不同水沙情势下现行黄河口滨海区冲淤时空演变

吴文娟, 范勇勇

（黄河河口海岸科学研究所, 山东 东营 257091）

摘　要：2018 年至 2021 年黄河河口春季生态调水与 2 次罕见大洪水，导致时段内入海水沙过程和水沙通量发生变化。为了解滨海地貌变化特征，根据海域实测地形资料，结合同期利津水文站来水来沙数据，分析了河口滨海区 2、5 和 10 m 等深线变化及冲淤演变，比较了现河口各汊三角洲前缘发育情况。结果表明：2018 年至 2021 年河口年均入海水沙分别为 362 亿 m^3 和 2.81 亿 t，是 2002 年至 2017 年入海水沙均值的 2 倍；4 a 间入海泥沙共 11.67 亿 t（包括尾闾河道冲刷 0.42 亿 t），其中有 8.58 亿 t（6.13 亿 m^3）落淤在现行河口滨海区；洪峰呈漫流入海，入海汊口稳定性变差，加速河口出汊摆动演变，口门前方形成长轴平行岸线、短轴垂直岸线的椭圆形连续狭长淤积带，三角洲前缘得到充分发育；大洪水期间，河口在东北向自然出汊，东汊和东北汊成为入海主汊。

关键词：水沙情势；大洪水；滨海冲淤；黄河口

中图分类号：TV148　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-3682（2023）01-0052-09

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220728001

引用格式：吴文娟, 范勇勇. 不同水沙情势下现行黄河口滨海区冲淤时空演变[J]. 海岸工程, 2023, 42（1）：52-60. WU W J, FAN Y Y. Spatiotemporal evolution of erosion and deposition in the current Yellow River Estuary under different water and sediment regimes[J]. Coastal Engineering, 2023, 42（1）：52-60.

黄河口滨海区位于陆海相互作用的关键地带，地形地貌演变是海岸潮汐动力、上游河道来水来沙、风浪动力等多方面因素耦合作用的结果。黄河素以“水少沙多”闻名于世，多年平均入海泥沙通量 10.8 亿 t[1]。近年来，由于流域气候变化和人类活动的强烈干预，黄河入海水沙条件发生变化，滨海区地形地貌演变表现出新特征[2]。有多名学者结合实测水文数据对此做了分析研究，姜明星等[3]分析了 1976 年至 2000 年清水沟流路时期滨海区水下地形演变特征，提出行水河口岸段剧烈淤进，停止行河岸段“剧烈蚀退-蚀退减缓-相对稳定”的发育特征；徐丛亮等[4]利用实测数据分析了黄河调水调沙后水沙短期快速入海，河口拦门沙海域迅速淤积，且淤积量占同期入海泥沙的 75.6%；陈俊卿等[5]计算发现 2016 年至 2017 年入海水沙锐减导致拦门沙海域遭受冲刷，底质沉积物筛选后粒度变粗，等深线整体向陆蚀退。

2018 年以来每年 3 月至 5 月，黄河水利委员会在黄河下游及河口近海实施春季生态调度，通过精细调度小浪底水库，塑造维持下游河道生态廊道功能的流量过程。2020 年 7 月黄河汛前腾库迎汛，利津径流量连续 3 日达 4 580 m^3/s，北岸清 3 险工堤坝上用手就能掬起洪水；2021 年秋季大洪水入海，利津径流量达 5 240 m^3/s，河口保护区湿地全部漫滩半米以上。目前，生态调度时期，尤其是大洪水形势下的河口滨海区冲淤研究缺乏，因此对该时段内滨海区冲淤演变特征研究非常有意义，本文基于研究时段内黄河口滨海区实测地形资料，结合同期入海水沙数据，分析了滨海区冲淤演变特征，为河口海岸线演变分析、水沙运动规律研究、容沙区分析研究等提供及时可靠的资料依据。

收稿日期：2022-07-28

资助项目：国家自然科学基金项目（U2243208）；国家自然科学基金委员会与山东省人民政府联合资助项目（U1706214）

作者简介：吴文娟（1988—），女，工程师，硕士，主要从事河口与河道监测方面研究. E-mail：wuwenjuan0205@163.com

（王佳实　编辑）

1　区域概况

研究区域为 1996 年黄河清 8 人工出汊后的现行河口拦门沙区，共布设 101 个水下监测断面开展滨海区冲淤演变分析，断面编号为+20～81（图 1）。北坐标范围为 4 180 000～4 205 000，东西向自海岸向外延伸 15～35 km，面积约为 610 km^2。黄河入海口为弱潮型河口，不规则半日潮。河口近岸潮流为往复流，涨潮流方向为 S 或 SW 向，落潮流方向为 N 或 NE 向。河口区域潮间带宽约 2 km，比降约 1.1‰[6]。波浪以本地风生浪为主，具有明显的季节性特征，波浪对河口区泥沙再悬浮作用强烈[7]。

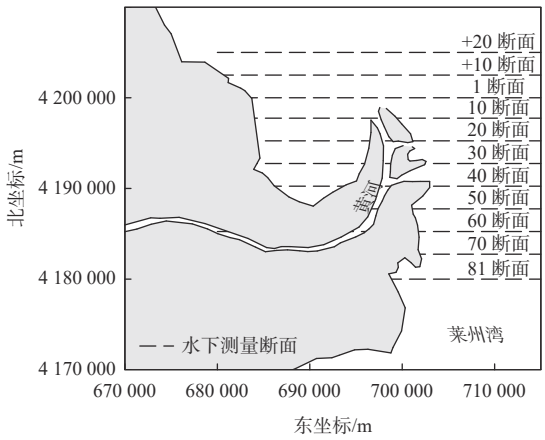


图 1　研究区域和部分监测断面布设位置

Fig. 1　Location of the study area and layout of some monitoring sectionis

2　资料与方法

利津站是黄河入海前最后一个水文站，径流量、输沙量数据由利津水文站提供，其以下尾闾河道冲淤量由黄河口水文水资源勘测局河道断面实测资料计算得到。收集 2017 年至 2021 年多景汛后高分一号遥感影像，影像分辨率为 16 m，获取时间分别为 2017 年 11 月 12 日、2018 年 10 月 23 日、2019 年 10 月 31 日、2020 年 10 月 26 日和 2021 年 11 月 27 日，在中国资源卫星应用中心网站免费下载获取。利用 NDWI（Normalized Difference Water Index）方法解译不同年份的 0 m 水边线作为冲淤计算岸线[8]，并利用实测 0 m 线对水边线进行校正。

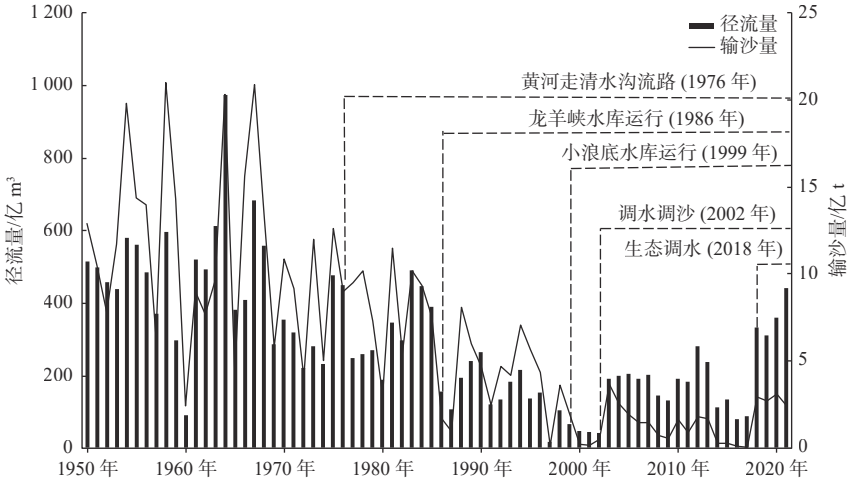
为获取连续的河口地貌演变数据，黄河口水文水资源勘测局每年汛后 8 月至 10 月开展现行黄河口区水下地形测量。2017 年至 2019 年布设 81 条东西向水下测量断面（断面编号 1～81），监测范围为 20 km×30 km。2020 年随口门向北延伸增设 10 条测量断面（断面编号+1～+10），2021 年汛后再向北增设 10 条测量断面（断面编号+11～+20）。2021 年测量数据增至 101 条东西向水下测量断面，监测范围 25 km×35 km。每条测线长 15～35 km，岸边在高潮期间测至高潮线，相邻断面间隔 250 m，采用北京 54 平面坐标系、1985 国家高程基准。运用 Surfer 软件对水下地形数据进行克里金插值处理，绘制河口水下地形等深线，对相邻年份水深数据作差计算冲淤变化量，并分析三角洲前缘发育特点。

3　黄河入海水沙情势

3.1　黄河入海水沙总体特征

由利津水文站多年的监测数据可知，1950 年至 2021 年，黄河入海水沙年际变化较大。1976 年之前的刁口河流路和神仙沟流路时期河口平均入海径流量 450 亿 m^3/a、入海输沙量 11.37 亿 t/a。1976 年，黄河改走清水沟流路入海，人工干预初期，上游来水来沙量比自然状态略少，随着中游水土流失治理和水库建设，来水来沙量急剧减少。清 8 改汉前，1976 年至 1996年间河口平均入海径流量 257 亿 m^3/a、入海输沙量 6.44 亿 t/a。清 8 改汉至调水调沙实施前，1996 年至 2002 年河口平均入海径流量 69.3 亿 m^3/a、入海输沙量 1.58 亿 t/a。调水调沙实施以来，2002 年至 2017 年河口平均入海径流量 173 亿 m^3/a、

入海输沙量 1.30 亿 t/a。2018 年后春季生态调水实施以来，2 次大洪水过流，时段内入海水沙明显回升，2018 年至 2021 年河口平均入海径流量 362 亿 m^3/a、入海输沙量 2.81 亿 t/a(图 2)。



注：数据来自利津水文站整编资料。

图 2 1950—2021 年间黄河入海径流量与输沙量

Fig. 2 Runoff and sediment discharge entering into the sea from the Yellow River in the period from 1950 to 2021

3.2 春季河口生态调度

自 2018 年开始实施的黄河下游春季生态调度，旨在通过精细调度小浪底水库，塑造维持下游河道生态廊道功能的流量过程，为河口湿地补充淡水资源创造条件[7,9]。黄河在每年春季 3 月至 5 月实施下游及河口近海生态调度调控，在常规年份(小浪底等干流水库蓄水不足年份)严格按照 30 亿 m^3 入海流量实施调度，在丰水年份(小浪底等干流水库蓄水充足年份)进行更多水量生态调度或者实施调水调沙。生态调度后，利津水文站入海径流量和输沙量从 4 月开始明显增加，径流量较 3 月增加了 1.5 倍，5 月也表现出增加的趋势(图 3)。黄河下游生态调度，保证 3 月至 6 月在河口地区鱼类洄游及产卵关键时期塑造适宜的冲淡水环境，同时也实现了春季入海水沙量的显著增加。2018 年至 2021 年年均入海水沙量分别为 362 亿 m^3 和 2.81 亿 t，是前期调水调沙期间年均入海水沙量的 2 倍。

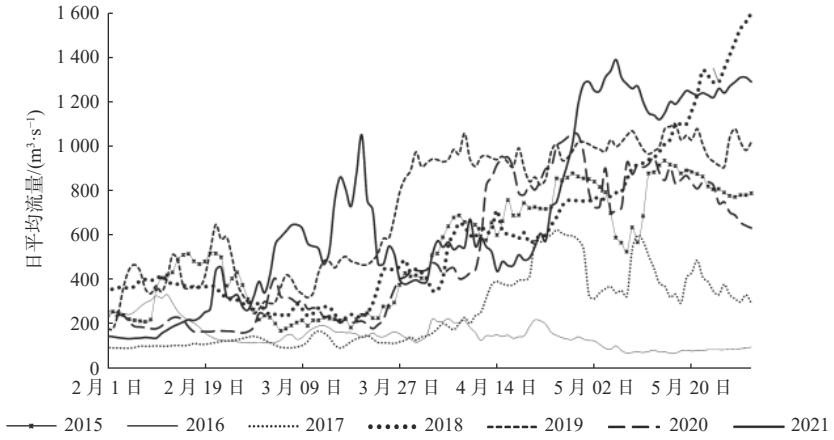


图 3 2017—2021 年 2 月至 5 月利津水文站日均入海水量分布

Fig. 3 Distribution of average daily water volume into the sea at Lijin Station from February to May, 2017—2021

3.3　2020—2021 年夏秋大洪水

为解决小浪底水库调水调沙后续动力不足问题，提升下游河道过流能力，2020 年 6 月 24 日水利部黄河水利委员会开展汛前腾库迎汛，6 月 28 日小浪底水库以峰值流量 5 500 m^3/s 下泄 12 h，是小浪底水库投入运用以来的最大下泄流量。

利津水文站流量从 6 月 25 日开始增加，当日流量为 1 270 m^3/s，7 月 3 日流量最大，为 4 440 m^3/s（图 4），之后整体呈下降趋势。含沙量和流量表现出不同步的特征，6 月 24 日含沙量开始增加，至 6 月 28 日增加到 12.60 kg/m^3，6 月 29 至 30 日下降到 9.11 kg/m^3，7 月 1 日含沙量达到最大值 14.20 kg/m^3。创新的洪水调度模式使流域水沙短期入海，利津以下尾闾河道显著冲刷，主河槽过流能力回升。大流量洪水下泄保证了年入海水沙通量进一步增加，2020 年入海径流量 360 亿 m^3，是 1976 年至 1996 年年均入海径流量的 1.4 倍，2020 年利津站统计年平均来沙量接近 20 a 以来的最大值。

2021 年 8 月下旬至 10 月，受华西秋雨持续影响，黄河中下游地区发生历史罕见秋汛洪水。黄河干流 9 d 内相继出现 3 次编号洪水，黄河下游出现长历时、大流量洪水过程。

利津水文站出现 1979 年以来最大洪水，流量从 8 月 31 日开始增加，流量为 646 m^3/s（图 5），9 月 6 日流量达到 2 500 m^3/s，之后整体呈下降趋势，9 月 19 日至 10 月 5 日流量又迅速增至 5 000 m^3/s，10 月 8 日达到最大值 5 200 m^3/s。利津站流量在 4 000 m^3/s 以上历时达 25 d，其中流量在 5 000 m^3/s 以上历时 7 d。2021 年入海径流量 441.1 亿 m^3，接近 1976 年清水沟流路以来的最大值。

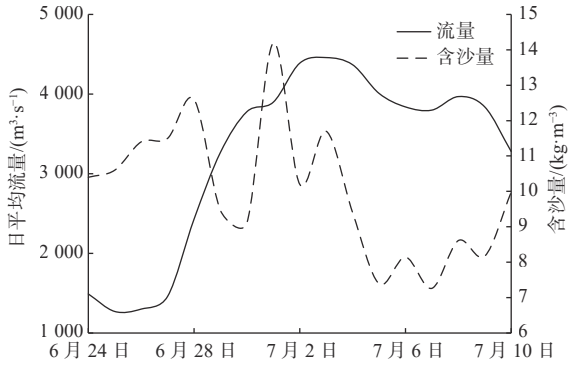


图 4　利津站 2020 年夏季大洪水期间日平均流量、含沙量变化过程线

Fig. 4　Variations of the average daily discharge and sediment concentration at Lijin Station during the great summer flood period in 2020

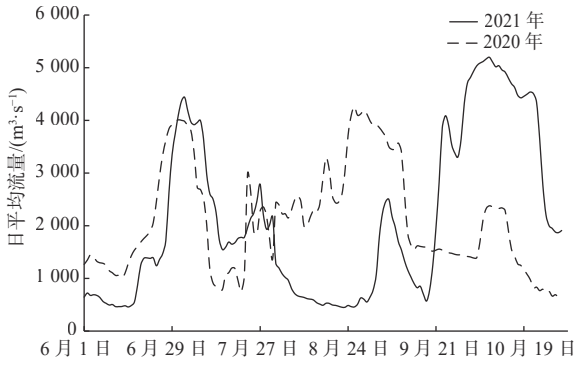


图 5　利津站 2021 年 6 至 10 月日平均流量变化过程线

Fig. 5　Variations of average daily discharge at Lijin Station from June to October in 2021

4　黄河口地貌演变特征

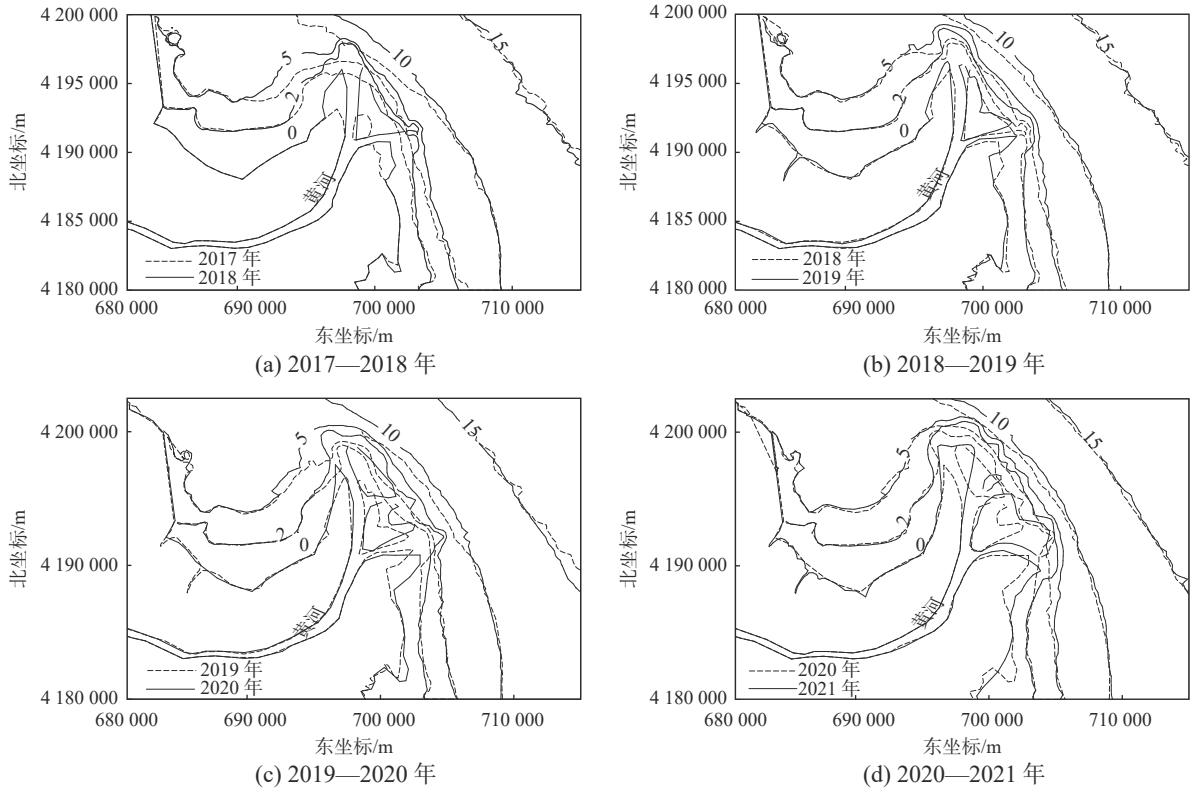
结合现行黄河河口实测水深数据和相对应的遥感影像，对 2017 年至 2021 年黄河口实施春季生态调度后滨海地形演变特征进行总结，并重点分析了 2020 年和 2021 年两次大洪水后河口淤积延伸调整变化。

4.1　河口滨海区等深线变化

利用遥感影像解译 0 m 岸线，根据实测水深数据绘制相邻年度间黄河口滨海区等深线变化图，重点标绘了 2、5、10 和 15 m 等深线（图 6），估算正对口门处水下 2、5 和 10 m 等深线位置变化。

口门处三角洲岸线延伸迅速，10 m 以浅各等深线位置变化明显，15 m 等深线位置相对稳定。

其中 2017 年至 2018 年间沙嘴前缘淤长最快，等深线向海推进幅度最大，口门以西海域多年水下地形变化不大。入海泥沙大部分淤积在现行河口滨海区参与三角洲造陆和沙嘴前缘延伸塑造，少部分泥沙输移至外海。2015 年至 2017 年入海水沙偏少，大量泥沙在水库和下游河床产生淤积，河口发生大面积蚀退[5]。2018 年春季生态调度及调水调沙实施，入海水沙大幅增加，小浪底水库和下游河道受冲刷造成大量泥沙下泄，河口沙嘴迅速淤长。经过多年调水调沙，河床泥沙粗化，河道冲刷效率大大减小，下游河道过流能力提升进入平台期[7]。2020 年创新洪水调度模式，水沙不同步下泄，小浪底水库排淤扩容，下游河道实现全面冲刷。河床粗砂和黄河细沙集中入海，河口沙嘴自然分汊，右岸沙洲迅速发育，河口向西北快速淤积延伸。2021 年秋汛，河口长时间大洪水漫滩过流，入海径流水位高，含沙量少，口门处沙洲受径流冲刷再塑，黄河入海重回正北向。



(a) 2017—2018 年　(b) 2018—2019 年

(c) 2019—2020 年　(d) 2020—2021 年

图 6　2017—2021 年黄河口滨海水下地形等深线逐年变化（m）

Fig. 6　Changes of isobaths in the Yellow River Estuary year by year from 2017 to 2021 (m)

现行河口滨海区等深线变化统计结果（表 1）中，除 2019 年至 2020 年，其余年内 2、5 和 10 m 等深线向海移动距离依次减小，说明入海泥沙对滨海地形的塑造作用由陆及海影响逐渐减弱。年度间各等深线向海移动距离呈波动状，与上游来沙年度变化关系一致。

表 1　现行黄河口滨海区逐年等深线最大向海推进距离（km）

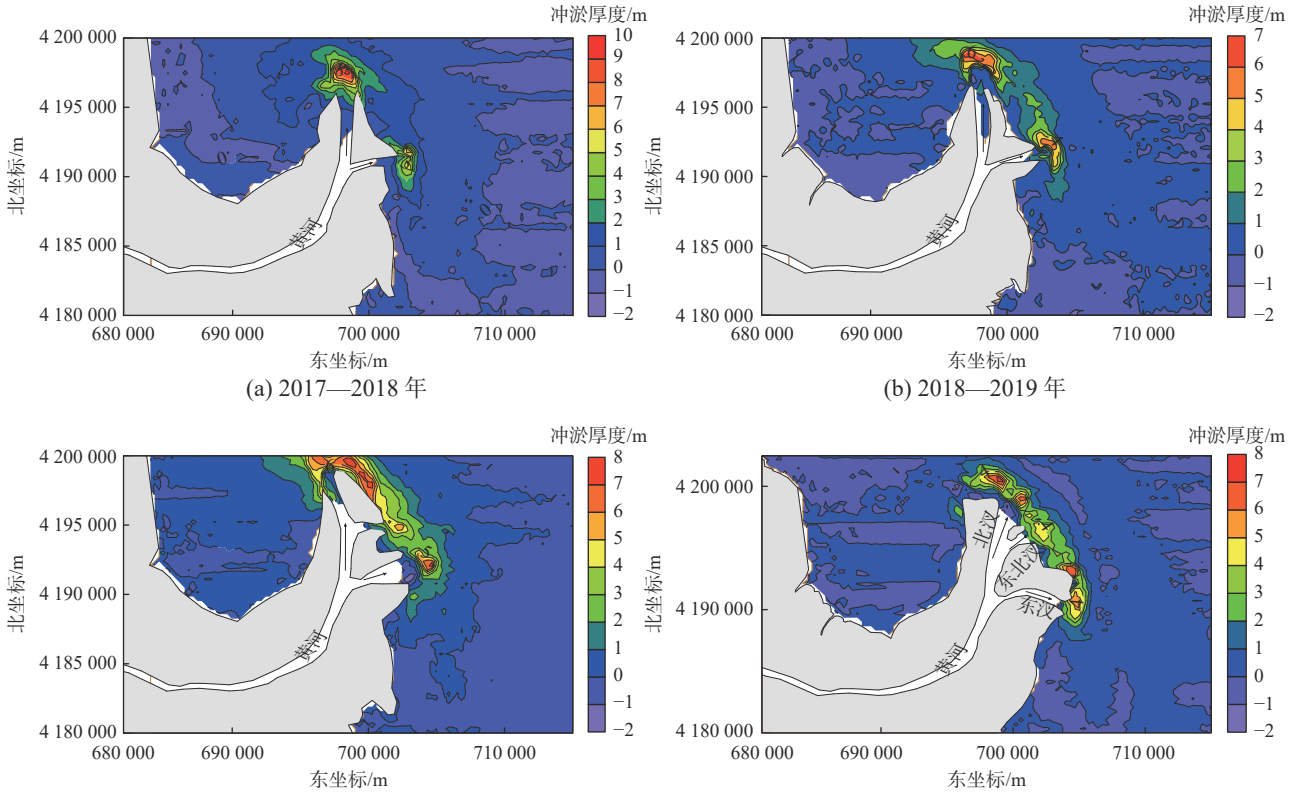
Table 1　The maximum distance of isobaths pushing to the sea year by year in the current Yellow River Estuary (km)

时　段	2 m 等深线	5 m 等深线	10 m 等深线
2017—2018 年	2.13	1.63	1.36
2018—2019 年	1.21	1.19	0.83
2019—2020 年	1.54	1.87	1.09
2020—2021 年	1.06	0.94	0.83

4.2　河口滨海区冲淤演变

依据 2017 年至 2021 年水深数据，利用 surfer 软件绘制年度间冲淤厚度分布图，如图 7 所示。

2017 年至 2021 年，利津站统计总来沙量 11.25 亿 t，计算得到利津以下尾闾河段河床总冲刷量 0.30 亿 m^3（0.42 亿 t）。黄河入海沙量总计 11.67 亿 t，其中有 6.13 亿 m^3（8.58 亿 t）在滨海区范围淤积并参与三角洲造陆和沙嘴前缘塑造，占总入海沙量的 73.5%。大部分黄河入海泥沙沉积在河口以外的拦门沙及其以外的前缘斜坡区，淤积形态呈长轴平行于岸线，短轴垂直于岸线的不规则椭圆状。



注：冲淤厚度为正值表示淤积、负值表示冲刷；北汊剖面起点坐标为（4 192 000，698 140），东汊剖面起点坐标为（4 191 000，700 000），东北汊剖面起点坐标为（4 194 860，700 000）。

图 7　2017—2021 年逐年冲淤厚度分布

Fig. 7　Distributions of erosion and deposition thickness year by year from 2017 to 2021

2017 年至 2018 年，测区内淤积及冲刷面积分别为 268.2 和 163.78 km^2（表 2）。入海水量增加伴随大量泥沙下泄，在河口地形和潮流切变锋作用下，在行水口门前方形成 2 个淤积中心，最大淤积厚度达 9.33 m，冲刷区主要分布在孤东近岸及口门东 12 m 以深海域。受拦门沙阻隔，小流量时以东汊口门行水为主，大流量时以北汊口门行水为主，随春季生态调度和调水调沙的持续实施，两汊口门泥沙淤积厚度差距缩小。2018 年至 2019年，两汊口门前方分别形成淤积中心，北口门最大淤积厚度为 6.67 m，东口门最大淤积厚度为 5.90 m。2020 年 7 月黄河汛前腾库迎汛，小浪底水库排沙和下游河道持续冲刷，大量粗颗粒泥沙输运入海，受潮流顶托在口门处快速落淤。洪峰径流在两汊间心滩漫流入海，东北向滨海近岸海底地形坡降大，北汊自然向东北分汊，北、东、东北三汊（各汊位置见图 7d）入海形成狭长马鞍形拦门坎，北汊向西偏转对孤东海域产生了少量的泥沙补给。2020 年至 2021 年，在秋汛大洪水和海洋动力共同作用下，北汊继续向东北偏移，测区内淤积面积

327.9 km^2，淤积范围向东延伸至 15 m 水深处，口门前方形成 16 km 的连续狭长淤积带（淤积厚度≥2 m）。

表 2 2017—2021 年滨海区逐年冲淤变化

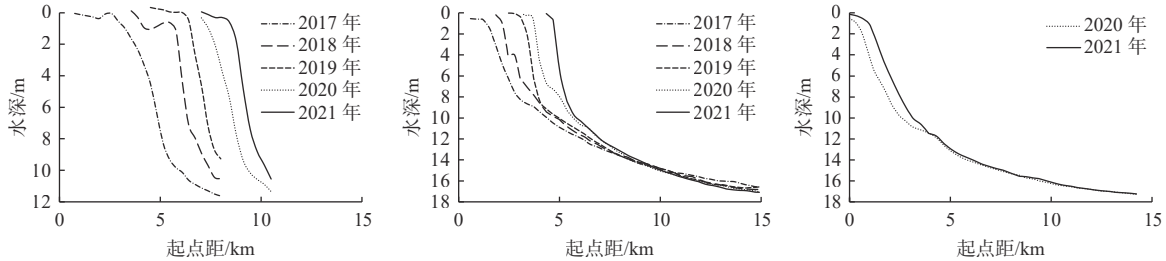
Table 2 Changes of erosion and deposition in the study area year by year from 2017 to 2021

时 段	面积变化/km^2		体积变化/亿 m^3		净冲淤量/亿 t	最大淤积厚度/m	最大冲刷厚度/m
	淤积	冲刷	淤积	冲刷			
2017—2018 年	268.2	163.8	2.06	0.30	2.47	9.33	−1.40
2018—2019 年	270.4	150.3	1.43	0.24	1.66	6.67	−1.42
2019—2020 年	217.1	198.0	2.00	0.42	2.21	7.85	−1.51
2020—2021 年	327.9	148.3	1.81	0.21	2.24	7.28	−1.45

注：泥沙容重取 1.4 t/m^3 计算；面积变化和体积变化分别为测区总面积和总体积变化量。

4.3 三角洲前缘发育分析

2018 年以后，春季生态调度的持续实施和 2 次大洪水保证了河口充足的水沙供给，水下三角洲得到充分发育，入海水沙受拦门沙阻碍，口门出汊摆动，淤积中心位置不断变化，淤积带范围增大，三角洲前缘持续向海推进。由 2017 年至 2021 年各汊三角洲前缘变化剖面分布（图 8）可见，水下三角洲 12 m 水深范围内均发生明显淤积。北汊三角洲前缘向海推进最快，平均每年向海推进 1.49 km，其中 2018 年推进最快，为 2.12 km，2021 年最慢，为 1.09 km。东汊三角洲前缘平均推进速率为 1.08 km/a，2021 年最快，为 1.46 km。河口沙嘴持续向海延伸，三角洲前缘坡降变大，淤积厚度大于 2 m 区域净淤积沙量为 2.08 亿 t，占入海沙量的 18%。



(a) 北汊三角洲前缘剖面 (b) 东汊三角洲前缘剖面 (c) 东北汊三角洲前缘剖面

图 8 2017—2021 年三角洲前缘变化剖面分布

Fig. 8 Profiles of the changes in delta front from 2017 to 2021

由 2017 年至 2021 年河口北汊、东汊、东北汊各汊三角洲前缘发育统计结果（表 3）可见，2017 年至 2019 年北汊三角洲前缘发育迅速，接近同期东汊向海推进距离的 2 倍， 2019 年 2 m 以上淤积厚度发育范围萎缩，中心淤积厚度减小。2020 年水下三角洲得到充分发育，2 m 以上淤积厚度范围为 30.7 km^2，淤积体积为 0.58 亿 m^3，期间东北向自然出汊，东汊、北汊、东北汊三角洲前缘快速向海推进，北汊略显优势。2021 年，秋季大洪水后，淤积中心向东北偏移，淤积范围向南北两侧扩展，北汊、东汊、东北汊三角洲前缘向海延伸距离分别为 1.09、1.46 和 1.31 km，东汊和东北汊成为入海主汊。

河口水下三角洲发育与黄河径流入海水沙量、口门外地形条件及泥沙颗粒级配有关。入海水沙量大，北汊更容易成为入海主流，河口北部三角洲前缘快速向海淤长。黄河径流和来沙量少，入海水沙受阻，更容易选择东汊或东北汊入海。且粗砂受海水顶托，更易在河口处落淤。随着河口

沙嘴的淤积延伸，北汊的淤长优势不再明显，入海径流选择容沙区范围更大的东汊或东北汊为入海主汊。

表 3　2017—2021 年北汊、东汊和东北汊各汊三角洲前缘发育统计结果

Table 3　Statistical results of delta front development at the mouths of north branch, east branch and northeast branch from 2017 to 2021

时　段	范围/km^2	体积/亿 m^3	净淤积/亿 t	北汊淤长/km	东汊淤长/km	东北汊淤长/km
2017—2018 年	19.4	0.31	0.43	2.12	1.14	
2018—2019 年	15.5	0.20	0.28	1.20	0.58	
2019—2020 年	30.7	0.58	0.81	1.53	1.12	1.26
2020—2021 年	27.5	0.40	0.56	1.09	1.46	1.31

注：空白代表无数据；泥沙容重取 1.4 t/m^3 计算；面积变化和体积变化为三角洲前缘淤积厚度为 2 m 以上区域的面积和体积变化量。

5　结　论

本文利用 2017 年至 2021 年现行黄河口附近海域实测水下地形资料，结合同期利津水文站来水来沙情况，分析了春季生态调水实施后及 2 次大洪水作用河口地形演变特征，比较了现河口北汊、东汊和东北汊各汊三角洲前缘发育情况，得到如下结论。

1）2018 年至 2021 年春季生态调水与 2 次大洪水条件下，入海水沙情势发生显著变化，年均入海水沙量分别为 362 亿 m^3 和 2.81 亿 t，是 2002 年至 2017 年调水调沙期间年均入海水沙量的 2 倍。

2）入海水沙增加，10 m 以浅等深线滨海地形快速变化，2017 年至 2021 年年内各等深线向海推进距离由陆及海依次减小。年度间各等深线延伸距离呈波动状，与上游来沙量年际变化关系一致。

3）2017 年至 2021 年间入海泥沙 11.67 亿 t（利津站总来沙量 11.25 亿 t，利津以下尾闾河段河床总冲刷量 0.42 亿 t），有 8.58 亿 t 在滨海区范围淤积，占入海沙量的 73.5%。洪峰漫流入海，入海汊口稳定性变差，洪水择地势低点入海，加速了河口出汊摆动演变，沙洲快速发育，口门前方形成长半轴平行于岸线、短半轴垂直于岸线的椭圆形连续狭长淤积带。

4）充足水沙入海使三角洲前缘得到充分发育，泥沙主要淤积区域在 0～12 m 水深范围，淤积厚度大于 2 m 处净淤积沙量占入海沙量的 18%。大洪水期间，黄河径流入海水沙大，河口在东北向自然出汊且快速发育，北汊行河优势不再明显，东汊和东北汊成为入海主汊。

参考文献 (References)：

[1] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21.

[2] 王开荣, 于守兵, 茹玉英. 2000年以来黄河入海水沙变化及河口演变分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(4): 11-13. WANG K R, YU S B, RU Y Y. Study on change of flow and sediment entering into the sea and the Yellow River Estuary evolution since 2000[J]. Yellow River, 2013, 35(4): 11-13.

[3] 姜明星, 杨凤栋, 霍瑞敬, 等. 黄河三角洲海岸及滨海区演变与河口流路、入海水沙的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2004(3): 6-15. JIANG M X, YANG F D, HUO R J, et al. On the evolution of the Yellow River delta and its relation to the riverway and sand entering the sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2004(3): 6-15.

[4] 徐丛亮, 谷硕, 刘喆, 等. 黄河调水调沙14 a来河口拦门沙形态变化特征[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 69-73. XU C L,

GU S, LIU Z, et al. Characteristics of the river mouth bar in the past 14 years of the Yellow River water-sediment regulation[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 69-73.

[5] 陈俊卿, 范勇勇, 吴文娟, 等. 2016-2017年调水调沙中断后黄河口演变特征[J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 6-9,116. CHEN J Q, FAN Y Y, WU W J, et al. Evolution characteristics of theYellow River Estuary after interruption of the Yellow River water and sediment regulation in 2016-2017[J]. Yellow River, 2019, 41(8): 6-9,116.

[6] 苏国宾. 黄河口淤泥质潮滩高程定量遥感反演技术研究及应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2019. SU G B. Research and application of quantitative remote sensing inversion technology for mudflat elevation in the Yellow River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.

[7] 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[J]. 泥沙研究, 2019, 44(5): 61-67. CHEN S L, GU S, JI H Y, et al. Processes of the Yellow River Mouth on new water and sediment condition[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(5): 61-67.

[8] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. XU H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.

[9] 张朝晖, 徐丛亮, 刘艳芬, 等. 黄河口及其邻近海域生态系统管理关键技术研究及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2017: 402-407. ZHANG C H, XU C L, LIU Y F, et al. Research and application on key technologies of ecosystem management in the Yellow River Estuary and its adjacent sea areas[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2017: 402-407.

Spatiotemporal Evolution of Erosion and Deposition in the Current Yellow River Estuary Under Different Water and Sediment Regimes

WU Wenjuan，FAN Yongyong

（*Institution of the Yellow River Estuary and Coast Science*, Dongying 257091, China）

Abstract: The ecological water regulation in spring and the occurrence of two rare floods in the area of the Yellow River Estuary from 2018 to 2021 led to the changes in water and sediment flux and process. In order to know the changes in geomorphological characteristics in the coastal area of the estuary, the changes of 2 m, 5 m and 10 m isobaths, the evolution of erosion and deposition, as well as the development of delta fronts of each branch of the current estuary are analyzed and compared, according to the measured bathymetric data and combined with the water and sediment data of Lijin Hydrological Station in the same period. The results show that the average annual amount of water and sediment delivered into the sea from 2018 to 2021 is 36.2 billion m^3 and 281 million tons respectively, being twice of that from 2002 to 2017. In the 4-year period a total of sediment delivered into the sea is 1,167 billion tons (including 42 million tons from the tail river channel erosion), of which approximately 858 million tons (about 613 million m^3) of the sediment are deposited in the coastal area of the current estuary. At the flood time the flood peak flows into the sea in the form of diffuse flow and the stability of the tributary mouths is weakened. As a result, the branching and oscillating evolution of the estuary is accelerated and an elliptical, continuous and narrow silting zone with its horizontal axis parallel to the shoreline and its short axis vertical to the shoreline is formed in front of the tributary mouths. The delta fronts are fully developed due to the sufficient water and sediment supply. During great flood, the estuary can naturally branch in the northeast and the east branch and the northeast branch become the main branches into the sea.

Key words: water and sediment regime；great flood；erosion and accretion；Yellow River Estuary

Received: July 28, 2022