



潮流动力下的横沙浅滩人工促淤演变趋势*

李溢汶

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 为研究长江口自然滩涂在输沙量减少和人类活动影响下的演变趋势及人工保护的可行性, 以横沙浅滩为例, 基于 MIKE21 数值模型构建长江口动力地貌模型, 模拟横沙浅滩自然状态及人工保护下未来的演变趋势。结果表明: 横沙浅滩未来仍将呈整体萎缩的演变态势, 滩面串沟发展, 滩体较不稳定, 须适时启动人工保护措施; 人工保护后, 横沙浅滩整体稳定, 串沟发展得到抑制; 仅通过人工保护措施难以在短期内塑造适宜的生态基底, 可结合长江口深水航道疏浚土的资源化利用加速横沙浅滩地形塑造过程。

关键词: 长江口; 滩涂保护; 动力地貌; 演变趋势预测; 工程效果预测

中图分类号: U 612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0024-05

Evolution trends of siltation promotion of Hengsha shoal under tidal force

LI Yi-wen

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: In order to study the evolution trend of shoals in the Yangtze estuary under the influences of sediment discharge decreasing and human activities and the feasibility of artificial protection measures, we take Hengsha shoal as an example, establish a morphological evolution model of the Yangtze estuary based on the numerical model of MIKE21, simulate the evolution trends of Hengsha shoal under natural environment and artificial protection. The results show that Hengsha shoal will be an overall shrinking trend in the future, the development of channeling ditch occurs, and its stability will be threatened. It is necessary to start the artificial protection measures in time. After the implementation of the artificial protection measures, Hengsha shoal is overall stable, the development of channeling ditch is restrained. It is difficult to create a suitable ecological landform in a short time by artificial protection measures, and the utilization of dredged soil of the Yangtze estuary deep water channel can be combined to accelerate the process of terrain shaping.

Keywords: the Yangtze estuary; tidal flat protection; morphodynamics; evolution trend prediction; project effect prediction

长江口河段上起徐六泾, 下至口外原 50 号标灯, 是较为典型的潮汐型河口, 其河床平面呈三级分汊、四口入海的复杂河势格局^[1]。受径流与潮汐、季节性风浪、陆海双向来沙等因素的影响, 自然状态下的长江口泥沙时空分布差异巨大, 滩涂冲淤变化频繁^[2-3]。横沙浅滩属于长江口面积较

大的自然滩涂, 分隔北港下段与北槽河道。近年来受流域来沙减少^[4]及人类活动等影响, 滩面串沟发展^[5], 滩体的稳定受到威胁, 进而可能影响区域河势稳定, 威胁北槽航道安全运行。因此, 研究新形势下横沙浅滩的演变趋势及保护措施具有重要意义。

收稿日期: 2020-11-09

***基金项目:** 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1206600)

作者简介: 李溢汶(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事河口海岸方向的研究。

目前，针对横沙浅滩的研究一方面是基于历史或实测地形资料开展的滩涂演变分析及治理对策的探讨，如陈海英等^[6]根据横沙浅滩近 40 年实测地形资料，分析浅滩的演变过程以及人工促淤措施的效果；刘杰等^[7]基于横沙浅滩冲淤演变过程，提出横沙浅滩保护与利用的基本原则及远期设想。另一方面多是采用数值模拟的办法论证横沙浅滩成陆或建港的可行性，如路川藤等^[8]基于非结构网格模拟横沙浅滩成陆对南北港、南北槽水流过程的影响，论证成陆方案的合理性；曹慧江等^[9]通过建立三维潮流泥沙模型从泥沙输运等角度研究在横沙浅滩建港的可行性、综合效益及对周边区域的影响。但这些研究侧重于如何利用横沙浅滩及工程建设合理性论证等，并未分析横沙浅滩保护及治理的必要性。此外，也有学者结合北槽深水航道疏浚土处置问题对横沙浅滩的保护与治理进行了有益探索，如包起帆等^[10]研究利用长江口北槽航道疏浚土进行横沙浅滩生态陆域塑造的可行性及优势。然而，现阶段横沙浅滩的开发利用方向尚未明确，可通过数值模拟方法研究横沙浅滩的演变趋势及人工保护等可能存在的影响，为后续浅滩保护与治理工作的开展提供重要依据。

本文利用长江河口实测水沙及地形资料，构建长江口动力地貌数学模型，开展模型合理性论证，对横沙浅滩自然状态及人工保护下的冲淤演变趋势进行预测模拟，根据预测结果提出横沙浅滩保护与治理的相关建议。

1 研究区域概况

横沙浅滩位于长江口北港与北槽之间，滩体形态由西向东呈舌形分布，见图 1。目前，横沙浅滩区域已按照《长江口综合整治开发规划》^[11]等相关规划成果，先后实施了横沙东滩一期至八期整治工程等重大河口治理工程，取得了显著成果，但也极大程度地改变了区域原有的水动力条件。与此同时，受长江上游水土保持工程及三峡工程的影响，长江河口来沙量出现大幅减少。水情、工情的改变导致横沙浅滩-5 m 以上的沙体面积萎

缩、体积明显减小。此外，横沙浅滩还长期处于易侵蚀的环境中，滩面串沟持续发展，滩体稳定岌岌可危，其演变的不确定性极可能影响北港口门区域河势格局的稳定。

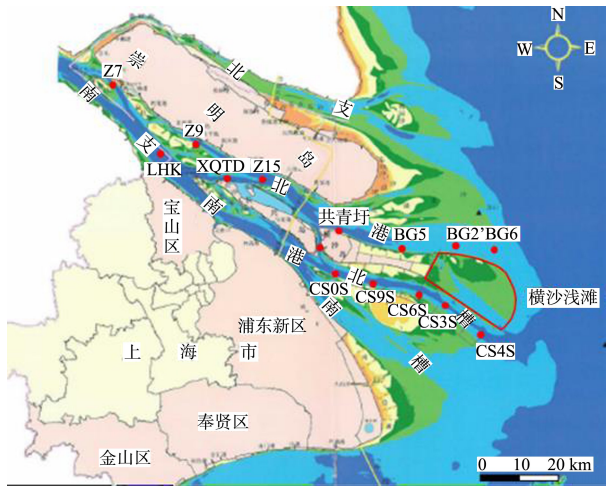


图 1 研究区域

2 长江口动力地貌数学模型构建

相关研究表明，潮流、径流在长江口河口中长周期地貌演变中起主导作用^[12]，且已有学者采用数值模拟方法对河口区域中长周期冲淤演变趋势进行研究^[13-14]。因此，本研究基于丹麦水力研究所 (DHI) 研发的 MIKE21 软件构建长江口二维动力地貌数学模型进行横沙浅滩冲淤演变预测模拟。

2.1 基本控制方程

MIKE 21 模型是在 Boussinesq 假定和流体静压假定的三维不可压雷诺平均 Navier-Stokes 方程的基础上，对水平动量方程和连续性方程进行沿水深 h 的积分，得到二维浅水方程，动力地貌过程的模拟主要通过水动力、泥沙沉降和悬浮以及床面变形间的相互耦合实现。同时，为了减少中长期河床地貌演变模拟的计算时间，通过地貌加速因子将原有水动力时间尺度下的泥沙输运量线性放大到河床地形更新中去，其连续性方程为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v})}{\partial y} = hS$$

(1)

动量方程为：

$$\frac{\partial (h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} +$$

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{tx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_sS$$

(2)

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} +$$
$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$
式中： t 为时间； x 、 y 为笛卡尔坐标系下的坐标分量； p_a 为当地大气压； η 为水面高度； h 为总水深，其值为 $\eta+d$ ，其中 d 为静水深； f 为科里奥利参数； ρ 为水的密度； S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 和 S_{yy} 是辐射应力张量的分量； ρ_0 为水的参考密度； S 为源汇项； \bar{u} 、 \bar{v} 分别为关于水深的平均速度在 x 、 y 方向的速度分量； u_s 、 v_s 分别为源汇项 x 、 y 方向的水流流速； τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为水表面 x 、 y 方向的风应力项； τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为底部 x 、 y 方向的切应力； T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 为水平黏滞应力项。

悬沙扩散方程：

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) +$$
$$Q_L C_L \frac{1}{h} - S' \quad (4)$$

式中： \bar{c} 为垂线平均含沙量； D_x 、 D_y 为 x 、 y 方向泥沙扩散系数； S' 为床沙侵蚀或淤积速率； Q_L 为泥沙输入源强； C_L 为泥沙输入源强中的含沙量。

地貌变化：

$$Z_{n+1} = Z_n + a \cdot \Delta Z_n \quad (5)$$

式中： Z_n 为当前时刻水深； ΔZ_n 为当前时刻的水深增量； Z_{n+1} 为下一步长时的水深； n 为时间步长； a 为无因次加速因子，仅对河床有影响。

2.2 模型验证

本文构建模型的计算区域覆盖长江口、杭州湾及附近感潮河段，见图2。上游边界选取大通水文站；外海边界考虑长江口地区受东海前进潮波控制，取到-50 m等深线附近，以最大程度消除外海边界对于计算区域的影响。模型东西长约560 km，南北宽约320 km，采用三角形网格对模型区域进行剖分，准确贴合复杂多变的岸线、岛屿及工程方案平面布置。模型中同时考虑黏性和非黏性沙组分^[15]，悬沙粒径参考相关研究成果，以63 μm为界区分泥与细沙^[16-17]，沉速设置考虑长江河口盐度对于泥沙的絮凝作用影响。此外，模型中采用局部矩形网格、水工结构物的计算等

方法还原了长江口各类重要水利工程。模型高程系统为上海城建吴淞高程。

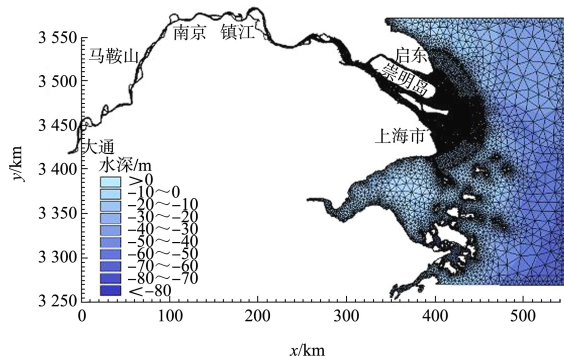
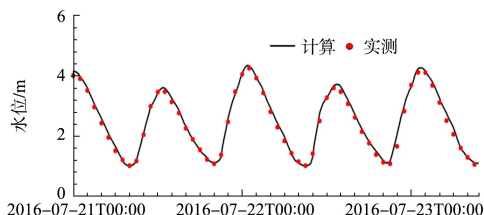


图2 模型计算网格及水下地形

为保证获得良好的中长期地貌演变模拟结果，模型验证主要包括水流、泥沙及横沙浅滩区域地貌冲淤反演。其中，水动力、含沙量验证资料采用长江口2016年洪、枯季实测水沙资料；地貌冲淤反演验证是采用2013—2017年横沙浅滩实测地形资料，上游大通边界选取的是2016年代表枯、洪共60 d的水沙过程，外海边界采用全球潮汐预报模型对应计算结果，这里通过敏感性分析及冲淤后的数据进行验证，在保证地貌模拟的效率及可靠性的前提下，最终选取地貌加速因子为30。

验证结果基本能反映长江口泥沙输运随涨落潮的周期性变迁特点，但对含沙量量值的模拟精度较水流模拟精度稍差，这主要是因为泥沙模型涉及的参数多且更复杂，床面泥沙冲淤状态的确定还存在一定经验性。同时也较好地反演了横沙浅滩的冲淤变化幅度，并在冲淤分布格局上也具有一定的一致性，如横沙浅滩北侧、深水航道北导堤头部等部位的冲刷以及浅滩尾部的淤积，但未能较好地反演出浅滩滩面的复杂冲淤分布态势，这主要是由于现实的河床冲淤演变过程包含更多的复杂物理过程，如采砂、台风袭击等。部分验证结果如图3~5所示。



a) 共青圩水位

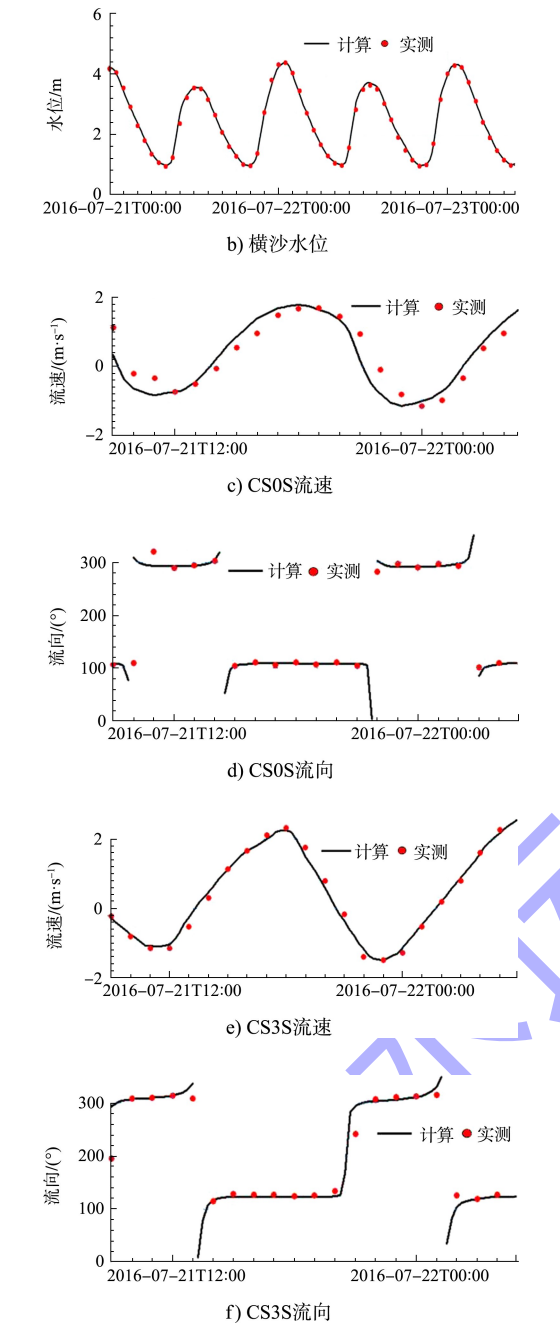


图 3 水动力验证结果

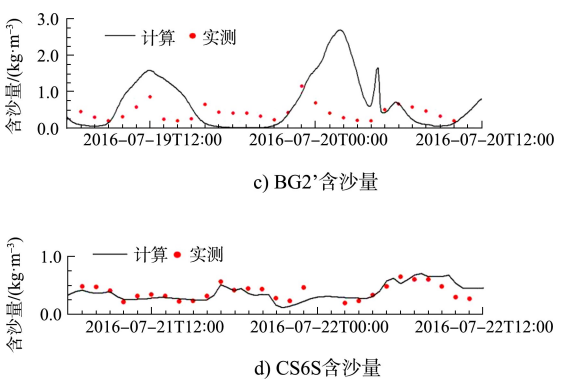
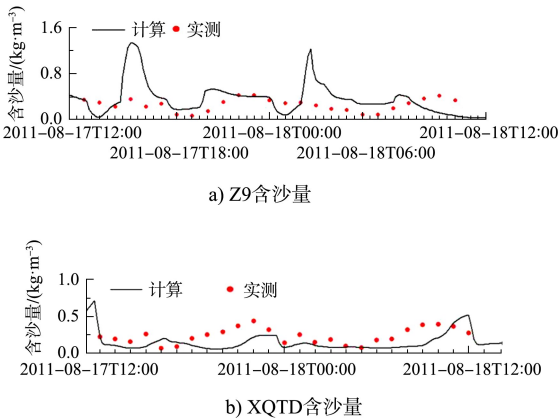


图 4 含沙量验证结果

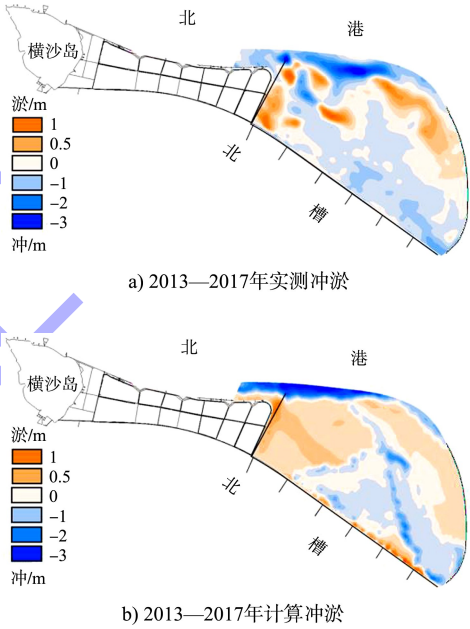


图 5 横沙浅滩冲淤反演结果

3 横沙浅滩自然演变预测及分析

为模拟横沙浅滩 2017—2047 年的冲淤演变情况，加速因子根据地貌反演结果设置为 30，上游大通边界根据加速因子选取近 4 年洪、枯季特征水沙过程，按照枯→洪→枯→洪季的连续模式，构建模拟时间为 360 d，外海边界采用全球潮汐预报模型对应的计算结果。

横沙浅滩的冲淤模拟结果见图 6。可以看出，随着流域减沙对长江口河床演变影响的加深，未来横沙浅滩呈现冲多淤少、整体侵蚀的发展态势。具体来说，滩体南侧串沟部位仍呈长距离、大幅度冲刷的态势，且有与上游连通形成新的分流通道的趋势；滩体北侧靠近北港河道处滩面冲刷距离较长，整体明显向内萎缩；中部滩面在 N23 潜

堤的掩护下冲淤变幅相对较小，但滩面淤积区域分布的范围及幅度较近几年明显减少。总体上，横沙浅滩未来仍将呈冲多淤少的演变趋势，滩体体积持续减小，既不利于滩涂湿地的保护，还可能威胁口门区河势及北槽深水航道的稳定，有必要适时启动人工保护措施。

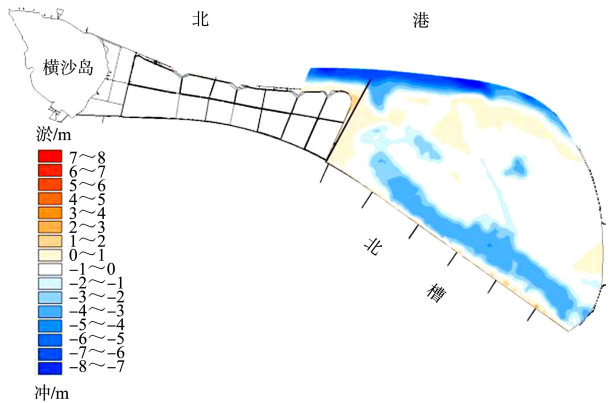
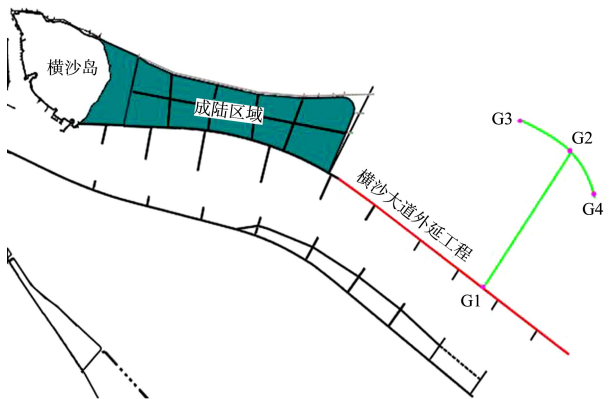


图 6 2017—2047 年横沙浅滩冲淤演变预测结果

4 横沙浅滩人工保护效果预测及分析

为达到封堵串沟，保护滩面的效果，横沙浅滩保滩工程布置方案如图 7 所示，横沙大道外延工程，总长 26 km，高程 4.5 m；护滩堤南侧起于 N8 与 N9 丁坝间，向北延伸至 -5 m 等深线，总长 14 km，高程 2 m；G1、G2 坐标分别为(426.984 km, 3 451.125 km)、(434.875 km,3 462.355 km)；护滩坝沿浅滩北侧轮廓向东、西延伸，总长 10 km，高程 2 m；G3、G4 坐标分别为 (430.309 km, 3 465.015 km)、(436.983 km,3 458.609 km)。采用构建的模型模拟工后横沙浅滩未来 20 年的冲淤演变趋势，参数设置同自然状态模拟一致。



注：横沙大道外延 4.5 m 高、26 km 长；护滩堤(G1~G2)：2.0 m 高、14 km 长；护滩坝(G3~G4)：2.0 m 高、10 km 长。

图 7 横沙浅滩保护方案

由图 8 的模拟结果可知，保滩工程实施后，横沙浅滩的冲淤分布较自然状态出现明显变化，其中，浅滩南侧串沟由于受到护滩堤的封堵以及横沙大道外延工程对两侧横向水流交换的抑制，水动力大幅减弱、泥沙更易落淤，护滩堤附近出现较大范围的淤积，而横沙大道外延头部附近由于流速增大，出现一定范围的冲刷；浅滩北侧受到护滩坝对水流的影响，在两侧坝头及北部引起冲刷，且较自然状态更为剧烈，而南部 T 字坝内则以淤积为主。总体上，人工保护措施基本能够改变自然状态下横沙浅滩冲淤变化频繁、串沟发展的不利演变态势，对维持河势稳定、航道安全运行等具有重要意义，同时还能起到一定的自然促淤效果，具有多方面综合效益，但促淤效果较差，这可能与分仓面积较大、来沙量少有关。此外，西半区滩面北侧有串沟形成的趋势，须引起重视。

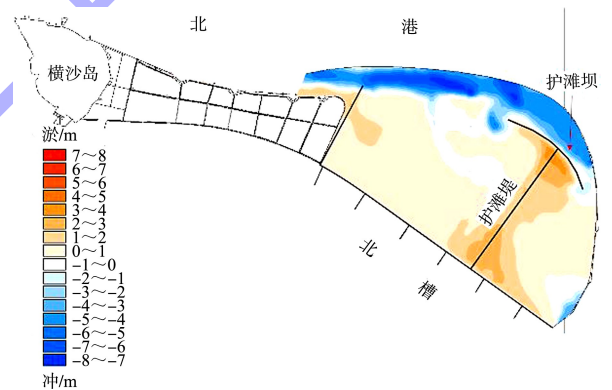


图 8 人工保护下横沙浅滩冲淤演变预测结果

5 结论

- 1) 本文通过构建长江河口中长期动力地貌演变模型，给出模型设置的参数化方案，并进行水流和泥沙的模型验证，同时进行研究区域历史冲淤过程的反演模拟，证明了模型应用于地貌演变预测模拟的可行性及合理性。
- 2) 基于构建的模型对横沙浅滩自然状态 2017—2047 年的演变趋势进行模拟预测，表明未来横沙浅滩整体呈冲蚀状态，滩体面积萎缩，南侧串沟持续发展且有形成新通道的趋势，威胁河势稳定及航道安全运行，须适时进行人工保护。