



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

黄河三角洲浅地层扰动的空间差异及其主控机制

孙超, 巴旗, 时义睿, 丛帅, 祝嵘祺, 陈颖, 王盼盼, 吴晓, 王厚杰, 毕乃双

Spatial variations in the disturbances of shallow strata and the controlling factors in the Huanghe (Yellow) River delta

SUN Chao, BA Qi, SHI Yirui, CONG Shuai, ZHU Rongqi, CHEN Ying, WANG Panpan, WU Xiao, WANG Houjie, and BI Naishuang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024080101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河三角洲北部地区软土工程地质特性及空间分布

Soft soil engineering geological characteristics and spatial distribution in the north of Yellow River delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 31–41

黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素

Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 104–118

现代长江水下三角洲浅地层地震相特征

Shallow seismic facies characteristics of the modern underwater delta of the Yangtze River

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 114–122

黄河口湿地时空变化过程及其主控因素

Tempo-spatial variation of wetlands at the Yellow River Mouth and its control factors

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 68–80

松辽盆地新民油田下白垩统泉四段浅水三角洲骨架单砂体空间发育特征

Spatial distribution patterns of single framework sand bodies of a shallow-water delta in the Cretaceous Quantou Formation of Xinmin Oilfield, Songliao Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 46–55

白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲特征及其主控因素

Characteristics and main controlling factors of the shelf-edge delta of the lower member of Zhujiang Formation in the northern Baiyun Depression

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 28–39



关注微信公众号，获得更多资讯信息

孙超, 巴旗, 时义睿, 等. 黄河三角洲浅地层扰动的空间差异及其主控机制 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 70-84.
SUN Chao, BA Qi, SHI Yirui, et al. Spatial variations in the disturbances of shallow strata and the controlling factors in the Huanghe (Yellow) River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 70-84.

黄河三角洲浅地层扰动的空间差异及其主控机制

孙超¹, 巴旗¹, 时义睿¹, 丛帅¹, 祝嵘祺¹, 陈颖¹, 王盼盼¹, 吴晓^{1,2}, 王厚杰^{1,2}, 毕乃双^{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

摘要:现代黄河水下三角洲是油气开采、海底管道铺设等基础设施建设的重要地区,随着黄河经历多次改道,不同河口海域的泥沙供应、海洋动力以及人类活动等条件发生显著变化,黄河三角洲不同河口地区沉积演化出现明显差异,其地层结构的变化备受工程人员及研究学者的关注。本文基于2023年浅地层剖面数据,以整个现代黄河三角洲及其分区(刁口-神仙沟河口、现行河口、清水沟河口)为研究对象,研究黄河三角洲浅地层扰动空间分布特征,对比3个河口区浅地层扰动的差异性,结合不同河口区的泥沙供应、海洋动力等资料,揭示地层扰动差异性的主控机制。研究结果表明:(1)从典型地层扰动区的基本特征来看,黄河三角洲地区的扰动地层的总体分布呈现出随水深的增加而逐渐减少的规律。不同河口区扰动地层差异显著,其中刁口-神仙沟河口的扰动地层主要表现为数量多、埋藏深度浅的特征;清水沟河口的扰动地层以聚集分布、埋藏浅、发育规模大等为特征;而现行河口海域扰动地层以埋藏深、数量少为主要特征;(2)黄河三角洲不同区域的地层结构受入海泥沙和海洋动力等因素的影响,具有明显的空间差异性。波浪的高底剪切应力分布与地层扰动高密度区分布高度一致,波致底剪切应力是影响3个河口区域以及不同水深地层结构差异的主要动力因素,而入海泥沙供应则导致不同河口区扰动地层埋深有所差异。

关键词:地层扰动;空间分布;主控机制;现代黄河三角洲

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024080101](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024080101)

Spatial variations in the disturbances of shallow strata and the controlling factors in the Huanghe (Yellow) River delta

SUN Chao¹, BA Qi¹, SHI Yirui¹, CONG Shuai¹, ZHU Rongqi¹, CHEN Ying¹, WANG Panpan¹, WU Xiao^{1,2}, WANG Houjie^{1,2}, BI Naishuang^{1,2}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The modern subaqueous delta of the Huanghe (Yellow) River is an important area for oil and gas exploitation, submarine pipeline construction, offshore wind farming, and other infrastructure developments. The Huanhe River has undergone multiple shifts in its deltaic river course, resulting in significant variations in sediment supply, ocean dynamics, and human activities in different river mouth areas. Based on the data from subbottom profiler and multibeam echo-sounder in 2022 and 2023, we investigated the spatial distribution of shallow-strata disturbances in the delta and its subordinate areas (the Diaokou-Shenxiangou river mouth, the modern river mouth, and the Qingshuigou river mouth). Differences in disturbances among the three areas were examined. The main controlling factors of the disturbances were revealed by combining data on sediment supply and ocean dynamics in different river mouth areas. Results show that (1) the shallow-strata structure of the delta exhibits significant spatial variability. The number of disturbed strata in the delta decreased with increasing water depth. The disturbances in various river mouth areas differed from each other significantly. The Diaokou-Shenxiangou river mouth is characterized by numerous disturbances in shallow burial depth. The Qingshuigou river mouth is characterized by disturbances in clustered distribution, shallow burial, and large development scale. The modern river mouth are characterized by deep burial and less disturbance. (2) The shallow-strata structure of different areas of the delta was significantly influenced by factors such as sediment input and ocean dynamics, exhibiting distinct spatial differences. The field of high bottom-shear stress of waves is highly consistent with the distribution of high-density stratigraphic disturbance,

资助项目:国家自然科学基金“调水调沙影响下黄河口冲淤格局转变的动力机制研究”(42076175)

作者简介:孙超(1995—),男,硕士研究生,资源与环境专业, E-mail: 593403661@qq.com

通讯作者:毕乃双(1981—),男,教授,主要从事河口沉积动力学、地貌学研究, E-mail: binaishuang@ouc.edu.cn

收稿日期:2024-08-01; 改回日期:2024-09-12。 文凤英编辑

indicating that wave-induced bottom shear stress was the main dynamic factor affecting the differences in stratigraphic structure in the three subordinate estuarine areas at different water depths.

Key words: disturbance of shallow strata; spatial distribution; controlling factors; modern Huanghe (Yellow) River delta

河口三角洲地区是海陆相互作用最强烈的地区之一, 地球表面超过 87% 的陆地通过河流与海洋相连, 并将巨量沉积物输送入海^[1]。河流与海洋之间的相互作用决定了沉积物扩散与沉积的模式, 因此, 河口三角洲的形态、沉积物粒度、沉积结构的分布等可以反映出水动力变化^[2-3]。全球约有超过 5 亿人生活在三角洲地区, 使得该地区逐渐成为人口密集、经济发达的区域之一^[4-5]。近些年来, 随着人类活动和气候变化的影响, 全球入海河流的水沙输送量急剧减少^[6-8]。加之全球海平面逐年上升^[9], 世界多个大河口三角洲面临着被侵蚀、淹没的威胁^[10-12]。作为人类赖以生存的栖息地以及生产资料重要的获取地^[13-15], 河口三角洲地区的石油平台、管道线缆等基础设施的建设愈加频繁, 这对基建安全和可持续发展等问题提出了更高要求, 亟需开展海底地层结构稳定性的系统研究。

黄河素有“水少沙多、水沙异源”的特点^[1, 16], 其径流携带的大量泥沙在入海口附近迅速淤积, 形成了面积广大的现代黄河三角洲^[17-18]。然而黄河独有的“善淤、善徙、善决”特点, 使得黄河尾闾改道频繁^[19], 其中自 1855 年改道进入渤海以来, 黄河发生多次改道, 形成了 8 个三角洲叶瓣相互叠覆的现代黄河水下三角洲, 每个叶瓣的平均活动时间仅有 18 年^[20]。而每个叶瓣受河流物源供应变化的影响, 导致其冲淤变化存在明显差异, 进而形成具有明显区域特征的地层结构^[21]。近 60 年来, 受气候变化和人类活动的双重影响, 黄河入海水沙通量呈现阶段性显著减少的态势^[22], 尤其是 2002 年以来实施的黄河调水调沙工程, 显著改变了黄河入海泥沙的性质^[23], 入海悬沙粒度显著粗化, 导致粗颗粒泥沙在河口区域快速堆积, 而细颗粒泥沙在较短时间内以泥沙异重流输入到渤海, 这改变了自然状态下泥沙淤积的模式^[24-25]。另外, 潮汐、波浪、风暴潮等海洋动力及人类活动对海底的破坏, 造成了黄河三角洲浅表地层的侵蚀、扰动现象^[26], 而海底浅表的液化、剪切破坏会引起一系列的海底地质灾害和灾害地貌^[27-28], 严重威胁了该区域的基础设施安全及利用。

对于黄河三角洲地区的地层结构的研究, 可追溯到 20 世纪 80 年代的中美联合调查, 该调查中发现了大量海底不稳定现象, 并按其形态和诱发因素

进行了分类, 且在跟踪调查中发现同一区域海底不稳定具有“复活”的现象^[29-30]。在黄河三角洲刁口-神仙沟三角洲叶瓣区的研究中, 对多种地质灾害的空间分布进行了划分^[31], 并初步将海底划分为低扰动海底、中等扰动海底和高扰动海底^[32]。后续研究中借助侧扫声呐、浅地层剖面仪等设备, 揭示了黄河现代三角洲海底浅表地层及地貌的空间分布特征^[33]。结合现场钻孔资料及室内土工实验的结果, 发现三角洲地区快速沉积的海底土体具有高含水量、高孔隙比、低抗剪强度的特点^[34-35], 其在海洋动力的循环荷载以及人类活动、海底生物等外力扰动下, 快速堆积的地层遭受侵蚀、变形, 进而形成黄河三角洲局部地区浅表地层与相邻地层不协调的现象^[36], 根据其结构特征命名为局部扰动地层^[37]。扰动地层是发育在海底浅表地层的一种灾害地质, 易造成海底设施的失稳、不均匀沉降等, 可以通过浅地层剖面探测资料识别, 其声学特征主要表现为内部无明显层理或层理不清晰, 地层结构杂乱, 扰动边界与周围正常地层有明显差别^[38]。学者对黄河三角洲地区的扰动地层进行了详细的调查, 结合室内水槽实验, 模拟波浪对海底浅表地层的影响以及土体液化的发育过程^[39], 分析扰动地层的形成和演变机理, 进而揭示黄河三角洲局部沉积环境、海洋动力等因素对区域地层演变的影响。本文深入研究黄河三角洲浅地层结构的空间差异性及其对入海泥沙和海洋动力的响应过程, 可以为黄河三角洲的海洋工程建设、油气资源安全开发, 海洋地质灾害的预防等提供理论支撑, 对持续推进黄河流域生态保护与高质量发展战略具有重要意义。

综上所述, 对于黄河三角洲地层扰动已有大量研究, 但早期对整个现代黄河三角洲地层结构的调查已过去多年, 近年的研究多围绕北部的埕岛海域油气开发保障以及事件性的地质灾害进行局部调查, 缺乏整个黄河三角洲地区浅地层扰动的空间差异性的系统研究。为此, 本文利用 2023 年浅地层剖面测量数据以及多波束测深数据, 研究不同河口区域以及同一河口区域不同水深地区的浅地层扰动空间差异性, 同时结合不同河口区泥沙供应、海洋水动力和人类活动等数据, 阐明黄河三角洲地区浅地层扰动空间差异性的主控机制。

1 研究区概况

自1855年黄河改道至大清河注入渤海以来,黄河河口先后经历十次变迁^[40-41],期间经历了神仙沟河口(1953—1964年)、刁口河河口(1964—1976年)、清水沟河口(1976—1996年)、清8汊河口(1996年至今),多次流路的变迁使得黄河入海泥沙的沉积、扩散发生变化。黄河向来以水少沙多闻名,输送至渤海的泥沙量大、堆积速率高,使得形成的三角洲具有高孔隙率、高含水率、高压缩性的特点,并形成了现行河口迅速淤积与废弃河口区域的蚀退差异演化^[42],且作为典型河控三角洲,黄河三角洲受流域人类活动影响显著(水库修建、调水调沙工程等),均导致不同河口区域浅地层结构存在较大差异^[18,43]。

本文研究区域包括刁口-神仙沟河口区域、清水沟河口区域、现行河口区域,覆盖整个现代黄河三角洲区域(图1)。研究区域海底沉积物结构和稳定性受到人类活动、波浪、潮汐作用等,对工程建筑造成了潜在危害。

2 数据与方法

2.1 数据采集

研究区域覆盖现行河口区与多个废弃河口,课

题组于2023年8月在研究海域开展浅地层剖面调查。浅地层剖面测量设备采用美国EdgeTech公司的EdgeTech 3400浅地层剖面仪,设备安装采用侧拖方式,主要用来获取研究区海底面以下0~15 m深度范围内的地层剖面。调查船采用长30 m、宽6.6 m的钢质渔船,船航速控制在6节左右,采集方式采用走航式测量。

本次调查测线分布如图1所示,共布设主测线13条,连接测线16条,测量区域包括刁口-神仙沟河口区域、现行河口区区域、清水沟河口区域,覆盖整个黄河三角洲地区。

2.2 数据处理

浅地层剖面数据使用SonarWiz 5.0(美国Chesapeake公司)后处理软件进行处理。工作内容主要包括:对带通滤波、振幅滤波、TVG、DBG的调整,压制二次波、多次波等,使得浅地层剖面有效数据清晰明了,能准确识别海底表面地形以及各地层的分界面,并对地层进行划分,结合毗邻海域的地质资料,判断地层中的地层扰动类型,并对各河口区地层扰动的种类、规模、数量进行整理统计,分析出各个废弃河口区与现行河口区之间的空间地层差异。

3 结果

在浅地层剖面图谱解译工作中,为方便描述扰

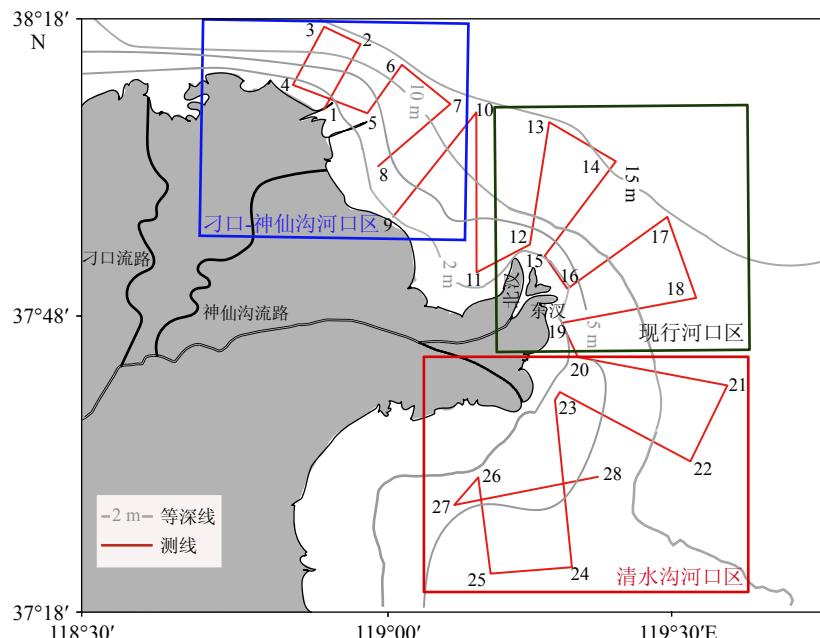


图1 研究区概况及测线布设

Fig.1 The study area and the settings of survey lines in the Huanghe River delta

动地层的属性特征,本文以沿测线距离(从岸向海)、扰动地层厚度、埋藏深度、水深等定量描述扰动地层的特征。其中,海底声波信号由海水进入海底过程中,介质的突变导致声波信号反射强烈,在浅地层图谱中表现为第一个高连续性的强反射信号(图 2a);沿测线距离:在浅地层剖面图谱中扰动地层的横向长度(图 2b);扰动地层厚度:表现为扰动地层上界面与下界面之间的垂直距离(图 2c);埋藏深度:发生扰动的地层顶部至海底表面的垂直距离(图 2d)。

根据 2023 年浅地层剖面测量数据以及多波束测量数据,分别统计 3 个河口区域地层扰动区的水深、地层厚度、沿测线距离(从岸向海)、埋藏深度,量化整个黄河三角洲以及 3 个河口区域地层扰动的空间差异,进而揭示造成这种差异的主控机制。

3.1 刃口-神仙沟河口区域

在刃口-神仙沟河口区域选取 4 条测线(测线 1-2、2-3、3-4、4-5)共计 42 km,对测线范围内的 57 个地层扰动区、海底地貌等测量结果进行地质解译。研究区连续成片存在的地层扰动,虽然造成了地层结构的紊乱甚至缺失,但其内部变化幅度相对均匀,前人对该地区研究发现扰动地层均表现为负地形,但本文调查结果显示,刃口-神仙沟河口区部分扰动地层已经发育为正地形,且地形高差最大可达 1 m。

从地层扰动的空间分布来看,扰动地层在距离岸线 10 km 范围以内广泛发育,尤其近岸 5 km 范围内的浅水区域(图 3a),呈现出扰动区规模大小不一、成片连续分布的现象,特别是在小规模地层扰

动区(沿测线距离 200 m 以内)密集的近岸区域,扰动地层数量最多可达 14 个/km。在测区范围内,扰动地层数量随着离岸距离变化明显,呈现随距离的增加而减少的规律。在离岸测线中(水深 > 15 m),各个浅地层反射波连续性较好,未发现地层扰动现象,海底表面无明显起伏。

刃口-神仙沟河口海域扰动地层的基本特征(沿测线距离、扰动地层厚度、埋藏深度、水深)分布情况显示,扰动地层的沿测线距离主要在 0~300 m 范围内,数量达 36 个,约占总量的 63%,随长度的增加,数量逐渐减少,在 300~600 m 范围内数量达 12 个,600~900 m 数量达 6 个,沿测线距离超过 900 m 的仅有 2 个(图 4a)。扰动地层厚度均小于 8 m,其中主要分布在 2~4 m 范围内,数量达 38 个,约占总量的 67%,0~2 m 和 4~6 m 分别为 10 个和 8 个,6~8 m 仅有 1 个(图 4b)。该区域地层扰动区的埋藏深度均小于 6 m,其中埋藏深度分布在 0~2 m 范围内达 43 个,约占总量的 73%,并有 25 个分布在海底表面,埋藏深度 2~4 m 的扰动地层约为 13 个,大于 4 m 的扰动地层未发现(图 4c)。本区域扰动地层在水深 8~10 m 范围内分布最多,数量达 32 个,占比 56%,其他水深范围内的地层扰动区发育数量基本相当,在 5~7 个范围之内(图 4d)。

3.2 现行河口区

在现行河口区测线中,共选取测线 4 条(测线 12-13、13-14、15-16、16-17),测线总长度 42 km,总计发现地层扰动区 16 个。

从空间分布分析,扰动地层在距离岸线 3 km 范围以内广泛发育,特别是在 2 km 范围内北汊与东

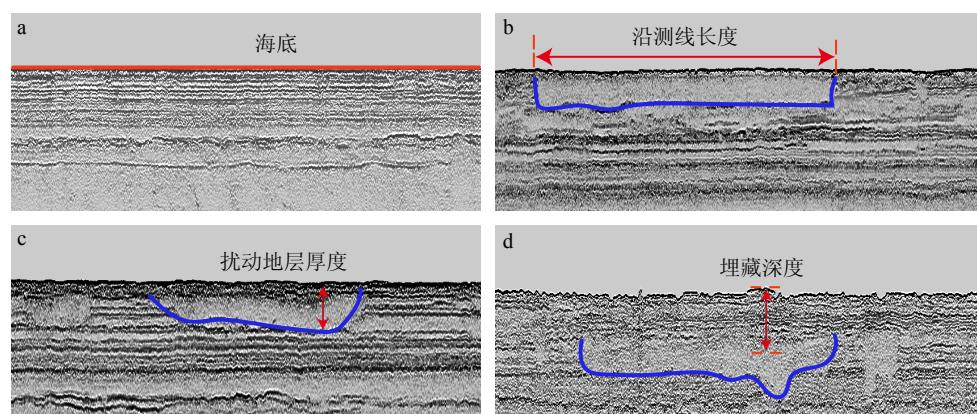


图 2 基于浅地层剖面图像的地层扰动属性示意图

蓝线代表扰动地层的边界。

Fig.2 Schematic diagram of attributes for disturbance of shallow strata

Blue line represents the boundary of disturbed strata.

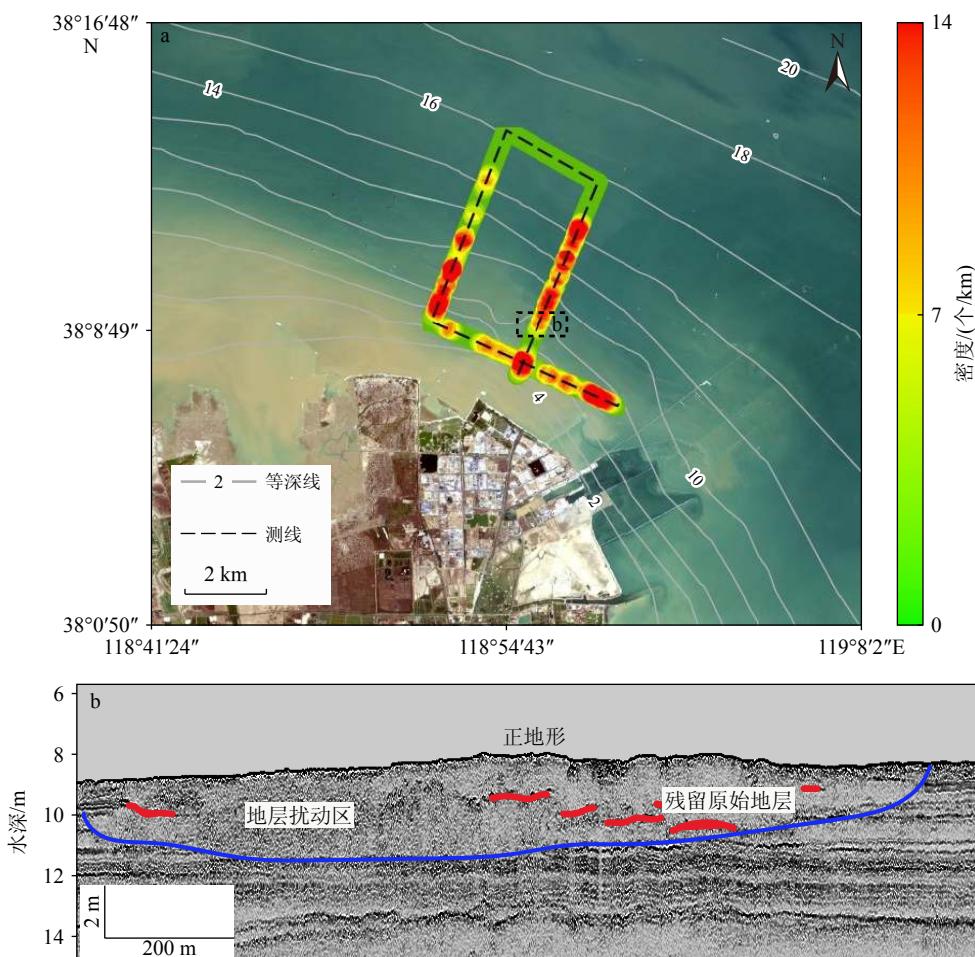


图 3 刁口-神仙沟扰动地层

a: 刁口-神仙沟地层扰动分布图, b: 刁口-神仙沟典型扰动地层。蓝色线代表扰动地层边界。

Fig.3 The disturbance of shallow strata in the Diaokou-Shenxiangou area of the river mouth

a: The spatial distribution map,b: typical disturbed shallow strata. Blue line represents the boundary of disturbed strata.

汉的近岸海域,扰动地层集中发育(图 5a),该区域发现地层扰动现象数量最高达 10 处/km。该区域扰动地层频繁发育,导致地层连续性较差,正常地层连续不超过 150 m(图 5c)。近岸虽地层扰动频繁,但海底微地貌发育较少,海底地形起伏相对平缓,仅在地层扰动位置略有凹陷,且凹陷深度均在 0.3 m 以内。在离岸测线中,未发现地层扰动现象,海底表面较为平坦,基本无微地貌发育。该区域地层扰动均表现为负地形(图 5b),在测区范围内,该区域地层扰动区的数量不仅符合随水深增加而减少的规律,而且具有在相同水深的情况下,距离现行河口越远,扰动区数量越多的规律。

从扰动地层的分布情况来看,该区域共发现 16 个扰动地层,扰动地层的沿测线距离主要分布在 0~300 m 范围内,数量达 10 个,约占该区域发现扰动地层总量的 63%,300~600 m 范围内数量为 2 个,600~900 m 范围内数量为 3 个,超过 900 m 范

围内仅发现 1 个(图 6a)。扰动地层厚度主要分布在 2~4 m 范围内,数量达 8 个,约占总量的 50%,0~2 m 范围内数量达 3 个,4~6 m 范围内数量达 4 个,扰动地层厚度基本分布在 6 m 以内,仅在离岸约 1 km 处近岸发现一处扰动厚度约 10.5 m 的扰动地层(图 6b)。埋藏深度主要分布在 0~2 m 范围内,数量达 11 个,约占总量的 69%,埋藏深度范围在 2~4 m 和 4~6 m 的数量分别为 4 个和 1 个,埋藏深度超过 6 m 的扰动地层在本次调查中并未发现(图 6c)。该区域扰动地层在水深 4~6 m 范围内发育广泛,数量达 8 个,约占总数的 50%,水深 0~2 m 范围内发现 1 个,2~4 m、6~8 m 和 10~12 m 水深范围内均为 2 个(图 6d)。

3.3 清水沟河口区域

在清水沟河口区域选取 4 条测线(测线 20-21、21-22、22-23、23-24),42 km 的测线范围内共发现

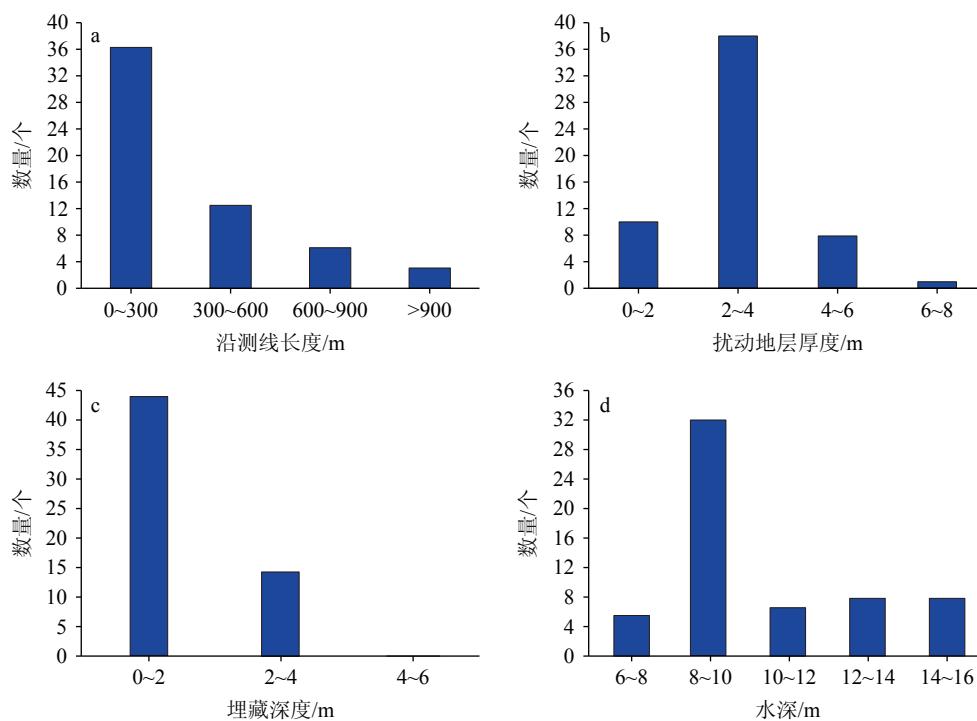


图 4 刁口-神仙沟扰动地层基本特征

a: 沿测线距离分布情况, b: 扰动地层厚度分布情况, c: 埋藏深度分布情况, d: 水深分布情况。

Fig.4 Distribution characteristics of the disturbance of shallow strata in the Diaokou-Shenxiangou area of the river mouth

a: Along-strike length, b: thickness, c: burial depth, d: water depth.

30 个地层扰动区。

从地层扰动的空间分布来看, 扰动地层在距离岸线约 5 km 范围以内广泛发育, 特别是清水沟河口口门的浅水区域(图 7a), 地层扰动发育的空间位置紧密相连且集中分布, 扰动地层数量最多可达 14 个/km。在测区范围内, 扰动地层数量随距离的增加而减少, 在距离岸边 6 km 以远海域未发现地层扰动现象。离岸测线中, 海底表面总体平整无明显起伏现象, 各地层之间呈整合接触。清水沟河口海域发育典型的三角洲前积层理, 规模较大, 沿测线距离达 3820 m 左右(图 7b), 该地层结构记录了黄河三角洲淤进的沉积方式。在本次调查中, 本区域发现有 1 处规模较大的扰动地层(图 7c), 其中最大规模的扰动地层位于水深约 8~9 m 处的海底表面, 其沿测线距离可达 5570 m, 扰动地层厚度约为 4 m。

从扰动地层的分布来看, 其沿测线距离主要分布在 0~300 m 范围内, 数量达 20 个, 约占总量的 67%, 其余沿测线距离范围内发育数量基本相当(图 8a), 数量为 3—4 个, 其中最大沿测线距离达 5500 m; 扰动地层厚度主要分布在 2~4 m 范围内, 数量达 17 个, 约占总量的 57%, 0~2 m 水深范围内有 3 个, 该海域扰动地层厚度大多分布在约 6 m 以

内(图 8b), 仅有 1 处扰动地层厚度为 6.2 m; 该区域地层扰动区的埋藏深度主要分布在 0~2 m 范围内, 数量达 24 个, 约占总数的 80%, 其中有 20 个分布在海底表面, 埋藏深度在 2~4 m 范围内有 5 个, 4~6 m 范围内仅有 1 个, 为 4.1 m(图 8c); 清水沟河口海域的扰动地层主要分布在水深 6 m 以浅范围内, 数量达 20 个, 约占总数的 67%, 6~8 m 水深范围内数量达 9 个, 8~10 m 水深仅发现 1 处, 而水深 10 m 以深的海域未发现地层扰动现象(图 8d)。

4 讨论

4.1 不同河口地层扰动特征对比

分别统计 3 个河口区域的地层扰动区的水深、类型、地层厚度、沿测线距离、埋藏深度, 量化整个黄河三角洲以及 3 个河口区域的地层扰动空间差异。

对比 3 个河口海域扰动地层埋藏深度特征, 总体表现为埋藏深度大多分布在 4 m 以内, 占比 98%, 其中埋深 2 m 以内占比 76%。不同河口埋藏深度有明显差异, 其中刁口-神仙沟河口海域扰动地层埋藏深度均小于 4 m, 且 2 m 以浅占比最高, 可达 75%。清水沟河口海域埋藏深度 4 m 以浅约为

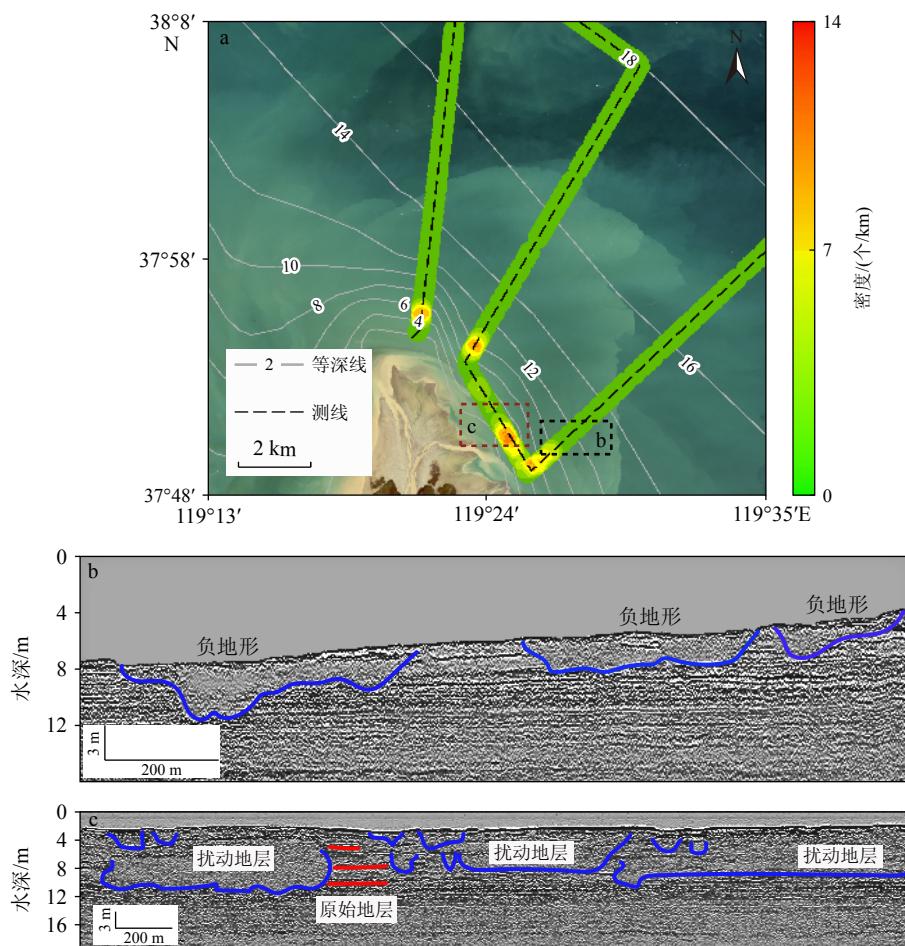


图5 现行河口地层结构特征

a: 现行河口扰动地层分布图, b: 扰动地层负地形特征, c: 现行河口地层扰动特征。图中蓝色线表示地层扰动的边界;红色线代表原始地层。

Fig.5 The disturbance of shallow strata in the modern river mouth

a: The spatial distribution map, b: typical disturbance of shallow strata, c: Blue line represents the boundary of disturbed strata; red line represents the original strata.

97%，其中2 m以浅占83%。现行河口海域扰动地层埋藏深度超过4 m的比例可达6%，且埋藏深度小于2 m扰动地层的数量相比于其他河口占比最少，约为68%（图9a）。

就扰动地层沿测线距离而言，黄河三角洲扰动地层沿测线距离变化范围较大，其中扰动距离范围位于300 m以内占主导，占比为64%以上。空间上，3个河口海域扰动地层的沿测线距离在0~300 m范围内数量相当，约为64%。沿测线距离超过1000 m的扰动地层在3个河口均有发现，其中刁口-神仙沟河口海域、清水沟河口海域各发现3处，现行河口海域仅在浅水区发现1处，其中清水沟河口海域沿测线距离超过1000 m的扰动地层数量占比最高，约为10%（图9b）。

对比分析扰动地层的厚度，黄河三角洲扰动地层厚度以小于4 m为主，占比77%，其中主要集中

在2~4 m范围内，占比约为61%。3个河口中刁口-神仙沟河口海域在2~4 m范围占比最高达65%，现行河口海域在2~4 m范围占比最低达43%，扰动地层厚度达8 m以上仅在现行河口海域发现1处（图9c）。

4.2 黄河三角洲扰动地层发育时空差异的主控因素

黄河三角洲的扰动地层多始于强浪、潮流作用和人类活动对海底浅表层的局部破坏^[29, 44-45]，研究区内近期无强度较大的地震发生，推测研究区内地层扰动大多是由波浪作用下土体液化引起的，其中残余液化是黄河水下三角洲粉质土扰动地层的主要因素^[37]。在波流耦合的持续影响下，发生扰动的局部沉积物逐渐破坏相邻稳定地层（图10），使得扰动区的深度与广度逐渐增加^[46]。地层扰动现象发生初期，在风暴潮、波浪等荷载作用下，某些砂粒周

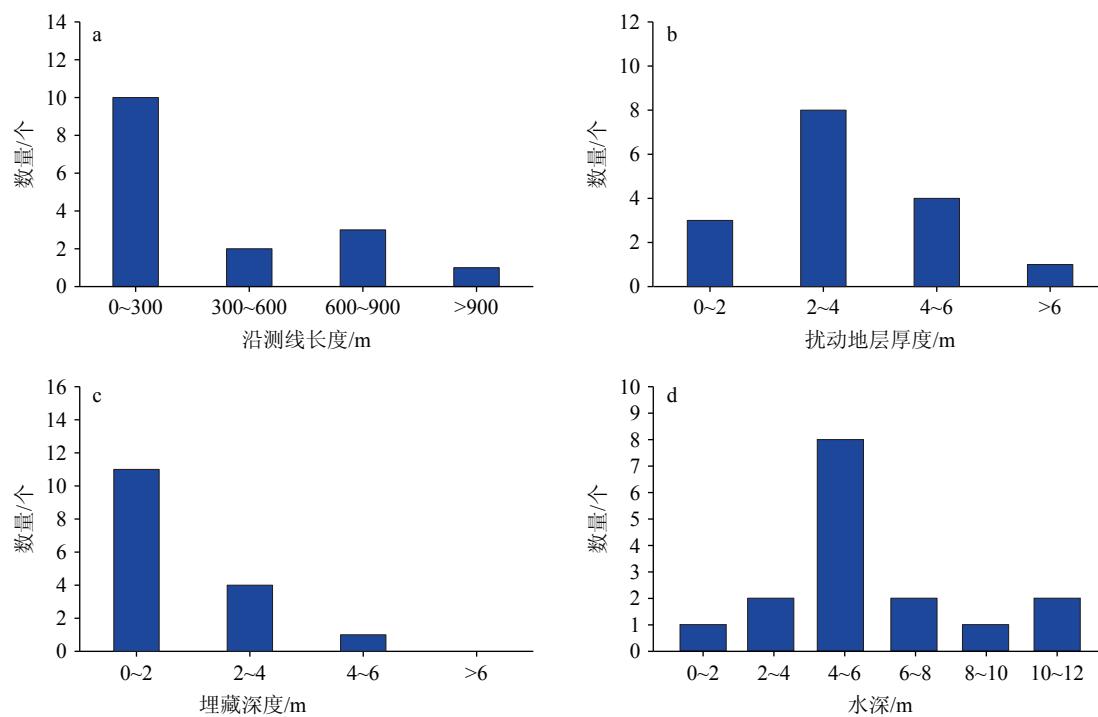


图 6 现行河口海域扰动地层基本特征

a: 沿测线距离分布情况, b: 扰动地层厚度分布情况, c: 埋藏深度分布情况, d: 水深分布情况。

Fig.6 Distribution of the disturbed shallow strata in the modern river mouth

a: Along-strike length, b: thickness, c: burial depth; d: water depth.

边有冗余空间时, 其向冗余空间运动, 其原本占据的空间此时成为其他砂粒的冗余空间, 周围颗粒也向冗余空间运动悬浮于水中, 从而产生砂粒分离悬浮的链式反应, 最终使该区域砂粒呈现出离散的流动现象。由于土体之间主要依靠颗粒之间相互支撑提供抗剪切能力来承担荷载, 即砂粒在振动作用下脱离了原本相互支撑的位置, 悬浮于水体之中呈现出流体的性质。发生液化、扰动的土体含水量降低, 细颗粒沉积物被排出, 导致海底表层塌陷^[47]。海底动力循环荷载持续作用在地层表面^[48], 土体颗粒之间的孔隙水被排出, 土体砂粒逐渐被压实固结, 发育后期扰动区土体的密实度与抗剪强度均明显高于周围土体^[37], 在相同的海洋水动力条件下, 海底局部沉积土体遭受差异性侵蚀, 在浅地层剖面图谱中逐渐显示为正地形(图 3b)。就因扰动而形成的正地形而言, 其地层结构缺失或杂乱无章, 而侵蚀残留体、原始地层凸起的内部地层结构一般较为完整, 在浅地层剖面图谱中存在较明显差异。

黄河水下三角洲浅地层结构的变化呈现出不同水深区域特征, 综合整个黄河三角洲地区地层结构的异同, 10 m 以浅变化剧烈, 波浪由深水至浅水的破碎作用^[49], 将黄河三角洲塑造成典型的浪控形态。波浪在由深水向浅水传播的过程中, 受海底摩

擦的影响产生变形, 导致黄河三角洲地区波浪在6~8 m 水深范围内剪切应力增幅最大, 且 8 m 水深波浪剪切应力达到最高, 造成海底表面土体被剪切破坏, 在波浪循环荷载作用下发生液化、扰动。而当水深超过 10 m 后, 波浪对于海底浅表地层影响力逐渐减弱^[50]。黄河三角洲地区的波浪及海流作用, 增强了该区域海底浅表地层的作用力, 导致 0~10 m 水深范围内的软弱地层易发生扰动, 扰动地层频繁发育。在常浪条件下, 水深 10 m 以深的海底浅表土体强度大于波浪对海底的循环压力, 沉积土体不会被破坏, 发育成连续性良好的海底地层^[51], 进而造成同一河口区地层结构呈现出近岸扰动杂乱、远岸平滑连续的规律(图 3a、图 5a、图 7a、图 11)。

刁口-神仙沟河口区域冬季盛行偏北风, 该区域为迎风区, 存在一个高波致底剪切应力区(图 12b), 且与本文揭示的地层扰动高密度区分布具有较好的一致性, 即波浪是影响该区域地层结构的重要因素。浅水区波浪导致的底剪切应力使得刁口-神仙沟水下三角洲遭受严重侵蚀^[49, 52], 且该区域浅水区 13 m 以浅位于破波带^[53], 波浪的破碎频率以及对海底浅表地层的扰动频率较高, 使得刁口-神仙沟浅水区扰动地层呈块状频繁发育。黄河三角洲地区波浪在 6~8 m 水深位置底剪切应力增幅最大, 且在 8 m

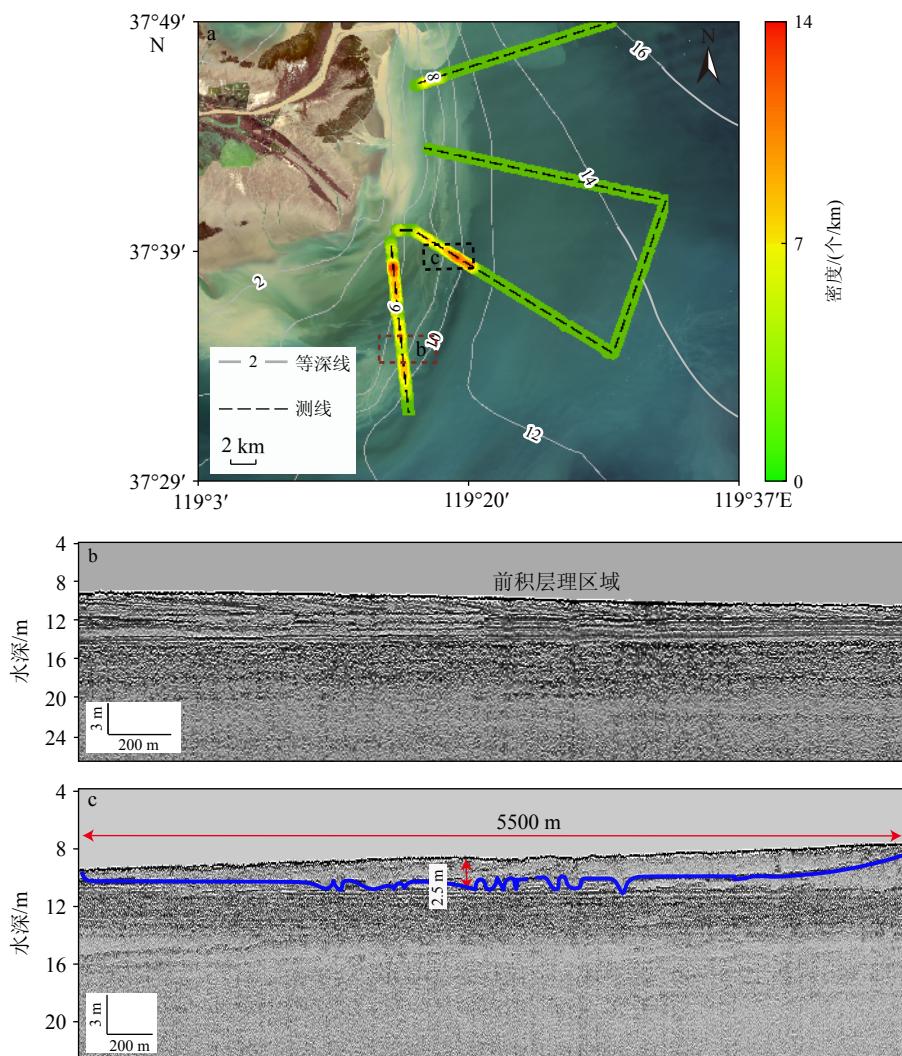


图 7 清水沟河口地层结构

a: 清水沟河口扰动地层分布图, b: 未扰动的三角洲前积层理特征, c: 典型扰动地层特征。蓝色线表示地层扰动边界。

Fig. 7 The disturbance of shallow strata in the Qingshuiogou river mouth

a: Spatial distribution of strata, b: undisturbed deltaic foreset bedding, c: typical disturbed shallow strata. Blue line represents the boundary of the disturbed strata.

水深底剪切应力值达到最高,而水深 10 m 以深波浪对海底浅表地层影响较小;加之本文提到的刁口-神仙沟地区基本失去了物源的直接供给^[54],且该区域偏北大风频发,特别是在风暴潮过程中,刁口-神仙沟海域浅表地层被破坏,在波流耦合作用下,刁口-神仙沟区域浅表地层持续遭受侵蚀、扰动^[48, 55],从而使得刁口-神仙沟地层扰动区的数量明显多于清水沟河口区与现行河口区(图 11)。

清水沟河口门口水深较浅,加之河口沙嘴的障壁作用,导致该区域风生浪的有效波高小(平均有效波高仅为 1.2 m)、周期短(平均周期仅为 2.8 s),但波致底剪切应力高的特点^[56-57],导致清水沟河口区浅地层土体不断被扰动、侵蚀,在潮流与波浪的影响下,浅表地层的原始高含水量、低抗剪强度的地

层持续遭受循环荷载的扰动。加之海洋动力循环荷载的持续作用,扰动地层在广度与厚度不断扩张,导致清水沟河口区出现了扰动地层沿测线距离与扰动地层厚度均较大的现象(图 9b-c)。

现行河口北汊口门的东南侧与东汊口门处接收入海泥沙较少且水下斜坡逐渐变陡,出现高流速中心,该地区浅表地层土体持续受到海洋动力侵蚀扰动,故该区域地层扰动区集中出现(图 5a)。现行河口区的高输沙量使得 10 m 等深线以浅地区泥沙沉积速率较高,地层扰动现象多处于发育初期进而浅地层剖面声学图谱中多显示负地形(图 5b)。另外,现行河口区受黄河入海泥沙通量影响,不断向前淤进,形成了较其他废弃河口坡度更大的三角洲斜坡,在波浪由离岸向近岸传播的过程中,波浪

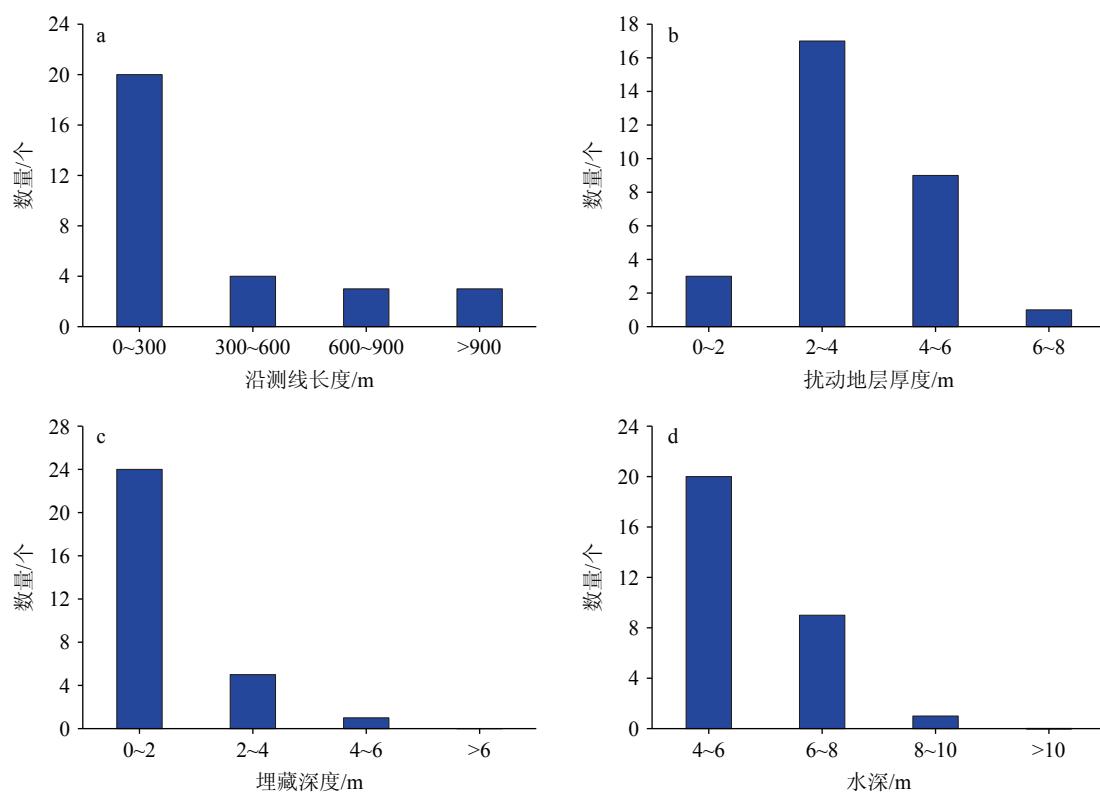


图 8 清水沟河口海域扰动地层基本特征

a: 沿测线距离分布情况, b: 扰动地层厚度分布情况, c: 埋藏深度分布情况, d: 水深分布情况。

Fig.8 Distribution of the disturbed shallow strata in the Qingshuigou river mouth

a: Along-strike length, b: thickness, c: burial depth, d: water depth.

破碎形成的破波带较其他废弃河口更窄, 因此形成的扰动地层的范围也相应狭窄, 形成了 6~8 m 扰动强烈、而浅水和深水区地层连续的特征(图 5a、图 11)。

黄河三角洲浅地层空间分布特征还与不同河口区的冲淤变化密切相关。黄河 1976 年改道清水沟流路以来, 刁口-神仙沟河口区泥沙供应断绝, 整个区域发生了快速的侵蚀^[25]。而 1996 年由清水沟改至清 8 汉入海后, 原清水沟河口泥沙供应不足, 也发生了显著侵蚀。因此, 在两个废弃河口区域浅地层扰动的埋藏深度较浅, 尤其是刁口-神仙沟河口区, 埋深普遍小于 2 m(图 9a)。而在现行河口区, 由于入海泥沙供应相对充足, 且主要沉积在河口拦门沙以及河口前缘斜坡地区, 于黄河入海口北汊和东汊前缘形成两处淤积中心, 沉积厚度超过 1 m 的地区主要分布在水深 10 m 以浅。因此, 地层扰动的埋深较废弃河口区要大(图 9a)。河口北侧存在涨潮流中心, 而河口南侧存在落潮流中心, 该区域潮流沿着等深线做往复运动^[16]。现行河口北汊口门的东南侧与东汊口门处接收入海泥沙较少, 水下斜坡逐渐变陡出现高流速中心, 受到海洋动力侵蚀扰

动, 故该区域地层扰动区集中出现(图 5a、图 11)。现行河口海域地层扰动现象多处于发育初期, 进而在浅地层剖面声学图谱中多显示负地形(图 5b)。

此外, 3 个河口的形成时间也是影响不同河口区扰动地层数量的重要因素, 刁口-神仙沟河口区形成时间较早, 扰动地层累积数量多于形成较晚的清水沟河口区与现行河口区。

4.3 人类活动对地层扰动的影响

黄河三角洲地区人为扰动频繁, 石油平台的建设、插拔桩、抛锚等对浅表地层破坏扰动, 加之海洋动力循环荷载的持续作用, 扰动地层区域的空间分布呈现一定的随机性与复杂性。

特别是近几年来, 黄河三角洲北部浅海地带已建成各种固定式采油平台 100 多座, 并且配备有 11 个自生式移动平台进行井下作业^[58], 仅在 2009—2019 年就有 5 个自升式平台进行多次插拔作业。插拔桩过程是海上移动平台在漂浮状态与海底支撑状态之间的转换过程, 插拔桩频繁, 桩靴对海底地基土造成严重破坏, 海底原始土体经过插拔桩后桩坑周围土体发生塌陷、滑移等现象, 地层性质发

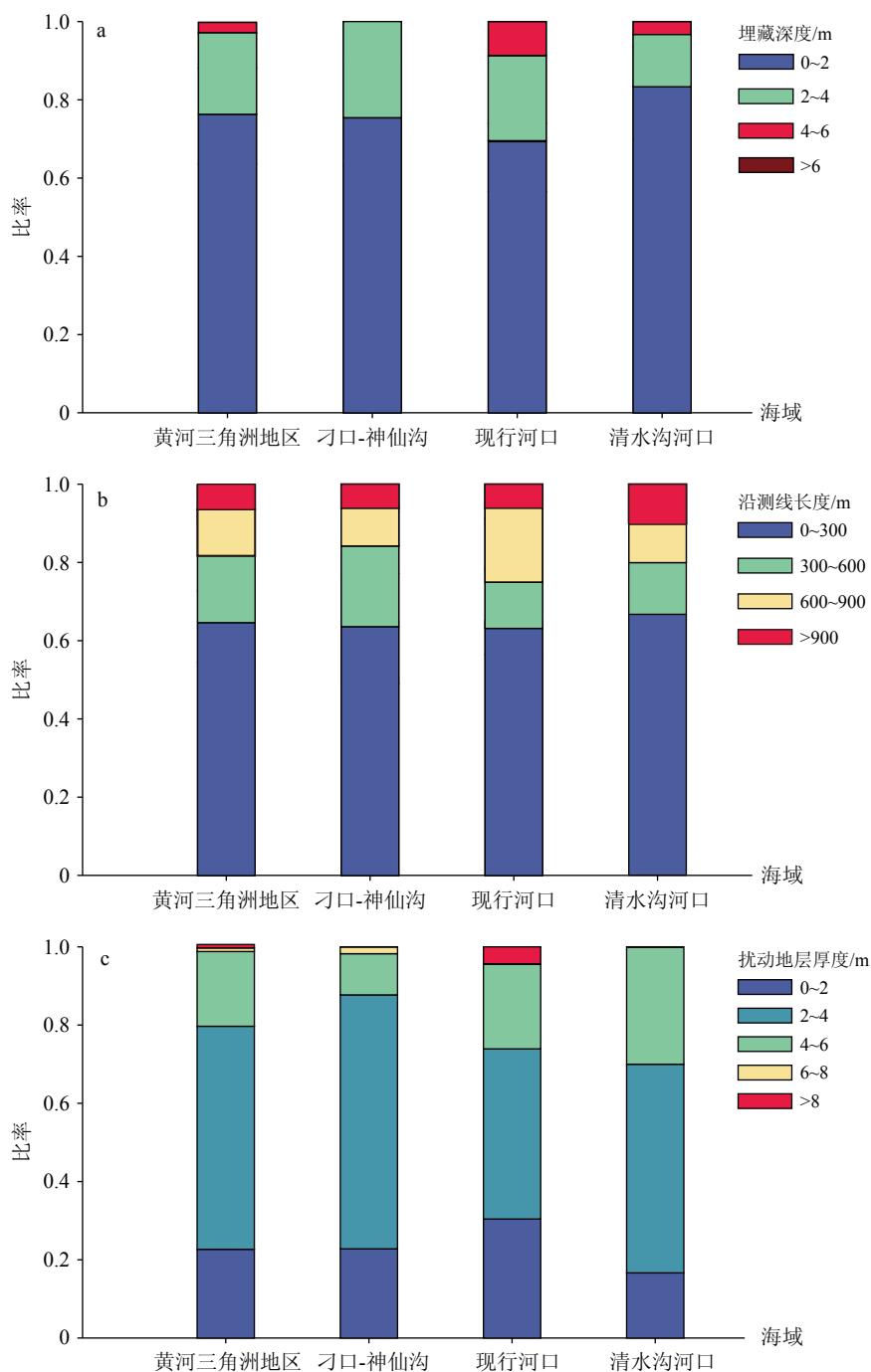


图 9 黄河三角洲不同河口海域扰动特征对比

Fig.9 Comparisons in disturbance of modern strata in different river mouth areas of the Huanghe River delta

生明显改变^[59],并在施工处留下一明显桩坑(图13),其内充填的粉土沉积物,在波浪周期性循环荷载的作用下发生液化,液化后细颗粒物质以及孔隙水被排除,桩坑内的土体变得更为致密,抗剪强度逐渐高于周围正常土体^[60]。

5 结论

(1) 黄河三角洲地区的浅地层扰动分布具有显

著的空间特征。在测区范围内,整体表现为随水深的增加,地层扰动数量逐渐减少的规律。不同河口区地层扰动差异显著,其中刁口-神仙沟河口海域的扰动地层特征主要表现为数量多、埋藏深度浅;现行河口海域的扰动地层特征主要表现为数量少、埋藏深度大,扰动地层主要集中发育在河口北汊与东汊之间的近岸海域;清水沟河口海域的扰动地层空间分布主要表现为水深较浅、聚集分布、存在多个大规模扰动地层的特征。

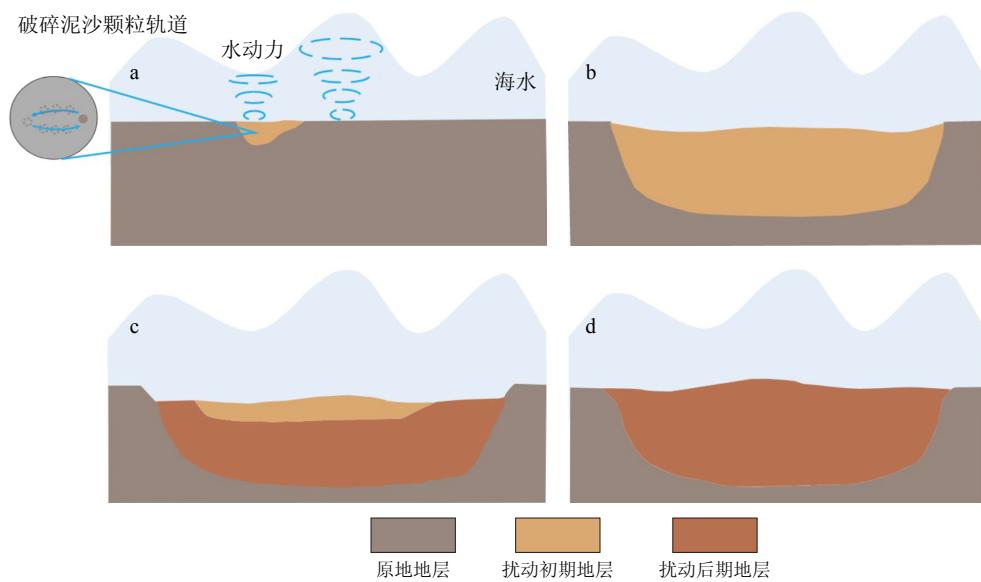


图 10 扰动地层发育过程

改绘自 Wang 等^[48]。

Fig.10 Development process of disturbance in shallow strata

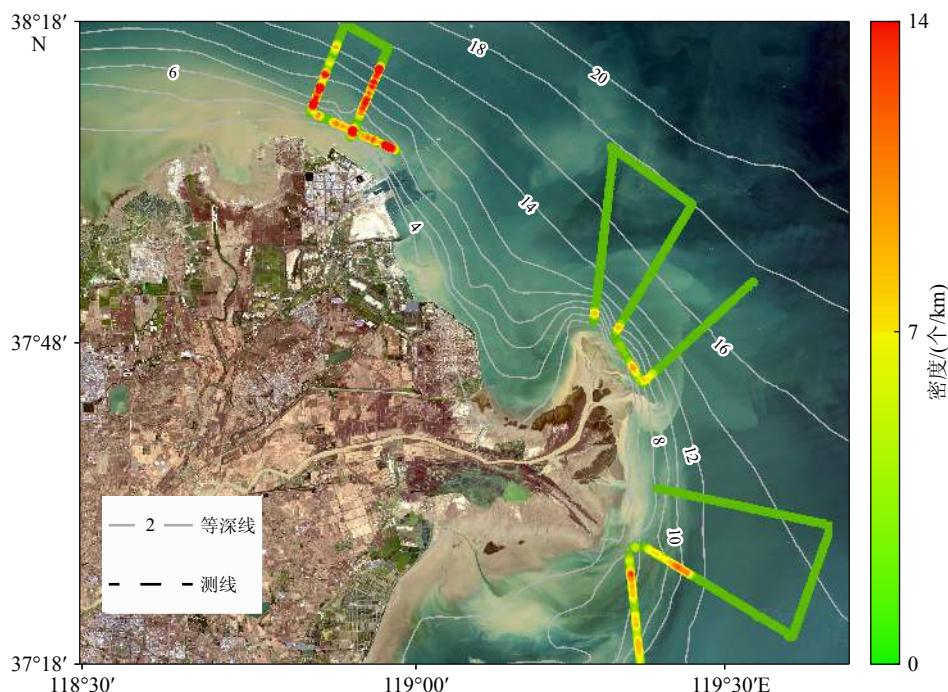
Modified from Wang et al^[48].

图 11 黄河三角洲不同河口海域扰动特征对比

Fig.11 Comparisons in the disturbance of modern strata in different river mouth areas of the Huanghe River delta

(2) 黄河三角洲不同区域的地层结构受入海泥沙和海洋动力等因素的影响, 具有明显的空间差异性。刁口-神仙沟河口区河流泥沙直接供应断绝, 使得该区域扰动地层的埋藏深度较浅, 波浪是影响该海域扰动地层发育的主要因素, 加之人类活动频繁(插拔桩、管道铺设、抛锚等), 浅表地层土体被破坏, 在波浪循环荷载作用下逐渐液化、扰动, 使得该

海域扰动地层数量显著多于清水沟河口区与现行河口区; 现行河口海域泥沙供应充足, 使得该海域扰动地层埋藏深度相对较大, 扰动地层主要集中发育在北汉口门的东南侧与东汉口门处正处于 4~6 m 水深较窄的破波带处。清水沟河口海域除接受小部分径流携带的泥沙外, 还沉积一些再悬浮的泥沙, 使得部分扰动地层埋藏深度较刁口-神仙沟河口

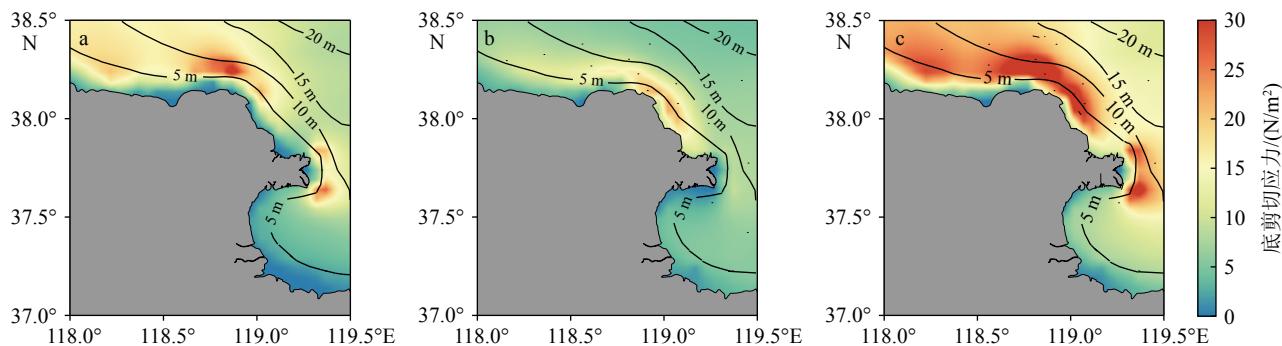


图 12 黄河三角洲 11 月平均海洋动力图

改绘自 Wang 等^[55]。a: 潮致底剪切应力, b: 波致底剪切应力, c: 波流耦合底剪切应力。图中黑色线段代表等深线。

Fig.12 Hydrodynamics off the Yellow River delta in November

Modified from Wang et al^[55]. a: Tidal-induced bed shear stress, b: wave-induced bed shear stress, c: wave-current coupled bed shear stress. Black lines represent the depth contours.

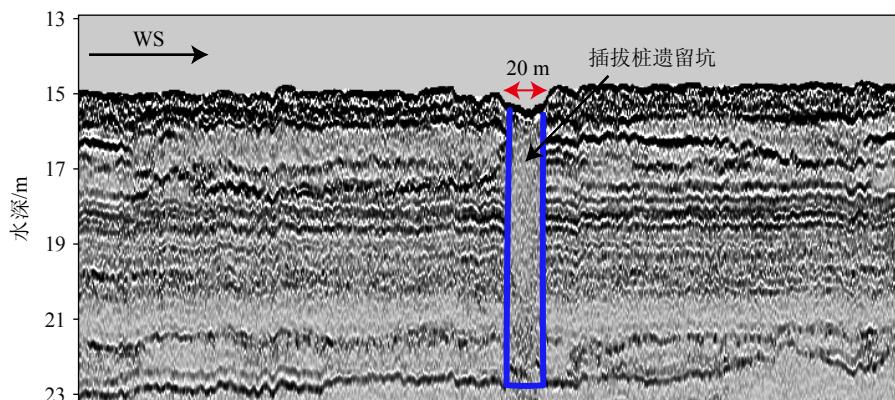


图 13 插拔桩坑

Fig.13 A pit due to insertion and pullout of a pile

有一定的增加。

致谢：感谢中国海洋大学海洋地球科学学院涂德耀博士,任宇鹏副教授在论文撰写过程中给予的大力支持!

参考文献 (References)

- [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] Wright L D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis[J]. *GSA Bulletin*, 1977, 88(6): 857-868.
- [3] Buatois L A, Santiago N, Herrera M, et al. Sedimentological and ichnological signatures of changes in wave, river and tidal influence along a Neogene tropical deltaic shoreline[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(5): 1568-1612.
- [4] Giosan L, Syvitski J, Constantinescu S, et al. Climate change: protect the world's deltas[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 31-33.
- [5] Edmonds D A, Caldwell R L, Brondizio E S, et al. Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4741.
- [6] Tessler Z D, Vörösmarty C J, Grossberg M, et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 638-643.
- [7] Dethier E N, Renshaw C E, Magilligan F J. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J]. *Science*, 2022, 376(6600): 1447-1452.
- [8] Syvitski J, Anthony E, Saito Y, et al. Large deltas, small deltas: toward a more rigorous understanding of coastal marine deltas[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 218: 103958.
- [9] Paszkowski A, Goodbred Jr S, Borgomeo E, et al. Geomorphic change in the Ganges-Brahmaputra-Meghna delta[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(11): 763-780.
- [10] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3-4): 192-216.
- [11] Giosan L, Constantinescu S, Clift P D, et al. Recent morphodynamics of the Indus delta shore and shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(14): 1668-1684.
- [12] Yang H F, Yang S L, Xu K H, et al. Erosion potential of the Yangtze Delta under sediment starvation and climate change[J]. *Scientific Re-*

- ports, 2017, 7(1): 10535.
- [13] Woodroffe C D, Nicholls R J, Saito Y, et al. Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change[M]//Harvey N. Global Change and Integrated Coastal Management: The Asia-Pacific Region. Dordrecht: Springer, 2006: 277-314.
- [14] Wiktor J, Tatarek A, Węsławski J M, et al. Colonies of *Gyrosigma exiguum*: a new phenomenon in Arctic tidal flats[J]. *Oceanologia*, 2016, 58(4): 336-340.
- [15] Nienhuis J H, Ashton A D, Edmonds D A, et al. Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain[J]. *Nature*, 2020, 577(7791): 514-518.
- [16] 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(3-4): 331-354.
- [17] Chu Z X, Sun X G, Zhai S K, et al. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: based on remote sensing images[J]. *Marine Geology*, 2006, 227(1-2): 13-30.
- [18] Peng J, Chen S L. Response of delta sedimentary system to variation of water and sediment in the Yellow River over past six decades[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 613-627.
- [19] Xue C T. Historical changes in the Yellow River Delta, China[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(3-4): 321-330.
- [20] 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 the Yellow River Delta[M]. Beijing: Geology Press, 1997.]
- [21] 薛春汀. 现代黄河三角洲叶瓣的划分和识别 [J]. 地理研究, 1994, 13(2): 59-66. [XUE Chunting. Division and recognition of modern Yellow River delta lobes[J]. Geographical Research, 1994, 13(2): 59-66.]
- [22] Jiang C, Pan S Q, Chen S L. Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: causes and environmental implications[J]. *Geomorphology*, 2017, 293: 93-107.
- [23] Wang J J, Shi B, Yuan Q Y, et al. Hydro-geomorphological regime of the lower Yellow river and delta in response to the water-sediment regulation scheme: process, mechanism and implication[J]. *CATENA*, 2022, 219: 106646.
- [24] Wu X, Bi N S, Yuan P, et al. Sediment dispersal and accumulation off the present Huanghe (Yellow River) delta as impacted by the Water-Sediment Regulation Scheme[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 126-138.
- [25] 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.
- [26] Masson D G, Harbitz C B, Wynn R B, et al. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1845): 2009-2039.
- [27] Henkel D J. The role of waves in causing submarine landslides[J]. *Géotechnique*, 1970, 20(1): 75-80.
- [28] Wang H, Liu H J. Evaluation of storm wave-induced silty seabed instability and geo-hazards: a case study in the Yellow River delta[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 58: 135-145.
- [29] Prior D B, Yang Z S, Bornhold B D, et al. The subaqueous delta of the modern Huanghe (Yellow River)[J]. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6(2): 67-75.
- [30] Bornhold B D, Yang Z S, Keller G H, et al. Sedimentary framework of the modern Huanghe (Yellow River) delta[J]. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6(2): 77-83.
- [31] 周良勇, 刘健, 刘锡清, 等. 现代黄河三角洲滨浅海区的灾害地质 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 19-27. [ZHOU Liangyong, LIU Jian, LIU Xiqing, et al. Coastal and marine geo-hazards in the modern Yellow River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 19-27.]
- [32] 杨作升, 王涛. 埤岛油田勘探开发海洋环境 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993. [YANG Zuosheng, WANG Tao. Marine Environment of Chengdao Offshore Oil Exploration and Development[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1993.]
- [33] 常瑞芳, 陈樟榕, 陈卫民, 等. 老黄河口水下三角洲前缘底坡不稳定地形的近期演变及控制因素 [J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(1): 159-164. [CHANG Ruifang, CHEN Zhangrong, CHEN Weimin, et al. The recent evolution and controlling factors of unstable seabed topography of the old Yellow River subaqueous delta[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2000, 30(1): 159-164.]
- [34] Keller G H, Zhen J, Yang Z S, et al. Mass physical properties of Huanghe delta and southern Bohai Sea near - surface deposits, China[J]. *Marine Geotechnology*, 1990, 9(3): 207-225.
- [35] 郑继民, 沈谓铨, 陆念祖, 等. 黄河口及渤海中南部沉积物工程特性及其机理 [J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(2): 231-238. [ZHENG Jimin, SHEN Weiquan, LU Nianzu, et al. Geotechnical properties of sediments from the Huanghe estuary and south-middle Bohai gulf and their mechanism of origin[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994, 24(2): 231-238.]
- [36] 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 Shaotong, JIA Yonggang, LIU Xiaolei, et al. Feature and mechanism of sediment dynamic changing processes in the modern Yellow River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 33-44.]
- [37] 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析 [J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499. [SUN Yongfu, DONG Lifeng, SONG Yupeng. Analysis of characteristics and formation of disturbed soil on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1494-1499.]
- [38] 许国辉, 卫聪聪, 孙永福, 等. 黄河水下三角洲浅表局部扰动地层工程特性与成因 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 19-25. [XU Guohui, WEI Congcong, SUN Yongfu, et al. The engineering characteristics of shallow disturbed strata and analysis of their formation on the subaqueous Yellow River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(6): 19-25.]
- [39] Foda M A, Tzang S Y. Resonant fluidization of silty soil by water waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C10): 20463-20475.

- [40] 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(4): 1-13.
[PANG Jiazheng, JIANG Mingxing. On the evolution of the Yellow River estuary (part II)[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003(4): 1-13.]
- [41] Xu X G, Chen Z X, Feng Z. From natural driving to artificial intervention: changes of the Yellow River estuary and delta development[J]. Ocean & Coastal Management, 2019, 174: 63-70.
- [42] 刘杰. 现代黄河三角洲固结沉降及其对三角洲地形变化的贡献研究 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2014. [LIU Jie. Analysis of consolidation settlement and its contribution to topographical change in the modern Yellow River subaqueous delta[D]. Doctor Dissertation of Ocean of University of China, 2014.]
- [43] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策 [J]. 水利学报, 2004(7): 1-6,13. [CHEN Shenliang, ZHANG Guoan, GU Guochuan. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River delta and its countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 1-6,13.]
- [44] 刘文洁, 许国辉, 于月倩, 等. 波致土体液化下水体含沙量垂向分布试验研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(S1): 386-390. [LIU Wenjie, XU Guohui, YU Yueqian, et al. Research on wave induced vertical distribution of suspended sediment concentration above liquefaction seabed[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(S1): 386-390.]
- [45] 孙永福, 董立峰, 蒲高军, 等. 风暴潮作用下黄河水下三角洲斜坡稳定性研究 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 582-587. [SUN Yongfu, DONG Lifeng, PU Gaojun, et al. Stability analysis of slopes in the subaqueous delta of the Yellow River under storm wave loading[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 582-587.]
- [46] 许国辉. 波浪导致粉质土缓坡海底滑动的研究: 以黄河水下三角洲为例 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006. [XU Guohui. Study on the landslide of gentle-slope silty seabed under waves: a case of Yellow River subaqueous delta[D]. Master Dissertation of Ocean of University of China, 2006.]
- [47] Ren Y P, Xu G H, Xu X B, et al. The initial wave induced failure of silty seabed: liquefaction or shear failure[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200: 106990.
- [48] Wang Z H, Sun Y F, Jia Y G, et al. Wave-induced seafloor instabilities in the subaqueous Yellow River Delta: initiation and process of sediment failure[J]. *Landslides*, 2020, 17(8): 1849-1862.
- [49] 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. [WANG Houjie, YUAN Xiaojun, WANG Yan, et al. Evolution of the abandoned Shexiangou-Diaokou delta lobe: processes and mechanism[J]. Journal of Sediment Research, 2010(4): 51-60.]
- [50] 曹成林. 波浪作用下埕岛海域海底冲刷预测评价 [D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2010. [CAO Chenglin. Prediction and evaluation of seabed erosion in Chengdao sea area under wave action[D]. Master Dissertation of First Institute of Oceanography, 2010.]
- [51] 许国辉, 尹晓慧, 王秀海, 等. 浅表土体强度对黄河水下三角洲微地貌形成的控制作用 [J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 657-662.
[XU Guohui, YIN Xiaohui, WANG Xiuhai, et al. Control actions of non-uniformity of superficial stratum on the development of microgeomorphology of the subaqueous Yellow River Delta[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(4): 657-662.]
- [52] Wang H J, Yang Z S, Li G X, 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.
- [53] 黄波. 黄河三角洲刁口河海岸侵蚀过程时空演变与防护对策研究 [D]. 北京林业大学博士学位论文, 2015. [HUANG Bo. Spatial-temporal evolution of erosion process and protective countermeasures research for Diaokou River Coastline in Yellow River Delta[D]. Doctor Dissertation of Beijing Forestry University, 2015.]
- [54] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 239-247.
- [55] Wang A M, Ralston D K, Bi N S, et al. Sediment resuspension and transport due to synoptic winter winds in the Bohai Sea[J]. *Geomorphology*, 2024, 456: 109211.
- [56] 刘猛, 毕乃双, 纪金龙, 等. 现行黄河三角洲叶瓣冲积演化对动力环境的影响 [J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(6): 8-18. [LIU Meng, BI Naishuang, JI Jinlong, et al. Evolution of the active deltaic lobe of Huanghe River and its response to hydrodynamics[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(6): 8-18.]
- [57] 王世雄, 范勇勇, 刘猛, 等. 黄河清水沟废弃河口冲淤时空变化特征 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 1-11. [WANG Shixiong, FAN Yongyong, LIU Meng, et al. Temporal and spatial variations of erosion and accumulation off the Qingshuiogou mouth of the Yellow River[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 1-11.]
- [58] 荆少东, 梁晓勇, 徐帅陵, 等. 埕岛油田海上自升式平台反复插拔桩对地层的影响 [J]. 油气田地面工程, 2021, 40(4): 21-26. [JING Shaodong, LIANG Xiaoyong, XU Shuailei, et al. Experimental study on the effect of repeated insertion and pullout of piles on offshore jack-up platform of Chengdao oilfield[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2021, 40(4): 21-26.]
- [59] 安涛, 林增勇, 张达. 埕岛油田反复插拔桩区域就位风险及预防措施 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(S1): 25-29. [AN Tao, LIN Zengyong, ZHANG Da. Risk and preventive measures of pile placement in Chengdao oilfield[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(S1): 25-29.]
- [60] 徐永臣. 黄河废弃水下三角洲地基土对平台插拔桩的响应 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2014. [XU Yongchen. Response to platform pile insertion and pullout of Yellow River abandoned underwater delta foundation soil[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2014.]