

邢吕阳, 李广雪, 刘思雨, 等. 黄河三角洲刁口叶瓣堆积过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 97-104.
XING Lvyang, LI Guangxue, LIU Siyu, et al. Formation of the Diaokou Lobe in Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 97-104.

黄河三角洲刁口叶瓣堆积过程

邢吕阳¹, 李广雪^{1,2}, 刘思雨^{1,2}, 李浩楠¹, 潘煜峰¹

1. 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
2. 中国海洋大学未来海洋学院, 青岛 266100

摘要:黄河三角洲刁口叶瓣于 1964—1976 年间堆积而成, 中国大型滩浅海油田——埕岛油田在这个叶瓣上建设开发, 该叶瓣的形成过程与地层结构对海洋工程建设影响较大。根据多年历史测深资料, 研究了刁口叶瓣形成期间河口摆动与堆积体演变过程, 依据堆积中心的位置变化明确了古河口摆动规律。1964—1966 年河口及堆积体在叶瓣西侧发育, 在柯氏力作用下, 河口逐渐 NNE 向摆动, 堆积中心移动到叶瓣东侧; 1975—1976 年, 由于河道摆动曲率过大引发失稳, 河道取直后堆积中心又回到叶瓣西侧。根据堆积速率和河口位置将形成期分为 3 个阶段: 近岸堆积阶段 (1964—1966 年)、整体堆积阶段 (1966—1975 年) 和调整堆积阶段 (1975—1976 年)。受黄河海港附近 M_2 无潮点影响下的强潮流场控制, 刁口叶瓣东侧在形成早期和末期存在局部冲刷作用, 而叶瓣西侧是三角洲形成期堆积最活跃的区域。

关键词:堆积中心; 河口摆动; 刁口叶瓣; 黄河三角洲

中图分类号: P736.21 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023040901

Formation of the Diaokou Lobe in Yellow River Delta

XING Lvyang¹, LI Guangxue^{1,2}, LIU Siyu^{1,2}, LI Haonan¹, PAN Yufeng¹

1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Academy of the Future Ocean, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Diaokou Lobe in Yellow River Delta was formed from 1964 to 1976 under human intervention at the beginning, on which the Chengdao Oilfield, a large beach shallow-sea oil field in China, was constructed and developed. The formation and stratum structure of the lobe have a great impact on marine construction of the oil field. Therefore, the multiple historical sounding data were collected and analyzed, from which the process of estuarine oscillation and sedimentation evolution during the formation of the Diaokou Lobe were anatomized. Based on the changes in the position of the sedimentation center, the estuarine oscillation pattern of the lobe in the past was clarified. From 1964 to 1966, estuary deposits were developed in the west flank of the lobe. Under the Coriolis force, the river mouth gradually moved towards NNE and the sedimentation center moved to the east of the lobe. From 1975 to 1976, due to the instability resulted from excessive swing curvature of river channel, the river channel was cut straight artificially, and afterward the sedimentation center returned to the west side of the lobe. The lobe formation could be divided into three stages based on the accumulation rate and river mouth position: nearshore accumulation (1964—1966), overall accumulation (1966—1975), and adjusting accumulation (1975—1976). Controlled by the strong tidal flow field by the M_2 tidal point near the Yellow River Seaport, local erosion took place on the eastern flank of the Diaokou Lobe in the early and late stages of the lobe formation period, while the western flank of the lobe was the most active accumulation area in the delta during the lobe formation.

Key words: sedimentation center; river mouth shifting; Diaokou Lobe; Yellow River delta

黄河三角洲曾是世界上堆积速度最快、演变最剧烈的大河三角洲, 埕岛油田位于现代黄河三角洲北部海域, 主体工程区坐落于废弃的刁口水下三角洲叶瓣上, 共建有在役各类平台 107 座、海底管道 162 条、海底电缆 123 条, 依附于刁口叶瓣堆积体,

因此, 研究刁口叶瓣堆积体形成过程有利于查明工程设施所处的地层组合状态, 有利于埕岛油田工程设施的安全监测和维护。

1980 年以来, 随着国际对高含沙河口沉积作用的逐渐关注, 以及黄河三角洲经济发展的需要, 众

资助项目: 国家自然科学基金创新群体项目“海底古地貌动态重建”(42121005)

作者简介: 邢吕阳 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: 21200411610@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 李广雪 (1962—), 男, 教授, 主要从事海洋地质研究, E-mail: gxli1962@163.com

收稿日期: 2023-04-09; 改回日期: 2023-04-21. 文凤英编辑

多学者研究了黄河三角洲堆积体的发育演变过程。根据前人研究,黄河三角洲由10个大型三角洲叶瓣组成,流路行水期,在异重流^[1-2]和切变锋^[3-4]作用下,河口快速堆积形成三角洲叶瓣^[5]。刁口流路三角洲叶瓣是1964—1976年间形成,前人围绕黄河来水来沙^[6-7]、岸线变化^[8-11]、河道演化^[10-13]和形成过程^[14-18]对刁口叶瓣水下三角洲做了一些研究,论证了刁口流路行水期整体演化过程。

由于历史测量资料收集难,学者们对刁口叶瓣形成期的研究往往局限于总体描述,缺少堆积体阶段性发育过程分析,本文收集了刁口叶瓣形成期多次岸线航测和水深实测数据,重建了刁口流路三角洲叶瓣形成期岸线演变和堆积中心阶段性形成过程。

1 资料与方法

1.1 选区

1964年1月黄河改道刁口流路行河,到1976年5月人工改道清水沟流路,在此期间形成的三角洲称为刁口流路三角洲叶瓣,本文简称刁口叶瓣。本文研究区范围是 $38^{\circ}05'36''\sim 38^{\circ}18'35''\text{N}$ 、 $118^{\circ}38'19''\sim 118^{\circ}57'27''\text{E}$ 之间的区域,覆盖了刁口叶瓣的主体区域(图1)。水深数据坐标采用1954年北京坐标系,投影格式为高斯-克吕格投影,

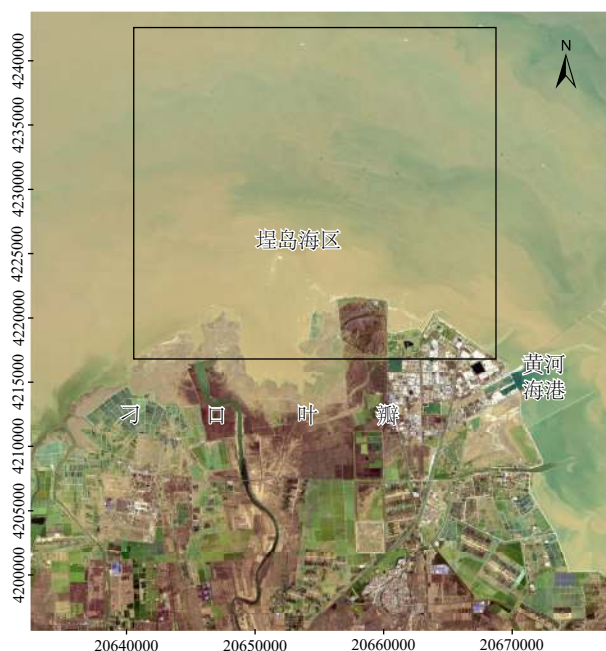


图1 黄河三角洲研究选区
2021年刁口叶瓣遥感图像。

Fig.1 The study area of the modern Yellow River delta
Remote sensing images of the Diaokou Lobe in 2021.

6度带,中央经线117度,1985国家高程基准,高斯坐标系的研究范围为20644000~20671000、4220000~4243000。

1.2 资料来源

黄河来水来沙数据来自黄河水利委员会利津水文站1950—2000年实测数据,黄河年平均输沙量为 $8.54\times 10^8\text{ t/a}$,年平均径流量为 $335\times 10^8\text{ m}^3$,水沙年际变化大,年内分配不均,来水来沙主要集中在夏季汛期(每年7—10月)。

本文岸线数据基于航测资料(1963、1964年)、水深插值0 m岸线(1964、1968和1972年)和1976年Landsat2MSS遥感数据。高潮线和低潮线均常作为遥感图像提取的海岸线基线^[9,19],但高潮线已经处于低动能海洋环境,不足以反映水下三角洲堆积体的冲淤变化,因此本文选用低潮线用于刁口流路三角洲叶瓣岸线变化研究。低潮线是平缓潮间带与坡度较大的三角洲前缘斜坡的地形转换界线,在遥感图像上界线明显,容易识别。

本文收集到刁口流路行河期间1959、1966、1968、1972、1975和1976年的水深测量数据,这些数据主要来自黄河水利委员会、胜利油田和国家基础调查项目的测量数据,形成了一套比较全面的历史数据集。水深测量采用SDH-13A型测深仪,测量范围0.5~200 m,测深误差小于5 cm。水深测量时间基本集中于每年9—10月,黄河三角洲海床年际地形冲淤幅度较大,所用测深仪器测量误差在允许范围以内。其中,1964年缺乏水深测量数据,用1959年作为刁口叶瓣发育的初始水深,由于该海域大部分区域属于早期废弃的三角洲叶瓣,经过长时间海床调整,1959—1964年之间海床变化强度相对偏弱,所以可以近似用1959年水深代替1964年。

为了研究刁口叶瓣水下三角洲堆积体演变的阶段性规律,采用堆积体厚度平面分布和特征剖面的时间序列变化分析相结合的方法。堆积中心是整个叶瓣形成期海床变化最敏感的代表性区域,特征剖面选取都穿过了这些堆积中心,因此提取垂直岸线的3条特征剖面的水深数据,对于多条剖面不同水深采集固定点水深数据和不同水深界面,分析海床冲淤和堆积体的阶段性变化特征。

1.3 堆积效率计算方法

本文引入造陆效率、堆积效率和最大堆积比例3个参数,用于研究黄河来水来沙在三角洲叶瓣的堆积效果:

造陆效率计算公式为

$$\lambda = \frac{A}{Q} \quad (1)$$

λ 为造陆效率, 表达黄河入海泥沙形成陆地的能力, 单位 $\text{km}^2/10^8 \text{t}$; A 为造陆面积, 单位 km^2 ; Q 为黄河入海泥沙量, 单位 10^8t 。

堆积效率计算公式为

$$\gamma = \frac{V\sigma}{Q} \times 100 \quad (2)$$

γ 为堆积效率, 表达的是水下三角洲捕获入海泥沙的能力, 堆积效率值是无量纲百分比; σ 为海底沉积物密度, 本文选为 1.1 t/m^3 [20]; V 为堆积体体积, 单位 m^3 。

最大堆积比例计算公式为:

$$\Delta_{\max} = \frac{Q}{H_{\max} T} \quad (3)$$

$\Delta_{\max}$ 为最大堆积比例, 单位 $\text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ (每年堆积中心每堆积 1 m 沉积物所需的黄河来沙量); $H_{\max}$ 堆积中心厚度, 单位 m; T 是堆积时间, 单位 a。

最大堆积比例 $\Delta_{\max}$ 表达的是入海泥沙在水下三角洲形成最大堆积厚度的能力, 堆积比例越高, 入海泥沙向外扩散的能力越弱。

2 海岸线变化

2.1 黄河水沙特征

1950—2000 年间, 黄河在汛期入海的径流量占年径流量的 61.32%, 入海泥沙量占全年的 85.20%。刁口叶瓣形成期水沙充足, 来水来沙同样集中在汛期, 汛期径流量占全年的 59.09%, 泥沙量占全年的 82.07% (图 2), 整个形成期入海总沙量为 $140.48 \times 10^8 \text{t}$, 黄河水沙供应峰值同期, 平均含沙量为 25.44 kg/m^3 。如此高的河流含沙量, 使得刁口叶瓣堆积较快。

2.2 岸线与陆地面积变化

刁口叶瓣形成期岸线变化资料显示 (图 3)。1963 年底, 近岸存在一个小型古海湾, 自 1964 年

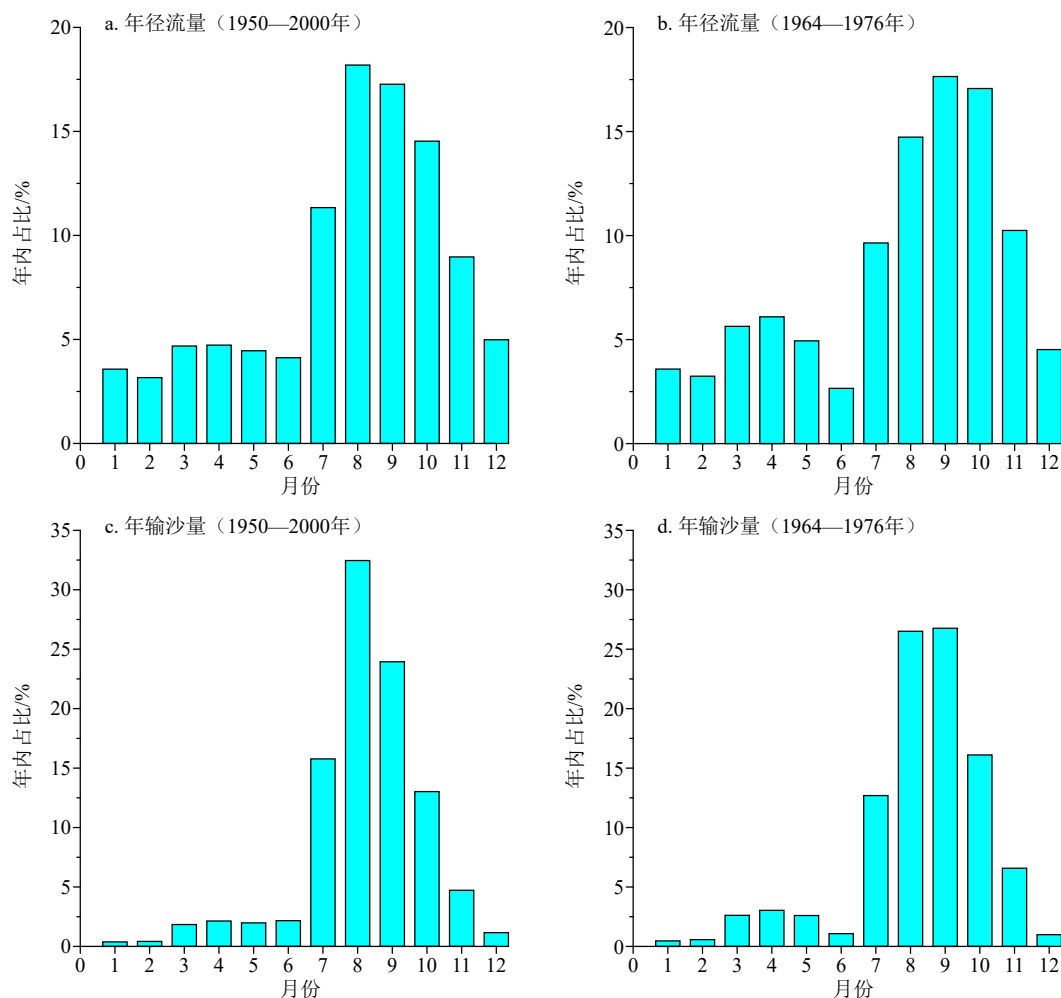


图 2 黄河利津水文站逐月平均水沙量占全年的百分比

Fig.2 Monthly annual percentage of water and sediment in the Yellow River at Lijin gauge station

1月1日黄河改道刁口流路后的第一个汛期,黄河上游三门峡大坝改建后,排水排沙能力加大,入海泥沙量达到了 $19\times 10^8\text{ t}$,为整个行水期间输沙平均值的两倍。三门峡大坝大规模的排沙将原始内凹的小海湾迅速填平,到1964年9月,叶瓣东西两侧岸线基本平行。1964年汛期之后开始形成水下三角洲,岸线向外海快速逐步推移(图3),1964年汛后到1976年之间,岸线整体向外海推移,1964—1968年岸线平均推移速度为2073 m/a,1968—1972年岸线平均推移速度为902 m/a。1972—1976年,堆积体主要在叶瓣西侧发育,岸线向海推移速度为1019 m/a。

1964—1976年黄河入海泥沙总量高达 $140.48\times 10^8\text{ t}$,刘家峡大坝复工使得1968年后整体来水来沙量有所降低,年平均输沙量仅为1964年的一半,整个行水期岸线随着河道尾间摆动仍不断向海推进,新堆积的陆地总面积为 599.26 km^2 ,每年平均造陆面积为 49.94 km^2 ,每年岸线平均向海推进1692.56 m。

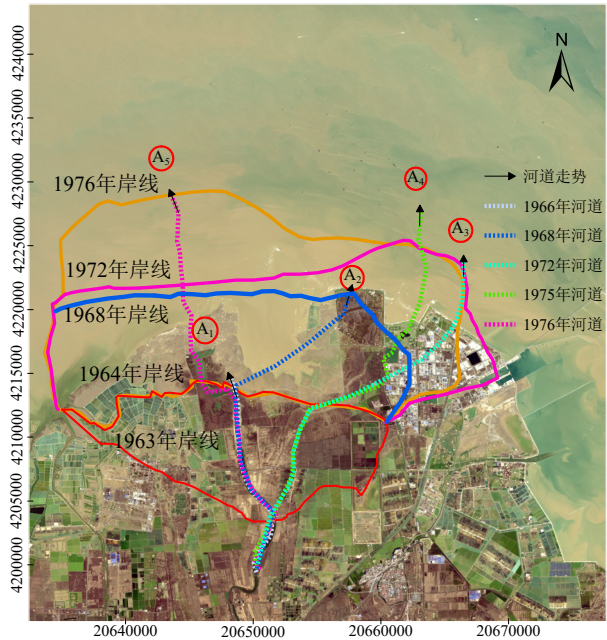


图3 刁口叶瓣岸线与河道演化

A_1 : 1964—1966年堆积中心, A_2 : 1966—1968年堆积中心, A_3 : 1968—1972年堆积中心, A_4 : 1972—1975年堆积中心, A_5 : 1975—1976年堆积中心。

Fig.3 Shoreline and channel evolution of Diaokou Lobe

A_1 : Accumulation center (1964—1966), A_2 : accumulation center (1966—1968), A_3 : accumulation center (1968—1972), A_4 : accumulation center (1972—1975), A_5 : accumulation center (1975—1976).

到每亿吨泥沙造陆 8.27 km^2 ,其中,1964年汛期将古海湾填满,造陆速度高达 $157.20\text{ km}^2/\text{a}$ 。1964年汛期后,造陆速度和效率逐步下降(表1),造陆效率下降一半以上,主要原因是河口向海凸出后,入海泥沙向外海扩散的作用加强。

3 堆积特征

3.1 水深演变特征

为了研究不同时间段的堆积过程,选取三条剖面(图4a中剖面47、54和62),以刁口叶瓣1976年1~15 m间隔1 m的水深点作为固定点,研究整个建设期内不同年份固定点水深随着河口堆积发生的变化。根据3个剖面水深演变可看出,整个形成期堆积体的分区特征和阶段性演变明显(图4)。分区特征表现为以1976年10 m水深为界分为浅水区和深水区,浅水区快速堆积,深水区堆积缓慢,12 m以深海域堆积更为缓慢。

3.2 水下堆积体变化特征

刁口叶瓣形成期总堆积体厚度见图5a,堆积体体积为 $450.96\times 10^8\text{ m}^3$,两个大于13 m厚的堆积中心位于7~10 m水深范围,以中间线为界,分别计算研究区东西两侧堆积量:西侧水下堆积体体积为 $276.60\times 10^8\text{ m}^3$,占整个堆积体体积的61.34%,三角洲造陆面积占总造陆面积的58.71%,说明在东西两个堆积中心厚度接近的情况下,受到刁口水下三角洲叶瓣东部近岸无潮点强潮流区影响,联合东北向大浪的作用,造成研究区西侧堆积体体积大于东侧。

由图5不同时期堆积中心 A_1 — A_5 变化过程可以看出,刁口叶瓣形成初期,河口位于西侧,随着行河时间推移,在北半球柯氏力作用下河道持续向东摆动,古河道口位置不断东移,到1976年刁口流路废弃时,河道又调整回到西侧。基于各时间段堆积中心位置和堆积体等厚度分布综合分析,将形成期水

表1 刁口叶瓣形成期造陆统计				
Table 1 Statistics of epeirogeny during the formation of the Diaokou Lobe				
参数	1964年 汛期	1965—1968 年	1968—1972 年	1972—1976 年
造陆速度/(km^2/a)	157.20	54.70	26.28	31.33
年输沙量/(10^8 t/a)	19.00	13.48	7.23	9.74
造陆效率 λ /($\text{km}^2/10^8\text{ t}$)	8.27	4.06	3.63	3.22

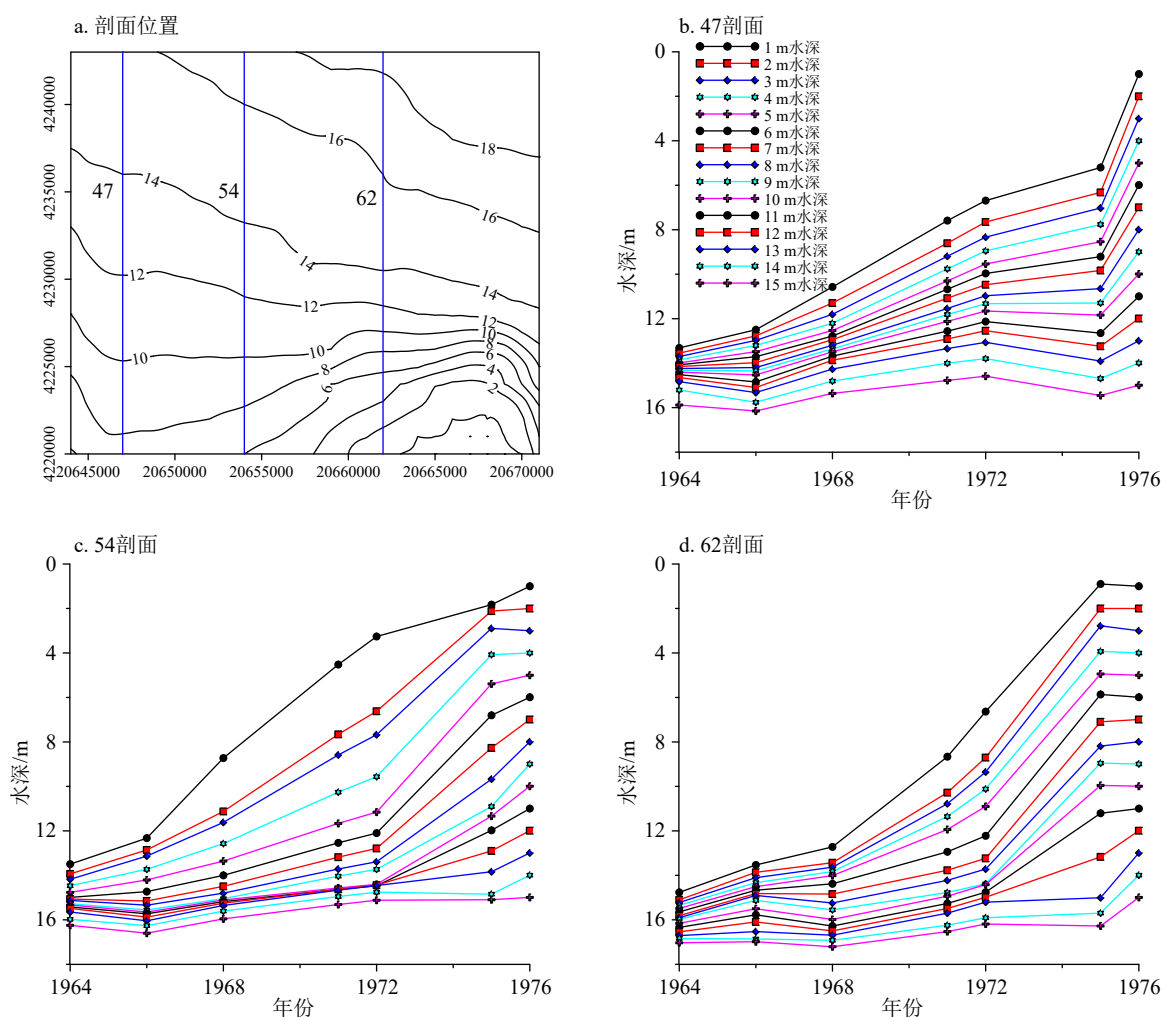


图 4 固定点水深变化

a: 剖面布置位置, b: #47 剖面固定点水深, c: #54 剖面固定点水深, d: #62 剖面固定点水深。

Fig.4 Evolution of water depth at fixed points

a: location of survey lines; b-d: profiles of water depth at fixed points of #47 (b), #54 (c), and #62 (d).

下三角洲演变划分为 3 个阶段 (图 5): 近岸堆积阶段 (1964—1966 年)、整体堆积阶段 (1966—1975 年)、调整堆积阶段 (1975—1976 年)。

(1) 近岸堆积阶段 (1964—1966 年): 黄河入海水沙量充足, 泥沙总量达 $40.13 \times 10^8 \text{ t}$, 黄河径流总量为 $1692.50 \times 10^8 \text{ m}^3$, 堆积中心位于研究区西侧, 靠近 1964 年汛期后水下三角洲 0 m 水深线, 堆积中心位于 A_1 , 远离 1966 年 10 m 水深线, 堆积厚度超过 8 m, 堆积总体积为 $12.33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 堆积中心的堆积速度为 4 m/a; 近岸堆积阶段刁口叶瓣海床并非都处于堆积状态, 东侧的神仙沟流路在其行水期 1953—1964 年后被废弃, 此时仍处于快速冲刷阶段, 使得研究区东部出现一个 4 m 左右的冲刷中心 A_6 , 黄河口在附近供应入海泥沙, 仍然抵挡不住神仙沟流路废弃后的侵蚀调整作用, 冲刷总量为 $1.33 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最大冲刷厚度为 4 m (图 5b)。

(2) 整体堆积阶段 (1966—1975 年): 1968 年之后黄河口来水来沙量有所下降, 该阶段黄河入海泥沙总量为 $91.73 \times 10^8 \text{ t}$, 径流总量为 $3334.60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 研究区整体堆积 (图 5c), 在柯氏力作用下黄河河口向东侧偏移, 岸线向海推进, 两种作用结合下整体堆积阶段的堆积中心由 A_1 向东北转移到 A_7 。堆积中心最大堆积厚度超过 12 m, 堆积体呈椭圆形分布, 堆积体中心轴线与岸线平行, 表明入海泥沙受到往复性潮流场携带扩散控制, 沿等深线堆积。淤积总体积为 $30.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均堆积速度为 0.51 m/a, 堆积中心的堆积速度为 1.33 m/a, 堆积速度慢于近岸堆积阶段。

(3) 调整堆积阶段 (1975—1976 年): 1975 年黄河汛期入海水沙充足, 入海泥沙总量为 $8.62 \times 10^8 \text{ t}$, 径流总量为 $425.90 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最大堆积厚度超过 5 m。前期柯氏力使得古河口持续向东向北偏移, 引起河

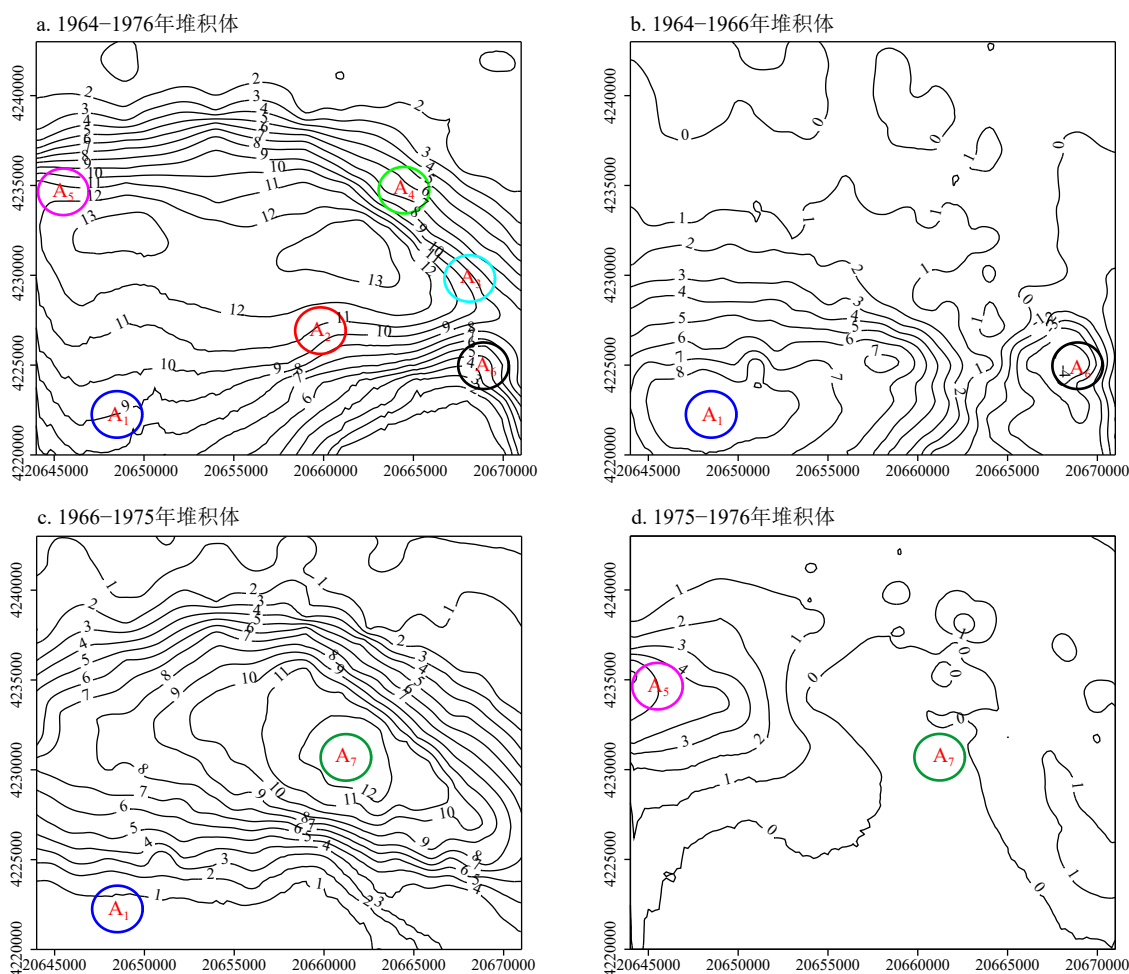


图 5 刁口叶瓣堆积体厚度变化

A_1 : 1964—1966 年堆积中心, A_2 : 1966—1968 年堆积中心, A_3 : 1968—1972 年堆积中心, A_4 : 1972—1975 年堆积中心, A_5 : 1975—1976 年堆积中心, A_6 : 1964—1966 年冲刷中心, A_7 : 1966—1975 年堆积中心。

Fig.5 Sedimentary thickness of the Diaokou Lobe

Accumulation centers during 1964—1966 (A_1), 1966—1968 (A_2), 1968—1972 (A_3), 1972—1975 (A_4), 1975—1976 (A_5), and 1966—1975 (A_7), and erosion center during 1964—1966 (A_6).

道曲率过大,河道开始失稳,1976 年河口回到叶瓣发育初期的西侧位置,堆积中心由 A_7 转移至 A_5 ,1975 年研究区东部海床缺少河口泥沙直接供应,堆积缓慢(图 5d)。这一阶段淤积总量为 $4.20 \times 10^8 \text{ m}^3$,中部地区出现微弱冲刷,冲刷总量仅为 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 5d),堆积中心的堆积速度为 4 m/s 。

3.3 三角洲堆积效率

表 2 是针对上述 3 个堆积阶段计算的水下三角洲叶瓣堆积效率。

(1) 近岸堆积阶段(1964—1966 年): 黄河入海输沙量为 $13.38 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。整个研究区经历了 1964 年汛期充足的水沙供给、上游水利工程改建的泄洪泄沙和研究区东部神仙沟叶瓣废弃初期快速的冲刷,近岸堆积阶段堆积体积为 $11.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,早期黄河潮

流动力强,近岸堆积阶段堆积体的堆积效率最低,为 30.14% ,堆积比例最高,为 $2.51 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,入海泥沙向外扩散能力最弱,依靠充足的泥沙供应,刁口叶瓣水下三角洲近岸堆积阶段堆积速度为 $5.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (表 2)。近岸堆积阶段研究区西部水下三角洲堆积体体积为 $9.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,占近岸堆积阶段堆积体体积的 89.18% ,该时期古河口位于西侧,研究区西侧是主要堆积区域。

(2) 整体堆积阶段(1966—1975 年): 研究区枯水少沙,含沙量最高达到 27.50 kg/m^3 ,整体堆积阶段的堆积效率有所上升,为 36.70% 。研究区整体堆积,堆积中心狭长,堆积比例最低,为 $0.85 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,整体堆积阶段堆积速度最慢,仅为 $3.40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (表 2)。整体堆积阶段研究区西部堆积体体积为 $15.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,占整体堆积阶段堆积体体积的 49.05% ,

表 2 刁口叶瓣形成期堆积统计
Table 2 Statistics of accumulation in the Diaokou Lobe formatin

参数	近岸堆积	整体堆积	调整堆积
堆积比例 $\Delta_{\max}/(10^8\text{t}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	2.51	0.85	1.72
堆积速度 $/(10^8\text{m}^3/\text{a})$	5.50	3.40	3.45
输沙量 $/(10^8\text{t}/\text{a})$	13.38	10.19	8.62
含沙量 $/(kg/m^3)$	23.71	27.50	20.24
堆积效率 $\gamma/\%$	30.14	36.70	44.03

由于持续柯氏力作用, 堆积中心已经偏移至研究区东侧, 该阶段研究区西侧堆积体体积仍接近整个研究区的一半, 无潮点区域强的潮流场作用下使得大量泥沙入海后仍以向西扩散为主。

(3)调整堆积阶段(1975—1976 年): 堆积中心位置调整回到西侧, 研究区东部水下三角洲海床稳定。调整堆积阶段堆积体体积为 $3.45\times10^8\text{ m}^3$, 由于堆积集中在西北新形成的水下三角洲, 调整堆积阶段的堆积效率最高, 为 44.03%, 研究区堆积体集中在堆积中心(表 2)。调整堆积阶段研究区西部水下三角洲堆积体体积为 $2.82\times10^8\text{ m}^3$, 占整个堆积体体积的 81.79%。

4 古河道变化

成国栋等^[15]认为黄河三角洲形成过程中古河道演化可以总结为漫流、归股顺直和出汉摆动 3 个阶段。黄河三角洲为河控型三角洲, 地表径流直接控制来水来沙, 黄河尾间摆动控制堆积区域, 是刁口叶瓣形成期三角洲不同演化阶段的主要控制因素。本文基于不同阶段堆积中心位置和 1976、1977 年遥感图像中陆地遗存古河道痕迹, 重现了 1964—1976 年刁口流路行水期河口位置和河道摆动过程(图 3)。

(1)1964—1966 年, 刁口流路改道初期, 河口处于神仙沟与挑河间的狭窄海湾上, 海底平坦, 水深在 5 m 左右, 河水漫流入湾, 泥沙大量淤积在滨海地区, 1964 年汛期后将海湾填平(图 3), 1965 年之后, 河口向外海推移。

(2)1966—1968 年, 刁口流路河道在新的河滩分汊入海, 呈现一条主流、一条小汊河の入海情景, 两股水流输水输沙能力极不平衡, 在经历 1967 年旱情后, 刁口流路逐渐形成单一的分流河道行水, 汇流顺直单一入海(图 3)。河道逐渐向 NNE 向偏移, 河口快速向海推进。

(3)1968—1972 年, 河道持续沿 NNE 增长, 河口迅速向海推进, 呈鸟嘴状插入海中, 河口水下三角洲前缘迅速堆积, 水下三角洲轮廓呈现平行于海岸线的椭圆形(图 3)。

(4)1972—1975 年, 刁口古河道曲直向海, 1974 年时河道曲率过大平行于岸线, 河口逐渐失稳开始向西侧回摆(图 3)。三角洲叶瓣整体向海推进, 河口外海扩散范围大, 堆积厚度变薄, 堆积中心厚度最大可达到 5 m, 1975 年河口向西偏移明显。

(5)1975—1976 年, 东南侧水下三角洲缺少泥沙供应, 不再堆积, 研究区东侧出现断流, 刁口分流河道在西岸决口, 河口调整回到西侧(图 3)。河道演变过程与堆积中心迁移过程基本一致: 1964—1966 年漫流入海, 1968—1972 年归股顺直, 1972—1976 年出汉摆动。

5 结论

(1)1964 年汛期将古海湾填平, 之后岸线快速向海淤进。1964—1976 年黄河入海输沙总量 $140.48\times10^8\text{ t}$, 造陆面积为 599.26 km^2 , 每亿吨泥沙造陆 4.3 km^2 ; 岸线向外海最大延伸距离 27.1 km, 平均每年向海推移 1.7 km。

(2)刁口叶瓣形成期堆积总体积为 $450.96\times10^8\text{ m}^3$, 堆积中心位于 7~10 m 水深范围, 随着岸线向海推进, 浅水区快速堆积, 深水区缓慢堆积, 13 m 水深外海基本维持冲淤平衡。堆积过程分为近岸堆积(1964—1966 年)、整体堆积(1966—1975 年)和调整堆积(1975—1976 年)3 个阶段。1964—1966 年堆积厚度 8 m, 河口在叶瓣西侧; 1966—1975 年间, 由于岸线向海推进和柯氏力持续作用, 水下三角洲堆积中心不断向东北移动, 其中 1968—1972 年是叶瓣东部最主要的堆积阶段, 堆积中心厚度高达 12 m; 1975—1976 年河道调整回到西侧, 堆积中心厚度 5 m。

(3)刁口叶瓣形成期海床并非都处于堆积状态, 1953—1964 年黄河走神仙沟流路, 靠近研究区东侧, 1964 年神仙沟流路被废弃后该区处于快速冲刷阶段, 冲刷速度高于同一时期刁口供沙, 东侧局部形成一个小冲刷中心。

(4)整个形成期, 计算得到西侧水上三角洲造陆面积和水下三角洲堆积体占比均超过 58%, 堆积中心位于西侧时, 西侧水下三角洲面积占比超过 80%, 堆积中心位于研究区东侧时, 研究区西侧水下三角洲堆积体占比仍达到 49%, 总结来看在无潮点

强潮流场的影响下,刁口叶瓣形成期西侧水下三角洲是泥沙堆积最活跃区域。

(5) 刁口流路河口和河道演变分3个阶段: 1964—1966年,河口漫流入海,将老海湾填平;1966—1972年,河道分汊入海,逐渐形成NNE向单一流河道,河口三角洲前缘迅速堆积;1972—1976年,随着岸线推进,刁口河道不断摆动调整,河道曲率过大失稳,1976年河道调整回到西侧。

参考文献 (References)

- [1] Wright L D, Wiseman W J, Yang Z S, et al. Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River) [J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10(1): 1-40.
- [2] 陈小英, 陈沈良, 李九发, 等. 黄河三角洲孤东及新滩海岸侵蚀机制研究[J]. *海岸工程*, 2005, 24(4): 1-10. [CHEN Xiaoying, CHEN Shenliang, LI Jiufa, et al. Study on the coastal erosion mechanism in the Yellow River Delta Gudong and Xintan Areas [J]. *Coastal Engineering*, 2005, 24(4): 1-10.]
- [3] Wright L D, Wiseman W J, Bornhold B D, et al. Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity-driven underflows [J]. *Nature*, 1988, 332(6165): 629-632.
- [4] 李广雪, 成国栋, 魏合龙, 等. 现代黄河口区流场切变带[J]. *科学通报*, 1994, 39(10): 928-932. [LI Guangxue, CHENG Guodong, WEI Helong, et al. Flow shear zone in the modern Yellow River mouth region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(10): 928-932.]
- [5] 时连强, 李九发, 应铭, 等. 近、现代黄河三角洲发育演变及沉积过程研究综述[C]//第八届全国海岸河口学术研讨会暨海岸河口理事会议论文摘要集. 上海: 中国海洋学会, 2004: 68. [SHI Lianqiang, LI Jiufa, YING Ming, et al. A review of recent studies on the development, evolution and sedimentary process of Yellow River Delta[C]//Proceedings of the 8th National Coastal and Estuarine Academic Seminar and Coastal and Estuarine Council Meeting. Shanghai: Chinese Society of Oceanography, 2004: 68.]
- [6] 杨作升, 李国刚, 王厚杰, 等. 55年来黄河下游逐日水沙过程变化及其对干流建库的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 9-18. [YANG Zuosheng, LI Guogang, WANG Houjie, et al. Variation of daily water and sediment discharge in the Yellow River lower reaches in the past 55 years and its response to the dam operation on its main stream [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 9-18.]
- [7] 胡春宏, 陈绪坚, 陈建国. 黄河水沙空间分布及其变化过程研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(5): 518-527. [HU Chunhong, CHEN Xujian, CHEN Jianguo. Spatial distribution and its variation process of sedimentation in Yellow River [J]. *Journal of Water Resources*, 2008, 39(5): 518-527.]
- [8] 凡姚申. 黄河三角洲近岸 seabed 侵蚀过程及其动力机制[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2019. [FAN Yaoshen. Seabed erosion and its mechanism in the littoral area of Yellow River Delta[D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2019.]
- [9] 李安龙, 李广雪, 曹立华, 等. 黄河三角洲废弃叶瓣海岸侵蚀与岸线演化[J]. *地理学报*, 2004, 59(5): 731-737. [LI Anlong, LI Guangxue, CAO Lihua, et al. The coast erosion and evolution of the abandoned lobe of the Yellow River Delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 731-737.]
- [10] 刘玲, 李广雪, 李季. 黄河三角洲刁口叶瓣河道与岸线演化分析[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(6): 1-6. [LIU Ling, LI Guangxue, LI Ji. Evolution of river channel and shoreline of the Diaokou lobe of Yellow River delta [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(6): 1-6.]
- [11] 刘鹏, 王庆, 战超, 等. 基于DSAS和FA的1959—2002年黄河三角洲海岸线演变规律及影响因素研究[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 585-594. [LIU Peng, WANG Qing, ZHAN Chao, et al. Quantitative analysis of coastline change in the Yellow River Delta from 1959 to 2002 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 585-594.]
- [12] 高伟. 现代黄河三角洲刁口叶瓣地层层序研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2011. [GAO Wei. Stratigraphy sequence of Diaokou lobe in the Modern Yellow River Delta[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2011.]
- [13] 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): 1-9. [PANG Jiazhen. Fluvial process on the Huanghe River Delta and its influence on lower reaches [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1994(3): 1-9.]
- [14] 李广雪, 薛春汀. 黄河水下三角洲沉积厚度、沉积速率及砂体形态[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13(4): 35-44. [LI Guangxue, XUE Chunting. Sediment thickness, sedimentation rate, and silt body shape of the Yellow River subaqueous delta lobe [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13(4): 35-44.]
- [15] 成国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. [CHENG Guodong, XUE Chunting. *Sedimentary Geology of Yellow River Delta*[M]. Beijing: Geology Press, 1997.]
- [16] 何孝海. 黄河三角洲动力沉积及冲淤演变研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006. [HE Xiaohai. Study on dynamic sedimentation and Erosion-deposition evolution of Yellow River Delta[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2006.]
- [17] 王厚杰, 原晓军, 王燕, 等. 现代黄河三角洲废弃神仙沟-刁口叶瓣的演化及其动力机制[J]. *泥沙研究*, 2010(4): 51-60. [WANG Houjie, YUAN Xiaojun, WANG Yan, et al. Evolution of the abandoned Shenxiangou-Diaokou delta lobe: processes and mechanism [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 51-60.]
- [18] 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 Yong, LI Guangxue, DENG Shenggui, 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.]
- [19] Zhang M W, Dong Q, Cui T W, et al. Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM + imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 136-147.
- [20] 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 [J]. *Marine Geology*, 1998, 149(1-4): 113-131.