

## 1976 年黄河改道以来三角洲近岸区变化遥感监测\*

黄海军 樊 辉<sup>†</sup>

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

<sup>†</sup>(中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 中国科学院研究生院 北京 100039)

**提要** 通过对黄河三角洲沿岸 10 个河口、潮汐汉道的 23 景陆地卫星影像高潮线的解译与对比,探讨自 1976 年黄河改道以来,三角洲岸线的变化特征;同时,利用 GIS 软件处理 1976 年和 1992 年滨海区水深测量数据,并与黄河利津站同期入海沙量进行对照分析。结果表明:1) 目前黄河三角洲总体处于侵蚀破坏阶段,侵蚀岸线长相当于淤积岸线的 2 倍;2) 人类活动对三角洲岸线变化的影响不断增强,人工海岸长度大幅度增加,总岸线长度缩短,岸线趋于平直;3) 52.6% 的黄河入海泥沙堆积于入海口附近,其中 92% 的泥沙堆积在 15m 水深线以内,向外迅速减少,20m 水深线以外出现侵蚀;4) 87% 黄河入海泥沙往东、东南方向扩散与沉积,往南、东北方向扩散与沉积的泥沙很少,河口的北、西北方向整体上处于侵蚀状态。海岸侵蚀与河口泥沙的输移密切相关。

**关键词** 黄河三角洲,遥感监测,海岸变化,沉积

**中图分类号** P737.12.1

对黄河三角洲近岸区泥沙淤、蚀变化的研究较多,研究手段各异,有历史海图、地形图、实测浅海断面分析统计和航片或卫片解译等;在时间尺度上,大多研究近代三角洲几年至上百年的变迁(山东省科学技术委员会编,1991;范兆木等,1992;李福林等,2000)。黄河自 1976 年在西河口人工改道以来,巨量的泥沙输入,在近岸浅水区淤积出新的三角洲舌状体,废弃的三角洲流路则由于泥沙供给中断,海岸出现蚀退。由于黄河来水来沙量极其不均,三角洲同一岸段年间淤、蚀变化存在差异,迄今尚未见有文献对此进行定量描述。

黄河入海泥沙在河口区的输移和扩散对三角洲的发育和演变具有重要意义。由于河道的迁移和水沙输入量的变化,水下三角洲的淤、蚀可能会发生,许多学者对此进行了定量研究(王颖等,1990;孙效功等,1993;钱意颖等,1993;胡春宏等,1996),但计算结果差异甚大。考虑到海岸和下水三角洲的淤、蚀变化对当地工农业发展的重要影

响,作者利用遥感和地理信息系统技术对黄河三角洲 23 景卫星影像及滨海区水深测量数据进行处理,藉以定量研究黄河 1976 年改道以来三角洲各岸段岸线的年间进退和下水三角洲的淤、蚀状况。

## 1 概况

现代黄河三角洲属现代地壳沉降区(山东省科学技术委员会编,1991;任美镔,1990),年平均沉降量约为 3mm(任美镔,1993;叶青超,1989)。估计至 2030 年,加上全球海平面上升值 18cm,本区相对海平面将上升 30—35cm(任美镔,1993;叶青超,1996)。

黄河三角洲周围海区以半日潮( $M_2$ 、 $S_2$ )为主,仅神仙沟南至五号桩一带有小片全日潮区( $K_1$ 、 $O_1$ );半日潮有两个旋转潮波系统,其中一个的中心位置在  $38^{\circ}09'N$ ,  $119^{\circ}04'E$ ,它直接控制本区的潮汐性质和潮差。该区高潮出现顺序:先西后东、先北后南。三角洲北岸的湾湾沟与东侧的甜水沟高

\* 国家 863 计划项目,AA630301-05 号和国家自然科学基金资助项目,40176021 号。黄海军,研究员,博士生导师, E-mail: hjuang@ms.qdio.ac.cn.

收稿日期:2002-10-05, 收修改稿日期:2003-12-24

潮出现时间相差 6h,即三角洲北岸高潮时,东南岸为低潮时,反之亦然。同时,以无潮点为界,向两侧潮差不断增大,由大口河(西侧)的 288cm(平均大潮潮差,下同)到神仙沟附近的 22cm,往南又增大,到羊角沟增至 130cm(山东省科学技术委员会编,1991)。

区内有两个潮流流速高值区,一个在神仙沟口至湾湾沟口外 15m 左右水深处,即  $M_2$  分潮无潮区,实测最大潮流流速为 1.3m/s;另一个位于清水沟流路河口口门外,实测最大潮流流速达 1.87m/s(山东省科学技术委员会编,1991)。 $M_2$  分潮流椭圆长轴方向大都与海岸线(或等深线)平行。黄河口滨海区的余流主要是风吹流,流速一般在 10cm/s 左右(山东省科学技术委员会编,1991)。

本区波浪的波向分布与风向颇为一致,具有明显的季节性。冬季,北向浪占优势,常浪向为

NNE 和 NW;夏季,南向浪占优势;春季,偏东向浪为常向浪。全年以 NE 向浪出现频率最高,浪高一般小于 1.5m(李殿魁等,2002)。

## 2 黄河三角洲岸线变化的卫片解译

为分析黄河最近一次改道以来三角洲海岸的变化,作者选用 1976—1996 年、1998 和 2001 年间 23 景卫星影像进行几何校正(每景影像选取 30 个以上的地面控制点,均方根误差小于 0.5 个像元)、影像增强处理和假彩色合成,通过目视解译岸线(本文中以一般高潮线为岸线)(黄海军等,1994)。选择黄河三角洲沿岸 10 个河口岸段(清水沟、永丰河、小岛河、神仙沟、钓口河、挑河、郭局子北、潮河、套尔河和淄脉沟等)分析岸线位置的变化状况(表 1、图 1),以此反映三角洲岸线近 20 多年来的总体演变。

表 1 黄河三角洲近年来遥感图像解译岸线(km)变化

Tab.1 Coastline(km) changes interpreted from Landsat images in 10 sites around the Huanghe (Yellow River) delta from 1976 to 1998

影像日期 (年.月.日)	清水沟	永丰河	小岛河	神仙沟	钓口河	挑河	郭局子北	潮河	套尔河	淄脉沟
1976.06.02	32.0	30.9	27.4	38.3	48.0	36.3	68.0	69.7	74.9	65.1
1977.05.10	36.0	30.3	26.6	37.4	46.9	34.3	65.1	69.1	73.7	64.8
1978.03.12	42.8	30.3	27.4	37.7	49.1	35.1	68.6	66.9	72.0	64.2
1979.09.30	45.6	30.9	28.3	37.1	44.0	35.1	69.1	69.1	72.6	64.5
1980.07.14	54.4	30.6	27.7	37.4	45.1	36.3	68.0	66.0	71.4	65.1
1981.11.21	47.6	30.6	26.9	37.1	44.0	35.7	66.3	69.1	71.4	63.9
1982.10.20	48.8	30.9	28.0	36.6	44.0	35.4	65.7	68.0	69.7	64.5
1983.10.27	50.8	30.9	28.0	36.6	42.9	33.7	65.1	68.6	72.6	65.4
1984.10.05	52.8	30.3	27.4	36.0	45.1	35.4	68.0	68.6	73.7	63.9
1985.11.25	58.0	30.3	27.1	37.7	45.1	36.0	68.6	68.6	74.3	63.7
1986.06.06	56.0	30.9	28.0	37.4	44.0	37.1	67.4	69.1	73.1	63.3
1987.05.07	54.4	30.3	27.7	36.9	43.1	34.9	67.4	68.6	73.1	64.2
1988.12.03	55.6	30.9	27.7	37.7	44.0	35.7	67.7	68.3	71.7	64.2
1989.11.20	62.0	30.9	27.1	36.6	43.4	35.4	68.0	68.0	72.0	64.6
1990.01.16	61.5	31.0	27.3	37.1	43.0	35.7	67.5	68.5	72.0	63.4
1991.01.26	61.0	31.0	27.5	37.5	42.5	36.0	67.0	69.0	72.0	62.2
1992.01.26	56.0	30.5	27.0	37.5	42.5	35.5	65.2	65.8	72.3	63.7
1993.10.30	64.0	32.4	29.3	37.9	43.0	34.0	66.5	69.0	72.5	63.2
1994.02.19	58.9	32.8	30.2	36.7	44.9	38.0	60.4	67.3	74.2	63.0
1995.10.04	58.5	31.4	27.5	38.0	45.6	39.6	59.3	66.2	75.3	63.6
1996.05.31	55.4	30.7	27.3	36.1	43.5	36.7	58.9	65.7	/	62.7
1998.05.05	53.6	29.7	26.5	37.2	42.3	36.4	56.8	63.3	/	59.8

注:表中数值为一般高潮线至基点的距离(郭局子北、潮河和套尔河的基点为垦利,其余河口均以西河口为基点),不同时间量得的距离之差即为该岸段的岸线变化。1976—1983 年影像为 Landsat Multispectral Scanner (MSS)影像,分辨率为 80m;1984—1998 年影像为 Landsat Thematic Mapper (TM)影像,分辨率为 30m

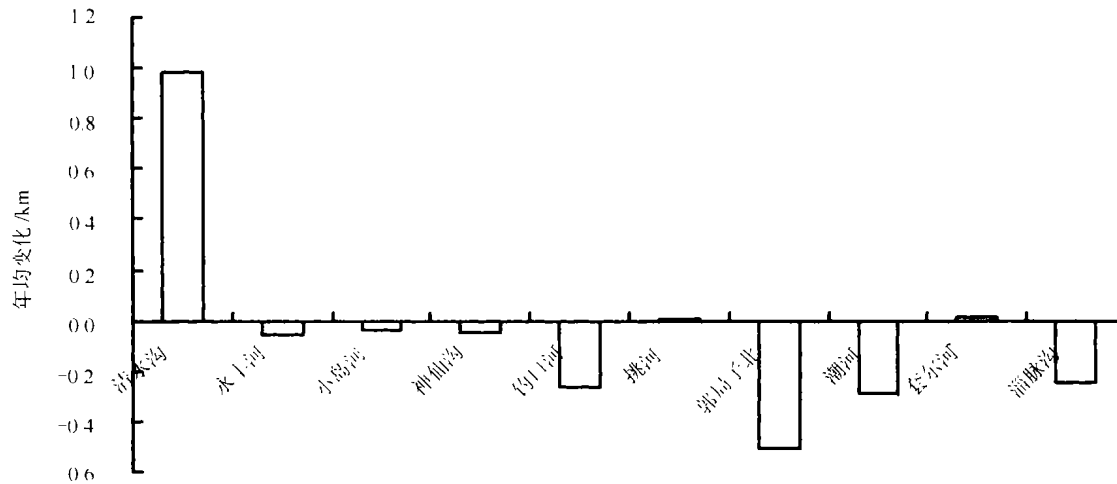


图1 黄河三角洲海岸岸线年平均变化(1976—1998年)

Fig.1 The mean annual changes of coastlines at 10 sites around the Huanghe (Yellow River) delta (1976—1998)

由表1可知,各河口岸段变化的总体趋势为:现行水河口淤积、岸线外延,废弃河口海岸蚀退。由于计算误差以及特殊环境影响,如距离量算、比例尺换算、卫片清晰度及特大风暴潮高水位影响等,少数地点的个别年份岸线变化出现异常,如潮河口1980年的岸线位置、钓口河口1978年岸线位置、小岛河口1993年与1994年岸线位置等。

1976—1998年间,岸线平均变化速率以现行水河口——清水沟最快,年均淤积延伸达0.98km;郭局子北、潮河、钓口河、淄脉沟4个河口侵蚀较为强烈,岸线年均蚀退速度分别为0.51km、0.29km、0.26km和0.24km;其余岸段相对稳定,套尔河和挑河年均延伸分别为0.02km和0.005km,而永丰河、神仙沟和小岛河存在轻微侵蚀,年均蚀退分别为0.05km、0.05km和0.04km。因此,按岸滩的自然演替进程可将黄河三角洲海岸划分为淤进型(如清水沟)、蚀退型(如钓口河)和稳定型(如神仙沟、挑河)三种类型。

淤进型海岸尽管年际冲、淤变化不定,但总体上呈淤进延伸状态。该类岸滩(清水沟河口)的淤进主要受行水河口发育进程控制,如从1976年改道至1980年,黄河大量泥沙淤积在河口湾较浅、窄的海域。期间,河流改道的当年,即填满了100多 $\text{km}^2$ 的海湾,河口区大范围( $37^{\circ}44'—37^{\circ}50'N$ )淤高速率达 $2\text{m/a}$ 以上<sup>1)</sup>,河口前缘及两侧均为淤

积区,三角洲面积迅速增长,河口逐年向海域推进,增长速率几乎成直线(图2a)。行水河口距西河口的距离1976年为32.0km,1980年增至54.4km,4年间增长22.4km,河口年均延伸5.6km,是研究时段内河口平均延伸速度的5倍多。

随后河口淤积减缓,岸线淤进与蚀退交替出现,但整体趋势是淤进的。河口沙嘴由1980年的54.4km延伸至1993年的64.0km(表1),13年间延伸9.6km,年均延伸近740m。和前一阶段相比,河口延伸速度明显降低,究其原因,一方面是此期间河口区河道不断有小幅摆动,泥沙堆积呈扇面展开,影响其延伸速度;另一方面,河道外延,三角洲前缘水深和坡度增大,水动力条件增强,河流泥沙外移量增加,减缓了河口延伸速度,同时黄河入海水沙逐年减少,甚至断流导致河口遭受侵蚀,直接减缓了河口平均外延速度。

1993—1998年,河口不仅没有淤进,反而有蚀退的趋势,其距西河口的距离由1993年的64km逐渐降至58.9km(1994年)、58.5km(1995年)、55.4km(1996年)和53.6km(1998年),连续几年处于蚀退状态,表明由于近年黄河断流、入海水沙通量减少,河口逐渐由淤积延伸型向蚀退型转化。1996年8月以后,黄河由清8出汉入海,原行水河口侵蚀后退速度加快,而在出汉河口出现淤积延伸。

1) 李凡,2000. 黄河水沙动态变化对近海资源环境的效应研究报告(资料)

蚀退型海岸以钓口河河口最为典型(图 2b)。由于泥沙供给中断,岸线全面侵蚀后退,起初蚀退速度最快,在 1976—1979 年 3 年间蚀退 4km,年均蚀退 1.3km。河口岸滩上部冲刷蚀退,下部出现淤积,水深变浅,岸坡剖面坡度变缓。随后,岸线年际变化幅度出现波动,但总体蚀退趋势明显。该类海岸的总体特征是河道断水初期强烈侵蚀后退,中、后期蚀退速度减缓,最后逐渐趋于冲淤动态平衡。

稳定型海岸以神仙沟河口较为典型(图 2c)。该类海岸岸线变幅很小,变化趋势线平稳。神仙沟河口距西河口的距离在 1976—1998 年的 22 年间仅蚀退 1.1km,部分海岸(如挑河、套尔河)存在轻微的淤积。此类海岸总体上处于冲淤动态平衡状态,较为稳定。

### 3 人类活动对岸线变化的影响

人类活动是极重要的地质营力(任美镔, 1990),是目前影响黄河三角洲海岸变化的最活跃因素,无论是在作用强度还是广度上,均使塑造三角洲的外营力大大增强,三角洲海岸发育呈现新的特征。为详细阐释这一特征,作者对 1996 年黄河清 8 出汉以前的遥感影像解译的各类岸线长度和 80 年代海岸带调查的岸线长度(山东省科学技术委员会编,1991)进行对比研究(表 2)。

由表 2 可知,人工海岸所占比重最大;蚀退型海岸长度接近淤进型海岸的 2 倍,说明目前黄河

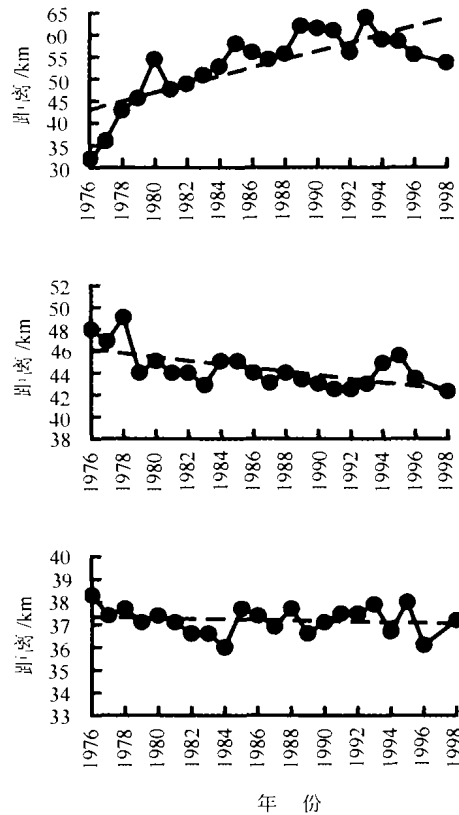


图 2 典型河口岸线变化(1976—1998)

a. 清水沟河口; b. 钓口河河口; c. 神仙沟河口。图中虚线为变化趋势线

Fig.2 Coastline changes in typical estuaries (1976—1998)  
a. Qingshuigou Estuary; b. Diaokou River Estuary; c. Shenxiangou Estuary. Dashed lines in figure show change trend

表 2 黄河三角洲各类海岸类型岸线长度(km)对比

Tab.2 Coastline lengths(km)of different typical coastal segments in the Huanghe (Yellow River) delta

项目	1996 年卫星影像解译各海岸类型岸线长度				总计(1)	80 年代海岸带调查岸线长度(2)	(2)—(1)
	蚀退型	淤进型	稳定型	人工海岸 <sup>1)</sup>			
合计	142.65	81.14	80.87	149.78	454.44	494.57	40.13
比例(%)	31.4	17.8	17.8	33.0	100		
滨州	28.37	0	73.02	14.56	115.95	144.23	28.28
无棣县	17.63	0	38.03	14.56	70.22	85.09	14.87
沾化县	10.74	0	34.99	0	45.73	59.14	13.41
东营	114.28	81.14	7.85	135.22	338.49	350.34	11.85
河口区	84.12	44.36	7.85	101.93	238.26	254.37	16.11
垦利县	14.11	36.78	0	20.92	71.81	57.41	-14.4
东营区	11.63	0	0	12.37	24	26.7	2.7
广饶县	4.42	0	0	0	4.42	11.86	7.44

1) 人工海岸是指海岸演替进程中受人为因素直接影响的海岸,考虑到人类活动的重要作用,将其单独划为一类进行研究

三角洲海岸岸线全面蚀退正在形成。人工海岸的迅速增长和总岸线长度相应缩短是本区海岸变化的另一个重要特征,也是人类活动对三角洲海岸干预的具体体现。

岸线变短的主要原因来源于自然和人为两方面。首先,河流改道,入海口位置变化对三角洲潮间带上的小海湾和沙岛影响很大(北部尤其是如此),大部分沙岛与陆地间的浅平潮沟因淤积进一步变浅,仅在特大高潮时才有海水进入,沙岛并入陆地,部分海湾消失,海岸线逐渐趋于平直。

人类活动极大地促进了沙岛的并陆、海湾消亡进程,岸线迅速缩短。在黄河三角洲北部,因修堤、固滩、采油和人工养殖等人为干扰,人工岸线向海推进,部分地段推进达 10km,许多岛屿并入陆地,海湾被拦截,原来曲折的天然韵律型海岸被平直的人工海岸取代。海堤、油田、港口的兴建和养殖业的发展,使一些地段岸滩暂时得以稳定,却导致邻近岸滩不稳定性增强,改变了三角洲海岸的发育特征。

人类活动使近年来黄河来水来沙量大幅度减少。随着中、上游水土保持工作的开展,水库拦截,中、下游引水灌溉,造成黄河径流量大为减少,入海泥沙通量也相应降低;来水、来沙量的季节性变化更加明显,汛期来沙量占全年总输沙量的比重增加,汛期泥沙中大于 0.025mm 粒径的含量也有所增加(陈先德,1996),进而影响黄河三角洲的造陆进程。

人为出汉严重地影响了三角洲的发育进程。1996年8月以来清8出汉新河口沙嘴的形成与原沙嘴的衰退为最好的例证。1996年出汉至2001年8月5年间出汉河口淤积造陆 22.5km<sup>2</sup>,年造陆速率为 4.5km<sup>2</sup>;出汉河道向东北方向伸展,岸线向东推移,最大距离为 7.1km,年均推进 1.4km。其中,清8出汉至1999年10月新河口沙嘴延伸约 6km,年均延伸 1.9km。河口区造陆速率与沙嘴推移速率和1976年改道初期相比均有很大的差异。与此同时,原河口沙嘴向西北侵蚀后退,最大蚀退距离为 2.25km,年均蚀退约 450m(图3)。

#### 4 黄河入海泥沙与三角洲发育

河流与海洋是一个相互联系的系统,三角洲处于海陆相互作用的交汇带,其发育演变取决于海、陆两方面的综合作用(任美镔,1989)。就陆上而言,河流来水来沙是三角洲延伸发育的基础,来

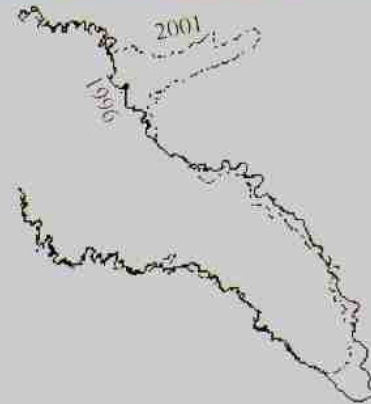


图3 清8出汉以来黄河河口变化(上:1996年5月;中:2001年8月;下:1996—2001年间岸线对比)

Fig.3 Change of the Huanghe (Yellow River) mouth since Qing 8 branch formation

(Top: May, 1996; Middle: August, 2001; Bottom: coastline change between 1996 and 2001)

水来沙之比、来沙量、泥沙物质组成、粒径等对三角洲的生长延伸都有重要影响。

##### 4.1 黄河来沙量与现行河口的延伸

黄河是世界上最著名的多泥沙河流,以其巨量的泥沙而闻名于世。据利津水文站1950—1995年46年来的实测资料统计,黄河多年平均径流量为

366 亿  $m^3$ , 平均流量为  $1160m^3/s$ 。黄河来水来沙量年际变化大, 其流量最小为 (1987 年)  $98.6m^3/s$ , 而最高平均径流量为  $904m^3/s$  (1964 年), 两者相差 9 倍多。黄河输入河口段多年平均悬移质输沙量为 9.20 亿 t, 1997 年泥沙输送量最少, 为 0.16 亿 t, 1958 年最多, 达 21.08 亿 t, 两者相差 132 倍, 而且其水沙量年内分布不均, 季节性变化非常明显。尽管水量与泥沙量不完全同步, 但一般情况下, 两者具有一定的相关性, 即流量多的年份, 其输送至三角洲地区的泥沙也多, 反之则泥沙输送量较少。从多年实测泥沙量与年平均流量相关分析表明, 两者呈正相关。入海泥沙是三角洲造陆的物质基础, 输入河口的泥沙量与现行河道的延伸呈正相关, 以清水沟为例, 自 1976 年改道至 1996 年, 河道延伸与累计输入河口泥沙量的对数值呈线性相关, 相关关系式为  $y = 10.7x + 8.0$ , 相关系数为 0.87。式中  $y$  为清水沟河口距西河口的距离,  $x$  为累计入海泥沙量的对数值 (图 4)。

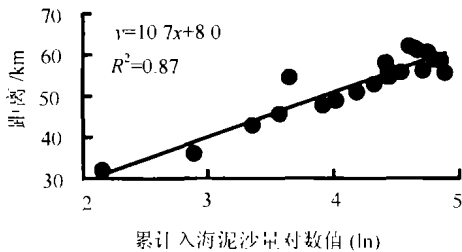


图 4 清水沟河口延伸与累计来沙 (对数) 相关图

Fig.4 Relationship between the extension degree of the Qingshuigou Estuary and the logarithm of accumulated sediment discharge

从上世纪 50 年代至 90 年代, 黄河入海水沙量逐年递减, 特别是进入 70 年代以后, 黄河下游河道常出现断流 (叶青超, 1998), 输入河口的泥沙量逐年递减十分明显, 2000 年和 2001 年锐减至 0.2 亿 t 左右。黄河三角洲的侵蚀范围因而不断增大, 由三角洲北侧、东北侧逐渐扩展到整个三角洲, 现行黄河入海河口两侧也出现了侵蚀, 尤其在清 8 出汙以后更是如此。如前所述, 1997 年由于当年入海泥沙量极少 (全年入海泥沙仅 0.16 亿 t), 河道断流时间长 [利津站全年断流 226 天 (叶青超, 1998)], 现行河口不但没有淤进, 反而比上年蚀退 2.25km。由此可见, 自 1855 年以来形成的

在我国乃至全球淤积速度最快的近代黄河三角洲, 已进入全面侵蚀期。

#### 4.2 黄河入海泥沙扩散与沉积

黄河入海泥沙在河口区的输移和扩散对三角洲的发育和演变具有重要意义, 许多学者对此进行了定量研究 (王颖等, 1990; 孙效功等, 1993; 钱意颖, 1993; 胡春宏等, 1996; 薛允传, 2003<sup>1)</sup>)。黄河入海悬沙分布在卫星影像上反映清晰, 层次分明, 可定性划分为 4 个不同的相对悬沙浓度等级。在灰度影像上, 近岸高浓度浑水区呈白色调, 向外海逐渐过渡为暗色调, 各级泥沙区之间的边界大都呈羽状 (影像图略)。

悬沙分布与扩散在不同的流路及同一流路的不同发展阶段, 洪、枯水季节均具有不同的特点, 潮流、波浪与风等因素对悬沙的分布也有较大的影响。改道初期, 河口尚未向外凸出, 黄河入海泥沙浑水区分布于河口及其两侧小范围内。涨潮时, 高悬沙浑水区, 枯水期逼近岸边, 洪水期扩散范围增大; 落潮时, 浑水区聚集于河口附近并向东偏北扩展, 枯水期扩散范围小, 洪水期向外扩散范围增大。河口向外凸出后, 无论是洪、枯水期, 还是涨、落潮时, 河口附近高悬沙浑水区大都向外扩展, 并向南偏, 涨潮时偏南范围增大; 落潮时, 除了偏南外还明显向东北伸展。

次级浑水区在河口以东和东南多数呈平行海岸的条带状分布, 向外海, 泥沙浓度迅速降低。河口以南, 涨潮时, 外海水涌向近岸; 落潮时, 悬浮泥沙向外海扩散范围增大。河口以北, 涨潮时, 外海水涌向近岸, 使近岸泥沙浓度增高, 但枯水期仅限于河口附近, 洪水期范围扩大; 落潮时, 主要向东北伸展。

无论是洪、枯水期, 还是涨、落潮时, 3、4 级低浓度悬沙区分布范围大, 表明河口南北两侧主要受外海水的控制, 在河口南北形成两个悬沙浓度低值区。

改为清 8 出汙后, 河口区悬沙的分布范围与扩散方向发生了明显变化, 向西、北方向扩散的泥沙有所增加, 而全年泥沙主要扩散方向还是南、东南向。河口区推移质泥沙运动趋势分析也表明, 全年波能流合成方向为 SE。

为了进一步估算黄河入海物质在三角洲水下岸坡不同水深、不同方向的淤积分布情况, 作者对

1) 薛允传, 2003. 近代黄河三角洲景观格局及演化研究. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 117

1976 年与 1992 年水深测量数据(黄委会黄河三角洲滨海区水深资料)进行分析与对比,其统计范围见表 3。

表 3 黄河口入海泥沙扩散与淤积统计范围

Tab.3 Statistical scope of diffusion and deposition of incoming sediment in the Huanghe (Yellow River) mouth

方位	最大距离(km)	1976 年最大水深(m)	1992 年最大水深(m)
西北	93.06	- 19.63	- 20.03
北	73.58	- 23.50	- 24.50
东北	73.58	- 23.50	- 24.67
东	32.23	- 17.20	- 17.43
东南	61.61	- 15.23	- 13.80
南	58.04	- 10.38	- 9.80

注:方位、距离和水深统计均以河口为起点

计算结果表明,16 年来清水沟流路河口水下岸坡共淤积泥沙  $53.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,折合重量为  $58.9 \times 10^8 \text{ t}$ [取沉积物干容重数值为  $1.1 \text{ g/cm}^3$ (孙效功等,1993)],同期黄河输入泥沙量为  $111.9 \times 10^8 \text{ t}$ (利津站),河口周围沉积物占总入海泥沙总量的 52.6%。

图 5 为淤积泥沙在水下三角洲不同水深的分布。从该图中可看出,入海泥沙主要堆积在 15m 水深线以内,占总淤积量的 92%,往外泥沙堆积数量明显减少,至 20m 水深线达到冲淤平衡,20m 水深线以外处于冲刷状态(图 5)。

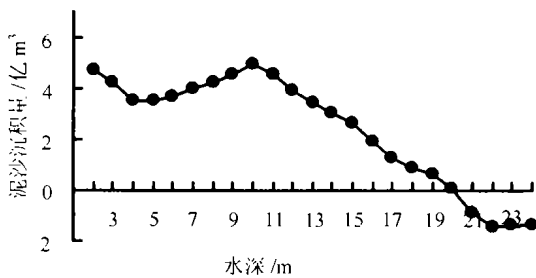


图 5 黄河水下三角洲变化(1976—1992)

Fig.5 Changes in the Huanghe (Yellow River) subaqueous delta (1976—1992)

为了统计黄河入海泥沙的扩散方向和沉积范围,作者利用单位面积冲淤厚度来表示泥沙的淤积与扩散强度,由于资料的限制,各方向的计算范

围与水深不尽相同(表 3)。

对黄河入海泥沙的扩散与淤积强度的计算表明,泥沙主要输往河口的东南和正东方向,其淤积量占各方位总量的 50% 和 37%,在河口北东和南向,该值仅为 6% 和 5%,而北西和北向则总体出现侵蚀(图 6)。该值与河口区推移质泥沙运动趋势分析结果完全相同。

一些学者曾对黄河入海泥沙在河口附近沉积的比例进行了讨论(王颖等,1990;孙效功等,1993;胡春宏等,1996;薛允传,2003<sup>1)</sup>)。由于各人使用的计算方法、估算范围等方面存在差异,淤积量估算数值各不相同。各区淤积比例受三角洲发育阶段影响甚大:初期黄河入海泥沙沉积在河口及周围的比例大,到中、后期,进入外海的比例增加,而沉积在河口周围的泥沙比例相对减少。根据统计时间的长短,河口及附近浅海区所占比例的变化范围从最低的 40% (1988—1993 年,胡春宏等,1996)、52.6% (1976—1992 年,本文)、57.6% (1976—1985 年,胡春宏等,1996)、66.9% (1976—1988 年,孙效功等,1993) 到最高的 83.8%<sup>1)</sup> (1976—1984 年)。这一现象表明,黄河改道初期,大量物质沉积在河口及附近浅海区,三角洲河口段因而迅速伸延,中、后期延伸速度呈逐渐减小的趋势。

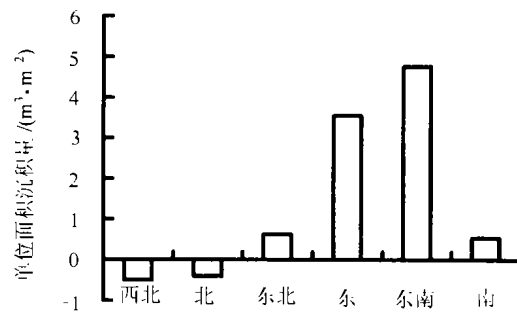


图 6 清水沟流路黄河入海泥沙沉积方位(1976—1992)

Fig.6 Sediment deposited at different orientations since the Qingshuigou River course(1976—1992)

## 5 结语

自 1976 年黄河人工改道清水沟以来,黄河三角洲岸线表现为现行水河口——清水沟河口快速堆积,钓口河口等地大幅度蚀退,神仙沟、套尔

1) 薛允传, 2003. 近代黄河三角洲景观格局及演化研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 117



河、挑河等出现轻微的侵蚀与堆积,为较稳定型海岸。整个三角洲海岸以侵蚀为主,蚀退岸线长相当于淤进岸线长度的2倍。随黄河入海水沙量的不断减少,黄河三角洲总体上由建设期转入破坏期,呈侵蚀后退迹象,即使在现行入海河口也是如此。

人类活动对三角洲海岸变化的影响愈显突出。本区人工岸线长度大幅增加,而三角洲岸线总长不断缩短,人工海岸长度占三角洲海岸的33.0%。人工海岸使三角洲海岸裁弯取直、岸线缩短,改变了三角洲岸滩的沉积动力环境,影响岸滩的稳定性。同时,黄河中下游大规模的引水工程极大地减少了黄河入海水沙通量,改变三角洲的发育进程,造成岸线蚀退。

黄河改道清水沟流路以来,52.6%的人海物质堆积在河口附近,其中92%堆积在15m水深线以内,再往外淤积速度明显降低,20m水深线以外出现侵蚀,淤积物质中87%往东、东南方向扩散、沉积,往南和东北方向的泥沙量很少,而北和西北方向整体上处于侵蚀状态。

### 参 考 文 献

山东省科学技术委员会编,1991. 山东省海岸带和海涂资源综合调查报告集——黄河口调查区综合调查报告. 济南:山东科学技术出版社,39—244  
王 颖,朱大奎,1990. 中国的潮滩. 第四纪研究,4:291—300  
叶青超,1989. 华北平原地貌体系与环境演化趋势. 地理

研究,8(3):10—20  
叶青超,1996. 黄河下游地上河发展趋势. 人民黄河,11:11—15  
叶青超,1998. 黄河断流对三角洲环境的恶性影响. 地理学报,53(5):385—392  
李殿魁,杨玉珍,程义吉等编著,2002. 延长黄河口清水沟流路行水年限的研究. 郑州:黄河水利出版社,304  
李福林,庞家珍,姜明星,2000. 黄河三角洲海岸线变化及其环境地质效应. 海洋地质与第四纪地质,20(4):17—21  
孙效功,杨作升,陈彰裕,1993. 现行黄河口海域泥沙冲淤的定量计算及其规律探讨. 海洋学报,15(1):129—136  
任美镔,1989. 人类活动对中国北部海岸带地貌和沉积作用的影响. 地理科学,9(1):1—7  
任美镔,1990. 海平面上升与地面沉降对黄河三角洲影响初步研究. 地理科学,10(1):48—57  
任美镔,1993. 黄河长江珠江三角洲近30年海平面上升趋势及2030年上升量预测. 地理学报,48(5):385—393  
陈先德,1996. 黄河水文. 郑州:黄河水利出版社,113  
范兆木,郭永盛主编,1992. 黄河三角洲沿岸遥感动态分析图集. 北京:海洋出版社,8—87  
胡春宏,吉祖稳,王 涛,1996. 黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散. 泥沙研究,2:13—22  
钱意颖,1993. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京:中国建材工业出版社,160—200  
黄海军,李成治,1994. 卫星影像在黄河三角洲岸线变化研究中的应用. 海洋地质与第四纪地质,14(2):29—37

## MONITORING CHANGES OF NEARSHORE ZONES IN THE HUANGHE (YELLOW RIVER) DELTA SINCE 1976

HUANG Hai-Jun, FAN Hui<sup>†</sup>

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

<sup>†</sup>(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;

Graduate of School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039)

**Abstract** The Huanghe (Yellow River) is well known for its high sediment concentration and low water discharge. The deposition of a large amount of fluvial sediment in the nearshore shallow water zone has resulted in the rapid advance of the Huanghe (Yellow River) delta. Due to reduction of river fluxes resulted from human activities in its upper and middle drainage areas, the evolution of the delta has showed particular characteristics since the artificial migration of the Huanghe (Yellow River) course in 1976.

Remote sensing is an effective method to obtain data on changes in subaerial delta. Multi-temporal satellite images can be deployed to study coastline change in the Huanghe (Yellow River) delta. In order to determine changes since the last river course shift in 1976, 23 cloud-free Landsat Multispectral Scanner (MSS) and Landsat Thematic Mapper (TM) im-



ages, including 1976—1996, 1998 and 2001 were used in this study. All images were registered to a 1:50000 topographical map with 30 Ground Control Points (GCPs) per image and transformed to Gaussian orthogonal coordinates. During the geometric correction, MSS images were resampled to  $60\text{m} \times 60\text{m}$  while TM images were resampled to  $30\text{m} \times 30\text{m}$ , using the nearest neighbor method with a root mean square (rms) error less than 0.9 pixel for MSS or 0.5 pixels for TM. Based on coastline interpretation maps of the 10 estuaries and inlets around the Huanghe (Yellow River) delta, coastline changes in the delta during the period 1976—1998 were analyzed according to different coastline types. Results show that accretion only appeared in the Qingshuigou Estuary with a mean annual change rate of  $0.98\text{km/a}$ . Coastline erosion was taking place in the Guoqzubei, Chaohe, Diaokou and Zimaigou estuaries at a rate of  $-0.51\text{km/a}$ ,  $-0.29\text{km/a}$ ,  $-0.26\text{km/a}$  and  $-0.24\text{km/a}$  respectively, while coastlines in the remaining estuaries and inlets were relatively stable. The progradation rate of coastline near the active river course depended on the amount of incoming sediment from the Huanghe (Yellow River). Due to the decrease of water and sediment discharge, the coastline in the vicinity of the Qingshuigou Estuary continuously retreated over the period 1993—1998. Up to 1998, the length of eroded coastal segments was twice as that of prograded ones, showing that the Huanghe (Yellow River) delta, despite being the fastest growing delta in the world, was actually in a destruction stage. Human activities played an increasingly important role in the evolution of the delta. Due to the rapid industrial and agricultural development in the delta, artificial coastline grew fast causing great changes in the nearshore hydrodynamic conditions and sedimentation environment, and shortening in the total coastline length. In 1996, artificial coastline accounted for one-third of the total coastline in the delta.

Topographic changes in the subaqueous delta, sediment diffusion and transportation in the nearshore zone off the delta have profound impacts on the evolution of the whole delta. Water depth data of the subaqueous Huanghe (Yellow River) delta surveyed in 1976 and 1992 were analyzed and digital elevation models (DEMs) of the sea bed were generated using geographic information system (GIS) software. The amount of sediment deposited at different orientations and water depths were then calculated. Results showed that 52.6% of incoming sediment was deposited in the vicinity of the river estuary, of which 92% of deposited sediment was within the  $-15\text{m}$  isobath, while erosion of the sea floor occurred beyond  $-20\text{m}$  deep. About 87% of deposited sediments were found to the southeast and east of the river mouth while a small amount of incoming sediment was transported to the south and northeast of the river mouth. Eroded sea floors appeared to the north and northwest of the river mouth.

Through the analysis, it is clear that human activities had great impacts directly and indirectly on delta evolution from a construction phase to a destruction one of the Huanghe (Yellow River) delta.

**Key words** Huanghe (Yellow River) delta, Remote sensing, Coastline change, Sedimentation