



潮流作用下人工鱼礁山海域泥沙输运的数值模拟研究

林 军^{1,2*}, 吴星辰¹, 杨 伟¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为探究人工鱼礁投放后对海域底质的影响, 实验基于海洋数值模型 FVCOM (finite volume community ocean model) 及其泥沙计算模块, 对嵊泗马鞍列岛的人工鱼礁山的流场效应、悬沙和底床泥沙冲淤效果进行了数值模拟研究。数值模型中圆台型堆积人工鱼礁山设置为直径 100 m、高度 10 m, 将人工鱼礁山部分简化为密闭空间并减去相应高度的水深, 以体现潮流作用下鱼礁山周围的泥沙悬浮、底床冲淤效应。通过对大小潮期间涨急、落急时刻流场的分析, 结果发现鱼礁山对流速的影响主要体现在鱼礁山附近, 礁体上方及潮流主轴两侧的底层流速增加, 背流面一侧流速大幅减弱。鱼礁山投放前后悬浮泥沙含量的差异与流场变化趋势比较接近, 最大值不超过 0.01 g/L。海床的泥沙冲淤结果在人工鱼礁山周围表现为沿涨、落潮主轴方向淤积, 两侧冲刷, 冲淤结果在±0.5 m 左右, 且水平影响范围在鱼礁山 2 倍直径, 即约 200 m 以内, 由人工鱼礁引起的泥沙输运过程是一个局部变化过程。研究表明, 为避免局部过度冲刷, 需对鱼礁山潮流椭圆短轴侧的附近海底使用特殊护底型礁体进行加固处理。潮流速度过大、且底质易严重冲淤的海域不适合建设人工鱼礁山。

关键词: 人工鱼礁山; FVCOM; 悬浮泥沙; 底床冲淤

中图分类号: S 931

文献标志码: A

近年来, 随着海洋渔业资源的过度捕捞和海洋生态环境的破坏加剧, 我国近海渔业资源衰退严重。因此, 以投放人工鱼礁、海藻场建设、增殖放流等措施为主的海洋牧场建设养护近海渔业资源和改善海域生态环境具有重要意义^[1]。

人工鱼礁作为现代海洋牧场建设的重要组成部分, 是指在特定海域投放人造构筑物, 以用来为鱼类等提供栖息、索饵和产卵的场所, 为水生动物、植物营造良好的生态环境, 达到保护和增殖渔业资源, 改造海底环境的目的^[2]。人工鱼礁的投放将改变原有天然海域底质环境, 影响局部海域流场。潮流、波浪、海流等水动力

过程与礁体的相互作用不仅直接影响鱼礁区的流场效应, 也将影响到鱼礁的物理稳定性^[3]。国内外对人工鱼礁的水动力效应研究主要集中在不同礁型单体或鱼礁组合的水槽实验和数值模拟实验, 研究分析不同结构类型鱼礁的流场效应^[4], 以及不同水动力环境下鱼礁的受力情况^[5-6], 并在水槽中加入泥沙进行泥沙输运的模拟实验^[7-9]。实际的人工鱼礁建设不仅要考虑礁体的设计及其流场效应, 礁体投放海域的底质与水动力等自然条件也是极其重要的因素, 礁体投放后因周围底质中的泥沙冲淤而下陷、倾覆、位移等现象与这些礁区自然条件直接相关。

收稿日期: 2019-05-27 修回日期: 2020-05-17

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901302)

通信作者: 林军, E-mail: jlin@shou.edu.cn

对于近海水体悬浮泥沙、海底地形演变等的研究,主流的三维海洋数值模式往往都加入泥沙悬浮与输运等模块,并仍在不断完善之中。Martyanov 等^[10]通过三维海洋数值模型(princeton ocean model, POM)在波罗的海 Neva 湾模拟了底部泥沙再悬浮,该模型考虑了潮流和波浪非线性相互作用下的床剪切应力,泥沙黏性力和群体效应,由沉降受阻和絮凝等引起的悬浮颗粒物的沉速变化,以及水体层化的影响,并加入 SWAN 模型用于计算风浪特性。Warner 等^[11]在 Regional Ocean Modeling System(ROMS)三维数值模型加入泥沙输运和底床形态算法,并建立了 ROMS 与波浪模型 SWAN 的双向耦合,在动量方程中包含三维辐射应力项及表面波模型,泥沙输运算法采用自定义的非黏性泥沙分级,在 Massachusetts 湾模拟了泥沙分布演变。吴伦宇^[12]基于 FVCOM 在非结构网格下耦合波浪模型进行泥沙冲淤数值实验,并改进了由 FVCOM_SWAVE、FVCOM_SED 与 FVCOM 组成的三维全耦合模型系统。

对于人工鱼礁流场效应的水槽和数值实验,以及近岸自然海域的泥沙运动已有大量的研究成果,但对于人工鱼礁在实际海域投放后的对流场和海床泥沙冲淤情况的研究还比较少。本实验基于 FVCOM 的水动力与悬浮泥沙和海床泥沙计算模块,对浙江省嵊泗县马鞍列岛海洋牧场规划拟建的人工鱼礁山对流场的影响,及礁体周围泥沙冲淤情况进行了数值模拟研究。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

模型计算区域网格包含了整个东中国海域(图 1),并在嵊泗马鞍列岛海域进行了局部加密,模型网格分辨率在鱼礁山区域精度达到 10 m,共计 45761 个顶点,87567 个三角单元。模型水深范围在开边界处最大为 117 m,鱼礁区的水深处于 30 m 以内。垂向上采用底层加密的 sigma 坐标,分为 20 层。在垂向上进行底层加密将有利于提高对海床泥沙侵蚀和沉降及海床层厚演变的数值模拟精度。

模型采用冷启动,开边界处设置潮边界条件。模型主要由开边界的潮汐调和常数驱动,潮边界振幅和相位等参数来自于 TPX08 数据集。

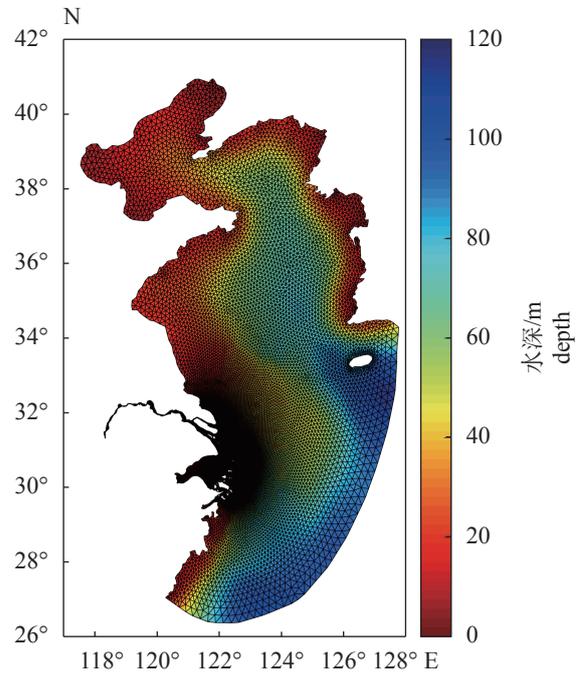


图 1 计算网格和水深

Fig. 1 Mesh and bathymetry of model area

主要包括 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。模式的泥沙模型也采用冷启动,即设置初始悬沙浓度为 0,模型计算时间为 1 年,侵蚀和沉降、悬沙场和底床冲淤基本稳定后输出计算结果并进行投礁前后的对比。

模型泥沙验证采用鱼礁山工程附近、枸杞岛西侧码头海域进行的大、小潮同步含沙量观测资料。此次观测分别在小潮(2013 年 4 月 17 日 18 时—4 月 18 日 20)和大潮(2013 年 4 月 25 日 08 时—4 月 26 日 10)期间进行,共设 S1、S2、S3、S4、S5 等 5 个泥沙垂线定点观测站点(图 2),

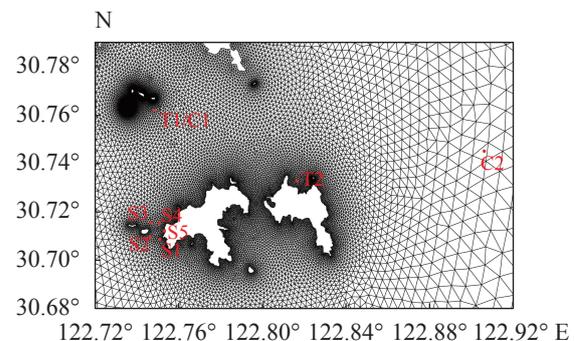


图 2 研究区域观测站点分布

Fig. 2 Distribution of observation sites in research area

距离模拟鱼礁山所处区域直线距离 5.5 km, 两处海域悬沙和床沙的特性相近。潮位 (站点 T1、T2) 与流速 (站点 C1、C2) 验证采用 2018 年 11 月在马鞍列岛附近海域的实测资料。

1.2 模型方程

由美国麻省大学陈长胜教授团队开发的非结构网格 FVCOM (unstructured grid finite volume community ocean model) 是采用非结构三角形网格、有限体积、自由表面、三维原始方程的海洋数值模型。其原始方程主要包含动量方程、质量连续方程以及温度、盐度和密度方程。FVCOM 基于非结构网格可以灵活性应用于复杂河口海湾等区域, 其有限体积积分格式, 能更好地保证计算中的质量、动量、盐度、温度及热量的守恒性, 在国际上得到广泛应用。泥沙模型计算方程如下:

悬移质计算方程:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial u C_i}{\partial x} + \frac{\partial v C_i}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_i) C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中, C_i 为第 i 类悬浮泥沙的浓度; A_H 、 K_h 分别为水平与垂直涡黏系数; w_i 为第 i 类泥沙沉降速度。

海表面边界为无泥沙通量:

$$K_h \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0, z = \zeta \quad (2)$$

海底边界条件:

$$K_h \frac{\partial C_i}{\partial z} = E_i - D_i, z = -H \quad (3)$$

式中, E_i 为侵蚀通量, D_i 为沉积通量。

侵蚀率计算公式:

$$E_i = \Delta t Q_i (1 - P_b) F_{bi} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ci}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中, Q_i 为侵蚀通量, P_b 为底质孔隙率, F_{bi} 为第 i 类泥沙的占比, τ_b 为底部剪切应力, τ_{ci} 为第 i 类泥沙的临界剪切应力。

推移质输移率的计算采用 Meyer-Peter Müller (1948) 公式^[11]:

$$\Phi = \max[8 (\theta_{sf} - \theta_c)^{1.5}, 0] \quad (5)$$

式中, Φ 是泥沙的无量纲输移率, θ_{sf} 是底床表层应力的无量纲 Shields 数, θ_c 是临界 Shields 数。通过输移率计算得到推移质总量。

海底床层厚计算采用 Harris and Wiberg (1997) 公式^[13]:

$$z_a = k_1 (\tau_{sf} - \tau_{ce}) + k_2 D_{50} \quad (6)$$

式中, k_1 , k_2 分别为经验常数 0.007 和 6.0, D_{50} 为底床表层中值粒径。当底床剪切应力 τ_{sf} 大于临界侵蚀剪切应力 τ_{ce} 发生侵蚀时, 则从下一层泥沙床层补充泥沙以保证表层床层厚度 z_a 不变; 反之, 则发生沉降, 并产生新的泥沙床层。

对比鱼礁山区域与泥沙验证点附近海域的泥沙柱状采样结果^[14] 表明, 均以粉砂、砂质粉砂和 t 黏土质粉砂类型的底质为主, 性状接近。泥沙模型主要参数设置如下 (表 1)。

1.3 经验公式

为进一步对底床泥沙冲淤变化进行验证,

表 1 泥沙模型主要参数选取

Tab. 1 Definition parameters value of sediment module

泥沙名 sediment name		细砂 fine-sand	淤泥 silt	黏土 clay
泥沙类型	sediment type	无粘聚力 non-cohesive	有粘聚力 cohesive	有粘聚力 cohesive
中值粒径/mm	median grain diameter	0.083	0.025 6	0.003
沉降速率/(mm/s)	settling velocity	3.47	0.37	0.1
沉积物容重/(kg/m ³)	sediment grain density	2 750.	2 750.	2 750.
底床表层侵蚀率/(kg/(m ² ·s))	erosion rate	1.e-5	1.8e-5	2.e-5
底沉积质孔隙率	porosity	0.25	0.5	0.55
侵蚀过程临界剪切应力/(N/m ²)	critical shear stress for erosion	0.25	0.12	0.08
沉降过程临界剪切应力/(N/m ²)	critical shear stress for deposition	0.25	0.12	0.08

采用了半经验半理论公式^[15-16]进行对比计算：

$$P = \frac{\alpha S \omega t}{\gamma_c} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \right] \quad (7)$$

式中， P 为有鱼礁山经过时间 t 后的冲淤量， α 为泥沙沉降概率， S 为水流挟沙力， γ_c 为泥沙干容重， ω 为沉降速度， V_1 、 V_2 分别为无鱼礁山、有鱼礁山的流速， H_1 、 H_2 分别是无鱼礁山、有鱼礁山的水深。经过推导得：

$$H_1 - H_2 = 0.5[(H_1 + \beta \Delta t) - \sqrt{(\beta \Delta t - H_1)^2 + 4\beta \Delta t K^2 H_1}] \quad (8)$$

式中， $\beta = \frac{\alpha S \omega}{\gamma_c}$ ， $K = \frac{V_2}{V_1}$ ，当 $t \rightarrow \infty$ 时，极限冲淤厚度为 $H_1 - H_2 = (1 - K^2) H_1$ 。在计算时取 α 为0.5， γ_c 根据经验公式取 $\gamma_c = 1750 D_{50}^{0.183}$ ，本研究区域表层泥沙中值粒径取0.0244 mm，取 $\gamma_c = 1200 \text{ kg/m}^3$ ，沉降速度取0.0004 m/s。

1.4 鱼礁山布设方法

在海洋牧场建设中，人工鱼礁在投放过程中大多以不同规格的单体投放在建设区域，礁体投放方式也根据海域环境和工程需求分为2种：第一种将多个鱼礁单体平铺式投放，适合于水深较浅的海域；第二种则是定点投放多个鱼礁单体形成堆积型鱼礁堆或鱼礁山，适合投放在水深相对较深的区域。本实验中模拟了堆积型

人工鱼礁山。

相较于单层平铺的方式，鱼礁单体的因材料和结构设计等而具有镂空性和高通透水性，单个鱼礁对于流场和海域底质环境的改变相较于模型网格水平尺度要小得多，常用的三维海洋数值模型不适用于鱼礁单体的精确模拟。本文的数值实验模拟堆积一个规格为直径100 m、中心高度10 m的圆台型人工鱼礁山。堆积圆台型鱼礁山将大大降低鱼礁对水流的通透率，可将圆台形鱼礁山近似为密闭的固体，即没有水流透过鱼礁山，故可以减去相应鱼礁山高度水深值来近似体现鱼礁山形态(图3)。

2 结果

2.1 潮位流速验证

T1、T2站潮位模型计算值时间序列和观测值结果接近(图4)，数模结果(x_{mod})与观测值(x_{obs})的均方根误差(r_{ms})计算式如下^[17]：

$$r_{\text{ms}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{\text{mod}} - x_{\text{obs}})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

相关系数 r 计算式：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{\text{mod}} - \bar{x}_{\text{mod}})(x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}})}{\left[\sum_{i=1}^N (x_{\text{mod}} - \bar{x}_{\text{mod}})^2 \sum_{i=1}^N (x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}})^2 \right]^{1/2}} \quad (10)$$

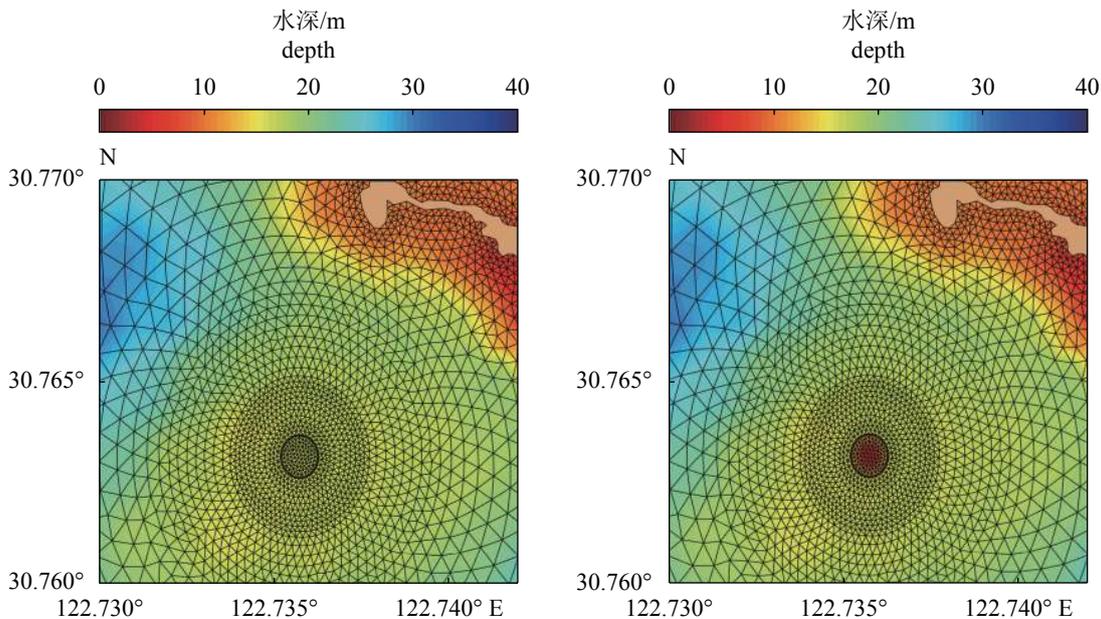


图3 鱼礁山布放前(左)后(右)水深对比图

Fig. 3 Depth change with artificial seamount(right panel) and without artificial seamount(left panel)

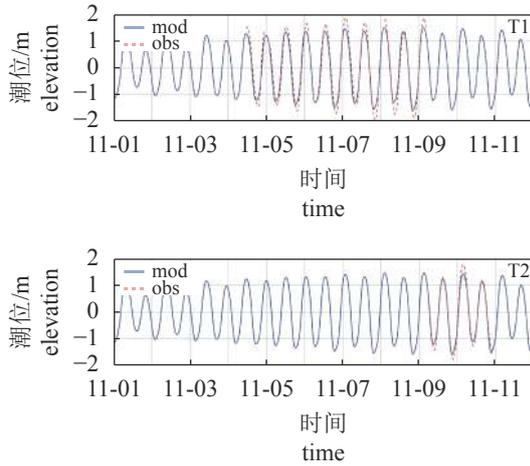


图 4 潮位时间序列

Fig. 4 Time series of elevation

体现数值模拟结果质量的 Skill 值^[18], 其值越接近 1, 表示实测值与模拟结果越接近, 越接近 0 则差异越大:

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_{mod} - x_{obs}|^2}{\sum_{i=1}^N (|x_{mod} - \bar{x}_{mod}| + |x_{obs} - \bar{x}_{obs}|)^2} \quad (11)$$

潮位验证结果如表 1 所示, 2 个潮位观测点的观测值与模型计算值的均方根误差小于 0.26, 相关系数在 0.98 以上, 相较于实测值, 模型计算的潮差部分时刻略小于实测值, Skill 值达到

0.97 以上, 说明潮位计算值及其变化趋势对实测值模拟精度良好。

流速验证选用 C1、C2 站点观测数据, 获得各站点表、中、底层流速 (图 5)、流向结果如 (图 6)。2 个站点流速值最大不超过 1.2 m/s, 实测表、底层流速差异的平均值为表层比底层流速大 0.2 m/s 左右。

模型计算结果较观测值偏小, 特别是在表层, 其原因是模型计算只考虑引潮力的驱动, 未加入风场驱动和温盐场的计算。模型未考虑观测期间海域的风应力和斜压力的驱动是流速验证精度下降的主要原因; 其次, 测站周边复杂的岛礁与水道地形分布使本海域的流态复杂, 也对流速模拟造成一定的难度。模型对决定海床泥沙冲淤变化最重要的底层流速的模拟精度优于表层和中层。相较于流速大小, 模型计算的流向与观测值及变化趋势则基本保持一致。流速均方根误差均小于 0.3, 说明模型对潮流场的模拟达到了一定精度, 可用于潮流作用下鱼礁山海域的泥沙运输研究。

2.2 泥沙验证

根据模型计算泥沙浓度结果与实测资料的对比 (表 2), 模型值相较于实测值在大潮期间偏高, 小潮期间偏低, 除个别站点误差相对较大

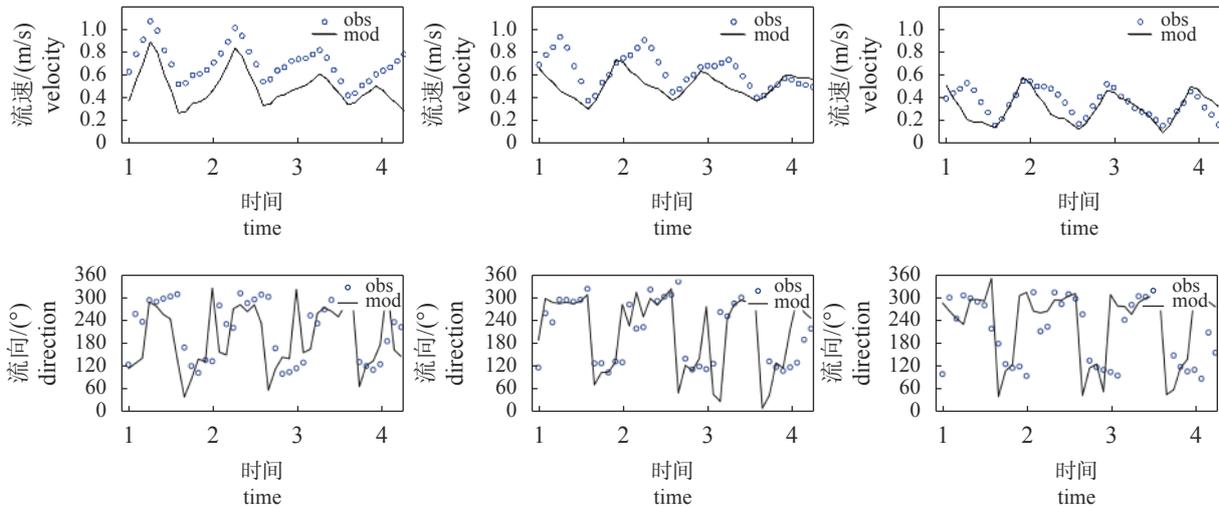


图 5 C1 站点流速 (上) 和流向 (下) 序列验证

左: 表层, 中: 中层, 右: 底层

Fig. 5 Comparisons of velocity(upper panels) and direction(lower panels) of observation and model in C1 site

left panels: surface layer, middle panels: middle layer, right panels: bottom layer

1. 11-06 15:00, 2. 11-07 03:00, 3. 11-07 15:00, 4. 11-08 03:00

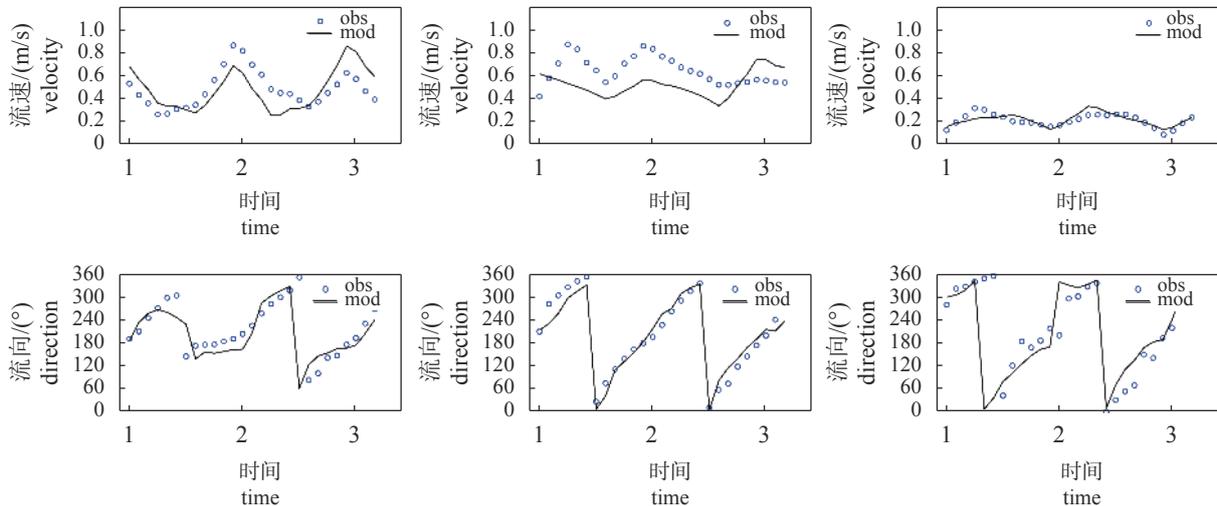


图 6 C2 站点流速(上)和流向(下)序列验证

左: 表层, 中: 中层, 右: 底层

Fig. 6 Comparisons of velocity (upper panels) and direction (lower panels) of observation and model in C2 site

left panels: surface layer, middle panels: middle layer, right panels: bottom layer

1. 11-09 19:00, 2. 11-10 07:00, 3. 11-10 19:00

表 2 潮位模拟误差值

Tab. 2 Error of tidal elevation modeling

站点 site	r_{ms}	r	Skill
T1	0.26	0.98	0.97
T2	0.14	0.99	0.99

外, 大小潮期间模型计算值与观测值的相对误差的平均值整体控制在 20% 以内。表明泥沙模型在该区域对悬浮泥沙含量的模拟达到了一定精度, 可以为后续底床泥沙活动分析提供依据。

2.3 涨落潮流场变化

选取大潮期间涨落急时的底层流场分布(图 7)及其差异(图 8)分析人工鱼礁山对潮流场的影响。模型所得底层流速值在涨、落急时均不超过 1.0 m/s, 由人工鱼礁山引起的流速增减幅度均不超过 0.5 m/s。在大潮涨落急时, 由于人工鱼礁山引起的水深变浅, 在圆台型鱼礁山区域上方存在明显由鱼礁山引起的流速增加区, 两侧则是类似于圆柱绕流的流场效应引起的流速增加; 而沿着涨、落急的潮流主流轴方向, 在鱼礁山前、后均形成了流速减小的区域。由于鱼礁山的阻流作用, 在沿流向鱼礁山背流面的底层流速大幅减小, 迎流面流速则略减。涨、落急流向分别为东南往西北和西北往东南, 此

即为本海域潮流椭圆的长轴方向。

小潮期间鱼礁山堆积前后的潮流变化趋势与大潮时相似, 相对大潮时流速值整体偏小, 且由人工鱼礁山引起的流速差异和影响范围主要集中在鱼礁山附近, 越远则影响效果越小。

2.4 大小潮悬浮泥沙差异

大、小潮期间涨、落急时, 人工鱼礁山周边海域悬浮泥沙的分布趋势与潮流分布趋于一致(图 9、图 10)。在临近鱼礁山的表层海域, 背流面一个小范围内有礁体时的泥沙含量略大于无礁体时的值, 主要原因是由鱼礁山迎流面导致的垂向流速增加, 从而携带部分泥沙进入到表层水体。且表层泥沙增加的区域较人工鱼礁山中心位置有沿潮流流向后移的现象, 符合悬浮泥沙随潮流变化的趋势。

在底层, 人工鱼礁山背流区的悬浮泥沙含量值则是无礁时远小于有礁体时, 原因是与该区域的流速减缓相关(表 3)。有人工鱼礁山时背流区的流速较于无鱼礁山时减小, 流速的减小导致水体对底床泥沙颗粒的剪切应力弱于泥沙颗粒的侵蚀临界剪切应力, 从而不利于泥沙的再悬浮而造成悬浮泥沙含量的降低。

2.5 底床冲淤结果

在底床冲淤计算中, 因鱼礁山海域底质无

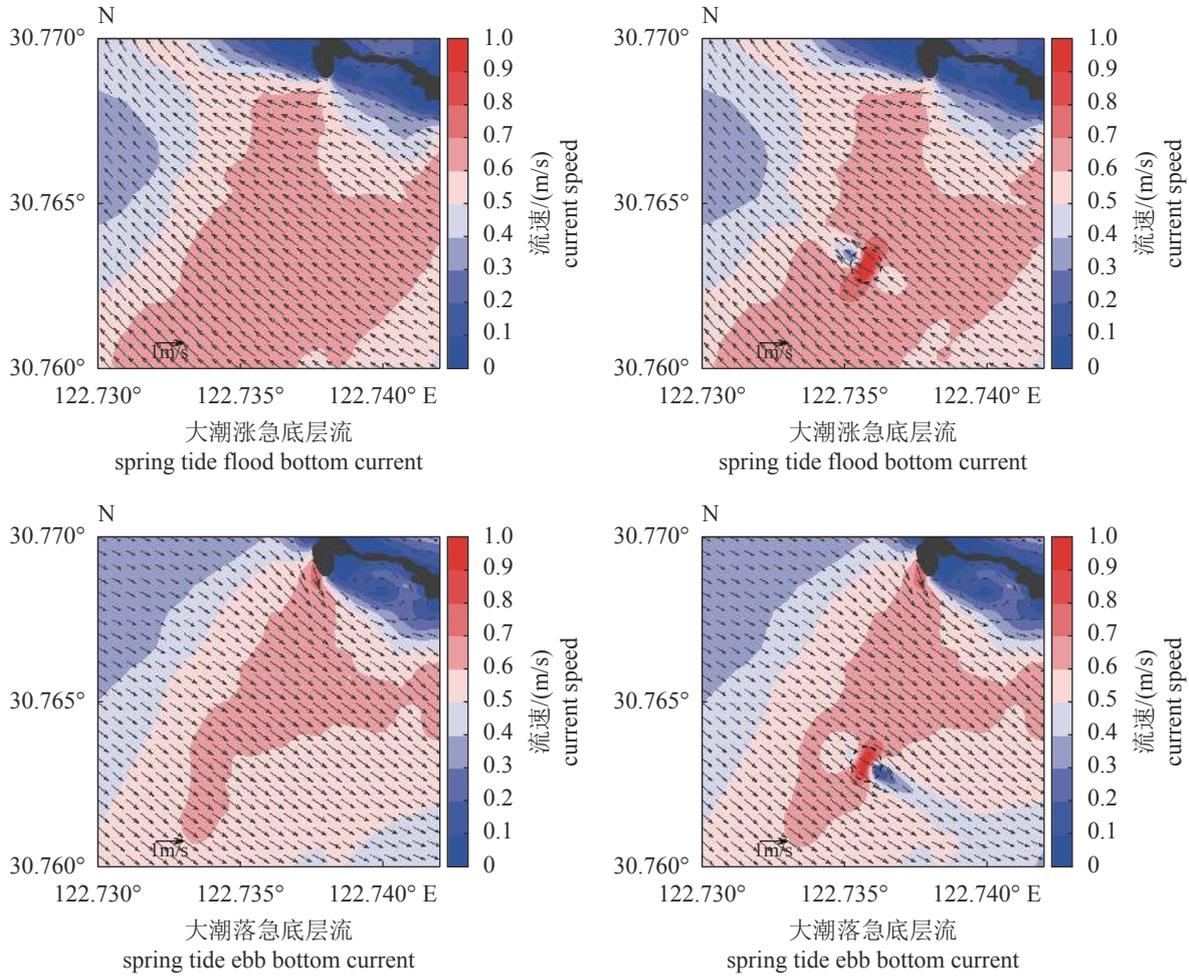


图 7 鱼礁山大潮涨急(上)、落急(下)时底层流速

左: 无鱼礁山, 右: 有鱼礁山

Fig. 7 Bottom current speed distribution of flood(upper panels) and ebb(lower panels) in artificial seamount area during spring tide

left panels: without artificial seamount, right panels: with artificial seamount

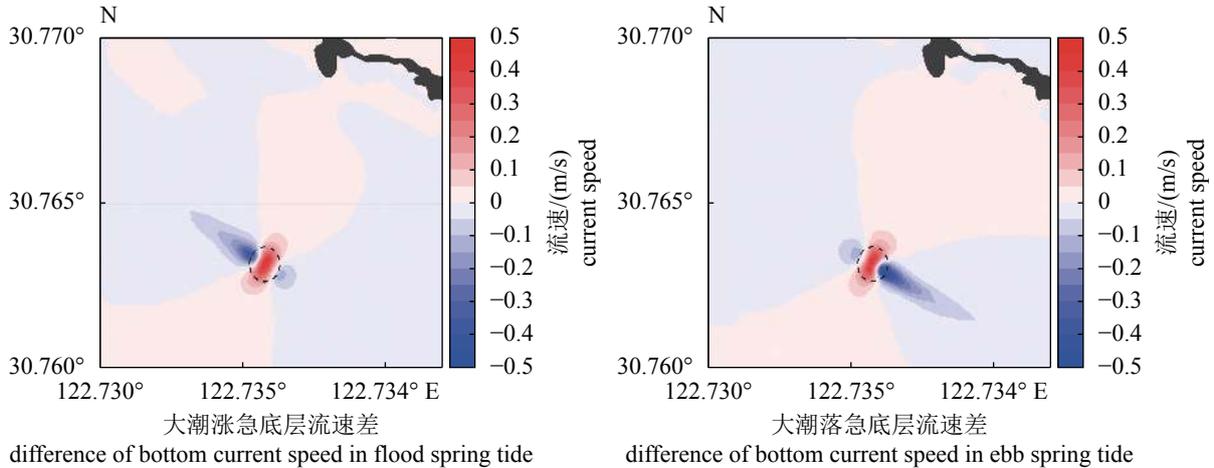


图 8 鱼礁山大潮涨急(左)、落急(右)时底层流速差异

Fig. 8 Difference of bottom current velocity distribution of flood (left panels) and ebb (right panels) in artificial seamount area during spring tide

表 3 悬浮泥沙浓度验证

Tab. 3 Verification of suspended sediment concentration

潮汛 tidal	站号 site	层次 layer	周日变化-观测值(g/L)			周日变化-计算值(g/L)			周日变化-相对误差/%		
			Diurnal variation-observed			Diurnal variation-simulated			Diurnal variation-relative error		
			最大值 maximum	最小值 minimum	平均 mean	最大值 maximum	最小值 minimum	平均 mean	最大值 maximum	最小值 minimum	平均 mean
大潮 spring	S1	表层 surface	0.079	0.045	0.061	0.091	0.060	0.078	15.4	33.5	28.1
		中层 middle	0.090	0.064	0.076	0.108	0.074	0.091	20.2	15.7	19.0
		底层 bottom	0.114	0.078	0.091	0.133	0.081	0.101	16.3	3.9	11.3
	S2	表层 surface	0.077	0.046	0.062	0.102	0.073	0.087	32.8	57.6	39.8
		中层 middle	0.099	0.065	0.079	0.112	0.079	0.096	13.0	20.7	21.7
		底层 bottom	0.113	0.083	0.094	0.125	0.086	0.104	10.2	3.5	10.1
	S3	表层 surface	0.075	0.048	0.063	0.104	0.065	0.086	38.9	35.6	35.7
		中层 middle	0.097	0.066	0.080	0.112	0.075	0.094	15.5	14.1	17.5
		底层 bottom	0.117	0.079	0.096	0.125	0.082	0.102	6.8	3.1	6.0
	S4	表层 surface	0.085	0.059	0.074	0.103	0.065	0.081	21.3	9.5	9.3
		中层 middle	0.105	0.079	0.090	0.118	0.073	0.091	12.2	-8.1	0.9
		底层 bottom	0.128	0.092	0.104	0.146	0.071	0.105	13.6	-22.7	0.8
	S5	表层 surface	0.078	0.047	0.064	0.091	0.042	0.072	16.4	-11.7	12.8
		中层 middle	0.097	0.072	0.082	0.101	0.058	0.084	4.5	-19.6	1.9
		底层 bottom	0.119	0.085	0.095	0.109	0.067	0.090	-8.0	-21.4	-4.9
小潮 neap	S1	表层 surface	0.050	0.024	0.036	0.048	0.026	0.041	-4.0	9.6	12.5
		中层 middle	0.067	0.031	0.047	0.056	0.032	0.047	-16.4	1.9	-1.0
		底层 bottom	0.114	0.047	0.064	0.066	0.038	0.052	-42.5	-18.3	-18.7
	S2	表层 surface	0.070	0.023	0.050	0.054	0.032	0.042	-22.5	39.1	-15.2
		中层 middle	0.061	0.035	0.050	0.058	0.035	0.047	-4.4	0.3	-5.2
		底层 bottom	0.113	0.052	0.069	0.063	0.039	0.051	-44.3	-25.9	-26.6
	S3	表层 surface	0.050	0.017	0.034	0.051	0.029	0.041	2.6	70.6	20.9
		中层 middle	0.059	0.030	0.044	0.056	0.035	0.046	-5.7	17.0	4.3
		底层 bottom	0.117	0.049	0.062	0.063	0.038	0.050	-46.6	-22.0	-19.5
	S4	表层 surface	0.058	0.032	0.043	0.054	0.027	0.040	-6.5	-14.7	-6.3
		中层 middle	0.062	0.040	0.053	0.060	0.033	0.046	-2.6	-16.7	-13.6
		底层 bottom	0.128	0.054	0.068	0.071	0.037	0.054	-44.8	-32.0	-21.0
	S5	表层 surface	0.056	0.032	0.039	0.048	0.022	0.037	-14.1	-32.5	-6.1
		中层 middle	0.073	0.038	0.050	0.055	0.025	0.043	-24.8	-34.2	-14.6
		底层 bottom	0.119	0.051	0.065	0.060	0.028	0.046	-49.5	-45.3	-29.1

粘结力的砂组分含量少，故泥沙模型中关闭推移质模块计算，只考虑悬移质随潮流作用的悬

浮和沉降引起的底床层厚变化。在有人工鱼礁山时，鱼礁山区域内的网格点不开启侵蚀与沉

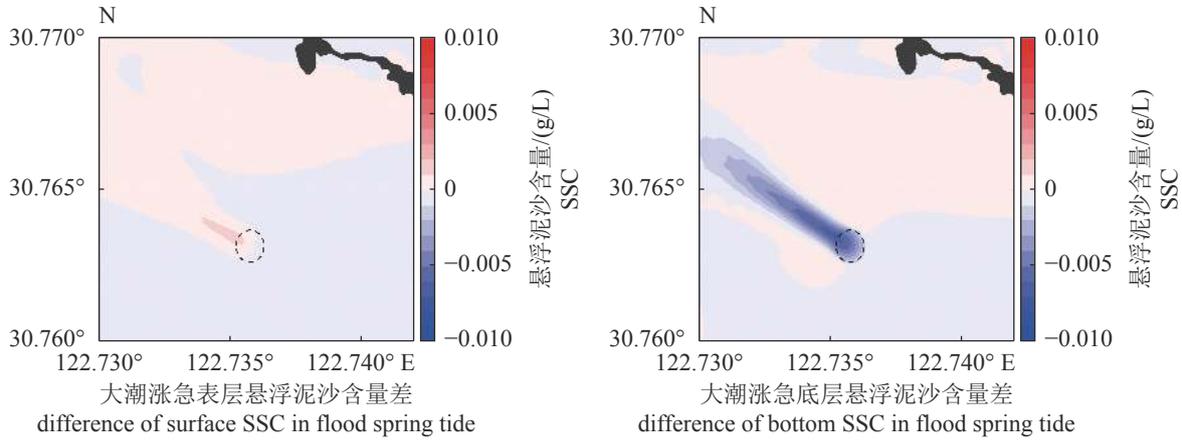


图 9 鱼礁山大潮涨急时表层(左)、底层(右)悬浮泥沙含量差异

Fig. 9 Difference of surface(left panels) and bottom(right panels) suspended sediment concentration in artificial seamount area during spring flood tide

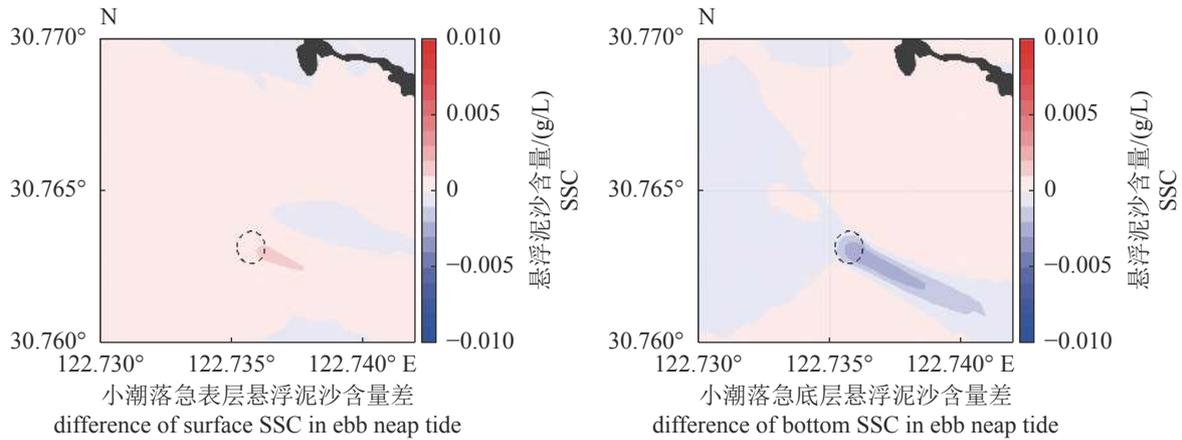


图 10 鱼礁山小潮落急时表层(左)、底层(右)悬浮泥沙含量差异

Fig. 10 Difference of surface(left panels) and bottom(right panels) suspended sediment concentration in artificial seamount area during ebb neap tide

积功能, 将人工鱼礁山表征为不可侵蚀的混凝土构件固体。分别取数值模拟与经验公式计算 1 年时间的底床层厚结果, 对比有人工鱼礁山和无人工鱼礁山时的底床层厚差异, 结果发现: 人工鱼礁山引起的底床冲淤结果为在鱼礁山周围呈西北-东南向的淤积效果, 底床泥沙的淤积厚度在 0.17 m 左右; 东北-西南向呈冲刷效果, 底床泥沙的冲刷厚度在 0.28 m 左右, 水平影响范围在鱼礁山周围 120 m 以内, 区域以外则影响极小(图 11)。而经验公式计算的结果表明, 冲淤的分布趋势是一致的, 但在数值结果上偏大, 冲刷厚度在 0.45 m 左右, 淤积厚度在 0.32 m 左右, 影响范围在 200 m 内。

根据数值模拟与经验公式计算的冲淤分布

结果, 对应冲淤变化最剧烈处分别取 4 个点(P1、P2、P3、P4; Q1、Q2、Q3、Q4), 其随时间变化趋势如(图 12)所示。P1、P3 点变化趋势随半月潮周期底床层厚呈阶梯型增加, P2、P4 点变化趋势随半月潮周期底床层厚呈阶梯型降低, 且淤积随时间变化的周期性相对比较规律, 而侵蚀冲刷的周期性并不完全统一。各点在一个月周期内主要表现为冲刷或淤积, 而冲淤平衡态的时间占比较少, 仅在小潮期的几天出现。而因经验公式考虑的是大小潮平均的流速差异, 经验公式的冲淤计算结果则是线性变化过程, P1 和 Q1 点数模和经验公式的层厚差异最大, 为 0.11 m; P2 和 Q2, P3 和 Q3 的差异相对较小; 而在 P4、Q4 点的冲淤变化高度一致。模型计算

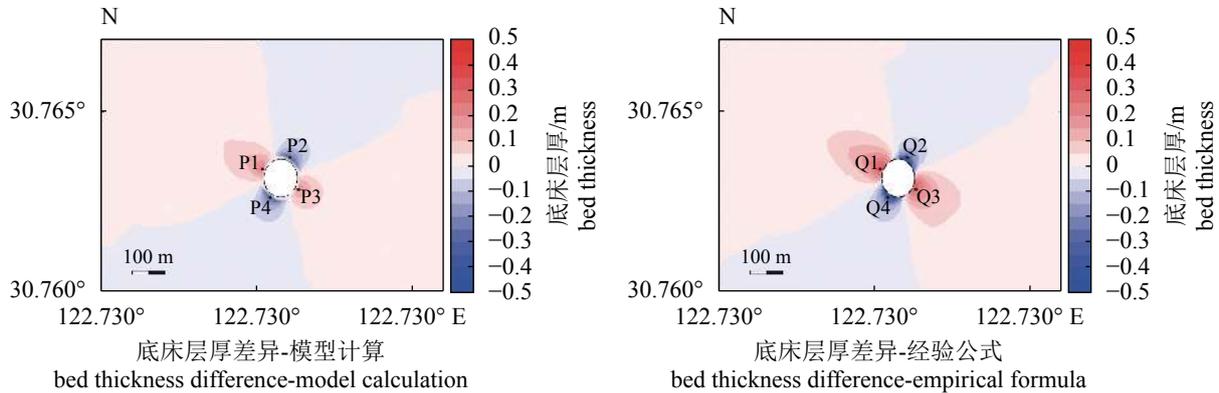


图 11 一年后鱼礁山底床层厚差异

左：模型计算；右：经验公式

Fig. 11 Difference of bed thickness in artificial seamount area after one year

left panels: model simulation; right panels: empirical formula

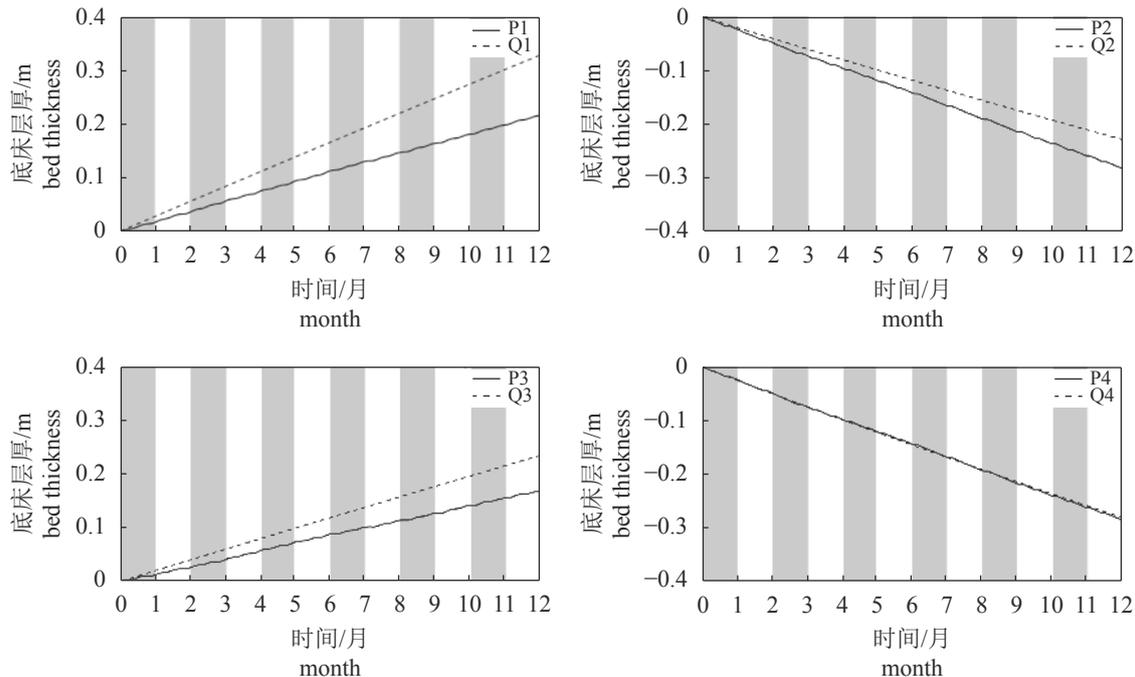


图 12 一年内 P1、P2、P3、P4 点的冲淤变化

Fig. 12 Bed thickness variation at points P1, P2, P3 and P4 within one year

结果与经验公式计算结果总体差异不大。

通过以上模型与经验公式对比结果，可以对鱼礁山冲淤的长期结果进行预估。另增设以经验公式计算 10 年的冲淤结果作为初始水深地形，模型计算 6 个月，冲淤结果分布如 (图 13、图 14) 所示。结果表明：冲淤的分布趋势基本与一年的计算结果分布相同，但在 P1、P3 点处冲淤变化基本达到稳定，淤积幅度在 0.01 m 以内；但在 P2、P4 点处冲刷幅度在 0.13 m 内，仍旧处

于冲刷增长趋势中。

以上主要分析了人工鱼礁山在涨急和落急时刻的流场分布，为进一步研究分析冲淤分布的成因，还对该区域的模型输出结果进行 M_2 分潮的潮流调和与分析，结果发现，人工鱼礁山区域的 M_2 分潮潮流椭圆的长轴为东南-西北方向，靠近岛礁处呈现往复流特征，远离岛间的开阔海域具有明显的顺时针旋转流特点 (图 15)。经过较长时间的潮流作用，底床泥沙的侵蚀与沉积

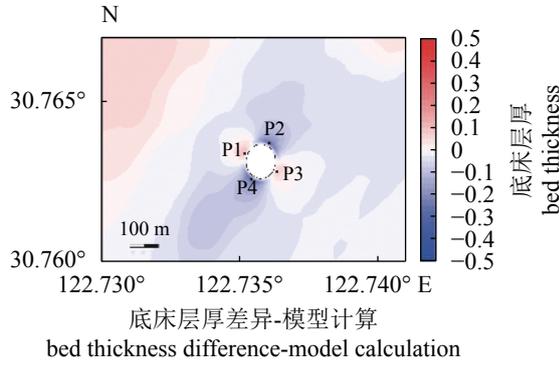


图 13 经验公式计算所得十年后鱼礁山底床层厚差异

Fig. 13 Difference of bed thickness in artificial seamount area calculated by empirical formula after 10 years

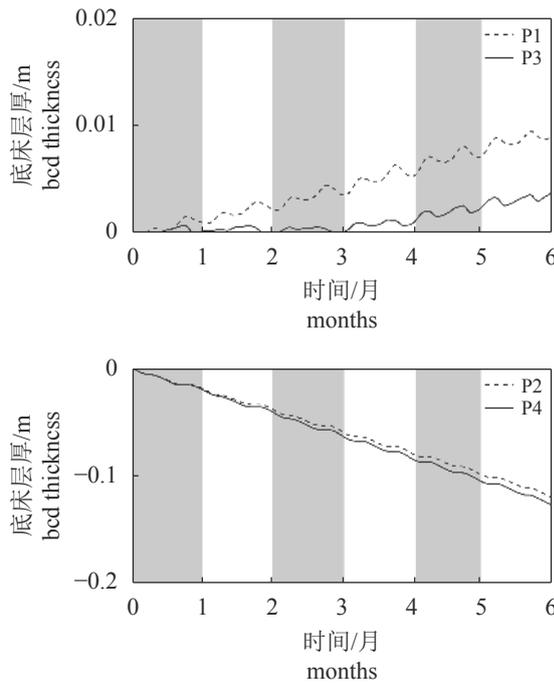


图 14 P1、P2、P3、P4 点的冲淤变化

经验公式计算所得十年底床层厚差异为初始条件

Fig. 14 Bed thickness variation at points P1, P2, P3 and P4

initial condition: the difference of bed thickness calculated by empirical formula after 10 years

表现为在鱼礁山周围呈以西北-东南向淤积、东北-西南向冲刷的分布。而根据之前对流场的分析结果, 在 P1、P3 点流速降低, 有利于泥沙沉积过程, 故底床层厚增加; 在鱼礁山周边的 P2、P4 点流速增加, 底床泥沙颗粒受到大于临界侵蚀应力的临界剪切应力作用, 泥沙被侵蚀而表现为冲刷过程, 底床层厚减少。

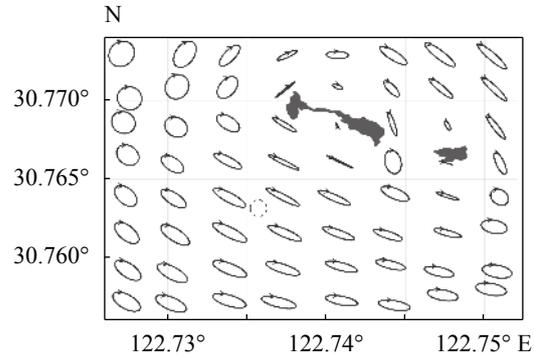


图 15 鱼礁山海域 M₂ 分潮潮流椭圆分布

Fig. 15 Tidal ellipses distribution of M₂ constituent in artificial seamount area

3 讨论

本实验结果表明, 模型结果与实测资料对比具有较好的精度, 潮位均方根误差不超过 0.26, 流速值均方根误差小于 0.3, 对潮流场的模拟比较准确; 模型对悬浮泥沙含量的计算也具有较高的精度, 除个别站点误差相对较大外, 泥沙含量的相对误差平均值控制在 15% 以内。

在潮流涨急和落急时, 人工鱼礁山对流场的影响主要体现在鱼礁山礁体附近, 表现为在人工鱼礁山范围内顶部及其两侧翼总体流速增加, 鱼礁山迎流和背流侧底层流速明显减弱; 悬浮泥沙含量在底层为受流速减弱影响而减少, 但差异不超过 0.01 g/L。潮流作用下的人工鱼礁山泥沙运输在本实验中表现为: 沿涨、落潮方向为淤积效果, 两侧为冲刷效果, 冲淤结果在 0.3 m 内, 且水平影响范围在鱼礁山周围 200 m 以内, 区域以外则影响极小。对于鱼礁山冲淤达到稳定的结果来看, 受潮流冲刷作用的两个侧翼区域较难达到稳定状态。

人工鱼礁山泥沙模拟实验结果表明: 实验所处位置的鱼礁山位置并不完全适合鱼礁山建设, 虽短期内泥沙的冲淤变化量级较鱼礁山规模可忽略不计, 但从更长时间的范围表现来看, 模拟结果显示的鱼礁山两侧的持续冲刷侵蚀将不利于鱼礁山的稳定性, 为避免局部过度冲刷, 可考虑对潮流椭圆短轴侧的鱼礁山附近海底使用大底面、低阻流的特殊型护底礁体进行加固处理。从本实验而言, 以减去鱼礁山相应高度的水深值来体现鱼礁山形态, 而没有考虑鱼礁山周边礁体的通透性, 会影响鱼礁山周围流速

和底床冲淤模拟的精度,特别是可能导致过高估计两个侧翼的冲刷。对于海洋牧场人工鱼礁区的建设而言,由人工鱼礁引起的流场变化和泥沙侵蚀、悬浮、输运、沉积等过程是局部过程,应选择受潮流与地形影响较小的区域进行鱼礁山投放,潮流速度过大、且底质易严重冲淤的海域不适合建设人工鱼礁山。

本实验的不足之处在于,模型仅仅考虑潮流作用,没有考虑到风应力和斜压效应等驱动因素,故对水动力场与悬浮泥沙浓度的模拟存在一定误差,且复杂的岛礁地形也会增加模型值与观测值的误差。受计算量大的限制,本实验对于海域泥沙悬浮、冲刷、淤积的过程模拟计算的时间长度还有不足,有条件时应该考虑计算更长时间,长期模拟结果可以更加准确。

参考文献 (References):

- [1] 阙华勇,陈勇,张秀梅,等.现代海洋牧场建设的现状与发展对策[J].*中国工程科学*,2016,18(3):79-84.
Que H Y, Chen Y, Zhang X M, *et al.* Modern marine ranching: Status and development strategy[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(3): 79-84.
- [2] 姜作真,段钰.建设人工鱼礁,保护和增殖海洋渔业资源[J].*水产科技情报*,2006,33(2):94-96.
Jiang Z Z, Duan Y. Construct artificial reef, protect and enhance marine fishery resources[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2006, 33(2): 94-96.
- [3] 林军,章守宇.人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J].*海洋渔业*,2006,28(3):257-262.
Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(3): 257-262.
- [4] 刘洪生,马翔,章守宇,等.人工鱼礁流场效应的模型实验[J].*水产学报*,2009,33(2):229-236.
Liu H S, Ma X, Zhang S Y, *et al.* Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(2): 229-236.
- [5] 赵云鹏,王晓鹏,董国海.波浪作用下三角型人工鱼礁水动力特性数值模拟与实验验证[J].*海洋工程*,2015,33(6):52-61.
Zhao Y P, Wang X P, Dong G H. Numerical simulation and experimental validation of hydrodynamic characteristics of submerged artificial reef in waves[J]. *The Ocean Engineering*, 2015, 33(6): 52-61.
- [6] Miao Z Q, Xie Y H. Effects of water-depth on hydrodynamic force of artificial reef[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2007, 19(3): 372-377.
- [7] Ahmad N, Bihs H, Kamath A, *et al.* Three-dimensional CFD modeling of wave scour around side-by-side and triangular arrangement of piles with REEF3D[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 683-690.
- [8] 张芝永,拾兵.泥沙局部冲淤二维数值模拟仿真[J].*哈尔滨工程大学学报*,2013,34(2):145-150.
Zhang Z Y, Shi B. Two-dimensional numerical simulation on local mud & sand erosion and deposition[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(2): 145-150.
- [9] 车海鸥,王凯,张景新.带自由表面水流与离散颗粒耦合模型研究[J].*计算力学学报*,2016,33(5):747-752.
Che H O, Wang K, Zhang J X. Study of numerical model coupling of hydrodynamic CFD-DEM simulation[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5): 747-752.
- [10] Martyanov S, Ryabchenko V. Bottom sediment resuspension in the easternmost Gulf of Finland in the Baltic Sea: A case study based on three-dimensional modeling[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 117: 126-137.
- [11] Warner J C, Sherwood C R, Signell R P, *et al.* Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model[J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(10): 1284-1306.
- [12] Wu L Y, Chen C S, Guo P F, *et al.* A FVCOM-based unstructured grid wave, current, sediment transport model, I. Model description and validation[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2011, 10(1): 1-8.
- [13] Harris C K, Wiberg P L. Approaches to quantifying long-term continental shelf sediment transport with an example from the northern California STRESS mid-shelf site[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(11): 1389-1418.
- [14] 罗含思,沈敏,林军,等.马鞍列岛人工鱼礁区海域底质特征及其承载力[J].*水产学报*,2019,43(2):441-453.
Luo H S, Shen M, Lin J, *et al.* Sediment characteristics and bearing capacity in an artificial reef area of Ma'an Archipelago[J]. *Journal of fisheries of China*, 2019, 43(2): 441-453.
- [15] 陈一梅.沙质海岸河口航道回淤计算方法及其应用[J].*河海大学学报*,2000,28(6):82-86.
Chen Y M. Siltation predication for estural navigation

- channels on sand beaches[J]. *Journal of Hohai University*, 2000, 28(6): 82-86.
- [16] 诸裕良, 金勇, 王昌杰. 河口推移质水道冲淤计算公式[J]. *河海大学学报*, 2002, 30(3): 64-67.
- Zhu Y L, Jin Y, Wang C J. Calculation formula of erosion and deposition for bed load waterways at estuaries[J]. *Journal of Hohai University*, 2002, 30(3): 64-67.
- [17] Zhong L J, Li M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(6): 752-770.
- [18] Warner J C, Geyer W R, Lerczak J A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C5): C05001.

Numerical modelling of sediment transport in artificial seamount by the action of tidal current

LIN Jun ^{1,2*}, WU Xingchen ¹, YANG Wei ¹

(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*)

Abstract: In order to study the influence of artificial reef on the sea bottom, based on the marine numerical model FVCOM (finite volume community ocean model) and its sediment transport module, the effects of the current field, suspended sediment and seabed sediment erosion and deposition around an artificial seamount in the artificial reef area of the Ma'an Islands are analyzed. A truncated-cone-type artificial seamount was set up with a diameter of 100 m and a height of 10 m. In order to simulate the effect of sediment suspension and seabed erosion and deposition around artificial seamount by the action of the tidal current, the part of the artificial seamount was simplified into a closed solid and the corresponding height of water depth was subtracted. Based on the analysis of the current field during the floods and ebbs of the spring and neap tides, the influence of artificial seamount on current velocity was mainly showed in the vicinity of the artificial seamount. The velocity of the water layer above the artificial seamount and velocity of bottom layer on both sides of the main current axis increased, while the velocity of downstream of the artificial seamount decreased significantly. The difference of suspended sediment concentration variation before and after the construction of artificial seamount was close to the trend of the current field variation and the maximum value was not more than 0.01 g/L. The results of sediment erosion and deposition on the sea bed around the artificial seamount showed deposition along the long axis of current ellipse, and erosion along the short axis of current ellipse, and the thickness of erosion and deposition were about ± 0.5 m, and the horizontal influence range was within 2.0 times of the diameter around the reef mountain, that is, within 200 m. The sediment transport process caused by the artificial seamount was a local change process. In order to avoid local over erosion, it is necessary to reinforce the seabed near the artificial seamount on the short axis of the tide ellipse with special bottom protection reef. It is not suitable to build artificial seamount in the area where tidal current velocity is too high and bottom sediment is liable to serious erosion and deposition.

Key words: artificial seamount; FVCOM (finite volume community ocean model); suspended sediment; seabed erosion and deposition

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

Funding projects: National Key R&D Program of China (2019YFD0901302)