

基于现场试验的大尺寸圆形养殖池水动力特性

陈佳能^{1, 2}, 桂福坤^{1*}, 冯德军¹, 南海林², 周其贤², 张清靖^{1, 2}, 吴彦飞^{2*}

1. 浙江海洋大学国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022;
2. 北京市农林科学院水产科学研究所渔业生物技术北京市重点实验室, 北京 100068

摘要: 陆基圆池循环水养殖模式因具有节水、环保及运行成本低等优势, 已成为现代水产养殖的重要发展方向, 如何使池内残饵粪便快速聚集与排出是其面临的重要问题。本研究设置 3 种气提推水器布设角度($\theta=0^\circ$ 、 20° 、 45°)、7 种布设数量($n=2$ 、 3 、 4 、 6 、 8 、 10 、 12)，通过现场试验研究气提推水器布设参数对池内流场分布的影响。利用声学多普勒流速仪测量池内表、中、底 3 层($h=30$ cm、 60 cm、 90 cm)的流场分布, 结合平均流速(v_{avg})和均匀系数(U)定量分析池内水动力特性。结果表明: (1)布设角度显著影响池内流场分布, 当布设角度 $\theta=0^\circ$ 、布设数量 $n=12$ 时, 平均流速为 0.036 m/s, 均匀系数为 0.18 , 池中心低流速区面积占比较大, 水体混合效率低; 当布设角度增至 45° 后, 低流速区面积显著减小, 平均流速为 0.051 m/s, 均匀系数 U 为 0.29 , 流场均匀性最优。(2)当布设角度 $\theta=45^\circ$ 、布设数量 $n>2$ 时, 气提推水器数量的增加对池内流场分布无显著影响。调整气提推水器布设角度比改变布设数量更能有效改善池内水动力特性。本研究结果可为大型陆基圆池内气提推水器的工程布设提供理论依据。

关键词: 陆基圆池; 气提推水器; 水动力特性; 平均流速; 均匀系数

中图分类号: S955 文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)08-1186-12

当前, 中国渔业处在转型升级的关键时期, 正在由劳动密集型向着技术密集型的生产模式快速转变^[1]。随着国内市场对水产品需求的不断增长, 绿色和智能化水产养殖业蓬勃发展, 形成了如稻渔种养结合、智慧渔场、休闲渔业等高效、环保、创新的运作模式^[2]。其中, 陆基圆池循环水养殖模式作为一种集约化的绿色生态养殖新模式而受到越来越多的关注。该模式采用圆形养殖池和尾水处理循环利用系统相结合的方式, 实现高密度集约化生态养殖, 具有养殖单产高、饵料系数低、养殖周期短, 节地节水和生态环保等优势^[3]。在陆基圆池高密度高投喂量的养殖条件下, 池内会快速积聚大量残饵粪便等固态废弃物^[4], 这些固态废弃物在鱼类游动、水体交换、温度变化等因素共同作用下会分解产生氨氮、亚硝酸盐、硫化氢等有害物质^[5], 滋生各种病原体, 严重恶化池内水质, 且残饵和粪便的分解还会增加水体的生化需氧量^[6], 导致水体溶解氧减少, 影响鱼类健康^[7]。因此, 陆基圆池在运行中需要利用水动力特性及时清除池内积聚的残饵粪便并增加水体溶氧。气提推水器作为一款新型渔业装备, 其应用逐渐受到重视。气提推水器利用外部风机或压缩机提供的压力空气^[8], 通过曝气管喷出空气带动水体以高速射流的形式从气提推水器管口喷射到养殖池中。利用变频器调控罗茨风机的空气输入量, 可提高氧气在水体中的溶解效率。将气提推水器安装在陆基圆池中, 可维持水体中的溶解氧水平, 保证养殖对象的呼吸需求^[9]。通过水流的混

收稿日期: 2025-02-14; 修订日期: 2025-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32273189); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20251205); 北京市农林科学院水产科学研究所所长基金项目(JJPY-2025-05); 河北省重点研发计划项目(22326701D, 19226703D); 现代农业产业技术体系北京市渔业创新团队(BAIC07-2025-07); 渔业生物技术北京重点实验室项目(PT2025-20).

作者简介: 陈佳能(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产养殖工程技术. E-mail: m13235475463@163.com

通信作者: 桂福坤, 教授, 博士生导师, 研究方向为海洋养殖过程装备技术. E-mail: guif2237@163.com;

吴彦飞, 助理研究员, 研究方向为水产养殖工程技术. E-mail: wuyf2208@163.com

合作用使温度、pH 和溶解氧等水质参数分布更加均匀, 避免局部水质恶化。气提推水器产生的推力在池内形成环流, 将池底的残饵、粪便和固态废弃物聚集到陆基圆池中心排污区域^[10], 便于清除。射流方向和进水流速会直接影响养殖池水体的切向流速与径向流速, 合理调整气提推水器的设置方式可以改善养殖池内的水动力特性和流场特性^[11]。

随着循环水养殖模式的不断发展, 对养殖池水动力特性的研究已经越来越广泛。李瑞鹏等^[12]构建了简化的圆形养殖池模型, 使用计算流体动力学(CFD)软件 Fluent 进行仿真, 提出了基于数值模拟的有助于降低养殖成本和增加经济效益的循环水养殖进水流速调控方案, 结果显示对进水流速的调控可以优化流场分布, 降低养殖成本, 而射流孔数的增加可以显著提升流场均匀性。车宗龙等^[13]建立物理模型试验系统, 监测养殖池不同径深比下的水动力特性, 发现养殖池中线速度呈“W”形分布, 随着径深比的减小, 靠近养殖池中心处速度增量更高, 而随着径深比增大, 养殖池水体平均流速呈下降趋势。Rodrigo 等^[14]评估了不同养殖池排水系统(单排水和双排水系统)对水动力学、流速分布和固体颗粒物去除效果的影响, 结果表明较大的底部排水口可以使养殖池中水体旋转速度分布更均匀, 且水体流速随进水流量的增加而增加, 在单排水系统中, 固体冲洗效率与系统类型和流入率显著相关, 流入率的增加

通常会提高固体冲洗效率。胡艺萱等^[15]通过建立三维数值计算模型, 研究不同射流角度对方形圆弧角养殖池内流场特性的影响, 发现射流角度和进水系统的进径比会对方形圆弧角养殖池内平均流速和流场分布均匀性产生显著影响。以上研究主要集中于实验室小尺寸模型和数值模拟, 基于现场大尺寸陆基圆池的水动力特性研究较少, 研究结果存在一定局限性, 难以为优化陆基圆形养殖池工程设计提供参考与依据^[16]。

本研究采用现场试验的方法, 研究大尺寸陆基圆池中气提推水器的布设数量、布设角度等参数对池内流场特性的影响。利用声学多普勒流速仪测量池内表、中、底 3 层($h=30 \text{ cm}, 60 \text{ cm}, 90 \text{ cm}$)的流场分布, 定量分析池内平均流速和养殖池均匀系数, 并深入探讨其对池内各水层流场分布及水动力特性的影响规律。研究结果旨在为陆基圆池的设计与优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在北京市农林科学院水产科学研究所廊坊示范基地进行, 陆基圆池实物如下图 1a 所示, 池体容积 520 m^3 , 直径 20 m, 圆池中心最深处 1.95 m, 池壁边缘深度 1.45 m, 池底为锅底状, 坡度为 15°, 便于残饵粪便等固态废弃物向圆池底部中心处聚集(图 1b)。气提推水器结构尺寸以及

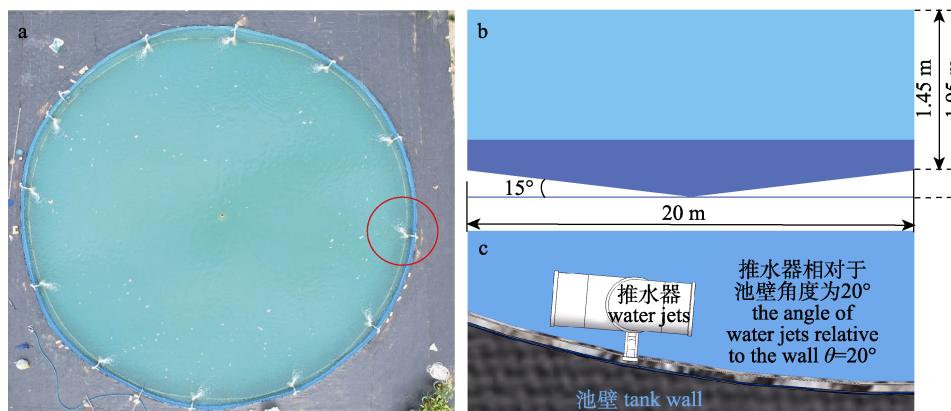


图 1 陆基圆池实物及其结构示意图

a. 陆基圆池实物图; b. 圆池尺寸结构图; c. 气提推水器设置方式.

图 1a 内红圈表示气提推水器的布设位置.

Fig. 1 Photography and diagram of the land-based circular tank

a. Photography of the land-based circular tank; b. Dimensional and structural diagram of the circular tank;

c. Schematic diagram of the airlift water jet configuration.

The red circle in fig. 1a indicates the placement of the airlift water jet.

池内气提推水器布置方式见图 1c, 利用罗茨风机作为气源, 通过地下的气管连接池内的气提推水器。试验中采用 1 台功率 3 kW、风量 17 m³/h、风压 80 Pa 的罗茨风机为气提推水器供气, 全程在相同功率下工作, 保证总进水量不变, 气提推水器高度 80 cm、底部进水口直径 16 cm, 顶部出水口直径 11 cm, 具体尺寸见图 2。

鉴于陆基圆池直径达 20 m, 常规流速测量方法存在一定的局限性, 因此本研究采用钢材自主构建了一套三维滑轨系统(图 3), 能够实现流速仪在测量过程中稳定的前进和上下运动。利用固定在钢管架上的“小威龙”声学多普勒流速仪(以下简称 ADV)^[17]系统测量陆基圆池内不同水层的流速, 本研究中流速测量系统主要由流速仪、通信线缆、供电电源、电脑端软件组成。其中, 流速仪探头规格为 70 cm × 6.5 cm × 6.5 cm, 采样频率为 32 Hz。

1.2 实验方案

本研究主要采用现场试验的方法, 探究气提推水器布设角度 θ 、布设数量 n 等参数对大尺寸圆

形养殖池内各水层流场分布和水动力特性的影响。试验设置 3 组布设角度, 分别为 $\theta=0^\circ$ 、 20° 、 45° , 研究布设角度 θ 不同时, 布设数量对养殖池内流场分布的影响; 设置 7 组布设数量, 分别为 $n=2$ 、 3 、 4 、 6 、 8 、 10 、 12 , 研究布设数量 n 不同时, 布设角度 θ 对养殖池内水动力特性的影响^[18]。

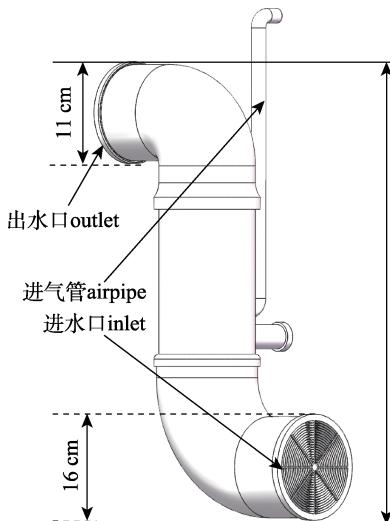


图 2 气提推水器尺寸示意图
Fig. 2 Size diagram of airlift water jet

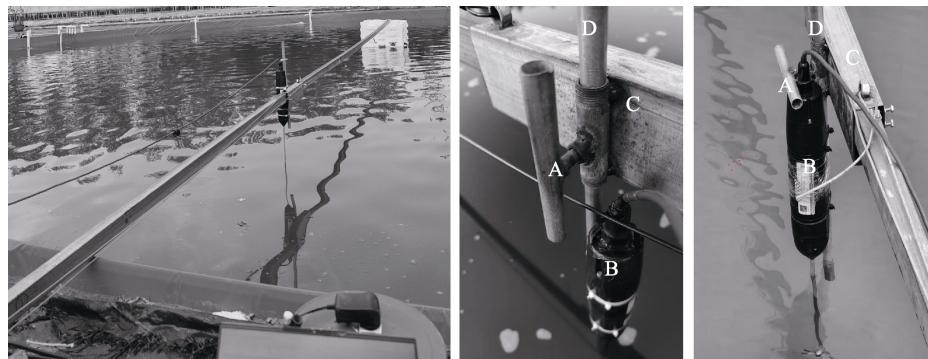


图 3 三维滑轨流速测试系统实物图

A: 紧固螺栓; B: 流速测量仪; C: 滑套; D: 铁杆.

Fig. 3 Photography of the three-dimensional slide rail system for flow measuring
A: fastening bolt; B: acoustic doppler velocimetry; C: sliding sleeve; D: iron rod.

在所有工况下, 气提推水器不同布设数量示意图如图 4 所示, 图中池壁的白色弯管代表气提推水器在池中的安装点。气提推水器喷射的水流方向为逆时针方向。本研究所有工况测量点最高流速为 0.067 m/s, 最低流速 0.026 m/s, 因此将高低流速区分界阈值设定为 0.06 m/s(图 4 红色虚线标识), 低于此流速即为低流速区, 反之则为高流

速区。

分别测量表、中、底 3 个不同水层(距离水面 $h=30$ cm、60 cm、90 cm)的流速, 每层按照气提推水器布设数量 n 的不同分别设置测量线, 测量线的两端在池中心和池壁上, 每条测量线 5 个测量点, 每个测量点间隔 2 m, 距离池壁最近的点与池壁相隔 40 cm。由于大尺寸陆基圆池中的流速

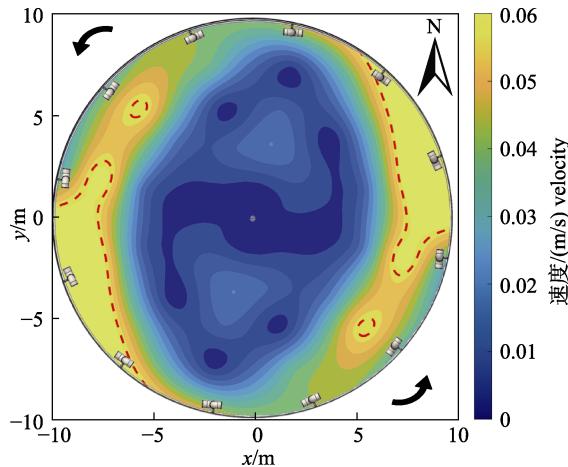


图 4 气提推水器布设分布图

Fig. 4 Schematic diagram of airlift water jets deployment

测量复杂, 本研究利用圆形养殖池的对称性对各个工况的测量工作进行了简化。不同布设数量下测量点的具体分布如图 5 所示, 以布设数量 $n=2$

的测试工况为例, 将占圆池表面一半的水域面积分 4 条测量线, 共 20 个测量点进行流速测量, 对采集的数据插值拟合处理后得出整个圆池的流场分布情况。试验前通过罗茨风机验证气提推水器运行状态, 确保设备稳定性。使用变频器调节试验所需进水流量。将罗茨风机开启约 20 min (经预实验综合各工况下的最大水体稳定时间额外增加了 2 min, 确保所有工况的水体在 20 min 后保持稳定), 待养殖池内水体平稳后, 固定好在钢材架上的 ADV 流速测量仪, 使用数据线将 ADV 与笔记本电脑互相连接, 打开电脑桌面上的 Vectrino Plus 软件, 在软件上配置好硬件数据采集参数, 随后开始进行数据采集。ADV 在 32 Hz 采样频率下对一个采样点采集 60 s 时长, 每个采样点共获得 1800 余组三维流速数据; 一组采样点结束, 待水体稳定后开始下一组试验。

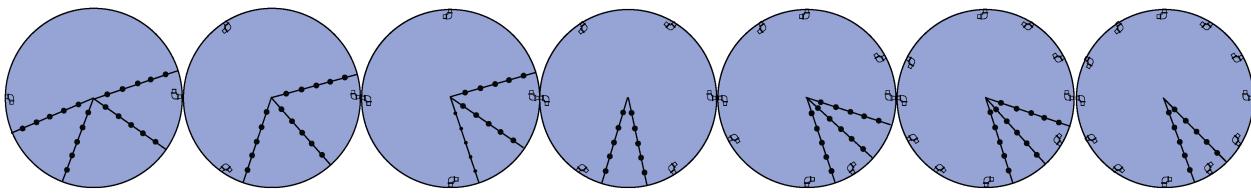


图 5 不同布设数量下测量点分布图

图片从左到右分别代表池内布设气提推水器数量 $n=2, 3, 4, 6, 8, 10, 12$, 黑点代表 ADV 测量点.

Fig. 5 Measurement point distribution diagrams under different deployment quantities

The pictures from left to right respectively represent the number of airlift water jets arranged in the tank $n=2, 3, 4, 6, 8, 10, 12$. The black dots represent the ADV measurement points.

1.3 数据处理

利用 Matlab 软件处理流速数据, 对所测得的数据首先进行处理, 剔除 10%过大或者过小的异常值, 求出平均值作为该点流速值。使用 griddata 函数^[19]对陆基圆池各个水层离散的流速数据进行插值, 获得整个养殖池的流场分布情况。考虑到外插数据的准确度低, 因此删除外插流速数据。最后使用 imagesc 函数绘制流场云图, 云图色块在超过 0.06 m/s 后高流速区与低流速区颜色出现明显区别, 据此划定高低流速区边界, 计算高流速区面积。为了进一步定量描述和比较不同工况下圆形养殖池内水动力特性, 本研究通过养殖池内平均流速 v_{avg} (养殖池内各测量点流速的平均值, m/s) 和养殖池均匀系数 U 这 2 个水动力学特征

量^[20]对流场进行具体分析:

$$v_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (1)$$

$$U = \frac{v_{L50}}{v_{H50}} \quad (2)$$

式(1)中, v_{avg} 为养殖池平均加权速度, m/s; v_i 为测量点速度, m/s; r_i 为测量点相对于养殖池中心的距离, v_{avg} 是由 v_i 和 r_i 计算得出的平均加权速度 (m/s)。式(2)中, U 为养殖池均匀系数; v_{L50} 为养殖池中 50% 的较低速度的平均值, v_{H50} 为养殖池中 50% 的较高速度的平均值; 通过比较不同试验工况下各个水层的流速, 分析大型圆形养殖池内的水动力特性。

2 结果与分析

2.1 气提推水器布设数量对流场分布特性的影响

图6分别为气提推水器布设角度为0°时的陆基圆池流场云图和对应的高流速区面积占比图,由图6a可以看到,受圆形池和气提推水器影响,水流在池内的运动方式为旋转式环流,此时池内产生的二次流会使靠近池底中心的流速减小,引起底部水流方向趋于池中心^[21]。从图6可以发现,在气提推水器布设角度 $\theta=0^\circ$ 时,随着布设数量n逐渐增加,各水层高流速区主要分布在养殖池池壁附近,高流速区面积从表层到底层逐渐降低。在气提推水器布设数量n=2时,各水层的高流速区面积占比最小,高流速区面积占比由表层到底层逐渐减小;在布设气提推水器数量n=3时,高流速区面积占比由

表层到底层逐渐增大;当气提推水器布设数量n>6,各个水层的流场分布没有明显改变。

图7分别为气提推水器布设角度为20°时的陆基圆池流场云图和对应的高流速区面积占比图,在图7a可以看到,当布设气提推水器数量n>6时,随着气提推水器布设数量n的增加,各水层高流速区面积占比没有明显区别,但相较于布设角度 $\theta=0^\circ$ 工况,布设角度 $\theta=20^\circ$ 下各水层高流速区面积占比总体上增加了10%左右。在气提推水器布设数量n≤4时,池内表层高流速区面积随着气提推水器布设数量n增加而增加,中层的高流速区面积随着气提推水器布设数量n增加而减少,底层高流速区面积比先增加后减少。在气提推水器布设数量n=4时各水层水动力特性差别最大,表层的高流速区面积占比是中层和底层的2倍。

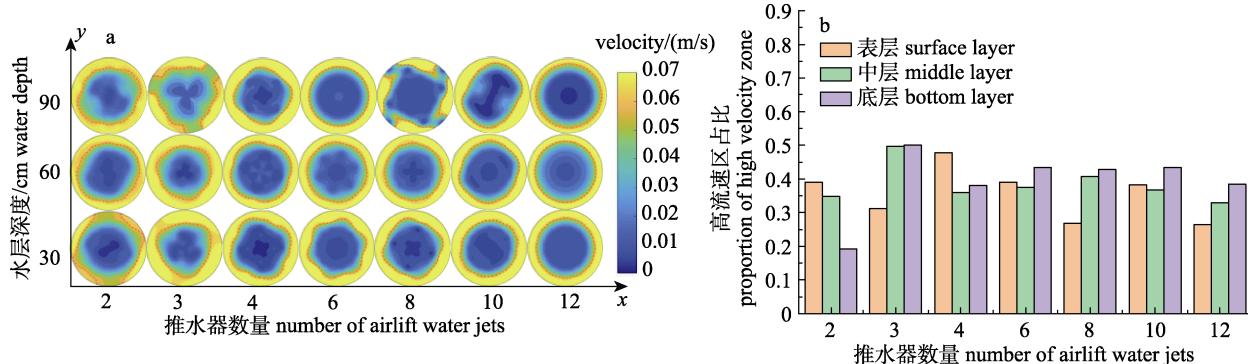


图6 布设角度0°工况下养殖池内不同水层流场特性图

a. 各水层流场云图; b. 高流速区面积占比图.

Fig. 6 Flow field characteristics of each water depth in the aquaculture tank under condition with the deployment angle of 0°
a. Flow field cloud map of each water depth; b. Area proportion chart of high flow velocity zones.

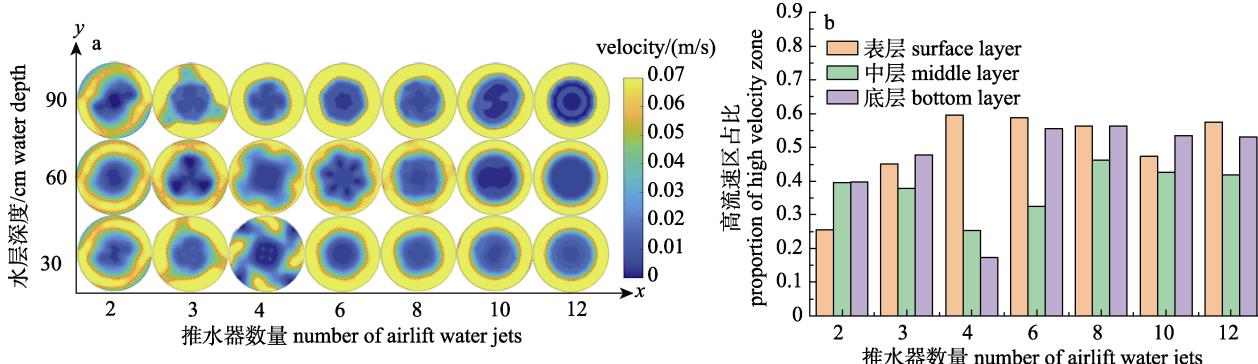


图7 布设角度20°工况下养殖池内不同水层流场特性图

a. 各水层流场云图; b. 高流速区面积占比图.

Fig. 7 Flow field characteristics of each water depth in the aquaculture tank under condition with the deployment angle of 20°
a. Flow field cloud map of each water depth; b. Area proportion chart of high flow velocity zones.

图8分别为气提推水器布设角度为45°时的陆基圆池流场云图和对应的高流速区面积占比图,从图8可以看到,当气提推水器布设数量n=2时,表层高流速区面积占比仅为22%,面积占比从表层到底层逐渐增加,这可能是由于气提推水器布设数量n较少,池内流场分布不均匀导致的。在气提推水器布设数量n增加到3以后,各水层高流速区面积占比普遍达到58%以上,各个水层高流速区面积占比接近,底层高流速区面积在各个水层中占比最大,较布设2个气提推水器时的流场均匀性已经有明显提高。在气提推水器布设数量n由4增加到12的过程中,各个水层的水动力特

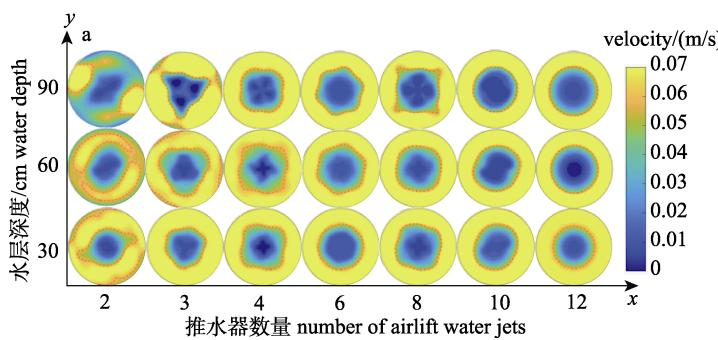


图8 布设角度45°工况下养殖池内不同水层流场特性图

a. 各水层流场云图; b. 高流速区面积占比图。

Fig. 8 Flow field characteristics of each water depth in the aquaculture tank under condition with the deployment angle of 45°
a. Flow field cloud map of each water depth; b. Area proportion chart of high flow velocity zones.

表1 气提推水器不同布设数量下的进水流量

Tab. 1 Inlet flow rate under different numbers of airlift water jets' arrangements

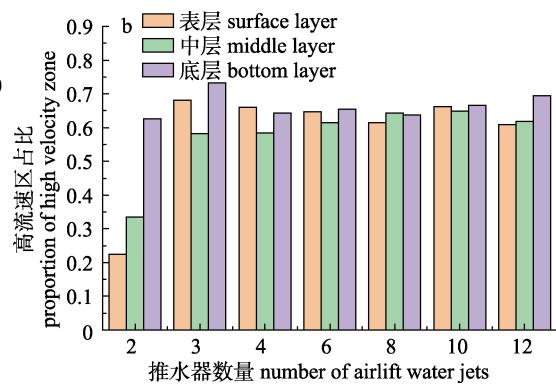
气提推水器布设数量/个 number of airlift water jets	2	3	4	6	8	10	12
流量/(L/s) flow rate	3.2	2.95	2.90	3.80	3.34	2.70	2.49

2.2 气提推水器布设角度对水动力特性的影响

图9为气提推水器在不同布设角度时的圆池平均流速特性图。当布设角度θ=0°时,射流方向与池壁相切,此时气提推水器射流主要沿池壁呈现出近似环形的流动趋势。随着气提推水器布设数量n逐渐增加,表层流速在气提推水器布设数量n=4时最高,达0.046 m/s,而底层流速在n=8时最高,为0.065 m/s;在气提推水器布设数量n=12时,表层流速降至最低,为0.03 m/s。在布设角度θ为20°时,随着气提推水器布设数

性表现出相近的变化趋势,高流速区面积占比主要在60%左右,布设数量n的增加对养殖池的水动力特性影响较小。

根据现场实测数据(表1),当气提推水器数量从2增至12时,单个气提推水器的出口流量从3.2 L/s降至2.49 L/s,降幅达22%。进水流量的减少导致射流冲击力减弱,从而显著影响池内流场分布(图6~8)。例如,当布设角度θ=0°、布设数量n=12时,表层平均流速为0.026 m/s,较布设数量n=2工况下的0.039 m/s显著降低,表明气提推水器数量的增加反而减弱了单个气提推水器射流强度。



量n增加,养殖池表层流速也逐渐增加,从n=2时的0.035 m/s增至n=12时的0.062 m/s,中层和底层平均流速呈现先降低后增加的趋势;中层流速在气提推水器布设数量n=4时流速最低,为0.032 m/s,底层流速在n=4时最低,为0.026 m/s,之后又逐渐回升。在布设角度θ为45°时,池内表层平均流速在气提推水器布设数量n=10时达到峰值0.066 m/s,中层平均流速在布设数量n=12达到最高0.054 m/s,底层平均流速在布设数量n=3时达到峰值0.059 m/s。综上所述,布设角度θ为45°时池内平均流速较高且各水层之间水体平均流速接近,水动力特性较优。这表明调整气提推水器布设角度比改变布设数量更能有效改善池内水动力特性,当布设角度θ为45°且布设数量n超过2后,平均流速趋于稳定,数量变化对平均流速的影响较小。

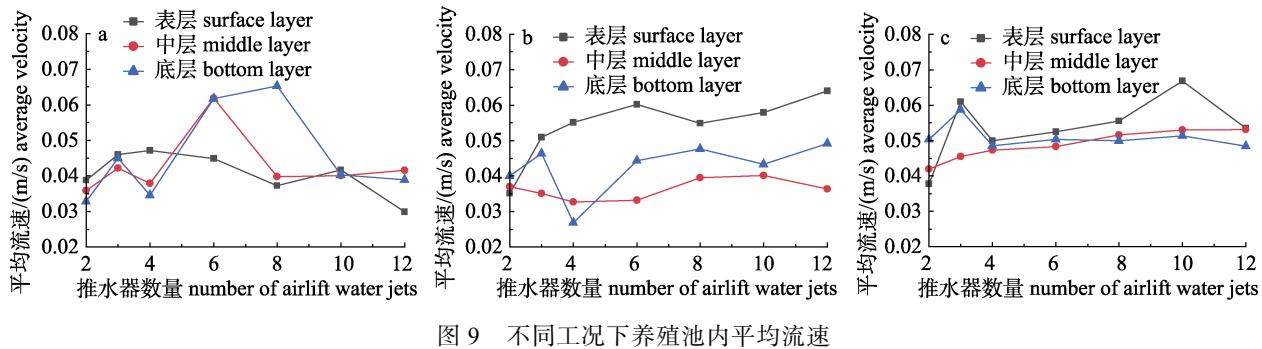


图9 不同工况下养殖池内平均流速

布设角度 a=0°, b=20°, c=45°.

Fig. 9 Average velocity in the aquaculture tank under different working conditions
The angle of deployment are a=0°, b=20°, and c=45°.

图10为气提推水器在不同布设角度时的圆池均匀系数特性图,可以看到气提推水器布设角度 θ 对池内流场均匀性 U 的影响显著。当布设角度 $\theta=0^\circ$ 时,射流方向与池壁相切,能量损失较大,流场分布极不均匀:布设数量 $n=10$ 时,整体均匀系数 U 降至最低范围0.16~0.20,池中心低流速区面积占比达65%;随 n 增加,均匀系数 U 持续下降,表明数量增加反而加剧流场不均匀性。当布设角度 $\theta=20^\circ$ 、布设数量 $n=2$ 时,均匀系数 $U\approx0.30$,较布设角度 $\theta=0^\circ$ 提升约7%,低流速区面积缩减15%;但随着布设数量 n 增至12,均匀系数 U 为0.08~0.20,高流速区仍集中于池壁附近。相比之下,布设角度 $\theta=45^\circ$ 时射流方向偏向池中心,流

场均匀性提升:布设数量 $n=2$ 时均匀系数 U 达峰值0.49,较布设角度 $\theta=0^\circ$ 提升40%,低流速区面积占比最小;当布设数量增至 $n=4\sim8$ 时,均匀系数 U 波动范围缩窄至0.25~0.41,差异最大为10%,且布设数量 $n=12$ 时均匀系数 U 整体回升至约0.33,较布设数量 $n=6$ 时仅提高3%,低流速区面积占比缩减至15%,各水层均匀性较 $\theta=0^\circ$ 和 20° 提升30%以上。结论表明:布设角度 $\theta=45^\circ$ 时,角度的增加减少了气提推水器在池壁附近的能量损失,并改善了流场分布,且布设数量 $n>2$ 后流场趋于稳定,数量变化影响微弱;而布设角度 $\theta=0^\circ\sim20^\circ$ 时,角度调整对均匀性改善有限,需优先调整布设角度而非布设数量以改善陆基圆池流场分布。

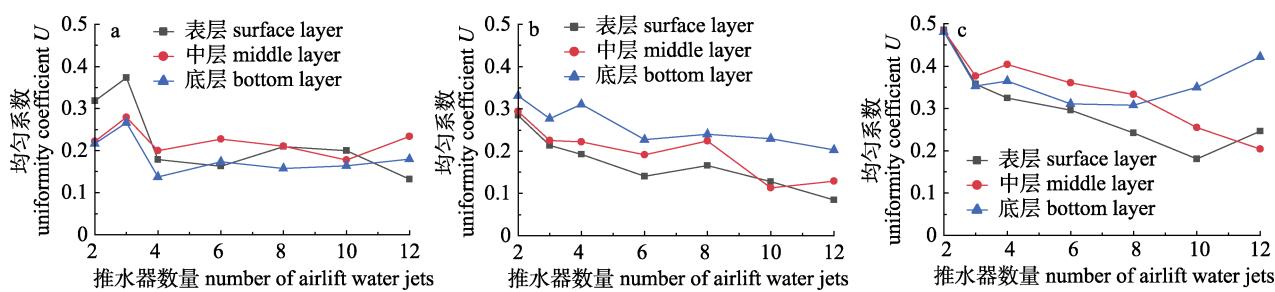


图10 不同工况下养殖池均匀系数

布设角度 a=0°, b=20°, c=45°.

Fig. 10 Uniformity coefficient of aquaculture tank under different working conditions
The angle of deployment are a=0°, b=20°, and c=45°.

3 讨论

3.1 气提推水器布设数量对养殖池内水动力特性的影响

气提推水器布设数量与池内水动力特性密切

相关。本研究在直径20 m的养殖池池壁均匀布置了12个气提推水器,研究不同布设角度、布设数量对养殖池不同水层流场分布的影响,国内外关于进水管数量对养殖池的影响已经有了一些研究,但针对实际场景下大尺寸养殖池的试验探索较

少。于林平等^[22]使用流体动力学仿真技术建立三维数值计算模型, 对矩形圆弧角养殖池在单进水管结构水力驱动模式下的流场进行模拟, 发现射流孔数 $n=4$ 的养殖池内不同水平截面水体的速度变化率为 43.8%~56.3%, 而射流孔数 $n=21$ 的养殖池内不同水平截面水体的速度变化率为 5.1%。不同水平截面间的平均速度变化小于 10%, 养殖池在射流孔增加时能达到较优的流场状态, 其结果与本文基本一致。本研究中, 罗茨风机提供的功率保持恒定, 这意味着气提推水器布设数量 n 越少, 其单个气提推水器射出的水流具有的冲击力越大, 尤其在表层, 水流高速区都集中在气提推水器正对的位置, 其他区域的平均流速明显较低。此时水池内部的水体交换效率较低, 底层和中层水流的速度较慢, 水体循环不充分。Zhang 等^[23]通过计算机数值模拟技术研究了进水管数量对循环水养殖池内水流均匀性、能量利用效率及废弃物收集效率的影响。随着进水管数量减少, 流速分布的均匀性和旋流强度显著提高; 而多管设计会导致流场混乱、能量消耗高, 不利于固态废弃物的有效收集, 流动均匀性指数和能量利用效率均随着进水管数量减少而增加, 这很好地验证了本研究得到的结果, 本研究发现, 当布设数量 n 由 2 增至 12 时, 尽管流场均匀性随 n 增加而改善($n=6$ 时 U 值提升约 40%), 但单管流量从 3.2 L/s 降至 2.49 L/s (表 1)。这一现象表明, 管路分支增多导致气体输送阻力显著上升: 一方面, 多管路布设增加了管道总长度与局部弯头数量, 局部阻力叠加使得风机需克服更高的总压损; 另一方面, 单管流量减少虽降低了管内气流速度, 但风机功率恒定的情况下, 分散的流量配置加剧了能量损耗。这与 Zhang 等^[23]的研究结论一致, 多管布设虽可改善流场均匀性, 但会导致能量利用效率下降。本试验中 $n>6$ 时, 流场均匀性提升趋缓(U 值仅增加 5%~8%), 生产实践中建议根据实际情况确定气提推水器最优布设数量的方案。从图 7 流场云图可以看到, 气提推水器在达到最优水动力特性的布设数量后, 继续增加布设数量在某些布设角度甚至会减弱气提推水器对养殖池流场带来的影响。Milad 等^[24]使用 CFD 软件建模研究不同

养殖池池型中进水管角度、位置、角度的最优布设方式, 发现随着进水管和管上喷嘴数量的增加, 流场分布变得更加均匀, 相比之下进水口较少的养殖池在进水口附近存在局部高流速区域, 将方形弧形水槽的进水管数量增加到 2 个, 喷嘴数量增加到 6 个, 与只有一个进水管和 3 个喷嘴的养殖池相比, 水流均匀性显著提高, 进水管和喷嘴较少的养殖池显示出较低的平均流速分布, 靠近进水口处存在局部高流速区域, 这可能导致养殖池内水体的不均匀混合和分布。将养殖池的进水口喷嘴数量从 6 个增加到 9 个时, 流场均匀性指数没有显著影响, 这些研究结果与本文的结论一致, 在本文中气提推水器布设角度 θ 为 0° 和 20°, 且气提推水器布设数量 n 较少的工况下, 各个水层流场分布极不均匀, 这可能是由于气提推水器在射流角度较小时, 管口射流会与池壁发生碰撞而损失大部分能量, 导致此时池内平均流速较小。在各个布设角度 θ 下, 养殖池均匀系数随着气提推水器布设数量 n 逐渐增加, 当气提推水器布设数量达到 6 个以上时, 单管供气量减少, 射流能量分散, 削弱了对水体的驱动效果。这与流量数据(表 1)及流场分布结果(图 6~8)一致。当布设数量 $n>6$ 时, 单管流量低于 3 L/s, 射流难以有效形成环流, 导致池内低流速区面积扩大(均匀系数降至 0.15~0.25)。因此, 优化推水器数量需平衡总供气量与单管能量输入的矛盾。在罗茨风机总功率较小时, 布设数量 n 的增加对养殖池水动力特性产生的影响较小。

3.2 气提推水器布设角度对养殖池内水动力特性的影响

高密度的水产养殖模式下养殖池内会产生大量鱼类粪便和残饵, 没有及时排出的部分会积累在水体中并持续分解, 产生严重影响鱼类健康的有害物质^[25]。通过气提推水器增强水体中的溶氧水平、改善流场分布, 可以有效提高养殖池中固态废弃物的排放效率^[26], 保持水质的稳定性并显著改善水体环境。本研究通过 ADV 测量水体三维流速的方式评估气提推水器影响下养殖池的流场分布, 结果表明气提推水器布设数量 n 一定时布设角度 $\theta=45^\circ$ 的工况下水动力特性较好。赵乐等^[27]使用方形圆切角模型养殖池进行试验, 通过

流速仪测量流场特性，并利用软件进行分析，研究结果表明在一定流速条件下(24 cm/s)，气提推水器最佳射流角度在40°左右，并且在射流速度越大时，池心低流速区域越小，污物向池心的聚集效果越好，越利于池底颗粒物的排出。在本研究中，气提推水器布设数量 $n=12$ 时，随着气提推水器布设角度 θ 从0°调整到45°，水体受到的冲击能量逐渐增加，养殖池内平均流速增大，此时池中心水流低速区面积明显缩小。然而，此研究未涵盖射流角度超过40°的工况，需进一步验证其适用性。有学者通过建立数值模型，对养殖池流场进行模拟验证物理试验的准确性。方帅等^[28]采用数值模拟和响应曲面法设计试验并建立模型预测最优值，试验表明模型对结果具有很好的一致性和预测能力，预测射流管最优布置方式为射流角度44.93°，这一结果与本文中得出的最佳射流角度基本相符。任效忠等^[29]建立了单通道排污的养殖池物理模型试验系统，开展了射流角度等因素对养殖池集排污特性影响的试验研究，分析了固体颗粒物排污规律以及影响池内排污效果的主要因素，研究发现单管弧壁进水方式下进水管的入射角度在0°~40°时，饲料的最终排出率呈单调递增趋势，入射角度为40°时养殖池系统的排污效果最好。这些研究结果与本研究结果基本相同，验证了本试验结果的准确性。气提推水器射流方向相对池壁切线方向夹角越小，管口射流越容易在和池壁碰撞中损失大部分能量。如图8所示，当布设角度 $\theta=45^{\circ}$ 且 $n>4$ 时，各水层高流速区面积占比趋于稳定(波动范围≤5%)。在气提推水器数量 $n>6$ 时，三种布设角度 θ 下表、中、底各个水层间流场分布都较为均匀，各个水层间高流速区分布差异很小，这意味着此时相较于气提推水器布设数量 n 的变化，布设角度 θ 的改变会对养殖池水动力特性产生更明显的影响。气提推水器布设数量的增加和布设角度的调整可以明显提高流速分布的均匀性，减少低流速区面积，这对于提高混合效率和水流均匀性至关重要。朱放等^[18]利用PIV技术测量养殖池流场情况，发现除流速分布均匀系数外，各水动力特征量都在射流角度为40°~50°工况下取得最优值。本研究中，在气提推

水器布设角度 $\theta=45^{\circ}$ 时，养殖池平均流速在气提推水器布设数量 $n=3$ 最高，而均匀系数在气提推水器布设数量 $n=2$ 时达到最高，这表明需要综合考虑养殖池多个水动力特征量才能更合理地比较养殖池水动力特性的优劣，气提推水器布设角度的合理设置能有效改善养殖池流场。

3.3 不足与展望

本研究受试验进度和相关设备影响，未能充分测量和记录进水流速等关键水流参数，无法据此得到可以表征养殖池水循环阻力强弱程度的阻力系数 C_t 等水动力特征量，因而很难综合判断养殖池能量利用效率。考虑到试验的工作量和生产实践的进度，本研究没有在试验进行的各个阶段对养殖池流速测量点位同步测量如溶氧、水温和pH等参数，这些参数能够有效反映气提推水器对养殖池水体的整体影响；未来研究可进一步探讨水动力特性与养殖鱼类行为的交互作用，以探究不同养殖鱼类密度和气提推水器工况设置对养殖池水环境的影响。

4 结论

本研究使用变频罗茨风机作为动力源，现场测定了大型陆基高位圆池中气提推水器以不同数量($n=2, 3, 4, 6, 8, 10, 12$)独立布设时，不同布设角度($\theta=0^{\circ}, 20^{\circ}, 45^{\circ}$)对池内表、中、底三个不同水层($h=30\text{ cm}, 60\text{ cm}, 90\text{ cm}$)流场分布的影响。主要结论如下：

(1)布设角度为0°，布设数量在 $n=12$ 时，平均流速为0.036 m/s，均匀系数为0.18，此时池中心低流速区面积占比最大，达到65%以上，水体混合效率较低，此时增加布设数量对流场特性改善效果微弱。

(2)布设角度为20°时，流场均匀性略有改善，低流速区面积占比较0°工况平均缩减约15%，均匀系数提升至0.3左右，但高流速区仍集中在池壁附近，水体混合效率未显著提升。在布设数量增加时各水层均匀系数呈现出缓慢降低的趋势。

(3)布设角度为45°时，流场均匀性较优，低流速区面积占比缩减至15%以下，平均流速为0.051 m/s，均匀系数为0.29。且布设数量 $n>2$ 时，

数量变化对流场分布影响微弱, 调整体气提推水器布设角度比改变布设数量更能有效改善池内水动力特性。

参考文献:

- [1] Zhu M, Tan H Q, Niu Z Y, et al. Research on transformation and upgrading path of freshwater fisheries and key directions of engineering science and technology innovation in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(2): 1-9. [朱明, 谭鹤群, 牛智有, 等. 我国淡水渔业转型升级路径与工程科技创新重点研究[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 1-9.]
- [2] Liu S J, Li G D, Liu H, et al. Current development status of aquaculture equipment in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 190-203. [刘世晶, 李国栋, 刘晃, 等. 中国水产养殖装备发展现状[J]. 水产学报, 2023, 47(11): 190-203.]
- [3] Hu X N, Zhu Y J, Wu X B, et al. Construction and operation effect of land-based recirculating aquaculture system based on pond[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(18): 210-219. [胡晓娜, 朱永久, 吴兴兵, 等. 池塘陆基循环水养殖系统构建及其运行效果[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 210-219.]
- [4] Jiang Y, Wang W X, Xu Y J, et al. Effects of industrial stocking density on the growth and physiological characteristics of *Seriola lalandi*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(9): 1290-1299. [姜燕, 王维鑫, 徐永江, 等. 工厂化养殖密度对黄条鰈生长和生理特性的影响[J]. 中国水产科学, 2022, 29(9): 1290-1299.]
- [5] Nie L L, Yang Z H, Zhang Q, et al. High ammonia exposure after pre-acclimatization to low ammonia concentration on gill tissue structure, immune indices, and related genes in *Tachysurus fulvidraco*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(11): 1812-1821. [聂丽玲, 杨占虎, 张卿, 等. 低浓度氨氮预适应后高氨氮暴露对黄颡鱼鳃组织结构、免疫指标及相关基因的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(11): 1812-1821.]
- [6] Almansa C, Masaló I, Reig L, et al. Influence of tank hydrodynamics on vertical oxygen stratification in flatfish tanks[J]. Aquacultural Engineering, 2014, 63: 1-8.
- [7] Zhu T Y, Li D C, Xiang K, et al. Flow velocity on fish and its application in recirculating aquaculture system[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(1): 211-221. [朱庭耀, 李冬春, 向坤, 等. 流速对鱼类的影响及其在循环水养殖中的应用[J]. 水生生物学报, 2025, 49(1): 211-221.]
- [8] Xing L F, Feng J M, Tang H, et al. Performance improvement of a large capacity Roots blower based on profile modification[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(13): 2386-2394.
- [9] Li H, Shentu L X, Zhou Y P, et al. Overview of aerator for increasing dissolved oxygen in aquaculture water[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2022(9): 90-92, 95. [李红, 申屠兰欣, 周艳萍, 等. 增氧机增加养殖水体中溶氧方式的概述[J]. 农业技术与装备, 2022(9): 90-92, 95.]
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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. [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.]
- [13] 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. [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.]
- [14] 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.
- [15] 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. [胡艺萱, 刘鹰, 任效忠, 等. 基于流态的方形圆弧角养殖池进水系统优化数值研究[J]. 水产学报, 2023, 47(5): 182-193.]
- [16] Zhu F, Hu J J, Kong J Q, et al. Flow field of circular recirculating aquaculture tank based on PIV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 296-300. [朱放, 胡佳俊, 孔剑桥, 等. 基于PIV技术的圆形循环水养殖池流场[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 296-300.]
- [17] Zhu Y L, Hu H M, Wang Z G, et al. Performance tests of ADV using towing-tank velocity calibration facility[J].

- Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(11): 36-42.
- [朱云龙, 胡鹤鸣, 王志刚, 等. 基于拖曳水槽流速校准装置的 ADV 性能测试[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 36-42.]
- [18] 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, 2024, 48(3): 174-183. [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]. 水产学报, 2024, 48(3): 174-183.]
- [19] Chen B F, Wang G W, Shen H, et al. Application of data Process based on Matlab to GPS elevaton fitting[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2009, 34(5): 1-4. [陈本富, 王贵武, 沈慧, 等. 基于 Matlab 的数据处理方法在 GPS 高程拟合中的应用[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2009, 34(5): 1-4.]
- [20] Wu Y F, Feng D J, Qu J Q, et al. Characteristics of flow field in a large-scale circular aquaculture tank under action of submersible thrusters[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024, 39(2): 289-297. [吴彦飞, 冯德军, 曲疆奇, 等. 潜水推流器作用下大型圆形养殖池的流场特性[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(2): 289-297.]
- [21] Feng D J, Huang H D, Zhang Y J, et al. Effects of aquaculture density on self-cleaning ability of circular recirculating water aquaculture tank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19): 267-276. [冯德军, 黄亨达, 张宇笈, 等. 养殖密度对圆形循环水养殖池自清洗能力的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 267-276.]
- [22] 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. [于林平, 薛博茹, 任效忠, 等. 单进水管结构对单通道矩形圆弧角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.]
- [23] 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.
- [24] Mohammadi Moghadam M, Rajabi Islami H, Ezam M, et al. Optimizing flow uniformity and velocity fields in aquaculture tanks by modifying water inlets and nozzles arrangement: A computational fluid dynamics study[J]. Aquacultural Engineering, 2024, 106: 102431.
- [25] Zhang J, Yao J J, Cheng G F, et al. A comprehensive review on purification technologies for pond aquaculture wastewater[J]. Fishery Modernization, 2024, 51(4): 95-104. [张俊, 姚晶晶, 程果峰, 等. 淡水池塘养殖尾水处理技术研究综述[J]. 渔业现代化, 2024, 51(4): 95-104.]
- [26] Zhu Z W. Pollution characteristics and treatment effects of aquaculture wastewater in the core area of Changjiang River Delta[J]. Fisheries Science, 2025, 44(2): 284-294. [朱泽伟. 长三角地区水产养殖尾水污染特征及处理效果[J]. 水产科学, 2025, 44(2): 284-294.]
- [27] Zhao L, Zhang Q J, Xu J, et al. Experimental study on the hydraulic characteristics of waste concentrated in an industrial aquaculture pond equipped with a pipe jet flow system[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(1): 190-198. [赵乐, 张清靖, 许静, 等. 工厂化对虾养殖池管式射流集污水力特性[J]. 中国水产科学, 2017, 24(1): 190-198.]
- [28] Fang S. Study on hydrostatic settling characteristics of aquaculture source water and optimizing jet-pipe arrangement form in circular tank[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021: 26-42. [方帅. 养殖源水静沉降特性及圆形池射流管布置方式优化研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021: 26-42.]
- [29] Ren X Z, Wang J Z, Xue B R, et al. Experimental study on the blowdown characteristics of square arc-angle maricultural tank[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(5): 790-797. [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.]

Hydrodynamic characteristics of large-sized circular aquaculture tank based on field experiments

CHEN Jianeng^{1,2}, GUI Fukun^{1*}, FENG Dejun¹, NAN Hailin², ZHOU Qixian², ZHANG Qingjing^{1,2}, WU Yanfei^{2*}

1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Beijing Key Laboratory of Fishery Biotechnology, Fisheries Science Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100068, China

Abstract: Land-based circular tank recirculating aquaculture systems, which offer advantages such as water conservation, environmental sustainability, and low cost, are increasingly emerging as a significant trend in modern aquaculture. The hydrodynamic characteristics within the tank directly influence the accumulation of residual feed and fecal matter as well as water quality fluctuations, while the airlift water jets plays a crucial role in enhancing these conditions. A field test was conducted to investigate the hydrodynamic characteristics of a large-scale, land-based circular tank under the influence of the airlift water jets. Three deployment angles for the jet were evaluated, defined as the relative angle between the jet direction and the tank wall ($\theta=0^\circ$, 20° , and 45°), and for each deployment angle, the number of airlift water jets was varied across seven levels ($n=2, 3, 4, 6, 8, 10$, and 12). An acoustic Doppler velocimeter was employed to measure the velocity distribution in three distinct water depth of the tank (located at $h=30$ cm, 60 cm, and 90 cm from the surface), and the hydrodynamic characteristics were evaluated based on the average velocity (v_{avg}) and the tank uniformity coefficient (U). The results indicated that the configuration of the airlift water jet exerts a significant influence on the flow field and hydrodynamic properties. When 12 jets were installed at an deployment angle of 0° , a large low-velocity zone was observed at the center of the tank. As the deployment angle increased from 20° to 45° , the area of the low-velocity zone within the tank progressively decreased. At an deployment angle of 45° , the average velocity under each operating condition is 0.051 m/s, and the tank uniformity coefficient is 0.29 , resulting in the most uniform flow field distribution and a markedly expanded high-velocity zone within the tank. Moreover, at an deployment angle of 45° , when the number of airlift water jets exceeded two, further variations in jet count did not produce a significant impact on the flow field distribution. In summary, the installation angle exerts a more pronounced effect on the flow field within the tank than variations in jet count, and these findings offer a theoretical basis for optimizing the configuration of airlift water jets in large-scale circular aquaculture tanks.

Key words: land-based circular aquaculture tank; airlift water jets; hydrodynamic characteristics; average velocity; uniformity coefficient

Corresponding author: GUI Fukun, E-mail:gui2337@163.com; WU Yanfei, E-mail:wuyf2208@163.com