

养殖系统中沉降式颗粒驱动机制的研究进展

任效忠^{1,2}, 赵晨旭^{1,3}, 赵 崑⁴, 王一凡^{1,3}, 张 俊⁵, 吴 罡^{1,3}, 史宪莹³,
卢 珊³

(1. 大连海洋大学 设施渔业教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海洋大学 水产与生命学院, 辽宁 大连 116023; 3. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023; 4. 恒力造船(大连)有限公司, 辽宁 大连 116318; 5. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘 要: 陆基养殖系统在设施渔业时代发挥着重要作用, 无论是全周期陆基循环水养殖模式还是深远海养殖中的陆基育苗模式, 以及陆-海接力养殖模式中的陆基养殖, 陆基养殖系统的性能都至关重要。然而, 陆基养殖系统在固体废物处理上仍面临挑战, 尤其是残饵和粪便等沉降式颗粒物的高效收集与去除问题, 废物积累对养殖水质稳定、养殖生物安全、生产操作等带来不利影响。为了对养殖池沉降式颗粒物运动影响因素进行准确、全面地描述, 本研究重点综述了陆基养殖系统中水动力特征量、养殖池结构特征量和沉降式颗粒物自身特性对其驱动的影响。针对陆基系统中沉降式颗粒物去除的难点, 提出具有研究价值的方向, 通过研究改善养殖环境、增进鱼类健康, 提升养殖系统水质, 为生产提供理论支持和实践指导。

关键词: 循环水养殖系统; 沉降式颗粒物; 水动力特征量; 养殖池结构特征量; 驱动机制

中图分类号: S 955

文献标志码: A

在全球人口增长和资源紧张的背景下, 粮食安全和可持续发展已经成为全球性议题, 水产养殖业作为重要的粮食来源之一, 其重要性日益凸显且发展速度迅猛, 对缓解粮食压力和促进经济发展起到了关键作用。中国作为世界上最大的水产养殖国, 其产量约占世界总产量的70%^[1], 对全球水产供应具有举足轻重的影响。然而, 传统水产养殖模式面临着气候变化敏感性高、产量不稳定和环境污染等多重挑战^[2]。为应对这些挑战, 目前的海水养殖主要向陆基工厂化循环水养殖(Recirculating aquaculture systems, RAS)和深远海养殖两个方向发展。然而, 无论是全周期陆基循环水养殖模式还是深远海养殖中的陆基育苗模式, 以及陆-海接力养殖模式中的陆基养殖, 陆基养殖都是一个非常重要的阶段, 陆基系统的性能至关重要。

陆基系统能够更好地适应外部环境变化, 提供更稳定和高效的生产模式^[3-4]。此外, RAS的优

势还包括高养殖密度、节约水资源、提高空间利用率和降低环境污染等, 在可控的环境下保持产品质量的稳定^[5]。同时, 可大幅提高单位产出和养殖效益, 在管理上也更加方便, 运营风险较低。因此, RAS被广泛视为水产养殖业转型升级的关键方向之一, 并被联合国粮农组织(Food and Agriculture Organisation, FAO)大力推广^[6], 成为推动水产养殖业可持续发展的重要力量。

尽管RAS具有诸多优势, 但其在固体废物处理方面存在明显技术瓶颈。据统计, 饲料养殖已占水产养殖总产量的69.5%^[6]。在高密度养殖条件下, 不科学的饲料投喂手段和策略导致大量残饵和鱼类粪便积累在水中, 对水质、鱼类健康和养殖效益产生负面影响。因此, 如何有效管理养殖池中的固体废物, 已成为确保RAS可持续发展的核心问题。废水处理工艺通常可分为3个阶段: 初级固体颗粒分离和去除、二级生物处理以及三级生物处理, 这些阶段的有效性相互依赖,

收稿日期: 2024-12-12 修回日期: 2025-01-08

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFD2400200)

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

通信作者: 卢 珊, E-mail: coolgirl86@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

尤其是初级阶段,其效率直接影响整个处理过程的效果^[7]。目前,初级固体去除技术的研究进展主要集中在提高水处理设备的效率上。有研究者通过结合传统的旋流分离技术和复合流场旋流分离技术,开发出新型旋流沉降池,利用流体动力学原理,通过优化流体路径和沉降池结构布局,使沉降池具有出色的分离固体颗粒的能力^[8]。在过滤设备方面,弧形筛等被广泛应用于颗粒过滤处理。弧形筛有效去除了废水中的固体颗粒,筛除率高达 90%^[9]。此外,导流盘^[10]和增氧水车^[11]的应用也影响了可沉降颗粒物的运动,然而,这些设备在大多数情况下只能实现部分水净化,需要经常维护并会产生二次污染。由于养殖池中的粪便、残饵等可沉降式颗粒物在水体湍流、动物活动、水流冲刷和泵送作用下会迅速分解成细小颗粒,这增加了细小颗粒物的去除难度^[12]。相对而言,养殖池中较大且完整的颗粒物更易于捕获,其处理成本也更为经济。因此,对养殖池中的固体颗粒进行有效管理可以抵消

RAS 中设备的局限性,这对于优化整个 RAS 的废物处理至关重要。

如何提高养殖池自净效果,营造良好水力学环境,是保证当前工厂化循环水养殖池系统稳定发展的重要课题。本研究分类评述了影响沉降式颗粒物运动特征量,其中包括养殖池结构特征量、养殖池水动力特征量与沉降式颗粒物自身特性,为研究者选择所需特征量提供依据,同时为实现 RAS 系统的可持续发展提供技术支持。

1 养殖池结构特征量

不合理的养殖池结构设置易造成可沉降式颗粒物在养殖池底部沉积,引发底部溶解氧降低和水体浑浊度升高。这些变化会影响鱼类的生理功能和新陈代谢,进而影响其行为和健康^[13],养殖池结构对可沉积固体颗粒运动至关重要,养殖池结构特征量如表 1 所示。

表 1 养殖池结构特征量
Tab. 1 Structural characteristics of aquaculture tanks

参数 Parameter	数学表示 Mathematical representation	注释 Explanatory note	文献 Reference
径深比 Diameter to depth ratio	L/H	养殖池的深度与池边长之比	[14-16]
长宽比 Length width ratio	L/B	养殖池较长边与较短边之比	[17-18]
相对弧宽比 Relative arc to width ratio	R/B	矩形圆弧角养殖池中圆弧半径与池边长之比	[19-22]
进径比 Relative inflow distance	C/B	进水管布设距离池中心的距离与池边长之比	[23-27]
坡度 Slope/(°)	—	养殖池池底的坡度	[28-32]

养殖池的径深比、长宽比、相对弧宽比、进径比与池中水动力特性密切相关。当径深比超过一定范围时,会在养殖池中心排水口上方形成水流盲区,该区域内水基本处于静止状态,导致池内整体流态不均匀。LARMOYEUX 等^[14]认为水流流态与水深和直径存在一定的函数关系,建议使用径深比为 5:1~10:1 以防止出现不旋转区。在矩形圆弧角养殖中,当径深比为 2:1~6:1 时,养殖池具有较好的水动力特性,低流速区比例较低、水体较均匀,并且固体颗粒的排放效率随着径深比的减小而增大,排污性能较好^[15]。TIMMONS 等^[16]研究表明,应考虑占地面积、水头、鱼类放养密度、鱼类种类、投喂水平和所需处理类型的成本来确定径深比。研究发现随着长

宽比的增加,矩形圆弧角养殖池中水动力特性和排污性能下降,推荐长宽比范围为 1.0~1.5^[17-18]。在矩形圆弧角池中,随着池壁弧度的增加,养殖池的流场均匀性更好^[19-20],养殖池更接近圆形时,死区逐渐减少,低流速区域得到改善,并且旋转流动变得更加平滑,圆形的水力混合能力相对较好^[21-22]。

进径比是衡量系统流场与影响废物排出的重要参数,优化养殖池的进径比可有效改善养殖池系统内平均流速,提高流场均匀性^[23]。胡艺萱等^[23]、REN 等^[24]在矩形圆弧角养殖中研究了进水管射流角度对养殖池水动力与排污的影响,研究发现,当进径比为 0.07~0.09、射流角度为 25°时,养殖池的流场特性与排污较好。LIU 等^[25]研究了

不同进径比双通道矩形圆弧角养殖池的流场特性,分析了其池底速度分布均匀性和流场底层动能梯度,结果表明进径比为0.02~0.04时,可有效改善系统流场特性,获得较好水动力条件。XUE等^[26]讨论了不同进径比的单边弧角养殖池中流速、流场均匀性、湍流区域和涡流分布的差异,研究发现,远离侧壁的进水管可以增强水箱的自清洁性能,进径比为0.02~0.04时的进水管布置区域为优选区间。研究还进一步解释了养殖池中废物颗粒排出率和运动规律与池内速度分布和压力梯度紧密相关。有学者^[27]结合计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法和多目标遗传算法(Multi-objective genetic algorithm, MOGA),对相对弧宽比和进径比两个参数进行评估和优化,以方形弧角养殖池内平均流速和流速均匀度为评价指标,结果表明弧宽比和进径比均会影响流速和漩涡的分布,但相对于进径比,增大相对弧宽比可以显著提高养殖池内部的平均流速和流场均匀性。

此外,养殖池的底坡设计,特别是锥形池底坡设计,对于限制固体颗粒破碎、提高养殖池的自清洁能力至关重要^[28]。目前,养殖池的坡度设计主要是通过形成二次流、优化流场分布、改变颗粒受力这三方面促进可沉降式颗粒的运动。GORLE等^[29]在八角池中采用了10°坡度设计,以促进次级漩涡的形成。孙嶝等^[30]建立二维养殖槽数值模型,将泥沙运动理论与统计学方法相结合,讨论了坡度对颗粒启动和去除的影响。此项研究从一个新视角指出坡度影响流场分布,且直接改变推移质颗粒受力情况,在颗粒起动研究领域具有显著的优越性。然而,二维模型无法完全反映三维空间中复杂的水动力特性。因此,有学者建立三维模型,研究底坡对可沉降式颗粒运动的影响,结果^[31]表明,增加养殖池坡度对速度分布没有影响,但会降低池内流态紊乱程度、流场湍流强度以及底部出口附近压力,进而减小颗粒物受到的作用力,促进可沉降式颗粒沉降^[32],为提高沉降式颗粒在中心出口的排出率提供了理论依据。

鉴于此,通过改进并优化养殖池结构特征量,包括养殖池的径深比、长宽比、相对弧宽比、坡度等,可以实现养殖池内水体流态的优化,使流速达到鱼类游泳的适宜范围,有效优化养殖池

流场,影响可沉降式颗粒运动,及时有效去除可沉降式颗粒物。

2 养殖池中水动力特征量

养殖池作为工厂化循环水系统的核心组成部分之一,为鱼类提供了必要的生存与生长环境。在此系统中,固体废物的有效管理,对于维持水质和提升鱼类品质至关重要。因此,深入研究养殖池水动力特性,了解沉降式颗粒的池内运动的影响因素,优化水动力学环境促进可沉降式颗粒物排出,是实现循环水系统“节能、减排、绿色”发展的关键课题。为全面了解养殖池内水动力学行为,本研究对水动力学特征量进行了深入探讨。根据描述对象不同,养殖池水动力特征量可分为水流基本特征量(表2)与水流衍生特征量(表3)。

2.1 水流基本特征量

养殖池流速和流量等水流特征对沉降式颗粒的运动起主要影响作用,表2列举了养殖池中水流基本特征量。大量学者通过实验测试与数值模拟对养殖池等封闭系统进行流场分析,结果表明,适宜的流速增加了沉降式颗粒沉降并促进其清除^[33-34]。当池底流速达到颗粒的最小启动速度时,颗粒随流体在罐内发生曲线运动^[26],较高的水流速度能够有效防止固体颗粒沉积,而低流速区域或静止水体则容易导致固体颗粒迅速沉降。流速分布会影响养殖池中鱼类的游动行为,当流速低于养殖鱼类的偏好游泳速度时,鱼类的摄食行为受到影响,当流速超过鱼类游泳能力时,就会导致鱼类疲劳^[35]。然而,养殖池中流速控制的范围并未达到统一,根据出发点不同,目前业界主要有两种说法:一种是基于鱼类健康状态,GORLE等^[36]提出养殖池内流速应控制在鱼体长度的1.0~1.5倍,同时发现大西洋鲑鱼的生长速度和品质随着水流速度的增加而提高,DAVIDSON等^[37]提出当池内流速为每秒0.5~1.5倍鱼体长度时,可提高硬骨鱼的生长速度和食物转化效率;另一种则从排污效率的角度出发,建议流速应维持在15~30 cm/s,以避免产生死水区和净水区,维持自净能力^[38]。以上建议基本以经验为主,在复杂的流场环境中存在一定误差。

表 2 水流基本特征量
Tab. 2 Basic hydrodynamic characteristics

参数 Parameter	数学表示 Mathematical representation	注释 Explanatory note	文献 Reference
流速 Velocity/(m/s)	V	养殖池中水体速度,包括进水速度、出水速度、平均速度	[39]
流量 Water flow rate/(m ³ /s)	Q	注入水的流动速率,用于衡量进入养殖池的水量	[40]

养殖池的流速主要与进水管的射流速度、角度、位置有关,并且可以通过一系列手段进行调节。有研究发现,池内的水体流速与进水速度成正比,尤其是在圆形池中,这种比例根据入水口结构不同,一般在 15% 到 20%^[16],八角池中的进水管径向射流速度比切向射流速度要低 50% 左右^[29],八角池中角壁进水速度比侧壁进水速度低 15%^[41]。在速度调节方面,OCA 等^[39]提出一种新模型预测速度分布,根据池壁和中心轴附近水体的单位质量角动量来预测。李瑞鹏等^[42]针对不同养殖生物与养殖环境,设计进水流速智能调控策略,对不同时间的水流流速进行调控。此外,流速也直接关系到养殖生物生长状态。适宜的水流能够保证鱼类的正常行为模式、适当耗氧量^[43]和健康代谢过程^[44],因此研究水流基本特征量至关重要。

流量是一个宏观量,进水流量会对养殖池中的速度分布、水体混合、固体颗粒的分布与排出产生显著影响。有研究表明,在组合跑道式养殖池中,在单位小时内进水流量为 1 倍水体体积和

1.5 倍水体体积时,池中水的平均旋流速度占进水口进水速度的比值从 6.3% 增加到 8.6%,在进水流量较大时,养殖池中更易形成环流,可使可沉降式颗粒旋转到池中心,实现有效集污排污^[40]。然而,增加进水流量的同时也增加了耗水量和水处理的成本,为达到养殖池节能减排的目标,必须在有限流量的情况下提高养殖池内水流速度。将二者结合,提高适宜的流速区面积并控制水处理成本,以促进沉降式颗粒的运动并汇聚到池中心,使其快速排出并避免水质恶化。

2.2 水流衍生特征量

在循环水养殖系统中,水流衍生特征量是描述养殖池内水流状态和水动力学特性的关键参数,对水体的整体环境、养殖效果以及运营效率具有显著影响,如表 3 所示。有研究表明,养殖池的流动模式取决于切向注入水池壁的水流冲击力^[45]。并且可以通过调节入水冲击力和阻力系数^[46]等参数,对比不同流量养殖池设计中所需能量,以实现养殖池中特定速度。

表 3 水流衍生特征量
Tab. 3 Derived hydrodynamic characteristics

参数 Parameter	注释 Explanatory note	文献 Reference
入水冲击力 Impulse force	进水结构射流产生,用于维持池内水体运动	[45]
阻力系数 Resistance coefficient	养殖池克服阻力消耗的能量	[46]
流量均匀性系数 Fow uniformity index	速度分布的均匀程度	[26]
流速梯度 Flow velocity gradient	流场的散乱程度	
动能梯度 Kinetic energy gradient	速度梯度能量的表现形式,指单位质量的物体移动单位距离的动能变化	[47]
能量有效利用系数 Effective utilization coefficient of energy	养殖池输入用于维持水体运转和水体之间混合的能量与总能量之比	[25]

流场均匀性是评估养殖池流体动力学性能的重要指标,通常通过流场均匀性系数、速度梯度和动能梯度等参数来量化。均匀的流场可以有效避免水流死角和死水区,增强水体混合能力,促进溶解氧与营养物质的均匀分布、减少养殖废物积累。提高流动均匀性可有效减少池中

颗粒额外受到的水流剪切力,减少大直径颗粒物破碎,有效减少悬浮微粒。通过计算建模,SHAHROKHI 等^[48]发现沉降池的沉淀效率随着流动均匀性的增加而增加,均匀的速度场可以提高悬浮颗粒的沉积速率。在池型上,矩形圆弧角养殖池在流场均匀性方面优于八角形养殖池^[18],

且随着弧度的增加,养殖池的流场均匀性得到改善^[49]。圆形池由于其旋转特性,能够实现接近完全混合的状态,有助于溶解氧和代谢物的均匀分布,并促进池底可沉降式颗粒的清除,实现养殖池的自清洁功能。进水管的设计同样对流场均匀性有着重要影响,径向分量的流入可以改变养殖池的混合特性和流场均匀性,而调整进水管射流角度可获得更加均匀的流场^[50],然而,增加进水管数量会导致中间低流速区域增多,从而降低水动力混合均匀性和能量有效利用率^[10]。在康奈尔双排水系统中,纯壁式排水会降低旋转流速和流动均匀性(纯壁式排水的旋转流速降低25.0%,均匀性降低5.5%),进而影响养殖池的整体流场性能^[46]。

能量利用率是评估循环水养殖系统能源利用效率的关键指标,也是衡量养殖池流场特性好坏程度的一个指标,能反映出输入养殖池系统的能量在维持养殖池流场速度方面的能量占比。由于养殖池系统排污性能与流场性能密切相关,因此反映流场性能的能量利用率指标也可成为衡量沉降式颗粒物排污性能的重要参考。水体环流运动的能量主要由进水口射流提供,而能量损耗主要来自克服养殖池阻力和水体质点间相对运动的黏性阻力、水体不规则运动的相互碰撞消耗,提高能量利用率可有效提高水流速度^[22]。水体的剧烈碰撞、反射、折射等过程均伴随较高的能量消耗。提高能量利用率意味着输入能量中有更多的部分被有效转化为水体的动能,而不是以热能或其他形式散失,降低了水体在剧烈碰撞、反射、折射等过程中伴随的能量消耗。这种转化能够增强养殖池内的水流速度与水流混合能力,使水流分布更加均匀,从而减少水流死角,促进水体的有效循环和混合。进而增强水流对沉降颗粒物的驱动能力,减少颗粒物在水中的停留时间,使其在沉积以后以较高的速率排出,避免颗粒物的滞留、分解等引起的水质污染。能量有效利用受到养殖池几何形状、进水方式及进水管位置等因素的影响。养殖池的空间布局对于提高能量利用效率十分重要,例如,合理的空间配置可以减少水流死角,提高能量的有效利用^[21]。在方形弧角养殖池中,ZHANG等^[51]探讨了组合进水管射流进水对提高能量利用率和改善流体动力学性能的影响,结果表明可通过增强

水流混合和减少涡流来提高能量利用率。LIU等^[25]的研究进一步揭示了进水管位置对双排水弧角养殖池的流体动力学影响,指出适当的进水管位置(进水管到池壁的距离与养殖池直径之比为0.02~0.04)可以显著改善流场均匀性,减少能量损耗。在双进水管驱动下的矩形圆弧角养殖池中,相较进水管布设在角壁位置,进水管布设在弧壁位置的养殖池底部流场分布更加均匀^[52]。此外,ZHANG等^[53]结合计算流体力学和机器学习技术,对养殖池的设计参数进行了优化,参数包括出水口直径、进水口直径、高度、射流角度等,旨在实现更高能量利用率和更优的流场水力性能。研究表明,优化后的参数组合能够显著提高能量利用率。

因此,流场特征量在养殖池中具有重要的实际意义。通过对这些特征量的精确测量和分析,可以优化养殖池的设计和运营,提高水质、提升养殖效果并降低运营成本,对于推动水产养殖业的可持续发展具有重要意义。

3 沉降式颗粒物自身特性

沉降颗粒物的聚集分布特征与颗粒物的运动密切相关,这对于理解颗粒物在养殖池中的行为至关重要。研究颗粒物的聚集分布特征主要采用物理实验和数值模拟两种方法。物理实验通过先进的图像采集和处理技术,能够揭示池内流场的分布特性,并分析颗粒物的聚集分布特征^[54]。数值模拟主要利用计算流体力学技术,采用有限元软件如EDEM,ANSYS FLUENT等,进行离散相的模拟。目前,有关养殖池沉降式颗粒物的研究大多数是采用ANSYS FLUENT进行离散相模拟。实际上,采用EDEM进行颗粒运行轨迹的计算,构建不同物性的颗粒模型并与FLUENT耦合,可以更精确地还原颗粒对流场的作用及颗粒间的碰撞情况^[55],但联合使用EDEM和ANSYS FLUENT分析养殖池可沉降式颗粒物的研究较少。陈波等^[56]使用ANSYS和EDEM进行双流体喷嘴的数值模拟,探究颗粒间的相互作用,包括碰撞、黏附以及沉降过程,并分析不同气液压力比和雾滴粒径对雾滴颗粒速度分布的影响。王建明等^[57]则通过EDEM-FLUENT联合仿真探究固体颗粒在搅拌罐内的运动状态,得到了固体颗粒在搅拌罐内的位置信息、运动情况和分

散情况。孙颀等^[30]采用CFD-DEM,分析养殖槽中水流与颗粒的运动情况,研究不同斜坡与池底粗糙度条件下颗粒的启动与输运。因此,物理实验和数值模拟相结合,为研究可沉降式颗粒的运动行为提供了强有力的支持,EDEM、ANSYS和FLUENT软件的联合使用也为研究可沉降式颗粒运动提供了新思路。

沉降式颗粒物运动受到颗粒自身特性的影响,包括粒径、密度、形状等,这些特性决定了其在养殖池中的运动和沉积行为。颗粒的密度直接影响了其在重力作用下的沉降行为,增加颗粒密度可促进沉降,从而提高去除效率。粒径则直接影响颗粒的沉降速度和在养殖池中的分布,不同粒径颗粒在沉淀槽中的去除率有显著差异。形状则影响颗粒在水流中的阻力及其沉降模式,不同形状颗粒在水流中受到的阻力不同,进而影响其沉降行为和堵塞情况。PAPÁČEK等^[54]基于颗粒在水柱中的沉降和确定沉降速度,使用图像处理测量颗粒直径并确定颗粒的有效密度,以准确获得颗粒的适当尺寸分布,并利用高清摄像机记录了颗粒运动轨迹,通过ANSYS FLUENT软件对鱼缸中的流场和进料颗粒物的分布进行了三维模拟,评估了池内颗粒的平均停留时间。薛博茹等^[58]使用FLUENT软件研究了不同密度和粒径的可沉降式颗粒的沉降规律和排出效率,结果表明,增加可沉降式颗粒密度可以促进颗粒的沉降,从而提高去除效率,不同粒径颗粒物受流场驱动力呈现不同程度的向心运动和离心运动状态,颗粒累计排出率随粒径增大呈现先减后增的趋势,当固体颗粒物粒径为1和4 mm时,系统排污效果均较好。有研究^[59]表明,增加颗粒密度可将沉淀池的去除效率提高约20%。刘长发等^[60]使用FLUENT软件研究牙鲆养殖系统中颗粒物粒径分布与沉降特性的关系,沉淀槽中不同粒径的颗粒物去除率有显著差异,粒径为100~150 μm 的颗粒物去除率比50~100 μm 的颗粒物去除率高8%左右。魏武^[61]采用FLUENT软件建立了双通道圆形养殖池固液两相模型,讨论了不同直径固相颗粒物的运动轨迹,发现颗粒物在养殖池中的滞留时间分布随着颗粒粒径的增大而呈线性变化,且变化趋势为先增大后减小,且当粒径为毫米级以上时,颗粒物的滞留

时间分布有一定的规律,而粒径为微米级时,滞留时间为不规则变化。KLEBERT等^[33]通过FLUENT软件预测了封闭椭圆形网箱中的流动趋势和颗粒去除特征,发现由于重力和湍流的影响,小颗粒主要从上部排水口去除,而大颗粒则从底部排水口快速排出。HUGGINS等^[62]采用FLUENT软件在虹鳟跑道养殖池中研究了不同粒径对其沉淀率的影响,研究发现692、532和350 μm 这3种较大粒径颗粒物的沉淀率为100%,204、61和35 μm 这3种粒径颗粒物的沉淀率分别为54.7%、0.9%和0.1%。颗粒形状特征,如形状、圆度和表面纹理等,会影响颗粒的堵塞^[63]。

综上所述,沉降式颗粒物自身特性对其运动的影响不可忽视,控制可沉降式颗粒物自身特性为管理和优化水产养殖作业的废物去除提供一种新的有效方法。深入理解可沉降式颗粒物自身特性对于促进沉降式颗粒物运动、优化养殖环境、提高养殖效率具有重要意义。

4 存在问题与展望

提升系统颗粒输运效率是保证循环水养殖系统长期稳定运行的关键措施。目前的生产系统中,养殖池的固体输运性能不理想问题是常见现象,对鱼类健康、系统运行均有较大不利影响。而目前大多数研究主要集中在水处理设备,例如机械过滤设备和生物滤池。为了优化养殖池的固体颗粒运动性能以提升排污效率,需要系统分析颗粒的自身属性和系统内的水动力学特性,通过深入研究这些因素以便有效地控制和管理固体颗粒的输运,从而优化养殖环境、提高养殖效率。结合目前国内外关于循环水养殖池固体颗粒的输运研究现状,建议未来从以下几方面开展深入研究:(1)针对系统水动力特性和鱼类行为耦合研究对颗粒运动特性的影响。鱼类高密度养殖环境会显著改变养殖系统的水动力特性,鱼类摆尾运动会在尾部末端形成一系列环形脱落涡,与周围水体产生交互影响。未来研究要针对指定养殖系统、特定鱼类养殖环境和养殖密度、鱼类行为等开展耦合研究,深入分析对颗粒运动特性的排出机理,精准模拟鱼类运动与颗粒物排出的动态互作过程。(2)开展多级配固体颗粒输运的影响研究。养殖生产系统的固体颗粒

不是单一物理特性理想化的固体颗粒,涵盖了残饵、粪便等不同物质组成,是由不同粒径、密度、形状组成的多级配的颗粒混合物。未来的研究要分析养殖系统固体颗粒组成,建立多级配固体颗粒输运的模型,并开展针对性研究。(3)开展大型化设施对颗粒运动的影响研究。随着养殖设施向大尺度方向发展,其流场特性和颗粒物输运性能变得更加复杂,日常管理操作的难度明显增大,系统不完善带来的生产风险陡增。因此,对大型化设施的性能进行精准预测分析,对方便操作、降低风险和提升效益至关重要。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 李成军. 我国水产养殖安全问题研究现状[J]. 现代农业, 2019(6): 69-70.
LI C J. Research status of aquaculture safety in China[J]. Modern Agriculture, 2019(6): 69-70.
- [2] 柯蕾, 周爱国. 探究新旧模式优劣促进水产养殖优化[J]. 渔业致富指南, 2019(22): 22-25.
KE L, ZHOU A G. Explore the advantages and disadvantages of the old and new models to promote aquaculture optimization[J]. Fishery Guide to be Rich, 2019(22): 22-25.
- [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.
ZHANG J G. Study on efficient facility recirculating aquaculture mode[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2017(4): 24-25.
- [4] 任效忠, 周寅鑫, 车宗龙, 等. 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[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(3): 483-492.
REN X Z, ZHOU Y X, CHE Z L, et al. A review: the construction of flow field and its interaction with fish in high-density seawater aquaculture system[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(3): 483-492.
- [5] ZHAO Y P, XUE B R, BI C W, et al. Influence mechanisms of macro - infrastructure on micro - environments in the recirculating aquaculture system and biofloc technology system[J]. Reviews in Aquaculture, 2023, 15(3): 991-1009.
- [6] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022 [R]. Rome: FAO, 2022.
- [7] GUERDAT T C, LOSORDO T M, DELONG D P, et al. An evaluation of solid waste capture from recirculating aquaculture systems using a geotextile bag system with a flocculant-aid[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 54: 1-8.
- [8] 姜宇. 旋流沉降池流场的CFD分析[J]. 农机化研究, 2006, 28(6): 93-94, 105.
JIANG Y. Turbulence numerical simulation of hydrocyclone[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(6): 93-94, 105.
- [9] 梁友, 王印庚, 倪琦, 等. 弧形筛在工厂化水产养殖系统中的应用及其净化效果[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(3): 116-120.
LIANG Y, WANG Y G, NI Q, et al. The application and purification effect of the arc screen in the factorized aquaculture systems[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(3): 116-120.
- [10] ZHANG J, ZHANG Z H, CHE X, et al. Hydrodynamics of waste collection in a recirculating aquaculture tank with different numbers of inlet pipes [J]. Aquacultural Engineering, 2023, 101: 102324.
- [11] 桂福坤, 张学芬, 曲晓玉, 等. 水车式增氧机驱动下方形圆切角养殖池集污水动力试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 275-282.
GUI F K, ZHANG X F, QU X Y, et al. Hydraulic characteristics of waste convergence under paddle-wheel aerators for square aquaculture pond with round angle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 275-282.
- [12] SUMMERFELT S T, DAVIDSON J, TIMMONS M B. Hydrodynamics in the 'Cornell-type' dual-drain tank [C]//Proceedings of the Third International Conference on Recirculating Aquaculture. Roanoke, 2000: 160-166.
- [13] ZHANG K S, YE Z Y, QI M, et al. Water quality impact on fish behavior: a review from an aquaculture perspective [J]. Reviews in Aquaculture, 2025, 17(1): e12985.
- [14] LARMOYEUX J D, PIPER R G, CHENOWETH H H. Evaluation of circular tanks for salmonid production[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1973, 35(3): 122-131.
- [15] 车宗龙, 胡伟, 任效忠, 等. 方形圆弧角养殖池径深比对水动力特性的影响[J]. 淡水渔业, 2024, 54(3): 97-106.
CHE Z L, HU W, REN X Z, et al. Influence of the diameter to depth ratio on hydrodynamic characteristics of the square arc angle aquaculture tank [J]. Freshwater Fisheries, 2024, 54(3): 97-106.
- [16] TIMMONS M B, SUMMERFELT S T, VINCI B J. Review of circular tank technology and management[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 18(1): 51-69.
- [17] 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.
SHI X Y, LI M, JIANG H Z, et al. Numerical study on effects of length-width ratio parameters on hydrodynamic characteristics of circular Angle mariculture tanks [J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(6): 921-929.

- [18] 史宪莹, 李猛, 任效忠, 等. 长宽比对双进水管结构矩形圆弧角养殖池排污特性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(4): 707-716.
SHI X Y, LI M, REN X Z, et al. Influence of length width ratio on sewage discharge characteristics in acircular rectangular angle culture tank with double inlet pipe structure[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(4): 707-716.
- [19] 张倩, 桂劲松, 任效忠, 等. 相对弧宽比对双通道方形养殖池的流场优化研究[J]. 南方水产科学, 2022, 18(4): 119-125.
ZHANG Q, GUI J S, REN X Z, et al. Optimization of flow field in dual-drain square aquaculture tank with relative arc to width ratio [J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(4): 119-125.
- [20] ZHANG Q, ZHOU Y X, REN X Z, et al. Numerical simulation of hydrodynamics in dual-drain aquaculture tanks with different tank structures [J]. Ocean Engineering, 2022, 265: 112662.
- [21] ZHANG J, JIA G C, WANG M H, et al. Hydrodynamics of recirculating aquaculture tanks with different spatial utilization [J]. Aquacultural Engineering, 2022, 96: 102217.
- [22] 张俊, 王明华, 贾广臣, 等. 不同池型结构循环水养殖池水动力特性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 311-320.
ZHANG J, WANG M H, JIA G C, et al. Effect of structures on hydrodynamic characteristics of recirculating aquaculture pond[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 311-320.
- [23] 胡艺萱, 刘鹰, 任效忠, 等. 基于流态的方形圆弧角养殖池进水管系统优化数值研究[J]. 水产学报, 2023, 47(5): 182-193.
HU Y X, LIU Y, REN X Z, et al. Numerical study on optimization of inlet system of square arc angle aquaculture tank based on flow pattern [J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(5): 182-193.
- [24] REN X Z, HU Y X, ZHOU Y X, et al. Numerical simulation of inlet placement on sewage characteristics in the rounded square aquaculture tank with single inlet[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2024, 42(4): 1359-1382.
- [25] LIU H B, XUE B R, REN X Z, et al. Influence of inlet placement on the hydrodynamics of the dual-drain arc angle tank for fish growth[J]. Aquacultural Engineering, 2023, 101: 102327.
- [26] XUE B R, ZHAO Y P, BI C W, et al. Investigation of flow field and pollutant particle distribution in the aquaculture tank for fish farming based on computational fluid dynamics [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107243.
- [27] LIU H F, REN X Z, XUE B R, et al. Systematic optimization of the square arc angle aquaculture tank combining CFD methodology and multi-objective genetic algorithm [J]. Aquacultural Engineering, 2023, 101: 102326.
- [28] CARVALHO R A P L F, LEMOS D E L, TACON A G J. Performance of single-drain and dual-drain tanks in terms of water velocity profile and solids flushing for *in vivo* digestibility studies in juvenile shrimp [J]. Aquacultural Engineering, 2013, 57: 9-17.
- [29] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: effect of inlet nozzle angle on the velocity field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 79-91.
- [30] 孙颀, 刘飞. 以CFD-DEM为基础的养殖槽排污性能及底坡优化[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 946-957.
SUN D, LIU F. Pollution discharge performance and bottom slope optimization of aquaculture tanks for intensive pond aquaculture [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 946-957.
- [31] XUE B R, REN X Z, LIU C F, et al. A study on the influence of bottom structure in recirculating aquaculture tank on velocity field [C]//Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu: ISOPE, 2019: ISOPE-I-19-350.
- [32] 张俊, 贾广臣, 王庆诚, 等. 不同底面坡度的循环水养殖池塘净化效能[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(4): 702-709.
ZHANG J, JIA G C, WANG Q C, et al. Purification efficiency of a recirculating aquaculture pond with different bottom slopes [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(4): 702-709.
- [33] KLEBERT P, VOLENT Z, ROSTEN T. Measurement and simulation of the three-dimensional flow pattern and particle removal efficiencies in a large floating closed sea cage with multiple inlets and drains [J]. Aquacultural Engineering, 2018, 80: 11-21.
- [34] GUO H, KI S J, OH S, et al. Numerical simulation of separation process for enhancing fine particle removal in tertiary sedimentation tank mounting adjustable baffle[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 158: 21-29.
- [35] HVAS M, FOLKEDAL O, OPPEDAL F. Fish welfare in offshore salmon aquaculture[J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13(2): 836-852.
- [36] GORLE J M R, TERJESEN B F, HOLAN A B, et al. Qualifying the design of a floating closed-containment fish farm using computational fluid dynamics [J]. Biosystems Engineering, 2018, 175: 63-81.
- [37] 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.
- [38] BURROWS R E, CHENOWETH H H. The rectangular circulating rearing pond [J]. The Progressive Fish-Culturist, 1970, 32(2): 67-80.
- [39] OCA J, MASALO I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features [J]. Aquacultural Engineering, 2013, 52: 65-72.
- [40] 程果锋, 吴宗凡, 顾兆俊, 等. 组合跑道式养殖池系统设计及水力学特征[J]. 渔业现代化, 2015, 42(1): 6-10.
- CHENG G F, WU Z F, GU Z J, et al. System design and hydraulic characterization of mixed-cell raceway-type pond system [J]. Fishery Modernization, 2015, 42(1): 6-10.
- [41] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Influence of inlet and outlet placement on the hydrodynamics of culture tanks for Atlantic salmon [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 188: 105944.
- [42] 李瑞鹏, 田云臣, 李青飞, 等. 进水流速对圆形循环水养殖池流场特性影响的数值模拟[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(3): 55-65.
- LI R P, TIAN Y C, LI Q F, et al. Numerical simulation of the effect of inflow velocity on the flow field characteristics of circular circulating aquaculture ponds [J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(3): 55-65.
- [43] SEGOVIA E, MUÑOZ A, FLORES H. Water flow requirements related to oxygen consumption in juveniles of *Oplegnathus insignis* [J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2012, 40(3): 755-762.
- [44] 孙国祥, 李勇, 田喆, 等. 流速对封闭循环水养殖大菱鲆生长、摄食及水质氮素的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 53-60.
- SUN G X, LI Y, TIAN Z, et al. Effects of flow rate on the growth, feed intake and water nitrogen in a closed recirculation aquaculture system of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. Marine Sciences, 2011, 35(5): 53-60.
- [45] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of octagonal culture tanks with Cornell-type dual-drain system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 354-364.
- [46] OCA J, MASALÓ I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks [J]. Aquacultural Engineering, 2007, 36(1): 36-44.
- [47] 杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 125-130.
- YANG Y, YAN Z M, QIAO Y. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(2): 125-130.
- [48] SHAHROKHI M, ROSTAMI F, MD SAID M A, et al. The effect of number of baffles on the improvement efficiency of primary sedimentation tanks [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(8): 3725-3735.
- [49] 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.
- REN X Z, ZHANG Q, JIANG H Z, et al. Study on the structure optimization of single-drain square mariculture aquaculture tank based on the flow field uniformity [J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(2): 287-293.
- [50] CHOI W, LEE S, BAEK S, et al. Numerical analysis of thermal and hydrodynamic characteristics in aquaculture tanks with different tank structures [J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115880.
- [51] ZHANG J, GAO Y, CHEN C C, et al. Effect of combined water-jet inlets on the hydrodynamic performances in square arc-corner aquaculture tanks [J]. Ocean Engineering, 2023, 289: 116234.
- [52] 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.
- REN X Z, XUE B R, JIANG H Z, et al. Numerical study on the influence of double-inlet pipes system for single-drain rectangular arc angle aquaculture tank on hydrodynamic characteristics [J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 50-56.
- [53] ZHANG S H, YU G H, GUO Y, et al. Modelling development and optimization on hydrodynamics and energy utilization of fish culture tank based on computational fluid dynamics and machine learning [J]. Energy, 2023, 276: 127518.
- [54] PAPÁČEK Š, PETERA K, CÍSAŘ P, et al. Experimental & computational fluid dynamics study of the suitability of different solid feed pellets for aquaculture systems [J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6954.
- [55] 喻黎明, 邹小艳, 谭弘, 等. 基于CFD-DEM耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132.
- YU L M, ZOU X Y, TAN H, et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydrocyclone based on coupled CFD-DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 126-132.
- [56] 陈波, 许尽欢, 李艳英, 等. 基于CFD-DEM的双流体喷嘴颗粒物去除特性及效率优化研究[J]. 高技术通讯, 2024, 34(8): 895-904.
- CHEN B, XU J H, LI Y Y, et al. Optimization of particle removal characteristics and efficiency of two-fluid

- nozzle based on CFD-DEM [J]. Chinese High Technology Letters, 2024, 34(8): 895-904.
- [57] 王建国, 邱钦宇, 何讯超. 搅拌罐内基于 EDEM-FLUENT 耦合的多相流混合数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(5): 79-84.
- WANG J M, QIU Q Y, HE X C. Numerical simulation of multi-phase flow mixing in stirring tank based on EDEM-FLUENT coupling [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(5): 79-84.
- [58] 薛博茹, 李永峰, 胡艺萱, 等. 基于 CFD 的进水管布置位置对沉降式固体颗粒排污影响的数值模拟[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(4): 620-628.
- XUE B R, LI Y F, HU Y X, et al. Numerical simulation on influence of inlet pipe location on the discharge rate of settling solid particles based on computation fluid dynamics[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(4): 620-628.
- [59] UNGER J, BRINKER A. Feed and treat: what to expect from commercial diets [J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 19-29.
- [60] 刘长发, 徐岩, 晏再生, 等. 牙鲆养殖循环系统中固体废物物的粒径分布与沉降特征[J]. 渔业现代化, 2009, 36(6): 1-5.
- LIU C F, XU Y, YAN Z S, et al. Particle size distribution and settling characteristics of solids waste settled in the recirculating aquaculture system for Japanese flounder culture [J]. Fishery Modernization, 2009, 36(6): 1-5.
- [61] 魏武. 循环水圆形养殖池数值模拟及结构优化[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- WEI W. Numerical simulation and structure optimization of circular culture tank for recirculating aquaculture systems [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [62] HUGGINS D L, PIEDRAHITA R H, RUMSEY T. Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness [J]. Aquacultural Engineering, 2005, 33(3): 167-180.
- [63] QIU Z M, XIAO Q H, YUAN H, et al. Particle shape and clogging in fluid-driven flow: a coupled CFD-DEM study[J]. Powder Technology, 2024, 437: 119566.

Progress on settleable particle driving mechanisms in aquaculture systems

REN Xiaozhong^{1,2}, ZHAO Chenxu^{1,3}, ZHAO Wei⁴, WANG Yifan^{1,3}, ZHANG Jun⁵, WU Gang^{1,3}, SHI Xianying³, LU Shan³

(1. *Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Ministry of Education, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China*; 2. *College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China*; 3. *College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China*; 4. *Hengli Shipbuilding (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116318, Liaoning, China*; 5. *College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: Land-based aquaculture systems play an important role in the era of facility-based fisheries. Whether it is a full-cycle land-based recirculating aquaculture model or a land-based nursery model in deep-sea aquaculture, or land-based aquaculture in land-sea relay aquaculture models, the performance of land-based systems is critical. However, land-based aquaculture systems still face challenges in solid waste management, especially the efficient collection and removal of settleable particles like uneaten feed and feces. Accumulation of these wastes adversely impacts the stability of water quality, biological safety of cultured organisms, and production operations. To accurately and comprehensively describe the factors influencing the movement of settleable particles in aquaculture tanks, this paper focuses on reviewing the effects of hydrodynamic characteristics of aquaculture tanks, structural characteristics of the tanks, and the inherent properties of settleable particles on the movement of settleable particles. Aiming at the difficulties of removing settleable particles in land-based systems, this paper proposes valuable research directions to improve the aquaculture environment, enhance fish health, and improve the water quality of the aquaculture system, thus providing theoretical support and practical guidance for production.

Key words: recirculating aquaculture systems; settleable particles; hydrodynamic characteristics; aquaculture tank structural characteristics; driving mechanisms