

海底碳封存环境地质灾害风险及监测技术研究

张少鹏^{1,2}, 刘晓磊^{1,2*}, 程光伟^{1,2}, 朱超祁^{1,2,3}, 李清平⁴, 何玉发⁴

(1. 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266100; 3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100; 4. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 海底 CO₂地质封存是我国实现“双碳”目标的重要组成部分, 但 CO₂泄露具有诱发海底地质灾害的风险, 威胁海洋工程的安全建设, 因此开展封存区环境地质监测对海洋碳封存实施具有重要的现实意义。本文在简要介绍海底 CO₂地质封存示范案例的基础上, 阐述了海底封存区 CO₂泄露的致灾机制, 结合实例梳理了典型 CO₂控释试验中的海洋环境监测技术, 重点分析了与 CO₂泄露相关的环境地质监测技术, 包括地震调查与监测、电阻率法监测技术、重力监测技术、海床变形监测技术以及沉积物孔隙压力监测技术等, 展望了我国海底碳封存及其环境地质监测的未来发展前景。研究认为, 今后应侧重封存区 CO₂泄露致灾机制与环境地质监测技术研究, 建议在研发长时序、低成本并实时监测技术的基础上, 结合封存区基线调查, 建立和发展系统性、智能性的多维度灾害识别模型, 构建多方面、多层次、多灾种的监测预警预报体系。

关键词: 海底碳封存; 环境地质; CO₂泄露; 灾害风险; 监测技术

中图分类号: P736 **文献标识码:** A

Geoenvironmental Hazard Risks and Monitoring Technologies for Marine Carbon Sequestration

Zhang Shaopeng^{1,2}, Liu Xiaolei^{1,2*}, Cheng Guangwei^{1,2}, Zhu Chaoqi^{1,2,3}, Li Qingping⁴, He Yufa⁴

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 3. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Marine carbon geological sequestration is crucial for achieving carbon peaking and carbon neutralization in China. However, there exist risks of carbon dioxide (CO₂) leakage that leads to seabed geological disasters, severely threatening the safety of marine engineering. Therefore, it is of great practical significance to monitor the environmental geology of sequestration areas. This study briefly introduces several demonstration cases of marine carbon geological sequestration and explores the disaster mechanism associated with CO₂ leakage in seabed sequestration areas. It also sorts out the marine environment monitoring technologies in typical CO₂ controlled release tests via examples and analyzes the environmental geology monitoring technologies related to CO₂ leakage, including seismic investigation and monitoring, resistivity monitoring, gravity monitoring, seabed deformation monitoring, and sediment pore pressure monitoring. Moreover, the prospects of China's marine carbon geological sequestration and its environmental geology monitoring are presented. We suggest that long-time, low-cost, and real-time monitoring technologies should be developed, a

收稿日期: 2023-03-20; 修回日期: 2023-04-23

通讯作者: *刘晓磊, 中国海洋大学山东省海洋环境地质工程重点实验室教授, 研究方向为海洋地质工程; E-mail: xiaolei@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(42277138)

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

systematic and intelligent multi-dimensional disaster identification model should be established in combination with the baseline investigation of the sequestration areas, and a multi-faceted, multi-level, and multi-disaster monitoring and forecasting system should be built.

Keywords: marine carbon geological sequestration; environmental geology; CO₂ leakage; hazard risks; monitoring technologies

一、前言

目前,大气中的温室气体浓度显著增加^[1],全球变暖,厄尔尼诺现象频发,气候危机迫在眉睫,人们也在努力改变局势,但世界仍然离不开化石燃料的使用。若要实现 1.5 °C 的全球温升控制目标,全球碳减排工作仍十分艰巨^[2]。在诸多减少温室气体排放的战略技术中,碳捕集、利用和封存(CCUS)技术是对减少碳排放贡献最大的单一技术^[3-5],并已在水泥生产、钢铁制造和生物化学等多个学科领域得到应用,取得了良好效果^[6-8]。相较于碳捕集、运输和利用等 CCUS 子系统^[9,10],CO₂封存的可靠性在一定程度上决定了 CCUS 技术的可行性,但其潜在的泄露致灾风险阻碍了 CCUS 技术的全面应用。为确保碳封存利益最大化和灾害风险最小化,有必要对碳封存过程中可能发生的 CO₂泄露情况进行环境地质灾害监测。

碳封存主要有陆上地质封存和海底封存两种方式,限于陆地封存空间、成本以及潜在的陆上安全风险,海底碳封存优势明显。但是,如同海底石油、甲烷水合物和浅层气等资源一样,海底 CO₂地质封存同样面临着气体迁移和泄露带来的海底地质灾害威胁。作为典型的多相多场耦合过程^[11],CO₂泄露事件具有复杂性和不确定性。海底 CO₂泄露具有隐蔽性,容易被忽视,小范围的泄露可以及时采取补救措施,但若没有开展完善且持续的监测方案,一旦泄露事件扩大,将严重影响海底稳定性,破坏海洋工程设施,甚至可能诱发海底滑坡等大型海洋地质灾害,带来大量的生命和财产损失,制约海洋开发利用的进程。对此,联合国政府间气候变化专门委员会建议,CO₂地质封存在 1000 年期间的泄露量应低于 1%^[12]。因此,从封存效率和区域安全性角度^[13],在海底碳封存过程中,对注入和封存阶段进行多层次、多方位、多周期的环境地质监测与量化评估是确保整个封存项目安全性和合理性的必要环节。

我国碳减排时间紧、任务重,海底碳封存以及

相应的环境地质监测技术尚处于起步示范阶段。目前已成功启动了恩平 15-1 海底 CO₂封存示范项目,但距离商业化应用仍存在较大差距。基于此,本文对全球海底 CO₂地质封存示范项目进行简要介绍,总结典型 CO₂控释试验中的环境监测技术,分析海底碳封存项目在监测环节方面存在的不足之处,从环境地质角度总结针对 CO₂海底封存区的监测手段,通过梳理我国目前海洋地质碳封存所遇到的机遇和挑战,提出对我国海底 CO₂地质封存环境地质监测的对策建议,为我国开展海洋碳减排任务提供参考依据,助力“双碳”目标实现。

二、海底 CO₂地质封存现状及泄露致灾风险

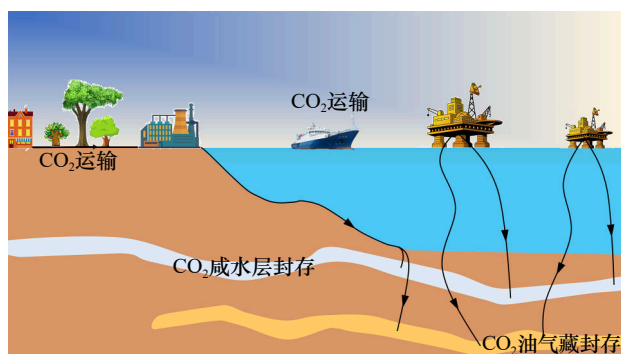
(一) 海底 CO₂地质封存典型案例

截至 2021 年,海洋吸收了 26% 的人为 CO₂排放量,海洋碳汇约为 2.9±0.4 GtC/a^[14],根据计算,全球海域沉积盆地可容纳 40% 的 CO₂封存容量^[15],因此,海底 CO₂地质封存被认为是未来 CO₂封存的首选^[4,14]。截至 2022 年,全球范围内已开展了多个成熟的海底 CO₂地质封存项目(见表 1),主要位于挪威、荷兰、巴西、澳大利亚、日本等国家的附近海域^[16-19],封存场地大多为海底咸水层,其次为油气藏(见图 1)。1996 年,由挪威国家石油公司开发的 Sleipner 项目正式在北海投运,是全球第一个工业规模的海底 CO₂地质封存项目,截至 2017 年已有效封存 CO₂约 1.7×10⁷ t。2016 年,日本在北海道苫小牧地区开展了海底 CO₂地质封存示范项目,截至 2019 年已累计注入的 CO₂量约为 3×10⁵ t^[20];因对气体注入前后进行了全面的地质调查与监测,该项目被认为是亚洲较为成功的 CO₂海底封存项目。上述项目的成功运行和经验积累,对我国海底碳封存项目建设具有借鉴和参考价值。

我国近海盆地具有物理力学性质较良好的储层和盖层^[21],并具有碳封存圈闭特性,近海主要盆地中的咸水层可封存约 2×10¹² t 的 CO₂^[15]。针对我国海底 CO₂地质封存的可行性,目前已进行了全面且深

表1 典型的海底CO₂地质封存项目

项目名称	国家及实施地点	封存量/ $\times 10^6$ t	地层注入深度/m	储层岩性	盖层岩性	封存方式
Sleipner	挪威北海	17	1000	砂岩	页岩	咸水层封存
Snøhvit	挪威巴伦支海	1.1	2500	砂岩	页岩	咸水层封存
Tomakomai	日本苦小牧近海	0.3	3000	砂岩/火山岩	泥岩	咸水层封存
Gorgon	澳大利亚巴罗岛近海	55	2300	砂岩	页岩	咸水层封存
White Rose	英国亨伯近海	54	1020	砂岩	泥岩	咸水层封存
K12-B	荷兰北海	0.1	3800	砂岩	蒸发岩	枯竭油气藏封存
Peterhead	英国北海	34	2560	砂岩	页岩	枯竭油气藏封存
Lula	巴西里约热内卢近海	0.8	3000	碳酸盐岩	泥岩	驱油封存

图1 海底CO₂地质封存示意图

入的研究^[21,22],从断裂活动、盆地压力、构造沉降特征、地震活动性以及地温梯度等角度对我国多个海域的近海盆地进行了综合分析,其中,东海陆架盆地、珠江口盆地、琼东南盆地东部以及南海中央海盆总体构造稳定,不存在明显压力和温度异常,是地质构造比较理想的海底碳封存区。此外,我国南海地区是一个重要的CO₂排放源,已有多处海上油气田,具有丰富的地质资料和完善的基础设施。总体而言,我国南海珠江口盆地具有相对较为优越的封存条件,其次为东海盆地、渤海盆地、台西南盆地及南海中南部诸盆地等^[22]。

2023年3月19日,位于南海珠江口盆地的恩平15-1平台正式开启CO₂回注井钻井作业,这是我国第一口海上CO₂回注井,也是目前亚洲最大的海上石油生产平台,标志着我国首个超百万吨级海上CO₂回注封存示范工程取得了重要进展。恩平15-1油田CO₂回注封存示范工程建成后,预计每年可封存的CO₂量约为 3×10^5 t,5年内累计碳封存量可达 1.46×10^6 t以上。此外,尽管我国目前尚未提出针对海底CO₂地质封存的明确环境监测要求,也未实施

过针对性的封存区环境地质监测,但恩平15-1油田CO₂回注封存示范工程首次开展了环境监测方案研究,对地层水、回注参数、时移地震和环境现状等要素进行了监测^[23],填补了我国海底碳封存区环境监测示范的空缺。

(二) 碳封存泄露致灾分析

由于CCUS相关技术壁垒,我国海底CO₂地质碳封存和陆上碳封存同样面临着高成本的技术难题亟待解决^[24,25],其中封存技术不仅直接影响着海底CO₂地质封存的顺利开展,还会出现钻井出砂等工程技术难题。若地层出砂加剧,则会进一步降低储层强度,扩大岩层孔隙通道,增加CO₂泄露的风险。如目前处于搁置状态的澳大利亚CO₂咸水层封存项目——Gorgon项目^[26],前期设计以及地质调查不足致使注井出砂、注入量不理想等问题出现,增加了CO₂泄露的可能性,若持续注入,则会存在工程项目运行风险,如出现裂隙扩张等现象,破坏储层骨架强度。

全球多个海底碳封存项目的初步监测结果表明,海底碳封存发生CO₂泄露的概率极低;但长期来看,由于海底地质条件具有复杂性和不确定性,封存地始终存在气体缓慢泄露的可能性,因为注井、地层裂隙或断层、碳酸流体腐蚀的孔隙路径等都是气体泄露的通道。封存区气体泄露会导致局部CO₂含量升高,不可避免地会酸化海水,从而导致海洋底栖生物群落发生改变,破坏海洋生态环境。若CO₂泄露量足够大,则将释放回大气圈,加剧温室效应。

海底碳封存区的环境地质问题同样也需要受到重视。无论是CO₂的注入还是泄露,地层的应力场

都会发生改变^[11],使得储层及相邻层位孔隙结构发生改变以及岩层发生形变,影响盖层的渗透性,从而加快CO₂泄露(见图2)。在高压条件下,特别是对于含裂隙的岩层,裂隙将会产生扩张甚至贯通,很容易形成劈裂破坏,应力集中甚至还会导致地层内部滑裂面的出现,引起断层活化、海床塌陷、海底地震等一系列地质灾害。以挪威Sleipner项目为例^[27],通过模拟计算CO₂注入封存后储层和盖层的应力变化,在注入储层10年后,盖层下部的水力压裂裕度仅约为-0.1 MPa,表明地层存在压裂的风险,断层还可能会随着地震的出现而再活动。

CO₂的运移不仅会使地层应力发生改变,化学反应过程也会进一步加剧地层的不稳定性。通过室内试验研究发现^[28],饱和CO₂盐水会导致储层岩石的成分和孔隙度发生变化,含低硫酸盐的饱和CO₂盐水能溶解岩石中10%的原生方解石,并使孔隙率增加2.6%,这也就表明,过量泄露的CO₂将会进一步扩大裂隙,降低储层的物理力学性质,减少CO₂封存年限。

三、海底碳封存区环境监测技术进展

海底CO₂地质封存的收益和风险并存。海底沉积物具有庞大的固碳能力,然而碳封存区的地质环境安全性制约着海洋碳封存技术的发展和推广应用^[12];海洋碳封存的时空跨度较大,海底地质条件复杂,气体泄露传播具有不确定性,因此,研发和应用具有针对性的海底碳封存区地质环境监测技术尤为重要。该技术不仅可以量化海底CO₂的泄露量,正确评估海底碳封存效率,还可以对海底CO₂泄漏事故做出应急响应。

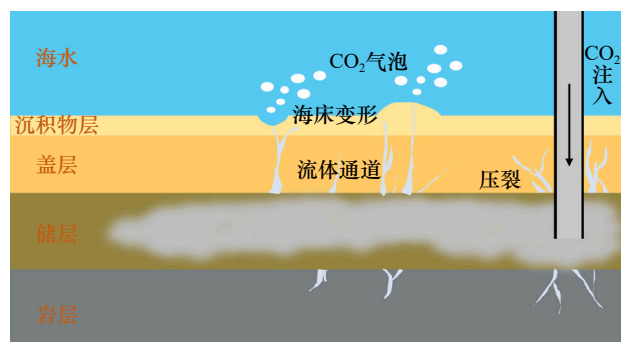


图2 CO₂的注入或泄露导致地层特性变化

(一) 海底CO₂地质封存环境监测现状

目前,我国海底CO₂地质封存以及监测技术尚处于起步阶段,缺少专门针对封存区监测的相关规定和案例。对封存区进行全面监测有利于准确评估封存效率,对于可能出现的安全隐患也能快速做出应急判断以及补救措施。

目前,针对海底CO₂泄露的地质环境监测主要围绕声学(水中气泡定量估算)和化学(检测和表征海水中的化学异常)两类技术展开,同时辅以温盐深仪(CTD)、洋流计等其他手段。由于海底CO₂地质封存仍然处于探索和示范阶段,监测内容主要包含海水pH值、二氧化碳分压(P_{CO_2})、金属离子浓度、氢离子浓度、营养盐以及CO₂羽流等海水环境要素。

针对上述环境要素,近年来不同的CCUS企业单位、科研机构以及政府部门等在世界各地具有代表性的海洋环境中联合开展了许多具有现场规模的CO₂控释实验,在评估封存方式的同时也测试了监测技术的性能。其中,规模较大、内容较全面、最具有代表性的海底CO₂封存控释监测项目分别为量化与监测地质碳储存的潜在生态系统影响项目(QICS)、CO₂储存的测量、监测和验证项目(ETI MMV)和海洋碳捕集与封存环境监测策略项目(STEMM-CCS),这些项目的顺利开展填补了海底CO₂地质封存监测在内容与技术中的许多空白领域,表2列出了上述3个项目的基本情况。可以看出,这些项目的共同点都是通过CO₂控释实验对多种监测技术进行测试,监测的主要内容为利用沉积物采样、海水采样、声学技术等方式对CO₂异常泄漏识别。此外,STEMM-CCS项目还特别加入了生态基线调查。

总体而言,这些CO₂控释实验研究目标有所不同,但都加深了对海底碳封存区环境地质变动特征的科学理解,推动了先进监测技术的研究及应用,为CCUS技术的发展做出了重大的贡献。目前,全球海底CO₂地质封存项目还没有出现因为泄露事件而致使严重地质灾害发生的情况,但相关可能性仍客观存在,威胁海底工程设施安全。

(二) 海底碳封存区环境地质监测的主要技术

目前鲜少有专门针对海底碳封存区环境地质监测的系统性研究,但浅层气和甲烷水合物等也存在气体泄露的潜在威胁,因此,可以借鉴地震调查与

表2 典型海底CO₂地质封存区监测研究计划

项目名称	运行时间/年	实施地点	研究目标	研究内容
QICS ^[29,30]	2010—2013	苏格兰阿德穆克尼什湾	了解英国海洋环境对CO ₂ 储存综合体潜在泄漏的敏感性,同时测试排放技术	研究CO ₂ 溶解和流动对沉积物及海洋动力学的影响,量化CO ₂ 泄露通量,开发CO ₂ 动态响应数值模型
ETI MMV ^[31,32]	2014—2018	英国波特兰角港和北海布里德灵顿近海	开发和在海上试验一个可操作的、具有成本效益的综合海洋监测系统	设计集成式海洋CO ₂ 综合监测系统,在代表性海洋环境中测试控释综合系统
STEMM-CCS ^[33,34]	2016—2020	英国北海中部	测试英国北海海洋CO ₂ 封存点环境监测技术,建立首个海洋碳捕集与封存示范级生态基线	建立海洋碳捕集与封存示范生态基线,研究由于地质特征造成的近地表泄漏路径,测试泄露量化的创新技术

监测、电阻率法监测技术、重力监测技术、海床变形监测技术以及沉积物孔隙压力监测技术等相对成熟的方案来发展海底碳封存区环境地质监测技术。

1. 地震调查与监测

地震调查和监测是目前调查和监测海底资源分布最有效、应用最广的手段之一,能清楚地显示流体的逸出特征。地震法利用不同介质之间的弹性差异,通过研究地震波在地下的传播特性,探明地下土层具体情况。运用地震调查,可以分析得到海底的地层结构、深层断裂分布以及各种潜在的地质灾害因素资料。在我国南海,已利用地震调查开展了多次针对麻坑、浅层气和流体溢出等现象的系统研究。海底微地震监测可以用来监测海底封存区由于气体运移所产生的微地震事件,已广泛用于游离气的定性及定量研究,如在北极海域使用海底地震仪(OBS)记录了由于构造过程和底部甲烷气泡释放所产生的地震响应特征^[35]。

2. 电阻率法监测技术

CO₂的泄露会直接影响土体导电性。电阻率除了用于与沉积物物理化学性质的关系研究外,还可以用于判断孔隙度、渗透率和结构因子,因此,可通过电阻率技术监测电学参数的演化规律,推测海底CO₂的泄露过程。德国在Ketzin CCS项目中部署了一套垂直电阻率阵以用于CO₂地质封存区泄露监测,并发现电阻率对CO₂饱和度非常敏感^[36]。中国海洋大学自主设计和制作的电阻率探针经多次试验,结果表明,电阻率法可实现对一定空间内气体扩散过程的监测^[37],这也为海底CO₂泄露原位监测提供了潜在的有效手段。

3. 重力监测技术

CO₂在注入海床后会填充或替换储层中原本存在的孔隙流体,导致其对应的重力加速度场发生改变,因此,可以通过监测CO₂封存场地重力加速度场的时间-空间变化,估算CO₂注入后的质量变化和分布,间接监测海底CO₂运移过程,揭示海底CO₂空间分布规律。同时,海底重力监测技术还是地震调查与监测技术的补充。目前已通过操作水下机器人(ROV)下放并部署重力仪的方式,对CO₂地质封存区进行了动态监测^[38]。

4. 海床变形监测技术

海底CO₂的泄露过程会导致地层中的应力场受到扰动,海床稳定性降低,最终可能诱发海床变形滑动等地质灾害问题。多波束测深、侧扫声呐测深等声学监测方法已广泛用于海底地形地貌的测量,可以监测海床变形,但难以实时监测变形滑动过程,且监测精度有限。随着科技的进步,传感器技术由于其具有数据精度高、监测时序长等特点,逐渐被广泛接受并使用。针对海床变形监测,法国设计研发的IFREMER SAAF-Tiltmeter倾角计探针集成了三轴加速度传感器^[39],在法国尼斯海底滑坡监测中的应用表现良好。中国海洋大学研发的海底变形滑动原位实时自动监测设备,其搭载的位移传感器阵列(SAA)能对海床动态变形进行实时记录,已被成功应用在黄河水下三角洲埕岛海域的多次原位监测工作中^[40],结果表明,该技术对海底变形滑动过程具有良好的监测效果。

5. 沉积物孔隙压力监测技术

除CO₂注入和泄露外,CO₂封存对土层的影响也是一种应力动态平衡的过程。孔压传感器记录的

海床内部孔隙压力能够准确反映流体运移特征,能够表征海底岩土体外部应力和内部应变,通过对孔压数据的判断能够间接反映海底稳定性演变过程,是判定可能发生海底地质灾害的重要指标。自NGI-Illinois压差式孔隙压力监测设备问世以来,孔隙压力监测探杆已被广泛用于如浅层气逸散、天然气水合物分解等气体运移诱发海底环境地质问题的研究中^[41],如德国不来梅大学研发的P-lance孔隙压力监测探杆已被成功应用在2014—2016年的泥火山监测任务中^[42],记录到多次孔压突变事件。

四、我国海底碳封存及监测的研究展望与建议

(一) 研究展望

我国地域辽阔,拥有约 3×10^6 km²的海域面积,具有万亿量级的地质封存能力^[43],我国开展海底CO₂地质封存具有天然的地理位置优势和广阔的市场前景。海底CO₂地质封存一方面可用于处理CO₂废气,如我国南海油气田地区在油气开采生产时会出现大量CO₂废气以及陆地沿海地区的煤电厂、水泥厂、钢铁厂等产业园区也是重要的CO₂产生源^[10],利用海底CO₂地质封存技术,可以就地可将CO₂废气通过捕集、运输等手段最终封存在海底枯竭油气藏或咸水层中,实现减排、环保、可持续发展等多重目的,还能节省CO₂废气运输成本。另一方面,海上油气田CO₂驱油开采优势显著,这样的协同技术手段在提高油气产量的同时,还达到了应对气候变化问题的双赢结果,我国南海海域陆续被探明的天然气水合物藏也为海底CO₂地质封存技术的开展提供了优良的自然场地。

虽然目前暂未出现海底CO₂封存区相关的灾害事件,但是海底地质灾害具有突发性,正如海底滑坡一样,灾害发生前土层已经进行缓慢的形变,若形变到了一定的程度,灾害则会瞬间发生。因此,对海底碳封存区展开泄露监测以及致灾机理研究具有重要的现实意义。

在CO₂注入和泄露过程中,储层、盖层及沉积物层的特性均会发生显著变化,如温度、盐度、pH值、 P_{CO_2} 、离子浓度等要素都是可以直接表明CO₂注入和泄露迹象的参量,也是海底碳封存区的重点监测对象。目前,全球海底CO₂地质封存试验项目也是采取对上述指标进行全方位监测的方案,从理

论结果来看,海底CO₂地质封存泄漏的概率较低,但盖层破损、工程设计不完善和地层不稳等问题均有概率造成出砂、水堵等风险事件,具有泄露致灾的危险性。因此,海底CO₂地质封存监测除化学性质监测外,今后还需要重视地层孔压、地层变形和流体运移轨迹等物理力学性质监测以及从力学属性分析方面着手,进一步量化并厘清海底CO₂地质封存的泄露致灾影响。

当前,位于我国南海珠江口盆地的恩平15-1海底CO₂封存示范项目已经启动,未来不仅需要监测海洋生态环境的变化,还需要侧重环境地质多层次、多方位监测技术的研发与应用,加强封存区地质灾害风险评估及防控机制研究。

(二) 研究方向建议

我国对于海底CO₂泄露的监测工作尚处于起步阶段,特别是在环境地质领域,相关监测技术和方法尚未部署,缺乏对海底碳封存实例的现场监测试验,这在一定程度上制约了我国海底CO₂地质封存技术的进一步发展。借鉴世界上不同领域、不同项目成熟的实践经验,我国海底碳封存区环境地质的监测研究可围绕以下5个方面展开。

1. 研发长时序实时监测技术

CO₂注入后需要花费大量的时间来进行区域管理,对封存区的监测是需要长期维持的。目前针对海底沉积物特性长期监测,存在技术不足、装备较少和系统不完善等问题,限制了对封存区的有效监测和管控,为实现海底CO₂地质封存的有效性和安全性的监测需求,需要开展CO₂泄露长期连续实时监测、数据收集及分析处理技术研究。

2. 研制低成本高效监测装备

监测技术的成本是判断其可行性的重要指标之一。目前常用的海底沉积物物理力学特性监测技术成本较高,难以满足CO₂长期封存的经济要求。这样的高成本不单指装备的研发成本,还包含安装、维护和更替所需花费的资金,同时,数据的储存和处理也会进一步增加开支。回报率较低使许多商业企业难以踏足,因此需要发展低成本的监测装备,突破研究技术瓶颈,提升经济效益,同时需要加强国际合作交流,搭建企业、研究机构和高校之间合作的桥梁,推动财税政策予以倾斜以鼓励企业加入。

3. 开展封存区基线调查工作

海洋环境错综复杂, 监测CO₂泄漏是一项具有一定难度的任务。海底存在一定含量的CO₂气体, 自然发生的气体逸出导致麻坑或局部凹陷隆起等现象在海洋环境中也很常见, 很难区分自然和封存的CO₂泄漏。因此, 在监测中需要明晰跟封存气体泄露事件相关的信息, 避免将自然发生的事件错误归因于封存项目。对此, 基线调查是一个重要的技术手段, 通过了解封存区时空尺度上的海洋自然环境, 可以更容易地识别可能与CO₂泄漏相关的异常情况, 了解封存区时空尺度上的海洋自然环境, 确保封存场地的安全稳定。

4. 发展多维度灾害识别模型

围绕CO₂封存区进行的环境地质监测具有时空尺度较大的特点, 会产生大量的多元化信息, 在目前的数据处理技术和模型条件下, 较难实现繁杂的处理和分析任务, 因此, 需要发展专门的数据处理方法及模型用以提高数据分析的速度和准确性。其中, 机器学习可以利用计算机和自动化算法高效处理大规模、多维度的数据集, 提取关键信息, 并进行准确分析以挖掘数据间的关联性。通过建立系统性和智能性的灾害识别模型, 可以及时发现并解决潜在的灾害问题, 有效监测各种环境下的CO₂泄漏情况。

5. 构建地海空监测预警体系

海底CO₂泄漏甚至诱发海床变形等地质灾害是具有突发性和破坏性的, 这就要求监测技术能够提供快速数据处理和风险评估与预警功能。然而目前对于CO₂封存区海底地质灾害综合评价预测模型尚未建立, 监测系统尚不具备对封存区域海底地质灾害进行多点、多维度、多灾种协同智能监测能力, 未能构建海陆统筹的远程实时监测物联网。因此, 需要搭建封存区地质环境监测物联网及研制灾害预警预报平台技术与装备, 实现对CO₂泄漏过程诱发地质灾害演化规律的揭示, 加强对封存区海底地质灾害前兆的判别和对典型海底地质灾害危险性的分级。

五、结语

目前针对海底CO₂地质封存的研究集中在封存手段等技术领域与对海洋生态等威胁程度分析上,

但无论是CO₂的注入还是泄露, 地层的应力场都会显著改变, 影响盖层的渗透性并加剧CO₂泄露, 使得岩层发生形变, 甚至存在诱发海底地质灾害的威胁。我国海底CO₂地质封存以及封存区泄露致灾研究尚处于起步阶段, 因此可以借鉴针对海底浅层气、甲烷水合物等气体释放泄露监测等成熟的地球物理手段来发展海底碳封存区环境地质监测技术。

位于我国南海珠江口盆地的恩平15-1油田海底CO₂封存示范项目回注井正式开钻, 标志着我国CCUS技术在碳减排道路上已经成功迈出了一大步。然而, 我国海底CO₂地质封存领域在面临机遇的同时, 也遭遇了严峻的挑战。对于海底碳封存区需要更加重视CO₂泄露致灾机理研究以及环境地质灾害监测与预警工作, 构建多方面、多层次、多灾种的协同智能监测技术。这不仅有利于量化CO₂泄露量以及封存区地质信息, 正确评估海底碳封存效率, 还能对CO₂泄漏致灾做出应急响应, 对确保海底碳封存实施具有重要的现实意义。

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 20, 2023; **Revised date:** April 23, 2023

Corresponding author: Liu Xiaolei is a professor from Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering of Ocean University of China. His major research field is marine geological engineering. E-mail: xiaolei@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 (42277138)

参考文献

- [1] Stainforth D A, Aina T, Christensen C, et al. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases [J]. *Nature*, 2005, 433(7024): 403–406.
- [2] Gür T M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, 89: 100965.
- [3] Masuda Y, Yamanaka Y, Sasai Y. Optimization of the horizontal shape of CO₂ injected domain and the depths of release in moving-ship type CO₂ ocean sequestration [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2013, 18: 220–228.
- [4] Haszeldine R S. Carbon capture and storage: How green can black be? [J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1647–1652.
- [5] Metz B, Davidson O, De Coninck H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

- [6] Monteiro J, Roussanaly S. CCUS scenarios for the cement industry: Is CO₂ utilization feasible? [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 61: 102015.
- [7] Wei N, Liu S N, Jiao Z S, et al. A possible contribution of carbon capture, geological utilization, and storage in the Chinese crude steel industry for carbon neutrality [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 374: 133793.
- [8] American Society of Civil Engineers. Carbon capture and storage: Physical, chemical, and biological methods [C]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [9] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70–80.
Zhang X, Li Y, Ma Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 70–80.
- [10] 李姜辉, 李鹏春, 李彦尊, 等. 离岸碳捕集利用与封存技术体系研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(2): 173–186.
Li J H, Li P C, Li Y Z, et al. Technology system of offshore carbon capture, utilization, and storage [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 173–186.
- [11] 张旭辉, 郑委, 刘庆杰. CO₂地质埋存后的逃逸问题研究进展 [J]. *力学进展*, 2010, 40(5): 517–527.
Zhang X H, Zheng W, Liu Q J. Advances in CO₂ escape after sequestration [J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(5): 517–527.
- [12] Metz B, Davidson O, De Coninck H, et al. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [C]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [13] Dixon T, McCoy S T, Havercroft I. Legal and regulatory developments on CCS [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 431–448.
- [14] Schrag D P. Storage of carbon dioxide in offshore sediments [J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1658–1659.
- [15] Pearce J M, West J M. Study of potential impacts of leaks from onshore CO₂ storage projects on terrestrial ecosystems [R]. Nottingham: IEA Greenhouse Gas R&D Programme Technical Study, 2007.
- [16] Li Q, Wu Z S, Li X C. Prediction of CO₂ leakage during sequestration into marine sedimentary strata [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3): 503–509.
- [17] Anderson J, Bachu S, Nimir H B, et al. Underground geological storage [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [18] Liu S Y, Ren B, Li H Y, et al. CO₂ storage with enhanced gas recovery (CSEGR): A review of experimental and numerical studies [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(2): 594–607.
- [19] Kumar N, Sampaio M A, Ojha K, et al. Fundamental aspects, mechanisms and emerging possibilities of CO₂ miscible flooding in enhanced oil recovery: A review [J]. *Fuel*, 2022, 330: 125633.
- [20] Tanase D, Tanaka J. Progress of CO₂ injection and monitoring of the Tomakomai CCS Demonstration Project [C]. Abu Dhabi: Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference, 2021.
- [21] 李春峰, 赵学婷, 段威, 等. 中国海域盆地 CO₂地质封存选址方案与构造力学分析 [J]. *力学学报*, 2023, 55(3): 1–13.
Li C F, Zhao X T, Duan W, et al. Strategic and geodynamic analyses of geo-sequestration of CO₂ in China offshore sedimentary basins [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(3): 1–13.
- [22] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究 [D]. 大连: 大连海事大学 (博士学位论文), 2014.
Huo C L. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China [D]. Dalian: Dalian Maritime University (Doctoral dissertation), 2014.
- [23] 衣华磊, 郭欣, 贾津耀, 等. 恩平 15-1 油田开发 CO₂回注封存工程方案研究 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 163–169.
Yi H L, Guo X, Jia J Y, et al. Research on CO₂ re-injection and storage engineering scenario of EP15-1 oilfield development [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 163–169.
- [24] Nguyen D N. Carbon dioxide geological sequestration: Technical and economic reviews [C]. San Antonio: SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, 2003.
- [25] 赵小令, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 中国二氧化碳捕集利用和封存技术经济性 with 规模预测 [J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 1–12.
Zhao X L, Xiao J Y, Hou J M, et al. Economic and scale prediction of CO₂ capture, utilization and storage technology in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 1–12.
- [26] Marshall J. A social exploration of the west Australian Gorgon gas, carbon capture and storage project [J]. *Clean Technologies*, 2022, 4(1): 67–90.
- [27] Rutqvist J, Tsang C F. A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂-injection into a brine formation [J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(2): 296–305.
- [28] Rosenbauer R J, Koksalan T, Palandri J L. Experimental investigation of CO₂-brine-rock interactions at elevated temperature and pressure: Implications for CO₂ sequestration in deep-saline aquifers [J]. *Fuel Processing Technology*, 2005, 86(14–15): 1581–1597.
- [29] Blackford J, Stahl H, Bull J, et al. Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 1011–1016.
- [30] Atamanchuk D, Tengberg A, Aleynik D, et al. Detection of CO₂ leakage from a simulated sub-seabed storage site using three different types of pCO₂ sensors [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38: 121–134.
- [31] Bourne S, Crouch S, Smith M. A risk-based framework for measurement, monitoring and verification of the Quest CCS Project, Alberta, Canada [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 26: 109–126.
- [32] Dean M, Blackford J, Connelly D, et al. Insights and guidance for offshore CO₂ storage monitoring based on the QICS, ETI MMV, and STEMM-CCS projects [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 100: 103120.
- [33] Flohr A, Schaap A, Achterberg E P, et al. Towards improved monitoring of offshore carbon storage: A real-world field experiment detecting a controlled sub-seafloor CO₂ release [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 106: 103237.
- [34] Saleem U, Dewar M, Chaudhary T N, et al. Numerical modelling of CO₂ migration in heterogeneous sediments and leakage scenario for STEMM-CCS field experiments [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109: 103339.

- [35] Krylov A A, Egorov I V, Kovachev S A, et al. Ocean-bottom seismographs based on broadband met sensors: Architecture and deployment case study in the arctic [J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 3979.
- [36] Würdemann H, Möller F, Kühn M, et al. CO₂ SINK—From site characterisation and risk assessment to monitoring and verification: One year of operational experience with the field laboratory for CO₂ storage at Ketzin, Germany [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(6): 938–951.
- [37] Wu J X, Guo X J, Sun X, et al. Flume experiment evaluation of resistivity probes as a new tool for monitoring gas migration in multilayered sediments [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 105: 102415.
- [38] Nooner S L, Eiken O, Hermanrud C, et al. Constraints on the in situ density of CO₂ within the Utsira formation from time-lapse seafloor gravity measurements [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(2): 198–214.
- [39] Stegmann S, Sultan N, Pelleau P, et al. A long-term monitoring array for landslide precursors: A case study at the Ligurian Slope (Western Mediterranean Sea) [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2012.
- [40] Wang Z H, Jia Y G, Liu X L, et al. In situ observation of storm-wave-induced seabed deformation with a submarine landslide monitoring system [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(7): 1091–1102.
- [41] 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]. *地学前缘*, 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.
- [42] Menapace W, Völker D, Sahling H, et al. Long-term in situ observations at the Athina mud volcano, Eastern Mediterranean: Taking the pulse of mud volcanism [J]. *Tectonophysics*, 2017, 721: 12–27.
- [43] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国CCUS路径研究 [R]. 北京/武汉: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国21世纪议程管理中心, 2021.
- Cai B F, Li Q, Zhang X, et al. China carbon dioxide capture, use and storage (CCUS) annual report (2021)—China's CCUS pathway study [R]. Beijing/Wuhan: Chinese Academy of Environmental Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics of Chinese Academy of sciences, the Administrative Center for China's Agenda 21, 2021.