

海水高密度养殖系统流场营造及与鱼类相互影响的研究与展望

任效忠^{1,2}, 周寅鑫^{1,2}, 车宗龙², 刘海波²,
胡伟³, 姜恒志⁴

(1.大连海洋大学 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023; 2.设施渔业教育部重点实验室(大连海洋大学), 辽宁 大连 116023; 3.大连海洋大学 后勤管理处, 辽宁 大连 116023; 4.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘 要:陆基工厂化循环水养殖是海水高密度养殖系统的典型模式之一,它是一种综合运用了生物学、信息学、工程学、流体力学等多门学科知识的新兴水产养殖模式。与传统的水产养殖模式相比,它突破了气候、水文等外界条件的限制,且占地面积小、水资源利用率高、对环境几乎无污染,是实现渔业可持续发展的重要途径。然而,目前国内对于陆基工厂化循环水养殖的研究主要集中在鱼苗的选育、水处理技术、养殖设备的改进等方面,对于养殖池流场特性及其与鱼类相互影响的研究则相对较少。本文阐述了国内外陆基工厂化循环水养殖中养殖池流场的研究方法、流场与鱼类的相互影响关系,对目前养殖池流场研究的不足进行了总结,可为以后的养殖系统流场的营造和养殖环境的优化提供借鉴,实现循环水养殖动物福利的改善和高效清洁的生产。

关键词:海水高密度养殖; 流场; 鱼类

中图分类号:S95

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2023)03-0483-10

A review: the construction of flow field and its interaction with fish in high-density seawater aquaculture system

REN Xiao-zhong^{1,2}, ZHOU Yin-xin^{1,2}, CHE Zong-long², LIU Hai-bo²,
HU Wei³, JIANG Heng-zhi⁴

(1.College of Marine Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2.Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture (Dalian Ocean University) Ministry of Education, Dalian 116023, China; 3.Logistics Management Office, Dalian 116023, China; 4.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: One of the typical model of high-density seawater aquaculture system is recirculating aquaculture system. It is an emerging aquaculture mode which synthesizes multidisciplinary knowledge, such as biology, informatics, engineering, fluid mechanics and so on. Compared with the traditional aquaculture mode, it breaks through the limitations of external conditions including climate and hydrology. And it covers a smaller area

收稿日期:2022-06-16, 修订日期:2022-12-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31872609);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0402);广东省重点领域研发计划(2019B020215001)

作者简介:任效忠(1981—),男,山西孝义人,博士,教授,主要研究方向为工程水动力学及工程设计, E-mail: renxiaozhong@dlou.edu.cn

通讯作者:姜恒志(1979—),男,山东昌邑人,正高级工程师,主要从事近海水动力泥沙及水环境数值模拟, E-mail: 120982518@qq.com

with higher utilization rate of water resources and discharges almost no pollution to the environment, which make it become an important way to realize the sustainable development of fishery. However, in our country, there are currently so many researches on the breeding of fish fry, water treatment technology and the improvement of breeding equipment, ignoring the research on the flow field characteristics of culture pond and their interaction with fish. This paper reviews the development status of recirculating aquaculture system at home and abroad, the research method of aquaculture tank flow field, and the interaction between flow field and fish, and summarizes the shortcomings of the current researches on aquaculture tank flow field, which can provide reference for the improvement of aquaculture facilities and the optimization of aquaculture environment in the future, so as to realize the efficient and clean production of recirculating aquaculture system.

Key words: high-density seawater aquaculture; flow field; fish

中国的水产产量常年居于世界首位, 约占世界总产量的 70%^[1]。但中国还只能称作水产养殖大国, 而算不上水产养殖强国。目前, 我国还是以池塘养殖、海上筏式养殖、网箱养殖等较为传统落后的水产养殖模式为主, 不仅生产效率低下、病害频发, 还容易造成环境污染和生态破坏^[2]。陆基工厂化循环水养殖 (recirculating aquaculture system, RAS) 是海水高密度养殖系统的典型模式之一, 其工艺流程如图 1 所示。RAS 是一种新兴的水产养殖模式, 集中使用多种

先进的设施设备, 综合运用化学、机械、电子等各种科学技术, 创造适合养殖生物的生活环境, 进行科学管理, 从而摆脱气候、土地、水等外界条件的限制^[3]。RAS 以其用水量少、占地面积小、高密度、高产出、生产可控等特点, 有望成为 21 世纪水产养殖的主导模式之一, 以实现渔业的可持续和绿色发展^[4]。但是由于国内循环水养殖起步较晚, 因此存在生产成本较高、养殖和水处理系统工艺不完善、养殖环境恶化以及病原体对鱼类的危害等问题^[5]。

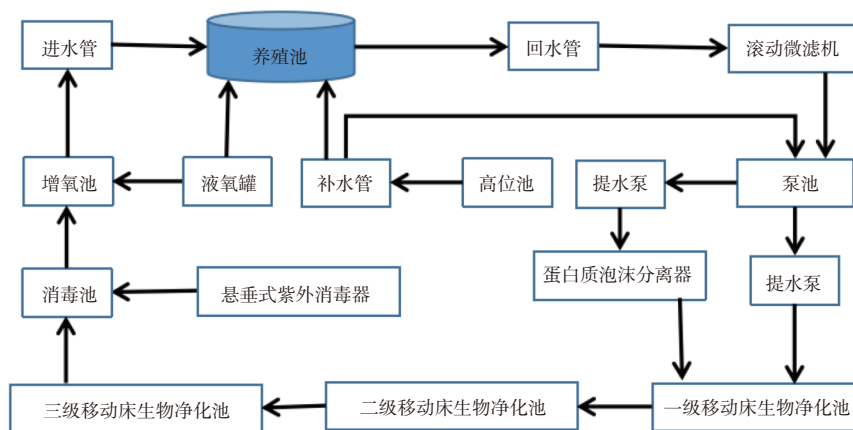


图 1 陆基工厂化循环水养殖的工艺流程

Fig. 1 Process flow of recirculating aquaculture system

目前, 国内外的学者和研究机构主要在鱼苗的选育、水处理技术、养殖设备的改进等方面进行了广泛的研究, 对于养殖池流场营造及其与鱼类相互影响的研究相对较少^[6]。养殖池的流场特性能够对鱼类的生长、繁殖、摄食等方面产生重要影响, 引起大多数鱼类产生趋流性。此外, 养殖池的流场对于养殖池内固体颗粒物残饵、粪便等废弃物的汇聚与排除具有非常重要的影

响^[7]。同时, 鱼类的游泳行为也会对养殖池内的流场特性产生显著影响^[6]。因此, 研究养殖池的流场特性及其与鱼类的耦合作用是循环水养殖的一项重要内容。本文阐述了陆基工厂化循环水养殖系统的流场营造及与鱼类相互影响关系, 可为系统养殖设施的改进和养殖环境的优化提供借鉴, 实现循环水养殖动物福利的改善和高效清洁的生产。

1 国内外陆基工厂化循环水养殖发展现状

20世纪60年代,国外开始了早期的陆基工厂化循环水养殖。经过数十年的发展,一些发达国家正在逐步建立成熟且完善的循环水养殖体系,获得了巨大的经济效益和环境效益^[8]。比如,日本的循环水养殖系统结构合理、集成化程度高,实现了日本鳗鲡的高密度养殖,而且水资源利用率高、生产成本低、经济效益高^[9]。欧洲的循环水养殖产业较为发达,已经实现从鱼苗孵化到成鱼的一体化循环水养殖模式^[10]。法国已实现大菱鲆苗种孵化和成鱼养殖全部在封闭循环水养殖车间进行^[11]。美国保持着较为先进的工厂化循环水养殖技术,包括集约化养殖生物的营养生理、防病技术、水处理技术等^[12]。

我国的工厂化循环水养殖始于20世纪80年代,发展至今已将近40年,其发展历程大体可以分为四个阶段,即开拓阶段(1985—1998年)、探索阶段(1999—2006年)、整合阶段(2007—2011年)和快速发展阶段(2012年至今)^[13]。目前,我国的工厂化循环水养殖研究已取得较多成果,但科技成果产业化应用较少,这主要是因为多数企业难以承受设施转型更新和生产的高额成本。近年来,政府积极引导科研机构和企业,有效整合产学研力量,促进研究成果的转化应用。2020年,全国海水工厂化养殖水体达到约3941万m³,全国淡水工厂化养殖水体达到约5803万m³。然而,相较于国外完善的工厂化循环水养殖体系,我国的工厂化循环水养殖尚存在诸多不足,尤其是养殖系统流场与鱼类耦合作用的研究成果极少。因此,我国陆基工厂化循环水养殖的科研工作任重道远,系统流场特性营造与鱼类响应的研究也亟待突破。

2 养殖系统流场特性研究方法

2.1 物理模型试验法

目前,物理模型试验法和数值模拟法是研究养殖池内流场特性的两种常用方法。在研究中,往往同时使用这两种方法,实现物理模型和数值模型的优势互补,从而更好、更准确地开展系统流场研究及鱼类响应的研究,发现相互间深层次

的作用机理。

物理模型试验法是以建立物理模型试验系统为基础,运用计算机、超声波、激光等技术获取流场数据并对其进行分析和处理的研究方法。目前,用来跟踪记录流场分布变化情况的测量仪器以粒子图像流速仪(particle image velocimetry, PIV)、声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)应用较多并取得了一定的研究成果。

ADV基于声学多普勒效应,采用遥距测量方式,利用超声波对距离探头一定距离的采样点进行测量,是实验室最常用的流速测量仪器。ADV具有操作简单、无须校正、可用于三维速度测量等优点,但是由于其探头深入水中对流速产生影响,影响测量数据精度,而且在距离水面相对较近的位置得不到测量数据^[14-15]。

PIV通过频繁摄像来记录流场中示踪粒子的位置,并对其分析获得流速。与ADV等接触式的流速测量仪器相比,PIV综合了单点测量技术和显示测量技术的优点,既具备单点测量技术的精度和分辨率,又能获得平面流场显示的整体结构和瞬态图像,实现了非接触式无干扰瞬时全流场测量^[16]。研究表明,利用PIV对水体进行多点测量,可以全面且精确地反映流场的流速分布,以便于改善流场条件^[17-18]。

ADV和PIV均是实验室常用的流速测量仪器,各有其优点和局限性,虽然其工作原理不同,但对流场的测量效果相差不大。例如,有学者同时采用ADV和PIV测量池式鱼道内多个位置的流速,比较其测量的参数值,并评估两种技术在时间和空间分辨率上的差异,结果表明,两种技术的监测数据具有极高的一致性^[19]。因此,在实际使用过程中应根据实际情况选择合适的测量仪器。

2.2 CFD数值模拟法

应用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)可以运用计算机对养殖池内的水动力特性进行数学建模并进行模拟计算,从而获得较好的结构参数和运行参数,是研究养殖池内流场特性的一种经济高效的研究手段^[20-21]。

近年来,CFD技术被广泛应用于水产养殖的

单相流、多相流流体力学研究中,主要为液相、固-液两相和固-液-气三相的数值模拟研究。目前,CFD 在养殖池流场特性方面的研究主要集中在养殖池流态优化和集排污性能的提升上^[22]。任效忠等^[23]采用计算流体力学仿真技术研究双进水管系统对单通道矩形圆弧角养殖池水动力特性的影响。史宪莹等^[24]利用 CFD 技术开展长宽比参数对圆弧角养殖池水动力特性影响的数值研究。Liu 等^[25]对八角养殖池的流体动力学进行 CFD 数值模拟,并评估了八角养殖池的流场特性和集排污性能。此外,还有学者^[26]研究了三维仿生鱼黏性流中游泳的数值模拟,利用 CFD 软件包,获得了黏性流体中三维仿生鱼的游泳和控制结果,并深入分析三维仿生鱼的尾流结构及其作用。

相比物理模型试验,CFD 数值模拟方法具有参数易于调整、能进行远程操控等特点,而且其实验周期更短、成本更低,在养殖池流场的研究

方面具有独特的优势。但是,CFD 技术也具有不确定性:一方面,CFD 数值模型基于数值理论假设和简化,很难做到和真实实验的试验条件、边界条件等完全一致,模拟结果也存在一定的误差;另一方面,CFD 技术本身具有不确定性,包括模型型式、模型参数、模型数值离散等的不确定性^[27]。因此,在运用 CFD 技术时,设置的参数和边界条件必须尽可能地符合实际需求,并选择合适的网格划分方式,以建立准确的数值模型,必要时进行程序的二次开发,并与真实实验结果相互验证。

3 养殖池中鱼类对流场的响应

3.1 鱼类在流场中的空间分布特征

近年来,陆基工厂化循环水养殖快速发展,高密度的养殖模式使得水流对养殖鱼类的影响尤其突出,研究养殖池流场对鱼类的影响(表 1)也逐渐为水产工作者所关注。

表 1 养殖池流场对鱼类的影响
Tab.1 Influence of flow field in aquaculture tank on fish

养殖环境	测量方法	鱼的种类	平均体长/cm	养殖池流场对鱼类的影响效果	文献
矩形养殖池	PTV	斑马鱼	2.5±0.10	鱼类分布不均匀,聚集于养殖池前30 cm的高流速区域	[29]
圆形养殖池				鱼类分布均匀,且分布模式与流速梯度相匹配	
圆形养殖池	生理指标检测	虹鳟	—	1.0 Bl/s流速对虹鳟的特定生长率和饲料转化率产生了负面影响	[30]
矩形养殖池	生理指标检测	加利福尼亚大比目鱼	5.40	1.0 Bl/s流速时生长速率最大,1.5 Bl/s流速则抑制生长	[32]
圆形养殖池	生理指标检测	大菱鲆	20.10±1.12	0.9 Bl/s流速下特定生长率较高;1.8 Bl/s流速下,幼鱼受到胁迫,生长速度降低	[33]
室内循环水养殖系统	流速水位计	杂交鲟	21.00±0.30	流速为0.0~0.3 m/s时,幼鱼平均趋流率、摆尾频率和耗氧率均随着流速的增加而增大	[37]

鱼类在水体中的空间分布受到多种复杂因素的共同影响,而在陆基循环水养殖系统中,流速是影响鱼类空间分布的主要因素之一。研究发现,鱼类的空间分布在低水体交换率的静态水体中(如湖泊、池塘)受水流因素的影响较小,而在高水体交换率的动态水体中(如河流和溪流)则受水流的影响较大^[28]。因此,流场营造的合理性是陆基循环水系统构建中必须要考虑的因素,它对鱼类在养殖池内的空间分布产生了极大影

响。为了定量评价鱼类在养殖池中的分布状况,有学者定义了鱼类分布均匀系数(FCU)来评估鱼类在养殖池中分布的均匀性,并通过研究发现圆形养殖池流场均匀性较好,鱼类分布更均匀^[29]。

陆基工厂化循环水养殖是一种高密度养殖模式,良好的养殖环境是提高养殖效率的关键要素。因此,在构建循环水养殖系统时,应当根据不同养殖鱼类的天然环境习性、流速偏好来营造一个较均匀的流场环境,这能有效提升养殖池

的空间利用率,提升鱼类养殖福利、促进健康生长。

3.2 鱼类对流场的行为响应特征

在陆基循环水养殖系统中,鱼类不必担忧天敌袭击,也不用进行洄游、索饵行为,流场对鱼类的生长、摄食、游泳等行为起主导作用。适宜的流场条件能通过调节神经激素来影响鱼类的食欲进而影响摄食量,在一定范围内流速与鱼类的生长呈正相关,对鱼类的生长、摄食产生积极影响,超过了这个范围则会阻碍鱼类的生长^[30-31]。例如,加利福尼亚大比目鱼幼鱼在 0.5 Bl/s 和 1.0 Bl/s 流速下饵料利用率均高于 1.5 Bl/s 流速,生长更快,并且在流速为 1.0 Bl/s 时达到最大的生长速率^[32];大菱鲆幼鱼在流速为 0.9 Bl/s 中等条件下摄食量增加,生长率较高,而在流速为 1.8 Bl/s 时,幼鱼受到胁迫,生长速度降低^[33]。此外,水中的氨、氮浓度也影响鱼类的生长、摄食行为。有研究表明,氨、氮浓度过高会对大菱鲆[平均体重为(19.1±4.1) g]的生长产生不利影响,当非离子氨浓度达到 170 μg/L 时,大菱鲆死亡^[34]。因此,在循环水养殖中可以适当提高流速和水循环率,以降低水中的氨、氮浓度^[35]。

流场能够影响鱼类的摆尾频率、耗氧率、趋流率等行为。大量研究表明,摆尾频率与水流速度呈线性关系,摆尾频率与游泳速度也呈线性关系^[36]。此外,在不同的流场条件下,鱼类的运动强度和游泳状态不同。在静水条件下,鱼类为随机游泳状态,较高的自主性游泳运动会使鱼类消耗较多的能量;随着流速的升高,鱼类开始表现出趋流性,且流速越高趋流率越高,但是过高的流速会导致鱼类频繁地摆尾以保持稳定,呼吸的耗氧率大幅提高,最终导致鱼类疲劳受伤,甚至缺氧死亡^[37-38]。

总之,在构建陆基循环水系统的流场时,营造一个适宜且均匀的流速环境有助于降低污染物浓度,促进鱼类生长。同时,还可以通过调节流速对鱼类进行游泳训练,一方面可以实现对鱼类行为的控制和预测,便于管理;另一方面可以改善肉质,减少脂肪堆积。

3.3 养殖池中的鱼类健康

在循环水养殖中,鱼类的健康主要受养殖池

集排污性能和病毒细菌的影响。当水体中的污染物浓度过高时,鱼类受到毒害,导致行为异常、生长畸形或死亡^[35]。同时,水质太差也容易滋生病菌,导致大面积的鱼类生病甚至死亡。提高流速、增加水循环率能促进排污,有效减少养殖水体中有害物质的积累速度。而通过臭氧、紫外线等方法进行杀菌消毒可以有效减少病害发生的可能,亦可以有针对性地给鱼类注射疫苗以预防病害。此外,鱼类的攻击性行为也是影响鱼类健康的重要原因^[39]。

大量研究表明,养殖密度过高会影响水质,阻碍鱼类生长,降低鱼体免疫力^[40-42]。例如,在过度拥挤的条件下,虹鳟鱼的免疫相关酶水平如血清溶菌酶、补体和免疫球蛋白 M(IgM)水平显著降低^[43]。养殖密度和生长效率都是影响循环水养殖产量的重要因素,必须寻找两者间的平衡点才能获得更大的经济效益。

众所周知,水流中存在着剪切力和切应力,二者是影响鱼类行为的重要因素。鱼类可以从湍流中获取能量,以降低自身游泳的能量消耗,提高在水中的游动速度和游泳效率^[44]。但过高的紊动强度与剪切力会对鱼类产生损伤乃至死亡^[45]。因此,紊流是构建陆基循环水养殖系统必须考虑的水动力因素,一个均匀且稳定的紊动环境是提高鱼类存活率的重要因素。

3.4 养殖池中的鱼群群体行为

在高密度的循环水养殖系统中,对鱼群的群体行为进行深入研究是非常必要的。Filella^[46]等提出了耦合行为规则与远场水动力相互作用的新模型,研究发现鱼群出现了“集体转向”阶段,并且其中的个体游泳速度更快,但水流的流动增强了行为噪音。因此,要充分理解鱼类的群体行为学,养殖池内的流场是必须要考虑的因素。

鱼类能利用水流经过物理作用或其他鱼类的推进运动所产生的湍流来降低运动消耗,并且涡流提供了一个可用于提高游泳性能的富含能量的环境^[47]。比如,对斜齿鳊鱼群在养殖池中个体的相对位置和尾拍频率实验研究中发现,由于水动力的相互作用,在较大游泳速度范围内,位于尾部位置的斜齿鳊能量消耗较少^[48]。个体鱼在协调的鱼群中一起游泳有一个潜在优势,即可

以让鱼从其相邻鱼类流出的旋涡中获取能量,从而减少运动的成本^[47]。Li 等^[49]开发了一种仿生机器鱼,并测量了机器鱼在单独游泳和成对并排游泳时的速度和功率消耗,研究发现并排游泳可以大大提高速度和效率。这是因为并排游泳的两条鱼的推力尾流会形成 Ka'rma'n 涡街,位于这两条鱼后面的个体可以利用其离散涡的能量和在 Ka'rma'n 涡街上的平均减速速度,从而节

省能量、减少运动成本^[47,50]。

4 鱼类对养殖池流场的影响

4.1 鱼类对养殖池湍流的影响

养殖池的流场特性与鱼类的游泳行为是相互影响的。流场对鱼类的分布有重要影响,同时还调控着鱼类的生长、摄食、繁殖等行为,而鱼类也影响着养殖池的流场特性(表 2)。

表 2 鱼类对养殖池流场的影响
Tab.2 Influence of fish on flow field in the aquaculture tank

养殖池型	测量方法	鱼的种类	平均体长/cm	鱼类对养殖池流场的影响效果	文献
矩形	PIV	大斑马鱼	5.8	鱼在前进或转向时,尾部产生喷射流涡环,引起涡量的变化	[54]
	DPIV	蓝鳃太阳鱼	21.0±1.2	在低速转弯时,背鳍会产生一对离散的反向旋转旋涡	[55]
	PIV	厚唇鲮鱼	12.0	波动游动的鱼在交替的涡旋之间形成后向的锯齿状喷射尾流	[56]
	ADV	大西洋鲑鱼	—	鱼类增强了湍流动能、湍流强度和氧气的湍流运输	[57]
圆形	流量计	红鼓鱼	—	随着饲养密度提升,水体混合加强,死水区减少	[58]
	ADV	鲈鱼	22.0±1.5	鱼的存在导致养殖池中心流速降低,湍流增加,水循环阻力增加	[60]
八角形	ADV	大西洋鲑鱼	—	鱼的存在导致养殖池平均流速降低,湍流增加,影响溶解氧的分布	[61]

鱼类的游泳行为会引起养殖池内湍流的变化。当水在鱼周围流动时,鱼需要进行摆尾运动产生推力以应对水流的阻力并保持身体的平衡。鱼的摆尾运动在尾部会产生涡流,进而影响水体的湍流变化^[47,51]。鱼在进行转弯运动时,养殖池内的湍流变化尤为剧烈。鱼在转弯开始时将身体弯曲成 C 形,通过向后传播弯曲点,身体开始恢复拉直状态并在尾鳍周围产生旋涡,随着旋涡在尾鳍后脱落并被拉长,形成宽而强的射流,使鱼的身体和周围增加的质量产生角动量,最后推力射流向后释放,身体向前移动^[52-56]。

鱼类的游泳行为还会影响养殖池内溶解氧的分布。有学者研究了幼年大西洋鲑鱼对圆形养殖池内湍流的影响,并通过涡流相关法计算了溶解氧的湍流输运后发现,与无鱼工况相比,有鱼工况的紊动强度、动能更高,氧的湍流输运增加^[57]。

此外,鱼的数量也会影响养殖池内流场特性。随着鱼类饲养密度的增加,水体混合时间减少,增强了养殖池的混合和系统的水力性能,这引起颗粒动力学的变化并增加近底部运输,粪

便、食物和其他颗粒可能更快地排出系统,并减少预期死区的发生^[58]。

4.2 鱼类对养殖池流速的影响

鱼类对养殖池流速具有非常显著的影响。相比无鱼的养殖池,有鱼的养殖池内水体混合程度增强、平均流速降低,并且随着养殖密度的增加,这种趋势愈加明显^[57,59]。有研究表明,养殖池流速降低的原因是,鱼类游动引起湍流变化,提高了池内的阻力系数和运动涡流黏度,同时也促进了水体混合^[60]。还有研究发现,与无鱼工况的养殖池相比,当鱼的养殖密度为 35 kg/m³ 时,养殖池水流速度降低 25%,表明鱼的存在很大程度上影响了流态,并推断鱼类游泳运动可能是养殖池内湍流和流场非线性的主要来源^[61]。

在陆基工厂化循环水养殖中,高密度的养殖鱼类明显降低了养殖池的流速,这导致养殖池内的污染物往往因水流驱动力的不足而无法排出,毒化养殖环境,危害鱼类健康。针对这一问题,可以通过提高进水速度、改善进排水结构、优化养殖池池型等来改善养殖池流态,提高水流驱动力,也可以通过增加水循环次数来实现快速清理

污染物。

4.3 鱼类对压力梯度的影响

鱼类的游泳行为会影响养殖系统内压力场的分布。有学者采用CFD研究了养殖鱼类对网箱流场和网箱变形的影响,结果发现鱼类在静水中的圆周运动导致网箱中心出现低压区,引起网箱中心线出现强烈的垂直流^[62]。而在实验室测试和现场测量中也发现,为了实现圆周运动,鱼必须向网箱的中心加速,这种向内定向的力必须由一种向外的力来平衡,这种向外的力将水推出网箱,从而在鱼的旋转运动中心形成一个低压区域^[63]。

鱼类还可以利用其圆周运动产生的低压场来获得能量并提高游泳效率。有学者开展了一种黄貂鱼的大涡模拟,研究发现存在于黄貂鱼前缘的马蹄形涡旋,创造了一个低压区域,增强了快速和缓慢游泳运动的推力^[64]。

此外,鱼类的摆尾运动在其尾迹产生了旋涡,导致水中压力场发生变化,这是鱼类能在水中游动的重要原因。鱼在游泳运动时,水作用在鱼体表面的正压即为推力,作用在鱼体表面的负压即为阻力,两者的合力决定了鱼类的前进方向^[65]。因此,研究鱼类与养殖池中压力的耦合作用有助于我们了解鱼类的推进机制,同时对鱼体周身进行受力分析可以预测鱼类的行为轨迹。

5 存在的问题

5.1 关于陆基工厂化循环水养殖系统的流场特性研究不足

循环水养殖系统的养殖池流场特性不仅直接影响养殖池内水体流态、溶解氧分布、集排污性能、系统能耗等,还影响鱼类的生长、摄食、繁殖等行为。但是,目前我国循环水养殖的研究方向主要集中在鱼苗选育、水处理技术、养殖设备的改进等方面,而对于养殖池流场特性的研究尚属刚刚起步。因此,陆基循环水养殖系统构建时,往往缺乏养殖池流场营造的理论指导,导致水体流态不佳、集排污性能不良、溶解氧分布不均、系统能耗过高等,甚至危害养殖鱼类的健康。

5.2 未考虑鱼类的参与对流场的影响

养殖池的流场特性与鱼类的游泳行为是相

互影响的。流场影响鱼类的空间分布、生长、摄食、繁殖等行为,同时鱼类也影响着养殖池的流场特性。但是,当前养殖池内的流场研究以无鱼工况的纯流场优化和提升集排污性能为主。而在实际生产中,养殖鱼类的加入必然引起系统的流场变化,导致湍流强度增强、水体混合变化、平均流速降低等。

5.3 养殖鱼类的行为无法准确预测

鱼类作为活体且具有能动性的生物,其行为轨迹具有随机性,人们很难准确预测鱼的行为轨迹。且不同种类、不同密度的鱼类应对流场的行为呈现差异,这进一步加大了研究鱼类与流场相互影响的难度。因此,无论是进行物理模型试验还是进行数值模拟,都面临重复性差、规律性差和模型构建难度大、精度低的挑战。

6 展望

陆基工厂化循环水养殖是一种现代化的水产养殖模式,能够实现渔业的绿色和可持续发展,是未来水产养殖业发展的必然趋势。流场营造是构建陆基循环水养殖系统的关键环节,研究流场与鱼类的耦合作用对构建科学合理的循环水养殖系统具有重要意义。但是目前关于陆基工厂化循环水养殖系统流场营造及其与鱼类相互影响的研究少之又少,研究面临诸多挑战。针对目前存在的问题,今后的工作建议从以下几方面开展:

(1)研究陆基循环水养殖系统流场营造及与鱼类的耦合作用,涉及流体力学、水产养殖学和鱼类行为学等多门学科,因此培养具有交叉学科知识的人才是非常必要的。

(2)利用先进的技术和设备进行流场营造与鱼类行为响应的研究,创新研究方法与研究手段。近年来,CFD被广泛应用于循环水养殖系统的水动力特性研究,同时各种先进测量仪器的推陈出新大大提高了物理模型试验测量流场参数的精度。新兴的机器学习、数字孪生技术都为研究流场与鱼类的耦合作用提供了新的方法与技术支撑。

(3)鱼类在水中的游泳行为具有自主性,流场与鱼类的耦合作用具有复杂性,物理模型试验

的科学开展和数据分析是CFD数值模型建立的重要基础。在实际研究中,注重物理模型试验和数值模拟相结合,发挥各自优势,互相验证,互为补充。

(4)走“实践→理论→实践”的循环发展路径。在开展研究时注重生产实际,科学问题来源于生产实践,实验室的研究成果及时在生产中进行验证,完善的研究成果积极推广到生产实践中。

参考文献:

- [1] 任效忠,王江竹,张倩,等.方形圆弧角养殖池进水结构对流场影响的试验研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(5): 726-732.
- [2] 顾海涛,李明爽,刘兴国.水产养殖机械发展现状、问题与挑战及发展建议[J]. *中国水产*, 2022 (8): 42-46.
- [3] 张建国.高效设施循环水养殖模式的研究[J]. *农机科技推广*, 2017 (4): 24-25.
- [4] 薛博茹,于林平,张倩,等.进径比对矩形圆弧角养殖池水动力特性影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 444-452.
- [5] 唐茹霞,史策,刘鹰.循环水养殖系统管理运行存在主要问题调查分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(1): 100-106.
- [6] 车宗龙,任效忠,张倩.循环水养殖系统中水动力特性及其与鱼类相互影响研究进展[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(5): 886-898.
- [7] 任效忠,王江竹,薛博茹,等.方形圆弧角海水养殖池排污特性的试验研究[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(5): 790-797.
- [8] MARTINS C I M, EDING E H, VERDEGEM M C J, et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(3): 83-93.
- [9] 蔡雨.日本鳗鲡循环水养殖技术及发展史[J]. *农村·农业·农业(B版)*, 2021 (12): 60-62.
- [10] 王江竹,宛立,任效忠,等.循环水养殖中水动力特性对鱼类影响的研究进展[J]. *水产科学*, 2020, 39(3): 458-464.
- [11] 谢龙.工厂化循环水养殖模式现状分析[J]. *当代水产*, 2019, 44(8): 90-91.
- [12] 朱建新,刘慧,程海华,等.工厂化循环水养殖技术研究与产业化发展[J]. *中国水产*, 2022 (10): 41-49.
- [13] 刘鹰,刘宝良.我国海水工业化养殖面临的机遇和挑战[J]. *渔业现代化*, 2012, 39(6): 1-4,9.
- [14] 姜新.新型声学多普勒流速仪及其应用[J]. *河南水利与南北水北调*, 2017, 45(7): 95-96.
- [15] 严松,吴浩,孙大鹏,等.声学多普勒流速仪在水槽流速测量中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2017, 36(5): 9-13.
- [16] 陈根华,詹斌,王海龙,等.粒子图像测速发展综述[J]. *南昌工程学院学报*, 2019, 38(3): 90-96.
- [17] STERCZYŃSKA M, STACHNIK M, POREDA A, et al. The improvement of flow conditions in a whirlpool with a modified bottom: an experimental study based on particle image velocimetry (PIV)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 289: 110164.
- [18] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.基于粒子图像测速的坡面流动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 115-124.
- [19] QUARESMA A L, FERREIRA R M L, PINHEIRO A N. Comparative analysis of particle image velocimetry and acoustic Doppler velocimetry in relation to a pool-type fishway flow[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2017, 55(4): 582-591.
- [20] 黄铮铮,史宪莹,张倩,等.CFD技术在循环水养殖系统构建中的研究现状与展望[J]. *科学养鱼*, 2021 (5): 3-4.
- [21] 刘海波,任效忠,张倩,等.循环水养殖池内鱼类运动数值模型的建立——以许氏平鲈为例[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(6): 995-1002.
- [22] 任效忠,张倩,姜恒志,等.单通道方形海水养殖池基于流场均匀性的结构优化研究[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(2): 287-293.
- [23] 任效忠,薛博茹,姜恒志,等.双进水管系统对单通道矩形圆弧角养殖池水动力特性影响的数值研究[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(1): 50-56.
- [24] 史宪莹,李猛,姜恒志,等.长宽比参数对圆弧角海水养殖池水动力特性影响的数值研究[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(6): 921-929.
- [25] LIU Y, LIU B L, LEI J L, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(4): 912-920.
- [26] XIN Z Q, WU C J. Numerical simulations and vorticity dynamics of self-propelled swimming of 3D bionic fish[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(2): 272-283.
- [27] 夏侯唐凡,陈江涛,邵志栋,等.随机和认知不确定性框架下的CFD模型确认度量综述[J]. *航空学报*, 2022, 43(8): 174-190.
- [28] MOCHEK A D, PAVLOV D S. Comparative analysis of fish distribution in lentic and lotic ecosystems (review)[J]. *Inland Water Biology*, 2021, 14(2): 196-204.
- [29] DUARTE S, REIG L, MASALÓ I, et al. Influence of tank

- geometry and flow pattern in fish distribution[J]. [Aquacultural Engineering](#), 2011, 44(2): 48-54.
- [30] SKOV P V, ELUND I, PARGANA A M. No evidence for a bioenergetic advantage from forced swimming in rainbow trout under a restrictive feeding regime[J]. [Frontiers in Physiology](#), 2015, 6: 31.
- [31] KULCZYKOWSKA E, VÁZQUEZ F J S. Neurohormonal regulation of feed intake and response to nutrients in fish: aspects of feeding rhythm and stress[J]. [Aquaculture Research](#), 2010, 41(5): 654-667.
- [32] MERINO G E, PIEDRAHITA R H, CONKLIN D E. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles[J]. [Aquaculture](#), 2007, 271(1/2/3/4): 206-215.
- [33] SCHRAM E, VERDEGEM M C J, WIDJAJA R T O B H, et al. Impact of increased flow rate on specific growth rate of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*, Rafinesque 1810)[J]. [Aquaculture](#), 2009, 292(1/2): 46-52.
- [34] FOSS A, IMSLAND A K, ROTH B, et al. Interactive effects of oxygen saturation and ammonia on growth and blood physiology in juvenile turbot[J]. [Aquaculture](#), 2007, 271(1/2/3/4): 244-251.
- [35] DAVIDSON J, SUMMERFELT S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular “Cornell-type” dual-drain tanks[J]. [Aquacultural Engineering](#), 2004, 32(1): 245-271.
- [36] 戴东宸. 玻尔兹曼方程模拟鱼等水生动物游动数学模型及工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [37] 李 丹, 林小涛, 朱志明, 等. 不同流速下杂交鲟幼鱼游泳状态与活动代谢研究[J]. [水生生物学报](#), 2011, 35(4): 578-585.
- [38] PALSTRA A P, PLANAS J V. Fish under exercise[J]. [Fish Physiology and Biochemistry](#), 2011, 37(2): 259-272.
- [39] GRIFFITHS S W, ARMSTRONG J D. Differential responses of kin and nonkin salmon to patterns of water flow: does recirculation influence aggression?[J]. [Animal Behaviour](#), 2000, 59(5): 1019-1023.
- [40] NI M, WEN H S, LI J F, et al. Effects of stocking density on mortality, growth and physiology of juvenile Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*)[J]. [Aquaculture Research](#), 2016, 47(5): 1596-1604.
- [41] LIN W, LI L, CHEN J, et al. Long-term crowding stress causes compromised nonspecific immunity and increases apoptosis of spleen in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. [Fish & Shellfish Immunology](#), 2018, 80: 540-545.
- [42] LONG L N, ZHANG H G, NI Q, et al. Effects of stocking density on growth, stress, and immune responses of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) in a recirculating aquaculture system[J]. [Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology](#), 2019, 219: 25-34.
- [43] YARAHMADI P, MIANDARE H K, FAYAZ S, et al. Increased stocking density causes changes in expression of selected stress- and immune-related genes, humoral innate immune parameters and stress responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. [Fish & Shellfish Immunology](#), 2016, 48: 43-53.
- [44] MUHAWENIMANA V, WILSON C A M E, CABLE J. Fish swimming kinematics in a turbulent wake: To spill or not to spill?[J]. [E3S Web of Conferences](#), 2018, 40: 03024.
- [45] MENG L, WANG W P, LI T Y, et al. Evaluation of the effects of shear stress on crucian carps passing through turbines[J]. [IOP Conference Series: Earth and Environmental Science](#), 2021, 774: 012147.
- [46] FILELLA A, NADAL F, SIRE C, et al. Model of collective fish behavior with hydrodynamic interactions[J]. [Physical Review Letters](#), 2018, 120(19): 198101.
- [47] LIAO J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows[J]. [Philosophical Transactions of the Royal Society B](#), 2007, 362(1487): 1973-1993.
- [48] SVENDSEN J C, SKOV J, BILDSOE M, et al. Intra-school positional preference and reduced tail beat frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions[J]. [Journal of Fish Biology](#), 2003, 62(4): 834-846.
- [49] LI L, RAVI S, XIE G M, et al. Using a robotic platform to study the influence of relative tailbeat phase on the energetic costs of side-by-side swimming in fish[J]. [Proceedings of the Royal Society A](#), 2021, 477(2249): 20200810.
- [50] WEIHS D. Hydromechanics of fish schooling[J]. [Nature](#), 1973, 241(5387): 290-291.
- [51] HE Z, FALTINSEN O M, FREDHEIM A, et al. The influence of fish on the mooring loads of a floating net cage[J]. [Journal of Fluids and Structures](#), 2018, 76: 384-395.
- [52] FENG Y K, LIU H X, SU Y Y, et al. Numerical study on the hydrodynamics of C-turn maneuvering of a tuna-like fish body under self-propulsion[J]. [Journal of Fluids and Structures](#), 2020, 94: 102954.
- [53] SAKAKIBARA J, NAKAGAWA M, YOSHIDA M. Stereo-PIV study of flow around a maneuvering fish[J]. [Experiments in Fluids](#), 2004, 36(2): 282-293.
- [54] MENDELSON L, TECHET A H. Quantitative wake analysis

- of a freely swimming fish using 3D synthetic aperture PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(7): 135.
- [55] DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: experimental analysis of wake forces in sunfish[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(Pt 17): 2943-2958.
- [56] MÜLLER U K, VAN DEN HEUVEL B L E, STAMHUIS E J, et al. Fish foot prints: morphology and energetics of the wake behind a continuously swimming mullet (*Chelon labrosus* Risso)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1997, 200(Pt 22): 2893-2906.
- [57] PLEW D R, KLEBERT P, ROSTEN T W, et al. Changes to flow and turbulence caused by different concentrations of fish in a circular tank[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2015, 53(3): 364-383.
- [58] LUNGER A, RASMUSSEN M R, LAURSEN J, et al. Fish stocking density impacts tank hydrodynamics[J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1/2/3/4): 370-375.
- [59] KLEBERT P, LADER P, GANSEL L, et al. Hydrodynamic interactions on net panel and aquaculture fish cages: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 58: 260-274.
- [60] MASALÓ I, OCA J. Influence of fish swimming on the flow pattern of circular tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 84-95.
- [61] GORLE J M R, TERJESEN B F, MOTA V C, et al. Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 81: 89-100.
- [62] TANG M F, XU T J, DONG G H, et al. Numerical simulation of the effects of fish behavior on flow dynamics around net cage[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 64: 258-280.
- [63] GANSEL L C, RACKEBRANDT S, OPPEDAL F, et al. Flow fields inside stocked fish cages and the near environment[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136(3): 031201.
- [64] BOTTOM II R G, BORAZJANI I, BLEVINS E L, et al. Hydrodynamics of swimming in stingrays: numerical simulations and the role of the leading-edge vortex[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 788: 407-443.
- [65] 张 奔, 胡 晓, 杨国党, 等. 基于压力场的草鱼幼鱼巡游动力学研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(6): 79-88.
- ~~~~~
- (上接第 465 页)
- [14] APITZ S E, BARBANTI A, BERNSTEIN A G, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(5): 326-341.
- [15] 裴艳东, 刘文岭, 王 宏, 等. 天津海域重金属元素环境地球化学特征及其影响因素分析[J]. *海洋通报*, 2012, 31(4): 397-403.
- [16] 江洪友, 刘宪斌, 张秋丰, 等. 天津近岸海域沉积物重金属及砷分布与生态风险分析[J]. *海洋科学*, 2013, 37(9): 82-89.
- [17] GB 18668—2002, 海洋沉积物质量[S].
- [18] 白玉川, 史丰硕, 徐海珏, 等. 渤海湾大规模围填海导致的岸线变化及潮流场响应分析[J]. *海洋通报*, 2021, 40(6): 621-635.
- [19] 朱爱美, 张 辉, 崔菁菁, 等. 渤海沉积物重金属环境质量评价及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2019, 41(12): 134-144.
- [20] BORŮVKA L, VACEK O, JEHLÍČKA J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128(3/4): 289-300.
- [21] GRAY C W, MCLAREN R G, ROBERTS A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(3): 267-277.
- [22] 王焕校. 污染生态学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 268-271.
- [23] 刘 庆, 王 静, 史衍玺, 等. 浙江省慈溪市农田土壤重金属污染初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 639-644.
- [24] BUCHIREDDY P R, BRICKA R M, GENT D B. Electrokinetic remediation of wood preservative contaminated soil containing copper, chromium, and arsenic[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(1): 490-497.
- [25] PARK D, YANG H, JEONG J, et al. A comprehensive review of arsenic levels in the semiconductor manufacturing industry[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2010, 54(8): 869-879.
- [26] 滕德强, 崔振昂, 袁晓婕, 等. 北部湾海域表层沉积物中重金属元素分布特征及潜在生态危害评价[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(6): 79-85.