

调水调沙以来黄河尾间河道冲淤演变及其影响因素

刘清兰¹, 陈俊卿², 陈沈良¹

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2. 黄河河口海岸科学研究所, 东营 257000)

摘要: 2002年开始的黄河调水调沙改变了进入黄河口的水沙条件, 必然引起尾间河道地貌的显著调整。根据黄河尾间河道利津以下的断面实测高程数据, 建立基于正交曲线网格的河道DEM, 结合河床形态与水沙条件变化, 综合研究黄河尾间河道冲淤的时空演变及其影响因素。结果表明, 调水调沙以来尾间河道冲刷明显, 2002—2017年累计冲刷6240万m³, 根据冲淤速率可以分为3个阶段: 快速冲刷阶段(2002—2005年)冲刷速率为1443万m³/a; 冲刷减慢阶段(2006—2014年)冲刷速率为139万m³/a; 以及淤积阶段(2015—2017年), 淤积速率为263万m³/a。其中, 调水调沙初始4年尾间河道的冲刷量占总冲刷量的80%, 2006年以后冲刷强度逐渐减弱, 甚至转为淤积。从季节上看, 主要表现为汛期冲刷, 非汛期淤积; 从空间上看, 越往口门方向, 冲刷强度越小。调水调沙改变了入海水沙的年内分配, 造成了尾间河道的持续冲刷, 入海流路也发生多次调整。但经过多年冲刷, 河床整体下切, 加上河口淤积延伸影响, 调水调沙对尾间河道的冲刷效率在持续降低。受河口海域淤积影响, 近口门段在经历冲刷后转为淤积, 河道纵比降减缓, 增加了尾间的不稳定性。

关键词: 调水调沙; 河道DEM; 黄河尾间; 河道冲淤

DOI: 10.11821/dlxb202101011

1 引言

尾间河道是河流水沙入海的最后通道, 是河海交互作用的焦点区域, 同时受径流水沙、海洋动力以及人类活动等多重影响。自然状态下, 黄河尾间河道频繁摆动、出汉、改道, 遵循“淤积漫流、延伸归一、分汉摆动、改道行河”4个环节的循环演变规律^[1]。自1855年黄河在铜瓦厢决口夺大清河入渤海以来, 大的改道有9次^[2], 每一次改道都经历由地下河到地上河决口改道的过程, 黄河携带的巨量泥沙与入海海域地形较浅是河口尾间发生周期性改道的根本原因^[3]。1986年以来, 受气候变化和人类活动影响, 进入黄河口的水沙过程发生了显著变异, 由水少沙多转变为少水少沙^[4], 尾间河道逐渐萎缩, 断流频繁, 泄洪能力降低^[5]。1999年小浪底水库下闸蓄水, 2002年开始实施调水调沙, 进入黄河下游及尾间河道的水沙通量高度受人工调控, 显著影响了尾间河道和河口海岸地区的地貌演变。近年来关于调水调沙对下游河道大尺度冲淤^[6-7]、河口三角洲地貌演变^[8-10]的研究已取得大量成果, 而对于尾间河道冲淤演变的研究则相对较少。尾间河道的演变影响着三角洲的冲淤格局^[11], 研究其冲淤演变及其影响因素, 将有利于深入了解现行河口流路对水沙条件变化的响应, 为河口流路稳定治理和三角洲可持续发展提供科学依据。

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405503); 国家自然科学基金项目(U1706214) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0402403; National Natural Science Foundation of China, No.U1706214]

作者简介: 刘清兰(1996-), 女, 江西瑞金人, 硕士, 主要从事河口地貌演变研究。E-mail: 51173904005@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者: 陈沈良(1964-), 男, 浙江海盐人, 博士, 教授, 主要从事河口海岸学及其应用研究。

E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

前人关于河道冲淤变化的研究主要基于断面地形法和输沙量平衡法。断面地形法是利用河道横断面数据和断面间距,将相邻断面间的几何图形近似为台体或截锥体,通过比较同一水位下相邻断面间容积的差异,反映河床冲淤情况。输沙量法是采用河段上下游水文测站实测的输沙量和区间加入、引出沙量,利用物质守恒定律,计算出输入和输出沙量的差值,即为该河段的河床冲淤量。断面法忽略了河道本身弯曲的几何特性和河床地形起伏程度的差异性^[12],适用于两断面间为顺直河段且断面方向垂直于流向的情况^[13],在弯道、汉道、河道急剧放宽和束窄的河段会产生较大的误差^[14];输沙量法无需考虑河道地形变化,但存在沙量漏测的问题,需要对输沙率进行修正^[15]。这两种方法在实际应用中均存在计算精度不够高、空间分析能力差等弱点。近年来随着计算机和遥感技术的发展,网格地形法应运而生并被广泛使用。网格地形法基于断面实测资料和卫星遥感影像,构造覆盖研究区的网格并插值得到数字高程模型(DEM),从而定量计算河道冲淤。该方法不仅考虑到河道本身的几何特性,能够进一步提高计算精度,而且拥有较强的空间分析能力,结果的可视化效果更加直观^[16]。许多国内外学者对网格的插值方法选取^[17-19]、网格的适宜尺寸^[20]等进行了研究,比较了计算河床冲淤量的差异,但其方法的实际应用仍然较少,且在黄河尾间河段的研究尚未展开。使用网格地形法准确计算黄河尾间河段冲淤量,也可为网格地形法在测量资料欠缺区域的应用提供参考。

本文基于2000—2017年黄河尾间河道41个断面的实测高程数据,结合遥感影像,建立基于曲线正交网格的河道DEM,研究黄河调水调沙以来尾间河道的冲淤演变,结合河道形态与水沙条件变化,研究尾间河道冲淤的影响因素。

2 研究区概况

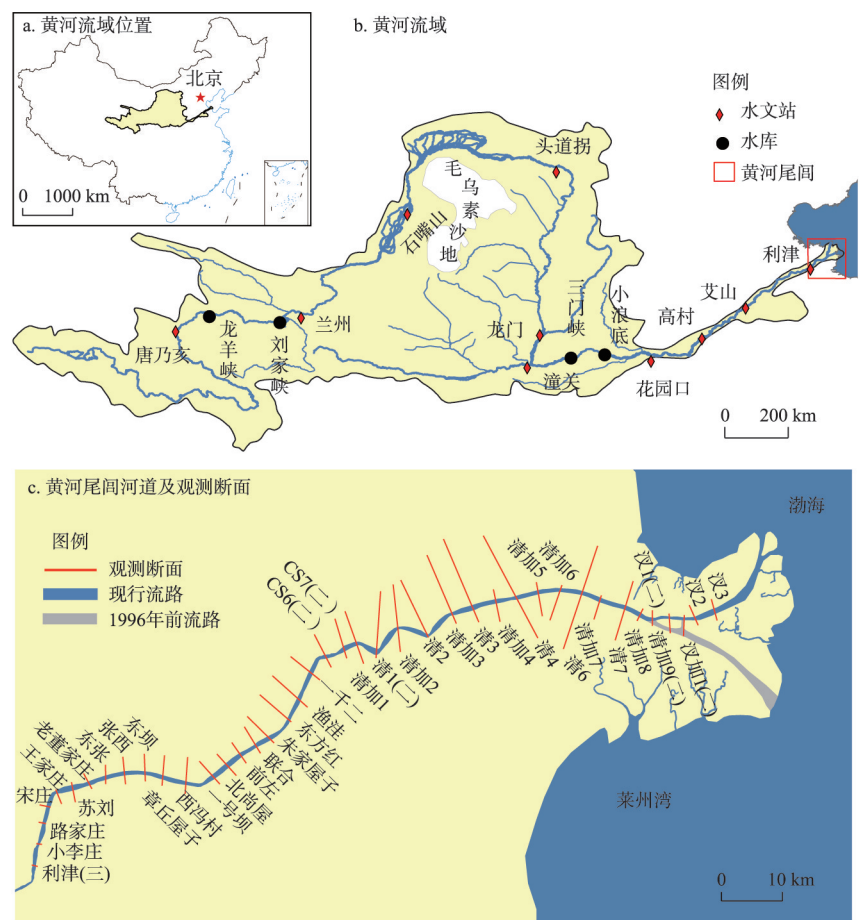
自1855年以来,黄河河口流路改道、出汉都发生在利津以下,因此利津以下长约106 km的河道常被视为黄河的尾间河道(图1)。其中利津至王家庄为弯曲型河段,长约10 km,河段内险工工程密集,河势较为稳定;王家庄至渔洼河道长约30 km,为窄河道向河口段的过渡段,整治工程较少,故主槽横向摆动频繁;渔洼以下为河口段,河道较为宽浅,整治工程较少,清4断面以下无工程控制,河势变化剧烈^[21]。河口段受海洋动力影响较弱,潮差一般小于1 m,感潮段长度约为15~30 km,河口平均高潮位平交河口河道主槽纵剖面于清3—清4,因此清4以下为感潮河段^[22]。

21世纪以来,尾间河道观测断面变化频繁。1996年清8断面人工出汉后,清8断面废弃,断面数量为10个,到2000年为16个,终点为清7。2003年增设了大量断面,此后断面数量稳定在41个,终点为汉3(图1)。2011年汉1附近人工裁弯取直,导致清加9、汉1、汉加1断面的位置进行了调整。

3 材料与方法

3.1 资料来源

本文所使用的数据包括:① 2000—2017年利津至汉3的河道断面高程数据(部分断面数据始于2004年),每年汛前(4月)、汛后(10月)各测一次,高程为大沽高程,坐标系统为北京54坐标系;② 利津站1950—2017年的径流量和输沙量数据,来源于黄河水利委员会黄河泥沙公报;③ 2002—2017年的Landsat TM/ETM遥感影像,选取每年汛期、非汛期无云或少云天气的影像各1景,共32景,分辨率为30 m,均来源于地理空间



注：a图基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1594号标准地图制作,底图无修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Sketch of the study area

数据云网站；④ 1976—2017年利津至口门的河长数据，河长为河道中心线长度，数据来自黄河水利委员会。

3.2 DEM构建

基于实测断面高程数据，结合 Landsat 影像建立基于正交曲线网格的黄河尾间河道DEM，定量计算河道冲淤。首先根据 Landsat 影像，在 ArcGIS 10.3 中提取河道边界；通过 Delft3D 网格模块建立与河道边界贴合的正交曲线网格（图 2a），网格间距控制在 30~100 m 内；通过插值获得每个网格点的高程值，从而构建河道 DEM（图 2b）；最后计算河道 DEM 体积，DEM 体积变化即为河道冲淤量。

使用网格构建河道 DEM，网格插值是关键。由于河道断面高程数据空间分布不均匀，相邻断面间距较大，再加上河道狭长且弯曲的几何特性，传统的插值方法如 IDW 插值、克里金插值、反三角插值法等无法取得准确的插补结果^[19]。为此本文，① 采用正交曲线网格，构造若干垂直于河道的横断面和沿河道的纵断面，每个横断面的点数保持一致，靠近实测断面的横断面调整到与实测断面位置一致或平行；② 在 Matlab 中通过一维线性插值获得贴近实测断面的横断面高程（图 3a），为保证获得的高程为主槽内河道，在实测断面处通过断面曲线划分滩槽，并使横断面点位置控制在主槽内；③ 因为纵横断面

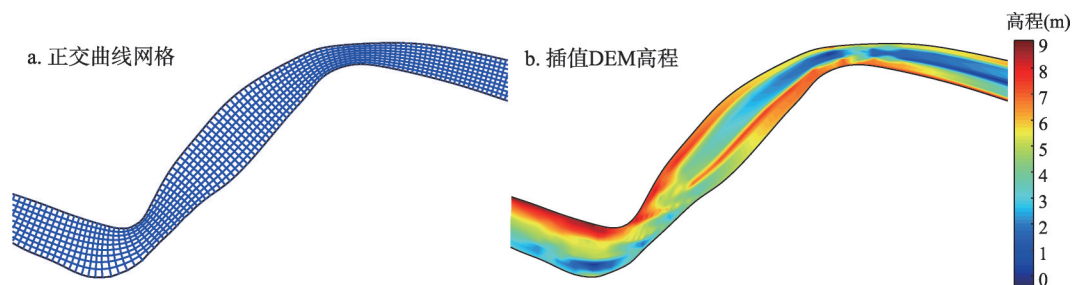


图2 黄河口尾闾河道DEM构建

Fig. 2 DEM construction of Yellow River estuarine channel

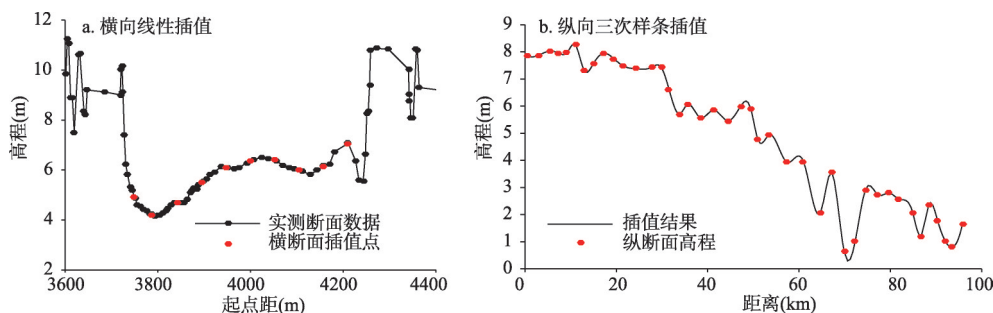


图3 断面插值示意图

Fig. 3 Schematic of interpolation of transects

交叉,通过该方法得到不同横断面插值点高程值的同时,同一纵断面上插值点的高程值也会得到,在Matlab中采用三次样条插值法对纵断面的剩余点在纵向上进行一维插值(图3b),相比于线性插值三次样条插值法的光滑性更好;④通过插值得到的构造断面高程,在正交曲线网格上采用三角网线形插值法得到河道二维地形模型(图2b)。

三次样条插值问题是求 $[a, b]$ 上关于分划 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ 的三次样条函数 $S(x)$,其在定义域 $[x_i, x_{i+1}]$ 应满足:

$$S(x) = \frac{(x_{i+1} - x)}{6(x_{i+1} - x_i)} M_i + \frac{(x - x_i)}{6(x_{i+1} - x_i)} M_{i+1} + A_i x + B_i \quad (1)$$

式中: M_i 为 $S(x_i)$ 的二阶导; M_{i+1} 为 $S(x_{i+1})$ 的二阶导; 依据 $S(x_i) = y_i$ 和 $S(x_{i+1}) = y_{i+1}$ 可得:

$$A_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{(x_{i+1} - x_i)} - \frac{M_{i+1} - M_i}{6} (x_{i+1} - x_i) \quad (2)$$

$$B_i = y_{i+1} - \frac{M_{i+1}}{6} (x_{i+1} - x_i)^2 - A_i x_{i+1} \quad (3)$$

该方法使用了贴合河道边界的正交曲线网格,考虑到了河道形态和宽窄的变化,插值方法考虑到了河道横纵方向上地形变化的差异。从插值结果来看(图2b),得到的河道DEM符合河道实际情况,对河道地形模拟的精度取决于实测断面的密度和精度,可以作为河道地形模拟的普适性方法。

4 黄河尾闾河道冲淤的时空变化

受来水来沙、河道控制工程、口门摆动和海洋动力的影响,黄河尾闾河道存在时空尺度变化。时间上存在明显的洪枯季变化、年际变化,空间上不同河段也具有明显的差异。

4.1 尾间河道冲淤时间变化

2002年以来,利津以下河道主槽总体处于冲淤趋势(图4)。截至2017年,共计冲淤6240万 m^3 ,年均冲淤390万 m^3 ,冲淤量最大值出现在2003年,约2423万 m^3 。冲淤年际变化明显,根据冲淤速率可以分为3个阶段。其中,2002—2005年冲淤速率最大,年均冲淤1443万 m^3 ,累积冲淤5779万 m^3 ,占总冲淤量的80%;2006年后河道冲淤速率明显下降,2006—2014年共冲淤1118万 m^3 ,年均冲淤139万 m^3 ,相比于前一阶段冲淤速率下降了约90%;2015—2016年河道淤积明显,2年共计淤积1164万 m^3 ,2017又转为冲淤。

从季节变化来看(图5),尾间河道具有汛期冲淤、非汛期淤积的特点。与年际变化特征类似,调水调沙初期河道汛期冲淤明显,2002—2005年汛期平均冲淤达1689万 m^3/a ,而2006—2014年则下降到了633万 m^3/a ,2015—2017年汛期河道表现为淤积,年均淤积约162万 m^3 。此外,2004年开始非汛期淤积量增加,部分年份非汛期淤积量甚至大于汛期冲淤量(如2004、2006、2010年)。

4.2 尾间河道冲淤的空间分布

为了分析尾间河道冲淤空间分布及其变化,根据水动力和地貌演变特点,将尾间河道分段计算冲淤量。清4断面是河口径流段与感潮段的分界,其以上河段不受潮汐影响,主要受上游水沙条件影响,以下河段不仅受上游水沙条件影响,而且受潮汐和口门变动的影响^[23]。1996年清8附近人工出汉,形成黄河第三代亚三角洲,新的顶点在清8附近^[3],但清8断面已被废弃。因此,利津至口门的尾间河道可分为3段:利津—清4、清4—清7和清7—汉3,并统计各河段在不同时段的冲淤量和冲淤强度(即单位时间单位河长冲淤量)(表1、图6)。

总体来看,2002—2017年,冲淤强度从利津至河口沿程减小,利津—清4、清4—清7河段冲淤强度相差不大,而清7—汉3冲淤强度相对小得多,说明冲淤具有沿程的性质,越靠近河口,冲淤强度越小,这种趋势在2002—2005年表现得更加明显。通常水沙条件下黄河口感潮河段容易淤积,但2002年调水调沙以来,利津以下河段全线均发生明显的冲淤。

从各时段来看,2002—2005年,利津—清4、清4—清7、清7—汉3冲淤强度沿程递减,越靠近口门冲淤量越小,这是调水调沙带来的低含沙量洪水冲淤的结果。2006—2014年,各河段冲淤强度均显著下降,清7—汉3河段由冲淤转为淤积,清4—清7河段的冲淤强度要大于利津—清4河段,与2007年、2013年口门出汉及2011人工裁弯作用有关。2015—2017年尾间河道全河段发生淤积,利津—清4、清4—清7河段淤积强度接近,而清7—汉3河段远大于清7以上河段,表现出一定程度的溯源淤积特点。

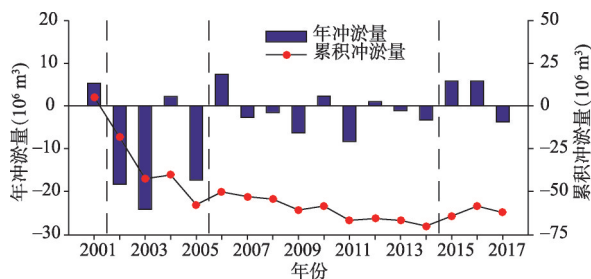


图4 2001—2017年黄河尾间河道年冲淤量及累积冲淤量变化

Fig. 4 Annual erosion and deposition and cumulative amounts in the Yellow River estuarine channel during 2001-2017

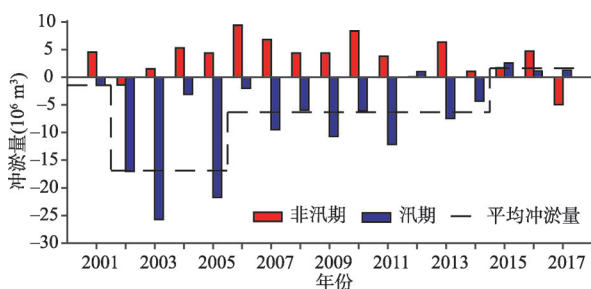


图5 2001—2017年黄河尾间河道冲淤年内变化

Fig. 5 Seasonal variations in Yellow River estuarine channel during 2001-2017

表 1 黄河尾间河道不同河段冲淤统计

Tab. 1 Erosion and deposition in different reaches of Yellow River estuarine channel

年份	利津—清 4 (71.52 km)		清 4—清 7 (12.70 km)		清 7—汉 3 (11.85 km)	
	冲淤体积 (10 ⁶ m ³)	冲淤强度 (m ³ /(m·a))	冲淤体积 (10 ⁶ m ³)	冲淤强度 (m ³ /(m·a))	冲淤体积 (10 ⁶ m ³)	冲淤强度 (m ³ /(m·a))
2002—2005	-45.16	-157.86	-5.68	-111.92	-4.40	-92.88
2006—1014	-6.93	-24.22	-3.22	-63.39	0.03	6.43
2015—2017	4.33	15.14	0.75	14.69	2.83	66.30
2002—2017	-47.75	-166.89	-8.16	-160.63	-1.27	-26.79

5 黄河尾间河道形态调整

5.1 河口河势变化

1976 年黄河尾间改道清水沟流路初期, 河道呈游荡散乱状态, 1980 年后逐渐呈单股入海的形式, 河道基本稳定, 1996 年 5 月在清 8 人工出汉, 水沙沿东北方向入海, 形成了目前的清 8 流路, 此后河道的变动区域集中在发生在口门区域^[24]。通过遥感影像分析 2002 年以来清 8 流路的演变过程主要有 4 次较大的变动 (图 7)。2004 年 6 月调水调沙期间, 尾间由东北流向向正东方向摆动, 这是调水调沙带来的较大水流所致, 摆动点在汉 3 断面以下约 3.9 km 处; 2007 年 6 月尾间向北自然出汉, 出汉点在距离汉 3 以下约 3 km 处, 口门向北移动了约 7 km, 之后原来的东向汉道逐渐淤积不过水, 水沙全部由北汉入海; 2011 年在清加 8 到汉 2 之间进行了人工裁弯取直, 河长缩短了约 0.6 km; 2013 年口门附近向东延伸出一条汉沟, 并形成河口沙岛, 形成目前北汉、东汉双股入海的局面。

5.2 河道剖面形态调整

河道冲淤变化必然引起河床纵横剖面的调整, 在流域来水来沙作用下, 河流通过河底坡降、横断面和河床粒径组成的调整, 使其挟沙能力与来水来沙相适应^[21]。2002 年以来尾间河道平均河底高程的变化 (图 8) 表明, 调水调沙初期 4 年河道冲淤明显, 纵剖面整体下降, 2005 年河道平均河底高程相比于 2001 年平均下降了 1.23 m, 局部如渔洼和清 1 断面刷深超过 2 m。2006 年以后河道纵剖面变幅很小, 说明经过前期的冲淤, 河道纵剖面趋向于平衡状态, 冲淤难度加大。由于冲淤强度从上游至口门方向逐渐降低, 且清 7 以下河段在后期发生淤积, 导致清 7 以下河道的纵比降比清 7 以上要更加和缓, 河道总体纵比降减小。

河道断面形态变化能够反映河道冲淤状况, 通过对比不同断面的形态调整过程, 可以反映不同河段对环境条件变化的响应情况。分别在尾间河道相对稳定的河段和靠近口门的不稳定河段选取若干典型断面, 分析其形态调整特点。图 9 给出了 2001—2017 年利津、渔洼、清 7 和汉 2 断面的形态变化过程, 分析表明: 2002 年调水调沙以来, 4 个断面都发生了明显的冲刷下切, 但不同断面随时间的变化特点存在差异: 2002—2017 年期间利津和渔洼断面总体上呈持续冲刷下切的趋势, 河底平均高程分别降低了 2.08 m、1.85 m, 但下切幅度随时间变化在不断减小。利津断面两侧有险工控制, 因此河岸比较稳定。渔

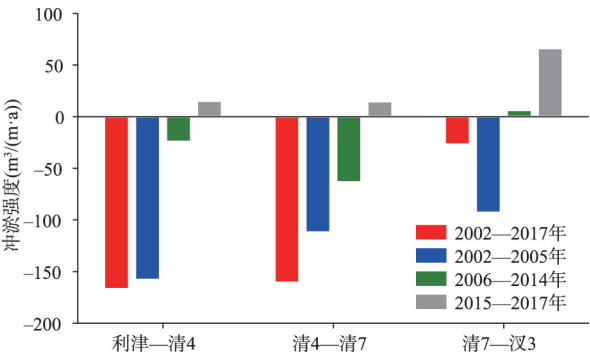
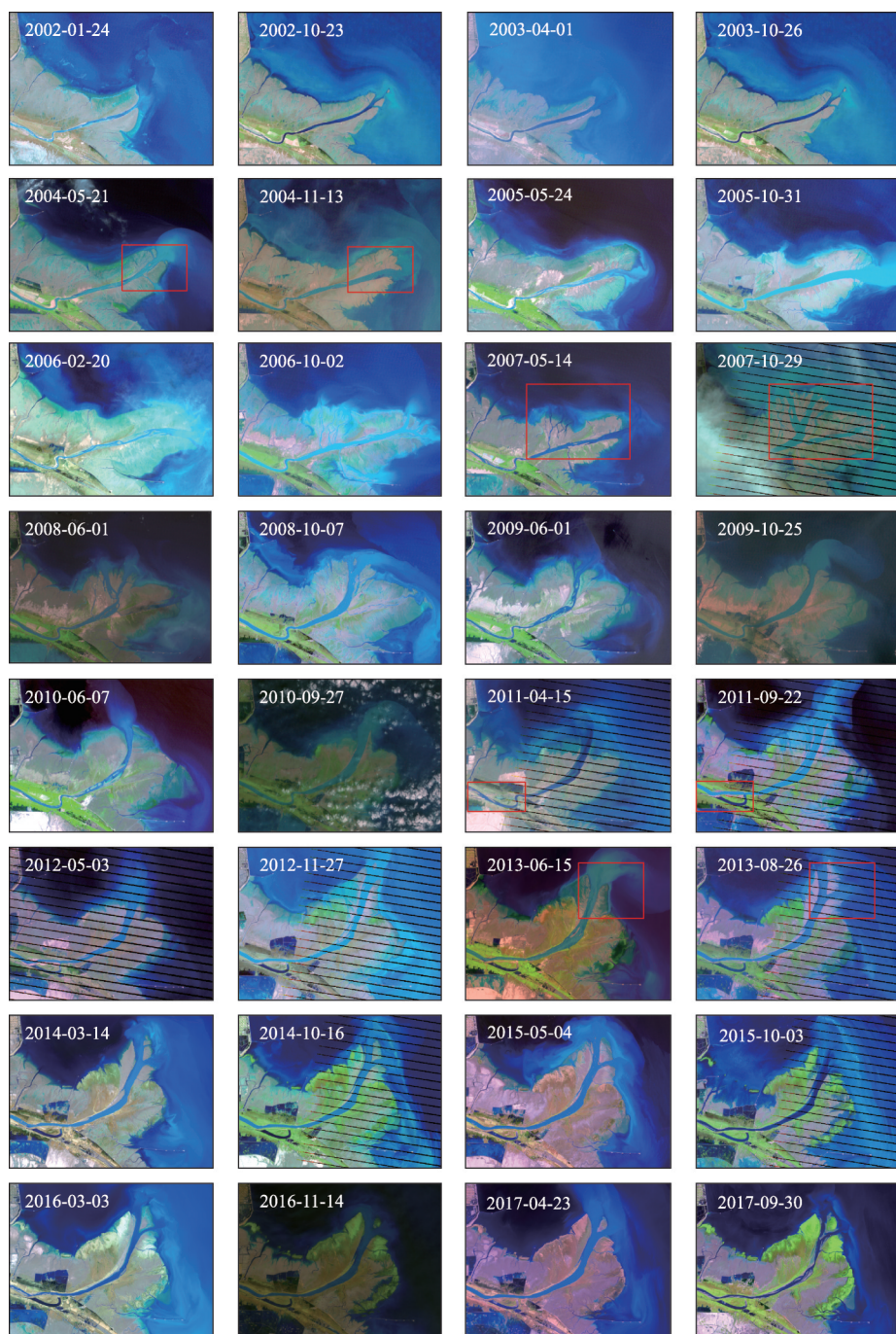


图 6 黄河尾间河道不同河段冲淤强度变化

Fig. 6 Erosion-deposition intensities in different reaches of Yellow River estuarine channel



注: 红色方框表示前后变化。

图7 2002—2017年Landsat遥感影像显示的黄河尾间变动过程

Fig. 7 Changes in the Yellow River estuarine channel revealed by Landsat imagery during 2002–2017

洼断面左岸没有控制工程, 主槽在冲刷下切的同时不断向左(北)移动, 深泓点向左移动了 359 m。清7和汉2断面在2002—2017年主槽平均高程分别下降了 0.38 m 和 0.30 m, 断面形态先朝窄深方向发展, 但2013年后2个断面均发生明显的淤高现象。汉2由于靠

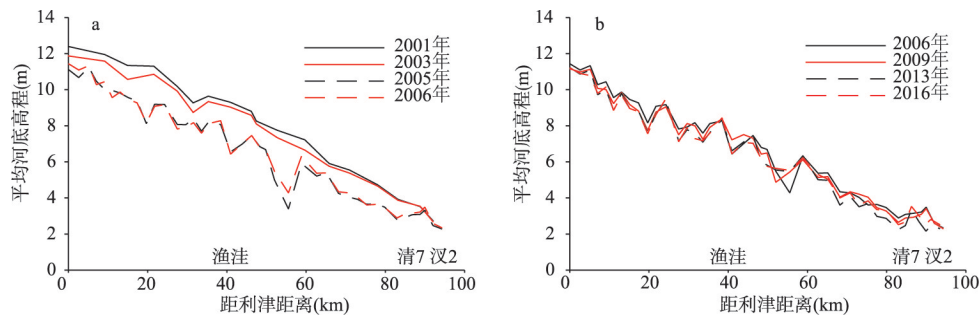


图 8 2002 年以来黄河尾间河道纵剖面变化

Fig. 8 Changes in longitudinal profiles of the Yellow River estuarine channel since 2002

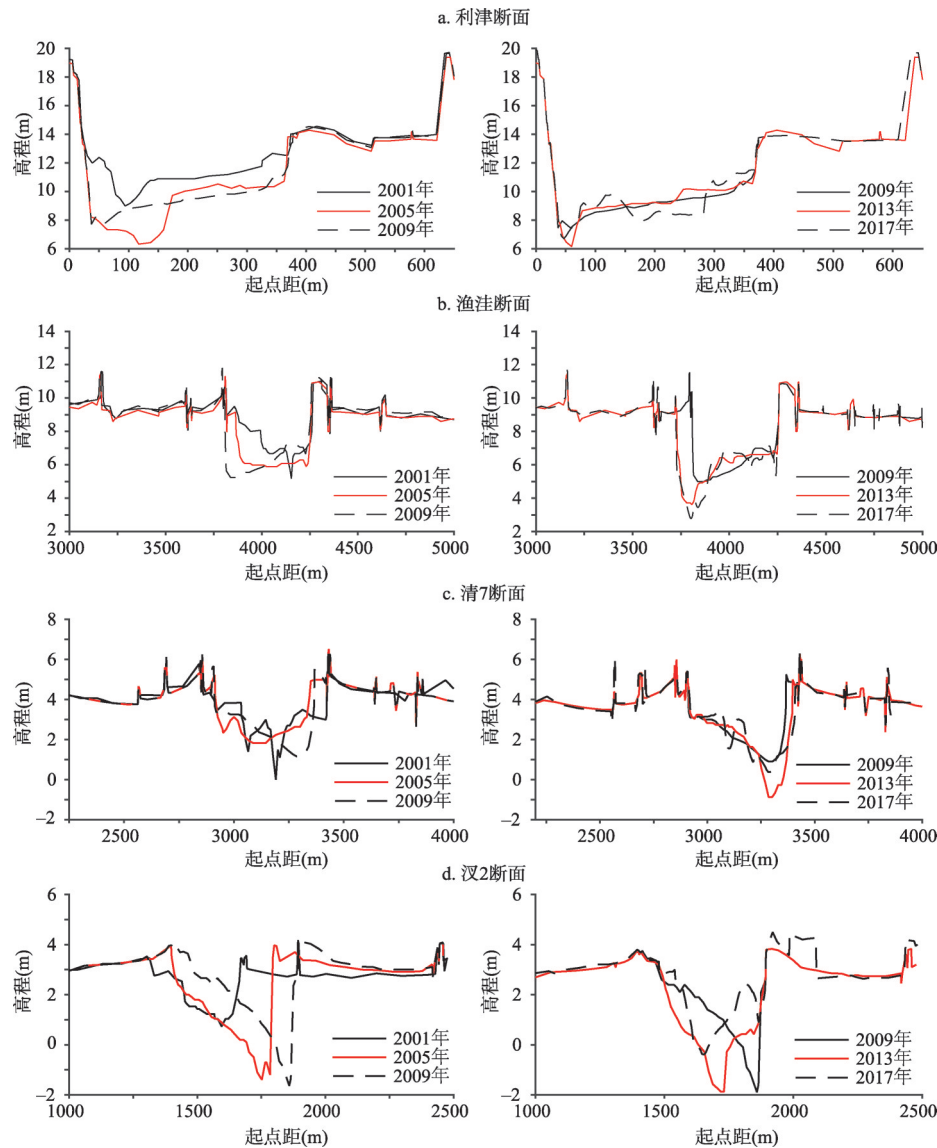


图 9 2001—2017 年黄河尾间河道典型断面形态变化过程

Fig. 9 Variations in typical transects of the Yellow River estuarine channel during 2001-2017

近口门, 因此主槽左右摆动频繁。这4个断面的变化特点同样表明, 尾间河道从上游到口门方向, 冲刷幅度呈减小趋势, 靠近口门的河段, 受潮汐和纵比降减小的影响较大, 冲淤量更少, 也更易发生淤积。

6 黄河尾间河道冲淤的影响因素

尾间河道地貌演变与多种因素相关, 流域来水来沙、河床边界、河口淤积延伸、河床纵横剖面的调整等都对河道冲淤有着不同程度的影响。

6.1 调水调沙

来水来沙条件是河道冲淤的主控因素。利津是黄河下游最后一个水文站, 通常以该站的水沙资料代表进入河口的水沙条件。图10给出了1950年以来利津站的水沙通量变化, 由于流域降雨量的减少、水库的蓄水拦沙、持续的沿黄取水工程和有效的水土保持措施等原因^[25], 黄河入海水沙总体呈阶梯式持续减少的态势, 1986年以后进入枯水少沙阶段。1950—1986年尾间河道的年均来水量为412亿 m^3/a , 年均来沙量为10.27亿 t/a , 而1987—1999年尾间河道年均径流量和年均输沙量为150亿 m^3/a 和4.16亿 t/a , 分别较1950—1986年期间下降了63.56%和59.51%。

1999年小浪底建成并投入使用, 2002年开始联合上游水库进行调水调沙, 保证了黄河不断流, 此后利津站来水量有所回升, 2002—2017年尾间河道年均来水量约164亿 m^3/a , 来沙量继续降低, 年均1.31亿 t/a , 水沙搭配有利于河道冲刷。此外, 调水调沙通过人工调控洪水在短时间内将大量水沙集中输送入海, 改变了水沙的年内分配。对比1986—1999年和2000—2017年月平均径流量和月平均输沙量变化(图11), 1986—1999年月平均径流量最大值在8—10月的主汛期, 水沙量均从7月开始增加; 而2000—2017年月平均径流量和输沙量最大值均出现在7月, 且从6月径流量就开始增加, 相比之前提前了1个月, 水沙主要集中在6—7月的调水调沙期间入海。

调水调沙在一定程度上改善了进入河口的水沙条件, 清水下泄使得下游和尾间河道发生冲刷。由于调水调沙集中在汛期, 汛前汛后尾间河道的冲淤对比代表汛期的冲淤变化, 也可代表调水调沙引起的河道冲淤变化, 因此计算每年汛期的冲刷效率代表调水调沙的冲刷效率, 如表2所示。随着调水调沙的持续进行, 河道冲刷效率也在发生变化。

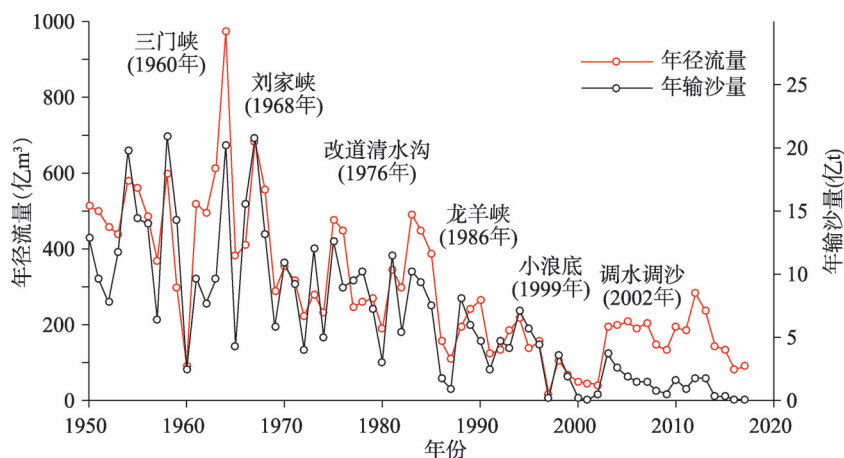


图10 1950—2017年利津站径流量和输沙量

Fig.10 Water discharge and sediment load at Lijin Station during 1950-2017

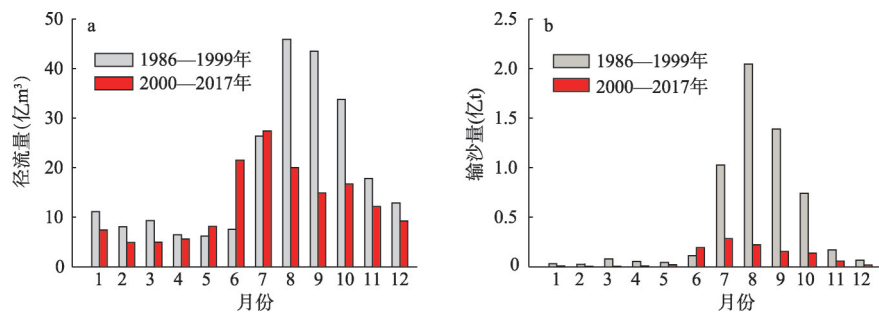


图 11 1986—1999 年和 2000—2017 年月平均径流量和输沙量对比
Fig. 11 Monthly average water discharge and sediment load during 1986-1999 and 2000-2017

表 2 2002—2017 年黄河尾间河道水沙变化及冲淤特征

Tab. 2 Scour and siltation related with water and sediment changes in the Yellow River estuarine channel						
年份	年来水量(亿 m ³)	年来沙量(亿 t)	年冲淤量(10 ⁶ t)	冲淤占比(%)	汛期冲淤量(10 ⁶ t)	汛期冲刷效率(kg/m ³)
2002	41.9	0.54	-23.88	-43.98	-22.10	-6.67
2003	192.7	3.69	-31.51	-8.54	-33.45	-2.66
2004	198.8	2.58	2.85	1.11	-12.57	-0.82
2005	206.8	1.91	-22.59	-11.83	-28.23	-1.87
平均	160.1	2.18	14.46	-15.81	-24.089	-3.00
2006	191.7	1.49	9.65	6.48	-2.565	-0.17
2007	204.0	1.47	-3.51	-2.39	-12.335	-0.78
2008	145.6	0.77	-1.99	-2.59	-7.68	-0.75
2009	132.9	0.56	-8.21	-14.63	-13.86	-1.45
2010	193.0	1.67	2.97	1.78	-7.88	-0.49
2011	184.2	0.93	-10.86	-11.73	-15.75	-1.29
2012	282.5	1.83	1.36	0.74	1.28	0.06
2013	236.9	2.73	-1.43	-0.52	-9.67	-0.55
2014	114.3	0.30	-4.25	-14.12	-5.59	-0.82
平均	187.2	1.31	-1.39	-4.12	-8.23	-0.69
2015	133.6	0.31	7.58	24.14	7.44	0.88
2016	81.9	0.11	7.56	71.32	1.42	0.27
2017	89.6	0.08	-4.86	-63.14	1.59	0.33
平均	101.7	0.17	2.64	10.77	3.48	0.50

注：冲刷效率为汛期冲淤量/汛期来水量(正值代表淤积,负值代表冲刷);冲淤占比为年冲淤量/年来沙量(利津站),泥沙干容重按 1.3 t/m³计算。

调水调沙初期冲刷效率最大, 2002—2005 年冲刷效率平均为 3.00 kg/m³, 其中 2002 年冲刷效率达 6.67 kg/m³, 河道冲刷量占该年来沙量的约 44%, 说明长期小水后进行调水调沙对尾间河道冲刷效果最明显。2006 年以后冲刷效率显著下降, 2006—2014 年冲刷效率平均仅为 0.69 kg/m³, 河道冲刷效果不佳, 且冲淤年际波动较大。2015—2017 年黄河上游来水量极小, 水库对水沙的调节能力有限, 尾间来水来沙显著减少, 河道淤积严重, 2015 年进入河口的泥沙约有 24.14%淤积在尾间河道, 2016 年调水调沙开始中断, 汛期和非汛期均淤积严重, 进入河口的泥沙约有 71.32%淤积在尾间河道, 2017 年的汛期河道同样发生淤积。调水调沙中断前一年和中断后一年, 尾间河道汛期均发生淤积, 不利于河口防洪、防凌安全, 这值得引起警惕。

来沙系数是指某时段的含沙量除以相应时段内的流量,流量越大,含沙量越小,来沙系数就越小,河道越容易冲刷,水沙搭配条件越有利^[26]。2002年以来,利津站汛期来沙系数不断降低,水沙搭配条件越来越有利于河道冲刷,但冲淤效率却不断降低(图12a)。说明尾间河道的冲淤不仅受水沙搭配条件的控制,还受其他因素的影响。从2002—2017年利津站累积径流量与累积输沙量的关系变化可以看出,累积径流量与累积输沙量的斜率在2006年和2015年都存在较为明显的降低态势,说明进入尾间河道的单位水量的携沙能力在不断降低。这两个拐点的出现与河床冲淤量变化的拐点基本对应,2006—2014年期间调水调沙对下游及尾间河道的冲刷能力显著下降,这表明河床经过前期的冲刷调整,已经逐渐适应了现有的来水来沙条件,河床抵抗侵蚀的能力增强(图8~图9)。而2014年以后尽管来沙量相比前期大大减少,但径流量同样大量减少(图10),2014—2017年平均年径流量约为2002—2013年的56%,流量大于2000 m³/s的天数很少甚至没有,对河道的冲刷作用不明显,2015—2016年由于来水来沙太少以至调水调沙中断,河道甚至出现不冲反淤的现象,因此2014年也出现拐点。

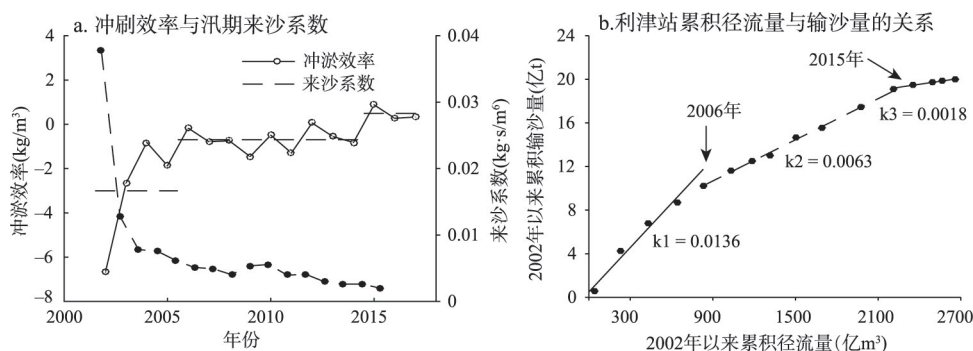


图12 2002—2017年尾间河道的冲刷效率与利津站水沙

Fig.12 Erosion efficiency of estuarine channel and water-sediment at Linjin Station during 2002-2017

6.3 河口海域淤积

河口段河道冲淤不仅与水沙条件有关,而且与河口基准面密切相关,有利的水沙条件可以延续到河口,但能否产生冲刷则必须与河口基准面的有利条件相结合方能显现^[27]。流域来沙,一部分在尾间河道内淤积,一部分输送至外海,剩余的在口门处淤积,参与三角洲造陆过程。调水调沙将上游冲刷下来的泥沙强烈堆积在河口,2002—2015年间入海泥沙共19.79亿t,其中有66.2%的泥沙在河口海滨处淤积,参与造陆和三角洲前缘塑造^[10],使得河口不断延伸。河道的延伸长度影响河道的冲淤变化,延伸越长,侵蚀基准面越高,河道就越易淤积^[28]。图13是1976年清水沟流路以来利津以下河长的变化,从初期的75 km延伸到1996年的113 km,1996年清8人工改汉,河长缩短了约16 km。小浪底水库运行以来,进入河口的泥沙大量减少,但河口仍然不断淤积延伸,延伸速率相比于清8改汉前大幅减小,平均延伸速度约为0.33 km/a。河口延伸,加上河道经过多年的冲刷,河床高程整体下降,因此相对侵蚀基准面抬高,导致调水调沙后期尾间冲刷效

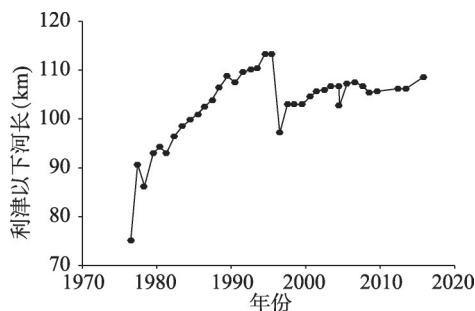


图13 利津以下河长逐年变化

Fig. 13 Annual variations in river channel length under Lijin Station

率的减小甚至淤积。此外,随着河口海域的淤积,河道延伸,河道冲淤会有溯源特性,河道纵比降也会发生变化。2000年以来利津—清7河段纵比降总体变化不大,而清7—汉3河段纵比降呈不断减小的趋势(图14),这是由于清7—汉3河段在调水调沙快速冲刷期的冲刷强度小于利津—清7河段,在淤积期的淤积强度远大于利津—清7河段,导致清7以下河道河床相对抬高,纵比降减缓。

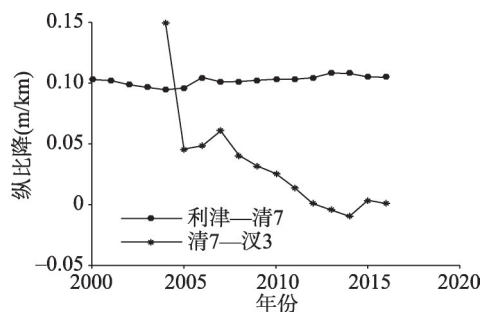


图14 利津—清7、清7—汉3河床纵比降变化

Fig. 14 Annual variations of river longitudinal slope

5 结论

受径流水沙和海洋动力的作用,河口不断发生动态调整和演变。根据黄河尾闾河道41个断面实测高程数据,建立基于正交曲线网格的河道DEM,结合河道形态变化及来水来沙条件,研究黄河2002年调水调沙以来尾闾河道的时空演变。得到以下几点认识:

(1) 自2002年黄河调水调沙以来,尾闾河道发生了明显的冲刷,截至2017年共计冲刷6240万 m^3 ,根据冲刷速率可以分为3个阶段:快速冲刷阶段(2002—2005年),冲刷速率为1443万 m^3/a ;冲刷减慢阶段(2006—2014年),冲刷速率为139万 m^3/a ;淤积阶段(2015—2017年),淤积速率为263万 m^3/a 。其中,2002—2005年快速冲刷阶段的冲刷量占总冲刷量80%,2006年以后尾闾河道冲刷减弱。

(2) 从季节上看,黄河尾闾河道汛期主要表现为冲刷,非汛期则表现为淤积;从空间上看,越往口门方向,冲刷强度越小。

(3) 2002年以来,尾闾河道河势发生了几次调整,分别是2004年河口向东自然摆动,2007年6月由东向北自然出汉,2011年汉1附近的人工裁弯取直,2013年又在北汉东岸冲出了一条汉沟,形成了目前河口北汉、东汉分流入海的格局。

(4) 影响黄河尾闾河道冲淤的主控因素是来水来沙条件,调水调沙的实施改变了水沙的年内分配,造成了尾闾河道的持续冲刷,冲刷效率最大在2002年,达 $6.67 \text{ kg}/\text{m}^3$,之后急剧下降。2015—2016年由于来水来沙太少以至调水调沙中断,尾闾河道淤积严重,淤积量分别占该年来沙量的24.14%和71.32%。

(5) 由于近口门段冲刷强度显著小于尾闾河道上段,口门海域的淤积造成相对侵蚀基准面升高,加剧了近口门段的淤积,导致清7以下河道纵比降减小,不利于河口防洪、防凌安全,这是需要密切关注的。

参考文献(References)

- [1] Xu Congliang, Chen Shenliang, Chen Junqing. Evolution mode of channel bifurcation delta system at the Yellow River Estuary under the new situation. *Coastal Engineering*, 2018, 37(4): 35-43. [徐丛亮, 陈沈良, 陈俊卿. 新情势下黄河口出汉流路三角洲体系的演化模式. *海岸工程*, 2018, 37(4): 35-43.]
- [2] Yu Xin, Zhang Yuanfeng, Yu Shoubing, et al. Study on both morphological changes of Yellow River estuarine course and integrated management for its stability. *Yellow River*, 2018, 40(3): 1-6. [余欣, 张原峰, 于守兵, 等. 黄河口演变与流路稳定综合治理研究. *人民黄河*, 2018, 40(3): 1-6.]
- [3] Xu Congliang, Li Jinping, Li Guangxue, et al. Evolution processes and mechanisms of the Yellow River Delta and its deltaic channel. *Yellow River*, 2013, 35(4): 3-5. [徐丛亮, 李金萍, 李广雪, 等. 黄河河口尾闾与三角洲演变过程机制解析. *人民黄河*, 2013, 35(4): 3-5.]
- [4] Miao C Y, Kong D X, Wu J W, et al. Functional degradation of the water-sediment regulation scheme in the lower

- Yellow River: Spatial and temporal analyses. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552: 16-22.
- [5] Zhang Zhihao, Hu Chunhong. Variation of flow and sediment and atrophy response of tail channels in the Yellow River Estuary. *Journal of Sediment Research*, 2005(5): 13-21. [张治昊, 胡春宏. 黄河口水沙变异及尾间河道的萎缩响应. 泥沙研究, 2005(5): 13-21.]
- [6] Xia J Q, Li X J, Li T, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River. *Geomorphology*, 2014, 213: 255-265.
- [7] Bi N S, Sun Z Q, Wang H J, et al. Response of channel scouring and deposition to the regulation of large reservoirs: A case study of the lower reaches of the Yellow River (Huanghe). *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 972-984.
- [8] Ji H Y, Chen S L, Pan S Q, et al. Morphological variability of the active Yellow River mouth under the new regime of riverine delivery. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 329-341.
- [9] Fan Y S, Chen S L, Zhao B, 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. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 406-419.
- [10] Chen Shenliang, Gu Shuo, Ji Hongyu, et al. Processes of the Yellow River Mouth on new water and sediment condition. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 61-67. [陈沈良, 谷硕, 姬泓宇, 等. 新入海水沙情势下黄河口的地貌演变. 泥沙研究, 2019, 44(5): 61-67.]
- [11] Zheng S, Wu B S, Wang K R, et al. Evolution of the Yellow River Delta, China: Impacts of channel avulsion and progradation. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(1): 34-44.
- [12] Yuan Yuan, Zhang Xiaofeng, Duan Guanglei. Effect of riverbed form on error in calculation of channel erosion and deposition volumes by cross-section method. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1): 131-138, 182. [元媛, 张小峰, 段光磊. 河道床面形态对断面法计算冲淤量误差的影响. 水力发电学报, 2015, 34(1): 131-138, 182.]
- [13] Shu Caiwen, Tan Guangming. Advances in calculation methods for river sedimentation. *Journal of Sediment Research*, 2009(4): 68-73. [舒彩文, 谈广鸣. 河道冲淤量计算方法研究进展. 泥沙研究, 2009(4): 68-73.]
- [14] Duan Guanglei, Peng Yanbo, Guo Manjiao. Comparative analysis on riverbed erosion and deposition amount calculated by different methods. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(2): 108-113, 118. [段光磊, 彭严波, 郭满姣. 河道实测冲淤量不同计算方法结果比较分析. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 108-113, 118.]
- [15] Shen Guanqing, Jiang Naiqian, Zhang Yuanfeng, et al. Comparison of the calculated sedimentation amount by different methods in the lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2006(1): 32-37. [申冠卿, 姜乃迁, 张原锋, 等. 黄河下游断面法与沙量法冲淤计算成果比较及输沙率资料修正. 泥沙研究, 2006(1): 32-37.]
- [16] Sun Zhongqiang, Gu Shuo, Wang Houjie, et al. A method for the calculation of erosion and accumulation in the river channel using bathymetric data of river cross section: Based on orthogonal-curvilinear-grid DEM. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(9): 90-99. [孙中强, 谷硕, 王厚杰, 等. 一种基于断面高程数据的河道冲淤计算方法: 曲线正交网格地形法. 中国海洋大学学报, 2018, 48(9): 90-99.]
- [17] Merwade V M, Maidment D R, Goff J A. Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(3/4): 731-741.
- [18] Schäppi B, Perona P, Schneider P, et al. Integrating river cross section measurements with digital terrain models for improved flow modelling applications. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(6): 707-716.
- [19] Legleiter C J, Kyriakidis P C. Spatial prediction of river channel topography by kriging. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(6): 841-867.
- [20] Yuan Yuan, Zhang Xiaofeng, Duan Guanglei. Influence of grid dimensions on erosion-deposition amount by grid method in straight channels. *Journal of Sediment Research*, 2014, 39(2): 55-61. [元媛, 张小峰, 段光磊. 网格尺寸对顺直河段计算冲淤量的敏感性分析. 泥沙研究, 2014, 39(2): 55-61.]
- [21] Hou Zhijun, You Baohong, Li Shiguo. Erosion and deposition characteristic analysis of tail reaches in the Yellow River Estuary in recent years. *Journal of Sediment Research*, 2009, 34(1): 48-53. [侯志军, 由宝宏, 李士国. 近年来黄河尾间河道冲淤特性分析. 泥沙研究, 2009, 34(1): 48-53.]
- [22] Wang Wanzhan, Zhang Junhua. Discussion on law of river course evolution at Yellow River estuary. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(2): 5-9, 20. [王万战, 张俊华. 黄河口河道演变规律探讨. 水利水电科技进展, 2006, 26(2): 5-9, 20.]
- [23] Yu Xin, Wang Wanzhan, Li Yan, et al. Processes of the Yellow River Estuary since operation of the Xiaolangdi Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2016, 41(6): 8-11. [余欣, 王万战, 李岩, 等. 小浪底水库运行以来黄河口演变分析. 泥沙研究, 2016, 41(6): 8-11.]
- [24] Zhang Shiyuan, Xia Junqiang, Wan Zhanwei, et al. Variations in planform and cross-sectional geometries of Qingshuigou channel in the Yellow River Estuary (1976-2016). *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(1): 63-

74. [张诗媛, 夏军强, 万占伟, 等. 黄河口尾间河道近 40 年河床断面及平面形态调整特点. 水力发电学报, 2019, 38 (1): 63-74.]
- [25] Li G X, Wei H L, Yue S H, et al. Sedimentation in the Yellow River Delta (Part II): Suspended sediment dispersal and deposition on the subaqueous delta. *Marine Geology*, 1998, 149(1-4): 113-131.
- [26] Wu Baosheng, Shen Guanqing. Discussion on the physical significance of the coefficient of coming sediment. *Yellow River*, 2008, 30(4):15-16. [吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨. 人民黄河, 2008, 30(4): 15-16.]
- [27] Wang Kaichen. Understandings of erosion and deposition in the lower Yellow River. *Yellow River*, 2012, 34(7): 20-24. [王恺忱. 对黄河下游河道冲淤问题的认识. 人民黄河, 2012, 34(7): 20-24.]
- [28] Shi C X, Zhou Y Y, Liu X F, et al. River base level change in mouth channel evolution: The case of the Yellow River Delta, China. *Catena*, 2019, 183: 104193. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104193.

Spatiotemporal evolution of Yellow River estuarine channel and its influencing factors since the water-sediment regulation scheme

LIU Qinglan¹, CHEN Junqing², CHEN Shenliang¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Institute of the Yellow River Estuary and Coast Science, Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: The implementation of the Water-Sediment Regulation Scheme (WSRS) since 2002 has changed the water and sediment entering the Yellow River Estuary, which may lead to adjustment of the estuarine channel. Based on the elevation data of 41 transects from 2002 to 2017 in the estuarine channel downstream from Lijin, we established a digital elevation model (DEM) based on curved orthogonal grids to investigate the spatiotemporal characteristics of channel erosion and deposition, and further analyzed its controlling factors combining the morphological changes of river mouth and water-sediment data. The results show that the Yellow River estuarine channel has undergone significant erosion with a total sediment volume of $62.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ since 2002. The channel evolution process can be divided into three stages according to the rates of erosion or deposition, namely: rapid erosion (2002-2005), slow erosion (2006-2014), and slow deposition (2015-2017). Approximately 80% of the total eroded sediment was depleted in the first stage. The erosion flux has shown a significant decreasing trend after 2006, and the overall characteristic of the channel transferred from erosion into deposition afterwards. On a seasonal scale, the estuarine channel was eroded in the flood seasons and deposited in the non-flood seasons; from the spatial perspective, the erosion intensity decreased in the downstream direction. The operation of the WSRS changed the distribution of water and sediment entering into the sea during a year, most of which was delivered in a short time (no more than 20 days), thus caused the continuous erosion of channel as well as the morphological adjustments of the estuarine channel. As a result of the intensive erosion in the first stage, the estuarine channel riverbed has lowered so much, and accompanied by the impact of the extension of river mouth, the erosion efficiency decreased continuously. Besides, the channel reach near the mouth has undergone significant siltation after the first stage causing the decline of riverbed longitudinal slope, which increased the instability of the estuarine channel.

Keywords: water and sediment regulation scheme; estuarine channel; erosion and deposition; DEM