

王世雄, 范勇勇, 刘猛, 等. 黄河清水沟废弃河口冲淤时空变化特征[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 1-11.

WANG Shixiong, FAN Yongyong, LIU Meng, et al. Temporal and spatial variations of erosion and accumulation off the Qingshuigou mouth of the Yellow River[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 1-11.

## 黄河清水沟废弃河口冲淤时空变化特征

王世雄<sup>1</sup>, 范勇勇<sup>2</sup>, 刘猛<sup>1</sup>, 吴晓<sup>1</sup>, 王厚杰<sup>1,3</sup>, 毕乃双<sup>1,3\*</sup>

(1 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2 黄河河口海岸科学研究所, 山东东营 257091;

3 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237)

**摘要:**黄河于 1996 年人工改汉至清 8 入海是导致清水沟废弃河口岸线蚀退和海底侵蚀冲刷的主要诱因。但目前有关清水沟废弃河口海底冲淤演化对黄河人工改道的响应的认识尚有不足。因此, 利用现代黄河三角洲毗邻海域多年的水深资料和 Landsat 卫星遥感影像, 综合分析了清水沟(废弃)河口在 1996—2015 年的岸线变化及冲淤时空变化。结果表明: 黄河清水沟废弃河口沙嘴两侧蚀退速率的变化存在明显的时空差异性。黄河改道初期(1996—2002 年), 研究区海底冲刷速率较快, 年均冲刷速率约为 0.03~0.05 km<sup>3</sup>/a; 2002—2007 年, 研究区海底冲刷速率大幅降低至约 0.02 km<sup>3</sup>/a; 2007—2010 年, 随着黄河口位置再次向北迁移, 研究区海底年均冲刷速率增大至约 0.026 km<sup>3</sup>/a; 2010—2015 年, 研究区海底年均冲刷速率减缓至约 0.01 km<sup>3</sup>/a, 远小于 1996—2002 年黄河改道初期时的水平。同时, 基于 Delft3D 模式构建了黄河三角洲高分辨率三维水动力模型, 定量研究了清水沟废弃河口潮流与冬季波浪变化对海底冲淤变化的影响, 结果表明波浪和潮流在河口侵蚀过程中扮演着不同的角色。一方面, 潮流与波浪在三角洲前缘斜坡处形成的高底剪切应力区是使得该区域形成侵蚀中心的主要原因。清水沟废弃河口岸线不断向陆方向蚀退以及侵蚀冲刷所造成的研究区整体水深增加使得潮流与波浪对海底的侵蚀冲刷作用逐渐减弱, 最终使得近年来研究区海底冲刷速率不断减缓。另外, 波浪在河口近岸区形成的高底剪切应力是造成河嘴两侧叶瓣差异侵蚀和近岸区形成侵蚀中心的主要动力机制。同时, 潮流、波浪与海底冲淤变化间的相互作用对于该区域冲淤演化模式有着重要影响。

**关键词:**黄河清水沟废弃河口; 黄河人工改道; 冲淤时空变化; 水动力变化

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.082

## 0 引言

河口是河流与海洋相互作用最为强烈的区域, 其每年接受全球大河携带的约 120 亿 t 入海沉积物<sup>[1]</sup>。巨量的陆源沉积物在河口及其毗邻海域快速堆积, 形成了大型三角洲沉积体<sup>[2]</sup>, 并逐渐成为世界

上经济最发达、人口最为集中的区域之一<sup>[3-4]</sup>。然而, 在全球气候变化和流域内人类活动的叠加作用下, 近几十年来全球大河入海水沙通量显著降低<sup>[5-10]</sup>, 加之全球海平面上升、三角洲地面沉降等问题日益严重, 由此导致全球多个大河三角洲正在或者即将面临严重侵蚀的威胁<sup>[11-12]</sup>, 严重影响了人类的生存空间及经济社会发展。同时, 三角洲侵蚀改变了陆源沉积物的“源-汇”格局, 使其由陆源沉积物的重要的“汇”转变为“源”<sup>[13]</sup>, 并显著改变了与沉积物运输和沉积密切相关的生物地球化学过程<sup>[14-15]</sup>。因此, 揭示三角洲冲淤演化机理已成为国内外学者的研究焦点<sup>[16-20]</sup>, 是全球变化研究及“海陆边缘科学计划——从源到汇 (Source to Sink)”<sup>[21]</sup>、“海岸

收稿日期: 2021-04-08

资助项目: 国家自然科学基金面上基金(42076175)

作者简介: 王世雄(1994—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: 2282158774@qq.com

\* 通讯作者: 毕乃双(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事近海沉积动力学研究工作. E-mail: binaishuang@ouc.edu.cn

带陆海相互作用(LOICZ)”<sup>[22]</sup>，“未来地球海岸(Future Earth Coasts)”<sup>[23]</sup>等重大国际研究计划的研究热点。

黄河作为我国第二大河流,素来以水少沙多著称,每年向渤海输运大量泥沙<sup>[24]</sup>。据统计,20世纪70年代之前,黄河多年平均的入海水沙量分别为341.2亿m<sup>3</sup>和7.22亿t<sup>[25]</sup>;而自20世纪70年代以来,受气候变化和流域内人类活动的共同影响,黄河水沙量逐年减少。1996—2001年间,黄河年均水沙量已分别降至120亿m<sup>3</sup>和1.62亿t<sup>[26]</sup>。其中,因黄河人工改汉导致行水河口废弃,加之潮流、波浪等海洋水动力的侵蚀,使得废弃河口处的水上三角洲叶瓣蚀退,水下三角洲也同样受到强烈的侵蚀破坏<sup>[27]</sup>。LI等<sup>[28]</sup>通过综合分析黄河三角洲北部毗邻海域水下岸坡的演化规律,将其演化过程大致分为3个阶段,即蚀退期(1976—1989年)、转换过渡期(1989—1990)及周期性波动期(1990—2003)。XING等<sup>[29]</sup>指出从1976年黄河改道清水沟流路入海到1980年间,现代黄河三角洲北部叶瓣及其水下三角洲均处于严重侵蚀阶段,且随着侵蚀破坏过程的持续,海底斜坡坡度呈现出逐渐变缓的趋势。CUI等<sup>[30]</sup>利用1996—2005年黄河口遥感影像对清水沟河口岸线形态演化进行分析后指出,清水沟河口沙嘴的演化过程可划分为快速淤长期(1976—1986年)、蚀积调整期(1986—1996年)和缓慢蚀积期(1996—2003年)及缓慢淤长期(2003—2005年)4个阶段。BI等<sup>[31]</sup>分析黄河水下三角洲在1976—2004年间的冲淤演化过程后指出,自1976年黄河尾闾改道清水沟流路后,沉积中心即由现代黄河三角洲北部的刁河口转移至其南部的清水沟河口,而随着1996年后河口位置的再次北移,沉积中心也随之再次转移。刘付程等<sup>[32]</sup>以黄河三角洲毗邻海域海底表层沉积物粒度数据为基础,运用FCM等方法对黄河水下三角洲的沉积动力环境进行分类,识别、分区及可视化展示。其研究结果表明,黄河三角洲毗邻海域的冲刷区主要呈斑块状分布于三角洲北部水深<6m的近岸浅水区及清水沟废弃河口附近。FU等<sup>[33]</sup>则通过系统研究现代黄河三角洲1855—2015年间的沉积演化后指出,沉积物输运量、气候变化和人类活动均在现代黄河三角洲沉积演化过程中扮演着十分重要的角色。上述研究详尽地描述了黄河废弃河口岸线演化及其毗邻海域的冲淤时空变化,但相关研究多集中于黄河三角洲北侧,且由于受到技术手段的限制,研究方法多

是基于对观测资料的分析,因此,目前对于黄河改道清8河道入海后,清水沟废弃河口的河口岸线演化和冲淤时空变化及其对黄河改道及河口毗邻海域动力环境变化的响应的认识仍有不足。为此,笔者利用现代黄河三角洲毗邻海域多年的水深资料和Landsat卫星遥感影像,综合分析了黄河清水沟废弃河口在1996—2015年的岸线演化及冲淤时空变化。同时,基于Delft3D三维水动力模型,利用2000、2007和2015年黄河三角洲岸线和水深地形数据,模拟了不同地貌条件下黄河三角洲毗邻海域动力环境,并通过对比其变化探讨其对黄河清水沟废弃河口的岸线演化及冲淤时空变化的影响。分析黄河三角洲的核心部分在1996年和2007年2次流路摆动前后的海底冲淤时空变化特征,不仅对揭示全球变化背景下黄河三角洲冲淤演变规律及其未来变化趋势具有重要的理论意义,同时可为未来的青东油气田开发、湿地核心区保护、黄河三角洲高效生态经济区的发展等方面提供重要的科学支撑。

## 1 研究区域概况

自1855年黄河于河南省铜瓦厢决口而改道至大清河汇入渤海湾以来,经过一百多年的冲积演化,逐渐形成南至莱州湾,北达渤海湾的巨大堆积扇体,其总面积可达5460km<sup>2</sup>,海岸线总长约为350km<sup>[33]</sup>。自黄河1976年由刁口流路改道至今已行水接近45年,期间于1996年改汉至清8入海,导致原河口废弃,而后受2007年黄河汛期影响,老清8河道再次向北移动,并最终稳定于北略偏东方向<sup>[34]</sup>。1976—1996年,河口累计接受黄河入海泥沙高达124亿t,累计造陆接近490km<sup>2</sup><sup>[35]</sup>。现代黄河三角洲主要以黄河1976年改道清水沟至今形成的河口三角洲叶瓣为主体,南端以宋春荣沟为界,北端可达孤东大堤一带。本文研究区位于黄河清水沟废弃河口毗邻海域,为黄河1976年改道清水沟流路后到1996年改汉至清8入海前形成的水下三角洲区域,地处现代黄河三角洲南端,为黄河湿地国家级自然保护区的重要组成部分,大致范围为118.98°—119.3°E,37.5°—37.65°N(图1)。

清水沟(废弃)河口属于典型的弱潮型河口,其附近海域平均潮差约为1.8m,典型半日潮。而现代黄河三角洲近岸海域潮流多为沿岸流动的往复流,且在清水沟(废弃)河口附近存在一处高流速中

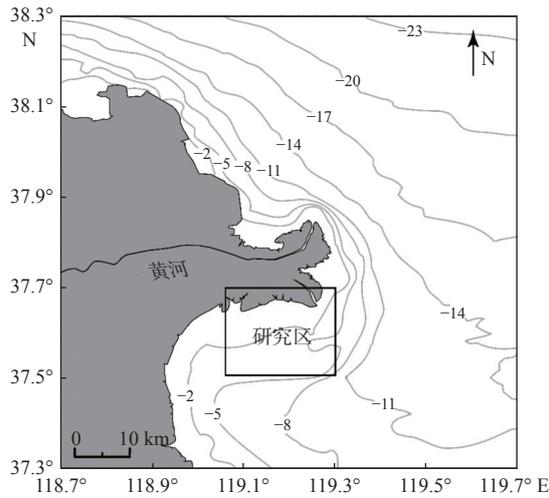


图 1 黄河三角洲及研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the Yellow River Delta and the study area

心, 中心处最大表层流速超过 1 m/s。

1996 年和 2007 年 2 次改道使得黄河口与清水沟废弃河口间的距离不断增大, 进而导致黄河向清水沟废弃河口的有效泥沙供给持续减少, 清水沟废弃河口外的淤积中心随之消失, 研究区海底也在海洋水动力的长期作用下受到严重的侵蚀冲刷<sup>[27]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 测深及岸线数据

本文收集了现代黄河三角洲毗邻海域 1996—2015 年 6 个年份的测深资料: 其中, 2000、2007、2015 年断面间距为 1 km; 1996、2002、2010 年断面间距为 4 km(图 2), 测深数据由黄河口水文水资源勘测局于每年黄河汛后应用 SDH-13D 型回声测深仪测得, 测量精度为  $(5 \pm 0.4\%)H$  ( $H$  为水深)。应用 Surfer 16.0 软件在固定网格进行插值, 插值方法采用 Kriging 法, 网格间距为  $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ , 而后应用辛普森 3/8 规则<sup>[36]</sup> 计算得到不同年份的海底蓄水体积  $V$ 。最后, 对 2 个年份的海底蓄水体积相减, 即可计算得到对应时间段内的海底冲淤体积。辛普森 3/8 规则的数学表达式如下:

$$S_i = \frac{3\Delta x}{8} \left( h_{i1} + h_{in} + 3 \sum_{j=2}^{n-2} h_{ij} \right) \quad (1)$$

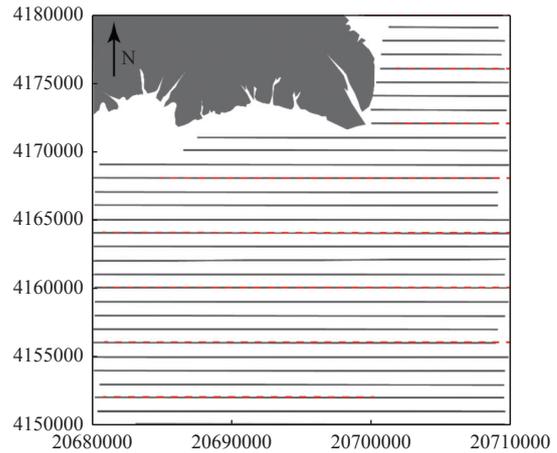
$$V = \frac{\lambda}{3} (S_1 + 4S_2 + 2S_3 + S_4 + \dots + 2S_{n-1} + S_n) \quad (2)$$

式中:  $S_i$  为计算网格中第  $i$  行断面的面积, 海底一侧的断面曲线边为经过 3 次拟合得到的抛物线;

$\Delta x$  与  $\Delta y$  分别为网格中  $x$  轴方向与  $y$  轴方向的间距;

$h_{ij}$  为计算网格中第  $i$  行第  $j$  列处的网格点对应的水深值;

$m$ 、 $n$  为网格的大小。



灰色实线为断面间距 1 km 的测深断面; 红色虚线为断面间距 4 km 的测深断面; 采用 1954 年北京坐标系及高斯克列格投影(中央经线为 117°E), 单位: m

图 2 研究区内测深断面分布

Fig.2 Settings of bathymetric sections in the study area

1996—2015 年的黄河清水沟废弃河口 Landsat Thematic Mapper(TM)和 Landsat Enhanced Thematic Mapper(ETM+) 卫星遥感影像 (<http://glovis.usgs.gov>) 详细信息见表 1。应用直方图阈值与多波段运算相结合的混合分析法<sup>[37]</sup> 进行黄河清水沟废弃河口岸线的提取。首先, 基于波段 5 的直方图进行水陆分离, 即根据直方图阈值将遥感影像中属于水体的像素设定为 1, 属于陆地的像素则设定为 0, 从而得到水陆分离的二元图像。同样, 基于波段 2 与波段 5 的比率得到另一幅二元图像。最后将 2 幅二元图像相乘即可得到代表河口岸线的二元图像。该方法可以准确地提取河口岸线, 已广泛地应用于黄河三角洲岸线演化研究<sup>[16,38]</sup>。

表 1 Landsat 卫星遥感影像详细信息

Table 1 The detailed information of satellite images

日期	影像类型	空间分辨率/m
1996-09-20	TM	30
2000-05-02	TM	30
2004-05-13	TM	30
2008-10-31	ETM+	30
2012-08-15	ETM+	30
2015-05-10	ETM+	30

### 2.2 水动力模型设置与验证

#### 2.2.1 模型设置

本文主要采用 Delft3D 模型提供的 FLOW 模块和 WAVE 模块对研究区的水动力环境进行模拟。构建了渤海潮汐模型,并利用该模型的模拟结果为小范围的黄河三角洲毗邻海域嵌套模型提供外海开边界条件。

渤海模型采用矩形网格,模型范围为 117.5°—122.5°E, 37°—41°N, 网格分辨率为 1 km; 嵌套模型的计算网格则是覆盖了整个莱州湾及现代黄河三角洲毗邻海域,采用正交曲线网格,以更好地适应岸线(图 3); 最小网格间距为 150 m, 位于河口附近海域; 最大网格间距为 700 m, 主要位于开边界附近; 网格大小为 536×220。在垂向上,二者均采用底层加密的  $\sigma$  坐标系统,共划分了 13 层; 从上到下,每层的层厚分别占到总水深的 2%、4%、6%、8%、10%、10%、20%、10%、10%、8%、6%、4%、2%。另外,渤海海域的水深数据源于海图资料及 2015 年黄河三角洲毗邻海域 150 条断面测深数据; 嵌套模型的水深地形数据分别为 2000、2007 及 2015 年黄河三角洲毗邻海域 150 条断面测深数据。外层模型的开边界设置在远离黄河三角洲的 122.59°E 处,并采用 TPX08.0 TOPEX/POSEIDON 全球潮汐模型提供的 4 个天文分潮 M2、S2、K1、O1 来作为模型水文开边界条件的驱动力。嵌套模型外海开边界处的潮汐水位边界条件则由外层模型的计算得出。另外,外层模型时间步长为 5 min, 嵌套模型的时间步长则是水动力模块设置为 3 min, WAVE

模块时间步长设置为 30 min。嵌套模型的风场及海面边界条件均源自欧洲中期天气预报中心(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>), 分辨率均为 0.125°。模型验证的模拟时间分别设置为 2017 和 2018 年的 7—8 月。

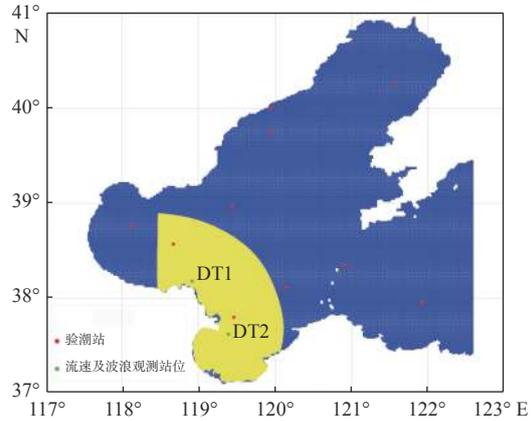
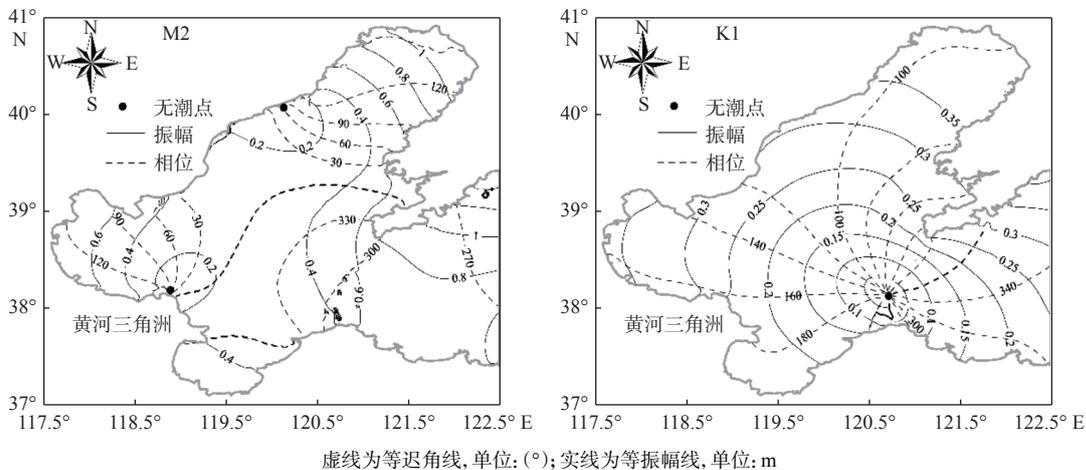


图 3 渤海潮汐模型-嵌套模型区域示意图及观测站位分布  
Fig.3 The domain of the Bohai Sea tidal model-nested model and settings of observation stations

#### 2.2.2 模型验证

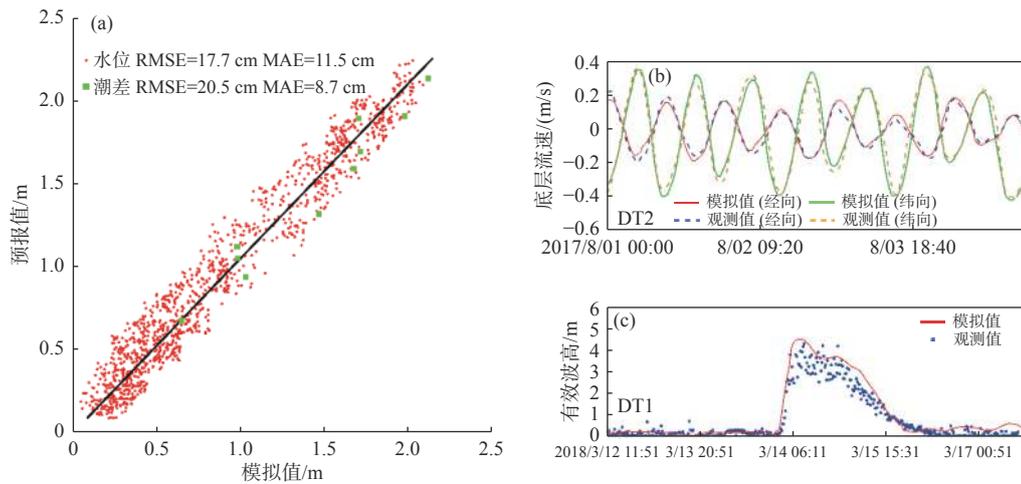
渤海水位验证的潮位数据来自于 Delft Dashboard 潮汐数据库 (<http://publicwiki.deltares.nl/display/OET/DelftDashboard>) (验潮站位分布如图 3 所示)。黄河口毗邻海域潮位、潮流及有效波高数据则是课题组 2018 年 7 月在黄河三角洲毗邻海域现场观测得到(观测站位 DT1 和 DT2 分布如图 3 所示)。对比模拟与实验结果显示,模拟潮位、潮流及有效波高与观测值基本一致(图 4、5),水动力模拟结果可信。



虚线为等迟角线,单位:(°);实线为等振幅线,单位:m

图 4 M2 和 K1 分潮同潮图

Fig.4 Theco-tidal charts of M2 and K1 tidal constituents



(a) 嵌套模型潮位; (b) 底层流速及波浪; (c) 验证结果

图 5 渤海模型-嵌套模型

Fig.5 The Bohai Sea model and nested model

### 3 结果

#### 3.1 清水沟废弃河口岸线变化

自 1996 年黄河改道清 8 汊入海后, 河口沙嘴逐渐向陆蚀退, 经过 1996—2015 年近 20 年的时间, 其向陆最大蚀退距离可达 6.3 km 左右(图 6a)。且河嘴南北两侧叶瓣向陆蚀退过程存在明显的时空差异性。以河嘴南北两侧的 N 断面与 S 断面为参照可见, 河嘴北侧叶瓣的蚀退速率呈现出先加快、后逐渐减慢的特点, 而南侧叶瓣的蚀退速率则呈现出逐渐加快的特点。1996—2000 年, 河嘴北侧叶瓣的年均蚀退速率约为 0.2 km/a, 同期南侧叶瓣的蚀退速率远低于北侧叶瓣, 其年均蚀退速率仅为 0.04 km/a; 2000—2004 年, 河嘴北侧叶瓣的年均蚀

退速率增大至 0.47 km/a, 而南侧叶瓣的蚀退速率虽有所增大, 但其年均蚀退速率仅为 0.12 km/a, 远低于北侧叶瓣的蚀退速率; 2004—2008 年, 河嘴北侧叶瓣的年均蚀退速率降低至 0.36 km/a, 而南侧叶瓣的年均蚀退速率则小幅提升至 0.15 km/a; 2008—2012 年, 南北两侧叶瓣的蚀退速率均无明显变化; 2012—2015 年, 河嘴北侧叶瓣的年均蚀退速率进一步降低至 0.28 km/a, 而南侧叶瓣的年均蚀退速率则超过北侧叶瓣, 大幅提升至 0.4 km/a(图 6b)。

#### 3.2 清水沟废弃河口冲淤时空变化

基于测深资料, 分别计算得到黄河清水沟废弃河口在 1996—2000、2000—2002、2002—2007、2007—2010 及 2010—2015 年 5 个时间段内的海底冲刷量及冲淤空间分布。

结果表明: 在 1996 年黄河改汊至清 8 入海后,

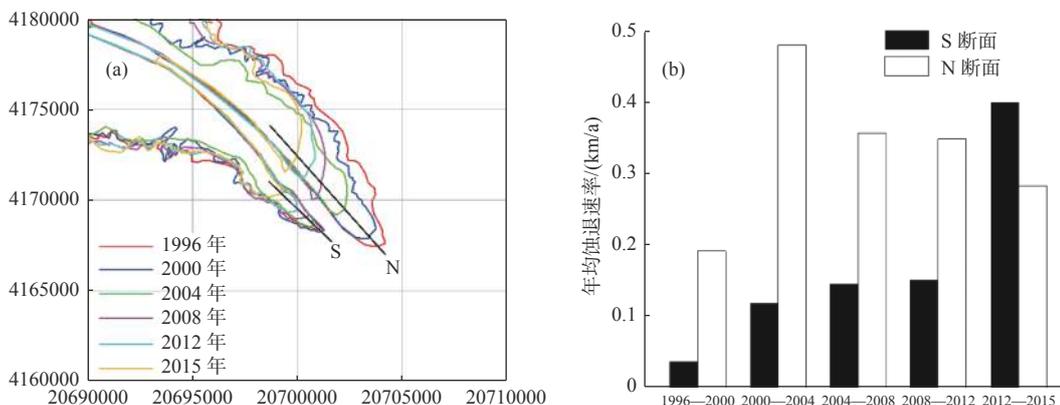


图 6 黄河清水沟废弃河口沙嘴岸线变化及口门岸线年均蚀退速率变化

Fig.6 Coastline changes of the abandoned Qingshugiou mouth and tempo-spatial variations in retreating rate of Yellow River Mouth

随着黄河向清水沟废弃河口的有效泥沙供给急剧减少,其水下三角洲受到强烈的侵蚀冲刷,研究区海底冲刷量逐渐增加。其中,1996—2000年,海底冲刷量约为 $0.14 \text{ km}^3$ ;2000—2002年,海底冲刷量达到 $0.1 \text{ km}^3$ ,年均冲刷速率由1996—2000年间的 $0.03 \text{ km}^3/\text{a}$ 增加至 $0.05 \text{ km}^3/\text{a}$ ;2002—2007年,研究区海底冲刷量较上一阶段明显减少,5年间的冲刷量仅约为 $0.10 \text{ km}^3$ ,年均冲刷速率降低至 $0.02 \text{ km}^3/\text{a}$ ;2007—2010年,海底年均冲刷速率增大至 $0.026 \text{ km}^3/\text{a}$ ,但3年间的海底冲刷量仅约为 $0.08 \text{ km}^3$ ,远小于2000—2002年的 $0.11 \text{ km}^3$ ;2010—2015年,海底冲刷量及年均冲刷速率分别大幅降低至 $0.05 \text{ km}^3$ 和 $0.01 \text{ km}^3/\text{a}$ ,在量值上远低于冲刷初期的水平(表2)。1996—2015年,研究区累计冲刷泥沙达 $0.48 \text{ km}^3$ ,约为6.2亿t(按照 $1.3 \text{ t/m}^3$ 容重计算),年均冲刷速率约为0.32亿t/a,约占同期黄河入海泥沙通量的20%。

表2 1996—2015年清水沟废弃河口海底冲刷量及年均冲刷速率阶段性变化

Table 2 Phase changes in erosion volumes and rate off the abandoned Qingshuigou mouth in 1996—2005

时间段/年	冲刷量/ $\text{km}^3$	冲刷速率/ $(\text{km}^3/\text{a})$
1996—2000	0.14	0.03
2000—2002	0.12	0.05
2002—2007	0.10	0.02
2007—2010	0.08	0.026
2010—2015	0.05	0.01

三角洲南侧前缘斜坡下方及东北侧前缘斜坡处均存在冲刷中心,二者在1996—2015年的最大冲刷厚度分别超过了6 m和3 m(图7a)。1996—2000年,冲刷中心位于三角洲东北侧前缘斜坡处,该区域的年均冲刷速率约为 $0.0087 \text{ km}^3/\text{a}$ (图7b);2000—2002年,冲刷区(冲刷厚度 $>0 \text{ m}$ )范围向西扩张;冲刷中心也明显向西移动,其平均冲刷速率大幅提升至 $0.0232 \text{ km}^3/\text{a}$ (图7c);2002—2007年,尽管位于水下三角洲东侧前缘斜坡处的冲刷中心明显向水下三角洲内部扩张,但冲刷区范围2000—2002年明显缩小,冲刷中心的平均冲刷速率也降低至 $0.006 \text{ km}^3/\text{a}$ (图7d);2007—2010年,冲刷区范围较上一阶段有所扩大,且冲刷中心的平均冲刷速率也增大至 $0.072 \text{ km}^3/\text{a}$ (图7e);2010—2015年,研究区内的冲刷区范围大幅缩小,冲刷中心平均冲刷速率降低至 $0.0017 \text{ km}^3/\text{a}$ ,研究区内大部分区域均呈现缓慢淤积(图7f)。

## 4 讨论

### 4.1 黄河改道对清水沟废弃河口冲淤演化的影响

黄河每年约 $2.6 \times 10^8 \text{ t}$ 的泥沙输运量是保证黄河陆上三角洲维持冲淤平衡的重要条件<sup>[33]</sup>,而河流入海流路变迁通常是导致废弃河口岸线蚀退和近岸海底遭受侵蚀冲刷的诱因<sup>[38]</sup>。1996年,黄河人工改汉至清8断面入海后,黄河向清水沟废弃河口的有效泥沙供给急剧减少,加之清水沟河道行水中断,清水沟废弃河口岸线开始向陆快速蚀退(图6a),其水下三角洲也受到强烈的侵蚀冲刷。而随着老清8河嘴不断向海淤进,黄河入海口到清水沟废弃河口的距离逐渐增大,黄河向清水沟废弃河口输运的泥沙量也随之大幅减少,从而导致研究区2000—2002年的冲刷速率较1996—2000年时显著提高<sup>[33]</sup>。2007年,受黄河汛期影响,黄河口再次向北移动,并最终稳定于北略偏东方向入海<sup>[33]</sup>,随着黄河现行河口不断向海淤近,其与清水沟废弃河口的距离也随之进一步增大;且当黄河径流携带大量泥沙从黄河口入海后,水体动力快速释放,径流携沙能力也快速减弱;加之海水顶托作用及潮流切边锋的阻隔效应,约80%的悬浮泥沙在河口口门附近10 m等深线以浅的区域快速淤落堆积<sup>[35]</sup>,使得黄河现行河口向清水沟废弃河口泥沙供给进一步减少。泥沙输运量骤减容易造成黄河水下三角洲的冲淤模式发生短期振荡<sup>[33]</sup>,导致研究区的海底冲刷速率在2007年后明显增大,即由2002—2007年时的 $0.02 \text{ km}^3/\text{a}$ 加快至2007—2010年时的 $0.026 \text{ km}^3/\text{a}$ (表2)。

### 4.2 潮流变化对清水沟废弃河口冲淤演化的影响

黄河清水沟河口水上三角洲叶瓣及其水下三角洲向海突出,使得潮波逆时针绕过河口向莱州湾传播时的过流截面变小,导致流速增加,并由此形成清水沟河口外的高流速中心<sup>[39]</sup>。

利用黄河三角洲毗邻海域的水动力模型分别对2000、2007和2015年黄河清水沟废弃河口毗邻海域的底层潮流动力特征进行模拟。模拟结果显示研究区内存在一个高流速中心,其位置位于水下三角洲前缘斜坡处。高流速中心内的整体流速呈现逐渐降低的趋势。2000年时,该区域内的最大底层流速超过 $0.4 \text{ m/s}$ (图8a)。到2007年时,该区域

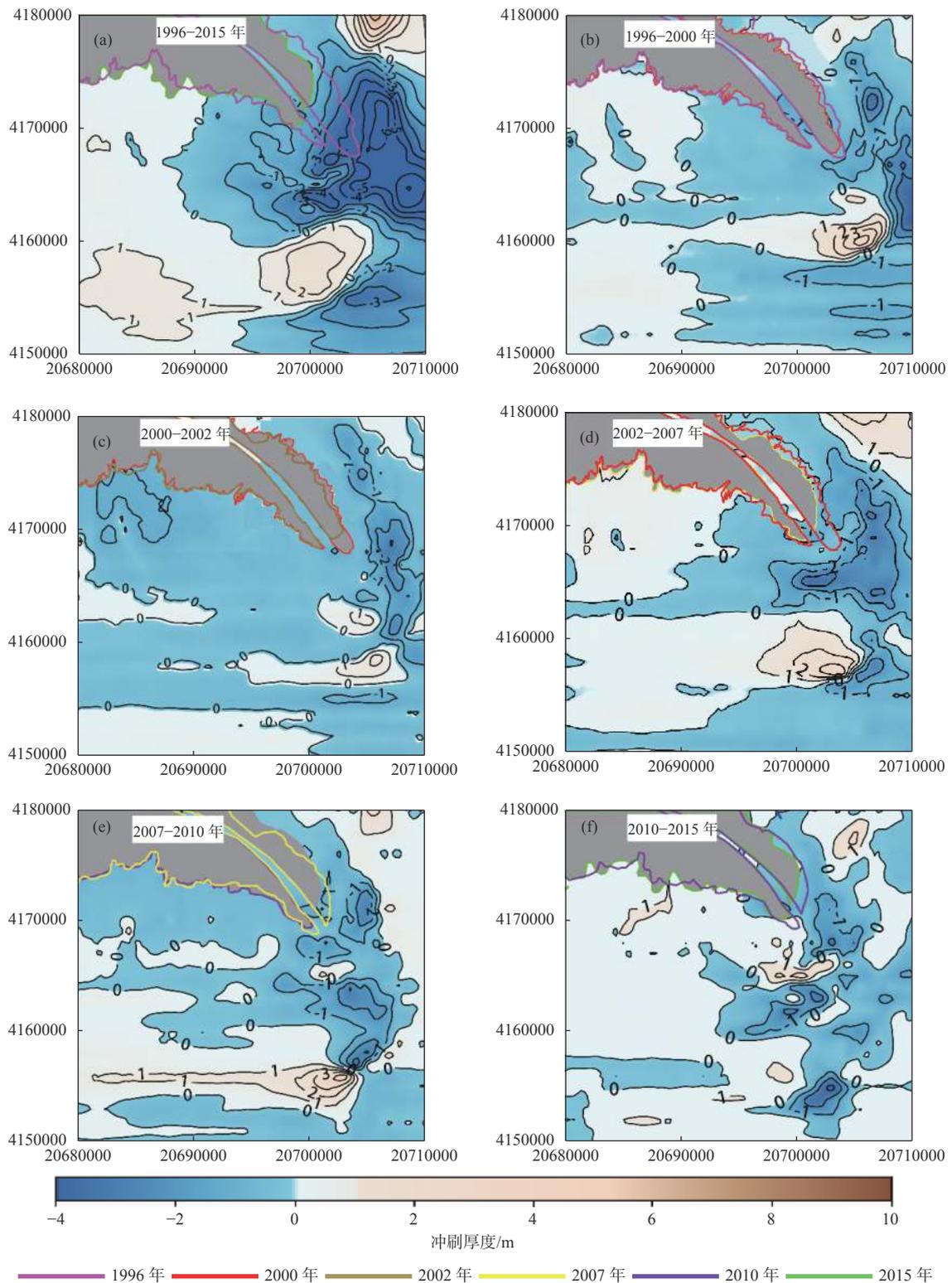


图 7 1996—2015 年间黄河清水沟废弃河口冲淤时空变化

Fig.7 Tempo-spatial variations of erosion and accumulation off the abandoned Qingshuigou mouth of the Yellow River from 1996 to 2015

在落急时刻的平均流速已降低至 0.3 m/s(图 8a、c)。2015 年,落急时刻的平均流速进一步降低至 0.3 m/s(图 8e)。

随着河嘴逐渐向陆蚀退(图 6a),加之持续地侵

蚀冲刷使得清水沟废弃河口水下三角洲前缘斜坡处的水深不断增加,导致三角洲前缘斜坡处的高流速中心的流速逐渐降低(图 8)。而根据 2000、2007 和 2015 年清水沟废弃河口在落急时刻的潮致底剪

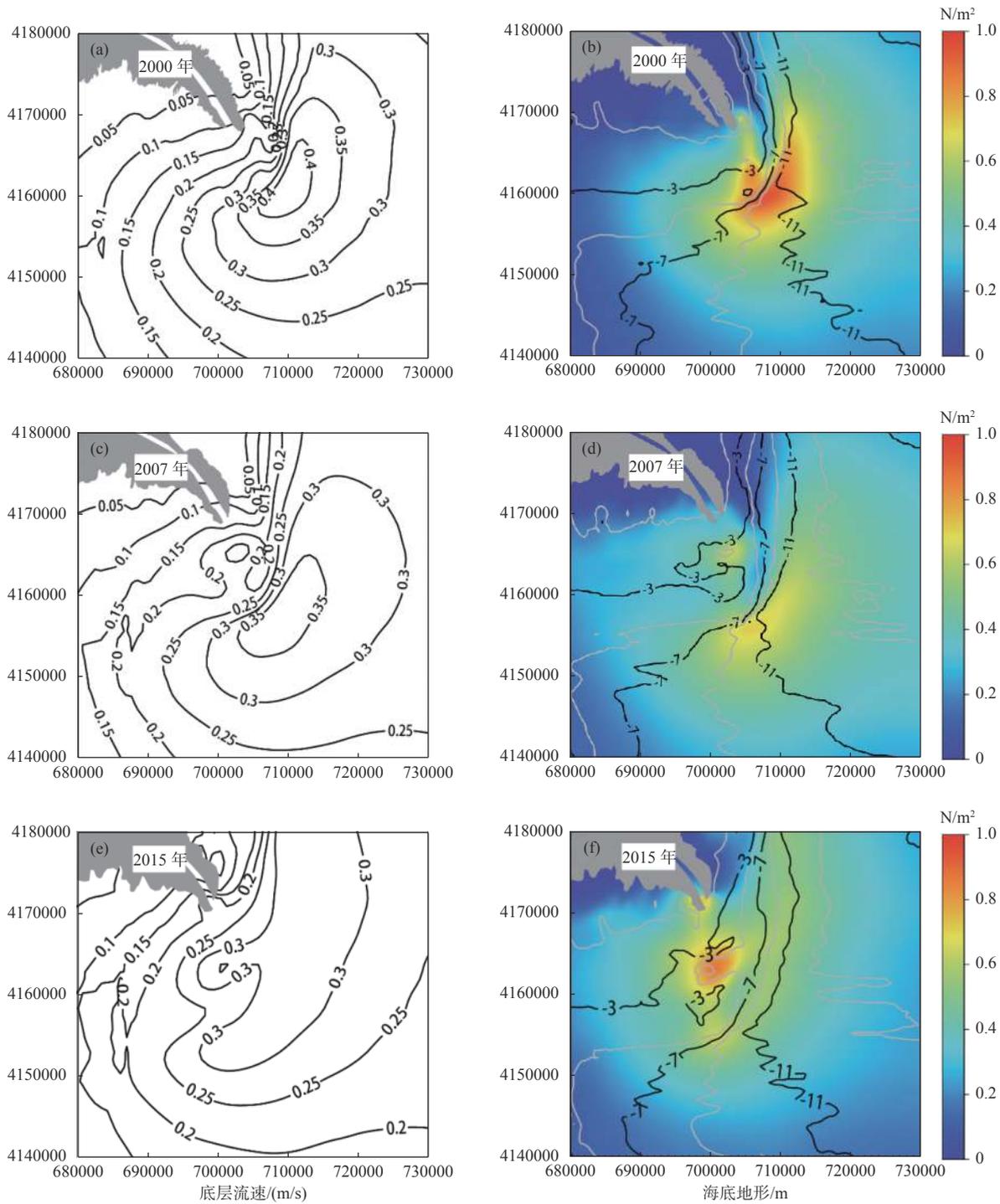


图8 2000、2007和2015年清水沟废弃河口毗邻海域在落急时刻的底层流速和海底地形与潮致底剪切应力空间分布

Fig.8 Spatial distribution of magnitude of bottom tidal currents and seafloor topography and tidal-induced bed shear stress off the abandoned Qingshuigou mouth during maximum ebb tide in 2000, 2007 and 2015

切应力空间分布,三角洲前缘斜坡处的潮致底剪切应力逐渐减小,2000年,水下三角洲前缘斜坡处的平均潮致底剪切应力达  $0.9 \text{ N/m}^2$ ; 2007年,已降低至  $0.7 \text{ N/m}^2$ (图 8b、d)。截止 2015年,水下三角洲前缘斜坡处的潮流动力进一步减弱,平均潮致底剪切应力降低至  $0.5 \text{ N/m}^2$ (图 8f)。

自黄河改道以来,径流输沙对清水沟废弃河口的影响逐渐减弱,潮流于清水沟废弃河口水下三角洲前缘斜坡处形成的高流速中心成为导致河口水下三角洲前缘斜坡受到强烈侵蚀冲刷的主要动力之一。而清水沟废弃河口岸线逐渐向陆方向蚀退,则使得潮流过流截面增大,加之长期的侵蚀冲刷使

得研究区水深不断增加, 最终导致潮流动力逐渐减弱, 其中, 冲刷中心处的潮流动力减弱最为明显。潮流动力的总体减弱是研究区近年来冲刷速率有所降低的原因之一。

#### 4.3 波浪变化对清水沟废弃河口冲淤演化的影响

波浪在黄河河口冲淤变化中扮演着十分重要的角色<sup>[40]</sup>。黄河三角洲地处东北亚, 台风引发的大

浪或风暴潮较为罕见, 其毗邻海域内的大风过程主要受到东亚季风与温带风暴潮(寒潮大风)控制, 冬季盛行强烈的偏北风, 而夏季的风力则相对较弱<sup>[41]</sup>。因此, 研究区内的强浪多是在冬季大风过程中形成。本文采用冬季盛行的东北风向(30°)、风速 20 m/s 的风场作为定值条件, 分别模拟了冬季大风条件下研究区在 2000、2007 和 2015 年的波致底剪切应力分布(图 9)。

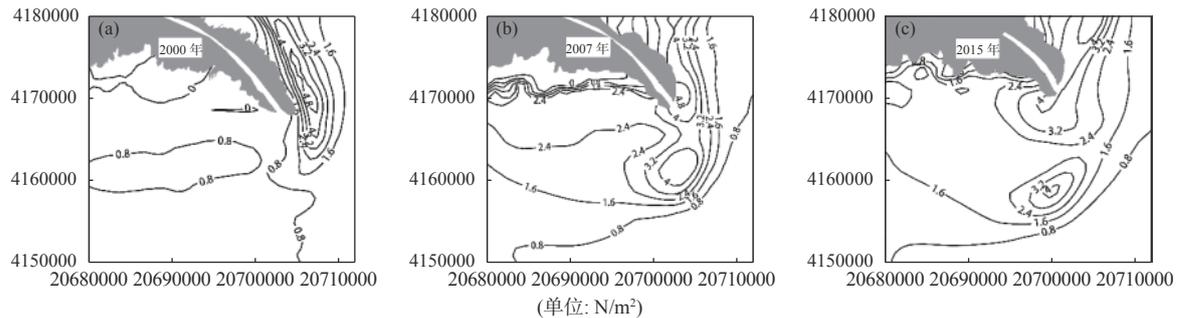


图 9 2000、2007 和 2015 年黄河清水沟废弃河口冬季波致底剪切应力空间分布

Fig.9 Spatial variation of wave-induced bed shear stress off the abandoned Qingshuigou mouth of the Yellow River in 2000, 2007 and 2015

2000 年, 由于河口沙嘴对冬季波浪的障壁作用, 使得波致底剪切应力高值区( $>1.6 \text{ N/m}^2$ )呈带状沿河嘴北岸及水下三角洲东北侧前缘斜坡分布; 在河嘴南岸及其附近海域为低值区( $<1.6 \text{ N/m}^2$ )。冬季强浪形成的高波致底剪切应力区, 河口沙嘴北侧叶瓣向陆快速蚀退, 水下三角洲东北侧前缘斜坡受到严重侵蚀破坏。随着河口岸线逐渐向陆蚀退, 河嘴对冬季波浪的障壁作用逐渐减弱, 2007 和 2015 年, 河嘴南岸附近的波致底剪切应力较 2000 年显著增大(图 9b、c), 波浪对河嘴南岸及其近岸海底的侵蚀破坏逐渐增强, 进而导致河口沙嘴南侧叶瓣向陆蚀退速率逐渐增加(图 6b)及河口近岸区的快速侵蚀。黄河向研究区的输沙量骤减, 加之波浪对研究区海底持续地侵蚀冲刷使得该区域的水深逐渐增加, 波致底剪切应力随之减小(图 9b、c), 而波浪引发的泥沙再悬浮通常是侵蚀型海岸的主要水沙过程<sup>[40]</sup>, 因此, 研究区内波致底剪切应力的减弱也是导致近年来该区域海底冲刷速率逐渐减缓的主要原因之一。

## 5 结论

1996 年, 黄河实施人工改道以及 2007 年黄河汛期导致的黄河口北移均导致清水沟废弃河口冲淤演化模式发生显著改变。随着清水沟河口的废弃, 其河口沙嘴向陆快速蚀退, 且河嘴南北两侧叶

瓣的蚀退存在明显的时空差异性。

黄河改道初期(1996—2002 年), 研究区海底冲刷速率较快, 海底年均冲刷速率约为  $0.03 \sim 0.05 \text{ km}^3/\text{a}$ ; 2002—2007 年, 研究区海底冲刷速率大幅降低至约  $0.02 \text{ km}^3/\text{a}$ ; 到 2007—2010 年, 随着黄河口位置再次向北迁移, 研究区海底年均冲刷速率增大至约  $0.026 \text{ km}^3/\text{a}$ ; 2010—2015 年, 研究区海底年均冲刷速率减缓至约  $0.01 \text{ km}^3/\text{a}$ , 远小于 1996—2002 年黄河改道初期时的水平。

黄河入海流路改道是导致清水沟废弃河口岸线蚀退及研究区海底遭受侵蚀冲刷的诱因, 而波浪和潮流的共同作用则是研究区海底受到严重侵蚀冲刷的主要原因。清水沟废弃河口岸线不断向陆蚀退以及持续的冲刷所导致的水深增加, 是使得研究区潮流与波浪作用逐渐减弱, 进而造成近年来研究区海底冲刷速率逐渐减缓的主要原因。黄河口因 2007 年黄河汛期而向北迁移所导致的黄河现行河口向清水沟废弃河口输沙量进一步减少, 则是造成研究区海底冲刷速率在 2007 年后显著加快的主要原因。另外, 波浪在河口近岸区形成的高底剪切应力也是导致河嘴两侧叶瓣差异侵蚀和河口近岸区形成侵蚀中心的主要动力机制。同时, 潮流、波浪与海底冲淤变化间的相互作用对于该区域冲淤演化模式有着重要影响。

## 参考文献:

- [1] SYVITSKI J P, SATIO Y. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2007, 308: 376-380.
- [2] WRIGHT L D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1977, 88: 857-868.
- [3] SYVITSKI J P, SAITO Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 57(3): 261-282.
- [4] WOODROFFE C D, NICHOLLS R J, SAITO Y, et al. Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change[J]. *Global Change and Integrated Coastal Management*, 2006, 5: 277-314.
- [5] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. *Science*, 2005, 308: 405-408.
- [6] VÖRÖSMARTY C J, MEYBECK M, FEKETE B, et al. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1): 169-190.
- [7] WANG H J, YANG Z S, SAITO Y, et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from Connections to impacts from ENSO events and dams[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50: 212-225.
- [8] WANG H J, YANG Z S, SAITO Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57: 331-354.
- [9] WANG S, FU B, PIAO S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [10] YANG S L, LI M, DAI S B, et al. Drastic decrease in sediment supply from the Yangtze River and its challenge to coastal wetland management[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6).
- [11] SYVITSKI J P, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [12] TESSLER Z D, VÖRÖSMARTY C J, GROSSBERG M, et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 638-643.
- [13] GAO J H, SHI Y, SHENG H, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source to sink conveying system to human induced catchment perturbations[J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 1-17.
- [14] SCHMIDT F, HINRICHS K, ELVERT M. Sources, transport, and partitioning of organic matter at a highly dynamic continental margin[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 118(1): 37-55.
- [15] VONK J E, SÁNCHEZ GARCÍA L, VAN DONGEN B E, et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia[J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 137.
- [16] BI N S, WANG H J, YANG Z S. Recent changes in the erosion–accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 70-78.
- [17] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 3(2): 105-109.
- [18] NITTROUER J A, BEST J L, BRANTLEY C, et al. Mitigating land loss in coastal Louisiana by controlled diversion of Mississippi River sand[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(8): 534-537.
- [19] NITTROUER J A, VIPARELLI E. Sand as a stable and sustainable resource for nourishing the Mississippi River delta[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 350-354.
- [20] TEMMERMAN B S, KIRWAN M L, KATRINA H. Building land with a rising sea[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 9-11.
- [21] MARGINS OFFICE[Z]. NSF margins program science plans, 2003.
- [22] LOICZ IPO[Z]. Land-ocean interactions in the coastal zone: Science plan and implementation strategy, 2005.
- [23] FUTURE EARTH COASTS IPO[Z]. Strategy for research 2018–2028, 2018.
- [24] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [25] 中国河流泥沙公报2011[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [26] 胡小雷, 陈沈良, 刘小喜, 等. 2012年调水调沙期间黄河口水沙扩散途径及范围[J]. *泥沙研究*, 2014(3): 49-56.
- [27] JIANG C, PAN S Q, CHEN S L. Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: causes and environmental implications[J]. *Geomorphology*, 2017, 293: 93-107.
- [28] LI G X, YUE S H, ZHAO D B, et al. Rapid deposition and dynamic processes in the modern Yellow River Mouth[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 29-36.
- [29] XING G, WANG H J, YANG Z, et al. Spatial and temporal variation in erosion and accumulation of the subaqueous Yellow River Delta (1976–2004) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, SI74: 32-47.
- [30] CUI B L, LI X Y. Coastline change of the Yellow River Mouth and its response to the sediment and runoff (1976~2005) [J]. *Geomorphology*, 2011, 127(1/2): 20-40.
- [31] BI N S, YANG X S, WANG H J, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 352-362.
- [32] 刘付程, 陈沈良, 彭俊, 等. 基于FCM方法的黄河水下三角洲沉积动力环境分区[J]. *海洋学报*, 2016, 38(9): 89-99.
- [33] 王柯萌. 调水调沙影响下的黄河入海水沙运输机制[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2018.
- [34] FU Y T, CHEN S L, JI H Y, et al. The modern Yellow River

- Delta in transition: causes and implications[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106-476.
- [35] WU X, WANG H J, BI N S, et al. Evolution of a tide-dominated abandoned channel: a case of the abandoned Qingshuigou course, Yellow River[J]. *Marine Geology*, 2020, 422: 106-116.
- [36] 裘祥海. 基于DEM的河床冲淤量计算与评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [37] ALESHEIKH A A, GHORBANALI A, NOURI N. Coastline change detection using remote sensing[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2007, 4(1): 61-66.
- [38] 凡姚申. 黄河三角洲近岸海床侵蚀过程及其动力机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [39] 刘猛. 黄河现行三角洲叶瓣蚀积演化的动力机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018.
- [40] WANG H J, YANG Z S, LI G, et al. Wave climate modeling on the abandoned Huanghe (Yellow River) Delta lobe and related deltaic erosion[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 224: 906-918.
- [41] YANG Z S, JI Y, BI N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.

## Temporal and spatial variations of erosion and accumulation off the Qingshuigou mouth of the Yellow River

WANG Shixiong<sup>1</sup>, FAN Yongyong<sup>2</sup>, LIU Meng<sup>1</sup>, WU Xiao<sup>1</sup>, WANG Houjie<sup>1,3</sup>, BI Naishuang<sup>1,3\*</sup>

(1 Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2 Institute of the Yellow River Estuary and Coast Science, Dongying 257091, Shandong, China; 3 Pilot National Laboratory for Marine Science and

Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

**Abstract:** The deltaic river course of the Yellow River was diverted artificially northward at the Qing8 of the Qingshuigou channel to the current channel. The channel shift resulted in a decrease or cutoff in the sediment supply from the river. However, the response of the tempo-spatial variation in erosion and accumulation off the abandoned Qingshuigou mouth to the channel shift has not been well studied. Based on multi-years bathymetric data and Landsat satellite remote sensing images off the Yellow River Delta, the tempo-spatial variations of erosion-accumulation off the abandoned Qingshuigou mouth were analyzed comprehensively. In the early stage of the Yellow River diversion (1996–2002), the seafloor erosion rate in the study area was relatively fast, and the average annual seafloor erosion rate was about 0.03-0.05 km<sup>3</sup>/a. From 2002 to 2007, the value was significantly reduced to about 0.02 km<sup>3</sup>/a. During 2007–2010, as the Yellow River mouth diverted northward again in 2007, the average annual seafloor erosion increased to about 0.26 km<sup>3</sup>/a. In the years of 2010–2015, the value reduced to about 0.01 km<sup>3</sup>/a again, which was much lower than the level at the initial stage of the Yellow River artificial diversion in 1996. Meanwhile, the tidal regime changes and its response to tempo-spatial variation of erosion-accumulation off the abandoned Qingshuigou mouth were simulated using the Delft-3D model. The results indicated that waves and currents played significant but different roles in the erosion and accumulation of seabed in the study area. On one hand, The high bed shear stress area formed by the tidal current and wave on the slope of the delta front caused the area to be severely eroded after the Yellow River rerouted. In addition, as the abandoned Qingshuigou mouth gradually eroded landward and water depth at the slope continuously increased, the influence of tidal current and wave to seafloor decreased gradually. Finally, the erosion rate of seabed continuously decreased in the study area in recent years. The wave-induced high-bottom shear stress zone mostly resulted in the different erosion on both sides of the mouth and the formation of erosion center in the nearshore area. Meanwhile, the interactions between hydrodynamics and delta erosion played an important role in the erosion-accumulation evolution pattern of the subaqueous delta off the abandoned Qingshuigou mouth of the Yellow River.

**Key words:** abandoned Qingshuigou mouth of the Yellow River; artificial diversion of the Yellow River; tempo-spatial variation of erosion-accumulation; hydrodynamics change