



## 规模化透水性人工鱼礁阻流效应的数值模拟

杨伟<sup>1</sup>, 林军<sup>1,2\*</sup>, 唐建江<sup>3</sup>, 杨冠林<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200136)

**摘要:** 为在大尺度海洋模型中合理体现透水性人工鱼礁组合, 基于海洋数值模型 (FVCOM) 模拟了大陈岛拟建人工鱼礁区的水动力情况, 比较了阻滞力法、实心礁法和附加底摩擦法在投礁前后的垂向流速、礁顶平面流速、水体向上输运通量和背涡流体积的差异, 并根据投礁前后的流速差异, 应用经验公式预测了投礁 1 年后底床泥沙冲淤情况。数值模拟结果显示, 同未设置礁体相比, 阻滞力法体现的鱼礁在所占水层内流速最大减少了 0.06 m/s, 迎流面垂向上产生的上升流流速最大为 0.005 m/s; 涨急时刻礁体背面的流速减小范围可达礁体组合长度的 20 倍以上, 对应流速减小海域一年后底床淤积厚度最大约 0.05 m; 单个台礁平均向上水体输运通量为 66 m<sup>3</sup>, 背涡流体积为 1550 m<sup>3</sup>。相较于实心礁法和附加底摩擦法, 阻滞力法能很好体现礁体对水流的阻滞作用, 避免了实心礁法在透水性鱼礁模拟中过高估计流场效应的问题, 且无附加底摩擦法只适用于低矮礁体的缺陷。阻滞力法不仅适用于置底型透水性鱼礁, 也适用于浮鱼礁和网箱等增养殖设施的水动力学和生态动力学研究。

**关键词:** 人工鱼礁; 透水性; 海洋数值模型 (FVCOM); 阻滞力法; 底床冲淤

**中图分类号:** S 953.1

**文献标志码:** A

海洋牧场是基于生态学原理, 充分利用自然生产力, 运用现代工程技术和管理模式, 通过生境修复和人工增殖, 在适宜海域构建的兼具环境保护、资源养护和渔业持续产出功能的生态系统<sup>[1]</sup>。投放人工鱼礁是我国海洋牧场建设的主要生境修复手段, 对渔业资源的养护和增殖具有积极作用。人工鱼礁投放到预定的海域后, 其流场效应主要表现为迎流面产生的上升流和背流面产生的涡流。在层化水体中, 这种人工上升流可以把底部营养盐输送到近海面的真光层, 可有效增加初级生产力, 同时促进上下层水体的混合, 增加有氧空间、改善海洋生态环境<sup>[2]</sup>。背涡流区则产生大范围流

速低于背景流场、且湍流涡动强于背景流场的水体空间, 可有效吸引底层和中上层鱼类栖息和聚集<sup>[3-5]</sup>。

数值模拟技术是优化人工鱼礁单体设计和组合布局的有效工具<sup>[6]</sup>。在鱼礁的数值模拟研究方面, 前人开展了很多工作, 并在礁体开孔、迎流面形状、迎流角度、布设间距、投放个数与组合方式等方面取得了大量研究成果。在实际投入使用前, 鱼礁的设计合理性通常使用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 软件对其进行仿真优化。CFD 模型具有较高的空间分辨率, 但与粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV)

收稿日期: 2021-05-13 修回日期: 2021-06-08

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901302); 中国海油公益基金会项目

第一作者: 杨伟 (照片), 从事海洋生态系统动力学方面的研究, E-mail: 15001957821@163.com

通信作者: 林军, 从事海洋生态系统动力学、海洋牧场等渔业增养殖工程方面研究, E-mail: jlin@shou.edu.cn



水槽模型等研究手段一样, 大部分实验是基于定常流场来探究礁体产生的流场效应<sup>[7-8]</sup>。大尺度海洋数值模型, 如区域海洋模型 (ROMs)、非结构网格有限体积海洋模型 (an unstructured Grid Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM)、半隐式河口海岸海洋模型 (ECOM-si) 等<sup>[9-17]</sup>, 可模拟营养盐输运、混合和生态动力过程, 能更全面地考虑实际海洋中的潮流、风生浪流和温盐密度流等各种动力因素, 有利于全面评估人工鱼礁工程的合理性, 继而优化工程方案。

综合平衡建造成本和投放后的生态效益, 人工鱼礁常被设计为镂空结构, 因此具有一定的透水性。最常见的礁体外形有立方体、圆柱体等, 也有许多创新型、内部结构复杂的礁体, 如米字型鱼礁<sup>[17]</sup>、双层十字翼型人工鱼礁<sup>[18]</sup>等。不同结构的人工鱼礁在海水中会产生不同的流场效应。人工鱼礁可以看作人为在海中设置的结构物, 目前在大尺度海洋模型中体现置底结构物的方法有三种: 实心礁法, 将人工鱼礁看作不透水的固体, 通过改变水深的方法来体现鱼礁, 适用于不透水的鱼礁山<sup>[19]</sup>; 附加底摩擦法, 通过增加模型底摩擦来体现海床上的结构物对水流的阻碍, 适用于对海底贻贝床、低矮的牡蛎礁等情形的模拟<sup>[20-22]</sup>; 阻滞力法, 通过在模型动量方程中添加阻滞力项来模拟结构物对不同水层水流的阻碍作用<sup>[23]</sup>。林军等<sup>[19]</sup>利用实心礁法基于 FVCOM 探究了潮流作用下人工鱼礁山海域的泥沙输运情况。阻滞力法在模拟潮流涡轮发电机的阻流效应和发电量评估等方面取得了大量成果<sup>[23-25]</sup>。

本实验基于 FVCOM 的水动力模块, 对浙江省台州市大陈岛海洋牧场规划区拟建的人工鱼礁区的流场效应进行了数值模拟, 并根据投礁前后的流速差异, 应用经验公式计算了礁区的底床冲淤。结合 3 个站点的连续观测流速和规划区的实测水深数据, 对比分析了阻滞力法、实心礁法和附加底摩擦法在投礁前后的流场效应及底床冲淤情况, 评估了阻滞力法在大尺度模型中模拟透水性人工鱼礁的可行性和合理性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 模型介绍

本研究使用了美国麻省大学陈长胜教授团队开发的 FVCOM<sup>[26]</sup>。FVCOM 是一个包含自由表面的三维水动力模型, 在水平方向上具有非结构化三角形网格, 在垂向上使用 sigma 坐标系。FVCOM

使用有限体积方法以积分形式离散控制方程, 通过计算由不重叠控制体积组成的非结构三角形网格之间的通量, 采用有限差分方法对控制方程进行数值求解。因此, 该模型兼备了有限差分法的计算效率和有限元方法的几何灵活性。FVCOM 采用内外模分离的方法来求解具有不同时间步长的二维正压方程和三维斜压方程, 外模方程的求解频率是内模的 1~10 倍, 这样可以在保持外模稳定的情况下增大内模的时间步长。FVCOM 基于非结构网格可以灵活应用于复杂的河口海湾等区域, 其有限体积方法能很好保证计算中的质量、动量、温度、盐度及热量的守恒性, 在国际上得到了广泛的应用。

### 1.2 控制方程

FVCOM 的动量控制方程和连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中,  $t$  表示时间 (s),  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别代表东西方向、南北方向和垂直方向,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的流速 (m/s) 分量;  $\rho_0$  是海水密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $P_a$  表示海表大气压强 (Pa);  $P_H$  代表静水压强;  $q$  代表非静水压强;  $f$  为科氏力参数 (rad/s);  $K_m$  代表垂向涡粘系数;  $F_u$ 、 $F_v$  代表两个方向的水平动量耗散项; 水体总深度 (m) 为  $h = H + \zeta$ , 其中  $H$  为平均水深 (m),  $\zeta$  为自由表面的高度。

$u$ 、 $v$ 、 $w$  的表边界条件和底边界条件:

$$\begin{aligned} K_m \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \frac{1}{\rho_0} (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \\ w &= \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{E - P}{\rho}, \\ z &= \zeta(x, y, t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_m \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \frac{1}{\rho_0} (\tau_{bx}, \tau_{by}), \\ w &= -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}, \\ z &= -H(x, y) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$  分别表示海表风应力在  $x$  和  $y$  方向上的分量 ( $\text{N/m}^2$ ),  $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = C_d \sqrt{u^2 + v^2} (u, v)$  分别代表底应力在  $x$  和  $y$  方向上的分量 ( $\text{N/m}^2$ ),  $E$  和  $P$  分别代表海表的蒸发与降水 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ].

底摩擦系数  $C_d$  由对数方法来确定:

$$C_d = \max \left( \frac{\kappa^2}{\ln^2 \left( \frac{z_{ab}}{z_0} \right)}, 0.0025 \right) \quad (7)$$

式中,  $z_{ab}$  代表距离海底的高度 (m).  $\kappa=0.4$  为冯·卡门常数,  $z_0$  为底部粗糙参数.

### 1.3 阻滞力法

对于置于海底的不透水结构物, 可以通过改变局地水深来体现. 而对于结构复杂、最大高度远离海底的结构物, Yang 等<sup>[27]</sup> 提出了在模型方程中添加结构物对水体阻滞力的方法. 当水流通过结构物时, 对水体的阻滞力 ( $F, N$ ) 计算公式:

$$F = -\frac{P_{\text{ext}}}{U} \quad (8)$$

其中  $P_{\text{ext}}$  (W) 是水流流经结构物时的动态功率密度  $P$  的一部分,  $U$  为来流流速 (m/s).

$$P_{\text{ext}} = C_{\text{ext}} \cdot P \quad (9)$$

$C_{\text{ext}}$  为结构物对水流的阻滞系数,  $P$  计算公式:

$$P = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (10)$$

结合公式 (8)、(9) 和 (10) 可以将阻滞力项拆分为  $x$ 、 $y$  方向的分量:

$$F_x = -\frac{1}{2} \rho C_{\text{ext}} u \left| \vec{U} \right| \quad (11)$$

$$F_y = -\frac{1}{2} \rho C_{\text{ext}} v \left| \vec{U} \right| \quad (12)$$

式中,  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $u$ 、 $v$  分别代表  $x$ 、 $y$  方向上的阻滞力和速度分量.

根据结构物的具体性质, 公式 (11) 和 (12) 可以转换为多个变量的乘积. 人工鱼礁是具有透水性的结构物, 因此可以引入迎流面积来体现礁体的透水性. 海洋数值模型的网格水平尺度通常大于鱼礁单体的尺寸, 单个网格代表的空间尺度往

往可以容纳多个小型礁体.

对于单个网格内的  $N$  个结构物<sup>[28]</sup>, 公式 (11) 和 (12) 可以转换:

$$F_x = -\frac{1}{2} \rho C_T A N K_\sigma u \left| \vec{U} \right| \quad (13)$$

$$F_y = -\frac{1}{2} \rho C_T A N K_\sigma v \left| \vec{U} \right| \quad (14)$$

式中,  $C_T$  为结构物的阻滞系数,  $A$  为结构物的迎流面积 ( $\text{m}^2$ ),  $N$  为该水平网格内结构物的数量. 由于鱼礁具有一定高度, 在垂向上往往占据多个  $\sigma$  层,  $K_\sigma$  为迎流面积在各  $\sigma$  层的百分比. 上述表达式假设结构物各向迎流面积一致, 结构物对水流的阻滞效果不随流向变化而变化.

假设结构物存在, 将阻滞力项添加到 FVCOM 内模动量方程 (1) 和 (2)<sup>[28]</sup> 后, 积分形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (A_e \Delta_\sigma D u)}{\partial t} + R_u - f A_e \Delta_\sigma D v = \\ \frac{1}{2} \rho K_\sigma N C_T A u \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (A_e \Delta_\sigma D v)}{\partial t} + R_v + f A_e \Delta_\sigma D u = \\ \frac{1}{2} \rho K_\sigma N C_T A v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $A_e$  为网格面积 ( $\text{m}^2$ ),  $D$  为水深 (m),  $\Delta_\sigma$  为  $\sigma$  层高度 (m).

外模控制方程转换后的形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (A_e D \bar{u})}{\partial t} + R_u - f A_e D \bar{v} = \\ \frac{1}{2} \rho N C_T A \sum_{\sigma=1}^{\sigma=k} K_\sigma u \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (A_e D \bar{v})}{\partial t} + R_v + f A_e D \bar{u} = \\ \frac{1}{2} \rho N C_T A \sum_{\sigma=1}^{\sigma=k} K_\sigma v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  是在  $x$ 、 $y$  方向上的垂向速度积分,  $k$  为  $\sigma$  层数,  $R_u$ 、 $R_v$  为其他动量项的总和.

根据结构物的具体性质, 阻滞力系数  $C_T$  可以定为常数, 也可以是变量. Murray 等<sup>[28]</sup> 在模型中将  $C_T$  定义为随流速变化的函数, 在每个内模时间步长对其更新.

### 1.4 附加底摩擦法

为了体现透水性结构物的存在, 当结构物的高度有限且结构一致时, 可通过增大模型中底摩

擦参数来实现数值模拟<sup>[29]</sup>。模型因底摩擦消耗的总的动态功率密度 $P_{total}$ 可以通过对底摩擦进行积分得到<sup>[30]</sup>:

$$P_{total} = \iint_{A_e} \rho C_d U^3 dA_e \quad (19)$$

式中,  $C_d$ 为底摩擦系数,  $A_e$ 为网格面积,  $U$ 为来流流速。

对于单个网格, 因结构物阻碍而消耗的动态功率密度 ( $P_{ext}$ ):

$$P_{ext} = \rho C_d U^3 A_e \quad (20)$$

结合公式(13)(14)(20), 阻滞力法和附加底摩擦法的等效动态功率密度耗散计算公式:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho C_T A N U^3 = \rho C_d A_e U^3 \quad (21)$$

对于阻滞力法中单个网格内放置  $N$  个结构物,

等效的  $C_d$  计算公式:

$$C_d = \left( \frac{C_T A}{2 A_e} \right) N \quad (22)$$

## 1.5 模型网格设置

模型计算区域包含整个东中国海, 可以保证模型背景动力场的完整性。计算网格共含 34735 个节点, 66745 个三角单元(图 1)。拟建海洋牧场区位于浙江台州大陈岛南部, 相较于整个计算域, 面积较小, 且周围地形复杂, 岛屿较多, 因此对该区域进行了网格分辨率的加密, 最小网格尺度达 20 m。垂向采用 sigma 坐标, 分为 34 层, 底层加密, 有利于置底型鱼礁流场效应的模拟。本研究所有模拟都为斜压模式。

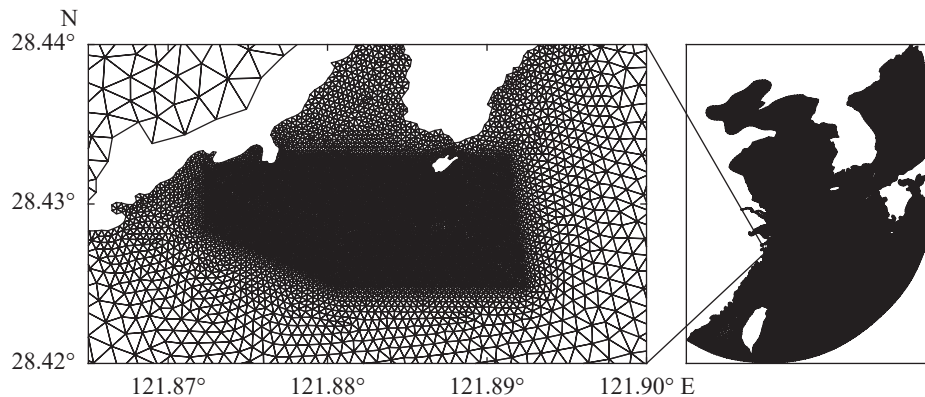


图 1 模型网格设置

Fig. 1 Model mesh settings

## 1.6 模型边界与初始条件

模型由潮汐驱动, 开边界上包括 8 个半日和全日分潮:  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ , 以及分别代表半月和月周期的  $M_f$  和  $M_m$  分潮。开边界上 241 个网格点分潮的调和常数来自俄勒冈州立大学的潮汐数据反演模式 (Oregon State University Tidal Inversion Software, OTIS) 中 TPXO7.1 数据集<sup>[31]</sup>。模型外模时间步长为 0.1 s, 内模时间步长为 1 s, 计算结果每 1 h 输出 1 次, 初始启动采用冷启动。模型中温盐恒定, 盐度为 35, 温度为 18 °C。流场验证模拟时间为 2020 年 6 月 15 日 0 时至 2020 年 7 月 15 日 0 时。

## 1.7 人工鱼礁的设置

单纯的置底式鱼礁区建设往往存在投放二次定位不方便、效果评估不精准、产业融合不到位、

后期管护不持续等一系列问题。大陈岛人工鱼礁区采用钢桩固底、鱼礁嵌套、绳索环绕、台面整装的形式构建 20 m 见方的大型平台礁系统(图 2),

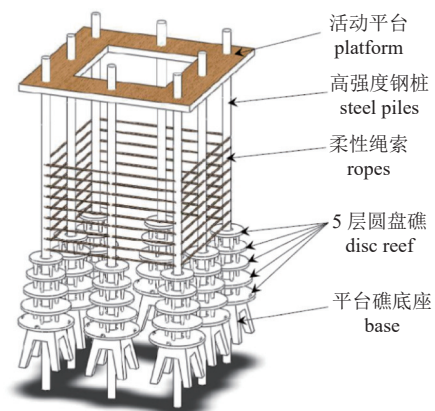


图 2 台礁示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the table reef

有望根本上解决上述问题。在人工鱼礁区拟布置8个大型平台礁,每个台礁系统东西方向上间距约400 m、南北方向上间距约300 m(图3)。

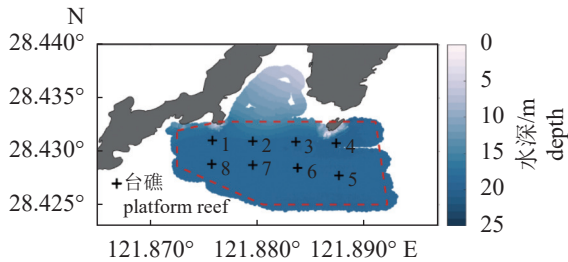


图3 人工鱼礁区水深与站点图

Fig. 3 Water depth and site map of artificial reef area

为了体现人工鱼礁对流场的影响,本实验选用了三种方法。以三维海洋数值模型的水平尺度来模拟鱼礁单体具有较高难度,故本实验中将底座和圆盘礁部分看作是平台礁的底座,单个平台礁系统共8个底座,视为一个单位鱼礁组合,高度为5.8 m,在本研究中只模拟5.8 m高的平台礁底座对流场的影响。

实心礁法直接修改网格水深。该方法采用了近似简化的方法,将8个平台礁底座和圆盘礁部分看作封闭不透水的固体,假设没有水流会穿透平台礁,因此在该实验中通过减去平台礁底座高度的水深值来体现鱼礁的形态。

阻滞力法在模型的动量方程里添加阻滞力项来模拟礁体对水流的阻滞作用,在本实验中假设迎流面始终是8个底座的垂向截面积之和,单个底座的迎流面积为 $7\text{ m}^2$ 。鱼礁在垂向上占据多个sigma层,本实验假设迎流面均匀分布在这些sigma层中,因此 $K_\sigma$ 在各层一致。鱼礁对水流的阻滞系数 $C_T$ 设为0.85<sup>[28]</sup>。

附加底摩擦法通过增加对应网格的底摩擦系数来体现鱼礁的存在。鱼礁区单个网格面积为 $173.2\text{ m}^2$ ,结合阻滞力法的设置,根据公式(22)可得鱼礁处底摩擦系数 $C_d$ 约为0.137,在人工鱼礁区未投礁处的底摩擦系数 $C_d=0.0025$ 。

### 1.8 泥沙经验公式

本研究采用已有广泛应用的半经验半理论回淤强度公式进行冲淤估算<sup>[19,32]</sup>,该方法基于工程实施前后流场的变化来估算海床的冲淤。

$$\Delta\zeta_b=0.5\left[(H_1+\beta\Delta tK_s)-\sqrt{(H_1-\beta\Delta tK_s)^2+4\beta\Delta tH_1K_F}\right] \quad (23)$$

$$K_F=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \quad (24)$$

$$K_s=1-\left(\frac{S_1-S_2}{S_*}\right) \quad (25)$$

$$\beta=\frac{\alpha\omega S_*}{\gamma_s} \quad (26)$$

式中, $\Delta\zeta_b$ 为冲淤幅度, $\omega$ 为泥沙沉降速度(m/s), $\alpha$ 为泥沙沉降概率,通常取值0.5~0.6, $H_1$ 为工程前水深, $V_1$ 、 $V_2$ 分别为工程前后流速, $S_1$ 、 $S_2$ 分别为工程前后水流含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $S_*$ 为工程实施前水流挟沙力, $\gamma_s$ 为泥沙干容重,根据经验公式 $\gamma_s=750D_{50}^{0.183}$ 计算,其中 $D_{50}$ 为中值粒径(mm)。如果初步计算结果 $\Delta\zeta_b$ 数值很小,则可以采用公式的计算结果,但当 $\Delta\zeta_b/H_1\geq 0.2$ 时需进行地形反馈计算,直到 $\Delta\zeta_b/H_1\leq 0.05$ 。上述公式曾在钱塘江河口和杭州湾水域广泛应用。

本研究采用全潮平均流速的变化对淤积进行估算。根据实测悬浮泥沙含沙量的数据反映,礁区附近海域含沙量较低,各测站悬沙含沙量一般在 $0.06\sim 0.10\text{ kg}/\text{m}^3$ ,人工鱼礁区海域悬沙粒径 $D_{50}$ 在 $0.0079\sim 0.0100\text{ mm}$ ,按照海域规范分类属于粉砂,沉降速度 $\omega$ 取常数 $0.0005\text{ m/s}$ ,沉降概率取值0.5。

## 2 结果

### 2.1 潮位流速验证

本研究选取大陈岛及附近海域4个验潮站(图4,表1)的潮位数据与模型结果进行对比。潮位数据来自国家海洋信息中心编制、海洋出版社出版的2018年潮汐表数据。数据的时间为2018年10月1日0时至11月1日0时。

潮位模拟值的时间序列与观测结果较为一致,模型结果的潮位振幅与潮汐的周期性变化均接近实测值(图5)。为了量化模型的准确性,本研究统计了4个测站的均方根误差(RMSE)<sup>[31]</sup>、相关系数( $r$ )、技能评估参数(Skill)<sup>[34]</sup>、纳什效率系数(NSE)<sup>[35-36]</sup>(表2)。

模型结果( $\chi_{\text{mod}}$ )和潮位数据( $\chi_{\text{obs}}$ )的均方根误差计算公式:

$$\text{RMSE}=\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(\chi_{\text{mod}}-\chi_{\text{obs}})^2\right]^{1/2} \quad (27)$$

相关系数 $r$ 的计算公式:

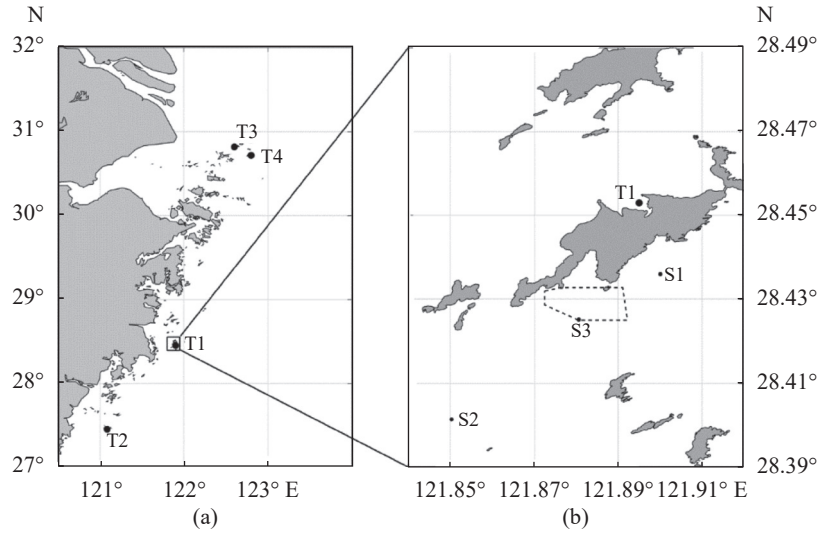


图 4 潮位验证站点 (a) 与流速验证站点 (b) 意图

Fig. 4 Tide level verification sites (a) and flow rate verification site (b)

表 1 潮位验证站点

Tab. 1 Tide level verification sites

站点编号 sites	站点名称 name	经度 longitude	纬度 latitude
T1	下大陈 Xiadachen	121°54'E	28°27'N
T2	南麂山 Nanjishan	121°05'E	27°27'N
T3	绿华山 Lvhuashan	122°36'E	30°49'N
T4	嵎山 Shengshan	122°48'E	30°43'N

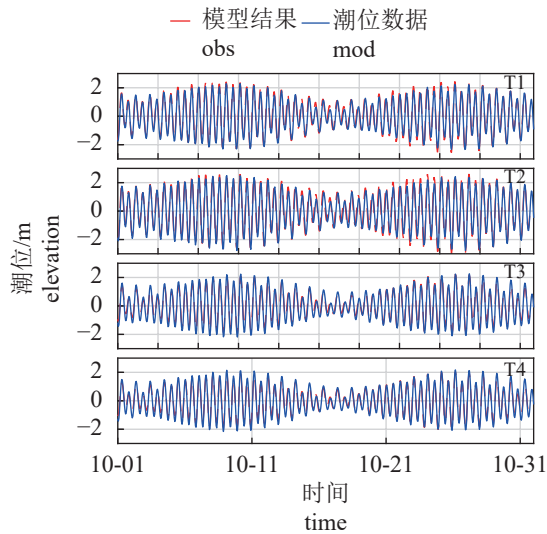


图 5 潮位时间序列

Fig. 5 Tide level time series

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\chi_{mod} - \bar{\chi}_{mod}) (\chi_{obs} - \bar{\chi}_{obs})}{\left[ \sum_{i=1}^N (\chi_{mod} - \bar{\chi}_{mod})^2 \sum_{i=1}^N (\chi_{obs} - \bar{\chi}_{obs})^2 \right]^{1/2}} \quad (28)$$

Skill 值可以用来表征模型模拟结果的质量, 其值越接近 1, 表示模型质量良好, 可信度高; 接近于 0 表示模拟结果与数据有较大差异:

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |\chi_{mod} - \chi_{obs}|^2}{\sum_{i=1}^N \left( |\chi_{mod} - \bar{\chi}_{mod}| + |\chi_{obs} - \bar{\chi}_{obs}| \right)^2} \quad (29)$$

NSE 值接近于 1, 说明模型模拟结果良好, 模型有较高可信度; 接近于 0 表示模拟结果接近观测值的平均值水平, 总体结果可信; 远远小于 0 则模型不可信:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (\chi_{mod} - \chi_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (\chi_{obs} - \bar{\chi}_{obs})^2} \right] \quad (30)$$

从对比结果看, 潮位模拟结果与潮汐表数据吻合较好, 均方根误差都在 0.19~0.34 之间, Skill、r、NSE 均大于 0.94, 说明模型具有较高的模拟精度。模型模拟潮位的整体变化趋势和量值都与实测值比较接近。

表 2 潮位误差统计表

Tab. 2 Tide level error statistics

站点 sites	均方根误差 RMSE	相关系数 r	模型技术得分 Skill	纳什效率系数 NSE
T1	0.23	0.98	0.99	0.96
T2	0.34	0.97	0.98	0.94
T3	0.21	0.99	0.99	0.95
T4	0.19	0.98	0.99	0.95

### 2.2 流速验证

流速验证主要为流速和流向的验证，本研究采用的流速流向验证数据来自 2019 年 11 月 22—23 日和 2020 年 7 月 2—7 日在 S1、S2、S3 站点的实测数据 (表 3)。流速观测使用声学多普勒流速剖面仪 (Nortek signature 500K)，单次测量周期为 25 h，数据垂向间隔 0.5 m。

在观测期间，各站点的表层流速均大于底层流速 (图 6, 图 7, 图 8)。S1、S2、S3 三个测量站点的表中底层流速流向误差统计如表 4。对比结果表明，大陈岛邻近海域潮流表现为往复流，模型

表 3 流速观测站点

站点编号 sites	经度 longitude	纬度 latitude
S1	121°54'12"E	28°26'27" N
S2	121°51'00" E	28°24'10" N
S3	121°52'50" E	28°25'30" N

计算的流速、流向与观测值的变化趋势基本保持一致。流向对比吻合度较高，流速对比基本吻合，流速均方根误差均小于 0.22。说明模型能够较准确地预测人工鱼礁区附近海域的水动力特征。

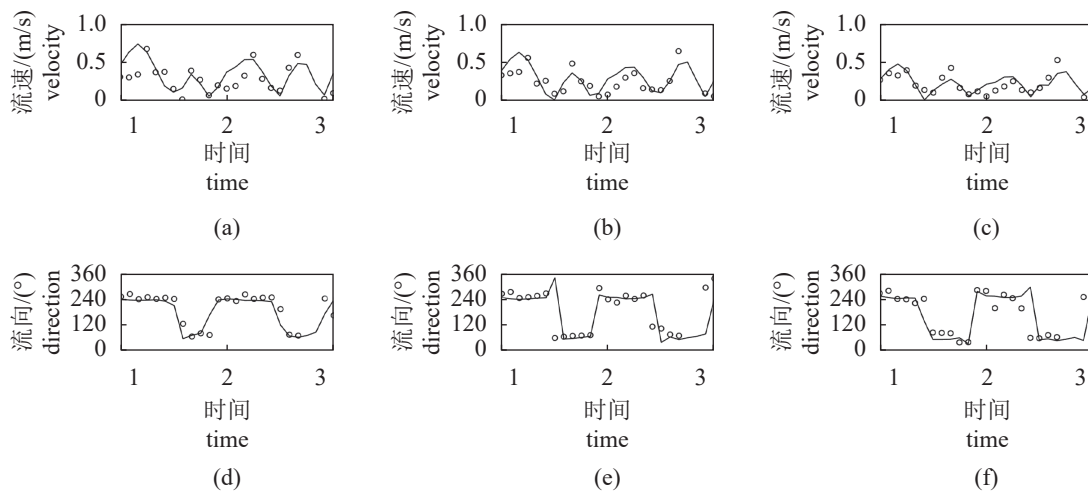


图 6 S1 站点流速 (a, b, c) 和流向 (d, e, f) 序列验证

(a) 和 (d) 表层, (b) 和 (e) 中层, (c) 和 (f) 底层; ○. 观测值; —. 模拟值; 1. 11-22 12:00, 2. 11-23 00:00, 3. 11-23 12:00; 下同

Fig. 6 Comparisons of velocity (a, b, c) and direction (d, e, f) of observation and stimulation in S1 site

(a) and (d) surface layer, (b) and (e) middle layer, (c) and (f) bottom layer; ○. observation, —. stimulation; 1. 11-22 12:00, 2. 11-23 00:00, 3. 11-23 12:00; the same below

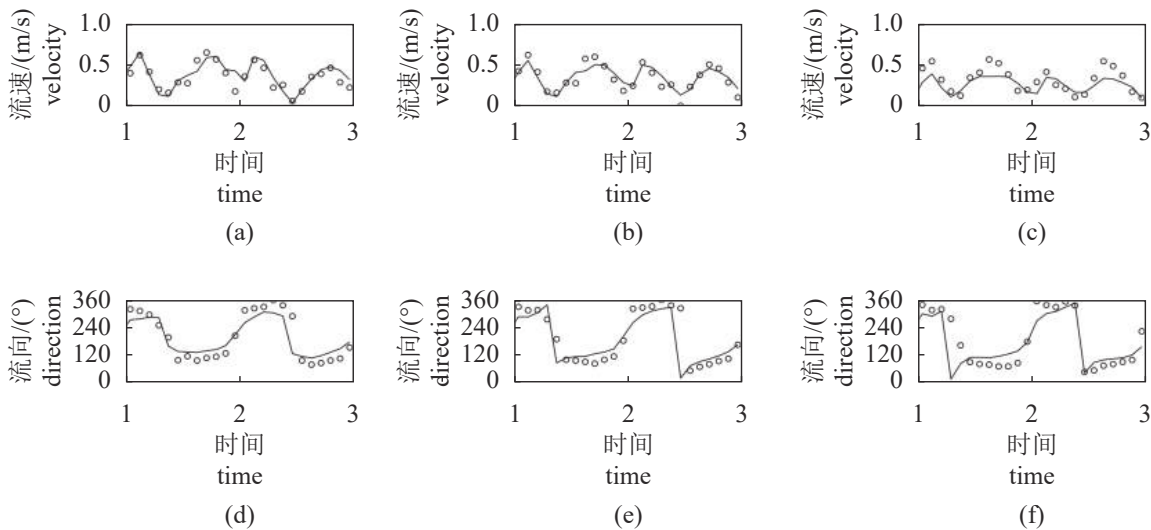


图 7 S2 站点流速 (a, b, c) 和流向 (d, e, f) 序列验证

Fig. 7 Comparisons of velocity (a, b, c) and direction (d, e, f) of observation and stimulation in S2 site

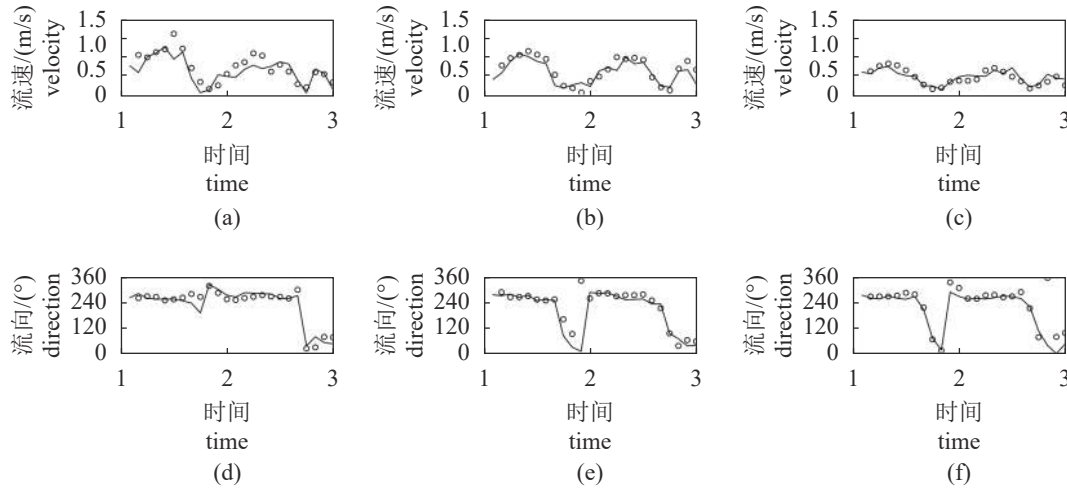


图 8 S3 站点流速 (a, b, c) 和流向 (d, e, f) 序列验证

Fig. 8 Comparisons of velocity (a, b, c) and direction (d, e, f) of observation and stimulation in S3 site

1. 07-04 12:00, 2. 07-05 00:00, 3. 07-05 12:00

表 4 流速流向误差统计

Tab. 4 Error statistics of velocity and direction

站点 sites		均方根误差 RMSE	相关系数 <i>r</i>	模型技术得分 Skill	纳什效率系数 NSE	
S1	表层 surface	流速 velocity	0.15	0.68	0.84	0.13
		流向 direction	33.25	0.91	0.97	0.80
	中层 middle	流速 velocity	0.12	0.73	0.85	0.36
		流向 direction	70.05	0.72	0.96	0.40
底层 bottom	流速 velocity	0.10	0.68	0.85	0.41	
	流向 direction	59.85	0.81	0.96	0.59	
S2	表层 surface	流速 velocity	0.09	0.85	0.91	0.65
		流向 direction	45.18	0.91	0.94	0.78
	中层 middle	流速 velocity	0.07	0.90	0.94	0.79
		流向 direction	67.74	0.79	0.95	0.61
底层 bottom	流速 velocity	0.10	0.84	0.84	0.53	
	流向 direction	68.92	0.83	0.95	0.68	
S3	表层 surface	流速 velocity	0.22	0.79	0.86	0.42
		流向 direction	61.20	0.68	0.87	0.44
	中层 middle	流速 velocity	0.18	0.76	0.91	0.52
		流向 direction	53.39	0.79	0.95	0.58
底层 bottom	流速 velocity	0.09	0.86	0.94	0.61	
	流向 direction	62.48	0.76	0.93	0.56	

### 2.3 人工鱼礁区及附近流场特征

水动力条件是影响人工鱼礁投放成效的重要因素, 鱼礁的稳定性在很大程度上依赖于鱼礁周围的物理环境以及水流-底质-礁体系统的相互作用。流速过大, 容易引起海底的冲淤, 水循环导致的洗掘现象可能会使礁体与底土层脱离, 发生位移或者翻滚<sup>[37]</sup>。人工鱼礁投放海域的流速一般

以不超过 0.8 m/s 为宜<sup>[38]</sup>。

以大潮期间 74.5 h (6 个 M<sub>2</sub> 分潮周期) 的表底层最大流速和表底层平均流速来表征人工鱼礁区的水动力特征。礁区附近岛屿众多, 地形复杂。大陈岛西侧流速较大, 最大流速出现在大陈岛和西侧岛屿之间的水道内, 礁区背靠海湾流速较小。大潮期间礁区表层最大流速可达 1.2 m/s, 表层平



均流速在岛礁南部可达 0.7 m/s，其余地区不超过 0.5 m/s，底层最大流速为 1.2 m/s，底层平均流速约 0.4 m/s (图 9)。

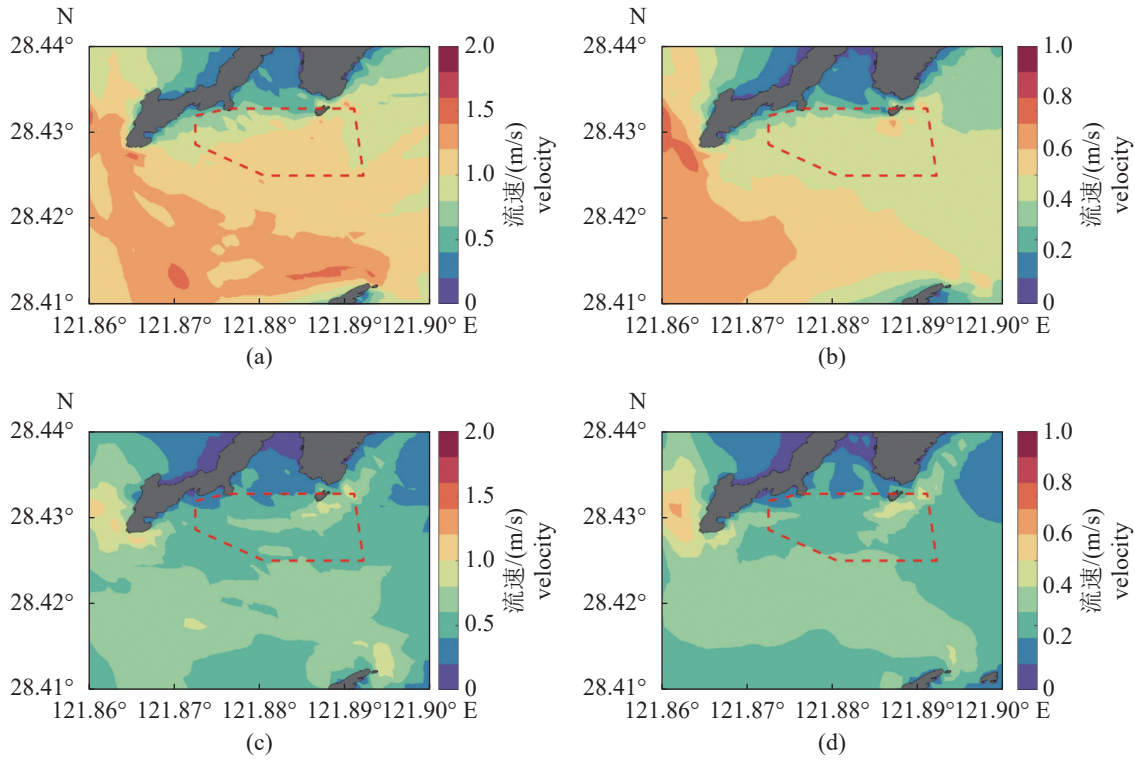


图 9 大潮期间表层 (a, b) 和底层 (c, d) 流速

(a) 表层最大流速, (b) 表层平均流速, (c) 底层最大流速, (d) 底层平均流速

Fig. 9 Surface (a, b) and bottom (c, d) current velocity during spring tide

(a) maximum velocity at the surface, (b) mean velocity at the surface, (c) maximum velocity at the bottom, (d) mean velocity at the bottom

人工鱼礁区大潮期间涨急流方向为西向，表层为西偏北，底层为西偏南 (图 10)。涨急时刻礁区表层流速整体在 0.8 m/s 以上，底层流速不超过 0.6 m/s。礁区南部落急流方向为东南向，受岛屿影响，落急时礁区流向散乱、流速较小，表底层均不超过 0.6 m/s。整体而言，礁区流速较小，符合人工鱼礁建设的条件。

### 2.4 人工鱼礁的流场效应

随着潮涨潮落，水流经过鱼礁时，流速、流向均发生改变。垂向上通常表现为在迎流面产生上升流，水平方向上礁体背面流速减小产生背涡流，鱼礁两侧流速增大。在本研究中，当使用实心礁法来体现鱼礁时，水平方向上迎流面和礁体背面流速减小，鱼礁和礁体两侧流速增大。如图 11，在涨急时刻，水平方向上流速最大增加了 0.14 m/s，礁体背面的流速最大减小了 0.18 m/s；垂向上，迎流面产生的上升流流速最大可达 0.19 m/s，礁体背面产生的下降流流速最大可达 0.17

m/s。在礁区南部地形平坦处鱼礁对流场的影响范围约为礁体组合长度的 12 倍。当使用附加底摩擦的方法时，在礁顶平面水平方向上流速改变较小，礁体处垂向流速增大，最大增量为 0.003 m/s。通过在模型中增加阻滞力项，涨急时刻鱼礁背面的流速减小范围可达礁体组合长度的 20 倍以上，使用阻滞力法时垂向流速增加的量级不及实心礁法，迎流面垂向上产生的上升流流速最大为 0.005 m/s。

来流流速和地形决定了台礁对流场的影响程度，相同水深下在流速较大处有更明显的流场效应。1 至 4 号台礁位于礁区北部，该区域靠近天然岛礁，水深变化大且流场情况复杂。7 号台礁靠近礁区中心，周围地势平坦，本实验在分析单个台礁对流场的影响时将其作为研究对象。图 12 为 7 号台礁所在网格以及相邻网格在涨急时刻的流速剖面，图中灰色线条代表了 sigma 分层情况。在未设置礁体时表层流速为 0.75 m/s，底层流速为 0.48 m/s，垂向上呈现对数分布。P0 表示礁体所在的网格点，实心礁法将礁体看作海底的一部

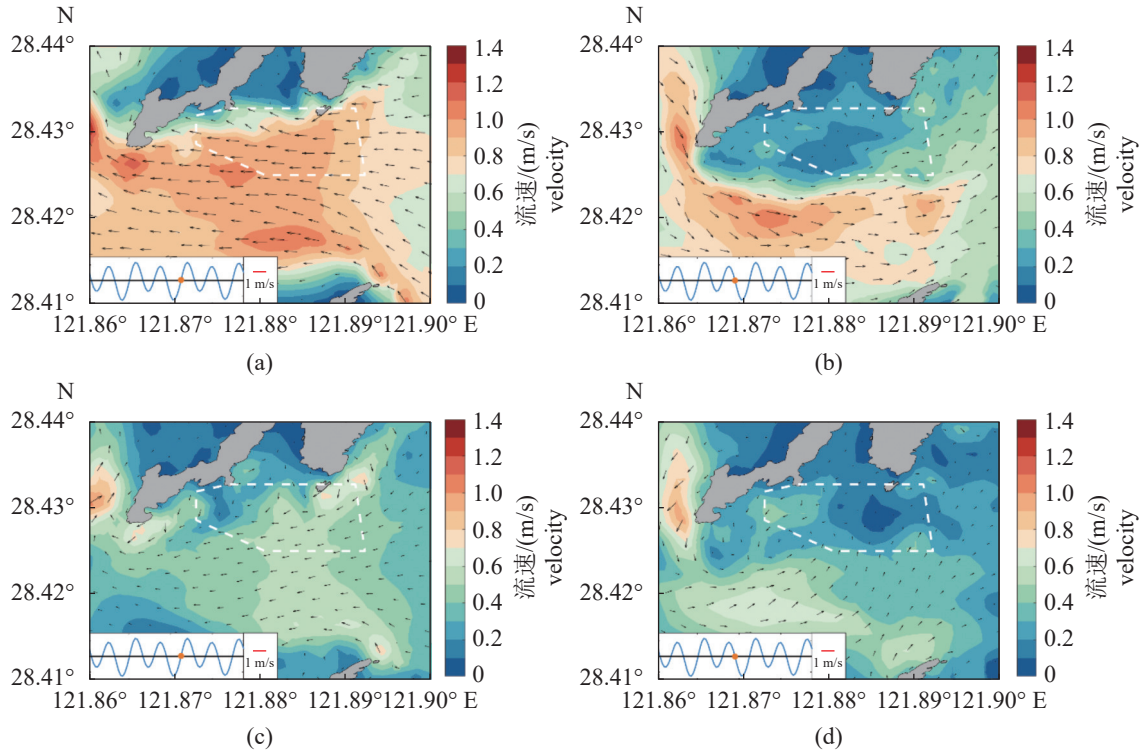


图 10 大潮期间表层 (a, b) 和底层 (c, d) 涨落急时刻流速

(a) 涨急表层流, (b) 落急表层流, (c) 涨急底层流, (d) 落急底层流

Fig. 10 Current velocities of the surface (a, b) and bottom (c, d) flood and ebb during spring tide

(a) maximum of surface flood tidal currents, (b) maximum of surface ebb tidal currents, (c) maximum of bottom flood tidal currents, (d) maximum of bottom ebb tidal currents

分, 修改了该网格的水深值, 实心礁法的海底面即礁顶平面, 流速为 0.61 m/s, 表层流速为 0.89 m/s。虚线代表了实心礁法的 sigma 分层, 在垂向上更为密集。由于底摩擦作用在底边界上, 附加底摩擦法的流速剖面与未设置鱼礁时基本一致, 在距离海底 0.6 m 范围内流速减小, 底层流速减小为 0.10 m/s。鱼礁是结构复杂、最大高度远离海底的结构物, 阻滞力法体现了礁体对水流的阻滞作用, 在鱼礁占据的水层内流速均减小, 礁体以上水层的流速剖面与未投礁时一致。表层流速为 0.75 m/s, 底层流速为 0.43 m/s。礁顶平面流速为 0.66 m/s, 礁体占据的水层的流速相较于未设置礁体时减少了 0.05 m/s。P2 表示礁体迎流面, 由于受到礁体阻碍, 水流往礁体两侧和上方流动, 此时阻滞力法在礁体占据的水层流速增大 0.03 m/s。附加底摩擦法在距离海底 0.4 m 的范围内流速增大, 底层流速为 0.62 m/s。P4 为礁体背流面, 阻滞力法在礁体占据的水层同样出现流速减小, 相较于未设置礁体时减少了 0.04 m/s。附加底摩擦法距海底 1.0 m 范围内出现流速减小, 底层流速减小为 0.41 m/s, 。P1 和 P3 为礁体两侧网格, 附加

底摩擦法距海底 0.6 m 范围内出现流速减小, 底层流速减小为 0.31 m/s。阻滞力法在礁体占据的水层出现流速减小, 相较于未设置礁体时减少了 0.03 m/s。在礁体两侧与礁体迎流面, 实心礁法产生的流速均大于未设置礁体时, 在礁体背面出现流速减小。

图 13 为 7 号台礁所在网格以及相邻网格在落急时刻的流速剖面, 在未设置礁体时表层流速为 0.73 m/s, 底层流速为 0.40 m/s。P0 表示礁体所在的网格点, 实心礁法的海底面即礁顶平面, 流速为 0.49 m/s, 表层流速为 0.82 m/s。附加底摩擦法在距离海底 0.6 m 范围内流速减小, 底层流速减小为 0.11 m/s。阻滞力法在鱼礁占据的水层内流速均减小, 表层流速为 0.73 m/s, 底层流速为 0.36 m/s。礁顶平面流速为 0.54 m/s, 礁体占据的水层其水流流速相较于未设置礁体时减少了 0.06 m/s。P2 为礁体背流面, 阻滞力法在礁体占据的水层同样出现流速减小, 相较于未设置礁体时减少了 0.07 m/s。附加底摩擦法底层流速减小为 0.19 m/s, 距海底 0.8 m 范围内出现流速减小。P1 和 P3 为礁

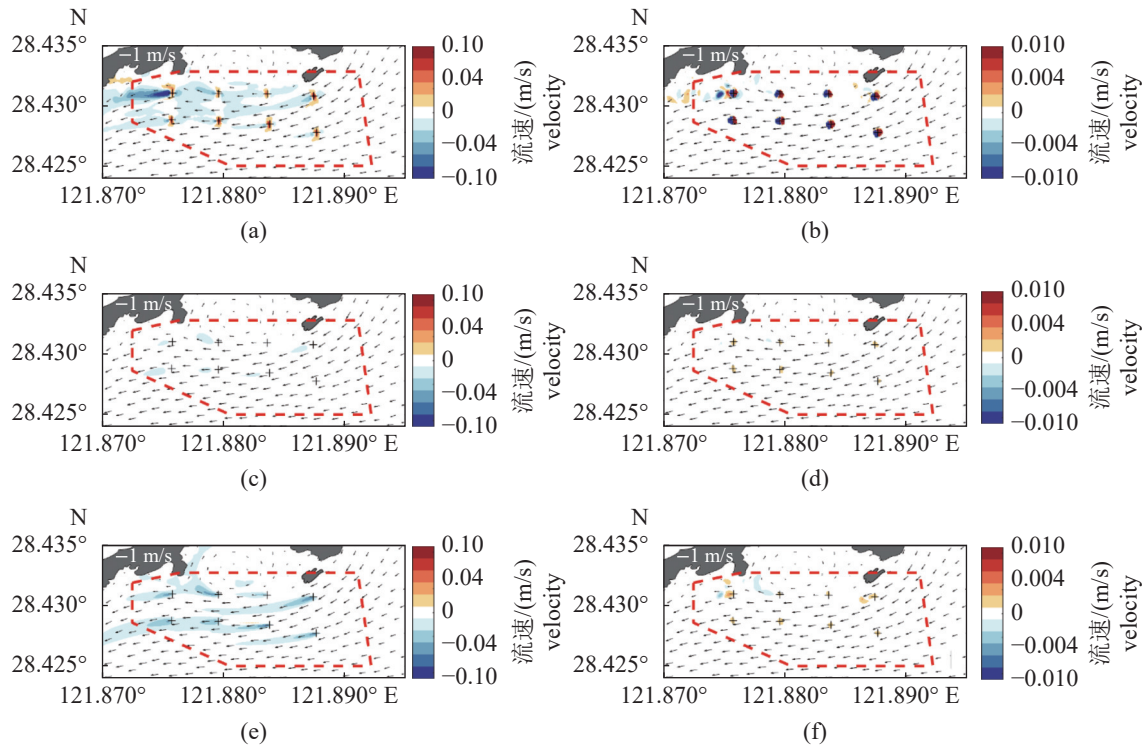


图 11 投礁前后水平流速差异 (a, c, e) 和垂向流速差异 (b, d, f)

(a) 和 (b) 实心礁法, (c) 和 (d) 附加底摩擦法, (e) 和 (f) 阻滞力法; 图 16 同

Fig. 11 Differences in horizontal flow velocity (a, c, e) and vertical flow velocity (b, d, f)

(a) and (b) method of water depth modified, (c) and (d) method of bottom friction increased, (e) and (f) method of retarding force; the same as fig. 16

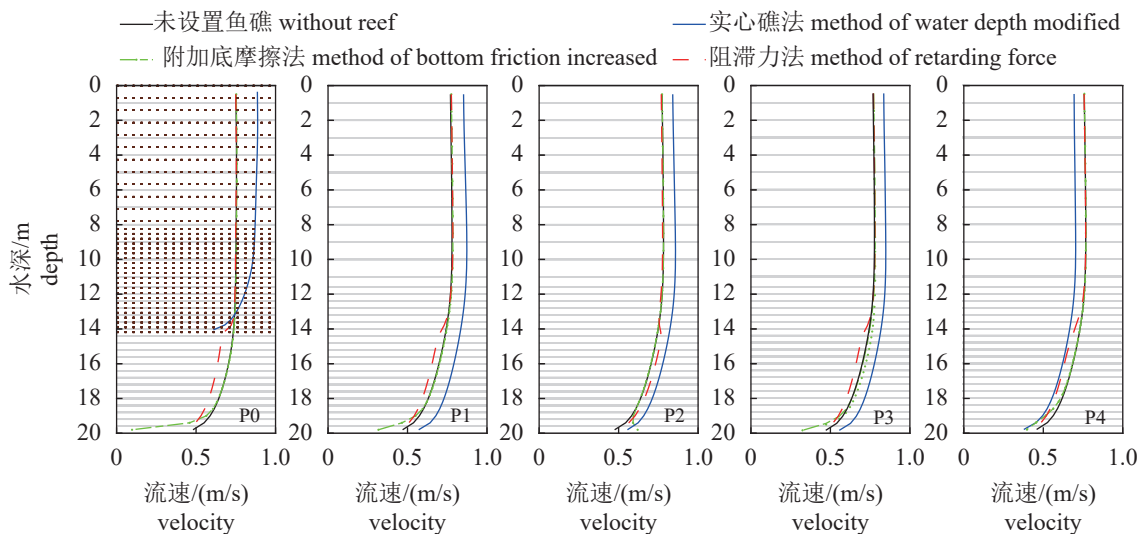


图 12 典型涨流速剖面

P0. 单位鱼礁所处网格, P1 和 P3. 单位鱼礁两侧网格, P2. 单位鱼礁迎水面网格, P4. 单位鱼礁背水面网格; 灰色线条. sigma 分层; 下同

Fig. 12 Typical velocity profile of flood tide

P0. grid on where the reef is located, P1 and P3. grid on both sides of the reef, P2. grid on the headwater side of the reef, P4. grid on the backwater side of the reef; gray lines. sigma layer; the same below

体两侧, 阻滞力法和附加底摩擦法的流速剖面与未设置礁体时一致。在礁体两侧与礁体背流面,

实心礁法产生的流速均大于未设置礁体时。P4 表示礁体迎水面, 由于模型使用三角网格, P4 网格

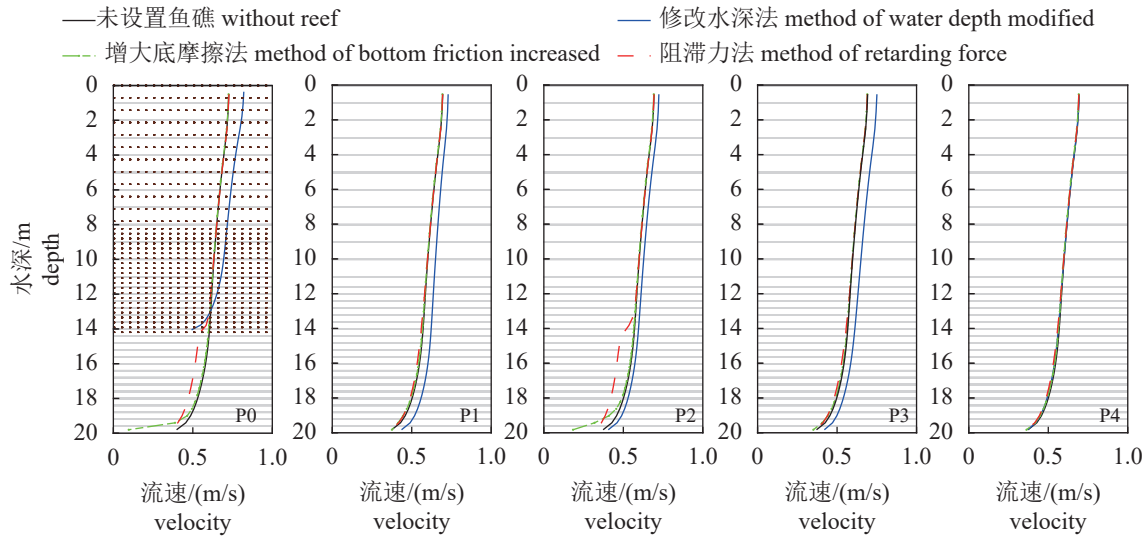


图 13 典型落急流速剖面

Fig. 13 Typical velocity profile of ebb tide

不与 P0 直接接壤, 在落急时刻没有体现出礁体迎流面流速增大的效果。

人工鱼礁的流场效率评价主要是通过对上升流和背涡流规模的衡量。通常将垂向速度分量与来流流速相比, 增量大于来流流速的 0.10 倍、0.15 倍和 0.20 倍的空间体积作为上升流规模的度量指标; 将礁体背面流速与来流流速之比小于 0.70 倍、0.75 倍和 0.80 倍的空间体积作为背涡流的度量指标。在模型中添加阻滞力项时, 垂向上的流速增量并不显著, 本研究引入向上的水体输运通量来体现上升流的规模<sup>[18]</sup>:

$$V_{up,k} = \sum_{i=1, m}^{j=1, n} S_{i,j} w_{i,j} (w_{i,j} > 0) \quad (31)$$

其中,  $V_{up,k}$  为垂向上第  $k$  层的向上水体输运通量。本研究使用的模型水平网格为三角形, 在计算向上水体输运通量时插值为  $m \times n$  的矩形网格。  $S_{i,j}$  为网格面积,  $w_{i,j}$  为该网格垂向上的流速。统计垂向流速大于 0 的网格面积和对应的垂向速度, 计算向上的水体输运通量来表征礁体对底层水向上输送的影响。

本实验将礁体背面流速与来流流速之比小于 0.8 倍的空间体积看作背涡流体积。选取 6 个  $M_2$  分潮周期, 计算了以 7 号台礁为中心, 200 m × 200 m 范围内 3 种鱼礁体现方法的向上水体输运通量和背涡流体积随时间变化情况。如图 14 所示, 滤波后背涡流体积和向上水体输运通量有明显的周期性变化, 在涨落急时刻能获得更大的流场效应。

当使用实心礁法来体现鱼礁时, 对流场的改变较为明显, 平均向上水体输运通量为 288 m<sup>3</sup>, 平均背涡流体积 4 180 m<sup>3</sup>; 使用附加底摩擦法时, 鱼礁导致的平均向上水体输运通量为 6 m<sup>3</sup>, 平均背涡流体积为 857 m<sup>3</sup>; 阻滞力法产生的平均向上水体输运通量为 66 m<sup>3</sup>, 平均背涡流体积 1 550 m<sup>3</sup>。

## 2.5 底床泥沙冲淤

基于数值模拟的结果, 对潮流进行调和分析得到了研究区域  $M_2$  分潮的潮流椭圆。椭圆的长轴长度代表分潮流最大流速, 长轴方向表示最大潮流流向, 椭圆的短轴与长轴的比值越小越接近往复流, 越大接近旋转流, 该区域潮流椭圆均逆时针旋转。图 15 中, 红色实线表示底层流的潮流椭圆, 黑色虚线代表表层流的潮流椭圆。鱼礁所在点的底层流流速为 0.12~0.36 m/s, 表层流流速较大, 更接近往复流。

利用经验公式计算 1 年的冲淤结果如图 16, 投礁前后的底层流场变化决定了底床冲淤。投礁后礁体附近流速发生改变, 流速增大的区域呈现冲刷效果, 流速减小的区域呈现淤积效果。冲淤方向与底层流的潮流椭圆一致。实心礁法在礁区西北侧最大淤积厚度为 0.24 m, 底床泥沙的最大冲刷厚度为 0.52 m。在人工鱼礁区中部和东部冲淤不明显, 底床厚度改变均在 0.10 m 左右。附加底摩擦法仅在礁体周围冲淤明显, 底床泥沙最大淤积厚度为 0.37 m, 最大冲刷厚度为 0.25 m。阻滞力法的冲淤结果在空间分布上与实心礁法相近,

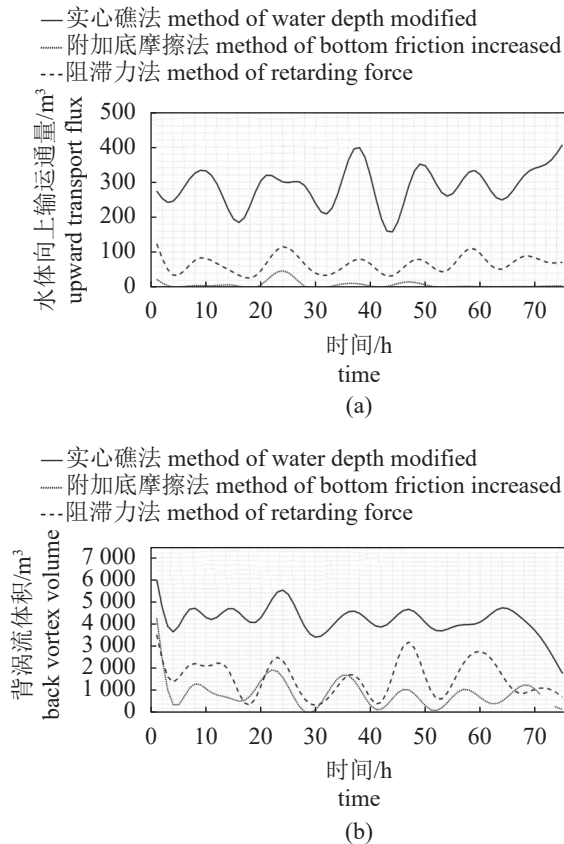


图 14 水体向上输运通量 (a) 和背涡流体积 (b)

Fig. 14 Upward transport flux (a) and back eddy volume (b)

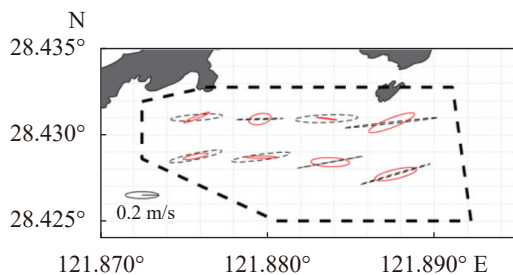


图 15 潮流椭圆

红色实线. 底层, 黑色虚线. 表层

Fig. 15 Tidal ellipse

red solid line. bottom layer, black dotted line. surface layer

总体呈现淤积效果, 在礁区西北侧有最大冲刷厚度 0.34 m, 最大淤积厚度为 0.17 m, 平均底床厚度改变约为 0.05 m。

### 3 讨论

本实验从实际海洋驱动要素出发, 研究人工鱼礁区周围的水动力情况以及人工鱼礁对周边海域造成的影响。验证结果表明, 所建模型精度良

好, 能够较好地进行人工鱼礁区和附近海域的数值模拟研究。模拟实验结果表明, 人工鱼礁规划区及周围海域水动力条件总体适合投放人工鱼礁。

以三维海洋数值模型的水平尺度来模拟小型鱼礁单体具有较高难度, 通过对比三种体现置底结构物的方法, 在模型的动量方程中添加阻滞力项来模拟透水性人工鱼礁在逻辑上更可行。阻滞力法考虑了透水性礁体的造型、迎流面积、组合个数和布放方式等因素, 模拟了鱼礁对水流的阻滞作用。该方法可以将结构物设置在任意水层, 因此阻滞力法理论上也可在大尺度模型中体现浮鱼礁。基于该特性, 本实验也能实现对台礁钢桩的模拟体现台礁整体的阻流效应, 但考虑到实心礁法对礁体体积的高估, 故只对底座进行了模拟。姜昭阳<sup>[39]</sup>基于 CFD 模型和物理水槽模型模拟了中空立方型礁体的流场效应, 结果表明礁体所在处流速减小, 仅开口处出现局部的流速增大。在来流流速为 0.5 m/s 情况下, 礁后距礁体 0.5 倍礁长处的流速剖面表现为流速在礁体占据的水层内减少约 20%。Liu 等<sup>[6]</sup>基于 CFD 模型模拟了透水性立方型礁体的礁后缓流区长度约为 12 倍礁体长度。林军等<sup>[40]</sup>基于 CFD 模型模拟了边长 3 m 的透水性回字型礁体的 9 礁组合在 1 倍礁长间距下, 面对 1 m/s 的来流, 背涡流体积均值为 1459.6 m<sup>3</sup>。本研究中, 台礁底座的流场作用范围与类似的 CFD 模型、水槽模型的礁体组合计算结果相近<sup>[6,39-40]</sup>, 阻滞力法能很好体现礁体对水流的阻滞作用, 流速剖面体现了台礁底座的高度及透水性。

实心礁法将网格面积近似为礁体占地面积, 会过高估计礁体体积, 同时忽略了礁体的透水性, 因此, 实心礁法很大程度上过高估计了礁体的水动力效应。实心礁法减小了网格水深导致过流断面减小, 垂向上 sigma 层与层之间的间隔也变小。由于水体的连续性和模型计算的特性, 下一网格计算需要用到上一网格的数据, 流速增大的情况会影响到周围网格。在计算底床泥沙冲淤情况时, 实心礁法造成的冲淤趋势与阻滞力法一致但程度稍强, 较适合堆积型鱼礁山的情形。

附加底摩擦的方法在本研究中无法模拟出礁顶的水平流场情况, 对泥沙冲淤的影响范围仅局限在礁体附近。由于计算底摩擦系数用到的距海底高度通常为离海底最近的 sigma 层与海底之间的距离, 因此礁体对水流的阻力设在底边界上而非水体中, 较难准确体现具有一定高度的结构物。

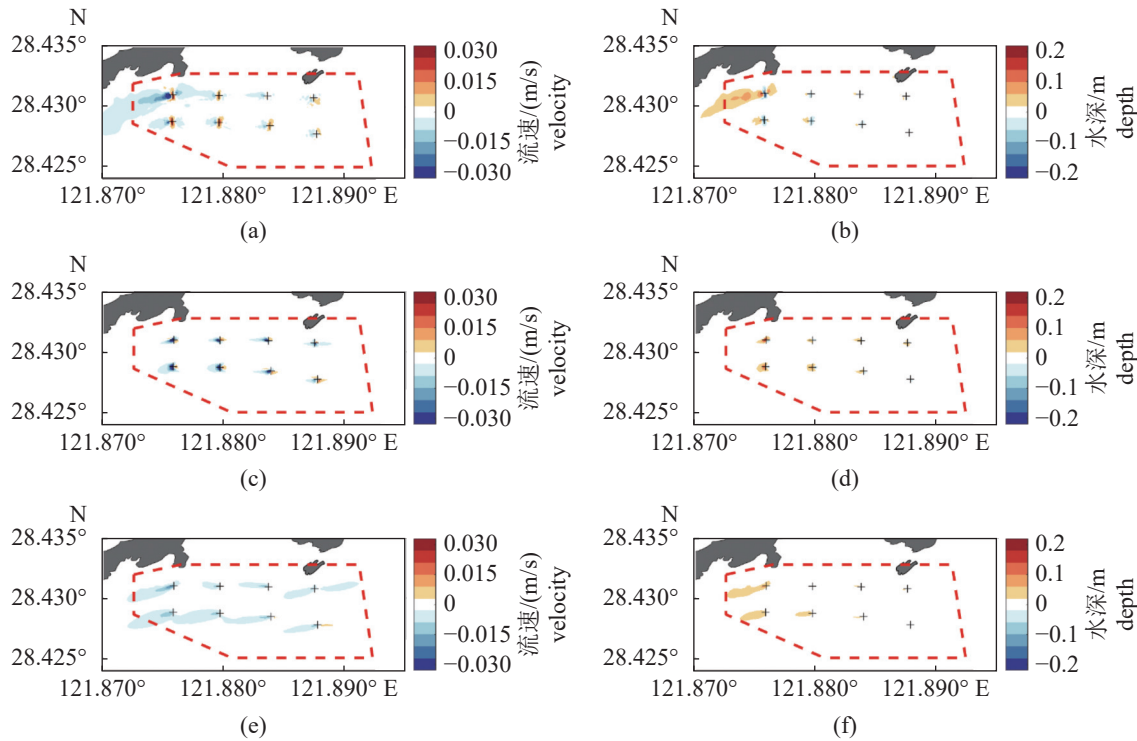


图 16 投礁前后平均流速差异 (a, c, e) 和一年后底床泥沙冲淤情况 (b, d, f)

Fig. 16 Difference in velocity (a, c, e) and situation of erosion and deposition after one year (b, d, f)

附加底摩擦法参数单一、无法体现各向差异,且完全不适用于浮鱼礁。

本研究中鱼礁对水流的阻滞系数采用了常数,这个值应通过物理水槽模型或 CFD 仿真模拟来确定<sup>[23]</sup>。本研究中迎流面积采用了常数,假设来流始终正对台礁的一个面。阻滞力法中的迎流面积可以是布放方式、来流流向的函数,平铺或堆叠等布放方式可以体现在迎流面积的差异上,且对于不同方向的来流,不同迎流面的迎流面积也不同。本研究初步验证了阻滞力法在大尺度海洋模型中体现人工鱼礁的可行性,下一步将对阻滞力公式中各个参数进行详细的实验,充分考虑礁体自身及环境因素的影响,并对模型的湍流项进行修改<sup>[23]</sup>,进一步优化人工鱼礁在模型中的体现方式。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献 (References):

- [1] 林承刚, 杨红生, 陈鹰, 等. 现代化海洋牧场建设与发展——第230期双清论坛学术综述[J]. 中国科学基金, 2021, 35(1): 143-152.
- Lin C G, Yang H S, Chen Y, *et al.* Construction and development of modern marine ranching academic

review of the 230th Shuangqing forum[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(1): 143-152 (in Chinese).

- [2] Ogiwara S, Awashima Y, Miyabe H, *et al.* Conceptual design of a deep ocean water upwelling structure for development of fisheries[C]//Fourth ISOPE Ocean Mining Symposium. Szczecin: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001.
- [3] Macreadie P I, Fowler A M, Booth D J. Rigs - to - reefs: will the deep sea benefit from artificial habitat?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(8): 455-461.
- [4] Claisse J T, Pondella II D J, Love M, *et al.* Oil platforms off California are among the most productive marine fish habitats globally[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(43): 15462-15467.
- [5] Cresson P, Le Direach L, Rouanet E, *et al.* Functional traits unravel temporal changes in fish biomass production on artificial reefs[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 145: 137-146.
- [6] Liu T L, Su D T. Numerical analysis of the influence of reef arrangements on artificial reef flow fields[J]. *Ocean*

- Engineering*, 2013, 74: 81-89.
- [7] 于定勇, 杨远航, 李宇佳. 不同开口比人工鱼礁体水动力特性及礁体稳定性研究[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(4): 128-136.  
Yu D Y, Yang Y H, Li Y J. Research on hydrodynamic characteristics and stability of artificial reefs with different opening ratios[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(4): 128-136 (in Chinese).
- [8] 戚福清, 林军, 张清雨. 不同侧板结构对八棱柱型人工鱼礁流场效应影响的研究 [J]. 水产学报, DOI: 10.11964/jfc.20210512862.  
Qi F Q, Lin J, Zhang Q Y. Study on the influence of different side plate structures on the flow field effect of octagonal prism artificial reef[J]. *Journal of Fisheries of China*, DOI: 10.11964/jfc.20210512862.
- [9] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4): 347-404.
- [10] Roc T, Conley D C, Greaves D. Methodology for tidal turbine representation in ocean circulation model[J]. *Renewable Energy*, 2013, 51: 448-464.
- [11] Zhang Y, Chen C S, Xue P F, *et al.* A view of physical mechanisms for transporting harmful algal blooms to Massachusetts Bay[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 154: 111048.
- [12] Ge J Z, Shi S Y, Liu J, *et al.* Interannual variabilities of nutrients and phytoplankton off the Changjiang Estuary in response to changing river inputs[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(3): e2019JC015595.
- [13] Ge J Z, Torres R, Chen C S, *et al.* Influence of suspended sediment front on nutrients and phytoplankton dynamics off the Changjiang Estuary: a FVCOM-ERSEM coupled model experiment[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 204: 103292.
- [14] Zhang Z W, Wu H, Peng G Y, *et al.* Coastal ocean dynamics reduce the export of microplastics to the open ocean[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136634.
- [15] Ding Z L, Zhu J R, Lyu H H. Impacts of the Qingcaosha Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. *Anthropocene Coasts*, 2021, 4(1): 17-35.
- [16] Lyu H H, Zhu J R. Impact of the bottom drag coefficient on saltwater intrusion in the extremely shallow estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 838-850.
- [17] 郭禹, 章守宇, 林军. 以数值实验为基础的米字型鱼礁布设模式差异下的流场效率[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2025-2038.  
Guo Y, Zhang S Y, Lin J. Flow field efficiency of Mi-zi artificial reefs in different construction modes based on numerical experiments[J]. *Journal of fisheries of China*, 2019, 43(9): 2025-2038 (in Chinese).
- [18] 方继红, 林军, 杨伟, 等. 双层十字翼型人工鱼礁流场效应的数值模拟 [J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(4): 743-754  
Fang J H, Lin J, Yang W, *et al.* Numerical simulation of flow field effect around the double-layer cross-wing artificial reef[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(4): 743-754
- [19] 林军, 吴星辰, 杨伟. 潮流作用下人工鱼礁山海域泥沙输运的数值模拟研究[J]. 水产学报, 2020, 44(12): 2087-2099.  
Lin J, Wu X C, Yang W. Numerical modelling of sediment transport in artificial seamount by the action of tidal current[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(12): 2087-2099 (in Chinese).
- [20] Bryden I G, Couch S J. ME1—marine energy extraction: tidal resource analysis[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(2): 133-139.
- [21] Karsten R H, McMillan J M, Lickley M J, *et al.* Assessment of tidal current energy in the Minas Passage, Bay of Fundy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2008, 222(5): 493-507.
- [22] Walkington I, Burrows R. Modelling tidal stream power potential[J]. *Applied Ocean Research*, 2009, 31(4): 239-245.
- [23] Li X R, Li M, McLelland S J, *et al.* Modelling tidal stream turbines in a three-dimensional wave-current fully coupled oceanographic model[J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 297-307.
- [24] Couch S J, Bryden I. Tidal current energy extraction: hydrodynamic resource characteristics[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2006, 220(4): 185-194.
- [25] Martin-Short R, Hill J, Kramer S C, *et al.* Tidal resource extraction in the Pentland Firth, UK: potential impacts

- on flow regime and sediment transport in the Inner Sound of Stroma[J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 596-607.
- [26] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [27] Yang Z Q, Wang T P, Copping A E. Modeling tidal stream energy extraction and its effects on transport processes in a tidal channel and bay system using a three-dimensional coastal ocean model[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 605-613.
- [28] Murray R O H, Gallego A. A modelling study of the tidal stream resource of the Pentland Firth, Scotland[J]. *Renewable Energy*, 2017, 102: 326-340.
- [29] Lin J, Li C Y, Zhang S Y. Hydrodynamic effect of a large offshore mussel suspended aquaculture farm[J]. *Aquaculture*, 2016, 451: 147-155.
- [30] Sutherland G, Foreman M, Garrett C. Tidal current energy assessment for Johnstone strait, Vancouver Island[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, 221(2): 147-157.
- [31] Lee S B, Li M, Zhang F. Impact of sea level rise on tidal range in Chesapeake and Delaware Bays[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(5): 3917-3938.
- [32] 王义刚, 林祥, 冯卫兵. 计算淤泥质海岸围垦多年回淤强度的一种简便方法[J]. *河海大学学报*, 2000, 28(6): 100-102.
- Wang Y G, Lin X, Feng W B. A simple method for calculating long-term deposition rate after construction of warping bank in estuary[J]. *Journal of Hohai University*, 2000, 28(6): 100-102 (in Chinese).
- [33] Coffey M E, Workman S R, Taraba J L, *et al.* Statistical procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(1): 59-68.
- [34] Warner J C, Geyer W R, Lerczak J A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C5): C05001.
- [35] Bitew M M, Gebremichael M. Evaluation of satellite rainfall products through hydrologic simulation in a fully distributed hydrologic model[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(6): W06526.
- [36] Gupta H V, Kling H. On typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(10): W10601.
- [37] 贾后磊, 谢健, 彭昆仑. 人工鱼礁选址合理性分析[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(4): 72-75.
- Jia H L, Xie J, Peng K L. Reasonable analysis on the artificial reef site location[J]. *Ocean Development and Management*, 2009, 26(4): 72-75 (in Chinese).
- [38] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. *海洋学研究*, 2006, 24(4): 69-76.
- Zhao H T, Zhang Y F, Hao C L, *et al.* Siting and designing of artificial reefs[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2006, 24(4): 69-76 (in Chinese).
- [39] 姜昭阳. 人工鱼礁水动力学与数值模拟研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- Jiang Z Y. Hydrodynamics and numerical simulation of artificial reefs[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese).
- [40] 林军, 章守宇, 叶灵娜. 基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究[J]. *水产学报*, 2013, 37(7): 1023-1031.
- Lin J, Zhang S Y, Ye L N. Optimization study of artificial reef assemblage based on the numerical simulation of flow field[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(7): 1023-1031 (in Chinese).



## Numerical simulation of the flow retarding effect of large-scale permeable artificial reefs

YANG Wei<sup>1</sup>, LIN Jun<sup>1,2\*</sup>, TANG Jianjiang<sup>3</sup>, YANG Guanlin<sup>1</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. East China Sea Forecasting Center, State Oceanic Administration, Shanghai 200136, China)

**Abstract:** Artificial reefs can be regarded as artificial structures in the sea. There are three methods to reflect bottom structures in large-scale ocean models: method of water depth modified treats artificial reefs as impermeable solids and reflects reefs by changing the water depth, which is applicable to impermeable reef mountains; method of bottom friction increased reflects the obstruction of water flow by structures on the seabed by increasing the bottom friction of the model, which is applicable to the simulation of submarine mussel beds and low oyster reefs; method of retarding force simulates the obstruction of water flow in different water layers by adding a retarding force term to the model momentum equation. In order to reasonably represent the permeable artificial reef assemblage in the large-scale ocean model, the hydrodynamic conditions of the proposed artificial reef area on Dachen Island were simulated based on the numerical ocean model FVCOM (An unstructured grid Finite-Volume Community Ocean Model), and the differences of vertical flow velocity, reef top plane flow velocity, upward transport flux and back eddy volume before and after reefing were compared among the method of water depth modified, method of bottom friction increased and method of retarding force. Based on the difference of flow velocity before and after reef casting, the empirical formula was applied to predict the bottom bed sediment flushing and siltation one year after reef casting. The numerical simulation results showed that by adding the retarding force term in the model, the flow velocity in the occupied water layer was reduced by 0.06 m/s compared with the time when the reef was not installed, and the maximum upward flow velocity was 0.005 m/s in the direction of incoming flow; the reduction of flow velocity at the back of the reef at the time of rapid rise can be more than 20 times of the combined length of the reef, and the maximum thickness of the bottom bed siltation after one year in the corresponding flow velocity reduction sea was about 0.05 m, the average upward water transport flux of single reef was 66 m<sup>3</sup>, and the back eddy volume was 1 550 m<sup>3</sup>. Compared with the method of water depth modified and the method of bottom friction increased, the retarding force method can well represent the effect of the reef on water flow, avoiding the problem of overestimating the flow field effect in the simulation of permeable reefs by the method of water depth modified, and without the defect that the method of bottom friction increased is only applicable to low reefs. The hysteresis method is not only applicable to the bottom-set permeable reefs, but also to the study of hydrodynamics and ecodynamics of enrichment culture facilities such as floating reefs and net cages.

**Key words:** artificial reef; flow retarding effect; An unstructured grid Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM; method of retarding force; seabed erosion and deposition

**Corresponding author:** LIN Jun. E-mail: jlin@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Key R&D Program of China(2019YFD0901302); China National Offshore Oil Corporation Foundation