

马乐, 陈健斌, 俞永庆, 等. 近 30 年黄河陆上三角洲蚀退-淤进对气候变化和人类活动的响应[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(9): 49-62.

MA Yue, CHEN Jianbin, YU Yongqing, et al. Response of Yellow River subaerial delta erosion and accretion to climate change and human activities in the past 30 years[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(9): 49-62.

近 30 年黄河陆上三角洲蚀退-淤进对气候变化和人类活动的响应

马乐¹, 陈健斌², 俞永庆³, 王亚梅³, 王国阳^{1,4}, 黄渊源¹, 吕燕玲¹, 丁咚^{1,4,5*}

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 山东省黄河三角洲可持续发展研究院, 东营 257000; 3 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 东营 257000; 4 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237;

5 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)

摘要:近 30 年来,受全球气候变化和流域人类活动加剧的影响,黄河三角洲陆地蚀退-淤进过程对黄河流域水循环系统的响应变得更为显著。基于谷歌地球引擎 (Google Earth Engine) 和长时间序列的 Landsat 影像,结合流域内气象水文长期测量数据,定量研究了近 30 年黄河陆上三角洲蚀退-淤进对气候变化和人类活动的响应。研究发现,1993—2022 年间,黄河三角洲陆地面积经历了先增加后减少再波动增加的阶段,现行河口岸段为主要淤积区,陆地面积每年增长约 1.67 km²,刁口河岸段为主要侵蚀区,陆地面积每年减少约 2.15 km²;入海水沙与河口面积变化在 1993—2001 年自然水沙输运时期存在周期为 4~5 a 的负相位关系;多元回归分析表明,自然水沙输运时期 (1993—2001 年) 气候变化主导了河口蚀退-淤进,人工水沙调控时期 (2002—2022 年) 人类活动的影响远大于气候变化。

关键词:黄河三角洲; 蚀退-淤进; 气候变化; 人类活动影响; 谷歌地球引擎

中图分类号: P736; P737

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.248

0 引言

河流三角洲对人类具有重要意义,承载着众多的城市和人口,包含着复杂的湿地生态系统,并为全球生物地球化学循环提供了丰富的沉积物等相关资源^[1-3]。一般而言,河流三角洲蚀退-淤进主要取决于河流沉积物供应^[4],以及河口沿岸海洋动力环境^[5]。大河的径流和输沙过程与流域降水、气温及植被条件密切相关,全球气候变化和人类活动可能导致河流入海的水和沉积物通量发生变化,从而影响三角洲的蚀退-淤进过程^[6]。在过去的 1 个世纪里,大坝建设、农业灌溉、地下水抽取、油气开采、

河口人工改道以及调水调沙等强烈的人类活动对黄河水文环境产生了重要影响,引发了现代黄河三角洲蚀退-淤进格局的快速演变,黄河三角洲的生态环境和可持续发展面临威胁^[6-10]。

大量卫星对地观测数据为研究黄河三角洲长时序的蚀退-淤进演化提供了数据支持,但以往研究多为对海岸线^[11]、河口形态^[12]和滨海湿地的年际演变观测,缺乏不同阶段黄河陆上三角洲蚀退-淤进的定量描述。除此之外,流域降水、地表气温以及人类活动的长期数据集为分离流域尺度自然和人为因素对蚀退-淤进的影响提供了条件。以往的研究定性描述了黄河三角洲蚀退-淤进与流域气候变化和人类活动的相互关系^[13-15],如 YU 等^[14]认为黄河三角洲的海岸线演变和面积变化直接受到径流和沉积物负载剧烈减少的影响,这与近几十年来黄河流域内的人类活动密切相关;ZHOU 等^[15]研究了黄河三角洲面积增长与流域水沙调控的关系,并计算了保持三角洲面积稳定的沉积物供应阈值;

收稿日期: 2023-10-27

资助项目: 东营市市校合作重点项目 (SXHZ-2022-02-15)

第一作者: 马乐 (1998—), 男, 在读硕士, 主要从事海岸带陆海环境信息集成方法及应用方面的研究工作. E-mail: male@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者: 丁咚 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海岸带陆海环境信息集成方法及应用方面的研究工作. E-mail: dingdong@ouc.edu.cn

XU^[6]将三角洲海岸线演变与流域影响联系起来,计算了各自然和人类活动因子对陆上三角洲年际变化的贡献,但对这些因素贡献的定量分析尚有欠缺。JIANG等^[16]和WANG等^[17]关注于几十年来气候变化与人类活动导致黄河沉积物的阶梯式减少如何影响陆上三角洲的蚀退-淤进,但在不同演化阶段,在各要素之间的相互作用以及黄河陆上三角洲蚀退-淤进对流域气候变化和人类活动的响应过程方面,有待开展进一步研究^[6-7,15-17]。

本文的主要研究目标为:①研究近30年黄河三角洲不同岸段海岸线时空演变与陆地蚀退-淤进演化特征;②以河流输入为纽带,探索近30年主导黄河三角洲蚀退-淤进的入海水沙变化;③建立河口岸段陆地蚀退-淤进年际变化与流域参数在时频空间内的响应关系与定量联系。本研究可为促进黄河三角洲的可持续发展提供定量化的参考,且在人类活动和气候变化加剧背景下,为其他河流三角洲的演化进程研究提供参考。

1 研究区概况

黄河发源于青藏高原东北部,向东流经黄土高

原和华北平原,最终汇入浅水半封闭的渤海(图1a)。作为中国河流沉积物进入海洋的最大贡献者,黄河每年向海输送泥沙约 $1.08 \times 10^9 \text{ t}$ ^[18],但在过去的几十年里,黄河入海水沙排放量明显减少,利津站(图1a)排放量仅为20世纪60年代的10.58%,这与流域气候变化和人类活动有很强的关联^[17,19]。20世纪90年代以来,由于全球变暖,流域降水减少,气温上升,黄河径流生成减少,断流加剧,加之极端气候事件的频发,黄河三角洲面临侵蚀的风险加剧^[20]。人工改道、水沙调控、引水工程和水土保持等人类活动也对三角洲蚀退-淤进产生了重要影响。例如,黄河最近2次的人工改道,显著改变了黄河陆上三角洲蚀退-淤进格局。1976年5月,黄河由刁口河改由清水沟入海,入海口开始向东南方向淤出,刁口故道向陆蚀退;1996年8月,在清8剖面处人工改道,入海口开始向北东方向延伸,清水沟叶瓣则逐渐蚀退。更为重要的是,2002年开始的调水调沙以及下游河道整治工程打破了黄河入海水沙的自然循环和季节分配规律,使得黄河陆上三角洲蚀退-淤进演化变得更为迅速和复杂。

本文研究区大部分为现代黄河三角洲,陆上面积约为3 000 km²。根据不同海岸线类型,综合前人

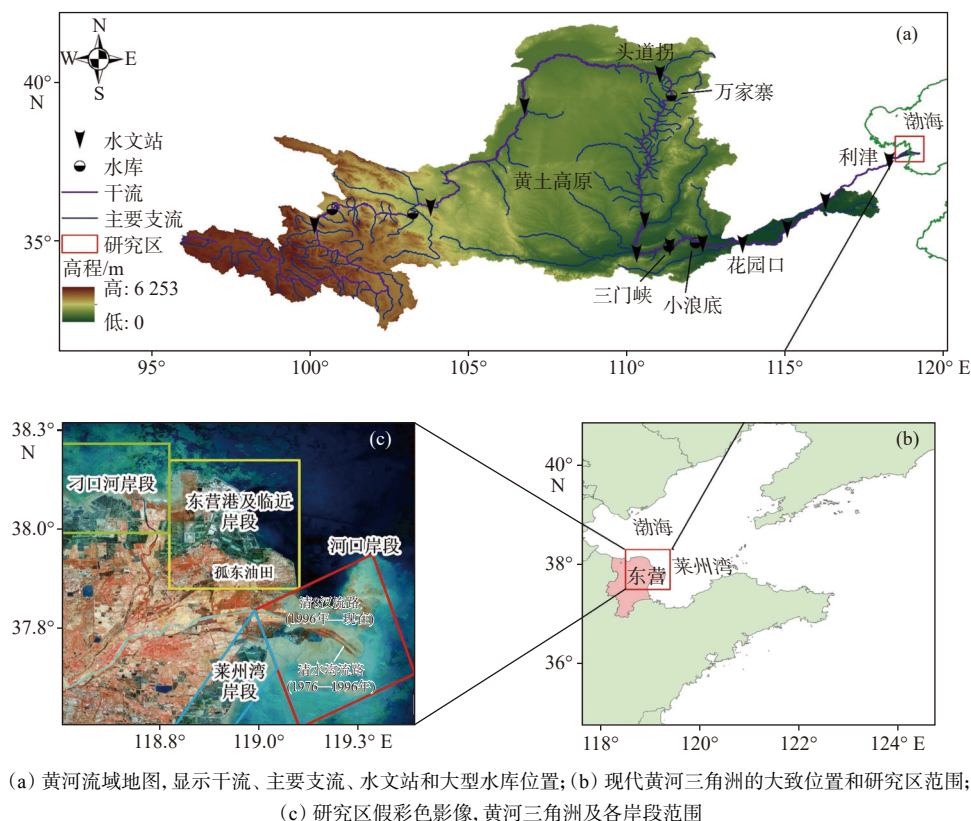


图1 黄河流域及研究区位置

Fig.1 Map of the Yellow River Basin and location of the study area

研究和历史资料^[21-23], 本文将研究区分为刁口河岸段、东营港及临近岸段、河口岸段、莱州湾岸段等 4 个岸段(图 1b)来讨论黄河三角洲各区域的蚀退-淤进格局, 研究区地理范围为 37°36′—37°54′N、119°00′—119°30′E, 其中河口岸段受黄河来水来沙影响最为显著。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文利用美国地质调查局(USGS)存档的陆地卫星专题成像仪(TM)、陆地卫星增强型专题成像仪(ETM⁺)和陆地成像仪(OLI)的多时相遥感数据来获取黄河三角洲海岸线。在谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)对 Landsat 系列 Tier 1 Level-2 地表反射率数据进行预处理。选用的影像由 4~5 个可见光、近红外波段和 2 个短波红外波段组成, 时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 30 m。在 GEE 中筛选 1993—2022 年(受 Landsat 7 ETM⁺ 数据条带故障影响缺少 2012 年)所有云量 < 50% 的图像进行海岸线提取, 共使用影像 3 125 景, 影像详细信息见图 2。

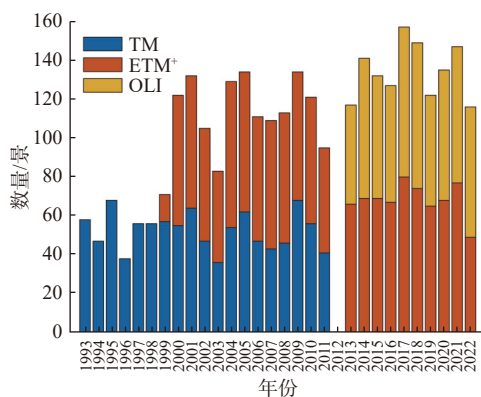


图 2 本研究使用的陆地卫星时间序列影像可用数量

Fig.2 Number of available Landsat time series images used in this study

此外, 1993—2022 年利津站年径流量和输沙量来自《中国河流泥沙公报》(http://www.irtces.org/nszx/cbw/hlmsgb/A550406index_1.htm)、《黄河泥沙公报》(<http://yrcc.gov.cn/nishagonggao/>)和《东营市水利志》(<https://shandong-chorography.org/database/b5/section/4/>)。流域气温数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5, 降水数据来自 UCSB 气候灾害组

红外降水与站点数据(CHIRPS), 均在 GEE 中计算各气象要素的空间平均值。全流域(1993—2022 年)的年净取水量主要来自文献^[6,11]和泥沙公报, 缺失年份数据用二次多项式插值得出。净引水量是指从河流中引出用于生活、农业和工业消耗以及大坝运行的水量减去使用后返回河流的水量, 可大致表征人类活动对流域水文循环的影响^[24]。

2.2 研究方法

2.2.1 海岸线提取

本研究采用基于修正归一化差异水指数(MNDWI)和 Otsu 阈值分割的海岸线自动提取方法, 整个海岸线提取过程在 GEE 上进行。遥感图像中提取的海陆分界线为瞬时水边线, 受潮汐影响, 为了获得全年平均海岸线, 有必要最小化潮汐变化的影响。全年瞬时水边线之间的差异代表了潮汐的变化范围, 从统计上讲, 可以用足够长时间的差异平均值来表示平均潮位^[21]。本研究通过计算图像集合中所有匹配波段堆栈中每个像素点的所有数值的中位数, 可减少由于异常值引起的噪声和误差, 提取的水陆边界可视为相应年份的平均海岸线。自动提取算法流程如下:

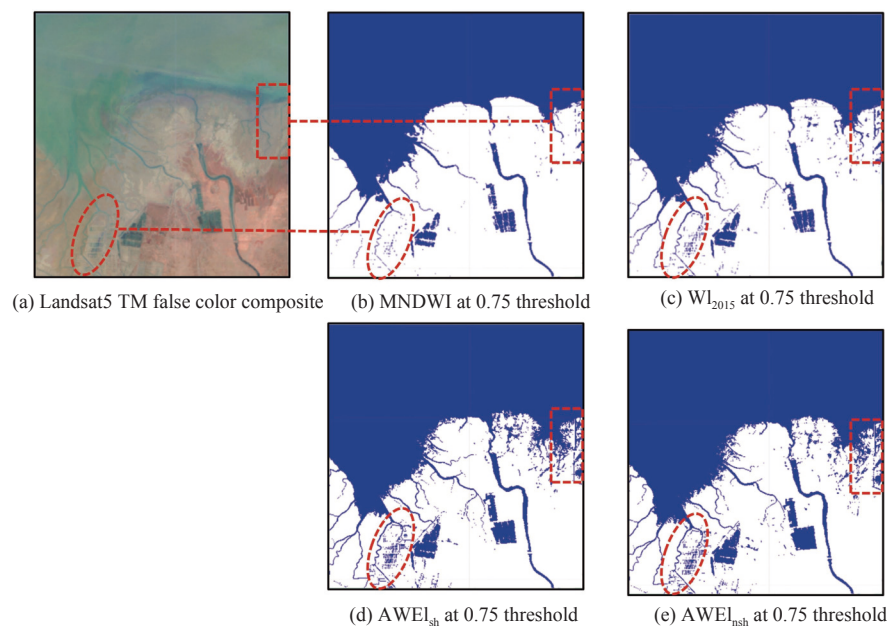
(1) 对每张影像进行去云和裁剪, 选取质量评估波段(QA_PIXEL)进行逐位运算, 识别出不良像元, 旨在减少云层干扰的同时保留海岸特征。通过比较 4 种常用水体指数, 包括 MNDWI^[25]、AWEI_{sh}、AWEI_{nsh}^[26]、WI₂₀₁₅^[27], 在给定阈值下, MNDWI 在研究区的提取效果最好(图 3)。

MNDWI 增强了开阔水域的特征, 同时有效地抑制或消除了植被和土壤噪声, 在研究区细节提取上优于其他水体指数。计算公式如下:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{MIR}) / (\text{Green} + \text{MIR}) \quad (1)$$

(2) 在计算 1 年内所有有效图像的 MNDWI(图 4a)后, 将 Canny 边缘检测器^[25]应用于给定阈值和 σ 值下的 MNDWI 图像, 得到边缘检测图像(图 4b)。

(3) 使用形态学方法将得到的边缘图像扩展 1 个像素以增强边缘特征, 应用 Otsu 阈值分割算法^[28]确定使边缘图像可分性最大化的最优阈值, 随后, 通过 Otsu 确定水指数低范围和高范围的阈值并添加至影像属性中, 将大于或等于阈值的像素赋值为 1, 低于阈值的像素赋值为 0, 来创建二值水陆图像^[29](图 4c)。



(a) 1993 年合成的 Landsat5 TM 影像; (b) 基于 MNDWI 的水陆分割; (c) 基于 WI 的水陆分割; (d—e) 基于 AWEI 的水陆分割

图 3 研究区 Landsat5 TM 影像及测试地点水陆分割图像

Fig.3 Landsat5 TM image and water-land segmentation at the test site

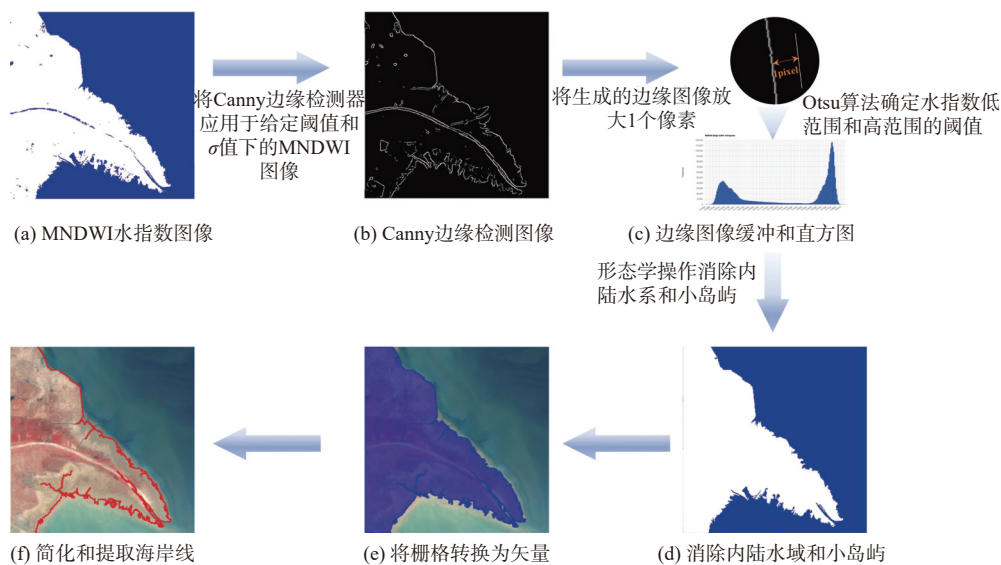


图 4 基于 MNDWI 和 Otsu 阈值分割的海岸线提取过程

Fig.4 Coastline extraction process based on MNDWI and Otsu threshold segmentation

(4)消除内陆水体和小岛屿: 基于二值水陆图像, 规定水陆最大孤岛面积阈值(以像素为单位), 通过邻域连接的方法移除内陆水体和小岛屿(图 4d)。

(5)将水陆栅格转化为矢量: 将水陆边界外的像素掩膜, 将陆域范围转换为矢量多边形(图 4e)。

(6)海岸线的简化: 简化每个陆域范围, 提取简化后的几何坐标, 用于绘制海岸线(图 4f), 将河口处突然加宽处连接为河口岸线^[30], 最后利用 ArcMap10.8 对海岸线进行平滑处理。

2.2.2 气象水文时序数据分析

(1) Mann-Kendall 趋势及突变检验

Mann-Kendall(MK)趋势检验^[31-32]是一种非参数检验的方法, 被广泛应用于气象水文领域非正态分布的数据趋势分析中。在突变检测中, 统计量 UF 为独立序列按照顺序计算的秩序列标准化参数, UF 为标准正态分布, U 为给定显著性水平 α 下的检验统计量, 本文取 95% 显著度, $U=1.96$ 。若 $|UF| > U$, 表明序列存在明显的趋势变化。UB 为按照独立序列逆序计算的秩序列标准化参数。若统计量

UF>0,则表明序列呈上升趋势,若UF<0则为下降趋势。若UF和UB存在交点,且交点位于临界线之间,那么交点对应的时间为发生突变的时刻^[33-35]。本文采用MK突变检测对水沙时间序列数据做进一步统计分析。

(2) 交叉小波变换和小波相干

与传统的傅立叶变换相比,小波变换(Wavelet Transform)能有效提取信号的时频特征,可用于分析两个时间序列数据的周期性变化特征^[36]。交叉小波变换(Cross Wavelet Transform, XWT)可在时频空间中找到时间序列里周期性强度一致的区域^[37]。小波相干(Wavelet Transform Coherence, WTC)可以反映2个时间序列在时频空间上的局部相关程度^[38]。WTC定义为:

$$R^2(a, \tau) = \frac{|S(a^{-1}W_{XY}(a, \tau))|^2}{S(a^{-1}|W_X(a, \tau)|^2)S(a^{-1}|W_Y(a, \tau)|^2)} \quad (2)$$

式中: S 是平滑算子;

a 为伸缩尺度^[36]。

本文利用小波变换分析了河口岸段陆地面积变化和年径流量、输沙量时间序列的周期变化特征,并利用XWT和WTC进一步分析了数据之间的响应关系。陆上三角洲蚀退-淤进对各气候因

子与人类活动的响应则用多元线性回归进行定量联系。

3 结果与分析

3.1 黄河三角洲各岸段海岸线时空演变

根据GEE及ArcGIS空间分析结果,得到了近30年各岸段海岸线时空演变。本文根据1996年黄河改道清8汊入海,2002年黄河第1次实施调水调沙,2013年为固定调水调沙10周年,将1993—2022年30年间划分为4个阶段。以下将分岸段展开分析近30年海岸线的时空演变。

(1) 刁口河岸段

如图5所示,1993—2022年刁口河岸段海岸线不断向陆地蚀退,呈现前期蚀退快,后期蚀退逐渐减缓的趋势。侵蚀严重的区域主要位于黄河刁口故道入海口东侧,30年间总蚀退面积约65 km²。1993—1996年,刁口段海岸线逐年向内陆蚀退,总蚀退面积约12 km²(图5a);1997—2013年,海岸线淤积与侵蚀交替进行,总体蚀退面积约43 km²(图5b、c);2014—2022年海岸线逐渐稳定,侵蚀区域零散分布(图5d)。

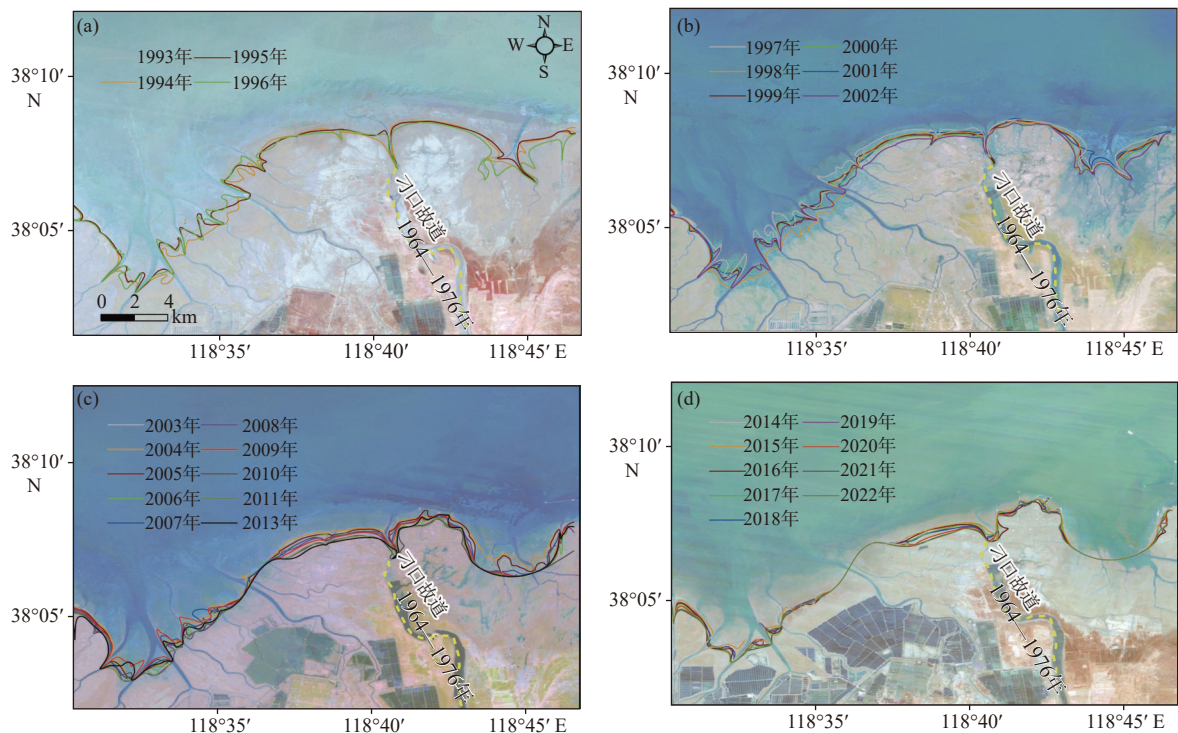


图5 1993—2022年刁口河岸段海岸线变化

Fig.5 Coastline changes in the Diaokou Riverbank section from 1993 to 2022

(2) 东营港及临近岸段

图6展示了东营港及临近岸段1993—2022年海岸线时空变化情况。由于人工堤岸的建设被较早固定下来,本岸段海岸线变化主要在港口及港口与油田之间的区域,淤蚀面积变化在 20 km^2 以内。

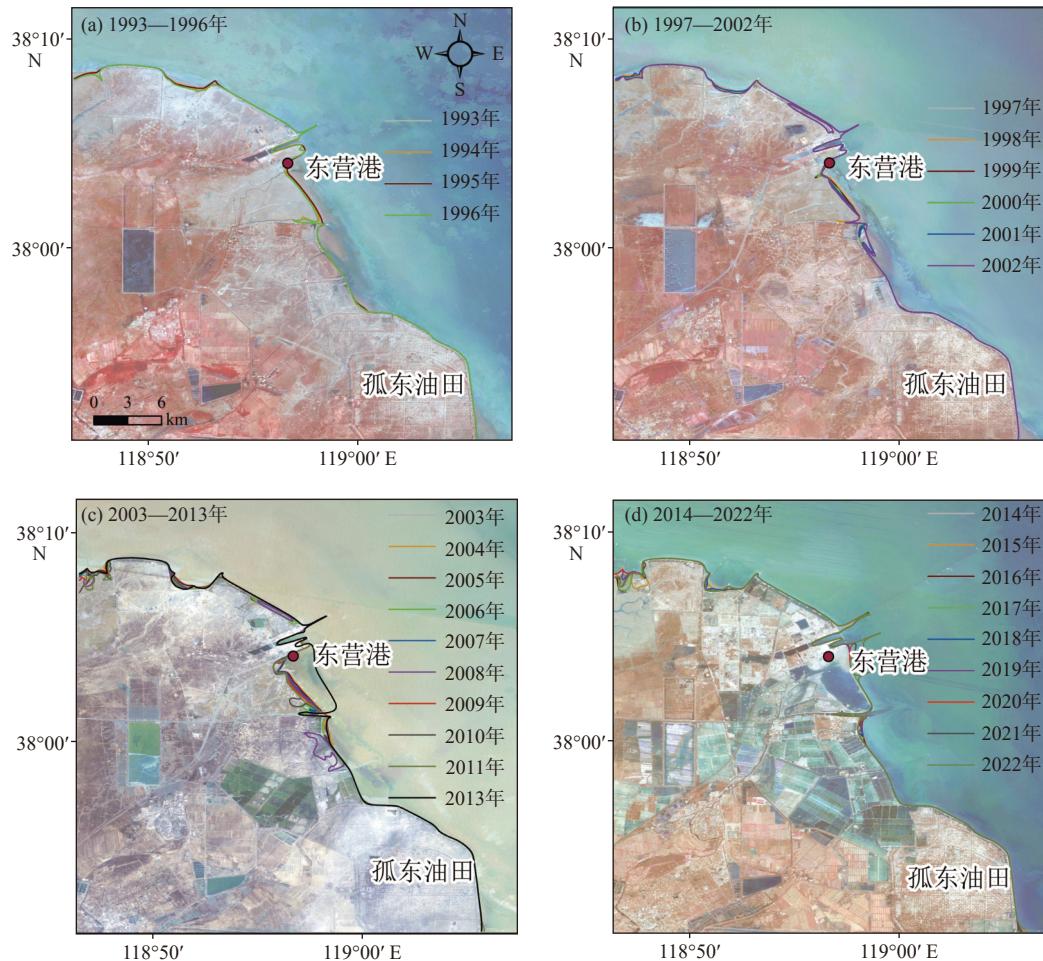


图6 1993—2022年东营港及临近岸段海岸线变化

Fig.6 Coastline changes in Dongying Port and adjacent shore section from 1993 to 2022

(3) 河口岸段

图7展示了河口岸段1993—2022年海岸线时空变化情况。1993—1996年清8汉改道之前,河口海岸线不断朝东南向海扩张,南部岸线亦逐年向海扩张(图7a)。1996年7月清8汉改道后,河口开始沿北东向海扩张,并在近岸流^[39]、科里奥利力^[40]和黄河口地形条件的影响下向东偏移(图7b、c)。1997—2002年,由于清水沟叶瓣蚀退速率大于清8汉叶瓣淤积速率,区域面积减小。2003—2013年,尽管清水沟叶瓣仍逐年向陆蚀退,但清8汉叶瓣向海淤积的速度明显加快,总体面积增长 30 km^2 ,平均增长 $3\text{ km}^2/\text{a}$ 。2004、2007年过量径流导致的2次自然出汉使河口向北偏移约 2 km ,并在2009年

1993—2002年由于东营港二、三期工程建设导致海岸线变化显著。2003—2013年,东营港建设速度加快,港口南部淤进变化较大,海岸线向海扩张,围填海面积约 20 km^2 。2014—2022年,除了港口区域丁坝的修建,其他岸段基本无变化。

前后稳定向北(图7c)。2014—2022年,清8汉叶瓣继续向北扩张,淤积速率大致与前一阶段相当,陆地面积增长约 30 km^2 ,河口尖端不断朝正北延伸,并在2014年前后发育了心滩(图7d)。总体来说,河口陆地呈现先淤积后侵蚀再波动淤积的状态,30年间累积造陆面积约 50 km^2 。

(4) 莱州湾岸段

莱州湾岸段海岸线1993—2022年淤进与蚀退交替进行(图8),区域面积基本保持不变。1993—1996年,海岸线逐年蚀退,平均减少 $1.5\text{ km}^2/\text{a}$ 。1997—2002年,海岸线先蚀退后淤进,平均增长 $1.2\text{ km}^2/\text{a}$ 。2003—2013年,海岸线蚀退与淤进交替进行,陆地面积变化 $<3\text{ km}^2$ 。2014—2022年,海岸

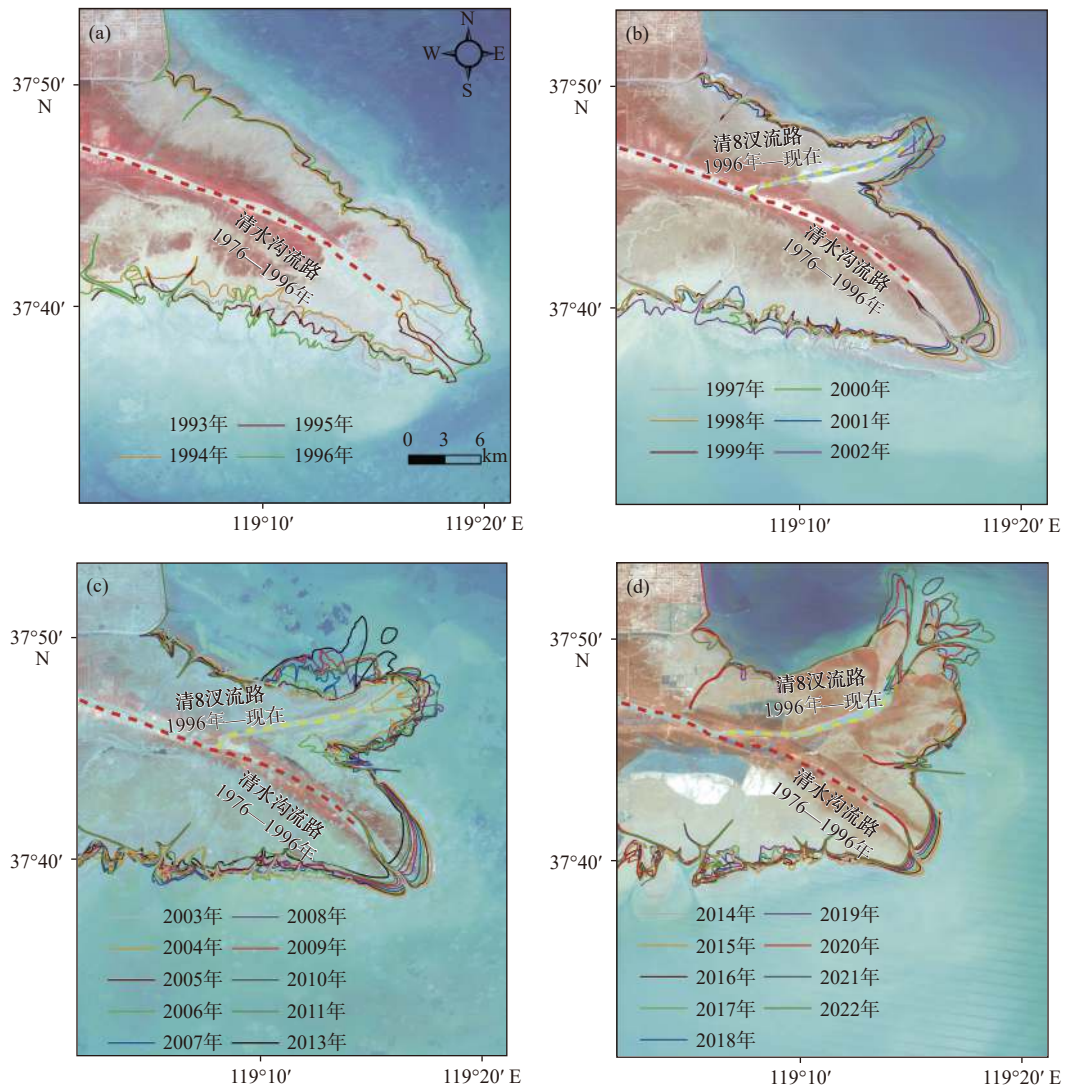


图 7 1993—2022 年河口岸段海岸线变化

Fig.7 Coastline changes in the estuary section from 1993 to 2022

线基本保持稳定, 陆地面积变化 $< 1 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

3.2 黄河陆上三角洲的淤进与蚀退

如图 9 所示, 根据提取的海岸线矢量数据计算了过去 30 年黄河三角洲阶段性侵蚀和扩张区域的变化。

1993—1996 年, 整个黄河陆上三角洲基本处于淤进状态, 仅有零星蚀退区位于刁口故道两侧和莱州湾沿岸(图 9a); 1997—2002 年, 黄河入海口改道导致淤进和蚀退区域发生改变, 新生叶瓣南侧和莱州湾沿岸成为新的淤进区, 新生叶瓣北沿岸、刁口故道和清水沟故道受到侵蚀, 其中刁口故道流路区侵蚀最为严重(图 9b)。2003—2013 年, 新生清 8 汉叶瓣向海淤进速率加快, 东营港南侧向海扩张, 清水沟和刁口故道两侧持续受到侵蚀, 莱州湾沿岸侵蚀与淤积交替进行(图 9c)。2014—2022 年, 黄河

三角洲整体处于淤进的状态, 少量侵蚀区主要分布在清水沟和刁口故道两侧(图 9d)。

图 10 显示了黄河三角洲总体(图 10a)和各岸段(图 10b)近 30 年陆地面积的变化, 通过非参数局部加权回归 (LOWESS)^[41] 进行拟合分析。从图 10a 可以看出, 黄河三角洲总面积经历了先增加后减少再波动增加的阶段。1993—1997 年为增长期, 平均每年增长约 13 km^2 , 此阶段河口岸段面积增长为黄河三角洲总面积增长做了主要贡献。1997—2003 年为减少期, 平均每年减少约 18 km^2 , 河口岸段和刁口河岸段面积均呈下降趋势。2004—2022 年呈缓慢波动增长的趋势, 平均每年增长 $2 \sim 3 \text{ km}^2$ 。

图 10b 显示了黄河三角洲各岸段面积的时间变化序列。其中, 东营港及临近岸段、莱州湾岸段近 30 年没有明显的变化趋势, 东营港及临近岸段

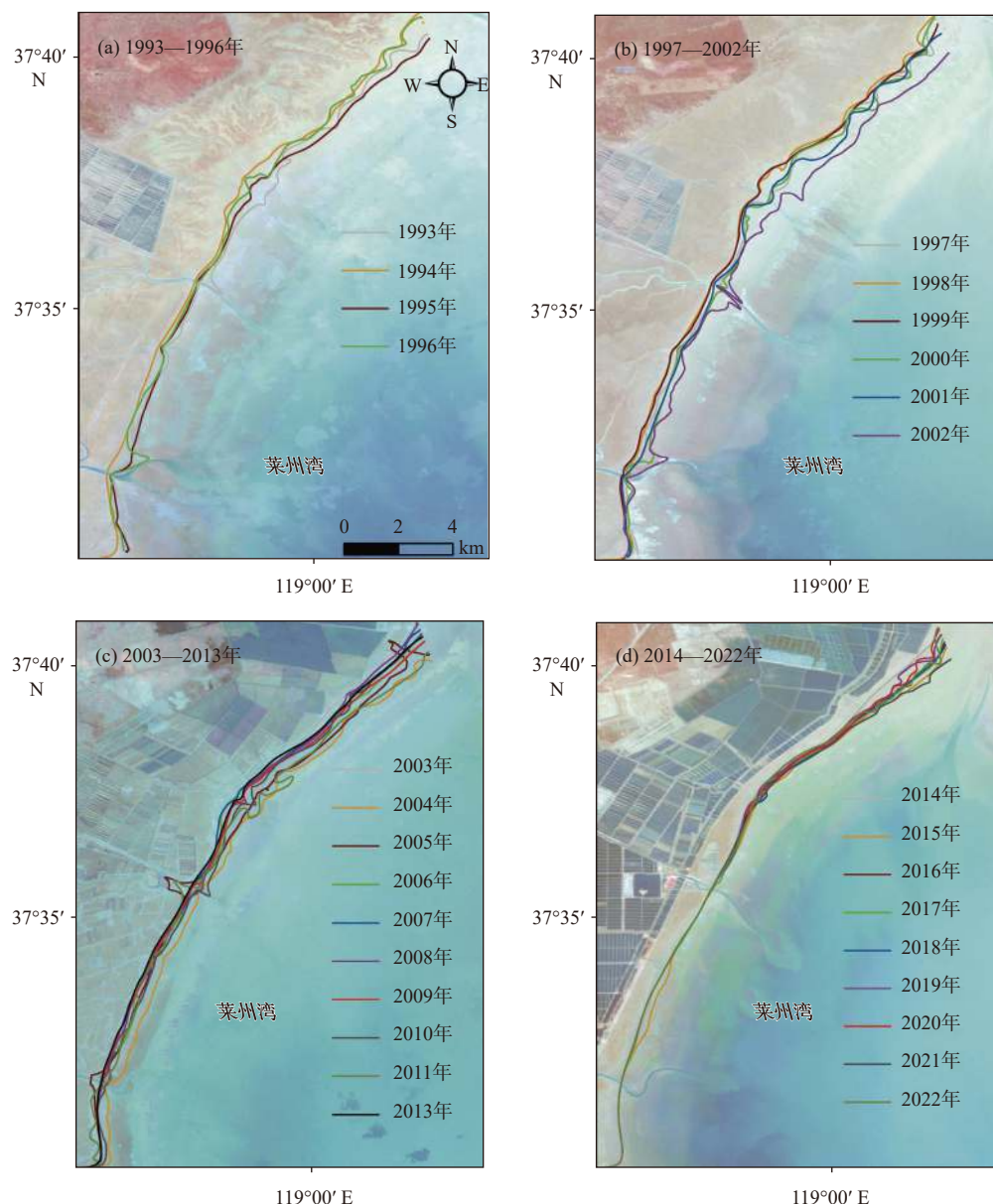


图 8 1993—2022 年莱州湾岸段海岸线变化

Fig.8 Coastline changes in the Laizhou Bay section from 1993 to 2022

面积积极差为 28 km^2 , 莱州湾岸段面积积极差为 24 km^2 。刁口河岸段面积呈下降趋势, 30 年间总蚀退面积约为 65 km^2 , 平均蚀退 $2.15 \text{ km}^2/\text{a}$ 。河口岸段面积呈先曾后减再波动增加的趋势, 30 年间累积造陆面积约 50 km^2 , 平均 $1.67 \text{ km}^2/\text{a}$, 其中 1993—1996 年为快速增加阶段, 1997—2005 年为缓慢减少阶段, 2006—2022 年为缓慢波动增加阶段。

4 讨论

4.1 陆上三角洲蚀退-淤进对入海水沙变化的响应

黄河陆上三角洲蚀退-淤进很大程度上取决于

黄河入海水沙供应^[42-43]。利津站作为黄河入海之前最后一个水文测站, 年径流量和年输沙量可分别近似视为黄河每年排入渤海的水量和泥沙量。从图 11a 可以看出, 近 30 年黄河入海泥沙量呈阶梯式下降趋势, 平均减少约 $0.1 \times 10^8 \text{ t/a}$; 入海水量呈先减少后增加的趋势, 平均增加 $6.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。在自然水沙输运时期(1993—2001 年)和人工水沙调控时期(2002—2022 年)径流量与输沙量的相关系数分别为 0.87 和 0.56, 表明自然水沙输运时期水沙关系较为和谐, 高径流对应着高输沙; 人工水沙调控前期(2002—2005 年)水沙关系较为复杂, 径流量与输沙量的相关性较低; 人工水沙调控后期(2006—2022 年)径流量与输沙量的变化趋势趋于一致, 但

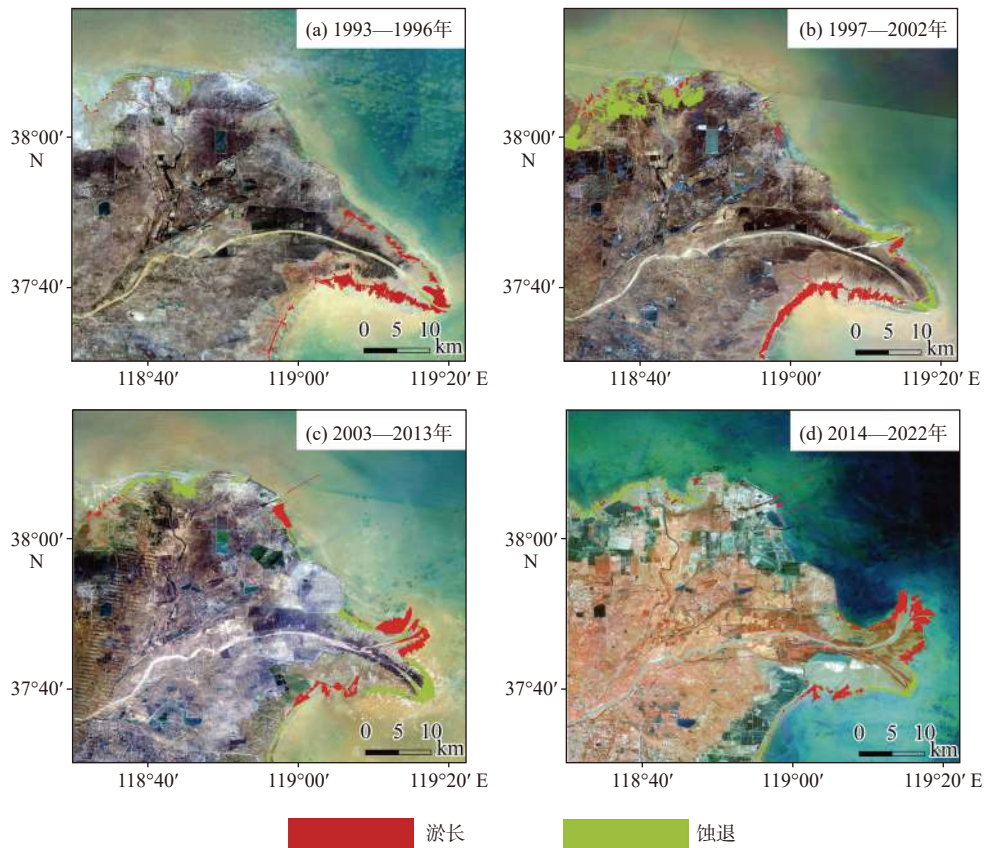


图 9 近 30 年黄河三角洲阶段性侵蚀和淤进区域

Fig.9 Phased erosion and expansion areas of the Yellow River Delta in the past 30 years

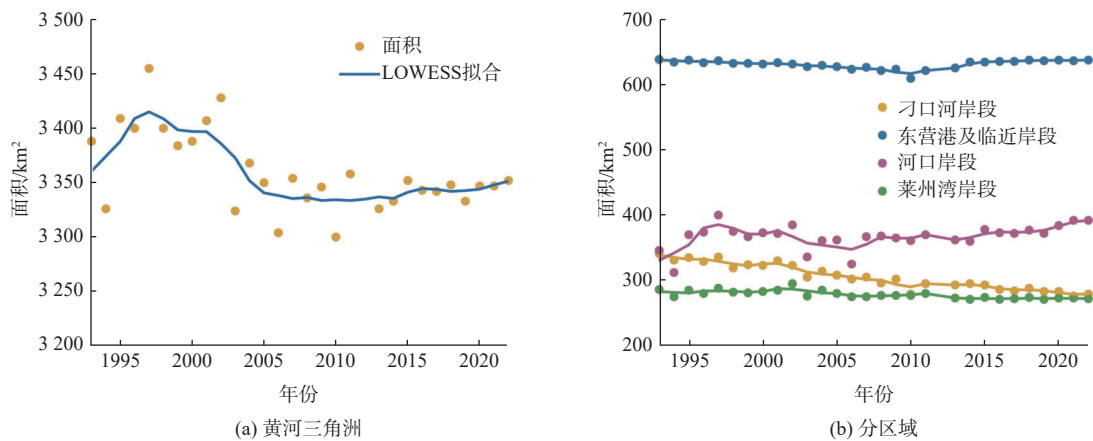


图 10 陆地面积的时间变化序列

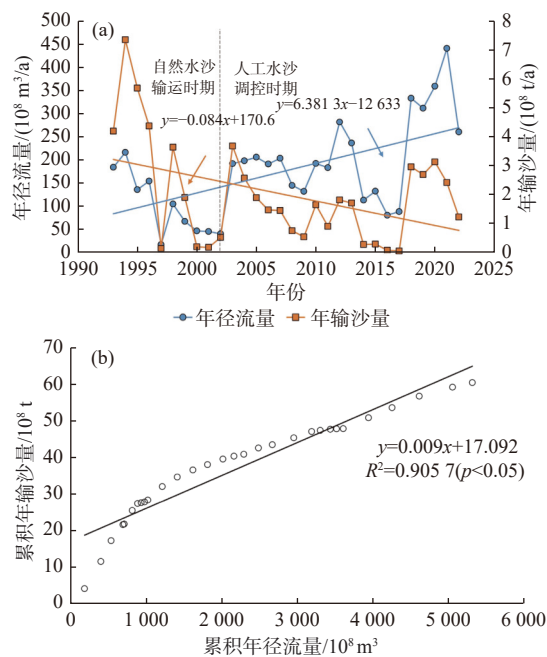
Fig.10 The time series of variation in land area

径流的增加并未彻底遏制输沙下降的趋势。如图 11b 所示, 累积输沙量与累积径流量相关系数为 0.91, 在 $p < 0.05$ 的水平上具有显著性, 入海水沙关系受水沙调控影响, 在研究期间呈现明显的阶段性, 单位径流携带泥沙量经历了从高到低再逐渐稳定的阶段。

年径流量和年输沙量 MK 检验表明 (图 12a、b), 年径流量在 1995—2004 年 $UF < 0$, 呈下降趋势,

2005 年之后 $UF > 0$, 呈上升趋势, 推测可能与 2004 年开始以固定方案调水调沙, 黄河入海水量有所恢复有关, 突变发生在 2017 年前后, 推测可能与 2016、2017 年调水调沙中断有关; 年输沙量在 1996 年之后 $UF < 0$, 一直是减少的趋势, 突变发生在 1996 年前后, 推测可能与黄河入海口人工改道和黄河连续多年断流有关。

现行河口岸段为黄河三角洲主要造陆区域, 受

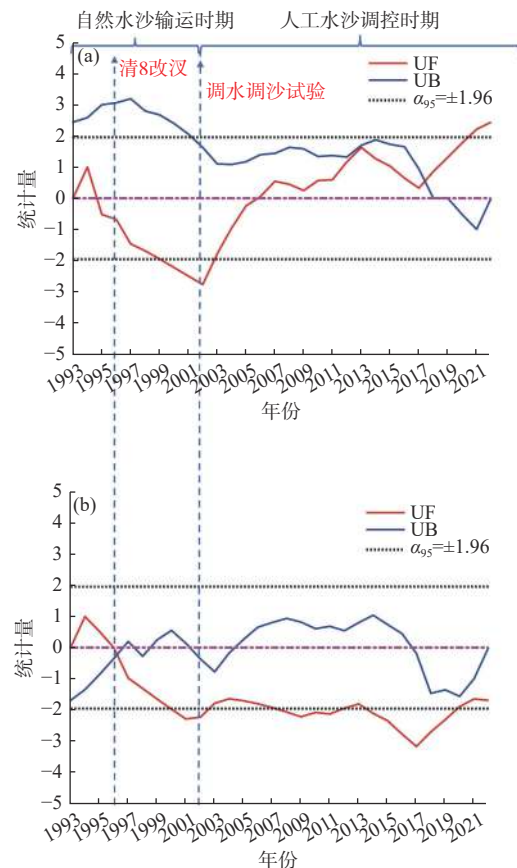


(a) 1993—2022 年利津水文站年径流量与输沙量关系;
(b) 1993—2022 年累积径流量与累积输沙量关系

图 11 1993—2022 年黄河入海水沙变化

Fig.11 Changes in sediment discharging from the Yellow River from 1993 to 2022

黄河入海水沙供应影响最为显著。从径流量、输沙量与河口岸段面积变化 2 组连续小波变换(CWT)构建交叉小波变换(XWT)和小波相干(WTC), XWT 表明序列不存在显著的共振周期, WTC 表明河口陆地面积变化与入海径流量在 1996—1999 年存在周期为 0~1 a 显著的负相位关系, 1999—2002 年存在周期为 4~5 a 的负相位关系, 且面积变化滞后于径流变化约 1/4 个周期(图 13a); 河口面积变化与入海泥沙量相位关系在调水调沙实施

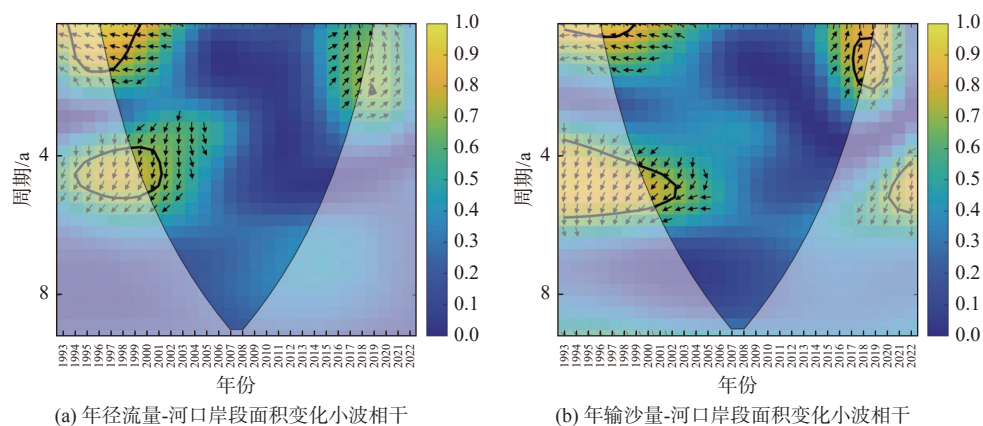


统计量 UF 为独立序列按照顺序计算的序序列标准化参数, UB 为按照独立序列逆序计算的序序列标准化参数

图 12 年径流量 (a) 和年输沙量 (b) MK 检验

Fig.12 The MK test on annual runoff (a) and annual sediment load (b)

之前基本与入海径流量保持同步, 在 2016—2018 年存在周期为 1~2 a 显著正相位关系, 推测可能与 2016、2017 年调水调沙中断后海洋动力相对增强, 黄河口蚀退速率加快有关^[44](图 13b)。其他未



(a) 年径流量-河口岸段面积变化小波相干

(b) 年输沙量-河口岸段面积变化小波相干

图中箭头表示两者的相位关系, 箭头向右表示两者为正相关关系, 箭头向左表示两者为负相关关系, 箭头向上表示后者的变化超过前者变化的 1/4 个周期, 箭头向下表示后者的变化滞后前者变化的 1/4 个周期

图 13 径流量、输沙量与河口岸段面积小波相干功率谱

Fig.13 Wavelet coherence power spectra of runoff, sediment load and estuary area

通过显著性检验的低能量区均以负相位为主, 表明河口陆地面积变化滞后于黄河年入海水沙量的变化, 这与黄河入海泥沙造陆存在明显的“后效”影响一致^[22]。

4.2 陆上三角洲蚀退-淤进对气候变化和人类活动的响应

图 14 显示了陆上三角洲蚀退-淤进面积与影响因子相关系数矩阵。蚀退-淤进面积(ΔS)与降水量(P)、径流量(Q)和输沙量(Q_s)呈正相关, 与气温(T)和净引水量(Q_d)呈负相关, 且 Q 、 Q_s 与 ΔS 的相关系数更大, 对此可以解释为降水使径流增加, 流域侵蚀加剧, 入海泥沙通量增加, 三角洲淤进; 气温升高使流域蒸发量增大, 河流流量减少, 输沙动力减弱, 入海泥沙通量减少, 三角洲蚀退; 人类引水减少了地表径流的侵蚀产沙量, 在引水的同时带走了部分泥沙也会使入海泥沙通量减少, 同样造成三角洲蚀退。结果表明, 气候变化和人类活动影响了流域水文循环, 三角洲蚀退-淤进对 P 、 T 与 Q_d 变化有明显响应。

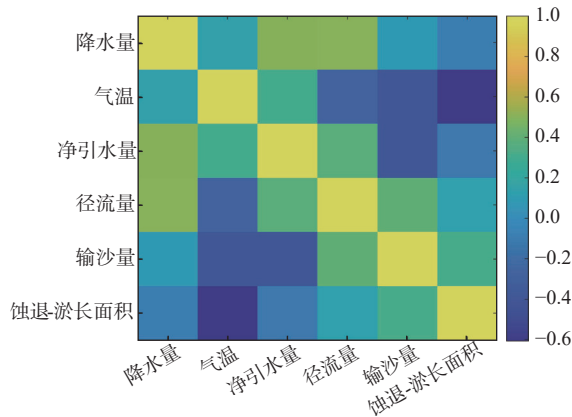


图 14 陆上三角洲蚀退-淤进与影响因子相关系数矩阵热图
Fig.14 Matrix heat map of correlation coefficient between erosion-siltation range and influencing factors in an onshore delta

为量化在自然水沙输运和人工水沙调控 2 个时期不同流域要素对 ΔS 的贡献, 在 MATLAB2021 中进行无量纲分析, 对时序 P 、 T 、 Q_d 、 Q 、 Q_s 和 ΔS 原始数据进行了零均值归一化^[16], 使之在 0~1 范围内变化, 建立 P' 、 T' 、 Q_d' 、 Q' 、 Q_s' 和 $\Delta S'$ 标准化多元回归方程如下, 自然水沙输运时期 (1993—2001 年):

$$\Delta S' = 0.20P' - 0.68T' - 0.23Q_d' + 0.48Q' - 0.40Q_s' + 0.69 \quad (3)$$

人工水沙调控时期:

$$\Delta S' = 0.01P' - 0.17T' + 0.05Q_d' + 0.86Q' - 0.75Q_s' + 0.53 \quad (4)$$

通过比较 3 个自变量的回归系数在三者回归系数之和所占比例, 即可得出各自变量对 ΔS 的贡献率。自然水沙输运时期 P 、 T 、 Q_d 、 Q 、 Q_s 贡献率分别为 10.1%、34.4%、11.4%、23.9%、20.2%, 此阶段自然因子 (P 、 T) 为影响河口蚀退-淤进的主要因素, 人类活动为次要因素, 这与 20 世纪 90 年代黄河径流输沙不足, 严重断流的现象所吻合; 人工水沙调控时期 P 、 T 、 Q_d 贡献率分别下降至 0.2%、9.2%、2.5%, Q 、 Q_s 贡献率上升至 47.1%、41.0%, 说明人工水沙调控之后, 水沙排放重新成为控制河口蚀退-淤进的主要因素, 人类活动的影响远大于气候变化, 因此, 本文认为持续调水调沙之下, 人类活动或将成控制河口蚀退-淤进的主要因素。

5 结论

本文基于 Google Earth Engine 平台, 利用长时间序列的 Landsat 系列影像提取了黄河三角洲 1993—2022 年海岸线, 结合流域内气象水文长期测量数据, 定量研究了近 30 年黄河三角洲蚀退-淤进状况, 以及流域尺度气候变化和人类活动对三角洲演化的影响, 结论如下:

(1) 1993—2022 年, 黄河三角洲陆地面积经历了先增加后减少再波动增加的阶段, 陆地侵蚀的区域主要位于刁口河岸段, 30 年间总蚀退面积约为 65 km², 淤积区域主要位于河口岸段, 30 年间总淤积面积约 50 km², 东营港及临近岸段和莱州湾岸段面积保持相对稳定, 对黄河三角洲总面积的影响较小。

(2) 1993—2022 年, 黄河输沙量呈阶梯式下降趋势, 平均下降率约为 0.1×10⁸ t/a; 径流量呈先下降后增长的趋势, 平均增长率 6.0×10⁸ m³/a。水沙序列发生突变的时间节点与人工改道、调水调沙等人类活动有关。

(3) 在自然水沙输运时期 (1993—2001 年), 径流量、输沙量与河口岸段面积变化均存在显著的负相位关系; 在人工水沙调控时期 (2002—2022 年), 输沙量与河口岸段面积变化存在周期为 1~2 a 显著的正相位关系, 且面积变化滞后于黄水沙量的变化。

(4) 自然水沙输运时期, 自然因子为影响河口蚀退-淤进的主要因素; 人工水沙调控之后, 水沙排放重新成为控制河口蚀退-淤进的主要因素, 人类活动的影响远大于气候变化。

参考文献:

- [1] OVEREEM I, SYVITSKI J P M. Dynamics and vulnerability of delta systems[R]. Geesthacht: GKSS Research Center, 2009.
- [2] SYVITSKI J P M. Deltas at risk[J]. *Sustainability Science*, 2008, 3(1): 23-32.
- [3] WRIGHT L D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1977, 88(6): 857.
- [4] SAITO Y, YANG Z, HORI K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2): 219-231.
- [5] GALAL E M, TAKEWAKA S. The influence of alongshore and cross-shore wave energy flux on large- and small-scale coastal erosion patterns[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(7): 953-966.
- [6] XU J. Response of land accretion of the Yellow River Delta to global climate change and human activity[J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 4-11.
- [7] RENAUD F G, SYVITSKI J P, SEBESVARI Z, et al. Tipping from the Holocene to the Anthropocene: how threatened are major world deltas?[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 644-654.
- [8] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [9] SYVITSKI J P M, SAITO Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 261-282.
- [10] WANG H, WU X, BI N, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): a review[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93-113.
- [11] ZHANG X, LU Z, JIANG S, et al. The progradation and retrogradation of two newborn Huanghe (Yellow River) Delta lobes and its influencing factors[J]. *Marine Geology*, 2018, 400: 38-48.
- [12] KUENZER C, OTTINGER M, LIU G, et al. Earth observation-based coastal zone monitoring of the Yellow River Delta: dynamics in China's second largest oil producing region over four decades[J]. *Applied Geography*, 2014, 55: 92-107.
- [13] KONG D, MIAO C, BORTHWICK A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 157-167.
- [14] YU J, FU Y, LI Y, et al. Effects of water discharge and sediment load on evolution of modern Yellow River Delta, China, over the period from 1976 to 2009[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(9): 2427-2435.
- [15] ZHOU Y, HUANG H Q, NANSON G C, et al. Progradation of the Yellow (Huanghe) River Delta in response to the implementation of a basin-scale water regulation program[J]. *Geomorphology*, 2015, 243: 65-74.
- [16] JIANG C, PAN S, CHEN S. Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: causes and environmental implications[J]. *Geomorphology*, 2017, 293: 93-107.
- [17] WANG S, HASSAN M.A, XIE X. Relationship between suspended sediment load, channel geometry and land area increment in the Yellow River Delta[J]. *CATENA*, 2006, 65(3): 302-314.
- [18] 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.
- [19] LIU F, CHEN S, DONG P, et al. Spatial and temporal variability of water discharge in the Yellow River Basin over the past 60 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 1013-1033.
- [20] MILLIMAN J D, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525-544.
- [21] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 等. 基于遥感的黄河三角洲海岸线变化研究 [J]. *海洋科学*, 2012, 36(4): 99-106.
LI Yunzhao, YU Junbao, HAN Guangxuan, et al. Research on the changes of the coastline in the Yellow River Delta based on remote sensing[J]. *Marine Science*, 2012, 36(4): 99-106.
- [22] 牛明香, 王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 26-33.
NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline changes in the Dongying Section of the Yellow River Delta based on Landsat remote sensing images[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 26-33.
- [23] 薛允传, 马圣媛, 周成虎. 基于遥感和 GIS 的现代黄河三角洲岸线变迁及发育演变研究 [J]. *海洋科学*, 2009, 33(5): 36-40.
XUE Yunchuan, MA Shengyuan, ZHOU Chenghu. Research on the modern changes and development evolution of the coastline in the Yellow River Delta based on remote sensing and GIS[J]. *Marine Science*, 2009, 33(5): 36-40.
- [24] JIANG C, CHEN S, PAN S, et al. Geomorphic evolution of the Yellow River Delta: quantification of basin-scale natural and anthropogenic impacts[J]. *CATENA*, 2018, 163: 361-377.
- [25] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005(5): 589-595.
XU Hanqiu. Research on extracting water information using Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005(5): 589-595.
- [26] FEYISA G L, MEILBY H, FENSHOLT R, et al. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water map-

- ping using Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 23-35.
- [27] FISHER A, FLOOD N, DANAHER T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 167-182.
- [28] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [29] NAUSHEEN N, SEAL A, KHANNA P, et al. A FPGA based implementation of Sobel edge detection[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2018, 56: 84-91.
- [30] HOU X, WU T, HOU W, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1791-1802.
- [31] KENDALL M G. Rank Correlation Methods[M]. Oxford: Griffin, 1948.
- [32] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245.
- [33] 王延贵, 刘茜, 史红玲. 江河水沙变化趋势分析方法与比较[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(2): 190-195, 201.
- WANG Yangui, LIU Qian, SHI Hongling. Analysis methods and comparison of trends in river sediment changes[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(2): 190-195, 201.
- [34] WANG H, YANG Z, 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(3): 331-354.
- [35] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496.
- ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparative analysis of trend test methods based on Chinese meteorological data[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490-496.
- [36] 苏志明, 孙永福, 宋玉鹏, 等. 基于 GEE 和 GIS 的黄河三角洲面积多尺度时间序列分析[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(1): 90-101.
- SU Zhiming, SUN Yongfu, SONG Yupeng, et al. Multi-scale time series analysis of the area of the Yellow River Delta based on GEE and GIS[J]. *Progress in Ocean Science*, 2022, 40(1): 90-101.
- [37] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1137-1146.
- LIU Zhifang, LIU Youcun, HAO Yonghong, et al. Multi-scale cross wavelet analysis of the Heihe River runoff process and meteorological factors[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1137-1146.
- [38] TORRENCE C, WEBSTER P J. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(8): 2679-2690.
- [39] LI H, HUANG C, ZHANG C, et al. Coastal erosion and sediment dynamics of the Yellow River Delta and their responses to the runoff-sediment flux since 1976[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 486-498.
- [40] FAN Y, CHEN S, ZHAO B, et al. Shoreline dynamics of the active Yellow River Delta since the implementation of Water-Sediment Regulation Scheme: a remote-sensing and statistics-based approach[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 406-419.
- [41] CLEVELAND W S, DEVLIN S J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1988, 83(403): 596-610.
- [42] COLEMAN J M, WRIGHT L D. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies[M]//BROUSSARD M L. Deltas: Models for Exploration. Houston: Houston Geological Society, 1975: 99-149.
- [43] YANG S L, BELKIN I M, BELKINA A I, et al. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(4): 689-699.
- [44] 陈俊卿, 范勇勇, 吴文娟, 等. 2016—2017 年调水调沙中断后黄河口演变特征[J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 6-9, 116.
- CHEN Junqing, FAN Yongyong, WU Wenjuan, et al. Evolution characteristics of the Yellow River Estuary after the water and sediment regulation interruption from 2016 to 2017[J]. *People's Yellow River*, 2019, 41(8): 6-9, 116.

Response of Yellow River subaerial delta erosion and accretion to climate change and human activities in the past 30 years

MA Yue¹, CHEN Jianbin², YU Yongqing³, WANG Yamei³, WANG Guoyang^{1,4},
HUANG Yuanyuan¹, LYU Yanling¹, DING Dong^{1,4,5*}

(1 College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Shandong Research Institute Yellow River Delta Sustainable Development, Dongying 257000, China; 3 East China Branch of SINOPEC, Dongying 257000, China; 4 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 5 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In the past 30 years, affected by global climate change and intensified human activities in the basin, the response of the Yellow River Delta land erosion-accretion process to the water circulation system of the Yellow River Basin has become more significant. Based on Google Earth Engine and long-term series of Landsat images, combined with long-term meteorological and hydrological measurement data in the basin, this research quantitatively studies the response of the Yellow River subaerial delta erosion and accretion to climate change and human activities in the past 30 years. The research found that in the 30 years from 1993 to 2022, the land area of the Yellow River Delta experienced a stage of first increasing, then decreasing and then fluctuating increase. The current river mouth bank section is the main accretion area, and the land area increases by about 1.67 km² per year. The Diaokou river bank section is the main erosion area. area, the land area decreases by about 2.15 km² per year; there is a negative phase relationship with a period of 4~5 years between the changes in sediment loads and river mouth area during the natural water and sediment transport period (1993-2001); multiple regression analysis shows that the natural water and sediment during the period (1993-2001), climate change dominated the erosion and accretion of the river mouth. During the artificial Water-Sediment Regulation Scheme period (2002-2022), the impact of human activities was far greater than climate change.

Key words: Yellow River Delta; erosion-accretion; climate change; impact of human activities; Google Earth Engine