

龚雪雷, 姬泓宇, 李鹏, 等. 黄河三角洲近岸潮汐动力对地貌演变的响应及其沉积效应[J]. 海洋学报, 2024, 46(2): 64–78, doi:10.12284/hyxb2024021

Gong Xuelei, Ji Hongyu, Li Peng, et al. Response of tidal dynamics to geomorphic evolution and depositional effects in the Huanghe River Delta[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(2): 64–78, doi:10.12284/hyxb2024021

黄河三角洲近岸潮汐动力对地貌演变的响应及其沉积效应

龚雪雷¹, 姬泓宇¹, 李鹏², 陈沈良^{1*}

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2. 集美大学 港口与海岸工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 近年来自然过程和人类活动显著改变了黄河入海流路以及近岸地貌格局, 而剧烈的地貌演变对近岸水动力环境的影响尚未得到充分研究。为厘清近 30 年来黄河三角洲近岸水动力格局对地貌演变的响应过程, 本文基于 Landsat 系列遥感影像和多期测深数据, 分析了 1992–2020 年黄河三角洲岸线和地形变化, 并采用 TELEMAC-2D 建立了多套覆盖整个渤海的数值模型, 研究了地貌演变对黄河三角洲邻近海域潮汐动力的影响及其沉积效应。结果表明, 黄河三角洲近岸冲淤格局呈现显著的时空异质性, 分布多个淤积和侵蚀中心, 且 2000–2020 年南侧老清水沟外侵蚀中心向南移动 9.6 km, 1992–2015 年北侧刁口河口外侵蚀中心东移 6.4 km。中长时间尺度黄河三角洲岸线和地形变化主导了潮汐动态, 三角洲北部刁口河口近岸潮差减小, 清水沟河口外潮差增大, 5 m 水深处的潮差变化增大幅度达 0.27 m; 黄河口近岸 K_1 分潮振幅显著增加, M_2 分潮振幅明显减小, 东营港附近无潮点向东迁移 3.8 km。刁口河口和老河口外高流速区持续减弱, 现行河口外逐渐发育形成另一高流速区, 持续稳定的高流速区造成了水下三角洲的冲刷, 南北侧高流速区沉积物粗化。

关键词: 黄河三角洲; 数值模型; 地貌演变; 潮汐动力; 沉积效应

中图分类号: P736.21^{†3}

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)02-0064-15

1 引言

三角洲是陆地和海洋间的重要边界, 受海平面上升^[1]、海岸侵蚀^[2]、风暴潮频发^[3]等影响, 其岸线经历频繁变化并在空间上呈现出异质性和复杂性^[4], 强烈人类活动如海堤防护工程建设、滩涂围垦等人工建筑也将永久改变海岸形态和近岸动力过程^[5]。在变化环境下全球海岸带受到日益关注^[6-7], 研究自然因素和人类活动干预下的三角洲地貌演变及其对近岸水动力环境的反馈影响至关重要。如韩国 Mokpo 沿海海堤建设后半日潮(M_2 、 S_2)和四分之一日潮(M_4 、 MS_4)

振幅明显增大, 防波堤建设后全日潮(K_1 、 O_1)振幅略有减小^[8]。至 1990 年, 美国旧金山湾进行了约 800 km²的人工填海工程, 其水交换能力和潮汐通量急剧下降^[9]。在河流建坝、地面沉降和海平面上升的叠加影响下, 密西西比河三角洲从 19 世纪前的净淤积状态转变为后期的土地丧失, 再到 20 世纪三角洲陆地面积极剧减小^[10]和水下三角洲的显著蚀退^[11]。在我国, 长江三角洲在河流来沙量急剧降低与相对海平面上升的耦合作用下, 河口潮滩的侵蚀风险加剧^[12]; 以江阴为界, 上游 M_4 分潮振幅随径流增大而减小, 下游随径流增大而增大^[13]。瓯江口南口围垦工程实施后, 南

收稿日期: 2023-11-13; 修订日期: 2024-01-13。

基金项目: 中国博士后科学基金第 73 批面上资助(2023M731092); 国家自然科学基金项目(U1706214)。

作者简介: 龚雪雷(1998—), 女, 江苏省南通市人, 主要从事海岸动力地貌与工程应用研究。E-mail: 51253904068@stu.ecnu.edu.cn

* 通信作者: 陈沈良(1964—), 男, 浙江省海盐县人, 教授, 主要从事河口海岸学及其应用研究。E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

入海通道封堵,下泄径流受阻,口门处潮汐动力减弱,潮差减小^[14]。

黄河是中国第二大河,素以水少沙多著称,每年携带大量泥沙入海,在河口处发育形成巨大扇形堆积体。受流域气候变化和强烈的人类活动干预,黄河入海水沙出现了新情势,逐渐由“水少沙多”向“枯水少沙”转变,近60年入海泥沙量显著降低,三角洲大面积侵蚀后退^[15]。随着入海水沙量减少,潮流作用对三角洲地貌的塑造愈发显著,现行河口外的涨潮优势流呈舌状向莱州湾方向伸展,而近岸和莱州湾则普遍为落潮主导;黄河口滨海区的冲淤变化很大程度上受涨落潮流速不对称空间分布及涨落潮优势流转换所控制^[16]。同时,岸线和地形的变化主导了潮汐动态。近30年来整个渤海岸线变化巨大,2018年绘制的渤海岸线与1985年的位置相比,约72.9%的海岸线发生了向海移动^[17]。黄河入海口东迁和渤海湾大规模围垦引起渤海湾和莱州湾 M_2 分潮振幅变化,潮时提前。渤海湾大规模围垦对近场振幅增加的促进作用随海平面升高而减小,而对远场(辽东湾和莱州湾)振幅增长的抑制作用随海平面升高而增强^[18]。随着岸线变化,2009–2019年黄河三角洲流速总体呈下降趋势。现行河口附近的余流流速逐渐增大,而老河口附近的余流逐渐减小^[19]。关于黄河三角洲岸线时空变化的研究较多,且目前的研究主要集中在河口流路演

变、三角洲冲淤动态与潮汐动力的相互作用等,但对中长时间尺度潮汐动力变化及其沉积效应研究甚少。

黄河三角洲作为我国重要石油化工基地和黄河口国家公园所在地,近年来剧烈的冲淤演变所引发的海洋水动力条件的改变,对近岸基础设施和生态环境的稳定产生潜在影响。因此亟待加强对三角洲岸线及地貌动态的深入探讨,以此为基础揭示近海水动力格局对地形变化的响应过程,综合评估黄河三角洲岸线和地形变化对潮汐振幅、相位、流速、潮差等的影响及其沉积效应。研究结果可为黄河三角洲土地利用、生态保护以及高质量发展提供科学依据。

2 数据和方法

2.1 研究区域

现代黄河三角洲是1855年黄河在河南铜瓦厢决口改道至大清河流入渤海形成的面积约5400 km²的扇形堆积体(图1)。黄河三角洲尾间河道改道频繁,自1855年以来大小改道50余次,其中大的改道有11次^[20]。黄河三角洲属于半湿润半干旱的暖温带大陆性季风气候,四季分明,年均降雨量为530~630 mm,降雨多集中在夏季,常风向为SSE和E向。近岸海域以不规则半日潮为主,属于弱潮河控型河口,大潮平均潮差为0.22~0.24 m,小潮平均潮差为0.08~0.18 m^[21]。近岸波浪以风生浪为主,常见波高小于0.3 m,近岸海

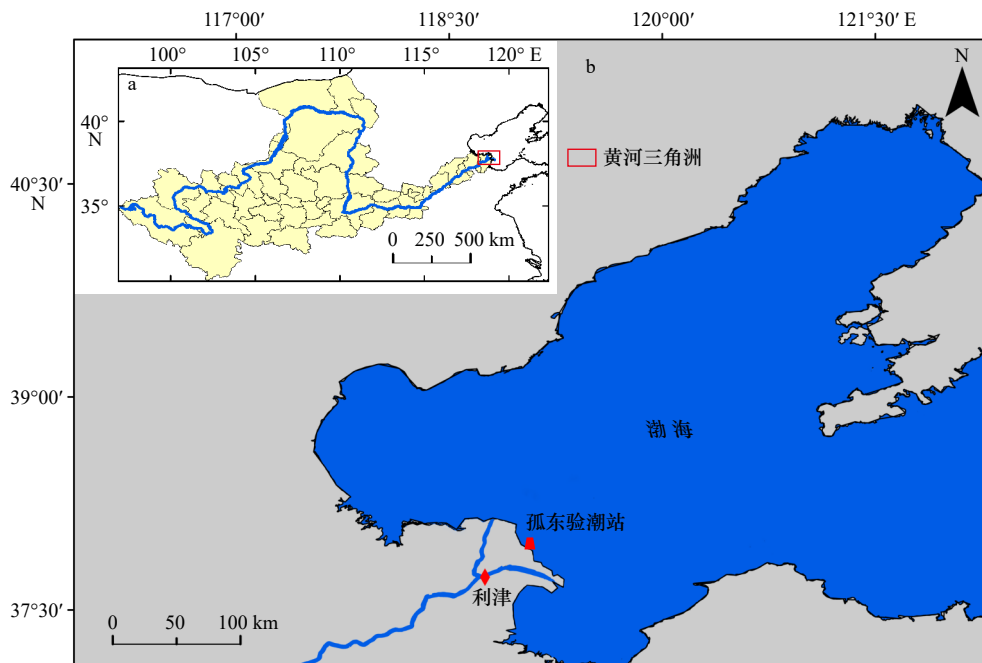


图1 研究区概况

Fig. 1 Sketch map of the study area

a. 黄河流域; b. 黄河三角洲及其邻近海域

a. The Huanghe River Basin; b. the Huanghe River Delta and its adjacent seas

域常遭受寒潮侵袭^[22]。

2.2 资料来源

2.2.1 地形地貌

黄河三角洲水下地形资料来自黄河水利委员会多年实测水深点, 测量范围覆盖现行河口和孤东邻近海域。加密测量每 7 年左右开展一次, 其余年份观测基于 36 条固定断面, 每条断面测线长 15~30 km, 水

深数据统一为黄海基准面。本文采用具体地形数据为 1992、2000、2007、2015 和 2020 年。在 ArcGIS 10.8 中以 100 m × 100 m 精度将测量得到的水深散点进行 Kriging 插值, 2015 年地形插值结果与测深站点位置见图 2a。其中, 由于 2020 年黄河三角洲北侧水深没有测量, 因此近岸 DEM 只对现行河口区及其东侧水深散点进行插值。

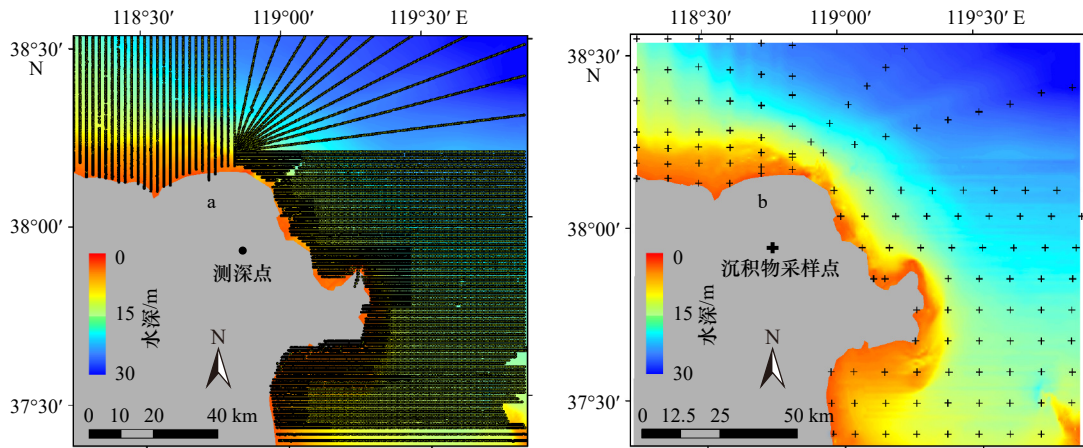


图 2 测深站点和地形插值结果(a)和沉积物粒径采样点分布(b)

Fig. 2 Distributions of bathymetric surveying stations and interpolated bathymetry (a) and surface sediment sampling sites (b)

2.2.2 遥感影像

遥感技术的发展为大尺度海岸线和潮滩变化监测提供了可能。本文用于解译岸线的遥感影像来源于地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>)下载

的 Landsat 卫星多光谱遥感图像, 以 Landsat TM /OLI 卫星遥感影像作为数据源(表 1)。此外, 利用 2020 年 10 月 24 日的 PlanetScope 卫星图像验证水边线提取的准确性。

表 1 卫星遥感影像和潮高

Table 1 List of different satellite date and tidal heights

编号	成像时间	卫星传感器	潮高/cm	编号	成像时间	传感器	潮高/cm
1	1992年8月24日	TM	95.30	11	2007年5月14日	TM	120.80
2	1992年9月25日	TM	112.95	12	2007年5月30日	TM	118.8
3	1992年11月12日	TM	62.30	13	2015年3月1日	OLI_TIRS	82.73
4	1992年12月14日	TM	38.55	14	2015年5月4日	OLI_TIRS	96.15
5	2000年2月4日	TM	85.75	15	2015年10月11日	OLI_TIRS	112.32
6	2000年2月20日	TM	74.00	16	2015年10月27日	OLI_TIRS	96.83
7	2000年3月7日	TM	67.00	17	2020年5月1日	OLI_TIRS	144.37
8	2000年4月8日	TM	93.20	18	2020年5月17日	OLI_TIRS	133.27
9	2007年2月7日	TM	52.00	19	2020年7月20日	OLI_TIRS	138.22
10	2007年3月11日	TM	70.00	20	2020年10月24日	OLI_TIRS	42.80

2.2.3 河口水文泥沙

黄河逐年径流量数据来自利津水文站。1992–2020 年逐时潮位数据来自孤东验潮站。此外, 课题

组于 2009 年和 2018 年多次在黄河口近岸海域布设站点进行水文泥沙现场观测, 位于刁口河口及现行河口外的近岸海域, 测站位置见图 3。

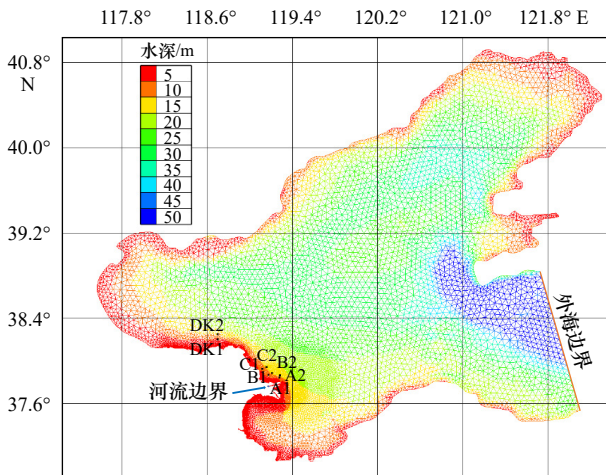


图3 模型网格与测站位置
Fig. 3 Model grid and location of *in-situ* observation stations

沉积物粒径数据采集于1992年、2000年、2007年和2015年夏季,对黄河三角洲滨海区18条固定断面的海底沉积物进行取样,断面间距约为10 km,沉积物采样点分布情况详见图2b,并采用Coulter LS-100Q激光粒度仪测定沉积物粒度。本研究采用中值粒径(D_{50})表征黄河三角洲近岸海域沉积物粗细。

2.3 黄河口岸线解译

考虑到下载的卫星遥感影像存在少量云层覆盖,所以对Landsat影像进行预处理^[23]。首先运用ENVI5.6软件进行辐射标定和大气校正。标准化差异水体指数(NDWI)通过遥感影像的绿波段和近红外波段进行归一化插值处理,能有效抑制植被信息并突出水体信息,已广泛应用于区分陆地和水体边界^[24]。NDWI计算方法如下:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}, \quad (1)$$

式中, Green 为绿波段; NIR 为近红外波段, 分别对应Landsat TM影像的波段2和波段4, Landsat OLI_TIRS影像的波段3和波段5。

由于黄河三角洲潮间带广阔,岸坡平缓,水边线位置随水位变化高度动态。考虑卫星成像时刻的潮情,将平均大潮高潮线位置作为岸线位置。水边线提取精度的验证采用边缘点和混淆矩阵的方法^[25],在空间分辨率为3 m的PlanetScope影像中水陆边界两侧随机设置一组水陆边缘点,每对边缘点之间的最大距离不超过90 m,在Landsat影像中不超过3个象元。利用2020年10月24日的PlanetScope影像在黄河三角洲近岸布设了244个边缘点,其中包括122个水体点和122个非水体点(图4),基于此建立了精度验证混淆矩阵,孤东近岸等人工固定岸线,易通过目视解译直接提取。精度验证结果表2表明,提取的用户精度和生产者精度都达到了0.90以上,总体精度为0.930, Kappa系数为0.861,表明本文所使用的方法能够较准确地提取水边线。根据此方法从Landsat影像中提取两条间隔较短(8 d或16 d)的瞬时水边线,命名为 l_1 和 l_2 。假设潮间带近似均匀,坡度为 θ 。 h_1 和 h_2 分别表示卫星经过研究区域时水线 l_1 和 l_2 的水位高度。采用线性潮位校正法,将瞬时水边线校正为平均大潮高潮线作为提取的岸线^[26],计算方法如下:

$$\theta = \arctan \frac{h_1 - h_2}{\Delta L}, \quad (2)$$

$$L = \frac{H - h_1}{\tan \theta}. \quad (3)$$

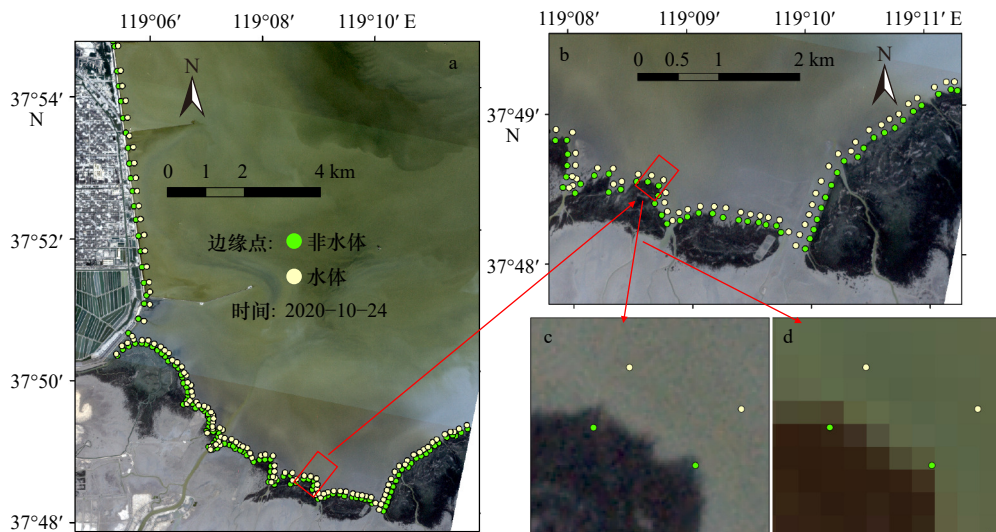


图4 部分研究区域边缘点分布图(a),研究区局地图(b), PlanetScope影像边缘点细节图(c)和Landsat影像边缘点细节图(d)
Fig. 4 Layout of edge-points in the part of study area (a), local thumbnails (b), edge-points details of PlanetScope (c) and edge-points details of Landsat images (d)

表 2 精度验证结果
Table 2 Results of accuracy verification

类型	非水体	水体	小计	用户精度	总体精度	Kappa系数
非水体	118	13	131	0.901		
水体	4	109	113	0.965		
小计	122	122	244		0.930	0.861
生产者精度	0.967	0.893				

2.4 数值模型

2.4.1 模型介绍和设置

TELEMAC 开源模型由法国国家水利与环境实验室开发,包含水流、泥沙、波浪等模块。本文主要运用 TELEMAC-2D 模块求解浅水方程对渤海水动力进行计算。为减小模型计算时渤海潮波系统受外海开边界的影响,模型研究区域为 $37^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $117.5^{\circ}\sim 122.3^{\circ}\text{E}$,覆盖整个渤海区域(图 3)。模型采用非结构化三角网格,黄河口近岸网格加密,网格分辨率从开放边界附近的 8 km 到黄河口近岸的 50 m 不等,能较

好拟合岸线。在模型中,外海边界位于黄海北部,河流边界设置在现行河口。模型输入流量值即代表利津站径流量,根据利津站 1952–2020 年多年平均径流量,本文统一设置黄河入海流量为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。由 TPXO8.0 数据集给定外海边界潮位和流速值(<https://www.tpxo.net/global/tpxo8-atlas>)。模型中,底床糙率设置为 0.016,计算时间步长为 30 s。

2.4.2 水位验证

模型分别于 2007 年和 2015 年网格基础上设置起始时间 2009 年 6 月 1 日和 2018 年 8 月 1 日使用上述河流流量运行 60 d,将模拟结果与孤东验潮站实测潮位进行对比,验潮站位置见图 1,水位验证时间段为 2009 年 6 月 20 日至 7 月 15 日和 2018 年 8 月 20 日至 9 月 15 日,为检验模型的可靠性,运用均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (CC) 进行比较评估,验证结果见图 5。结果表明,模拟和实测水位相关系数较高,除大潮时潮位存在误差外,孤东验潮站的水位模拟结果与实测数据比较吻合。

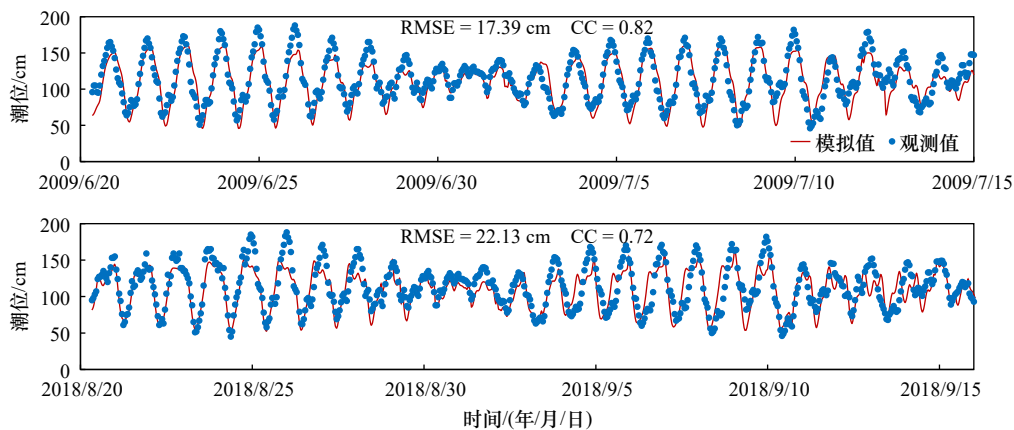


图 5 2009 年和 2018 年模型计算水位与潮位站观测结果对比

Fig. 5 Comparisons between the simulated water elevation and the observed values in 2009 and 2018

为比较黄河口近岸潮汐模型计算结果、探讨渤海潮汐传播至河口近岸的特征,模型模拟运行 60 d,运用 Matlab T_Tide 程序对后 30 d 模型稳定运行后得到的潮位变化进行调和,计算主要分潮振幅及相位分布。图 6 为 2007 年渤海 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 4 个主要分潮潮汐振幅和相位分布,结果与前人模型结果基本一致^[27]。模拟结果显示半日潮潮波 M_2 和 S_2 传入渤海海峡后分为左右两支,一支绕东营港附近的无潮点逆时针旋转向东北传入辽东湾;另一支绕秦皇岛附近的无潮点逆时针旋转向西进入渤海湾。全日潮潮波 K_1 和 O_1 在渤海海峡有一个无潮点,潮波绕无潮点逆时针旋转。对比 4 个分潮振幅, M_2 分潮振幅最大,

O_1 分潮振幅最小。

2.4.3 流速流向验证

流速流向验证时间段为 2009 年 7 月 5 日至 12 日和 2018 年 8 月 29 日至 31 日,本文采用 2009 年 A1、A2、B1、B2、C1、C2 站位流速流向观测数据,2018 年 DK1、DK2 站位的流速流向观测数据以验证数值模型精度,站点位置如图 3 所示。

图 7 为黄河三角洲近岸站点现场观测数据与模型计算结果对比。模拟与实测流速大小对比, RMSE 为 $3.64\sim 24.61\ \text{cm/s}$, CC 介于 $0.62\sim 0.96$ 。其中 A1、A2 位于现行河口附近,最大流速接近 $1\ \text{m/s}$,模拟流速偏小,可能与现行河口复杂地形有关。B1、B2 和 C1、

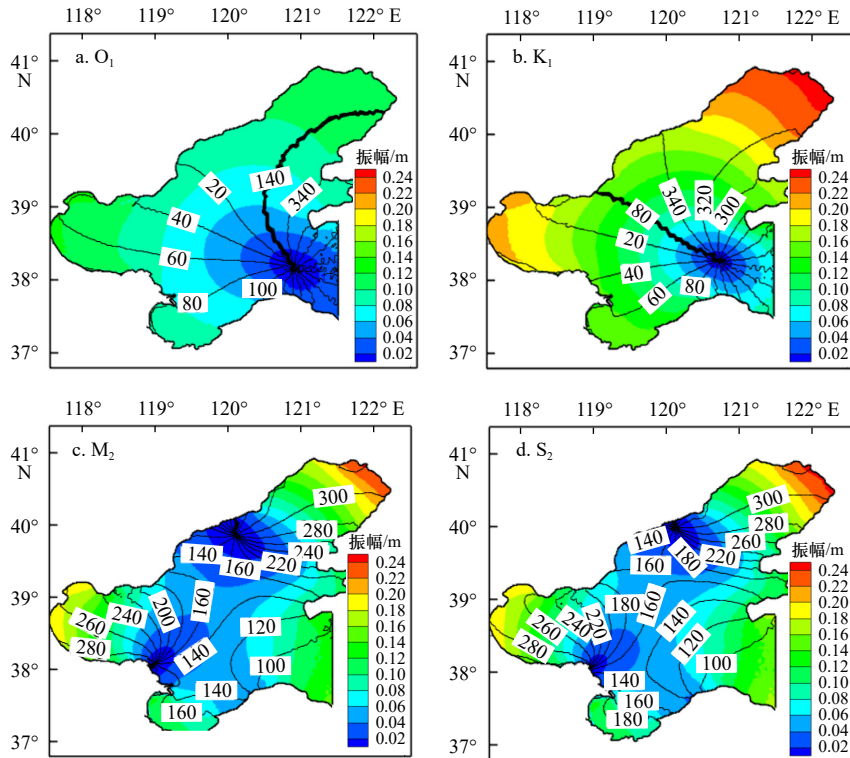


图6 模型模拟2007年渤海分潮同潮

Fig. 6 Simulated co-tidal charts of tidal constituents in the Bohai Sea in 2007

C2位于现行河口北侧,垂线平均流速均小于0.5 m/s,约为现行河口附近流速的一半,验证结果较好。DK1和DK2站位于刁口河口北部,DK1站流速模拟结果较好,DK2流速计算值与观测值差异稍大。综合流速流向结果对比来看,模型验证结果良好。

3 结果与讨论

3.1 近期黄河口地貌演变

图8为1992–2020年黄河三角洲岸线动态,揭示近30年黄河三角洲岸线呈现显著的时空变化。黄河入海输沙量大,导致河口流路长期处于摆动和改道的频繁变化状态,其入海流路在1992年河流走老清水沟后三角洲叶瓣才基本稳定,沙嘴呈“尖头状”。1996年人工出汉实施后,老清水沟河口失去泥沙直接补给,海岸蚀退,河口口门位置不断向东北向调整,直至2007年黄河入海主汉道逐渐形成,因为2006年汛期洪水漫滩,汉3断面附近形成汉河从北侧沙嘴出汉入海,并在2007年迅速展宽,淤积成小沙嘴。2007–2015年河口沙嘴随入海流路向东北出汉并不断淤积延伸,呈现出双汉入海格局,沙嘴淤长,拦门沙面积持续增大。

除河口沙嘴地貌剧烈变化外,海堤、丁坝等建筑物对海岸线动态也有显著影响。20世纪90年代,随

着东营港投入使用,海港及其附近海岸修筑了北起桩106南至神仙沟口的人工海堤。为缓解侵蚀,2001年孤东海堤还建设了丁坝护滩工程,形成三角洲沿岸密集的丁坝群。此外盐田建设、围垦养殖等活动不断增加,三角洲人工岸线范围扩大。

为进一步研究黄河三角洲近岸地形冲淤特征,本文选取4个特征断面D1–D4分析水深随时间动态变化情况(图9),其中D1代表废弃河口断面,D2为工程防护区代表断面,D3、D4分别为清水沟新、老河口典型断面。1992–2020年位于刁口河附近的D1断面岸线蚀退,但总体冲淤量变化不大。位于新、老河口附近的D2–D4断面变化显著,由于入海流路改变,现行河口口门持续淤积,D2断面高程显著抬升,D3断面岸线向外海延伸。D4断面显著冲刷,由于老河口缺少泥沙补给而出现侵蚀。

根据1992–2020年5期黄河现行河口水下地形数据,利用ArcGIS 10.8将相邻研究年份测深数据插值结果进行对比,计算黄河水下三角洲冲淤体积变化,结果见图10和表3。1992–2000年区域呈淤积态势,清水沟老河口和现行河口均存在淤积中心,现行河口快速淤积,沙嘴向海延伸(图10a)。2000–2007年处于黄河调水调沙初期,由于小浪底水库的拦沙效应和黄河流域降雨量的总体减小,上游来沙量锐减,期间

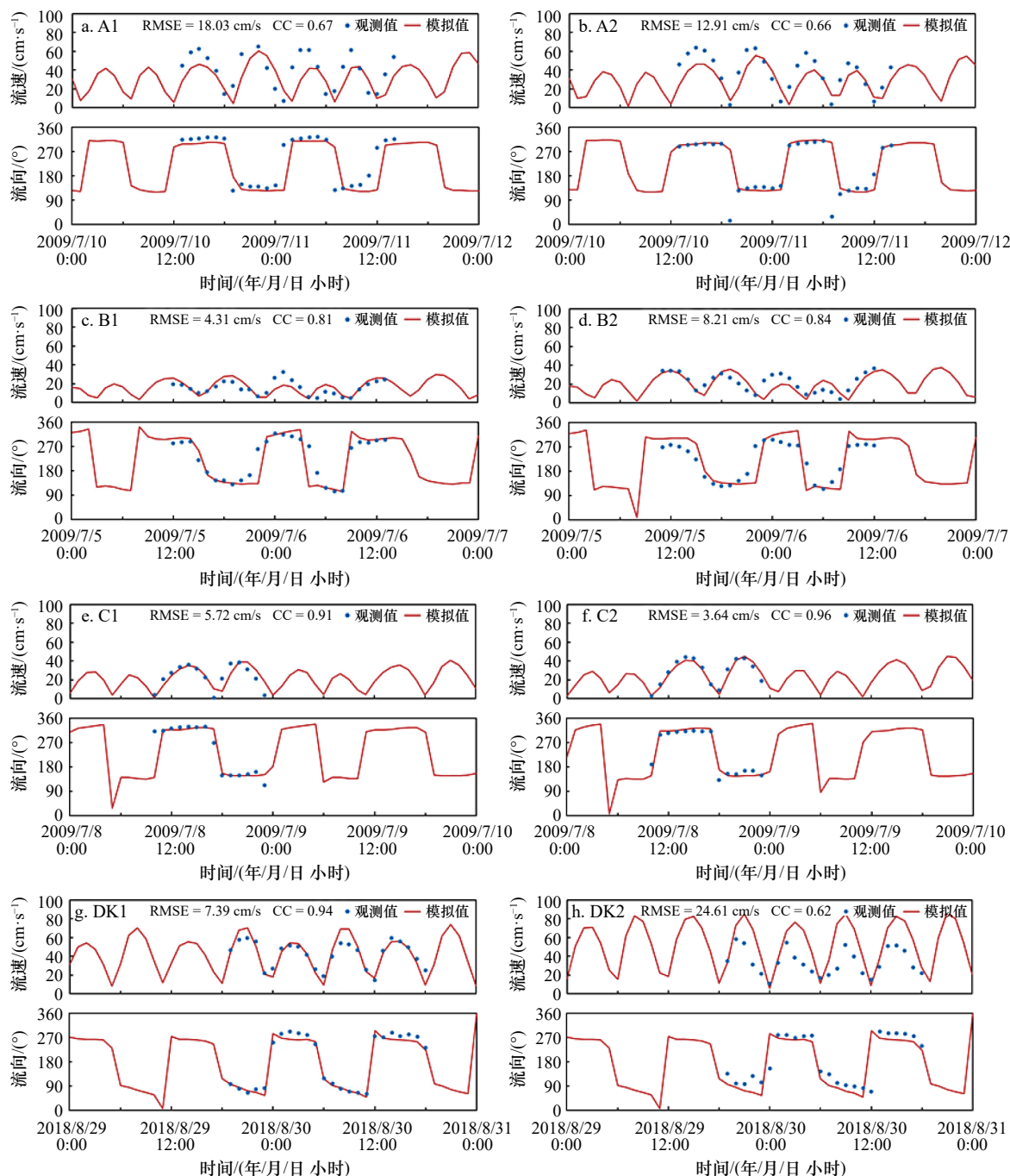


图7 模型计算结果与观测站点流速流向对比

Fig. 7 Comparisons of model computed and station measured current velocity and direction

利津站来沙总量仅 12.10×10^8 t, 水下三角洲 85% 面积均处于侵蚀状态, 平均侵蚀速率高达 11.09×10^8 m³/a, 侵蚀中心位于老河口处, 侵蚀中心垂直冲刷达 4.64 m。泥沙淤积主要集中在现行河口口门附近(图 10b)。2007 年现行河口口门自然出汉摆动, 主汉从东向转为北向, 泥沙持续淤积, 出现沉积中心, 原主汉口门处因缺少泥沙补给出现侵蚀中心, 清水沟老河口持续侵蚀。2007–2015 年期间侵蚀中心冲刷最大达 5.02 m (图 10c)。持续了 14 年的黄河调水调沙于 2016 年首

次中断, 当年仅有 0.106×10^8 t 的泥沙入海, 远低于多年平均值 2.56×10^8 t。在 2015–2020 年期间, 69% 的区域处于侵蚀状态, 但侵蚀速率较 2000–2007 年减小, 至 2.66×10^8 m³/a, 侵蚀中心最大垂直冲刷达 4.97 m, 侵蚀区主要集中在孤东近岸, 并且很可能在未来发生持续侵蚀(图 10d)。

在这里将水下三角洲冲淤净变化速率低于 5×10^8 m³/a 定义为缓慢变化, 将 $5 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$ m³/a 定义为中速变化, 将超过 10×10^8 m³/a 定义为快速变化, 正

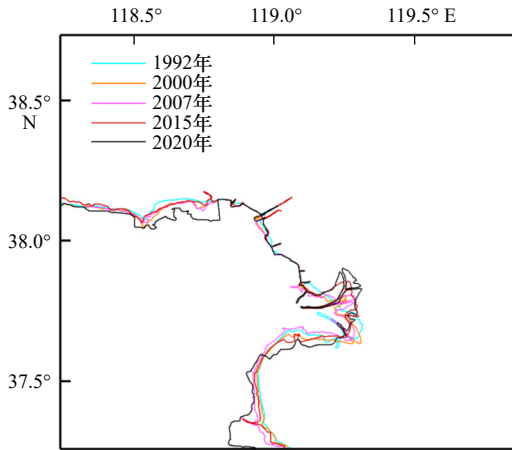


图8 1992–2020年黄河三角洲岸线动态变化

Fig. 8 Shoreline dynamics of the Huanghe River Delta from 1992 to 2020

负分别代表淤积和侵蚀。黄河水下三角洲冲淤过程具有显著的阶段性, 经历了中速淤积(1992–2000年), 快速侵蚀(2000–2007年), 中速淤积(2007–2015年), 缓慢侵蚀(2015–2020年)。同时, 黄河三角洲不同地貌单元间冲淤动态存在明显的空间异质性, 分布多个沉积中心和侵蚀中心, 1992–2015年北侧刁口河口外侵蚀中心东移6.4 km。现行河口不断淤积延伸, 沉积中心的位置随口门方向不断发生调整, 而缺少泥沙补给的老河口发生持续侵蚀, 老清水沟外侵蚀中心在2000–2020年间向南方向移动9.6 km, 孤东近岸剧烈侵蚀。

3.2 潮差与典型分潮振幅变化

本文使用 Matlab T_Tide 程序进行潮汐调和和分析, 计算渤海主要分潮的振幅和相位分布。结果显示, 渤海中部为弱潮区, 潮差在 0~2 m 之间, 北部辽东湾、西部渤海湾为中潮区, 潮差在 2~4 m 之间。渤海最

北端由 1992–2000 年潮差超过 4 m 的强潮区变为 2007–2020 年的中潮区(图 11)。

为探讨黄河三角洲近岸潮差变化, 本文在设定的径流量和时间下仅改变地形进行模型计算, 并参考 2007 年水下 5 m 等深线位置等间距提取 150 个点, 北起刁口河口, 南至支脉沟口北侧(图 12a), 以刁口河口为起点, 对潮差数据进行平滑处理后取各提取点对应年份的潮差(图 12b)。对比各年份潮差变化结果发现, 北侧刁口河口潮差比现行河口区大, 且刁口河口潮差缓慢减小; 无潮点附近的潮差变化小(距起点 25~40 km); 新老河口区潮差显著变大, 潮差变化较大的区域集中在岸线变化剧烈的现行河口区。1992–2000 年除清 8 出汉、口门向东北侧调整外, 整体岸线变化并不明显, 但在 2000 年后由于沙嘴不断向北淤积延伸, 老清水沟河口蚀退, 岸线变化显著, 尤其是在口门区附近, 由此地形改变引起的潮差相比于 1992 年增大幅度达 0.27 m。

黄河三角洲近岸潮汐特征受渤海 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 4 个典型分潮影响, 其中半日潮振幅 M_2 大于 S_2 , 全日潮振幅 K_1 大于 O_1 (图 6)。以 M_2 、 K_1 分潮为例, 探讨典型分潮变化对三角洲岸线和近岸地形变化的响应。如图 13, 1992 年和 2020 年 M_2 和 K_1 的振幅及相位对比结果显示, K_1 分潮红线(1992 年)滞后于蓝线(2020 年), K_1 分潮潮时提前, 振幅增加; M_2 分潮潮时提前, 且在无潮点附近等振幅线相距较远, 蓝线(2020 年)远滞后于红线(1992 年), 振幅变化较大, 而西侧渤海湾振幅变化较小, M_2 分潮振幅总体呈降低趋势。 M_2 分潮在东营港附近的无潮点有向东迁移的趋势, 偏移距离约为 3.8 km。

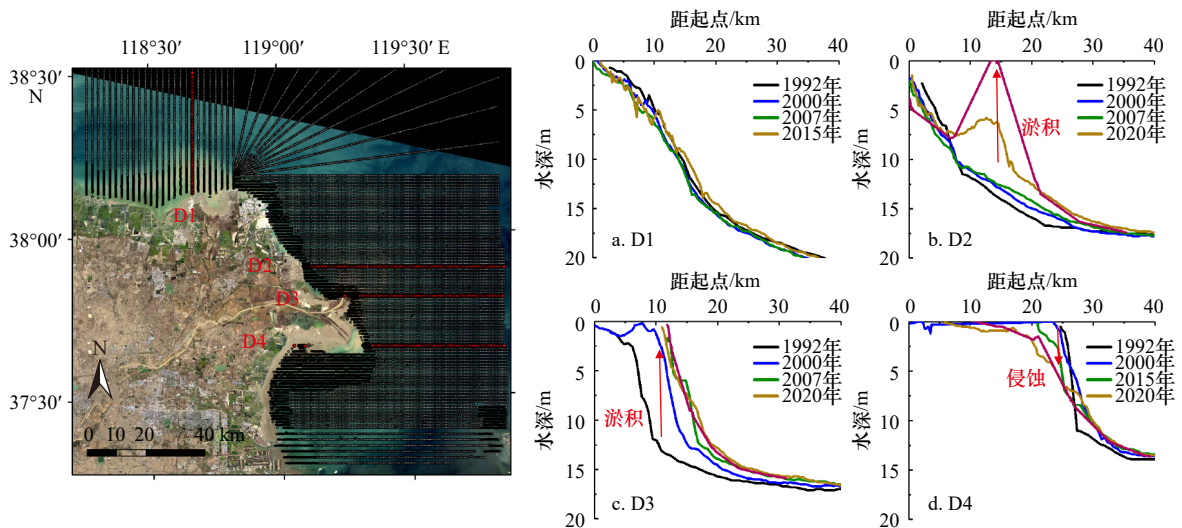


图9 黄河三角洲近岸水深典型断面位置及 D1–D4 断面水深变化

Fig. 9 Location of bathymetry profiles of the Huanghe River Delta and variations of selected cross-shore profiles of D1–D4

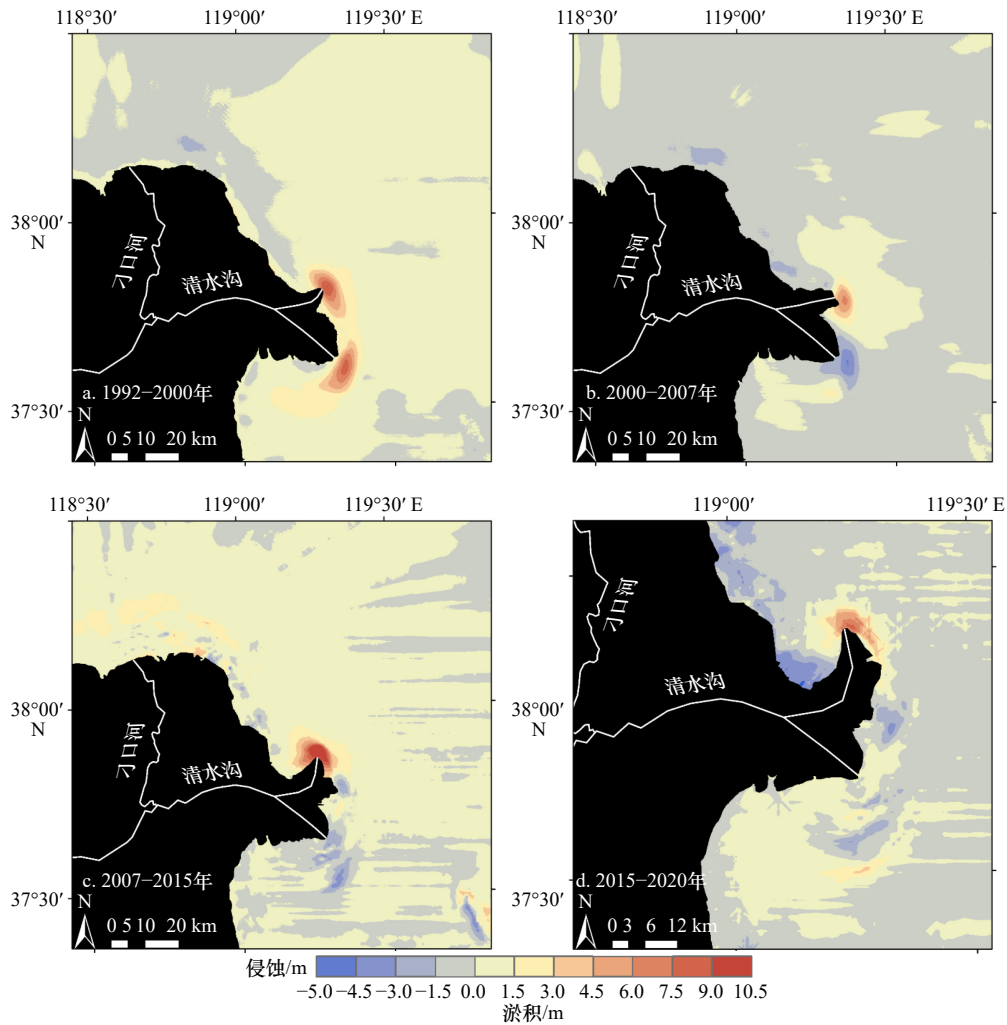


图 10 1992–2020 年黄河水下三角洲地貌演变过程

Fig. 10 Morphological changes of the Huanghe River Subaqueous Delta of 1992–2020

表 3 黄河水下三角洲冲淤体积和速率

Table 3 Erosion/accretion volumes and rates at the Huanghe River Subaqueous Delta

时间	淤积/%	侵蚀/%	淤积量/(10^8 m^3)	侵蚀量/(10^8 m^3)	净变化/(10^8 m^3)	净变化率/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
1992–2000年	73	27	80.54	30.11	50.43	6.30
2000–2007年	15	85	16.61	94.26	-77.66	-11.09
2007–2015年	77	23	86.33	25.19	61.14	7.64
2015–2020年	31	69	10.50	23.80	-13.29	-2.66

对比 1992 年与 2000 年、2007 年、2015 年、2020 年 M_2 分潮振幅值, 得到黄河三角洲近岸 M_2 振幅差变化分布 (图 14)。结果表明, M_2 分潮振幅总体呈降低趋势, 1992–2000 年无潮点附近 M_2 振幅变化不大, 沙嘴随入海流路向北淤长, 岸线发生较大改变, 新老河口和工程建设区 M_2 振幅显著降低, 2007–2020 年无潮点附近与老河口外振幅差均达到 0.2 m, 2015–2020 年期间现行河口外振幅差达 0.1 m 左右。因此, 岸线和地形变化是导致 M_2 典型分潮变化的最主要因素。

3.3 近岸高流速区变化及沉积效应

对比近 30 年研究区卫星影像和地形冲淤动态, 发现近年来口门形态发生显著改变, 影响河口近岸潮流场分布。如图 15 所示, 从涨急时刻流场分布看, 1992 年黄河口改汊前河口前缘只存在一个高流速区 (这里定义为大潮涨急时刻流速大于 0.75 m/s 区域), 中心流速可达 1 m/s; 2000 年改汊后至 2007 年, 伴随老河口侵蚀和新河口淤长, 原高流速区流速减弱, 新河口外出现高流速区, 并不断增强; 2015 年开始向北

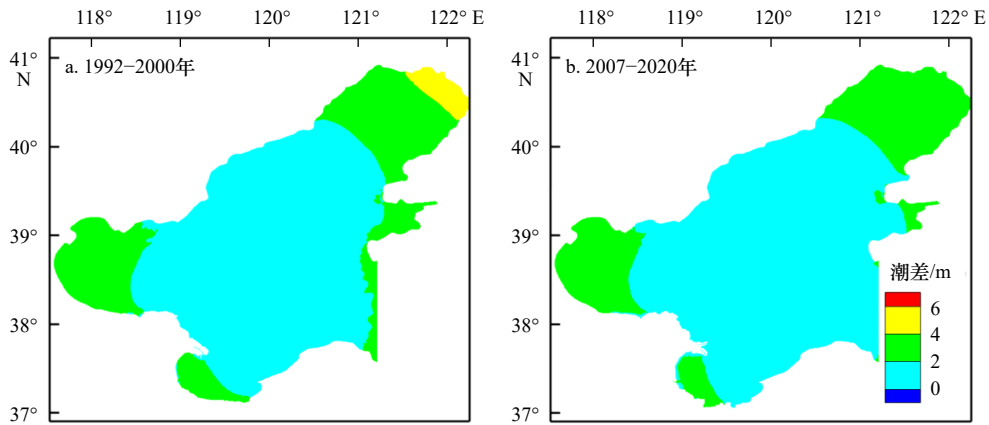


图 11 1992-2000 年(a)和 2007-2020 年(b)渤海平均潮差分布
Fig. 11 Tidal ranges in the Bohai Sea during 1992-2000 (a) and 2007-2020 (b)

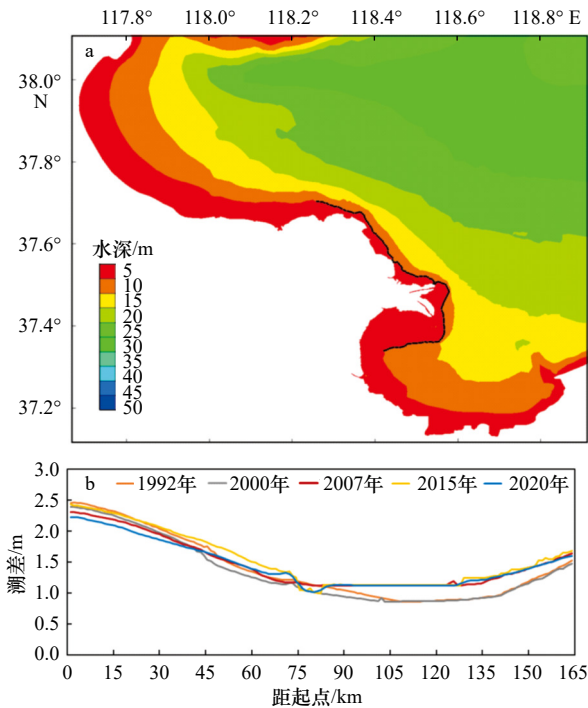
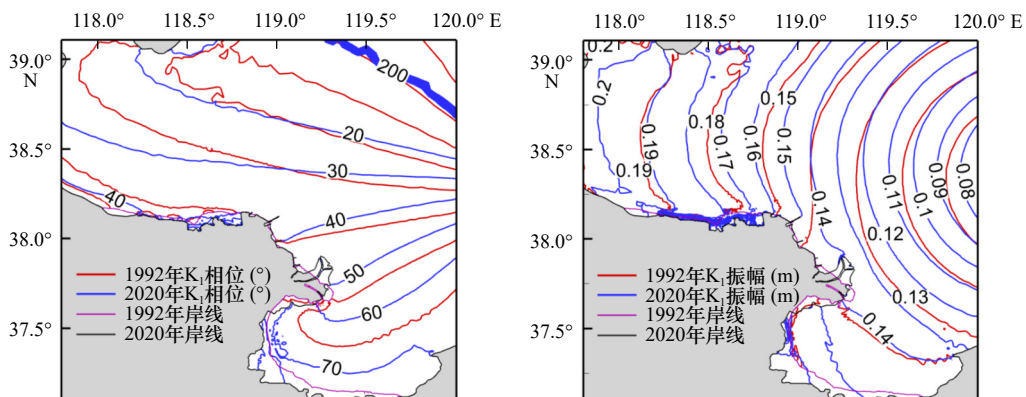


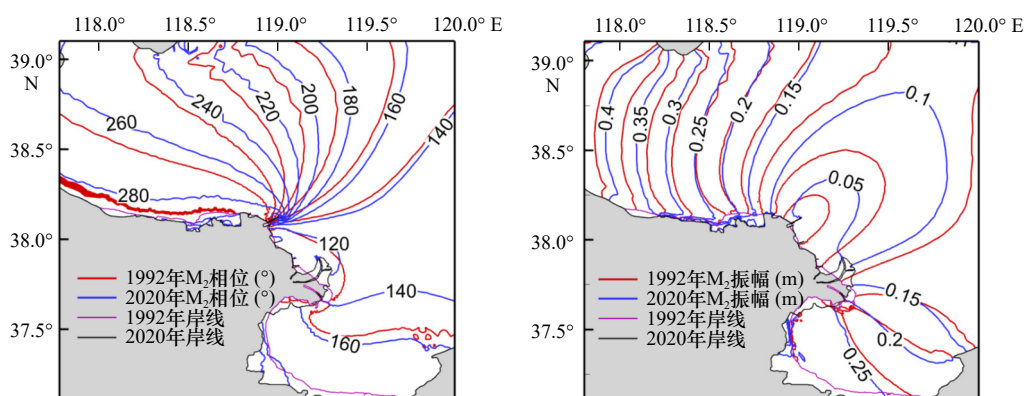
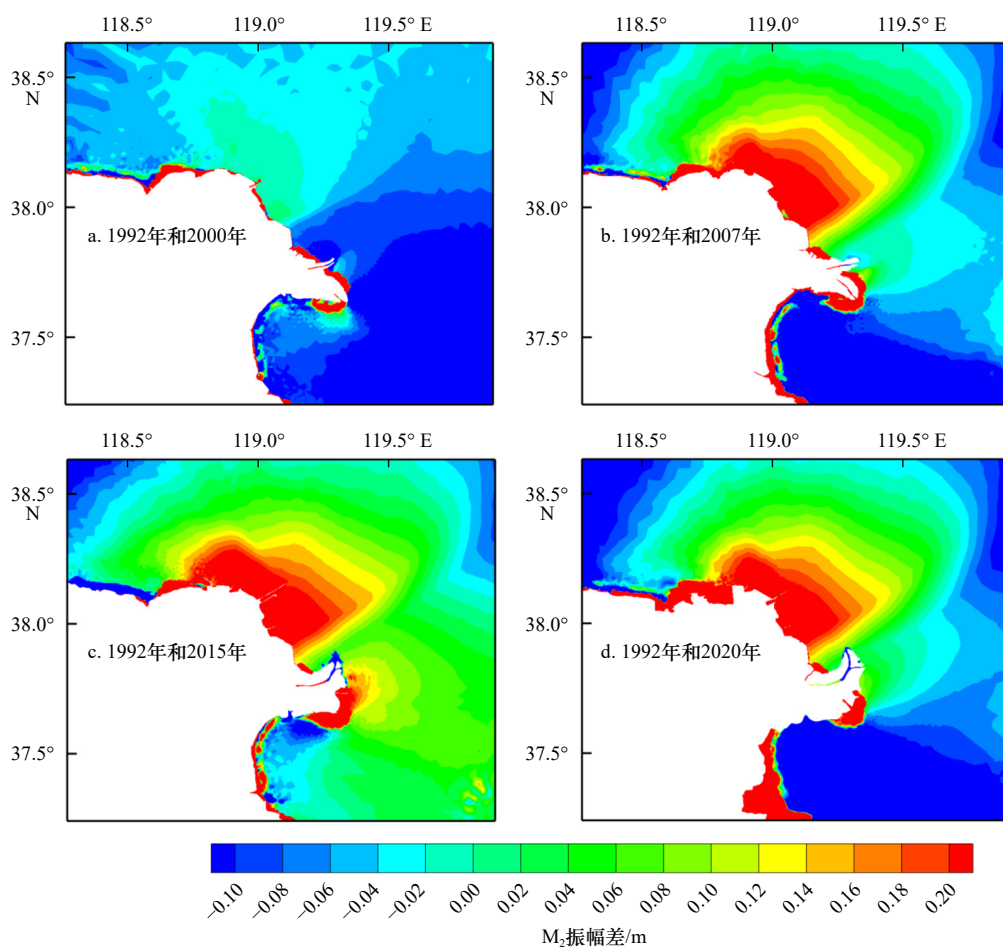
图 12 黄河三角洲近岸等距离潮差提取点位置(a)和对应潮差变化(b)

Fig. 12 Locations of equidistant points along the Huanghe River Delta (a) and changes in tidal range (b)

发育的新入海口与潮流方向近似平行, 口门处出现沿岸条带状高流速区。北侧高流速区流速在大潮涨急时刻可达 0.9 m/s, 东侧高流速区流速可达 1 m/s, 岸线和地形改变后, 两高流速区面积和流速大小均呈减小趋势。2015 年起, 原黄河三角洲海岸由于海岸工程阻挡, 局部区域流速流向变化较大, 北侧丁坝处流速变化分级较为明显, 出现局部高流速区, 潮流在涨急时刻可达 1 m/s。落急与涨急变化趋势相似, 但总体上, 现行河口属于涨潮流主导的水域, 涨潮流速大于落潮^[16], 并且随着岸线和地形的变化, 涨急落急时刻最大流速逐年减小。

泥沙的搬运和沉积不仅受自身性状特征的影响, 还受水动力条件控制, 沉积物中值粒径分布的空间差异性与当地水动力强弱相适应^[28]。三角洲近岸潮流场分布及变化对海床表层沉积物变化产生潜在影响。近年来黄河三角洲海域表层沉积物整体呈现近岸中值粒径大, 离岸中值粒径小的特点(图 16)。现行河口是流域来沙的直接沉积场所, 动力环境相对较弱, 以细颗粒泥沙沉积为主, 中值粒径较小; 刁口河口和老清水沟河口位于高流速区, 潮流流速大, 动力环境较强, 冲刷显著, 以粗颗粒泥沙为主要沉积物。



图 13 1992 年与 2020 年 K_1 、 M_2 振幅和相位对比图Fig. 13 Changes in M_2 and K_1 tidal amplitudes and phases between 1992 and 2020图 14 1992 年与 2000–2020 年各年份 M_2 分潮振幅差对比Fig. 14 Changes in M_2 tidal amplitudes between 1992 and 2000–2020

对比 4 年表层沉积物中值粒径图, 三角洲近岸沉积物总体粗化明显。与南侧相比, 北侧沉积物粗化更快, 侵蚀中心中值粒径由 1992 年的 $62.18 \mu\text{m}$ 变为 2015 年的 $130.30 \mu\text{m}$, 中值粒径平均变化率为 $2.84 \mu\text{m/a}$, 2000–2007 年期间中值粒径变化率高达 $4.68 \mu\text{m/a}$, 这可能与丁坝建设产生的导流阻沙作用以及增强的高流速区密切相关。清水沟外和北部刁口河口近岸水

深较浅, 涨落急时刻流速较高, 强烈的沿岸潮流引发泥沙再悬浮, 持续稳定的高流速区侵蚀搬运能力较强, 细颗粒泥沙易于起被水流带走, 造成水下三角洲冲刷, 出现沉积物粗化现象。

4 结论

本文运用岸线遥感解译和 TELEMAC-2D 数值模

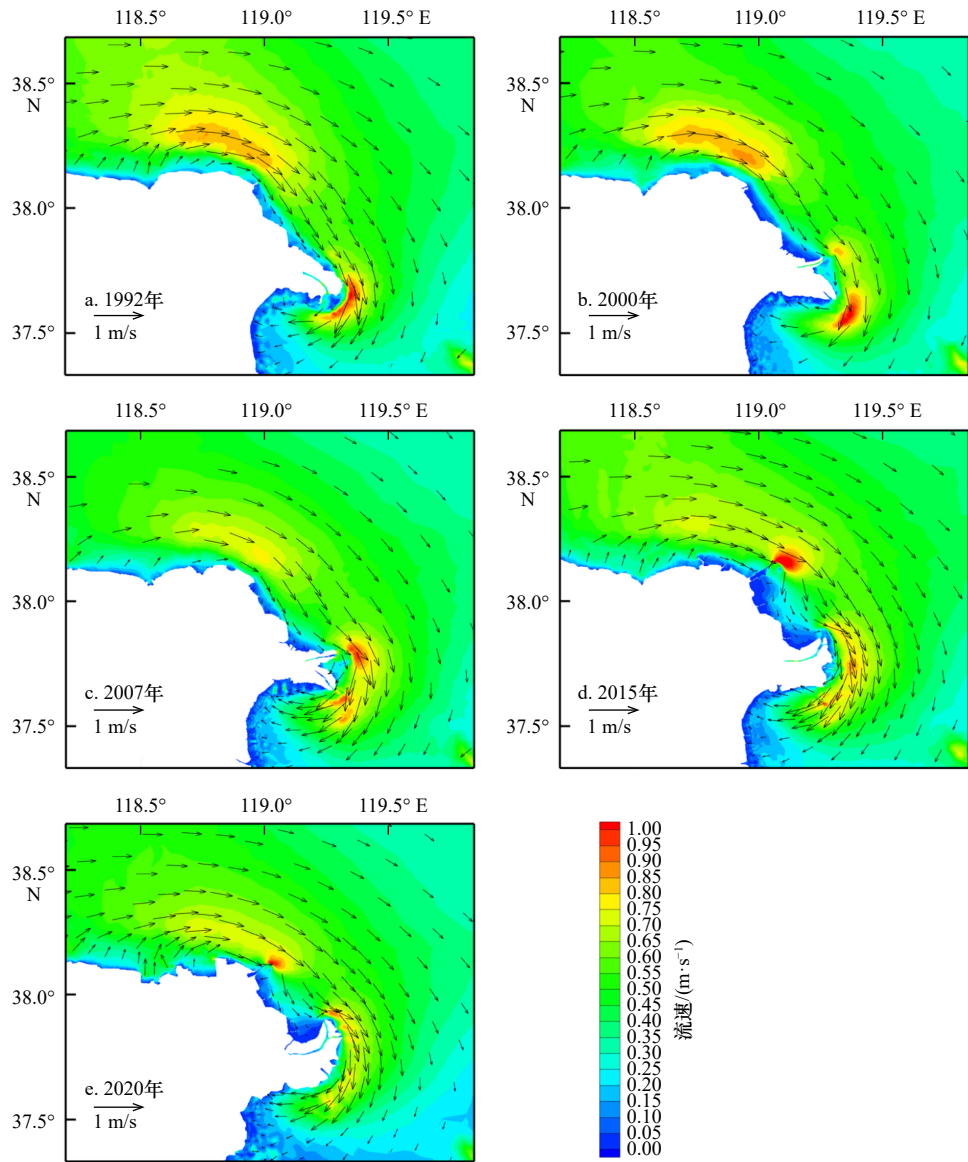
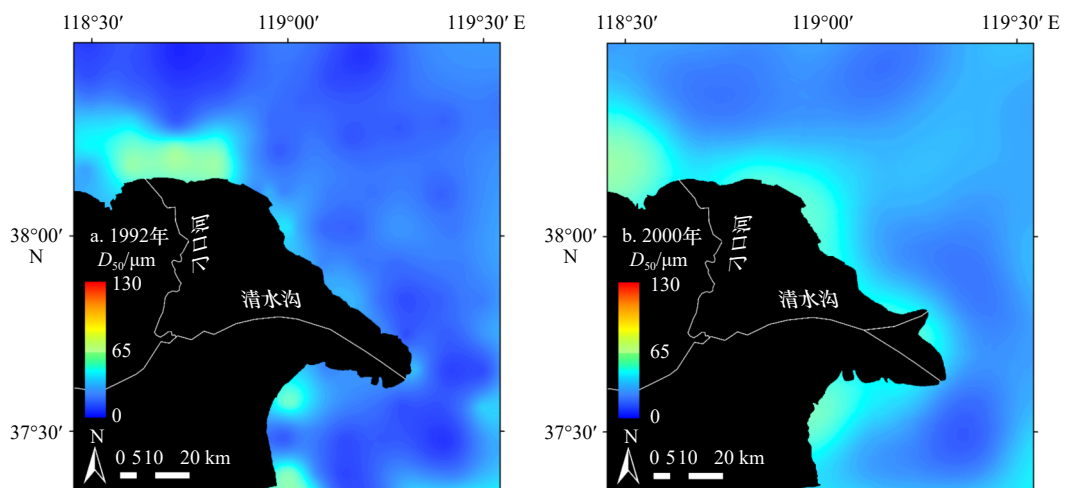


图 15 黄河三角洲近岸涨急的流场分布

Fig. 15 Velocity distributions at maximum flood phases in the Huanghe River Delta



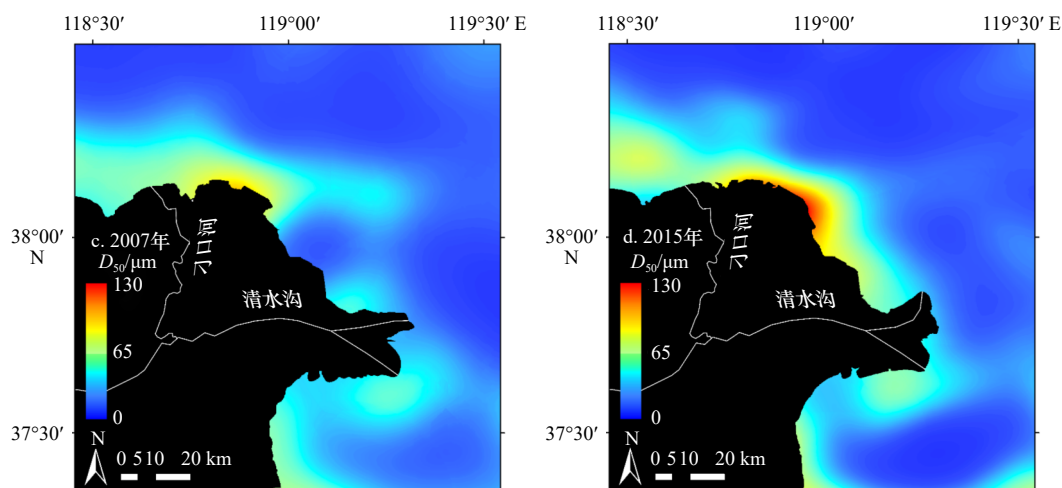


图 16 黄河三角洲表层沉积物中值粒径空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of median grain size of surface sediment in the Huanghe River Delta

拟手段研究了黄河三角洲近岸岸线和地形变化对潮汐动力的影响及其沉积效应。利用黄河口沿岸多个站点的实测水文数据,对该模型水动力过程进行了充分验证,在此基础上分析了岸线及地形变化导致黄河口近岸潮汐振幅、相位、无潮点、潮流及对海床沉积物动态的影响。得到主要结论如下:

(1)黄河水下三角洲冲淤过程具有显著的时空异质性,先后经历了中速淤积(1992–2000年),快速侵蚀(2000–2007年),中速淤积(2007–2015年),缓慢侵蚀(2015–2020年)4个阶段。现行河口不断淤积延伸,沉积中心随口门方向改变,老河口缺少泥沙补给,逐渐发育侵蚀中心,孤东近岸侵蚀强烈。此外,南侧老清水沟外侵蚀中心在2000–2020年间向南移动9.6 km,1992–2015年北侧刁口河口外侵蚀中心向东移6.4 km。

(2)岸线和水下地形的变化导致刁口河处潮差减

小,新老河口外潮差增大,相比于1992年河口附近5 m水深处的潮差增大幅度达0.27 m。1992–2020年 K_1 分潮潮时提前,振幅增大, M_2 分潮潮时提前,振幅减小,且 M_2 在东营港附近的无潮点略微向东迁移约3.8 km,新老河口和工程建设区 M_2 振幅显著降低,2007–2020年间无潮点附近与老河口外 M_2 振幅显著降低0.2 m。

(3)黄河三角洲刁口河口与新老河口外存在高流速区,北部刁口河口外的高流速区持续减弱,黄河改汙后原河口前缘高流速区减弱,现行河口外形成另一高流速区并不断增强,至2015年口门附近发育形成沿岸相对高流速带,随岸线和地形改变,两高流速区面积和流速大小均呈减小趋势。潮流冲刷造成表层沉积物整体呈现近岸中值粒径大,离岸中值粒径小的特点。持续稳定的高流速区造成了水下三角洲的冲刷,南北高流速区沉积物粗化。

参考文献:

- [1] Arkema K K, Guannel G, Verutes G, et al. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 913–918.
- [2] Konlechner T M, Kennedy D M, O'Grady J J, et al. Mapping spatial variability in shoreline change hotspots from satellite data; a case study in Southeast Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 246: 107018.
- [3] Temmerman S, Meire P, Bouma T J, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 79–83.
- [4] Pardo-Pascual J E, Almonacid-Caballer J, Ruiz L A, et al. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 1–11.
- [5] Jabaloy-Sánchez A, Lobo F J, Azor A, et al. Human-driven coastline changes in the Adra River deltaic system, Southeast Spain[J]. *Geomorphology*, 2010, 119(1/2): 9–22.
- [6] Dai Zhijun, Liu J T, Wei Wen, et al. Detection of the three gorges dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 6600.
- [7] Jiang Chao, Chen Shenliang, Pan Shuqi, et al. Geomorphic evolution of the Yellow River Delta: quantification of basin-scale natural and anthropogenic impacts[J]. *CATENA*, 2018, 163: 361–377.
- [8] Byun D S, Wang X H, Holloway P E. Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo coastal zone,

- Korea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 59(2): 185–196.
- [9] Takekawa J Y, Woo I, Spautz H, et al. Environmental threats to tidal-marsh vertebrates of the San Francisco Bay Estuary[J]. *Avian Biology*, 2006, 32: 176–197.
- [10] Blum M D, Roberts H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7): 488–491.
- [11] Maloney J M, Bentley S J, Xu Kehui, et al. Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation[J]. *Marine Geology*, 2018, 400: 12–23.
- [12] 杨世伦, 朱骏, 李鹏. 长江口前沿潮滩对来沙锐减和海面上升的响应 [J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(2): 152–158.
Yang Shilun, Zhu Jun, Li Peng. Response of tidal bank on the Changjiang River mouth foreland to drastic decline in riverine sediment supply and sea level rise[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(2): 152–158.
- [13] 郭磊城, 朱春燕, 何青, 等. 长江河口潮汐时空特征再分析 [J]. *海洋通报*, 2017, 36(6): 652–661.
Guo Leicheng, Zhu Chunyan, He Qing, et al. Examination of tidal wave properties in the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(6): 652–661.
- [14] 陈道信, 陈木永, 张弛. 围垦工程对温州近海及河口水动力的影响 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2009, 37(4): 457–462.
Chen Daoxin, Chen Muyong, Zhang Chi. Influence of reclamation projects on hydrodynamic force in offshore and estuary of Wenzhou[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(4): 457–462.
- [15] 陈沈良, 谷硕, 姬泓宇, 等. 新入海水沙情势下黄河口的地貌演变 [J]. *泥沙研究*, 2019, 44(5): 60–66.
Chen Shenliang, Gu Shuo, Ji Hongyu, et al. Processes of the Yellow River Mouth on new water and sediment condition[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 60–66.
- [16] 杨洋, 陈沈良, 徐丛亮. 黄河口滨海区冲淤演变与潮流不对称 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 13–25.
Yang Yang, Chen Shenliang, Xu Congliang. Morphodynamics and tidal flow asymmetry of the Huanghe River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 13–25.
- [17] Lu Jingfang, Zhang Yibo, Lü Xianqing, et al. The temporal evolution of coastlines in the Bohai Sea and its impact on hydrodynamics[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5549.
- [18] 梁慧迪, 匡翠萍. 岸线变化及海平面上升对渤海潮汐运动影响研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 2021, 36(3): 462–470.
Liang Huidi, Kuang Cuiping. Impacts of coastline changes and sea level rise on tides in the Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2021, 36(3): 462–470.
- [19] Zhang Lili, Shi Hongyuan, Xing Hao, et al. Analysis of the evolution of the Yellow River Delta coastline and the response of the tidal current field[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1232060.
- [20] 徐丛亮, 陈沈良, 陈俊卿. 新情势下黄河口出汊流路三角洲体系的演化模式 [J]. *海岸工程*, 2018, 37(4): 35–43.
Xu Congliang, Chen Shenliang, Chen Junqing. Evolution mode of channel bifurcation delta system at the Yellow River Estuary under the new situation[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 37(4): 35–43.
- [21] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策 [J]. *水利学报*, 2004, 35(7): 1–6, 13.
Chen Shenliang, Zhang Guoan, Gu Guochuan. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River Delta and its countermeasures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(7): 1–6, 13.
- [22] 刘锋, 陈沈良, 周永东, 等. 黄河 2009 年调水调沙期间河口水动力及悬沙输移变化特征 [J]. *泥沙研究*, 2010, 35(6): 1–8.
Liu Feng, Chen Shenliang, Zhou Yongdong, et al. Effect of water-sediment regulation in Yellow River on hydrodynamics and suspended sediment transport in its estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010, 35(6): 1–8.
- [23] 李鹏, 陈沈良, 刘清兰, 等. 黄河尾间沙洲及河口形态对水沙变化的响应 [J]. *泥沙研究*, 2022, 47(2): 57–64.
Li Peng, Chen Shenliang, Liu Qinglan, et al. Responses of the processes in the Yellow River lowermost channel sandbars and estuary to the variation of water and sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(2): 57–64.
- [24] 苏国宾, 陈沈良, 徐丛亮, 等. 基于 GF-1 影像的黄河口潮滩高程定量反演 [J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(11): 1–9.
Su Guobing, Chen Shenliang, Xu Congliang, et al. Quantitative retrieval of tidal flat elevation with GF-1 images in the Yellow River Mouth[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(11): 1–9.
- [25] Jia Mingming, Wang Zongming, Mao Dehua, et al. Rapid, robust, and automated mapping of tidal flats in China using time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255: 112285.
- [26] Ran Baichuan, Chen Shenliang, Pan Shunqi, et al. Impacts of sea-access roads on wetland landscape dynamics in the Yellow River Delta front[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 244: 106834.
- [27] Ji Hongyu, Pan Shunqi, Chen Shenliang. Impact of river discharge on hydrodynamics and sedimentary processes at Yellow River Delta[J]. *Marine Geology*, 2020, 425: 106210.
- [28] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1985, 55(4): 457–470.

Response of tidal dynamics to geomorphic evolution and depositional effects in the Huanghe River Delta

Gong Xuelei¹, Ji Hongyu¹, Li Peng², Chen Shenliang¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In recent years, natural processes and human activities have significantly altered the Huanghe River channel and the coastal geomorphic pattern, while the impact of the dramatic geomorphic evolution on the coastal hydrodynamics has not been fully studied. Based on series images captured by the Landsat satellites and bathymetric measurements, this paper analyzed the shorelines and topography changes of the Huanghe River Delta from 1992 to 2020. Several sets of numerical models covering the entire Bohai Sea were established by TELEMAC-2D to investigate the response of tidal dynamics to geomorphic evolution and its depositional effects in the Huanghe River Delta. The results show that the erosion and deposition had significant spatial and temporal heterogeneity, and there were multiple siltation and erosion centers. The erosion center outside the old Qingshuigou Estuary moved 9.6 km to the south during 2000–2020, and the one outside the Diaokou Estuary moved 6.4 km to the east during 1992–2015. The tidal dynamics were dominated by the coastline and terrain changes on the medium and long time scales. The tidal range of the Diaokou estuary decreased, while the old and the new estuary increased. And the tidal range at 5 m depth had a maximum variation of 0.27 m. The K_1 tidal amplitude increased significantly, while the M_2 tidal amplitude was considerably reduced, and the amphidromic point near Dongying port eastward migration of 3.8 km. The high velocity outside the Diaokou Estuary and the old estuary continued to weaken, and another high velocity area gradually developed outside the current estuary. The continuous and stable high velocity area caused the erosion of the subaqueous delta and the coarsening of sediment.

Key words: the Huanghe River Delta; numerical simulation; geomorphic evolution; tidal dynamics; depositional effects