



基于流态的方形圆弧角养殖池进水系统优化数值研究

胡艺萱¹, 刘 鹰¹, 任效忠^{1*}, 李 猛¹, 毕春伟²

(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. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究进水系统优化对方形圆弧角养殖池内流场特性的影响, 实验运用计算流体力学仿真技术 (CFD) 构建方形圆弧角养殖池的三维数值湍流模型, 单管进水系统设置在养殖池弧壁的中间位置 (以下称弧壁单管), 并主要对不同进径比 (参数 C/B , 射流管中心位置到养殖池壁的水平距离 C 与养殖池短边边长 B 之比) 和不同射流角度对养殖池系统内的流场特性开展研究。结果显示, 不同进径比条件下, 随射流角度增加养殖池水体平均速度均呈现先增大后减小的趋势, 且最优射流角度不同。进径比为 0.01 且射流角度为 45° 时, 养殖池内部流场平均流速最高。进径比为 0.03 时, 最优射流角度为 30° 。当 $C/B=0.05\sim 0.13$ 时且射流角度为 25° 时, 水体平均速度最高且流场均匀性较好。进径比 $C/B=0.07\sim 0.09$ 、射流角度为 25° 时, 养殖池内部流态总体上优于其他工况。研究表明, 养殖池流场特性与进水系统进径比和射流角度密切相关。研究结果可为工厂化循环水养殖进水系统设计和优化养殖池系统的流场特性提供理论依据。

关键词: 养殖池; 进水系统; 计算流体力学; 流场特性

中图分类号: O 351.2; S 955.1

文献标志码: A

水产养殖行业正处于由传统粗放型养殖向现代精准型养殖转变的过程中, 工厂化循环水养殖模式是一种新型的高效养殖模式, 以养殖用水处理后循环利用为核心特征, 能做到节水、节地、绿色健康养殖, 符合当前国家提出的循环经济、绿色环保、转变经济增长方式的战略需求^[1-7]。改进养殖池内进出水系统则是实现鱼类福利化养殖和促进池底有效排污的重要手段^[8]。目前, 实验方法与数值模拟方法已被广泛应用于研究养殖池系统的流场及相关特性^[9], 从养殖池结构选型优化和进出水装置改进等多方面开展研究以期改善养殖池系统的流场特性和集排污性能。Guo 等^[10]对养殖池内的流动特性 (停留时间、速度均匀性)

进行了数值研究和分析, 结果显示进水口和滚动角度都会影响养殖池中的水流特性, 滚柱与进水口条件改变对养殖池内水环境均有影响。在固定的滚动周期内, 随着角度的增加, 滚动角度会使水流速度明显增加。Behroozi 等^[11]预测三维养殖池中边界层边缘的切向速度 $v_{\theta w}$ 并与实测切向速度比较, 认为入口结构的阻力不可忽略, 优化进水口的结构可以减小阻力与能量消耗以改善养殖池内流场特性。Davidson 等^[12]通过试验对比分析了圆形养殖池不同进水结构对水力混合性能与固体颗粒物运动规律的影响, 结果表明, 调整进水结构的位置和射流方向对提高养殖池内的水力混合特性产生了积极的影响, 适当提高池壁、池底

收稿日期: 2021-12-22 修回日期: 2022-10-24

资助项目: 国家自然科学基金 (31872609)

第一作者: 胡艺萱 (照片), 从事养殖工程水动力学研究, E-mail: 18042728623@163.com

通信作者: 任效忠, 从事工程水动力学及工程设计研究, E-mail: renxiaozhong@dlou.edu.cn



的流速更有利于固体废弃物实现预期的去除效率。

目前国内外关于养殖池进水系统的数值研究多聚焦于射流方向对养殖池的影响, 薛博茹等^[13]认为进水管的布置位置对养殖池内部流场特性同样具有重要影响, 研究表明优化进径比可有效改善养殖池系统内平均流速 ($a=0.05$, $P<0.0001$), 提高能量有效利用率。

本研究基于计算流体力学仿真技术, 采用 RNG k- ϵ 湍流模型对方形圆弧角养殖池内部流场进行三维数值计算分析。对单管弧壁入流条件下不同进径比与不同射流角度参数的养殖池内流场进行三维数值模型研究, 以期为工厂化循环水养殖池进水结构的设计和流场条件改善提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数值模型理论

在养殖池系统流场研究中, 存在边界层效应, 所以湍流模型的建立是研究养殖池流场特性的重要环节。在 Ansys Fluent 模块的多种湍流模型中, RNG k- ϵ 模型和标准 k- ϵ 模型可以通过修正湍动黏度, 兼顾考虑水流旋转流动情况等有效解决湍流问题。相较标准 k- ϵ 模型, RNG k- ϵ 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动^[14], 因此 RNG k- ϵ 模型可满足本研究所需求的计算精度, 更适用于养殖池内部水动力环境。

采用有限体积法求解三维 N-S 方程, 有限差分法求解 RNG k- ϵ 湍流模型方程, 求解方法采用压力隐式求解, 压力速度耦合方式采用 SIMPLE 算法, 湍流动能采用一阶迎风离散格式^[15]。

连续性方程和雷诺平均 N-S 方程表示如下。

连续性方程^[16]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

纳维-斯托克斯方程^[14]为:

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (2)$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \quad (3)$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度, μ 是流体的粘度, t 为流经时间; X 、 Y 、 Z 为单位质量流体的质量力分量; $\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_x$, $\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_y$, $\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_z$ 为单位质量流体的切向应力分量; $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ 为法向应力分量;

RNG k- ϵ 模型的运输方程^[17] 表示如下。

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

湍流耗散率 ϵ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha k \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + G_{I\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中, G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; 其中 $C_{I\epsilon}=1.42$, $G_{2\epsilon}=1.68$, 湍动能与耗散率的湍流普朗特数为 $\sigma_k=\sigma_\epsilon=1.39$ 。

1.2 模型验证

本节研究对方形圆弧角养殖池模型进行数值模拟, 在相同工况下监测对比同一位置处的流速变化, 评估网格尺寸对养殖池内流速分布模拟精度的影响, 以确定用于数值计算的合理网格数量范围。

其中, 监测线是以养殖池中间层水平坐标 $[(0, -0.45)$ 和 $(0, 0.45)]$ 两点为端点的连线, 即距离池底高度 $h_z=0.1$ m 且进水管所在直线, 每间隔 0.05 m 取一个监测点, 共 18 个监测点。

网格数达到 1 085 435 个时, 养殖池内监测点速度与网格数为 1 267 234 时的数值模拟结果相差在 2% 以内, 数值模拟结果均趋于稳定, 模拟结果不再随网格数增加而发生明显变化 (图 1-b)。为减少计算压力, 选取网格数约为 108 万个进行养殖池系统建模与网格划分, 对各个研究工况进行数值模拟。

为验证数值模型的合理性以及模拟结果的精度, 建立实际物理模型进行试验并建立相应的数值模型进行模拟^[18]。

物理模型如图 2-a 所示, 进水流量稳定为 0.473 m³/h, 进水方式为弧壁单管进水 (管身自上而下均匀开 18 孔, 孔径为 0.004 m)。启动水泵后

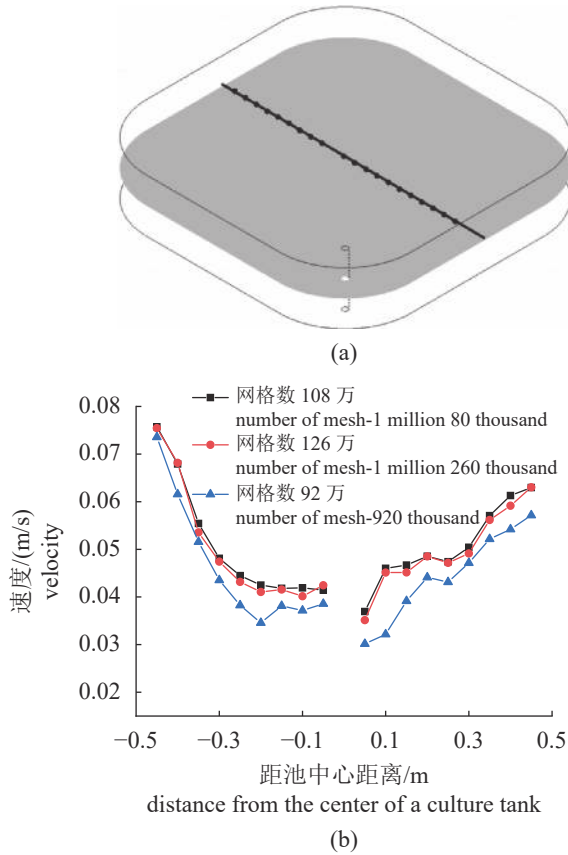


图1 网格无关性验证结果

(a) 监测点布设位置, (b) 不同网格模型流速对比图。

Fig. 1 Verification result of grid independence

(a) location of monitoring point, (b) comparison diagram of velocity of different mesh model.

养殖池系统内部水体循环, 池内水体旋转运动并在池中心形成漩涡, 待漩涡形成 20 min 水体运动基本稳定后, 利用 Vectrino 声学多普勒点式流速仪对试验设计位置的流速进行测量。试验设置一个通过养殖池中心的纵切面, 在距池底高度 $h_z=0.01$ m 处进行速度监测。为准确对比物理实验与数值模拟中养殖池内部流速分布情况, 将数值模拟结果与实验结果以 v_1 (距池中心-0.4m 处的点速度) 为标准做归一化无量纲处理。

数值模拟结果与实验结果吻合较好且呈现相同变化规律, 养殖池内监测速度分布趋势一致, 监测点的相对误差均在 10% 以内 (图 2-b), 这表明本研究所建立的数值模型合理、参数设置合适, 精度满足试验需求, 可以应用于养殖池流场特性研究。

1.3 养殖池模型建立

本研究以等比例缩放的单通道方形圆弧角养

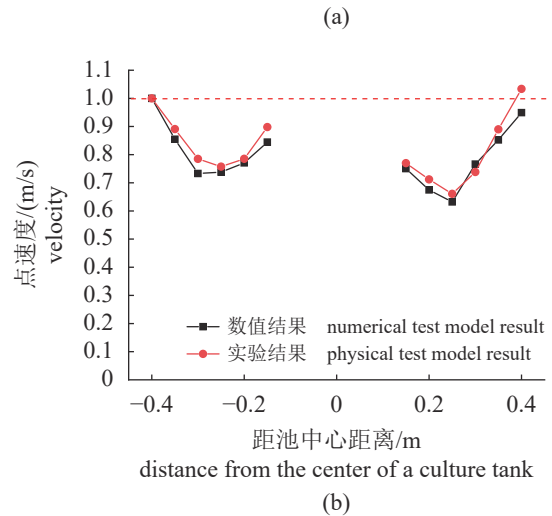
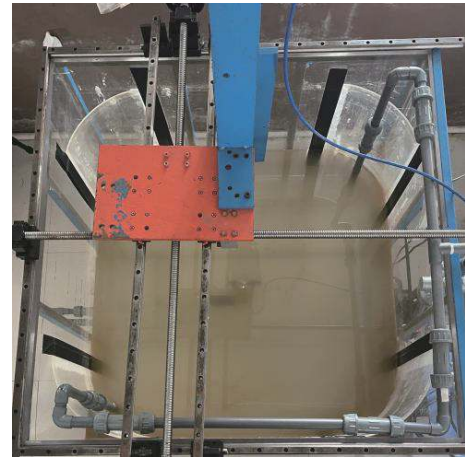


图2 模型验证结果图

(a) 物理模型实验图, (b) 物理实验与数值模拟结果对比图。

Fig. 2 Model verification results

(a) diagram of physical model test, (b) comparison of physical test and numerical simulation results.

殖池为模拟对象, 进水系统位置设置为单管弧壁入流, 模型各部分如图 3 所示, 假定射流角度 (α) 与进径比 (C/B) 为可变参数, 其余设为固定参数, 进水结构进径比示意图如图 4 所示。

养殖池各设计固定参数: 养殖池长 (L) \times 宽 (B) 为 1 m \times 1 m, 水深为 $H=0.2$ m (长宽比 $L/B=1:1$, 径深比 $B/H=5:1$, 相对弧宽比 $R/B=0.25$), 底部出水口的直径为 0.02 m, 进水管直径为 0.02 m。进水管自上而下均匀设置 9 个直径为 0.004 m 的射流孔, 流量恒为 0.814 m³/h, 射流速度恒为 1 m/s。可变参数进径比共设置 7 组 ($C/B=0.01$ 、0.03、0.05、0.07、0.09、0.11 和 0.13), 射流角度设置 19 组 (从 0~90°以每隔 5°设置 1 个工况), 计算分析射流角度与进径比对养殖池内水动力特性的影响。

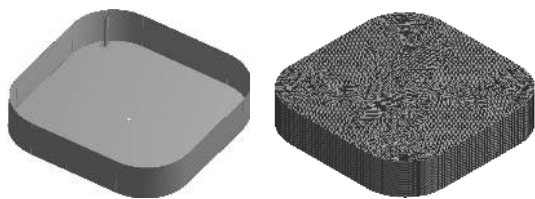


图3 模型与网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model and meshing

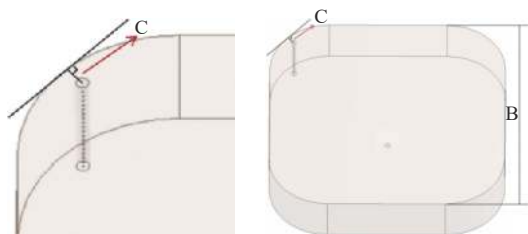


图4 单管弧壁进水方式进径比示意图

C. 进水口中心位置距弧壁距离, B. 养殖池对侧直边间距。

Fig. 4 Schematic diagram of inlet-diameter ratio of arc wall single tube tank

C. the distance from the center of the jet tube to the tank wall, B. the distance between straight edges of the tank.

为在保障计算精度的同时, 兼顾提高计算效率与节约计算资源, 本研究选择多区域网格划分(Multizone)方式对养殖池内分3个区域进行网格划分处理, 分别为进水结构区、排水结构区和养殖池主体区^[19]。由图3可见, 主体部分采用六面体网格划分, 进水结构区和排水结构区以四面体网格加密处理, 提高网格分辨率以满足实验所需的数值求解精度。网格质量检查结果显示, 模型中网格平均偏斜度为0.1037, 整体网格质量较高。

基于计算流体力学中的Fluent模块, 设置边界条件。

入口边界设置: 速度入口, 入口速度设为1 m/s。湍流强度与入水水力直径根据进水流量设置。进水流量 $Q=0.814 \text{ m}^3/\text{h}$, 湍流强度为5.7%, 入水直径为0.004 m。

出口边界设置: 压力出口。

固体壁面边界设置: 池底池壁均为固体壁面。

2 结果

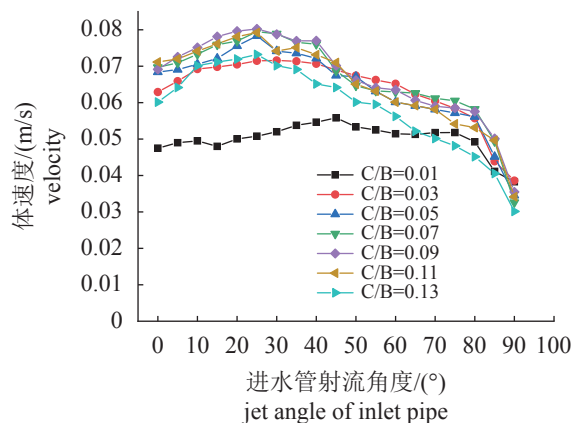
2.1 不同进水条件下养殖池流速变化

An等^[20]研究表明大型, 无鱼圆形养殖池内部的旋转流动模式主要由喷管(即入流系统)决定。

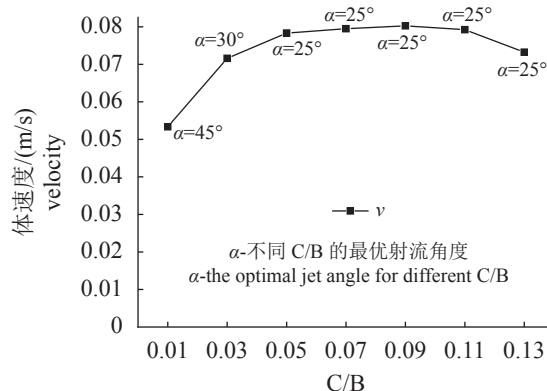
$$F_i = \rho Q (V_{in} - V_{avg}) \quad (7)$$

式中, F_i 为进水结构冲击力, ρ 为水的密度, Q 为循环流量, V_{in} 为入口速度, V_{avg} 为养殖池内平均速度。

在同一系统恒定进水流量条件下, 研究进径比与射流角度对池内流场速度的影响。随入流系统参数的变化, 养殖池内流速出现了明显差异, 养殖池内平均速度随进径比与射流角度的变化如图5所示。



(a)



(b)

图5 七种进水条件的养殖池内流速变化

(a) 不同进水条件的养殖池内平均流速, (b) 不同进径比最优角度平均流速, C/B. 进径比。

Fig. 5 Variation of flow velocity in aquaculture tank under seven inlet conditions

(a) average velocity in aquaculture tank under different inlet conditions, (b) average velocity at optimal angle with different inlet-diameter ratios, C/B. inlet-diameter ratio.

由图5-a可知, 在单管弧壁射流驱动下进径比为0.01~0.13范围内, 流场平均速度随射流角度增大均呈现出先增大后减小的趋势, 随射流角度增长出现1次递增与1次递减趋势。进径比为0.01时, 0~45°区间的平均速度总体呈现递增趋势, 而45~90°区间呈现递减趋势。进径比为0.03时,

0~30°区间的平均速度总体呈现递增趋势, 而30~90°区间呈现递减趋势。进径比为0.05~0.13时, 0~25°区间的平均速度总体呈现递增趋势, 25~90°区间呈现递减趋势。而进径比为0.07~0.11时, 池内流速较高。

薛博茹等^[13]研究表明, 改变进径比参数对单管直壁射流驱动的双排污通道养殖池内部水动力条件具有明显影响, 进径比参数的合理设置是优化养殖池系统流场的重要手段。在本研究中发现, 随进径比系数逐渐增大, 养殖池内部最大平均流速出现先增大后减小的发展趋势。图5-b给出不同进径比条件下, 最优射流角度时的养殖池内部平均流速变化, 进径比为0.01、射流角度45°时养殖池内部流速较低; 随进径比增大到0.07时, 水体最优平均流速逐渐增加。进径比为0.05~0.13、最优射流角度基本稳定为25°时, 水体平均流速较高, 进径比在0.05~0.11区间最优水体平均流速差异较小。进径比0.09的最优角度流速较进径比0.01的最优流速提高约28.13%。进径比增至0.11后, 水体最优流速向减小方向发展, 进径比0.13时较进径比为0.09时水体最优速度降低约10.45%。

2.2 不同进水条件下养殖池水体均匀性变化

任效忠等^[21]以判别参数 UC_{50} 作为研究双通道排水系统的养殖池内流场均匀性的依据, UC_{50} 越接近1, 说明低流速区的平均流速与高流速区的平均流速相差越小, 养殖池内的整体流场均匀性越好。

$$UC_{50} = \frac{v_{L50}}{v_{H50}} \quad (8)$$

式中, v_{L50} 为养殖池中50%较低速度的速度均值, m/s; v_{H50} 为50%较高速度的速度均值, m/s。

水体均匀系数随射流角度变化情况如图6所示, 养殖池水体均匀系数 UC_{50} 与水体平均速度随入射角度的变化呈现高度正相关性, 随入流角度增大呈现出1次递增与1次递减趋势。

进径比在0.01~0.13区间, 水体均匀性总体呈现1次递增与1次递减趋势。进径比为0.01时, 此时池内流速较低水动力条件相对稳定, 射流角度为45°时养殖池内部均匀性最高。当进径比增加至0.03~0.05时, 最优射流角度区间为25~30°, 虽然总体流速较大, 但是入射水流的混合能力较弱且速度梯度较大, 此时养殖池内部整体均匀性相对较差。当进径比达到0.07~0.11时, 养殖池内部

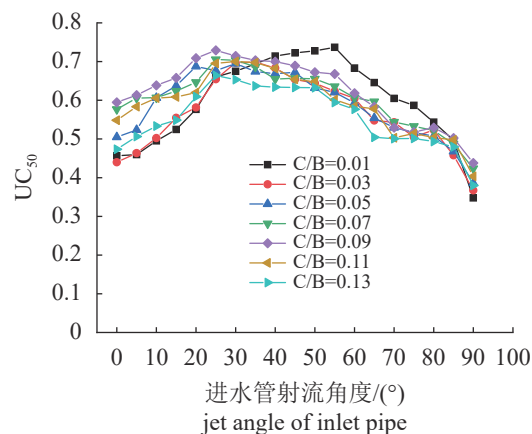


图6 七种进水条件下养殖池内 UC_{50} 变化

Fig. 6 Variation of UC_{50} in aquaculture tank under seven inlet conditions

水体均匀系数较高, 该射流条件下虽仍然出现等值线密集区域, 但养殖池局部密闭环形等值线区域较少且高流速区较多, 无明显低流速区, 因而此时水体均匀性较好。进径比增加至0.13时, 边壁附近的水体与养殖池中心水体流速降低, 速度梯度变大, 水体均匀性较差。

3 讨论

3.1 不同射流角度对养殖池流场的影响

任效忠等^[22]认为, 养殖池进水角度对养殖池流场分布有显著影响, 以单管弧壁和对弧双管进水时, 入射角度在0~90°时, 随进水角度的增加, 池内水体平均流速呈先升高后降低的趋势, 与本研究结论一致。图7为进径比为0.09时养殖池流速分布云图与流速矢量。

射流角度0~10°区间 在方形圆弧角养殖池中, 入射水流位于弧壁位置, 以与圆弧角相切方向(0°)进入养殖池后, 入流会与养殖池边壁发生碰撞并伴随水质点折射与反射现象, 入射水流的紊乱运动会使水体能量大量损耗, 入流与池壁相互作用总体耗能较多。由云图与矢量图可知, 此时养殖池内部出现低流速区域, 进水口附近除射流区域外, 其他区域流速很低且出现死水区, 水体均匀性较差, 矢量图中水体的环流运动呈现椭圆形, 带动流体区域较小。随角度的增大(5~10°)射流沿程变长, 入射水流与边壁的碰撞、折射与反射的程度减轻, 因此养殖池内部水流与池壁撞击以及撞击后水质点无序运动造成的能量损失逐渐减小, 养殖池水体速度逐渐变大, 均匀系

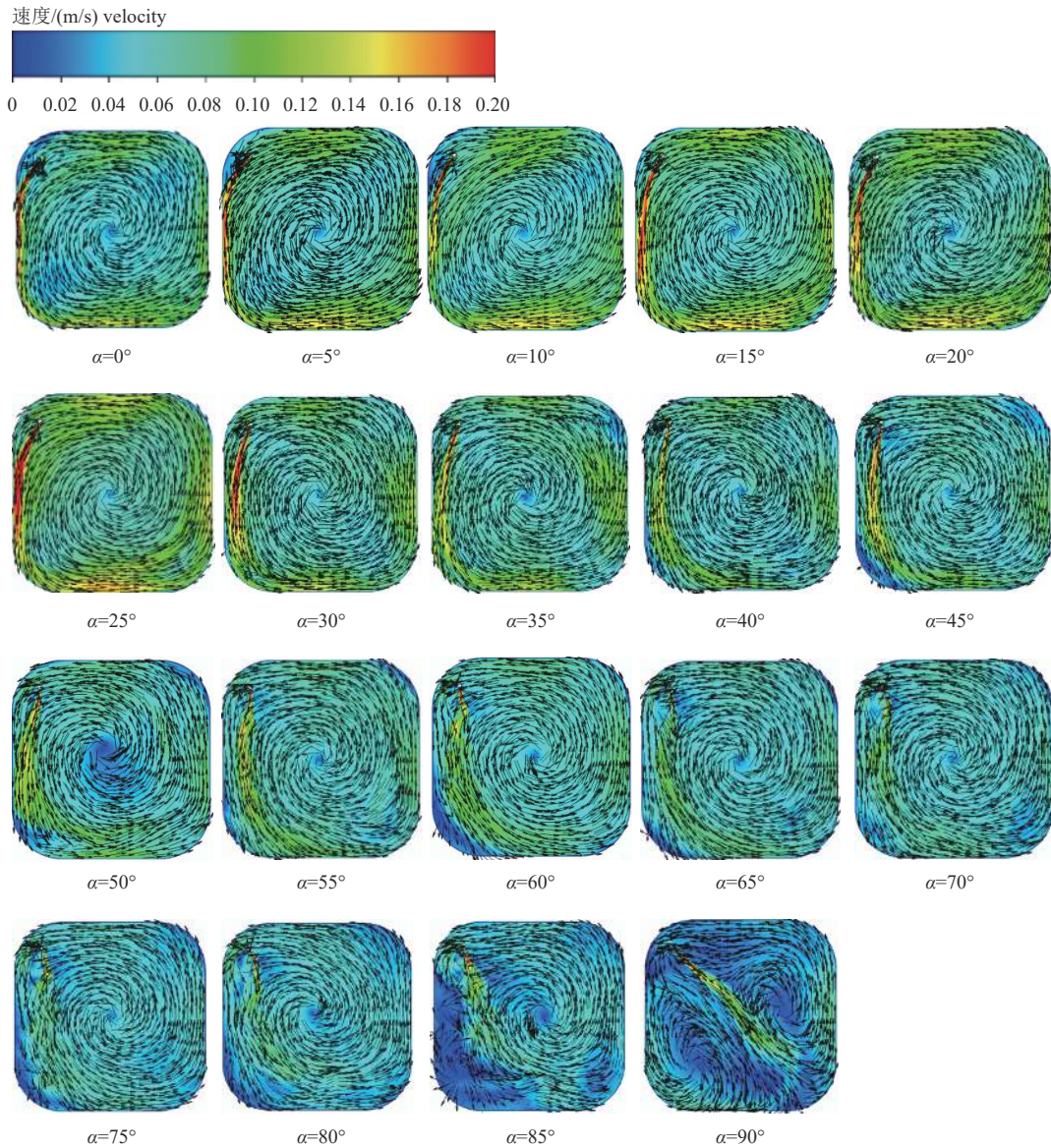


图 7 进径比=0.09 时, 不同射流角度的养殖池流速分布特征图

Fig. 7 Characteristic map of aquaculture tank flow field with inlet-diameter ratio=0.09 and different jet angles

数逐渐增大。此区间内养殖池入射水流与池壁碰撞以及撞击后水质点无序运动摩擦耗能成为养殖池水体的主要耗能方式, 能量损耗较大, 因此水体流速不高且水体均匀性略差。

射流角度 15~35° 区间 随水流入射角度逐渐变大, 入射水流到达池壁沿程变长, 两者间直接相互作用程度减弱。射流角度在 15~20° 区间内, 入射水流在首个流经的圆弧角前与池壁产生摩擦耗能, 此过程摩擦所损耗能量较 0~10° 区间减小, 因此养殖池水体流速较大且均匀性较好。射流角度为 25° 时, 射流与池壁之间的直接相互作用趋近最弱且能量损耗大大减小, 此时养殖池流速最大

且水体均匀性较好, 养殖池流场环境最优。随射流角度再次增大至 30~35° 区间, 入射水流与首个流经的养殖池边壁间出现流速比较低的水层, 这说明入射水流驱动的水体环流逐渐向养殖池中心靠拢, 驱动范围缩小, 此时养殖池水体速度与均匀系数均降低。

射流角度 40~80° 区间 随射流角度的增大, 入射水流与养殖池边壁之间已明显出现流速低的水层, 这些低流速水层充分说明在此区间圆弧池壁的顺畅行进及转向等导向特性对改善边壁区流场性能变差, 同时这些低流速区域和死水区与入射水流发生水质点间碰撞、内摩擦出现较多能

量损耗, 养殖池水体速度逐渐降低且养殖池水体均匀性逐渐变差。

射流角度 80~90° 区间 在此区间内, 入射水流远离池壁主要向中心区域输入入流能量且带动水体环形运动范围明显缩小。入射水流与池壁间出现大面积的死水区, 水体掺混能力极弱, 水流无法维持较稳定的环流特性, 而是在养殖池内部出现正向与反向两种环流, 水质点间内摩擦力增大而消耗大量水体能量, 流速与均匀系数均比较低。射流角度在 90° 时此现象更为明显, 水体流场环境达到最差状态。

3.2 不同进径比对养殖池流场的影响

由“不同射流角度对养殖池流场的影响”的结果可知, 不同进径比条件下方形圆弧角养殖池最优射流角度不同, 本节综合分析在最优射流角度条件下, 不同进径比参数对养殖池内部水动力条件的影响。薛博茹等^[13]认为优化进径比可有效改善养殖池系统内平均流速、提高能量有效利用率。本研究结果表明, 设置合理的进径比可有效改善养殖池内部流场环境, 结论与薛博茹等^[13]的一致。由图 8 可知, 在不同进径比最优射流角度下, 射流系统与排水系统共同作用驱动水体呈现整体环流运动状态。当进径比为 0.01、射流角度为 45° 时, 出现大量低流速区, 养殖池内部总体流速也较低, 矢量图与流线图呈现椭圆形环流, 养殖池内部水流流向规律性欠佳, 在入水口位置入射水流与养殖池边壁产生了较强烈的摩擦与碰撞, 消耗了大量的输入能量, 该射流条件下养殖池内部环境较差。当进径比增加至 0.03 与 0.05 时, 最优射流角度分别为 30 与 25°, 此时养殖池内部流场优于进径比为 0.01、射流角度为 45° 时的流场环境, 但是在射流入口处, 入射水流与养殖池壁仍然发生摩擦与碰撞, 此时仍然存在较大的与池壁间的能量消耗而影响了池内流态, 养殖池内部水流流线分布不均匀。当进径比为 0.07~0.11 时、射流角度为 25°, 此时养殖池内部流场环境较好, 由矢量图可知流场内部水流运动规律, 没有明显的低流速区及水质点与池壁碰撞, 没有明显的水质点间流速不同步或流向不同引起的较大能量消耗, 流线分布均匀且呈现为正圆形环流特性。养殖池入流输入能量大部分应用于维持水流高速运动, 故该入射条件可以维持较好的养殖池内部环境及较高的流场速度与均匀性。当进径比增大至 0.13 时,

养殖池入射水流与养殖池边壁距离较远, 此时圆弧引导水体转向的作用减弱, 引起进水系统射出的高速水体与池对面直壁发生直接碰撞逐渐剧烈, 出现类似于矩形养殖池内的反射、折射现象, 无法发挥出圆弧池壁的顺畅行进及转向等导向特性, 边壁处有低流速区产生, 此时养殖池内部流速降低且流态环境不如进径比在 0.07~0.11 区间、射流角度为 25° 的工况。

图 9 为养殖池内部流场速度等值线图, 等值线越密集反映出流场均匀性欠佳, 等值线越稀疏反映出流场均匀性较好; 存在较多局部的封闭速度等值线图反映流场欠佳, 整体呈现围绕池心的封闭速度等值线图反映流场较好。由图 9 可知, 进径比为 0.01、射流角度为 45° 时, 由于养殖池整体流速较低, 高流速区较少且流速梯度较小, 养殖池内部等值线密集处较少, 此时养殖池内部流场均匀性较高, 但存在较多局部区域的封闭速度等值线图, 反映出该射流条件下养殖池内部环境较差。当进径比增加至 0.03~0.05 时, 最优射流角度分别为 30 和 25°, 该进水条件下养殖池内部等值线较为密集, 且出现许多封闭的局部环形速度等值线, 因而该工况流场均匀系数较低, 此时养殖池内部整体流场均匀性较差。当进径比为 0.07~0.11、最优射流角度为 25° 时, 该射流条件下虽仍然出现等值线密集区域, 但养殖池局部密闭环形等值线区域较少且流速较大, 整体呈现围绕池心的封闭速度等值线图且等值线图比较匀称, 故此时水体均匀性和流态均较好。进径比为 0.13、射流角度为 25° 时, 流场云图中出现较多的密集等值线区域, 且有较多的局部密闭环形等值线区域, 此时水体均匀性和流态又较进径比为 0.07~0.11 区间时变差。

图 10 为基于 Q 准则 (Q=0.01) 识别的养殖池内部涡旋, 从涡柱、涡环和涡丝 3 个方面对不同进水条件的养殖池内部涡量分布进行对比研究。从图中可以看出, 进径比为 0.01、射流角度为 45° 时, 养殖池内涡柱对称性较好, 在池心呈现形状比较规则的轴对称涡柱, 涡环形状对称规则, 且分布在池壁和涡柱周围的涡丝较少, 此时流场比较稳定且流场均匀性较高。随进径比增大至 0.03~0.05, 射流角度分别为 30 与 25° 时, 此时的涡柱变成了一个非轴对称的封闭柱形轮廓, 涡环分布不均匀, 且由于涡柱不断地被剥离拉伸, 因而养殖池内涡丝较多且涡丝分布紊乱, 此时流

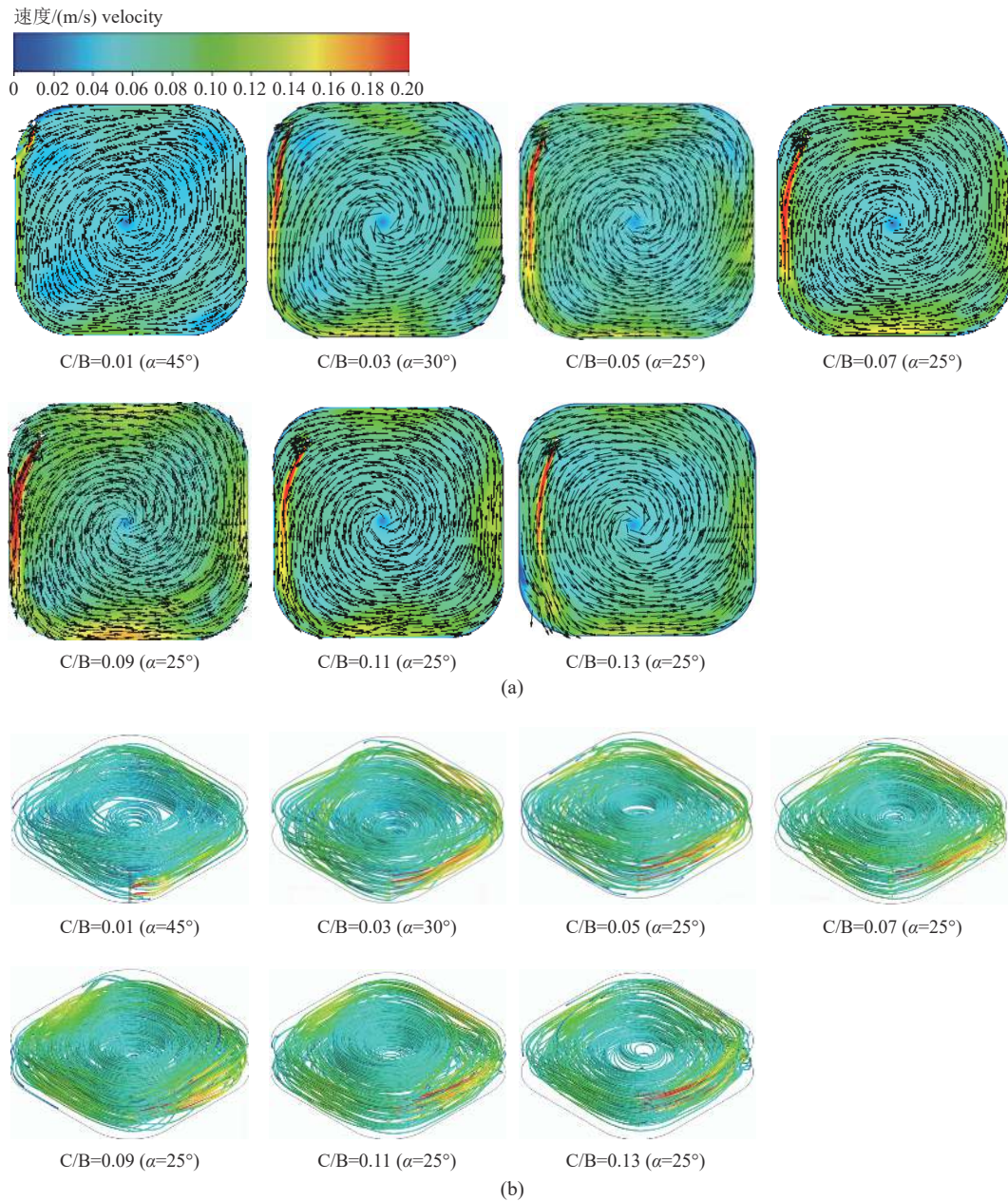


图 8 7种入流条件下的养殖池流场图与流线图

(a) 矢量图, (b) 流线图。

Fig. 8 Flow field diagrams and flow line diagrams of seven intake conditions

(a) vectorgraph, (b) streamline diagram.

场均匀性较差。当进径比为 0.07~0.09 时, 水流与池壁之间的摩擦耗能减少, 与其他进径比范围工况相比, 相对涡柱对称性较好且涡环形状对称比较规则, 涡柱被剥离的涡丝较少, 流场内部达到较为稳定的状态, 此时流场均匀性较高。进径比为 0.11 时, 入射水流逐渐向养殖池中心靠拢, 与边壁附近水体的相互作用减弱, 伴随池壁处低流速及运动方向不稳定流场的形成而出现紊乱流场, 因而在边壁附近出现紊乱涡环与涡丝, 此时流场

均匀性变差。随进径比增大至 0.13, 此时养殖池中心区域流速较高而边壁区域流速较低, 水体速度梯度较大, 池内中心水体与边壁水体间的水质点内部摩擦, 出现一定的能量耗散, 此时涡柱被拉伸, 呈现不规则形状, 涡环分布不对称且出现大量紊乱复杂的涡丝, 此时流场均匀性明显变差。养殖池内部涡量研究结论与本研究“不同进水条件下养殖池水体均匀性变化”不同进水条件下养殖池水体

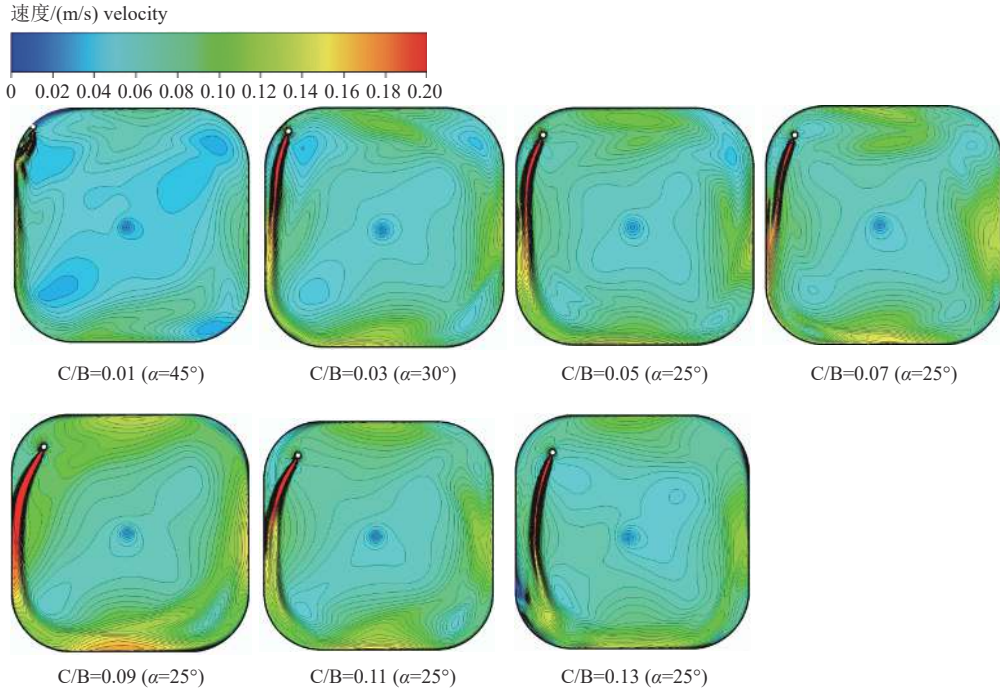


图 9 7种入流条件下的养殖池等值线图

Fig. 9 Isograms of of seven intake conditions

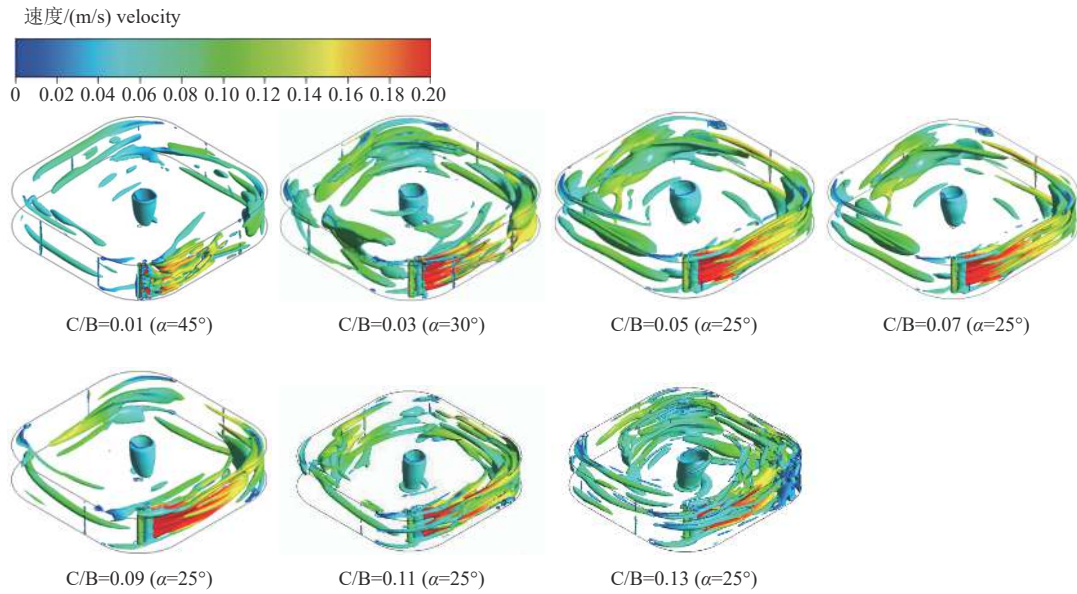


图 10 7种入流条件下的涡量分布对比

Fig. 10 Comparison of vorticity distribution under seven intake conditions

均匀性变化的研究结论高度一致, 证明了涡量图也可作为流场流态与均匀性判别的重要手段。

通过对养殖池内部水体速度分布、环流特性、均匀性以及内部涡旋的分析可知, 不同进径比条件下的最优射流角度并非一成不变的。在进径比为 0.01~0.13 区间内, 最优射流角度随进径比的增大出现快速减小至稳定的变化趋势。进径比为

0.01、最优射流角度为 45°时, 由于此时进水管紧贴池壁, 射流角度 45°可使入射水流基本平行于养殖池直壁, 相较过小的入射角度可减小入射水流与出流位置圆弧角边壁的碰撞程度, 又不会因为角度过大直接与中心水体混合而削弱对池壁水体的能量输入与带动作用。当进径比增大至 0.03 时, 最优射流角度减小至 30°, 此时射流管与养殖池壁

产生一定距离, 入射水流到达池壁沿程增大, 如果继续设置 45°入流, 入射水流与养殖池内壁间会出现流速较低的水层, 影响养殖池内部沿池壁的环流形成与速度分布。进径比为 0.05~0.13 区间, 最优射流角度基本稳定在 25°, 该进径比区间内入射水流到达养殖池内壁的沿程增大, 射流角度 25°即不会因角度过小而使入流与边壁碰撞产生过大耗能, 又兼顾最大程度的与池中水体混合形成沿池壁运转的水体环流特性。

4 结论

本研究基于有限体积法与有限差分法建立三维湍流数值模型, 系统研究了进水系统的布设(进径比与射流角度)对单管弧壁方形圆弧角养殖池流场特性的影响, 通过对流速大小分布, 水体均匀性以及水体涡量分布直接评估养殖池流态环境。得出以下结论:

①模型验证结果显示, 数值模拟计算结果与实验结果吻合良好, 证明了本实验建立的数值模型合理且精度满足要求, 可应用于养殖池水动力特性的研究。

②进径比为 0.07~0.09、射流角度为 25°时, 养殖池内水体平均流速较高、均匀性较好, 且没有明显的低流速区, 呈现沿池壁运转的稳定环流特性, 此时养殖池流态环境达到最佳状态, 相应的流场条件更符合循环水养殖模式降低能耗且构建流态均匀系统的需求。

③单通道养殖池内部流场特性受进水系统的进水角度与布设进径比影响明显, 方形圆弧角养殖池进水系统各进径比的最优射流角度不一致。在进径比为 0.01~0.13 区间内, 随进径比增大, 最优射流角度出现快速减小至稳定的变化趋势, 因此养殖池入流系统的布设需综合考虑进径比与射流角度两大参数并让二者相匹配。

④综合分析进径比与射流角度对养殖池流场环境的共同作用, 可提供降低养殖能耗与兼顾营造养殖生物所需适宜流场的进水系统布设方案。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] 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.

<https://www.china-fishery.cn>

Wei W. Numerical simulation and structure optimization of circular culture tank for recirculating aquaculture system[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013 (in Chinese).

[2] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1100-1111.

Wang F, Lei J L, Gao C R, et al. Review of industrial recirculating aquaculture research at home and abroad[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 1100-1111 (in Chinese).

[3] 刘鹰. 海水工业化循环水养殖技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 50-53.

Liu Y. Research progress on marine industrial recirculating aquaculture technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5): 50-53 (in Chinese).

[4] 唐茹霞, 史策, 刘鹰. 循环水养殖系统管理运行存在主要问题调查分析[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(1): 100-106.

Tang R X, Shi C, Liu Y. Analysis on the major problems in the management and operation of recirculating aquaculture system[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(1): 100-106 (in Chinese).

[5] 潘荣华, 胡一丞, 陆宁基, 等. 循环水养殖技术研究进展[J]. 科学养鱼, 2018(11): 1-2.

Pan R H, Hu Y C, Lu N J, et al. Research progress of recirculating aquaculture technology[J]. Scientific Fish Farming, 2018(11): 1-2 (in Chinese).

[6] 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[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(6): 995-1002.

Liu H B, Ren X Z, Zhang Q, et al. Numerical modeling of fish movement in a recirculating aquaculture tank: in the case of Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegelii*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(6): 995-1002 (in Chinese).

[7] 车宗龙, 任效忠, 张倩. 循环水养殖系统中水动力特性及其与鱼类相互影响研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(5): 886-898.

Che Z L, Ren X Z, Zhang Q. Research progress on hydrodynamics in a recirculating aquaculture tank system: a review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(5): 886-898 (in Chinese).

[8] Timmons M B, Summerfelt S T, Vinci B J. Review of 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- circular tank technology and management[J]. *Aquacultural Engineering*, 1998, 18(1): 51-69.
- [9] 刘威. 矩形流水对虾养殖池集污特性及对虾耐流性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- Liu W. Study on fouling characteristics and prawn tolerance in shrimp pond[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [10] Guo X Y, Li Z S, Cui M C, *et al.* Numerical investigation on flow characteristics of water in the fish tank on a force-rolling aquaculture platform[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107936.
- [11] Behroozi L, Couturier M F. Prediction of water velocities in circular aquaculture tanks using an Axisymmetric CFD model[J]. *Aquacultural Engineering*, 2019, 85: 114-128.
- [12] 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.
- [13] 薛博茹, 姜恒志, 任效忠, 等. 进径比对方形圆弧角养殖池内流场特性的影响研究[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(4): 20-27.
- Xue B R, Jiang H Z, Ren X Z, *et al.* Study on the influence of the relative inflow distance on the flow field characteristics in square arc angle aquaculture tank[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(4): 20-27 (in Chinese).
- [14] 胡艺萱. 方形圆弧角养殖池多相流模型的建立与应用研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- Hu Y X. Establishment and application of multiphase flow model in square arc angle aquaculture tank[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022 (in Chinese).
- [15] 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.
- 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 (in Chinese).
- [16] Liu Y, Liu B L, Lei J L, *et al.* Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(4): 912-920.
- [17] Oca J, Masaló I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 36(1): 36-44.
- [18] 薛博茹, 李永锋, 胡艺萱, 等. 基于CFD的进水管布设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 (in Chinese).
- [19] 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 (in Chinese).
- [20] An C H, Sin M G, Kim M J, *et al.* Effect of bottom drain positions on circular tank hydraulics: CFD simulations[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 83: 138-150.
- [21] 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 (in Chinese).
- [22] 任效忠, 王江竹, 张倩, 等. 方形圆弧角养殖池进水结构对流场影响的试验研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(5): 726-732.
- Ren X Z, Wang J Z, Zhang Q, *et al.* Influence of inlet structure on flow field in a rectangular arc angle tank in aquaculture[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(5): 726-732 (in Chinese).

Numerical study on optimization of inlet system of square arc angle aquaculture tank based on flow pattern

HU Yixuan¹, LIU Ying¹, REN Xiaozhong^{1*}, LI Meng¹, BI Chunwei²

(1. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Ministry of Education, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The aquaculture industry is now in a state of changing, from traditional to modern, from extensive to accuracy aquaculture, with Recirculating Aquaculture System as a creative and efficient aquaculture model. In order to investigate the effects of inlet system optimization on the internal flow field characteristics of aquaculture tanks, analyzes the hydrodynamic features of aquaculture tank applying different inlet structure layout, so as to provide a theoretical basis for the inlet structure design of Recirculating Aquaculture System. Under the application of Computational Fluid Dynamics simulation (CFD), a three-dimensional numerical turbulence model of the square arc angle aquaculture tank was constructed. The single tube inlet system was located in the middle of the arc wall of the aquaculture tank (hereinafter referred to as: arc wall single tube), and adjusted to various inlet-diameter ratios (parameter C/B , the ratio of the horizontal distance C from the center of the jet tube to the tank wall, to the length B on the shorter side of the tank) and different jet angles to study the flow field characteristics in the tank system. From the experiment it is found that the internal flow field features of single tube aquaculture tank are significantly affected by the inlet angle and diameter ratio of the inlet system, and the optimized jet angle of each inlet diameter ratio of square arc angle aquaculture tank differs with each other. The layout of the inflow system of the aquaculture tank involves the two parameters of inlet diameter ratio and jet angle in a comprehensive way, and make sure they are matching. According to the relative inflow distance data, the results show that with the increase of inlet diameter ratio, the optimal average velocity curve of water body first increases and then decreases. When the inlet diameter ratio is 0.09 and the jet angle is 25° , the velocity is the maximum. The optimal angular velocity of inlet diameter ratio 0.09 is about 28.13% higher than that of inlet diameter ratio 0.01. When the relative inflow distance reaches 0.07-0.11, the uniformity coefficient reaches the peak value when the jet angle is 25° . According to the comprehensive analysis of the internal flow velocity, flow field uniformity and internal characteristic diagram of the flow field in the aquaculture tank, under the condition that the inlet diameter ratio $C/B=0.07-0.09$ and the jet angle is 25° , the internal flow pattern of the aquaculture tank is generally better than other working conditions, the flow environment of the aquaculture tank achieves the best, and the correstanking flow conditions accommodate the needs of Recirculating Aquaculture System better, reducing energy consumption and building a steady flow system. This research will provide a basis for influent system of Recirculating Aquaculture System designing and the optimization of its flow field features.

Key words: aquaculture tank; water inlet system; computational fluid dynamics; flow field characteristics

Corresponding author: REN Xiaozhong. E-mail: renxiaozhong@dlou.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31872609)