

海床流体迁移致灾机理与风险防控研究现状及展望

田兆阳¹, 贾永刚^{1,2}, 朱超祁^{1,2,3*}, 卢龙玉¹, 郭煦¹, 冯学志¹, 王慧¹,
王宏威¹, 何满潮⁴, 彭建兵⁵

(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试点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. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100; 4. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 5. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要: 海床流体迁移指海底液体、气体、海水在海床内外的传输运移过程, 对海洋地质灾害的孕育、发展、演化具有重要影响; 我国海域内广泛发育的海底滑坡等典型灾害, 与海床流体迁移现象之间呈现出明显的关联性。本文从海床流体迁移的灾害效应出发并以南海北部为例, 分析了典型流体迁移系统类型、地质灾害成因分布特征, 梳理了海床流体迁移的观测与调查方法; 总结了海床流体迁移致灾与风险防控方向的科学问题, 针对性提出了有待开展的重点研究内容。研究建议, 从深部高压流体向上迁移影响灾害孕育、天然气水合物分解流体迁移影响灾害发展、海洋水体运动导致灾害发生3个方面着手, 研究海床流体迁移影响下的海底灾害孕育、发展与触发演化过程机理, 海床流体迁移-地质环境-人类活动耦合作用下海底灾害风险防控理论方法, 支持突破深海探测多系统集成、多尺度联合、多维信息处理等技术瓶颈。

关键词: 海床流体迁移; 海洋地质灾害; 风险防控; 南海北部

中图分类号: P736 **文献标识码:** A

Research Progress and Prospects of Geohazard Mechanism and Risk Prevention Related to Seabed Fluid Migration

Tian Zhaoyang¹, Jia Yonggang^{1,2}, Zhu Chaoqi^{1,2,3*}, Lu Longyu¹, Guo Xu¹, Feng Xuezhi¹,
Wang Hui¹, Wang Hongwei¹, He Manchao⁴, Peng Jianbing⁵

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering (Ocean University of China), Qingdao 266100, Shandong, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China; 3. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, China; 4. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China; 5. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Seabed fluid migration is a critical process that involves the transport and movement of liquids, gases, and seawater within and outside the seabed, which has significant impacts on the genesis, development, and evolution of seabed geological disasters.

收稿日期: 2023-03-17; **修回日期:** 2023-05-04

通讯作者: *朱超祁, 山东省海洋环境地质工程重点实验室 (中国海洋大学) 博士后, 研究方向为海洋工程地质; E-mail: zhuchaoqi@ouc.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“琼东南盆地海底地质灾害风险应对战略咨询研究”(21-HN-ZD-02); 国家自然科学基金项目(4220717, 41831280)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Notably, typical disasters such as submarine landslides in the sea area of China demonstrate a strong relevance with seabed fluid migration phenomena. In this paper, we analyze the distribution characteristics of typical fluid migration system types and geological disaster causes taking the northern South China Sea as an example, and we summarize the observation and investigation methods of seabed fluid migration. Furthermore, we propose the primary issues and content that must be addressed in the study of disasters induced by seabed fluid migration and their prevention and control. Specifically, we suggest that research should focus on the three phases, namely disaster genesis induced by deep high-pressure fluid migration, disaster development caused by gas hydrate decomposition and fluid migration, and disaster triggering resulting from ocean water movement. Based on breakthroughs in technological bottlenecks such as multi-system integration, multi-scale cooperation, and multi-dimensional information processing in deep-sea exploration, we must conduct in-depth research on the evolution mechanisms of seabed disaster genesis, development, and triggering under the influence of seabed fluid migration. Additionally, we must develop theoretical methods for seabed disaster risk prevention and control under the coupled effects of seabed fluid migration, geological environment, and human activities.

Keywords: seabed fluid migration; marine geologic hazards; risk prevention and control; northern South China Sea

一、前言

近年来,我国海洋强国建设、南海资源开发工作稳步推进。南海北部累计发现天然气三级地质储量约为 $7 \times 10^{11} \text{ m}^3$,原油三级地质储量约为 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1];各类海洋工程建设蓬勃发展,铺设海底电缆60多条。在此背景下,揭示海洋地质灾害发生机理并开展风险防控,有助于国家海洋开发的高质量实施。此外,海洋地质灾害研究涉及地球圈层、时空、自然、人类活动,多学科交叉特征鲜明,深化相关研究有望在地球系统科学的理论技术方面取得突破。

海床流体迁移指海底液体、气体、海水在海床内外的传输运移过程,作为岩石圈、水圈、生物圈的物质和能量交换中最活跃、最直接的要素,对海洋地质灾害的孕育、发展、演化具有重要影响^[2]。海床流体既会以地质构造作为通道发生迁移和聚散,也会与地质体产生物质和能量的交换,由此引发各类地质灾害。例如,深部流体垂向迁移会改变断层应力状态及其活动性,形成底辟构造,参与地质灾害的孕育过程^[3];天然气水合物的分解会使浅部地层压力升高,在地表形成隆起或麻坑,相应的侧向迁移会产生软弱层,劣化斜坡的物理力学性质,对巨型滑坡等灾害体结构发展起到促进作用^[4];海水动力作用会造成海底环境要素变化、沉积物侵蚀再沉积,最终导致海洋地质灾害的形成^[5]。此外,流体运移特征的变化对地质灾害具有指示意义,如地质体内部状态的变化通常伴随着流体温度、压力、元素成分的变化,流体迁移携带的深部信号可作为地质灾害预警的有效工具^[6]。目前,利用海洋地球物理调查、地质取样、水下调查等手段,初步查清海床流体迁移模式,认识到海床流体迁移的广泛性及其对海底地质灾害的直接影响;基于现场调查、模

型试验、数值模拟,分析了海底地质灾害的类型特征、典型分布、演化历史并获得灾害风险初步评价。

南海北部地处三大板块交界处,地质构造活动强烈,珠江等河流向南海输入了大量的陆源碎屑沉积物。南海也属地球上孤立波发育最为活跃的区域之一。在强烈的内外动力地质作用下,南海北部广泛发育了滑坡、活动断层、泥火山、麻坑、沉积物侵蚀等十余种海洋地质灾害^[7-9]。与陆地相比,海洋地质灾害具有发生规模大、灾害范围广、多类灾种共生/链生等显著特点,多类因素耦合作用下的成灾过程与流体作用密切相关。以海底滑坡为例,流体作用在其全部触发因素中的比例超过50%^[10]。目前,已在南海北部识别出一系列正断层、直径为8 km的巨型麻坑、直径为4.1 km的泥火山、面积为数千平方千米的巨型海底滑坡,观测到内孤立波引起的海底沉积物侵蚀现象^[11-15],这些灾害现象均反映了与海床流体迁移的直接关联。

南海北部作为多圈层内外动力地质作用、人类工程活动的汇聚点,是开展地球系统科学防灾研究的优良“试验场”,在此方向我国已积累一定的研究基础。“南海深海过程演变”项目支持形成了对南海沉积与构造系统的全面认识^[16];“透明海洋”项目支持发展了海洋观测和探测的系列关键技术,系统研究了南海海洋动力场特征^[17]。针对南海北部,建立了对海底流体迁移系统的基本认识^[18],初步揭示了南海白云凹陷区巨型滑坡特征及其蠕动变形^[9],分析了深海海床侵蚀再悬浮、海底滑坡等典型海洋地质灾害的影响因素^[20]。需要注意到,深海地质过程的原位观测、探测以及风险防控,仍在多系统集成、多尺度联合、多维信息处理方面存在技术瓶颈;现有研究主要从地质学角度开展识别和推断,未能就流体迁移致灾过程的直接观测证据、灾

害孕育发展演化等进行分析。因此，相关灾害的预测与风险防控问题仍待进一步研究^[21]。

结合上述研究与应用背景，本文突出南海北部海域的代表性，梳理海床流体迁移系统、典型地质灾害、调查研究方法，提出开展海床流体迁移致灾机理及风险防控研究的科学问题与研究方向，以期为海洋地质灾害研究、海洋资源开发利用提供基础参考。

二、南海北部海床流体迁移系统及典型地质灾害

南海北部是我国海床流体迁移系统、海洋地质灾害分布最为齐全的海区，也是国家海洋开发的重点区域、海洋研究的典型试验场。以南海北部为研究对象开展海床流体迁移系统及典型地质灾害分析，具有显著的代表性，可为我国其他海区的相关研究提供参考。

(一) 南海北部海床流体迁移系统

自20世纪70年代起，随着海洋油气资源开发的兴起，地球物理勘探、海洋观测等工作逐步展开，有关海床流体迁移现象的认识逐步加深^[2]。根据迁移特征、物质能量来源、灾害影响等因素，可将南海北部海床流体迁移系统归纳为4类：深部热液向上运移、天然气水合物分解释放、内波等海水流体迁移、其他形式。

1. 深部热液向上运移

南海北部位于被动大陆边缘，其中琼东南盆地、中建南盆地、珠江口盆地等区域蕴藏的油气及天然气水合物资源丰富，深部流体活动活跃（见图1）。矿物脱水，岩浆，热成因、微生物成因的气体构成了深部流体的主要来源，较高的沉积速率、地温梯度形成的超压为流体运移提供了动力；底辟、大型断层、气烟囱等构造，为深部流体向上迁移提供了通道；流体进入浅层后，随着压力、温度的变化，一部分以水合物等形式储层，另一部分继续沿着以

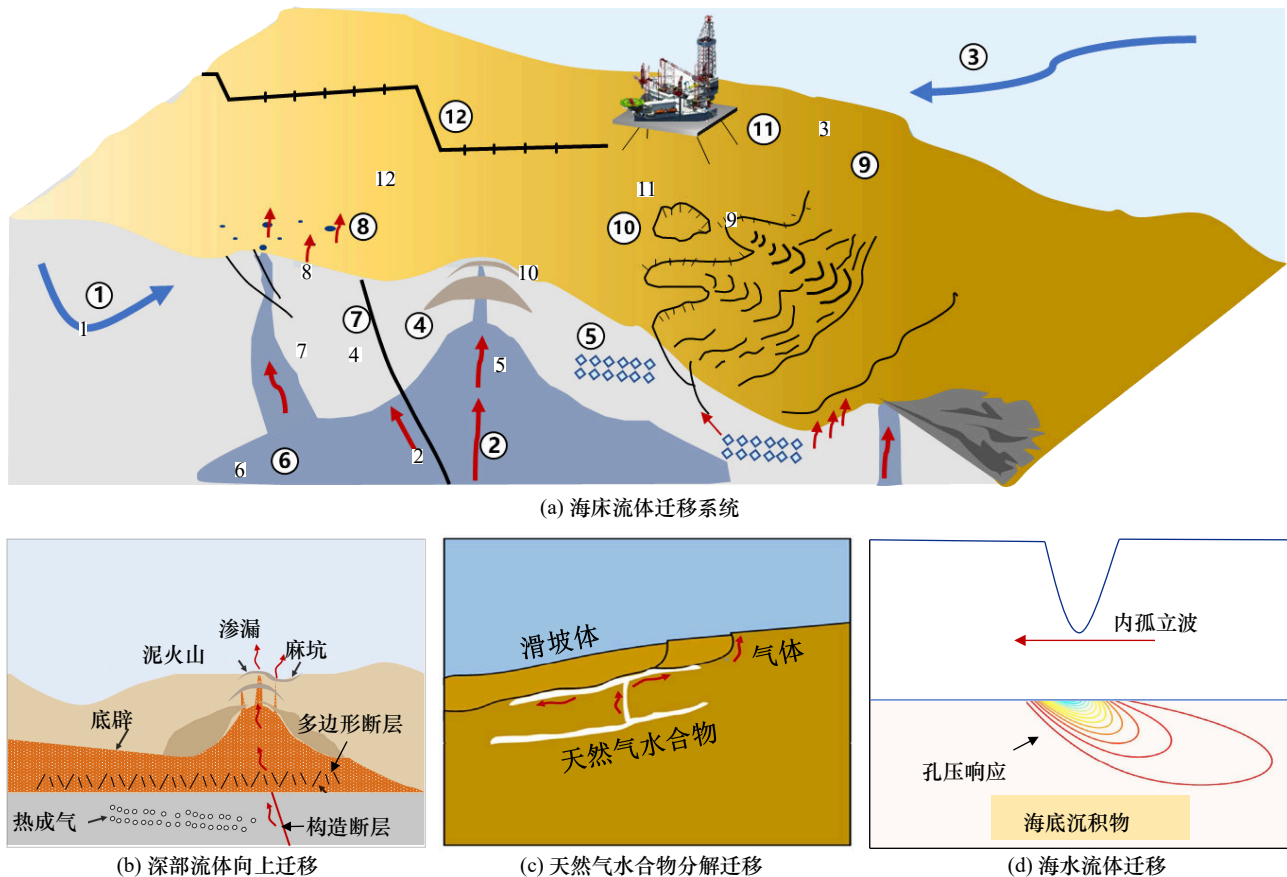


图1 流体迁移致灾概念图

注：①表示地下水；②表示热液；③表示内波；④表示高压气体；⑤表示天然气水合物；⑥表示底辟；⑦表示断层；⑧表示麻坑；⑨表示滑坡；⑩表示海底侵蚀；⑪表示石油平台；⑫表示海底管线。

多边形断层为代表的浅部构造向上运移，直至在海床面溢出，从而形成麻坑、冷泉、碳酸盐岩等地貌现象。高分辨地震勘探结果表明，南海北部各盆地深部大量发育流体迁移构造，地层浅部具有明显的似海底反射层。多波束成像、近底调查等也发现，在海床表面具有麻坑、冷泉、气体羽状流等流体迁移的直接证据。

2. 天然气水合物分解释放

南海北部具有丰富的天然气水合物资源。近年来，在台南盆地、珠江口盆地、西沙海槽/琼东南盆地等区域发现大量水合物存在的地球物理证据，6次钻探计划获取了高品位水合物沉积物^[22]，在神狐海域成功开展2次试采。海域天然气水合物赋存于海底低温高压环境中，具有稳定存在的上界和底界。如果压力、温度条件改变，稳定带将发生变化，1 m³天然气水合物可以分解产生0.8 m³水和164 m³气体（标准状况）；分解产生的流体及超压会弱化地层的力学性质，流体又会在压力的驱动下发生竖向、侧向迁移，进而引发滑坡等地质灾害。研究表明，神狐海域水合物层气源充足，水合物主要分布在海底以下100~200 m范围内；存在游离气体、气烟囱、小尺度断层等浅层迁移证据，为地质灾害发展演化提供了动力条件。

3. 内波等海水流体迁移

南海北部陆坡的水动力环境较为复杂，内孤立波发育尤其丰富。内孤立波是发生在海洋内部的强非线性、大振幅、短周期波动，在印度洋安达曼海等七大海域内广泛分布。南海的内孤立波传输能量最大、振幅最强、频率最高，如振幅可达240 m、水平流速可达2.5 m/s、在天文大潮期间每天发生2次^[23]；内孤立波由吕宋海峡产生并向西传播，穿越深水区、经过陆坡陆架区，最终在近岸破碎消亡，传播距离超过600 km^[24]，携带能量主要通过陆坡、陆架区的相互作用而传递给海底沉积物。内孤立波产生的底部剪切流速，能够侵蚀海底表层沉积物、改造陆坡底形^[1]，还会影响海床的孔隙水压力并造成海底失稳等破坏。

4. 其他形式

除上述类型以外，南海北部海床流体迁移系统还包括海底地下水排泄（SGD）、与人类工程相关的流体系统。SGD指陆地来源的地下水通过海床渗流进入海洋的过程，全球60%以上沿海地区SGD

携带的营养物质入海通量超过河流输入^[25]。在南海北部珠江口、莺歌海等海岸带区域，每年有大量的地下水排泄进入海洋，造成海底环境变化，对珊瑚礁等产生破坏性作用，较大的径流量对地质灾害发育也有潜在影响。此外，海底碳封存将捕集到的CO₂通过管线等注入到海底沉积盆地中，这类人类工程活动形成的流体迁移，也是影响灾害发育的重要因素；相关流体注入和封存过程将增加海底地质体内部压力，流体也可能沿断层等通道迁移而发生泄漏，诱发海底地质灾害。

（二）南海北部海床流体迁移引起的典型地质灾害

海洋地质灾害是海水动力过程、海底地质过程、人类活动相结合的产物，跨越多种时空尺度，威胁自然环境与人类经济社会安全发展。典型的海洋地质灾害有十余种，表现为多灾害关联、伴生、耦合，也可分为以活断层为代表的内动力灾害、以侵蚀为代表的外动力灾害等主要类别。在南海北部，与流体活动直接相关并广泛发育的灾害类型主要有活动断层、海底滑坡、泥火山与底辟、麻坑、海床侵蚀。

1. 活动断层

南海北部陆坡处于大陆板块、海洋板块的衔接区，自中生代以来断裂活动非常强烈，发育了一系列与海岸平行的NEE-EW方向断层。这些断层以张应力作用下形成的正断层为主，决定了区域内大地构造隆起和凹陷的产生及分布，如珠江口盆地中新世晚期以来的断裂超过1400条^[26]。深反射地震剖面揭示的白云凹陷深部地壳结构表明，形成过程由正断层活动造成的地堑组合所控制，峡谷趾部位置出现了大量的微断层。近100年来，珠江口盆地周围记录到多次破坏性地震活动（如1929年、1931年），说明区域内存在强烈的断层活动。这些断层中的深部流体向上迁移提供了引发地震活动的有利条件，成为海底滑坡等灾害的触发因素。

2. 海底滑坡

海底滑坡在南海北部陆坡非常发育，潜在灾害风险巨大。20世纪90年代至今获得的大量二维、三维高分辨率地震与多波束水深数据表明，海底滑坡在东沙、神狐、西沙、琼东南4段陆坡区内广泛发育，呈北东或北东东向分布，水深范围为200~3000 m，主要位于在坡折带、火山、峡谷底辟隆起陡坡处^[27]。典型的是白云滑坡，位于白云凹陷，滑

坡区域面积约为 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，体积约为 1035 km^3 ，坡度范围为 $1 \sim 4.5^\circ$ ；该滑坡区与水合物发育区存在一定的耦合关系，与浅层气、气烟囱、麻坑等流体迁移现象相伴生。滑坡的再次启动会对海洋工程设施造成直接破坏，如计算显示古白云滑坡可诱发沿岸浪高 23 m 的海啸，对南海沿岸地区构成显著威胁；古老的白云-荔湾海底滑坡可能是一个巨型整体，滑坡体长约 250 km ，影响面积为 $3.5 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ km}^2$ [12]。

3. 泥火山与底辟

南海北部莺歌海盆地、琼东南盆地、珠江口盆地、台西南盆地均分布有泥火山和底辟，以莺歌海盆地最为密集，单个泥底辟展布面积超过 700 km^2 ；琼东南盆地、珠江口盆地主要为泥底辟构造，总体规模不大；台西南盆地的泥火山发育较为密集，直径范围为 $5 \sim 4100 \text{ m}$ ，高出海底 $5 \sim 200 \text{ m}$ 。泥火山与底辟是连接深层油气、海底浅层水合物的通道，生成及分布受到快速沉积和断层活动的影响。巨厚欠压实的泥页岩为泥火山与底辟的形成提供了物质基础，构造作用提供了动力来源；泥火山与底辟的整体展布方向与断裂带方向相近 [28]。在灾害效应方面，泥火山与底辟可侵入周围地层甚至刺穿海底，可能直接损害海底工程设施，也会造成海底地基承载力不均匀而影响工程的建设运行。

4. 麻坑

早在1970年，在加拿大斯科舍大陆架中发现了麻坑。麻坑是系统认识海床流体迁移现象的起点，形成原因主要是海底面以下流体的溢出、上部海水的侵蚀搬运。南海北部发育了大量的麻坑，以莺歌海盆地、中建南盆地的麻坑最为典型，具有规模大、数量多的特点，已发现的最大麻坑长度为 8 km [15]；台西南盆地、琼东南盆地、珠江口盆地的麻坑主要分布在陆坡区，大型麻坑的直径为 $100 \sim 1200 \text{ m}$ [29]。麻坑的形态表现为圆形、椭圆形、新月形等，可单独或链状分布；常被作为海床流体溢出的直接指示，为监测海底不稳定性提供有效信息；生成和发展具有突发性，对海底管线等设施的安全运行构成威胁。

5. 海床侵蚀

南海北部的水动力环境较为复杂，广泛存在侵蚀地形；珠江口外海底峡谷群、东沙海底峡谷、台湾浅滩南海底峡谷等峡谷地貌，与水动力侵蚀密切相关，而神狐峡谷表现出向东迁移的趋势。在频繁

的内潮、内孤立波的作用下，海底表层沉积物受到侵蚀，形成并输运底部和中部的雾状层。此外，海床侵蚀主要受控于上部流体、下部流动：前者是复杂的水动力作用，后者源自海底面以下流体迁移；这些现象引发的海床沉积物内部侵蚀及液化，是海床面及斜坡失稳的重要诱因。

三、海床流体迁移的观测研究方法

海床流体存在于海水及海床面，涉及固、液、气等要素，分布范围广、时空跨度大。鉴于流体迁移的观测与调查受制于复杂的海底环境，需要更大的技术和资源支持力度，才能深化对相应过程机制的认识。海床流体迁移研究主要手段是现场调查、原位监测，试验及数值模拟等也是重要补充。

（一）现场调查方法

1. 地球物理调查

海洋地球物理调查技术的发展，显著增强了海床流体迁移研究水平。常用手段有多波束水深测量、侧扫声呐、浅地层剖面、高分辨率地震勘探等，探测精度和效率的提高支持识别了更多的流体迁移地貌及构造。自首次发现麻坑开始，英国石油公司、荷兰海洋研究所、英国地质调查局等利用地球物理手段系统开展了麻坑、浅层气、流体溢出等现象的调查研究。自20世纪80年代起，我国在南海开展了地球物理调查，基本覆盖神狐海域等区域的地形地貌及地震，识别了典型的流体迁移系统、地质灾害要素。在调查装备方面，我国建造了包括“东方红3号”在内的多艘海洋综合科考船，研制了深拖式多道高分辨率地震探测系统，为继续开展调查研究提供了坚实保障 [30]。

2. 地质取样

海底地质样品是确定海床流体及地质体组分分类、物质来源、年代、物理力学性质的直接证据，常用的获取手段有表层重力取样、深部钻探取样。表层取样设备包括箱式取样器、多管取样器、重力柱状取样器等，用于海床表层 $0 \sim 10 \text{ m}$ 的地质样品采取。深部钻探取样采用海底钻机、钻井等方式，获取海底面以下数百米深处水合物储层等的地质样品。近年来，电视抓斗、保温保压取样技术广泛用

于水合物相关的海底流体调查；在南海实施的多个水合物钻探航次累计钻井 / 探井超过 60 口，基本查明水合物的赋存情况，获取了丰富的沉积物岩性及物性数据^[31]。

3. 近底调查

我国研制了多款载人深潜器、无人遥控潜水器、水下自主航行器，为海底调查提供了更加清晰和直接的视角。深潜器搭载设备获得的多波束数据，平面分辨率为 1 m×1 m，浅地层剖面的纵向分辨率优于 0.1 m。利用深潜设备在热液、冷泉区获取生物和理化参数，在地质灾害发育区获取高精度声学、影像、浅地层结构信息，成为常态化应用。“海马号”无人遥控潜水器在琼东南海域首次发现海底巨型活动性冷泉，查明了冷泉区的流体活动特征^[32]。

(二) 原位长期监测方法

海床流体迁移原位监测是认识相关致灾过程及灾害演变过程的直接途径，开展深海原位观测涉及多系统集成、多尺度联合、多维信息处理等关键技术。

1. 海床内部流体迁移

海床内部流体迁移分布在海床面至海床面以下数千米深度范围内，迁移过程伴随着温度、压力、电磁等物理场以及震动等信号的响应。对于深层流体，主要方法有海底地震、电磁观测，利用监测数据可得深部速度场、电导率场分布，据此追踪流体在构造尺度层面的迁移过程以及对地质事件的影响；相关方法在地层浅部特征、水动力事件观测中得到应用。对于浅层流体，主要方法有孔隙压力、温度、电阻率观测等，在天然气水合物分解、滑坡、麻坑等研究上获得广泛应用。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（见图 2），用于同步监测海底面以下 3 m 深度的孔隙压力及温度变化、沉积物的电阻率与声学特性，可在水深 1500 m 海底实现连续 12 个月的原位监测，为进一步开展海床流体迁移研究提供了坚实基础^[33]。

2. 海底边界层

海底边界层指在海床界面上下一定范围内、水流与海床相互作用的区域。通常使用声学、光学、电化学仪器直接获得海床界面的动态变化信息，据

此确定在海水动力作用下海床侵蚀淤积、悬浮物浓度、甲烷浓度等的变化。国产海底边界层综合观测系统（见图 3）实现了南海深水条件下海水动力、沉积物响应、气体释放的同步观测。海底冷泉渗漏流体通量、渗漏流化学组分是当前的关注重点，相关研究多基于通量浮标、涡轮渗漏、气泡捕捉、被动声呐等装备展开。国产深海长期观测系统在冷泉区实现了原位影像、流体理化参数动态变化数据的连续获取^[34]。

3. 海水动力监测

深海原位水动力监测主要依托潜标和坐底平台（搭载声学多普勒流速仪以及“温、盐、深”传感器）获取海床面以上的流体与环境参数。我国研究机构在南海建立了规模领先的区域潜标观测网，实现对南海全海深动力环境的长期连续观测；捕捉到迄今为止全球海洋最大振幅的内孤立波，明确了南海东北部内孤立波包括生成、传播、演变、消亡在内的全过程统计规律。

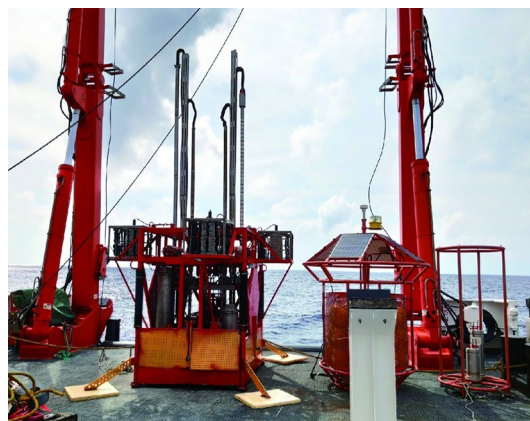


图 2 复杂深海工程地质原位长期监测系统



图 3 海底边界层综合观测系统

(三) 其他方法

对于海床流体迁移致灾过程的观测,除现场观测调查以外,物理试验、数值模拟手段可用于海底地质灾害的主控因素及灾害影响分析,在灾害成因机制、风险预测方面可发挥重要作用。利用室内试验、水槽试验、离心机试验等物理模型试验方法以及有限元、计算流体力学、物质点等数值模拟方法,研究了南海北部天然气水合物分解、海底滑坡、海啸等灾害的多尺度过程,评价了多因素耦合作用下的灾害规模及风险特征^[35],对明晰流体迁移对地质灾害的作用机制起到了直接支持。

四、海床流体迁移致灾机理与风险防控研究展望

(一) 科学问题

海洋地质灾害研究一直是全球海洋领域的热点,如欧洲海洋局2021年将海洋地质灾害防控列入促进可持续发展的未来10年目标。在海洋地质灾害中,构造、沉积、气体、潮流、侵蚀等内外动力作用相互结合,滑坡、浊流、海啸等灾害相互链生和叠加,相比陆地地质灾害而言规模更大、影响范围更广、触发机制更复杂。例如,世界著名的挪威近海Storegga滑坡,体积达到3000 km³,平均坡度仅为0.6~0.7°,成因机制受地震、天然气水合物分解等流体迁移作用的显著影响。

得益于深海油气资源开发过程中调查观测资料的逐步积累,研究人员识别出断层、底辟、气烟囱、管道、麻坑等海床内部流体迁移构造,内孤立波、浊流等海水流体活动;针对流体迁移的动力来源、类型特点、识别特征,与地质灾害之间的分布关联等开展了较多研究^[36],探析了各类现象的致灾机制。在灾害风险防控方面,海洋大国都建设了海底观测网,期望通过包括地质、地球物理、地球化学、生物在内的多学科海底观测手段,对海洋地质灾害进行监测和预警,开展海底环境和海洋工程设施的影响评价,据此构建海洋灾害风险防控体系^[37]。然而,各类灾害成因机制之间的关联性、流体迁移在多因素耦合孕灾过程中的关键作用、以流体迁移为纽带对灾害进行综合监测预警等,有待开展深入探究。

在当前及未来一段时期,本领域研究关键在

于通过海床流体迁移系统建立海洋水动力过程、海底地质过程、人类工程活动之间的联系,揭示各类内/外动力灾害因素之间的联合作用机制;重点是突破深海海床流体迁移过程原位观测和探测的技术瓶颈,阐明流体迁移作用下灾害孕育、发展、演化过程,揭示流体迁移对灾害的控制机理及影响因素。基于海床流体迁移研究,构建典型海洋地质灾害预警与风险防控体系,涉及两大科学问题:海床流体迁移影响下的海底灾害孕育、发展与触发演化过程机理,海床流体迁移-地质环境-人类活动耦合作用下海底灾害风险的防控理论方法。

(二) 科学背景

海床流体迁移联系了深部地壳、浅部地层、海洋水体,在传输物质能量的同时与地质体发生强烈的相互作用,从而引发各类地质灾害。例如,流体活动受构造作用、沉积作用、矿物脱水、气候条件等因素的影响,会在迁移过程中形成超压、改变地层的物理力学性质、生成灾害地质体^[38,39]。

根据海床流体迁移系统类型、地质灾害发育情况,可将流体迁移及致灾过程分为3个阶段:①深部高压流体在地球内部动力的作用下向上迁移,影响深部构造的形成和活动,在与构造应力场的共同作用下,为地质灾害的孕育提供物质能量基础,对区域内大范围的灾害分布起到控制作用;②天然气水合物分解形成超压气体以及相应的流体迁移,劣化地质体的物理力学性质,改变地层压力状态,对巨型滑坡等灾害的形成起到促进作用;③内孤立波等海洋水体运动会造成海底沉积物的侵蚀淤积,引起边界层温度、压力、流场等环境要素变化,直接影响灾害事件的产生,致使多灾种共生及链生演化发展。

(三) 研究内容

1. 海床流体迁移与灾害信息动态感知系统

以高精度地球物理探测为主要手段,识别典型流体迁移系统、灾害地质体的空间分布与结构特征,与地质取样、原位测试等手段配合,探明地质体的物质组分和力学特性,揭示流体活动及其与地质灾害的赋存关系。基于流体迁移系统特征,研究表层流体渗漏与地质体物理力学性质演变特征的长期原位观测技术,克服海底极端环境

的不利影响；识别地质灾害灵敏型观测指标，构建流体迁移—海洋环境要素—地质体响应多场协同信息感知系统。

2. 深部高压流体向上迁移对灾害孕育过程的影响机理

深部高压流体将地球内部能量传递至海床表面，可视为地质灾害孕育的物质与动力来源。研究海底断层、底辟、泥火山、麻坑等构造的多尺度特征及流体伴生规律，明晰各类构造的空间分布与时间演化联系，揭示深部流体运移、聚散过程以及物质能量传递机制。在探明流体迁移系统和区域的动力地质作用基础上，选择代表性、控制性测点开展原位观测，识别流体迁移作用下的典型构造活动事件；建立构造事件与灾害过程的时空联系，阐明触发机理和时空发展规律，探究流体迁移与构造应力场对地质灾害孕育的协同控制作用。

3. 天然气水合物分解流体迁移对灾害发展过程的影响机理

天然气水合物既有资源层面价值，也是连接深部和表层流体迁移过程的关键物质；在自然与人为因素造成的温度、压力变化影响下，赋存状态极易变化，分解产生的超压和流体会导致地质体强度弱化。多种海洋地质灾害均表现出与天然气水合物分解之间的直接关系。探明区域内典型天然气水合物的赋存特征，研究影响储层稳定性的因素，评价内/外动力和人类工程活动对水合物分解的作用程度；基于孔压、电阻率、地震、水化学等原位观测方法，分析浅层地质体及内部流体迁移动态变化过程，掌握水合物分解过程中地质体内部压力场、速度场的变化规律；揭示流体迁移对地层结构劣化与破坏的机制以及灾害指示作用，形成多因素耦合作用的灾害发展模型。

4. 海洋水体运动对灾害触发演化过程的影响机理

海洋水体直接作用于海床地质体，可显著改变海底边界层的环境要素，对地质灾害发生及链生产生直接影响，自身也属极具威胁的灾害体。采用海底边界层原位观测手段，分析海洋内波影响下海底边界层的流速场、压力场、变形场特征，定量表征沉积物在流体迁移影响下侵蚀、液化、快速沉积的程度，明晰水体运动对海底地质灾害的触发作用。研究灾害过程中水土交换作用程度、地质体状态变

化规律，分析水体运动对灾害演化及链生过程的影响，预测海洋地质灾害的发展规模。

5. 南海北部地质灾害风险防控

针对南海北部等重点海域开展海洋地质灾害防控，预估长时期、大空间范围内的地质灾害特征及风险，就具体区域及工程设施开展及时有效的灾害预警。研究流体迁移影响下地质灾害的共生规律，建立海床流体迁移与地质环境、人类活动要素的协同影响模型；开展南海北部地质灾害的易发性、危险性分区评价，划分典型地质灾害的发生区和影响区。建立基于原位观测数据、灾害链效应分析的灾害预测模型，实现灾害信息的动态感知，形成南海北部地质灾害观测预警系统与风险防控能力。

五、结语

海床流体作为海洋地球系统的“血液”，由深至浅、由表及里，全面参与海洋地质灾害的孕育、发展、演化过程。以流体迁移为纽带，探究复杂因素下南海北部典型地质灾害控制机制，突破灾害预测与工程风险防控的技术难题，对于支持重大海洋工程的安全建设及运行具有重要意义。

本文在阐明南海北部流体迁移系统及典型地质灾害的基础上，总结了海床流体迁移过程的观测研究方法，展望了海床流体迁移致灾机理及风险防控的科学问题与研究内容，获得的研究结论有：①海洋地质灾害问题是多圈层耦合、多因素关联、多学科交叉的地球系统科学问题，需从整体上认识灾害的发育特征及成因机制；②南海北部海床流体迁移致灾过程可划分为深部流体向上迁移影响灾害孕育、天然气水合物分解迁移影响灾害发展、海洋水体迁移触发灾害3个主要阶段，相关科学问题凝练可围绕此背景展开；③深海地质过程观测和探测是开展海床流体迁移相关地质灾害研究中需要率先解决的关键技术问题。

着眼中长期研究与应用，海洋地质灾害防控工作可以流体迁移为突破口，深入分析不同灾种之间的关联机制，引导系统持续的基础研究。以探明迁移系统分布特征、揭示流体迁移动态过程及其对地质体的影响为重点，发展高精度、高稳定性、多尺度，具有多物理场耦合特征的灾害监测探测装备技术。培育多学科交叉型研究团队，筑牢我国海洋工

程建设、油气资源开发过程中开展海洋地质灾害防控的科技和智力基础。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 17, 2023; **Revised date:** May 4, 2023

Corresponding author: Zhu Chaoqi is a postdoctoral from the Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering (Ocean University of China). His major research field is marine engineering geology. E-mail: zhuchaoqi@ouc.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Consultation for Risk Response of Submarine Geological Hazards in the Qiongdongnan Basin” (21-HN-ZD-02); National Natural Science Foundation of China project (4220717, 41831280)

参考文献

- [1] 米立军, 周守为, 谢玉洪, 等. 南海北部深水油气勘探进展与未来展望 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 58–65.
Mi L J, Zhou S W, Xie Y H, et al. Deep-water oil and gas exploration in northern South China Sea: Progress and outlook [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 58–65.
- [2] Judd A, Hovland M. Seabed fluid flow: The impact on geology, biology and the marine environment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [3] 匡增桂, 方允鑫, 梁金强, 等. 珠江口盆地东部海域高通量流体运移的地貌-地质-地球物理标志及其对水合物成藏的控制 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(8): 1033–1044.
Kuang Z G, Fang Y X, Liang J Q, et al. Geomorphological-geological-geophysical signatures of high-flux fluid flows in the Eastern Pearl River Mouth Basin and effects on gas hydrate accumulation [J]. Scientia Sinica Terrae, 2018, 48(8): 1033–1044.
- [4] Yan P, Deng H, Liu H L. The geological structure and prospect of gas hydrate over the Dongsha Slope, South China Sea [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2006, 17(4): 645.
- [5] Jia Y G, Tian Z C, Shi X F, et al. Deep-sea sediment resuspension by internal solitary waves in the Northern South China Sea [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 12137.
- [6] 李营, 陈志, 胡乐, 等. 流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用 [J]. 科学通报, 2022, 67(13): 1404–1420.
Li Y, Chen Z, Hu L, et al. Advances in seismic fluid geochemistry and its application in earthquake forecasting [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(13): 1404–1420.
- [7] Cai S Q, Xie J S, He J L. An overview of internal solitary waves in the South China Sea [J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33: 927–943.
- [8] 董冬冬. 南海北部陆缘深水构造演化及其资源效应 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所) (博士学位论文), 2008.
Dong D D. Structural evolution and its resource effect of the deep water area, northern continental margin of the south China sea [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science (Doctoral dissertation), 2008.
- [9] 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 Y G, Chen T, Li P Y, 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.
- [10] 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.
Zhu C Q, Jia Y G, Liu X L, et al. Classification and genetic mechanism of submarine landslide: A review [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(6): 153–163.
- [11] Tian Z C, Liu C, Jia Y G, et al. Submarine trenches and wave-wave interactions enhance the sediment resuspension induced by internal solitary waves [J/OL]. Journal of Ocean University of China, [2022-10-12]. <https://doi.org/10.1007/s11802-023-5384-0>.
- [12] Zhu C Q, Cheng S, Li Q P, et al. Giant submarine landslide in the South China Sea: Evidence, causes, and implications [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(5): 152.
- [13] Sun Q L, Alves T M, Lu X Y, et al. True volumes of slope failure estimated from a quaternary mass-transport deposit in the northern South China Sea [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(6): 2642–2651.
- [14] Chiu J K, Tseng W H, Liu C S. Distribution of gassy sediments and mud volcanoes offshore Southwestern Taiwan [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2006, 17(4): 703–722.
- [15] Lu Y T, Luan X W, Lyu F L, et al. Seismic evidence and formation mechanism of gas hydrates in the Zhongjiannan Basin, Western margin of the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 274–288.
- [16] 汪品先. 追踪边缘海的生命史: “南海深部计划”的科学目标 [J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1807–1826.
Wang P X. Tracing the life history of a marginal sea: On the “South China Sea deep” research program [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 1807–1826.
- [17] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. “透明海洋”立体观测网构建 [J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654–2661.
Wu L X, Chen Z H, Lin X P, et al. Building the integrated observational network of “transparent ocean” [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(25): 2654–2661.
- [18] 孙启良, 吴时国, 陈端新, 等. 南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4052–4062.
Sun Q L, Wu S G, Chen D X, et al. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon and gas hydrate accumulations in the deep-water basins of the northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(12): 4052–4062.
- [19] Li W, Alves T M, Wu S G, et al. A giant, submarine creep zone as a precursor of large-scale slope instability offshore the Dongsha Islands (South China Sea) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 451, 272–284.
- [20] Wang X X, Kneller B, Sun Q L. Sediment waves control origins of submarine canyons [J]. Geology, 2023, 51(3): 310–314.
- [21] 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]. 地学前沿, 2022, 29(5): 229–245.
Chen T, Jia Y G, Liu T, et al. Long-term in situ observation of pore pressure in marine sediments: A review of technology development and future outlooks [J]. Earth Science Frontiers, 2022,

- 29(5): 229–245.
- [22] 贾永刚, 阮文凤, 胡乃利, 等. 现代暖期气候变暖对南海北部陆坡天然气水合物分解潜在影响 [J]. 地学前缘, 2022, 29(4): 191–201.
Jia Y G, Ruan W F, Hu N L, et al. Hydrate dissociation on the northern slope of the South China Sea: Potential effects from climate warming in the current warm period [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 191–201.
- [23] Huang X D, Chen Z H, Zhao W, et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 30041.
- [24] Alford M H, Peacock T, MacKinnon J A, et al. The formation and fate of internal waves in the South China Sea [J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 65–69.
- [25] Santos I R, Chen X G, Lecher A L, et al. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(5): 307–323.
- [26] 王霄飞, 李三忠, 龚跃华, 等. 南海北部活动构造及其对天然气水合物的影响 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2014, 44(2): 419–413.
Wang X F, Li S Z, Gong Y H, et al. Active tectonics and its effect on gas hydrates in northern South China Sea [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(2): 419–413.
- [27] 马云, 孔亮, 梁前勇, 等. 南海北部东沙陆坡主要灾害地质因素特征 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 102–111.
Ma Y, Kong L, Liang Q Y, et al. Characteristics of hazardous geological factors on the Dongsha continental slope in the northern South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 102–111.
- [28] 张伟. 南海北部主要盆地泥底辟 / 泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成藏 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所 (博士学位论文), 2016.
Zhang W. Research on development and evolution of mud diapirs / mud volcanoes and their relationship with migration and accumulation of petroleum and natural gas-hydrate in major basins, northern South China Sea [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (Doctoral dissertation), 2016.
- [29] 陈江欣, 关永贤, 宋海斌, 等. 麻坑、泥火山在南海北部与西部陆缘的分布特征和地质意义 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 919–938.
Chen J X, Guan Y X, Song H B, et al. Distribution characteristics and geological implications of pockmarks and mud volcanoes in the northern and western continental margins of the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 919–938.
- [30] Pei Y L, Wen M M, Zhang L C, et al. Development of a high-resolution deep-towed multi-channel seismic exploration system: Kuiyang ST2000 [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 198: 104575.
- [31] 苏丕波, 何家雄, 梁金强, 等. 南海北部陆坡深水区天然气水合物成藏系统及其控制因素 [J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(7): 1–10.
Su P B, He J X, Liang J Q, et al. Natural gas hydrate migration and accumulation system and its controlling factors on northern deep water slope of the South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(7): 1–10.
- [32] 赵静, 梁前勇, 尉建功, 等. 南海北部陆坡西部海域“海马”冷泉甲烷渗漏及其海底表征 [J]. 地球化学, 2020, 49(1): 108–118.
Zhao J, Liang Q Y, Wei J G, et al. Seafloor geology and geochemistry characteristic of methane seepage of the “Haima” cold seep, northwestern slope of the South China Sea [J]. *Geochimica*, 2020, 49(1): 108–118.
- [33] 孙志文, 贾永刚, 权永峙, 等. 复杂深海工程地质原位长期监测系统研发与应用 [J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 216–228.
Sun Z W, Jia Y G, Quan Y Z, et al. Development and application of long-term in situ monitoring system for complex deep-sea engineering geology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 216–228.
- [34] 张云山, 贾永刚, 尉建功. 海底冷泉原位观测装置研究回顾与展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 200–213.
Zhang Y S, Jia Y G, Wei J G. A review and prospect of in-situ observation equipment for cold seep [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(2): 200–213.
- [35] 年廷凯, 沈月强, 郑德凤, 等. 海底滑坡链式灾害研究进展 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1657–1675.
Nian T K, Shen Y Q, Zheng D F, et al. Research advances on the chain disasters of submarine landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(6): 1657–1675.
- [36] Cartwright J, Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 126–140.
- [37] 吴时国, 孙运宝, 李清平, 等. 南海深水地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Wu S G, Sun Y B, Li Q P, et al. Deepwater geohazards in the South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [38] Kopf A, Klaeschen D, Mascle J. Extreme efficiency of mud volcanism in dewatering accretionary prisms [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 189(3–4): 295–313.
- [39] Yan C L, Ren X, Cheng Y F, et al. Geomechanical issues in the exploitation of natural gas hydrate [J]. *Gondwana Research*, 2020, 81: 403–422.