

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020070101

三角洲废弃河道演化过程及受控机制 ——以黄河刁口废弃河道为例

吴晓^{1,2}, 范勇勇³, 王厚杰¹, 毕乃双¹, 徐丛亮³, 张勇⁴, 刘京鹏⁴, 卢泰安¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

3. 黄河河口海岸科学研究所, 东营 257000

4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要: 废弃河道是河流系统的重要组成部分, 其沉积记录蕴含了丰富的流域内构造活动、水文特征、海平面波动等环境变化的珍贵记录。然而相比内陆河废弃河道, 三角洲废弃河道的演化过程及机制研究尚显不足。1976 年黄河人工改道清水沟流路, 切断了刁口流路的河流水沙供给, 刁口流路逐渐废弃。通过 1976—2016 年的 Landsat 遥感影像、黄河水下三角洲测深资料和刁口流路河道高程测量数据, 探讨了黄河刁口流路废弃河道演化过程及其受控机制。结果表明, 刁口流路废弃 40 年来, 河口不断向岸蚀退, 河道长度逐渐萎缩, 但废弃河道沉积过程并未完全中止, 刁口流路 L7—L11 河段每年约有 10×10^4 t 泥沙不断充填废弃河道, 河道主槽高程抬升 0.3~2.0 m。海洋动力是废弃河道演化的关键动力机制, 波浪对刁口流路三角洲的冲刷为废弃河道充填提供了重要的物源, 潮流携带悬浮泥沙回淤废弃河道, 为其提供了直接泥沙供给。

关键词: 废弃河道; 刁口流路; 地貌演化; 黄河三角洲

中图分类号: P736.11

文献标识码: A

Evolution of abandoned deltaic river channel—A case from the Diaokou channel of the Yellow River

WU Xiao^{1,2}, FAN Yongyong³, WANG Houjie¹, BI Naishuang¹, XU Congliang³, ZHANG Yong⁴, LIU Jingpeng⁴, LU Taian¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics (Second Institute of Oceanography, SOA), Hangzhou 310012, China

3. Institute of the Yellow River Estuarine and Coastal Science, Dongying 257000, China

4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

Abstract: Abandoned channels are one of the major components of a deltaic system, which contains valuable information related to tectonism, hydrology, sea-level fluctuation and environmental changes of the catchment. Comparing to the study of filling process of abandoned channels on land, which are well studied in the past decades, little research has been devoted to the tidal-dominated abandoned channels. The Diaokou River channel was fully abandoned in 1976 by an artificial construction separating it from the main course of the Yellow River. With the support of landsat images, bathymetric surveys and elevation data of the abandoned Diaokou River channel, the evolution of this tide-dominated abandoned channel is documented in this study. Since abandonment, about 0.3~2.0 meters of filling sediment have deposited in the channel, with along-channel and landward decrease in sedimentation. Marine dynamics is the main force to control the evolution of abandoned channels. The severe erosion near the abandoned channel mouth, as a source of sediments, has made the channel shortening gradually.

Key words: abandoned river channel; Diaokou course; geomorphological evolution; Yellow River delta

河流是自然界最广泛、最活跃的地形塑造因子之一, 在河道演变过程中, 整条河道或某一河道丧

失了作为地表水通行路径的功能时, 逐渐转为废弃^[1]。作为曲流河沉积体系的重要组成端元之一, 废弃河

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄河口流路演变过程的动力机制及流路稳定的指标体系”(2017YFC0405502), “大型水库调控下河口沉积动力过程及其生物地球化学效应”(2016YFA0600903); 国家自然科学基金项目“黄河口沉积对黄河调水和调沙过程的差异性响应机制”(41806101), “海洋地质过程与环境”(U1706214); 山东省自然科学基金“现行黄河三角洲叶瓣废弃河道的充填过程及其受控机制”(ZR2018BD028); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放课题“黄河人造洪峰期间河口沉积动力过程及地貌效应”(QNHX1607)

作者简介: 吴晓(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事河口海岸学研究, E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-07-01; 改回日期: 2020-07-31. 文凤英编辑

道是河流在流域内迁徙演化的地貌证据,其与主河道一起构成了河流沉积体系的沉积骨架^[2]。废弃河道沉积序列是古地理环境记录的良好载体,可以用来反演古河流流量波动与动力变化^[3]、古洪水强度与频率^[4]以及气候变化和人类活动影响下的河流体系变迁^[5]。同时,作为油气藏和地下水的良好储层^[6],废弃河道演化过程及其受控机制的研究不仅具有重要的科学意义,也具有一定的经济价值。

黄河以其“多淤善徙”著称世界,在世界大河中特色显著,为研究废弃河道演化提供了理想靶区。自1855年在铜瓦厢(河南兰阳)决口夺大清河入渤海以来,大量泥沙堆积在陆上三角洲地区,抬高河床,河道泄洪排沙能力降低,自然堤坝和人工堤坝无法制约河流蔓延,尾间河道变迁频繁。据史料记载和调查结果统计,1855年以来黄河决口改道50余次,其中较大规模改道10次^[7],每条流路的行水时间平均只有十余年。最近一次的大规模尾间河道变迁发生在1976年,刁口流路废弃,河水东流经清水沟流路入海。改道事件切断了刁口流路河流水沙的直接供给,波浪和潮汐作用成为该区地貌

演化的主要动力机制^[8]。刁口三角洲叶瓣由原来的快速向海淤进转为向岸侵蚀,水下三角洲遭受强烈冲刷^[9]。前人虽然对刁口流路废弃后陆上三角洲和水下三角洲冲淤演化开展了大量工作,但缺乏对刁口流路废弃河道演化过程及其受控机制的研究。本文以改道年代确定、自然保存完好的刁口流路废弃河道作为研究对象,围绕废弃河道演化过程和控制机制开展研究,对于深入理解平原三角洲“改道型”废弃河道的演化和机制、丰富废弃河道发育演化的沉积学理论具有十分重要的意义。

1 研究区概况

1964年1月,在罗家屋子(渔洼东北)人工破堤分流,黄河经刁口流路注入渤海湾。改道后黄河漫流向北,形成宽浅的游荡型河道和两条不稳定的分流,至1967年支汊归并,形成单一稳定的河道,向海突出。1976年黄河在西河口(渔洼东北)人工截流,经清水沟流路入海(图1)。从1964年1月黄河改道北上,到1976年5月废弃,刁口流路共行水

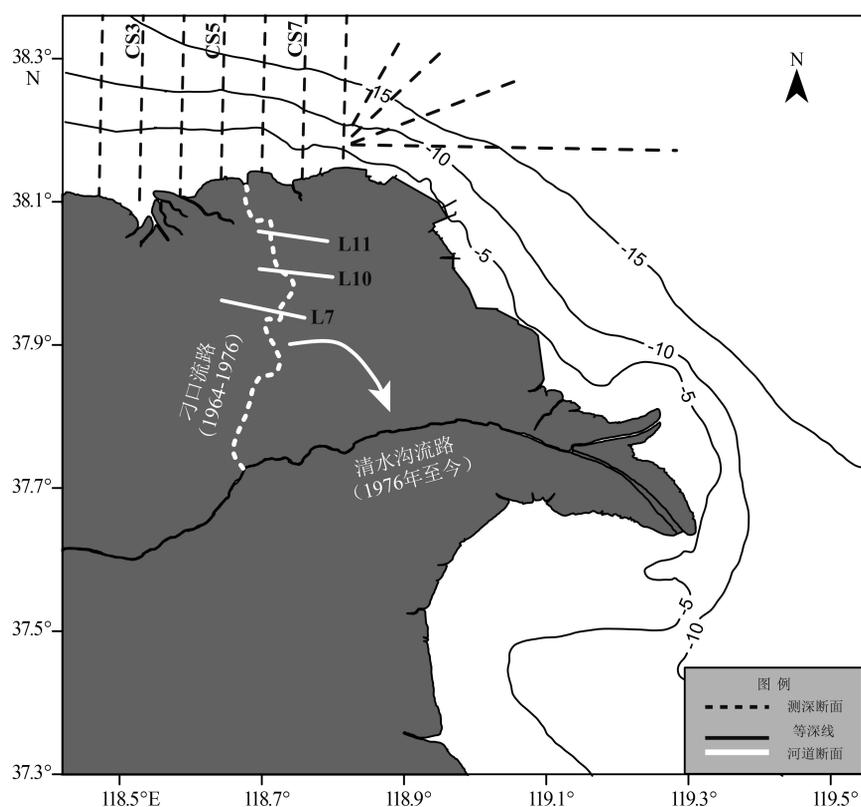


图1 研究区域位置图

白色实线(L7—L11)为河道测量断面,黑色虚线为水下三角洲测深断面,黑色实线为等深线。

Fig.1 Map of study area with survey sections

The white lines indicate the cross-sections of the Diaokou river channel, and the black dash lines indicate bathymetric sections.

The black lines indicate the water depth.

12年5个月,平均每年入海泥沙11亿t,其中超过71亿t泥沙在河口处快速堆积,塑造了刁口三角洲叶瓣^[10]。由于水沙供应断绝,废弃后刁口三角洲叶瓣及其水下岸坡在海洋动力的作用下发生快速调整^[9]。

研究区位于渤海湾南岸,气候条件主要受东亚季风的影响,具有典型的季节性特征:夏季盛行东南风,冬季多为西北风。研究区的波浪主要为风浪,在季风的影响下,季节变化显著:夏半年以东向、东南向浪为主,波高较小;冬半年以北向浪为主,其中东北向浪频率最高,波高显著高于夏半年^[11]。刁口河口为弱潮河口,潮汐由河口东侧无潮点的全日潮向不规则半日潮过渡,潮汐振幅由无潮点向两侧逐渐增大。研究区余流以风生流为主,夏半年东南风驱动表层余流向北流动,冬半年西北风驱动表层余流向南流动,底层余流为补偿流^[12]。

2 资料与方法

本文选取1976—2016年每五年合计9景陆地卫星Multi-Spectral Scanner(MSS)影像和Thematic Mapper(TM)影像(<http://glovis.usgs.gov/>)(表1),用以分析探讨1976年黄河末次尾间改道以来岸线及刁口流路河道长度变化特征。利用Landsat影像提取的岸线误差仅为一个象元左右^[13],岸线提取方法采用的是Alesheikh等2007年^[14]提出的基于直方图阈值和波段比的海岸线提取方法,将遥感影像的不同波段经过直方图阈值化和波段比处理后,将分别取得的二元图像叠附后获得的海陆界线能够较为准确地反映海岸线特征。

表1 使用卫星影像的时序特征
Table 1 Information of satellite images

| 序号 | 成像时间 | 数据类型 | 波段数 | 空间分辨率 |
|----|---------|------|-----|-------|
| 1 | 1976.06 | MSS | 4 | 80 |
| 2 | 1981.06 | MSS | 4 | 80 |
| 3 | 1986.06 | TM | 7 | 30 |
| 4 | 1991.09 | TM | 7 | 30 |
| 5 | 1996.09 | TM | 7 | 30 |
| 6 | 2001.06 | ETM | 7 | 30 |
| 7 | 2006.06 | ETM | 7 | 30 |
| 8 | 2011.09 | ETM | 7 | 30 |
| 9 | 2016.08 | ETM | 7 | 30 |

此外,本文系统收集了黄河河口海岸科学研究所1976年和2016年刁口流路的河道地形测量数据(图1),河道断面长度为10.5~11.8 km,测点间距为1~100 m,高程测量精度为厘米级,两次地形测量数据均已按照1985国家高程基准进行转换作为对比研究。本文同时收集了1976年和2016年刁口流路水下三角洲的测深资料,用以探讨刁口流路废弃后水下三角洲冲淤格局转换及其对河道充填的影响。测深断面从近岸延伸至20 m等深线位置,基本覆盖整个刁口流路水下三角洲区域(图1),所有水深数据均进行了声速校正和潮汐改正,并以黄海平均海平面为基准进行了统一转换。

3 结果与讨论

3.1 废弃河口岸线及废弃河道长度变化

1976年黄河人工改道清水沟流路,切断了刁口流路黄河入海水沙的直接供给,在海洋动力作用下,刁口三角洲叶瓣结束了向海快速淤进的时期,开始进入全面蚀退阶段。1976—2016年刁口河口附近岸线变化如图2所示,改道初期,1976年至1986年间,海岸线大范围向岸蚀退,蚀退幅度较大,刁口三角洲叶瓣陆地面积蚀退速率达到 $25.5 \text{ km}^2/\text{a}$ ^[15];同时,该阶段河道由废弃前快速向海延伸转为快速萎缩,1976—1981年、1981—1986年刁口废弃河道向岸蚀退速率分别高达 764.6 m/a 和 402.0 m/a (图2);此后,刁口流路岸线和废弃河道向陆蚀退规模和速率开始减缓,1986—1991年、1991—1996年刁口废弃河道向岸蚀退速率由前一阶段的 402.0 m/a 降至 $188.8 \sim 209.8 \text{ m/a}$;1996—2006年岸线蚀退幅度继续降低,废弃河道向岸蚀退速率降至 $63.0 \sim 71.2 \text{ m/a}$;近十年来(2006—2016年),刁口河口附近岸线有进有退,但是总体上仍表现为缓慢蚀退的特征,废弃河道向岸蚀退速率进一步降低,仅为 $13.7 \sim 17.7 \text{ m/a}$ 。

3.2 废弃河口水下三角洲冲淤变化

刁口流路废弃后,河流水沙供应中断,海洋动力引起了水下三角洲的大规模重塑。刁口河口水下三角洲由上一阶段的强烈淤积中心^[9]转为冲刷区(图3)。废弃40年后,刁口流路水下三角洲刷深强烈,冲刷中心基本与行河时期的水下淤积中心相对应,最大侵蚀区域发生在原刁口河口外,侵蚀厚度达到15 m以上,冲刷速率高达 0.4 m/a 。随着水下

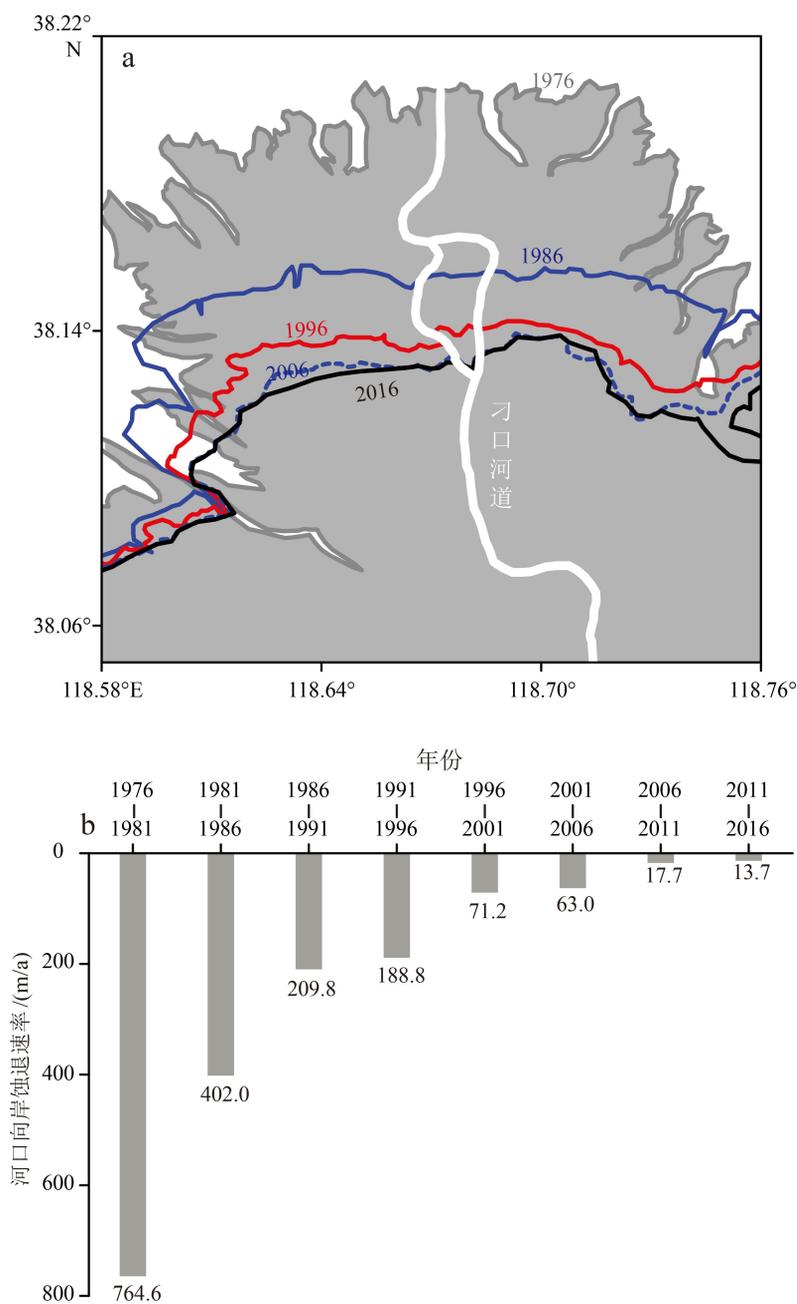


图 2 1976—2016 年刁口叶瓣岸线变化图 (a) 及刁口河口向岸蚀退速率 (b)

Fig.2 (a) Shorelines extracted from the remote sensing images in different years (1976, 1986, 1996, 2006 and 2016); (b) erosion rates of abandoned Diakou river mouth.

三角洲不断重塑, 刁口流路外海水下岸坡形态也发生显著调整(图 4)。刁口流路废弃前, 三角洲前缘和前三角洲之间的地貌界线清晰, 水下岸坡坡度在水深 8 m(CS3 断面)和水深 12 m(CS5 和 CS7 断面)处存在明显转折点。转折点以上, 岸坡坡度较大, 约为 1.6%~3.1%, 向海坡度明显减缓至 0.4%左右。废弃后, 水下岸坡经海洋动力的改造作用, 水下地貌特征发生显著变化, 三角洲前缘不断刷深, 部分区域刷深幅度高达 8 m 左右; 深水区域冲刷幅度不大, 由于近岸冲刷的泥沙向深水区运移^[1], 在部分

位置甚至出现少量淤积, 但总体上仍表现为缓慢冲刷的特征, 冲刷深度不足 1 m。经过海洋动力 40 年的重塑, 三角洲前缘和前三角洲之间的坡度转折已几乎不见, 水下岸坡整体变化平缓, 坡度降为 0.6%左右。

3.3 刁口废弃河道冲淤演化

与刁口三角洲叶瓣整体转为蚀退不同, 虽然 1976 年刁口流路废弃后切断了黄河水沙的直接供给, 但刁口废弃河道的沉积过程并未完全中断。1976 年与 2016 年河道测量断面 L7、L10、L11(图 5)

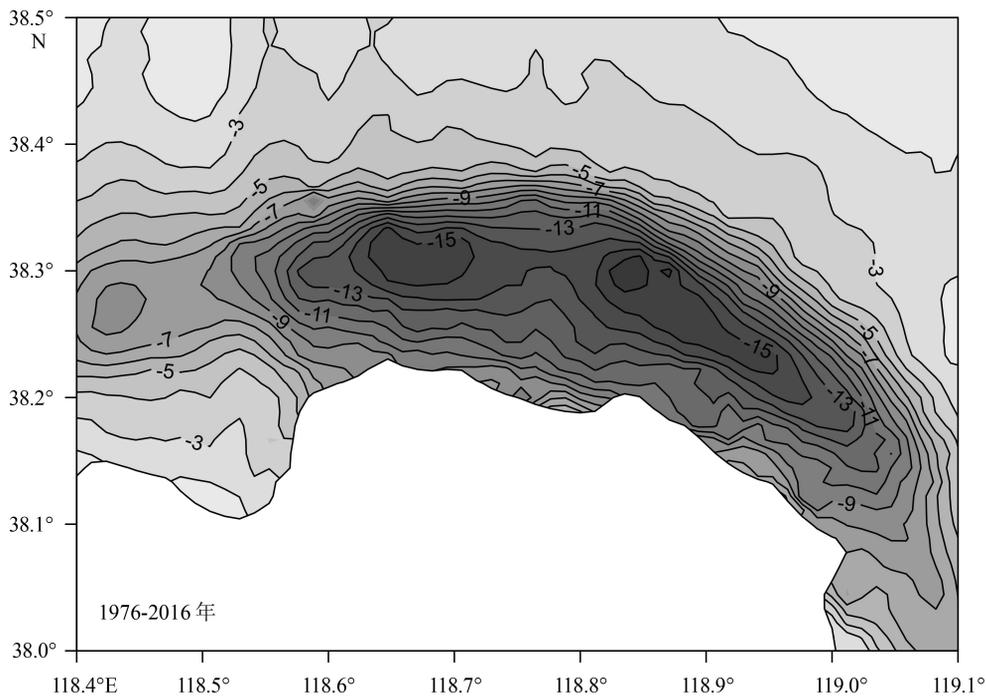


图3 1976—2016年刁口水下三角洲冲淤变化

Fig.3 Spatial variation of accumulation-erosion pattern of the Diaokou subaqueous delta from 1976 to 2016

的对比显示,过去的40年刁口废弃河道仍在不断接受沉积。L7断面河流主槽平均高程由1976年的0.5 m左右抬升至2.5 m左右,淤积面积约为172 m²。L10断面主槽最低高程由1976年的接近0 m抬升至2016年的0.7 m,主槽平均高程由0.3 m抬升至1.3 m,断面淤积面积约为245 m²。L11断面主槽最低高程由1976年的接近1.6 m抬升至2016年的1.9 m,断面总淤积面积约为314 m²。结合断面间距,1976年至2016年刁口流路废弃以来,仅L7—L11断面淤积2.9×10⁶ m³的泥沙,且由岸向海淤积面积逐渐增加,按刁口流路泥沙平均干容重1360 kg/m³计算^[10],刁口河道废弃40年来,L7—L11河道断面11.9 km长的废弃河段淤积泥沙390×10⁴ t,平均每年淤积泥沙量10×10⁴ t左右。刁口流路废弃河道总长度约为57.1 km,若以L7—L11断面淤积速率作为废弃河道平均充填速率进行换算,废弃河道每年接受泥沙量约为46.8×10⁴ t。需要指出,由于废弃河道充填量由海向陆逐渐降低,在现有断面数量下该估算值可能相比实际淤积量较高,需要更多的断面或钻孔资料进一步厘定。近年来流域内人类活动和气候变化影响下黄河入海泥沙量急剧降低,2017年全年黄河入海泥沙仅为770×10⁴ t,仅刁口流路一条废弃河道充填量约为黄河入海沙量的0.6%,考虑到现代黄河三角洲废弃河道众多,废弃河道充填在黄河入海沉积物“源-汇”过程

中扮演的角色应当引起进一步的重视。

3.4 海洋动力及其对废弃河道演化的控制作用

刁口流路废弃后失去了黄河泥沙的直接补给,汛期大量黄河入海泥沙出清8汉后主要以羽状流的形式扩散,由于黄河口切变峰的阻隔以及河口垂向环流的捕获作用,入海泥沙在现行河口口门附近快速沉降^[6],难以运移至刁口流路外海。海洋动力成为该区地貌演化的主控因素。

波浪在浅水区域的作用及其导致的底剪切力是废弃刁口叶瓣岸线演化和水下岸坡再造的主要驱动力^[11]。波浪的扰动、破碎和发生频率是影响波浪掀沙的主要因素,通常来说,波高越大、破碎深度越深、破碎频率越高的地方,波浪掀沙的范围和幅度越显著^[7]。同时,岸线走向与波向之间的相对关系也显著影响着波浪的掀沙过程。刁口废弃河口外波浪以风浪为主,夏半年主要受东南风控制,常浪向为NE和SE向,频率分别为16.6%和15.6%,波高相对较小;冬半年主要受西北风控制,常浪向为NE向和NW向,出现频率分别为33.1%和13.0%,浪高较高^[11]。刁口三角洲叶瓣海岸线总体呈现E-W走向,118.5°E以东呈WNW-ESE走向,118.5°E以西呈WSW-ENE走向,其岸线走向均面对常浪和强浪向,从而加大了海岸受波浪侵蚀的频率和强度^[17]。因此,刁口流路废弃后,岸线向岸蚀退明显,废弃河

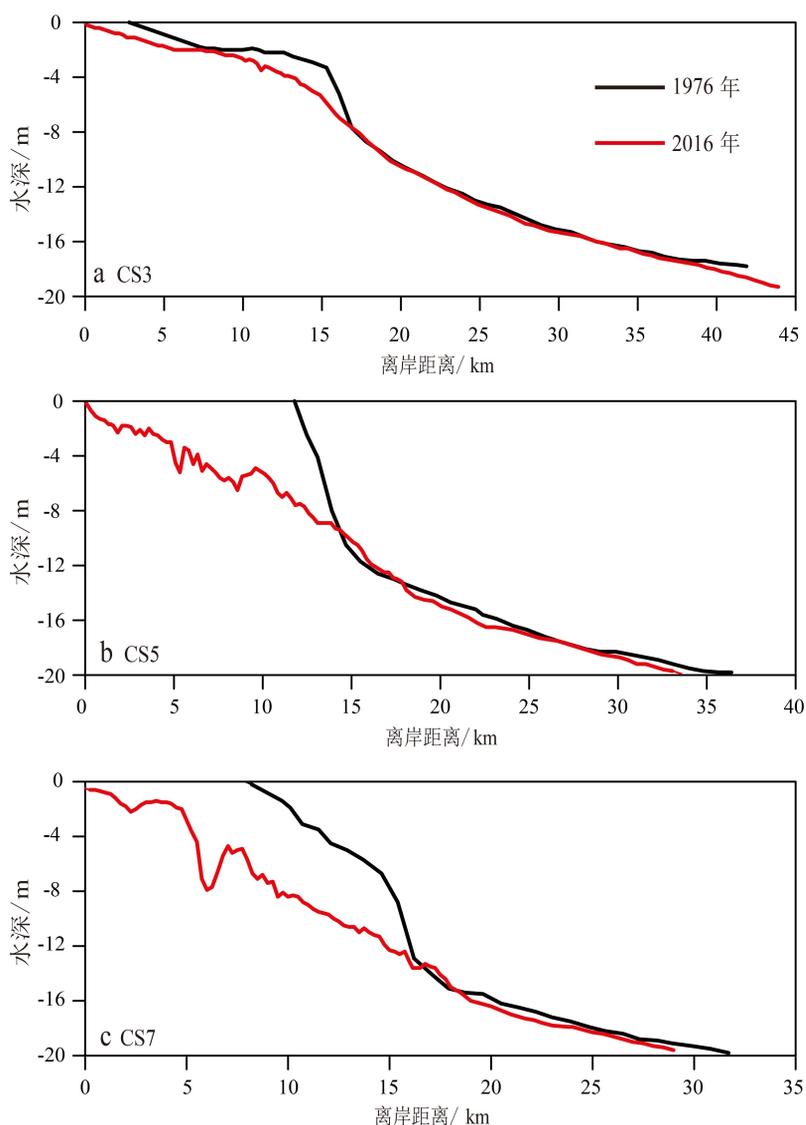


图 4 1976—2016 年刁口水下三角洲 CS3、CS5 和 CS7 断面深度变化
断面位置见图 1。

Fig. 4 Bathymetric changes of subaqueous slope from 1976 to 2016 at three cross-shore transects along the Diaokou delta lobe (a) CS3, (b) CS5 and (c) CS7.

See Fig. 1 for locations of cross-shore transects.

道长度不断缩短(图 2)。此外, NE 向强浪向浅水区域传输过程中发生破碎, 大部分能量耗散在浅水区域。前人的研究表明, 刁口废弃河口外 0~2 m 水深地带为波浪的高频破碎带, 破碎频率高达 87.2%; 2~6.5 m 为低频破碎带, 破碎频率 12.3%; 6.6 m 以深区域, 破碎频率降至 0.5% 以下^[17]。波致底剪切力由深水区域的 0.03 N/m² 急剧增加至三角洲前缘处的 0.25 N/m², 在浅水区域形成高剪切应力区^[11]。同时, 河口区域人类工程活动的修建, 也进一步改变了废弃河口区域的动力环境。比如, 1995 年在刁口流路废弃河口为采油活动修建的公路路堤, 导致废弃河口水动力条件发生变化, 加剧了该区的岸滩

侵蚀^[18]。强烈的波浪掀沙过程不断刷深和重塑水下三角洲岸坡, 导致原来较陡的三角洲前缘逐渐趋于平缓(图 4)。

刁口河口外海为往复性半日潮流, 潮周期内涨落潮流速与历时很不对称, 涨潮流流速为 55~70 cm/s, 落潮流流速 50~70 cm/s, 涨落潮历时相差 20 分钟左右^[17]。刁口河口口门向北, 流路废弃后, 涨潮过程中失去了径流的顶托作用, 潮流携带悬浮泥沙更容易回潮河道, 上涌过程中由于底摩擦, 流速降低, 挟沙能力下降, 悬浮泥沙逐渐落淤^[18]。波浪掀沙造成刁口三角洲的显著蚀退为刁口流路废弃河道充填提供了重要的泥沙来源, 涨落潮流速、历时和悬

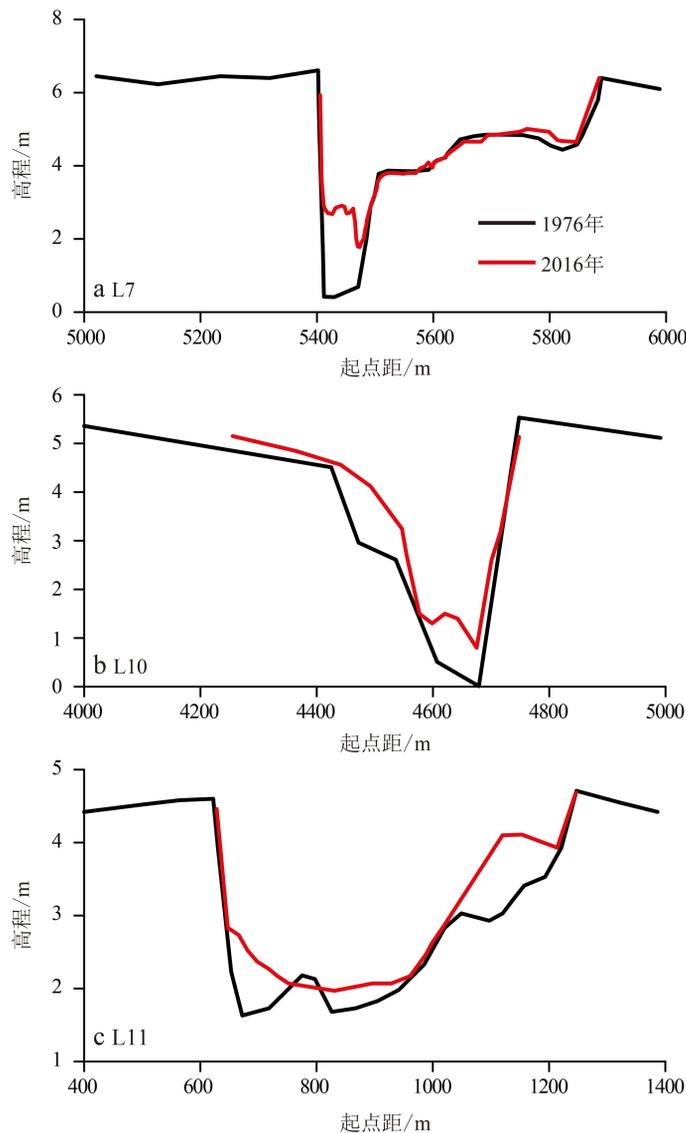


图5 1976—2016年刁口废弃河道L7(a)、L10(b)和L11(c)断面高程变化
断面位置见图1。

Fig.5 Elevation changes of abandoned Diaokou River channel from 1976 to 2016 at three cross-sections: (a) L7, (b) L10 and (c) L11

See Fig. 1 for locations of cross-sections.

沙浓度的不对称性成为悬浮泥沙向岸输运并充填废弃河道的关键动力机制。因此,尽管1976年黄河改道清水沟流路后,切断了刁口流路黄河泥沙的直接供给,但废弃河道的沉积过程并未完全停止,仍以 $0.8\sim 2.0\text{ cm/a}$ 的平均沉积速率继续接受沉积。对清水沟流路1996年的研究显示,相比行水阶段,河道废弃后充填泥沙粒径相对更细,有机碳含量更高,且海洋植物贡献增加明显^[19-20]。

4 结论

本文通过系统收集的多年Landsat卫星遥感影像、黄河水下三角洲测深断面和刁口流路河道测量

断面,研究了黄河刁口流路1976年废弃以来河道演化过程,探讨了刁口废弃河道演化的受控机制。结果表明,刁口流路废弃后,黄河入海水沙的直接供应被切断,在海洋动力的作用下,刁口流路岸线不断向岸蚀退,废弃河道长度逐渐萎缩,到2016年废弃河口向岸蚀退8.7 km,随时间推进蚀退速率逐渐减缓,由1976—1981年的 764.6 m/a 降低至2011—2016年的 13.7 m/a 。但改道后废弃河道的沉积过程并未完全中断,1976年和2016年的河道测量断面对比显示L7—L11断面河流主槽平均高程抬升 $0.3\sim 2.0\text{ m}$,断面淤积面积 $245\sim 314\text{ m}^2$ 。刁口流路废弃40年来,仅L7—L11河段淤积泥沙 $390\times 10^4\text{ t}$,平均每年淤积泥沙量 $10\times 10^4\text{ t}$ 左右。海洋动力是控

制刁口流路废弃河道演化的关键因素,波浪掀沙造成底床泥沙的再悬浮为刁口流路废弃河道充填提供了物源,潮流携带悬浮泥沙回溯废弃河道,为其提供了泥沙供给,废弃河道逐渐被充填。考虑到黄河改道频繁,现代黄河三角洲存在众多废弃河道,废弃河道在河流入海沉积物“源-汇”过程及收支估算中所扮演的角色不可忽视,需要进一步的研究和估算。

参考文献 (References)

- [1] 吴忱,朱宣清,许清华,等. 华北平原古河道研究论文集[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 49-235. [WU Chen, ZHU Xuanqing, XU Qinghua, et al. Collected Papers on Palaeochannel in the North China Plain [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991: 49-235.]
- [2] 张本华. 曲流河储层构型中废弃河道的识别及其分布模式——以孤岛油田馆上段为例[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 18-21, 25. [ZHANG Benhua. Discussion on abandoned channels recognition and distribution models on meandering river reservoir architecture research-case study of upper member of Guantao formation in Gudao oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 18-21, 25.]
- [3] Page K J, Nanson G C. Stratigraphic architecture resulting from Late Quaternary evolution of the Riverine Plain, south-eastern Australia [J]. *Sedimentology*, 1996, 43(6): 927-945.
- [4] Macklin M G, Lewin J. River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2003, 18(2): 101-105.
- [5] Stouthamer E, Berendsen H J A. Factors controlling the Holocene avulsion history of the Rhine-Meuse delta (The Netherlands) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(5): 1051-1064.
- [6] 刘波,赵翰卿,王良书,等. 古河流废弃河道微相的精细描述[J]. 沉积学报, 2011, 19(3): 394-398. [LIU Bo, ZHAO Hanqing, WANG Liangshu, et al. The detailed description of ancient fluvial abandoned channel Micro-facies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 19(3): 394-398.]
- [7] 马妍妍. 现代黄河三角洲海岸带环境演变[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2008. [MA Yanyan. Evolution of modern Yellow River delta coastal environment [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2008.]
- [8] Li G X, Zhang K L, Wei H L. Sedimentation in the Yellow River delta. Part III. Seabed erosion and diapirism in the abandoned subaqueous delta lobe [J]. *Marine Geology*, 2000, 168(1-4): 129-144.
- [9] 刘勇,李广雪,邓声贵,等. 黄河废弃三角洲海底冲淤演变规律研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 27-34. [LIU Yong, LI Guangxue, DENG Shenggui, et al. Evolution of erosion and accumulation in the abandoned subaqueous delta lobe of the Yellow River [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 27-34.]
- [10] 师长兴,章典,尤联元,等. 黄河口泥沙淤积估算问题和方法——以刁口河三角洲为例[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 49-59. [SHI Changxing, ZHANG Dian, YOU Lianyuan, et al. A study of sediment budget of the Yellow River delta: the case of Diaokouhe lobe [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 49-59.]
- [11] 王厚杰,原晓军,王燕,等. 现代黄河三角洲废弃神仙沟-刁口叶瓣的演化及其动力机制[J]. 泥沙研究, 2010(4): 51-60. [WANG Houjie, YUAN Xiaojun, WANG Yan, et al. Evolution of the abandoned Shenxiangou-Diaokou delta lobe: processes and mechanism [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 51-60.]
- [12] 董年虎,王广月. 渤海湾黄河入海口区余流特性分析[J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(1): 64-69. [DONG Nianhu, WANG Guangyue. Residual current analysis of the Yellow River mouth area in Bohai Gulf [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 1997, 15(1): 64-69.]
- [13] Fan H, Huang H J. Spatial-temporal changes of tidal flats in the Huanghe River Delta using Landsat TM/ETM+ images [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(3): 366-374.
- [14] Alesheikh A, Ghorbanali A, Nouri N. Coastline change detection using remote sensing [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2007, 4(1): 61-66.
- [15] 刘玲,李广雪,李季. 黄河三角洲刁口叶瓣河道与岸线演化分析[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(6): 1-6. [LIU Ling, LI Guangxue, LI Ji. Evolution of river channel and shoreline of the Diaokou Lobe of Yellow River delta [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(6): 1-6.]
- [16] Wu X, Bi N S, Yuan P, et al. Sediment dispersal and accumulation off the present Huanghe (Yellow River) delta as impacted by the Water-Sediment Regulation Scheme [J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 126-138.
- [17] 黄波. 黄河三角洲刁口河海岸侵蚀过程时空演变与防护对策研究[D]. 北京林业大学博士学位论文, 2015. [HUANG Bo. Spatial-temporal evolution of erosion process and protective countermeasures research for Diaokou River Coastline in Yellow River delta [D]. Doctor Dissertation of Beijing Forestry University, 2015.]
- [18] Jia Y G, Zheng J W, Yue Z Q, et al. Tidal flat erosion of the Huanghe River Delta due to local changes in hydrodynamic conditions [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 116-124.
- [19] 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: 106116.
- [20] Li Z Y, Wang H J, Nittrouer J A, et al. Modeling the infilling process of an abandoned fluvial-deltaic distributary channel: An example from the Yellow River delta, China [J]. *Geomorphology*, 2020, 361: 107204.