



台风“杜苏芮”远端影响下黄河三角洲沉积特征变化

王 , 丛 帅, 陈健斌, 王瀚锐, 魏一粟, 朱朋羽, 王厚杰, 吴 晓

Variations in sedimentation characteristics of the Yellow River Delta under the remote influence of Typhoon Doksuri

WANG Ti, CONG Shuai, CHEN Jianbin, WANG Hanrui, WEI Yisu, ZHU Pengyu, WANG Houjie, and WU Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024071601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河流三角洲沉积体系再析

Revisiting the concept of river delta sedimentary systems

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 1-13

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

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77-89

黄河三角洲刁口叶瓣堆积过程

Formation of the Diaokou Lobe in Yellow River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 97-104

黄河口水下三角洲刁口叶瓣的核素分布与沉积特征

Nuclides distribution and sedimentary characteristics of the Diaokou course in Yellow River subaqueous delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 43-50

珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化

Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 145-156



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王媿, 丛帅, 陈健斌, 等. 台风“杜苏芮”远端影响下黄河三角洲沉积特征变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 50-57.

WANG Ti, CONG Shuai, CHEN Jianbin, et al. Variations in sedimentation characteristics of the Yellow River Delta under the remote influence of Typhoon Doksuri[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 50-57.

台风“杜苏芮”远端影响下黄河三角洲沉积特征变化

王媿¹, 丛帅^{1,2}, 陈健斌³, 王瀚锐¹, 魏一粟¹, 朱朋羽¹, 王厚杰^{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. 山东省黄河三角洲可持续发展研究院, 东营 257000

摘要:通过原位观测、无人机遥测、野外调查取样和室内测试分析等多种手段,探讨了2023年台风“杜苏芮”外围风圈对黄河三角洲沉积环境的影响。研究结果表明:①台风外围风圈引起黄河三角洲区域风场特征出现快速调整,河口动力增强,导致沉积物再悬浮;②受海洋动力变化影响,河口三角洲不同断面整体呈现出近海一侧高程降低、向陆一侧潮沟增加的特征,受沿海人为工程影响,垦东12附近台风后淤积明显,废弃清水沟河道断面靠海部分侵蚀,靠岸部分淤积;③除高程外,三角洲不同断面位置沉积物粒度发生显著变化,粒度变化受到潮沟侵蚀、河流输沙、河口侵蚀和废弃河道充填等不同因素的影响,呈现出空间差异性。研究结果揭示了未直接过境的台风依然可能通过外围风圈影响三角洲沉积演化过程,在未来三角洲沉积演化研究与防灾减灾应对过程中应予以重视。

关键词:台风“杜苏芮”;远端影响;沉积动力过程;三角洲沉积演化;黄河三角洲

中图分类号:P737

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024071601

Variations in sedimentation characteristics of the Yellow River Delta under the remote influence of Typhoon Doksuri

WANG Ti¹, CONG Shuai^{1,2}, CHEN Jianbin³, WANG Hanrui¹, WEI Yisu¹, ZHU Pengyu¹, WANG Houjie^{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. Administration Center of the Yellow River Delta Sustainable Development Institute of Shandong Province, Dongying 257000, China

Abstract: To explore the influence of a non-directly passing typhoon on the sedimentary dynamic environment and characteristics of the Yellow River Delta, the impact of the peripheral wind field of Typhoon Doksuri in 2023 on the sedimentary environment of the deltaic area was studied through a combination of in-situ observations, unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing, field survey sampling, and laboratory analysis. Results indicate that: (1) The peripheral wind field of the typhoon caused a rapid change in wind pattern in the delta region, enhanced the estuarine dynamics, and triggered the resuspension of sediments. (2) Variations in marine dynamics resulted in different cross-sectional characteristics within the estuarine delta, which reduced the elevation in the nearshore segment and increased the tidal creeks landside. Due to coastal engineering, sedimentation was increased notably near Kendong 12 Block of the Shengli Oilfield in the study area after the typhoon. The abandoned Qingshuigou River channel experienced erosion seaward and sedimentation shoreward. (3) In addition to the elevation change, significant changes in sediment grain size occurred in different cross-sections of the delta. The changes in grain size were influenced by various factors such as tidal creek erosion, river sediment transport, estuarine erosion, and filling of abandoned river channels, showing spatial differences. The findings of the study demonstrate that typhoons do not directly pass through the delta can still affect the sedimentary evolution process in this region through their peripheral wind field, which should be taken into consideration seriously in future research on delta sedimentary evolution and disaster prevention and mitigation efforts.

Key words: Typhoon Doksuri; remote influence; sedimentary dynamics; delta evolution; Yellow River Delta

资助项目:国家自然科学基金项目“黄河流域生态系统变化与生态屏障效应”(42041005),“黄河口关键过程及物质输运协同效应重大科学考察实验研究”(42149301);中央高校基本科研业务费项目(202241007);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);东营市市校合作重点项目“黄河三角洲海岸非均衡演化及应对策略”(SXHZ-2022-02-15)

作者简介:王媿(2004—),女,本科生,地球信息科学与技术专业, E-mail: 22040032036@stu.ouc.edu.cn

通讯作者:吴晓(1989—),男,副教授,主要从事河口海岸学研究, E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

收稿日期:2024-07-16; **改回日期:**2024-09-25 周立君编辑

三角洲作为河流沉积物在河口形成的扇形地带,具有肥沃的土壤、丰富的资源和生物多样性,在人类社会的发展进程中扮演着重要角色。现代黄河三角洲位于山东半岛西北部,是我国三大河口三角洲之一,整体面积约5400 km²。黄河三角洲地势低平,受河流(改道事件、水沙输入)及海洋动力的共同影响,微地貌类型繁多,具有重要的生态屏障作用^[1]。黄河三角洲是我国暖温带最完整的湿地生态系统,也是世界上最年轻的湿地生态系统之一,为1500多种动植物提供了良好的栖息环境。同时,黄河三角洲蕴含着丰富的油气资源,具有极高的经济价值。国务院先后将其列为黄淮海农业开发区、农业综合开发试验区和全国农业开发区之一^[2]。但由于地处陆海交界地带,黄河三角洲动力环境特殊、地形条件复杂,生态环境较为脆弱,长期面临着风暴潮、海水入侵、海岸侵蚀等多种灾害风险^[3]。长期以来,前人对黄河三角洲不同时间尺度沉积演化过程与机制已开展了大量的研究工作^[4-7],表明黄河三角洲的沉积演化是气候变化、水库建设以及调水调沙工程等多种因素共同作用的结果,系统揭示了流域变化和海洋动力共同影响下黄河三角洲的沉积演化特征,然而受限于现场观测的难度,以往的研究较多关注于常态天气过程,对极端天气事件影响的研究相对薄弱。

我国是世界上台风登陆次数最多、灾害影响最为严重的国家之一,每年大约有7—8个台风直接登陆。每年7—10月期间,由于海水温度升高和大气环流条件的变化,热带气旋活动频繁,台风生成和登陆概率大幅提升。随着气候变暖,全球强台风事件频发,台风路径逐渐向两极移动,导致台风影响范围扩展,我国北方地区遭受台风灾害的风险不断加剧^[8-9]。台风带来的强降雨可能导致洪水,淹没低洼地区,损坏基础设施,威胁人类生命安全,同时也会显著改变河口海岸的沉积特征。例如,2004年8月台风“艾利”过境造成福建沿海砂质岸滩明显侵蚀,细粒沉积盖层消失,堆积砾石粒径变粗^[10]。除台风过境的直接影响外,台风外围风圈较强的风场条件也会引起未直接过境区域海洋沉积动力过程的显著变化^[11]。对于黄河三角洲地区,虽然直接过境的台风数量相对有限,但仍受到北上台风的外围风圈的频繁影响。在全球变化不断加剧的背景下,台风对黄河三角洲沉积特征的远端影响成为系统认识黄河三角洲沉积演化机制的重要问题。

台风“杜苏芮”(2305号)于2023年7月21日在西北太平洋洋面生成后,逐渐发展增强为超强台

风。7月28日以强台风级别登陆中国福建省晋江沿海,至7月29日在安徽省安庆市境内减弱为热带低压,但此后其残余环流仍继续北上并持续影响我国北方地区(图1)。本文基于台风“杜苏芮”影响前后黄河三角洲地区的无人机遥测、沉积物取样和室内测试分析,研究了台风“杜苏芮”外围风圈影响下的黄河三角洲沉积特征变化,探讨了台风远端影响下黄河口沉积动力过程与沉积响应。研究认识将提升对极端天气影响下黄河三角洲沉积过程与机制的深入理解,也可为推进黄河流域生态保护和高质量发展国家战略、提升黄河三角洲防灾减灾应对策略提供科学参考。

1 研究区域概况

现代黄河三角洲是黄河入海所携带的泥沙在渤海凹陷处沉积形成的冲积平原,即以垦利宁海为顶点,北起套尔河口,南至支脉沟口的扇形地带。在历史上黄河三角洲曾多次变迁,1855年(清咸丰五年)黄河于河南省铜瓦厢决口北夺大清河入渤海后冲积形成三角洲;1855—1904年间,黄河三角洲主要向东淤进,大约推进了20 km;1904—1929年间,主要向北淤进,淤进约18 km;1929—1935年间,黄河改道主要向东南淤进,淤进约4~5 km。1976年黄河尾间河段发生人为改道,由刁口流路改至清水沟流路,尽管1996年小范围改道清8汉,但流路整体较为稳定,至今行水50余年,逐渐淤积形成现行黄河三角洲^[12]。

黄河三角洲背陆面海,受欧亚大陆和太平洋的共同影响,属于半湿润半干旱的暖温带大陆性季风气候,四季分明,温差明显,年均降水量530~630 mm,主要集中在夏季,温度高湿度大,有时会受台风侵袭^[13-14]。黄河三角洲近岸海域以不规则半日潮为主,属于弱潮河控型河口,大潮平均潮差为0.22~0.24 m,小潮平均潮差为0.08~0.18 m。黄河三角洲的近岸波浪以风生浪为主,常见波高小于0.3 m,近岸海域常遭受寒潮侵袭,寒潮期间波高会显著增大,通常大于2.5 m^[15]。日潮区的潮差小,大潮与小潮潮差相差悬殊;涨潮历时比落潮长。最高潮面夏半年比冬半年高,最低潮面冬半年比夏半年低。

2 数据来源与方法

台风“杜苏芮”影响前后,本研究在黄河三角洲共7条断面开展了无人机高程测量和表层沉积物

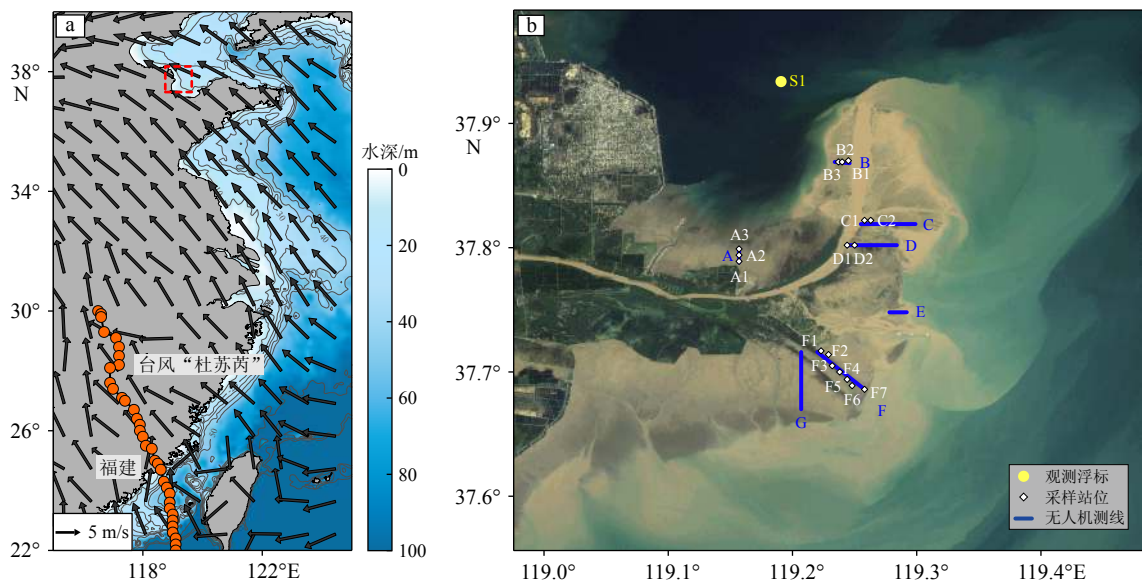


图1 2023年7月台风“杜苏芮”登陆与演进路径及7月29日风场特征(a)以及研究区范围和调查断面与站位分布(b)
Fig.1 The landing and evolution path of Typhoon Doksuri in July 2023, and the wind field characteristics on July 29 (a), and the scope of the study area, as well as the distribution of survey sections and stations (b)

取样调查(图1b)。无人机遥测采用大疆 M300RTK 无人机,其搭载了新一代 OcuSync 专业图传系统,拥有较远的控制距离和长时间的飞行续航时间,单次拍摄可同时获得5个不同角度所摄取的像片,能够更好地反映物体的三维信息;飞行时具有较好的稳定性和可靠性,装备的 RTK 定位系统精度可达厘米级,可用于开展地貌冲淤演化的分析研究^[16-19]。无人机遥测于台风前、后各测量一次,通过飞行管理软件对所获取的数据进行分析和处理,对比揭示陆上三角洲地区的冲淤变化。野外调查过程中,在各断面采集 0.5 cm 以浅的表层沉积物,每个站位同样在台风前后各采集一次,沉积样品用锡纸包裹后装入样品袋编号、密封,带回实验室开展粒度测试等室内分析。

沉积物粒度测试在自然资源部第一海洋研究所进行,测试前取 0.2 g 样品于离心管中,加入 5 mL 浓度为 30% 的 H_2O_2 静置 24 h(去除有机质),再加入 5 mL 10% 的 HCl 静置 12 h(去除碳酸钙),离心洗酸 3—4 次至溶液呈中性,最后加入 5 mL 浓度为 5.1% 的六偏磷酸钠溶液(充分分散)。上机前将离心管置于超声波清洗器中震荡至沉积物充分分散。处理后的样品在英国 Malvern 3000 型号激光粒度仪上测试,测量范围 0.02~2000 μm ,重复测量误差小于 1%。本文采用 Udden-Wentworth Φ 值粒级标准,沉积物分类和命名采用谢帕德分类命名法^[20],粒度参数采用矩值法进行计算。

此外,为揭示台风“杜苏芮”远端风圈影响下的

河口沉积动力环境变化,本研究还在黄河口开展了 15 天的定点原位观测(观测站位见图 1b)。原位观测于海表 0.5 m 处布放了锚系浮标,浮标搭载了 RBR-CT、TU 和水质仪用以获取水体温度、盐度、浊度、叶绿素等水质参数,同时搭载了波浪传感器和海流计,用以获取台风影响期间的有效波高、流速等河口动力信息。另外通过欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),本研究还获取了 2023 年 7 月 21 日至 8 月 6 日黄河三角洲区域内的风场数据,用以揭示台风“杜苏芮”外围风圈对黄河三角洲的影响。

3 结果与讨论

3.1 台风“杜苏芮”外围风圈影响下黄河三角洲沉积动力过程变化

受台风“杜苏芮”外围风圈影响,黄河三角洲区域风场结构发生快速调整(图 2)。“杜苏芮”外围风圈影响之前,黄河三角洲区域以南风和东风为主,风速整体小于 4 m/s(图 2a 和 2d)。27 日台风“杜苏芮”向我国逐渐靠近,并于 28 日登陆福建晋江后北上,黄河三角洲区域风场转为东南,风力逐渐增大(图 2d)。7 月 29—31 日,黄河三角洲整体被东南风影响,风速达到 10 m/s 以上(图 2b)。台风影响结束后,黄河三角洲区域风场重新恢复至南风为主,风速降至 5 m/s(图 2c)。

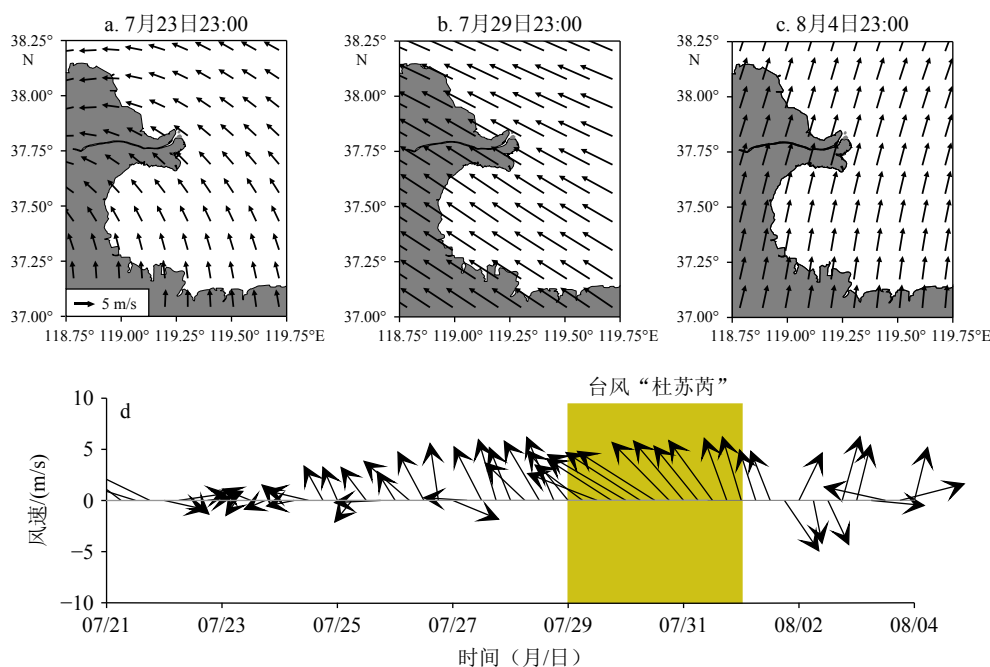


图 2 黄河三角洲区域 7 月 23 日、7 月 29 日、8 月 4 日风场特征 (a-c) 以及黄河三角洲区域 7 月 21 日至 8 月 4 日区域平均风矢量图 (d)

Fig.2 The wind field characteristics in the Yellow River Delta region on July 23, July 29, and August 4 (a-c, respectively), and the regional-averaged wind vectors in the Yellow River Delta from July 21 to August 4 (d)

台风引起的风场调整会导致河口动力过程发生显著变化^[21], 受台风外围风圈影响, 黄河三角洲海域水文要素与海洋动力特征同样发生急剧变化。随着台风临近以及风力增强, 黄河三角洲海域有效波高明显增加, 由台风影响前的 0.2~0.4 m 增加至接近 1 m; 台风影响结束后, 区域有效波高快速恢复至 0.2 m 左右 (图 3a)。台风影响前后, 河口区流速整体变化不大, 仅在 7 月 29 日流速略有增加, 由 0.4 m/s 增加至 0.5 m/s (图 3b)。台风还会通过影响光照条件和加强水体垂直混合, 改变海水温度^[22]。图 3c 显示, 受台风“杜苏芮”影响, 黄河口海面温度由 26℃ 逐渐降低至 23℃, 8 月 1 日之后, 温度逐渐恢复, 至 8 月 4 日恢复至台风影响前的水平 (图 3c)。7 月 22 日海水温度的明显降低则主要受当地阵风影响, 与台风影响无关, 故在本研究中不作过多讨论。随着风场变化与海洋动力调整, 黄河三角洲海域水体浊度显著增加, 由台风影响前的 20 NTU 逐渐增加至 120 NTU (图 3d), 反映出台风影响下河口沉积物再悬浮过程的增强。而水体叶绿素含量受台风影响不明显, 在台风影响期间整体较低, 台风影响结束后略有增加 (图 3e)。

3.2 黄河口湿地高程变化

台风“杜苏芮”外围风圈影响下, 黄河三角洲湿

地高程发生了不同程度的变化。断面 A 近海侧受海洋动力侵蚀明显, 高程降低 0.2 m 左右 (图 4a); 断面向陆一侧潮沟发育, 推断可能是台风引起的风暴潮和海洋动力增强, 导致部分区域发生潮流侵蚀所致 (图 5a)。断面 B 与断面 A 变化相似, 靠海一侧发生显著侵蚀, 侵蚀幅度在 0.2 m 左右 (图 4b)。断面 C 与断面 D 整体变化不大, 近海一侧略有侵蚀, 高程变化不显著, 仅在近海段部分区域出现幅度 0.1 m 的侵蚀 (图 4c-d)。E 断面变化较其他断面显著不同, 台风影响后整体出现了显著淤积, 淤积幅度约为 0.5 m (图 4e)。受台风影响, 黄河三角洲海域再悬浮过程增强, 再悬浮泥沙在沿岸流作用下由河口向莱州湾运输。胜利油田在垦东 12 区块修建的一条东西向进海路截断了现行清 8 汉河河口南侧的沿岸流通道 (图 5b), 阻隔了再悬浮泥沙的南向传输^[23-24]。由此, 台风影响下河口部分再悬浮泥沙在进海路北侧淤积, 进而导致台风过后断面 E 的高程显著增加, 整体呈现淤积状态。断面 F 近海段在台风过后呈现轻微侵蚀, 在断面 3 km 左右位置高程呈现明显抬升 (图 4f), 这一方面可能是由于清水沟口门再悬浮泥沙在涨潮过程中经清水沟废弃河道上溯, 随着涨潮流速减弱, 沿程淤积, 充填废弃河道所致; 另一方面, 台风过境也在该区域产生明显的植物残骸堆积, 引起高程增加 (图 5d)。断面 G 高

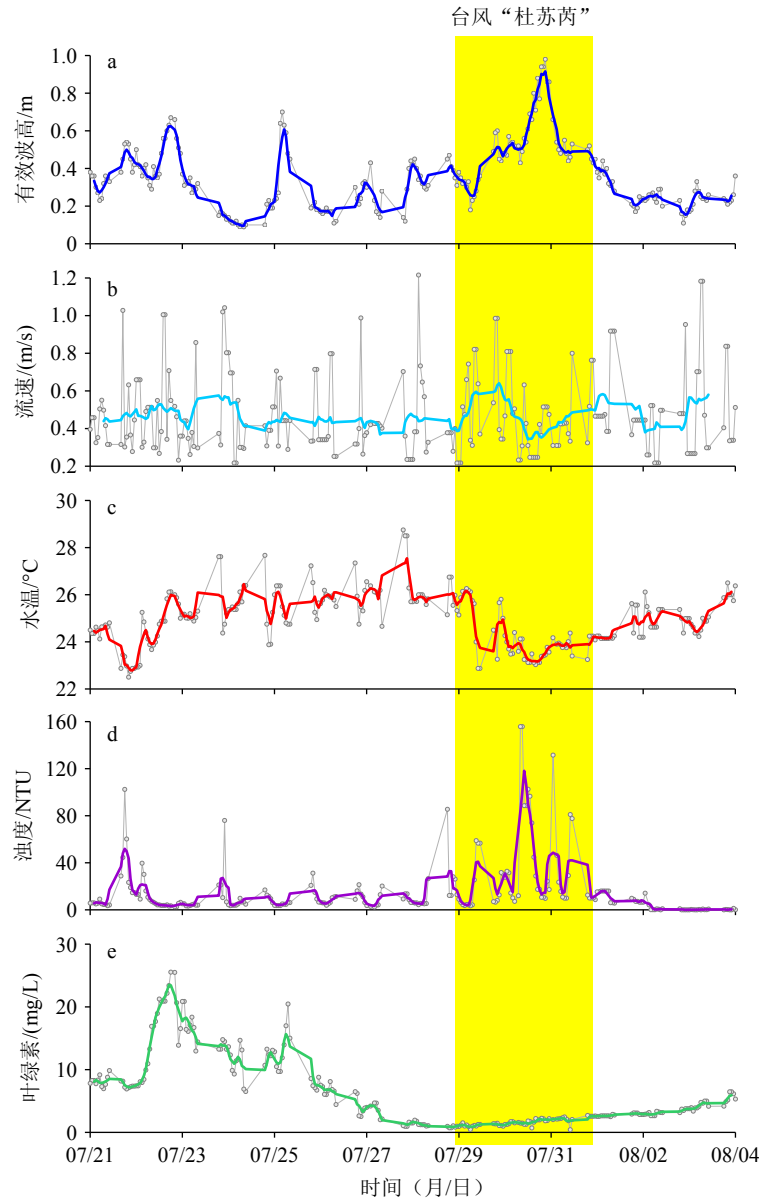


图3 7月21日至8月4日黄河口S1站位浮标观测数据

a: 有效波高, b: 流速, c: 水体温度, d: 浊度, e: 叶绿素含量。

Fig.3 Buoy observation data at Station S1 in the Yellow River estuary from July 21 to August 4

a: Significant wave height, b: current velocity, c: water temperature, d: turbidity, e: chlorophyll content.

程整体变化不大,台风后出现多条潮沟(图4g)。

3.3 黄河三角洲表层沉积特征变化

除高程变化外,台风“杜苏芮”外围风圈影响前后,黄河三角洲区域表层沉积粒度也发生了显著变化(图6)。受台风影响,断面A靠海一侧的A3站位沉积物粒径变细,靠陆一侧的A1、A2站位粒度变粗(图6a),推断可能是侵蚀塑造潮沟过程中沉积物的再搬运导致(图4a)。断面C与断面D由于三角洲泥滩限制,难以跨越整条断面取样,仅在靠陆一侧各采集了两个站位,但断面C与D呈现出相反

的变化特征,台风影响后C1、C2站位整体变细,而D1、D2站位粗化明显(图6d)。由于断面C与断面D向陆一侧为黄河行水河道(图1b),沉积演化过程可能受到河流泥沙供应的影响,演变机制更为复杂。断面F位于废弃清水沟流路,受较强海洋动力影响,断面靠海一侧呈现侵蚀,向陆一侧发生淤积(图4f)。与高程变化对应,近海一侧F7站位粒度粗化,向陆一侧站位整体表现为变细的特征(图6e)。断面总体表现为南端靠海部分受风浪影响更大,发生明显的侵蚀,近岸部分受风浪影响较小,主要发生淤积。前人研究表明,强海洋动力会造成废弃清

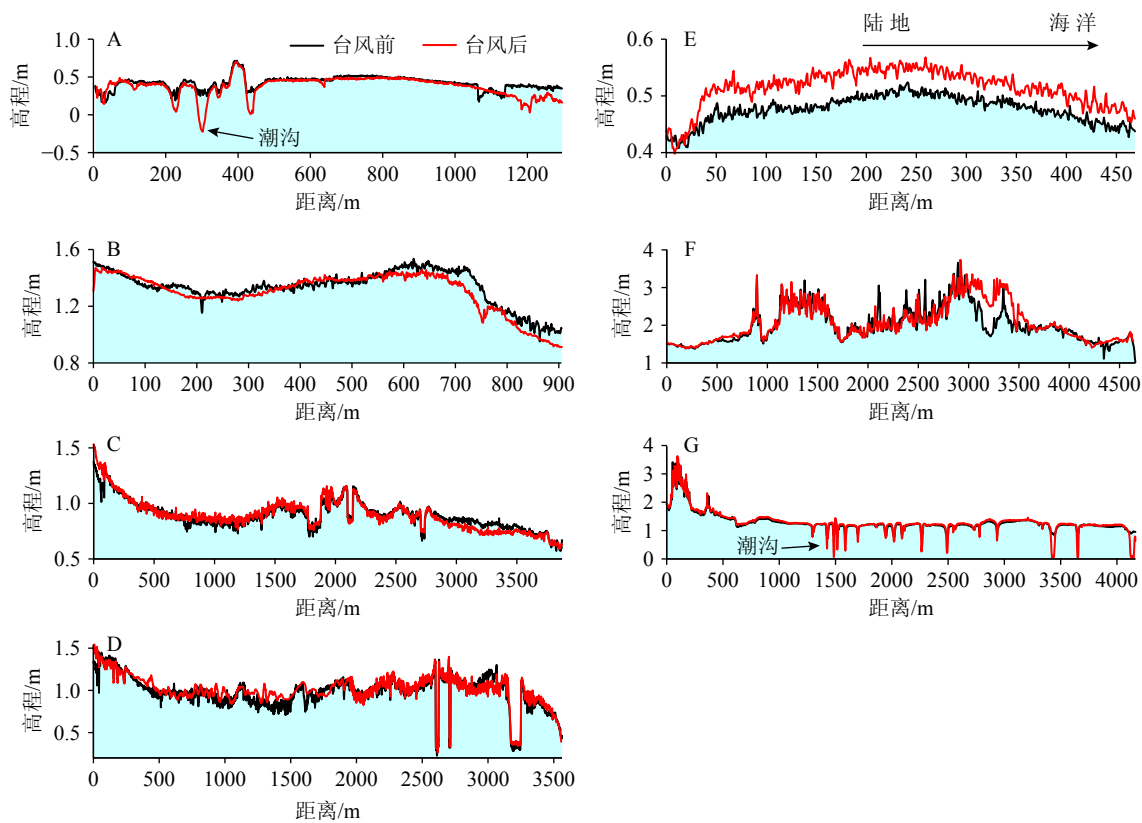


图 4 台风影响前后断面 A-G 高程变化
断面位置见图 1。

Fig.4 Changes in elevation of sections A-G before and after the typhoon passage
Section locations are shown in Fig.1.

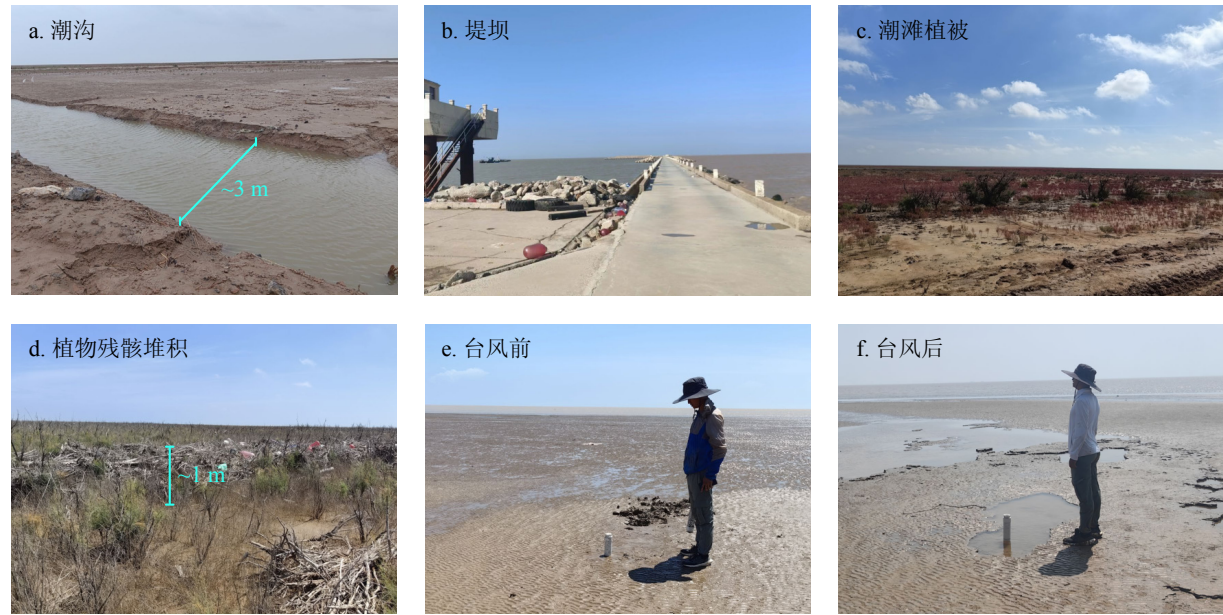


图 5 台风过后黄河三角洲不同地貌现场照片 (a-d) 以及台风影响前后同一位置对比图 (e-f)

Fig.5 On-site photos of different landscapes in the Yellow River Delta before the typhoon (a-d) and comparison images of the same location before and after the typhoon passage (e-f)

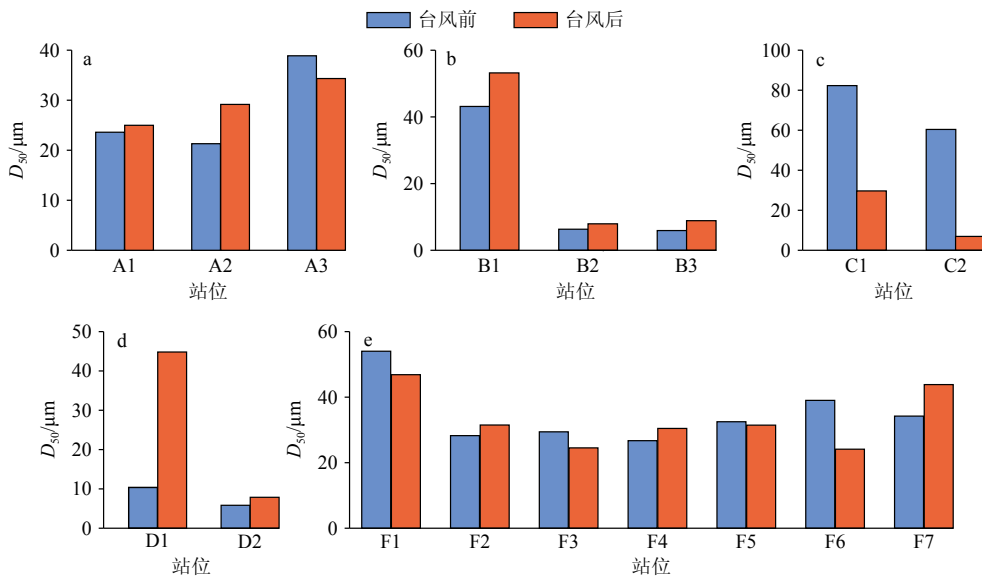


图 6 台风影响前后各断面站位沉积物中值粒径变化特征

Fig.6 Characteristics of median grain size changes in sediments at each section before and after the typhoon

水沟河口处侵蚀,再悬浮泥沙在涨潮流作用下沿废弃河道上溯,上溯过程中因流速降低逐渐落淤,导致废弃河道填充^[25]。这一侵蚀-填充过程可能是造成 F 断面高程变化与沉积物粒度调整的主要原因。

4 结论

通过台风“杜苏芮”影响前后黄河三角洲的现场采样调查,综合河口沉积动力原位观测、无人机遥测和沉积粒度测试等多种研究手段,研究了台风“杜苏芮”外围风圈影响下黄河三角洲沉积演化特征,探讨了台风远端影响下黄河三角洲的沉积响应特征与机制,主要认识如下:

(1)在台风“杜苏芮”外围风圈影响下,黄河三角洲区域风场特征发生快速调整,由南风为主转为东南风,风速由 4 m/s 增加至 10 m/s;随着风力增强,有效波高由台风影响前的 0.2 m 左右增加至近 1 m;受台风影响,河口区水体温度持续降低,浊度增加,台风影响期间水体叶绿素降至最低,台风后逐渐恢复。

(2)在台风“杜苏芮”外围风圈影响下,黄河三角洲区域整体表现为近海一侧以侵蚀为主,向陆一侧出现潮沟。断面 E 位于垦东 12 进海路北侧,河口再悬浮泥沙向南输运过程中受到进海路阻隔在断面 E 位置淤积,导致断面 E 台风影响后呈现淤积状态。位于废弃清水沟流路的断面 F 表现为近海端侵蚀,向海逐渐淤积,主要是由于河口再悬浮泥沙在涨潮流作用下沿废弃河道上溯过程中逐渐落

淤导致。

(3)除高程变化外,不同断面站位沉积物粒度均发生调整,不同区域的粒度变化受到潮沟侵蚀、河流输沙、河口侵蚀和废弃河道充填等因素的影响。

参考文献 (References)

- [1] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 等. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价 [J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4584-4595. [WU Chunsheng, HUANG Chong, LIU Gao-huan, et al. Ecological vulnerability assessment of the Yellow River Delta based on fuzzy analytic Hierarchy Process[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4584-4595.]
- [2] 潘世兵. 区域水资源可持续开发利用研究——以黄河三角洲地区为例 [D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2000. [PAN Shibing. Research on Sustainable Development and Utilization of Regional Water Resources-Example of Yellow River Delta[D]. Doctor Dissertation of Jilin University, 2000.]
- [3] 孙庆荣. 黄河三角洲区域发展模式构建 [D]. 同济大学博士学位论文, 2006. [SUN Qingrong. Construction of regional development model of Yellow River Delta[D]. Doctor Dissertation of Tongji University, 2006.]
- [4] Wu X, Yue Y, Alistair Borthwick, et al. Mega-reservoir regulation: A comparative study on downstream responses of the Yangtze and Yellow rivers[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 245: 104567.
- [5] Ji H, Pan S, Chen S. Impact of river discharge on hydrodynamics and sedimentary processes at Yellow River Delta[J]. *Marine Geology*, 2020, 425: 106210.
- [6] Wu X, Wang H, Yoshiki Saito, et al. Boosting riverine sediment by artificial flood in the Yellow River and the implication for delta restoration[J]. *Marine Geology*, 2022, 448: 106816.
- [7] 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 Xiao, FAN Yongyong, WANG Houjie, et al. Evolution and control mechanism of abandoned river channels in delta-A case study of abandoned river channels in Diaokou, Yellow River[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2021, 41(2): 22-29.]
- [8] Mei W, Xie S. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 753-757.
- [9] Wang S, Ralf Toumi. Recent migration of tropical cyclones toward coasts[J]. *Science*, 2021, 371(6528): 514-517.
- [10] 雷刚. 福建砂质海岸沉积地貌的风暴效应研究——以对0418号台风“艾利”的响应为例[D]. 国家海洋局第三海洋研究所硕士学位论文, 2005. [LEI Gang. Study on storm effect of sedimentary geomorphology in sandy coast of Fujian-The response to Typhoon 0418 “Aili” as a case study[D]. Master Dissertation of Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2005.]
- [11] 李敏, 王辉, 金敬华. 中国近海海面风场预报方法综述[J]. 海洋预报, 2009, 26(3): 114-120. [LI Min, WANG Hui, JIN Qihua. A review of methods for forecasting sea surface wind field in offshore China[J]. *Marine Forecast*, 2009, 26(3): 114-120.]
- [12] 赵广明, 叶青, 薛春汀, 等. 现代黄河三角洲陆上表层沉积物类型与沉积环境分区及岸线演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 47-52. [ZHAO Guangming, YE Qing, XUE Chunting, et al. The types of surface sediments, the zoning of sedimentary environment and the evolution of shoreline in the Yellow River Delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(5): 47-52.]
- [13] 龚雪雷, 姬泓宇, 李鹏, 等. 黄河三角洲近岸潮汐动力对地貌演变的响应及其沉积效应[J]. 海洋学报, 2024, 46(2): 64-78. [GONG Xuelei, JI Hongyu, LI Peng, et al. Response of coastal tidal dynamics to geomorphic evolution and its depositional effects in the Yellow River Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2024, 46(2): 64-78.]
- [14] 张建民, 单红仙, 王振强, 等. 黄河三角洲潮滩表层沉积物在潮波和波浪作用下的孔压响应及固结机理现场试验研究[J/OL]. 岩土工程学报, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240422.1057.016.html>. [ZHANG Jianming, SHAN Hongxian, WANG Zhenqiang, et al. Field test study on pore pressure response and consolidation mechanism of tidal flat surface sediments in the Yellow River Delta under tidal wave and wave action[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240422.1057.016.html>.]
- [15] 牛玉乾. 遥感耦合下的黄河口海域泥沙数值模拟[D]. 舟山: 浙江海洋大学硕士学位论文, 2022. [NIU Yuqian. Numerical simulation of sediment in the Yellow River Estuary coupled with remote sensing[D]. Master Dissertation of Zhejiang Ocean University, 2022.]
- [16] 丁涛, 刘超, 邓烨, 等. 大疆 M300 RTK 无人机在农村地籍测量中的应用[J]. 安徽科技学院学报, 2021, 35(3): 23-29. [DING Tao, LIU Chao, DENG Ye, et al. Application of DJI M300 RTK UAV in rural cadastral survey[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology*, 2021, 35(3): 23-29.]
- [17] 阮东旭, 闫育超. 大疆 M300 RTK 无人机在 1: 500 地形图测绘中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(7): 44-46. [RUAN Dongxu, YAN Yuchao. Application of DJI M300 RTK UAV in 1: 500 topographic map mapping[J]. *Engineering Research*, 2019, 9(7): 44-46.]
- [18] 刘英文. 基于 RTK-GPS 现场观测的崇明东滩冲淤变化研究[D]. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2012. [LIU Yingwen. Research on the Erosion and Sedimentation Changes in Chongming Dongtan Based on RTK-GPS Field Observation[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2012.]
- [19] 仇晴川, 张乔民. 湿地地表高程变化的测量与研究[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(11): 15-20. [QIU Qingchuan, ZHANG Qiaomin. Measurement and Research on the Change of Wetland Surface Elevation[J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(11): 15-20.]
- [20] 王中波, 何起祥, 杨守业, 等. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 1-8. [WANG Zhongbo, HE Qixiang, YANG Shouye, et al. Application and Comparison of Shepard and Folk's Clastic Sediment Classification Methods in the Mapping of Surface Sediments in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(1): 1-8.]
- [21] 乔璐璐, LE DUC Cuong, 李珏, 等. 超强台风“威马逊”作用下红河三角洲海域水动力环境变化的数值研究[J]. 海洋科学, 2021, 45(4): 64-74. [QIAO Lulu, LE DUC Cuong, LI Jue, et al. Numerical Study on the Hydrodynamic Environmental Changes in the Red River Delta Under the Action of Super Typhoon Rammasun[J]. *Marine Science*, 2021, 45(4): 64-74.]
- [22] Wu X, Wang H, Bi N, et al. Bio-physical changes in the coastal ocean triggered by typhoon: A case of Typhoon Meari in summer 2011[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 183: 413-421.
- [23] 金群昊, 程义吉, 宋振杰, 等. 黄河口垦东 12 区块海域泥沙输运的数值模拟[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(7): 51-56. [JIN Qunhao, CHENG Yiji, SONG Zhenjie, et al. Numerical Simulation of Sediment Transport in the Ken Dong 12 Block of the Yellow River Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(7): 51-56.]
- [24] 王奎峰, 张太平, 宋新强, 等. 黄河三角洲海岸冲淤及泥沙输运模型数值模拟分析[J]. 山东国土资源, 2018, 34(11): 22-31. [WANG Kuifeng, ZHANG Taiping, SONG Xinqiang, et al. Numerical simulation analysis of coastal scouring and sediment transport model in the Yellow River Delta[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(11): 22-31.]
- [25] Wu X, Wang H, Bi N, et al. Evolution of a tide-dominated abandoned channel: A case of the abandoned Qingshuigou course, Yellow River[J]. *Marine Geology*, 2020, 422: 106166.