

黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制*

韩广轩¹ 栗云召^{1,2} 于君宝^{1**} 许景伟³ 王光美¹ 张志东¹ 毛培利¹ 刘玉虹¹

(¹ 中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室/山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东烟台 264003; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 山东省林业科学院, 济南 250014)

摘要 基于1976—2009年的23期遥感影像,并结合1976—2008年利津站水沙数据以及黄河流域年均降水量数据,定量分析黄河入海水沙特征以及黄河三角洲演变过程及其驱动机制。结果表明:1976—2008年间,黄河入海年径流量和年输沙量呈现出年际变化大和丰枯水(沙)年交替的特征,但总体均呈下降趋势;清水沟流路河口三角洲岸线和面积变化总体呈淤积增长趋势,三角洲的发育过程大致分1976—1985年、1986—1995年和1996—2009年3个阶段,3个阶段的增长速率逐阶段递减;黄河三角洲岸线和面积与利津站累积输沙量之间均呈显著的指数函数关系;黄河流域降水量的年际波动与利津站入海输沙量年际波动基本同步,并具有相关性,说明黄河流域降水量的年际波动是引起入海径流量和输沙量波动的重要原因。

关键词 黄河三角洲 岸线 演变 驱动机制

文章编号 1001-9332(2011)02-0467-06 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

Evolution process and related driving mechanisms of Yellow River Delta since the diversion of Yellow River. HAN Guang-xuan¹, LI Yun-zhao^{1,2}, YU Jun-bao¹, XU Jing-wei³, WANG Guang-mei¹, ZHANG Zhi-dong¹, MAO Pei-li¹, LIU Yu-hong¹ (¹Laboratory of Coastal Wetland Ecology/Shandong Province Key Laboratory of Coastal Zone Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Shandong Academy of Forestry, Ji'nan 250014, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(2): 467-472.

Abstract: Based on the 23 sheets of remote sensing images from 1976 to 2009, in combining with the water and sediment data from Lijin station and the annual precipitation data of Yellow River Basin from 1976 to 2008, this paper quantitatively analyzed the features of water and sediment discharge from Yellow River, and the evolution process of Yellow River Delta and related driving mechanisms. In 1976-2008, the annual runoff and the annual sediment discharge into sea changed largely and frequently, but overall, presented a decreasing trend. Since the course of the Yellow River changed its direction to Qingshui channel in 1976, the Delta coastline and area were generally in a silting-up state. The evolution process of the Delta could be approximately divided into three stages, *i. e.*, 1976-1985, 1986-1995, and 1996-2009, and the increasing rate of the Delta decreased with the stages. The coastline and area of the Delta were significantly exponentially correlated to the sediment accumulated at Lijin station, and the inter-annual variation of the precipitation of the Yellow River Basin had a strong correlation with that of the sediment at Lijin station, suggesting that the annual variation of the precipitation in Yellow River Basin was the main factor affecting the runoff and sediment discharge into sea.

Key words: Yellow River Delta; coastline; evolution; driving mechanism.

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-223)、林业科技支撑计划项目(2009BADB2B0502-01)、中国科学院百人计划项目、山东省科技攻关计划项目(2008GG20005006, 2008GG3NS07005)和中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目资助。

** 通讯作者。E-mail: Junbao.yu@gmail.com

2010-06-23 收稿, 2010-11-17 接受。

黄河三角洲是中国大河三角洲中海陆变迁最活跃的地区,特别是黄河口地区造陆速率之快、尾间迁徙之频繁,更为世界罕见^[1]。黄河三角洲演变受黄河水沙条件和海洋动力作用的制约,黄河来沙使海岸堆积向海洋推进,海洋动力作用又使海岸侵蚀向陆地推进。几十年来,受流域气候变化和人类活动的影响,入海水沙条件发生变化,河-海动力力量的对比也随之改变,入海泥沙在河口的输移、沉积模式和三角洲海岸形态亦会对此做出响应,导致河口三角洲出现延伸或遭受侵蚀。自20世纪50年代以来,国内外学者已在黄河三角洲水文特征^[2]、泥沙输移规律^[3-4]、河流流路演变^[5]、三角洲冲淤变化与岸线变迁^[6-8]、湿地景观^[9-10]等方面开展了大量研究,为黄河三角洲的科学研究和保护开发提供了重要的理论基础和实践指导。

由于黄河携带大量泥沙填充渤海,使黄河平均每年向海延伸2.2 km,年均造陆20~30 km²^[10],成为我国最后一块尚未完全开发的三角洲。黄河三角洲自然资源丰富,特别是拥有未利用土地5400 km²,这在近年来我国政府严格控制建设用地的背景下,已成为独一无二的稀缺资源。2009年11月,《黄河三角洲高效生态经济区规划》得到国务院正式批复,标志着黄河三角洲地区的发展上升为国家战略。随着黄河三角洲地区的建设和开发,对黄河口研究的需求将更加迫切。1976年黄河入海口由刁口河改道清水沟流路,至今已行水30多年,巨量泥沙的输入使近岸浅水区淤积出新的三角洲舌状体。因此,本研究以清水沟流路河口三角洲为研究对象,提取了三角洲岸线和面积等空间数据,分析了1976—2009年黄河三角洲的演变过程及其阶段性特征,并结合利津站水沙通量数据,采用数理统计方法,探讨了黄河三角洲演变的驱动机制,旨在为黄河三角洲的生态保护与生态建设提供帮助。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲北临渤海湾,东靠莱州湾,北到挑河口,南到宋春荣沟(图1)。黄河三角洲属暖温带半湿润大陆性季风气候,境内气候南北差异不明显。年均日照时数2590~2830 h,年均气温11.7℃~12.8℃,年无霜期206 d,≥10℃年积温4300℃,年均降水量530~630 mm,70%降水分布在夏季,年均蒸发量1900~2400 mm^[11]。该区土壤因成土母质和成陆时间的不同而有所分异,包括5个土类:黄褐土、砂

姜黑土、潮土、盐土、水稻土,其中,潮土和盐土的分布最广^[6];自然植被为草甸植被,尤以盐生草甸占显著地位,群落优势种主要有白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、芦苇(*Phragmites australis*)、獐茅(*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)等。本研究范围为1976年黄河改道处至清水沟流路,现黄河入海口所在地,即黄河北岸沟渠大堤至宋春荣沟之间的黄河口区域(图1)。

1.2 研究方法

本文中1976、1977、1979、1981、1984—1987、1989、1991—2001、2004、2006、2009年Landsat MSS和TM遥感影像源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据库。1976—2008年的径流量和输沙量数据源于利津水文站的实测数据以及文献^[12];1976—2008年黄河流域降水量数据引自文献^[8,12]。

海岸线是水陆交界线,它随潮汐的运动在一定范围内移动。黄河三角洲岸滩坡度极平缓(2/10000~7/10000),潮位变化对水陆边界线影响较大。因此,正确提取岸线是三角洲演变过程分析的前提。有研究者曾用低潮线法^[13]、平均高潮法^[5-6]、潮位和坡度改正法^[14]等方法提取黄河三角洲岸线。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^[15]。本文参考樊彦国等^[16]对黄河三角洲海岸线的提取方法,采用计算机自动提取和人工目视解译相结合的方法,以平均高潮线为岸线,对黄河三角洲进行岸线提取。

1.3 数据处理

采用SPSS 12.0统计分析软件,运用线性回归方法分析1976—2008年利津站径流量和输沙量的变化趋势;运用相关分析方法分析利津站径流量与输沙量之间的关系;运用线性回归方法分析1976—

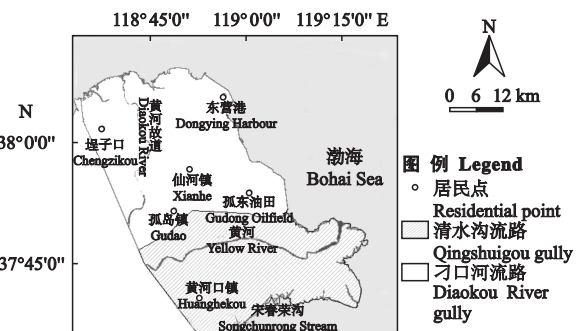


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area.

2009 年黄河三角洲岸线和面积的变化趋势;运用非线性回归方法分别分析黄河三角洲岸线、面积与累积径流量和输沙量之间的关系. 在 SigmaPlot 9.0 软件中进行绘图.

2 结果与分析

2.1 黄河三角洲水沙通量特征

1976—2008 年,黄河入海年径流量和年输沙量呈现出年际变化大和丰枯水(沙)年交替的特征,但总体均呈现下降趋势(图 2). 研究期间,黄河利津站年均入海径流量为 $207.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,1983 年的径流量($496.0 \times 10^8 \text{ m}^3$)最大,1997 年的径流量($18.6 \times 10^8 \text{ m}^3$)最小,年径流量的变异系数为 58.0%;年均输沙量为 $4.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,1981 年输沙量($11.5 \times 10^8 \text{ t}$)最大,1997 年输沙量($0.16 \times 10^8 \text{ t}$)最小,年输沙量的变异系数为 73.8%.

在利津站年径流量和输沙量整体呈下降的趋势,但 2002 年后年径流量明显增加,2005 和 2007 年的

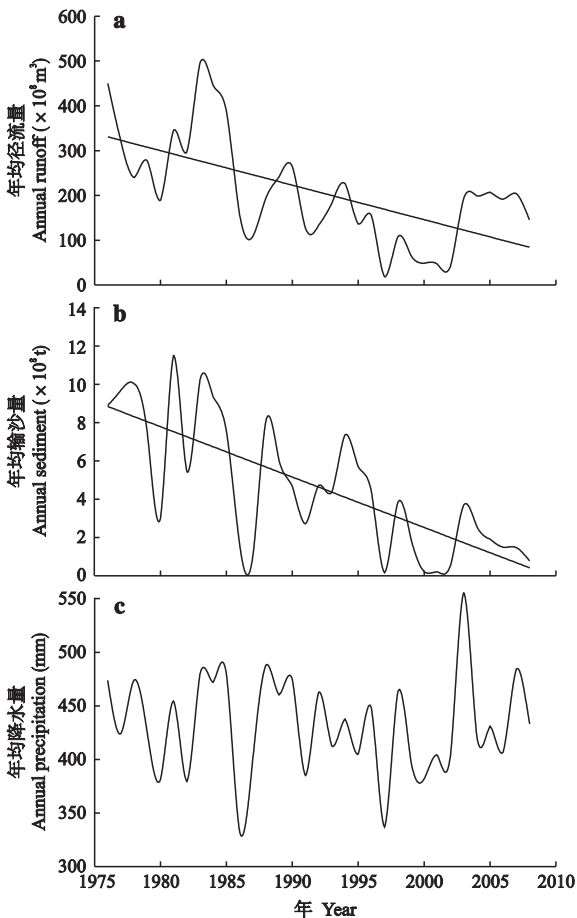


图 2 1976—2008 年利津站年径流量和年输沙量及黄河流域年均降水量

Fig. 2 Annual runoff and sediment at Lijin station and the annual precipitation of the Yellow River Basin from 1976 to 2008.

径流量均超过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,接近多年平均入海径流量;入海泥沙量在 2003 年显著增加,达到 $3.69 \times 10^8 \text{ t}$,其后又呈减小趋势. 黄河流域自 1999 年起实行流域水资源统一配置,有效遏制了下游断流的发生;2002—2009 年间进行了 9 次调水调沙,这两项人工干预措施使黄河口的水沙环境发生了较明显的改善. 研究期间,黄河输沙量与径流量之间呈显著的正相关关系(图 3).

2.2 黄河三角洲岸线和面积的演变过程

1976—2009 年,黄河三角洲岸线和面积的总体变化趋势都是淤积增长. 其中,三角洲岸线净增长 61.64 km,年均增长 1.99 km;三角洲面积净增长 309.81 km^2 ,年均增长 10.00 km^2 . 由图 4 可以看出,1976—1995、1996—2004 年先后淤积出了清水沟和清 8 汊两个鸟嘴状河嘴. 1976—1995 年间该三角洲岸线净增长 50.18 km,面积净增长 225.89 km^2 ;1996 年黄河改道清 8 汊流路后至 2009 年间,该三角洲岸线净增长 11.95 km,面积净增长 96.6 km^2 .

根据河道的摆动规律、三角洲岸线长度和陆地面积的增长趋势,清水沟流路河口三角洲的发育过程可分为 3 个阶段:1976—1985 年,河口地区岸线增长较快,沙嘴迅速向海突伸,三角洲岸线年均延伸 3.63 km,面积年均增长 16.26 km^2 ;1986—1995 年,河口岸线也呈增长趋势,但陆地向海延伸速度变慢,岸线年均延伸 2.13 km,面积年均增长 9.79 km^2 ;1996—2009 年,黄河通过人工改道在清 8 汊流路向东北方向注入渤海,河口地区岸线和面积在剧烈波动中增长,岸线年均延伸 0.85 km,面积年均增长 6.90 km^2 (图 5).

回归分析表明,1976—1985、1986—1995 和 1996—2009 年 3 个阶段,黄河三角洲岸线和面积与

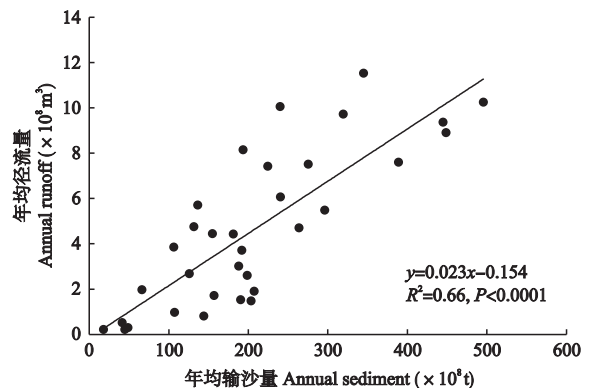


图 3 利津站年均输沙量与年均径流量的关系

Fig. 3 Relationship between the annual runoff and annual sediment at Lijin station.

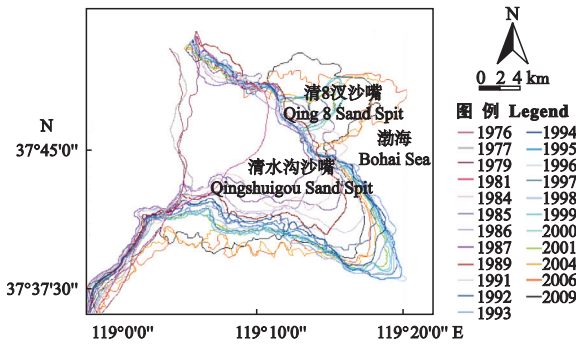


图4 1976—2009年黄河三角洲河口岸线演变过程

Fig. 4 Estuary shoreline evolution in the Yellow River delta from 1976 to 2009.

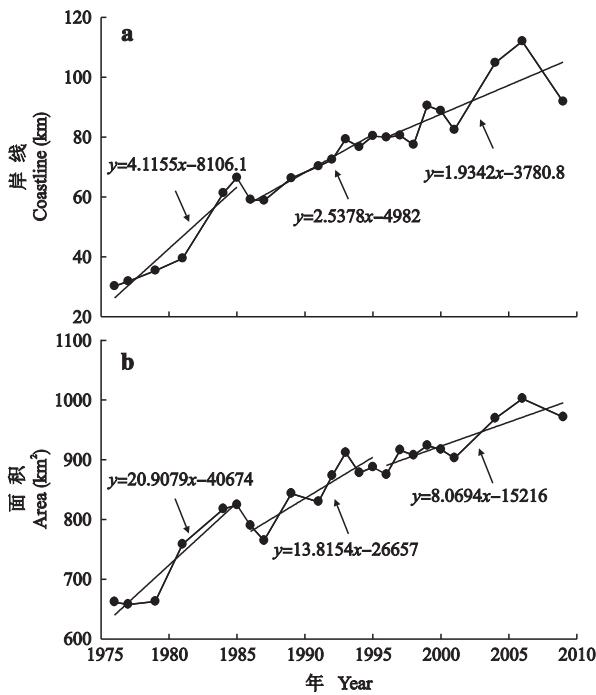


图5 1976—2009年黄河三角洲岸线和面积的变化趋势

Fig. 5 Change trends of coastline and area of the Yellow River Delta from 1976 to 2009.

年份均呈显著线性相关(图5),黄河三角洲岸线和面积的增长速率总体呈下降趋势(表1)。

表1 1976—2009年黄河三角洲各时段的演变过程

Table 1 Evolution processes of the Yellow River Delta at different stages from 1976 to 2009

阶段 Stage	岸线 Coastline		面积 Area		年均径流量 Annual runoff ($\times 10^8$ m ³)	年均输沙量 Annual sediment ($\times 10^8$ t)
	回归方程 Regression equation	增长速率 Increasing rate (km · a ⁻¹)	回归方程 Regression equation	增长速率 Increasing rate (km ² · a ⁻¹)		
1976—1985	$y = 4.1155x - 8106.1$ $R^2 = 0.922, P < 0.01$	3.63	$y = 20.9079x - 40674$ $R^2 = 0.924, P < 0.01$	16.26	344.86 (189.00 ~ 496.00)	8.33 (3.07 ~ 11.50)
1986—1995	$y = 2.5378x - 4982.0$ $R^2 = 0.959, P < 0.001$	2.13	$y = 13.8154x - 26657$ $R^2 = 0.799, P < 0.01$	9.79	177.18 (108.45 ~ 264.40)	4.63 (0.95 ~ 8.11)
1996—2009	$y = 1.9342x - 3780.8$ $R^2 = 0.512, P < 0.05$	0.85	$y = 8.0694x - 15216$ $R^2 = 0.757, P < 0.01$	6.90	125.10 (18.60 ~ 207.10)	1.78 (0.16 ~ 4.40)

2.3 黄河三角洲岸线和面积演变的驱动机制

黄河入海水、沙高度相关 ($R^2 = 0.812, P < 0.001$),且黄河来沙是三角洲发育的物质基础,所以在分析黄河三角洲演变过程与河流水沙通量的关系时,本文仅讨论黄河输沙量对三角洲演变过程的影响.回归分析表明,黄河三角洲岸线和面积与累积输沙量之间均呈显著的指数关系(图6)。

1976—1985年,黄河年输沙量约 8.33×10^8 t,河口沙嘴迅速向海突伸,三角洲岸线年均延伸 3.63 km,面积年均增长 16.26 km². 1986—1995年,进入河口的沙量减至 4.24×10^8 t · a⁻¹,该时期陆地向海延伸速度变慢,岸线年均延伸 2.13 km,面积年均增长 9.79 km². 1996—2001年,黄河进入枯水枯沙期,黄河下游连年断流,年输沙量仅 1.80×10^8 t,特别是1997年的输沙量仅 0.16×10^8 t. 该时期,黄河三角洲

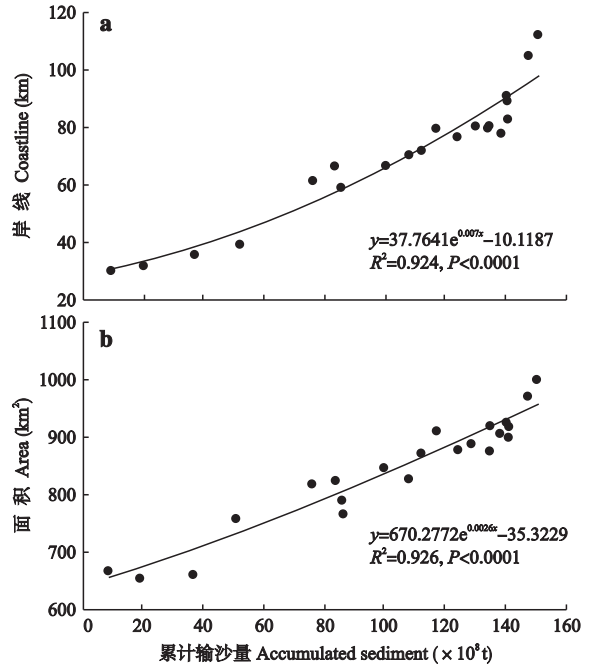


图6 利津站累积输沙量与黄河三角洲岸线、面积之间的关系
Fig. 6 Relationships between the accumulated sediment at Lijin station and the coastline and area of the Yellow River Delta.

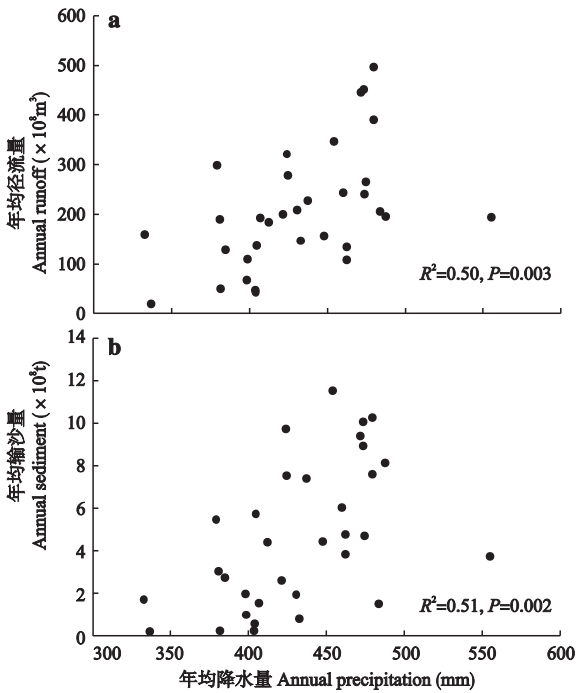


图7 黄河流域年降水量与利津站年径流量、输沙量之间的关系

Fig. 7 Relationships between the annual precipitation of the Yellow River Basin and the annual runoff and sediment at Lijin station.

处于淤积与侵蚀的交替波动状态,整体虽处于增加趋势,但岸线增加速度仅 $0.42 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$,面积年均增加 4.64 km^2 . 2002 年小浪底水库开始调水调沙,利津站入海水沙量才有所增加. 2002—2006 年,连续进行了 5 次调水调沙, $2.51 \times 10^8 \text{ t}$ 泥沙被输送入海,加之该时期黄河年径流量有所增大,导致黄河口岸线和面积均明显增加. 2006 年后,黄河输沙量减少,河口向外延伸速率放慢,并出现蚀退,使三角洲岸线和面积均减少(图 5). 由此可见,黄河三角洲造陆速率与利津站年输沙量呈密切的正相关,两者随时间的变化具有同步性^[8].

1976—2008 年,黄河流域降水量与利津站入海径流量和输沙量之间具有显著的相关性(图 7). 而且,黄河流域降水量的年际波动与利津站入海输沙量年际波动保持着同步性(图 2). 说明该区降水量的年际波动是引起入海径流量和输沙量波动的重要原因.

3 讨 论

黄河三角洲的发展与演化受入海水沙条件和海洋动力作用的双重制约,前者使三角洲岸线向海延伸,后者使三角洲岸线向陆蚀退^[4]. 1976 年黄河人

工改道清水沟流路以来,黄河三角洲岸线和面积演变与利津站累积输沙量之间均呈显著的指数函数关系,说明黄河泥沙是决定黄河口岸线和陆地面积演变的主要因素. 由于清水沟流路河口海岸是以河流供沙作为主要物质来源的岸段^[17],因此,黄河口岸线和陆地面积的增减主要取决于黄河水沙条件. 这与许多研究结果^[5-6,8,18-19]一致.

本研究期间,黄河流域降水量的年际波动与利津站入海输沙量年际波动基本同步,且具有显著的相关性. 说明黄河流域降水量是影响黄河口岸输沙量变化的重要因素. 彭俊等^[4] 研究结果表明,1950—2007 年,气候变化是黄河入海水沙量年际波动的重要影响因素. 由于河流径流量是流域降水和下垫面结合的产物,因而河流径流量与流域降水量保持很好的同步性^[4],加之径流是泥沙的搬载体,因此,流域降水量的变化必然导致河流输沙量的改变. 除气候因素外,人类活动也是影响黄河入海水沙量的重要因素. 人类活动的影响主要体现在流域取水、水土保持措施和水利工程上. 流域取水量的增加是造成入海径流量逐阶段减少和断流严重增强的主要原因^[2],20 世纪 80 年代和 90 年代引黄水量接近 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过黄河年均天然径流量的一半^[20]. 1950—2002 年,引黄水量增加是导致黄河流域径流量减少的主要原因,其中灌溉引水量约占总引水量的 85%. 1950—2000 年,黄河入海径流量与年净取水量之间表现出明显的负相关^[21]. 水土保持措施的实施,增加了入渗量,使流域侵蚀强度降低、入黄水沙减少,同时有助于改善下游河道的水沙分布状况^[2,4]. 1970—1996 年,水土保持后累计减少水量占黄河天然入海水量的 8.5%^[21]. 黄河干流上的主要水库不仅对上游来水来沙起着主要的调节作用,而且对下游河道的演变和行洪输沙能力以及入海水沙的变化产生影响^[4]. 黄河流域已建水库 3380 余座,其中大型水库 12 座,总库容量 $563 \times 10^8 \text{ m}^3$,有效库容 $355.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于利津站年均径流量的 82%^[22]. 另外,始于 2002 年的调水调沙工程使黄河口水沙环境发生了较明显的变化^[23],从而影响着黄河三角洲发育. 说明除了黄河流域降水量年际波动等自然因素外,人类活动在黄河三角洲近期演变中也扮演着重要角色.

参考文献

- [1] Yin M-Q (尹明泉), Li C (李 采). Shoreline dynamics and evolution forecast in the Yellow River Delta

- Estuary. *Marine Geology and Quaternary Geology* (海洋地质与第四纪地质), 2006, **26**(6): 35-40 (in Chinese)
- [2] Ding Y-F (丁艳峰), Pan S-M (潘少明). Evolutionary characteristics of runoff into the sea of the Huanghe River and their causes in recent 50 years. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2007, **27**(5): 709-717 (in Chinese)
- [3] Wang C-H (王崇浩), Cao W-H (曹文洪), Zhang S-Q (张世奇), *et al.* Tidal current and its sediment transport capacity in Yellow River Estuary. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2008, **39**(10): 1256-1262 (in Chinese)
- [4] Peng J (彭俊), Chen S-L (陈沈良). The variation process of water and sediment and its effect on the Yellow River Delta over the six decades. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2009, **64**(11): 1353-1362 (in Chinese)
- [5] Huang H-J (黄海军), Fan H (樊辉). Monitoring changes of nearshore zones in the Huanghe Delta since 1976. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), 2004, **35**(4): 306-314 (in Chinese)
- [6] Cui B-L (崔步礼), Chang X-L (常学礼), Chen Y-L (陈雅琳), *et al.* The impact of hydrological characteristics of the Yellow River coastline changes in the Yellow River Delta. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2006, **21**(6): 957-964 (in Chinese)
- [7] He Q-C (何庆成), Zhang B (张波), Li C (李采). Monitoring the change of the coastline of the Yellow River Delta by integrating RS and GIS. *Geology in China* (中国地质), 2006, **33**(5): 1118-1123 (in Chinese)
- [8] Xu J-X (许炯心). Response of land accretion of the Huanghe River Delta to global climate change and human activity. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2007, **29**(5): 88-94 (in Chinese)
- [9] Yang M (杨敏), Liu S-L (刘世梁), Sun T (孙涛), *et al.* Landscape change and its spatial heterogeneity in Yellow River Delta based on boundary characteristics. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(7): 1149-1155 (in Chinese)
- [10] Zong X-Y (宗秀影), Liu G-H (刘高焕), Qiao Y-L (乔玉良), *et al.* Study on dynamic changes of wetland landscape pattern in Yellow River Delta. *Journal of Geoinformation Science* (地球信息科学学报), 2009, **11**(1): 91-97 (in Chinese)
- [11] Song C-Y (宋创业), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), *et al.* Distribution patterns of plant communities in the Yellow River Delta and related affecting factors. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(12): 2042-2048 (in Chinese)
- [12] Yellow River Conservancy Committee (黄河水利委员会). Yellow River Water Resources Bulletin [EB/OL]. (1999-02-20) [2010-05-10]. <http://www.yellowriver.gov.cn/other/hhgb>
- [13] Yang XJ, Damen MCJ, Van Zuidam RA. Use of Thematic Mapper imagery with a geographic information system for geomorphic mapping in a large deltaic lowland environment. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**: 659-681
- [14] Huang H-J (黄海军), Li C-Z (李成治), Guo J-J (郭建军). Application of landsat images to the studies of the shoreline changes of the Huanghe River Delta. *Marine Geology and Quaternary Geology* (海洋地质与第四纪地质), 1994, **14**(2): 29-37 (in Chinese)
- [15] Ji Z-W (吉祖稳), Hu C-H (胡春宏), Zeng Q-H (曾庆华), *et al.* Analysis of recent evolution of the Yellow River estuary by landsat images. *Journal of Sediment Research* (泥沙研究), 1994(3): 12-22 (in Chinese)
- [16] Fan Y-G (樊彦国), Zhang S-Q (张淑芹), Hou C-L (侯春玲), *et al.* Study on method of coastline extraction from remote sensing: Taking Yellow River mouth reach and Diaokou reach of Yellow River Delta area as an example. *Remote Sensing Information* (遥感信息), 2009(4): 67-70 (in Chinese)
- [17] Yang W (杨伟), Chen S-L (陈沈良), Gu G-C (谷国传), *et al.* Accretion and erosion characteristics of Qingshuigou Lobe of the Yellow River Delta in the near future. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), 2010, **29**(1): 40-51 (in Chinese)
- [18] Chang J (常军), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), *et al.* Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation. *Geographical Research* (地理研究), 2004, **23**(5): 339-346 (in Chinese)
- [19] Liu S-G (刘曙光), Li C-X (李从先), Ding J (丁坚), *et al.* The rough balance of progradation and erosion of the Yellow River Delta and its geological meaning. *Marine Geology and Quaternary Geology* (海洋地质与第四纪地质), 2001, **21**(4): 14-18 (in Chinese)
- [20] Liu C-M (刘昌明), Cheng L (成立). Analysis on runoff series with special reference to drying up courses of lower Huanghe River. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2000, **55**(3): 257-265 (in Chinese)
- [21] Xu J-X (许炯心), Sun J (孙季). Influence of precipitation and human activities on water fluxes from the Yellow River into the sea in the past 50 years. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2003, **14**(6): 690-695 (in Chinese)
- [22] Huang H-J (黄海军), Li F (李凡). Conception model of land ocean interaction in the coast zone of the Yellow River Delta. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2004, **19**(5): 808-816 (in Chinese)
- [23] Xu M (徐美), Huang S-F (黄诗峰), Li X-T (李小涛), *et al.* Monitoring the change of the Yellow River Estuary with remote sensing and analysis of flow and sediment condition in the last ten years. *Journal of Sediment Research* (泥沙研究), 2007(6): 39-46 (in Chinese)

作者简介 韩广轩,男,1978年生,博士,副研究员.主要从事陆地生态系统碳循环与碳收支、植物生态学研究,发表论文17篇. E-mail: gxhan@yic.ac.cn

责任编辑 杨弘