

基于 IDW 的埕岛海域水下三角洲地形演变

蒋伟达^{1,2,3}, 孙永福^{2,4*}, 刘绍文^{1,3}, 董立峰^{2,4}, 宋玉鹏^{2,4}

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
3. 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;
4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:为研究埕岛海域水下三角洲地形演变,利用 1958—2014 年间埕岛海域 7 个不同时期水深点的数据,采用不同插值方法开展适用性比较,确定选用反距离加权法进行数据插值,生成研究海域范围内 7 期水深地形图。通过栅格计算对不同时期的水深地形进行研究,分析比较了各个时期的地形特征,总结出区域内地形演变规律。研究表明,埕岛海域内整体地形呈西南高东北低走势,3~12 m 等深线间水下岸坡地带地形最为复杂且变化剧烈,走河期淤积中心不断向东北方向推进,最大淤积厚度超过 12 m,废弃后侵蚀中心逐步向岸移动,且后期侵蚀速率明显降低,形成了“陡-缓-陡”的地形特征。

关键词:埕岛海域;反距离加权法;插值;地形演变

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2020)04-0697-11

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.013

引用格式:JIANG W D, SUN Y F, LIU S W, et al. Terrain evolution of subaqueous delta in Chengdao sea area based on IDW[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 697-707. 蒋伟达, 孙永福, 刘绍文, 等. 基于 IDW 的埕岛海域水下三角洲地形演变[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 697-707.

黄河水下三角洲埕岛海域是我国重要的滩浅海海洋资源开发区^[1],自 1988 年在该海域发现储量丰富的油气资源以来,大量海上工程设施如油气勘探生产平台、海底油气管道等人工构筑物不断建成^[2]。为了顺应国家发展战略,满足市场日益增长的油气需求,海域油气资源的开发逐步向高速高效模式转变,而海上工程设施的选址设计除了要考虑油气资源的储藏量之外,海域水深地形、海底地貌、底质类型等也是重要的影响因素。

研究区域主要在 1964 年以前神仙沟流路走河期间和 1964—1976 年刁口流路走河期间形成的两个亚三角洲沉积体^[3]。每个黄河亚三角洲沉积体,即三角洲叶瓣的演化都遵循“叶瓣开始生长一向海中伸展一横行扩展一废弃蚀退成堤”的规律^[4],尾间河道行水初期,河口区域在黄河入海泥沙和海洋动力条件的影响下迅速淤积延伸,不断演化;而当尾间改道后,泥沙来量骤减,在海洋动力的强作用下,海岸受到侵蚀不断后退,水下岸坡也受到强烈冲刷,海底地形短期内发生巨大改变,对海域内油藏的开发利用造成极大影响^[5]。大量学者使用黄河水利委员会提供的测深数据对刁口叶瓣废弃后水下三角洲的冲淤变化进行了深入研究^[6-9],但大多只注重讨论了阶段性的冲淤规律,普遍认为水下三角洲主体部分以侵蚀为主要趋势,并且侵蚀强度随时间逐步减弱,最终趋于冲淤平衡状态。Zhang 等^[10]在探讨水下三角洲整体冲淤规律的基础上又进一步探究了其地质意义。

收稿日期:2019-03-06

资助项目:国家重点研发计划项目——水合物形成与分解过程微观结构与宏观力学特性(2017YFC0307305)

作者简介:蒋伟达(1994-),男,硕士研究生,主要从事海洋工程地质环境方面研究。E-mail: mg1627089@smail.nju.edu.cn

* **通信作者:**孙永福(1964-),男,研究员,博士,主要从事海洋工程地质与灾害地质方面研究。E-mail: sunyongfu@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

而经过近半个世纪的废弃改造,埕岛海域水下三角洲当前的真实地形如何,是否发生了新的变化,仍然值得深入研究。本文主要根据 1958—2014 年间各期水深插值结果,分析讨论了在叶瓣发育到废弃整个过程中,各个时期水下三角洲的地形特征及其演变状态。

1 数据与方法

1.1 数据预处理

在水下测量中,通常使用单波束或多波束测深仪获取水深数据,通过 GPS 获取平面坐标,结合潮位数据,使用数据处理软件解算得到测点校准后的平面坐标及高程数据^[11-12]。将水深测量数据通过表格软件编辑,将测点的 X,Y,Z 值按点文件的格式保存为 excel 表格或逗号分隔符文件(.csv 格式),使用 Arcgis 软件导入数据,选择适当的投影坐标系,即可将表格数据转化成便于插值的矢量点文件。

我们利用研究区域的历年海图采集到 1959,1966,1968,1976,1985 和 1999 年海域内部分水深数据,以及 2014 年实测水深数据共 7 期数据。在获得矢量点数据后,一般会先进行简单的数据统计来了解区域内数据的统计规律和分布特征,统计直方图及 QQplot 图是最常用的统计工具。以 2014 年实测数据为例,统计结果表明,该区域内测点最大水深 20.7 m,最小水深 0.9 m,平均水深约 12.4 m,且样本差异性较大;数据分布近似正态,偏度 0.39,主要影响数据点位置分布的因素是在实际测量过程中,航线设计要求便于船舶行驶同时需避让人工构筑物及危险区域。借助趋势分析可提前了解区域内地形的整体态势(图 1c),该区域内水深明显在经线(Y 轴)方向上近似线性加深,而在纬线(X 轴)方向上则是西高东低的特征。

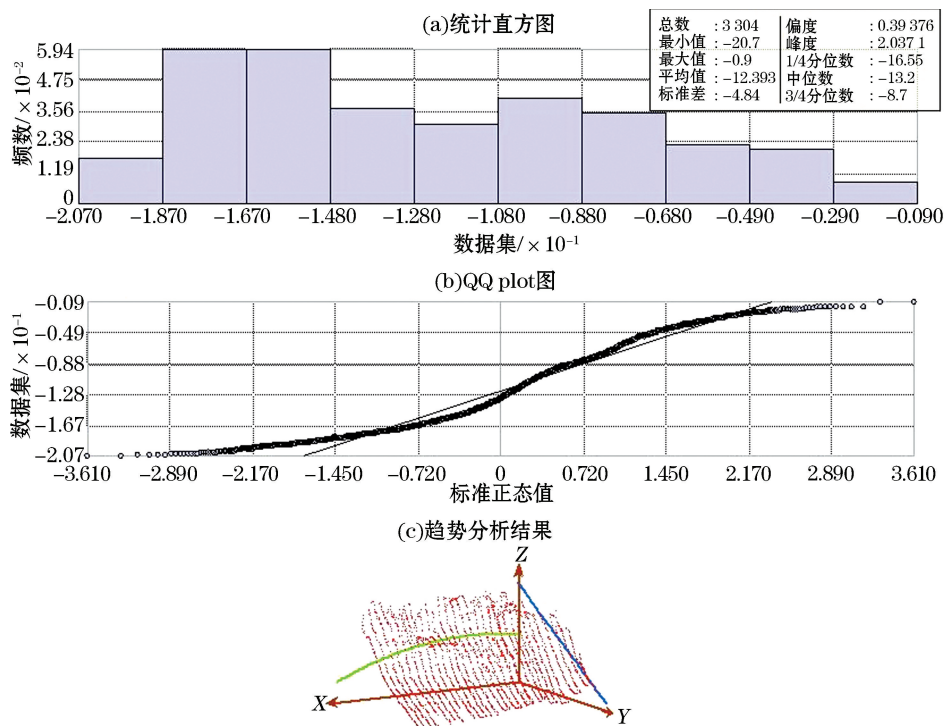


图 1 2014 年实测点数据统计结果

Fig.1 Statistics of measured data in 2014

在进行插值前,一般需要剔除明显错误的水深点以减少插值误差,传统方法是在直方图或 QQplot 图中直接选取首尾两端的数据,将偏大和偏小的数据全部剔除,收束数据值的范围,但这样处理的缺点也十分明

显,删除的数据点越多,插值结果的准确性也越低。本文采用的处理方法是点数据三维化后进行人工挑选。根据趋势分析结果,该海域水深值在经线(Y轴)方向上呈现较好的线性趋势,因此将点数据投影至XZ面上,将明显偏离的数据手动剔除。

1.2 插值方法选择

目前较为常见的空间插值方法按插值函数的范围可分为整体插值法和局部插值法两种。前者因计算量大、难以表达区域内局部特征等缺点,并不常用;而后者则是将插值区域按地形曲面特征先进行分块,再在独立块体内进行曲面拟合和插值,因此适用性较好。常用的局部插值法有4种:

1)反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)插值法^[13]是通过插值点与样本点之间的距离为权重进行加权平均,与插值点越靠近的样本点计算时所被赋予的权重值越大,权重值一般与距离成反比关系^[14],故而称之为“反距离”加权。2)克里金(Kriging)插值法^[15]与反距离加权插值法形式类似,仅在权重的选择上有区别,一般用半变异函数 $\gamma(d)$ 或者协方差函数 $Cov(d)$ 作为权重参与计算。3)样条函数(Spline)插值法则是使用一个最小化表面总曲率的数学函数来计算,生成恰好通过输入点的光滑表面,适用于生成较平缓的表面,可分成规则样条和张力样条两种,区别主要在生成曲面的范围和光滑程度,规则样条更能顾及到输入点范围外的数据进而生成渐变的光滑曲面^[16]。4)自然邻点(Natural Neighbour, NN)插值法则是通过不断修改构建的泰森多边形^[17]来进行插值。

本文先选用局部插值方法进行计算,再分别与反距离加权插值法、克里金插值法、样条函数插值法、自然邻点插值法四种方法的计算结果进行对比分析,最终确定最适合本研究区的插值方法。

1.3 插值结果比较

以2014年实测数据为例,经过预处理后,研究海域内共计有3 296个水深点,基本均匀覆盖整个研究区域(图2),随机挑选330个(约占原始数据10%)作为插值检验点,剩余2 966个水深数据作为插值样本点参与计算。通过插值结果与检验点之间的误差分析可知插值方法研究区的适用性,详细误差对比分析结果见表1及表2。

从插值结果可知,本区域内使用反距离加权法和克里金法插值法效果相对较好,平均误差在0.01 m左右,且插值曲面较为光滑;样条曲线法效果最差,插值面在数据较稀疏处存在明显凸起或凹陷;而自然邻近法主要在边缘区域误差较大,且在4种插值方法中平均误差最大。考虑到计算速度,本文确定选取反距离加权法进行插值,并根据胡丽川^[18]推荐的“最优”参数进行插值计算:搜索方向设定为四方向,搜索点数设定为12,权指数设定为2。最终各期水深图的插值结果误差基本控制在0.1 m以内。

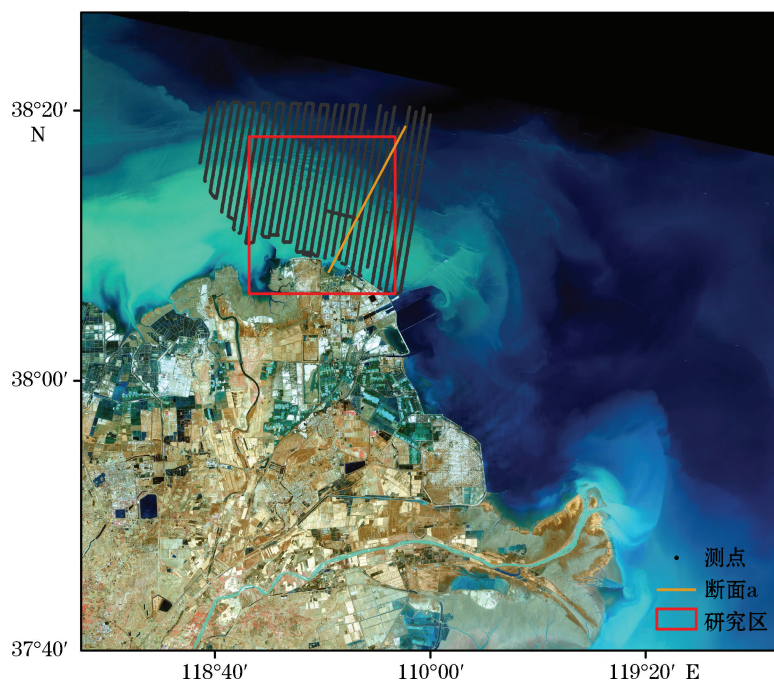


图2 研究区位置

Fig.2 Location of study area

表 1 四种插值方法误差对比分析

Table 1 Error comparative analysis of four interpolation methods

误 差	IDW 法	Kriging 法	Spline 法	NN 法
最小值/m	-1.17	-1.28	-2.47	-1.27
最大值/m	1.47	1.84	2.20	1.52
平均值/m	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02
标准差/m	0.32	0.31	0.46	0.31

表 2 部分点数据插值结果对比

Table 2 Comparison of interpolating results for partial points

编 号	实测水 深值/m	IDW 法/m	IDW 法 残差/m	Kriging 法/m	Kriging 法 残差/m	Spline 法/m	Spline 法 残差/m	NN 法/m	NN 法 残差/m
1	-16.6	-16.80	-0.20	-16.80	-0.20	-16.98	-0.38	-16.79	-0.19
2	-8.5	-8.86	-0.36	-8.74	-0.24	-8.66	-0.16	-8.75	-0.25
3	-18.7	-18.69	0.01	-18.69	0.01	-18.66	0.04	-18.69	0.01
4	-6.7	-7.07	-0.37	-6.95	-0.25	-7.14	-0.44	-6.96	-0.26
5	-18.1	-18.19	-0.09	-18.15	-0.05	-18.11	-0.01	-18.15	-0.05
6	-9.1	-9.14	-0.04	-9.13	-0.03	-9.12	-0.02	-9.16	-0.06
7	-18.9	-18.85	0.05	-18.85	0.05	-18.91	-0.01	-18.85	0.05
8	-8.9	-8.84	0.06	-8.80	0.10	-8.78	0.12	-8.80	0.10
9	-8.6	-8.62	-0.02	-8.75	-0.15	-9.06	-0.46	-8.76	-0.16
10	-17.9	-17.82	0.08	-17.82	0.08	-17.86	0.04	-17.82	0.08

2 结果与分析

2.1 水深变化

如上所述,选用反距离加权法并设置“最优”参数,利用已有水深点数据插值生成了 7 幅水深图,其中 6 幅见图 3。1964 年前,该区域附近河道长期废弃,海底地形经过多年调整已经基本达到稳定状态,因此 1959 年海底地形可同等视作 1964 年初始地形^[19]。如图 3 所示,本区域内整体呈西南高东北低趋势,除 1976 年黄河流路摆动时期处于调整阶段外,等深线一般平行于 NW—SE 方向,与区域内波浪常浪向 NE 方向^[20]相垂直,等深线越往深处越稀疏,即坡度随深度增加逐渐变缓。1959 年,本区域东南角是一片凸出陆地,西南角有一海湾,而 1964 年人工破堤后,经过几个汛期至 1966 年浅水湾已经被完全填平并继续向海淤进,在此期间最大淤积厚度超过 9 m。

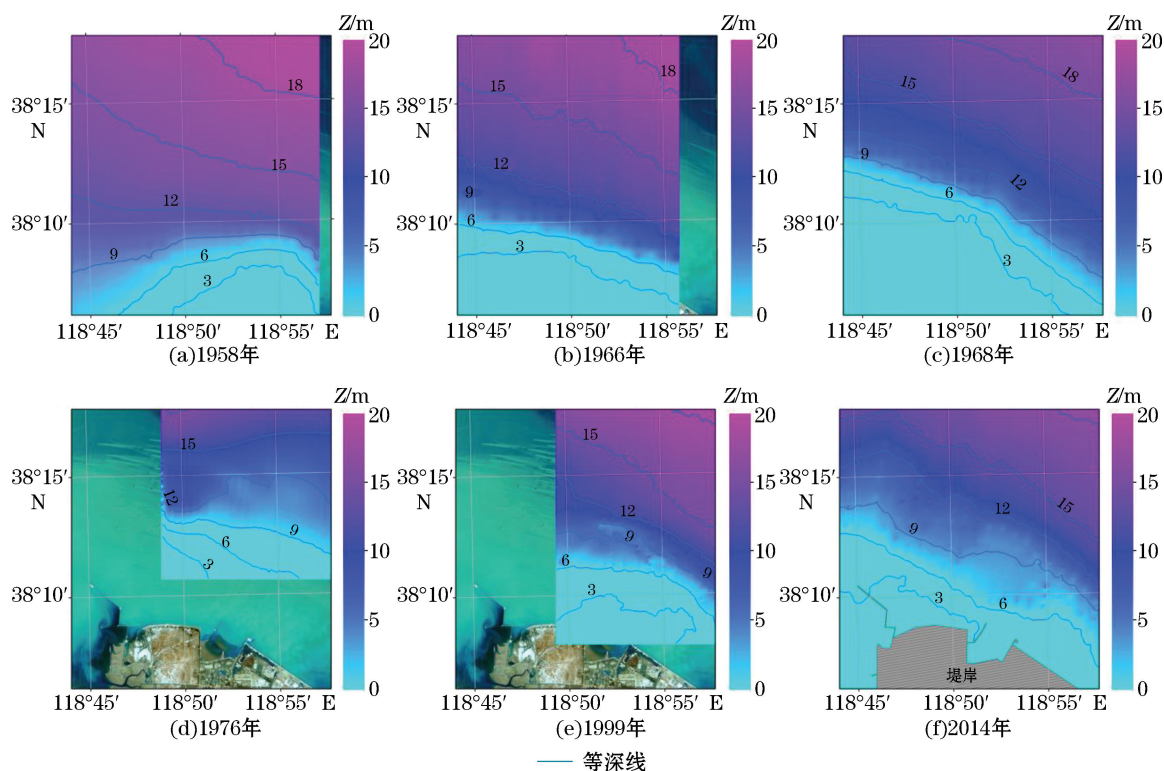


图 3 研究区不同时期水深(m)

Fig.3 Variations of water depths for study area in various periods (m)

通过历年 12 m 等深线的对比(图 4)可更清晰地重现研究海域内水深变化过程,12 m 等深线在 1964—1976 年间略微调整方向后迅速向海推进,1976 后又逐渐向岸蚀退。据统计^[21],在刁口流路 12 a 行水期间,黄河携带了 140 多亿 t 泥沙快速堆积在河口地区,海岸线向海推移了近 15 km。1964 年刁口流路开始行水,带来大量泥沙,在河口迅速堆积,至 1976 年 12 m 等深线已经向海移动 8~9 km,平均淤进速度可达 0.7 km/a。1976 年人工截流以后,黄河尾间改道清水沟流路,本海域外部泥沙来源断绝,在风浪和海流的强力作用下,原三角洲体系受到强烈侵蚀,近岸水深加大,等深线向岸后退,但后退速度逐年减慢。从 12 m 等深线来看,侵蚀初期 1976—1985 年后退 3 km,蚀退速度约 0.33 km/a,但 1999—2014 年移动了约 0.6 km,蚀退速度约 0.04 km/a,相比初期已经下降了整整一个数量级,海底地形进入缓慢调整时期。

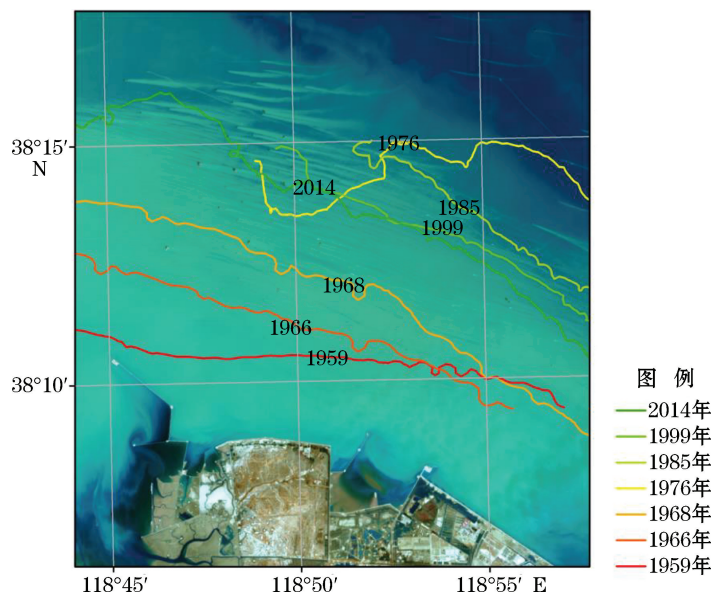


图 4 研究区不同时期水深 12 m 等深线位置

Fig.4 Locations of 12 m isobaths in various periods

2.2 坡比变化

从地貌学角度分析,本研究区海域内海底地貌以 12 m 等深线为界,12 m 以浅为水下岸坡地貌,12 m 以深为海底平原地貌^[22-23]。其中水下岸坡又以 5 m 等深线为界,5 m 以浅为近岸浅水区,地势相对平坦;5~12 m 为复杂地貌区,地势起伏最大,在海洋动力条件下被改造成多种复杂微地貌,沟谷纵横,丘台叠嶂;而海底平原区则是坡度平缓的宽广海床。该海域内坡度较陡区主要集中在 3~12 m 等深线之间,并且连结形成条带状,剖面坡度可达 2‰(图 5)。这主要是由于海浪在攀爬岸坡时与海底摩擦破碎,向海底输送巨大能量,为水下地形的重塑改造提供了动力,形成复杂的微地貌。而与往期不同的是,2014 年该研究海域内已经分异出两个明显的坡降陡坎,分别位于 6 和 12 m 水深附近,最陡处坡比甚至达到 6‰以上,8~10 m 等深线之间反而存在一片异常缓坡平台,平均坡比小于 0.5‰(图 6),形成了“陡-缓-陡”的特殊地貌单元。

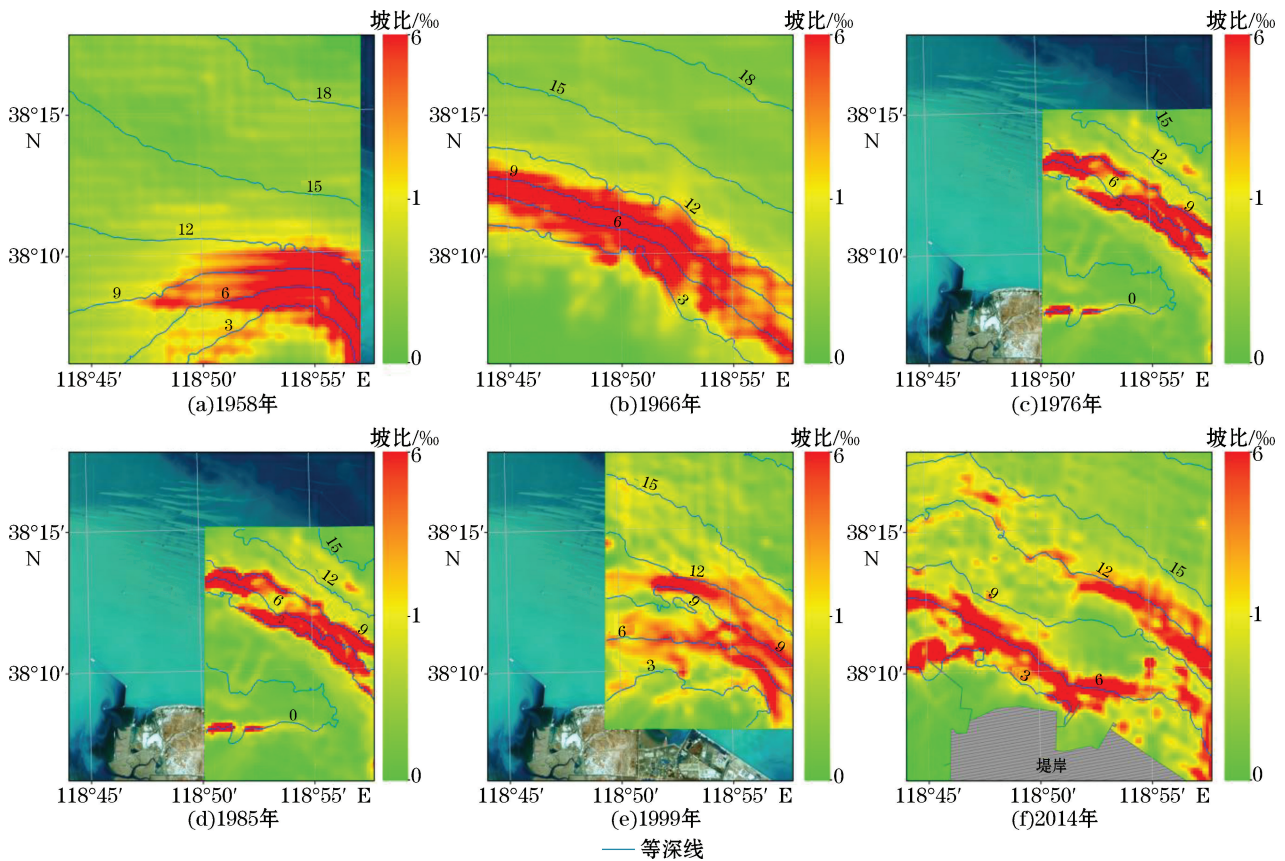
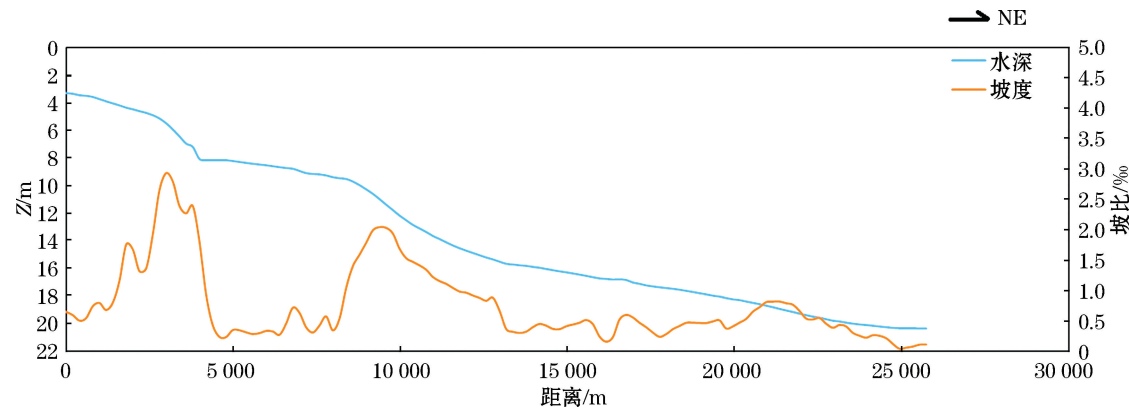


图 5 研究区不同时期地形坡度

Fig.5 Slope maps for various periods since 1959



注:断面 a 位置见图 1

图 6 2014 年断面 a 水深、坡度关系

Fig.6 Relationship between depth and slope of the section-a in 2014

2.3 冲淤情况

使用栅格计算功能,可以获取区域内年代际冲淤程度(图 7)。以 1976 年断流为状态区分界,1964 年(1959 年)至 1976 年处于快速淤积(红色)阶段,且淤积中心明显向东北方向推进,1966 年前主要在古海湾处淤积,中期迅速开始向海淤进,后期分化出两个沉积中心,平均沉积厚度超过 6 m。1976 年以来,由于沉积

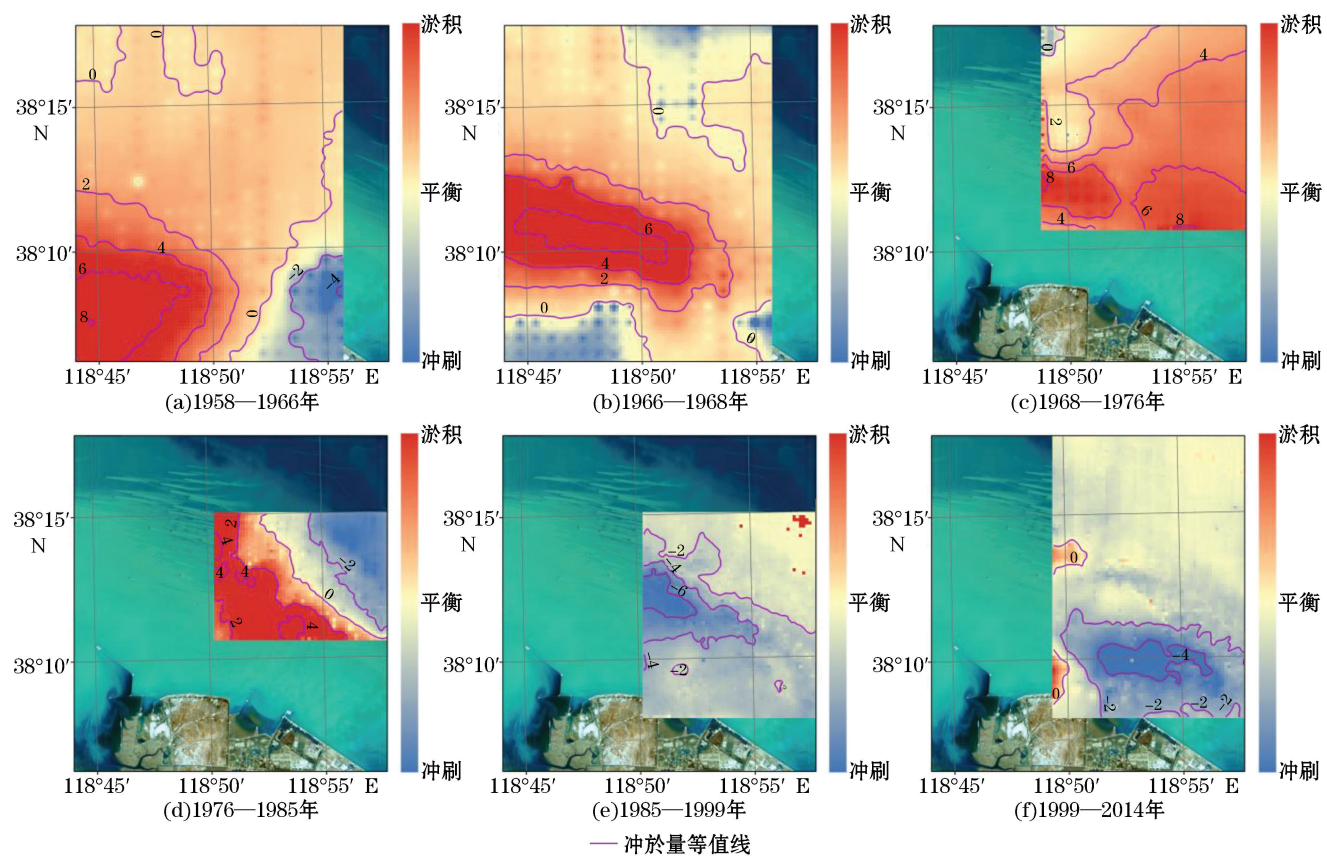


图 7 研究区不同时期冲淤变化(m)

Fig.7 Erosion and deposition maps for various periods since 1959(m)

物来源断绝而海洋动力较强,整体区域内主要以冲刷(蓝色)重塑为主,冲刷中心主要集中在近岸区域 9 m 等深线以内,并逐年向岸加大侵蚀。1999 年后,大部分区域已逐渐达到冲淤平衡状态,只在近岸处有一显著冲刷坑,至 2014 年(15 a)最大侵蚀深度约有 6 m;相对的,海域内仅有部分小斑块状淤积,通过位置对比发现该淤积区位于几个开发平台附近,推测可能是受人工构筑物影响造成的局部淤积。

经统计,1959—1976 年研究海域内海底面平均升高 4.8 m,最大淤积厚度超过 12 m。根据研究海域内实地采样土工试验结果,海底 10 m 以浅表层土湿密度为 $1.67 \sim 2.04 \text{ g/cm}^3$,含水率为 $22.8\% \sim 58.5\%$,变化较大,若按泥沙容重取 1.1 t/m^3 ^[24] 计算,本区域 430 km^2 范围内共计淤积泥沙约 22.7 亿 t,占 140 多亿 t 泥沙来量的 16%;1976—2014 年海域内水深平均加大 2.1 m,最大冲刷厚度超过 6 m,净输出泥沙约 10 亿 t。

3 讨 论

刁口流路叶瓣作为现代黄河三角洲最后一个废弃叶瓣,发育年代距今不过半个世纪,整个过程记录也相对完整,为研究三角洲叶瓣演变规律提供了很好的研究素材,具有极高的研究价值^[19]。本区域内海底地形演变主要可以分成 3 个阶段:1964 年以前的相对稳定期、1964—1976 年间行水淤积期和 1976 年至今的侵蚀调整期。1964 年之前,黄河长期行水神仙沟流路在本区域东南侧入海,期间区域内未发生气象大事件,海底地形处于较为稳定的状态,属于典型的水下三角洲侧缘地貌。从 1964 年为应对凌汛人工决堤开始,到 1976 年人工改道清水沟流路,刁口河流路实际行水虽仅 12 a,但期间经历了一次完整的河口水下三角洲发育过程。1976 年后黄河尾间改道清水沟流路,本研究区重新废弃,水下三角洲进入废弃侵蚀阶段。

图 7 展示的是断面 a 在不同时期的水深剖面,在刁口河流路行水初期(1968 年前),泥沙主要在近岸段淤积,形成了“缓-陡-缓”的基本海底地形特征;行水中后期(1976 年前)发生全域性淤积,海底面整体升高 4~6 m,保持整体地形特征不变。刁口河断流后,水下三角洲被快速侵蚀,至 1999 年整体被侵蚀约 2 m,但在 8~10 m 水深间存在蚀余凸起;1999 年后,12 m 水深以下海底平原区已经基本达到平衡状态,仅在近岸 4~8 m 水深间仍然存在侵蚀现象;至 2014 年,凸起也被侵蚀形成缓坡平台,整体海底地形特征转变为“陡-缓-陡”格局。

大量学者^[6-9,25-26]研究了埕岛地区近年的海底侵蚀规律,一般根据冲刷速率、剖面坡度等条件将侵蚀变化分为 3 个阶段:1976—1980 年是废弃初期快速冲刷阶段、1980—1989 年是缓慢冲刷阶段、1989 年以来是以冲刷为主的冲淤调整阶段。而根据本文研究可知,1999 年以后,虽然大部分区域已经到达冲淤平衡状态,但是在靠近堤岸处仍然存在显著冲刷侵蚀迹象,且在此状态下,海洋动力对水下岸坡段的地形改造依旧强

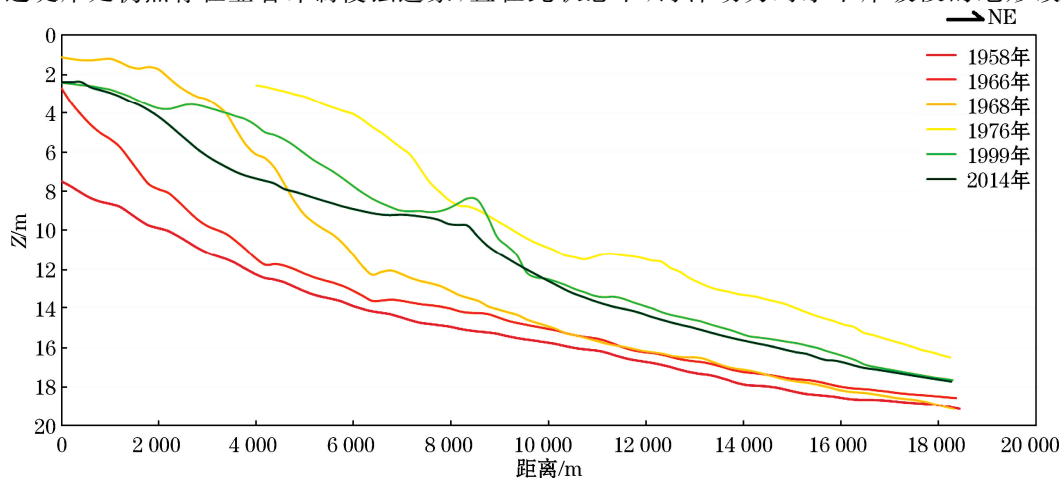


图 8 断面 a 不同时期水深分布

Fig.8 Variations for depth of section-a in various periods

烈,在 8~10 m 等深线之间形成一片异常缓坡地带,坡度远小于两侧。王厚杰等^[27]认为,刁口流路断流后,尤其是 20 世纪 90 年代来,浅水区域(<10 m)由波浪过程导致的粉砂通过再悬浮进入浮泥层,在重力控制下沿水下岸坡向深水输送并在深水区(>10 m)沉积。但结合图 7f 与图 8 分析,在深水区未见明显堆积区域,反而在同水深的其他位置存在泥沙淤积,由此推测,近岸海底沉积物受波浪作用再悬浮后随海流输运至其他区域的可能性更大。

4 结论与展望

通过分析研究区 7 期水深数据,对比不同插值方法生成水深图的结果误差,最终确定选择使用反距离加权法插值生成研究海域不同时期的水深图、坡比图,并且通过栅格计算生成各个年代间的相对冲淤情况图。研究讨论了不同时期的海底地形特征,尤其是刁口流路断流前后的坡度变化、冲淤情况,主要得到以下认识和结论:

1)研究海域内反距离加权插值法适用性最好,整体地形除了开始行河及断流当年由于外部环境突变致使不稳定,其余各年份整体呈西南高东北低态势,等深线平行于海岸、垂直于常浪向,越往深处越稀疏。

2)该海域在 3~12 m 等深线之间属于水下岸坡段,坡度较陡且连结成带。岸坡段地形各个时期都较为复杂,在行水期间岸坡段坡度主要表现为“缓-陡-缓”特征,断流侵蚀后则表现为“陡-缓-陡”。

3)在行水期(1964—1976 年),刁口流路叶瓣快速生长淤积,填平浅水湾后继续向海淤进,12 m 等深线向海推进约 9 km,海底面平均升高 4.8 m,最大淤积厚度超过 12 m,形成西南高东北低的整体地形趋势;1976 年后黄河改道尾闾,三角洲叶瓣进入被冲刷侵蚀阶段,侵蚀速率逐渐减缓,中心不断向岸移动,水深平均加大 2.1 m,最大冲刷厚度超过 6 m。

我们未考虑构造和沉积物的固结下沉导致的地形变化,而是直接将各期水深之间的差值视为年代之间的地形变化,李广雪等^[28]计算得出本区域内固结压实速率约为 5 cm/a,但由于本海域海底底质复杂,故未计算该部分变化。由于海底面水深数据获取难度较大,因此数据年代间隔较大且不均匀,希望日后能够获取更多更精准的数据,在后续研究中挖掘出更多规律。

参考文献(References):

- [1] YANG P F, ZHANG L, LI D W, et al. Classification, contrast and sedimentary of Tertiary period Dongying formation in east slope of Chengdao Oil Field in Bohai Sea[J]. *Geology of Shandong*, 2003, 19(S1): 47-50. 杨鹏飞, 张磊, 李大伟, 等. 渤海埕岛油田东斜坡古近纪东营组划分与对比及沉积[J]. *山东地质*, 2003, 19(S1): 47-50.
- [2] ZHAI K. The difference of seabed instability and its impact on the engineering facilities in Chengdao sea area[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2010. 翟科. 埕岛海区海底不稳定性差异对工程设施的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [3] MA B B. Liquefaction of seabed silt under storm waves[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2015. 马彬彬. 暴风浪作用下海底粉土液化研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015.
- [4] QIAO S Q, SHI X F. Status and prospect of studies on sedimentary characteristics and evolution of the Yellow River Delta[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(3): 408-416. 乔淑卿, 石学法. 黄河三角洲沉积特征和演化研究现状及展望[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(3): 408-416.
- [5] HU H Q. Anti-scouring Engineering for submarine pipeline in marine Chengdao oil field[J]. *Marine Sciences*, 2005, 29(6): 13-16. 胡洪勤. 埕岛油田海底管道冲刷及工程治理[J]. *海洋科学*, 2005, 29(6): 13-16.
- [6] LIU X G, ZHU X Q. Discussion about the features of water-depth and terrain and rules of erosion and siltation in Cheng Dao sea area[J]. *Advances in Marine Science*, 2000, 18(1): 34-39. 刘效国, 朱孝强. 埕岛海域水深地形特征及冲淤规律探讨[J]. *海洋科学进展*, 2000, 18(1): 34-39.
- [7] LU H Y, LI G X. The features of scouring and silting and the prediction of water depth in the Chengdao area of the Yellow River Delta in recent years[J]. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 2003, 25(1): 60-64. 鹿洪友, 李广雪. 黄河三角洲埕岛地区近年海底冲淤规律及水深预测[J]. *长安大学学报(地球科学版)*, 2003, 25(1): 60-64.

- [8] CHEN X Y. Coastal erosion and sedimentary environment of the modern Yellow River Delta under land and sea interaction[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. 陈小英. 陆海相互作用下现代黄河三角洲沉积和冲淤环境研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [9] ZHANG Z H, YANG M, YANG X Y, et al. Factors controlling over the coast scouring and deposition at Yellow River Estuary[J]. Marine Geology Letters, 2011, 27(7): 23-27. 张治昊, 杨明, 杨晓阳, 等. 黄河口海岸冲淤演变的影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(7): 23-27.
- [10] ZHANG Y, SWIFT D J P, YU Z, et al. Modeling of coastal profile evolution on the abandoned delta of the Huanghe River[J]. Marine Geology, 1998, 145(1): 133-148.
- [11] LI J W, YE J H, RUAN Q X. Application of underwater topographic mapping based Kriging interpolation in ArcGIS[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(21): 113-113. 李俊位, 叶镜湖, 阮曲星. 基于 ArcGIS 克里格插值的水下地形制图应用[J]. 山东工业技术, 2014(21): 113-113.
- [12] BIAN X C, HUANG Z Y, ZHANG W X, et al. Comparative analysis of interpolation on single wave beam water depth[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(1): 33-37. 卞晓晨, 黄张裕, 张文祥, 等. 单波束水深的插值方法比较分析[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(1): 33-37.
- [13] SHEPARD D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data[C]//RICHARD B B. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference. New York: ACM, 1968: 517-524.
- [14] ZHU Q A, ZHANG W C, YU Y H. The spatial interpolations in GIS[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Sciences Edition), 2004, 28(2): 183-188. 朱求安, 张万昌, 余钧辉. 基于 GIS 的空间插值方法研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 183-188.
- [15] OLIVER M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1990, 4(3): 313-332.
- [16] SHEN J Q, ZHANG Q, SANG B C, et al. The application of spatial interpolation in water depth detection of waterway surveying[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(6): 43-46. 沈继青, 张琴, 桑百川, 等. 空间内插法在航道测量水深检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2017, 37(6): 43-46.
- [17] SIBSON R. A brief description of natural neighbour interpolation[C]//BARNETT V. Interpreting Multivariate Data. New York: John Wiley & Sons, 1981: 21-36.
- [18] HU L C. Based on Multi-beam and submarine pipelines the research and implementation of collaborative modeling method[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016. 胡丽川. 基于多波束与海底管道建模方法的研究与实现[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- [19] LIU L. Evolution of Diaokou Channel Lobe in Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. 刘玲. 黄河三角洲钓口流路叶瓣演化规律[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [20] LI P, ZHU D K. The role of wave action on the formation of Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(2): 39-46. 李平, 朱大奎. 波浪在黄河三角洲形成中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2): 39-46.
- [21] WANG Y G, YU Y H, FU Y B, et al. Marine bottom features and evolution of the abandoned Huanghe River Delta[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008(1): 10-16. 王玉广, 于永海, 付云宾, 等. 废弃的黄河三角洲的地形特征及演化[J]. 海洋湖沼通报, 2008(1): 10-16.
- [22] HUANG Z P, WU N. Analysis of submarine topography and shallow structure in Chengdao sea area[J]. Energy Environment, 2013(13): 116-118. 黄忠平, 吴宁. 埕岛海区海底地形地貌及浅层结构分析[J]. 科技资讯, 2013(13): 116-118.
- [23] GENG X S, ZHANG Q N, FU M Z, et al. The quantitative analysis and evaluation of scour-and-fill in the harbor of Yellow River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 1988, 10(6): 56-63. 耿秀山, 张耆年, 傅命佐, 等. 黄河口海港冲淤变化的定量分析与评价[J]. 海洋学报, 1988, 10(6): 56-63.
- [24] SUN G X, YANG Z S, CHEN Z R. The calculation and regularity discussion of silt erosion/depositon in modern Yellow River mouth area[J]. Haiyang Xuebao, 1993, 15(1): 129-136. 孙效功, 杨作升, 陈彰榕. 现行黄河口海域泥沙冲淤的定量计算及其规律探讨[J]. 海洋学报, 1993, 15(1): 129-136.
- [25] ZHAO D B. The study of the erosion of Diaokou course coast in Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. 赵东波. 黄河三角洲刁口叶瓣海岸的侵蚀研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [26] LI A L, LI G X, CAO L H, 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. 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.
- [27] WANG H J, YUAN X J, WANG Y, et al. Evolution of the abandoned Shenxiangou-Diaokou delta lobe: processes and mechanism[J]. Journal of Sediment Research, 2010(4): 51-60. 王厚杰, 原晓军, 王燕, 等. 现代黄河三角洲废弃神仙沟-钓口叶瓣的演化及其动力机制

[J]. 泥沙研究, 2010(4): 51-60.

- [28] LI G X, ZHUANG K L. Engineering in stability of the deposition bodies in the Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(2): 21-26. 李广雪, 庄克琳. 黄河三角洲沉积体的工程不稳定性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 21-26.

Terrain Evolution of Subaqueous Delta in Chengdao Sea Area Based on IDW

JIANG Wei-da^{1,2,3}, SUN Yong-fu^{2,4}, LIU Shao-wen^{1,3}, DONG Li-feng^{2,4}, SONG Yu-peng^{2,4}

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

3. Ministry of Education Key Laboratory for Coast & Island Development, Nanjing 210023, China;

4. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China)

Abstract: Bathymetric data for seven different periods during 1958 to 2014 were collected to study the terrain evolution of subaqueous delta in Chengdao sea area. By comparing the applicability of different interpolation methods, this study selected the inverse distance weighted method to produce the digital elevation model (DEM), and seven depth maps were generated for the study area. Then, by using grid calculation, This work studied the depth and topography of different periods, compared the topographic characteristics, and analyzed the terrain evolution in the study area. The results showed that, 1) The overall topography is high in the southwest and low in the northeast while the terrain of the offshore slope between 3 m and 12 m isobaths was strongly being changed. 2) During river runs, the sedimentation center goes forward to north-east and the maximum deposition thickness was over 12 meters. 3) Since the river is abandoned, the erosion center gradually moves toward the shore and finally forms the topographic characteristics of "steep to gentle to steep".

Key words: Chengdao sea area; IDW; interpolation; terrain evolution

Received: March 6, 2019