

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.005

基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析

牛明香^{1,2,3}, 王 俊^{1,2,3}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:基于 Landsat 遥感影像数据,利用平均高潮线法提取了 1986—2015 年的海岸线,运用 GIS 技术分析了黄河三角洲东营段面积的淤蚀变化、海岸线迁移特征及其时空变化规律,以及淤蚀变化与入海水沙的关系。结果表明:1986—1997 年黄河三角洲东营段处于持续蚀退状态,蚀退面积约为 180 km²;1997—2006 年淤积后面积相对稳定,2006 年面积和 1986 年相差不大;自 2008 年开始呈现轻微蚀退状态;蚀退速率和淤积速率最快的时段分别为 2011—2013 年和 1997—1999 年。海岸线时空变化特征显著,黄河入海口段变化最为剧烈,海岸线方向和形态不断变化,向海延伸;东营港及邻近岸段区域面积基本稳定;刁口段、莱州湾岸段年间淤进和蚀退交替进行,总体上均处于蚀退状态。黄河三角洲东营段海岸线变化主要受黄河流路变化、入海水沙和海水侵蚀的影响,黄河调水调沙工程的长期实施对于近年来河口海岸线的变迁具有深刻影响。

关键词:海岸线变化;淤蚀;时空异质性;遥感影像;黄河三角洲;东营段

中图分类号:TV882.1;P737.12⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)04-0026-08

Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image
//NIU Mingxiang^{1,2,3}, WANG Jun^{1,2,3} (1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the Landsat remote sensing image data, the coastline from 1986 to 2015 was extracted by using the mean high tide line method. The erosion and accumulation changes, shoreline migration characteristics and their temporal and spatial changes in the area of Dongying section of the Yellow River Delta were analyzed by using GIS technology, as well as the relationship between the erosion and accumulation changes and the water and sediment entering the sea. The results show that the Dongying section of the Yellow River Delta was in a state of continuous erosion and regression from 1986 to 1997, with an area of about 180 km². From 1997 to 2006, the area after accumulation was relatively stable, and there was little difference between 2006 and 1986. Since 2008, it has been in a slight state of erosional regression, with the fastest erosion rate and accumulation rate in the periods from 2011 to 2013 and from 1997 to 1999, respectively. The temporal and spatial characteristics of coastline change are significant and it is most acutely in the estuary of the Yellow River. The direction and shape of coastline change constantly and extend to the sea. The area of Dongying Port and its adjacent section is basically stable. In Diaokou section and Laizhou Bay bank section, the erosion and accumulation are carried out alternately, and they are in erosional regressive state over all. The coastline change of Dongying section of the Yellow River Delta is mainly affected by the change of the Yellow River flow path, the water and sediment entering the sea and the sea erosion. The long-term implementation of "Water and sediment regulation project of the Yellow River" has a profound impact on the change of the estuary coastline in recent years.

Key words: coastline variation; accumulation and erosion; spatiotemporal heterogeneity; remote sensing image; Yellow River Delta; Dongying section

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2018HY-ZD0102);海洋公益性行业科研专项(201505001);公益性行业(农业)科研专项(201303050)

作者简介:牛明香(1977—),女,副研究员,博士,主要从事渔业生物环境与生态、海洋渔业遥感及 GIS 研究。E-mail: niuwx@ysfri.ac.cn

通信作者:王俊,研究员。E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn

黄河三角洲是中国乃至世界各大河三角洲中海陆变迁最活跃的地区,在自然变化和人工干预下,黄河尾间频繁变迁、不断向海延伸,自 1855 年以来,黄河大的改道已有 10 次,小的改道 70 多次。1976 年,黄河改道清水沟流路,泥沙集中淤积,河口迅速向海延伸;1996 年,黄河改道清八汊河流路,淤积形成新的沙嘴;2009 年,黄河再次改道,现行水流路尾间河道为东略偏北走向。在淤进造陆的同时,三角洲也受到海洋动力的侵蚀,在两者的双重作用下,海岸线淤进蚀退交替演变迅速,三角洲面积也逐年发生变化^[1-3]。了解和掌握海岸线的动态变化特征,对于海岸带资源使用、管理、保护和规划具有重要意义。

黄河入海水沙是河口演变的前提。受气候变化和人类活动的影响,黄河水沙特征不断变化,自 20 世纪 70 年代开始下游河段出现断流,入海水沙大幅度减少。1997 年 10 月底,小浪底水利枢纽工程截流成功,黄河入海水沙环境再次改变。自 1999 年实施的水资源统一管理和调度以及 2002 年开始的调水调沙有效遏制了黄河断流,黄河口水沙环境在人为作用下发生明显改变^[4]。这些水沙条件的变化必然导致河口演变的响应,改变黄河三角洲湿地的演替特征。

在气候变化和人为干扰背景下,海岸线变迁一直是研究的热点^[5-7]。有关黄河口海岸线变迁的研究主要集中在海岸线变迁对景观格局的影响^[3,8]、海岸线变迁^[9-11]及其与调水调沙的关系^[12-15]等方面,着重对入海口或黄河三角洲不同时间、不同范围的海岸线变迁进行了分析。本文基于 1986—2015 年的 Landsat 遥感影像数据,运用 GIS 技术,分析了黄河三角洲东营段面积在黄河入海水沙丰富、黄河断流、调水调沙 3 个典型时期的淤蚀变化及其海岸线变迁的时空异质性,可为新水沙条件下区域的海岸线管理和滩涂利用提供参考。

1 材料与方法

研究区位于山东省东营市,包含河口区、垦利区和东营区的行政区划范围,北临渤海湾,东接莱州湾,其沿海岸线如图 1 所示。根据海岸线特征及水沙条件,将研究区分为刁口段、东营港及邻近岸段、入海口段和莱州湾岸段 4 部分。

1.1 数据获取及预处理

采用 Landsat 遥感影像数据监测海岸线变迁,综合考虑数据质量、成像时间等,收集了 1986—2015 年的 TM、ETM 和 OLI 数据共 12 幅(表 1),空间分辨率为 30 m。为保证研究时相的一致性,除 1986 年外,均为 9、10 月的数据。利用 ENVI 软件,对影像



图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

数据进行几何精校正、增强处理、噪音消除以及研究区域提取等预处理,所有影像投影到高斯-克吕格 6°分带的北京 1954 坐标系。

表 1 用于海岸线监测的遥感影像数据

Table 1 Remote sensing data used for coastline monitoring

卫星	传感器	获取日期	卫星	传感器	获取日期
Landsat5	TM	1986-08-08	Landsat7	ETM	2004-10-12
Landsat5	TM	1989-10-03	Landsat5	TM	2006-10-02
Landsat5	TM	1991-09-23	Landsat5	TM	2008-10-07
Landsat5	TM	1997-09-07	Landsat7	ETM	2011-09-22
Landsat7	ETM	1999-10-07	Landsat8	OLI	2013-10-05
Landsat7	ETM	2001-10-12	Landsat8	OLI	2015-10-27

水沙数据来源于黄河利津水文观测站,为 1982—2015 年的年输沙量和年径流量。黄河利津水文观测站位于黄河的最下游,其输沙量和径流量观测值代表了黄河入海的输沙量和径流量。

1.2 研究方法

由于近红外波段的水体反射率明显单一并低于其他地物,采用阈值法即可进行水陆边界的划分。但由此直接获取的水陆边界线是卫星成像时的瞬时水边线,水陆边界线的位置受潮汐、地形等因素的影响变化较大,瞬时水边线法不能真实反映海岸线的变化。因此,进行不同年份的海岸线遥感监测,需要有一个统一的标准。关于海岸线的提取,国内外学者结合研究区实际情况给出了相应的提取原则和方法^[16-20],但在缺乏潮位和地形资料的前提下,平均高潮线法^[21-22]是海岸线监测切实可行的方法,能够满足宏观分析所需的精度^[23],因此本文采用平均高潮线法进行海岸线信息提取。

平均高潮线一般介于高潮滩和中潮滩之间,由于潮滩物质成分的差异及暴露水上时间不同而导致含水量不同,其光谱特征差异明显,TM 751、OLI 751 波段组合均能清楚地区分海岸信息。利用 ENVI 软

件,首先进行非监督分类完成水陆分离,再利用交互式后处理操作对海岸线提取结果进行逐景影像优化处理,即可获得时间序列的研究区海岸线信息。交互式后处理操作主要通过人工判读完成对河口以及近岸浑浊水域的解译,河口处需要保留大型河口港湾特征和小河齐陆地基线。最后将分类后的图像转换为 shp 文件,通过 ArcGIS 空间分析,获得各时期海岸线的时空变化。

根据预先划定的4个分区(图1),在 ArcGIS 中人为建立各分区边界,并用建立的边界文件进行区域分割,获得各分区面积;对各分区不同年份的面积变化进行分析,获得各分区的淤积面积、蚀退面积。

利用相关关系图分析入海口段面积变化与黄河入海水沙量的关系。

2 结果与分析

2.1 研究区面积变化

黄河泥沙淤积在海岸带造陆,而海水的侵蚀则不停地蚀退陆地,泥沙淤积和海水侵蚀并存,使得研究区面积不断发生变化。如表2所示,1986—2015年淤积和蚀退交替进行,研究区总体上处于轻微蚀退状态。研究区面积变化规律大致如下:1986—1997年处于连续蚀退阶段,蚀退面积达180 km²,平均蚀退速率为16.36 km²/a;1997—2006年先淤积,之后保持相对稳定,淤积和蚀退交替进行,2006年较1997年面积增加了约176 km²;2006—2015年面积总体不断缩小,2015年略有回升,但较2006年面积减少约60 km²。以研究时段内前一年的数据为基础,利用两个年份间的面积变化分析研究区面积的

表2 1986—2015年研究区及各分区面积变化

Table 2 Changes of total area and each division area during 1986—2015

年份	研究区			各分区面积/km ²			
	面积/km ²	面积变化/km ²	面积变化速率/(km ² ·a ⁻¹)	刁口段	东营港及邻近岸段	入海口段	莱州湾岸段
1986	5 404.69			475	558	457	257
1989	5 418.92	14.23	4.74	454	558	491	256
1991	5 388.16	-30.76	-15.38	460	558	470	242
1997	5 224.52	-163.64	-27.27	337	555	466	213
1999	5 406.69	182.17	91.09	429	562	525	246
2001	5 399.74	-6.95	-3.48	399	558	555	255
2004	5 372.91	-26.83	-8.94	409	553	531	232
2006	5 401.07	28.16	14.08	381	548	580	239
2008	5 376.14	-24.93	-12.47	364	547	575	238
2011	5 373.43	-2.71	-0.90	361	547	566	246
2013	5 283.18	-90.25	-45.13	389	562	483	207
2015	5 341.35	58.17	29.09	388	562	515	213

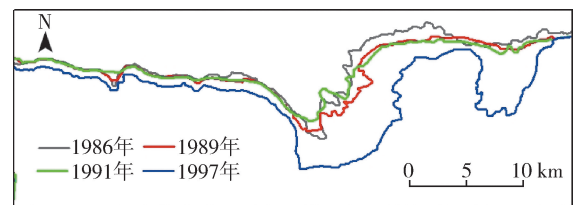
注:“-”为减少;各分区面积数值没有绝对意义,仅为比较不同年份的变化。

淤蚀动态。不同时段,研究区淤积和蚀退发生情况不同,2011—2013年蚀退最为严重,平均蚀退速率达45.13 km²/a,其次为1991—1997年;1997—1999年淤积最多,平均淤积速率为91.09 km²/a。

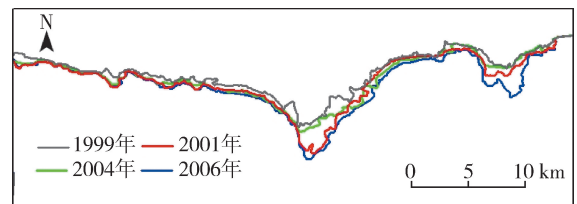
2.2 海岸线时空演变

根据 ArcGIS 空间分析结果和分割区域面积统计,得到各分区海岸线时空分布及面积变化。

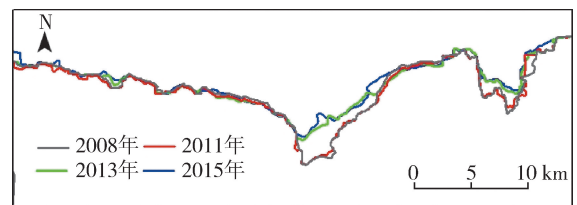
a. 刁口段。1986—1997年,刁口段海岸线大幅度向内陆蚀退,蚀退面积达138 km²,且1991—1997年退化速度最快,为123 km²,平均退化速率为20.5 km²/a(图2(a),表2)。1999—2006年,总体为轻微蚀退状态,蚀退面积仅为48 km²,其中2001—2004年为淤积阶段(图2(b),表2)。2008—2015年,海岸线处于淤进状态,淤积面积仅为24 km²;其中,2008—2011年和2013—2015年的海岸线几乎没有变化,仅2011—2013年海岸线有淤进(图2(c),表2)。图2(d)为1986—2015年刁口段海岸线变化,清楚地表明了海岸线先蚀退后淤进、蚀退大于淤进的变化趋势。



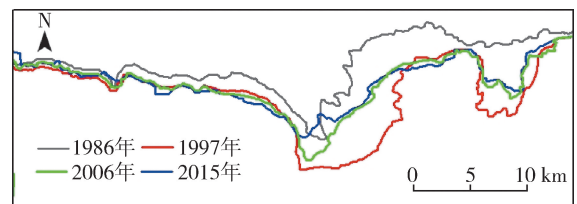
(a) 1986—1997年



(b) 1999—2006年



(c) 2008—2015年



(d) 1986—2015年

图2 1986—2015年刁口段海岸线变化

Fig. 2 Coastline changes in Diaokou estuary during 1986—2015

b. 东营港及邻近岸段。图3和表2清楚地反映了东营港及邻近岸段海岸线时空变化及区域面积变化情况。1986—1997年,港口及邻近岸段海岸线并不稳定,尤其是港口左侧、港口和油田之间的区域各年变化不一,但区域面积基本稳定。1999—2006年,由于人工堤岸的修建,港口段和油田段海岸线稳定,其他岸段略有变化;总体来讲,海岸线向陆地蚀退 14 km^2 。2008—2015年,港口段右侧海岸线冲淤变化较大,其他岸段基本无变化,总体趋势为向外淤进,淤积面积达 15 km^2 。从1986—2015年整体变化来看,除1986年外,其他3个时段港口段和油田段海岸线稳定,仅港口段两侧区域出现淤蚀变化,1986—2015年该区域总体面积基本稳定。

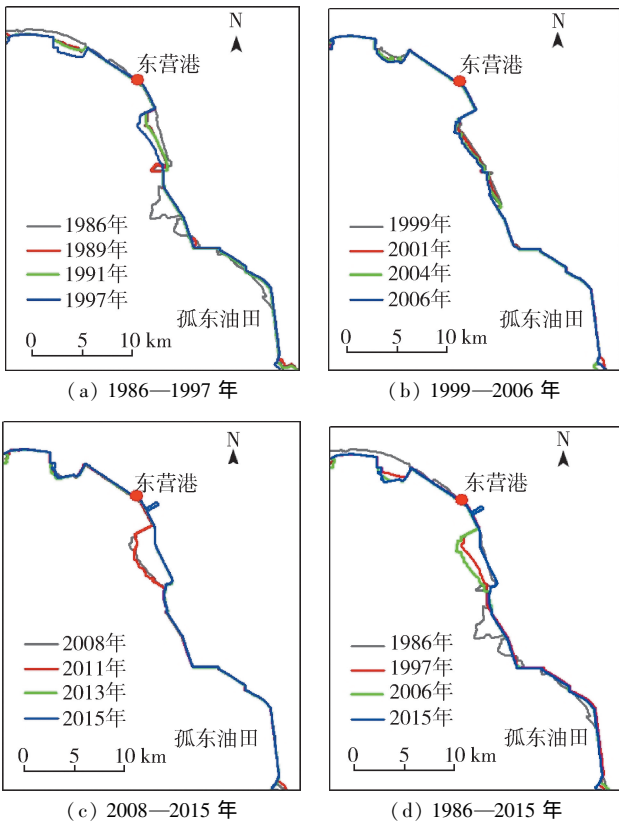
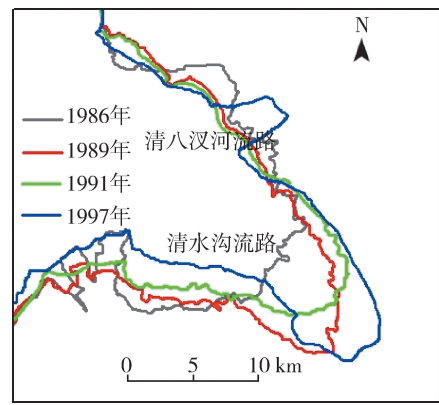
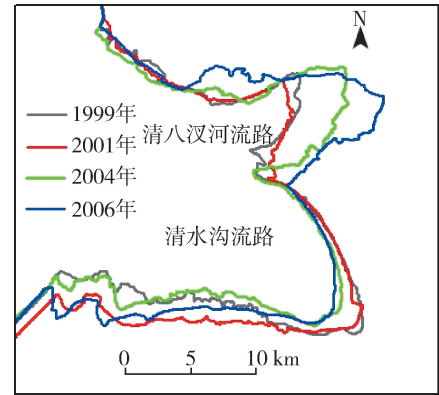


图3 1986—2015年东营港及邻近岸段海岸线变化
Fig.3 Coastline changes in Dongying harbor and its adjacent coastal areas during 1986—2015

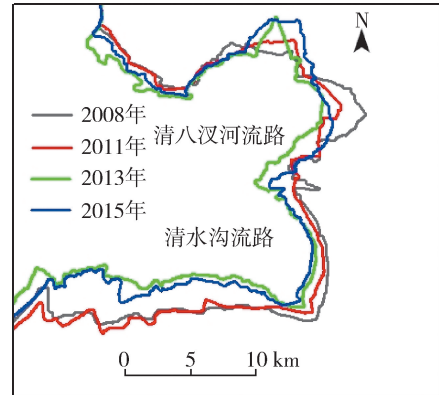
c. 入海口段。不同年份,沙嘴附近海岸线变化特征不同(图4)。1986—1997年,南部(清水沟流路)沙嘴明显向东淤积扩张;1996年,黄河人工向北改道清八汉河流路,1997年北部沙嘴开始形成。区域呈现先淤积后蚀退的趋势,1986—1989年,淤积面积达 34 km^2 ,平均淤积速率为 $11.3\text{ km}^2/\text{a}$,之后蚀退大于淤积,区域总面积变小。口门南侧区域蚀退严重,因此,尽管沙嘴逐年向海延伸,但从1986—1997年净淤积面积仅为 9 km^2 (图4(a),表2)。1999—2006年,黄河改道后,清水沟流路的海水侵



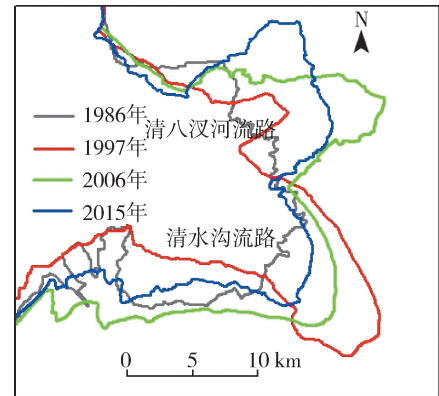
(a) 1986—1997年



(b) 1999—2006年



(c) 2008—2015年



(d) 1986—2015年

图4 1986—2015年入海口段海岸线变化
Fig.4 Coastline changes in current estuary during 1986—2015

蚀大于淤积,南部沙嘴逐渐退缩,行水河道的北部沙嘴快速向海淤积扩张,由于淤积侵蚀程度不同,沙嘴的方向略有变化;其间,沙嘴呈现逐年淤积的趋势,1999—2006年平均淤积速率达 $7.9\text{ km}^2/\text{a}$ (图4(b),表2)。2008—2015年,南部沙嘴进一步退缩,北部沙嘴继续淤积扩张,但淤积速率明显变慢,自2011年开始,北部沙嘴方向明显改变,整体方向由东向改为北向;区域呈现先蚀退后淤积的特征,但淤积远远弱于蚀退,整个区域面积减少 60 km^2 (图4(c),表2)。图4(d)表明了1986—2015年黄河入海口海岸线的整体变化情况,南部沙嘴先淤积扩张再退缩,北部沙嘴1997年开始形成,之后不断淤积扩张,但淤积速率逐渐变慢,且北部沙嘴的方向逐渐向北偏移。1986年以来,入海口段呈现先淤积后蚀退的态势,以2006年区域面积最大,之后退缩,总体上淤积大于蚀退,入海口段淤积面积达 58 km^2 (图4(d),表2)。

d. 莱州湾岸段。莱州湾岸段海岸线年间淤进与蚀退交替进行(图5),总体上为蚀退状态,蚀退面积达 44 km^2 (表2)。1986—1997年,海岸线逐年蚀退,平均蚀退速率达 $4\text{ km}^2/\text{a}$,蚀退幅度最大;1999—2006年,海岸线相对稳定,年间淤积面积略有变化;2008—2015年,海岸线呈现先淤进后蚀退的趋势,总体蚀退面积为 25 km^2 (表2)。

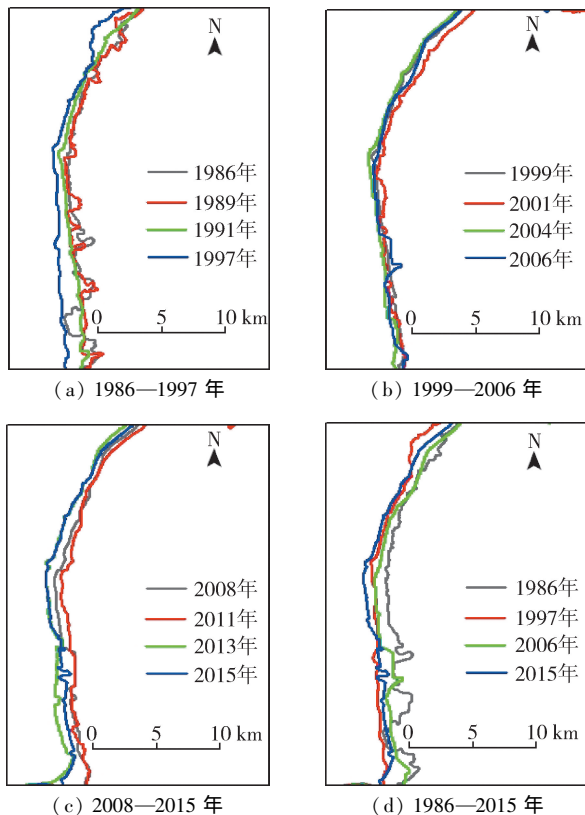


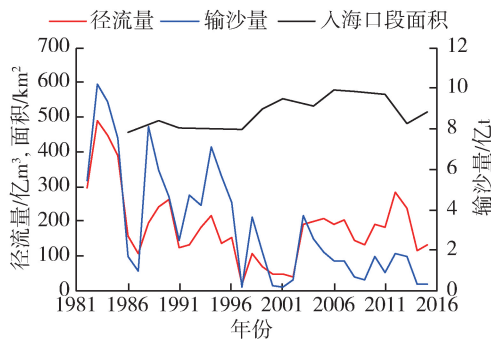
图5 1986—2015年莱州湾岸段海岸线变化

Fig. 5 Coastline changes in Laizhou Bay during 1986—2015

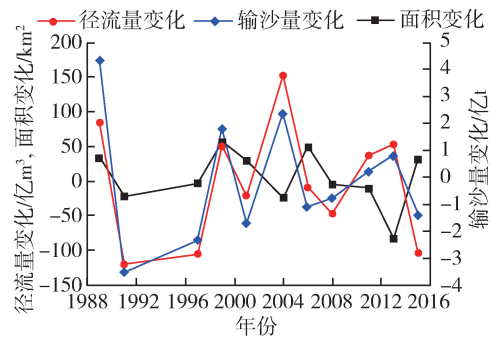
2.3 水沙条件对海岸线的影响

研究区内入海口段的面积变化与黄河入海水沙关系最为密切,且存在滞后效应,因此进行入海口段面积变化与水沙关系分析时,年径流量和输沙量的分析从1982年开始,以便更好地理解黄海入海水沙的累积影响。由图6(a)可知,利津站水沙年间波动剧烈,最大年径流量为491亿 m^3 (1983年),而最小年径流量仅为19亿 m^3 (1997年);最大年输沙量为10.2亿 m^3 (1983年),最小年输沙量为0.16亿 m^3 (1997年)。水沙变化趋势基本一致,总体均呈先减少后增加和丰枯交替的特征。1986—1997年,径流量和输沙量均为逐渐减少趋势,1997年两者均处在最低值,在径流量和输沙量不断减少的情况下,入海口段面积有所减小。1997—2006年,年径流量处于增加趋势,输沙量也是先增加后减少,其间入海口段面积不断增大,总体上淤积大于蚀退。2006年之后,水沙输入量年间交替变化,差异并不显著,入海口段面积也呈淤蚀交替的趋势。

为进一步明晰水沙变化与入海口段面积变化的关系,将不同年份的入海口段面积、径流量和输沙量分别与前一年份的数据进行对比,获得各年份的增加和减少情况如图6(b)所示。1989—2001年,黄河入海口段面积变化和径流量、输沙量的增减趋势一致;自2004年开始,入海口段面积的增减和径流量、输沙量的变化关系不明显。



(a) 径流量、输沙量和入海口段面积



(b) 径流量、输沙量和入海口段面积变化

图6 入海口段面积与黄河入海水沙的关系

Fig. 6 Relationship between the current estuary sub-region and the flow-sediment conditions entering into the sea

3 讨论

3.1 研究区面积变化

黄河泥沙淤积在海岸带造陆,海洋动力作用又不断侵蚀,黄河三角洲面积在河流泥沙淤积和海洋动力侵蚀的双重作用下不断发生变化。研究表明:20世纪90年代以前黄河三角洲面积增加大于减少,而之后则减少大于增加^[24],近年来海岸线的长度虽然发生了很大的变化,但总体面积并没有显著增长^[3,25];且1986—1995年淤积面积小于蚀退面积,三角洲处于蚀退状态,1996—2013年黄河三角洲总体呈现向海延伸的变化,陆地面积略微增加^[10]。本研究亦得到类似的结果,1986—2015年研究区面积缩小,整体处于轻微蚀退状态;但整个研究时段内面积变化规律大致如下:1986—1997年急剧蚀退,1997—2006年淤积后相对稳定,2006—2015年轻微蚀退。研究区的面积变化尤其是入海口段的面积变化与黄河入海径流量和输沙量关系密切。黄河入海水沙在20世纪80—90年代显著减少,尤其是1986年后,持续枯水少沙。据利津站水沙观测数据,1997年黄河断流长达202 d;1986—1997年淤积面积远远小于蚀退面积,研究区总面积急剧减少,到1997年达到最低值(表2)。自1999年流域实行统一水资源配置,2002年开始又实施调水调沙,入海水沙量增多,1997—2006年研究区面积有所增加。自2006年开始,黄河入海水沙量呈现减少趋势并且年间波动较大,相应时段内的研究区面积也出现轻微减少趋势。1989—2001年黄河入海口段面积增减与入海水沙增减趋势一致,但自2004年后,其关系并不显著(图6(b))。黄河自2002年开始实施调水调沙,入海水沙模式与之前有所不同,这是可能原因之一;同时,入海口的淤蚀变化涉及多方面的因素^[1],具体原因尚需进一步探讨。

3.2 海岸线变迁的时空异质性

黄河三角洲各海岸段的底质、地形、地貌、水动力学特征、冲淤状态等各有差别^[26],由此导致海岸线的演化具有明显的时空异质性。王苗苗等^[10]将东营市境内的岸段分为6个部分,分析了1979—2013年黄河三角洲海岸线变迁的时空异质性,本文根据岸段特点,将整个岸段分为4个部分,虽然用的数据年份不同,具体年份之间无法进行比较,但时段内的变化趋势基本一致。

a. 刁口段为蚀退型海岸,1976年黄河改道清水沟流路后,该岸段失去了水沙来源的有效补给,加之沉积物以粉砂为主,处于松散状态,稳定性差^[27],海洋动力的侵蚀导致海岸线极易发生蚀退。本文结

果表明,1986—1997年,刁口段面积大幅度蚀退,蚀退速率在所有时段中最高;1999—2006年,面积持续减少,但减少幅度降低;2008—2015年,海岸线轻微淤进。这与改道初期侵蚀较快、以后逐渐减缓的研究结论^[2,28-29]一致。另外,自2010年开始,黄河三角洲实施“生态补水”战略,刁口河流路恢复过水,生态补水的同时带来泥沙淤积,这也是近年来刁口段海岸线轻微淤进的原因。

b. 由于人工堤坝的修建,1986—2015年东营港及邻近岸段海岸线总体变化不大,面积基本稳定。1986年,港口和油田中间的海岸线呈自然状态,其他年份海岸线均为堤坝,这是因为1988年桩西油田建成之后,海岸线基本被固定下来^[1]。也有研究表明,受渤海冷流南下的影响,现行河口区域的入海水沙通过潮流和风力的作用很难输运到该区域而导致区域潮滩未出现淤积^[30]。由于海洋动力的作用,轻微的淤积和蚀退发生的区域仅出现在港口两侧。

c. 入海口段是研究期内变化最为剧烈的区域。1976年黄河改道清水沟流路,1986年之前属于改道初期,黄河入海水沙量大,行水河口在行水流路初期延伸较快^[30],该时段清水沟流路附近海岸线呈明显向海延伸变化,淤积面积最大,海岸线增长速率最快^[10]。1986—1997年,黄河入海水沙持续减少,尤其是1997年的持续断流,黄河入海水沙跌至低谷,这使得入海口门虽然继续向深水区延伸,但沙嘴两侧区域特别是沙嘴南侧受到海洋的动力作用,侵蚀程度不断增大,致使该区域面积呈微弱向海扩张的态势。1996年黄河入海口改道清八岔河流路后,北部逐渐形成沙嘴。1999—2006年,由于黄河水资源统一管理和调度政策以及调水调沙的实施,入海水沙增加,黄河入海年均径流量和年均输沙量分别为124.42亿 m^3 和1.57亿t。行水河口(清八岔河流路)不断淤积,老河口(清水沟流路)因失去水沙供应,海洋动力作用使其受到持续侵蚀。该区域总体呈淤积趋势,其面积较上一时期(1986—1997年)增加了114 km^2 。由于新形成的河口不断向海淤积、延伸和摆动,致使行水河道入海口方向不断变化,2009年开始,黄河入海口改道为偏北走向。2008—2015年,黄河入海年均径流量和年均输沙量分别为177.98亿 m^3 和1.01亿t,虽然年均径流量较上一时期(1999—2006年)增加,但输沙量却减少了36%。在海洋动力作用下,无水沙来源的清水沟流路进一步蚀退,清八岔河流路虽有淤积,但淤积速度较改道初期变缓,一是由于黄河来水来沙量减少,同时也可能与沙嘴附近的海域地形、潮流特点及泥沙的扩散方向等多种因素有关^[1],该区域总面积减少。

d. 莱州湾岸段在研究时段内(1986—2015年)面积略有减少。其面积变化趋势与入海口段类似,均在1997年最低,之后波动变化,2013年面积显著减少。这种变化一方面由于防潮岸堤的构建,使得海岸线的蚀退得到有效控制,面积变化较小;另一方面,该区域淤积的泥沙主要来自黄河入海口泥沙,黄河入海水沙减少时,该区域的泥沙来源同时减少,且黄河改道清八岔河流路后,输送到莱州湾岸段的泥沙减少。

4 结论

a. 1986—2015年,研究区内海岸线淤进与蚀退交替进行,总体处于轻微蚀退状态。面积变化规律大致为:1986—1997年持续蚀退,1997—2006年淤积后面积基本稳定,2006—2015年轻微蚀退。

b. 各岸段变化特征不同,刁口段海岸线先蚀退后淤进,总体上为蚀退状态;东营港及邻近岸段海岸线基本稳定;莱州湾岸段处于轻微蚀退状态;入海口段海岸线变化最为复杂,总体向海淤进延伸,行水河道不断淤积,非行水河道不断蚀退。

c. 研究区面积尤其是入海口段面积变化与黄河入海水沙关系密切,但淤蚀变化同时与海域地形、泥沙扩散方向等诸多因素有关,因此,面积变化与径流量、泥沙量变化并不完全一致。

参考文献:

[1] 何庆成,张波,李采. 基于RS、GIS集成技术的黄河三角洲海岸线变迁研究[J]. 中国地质,2006,33(5):1118-1123. (HE Qingcheng,ZHANG Bo,LI Cai. Monitoring the change of the coastline of the Yellow River Delta by integrating remote sensing(RS) and GIS[J]. Geology in China,2006,33(5):1118-1123. (in Chinese))

[2] 孙万龙,孙志高,卢晓宁,等. 黄河口岸线变迁对滩涂盐沼景观格局变化的影响[J]. 生态学报,2016,36(2):480-488. (SUN Wanlong,SUN Zhigao,LU Xiaoning, et al. Relationship between coastline changes and the landscape pattern heterogeneity of the salt marshes in the Yellow River Delta, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(2):480-488. (in Chinese))

[3] 王集宁,蒙永辉,张丽霞. 近42年黄河口岸线遥感监测与变迁分析[J]. 国土资源遥感,2016,28(3):188-193. (WANG Jining,MENG Yonghui,ZHANG Lixia. Remote sensing monitoring and change analysis of Yellow River Estuary coastline in the past 42 years[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2016,28(3):188-193. (in Chinese))

[4] 齐璞,齐宏海,田世民. 2000年以来黄河下游河道巨变与前景展望[J]. 水利水电科技进展,2013,33(6):23-

28. (QI Pu,QI Honghai,TIAN Shimin. Great changes on the Lower Yellow River channel since 2000 and future prospective[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(6):23-28. (in Chinese))

[5] ESMAIL M, MAHMOD W E, FATH H. Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite images and statistics: case study of Damietta coast, Egypt[J]. Applied Ocean Research, 2019, 82: 274-282.

[6] THOAI D T, DANG A N, OANH N T K. Analysis of coastline change in relation to meteorological conditions and human activities in Ca mau cape, Viet Nam [J]. Ocean and Coastal Management, 2019, 171: 56-65.

[7] 李静,张鹰. 基于遥感测量的海岸线变化与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 224-228. (LI Jing,ZHANG Ying. Analysis of coastline change based on remote sensing measurement [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(2): 224-228. (in Chinese))

[8] 李丹,王庆,徐洋,等. 基于地学信息图谱的河道、海岸线演变对黄河三角洲景观格局影响研究[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(6): 1220-1229. (LI Dan, WANG Qing, XU Yang, et al. Influence of river and coastline evolution on landscape pattern in the Yellow River Delta based on geoscience-information atlas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(6): 1220-1229. (in Chinese))

[9] 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. The shoreline migration and the delta changes study in the modern Yellow River Delta using remote sensing and GIS[J]. Marine Sciences, 2009, 33(5): 36-40. (in Chinese))

[10] 王苗苗,卢晓宁,孙志高,等. 1979—2013年黄河三角洲岸线变迁的时空异质性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(3): 185-192. (WANG Miaomiao, LU Xiaoning, SUN Zhigao, et al. The spatial and temporal heterogeneity of the coastline change in the Yellow River Delta from 1979 to 2013[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(3): 185-192. (in Chinese))

[11] 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.

[12] 徐美,李纪人,黄诗峰,等. 水沙环境改变下的黄河口变化遥感监测与分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 8-12. (XU Mei, LI Jiren, HUANG Shifeng, et al. Monitoring and analysis of variation in the Yellow River estuary based on remote sensing under the change of environment of flow and sediment [J]. Advances in Water Science, 2008, 19

- (1);8-12. (in Chinese))
- [13] CUI B L, LI X Y. Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976—2005) [J]. *Geomorphology*, 2011, 127: 32-40.
- [14] KONG D X, MIAO C Y, 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.
- [15] WU X, BI N S, XU J P, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River(Huanghe) Delta lobe (1976—2013); dominant roles of riverine discharge and sediment grain size [J]. *Geomorphology*, 2017, 292: 115-127.
- [16] 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. Coastline change detection of the Yellow River Delta by satellite remote sensing [J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(4): 99-106. (in Chinese))
- [17] 杨雷, 孙伟富, 马毅, 等. 近 10 年珠海海岸带海岸线时空变化遥感分析 [J]. *海洋科学*, 2017, 41(2): 20-28. (YANG Lei, SUN Weifu, MA Yi, et al. Remote sensing analyses of the spatial and temporal changes in Zhuhai shoreline [J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(2): 20-28. (in Chinese))
- [18] 巢子豪, 高一博, 谢宏全, 等. 1984—2012 年海州湾海岸线时空演变研究 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(6): 95-100. (CHAO Zihao, GAO Yibo, XIE Hongquan, et al. Study of temporal and spatial evolutions of coastline of the Haizhou Bay from 1984 to 2012 [J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(6): 95-100. (in Chinese))
- [19] 陈晓英, 张杰, 马毅, 等. 近 40 年来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析 [J]. *海洋科学*, 2015, 39(2): 43-49. (CHEN Xiaoying, ZHANG Jie, MA Yi, et al. Monitoring and analysis of coastline changes of the Sanmen Bay with remote sensing during the past 40 years [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(2): 43-49. (in Chinese))
- [20] MARFAI M A, ALMOHAMMAD H, DEY S, et al. Coastal dynamic and shoreline mapping: multi-sources spatial data analysis in Semarang Indonesia [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, 142(1/2/3): 297-308.
- [21] 吉祖稳, 胡春宏, 曾庆华, 等. 运用遥感卫星照片分析黄河河口近期演变 [J]. *泥沙研究*, 1994(3): 12-22. (JI Zuwen, HU Chunhong, ZENG Qinghua, et al. Analysis of recent evolution of the Yellow River estuary by landsat images [J]. *Journal of Sediment Research*, 1994(3): 12-22. (in Chinese))
- [22] 常军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系 [J]. *地理研究*, 2004, 23(3): 339-346. (CHANG Jun, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng, Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(3): 339-346. (in Chinese))
- [23] 刘勇, 黄海军, 刘艳霞, 等. 基于 RS 和 GIS 的近代黄河三角洲滩涂变化分析 [J]. *海洋科学*, 2012, 36(2): 82-87. (LIU Yong, HUANG Haijun, LIU Yanxia, et al. Changes of the tidal flat the modern Yellow River Delta based on RS and GIS [J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(2): 82-87. (in Chinese))
- [24] 王三, 侯杰娟. 基于遥感技术的黄河三角洲河口土地变迁研究 [J]. *西南农业大学学报*, 2002, 24(1): 86-88. (WANG San, HOU Jiejuan. Study of the changes of the land of the Yellow River Delta based on remote sensing technology [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(1): 86-88. (in Chinese))
- [25] WANG H J, BI N S, SAITO Y S, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea; causes and environmental implications in its estuary [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391: 302-313.
- [26] 田家怡, 王民, 窦洪云, 等. 黄河断流对三角洲生态环境的影响与缓解对策的研究 [J]. *生态学杂志*, 1997, 16(3): 39-44. (TIAN Jiayi, WANG Min, DOU Hongyun, et al. Studies of influence of the Yellow River cut-off on ecological environment and its countermeasures [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(3): 39-44. (in Chinese))
- [27] 杨中华, 王卫东, 马浩录. 遥感监测调水调沙对黄河河口尾间的影响 [J]. *水利水运工程学报*, 2006(3): 65-68. (YANG Zhonghua, WANG Weidong, MA Haolu. Influences of water and sand regulation on Yellow River estuary reach monitored by remote sensing [J]. *Hydroscience and Engineering*, 2006(3): 65-68. (in Chinese))
- [28] 何庆成, 叶晓滨, 张波, 等. 黄河三角洲油气聚集区地质环境评价与预测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2004: 18-21.
- [29] 彭俊, 陈沈良. 近 60 年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响 [J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1353-1362. (PENG Jun, CHEN Shenliang. The variation process of water and sediment and its effect on the Yellow River Delta over the six decades [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1353-1362. (in Chinese))
- [30] 赵庚星, 张万清, 李玉环, 等. GIS 支持下的黄河口近期淤、蚀动态研究 [J]. *地理科学*, 1999, 19(5): 442-445. (ZHAO Gengxing, ZHANG Wanqing, LI Yuhuan, et al. GIS supporting study on current siltation and erosion dynamic changes of Yellow River mouth [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(5): 442-445. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-06-28 编辑: 熊水斌)