配合饲料的普及率不到30%^[1]。饲料系数在1.2~1.8,部分品种仍然偏高,仅少部分在1左右。养殖中直接投喂鲜杂鱼或饲料原料,配合饲料偏高的饲料系数不仅导致生产成本提高,而且造成资源浪费,增加环境污染。水产养殖在带来经济收入的同时,其废物排放也带来了水环境的污染^[29]。

(二) 饲料原料缺口大、饲料成本偏高

我国虽然是一个农业大国,但不是一个饲料资源大国。我国饲料原料的数量和质量都不能完全满足我国饲料工业高速发展的需要^[30,31]。近几年鱼粉价格经几轮飞涨,豆粕、玉米等大宗原料也不断上涨。国内饲料原料供应缺口越来越大,主要饲料蛋白源鱼粉和豆粕70%以上依靠进口,50%以上的氨基酸依靠进口,成为饲料行业和水产养殖业发展的极为核心的制约因素。国内部分饲料添加剂的供应量严重不足,存在品种单一,产品生产成本偏高等问题,在质量和数量上均难以满足需要。

(三) 配合饲料的养殖效益不稳定

由于我国地区跨度较大,养殖模式多样化,加上加工工艺的差别、养殖管理技术的差别,同样的饲料配方在不同养殖模式下其养殖效益差别很大。此外,由于加工工艺等问题,膨化饲料的推广受到限制,国内还不到20%^[32]。对膨化技术研究和设备开发工作做得还很不够,对膨化颗粒饲料加工工艺

及技术参数进行系统研究的工作很少,造成膨化颗粒饲料生产线生产效率不高、能耗高、产品性能稳定性不够。

(四) 饲料市场竞争环境有待规范

饲料企业生产规模小、起点低。我国水产饲料企业众多,6家大型饲料企业水产饲料占总产量的85%以上^[32]。但仍有1000多家中小水产饲料企业年均产出8000t。专业化程度不高,科技含量低。80%以上的水产饲料生产企业是综合型或加工型。市场以次充好、恶性竞争等现象仍然存在。在饲料原料质量控制、配方管理、生产经营等方面没有形成系统的标准,或者有些标准是参考国外的而不适合国内的养殖品种导致执法部门执法困难等。

五、我国水产动物营养与饲料发展的战略选择

为实现水产养殖业“高效、优质、生态、健康、安全”的可持续发展战略目标,水产动物营养与饲料工业发展需要围绕“安全高效,节约环保”的中心,通过从基础理论到应用技术的全创新链的系统研究,从动物营养代谢、饲料原料利用、饲料加工工艺、饲料与养殖环境关系,以及水产品安全等多方面,结合现代分子生物学及“组学”手段,深入研究水产养殖及产品加工全过程中密切相关的营养学和饲料学的理论技术问题。

水产动物营养与饲料工业的发展目标是:通过系列研究与典型示范,揭示水产动物营养需求与摄食、代谢调控的基本理论,阐明饲料利用的过程,深度优化饲料配方,开发新型饲料原料替代品及绿色环保添加剂,加快饲料生产及投喂管理技术升级,建立现代饲料工业体系,以提高养殖产品品质、降低饲料成本、减少环境污染;积极发展现代水产饲料与加工流通业,提高市场信息化水平,加强饲料源头和过程控制,利用物联网和溯源技术,保障水产品的品质和安全;此外,还要重视动物福利,最终实现水产养殖业的绿色、生态、健康和可持续发展。

(一) 利用分子手段进行水产动物营养代谢研究

将动物营养生理、生物化学、免疫学、分子生物学及“组学”等学科相结合,在动物环境、动物

组织细胞、动物体内营养物质的分子代谢水平等不同层次上,进行水产动物的营养需要量、代谢调控机制的研究,为促进水产养殖动物生长发育、提高其抗病能力、最大程度地实现动物的遗传潜能提供理论和技术支持。

(二) 动物的营养需要与精准饲料配方技术的研究

加强对水产动物饲料原料的营养价值评定研究,根据饲料的有效养分、水产动物不同生长阶段和不同养殖条件下的营养需求量、养殖水体可持续精养的营养调控和市场需要等方面,开发精准环保饲料配方,以满足养殖动物的生长、健康、品质及市场要求。

(三) 饲料质量控制与加工工艺

从原料、配方、工艺和参数配置与管理等方面进行水产饲料的质量控制,以稳定饲料品质,并在饲料加工过程中注意提高饲料转化效率、钝化饲料中抗营养因子、消除致病菌和霉菌毒素等有害物质,从而降低粮食浪费和渔业的次生污染、保证食品安全。

(四) 科学规范的投喂技术

根据养殖种类、健康体征、动物营养需求、环境因素以及饲料营养成分等,确定投喂量和投喂频率,建立数据库,最终形成一整套针对不同种类水产动物的投喂技术规范,以便达到饲料的最高利用效率并减少废物排放。

(五) 水产品品质调控技术

研究水产品中有毒有害物质的摄入、代谢、积累及清除关系,揭示水产品中异味物质的形成和清除机制,建立水产品营养、风味、口感等形成及其调控的营养学技术,以实现水产动物养殖中的营养适宜、环境稳定和品质安全。近期的研究任务主要在以下几个方面开展。

(1) 水产动物主要营养素的利用与调控机制研究:主要包括水产动物对不同原料组成饲料的摄食选择及其调控机制,水产动物对主要营养素的营养代谢调控网络构建,基于不同的生理阶段、环境和饲料组成条件下的水产动物营养素需求量的动态变化,营养和饲料对水产动物机体健康和品质的影响。

(2) 水产动物与微生物的功能研究:主要包括水环境微生物对宿主与养殖环境的相互作用机制、肠道微生态的营养生理功能、肠道微生态与营养素消化吸收及信号网络的交互作用机制、益生菌(元)的营养调控作用。

(3) 水产动物的营养遗传性状改良:主要包括水产动物营养性状的遗传学特性研究、水产动物营养基因组学的研究、水产动物营养状况改变营养遗传性状的表观遗传学研究、水产生物现有不同遗传品系间营养代谢差异的机制研究。

(4) 水产品品质形成的营养学机制研究:主要包括鱼类肌肉理化性质的调节机制、鱼类富集高度不饱和脂肪酸等生物活性物质的机制、鱼类体色调节的机制研究、水产品风味物质形成机制研究。

(5) 水产饲料理化性质与水产动物营养过程的相互关系研究:主要包括水产饲料不同理化特性对水产动物饲料利用效率和氮磷排放的影响及其生物学机制、水产饲料不同理化特性对水产动物健康与水产品品质的影响及其生物学机制、在体内外改善水产饲料理化性质以提高饲料利用效率的生物技术原理基础研究。

同时,开展水产动物分子营养学研究体系构建、水产饲料新蛋白源的开发与示范推广、精准功能性饲料的合理设计等方面工作。

六、我国水产动物营养与饲料发展的政策建议

(一) 加强科技持续支持,深入研究与营养代谢有关的生理生态学过程

因农业科技发展的长期性和连续性,应该加强对水产动物营养与饲料研究的长期持续支撑,以保障科技研发可以围绕产业发展开展持续研究。同时加强对产业示范项目的科技支持,这样才能促进科技与产业的结合。

(二) 加强饲料和养殖管理,推进良好操作规范

推行饲料生产和养殖企业的产品质量可溯源制度,完善养殖产品质检体系建设,保障饲料与水产品食品安全。建立饲料和水产品的全程可追溯体系,是当前保障水产品安全的重要措施。在当前互联网和物联网日益普及的时代,采用电子条码、电子标

签等现代标志技术, 对不同批次的饲料或者水产品进行标志, 并在生产、流通、使用 / 消费各环节进行电子扫描并保存相关信息, 可以有效保证产品质量安全体系。

(三) 加强人才培养, 提高产业发展能力

必须加强对水产养殖动物营养与饲料工程领域研究人才的扶持力度, 扩充科研和应用开发力量。需要国家加大人才的扶持力度, 通过有针对性地设立重点、重大项目和高层次人才基金, 建立若干具有国际一流水平的科研团队和学科带头人, 扶持一批具有科研潜力的青年研究人员, 打造出一支具备国际一流水平, 团结高效, 能为我国水产养殖动物营养与饲料工程领域获得跨越式发展奠定坚实科学基础的强大研究团队。

参考文献

- [1] 陈人弼. 中国水产配合饲料工业发展现状与前景分析[J]. 中国饲料, 2012 (23): 43–45.
Chen R B. Analysis of present status and future development of China aquafeed industry [J]. Chin Feed. 2012; (23): 43–45.
- [2] Wang Q, Cheng L, Liu J, et al. Freshwater aquaculture in PR China: trends and prospects [J]. Rev Aquac. 2015; 5: 1–20.
- [3] Tu Y, Xie S, Han D, et al. Growth performance, digestive enzyme, transaminase and GH—IGF-I axis gene responsiveness to different dietary protein levels in broodstock allogynogentic gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) CAS III [J]. Aquaculture. 2015; 446: 290–297.
- [4] Tu Y, Xie S, Han D, et al. Dietary arginine requirement for gibel carp (*Carassius auratus gibelio* var. CAS III) reduces with fish size from 50g to 150g associated with modulation of genes involved in TOR signaling pathway [J]. Aquaculture. 2015; 449: 37–47.
- [5] 李海燕, 朱晓鸣, 韩冬, 等. 上市前限喂对池塘养殖异育银鲫生长及品质的影响[J]. 水生生物学报, 2014, 38: 525–532.
Li H Y, Zhu X M, Han D, et al. The effects of pre-harvest restricted feeding on the growth and the production quality traits of pond-reared gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. Acta Hydrobiol Sin. 2014; 38: 525–532.
- [6] 赵帅兵. 投喂频率和饲料蛋白配方对异育银鲫生长、饲料利用和血液游离必需氨基酸动态的影响[D]. 武汉: 中国科学院大学博士学位论文, 2014.
Zhao S B. Effects of feeding frequency and dietary protein formulation on gibel carp (*Carassius auratus gibelio*): growth, feed utilization and blood free essential amino acids dynamics [D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation); 2014.
- [7] Zhao S, Han D, Zhu X, et al. Effects of feeding frequency and dietary protein levels on juvenile allogynogentic gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) var. CAS III: growth, feed utilization and serum free essential amino acids dynamics [J]. Aquac Res. 2016; 47: 293–303.
- [8] Ma H, Cahu C, Zambonino J, et al. Activities of selected digestive enzymes during larval development of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. Aquaculture. 2005; 245: 1–4.
- [9] 刘变枝, 朱晓鸣, 雷武, 等. 卤虫投喂下长吻鮠仔稚鱼消化酶发育和口宽变化的研究[J]. 水生生物学报, 2013, 37(1): 125–131.
Liu B Z, Zhu X M, Lei W, et al. Variation of digestive enzymes and mouth width during larval development of Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther) fed with *Artemia* [J]. Acta Hyrbiol Sin. 2013; 37(1): 125–131.
- [10] Chang Q, Liang M Q, Wang J L, et al. Growth and survival of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis* Günther, 1873) larvae fed compound diet with different protein sources [J]. Aquac Res. 2006; 37(6): 643–646.
- [11] Chang Q, Liang M Q, Wang J L, et al. Influence of co-feeding larval with live and inert diets on weaning the tongue sole *Cynoglossus semilaevis* [J]. Aquac Nutr. 2006; 12: 135–139.
- [12] 柳旭东, 梁萌青, 张利民, 等. 饲料中添加水解鱼蛋白对半滑舌鲷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.
Liu X D, Liang M Q, Zhang L M, et al. Effect of fish protein hydrolysate levels on growth performance and biological and physiological parameters in tongue sole (*Cynoglossus semilaevis* Günther 1873) post-larvae [J]. Acta Hyrbiol Sin. 2010; 34(2): 242–249.
- [13] 韩冰. 大豆卵磷脂、胆固醇及其交互作用对半滑舌鲷 (*Cynoglossus semilaevis*) 稚鱼生长、消化酶活力及相关基因表达的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 2013.
Han B. Effects of dietary phospholipid, cholesterol and their interactions on growth performance, digestive enzymes and expression of related gene of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) larvae [D]. Qiangdao: Ocean University of China (Master's thesis); 2013.
- [14] Yuan Y, Li S, Mai K, et al. The effect of dietary arachidonic acid (ARA) on growth performance, fatty acid composition and expression of ARA metabolism-related genes in larval half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [J]. Brit J Nutr. 2015; 113(10): 1518–1530.
- [15] Liu J, Mai K, Xu W, et al. Effects of dietary glutamine on survival, growth performance, activities of digestive enzyme, antioxidant status and hypoxia stress resistance of half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) post larvae [J]. Aquaculture. 2015; 446(1): 48–56.
- [16] 黄利娜, 梁萌青, 张海涛, 等. 饲料中添加不同维生素A对大菱鲆亲鱼繁殖性能的影响[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(4): 62–70.
Huang L N, Liang M Q, Zhang H T, et al. The effect of dietary vitamin A level on reproductive performance of broodstock *Scophthamus maximus* [J]. Pro Fish Sci. 2013; 34(4): 62–70.
- [17] 赵敏, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 牛磺酸对半滑舌鲷亲鱼繁殖性能及仔鱼质量的影响[J]. 渔业科学进展. 2015, 36(3): 101–108.
Zhao M, Liang M Q, Zheng K K, et al. Effects of dietary taurine on the reproductive performance and the larval quality in *Cynoglossus semilaevis* [J]. Pro Fish Sci. 2015; 36(3): 101–108.
- [18] 刘昊昆. 饲料中豆粕替代鱼粉蛋白对不同生长阶段异育银鲫的影响[D]. 武汉: 中国科学院大学博士学位论文, 2014.
Liu H K. Effect of substitution of dietary fishmeal by soybean

- meal on gibel carp of different sizes [D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation); 2014.
- [19] Huang Y, Han D, Xiao X, et al. Effect of dietary aflatoxin B1 on growth, fecundity and tissue accumulation in gibel carp during the stage of gonad development [J]. *Aquaculture*. 2014; 428–429: 236–242.
- [20] 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: 425–430.
Ai Q H, Mai K S. Advance on nutritional immunology of fish [J]. *Acta Hydrobiol Sin*. 2007; 31: 425–430.
- [21] Chen Y, Zhu X, Yang Y, et al. Effect of dietary lysozyme on growth, immune response, intestine microbiota, intestine morphology and resistance to aeromonas hydrophilia in gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquacu Nutr*. 2014; 20: 229–241.
- [22] Chen Y, Zhu X, Yang Y, et al. Effect of dietary chitosan on growth performance, haematology, immune response, intestine morphology, intestine microbiota and disease resistance in gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquacu Nutr*. 2014; 20:532–546.
- [23] Camara M D, Symonds J E. Genetic improvement of New Zealand aquaculture species: programmes, progress and prospects [J]. *New Zealand J Mar Freshwater Res*. 2014; 48: (3): 466–491.
- [24] Klasing K C. Minimizing amino acid catabolism decreases amino acid requirement [J]. *J Nutr*. 2009; 139: 11–12.
- [25] Cleveland B M, Kiess A S, Blemings K R. Alpha-amino adipate delta-semialdehyde synthase mRNA knockdown reduces the lysine requirement of a mouse hepatic cell line [J]. *J Nutr*. 2008; 138: 2143–2147.
- [26] Newaj-Fyzul A, Al-Harbi A H, Austin B. Review: developments in the use of probiotics for disease control in aquaculture [J]. *Aquaculture*. 2014; 431: 1–11.
- [27] Han D, and Yang Y. Effects of dietary ascorbic acid supplementation on the growth performance, immune and stress response in juvenile *Leiocassis longirostris* Günther exposed to ammonia [J]. *Aquacu Res*. 2008; 39: 1628–1638.
- [28] Leaver M J, Villeneuve L N, Obach A, et al. Functional genomics reveals increases in cholesterol biosynthetic genes and highly unsaturated fatty acid biosynthesis after dietary substitution of fish oil with vegetable oils in Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *BMC Genomics*. 2008; 9(1): 299.
- [29] 戈贤平, 缪凌鸿, 孙盛明, 等. 水产饲料对养殖环境调控的研究与探索[J]. *中国渔业质量标准*, 2014, 4: 1–6.
Ge X P, Miao L H, Sun S M, et al. Study and exploration on the regulation of aquaculture environment with aquatic feed [J]. *Chin Fish Qua Stand*. 2014; 4: 1–6.
- [30] Tacon A G J, Metian M. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects [J]. *Aquaculture*. 2008; 285: 146–158.
- [31] 阮征, 米书梅, 印遇龙. 我国大宗非粮型饲料蛋白资源现状及高效利用[J]. *饲料工业*, 2015, 36: 51–55.
Ruan Z, Mi S M, Yin Y L. Protein resource use efficiency for non-grain-based feed and related techniques [J]. *Feed Ind*. 2015; 36: 51–55.
- [32] 张璐. 2013 年国内水产饲料行业发展特点及2014 年展望[J]. *科学养鱼*, 2013 (6): 5–6.
Zhang L. Characteristics in 2013 and focus in 2014 of aquafeed industries in China [J]. *Scientific Fish Farming*. 2013; (6): 5–6.