

孔森森, 刘凤睿, 王厚杰, 等. 现代黄河水下三角洲对尾间改道事件的沉积响应——以 1855、1976、1996 年三期改道为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(2): 68-77.

KONG Miaomiao, LIU Surui, WANG Houjie, et al. Sedimentary response of the modern subaqueous Yellow River Delta to channel migrations in the 1855, 1976, and 1996 diversion events[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(2): 68-77.

现代黄河水下三角洲对尾间改道事件的沉积响应 ——以 1855、1976、1996 年三期改道为例

孔森森^{1,2}, 刘凤睿³, 王厚杰^{1,2}, 毕乃双^{1,2}, 胡利民^{1,2}, 闫天浩^{1,2}, 任晰熙^{1,2}, 刘彦昊^{1,2}, 吴晓^{1,2*}

(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 黄河水利委员会山东水文水资源局利津水文站, 东营 257400)

摘 要:三角洲尾间河道摆动会引起入海口位置变迁,进而导致三角洲物源供应与动力过程发生快速调整,引起三角洲沉积演化格局发生重大转变。黄河三角洲因其巨量的入海泥沙供应和频繁的尾间河道摆动成为研究河流改道影响下三角洲沉积演化的理想区域。本研究通过系统收集前人发表的 22 根沉积物柱状样的测年数据与粒度资料,结合尾间改道信息,重点探讨了 1855、1976 和 1996 年 3 期黄河尾间改道事件对黄河水下三角洲沉积演化的控制机制,对比揭示了水下三角洲不同区域对同一改道事件的空间差异性响应。研究表明,1855 年黄河北上重新注入渤海引起黄河水下三角洲物源的快速变化,导致黄河水下三角洲不同区域均表现出沉积物粒度细化,砂含量降低,粒度频率分布曲线由双峰转为单峰为主的特征。1976 年黄河由刁口流路改道至清水沟流路,废弃刁口三角洲叶瓣粒度明显粗化,砂含量增加,沉积速率降低,海源有机质对该区有机碳埋藏的影响增加;莱州湾区域和现行河口区域由于黄河细粒泥沙的直接供给,粒度细化,砂含量减少,沉积速率增加。1996 年至今黄河行水清 8 汉流路,刁口区域持续缺少沉积物供应,粒度继续呈现粗化趋势;莱州湾区域主要物源转为沿岸再悬浮物质,粒度粗化;现行河口区域水下三角洲受黄河泥沙直接供给,但由于输运过程中的动力分选及黄河入海泥沙的变化,浅水区及其东北部深水区呈粗化趋势。

关键词:河流改道;黄河水下三角洲;三角洲演化;沉积特征

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.103

0 引言

黄河作为世界上含沙量最大的河流^[1],多年平均含沙量高达 25.5 kg/m³,以“水少沙多”而闻名世

界。下游相对平坦的地势导致黄河泥沙在下游沉积形成“地上悬河”^[2],造就了黄河下游善淤、善决、善徙的特点,尤其是黄河尾间改道之频繁,更为世界大河罕见。巨量的入海泥沙供应和频繁的尾间河道摆动使得黄河三角洲成为全球大河三角洲中海陆变迁最为活跃的区域^[3],因而成为研究河流改道影响下三角洲沉积演化的理想区域之一。自 1855 年黄河于铜瓦厢决口夺大清河入渤海以来,尾间决口 50 多次,较大改道 9 次^[4],其中,1976 年改道是最近一次的大规模尾间河道变迁,刁口流路废弃,河水东流经清水沟流路入海,而后 1996 年在清 8 断面以上 950 m 处实施了人工出汉工程,黄河自此经清 8 汉行水至今。前人通过对黄河水下三角

收稿日期: 2023-04-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42176168);国家自然科学基金国际合作与交流项目(42411540024);山东省杰出青年基金项目(ZR2024JQ016);山东省泰山学者项目(TSQN202211054);山东省高等学校青创科技支持计划(2022KJ045)

第一作者: 孔森森(1996—),女,在读硕士,主要从事海洋沉积学方面的研究工作。E-mail: 1693051084@qq.com

* 通讯作者: 吴晓(1989—),男,博士,教授,主要从事河口海岸学方面的研究工作。E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

洲沉积记录的解译,在黄河尾间改道引起的入海物源变化^[5-8]、河口沉积动力过程调整^[6-9]及三角洲淤积-侵蚀模式转变^[10-13]等方面开展了大量研究。但这些工作大多依托单一钻孔或仅仅聚焦某一次改道事件,受到钻孔位置、年代及测试指标等因素的制约,取得的成果难以建立黄河改道事件影响下水下三角洲演化特征转变的系统认识。

本研究通过系统收集前人发表的 22 根沉积物柱状样的测年数据与粒度资料,建立了黄河水下三角洲 1855 年以来的沉积框架,结合尾间改道信息,重点探讨了 1855、1976 和 1996 年 3 期黄河改道事件影响下黄河水下三角洲沉积演化过程及其控制机制,对比揭示了水下三角洲不同区域对同一改道事件的空间差异性响应,取得的研究认识将为深入理解河流改道影响下三角洲沉积格局调整提供重要的科学参考。

1 研究区概况

黄河自 1855 年从苏北入黄海改道山东利津入渤海后^[14-15],由于自然或人为因素决口改道 50 余次,其中较大改道 9 次,每条流路平均行水时间约为 10 余年^[16](图 1、表 1)。1855 年黄河在河南兰阳铜瓦厢(今兰考县东坝头)决口夺大清河入海,是下游河道最近一次的大范围迁徙,入海口由苏北沿岸改道至渤海西岸;1889 年 3 月,黄河尾间河段在韩家垣决口,经四段及杨家咀,改道至毛丝垞以下入海;1897 年 5 月间,南、北岭子发生决口,黄河经朱家坨丝网坨向东偏南入海,历时 7 年,实际行水时间 5 年 9 个月;1904 年 6 月 2 日,黄河尾间河段在盐窝附近决口,后于 1929 年 8 月由青坨子入海;

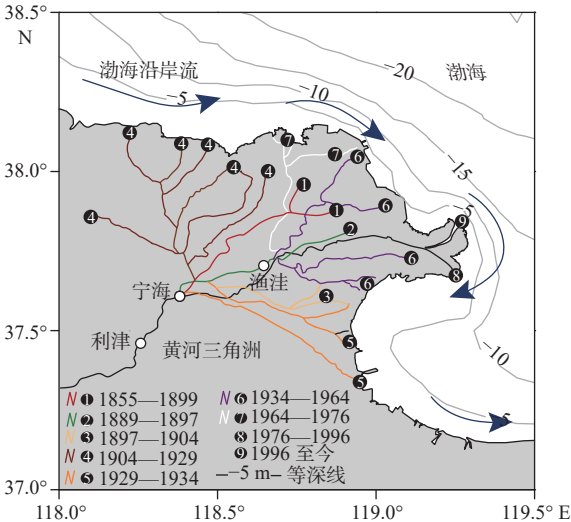


图 1 现代黄河三角洲尾间河道变迁^[7]
Fig.1 Historical migration of channels to the modern Yellow River Delta

1934 年 8 月决口后黄河水一漫无际,曾由毛丝垞以北老神仙沟入海,嗣后初步由神仙沟、甜水沟、宋春荣沟三股入海,1938 年 7 月,郑州花园口决口,1947 年复又堵住花园口重归入渤海,仍为神仙沟、甜水沟、宋春荣沟 3 股入海;1964 年 1 月凌汛,人为地在罗家屋子破开民埝,黄河改道至刁口河入海,共行水 12 年 5 个月;1976 年,在西河口人工截留改道,刁口流路废弃,河水东流经清水沟流路入海,行水 20 年;现行河口于 1996 年 7 月自清水沟人工截流改道至清 8 汉,行水至今,是最后一次的尾间摆动^[8,17-18]。频繁的尾间河道摆动和巨量的入海泥沙供应形成了 1855—1934 年以宁海为顶点的亚三角洲与 1934 年至今以渔洼为顶点的亚三角洲叠覆而成的现代黄河三角洲^[4](图 1)。

渤海邻接现代黄河三角洲,其为半封闭陆架浅海,总面积 7.7 万 km²,平均水深 18 m^[19],主要包括

表 1 近代黄河三角洲河道变迁信息

Table 1 Specifications of historical migration of channels of the modern Yellow River delta			
序号	行水时间	行水年数/a	入海地点
1	1855年6月—1889年3月	32	夺大清河入海
2	1889年3月—1897年5月	6	由毛丝垞入海
3	1897年5月—1904年6月	7	朱家坨丝网坨向东偏南
4	1904年6月—1929年8月	24	由刁口向东北入海
5	1929年8月—1934年8月	5	由宋春荣沟青坨子入海
6	1934年8月—1938年	4	神仙沟、甜水沟、宋春荣沟
	1947年—1964年1月	18	由四号桩附近入海
7	1964年1月—1976年5月	20	由刁口河入海
8	1976年5月—1996年7月	13	由清水沟入海
9	1996年7月至今	-	由清8汉入海

注:“-”代表无确定行水年数。

渤海湾、辽东湾和莱州湾 3 个海湾。渤海接受周边多条河流的陆源物质输入,包括黄河、滦河、辽河等主要的入海河流,其中,黄河入海泥沙量最大,达 10^9 t/a,占渤海河流输入的 90% 左右^[17,20]。这些入海物质超过 2/3 在入海口附近沉积,形成了黄河三角洲,其余物质主要受渤海潮流、波浪的影响向渤海湾中部及南部、莱州湾、渤海海峡南部及渤海中部海域扩散^[21]。黄河口为弱潮河口,平均潮差为 0.6~0.8 m,潮流沿海岸线平行,涨潮时南流,退潮时北流^[22-23]。渤海沿岸波浪平均波高为 0.3~0.6 m,具有明显的季节差异,在强劲的东北风影响下,波高可达 1.5~2 m^[4]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文聚焦黄河水下三角洲沉积演化对 1855、1976 和 1996 年 3 期改道事件的空间差异性响应,系统收集了黄河水下三角洲不同位置的 22 根沉积

物柱状样资料进行对比分析(图 2、表 2),通过对柱状样 A26、B83、A178 和 B42 的粒级含量、平均粒径、峰态变化,柱状样 K2、BH-239、BC1、BC2、O3、M2、3-3、Z01、Z02、Z03、YD02、A25、P4、A26、9-2、A11、BH-264 和 B63 的粒级含量、平均粒径、沉

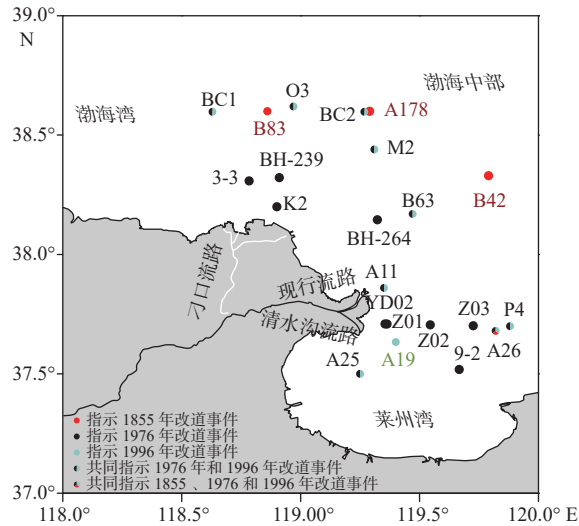


图 2 本文统计的柱状样位置

Fig.2 Sampling stations of core sediments in this study

表 2 相关钻孔和柱状样基本信息

Table 2 Basic information from related boreholes and cores

序号	柱状样	经度/(°E)	纬度/(°N)	水深/m	全长/cm	测年方法	粒级含量	平均粒径	沉积速率	C/N	数据来源
1	A26	119.82	37.68	18	157.5	^{210}Pb 、 ^{137}Cs	√	√			文献[7]
2	B83	118.86	38.60	-	206.0	据粒度特征及常、微量元素含量变化	√	√			文献[9]
3	A178	119.29	38.60	-	238.0		√	√			文献[9]
4	B42	119.79	38.33	-	350.0	^{137}Cs	√	√			文献[24]
5	3-3	118.78	38.31	16.0	232.0	^{210}Pb			√		文献[8]
6	K2	118.90	38.20	10.0	350.0	^{137}Cs	√				文献[25]
7	BH-239	118.91	38.32	19.3	295.0	^{210}Pb 、 ^{137}Cs	√				文献[26]
8	BC1	118.63	38.60	20.0	217.0	^{210}Pb	√			√	文献[19]
9	BC2	119.27	38.6	27.0	238.0	^{210}Pb	√			√	文献[20]
10	O3	118.97	38.62	24.5	50.0	参照渤海沉积速率等值线图	√	√		√	文献[27]
11	M2	119.31	38.44	24.9	30.0		√	√		√	文献[27]
12	Z01	119.36	37.71	8.8	250.0	^{137}Cs	√				文献[28]
13	Z02	119.54	37.71	14.5	300.0	^{137}Cs	√				文献[28]
14	Z03	119.73	37.70	14.8	170.0	^{210}Pb 、 ^{137}Cs	√				文献[28]
15	YD02	119.35	37.71	5.1	100.0	据岩性变化和年代-水深数据	√				文献[29]
16	A25	119.25	37.50	15.0	18.80	据粒度特征和 ^{210}Pb 变化	√	√			文献[6]
17	P4	119.88	37.70	16.8	31.0	^{210}Pb	√	√			文献[30]
18	9-2	119.67	37.52	16.0	396.0	^{210}Pb			√		文献[8]
19	A11	119.35	37.86	14.0	124.0	^{137}Cs	√	√	√		文献[7]
20	BH-264	119.32	38.15	20.1	295.0	^{210}Pb 、 ^{137}Cs	√				文献[26]
21	B63	119.47	38.17	25.0	32.0	^{210}Pb	√	√			文献[27]
22	A19	119.40	37.63	13.0	24.0	据粒度特征和 ^{210}Pb 变化		√			文献[6]

注:“-”代表无确定水深,“√”代表对应指标已测试。

积速率、C/N 值变化, 以及柱状样 O3、M2、BC1、BC2、A25、P4、A26、A19、A11 和 B63 的平均粒径变化分别探讨了 1855、1976 和 1996 年黄河改道事件对水下三角洲沉积演化的影响。

2.2 研究方法

2.2.1 测年方法

收集的柱样中 15 根进行了 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测年 (表 2), 所得数据能较为精准地反映出沉积物的年龄, 具有可对比性。

此外, 柱状样 B83、A178、YD02、A25 和 A19 通过沉积物岩性、环境磁学、粒度、元素地球化学组成等特征以及年代-水深、沉积速率等数据可识别改道事件, 虽不能对沉积物进行精准定年, 但柱状样沉积物粒度、元素化学组成等垂向上的突变, 依然可以作为黄河改道事件的时间节点, 故可以此为依据分析黄河改道前后沉积物粒度的变化趋势。

2.2.2 粒度分析方法

已发表的柱状样主要使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪进行粒度分析, 数据质量整体可控。同时, 本研究针对不同年代柱状样进行独立分析对比, 即使各柱状样之间可能存在测试仪器、测试流程上的系统误差, 也不会对分析结果产生太大影响。

2.2.3 C/N 测试方法

所用到的 4 根柱状样品加盐酸去除碳酸盐后, 在 60 °C 条件下烘干后, 研磨过筛, 然后使用元素分析仪对样品进行 C、N 元素含量测试。

3 结果与讨论

3.1 黄河水下三角洲对 1855 年改道事件的沉积响应

1855 年黄河在河南兰阳铜瓦厢 (今兰考县东坝头) 决口, 由苏北入黄海改道至山东利津入渤海^[15], 对渤海的物源供应和沉积环境产生重要影响。1855 年前渤海由于缺少大型河流注入, 物源供应有限, 主要是周边中小型河流汇入及沿岸侵蚀为主。季节性波动的海洋动力过程控制了该时期的沉积物分布, 尤其冬季时风暴强烈, N、NNE 向波浪年平均波高可达 1.7~1.8 m^[20], 导致粗颗粒沉积物被搬运和沉积, 表现在沉积物柱状样中砂含量较高, 沉

积物粒度较粗, 分选较差。柱状样 A26、B83、A178 和 B42 在该时期的平均粒径分别为 $(5.73 \pm 0.53) \Phi$ 、 $(6.98 \pm 0.26) \Phi$ 、 $(6.86 \pm 0.31) \Phi$ 和 $(6.54 \pm 0.49) \Phi$ (图 3), 粒度频率曲线均表现出明显的双峰分布, 在 3 Φ 和 6 Φ 左右各有一个峰值 (图 4)。

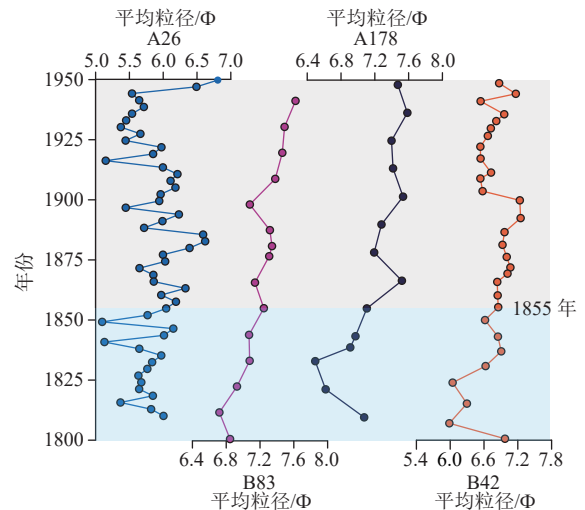


图 3 柱状样 A26、B83、A178 和 B42 平均粒径变化

Fig.3 Changes in grain size of cores A26, B83, A178 and B42

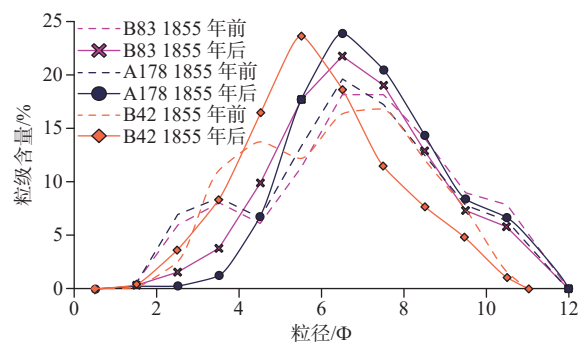


图 4 柱状样 B83、A178 和 B42 典型粒度频率

Fig.4 Typical frequency curves of grain size distribution of cores B83, A178 and B42

1855 年改道入渤海后, 渤海作为黄河巨量泥沙的直接输入地, 三角洲的进积作用强烈, 加之黄河口切变锋对入海泥沙扩散的阻碍作用^[31-32], 黄河携带的大量粉砂、黏土等细颗粒物在河口处迅速沉积, 少部分细粒物质向渤海湾中部及南部扩散或在渤海环流作用下向东、南方向长距离搬运至渤海中部海域、莱州湾沉积^[22,33-34]。相比改道前沿岸侵蚀的物质, 黄河供应的沉积物相对较细, 大量的黄河入海泥沙供应导致 A26、B83、A178 和 B42 的砂含量降低, 平均粒径由改道之前的较粗粒级分别转变为 $(5.94 \pm 0.83) \Phi$ 、 $(7.35 \pm 0.27) \Phi$ 、 $(7.42 \pm 0.20) \Phi$ 和 $(6.85 \pm 0.36) \Phi$ 的细粒径, 垂向上平均粒径自下往上细化明显 (图 3), 表明 1855 年黄河改道重新注入渤

海后,水下三角洲不同区域均表现出沉积物粒度细化的特征,砂组分降低,粒度频率分布曲线由双峰转为单峰为主(图4)。

3.2 黄河水下三角洲对1976年改道事件的沉积响应

1964—1976年间,黄河行水刁口河流路,向北注入渤海湾。行水期间随着三角洲进积河道不断延伸,河底高程抬高,比降减缓,河道排洪能力大大降低,为减轻河口地区乃至黄河下游的防洪压力,1976年在清水沟实施了人工截流改道工程^[27]。自此黄河由刁口河流路转为清水沟流路,入海口南移至清水沟河口,向东南注入莱州湾,河口的变化相应地引起新老三角洲地区物质来源和沉积动力的差异性调整,现代黄河水下三角洲不同区域的演化特征呈现明显的空间差异。

3.2.1 刁口区域

从1964年1月黄河改道北上,到1976年5月废弃,刁口流路行水的12年5个月期间,平均每年入海泥沙11亿t^[30],整个渤海湾区域接受黄河带来的巨量泥沙,绝大部分黄河细粒物质在河口附近沉积,柱状样3-3在1964—1976年间的沉积速率高达14.5 cm/a(图5)。黄河物质的直接供应除了引起较高的沉积速率外,入海泥沙向海输运过程中的动力分选还导致刁口流域外海由浅水向深水沉积物粒度逐渐变细,柱状样K2、BH-239、BC1和BC2的砂含量较小且稳定,沉积物主要由粉砂、黏土组成,柱状样O3、M2、BC1和BC2的粒径相对较细(图6)。

1976年5月黄河改道清水沟流路后,刁口区域黄河的直接供应断绝,处于渤海强流区的废弃刁口三角洲叶瓣在波浪、潮流的作用下岸线以年均0.26 km的速度蚀退^[35],陆上三角洲及水下三角洲

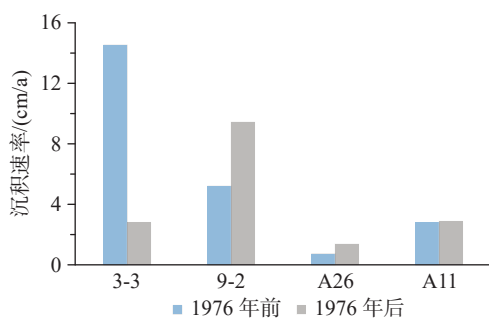


图5 柱状样3-3、9-2、A26和A11 1976年前后沉积速率

Fig.5 Comparison in the sedimentation rates of cores 3-3, 9-2, A26, and A11 before and after 1976

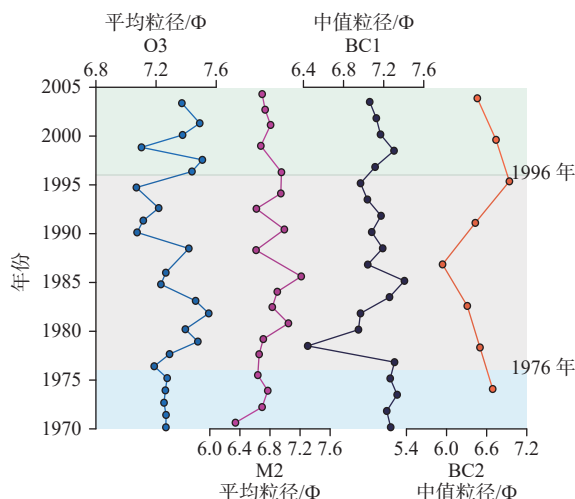


图6 柱状样O3、M2、BC1和BC2平均粒径和中值粒径变化

Fig.6 Changes in grain size and median size of core O3, M2, BC1 and BC2

的浅水区域由1976年前的沉积物“汇”转为“源”区,侵蚀再悬浮的沉积物在海流的作用下向深水区域搬运沉积。相较于黄河的直接供应,侵蚀再悬浮的物质相对较粗,由此导致K2、BH-239、O3、M2、BC1、BC2等柱状样沉积物粒度发生明显粗化,砂含量增加。如柱状样K2和BH-239的含沙量分别增加了7.78%和1.78%,O3、M2的平均粒径由改道前的 $(7.24 \pm 0.17) \Phi$ 和 $(6.91 \pm 0.26) \Phi$ 分别粗化为 $(7.21 \pm 0.09) \Phi$ 和 $(6.86 \pm 0.21) \Phi$,BC1和BC2的中值粒径由改道前的 $(7.28 \pm 0.05) \Phi$ 和 $(6.77 \pm 0.08) \Phi$ 也粗化为 $(7.07 \pm 0.48) \Phi$ 和 $(6.42 \pm 0.50) \Phi$ (图6)。同时,由于缺少黄河泥沙的直接供应,刁口流路周边海域沉积速率显著降低,柱状样3-3的沉积速率由改道前的14.5 cm/a减小至2.8 cm/a(图5)。尾间改道引起水下三角洲沉积特征发生变化,还导致有机质来源的调整。1976年黄河改道后O3、BC1和BC2柱状样的C/N值显著降低,O3自 7.93 ± 0.64 降低至 7.84 ± 0.61 ,BC1自 9.10 ± 0.88 降低至 8.24 ± 1.46 ,BC2自 10.09 ± 0.96 降低至 9.58 ± 0.45 (图7),指示改道后海源有机质对该区有机碳埋藏的影响增加。

3.2.2 莱州湾区域

1976年前,黄河向北注入渤海湾,莱州湾区域黄河泥沙的供应较少,该区物源主要以沿岸侵蚀的物质供应为主,粒度较粗。莱州湾Z01、Z02、Z03、YD02、A25等柱状样1976年的沉积层位以砂层、粗粉砂等粗粒级沉积为主,粒径相对较粗。如莱州湾西北部柱状样YD02主要为青灰色粗粉砂,A25

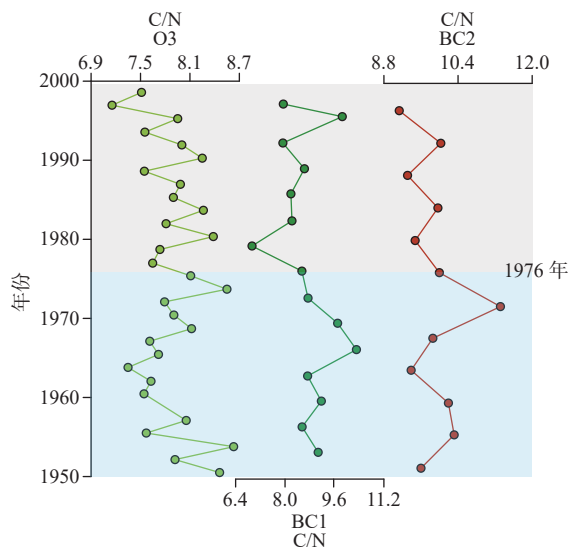


图 7 柱状样 O3、BC1 和 BC2 C/N 值变化

Fig.7 Changes in C/N value of cores O3, BC1 and BC2

在 1976 年前的沉积层中砂粒级含量普遍介于 5%~10%, 平均粒径为 $(6.93 \pm 0.52) \Phi$; 莱州湾东北部的 P4 柱状样 1976 年前的沉积层平均粒径为 $(5.85 \pm 0.20) \Phi$; 同样位于莱州湾东北部的柱状样 A26 平均粒径为 $(5.57 \pm 0.08) \Phi$, 沉积速率为 1.38 cm/a (图 5、8)。

1976 年黄河人工截流改道至清水沟后至 1996 年清 8 汊改道前, 高达 6.15 亿 t/a 的黄河物质输送至清水沟河口^[36], 相比 1976 年改道前的物源(主要来自沿岸侵蚀), 黄河入海物质相对较细, 引起莱州湾区域沉积特征发生显著调整(图 8)。比如, 莱州湾北部 Z01、Z02、Z03 柱状样由 1976 年前的砂质层转变为泥质层; 莱州湾西北部柱状样 YD02 岩性突

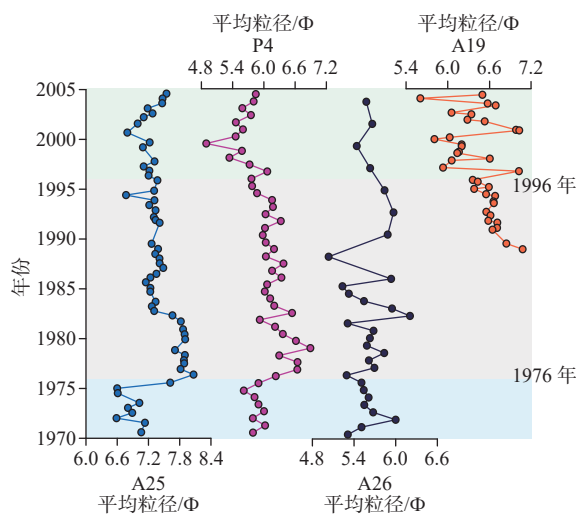


图 8 柱状样 A25、P4、A26 和 A19 平均粒径变化

Fig.8 Changes in mean grain size of cores A25, P4, A26 and A19

变为黄灰色粉砂, A25 沉积物中砂含量也显著降低, 平均粒径细化为 $(7.48 \pm 0.65) \Phi$; 莱州湾东北部柱状样 P4 和 A26 平均粒径转化为 $(6.22 \pm 0.56) \Phi$ 和 $(5.71 \pm 0.32) \Phi$, 黏土含量明显增加。黄河泥沙的直接供应还导致该区沉积显著增强, 柱状样 9-2 和 A26 的沉积速率分别由 5.19 和 0.72 cm/a 增加至 9.44 和 1.38 cm/a(图 5), 并呈现出随着离河口距离增大, 沉积速率逐渐降低的趋势。总体而言, 1976 年黄河改道至清水沟流路, 导致清水沟口门及莱州湾海域水下三角洲沉积特征发生明显调整, 主要表现为沉积物中砂含量减少, 粒度细化, 沉积速率增加。

3.2.3 现行河口区域

现行河口区域在 1976 年前的沉积物来自黄河细粒悬浮泥沙的长距离搬运, 加之输运过程中的动力分选, 该区 1976 年前主要以细粒泥沙沉积为主。比如, 现行口门外的 A11 柱状样 1954—1976 年期间的沉积层序中黏土含量高达 22.38%, 平均粒径仅为 $(6.74 \pm 0.67) \Phi$, 粒度较细; 位于现行河口东北部深水区的 BH-264 和 B63 柱状样的砂含量同样较低, 分选相对较好。1976 年黄河改道至清水沟流路后, 行水口门至该区的距离缩短。同时, 改道初期, 黄河河口朝向东南东, 正对该区域, 黄河泥沙的直接供应并在此沉积导致该区沉积物比 1976 年之前的沉积物相对较粗。1976 年改道后, 现行口门外的 A11 柱状样砂含量明显增加至 7.85%, 黏土含量降低至 15.53%, 平均粒径增大至 $(6.64 \pm 1.46) \Phi$, 且波动较大。粗化的现象同样扩散至现行口门外的深水区域, 1976 年后 BH-264 柱状样砂含量由 4.78% 增加至 6.43%, 平均粒径由 $(6.37 \pm 0.05) \Phi$ 粗化至 $(6.18 \pm 0.31) \Phi$, 同样 B63 柱状样也粗化至 $(7.10 \pm 0.29) \Phi$ (图 9)。黄河泥沙的直接供应还导致柱状样 A11 的沉积速率由 2.78 cm/a 增加至 2.87 cm/a(图 5)。因此, 1976 年改道事件导致河口位置变迁, 进而导致黄河物质对现行河口区域的供应增加, 相比 1976 年前黄河细粒物质的长距离搬运, 入海泥沙的直接供应导致该区沉积速率增加, 粒度粗化。

3.3 黄河水下三角洲对 1996 年改道事件的沉积响应

为延长清水沟流路的使用年限, 节省胜利油田采油成本, 1996 年在黄河清 8 断面以上 950 m 处实施了人工出汊工程^[10], 黄河入海口自此由清水沟河口北移至现行清 8 河口。河口北移改变了黄河泥

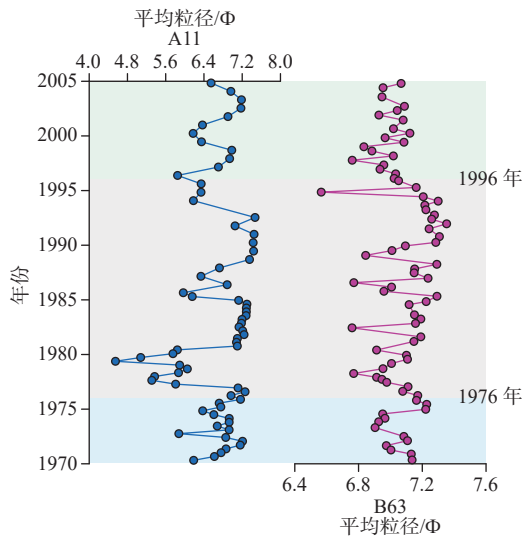


图9 柱状样 A11 和 B63 平均粒径变化

Fig.9 Changes in mean grain size of cores A11 and B63

沙供给区域和输运路径,进而导致黄河水下三角洲的沉积特征发生进一步调整。

1996年改道并未引起刁口区域的沉积物供应变化,刁口区域由于持续缺少沉积物供应,粒度继续呈现粗化趋势(图6)。而莱州湾区域由于黄河改道至清8汉后,直接的泥沙供给减少,莱州湾区域尤其是莱州湾西北部,与1976年改道后的刁口外海类似,陆上三角洲及水下三角洲浅水区域由淤积转为侵蚀。沿岸再悬浮的物质成为莱州湾深水区域的主要物源,相比黄河的直接供应,再悬浮沉积物粒度相对较粗,导致位于莱州湾西北、东北、北部的A25、P4和A26、A19柱状样自1996年后粒度粗化明显,平均粒径由 $(7.48 \pm 0.65)\Phi$ 、 $(6.22 \pm 0.56)\Phi$ 和 $(5.71 \pm 0.32)\Phi$ 、 $(6.63 \pm 0.36)\Phi$ 分别变为 $(7.21 \pm 0.38)\Phi$ 、 $(5.60 \pm 0.59)\Phi$ 和 $(5.51 \pm 0.07)\Phi$ 、 $(6.34 \pm 0.71)\Phi$ (图8)。现行河口成为1996年改道后黄河泥沙的直接供应区,河口口门处至行水河道的距离缩短,泥沙输运过程中的动力分选弱,同时随着黄河输沙量减少和入海悬沙粒径增加,使得现行河口外粗粒级组分相对快速沉积,导致A11柱状样相对于改道前平均粒径增大,粗化现象同样扩散到距现行河口较远的东北区域,如B63柱状样的平均粒径由1996年之前的 $(7.10 \pm 0.29)\Phi$ 粗化至 $(6.99 \pm 0.18)\Phi$ (图9)。

4 结论

黄河尾间改道频繁,一经改道,河口位置改变,进而引起入海物源变化和河口沉积动力过程调整,

导致水下三角洲的沉积特征发生显著变化。本文通过对前人发表的22根沉积物柱状样资料进行收集、对比和分析,探讨了现代黄河水下三角洲对1855、1976和1996年3期改道事件的沉积响应,取得的研究认识如下:

(1)1855年后黄河北上复归渤海后,渤海成为黄河巨量泥沙的直接输入地,黄河水下三角洲以进积作用为主,相比改道前沿岸侵蚀的较粗物质,黄河相对细粒的泥沙在河口处迅速沉积,少部分细粒物质向近海及外海搬运,导致黄河水下三角洲不同区域均表现出沉积物粒度细化,砂组分降低,粒度频率分布曲线由双峰转为单峰为主的特征。

(2)1976年黄河由刁口流路改道至清水沟流路,废弃刁口三角洲叶瓣由于黄河直接供应的断绝发生蚀退,侵蚀再悬浮的较粗粒沉积物在海流的作用下向深水区域搬运沉积,导致刁口区域沉积物粒度明显粗化,砂含量增加,沉积速率降低,海源有机质对该区有机碳埋藏的影响增加。黄河改道清水沟流路后,莱州湾区域和现行河口区域黄河入海物质增加,相对较细的黄河泥沙引起相应区域的沉积物粒度细化,砂含量减少,沉积速率快速增加。

(3)1996年至今,黄河行水清8汉流路,莱州湾区域尤其是莱州湾西北部由于黄河直接泥沙供应的减少,沿岸再悬浮的物质成为莱州湾深水区域的主要物源,导致莱州湾区域粒度粗化明显。现行河口作为1996年改道后黄河泥沙的直接供应区,泥沙输运过程中的动力分选加之黄河入海泥沙的变化使得现行河口浅水及其东北部深水区域粒度较改道前相对变粗。

参考文献:

- [1] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [2] WANG S J, LI Y K. Channel variations of the different channel pattern reaches in the lower Yellow River from 1950 to 1999[J]. *Quaternary International*, 2010, 244(2): 238-247.
- [3] 尹明泉, 李采. 黄河三角洲河口段海岸线动态及演变预测 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 35-40.
YIN M Q, LI C. Shoreline dynamics and evolution forecast in the Yellow River Delta Estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 35-40.
- [4] 成国栋, 任于灿, 李绍全, 等. 现代黄河三角洲河道演变及垂向序列 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6(2): 1-15.
CHENG G D, REN Y C, LI S Q, et al. Channel evolution and sedimentary sequence of modern Huanghe River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1986, 6(2): 1-15.

- [5] 彭俊,陈沈良. 近 60 年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1353-1362.
- PENG J, CHEN S L. The variation process of water and sediment and its effect on the Yellow River Delta over their sixth decades[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1353-1362.
- [6] 任寒寒,范德江,张喜林,等. 黄河入海口变迁的沉积记录: 来自粒度和 ^{210}Pb 的证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(4): 21-29.
- REN H H, FAN D J, ZHANG X L, et al. Sedimentary records of the Yellow River mouth migration: evidence from grain-size and ^{210}Pb [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(4): 21-29.
- [7] WU X, BI N S, KANAI Y, et al. Sedimentary records off the modern Huanghe (Yellow River) Delta and their response to deltaic river channel shifts over the last 200 years[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 108: 68-80.
- [8] 李凤业,袁巍. 近代黄河三角洲海域 ^{210}Pb 多阶分布与河口变迁[J]. *海洋与湖沼*, 1992, 23(5): 566-571.
- LI F Y, YUAN W. Stage profiles ^{210}Pb and implication of migration of the channel to the modern Huanghe River Delta[J]. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 1992, 23(5): 566-571.
- [9] 廖永杰,范德江,刘明,等. 1855 年黄河改道事件在渤海的沉积记录[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(2): 88-100.
- LIAO Y J, FAN D J, LIU M, et al. Sedimentary records correspond to relocation of Huanghe River in Bohai sea[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science edition)*, 2015, 45(2): 88-100.
- [10] 仲德林,刘建立. 黄河改道后河口至黄河海港海岸冲淤变化研究[J]. *海洋测绘*, 2003, 23(1): 49-52.
- ZHONG D L, LIU J L. Research on the scour-and-fill structure from the river mouth to the harbor bank of Yellow River after the diversion[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2003, 23(1): 49-52.
- [11] 刘勇,李广雪,邓声贵,等. 黄河废弃三角洲海底冲淤演变规律研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(3): 27-34.
- LIU Y, LI G X, DENG S G, et al. Evolution of erosion and accumulation in the abandoned subaqueous delta lobe of the Yellow River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 27-34.
- [12] 韩广轩,栗云召,于君宝,等. 黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 467-472.
- HAN G X, LI Y Z, YU J B, et al. Evolution process and related driving mechanisms of Yellow River Delta since the diversion of Yellow River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 467-472.
- [13] 杨伟,陈沈良,谷国传,等. 黄河三角洲清水沟河口区近期冲淤演变特征[J]. *海洋通报*, 2010, 29(1): 44-51.
- YANG W, CHEN S L, GU G C, et al. Accretion and erosion characteristics of Qingshuigou lobe of the Yellow River Delta in the near future[J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(1): 44-51.
- [14] 薛春汀,刘健,孔祥淮. 1128—1855 年黄河下游河道变迁及其对中国东部海域的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 25-36.
- XUE C T, LIU J, KONG X H, et al. Channel shifting of lower Yellow River in 1128-1855 AD and its influence to the sedimentation in Bohai, Yellow and East China Seas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 25-36.
- [15] 叶青超,杨毅芬,张义丰. 黄河冲积扇形成模式和下游河道演变[J]. *人民黄河*, 1982, 4: 32-37.
- YE Q C, YANG Y F, ZHANG Y F. Forming model and lower reaches evolution of Yellow River alluvial fan[J]. *Yellow River*, 1982, 4: 32-37.
- [16] 张少同,贾永刚,刘晓磊,等. 现代黄河三角洲沉积物动态变化过程的特征与机理[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(6): 33-44.
- ZHANG S T, JIA Y G, LIU X L, et al. Feature and mechanism of sediment dynamic changing progresses in the modern Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 33-44.
- [17] 庞家珍,姜明星. 黄河河口演变(II): (二)1855 年以来黄河三角洲流路变迁及海岸线变化及其他[J]. *海洋湖沼通报*, 2003, 1(4): 1-13.
- PANG J Z, JIANG M X. Fluvial process of the Yellow River Estuary (II): changes in the flow path and coastline of the Yellow River Delta since 1855 and other issues[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2003, 1(4): 1-13.
- [18] 庞家珍,司书亨. 黄河河口演变: I. 近代历史变迁[J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(2): 136-141.
- PANG J Z, SI S H. The estuary changes of Huanghe River: I. changes in modern time[J]. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 1979, 10(2): 136-141.
- [19] HU L M, GUO Z G, SHI X F, et al. Temporal trends of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in the Bohai Sea, China: evidence from the sedimentary record[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(10): 1181-1193.
- [20] 秦韵珊,赵一阳. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- QIN Y S, ZHAO Y Y. *Geology of Bohai Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [21] 庞家珍,司书亨. 黄河河口演变 II. 河口水文特征及泥沙淤积分布[J]. *海洋与湖沼*, 1980, 11(4): 295-305.
- PANG J Z, SI S H. Fluvial process of the Huanghe River Estuary II. hydrographical character and the region of sediment silt-ing[J]. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 1980, 11(4): 295-305.
- [22] ZHANG J, WEN H W, CHONG S M. Huanghe (Yellow River) and its estuary: sediment origin, transport and deposition[J]. *Journal of Hydrology*, 1990, 120(1/4): 203-223.
- [23] 程义吉,程建刚. 黄河口新口门海域流场分析[J]. *海岸工程*, 2000, 19(4): 5-11.
- CHENG Y J, CHENG J G. Analysis of the current field in the new Yellow River entrance sea area[J]. *Coastal Engineering*, 2000, 19(4): 5-11.
- [24] 廖永杰. 渤海中南部沉积地球化学特征和黄河改道事件[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

- LIAO Y J. Characteristic of sediments in Bohai Sea and relocation of Huang River[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [25] 宋莎莎, 孙永福, 宋玉鹏, 等. 黄河口水下三角洲刁口叶瓣的核素分布与沉积特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(3): 43-50.
- SONG S S, SUN Y F, SONG Y P, et al. Nuclides distribution and sedimentary characteristics of the Diaokou course in Yellow River subaqueous delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(3): 43-50.
- [26] QIAO S Q, SHI X F, SAITO Y, et al. Sedimentary records of natural and artificial Huanghe (Yellow River) channel shifts during the Holocene in the southern Bohai Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(13): 1336-1342.
- [27] 范勇勇, 毕乃双, 李云海, 等. 百年来黄河三角洲东北部毗邻海域沉积记录演化及其影响因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(4): 29-39.
- FAN Y Y, BI N S, LI Y H, et al. High-resolution depositional records in the northeastern adjacent area off the Huanghe (Yellow River) Delta for the past hundred years and their influence factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(4): 29-39.
- [28] ZHOU L Y, LIU J, SAITO Y, et al. Modern sediment characteristics and accumulation rates from the delta front to prodelta of the Yellow River (Huanghe)[J]. *Geo-Marine Letters*, 2016, 36(4): 247-258.
- [29] 陈艇, 刘青松, 郑一. 黄河水下三角洲钻孔沉积物磁学记录及其年代学意义 [J]. 科学通报, 2021, 66(30): 3902-3915.
- CHEN T, LIU Q S, ZHENG Y. Environmental magnetic properties of core sediments in the Yellow River subaqueous delta and their chronological applications[J]. Science Bulletin, 2021, 66(30): 3902-3915.
- [30] LIU L, WANG H J, YANG Z S, et al. Coarsening of sediments from the Huanghe (Yellow River) delta-coast and its environmental implications[J]. Geomorphology, 2022, 401: 108105.
- [31] WANG H J, YANG Z S, SAITO Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3): 331-354.
- [32] BI N S, YANG Z S, WANG H J, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 86(3): 352-362.
- [33] BI N S, WANG H J, WU X, et al. Phase change in evolution of the modern Huanghe (Yellow River) Delta: process, pattern, and mechanisms[J]. Marine Geology, 2021, 437: 106516.
- [34] 江文胜, 王厚杰. 莱州湾悬浮泥沙分布形态及其与底质分布的关系 [J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(2): 97-103.
- JIANG W S, WANG H J. Distribution of suspended matter and its relationship with sediment particle size in Laizhou Bay[J]. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 2005, 36(2): 97-103.
- [35] 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.
- WU X, FAN Y Y, WANG H J, et al. Evolution of abandoned deltaic river channel: a case from the Diaokou channel of the Yellow River[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(2): 22-29.
- [36] 黄海军, 樊辉. 1976 年黄河改道以来三角洲近岸区变化遥感监测 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 306-314.
- HUANG H J, FAN H. Monitoring changes of nearshore zones in the Huanghe (Yellow River) Delta since 1976[J]. Oceanology et Limnologia Sinica, 2004, 35(4): 306-314.

Sedimentary response of the modern subaqueous Yellow River Delta to channel migrations in the 1855, 1976, and 1996 diversion events

KONG Miaomiao^{1,2}, LIU Surui³, WANG Houjie^{1,2}, BI Naishuang^{1,2}, HU Limin^{1,2},
YAN Tianhao^{1,2}, REN Xixi^{1,2}, LIU Yanhao^{1,2}, WU Xiao^{1,2*}

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3 Lijin Hydrological Station, Shandong Hydrology and Water Resources Bureau, Yellow River Conservancy Committee, Dongying 257400, China)

Abstract: The migration of deltaic river channels is a major factor affecting the sedimentary evolution pattern of the delta. Due to its large sediment supply and frequent channel migrations, the Yellow River Delta was regarded as an ideal area to address this issue. In this study, we systematically collected the age and particle size data from 22 sediment cores to explore the impacts of the three Yellow River channel migration events on the sedimentary evolution of the Yellow River subaqueous delta and spatial differences in the delta's response to the same migration event. In 1855, the northward inflow of the Yellow River into the Bohai Bay caused changes in the sedimentary sources and sedimentary dynamics, resulting in refined sediment particle size and a shift in particle size frequency distribution curve. In 1976, the Yellow River was diverted from the Diaokou course to the Qingshuigou course, causing the particle size of abandoned Diaokou subaqueous delta to coarsen with increased sand content and decreased sedimentation rate. Interruption of the terrestrial supply increased the influence of marine organic matter on organic carbon burial. However, the direct supply of fine sediment from the Yellow River caused the fining of particle size seen in sediment cores in the Laizhou Bay and the active river mouth area. Since 1996, the Yellow River has been diverted to the Q8 course, causing a continuously coarsening trend in particle size in the Diaokou area; the main source of sediment in the Laizhou Bay area had changed to eroded coastal materials with coarsening particles; and the active subaqueous delta received the material supply from the Yellow River sediment, but the dynamic sorting during transportation caused a trend of particle coarsening in the shallow area.

Key words: channel migration; Yellow River subaqueous delta; delta evolution; sedimentary characteristics