

## 基于多孔介质的蟹塘水草团偏移量流场特性数值模拟

韩华翔<sup>1</sup>, 蓝天傲<sup>1</sup>, 李俊<sup>1,2</sup>, 张俊<sup>1,2</sup>, 胡庆松<sup>1,2</sup>, 陈雷雷<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心, 上海 201306)

**摘要:** 河蟹池塘养殖中水草是关键要素之一, 为了研究水草团种植偏移量与池塘流场的相互影响及作用机理, 基于多孔介质进行了水草团偏移量流场特性的数值模拟研究。以水草团的固体体积分数为线索, 建立一套多孔介质试验装置量化水草阻力, 根据现场测量样本建立水草团数值模型, 并在 Fluent 中通过 5 组偏移量递增的试验, 研究水草团偏移量对池塘流场的影响。研究表明: 偏移量增加能够明显改变流速分布, 由带状逐渐变为斑块状, 促进水体横向混合, 水流均匀性指数在 0.6 左右浮动, 中等偏移量水流均匀性最高; 水草团内部速度和均匀性随偏移量增加而上升, 其主要取决于次列水草团迎流面脱离首列水草团剪切区的面积, 最高偏移量工况的能量利用率可达 0.49, 为最低值的 4.6 倍; 水草团后的垂直涡与边界层分离涡变化趋势相反, 高偏移量将减弱垂直涡的作用范围, 提升边界层分离涡的范围和强度。研究结果有助于理解蟹塘能量循环和物质分布, 并科学指导蟹塘水草种植规划。

**关键词:** 多孔介质; 植被水流; 河蟹养殖; 数值模拟

**中图分类号:** S 954.2

**文献标志码:** A

中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*), 简称河蟹, 是一种优质的水产养殖品种, 人民物质需求的增长提升了对高品质河蟹的需求<sup>[1-2]</sup>, 流水养殖在优化上下水层温度和溶氧分布、池塘物质能量循环等方面具有良好的效果, 有望形成更加适宜高规格河蟹生产的池塘养殖模式<sup>[3]</sup>。水流是影响河蟹发育的核心环境因素, 对河蟹生长、捕食、栖息等起重要作用<sup>[4-5]</sup>。区别于鱼类与虾类养殖池的纯水域环境, 河蟹养殖池塘中大面积种植水草<sup>[6-7]</sup>, 水草以团状整列均匀分布于池塘, 为河蟹提供食物和栖息场所, 有助于调节温度并净化水质<sup>[8]</sup>。水草的存在会改变池塘的水动力组成, 降低流过水草团的流速, 提高水草团间隔的流速, 两者形成复杂的互反馈系统<sup>[9]</sup>。因此深刻理解水草团种植位置与蟹塘水环境的相互作用, 对指导水草种植、改善河蟹生长环境、提高养殖收益等具有重要意义。

蟹塘是典型的含植被水体, 目前植被对水流

影响作用的研究途径主要为水槽实验和数值模拟。HUI 等<sup>[10]</sup>通过改变植被布置间距研究了水槽内柔性植被下游流的水动力特性, 指出植被密度、叶片类型和垂直减阻之间的相互作用对速度剖面研究的意义; 部分学者<sup>[11-12]</sup>以矩形、梅花形等改变植被的水平布置方式, 研究淹没度、植被直径、流速等对流体特性的作用效果。在蟹塘水域中, 植被通常以群落的形式存在, 其小区域形式更加类似于有限植被群。SUKHODOLOVA 等<sup>[13]</sup>等研究了低地河流中淹没植物周围植被混合层的动力学, 并引入了描述混合层扩展和平均流量变化的方程, 对湍流结构、植物形态、生物学特性等内容进行测量评估; CHEN 等<sup>[14]</sup>等以多孔障碍物后面的尾流结构及其对有限块突发性植被附近沉积进行研究, 开发了一个预测多孔斑块速度的模型; ROMINGER 等<sup>[15]</sup>通过调整矩形多孔障碍物的密度研究其内部流动, 发现高流动阻塞冠层有助于染料在前缘扩散; CHENG 等<sup>[16]</sup>通过数

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-11-01

基金项目: 上海市现代农业产业技术体系专项(沪农科产字[2024]第4号); 上海市科技兴农技术创新项目(2022-02-08-00-12-F01096); 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)

作者简介: 韩华翔(1984—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为智慧渔业。E-mail: hxhan@shou.edu.cn

通信作者: 陈雷雷, E-mail: llchen@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>

值模拟研究了植物茎的变形和阻力对周围水动力和环境的影响;SUZUKI等<sup>[17]</sup>实现了一种新的波浪-植被模型,性能和扩展能力良好。蟹塘环境研究需兼顾上述两类研究的特点,在大尺度上应考虑植被布置方式,小尺度上需要分析水草团间水流特性。

综上所述,植被对水流的影响及作用机理前人已经做了大量的研究,但是河蟹养殖池塘中水草种植对水体流场影响的研究相对较少。河蟹养殖池塘中水草种植存在水草团数量多、分布不均匀、测量困难等特点,因此,本文应用数值模拟方法,基于多孔介质模型模拟水草团并进行仿真试验和研究。通过研究,阐明水草团种植偏移量与池塘水体流场之间相互影响及作用机理,并科学指导蟹塘水草的种植规划。

## 1 水草块阻力模型建立

### 1.1 湍流模型及多孔介质模型

本研究选择工程适应性广的 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对水草团水域进行模拟, Realizable  $k-\varepsilon$  模型的湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  的模型方程如下。

湍动能  $k$  方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

耗散率  $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{\delta\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中:  $\mu_t$  为层流黏性系数;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $t$  为时间;  $x_i$  为位移在  $i$  方向的分量;  $G_k$  为湍流动能生成项;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能;  $u_i$  为流体速度在  $i$  方向的分量;  $\sigma_k$  为湍动能的湍流普朗特数, 取 1.0;  $\sigma_\varepsilon$  为湍动能的湍流普朗特数, 取 1.3;  $G_{\delta\varepsilon}$  为湍流扩散率;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为经验常数, 取 1.44、1.92;  $\rho$  为水的密度, 取  $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

水草枝叶形态复杂, 生长密集且空间分布不均匀, 难以直接量化水草的阻水效果, 故本研究采用多孔介质模拟水草。水草团对水流的影响由动量方程中的附加源项体现<sup>[18-19]</sup>。

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{v_i}{x_j} \right) + S_i \quad (4)$$

$$S_i = - \left[ \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_i + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} C_{ij} \rho |v| v_i \right] \quad (5)$$

式中:  $S_i$  为动量方程的附加源项, 定义为水流流经多孔介质域损失量, Pa/m;  $D_{ij}$  为黏性阻力系数矩阵;  $C_{ij}$  为惯性阻力系数矩阵;  $\mu$  为水的动力黏度, 取  $1.01 \times 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$ ;  $v_i$  为水在  $i$  方向上的速度, m/s;  $x_j$  为位移在  $j$  方向的分量;  $f_i$  为单位质量流体所受的体积力在  $i$  方向的分量;  $p$  为流体的压强, Pa。

公式(5)等号右侧的第一项为黏性损失项, 第二项为惯性损失项, 由于水在水草块中的流速较低, 低速流动中黏性力为主导, 惯性阻力影响较小, 对于各向同性的简单多孔介质, 可以将公式(5)简化<sup>[20-21]</sup>。

$$\begin{cases} S = -\frac{\mu}{\alpha} v \\ \nabla p = -S = \frac{\Delta p}{\Delta n} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\nabla p$  为压力梯度;  $\alpha$  为渗透率,  $\text{m}^2$ , 其倒数数值为黏性阻力系数值<sup>[22-23]</sup>;  $\Delta p$  为通过水草产生的降压, Pa;  $\Delta n$  为水草块厚度, m。

故水流通过水草时产生的阻力效应为

$$\Delta p = \frac{\mu v \Delta n}{\alpha} \quad (7)$$

### 1.2 黏性阻力系数试验

#### 1.2.1 装置搭建及试验设计

本研究设计了1个多孔介质试验装置, 尺寸如图1a所示(示意图各区域比例含一定缩放)。该装置使用亚克力管分隔内外流场, 将内部划分为多个连续子区域, AB段与EF段为稳流填充段, 确保流场在此区间内达到稳定的流动状态, CD段为待测域。在管道尾端设计了收口结构, 提高截面流速, 便于进行精确的流速测量。使用祥瑞德 LS300A 便捷式流速仪测量出口处的流速, 2台 LONTROL 压力变送器分别位于BC段和DE段的中间, 用以测量待测域前后的压力, 装置实物如图1b所示, 每组数据经处理后代入公式(7)计算黏性阻力系数。

蟹塘中大量种植典型的冠层型沉水植物伊乐藻 (*Elodea nuttallii*), 底部分布稀疏, 植株上端存在大量分支, 生物量极大, 水草团中心区域分布相对密集且平均, 向外层逐渐减少。

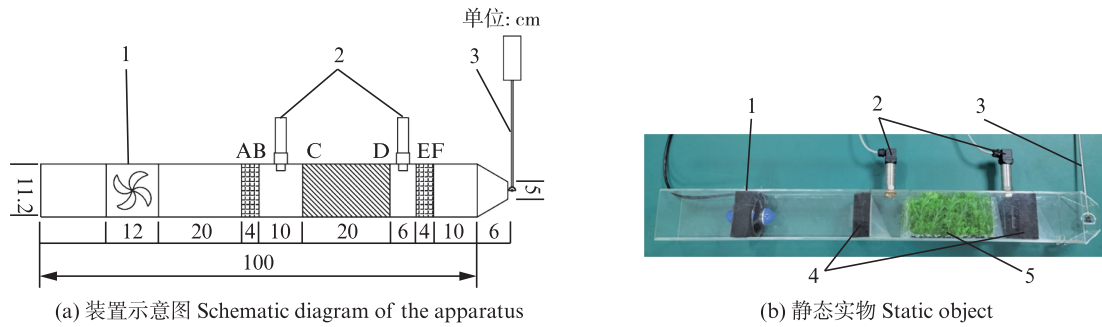


图1 多孔介质试验装置  
1. 螺旋桨; 2. 压力变送器; 3. 流速仪; 4. 海绵; 5. 仿真水草。  
1. Propeller; 2. Pressure sensor; 3. Hydrometric propeller; 4. Sponge; 5. Artificial waterweed.

图1 多孔介质试验装置  
Fig. 1 Porous media experimental devices

本研究选取的圆柱形茎线形轮生叶片仿真水草平均数据如下: 茎干直径 1.1 mm、叶片长 19 mm、宽 2.5 mm、叶片间等效间距 2.7 mm/叶。仿真水草数据与伊乐藻基本相似, 试验准备中, 将仿真水草分别以 1.00、1.25、1.54、2.00、2.86、4.00 cm 的行间距均匀布置于待测域中, 通过调整水草数量改变计算域内的固体体积分数, 进行一系列控制变量的实验。由于池塘面积广阔, 水草对水流的阻碍效果显著, 导致通过水草区域的流速较低。试验水深约 160 mm, 除变送器上端外全部淹没于水中, 通过调整螺旋桨的脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)占空比以控制水流速度, 设置水流速度为 0~0.08 m/s, 待管内水流稳定后, 利用两台压力变送器连续读取数据 8 次, 计算平均值, 将流速仪放置于装置尾端的收口处, 测量流经该截面的流速。结合截面流速与截面面积的关系, 计算水流通过待测域时的平均流速。通过以上实验内容获取水草对水流动力学特性的影响, 为进一步研究水生生态系统中水流与植物相互作用的复杂机制提供科学依据。

### 1.2.2 试验参数计算

水流流经待测域的压降  $\Delta p$  计算公式为

$$\Delta p = p_1 - p_2 - p_0 \quad (8)$$

式中:  $p_1$  为待测域前压强, Pa;  $p_2$  为待测域后压强, Pa;  $p_0$  为初始压强差, Pa。

排水法测量单株水草的体积计算公式为

$$V_1 = \frac{m_w}{\rho n} \quad (9)$$

式中:  $m_w$  为溢出水体质量, kg, 由纪铭 A6-001 型高精度电子秤测量, 精度为 0.01 g;  $n$  为水草株数。

待测域的固体体积分数计算公式为

$$\begin{cases} V_s = \frac{nV_1}{V_f} \\ V_f = A\Delta n \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $V_f$  为待测域体积,  $\text{m}^3$ ;  $A$  为亚克力管内部截面面积,  $\text{m}^2$ 。

待测域水流速度计算公式为

$$v = \frac{v_m A_e}{A} \quad (11)$$

式中:  $v_m$  为管道末端测量的流速,  $\text{m/s}$ ;  $A_e$  为管道末端缩口出的截面面积,  $\text{m}^2$ 。

### 1.2.3 试验数据分析

多孔介质试验共 8 组, 6 组为拟合组, 2 组为验证组, 拟合组在不同固体体积分数下水流流速与压力损失的关系如图 2 所示, 试验数据采集涵盖了从 0.026 8 至 0.104 9 的固体体积分数范围。针对拟合组流速在 0~0.05 m/s 范围内数据采用线性回归方法进行拟合, 设置截距为 0, 由方程回归系数得到图 3 中 6 个数据点, 每组数据  $R^2$  不低于 0.91。

为获取任意固体体积分数与黏性阻力系数的对应关系, 将数据点进行多项式回归, 得到公式(12),  $R^2=0.98$  说明多项式模型能够以高准确度拟合试验数据, 基于多项式拟合曲线可精确获取固体体积分数 0~0.104 9 范围内黏性阻力系数数值。

$$\frac{1}{\alpha} = 4.14 \times 10^8 V_s^2 + 2.19 \times 10^7 V_s \quad (12)$$

式中:  $V_s$  为水草团某区域的固体体积分数;  $\frac{1}{\alpha}$  的数值为水草团在该位置的黏性阻力系数。



为验证数学模型准确性,将公式(12)结果与验证组数据进行 $t$ 检验,数据如图4所示。在95%置信区间下,验证组一的 $t$ 值与临界 $t$ 值之比为0.050,验证组二的 $t$ 值与临界 $t$ 值之比为0.017,表明在统计学上对于试验数据而言,所回归的数学模型有较高的可靠性,可以应用于后续数值模拟。

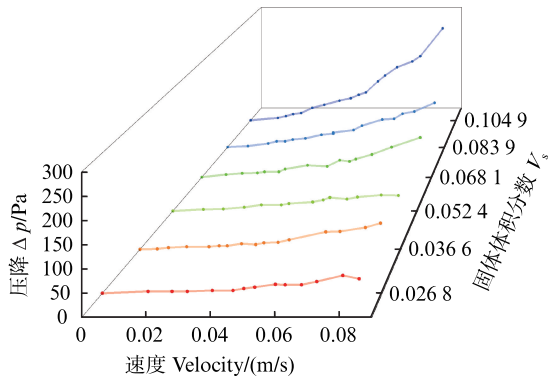


图2 不同固体体积分数的速度压降曲线

Fig. 2 Velocity-pressure drop curve of different solid volume fractions

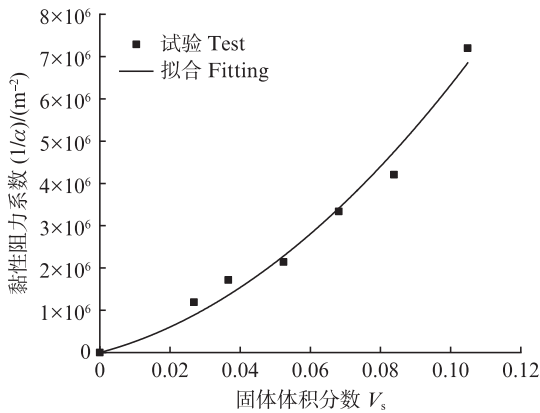


图3 黏性阻力系数拟合曲线

Fig. 3 Fitted viscous drag coefficient curve

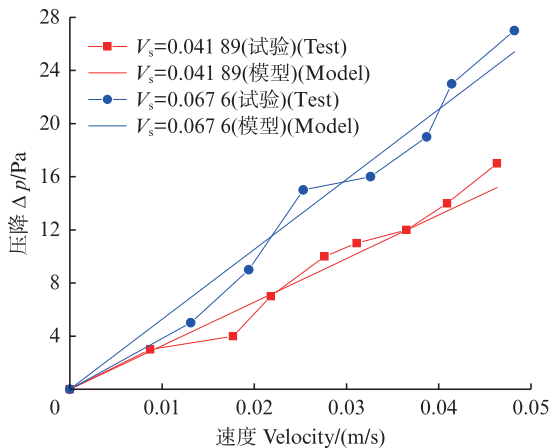


图4 模型验证( $t$ 检验)

Fig. 4 Model validation ( $t$  test)

## 2 数值模拟模型建立

### 2.1 水草团模型建立

水草团形态受生长环境和生长时期的影响极大,本研究以2023年6月上海市崇明区珍品养殖场的水草分布为原型,鸟瞰图如图5所示。该养殖场种植的水草品种主要为伊乐藻,全部由人工种植,图5中每个深色点位都是一个水草团,水草团间距为2.0~5.2 m,取平均值3.8 m,水草团直径为1.4~2.6 m,取平均值1.9 m。水草团均淹没于水下,通过采集测量获取水草团在塘底水平面上的固体体积分数和平均单株水草的纵向分支数,水草团任意位置的固体体积分数可由上述2个参数获得,计算公式参见公式(13)。图6展示了水草团纵向剖面的分布示意。

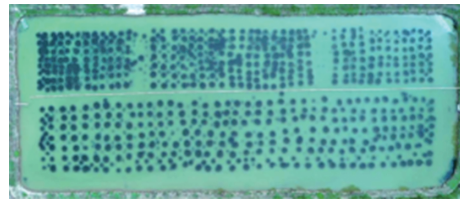


图5 蟹塘鸟瞰图

Fig. 5 Aerial view of the crab pond

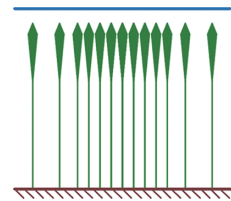


图6 水草团剖面分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the vertical distribution of the waterweed clump

单个水草团固体体积分数的空间分布为

$$V_{ss} = V_{hor} \times n_{ver} \quad (13)$$

式中: $V_{hor}$ 为水草团在塘底水平面上的固体体积分分数; $n_{ver}$ 为平均单株水草的纵向分支数。其中

$$V_{hor} = \begin{cases} 0.0108, & \sqrt{X^2 + Y^2} \leq 0.5 \\ -0.024x + 0.0228, & \sqrt{X^2 + Y^2} > 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

$$n_{ver} = \begin{cases} 1, & 0 \leq Z < 0.60 \\ 1 + 0.17(Z - 0.6), & 0.60 \leq Z < 0.86 \\ 5.42 - \frac{271}{3}(Z - 0.86), & 0.86 \leq Z < 0.92 \\ 0, & 0.92 \leq Z \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$



式中:水草团底部圆心为坐标原点, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 为水草团各位置的空间坐标。

2.2 模型建立及边界条件

蟹塘全尺寸模型过于巨大,因此本研究选取典型环境进行模拟,为保证试验来流条件一致性,减少边界效应对流场的影响,模型宽度需足够大,本研究未对尾流做深入分析,模型长度可以适度缩短。根据设计要求,模型设置如图7所示,其高为1 m,宽为11.4 m,长为12 m,其中上游长为2 m。为保证次列水草团在不同偏移量下均能获取经首列水草团影响后的来流,且水草团间存在至少1个间隔,首列布置3个水草团,关于XOZ平面对称,以中间水草团左侧底部为坐标原点,次列布置2个水草团,水草团间距 $L$ 为3.8 m,直径 $D$ 为1.9 m,其中首列中间水草团圆心和次列上侧水草团圆心的 $Y$ 轴方向间距为偏移量 $S$ ,以0.475 m为间隔设置5次试验,工况参数见表1。对于任意单个水草团,其 $Z=0$  m平面的圆心为相对坐标轴原点,将水草团任意网格的相对坐标代入公式(13)可获得该位置的固体体积分数,再将其代入公式(12)可计算出该位置的黏性阻力系数,以此完成对水草团内部的阻力设置。

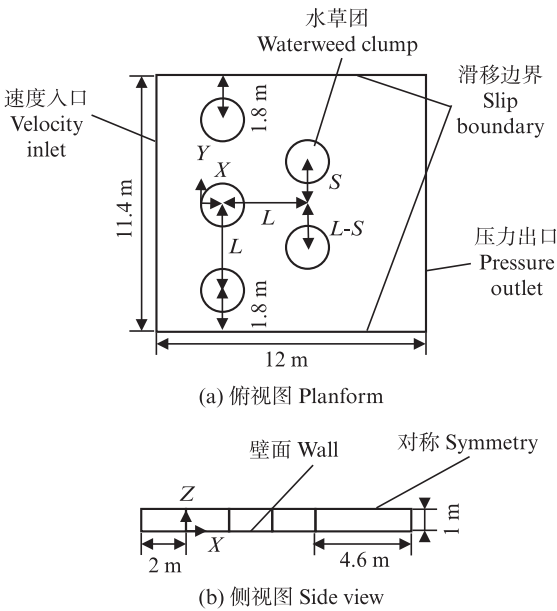


图7 模型尺寸及边界条件示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of model dimensions and boundary conditions

如图7所示,模型左边界为速度入口,动力源为造流增氧设备,对蟹塘分区后可提供稳定单向

的水流<sup>[3]</sup>,来流速度设置为0.05 m/s,右边界为压力出口,其余两侧为滑移边界,底部为壁面,考虑到水面线几乎与底面平行,自由水面高程的起伏变化很小,在水深较大的情况下可以用刚盖假定法做近似处理,使用对称边界条件近似代替自由水面<sup>[24]</sup>。

表1 数值模拟工况参数  
Tab. 1 Numerical simulation operating conditions parameters

试验编号 Test number	来流速度 $v_{in}/(m/s)$	水草团间距 $L/m$	水草团直径 $D/m$	偏移量 $S/m$
1	0.05	3.8	1.9	0
2				0.475
3				0.950
4				1.425
5				1.900

2.3 网格无关性验证

网格划分对模拟结果存在重要影响,为兼顾数值模拟的计算精度和计算效率,进行网格无关性验证,对比网格数量对计算结果的影响。进行网格无关性验证为工况 $S=0$ ,对水草团与水域的交界处进行加密,采用77万、175万、280万3种网格分别模拟计算,3种网格的最小空间分辨率分别为50、37、31 mm。监测线位于YOZ平面,对比结果如图8所示。3种网格整体差异较小,差异最大的区域位于 $X=2\sim 4$  m,网格1与网格3有一定差异,网格2与网格3结果接近,综合考虑模拟精度和计算效率,本研究将选用网格2进行后续计算。

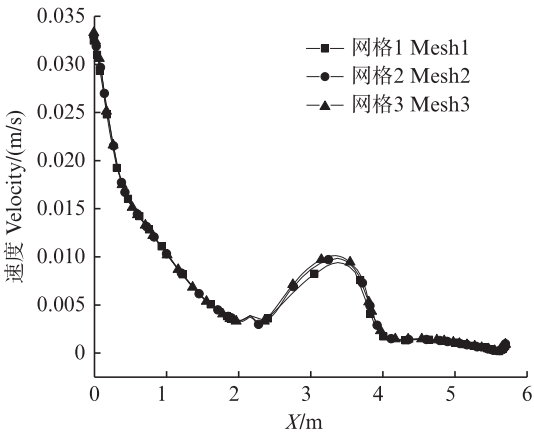


图8 网格无关性验证结果  
Fig. 8 Grid independence validation results

### 3 结果与分析

本研究模型的  $X=-2\sim 4\text{ m}$  为近似一个非典型的圆柱绕流模型,水流在接触水草团表面时,受水草团的曲率影响,水流在表面减速,过流断面收缩导致流速沿程增加;水草团区域并非完全固体区域,区域边界不存在速度为零的位置,边界层实际位于水草团区域内部;边界层厚度沿程增加,在压强差作用下,曲面边界层分离,出现与主流方向相反的回流;首列水草团相对于来流对称分布,水草团两侧压力相同,水体均匀分流使次列水草团的来流速度出现差异,结合不同的偏移量可实现差异化的分流和导流现象。

#### 3.1 偏移量对流速分布的影响

池塘近底平面  $Z=0.1\text{ m}$  处流速云图如图 9 所示。由图 9a 可知,无偏移工况下,首列水草团将来流分流成上下两部分,首列水草团后的低速剪切区将次列水草团完全覆盖,令大部分水体直接从水草团间隔中通过,未直接冲击次列水草团,不同速度的水流以明显的带状间隔分布,不利于水体在  $Y$  轴方向上的交换;对比图 9a、9b 和 9c、9d,随着水草团偏移量增加,次列水草团被遮挡侧出现流速过渡带,水流稳定且速度梯度较小,过渡带范围较大且水流均匀,避免河蟹因抢夺位置而产生养殖损耗,当偏移量为  $0.950\text{ m}$  时,其宽度达到最大值(图 9c);观察图 9c 次列水草团可见,偏移量为  $0.950\text{ m}$  时次列水草团迎流面首次部分离开首列水草团的剪切区,间隔处的高速水流可直接冲击次列水草团的迎流面,将水体再次分流,水体微团有机会在一次次分流中流入  $Y$  轴坐标更高(更低)的水草团间隔中,促进水体在  $Y$  轴方向上的交换;对比图 9c、9d、9e,从被遮挡侧流出的分流流量随偏移量增加而上升,有助于平均单个水草团间隔流向两侧的流量,该束水流将抑制过渡带的形成,令过渡带宽度下降;图 9e 中当偏移量为  $1.9\text{ m}$  时,流速将变为以水草团为中

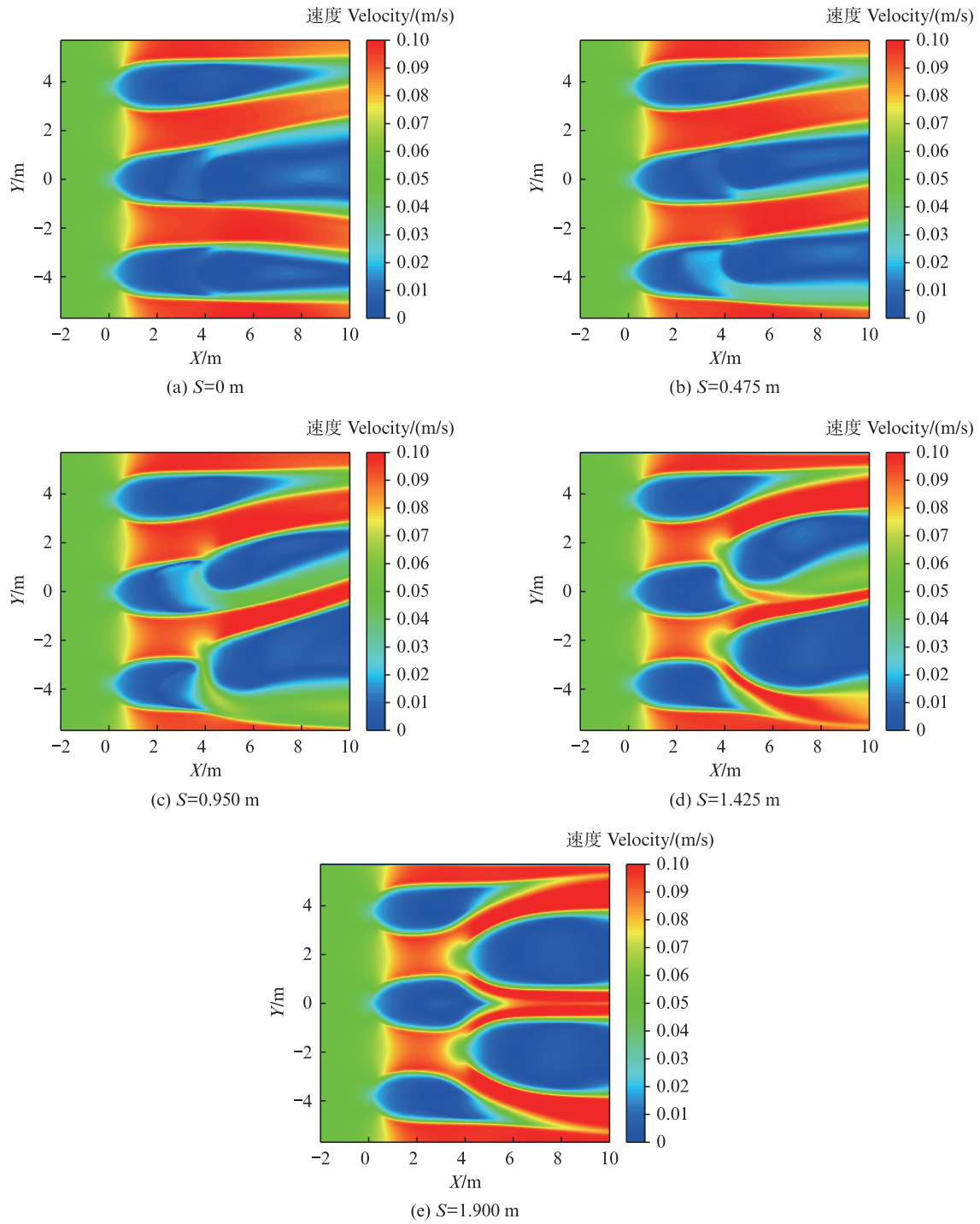
心的斑块状分布。

河蟹不善高速游动,水草团区域是河蟹养殖环境中唯一的立体区域,水草团的位置与疏密度构成各异的内部速度分布,为河蟹提供具备不同特征的栖息场所,图 10 为水草团区域速度占比直方图,数据对象为次列水草团中上侧水草团的下半扇形区域和下侧水草团的上半扇形区域。可见随着偏移量的增加,速度小于  $0.01\text{ m/s}$  的占比从  $84\%$  迅速降低至  $38\%$ ,其他速度区间占比缓慢上升;在高偏移量工况中,速度占比相似,其中速度区间为  $0.04\sim 0.08\text{ m/s}$  的速度占比呈均匀分布,为具备不同需求的河蟹提供差异化的空间区域,降低因抢夺区域而相互竞争的风险。

蟹塘水体的能量来源除了风力吹动表层水外,整体流动的能量主要来源于造流设备的推水作用,高效利用造流设备提供的动能就能减小能源消耗,降低为提高设备性能造成的额外支出,间接提高养殖收益。蟹塘中的能量损耗主要来自克服水草团的阻力和水体质点间相对运动的黏性阻力。利用体积加权水体速度  $v_{\text{avg}}$  与来流速度  $v_{\text{in}}$  的比值评估不同偏移量水草团区域的能量利用率,结果如图 11 所示。不同偏移量的水草团区域能量利用率呈两极分化,低偏移度工况均低于  $0.2$ ,高偏移度工况接近  $0.5$ 。随着偏移量逐渐以  $0.475\text{ m}$  间隔提高,5 组工况间的能量利用率净增长值分别为  $0.063$ 、 $0.166$ 、 $0.129$ 、 $0.025$ ,结合图 9 与图 11,可见能量利用率高主要取决于次列水草团迎流面是否有区域脱离首列水草团剪切区,脱离比例达到迎流面面积的一半即可显著提高能量利用率,继续脱离对能量利用率提升较弱。

#### 3.2 水草团偏移量对涡流的影响

在水流单向流入水草团的过程中,形成的漩涡特征可用  $Q$  准则识别, $Q$  准则被定义为流场的速度梯度张量的正第二不变量,被广泛用于识别和分析涡流特征。图 12 展示不同偏移量下的涡量分布( $Q=0.02$ )。

图9  $Z=0.1$  m 平面速度云图Fig. 9 Velocity contour diagrams at  $Z=0.1$  m



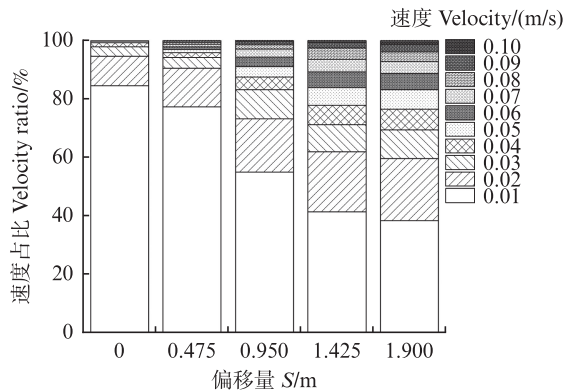


图 10 水草团内部速度堆积直方图

Fig. 10 Stacked histogram of velocity within the waterweed clump

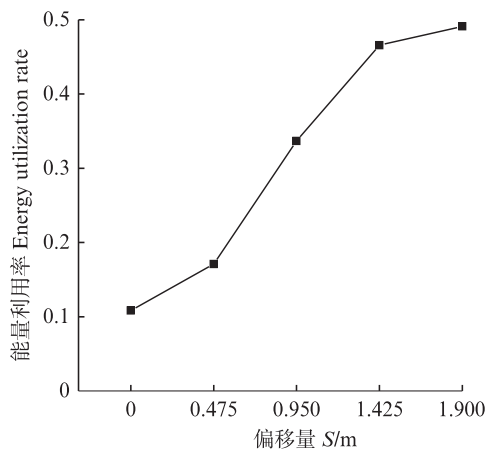


图 11 水草团能量利用率曲线

Fig. 11 Energy utilization rate curve of the waterweed clump

水草团偏移量对涡流的空间分布没有明显影响,但会显著影响涡流的结构形态,其中涡的类型可分为以下几个大类:无滑移塘底形成的涡粒、水草团背流面的边界层分离涡、淹没水草团形成的垂直涡。垂直涡位于首列水草团后,有利于蟹塘水体在垂直方向上的交换混合,打破夏季近水面的温跃层<sup>[25]</sup>,提升底层溶氧。垂直涡的形成原因为顶层水流在淹没水草团末端向下剪切与塘底壁面对近壁面剪切导致的垂直方向上的回流,初始位置与多孔水草团间存在小幅间隔,其位置与 FOLKARD<sup>[26]</sup>与 PERERA<sup>[27]</sup>的研究相似;通过对比图 12b 和图 12c 中垂直涡的形态和大小可发现:水草团偏移量增加将导致垂直涡的三维尺寸全部发生变化,垂直涡的高度和宽度降低,长度增加,俯视投影形状从方形转变为三角形,作用面积减小。边界层分离涡位于稳定尾迹

区内<sup>[28]</sup>,若后侧无障碍物将发展为卡门涡街。边界层分离涡有助于促进间隔中高速水流和水草团后低速区的水体交换,避免死水区的产生,对比图 12 中的边界层分离涡的形态可发现:外侧边界层分离涡的强度显著高于内侧,若水草团背流侧水域不对称,则在水草种植偏移负方向一侧边界层分离涡明显大于偏移正方向一侧。

水草团偏移量增加有助于增强边界层分离涡而减弱垂直涡,蟹塘中涡流强度和覆盖范围的提升有助于均匀混合水体,减少死水区范围,抑制水中微生物和病原体的聚集,然而过大的涡流强度将增加水产生物的应激水平<sup>[29]</sup>。

### 3.3 核心区域流速统计与分析

水草团周围空间各点流速数据对于理解水流动态及其对河蟹养殖行为的影响至关重要。为了精准分析偏移量下水草团周围流速分布规律,对  $Z=0.1$  m 平面,核心区域  $X=\{0.95, 4.75\}$ ,  $Y=\{S-3.8, S\}$  流速的常规数理统计参数进行了统计分析。由图 13 可知,当来流速度为 0.05 m/s 时,尽管不同偏移量下的速度分布存在显著差异,但是最大值和平均值未随偏移量发生明显变化,最大值为 0.099~0.103 m/s,约两倍来流速度,平均值为 0.044~0.049 m/s,略低于来流速度。速度占比图可反映核心区域流速分布的集中性和离散性。图 14 展示了不同偏移量下核心区域的速度占比,不同水草团偏移量下核心区域速度分布都呈明显双峰型,低速区和高速区占据大部分比例,该现象在低偏移量工况尤为明显,在高偏移量工况中则有所改善,当偏移量为 0.95 m 时速度分布最均匀,该结果与之前分析中观察到的过渡带最宽的现象相互印证。

水流均匀性指数可作为衡量养殖池塘性能的重要水动力学指标,可作为评估养殖生物生存条件的水文参数。河蟹养殖池塘中水流均匀性指数越高,溶氧分布越均匀,有害物质分解越迅速,对河蟹的生长更有利。水流均匀性指数计算公式为<sup>[30]</sup>

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2A_{cs}} \int_{A_{cs}} \frac{|u_{avg} - u'|}{u_{avg}} dA_{cs} \quad (16)$$

式中:  $\gamma$  为水流均匀性指数;  $u_{avg}$  为横截面上的加权平均速度, m/s;  $u'$  为横截面上的流体微元速度, m/s;  $A_{cs}$  为横截面面积, m。

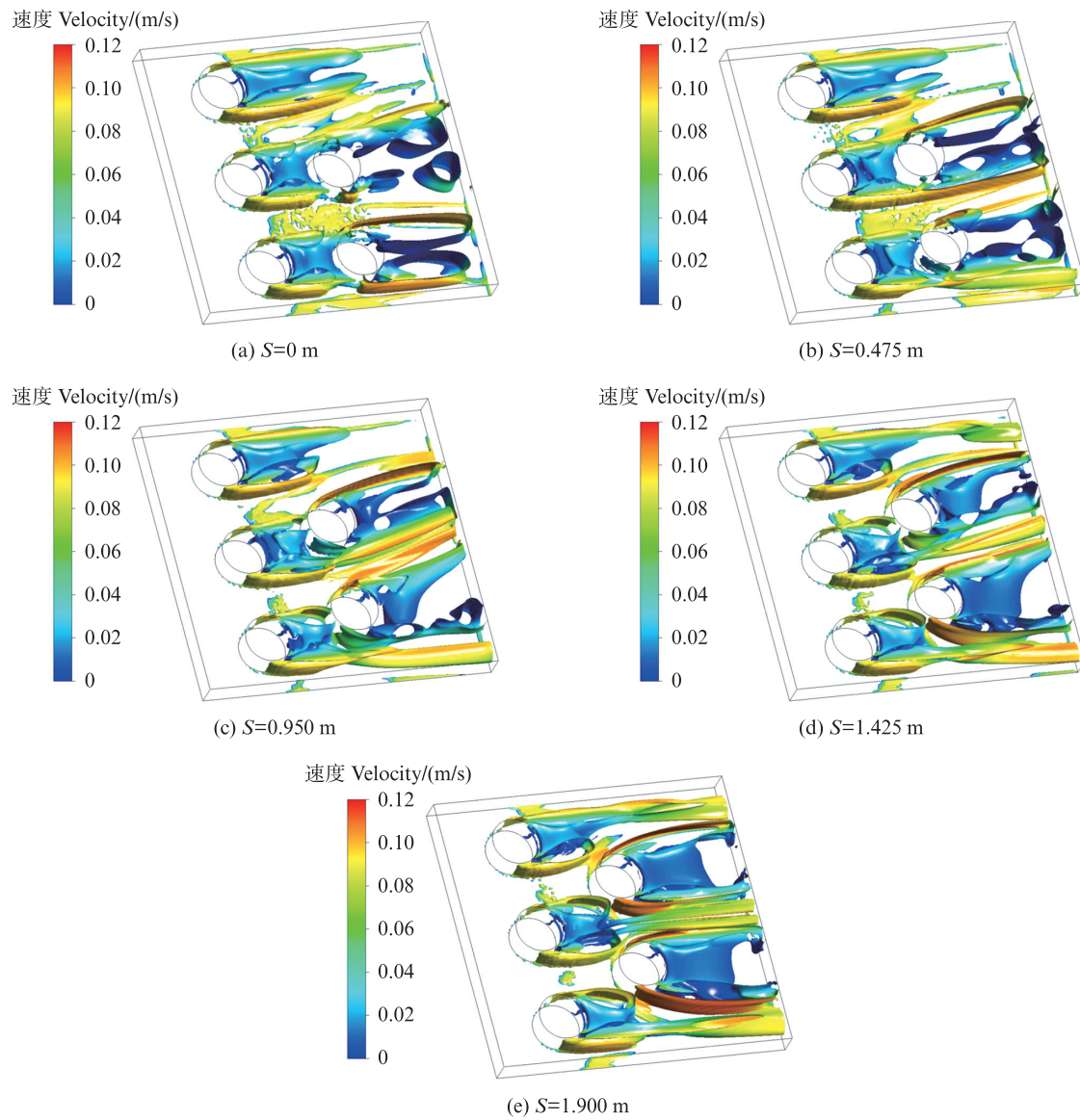


图 12 涡流分布图

Fig. 12 Distribution of vortices

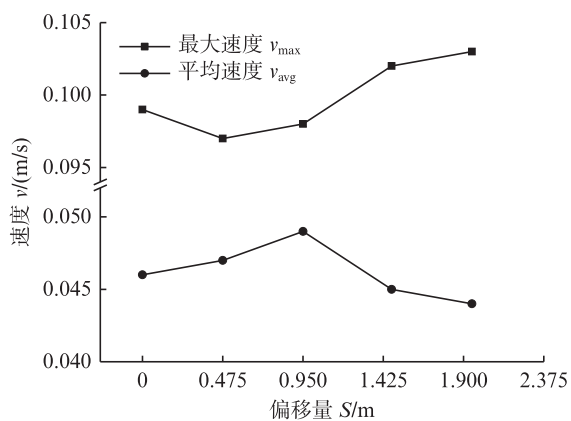


图 13 不同偏移量下的核心区域速度特征

Fig. 13 Velocity characteristics of core area for different offsets

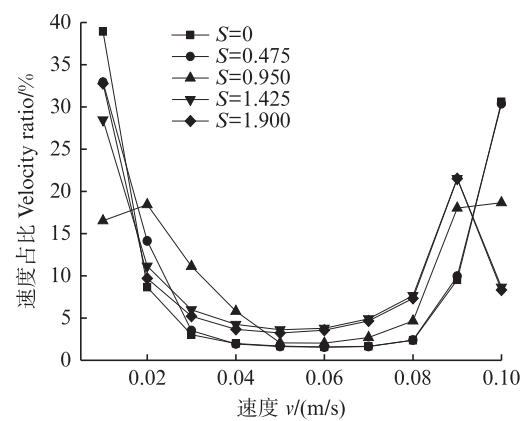


图 14 不同偏移量下核心区域速度占比

Fig. 14 Proportion of core area velocity for different offsets

由图 15 可知,不同水草团偏移量的水流均匀性指数为 0.575~0.653,在偏移量为 0.950 m 时上升到顶峰,增长率为 13.6%;偏移量继续增加,水流均匀性指数逐渐下降至 1.900 m 时的 0.617,降低率仅 5.5%;综合分析以上内容,水草团的点状布置必然导致背流侧产生大面积低速区域和水草团间隔中的高速区域,无法有效平均流速,近底平面水流均匀性差异较小。

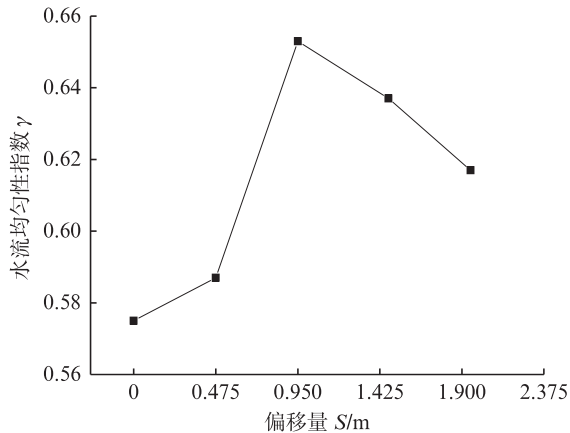


图 15 不同偏移量下的水流均匀性指数  
Fig. 15 The index of flow uniformity for different offsets

## 4 结论

河蟹池塘养殖中,水草的种植和蟹塘水体流场分布决定河蟹的养殖成效。本研究基于多孔介质以水草团的固体体积分数为线索,研究了 5 种水草团种植偏移量下的蟹塘水体流场特性,得到以下结论。

(1)水草团种植偏移量对蟹塘水体流速分布有显著影响。低偏移量下,流场呈现明显的带状分布,高偏移量下,流场呈现斑块状分布;增加偏移量可以显著提高水草团内部速度均匀性,小于 20% 来流速度的区域占比从 84% 降至 38%;水草团的能量利用率与脱离首列水草团剪切区面积直接相关,最高偏移量下的能量利用率为 0.49,约为最低值的 4.6 倍。

(2)水草团种植偏移量会引起涡流的明显改变。垂直涡有助于促进水体纵向流动,其作用范围随偏移量上升而下降;边界层分离涡能提高水草团背流侧低速区的水体交换速率,外侧边界层分离涡的强度显著高于内侧,若水草团背流侧水域不对称,则在水草种植偏移负方向一侧边界层

分离涡明显大于偏移正方向一侧。

(3)水草团种植偏移量会影响核心区域水体流速的均匀性。核心区域流速平均值略低于来流速度,水流均匀性指数为 0.575~0.653,最高值出现于中等偏移量工况,该工况的速度占比相对均匀。

研究结果能为蟹塘水草团的科学种植提供依据,研究方法能为蟹塘水草对池塘流场的作用机理研究提供借鉴。但是,蟹塘水草种植对其流场的影响机理十分复杂,不仅与水草团的本身特性和布局有关,还与水草生长阶段以及池塘结构都紧密关联,同时也受到不同河蟹流水养殖模式下的造流设备及其布置的影响。因此,蟹塘水草与流场的相互作用机理有待进一步研究和探索。

作者声明本文无利益冲突。

## 参考文献:

- [1] 彭涛,张冬冬,张光宝,等.放养密度对中华绒螯蟹“六月黄”养殖性能和经济效益的影响[J].上海海洋大学学报,2024,33(6):1324-1334.  
PENG T, ZHANG D D, ZHANG G B, et al. Effects of stocking density on culture performance and economic profits of out-season *Eriocheir sinensis* marketing in lunar June[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(6): 1324-1334.
- [2] 刘若晨,朱筛成,张光宝,等.雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹亚成体育肥性能、生理代谢和生化组成的影响[J].上海海洋大学学报,2025,34(3):562-574.  
LIU R C, ZHU S C, ZHANG G B, et al. Effects of gender-specific fattening diets on fattening performance, physiological metabolism and biochemical composition of pre-adult Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2025, 34(3):562-574.
- [3] 陈雷雷,杜舟,胡庆松,等.基于塘内循环自净的河蟹生态养殖系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(7):227-234.  
CHEN L L, DU Z, HU Q S, et al. Design and experiment on crab ecological culture system using internal circulation and self-purification in a pond [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 227-234.
- [4] 李春波,沈晨晨,冯广朋,等.中华绒螯蟹栖息地因子适宜范围的研究进展[J].海洋渔业,2023,45(6):766-774.  
LI C B, SHEN C C, FENG G P, et al. Research progress on habitat suitability of *Eriocheir sinensis* [J]. Marine



- Fisheries, 2023, 45(6): 766-774.
- [5] POWERS S P, KITTINGER J N. Hydrodynamic mediation of predator - prey interactions: differential patterns of prey susceptibility and predator success explained by variation in water flow [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2002, 273 (2): 171-187.
- [6] 胡庆松, 黄克诚, 吴刚, 等. 蟹塘梳草船驱动系统设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 923-931.  
HU Q S, HUANG K C, WU G, et al. Design and test of aquatic plants comb-collect boat driving system [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32 (5): 923-931.
- [7] 侯瑞丹, 彭自然, 何文辉, 等. 苦草对重金属去除效果的对比及其叶绿素荧光特性响应[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(3): 609-617.  
HOU R D, PENG Z R, HE W H, et al. Study on heavy metal removal efficiency and chlorophyll fluorescence response of *Vallisneria natans* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(3): 609-617.
- [8] 彭姣. 养殖水环境对中华绒螯蟹幼蟹和成蟹生存与生长的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.  
PENG J. Effects of cultural water environment on survival and growth of juvenile and adult *Eriocheir sinensis* [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.
- [9] 蒋北寒, 杨洋, 蔡枫, 等. 不同密度下相邻植被群的水流结构发展特性[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(3): 189-196.  
JIANG B H, YANG Y, CAI F, et al. Influence of neighboring vegetation patches on flow structure characteristics with different densities [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(3): 189-196.
- [10] HUAI W X, ZHANG J, KATUL G G, et al. The structure of turbulent flow through submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(2): 274-292.
- [11] 马健鑫. 含刚性植被明渠水流结构特性数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.  
MA J X. Numerical simulation study of water flow structure characteristics of open channels containing rigid vegetation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [12] 樊新建, 雷鹏, 王成, 等. 柔性淹没植被的排列方式对水流特性的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 127-132.  
FAN X J, LEI P, WANG C, et al. Influence of flexible submerged vegetation on flow characteristics under different arrangement patterns [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2020, 48(3): 127-132.
- [13] SUKHODOLOVA T A, SUKHODOLOV A N. Vegetated mixing layer around a finite - size patch of submerged plants: 1. Theory and field experiments [J]. Water Resources Research, 2012, 48(10): W10533.
- [14] CHEN Z B, ORTIZ A, ZONG L J, et al. The wake structure behind a porous obstruction and its implications for deposition near a finite patch of emergent vegetation [J]. Water Resources Research, 2012, 48(9): W09517.
- [15] ROMINGER J T, NEPF H M. Flow adjustment and interior flow associated with a rectangular porous obstruction [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 680: 636-659.
- [16] CHENG W W, SUN Z C, LIANG S X. Numerical simulation of flow through suspended and submerged canopy [J]. Advances in Water Resources, 2019, 127: 109-119.
- [17] SUZUKI T, HU Z, KUMADA K, et al. Non-hydrostatic modeling of drag, inertia and porous effects in wave propagation over dense vegetation fields [J]. Coastal Engineering, 2019, 149: 49-64.
- [18] 王之君, 张开和. 斑块状沙化草甸周围气流场特性的数值风洞实验[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5687-5699.  
WANG Z J, ZHANG K H. Numerical wind tunnel experiment on surrounding air flow field characteristics of the desertified patchy meadow [J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 5687-5699.
- [19] 李正农, 余世斌, 吴红华, 等. 强风作用下树木周围流场的数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 3970-3980.  
LI Z N, YU S B, WU H H, et al. Numerical simulation of flow field around the tree in strong wind [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 3970-3980.
- [20] 徐卫刚. 非均匀流条件下植被河道水力学特性与曼宁公式研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.  
XU W G. Research on the hydraulics characteristics and manning formula of the vegetated channel in non-uniform flow [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [21] 谢志豪, 付海明. 树冠流动阻力风洞试验与数值模拟[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(3): 442-449.
- [22] XIE Z H, FU H M. Wind tunnel experiment and numerical simulation of canopy flow resistance [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(3): 442-449.
- 董霖, 王爽, 欧阳锐凌, 等. 网带式花椒干燥机流场模拟与结构优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 373-380.
- DONG L, WANG S, OUYANG R L, et al. Flow field simulation and structural optimization of mesh-belt pepper

- drying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 373-380.
- [23] 刘彦东. 植物对河道水流特性的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LIU Y D. Study of plants' influence on flow characteristics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [24] 郝由之, 假冬冬, 张幸农, 等. 岸坡植被对复式河道水动力特性影响的数值模拟[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 149-157.
- HAO Y Z, JIA D D, ZHANG X N, et al. Numerical simulation of the influence of riparian vegetation on hydrodynamic characteristics of a compound river[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 149-157.
- [25] 戴恒鑫, 李应森, 马旭洲, 等. 河蟹生态养殖池塘溶解氧分布变化的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(1): 66-73.
- DAI H X, LI Y S, MA X Z, et al. The research of dissolved oxygen distribution in the crab ecological culture ponds[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(1): 66-73.
- [26] FOLKARD A M. Hydrodynamics of model *Posidonia oceanica* patches in shallow water[J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(5): 1592-1600.
- [27] PERERA M D A E S. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 8(1/2): 93-104.
- [28] ZONG L J, NEPF H. Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 691: 368-391.
- [29] 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.
- [30] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: effect of inlet nozzle angle on the velocity field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 79-91.

## Numerical simulation study on the flow field characteristics of waterweed clumps offset in crab ponds based on porous media

HAN Huaxiang<sup>1</sup>, LAN Tianao<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, HU Qingsong<sup>1,2</sup>, CHEN Leilei<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Collaborative Innovation Center for Cultivating Elite Breeds and Green-culture of Aquaculture Animals, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Waterweed is one of the key elements in *Eriocheir sinensis* (Chinese mitten crab) pond aquaculture. In order to investigate the mutual influence and mechanism of waterweed clump planting offset and pond flow field in aquaculture ponds, this paper conducts a numerical simulation study on the flow field characteristics of waterweed clump offset based on porous media. Using the solid volume fraction of waterweed clump as a clue, a set of porous media experimental devices are established to quantify the resistance of waterweed. A numerical model of waterweed clump is established based on field measurement samples, and the influence of waterweed clump offset on the pond flow field is studied through 5 sets of incremental offset experiments in Fluent. The study shows that increasing the offset can significantly change the flow velocity distribution from strip-like to patchy, promoting lateral mixing of water. The index of flow uniformity fluctuates around 0.6, and the medium offset has the highest uniformity of water flow. The velocity and uniformity inside the waterweed clump increase with the increase of offset, mainly depending on the area where the secondary waterweed clump leaves the shear zone of the first row of waterweed clumps. The energy utilization rate of the highest offset condition can reach 0.49, 4.6 times the lowest value. The vertical vortex behind the waterweed clump is opposite to the change trend of the boundary layer separation vortex. A high offset will weaken the range of action of the vertical vortex and enhance the range and intensity of the boundary layer separation vortex. The research results help to understand the energy circulation and material distribution in crab ponds, and scientifically guide the planning of waterweed planting in crab ponds.

**Key words:** porous media; vegetation flow; crab culture; numerical simulation