

海洋地质灾害原位监测技术研究进展

贾永刚, 陈 天, 李培英, 李正辉, 胡 聪, 刘晓磊, 单红仙

Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards

JIA Yonggang, CHEN Tian, LI Peiying, LI Zhenghui, HU Cong, LIU Xiaolei, and SHAN Hongxian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-01>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

堰塞坝堆积演化过程及开发利用研究进展

Research progress on the evolution and utilization of the barrier dam accumulations

王环玲, 屈晓, 徐卫亚, 王如宾, 刘士奇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 84-94

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

时序数据库技术在贵州地质灾害监测设备运行维护调度平台中的应用

Application of time series database in Guizhou Province geological disaster monitoring equipment operation maintenance scheduling platform

张家勇, 刘黔云, 邓卫卫, 龚伟, 张楠, 李程, 李潇, 胡屿 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 117-122

滑坡变形高精度智能化监测预警技术研究与实践

Research and practice of high-precision intelligent monitoring and early warning technology for landslide deformation

李星宇 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 21-29

2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况

Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018

程素珍, 路璐, 翟淑花, 张长敏, 郝春燕, 任凯珍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 38-46

自贡市地质灾害专群结合监测预警模式升级与实践

Upgrading and practice of early warning mode of geological disaster special group combination in Zigong City

杨江涛, 李波, 李伯宣, 罗兰 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 130-134



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-01

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.

JIA Yonggang, CHEN Tian, LI Peiying, *et al.* Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 1-14.

海洋地质灾害原位监测技术研究进展

贾永刚^{1,2}, 陈天^{1,3}, 李培英^{1,2,4}, 李正辉¹, 胡聪¹, 刘晓磊^{1,2}, 单红仙^{1,2}

- (1. 山东省海洋环境地质工程重点实验室(中国海洋大学), 山东 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061;
3. 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061;
4. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:海洋地质灾害对沿海城市人口和海洋经济发展构成重大威胁。海岸港口航道、海底管线光缆、海洋平台基础等工程建设规模的扩大,意味着海洋地质灾害风险进一步提高。海底火山爆发、海啸等大规模但不常见的灾害事件吸引了大多数公众关注和媒体报道,并促使政策调整以防范化解灾害风险。然而,海底气体喷溢、海底滑坡等小规模但更频繁的原生灾害事件,会产生严重的局部影响,并且极易转变为灾害链导致灾害事件恶化,但社会公众在很大程度上没有足够重视此类灾害风险。迄今为止,大多数海洋地质灾害的特征都可以被探测识别,但依靠现有的技术却很难有效监测。海洋地质灾害的原位监测需要更加严苛的技术能力,特别是突发性海洋地质灾害的原位监测难度较大。综述首先介绍了海洋地质灾害原位监测的意义以及技术发展的挑战,然后对海洋地质灾害的监测要素进行总结探讨,重点阐述海洋地质灾害监测技术装备的应用情况,并对海洋地质灾害的风险评估和灾害预警进行分析探讨,最后对海洋地质灾害原位监测技术及其应用作了总结和展望。综述旨在分析总结海洋地质灾害类型的监测技术装备及其应用中涉及的一些核心技术和急需解决的关键问题,以期为该项技术发展和应用提供借鉴。

关键词:海洋地质灾害;原位长期监测;监测要素;监测装备;风险评估;海洋工程地质;研究进展

中图分类号: P736 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)03-0001-14

Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards

JIA Yonggang^{1,2}, CHEN Tian^{1,3}, LI Peiying^{1,2,4}, LI Zhenghui¹, HU Cong¹, LIU Xiaolei^{1,2}, SHAN Hongxian^{1,2}

- (1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering (Ocean University of China), Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China; 3. Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China; 4. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: Marine geohazards pose a major threat to the population and marine economic development of coastal cities. The expansion of construction of coastal port channels, submarine pipelines, optical cables, and marine platform foundations means

收稿日期: 2022-02-22; 修订日期: 2022-05-01

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877223); 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金(2021COSIMQ007); 国家自然科学基金山东省联合基金项目(U190620170); 中央高校基本科研业务费专项(202161039)

第一作者: 贾永刚(1965-),男,吉林伊通人,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋地质灾害监测预警、海洋工程地质等方面的研究工作。E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

that the risk of marine geohazards has further increased. Large-scale but uncommon disaster events such as submarine volcanic eruptions and tsunamis have attracted most of the public attention and media coverage and prompted policy adjustments to prevent and resolve disaster risks. However, small-scale but more frequent primary hazard events such as submarine gas leakages and submarine landslides, which can have severe localized impacts and are highly susceptible to transformation into hazard chains leading to worsening hazard events, are largely underappreciated by the public. To date, most features of marine geohazards can be detected and identified, but it is difficult to monitor effectively with existing technologies. In-situ monitoring of marine geohazards requires more demanding technical capabilities, especially in-situ monitoring of sudden-onset marine geohazards. The review first introduces the significance of in-situ monitoring of marine geohazards and the challenges of technology development, then summarizes and discusses the monitoring elements of marine geohazards, focuses on the application of marine geohazards monitoring technology and equipment, and analyzes and discusses the risk assessment and early warning of marine geohazards. Finally, summarizes outlooks on the marine geohazards in-situ monitoring technology and its application. The review aims to analyze and summarize some core technologies and key issues that need to be solved urgently in the monitoring technology and equipment of marine geohazards and their applications, in order to provide reference for the development and application of this technology.

Keywords: marine geohazard; in-situ long-term monitoring; monitoring elements; monitoring equipment; risk assessment; marine engineering geology; research progress

0 引言

海洋蕴含着丰富的海洋矿物资源、海水化学资源和海洋生物资源等,发展潜力巨大^[1]。但是,由于沿海城市建设和海洋资源开发的不断扩大,导致海洋地质灾害的暴露度和脆弱性日益增加,对人类生命安全和海洋生态环境构成重大风险^[2-3]。

在过去 50 年中,海洋地质灾害导致了一系列的破坏性事件,如:1977 年,意大利最大的海港 Gioia Tauro 港口发生的海底滑坡事件,滑坡体积约为 $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,引起了 5 m 高的海啸,切断了海底电缆,破坏了港口基础设施^[4];1979 年,法国 Nice 海底滑坡事件造成附近机场巨大破坏,7 名工人遇难,海水渗入内陆约 150 m^3 ^[5-6];1994 年,阿拉斯加 Skagway 发生的大型海底滑坡,滑坡体积约为 $7.6 \times 10^5 \text{ m}^3$,摧毁了 275 m 的码头,码头滑移至水下 21 m^[7],这些突发性海洋地质灾害事件导致严重的次生灾害和巨大的经济损失。然而,大多数人没有意识到再次发生这类破坏性事件的威胁。

在过去 20 年中,海洋地质灾害引起了更多更广泛的关注,人们对此类大规模灾害的危险认识大大提高:2004 年印度尼西亚苏门答腊岛附近海域发生里氏 9 级地震并引发海啸,遇难者总人数超 29.2 万人^[8-9];2011 年日本东北部太平洋海域的强烈地震引发的巨大海啸造成了毁灭性破坏,并导致福岛第一核电站核泄漏,造成重大的直接和间接经济损失^[10-12];2022 年南太平洋岛国汤加海底火山爆发引发海啸淹没了海岸城市,导致船只受损、供水污染以及通讯中断^[13]。最近对灾

害流行病学研究中心(CRED)的灾害损失数据库和 1998—2017 年间联合国数据的分析表明,自然灾害造成的人类死亡大多是由于突发性、高风险的地质灾害事件^[14]。在过去 20 年中,地质灾害事件仅占总灾害的 9%,但占有与灾害有关死亡人数的 59%,使其成为迄今为止最致命的灾难类型^[15]。

海洋地质灾害的研究侧重于识别过去的灾害事件并评估其发生频率,以及监测当前可能演变成灾害的活跃海底地质过程^[16]。从识别和量化过去的灾害事件,到监测和预警当前活跃的灾害过程,这一进步改变了我们对海洋地质灾害的认知水平,但也面临诸多挑战。海洋地质灾害的识别很大程度上取决于海底地形地貌和地层结构探测成像技术的进步^[17]。通过高分辨率地震反射剖面(使用深拖仪器可达分米量级分辨率)、高分辨率多波束测深(使用自主水下航行器 AUV 可达厘米量级分辨率)来重建灾害事件^[18-21],结合重力取样器、活塞取样器、钻孔取芯器等获得的沉积物样品分析,使用放射性碳测年、光释光测年、热释光测年技术以高精度测定灾害事件^[22-25],使用古地磁地层学、氧同位素地层学、生物地层学的方法以低精度测定灾害事件^[26-28]。但是,海洋地质灾害的原位监测需要更加严苛的技术能力,特别是突发性海洋地质灾害的原位监测难度较大。

迄今为止,海底发生的大多数地质灾害特征都可以被探测识别,但很难有效监测。海洋地质灾害的监测需要克服深海高压、复杂多变的环境限制,面临着高测量精度、耐压耐腐蚀、抗电磁干扰、长期电能供应等一系

列挑战^[17]。

文章首先总结了海洋地质灾害的类型特征及监测要素,重点阐述不同海洋地质灾害的监测技术装备应用情况,然后探讨海洋地质灾害的监测预警网络建设,最后展望了海洋地质灾害监测技术装备的发展方向。旨在分析总结海洋地质灾害的监测技术装备及其应用中涉及的一些核心技术和亟需解决的关键问题,以期为技术发展和应用提供借鉴。

1 海洋地质灾害的类型及其特征

海洋地质灾害是由海底地质过程产生的一类灾害,

发育尺度有大有小,发生时间有长有短,形成过程有缓有急,极易诱发一连串次生灾害,形成灾害链^[16-17]。海底地形地貌及典型海洋地质灾害发育如图1所示。由于不同海域存在不同的地质背景及环境条件,海洋地质灾害的位置、成因及危害等要素具有复杂性,因此海洋地质灾害的类型划分方法多样,迄今尚无统一的国际方案^[29]。考虑到海洋地质灾害原位监测技术的特殊性,以及从单一要素来划分灾害类型的局限性,综合灾害演化特征、致灾因素、成灾范围、危害程度等多要素,将海洋地质灾害划分为突发性海洋地质灾害和缓发性海洋地质灾害两类。

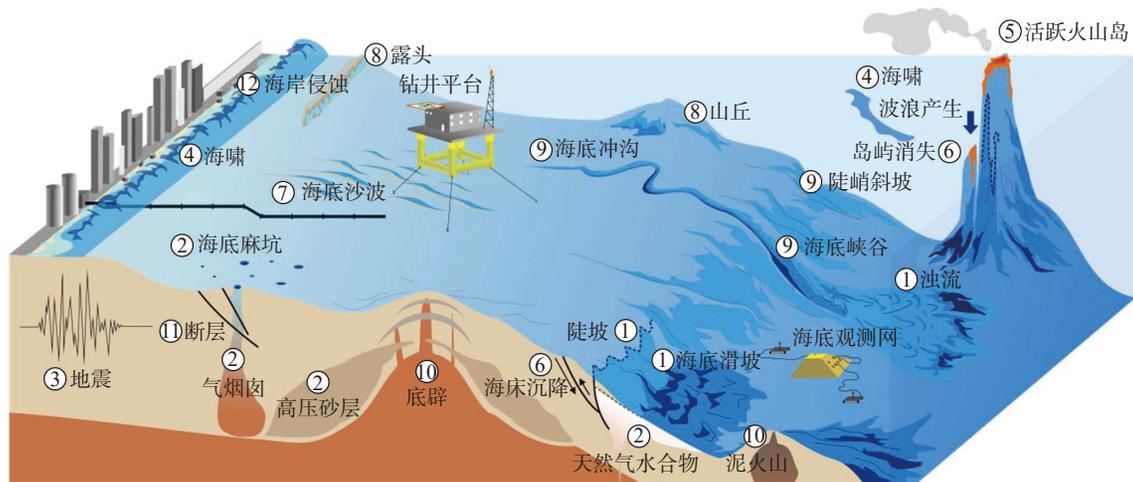


图1 海底地形地貌及典型海洋地质灾害^[2]

Fig. 1 Submarine topography and typical marine geohazards

突发性海洋地质灾害发生频率较低,当致灾因素变化超过一定强度时,就会在几天、几小时甚至几分钟、几秒钟的时间尺度内表现出灾害行为,灾害效应几乎是“突然出现的”^[17,30]。这类灾害有:海底滑坡、浊流、浅层气、活动断层、地震、海啸等。突发性海洋地质灾害具有发生的突然性和周期短、危害大等特征,因此极难进行监测预警。缓发性海洋地质灾害通常是致灾因素在长发展周期内,灾害效应逐渐累积显现成灾的,这类灾害通常需要几年或更长的时间尺度^[31-33]。缓发性海洋地质灾害的主要类型有侵蚀淤积、海床变形沉降、活动沙波、海水入侵等。缓发性海洋地质灾害强调灾害发生的渐变性,具有周期长的特征,因此相对容易进行监测预警。

海洋地质灾害事件极易触发导致一系列破坏性灾害现象发生,表现出链式结构和放大效应。海洋地质灾害的链式结构,即灾害事件呈现在成因上相互关联,时间上前后相继,空间上彼此相依的连锁反

应^[2,17,34-35];海洋地质灾害的放大效应,即灾害链呈现在规模上逐级扩大,范围上辐射扩散,影响上累加倍增的放大趋势^[17,35]。海洋地质灾害的一个典型链式结构是地震-海底滑坡-海啸/浊流,海啸会危及海岸城市,而浊流会破坏海底管线。越来越多的证据表明,许多与地震相关的海啸不是由地震本身引起的,而是由地震导致的海底滑坡引发的^[36-37]。海洋地质灾害的链式结构可以是自然因素发生的,也可以是人类活动加剧的,例如2011年日本福岛核电站核泄漏事件(地震-海啸-核泄漏)^[17]。日本福岛核电站受到3·11日本地震(里氏9.0级)产生的14~15 m高海啸的袭击,海水淹没了反应堆,导致应急发电机故障^[38]。最终引发核熔毁、氢气爆炸、放射性污染,以及将受放射性污染的水释放到太平洋等一连串灾害事件^[39]。海洋地质灾害的放大效应发生在一系列不同的灾害连锁反应下,其中初始原生灾害的触发需要多个致灾因素的相互作用,而形成的次生灾害——特别是末端

次生灾害——往往会跨越海岸带边界,入侵人类的生存环境,引发更大的危机^[40]。随着越来越多的海底光缆、海底管线、深海网箱等海底工程设施的使用,海洋地质灾害链导致的灾害风险呈指数增长^[41]。如果将灾害放大效应考虑在内,那么即使是小规模的原生海洋地质灾害事件,也可能产生灾难性的后果,可能会导致灾害的风险水平增加一个数量级^[42]。例如:1908年,意大利墨西拿地震(里氏7.5级)发生10小时后,连接马耳他和希腊的1条海底电缆在震中以南190公里处被浊流破坏^[43];2003年,海底地震(里氏6.8级)引发的巨大浊流,导致阿尔及利亚大陆边缘绵延150公里长的29条海底电缆断裂^[44]。与单一的海洋地质灾害事件相比,灾害链发生过程更为复杂,通常造成更大的影响和后果,导致人员伤亡和灾害损失的成倍增加^[17,41-42]。

2 海洋地质灾害原位监测的主要要素

海洋地质灾害的原位监测主要包括致灾因素、内部应力、外部变形以及灾前征兆等4方面要素。海洋地质灾害是海底岩土体在致灾因素作用下,所表现出的一种变形破坏过程以及引发的一系列灾害现象^[2,45]。

其中,致灾因素既包括由地震作用、构造运动、岩浆作用等地球内部能量引发的内动力地质作用,还包括由流体动力作用、大气动力作用、沉积动力作用等发生在地球圈表层的外动力地质作用。致灾因素的监测应突出针对性,不同海域的监测手段应当依据地层构造、地质环境等有所区别,应重点监测影响海底稳定性的关键指标^[46]。

在灾害演化过程中,力的变化是驱使变形破坏及灾害效应产生的内在原因和根本动力,包括海底岩土体受到的重力,还包括由内、外动力地质作用对岩土体产生的正应力、剪应力、孔隙压力等,以及岩土体与海洋工程结构物之间的相互作用力,这些力的变化可通过一些应力、应变传感器进行监测^[32,45]。在整个灾害过程中,伴随着力的变化,将会表现出一系列的外部宏观变形破坏现象,这些外部的变形破坏可通过光纤传感技术等一些技术手段监测海底表面及海床内部的相对和绝对位移进行量化^[44]。此外,在灾害发生前可能会出现一些灾前征兆,如孔隙压力不断累积、外部变形急剧增加等,灾前征兆往往被视作预报预警和灾害防控的重要依据^[46-49]。常用海洋地质灾害的原位监测要素及监测技术见表1。

表1 海洋地质灾害的原位监测要素及监测技术

Table 1 Main in-situ monitoring elements and monitoring technology of marine geohazard

监测要素	监测内容	监测技术	监测指标
致灾因素	内动力地质作用(地震作用、构造运动、岩浆作用等)	海底地震仪OBS、海底热流探针等	记录天然地震事件和人工地震勘探、温度梯度和热导系数等
	外动力地质作用(流体动力作用、大气动力作用、沉积动力作用等)	声学多普勒流速仪、波浪仪、大气遥感探测、气象卫星探测等	流速、流向、波浪、潮汐、大气风暴等
内部应力	孔隙压力、温度	孔隙压力探针、温度传感器等	孔隙压力、温度
	垂向变形	压力传感器、加速度传感器、倾角计等	变形量、变形速率、加速度、倾角等
外部变形	侧向变形	压力传感器、加速度传感器、倾角计、声学应答器、光纤应变传感器等	变形量、变形速率、加速度、倾角等
	地形地貌	数字图像声呐、电阻率探针、自然电位探针、压力传感器等	海床侵蚀淤积量、地形地貌变化等
灾前征兆	内部应力、外部变形等灾前征兆信息	内部应力及外部变形等要素的相关监测技术	孔隙压力累积、外部变形加速等灾前异常征兆信息

3 海洋地质灾害的监测技术装备

海洋地质灾害的原位监测是认识灾害触发机制及演变过程的最直接渠道,创新的原位监测技术装备是满足这一需求的唯一途径^[17,50]。本章重点阐述海洋地质灾害监测装备的核心技术及其应用情况,侧重于涉及海底岩土体地质变动的原生海洋地质灾害的原位监测技术,不涉及海岸侵蚀、海水入侵等缓发性海岸地质灾害监测,以及与风暴潮、海啸等大气扰动和水体扰动相关

的灾害监测。

3.1 海底地震监测技术装备

海底地震容易诱发海啸、海底滑坡等突发性灾害,是重要的海洋地质灾害致灾因素,海底地震灾害的监测技术更加注重准确性与时效性^[51]。海底地震仪(Ocean Bottom Seismograph, OBS)是部署在海底,使用水听器和地震检波器来监测自然或人为地震事件的监测仪器^[52-53]。OBS在国内外应用十分广泛,监测数据可以获取深部板块速度结构,构建震源空间分布模型,探测

浅层低频地震震颤以及确定地震群分布等^[54-55]。德国 GeoPro 公司研制的 OBS 具有很高的市场占有率,最大工作水深 6 700 m,能够部署在大多数海洋区域,可以在海底连续监测 6 个月(图 2)^[56-58]。OBS 还被开发用于海啸实时监测预警^[59],作为海底观测网的一部分,不断将监测数据实时传输到陆地,例如日本高密度地震-海啸实时观测网(DONET)和日本海沟海底地震海啸观测网(S-net)^[60-62]。国内中科院地质与地球物理研究所自 2003 年开始 OBS 相关技术的研究工作,所研制的线缆式海底地震观测台(网)实现了长期连续观测地球内部过程,具备较好的应用效果,成为海洋监测预警研究的创新型研究平台,对海洋地震的监测预警具有重大意义^[55]。此外,中科院半导体研究所研制的以光纤作为地震检波器敏感元件的光纤海底地震仪,具有良好的频响和环境适应性^[63]。

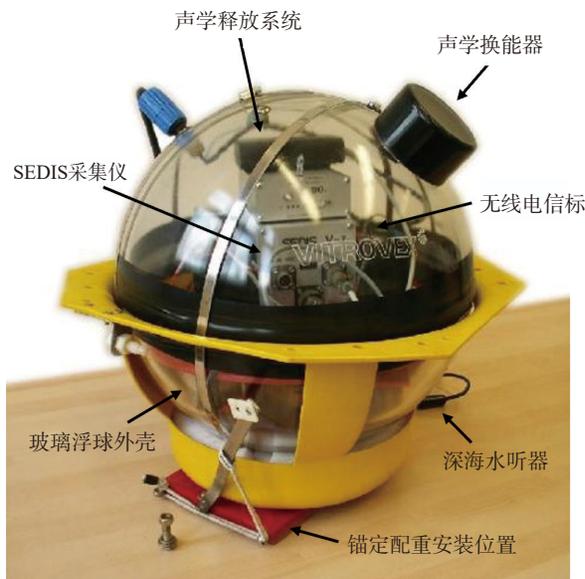


图 2 德国 GeoPro 海底地震仪 OBS

Fig. 2 Germany GeoPro ocean bottom seismograph (OBS)

最近,光纤传感技术被应用于海底地震的监测,以提供更高的时间和空间分辨率。这一突破来自于检测到地震对海底通信光缆中激光稳定性的影响,将海底通信光缆转换为致密的海底地震监测阵列^[64]。分布式声学传感技术(Distributed Acoustic Sensing, DAS)利用由光纤纤维的不规则光散射特性,实现高空间分辨率的高频应变测量,相当于每隔几米放置一个 OBS^[65]。该技术已被证实可用于监测 100 km 外海底的区域微地震活动(M_w 1.9),其监测效果可与海岸地震台站相媲美^[66]。未来,科学监测和可靠通讯计划(Science Monitoring and Reliable Telecommunications, SMART)将整合海底基础

设施,创建一个全球海洋观测网络,使海底光缆能够感知环境,可能会将地震的探测时间缩短约 20 %^[67]。

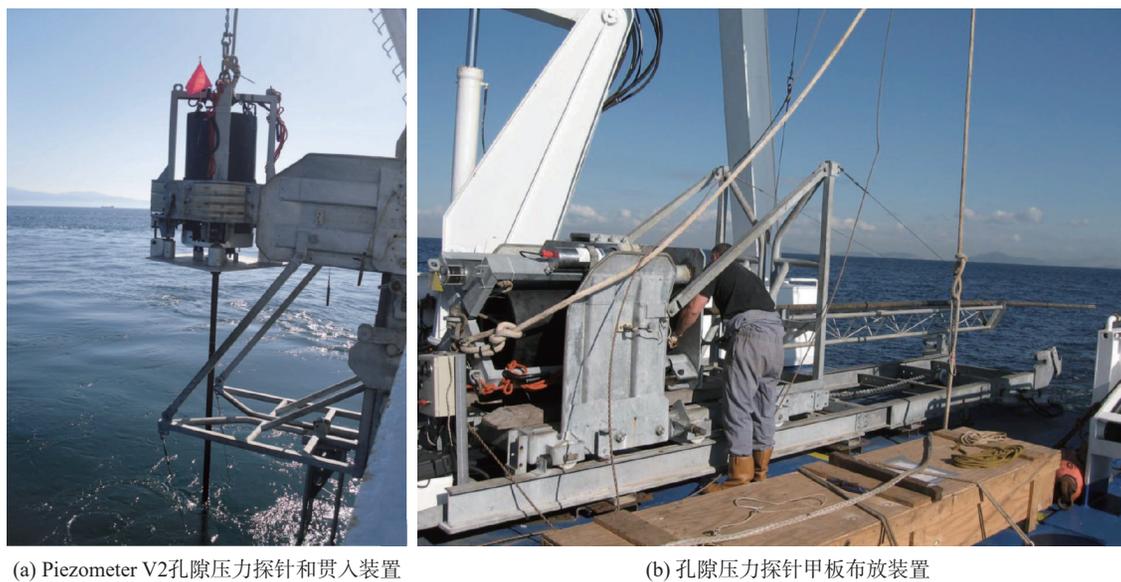
3.2 海底孔隙压力监测技术装备

海底孔隙压力与海底岩土体的地质变动密切相关,是海底地质灾害发育过程的关键参量,海底孔隙压力监测可以判断海床稳定状态,对于灾害预警具有重要意义^[47]。孔隙压力监测探针(Piezometer probes)是通过孔隙压力传感器和温度传感器记录海底沉积物内部孔隙压力和温度变化的监测装备^[68]。海底孔隙压力可以表征海底岩土体外部应力和内部应变,同时反映孔隙流体的运动;海底的温度变化是表征热量输运和孔隙流体运动的重要指标^[17]。孔隙压力监测探针经过近 50 年的发展,已被广泛用于海底滑坡、海底麻坑、海底浅层气逸散、天然气水合物分解等海底地质变动的研究^[69-73]。在科学研究领域,法国海洋开发研究院(French Research Institute for Exploitation of the Sea, IFREMER)设计研发的 Piezometer 系列孔隙压力监测探针应用最为广泛(图 3)^[69-72];在海洋工程领域,挪威岩土工程研究所(Norwegian Geotechnical Institute, NGI)在 Troll A 深海天然气平台、Ormen Lange 海洋油气田等工程监测中积累了丰富的经验^[68]。

目前,海底孔隙压力监测探针面临大测量深度、长监测周期的挑战。法国 IFREMER 将 Penfeld 静力触探仪升级改造为孔隙压力监测探针的贯入装置,可以实现海底面以下 50 m 深度的原位监测^[69]。法国 IFREMER 研发的 TIPS(温度、倾角和孔隙压力传感器)精度高、功耗低,可以满足 1~2 a 的长期监测需求,最大工作水深 6 000 m^[17]。国内,中国海洋大学研发的复杂深海工程地质原位长期观测设备(In-situ Surveying Equipment of Engineering Geology in Complex Deep Sea, SEEGeo),能够同步监测海底面以下 3 m 深度的孔隙压力及温度变化,以及沉积物的电阻率和声学特性,能够在水深 1 500 m 的海底实现连续 12 个月的原位长期监测(图 4)^[73-74]。陈天等^[68]对过去几十年中的孔隙压力监测技术装备设计进行了综述。未来,海底孔隙压力监测技术将进一步提高贯入装置的海底贯入能力,实现更大深度的原位监测,并且与海底观测网的有缆观测系统结合,实现更长的监测周期和更广泛的监测范围。

3.3 海底变形滑动监测技术装备

海底变形滑动监测可以获取海底岩土体的变形速度、滑动模式、滑移距离等重要参量,是反映岩土体地质变动的最直观指标,有助于深入分析灾害阶段特

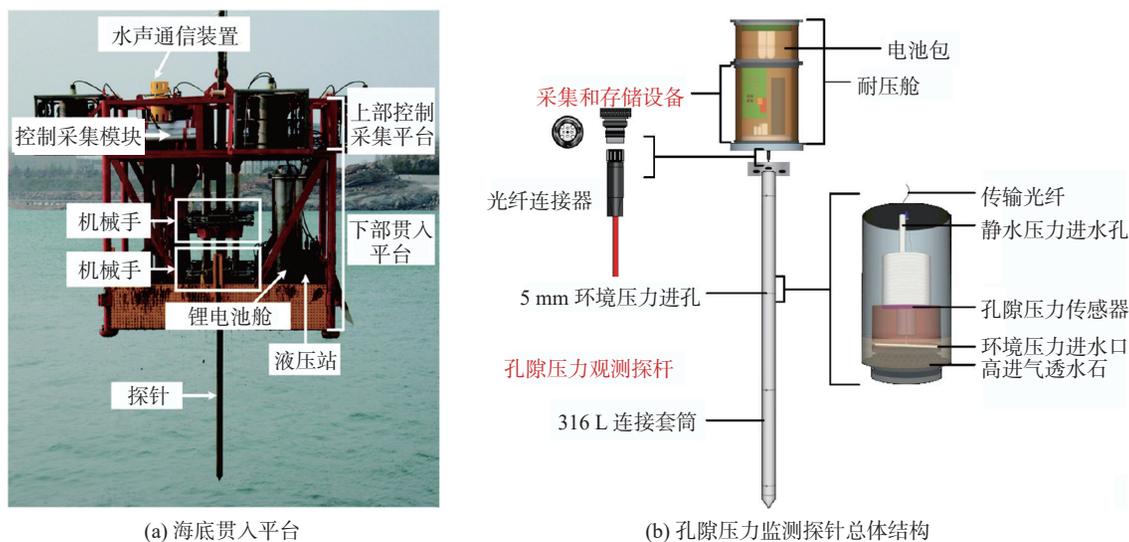


(a) Piezometer V2孔隙压力探针和贯入装置

(b) 孔隙压力探针甲板布置装置

图 3 法国 IFREMER Piezometer V2 孔隙压力探针监测系统

Fig. 3 France IFREMER Piezometer V2 pore-pressure monitoring system



(a) 海底贯入平台

(b) 孔隙压力监测探针总体结构

图 4 中国海洋大学 SEEGeo 孔隙压力监测系统

Fig. 4 SEEGeo pore-pressure monitoring system of Ocean University of China

性,还可以作为灾害预报预警的重要参考^[48]。海底垂向变形监测通常利用高精度压力传感器测量水压力变化反算海床沉降量,利用倾角计监测海床倾角变化^[75],如日本应用地质公司(OYO)联合 JOGMEC 研发的监测装置,工作水深达 1 400 m,地层沉降测量精度达 10 mm^[76-77]。该方法也被应用于监测海床隆起,以此预测海底火山的爆发^[78]。国内中国海洋大学研发的海底垂向变形原位长期自动观测装备,集成石英晶体谐振水压力传感器,工作水深达 2000 m,测量精度可达毫米级。

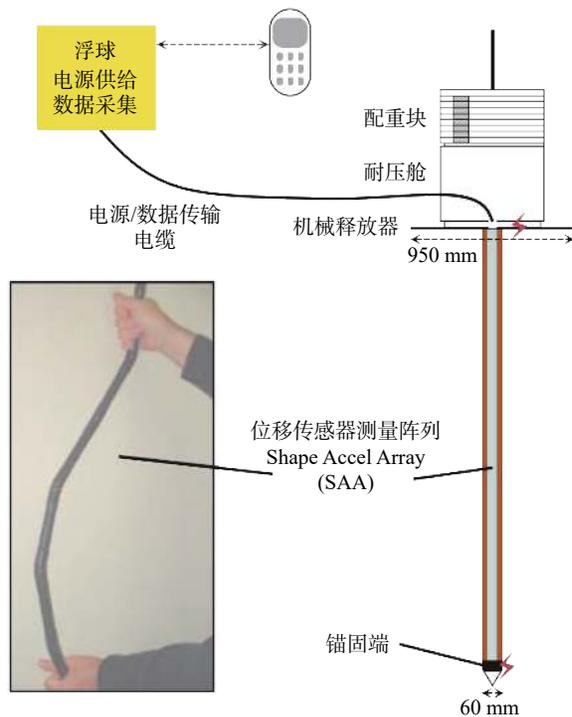
海底侧向变形监测技术装备尚不多见,美国加州大

学曾利用光纤传感器观测海底构造应变,通过测量光纤拉伸长度反映海床变形量,精度可达毫米级,但量程较小^[79]。法国 IFREMER 设计研发的 IFREMER SAAF-Tiltmeter 倾角计探针(图 5),使用多个刚性杆串联,杆间为万向节连接,连接处集成三轴加速度传感器测量位移,总长度为 8 m,曾用于法国尼斯海底滑坡监测^[72]。

国内中国海洋大学研发的海底变形滑动原位实时自动观测装备,可搭载位移传感器阵列 SAA(Shape Accel Array),传感器阵列总长度 4 m,测量精度为 0.5 mm,目前已在黄河水下三角洲埕岛海域开展了多次原位监测工作(图 6)^[48,80]。海底变形滑动监测通常



(a) SAAF-Tiltmeter倾角计甲板布放装置



(b) SAAF-Tiltmeter倾角计总体结构

图 5 法国 IFREMER SAAF-Tiltmeter 倾角计探针结构^[48,71]

Fig. 5 FREMER SAAF-Tiltmeter Inclinometer Probe Structure

使用加速度传感器和倾角计,通过记录加速度以及倾角的变化来反映海床变形滑动的动态过程,对加速度值进行积分即可得到海床位移量,目前已有较多的应用案例^[81-83]。

最近,海底大地测量技术(Seafloor Geodetic Techniques)被应用于海底大范围变形滑动监测,通过部署多个海底声学应答器节点,测量多节点间的相对或绝对位置信息,监测海底毫米级微小变形,这些节点可以自主工作 10 年^[84-85]。该方法结合海底压力传感器、应变传感器、重力计及倾角计等,被应用于监测构造断层运动、海底滑坡、海底火山等灾害现象^[60-62,84-85]。海底大地测量技术需要精确的海底定位、位移、应力、应变和重力测量等技术支持,还面临建设成本、节点维护等一

图 6 中国海洋大学海底变形滑动原位实时自动观测装备^[46]

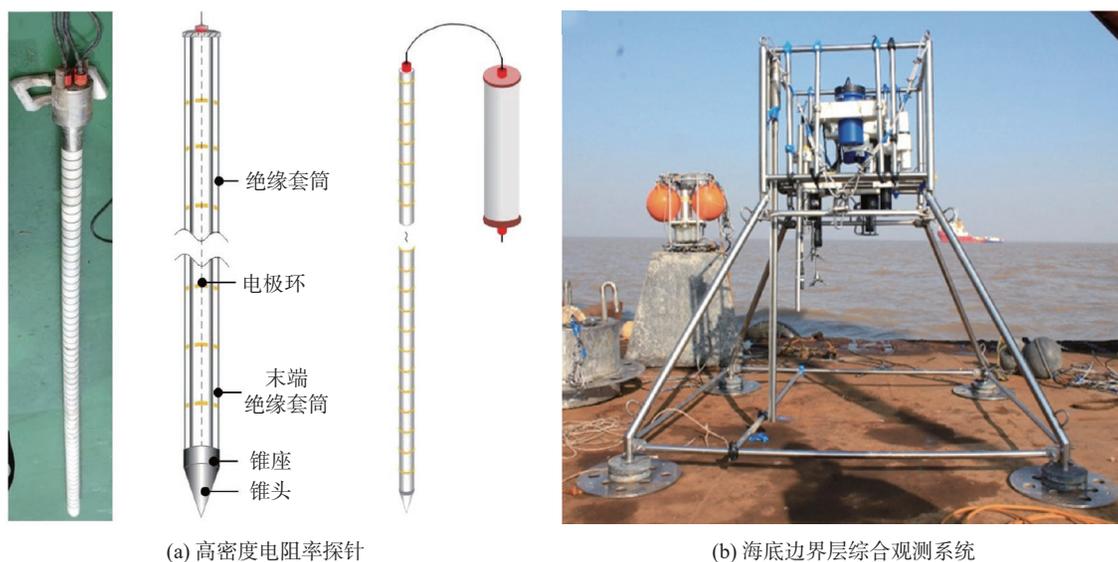
Fig. 6 In-situ real-time automatic observation equipment for submarine deformation sliding of Ocean University of China

系列挑战^[17]。未来有望提高测量精度,并减小体积、降低成本。海底天然气水合物开采和其他海底资源开发相关的非构造变形监测,是海底大地测量技术进一步的重要应用目标。

3.4 海底侵蚀淤积监测技术装备

海底侵蚀淤积是海洋动力作用下底层海水与浅层沉积物相互作用的结果,是海底边界层结构变化和塑造海底地形地貌的重要物理过程,对海洋工程建设影响重大^[86]。海底侵蚀淤积监测包括确定悬浮物浓度的动态变化和海底界面的动态变化,悬浮物浓度的动态变化通常采用现场常规水体采样抽滤、光学后向散射技术、现场激光粒度仪和声学测量技术反演等 4 种方法^[86-87];海底界面的动态变化通常使用声学、光学仪器直接获得海底界面高程变化,如光电感应探杆(PEEP)、声学蚀积仪、图像声纳等^[88-89],相关的应用十分广泛。其中,海底图像声纳基于声学原理持续扫描海底地形地貌的变化过程,但扫描范围有限,该设备已被应用于海底沙波迁移过程的监测^[89]。

国内中国海洋大学采用电阻率测量海底边界层的方法,研发了海底边界层综合观测系统和高密度电阻率探针(图 7),实现了悬浮物浓度动态变化过程和海底界面动态变化过程的同步测量^[73-74,88,90],并进一步发展了自然电位测量探针,电极测量过程中无需供电,稳定性高,更适用于海底原位长期观测,未来该监测技术将推进到海水、沉积物、浅层气体三项介质的同步观测,进一步应用于海底沙波迁移、浅层气体逸散等灾害过程



(a) 高密度电阻率探针 (b) 海底边界层综合观测系统

图 7 中国海洋大学海底侵蚀淤积监测装备

Fig. 7 Ocean University of China submarine erosion and siltation monitoring equipment

的监测。

3.5 海底浅层气体监测技术装备

海底浅层气体是在海底面以下聚集的浅层有机气体, 主要分布于河口与陆架海区, 人类工程活动容易诱发沉积层中的高压气体逸出而形成麻坑破坏, 影响工程安全^[91]。海底浅层气体的监测可以通过跟踪气体内烃类气体和其他地球化学指标的异常效应, 利用传感器监测指标变化来实现对气体喷发状态的量化, 如甲烷传感器等^[90-92]。此外, 中国海洋大学研发了点状电极和环状电极两种形式的电阻率探针, 通过海洋电阻率法对气体运移过程进行监测, 并在浙江舟山海域进行了初步应用^[93-96]。总体而言, 海底浅层气体的监测预警技术与手段受限于海底监测环境的恶劣, 装备的可靠性、准确度及稳定性需要进一步发展改进。

3.6 海底长期钻孔监测技术装备

海底长期钻孔监测技术装备 (Long-Term Borehole Monitoring Systems, LTBMS) 也被称为 CORK (Circulation Obviation Retrofit Kit), 可以对海底深层地质过程进行原位长期监测 (图 8)^[97]。Solomon 等^[98]已经对过去几十年中的 CORK 设计进行了综述。最近, 日本研发了一种非常复杂的海底长期钻孔监测技术装备, 监测深度达 100 m, 包括一系列旨在监测缓慢地壳变动和海底沉积物变形的传感器, 具体包括压力传感器、应变传感器、海底地震仪、倾角计、加速度传感器、温度传感器阵列等^[61]。该装备可以独立在海底运行, 也可以作为海底观测网的一部分进行联合监测, 用于海底地质灾害的监测预警^[99]。



图 8 CORK-II 海底长期钻孔监测技术装备

Fig. 8 CORK-II long-term borehole monitoring systems

4 海洋地质灾害的监测预警网络

对于大多数海洋地质灾害, 阻止灾害发生是不可能的, 因为自然现象不可能避免, 但是对海洋地质灾害开展有效的风险评估和预报预警, 有助于减少灾害暴露的威胁、降低灾害引发的不利影响^[17]。海洋地质灾害原位监测是风险评估和预报预警的基础及先决条件^[16, 98]。建立健全海洋地质灾害监测预警网络, 联通灾害预警信息共享体系, 是海洋地质灾害防控的关键环节。目前, 陆地地质灾害监测预警网络建设相对成熟^[99-102], 而海洋地质灾害监测预警网络建设还很不

完善。

海洋地质灾害的预报预警需求,导致灾害原位监测技术体系的复杂性大大提高,一方面要求具有更长的在位监测周期,另一方面要求具备更快的数据传输速度,此外还需要耦合监测数据研发精准的灾害预报预测技术方法^[14]。近年来,基于现场监测数据的海洋地质灾害识别、海洋岩土工程探测以及地质年代学测定的数学模型发展迅速,不仅用于了解海洋地质灾害的形成机制以及开展风险评估,还可以用于开发灾害预报预警系统^[15]。

此外,为了减少海洋地质灾害的链式结构和放大效应导致的灾害风险增长,必须采取多灾种联合风险评估和预报预警的方法,而不是对受灾害影响的海洋工程设施进行单独监测和评估,孤立地处理海洋地质灾害事件^[29]。多灾种联合风险评估和预报预警可以通过建立多圈层、多维度、多灾种协同监测的海洋地质灾害监测链来实现^[33]。但是,从单一海洋地质灾害到灾害链的过渡显著增加了原位监测过程的系统性、复杂性,不仅需要深入融合考虑不同地理区域的具体海洋地质条件、海洋动力条件等因素^[14],而且必须从“以灾害为中心”的监测理念转变为“以领土为中心”的监测理念^[15]。

5 结论与展望

海洋地质灾害的原位监测涉及灾害链中各灾害事件之间相互影响的关系,涉及岩石圈、水圈、大气圈、生物圈之间相互作用的关系,涉及海洋地质过程、物理过程、化学过程、生物过程之间交织耦合的关系。显然,单一要素的灾害原位监测技术难以覆盖灾害链中各灾害事件之间的复杂连锁反应。因此,对于同一地区的不同类型的海洋地质灾害的原位监测,既要关注监测要素的个性问题,也要注重潜在灾害链的共性问题。目前,缓发性海洋地质灾害的原位监测技术已经展现出比较好的应用效果,但是突发性海洋地质灾害的突然性、爆发性给灾害原位监测带来巨大挑战。因此,迫切需要发展新的监测技术装备来查明和量化突发性海洋地质灾害的演化过程,为灾害风险的有效评估提供技术支撑。此外,尽快完善海洋地质灾害链的预警预报理论和评价技术方法体系,建立覆盖多灾种协同监测的海洋地质灾害监测链,是未来海洋地质灾害监测科学的重大研究方向之一。

由于海洋地质灾害的不可避免和持续存在性,海洋地质灾害的防控措施应侧重于降低灾害风险的暴露度和脆弱性,以及提高承受灾害冲击的能力。所有的灾害

防控措施都必须建立在对灾害事件的发育规模、发生频率、时间和空间尺度的科学认知基础之上,是海洋地质灾害原位监测的意义所在。为此,建议从以下几个方面开展深入研究:

(1)针对不同类型海洋地质灾害的特征,加强突发性海洋地质灾害原位监测技术的研究和应用。需要突破传统原位监测方法的桎梏,识别和量化海底地质过程与海洋地质灾害之间的变化关系,建立综合多物理场、多物理量的海洋地质灾害立体监测体系,更加准确地监测预警突发性海洋地质灾害过程,提升对灾害机制的科学认知。

(2)针对不同海洋地质灾害的监测要素,深入研究重大海洋地质灾害事件爆发征兆的监测和识别。海洋地质灾害监测技术研究的一个关键方面是提高预见性,打好提前量,有效提前预警时间以及提高预报质量。因此,需要基于多学科交叉的新兴方法,结合人工智能、数字孪生、智能传感器等创新技术,有效监测和识别重大海洋地质灾害事件的发生前兆,提高预警网络的可靠性、完整性,扩大覆盖范围。

(3)针对不同海洋地质灾害的监测装备,建立覆盖多圈层的海洋地质灾害立体监测体系。重复的海底地形地貌和地层结构探测成像和单一监测要素的海洋地质灾害监测装备,难以有效反映海底灾害过程的复杂多维度变化。因此,需要建立覆盖岩石圈、水圈、大气圈等多圈层的多尺度、多方法、多要素的永久性海底监测站,将单一的海洋地质灾害监测系统扩大到覆盖整个海洋地质灾害链的协同监测体系,更好地防控灾害风险。

(4)针对不同海洋地质灾害的监测评估,开展活跃海洋地质灾害动力学过程及潜在灾害链式结构的评估预报。海洋地质灾害与地球气候变化之间存在着千丝万缕的潜在联系,全球气候变化加剧会增强海洋内外动力地质作用的灾害效应,导致潜在海洋地质灾害发生频率的增加,引起复杂灾害连锁反应。因此,需要深入研究海洋地质灾害与地球气候变化之间关系的识别和量化,建立基于原位监测数据的活跃海洋地质灾害动力学过程及潜在灾害链式结构的多灾种风险评估技术方法,从而更好地开展灾害预报预警。

参考文献 (References):

- [1] HUGO G. Future demographic change and its interactions with migration and climate change [J]. *Global Environmental Change*, 2011, 21: S21 - S33.
- [2] CAMARGO J, SILVA M, FERREIRA A J, et al. Marine

- geohazards: A bibliometric-based review [J]. *Geosciences*, 2019, 9(2): 1–37.
- [3] OECD. The Ocean Economy in 2030 [M]. Paris: OECD Publishing, 2016.
- [4] ZANIBONI F, ARMIGLIATO A, ELSEN K, et al. The 1977 Gioia Tauro Harbour (South Tyrrhenian Sea, Italy) Landslide-Tsunami: Numerical Simulation [C] //SASSA K, CANUTI P, YIN Y P. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 589-594.
- [5] ASSIER-RZADKIEAICZ S, HEINRICH P, SABATIER P C, et al. Numerical modelling of a landslide-generated tsunami: the 1979 nice event [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(10): 1707–1727.
- [6] SAHAL A, LEMAHIEU A. The 1979 nice airport tsunami: mapping of the flood in Antibes [J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(3): 833–840.
- [7] NOTTINGHAM P. Review of the 1994 Skagway, Alaska tsunami and future plans [J]. *Science of Tsunami Hazards*, 2002, 20(1): 42–49.
- [8] MENKE W, ABEND H, BACH D, et al. Review of the source characteristics of the Great Sumatra–Andaman Islands earthquake of 2004 [J]. *Surveys in Geophysics*, 2006, 27(6): 603–613.
- [9] SULTAN N, CATTANEO A, SIBUET J C, et al. Deep sea in situ excess pore pressure and sediment deformation off NW Sumatra and its relation with the December 26, 2004 Great Sumatra-Andaman Earthquake [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(4): 823–837.
- [10] MAHANEY W C, DOHM J M. The 2011 Japanese 9.0 magnitude earthquake: Test of a kinetic energy wave model using coastal configuration and offshore gradient of Earth and beyond [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 239(1/2): 80–86.
- [11] NORIO O, YE T, KAJITANI Y, et al. The 2011 eastern Japan great earthquake disaster: Overview and comments [J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2011, 2(1): 34–42.
- [12] FRITZ H M, PHILLIPS D A, OKAYASU A, et al. The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesenuma Bay using LiDAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): 1–6.
- [13] 王淼, 马迎晨, 陈洋. 汤加火山喷发搅动半个地球 [N]. 北京: 环球时报, 2022. [WANG Miao, MA Yingcheng, CHEN Yang. Tonga's volcanic eruption stirs half the world [N]. Beijing: Global Times, 2022. (in Chinese)]
- [14] CRED, UNISDR. Economic Losses, Poverty & Disasters: 1998-2017 [R]. Belgium: CRED&UNISDR Publishing, 2018.
- [15] MIZUTORI M, GUHA-SAPIR D. Human cost of disasters: An overview of the last 20 years 2000—2019 [R]. Belgium: CRED&UNDRR Publishing, 2020.
- [16] 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.
- [17] KOPP H, CHIOCCI F L, BERNDT C, et al. Marine geohazards: Safeguarding society and the blue economy from a hidden threat [R]. Belgium: European Marine Board Publishing, 2021.
- [18] POUDEROUX H, LAMARCHE G, PROUST J N. Building an 18000-year-long paleo-earthquake record from detailed deep-sea turbidite characterisation in Poverty Bay, New Zealand [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(6): 2077–2101.
- [19] POLONIA A, VAIANI S C, DE LANGE G J. Did the A. D. 365 Crete earthquake/tsunami trigger synchronous giant turbidity currents in the Mediterranean Sea? [J]. *Geology*, 2016, 44(3): 191–194.
- [20] IKEHARA K, KANAMATSU T, NAGAHASHI Y, et al. Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-Oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 445: 48–56.
- [21] GOLDFINGER C, GALER S, BEESON J, et al. The importance of site selection, sediment supply, and hydrodynamics: A case study of submarine paleoseismology on the northern Cascadia margin, Washington USA [J]. *Marine Geology*, 2017, 384: 4–46.
- [22] ARMIJO R, PONDARD N, MEYER B, et al. Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(6): 1–29.
- [23] GASPERINI L, POLONIA A, ÇAĞATAY M N, et al. Geological slip rates along the North Anatolian Fault in the Marmara region [J]. *Tectonics*, 2011, 30(TC6001): 1–14.
- [24] ÇAĞATAY M N, EREL L, BELLUCCI L G, et al. Sedimentary earthquake records in the İzmit Gulf, Sea of Marmara, Turkey [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 282: 347–359.
- [25] YAKUPOĞLU N, UÇARKUŞ G, ERIŞ K K, et al. Sedimentological and geochemical evidence for seismoturbidite generation in the Kumburgaz Basin, Sea of Marmara: Implications for earthquake recurrence along the Central High Segment of the North Anatolian Fault [J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 380: 31–44.
- [26] KELLER J, RYAN W B F, NINKOVICH D, et al. Explosive volcanic activity in the Mediterranean over the past 200, 000 yr as recorded in deep-sea sediments [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1978, 89(4): 591–604.
- [27] WULF S, KRAML M, KELLER J. Towards a detailed distal tephrostratigraphy in the Central Mediterranean: The last 20, 000 yrs record of Lago Grande di Monticchio [J]. *Journal of*

- Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 177(1): 118 – 132.
- [28] NOMIKOU P, PAPANIKOLAOU D, ALEXANDRI M, et al. Submarine volcanoes along the Aegean volcanic arc [J]. *Tectonophysics*, 2013, 597/598: 123 – 146.
- [29] 冯志强, 刘宗惠, 柯胜边. 南海北部地质灾害类型及分布规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(增刊1): 171 – 180. [FENG Zhiqiang, LIU Zonghui, KE Shengbian. The type, character and distribution law of geological hazard in the north Nanhai Sea [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5(Sup 1): 171 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 王运兴, 梁收运. 突发性地质灾害研究现状 [J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(1): 84 – 88. [WANG Yunxing, LIANG Shouyun. Review of abrupt geological disasters [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2012, 34(1): 84 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 洪海粟, 周建钰. 海洋地质灾害的类型、特征与研究趋势 [J]. 海洋地质动态, 1998, 14(7): 1 – 4. [WANG Haisu, ZHOU Jianyu. Types, characteristics and research trends of marine geohazards [J]. *Marine Geology Frontiers*, 1998, 14(7): 1 – 4. (in Chinese)]
- [32] 叶银灿. 海洋灾害地质学发展的历史回顾及前景展望 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(4): 1 – 7. [YE Yincan. Review of the development of marine hazard geology and its future prospects [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(4): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 赵广涛, 谭肖杰, 李德平. 海洋地质灾害研究进展 [J]. 海洋湖沼通报, 2011(1): 159 – 164. [ZHAO Guangtao, TAN Xiaojie, LI Deping. Research and advances in marine geohazards [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(1): 159 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链 [J]. *地质学前沿*, 2007, 14(6): 11 – 23. [HAN Jinliang, WU Shuren, WANG Huabin. Preliminary study on geological hazard chains [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 11 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等. 黄土地区地质灾害链研究初探 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 117 – 122. [ZHU Xinghua, PENG Jianbing, TONG Xiao, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 117 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [36] TAPPIN D R. Tsunamis from submarine landslides [J]. *Geology Today*, 2017, 33(5): 190 – 200.
- [37] PINO N A, PIATANESI A, VALENSISE G, et al. The 28 December 1908 Messina Straits earthquake (MW 7.1): A great earthquake throughout a century of seismology [J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(2): 243 – 259.
- [38] HASEGAWA A, OHIRA T, MAEDA M, et al. Emergency responses and health consequences after the Fukushima accident; evacuation and relocation [J]. *Clinical Oncology*, 2016, 28(4): 237 – 244.
- [39] LIPSCY P Y, KUSHIDA K E, INCERTI T. The Fukushima disaster and Japan's nuclear plant vulnerability in comparative perspective [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6082 – 6088.
- [40] COLANTONI P, GENNESSEAU M, VANNEY J R, et al. Dynamic processes of a submarine canyon of Gioia Tauro, Tyrrhenian Sea [J]. *Giornale Di Geologia*, 1992, 54(2): 199 – 213.
- [41] DANIELL J E, SCHAEFER A M, WENZEL F. Losses associated with secondary effects in earthquakes [J]. *Frontiers in Built Environment*, 2017, 3(30): 1 – 14.
- [42] CUTTER S L. Compound, cascading, or complex disasters: what's in a name? [J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2018, 60(6): 16 – 25.
- [43] RYAN W B F, HEEZEN B C. Ionian Sea submarine canyons and the 1908 Messina turbidity current [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76: 915 – 932.
- [44] CATTANEO A, BABONNEAU N, RATZOV G, et al. Searching for the seafloor signature of the 21 May 2003 Boumerdès earthquake offshore central Algeria [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(7): 2159 – 2172.
- [45] 董月娥, 左书华. 1989年以来我国海洋灾害类型、危害及特征分析 [J]. 海洋地质动态, 2009, 25(6): 28 – 33. [DONG Yuee, ZUOSHUHUA. Analysis of the types, hazards and characteristics of marine disasters in China since 1989 [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2009, 25(6): 28 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360 – 374. [XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 360 – 374. (in Chinese with English abstract)]
- [47] SCHULTHEISS P J. Pore pressures in marine sediments: an overview of measurement techniques and some geological and engineering applications [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1990, 12(1/2): 153 – 168.
- [48] 贾永刚, 王振豪, 刘晓磊, 等. 海底滑坡现场调查及原位观测方法研究进展 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 61 – 72. [JIA Yonggang, WANG Zhenhao, LIU Xiaolei, et al. The research progress of field investigation and in-situ observation methods for submarine landslide [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 61 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [49] PRIOR D B, SUHAYDA J N, LU N Z, et al. Storm wave

- reactivation of a submarine landslide [J]. *Nature*, 1989, 341(6237): 47–50.
- [50] FAVALI P, BERANZOLI L. Seafloor observatory science: A review [J]. *Annals of Geophysics*, 2009, 49(2/3): 515–567.
- [51] 阮爱国, 李家彪, 冯占英, 等. 海底地震仪及其国内外发展现状 [J]. *东海海洋*, 2004, 22(2): 19–27. [RUAN Aiguo, LI Jiabiao, FENG Zhanying, et al. Ocean bottom seismometer and its development in the world [J]. *Donghai Marine Science*, 2004, 22(2): 19–27. (in Chinese with English abstract)]
- [52] KOPP H, WEINZIERL W, BECEL A, et al. Deep structure of the central Lesser Antilles Island Arc: relevance for the formation of continental crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(1/2): 121–134.
- [53] SALLARÈS V, MARTÍNEZ-LORIENTE S, PRADA M, et al. Seismic evidence of exhumed mantle rock basement at the Gorringe Bank and the adjacent Horseshoe and Tagus abyssal Plains (SW Iberia) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 365: 120–131.
- [54] 牛雄伟, 阮爱国, 吴振利, 等. 海底地震仪实用技术探讨 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(3): 1418–1425. [NIU Xiongwei, RUAN Aiguo, WU Zhenli, et al. Progress on practical skills of Ocean Bottom Seismometer(OBS) experiment [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(3): 1418–1425. (in Chinese with English abstract)]
- [55] 余本善, 孙乃达. 海底地震采集技术发展现状及建议 [J]. *海洋石油*, 2015, 35(2): 1–5. [YU Benshan, SUN Naida. Current development situations and suggestion on the techniques of ocean bottom seismic acquisition [J]. *Offshore Oil*, 2015, 35(2): 1–5. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 郝天兆, 游庆瑜. 国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3352–3361. [HAO Tianyao, YOU Qingyu. Progress of homemade OBS and its application on ocean bottom structure survey [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3352–3361. (in Chinese with English abstract)]
- [57] PAPOULIA J, MAKRIS J, KOULAKOV I, et al. Microseismicity and Crustal Deformation of the Dodecanese Volcanic Area, Southeastern Aegean Sea Using an Onshore/Offshore Seismic Array [J]. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2018, 55(2): 281–302.
- [58] GOHL K. Structure and dynamics of a submarine continent: Tectonic-magmatic evolution of the Campbell Plateau (New Zealand) [R]. Report of the RV SONNE cruise SO-169, Germany: Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung, 2003.
- [59] WALLACE L M, ARAKI E, SAFFER D, et al. Near-field observations of an offshore Mw 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2016, 121(11): 8338–8351.
- [60] 吕枫, 周怀阳. 缆系海底科学观测网研究进展 [J]. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2016, 8(2): 139–154. [LYU Feng, ZHOU Huaiyang. Progress of scientific cabled seafloor observatory networks [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2016, 8(2): 139–154. (in Chinese with English abstract)]
- [61] 申中寅. 日本海洋实时监测系统 DONET 简介 [J]. *国际地震动态*, 2018, 48(7): 34–40. [SHEN Zhongyin. A brief introduction to DONET in Japan [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2018, 48(7): 34–40. (in Chinese with English abstract)]
- [62] MULIA I E, SATAKE K. Correction to: Synthetic analysis of the efficacy of the S-net system in tsunami forecasting [J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, 73(36): 1–11.
- [63] 张文涛, 黄稳柱. 光纤海底地震仪的研制与应用探索 [C] //中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会, 陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会. 国家安全地球物理丛书(十四)——资源·环境与地球物理. 西安: 西安地图出版社, 2018: 296–300. [ZHANG Wentao, HUANG Wenzhu. Development of fiber optic ocean bottom seismograph [C] //National Security Geophysics Committee of the Chinese Geophysical Society, Military Geophysics Committee of the Geophysical Society of Shaanxi Province. National Security Geophysics Series (XIV)——Resources·Environment and Geophysics. Xi'an: Xi'an Map Press, 2018: 296–300. (in Chinese with English abstract)]
- [64] MARRA G, CLIVATI C, LUCKETT R, et al. Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables [J]. *Science*, 2018, 361(6401): 486–490.
- [65] JOUSSET P, REINSCH T, RYBERG T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2509.
- [66] SLADEN A, RIVET D, AMPUERO J P, et al. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5777.
- [67] HOWE B M, ARBIC B K, AUCAN J, et al. SMART cables for observing the global ocean: science and implementation [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 424.
- [68] 陈天, 贾永刚, 刘涛, 等. 海底沉积物孔隙压力原位长期观测技术回顾和展望 [J/OL]. *地学前缘*, 2022. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.30>. [CHEN Tian, JIA Yonggang, LIU Tao, et al. Review and prospects of in-situ long term pore-pressures observation in marine sediments [J/OL]. *EarthScienceFrontiers*: 1–16, 2022<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.30>. (in Chinese with English abstract)]

- [69] SULTAN N, SAVOYE B, JOUET G, et al. Investigation of a possible submarine landslide at the Var delta front (Nice continental slope, southeast France) [J] . *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(4): 486 – 496.
- [70] STEGMANN S, SULTAN N, KOPF A, et al. Hydrogeology and its effect on slope stability along the coastal aquifer of Nice, France [J] . *Marine Geology*, 2011, 280(1/2/3/4): 168 – 181.
- [71] STEGMANN S, SULTAN N, GARZIGLIA S, et al. A long-term monitoring array for landslide precursors: a case study at the Ligurian slope (western Mediterranean Sea) [C] //All Days. April 30-May 3, 2012. Houston, Texas, USA. OTC, 2012: 1 – 10.
- [72] SULTAN N, GARZIGLIA S, BOMPAIS X, et al. Transient groundwater flow through a coastal confined aquifer and its impact on nearshore submarine slope instability [J] . *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(9): e2020JF005654.
- [73] 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.
- [74] 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 & Geotechnology*, 2019, 37(7): 775 – 782.
- [75] STENVOLD T, EIKEN O, ZUMBERGE M A, et al. High-precision relative depth and subsidence mapping from seafloor water-pressure measurements [J] . *SPE Journal*, 2006, 11(3): 380 – 389.
- [76] YOKOYAMA T, SHIMOYAMA M, MATSUDA S, et al. Monitoring system of seafloor subsidence for methane hydrate production test [C] //Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. 18th Formation Evaluation Symposium of Japan 2012. Japan: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2012.
- [77] YOKOYAMA T, SHIMOYAMA M, MATSUDA S, et al. Monitoring system for seafloor deformation during Methane Hydrate production test [C] //International Society of Offshore and Polar Engineers. Proceedings of the 10th (2013) ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, ISOPE OMS 2013. Poland: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2013: 132 – 135.
- [78] CHADWICK W W, NOONER S L, BUTTERFIELD D A, et al. Seafloor deformation and forecasts of the April 2011 eruption at Axial Seamount [J] . *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 474 – 477.
- [79] ZUMBERGE M A. Precise optical path length measurement through an optical fiber: Application to seafloor strain monitoring [J] . *Ocean Engineering*, 1997, 24(6): 531 – 542.
- [80] 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.
- [81] SAITO H, YOKOYAMA T, UCHIYAMA S. Seafloor stability monitoring by displacements calculated from acceleration waveforms obtained by a 3-component servo-accelerometer system [C] //OCEANS 2006. September 18-21, 2006, Boston, MA, USA. IEEE, 2006: 1 – 6.
- [82] FABIAN M, VILLINGER H. The Bremen Ocean bottom tiltmeter (OBT)—A technical article on a new instrument to monitor deep sea floor deformation and seismicity level [J] . *Marine Geophysical Researches*, 2007, 28(1): 13 – 26.
- [83] FABIAN M, VILLINGER H. Long-term tilt and acceleration data from the Logatchev Hydrothermal Vent Field, Mid-Atlantic Ridge, measured by the Bremen Ocean Bottom Tiltmeter [J] . *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(7): 488 – 498.
- [84] PETERSEN F, KOPP H, LANGE D, et al. Measuring tectonic seafloor deformation and strain-build up with acoustic direct-path ranging [J] . *Journal of Geodynamics*, 2019, 124: 14 – 24.
- [85] YOKOTA Y, ISHIKAWA T, WATANABE S I. Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations [J] . *Scientific Data*, 2018, 5: 180182.
- [86] EISMA D. Suspended matter in the aquatic environment [M] . Berlin: Springer, 1993: 1-8.
- [87] WREN D G, BARKDOLL B D, KUHNLE R A, et al. Field techniques for suspended-sediment measurement [J] . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2): 97 – 104.
- [88] 郭磊. 海底边界层原位综合观测系统研发与应用研究 [D] . 青岛: 中国海洋大学, 2016. [GUO Lei. Research and application of in-situ integrated observation system for seabed boundary layer [D] . Qingdao: Ocean University of China, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [89] TRAYKOVSKI P, HAY A E, IRISH J D, et al. Geometry, migration, and evolution of wave orbital ripples at LEO-15 [J] . *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C1): 1505 – 1524.
- [90] 季春生, 贾永刚, 朱俊江, 等. 海底沉积物孔隙压力原位长期观测技术回顾和展望 [J/OL] . *地学前缘*, 2022. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.28>. [JI Chunsheng, JIA Yonggang, ZHU Junjiang, et al. Development and application of in-situ observation system for bottom boundary layer in abyssal sea [J/OL] . *Earth Science Frontiers*, 2022. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.28>. (in Chinese with English abstract)]
- [91] DAVIS A M. Methane in marine sediments [J] . *Continental Shelf Research*, 1992, 12(10): 1075 – 1264.
- [92] 杨肖迪, 马瑞民, 罗小桥, 等. 海底浅层气探测识别方法研究 [J] . *海岸工程*, 2020, 39(3): 187 – 195. [YANG

- Xiaodi, MA Ruimin, LUO Xiaoqiao, et al. Study on the methods for detection and identification of sub-seabed shallow gases [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 39(3): 187 – 195. (in Chinese with English abstract)
- [93] 任子茵, 郭秀军, 吴景鑫. 浅水条件下浅层气走航式海洋电阻率法探测结果模拟分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(7): 56 – 63. [REN Ziyin, GUO Xiujun, WU Jingxin. Simulation and analysis of detection results of shallow gas under shallow water with a navigated DC marine resistivity method [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(7): 56 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [94] 孙翔, 郭秀军, 吴景鑫. 海底砂土中气体运移过程电阻率监测探针设计与实验 [J]. *海洋学报*, 2020, 42(5): 139 – 149. [SUN Xiang, GUO Xiujun, WU Jingxin. Design and experiment of resistivity monitoring probe for gas migration in marine sand [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(5): 139 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [95] COWEN J P, COPSON D A, JOLLY J, et al. Advanced instrument system for real-time and time-series microbial geochemical sampling of the deep (basaltic) crustal biosphere [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012, 61: 43 – 56.
- [96] SOLOMON E, BECKER K, KOPF A, et al. Listening down the pipe [J]. *Oceanography*, 2019, 32(1): 98 – 101.
- [97] ARAKI E, SAFFER D M, KOPF A J, et al. Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust [J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1157 – 1160.
- [98] URLAUB M, PETERSEN F, GROSS F, et al. Gravitational collapse of Mount Etna's southeastern flank [J]. *Science Advances*, 2018, 4(10): eaat9700.
- [99] 郭延辉, 杨溢, 杨志全, 等. 国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 66 – 72. [GUO Yanhui, YANG Yi, YANG Zhiquan, et al. Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 66 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [100] 周小龙, 贾强, 石鹏卿, 等. 免像控无人机航测技术在舟曲县立节北山滑坡-泥石流灾害应急处置中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 107 – 116. [ZHOU Xiaolong, JIA Qiang, SHI Pengqing, et al. Application of image-free control UAV aerial survey technology in emergency treatment of landslide-debris flow disaster in Lijie north hill, Zhouqu County [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 107 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [101] 张欢, 巨能攀, 陆渊, 等. 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 171 – 179. [ZHANG Huan, JU Nengpan, LU Yuan, et al. Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 171 – 179. (in Chinese with English abstract)]
- [102] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 181 – 187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 181 – 187. (in Chinese with English abstract)]