

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220628001

http://www.yyxxjz.cn/

任效忠, 刘海波, 刘鹰, 周寅鑫, 车宗龙, 李猛. 工厂化循环水养殖系统中流场特性与鱼类互作影响的研究进展与展望. 渔业科学进展, 2023, 44(6): 07-17

REN X Z, LIU H B, LIU Y, ZHOU Y X, CHE Z L, LI M. Research progress and perspectives on the influence of flow field characteristics and fish interactions in factory recirculating aquaculture systems. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(6): 07-17

# 工厂化循环水养殖系统中流场特性与 鱼类互作影响的研究进展与展望\*

任效忠<sup>1</sup> 刘海波<sup>1</sup> 刘鹰<sup>1,2①</sup> 周寅鑫<sup>1</sup> 车宗龙<sup>1</sup> 李猛<sup>1</sup>

(1. 设施渔业教育部重点实验室(大连海洋大学) 辽宁 大连 116023;

2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院 浙江 杭州 310058)

**摘要** 随着人口与经济的发展,水产养殖业在世界范围内迅速兴起,集约型工厂化循环水养殖因其高密度、低污染、高效率等独特的优势,契合水产养殖业绿色发展理念,已成为水产养殖转型升级的重要方向之一。水作为循环水养殖系统中重要的环境因子,其流态能够直接影响鱼类的生长及福利,同样,鱼类存在及运动也会影响到系统流态的构建。本文综合分析了循环水养殖系统中流场条件对不同鱼类生长发育及福利的影响,鱼类及其运动行为对养殖池内水动力条件及性能的影响,以及鱼类对养殖池内流场流态、水体混合等的影响。将研究鱼类运动对流场特性的影响方法主要归纳为实测法和数值研究,通过对比分析2种方法的优点和不足之处,并结合当前循环水养殖产业系统构建中的问题提出针对性方法建议,旨在为系统中水动力条件的设计拓展思路,促进循环水养殖产业流态构建向“鱼”与“水”兼顾的方向发展。

**关键词** 循环水养殖系统;水动力;鱼类;相互影响;实测法;数值模拟

中图分类号 Q938.8; S942.3 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2023)06-0007-11

作为世界第一水产养殖大国,我国水产养殖产量约占世界水产养殖总产量的2/3。统计数据显示,2020年全国水产品总产量为6549.02万t,比2019年增长1.06%,其中,养殖产量为5224.2万t,捕捞产量为1324.82万t,养殖产量远超捕捞产量(农业农村部渔业渔政管理局等,2021)。随着水产养殖业的快速发展,循环水养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)因其土地高效利用、水资源循环利用、不受自然条件制约、生产利于自动化控制、养殖产品高效且质量安全等优点,被认为是21世纪水产养殖业发展

的主导方向之一(唐茹霞等,2018)。循环水养殖系统是集现代化、自动化、集约化于一体的绿色健康的水产养殖模式,可做到生产过程可控,实现跨季节常年养殖。同时,该模式排放的废水废物少且方便集中处理,在稳定高产的同时对环境造成的压力较小,具有良好的社会和生态效益,已逐渐发展成为水产养殖业的主流模式之一。

水是鱼类生长发育过程中的重要载体,作为最重要的环境因子之一,其流态和水质能够直接影响鱼类的生长质量(顾川川等,2013)。不佳的系统水动力除

\* 国家自然科学基金面上项目(31872609)、现代农业产业技术体系专项(CARS-49)、大连市支持高层次人才创新创业项目(2019RD12)和2022年辽宁省教育厅重点攻关项目(LJKZZ20220091)共同资助。任效忠,教授, E-mail: renxiaozhong@dlou.edu.cn

① 通信作者: 刘鹰,教授, E-mail: liuyingzju@zju.edu.cn

收稿日期: 2022-06-28, 收修改稿日期: 2022-07-23

了会影响鱼类运动及行为,还会影响养殖池水体死区容积(低流速容积)、代谢物稀释、饲料分散、水质和废物管理,以及动物健康和对疾病的易感性(Odeh *et al*, 2004; Rasmussen *et al*, 2005),探索鱼类对系统水动力条件的需求,不仅可以为鱼类的福利化养殖、养殖池结构的设计与优化奠定生物学理论基础,也可为养殖生产提供理论和技术支持。研究鱼类与水动力学之间的相互影响,并建立二者联系、量化二者之间关系的关键是找到合适的指标,来耦合鱼类能够感知到的水动力因素和特征量(齐亮等, 2012)。本文综合分析水动力与鱼类的相互影响,其中包括水流速度、湍流及水循环率等对鱼类的影响,以及鱼类及其行为对湍流、水流速度和水流方向等的影响,以期为工厂化循环水养殖系统中水动力条件的设计理清思路,促进循环水养殖产业向“鱼”与“水”兼顾的方向发展。

## 1 国内外循环水养殖系统的发展

20世纪50年代,日本最早对循环水养殖系统进行科学研究(Murray *et al*, 2014),由于一些发达国家劳动力成本较高而能源相对廉价,水产养殖企业较多选择增加渔业设备、减少人工投入进行养殖,投饲、捕鱼等均实现了机械化和半机械化。因此,国外循环水养殖系统得到了较快的发展(谢龙, 2019)。目前,欧洲等部分发达国家在其商业化的成鱼和育苗系统中基本采用工厂化循环水生产模式(张晓双等, 2017),例如,丹麦是以循环水养殖系统为特色的世界第五大鱼类出口国(Badiola *et al*, 2012),挪威主要从事鲑鱼养殖,将大西洋鲑(*Salmo salar*)从网箱养殖逐渐转移到循环水车间养殖(Dalsgaard *et al*, 2013)。

相比于国外,我国循环水养殖系统起步较晚,循环水养殖技术从20世纪80年代引入,主要经历了开拓、探索、整合和快速发展四个阶段。1988年,中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所设计了国内第一个生产性的工厂化循环水养殖车间(潘荣华等, 2018)。20世纪90年代,全国各地兴建诸多水产养殖示范区。2019年,为符合绿色发展理念,国内大力实施池塘标准化改造,完善循环水和进排水处理设施,推动我国由水产养殖大国向水产养殖强国转变。目前,我国工厂化循环水养殖设备全部实现国产化,呈现出快速增长的势头,且在水产养殖业中所占的比重逐步提高(谢龙, 2019),国内工厂化循环水养殖系统的发展已呈现出方兴未艾之势。

国内外针对循环水养殖系统的研究多从基础设计(Badiola *et al*, 2018; Supono, 2019)、放养密度(王尧

等, 2022; Arifin *et al*, 2019)、池内微生物(Liu D *et al*, 2018; Ljubobratovi *et al*, 2017)、养殖池内溶解氧(钱辰颖等, 2021)等方面展开,而水动力因素在不同鱼类物种及其游泳方式的进化中发挥了重要作用(Borazjani *et al*, 2010),但关于养殖池内流场特性、水动力条件的研究总体占比较少,尚无法给实际生产提供系统的理论与技术支持。为设计精准的循环水养殖系统,必须充分了解水动力条件,使鱼类在合适的流速和溶解氧水平下生长,并充分利用饲料和残饵、粪便等固体废物及可溶性、悬浮污染物。此外,鱼类游动产生的湍流等水动力因素可能会改变养殖池内的流场条件、流态分布、溶解氧、氧气扩散率,有助于防止固体颗粒的沉积,并促进沉积在池底的生物固体颗粒物再悬浮。因此,在设计循环水养殖系统时,还需要考虑鱼类与水动力的相互影响,以便能够准确预测适宜鱼类种群生存的养殖流场环境。

## 2 流场特性对鱼类的影响研究

### 2.1 流速对鱼类生长发育的影响及作用

**2.1.1 流速对鱼类生长的影响** 环境的波动会对养殖对象的生长产生影响,而水体流速是一个重要的环境因素。在水产养殖中,水体流速在去除粪便、循环溶解氧和维持水质方面起着至关重要的作用(Gorle *et al*, 2020; Oca *et al*, 2013),同时也会对鱼类的新陈代谢、生长、行为和福利产生深远的影响。在一定流速下,鱼类会表现出明显的趋流行为,流速通过诱导鱼类持续游泳从而影响鱼体的能量消耗,进而对鱼类生长产生影响。研究表明,适宜的流速会增加鱼类的生长速度,而不同鱼类适宜生长的流速各不相同。如加州大比目鱼(*Paralichthys californica*)幼鱼的最佳生长流速为1.0 bl/s,该流速下幼鱼的饲料转化率达到最高、生长速度最快(Merino *et al*, 2007);中等流速(0.36~0.63 bl/s)有利于大西洋鲑整个生长周期的生长速度(Nilsen *et al*, 2019);金头鲷(*Sparus aurata*)在1.0 bl/s的流速下具有最佳的生长表现,同时,该流速可为养殖池内水体均匀提供最佳条件(Palstra *et al*, 2020);大菱鲂幼鱼(*Scophthalmus maximus*)在0.9 bl/s流速下采食量增加,特定生长率(SGR)升高(Li *et al*, 2019);当循环水养殖系统中流速为2 bl/s时,美索不达米亚鲈(*Piaractus mesopotamicus*)获得最佳生长速度,其生长速度可提高51%(Inoue *et al*, 2019)。也有研究表明,流速对部分鱼类的生长无显著影响甚至会产生负面作用,例如,0.36 m/s的流速使大菱鲂幼鱼受到胁迫、生长速度降低(Li *et al*, 2019);而较高的流

速会加剧高密度养殖的负面影响, 降低虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 的 SGR (McKenzie *et al*, 2012)。综上, 适宜的流速会促进鱼类的生长, 而过高或过低

的流速则会带来厌氧、代谢过度等负面影响, 反而限制鱼类生长, 因此, 探究循环水养殖系统中鱼类适宜的生长流速尤为重要(表 1)。

表 1 流速对几种常见养殖鱼类的影响

Tab.1 Velocity influence on several kinds of common farmed fish

种类 Species	诱导流速 Induced velocity/(bl/s)	影响 Influence		参考文献 Reference
		特定生长率 SGR/(%/d)	饲料转化率 FCR	
加州大比目鱼幼鱼 <i>P. California</i>	0.5	3.98 <sup>a</sup>	1.43 <sup>a</sup>	Merino 等(2007)
	1	3.93 <sup>a</sup>	1.43 <sup>a</sup>	
	1.5	3.59 <sup>b</sup>	1.59 <sup>b</sup>	
大菱鲂幼鱼 <i>S. maximus</i>	0.3	0.865	1.34	Li 等(2019)
	0.9	0.952	1.17	
	1.8	0.830	1.54	
美索不达米亚鲈 <i>P. mesopotamicus</i>	1	1.8±0.3 <sup>b</sup>	1.6±0.4 <sup>a</sup>	Inoue 等(2019)
	2	2.2±0.4 <sup>a</sup>	1.1±0.2 <sup>b</sup>	
	3	1.6±0.1 <sup>b</sup>	1.5±0.04 <sup>a</sup>	
亚马逊布列康幼鱼 <i>Brycon amazonicus</i>	1	1.71 <sup>a</sup>		Arbeláez-Rojas 等(2010)
	1.5	1.72 <sup>a</sup>		
	2	1.54 <sup>ab</sup>		
	2.5	1.50 <sup>b</sup>		
金带篮子鱼 <i>Siganus rivulatus</i>	0	2.13±0.08	1.3±0.04	Ghanawi 等(2010)
	1.5	1.6±0.09	1.8±0.11	
南方鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	0	2.09±0.12		Li 等(2016a)
	1	2.12±0.06		
齐口裂腹鱼 <i>schizothorax prenanti</i>	0	0.95±0.08 <sup>c</sup>	1.64	Liu G 等(2018)
	1	1.28±0.07 <sup>a</sup>	1.45	
	2	1.36±0.05 <sup>c</sup>	1.45	
	4	1.08±0.05 <sup>b</sup>	2.13	
大口黑鲈幼鱼 <i>Micropterus salmoides</i>	0.9	4.52±0.12 <sup>a</sup>	0.75±0.02 <sup>a</sup>	Chen 等(2021)
	2.45	4.12±0.10 <sup>b</sup>	0.77±0.05 <sup>a</sup>	
	4	4.13±0.16 <sup>b</sup>	0.76±0.02 <sup>a</sup>	
金头鲷 <i>S. aurata</i>	0	3.41±0.08 <sup>a</sup>	1.17±0.16 <sup>b</sup>	Blasco 等(2015)
	5	3.72±0.13 <sup>a</sup>	0.93±0.06 <sup>b</sup>	

注: 不同上标字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different superscript letter indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

**2.1.2 流速对鱼类生理指标的影响** 流速不仅会影响鱼类的生长, 还会对不同鱼类的各项生理指标产生明显的影响, 从而引起生长差异。与对照组(0.06 bl/s)相比, 泰国鲫(*Barbonymus schwanenfeldii*)在 0.66 和 1.92 bl/s 流速下具有较高的血液载氧能力和血浆免疫指标(Zhu *et al*, 2016); 在中等流速下(1 和 2 bl/s), 游动的青波鱼(*Spinibarbus sinensis*)幼鱼肌肉蛋白质含量、总必需氨基酸和总氨基酸水平较高。而在 4 bl/s 流速下, 总氨基酸和总 n-6 多不饱和脂肪酸水平最低(Li *et al*, 2016b)。作为一种常见的养殖鱼类, 大西洋

鲑对不同的流速表现出不同的应激。在 0.2 bl/s 的流速下, 鲑脂肪含量较高, 蛋白质含量较低, 而中等流速(0.8 bl/s)使鲑的肌肉蛋白质增多, 对大西洋鲑的生长和福利产生积极影响(Solstorm *et al*, 2015)。研究人员通过对比不同流速对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)的生长、消化酶活性、抗氧化能力和免疫能力的影响, 发现在高流速(4 bl/s)条件下, 鱼类的生长、抗氧化能力、免疫能力和消化能力均有很大程度的提高(Chen *et al*, 2021)。已有实验表明, 增加流速可促进大菱鲂的生长, 随着流速的增加, 大菱鲂幼鱼

SGR 随之升高(Schram *et al.*, 2009)。除此之外, 流速的增加还会使大菱鲂幼鱼的超氧化物歧化酶(SOD)和溶菌酶(LZM)的活性均显著提高(Sun *et al.*, 2016)。然而对于大菱鲂来说, 生长速度与流速并不总是呈正相关关系。有研究发现, 流速会对循环水养殖系统中的大菱鲂生长和免疫产生影响, 在最高流速下, 大菱鲂幼鱼的生长速度减慢, 血浆中 SOD 活性和总蛋白浓度显著降低, 而过大的流速对大菱鲂的皮肤是一个应激源, 诱导对环境变化敏感的皮肤免疫反应; 而在中等流速下, 大菱鲂采食量增加, SGR 则升高, 血浆中酸性磷酸酶(AKP)和碱性磷酸酶(ACP)活性显著升高, 中等流速可促进养殖大菱鲂的生长并使其获得较好的先天免疫(Li *et al.*, 2019)。此外, 研究发现, 较高的流速还会影响鱼肉的质地和营养品质(Bugeon *et al.*, 2003; Solstorm *et al.*, 2016)。提高鱼类的生长性能、健康和品质是水产养殖的重要目标, 需要优化鱼类生长条件, 且不损害鱼类的健康和福利并兼顾养殖产品的品质。因此, 针对特定养殖对象应该确定最适宜的水动力条件, 同时探索流场条件与鱼类生物学参数间的联系。

**2.1.3 流速对鱼类存活率的影响** 除生长及福利外, 流速还会对鱼类的存活率产生重要影响。在无流环境(0 cm/s)中, 白鲟(*Scaphirhynchus albus*)幼鱼的能量消耗更大, 导致死亡率较高(Mrnak *et al.*, 2020)。此外, 有学者发现, 低流速处理组的大菱鲂死亡率高于高流速处理组, 并提出可能是因为采食量低、水质差和细菌数量多导致的低能量供应的综合作用(Sun *et al.*, 2016)。而高雷诺数的水动力条件使金头鲷吸食更有效, 从而能够降低死亡率(China *et al.*, 2017)。掌握不同鱼类的最佳养殖流速, 可以在循环水养殖系统中对水动力条件进行调控, 为鱼类提供最适宜的生存环境, 降低养殖鱼类的死亡率, 进一步实现高效高产的养殖目标。

## 2.2 其他流场因素对鱼类的影响

水流可以诱导鱼群行为, 减少鱼类的攻击性和压力, 对养殖的福利产生积极的影响(Larsen *et al.*, 2012)。鱼类会偏好可预测性的水流, 而排斥速度波动较大且混乱的水流(Liao, 2007), 不良的水动力甚至会对鱼类身体造成伤害(Odeh, 2002)。当养殖池内有循环水时, 大西洋鲑的攻击性增加, 非亲属大西洋鲑的平均攻击性是亲属大西洋鲑的 1.56 倍(Griffiths *et al.*, 2000)。而较高的循环水换水率可提高尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的质量、降低患病率(Obirikorang *et al.*, 2019)。此外, 养殖池内的池形结构等引起的流场环境变化也会对养殖鱼类产生影响。

Duarte 等(2011)利用粒子跟踪测速(PTV)技术分别描述矩形和圆形养殖池内鱼类的空间分布, 发现圆形和矩形养殖池中鱼的分布存在差异, 鱼类在圆形养殖池内的分布更加均匀。

水产养殖鱼类种类较多, 不同鱼类对水动力条件的需求和适应能力各不相同, 鱼类的最佳养殖流速是鱼类生长与福利之间的平衡。由于高密度养殖环境对鱼类群体形成的竞争与胁迫有别于鱼类长期进化生存的自然环境, 现阶段循环水养殖系统内流场特性对鱼类的影响机制仍然知之甚少, 针对某一种养殖对象应该系统研究高密度环境的适宜养殖流场条件, 从而实现高密度养殖环境中福利化养殖系统的精准构建与调控。

## 3 鱼类运动对流场特性的影响研究

影响循环水养殖池内流态的因素包括进水结构、循环流量、养殖池结构、出水结构、鱼类运动及其行为等。鱼类运动及行为会影响养殖池内流场及水体混合, 并且鱼类的存在及运动的紊流对养殖池内流场产生影响的同时也关系到养殖池内溶解氧、鱼的代谢物(如氨和 CO<sub>2</sub>)与分解的可溶性有害物质(如氨氮、亚硝酸盐等)的分布, 以及粪便、未食性饲料的汇聚与排出, 因此, 研究鱼类运动及行为对养殖池内流场的影响有重要意义。目前, 对于有鱼存在的养殖池内流态的研究方法较少且研究困难较多、精度较低, 依据研究方法手段的不同主要将其归纳为实测法和数值研究。

### 3.1 实测法

鱼类以逆流游动为运动常态, 鱼的存在会减弱或改变水流方向, 研究人员使用荧光素将网箱内的三维流动模式可视化, 结果显示, 大西洋鲑在网箱内环形游动, 在鱼群所在深度处会产生水流从而阻挡流入的水体(Gansel *et al.*, 2014)。Masaló 等(2008)利用声学多普勒测速技术(ADV)测量养殖池内流场, 研究表明, 系统内鱼类存在影响流态这一现象, 由鱼类游泳活动引起的湍流强度与鱼类密度之间存在正相关关系。在相同入流条件下, 与无鱼养殖池相比, 有鱼的养殖池内流速明显减小, 此外, 鱼类运动引起的湍流增加了养殖池内约 1/3 的氧扩散率(Plew *et al.*, 2015)。

粒子图像测速(PIV)技术是 20 世纪 80 年代发展起来的测速方法, 极大地提高了学者对生物流体力学的认识(Reid, 2011), 从而逐渐被用于量化游动鱼类产生的尾流流体力学。PIV 技术的突出优点是它能够无干扰地测量高分辨率下的二维或三维速度场(Mendelson *et al.*, 2015)。Drucker 等(2001)利用 PIV 技

术探索了蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)胸鳍的三维尾流结构, 实验表明, 研究软背鳍和尾鳍在运动过程中同时产生的涡可以对中鳍尾迹相互作用进行实验表征。Sakakibara 等(2004)利用立体 PIV 技术获得活金鱼速度分布的 3 个分量及粒子跟踪速度, 以确定空间速度、加速度和涡度。Mendelson (2013)和 Mendelson 等(2013)利用三维 PIV 系统对大斑马鱼(*Danio aequipinnatus*)的流体动力学进行了研究, 发现尾迹结构中存在明显的分离和连接的涡环, 并可可视化了鱼体产生的推力射流, 在此基础上成功地描述了自由游动的大斑马鱼在稳定前进和转弯过程中的速度场和旋涡环结构。崔勇等(2015)利用 PIV 技术可视化经过网箱中心点铅垂面流场分布的云图, 可清晰看出网箱周围的水流流线分布疏密程度。

作为一个高密度养殖空间, 关于鱼的存在对养殖池内水体混合的影响研究产生了分歧, 部分学者认为鱼的存在减慢了养殖池内流体的混合。如 Watten 等(2000)将跑道养殖池改为 6 个相邻的反旋转混合单元, 通过分析较低流速下的示踪剂停留时间(RTD), 发现湖鲮(*Salmo trutta lacustris*)的运动增加了相邻单元水体之间的交换程度, 进而使圆形养殖池中水体混合减慢。而 Lunger 等(2006)和 Rasmussen 等(2005)采用罗丹明 WT 荧光法分析了不同养殖密度条件下独立养殖池内的水体混合情况, 将养殖池内染料浓度和放养密度的关系可视化, 确定鱼的存在会对养殖池水动力产生影响, 并且极大地增强了水体的混合。也有研究人员使用红色染料示踪剂将网箱内部和周围的流场特征可视化, 发现鱼的存在加快了染料分散, 鱼体和鱼鳍的运动增强了网箱内部和下游水体的混合。此外, 网箱内部流体湍流强度与鱼类密度呈正相关关系(Bi *et al.*, 2020)。综合来看, 在研究鱼类对养殖池内水体混合的影响时, 养殖池的设计也是一项不可忽视的重要指标。

为预测圆形养殖池内的速度分布, Oca (2013)和 Masaló 等(2016)通过确定靠近池壁和围绕中心轴的单位质量角动量( $\beta=V \cdot r$ )建立预测模型, 并在该模型的基础上进行修正, 研究鱼的存在对养殖池内流速的影响, 通过分析速度剖面来反映有鱼和无鱼养殖池内平均速度的差异, 结果表明, 鱼类运动引起的湍流增加了运动涡旋粘度, 使养殖池中心区域的角速度剖面变平坦, 从而降低了养殖池内靠近出口中心处的流速。此外, 研究鱼类对循环水养殖池内流速影响的实验中, 发现由于鱼类的存在, 八角形养殖池内流速降低了 25%, 但径向平均速度的变化趋势不变。研究人员推断, 养殖池中游动的鱼是紊流和非线性的主要来源

(Gorle *et al.*, 2018)。不同的饲养密度、鱼的大小和种类均会对养殖池内流场产生不同程度的影响, 准确地了解这种影响将有助于设计最佳的特定鱼类养殖系统。

### 3.2 数值研究

流场参数在研究鱼类与水动力相互作用时至关重要, 随着计算流体力学(CFD)方法的发展, 开展鱼类游动的复杂模拟并研究相应的机理已经成为可能。鱼类的游动力学是流体力学研究的一个热点问题, 由于鱼类的随机性让实验难以简化和重复, 数值模拟成为研究该难题的主要方法之一。与实测法相比, 该方法能够更全面地反映养殖池内的流场信息, 提供更详细的压力场和三维尾流结构, 可为鱼类游动的流体动力学现象认识与机理研究提供丰富信息(Feng *et al.*, 2020)。数值模拟以实验周期短、通过设定参数利于实现多模型优化的优点受到重视, 同时数值模拟利于流场(如速度场和阻力-升力系数等)的详细可视化和数据分析处理。近年来, CFD 技术作为辅助工具用于仿真鱼类推力(Bottom *et al.*, 2016)和提高游动效率(Doi *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021)的研究是一个热点, 学者们已建立较为可靠的运动模型, 能够直观地模拟出仿生鱼推进过程中产生的涡流及量化推进过程中产生的能量消耗。现在越来越多的学者将 CFD 技术应用于水产养殖系统中开展研究, 运用其强大的模拟功能再现水产养殖系统中遇到的水动力学问题。

工厂化循环水养殖系统的流场特性研究中, 成本低与数据处理的便捷性也让数值模拟越来越受到青睐, 成为系统水动力研究重要方法与物理模型实验的主要验证手段, 基于 ANSYS Fluent 进行数值模拟并进行二次开发是一种发展趋势。在建立以八角形养殖池为例的数值模型中, 研究发现, 相比于物理模型, 数值模拟能够预测养殖池内循环、滞留和混合时间且其精度略高于物理模型(Rasmussen *et al.*, 2004)。有学者采用数值模拟方法建立了循环水养殖系统八角形养殖池内流体动力学的三维数值模型, 采用可实现的 k- $\epsilon$  湍流模型描述流动, 将数值结果与全尺寸物理模型的测量数据进行了比较, 结果表明, k- $\epsilon$  湍流模型能较好地描述八角形养殖池内的流态(Liu *et al.*, 2016)。此外, 数值模拟在养殖池进水结构、池型结构对流场特性的影响方面也有较多的研究, 在单管入流模式下, 进径比对单通道矩形圆弧角养殖池系统水动力特性的影响研究中, 运用计算流体力学仿真技术构建单通道矩形圆弧角养殖池三维数值计算模型, 验证结果表明, 数值模型精度满足要求, 可用于矩形圆弧角养殖池流场特性的数值计算研究(薛博茹等,

2021)。

国内外多将 CFD 技术用于进出水结构、养殖池池型等对池内流态的影响研究。由于将流体动力学与鱼类的随机行为相耦合具有相当大的复杂性，因此，关于养殖池流体动力学的大多数研究都是在没有鱼类的养殖系统中开展的，使用 CFD 技术研究养殖池内鱼类运动对流场产生的影响研究很少。数值模拟能较好的模拟养殖池中的真实流态，从而为分析鱼类与养殖池的相互影响提供较为准确的对比数据，还可以详细地再现不同游泳动物的流场流态(Gazzola *et al.*, 2014)。在同样高密度的网箱养殖环境中，研究人员建立了一种能够准确模拟网箱周围流场和网箱变形的模型，并通过一系列物理模型实验验证了数值模型的有效性。数值模拟的结果表明，鱼在静水中的圆周运动导致网箱中心出现低压区，使网箱中心线出现强烈的垂直流动。网箱的阻力随鱼密度的增加而显著减小，而在中等鱼密度时网箱变形最严重(Tang *et al.*, 2017)。

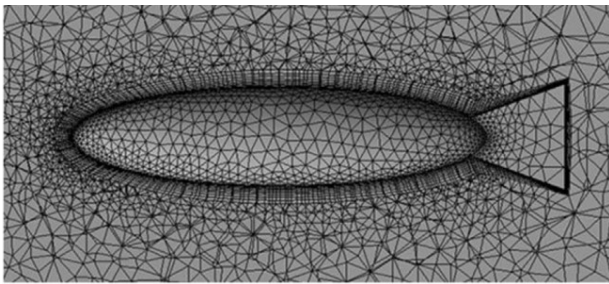


图 1 仿生鱼模型及其在网箱中分布示意图  
(Tang *et al.*, 2017)

Fig.1 The bionic fish model and its distribution diagram in the cage (Tang *et al.*, 2017)

对于循环水养殖系统内鱼与流场的耦合数值模拟，有学者采用 Solidworks 建立二维和三维鱼体仿真运动模型，并将模型接入 Fluent 模块中建立鱼类-流体间的流固耦合数值模型，基于鲮科(Carangidae)波动方程编写 UDF 宏文件，采用动网格技术实现循环水养殖池内仿生鱼的数值模拟(刘海波等, 2021)。而作为一种以鱼群为主体的养殖模式，在研究鱼类运动

对养殖池内流场的影响时，主要以研究鱼群产生的水动力影响为主，相比于个体效应，鱼群会对周围流体特性产生更明显的影响，鱼群的游动是影响流场特性的关键因素(Bi *et al.*, 2020)。而要充分理解鱼类的群体运动行为，在考虑到鱼类对养殖池流场产生影响的同时，还要考虑流场条件对鱼类产生的作用以及鱼类对流场条件变化产生的应激反应，目前关于如何对鱼群进行数值建模的研究较少。

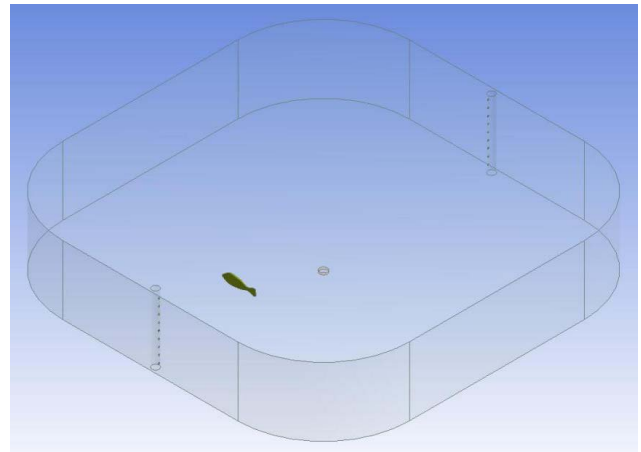


图 2 方形圆弧角养殖池有鱼模型

Fig.2 Fish-square circular angle aquaculture tank model

Filella 等(2018)首次提出一种鱼类行为与水动力相互作用的鱼类集体运动模型，“鱼”与“水”的相互作用过程是通过将每条鱼与涡旋偶极子(vortex dipole)相关联进行建模，涡旋偶极子既包含自推进力，又包含游动鱼产生的速度场。以建模的一条鱼为例，其产生的速度场会作用引起附近的其他鱼类的运动，其他鱼类也会产生流场影响到该鱼，从而提供了鱼与流场相互作用的机制。虽然模型建立取得了较大的进展，但是所有的成果都是基于数值模拟做出的研究，尚缺乏真实的实验验证。在此基础上，Porfiri 等(2021)将该模型中鱼类运动由每条鱼的速度和转弯速率的非线性随机微分方程组拟合组成，使用 Zienkiewicz 等(2015)研究中在浅水中游泳的斑马鱼(*Danio rerio*)真实数据校准模型参数，校准模型可成功地预测活体动物集体运动的主要特征。

建立精确的数值模型和控制仿生鱼的运动是基于 CFD 技术研究流场与鱼相互影响的基础，鱼类与流场相互影响的实质就是变形体与流体力学的相互作用，由于鱼类的多样性和运动的随机性与复杂性，很难建立一个精确的运动模型来进行鱼类的仿生研究。在使用 CFD 研究循环水养殖系统内鱼与流场相互作用时，为充分还原养殖池内流态，应充分考虑养

养殖池内气、液、固三相流的相互作用。此外,鱼皮的边界条件、结构的柔性以及鱼类与流体间的流固耦合等问题都是建模需要解决的重要问题。因此,循环水养殖系统内流场的数值模拟非常复杂,导致CFD模拟循环水养殖系统计算量较大,引入鱼群以后计算量会以几何级数增加。此外,不同鱼类对流场条件的应激不同,必须进行一系列物理模型实验,以验证数值模型的准确性。目前缺少大量精确的实验数据作为支撑,因此,距离全面使用CFD模拟工厂化循环水养殖系统中鱼与流场的耦合问题还有很长的路要走。

## 4 总结与展望

### 4.1 存在问题

近年来,循环水养殖发展迅速,旨在通过养殖水体的不间断过滤、处理和循环利用去综合调节养殖水环境,从而提高生产效率、减少与自然水体接触、降低病害暴发和养殖水环境污染所带来的风险。与常规养殖方式相比,循环水养殖对土地和水资源的直接需求较低,并可实现更高的养殖密度,但在推广应用,在系统流场构建方面仍存在以下几个方面的问题。

1)系统流场研究尚未引起足够重视,缺乏事前的研究与预测。目前,研究更聚焦于养殖鱼种、水处理、养殖病害和养殖设备等方面,总是有意无意地忽视系统流场的重要性,而忽视流态构建引起的直接问题就是系统能耗高、流态不佳、集排污性能不良、营养物质与污染物分布不均衡、鱼类局部聚集未充分利用养殖水体空间等。此外,由于缺乏研究与预测,这些问题往往会在生产过程中暴露,无论给生产还是系统改造都造成很多困难。

2)系统流场研究是工程水动力学、水产养殖学和鱼类行为学的交叉科学问题,单一的学科知识尚不能很好地解决问题,而交叉学科研究对传统学科各专业人士更是一大挑战。目前,专业复合型人才缺乏,工程水动力与水产养殖、鱼类行为专业跨度大,交叉结合研究较困难、进而影响研究的开展与效果。

3)流场特性与鱼类机能相互影响研究仍面临较大的挑战。由于鱼类的多样性和鱼类运动的随机性,无论开展实验研究还是数值模拟,都面临规律性差、重复性差、模型构建难度大、精度比较低的挑战。此外,开展低密度养殖研究相对容易,高密度养殖研究异常困难。且低密度养殖研究多限于理论成果,与生产环境有较大差距,取得的结果用于指导生产应用还有很多不足。

### 4.2 展望

工厂化循环水养殖符合产业可持续发展的要求,是未来水产养殖业发展的必然趋势。循环水养殖不同于天然环境,在系统中可以通过人工设计和改造营造出更精准、更适宜养殖、更利于排污、更方便操作的流态。建立系统的实验方案与精细化的数值模拟方法相结合,对拟构建的系统进行实验分析与优化,从池型结构、进水结构、排水结构等方面进行综合分析,构建流场均匀排污良好、能效利用高、鱼类行为稳定且无应激反应的系统流态,更好地解决系统构建中的能耗、流态、排污、鱼类应激等问题。系统流场构建的研究依赖于学科受到重视、走不同学科之间的交叉融合、实验与数值模拟等技术的共同进步、与产业紧密结合,未来研究会向以下方向发展。

1)作为一种新兴的养殖模式,系统流场作为产业链的重要一环未来会受到足够重视。优化RAS的设计和运行是一个长期与渐进的过程,要在这一过程中,用大量的理论研究来支撑构建性能良好、更匹配养殖鱼类的循环水养殖系统。

2)从流场特性与鱼类机能相互影响的角度构建系统流场是发展趋势。无论实验研究还是数值模拟,未来的研究都要引入鱼的参与,认知鱼类与系统流态的相互影响与作用机理,走工程水动力学、水产养殖学和鱼类行为学的交叉研究。

3)无论实验研究还是数值模拟都需要致力于提升研究的技术水平与深度,对目前水下测量及鱼类影响导致的实验难题要从实验方法、实验仪器、实验技术和数据分析方法方面提升,数值模型研究要从模型构建、模型验证、模型精度和计算效率方面推动进步。

4)从简单模型向复杂模型发展,从理论研究走向服务产业。为了支撑产业发展,研究从单体鱼向鱼群方向发展、从低密度走向高密度研究,从实验室研究走向生产应用研究,要从特定鱼种、不同阶段、不同密度等开展系统深入研究。

## 参 考 文 献

- ARBELÁEZ-ROJAS G, MORAES G. Optimization of sustaining swimming speed of matrinxã *Brycon amazonicus*: Performance and adaptive aspects. *Scientia Agricola*, 2010, 67(3): 253-258
- ARIFIN O Z, PRAKOSO V A, SUBAGJA J, *et al.* Effects of stocking density on survival, food intake and growth of giant gourami (*Osphronemus goramy*) larvae reared in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 2019, 509: 159-166

- BADIOLA M, BASURKO O C, PIEDRAHITA R, *et al.* Energy use in recirculating aquaculture systems (RAS): A review. *Aquacultural Engineering*, 2018, 81: 57–70
- BADIOLA M, MENDIOLA D, BOSTOCK J. Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 2012, 51: 26–35
- BI C W, ZHAO Y P, DONG G H. Experimental study on the effects of farmed fish on the hydrodynamic characteristics of the net cage. *Aquaculture*, 2020, 524: 735239
- BLASCO J, MOYA A, MILLÁN-CUBILLO A, *et al.* Growth-promoting effects of sustained swimming in fingerlings of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.). *Journal of Comparative Physiology B Biochemical Systems and Environmental Physiology*, 2015, 185: 859–868
- BORAZJANI I, SOTIROPOULOS F. On the role of form and kinematics on the hydrodynamics of self-propelled body/caudal fin swimming. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213: 89–107
- BOTTOM R G, BORAZJANI I, BLEVINS E L, *et al.* Hydrodynamics of swimming in stingrays: Numerical simulations and the role of the leading-edge vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 788: 407–443
- BUGEON J, LEFÈVRE F, FAUCONNEAU B. Fillet texture and muscle structure in brown trout (*Salmo trutta*) subjected to long-term exercise. *Aquaculture Research*, 2003, 34(14): 1287–1295
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2021. Beijing: China Agriculture Press, 2021 [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. 北京: 中国农业出版社, 2021]
- CHEN Z L, YE Z Y, JI M D, *et al.* Effects of flow velocity on growth and physiology of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 2021, 52(7): 3093–3100
- CHINA V, LEVY L, LIBERZON A, *et al.* Hydrodynamic regime determines the feeding success of larval fish through the modulation of strike kinematics. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 284: 20170235
- CUI Y, GUAN C T, ZHAO X, *et al.* Analysis of two-dimension flow field of the square cage based on particle image velocimetry (PIV). *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(5): 138–144 [崔勇, 关长涛, 赵侠, 等. 基于 PIV 技术的方形网箱二维流场分析. *渔业科学进展*, 2015, 36(5): 138–144]
- DALSGAARD J, LUND I, THORARINSDOTTIR R, *et al.* Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives. *Aquacultural Engineering*, 2013, 53: 2–13
- DOI K, TAKAGI T, MITSUNAGA Y, *et al.* Hydrodynamical effect of parallelly swimming fish using computational fluid dynamics method. *PLoS One*, 2021, 16: e0250837
- DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: Experimental analysis of wake forces in sunfish. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(Pt17): 2943–2958
- DUARTE S, REIG L, MASALÓ I, *et al.* Influence of tank geometry and flow pattern in fish distribution. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44: 48–54
- 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. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 94: 102954
- FILELLA A, NADAL F, SIRE C, *et al.* Model of collective fish behavior with hydrodynamic interactions. *Physical Review Letters*, 2018, 120(19): 198101
- GANSEL L, RACKEBRANDT S, OPPEL F, *et al.* Flow fields inside stocked fish cages and the near environment. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the ASME*, 2014, 136: 031201
- GAZZOLA M, ARGENTINA M, MAHADEVAN L. Scaling macroscopic aquatic locomotion. *Nature Physics*, 2014, 10(10): 758–761
- GHANAWI J, MOHANNA C, SAOUD I P. Effect of continuous water movement on growth and body composition of juvenile rabbitfish, *Siganus rivulatus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41: 834–839
- GORLE J M R, TERJESEN B F, MOTA V C, *et al.* Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production. *Aquacultural Engineering*, 2018, 81: 89–100
- GORLE J, TERJESEN B F, SUMMERFELT S F. Influence of inlet and outlet placement on the hydrodynamics of culture tanks for Atlantic salmon. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 188: 105944
- GRIFFITHS S W, ARMSTRONG J D. Differential responses of kin and nonkin salmon to patterns of water flow: Does recirculation influence aggression? *Animal Behaviour*, 2000, 59(5): 1019–1023
- GU C C, ZHANG Y L. Overview of research on tank flow pattern in industrial aquaculture systems. *Fishery Modernization*, 2013(6): 10–14, 29 [顾川川, 张宇雷. 国内外工厂化养殖鱼池流态研究进展概述. *渔业现代化*, 2013(6): 10–14, 29]
- INOUE L A K A, HACKBARTH A, ARBERLÁEZ-ROJAS G, *et al.* Growth performance and metabolism of the Neotropical fish *Piaractus mesopotamicus* under sustained swimming. *Aquaculture*, 2019, 511: 734219
- LARSEN B, SKOV P V, MCKENZIE D, *et al.* The effects of stocking density and low level sustained exercise on the energetic efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at 19 °C. *Aquaculture*, 2012, 324: 226–233



- LI L, RAVI S, XIE G, *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. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2021, 477(2249): 20200810
- LI X M, LIU L, YUAN J M, *et al.* The effect of aerobic exercise and starvation on growth performance and postprandial metabolic response in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2016a, 193: 36–44
- LI X M, YUAN J M, FU S J, *et al.* The effect of sustained swimming exercise on the growth performance, muscle cellularity and flesh quality of juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*). *Aquaculture*, 2016b, 465: 287–295
- LI X, JI L Q, WU L L, *et al.* Effect of flow velocity on the growth, stress and immune responses of turbot (*Scophthalmus maximus*) in recirculating aquaculture systems. *Fish and Shellfish Immunology*, 2019, 86: 1169–1176
- LIAO J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 362(1487): 1973–1993
- LIU D, STRAUS D L, PEDERSEN L, *et al.* Periodic bacterial control with peracetic acid in a recirculating aquaculture system and its long-term beneficial effect on fish health. *Aquaculture*, 2018, 485: 154–159
- LIU G, WU Y, QIN X, *et al.* The effect of aerobic exercise training on growth performance, innate immune response and disease resistance in juvenile *Schizothorax prenanti*. *Aquaculture*, 2018, 486: 18–25
- LIU H B, REN X Z, ZHANG Q, *et al.* Numerical modeling of fish movement in recirculating aquaculture tank: In the case of Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegelii*. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(6): 995–1002 [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—以许氏平鲷为例. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(6): 995–1002]
- LIU Y, LIU B, LEI J, *et al.* Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35: 912–920
- LJUBOBRATOVI U, KOSANOVJ D, VUKOTJ G, *et al.* Supplementation of lactobacilli improves growth, regulates microbiota composition and suppresses skeletal anomalies in juvenile pike-perch (*Sander lucioperca*) reared in recirculating aquaculture system (RAS): A pilot study. *Research in Veterinary Science*, 2017, 115: 451–462
- LUNGER A, RASMUSSEN M R, LAURSEN J, *et al.* Fish stocking density impacts tank hydrodynamics. *Aquaculture*, 2006, 254(1/2/3/4): 370–375
- MASALÓ I, OCA J. Influence of fish swimming on the flow pattern of circular tanks. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 84–95
- MASALÓ I, REIG L, OCA J. Study of fish swimming activity using acoustical Doppler velocimetry (ADV) techniques. *Aquacultural Engineering*, 2008, 38(1): 43–51
- MCKENZIE D, HÖGLUND E, DUPONT-PRINET A, *et al.* Effects of stocking density and sustained aerobic exercise on growth, energetics and welfare of rainbow trout. *Aquaculture*, 2012, 338: 216–222
- MENDELSON L, TECHET A H. Quantitative wake analysis of a freely swimming fish using 3D synthetic aperture PIV. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(7): 135
- MENDELSON L, TECHET A. 3D synthetic aperture PIV of a swimming fish. 10<sup>th</sup> International Symposium on Particle Image Velocimetry-PIV13, Delft, The Netherlands, 2013
- MENDELSON L. Volumetric analysis of fish swimming hydrodynamics using synthetic aperture particle image velocimetry, 2013
- MERINO G E, PIEDRAHITA R H, CONKLIN D E. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles. *Aquaculture*, 2007, 271(1/2/3/4): 206–215
- MRNAK J T, HEIRONIMUS L B, JAMES D A, *et al.* Effect of water velocity and temperature on energy use, behaviour and mortality of pallid sturgeon *Scaphirhynchus albus* larvae. *Journal of Fish Biology*, 2020, 97(6): 1690–1700
- MURRAY F, BOSTOCK J, FLETCHER D. Review of recirculation aquaculture system technologies and their commercial application. *Highlands and Islands Enterprise*. University of Stirling Aquaculture, Stirling, 2014, 75
- NILSEN A, HAGEN Ø, JOHNSEN C A, *et al.* The importance of exercise: Increased water velocity improves growth of *Atlantic salmon* in closed cages. *Aquaculture*, 2019, 501: 537–546
- OBIRIKORANG K A, AGBO N, OBIRIKORANG C, *et al.* Effects of water flow rates on growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture International*, 2019, 27: 449–462
- OCA J, MASALÓ I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet and outlet features. *Aquacultural Engineering*, 2013, 52: 65–72
- ODEH M, SCHROCK R M, GANNAM A. Comparative hydraulics of two fishery research circular tanks and recommendations for control of experimental bias. *Journal of Applied Aquaculture*, 2004, 14(3/4): 1–23
- ODEH M. Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish, final report 2002. 2002
- PALSTRA A P, ROQUE A, KRUIJT L, *et al.* Physiological effects of water flow induced swimming exercise in seabream *Sparus aurata*. *Frontiers in Physiology*, 2020, 11:

- 610049
- PAN R H, HU Y C, LU N J, *et al.* Research progress of recirculating aquaculture technology. *Scientific Fish Farming*, 2018(11): 1–2 [潘荣华, 胡一丞, 陆宁基, 等. 循环水养殖技术研究进展. *科学养鱼*, 2018(11): 1–2]
- 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. *Journal of Hydraulic Research*, 2015, 53(3): 364–383
- PORFIRI M, KARAKAYA M, SATTANAPALLE R R, *et al.* Emergence of in-line swimming patterns in zebrafish pairs. *Flow*, 2021, 1: E7
- QI L, YANG Y, WANG Y, *et al.* Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(4): 438–445 [齐亮, 杨宇, 王悦, 等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(4): 438–445]
- QIAN C Y, ZHENG G D, CHEN J, *et al.* Effects of oxygen on the gill tissue and enzyme activities of each tissue in a hypoxia-tolerant new strain F<sub>5</sub> of *Megalobrama amblycephala*. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(4): 73–81 [钱辰颖, 郑国栋, 陈杰, 等. 溶解氧对团头鲂耐低氧新品系 F<sub>5</sub> 代的鳃组织形态及各组织酶活性的影响. *渔业科学进展*, 2021, 42(4): 73–81]
- RASMUSSEN M R, LAUREN J, CRAIG S, *et al.* Do fish enhance tank mixing? *Aquaculture*, 2005, 250: 162–174
- RASMUSSEN M R, MCLEAN E. Comparison of two different methods for evaluating the hydrodynamic performance of an industrial-scale fish-rearing unit. *Aquaculture*, 2004, 242: 397–416
- REID D A P. Modelling the hydrodynamics of swimming fish, from individuals to infinite schools. *Doctoral Dissertation of University of Groningen*, 2011
- SAKAKIBARA J, NAKAGAWA M, YOSHIDA M. Stereo-PIV study of flow around a maneuvering fish. *Experiments in Fluids*, 2004, 36: 282–293
- 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). *Aquaculture*, 2009, 292(1/2): 46–52
- SOLSTORM F, SOLSTORM D, OPPEDEAL F, *et al.* Fast water currents reduce production performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquaculture Environment Interactions*, 2015, 7(2): 125–134
- SOLSTORM F, SOLSTORM D, OPPEDEAL F, *et al.* Not too slow, not too fast: Water currents affect group structure, aggression and welfare in postsmolt Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 339–347
- SUN G X, LI M, WANG J, *et al.* Effects of flow rate on growth performance and welfare of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 2016, 47(4): 1341–1352
- SUPONO S. Circular tank design and function in recirculating aquaculture system (RAS). *Oseana*, 2017, 42(2): 59–69
- 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. *Applied Ocean Research*, 2017, 64: 258–280
- TANG R X, SHI C, LIU Y. Analysis on the major problems in the management and operation of recirculating aquaculture system. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(1): 100–106 [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. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(1): 100–106]
- WANG Y, CHEN C G, ZHANG J R, *et al.* Effects of stocking density on growth, feed utilization and intestinal oxidative stress resistance in juvenile *Megalobrama pellegrini* (Tchang, 1930). *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(1): 106–114 [王尧, 陈晨光, 张洁若, 等. 养殖密度对厚颌鲂幼鱼生长、饲料利用及肠道抗氧化应激性能的影响. *渔业科学进展*, 2022, 43(1): 106–114]
- WATTEN B J, HONEYFIELD D C, SCHWARTZ M F. Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit. *Aquacultural Engineering*, 2000, 24(1): 59–73
- XIE L. Analysis on current situation of industrial recirculating aquaculture model. *Current Fisheries*, 2019(8): 90–91 [谢龙. 工厂化循环水养殖模式现状分析. *当代水产*, 2019(8): 90–91]
- XUE B R, YU L P, ZHANG Q, *et al.* A numerical study of the effect of relative inflow distance on hydrodynamic characteristics in the single-drain rectangular aquaculture tank with arc angles. *Journal of Fisheries of China*, 2021(3): 444–452 [薛博茹, 于林平, 张倩, 等. 进径比对矩形圆弧形养殖池水动力特性影响. *水产学报*, 2021(3): 444–452]
- ZHANG X S, FU L L, LV Z M, *et al.* Research development review of recirculating aquaculture mode in China and abroad. *Feed Industry*, 2017, 38(6): 61–64 [张晓双, 傅玲琳, 吕振明, 等. 国内外循环式工厂化水产养殖模式研究进展. *饲料工业*, 2017, 38(6): 61–64]
- ZHU Z, SONG B, LIN X, *et al.* Effects of water-current speed on hematological, biochemical and immune parameters in juvenile tinfoil barb, *Barbonymus schwanenfeldii* (Bleeker, 1854). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(1): 118–124
- ZIENKIEWICZ A, BARTON D A W, PORFIRI M, *et al.* Leadership emergence in a data-driven model of zebrafish shoals with speed modulation. *European Physical Journal-Special Topics*, 2015, 224: 3343–3360

## Research Progress and Perspectives on the Influence of Flow Field Characteristics and Fish Interactions in Factory Recirculating Aquaculture Systems

REN Xiaozhong<sup>1</sup>, LIU Haibo<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1,2①</sup>, ZHOU Yinxin<sup>1</sup>, CHE Zonglong<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture (Dalian Ocean University) Ministry of Education, Dalian 116023, China*; 2. *College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

**Abstract** Both population and economic development are driving the rapid adoption of aquaculture development worldwide. The unique attributes of the intensive factory recirculating aquaculture system, including high density, low pollution, and high efficiency, have made this system an important avenue for aquaculture transformation and improvement, and this fits the current concept of green development in aquaculture. Flow patterns are an important environmental factor in the recirculating water aquaculture systems, with this parameter directly affecting the growth and welfare of fish within the system. However, it is also worth noting that the presence and movement of the fish also affect the construction of the system flow pattern. This study presents a comprehensive analysis of the effects of flow field conditions in recirculating aquaculture systems on different fish species, including the effects of flow rate on the growth and development, physiological indicators, and survival rates of commonly cultured fish, as well as the effects of other hydrodynamic conditions, such as circulating water and circulating water exchange rates, on fish behavior. The effects of fish and their locomotor behavior on hydrodynamic conditions and performance in culture ponds are also discussed, including the effects on turbulence intensity, flow-field flow patterns, and water mixing in these systems. The methods used to study the effect of fish movement on the flow field characteristics of any system can be broadly categorized into real measurement methods and numerical studies, where the real measurement methods include the visualization of research objects using the particle image velocimetry (PIV), acoustic Doppler velocimetry (ADV), and rhodamine water tracer fluorescence method. In contrast, numerical studies primarily rely on the application of the computational fluid dynamics (CFD) method. The advantages and disadvantages of both approaches are evaluated in this study. Our evaluations include a discussion of the common problems with the current system for constructing the circulating water aquaculture systems in industry, such as neglecting the flow field construction, lack of cross-disciplinary research, poor regularity, and repeatability of research, and suggest that a systematic experimental program should be established in combination with refined numerical simulation methods to facilitate the development of more accurate complex models. The aim of this study was to clarify the design of hydrodynamic conditions in these aquaculture systems in order to promote the development of better circulating water aquaculture systems for the industry in the hope of improving both the fish and water balance.

**Key words** Recirculating aquaculture systems; Hydrodynamics; Fish; Interactions; Empirical methods; Numerical simulations

---

① Corresponding author: LIU Ying, E-mail: liuyingzju@zju.edu.cn