

李彬涛,谭鹤群,张义仁,等.进水结构对圆形循环水养殖池流场的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(2):22-29.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.003

进水结构对圆形循环水养殖池流场的影响

李彬涛,谭鹤群,张义仁,夏成醒

华中农业大学工学院/农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,武汉 430070

摘要 为精准设计工厂化圆形循环水养殖池的进水结构,基于计算流体力学技术,采用Fluent软件建立数值模型模拟进水管在不同进水角度 θ 、进径比 d/r 、进水高度 h 工况下养殖池内的流场分布特性,并以平均速度 v_{avg} 和均匀系数 U 为评价指标,对进水结构进行优化分析,在物理试验证明该数值模型能较好地模拟养殖池内的流场特征的基础上,模拟了不同进水结构对流场分布的影响。结果显示:在相同条件下,进水角度 θ 在 40° 时 v_{avg} 取得最大值,水层之间的 U 差异较小;进径比 d/r 在0.1时 v_{avg} 和 U 取得较大值,水层之间的 U 差异较小;进水高度 h 在100~400 mm时 v_{avg} 取得较大值,且在 $h=100$ mm时水层之间的 U 差异最小。研究表明,当进水角度 $\theta=40^\circ$ 、进径比 $d/r=0.1$ 、进水高度 $h=100$ mm时,养殖池内流场特性处于较优状态。

关键词 循环水养殖;计算流体力学;进水结构;流场特性

中图分类号 S964.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0022-08

循环水养殖是一种通过技术手段创造合理可控的养殖环境、提高鱼类质量的高效集约型养殖模式^[1]。随着循环水养殖技术的发展,循环水养殖将在中国占据更多的市场份额,是中国水产养殖的主要发展方向之一^[2]。但是循环水养殖密度高、饵料投放多,在养殖过程中易产生大量不被摄食的饵料以及鱼类粪便等颗粒物,堆积于池底中^[3]。这些颗粒物在适宜条件下分解成氨氮等有害物质影响养殖对象^[4]。如何有效地将残饵和粪便等颗粒物排出是循环水养殖系统面临的重要问题之一。而颗粒物的运动规律由养殖池流场特性直接决定,因此研究养殖池流场特性对构建适宜流场环境、有效去除颗粒物及提高鱼类质量具有重要意义。

进水结构是影响养殖池流场的关键。Plew等^[5]通过试验表明优化养殖池进水结构有助于提高池内流速。任效忠等^[6]研究表明不同的进水方式、水体日循环次数、进水管入射角度对养殖池流场特性的影响具有显著差异。传统的超声学多普勒测量仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)或粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)等操作成本高、费时、费力,难以获得流场的详细信息,而计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术为

获取养殖池内复杂的流场信息提供了新方法。于林平等^[7]通过构建三维数值计算模型,研究了单通道矩形圆弧角养殖池流场特性,结果表明提高水体日循环次数,养殖池平均流速增加且系统阻力系数降低。薛博茹等^[8]运用数值模拟技术研究了进径比对流场特性的影响,结果表明进径比在0.02~0.04区间内流场特性较优。张倩等^[9]研究了相对弧宽对方形养殖池流场特性的影响,结果表明相对弧宽比在0.2~0.4区间内流场水动力条件较优。综上所述,虽然国内外研究人员对养殖池流场特性已有了深入研究,但主要集中于多孔进水对流场特性的影响,而对单孔式进水结构的研究较少。尤其在综合考虑多个因素对双管单孔进水圆形养殖池流场影响方面的研究有所缺失。

圆形养殖池具有良好的水体均匀性和混合性,自净效率高,为养殖行业中常用的养殖池之一^[10-11]。本研究以双管单孔进水圆形养殖池为研究对象,采用CFD技术建立养殖池液相模型,探究不同进水角度、进径比、进水高度对圆形养殖池内流场特性的影响,旨在为圆形循环水养殖池进水结构的设计提供参考依据,也为养殖池内颗粒物运动规律的研究提供理论基础。

收稿日期:2023-12-23

基金项目:湖北省科技重大项目(2023BBA001)

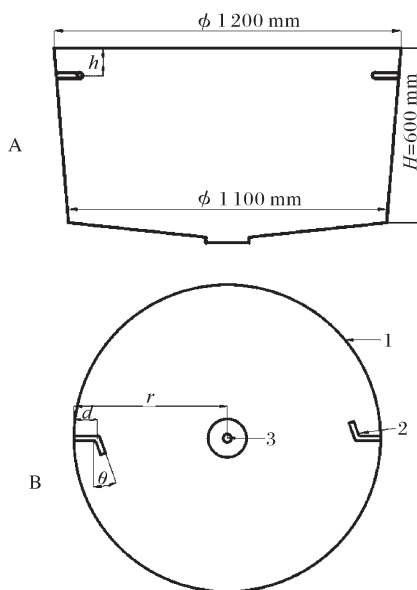
李彬涛, E-mail: libintao123@qq.com

通信作者:谭鹤群, E-mail: thq@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 养殖池模型

本研究以圆形养殖池为研究对象,参照现有工厂化养殖池常用结构,并在此基础上进行部分结构简化。为方便模拟计算,假定养殖池深度等于水体深度。进水角度 θ (射流方向与养殖池切线形成的锐角)、进径比 d/r (进水管位置到池壁水平距离 d 与所在截面半径 r 之比)、进水高度 h (进水管与水平面之间的距离)为可变参数,其余为固定参数。养殖池各固定参数如图1所示:养殖池上端直径 $\phi=1\ 200$ mm,池底直径 $\phi=1\ 100$ mm,水深 $H=600$ mm,底部坡度 8° ,即养殖池中心水深 700 mm,进水管直径 20 mm,底部排水口直径 32 mm。进水管设置在池壁上,呈对称形式分布,进水流速恒定为 1.5 m/s。



A: 正视图 Front view; B: 俯视图 Top view. 1. 养殖池 Aquaculture tank; 2. 进水管 Inlet pipe; 3. 排水口 Outlet.

图1 养殖池模型图

Fig.1 Model drawing of aquaculture tank

1.2 湍流模型

在养殖池流场中,存在着边界层作用和较不规则的环流运动,这种复杂的流动称为湍流,养殖池内流场特性受湍流干扰较大。根据相关研究,湍流标准 $k-\epsilon$ 模型与RNG $k-\epsilon$ 模型均可以处理湍流问题^[12]。本研究以养殖池内环流水体为研究对象,相比于标准 $k-\epsilon$ 模型,RNG $k-\epsilon$ 模型能更好地模拟射流撞击、二次流和旋流等复杂流动^[13]。因此,本研究选用RNG $k-\epsilon$ 模型进行模拟计算,输运方程^[14-16]如下:

湍流动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

湍流耗散率方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: ρ 为流体密度,kg/m³; u 为流体速度,m/s; μ 为流体动力黏度,Pa·s; μ_t 为湍流黏度系数; α_k 和 α_ϵ 分别为湍流动能 k 和耗散率 ϵ 的有效湍流普朗特数的倒数; $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为常数,取值为: $C_{1\epsilon}=1.42$ 、 $C_{2\epsilon}=1.68$ 。

1.3 求解方法

基于CFD仿真软件Fluent,对养殖池流场即液相模型选择稳态(steady)控制方式,设置养殖池模型的重力加速度,模型基于压力隐式控制,选择SIMPLE耦合方式,压力、动量基于二阶迎风离散格式,湍流动能、湍流耗散率基于一阶迎风离散格式,模型初始化后运行计算。对养殖池模型的进出口、流体介质和壁面等边界参数进行设置,边界条件如下:(1)液体为水,密度 $\rho=998.2$ kg/m³,黏度 $\mu=1.01 \times 10^{-3}$ Pa·s;(2)进口边界为速度入口,进水速度 $v_{in}=1.5$ m/s,水力直径 $D_H=0.02$ m,湍流强度 $I=4.43\%$;(3)出口边界为压力出口,水力直径 $D_H=0.032$ m,湍流强度 $I=4.18\%$;(4)壁面边界,池底和池壁均采用固体壁面边界,假设无剪切且无滑移速度。

1.4 网格划分

本研究中养殖池模型采用四面体网格划分,保留细节特征的同时对进出口边界进行网格加密,提高计算精度,如图2所示。网格数量是影响模拟计算精度的重要因素,数量过少计算误差过大,数量过多模型计算时间过长。为满足数值模拟计算精度并减少计算时间,在相同设置条件下,进行网格无关性检验,通过对比同一位置的流速变化,评估网格数量对流速分布模拟精度的影响,以获取合理的网格数量。在距离水平面 400 mm且通过池中心的截面取 11 个监测点,监测点间隔 100 mm,进行了Mesh-A(2 741 028)、Mesh-B(2 039 327)和Mesh-C(1 316 122)3种不同网格数量的数值模拟。不同网格数量的流速分布结果如图3所示,可以看出,当网

格数达到 Mesh-B(2 039 327)时,各监测点速度趋于稳定,不再随网格数量的增加而发生明显变化。因此养殖池模型选取约为200万的网格数量,用于圆形养殖池流场特性研究。

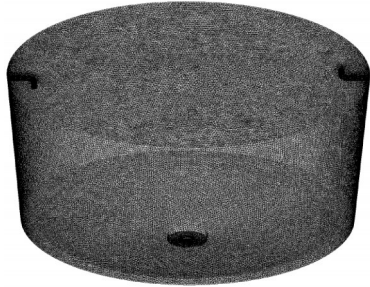


图2 网格划分示意图

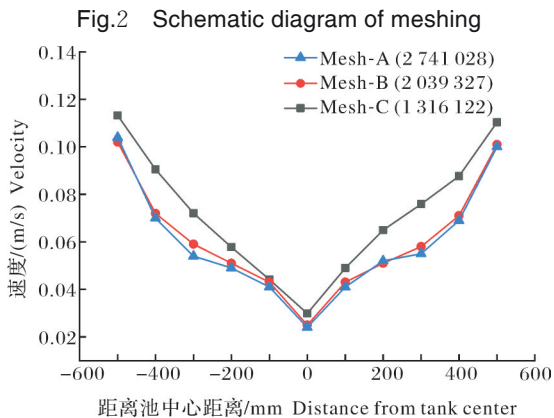


图3 3种不同数量的网格计算结果对比

Fig.3 Comparison of three meshes with different quantity

1.5 试验设计

1)物理模型验证试验。建立与数值模型参数相同的循环水养殖装置进行试验,如图4所示。试验过程:调节进水管安装角度 $\theta=0^\circ$ 、进径比 $d/r=0.1$ 、高度 $h=0$ 、进水流速为1.5 m/s,约25 min水体稳定后,使用LS300-A型流速仪对监测点进行测量,监测点设置在距离水平面400 mm且通过池中心的截面上,取11个监测点,各点间隔100 mm,每个点测量3次取平均值。同时设置相同边界参数的数值模型进行模拟,验证数值模型的可行性。



图4 试验装置图

Fig.4 Experimental setup

2)探究进水角度对流场特性的影响。设置不同进水角度进行模拟计算,模拟计算条件如下:进水角度 θ 设置从 $0^\circ\sim 80^\circ$,以 10° 为间隔,进径比 $d/r=0.1$,进水高度 $h=100$ mm,进水流速为1.5 m/s,并截取养殖池底层(距水面500 mm)的流场速度分布矢量图进行分析。

3)探究进径比对流场特性的影响。设置不同进径比进行模拟计算,条件如下:进水角度 d/r 设置从 $0\sim 0.5$,以0.1为间隔,进水角度 $\theta=40^\circ$,进水高度 $h=100$ mm,进水流速为1.5 m/s,并截取养殖池底层(距水面500 mm)的流场速度分布矢量图进行分析。

4)探究进水高度对流场特性的影响。设置不同进水高度进行模拟计算,模拟计算条件如下:进水高度 h 设置从 $0\sim 600$ mm,以100 mm为间隔,进水角度 $\theta=40^\circ$,进径比 $d/r=0.1$,进水流速为1.5 m/s,并截取与进水管截面相垂直的纵截面流场速度分布云图进行分析。

1.6 评价指标

水动力特征量有助于对流场进行定量分析,基于均匀系数(uniformity coefficient, U)和平均速度(v_{avg})对流场水动力特性进行深入分析。 U 值介于0和1间,越接近1流场均匀性越好,养殖对象分布均匀,养殖水体空间利用率高^[17]。 v_{avg} 越大代表水流驱动力越大,池底颗粒物运转起动条件更充分,促进颗粒物向池中心集聚^[18-19]。计算公式如下:

$$v_{avg} = \frac{\sum v_i r_i}{\sum r_i} \quad (3)$$

式(3)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,m。

$$U = \frac{v_{150}}{v_{H50}} \quad (4)$$

式(4)中: U 为养殖池均匀系数; v_{150} 为养殖池池中50%的较低速度的平均值,m/s; v_{H50} 为养殖池池中50%的较高速度的平均值,m/s。

在养殖池距离水平面200、300、400、500、600 mm的截面各设置40个测量点,取20个较低值的平均值为池中50%的较低速度的平均值 v_{150} ,20个较高值的平均值为池中50%的较高速度的平均值 v_{H50} 。各截面测量点均设置于5个以池中心为圆心、半径分别为100、200、300、400、500 mm的圆周上,每个圆周取8个均匀分布的点。根据公式(3)、(4)计算出

每个截面的平均速度和均匀系数,用以分析不同进水角度、进径比和进水高度下养殖池的水动力特性。

2 结果与分析

2.1 模型验证

图 5 为数值模拟与试验结果的比较图,从图 5 中可看出,模拟值与试验值的变化趋势相同,速度由外向内逐渐减小,绝大多数监测点误差在 5% 以内,存在个别点误差较大,但平均误差在 10% 以内,表明本研究所构建的数值模型合理,能较好地模拟养殖池内流场分布,可用于双管单孔进水圆形养殖池的流场特性研究。

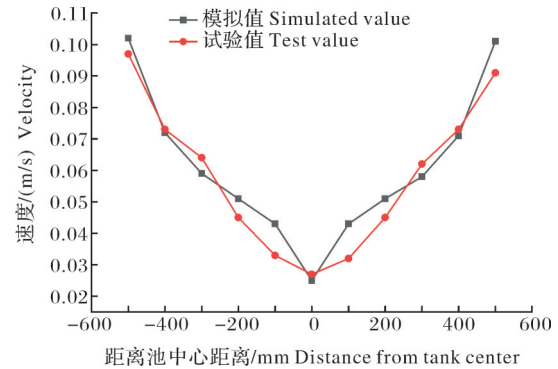


图 5 模拟值与试验值比较

Fig.5 Comparison of simulated and test values

2.2 进水结构对流场分布的影响

1) 进水角度对流场分布的影响。不同进水角度的养殖池流场分布如图 6 所示,可以观察到进水角度明显影响池内流场分布。进水角度 $\theta=0^\circ\sim 40^\circ$ 时,养殖池内形成高速环形水流,速度由外向内递减,这种

速度随径向距离变化的趋势会形成一种径向流体附带作用,池底颗粒物会在径向流体附带和重力双重作用下集聚在排水口,高速环流区面积随角度的增大而增大; $50^\circ\sim 60^\circ$ 时,环形水流的速度变化梯度减小,高速环流区向池中心转移; $70^\circ\sim 80^\circ$ 时,射流在池中心区域接触,难以形成环形水流,水体回转速度较小。

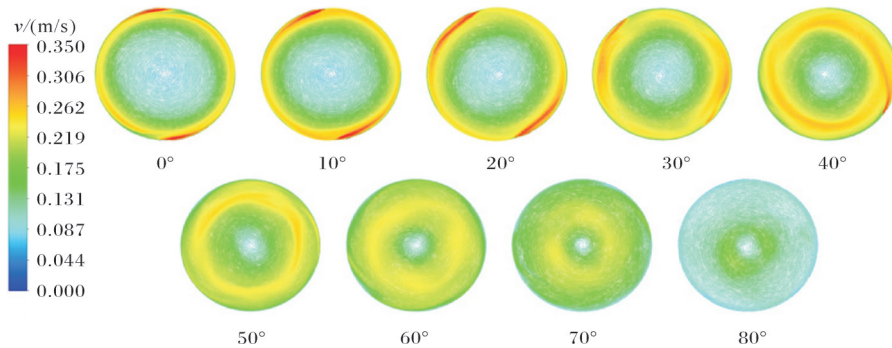


图 6 不同进水角度下的速度分布矢量图

Fig.6 The vector maps of velocity distribution at different inlet angles

2) 进径比对流场分布的影响。图 7 为不同进径比下养殖池内流场速度分布矢量图,可以清晰地看出进径比 $d/r=0\sim 0.1$ 时,水体回转速度较高,变化梯度较为明显,利于颗粒物向池中心集聚。随着进径比增大,养殖池高速环流区减小,逐渐向池中心方向

转移。尤其是 $d/r=0.5$ 时,由于进水管相隔过近射流带动水体有限,仅在养殖池中心附近区域形成高速环流,池壁附近出现低速流区。

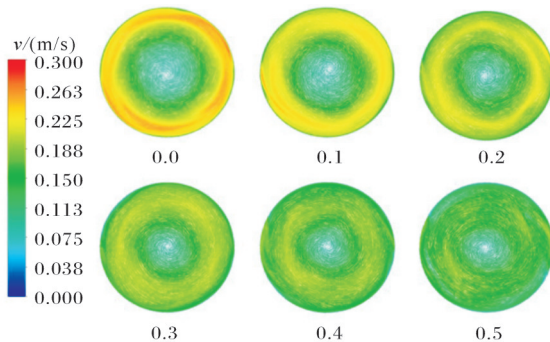


图 7 不同进径比下的速度分布矢量图

Fig.7 The vector maps of velocity distribution at different relative inflow distance

3) 进水高度对流场分布的影响。图 8 为不同进水高度下养殖池内纵截面速度分布图,从图 8 中可以看出,当进水高度 $h=0\sim 400$ mm 时,养殖池水体回转速度大小、分布相似,高速流覆盖池底区域未有明显变化,整个空间高速流占比高,利于颗粒物向池中心集聚。进水高度为 500~600 mm 时,池内流场紊乱,高速环流形态不规则,甚至出现乱流现象;池底的高速流覆盖区域较小,不利于颗粒物起运集聚。

2.3 进水结构对水动力特征量的影响

1) 进水角度对流场水动力特征量的影响。根据数值模拟得到不同进水角度下不同深度水层的平均速度如图 9A 所示,平均速度随进水角度的增大呈现先增后减的趋势,其中 $\theta=40^\circ$ 时平均速度最高。各水

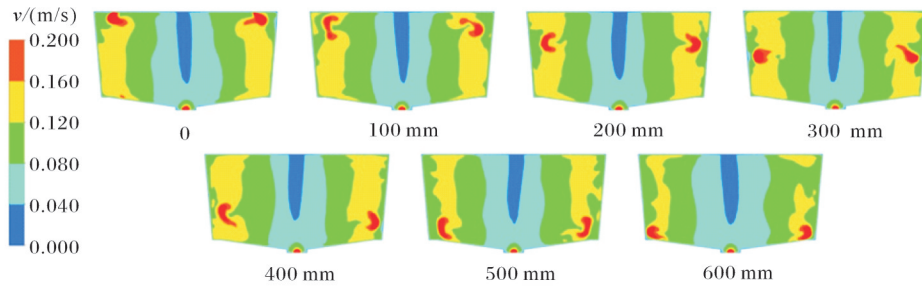


图8 不同进水高度下的纵截面速度分布云图

Fig.8 The contour maps of velocity distribution at different inlet heights

层平均速度整体变化趋势相似,200~500 mm 深度的水层平均速度较为接近,600 mm 深度的水层与池壁面摩擦产生能量损失,导致平均速度略低。进水角度为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时,平均速度随进水角度的增大而增大。原因在于射流离开进水口后在前进方向上与池壁之间的距离逐渐增大,与池壁的碰撞程度减弱,反射、折射、碰撞所损耗的能量减小,因此平均速度提高。进水角度为 $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 时,平均速度随进水角度的增大而减小。此时水质点之间的相互碰撞及摩擦为主要耗能方式。角度增加导致射流带动的主体运动水域减小,环流与池壁之间出现低速流区,水质点间能量损耗增大,致使速度减弱。尤其是 80° 时养殖池内水体混合程度低,平均速度较小。

图9B为不同进水角度下不同深度水层的均匀系数。由图9B看出均匀系数随进水角度的增大呈现先增后减的趋势,其中进水角度为 40° 时水层均匀系数之间差异最小, 70° 时取得最大值。进水角度为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时均匀系数增长缓慢,200~600 mm 不同深度水层的波动起伏小、均匀系数接近, 40° 时差异最小,养殖池流场均匀性良好。进水角度为 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 时均匀系数增长迅速,但角度的增加导致射流与池壁之间出现低速流影响了水体的均匀性,各水层的均匀系数差异大,不利于养殖对象整体空间分布,空间利用率低。在 80° 时均匀系数降低,养殖池水体均匀性下降。综上所述,进水角度 $\theta=40^{\circ}$ 时,养殖池内水动力特性相对较优。

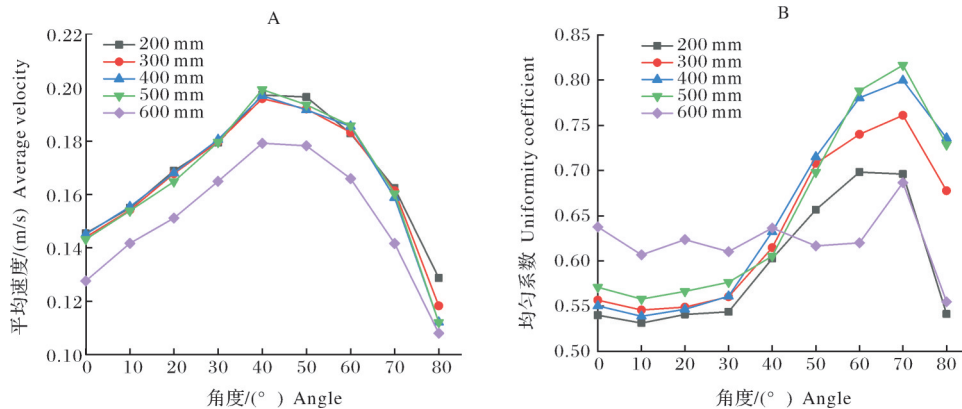


图9 不同进水角度下的平均速度(A)与均匀系数(B)

Fig.9 Average velocity(A) and uniformity coefficient(B) at different inlet angles

2) 进径比对流场水动力特征量的影响。根据模拟计算得到不同进径比下不同深度水层的平均速度如图10A所示。可以看出各水层平均速度整体变化趋势相似,200~500 mm 深度的水层平均速度较为接近,600 mm 深度的水层平均速度低于其他水层,进径比 $d/r=0\sim 0.1$ 区间内平均速度逐渐提高,在 $0.1\sim 0.5$ 区间呈现递减趋势,其中 $d/r=0.1$ 时池内平均速度较高。当进径比 $d/r=0\sim 0.1$ 时,射流与池壁之间碰撞、摩擦的能量消耗减小,水体获得较多的能量去

维持环流运动状态,进而平均速度提高,促进颗粒物向池中心集聚。随着进径比的增大,即进水口与池壁之间的距离增大,水流转向前的沿程过长无法充分利用池壁引导水体转向的作用。同时水质点间的反射、折射、碰撞伴随着过高的能量损耗使得维持水体旋流运动的能量减小,进而平均速度较低。

图10B为不同进径比下不同水层的均匀系数,可以看出进径比会明显影响池内流场分布。进径比 $d/r=0\sim 0.1$ 时池内低速流区减小,均匀系数略有增

长,各水层的均匀系数差异较小,养殖池水体均匀性逐渐改善。进径比 $d/r=0.1\sim 0.3$ 时均匀系数呈递减趋势,进径比的增加导致射流与池壁之间逐渐出现低速流区,破坏了水体均匀性。进径比 $d/r=0.3\sim 0.5$ 时,均匀系数递增但各水层的均匀系数差异大,

射流仅与池中心附近水体混合,均匀性较差,养殖池空间利用率低。综上所述,当进径比 $d/r=0.1$ 时,平均速度和均匀系数较高,既有利于颗粒物集聚又提高了空间利用率,养殖池内水动力特性相对较优。

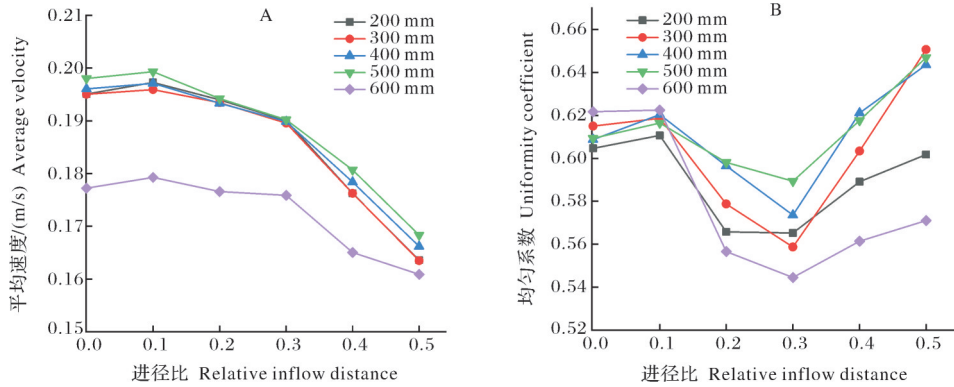


图10 不同进径比下的平均速度(A)与均匀系数(B)

Fig.10 Average velocity(A) and uniformity coefficient(B) at different relative inflow distance

3)进水高度对流场水动力特征量的影响。根据模拟计算得到不同进水高度下不同深度水层的平均速度如图11A所示。由图11A可知不同水层的平均速度随进水高度增大的变化趋势相似,200~500 mm水层的平均速度之间的差异较小,600 mm水层与池底壁面摩擦的缘故使其平均速度较上部水层略低。平均速度随进水高度增大呈现先递增、后稳定、再递减的趋势,其中进水高度 h 在100~400 mm区间内平

均速度较高,水流驱动力高,颗粒物起运集聚条件较为充分。进水高度为0时,高速水流部分暴露在空气中无法与池内水体充分混合而带动水体运动,进水能量没有被充分利用,导致平均速度较低。进水高度为400~600 mm区间时,根据液体越深,压强越大的原理,高压强下射流抵抗养殖池阻力能量消耗较高,同时底部水层与池底壁面摩擦产生能量消耗,进而池内的平均速度较低。

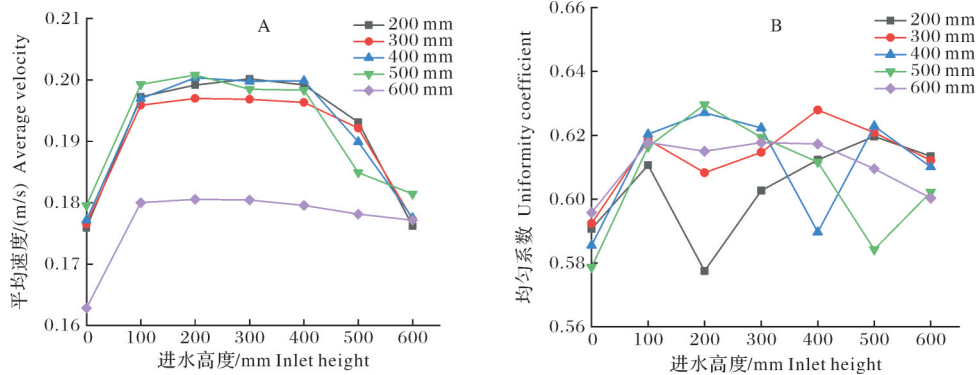


图11 不同进水高度下的平均速度(A)与均匀系数(B)

Fig.11 Average velocity(A) and uniformity coefficient(B) at different inlet heights

图11B为不同进水高度下不同深度水层的养殖池均匀系数。不同进水高度的射流会扰乱其所在水层及附近水层的流速分布,导致养殖池各水层的均匀系数变化波动较大,其中当进水高度 $h=100$ mm时,各水层均匀系数差异最小。进水高度0~100 mm区间内均匀系数迅速增长,养殖池水体均匀性逐渐改善,空间利用率提高;100~600 mm区间内均匀系数起伏不定,同一进水高度下水层之间均匀系数差

异较大,不利于养殖对象空间均匀分布。综上所述,进水管高度 $h=100$ mm时,养殖池水动力特性较优。

3 讨论

水动力条件可以影响整个养殖池流场,良好的流场特性是提高颗粒物集聚效果的重要前提,合适的进水结构有助于提高流场特性。本研究基于CFD技术对养殖池流场进行仿真分析,探究了不同进水

角度、进径比、进水高度对双管单孔进水圆形循环水养殖池流场的影响。针对双管单孔进水圆形循环水养殖池建立了液相数值模型并进行验证,验证结果显示池内水流速度的模拟值与试验值的变化趋势相同,平均误差在10%以内,表明本研究所构建的数值模型合理、能较好地模拟养殖池内的流场特征。多孔进水因其射流较多,养殖对象受影响远离进水管区域,导致养殖空间没有被充分利用;单孔进水优势在于射流对养殖空间扰动范围小,对鱼类等养殖对象的生长活动影响较小。对养殖池进水结构参数进行的数值模拟结果表明,当进水角度 $\theta=40^\circ$ 、进径比 $d/r=0.1$ 、进水高度 $h=100\sim 400$ mm时,水体环流形态规则、平均速度 v_{avg} 较高,同一水层流速均匀度高,不同水层之间的均匀系数 U 差异较小。这种流场特性既有利于促进池底颗粒物向池中心集聚,提高养殖池自净能力,也有利于养殖对象的均匀分布,提高空间利用率。对于圆形养殖池而言,考虑到进水管远离水面不利于养殖过程中对进水管进行维护,因此进水角度 $\theta=40^\circ$ 、进径比 $d/r=0.1$ 、进水高度 $h=100$ mm是相对合理的进水结构参数。然而本研究没有考虑养殖对象对流场可能造成的影响,实际生产中,同样的进水结构条件下,由于养殖对象的大小规格不同、养殖密度不同,养殖池内的流场特性可能会存在差异。因此,本文得出的进水结构参数还有待养殖生产实际的检验。

参考文献 References

- [1] 陈震雷. 循环水养殖中水流速度对大口黑鲈幼鱼的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. CHEN Z L. Study on the influence of current velocity on juvenile black bass in circulating water culture[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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. ZHU F, HU J J, KONG J Q, et al. Flow field of circular recirculating aquaculture tank based on PIV[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 296-300 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张成林, 杨菁, 张宇雷, 等. 去除养殖水体悬浮颗粒的多向流重力沉淀装置设计及性能[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 53-60. ZHANG C L, YANG J, ZHANG Y L, et al. Design and performance of multidirectional gravity sedimentation device for removing suspended particles from aquaculture water[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(S1): 53-60 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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 with English abstract).
- [5] PLEW D R, KLEBERT P, ROSTEN T W, et al. Changes to flow and turbulence caused by different concentrations of fish in a circular tank[J]. Journal of hydraulic research, 2015, 53(3): 364-383.
- [6] 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 with English abstract).
- [7] 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 with English abstract).
- [8] 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 with English abstract).
- [9] 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 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘乃硕, 刘思, 俞国燕. 两种双通道圆形养殖池水动力特性的数值模拟与研究[J]. 渔业现代化, 2017, 44(3): 1-6. LIU N S, LIU S, YU G Y. Numerical simulation of and research on hydrodynamic characteristics of two dual-channel circular aquaculture ponds[J]. Fishery modernization, 2017, 44(3): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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, 2022: 1-12. 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/OL]. Journal of fisheries of China, 2022: 1-12 [2023-12-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220309.1832.011.html> (in Chinese with English abstract).
- [12] 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 with English abstract).

- [13] 胡佳俊,朱放,姚榕,等.基于STAR-CCM+的圆形循环水养殖池进水管布设位置优化[J].农业工程学报,2021,37(21):244-251.HU J J,ZHU F,YAO R,et al.Optimization of the inlet pipe layout of circular recirculating water aquaculture tank based on STAR-CCM+ [J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(21):244-251 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张春晋,孙西欢,李永业,等.螺旋流起旋器内部流场水力特性数值模拟与验证[J].农业工程学报,2018,34(1):53-62. ZHANG C J,SUN X H,LI Y Y,et al.Numerical simulation and verification of hydraulic characteristics of internal flow field in spiral flow generator [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(1):53-62 (in Chinese with English abstract).
- [15] 史明明,阮贇杰,刘晔,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 CSAE, 2017, 33 (2) : 252-258 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张俊,王明华,贾广臣,等.不同池型结构循环水养殖池水力特性研究[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 CSAM, 2022, 53 (3) : 311-320 (in Chinese with English abstract).
- [17] 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 with English abstract).
- [18] 桂劲松,张倩,任效忠,等.圆弧角优化对单通道方形养殖池流场特性的影响研究[J].大连海洋大学学报,2020,35(2):308-316.GUI J S,ZHANG Q,REN X Z,et al.Influence of arc angle optimization in single-drain square aquaculture tanks on flow field characteristics [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020,35(2):308-316 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赵乐,张清靖,李宏伟,等.循环水养殖系统管式射流集污特性试验研究[J].渔业现代化,2016,43(4):16-21.ZHAO L,ZHANG Q J,LI H W,et al.Experimental study on waste accumulation effect of pipe jetting system in recirculating aquaculture system [J]. Fishery modernization, 2016, 43 (4) : 16-21 (in Chinese with English abstract).

Effects of inlet structure on flow field of circular recirculating aquaculture tank

LI Bintao, TAN Hequn, ZHANG Yiren, XIA Chengxing

College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract To accurately design the inlet structure of the factory circular recirculating aquaculture tank, based on the computational fluid dynamics technology, fluent software was used to establish a numerical model to simulate the flow field distribution characteristics of the inlet pipe in the pond under different inlet angles θ , inlet diameter ratio d/r , and inlet height h in this study. The average velocity v_{avg} and uniformity coefficient U were used as the evaluation indexes, and the inlet structure was optimized and analyzed. On the basis of physical experiments that the numerical model can better simulate the flow field characteristics in the aquaculture pond, the effects of different inlet structures on the flow field were simulated. The results showed that under the same conditions, the maximum v_{avg} was achieved at $\theta=40^\circ$ and the U difference between water layers was minimized; the larger v_{avg} and U was achieved at $d/r=0.1$ and the U difference between water layers was minimized; the larger v_{avg} was achieved at $h=100\sim 400$ mm and the U difference between water layers was smallest at $h=100$ mm. It was shown that the flow field characteristics in the pond were in an optimal state when the inlet angle $\theta=40^\circ$, inlet angle $d/r=0.1$ and the inlet height $h=100$ mm.

Keywords recirculating aquaculture; computational fluid dynamics; inlet structure; flow field characteristics

(责任编辑:边书京)