

白晓霞, 范勇勇, 王厚杰. 黄河刁口废弃流路冲淤演化及其影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 34-42.

BAI Xiaoxia, FAN Yongyong, WANG Houjie. Erosion and deposition evolution of the abandoned Diaokou course of the Yellow River and influential factors[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(10): 34-42.

# 黄河刁口废弃流路冲淤演化及其影响因素

白晓霞<sup>1,2</sup>, 范勇勇<sup>3</sup>, 王厚杰<sup>1,2\*</sup>

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 3 黄河河口海岸科学研究所, 东营 257000)

**摘要:**刁口流路是黄河 1964 年至 1976 年期间的行水流路, 在 1976 年黄河人为改道清水沟后废弃, 在 1992 年将其作为备用流路。依据不同年份刁口废弃流路的高程测量数据, 计算了不同时期刁口废弃流路的冲淤量, 分析了刁口废弃流路不同时期的冲淤变化特征, 探讨了刁口废弃流路冲淤变化的受控机制。研究表明, 1976—2000 年, 刁口废弃流路河道整体处于冲刷状态, 冲刷速率约为  $1.92 \times 10^6$  t/a; 2000—2016 年, 河道整体处于淤积状态, 淤积速率约为  $7.99 \times 10^6$  t/a。刁口废弃河道的冲淤在空间上存在明显的差异, 2000—2016 年, 以断面 D20 为分界线, 向海一侧的河段呈现冲刷状态, 河道槽蓄量增加; 而向陆一侧的河段呈现淤积状态, 河道槽蓄量减少。废弃河道的冲淤演化除受生态调水、海洋动力侵蚀等影响外, 更多地受到河道周边油田开发以及两岸的农田和林业发展等因素的影响。因此, 从维持河道行水能力的角度来看, 亟需对河道开展维护修缮, 以保证刁口流路作为黄河入海备用流路的适宜性。

**关键词:**黄河; 刁口废弃流路; 冲淤演化; 定量计算; 断面法

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.121

## 0 引言

黄河以多淤善徙著称, 1855 年入渤海以来, 尾间河段溃决、改道达 50 多次, 其中较大规模的改道有 10 多次, 平均每 10 年左右黄河就会发生规模较大的尾间改道(图 1)<sup>[1-2]</sup>。频繁的尾间改道导致黄河三角洲保留了多期废弃河道的历史记录, 伴随着淤积和冲刷交替变化, 并遵循淤积→延伸→抬高→摆动→改道的规律持续演变<sup>[3]</sup>。自 1976 年黄河人工改道至清水沟流路以来, 刁口流路已废弃 40 余年。在原国家计委 1992 年批复的由黄河委员会与胜利油田等单位编制的《黄河入海流路规划报告》中, 确定将刁口河流路作为黄河最近的备用流路,

需加强保护和治理。2021 年水利部组织编制的《黄河河口综合治理规划》对黄河河口入海流路、防洪、防潮、水资源利用保护、生态环境保护等方面进行了全面规划, 提出在清水沟流路行河完成之后(约需 50 年), 优先启用刁口河备用入海流路<sup>[4]</sup>。

废弃河道在三角洲的演化过程中扮演着关键角色, 不仅是记载古代河流历史变迁的重要地貌依据, 同时废弃河流沉积序列更是记述历史环境信息的良好载体<sup>[6]</sup>。此外, 废弃河道作为良好的油气藏和地下水储层, 具有重要的资源开发价值。前人对废弃河道的识别与分类进行了详细研究<sup>[6-9]</sup>, 但废弃河道的沉积演化往往受海洋动力改造、人类活动影响等多种因素的共同影响, 时空变化复杂, 因此, 关于废弃河道演化机制的研究仍十分有限, 尤其是被人为改造过的河流。

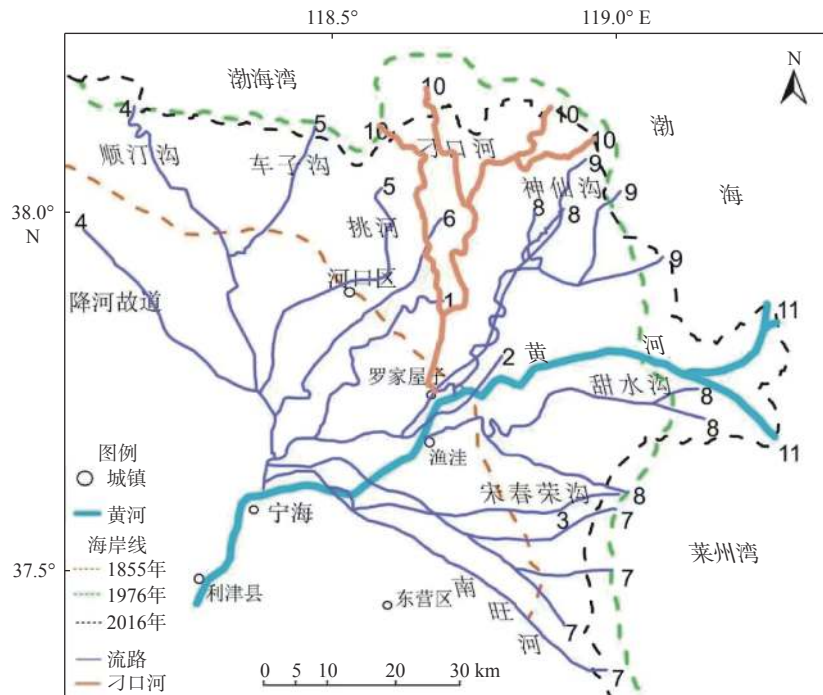
当前对黄河三角洲废弃河道的研究未得到充分的重视, ZHANG 等<sup>[10]</sup>探讨了黄河废弃河道的形成和发展, 分析了其形成原因和防治现状, 并对废弃河道造成的地质灾害进行控制分析, 提出应大力发展循环经济, 把防治荒漠化与农业结构调整和增

收稿日期: 2022-04-21

资助项目: 国家自然科学基金(42041005, 42176168)

作者简介: 白晓霞(1996—), 女, 硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: baixiaoxia0509@163.com

\* 通讯作者: 王厚杰(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事近海沉积动力学方面的研究工作。E-mail: hjwang@ouc.edu.cn



行河时间: 1-1855年8月—1889年4月; 2-1889年4月—1897年6月; 3-1897年6月—1904年7月; 4-1904年7月—1917年8月; 5-1917年8月—1926年7月; 6-1926年7月—1929年9月; 7-1929年9月—1934年9月; 8-1934年9月—1953年7月; 9-1953年7月—1964年1月; 10-1964年1月—1976年5月; 11-1976年5月—2016年6月  
据文献[5]修改

图 1 1855 年以来近代黄河改道变迁

Fig.1 Migrations of the lower Yellow River courses since 1855

加农民收入结合起来。WU 等<sup>[11]</sup>根据沉积记录和水文调查,研究了以潮汐作用为主的黄河清水沟废弃河道的沉积结构和沉积动力学。LI 等<sup>[12]</sup>以黄河清水沟流路为研究对象,基于质量守恒原理建立了描述废弃河道填充过程的定量模型,结果表明,潮汐输沙通量和河道水深是控制废弃河道堆积厚度变化的主要变量,河道萎缩影响了沉积面积,而不是沉积厚度。吴晓等<sup>[13]</sup>指出刁口流路废弃 40 年来,虽然出海口不断地向岸方向后退,河流宽度也逐步减少,但废弃河道堆积过程并没有彻底停止,刁口流路 L7—L11 段河道仍在不断接受充填,河道主槽高程抬升了 0.3~2.0 m。尽管前期针对刁口河生态调水对黄河三角洲在不同方面的影响开展了相关研究<sup>[14-17]</sup>,但对刁口河道自 1976 年废弃以来刁口流路的冲淤演化特征及其受控机制尚缺乏深入的认识。保持和维系备用流路的河流功能是设置和启用备用流路的重要前提和先决条件,因此需要对刁口流路废弃后的沉积演化开展系统研究。

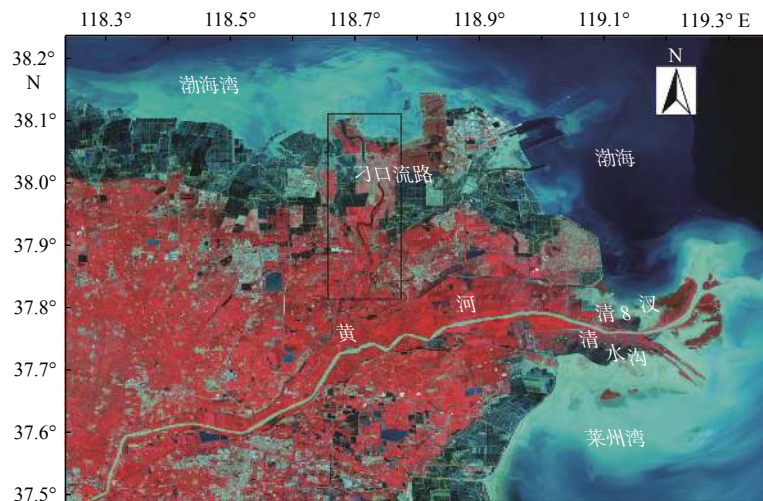
本文以黄河三角洲刁口流路为研究对象,通过断面法定量估算刁口废弃流路的冲淤变化状态,揭示黄河刁口废弃流路不同时段内的冲淤速率变化,探讨其受控因素,研究成果将为系统认识三角

洲废弃流路冲淤演化过程与机制提供重要的案例参考,也可为深入理解黄河三角洲演化机制、促进黄河三角洲的生态平衡发展提供科学基础与理论依据。

## 1 研究区域概况

黄河河口三角洲位于渤海湾与莱州湾之间,是 1855 年黄河在铜瓦厢决口改道夺大清河后入海流路不断变迁而发展形成的(图 2)。黄河自 1855 年改道入渤海以来形成的以垦利县宁海为顶点,北起套尔河口,南至支脉河口的超级扇形叶瓣,陆地面积约 5 500 km<sup>2</sup><sup>[18]</sup>。在三角洲发育过程中,新的沉积物直接沉积在沉积物表层之上,由东部扇形区域上 10 个并列的亚叶瓣组成,每个亚叶瓣与对应分流河道一起发育<sup>[19]</sup>。黄河三角洲被不同亚叶的全新世叠瓦状三角洲沉积物充填,主要由极细砂、粉砂、极细粉砂、黏土等松散细粒河流沉积物组成<sup>[20]</sup>。新沉积具有压缩性高、含水率高、承载力低、稳定性差的特点,极易发生明显的固结压实过程,同时也可能发生相应的地面沉降<sup>[21]</sup>。

黄河三角洲是由河流与海洋共同作用的巨大



图中方框为研究区

图2 黄河三角洲研究区域 Landsat8 OLI 影像 (2021年)

Fig.2 Landsat8 OLI image of the Yellow River Delta (2021) and the study area (framed)

泥沙堆积体,沉积环境复杂多变。研究区海浪的常浪方向为偏南向,强浪方向为 NNE—ENE 方向,所有灾害性的巨浪均为黄、渤海海域的风生浪,渤海区域的偏北风也是本区强浪的主要驱动力<sup>[22]</sup>。波浪在浅海破波带形成波致沿岸流,成为黄河三角洲沿岸输沙的重要动力因素<sup>[23]</sup>。

刁口河河口属弱潮型河口,其感潮段很短,但黄河口外海部分水域仍呈不正规半日潮的特征,且潮差较小,一般潮差范围为 0.73~1.77 m<sup>[22]</sup>,且区内风浪多发,在大风期间,强烈的波流相互作用对河口拦门沙的地形地貌演变有重要影响,其影响范围一般可达无风时的数倍;河口区的余流速度一般较小,通常在 10 cm/s 以内<sup>[23]</sup>。

1964年1月,河口冰凌壅塞和水位猛涨,黄河在罗家屋子破堤分洪,由刁口河入海。至1976年5月黄河改道清水沟流路,刁口河流路行水用时12年5个月,期间共来水 5 180 亿 m<sup>3</sup>,来沙 135 亿 t,累计造陆面积 507 km<sup>2</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 刁口流路 1976 年数据来源

本文采用的数据为黄河口水文水资源勘测局依照河道测验规范和有关规定设立河道淤积断面进行观测的高程数据。1976年刁口河流路黄河故道河道淤积断面、水文监测站设立及实测情况如表1,断面位置如图3所示。断面高程点精度为 1~100 m,断面间距为 3.6~6.3 km。

#### 2.1.2 刁口流路 2000 年数据来源

2000年横断面高程数据来自 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据源。SRTM 高程数据是由美国航空航天局(NASA)和国家测绘局(NIMA)利用联合测量的全球雷达影像数据而建立的高分辨率数字高程模型,其空间分辨率为 30 m

表1 1964—1976年刁口河流路淤积断面设立及实测情况

Table 1 Establishment and measurement of sedimentation cross-section of the Diaokou course from 1964 to 1976

断面名称	设立日期	停测日期	断面长度/m	说明
L4	1965年4月	1976年8月	11 463	
L5	1965年4月	1976年8月	10 457	
L6	1965年4月	1976年8月	9 624	
L6-1	1966年5月	1976年8月	8 168	原刁口河水位站位于L6-1右岸
L7	1965年4月	1976年8月	10 114	
L10	1966年8月	1976年8月	8 855	拟建刁口水文站站址位于L10北 1 km
L11	1968年5月	1976年8月	8 202	

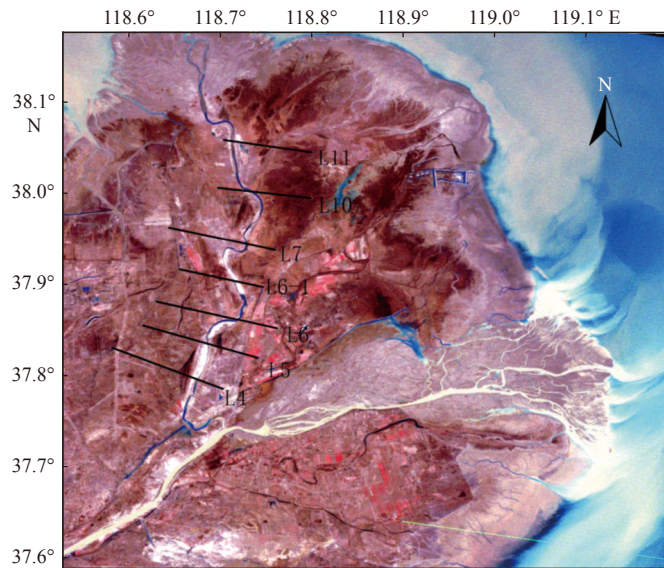


图 3 1976 年黄河刁口流路断面 Landsat4 MSS 影像

Fig.3 Landsat4 MSS image of Diaokou course of the Yellow River in 1976

(SRTM1)和 90 m(SRTM3)。本文获取了研究区分辨率为 90 m 的 SRTM3 高程数据, 在进行 2000 年河道横断面对比时, 通过将 SRTM 数据赋值到 L4—L11(图 3)、D1—D25(图 4)断面进行河道特征探讨。

### 2.1.3 刁口流路 2016 年数据来源

2016 年进行了 D1—D25 河道横断面高程的测量(图 4), 已知断面起点距与断面高程数据, 测量精度为 1~100 m, 断面间距为 0.8~3.5 km。

## 2.2 计算方法

断面地形法一般是根据断面高程数据, 在给定的计算水位下将相邻断面间的几何图形近似为梯形或锥形, 通过比较不同时期、同一水位下相邻横断面间容积的差异, 得出不同测次下相邻断面间河道泥沙冲淤的体积<sup>[24]</sup>。若两测次间相邻 2 个实测

断面面积分别为  $S_i$  和  $S_{i+1}$ , 两相邻横断面之间间距为  $L_i$ , 则计算两相邻断面间体积( $V$ )的梯形公式与截锥公式分别为

$$\text{梯形法: } V_i = \frac{1}{2}L_i(S_i + S_{i+1}) \quad (1)$$

$$\text{锥体法: } V_i = \frac{1}{3}L_i(S_i + S_{i+1} + \sqrt{S_i \times S_{i+1}}) \quad (2)$$

计算两测次两断面间冲淤量为两测次断面间体积之差。由于研究区的监测断面之间的面积相差较大, 其体积形状更接近于截锥体, 相邻两断面  $i$ 、 $i+1$  满足  $S_i > S_{i+1}$  且  $(S_i - S_{i+1})/S_i > 0.4$  时, 采用截锥体公式进行计算<sup>[25]</sup>。

## 2.3 误差分析

计算结果误差主要来源于测量误差、断面误差、

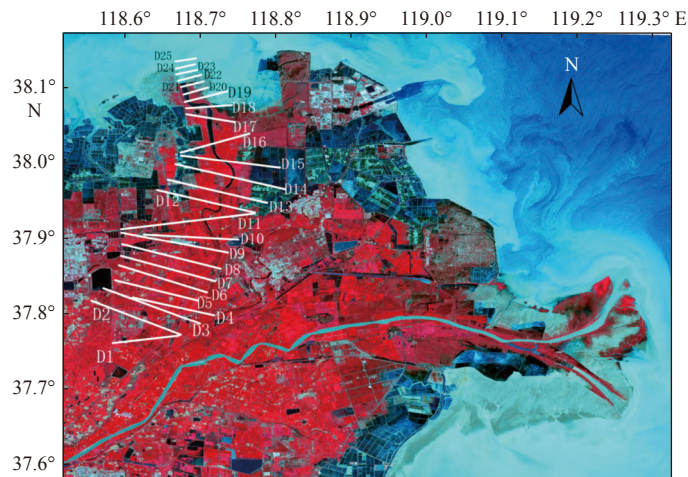


图 4 2016 年黄河刁口流路断面 Landsat11 OLI 影像

Fig.4 Landsat11 OLI image of Diaokou course of the Yellow River in 2016

仪器与人为误差和环境误差等。利用2000年2次不同断面数据对断面法相对误差和不确定度进行评估,分别在断面L4—L11和断面D3—D17赋值,求得河道槽蓄量不确定度为 $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

1976年与2016年只有1次断面实测结果,其不确定度估算则按照测量方法、仪器误差、测量条件以及可能发生在测量过程中的其他人为因素进行综合评估。对于单次测量的不确定度,约定利用仪器误差或其数倍作为不确定度的评估值。根据本文断面法测量特点,断面法体积测量结果不确定度为 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

根据槽蓄量不确定度可知刁口流路河道冲淤速率不确定度,1976—2000年为 $0.20 \times 10^6 \text{ t/a}$ ,2000—2016年为 $0.30 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 刁口流路1976—2000年冲淤

##### 3.1.1 河道横断面变化趋势

截取河道主槽进行河道横断面对比。河道深泓点是河道主槽床面的最深点,其变化趋势可以反映河道河势变化,研究区域内刁口流路河道主槽2000年相对于1976年的河道断面深泓点降低(图5a);河道整体变宽,两年河宽相差较小,且河宽变化基本趋于稳定(图5b)。

##### 3.1.2 刁口流路废弃后1976—2000年河道主槽冲淤变化

黄河三角洲沉积物由极细砂到黏土等松散细

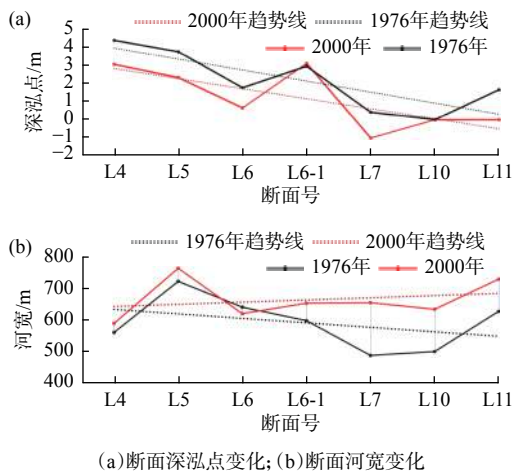


图5 1976年与2000年对应断面处深泓点及河宽对比

Fig.5 Comparison in thalweg depth and river width at each cross-sections in 1976 and 2000

粒河流沉积物组成,在不同的沉积状态下沉积物颗粒大小不同,导致沉积物压实程度有较大差异,并使得沉积物干容重有明显变化。依据相关研究文献,刁口流路1976—2000年废弃时间长达24年,须利用极限稳定干容重计算冲淤量,淤积物干容重为 $1.50 \text{ t/m}^3$ <sup>[26]</sup>。同理,2000—2016年废弃时长16a,淤积物干容重建议取值为 $1.43 \text{ t/m}^3$ <sup>[26]</sup>。

利用断面法求得1976年与2000年各相邻断面间河道槽蓄量(表2),2000年比1976年河道槽蓄量显著增加(图6)。刁口废弃流路在1976—2000年期间,河道整体处于冲刷状态,冲刷量约为 $(46.14 \pm 0.40) \times 10^6 \text{ t}$ ,冲刷速率约为 $(1.93 \pm 0.20) \times 10^6 \text{ t/a}$ 。

表2 1976年与2000年河道槽蓄量对比

Table 2 Comparison in channel storage capacity between 1976 and 2000

断面号	1976年槽蓄量/ $10^6 \text{ m}^3$	2000年槽蓄量/ $10^6 \text{ m}^3$	1976—2000年槽蓄量/ $10^6 \text{ m}^3$	冲淤速率/ $(10^6 \text{ t/a})$
L5—L4	3.14	7.51	4.37	-0.27
L6—L5	2.53	5.67	3.14	-0.20
L6-1—L6	3.86	2.93	-0.93	0.06
L7—L6-1	3.76	6.35	2.59	-0.16
L10—L7	3.88	16.31	12.43	-0.78
L11—L10	4.38	13.55	9.17	-0.57
L4—L11	21.52	52.32	30.82	-1.93

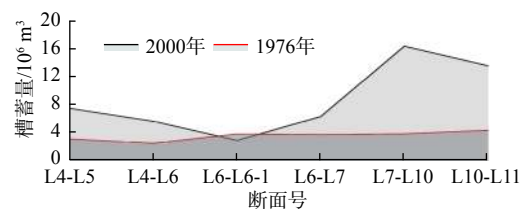


图6 1976年与2000年刁口流路河道槽蓄量分布

Fig.6 Distribution in storage capacity of the Diaokou course in 1976 and 2000

#### 3.2 刁口流路2000—2016年冲淤

##### 3.2.1 河道断面变化趋势对比

根据2016年河道断面D1—D25的实测资料,将SRTM高程数据赋值于2000年河道断面进行横断面高程变化对比。从横断面剖面可以看出,河道高程与河宽变化具有明显的分段现象,根据河道变化特征分为断面D1—D11、断面D12—D19、断面D20—D25共3个河段。

断面D1—D11河段整体处于萎缩状态,2016年河道主槽河宽远小于2000年,2016年深泓点要高于2000年(图7a)。断面D12—D19河段的河道

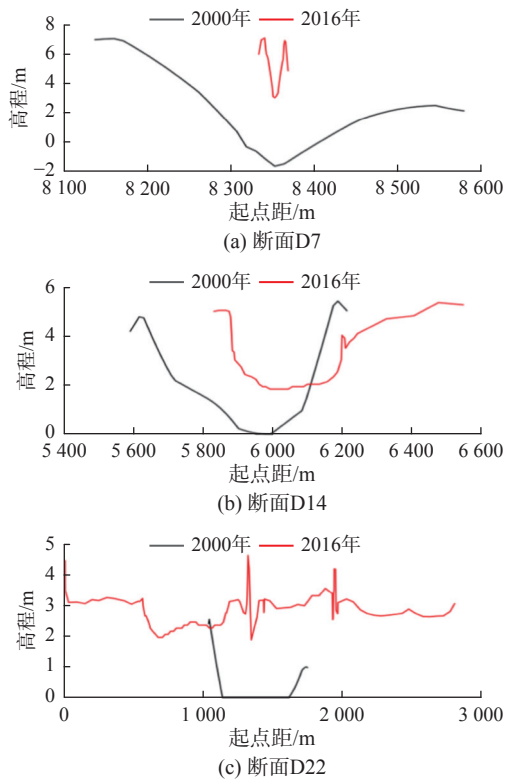


图 7 2000 年与 2016 年刁口流路横断面 D7、D14、D22 剖面图

Fig.7 Profiles of the Diaokou course in 2000 and 2016 across D7, D14 and D22 transections

主槽河宽变化不大, 但 2016 年深泓点明显抬高 (图 7b)。断面 D20—D25 河段的主槽河宽明显增大, 深泓点抬高 (图 7c)。

整体来看, 刁口废弃河道在 2000—2016 年期间, 河道深泓点抬高约 2 m (图 8a)。以断面 D12 为分

界线, 其向陆一侧的河宽明显减小, 其向海一侧河道的河宽逐渐加大 (图 8b), 呈现明显的空间差异。

### 3.2.2 刁口流路废弃后 2000 年与 2016 年河道冲淤变化

利用断面法计算 2000 年与 2016 年相同断面范围内河道槽蓄量 (表 3)。

对比 2000 年与 2016 年河道槽蓄量, 河道主槽整体冲淤量为  $127.38 \times 10^6 \text{ t}$ 。在断面 D20 以北 (向海方向) 河道槽蓄量增加, 呈冲刷状态, 冲刷速率为  $2.24 \times 10^6 \text{ t/a}$ ; 而断面 D20 以南 (向陆方向) 河道的槽蓄量减少, 呈淤积状态, 淤积速率为  $10.20 \times 10^6 \text{ t/a}$  (图 9)。

## 4 讨论

利用河道横断面多期数据, 截取相同范围内的河道对比刁口流路 1976、2000、2016 年不同时间段内河道冲淤变化情况。根据 2000 年与 2016 年河道横断面特征, 得知刁口废弃河道的冲淤演化存在明显的空间差异性。

1976—2000 年, 刁口废弃河道断面 L4—L7 河段处于冲刷状态, 冲刷速率为  $0.57 \times 10^6 \text{ t/a}$ ; 断面 L7—L11 河段处于冲刷状态, 冲刷速率为  $1.35 \times 10^6 \text{ t/a}$  (图 10)。断面 L7—L11 河段冲刷速率大于断面 L4—L7 河段, 原因是断面 L7—L11 河段除了受人为因素的影响, 还受到了海洋动力侵蚀的影响, 同时, 三角洲沉降与压实作用也会影响河道演化, 包括沉

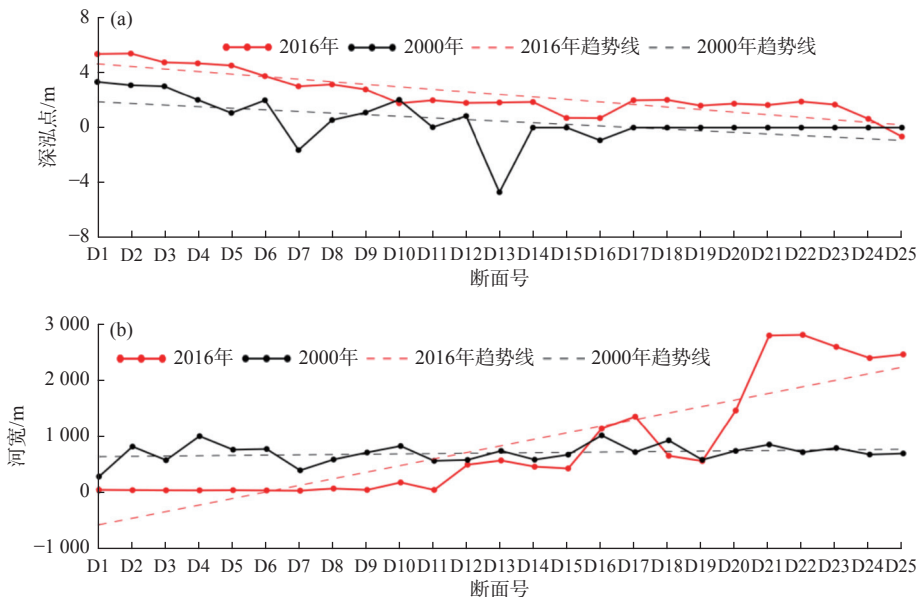


图 8 2000 年与 2016 年刁口流路河宽及深泓点变化趋势

Fig.8 Comparison in thalweg depth and river width at Diaokou course between 2000 and 2016

表3 2000年与2016年刁口流路河道槽蓄量对比

Table 3 Comparison in channel storage capacity of the Diaokou course between 2000 and 2016

断面号	2000年槽蓄量/ $10^6 \text{ m}^3$	2016年槽蓄量/ $10^6 \text{ m}^3$	2000—2016年槽蓄量/ $10^6 \text{ m}^3$	冲淤速率/ $(10^6 \text{ t/a})$
D1—D11	85.33	5.23	-80.10	7.92
D11—D20	105.24	71.16	-34.08	2.29
D20—D25	22.14	47.23	25.09	-2.24

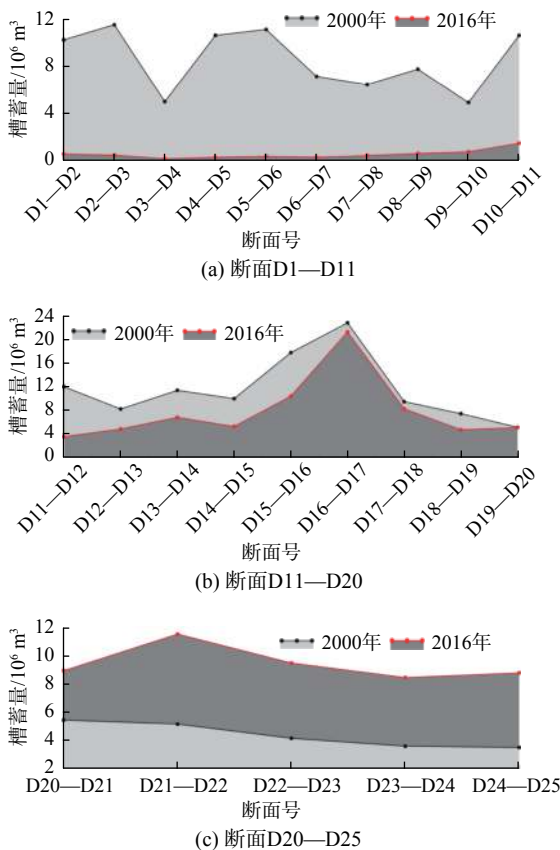


图9 刁口流路2000年与2016年断面D1—D12、D12—D20、D20—D25河段槽蓄量对比

Fig.9 Comparison in tank storage capacity of the Diaokou course in 2000 and 2016 at transections D1-D12, D12-D20, and D20-D25

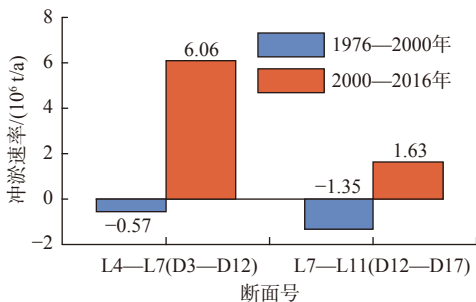


Fig.10 Erosion and deposition rates of the Diaokou course in different periods

积物自然沉降和修筑大型建筑物所引起的沉降压实<sup>[27-29]</sup>。

2000—2016年,河道断面D3—D12河段处于淤积状态,淤积速率 $6.06 \times 10^6 \text{ t/a}$ ,其主要原因是刁口流路河道受到了包括农田、林场和油田开发建设等人为破坏,河道主槽逐步趋于消失,河道在无通水状态下不断接受人为充填<sup>[17]</sup>,尤其是胜利油田在刁口故道建设了采油厂以及其他相关采油设备,这些较大范围的人为建设工程对刁口废弃流路造成了很大的破坏<sup>[30]</sup>,表明这一河段亟需进行维护,以维持其作为备用流路的适宜性。断面D12—D17河段呈淤积状态,淤积速率为 $1.63 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。近年来,刁口尾间河道实施生态调水工程,河道再次与海洋相通,因此,该段河道能够接受来自海洋的沉积物充填,调水期间径流携带泥沙也在此区间沉积。根据相关研究文献,刁口河流路生态调水期间,黄河悬浮泥沙浓度平均为 $17.3 \text{ kg/m}^3$ <sup>[31]</sup>,2010年起每年向刁口流路的补水量约为0.2亿 $\text{m}^3$ ,可以估算每年进入刁口河道的泥沙量约为 $0.35 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。但是与废弃河道周边胜利油田开发以及两岸的农田和林业发展等因素影响相比,刁口河道生态补水所输入的泥沙量几乎可以忽略,因此,从维持河道行水能力的角度来看,亟需对河道开展维护和修缮,以保证刁口流路作为黄河入海备用流路的适宜性。

### 5 结论

本文对刁口废弃流路冲淤进行了定量计算,探讨了流路沉积演化的主要影响因素,得到以下结论:

(1)刁口废弃河道1976—2000年整体处于冲刷状态,冲刷速率约 $1.92 \times 10^6 \text{ t/a}$ ;2000—2016年河道整体处于淤积状态,淤积速率约为 $7.99 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。

(2)从2000—2016年期间废弃河道的冲淤演化格局看,以断面D20为边界,其向海一侧河道的河宽增大,呈现冲刷状态,主要受海洋动力侵蚀控制,其向陆一侧河道的河宽缩小,呈现淤积状态,主要受到生态调水的补沙效应以及人类活动等因素的影响。

(3)废弃河道的冲淤演化除受生态调水、海洋动力侵蚀等影响外,更多受到河道周边胜利油田开发以及两岸的农田和林业发展等因素的影响,因此从维持河道行水能力的角度来看,亟需对河道开展维护修缮,以保证刁口流路作为黄河入海备用流路的适宜性。

## 参考文献:

- [1] CUI B L, LI X Y. Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976–2005) [J]. *Geomorphology*, 2011, 127(1/2): 32–40.
- [2] 王鸿翔, 赵颖异, 刘静航, 等. 近50年黄河下游水沙情势演变及其影响因素分析[J]. *水力发电*, 2020, 46(9): 48–54.
- [3] AMOROS C. The concept of habitat diversity between and within ecosystems applied to river side-arm restoration[J]. *Environmental Management*, 2001, 28(6): 805–817.
- [4] 王开荣, 李岩, 于守兵, 等. 黄河刁口河备用流路现状及保护工程措施探讨[J]. *中国水利*, 2017(1): 15–19.
- [5] 庞家珍. 黄河三角洲流路演变及对黄河下游的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 1994(3): 539–545.
- [6] 赵翰卿, 付志国. 大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J]. *石油学报*, 2000, 21(4): 109–113.
- [7] 李胜利, 于兴河, 姜涛, 等. 河流辫-曲转换特点与废弃河道模式[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 1–9.
- [8] 刘波, 赵翰卿, 王良书, 等. 古河流废弃河道微相的精细描述[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 394–398.
- [9] 张本华. 曲流河储层构型中废弃河道的识别及其分布模式: 以孤岛油田馆上段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 18–25.
- [10] ZHANG G Z, LI Y, WEI X, et al. Causes and typical control model of wind-drift sandy lands in abandoned channel of the Yellow River[J]. *Forestry Studies in China*, 2006, 8(1): 59–64.
- [11] WU X, WANG H J, BI N S, et al. Evolution of a tide-dominated abandoned channel: a case of the abandoned Qingshuigou course, Yellow River[J]. *Marine Geology*, 2020, 422(7/26): 106–116.
- [12] LI Z Y, WANG H J, JEFFREY A N, et al. Modeling the infilling process of an abandoned fluvial-deltaic distributary channel: an example from the Yellow River Delta, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 361(6): 107–204.
- [13] 吴晓, 范勇勇, 王厚杰, 等. 三角洲废弃河道演化过程及受控机制: 以黄河刁口废弃河道为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 22–29.
- [14] 葛海燕. 刁口河尾间黄河三角洲自然保护区生态补水效果评估[J]. *山东林业科技*, 2012, 42(5): 34–36.
- [15] 薛菲. 刁口河生态调水对湿地地下水矿化度的影响[J]. *中国科技信息*, 2015, 13(Z3): 48–49.
- [16] 王春华, 张娜, 何敏, 等. 黄河刁口河流路恢复运用目标与时机[J]. *人民黄河*, 2016, 38(3): 33–35.
- [17] 安催花, 唐梅英, 陈雄波, 等. 黄河河口综合治理面临的问题与对策[J]. *人民黄河*, 2013, 35(10): 60–62.
- [18] XUE C T. Historical changes in the Yellow River Delta, China[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(3): 321–330.
- [19] WANG H J, YANG Z S, LI G, et al. Wave climate modeling on the abandoned Huanghe (Yellow River) Delta lobe and related deltaic erosion[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(4): 906–918.
- [20] SAITO Y, YANG Z, HORI K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2/3): 219–231.
- [21] ZHENG S, HAN S S, TAN G M, et al. Morphological adjustment of the Qingshuigou channel on the Yellow River Delta and factors controlling its avulsion[J]. *Catena*, 2018, 166: 44–55.
- [22] JIA Y G, ZHENG J W, YUE Z Q, et al. Tidal flat erosion of the Huanghe River Delta due to local changes in hydrodynamic conditions[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 116–124.
- [23] WANG H J, WANG A M, BI N S, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17–32.
- [24] 姜朝. 断面法计算冲淤量的数学基础及实际应用中的局限性[C]//全国测绘科技信息网中南分网第二十八次学术信息交流会议论文集. 河南开封, 2014.
- [25] 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[J]. *泥沙研究*, 2006, 31(1): 32–37.
- [26] 韩其为. 淤积物干容重的分布及其应用[J]. *泥沙研究*, 1997, 22(2): 10–16.
- [27] 付云霞, 管勇, 王晓丹, 等. 大型河口三角洲地面沉降机制研究: 以黄河三角洲为例[J]. *海岸工程*, 2021, 40(2): 83–95.
- [28] 谭晋钰, 黄海军, 刘艳霞. 黄河三角洲沉积物压实固结及其对地面沉降贡献估算[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(5): 33–38.
- [29] 刘桂卫, 黄海军, 杜廷芹, 等. 黄河三角洲地区地面沉降驱动因素研究[J]. *海洋科学*, 2011, 35(8): 43–50.
- [30] 李华伟. 谈刁口河的开发与保护[C]//建设生态水利 推进绿色发展论文集. 南京: 中国水利水电出版社, 2018: 331–336.
- [31] 黄安定, 蒋雪中, 陈沈良. 黄河三角洲北部自然保护区生态补水定量分析[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 15–21.



## Erosion and deposition evolution of the abandoned Diaokou course of the Yellow River and influential factors

BAI Xiaoxia<sup>1,2</sup>, FAN Yongyong<sup>3</sup>, WANG Houjie<sup>1,2\*</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Institute of the Yellow River Estuarine and Coastal Science, Dongying 257091, China)

**Abstract:** From 1964 to 1976, the Yellow River flowed through the Diaokou course into the Bohai Sea. In 1976, the Diaokou course was abandoned and replaced by an artificial diversion to the Qingshuigou course. Based on the measured elevation data of the abandoned Diaokou course in years of 1976, 2000, and 2016, we calculated the volume of erosion and deposition along the Diaokou course at different stages, described the spatial distribution of erosion and deposition of the Diaokou course, and discussed the potential impact factors on the Diaokou course evolution over the last 40 years after its abandonment. The results indicate that during 1976-2000, the Diaokou course experienced erosion at rate of  $\sim 1.92 \times 10^6$  t/a, and during 2000-2016, the Diaokou course was silted at deposition rate of  $\sim 7.99 \times 10^6$  t/a. The erosion and deposition along the Diaokou course present significant spatial difference during 2000-2016. Taking section D20 as the boundary, the seaward river section was in scouring state, and the storage capacity of river channel increased; while the landward section was in siltation state, and the storage capacity of the river channel decrease. The evolution of erosion and sedimentation in the Diaokou course was not only affected by the ecological water diversion and marine dynamic erosion, but also by the development of nearby oil fields, farming, and forestation. Therefore, to maintain the water flow capacity of the Diaokou course, cleaning up the Diaokou course is urgent to ensure good condition of the Diaokou course as a backup waterway of the Yellow River seaward emptying.

**Key words:** Yellow River; abandoned Diaokou course; erosion and deposition evolution; quantitative calculation; cross section method