

基于 CFD 的池塘循环水养殖集污装置排污性能研究

曹志翔¹, 许志龙¹, 黄种明¹, 高贾顺^{2,3}

(1. 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021;
3. 厦门海洋职业技术学院, 福建 厦门 361102)

[摘要] 为了研究一种应用于海水池塘循环水养殖系统集污装置的排污性能, 采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法对集污装置流场进行数值模拟, 研究颗粒释放位置和粒径大小对集污装置颗粒去除效果的影响。结果表明: 释放位置接近引水槽底面时, 随颗粒释放位置深度的增加, 集污装置底部出口的颗粒去除率增大; 由于重力和流场等因素作用, 底部出口颗粒平均停留时间随释放位置深度的增加而呈现先减小后增加的趋势; 粒径较小的颗粒主要从集污装置上部出口流出, 且平均停留时间较短; 集污装置底部出口的颗粒随着颗粒粒径增大, 去除率增大, 颗粒平均停留时间逐渐减小; 当粒径超过 150 μm 时, 颗粒在集污装置内平均停留时间有所增加。

[关键词] 海水池塘; 循环水养殖; 集污装置; 计算流体力学; 颗粒去除

[中图分类号] S 969.38

Research on the Discharge Performance of Recirculating Aquaculture Seawater Pond Sewage Collection Device Based on CFD

CAO Zhixiang¹, XU Zhilong¹, HUANG Zhongming¹, GAO Jiashun^{2,3}

(1. College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;
3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361002, China)

Abstract: To investigate the discharge performance of a sewage collection device used in a seawater pond recirculating aquaculture system, computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to analyze its flow field. The study aimed to examine how particle release positions and sizes affect the device's efficiency in particle removal. The findings indicate that positioning particle release closer to the bottom of the diversion trough increases the depth of release and enhances particle removal at the device's bottom outlet. The average residence time of particles at this outlet varies with release depth, influenced by gravitational and flow dynamics. Smaller particles primarily exit through the upper outlet, resulting in shorter residence times. Conversely, larger particles demonstrate increased removal rates at the bottom outlet and generally shorter residence times. However, particles larger than 150 μm tend to exhibit longer residence times within the collection device. This research on sewage discharge performance offers valuable insights for developing sewage collection devices tai-

[收稿日期] 2023-04-02

[基金项目] 福建省海洋经济发展专项“海水池塘集约化养殖装备开发与示范”(FJHJF-L-2021-9); 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项资金项目“塑胶渔排养殖机械化输送系统开发与应用”(FJHY-YYKJ-2024-1-9)

[作者简介] 通信作者: 许志龙 (1971—), 博士, 教授, 博导, 从事机械装备设计、超精密加工技术研究。
E-mail: zhilong.xu@163.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

lored for seawater pond recirculating aquaculture systems.

Keywords: seawater pond; recirculating aquaculture; sewage collection device; computational fluid dynamics; particle removal

0 引言

池塘养殖是目前最广泛的水产养殖生产方式,为人们提供了丰富的优质动物蛋白和营养物质^[1-2]。据《2022 中国渔业统计年鉴》的数据显示,2021 年全国水产养殖产量为 5394.41 万 t,其中池塘水产养殖产量为 2631.85 万 t,占全国水产养殖产量的 48.8%^[3]。目前池塘养殖生产仍以传统散养方式为主,养殖基础设施薄弱,机械装备落后^[4]。近年来,伴随养殖规模的迅速发展,由于养殖污水处理不当,使水生生态系统恶化,养殖病害频发,再加上养殖水资源有限,水产养殖面临巨大的挑战^[5-7]。因此,池塘循环水养殖、工厂化循环水养殖模式等一些新型的水产养殖模式逐渐发展起来^[8-9],其中,池塘循环水养殖模式因具有高产高效、绿色生态等优势而成为主要的发展方向之一^[10-11]。

池塘循环水养殖模式将池塘改造成养殖区和生态净化区^[12-13]。养殖区采用高密度集约化的方式养殖鱼类,其中残饵和粪便等固体颗粒污物是影响养殖水质的重要因素,需要被及时有效地收集与处理;生态净化区通过水生动植物来净化养殖区排出的尾水,改善池塘水质。池塘循环水养殖中的固体颗粒污物主要通过养殖槽尾部的集污区来收集和处理^[14]。这些集污区通常是集污池,可分为平板型和漏斗型^[15]。平板型集污池与各养殖槽连通,其底部低于养殖槽底部或者相平;漏斗型集污池通常在一个养殖槽末端单独设有一个或多个集污漏斗,可单独对不同养殖槽进行排污,相比于平板型集污池,其排放方式更为灵活。Huggins 等^[16]用 CFD (computational fluid dynamics) 模拟跑道式养殖槽内不同粒径颗粒的输运情况,结果表明大粒径颗粒污物在流场中基本能完全去除,小粒径颗粒污物沉降速度较低,排污性能差。Huggins 等^[17]后续研究了集污区结构对颗粒去除效果的影响,发现集污区的挡板和其下方筛网组合时固体颗粒去除率最高。汪翔等^[18]研究了池塘跑道式循环水养殖系统集污区内的固体颗粒物的分布情况,结果表明粒径小于 0.60 mm 的颗粒沉积效果不明显,排污性能差。孙嶝等^[19]对不同底面坡度的循环水养殖槽内颗粒的运动情况进行了研究,结果表明养殖槽底面坡度在 0.013 ~ 0.015 范围时,可以有效改善养殖槽对固体颗粒的去除能力。以上研究所涉及的集污池均为平板型,而漏斗型由于近年才开始应用,关于其排污性能的研究报道较少,且相关描述大多比较简单^[20]。池塘循环水养殖集污装置的排污性能越好,收集固体污染物越多,有利于改善养殖池塘的生态环境。本文拟开发用于养殖石斑鱼的海水池塘循环水养殖的漏斗型集污装置,并通过数值模拟分析颗粒释放位置和粒径大小对去除效果的影响,探讨该集污装置的排污规律。

1 集污装置结构设计

海水池塘循环水养殖模式将海水池塘分为养殖区和生态净化区。养殖区内的养殖装备主要包括射流式增氧机、养殖槽和集污装置(见图 1)。射流式增氧机位于养殖槽前端,在养殖生产过程中将生态净化区里的水与空气混合后送入养殖槽中,使养殖槽内水体的溶解氧浓度较高并保持流动状态。集污装置位于养殖槽尾部,用来收集随水流进入的固体颗粒污物。含有固体污物的养殖废水通过排污泵排到岸上处理,处理后的水再重新流回池塘生态净化区,由贝类、滤食性鱼类和水生植物等净化。同时,集污装置内部分上层水体通过上部尼龙网出口直接流入生态净化区进行净化。整个海水池塘中的水体循环流动,实现循环水养殖。

集污装置包括引水槽和集污锥槽两部分,主要材质为帆布,它通过引水槽上的魔术贴和内套的 PVC 管与养殖槽(主要材质为帆布)连接。同时,集污装置上布置有浮球,可使整个集污装置浮在

水面上。集污装置流体计算域简化模型主要结构如图 1 所示。引水槽可分为直槽段和收缩槽段。收缩槽段的一侧壁面与集污锥槽壁面相切, 使水体沿切线方向流入集污锥槽后形成旋转流场, 有利于固体颗粒污物在底部中心沉积。为了提高集污装置的排污性能, 集污锥槽的上半部分设计为圆柱形, 下半部分设计为圆锥形 (漏斗形状), 分别称为圆柱段和圆锥段。同时, 为了防止集污装置中的水体过量影响设备运行, 圆柱段上部设置有出口, 可使部分上层水体直接流入池塘。

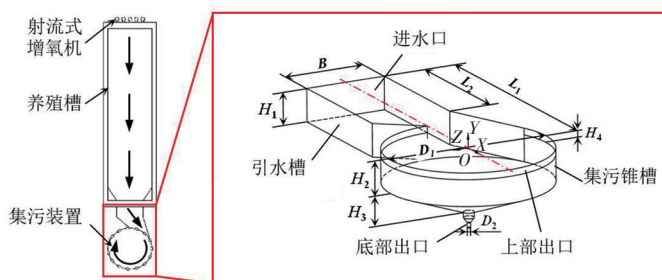


图 1 集污装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of sewage collection device

2 集污装置数值模拟

2.1 数值模拟方程

对集污装置的流场进行数值模拟分析时需要建立相关的数学计算模型。鉴于集污装置流场中含有固体颗粒污物, 因此集污装置内的流体为固液两相流。将其中液相视为黏性、不可压流体, 相关控制方程^[21-22]具体如下:

连续性方程:

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

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + F_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} + F_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} + F_z. \quad (4)$$

其中: x 、 y 、 z 为坐标分量; ρ 为液相的密度, kg/m^3 ; u 、 v 、 w 分别表示在 x 、 y 、 z 三个方向上的速度分量, m/s ; μ 为流体的动力粘度; P 为流体压强, Pa ; F_x 、 F_y 、 F_z 分别表示流体微元体在 x 、 y 、 z 三个方向上的体积力, N 。

集污装置内的流场是旋转流场, 由于雷诺应力模型 (RSM) 考虑了湍流的各向异性影响, 计算精度高, 因此湍流模型选用 RSM 模型。雷诺应力模型输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_k} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij}. \quad (5)$$

其中: u_i' 、 u_j' 分别表示脉动速度在 i 和 j 方向上的速度分量, m/s ; u_k 是在 k 方向上的速度分量, m/s ; $D_{T,ij}$ 为湍流扩散项; $D_{L,ij}$ 为分子扩散项; P_{ij} 为应力产生项; Φ_{ij} 为压力项; ε_{ij} 为耗散项; F_{ij} 为系统旋转产生项。

同时, RSM 模型的湍动能 k 和湍流耗散率 ρ 的方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} P_{ij} - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} C_{1\varepsilon} P_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

其中: 湍流粘度 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; $C_{1\varepsilon}$ 为 1.44; $C_{2\varepsilon}$ 为 1.92; σ_k 为 0.82; σ_ε 为 1.0; C_μ 为 0.09。

鉴于实际养殖生产过程中养殖槽内的水体一直处于流动状态,且流入集污装置的固体颗粒污物的体积分数小于 10%,故采用离散相模型(DPM)来研究集污装置内固体颗粒的运动情况^[23]。固体颗粒在流场中受到的作用力主要包括重力、浮力、拖曳力和其他附加力。单位质量固体颗粒在流体中的受力平衡方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (8)$$

其中: u 和 u_p 分别为液相和固体颗粒的速度, m/s ; ρ_p 为固体颗粒的密度, kg/m^3 ; $F_D(u - u_p)$ 表示单位质量固体颗粒受到的拖曳力, N ; $g(\rho_p - \rho)/\rho_p$ 表示单位质量固体颗粒受到的重力与浮力的合力, N ; F 为附加力,这里主要考虑压力梯度力和虚拟质量力。

集污装置的颗粒去除率可表示为:

$$E_i = (N_i/N) \times 100\% \quad (9)$$

其中: i 可为 1, 2; E_1 和 E_2 分别表示上部出口和底部出口的颗粒去除率; N_1 、 N_2 分别表示从上部出口和底部出口流出的颗粒数量; N 表示释放颗粒的总数。

2.2 网格划分

在构建集污装置流体计算域几何模型时需对其结构进行适当简化。简化后的流体计算域模型主要尺寸如图 1 所示: 引水槽进水口宽度 B 为 2.5 m, 槽内水深 H_1 为 1 m, 进水口与集污锥槽坐标原点 O 间的距离 L_1 为 7.5 m, 且引水槽直槽段长度 L_2 为 4 m, 集污锥槽圆柱段直径 D_1 为 5 m, 其水下高度 H_2 与圆锥段的高度 H_3 均为 1 m, 集污装置上部出口深度 H_4 为 0.2 m, 底部出口直径 D_2 为 0.102 m。

采用计算流体力学(CFD)软件 Fluent 19.2, 对集污装置流体计算域进行数值模拟仿真, 通过 Fluent Meshing 前处理软件对集污装置流体计算域进行四面体网格划分, 并对底部出水口进行了加密处理, 网格数量为 1 576 224 个, 如图 2 所示。数值模拟求解方法采用压力隐式求解, 压力速度耦合方式选用 SIMPLE 算法, 湍动能和湍流耗散率以及雷诺应力的离散格式均采用一阶迎风格式求解计算。

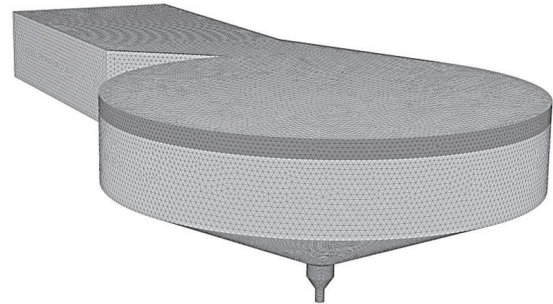


图 2 网格划分示意图
Fig.2 Schematic diagram of grid division

2.3 边界条件设置

集污装置进水口边界条件设为速度入口, 入口速度为 0.033 m/s ; 底部出口和上部出口边界条件均设为压力出口; 壁面边界条件设为无滑移壁面条件, 采用标准壁面函数; 水面作自由表面处理。液相为海水, 密度为 $1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 动力粘度为 $1.054 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 重力加速度为 9.81 m/s^2 。通过文献[24]得出石斑鱼养殖产生的固体颗粒污物粒径范围为 1~200 μm 。因此, 在此基础上本文模拟颗粒的粒径采用 20、50、100、150 和 200 μm , 并将颗粒的形状假设为密度均匀的球体, 颗粒密度为 1150 kg/m^3 。颗粒从进水口处释放, 释放方式为 group, 颗粒初始速度与进水速度一致。颗粒在集污装置上部出口的 DPM 边界条件设置为 escape; 底部出口设置为 trap; 其余壁面设置为 reflect。由于颗粒较为稀疏且对流体的影响很小, 故只考虑流体对颗粒的作用。为了研究集污装置内部的流场分布, 需要设置不同的监测位置。以集污锥槽水面圆心 O 点为坐标系原点, 将 $X=0 \text{ m}$ 处纵截面以及集污锥槽圆柱段和圆锥段 1/2 位置处的水平截面设为监测面, 如图 3 所示。

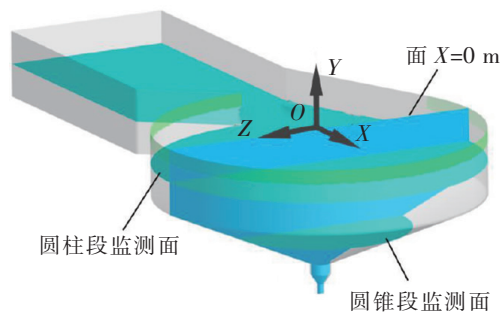


图 3 监测位置示意图
Fig.3 Diagram of monitoring positions

2.4 模型验证

为验证集污装置流场数值模拟计算模型的有效性而进行试验, 试验现场如图 4 所示。试验时的集污装置模型结构与图 1 的集污装置模型相似, 区别在于试验时引水槽没有收缩槽段, 只有长度为 5 m 的直槽段, 其余结构尺寸参数与图 1 一致。试验时选用 MGG-KL-DCB-I 便携式电磁流速仪来测量集污锥槽内的流速。流速测量时在 $X=0$ m 纵截面上设置了 9 个沿直径均匀分布的流速测量点, 其深度和相邻点间距均为 0.5 m, 如图 5 所示。每个流速测量点重复测量 3 次, 每次测量时间为 1 min, 获得流速数据后取平均值。

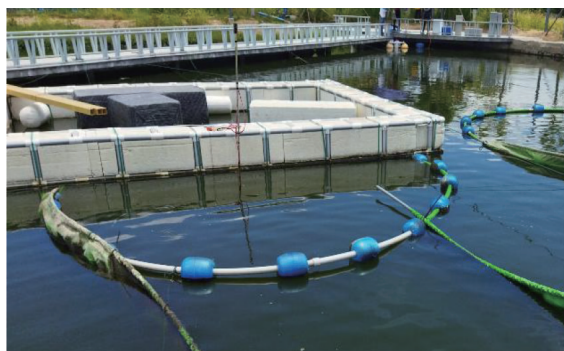


图 4 现场试验
Fig.4 Experimental site

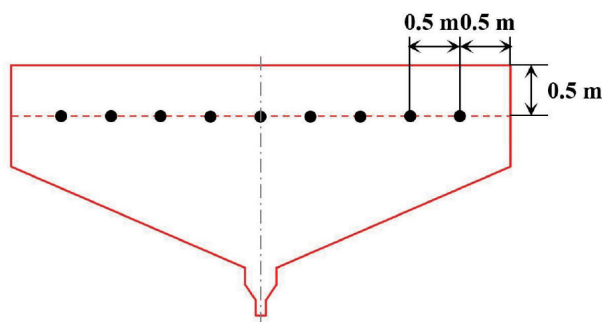


图 5 测量点位置示意图
Fig.5 Position of measurement points

在试验验证前对三种网格数量的数值模拟结果进行比较。网格 1、网格 2 和网格 3 对应的网格数量分别为 78 万、160 万和 240 万。如图 6 所示, 网格 2 与网格 3 的数值模拟结果基本一致, 而网格 1 的结果与前两者的差距较大。说明数值模拟计算结果与网格数量无关。将试验测量结果与网格 2 的结果进行对比, 发现试验测量数据与模拟结果的速度曲线均呈现出两边高中间低的变化趋势, 且靠近集污锥槽的中心位置速度最低。由于整个试验测量过程在室外进行, 外界环境会对数据测量造成影响, 且测量仪器无法测出低于量程的流速, 所以试验数据与模拟结果之间存在一定的误差。比较各点试验测量数据与数值模拟结果, 得出平均相对误差为 11%, 验证了数值模拟方法是合理有效的。

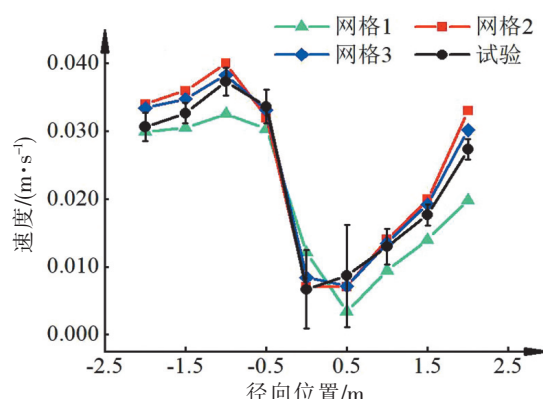


图 6 试验数据与数值模拟结果比较
Fig.6 Comparison between experiment and simulation results

3 集污装置排污性能分析

3.1 流场分布

为了研究集污装置内部流场分布, 选取了集污装置圆柱段监测面、圆锥段监测面和 $X=0$ m 监测面处的流场进行分析, 如图 7 所示。图 7 中的黑色箭头表示水流的运动方向。可以看到水流通过引水槽进入集污装置后会在集污锥槽内形成旋转流场, 有利于固体颗粒的聚集。同时, 由于引水槽收缩段的作用, 水流进入集污锥槽时速度得到显著提升, 有利于促进固体颗粒随着水流快速进入集污锥槽, 从而避免颗粒沉积在引水槽中。通过图 7 发现圆锥段监测面上的流场速度明显低于圆柱段监测面, 且靠近集污锥槽壁面的区域流场速度较高。随着水流沿壁面在集污锥槽中发展, 速度逐渐减小, 中心区域流场的速度较低, 有利于固体颗粒沉降到集污锥槽中心区域底部。

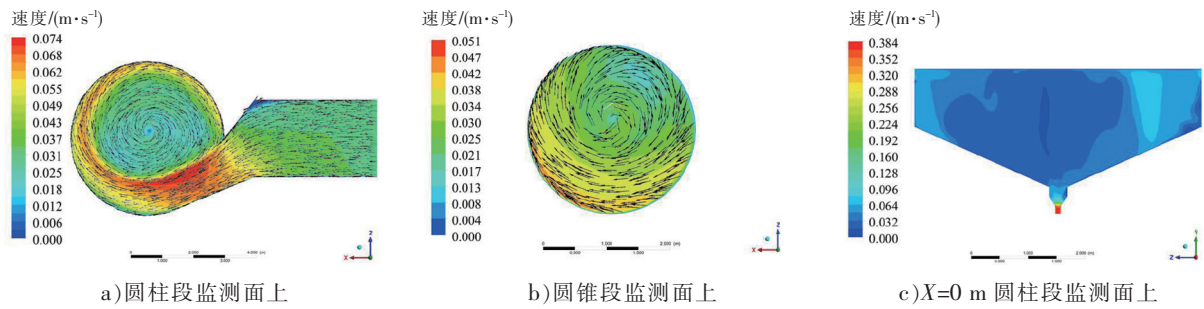


图 7 集污装置内部流场分布

Fig.7 Distribution of the internal flow field of the sewage collection device

3.2 颗粒释放位置对去除效果的影响

为研究颗粒释放位置对集污装置颗粒去除效果的影响, 分别在引水槽进水口深度为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 m 位置释放 1500 个粒径为 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒, 颗粒在集污装置内的运动轨迹如图 8 所示。通过分析释放位置不同时颗粒在集污装置内的运动轨迹, 发现: 在深度为 0.2 和 0.4 m 处释放的颗粒的运动轨迹通过上部出口到右侧区域的较多 (见图 8a、b); 而在深度为 0.6 和 0.8 m 处释放的颗粒的运动轨迹通过上部出口到右侧的较少 (见图 8c、d)。这表明颗粒在进水口处的释放位置越靠近水面, 越容易从上部出口流出。

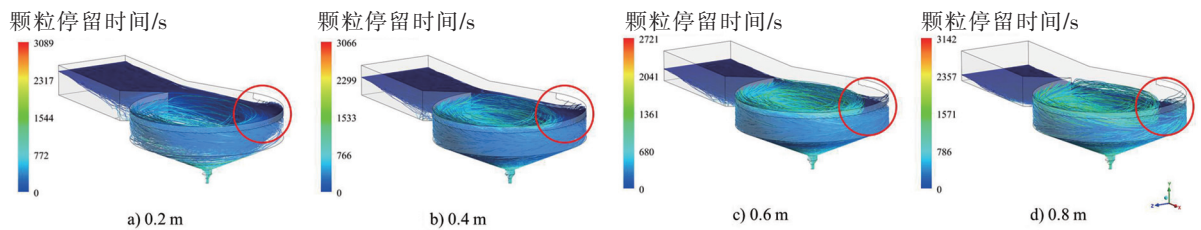


图 8 不同释放位置颗粒的运动轨迹

Fig.8 Particle trajectory for different release position

为了进一步研究不同释放位置颗粒的去除效果, 对颗粒去除率和平均停留时间进行分析。颗粒进入集污装置后基本被去除, 且随着颗粒释放位置深度的增加, 集污装置底部出口的颗粒去除率增大, 上部出口的颗粒去除率减小, 当颗粒释放位置深度为 0.8 m 时, 底部出口的颗粒去除率约为 84% (见图 9a), 底部出口的颗粒平均停留时间明显高于上部出口 (见图 9b)。

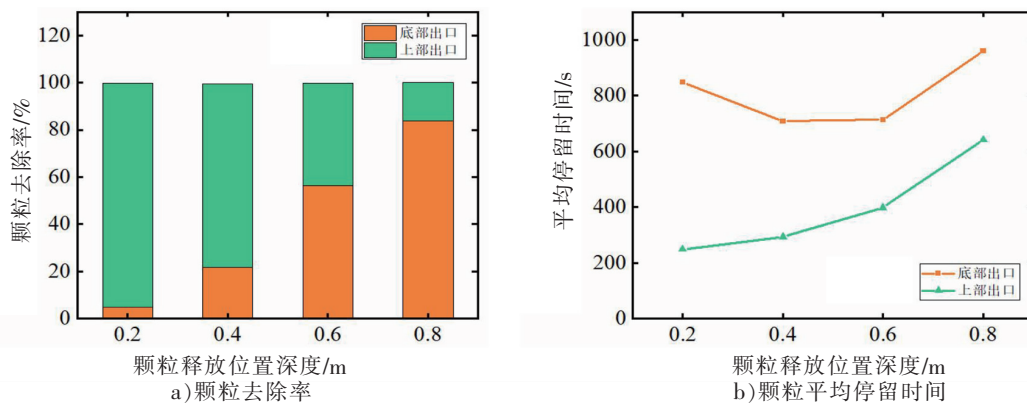


图 9 释放位置对颗粒去除的影响

Fig.9 Influence of the release position on particle removal

集污装置内颗粒的去除主要与流场中的湍流以及颗粒受到的重力等因素有关。当颗粒释放位置靠近水面 (深度 $\leq 0.4\ \text{m}$) 时, 集污锥槽内流场速度较高, 且颗粒距离上部出口较近, 容易随水流从上部出口流出, 这使颗粒去除率高, 且平均停留时间短。当颗粒释放位置接近引水槽底面 (深度 $\geq 0.6\ \text{m}$) 时, 进入集污锥槽的颗粒距离上部出口较远, 流场速度较小, 湍流对颗粒向上运动的影响减小, 在重

力作用下颗粒向底部沉降, 故底部出口的颗粒去除率高, 且由于颗粒沉降到底部出口需较长的时间, 因此平均停留时间较长。其中, 当释放位置深度为 0.8 m 时, 底部出口的颗粒平均停留时间有所增加 (见图 9b)。这是由于颗粒释放位置距离引水槽底面较近, 部分颗粒会沉降到底部出口直槽段底面 (见图 10d), 并随着水流以较低的速度向集污锥槽运动 (见图 11d), 从而使底部出口的颗粒平均停留时间增加。因此, 随着颗粒释放位置深度增加, 上部出口的颗粒平均停留时间增加, 底部出口的颗粒平均停留时间则呈现先减少后增加的趋势。

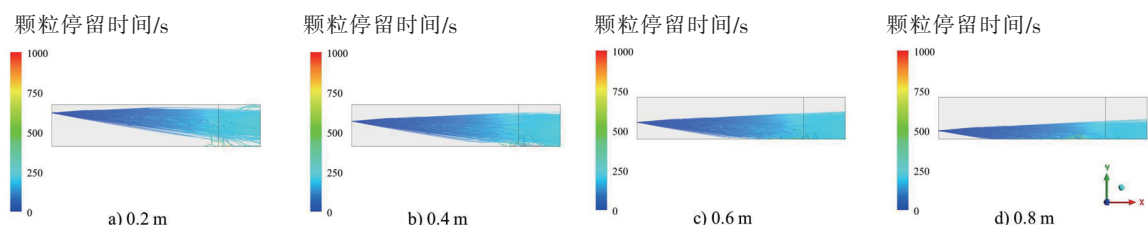


图 10 不同释放位置的颗粒在引水槽内的运动轨迹侧视图 (Z 轴负方向)

Fig.10 Side view of the trajectory of the particles in the diversion trough at different release positions (Z-axis negative direction)

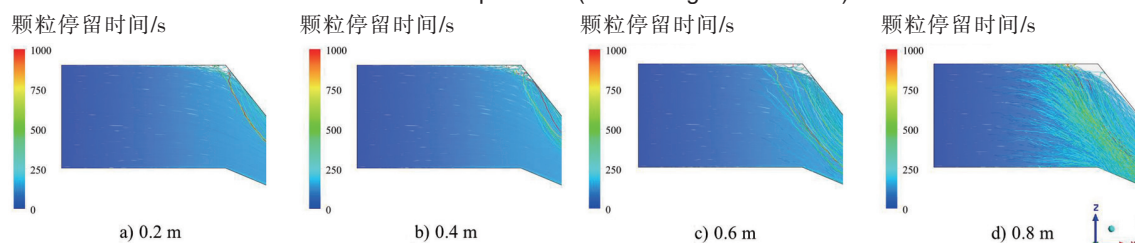


图 11 不同释放位置的颗粒在引水槽内的运动轨迹仰视图 (Y 轴正方向)

Fig.11 Elevation view of the trajectory of the particles in the diversion trough at different release positions (Y-axis positive direction)

3.3 颗粒粒径大小对去除效果的影响

为研究集污装置对不同粒径颗粒的去除效果, 将粒径分别为 20、50、100、150 和 200 μm 的 5 种 1 500 个颗粒在引水槽进水口 0.6 m 深度处释放, 颗粒在集污装置内的运动轨迹如图 12 所示。通过分析不同粒径颗粒在集污装置内的运动轨迹, 发现粒径为 20、50、100 μm 颗粒的运动轨迹通过上部出口右侧区域较多 (见图 12a、b、c), 而粒径为 150、200 μm 颗粒的运动轨迹通过上部出口右侧区域相对较少 (见图 12d、e)。这表明粒径较小的固体颗粒容易从上部出口流出。

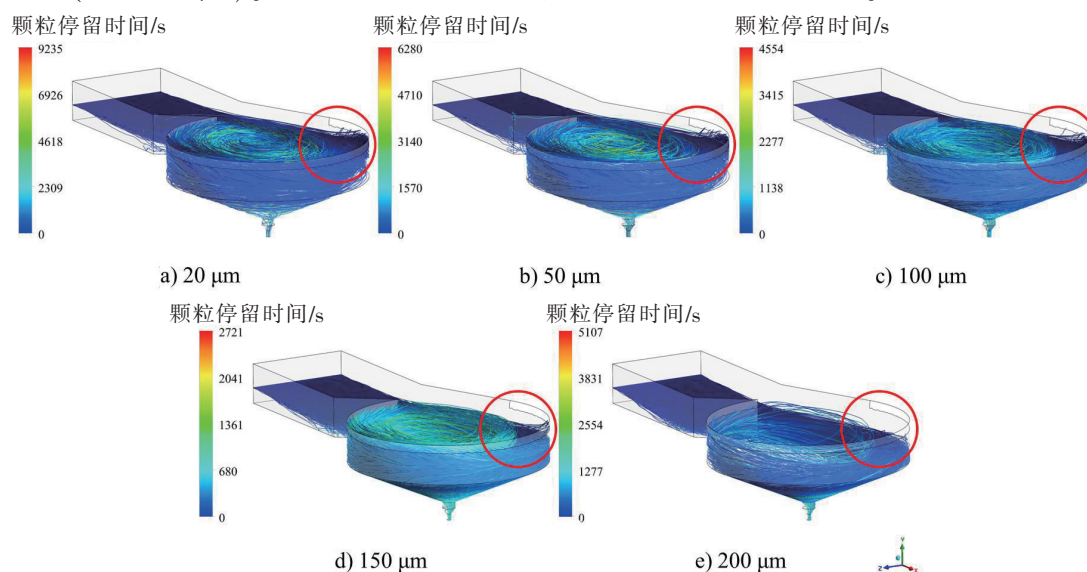


图 12 不同粒径大小颗粒的运动轨迹

Fig.12 Particle trajectory for different diameters

为了进一步研究粒径大小对颗粒去除效果的影响,对颗粒去除率和平均停留时间进行分析。集污装置能够较好地处理不同粒径的颗粒,随着粒径增大,底部出口的颗粒去除率增大,上部出口的颗粒去除率减小(见图 13a)。当颗粒粒径为 $200\ \mu\text{m}$ 时,底部出口颗粒去除率约为 94%。粒径大小对上部出口的颗粒平均停留时间影响不大,对底部出口的颗粒平均停留时间影响比较显著(见图 13b)。随着颗粒粒径的增加,上部出口的颗粒平均停留时间增加幅度较小,底部出口的颗粒平均停留时间则先减少后增加。当粒径小于 $150\ \mu\text{m}$ 时,粒径较小的颗粒受到重力作用较弱,不易沉降,在湍流的影响下主要从上部出口流出,平均停留时间较短。随着粒径增大,重力对颗粒的作用逐渐增强,有利于颗粒在集污装置内沉降,从而使底部出口颗粒的去除率逐渐增大,平均停留时间逐渐减少。此外, $200\ \mu\text{m}$ 的颗粒平均停留时间明显大于 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒(见图 13b)。这是由于 $200\ \mu\text{m}$ 的颗粒受到重力影响较大,能够较快地沉降到引水槽直槽段底面(见图 14e),并随水流以较低的速度向集污锥槽运动较长一段距离(见图 15e),从而增加了颗粒在集污装置内的平均停留时间。虽然 $200\ \mu\text{m}$ 的颗粒在集污装置内的平均停留时间较长,但颗粒去除效果十分显著。

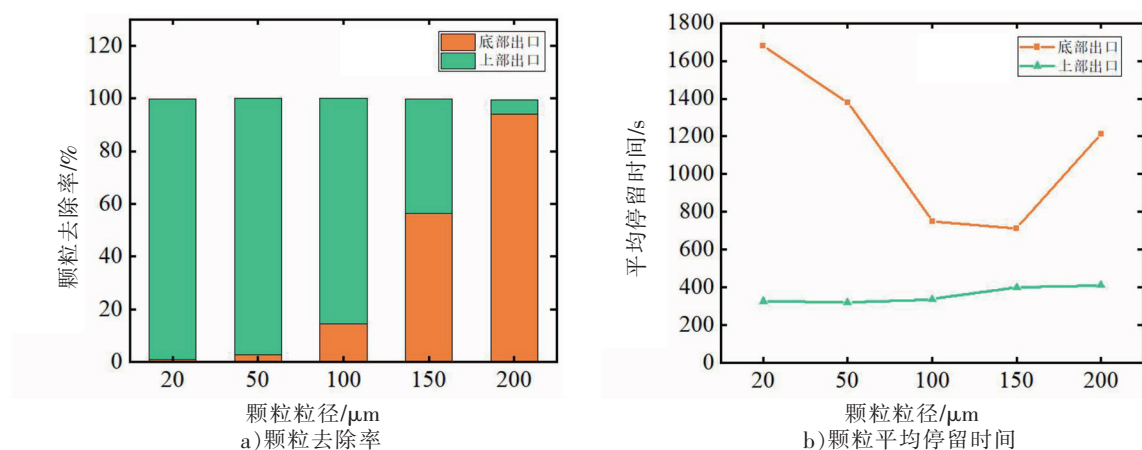


图 13 粒径大小对颗粒去除的影响
Fig.13 Influence of diameter sizes on particle removal

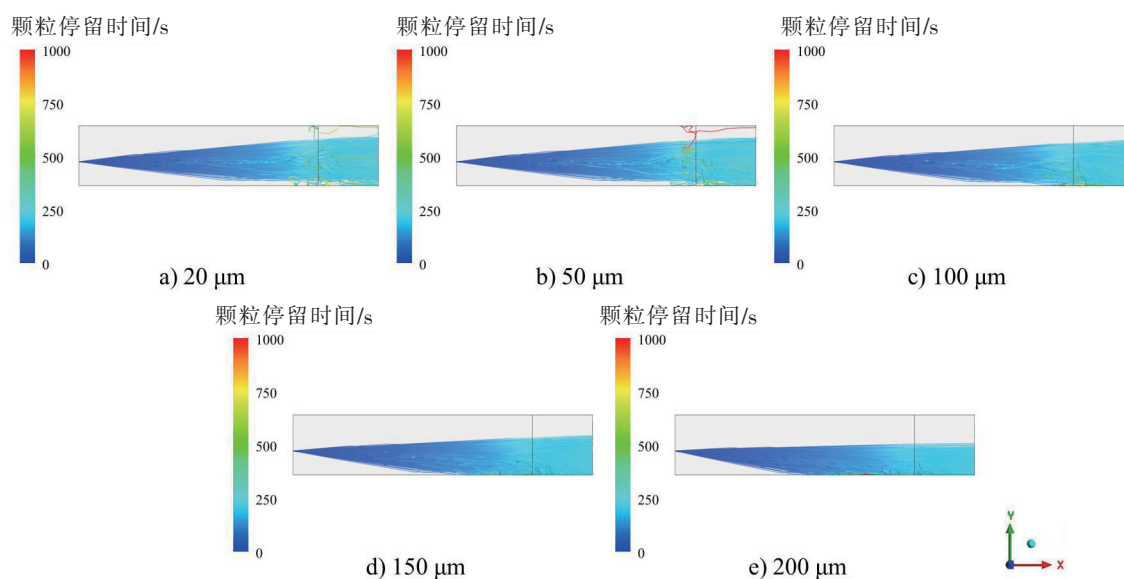


图 14 不同粒径颗粒在引水槽内的运动轨迹侧视图(Z轴负方向)
Fig.14 Side view of the trajectory of particles of different diameters in the diversion trough (Z-axis negative direction)

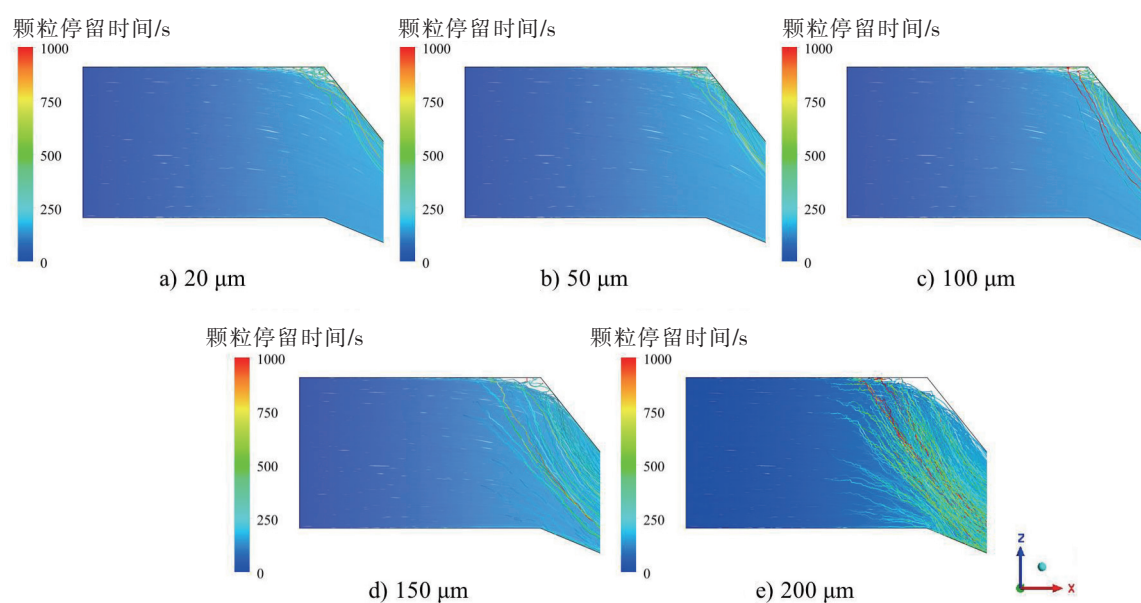


图 15 不同粒径颗粒在引水槽内的运动轨迹仰视图(Y轴正方向)
Fig.15 Elevation view of the trajectory of particles of different diameters in the diversion trough (Y-axis positive direction)

4 结论

本文设计了一种应用于池塘循环水养殖的集污装置。在数值模拟计算方法有效性得到验证的基础上,在颗粒释放位置和粒径大小都不同时,对集污装置的颗粒去除效果进行研究,结论如下:

1) 集污锥槽内会形成旋转流场,且中心区域的流场速度相对较低,这有利于固体颗粒聚集并沉降到底部。

2) 随着颗粒释放位置的深度从 0.2 m 增加到 0.8 m,集污装置底部出口颗粒去除率增大,颗粒平均停留时间呈现先减少后增加的趋势。

3) 粒径较小的颗粒主要从集污锥槽上部出口流出。随着颗粒粒径从 20 μm 增加到 200 μm ,在重力作用的影响下,集污装置底部出口颗粒去除率增大,颗粒平均停留时间逐渐减少。不过,当粒径超过 150 μm 时,集污装置底部出口的颗粒平均停留时间有所增加。

综上,本集污装置的优势主要在于,其内部的旋转流场和中心低流速区域有助于颗粒的聚集和沉降;不足之处在于,粒径较小的颗粒从底部出口去除的效果较差。本研究可为集污装置的设计提供一定的参考。

[参考文献]

- [1]SU H,YAKOVLEV I A,VAN EERDE A,et al. Plant-produced vaccines:future applications in aquaculture [J]. Frontiers in Plant Science,2021,12:718775. DOI:10. 3389/FPLS. 2021. 718775.
- [2]TILAMI S K,SAMPELS S. Nutritional value of fish:lipids,proteins,vitamins,and minerals[J]. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture,2018,26(2):243-253. DOI:10. 1080/23308249. 2017. 1399104.
- [3]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. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2022.
- [4]田昌凤,刘兴国,车轩,等. 分隔式循环水池塘养殖系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(8):183-190.
- [5]LU J M,LI S D,HE X G,et al. An in-pond tank culture system for high-intensive fish production:effect of stocking density on growth of grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Valenciennes,1844) and blunt snout bream(*Megalobrama amblycephala* Yih, 1955) [J]. Aquaculture,2022,549:737808. DOI:10. 1016/J. AQUACULTURE. 2021. 737808.

- [6] 童心雨,姜森颢,葛宝明,等.我国池塘养殖业发展现状与对策[J].中国农业科技导报,2020,22(8):5-13.
- [7] 吴益星,叶坤,王志勇,等.低盐养殖对大黄鱼生长、肌肉营养成分及抗氧化能力的影响[J].集美大学学报(自然科学版),2020,25(3):171-179.
- [8] 李岑鹏,关瑞章,江兴龙,等.循环水处理系统处理鳊鲴养殖污水的应用实验[J].集美大学学报(自然科学版),2009,14(2):126-130.
- [9] 念好水产养殖业绿色发展“八字诀”加快推进生态健康养殖技术集成及模式创新:于康震副部长在全国水产技术推广工作会议暨生态健康养殖技术集成现场会上讲话(摘要)[J].中国水产,2017(8):4-9.
- [10] 马立鸣,赵睿,范毛毛,等.新型池塘循环流水养殖模式初探[J].中国水产,2016(1):78-83.
- [11] 张振东,肖友红,范玉华,等.池塘工程化循环水养殖模式发展现状简析[J].中国水产,2019(5):34-37.
- [12] HOU Y R, LI B, XU G C, et al. Dynamic and assembly of benthic bacterial community in an industrial-scale in-pond raceway recirculating culture system [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 797817. DOI:10.3389/FMICB.2021.797817.
- [13] JIA E T, JIANG W B, LIU W B, et al. Crowding stress-related protein markers: new candidates for assessing welfare of large-mouth bass reared in an in-pond raceway system [J]. *Aquaculture*, 2022, 550: 737821. DOI:10.1016/J.AQUACULTURE.2021.737821.
- [14] 薛凌展,樊海平.池塘循环流水养殖模式(IPA)应用现状及发展潜力[J].中国农学通报,2020,36(32):153-157.
- [15] 何玉明,张天虎,陈文永,等.影响池塘工业化生态养殖系统水槽集排污水效果的因素与对策[J].科学养鱼,2016(6):2-3.
- [16] HUGGINS D L, PIEDRAHITA R H, RUMSEY T. Analysis of sediment transport modeling using computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceways [J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 31(3): 277-293. DOI:10.1016/j.aquaeng.2004.05.007.
- [17] HUGGINS D L, PIEDRAHITA R H, RUMSEY T. Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness [J]. *Aquacultural Engineering*, 2005, 33(3): 167-80. DOI:10.1016/j.aquaeng.2005.01.008.
- [18] 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.
- [19] 孙頔,刘飞.以 CFD-DEM 为基础的养殖槽排污性能及底坡优化[J].水产学报,2019,43(4):946-957.
- [20] 何玉明,陈文永,张正弼,等.漏斗型集排污装置在池塘工业化生态养殖系统中的应用研究[J].科学养鱼,2017(1):22-23.
- [21] 王福军.计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:132-137.
- [22] 李建平,吴康,何相逸,等.基于 CFD 的养殖水体固液旋流分离装置数值模拟与验证[J].农业工程学报,2019,35(11):182-187.
- [23] KLEBERT P, VOLANT T, 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. DOI:10.1016/j.aquaeng.2017.11.001.
- [24] 季明东.海水循环水养殖系统悬浮颗粒物去除机制及其粒径分布特征研究[D].杭州:浙江大学,2020.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄力行)