

刘晓磊, 张淑玉, 郑杰文, 等. 黄河三角洲极端风暴诱发地质灾害研究进展及对策[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 28-39.

LIU Xiaolei, ZHANG Shuyu, ZHENG Jiewen, et al. Research progress and countermeasures on geological hazards induced by extreme storms in the Yellow River Delta[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(11): 28-39.

黄河三角洲极端风暴诱发地质灾害研究进展及对策

刘晓磊^{1,2}, 张淑玉¹, 郑杰文², 贾永刚^{1,2}

(1 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100;

2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061)

摘要:受全球气候变化影响, 河口三角洲及沿海地区极端风暴事件发生频率及其危害性不断加剧。风暴事件中海底沉积物在波浪荷载作用下产生压密固结、液化流变等动态响应, 并伴随粒度成分、力学强度、结构分层等一系列海床工程地质性质的变化, 诱发侵蚀、滑坡等海洋地质灾害, 严重影响海洋资源开发工程及生态环境安全。黄河三角洲特殊的地理位置、气候特点和沉积特性, 决定了其成为我国海洋地质灾害最多发的地区之一, 是开展极端风暴事件下地质灾害机理与防控研究的理想试验场。近年来, 海洋工程地质领域围绕风暴水动力-海底沉积物相互作用与致灾机理开展了大量研究, 特别在极端风暴诱发海床液化、侵蚀冲刷、变形滑动的灾害特征、机制与定量评价方面取得了重要创新性成果, 为全球气候背景下的海洋工程地质评价和防灾减灾提供了理论指导。今后应进一步加强多学科交叉与产学研联合攻关, 在海洋地质灾害链生机制、灾害综合监测预警技术、海洋工程灾害防控技术等方面力争突破, 不断提升我国海洋地质灾害应对能力。

关键词:极端风暴事件; 海洋工程地质; 灾害防控; 黄河三角洲; 液化; 侵蚀冲刷; 变形滑动

中图分类号:P694

文献标识码:A

DOI:[10.16028/j.1009-2722.2022.228](https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2022.228)

0 引言

黄河三角洲位于渤海南岸, 有丰富的湿地、油气以及海上风电资源^[1-3]。自 2009 年国家批复《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》以来, 黄河三角洲地区成为国家“黄蓝两大战略”的高效经济区和生态环境保护区。2019 年, 随着《黄河流域生态保护和高质量发展》成为重大国家战略, 黄河三角洲进一步进入经济与环境协调发展的新阶段。

黄河三角洲是近百年来黄河入海泥沙沉积形成的一块年轻的土地, 拥有国家级的湿地类型自然保护区——黄河三角洲湿地以及全国第二大石油工业基地——胜利油田。该区大量的海洋油气开

发工程以及生态保护工程受到自然灾害的巨大威胁。1997 年特大风暴潮使位于黄河三角洲的全国最大人工刺槐林和白杨林全部毁坏^[2]; 2003 年 11 月, 垦岛油田 2 条海底主力电缆同时中断^[4]; 2010 年 9 月 7 日, 位于垦岛油田 CB22C 井组平台附近的胜利作业三号修井平台发生倾覆事故^[5], 致 2 人溺亡, 直接经济损失 592 万元; 2019 年, 台风“利奇马”使沿岸海堤及道路大量受损。这些事故的发生均与黄河三角洲沉积物工程地质性质的动态变化以及海底地质灾害的广泛发育有关^[5-6]。加强地质灾害调查及其成因机制的研究, 协调海洋经济发展与自然灾害的矛盾是目前黄河三角洲区域发展的重要任务。

自 1855 年黄河改道以来, 黄河三角洲区域几乎没有发现任何断层活动, 也鲜有水合物分解、天然气泄漏的证据^[6], 但在水下三角洲区域却发现了海底塌陷凹坑、滑坡、重力流等多类地质灾害^[7](图 1), 多数学者认为风暴事件频发是黄河三角洲地质灾害发育的重要原因^[8-10]。黄河三角洲地处中

收稿日期: 2022-08-14

资助项目: 国家自然科学基金(42022052); 山东省自然科学基金(ZR2020YQ29)

作者简介: 刘晓磊(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋工程地质与环境方面的研究工作. E-mail: xiaolei@ouc.edu.cn

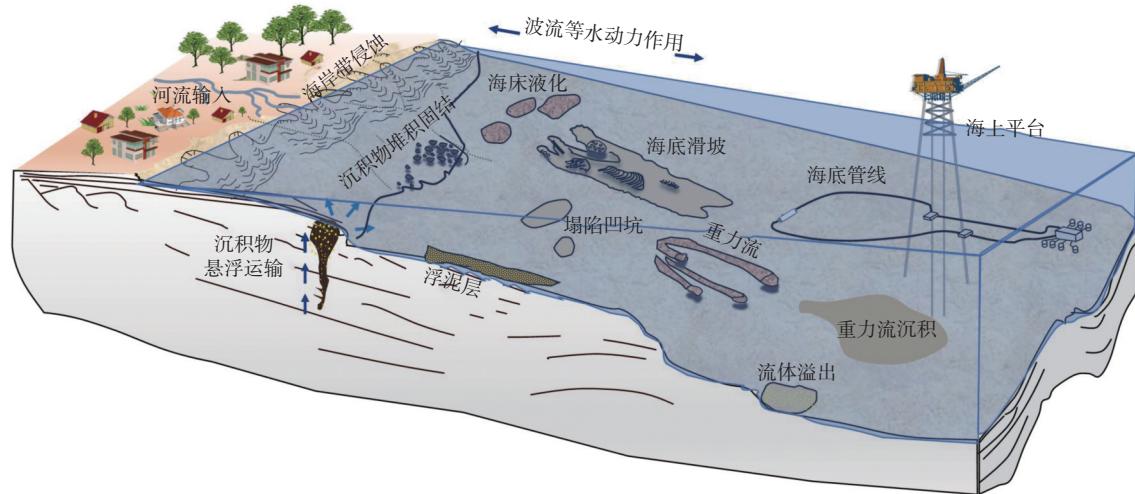


图1 水下三角洲典型地质灾害与地形地貌

Fig.1 Typical geological disasters and landforms of subaqueous delta

纬度地区、太平洋西岸,受东亚季风及西伯利亚气旋控制,寒潮侵袭、台风、气旋活动等天气过程会在冬夏两季产生有效波高超过4 m的波浪^[11-13]。黄河入海泥沙快速沉积形成的粉质土海床呈现出高含水量、高压缩性及不均匀固结等特殊工程地质性质,在强风暴水动力作用下呈现一系列独特的沉积物动态响应^[14-16]。特殊的地理位置、气候特点和沉积特性,决定了黄河三角洲成为我国海洋地质灾害多发的地区之一,是开展极端风暴事件下地质灾害机理研究的理想背景。

因此,梳理黄河三角洲极端风暴事件下的沉积物动态响应以及地质灾害发育机理,提出在海洋资源开发与工程建设中应对地质灾害风险的新对策,对黄河三角洲生态环境保护以及海洋资源高效开发具有重要的科学与战略意义。

1 极端风暴工程地质作用及灾害

风暴事件是由全球气候变化引起的一种极端天气,每年直接和间接造成巨大的财产损失和人员伤亡。在全球变暖与海平面上升背景下,沿海三角洲地区由台风、暴雨、洪水、风暴潮、气旋等各种致灾因子引起的极端风暴事件的危险性不断加剧^[17],严重威胁海岸带低地居民的生命和财产安全。1970年孟加拉湾特大风暴潮造成100万人无家可归^[18]。2013年,超强台风海燕登陆菲律宾莱特岛北部沿海,造成6300人死亡,经济损失约合87.8亿美元^[19],成为西北太平洋有气象记录以来最强的热带气旋之一。2019超强台风利奇马在浙江省温岭市沿海登陆,造成56人死亡,直接经济损失515.3

亿元^[20]。

最初对风暴事件灾害的研究主要聚焦于风暴事件对陆上设施造成的影响及风险评估。随着海洋探测技术的发展以及对海洋探索、开发的深入,极端风暴海况下沉积物工程地质性质及衍生灾害成为研究重点。极端风暴期间强烈的波浪循环荷载作用诱发海床内部孔隙水压力动态响应并导致沉积物液化、流化,这种现象发生于世界各大砂质、泥质、粉质河口三角洲,如加拿大弗雷泽河三角洲^[21]、美国密西西比河三角洲^[22]、中国黄河三角洲^[23]等。风暴期间海底沉积物颗粒特征、海床沉积序列发生变化,会进一步导致海床强度及抗侵蚀性改变^[24-25],加剧三角洲近岸海床的侵蚀危机^[26-29]。风暴期间海床强度的降低还极易诱发海床变形滑动,如在墨西哥湾北部、黄河三角洲等受风暴事件影响显著的海域,多项研究记录了风暴期间的海床变形滑动^[22, 30-31],进而诱发沉积物以重力流形式进行跨大陆架运输,沿途破坏海底管线、电缆等海洋工程^[32-34](图2)。

由此可见,极端风暴工程地质作用及沉积物动态响应特性是海洋地质灾害机理研究的核心科学问题。世界各国相继启动了一系列与极端风暴工程地质作用及灾害相关的重大研究计划项目。早在20世纪70年代,美国开展了名为“SEAWAB”的研究计划,旨在通过现场观测,探索波浪引起的海床孔隙水压力响应与沉积物性态变化之间的关系^[35]。20世纪末,欧洲也陆续开展相关工作,如1994年荷兰启动了“ECOFLAT”计划,对极端海况下底栖生物群与沉积物动态之间的相互作用进行了研究^[36]。意大利于2007—2012年开展的MaGIC

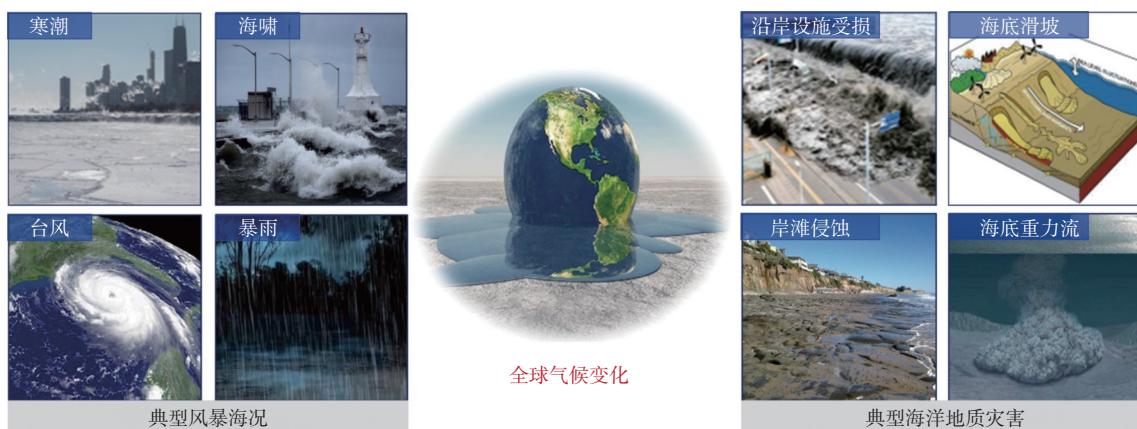


图 2 典型风暴海况与其诱发的典型海洋地质灾害

Fig.2 Typical stormy sea state and the induced typical marine geological disasters

项目旨在通过地球物理调查,建立海洋地质灾害和风险的数据系统与管理平台^[37]。日本作为世界上遭受地震、海啸等地质灾害最多的国家之一,自2006年起建立了DONET系统,用于海底地震和海啸的早期预警。

20世纪80年代后期的中美加合作项目和国家“七五”重大项目“中国河口主要沉积动力过程及其应用——河口水下底坡不稳定性”,开启了我国河口沉积物动力学研究序幕。1997—2001年,国家海洋局组织实施了“我国专属经济区和大陆架勘测”国家重大专项,对我国海域灾害地质环境进行了调查和评价。此后,围绕河口三角洲沉积物动力学,国家相继批准多项重点项目,如2012—2016年的“三峡工程对长江河口-三角洲动力沉积过程和地貌演化的影响”重点项目,2020年开始执行的“潮汐影响下的海滩动力地貌风暴响应机制研究”重点项目等。海岸和近海工程国家重点实验室(大连理工大学)、河口海岸学国家重点实验室(华东师范大学)将河口沉积动力学以及相关防灾减灾作为重点研究方向。2012年中国海洋大学牵头成立国际工程地质与环境协会海洋工程地质委员会(IAEG-C34),2022年成立国际地质灾害与减灾协会海洋地质灾害与地质环境委员会(ICGdR-TC4),均将极端风暴工程地质作用与灾害防控作为核心科学目标,中国在此研究领域开始起到引领作用。

基于以上背景,笔者认为对以黄河三角洲为例的大河三角洲风暴诱发地质灾害研究进展及对策进行梳理,已成为海洋工程地质学科发展的当务之急。通过阐述极端风暴作用下沉积物工程地质性质的演化规律,从宏观和微观层面系统阐明基于沉积物动力学特性分析的致灾机理,建立相应的理论

评价与预测模型,进而提出相关对策并展望海洋地质灾害研究的发展方向,以期为海洋地质灾害研究提供理论指导,实现极端风暴事件下海洋工程地质灾害的有效防控。

2 黄河三角洲海底沉积物风暴动力响应过程与致灾机制

风暴事件中,波浪在海底产生的压力场会在海床内部诱发循环剪应变并引起孔隙压力与有效应力的动态响应。随着超孔隙水压力的增加以及垂向有效应力的减小,部分海床强度降低甚至发生液化。此过程往往伴随着表层沉积物颗粒的侵蚀再悬浮,并最终导致海床颗粒成分改变。当波浪在海床内部产生的剪应力超过海床强度时,就会诱发变形滑动。下文以黄河三角洲粉质土沉积物在风暴水动力下发生动力响应为例,对海床液化、侵蚀冲刷及变形滑动的过程与机制进行了梳理与阐述。

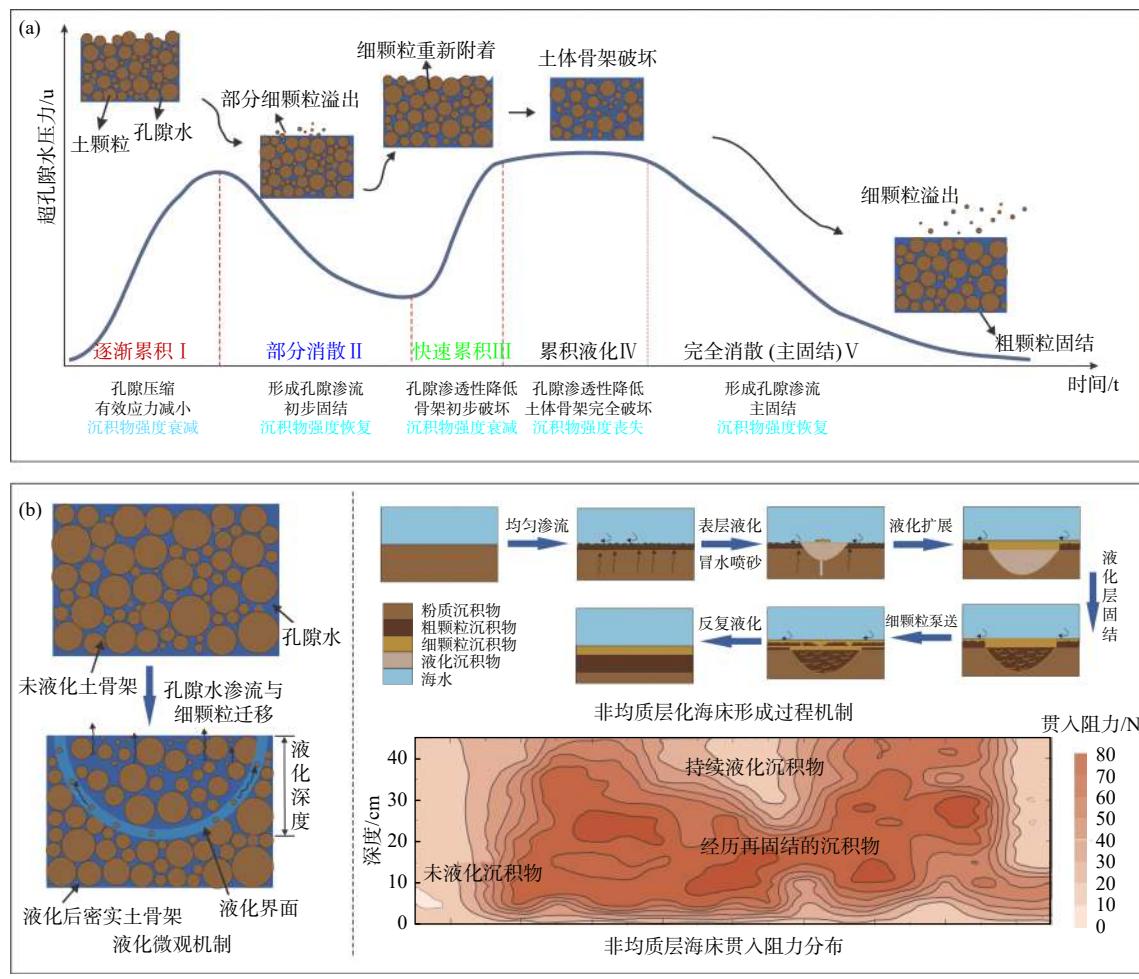
2.1 海床液化

黄河三角洲沉积物的液化受其特殊的工程地质性质控制。黄河入海泥沙在水动力作用下超孔隙水压力快速消散并固结形成均匀粉质海床^[38]。相较于陆上黄土,黄河三角洲粉质黄土黏粒含量增加且颗粒连接更紧密,这使其表现出较高的液化潜力^[39]。研究表明现代黄河三角洲广泛发育的塌陷凹坑、海底滑坡等地质灾害均与波浪作用下沉积物的液化有关^[38, 40-41],因此,系统阐明风暴波浪荷载作用下沉积物液化过程及其作用机制是探索黄河三角洲地质灾害成因机理的前提。

波浪荷载作用下沉积物内部孔隙水压力变化

是判断液化发生与扩展趋势的最直观证据。已有学者对波浪作用下饱和粉土孔隙水压力变化进行了研究^[42-46],但这类研究大多基于物理模型实验,真实海床波浪荷载作用下的孔隙水压力响应规律仍不清晰。受波浪循环荷载作用下粉土的微结构变化控制,黄河三角洲原状海床与重塑海床的孔压响应曲线模式不同,但2种模式均以孔压剧烈波动作为液化发生的判别标准^[47-48]。刘晓磊等^[49]在黄河三角洲潮滩现场对原状海床施加模拟波浪荷载,获得了粉质土海床的孔隙水压力变化曲线,发现其响应过程呈典型的五阶段特征,即逐渐累积(阶段I)、部分消散(阶段II)、快速累积(阶段III)、累积液化(阶段IV)和完全消散(阶段V);并基于实验过程中的沉积物强度测试结果,揭示了孔压响应五阶段与沉积物强度演变之间的关联特征(图3a)。在阶段I,波浪循环荷载持续作用下,孔隙间的海水受到压缩且来不及排出,导致海床内部超孔压累

积,有效应力降低,强度开始发生衰减。阶段II中一些细小颗粒在渗流力作用下脱离原始海床骨架,超孔压部分消散;同时较大颗粒形成了结构相对密实的新土壤骨架,海床强度有所恢复。在阶段III,黏粒重新附着于土壤骨架,降低了孔隙通道的渗透性,孔压累积速率再次超过消散速率;在这个阶段中,如有外力作用施加,相对脆弱的新土壤骨架会迅速破坏,细颗粒再次脱离骨架进入孔隙水,导致孔隙流体压力瞬时增大,强度因此快速衰减。在阶段IV,超孔压累积至临界值,土体骨架完全破坏,海床强度完全丧失并呈现液化状态。阶段V中,压力梯度驱使孔隙水携带细颗粒向上运移,粗颗粒向下压密,超孔隙水压力逐渐消散且沉积物强度开始恢复,这一过程与饱和海床的自重固结过程十分类似。基于动三轴实验结果的拟合归一化曲线,LIU等^[50]构建了黄河三角洲沉积物孔隙水压力累积模型,符合对数增长趋势,为黄河三角洲液化风险的判别提



(a) 沉积物液化过程中孔压响应及强度演变;(b) 液化对海床结构及强度改造的微观机制及宏观结果

图3 黄河三角洲沉积物液化及海床改造过程^[49, 53-54]Fig.3 Sediment liquefaction and seabed transformation in the Yellow River Delta^[49, 53-54]

供了理论基础。数值模拟与现场调查结果表明,黄河三角洲埕岛海域水深 10 m 以内的软弱土体可发生液化,在 50 年一遇波浪荷载作用下最大液化深度可达 5.2 m^[51-52]。

波浪荷载作用下的液化对黄河三角洲海床结构及强度有快速重构作用。黄河入海沉积物快速堆积形成均质海床,随后在波浪作用下逐渐演化成非均质层状海床,海床内形成硬壳层,表面常分布浮泥。针对这种地层演化现象,LIU 等^[53-54]提出了黄河三角洲海底地层层理的水动力次生改造成因,并揭示了液化在此过程中的关键作用。黄河三角洲初始均质海床在小振幅波浪作用下固结强化,随着波浪荷载持续作用及其强度的增加,表层沉积物液化并与下部原状海床之间形成弧形液化界面。当波浪荷载强度不足以支撑液化界面向下扩展时,液化沉积层中超孔隙水压力开始消散,细颗粒泥沙在渗流力的牵引下沿渗流通道及弧形液化面向上输送至表面形成细颗粒浮泥层,而下部粗粒沉积物再固结,最终形成下部强度大、表层强度小的非均质层化海床(图 3b)。

波致液化及其对海床的改造作用不仅影响海洋工程的选址与建设,更易对现有海洋工程如海上平台、海底管道等造成破坏。因此,进行孔隙水压长期原位观测,获取波浪作用下海底沉积物孔隙水压力动态响应,对液化过程机理的深入研究以及液化风险预测预警具有重要科学意义以及工程应用价值。近年来,孔隙压力监测探针已被广泛应用于科学研究与工程建设领域^[55],如中国海洋大学贾永刚教授团队自主研发压差式光纤布拉格光栅孔隙压力传感器与海底沉积物孔隙水(气)压力观测探杆已应用于现场,为相关理论研究提供了大量原始数据^[56-57]。

2.2 海床侵蚀冲刷

自 1976 年黄河改道清水沟以来,现代黄河三角洲整体呈现清水沟入海口岸线向外推进,北部岸线蚀退的趋势。这是由于黄河入海泥沙扩散范围有限,北部泥沙来源断绝,加上缺乏有效的护岸措施,在潮汐、波浪、风暴潮等海洋动力的影响下,近岸段浅海海床一直处于强烈冲刷侵蚀状态^[58-59],日均侵蚀速率达 56.6 cm/d。黄河三角洲侵蚀具有明显的季节特征,受风暴潮控制,不符合传统的“冬冲夏沉”规律^[58]。

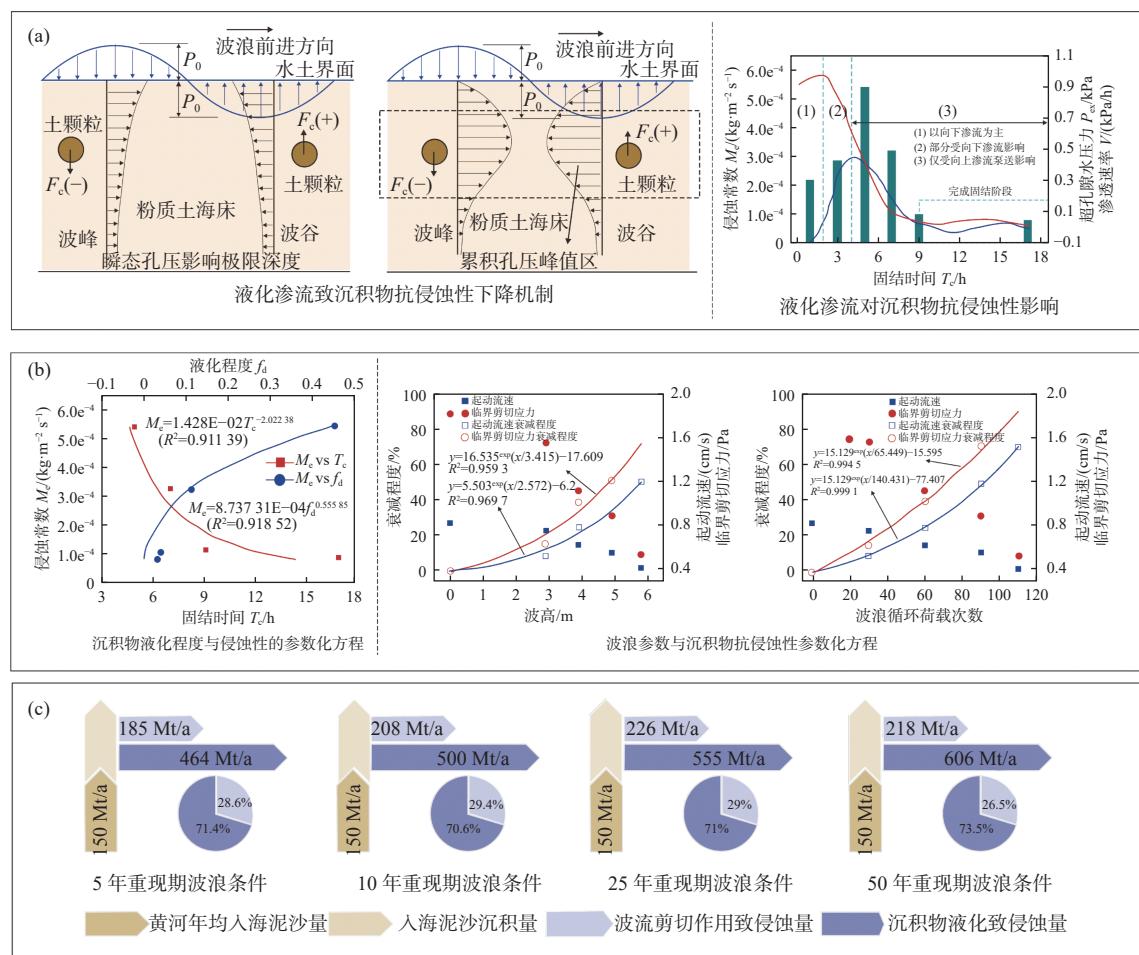
泥沙临界剪应力是描述泥沙侵蚀性的重要参

数之一,是抗剪强度、黏土含量、结构和其他岩土性质的复杂函数^[60]。理论上,当波流共同作用引起的剪切力超过泥沙临界剪切应力时,就会发生泥沙侵蚀^[61-62]。黄河入海沉积物快速堆积固结后形成的沉积海床抗剪强度可达数千帕^[38, 63],但在波浪荷载作用下,沉积物抗侵蚀性下降,此时海床临界剪应力在 0.22~1.82 Pa 不等,这种抗侵蚀性的非均匀特征促使了滩面凹坑的形成^[64-66]。在黄河三角洲,5 年重现期波浪要素下沉积物临界剪应力可衰减 12%~53%,50 年重现期波浪要素下可达到 72%^[67]。多项研究表明,这种沉积物抗侵蚀性的下降,与波浪循环荷载作用下导致的沉积物内部孔压累积、液化破坏乃至强度丧失有关^[68-69]。

如此显著的沉积物抗侵蚀性下降主要有以下 2 种机制:①沉积物内部瞬态以及累积孔压非均匀分布产生的垂向渗流,为表面沉积物提供了向上的托举力,降低了颗粒浮重,进而降低沉积物的抗侵蚀性^[70];②海床内部的细颗粒在渗流力的驱动下向上输送至海床表面,增大了表层沉积物的 Shields 参数,进一步降低其抗侵蚀性。随渗流速率增大,沉积物抗侵蚀性减小^[71](图 4a)。这种沉积物“泵送”效应会在海床表面产生“泥火山”,并最终形成细颗粒悬浮层,这层细颗粒悬浮层是沉积物内源侵蚀的主要产物,也是再悬浮通量增加的主要物质来源之一^[54, 72]。

为定量分析沉积物液化对侵蚀冲刷的贡献,ZHANG 等^[71]以侵蚀常数作为指标,建立了黄河三角洲沉积物液化程度与侵蚀性的参数化方程。随着液化程度的增大,侵蚀常数呈现出幂律增长;随着固结时间的增加,侵蚀常数呈现出幂律衰减。基于此研究成果,LIU 等^[73]建立了沉积物侵蚀性与波浪参数之间的关系(图 4b),对传统剪切侵蚀模型做出修正,提出了液化侵蚀计算模型。根据该模型预测黄河水下三角洲沉积物侵蚀量,在液化影响下,每年有 350~460 Mt 的沉积物侵蚀再悬浮并向海输运,占总侵蚀量的约 75%(图 4c),估算结果与前人地球物理探测和地质调查结果一致^[74-76]。

海床侵蚀冲刷是水动力作用下底层海水与浅层沉积物相互作用的结果,对海底边界层结构变化、海底地形地貌塑造有重要影响,进而对海洋工程的建设及维护形成严峻挑战。海床侵蚀冲刷的关键要素包括近底悬浮泥沙浓度以及海床界面动态变化,传统采样法、声学、光学仪器以及卫星遥感等被广泛应用于这方面的调查与监测。但由于黄河三



(a) 沉积物抗侵蝕性的液化控制机理; (b) 沉积物侵蝕性参数化方程; (c) 黄河三角洲沉积物侵蝕量预测

图4 黄河三角洲沉积物侵蝕机理及预测模型^[71,73]Fig.4 Mechanism and prediction model of sediment erosion in the Yellow River Delta^[71,73]

角洲粉质海床侵蚀冲刷受沉积物液化等动态响应过程控制,综合沉积物-水动力-气象的“海底-海水-天空”协同监测体系的研究与开发仍是技术发展的重要方向。

2.3 海床变形滑动

海床变形滑动是指海床在波浪、地震、水合物分解等内外动力作用下发生海床失稳,并沿着一定的滑动面发生滑动的现象。海床变形滑动能够在坡度<1°甚至趋于水平的条件下发生^[77-78]。PRIOR等^[22]在坡度平缓的(<1°)的黄河三角洲观测到风暴作用下被重新激活的海底浅层滑坡,并将其初步归因于波浪引起的海床液化。对于低角度条件下的海床变形滑动,目前主要认为其启动机制包括液化破坏和剪切破坏^[79-80]。单纯的剪切破坏更可能发生在黏粒含量较高的沉积物海床,而单纯的液化破坏主要针对无黏性沉积物的海床^[81-82]。黄河水下三角洲沉积物为粉质土,其性质介于砂质土

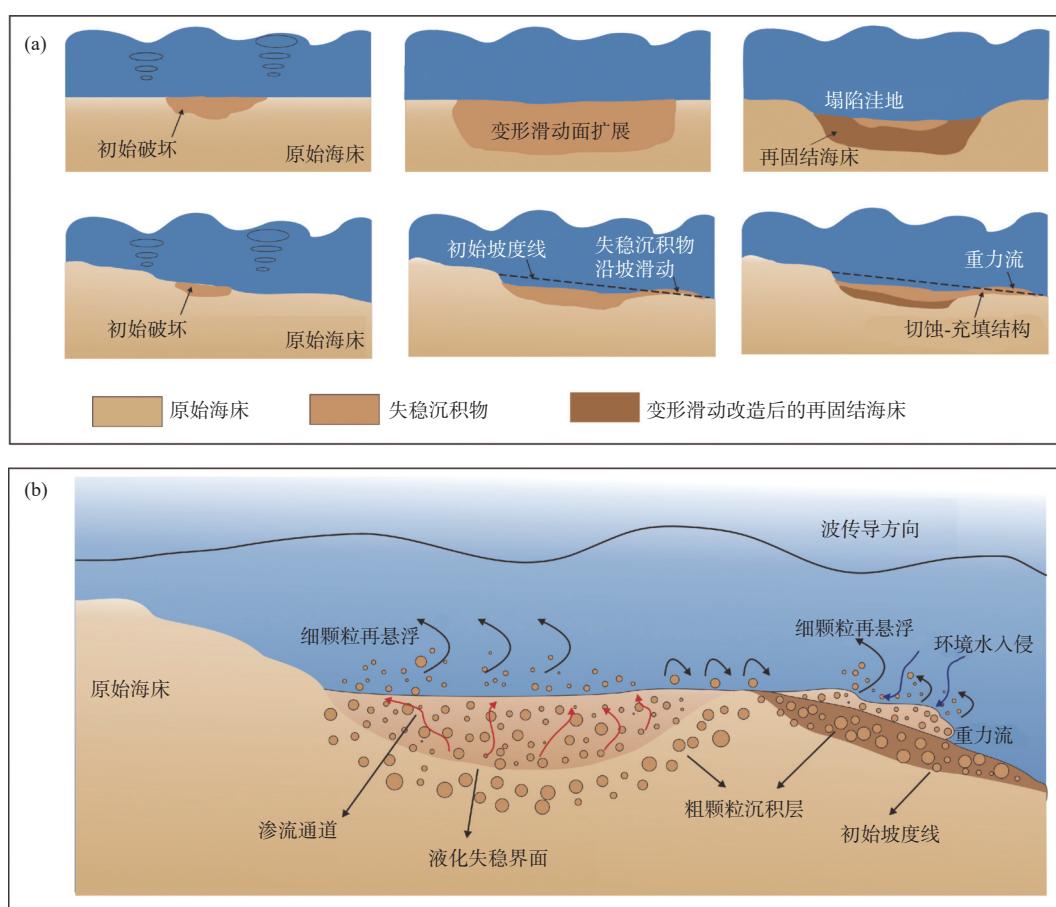
和黏土之间,波浪诱发海床变形滑动的机制要更复杂。

为探明黄河三角洲海床变形滑动机理,WANG等^[83]集成研发了一套海床变形滑动原位观测系统,布放于黄河三角洲并监测到了风暴事件下海床内部的变形滑动,指出黄河三角洲粉质土海床在波浪荷载的作用下发生变形滑动的启动机制需用液化-剪切的耦合作用进行解释。波浪作用下黄河三角洲沉积物内产生循环剪应变,颗粒重组加密,且孔隙水压力逐渐增长;沉积物内部的黏聚力以及内摩擦角持续减小,从而导致土体抗剪强度降低^[84-86]。当波浪在沉积物中所产生的剪应力超过抗剪强度,沉积物便发生破坏。此时沉积物颗粒孔隙增大,水被吸入孔隙内,孔隙水压力会在荷载作用下迅速增大,海床呈现液化失稳状态,并与下部海床形成弧形破坏界面。波浪作用下孔隙水压力的增长降低了沉积物抗剪强度,波致剪应力驱动沉积物液化失稳从而诱发海床变形滑动,此过程中的孔隙水压力

响应和沉积物强度演化过程与前文所述的五阶段特征吻合。

这种液化-剪切耦合作用下发生的海床变形滑动在不同条件下存在多种演化机制。在平坦的地方, 液化失稳的海床不能滑下斜坡, 只能在原地发生圆弧剪切滑动, 这也是海底滑坡的一种形式^[87-88]。当波浪在沉积物内部产生的剪应力不足以支撑弧形破坏面向下发展时, 失稳海床中孔隙水压力消散并在波浪作用下重新固结, 形成强度更大的致密海床, 最终形成塌陷凹坑。当坡度达到一定值时, 液

化失稳海床将在重力作用下沿坡向下运动, 形成沉积物重力流^[89], 沿途对海床产生侵蚀作用^[90], 切蚀形成冲沟, 随后又沉积固结, 形成“切蚀-充填”结构^[40](图 5a)。YU 等^[91]以黄河三角洲粉质土海床为研究对象, 对这种沉积物液化失稳诱发的重力流特性进行了探讨, 指出在黄河三角洲粉质土独特的液化渗流作用机制以及环境水夹带作用下, 细颗粒再悬浮进入水体, 沉积物重力流最终形成粗粒沉积海床(图 5b)。



(a) 海床变形滑动诱发地质灾害转化模式; (b) 重力流沉积模式

图 5 黄河三角洲海床变形滑动灾害演变模型^[83,91]

Fig.5 Evolution model of seabed deformation and sliding in the Yellow River Delta^[83,91]

海床变形滑动对海洋工程区域的工程地质稳定性有极大影响, 其衍生的塌陷凹坑、重力流等灾害, 是海洋工程的巨大潜在威胁。但由于海床三维变形监测技术及装备仍不多见, 海床变形滑动过程难以原位捕捉, 其灾害过程机制与预测模型的研究尚不完善。提高原位监测精度, 降低长期监测成本, 实现海床变形滑动过程的精准监测与预警仍是海洋地质工程新技术研究领域的重要方向。

3 对策与建议

黄河三角洲海洋环境复杂, 海底沉积物在波浪作用下呈现独特的工程地质性质, 极端风暴事件诱发的海洋工程地质问题或灾害多样化且区域化, 并在全球气候变化背景下呈现多发、加剧的趋势。如何采取有效的措施来应对极端风暴事件下的海洋

工程地质问题,对该区域的海洋工程建设与资源开发至关重要。综合目前对极端风暴诱灾机理的科学认知以及海洋资源绿色开发的工程需求,笔者认为可从以下4个方面进行考虑:

(1)加强极端风暴海洋动力与工程地质学科交叉,深化海洋地质灾害链生机制研究。进一步揭示极端风暴事件下不同类型沉积物动态响应机理及灾害链式演生机制,构建精细力学分析模型。充分考虑各类地质灾害发育尺度、持续时间及动力学特性方面的差异^[92-93],提出判识与评价预测方法。

(2)开展考虑极端风暴工程地质作用及灾害的海洋工程适应性优化设计。结合区域工程地质特点,从海洋工程结构设计、材料类型、施工方式、工程规模等方面提出优化设计方案,提高工程韧性与灾害适应性。如考虑黄河三角洲海底液化及侵蚀特性,形成海底管线“水下支撑+柔性覆盖”的防护新方法以及平台桩靴基础的全作业周期安全保障技术^[94-95],解决液化、侵蚀的不稳定海床上海洋工程地灾防控难题。

(3)建立多场、多维、多物理量的海洋地质灾害综合监测预警系统。获取重点区域海洋工程环境的复杂多维多场信息,提高海洋地质灾害关键物理量的可预见性,有效监测和预警海洋地质灾害事件的发生前兆。目前利用声学、光学、压力等测量原理进行海床侵蚀淤积监测、海床变形滑动监测及海底沉积物孔压动态响应监测技术已相对较为成熟,未来的监测预警技术发展方向在于提高监测精度和环境适应性,并研发基于新技术原理的海底多场信息同步监测,建立覆盖多灾种面向灾害链的综合协同监测预警体系。

(4)发展海洋工程地基与基础设施的应急处置技术。对失稳海床进行加固处理,主要是降低其渗透性以提高强度,常用的方法包括物理材料灌浆和化学材料灌浆^[96-97]。如在陆上工程地质灾害应急防治中较多采用的非水反应高聚物、聚氨酯^[98-99]等材料,具有高延展性及高强度,且环保价值高,可以很好地实现软弱土体的加固。未来可进一步研究其在海洋环境中的适用性与注浆方式、用料配比等相关工程技术,以期配合海洋地质灾害监测预警技术,实现临危工程地基基础的应急加固与修复。

4 总结与展望

在全球气候变化的大背景下,极端风暴事件诱

发的各种海洋地质灾害,给海洋工程建设及海洋资源开发带来极大危害,同时也为海洋工程地质研究带来新的挑战。黄河三角洲作为风暴事件频发、海床工程地质特性独特且地质灾害广泛发育的代表性区域,近年来受到越来越多的关注。国内外诸多学者围绕该区域的工程地质环境与灾害问题开展了大量研究,取得了如下创新成果:①黄河三角洲工程地质特性受波浪作用下粉质土沉积物动态响应控制,孔压响应的五阶段及其与强度演变之间的关联特征可解释非均质层化海床的成因机理;②波致沉积物孔隙水压力累积与液化是黄河水下三角洲海床侵蚀灾害的关键贡献要素,根据液化侵蚀模型,极端风暴作用下因液化造成的沉积物侵蚀量占侵蚀总量的70%以上;③黄河三角洲风暴事件下海床变形滑动是液化-剪切耦合作用的结果,平坦、低角度海床条件下变形滑动可渐进演变为塌陷凹坑、重力流等不同类型的海洋地质灾害。

以上成果从基础研究角度阐明了黄河三角洲地质灾害发育机理,丰富了海洋工程地质在极端风暴事件成灾方面的理论体系,对提升我国海洋工程地质评价与灾害防控水平具有重要的科学价值与现实意义。然而,要实现极端风暴工程地质作用下海洋地质灾害的防控仍十分困难,主要是由于极端风暴工程地质作用的复杂性、灾害孕育演化的耦合性、突发性以及灾害防控手段的不完善性。今后非常有必要开展多学科交叉及产学研联合攻关,解决以下关键科学与技术问题:①基于沉积物动力学的海洋地质灾害链生机制;②海洋工程灾害适应性优化设计;③海洋地质灾害多场多维信息的综合监测预警技术体系;④海洋工程地基与基础设施应急处置技术方法。这些问题的解决对进一步提升海洋工程地质灾害应对能力和指导海洋工程地质防灾减灾具有重要理论和现实意义。

参考文献:

- [1] 刘红军,李洪江.黄河三角洲海上风机新型吸力锚基础型式分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2014,44(7):71-76.
- [2] 刘昀,刘敏.风暴潮对黄河三角洲生态湿地的危害及应对措施[C]//2020(第八届)中国水生态大会论文集,2020:552-556.
- [3] 李东旭.基于层次分析法的我国大河三角洲脆弱性评价模型研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2012.
- [4] 孙永福,宋玉鹏,胡光海.埕岛油田灾害地质研究成果报告[R].青岛:自然资源部第一海洋研究所,2006.
- [5] 杜逢超.胜利油田作业三号修井平台倾覆地质原因分析[D].青岛:中国海洋大学,2013.

- [6] 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.
- [7] 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: 629-632.
- [8] MORTON R A. Subaerial storm deposits formed on barrier flats by wind-driven currents[J]. *Sedimentary Geology*, 1979, 24(1/2): 105-122.
- [9] PRIOR D B, COLEMAN J M. Active slides and flows in under-consolidated marine sediments on the slopes of the Mississippi Delta[C]//Saxov S, Nieuwenhuis J K . Marine slides and other mass movements. NATO Conference Series. Boston, MA: Springer, 1982; https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3362-3_3
- [10] MORTON R A, SALLINGER A H. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(3): 560-573.
- [11] WANG H J, YANG Z S, LI Y H et al. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) Mouth[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(6): 854-871.
- [12] WANG H J, WANG A M, BIN S, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17-32.
- [13] XIE W M, WANG X Y, GUO L C et al. Impacts of a storm on the erosion process of a tidal wetland in the Yellow River Delta[J]. *CATENA*, 2021, 205: 105461.
- [14] GAO W, LI G X, CAO L H et al. Formation mechanism of seafloor instability in the modern Yellow River Delta[C]//Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan: ISOPE, 2014: 289-29.
- [15] LIM D I, JUNG H S, CHOI J Y et al. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: Grain-size normalization and sediment provenance[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(1): 15-24.
- [16] 杨秀娟, 贾永刚, 刘红军, 等. 黄河三角洲沉积物超固结特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 29-34.
- [17] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [18] 许小峰, 顾建峰, 李永平. 海洋气象灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2016.
- [19] National Distaster Risk Reduction and Management Council. SitRep No. 108, Effect of Typhoon “Yolanda” (Haiyan) [R]. Philippines: NDRRMC. 2014
- [20] 王硕. 杭州湾沿岸平原新石器遗址海侵地层及极端风暴事件的数值模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [21] CHILLARIGE A R V, MORGENSTERN N R, ROBERTSON P K et al. Seabed instability due to flow liquefaction in the Fraser River delta[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(4): 520-533.
- [22] PRIOR D B, SUHAYDA J N, LU N Z et al. Storm wave reactivation of a submarine landslide[J]. *Nature (London)*, 1989, 341(6237): 47-50.
- [23] LIU X L, LU Y, YU H et al. In-Situ observation of storm-induced wave-supported fluid mud occurrence in the subaqueous Yellow River Delta[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(7): e2021JC018190.
- [24] ALBATAL A, WADMAN H, STARK N et al. Investigation of spatial and short-term temporal nearshore sandy sediment strength using a portable free fall penetrometer[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 143: 21-37.
- [25] MOLINA J M, ALFARO P, MORETTI M et al. Soft-sediment deformation structures induced by cyclic stress of storm waves in tempestites (Miocene, Guadalquivir Basin, Spain) [J]. *Terra nova (Oxford, England)*, 1998, 10(3): 145-150.
- [26] KREISA R D. Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of southwestern Virginia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51(3): 823-848.
- [27] BLUM M D, ROBERTS H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(7): 488-491.
- [28] ERICSON J, VOROSMARTY C, DINGMAN S et al. Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(1/2): 63-82.
- [29] 丁一汇, 杜祥琬. 气候变化对我国重大工程的影响与对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [30] WALSH J P, CORBETT R, MALLINSON D et al. Mississippi delta mudflow activity and 2005 Gulf hurricanes[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2006, 87(44): 477-478.
- [31] WANG D W, MITCHELL D A, TEAGUE W J et al. Extreme waves under Hurricane Ivan[J]. *Science*, 2005, 309(5736): 896.
- [32] BEVER A J, MCNINCH J E, HARRIS C K. Hydrodynamics and sediment-transport in the nearshore of Poverty Bay, New Zealand: observations of nearshore sediment segregation and oceanic storms[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(6): 507-526.
- [33] SHYNU R, RAO V P, SAMIKSHA S V et al. Suspended matter and fluid mud off Alleppey, southwest coast of India[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 185: 31-43.
- [34] TRAYKOVSKI P, GEYER W R, IRISH J D et al. The role of wave-induced density-driven fluid mud flows for cross-shelf transport on the Eel River continental shelf[J]. *Continental shelf research*, 2000, 20(16): 2113-2140.
- [35] GARRISON L E. The SEASWAB experiment[J]. *Marine Geotechnology*, 1977, 2(1/4): 117-122.
- [36] HERMAN P M J, MIDDELBURG J J, HEIP C H R. Benthic community structure and sediment processes on an intertidal flat: results from the ECOFLAT project[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(18): 2055-2071.
- [37] RIDENTE D, SPOSATO A, CHIOCCI F. Large-scale mapping of submarine geohazard-related features: example from the Italian

- an Project MAGIC (Marine Geohazards along the Italian Coasts) [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2010, 12: 5045.
- [38] ZHANG H, LIU X L, JIA Y G et al. Rapid consolidation characteristics of Yellow River-derived sediment: Geotechnical characterization and its implications for the deltaic geomorphic evolution[J]. *Engineering Geology*, 2020, 270: 105578.
- [39] LIU X L, ZHANG M S, ZHANG H et al. Physical and mechanical properties of loess discharged from the Yellow River into the Bohai Sea, China[J]. *Engineering Geology*, 2017, 227: 4-11.
- [40] 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.
- [41] XU G H, LIU Z Q, SUN Y F et al. Experimental characterization of storm liquefaction deposits sequences[J]. *Marine Geology*, 2016, 382: 191-199.
- [42] CHIEN L K, OH Y N, CHANG C H. Effects of fines content on liquefaction strength and dynamic settlement of reclaimed soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 254-265.
- [43] PRAKASH S, SANDOVAL J A. Liquefaction of low plasticity silts[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1992, 11(7): 373-379.
- [44] GUO T Q, PRAKASH. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125 (8): 706-710.
- [45] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1963-1966.
- [46] 曾长女, 刘汉龙, 陈育民. 细粒含量对粉土动孔压发展模式影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8): 2193-2198.
- [47] 常方强, 贾永刚, 郭秀军, 等. 黄河口粉土液化过程的现场振动试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 609-616.
- [48] 常方强, 贾永刚. 黄河口粉质土海床液化过程的现场试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(1): 121-126.
- [49] 刘晓磊, 贾永刚, 郑杰文. 波浪导致黄河口海床沉积物超孔压响应现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3055-3062.
- [50] LIU X L, ZHANG S Y, ZHENG J W et al. Experimental dynamic sediment behavior under storm waves with a 50 year recurrence interval in the Yellow River Delta[J]. *Anthropocene Coasts*, 2019, 2(1): 229-243.
- [51] DU X, SUN Y F, SONG Y P et al. Wave-induced liquefaction hazard assessment and liquefaction depth distribution: a case study in the Yellow River Estuary, China[C]/IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 569: 12011.
- [52] 常方强, 贾永刚. 波浪作用下埋岛海域粉质上海床的累积液化[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(4): 434-438.
- [53] LIU X L, JIA Y G, ZHENG J W et al. Experimental evidence of wave-induced inhomogeneity in the strength of silty seabed sediments: Yellow River Delta, China[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 59: 120-128.
- [54] LIU X L, JIA Y G, ZHENG J W et al. An experimental investigation of wave-induced sediment responses in a natural silty seabed: new insights into seabed stratification[J]. *Sedimentology*, 2017, 64(2): 508-529.
- [55] 贾永刚, 陈天, 李培英, 等. 海洋地质灾害原位监测技术研究进展[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 1-14.
- [56] LIU T, LI S P, KOU H L et al. Excess pore pressure observation in marine sediment based on fiber bragg grating pressure sensor[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2019, 37(7/8): 775-782.
- [57] LIU T, WEI G L, KOU H L et al. Pore pressure observation: pressure response of probe penetration and tides[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(7): 107-113.
- [58] JIA Y G, LIU X L, ZHANG S T et al. Wave-forced sediment erosion and resuspension in Yellow River Delta[M]. New York: Springer, 2020.
- [59] 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.
- [60] ZHENG J W, JIA Y G, LIU X L et al. Sediment characteristics as a function of variable hydrodynamics in a tidal flat of the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136(1): 011104.
- [61] TEISSON C, OCKENDEN M, LE HIR P et al. Cohesive sediment transport processes[J]. *Coastal Engineering*, 1993, 21(1): 129-162.
- [62] WANG Y H. The intertidal erosion rate of cohesive sediment: a case study from Long Island Sound[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(5/6): 891-896.
- [63] 单红仙, 张建民, 贾永刚, 等. 黄河口快速沉积海床土固结过程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006(8): 1676-1682.
- [64] 单红仙, 郑杰文, 贾永刚, 等. 黄河口粉质土沉积物侵蚀性动态变化试验研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2009, 31(4): 112-119.
- [65] 孟祥梅, 贾永刚, 杨忠年, 等. 现代黄河三角洲潮流沉积物抗侵蚀性原位试验[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(3): 39-45.
- [66] ZHENG J W, JIA Y G, LIU X L et al. Experimental study of the variation of sediment erodibility under wave-loading conditions[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 68: 14-26.
- [67] 郑杰文. 现代黄河三角洲沉积物波浪动力响应过程对其再悬浮控制作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [68] WOLANSKI E, SPAGNOL S. Dynamics of the turbidity maximum in King Sound, tropical Western Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(5/6): 877-890.
- [69] TZANG S, OU S, HSU T. Laboratory flume studies on monochromatic wave-fine sandy bed interactions Part 2. Sediment suspensions[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(3): 230-243.
- [70] ZHANG S T, JIA Y G, WANG Z H et al. Wave flume experiments on the contribution of seabed fluidization to sediment resuspension[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(3): 80-87.
- [71] ZHANG S T, JIA Y G, ZHANG Y Q, et al. Influence of seepage flows on the erodibility of fluidized silty sediments: parameterization and mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(5): 3307-3321.
- [72] 单红仙, 刘涛, 陈友媛, 等. 波浪载荷导致黄河口潮坪沉积物

- [垂向运移现场观测研究[J]. *工程地质学报*, 2008(2): 216-221.]
- [73] LIU X L, ZHANG H, ZHENG J W, et al. Critical role of wave-seabed interactions in the extensive erosion of Yellow River estuarine sediments[J]. *Marine Geology*, 2020, 426: 106208.
- [74] JIA Y G, ZHANG L P, ZHENG J W, et al. Effects of wave-induced seabed liquefaction on sediment re-suspension in the Yellow River Delta[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 89: 146-156.
- [75] LIU J P, MILLIMAN J D, GAO S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1/4): 45-67.
- [76] ZHANG S T, JIA Y G, ZHANG Y Q et al. In situ observations of wave pumping of sediments in the Yellow River Delta with a newly developed benthic chamber[J]. *Marine Geophysical Research*, 2018, 39(4): 463-474.
- [77] 朱超祁, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底滑坡分类及成因机制研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 153-163.
- [78] 贾永刚. 黄河口沉积物动力学与地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [79] RAHMAN M S. Instability and Movement of Oceanfloor Sediments: a review[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1994, 7: 589-599.
- [80] ZHANG M, HUANG Y, BAO Y J. The mechanism of shallow submarine landslides triggered by storm surge[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(2): 1373-1383.
- [81] RAHMAN M S. Wave-induced instability of seabed: Mechanism and conditions[J]. *Marine Geotechnology*, 1991, 10(3/4): 277-299.
- [82] JENG D S. Mechanism of the wave-induced seabed instability in the vicinity of a breakwater: a review[J]. *Ocean engineering*, 2001, 28(5): 537-570.
- [83] 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.
- [84] DIMITROVA R S, YANFUL E K. Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy[J]. *Engineering Geology*, 2012, 125: 11-25.
- [85] 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.
- [86] 王虎, 刘红军, 张民生. 低应力条件下海洋粉土的不排水强度特性及其在海底浅层滑坡分析中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(4): 849-856.
- [87] XU G H, SUN Y F, WANG X et al. Wave-induced shallow slides and their features on the subaqueous Yellow River delta[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(12): 1406-1417.
- [88] COLEMAN J M, GARRISON L E. Geological aspects of marine slope stability, northwestern Gulf of Mexico[J]. *Marine Geotechnology*, 1977, 2(1/4): 9-44.
- [89] PUIG P, OGSTON A S, MULLENBACH B L et al. Storm-induced sediment gravity flows at the head of the Eel submarine canyon, northern California margin[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109: C03019.
- [90] GEE M J R, GAWTHORPE R L, FRIEDMANN J S. Giant striations at the base of a submarine landslide[J]. *Marine Geology*, 2005, 214(1/3): 287-294.
- [91] YU H Y, LIU X L, LU Y et al. Characteristics of the sediment gravity flow triggered by wave-induced liquefaction on a sloping silty seabed: an experimental investigation[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 909605.
- [92] ERCILLA G, CASAS D, ALONSO B et al. Offshore geological hazards: charting the course of progress and future directions[J]. *Oceans*, 2021, 2(2): 393-428.
- [93] HEIDRUN K, CHIOCCI F L, Christian Berndt, et al. Marine geohazards: Safeguarding society and the blue economy from a hidden threat[R]. Belgium: European Marine Board Publishing, 2021.
- [94] 荆少东, 梁晓勇, 徐帅陵, 等. 垦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.
- [95] 张宗峰, 丁红岩, 刘锦昆. 混凝土联锁排应用于海底管线冲刷防护试验研究[J]. *海洋工程*, 2015, 33(2): 77-83.
- [96] KAZEMIAN S, HUAT B, PRASAD A et al. A review of stabilization of soft soils by injection of chemical grouting[J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2010, 4: 5862-5868.
- [97] PAKIR F, MARTO A, MOHD YUNUS N Z et al. Effect of sodium silicate as liquid based stabilizer on shear strength of marine clay[J]. *Jurnal Teknologi*, 2015, 76: 45-50.
- [98] WANG C J, GUO C C, DU X M et al. Reinforcement of silty soil with permeable polyurethane by penetration injection[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 310: 124829.
- [99] FANG H Y, ZHAO P, ZHANG C et al. A cleaner polyurethane elastomer grouting material with high hardening strain for the fundamental rehabilitation: the comprehensive mechanical properties study[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 125951.

Research progress and countermeasures on geological hazards induced by extreme storms in the Yellow River Delta

LIU Xiaolei^{1,2}, ZHANG Shuyu¹, ZHENG Jiewen², JIA Yonggang^{1,2}

(1 Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Under the influence of global climate change, the frequency and harmfulness level of extreme storm events in estuarine deltaic and coastal areas are increasing. In storm events, seabed sediments produce dynamic responses including pressure consolidation, liquefaction, and fluidization under wave stress, resulting in a series of impact on engineering geological properties, such as particle size composition, mechanical strength, and hierarchical structure. These dynamic responses induce marine geological disasters such as erosion and landslide, which seriously affect the stability of marine engineering construction and the safety of ecological environment. The special geographical location, climatic features, and sedimentary characteristics of the Yellow River Delta make it one of the areas where marine geological disasters happen most frequently in China. Thus it is an ideal background and unique testing ground for the study of geological disaster mechanism and its prevention and control under extreme storm events. In recent years, in the field of marine engineering geology, many studies have been carried out on the interaction between storm hydrodynamic force and seabed sediment, and on the mechanism of disaster. In particular, important innovative achievements have been made in characterization and mechanism of disaster development, quantitative evaluation on seabed liquefaction, erosion, deformation and sliding induced by extreme storms. It provides theoretical guidance for marine engineering geological evaluation and disaster prevention and/or mitigation under the global climate background. In the future, we should further strengthen the interdisciplinary and industry-university-institute cooperation, strive for breakthroughs in the chain-generation mechanism of marine geological disaster, comprehensive disaster monitoring and early warning technology, and marine engineering disaster prevention and control technology, and improve persistently China's ability of marine geological disaster response.

Key words: extreme storm events; marine engineering geology; disaster prevention and control; Yellow River Delta; liquefaction; erosion; deformation and sliding