

文章编号: 1674-5566(2023)05-0903-08

DOI: 10.12024/jsou.20230604235

工厂化循环水养殖池水动力学研究进展

张俊¹, 高阳¹, 陈聪聪¹, 张宁¹, 刘兴国², 曹守启¹, 胡庆松¹,
张铮¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要: 工厂化循环水养殖模式有利于实现标准化养殖和智能化管理, 符合资源节约、环境友善型绿色发展理念, 是未来水产养殖的主要发展方向。循环水养殖池是养殖系统的关键基础设施, 掌握其水动力特性既是提高空间利用率、注水能量利用率和集排污效能的关键, 也是保持溶解氧均匀混合、促进水生生物健康生长的前提。本研究全面梳理了国内外关于循环水养殖系统水动力特性的研究成果, 总结了该领域的研究热点和发展趋势, 分析了养殖池的池型结构、水循环驱动方式以及集排污装置对水动力特性的影响。研究成果可为构建“节能、减排、生态、高效”的工厂化循环水养殖系统提供创新思路和理论指导。

关键词: 水产养殖; 循环水养殖系统; 养殖池; 水动力学; 自净化效能

中图分类号: S 955 **文献标志码:** A

加快发展循环水养殖模式是我国现代水产养殖业健康可持续发展的必由之路。联合国粮食及农业组织发布的《2020年世界渔业和水产养殖状况》报告指出, 全球人均鱼类消费量已创下每年 20.5 kg 的新纪录。中国是世界上最大的水产养殖国家, 2022 年水产品总产量达到 6 865.91 万 t, 比 2021 年增加了 175.62 万 t, 增幅达到 2.62%, 养殖产量为 5 565.46 万 t, 同比增长了 3.17%^[1]。其中, 池塘、网箱、大水面、滩涂、稻田等养殖面积超过 15 万 km², 而这些养殖模式存在占地面积大、养殖地域受限、污染环境、土地富营养化、易受地理气候条件影响等劣势, 成为制约我国水产养殖业可持续发展的瓶颈。2022 年 1 月, 农业农村部印发《“十四五”全国渔业发展规划》, 提出要大力发展规模化、集约化、机械化、智能化和标准化水产养殖模式, 而工厂化循环水养殖模式正是核心和主要发展方向^[2]。

工厂化循环水养殖系统 (Recirculating aquaculture system, RAS) 取代了传统的户外开放式养殖模式, 转而在室内“受控”环境下进行高密度养殖, 其核心目标是通过调控水温、盐度、pH、

碱度、化学成分和溶解氧质量浓度等水质参数, 为养殖对象提供适宜的生长条件。研究^[3-4]表明, 相对于开放式养殖模式, RAS 可以提高单位产出 2~10 倍, 在大幅降低环境污染的同时提高养殖效益。当前, RAS 的研究热点主要集中在智能投喂、水质调控、尾水处理和智能化管控等方面。但是, 由于 RAS 结构设计存在问题, 导致水动力状况不理想、颗粒物分离效率低以及集污/排污效果差等问题日益凸显, 成为制约 RAS 发展的技术瓶颈。因此, 掌握 RAS 的水动力特性对提高养殖效益至关重要。研究表明, 具备良好水动力特性的养殖池需同时满足 3 个条件: (1) 水体混合性能好, 可提供溶解氧均匀分布的水环境; (2) 流速范围大, 可增强水生生物游动而有助于其保持健康; (3) 能快速去除粪污残饵等固体颗粒物, 可有效避免水质持续恶化。为实现以上目标, 当前研究集中在养殖池的池型结构、水循环驱动装置和集污装置优化等方面。此外, 养殖品种和密度也会直接影响养殖池的水动力特性, MASALÓ 等^[5]研究发现, 鱼类游动引起的湍流将会导致涡流黏度增大, 平均流速降低。所有这些因素相互影

收稿日期: 2023-06-15 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 上海市科技兴农项目 (沪农科推字 2021 第 3-1 号); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目 (2021 科技 02-12); 上海市崇明区农业科创项目 (2021CNKC-05-06)

作者简介: 张俊 (1983—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为渔业工程水动力学。E-mail: zhangjun@shou.edu.cn

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>

响,使得评估RAS的水动力特性成为研究热点和难点。

1 循环水养殖系统水动力特性的研究方法

1.1 物理实验

养殖池物理模型实验是研究和优化RAS水动力特性的有效方法,实验系统主要由养殖池、水循环系统、流速流量测量系统和图像采集系统等4个部分组成。在实验系统的设计中:首先,需根据相似性准则确定模型的结构参数;其次,需配置实验测试仪器和设备,在不同的系统运行条件下,监测不同位置上的流速、流量、颗粒物分布等水动力学指标;最后,通过分析实验测试数据,优化物理模型。朱放等^[6]构建了养殖池粒子图像测速技术(Particle image velocimetry, PIV)的实验系统,研究了进水管位置、注水角度、流量速度等因素对集污水动力特性的影响;张学芬^[7]利用PIV系统测量了八边形养殖池的速度分布,并研究了单进水管和双进水管的布设距离和入射角度对养殖池集污特性的影响;HU等^[8]通过PIV系统研究了进水管位置、注水角度和流量速度等因素对集污水动力特性的影响;于林平等^[9]和任效忠等^[10]开展了对方形圆弧角养殖池的水动力特性研究,得到了池型几何参数和进水管相对位置等对养殖池水动力特性的影响;OCA等^[11]采用粒子跟踪测速技术(Particle tracking velocimetry, PTV)评估4种不同进水口配置的矩形养殖池内的水流状况,研究得出,将垂直进水方式调整为水平进水方式有利于减少低速旋涡区,并且水平切向进水可以在养殖池中实现更高、更均匀的速度。

1.2 数值模拟

计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值模拟是研究养殖池水动力特性的重要手段。相对于物理实验,数值模拟可以克服实验研究所需设备昂贵、耗时长、数据少等缺点,有利于更加全面地了解养殖池内部的流场特性。研究表明:CFD仿真结果可用于养殖池的结构参数和运行参数的优化,相较于物理模型,数值模拟在预测流速、流量、水力停留时间、混合时间、颗粒运动轨迹和集聚效应等方面具有更高的准确性^[12-13]。通过CFD仿真可以

获得养殖池内的速度分布、湍流强度、水流均匀性指数、注水能量利用效率、水阻力系数、颗粒物的停留时间和排出率等水动力特性^[14],这些水动力学指标既是提高空间利用率、能量利用率和自净化效能的关键,也是保持溶解氧均匀混合、促进水生物健康生长的前提。例如:史明明等^[15]运用CFD仿真比较了2种养殖系统的流场分布,发现循环养殖池内流动死区更少;汪翔等^[16]运用CFD仿真中的离散项模型(Discrete phase model, DPM)评估了固相颗粒在跑道式养殖系统中的沉降运动规律,并通过实验验证了数值模拟方法的有效性;ZHU等^[17]运用CFD仿真研究了颗粒尺寸和水体循环时间对流场均匀性的影响,并与实验结果进行了对比分析。综上,CFD数值模拟是研究RAS水动力特性的主要方法,但在相关研究中,需结合实验数据验证计算方法的有效性。

2 养殖池的池型结构对水动力特性的影响

养殖池作为RAS的基础设施,其形状、大小、径深比、底面坡度等结构参数对养殖池的水动力特性均有较大影响。在不同的养殖环境、养殖品种和密度等条件下,研究人员提出了圆形、矩形、六边形、八边形、方形圆弧角、方形切角等池型结构。

2.1 圆形养殖池

圆形养殖池是当前应用最多的一种池型结构,它具有良好的水体混合和自净化能力,其水动力性能优于矩形养殖池,但空间利用率低。DUARTE等^[18]利用PTV研究了不同养殖池结构和流动状态对养殖水产分布的影响。实验表明,相比矩形养殖池,圆形养殖池具有更高的养殖生物均匀分布系数,更适合工厂化高密度养殖。根据TIMMONS等^[19]的观点,为避免池内产生死水区,建议保持圆形养殖池的径深比为3:1~10:1。然而,在实际设计中需要综合考虑空间利用、养殖密度、鱼类需求等因素,径深比通常会依据经验选取。当涉及池内流量控制时,增加底流流量可以提高养殖池的自净化效能,但同时也会增加换水次数。此外,随着圆形养殖池的直径增大,原有的水循环驱动装置和运行参数无法保证相同的自净化效能。因此,随着养殖密度和尺寸的增加,对养殖池水质管理、水流控制和废物处理

能力的要求也随之增加^[20]。魏武^[21]研究了圆形养殖池底面坡度对养殖池内速度特性的影响,在相同的水流回转速度下,增加养殖池的底面坡度可以提高固体颗粒物的分离效率。综上,圆形养殖池具备多项优势,但设计过程中需要根据具体情况选择径深比、流量参数和底面坡度,以充分发挥圆形养殖池的水动力学特性。

2.2 矩形养殖池

矩形养殖池具备便于施工、空间利用率最大化以及灵活的水流控制等优势,在实际中也有一定的应用。SUMMERFELT等^[22]指出尽管矩形池易于管理、构建成本低且空间利用率高,但是水体混合和集污排污能力较差。因此,矩形养殖池很少单独使用,通常需要进行改造来提升水动力性能。例如,OCA等^[23]提出在矩形养殖池中放置挡板将养殖池划分为多个养殖单元,发现挡板可提高排水口周围的水流速度,从而改善水体的循环来提高养殖池自净化效能。此外,该团队还引入了无量纲水箱阻力系数,用于评估养殖池内的平均速度和水循环阻力与养殖池几何形状和进出水管位置之间的关系。综上,矩形养殖池的空间利用率高但水动力性能不理想,通常需要进行改造和优化。如在其内部设置挡板、优化进出水口的位置等都是提升矩形养殖池水动力性能的必要手段。

2.3 方形圆弧角养殖池

方形圆弧角养殖池可以获得良好的水流形态,同时兼顾空间利用效率、强度和稳定性、管理便捷性以及可调性等特点。ZHANG等^[24]对不同弧宽比的方形圆弧角养殖池的水动力学特性进行了评估,发现弧宽比为0.2~0.4时,养殖池表现出最佳的水动力学特性。在相同空间利用率下,方形圆弧角养殖池相比于八边形养殖池拥有更高的平均流速、更少的低速区域和更有规律的水流运动。此外,薛博茹等^[25]提出了针对单通道方形圆弧角养殖池进径比的设置建议。将进径比参数控制为0.02~0.04时可以使养殖池底部的流体呈现规律的高速运动,从而促进明显的二次流效应。二次流效应对固体颗粒物的沉降和向池底中心的汇聚具有积极影响。史宪莹等^[26]研究了方形圆弧角中长宽比对双进水管结构养殖池排污特性的影响,得出将养殖池长宽比设置在1.0~1.5更具合理性的结论。综上,方形圆弧角养

殖池集各种池型优点,但在设计过程中需要考虑弧宽比、进径比、长宽比等参数的最佳匹配,以发挥最佳的水动力特性。

2.4 其他结构养殖池

XUE等^[27]将矩形和方形圆弧角养殖池的结构融合在一起,设计出了矩形单侧圆弧角养殖池。研究发现,矩形单侧圆弧角养殖池内的水流均匀性、循环特性和自净化效能均表现良好。方形切角养殖池的长宽比可以灵活调整,切角设计可以减少死水区的产生,使池内水流分布更合理。相比其他池型,方形切角池体更简单,建造工程量更小。张俊等^[28]对比研究了正方形、六边形、八边形养殖池的水动力特性和综合性能,得出正六边形和具有较大切角距离的方形养殖池具有更好的水动力学特性。WATTEN等^[29]提出了一种混合单元养殖池(Mixed-cell rearing unit, MCR),见图1a。在MCR中,每个单元内的水流由中心管引导,有助于形成良好的水循环条件。LABATUT等^[30]设计了一种矩形混合养殖池图1b。得出混合单元养殖池具有均匀的速度和水质、高效的自清洁效能以及易于维护的优势。综上,养殖池通过优化结构,均在改善流场和增强自净化效能方面取得成效。然而,在实际工程中,还需综合考虑鱼类种类、养殖密度等具体因素,以确定最佳的养殖池设计方案。

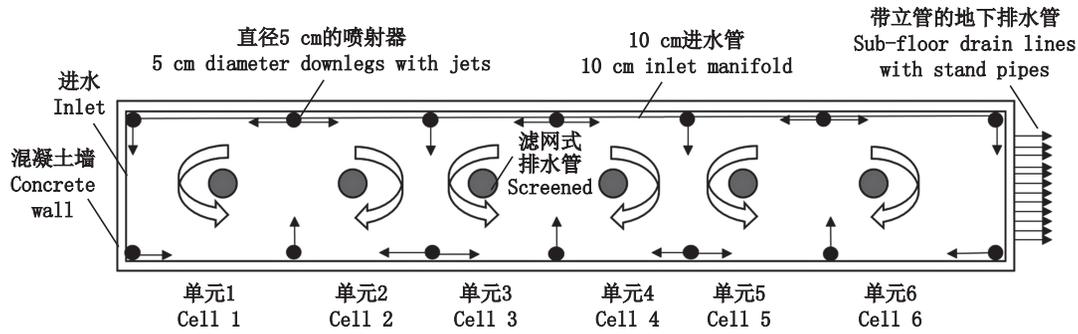
3 进排水结构对水动力特性的影响

3.1 进水结构

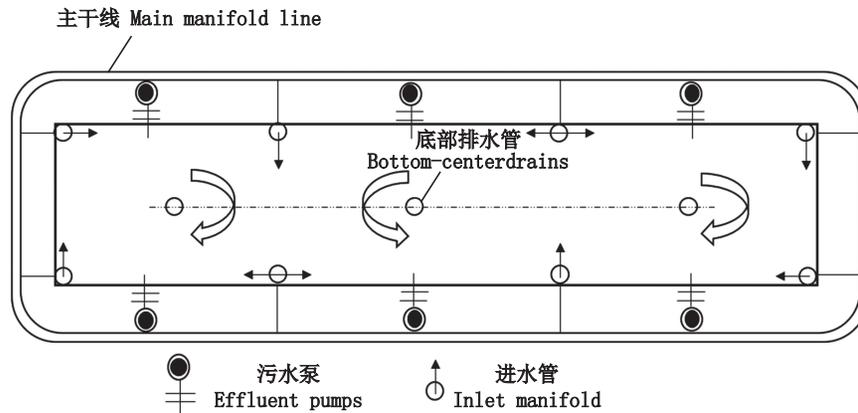
为提高RAS的集排污性能,国内外学者对水循环驱动方式开展了大量研究。这些研究主要侧重于射流式进水管的流量、数量、直径、深度、位置以及射流孔大小、间距、角度等因素对水动力特性的影响。养殖池内的水流旋转速度受水体交换率、进水孔的数量和开口面积以及进水结构的引导方向等因素的影响^[31]。DESPRES等^[32]建立了用于预测养殖池内切向和径向速度的模型,发现进水管的类型、角度、总体流量和水流产生的摩擦是影响切向和径向速度的关键因素;赵乐^[33]研究了养殖池射流式进水管在不同射流速度和角度下的流场特性对粪污残饵等颗粒物集聚效应的影响作用,并得出了最佳的射流角度和流速范围;ZHANG等^[34]研究了不同进水管数量对养殖池内流体动力学和自净化效能的影响;CARVALHO

等^[35]分析了不同进水流量和底部排水管直径对养殖池水力特性的影响,同时提出利用三根垂直管

道在不同深度注入水的方法,可在平均水体速度较低的情况下提高固体冲洗速度。



(a) 混合单元养殖池 Mixed-cell rearing unit



(b) 矩形混合养殖池 Rectangular mixed culture tank

图1 典型混合养殖池

Fig. 1 Typical mixed aquaculture tanks

养殖池内实现最佳的流动均匀性是优化设计的重要目标之一。这不仅可确保水生生物健康生长所需要的水流速度,还可以减少大颗粒饵料的打碎和破坏^[36]。然而,养殖池的流动均匀性通常受到涡流强度和湍流的影响。为度量养殖池内的流动均匀性,GORLE等^[37]提出了水流均匀性指数的概念,并指出采取增强水流混合和减少局部湍流的措施可以改善养殖池的混合效果和流动均匀性,其中比较典型的方法包括增加径向流入、调整进水口入射角度、优化进水管布局 and 出水口结构等;STOCKTON等^[38]指出,较高的水平流速和均匀的速度分布有利于提高养殖池的自净化效能;VENEGAS等^[39]对比了垂直进水管和文丘里管型喷射器的效果,在喷射器处于45°的喷射角度下,养殖池中可产生更高的切向速度,有效提高水产养殖的生产效益;OCA等^[40]提出了一种角动量模型法,分析了养殖池的进水流量、池半径、水深等对速度分布的影响规律。

3.2 排水结构

在实际应用中,循环水养殖系统排污方式主要有3种:一是虹吸式,但只能吸走中下层浊水,而对池底污物难彻底去除;二是自吸式,但自吸泵的功耗大,吸污效果不理想;三是大换水,但水资源浪费大。因此,设计有利于颗粒物在养殖池底流口汇聚的集污装置是提高排出率的关键。RAS双通道排水方式能显著降低固体颗粒物对水质的影响,同时减轻对后续自动过滤器的负荷^[41]。双通道排水方式主要通过Waterline池和Cornell池两种模式去除养殖池内的粪污残饵等颗粒物^[42]。VEERAPEN等^[43]和DAVIDSON等^[44]研究了Waterline池和Cornell池的水动力学特性,Cornell池具有良好的混合性能,而Waterline池具有良好的自净化效能。此外,他们还研究了Cornell池和Waterline池的水流状况,发现: Cornell池底部存在涡旋效应,对底层水流有较强的拖曳作用,存在一定的径向流动;而Waterline

池除了池壁处外,水流速度相对均匀,没有明显的径向流动;Cornell池的水流速度分布不均匀,不适于虾类养殖;而Waterline池中较高的水流速度和较大的排水口直径可以更有效地去除固体颗粒。GORLE等^[45]对双排水系统的分流比进行了研究,发现增加底部中央排水可以促进涡流的形成,从而提高养殖水体的速度。KLEBERT等^[46]利用声学多普勒测速技术测量了养殖池内的三维流场分布,研究了固体颗粒物去除效果与颗粒物直径之间的关系,发现在两个水力停留时间内,直径为0.1~3.0 mm的颗粒物逃逸率达到100%。研究^[47]指出,在养殖池底流口上方增加圆形导流盘有助于形成集污旋涡,不仅可以增强颗粒物的去除效率,还能防止幼鱼进入排水管。此外,在排水系统中还存在多种类型的集污装置,如集污碗式、圆盘式和转子式等。但是,关于对比各类底流口集排污装置的养殖池水动力性能研究未见报道,集排污装置的几何结构对颗粒物集聚效应、分布比例和排出率的影响机制尚不明确。

4 推水增氧设备和水生物对水动力特性的影响

射流式进水管不能满足较大尺寸养殖池的水循环驱动条件,须配合推水增氧设备。推水增氧设备在RAS中通过调节氧气含量、产生水体搅动、维持生物活性来保持养殖池内良好的水动力特性。目前的研究主要侧重于设备本身的水动力特性和增氧效率。桂福坤等^[48]构建了物理模型,试验研究了水车式增氧机驱动方式下的养殖池流场与集污特性。但是,缺乏考虑推水装置的养殖池塘集污水动力学理论模型和评价方法。此外,如何提高水循环能量利用效率,研究典型水车式推水增氧设备的布设位置、角度、驱动流速、吃水深度、叶片形状、大小、数量等因素对有效环流和集排污性能的影响机制,揭示水循环驱动装置对集排污性能的影响机制是关键科学问题。

目前,关于水生物对养殖池水动力特性影响的研究相对较少。研究表明,不同养殖品种、数量的水生物有具体的适宜流速范围。养殖池中存在鱼类时,水体的湍流动能、强度和耗散率均高于无鱼情况。LUNGER等^[49]得出养殖密度的增加会导致养殖池的平均流速降低。DUARTE

等^[18]在矩形和圆形养殖池中研究了鱼类分布对水动力特性的影响,并引入了鱼类分布均匀系数来评估鱼类在养殖池中的分布均匀性,结果显示,圆形养殖池内的鱼类分布较矩形养殖池更加均匀,且圆形养殖池中的水流速度从中心到池壁逐渐增加,这种水流的速度分布与鱼类密度有关。刘稳等^[50]研究了水动力特性对鱼类生长的影响,通过对水槽内流场进行数值模拟,得出鲫鱼生长与水动力学特性之间的定量关系。值得注意的是,保持适宜的水流速度对于养殖对象的游泳能力至关重要。一般而言,最佳的水流回转速度应该控制在鱼身长度的0.5~2.0倍每秒^[51]。

5 总结与展望

国内外学者已经对RAS水动力特性开展了多方面的研究。然而,RAS模式作为可持续性发展的创新领域,仍需进一步深入研究以确保其运行效率和可靠性。结合当前国内外研究现状,未来关于RAS水动力特性的研究可以从以下4个方面开展:

(1)研究大尺寸循环水养殖池的水动力特性。目前,大多数研究主要集中于小尺度模型,对于大尺度养殖池的水动力特性研究较少。因此,未来可针对大规模养殖系统,分析关键水动力学指标与池型结构、进排水装置的组合运行方式和匹配参数。

(2)研究推水增氧设备对水动力特性的影响研究。研究水车式增氧机的布设位置、驱动流速、叶片形状、大小和数量等因素对养殖池集污水动力特性的影响作用,确定进水装置和推水设备的组合运行方式,有助于提高进水装置和水循环设备的能量利用效率。

(3)设计养殖池底流口高效集污装置。底流口集污装置可以有效地收集和排除废物,防止废物在养殖池中积聚,降低水体的污染程度。因此,未来可研究不同类型和配置的集污装置对集污水动力特性的影响机制,对于提高养殖系统的自净化效能有重要应用价值。

(4)建立考虑水生物的RAS水动力学模型。鱼类在养殖池中的运动会改变水流状态、流速和湍流强度等水动力学指标。因此,未来可重点关注典型养殖品种、密度等因素与水动力特性之间的关系,建立考虑水生物数值模拟分析方法。

参考文献:

- [1] 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. 2023中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fisheries statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.
- [2] 农业农村部印发《“十四五”全国渔业发展规划》[J]. 中国水产, 2022(2): 7-19.
The ministry of agriculture and rural affairs issued the "14th five-year plan for national fisheries development"[J]. China Fisheries, 2022(2): 7-19.
- [3] FARGHALLY H M, ATIA D M, EL-MADANY H T, et al. Control methodologies based on geothermal recirculating aquaculture system[J]. Energy, 2014, 78: 826-833.
- [4] ELALOUF H, KASPI M, ELALOUF A, et al. Optimal operation policy for a sustainable recirculation aquaculture system for ornamental fish: simulation and response surface methodology [J]. Computers & Operations Research, 2018, 89: 230-240.
- [5] MASALÓ I, OCA J. Influence of fish swimming on the flow pattern of circular tanks [J]. Aquacultural Engineering, 2016, 74: 84-95.
- [6] 朱放, 桂福坤, 胡佳俊, 等. 进水管设置角度对圆形循环水养殖池自清洗能力的影响[J/OL]. 水产学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220309.1832.011.html>.
ZHU F, GUI F K, HU J J, et al. Effect of inlet pipe setting angle on the self-cleaning performance of circular recirculating aquaculture tank [J]. Journal of Fisheries of China. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220309.1832.011.html>.
- [7] 张学芬. 进水方式对八边形养殖池自清洗能力的影响[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
ZHANG X F. Effect of inlet setting on self-cleaning ability of octagonal culture tank [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [8] HU J J, ZHANG H W, WU L H, et al. Investigation of the inlet layout effect on the solid waste removal in an octagonal aquaculture tank [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 1035794.
- [9] 于林平, 薛博茹, 任效忠, 等. 单进水管结构对单通道矩形圆弧形养殖池水动力特性的影响研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 134-140.
YU L P, XUE B R, REN X Z, et al. Influence of single inlet pipe structure on hydrodynamic characteristics in single-drain rectangular aquaculture tank with arc angles [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(1): 134-140.
- [10] 任效忠, 薛博茹, 姜恒志, 等. 双进水管系统对单通道矩形圆弧形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.
- [11] OCA J, MASALÓ I, REIG L. Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics [J]. Aquacultural Engineering, 2004, 31(3/4): 221-236.
- [12] RASMUSSEN M R, MCLEAN E. Comparison of two different methods for evaluating the hydrodynamic performance of an industrial-scale fish-rearing unit [J]. Aquaculture, 2004, 242(1/4): 397-416.
- [13] SHAHROKHI M, ROSTAMI F, MD SAID M A, et al. Numerical investigation of baffle effect on the flow in a rectangular primary sedimentation tank [J]. International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 2011, 5(10): 571-576.
- [14] 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.
- [15] 史明明, 阮赞杰, 刘晃, 等. 基于CFD的循环生物絮团系统养殖池固相分布均匀性评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 252-258.
SHI M M, RUAN Y J, LIU H, et al. Solid phase distribution simulation of culture pond with recirculating biofloc technology based on computational fluid dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 252-258.
- [16] 汪翔, 崔凯, 李海洋, 等. 池塘养殖跑道流场特性数值模拟及集污区固相分布分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 220-227.
WANG X, CUI K, LI H Y, et al. Numerical simulation of flow field characteristics for aquaculture raceway and analysis of solid phase distribution in waste settling zone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 220-227.
- [17] ZHU S M, SHI M M, RUAN Y J, et al. Applications of computational fluid dynamics to modeling hydrodynamics in tilapia rearing tank of Recirculating Biofloc Technology system [J]. Aquacultural Engineering, 2016, 74: 120-130.
- [18] 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.
- [19] TIMMONS M B, SUMMERFELT S T, VINCI B J. Review of circular tank technology and management [J]. Aquacultural Engineering, 1998, 18(1): 51-69.
- [20] MCROBBIE A S, SHINN A P. A modular, mechanical

- rotary device for the cleaning of commercial-scale, circular tanks used in aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2011, 317(1/4): 16-19.
- [21] 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.
- [22] SUMMERFELT S T, DAVIDSON J W, WALDROP T B, et al. A partial-reuse system for coldwater aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 31(3/4): 157-181.
- [23] OCA J, MASALÓ I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks [J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 36(1): 36-44.
- [24] 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.
- [25] 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.
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 [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 444-452.
- [26] 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/OL]. *大连海洋大学学报*. <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2022-311>.
SHI X Y, LI M, REN X Z, et al. Influence of length width ratio on sewage discharge characteristics of circular rectangular angle culture tank with double inlet pipe structure [J/OL]. *Journal of Dalian Ocean University*. <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2022-311>.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] WATTEN B J, HONEYFIELD D C, SCHWARTZ M F. Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit [J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, 24(1): 59-73.
- [30] LABATUT R A, EBELING J M, BHASKARAN R, et al. Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR) using 3D computational fluid dynamics (CFD) [J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 67: 39-52.
- [31] SUMMERFELT S T, DAVIDSON J, WILSON G, et al. Advances in fish harvest technologies for circular tanks [J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40(2): 62-71.
- [32] DESPRES B. Hydrodynamic characteristics of multi-drain circular tanks [D]. New Brunswick: The University of New Brunswick, 2007.
- [33] 赵乐. 管式射流驱动下的养殖池集污水动力学特性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
ZHAO L. Study on the hydraulic characteristics of waste concentrated in the aquaculture pond equipped with a double pipe jet flow system [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2017.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] STOCKTON K A, MOFFITT C M, WATTEN B J, et al. Comparison of hydraulics and particle removal efficiencies in a mixed cell raceway and Burrows pond rearing system [J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 52-61.
- [39] VENEGAS P A, NARVÁEZ A L, ARRIAGADA A E, et al. Hydrodynamic effects of use of eductors (Jet-Mixing Eductor) for water inlet on circular tank fish culture [J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 59: 13-22.
- [40] OCA J, MASALÓ 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.
- [41] SCHRADER K K, DAVIDSON J W, RIMANDO A M, et al. Evaluation of ozonation on levels of the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol in water and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* from recirculating aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(2): 46-50.
- [42] EBELING J M, TIMMONS M B, WHEATON F W. Recirculating aquaculture systems [M]. 2nd ed. Ithaca: Cayuga Aqua Ventures, 2002.

- [43] VEERAPEN J P, LOWRY B J, COUTURIER M F. Solids removal in recirculating aquaculture systems - modelling and experiments [J]. Special Publication Aquaculture Association of Canada, 2002, 6: 81-83.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] KLEBERT P, VOLANT 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.
- [47] LÓPEZ-REBOLLAR B M, SALINAS-TAPIA H, GARCÍA-PULIDO D, et al. Performance study of annular settler with gratings in circular aquaculture tank using computational fluid dynamics [J]. Aquacultural Engineering, 2021, 92: 102143.
- [48] 桂福坤, 张学芬, 曲晓玉, 等. 水车式增氧机驱动下方圆形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.
- [49] LUNGER A, RASMUSSEN M R, LAURSEN J, et al. Fish stocking density impacts tank hydrodynamics [J]. Aquaculture, 2006, 254(1/4): 370-375.
- [50] 刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 812-817.
- LIU W, ZHUGE Y S, OUYANG L, et al. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 812-817.
- [51] TIMMONS M B, LOSORDO T M. Aquaculture water reuse systems: engineering design and management [M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.

Hydrodynamic characteristics of industrialized recirculating aquaculture systems: a comprehensive review

ZHANG Jun¹, GAO Yang¹, CHEN Congcong¹, ZHANG Ning¹, LIU Xingguo², CAO Shouqi¹, HU Qingsong¹, ZHANG Zheng¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: The industrialized recirculating aquaculture system (RAS) has emerged as a promising approach to achieving standardized culturing and intelligent management in aquaculture. This system conforms to the principles of resource conservation and environmentally friendly green development, making it a leading direction for the future of the industry. The aquaculture tank, being a vital infrastructure component of RAS, plays a crucial role in optimizing space utilization, water-injection energy efficiency, waste collection and discharge effectiveness, and ensuring uniform distribution of dissolved oxygen to support the healthy growth of aquatic organisms. This article provides a comprehensive review of both domestic and international research on the hydrodynamic characteristics of RAS. By summarizing the current research hotspots and trends in this field, it aims to analyze how various factors such as tank structure, water circulation driving devices, and waste discharge devices influence hydrodynamics within RAS. The research results presented in this article lay a solid foundation for the development of an "energy-saving, emission-reducing, ecological, and efficient" aquaculture system.

Key words: aquaculture; recirculating aquaculture system; aquaculture tank; hydrodynamics; self-purification efficiency