



· 综述 ·

改进鱼类营养和饲料研究范式:从大口黑鲈和大黄鱼配合饲料在养殖生产中的应用谈起

王 岩*

(浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 鱼类营养和饲料研究起始于 20 世纪 50 年代, 并借鉴对人类和畜、禽营养研究的经验建立了研究范式。在过去 70 年中, 鱼类营养和饲料研究遵循已有的范式取得了大量的成果, 这些研究成果推动了水产配合饲料技术的进步, 为水产饲料产业从无到有、从小到大做出了贡献。然而, 随着全球水产养殖规模的不断扩大, 水产养殖产业面临的资源和环境压力日益增加, 对水产饲料也提出了更多和更高的要求。养殖生产实践表明, 根据一些肉食性鱼类营养和饲料研究结果设计配方生产的饲料不能取得预期的应用效果, 这意味着遵循已有研究范式所得到的结果难以完全满足现代鱼类养殖生产的需要。本文总结了两种具有重要经济价值的肉食性鱼类(大口黑鲈和大黄鱼)配合饲料在养殖生产中应用的曲折历程, 指出早期研究明显低估了饲料蛋白水平是导致配合饲料长期无法在养殖生产中成功应用的主要原因。早期研究报道大口黑鲈的饲料蛋白需求为 400~440 g/kg, 大黄鱼的饲料蛋白需求为 450~470 g/kg, 但投喂配合饲料的鱼的生长明显比投喂冰鲜鱼的鱼慢。重新评估发现大口黑鲈和大黄鱼饲料蛋白需求分别为 480~510 g/kg 和 490~520 g/kg, 投喂含适量蛋白的配合饲料时鱼生长与投喂冰鲜鱼时接近。对大口黑鲈和大黄鱼饲料蛋白需求的明显低估反映出已有鱼类营养和饲料研究范式中存在不足, 其表现为: ①强调食物对鱼类生长的影响, 但忽视了鱼类遗传背景和食物外的其他环境条件对鱼类生长和摄食的作用; ②强调鱼类个体生长可反映其营养需求和饲料质量, 但忽视了鱼类个体生长并不能完全反映养殖产量和效益; ③强调生长和饲料利用效率在评价水产养殖效益方面的重要性, 但忽视了投饵养殖对自然资源和环境所产生的负面影响是限制水产养殖可持续发展的瓶颈; ④基础饲料配方对评价营养需求或饲料质量的影响没有得到足够重视, 因基础饲料组成不合理导致一些研究结果缺乏实际意义。针对上述问题, 作者建议对已有范式的概念、理论和研究方法做如下改进: ①重视鱼类遗传背景和食物以外的其它环境条件对鱼类生长的影响, 明确鱼类生长潜力决定营养需求, 而食物营养是实现生长潜力的条件; ②重视食物中各种营养素之间的相互作用, 明确不同饲料原料在配方的营养平衡中发挥不同的作用; ③进行饲养实验时重视实验鱼种质和种群结构, 重视对照组和处理组个体生长的差异幅度在判断处理效应方面的指示意义, 重视饲料配方对自然资源和环境等制约水产养殖可持续发展的因素的影响。改进后的研究范式更符合现代水产养殖生产实际, 遵循其开展研究获得的结果能够更好地指导饲料配方设计, 所生产的配合饲料也能更好地应用于水产养殖生产。

收稿日期: 2022-12-06 修回日期: 2023-07-12

资助项目: 国家重点研发项目(2020YFD0900803); 舟山市科技计划项目(2019C81054); 国家自然科学基金(31772868); 浙江省重点研发项目(2018C02033)

通信作者: 王岩(照片), 从事水域生态系统生态学和可持续水产养殖研究, E-mail: ywang@zju.edu.cn

关键词: 大口黑鲈; 大黄鱼; 配合饲料; 范式; 饲料蛋白需求; 饲料鱼粉替代; 生长
中图分类号: S 963.7
文献标志码: A

20世纪70年代以来,水产养殖是全球农业中发展最快的部分,其快速发展不仅归因于人类对水产品需求量的增加,还得益于水产动物人工育苗技术和配合饲料技术的进步。前者表现为在较短的时间内实现大量水生动物种类的家养^[1],后者表现为配合饲料在鱼类和甲壳动物养殖中的普遍应用和投饵养殖在水产养殖产量中所占比例的逐年升高^[2]。

水产动物营养和饲料研究是水产配合饲料技术的基础,二者侧重点有所不同。水产动物营养研究内容包括发现新营养素、确定营养素的功能、确定营养素在动物体内的代谢途径和过程、确定不同营养素间的相互作用、确定不同养殖动物种类饲料中各种营养素的需求量(图1)。水产饲料研究内容包括评价各种饲料原料的营养价值(如营养素组成、含量以及各种营养素的生物可利用性)、确定饲料原料中的功能性成分(如促生长因子、免疫调节因子)和抗营养因子等及其作用、确定饲料原料间的相互作用(如协同或拮抗等)、根据养殖对象的营养需求选择合适的原料种类设计饲料配方^[3]。对于水产动物营养研究而言,有关营养素及其功能和代谢等方面的知识多借鉴于人类、畜和禽的营养研究成果,有关营养素间相互作用方面的知识至今匮乏,确定具有重要经济价值的水产养殖动物的营养需求是研究的重点^[3],也是设计水产饲料配方的基础。对于水产饲料研究而言,有关饲料原料的营养价值和功能性成分的作用等方面的知识多借鉴于畜、禽饲料研究的结果,评价水产饲料原料中各种营养素的生物可利用性(如表观消化率等)和针对水产养殖生产要求设计营养平衡、高效、经济的饲料配方是研究的重点^[3]。

范式(paradigms)指从事某一类常规科学(normal science)研究活动的人员所共同遵循的世界观和行为方式,包括共同的信念或某种自然观以及共同的基本概念、理论和方法等,其特征如下:①具有公认性;②由基本定律、理论、应用和相关仪器设施等构成体系,该体系为科学研究提供基本的框架或可以借鉴并能够获得成功的范例^[4]。与人类和畜、禽营养研究相比,水产动物营养和饲料研究起步较晚,其大量借鉴了人类和畜、禽营养研究的成果,包括人类和畜、禽营养研究的

范式。遵循所建立的研究范式,水产动物营养和饲料研究在较短的时间内产生了大量的成果^[3,5-12],这些成果推动了水产配合饲料技术的进步,为水产饲料业从无到有、从小到大做出了重要的贡献。

水产养殖动物包括无脊椎动物(甲壳动物和软体动物)和脊椎动物(鱼类、两栖类和爬行类),其中鱼类在水产动物养殖产量和产值方面均居首位。2020年,鱼类分别贡献了世界水产动物养殖产量的65.74%和产值的55.15%^[2]。大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)属鲈形目(Perciformes)、太阳鱼科(Centrarchidae)、黑鲈属(*Micropterus*),原产于北美洲内陆水域,20世纪80年代后被引入我国进行养殖,目前已成为世界范围内重要的淡水肉食性鱼类养殖种类^[13]。2020年世界大口黑鲈养殖产量为62.41万t,居淡水肉食性鱼类养殖产量第2位,淡水鱼类养殖产量第15位^[2]。在我国,大口黑鲈居淡水肉食性鱼类养殖产量第1位,淡水鱼类养殖产量第7位^[14]。大黄鱼(*Larimichthys crocea*)属鲈形目(Perciformes)、石首鱼科(Sciaenidae)、黄鱼属(*Larimichthys*),为分布于西北太平洋区域的暖温性近岸洄游性鱼类。我国1985年突破大黄鱼全人工繁殖技术,1994年成功进行网箱养殖^[15-16]。2020年大黄鱼养殖产量达25.41万t,居世界海洋和沿岸带鱼类养殖产量第5位(占比3%)^[2],居我国海水鱼养殖产量第1位(占比17%)^[14]。在我国大口黑鲈和大黄鱼养殖产业发展过程中,很长一段时期内配合饲料难以在养殖生产中应用,不得不依赖冰鲜鱼饵料(大黄鱼养殖迄今仍普遍投喂冰鲜鱼)。回顾配合饲料在大口黑鲈和大黄鱼养殖生产中应用的曲折历程并分析其原因,对于完善水产动物营养和饲料研究方法具有启迪意义。下面,作者简单介绍已有的鱼类营养和饲料研究范式,然后以大口黑鲈和大黄鱼配合饲料研究和应用为例分析已有范式存在的问题,最后针对存在的问题提出改进意见。

1 鱼类营养和饲料研究范式的基本内容

1953年美国鱼类及野生动植物管理局(USFWS)所属西部鱼类营养实验室使用半纯化饲料(semipurified diet)研究大鳞大麻哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)

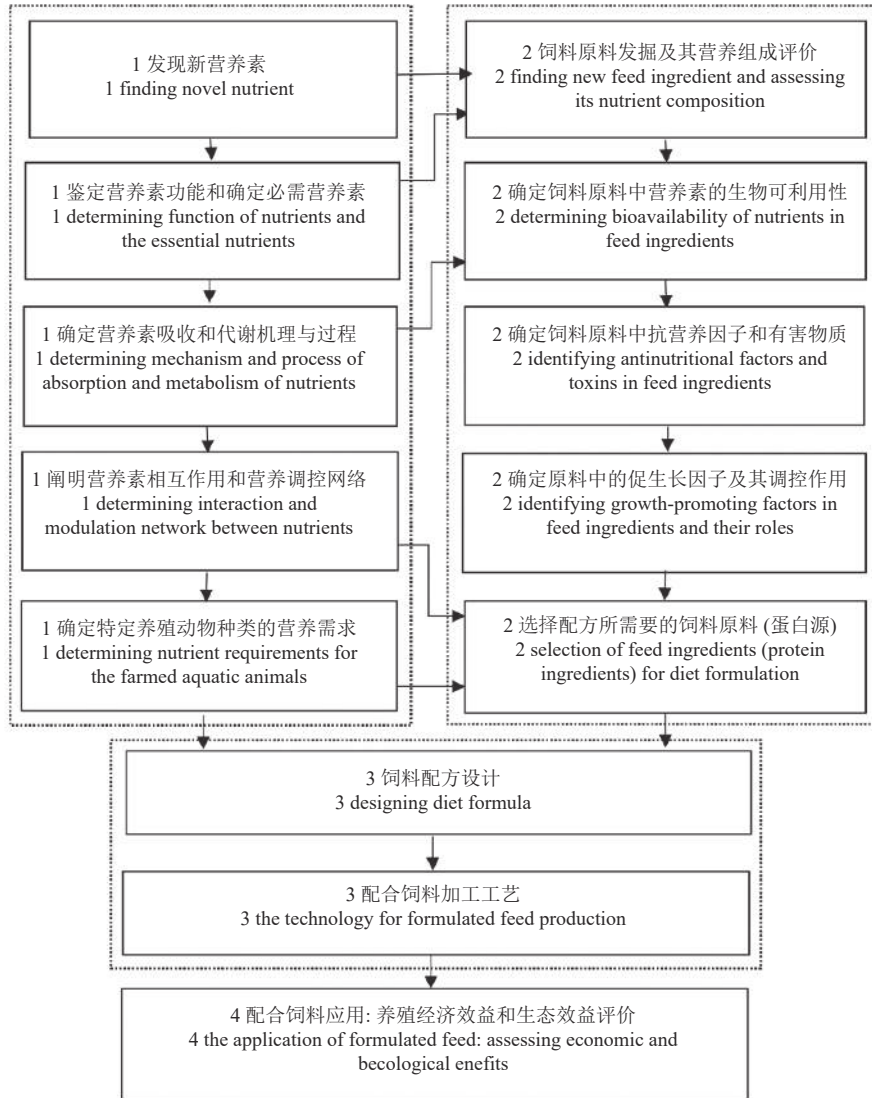


图 1 水产动物营养和饲料研究内容以及配合饲料生产与应用的流程

1. 营养研究内容, 2. 饲料研究内容, 3. 配合饲料技术, 4. 配合饲料在养殖生产中的应用。

Fig. 1 Contents of aquatic animal nutrition and feed research and diagram of production and application of formulated feed in commercial farming

1. contents of nutrition research, 2. contents of feed research, 3. design and production of formulated feed, 4. application of formulated feed in commercial farming.

wytscha) 饲料维生素和氨基酸需求^[3], 这一活动被认为是鱼类营养和饲料研究的开始。随之而形成了鱼类营养和饲料研究范式, 其基本内容如下。

概念和理论: ① 根据“一种营养性疾病对应一种营养素”的原则确定鱼类必需的营养素。需的营养素。② 根据“能够对生长产生限制作用的浓度最低的营养素为限制性营养素 (Liebig 最小量定律)”的原理确定营养素需求量或其在饲料中的最适水平。③ 根据“饲料原料提供营养素且特定原料的营养素组成和含量相对稳定”的理念, 在饲料

鱼粉替代研究中, 认为某种替代原料与鱼粉在饲料配方中的作用之差别取决于二者营养素组成和含量的差别, 认为该种替代原料的作用等同于一定比例鱼粉。

研究方法: ① 通常采用单因素方法设计饲养实验。在营养学研究中, 往往以缺乏某种营养素的饲料为基础饲料, 通过向基础配方中逐渐添加该种营养素以形成浓度梯度; 在饲料研究中, 往往以基于高质量饲料原料(如鱼粉)配制的饲料为基础饲料, 按等蛋白替代的原则向基础配方中逐

渐添加待检验的饲料原料以形成其替代高质量原料的梯度。实验饲料可以是半纯化饲料,也可以由实用饲料原料配制而成。②通过饲养实验来评价饲料效果,一般以成群饲养的幼鱼为实验鱼,实验过程中按饱食量投喂,实验开始和结束时测量鱼体重、鱼体组成和相关生理生化指标。营养学研究的饲养实验通常在室内循环水养殖系统(RAS)或流水水槽中进行,饲料研究的饲养实验可在室内RAS、室外水槽、池塘或网箱中进行,控制或监测养殖水体的水温、光照、溶解氧、pH、铵态氮和亚硝酸态氮浓度等环境因子。③通过方差分析或回归分析检验营养素浓度或饲料原料替换的比例对鱼摄食、生长、食物利用效率、鱼体组成以及组织中特定营养素水平等的影响。营养学研究中通常利用折线模型或抛物线模型确定待检营养素需求量,饲料研究中通过比较基础饲料和实验饲料组鱼的生长性能评价待检原料的营养价值。营养价值。

评价标准: 主要根据实验鱼个体生长表现确定营养需求量或饲料原料的营养价值。根据处理间个体生长差异在统计学上是否显著($P < 0.05$)判断是否出现生长差异。通常将鱼生长最快的饲料处理的营养素浓度确定为该营养素的需求量或在饲料中的最适水平,将与基础饲料相比未导致鱼生长明显减慢的实验饲料中替代原料的添加量确定为该饲料原料可在饲料配方中添加的水平。加的水平。

如前所述,水产动物营养和饲料研究范式是在借鉴人类和畜、禽营养研究成果的基础上建立的。与畜、禽相比,水产养殖动物种类较多,很多种类被驯化家养的时间较短^[1],许多凶猛肉食性鱼类的营养生理特点与前者(畜、禽为杂食性或草食性动物)存在较大的差异。即便如此,遵循已有范式所获得的鱼类营养和饲料研究结果仍成功构建起今天的鱼类营养和饲料知识体系^[5-10],为配合饲料在鱼类养殖中的广泛应用提供了科技支撑。然而,随着水产养殖规模的扩大,产业所面临的资源和环境压力日益增加^[17-20],对水产饲料的要求也越来越高、越来越多。养殖生产实践表明,根据一些已发表的肉食性鱼类营养和饲料研究结果所设计的饲料配方常常不能取得预期的应用效果^[21]。这一现象除了与个别研究所采用的实验设计、方法或操作存在缺陷有关外,也反映出已有研究范式存在不足,需要改进或完善。

2 大口黑鲈营养和饲料研究以及配合饲料在养殖生产中的应用过程

大口黑鲈的营养和饲料研究始于20世纪80年代(表1)。Anderson等^[22]报道初始体重为2~6 g的大口黑鲈饲料蛋白需求为399~408 g/kg,但养殖生产中投喂含470 g/kg粗蛋白和37 g/kg粗脂肪的配合饲料时鱼(初始体重为122 g)生长明显快于投喂含420 g/kg粗蛋白和87 g/kg粗脂肪的饲料时^[23]。之后的研究^[24-26]确定初始体重为15~28 g的大口黑鲈饲料蛋白需求量为420~436 g/kg。在我国,由于投喂配合饲料的鱼生长明显慢于投喂冰鲜饲料的鱼,很长一段时期大口黑鲈养殖生产完全依赖冰鲜鱼饵料。陈乃松等^[27]报道初始体重为10 g的大口黑鲈最适饲料粗蛋白和粗脂肪含量分别为460~490和115~140 g/kg,这一结果揭示以往研究^[22, 24-26]明显低估了饲料蛋白需求,但其实验设计中通过同时改变饲料蛋白质和脂肪含量使饲料能量保持在19和21 MJ/kg两个水平上以形成蛋白质/能量梯度,既未在等脂肪水平上评价饲料蛋白质含量变化的影响,也未在等蛋白水平上评价饲料脂肪含量变化的影响。为了检验陈乃松等^[27]的研究结果的可靠性,Hung等^[21]采用4×2实验设计进一步评价了初始体重为9 g的大口黑鲈最适饲料蛋白质和脂肪水平,确定其分别为480~510 g/kg粗蛋白和120 g/kg粗脂肪。在后续研究中,Guo等^[28]报道初始体重为21.8 g的大口黑鲈最适饲料脂肪水平为183 g/kg。Li等^[29]采用3×2实验设计确定初始体重为18 g的大口黑鲈最适饲料蛋白质和脂肪水平分别为450和100 g/kg。Cai等^[30]确定初始体重为10.6、103和204 g的大口黑鲈最适饲料蛋白质水平分别为516、505和470 g/kg。Chen等^[31]确定初始体重为110 g的大口黑鲈最适饲料蛋白质和脂肪水平分别为500和160 g/kg^[31]。养殖生产实践表明,投喂粗蛋白含量为480~510 g/kg的配合饲料时大口黑鲈生长与投喂冰鲜鱼时无明显差异。配合饲料在养殖生产中的普遍应用推动了大口黑鲈养殖产业的快速发展。2016年我国大口黑鲈养殖产量为34.73万t,2017年养殖产量较2016年增加了31.5%^[32]。

鱼粉为优质的饲料蛋白源,但其产量有限、价格昂贵。每年世界鱼粉产量的70%以上用于生产水产饲料,故降低饲料鱼粉含量是过去40多年来水产养殖研究领域中最重要的问题之一^[17-19, 33-35]。大口黑鲈商业饲料鱼粉含量高达450 g/kg^[36]。Tidwell等^[37]报道利用鸡肉粉可完全替代大口黑鲈饲

表 1 大口黑鲈饲料蛋白质和脂肪需求的部分研究结果

Tab. 1 Results of some research on dietary protein and lipid requirements of *M. salmoides*

蛋白水平/(g/kg) protein level	脂肪水平/(g/kg) lipid level	能量水平/(kJ/g) energy level	IBW/g	FBW/g	水温/°C temperature	时间/d time	结论和文献 conclusion and references
335, 399, 477, 100 545, 608, 682			1.8~2.1 5.0~6.2	3.5~6.7 7.8~15.4	23 23	25~44 14~59	初始体重为1.8~2.1 g和5.0~6.2 g的鱼最适蛋白水平为分别为399 g/kg和408 g/kg ^[22]
420, 440, 470	87 (420), 59 (440), 37 (470)		122.1	374~436	8~29	177	470 g/kg粗蛋白和37 g/kg粗脂肪饲料生长较快 ^[23]
390, 420, 450	50, 60, 70		25.1~28.8	43.6~56.3	23~28	30	最适蛋白和脂肪水平分别为420 g/kg和>60 g/kg ^[24]
340, 380, 420, 460, 500, 540	134 (340), 128 (380), 122 (420), 100 (460), 100 (500), 100 (540)		14.5	18.9~23.6	24	64	最适蛋白水平为420 g/kg ^[25]
340, 380, 420, 460, 500, 540	100-177	15.0, 15.6, 16.1, 16.6, 17.1	14.5	19.2~22.8	25.3	64	最适蛋白和能量水平分别为436 g/kg和161 kJ/kg (脂肪水平为100~134 g/kg) ^[26]
310, 340, 370, 400, 430, 460, 490, 520	90, 115, 140, 165, 190, 215, 240, 265	19, 21	10.1	43.87~87.04	28	88	最适蛋白和脂肪水平分别为460~490 g/kg和115~140 g/kg ^[27]
420, 450, 480, 510	80, 120		8.7	34.3~52.4	25.6	56	最适蛋白和脂肪水平分别为480~510 g/kg和120 g/kg ^[28]
452	33, 82, 132, 181, 233	14.1, 16.0, 18.2, 20.0, 22.1	21.8	68.6~84.0	27~30	60	最适脂肪水平分别为184 g/kg ^[28]
400, 450, 500	75, 100		18.4	44.3~52.5	26	56	最适蛋白和脂肪水平分别为450 g/kg和100 g/kg ^[29]
460, 480, 500, 520, 540, 560	120		10.6 103 204	26~36 173~199 434~525	25~28 25~28 25~28	56 56 84	初始体重为10.6、103和204 g的鱼最适蛋白水平分别为516、505和470 g/kg ^[30]
460, 500, 540	80, 120, 160	16.7~20.4	110	286~313	26.3± 2.9	84	初始体重为110 g的鱼最适蛋白和脂肪水平分别为500 g/kg和160 g/kg ^[31]

注: IBW. 初始体重, FBW. 终末体重, 下同。

Notes: IBW. initial body weight, FBW. final body weight; the same below.

料中的鱼粉, 但其所用的实验饲料蛋白质含量仅为 380 g/kg, 远低于最适饲料蛋白质水平^[21], 由于鱼类饲料蛋白水平可影响其鱼粉替代水平^[38], 故这一结果^[37] 难以置信。2018 年后围绕大口黑鲈饲料鱼粉替代开展了大量研究(表 2)。Ren 等^[39] 报道在最适饲料蛋白质水平下通过添加鸡肉粉与豆粕的混合物可将大口黑鲈饲料鱼粉含量降低至 160 g/kg, 其后续研究^[40] 表明, 通过添加 γ 射线辐照处理的羽毛粉可将饲料鱼粉含量降低至 180 g/kg。Wu 等^[41-42] 和 Cui 等^[43] 通过添加去皮豆粕、 γ 射线辐照豆粕、大豆浓缩蛋白或棉籽浓缩蛋白等将大口黑鲈饲料鱼粉含量降低至 160 g/kg。Wang 等^[44] 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、棉籽浓缩蛋白和大豆浓缩蛋白的混合物将大口黑鲈饲料鱼粉含量降低至 80 g/kg。在其他研究中, 大口黑鲈饲料鱼粉含量被分别降低至 410 g/kg (以鸡血浆蛋白粉为鱼粉替代物)^[45]、245 g/kg (以发酵豆粕为鱼粉替代物)^[46]、200 g/kg (以棉籽浓缩蛋白为鱼粉替代物)^[47]、300 g/kg (以虾水解物与植物蛋白的混合物为鱼粉替代物)^[48]、218 g/kg (以鸡肉粉与豆粕的混合物为鱼粉替代物)^[49]、145 g/kg (以鸡肉粉、血粉、豆粕与磷虾粉

的混合物为鱼粉替代物)^[50]、400 g/kg (以酶处理豆粕为鱼粉替代物)^[51]、385 g/kg (以棉籽浓缩蛋白为鱼粉替代物)^[52]、250 g/kg (以发酵豆粕为鱼粉替代物)^[53] 和 245 g/kg (以乙醇梭菌蛋白为鱼粉替代物)^[54]。上述结果显示, 单独利用鸡肉粉、豆粕、发酵豆粕、大豆浓缩蛋白、棉籽浓缩蛋白、羽毛粉和乙醇梭菌蛋白等作为替代原料时可将大口黑鲈饲料鱼粉含量降低至 80~250 g/kg^[40-44, 46-47, 51-54]。最近, McLean 等^[55] 报道利用鸡肉粉和大豆浓缩蛋白的混合物可完全替代大口黑鲈饲料中的鱼粉, 这一结果还需要验证。

3 大黄鱼营养和饲料研究与配合饲料在养殖生产中应用的过程

大黄鱼营养和饲料的研究始于 21 世纪初(表 3)。Duan 等^[56] 报道初始体重为 0.6 g 的大黄鱼最适饲料蛋白质和脂肪水平分别为 470 和 105 g/kg。2002 年发布的中华人民共和国水产行业标准 SC/T 2012—2002^[57] 中规定体重为 0.2~10 g、11~150 g 和 ≥ 151 g 的大黄鱼配合饲料蛋白质含量应分别 ≥ 470 g/kg、 ≥ 450 g/kg 和 ≥ 400 g/kg。随后的研究相

表 2 大口黑鲈饲料鱼粉替代方面的部分研究结果

Tab. 2 Results of some research on dietary fish meal replacement for *M. salmoides*

蛋白水平/ (g/kg) protein level	脂肪水平/ (g/kg) lipid level	CFM/ (g/kg)	MFm/ (g/kg)	替代蛋白源 alternative ingredient	IBW/g	FBW/g	水温/°C temperature	时间/d time	结论和文献 conclusion and references
380	100	300	0	PBM	3.1	30~45	25.6	84	PBM可完全替代饲料鱼粉 ^[37]
490	100	400	160	PBM与SBM混合物	10.5	59~65	26.7	56	饲料鱼粉含量可降低至160 g/kg ^[39]
480	120	510	410	鸡血浆蛋白粉	49.5	173~183	27	84	鸡血浆蛋白粉可替代对照饲料中鱼粉的20% ^[45]
460	110	350	245	发酵SBM	4.4	22.9~25.9	27~32	56	发酵SBM可替代对照饲料中鱼粉的30% ^[46]
500	90	300	180	γ射线辐照FEM	14.3	62~69	26.7	56	饲料鱼粉含量可降低至180 g/kg ^[40]
490	90	400	160	γ射线辐照SBM	10.7	57.5~61.5	22.7~30.3	56	饲料鱼粉含量可降低至160 g/kg ^[42]
480	90	400	160	SBM	12.6	64~76	23.4~28.2	56	饲料鱼粉含量可降低至160 g/kg ^[41]
500	11	400	80	PBM, CPC, PBM与CPC混合物, PBM, CPC和SPC混合物	24	78~104	25.2~30.3	56	饲料鱼粉含量可降低至80 g/kg ^[44]
500	90	400	200	CPC	15.1	55~63	27	56	CPC可替代对照饲料中鱼粉的50% ^[47]
500	120	450	300	虾水解物与植物蛋白混合物	66.2	184~201	27	82	虾水解物与植物蛋白混合物可替代对照饲料中鱼粉的33% ^[48]
54	13	784	218	PBM与SBM混合物	4.9	32~35	25~27	56	PPBM与SBM混合物可替代对照饲料中鱼粉的72.2% ^[49]
46	10	653	145	PBM, SBM, BM与磷虾粉混合物	16.6	51~63	25~27	56	PBM, SBM, BM与磷虾粉混合物可替代对照饲料中鱼粉的77.8% ^[50]
43	12	560	400	酶处理大豆	18.1	37~42	22~30	63	酶处理大豆可替代对照饲料中鱼粉的28.6% ^[51]
500	110	700	385	CPC	95.3	212~239	26.3	84	CPC可替代对照饲料中鱼粉的45% ^[52]
470	120	350	250	发酵SBM	21.2	95~100	28	56	发酵SBM可替代对照饲料中鱼粉的28.6% ^[53]
500	100	400	160	SPC和CPC	19.2	58~64	27.7	56	饲料鱼粉含量可降低至160 g/kg ^[43]
480	105	500	245	乙醇梭菌蛋白	17.8	53~57	20~26	60	乙醇梭菌蛋白可替代对照饲料中鱼粉的51% ^[54]
468-471	130	283	0	PBM与SPC混合物	15.2	48.8~56.9	27.8±0.5	70	PBM与SPC混合物可完全替代饲料鱼粉 ^[55]

注: CFM.对照鱼粉含量, MFm.最低鱼粉含量, PBM.鸡肉粉, SBM.豆粕, FEM.羽毛粉, CPC.棉籽浓缩蛋白, BM.血球蛋白粉, 下同。
Notes: CFM. fish meal content in control diet, MFm. the minimum fish meal content achieved by fish meal replacement, PBM. poultry by-product meal, SBM. soybean meal, FEM. feather meal, CPC. cotton protein concentrate, BM. blood cell meal, the same below.

继报道了饲料中的磷^[58]、蛋氨酸^[59-60]、维生素C^[61-62]、脯氨酸^[62]、赖氨酸^[63]、益生菌和益生元^[64]、蛋白质^[65]、烟酸^[66]、虾青素和叶黄素^[67-68]、脂肪和碳水化合物^[69-72]、锰^[73]、羟脯氨酸^[74]、柠檬酸^[75]和胆酸^[76-77]等对大黄鱼生长的影响, 确定适宜的饲料脂肪水平为97~110 g/kg^[69-72]。孙瑞健等^[65]报道每天投喂2次时, 摄食含450 g/kg粗蛋白的饲料时大黄鱼生长与摄食含500 g/kg粗蛋白的饲料的鱼无显著差异, 甚至略快于后者。2018年发布的中华人民共和国国家标准GB/T 36206—2018^[78]中规定体重<1.0 g、1.0~<50 g和50~<300 g的大黄鱼配合饲料蛋白质含量应分别≥450 g/kg、≥420 g/kg和≥400 g/kg。在上述大黄鱼营养研究中, 除了个别研究的饲料蛋白质含量为485 g/kg^[72]和470 g/kg^[75]以外, 绝大多数研究^[58-64, 66-71, 73-74, 76-77]所用的实验饲料蛋白质含量为430~450 g/kg。投喂蛋白

质含量为430~450 g/kg的商业配合饲料时大黄鱼生长缓慢, 难以按期养成上市规格, 因此养殖生产中一直普遍投喂冰鲜鱼饵料^[79]。配合饲料仅在夏季高温期间使用以降低养殖鱼类的死亡率, 或与冰鲜鱼搭配使用以节省劳力或弥补冰鲜鱼供应的不足。最近, Chen等^[80]采用4×3实验设计确定初始体重为11.5 g的大黄鱼的适宜饲料蛋白质和脂肪水平分别为490~520 g/kg和100 g/kg, 这一结果显示过去二十多年中大黄鱼饲料蛋白质需求一直被明显低估。Liu等^[81]报道初始体重为11.5 g的大黄鱼投喂含490~520 g/kg粗蛋白的配合饲料时, 生长与投喂冰鲜鱼时接近, 但其成活率和养殖产量远高于后者, 饲料成本、饲料利用效率和养殖废物排放量远低于后者。2020—2022年作者所在的实验室于舟山市普陀区登步岛完成了全过程使用配合饲料养殖大黄鱼的网箱生产实验, 结

果表明, 投喂粗蛋白含量为 490~520 g/kg 的配合饲料可将大黄鱼在 2 年内养成上市规格。根据已有的研究结果和 2020 年国内大黄鱼养殖产量推算,

假如全过程投喂配合饲料养殖大黄鱼, 我国每年所需的配合饲料应超过 40 万 t。

表 3 大黄鱼营养需求的部分研究结果

Tab. 3 Results of some research on dietary nutrient requirements of *L. crocea*

蛋白水平/(g/kg) protein level	脂肪水平/(g/kg) lipid level	IBW/g	FBW/g	存活率/% survival	水温/°C temperature	时间/d time	结论和文献 conclusion and references	
340, 370, 420, 470	75, 105, 140	0.6	5.4~7.5	86~97	19~26	60	最适蛋白和脂肪水平分别为470 g/kg和105 g/kg ^[56]	
56	430	120~130	1.9	9.8~13.2 ¹⁾	96~98	27~30	70	确定磷需求 ^[58]
440	120	1.2	11.9~19.6	95~96	26.5~32.5	56	确定蛋氨酸需求 ^[59]	
436	129	17.8	48.9~53.6	85~98	20~26	56	确定维生素C需求 ^[61]	
430	120	1.2	8.5~12.1	94~99	27~30	70	确定赖氨酸需求 ^[63]	
440	140	7.8	1.9~18.1 ²⁾	79~88	22.5~31.5	70	评价益生菌和益生元影响 ^[64]	
414, 462, 512	120	13.6	32.2~46.3 ³⁾	90~94	26.5~30.5	56	每天投喂2次条件下, 饲料蛋白水平为462 g/kg时, 鱼生长和饲料利用效率略优于饲料蛋白水平为512 g/kg时 ^[65]	
430	130	33.3	73.6~80.5	91~95	19.5~31.5	63	确定虾青素和叶黄素影响 ^[67]	
440	20, 50, 80, 110, 140, 180	10	31.4~46.8	89~100	21~31	60	最适脂肪水平为104 g/kg ^[69]	
460	100	5.6	32.3~35.4 ²⁾	72~84	26~32	66	确定虾青素影响 ^[68]	
420	110	8.7	24.4~27.1 ³⁾	92~97	26.5~30.5	70	确定烟酸需求 ^[66]	
450	30, 60, 90, 120, 150, 180	7.6	22.0~33.2	95~97	27~30	56	最适脂肪和能量水平分别为97 g/kg和18.54 MJ/kg ^[70]	
430	110	7.7	28~32	82~85	27.4	63	确定Mn需求 ^[73]	
470	90	7.7	25.5~28.1	82~85	27.4~33.2	63	评价柠檬酸影响 ^[75]	
440	130	189.9	251.5~270.2	84~90	26.5~32.5	82	评价羟脯氨酸影响 ^[74]	
390	50, 80, 110, 120, 130, 160	7.1	18.9~25.0	79~91	26.5~31.5	56	最适脂肪水平为121 g/kg ^[71]	
450	110	10.0	50.3~57.0	86~92	24.3~28.5	70	评价胆酸影响 ^[76]	
485	80, 110, 140	7.8	18~22	79~93	22~27	49	最适脂肪水平为110 g/kg ^[72]	
450	130, 180	12	57~63	82~89	25~29	70	评价胆酸影响 ^[77]	
430	100	149~152	229~252	71~86	26.5~32.5	60	评价维生素C和脯氨酸影响 ^[62]	
420	180	8.59	39.9~40.8 ²⁾	83~88	23.4~30.2	70	评价蛋氨酸影响 ^[60]	
430, 460, 490, 520	70, 100, 130	11.4	35.1~47.5	73~96 ⁴⁾	22.2~27.5	56	最适蛋白和脂肪水平分别为490~520 g/kg和100 g/kg ^[80]	

注: 1) FBW根据初体重和绝对增重数据计算, 2) FBW根据初体重和相对增重数据计算, 3) FBW根据初体重和特定生长率(SGR)数据计算, 4) 存活率指5~8周的存活率。

Notes: 1) FBW was calculated with IBM and weight gain, 2) FBW was calculated with IBM and relative growth (% weight gain), 3) FBW was calculated with IBM and specific growth rate (SGR), 4) survival rate was survival during weeks 5 to 8.

2016 年大黄鱼商业配合饲料鱼粉含量高达 450 g/kg^[35]。围绕替代大黄鱼饲料鱼粉开展了一些研究(表 4), 结果表明, 可将大黄鱼饲料鱼粉含量降低至 303 g/kg (以肉骨粉为鱼粉替代物)^[82]、361 g/kg (以豆粕、肉骨粉、花生粕和菜粕的混合物为鱼粉替代物)^[83]、420 g/kg (分别以豆粕、肉骨粉或鸡肉粉为鱼粉替代物)^[84]、283 g/kg (以虾壳粉为鱼粉替代物)^[85]、220 g/kg (以发酵豆粕为鱼粉替代物)^[86]、100 g/kg (以磷虾粉为鱼粉替代物)^[87]、468 g/kg (以磷虾粉为鱼粉替代物)^[88] 或 300 g/kg (以鸡

肉粉为鱼粉替代物)^[89]。根据上述结果, 通过合理使用虾壳粉、发酵豆粕和磷虾粉等作为替代原料可将大黄鱼饲料鱼粉含量降低至 100~283 g/kg^[85-87]。Wang 等^[90] 和 Fan 等^[91] 报道利用大豆浓缩蛋白或谷朊粉可完全替代大黄鱼饲料中的鱼粉, 但其结果与 Wang 等^[89] 的结果存在矛盾, 还需要进一步验证。除了个别研究^[88] 以外, 绝大多数大黄鱼饲料鱼粉替代研究中所用的实验饲料蛋白质水平为 430~450 g/kg^[82-87, 89-91], 明显低于 Chen 等^[80] 所报道的大黄鱼适宜饲料蛋白质水平 (490~520 g/kg)。由

于饲料蛋白质水平可影响饲料鱼粉替代水平^[38], 已有的饲料鱼粉替代研究结果需要被重新评价。最近, Chen 等^[92]报道在适宜饲料蛋白质水平下通过添加大豆浓缩蛋白可将大黄鱼饲料鱼粉含量降

低至 240 g/kg。于安澜等^[93]报道通过联合添加羽毛粉和 DP-100 酶可将饲料鱼粉含量降低至 245 g/kg。Wang 等的研究表明, 通过添加鸡肉粉可将饲料鱼粉含量降低至 160 g/kg^{*}。

表 4 大黄鱼饲料鱼粉替代方面的部分研究结果

Tab. 4 Results of some research on dietary fish meal replacement for *L. crocea*

蛋白水平/ (g/kg) protein level	脂肪水平/ (g/kg) lipid level	CFM/ (g/kg)	MFM/ (g/kg)	替代 蛋白源 alternative ingredient	IBW/g	FBW/g	存活率/% survival	水温/°C temperature	时间/d time	结论和文献 conclusion and references
430	110	550	303	MBM	1.9	13.1~18.7	94~98	26.5~32.5	56	MBM 替代对照饲料鱼粉的 45% ^[82]
430	120	488	361	SBM, MBM, PNM 与 RSM 混合物	1.9	10~14.3	93~97	26.5~29.5	56	SBM, MBM, PNM 与 RSM 混合物替代对照饲料鱼粉的 77.8% ^[83]
430	120	600	420	SBM, MBM, PBM	23.3	61.7~94.8 ¹⁾	95~99	27~30	56	SBM, MBM 或 PBM 可分别替代对照饲料鱼粉的 26% ^[84]
430	130	440	283	虾壳粉	70.3	113.6~135.4	86~93	18~28	63	虾壳粉替代对照饲料鱼粉的 36% ^[85]
450	100	400	0	SPC	10.1	35~40 ¹⁾	91~94	26.0~31.5	56	SPC 可完全替代鱼粉 ^[90]
450	100	400	220	发酵 SBM	10	29.5~41.3 ²⁾	85~100	26~31.5	56	发酵 SBM 替代对照饲料鱼粉的 45% ^[86]
450	110	400	100	磷虾粉	30.3	55.4~63.9	76~80	19~28	63	磷虾粉替代对照饲料鱼粉的 75% ^[87]
450	100	400	0	WGM	10.5	37.0~44.2 ²⁾	76~94	26~31.5	56	谷朊粉可完全替代鱼粉 ^[91]
480	11	550	468	磷虾粉	190.6	379~423	90~97	18~27	99	磷虾粉替代对照饲料鱼粉的 15% ^[88]
450	100	400	300	PBM	18.4	46~78 ¹⁾		28.0±0.8	56	PBM 可替代对照饲料鱼粉的 25% ^[89]
505	100	400	240	SPC	33.6	71.0~84.3	72~83	19.8~27.1	63	饲料鱼粉含量可降低至 240 g/kg ^[92]
500	95	350	175	FEM	19.7	60.6~66.7	72~83	19.8~27.1	70	饲料鱼粉含量可降低至 175 g/kg ^[93]
500	90	400	160	PBM	20.0	60.3~70.7	74~92	22.2~27.6	70	饲料鱼粉含量降低至 160 g/kg ¹⁾

注: MBM. 肉骨粉, CM. 棉籽粕, PNM. 花生粕, RAM. 菜籽粕, SPC. 大豆浓缩蛋白, WGM. 谷朊粉。1) FBW 根据初体重和相对增重数据计算得出, 2) FBW 根据初体重和特定增长率 (SGR) 数据计算得出。

Notes: MBM. meat and bone meal, CM. cotton seed meal, PNM. peanut meal, RAM. rapeseed meal, PBM. poultry by-product meal, SPC. soy protein concentrate, WGM. wheat gluten meal. 1) FBW was calculated with IBM and relative growth (% weight gain), 2) FBW was calculated with IBM and specific growth rate (SGR).

4 已有鱼类营养和饲料研究范式存在的不足

大口黑鲈和大黄鱼营养与饲料研究以及配合饲料应用的历史揭示, 这两种鱼类的饲料蛋白质需求在很长一段时期内被明显低估, 由于饲料蛋白水平偏低, 导致早期的配合饲料不能满足鱼类的快速生长需求而难以在养殖生产中应用。大口黑鲈和大黄鱼的饲料蛋白需求被长期低估, 这一事实折射出已有鱼类营养和饲料研究范式的不足, 主要表现在以下几个方面:

① 已有的范式忽视了鱼类遗传背景和食物以外的其他环境条件对鱼生长的作用: 在鱼类营养和饲料研究中, 主要根据实验鱼的个体生长表现来判断营养需求量或饲料质量, 但究竟是鱼类生长决定了其食物营养素的需要量, 还是鱼类生长取决于食物营养素的供给量 (需要量等同于最适供给量), 关于这一问题尚未见明确的答案。尽管一些研究报道同一种鱼类的不同品系 (生长速率不同) 在营养需求和对饲料蛋白源的利用能力方面存在差异^[94-97], 但其未明确鱼类生长与食物营养素供给量的关系。鱼类营养研究中被广为接受的观

* 文章未发表, 引自“Wang L, Lei M, Chen Z, et al. Dried porcine soluble augments fish meal replacement with poultry by-product meal in large yellow croaker *Larimichthys crocea* diet[J]. Aquaculture”。

点是“鱼类生长取决于食物营养素的供给”且“不同营养素各自独立地发挥着不同的作用”。事实上, 鱼类遗传因素是其生长的内因, 包括食物在内的环境条件是其生长的外因。因此, 鱼类生长的需求决定了其对食物营养素的需要量, 而食物是影响鱼类生长的诸多环境条件之一。作者认为, 在特定环境条件下鱼类的生长表现 (G) 可表示为:

$$G = G_{\max} - G_{\text{er}} + \varepsilon \quad (1)$$

式中, G_{\max} 为鱼的生长潜能, 其取决于遗传背景, 反映了在理想环境条件下鱼的生长潜力; G_{er} 为环境条件对鱼类生长的阻力, ε 为随机效应。 G_{er} 可表示为:

$$G_{\text{er}} = G_{\max} \times E_r \quad (2)$$

式中, E_r 为环境阻力系数 (E_r 为 0~1, $E_r = 0$ 时表明环境条件对鱼生长不产生限制, $E_r = 1$ 时表明环境阻力导致鱼生长停滞)。产生环境阻力的因素主要包括食物限制、水质恶化和由各种应激源产生的应激。 E_r 可表示为:

$$E_r = E_{\text{rf}} + E_{\text{rw}} + E_{\text{rs}} \quad (3)$$

式中, E_{rf} 为因食物限制所产生的阻力, E_{rw} 为因水质恶化所产生的阻力, E_{rs} 为因环境应激所产生的阻力。

鱼类生长 G 与摄食量 (FI) 和食物效率 (FE) 的关系可表示为: $FE = G / FI$, 则有:

$$FI = G / FE \quad (4)$$

式中, FI 和 G 的单位可以是湿重、干物质、蛋白质或能量。当 FI 和 G 的单位为蛋白质或能量时, FE 分别等于蛋白质贮积效率 (NRE) 或能量贮积效率 (ERE)。在最适摄食强度下, FE 可反映食物质量的好坏。

结合公式 (1)、(2)、(3) 和 (4), 得出:

$$FI = G_{\max} \times (1 - E_{\text{rf}} - E_{\text{rw}} - E_{\text{rs}}) / FE \quad (5)$$

从公式 (1)、(2)、(3)、(4) 和 (5) 可以看出, 鱼类遗传背景决定了其生长潜力, 食物只是限制鱼类生长潜力实现的诸多环境因素之一。鱼类内在的生长需求决定了对食物营养素的需要量, 而食物的质量和数量影响鱼类生长, 是决定鱼类能否实现其生长潜能的重要因素。由于鱼类对食物的需求取决于其生长潜能以及能够影响其生长的各种环境条件, 因此, 在鱼类营养和饲料研究中应选择合适的实验鱼和养殖环境条件进行饲养实

验, 只有实验鱼和养殖环境条件反映了养殖生产实际情况, 实验得出的结果才能够用于指导生产实践。如果选用生长缓慢的劣质鱼种做为实验鱼, 或者实验的养殖环境条件 (如养殖水体过小、水温偏低或过高、水质恶化等) 对鱼生长产生明显的限制作用, 实验鱼就会因生长受到其他因素的抑制而对食物需求下降, 也就难以客观评价饲料营养水平 and 饲料质量对鱼生长的作用。已有的范式没有强调实验鱼种质和养殖环境对饲养实验结果代表性或可靠性的影响, 因而一些研究的饲养实验中仅关心处理组之间鱼生长的差异, 而不太注意实验鱼的总体生长情况, 特别是摄食基础饲料或对照饲料的鱼的生长。早期研究明显低估了大口黑鲈和大黄鱼的饲料蛋白质需求, 很大程度上与这些研究的饲养实验中鱼生长速度较慢有关 (表 1, 表 3)。早期研究报道大口黑鲈饲料鱼粉可被鸡肉粉完全替代 (表 2), 原因也与实验饲料蛋白含量偏低导致实验鱼生长缓慢有关。

② 已有的范式忽视了鱼类个体生长差异与鱼类养殖产量差异的区别: 由于鱼类种群中往往存在社会等级^[98-99], 而鱼类生长过程中也存在补偿生长^[100], 因此不同的种群结构和不同的生长阶段都会使鱼类生长产生变化, 这使得在较短的时间内客观、准确地评价鱼类生长特征面临一定的困难。在鱼类营养和饲料研究中, 饲养实验所用的鱼通常被群体饲养, 选用的实验鱼往往是由同一批亲本产卵培育出的同一批幼鱼, 对实验鱼种群的大小 (或养殖密度) 以及鱼群内个体间大小分化的程度往往不加以特别限定。饲养实验时间为能够使实验处理间生长差异得以充分表现的最短时间 (通常为 8 周或使对照鱼体重增加 1 倍以上的时间); 判断处理效应是否显著的标准是处理间的鱼个体生长指标 [鱼体绝对增重或相对增重、特定生长率 (SGR)、日生长系数 (DGC) 或温度单位生长系数 (TGC 等)] 差异在统计学上是否显著 ($P < 0.05$)。由于不同处理间实验鱼生长是否表现出统计学显著差异同时取决于处理间个体生长差异的程度和处理内不同重复之间的生长分化的程度, 而上述处理间和重复之间的个体生长分化程度受实验鱼群内个体生长分化程度的影响, 因此实验鱼群结构是否合理可影响对处理间个体生长差异的评价。此外, 在养殖生产中, 单位水体的鱼类养殖产量等于个体增重 \times 放养密度 \times 成活率, 故个体生长对养殖产量的贡献被收获时的养殖密度

放大。当鱼类放养密度和成活率很高时, 较小的个体生长变化就会导致较大的养殖产量变化。因此, 鱼类个体生长差异并不能完全反映鱼类养殖产量和效益的差异。在鱼类营养和饲料研究中, 当同一处理的重复之间个体生长分化较大时, 处理间个体生长(绝对增重)差异超过 10% 在统计学上也不会表现出显著差异 ($P>0.05$), 这时根据统计学检验结果会得出处理间个体生长无差异的结论。在养殖生产中(以大口黑鲈池塘养殖为例), 当 2 口池塘的鱼个体平均增重相差 10% (设 W_1 和 W_2 分别为池塘 1 和 2 中鱼个体平均增重, $W_1 = 1.1W_2$), 放养密度均为 45 000 尾/hm², 成活率均为 100% 时, 池塘 1 (鱼产量为 45 000 W_1 /hm²) 较池塘 2 (鱼产量 45 000 W_2 /hm²) 可增产 4 500 W_2 /hm², 无论养殖产量还是经济效益都明显高于池塘 2。

③ 已有的范式未考虑投饵养殖对自然资源和环境的影响: 鱼类营养和饲料研究中所用的主要评价指标包括个体生长、饲料利用效率和鱼体组成, 这些指标对应了养殖产量、饲料成本以及鱼的健康和品质, 能够基本反映饲料质量对养殖生产性能的影响。随着水产养殖规模的扩大, 环境污染和饲料蛋白源匮乏对产业发展的制约作用越来越大。然而, 只有为数不多的研究评价了饲料营养水平和蛋白源结构对养殖碳、氮、磷废物排放量的影响^[13, 21, 38-44, 101-112]以及饲料蛋白源结构对鱼粉依赖性的影响^[13, 39-40, 42-44, 106-112]。Zhang 等^[106]提出综合生长、饲料成本、养殖鱼类健康和环境影响这 4 个方面评价鱼类养殖生产性能的方法, 但这一方法仅在少数研究中被采用^[113-114]。生态系统服务可全面反映水产养殖活动的经济、生态和社会效益以及产业发展的可持续性^[115], 根据作者掌握的资料, 仅 Cui 等^[43]定量分析了降低大口黑鲈饲料鱼粉含量对养殖生态系统服务价值的影响。

④ 已有的范式没有足够重视基础饲料配方对评价营养需求或饲料质量的影响: 评价鱼类营养需求和饲料质量需要设定参照, 基础饲料(有时也做为对照)是重要的参照。研究表明, 在不同基础饲料配方背景下, 利用豆粕替代卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*) 饲料鱼粉的水平^[110]以及尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*) 对特定饲料原料的消化率^[116]会明显不同。如果基础饲料配方不合理, 会导致研究结果偏颇而失去其科学和应用的价值。例如, 在饲料鱼粉替代研究中, 已发表的很多文献将“当摄食实验饲料和对照饲料的鱼个体生长无显著差

异时, 实验饲料中所检验的替代原料替代了对照饲料中鱼粉量的百分比作为该原料可替代鱼粉的水平”^[45-54, 82-91]。然而, 对照饲料中鱼粉量可被替代的百分比并不能反映饲料鱼粉含量, 当即使鱼粉含量偏高时, 对照饲料鱼粉量可被替代的百分比很高, 饲料鱼粉含量仍然保持在较高的水平。因此, 采用这种评价标准所得出的结果不能反映饲料鱼粉的替代能够在多大程度上降低配合饲料和养殖生产对鱼粉的依赖性。Wang 等^[117]指出上述评价方法的缺陷, 建议用能够满足鱼类正常生长(与对照饲料相比)的最低饲料鱼粉含量来判断饲料鱼粉替代效果, 并采用最低饲料鱼粉含量评价了鳊状黄姑鱼(*Nibea miichthioides*)^[38, 117]、点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)^[101-102]、卵形鲳鲹^[105, 108-111]、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[106-107]、大口黑鲈^[39-44]和大黄鱼^[92-93]的饲料鱼粉替代潜力。Naylor 等^[18-19]采用最低饲料鱼粉含量评价了 1995—2017 年世界水产饲料鱼粉替代技术的进步。

5 对已有鱼类营养和饲料研究范式的改进

作者认为应对已有鱼类营养和饲料研究范式做如下改进:

① 在概念和理论方面, 重视鱼类遗传背景和食物以外的其他环境条件对鱼类生长的影响, 明确鱼类生长潜力决定了其营养需求, 明确食物条件是满足具有特定种质的鱼类生长的环境条件之一, 而非决定鱼类生长的唯一因素或首要因素。此外, 重视食物中各种营养素之间的相互作用, 明确一种饲料原料是包含了多种营养素的集合, 不同的饲料原料在饲料配方的营养平衡方面具有不同的作用。

② 在研究方法方面, 明确饲养实验中应选用种质背景清晰、种群内个体大小均匀的鱼为实验鱼; 明确饲料研究中应避免使用纯化或半纯化饲料; 明确评价营养需求和饲料质量的指标体系中应包含与可持续发展的相关的指标(如对自然资源和环境的影响)。此外, 将个体生长差异的幅度作为判断饲料处理效应的指标, 设置 1 个阈值(建议将鱼类个体生长差异的阈值设为 5%~10%), 当处理间个体生长差异幅度超过规定的阈值时, 即使个体生长的差异在统计学上不显著 ($P>0.05$), 也判定处理间存在生长差异。最后, 发展基于多个指标的综合评价方法, 将其与基于单个指标的评价结合来确定营养需求水平和饲料质量好坏。

改进后的鱼类营养和饲料研究范式如下:

概念和理论: ①根据“鱼类生长潜力决定了营养需求, 食物仅在特定鱼类遗传背景和养殖环境条件下对鱼类生长发挥作用”的原则设计评价营养需求和饲料质量的饲养实验, 明确实验鱼的种质背景和除食物以外的其他环境条件。②根据“能够对生长产生限制作用的浓度最低的营养素为限制性营养素 (Liebig 最小量定律)”的原理开展饲养实验确定营养素需求量或最适水平。③根据“不同营养素之间存在相互作用”的原则, 在明确营养素相互作用的基础上确定限制性营养素的需求。④根据“一种饲料原料是包含多种营养素的集合”的原则进行饲料配方设计, 采用多种饲料原料的合理组合实现饲料营养“充分且平衡”的目的。由于不同的饲料原料在配方营养平衡方面发挥的作用不同, 故饲料配方设计应尽可能使用多种具有互补性的饲料原料, 而非依赖某一种优质原料。

研究方法: ①根据研究目的在饲养实验中采用单因素或多因素实验设计。在营养学研究中, 以缺乏待确定的营养素的饲料为基础饲料, 通过向基础配方中逐渐添加该种营养素以形成浓度梯度; 在饲料研究中, 根据养殖生产实际情况和需要设计基础饲料, 按等蛋白替代原则向基础配方中逐渐添加待确定的饲料原料以形成其替代高质量原料的梯度。②在强调促生长目的的饲养实验中避免使用纯化或半纯化饲料。除非对实验鱼规格有特殊要求, 饲养实验应选择种质背景清晰、初始体重 $>10\text{ g}$ 的幼鱼为实验鱼; 实验鱼成群饲养, 每个鱼群内个体大小均匀; 实验过程中按饱食量投喂, 实验开始和结束时测量鱼体重、鱼体组成和相关生理生化指标。营养学研究的饲养实验通常在室内 RAS 或流水水槽中进行, 饲料研究的饲养实验通常在室内 RAS、室外水槽、池塘或网箱中进行。养殖水体不宜过小, 以免对鱼产生应激限制其生长, 对养殖水体的水温、光照、溶解氧、pH、铵态氮和亚硝酸态氮浓度等环境指标进行控制或监测。③根据实验鱼总体生长情况是否正常判定饲养实验的有效性, 如实验鱼生长缓慢则应分析是否存在实验处理以外的干扰及其对实验处理效果的影响。在明确饲养实验有效性的前提下, 通过方差分析或回归分析检验营养素浓度或饲料原料的变化对鱼摄食、生长、食物利用效率、鱼体组成、组织中特定营养素水平、免疫、抗应激能力和养殖废物排放量等的影响。营养学研究中

利用折线模型或抛物线模型确定待测营养素需求量; 饲料研究中通过比较基础饲料和实验饲料组鱼体的生长性能确定待测原料的营养价值。

评价标准: 主要根据实验鱼个体生长表现确定营养需求量或饲料原料的营养价值。将能够使鱼体生长最快的饲料处理的营养素浓度确定为该营养素的需求量或最适水平, 将与基础饲料相比未导致鱼体生长明显变慢的实验饲料确定为符合要求的饲料。判定处理间个体生长差异一方面依据处理间生长在统计学上是否达到显著水平 ($P<0.05$), 另一方面依据处理间生长差异的幅度是否超出规定的阈值 (建议阈值取 5%~10%)。当处理间个体生长差异幅度超过规定的阈值时, 即使差异在统计学上达不到显著水平 ($P>0.05$), 也不判定为处理间生长无差异。此外, 与产业可持续发展相关的内容, 包括养殖废物排放量、对自然资源 (如鱼粉、淡水等) 的依赖性和生态系统服务价值等应被列入评价营养需求和饲料质量的指标体系。

综上所述, 水产养殖产业面临日益增长的资源和环境压力, 对水产配合饲料提出了越来越多和越来越高的要求。遵循已有鱼类营养和饲料研究范式所产生的一些研究成果难以满足养殖产业可持续发展的需要, 因此应对已有的研究范式加以改进。改进后的研究范式能够更好地符合现代水产动物养殖生产的实际情况, 在此范式指导下的研究结果能够为设计开发高营养、低污染、廉价配合饲料提供更可靠的数据, 能够为配合饲料在水产动物养殖生产中的应用提供有力的科技支撑。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Duarte C M, Marbá N, Holmer M. Rapid domestication of marine species[J]. *Science*, 2007, 316(5823): 382-383.
- [2] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022.
- [3] Halver J E, Hardy R W. Fish nutrition[M]. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2002.
- [4] Kuhn T S. The structure of scientific revolutions[M]. 2nd ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1972.

- [5] NRC. Nutrient requirements of trout, salmon, and catfish[M]. Washington: National Academies Press, 1973.
- [6] NRC. Nutrient requirements of warmwater fishes[M]. Washington: National Academies Press, 1977.
- [7] NRC. Nutrient requirements of coldwater fishes[M]. Washington: National Academies Press, 1981.
- [8] NRC. Nutrient requirements of warmwater fishes and shellfishes[M]. Washington: National Academies Press, 1983.
- [9] NRC. Nutrient requirements of fish[M]. Washington: National Academies Press, 1993.
- [10] NRC. Nutrient requirements of fish and shrimp[M]. Washington: National Academies Press, 2011.
- [11] Halver J E. Fish nutrition[M]. New York: Academic Press, 1989.
- [12] Wilson R P. Handbook of nutrient requirements of finfish[M]. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [13] 崔正贺, 余聪, 李云梦, 等. 饲料中发酵啤酒酵母添加水平对大口黑鲈生长、饲料利用效率和水质的影响[J]. 中国水产科学, 2022, 29(2): 274-283.
- Cui Z H, Yu C, Li Y M, *et al.* Effect of fermented brewer's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth, feed utilization, and water quality in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) farming[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(2): 274-283 (in Chinese).
- [14] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- Bureau of Fisheries and Fishery Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2021 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [15] Chen S H, Su Y Q, Hong W S. Aquaculture of the large yellow croaker[M]//Gui J F, Tang Q S, Li Z, *et al.* Aquaculture in China: success stories and modern trend. Oxford: John Wiley & Sons, 2018: 297-308.
- [16] Chen Y L, Huang W Q, Shan X J, *et al.* Growth characteristics of cage-cultured large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 16: 100242.
- [17] Naylor R L, Goldberg R J, Primavera J H, *et al.* Effect of aquaculture on world fish supplies[J]. *Nature*, 2000, 405(6790): 1017-1024.
- [18] Naylor R L, Hardy R W, Bureau D P, *et al.* Feeding aquaculture in an era of finite resources[J]. *Proceedings of the Nation Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(36): 15103-15110.
- [19] Naylor R L, Hardy R W, Buschmann A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 551-563.
- [20] Gephart J A, Henriksson P J G, Parker R W R, *et al.* Environmental performance of blue foods[J]. *Nature*, 2021, 597(7876): 360-365.
- [21] Huang D, Wu Y B, Lin Y Y, *et al.* Dietary protein and lipid requirements for juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2017, 48(5): 782-790.
- [22] Anderson R J, Kienholz E W, Flickinger S A. Protein requirements of smallmouth bass and largemouth bass[J]. *The Journal of Nutrition*, 1981, 111(6): 1085-1097.
- [23] Tidwell J H, Webster C D, Coyle S D. Effects of dietary protein level on second year growth and water quality for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) raised in ponds[J]. *Aquaculture*, 1996, 145(1-4): 213-223.
- [24] 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 on the growth of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Acta Zoonutrimenta Sinica*, 2000, 12(2): 48-52 (in Chinese).
- [25] Cyrino J E P, Portz L, Martino R C. Protein and energy retention by juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Scientia Agricola*, 2000, 57(4): 609-616.
- [26] Portz L, Cyrino J E P, 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(4): 247-254.
- [27] 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(8): 1270-1280.
- Chen N S, Xiao W W, Liang Q L, *et al.* Effects of dietary lipid to protein ratios on growth performance, body composition and non-specific immunity of largemouth bass [J]. *Journal of World Aquaculture Society*, 2012, 43(8): 1270-1280.

- bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(8): 1270-1280 (in Chinese).
- [28] Guo J L, Zhou Y L, Zhao H, *et al.* Effect of dietary lipid level on growth, lipid metabolism and oxidative status of largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture*, 2019, 506: 394-400.
- [29] Li X Y, Zheng S X, Ma X K, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on the growth performance, feed utilization, and liver histology of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Amino Acids*, 2020, 52(6): 1043-1061.
- [30] Cai Z N, Qian X Q, Xie S Q. Optimal dietary protein concentrations for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) of different sizes (10–500 g)[J]. *Aquaculture International*, 2020, 28(2): 831-840.
- [31] 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): 1-10.
- [32] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2018 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- Bureau of Fisheries and Fishery Administration in Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2018 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018 (in Chinese).
- [33] Hua K, Cobcroft J M, Cole A, *et al.* The future of aquatic protein: Implications for protein sources in aquaculture diets[J]. *One Earth*, 2019, 1(3): 316-329.
- [34] Gatlin III 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(6): 551-579.
- [35] Kaushik S J, Seiliez I. Protein and amino acid nutrition and metabolism in fish: current knowledge and future needs[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(3): 322-332.
- [36] Han D, Shan X J, Zhang W B, *et al.* A revisit to fishmeal usage and associated consequences in Chinese aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(2): 493-507.
- [37] 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(4): 454-463.
- [38] Wang Y, Kong L J, Li C, *et al.* The potential of land animal protein ingredients to replace fish meal in diets for cuneate drum, *Nibea miichthioides*, is affected by dietary protein level[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 16(1): 37-43.
- [39] Ren X, Wang Y, Chen J M, *et al.* Replacement of fishmeal with a blend of poultry byproduct meal and soybean meal in diets for largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2018, 49(1): 155-164.
- [40] Ren X, Huang D, Wu Y B, *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): 1-10.
- [41] Wu Y B, Ma H J, Wang X J, *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(3): 691-699.
- [42] Wu Y B, 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(4): 977-985.
- [43] Cui Z H, Zhang J Y, Ren X, *et al.* Replacing dietary fish meal improves ecosystem services of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) farming[J]. *Aquaculture*, 2022, 550(737830): 1-7.
- [44] Wang L, Cui Z H, 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): 1-7.
- [45] Li S L, Ding G T, 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(6): 1431-1439.
- [46] He M, Yu Y F, Li X Q, *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(10): 4302-4314.
- [47] Liu Y L, Lu Q S, Xi L W, *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): 1-13.
- [48] Li S L, Dai M, Qiu H J, *et al.* Effects of fishmeal replacement with composite mixture of shrimp hydrolysate and plant proteins on growth performance, feed utilization, and target of rapamycin pathway in largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture*, 2021, 533(736185): 1-8.
- [49] Li X Y, Zheng S X, Ma X K, *et al.* Use of alternative protein sources for fishmeal replacement in the diet of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Part I: effects of poultry by-product meal and soybean meal on growth, feed utilization, and health[J]. *Amino Acids*, 2021, 53(1): 33-47.
- [50] Li X Y, Zheng S X, Cheng K M, *et al.* Use of alternative protein sources for fishmeal replacement in the diet of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Part II: effects of supplementation with methionine or taurine on growth, feed utilization, and health[J]. *Amino Acids*, 2021, 53(1): 49-62.
- [51] Liu X, Chi S Y, 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(5): 1569-1577.
- [52] Xu X Y, Yang H, Zhang C Y, *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): 1-11.
- [53] Yang H, Bian Y H, Huang L 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): 1-10.
- [54] Zhu S J, Gao W H, Wen Z Y, *et al.* Partial substitution of fish meal by *Clostridium autoethanogenum* protein in the diets of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 22(100938): 1-11.
- [55] McLean E, Alfrey K B, Gatlin III D M, *et al.* Responses of largemouth bass (*Micropterus salmoides*, Lacépède, 1802) to fishmeal-, and fish oil-free diets[J]. *Aquaculture Research*, 2022, 53(8): 3036-3047.
- [56] Duan Q Y, Mai K S, Zhong H Y, *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(S1): 46-52.
- [57] 中华人民共和国农业部. 大黄鱼配合饲料: SC/T 2012—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002. Ministry of Agriculture of the PRC. Formula feed for large yellow croaker: SC/T 2012—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002 (in Chinese).
- [58] Mai K S, Zhang C X, Ai Q H, *et al.* Dietary phosphorus requirement of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R[J]. *Aquaculture*, 2006, 251(2-4): 346-353.
- [59] Mai K S, Wan J L, Ai Q H, *et al.* Dietary methionine requirement of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R[J]. *Aquaculture*, 2006, 253(1-4): 564-572.
- [60] Li J M, Xu W X, Lai W C, *et al.* Effect of dietary methionine on growth performance, lipid metabolism and antioxidant capacity of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fed with high lipid diets[J]. *Aquaculture*, 2021, 536(736388): 1-9.
- [61] Ai Q H, Mai K S, Tan B P, *et al.* Effects of dietary vitamin C on survival, growth, and immunity of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*[J]. *Aquaculture*, 2006, 261(1): 327-336.
- [62] Wei Z H, Deng K Y, Zhang W B, *et al.* Interactions of dietary vitamin C and proline on growth performance, anti-oxidative capacity and muscle quality of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2020, 528(735558): 1-14.
- [63] Zhang C X, Ai Q H, Mai K S, *et al.* Dietary lysine requirement of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R.[J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1-4): 123-127.
- [64] Ai Q H, Xu H G, Mai K S, *et al.* Effects of dietary supplementation of *Bacillus subtilis* and fructooligosaccharide on growth performance, survival, non-specific immune response and disease resistance of juvenile large yellow croaker, *Larimichthys crocea*[J]. *Aquacul-*

- ture, 2011, 317(1-4): 155-161.
- [65] 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*, 2013, 37(2): 281-289 (in Chinese).
- [66] Wang J, Ai Q H, Mai K S, *et al.* Dietary chromium polynicotinate enhanced growth performance, feed utilization, and resistance to *Cryptocaryon irritans* in juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Aquaculture*, 2014, 432: 321-326.
- [67] Yi X W, Xu W, Zhou H H, *et al.* Effects of dietary astaxanthin and xanthophylls on the growth and skin pigmentation of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2014, 433: 377-383.
- [68] Li M, Wu W J, Zhou P P, *et al.* Comparison effect of dietary astaxanthin and *Haematococcus pluvialis* on growth performance, antioxidant status and immune response of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea*[J]. *Aquaculture*, 2014, 434: 227-232.
- [69] Yi X W, 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.
- [70] Xing S J, Sun R J, Pan X Y, *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(2): 297-307.
- [71] Zhou P P, Wang M Q, Xie F J, *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.
- [72] Li S L, Yin J, Zhang H T, *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(3): 995-1005.
- [73] Zhang H L, Sun R J, Xu W, *et al.* Dietary manganese requirement of juvenile large yellow croaker *Larimichthys crocea* (Richardson, 1846)[J]. *Aquaculture*, 2016, 450: 74-79.
- [74] Wei Z H, Ma J, Pan X Y, *et al.* Dietary hydroxyproline improves the growth and muscle quality of large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Aquaculture*, 2016, 464: 497-504.
- [75] Zhang H L, Yi L N, Sun R J, *et al.* Effects of dietary citric acid on growth performance, mineral status and intestinal digestive enzyme activities of large yellow croaker *Larimichthys crocea* (Richardson, 1846) fed high plant protein diets[J]. *Aquaculture*, 2016, 453: 147-153.
- [76] Du J L, Xu H L, Li S L, *et al.* Effects of dietary chenodeoxycholic acid on growth performance, body composition and related gene expression in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fed diets with high replacement of fish oil with soybean oil[J]. *Aquaculture*, 2017, 479: 584-590.
- [77] Ding T, Xu N, Liu Y T, *et al.* Effect of dietary bile acid (BA) on the growth performance, body composition, antioxidant responses and expression of lipid metabolism-related genes of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fed high-lipid diets[J]. *Aquaculture*, 2020, 518(734768): 1-8.
- [78] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 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. Formula feed for yellow croaker (*Larimichthys crocea* Richardson): GB/T 36206—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese).
- [79] 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. 良好农业规范 第 23 部分: 大黄鱼网箱养殖控制点与符合性规范: GB/T 20014.23—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Good agricultural practice-Part 23: large yellow croaker cage culture controls points and compliance criteria: GB/T 20014.23—2008 [S].

- Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [80] Chen Z M, Yu A L, 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.
- [81] 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*, 2024, 580(740293): 1-8.
- [82] Ai Q H, Mai K S, Tan B P, *et al.* Replacement of fish meal by meat and bone meal in diets for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*[J]. *Aquaculture*, 2006, 260(1-4): 255-263.
- [83] Zhang L, Mai K S, Ai Q H, *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(1): 83-89.
- [84] Li J, Zhang L, Mai K S, *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(S2): 278-283.
- [85] Yi X W, 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 antioxidative capacity[J]. *Aquaculture*, 2015, 441: 45-50.
- [86] Wang P, Zhou Q C, 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(3): 748-757.
- [87] Wei Y T, Shen H H, Xu W Q, *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): 1-14.
- [88] Tang B J, Zheng H F, Wang S J, *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(4): 255-266.
- [89] Wang X X, Luo H J, Zheng Y Z, *et al.* Effects of poultry by-product meal replacing fish meal on growth performance, feed utilization, intestinal morphology and microbiota communities in juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 30(101547): 1-11.
- [90] Wang P, Zhu J Q, 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.
- [91] Fan X J, Yin H, Chai R Y, *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): 1-11.
- [92] Chen Z M, Ibrahim U B, Yu A L, *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.
- [93] 于安澜, 王力, 陈子末, 等. 角蛋白酶 DP-100 和 γ 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 feather meal as a fish meal substitute in large yellow croaker diet[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(5): 630-642 (in Chinese).
- [94] 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(1-4): 136-140.
- [95] Overturf K, Barrows F T, Hardy R W. Effect and interaction of rainbow trout strain (*Oncorhynchus mykiss*) and diet type on growth and nutrient retention[J]. *Aquaculture Research*, 2013, 44(4): 604-611.
- [96] 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 protein-based diets[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, 25(2): 319-332.
- [97] 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.
- [98] Huntingford F A, Metcalfe N B, Thorpe J E, *et al.*

- Social dominance and body size in Atlantic salmon parr, *Salmo solar* L.[J]. *Journal of Fish Biology*, 1990, 36(6): 877-881.
- [99] Jobling M, Baardvik B M. The influence of environmental manipulations on inter- and intra-individual variation in food acquisition and growth performance of Arctic charr, *Salvelinus Alpinus*[J]. *Journal of Fish Biology*, 1994, 44(6): 1069-1087.
- [100] Wang Y, Cui Y B, Yang Y X, *et al.* Compensatory growth in hybrid tilapia, *Oreochromis mossambicus*×*O. niloticus*, reared in seawater[J]. *Aquaculture*, 2000, 189(1-2): 101-108.
- [101] Wang Y, Li K, Han H, *et al.* Potential of using a blend of rendered animal protein ingredients to replace fish meal in practical diets for malabar grouper (*Epinephelus malabaricus*)[J]. *Aquaculture*, 2008, 281(1-4): 113-117.
- [102] Li K, Wang Y, Zheng Z X, *et al.* Replacing fish meal with rendered animal protein ingredients in diets for malabar grouper, *Epinephelus malabaricus*, reared in net pens[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2009, 40(1): 67-75.
- [103] Chai X J, Ji W X, 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(6): 928-935.
- [104] Wang F Y, Han H, Wang Y, *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.
- [105] Ma X Z, Wang F, Han H, *et al.* Replacement of dietary fish meal with poultry by-product meal and soybean meal for golden pompano, *Trachinotus ovatus*, reared in net pens[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2014, 45(6): 662-671.
- [106] Zhang Y Q, Wu Y B, Jiang D L, *et al.* Gamma-irradiated soybean meal replaced more fish meal in the diets of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2014, 197: 155-163.
- [107] Wang Y, Wang F, Ji W X, *et al.* Optimizing dietary protein sources for Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) with an emphasis on using poultry by-product meal to substitute fish meal[J]. *Aquaculture Research*, 2015, 46(4): 874-883.
- [108] Wu Y B, Wang Y, Ren G, *et al.* Improvement of fish meal replacements by soybean meal and soy protein concentrate in golden pompano diet through γ -ray irradiation[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(4): 873-880.
- [109] Wu Y B, Han H, Qin J G, *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(2): 214-222.
- [110] Wang Y, Ma X Z, Wang F, *et al.* Supplementations of poultry by-product meal and selenium yeast increase fish meal replacement by soybean meal in golden pompano (*Trachinotus ovatus*) diet[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(4): 1904-1914.
- [111] Ren X, Zhu M, Wu Y B, *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(2): 518-527.
- [112] Ren X, Zhu M, Wu Y B, *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(7): 3350-3359.
- [113] Liu Y, Lei M T, 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): 1-8.
- [114] 张静雅, 任幸, 李伟业, 等. 利用棉籽浓缩蛋白替代条纹锯鲷饲料鱼粉的潜力 [J]. *水产学报*, 2020, 44(11): 1873-1882.
- Zhang J Y, Ren X, Li W Y, *et al.* Potential of replacing fish meal with cottonseed protein concentrate in black sea bass (*Centropristis striata*) diet[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(11): 1873-1882 (in Chinese).
- [115] 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(1): 59-68.
- [116] Wang Y, Jiang R L, Ji W X, *et al.* The effect of dietary protein level on the apparent digestibility coefficient of two selected feed ingredients for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L.[J]. *Aquaculture Research*, 2011, 42(8): 1170-1177.

- [117] Wang Y, Guo J L, Bureau D P, *et al.* Replacement of feeds for cuneate drum (*Nibea miichthioides*)[J]. fish meal by rendered animal protein ingredients in *Aquaculture*, 2006, 252(2-4): 476-483.

Paradigm shift of fish nutrition and feed: the necessity revealed by the application of formulated feed in *Micropterus salmoides* and *Larimichthys crocea* farming

WANG Yan *

(Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: The research on fish nutrition and feed started in 1950s, and the paradigm in this field was established based on that of researches targeting human beings and terrestrial animals. In the past seven decades, based on the paradigm, researches on fish nutrition and feed generated a great amount of valuable data, which promoted the fast development of technology, production and industry of aqua-feed. Challenges of natural resource depletion and environmental pollution to aquaculture industry has been growing with the worldwide expansion of aquaculture scale, and farming practices always raise more and higher demands or standards on aqua-feed. It is widely noted that the formulated feed designed on basis of the research on nutrition and feed for some carnivorous fish species cannot be used in commercial fish farming with success. The fact reveals that results of fish nutrition and feed research conducted following the current paradigm cannot well meet the demand of modern finfish aquaculture. In this paper, the author reviews results of the researches about nutrient requirement and dietary fish meal replacement for *Micropterus salmoides* and *Larimichthys crocea*, two carnivorous fish species with commercial importance in inland finfish aquaculture and marine finfish aquaculture in both the world and China. The application of formulated feed in commercial farming of *M. salmoides* and *L. crocea* is full of twists and turns, and these fishes had to be fed with raw fish diet for a long period due to the formulated feed did not provide fast growth displayed by the fish fed with raw fish diet. At present, it is known the poor growth of *M. salmoides* and *L. crocea* fed with the formulated feed was attributed to the obviously underestimated dietary protein levels. Earlier studies reported that the optimal dietary protein level was 400-440 g/kg for *M. salmoides*, and 450-470 g/kg for *L. crocea*. Latter studies reassessed dietary protein requirements of these fishes, and revealed the optimal protein levels for *M. salmoides* and *L. crocea* are 480-510 g/kg and 490-520 g/kg, respectively, which are much higher than those reported in the earlier studies. Growth of *M. salmoides* and *L. crocea* fed with the formulated feed containing the optimal protein content are comparable to that of the fishes fed with raw fish diet. The story of formulated feed application in *M. salmoides* and *L. crocea* farming reveal the necessity of paradigm shift of fish nutrition and feed. The author indicates that the disadvantages in the currently used paradigm include the following: ① The paradigm emphasizes the role of food in regulating fish growth, but ignores the roles of fish genetics and environmental conditions other than food in determining growth and feed intake of fish. ② The paradigm emphasizes that individual growth of fish reflects its nutrient requirements and demand on feed quality, but ignores that individual growth of fish cannot completely represent yield and economic income of commercial fish farming. ③ The paradigm emphasizes the importance of fish growth and feed utilization efficiency as indicators in evaluating benefits of fish farming, but ignores that the negative impacts of fed aquaculture on natural resources and environment are the bottle-neck limiting sustainability of aquaculture industry. ④ The paradigm ignores the effect of basal diet formula in evaluating nutrient requirements and feed quality, and the use of unreasonable basal diet in some research results in erroneous

or senseless conclusion. To diminish the aforementioned disadvantages, the author proposes to improve the concept, theory and method of the currently used paradigm. ① Emphasizing the importance of fish genetics and the environmental conditions except food in determining growth and feed intake of fish. Emphasizing that growth potential of fish determine its nutrient requirement, while emphasizing that nutrients from diets can support and modulate fish growth. ② Emphasizing the interaction between different dietary nutrients, and emphasizing that different feed ingredients play their own role in establishing nutrient balance of diet formula. ③ Emphasizing the importance of genetics and population structure of the test fish used in feeding trials. Emphasizing the magnitude of difference in growth between individual fish fed with different diets is an indicator for assessing nutrient requirement and feed quality. Emphasizing the impacts of diet formula on natural resources and environment, which are factors limiting sustainability of aquaculture industry. After the shift or improvement, the paradigm for fish nutrition and feed research will be better in accord with the situation and demand of modern aquaculture farming practices. The results of nutrition and feed research conducted following the shifted paradigm will be more reliable and accurate for diet formula design of aqua-feed, and the formulated feed will be more successful in application in commercial aquaculture farming.

Key words: *Micropterus salmoides*; *Larimichthys crocea*; formulated feed; paradigm; dietary protein requirement; dietary fish meal replacement; growth

Corresponding author: WANG Yan. E-mail: ywang@zju.deu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2020YFD0900803); Bureau of Science and Technology of Zhoushan (2019C81054); National Natural Science Foundation of China (31772868); Science Technology Department of Zhejiang Province (2018C02033)