

导流盘对循环水养殖池水动力特性的影响

陈聪聪¹, 张俊¹, 刘兴国², 高阳¹, 张宁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: 为提高循环水养殖系统的集污自净化效能, 设计了一种带导流盘的正八边形养殖池结构。建立了三维非常流场数值计算模型, 在验证计算方法有效性的基础上, 研究了导流盘的几何参数和位置对流速分布、涡量强度、壁面剪切应力和水质混合均匀性等水动力特性的影响。结果表明: 在导流盘直径与养殖池宽度之比一定时, 随着导流盘高度增加, 流场中心涡柱呈先减小后增大趋势, 涡环数呈先减小再增加趋势, 其形状从不规则逐渐发展成环状结构; 在同一高度下, 随着导流盘直径与养殖池宽度之比增大, 涡柱呈先增大后减小趋势, 涡环的数量先增加后基本保持不变; 导流盘安装在距池底 20~40 mm, 直径与养殖池宽度之比为 0.05~0.08 时, 有助于增大养殖池底流口附近的速度梯度, 减小养殖池壁面与水体的碰撞, 提高涡流强度和水质混合均匀性, 有利于形成颗粒物聚集和排出的水动力条件。

关键词: 循环水养殖池系统; 正八边形; 导流盘; 水动力学; 自净化效能

中图分类号: S 955 **文献标志码:** A

2022 年农业农村部印发《“十四五”全国渔业发展规划》, 提出要大力提高水产养殖规模化、机械化、智能化、标准化水平, 而工厂化循环水养殖模式正是其核心和主要发展方向。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。因此, 养殖池的水动力学研究对于构建节能、减排、生态、高效的工厂化循环水养殖系统具有重要科学意义和应用价值。

国内外学者对循环水养殖系统在不同池型结构和进水装置下的水动力特性开展了大量研究, 但是, 关于底流口集污装置对养殖池水动力条件和自净化效能影响的研究较少^[1-3]。VEERAPEN^[4]分析了 Cornell 和 Waterline 两种养殖池的实验数据, 验证了计算方法的有效性, 证明了 Cornell 池具有良好的水力混合性能和 Waterline 池自清洗效果最佳的特点; GORLE 等^[5]

研究了养殖池的流场涡结构对颗粒物排出率的影响, 并通过改变流速获得了底流口与溢流口的最佳分流比; VENEGAS 等^[6]分析了不同注水装置对水流均匀性、混合时间以及去除固体颗粒物的影响; 于林平等^[7]和薛博茹等^[8]研究了不同进水管设置位置对养殖池流场特性的影响, 对比了弧壁单管和直壁单管两种设置方式下的颗粒物排出率; 文献[9-13]提出了循环水养殖池的空间利用率, 对比研究了正方形、六边形、八边形、圆形、方形切角、方形圆角等循环水养殖系统的水动力学特性, 得到了有利于颗粒物排出的池型结构及其参数范围, 得出流量、颗粒物滞留时间等仿真结果略高于物理模型, 并研究了进水管数量、底面坡度对水动力特性和集污效能的影响; EBELING 等^[14]提出在矩形混合池的底流口附近设置圆形导流盘, 证明了该结构能够迫使水流沿池底流向中央排水口, 从而有利于颗粒物聚集和排出, 但是, 关于导流盘的结构参数对养殖池水动力特性的影响机制尚不明确。

收稿日期: 2023-06-15 修回日期: 2023-08-11

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: 陈聪聪(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工厂化循环水养殖系统水动力学。E-mail: ccchen_1999@163.com

通信作者: 张俊, 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)

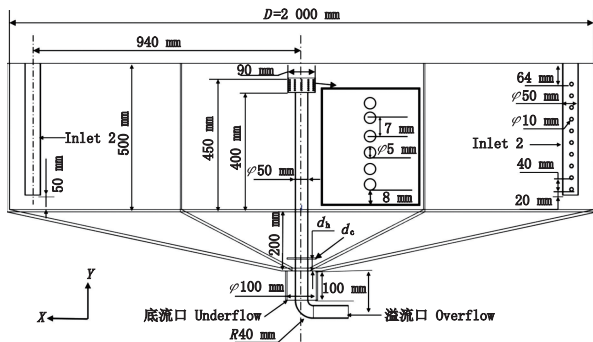
<http://www.shhydx.com>

本文提出在工厂化循环水养殖池的底部安装导流盘,以其安装位置和几何参数为设计变量,以正八边形养殖池为例,建立了19组养殖池的流场CFD仿真模型,在验证网格独立性和计算方法有效性的基础上,对比分析了导流盘的结构参数对养殖池速度分布、涡量强度、壁面剪切力和水流均匀性指数等水动力指标的影响规律。研究结果将为循环水养殖系统的优化设计水动力性能评估提供理论参考依据。

1 数值计算模型

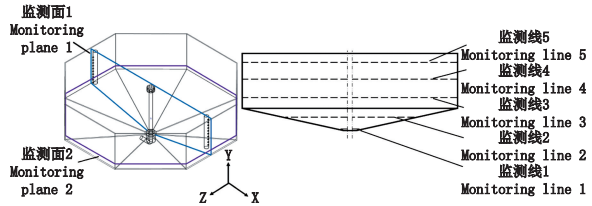
1.1 结构模型

图1a为循环水养殖池的几何模型,其结构为



(a) 养殖池结构图 Structure diagram of tank

正八边形,径深比为4:1,水深为650 mm,池壁、底流管壁厚和导流盘的厚度均为10 mm,溢流管壁厚、进水管壁厚为2.5 mm,喷嘴壁厚为2 mm。双进水管位于池中心两侧,进水管上喷嘴顶部距进水管中心距离为64 mm,喷嘴方向与池壁平行。溢流管上方小孔共有12列,每列有6个小孔。导流盘固定于溢流管壁上,通过改变导流盘距池底的高度(d_h)及其直径(d_c)与池宽(D)之比,共得到19组结构模型,从“Model 1”到“Model 19”编号,见表1。取监测面1和监测面2作为流场监测面,在监测面1上设置5条监测线,距池底的高度分别为9.75、110.5、279.5、442、585 mm,见图1b。



(b) 监测位置示意图 Monitoring location diagram

图1 养殖池模型图

Fig. 1 Tank diagram

表1 不同导流盘的养殖池结构模型
Tab. 1 Structural models of tanks with different deflectors

| d_h/mm | d_c/D | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0.05 | 0.08 | 0.11 | 0 |
| 0 | | | | Model 19 |
| 10 | Model 1 | Model 2 | Model 3 | |
| 20 | Model 4 | Model 5 | Model 6 | |
| 30 | Model 7 | Model 8 | Model 9 | |
| 40 | Model 10 | Model 11 | Model 12 | |
| 50 | Model 13 | Model 14 | Model 15 | |
| 60 | Model 16 | Model 17 | Model 18 | |

1.2 计算方法参数与网格独立性

养殖池中的气液固三相流动满足质量守恒方程和动量守恒方程,采用不可压缩三维非定常N-S方程描述。RNG $k-\epsilon$ 方程湍流模型考虑了低雷诺数对湍流结构的影响,提高了具有复杂旋涡流动的流场计算精度,适合于描述具有大应变率剪切流、分离流、有旋流等三维流动特性^[15]。将进水口

设置为流量入口边界,溢流口和底流口均采用出流边界,池壁和管壁均设置为无滑移固壁边界。假设水面无剪切力和滑移速度,可按自由液面处理,压力设为标准大气压。湍流动能及湍流耗散率均设置为二阶迎风格式,收敛精度设置为 10^{-6} 。采取基于压力耦合的SIMPLEC算法,使压力场与速度场迭代同步计算,相关计算参数如表2所示。

对养殖池的流场区域划分网格,对进水口、底流口、溢流口等流速梯度大的部位进行网格加密,采用标准壁面函数,取 y^+ 值为30,边界层网格第一层厚度为3.4 mm,划分6种不同数量的流场模型进行网格独立性验证,从Mesh 1到Mesh 6的网格数量分别为1 005 599、1 315 134、1 517 036、1 844 071、2 191 620和2 472 711。图2表明:随着网格数量的增加,养殖池流速均匀性指数呈先增加后不变的趋势,当网格数量为1 844 071时养殖池流速均匀性指数趋于稳定,确定网格划分数量约1 844 071。

表2 计算参数
Tab. 2 Calculation parameters

| 计算参数 Calculation parameters | 数值 Value |
|--|----------|
| 进水口1 流量 Inlet 1 flow /(kg/s) | 0.36 |
| 进水口2 流量 Inlet 2 flow /(kg/s) | 0.36 |
| 溢流口流出比例 Overflow outlet ratio /% | 70 |
| 底流口流出比例 Underflow ratio /% | 30 |
| 水力停留时间 Hydraulic retention time /min | 40 |
| 水力直径 Hydraulic diameter /m | 0.787 |
| 湍流强度 Turbulence intensity /% | 3.39 |
| 水的密度 Water density /(kg/m ³) | 1 000 |
| 液相动力黏度 Liquid dynamic viscosity /(Pa·s) | 0.001 |
| 壁面粗糙度 The wall roughness /μm | 0.001 |
| 标准大气压 Standard atmospheric pressure /kPa | 101.325 |

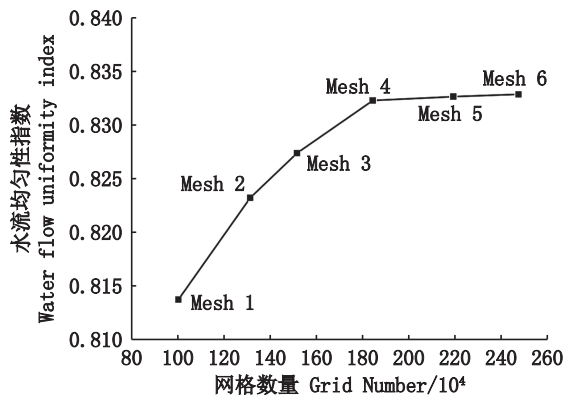


图2 网格独立性验证

Fig. 2 Grid independence verification

2 计算方法有效性验证

为验证计算方法的有效性,构建双通道循环水养殖池实验系统,如图3所示。系统主要由养殖池、2个相同进水装置、底流装置和溢流装置组成。在进水管、溢流管和底流管上分别安装了球阀和流量计,用于控制进水流量和分流比。养殖池水深450 mm,进水管直径25 mm,等间距设置6个直径为4 mm的喷射嘴,底流口直径64 mm,溢流口直径36 mm,进水流量为928.8 L/h。

用LS20B型旋桨式流速仪对养殖池的水速进行了实验测试。在位于X=0 m的监测面上设置了监测线,每条监测线设置10个监测点。水深为450 mm,由于接近底部的速度测量可能受到固体表面的影响,因此测量的最低深度保持在水深的17%。设置1条监测线距池底76.5 mm处。

图4为监测线上流速的数值模拟和实验结果,对比分析可知,流速整体上呈现出相似的

“V”型趋势,其相对误差均在10%以内,模拟结果的准确性受到离散化阶数、截断误差以及边界条件的不确定性影响。除了建立养殖池尺寸的物理误差之外,边界条件、流体特性以及测量设备也会影响模型输出,其中LS20B型旋桨式流速仪的测算误差在1.5%以内,验证了本文所采取的数值计算方法的可靠性。

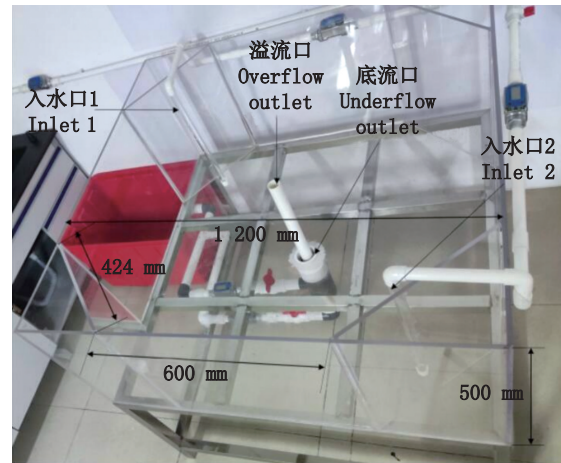


图3 实验模型

Fig. 3 Experimental model

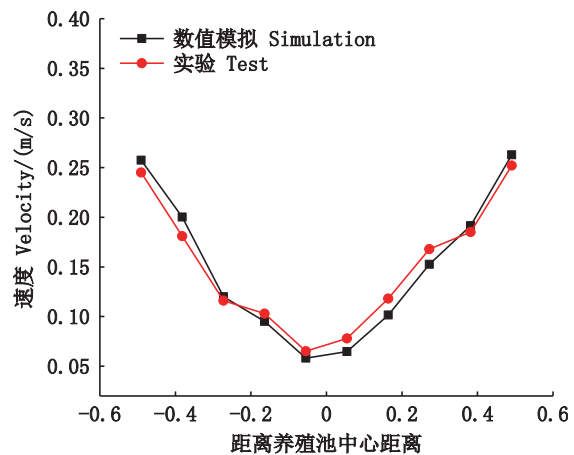


图4 数值模拟和实验结果的比较

Fig. 4 Comparison between numerical simulation and test results

3 计算结果分析

3.1 流速分布

图5展示了19组模型中6个模型在不同监测线上的流速变化曲线,其他模型的流速变化曲线之间差异不明显。对比分析可知:导流盘的参数只能影响底流口区域的速度分布情况,除监测线

1 外,不同监测线上的流速基本呈“M”型对称分布规律,水流速度表现为中间低、两侧高的分布趋势,这种速度分布使得颗粒物易在中心区域聚集,同时外围速度较高,使得靠近池壁的水体逐渐向池中心运动并混合。然而,仅图 5a 所示的情况下,整体水流速度分布受到影响,导致养殖池整体的水流速度降低,但速度分布仍然保持不规则的“M”字形。

在监测线 1 上,养殖池整体流速随着池壁靠近池中心,水流速度逐渐增大,且速度接近溢流管时速度突然降低。在底流口附近产生了速度差,使得养殖池底流口的水流速度高于周围水流

速度,而在底流口的高速水流通过产生速度梯度和水流动力学效应,能够加速颗粒物的运动和输送。由图 5b、5c、5d、可知,当 d_h 不变时,随着 d_c/D 的增大,养殖池监测线 1 上的水流速度最大值呈先增大再趋于不变的趋势。不同 $d_c/D, d_h$ 为 10 mm 和 50 mm 养殖池监测线 1 水流的最大速度小于无导流板模型, d_h 为 60 mm 养殖池监测线 1 水流的最大速度与无导流板模型相差不明显, d_h 取 20~40 mm 养殖池监测线 1 水流的最大速度大于无导流板模型。 d_c/D 太大养殖池颗粒物容易聚集在导流盘上不利于颗粒物的排出,因此 d_c/D 的取值范围为 0.05~0.08。

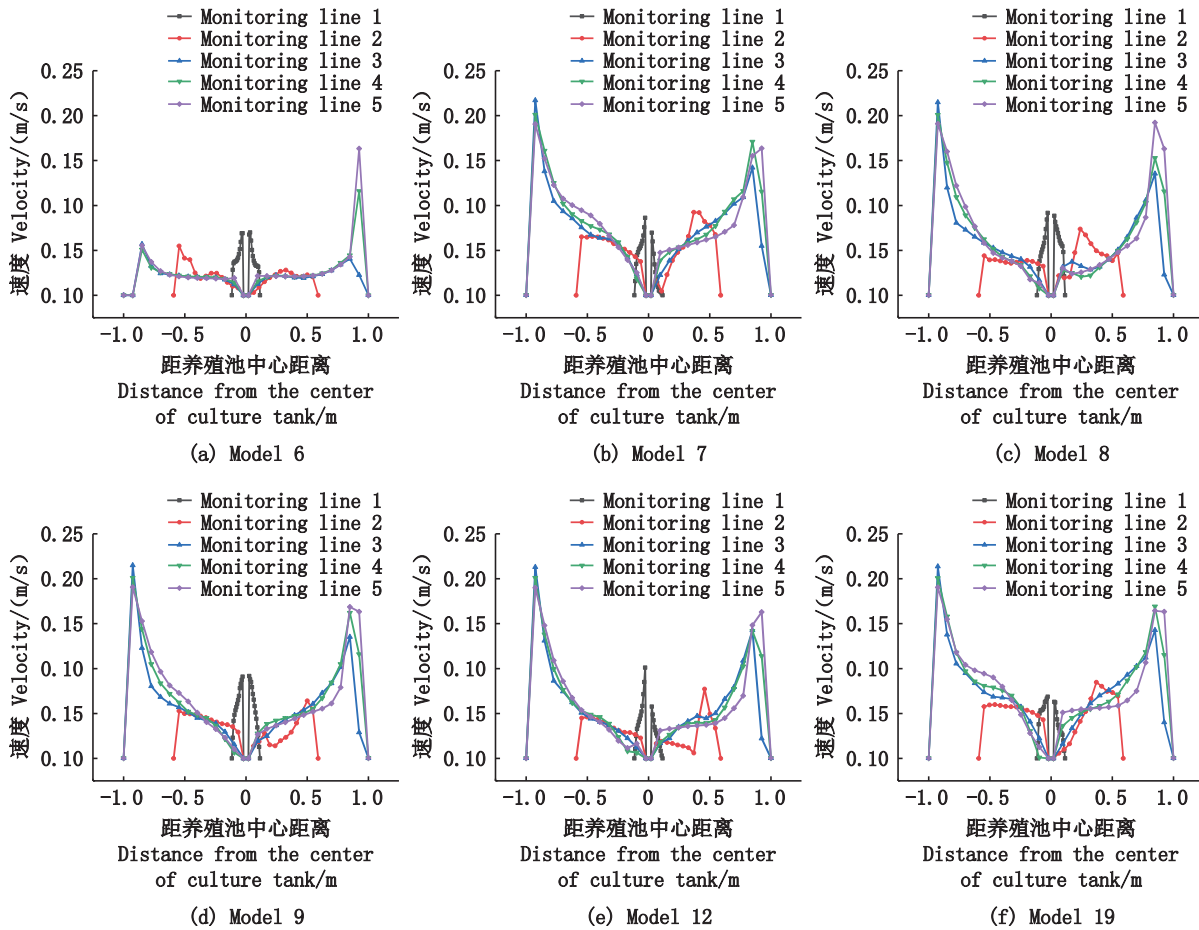


图 5 不同监测线上的速度分布

Fig. 5 Velocity distributions on different monitoring lines

3.2 涡量强度

图 6 表明:在养殖池中,流体的旋转运动由不同结构和长度尺度的非轴对称涡流所控制,在以旋涡为主的情况下,主要的旋涡特征分为涡柱、涡环和涡丝。由于导流盘的存在,养殖池内的非轴对称涡柱结构较为明显,高速区和低

速区的分布稳定,涡环的混合性增强,涡流和二次流强度提高,水力混合均匀性更好。导流盘对涡量强度和涡柱范围和涡环数量有明显影响,但对涡丝的影响不明显。图 6a 养殖池无涡柱,涡环和涡丝很少,与图 5a 监测线速度分布整体降低相对应,该导流盘结构参数导致养殖池

内水流不规则碰撞产生较大能量损耗,导致涡环数量减小形状不规则,涡柱区域过小可能不利于颗粒物在底流口集聚和排出。图6f无导流板养殖池内涡柱范围偏大,涡环数量少且形状不规则,涡柱的范围过大,水流不规则碰撞伴随着较大的射流能量消耗,导致养殖池出现低速混合区,流态紊乱,限制鱼类的自由移动并影响氧气供应,从而对鱼类的生存产生不利影响。由图6b、6c、6d、6f可知,图6d所示养殖池中的涡柱与图6f无导流板养殖池中的涡柱范围无明显差异,但涡环数量增加,形状逐渐转变成环状结构。当 d_h 为30 mm时,随着 d_c/D 增大,涡柱呈先

增大再减小趋势,涡环的数量先增加后基本保持不变。当 d_h 为50 mm时,随着 d_c/D 增大,养殖池内涡柱的形状由不规则变成规则涡柱,涡环形状由环状结构逐渐发展成不规则结构,低速混合区逐渐减少。当 d_h 为60 mm时,随着 d_c/D 增大,养殖池内涡柱范围与涡环数量和形状差异不明显。在相同 d_h 条件下,随着 d_c/D 增大,涡柱呈先增大再减小趋势,涡环的数量先增加至基本不变。当 d_c/D 不变时,随着 d_h 的增加,养殖池内的涡柱范围呈先减小后增大趋势,养殖池的涡环数量呈先减小再增加趋势,其形状从不规则逐渐发展成环状结构。

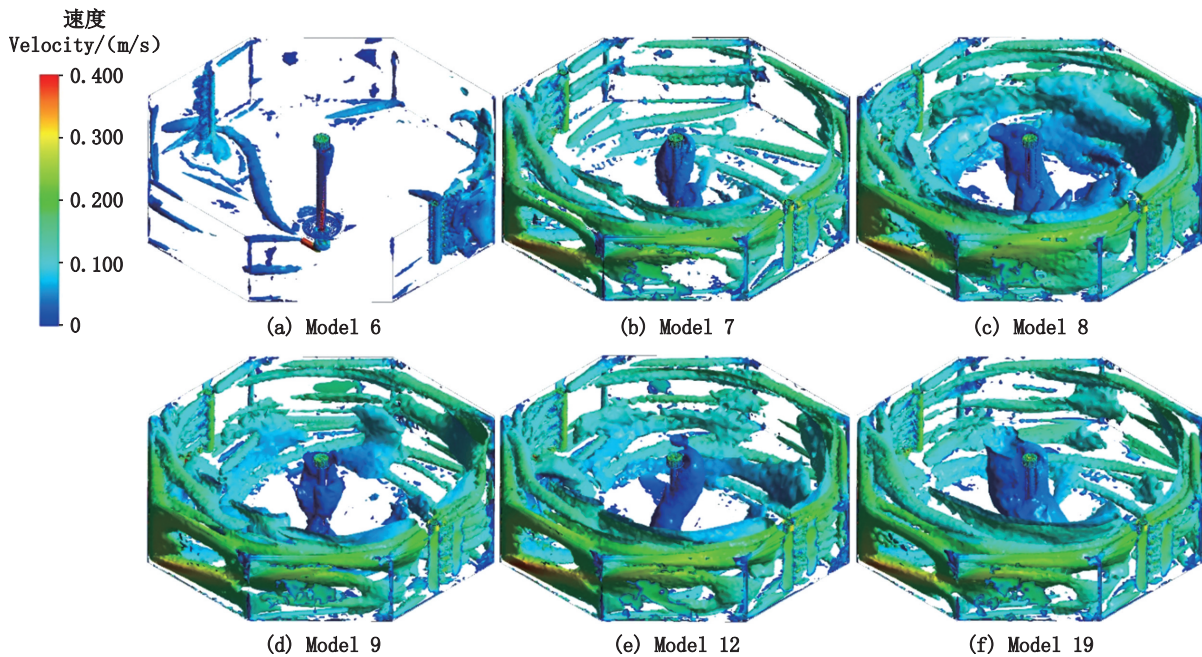


图6 不同模型下的涡量云图

Fig. 6 Vorticity contours under different models

3.3 壁面剪切应力

图7a为无导流盘的养殖池壁面剪切力轮廓图,图7b为 d_h 取30 mm、 d_c/D 为0.05的养殖池壁面剪切力轮廓图,图7c为 d_h 取30 mm、 d_c/D 为0.08的养殖池壁面剪切力轮廓图。对比分析可知,靠近养殖池一侧射流的壁面和底部出现了更高的剪切力,而另一侧射流壁面的剪切力很小。图7a与图7b加入了导流盘,降低养殖池壁面剪切力的分布,从壁面剪应力轮廓来看,图7a能量以耗散形式损失到罐壁最小,这有助于保持流动的动量。加入导流盘,可以减少水流与壁面碰撞能量损失,并促使流动保持更稳定的动量,提高流体的

混合效率。

3.4 水流均匀性指数

图8为不同导流盘养殖池的水流均匀性指数。结果表明:在同一 d_c/D 下,随着 d_h 的增加,养殖池的水流均匀性指数呈波动的趋势。当 d_h 为30 mm时,养殖池的水流均匀性指数达到最高值。在相同 d_h 下,随着 d_c/D 的增大,养殖池的水流均匀性指数先增加后减小。 d_h 取20~50 mm、 d_c/D 为0.08与0.11养殖池水流均匀性指数减小不明显。导流盘安装在距养殖池底面20~40 mm,直径与养殖池宽度之比为0.05~0.08时,养殖池具有良好的水流均匀性指数。

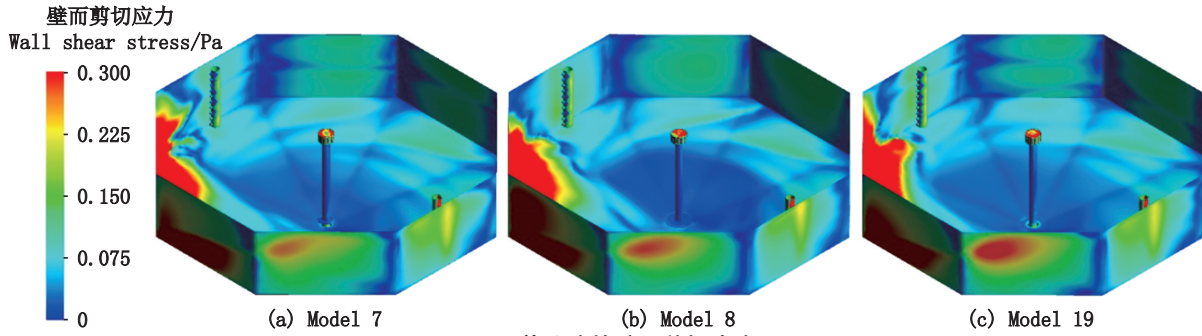


图7 养殖池的壁面剪切应力
Fig. 7 Wall shear stress of tank

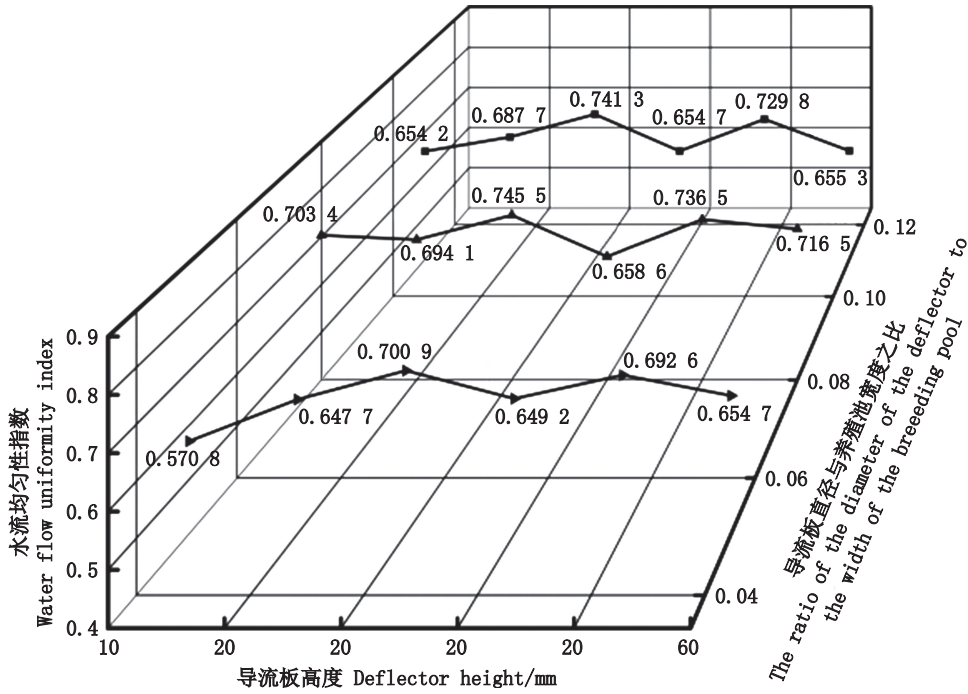


图8 不同导流盘养殖池的水流均匀性指数
Fig. 8 Uniformity index of water flow in different inflow tray culture ponds

4 结论

(1) 从养殖池的涡流结构和强度来看:当 d_c/D 不变时,随着 d_h 增加,养殖池内部的涡柱范围呈先减小后增大趋势,养殖池的涡环数量呈先减小再增加趋势,随着涡环的增加,其形状从不规则逐渐发展成环状结构;当 d_h 为 30 mm 时,不同 d_c/D 的养殖池的涡柱范围达到最小;在相同 d_h 下,随着 d_c/D 的增大涡柱呈先增大再减小趋势,涡环的数量先增加后基本保持不变。

(2) 从养殖池的壁面剪切力来看:当不设置导流盘时,水流与池壁的不规则碰撞伴随着较大的射流能量消耗,导致养殖池出现低速混合区,流态紊乱,对颗粒物产生的拖曳力减小,较大范

围的低速混合区和紊乱的湍流效应使得残饵粪便等颗粒物不易集聚和排出;导流盘可以减小养殖池壁面与水体的碰撞、折射和反射,当 d_c/D 取 0.05~0.08, d_h 为 20~40 mm 时,高速区和低速区的分布稳定,涡环的混合性增强,涡流和二次流强度提高,水力混合均匀性更好,有利于颗粒物在底流口集聚和排出。

(3) 从养殖池的水流均匀性指数来看:加入导流盘可以引导流动,有利于增强涡环的混合性,提高涡流和二次流强度,改善水力混合均匀性;在导流盘上方,养殖池内横截面上的水流速度基本呈“M”形对称分布特点;在导流盘下方,养殖池内横截面流速从池壁到池中心,水流速度逐渐增大,且速度接近溢流管时速度突然降低。

在底流口的高速水流通过产生速度梯度,能够加速颗粒物的排出。

参考文献:

- [1] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (21) : 244-251.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] VEERAPEN J P. Solids removal in recirculating aquaculture: The swirl separator and double-drain fish tank [D]. University of New Brunswick (Canada), 2004.
- [5] GORLE J M R, TERJESEN B F, MOTA V C, et al. Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production [J]. Aquacultural Engineering, 2018, 81: 89-100.
- [6] 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.
- [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.
- [8] 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.
- [9] ZHANG J, JIA G C, WANG M H, et al. Hydrodynamics of recirculating aquaculture tanks with different spatial utilization [J]. Aquacultural Engineering, 2022, 96: 102217.
- [10] 张俊,贾广臣,王庆诚,等. 不同底面坡度的循环水养殖池塘净化效能[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(4): 702-709.
ZHANG J, JIA G C, WANG Q C, et al. Purification efficiency of a recirculating aquaculture pond with different bottom slopes [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(4): 702-709.
- [11] 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.
- [12] ZHANG J, JIA G C, WANG M H, et al. Hydrodynamics of recirculating aquaculture tanks with different spatial utilization [J]. Aquacultural Engineering, 2022, 96: 102217.
- [13] 张俊,车轩,贾广臣,等. 人工坝体对长江上游鱼类栖息地流域水动力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 140-146.
ZHANG J, CHE X, JIA G C, et al. Effects of artificial dams on hydrodynamic characteristics of fish habitats in upper reaches of Yangtze River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (5): 140-146.
- [14] EBELING J M, TIMMONS M B, JOINER J A, et al. Mixed-cell raceway: engineering design criteria, construction, and hydraulic characterization [J]. North American Journal of Aquaculture, 2005, 67(3): 193-201.
- [15] 张俊,刘奥胜,李乐,等. 用于池塘养殖尾水处理的串联式旋流器水动力特性及分离效率[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 49-58.
ZHANG J, LIU A S, LI L, et al. Hydrodynamic characteristics and separation efficiency of the series cyclone separator for pond aquaculture tail water treatment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(20): 49-58.

Hydrodynamic characteristics in a recirculating aquaculture tank with different deflectors

CHEN Congcong¹, ZHANG Jun¹, LIU Xingguo², GAO Yang¹, ZHANG Ning¹

(1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Institute of Fisheries Machinery and Instruments, China Academy of Fisheries Science, Shanghai 200092, China)

Abstract: To enhance the effectiveness of pollution collection and self-purification within a circulating water aquaculture system, a regular octagonal aquaculture tank structure with a deflector was developed. A three-dimensional non-constant flow field numerical calculation model was established. Based on the validation of the calculation method, this study investigated the impact of geometric parameters and the positioning of flow-guide discs on hydrodynamic traits, including flow velocity distribution, vortex strength, wall shear stress, and water body mixing uniformity. The findings indicate that, while keeping the ratio of deflector diameter to pond width constant, elevating the deflector height yields a pattern of diminishing and then augmenting vortex columns at the center of the flow field. Additionally, the number of vortex rings displays a similar tendency, transitioning from decrease to increase and gradually evolving into an annular configuration from its irregular shape. Similarly, at the same height, raising the ratio of deflector diameter to pond width leads to an initial growth and subsequent reduction in the vortex column, while the count of vortex rings experiences a growth followed by a relatively stable phase. This initial growth in vortex rings is followed by a largely consistent state. By situating the deflector 20–40 mm above the pool bottom and maintaining a pool width-to-diameter ratio of 0.05–0.08, an amplified velocity gradient close to the pool's base can be achieved. Furthermore, this installation reduces collisions between the pool wall surface and the water body, enhancing vortex strength and promoting hydraulic mixing uniformity. This configuration fosters the necessary hydrodynamic conditions for the aggregation and expulsion of particulate matter.

Key words: recirculating water culture pond system; regular octagon; deflector; hydrodynamics; self-purification efficiency