

考虑多因素的多网箱水动力分析

刘爽¹ 曹祖伟¹ 吕超²

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学经济管理学院, 上海 201306)

摘要: 为揭示深远海网箱养殖系统中多因素耦合作用下水动力特性, 基于计算流体力学(CFD)方法, 建立了考虑网衣结构、鱼体阻力及泥沙颗粒作用的多孔介质模型, 开展了单网箱、双网箱及3×3多网箱阵列的流场数值模拟研究。结果表明, 网衣主导流场分布, 鱼体强化尾流衰减, 泥沙调控尾流恢复过程。单网箱条件下流场呈“上游减速-内部低速-下游尾流”的典型结构, 网衣为主导因素, 使内部流速降低10%~18%; 鱼体通过阻塞效应增强流速衰减并延长尾流恢复距离至约6*D*; 泥沙颗粒通过颗粒-流体动量交换调制尾流区湍流结构, 在增强整体衰减的同时诱导局部再加速现象。双网箱系统中存在明显尾流遮蔽效应, 且网箱间距对尾流干扰具有显著影响, 当间距由1.5*D*增大至3*D*时, 尾流长度由40~50 m缩短至20~25 m。多网箱阵列中尾流叠加效应进一步增强, 交叉排列可使下游流速提高6%~10%, 改善流场均匀性; 当网箱间距不小于2.5*D*时, 尾流干扰明显减弱, 阵列流场趋于稳定, 水体交换能力得到有效改善。在多因素耦合作用下, 阵列流速衰减率为18%~24%, 为深远海网箱布局优化、水体交换能力提升及养殖环境调控提供理论依据与技术参考。

关键词: 网箱养殖; 水动力特性; 多孔介质模型; 多因素耦合 CFD 数值模拟; 网箱阵列布局

中图分类号: S967.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)20-0284-13 **OSID:** 

Multifactor Hydrodynamic Analysis of Multiple Fish Cages

Liu Shuang¹ Cao Zuwei¹ Lü Chao²

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. College of Economics and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming to investigate the hydrodynamic characteristics of offshore aquaculture cage systems under multi-factor coupling, a computational fluid dynamics (CFD) model was developed incorporating net structure, fish-induced resistance, and sediment particle effects by using a porous media approach. Simulations were performed for single, double, and 3×3 cage array configurations. Results showed that the single-cage flow field exhibited a typical pattern of upstream deceleration, internal low velocity, and downstream wake. The net structure dominated the flow, reducing internal velocity by 10%~18%. Fish further increased flow resistance, enhanced velocity attenuation, and extended the wake recovery distance to about 6*D*. Sediment particles modified the wake through particle-fluid momentum exchange, enhancing turbulence and inducing local re-acceleration. In double-cage systems, while increasing spacing from 1.5*D* to 3*D*, shortened the wake length from 40~50 m to 20~25 m. In cage arrays, wake superposition intensified, whereas staggered arrangements improved flow uniformity and increased downstream velocity by 6%~10%, with a minimum inter-cage clearance of 2.5*D*, the wake interference effect was rendered negligible, the surrounding flow field attained a quasi-equilibrium configuration, and the mass transfer between the internal and external water bodies was significantly facilitated. Overall, netting governed flow distribution, fish enhanced attenuation, and sediment regulated wake recovery. The research result can provide a quantitative framework for optimizing cage layout and hydrodynamic conditions in offshore aquaculture.

Key words: cage aquaculture; hydrodynamic characteristics; porous media model; multi-factor coupled CFD numerical simulation; cage array layout

收稿日期: 2026-04-02 修回日期: 2026-04-27

基金项目: 农业农村部财政项目(D8021230163)

作者简介: 刘爽(1977—), 女, 讲师, 博士, 主要从事渔业装备力学分析与渔船安全工程研究, E-mail: s-liu@shou.edu.cn

通信作者: 吕超(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事渔业工程与管理研究, E-mail: clv@shou.edu.cn

0 引言

海洋渔业是海洋经济的重要支柱,《中央一号文件》(2017、2018、2019、2023)强调发展集约化海水养殖,设施安全对行业可持续发展具有重要意义^[1];近海空间受限^[2]促使网箱向深远海发展,但开敞海域及复杂海况对结构安全提出更高要求^[3];网衣不仅维持养殖空间^[4],还会显著改变周围流场,影响溶解氧输运及污染物扩散^[5-6];随着养殖规模扩大,环境荷载不断增加,其水动力特性亟需深入研究^[7-8];因此,优化网箱水动力环境对提升养殖效率、改善水质及抑制污染具有重要意义^[9]。

网箱作为多孔柔性结构,会显著改变周围流场分布。Fredriksson 等^[10]指出网箱内部流速较外部降低约 10%;Patursson^[11]发现网箱内部流速可下降 30%~60%,且受网衣密度与速度影响;Johansson 等^[12]表明尾流区流速衰减可达 33%~64%。

针对深水抗风浪网箱尺度大导致直接精细离散计算成本过高的问题,众学者提出了多种等效建模方法。Lee 等^[13]对网目单元进行合并简化,提高了计算效率;Fredriksson 等^[10]采用等效结构模型替代网衣,实现了计算精度与效率的平衡。此外,生物附着会引起网目堵塞并增加水动力阻力,从而改变网箱周围流场结构。Patursson 等^[14]通过试验研究发现,生物污损可导致尾流区流速显著降低并增强流场非均匀性;Zhan 等^[15]研究表明,尾流区流速衰减幅度可达 10%~30%。

鱼群活动同样会对网箱水动力特性产生影响。Plew 等^[16]通过数值与试验研究指出,鱼群会改变网箱内部流场结构;Johansson 等^[12]基于现场观测发现,鱼群行为会影响流速分布及水体交换过程。在网箱结构响应分析中,有限元方法广泛用于评估网衣的变形与受力特性,同时研究表明非线性波浪下二阶水动力效应对结构受力具有重要影响^[17]。施兴华等^[18]基于 Morison 方程对其进行了改进。

随着研究的深入,多网箱系统水动力问题逐渐受到关注。Patursson 等^[14]通过物理试验分析了网箱间距对尾流叠加的影响;Patursson 等^[19]结合数值模拟与实测数据指出,小间距条件下尾流干扰更为显著;Tsukrov 等^[20]基于多孔介质模型研究了网箱不同布置方式对流场均匀性的影响;Bi 等^[8]利用 RNG $k-\varepsilon$ 模型揭示了尾流相互作用对湍动能分布的影响;Zhao 等^[21]指出多网箱系统受力具有非线性叠加特征;Bortoletti 等^[22]基于 CFD 方法分析了网箱间距与排列方式对流场结构的影响,文献[23-24]进一步考虑波流耦合作用及流固耦合效应。近年

来,研究逐渐向多因素耦合方向发展,将网衣结构、鱼群活动及颗粒输运纳入统一分析框架,对多网箱系统水动力特性进行了综合评估^[25]。

针对现有研究对鱼群与泥沙颗粒耦合作用及多网箱阵列流场演化关注不足的问题,本文以大黄鱼养殖网箱为对象,基于 CFD 方法建立考虑网衣、鱼体阻力与泥沙颗粒的多孔介质模型,分析单、双及多网箱阵列在不同间距、排列方式及多因素耦合下流场与尾流演化规律,以期为深远海网箱布局优化及养殖环境调控提供理论依据。

1 数学模型

1.1 基本方程

Realizable $k-\varepsilon$ 模型是一种具有广泛适用性的湍流模型,在涉及强压力梯度流动中表现出优越的计算能力。在流经和绕过网箱网衣的流动过程中,由于网衣阻挡效应,网箱内外会产生显著的压力梯度。因此,选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[26-27]作为网箱水动力分析的最佳方法。

$k-\varepsilon$ 模型质量守恒方程和动量方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_{i,j} \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $P = p + \frac{2}{3} \rho k$ (3)

- 式中 t ——时间, s
 μ ——流体动力黏度, Pa·s
 ρ ——密度, kg/m³
 μ_t ——湍流黏度, Pa·s
 p ——静压, Pa
 k ——湍流动能, m²/s²
 u_i, u_j ——流体平均速度分量, m/s
 g_i ——重力加速度分量, m/s²
 $S_{i,j}$ ——动量方程源项, N/m³, $i, j = 1, 2, 3$
(对应 x, y 方向)
 P ——修正压力, Pa
 x_i, x_j ——空间坐标分量

当计算区域处于多孔介质模型之外时, $S_i = 0$;而在多孔介质内部, 计算式为

$$S_i = - \left(D_{ij} \mu u + C_{ij} \frac{1}{2} \rho |u| u \right) \tag{4}$$

其中

$$\mathbf{D}_{ij} = \begin{bmatrix} D_n & 0 & 0 \\ 0 & D_t & 0 \\ 0 & 0 & D_t \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_{ij} = \begin{bmatrix} C_n & 0 & 0 \\ 0 & C_t & 0 \\ 0 & 0 & C_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{D}_{ij}$ 、 $\mathbf{C}_{ij}$ ——由多孔介质阻力系数构成的材料矩阵

D_n ——法向黏性阻力系数

D_t ——切向黏性阻力系数

C_n ——法向惯性阻力系数

C_t ——切向惯性阻力系数

u ——流体速度, m/s

1.2 多孔介质模型

多孔介质模型^[28-29]描述流体在多孔介质区域内的运动,通过经验确定的流动阻力,流体穿过多孔介质所受到的流体动力作用力表达式为

$$F = S_i \lambda A \quad (6)$$

式中 λ ——多孔介质的厚度, m

A ——多孔介质的截面积, m²

F —— i 方向流体作用力, N

将式(4)代入式(6),可得计算平面网阻力 F_d 和升力 F_l 。其中,阻力 F_d 平行于流动方向,而升力 F_l 垂直于流动方向,计算式为

$$F_d = \left(D_n \mu u + C_n \frac{1}{2} \rho |u| u \right) \lambda A \quad (7)$$

$$F_l = \left(D_t \mu u + C_t \frac{1}{2} \rho |u| u \right) \lambda A \quad (8)$$

Patursson^[11]基于模型试验数据,利用最小二乘法分析流速与阻力之间的关系,并结合经验公式,当网衣垂直于水流方向时,多孔介质系数关系式为

$$D_n = 1.11 \times 10^7 S_n^3 + 2.26 \times 10^6 S_n^2$$

$$D_t = 3.97 \times 10^5 S_n^2 + 1.33 \times 10^6 S_n$$

$$C_n = 70.2 S_n^2 + 13.2 S_n$$

$$C_t = 31.9 S_n^2 + 6.93 S_n \quad (9)$$

其中

$$S_n = 2R/b$$

式中 D_t ——垂直来流方向黏性阻力系数

C_t ——垂直来流方向惯性阻力系数

S_n ——网衣密度

R ——网线直径, m

b ——目脚长度, m

网衣单元结构如图 1 所示。

将网箱简化为由沿方形周边均匀分布 5 片网衣组成的模型。通过在不同冲角下对各平面网衣模型的多孔介质系数进行设定,实现对单体网箱数值模拟。网箱模型示意图如图 2 所示。

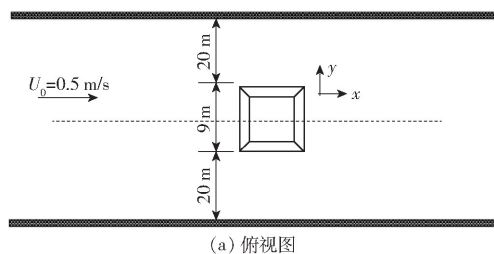
1.3 离散相模型

离散相模型(DPM)^[30-31]适用于解决固相体积分数低于 10% 的两相流问题。DPM 采用拉格朗日

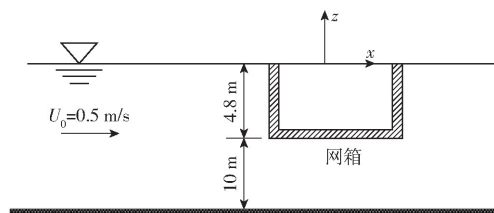


图 1 网衣单元结构

Fig. 1 Structural configuration of netting unit



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图 2 网箱简化示意图

Fig. 2 Simplified schematics of a net pen

法跟踪颗粒、欧拉法求解流体 Navier-Stokes 方程,实现流-固耦合,并通过积分颗粒作用力微分方程求解轨迹。在笛卡尔坐标系下,颗粒的作用力平衡方程形式为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (10)$$

其中

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (11)$$

式中 F_D ——阻力系数 u_p ——颗粒速度, m/s

ρ_p ——骨架密度, kg/m³

d_p ——颗粒直径, m

Re ——颗粒雷诺数

F_x ——其他附加力项, N

g_x ——重力加速度 x 方向分量

C_D ——颗粒阻力系数

假设颗粒间相互作用力可忽略,颗粒运动主要受流体作用力控制。因此,将泥沙视为稀疏离散相,仅考虑其与连续相之间的动量交换。

1.4 边界条件及数值计算方法

数值模拟中,采用进口速度和出口压力作为进出口边界条件。计算域侧壁设置为对称边界,底部为无滑移壁面,顶部为零剪切应力壁面以近似自由水面条件。网衣通过多孔介质模型进行等效处理,并在 Fluent 中通过设定各向异性黏性与惯性阻力系

数实现阻力效应。泥沙颗粒采用离散相模型模拟,颗粒相基于拉格朗日方法跟踪,连续相采用欧拉方法求解,并考虑双向耦合。底部设置为沉降边界以描述颗粒沉积行为,计算域网箱布置及参数设置示意图如图 3 所示。基于有限体积法离散基本方程,对流项采用二阶迎风模式,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。采用稳态求解方法计算,不涉及时间步长设置。当残差低于 10^{-5} 且监测点流速稳定时判定收敛,约在 2 400 步内完成计算。

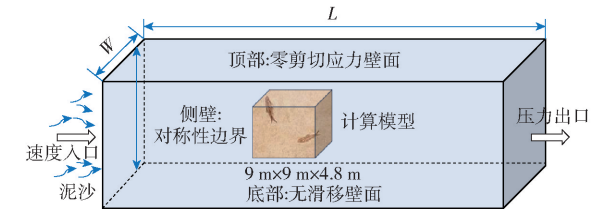


图 3 计算域网箱布置示意图

Fig. 3 Schematic of cage layout in computational domain

1.5 模型验证

为验证数值模型准确性,参照 Patursson 的单片网衣试验结果对网衣模型进行验证,如图 4 所示。文献[32-33]测试了 3 种不同的多孔介质厚度(5、10、50 mm),结果表明,多孔介质的厚度对模拟结果影响不显著。因此,在综合考虑计算精度和网格总数的情况下,选择 50 mm 作为网衣多孔介质的厚度进行数值模拟。网线直径 2 mm,数值水槽长 35 m,宽 4 m,深 4 m,目脚长度 0.028 m。 x 、 y 和 z 轴分别表示流向、横向和垂向,入口为均匀流体,速度 U_0 为 0.5 m/s。

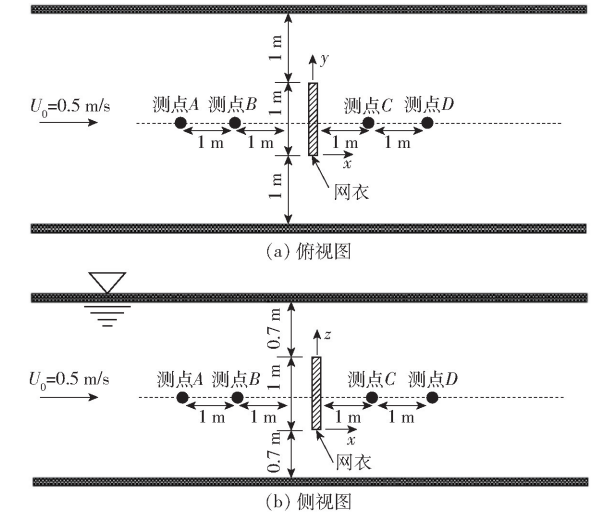


图 4 模型及测点示意图

Fig. 4 Schematics of model and measurement points

提取网衣前后设置的 4 个观测点流速,并据此计算网衣阻力系数 C_D 和升力系数 $C_L = C_l \lambda$ 。模拟值与试验值如表 1 所示。由表 1 可知,模拟值与试验值吻合良好,误差在可接受范围内。采用均匀流体且网衣垂直布置工况,试验旨在核校多孔介质模型对网衣基

本阻力特性的表征能力。该工况可准确标定网衣法向阻力,为复杂工况提供基础参数。多网箱、鱼体及泥沙作用主要改变局部流场分布与动量交换过程,并不改变网衣主导阻力机制。因此,基于该工况获得的参数能够合理支撑多因素耦合条件下数值模拟。

表 1 网衣阻力和升力系数

Tab. 1 Coefficients of drag and lift for mesh nets

参数	试验值	模拟值
阻力系数	0.29	0.30
升力系数	-0.01	-0.01

2 大黄鱼养殖网箱数值模拟

2.1 养殖网箱概述

以宁波近岸某大黄鱼养殖场为原型,建立网箱几何及计算域模型,如图 5 所示。根据现场调查资料,养殖网箱为方形结构,长 9 m、宽 9 m、高 4.8 m,网衣采用无结节聚乙烯材料,网线直径 2 mm,目脚长度 0.028 m。由此计算得网衣密度度 S_n 为 0.143,孔隙率约为 0.82。养殖密度约为 9 尾/ m^3 ,春季单尾大黄鱼平均质量约 0.5 kg。根据现场结构布置,数值水槽设置为长 150 m、宽 30 m、深 30 m。网箱布置于水槽中央,中心距进口边界约 34.5 m。以保证流场充分发展。为便于描述流场分布特征,建立三维直角坐标系,其中 x 方向为来流方向, y 方向为横向, z 方向为垂向,坐标原点 O 设置于网箱中心位置。



图 5 养殖网箱示意图

Fig. 5 Diagram of an aquaculture cage

研究海域位于浙江宁波近岸养殖带,平均水深约 20 ~ 25 m,底质以粉砂质黏泥为主,悬浮泥沙粒径约 60 ~ 100 μm 。实测结果显示,流速 0.3 ~ 0.7 m/s,其中 0.5 m/s 作为流体速度。年平均水温约 20.5 $^{\circ}C$,海水含盐度 27‰ ~ 31‰,水体密度约 1 023 ~ 1 026 kg/m^3 。

2.2 仿真模型建立

采用 ANSYS 中 Design modeler 模块进行网箱结构建模,大黄鱼三维鱼体模型采用 Solidworks 导入,鱼体采用简化建模方法处理。根据养殖密度约为 9 尾/ m^3 及网箱体积,单个网箱内鱼体数量约为 3 500 ~ 4 000 尾。在数值模型中,鱼体均匀分布于网箱内部区域,主要集中于中上层水体,以模拟实际养殖过程鱼群的空间分布特征。鱼体之间保持一定

间距,以避免局部网格重叠并保证计算稳定性。

网格类型采用非结构化四面体网格,将网衣多孔介质区域采用最小网格尺寸划分,再将周围的网格以向内 1.1 倍和向外 1.2 倍的增长比率逐渐增大。考虑研究重点在于网箱尺度流场结构及尾流特征,鱼体被视为固定不动的刚性结构,并采用无滑移壁面边界条件进行处理,大黄鱼表面^[33]划分网格,内部不进行网格划分,以模拟鱼体对流体的阻塞效应。虽然实际养殖过程鱼类具有游动行为,但在宏观尺度流场分析中,主要作用表现为增加流体阻力及改变局部动量分布。因此,将鱼体简化为静止固体是一种常见且合理的近似方法,能够在保证计算效率的同时反映对水动力影响。

为验证网格独立性,对最小单元尺寸为 0.025 (粗)、0.020 (中等)、0.017 (细) m 的 3 组网格进行了仿真计算,如表 2 所示。由表 2 可知,当网格尺寸从中等减小至细网格时,网箱内测点流速变化小于 1.8%,尾流区最大速度差小于 2.3%,计算结果已基本收敛。因此,最终选取最小单元尺寸 0.017 m 网格进行模拟计算,以兼顾计算精度与效率。局部网格划分如图 6 所示。

表 2 3 种网格计算结果

Tab.2 Computational results for three mesh densities		
类型	数量	测点流速/(m·s ⁻¹)
粗网格	1 596 000	0.436 5
中等网格	3 196 000	0.437 1
细网格	5 696 000	0.437 2

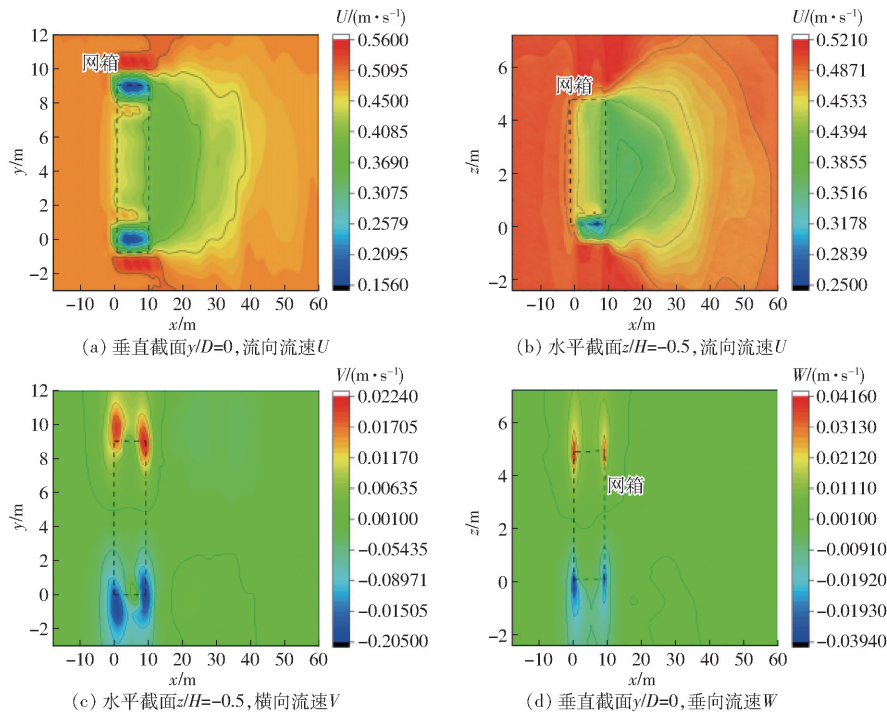


图 7 仅考虑网衣因素下养殖网箱内部及周围流速分布

Fig.7 Flow velocity distribution inside and around aquaculture cages , considering only the mesh factor

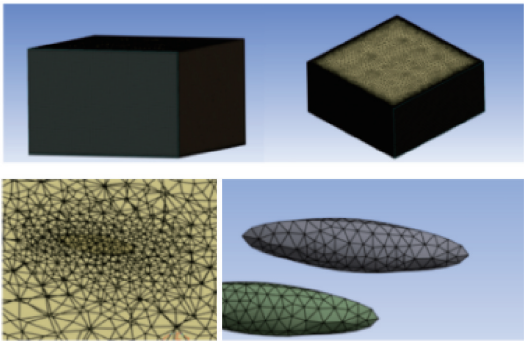


图 6 网箱局部网格示意图

Fig.6 Schematic of a section of cage mesh

入口边界设置为进口速度,流体速度 U_0 设 0.50 m/s,湍流强度取 5%,流体密度取 1 025 kg/m³,动力黏度为 1.08 × 10⁻³ Pa·s,当考虑泥沙效应时,启用 DPM 并采用双向耦合模式。泥沙密度设为 2 650 kg/m³,粒径取 100 μm,注入流量为 5 × 10⁻⁶ kg/s。颗粒注入边界与流体入口一致,颗粒在网箱与底部边界上设置为 Trap 与 Reflect 混合条件,以模拟部分沉积与再悬浮过程。

3 仿真结果分析

3.1 单网箱水动力分析

在单网箱条件下,分别考虑网衣结构、鱼体作用以及泥沙颗粒的综合影响,对网箱内部及周围流场进行分析。不同工况下流速分布如图 7~9 所示,黑色点划线区域表示网箱所在位置。不同方向流速变化如图 10 所示。

由图 7~9 可知,从整体来看,3 种工况均呈“上

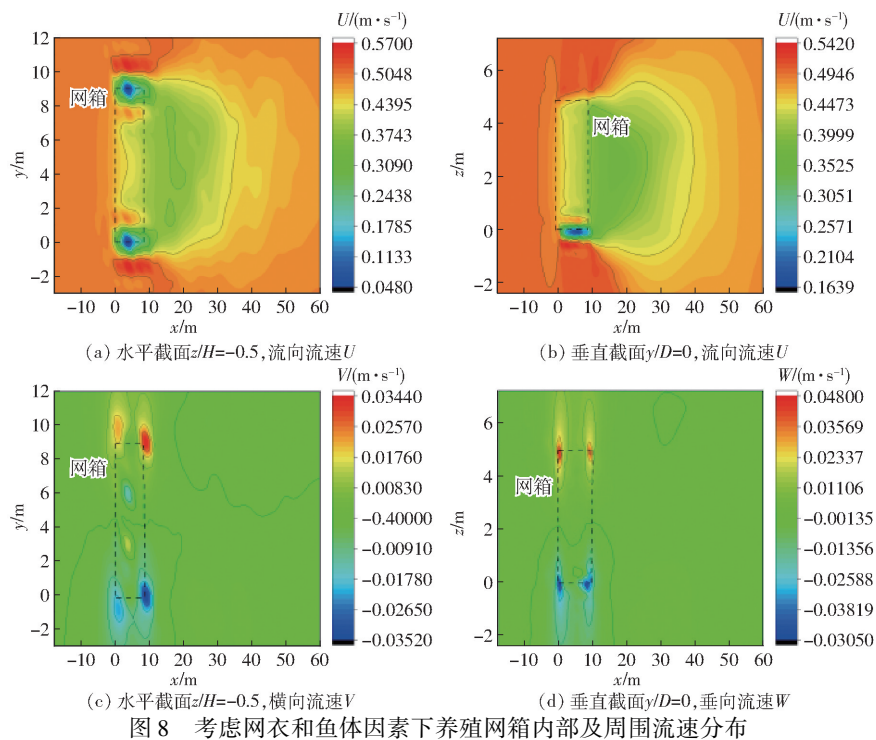


Fig. 8 Flow velocity distribution inside and around aquaculture cages , accounting for mesh and fish body factors

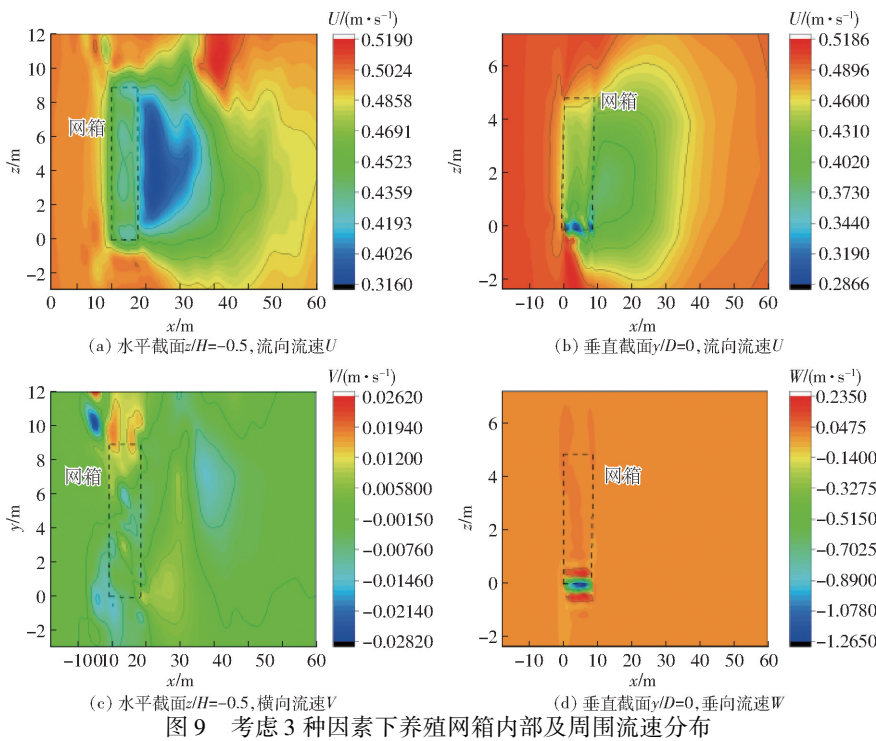


Fig. 9 Flow velocity distribution inside and around aquaculture cages under three different conditions

游减速-内部衰减-下游尾流”的典型分布特征。在仅考虑网衣作用时,水流通过网箱过程受到明显阻挡,网箱上游形成局部低速区,内部流速显著降低,下游形成范围较大的尾流衰减区,并伴随弱回流现象。同时,受网衣结构阻挡作用影响,流体在网箱中心区域发生明显减速,流体动量降低。为满足质量守恒,部分流体绕过网箱主体向两侧流动,使局部流

通截面积减小,从而产生类似“收缩效应”的流动特征。在连续性方程与动量守恒作用下,绕流区域流速相应提高,进而在网箱两侧形成局部加速区。因此,流场整体呈现中心低速区与两侧高速区并存的空间非均匀分布特征。

由图 7a、7b 可知,从流向流速分布来看,水流通过网箱后流速迅速衰减,网箱内部最低流速约为

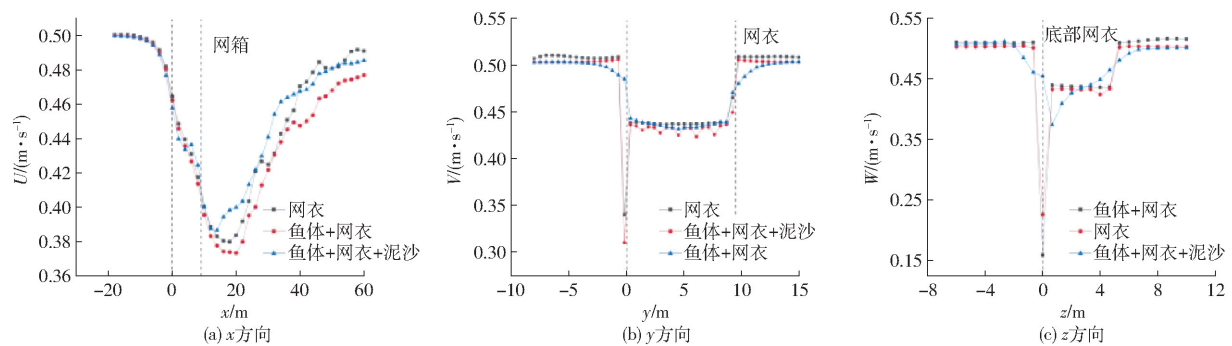


图 10 3 种工况下流向流速沿不同方向的变化曲线

Fig. 10 Variation curves in flow velocity in different directions under three operating conditions

0.41 m/s,约为来流速度的 82%,降低 18%。随后,流速在下游逐渐恢复,并在约 2 倍网箱尺度处开始接近流体水平。

由图 7c、7d 可知,从速度分量来看,网箱周围流动呈现出一定的三维特征。横向速度最大值主要出现在网箱两侧,约为流体速度的 4.48%;垂向速度最大值出现在网箱下方区域,约为来流速度的 8.2%。说明网衣不仅削弱了主流方向流速,同时增强了横向与垂向流动,使局部流场结构更加复杂。沿横向方向,流速呈现“中心低、两侧高”的分布特征,中心区域约为 0.44 m/s,约为 88% U_0 ,降低 12%,两侧加速至约 0.51 m/s,约为 102% U_0 ;沿垂向方向,流速由底部向顶部逐渐增大,底部最低约为 0.16 m/s,约为 32% U_0 ,表明底部区域水体交换能力较弱。

由图 8 可知,同时考虑总网衣和鱼体作用后,整体流场结构与仅考虑网衣时基本一致,但流速衰减程度明显增强。鱼体作为附加阻力源,使水流通过网箱时产生更大的动量损失,导致网箱内部及下游流速进一步降低。横向与垂向速度分别提高至约 7% U_0 和 10% U_0 ,表明鱼体的存在增强了局部流动扰动。由图 10 可知,网箱内部流速为 0.41 ~ 0.42 m/s,为(82% ~ 84%) U_0 ,尾流区流速衰减幅度约为 16%。与仅考虑网衣相比,尾流恢复距离明显延长,在约 6 倍网箱特征尺度处流速仍未完全恢复,说明鱼体会增强尾流效应并延缓流动恢复过程。

由图 9 可知,进一步考虑泥沙颗粒作用后,流场结构呈现出更加复杂的变化特征。泥沙颗粒通过与流体之间的动量交换,对尾流区流动产生显著影响。一方面,鱼体与网衣的共同作用使网箱内部流速整体降低 12% ~ 15%;另一方面,泥沙颗粒在尾流区产生动量反馈,使局部流速出现一定程度的回升。由图 10 可知,在距 5 ~ 7 倍网箱特征尺度范围内,流速可恢复至流体速度的 98% ~ 99%,明显高于未考虑泥沙时恢复水平。

从机理上分析,尾流区流速回升主要由 3 方面共同作用:①泥沙颗粒在尾流低速区内运动滞后,对流体的阻力减弱,从而在尾流核心区产生局部加速效应。②颗粒在剪切层内引起附加扰动,改变湍流能量的空间分布,使部分能量重新作用于主流方向,促进流速恢复。③颗粒沉降会改变局部密度分布,使上层流体绕流加速,从而进一步增强尾流区的速度回升现象。

表 3 为不同工况下流速特征,网衣结构是决定流场分布的主要因素,鱼体的存在会增加流体阻力并强化流速衰减,而泥沙颗粒则通过动量交换改变尾流恢复过程。在 3 种因素共同作用下,网箱内部平均流速 0.40 ~ 0.42 m/s,流速衰减幅度 16% ~ 20%。因此,在分析网箱水动力特性时,应综合考虑网衣、鱼体及泥沙耦合作用,以更准确地反映实际养殖环境中流场特征。

表 3 不同工况下流速特征			
Tab.3 Flow velocity characteristics under different operating conditions			
工况	内部平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率/%	尾流恢复距离
网衣	0.41 ~ 0.44	12 ~ 18	$\approx 2D$
鱼体 + 网衣	0.41 ~ 0.42	≈ 16	$\approx 6D$
鱼体 + 网衣 + 泥沙	0.40 ~ 0.42	16 ~ 20	(5 ~ 7) D (局部回升)

注: D 表示网箱特征尺度。

Patursson^[11]指出,网衣结构是影响流场分布的主导因素,水流通过网箱后会形成明显的尾流区,并伴随流速衰减及空间非均匀分布特征;同时,流速在网箱内部通常降低 10% ~ 20%,且尾流恢复距离随阻力增强而延长,与本研究所得结果基本吻合,验证了数值模型合理性与可靠性。

本研究揭示了鱼体附加阻力与泥沙颗粒动量交换耦合作用下网箱水动力特征,即鱼体强化尾流效应,而泥沙颗粒促进尾流后段流速恢复,这一多因素耦合机制在现有单因素研究中较少涉及。

3.2 双网箱水力分析

为系统分析双网箱系统的流场结构及其影响机制,在入口流速为 0.5 m/s 条件下,综合考虑网衣阻力、鱼体阻塞效应及泥沙颗粒动量交换作用,对 4 种不同网箱间距条件下流场分布及尾流演化规律进行研究。以网箱特征尺度 D 取 9 m 为基准,选取 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$ 和 $3.0D$ 4 种间距工况。

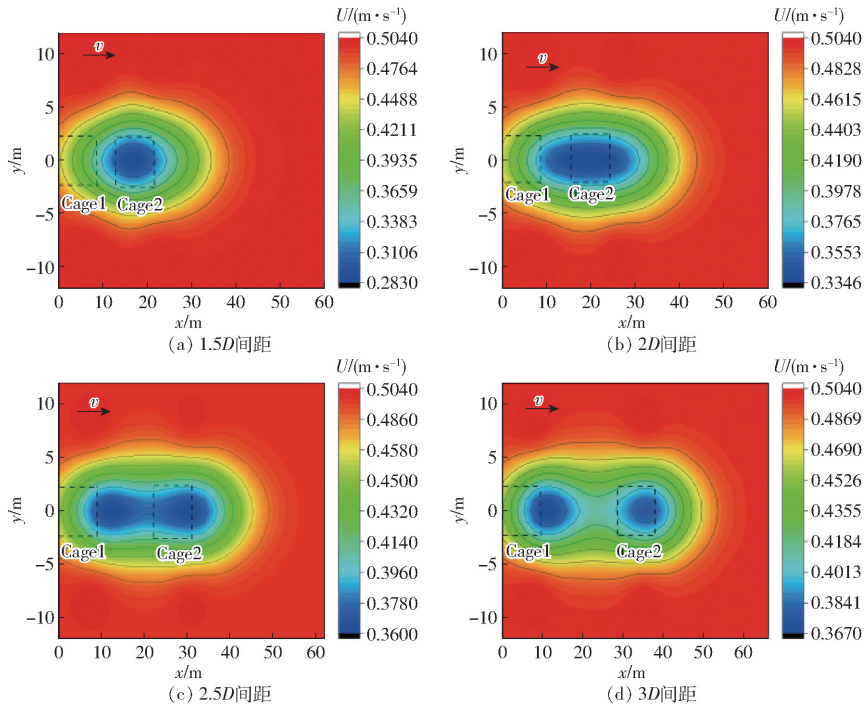


图 11 不同间距下双网箱内部及周围流速分布

Fig. 11 Flow velocity distribution inside and around a double cage at different spacings

在 $1.5D$ 间距条件下,尾流干扰最为显著。上游网箱尾流尚未恢复即进入下游网箱区域,最低流速约为 0.35 m/s,约 70% U_0 ,尾流长度为 40 ~ 50 m。下游网箱内部平均流速降至 0.39 ~ 0.41 m/s,较入口流速降低 18% ~ 24%,表明水体交换能力明显受限。当间距增大至 $2D$ 时,上游尾流在进入下游网箱前已部分恢复,尾流最低流速提高至 0.37 ~ 0.38 m/s,下游网箱内部流速提升至 0.41 ~ 0.43 m/s,尾流恢复距离缩短至 30 ~ 35 m,流场结构有所改善。在 $2.5D$ 间距条件下,尾流叠加效应显著减弱,上游网箱尾流基本恢复,下游网箱内部流速提高至 0.43 ~ 0.45 m/s,约 (86% ~ 90%) U_0 ,尾流长度缩短至 25 ~ 30 m,流场趋于稳定。当间距进一步增大至 $3D$ 时,上游尾流在到达下游网箱前基本完全恢复,流速恢复至 0.47 ~ 0.49 m/s,为 (94% ~ 98%) U_0 。此时下游网箱内部流速接近上游水平 0.45 ~ 0.47 m/s,尾流恢复距离为 20 ~ 25 m,尾流干扰基本消失,流场分布最为均匀。

综合来看,随着网箱间距由 $1.5D$ 增大至 $3D$,下游网箱内部平均流速提高 10% ~ 12%,尾流恢复距

3.2.1 不同间距下尾流干扰特性

不同间距条件下流速云图如图 11 所示,黑色点划线为网箱区域,截面为垂直截面, $y/D = 0$,中心线流速变化曲线见图 12。由图 11、12 可知,双网箱系统在来流作用下形成典型的“减速区—网箱内部低速区—尾流区”3 段式结构。当间距较小时,上游网箱尾流直接作用于下游网箱,形成显著的尾流叠加效应。

离由约 40 ~ 50 m 缩短至 20 ~ 25 m 左右,说明合理增大网箱间距可有效减弱尾流干扰。

3.2.2 双网箱下 3 因素耦合作用影响

为进一步明确各物理因素在双网箱系统中作用机制,在统一网箱间距,即 2.5 倍网箱特征尺度下,对“网衣”,“网衣 + 鱼体”,及“网衣 + 鱼体 + 泥沙”3 种工况进行分析,从而分离不同因素对流速衰减及尾流演化的贡献,揭示多因素耦合作用下水动力响应特征,结果如图 13 所示。

由图 13a、13b 可知,在仅考虑网衣作用时,上游与下游网箱内部平均流速分别约为 0.44 m/s 和 0.41 m/s,流速衰减率为 12% ~ 18%,由图 13c 可知,尾流恢复距离约为 $4D$ 。当考虑鱼体作用后,由于鱼体阻塞效应增加流体阻力,上游网箱流速降低至约 0.42 m/s,下游降低至约 0.39 m/s,流速衰减率提高至约 16%,尾流恢复距离延长至约 $5D$ 。

进一步引入泥沙颗粒后,使流速衰减率增加至约 18%,尾流恢复距离延长至约 $5.5D$ 。同时,局部区域出现一定程度再加速现象,表明泥沙对尾流恢复过程具有双重作用。由表 4 可知,网衣结构是主

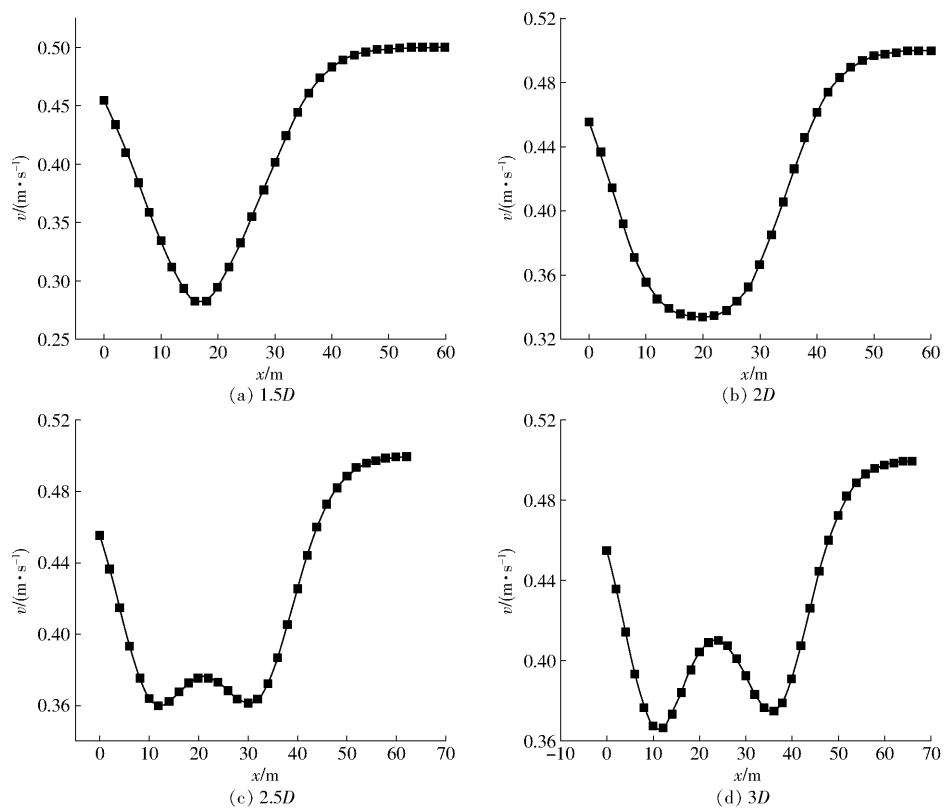


图 12 不同间距中心线流向流速衰减曲线

Fig. 12 Centerline flow velocity decay curves for different spacings

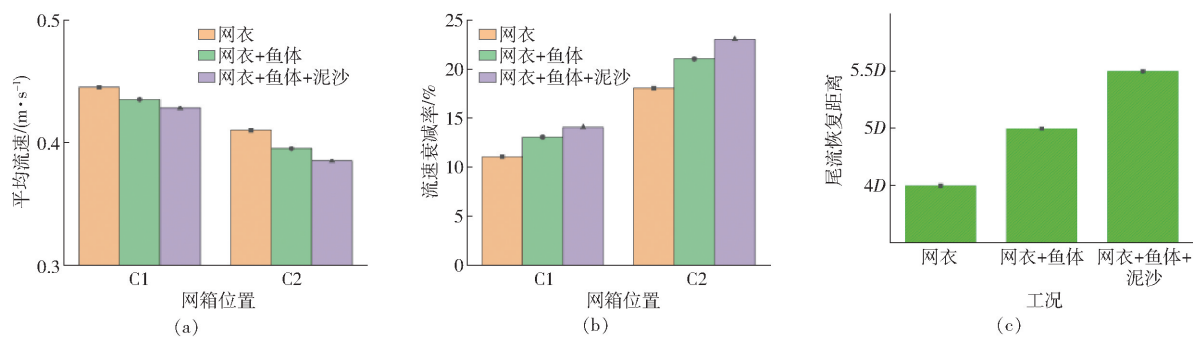


图 13 不同因素作用下尾流演化特性

Fig. 13 Wake evolution characteristics under different conditions

表 4 不同因素下双网箱水动力特征

Tab. 4 Hydrodynamic characteristics of twin-net cages under varying influencing factors

工况	上游流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	下游流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率/ %	尾流长度
鱼体	0.44	0.41	12	4D
鱼体 + 网衣	0.42	0.39	16	5D
鱼体 + 网衣 + 泥沙	0.41	0.38	18	5.5D

导因素,鱼体通过增加阻力强化尾流干扰,而泥沙颗粒主要通过改变湍流结构影响尾流恢复过程。

研究结果在总体规律上与文献[16]保持一致,即网衣结构主导流场分布,网箱间距显著影响尾流叠加效应;当间距较小时尾流干扰强、下游流速降低明显,而随着间距增大,尾流逐渐恢复、流场趋于均匀。然而,相较于传统研究多侧重“网衣单因素”或

“间距效应”的分析框架,本研究在综合考虑多因素耦合作用基础上,进一步通过对不同工况分析,明确区分了网衣、鱼体及泥沙对流场结构的差异化影响机制。

3.3 多网箱水动力分析

为研究多网箱系统中尾流叠加及阵列效应,在入口流速为 0.5 m/s 条件下,建立 3 × 3 网箱阵列模型,网箱阵列布局如图 14 所示,系统分析网箱间距、排列方式及多因素耦合作用对流场结构的影响。

3.3.1 网箱间距与尾流演化特征

不同间距条件下多网箱阵列流场分布如图 15 所示,黑色点划线为网箱区域,截面为垂直截面, $y/D=0$ 。由图 15 可知,各工况下均存在明显尾流结构,水流通过网箱后由于网衣阻力作用产生动量

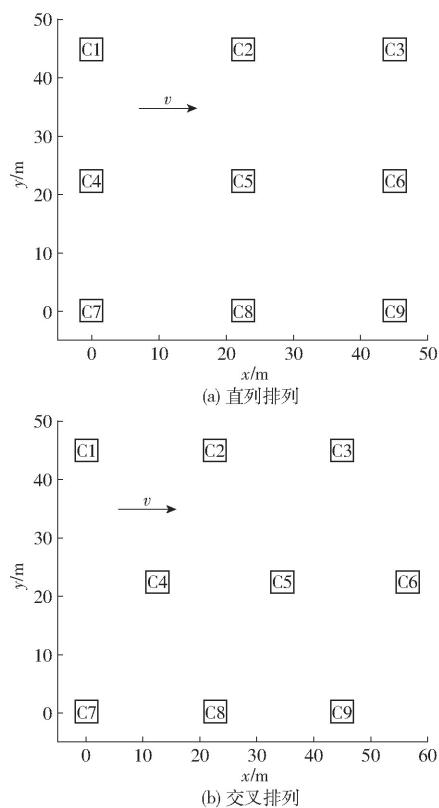


图 14 网箱阵列布局

Fig. 14 Layout of cage array

损失,在下游形成低速区;随着网箱间距增加,尾流范围逐渐减小,流速恢复加快,流场均匀性明显提升。

在 1.5*D* 间距条件下,尾流叠加效应最为显著,最低流速约为 0.35 m/s,约 70% *U*₀,尾流长度 40 ~ 50 m,下游网箱内部平均流速降至 0.30 ~ 0.36 m/s,

表明小间距条件下水体交换能力显著受限。当间距增加至 2*D* 时,尾流开始部分恢复,最低流速提高至 0.39 m/s,约 78% *U*₀,内部流速提升至 0.41 ~ 0.43 m/s,尾流长度缩至 30 ~ 40 m,流场结构有所改善。在 2.5*D* 间距条件下,尾流叠加效应明显减弱,最低流速约为 0.398 m/s,约 80% *U*₀,内部流速提高至 0.43 ~ 0.45 m/s,尾流长度缩短至 25 ~ 30 m,流场趋于稳定。当间距增大至 3*D* 时,上游尾流基本恢复,最低流速提高至 0.425 m/s,约 85% *U*₀,内部流速达到 0.45 ~ 0.47 m/s,尾流长度缩短至 20 ~ 25 m,整体流场最为均匀。

尾流中心线变化规律如图 16 所示,流速在 15 ~ 20 m 处达到最小值(约 0.36 m/s),随后逐渐恢复,在 60 m 处恢复至 (92% ~ 96%) *U*₀。尾流恢复过程可用指数函数描述,为

$$U/U_0 = 1 - 0.28e^{-0.045X}$$

式中 *X*——下游距离

表明该模型能够较好反映尾流衰减规律。综上,网箱间距是控制多网箱流场结构的关键参数,当间距达到 2.5*D* 及以上时,尾流干扰明显减弱,流场趋于稳定。

不同排列方式流场分布如图 17 所示,黑色点划线为网箱区域,截面为垂直截面,*y/D* = 0。在列线排列条件下,上游网箱尾流沿主流方向传播,并在下游网箱处发生明显叠加,形成连续条带状低速区,第 2 排网箱最低流速为 0.36 ~ 0.38 m/s,为 (72% ~ 76%) *U*₀。

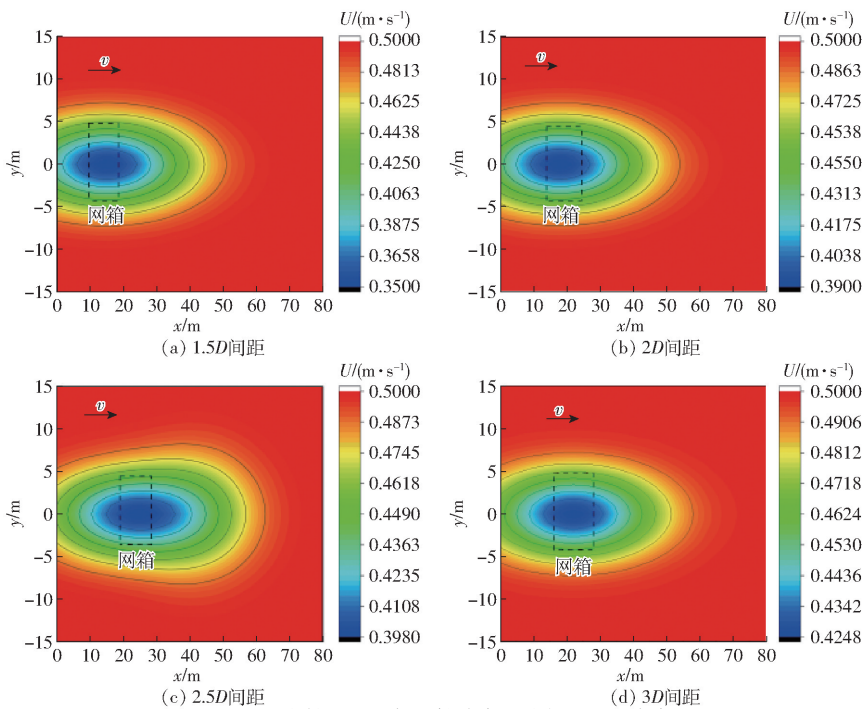


图 15 不同间距下多网箱内部及周围流速分布

Fig. 15 Flow velocity distribution inside and around multiple cages at different spacings

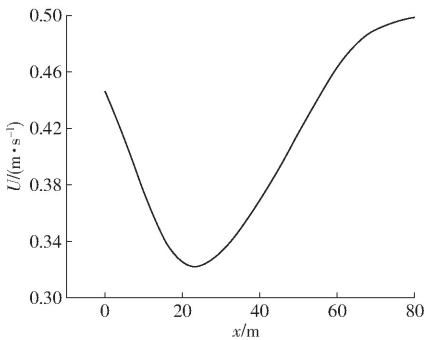


图 16 中心线衰减曲线

Fig. 16 Centerline attenuation curve

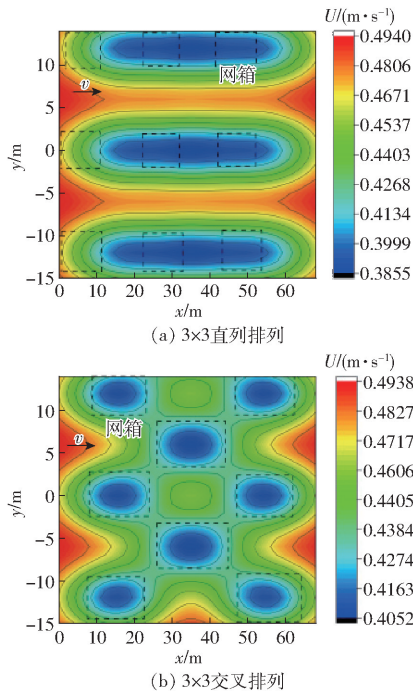


图 17 不同排列方式流场速度分布

Fig. 17 Flow velocity distribution of flow fields for different arrangements

相比之下,交叉排列通过横向错位,使尾流绕过下游网箱中心区域并向两侧扩散,从而削弱尾流叠加效应,使下游流速提高 6% ~ 10%。第 2 排网箱最低流速提高至 0.39 ~ 0.41 m/s,为 (78% ~ 82%) U_0 ,流场分布更加均匀。

3.3.2 多网箱下 3 因素耦合作用

为进一步明确不同物理因素在阵列系统中作用

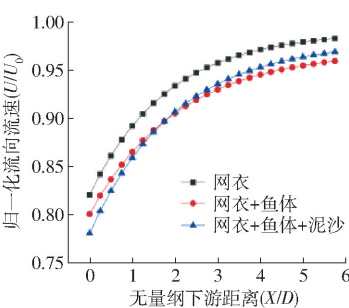
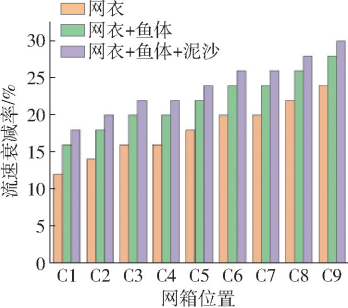
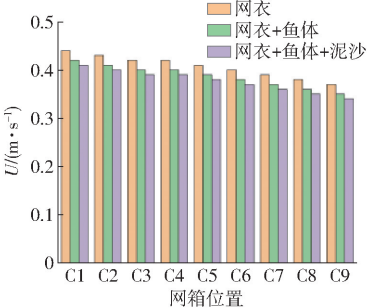


图 18 不同因素下流速

Fig. 18 Flow velocity under different condition

差异,在统一间距与排列条件下,即 2.5D 和直列排列条件下,对“网衣”,“网衣 + 鱼体”及“网衣 + 鱼体 + 泥沙”3 种工况进行分析,从而分析各因素对流速衰减及尾流恢复过程的贡献,进一步揭示多因素耦合作用下阵列流场演化机制,结果如图 18 所示。

由图 18 可知,在仅考虑网衣作用时,阵列内部平均流速约为 0.41 m/s,约 82% U_0 ;引入鱼体后,由于阻塞效应增强流体阻力,平均流速降至约 0.39 m/s;进一步考虑泥沙颗粒作用后,流速降至约 0.38 m/s。对应流速衰减率由约 18% 增至 22% ~ 24%,说明鱼体与泥沙均会强化流体动能损失。

由图 18 可知,网衣结构仍是决定流场分布的主导因素,而鱼体通过增加流动阻力强化尾流效应,泥沙颗粒则通过改变湍流结构调控尾流恢复过程。在 3 种因素共同作用下,阵列内部平均流速为 0.38 ~ 0.41 m/s,流速衰减 18% ~ 24%。

研究结果表明,随着间距由 1.5D 增大至 3D,尾流长度由 40 ~ 50 m 缩短至 20 ~ 25 m,下游网箱流速明显提高;交叉排列相较直列排列可有效减弱尾流叠加效应并改善流场均匀性,与文献[20]研究结论一致。

4 结论

(1) 基于 CFD 数值模拟方法,构建了考虑网衣结构、鱼体阻力及泥沙颗粒作用的多因素耦合模型,系统研究了单网箱、双网箱及多网箱阵列条件下的流场结构及尾流演化规律。

(2) 单网箱条件下,流场呈典型的“上游减速-内部低速-下游尾流”结构。网衣结构是影响流场分布的主导因素,网箱内部流速降低 10% ~ 18%。鱼体的引入进一步增强流体阻力,使流速衰减幅度增加至约 16%,并显著延长尾流恢复距离至约 6D;泥沙颗粒通过颗粒-流体动量交换改变尾流区湍流结构,在整体增强流速衰减的同时,在尾流后段产生局部再加速现象,使流速在 (5 ~ 7)D 范围内可恢复至 (98% ~ 99%) U_0 。

(3) 双网箱系统中存在明显的尾流遮蔽效应。上游网箱尾流会显著削弱下游流体条件,使下游网箱内部平均流速降低 5% ~ 8%。网箱间距对尾流干扰具有决定性影响:当间距由 1.5D 增大至 3D 时,下游网箱内部流速提高 10% ~ 12%,尾流恢复距离由约 40 m 缩短至 20 m;当间距达到 2.5D 及以上时,尾流叠加效应明显减弱,流场趋于稳定。

(4) 在多网箱阵列条件下,尾流叠加效应进一步增强,下游网箱流速衰减更加显著。在 1.5D 间距条件下,阵列内部流速最低可降至 0.30 ~ 0.36 m/s;随着间距增加至 3D,流速恢复至 0.45 ~ 0.47 m/s,尾流长度缩短至 20 ~ 25 m。同时,交叉排

列相较直列排列可使下游最低流速提高 6% ~ 10%,有效改善流场均匀性。在本研究条件下,推荐网箱间距不小于 2.5D,并优先采用交错排列方式,以减弱尾流叠加效应,提高养殖区水体交换能力。

(5) 多因素耦合作用下,网衣、鱼体与泥沙对流场的影响具有明显差异。网衣结构决定整体流场分布特征;鱼体通过阻塞效应增强流体动能损失,使阵列内部平均流速由约 0.41 m/s 降低至 0.39 m/s,并延长尾流恢复距离;泥沙颗粒则通过动量交换与湍流再分配作用调控尾流恢复过程,在局部区域诱导再加速现象。三因素共同作用下,阵列流速衰减率达到 18% ~ 24%。

参 考 文 献

- [1] Pauly D, Zeller D. Comments on FAOs state of world fisheries and aquaculture (Sofia 2016) [J]. Marine Policy, 2017, 77: 176 – 181.
 - [2] Wang C M, Ma M Y, Chu Y N, et al. Developments in modeling techniques for reliability design of aquaculture cages: a review [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(1): 103 – 135.
 - [3] Wang B, Liu H J, Lv J L, et al. Numerical analysis of safety and stability of rotatable horizontal aquaculture cages [J]. Ocean Engineering, 2025, 341(1): 122514.
 - [4] Tian Z L, Yang H, Wen H J. Hydrodynamic performance of a submersible net cage integrated with an offshore platform [J]. Frontiers in Marine Science, 2024, 11: 1436992.
 - [5] Fan Z Q, Liang Y H, Zhang Y P. Review of the research on the hydrodynamics of fishing cage nets [J]. Ocean Engineering, 2023, 276: 114192.
 - [6] Ji J, Zhou L L, Liu B, et al. Experimental and numerical study on the flow field of a bottom-supported net cage with double-layer fishing nets [J]. Ocean Engineering, 2025, 319: 120228.
 - [7] Wang Z Y, He W, Li W Q, et al. Offshore submerged aquaculture flow-net interaction simulation: a numerical approach for the hydrodynamic characteristics of nets produced from different materials [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(2): 234 – 251.
 - [8] Bi C W, Zhou Y X, Wang Z. An improved porous-media model for evaluating the impact of fish school on the hydrodynamics of net cage [J]. Ocean Engineering, 2026, 344: 123689.
 - [9] Oppedal F, Dempster T, Stien L H. Environmental drivers of Atlantic salmon behaviour in sea-cages: a review [J]. Aquaculture, 2011, 311(1–4): 1 – 18.
 - [10] Fredriksson D W, Swift M R, Irish J D, et al. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements [J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(2): 117 – 146.
 - [11] Patursson O. Flow through and around fish farming nets [D]. Durham, NH: University of New Hampshire, 2008.
 - [12] Johansson D, Juell J E, Oppedal F, et al. The influence of the pycnocline and cage resistance on current flow, oxygen flux and swimming behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in production cages [J]. Aquaculture, 2007, 265(1–4): 271 – 287.
 - [13] Lee C W, Lee J, Park S. Dynamic behavior and deformation analysis of the fish cage system using mass-spring model [J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(3): 311 – 324.
 - [14] Patursson O, Swift M R, Tsukrov I, et al. Development of a porous media model with application to flow through and around a net panel [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(2–3): 314 – 324.
 - [15] Zhan J M, Jia X P, Li Y S, et al. Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(1): 91 – 101.
 - [16] Plew D R, Stevens C L, Spigel R H, et al. Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 95 – 108.
 - [17] Delizisis P, Konispoliatis D N, Mavrakos S A, et al. Second-order diffraction forces on a vertical cylindrical body using theoretical, numerical formulations and CFD approaches [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2025, 35(2): 159 – 167.
 - [18] 施兴华, 周游, 钱佳麒, 等. 基于水动力性能的网箱网衣网目群化数值模拟方法研究 [J]. 渔业现代化, 2021, 48(3): 74 – 79.
- Shi Xinghua, Zhou You, Qian Jiqi, et al. Numerical simulation method of net grouping for aquaculture cage based on hydrodynamic performance [J]. Fishery Modernization, 2021, 48(3): 74 – 79. (in Chinese)

- [19] Patursson O E, Swift M R, Baldwin K, et al. Modeling flow through and around a net panel using computational fluid dynamics[J]. *Oceans*, 2006, 2006: 1–5.
- [20] Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, et al. Finite element modeling of net panels using a consistent net element[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251–270.
- [21] Zhao Y P, Bi C W, Dong G H, et al. Numerical simulation of the flow around fishing plane nets using the porous media model [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 62: 25–37.
- [22] Bortoletti M, Looke M, Pascoli F, et al. Behaviour and spatial distribution of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in experimental tanks; influence of water flow and husbandry procedures[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2026, 295: 106892.
- [23] Huang C C, Tang H H, Liu J Y. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea[J]. *Aquacultural Engineering*, 2008, 38(2): 105–116.
- [24] Lee C W, Kim Y B, Lee G H, et al. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(14–15): 1521–1532.
- [25] Jiang H, Ji Y, Zhang M. Modeling impact of culture facilities on hydrodynamics and solute transport in marine aquaculture waters of North Yellow Sea[J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(1): 26–35.
- [26] Shaheed R, Mohammadian A, Gildeh H K. A comparison of standard $k-\varepsilon$ and realizable $k-\varepsilon$ turbulence models in curved and confluent channels[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2019, 19(2): 543–568.
- [27] Gao Y, Liu Y, Lu L. Modification of realizable k-epsilon model for tip-leakage flow in an axial compressor rotor[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(3): 505–512.
- [28] 常金强,王培宇,段宏伟,等. 基于 CFD 的棉纤维长度检测装置吸风口结构优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(1): 234–244.
Chang Jinqiang, Wang Peiyu, Duan Hongwei, et al. Optimization and experiment of suction inlet structure of cotton fiber length detection device based on CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(1): 234–244. (in Chinese)
- [29] 施卫东,施亚,高雄发,等. 基于 DEM–CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 176–185.
Shi Weidong, Shi Ya, Gao Xiongfa, et al. Simulation and experiment on flow characteristics of large particles in vortex pump based on DEM–CFD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 176–85. (in Chinese)
- [30] Tanaka T, Kawaguchi T, Tsuji T, et al. Discrete particle modeling and simulation of granular flow-pioneering development of numerical prediction of granular flow and fluid-solid multiphase flow[J]. *Kona Powder and Particle Journal*, 2026(43): 3–21.
- [31] Marzban F, Marzban M, Mohammadzadeh K, et al. Field synergy analysis of conjugate heat transfer in nanofluid-filled wavy microchannel heat sink using DPM and DDPM approach[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025, 150(16): 12895–12916.
- [32] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H. Experimental study on the effects of farmed fish on the hydrodynamic characteristics of the net cage[J]. *Aquaculture*, 2020, 524: 735239.
- [33] 张文传,侯琳,梁砚,等. 高水头长距离鱼道水力特性及结构优化[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(13): 142–152.
Zhang Wenchuan, Hou Lin, Liang Yan, et al. Hydraulic characteristics and structural optimization of high-head long-distance fishway[J]. *Transactions of the CSAE*, 2025, 41(13): 142–152. (in Chinese)