

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230425001

http://www.yykxjz.cn/

李瑞鹏, 田云臣, 李青飞, 丛雪琪, 秦海晶. 进水流速对圆形循环水养殖池流场特性影响的数值模拟. 渔业科学进展, 2024, 45(3): 55-65

LI R P, TIAN Y C, LI Q F, CONG X Q, QIN H J. Numerical simulation of the effect of inflow velocity on the flow field characteristics of circular circulating aquaculture ponds. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(3): 55-65

进水流速对圆形循环水养殖池流场特性影响的数值模拟*

李瑞鹏¹ 田云臣^{1,2} 李青飞¹ 丛雪琪¹ 秦海晶¹

(1. 天津农学院计算机与信息工程学院 天津 300392; 2. 天津市水产生态及养殖重点实验室 天津 300392)

摘要 通过对工厂化循环水养殖进水流速的智能调控,可降低饵料残留,避免水质恶化。为此,本研究采用数值模拟方法探究了进水流速对工厂化循环水养殖池流场特性的影响,并基于该研究设计出一套确定进水流速调控的实验方法。首先,通过对比 Standard $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 和 Realizable $k-\epsilon$ 3种湍流模型及多种壁面函数的仿真效果,确定 RNG $k-\epsilon$ 模型和标准壁面函数作为仿真配置。同时,针对多相流模型,对欧拉多相流模型和 DPM 离散相模型进行对比,为提高计算准确性选用 DPM 离散相模型,并基于上述模型进行网格无关性验证、制定网格划分方案。其次,以大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 养殖为例,模拟不同进水流速下养殖池流场、排污和水温调节的效果。最后,针对仿真结果提出进水流速调控方案。结果显示,日常采用 1.0 m/s 的进水流速,可有效提高适宜流速区面积并控制水处理成本;投饵前,采用 0.2 m/s 的进水流速可以解决循环水养殖中存在的饵料浪费问题;进食结束后,采用 1.2 m/s 的进水流速可快速排出残饵避免水质恶化;水温异常时,采用 15 °C 的水、以 1.2 m/s 的进水流速注水 230 s,可使 20 °C 的水下降到正常水平,精准化控制水温。采用本研究提出的方法,可针对不同养殖生物和养殖环境设计进水流速智能调控策略,可用于解决循环水养殖过程中饵料浪费、水质变差和水温异常等问题。

关键词 离散相模型; 颗粒分布; 流场特性; 水温调控; 圆形养殖池

中图分类号 S955.1 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2024)03-0055-11

为满足人民群众日益增长的动物性食物消费需求,我国提出建设“蓝色粮仓”的战略。循环水养殖系统(recirculating aquaculture systems, RAS)契合“蓝色粮仓”战略,在有效降低水污染的同时保障了粮食安全(王峰等, 2013; 隋金柱等, 2022; 乔玮等, 2014)。

循环水养殖中,养殖池内的流速对养殖生物有较大影响,圆形养殖池中流速过低时,水体混合效果较

差,影响养殖安全;同时,流速过高会直接伤害养殖生物,且会致使循环水系统的后续水处理压力过大。

水产养殖中饲料成本占总生产成本的 30%~70% (de Verdal *et al*, 2018),残饵和排泄物的堆积会产生大量氨氮和亚硝酸盐(吕妍等, 2021; Yusoff *et al*, 2011),超过一定浓度后对养殖生物有致命性(Xu *et al*, 2021; 方成等, 2022)。同时,水温也是影响水产养殖生物健

* 国家重点研发计划(2020YFD0900600)、国家现代农业产业技术体系(CARS-47)和天津市海水养殖产业技术体系(ITTMRS2021000)共同资助。李瑞鹏, E-mail: 504391119@qq.com

① 通信作者: 田云臣, 教授, E-mail: tianyunchen@tjau.edu.cn

收稿日期: 2023-04-25, 收修改稿日期: 2023-06-10

康的重要因素(田相利等, 2010; 郭黎等, 2012; 杨凯等, 2020)。因此, 研究不同流速对排污和水温的影响, 并确定不同生产阶段的进水流速是必要的。

传统的循环水养殖进水流速调控方案通过研究不同流速对养殖品种生长、摄食和水质氮素等的影响, 进而确定养殖的适宜流速和经济流速(孙国祥等, 2011), 或通过对比不同流速下摄食后 12 h 内氨氮和亚硝酸盐的质量浓度变化, 提出摄食后 4~8 h 是氨氮和亚硝酸盐生成的高峰期, 提高流速可以加快氨氮和亚硝酸盐的排出, 其他时间保持较低流速构成的一套变速流方案(沈加正等, 2016)。实际应用中, 上述方法通过检测氨氮和亚硝酸盐的方式确定进水流速调控的方法成本高、反馈迟, 只能在水质已经变差的情况下调节, 无法提前预防水质变差。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)采用数值方法利用计算机求解关于流体流动的控制偏微分方程组, 并通过计算所得流场来研究流体流动状态与其相关变化。本研究基于 Fluent 流体仿真软件对不同进水流速下, 养殖池流速区大小变化、颗粒物排除效率、水温调节速度进行模拟实验, 提出了一种养殖池进水流速调控的实验方法。

1 数值模型建立与验证

水产养殖中可使用数值模拟方法解决实际生产中不同流速下的控温效果、固体颗粒物排放效率、流速区划分情况无法直接测量的问题。目前, 针对水产养殖多相流数值模拟的研究成果并不多, 已有研究集中在养殖池进出水结构和养殖池形状对流场和集排污效果的影响(薛博茹等, 2021; Liu *et al.*, 2023; 胡佳俊

等, 2021; 张倩等, 2022), 采用数值模拟方法设计进水流速调控方案的研究少有报道。

1.1 数值模型建立

本研究利用 SolidWorks 2018 软件, 参照实际养殖池尺寸, 等比例缩小 1/8 构建简化圆形养殖池, 进行数值模拟。模型各部分如图 1A 所示。养殖池半径为 40 cm, 水深为 13 cm。进水管从距壁面 52.5 mm 处养殖池顶部垂直插入, 底部沿养殖池池壁切向进水, 管径为 DN15。出水口位于养殖池底部正中央, 管径为 DN20。模型构建后, 使用 Space Claim 软件将流体域划分为主流体域、进水流体域和出水流体域, 设置边界名称, 并对几何模型进行缝隙检测。

1.2 数值模型验证

选择使用 OCA 等(2013)和 Duarte 等(2011)研究中的圆形养殖池模型, 如图 1B 所示。其中, 湍流模型和壁面函数验证中的检测位置为过养殖池中心平行于进水口的纵切面上距池底 0.03 m 处的线, 如图 1C 所示。进行数值模拟结果对比, 确定湍流模型和壁面函数。在本研究讨论的模型(图 1A)基础上, 确定了 DPM 多相流模型并进行网格无关性验证。

1.2.1 湍流模型 参考 Ansys 理论指南, 养殖池内的流场经计算属于高雷诺数, 并在充分考虑计算成本的前提下, 选择 $k-\varepsilon$ 系列的湍流模型, 其中 k 和 ε 由式(1)和(2)给出。Standard $k-\varepsilon$ 模型局限性强, 适用于高雷诺数的流场模拟; RNG $k-\varepsilon$ 相较于标准 $k-\varepsilon$ 模型在 ε 方程上增加了 1 项[由式(3)给出], 同时增加了涡流对流场的影响; Realizable $k-\varepsilon$ 模型适用于流动分离和二次流等流场

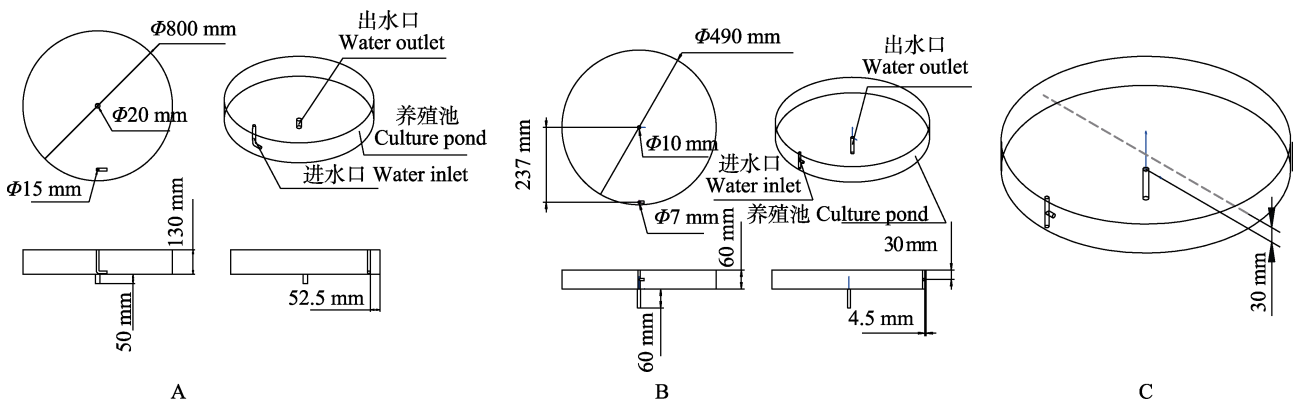


图1 几何模型图

Fig.1 Geometric model diagram

A: 圆形养殖池模型图; B: 验证养殖池模型图; C: 检测点示意图。Φ表示所标示圆的内径大小。

A: Model of a circular aquaculture pond; B: Validation of aquaculture pool model; C: Schematic diagram of detection points. Φ indicates the inner diameter size of the marked circle.

模拟,在射流曲率变化大的情况下有更好的表现。本研究通过实验对比 $k-\varepsilon$ 的 3 种湍流模型,实验结果如图 2A 所示。由图 2A 可知, RNG $k-\varepsilon$ 模型与实验结果拟合度最高,适用于本研究圆形养殖池流场仿真。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad (3)$$

式中, t 为时间(s); ρ 为流体密度(kg/m^3); x 为位移分量(m); u 为速度矢量(m/s); i, j 为张量指标,取值范围(1, 2, 3); μ 为流体动力粘度(Pa·s); α_k 和 α_ε 分别为 k 和 ε 的有效普朗特数的倒数; G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍流动能的产生项; G_b 是由浮力产生的湍流动能; Y_M 表示可压缩湍流中波动膨胀对总

湍流耗散率的贡献; S_k 和 S_ε 是用户定义的源项; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为模型经验常数,根据经验取值为 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。式(3)中, $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \eta_0 = 4.38 \quad \beta = 0.012 \quad C_\mu = 0.0845$$

1.2.2 壁面函数 标准壁面函数(standard wall functions)是一种壁面函数的方法,用于高雷诺数流动,不适合大压力梯度,一般要求 $30 < Y_+ < 300$; 增强壁面函数(enhanced wall functions)是一种近壁面模型方法,用于无法应用对数律求解的复杂流动问题,比如边界层分离现象,一般要求 $Y_+ \approx 1$; Menter-Lechner 处理也是一种近壁面模型方法,该方法在壁面网格足够细时使用一个新低雷诺数模型方法,当壁面函数较粗时,使用壁面函数方法,对 Y_+ 无要求。本研究对比了 3 种壁面函数,结果如图 2B 所示。从图 2B 可以看出,选择标准壁面函数的模拟结果与实验数据之间的相对误差平均值小于实际生产中的测量误差。因此,本研究的后续实验中均采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型和标准壁面函数的配置,稳态求解使用 Coupled 算法,瞬态求解使用 SIMPLE 算法。

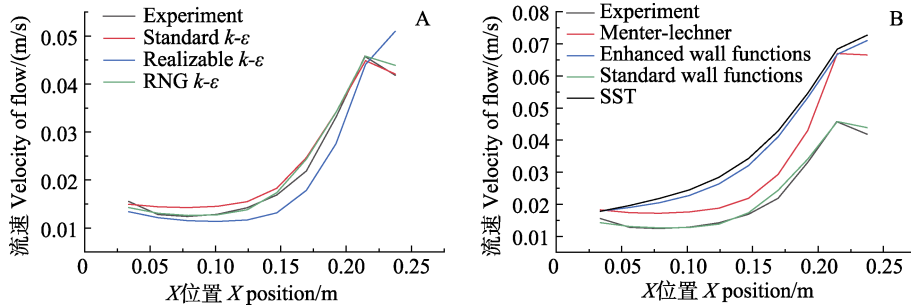


图 2 湍流模型仿真效果对比(A)和壁面函数仿真效果对比(B)

Fig.2 Comparison of turbulence model simulation effects (A) and wall function simulation effects (B)

1.2.3 多相流模型 多相流仿真中,离散相模型选择与固体颗粒物的体积分数相关。离散相模型分为拉格朗日法(DPM 模型)和欧拉法,其中拉格朗日法忽略了颗粒之间的相互作用,因此,要求固体颗粒物体积分数小于 10%~12%,若颗粒体积分数过高则只能采用欧拉法。本研究设计的固体颗粒物体积分数远小于 10%,因此,本研究的多相流模型采用 DPM 模型,式(4)为 DPM 模型的颗粒受力解析。在本研究中,离散相注入方式选择 cone,入射区域设置为与养殖池中心同心、半径为 0.35 m 的顶部圆形区域。从入射区域随机注入 300 个半径为 0.002 m、密度为 1250 kg/m^3 的颗粒,并采用离散随机轨迹模型模拟湍流对颗粒物的影响。

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (4)$$

式中, m_p 是粒子质量; \vec{u} 是流体速度; \vec{u}_p 是粒子速度; ρ 是流体密度; ρ_p 是粒子密度; \vec{F} 是附加力; m_p 是曳力。

1.2.4 网格无关性验证 在其他设置完全一致的前提下,本研究比较了不同网格数量时过养殖池中心纵切面上距池底 0.065 m 处线上的流速大小,结果如图 3 所示。其中, mesh-A、mesh-B 和 mesh-C 的网格数量分别为 104 662、272 453 和 1043 274。mesh-B 可以用较低的计算成本保证较高的准确性,故选用

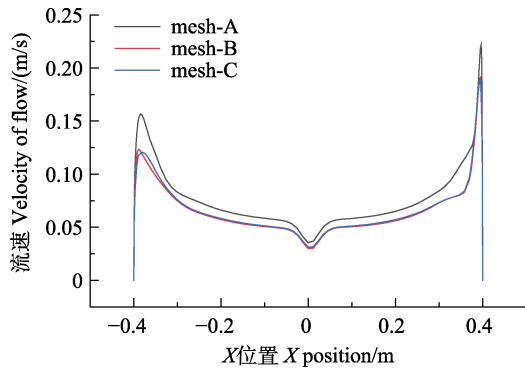


图3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

mesh-B 的网格划分方案进行数值模拟。

Mesh-B 具体的网格划分方案如下：在 Fluent Meshing 参照表 1 的设置划分非结构化网格，其中养殖池主体部分采用六面体网格，进出水口等部分采用多面体网格并对网格进行加密，划分情况如图 4 所示。

表 1 网格划分设置

Tab.1 Grid division settings

选项 Option	属性 Attribute	参数 Parameters
面网格生成设置 Generate the surface mesh	最小网格尺寸 Minimum size/m	0.000 5
	最大网格尺寸 Maximum size/m	0.01
	网格增长率 Growth rate	1.2
	尺寸函数 Size functions	Curvature and proximity
体网格生成设置 Generate the volume mesh	填充方法 Fill with	Poly-hexcore
	最小单元尺寸 Minimum cell length/m	0.000 7
	最大单元尺寸 Maximum cell length/m	0.011 2



图4 养殖池的网格划分

Fig.4 Grid division of aquaculture ponds

2 结果与分析

以大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)为例讨论进水流速对养殖池流场、颗粒物排出效率和水温调节的影响。

2.1 进水流速对养殖池流场的影响

大菱鲆除摄食外，伏底栖息，集群生活(Lei *et al.*, 2005)。因此，本研究选取近池底的水平截面进行流场分析。在不同进水流速下，比较距池底 0.01 m 处水平截面的切向流速大小，观察流场均匀性，结果见图 5。由图 5 可以看出，在一定程度内随进水流速的增大，切向流速增大，整体流场趋于稳定。

在养殖池流速区的研究中，通常采用 2 种方案定义流速区：一种是凭经验将低流速标准线定义为固定值(Sin *et al.*, 2021)；另一种是将流速和养殖池内平均流速做比值，以比值的大小来定义高、中、低流速区(任效忠等, 2021)。养殖生产中，适宜的流速可以有效增加养殖生物的食用价值并促进养殖生物的生长(Huang *et al.*, 2021)，长时间过低的流速会导致养殖生物的肉质营养和水体交换速度降低，过高的流速会对养殖生物的生长和营养成分造成负面影响(钟金鑫等, 2013; Jones *et al.*, 1974; Liao *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2019)。本研究结合以上研究，提出针对不同养殖生物的适宜流速范围确定流速区划分阈值的划分方法。

研究表明，平均体长(BL)为 22 cm 的大菱鲆，流速在 0.33~0.46 BL/s 时分布更均匀，在流速超过 0.98 BL/s 时无法正常活动(Almansa *et al.*, 2012)。本研究以大菱鲆为对象，做出如下规定：最低适宜流速 0.072 6 m/s (0.33 BL/s)为低流速标准线，流速小于该值的区域定义为低流速区；最高极限流速 0.215 6 m/s (0.98 BL/s)为高流速标准线，流速大于该值的区域定义为高流速区；流速介于低流速与高流速之间的区域定义为适宜流速区。不同进水流速依照此规定划分 3 种流速区分布，结果见图 6。由图 6 可以看出，在进水流速为 0.2~0.6 m/s 时，中、低流速区占比最大；为 1 m/s 左右时，适宜流速区最大；>1.2 m/s 时，高流速区占比增大，适宜流速区减小。为确定适宜进水流速，增加进水流速为 1.1 m/s 和 0.9 m/s 下的数值模拟，适宜流速区面积变化见图 7。由图 7 可以看出，随进水流速的增大适宜流速区面积先增大后减小，在进水流速为 1.1 m/s 时，适宜流速区面积达到峰值。

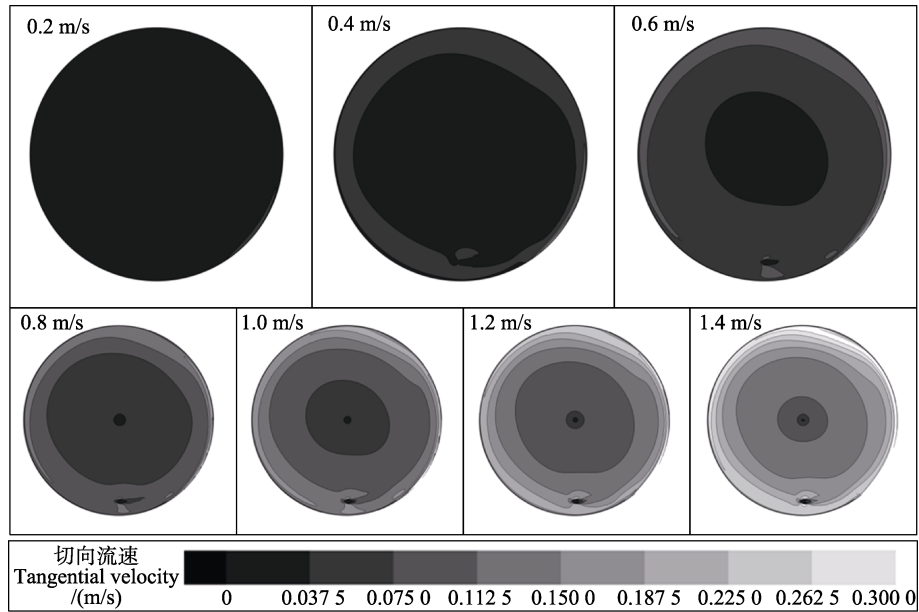


图 5 水平截面流速变化
Fig.5 Changes in horizontal cross section velocity

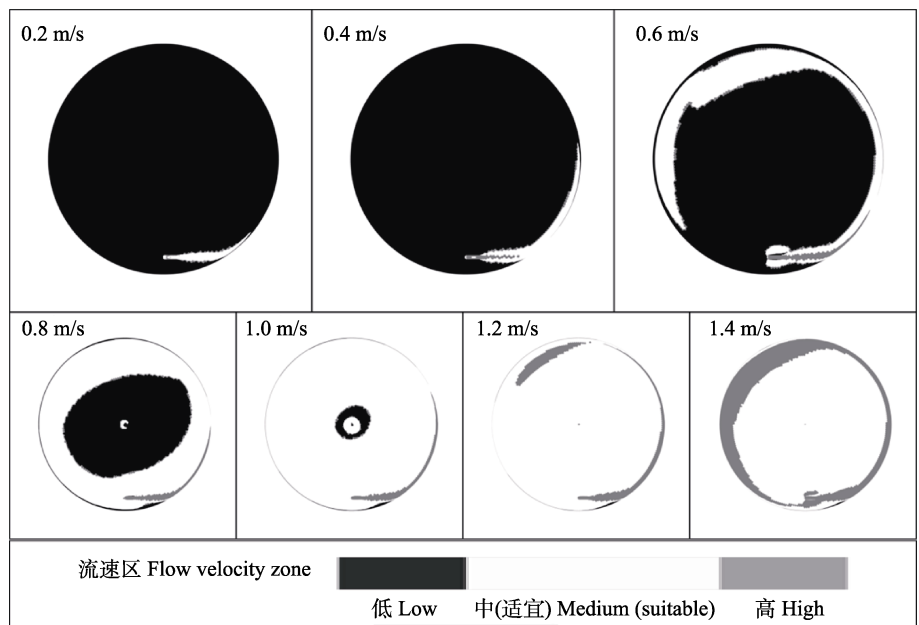


图 6 水平截面流速区划分
Fig.6 Division of horizontal cross section velocity zone

2.2 进水流速对养殖池颗粒物排出效率的影响

饵料的粒径与养殖品种和养殖周期、养殖环境等有关。以 0.002 m 的饵料粒径为例，模拟颗粒物在不同进水流速下的颗粒排出效率，结果见图 8、9。由图 8、9 可以看出，随进水流速的增大养殖池内颗粒物排出速度加快，且前期排放速度快，后期排放速度减慢。

将养殖池划分为 4 个区域，半径 < 0.1 m 的圆形区域为流出区，半径在 0.1~0.2 m 之间的环形区为次流出区，半径在 0.2~0.3 m 之间为近壁面区，半径 > 0.3 m 为壁面区，研究不同进水流速下颗粒物分布情况。各区域颗粒物分布情况见表 2。随流速增加，颗粒物聚集位置更趋近于出水口附近，排出效率也显著增加。

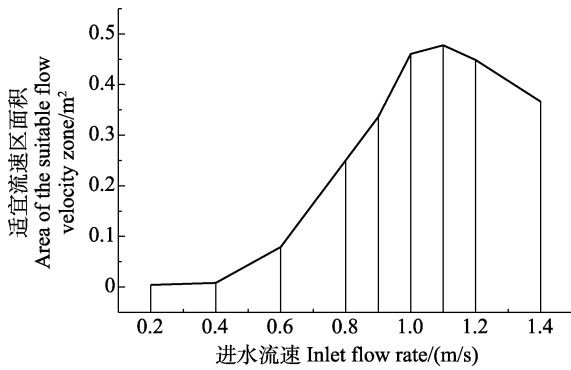


图7 适宜流速区面积变化

Fig.7 Changes in the area of the suitable flow velocity zone

2.3 进水流速对养殖池水温调控的影响

大菱鲆的最适水温为 16~18 °C(李勇等, 2011), 本研究将入水温度设置为 15 °C, 原池中水温假设为 21 °C 开始注水, 选择对 0.8~1.2 m/s 的进水流速进行仿真, 在不同进水流速下比较了大菱鲆主要活动区域(距池底 0.01 m 处水平截面)的平均温度, 结果见图 10。由图 10 可以看出, 在 100 s 内随进水流速增大调温速度并未有明显变化, 在 100~350 s 内调温效果明显且进水流速越大调温效果越好, 在 350 s 后水温逐渐趋于稳定且调温速度明显减慢。

Inflow velocity 0.2 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
Inflow velocity 0.4 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
Inflow velocity 0.4 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
Inflow velocity 1.0 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
Inflow velocity 10 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
Inflow velocity 1.2 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
Inflow velocity 1.4 m/s	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s

图8 随着时间变化的颗粒物留存情况

Fig.8 Retention of particulate matter over time

3 讨论

3.1 进水流速对养殖池流场的影响

由流场仿真结果可以看出, 在不考虑进水成本的前提下, 进水流速为 1.1 m/s 时的适宜流速区最大、养殖效果最好。

研究显示, 大菱鲆最佳养殖密度为 8.96 kg/m², 在最佳养殖密度条件下, 每月平均增重 2.136 4 kg/m² (王峰等, 2015)。因此, 本研究对比了 0.8~1.2 m/s 时

的适宜养殖面积(见图 11)。由图 11 可知, 进水流速为 1.2 m/s 时, 适宜养殖面积减少、流量增大, 流量越大养殖成本越高, 因此, 1.2 m/s 在所讨论的进水流速中经济性最低。进水流速从 0.8~1.2 m/s 的养殖增量分别为 0.534、0.726、0.983、1.025 和 0.961 kg/月。DN15 的进水管, 在 0.8~1.2 m/s 的进水流速条件下, 流量分别为 0.508、0.572、0.636、0.699 和 0.763 m³/h。进水流速为 0.8~1.1 m/s 时, 养殖增量和进水流量变化见图 12。如图 12 所示, 进水流速为 1.1 m/s 相

表 2 颗粒物分布情况
Tab.2 Particle distribution

进水流速-时间 Inlet flow rate-Time	$R < 0.1$ m	$0.1 \text{ m} < R < 0.2$ m	$0.2 \text{ m} < R < 0.3$ m	$0.3 \text{ m} < R < 0.4$ m	剩余颗粒数 Residual particulate matter
0.2 m/s-10 s	17.52%	30.66%	38.32%*	13.50%	274
0.2 m/s-50 s	20.79%	31.10%	45.27%*	3.54%	254
0.4 m/s-10 s	23.14%	34.90%*	34.50%	7.45%	255
0.4 m/s-50 s	21.79%	54.49%*	22.44%	1.28%	156
0.6 m/s-10 s	22.36%	39.66%*	34.60%	3.38%	237
0.6 m/s-50 s	70.77%*	29.23%	0	0	65
0.8 m/s-10 s	26.15%	40.51%*	30.26%	3.08%	195
0.8 m/s-40 s	100.00%*	0	0	0	6
1.0 m/s-10 s	32.37%	47.40%*	19.65%	0.58%	173
1.0 m/s-30 s	100.00%*	0	0	0	1
1.2 m/s-10 s	41.60%	53.60%*	4.80%	0	125
1.2 m/s-20 s	100.00%*	0	0	0	3
1.4 m/s-10 s	76.54%*	22.22%	1.23%	0	82

注: *表示在该流速、时间下颗粒物占比最大的区域。

Note: * indicates the area with the highest proportion of particulate matter at this flow rate and time.

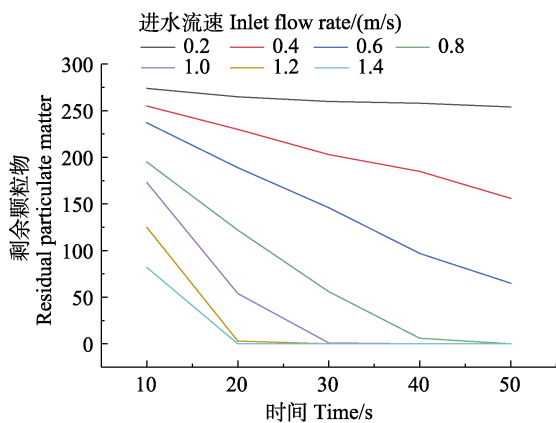


图 9 随着时间变化的颗粒物留存量
Fig.9 Particle retention over time

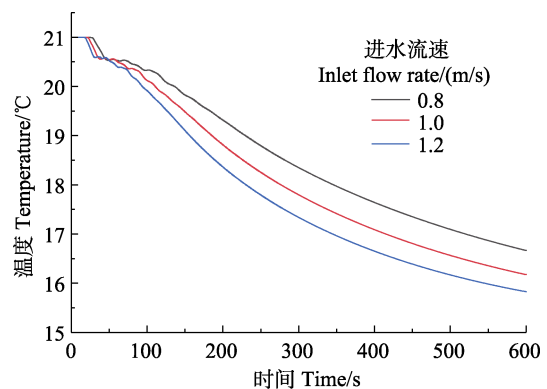


图 10 不同进水流速下养殖池平均水温随时间的变化
Fig.10 Changes of average water temperature of aquaculture ponds over time under different inflow velocities

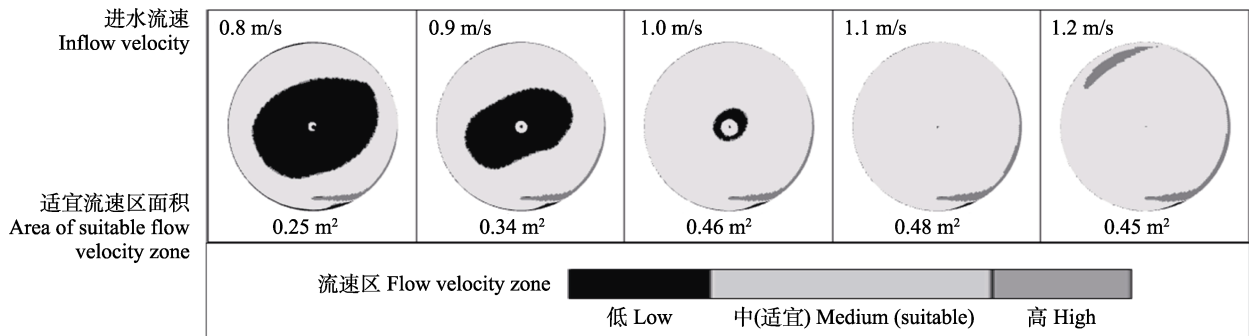


图 11 不同进水流速条件下流速区分布
Fig.11 Flow velocity zone division under different inflow velocities

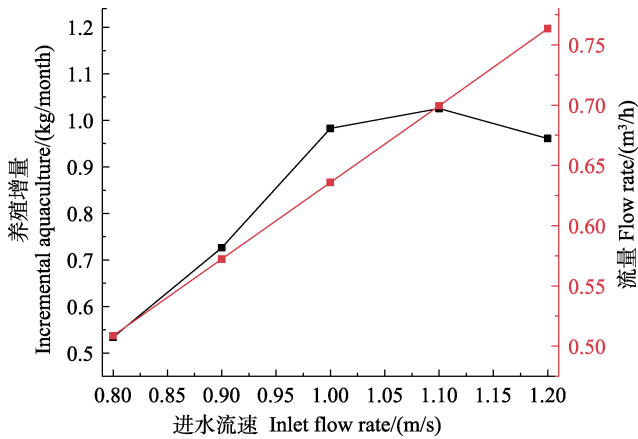


图 12 不同进水流速下养殖增量及流量变化

Fig.12 Increment and flow changes of aquaculture under different inflow velocities

于 1.0 m/s 对养殖增量提升有限, 进水流量持续较高增长, 因此, 在本研究条件下, 将 1.0 m/s 作为日常经济适宜的进水流速。

3.2 进水流速对养殖池颗粒物排出效率的影响

结合流场和颗粒物排出仿真结果, 在本研究中的适宜流速 1.1 m/s 或者经济适宜流速 1.0 m/s 时, 饵料会在 30 s 内排出, 浪费大量饵料, 增加饵料成本和后续水处理难度。若在投饵时采用 0.2 m/s 的进水流速, 饵料排出速度会有效降低, 在投饵 50 s 后饵料留存率依旧可以保持在 90% 以上, 可以保证养殖生物有充分的进食时间。虽然在该流速条件下的适宜流速区小, 但短时间的低流速不会过分影响肉质营养和水体交换, 不会对鱼体造成伤害, 因此, 可以在投饵开始时将进水流速调节到 0.2 m/s。

养殖生物进食结束后, 多余的饵料若不及时排出会产生氨氮和亚硝酸盐等有害物质, 对养殖生物造成伤害。在进食结束后, 应加快残饵和排泄物的排出。进水流速为 1.2 m/s 时, 20 s 左右可以快速排出养殖池内颗粒物, 避免养殖池中氨氮和亚硝酸盐的累积。进水流速继续增大可以更快地排出颗粒物, 但高流速会直接伤害养殖生物。因此, 在养殖生物进食结束后可采用 1.2 m/s 的进水流速。

3.3 进水流速对养殖池水温调控的影响

结合 2.3 节的仿真结果, 计算出 0.8、1.1 和 1.2 m/s 的进水流速下将平均水温调节到 18 °C 所用的时间和进水流量分别为 345 s、48.645 L, 276 s、48.576 L, 230s、48.760 L。在实际应用中可用 15 °C 的入水水温、1.2 m/s 的进水流速注水 230 s, 将 22 °C 的池内水温降低到 18 °C。

4 结论

本研究使用数值模拟方法, 模拟不同进水流速下养殖池内颗粒物排出效率、流场和水温调控的变化。与传统方法相比, 本研究提出的循环水养殖进水流速调控方法可以直接获得颗粒物排出量、养殖池内整体水温和流场分布, 从而保障养殖安全; 可以更低成本确定进水流速调控方案, 且在调控时间上精确到秒, 确保进水流速调控更精准。在此基础上, 以大菱鲆养殖为例提出一套流速调控方法: 进食阶段采用 0.2 m/s 的进水流速, 避免饵料快速排出, 降低饵料成本; 进食结束后, 采用 1.2 m/s 的进水流速持续 20 s, 可快速排出残饵、避免水质恶化; 水温异常时, 可采用不同的流速、时间方案来调节养殖池水温。在实际生产中, 针对不同生产环境和养殖品种均可参照此方法设计进水流速智能调控方案, 降低养殖成本, 增加经济效益。

参 考 文 献

- ALMANSA C, REIG L, OCA J. Use of laser scanning to evaluate turbot (*Scophthalmus maximus*) distribution in raceways with different water velocities. *Aquacultural Engineering*, 2012, 51: 7–14
- DE VERDAL H, KOMEN H, QUILLET E, *et al.* Improving feed efficiency in fish using selective breeding: A review. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(4): 833–851
- DUARTE S, REIG L, MASALÓ I, *et al.* Influence of tank geometry and flow pattern in fish distribution. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(2): 48–54
- FANG C, LI L S, LIANG Z Y, *et al.* Changes in immune system and growth performance of *Litopenaeus vannamei* after 40-day challenge with different concentrations of nitrite. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(4): 180–189 [方成, 黎兰诗, 梁震宇, 等. 不同浓度亚硝酸盐亚急性胁迫对凡纳滨对虾生长与免疫功能的影响. *渔业科学进展*, 2022, 43(4): 180–189]
- WANG F, LEI J L. Effect of stocking density on growth and quality in muscles of *Cynoglossus semilaevis* Günther adult fish in industrial recirculating aquaculture. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(1): 19–26 [王峰, 雷霖霖. 工厂化循环水养殖模式放养密度对半滑舌鲷成鱼生长和肌肉营养成分的影响. *中国工程科学*, 2015, 17(1): 19–26]
- GUO L, MA A J, WANG X A, *et al.* Effects of temperature and salinity on the activities of antioxidant enzymes of juvenile turbot *Scophthalmus maximus*. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(5): 422–428 [郭黎, 马爱军, 王新安等. 盐度和温度对大菱鲆幼鱼抗氧化酶活性的影响. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(5): 422–428]

- 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+. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 244–251 [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. 农业工程学报, 2021, 37(21): 244–251]
- HUANG X X, HEGAZY A M, ZHANG X Z. Swimming exercise as potential measure to improve flesh quality of cultivable fish: A review. Aquaculture Research, 2021, 52(12): 5978–5989
- JONES D R, KICENIUK J W, BAMFORD O S. Evaluation of the swimming performance of several fish species from the Mackenzie River. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1974, 31(10): 1641–1647
- LEI J L, MA A J, CHEN C, *et al.* The present status and sustainable development of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) culture in China. Engineering Science, 2005, 7(5): 30–34
- LI X, JI L Q, WU L L, *et al.* Effect of flow velocity on the growth, stress and immune responses of turbot (*Scophthalmus maximus*) in recirculating aquaculture systems. Fish and Shellfish Immunology, 2019, 86: 1169–1176
- LI Y, SUN G X, LIU Y, *et al.* Effects of temperature on feed intake, growth and digestive enzyme activity of turbot *Scophthalmus maximus* L. in high stocking density of closed recirculation aquaculture system. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(6): 17–24 [李勇, 孙国祥, 柳阳, 等. 温度对高密度循环海水养殖大菱鲆摄食、生长及消化酶的影响. 渔业科学进展, 2011, 32(6): 17–24]
- LIAO J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007, 362(1487): 1973–1993
- LIU H F, REN X, XUE B R, *et al.* Systematic optimization of the square arc angle aquaculture tank combining CFD methodology and multi-objective genetic algorithm. Aquacultural Engineering, 2023, 101: 102326
- LÜ Y. Effects of water quality indexes such as ammonia nitrogen on aquaculture a solutions. Northern Chinese Fisheries, 2021, 40(5): 53–56 [吕妍. 氨氮等水质指标对水产养殖的影响及解决办法. 黑龙江水产, 2021, 40(5): 53–56]
- OCA J, MASALO I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet and outlet features. Aquacultural Engineering, 2013, 52: 65–72
- QIAO W, SONG X F, GAO C R, *et al.* Effects of stocking density on the growth and physiology of adult turbot and changes in water quality. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(5): 76–82 [乔玮, 宋协法, 高淳仁, 等. 养殖密度对循环水系统中大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)生长的影响. 渔业科学进展, 2014, 35(5): 76–82]
- REN X Z, XUE B R, JIANG H Z, *et al.* Numerical study on the influence of double-inlet pipes system for single-drain rectangular arc angle aquaculture tank on hydrodynamic characteristics. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 50–56 [任效忠, 薛博茹, 姜恒志, 等. 双进水管系统对单通道矩形圆弧角养殖池水动力特性影响的数值研究. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 50–56]
- SHEN J Z, SHI M M, RUAN Y J, *et al.* Effects of variable flow rates on water qualities in recirculating aquaculture system. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 309–314 [沈加正, 史明明, 阮贇杰, 等. 变速流操作调控循环水养殖系统水质效果研究. 农业机械学报, 2016, 47(7): 309–314]
- SIN M G, AN C H, CHA S J, *et al.* A method for minimizing the zone of low water flow velocity in a bottom center drain circular aquaculture tank. Journal of the World Aquaculture Society, 2021, 52(6): 1221–1233
- SUI J Z, TIAN Y C, LI Z Z, *et al.* Research progress on intelligent feeding technology based on fish feeding behavior. Journal of Tianjin Agricultural University, 2022, 29(2): 63–68 [隋金柱, 田云臣, 李振忠, 等. 基于鱼类摄食行为的智能投饲技术研究进展. 天津农学院学报, 2022, 29(2): 63–68]
- SUN G X, LI Y, TIAN Z, *et al.* Effects of flow rate on the growth, feed intake and water nitrogen in a closed recirculation aquaculture system of turbot (*Scophthalmus maximus* L.). Marine Sciences, 2011, 35(5): 53–60 [孙国祥, 李勇, 田喆, 等. 流速对封闭循环水养殖大菱鲆生长、摄食及水质氮素的影响. 海洋科学, 2011, 35(5): 53–60]
- TIAN X L, WANG G D, DONG S L, *et al.* Effects of salinity and temperature on growth, osmophysiology and energy budget of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis* Günther). Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 771–782 [田相利, 王国栋, 董双林, 等. 盐度和温度对半滑舌鲷生长、渗透生理及能量收支的影响. 中国水产科学, 2010, 17(4): 771–782]
- WANG F, LEI J L, GAO C R, *et al.* Review of industrial recirculating aquaculture research at home and abroad. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 1100–1111 [王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1100–1111]
- XU Z, CAO J, QIN X, *et al.* Toxic effects on bioaccumulation, hematological parameters, oxidative stress, immune responses and tissue structure in fish exposed to ammonia nitrogen: A review. Animals, 2021, 11(11): 3304
- 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. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(4): 620–628 [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. 大连海洋大学学报, 2021, 36(4): 620–628]
- YANG K, HUANG Z H, MA A J, *et al.* Transcriptome study of

- kidney of turbot under high-temperature stress. *Progress In Fishery Sciences*, 2020, 41(1): 86–95 [杨凯, 黄智慧, 马爱军, 等. 高温胁迫条件下大菱鲂肾脏转录组研究. *渔业科学进展*, 2020, 41(1): 86–95]
- YUSOFF F, BANERJEE S, KHATOON H, *et al.* Biological approaches in management of nitrogenous compounds in aquaculture systems. *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology*, 2011, 5(1): 21–31
- 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. *South China Fisheries Science*, 2022, 18(4): 119–125 [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. *南方水产科学*, 2022, 18(4): 119–125]
- ZHANG S H, YU G H, WANG Y, *et al.* Numerical investigations on temperature and flow field performance of octagonal culture tank under different physical parameters for fish growth based on computational fluid dynamics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 195: 106821
- ZHONG J X, ZHANG Q, LI X R, *et al.* Effects of water velocity on the swimming behavior of *Anabarilius graham*. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 655–660 [钟金鑫, 张倩, 李小荣, 等. 不同流速对鳊(鰱)白鱼游泳行为的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 655–660]

(编辑 马瑾艳)

Numerical Simulation of the Effect of Inflow Velocity on the Flow Field Characteristics of Circular Circulating Aquaculture Ponds

LI Ruipeng¹, TIAN Yunchen^{1,2①}, LI Qingfei¹, CONG Xueqi¹, QIN Haijing¹

(1. *College of Computer and Information Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;*

2. *Tianjin Key Laboratory of Aquatic Ecology and Aquaculture, Tianjin 300392, China)*

Abstract To meet the growing demand for animal food among the population, China has proposed the strategy of building a “Blue Granary,” relying on marine space, marine biological resources, and the application of modern marine high-tech. Industrialized recirculating aquaculture (also known as land-based factory aquaculture, factory aquaculture, or industrial fish farming) has the advantages of high production efficiency and small land occupation. It is a high-density, high-yield, high investment, and cost-effective aquaculture method. The recirculating aquaculture system is in line with the “Blue Granary” strategy, effectively reducing water pollution while ensuring food security. Therefore, in recent years, recirculating aquaculture in China has developed rapidly. In this context to achieve intelligent regulation of the inflow velocity of industrial recirculating aquaculture, this article firstly summarizes the three main factors that affect the inflow velocity from previous research: The flow field velocity of the aquaculture pool, the discharge velocity of the bait (residual bait), and the velocity of temperature regulation. With the improvement of computer software and hardware, computational fluid dynamics (CFD) is gradually being applied in various fields. CFD provides cheap tools for simulation, design, and optimization, as well as tools for analyzing three-dimensional complex flows. In complex cases, measurements are often difficult, even impossible, and CFD can easily provide detailed information on all flow fields. Compared with conventional experiments, CFD has the advantages of no restrictions on parameters, lower cost, and no interference in the flow field. This method can be used in aquaculture to solve the problems of temperature control effects, solid particle emission efficiency, and flow zone division that cannot be directly measured in actual production under different flow rates. At present, there are few studies reporting CFD numerical simulation of multiphase flow in aquaculture. Existing research focuses on the impact of the inlet and outlet structure and the shape of aquaculture ponds on the flow field, and the effect

① Corresponding author: TIAN Yunchen, E-mail: tianyunchen@tjau.edu.cn

of sewage collection. There are few reports on the use of numerical simulation methods to design the regulation scheme of inlet flow velocity. Because of the advantages of CFD, we chose it for simulation. Secondly, the specific model used in the numerical simulation was determined through experimental verification, research discussion, and other methods. Based on this, grid independence verification was conducted, indicating that the simulation results under the number of grids in the text are not affected by the number of grids, and the simulation results are reliable. Thereafter, based on the above research, and taking *Scophthalmus maximus* as an example, the effects of different inlet flow rates on the flow field, sewage discharge, and water temperature regulation in aquaculture ponds were simulated. The results showed that the inlet flow rate significantly affects these three factors. Therefore, the inlet flow rate can be adjusted according to production needs. Based on the simulation results, a set of inlet flow velocity control schemes were proposed: For the feeding stage, low flow velocity can be used to reduce feed costs (inlet flow velocity = 0.2 m/s); after eating, the feed can be quickly discharged at a high flow rate for a short period of time (inlet flow velocity = 1.2 m/s for 20 s); at abnormal water temperature, different flow rates and times can be used to adjust the water temperature in the breeding pool (water inlet temperature = 15 °C; an inlet flow velocity of 1.2 m/s can be used to inject water for 230 s, reducing the water temperature in the breeding pool from 22 °C to 18 °C). Numerical simulation experiments can be designed based on this method for different aquaculture environments and organisms to determine the inflow velocity control scheme. Unlike traditional methods, the numerical simulation method proposed in this study for regulating the inflow velocity of recirculating aquaculture systems can be used to determine the inflow velocity control scheme at a lower cost. The method can directly measure the discharge of particulate matter, the overall water temperature, and the flow field in aquaculture ponds. This method is safer than the method of indirectly measuring water quality to determine the inflow velocity control scheme. In terms of regulation time, traditional methods are only accurate to the hour in regulating the inlet flow rate, whereas this method is accurate to the second, which makes it more reliable to determine the regulation of the inlet flow rate. Therefore, from the perspectives of cost, safety, and accuracy, it is better to use numerical simulation methods to regulate the inflow velocity of recirculating aquaculture systems. In actual production, the method described in this study can be used to determine the inflow velocity control scheme, which can be combined with the control system to achieve automatic control, reduce breeding costs, and increase breeding success.

Key words Discrete phase model; Particle distribution; Flow field characteristics; Water temperature regulation; Round aquaculture pond