

黄河口海岸线演变时空特征及其 与黄河来水来沙关系

常 军, 刘高焕, 刘庆生

(中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 黄河是世界上含沙量最高的河流, 每年向河口三角洲及附近海域输送数亿吨泥沙, 使得黄河口地区成为世界上海岸线变迁最快的地区。本文以 1976 年黄河改道清水沟流路以来 20 景多时相遥感影像为主要数据源, 经过几何精校正与配准, 形成相对完整时间序列的遥感影像集。在此基础上, 对影像进行监督分类处理后自动提取海岸线, 通过 GIS 叠加分析, 剖析了现行黄河河口地区海岸线演变的时空动态特征。最后, 结合利津水文站水文统计资料, 探讨了黄河口海岸线演变与黄河来水来沙条件之间的关系, 并就黄河口未来水沙条件初步预测了其演变趋势。

关 键 词: 海岸线; 时空特征; 来水来沙; 黄河口

中图分类号: P737.12⁺¹; P332.5 **文章编号:** 1000-0585(2004)03-0339-08

1 引言

1855 年, 黄河从河南铜瓦厢决口夺大清河入海, 逐步建造形成了近现代黄河三角洲体系。至今, 黄河河口流路已经经历了 10 次大的改道, 共形成 7 个主要的亚三角洲堆积体^[1]。1976 年 5 月, 黄河在西河口人工截流改道, 行清水沟流路入海, 开始了最近一轮的亚三角洲塑造过程。改道后, 黄河在两岸喇叭形大堤的作用下, 泥沙集中淤积, 河口迅速向海域延伸, 逐步形成以清水沟为中轴的亚三角洲。与此同时, 黄河口的海岸线也随之快速地变化着。而遥感以其多时相、多光谱、高分辨率的特长^[2], 在海岸线动态监测方面具有较大的优势。因此利用遥感影像, 尤其是多时相遥感影像来研究海岸线的动态变化已成为广大专家学者的共识^[3~12]。许学工探讨了利用遥感影像推求黄河三角洲低潮线的方法^[6], 黄海军等则在其基础上, 利用三组 TM 影像, 通过潮位校正、坡度改正等方法对比分析了该地区岸线变化特点, 论证了运用遥感影像研究黄河三角洲地区岸线变化的可行性^[7]。但是, 该方法中岸线的归算除了利用遥感影像外, 还需要黄河三角洲沿岸详尽的潮汐和地形资料。吉祖稳等运用遥感卫星照片分析了黄河口地区 1975~1992 年间清水沟流路、沙嘴及其附近海岸线的演变^[8]。何庆成等以成像时间的海陆边界为岸线特征, 分析了黄河三角洲地区 1976~1996 年间海岸线的演化状况^[9]。本文则以 1976~2000 年 20 景多时相遥感影像为主要数据源, 在缺乏详尽潮位和地形资料的情况下, 对黄

收稿日期: 2003-11-18; 修订日期: 2004-03-08

基金项目: 国家 863 海洋监测技术项目 (2001AA633010); 中科院地理科学与资源研究所前沿项目 (XIOGD00-004)

作者简介: 常军 (1975-), 男, 山东枣庄人, 博士研究生。主要从事遥感与 GIS 应用领域研究。E-mail: changj@reis.ac.cn

河口海岸线进行动态监测。

黄河口海岸线的演变与黄河来水来沙条件密切相关，大量的泥沙挟带到河口，必然会使口门沙嘴迅速向海域延伸，海岸线随之向外扩展；反之，口门沙嘴延伸速率会减缓，甚至蚀退。可以说，黄河泥沙是黄河三角洲形成的物质基础，也是决定黄河口海岸线演变的主要因素。根据海岸线演变时空特征，结合利津水文站 1976 ~ 1999 年同期的黄河来水来沙的水文统计资料，可以对二者关系进行深入分析，并预测黄河口海岸线演变发展趋势。

2 黄河口海岸线演变时空特征分析

2.1 研究区与数据源

黄河口海岸是指北起五号桩（东营港附近），南至宋春荣沟之间的一段岸线^[12]。由于东营港至孤东油田之间岸线、宋春荣沟附近及其南侧岸线基本稳定，本文选择孤东油田至宋春荣沟之间的一段岸线作为研究区域（图 1）。

目前，遥感数据源种类繁多，常用的多光谱遥感数据源如 Landsat - TM/ ETM + 、SPOT、Radasat、CBERS - 1 等，综合考虑以上各种数据源优缺点、研究目的与实际应用要求等多方面因素，本文选择了多时相 MSS、TM、ETM + 系列数据（表 1）来研究黄河口海岸线演变时空特征。



图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the research area

表 1 卫星遥感数据列表

Tab. 1 Satellite remote sensing data

数据类型	成像时间	数据描述
MSS	1976/ 12/ 01, 1977/ 05/ 10, 1981/ 11/ 21	4 波段，地面分辨率为 80m
TM	1984/ 10/ 05, 1985/ 03/ 04, 1986/ 06/ 05, 1987/ 05/ 07, 1988/ 12/ 03, 1989/ 02/ 13, 1991/ 01/ 26, 1992/ 04/ 02, 1993/ 10/ 30, 1994/ 02/ 19, 1995/ 03/ 10, 1996/ 05/ 31, 1996/ 09/ 20, 1997/ 10/ 09, 1998/ 05/ 05, 1999/ 06/ 25	7 波段，TM1 ~ TM5、TM7 地面分辨率为 30m，TM6 地面分辨率为 120m
ETM +	2000/ 05/ 02	8 波段，TM1 ~ TM5、TM7 地面分辨率为 30m，ETM + 6 地面分辨率为 60m，ETM + 8 地面分辨率为 15m

2.2 遥感影像预处理

遥感影像预处理过程主要包括：1) 影像的几何精校正。以黄河三角洲地区 1 : 50000 地形图作为影像校正的基准图件，采用控制点校正方式对 1999 年 6 月 25 日的 TM 影像进行几何精校正。在地形图和影像上选取近 30 个地面控制点对（均匀分布在整個影像区域内），采用二次多项式模型，双线性内插法对影像进行 30m 重采样。校正误差不超过

10m。2) 影像配准。以校正后影像为基础, 以高斯 - 克吕格投影为投影坐标系, 将所有影像配准到同一地理坐标系中, 形成完整时间序列的遥感影像集。3) 裁取子区。从所有校正好的影像上裁取覆盖研究区的子区, 以便减少数据量, 提高处理速度。

2.3 研究方法

通常情况下, 海岸线的提取也就是海陆边界线的提取, 这采用阈值法即可实现^[13], 但其前提条件是水陆边界线位置受潮汐、海岸地形等因素的影响变化很小, 岸线相对稳定。而黄河口地区地势非常平坦, 岸线随潮位变化较大, 由此直接获取的水陆边界线只是卫星成像时的瞬时水边线, 分析结果偏差较大。为了真实反映海岸线的动态变化, 必须有一个统一的参照标准。研究表明, 在缺乏潮位和地形资料的情况下, 平均高潮线法是一种切实可行的方法, 能够满足宏观分析所需的精度^[8]。

平均高潮线是指海洋潮流发生一般高潮时, 海水所淹没的平均界线。而且, 在不是很长的时间系列内, 这个平均值受潮汐及海平面的影响较小, 可以看作一个常值^[8]。一般来讲, 平均高潮线介于高潮滩与中潮滩之间, 由于潮滩物质成分的差异以及暴露于水上时间的长短而导致含水量的不同, 必然在光谱特征上有所变化, 在遥感影像上表现出不同的灰阶和彩色特征信息^[14], 可以通过对遥感影像的分类处理来确定, 因此简单易行。

海岸线提取在 ERDAS 图像处理软件中完成, 其主要步骤包括: 1) 非监督分类。用非监督分类方法 (ISODATA) 对裁取的子区影像进行预分类, 将地物分为 20 类。2) 监督分类。以预分类结果为基础, 选取训练样区, 运用最大似然法对影像进行监督分类。3) 分类后处理。主要是去除小斑, 并进行类别合并。4) 矢量图的生成。以处理后的分类结果图为基础, 运用栅格转矢量功能, 自动提取平均高潮线并作平滑等处理。

2.4 海岸线演变时空特征分析

提取后的海岸线可以清晰反映出黄河口海岸线演变的时空特征。在研究时段内, 黄河口地区共造陆约 330 km², 造陆速率为 13.8 km²/a。把整个时段分为 17 个子时段, 经过 GIS 叠加分析, 可以深刻地认识黄河口地区海岸线演变的时空动态特征 (表 2、图 2)。

表 2 黄河口地区净造陆面积与沙嘴变幅数值表

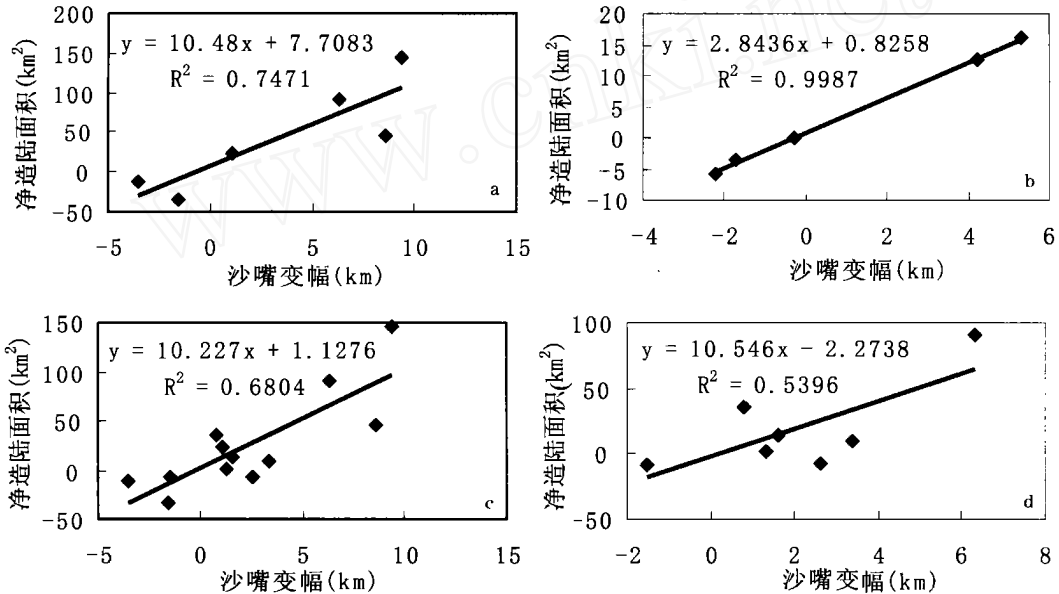
Tab. 2 Net epirogenetic area and ranges of the spit in the Yellow River Estuary

时段	具体时间	净造陆面积 (km ²)	沙嘴变幅 (km)	时段	具体时间	净造陆面积 (km ²)	沙嘴变幅 (km)
P1	1977.05 ~ 1981.11	145	9.4	P10	1993.10 ~ 1994.02	- 8	0.3
P2	1981.11 ~ 1984.10	45	8.6	P11	1994.02 ~ 1995.03	10	2.3
P3	1984.10 ~ 1985.03	23	1.1	P12	1995.03 ~ 1996.05	2	1.3
P4	1985.03 ~ 1986.06	- 11	- 3.5	P13	1996.05 ~ 1996.09	16	5.3
P5	1986.06 ~ 1987.05	- 34	- 1.6	P14	1996.09 ~ 1997.10	- 3.5	- 1.7
P6	1987.05 ~ 1989.02	91	6.3	P15	1997.10 ~ 1998.05	- 5.9	- 2.2
P7	1989.02 ~ 1991.01	- 7	2.6	P16	1998.05 ~ 1999.06	12.6	4.2
P8	1991.01 ~ 1992.04	35	0.8	P17	1999.06 ~ 2000.05	0	- 0.3
P9	1992.04 ~ 1993.10	14	1.6				

注:时段 P13 ~ P17 所对应净造陆面积与沙嘴变幅是针对 1996 年 7 月黄河人工改道北汉所形成小沙嘴而言。

从图 2 中可知,黄河口沙嘴前端的淤蚀变化与河口地区的造陆面积之间存在着一种较强的线性正相关关系。一方面是改道初期,二者之间的相关度极高(图 2a、b),河流夹带大

量泥沙淤积在河口,沙嘴前端迅速向海域延伸,河口地区造陆面积大幅度增加,而且沙嘴延伸速度越快,净造陆面积越大。反之,当河流夹带泥沙量较少,不足以在河口附近形成淤积,沙嘴前端后退,导致两侧岸线的后退,后退速度的快慢决定着蚀退面积的大小。另一方面,随着流路时限的延长,或在流路行河后期,这种相关度在逐渐减小(图 2c、d)。



注:图 a、b、c、d 所用时段分别为 P1 ~ P6、P13 ~ P17、P1 ~ P12、P7 ~ P12。

图 2 沙嘴变幅与净造陆面积之间关系

Fig. 2 Relation between ranges of the spit and net epirogenetic area

根据提取的黄河口海岸线空间分布特征,可将其空间动态变化分为四个阶段:

(1) 1976 年 12 月 ~ 1987 年 5 月,黄河口呈独特的“棉絮”状逐年向外伸展。黄河改道清水沟初期,水流散乱,多股入海,无稳定流路,但沙嘴前端整体向海域呈淤积延伸之势,一直持续约 5 年之久。1981 年 11 月起,沙嘴明显向东淤积扩张,开始形成单一河道,但在沿岸潮流及科氏力作用下,主河道向东南方向偏移。到 1985 年 3 月,沙嘴共向前延伸约 19.1km,造陆约 213km²。而 1986 ~ 1987 年,由于黄河来水来沙骤然减少,河口海岸普遍发生蚀退,到 1987 年 5 月,沙嘴顶端蚀退约 5.1km,蚀退面积达 45km² (图 3a)。此阶段,河口内海岸线整体发生变化,淤进蚀退交错进行,沙嘴呈“棉絮状”。

(2) 1987 年 5 月 ~ 1992 年 4 月,河口沙嘴逐渐近似于“楔形”向海推进,主河道位置稳定在东南方向,但沙嘴顶部还没有完全盈满。这段时期内河口沙嘴向前突伸了约 9.7km,造陆面积达 119km² (图 3b)。这一阶段黄河尾间河道顺直,一直处于填洼造陆过程中,河口海岸线不断向东南方向推进。

(3) 1992 年 4 月 ~ 1996 年 5 月,黄河口沙嘴逐渐形成了一个饱满的“楔子”向海洋凸伸,发育进入晚期,造陆速率减缓。在这一时期河口沙嘴前进了约 5.5km,而造陆面积仅为约 18km² (图 3c)。在此阶段由于黄河来水来沙量减少,海岸线的动态变幅不大。

(4) 1996 年 5 月 ~ 2000 年 5 月,北汊前端迅速淤出一个小沙嘴,而原大沙嘴顶端则开始蚀退。1996 年 7 月,人工引黄河从北汊入海,改变了泥沙淤积条件,使北汊造陆速

率加快, 到 9 月已形成一个小沙嘴, 但以后几年由于黄河来水来沙量减少, 甚至出现长时间断流, 淤进与蚀退交替, 变化不大, 但河口走向受潮流与科氏力影响却不断向偏东方向发展。此阶段北汉小沙嘴向海延伸了约 5.3 km, 造陆面积约 19.2 km² (图 3d)。

与此同时, 原清水沟流路大沙嘴顶端在断绝泥沙来源后开始发生缓慢侵蚀, 北侧弧顶越来越平滑。在 1999 年 6 月沙嘴北侧顶端附近已被冲出一条潮沟, 到 2000 年 5 月潮沟越来越宽, 在这一阶段大沙嘴顶端蚀退了约 2.1 km。

依照此阶段黄河口海岸线的空间动态变化情况, 可以将黄河口现阶段岸线分为以下几种类型: 稳定型岸段 ()、淤积型岸段 ()、侵蚀型岸段 () 和淤蚀交替型岸段 (), 其具体分布如图 3d。其原因主要是在河口外沿岸海洋潮流影响下, 入海泥沙输移与扩散造成的。

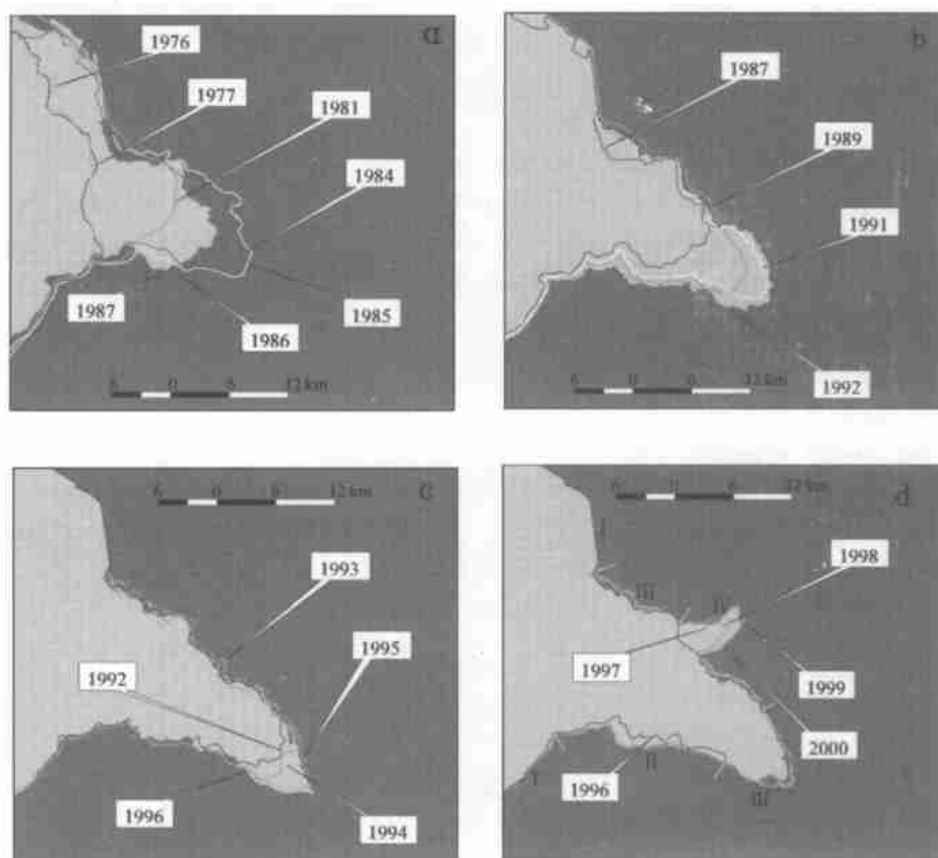


图 3 黄河口海岸线演变过程

Fig. 3 Evolution process of the coastline in the Yellow River Estuary

3 黄河口海岸线演变与黄河来水来沙关系

3.1 黄河口来水来沙情况分析

黄河以其极高的输沙量著称于世, 利津水文站资料统计, 1950~1975 年黄河多年平均年径流量为 448.7 亿 m³, 多年平均年输沙量为 11.3 亿 t。1976 年黄河人工改道清水沟以来, 利津站多年平均年径流量和年输沙量分别为 229.2 亿 m³ 和 5.82 亿 t, 与 1950~1975

年相比均有较大幅度的减少。其中,黄河汛期(7~10月)平均径流量为 149.4 亿 m^3 ,占年平均径流量的 65.2%;汛期平均输沙量为 5.21 亿 t,占年平均输沙量的 89.5%(图 4)。

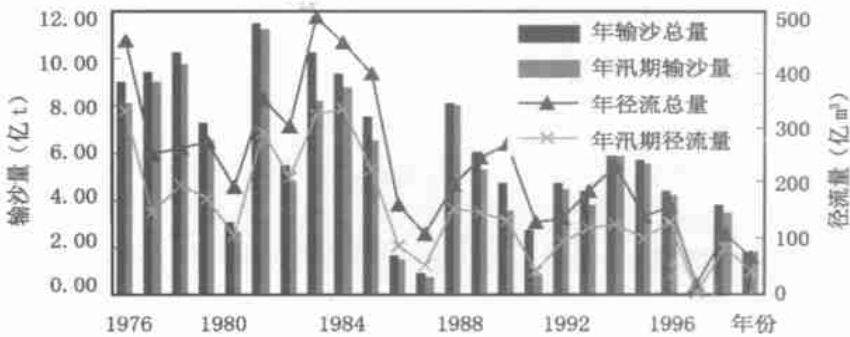


图 4 1976~1999 年黄河利津站水沙统计图

Fig. 4 Runoff and sand-transportation statistic at Lijin station during 1976~1999

总之，1976 年以来利津水文站黄河来水来沙特征主要表现在以下几个方面：(1) 清水沟流路年均来水来沙多属枯水少沙，而且更加集中于汛期，且小流量级来水所占比重大。(2) 从水沙过程看，清水沟流路可以 1986 年为界分为两个阶段，后期的来水来沙量远小于前期。(3) 90 年代中后期，黄河下游河段断流情况严重，即使不断流，河水夹带泥沙也多淤积于河道。

3.2 黄河口沙嘴变幅与水沙比关系分析

改道清水沟初期，黄河尾间水流散乱、多股入海，整个海岸迅速向海区淤进，沙嘴延伸速率较快；当稳定流路形成后，河水归入河槽，动能集中，可以将泥沙夹带到离海岸较远的水域；而在沙嘴顶端凸出以后，由于淤积海域变得开阔，同时受海洋动力作用（潮流）影响，沙嘴的延伸速率减小。1977 年 5 月~1985 年 3 月，沙嘴平均延伸速率为 2.40km/a；1985 年 3 月~1996 年 5 月，沙嘴平均延伸速率为 0.92 km/a；1977 年 5 月~1996 年 5 月，沙嘴平均延伸速率为 1.54 km/a。

1996 年 7 月黄河尾间人工改道北汉后，在短短两个月内便向海域延伸约 5.3km，但受黄河断流影响，在随后两年中沙嘴蚀退约 3.9km，到 1999 年 6 月沙嘴才又向前淤进了约 4.2km，而在其后一年中则变化不大。

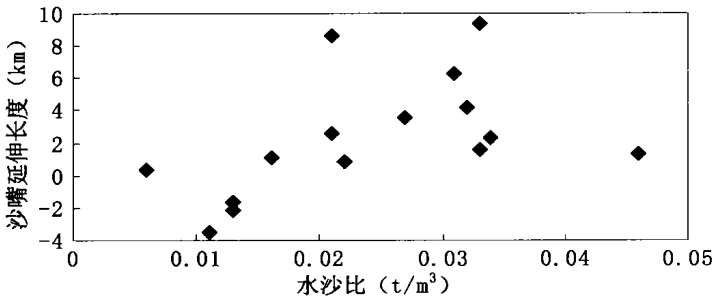


图 5 沙嘴淤进蚀退与来水来沙关系

Fig. 5 Relation between ranges of the spit and the runoff and sand-transportation

据监测数据分析, 沙嘴的变化与来水来沙条件之间关系较为密切, 如图 5 所示。由图中可以看出, 沙嘴的延伸与黄河来水来沙条件之间遵循这样一个规律: 当水沙比 (即来沙量与来水量之比) 大于 0.013 (近似值) 时, 沙嘴延伸长度与水沙比成正相关, 即水沙比较大沙嘴延伸幅度就大, 反之, 沙嘴的延伸幅度就小; 而在改道初期和中期, 当水沙比小于等于 0.013 (近似值) 时, 沙嘴就会出现蚀退。

3.3 黄河未来水沙条件与黄河口海岸线演变

由于上游水利水保工程、大型工程的拦沙、河道淤积以及引水引沙等原因, 今后进入黄河口的水沙将呈逐渐减少的趋势。据估算^[15], 今后河口段的年来水量不会超过 200 亿 m^3 。由于来水的减少造成进入河口的泥沙也会显著减少, 估计多年平均值不会超过 5 亿 t, 实际到达河口的泥沙一般在 2~3 亿 t 左右。

根据上述沙嘴进退与水沙比的关系, 如果来水量 200 亿 m^3 , 来沙 2 亿 t, 水沙比为 0.01, 河口沙嘴将出现缓慢蚀退; 如果来水 200 亿 m^3 , 来沙 3 亿 t, 水沙比为 0.015, 则河口沙嘴向海域缓慢延伸; 如果来水来沙条件达不到上述条件, 河口沙嘴将会不断被侵蚀。

4 结 论

(1) 黄河口地区由于泥沙来源特别丰富, 使其岸线变化又快又频繁, 本文应用遥感技术监测黄河口海岸线的演变, 构建相对完整时间序列的遥感图集, 对影像进行处理后自动提取海岸线, 其方法可行。

(2) 对黄河口海岸线演变时空特征进行分析发现, 从造陆面积时序变化看, 一般是改道初期几年造陆速率大, 改道后期造陆速率有逐年减小的趋势, 而且河口沙嘴前端的淤蚀变化与河口地区的造陆面积之间存在着一种较强的线性正相关关系; 同时, 当河口改道完全断绝泥沙来源后, 岸线即开始蚀退。本文还根据历年海岸线空间分布特征, 将现行河口岸线演变划分为四个阶段; 最后将现阶段河口地区岸线的特性划分为四种类型。

(3) 黄河口沙嘴变化与黄河来水来沙条件 (水沙比) 关系密切, 根据目前河口水沙条件推测, 未来河口岸线变化将减缓。

参考文献:

- [1] 陈述彭, 赵英时. 遥感地学分析. 北京: 测绘出版社, 1990. 251~253.
- [2] 刘高焕, 汉斯·德罗斯特. 黄河三角洲可持续发展图集. 北京: 测绘出版社, 1997. 60~61.
- [3] Frihy E, Nasr S M, El Hattab M M, *et al.* Remote sensing of beach erosion along the Rosetta Promontary, Northwestern Nile Delta, Egypt. *INT. J. Remote Sensing*, 1994, **15**(8): 1649~1660.
- [4] Chen L C, Rau J Y. Detection of Shoreline Changes for Tideland Areas Using Multi-temporal Satellite Images. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(17): 3383~3397.
- [5] 许殿元. 黄河口遥感研究. 北京: 气象出版社, 1990.
- [6] 许学工. 利用遥感图像推求泥质海岸滩涂低潮线的方法探讨. 山东师范大学学报(自然科学版), 1986, (4): 34~43.
- [7] 黄海军, 李成治, 郭建军. 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, 1994, **14**(2): 29~37.
- [8] 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. 泥沙研究, 1994, (3): 12~22.
- [9] 何庆成, 段永侯, 等. 黄河三角洲海岸带综合管理——从地质角度展望 21 世纪. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [10] 庞家珍, 姜明星, 李福林. 黄河口径流、泥沙、海岸线变化及其发展趋势. 海洋湖沼通报, 2000, (4): 1~6.
- [11] 李福林, 庞家珍, 姜明星. 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, 2000, **20**(4): 17~21.
- [12] 杨虎, 郭华东, 王长林. TM-SAR 数据融合在黄河口沙咀动态监测中的应用研究. 地理学与国土研究, 2001, **17**

(4):15~19.

- [13] Yang X M, Lan R Q, Yang Q H. Change Detection Based on Remote Sensing Information Model and its Application on Coastal Line of Yellow River Delta. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1999/ps5/ps5043pf.htm>, 2002, 12.
- [14] 陈述彭主编. 国土普查卫星资料应用研究(第二集). 北京:科学出版社,1989.90~99.
- [15] 中国水科院泥沙研究所. 黄河口泥沙输移规律研究. UNDP 支持黄河三角洲可持续发展专题报告之十,1997.

Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation

CHANG Jun, LIU Gao huan, LIU Qing sheng

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: It is well known that the Yellow River is the river with the highest sediment contents of all rivers in the world. Several hundred million tons of sediments are transported to the coast and to the sea nearby annually, so the Yellow River Estuary area has witnessed the fastest coastline changes in the world. This paper describes the spatio-temporal features of the coastline dynamics in the estuary area using remote sensing images since the course of the Yellow River was changed to Qingshuigou channel artificially in 1976.

Trying to anatomize the spatio-temporal features of coastline evolution, 20 sheets of Landsat images were used as the data source. The multi-temporal satellite images were rectified precisely and registered each other, and all the images have the same coordinate system. After supervised classification the coastlines were extracted automatically from remote sensing images. The result shows that a new land of 330 km² was formed during 1976 to 2000 by GIS overlay analysis. Finally, combined with the hydrologic data from Lijin station, the relation between coastline change and the runoff and sand-transportation was analyzed, and the evolution trend was forecasted.

The results are as follows: (1) The method in the paper is viable to monitor the coastline change. (2) Generally, the land-forming speed is faster at the initial stage after course change, and the range of the spit shows a strong linear positive correlation with the net epirogenetic area. But the coastline begins to erode after the sediment source is broken off absolutely. (3) The evolution process during 1976 to 2000 is divided into four stages based on the spatio-temporal features of the coastline. (4) There is a consanguineous correlation between the ranges of the spit and the runoff and sand-transportation, and the speed of the coastline change will become slow in the future according to the present condition of the runoff and sand-transportation.

Key words: coastline; spatio-temporal feature; runoff and sand-transportation; the Yellow River Estuary