

DOI: 10.11964/jfc.20231114226

· 综述 ·

## 鱼类养殖饲喂管理：概念、技术方案和应用

王 岩

浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021

**摘要:** 投饵养殖在水产养殖产量中所占比例已超过 70%，饲料成为决定水产动物养殖效益的重要因素。提高鱼类生长速率和饲料利用效率，特别是饲料蛋白质贮积效率，是鱼类遗传育种、营养、饲料和养殖管理研究的共同目标。饲喂管理指通过适量投喂营养组成合理的饵料以保障养殖动物快速生长和健康，从而最大程度地提高养殖产量，降低养殖成本以及养殖活动对自然资源和环境产生的负面影响，其集成了饲料管理和投喂管理，是水产养殖模式优化的重要内容。尽管针对鱼类营养需求、饲料和投喂分别开展了大量的研究，然而由于上述内容分别属于营养学、饲料科学和生态学等不同学科领域，针对重要养殖鱼类种类在特定养殖条件下的饲料管理和投喂管理的系统集成研究尚不多见。本文在已有的饲料管理和投喂管理研究基础上，提出了饲喂管理的概念并明确了饲喂管理在水产养殖模式优化中的作用。首先，笔者指出优化饲喂管理的技术路线包括：①确定养殖动物的营养需求；②在最适饲料营养水平下确定适宜的饲料原料种类及其添加量，设计饲料配方；③确定最优配方饲料的最适投喂频率和投喂量；④在饲料配方和投喂策略的基础上集成构建饲喂管理方案。其次，笔者介绍了对大黄鱼、大口黑鲈、卵形鲳鲹和厦门白姑鱼饲喂管理研究的过程及初步形成的饲喂管理方案。其中，①网箱养殖大黄鱼配合饲料粗蛋白水平、粗脂肪水平和蛋白能量比分别为 490~520 g/kg、100 g/kg 和 27.6 MJ/kg，饲料鱼粉水平可降低至 160 g/kg，投喂配合饲料的最适频率为 2 次/d，每天饲料投喂量为鱼体重的 2.1%；②池塘养殖大口黑鲈配合饲料粗蛋白和粗脂肪水平分别为 480~510 g/kg 和 120 g/kg，饲料鱼粉水平可降低至 80 g/kg，最适投喂频率为 3 次/d，每天饲料投喂量为鱼体重的 2.2%；③网箱养殖卵形鲳鲹配合饲料粗蛋白和粗脂肪水平分别为 450~490 g/kg 和 110 g/kg，饲料鱼粉水平可降低至 140 g/kg，最适投喂频率为 3 次/d，每天饲料投喂量为鱼体重的 5.7%；④网箱养殖厦门白姑鱼配合饲料粗蛋白水平、粗脂肪水平和蛋白能量比分别为 450 g/kg、150 g/kg 和 19.0 MJ/kg，饲料鱼粉水平可降低至 75 g/kg，最适投喂频率为 1 次/d，每天饲料投喂量为鱼体重的 2.1%。最后，笔者针对鱼类饲喂管理研究提出建议：①设计饲喂管理方案时应重视鱼类种类和种质以及养殖环境差异对饲喂管理要求的影响；②设计饲料配方时应重视所采用的鱼类营养和饲料研究结果的可靠性和准确性；③集



第一作者：王岩，浙江大学海洋学院教授，从事水域生态系统生态学和可持续水产养殖研究，已发表学术论文 170 余篇，E-mail: ywang@zju.edu.cn



资助项目：国家自然科学基金 (31772868)；国家重点研发项目 (2020YFD0900803)

收稿日期：2023-09-16

修回日期：2024-03-24

文章编号：

1000-0615(2025)04-049602-16

中图分类号：S 965

文献标志码：A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)  
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



成饲喂管理方案时应重视饲料配方与投喂策略对鱼类生长和饲料利用效率的交互影响; ④评价饲喂管理方案的应用效果时应重视长期养殖生产实验结果以及饲喂管理对养殖生态系统服务的影响。

**关键词:** 水产养殖; 饲喂管理; 饲料配方; 投喂策略; 生长; 饲料成本; 养殖废物排放

2022年11月25日世界人口数量达到80亿, 预计2037年将达到90亿, 人口数量持续增长使得食品安全成为人类社会面临的首要问题。20世纪70年代, 配合饲料和增氧机技术的普遍应用推动水产养殖进入集约化养殖阶段<sup>[1]</sup>, 之后养殖规模和产量一直处于快速增长阶段。养殖规模扩张的同时, 投饵养殖对水产养殖产量的贡献逐年升高, 饲料成为决定水产养殖经济效益以及养殖对自然资源和环境的关键因素<sup>[2-9]</sup>。水生动物的生长和代谢同时受食物质量(营养价值)和数量的影响。研究表明, 改变饲料营养水平<sup>[10-14]</sup>、蛋白源结构<sup>[15-20]</sup>或投喂量<sup>[21-23]</sup>均可影响鱼类的生长和食物利用效率。然而, 有关饲料营养组成和投喂量对于鱼类生长的相对重要性和交互影响尚不清楚, 在特定养殖环境条件下针对特定养殖种类所开展的饲料与投喂的系统集成研究鲜见报道。鉴于饲料管理(feed management)和投喂管理(feeding management)在鱼类养殖生产管理中的重要性<sup>[24-25]</sup>, 有必要集成二者构建系统的饲喂管理(feed and feeding management)方案。本文提出了饲喂管理的概念, 讨论了饲喂管理在优化水产养殖模式中所起的作用, 简要介绍了对大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)、卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)和厦门白姑鱼(*Argyrosomus amoyensis*)饲喂管理研究的过程和初步结果, 并针对鱼类饲喂管理研究中存在的问题提出了建议, 为探索促进水产养殖产业可持续发展的新的技术途径提供理论基础。

## 1 鱼类饲喂管理的概念

在水产养殖中, 可通过改善食物(饲料)组成或投喂策略来满足水产动物的营养需求, 促进动物生长并降低养殖废物排放<sup>[24-25]</sup>。然而, 由于饲料和投喂的研究属于不同学科, 针对特定养殖种类在特定养殖环境条件下饲料需求和投喂需求的系统的集成研究尚不多见。笔者将

饲喂管理定义为“在水产养殖生产中, 以适当的方式适量投喂营养组成合理的饵料以满足养殖动物的快速生长和健康需求, 从而实现增加养殖产量、降低养殖成本、减少养殖活动对自然资源与环境的负面影响的目标。其中“营养组成合理的饵料”包括能够满足养殖动物快速生长和健康需求的天然饵料或配合饲料, 对于配合饲料而言, 营养组成合理反映在饲料配方合理; “以适当的方式适量投喂”指采用的投喂方法和投喂量合理, 前者通常用最适投喂频率和时间来表示<sup>[26-32]</sup>, 后者通常用最适日粮来表示<sup>[33]</sup>; “养殖成本”包括饲料成本, 也包括与投饵相关的其他成本, 如劳动力、能源和治理环境污染的成本等; “对自然资源的负面影响”指因投饵而导致的自然资源(饲料蛋白源和水)损耗, “对环境的负面影响”指因投饵而产生的养殖污染。与饲料管理和投喂管理相比, 饲喂管理不仅包含上述每一方面的内容, 还包含协调和优化二者的交互作用, 是在分别实现饲料配方优化和投喂策略优化的基础上进行的系统集成优化。

## 2 饲喂管理在水产养殖模式优化中的作用

我国是最早开展水产养殖的国家, 在长期淡水池塘养殖生产中总结出的许多宝贵经验, 如混养和综合养殖, 已在世界范围内被广泛应用。20世纪70年代前, 世界水产养殖主要采用粗养(extensive aquaculture)和半精养(semi-intensive aquaculture), 其特征是依赖天然饵料或通过施肥培育的饵料, 单位水体养殖产量较低。20世纪50—70年代, 配合饲料和增氧机技术问世并在生产中迅速应用<sup>[1]</sup>, 推动水产养殖生产方式从粗养和半精养转变为精养(intensive aquaculture), 使单位水体的养殖产量大幅度增加。投饵养殖规模的扩大导致水产饲料蛋白源短缺和养殖污染日益加剧, 这使得饲料鱼粉替代<sup>[3-7,34-36]</sup>和养殖污染控制<sup>[9-10,24-25]</sup>成为水产养殖中备受瞩目的问题。为了解决养殖污染问题, 20

世纪 80 年代后, 国外学者先后发展了循环水养殖系统 (recirculating aquaculture systems, RAS)<sup>[7,37]</sup>、多营养级综合养殖 (integrated multi-trophic aquaculture, IMTA)<sup>[7,38]</sup>、分区养殖系统 (partitioned aquaculture system, PAS)<sup>[7,39]</sup>、池塘内跑道系统 (in-pond raceway systems, IPRS)<sup>[7]</sup> 和生物絮团技术 (biofloc technology, BFT)<sup>[7,40]</sup> 等。1997 年, 我国学者将池塘养殖模式定义为“在一定地域范围内, 生产性能和经济效益比较稳定, 具有一定特色和代表性的养殖生产方式, 由养殖对象的放养和相应的管理两部分构成”, 指出结合对养殖区域的合理规划和在养殖生产中使用优化的养殖模式是实现水产养殖产业可持续发展的途径<sup>[41-42]</sup>。如今, 养殖模式这一概念的应用范围已从池塘拓展至各种水产养殖水体, 即水产养殖模式。与混养、综合养殖和 IMTA(针对放养)、配合饲料(针对食物)、增氧机技术、RAS、PAS、IPRS 和 BFT(针对养殖水质) 针对养殖生产中具体某一个环节或流程提供解决技术或方案不同, 水产养殖模式则是为整个生产过程的各方面问题提供全面的技术解决方案, 包括放养、饲喂管理、环境管理和病害防控等, 是一个集成的技术体系, 包含了水产技术领域中除种苗和养殖工程外的所有养殖技术。饲料投喂不仅决定了养殖动物的生长和健康, 所产生的养殖废物会进一步通过影响养殖环境质量而影响养殖动物健康, 故饲喂管理水平很大程度上决定了养殖产量、养殖成本、养殖资源利用效率和养殖污染状况(养殖动物生长和健康决定养殖产量和水产品品质, 饲料利用效率决定饲料成本和养殖废物排放量, 养殖废物排放量影响环境管理成本和病害防控成本), 进而影响水产养殖经济效益和生态效益。因此, 饲喂管理是水产养殖模式优化的重要内容。

### 3 构建鱼类饲喂管理方案的科学依据和技术路线

鱼类是水产养殖的重要对象, 贡献了养殖水产品蛋白质的 82%<sup>[43]</sup>。2022 年世界鱼类养殖产量分别占水产动物养殖产量和水产养殖总产量的 65% 和 47%<sup>[2]</sup>。除鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*) 等少数滤食性鱼类外, 大多数鱼类种类的养殖需要投饵, 饲

料成本往往超过鱼类养殖成本的 50%。生长是鱼类育种、营养与饲料以及养殖管理中普遍关注和最重要的评价指标, 然而决定鱼类生长的因素和机制至今尚未完全查清。王岩<sup>[44]</sup> 提出鱼类在特定环境条件下的生长 ( $G$ ) 可表示:  $G = G_{\max} \times (1 - E_{rf} - E_{rw} - E_{rs})$ , 其中,  $G_{\max}$  为鱼类的生长潜能;  $E_{rf}$ 、 $E_{rw}$  和  $E_{rs}$  分别为食物、水质和应激源对鱼类生长的限制系数。当水质条件处于理想状态且应激源不存在时 ( $E_{rw} = 0$ ,  $E_{rs} = 0$ ), 鱼类生长取决于其种质状况和食物条件(食物质量和数量), 即  $G = G_{\max} \times (1 - E_{rf})$ 。有关鱼类种质、食物营养组成和投喂量对鱼类生长的影响已有大量研究报道, 但上述因素对鱼生长的相对重要性和彼此间的交互作用尚未确定。研究表明, 斑点叉尾鲟 (*Ictalurus punctatus*) 的 NWAC103 品系和 Norris 品系的最适投喂频率均为 3 次/d, 但每天投喂 1 次的 NWAC103 品系生长仍快于每天投喂 3 次的 Norris 品系<sup>[45]</sup>。大西洋鲑 (*Salmo salar*) 野生品系和选用品系摄食高能饲料时生长均快于摄食高蛋白饲料时, 但摄食高蛋白饲料的选用品系生长显著快于摄食高能饲料的野生品系<sup>[46]</sup>。虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 快速生长品系对饲料赖氨酸的需求量显著高于生长慢的品系<sup>[47]</sup>。异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 的 DT、A 和 F 品系摄食鱼粉饲料、豆粕饲料和菜粕饲料(上述 3 种饲料分别以鱼粉、豆粕和菜粕为主要蛋白源) 时表现出不同的生长速率, 但饲料差异所产生的影响不足以掩盖品系间的生长差异<sup>[48]</sup>。另外, 笔者研究发现, 将饲料蛋白水平从 450 g/kg 升高至 500 g/kg, 大口黑鲈种群中的大、中、小鱼个体生长均加快, 但增加饲料蛋白水平依然不能影响大、中、小鱼间的生长差异。上述结果显示, 对于同一种鱼类, 种质对个体生长的影响大于饲料蛋白水平、饲料鱼粉水平或投喂量所产生的影响。当实验鱼种质相同时, 饲料蛋白水平和投喂频率对鱼生长的相对重要性在不同鱼类种类中表现不同。如当饲料蛋白水平为 240、280、320 和 360 g/kg 时, 相同饲料蛋白水平下每天投喂 1 次的斑点叉尾鲟生长均快于每 2 天投喂 1 次的斑点叉尾鲟; 当将饲料蛋白水平从 240 g/kg 增加至 320 g/kg 后, 每天投喂 1 次的鱼生长未出现明显的变化, 但每 2 天投喂 1 次的鱼生长加快<sup>[49]</sup>。无论投喂频率为 1 次/d 或 2 次/d, 摄食低蛋白饲料(蛋白

水平为 320 g/kg) 的斑点叉尾鲴生长均快于摄食高蛋白饲料(蛋白水平为 380 g/kg) 的鱼<sup>[50]</sup>。吉富罗非鱼(GIFT *Oreochromis niloticus*) 在 250 和 350 g/kg 的饲料蛋白水平下最适投喂频率均为 3 次/d, 将饲料蛋白水平从 250 g/kg 增加到 350 g/kg 或将投喂频率从 1 次/d 增加到 3 次/d 均可加快鱼的生长, 但将投喂频率从 2 次/d 增加到 3 次/d 的生长增加幅度小于增加饲料蛋白水平所产生的生长增加幅度<sup>[51]</sup>。相反, 在 300、340 和 380 g/kg 的饲料蛋白水平下, 异育银鲫生长随饲料蛋白水平从 340 g/kg 增加到 380 g/kg 或随投喂频率从 2 次/d 增加到 6 次/d 而加快, 增加投喂频率所产生的促生长效果大于增加饲料蛋白水平的促生长效果<sup>[52]</sup>。孙瑞建等<sup>[53]</sup>报道当饲料蛋白水平为 413、462 和 512 g/kg 时, 相同饲料蛋白水平下按 2 次/d 投喂的大黄鱼生长均明显快于 1 次/d 投喂的大黄鱼, 将投喂频率从 1 次/d 增加到 2 次/d 的生长增加幅度大于提高饲料蛋白水平所产生的生长增加幅度<sup>[51]</sup>。相反, 笔者实验发现, 将饲料蛋白水平从 430 g/kg 增加到 490 g/kg 或将投喂频率从 1 次/d 增加到 2 次/d 均会加快大黄鱼的生长, 但增加投喂频率产生的生长增加幅度小于增加饲料蛋白水平的生长增加幅度。综上, 笔者初步认为饲料蛋白水平对一些种类鱼(如吉富罗非鱼等) 生长的影响大于投喂频率的影响<sup>[51]</sup>, 对另一些种类鱼(如异育银鲫等) 生长的影响小于投喂频率的影响<sup>[52]</sup>。饲料蛋白水平和投喂频率对大黄鱼生长的相对重要性目前存在不同的结论, 还需进一步的实验检验。基于已有研究结果, 笔者认为设计饲喂管理方案应首先考虑鱼的种类和种质, 在此前提下确定饲料的最适蛋白水平和蛋白源结构(包括饲料鱼粉水平), 设计饲料配方, 然后确定最适投喂策略(最适投喂方法和投喂量)。鉴于饲料蛋白水平影响鱼类生长的程度往往大于投喂频率, 而饲料蛋白水平和投喂频率影响生长的程度往往大于饲料鱼粉水平, 故优化饲喂管理方案时应特别重视饲料蛋白水平和投喂频率, 以免因饲料配方不合理或投喂不合理导致养殖鱼类生长缓慢, 从而不能按时达到上市规格。

考虑到食物营养组成和数量不仅均可直接影响鱼类的生长, 二者间还可能产生交互影响。因此, 在分别确定合理的食物营养组成和合理的投喂方式后, 还需要协调食物营养组成和投

喂量的关系, 最大程度地实现促进养殖动物快速生长和健康, 降低饲料成本和养殖污染的目的。对于配合饲料而言, 营养组成合理通常表现为饲料配方合理, 投喂方式合理通常表现为按最适投喂频率在最适时间来投喂, 合理的饲喂管理方案是合理的饲料配方和合理的投喂策略的集成(图 1)。除了鱼类生长和存活以外, 饲料利用效率(饲料系数以及饲料氮、磷、碳的贮积效率)可反映饲喂管理水平的优劣。其中, 饲料系数在很大程度上决定了饲料成本(养殖的饲料成本 = 饲料系数 × 饲料价格); 饲料氮、磷、碳在鱼体内的贮积效率直接影响养殖废物排放量。由于饲料氮贮积效率(nitrogen retention efficiency, NRE)往往与饲料系数和氮废物排放量相关, 故提高 NRE 是降低饲料成本和养殖污染的关键, 也是鱼类营养、饲料和摄食研究的核心问题。研究表明, 投喂配合饲料养殖温水性鱼类时 NRE 通常低于 45%<sup>[54]</sup>, 这意味着饲料中 55% 以上的蛋白质未能转化为鱼体蛋白质, 而是以代谢物的形式排放到环境中。鱼类摄食配合饲料时 NRE 究竟可达到多高, 能否通过改良鱼类种质或改善饲喂管理在养殖生产中将配合饲料 NRE 提高至 50% 以上, 这个问题是鱼类育种、营养、饲料和养殖研究中需要回答的重要问题, 也是优化水产养殖模式所需要解决的关键问题。

## 4 大黄鱼、大口黑鲈、卵形鲳鲹和厦门白姑鱼饲喂管理方案研究与应用

尽管围绕鱼类营养需求、饲料原料评价、饲料鱼粉替代和鱼类最适投喂策略等方面开展了大量的研究, 然而, 针对特定养殖鱼类种类所开展的系统饲喂管理研究尚不多见。本综述简单介绍在大黄鱼、大口黑鲈、卵形鲳鲹和厦门白姑鱼饲喂管理方面开展的一些工作和初步结果。

### 4.1 大黄鱼饲喂管理方案的研究与应用

大黄鱼属鲈形目(Perciformes)石首鱼科(Sciaenidae)黄鱼属, 为分布于西北太平洋区近岸的温水洄游性鱼类。20 世纪 80 年代, 我国突破大黄鱼全人工繁殖技术, 90 年代突破网箱养殖技术<sup>[55]</sup>。2020 年大黄鱼养殖产量为 25.41

万 t, 占我国海水鱼类养殖产量的 17%<sup>[56]</sup>, 占世界海水鱼类养殖产量的 3%<sup>[2]</sup>。

2001 年 Duan 等<sup>[57]</sup> 报道网箱养殖条件下初始体重为 0.6 g 的大黄鱼的最适饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为 470 和 105 g/kg, 2002 年水产行业标准 (SC/T 2012—2002)<sup>[58]</sup> 规定大黄鱼鱼苗 (体重为 0.5~10.0 g) 和鱼种 (体重为 11~150 g) 配合饲料粗蛋白含量分别应不低于 470 g/kg 和 450 g/kg。随后有研究发现, 大黄鱼适宜饲料粗脂肪含量为 97~110 g/kg<sup>[59-62]</sup>。2013 年孙瑞健等<sup>[53]</sup> 报道按 2 次/d 投喂时摄食粗蛋白含量为 462 g/kg 的饲料的大黄鱼生长略快于摄食粗蛋白含量为 512 g/kg 的饲料的鱼, 2018 年国家标准 (GB/T 36206—2018)<sup>[63]</sup> 规定大黄鱼稚鱼 (体重 < 1.0 g)、幼鱼 (体重为 1.0~50 g) 和中鱼 (体重为 50~300 g) 配合饲料粗蛋白含量应分别不低于 450、420 和 400 g/kg。投喂按上述标准生产的配合饲料时大黄鱼生长较慢, 故养殖生产中普遍投喂冰鲜鱼饵料<sup>[55]</sup>。2023 年 Chen 等<sup>[64]</sup> 报道初始体重为 11.5 g 的网箱养殖大黄鱼的适宜饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为 490~520 和 100 g/kg, 指出过去二十多年生产中难以完全利用

配合饲料养殖大黄鱼的主要原因是饲料的蛋白水平偏低。

早期研究表明, 通过在粗蛋白含量为 430~450 g/kg 的大黄鱼饲料中添加肉骨粉<sup>[65]</sup>、豆粕、肉骨粉、花生粕和菜粕的混合物<sup>[66]</sup>、豆粕、肉骨粉和鸡肉粉的混合物<sup>[67]</sup>、虾壳粉<sup>[68]</sup>、发酵豆粕<sup>[69]</sup> 和南极磷虾粉<sup>[70-71]</sup> 等, 可将鱼粉含量降低至 100~361 g/kg; 利用大豆浓缩蛋白<sup>[72]</sup> 或谷朊粉<sup>[73]</sup> 可完全替代鱼粉。有研究表明, 当饲料粗蛋白含量为 500 g/kg 时, 通过添加大豆浓缩蛋白或鸡肉粉可将大黄鱼饲料鱼粉含量降低至 160 g/kg<sup>[74-75]</sup>; 通过添加羽毛粉可将饲料鱼粉含量降低至 175 g/kg<sup>[76]</sup>。基于最适饲料蛋白和脂肪含量以及饲料最低鱼粉含量设计的大黄鱼饲料配方组成: 饲料粗蛋白含量、粗脂肪含量和蛋白能量比分别为 490~520 g/kg、100 g/kg 和 26.1~27.6 MJ/kg; 饲料最低鱼粉含量可降至 160 g/kg。

Liu 等<sup>[77]</sup> 报道了网箱养殖条件下按不同频率和时间投喂粗蛋白含量为 490 g/kg 的配合饲料对初始体重为 11.5 g 的大黄生长、饲料利用效率、鱼体组成和养殖废物排放量的影响, 发

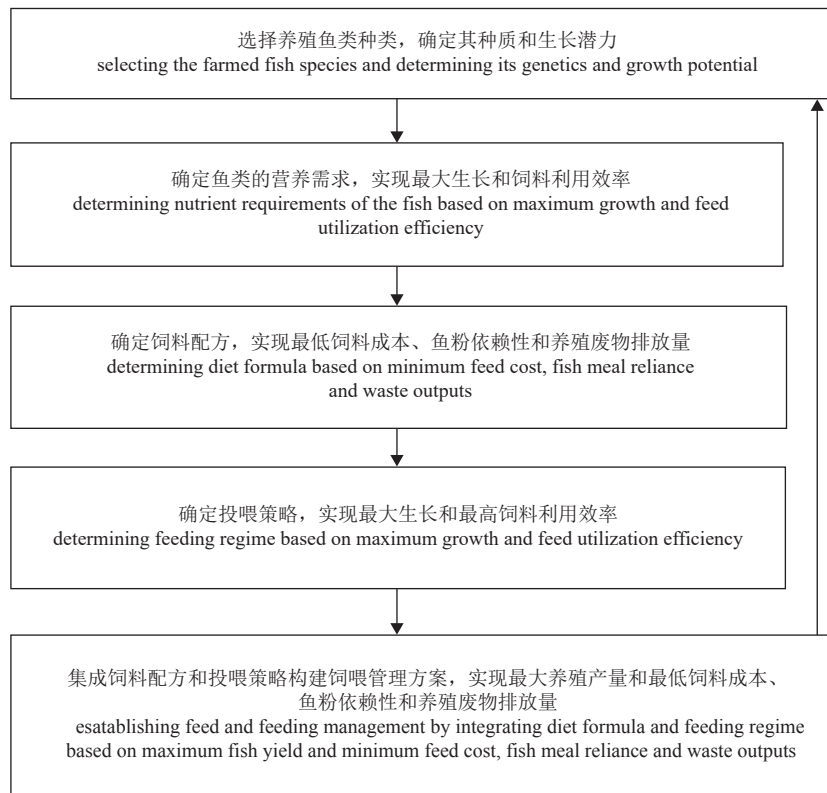


图 1 建立鱼类养殖饲喂管理方案的技术流程

Fig. 1 The technology diagram for establishing feed and feeding management scheme in fish farming

现投喂频率为 2 次/d (每天投喂量相当于鱼体重的 2.1%) 时大黄鱼生长较快, 饲料利用效率较高; 当投喂频率为 1 次/d 时, 每天 17:00 投喂的大黄鱼较早晨 5:00 投喂的大黄鱼摄食量略高, 生长略快; 在 2 次/d 的投喂频率下, 摄食一种由冷冻鲭科 (Scombridae) 鱼类躯干部分制成的鱼糜的大黄鱼与摄食配合饲料的大黄鱼相比成活率下降 18%, 实验结束时大黄鱼体重、饲料系数和单位鱼产量的野生鱼类资源消耗量分别为后者的 1.12、3.85 和 3.85 倍, 养殖碳、氮、磷废物排放量分别为后者的 1.53、2.42 和 6.56 倍。这一结果表明, 投喂配合饲料较投喂冰鲜鱼可增加大黄鱼养殖产量, 降低饲料成本以及对野生渔业资源和环境的负面影响。

在对饲料配方和投喂策略研究的基础上集成构建网箱养殖大黄鱼饲喂管理方案: 配合饲料粗蛋白含量、粗脂肪含量和蛋白能量比分别为 490~520 g/kg、100 g/kg 和 27.6 MJ/kg; 饲料最低鱼粉含量可降低至 160 g/kg; 最适投喂频率为 2 次/d (每天投喂量相当于鱼体重的 2.1%)。采用上述饲喂管理方案养殖大黄鱼时产量较高, 饲料成本、单位鱼产量的饲料鱼粉消耗量和养殖碳、氮、磷废物排放量较低。2020—2021 年笔者在舟山海域进行了连续两年完全利用配合饲料养殖大黄鱼的生产性实验, 结果表明, 完全投喂配合饲料可按期达到商品鱼规格 (图 2), 养成的大黄鱼蒜瓣肉特征明显, 肉质鲜美。

#### 4.2 大口黑鲈饲喂管理方案的研究与应用

大口黑鲈属鲈形目太阳鱼科 (Centrarchidae) 黑鲈属, 为分布于北美洲内陆水域的温水肉食性鱼类。20 世纪 70 年代后大口黑鲈先后被引入中国台湾地区和大陆进行人工养殖, 2022 年大口黑鲈养殖产量达到 80.25 万 t, 在我国淡水肉食性鱼类养殖产量中居第 1 位, 淡水鱼类养殖产量中居第 7 位<sup>[56]</sup>; 在世界鱼类养殖产量中居第 6 位 (按鱼类类群计)<sup>[2]</sup>。早期研究报道大口黑鲈饲料粗蛋白需求量为 399~436 g/kg<sup>[78-81]</sup>。因投喂配合饲料时鱼生长缓慢, 很长一段时间内大口黑鲈养殖生产中投喂冰鲜鱼饵料。2012 年陈乃松等<sup>[82]</sup>报道大口黑鲈的适宜饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为 460~490 g/kg 和 115~140 g/kg。2017 年 Huang 等<sup>[83]</sup>报道初始体重为 8.7 g 的大口黑鲈的适宜饲料粗蛋白和粗脂肪含量

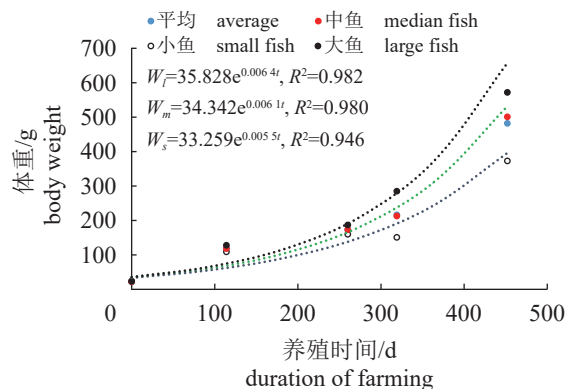


图 2 2020 年 8 月—2021 年 11 月舟山海域投喂配合饲料网箱养殖大黄鱼的生长轨迹

Fig. 2 Growth trajectory of *L. crocea* fed with formulated feed alone in net pens at Zhoushan from August, 2020 to November, 2021

分别为 480~510 g/kg 和 120 g/kg。随后, Cai 等<sup>[84]</sup>报道初始体重为 11、103 和 204 g 的大口黑鲈最适饲料粗蛋白含量分别为 516、505 和 470 g/kg。Chen 等<sup>[85]</sup>报道初始体重为 100 g 的大口黑鲈最适饲料粗蛋白含量为 500 g/kg。投喂粗蛋白含量为 480~510 g/kg 的配合饲料时大口黑鲈与投喂冰鲜鱼时生长无显著差异, 这使得配合饲料在养殖生产中普遍应用, 养殖规模迅速扩大。2016—2017 年我国大口黑鲈养殖产量从 347 300 t 增至 456 900 t, 增幅超过 31%<sup>[86]</sup>。

Tidwell 等<sup>[87]</sup>报道当饲料粗蛋白含量为 380 g/kg 时, 用鸡肉粉可完全替代大口黑鲈饲料中的鱼粉。Ren 等<sup>[88]</sup>报道在最适饲料蛋白水平下通过添加鸡肉粉和豆粕的混合物可将大口黑鲈饲料鱼粉含量降低至 160 g/kg。随后有研究表明, 利用鸡血浆蛋白粉<sup>[89]</sup>、发酵豆粕<sup>[90-91]</sup>、棉籽浓缩蛋白<sup>[92-93]</sup>、酶处理大豆<sup>[94]</sup>、去皮豆粕<sup>[95]</sup>、 $\gamma$ 射线辐照豆粕<sup>[96]</sup>和  $\gamma$ 射线辐照羽毛粉<sup>[97]</sup>等可不同程度地替代大口黑鲈饲料中的鱼粉。Wang 等<sup>[98]</sup>报道通过添加鸡肉粉、鸡肉粉与棉籽浓缩蛋白的混合物以及鸡肉粉、棉籽浓缩蛋白和豆粕的混合物可将饲料鱼粉含量降低至 80 g/kg。基于最适饲料蛋白和脂肪含量以及饲料最低鱼粉含量设计的大口黑鲈饲料配方组成: 饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为 480~510 和 120 g/kg; 饲料鱼粉含量可降低至 80 g/kg。

研究表明, 养殖在池塘“跑道”的大口黑鲈最适投喂频率为 2 次/d<sup>[99]</sup>。Liu 等<sup>[100]</sup>报道池塘养殖大口黑鲈 (初始体重为 43.0 g) 的最适投喂

频率为3次/d, 每天投喂量为鱼体重的2.2%; 池塘“跑道”养殖的大口黑鲈最适投喂频率为2次/d, 每天投喂量为鱼体重的2.5%。鉴于投喂同一配合饲料时池塘内养殖的大口黑鲈生长显著快于池塘“跑道”养殖的鱼, 饲料系数和养殖碳、氮、磷废物排放量明显低于后者, Liu等<sup>[100]</sup>认为池塘“跑道”不适合进行大口黑鲈商品鱼养殖生产。

在对饲料配方和投喂策略研究的基础上集成构建池塘养殖大口黑鲈饲喂管理方案: 配合饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为480~510和120 g/kg; 饲料最低鱼粉含量可降低至80 g/kg; 最适投喂频率为3次/d(每天投喂量为鱼体重的2.2%)。采用上述饲喂管理方案养殖大口黑鲈时鱼生长较快, 饲料成本、单位鱼产量的饲料鱼粉消耗量和养殖碳、氮、磷废物排放量较低。

### 4.3 卵形鲳鲹饲喂管理方案的研究与应用

卵形鲳鲹隶属鲈形目鲳科(Carangidae)鲳鲹属, 为分布于印度洋、太平洋、大西洋热带和温带海域中上层的温水洄游性和广盐性鱼类, 是我国广东、广西、海南等省份海水养殖的重要鱼类。2020年卵形鲳鲹养殖产量为16.00万t, 在我国海水鱼类养殖产量中居第5位<sup>[56]</sup>, 在世界海水鱼类养殖产量中居第11位<sup>[2]</sup>。

2011年刘兴旺等<sup>[101]</sup>报道当饲料粗脂肪含量为90 g/kg时, 网箱养殖卵形鲳鲹(初始体重为24.4 g)的最适饲料粗蛋白含量为460 g/kg, 在同年发表的另一篇文章<sup>[102]</sup>中指出, 初始体重为25.0 g的卵形鲳鲹最适饲料粗蛋白含量、粗脂肪含量和蛋白能量比分别为430 g/kg、60 g/kg和24.4 MJ/kg。2013年Wang等<sup>[103]</sup>发现初始体重为4.8 g的网箱养殖卵形鲳鲹的适宜饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为450~490和65 g/kg, 蛋白能量比为23.0~24.7 MJ/kg。Ren等<sup>[104]</sup>报道网箱养殖卵形鲳鲹(初始体重为4.8 g)适宜的饲料粗脂肪含量为107 g/kg, 并指出用大豆浓缩蛋白替代饲料鱼粉水平不受饲料脂肪含量影响。在适宜饲料蛋白水平下, 利用鸡肉粉与豆粕混合物<sup>[105]</sup>、大豆浓缩蛋白<sup>[106]</sup>和豆粕<sup>[107]</sup>等可不同程度地替代卵形鲳鲹饲料中的鱼粉; 将豆粕、大豆浓缩蛋白和羽毛粉经过伽马射线辐照后可提高其替代饲料鱼粉的水平<sup>[107-109]</sup>。通过添加硒酵母和增加基础饲料中鸡肉粉含量可提高大豆浓缩蛋白替代饲料鱼粉的水平, 将饲料鱼粉含

量降低至140 g/kg<sup>[110]</sup>。基于最适饲料蛋白和脂肪含量以及最低饲料鱼粉含量设计的卵形鲳鲹饲料配方组成: 饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为450~490和110 g/kg; 饲料鱼粉含量可降低至140 g/kg。

投喂频率可显著影响网箱养殖卵形鲳鲹(初始体重为10.3 g)的生长、饲料利用效率、鱼体组成和养殖废物排放量<sup>[96]</sup>。当投喂频率为3次/d(每天投喂量为鱼体重的5.7%)时鱼的生长较快, 饲料利用效率较高<sup>[111]</sup>。在对饲料配方和投喂策略研究的基础上集成构建网箱养殖卵形鲳鲹饲喂管理方案: 配合饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为450~490和110 g/kg; 最低饲料鱼粉含量可降低至140 g/kg; 最适投喂频率为3次/d(每天投喂量为鱼体重的5.7%)。采用上述饲喂管理方案养殖卵形鲳鲹时鱼生长较快, 饲料成本、单位鱼产量的饲料鱼粉消耗量和养殖碳、氮、磷废物排放量较低。

### 4.4 厦门白姑鱼饲喂管理方案的研究与应用

厦门白姑鱼隶属鲈形目石首鱼科(Sciaenidae)白姑鱼属, 为温水肉食性鱼类, 主要分布于我国浙江、福建、广东等省沿海, 是当地海水鱼类养殖的重要种类。2006年Wang等<sup>[112]</sup>报道网箱养殖厦门白姑鱼(初始体重为19.1 g)的最适饲料可消化蛋白和可消化脂肪含量分别为400和160 g/kg(粗蛋白和粗脂肪含量分别为452和149 g/kg), 适宜的饲料蛋白能量比为19.0 MJ/kg。在适宜的饲料蛋白和脂肪水平下, 利用植物性蛋白原料(豆粕)<sup>[113]</sup>和动物性蛋白原料(鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉和血粉等)<sup>[114]</sup>可不同程度地替代饲料鱼粉。鸡肉粉替代饲料鱼粉的水平高于肉骨粉, 肉骨粉又高于羽毛粉<sup>[114]</sup>, 但将鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉和血粉按一定比例组合后替代饲料鱼粉的水平与鸡肉粉接近, 高于肉骨粉<sup>[115]</sup>。提高饲料蛋白水平可提高鸡肉粉、肉骨粉、羽毛粉和血粉的混合物替代厦门白姑鱼饲料鱼粉的水平<sup>[116]</sup>。基于最适饲料蛋白和脂肪含量以及饲料最低鱼粉含量设计的厦门白姑鱼饲料配方组成: 饲料粗蛋白含量、粗脂肪含量和蛋白能量比分别为452 g/kg、149 g/kg和19.0 MJ/kg; 饲料鱼粉含量可降低至75 g/kg。

投喂频率和日粮水平可显著影响网箱养殖厦门白姑鱼(初始体重为38.3 g)的生长、饲料利用效率、鱼体组成和养殖废物排放量。当投

喂频率为 1 次/d (每天投喂量为鱼体重的 2.1%) 时鱼生长较快, 饲料利用效率较高<sup>[33]</sup>。在对饲料配方和投喂策略研究的基础上集成构建网箱养殖厦门白姑鱼饲喂管理方案: 配合饲料粗蛋白含量、粗脂肪含量和蛋白能量比分别为 450 g/kg、150 g/kg 和 19.0 MJ/kg; 饲料最低鱼粉含量可降低至 75 g/kg; 最适投喂频率为 1 次/d (每天投喂量为鱼体重的 2.1%)。采用上述饲喂管理方案养殖厦门白姑鱼时鱼生长较快, 饲料成本、单位鱼产量的饲料鱼粉消耗量和养殖氮、磷废物排放量较低。

## 5 水产养殖饲喂管理方案研究与应用面临的问题

世界人口数量的持续增长和全球气候变暖加剧使人类面临日益严峻的食品安全挑战。通过优化养殖模式提高水产养殖产量, 减少养殖活动对能量以及土地、淡水和饲料蛋白源等自然资源的消耗和对水环境的污染, 有助于水产养殖产业的可持续发展, 使水产养殖为保障人类食品安全做出更大的贡献。已有研究表明, 饲料蛋白含量、饲料蛋白源结构和投喂策略在满足水产养殖动物营养需求方面所发挥的作用并不相同。饲料蛋白水平或投喂频率主要通过影响养殖动物的生长、饲料利用效率(饲料系数和 NRE) 来影响养殖产量、饲料成本和养殖废物排放量; 饲料蛋白源结构主要通过改变饲料配方中高价值或稀缺蛋白原料(如鱼粉)的含量来影响饲料成本和对稀缺蛋白资源的消耗量。因此, 饲料蛋白水平和投喂策略决定了鱼类养殖产量和养殖污染程度, 而饲料蛋白源结构决定了饲料成本和对稀缺蛋白资源的需求量。水产养殖生产目标是在获得最大养殖产量的前提下尽可能降低养殖成本、养殖资源消耗量和养殖污染。构建饲喂管理方案的原则是在确定最适饲料蛋白水平、最适饲料蛋白源结构和最适投喂策略的基础上对三者进行集成协调, 从而实现水产养殖生产的目标。这种集成协调不是简单地通过调整某一方面的参数去弥补另一方面参数的不足, 如通过增加投喂量弥补饲料蛋白含量的不足或饲料蛋白源结构的不平衡, 而是通过改善三者的协同关系进一步增加养殖产量和降低养殖成本、养殖资源消耗量和养殖污染。

尽管针对少数养殖鱼类种类开展了一些较为系统的饲喂管理研究, 但已有的研究未评价鱼类种质差异对饲喂管理要求的影响, 实验时间也仅限于养殖生产过程中的某一阶段, 在营养需求、饲料鱼粉替代和投喂策略研究中所用的实验鱼(种质与规格)和实验条件(水温、水质等)并不完全一致。这些差异使已建立的饲喂管理方案在饲料配方与投喂策略的协调统一方面存在不足, 所得出的结果和结论还需要进一步检验和完善。为了能够建立合理的饲喂管理方案并使其能够在养殖生产中发挥更好的指导作用, 笔者建议在研究中应注意以下问题:

①设计饲喂管理方案时应重视水产养殖动物种类、种质和养殖环境的差异对饲喂管理要求的影响: 水产养殖动物种类多, 苗种遗传多样性较高, 不同鱼类、种类或品系的营养需求、对饲料蛋白源的利用能力和摄食量存在明显差异<sup>[45-48]</sup>。已有的饲喂管理研究中往往未对实验鱼的种质进行鉴定, 在评价营养需求、饲料鱼粉替代水平和投喂策略的研究中所用的实验鱼种质状况和养殖环境条件往往并不一致。由于鱼类种质对其生长的影响大于饲料蛋白水平、饲料蛋白源结构和投喂频率对生长的影响, 在未明确实验鱼种质背景的前提下所构建的饲喂管理方案在生产中应用的效果可能变化较大且难以预见。此外, 食物以外的一些环境条件, 如水温 and 水质等可影响鱼类生长并干扰食物对鱼类生长的调控作用<sup>[44]</sup>, 构建饲喂管理方案时应明确这些环境条件并尽可能使饲喂管理方案构建与应用的环境条件一致。

②设计饲料配方时应重视所依据的鱼类营养和饲料研究结果的可靠性和准确性: 鱼类营养和饲料研究的目的是为设计合理的饲料配方提供科学依据, 使配合饲料在养殖生产中取得良好的应用效果。鱼类营养和饲料研究范式是借鉴陆生动物研究的基础上形成的, 在已有范式指导下取得的一些研究结果, 特别是对肉食性鱼类的研究结果, 有时不能很好地对配合饲料生产发挥指导作用, 甚至产生误导作用<sup>[44]</sup>。因此, 设计饲料配方时应确保所依据的鱼类营养需求和饲料研究结果是可靠、准确的, 只有根据可靠、准确的参数设计的饲料配方才能在养殖生产中取得良好的应用效果。

③构建饲喂管理方案时应重视饲料配方与



投喂策略对鱼类产生的交互影响：理论上讲，改变饲料营养组成和投喂量均可影响鱼类的生长，有时甚至可达到同样的效果，例如，向鱼类投喂少量高营养价值的食物或投喂大量低营养价值的食物有时能够获得完全相同的生长速率。然而，当评价指标为最大生长速率和最大饲料利用效率时，通过改变饲料营养组成和投喂量来提高养殖效益均存在局限性。当投喂量达到最适水平后继续增加投喂量不仅不能进一步加快鱼类生长，反而会导致饲料系数大幅度增加；当饲料蛋白含量达到最适水平后继续增加饲料蛋白含量不仅不能进一步加快鱼类的生长，反而导致 NRE 明显降低。因此，只有通过饲料配方和投喂策略的合理集成才能同时获得最大生长和较高的食物利用效率。有关饲料蛋白水平和投喂频率对鱼类生长是否存在交互影响迄今尚未形成统一的结论<sup>[49-53]</sup>。重视饲料配方与投喂策略对鱼类生长的交互影响，充分利用饲料管理和投喂管理的互补性，是实现最大生长和较高的食物效率的有效途径。在构建饲喂管理方案时，通常是在确定最适饲料配方的基础上确定最适投喂频率，如发现投喂频率明显偏低或偏高，则应重新评价营养需求和饲料蛋白源结构，重新设计并优化饲料配方。

④评价饲喂管理方案的应用效果时应重视长期养殖生产实验结果以及饲喂管理对养殖生态系统服务的影响：鱼类生长具有连续性的特点和补偿机制<sup>[44]</sup>。前者指鱼类生长是不同阶段生长连续累积的结果，后者指不同阶段的生长轨迹存在波动，某一阶段生长停滞可诱导下一阶段的补偿生长。因此，对鱼类养殖生产过程中某一阶段生长的评价结果并不能完全反映出其他阶段或整个养殖过程的生长，据此进行的养殖效益评价也不一定符合生产实际，长期甚至整个养殖生产过程的实验结果才能够客观反映所建立的饲喂管理方案的应用效果。此外，水产养殖生态系统服务(包括供给、生境支持、生态调节和文化服务)价值可反映水产养殖活动满足人类需求的程度以及水产养殖产业可持续发展的潜力<sup>[117-118]</sup>，应被作为评价饲喂管理效益的指标。目前，有关鱼类养殖生态系统服务价值的定量评价方法尚处于探索之中<sup>[119]</sup>。

总之，饲喂管理是在鱼类营养、饲料科学

和生态学研究基础上对饲料管理和投喂管理进行集成的结果，是水产养殖模式优化的重要内容之一。采用合理的饲喂管理方案有助于增加鱼类养殖的产量、降低饲料成本以及养殖对自然资源和环境所产生的负面影响。针对具有重要经济价值的养殖鱼类，在系统研究其饲料配方和投喂策略的基础上集成构建饲喂管理方案并将其应用于养殖生产，可提高养殖的经济效益和生态效益，促进产业的可持续发展。笔者认为，饲喂管理将成为今后水产养殖模式研究的重要内容。

感谢澳大利亚 Flinders University 秦建光教授审阅全文并提出宝贵意见，感谢湘湖实验室王力博士在绘制投喂配合饲料养殖大黄鱼生长轨迹图方面提供的帮助。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Boyd C E, D'Abramo L R, Glencross B D, *et al.* Achieving sustainable aquaculture: historical and current perspectives and future needs and challenges[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2020, 51: 578-633.
- [ 2 ] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2024 – blue transformation in action[M]. 2024, Rome, Italy.
- [ 3 ] Naylor R L, Hardy R W, Bureau D P, *et al.* Feeding aquaculture in an era of finite resources[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 15103-15110.
- [ 4 ] Troell M, Naylor R L, Metian M, *et al.* Does aquaculture add resilience to the global food system?[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111: 13257-13263.
- [ 5 ] Tacon A G J, Metian M. Feed matters: satisfying the feed demand of aquaculture[J]. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 2015, 23: 1-10.
- [ 6 ] Glencross B D, Baily J, Berntssen M H G, *et al.* Risk assessment of the use of alternative animal and plant raw material resources in aquaculture feeds[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12: 703-758.
- [ 7 ] Naylor R L, Hardy R W, Buschmann A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591: 551-563.
- [ 8 ] Luo Z, Hu S, Chen D. The trends of aquacultural nitrogen budget and its environmental implications in China[J]. *Sci-*

- entific Reports, 2018, 8: 10877.
- [ 9 ] Huang Y, Ciais P, Goll D S, *et al.* The shift of phosphorus transfers in global fisheries and aquaculture[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 355,1-10.
- [ 10 ] Cowey CB. Nutrition - estimating requirements of rainbow trout[J]. *Aquaculture*, 1992, 100: 177-189.
- [ 11 ] Cowey, C B, Cho, C Y. Nutritional requirements of fish[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1993, 5: 417-426.
- [ 12 ] NRC. Nutrient requirements of fish and shrimp [M]. National Academies Press, 2011, Washington D. C., USA.
- [ 13 ] Liu X, Wang Y, Ji W. Growth, feed utilization and body composition of the Asian catfish (*Pangasius hypophthalmus*) fed at different dietary protein and lipid levels[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17: 578-584.
- [ 14 ] Bowyer, J N, Qin, J G, Stone, D A J. Protein, lipid and energy requirements of cultured marine fish in cold, temperate and warm water[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2013, 5: 10-32.
- [ 15 ] Cho C Y, Bayley H S, Slinger S J. Partial replacement of herring meal with soybean meal and other changes in a diet for rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. *J. Fish. Res. Board Can.*, 1974, 31: 1523-1528.
- [ 16 ] Reece, D L, Wesley, D E, Jackson, G A, *et al.* Blood meal rumen contents blend as a partial or complete substitute for fish meal in channel catfish diets[J]. *Progressive Fish-culturist*, 1975, 37(1): 15-19.
- [ 17 ] Fowler L G, Banks J L. 1976. Animal and vegetable substitute for fish-meal in Abernathy diet[J]. *Progressive Fish-culturist*, 1973, 38(3): 123-126.
- [ 18 ] Nengas I, Alexis M N, Davies S J. High inclusion levels of poultry meals and related byproducts in diets for gilthead seabream *Sparus aurata* L[J]. *Aquaculture*, 1999, 179: 13-23.
- [ 19 ] Kureshy N, Davis D A, Arnold, C R. Partial replacement of fish meal with meat-and-bone meal, flash-dried poultry by-product meal, and enzyme-digested poultry by-product meal in practical diets for juvenile red drum[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2000, 62: 266-272.
- [ 20 ] Millamena O M. Replacement of fish meal by animal by-product meals in a practical diet for grow-out culture of grouper *Epinephelus coioides*[J]. *Aquaculture*, 2002, 204: 75-84.
- [ 21 ] Dwyer K S, Brown J A, Parrish C, *et al.* Feeding frequency affects food consumption, feeding pattern and growth of juvenile yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*)[J]. *Aquaculture*, 2002, 213: 279-292.
- [ 22 ] Ruohonen K, Vielma J, Grove D J. Effects of feeding frequency on growth and food utilisation of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* fed low-fat herring or dry pellets[J]. *Aquaculture*, 1998, 165: 111-121.
- [ 23 ] Lee S-M, Cho S H, Kim D-J. Effects of feeding frequency and dietary energy level on growth and body composition of juvenile flounder, *Paralichthys olivaceus* (Temminck & Schlegel)[J]. *Aquaculture Research*, 2000, 31: 917-921.
- [ 24 ] Cho C Y, Bureau DP. Reduction of waste output from salmonid aquaculture through feeds and feeding[J]. *Progressive Fish-Culturist*, 1997, 59(2): 155-160
- [ 25 ] Amirkolaie A K. Reduction in the environmental impact of waste discharged by fish farms through feed and feeding[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2011, 3: 19-26.
- [ 26 ] Jobling M. Some observations on the effects of feeding frequency on the food intake and growth of plaice, *Pleuronectes platessa* L[J]. *Journal of Fish Biology*, 1982, 20: 431-444.
- [ 27 ] Bolliet V, Jarry M, Boujard T. Rhythmic pattern of growth and nutrient retention in response to feeding time in the rainbow trout[J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, 64: 1616-1624.
- [ 28 ] Riche M, Haley D I, Oetker M, *et al.* Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. *Aquaculture*, 2004, 234: 657-673.
- [ 29 ] Biswas G, Thirunavukkarasu A R, Sundaray J K, *et al.* Optimization of feeding frequency of Asian seabass (*Lates calcarifer*) fry reared in net cages under brackishwater environment[J]. *Aquaculture*, 2010, 305: 26-31.
- [ 30 ] Montoya A, López-Olmeda J F, Yúfera M, *et al.* Feeding time synchronises daily rhythms of behaviour and digestive physiology in gilthead seabream (*Sparus aurata*)[J]. *Aquaculture*, 2010, 306: 315-321.
- [ 31 ] Gilannejad N, Silva T, Martínez-Rodríguez G, *et al.* Effect of feeding time and frequency on gut transit and feed digestibility in two fish species with different feeding behaviours, gilthead seabream and Senegalese sole[J]. *Aquaculture*, 2019, 513: 734438.
- [ 32 ] Boujard T, Jourdan M, Kentouri M, *et al.* Diel feeding activity and the effect of time-restricted self-feeding on growth and feed conversion in European sea bass[J]. *Aquaculture*, 1996, 139: 117-127.
- [ 33 ] Wang Y, Kong L, Li K, Bureau, D P. Effects of ration level

- and feeding frequency on growth, feed utilization and carcass composition of cuneate drum (*Nibea miichthioides*) reared in net pens[J]. *Aquaculture*, 2007, 271: 350-356.
- [ 34 ] Gatlin D M, Barrows F T, Brown P, *et al.* Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review[J]. *Aquaculture Research*, 2007, 38: 551-579.
- [ 35 ] Hardy R W. Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41: 770-776.
- [ 36 ] Kaushik S J, Seiliez I. Protein and amino acid nutrition and metabolism in fish: current knowledge and future needs[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41: 322-332.
- [ 37 ] Martins C I M, Edinga E H, Verdegema M C J, *et al.* New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43: 83-93.
- [ 38 ] Troell M, Joyce A, Chopin T, *et al.* Ecological engineering in aquaculture-potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems[J]. *Aquaculture*, 2009, 297: 1-9.
- [ 39 ] Brune D E, Schwartz G, Eversole A G, *et al.* Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, 28: 65-86.
- [ 40 ] Avnimelech, Y. 2006. Bio-filters: the need for a new comprehensive approach[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34: 172-178.
- [ 41 ] 王岩. 不同养殖模式下海水实验围隔的生态学研究 [D]. 青岛: 青岛海洋大学, 1997.  
Wang Y. Ecological studies on mariculture enclosure-ecosystem with different stocking models[D]. Qingdao: Qingdao Ocean University, 1997 (in Chinese).
- [ 42 ] 王岩. 海水池塘养殖模式的优化: 概念、原理与方法 [J]. 水产学报, 2004, 28(5): 568-572.  
Wang Y. Optimization of culture model in seawater pond: concepts, principles and methods[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(5): 568-572 (in Chinese).
- [ 43 ] Boyd C E, McNevin A A, Davis R P. The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply[J]. *Food Security*, 2022, 14: 805-827.
- [ 44 ] 王岩. 以大口黑鲈和大黄鱼养殖中配合饲料的应用为例谈改变鱼类营养和饲料研究范式 [J]. 水产学报, 2024, 48 (4): 1-8.  
Wang Y. Paradigm shift of fish nutrition and feed: the necessity revealed by the story of formulated feed application in *Micropterus salmoides* and *Larimichthys crocea* farming [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 48 (4): 1-8 (in Chinese).
- [ 45 ] Peterson B C, Small B C. Effect of feeding frequency on feed consumption, growth, and feed efficiency in aquarium-reared Norris and NWAC103 channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2006, 37: 490-495.
- [ 46 ] Wolters W R, Barrows F T, Burr G S *et al.* Growth parameters of wild and selected strains of Atlantic salmon, *Salmo salar*, on two experimental diets [J]. *Aquaculture* 2009, 297: 136-140
- [ 47 ] Lee S, Small B C, Patro B, *et al.* The dietary lysine requirement for optimum protein retention differs with rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) strain[J]. *Aquaculture*, 2020, 514: 734483.
- [ 48 ] Xu W J, Jin J Y, Zou T *et al.* Growth, feed utilization and metabolic responses of three gibel carp (*Carassius gibelio*) strains to fishmeal and plant proteinbased diets[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, 25: 319-332
- [ 49 ] Li M H, Robinson E H, Oberle D F, *et al.* Effects of dietary protein concentration and feeding regimen on channel catfish, *Ictalurus punctatus*, production[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2006, 37: 370-377.
- [ 50 ] Webster C D, Tidwel J H, Goodgame L S, *et al.* Effects of protein level and feeding frequency on growth and on body composition of third-year channel catfish cultured in ponds[J]. *Journal of Applied Aquaculture*, 1993, 2: 27-37.
- [ 51 ] 刘伟, 文华, 蒋明, 等. 饲料蛋白质水平与投喂频率对吉富罗非鱼幼鱼生长及部分生理生化指标的影响 [J]. 水产学报, 2016, 40(5): 751-761.  
Liu W, Wen H, Jiang M, *et al.* Effects of dietary protein level and feeding frequency on growth and some physiological-biochemical indexes of GIFT strain of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(5): 751-761 (in Chinese).
- [ 52 ] Zhao S, Han D, Zhu X. Effects of feeding frequency and dietary protein levels on juvenile allogynogenetic gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) var. CAS III: growth, feed utilization and serum free essential amino acids dynamics[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47: 290-303.
- [ 53 ] 孙瑞健, 张文兵, 徐玮, 等. 饲料蛋白质水平与投喂频率对大黄鱼生长、体组成及蛋白质代谢的影响 [J]. 水生生物学报,

- 2013, 37(2): 281-289.
- Sun R J, Zhang W B, Xu W. *et al.* Effects of dietary protein level and feeding frequency on the growth performance, body composition and protein metabolism of juvenile large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R. [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 37(2): 281-289 (in Chinese).
- [ 54 ] Chai X, Ji W, Han H. *et al.* Growth, feed utilization, body composition and swimming performance of giant croaker, *Nibea japonica* temminck and schlegel, fed at different dietary protein and lipid levels[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2013, 19: 928-935.
- [ 55 ] Chen Y, Huang W, Shan X, *et al.* Growth characteristics of cage-cultured large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 16: 100242.
- [ 56 ] 中华人民共和国农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook in 2023 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023 (in Chinese).
- [ 57 ] Duan Q, Mai K, Zhong H, *et al.* Studies on the nutrition of the large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R. I: growth response to graded levels of dietary protein and lipid[J]. *Aquaculture Research*, 2001, 32: 46-52.
- [ 58 ] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国水产行业标准 大黄鱼配合饲料:SC/T 2012—2002 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Aquaculture Industry Standard Formula, feed for yellow croaker: SC/T2012-2002 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2011 (in Chinese).
- [ 59 ] Yi X, Zhang F, Xu W, *et al.* Effects of dietary lipid content on growth, body composition and pigmentation of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2014, 434: 355-361.
- [ 60 ] Xing S, Sun R, Pan X, *et al.* Effects of dietary carbohydrate-to-lipid ratio on growth performance, body composition, digestive enzyme activities, and hepatic enzyme activities in juvenile large yellow croaker, *Larimichthys crocea*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2016, 47: 297-307.
- [ 61 ] Zhou P, Wang M, Xie F, *et al.* Effects of dietary carbohydrate to lipid ratios on growth performance, digestive enzyme and hepatic carbohydrate metabolic enzyme activities of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Aquaculture*, 2016, 452: 45-51.
- [ 62 ] Li S, Yin J, Zhang H, *et al.* Effects of dietary carbohydrate and lipid levels on growth performance, feed utilization, body composition and non-specific immunity of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, 25: 995-1005.
- [ 63 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准 大黄鱼配合饲料:GB/T 36206—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation & Standardization Administration of the People's Republic of China. The Chinese national standard, formula feed for Large yellow croaker (*Larimichthys crocea* Richardson): GB/T 36206-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese).
- [ 64 ] Chen Z, Yu A, Wang L, *et al.* Reassessment of dietary protein and lipid requirements for large yellow croaker *Larimichthys crocea* reared in net pens[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2023, 54(5): 1179-1195.
- [ 65 ] Ai Q, Mai K, Tan B, *et al.* Replacement of fish meal by meat and bone meal in diets for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*[J]. *Aquaculture*, 2006, 260: 255-263.
- [ 66 ] Zhang L, Mai K, Ai Q, *et al.* Use of a compound protein source as a replacement for fish meal in diets of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2008, 39: 83-89
- [ 67 ] Li J, Zhang L, Mai K, *et al.* Potential of several protein sources as fish meal substitutes in diets for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41: 278-283.
- [ 68 ] Yi X, Li J, Xu W, *et al.* Shrimp shell meal in diets for large yellow croaker *Larimichthys crocea*: effects on growth, body composition, skin coloration and anti-oxidative capacity[J]. *Aquaculture*, 2015, 441: 45-50.
- [ 69 ] Wang P, Zhou Q, Feng J, *et al.* Effect of dietary fermented soybean meal on growth, intestinal morphology and microbiota in juvenile large yellow croaker, *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture Research*, 2019, 50: 748-757.
- [ 70 ] Wei Y, Shen H, Xu W, *et al.* Replacement of dietary fishmeal by Antarctic krill meal on growth performance, intestinal morphology, body composition and organoleptic quality of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2019, 512: 734281.

- [ 71 ] Tang B, Zheng H, Wang S, *et al.* Effects of Antarctic krill *Euphausia superba* meal inclusion on growth, body color, and composition of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2021, 83: 255-266.
- [ 72 ] Wang P, Zhu J, Feng J, *et al.* Effects of dietary soy protein concentrate meal on growth, immunity, enzyme activity and protein metabolism in relation to gene expression in large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2017, 477: 15-22.
- [ 73 ] Fan X, Yin H, Chai R, *et al.* Effects of dietary wheat gluten meal on growth, intestinal morphology, and microbiome in juvenile large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2020, 72: 1120913.
- [ 74 ] Chen Z, Ibrahim U B, Yu A, *et al.* Dried porcine soluble benefits to increase fish meal replacement with soy protein concentrate in large yellow croaker *Larimichthys crocea* diet[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2023, 54(5): 1162-1178.
- [ 75 ] Wang L, Lei M, Yu A, *et al.* Dried porcine soluble augments dietary fishmeal replacement by poultry by-product meal for large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2024, 593: 741306.
- [ 76 ] 于安澜, 王力, 陈子末, 等. 角蛋白酶 DP-100 和  $\gamma$  射线辐照对利用羽毛粉替代大黄鱼饲料鱼粉的影响 [J]. *中国水产科学*, 2023, 30(5): 630-642.
- Yu A L, Wang L, Chen Z M, *et al.* Influences of keratinase DP-100 and gamma irradiation on replacing dietary fish meal with feather meal for large yellow croaker[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(5): 630-642 (in Chinese).
- [ 77 ] Liu Y, Lei M, Victor H, *et al.* The optimal feeding regime for large yellow croaker *Larimichthys crocea*, with an emphasis on obviating raw fish diet in commercial farming[J]. *Aquaculture*, 2023, 580: 740293.
- [ 78 ] Anderson R J, Kienholz E W, Flickinger S A. Protein requirements of smallmouth bass and largemouth bass[J]. *The Journal of Nutrition*, 1981, 111: 1085-1097.
- [ 79 ] 钱国英. 饵料中不同蛋白质、纤维素、脂肪水平对加州鲈鱼生长的影响 [J]. *动物营养学报*, 2000, 12(2): 48-52.
- Qian G Y. Effects of dietary protein, fibre and fat the growth of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Acta Zoonutrimenta Sinica*, 2000, 12(2): 48-52 (in Chinese).
- [ 80 ] Cyrino J E P, Portz L, Martino R C. Protein and energy retention by juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Scientia Agricola*, 2000, 57: 609-616.
- [ 81 ] Portz L, Cyrino J, Martino R C. Growth and body composition of juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides* in response to dietary protein and energy levels[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2001, 7: 247-254.
- [ 82 ] 陈乃松, 肖温温, 梁勤朗, 等. 饲料中脂肪与蛋白质比对大口黑鲈生长、体组成和非特异性免疫的影响 [J]. *水产学报*, 2012, 36: 1270-1280.
- Chen N S, Xiao W W, Liang Q L, *et al.* Effect of dietary lipid to protein ratios on growth performance, body composition and non-specific immunity of largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36: 1270-1280 (in Chinese).
- [ 83 ] Huang D, Wu Y, Lin Y, *et al.* Dietary protein and lipid requirements for juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2017, 48: 782-789.
- [ 84 ] Cai Z, Qian X, Xie S. Optimal dietary protein concentrations for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) of different sizes (10–500 g)[J]. *Aquaculture International*, 2020, 28: 831-840.
- [ 85 ] Chen Y, Yang H, Guo B, *et al.* Dietary effects of protein and lipid levels on growth performance and flesh quality of large-size largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 33: 101852.
- [ 86 ] 中华人民共和国农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook in 2017 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017 (in Chinese).
- [ 87 ] Tidwell J H, Coyle S D, Bright L A, *et al.* Evaluation of plant and animal source proteins for replacement of fish meal in practical diets for the largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2005, 36: 454-463.
- [ 88 ] Ren X, Wang Y, Chen J M, *et al.* Replacement of fishmeal with a blend of poultry by-product meal and soybean meal in diets for largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2018, 49: 155-164.
- [ 89 ] Li S, Ding G, Wang A, *et al.* Replacement of fishmeal by chicken plasma powder in diets for largemouth bass (*Micropterus salmoides*): effects on growth performance, feed utilization and health status[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, 25:

- 1431-1439.
- [ 90 ] He M, Yu Y, Li X, *et al.* An evaluation of replacing fish meal with fermented soybean meal in the diets of largemouth bass (*Micropterus salmoides*): growth, nutrition utilization and intestinal histology[J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51: 4302-4314.
- [ 91 ] Yang H, Bian Y, Huang L, *et al.* Effects of replacing fish meal with fermented soybean meal on the growth performance, intestinal microbiota, morphology and disease resistance of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 22: 100954.
- [ 92 ] Liu Y, Lu Q, Xi L, *et al.* Effects of replacement of dietary fishmeal by cottonseed protein concentrate on growth performance, liver health, and intestinal histology of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 764987.
- [ 93 ] Xu X, Yang H, Zhang C, *et al.* Effects of replacing fishmeal with cottonseed protein concentrate on growth performance, flesh quality and gossypol deposition of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 548: 737551.
- [ 94 ] Liu X, Chi S, Li S, *et al.* Substitution of fish meal with enzyme - treated soybean in diets for juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, 27: 1569-1577.
- [ 95 ] Wu Y, Ma H, Wang X, *et al.* Taurine supplementation increases the potential of fishmeal replacement by soybean meal in diets for largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, 27: 691-699.
- [ 96 ] Wu Y, Wang Y, Ren X, *et al.* Replacement of fish meal with gamma - ray irradiated soybean meal in the diets of largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, 27: 977-985.
- [ 97 ] Ren X, Huang D, Wu Y, *et al.* Gamma ray irradiation improves feather meal as a fish meal alternate in largemouth bass *Micropterus salmoides* diet[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 269: 114647.
- [ 98 ] Wang L, Cui Z, Ren X, *et al.* Growth performance, feed cost and environmental impact of largemouth bass *Micropterus salmoides* fed low fish meal diets[J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 20: 100757.
- [ 99 ] Wang Y, Xie S, Nie Z, *et al.* Optimum feeding frequency of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) reared in in-pond raceway recirculating culture system[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2020, 46: 2197-2212.
- [100] Liu Y, Lei M, Victor H, *et al.* The optimal feeding frequency for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) reared in pond and in-pond-raceway[J]. *Aquaculture*, 2022, 548: 737464.
- [101] 刘兴旺, 许丹, 张海涛, 等. 卵形鲳鲹幼鱼蛋白质需要量的研究 [J]. *南方水产科学*, 2011, 7(1): 45-49.
- Liu X W, Xu D, Zhang H T, *et al.* Optimal dietary protein requirement for juvenile *Trachinotus ovatus*[J]. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(1): 45-49 (in Chinese).
- [102] 刘兴旺, 王华朗, 张海涛, 等. 卵形鲳鲹幼鱼饲料中适宜蛋白能量比的研究 [J]. *水产科学*, 2011, 30(3): 136-139.
- Liu X W, Wang H L, Zhang H T, *et al.* Optimal dietary protein to energy ratio in juvenile pompano *Trachinotus ovatus*[J]. *Fisheries Science*, 2011, 30(3): 136-139 (in Chinese).
- [103] Wang F, Wang Y, Ji W, *et al.* Growth, feed utilization and body composition of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus* fed at different dietary protein and lipid levels[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2013, 19(3): 360-367.
- [104] Ren X, Zhu M, Wu Y, *et al.* The optimal dietary lipid level for golden pompano *Trachinotus ovatus* fed the diets with fish meal replaced by soy protein concentrate[J]. *Aquaculture Research*, 2021, 52: 3350-3359.
- [105] Ma X, Wang F, Han H, *et al.* Replacement of dietary fish meal with poultry by-product meal and soybean meal in the diets for golden pompano *Trachinotus ovatus* reared in net pens[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2014, 45: 662-671.
- [106] Wu Y, Han H, Qin J *et al.* Replacement of fish meal by soy protein concentrate with taurine supplementation in diets for golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 21: 214-222.
- [107] Wu Y, Wang Y, Ren G, *et al.* Improvement of fish meal replacements by soybean meal and soy protein concentrate in golden pompano diet through  $\gamma$ -ray irradiation[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22: 873-880.
- [108] Wu Y, Ren G, Han H, *et al.* The suitable dose of gamma-irradiation on soybean meal as a fish meal substitute in diets for golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47: 1944-1953.
- [109] Ren X, Zhu M, Wu Y, *et al.* Increasing fish meal replacement level with feather meal in golden pompano *Trachinotus ovatus* diet through gamma-ray irradiation[J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53: 518-527.

- [110] Wang Y, Ma X, Wang F, *et al.* Supplementations of poultry by-product meal and selenium increase fish meal replacement by soybean meal in golden pompano (*Trachinotus ovatus*) diet[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48: 1904-1914.
- [111] Wu Y, Han H, Qin J, *et al.* Effect of feeding frequency on growth, feed utilization, body composition and wastes output of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) reared in net pens[J]. *Aquaculture Research*, 2015, 46: 1435-1443.
- [112] Wang Y, Guo J, Li K, *et al.* Effects of dietary protein and energy levels on growth, feed utilization and body composition of cuneate drum, *Nibea miichthioides*[J]. *Aquaculture*, 2006, 252(2-4): 421-428.
- [113] Wang Y, Guo J, Bureau D P, *et al.* Replacement of fish meal by rendered animal protein ingredients in feeds for cuneate drum (*Nibea miichthioides*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 252(2-4): 476-483.
- [114] Wang Y, Kong L, Li C, *et al.* Effect of replacing fish meal with soybean meal on growth, feed utilization and carcass composition of cuneate drum (*Nibea miichthioides*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 261: 1307-1313.
- [115] Guo J, Wang Y, Bureau D P. Inclusion of rendered protein ingredients to substitute fish meal in diets for cuneate drum, *Nibea miichthioides*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2007, 13: 81-87.
- [116] Wang Y, Kong L, Li C, *et al.* The potential of land animal protein ingredients to replace fish meal in diets for cuneate drum, *Nibea miichthioid*, is affected by dietary protein level[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 16: 37-43.
- [117] Alleway H K, Gillies C L, Bishop M J, *et al.* The ecosystem services of marine aquaculture: valuing benefits to people and nature[J]. *Bioscience*, 2019, 69: 59-68.
- [118] Willot P A, Aubin J, Salles J M, *et al.* Ecosystem service frame work and typology for an ecosystem approach to aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2019, 512: 734260.
- [119] Cui Z, Zhang J, Ren X, *et al.* Replacing dietary fish meal improves ecosystem services of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) farming[J]. *Aquaculture*, 2022, 550: 737830.

## Feed and feeding management in aquaculture: concept, technological scheme and practices

WANG Yan

Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

**Abstract:** Feed has become a key determinant of the benefits of aquaculture practices, as the proportion of fed aquaculture now exceeds 70% of global aquaculture production. Enhancing fish growth and feed utilization efficiency, particularly dietary protein retention efficiency (NRE), is a common objective in breeding, nutrition, feed, and aquaculture management research. Feed and feeding management (FFM) is defined as a method to improve the growth and health of farmed animals while reducing production costs and negative impacts of farming practices on natural resources and the environment by providing high-quality, cost-effective diets at appropriate feeding regimes. As an integrator of feed management and feeding management, FFM is recognized as one of the most important components in optimizing the aquaculture mode (AM). Nutrient requirements, diet formulation, and feeding of aquatic animals belong to different disciplines, such as nutrition, feed science, and feeding ecology, respectively. Although numerous attempts focused on investigating nutrient requirements, feed and feeding of fishes, however, few studies concern the integration of feed and feeding to establish FFM under specific farming conditions for the fish species commercially important to fed aquaculture. In this review, the author defined the concept of FFM based on the studies of feed management or feeding management of fishes and elucidated its role in optimizing the aquaculture model. First, the author indicated the technology diagram for optimizing FFM includes: ① determining the nutrient requirements of the farmed animals, ② designing high-quality, cost-effective diet formulas using feed ingredients that are rich in nutrients, low in anti-nutritional factors, and consistently available to meet the nutrient requirements of farmed animals, ③ determining the optimal feeding regimes for farmed animals fed with diets formulated according to the high-quality, cost-effective diet formula, ④ integrating the high-quality feed and optimal feeding regimes to determine the FFM scheme and assessing its benefits on production, production cost, natural resource depletion, and environmental pollution. Second, the author briefly reviewed researches on establishing FFM for the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*), largemouth bass (*Micropterus salmoides*), golden pompano (*Trachinotus ovatus*), and cuneate drum (*Argyrosomus amoyensis*) and presents preliminary results on FFM schemes for these fish species, including optimal dietary protein and lipid levels, minimum fish meal content in diet formulas, and optimal feeding frequency and ration levels. Specifically: ① For *L. crocea* reared in net pens, the optimal dietary protein level, lipid level, and protein-to-energy ratio were 490–520 g/kg, 100 g/kg and 27.6 MJ/kg, respectively, with a minimum dietary fish meal content of 160 g/kg. The optimal feeding frequency and ration level were 2 meals/d and 2.1% BW/d. ② For *M. salmoides* reared in earth ponds, the optimal dietary protein and lipid levels were 480–510 and 120 g/kg, respectively, with a minimum dietary fish meal content of 80 g/kg. The optimal feeding frequency and ration level were 3 meals/d and 2.2% BW/d. ③ For *T. ovatus* reared in net pens, the optimal dietary protein and lipid levels were 450–490 and 110 g/kg, respectively, with a minimum dietary fish meal content of 140 g/kg. The optimal feeding frequency and ration level were 3 meals/d and 5.7% BW/d. ④ For *N. miichthioides* reared in net pens, the optimal dietary protein, lipid and energy levels were 450 g/kg, 150 g/kg and 19.0 MJ/kg, respectively, with a minimum dietary fish meal content of 75 g/kg. The optimal feeding frequency and ration level were 1 meal/d and 2.1% BW/d. Finally, the author provided suggestions for establishing and optimizing FFM schemes for fish farming, which included: ① considering the effects of fish species and genetic characteristics as well as environmental conditions on FFM scheme, ② ensuring the reliability and accuracy of the data (nutrient requirements of the farmed fish and quality assessment of feed ingredients) used in diet formula, ③ recognizing the interactive effects between diet formulation and feeding regimes on fish growth and feed utilization efficiency, ④ evaluating the benefits of the FFM scheme based on long-term field experiments and their impact on ecosystem service values.

**Key words:** aquaculture; feed and feeding management; diet formula; feeding regime; growth; feed cost; waste outputs

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31772868); National Key R & D Program of China (2020YFD0900803)