

# 黄河三角洲孤东近岸冲淤演变及其影响因素

程 慧<sup>1</sup>, 陈沈良<sup>1</sup>, 徐丛亮<sup>2</sup>, 姬泓宇<sup>1</sup>, 凡姚申<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 黄河河口海岸科学研究所, 山东 东营 257000)

**摘要:** 为更好地了解近 40 年来孤东近岸的演变过程, 以研究区剖面水深地形、Landsat 影像和利津站水沙数据为数据源, 采用遥感技术及数理统计法对研究区域岸线及面积变化进行监测计算, 并分析 1976—1986 年、1986—1996 年、1996—2002 年、2002—2014 年 4 个不同阶段的冲淤演变及影响因素。结果表明: (1) 孤东近岸经历“强淤积-冲淤平衡-侵蚀-强侵蚀”4 个阶段。孤东近岸海域由淤积向侵蚀转变始于 1996 年, 且在 2002—2014 年间侵蚀最为严重, 大部分近岸海域蚀深达到 6~8 m, 侵蚀最大深度超过 8 m; (2) 等深线变化时空差异明显, 蚀退最先出现在北侧, 且近岸 5 m 水深区域内冲淤变化较水深 10 m 内敏感; (3) 研究区近岸侵蚀, 离岸淤积, 剖面冲淤平衡位置由 CS19 剖面的 11 m 水深变化到 CS21 剖面的 5 m 水深; (4) 黄河入海水沙的减少、河口人工改汉、孤东大堤建设和海洋动力作用都对孤东近岸的冲淤演变产生影响, 维持研究区冲淤平衡的年均来沙阈值为 3.78 亿 t/a。通过此来进一步探究孤东近岸演变进程, 为孤东近岸防护提供科学指导。

**关键词:** 黄河三角洲; 孤东近岸; 冲淤演变; 入海水沙; 河口改汉

**中图分类号:** TV148.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)11-0011-08

**DOI:** 10.11759/hyxx20180917001

黄河是世界级大河之一, 素以高浓度泥沙入海闻名于世。现代黄河三角洲是由黄河 1855 年自河南铜瓦厢决口夺大清河入海所形成, 以宁海为顶点, 西起套尔河口, 南至支脉沟口的多流路瓣状堆积体叠置而成的复合三角洲<sup>[1]</sup>。黄河三角洲地区拥有大量的土地与油气资源, 是我国重要的粮食产区和产油区, 区域建设发展具有巨大的社会效益。但黄河三角洲由于尾闾河道变动频繁, 导致其近岸海域是一个极为动态变化的区域, 这对三角洲沿岸的生产生活带来显著的影响。加之近年来, 受强烈的人类活动干预、入海水沙急剧减少、气候变化及海洋动力作用等多重耦合作用的影响<sup>[2-6]</sup>, 黄河三角洲近岸海域冲淤演变呈现出新的格局。

对于黄河三角洲近岸演变方面, Ji 等<sup>[7]</sup>分析了新水沙情势下黄河口附近地形演变, 发现现行河口附近淤积, 而孤东沿岸区域侵蚀; Fan 等<sup>[8]</sup>分析调水调沙以来三角洲岸线动态发现冬季现行流路河口三角洲发生侵蚀; Jiang 等<sup>[9]</sup>分析在人类活动和自然条件的共同影响下, 黄河三角洲在不同阶段呈现不同的演变格局。孤东近岸作为黄河三角洲冲淤变化的典型区域, 对该海域的冲淤演变, 已有许多学者做过相应的研究。如, 崔玉刚等<sup>[10]</sup>通过剖面监测发现孤东

及新滩海域在近岸水深 10 m 内出现冲刷, 并在孤东海堤附近侵蚀尤为严重; 陈小英等<sup>[11]</sup>从动力地貌角度描述孤东近岸冲淤过程, 发现孤东近岸呈蚀退状态, 水深下蚀明显; 李向阳等<sup>[12]</sup>利用孤东海域波浪、潮汐潮流等动力数据分析发现海洋动力对孤东近岸冲淤影响强烈; 彭俊等<sup>[13]</sup>通过对入海沙量数据的分析发现孤东近岸冲淤演变对于入海沙量变化响应敏感; 程义吉等<sup>[14]</sup>通过孤东海域剖面资料发现浅水区侵蚀后退, 深水区淤积抬高, 侵蚀最大区域出现在浅水区。但以往研究对于孤东近岸较长时间尺度的冲淤演变关注较少, 特别在黄河入海水沙显著减少、季节性特征转变的新情势下<sup>[15-16]</sup>, 孤东近岸海域侵蚀更为突出, 大堤前沿下蚀明显。因此, 为研究孤东近岸在自然过程和人类活动影响下的演变过程, 本

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2018-10-01

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0405503); 国家自然科学基金(U1706214)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC0405503; National Natural Science Foundation of China, No.U1706214]

作者简介: 程慧(1993-), 女, 浙江龙游人, 硕士研究生, 主要从事海岸动力地貌研究, E-mail: chenghui9309@163.com; 陈沈良, 通信作者, 教授, 主要从事河口海岸学研究, E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

文以 1976 年黄河改道清水沟流路入海至今作为研究时段, 深入揭示近 40 年来孤东近岸海域的冲淤演变过程及其影响因素, 这对该区域的海岸治理与防护具有重要的科学意义。

## 1 研究区概况

黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一, 位于渤海湾与莱州湾之间。孤东近岸海域位于黄河三角洲现行入海口北侧(图 1)。研究区内为不规则全日潮, 潮差小, 介于 0.8~1.3 m, 潮流主要为往复流, 垂线平均流速 0.2~0.3 m/s<sup>[12, 17]</sup>。波浪主要为风浪, 常、强向浪为 NE 向浪, 季节变化明显。研究区属于以粉砂为主的淤泥质海岸, 沉积物搬运活跃<sup>[12]</sup>。为保证孤东及新滩油田的安全生产, 采取修建孤东大堤及入海口清 8 改汊等举措。孤东大堤修建始于 1985 年, 于 1987 年竣工, 全长 17.2 km, 大堤为 NW 和 NNW 走向。

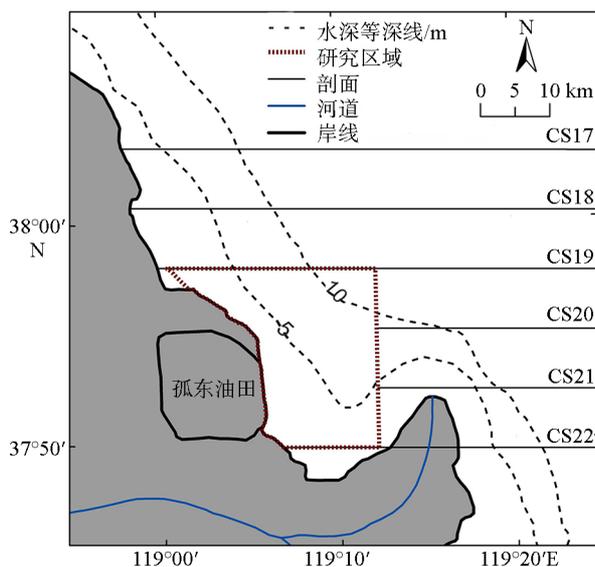


图 1 孤东海域区域概况

Fig. 1 Sketch map of the Gudong nearshore area

## 2 数据与方法

本文的研究范围为剖面 CS19—CS22 之间的近岸海域, 研究区南北以 CS19 与 CS22 剖面为界, 东侧以距起测点 25 km 为界(图 1)。水下地形资料主要基于 1976 年 8 月、1986 年 8 月、1996 年 9 月、2002 年 9 月和 2014 年 9 月实测水深数据, 相邻剖面间距为 5 km, 水深均以黄海基面为深度基准。利用 ArcGIS 软件进行克里金插值, 生成规则网格的数字高程模型(DEM)。通过对不同年份数据进行空间叠加, 绘制

及计算不同时期的冲淤分布图与冲淤量。同时提取近岸 5 m、10 m 等深线, 计算其等深线与固定区域的包络面积变化。利用研究区内各剖面的实测水深, 绘制剖面地形变化曲线, 从动力地貌学角度分析孤东近岸海域剖面的演变特征和规律。

黄河入海水沙数据来自于 1976—2014 年水利部逐年发布的《中国河流泥沙公报》和水利部黄河水利委员会发布的《黄河泥沙公报》中距河口最近的一个水文观测站(利津站)的实测数据。波浪数据来源于 1996—2000 年五号桩外实测资料统计值。

## 3 研究结果

### 3.1 不同时期的冲淤变化

根据主要的自然变化和人类活动事件, 将研究区近 40 年来的冲淤演变过程分为 4 个阶段: 1976—1986 年、1986—1996 年、1996—2002 年、2002—2014 年。各个阶段的冲淤演变分述如下。

1976—1986 年为黄河改道现行清水沟流路至孤东大堤修建之前阶段。该时期研究区处于强淤积, 孤东近岸区域在此阶段通过清水沟流路入海泥沙快速落淤堆积的自然淤涨过程, 大致形成了目前孤东油田的区域范围(图 2a)。此 10 年间, 区内共淤积泥沙 16.399 亿 t, 平均淤厚 6.54 m(表 1)淤积程度由南向北逐渐减缓, 且仅在近岸 3 km 范围内存有小于 2 m 的轻微冲刷。

1986—1996 年为孤东大堤主体工程竣工至清水沟流路改汊清 8 之前阶段。该时期孤东海岸由原来易随三角洲动力环境变化的自然岸线变为固定的人工岸线(图 2b)。在此期间, 研究区域内淤积程度减缓, 冲刷仅在孤东北大堤附近出现, 侵蚀程度在 2 m 以内。该时期内, 研究区共淤积泥沙 3.956 亿 t, 平均淤厚 1.60 m(表 1)。

1996—2002 年为黄河人工改汊清 8 入海至黄河调水调沙之前阶段(图 2c)。该时期内, 研究区开始出现全域冲刷现象, 冲刷泥沙 8.123 亿 t, 平均冲刷 3.27 m(表 1)。冲刷主要位于大堤前 2 km 内区域, 侵蚀 4~6 m。孤东北大堤距岸 6 km 外海域侵蚀现象加剧, 冲刷达 6~8 m。

2002—2014 年为黄河调水调沙以来阶段。该时期现行河口继续向北淤进, 河口滩地持续淤涨, 研究区内侵蚀范围进一步扩大, 处于强侵蚀阶段(图 2d)。区内泥沙冲刷 9.246 亿 t, 平均冲刷 3.77 m(表 1)。研

研究区内侵蚀基本处于 4~8 m 范围, 其中研究区南侧 侵蚀最为严重, 最大侵蚀深度超过 8 m。

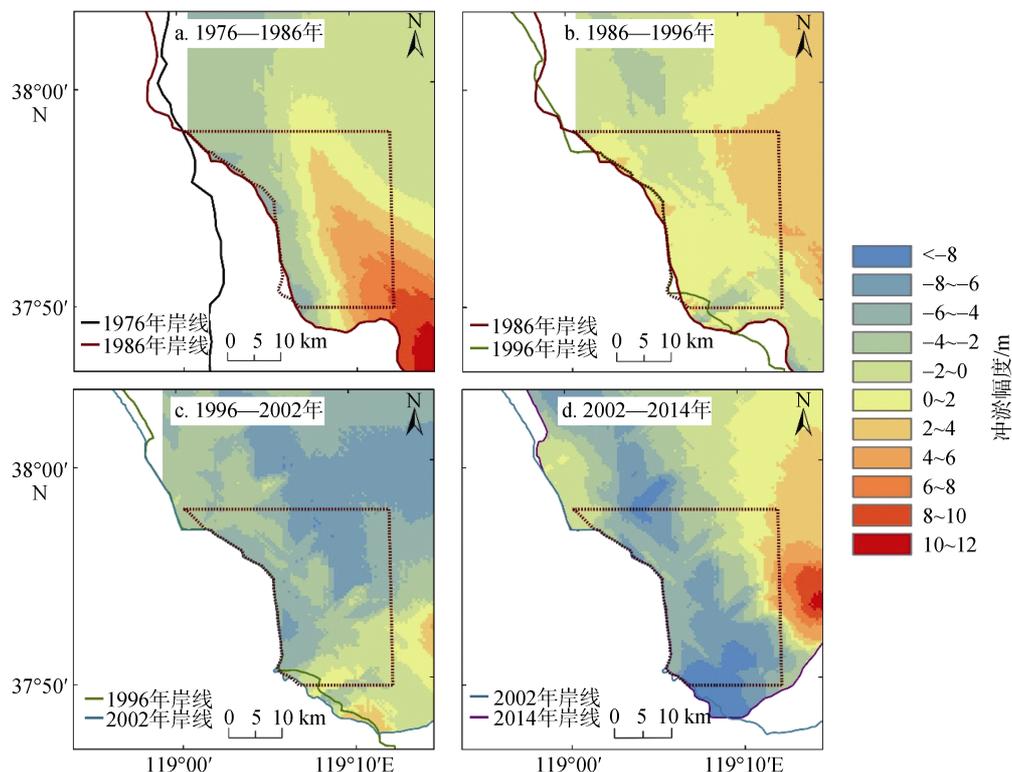


图 2 不同时期孤东近岸海域地貌冲淤变化

Fig. 2 Morphological changes in the Gudong nearshore area during 1976—2014

表 1 不同时期研究区内海域冲淤变化

Tab. 1 Erosion-accretion volume in the study area during different stages

时期	时长/a	冲淤量/亿 t	年均冲淤量/(亿 t/a)	平均冲淤深度/m	年均冲淤量变化率/%
1976—1986 年	10	16.399	1.640	6.54	/
1986—1996 年	10	3.956	0.396	1.60	-75.87
1996—2002 年	6	-8.123	-1.354	-3.27	-442.20
2002—2014 年	12	-9.246	-0.770	-3.77	-43.09

注: 负数为冲刷; 正数为淤积; “/”为无; 容重 1.57 t/m<sup>3</sup>。

### 3.2 近岸等深线变化

水下地形冲淤引起等深线的淤进、蚀退变化。鉴于孤东近岸水深大, 部分区域堤前水深已达 4~5 m, 本文选取 5 m、10 m 特征等深线作为研究参考, 并以 5 m 和 10 m 等深线包络面积反映其近岸冲淤变化(图 3 和图 4)。由近岸等深线包络线面积变化看, 孤东近岸 5 m、10 m 等深线包络面积均在 1996 年达到峰值, 水深净淤积面积分别为 118.18 km<sup>2</sup> 和 157.37 km<sup>2</sup>, 等深线均向海推进。1996 年以后, 5 m 等深线包络水面积开始减小, 等深线向岸蚀退逐期明显, 在 2002—2014 年减小速率达 2.51 km<sup>2</sup>/a, 是 1996—2002 年的

2.8 倍。同期, 10 m 等深线包络面积变化却不大。由此可见, 1996 年以后的侵蚀主要发生在近岸 5 m 水深范围内, 10 m 水深内区域则基本处于冲淤平衡。

### 3.3 典型剖面冲淤变化

为了更好地反映研究区海域的垂向冲淤变化, 选取 CS19—CS21 剖面绘制剖面演变形态图, 分析各剖面地形在垂向上的演变特征(图 5)。

CS19—CS21 剖面在 1976—1986 年属于淤积型, 在 1986—2014 年属于上冲下淤型。

CS19 剖面(图 5a)近岸坡度变化不大, 冲淤平衡点出现在水深 11 m 附近, 平衡点以上坡段冲刷,

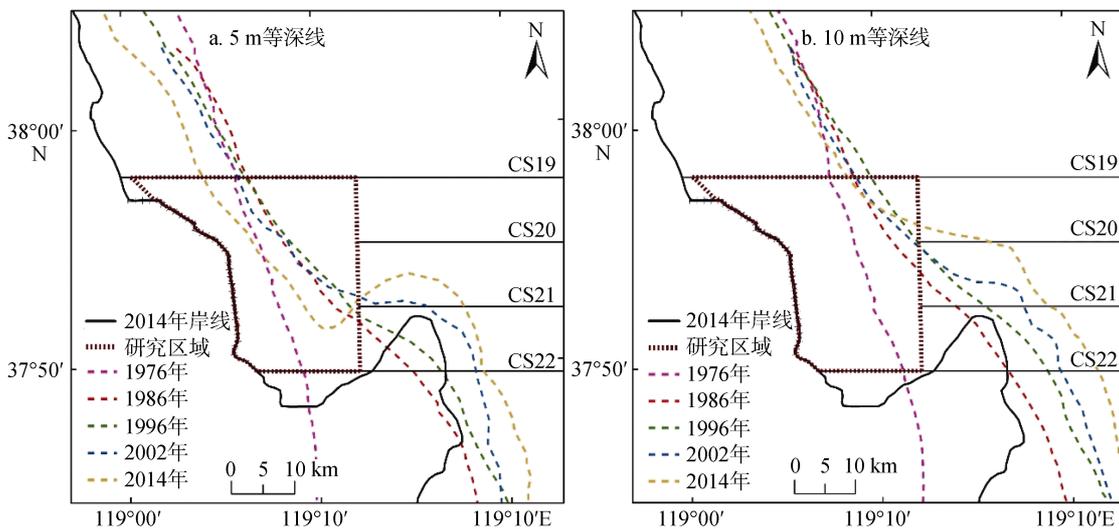


图3 孤东近岸海域不同年份各剖面 5 m、10 m 等深线变化情况

Fig. 3 Coastal profile isobaths in the Gudong nearshore area during different stages

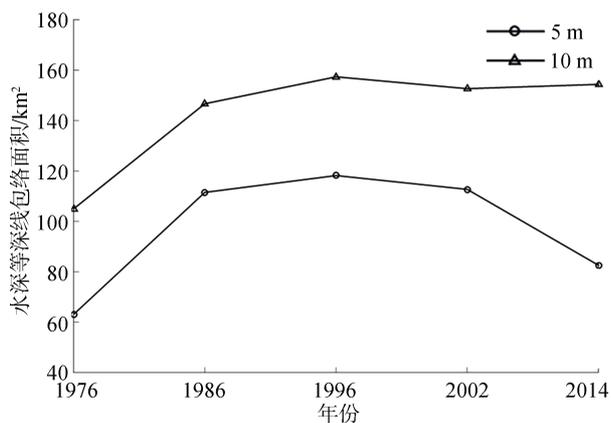


图4 孤东近岸等深线包围面积分布

Fig. 4 Depth distribution of 5 m and 10 m in the Gudong nearshore area

并在 2002—2014 年水深 7 m 以浅区域向岸侵蚀明显, 最大蚀退 4.5 km, 平衡点以下坡段淤积; CS20 剖面(图 5b)冲淤平衡点在 9 m 水深附近, 平衡点以上坡段向岸侵蚀, 坡度由 1986 年的 1.6‰ 减缓至 2014 年的 0.5‰, 以下坡段快速淤积; CS21 剖面(图 5c)冲淤

平衡水深在 5 m 左右, 1986—2002 年剖面在冲淤平衡点附近形态变化不大, 而 2014 年剖面在冲淤平衡点两侧迅速变化, 平衡点向岸侧坡段迅速向岸侵退, 离岸侧坡段发生小幅度淤积, 这与离岸侧剖面更易受到入海口门附近泥沙沉积落淤的影响所致。

## 4 讨论

孤东近岸海域的冲淤演变主要受自然环境变化和人类活动共同作用影响。前者主要指由气候等多因素引起的流域水沙变化及海洋动力条件变化, 后者主要指黄河口人为改汉、流域调水调沙、孤东大堤及入海口附近丁坝兴建等。

### 4.1 黄河入海水沙量

1976—2002 年, 黄河入海水沙量年际波动剧烈, 平均入海水沙量呈阶梯状下降。2002—2014 年, 黄河流域调水调沙实现年均水量增大明显, 但年均沙量却未同比增长(表 2 和图 6)。1976—1986 年的清水沟流路时期平均入海水沙量为研究期内最大,

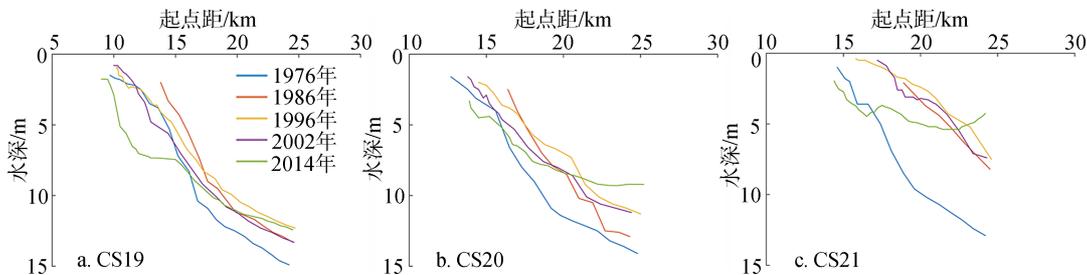


图5 孤东近岸海域海岸剖面地形演变

Fig. 5 Evolution of coastal profiles in the Gudong nearshore area

表 2 不同时期黄河入海水沙通量

Tab. 2 Water and sediment discharge of the Yellow River during different periods

时期	径流量/ 亿 m <sup>3</sup>	年均径流量/ (亿 m <sup>3</sup> /a)	径流量 变化率* /%	输沙量/ 亿 t	年均径流量/ (亿 t/a)	输沙量 变化率* /%	来沙系数
1976—1986 年	3 540.43	354.04	/	84.86	8.49	/	0.024
1986—1996 年	1 758.47	175.85	-50.33	48.31	4.83	-43.11	0.027
1996—2002 年	330.16	55.03	-68.71	6.52	1.09	-77.43	0.020
2002—2014 年	2 282.46	190.21	245.65	18.93	1.58	44.95	0.008

注: \*为同一时期年均值对比; 正数为冲刷; 负数为淤积; 容重 1.57 t/m<sup>3</sup>。

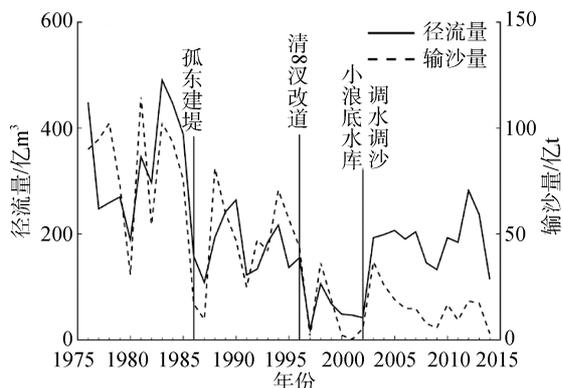


图 6 1976—2014 年不同时期利津站水沙通量

Fig. 6 Water and sediment discharge at Lijin between 1976 and 2014

分别为 354.04 亿 m<sup>3</sup>/a 和 8.49 亿 t/a; 孤东大堤修建至 1996 年清 8 改汉时期, 年均入海沙量为 4.83 亿 t/a; 清 8 改汉至 2002 年黄河调水调沙期间, 入海泥沙量平均为 1.09 亿 t/a; 2002—2014 年, 年平均入海水沙量分别为 190.21 亿 m<sup>3</sup>/a 和 1.58 亿 t/a。

来沙系数( $\gamma$ )是衡量水沙占比的重要参数<sup>[18]</sup>, 结合来沙系数( $\gamma=S/Q$ ,  $S$  为输沙量,  $Q$  为径流量)与孤东近岸海域的冲淤规律发现, 1976—1986 年、1986—1996 年这两个时期内的来沙系数处于 0.024~0.027, 此阶段研究区域处于大部分淤积, 局部轻微冲刷状态。1996—2002 年, 来沙系数减小到 0.020, 海域开始由淤积向冲刷转变, 研究区平均冲刷 4~6 m。2002—2014 年, 来沙系数迅速减少到 0.008, 研究区内侵蚀严重, 出现大范围侵蚀 6~8 m 现象。对于孤东近岸海域的冲淤, 来沙系数中的入海沙量起关键作用, 通过对年均入海沙量与研究区年均冲淤量的分析, 发现两者之间存在很好的相关性, 计算得到两者之间的关系式:  $y=3.495x-13.23$ (图 7)。为维持研究区内冲淤平衡, 估算年均入海泥沙临界值为 3.78 亿 t/a。

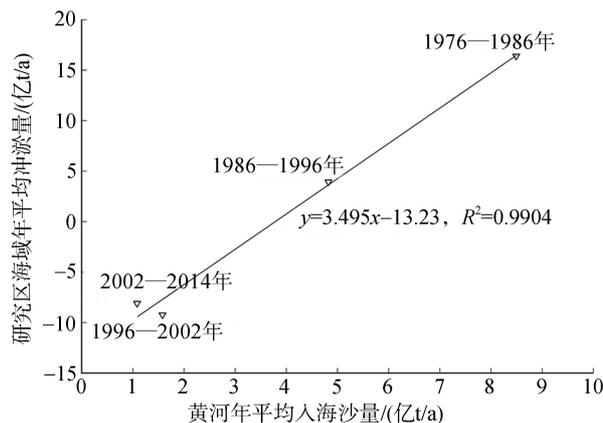


图 7 研究区海域年平均冲淤量与黄河年平均入海沙量通量线性关系

Fig. 7 Relationship between annual erosion-accretion in the study area and annual sediment input

## 4.2 人类活动影响

人类活动对孤东近岸海域的影响主要体现在河口人工改汉、黄河调水调沙、孤东大堤及丁坝的修建上。黄河口改汉对孤东近岸海域的泥沙来源有直接影响, 入海泥沙在河口附近快速淤积, 其余海域由于缺乏泥沙的补充发生侵蚀。黄河调水调沙后, 入海水量增幅明显, 但入海沙量并未随之同比增长, 来沙系数大幅下降, 泥沙供给不足, 孤东近岸冲刷显著。孤东大堤的修建使得岸线由原本的自然岸线转变为由工程固定的人工岸线, 改变原有海洋与岸滩泥沙交换方式。入海口附近的丁坝修建, 导致泥沙扩散运移路径受阻, 入海泥沙难以向北继续输移, 只能在附近落淤<sup>[19]</sup>。孤东近岸泥沙亏损不能通过岸线后退以及入海口泥沙扩散方式得以补充, 进而通过冲淘堤前海底泥沙来达到泥沙输运平衡。

## 4.3 海洋动力作用

孤东近岸的海洋动力主要有波浪、潮汐潮流以及风暴潮等<sup>[20]</sup>。对于淤泥质海岸而言, 波浪对于泥沙

的扰动作用极其显著,浅水波是导致侵蚀的重要因素<sup>[21]</sup>。由东营五号桩的波浪资料分析计算,该区以风浪为主,常、强向浪为NE,实测最大波高5.2 m,频率10.3%,次常浪向为SE和E,最大波高为4.5 m和3.6 m,频率分别为8%和7.6%。显然可见,孤东近岸在NE-E-SE方位上浪频率最大。孤东大堤的走向与区域内强、常浪向几近垂直,这大大增加了近岸海域受波浪影响的频率与强度。而泥沙的输移主要以潮流与余流作用为主,大堤沿岸潮流为往复流,潮流输沙作用明显,而北向余流作用时间长,对泥沙长距离的输移作用也非常显著<sup>[17]</sup>。在波、潮、流等海洋动力的共同作用下,孤东近岸泥沙亏损严重。

## 5 结论

1) 孤东近岸在近40年间经历了“强淤积-冲淤平衡-侵蚀-强侵蚀”4个阶段。孤东近岸海域由淤积向侵蚀的转变于1996年开始,侵蚀程度不断加剧。2002—2014年侵蚀最为严重,大部分近岸海域侵蚀达6~8 m,南侧区域最大侵蚀超过8 m。这对孤东大堤的安全和孤东及新滩油田的安全生产造成了严重的威胁。

2) 等深线变化时空差异明显,蚀退最先出现在北侧,并逐渐向南部发展变化。近岸5 m水深区域内冲淤变化较水深10 m内敏感。5 m、10 m等深线包络面积在1996年之前增大,近岸淤积,但淤积程度逐期减缓明显。1996年之后,5 m等深线包络面积开始发生侵蚀,且侵蚀出现加剧现象,在2002—2014年面积减少最为显著。而相比之下,10 m等深线包络面积变化则相对平缓。

3) 通过剖面演变发现,除第一阶段剖面属于淤积型,后三个阶段研究区内剖面均属于上冲下淤型,呈现出近岸侵蚀,离岸淤积现象。剖面冲淤平衡点的位置由CS19剖面的11 m水深变化到CS21剖面的5 m水深,说明自北向南海域侵蚀范围逐渐减小,淤积范围则逐渐增大,这与剖面距离黄河口位置相关,靠近入海口剖面则更易受黄河入海泥沙影响发生淤积,反之亦然。

4) 入海沙量的大幅减少是造成孤东近岸海域侵蚀的重要原因,黄河年均入海沙量与研究区内年均冲淤量密切相关,通过两者的线性关系估算研究区内冲淤临界的人海泥沙阈值是3.78亿t/a。孤东大堤的建设改变了原有的海洋动力环境,波能由原有的向岸自然衰减转变为冲击大堤方式衰减,增强了对

水下泥沙的扰动。孤东大堤走向与近岸海域常、强浪向几近垂直,这也大大增加了近岸海域受波浪的频率与强度。

### 参考文献:

- [1] Chen Xiaoying, Chen Shenliang, Dong Ping. Temporal and spatial evolution of the coastal profiles along the Yellow River Delta over last three decades[J]. *Geojournal*, 2008, 71(2-3): 185-199.
- [2] 史经昊,李广雪,周春艳. 海湾沉积环境对人类活动的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 16-23. Shi Jinghao, Li Guangxue, Zhou Chunyan. Preliminary study on human influence on sedimentary environment of a bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 16-23.
- [3] Jiang Chao, Pan Shunqi, Chen Shenliang. Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: Causes and environmental implications[J]. *Geomorphology*, 2017, 293: 93-107.
- [4] Komar P D. Coastal erosion: Underlying factors and human impacts[J]. *Shore & Beach*, 2000, 68(1): 3-16.
- [5] 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.
- [6] Xu Zongjun, Zhang Xuliang, Zhang Zhaohui. Coastal erosion in Shandong Peninsula and Yellow River Delta and related countermeasures[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(10): 90-95.
- [7] Ji Hongyu, Chen Shenliang, Pan Shunqi, et al. Morphological variability of the active Yellow River mouth under the new regime of riverine delivery[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 329-341.
- [8] Fan Yaoshen, Chen Shenliang, Zhao Bo, 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.
- [9] Jiang Chao, Chen Shenliang, Pan Shunqi, et al. Geomorphic evolution of the Yellow River Delta: Quantification of basin-scale natural and anthropogenic impacts[J]. *Catena*, 2018, 163: 361-377.
- [10] 崔玉刚,董春景,王福恩,等. 新滩海域海岸演变及冲淤变化分析[J]. *人民黄河*, 2012, 34(10): 49-50. Cui Yugang, Dong Chunjing, Wang Fuen, et al. Analysis of coastal evolution and changes of erosion and deposition of Xintan area[J]. *Yellow River*, 2012, 34(10): 49-50.

- [11] 陈小英, 陈沈良, 李九发, 等. 黄河三角洲孤东及新滩海岸侵蚀机制研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(4): 1-10.  
Chen Xiaoying, Chen Shenliang, Li Jiufa, et al. Study on the coastal erosion mechanism in the Yellow River Delta Gudong and Xintan areas[J]. Coastal Engineering, 2005, 24(4): 1-10.
- [12] 李向阳, 陈沈良, 胡静, 等. 黄河三角洲孤东海域沉积物及水动力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 43-49.  
Li Xiangyang, Chen Shenliang, Hu Jing, et al. Sediment characteristics and hydrodynamics of nearshore Gudong in the Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(1): 43-49.
- [13] 彭俊, 陈沈良, 李谷祺, 等. 黄河三角洲岸线及现行河口区水下地形演变[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 368-376.  
Peng Jun, Chen Shenliang, Li Guqi, et al. Evolution of coastline and subaqueous geomorphology off the survived river mouth in the Yellow River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 368-376.
- [14] 程义吉, 高菁. 黄河三角洲孤东海域前缘岸坡演变分析[J]. 人民黄河, 2006, 28(6): 22-23.  
Cheng Yiji, Gao Jing. Analysis on foreslope evolution of Gudong sea area of the Yellow River Delta[J]. Yellow River, 2006, 28(6): 22-23.
- [15] Peng Jun, Ma Suisui, Chen Hongquan, et al. Temporal and spatial evolution of coastline and subaqueous geomorphology in muddy coast of the Yellow River Delta[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(3): 490-502.
- [16] Yu Yonggui, Shi Xuefa, Wang Houjie, et al. Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Huanghe (Yellow River): the special role of Water-Sediment Modulation[J]. Anthropocene, 2013, 3: 72-82.
- [17] 陈俊卿, 张建华, 崔玉刚, 等. 黄河口孤东及新滩海域流场调查分析[J]. 人民黄河, 2004, 26(12): 14-16.  
Chen Junqing, Zhang Jianhua, Cui Yugang, et al. Survey and analysis on flow fields of Gudong and Xintan sea areas at the Yellow River Mouth[J]. Yellow River, 2004, 26(12): 14-16.
- [18] 吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨[J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 15-16.  
Wu Baosheng, Shen Guanqing. Discussion on physical significance of incoming sand coefficient[J]. Yellow River, 2008, 30(4): 15-16.
- [19] Bi Naishuang, Wang Houjie, Yang Zuosheng. 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.
- [20] 李向阳, 陈沈良, 李为华, 等. 黄河三角洲孤东海域冲淤塑造营力研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(10): 35-37.  
Li Xiangyang, Chen Shenliang, Li Weihua, et al. Agents of erosion and accretion at the Gudong nearshore in the Yellow River Delta[J]. Yellow River, 2008, 30(10): 35-37.
- [21] Coleman J M. Dynamic changes and processes in the Mississippi River delta[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 999-1015.

# Coastal evolution and its influencing factors in Gudong near-shore area of the Yellow River Delta

CHENG Hui<sup>1</sup>, CHEN Shen-liang<sup>1</sup>, XU Cong-liang<sup>2</sup>, JI Hong-yu<sup>1</sup>, FAN Yao-shen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Institute of the Yellow River Estuary and Coast Science, Dongying 257000, China)

**Received:** Sep. 17, 2018

**Key words:** the Yellow River Delta; Gudong nearshore area; erosion and deposition evolution; water and sediment discharge; estuarine diversion

**Abstract:** Since channel avulsion of the Yellow River shifted from Diaokou course to Qingshuigou course in 1976, morphological processes of Gudong have undergone tremendous changes owing to variations in fluvial water and sediment discharge, human activities, and marine dynamics. This study analyzed the four stages of the morphological evolution of Gudong area based on measured bathymetric data and hydrological data at Lijin station. Major results showed that the nearshore area of Gudong has undergone four stages of change: a rapid accretion stage, an accretion–erosion adjustment stage, an erosion stage, and a rapid erosion stage. This area has transformed from deposition to erosion since 1996. The erosion depth was about 6–8 m between 2002 and 2014, exceeding 8 m at the most serious erosion area. Isobathic change in this area had spatial and temporal differences, with erosion having begun in the north. The change in erosion and deposition within the 5-m depth area was more sensitive than within the 10-m depth area. Erosion occurred in the nearshore zone while accretion occurred in its offshore area. The balance depth of erosion and deposition changed from 11 to 5 m. Morphological evolution of the Gudong nearshore zone was influenced by the decrease in water and sediment discharge of the Yellow River, diversion of the river mouth channel, construction of the Gudong dyke, and marine dynamics. Moreover, the sediment discharge threshold value in the study area is estimated to be  $3.78 \times 10^8$  t/a.

(本文编辑: 刘珊珊)