

李姜辉,余凤玲,牛雄伟,等.海底碳封存监测技术体系研究及未来发展[J].地球科学进展,2023,38(11):1121-1144. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2023.071. [LI Jianghui, YU Fengling, NIU Xiongwei, et al. Advances and future development of monitoring technologies for marine carbon storage[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(11): 1121-1144. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.071.]

海底碳封存监测技术体系研究及未来发展*

李姜辉¹,余凤玲¹,牛雄伟²,周天³,张运修⁴,李雯菱¹

(1.厦门大学海洋与地球学院,福建 厦门 361005;2.自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室,浙江 杭州 310012;3.哈尔滨工程大学水声工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
4.中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室,辽宁 沈阳 110016)

摘要:海底碳封存是减少全球温室气体排放的重要途径之一。为确保高效安全地封存CO₂,需要在封存前、封存期间和封存后对CO₂的潜在运移空间进行勘探、评估和监测。当前可用于海底碳封存监测的方式主要有聚焦海底井筒的内置传感监测、聚焦储层和盖层的地球物理监测以及聚焦海床和海水层的海底环境监测。这3种方式在海底碳封存监测中分别可获得注入、监测井筒附近的温度、压力和声学等数据,深部储层和盖层地震、电磁、重力等数据,以及浅部沉积层和海水层声学、化学和海洋学等数据,对这些数据进行分析有助于识别注入地层CO₂的运移特征。但欲获取海底碳封存监测的相关数据,必须首先实现针对相关监测技术和研究方法的集成应用和优质方案的设计,这也成为当前学术界和工程界亟待解决的难题。本着尽可能降本增效的原则,为实现科学有序地进行海底碳封存监测,整理了不同监测方式和相关支撑技术的工作原理、应用现状以及面临的挑战,并展望了海底碳封存监测技术的未来发展。研究结果将为我国海底碳封存作业的实施和发展提供基础指引。

关键词:海底碳封存;CO₂监测;内置传感;地球物理;海洋环境

中图分类号: P754 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2023)11-1121-24

1 引言

自2005年联合国政府间气候变化专门委员会发表《关于碳捕集和封存的特别报告》^[1]以来,碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)逐渐成为大规模减少CO₂排放、实现《巴黎协定》全球1.5℃升温控制目标的主要选项之一^[2-5]。2021年发布的《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》亦将CCUS列为实现“双碳”目标的重要技术手段,并提出“推进规模化碳捕集利用与封存技术——研发、示范和产业化应用”^[6]。CCUS包括从

热电厂和能源密集型产业(如钢铁、水泥和化肥厂等)中捕集CO₂,并将其注入适宜封存的地质层从而与大气永久隔离或利用其生产价值产品的过程^[1]。与其他碳减排路径相比,如燃料使用降本增效和可再生能源开发,CCUS的优势在于其沿用现有油气生产设施的同时,可大幅(千兆吨级)快速地减少CO₂的排放^[1]。

在全球适宜封存CO₂的地质层中,有很大一部分位于近海大陆架盆地^[7],其中中国近海主要沉积盆地咸水层的封存量可达2万亿t^[8]。为了达到CO₂减排目标,已有超过20个沿海国家和地区开始考虑利

收稿日期:2023-07-09;修回日期:2023-09-25.

* 基金项目:生态环境部咨询项目(编号:20233160A0073)资助。

作者简介:李姜辉,教授,主要从事离岸碳捕集、利用与封存,海洋声学的相关研究. E-mail: jli@xmu.edu.cn

用其近海沉积盆地封存 CO_2 。截至 2023 年末,全球已开展了 7 个海底碳封存项目^[9-13],包括挪威的 Sleipner^[14]和 Snøhvit^[15]、荷兰的 K12-B^[16]、巴西的 Lula^[17]、日本的 Tomakomai^[18]、澳大利亚的 Gorgon^[19]以及中国的恩平 15-1^[10]。这些已有海底碳封存项目的成功实施为后续更多项目的开发提供了丰富经验和 技术示范,也增强了人们对利用离岸 CCUS 大规模减排 CO_2 的信心。其他正处于规划中的海底碳封存项目,包括荷兰的 Porthos^[20]、马来西亚的 Kasawari^[21]、澳大利亚的 CarbonNet^[22]、英国的 Acorn 和 Teesside^[23]以及美国的 Houston Ship Channel^[24]等。

对于这些大规模海底碳封存项目的实施,通常包括 CO_2 捕集、运输、封存和监测 4 个环节^[25]。空间选择、特征描述和工程设计是确保海底碳封存长期安全的主要手段。海底碳封存作业需要选择合适的海底 CO_2 封存地层空间,而其首要条件是最小化封存空间泄漏 CO_2 的概率,要求在预期封存点及潜在扩散区域内避开非密封废弃钻井、地质断层和地层断裂网络等不稳定地质因素^[26]。在排除不稳定地质因素、仔细挑选至少含有 1 个非渗透性盖层的自然密封储层后,一旦将 CO_2 注入到该储层,多重自然屏障将阻止 CO_2 垂向运移并被密封在储层内^[27]。然而,在向地层注入 CO_2 之后, CO_2 会因为浓度梯度等因素向外运移和扩散,同时增加扩散区域的地层压力从而改变储层环境。这种储层环境的改变可

能会导致稳定地层出现不稳定的变化,如地层局部压力增加或出现复杂的矿化作用,从而致使部分 CO_2 沿不稳定通道运移最终导致泄漏发生(图 1)。因此,为确保注入地层的 CO_2 能按预期被长期密封在海底深部地质空间、不会因地层变形发生泄漏以及不对海洋环境和人类生存空间构成威胁,就需要对注入海底地层 CO_2 的封存过程和运移空间进行持续性监测,以及时检测到可能的异常,从而启动封存纠正或补救措施。

海底碳封存的区域通常可达数百甚至上万平方米,而潜在 CO_2 泄漏事件发生的时空差异很大,且海洋环境的动态变化极其复杂,这对于监测工具和策略的选择要求极高。为了获得海底地层 CO_2 的运移状态并提早发现 CO_2 泄漏的迹象,主要通过检测和量化地层及以上空间中 CO_2 的运移来实现,如验证 CO_2 是否通过不稳定通道泄漏至海底更浅的地层甚至海水层,以及在一定时间范围内是否对周围海洋环境有严重影响等^[28]。海底碳封存监测框架的制定通常需要覆盖 CO_2 全生命周期的整个时间尺度,包括注入前、注入期间和注入后,也需要覆盖 CO_2 可能运移的范围,包括海底井筒、 CO_2 储层和海水层。目前,已有海底碳封存运营商采用基于风险的测量、监控和验证(Monitoring, Measurement and Verification, MMV)框架来评估 CO_2 地质封存的状态^[29],包括调查可能导致封存失效的潜在机制,提

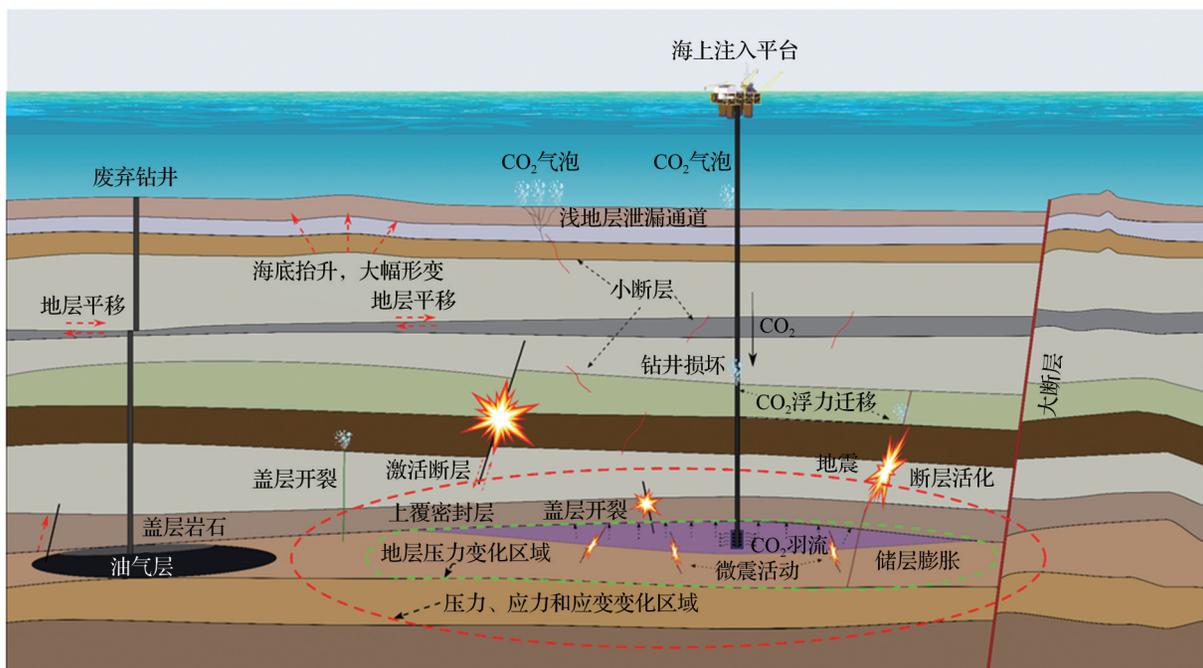


图 1 海底碳封存相关的部分潜在风险

Fig. 1 Part of potential risks related to marine carbon storage

出响应风险缓解或施工纠正方案等。

针对海底碳封存的监测方式主要有 3 种:①聚焦海底井筒的内置传感监测,如在注入井及其附近的井下监测压力和温度等参数^[30];②聚焦海底储层和盖层的地球物理监测,如通过时延地震勘测绘制低频声回波探测地层内封存的 CO₂羽流随时间的运移和空间演变等^[31];③聚焦海床和海水层的海底环境监测,如通过主动声呐探测海水层 CO₂气泡羽流并通过化学传感测量海水中 CO₂的浓度变化等^[32-34]。支撑每一种监测方式的相关技术都有其适用性和局限性:由于内置传感监测的空间局限性,使其无法监测到距离井筒或注入通道稍远但有 CO₂运移扩散的空间;地球物理监测的低分辨率,使其无法监测到中等规模以下的 CO₂泄漏;海底环境监测的传感数据会受到动态海洋环境的严重干扰等。同时,不同监测方式又相互关联形成互补作用,如井筒和地球物理监测数据可能会更早地发现潜在泄漏,从而指导海洋环境监测重新评估监测范围和强度。近些年来的一些研究给出了不同监测方式支撑技术的适用条件和场景以设计不同的监测方案,并强调了对这些技术的集成应用可以更加系统地进行海底碳封存监测^[35-36]。这些方案通常应该具备合法合规、安全、成本低、适用广和现场实测有效等特点,而对相关技术的选择应用需要在充分掌握封存区地质及海洋环境基线的基础之上进行。

本文较全面地总结了全球对海底碳封存的监测需求、相关监测技术及其应用的发展现状,概述了关键监测方式的工作原理,整理了相关监测技术的现实应用和面临的挑战,讨论了对不同内置传感技术、地球物理技术和环境监测技术的整合方式,明确了对监测技术的集成和对相关数据的交叉融合分析以获取更加有效信息的必要性,并基于具体监测需求对设计更高效和更经济的监测方案提出了未来发展建议。

2 海底碳封存的监测需求与发展现状

2.1 监测需求

人们对向海底地层注入 CO₂可能会出现泄漏或引发地层移位等问题产生了担忧,包括对经济、环境的影响和对相关方声誉的损害,从而产生了海底碳封存监测。经济风险主要来自对环境法规的遵守、泄漏监测、风险补救以及碳信用积分相关的成本。环境风险主要来自 CO₂泄漏后局部酸化的海洋环境

或相关化学变化对底栖生态系统的影响。声誉风险主要来自人们对海底碳封存的接受程度,而采取安全监测措施能够保证相关方声誉风险可控。

2.1.1 政府监管的要求

为保障海底碳封存的安全性,一些国家和地区制定了相关的强制性法规和指导性政策,包括 2007 年修订的《伦敦议定书》《东北大西洋海洋环境保护公约》和《欧盟 CCS 指导框架》等^[37-39]。这些法规规定,运营商必须在 CO₂注入前至注入后的所有阶段对注入点、地质储层和周围环境进行监测,检测可能存在的重大异常情况和 CO₂运移过程,根据 CO₂封存总量,量化可能存在的 CO₂泄漏量、评估风险等级和对周围环境的潜在重大不利影响^[26,40-41]。然而,这些法律法规均未对监测提出具体的量化指标要求,如需要监测的最小泄漏率、空间范围、频次或最小时间间隔等。中国目前主要从环境保护的角度出发规范海底碳封存项目的开发,但还未专门制定针对海底碳封存监测相关的法律法规。

2.1.2 规避经济风险的需求

欧盟排放交易体系要求 CO₂捕集装置、运输网络和存储设备需要符合《欧盟 CCS 指导框架》2009/31/EC 的规定^[39],未排放但转移出捕集装置的 CO₂可以从总的碳排放量中扣除。在测量成本不过高且技术允许的情况下,需要对转移出捕集装置且往地层注入 CO₂的量及逸出量进行测量,且逸出量需要小于注入量的 6.5%^[42]。无法量化注入及逸出量的运营商将受到欧盟排放交易体系的罚款(2023 年每吨 CO₂约 86 欧元)。在发生泄漏或报警的情况下,如果运营商不能提供未泄漏和误报警的有效证明,则可能要承担相关经济损失和法律责任。欧盟排放交易体系的测量规定并不直接适用于对海底封存 CO₂的监测,仅适用于对捕集、运输和注入 CO₂的监测。如果在地层中永久封存 CO₂的量小于注入 CO₂的量,则需要额外监测 CO₂的封存量。

2.1.3 规避环境风险的需求

与海底碳封存相关的环境风险主要是:注入的 CO₂可能运移至海床或海水层,使海底沉积物和海水层的 CO₂浓度增加,导致局部海洋生态环境发生变化。这些风险包括海洋化学环境的变化(如 pH 值下降)超过生物种群(如钙化生物)耐受极限、地层中有毒化合物转移至海床表面以及海底生物群落结构的变化等^[43-45]。此外,在海底水流缓慢的低能水文环境、靠近自然栖息地或野生动植物保护区的区域尤其需要得到重视^[46-47]。

2.1.4 声誉风险管理的需求

现如今,人们对与自己生活息息相关的各类工业活动尤为敏感,其中之一就是海底碳封存。对海底碳封存空间进行监测,能够及时发现风险源并对之进行定位、量化和处理,从而可以将有损相关方声誉的舆论降至最低。一般情况下,海底 CO₂ 泄漏的明显特征主要包括封存区域附近海底释放的 CO₂ 气泡或化学及生物环境的明显改变,而证明这些特征是否与碳封存有关,则需要对封存区域周围环境进行详细表征。此外,对海底空间的安全监测也有利于提升项目实施的透明度并可以更好的与利益相关方进行沟通,以降低相关机构及运营商的声誉损失^[48]。

2.2 发展现状

截至 2023 年末,全球已启动了十余个与海底碳封存监测相关的大型项目,包括应海底碳封存作业安全需要而实施的工程性监测和政府基金支持的研究性监测。这些项目根据不同的监测目标(井筒、深部地层和海水层)制定相应的监测方案,并明确每种监测技术的适用条件。

2.2.1 基于封存项目的工程性监测

当前全球 7 个大型海底碳封存项目都配套有监测项目^[35]。挪威的 Sleipner 和 Snøhvit 项目采用了三维时延地震技术监测 CO₂ 羽流在地层的运移分布范围,获取了 CO₂ 储层和盖层的时延地震剖面和时间切片^[14]。1994 年,挪威 Sleipner 进行了注入前的基线观测,并分别于 1999 年、2001 年、2004 年、2006 年、2008 年和 2010 年进行了重复观测。2004 年,荷兰的 K12-B 项目在注入阶段开展了全面的井筒监测,确保了井筒完整性、掌握了井筒中 CO₂ 的运移特征和储层中的水气混合特征^[16]。2011 年巴西的 Lula 项目自启动运行以来持续性地对海底井筒压力和温度进行了监测,并采用了化学示踪剂监测^[49]。2016 年日本的 Tomakomai 项目在注入前就部署了海底电缆(Ocean Bottom Cable, OBC)、海底地震仪(Ocean Bottom Seismic, OBS)、陆上地震台站(Hi-net)、三维时延地震、海底成像以及海水层采样等技术设施,并在注入期间和注入后对封存区域进行了持续性监测。2019 年澳大利亚的 Gorgon 项目采用了井筒温压测量和海底地震监测技术,并使用船载有缆遥控潜水器和自主式潜水器搭载传感设备对海底碳封存区进行定期测量。2023 年中国的恩平 15-1 项目采用了井筒分布式温压传感测量技术。

2.2.2 基于政府基金的研究性监测

除大型配套监测项目外,一些国家也开展了研究性的监测项目,主要用于测试潜在监测工具的有效性和适用性,为制定高效监测方案提供理论依据和技术基础。2010 年英国启动的 QICS (Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage) 项目通过海底可控 CO₂ 释放试验评估了对海底 CO₂ 泄漏进行监测的可行性,并厘清了 CO₂ 泄漏可能造成的环境影响机制^[28]; 2011 年欧盟启动的 ECO₂ (Sub-seabed CO₂ Storage: Impact on Marine Ecosystems) 项目为海底碳封存海洋环境安全保障建立了一个可行的监测实施框架^[50]; 2014 年英国启动的 ETI MMV (Energy Technologies Institute Measurement, Monitoring and Verification of CO₂ Storage) 项目通过产研结合的方式探索了一种可降低监测成本的集成式海底碳封存监测系统^[36]; 2016 年欧盟启动的 STEMM-CCS (Strategies for Environmental Monitoring of Marine Carbon Capture and Storage) 项目评估了不同监测方法对离岸近地表沉积物和海水层的 CO₂ 泄漏进行检测、归因和量化的适用性,包括在北海中部海底进行了 CO₂ 受控释放实验,模拟了海水中 CO₂ 浓度的自然时空波动,开发并优化了多种固定式和移动式监测海洋环境、海底沉积层的声学及化学传感技术设备^[51-52]; 2018 年挪威启动的 ACT4storage (Acoustic and Chemical Technologies for environmental monitoring of geological carbon storage) 项目在不同海洋环境监测场景下对多种声学和化学技术的集成使用进行了测试优化^[53]。这些项目通过受控的 CO₂ 释放实验对多种监测技术进行了测试,增强了海洋环境基线调查以及海床高风险特征监测的能力,部分填补了海底碳封存海洋环境监测的技术空白。

2.3 监测策略概要

海底碳封存的监测方式包括聚焦海底井筒的内置传感监测、聚焦储层和盖层的地球物理监测以及聚焦海床和海水层的海底环境监测^[35](表 1)。这些监测方式的共同目标是表征、检测、定位、归因和量化 CO₂ 在封存空间的运移,从而尽早发现可能存在泄漏的迹象。然而,为特定项目制定正确的技术解决方案并非易事,首先,需要清楚了解现有技术及其对不同监测场景的适用性;其次,制定合适的监测方案以最佳的方式组合使用这些技术,而海底碳封存监测方案的制定可能取决于特定的地质构造和地层特征。

表 1 海底碳封存监测关键技术及辅助研究方法归纳
Table 1 Summary of key monitoring technologies for marine carbon storage

关键技术	监测方式/辅助方法	监测方法或设备	主要监测目标	主要优点	主要缺点
聚焦海底井筒的内置传感监测技术	分布式光纤压力/温度传感	压力和温度传感器	注入井或监测井中压力和温度		
	分布式光纤声学传感	主动源地震声回波	井附近 CO ₂ 羽流轮廓	可直接获取井筒及附近区域完整性信息	监测区域有限、钻井成本高
		被动源地震声回波	井附近地下介质速度		
	井中地震	单井观测	CO ₂ 注入后井附近地质目标的动态变化		
井间观测 井地观测					
聚焦储层和盖层的地球物理监测技术	海底地震	二维/三维地震层析成像	流体运移通道特征	可揭示地层结构和流体运移	难以区分流体、信息获取间隔长
		时延地震	海底储层内部结构		
		地震各向异性及横波分裂	储层内部裂隙分布方向及密度特征		
		微地震	地层局部应力和应变		
	海底电磁	地层电性差异	储层 CO ₂ 饱和度	成本低	分辨率低
	海底重力	地层密度变化	储层质量变化		
卫星遥感	地表抬升/下沉	岩层应变异常	范围大	成本高	
辅助方法:数值模拟	热一流一固一化复杂耦合响应	对 CO ₂ 注入地层的有效性和安全性进行评价	可获封存预期	准确性验证难	
声学监测	主动声学	单波束扫描声呐	探测海底气体渗漏相关的形态特征,如海水层气泡羽流、海床麻坑、微生物群落等	探测距离远、精度高	能耗高、可持续性差
		多波束声呐			
		探鱼声呐			
		侧扫声呐			
	合成孔径声呐				
海底剖面仪	海底浅地层风险结构	可探测浅地层			
被动声学	水听器	海底气泡振动声学特征	能耗低续航长	监测区域有限	
聚焦海床和海水层的海底环境监测技术	化学监测	二氧化碳分压(pCO ₂)传感	局部海水中 CO ₂ 浓度	可归因 CO ₂ 源	可能存在时滞
		pH 传感	局部海水酸碱度		
	地层流体传感	孔隙水等相关离子/元素			
传感器搭载平台	水面船只			范围大	成本高
	自主水下航行器		搭载声学、化学、海洋学等传感设备对海底地层及近底环境参数采样	灵活	短续航
	水下滑翔机			长续航	载荷小
	海底着陆器			长期性	范围小
调查方式:海洋环境背景基线	记录注入 CO ₂ 前封存区域上部海洋环境的自然状况	提供判断环境异常的基准	降低误判风险	—	—
辅助方法:集成及自动数据处理	数据交叉融合	提升归因及量化准确率	提升数据处理及预测效率	—	—
	大数据与人工智能	提升数据处理效率		—	—
	数值模拟	自动风险识别、预判未来发展			验证难

注:“—”表示该方式或方法暂无法用“缺点”来评判。

海底井筒的内置传感监测技术能够获取井筒及注入通道附近的温度和压力等信息,但对距离较远的信息则无能为力。使用时延地震技术可获得储层 CO₂羽流运移和覆盖层的相关地球物理信息,但其耗时耗力且昂贵,导致调查频次较低,通常数年才可更新 1 次数据。使用电磁和重力测量也可获得部分地层 CO₂羽流运移的信息,然而其分辨率通

常不高。声学和化学传感器可以用来监测封存区域上部海床和海水层的 CO₂泄漏^[54],其中声学传感器可检测海水层的气泡,而化学传感器则可检测溶解相 CO₂、地层流体或沉积物孔隙水中特定化学成分的水溶液浓度。此外,用于监测洋流、温度和压力等参数的传感器以及光学成像设备、海底位移监测设备、沉积物取样、生态系统反应均可与声学和

化学监测结合使用。对于监测数据可通过数字通信和自动数据处理的方式及时获取,这有益于制定长期监测方案,并有助于实时检测到海底可能发生的泄漏。这些监测技术在应用过程中均会产生大量的数据,而对这些数据的交叉融合快速处理将是未来的一大发展方向。根据获取的大量数据流做出实时决策、确定合适的监控策略,有助于最大限度地及时预警、同时降低误报率和成本。

3 聚焦海底井筒的内置传感监测技术

通过海底注入井或监测井筒的内置传感器对井下通道进行连续测量,可获得注入速度、温度、井筒斜度和井底压力等实时传感数据。采集到的这些传感数据通常被用于与风险临界值进行比较,如通过地层或井筒壁开裂临界压力,来获取井筒及其附近区域 CO_2 地质储层的完整性信息(图2)。这些信息可进一步用于表征井筒与地层之间的黏结性、检测套管内径和厚度,评估井筒套管或水泥是否存在潜在的流体泄漏通道等。

3.1 分布式光纤井壁温度/压力传感

海底注入井或监测井的长度与 CO_2 储层的深度

和工程设计相关,通常可达数百米至数千米。海底井筒通常使用割缝套管组装,在套管的内壁间隔性地布设温度和压力传感器,可将井口至井底监测到的温度和压力数据通过光纤实时传输至海面平台。这些信息可用于判断实时注入速率是否超过了井筒及附近区域(如盖层)的风险耐受上限,分析 CO_2 注入储层后的物理性质、运移情况以及储层渗透率变化,评估剩余封存容量和地质结构稳定性等。

3.2 分布式光纤声学传感

分布式光纤声学传感是一种利用光纤传感检测振动的技术,可用于永久埋置在井中或海底进行长期、原位可重复的主动源地震和被动源地震的观测。这些实时声学传感数据能够用于对 CO_2 注入过程的不同阶段进行时延监测成像,如主动源地震声波振幅可反映 CO_2 羽流的轮廓,进而表征 CO_2 注入羽流的运移并评估可能诱发的断层滑动;被动源地震声学数据可用于反演地下介质速度模型^[55-57]。

3.3 井中地震

井中地震包括单井观测、井间观测和井地观测等多种方式,用来监测 CO_2 注入后的地下岩石、流体、应力、裂缝和断层等地质目标的动态变化^[55,58]。其中,井间观测可以获得高分辨率的反射成像、速

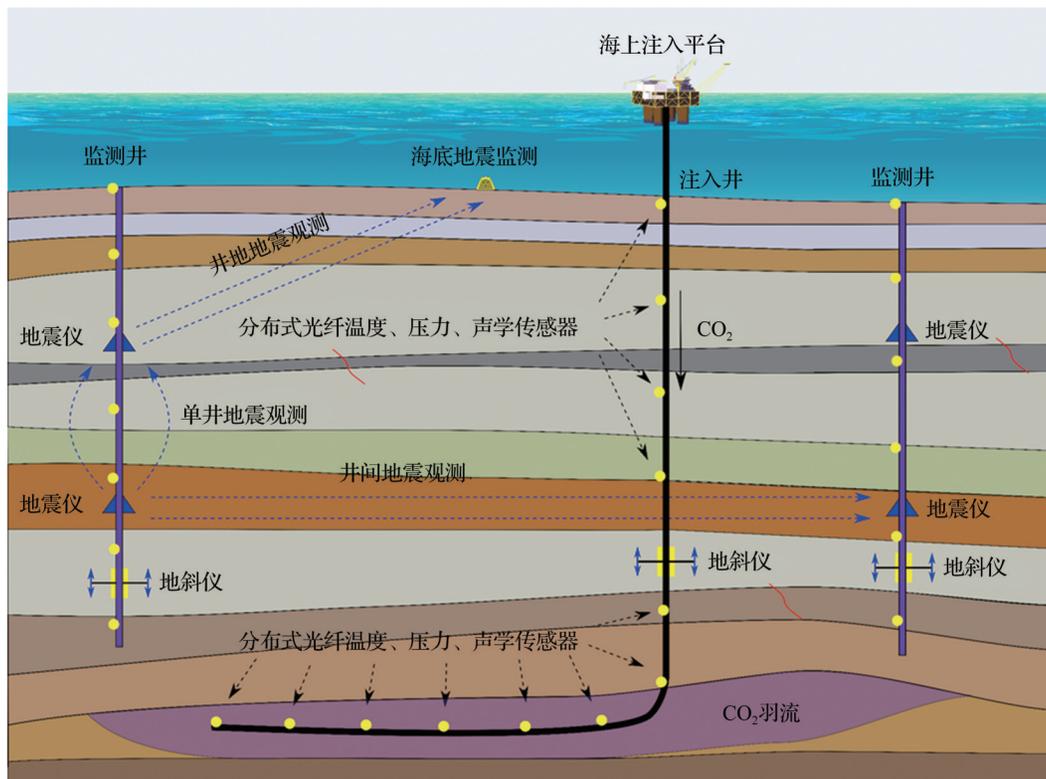


图2 海底碳封存井筒内置传感监测示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the built-in sensor monitoring in the wellbore of marine carbon storage

度成像和衰减性成像资料。例如,根据井间地震观测结果可反演获得注入井与监测井纵波(P波)和横波(S波)的速度变化连井剖面,并由流体替换模型估算得到CO₂饱和度连井剖面。如此可绘制井间CO₂饱和度分布剖面图,进而反映CO₂羽流在井筒和储层的扩散情况。

目前常用的一种井下地震监测方法是垂直地震剖面法(Vertical Seismic Profile, VSP)^[59],由震源激发地震波,固定在井壁的速度检波器接收来自2个相对方向的地震波,并对各波列进行详细分析,从而获取井筒附近的空间与时间信息。VSP测井数据通常可提供比海底地震更高分辨率的地震资料,对近井筒区域进行高分辨率成像,从而用于改善对海底表面地震资料的解释、研究井筒附近地层构造细节和岩性变化、提供地层物性参数并探测地层裂缝等。

同时,VSP测井也可与光纤传感结合应用来监测CO₂羽流在地层的扩散和运移,例如,联合分析利用时延井间地震层析成像获得的地震速度变化与时延压力层析成像获得的扩散性变化^[60],从而精确反演CO₂在地层的饱和度变化。虽然井中地震观测离海底地质封存空间距离近、信号强且海底干扰少,但由于钻井成本高使得井中观测受钻井数量、

分布密度和位置的限制较多,使其难以在海底进行大规模部署^[61]。

4 聚焦储层和盖层的地球物理监测技术

海底碳封存的地球物理监测技术包括地震、电磁、重力和卫星遥感测量等(图3),并可借助数值模拟辅以分析和预测。当前,地球物理方法大都集中在监测储层基质中的CO₂羽流运移和孔隙压力等方面,近些年已开始用于监测和分析可能存在更大安全风险的海底地层裂缝和地质断层,如挪威的北极光项目^[62]。海底岩层通常包含大大小小的裂缝,这些裂缝可以作为CO₂流体的运移通道,甚至是封存空间。因此,通过地球物理方式获得海底储层和盖层的相关数据,有利于掌握地层中CO₂流体的运移信息和封存潜力更新信息。当前,地球物理技术对海底碳封存空间的监测,主要是通过重复观测来判断测量数据与相对基线之间的差异来实现,而每种方法都有其优缺点^[35]。

4.1 海底地震

地震监测主要是对地下流体和固体结构进行机械阻抗对比,包括二维/三维地震层析成像反演CO₂饱和度或等效厚度分布变化^[56];时延地震重复

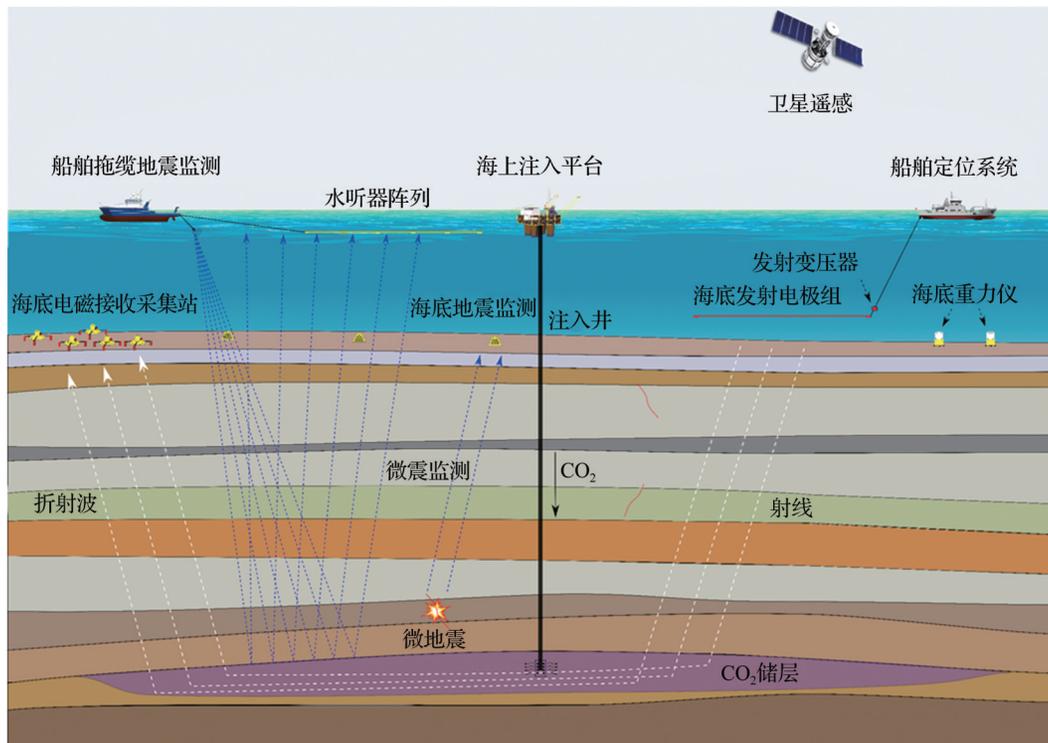


图3 海底碳封存地球物理监测示意图

Fig. 3 Schematic diagram illustrating the geophysical monitoring of marine carbon storage

观测振幅相对基线测量的差异;通过地震振幅方位各向异性分析预测裂缝的发育方位^[63];以及通过检测和定位较小幅度的微震事件对岩层保持稳态的预测等^[64-66]。此外,通过对观测地震数据进行振幅随偏移距变化分析,可以评估储层属性,预测地层弹性参数,如孔隙度、密度、岩性和流体含量等,从而进行异常识别^[67]。然而,地震监测目前还较难区分地层不同的流体类型和饱和度的变化^[68]。

OBC 和 OBS 通常被用来持续监测自然地震和微地震事件^[69-70]。OBC 通常被永久性埋设在海底以下数米处,并以数十米的间隔内置三分量地震传感器。除了监测自然地震和微地震之外,OBC 也被当作接收器用于二维地震测量。OBS 对海底储层监测主要是基于信噪比较高的地震数据,通过不同的研究方法揭示海底碳储层的地层结构物理性质和流体的运移特征,对储层环境及泄漏风险进行评估。这些方法主要包括二维/三维地震层析成像、时延地震、地震各向异性、横波分裂和微地震监测等。OBS 可以同时接收 P 波和 S 波信号,能够适应复杂的海底地形,实现深海地震数据采集,可开展广角地震勘测和对深度较大的地层结构进行探测,具有成本低和布放方式简单等优势。

然而,在精确描绘海底流体构造方面,OBS 二维/三维地震探测所建立的储层模型在分辨率方面还有待提高,如可通过布设密集观测台网、优化研究方法和数据处理等方法来改善。此外,未来的发展方向还包括研发四维海底地震仪实时监测技术并实施无缆地震数据传输,以提高对潜在海底 CO₂ 泄漏点的观测效率,研发碳储层的结构变化特征实时成像技术,基于地震台网四分量定位技术精确定位地层异常并快速预警响应等。

4.1.1 二维/三维地震层析成像

地震层析成像主要基于 P 波和 S 波走时信息反演沉积层速度结构,然后基于速度结构信息定位流体区域及其运移通道的存在和特征^[71-72],检测地层流体分布和储层压力变化,确定 CO₂ 运移模式并预测运移距离以及分布饱和度特征^[73-78]。二维地震层析成像成本较低,可操作性强并可广泛使用,但对于某些复杂的结构可能无法满足高分辨率成像要求。三维地震层析具有非常高的探测和分辨能力,能够探测盖层中流体含量的微小变化。通常二维地震调查也被用来补充三维地震调查数据的空窗期。利用二维和三维地震调查结果,结合地质资料及测井资料,可以预测储层流动单元的地层岩性、

孔隙度和渗透率等属性^[79-81],是实现储层精确表征与建模的必要前提,同时可优化注入方式和量化波及系数,并校正封存场地 CO₂ 空间运移规律的数值模拟结果,使储层模拟更加精确。

4.1.2 时延地震

时延地震主要基于对不同时间在同一位置采集的地震数据进行延时成像,可研究海底储层流体运移随时间变化所引起的内部结构变化,归纳解释流体运移特征和储层结构随时间变化特征,可基于时延地震成像结果对储层进行动态模拟评估^[82-83]。在 CO₂ 地质封存的不同时期开展时延地震观测,可以有效监控 CO₂ 注入海底地层后其运移羽流的纵向和横向扩散分布范围,从而验证 CO₂ 是否被有效地封存于目标储层中;也可以监测是否存在 CO₂ 泄漏的风险。通过分析时延地震剖面和时间切片,可获得 CO₂ 注入后地震 P 波速度下降幅度,进而绘制 CO₂ 注入后的深度位置、CO₂ 羽流的运移扩散空间分布范围以及盖层处可能存在的泄漏情况^[84]。影响时延地震应用效果的一个重要因素是多次地震观测的可重复性,这对于通过不同航次在海底定点开展地震观测是一个挑战。

4.1.3 地震各向异性及横波分裂

地震各向异性及横波分裂研究可利用地震信号传输过程中的方向相关性确定储层内部裂隙断裂的分布方向及密度特征,通过地震波的偏振方向和传播速度等观测结果,反映各向异性介质的内部结构和地下物质流动等信息,从而判别流体在储层内部的运移特征^[85-87],在观测频带宽度较窄时,使用地震各向异性方法预测的裂隙特征可能存在多解,因为少量大裂隙与大量小裂隙在介质中表现出相似各向异性,可通过多频率的方法研究各向异性,从而推断裂隙长度和流体饱和度等要素信息^[88-89]。通过各向异性研究结果观察到的剪切波分裂现象,通常可表明地层潜在的断裂方向,同时结合地震反射剖面及岩芯数据,可推测出沉积层内部流体运移路径^[90]。

4.1.4 微地震

CO₂ 注入引起的储层中孔隙压力的变化可能导致储层内部和周围的断层滑动,在过载和欠载情况下可能诱发地震活动^[64-66]。因此,微震监测提供了一个观察储层变形的窗口,并可以通过提高对断层位置、几何形状以及局部应力条件的理解来帮助约束地质力学模型。为了评估微地震监测作为目标海区监测工具的有效性,必须首先描述地层岩性中

微地震的可能性。对数据进行定量解释需要计算声发射率、模拟地震 b 值和声发射源参数、确定声发射事件的位置,并根据 P 波初动极性、振幅推断声发射震源机制和矩张量,最终了解应力场的变化,从而进一步开发与目标碳封存区油藏地质力学建模相关的应力—应变本构模型^[91]。

被动源微地震观测可以检测到 CO_2 注入运移羽流前缘所产生的微地震事件;也可以用于监测 CO_2 注入诱发断层活动形成的地震^[92]。通过微地震观测可以定位微地震活动的位置,从而估计流体注入地下后在地层中流动形成的压力波前缘。微地震监测可通过对碳储层的长期观测记录的多种微地震信号,并基于时间尺度划分为不同规模的事件来判别微地震的产生是否与深部流体运移有关,随之可推断储层内部流体的运移及泄漏情况^[93-94]。

4.2 海底电磁

时延电磁可探测地层电性差异,获取 CO_2 储存位置以及储层电阻率,估算 CO_2 饱和度,监测 CO_2 运移和封存量变化。与地震相比,电磁信号对通过裂缝的 CO_2 流相对敏感。因此,只要不同的流体具有不同的电阻率,电磁就可区分不同的流体及其量的变化。然而,电磁不能完全区分流体和固体。此外,与地震相比,电磁的分辨率较低但使用成本也低,因此,通常将地震和电磁方法相结合来评估海底地层结构、流变性、岩性和 CO_2 的运移。常用的电磁方法包括可控源电磁法^[95]、电阻率层析成像法^[96]和底质电导率测量^[97-98]等,同时可利用反演算法获得地质封存点的时延井间电阻率^[99]。

4.3 海底重力

CO_2 注入地层充填后,直接产生了密度变化,因而可利用海底重力数据测量储层质量变化,构建海底储层三维密度模型,直接估计储层内或储层上方 CO_2 的运移和分布^[99-102]。时延重力法通常用于深度较浅且 CO_2 羽流较厚的储层,并已在 Sleipner 项目对 CO_2 羽流近 20 年的海底重力观测中得到了成功的应用,证明了在现有仪器精度条件下可以得到重复性良好的观测结果^[91]。此外,重力测量可在地层质量方面对地震测量数据予以补充和校正^[103-104]。

4.4 卫星遥感

近些年来,油气行业已开始将海底地表的抬升/下沉和海底储层的压力变化以及岩层的应变异常联系起来^[105-106],这种方法将有效减少地震勘测的次数。在陆地上,全球卫星定位与导航系统可以实现地球表面毫米级的三维空间定位和位移量估计,可

以用于地表控制点上的位移量监测^[107-109]。通过卫星遥感采集干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 数据的成本目前已经很低,而且范围大、精度高,可连续高频次采集。最近人们已开始考虑在海上采集 InSAR 数据,但是这种方式的经济成本还很高,而且采集数据的空间也相当受限。预计在不久的将来,人们将能降低采集 InSAR 的成本,并能在足够大的区域获得数据,以便在海上环境中对浅地层进行充分测量。从地表抬升/下沉中提取的主要信息是储层连续的压力变化和岩层的应变异常,如在阿尔及利亚 Salah 项目监测到的断层活化^[65,105],这些数据无法用其他地球物理监测方法直接获得。进一步研究可以构建地表形变与地下储层流体注入导致的体积变化之间的关系模型,可由地表形变观测结果反演估计储层内流体体积变化的空间分布^[107,109]。

4.5 辅助研究方法:数值模拟

海底碳封存实质上是一个地层孔隙介质中多时空尺度的热—流—固—化的复杂耦合响应过程^[110]。对这个过程进行储层流体数值模拟、岩石物理建模和地震波场数值模拟,可以对 CO_2 注入地层形成的羽流分布的有效性和安全性进行评价^[111]。然而,该过程的复杂性对精准建模造成了巨大的挑战,目前许多模拟器都或多或少进行了较大的简化^[112]。

CO_2 注入储层前,有必要开展可行性论证,通过模拟和仿真平台预测地质封存长期过程中的有效性和安全性,设定预期指标并规划设计监测系统。基于岩石物理理论的从储层地质力学数值模拟到地震响应正演模拟,可构成 CO_2 地质封存可行性分析和动态监测分析评价的一体化工作流程^[113-114]。 CO_2 注入储层后,会导致储层的多种物性参数发生变化,这种变化通常都会在地震属性上有所反映,而地震反演可以根据地震属性的变化估计储层物性参数的变化。在 CO_2 注入形成的多相流储层中,孔隙度和 CO_2 饱和度对岩石的地震波频散影响强烈,而温度和压力对地震波速产生较大影响,基于多相流 Biot 理论可以由地震监测数据反演得到 CO_2 饱和度分布结果^[115],也可由地震数据反演得到泥质含量、孔隙度、静态杨氏模量和静态泊松比等参数,这些储层参数可用于储层岩石力学流体模型的建立与数值模拟,实现 CO_2 注入过程中储层、盖层和上覆地层的表征与评价^[116-117]。同时,对不同地层的地球物理数据的整合,有利于获取充足的地层信息并

系统化掌握因注入 CO_2 而导致的地质变化,从而减少地层信息盲区和降低监测成本^[61]。

5 聚焦海床和海水层的海底环境监测技术

在海底地质碳封存中,海底环境监测的范围局限于海底地质封存空间上方的海床和海水层(图4)。海底环境监测的目的是检测海底或海水层是否存在非预期的 CO_2 运移,以便根据风险评估判断是否采取更密集的检测或纠正措施。海底是否存在与 CO_2 泄漏有关的异常,包括沉积物孔隙水和海水层化学成分的变化以及在海底出现与 CO_2 泄漏有关的表象特征,如微生物群落、麻坑和沉积物中的气泡以及海水层中的气泡串或羽流等。然而,部分环境参数异常或特征可能与正在进行的海底碳封存项目无关,而是由海洋环境中的自然过程引起的,例如浅层天然气的运移、海床及海水层流体流动导致化学成分的自然变化。因此,需要开发泄漏归因技术以避免由于与自然背景环境基线波动相似而造成泄漏误判。此外,还需要对 CO_2 泄漏进行量化,以便对可能存在的环境和经济风险进行评估。

聚焦海床和海水层的海底环境监测,主要包括利用主动和被动声学的方法直接检测气相 CO_2 ,可量化海底气体泄漏的流量;对海床和海水层中 CO_2

和其他气体的流量和浓度进行测量,如用二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)传感器直接检测溶解相 CO_2 以及用 pH 传感器间接检测由 CO_2 溶解导致的海水 pH 变化等;检测海床表面以下孔隙水或地层流体中的化学成分,间接获得储层泄漏 CO_2 抵达海床前的流体特征,如地层卤水;对浅层环境综合采样,记录采样时间、地点、频次和周围环境等,并联合深地层监测数据进行综合分析。

5.1 声学监测

声波作为海洋中唯一可进行远距离信息传输的载体,可有效应用于水下监测。结合气体泄漏伴随气泡形成和气泡壁振动发声产生的特有声学特征,声学监测工具可有效检测到海底气体的泄漏。目前已知的可对海底气体泄漏进行监测的声学工具包括主动声学传感器和被动声学传感器,其中主动声学传感器的探测距离可达数千米,而单个被动声学传感器的监测距离则从数米至数十米不等,但其能耗低且可在海底长期部署。影响声学监测的主要因素包括监测系统设计、工作频率和海洋环境等,如地势地形、物理障碍和背景噪声等。为提升信号处理的有效性和接收信号的信噪比,有些声学设备由多个接收单元组成。接收端收到信号后需要进行处理从而获取清晰的声学图像。这种信号处理通常需要基于提升信噪比的先进声学

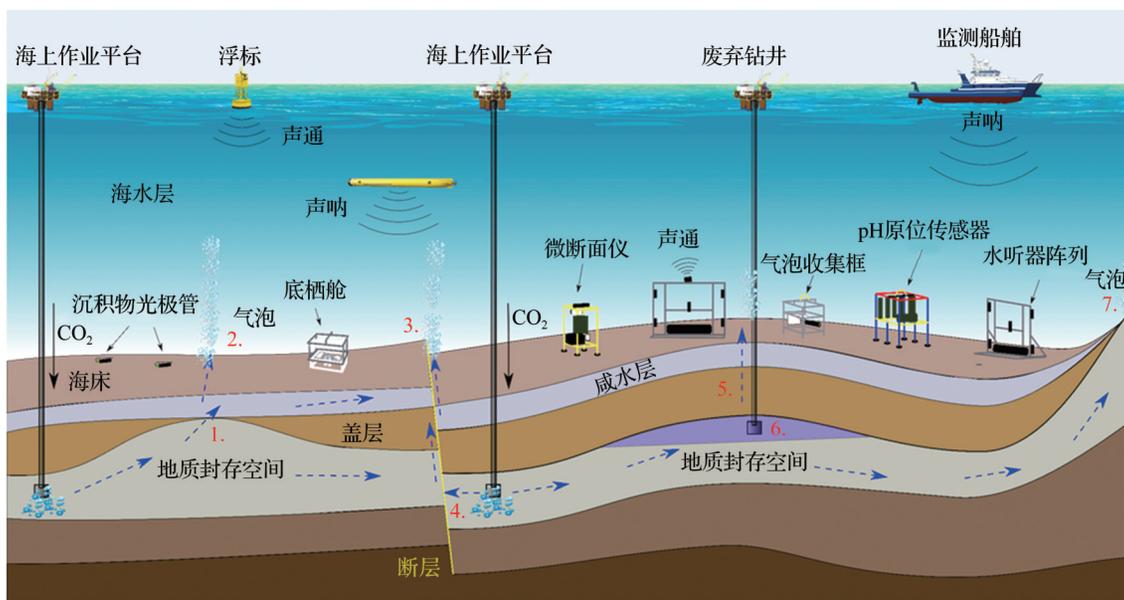


图4 海底碳封存部分潜在 CO_2 泄漏路径和海底环境监测示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing potential CO_2 leakage paths and environmental monitoring in marine carbon storage

潜在泄漏路径: 1. 穿过盖层裂缝; 2. 毛细管过压; 3. 断层泄漏; 4. 储层过压扩散; 5. 废弃钻井泄漏; 6. 自然流体溶解 CO_2 ; 7. 地层内运移

Potential leakage path: 1. through cracks in the caprock; 2. capillary overpressure; 3. fault leakage; 4. reservoir overpressure diffusion;

5. abandoned drilling leaks; 6. dissolving CO_2 in natural fluids; 7. migration within the formation

数据处理算法来实现,如自动检测气体泄漏的目标阵列信号处理识别和定位算法,包括自适应波束形成算法等。

5.1.1 主动声学

主动声学探测海底气体是否存在主要基于水和气体之间存在显著的声阻抗差异,从而导致了气泡的高强度声回波。可用于海底碳封存监测的主动声学技术包括单波束扫描声呐、多波束声呐、探鱼声呐、侧扫声呐、合成孔径声呐和海底剖面仪等。

(1) 单波束扫描声呐

单波束扫描声呐通过发射窄声束,并转动换能器,来获取周围环境的全向图像。单波束扫描声呐通过设计单个收发器元件,聚焦于单波束(角度通常为几度)的发射和接收,从而双向抑制了旁瓣干扰、增加了鲁棒性,也降低了制作成本并减少了数据存储量。然而,单波束和分裂波束声呐缺乏多通道声呐系统的数据处理灵活性,如使用自动阵列信号处理来提高海底气体泄漏的图像质量。同时,单波束机械扫描 360°需要数秒钟,获得的扫描图像并不是瞬间快照,这限制了捕捉高度变化气体泄漏信息的能力。

(2) 多波束声呐

多波束声呐通过宽波束发射和窄波束接收反向散射回波的方式可获得高分辨率声学图像或水深测量数据。为了获取清晰可靠的海底气体泄漏数据,通常可以控制其水平和垂直方向阵列来控制波束形成,此外还可进行灵活的数据处理并获得较宽角度的瞬时图像。已有的多波束声呐用于成像和剖面等目的,其工作频率一般在几十至数百 kHz 之间。船载多波束声呐的声学成像角度可达 140°,对近海碳封存区海床的扫描宽度可达数百米,且可用于对海底气体泄漏产生的气泡羽流进行探测和量化^[118-119]。相比而言,为了获得更高的声学分辨率,自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)载多波束声呐通常使用更高的频率(如数百 kHz),但扫描的范围较小。

(3) 探鱼声呐

相较于多波束声呐,探鱼声呐通常由单个发射端和多个接收端组成,其声学探测范围更小,但其可利用与气泡自然频率相近的低频(通常几 kHz 至十几 kHz)探测远处气泡的存在,并可估计海底泄漏气泡的尺寸分布,从而进一步计算气体泄漏的通量。利用声学回波判断气泡大小的理由是:水下气泡的声学回波强度与气泡的半径以及脉冲频率高度相关^[118]。近年来,对分裂波束技术的利用提高了

探鱼声呐的准确性,并且可在声束内定位目标。

(4) 侧扫声呐

侧扫声呐经常用于海底成像,通常由船舶拖曳或装于 AUV 上在海底附近发射接收高频声波。高分辨率侧扫声呐能够探测海底气体渗漏的相关形态特征。但是,使用侧扫声呐从侧面获得的成像数据来识别气体泄漏气泡羽流所形成的典型的声学“耀斑”形状可能较困难^[120]。

(5) 合成孔径声呐

合成孔径声呐通常安装在 AUV 上,利用 AUV 的运动来实现厘米级的海底声成像。合成孔径声呐通常通过阵列信号处理算法来提高声学图像的质量^[121]。现有的合成孔径声呐系统多由单个发射器和多个接收器阵列组成,这使得获得厘米级高分辨率海底图像变为可能。近些年,还出现了干涉测量合成孔径声呐系统,这种声呐系统测量的范围较大,每小时可达 1~2 km²,同时能够识别与气体泄漏相关的特征,如海床麻坑、微生物群落^[122]和海水层的气泡^[120]。

(6) 海底剖面仪

海底剖面仪通常在相对较低的几 kHz 频段工作,其可利用脉冲穿透海底沉积层数米至上百米的深度。与其他工作在较高频段的主动声学传感器不同,海底剖面仪可以通过图像分析海底浅地层的风险结构,包括浅地层天然气聚集和潜在 CO₂ 运移通道,如盐层、麻坑和断层等^[123]。其在对浅地层的数据获取中同样优于传统的时延地震技术,这是因为地震技术通常分辨率较低无法识别浅地层的地质特征。因此,海底剖面仪获取的浅地层数据就成了地质储层或深部覆盖层的地震图像与海水层声学图像之间的一个有效衔接,可结合海底剖面仪对从储层到海面的综合特征进行分析^[53]。

5.1.2 被动声学

海底气体泄漏在海床表面形成气泡,气泡脱离泄漏孔的瞬间因内外压力不均导致气泡壁开始振动产生声波并向外辐射。这种气泡壁振动产生的声波可由被动声学传感器(水听器)探测到。然而,这种由气泡本身发出声波的功率通常比主动声系统的功率低得多,因而被动声学的测量很容易受到海洋环境背景噪声的影响。此外,海底碳封存的区域通常很大,对潜在气体泄漏高风险区的判断不一定准确。因此,通过被动声学监测海底气体泄漏对传感器的灵敏度要求很高,而且需要额外的先进信号处理算法来识别气泡声学特征,从而区分环境背景噪声^[124]。

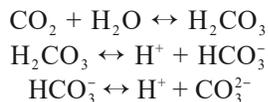
被动声学传感器通常制造成本低、坚固耐用且节能高效,适合海底长期大面积布设。目前,已有一些研究开始使用水听器记录气泡声学数据来检测海底气体泄漏和量化泄漏通量^[125-127],并使用水听器阵列来提升对气泡振动声信号监测的信噪比从而对海底泄漏点进行定位^[128]。然而,这种使用单一工具的监测范围通常只有数十平方米,未来可能的发展方向是在高风险区布置多个水听器阵列或水下传感器网络。同时,在AUV或水下滑翔机的自噪声不影响声学信号处理的情况下,也可使用其搭载水听器进行水下巡游识别和监测,并与主动声学传感器搭配使用。

5.2 化学监测

声学传感器能够监测到海底气体泄漏相关的气相特征,而化学传感器可以探测到海水化学参数异常。目前已有几种化学传感器被用来测量与CO₂泄漏直接或间接相关的海水中特定化学成分的浓度,如pH、pCO₂、营养盐和碳氢化合物等。与声学传感器的远程探测不同,化学传感器通常需要接触到某种化学物质才能进行测量,而且在海底CO₂泄漏的场景下,测量到相关化学异常可能会有一定延时。此外,海水中本身就含有许多不同的化学成分,且通常分布不均匀,因而需要通过海洋学和化学过程模型来帮助估算远离传感器的化学物质基准浓度。在海底布设化学传感器的过程中,也可能受到海水浊度、海洋生物、洋流或生产活动产生的化学成分的影响,因而要求海洋化学传感设备有一定的抗结垢和抗生物附着性能。

5.2.1 pCO₂传感

海水中的碳酸盐系统受以下平衡方程控制:



这些平衡意味着CO₂进入海水会增大CO₂和氢离子(H⁺)的浓度,并降低碳酸根离子(CO₃²⁻)的浓度。然而,由CO₂的释放或吸收(例如有机物的降解或光合作用)、碳酸盐过程(例如生物沉淀或碳酸钙的溶解)引起的碳酸盐系统的波动以及海洋从大气中吸收的CO₂也会影响CO₂和H⁺的浓度^[129-131]。例如,一种用于测量pCO₂的传感器,通常在外层和内腔配备了膜,在内腔装有对气相CO₂定量的指示剂或检测器。在测量中,CO₂会通过膜进行转移以达到膜内外CO₂浓度平衡。然而,这种通过转移达到平衡状态的过程会有时滞,这可能会引入测量误差。此外,海洋生物等障碍物可能影响CO₂通过膜的扩散,

这将进一步影响对海底化学传感器的长期布设。

5.2.2 pH传感

通过pH电极可以测量海水中H⁺的浓度,其中一种应用包括利用玻璃膜吸附H⁺从而在膜的两侧产生电势差。传感器和泄漏点之间的距离与所测量的pH值直接相关,而且洋流方向也直接影响着对CO₂泄漏导致的pH值变化的检测^[51]。在距离海底中等强度CO₂泄漏点数百米处的pH值的变化可能小于0.03个pH单位^[132],然而很多传感器的测量偏差大于这个值,而且传感器的性能可能随时间波动。这意味着在没有对泄漏点进行定位的情况下,很难检测到由海底CO₂泄漏引起的pH变化。此外,对pH测量值的解释需要考虑海洋环境的自然变化,另外生物污损和仪器漂移等不确定性也会影响pH值的准确度。

5.2.3 地层流体传感

在地层封存的CO₂泄漏至海床之前,浅地层的盐水、孔隙水、天然气和残余的石油可能被先挤出地层。如果这些物质溶解在海水中,可能导致相关浓度的变化,而这种变化可被用来预示CO₂是否泄漏。这种可用于预示的参数包括盐度/电导率、氧化还原电位、从矿物中溶解的主要元素[例如氯离子(Cl⁻)、氟离子(F⁻)、碘离子(I⁻)、钾离子(K⁺)、钠离子(Na⁺)、钙离子(Ca²⁺)、锰离子(Mn²⁺)等]、矿物质中溶解的微量元素[例如铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、锌(Zn)、银(Ag)等]、营养盐[例如硝酸盐(NO₃⁻)和铵(NH₄⁺)]和烃类物质[例如甲烷(CH₄)和多环芳烃]等^[53]。

5.3 传感器搭载平台

海洋环境监测通常需要水面或水下移动、固定平台来搭载传感器收集数据,常使用的平台有水面船只、AUV、水下滑翔机和海底着陆器等。这些搭载平台可配备多种声学传感设备,从而能够提供高分辨率的海底图像;同时也可配备多种化学及物理传感设备,以获取海洋近底环境的化学参数和海洋学参数。

5.3.1 水面船只

水面船只可以根据监测需要,灵活地搭载不同的传感器,并进行大范围的机动探测。例如,一艘科学考察船可以同时携带不同频段的声学传感器(如多波束声呐和浅层剖面仪)和化学传感器(水样采集器)。船载多波束可通过高频回波获取海水层的测绘和测深图像(如气体泄漏),浅层剖面仪可通过较低频回波绘制海底沉积浅层结构(如泄漏通

道),而化学传感器可以在目标位置收集海水和沉积物样品从而探寻泄露来源。需要注意的是,水深和所搭载传感器的覆盖范围决定着对船速和航线间距的规划。为节约海上收集数据的成本,建议与其他考察计划结合起来,充分利用各相关机构的共享航次。

5.3.2 自主水下航行器

船载传感器可大范围测绘目标海区,但AUV可在海床附近巡航获得海水层底部更小尺度的详细信息。AUV同样能够同时灵活搭载多种传感设备实现对声学、光学、化学和海洋学等数据的采样,比如在通过声学和光学记录海底麻坑、微生物群落和气泡泄漏的同时扫描浅地层结构,并测量溶解的CO₂、pH值、氧气、盐度、温度和浊度。近些年,已出现一些可根据监测需求和海洋环境自主编程采集路径、能携带大量传感器的更高载荷更长续航、能自动入坞无线充电的AUV,这些AUV的单次作业续航时间可达数天至数周不等,且其覆盖面积可达每小时数平方公里。

5.3.3 水下滑翔机

水下滑翔机不使用螺旋桨,而是结合水翼和浮力控制,在海水层的2个不同深度之间以“之”字形机动巡游。与AUV相比,水下滑翔机的载荷较小,只能搭载质量小功耗低的传感设备,但其可持续工作时长可达数月之久,因此可以较廉价的方式收集广阔海洋区域的海洋学数据,用于优化海洋地球化学的时空动态模型。目前水下滑翔机已可携带一系列传感器,包括pH值、溶解氧、电导率—深度—温度、海流计、多种声呐、盐度和浊度传感器等。然而,目前可用的CO₂传感器需要相对较长的接触反应时间,致使其不太适合部署在上下移动的水下滑翔机上。近年来,一些水下滑翔机也开始安装螺旋桨来满足短时间内的机动需求^[133]。

5.3.4 海底着陆器

虽然船载、AUV载和水下滑翔机载传感器能够提供很大的空间覆盖范围,但它们均是移动搭载平台,在单次勘测中通常无法有针对性地记录某一位置参数随时间的变化,如收集一些特征点位的环境背景基线数据或监测某些高风险区域(废弃钻井等)。而海底着陆器则可配备各种声学、化学和海洋学传感器进行海底环境的长期监测。对于主动声学监测,因其能耗较高且数据量较大,通常需要海底电缆和数据缆连接以实现长期监测的目的。对于化学和海洋学监测,随着时间的推移保持在一

个固定的位置并以高采样率获取数据,可以提高探测较小的或被稀释的溶解相CO₂羽流的能力。

5.4 调查方式:海洋环境背景基线

对于一个大型工业级海底碳封存项目,注入地层的CO₂的运移范围通常可达数千至数万平方公里。而对海底碳封存区域的环境背景研究是一个长期持续的过程,一般需要在CO₂注入前几年就开始记录数据,以便了解环境参数的长期自然波动,直到CO₂注入停止后的几年。对与海洋环境监测相关的取样范围和频次的制定需要根据具体监测区域的初步风险评估来判断,而这种初步的风险评估所需的信息一般可从地震数据和海底测绘地图中获取,并在整个项目进展期间随着海底成像和重复的地震勘测等新信息的获取而进行更新。初步判断为高风险的区域可能包括废弃钻井、有流体流动记录的区域或地质断层带。此外,环境基线研究应同时注重长期和短期的参数波动,如捕捉相关参数的季节性变化需要至少几年的时间,而短期的波动需要在足够短的时间上测量,以方便检测和区分CO₂注入中和注入后的潜在变化,从而降低异常误报的概率。海底环境基线研究通常应包括海底与流体相关的一些特征,如海床麻坑、微生物群落和气泡羽流等;也可能包括与地球化学相关的组成部分,如CO₂、pH、碱度、盐度和氧气等参数的浓度和自然波动情况。

在环境基线建立期间,为了确定注入CO₂前海底的相关化学成分,需要着重在高风险区进行沉积物取样,如注入井附近、任何废弃钻井或油气生产井附近、现有海底麻坑中以及已知过去或正在发生流体或气体泄漏的区域。由于海底沉积物的地球化学成分可能随季节变化(例如与藻类繁殖和有机物的数量有关),在同一地点不同时间需采集多个样本。与海底碳封存相关的CO₂泄漏可能会以气相气泡(在深海为液相液滴)或溶解相的形式被检测到。同时,在CO₂泄漏到海床附近之前,海底沉积层的孔隙流体会被向上的气体压力推出沉积层。这种流体的地球化学成分与周围海水的不同主要在于盐度和氧化还原电位,其中还可能包含溶解的CO₂、还原形式的营养物和金属物质,从而可以用海底布设的化学传感器来检测。此外,由于沉积层的孔隙流体的减少为部分微生物提供了良好的生长条件,因此也可以通过海底微生物群落的出现与否来判断流体的流动。

5.5 辅助研究方法:集成及自动数据处理

除了传感器的研发和对环境基线的研究之外,人们已开始追求低成本且高效的自动泄漏检测方式,包括对不同类型传感数据源的集成分析及对自动数据处理算法和模型的开发。

5.5.1 数据交叉融合

声学传感器和化学传感器的结合可使监测系统远程探测到气体泄漏且能够鉴别出气体的种类。声学传感器能够远程发现海水中的声阻抗差异,但是水和 CO_2 之间的声阻抗差异与水和 CH_4 之间的声阻抗差异接近,而化学传感器对特定的物质敏感,能够区分不同溶解相的气体,如 CO_2 和 CH_4 。但是,化学传感器只能通过接触的方式测量目标物浓度,而目标物质会受洋流的方向和流速的变化移动扩散,从而导致其浓度发生变化。为了精确获取海洋移动扩散目标物的浓度,通常需要借助海流计来获取目标区域海水流动方向和速度等参数,并校正化学传感监测值。在监测海底 CO_2 泄漏的场景下,声学、化学及海洋学传感器均有其特殊的检测性能,但归因和量化不同相态环境异常则需要考虑各传感器参数的交叉互补特点。由此,融合不同学科的监测数据,可建立更加全面的区域性海洋动态环境基线模型,并对海底各相态 CO_2 浓度异常进行综合分析从而更加高效精确地获取信息,降低误判风险。

5.5.2 大数据与人工智能

长时间海底监测将导致采集的数据量庞大。为了从原始数据中提取有效信息,目前已有大数据分析和机器学习等方面的先进算法研究。例如,通过基线研究获取的数据可用于训练预测模型,如根据学习典型气泡羽流声学回波特征来训练海底气体泄漏声学识别模型,或根据洋流方向和速度等参数预测海水层的 CO_2 或被提前挤出地层至海水层的流体相关物质的浓度。之后,该预测可用于对声呐图像的自动处理,或对海水中某物质浓度的变化进行归因。

5.5.3 数值模拟

人类对海洋环境的研究已有上百年历史,然而完全基于现有的数据来描绘海洋环境依然相形见绌。近些年,为了完整描绘海洋环境的自然变化,弥补因数据不足造成的缺失,人们开发了一系列海洋系统模型来描述流体流动(如洋流和潮汐效应)和生物地球化学系统(如碳酸盐化学)。这其中也包括与海底碳封存监测相关模型的构建,如描述海

底气体泄漏相关特征的气泡羽流动力学模型^[134]。利用这些模型可以进行自动风险识别或预测未来一段时间的相关变化,直接为监测策略的制定、传感器及平台的选择和布设提供重要的参考信息^[135]。

6 海底碳封存监测面临的挑战

近年来,部分面向海底碳封存的监测技术得到了一定程度的开发和验证,但尚无法大规模商业化应用,其技术体系还有待进一步优化和完善,以适应特殊的海底场景和工程需求。

6.1 技术适用局限性带来的挑战

海底井筒安全是注入 CO_2 前首要考虑的因素,然而来自井内的传感数据通常仅能显示井下通道或其附近区域的信息,而未能说明 CO_2 羽流扩散前端或距注入通道稍远的立体空间的信息。海底监测井可提供额外区域的井内连续原位监测从而部分辨别 CO_2 的实际注入深度和扩散范围,但是其应用成本较高。为了弥补这种区域局限性,通常需要采用空间覆盖更广的海洋地球物理监测技术,如主动/被动时延地震、电磁和重力监测技术等。这些地球物理监测技术理论上可以用来评估海底地层的密封性和 CO_2 封存空间的完整性^[136-137]。

在海洋地球物理技术中,主动时延地震技术和电位测量技术(如电磁和重力)可以分别绘制海底地层封存空间的 CO_2 渗透饱和度和因注入 CO_2 而引起的地层压力变化。然而,这些对海底地层空间的监测方法通常是不连续的,而且监测数据通常需要专业人员用很长时间来进行解释。此外,对特定海区海底地层空间的重复性测量也受众多海上不确定性因素的影响,而且海上全面测量和更新实地数据的成本通常都很高,这主要跟需要测量的频次和海底测量节点的布放位置有关。未来可降低此类测量成本的一类解决办法是采用永久性海洋地球监测系统,包括被动地震和微地震技术,这些技术通常可以连续获得注入 CO_2 过程中海底地质储层及上下密封盖层的关键风险信息并定位风险区域,如地层断裂或地质断层的再活化。其中对微地震监测数据的解释通常需要首先建立相关地层准确的背景速度模型(置信基线),如引入了各向异性速度模型来定位地层中的风险事件^[66],否则解释结果可能会存在误判的风险。这些背景速度模型通常可以通过常规时延地震方法获得,但此类地震方法的测量目标主要集中在深部地层,而无法获知海底浅

部地层的上覆岩层和海底沉积层的详细信息。然而,这类浅部地层的地球物理和地质信息是对海底环境监测重点区域选择和监测强度判断的重要参考依据。

海洋环境监测的对象是海底 CO₂地质储层上方的近海床地层和海水层,通常是距离海岸线数百公里的区域。对海洋环境监测的区域选择需要根据对海底地层的地球物理监测数据来做出判断,如定位于注入井或地质不稳定区域方圆数公里范围内。在这些区域内与 CO₂泄漏有关的气相及溶解相羽流可能仅限于海底以上数米的空间^[51],这意味着海底环境异常可能只限于靠近海底或沉积层的相对较小区域。因此,海洋环境监测方法需要使用到离岸平台,如船舶、AUV、有缆遥控水下机器人(Remote Operated Vehicle, ROV)以及海底着陆器等。同时,海洋环境的动态变化又对海底 CO₂泄漏的检测提出了挑战,包括海水中 CO₂溶解度的大幅波动、海底自然发生的气体渗漏(如 CO₂气泡)以及海洋流体的非均匀流动。目前,经校准的单波束、分波束声呐和水听器是最有可能探测和量化海底 CO₂泄漏的技术^[138-141],然而海洋环境的波动直接影响着这类技术的使用效果。解决这些困难首先需要建立长期的海底地质及海洋环境基线模型,提供 CO₂注入前的基础数据并对未来重要参数的波动进行预测、对比和评价。

6.2 技术集成与降本增效的挑战

依据单一监测方式或技术获得的信息存在某种时空频的局限性,而集成不同的监控技术和数据集合可以实现监测技术的区域及功能互补,从而可从监测数据中提取到更多的有用信息,并可能制定出更趋完善的监测方案。技术集成应用可实现监测效率提升的同时削减监测成本,同时又能促进交叉数据的融合和监测方式的优化,如此良性循环。技术集成可以在各种监测方式之间,如整合内置传感技术、地球物理技术和海洋环境监测技术;也可以是某种监测方式内的技术集成,如整合环境声学感知和化学痕量分析等。在制定经济高效的技术集成应用过程中,则需要考虑具体技术的灵敏度、检测范围、响应时间和稳定性等关键因素,而这些信息大都需要通过实验室测试和近岸控制释放实验来获取。

海底气体泄漏的成因包括注入 CO₂引起的泄漏和其他自然方式泄漏,如天然气泄漏等。检测这种泄漏通常需要采用化学示踪剂或海底环境监测技

术,而对这种泄漏进行归因则需要引入高分辨率地球物理数据绘制海底浅地沉积层图谱以获取泄漏源和泄漏通道信息,如地层孔隙结构以及是否含有天然气藏。这些从海底地球物理数据中获得的关键信息与海洋环境监测数据结合,可以降低监测误判的概率,同时降低监测运营成本。信息的反向流动也同样重要,例如,当我们在海底地球物理数据中观察到特定区域的任何异常时,就需要在海洋环境中的相应区域检查海洋环境监测数据,以查看是否有相关异常出现。

对海底碳封存区域进行连续、长期(一般超过 25 年)的立体监测的成本通常非常高,而使用融合交叉数据的通用数值模型能够实现海洋环境—海底地层综合监测信息的高效共享。这些从海面到下伏岩层的数值模型,可降低对部分监测数据获取的密度要求从而节省监测成本,同时实现不同监测方式之间数据的顺畅流动和信息的准确获取。此类模型也需要具备可扩展性,以便在海底碳封存项目的整个周期内的不同时期快速方便地更新。模型地质部分计算的结果需要能够预测封存区域海水层和海床表面附近的海洋生物地球化学变化,包括对底栖生物的影响和对 CO₂运移模型的建立、分析,从而可进一步优化海洋环境监测测量传感器的布设和安装。可扩展数值模型除了需要管理立体空间监测的数据流外,还需要根据这些数据流做出实时自动或人工协助决策,而这又是一个极大的挑战。

6.3 风险评估与方案优化的挑战

集合不同监测方式的传感数据可以最大限度地提升获取信息的质量和数量,而为保证封存区域的长期安全可控,则需要对整个封存空间的立体相关区域及设施设备进行持续性的监测和风险验证,包括注入井筒、海底储层、上覆/下伏岩层以及海床上下空间等^[142]。目前,全球正在开发的和规划中的一些海底碳封存项目的规模呈现逐步扩大的趋势,从数十万吨/年到数千万吨/年,这在任何离岸油气行业都是前所未有的,而这对海底碳封存安全监测的挑战也在相应放大。这主要是因为与封存相关的参数在很大程度上都被关联放大,包括注入速率、注入井筒数量、地层压力恢复周期和监测区域等。为了对这种大规模海底碳封存进行经济高效的监控,需要一种综合性强、多学科交叉、实时风险评估与控制的方法。例如,在海洋环境监测方面,重点应放在避免任何潜在的虚假风险警报的出现

以及对海洋生态环境的影响上^[143]。

基于实时风险评估的海底碳封存安全监测方法,其初始监测范围的选择应同时考虑具体封存相关区域的地质、环境基线和对已有相似区域的风险评估经验。随着海底碳封存项目的推进,将不断获取最新的监测数据和相关信息,而这些信息将被用来进行新阶段的风险评估和下一步监测策略的优化,如对关键信息获取的频次、对目标区域监测的范围、更新传感技术或更换传感器搭载平台等。因为不断更新的风险评估结果在整个海底碳封存项目推进过程中都可能会发生变化,因此在制定监控策略时还需要考虑应对可能的风险变化的处理框架(图5)。这些可能影响风险等级的因素包括超过预期水平的注入速率导致的地层压力增加、时延地

震数据中检测到的不规则变动以及海水层中检测到的环境参数异常等。

由于无法详细监测海底地层中 CO_2 在整个碳封存区域的运移,对海洋环境的监测区域及强度需要基于地质风险评估来做出判断和决定,并在整个项目行进期间依据风险等级的变化来调节。时延地震监测通常采用对地震数据的差值求均方根得到地震波振幅分布云图,从而分析判断注入 CO_2 所造成的地层地震反射波振幅异常及反映 CO_2 羽流演变。对海洋环境的监测通常会使用声学感知和化学痕量分析技术,声学感知技术能检测到海水层中 CO_2 气泡的出现,而化学痕量测量能够检测到海水层地球化学的变化,同时根据海流计测得海底流体流动的一些特征来进行综合风险评估。

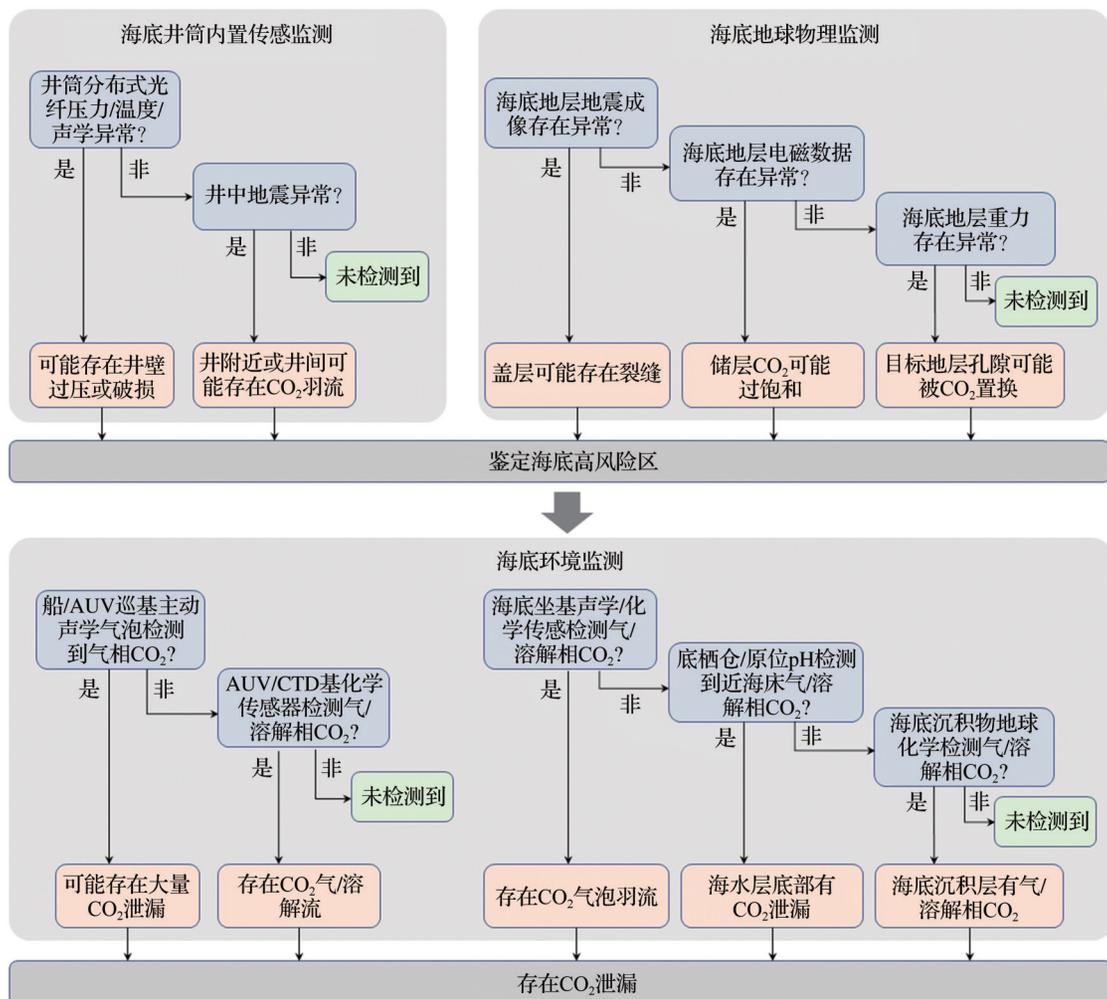


图5 海底碳封存潜在监测方案流程图

Fig. 5 Flow chart of a potential monitoring scheme for marine carbon storage

包括海底井筒内置传感监测、海底地球物理监测和海底环境监测

Including built-in sensor monitoring in subsea wellbore, subsea geophysical monitoring, and marine environmental monitoring

7 对我国海底碳封存监测的一些思考

海底碳封存监测科学理论及技术应用整体上尚处于试验和评估阶段,至今尚未建立完整成熟的海底碳封存监测标准规范和技术体系。不同海底地质和海洋环境条件下监测技术的方案选择和设计存在一定差异,目前尚未形成系统的监测理论和流程化的监测体系。

7.1 完善监测标准规范

确保海底碳封存的长期安全主要在于详细的地层表征、严格的选址流程、周密的工程设计以及规范的风险监测,并在未失控的情况下量化泄漏并评估影响。目前,中国尚未针对海底碳封存出台相关法律法规条文。2007年,自然资源部(原国家海洋局)《关于海洋领域应对气候变化有关工作的意见》提出进行海底碳封存试验的相关研究,开展有关海洋环境的影响评价,为控制温室气体排放提供技术选择方案。2016年,生态环境部(原环境保护部)出台《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》,但主要针对陆上碳封存。对于海底碳封存监测的需要,可以参考其他国家已有的成功经验,包括但不限于:

(1) 规范监测流程。为了对监测结果进行最佳解释,应首先对目标封存区海底地层及海洋环境特定的基线进行表征。然后,对CO₂注入期间和注入后发生的风险事件依次进行检测、定位、归因和量化。在某些特定场景下,需要将风险事件,如地震和CO₂泄漏,归因于海底的某个地层/储层进而做出适当的风险决策。

(2) 制定监测标准。目前已有的国际或某些国家层面的海底碳封存监测法律法规明确了相关监测目标,例如泄漏限制、羽流运移和储层完整等^[144]。而实现这些目标则通常需要根据封存现场信息制定操作规范和量化监测标准,以证明运营方具备避开风险事件发生的能力。

(3) 颁布激励措施。与海底碳封存监测相关的激励措施,最具参考价值的是美国的45Q条款。2008年,美国首次规定CO₂封存的抵免额为每吨20美元(抵免额根据不同封存方式而定)。2021年,美国财政部和国税局颁布了45Q条款法规,大幅提高了最高税收抵免额,同时设置了抵免收回期限。45Q最终法规将抵免收回期限由此前的5年缩减至3年。如果3年内发生CO₂泄漏,政府将收回已抵免的税额;如果泄漏发生在3年后,则仍可保留获得的

税额抵免,不会被政府收回^[145]。

(4) 保证公开运行。公众意见和对新项目的接受程度直接影响着海底碳封存项目的正常运行。为了向社会保证海底碳封存项目的安全性,需要定期公开项目相关的监测数据、回答公众质疑和进一步监测计划的开展。

7.2 明确监测目标任务

在经过周密地层选择后的海底碳封存项目的CO₂泄漏的概率极低,但有可能因为注入CO₂后储盖层特征变化、工程设计等问题造成风险事件。这就需要及时且经济高效地检测和表征地层及海洋环境中的意外泄漏,以限制意外事件的发酵。海底碳封存监测方案的设计应该明确监测的主要目标和恰当把握监测的时空尺度,具体要求包括但不限于:

(1) 根据调查资料制定监测目标。在注入前阶段,综合海底地质资料、储盖层空间特征和多尺度地质模型等,对目标封存空间开展全面的基线调查工作,包括海底二维/三维地震勘探、监测井的钻探、现有地质数据的重新评估以及海洋环境的季节性调查等,精确定位高风险区域,综合评估后制定封存项目全生命周期的监测计划和监测目标。

(2) 根据场景分析明确监测任务。针对CO₂注入方案、封存工程设计和监测技术选择等问题,开展覆盖井筒、深地、浅地和海水层等多种风险场景的分析和可行性研究及优选评价,来降低潜在泄漏风险以及工程风险事故,进而明确监测任务。例如,我国的恩平海底碳封存示范项目的目标储层地层年代新、胶结弱和封存浅,需要侧重对CO₂羽流运移的表征以及CO₂注入对地层造成的影响。

(3) 根据目标选择构建监测方式。海底碳封存的有效性和安全性监测与评价需要多种技术支撑,但各种监测技术在不同的注入阶段、应用条件和运营监测需求方面存在明显差异,因此需要根据不同应用场景、条件和目标选择构建不同的监测体系和创新方法,如多层次、全方位的陆—海—空—天一体化监测体系。

(4) 根据项目特点选取监测技术。不同的项目所采取的监测技术不同,根据项目的位置、类型、规模和传感技术的预期性能,选取适合该项目的技术与方案,并最大化集成不同监测技术可能带来的降本增效作用。采用时延地震监测就需要布设OBC和OBS等监测设备;采用海底环境监测就需要采用声呐成像、沉积物采样和海水采样等监测技术观察

海床特征、底栖生物和浮游生物的季节性及区域性特点等。

7.3 优化监测技术体系

近年来,不断有技术用于海底碳封存监测的测试,而每种方法都有其特定的功能局限和应用的优缺点,但它们共同提供了安全识别和监测的潜力。对监测方法和技术的核心要求是,能够测量和检测异常现象,具有成本效益,设备需要易于使用,处理结果应尽快可用于进一步决策。中国对海底碳封存监测技术体系的优化应尽量遵守全面覆盖、目标具体、技术互补的原则,包括但不限于:

(1) 覆盖井筒、深地、浅地、海水层多个层次。井内监测技术有望提供注入井附近泄漏风险较高的密封失效预警,而海洋环境监测技术能够在范围更大的海水层发现异常。异常归因技术可辨别导致异常结果的原因,而量化技术可对泄漏进行风险等级评估。

(2) 覆盖注入前、注入期间、注入后多个阶段。在海底碳封存的全生命周期中,根据阶段需求采用井筒压力和温度检测、分布式光纤监测、井下流体示踪、二维/三维地震调查、海底重力勘探、海底成像、海水采样、沉积物采样、多波束回声和侧扫声呐等监测技术。

(3) 通用的四维热—流—固—化多场耦合仿真模型。通用模型将使不同学科之间的沟通顺畅高效,提高对海底碳封存阶段进展的了解,而这反过来又可优化监测方案,最终节省整体成本和时间。为了实现大型模型集成并使这些模型工具变得通用,需要开发具有监测站点间可转移的开源数字工具箱和快速仿真器,并应用机器学习等技术来设计高效的监测方案。

(4) 专用的高效经济海底监测仪器设备。目前市场上已有一些成熟的海底监测传感器,而对不同场景下高分辨率模型的建立需要灵敏的观察数据的支持,现阶段对传感器的研发重点在缩短现有传感器的响应时间上,如声学及化学CO₂传感器;小型化设备使其更适合部署在移动平台上,如AUV和水下滑翔机。对于这类传感器的集成应用目前还较缺乏,因而还需集海底数据采集、分析、判决和传输于一体的专用型自主监测设备,并且做到低成本化。

(5) 自主式远程监测操控平台。大规模海底碳封存监测对船舶及离岸远程设备等监测平台的使用成本是目前最大的挑战之一,而这在未来可以通

过开发可搭载传感器的岸基自主式远程操控平台来解决。例如,结合无人船、AUV和ROV技术,在海岸即可自主启程出海并可远程遥控进行长期海底调查,显著降低监测成本。

(6) 基于大数据的自动化处理和实时决策。开发用于管理不同传感器采集的高分辨率大数据框架,测试机器学习方法,定制数据通信和信息共享的简化解决方案,推进数据处理和分析的自动化,同时最大限度地减少遗漏和错误警报,进一步提高大规模海底碳封存安全监测效率。

参考文献(References):

- [1] METZ B. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] HASZELDINE R, FLUDE S, JOHNSON G, *et al.* Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments[J]. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018. DOI: 10.1098/rsta.2016.0447.
- [3] GALE J, ABANADES J, BACHU S, *et al.* Special issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the intergovernmental panel on climate change special report on CO₂ capture and storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 1-5.
- [4] IPCC. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-Industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.
- [5] IPCC. Mitigation of climate change [R]. Geneva, Switzerland: IPCC Working Group III, 2022.
- [6] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. 新华社, (2021-10-24) [2023-04-05]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm? eqid=903bc90400027ca300000003647ed89a.
- [7] RINGROSE P S, MECKEL T A. Maturing global CO₂ storage resources on offshore continental margins to achieve 2DS emissions reductions[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-10.
- [8] GUO Jianqiang, DONG Guang, ZHANG Senqi, *et al.* Potential evaluation and demonstration project of CO₂ geological storage in China[J]. *Geological Survey of China*, 2015, 2(4): 36-46. [郭建强, 冬光, 张森琦, 等. 中国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程[J]. *中国地质调查*, 2015, 2(4): 36-46.]
- [9] CHADWICK R A. Geoscience, technologies, environmental aspects and legal frameworks: offshore CO₂ storage: sleipner natural gas field beneath the North Sea [M]. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing Limited, 2013: 227-250.
- [10] FURRE A K, MENEGUOLO R, RINGROSE P, *et al.* Building confidence in CCS: from Sleipner to the Northern Lights Project [J]. *First Break*, 2019, 7: 81-87.

- [11] TORP T A, GALE J. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: the Sleipner and SACS projects [J]. *Energy*, 2004, 29(9/10): 1 361-1 369.
- [12] GODOI J M A, dos SANTOS MATAI P H L. Enhanced oil recovery with carbon dioxide geosequestration: first steps at Pre-salt in Brazil [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 2021, 11(3): 1-13.
- [13] LI Jianghui, LI Pengchun, LI Yanzun, *et al.* Technology system of offshore carbon capture, utilization, and storage [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 173-186. [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.]
- [14] FURRE A K, EIKEN O, ALNES H, *et al.* 20 years of monitoring CO₂-injection at sleipner [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3 916-3 926.
- [15] HANSEN O, GILDING D, NAZARIAN B, *et al.* Snøhvit: the history of injecting and storing 1 Mt CO₂ in the fluvial tubåen Fm [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 3 565-3 573.
- [16] Van der meer L G H. The K12-B CO₂ injection project in the Netherlands [M]// Geological storage of carbon dioxide (CO₂). Amsterdam: Elsevier, 2013: 301-321, 328e-332e.
- [17] IGLESIAS R S, KETZER J M, MELO C L, *et al.* Carbon capture and geological storage in Brazil: an overview [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2015, 5(2): 119-130.
- [18] TANAKA J. Progress of CO₂ injection at the Tomakomai CCS demonstration project [Z]. Japan Pavilion COP-24 Katowice, 2018.
- [19] MARSHALL J P. A social exploration of the West Australian Gorgon gas carbon capture and storage project [J]. *Clean Technologies*, 2022, 4(1): 67-90.
- [20] AKERBOOM S, WALDMANN S, MUKHERJEE A, *et al.* Different this time? the prospects of CCS in the Netherlands in the 2020s [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9. DOI: 10.3389/fenrg.2021.644796.
- [21] BALAKRISNAN M, HALIM R B A, JOHAN A, *et al.* Methodological engineering approach in designing injector and observation wells incorporating MMV requirements in carbonate CCS project in offshore Malaysia [C]. ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2022. DOI: 10.2118/211722-MS.
- [22] HARKIN T, FILBY I, SICK H, *et al.* Development of a CO₂ specification for a CCS hub network [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 6 708-6 720.
- [23] ALCALDE J, HEINEMANN N, JAMES A, *et al.* A criteria-driven approach to the CO₂ storage site selection of East Mey for the acorn project in the North Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 133. DOI: 10.1016/J.MARPETGEO.2021.105309.
- [24] CHEN S, SARAJI S, MCLAUGHLIN F J. Carbon capture and storage [M]// Lecture notes in energy. Cham: Springer International Publishing, 2023: 183-201.
- [25] LI J H. Accelerate the offshore CCUS to carbon-neutral China [J]. *Fundamental Research*, 2022. DOI: 10.1016/j.fmre.2022.10.015.
- [26] European Commission. Implementation of directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide: guidance document 1: CO₂ storage life cycle risk management framework [Z]. European Commission Guidance Documents, 2009.
- [27] ALCALDE J, FLUDE S, WILKINSON M, *et al.* Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-13.
- [28] BLACKFORD J, STAHL H, BULL J M, *et al.* Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 1 011-1 016.
- [29] 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. DOI: 10.1016/j.ijggc.2020.103120.
- [30] LINDEBERG E. Modelling pressure and temperature profile in a CO₂ injection well [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3 935-3 941.
- [31] PARK J, GRIFFITHS L, DAUTRIAT J, *et al.* Induced-seismicity Geomechanics for Controlled CO₂ Storage in the North Sea (IGCCS) [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 115. DOI: 10.1016/j.ijggc.2022.103614.
- [32] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2 energy, chap. 5 carbon dioxide transport. injection and geological storage [R]. Japan: IGES, 2006.
- [33] SHITASHIMA K, MAEDA Y, OHSUMI T. Development of detection and monitoring techniques of CO₂ leakage from seafloor in sub-seabed CO₂ storage [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 30: 114-124.
- [34] DIXON T, ROMANAK K D. Improving monitoring protocols for CO₂ geological storage with technical advances in CO₂ attribution monitoring [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 41: 29-40.
- [35] IEAGHG. Review of offshore monitoring for CCS project [R]. IEAGHG, 2015.
- [36] DEAN M, TUCKER O. A risk-based framework for Measurement, Monitoring and Verification (MMV) of the Goldeneye storage complex for the Peterhead CCS project, UK [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 61: 1-15.
- [37] SETIAWAN B. 1996 protocol to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matters 1972 [J]. *Indonesian Journal of International Law*, 2015, 1: 597-630.
- [38] ATLANTIC N. OSPAR guidelines for risk assessment and management of storage of CO₂ streams in geological formations 1 [R/OL]. 2007. [2023-04-05]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110559422>.
- [39] European Communities. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006 [J]. *Official Journal of the European Union*, 2009, 5(6): 114-135.

- [40] OSPAR. 2007 amendment to 1992 OSPAR convention, convention for the protection of the marine environment of the North-East Atlantic [R]. Oslo: OSPAR Commission, 2007.
- [41] SETIAWAN B. 1996 protocol to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matters 1972[Z]. London Protocol, 2015.
- [42] European Commission. Guidance document, the monitoring and reporting regulation-general guidance for installations [Z]. Directorate-General Climate Action, 2012.
- [43] BEER D D, HAECKEL M, NEUMANN J, *et al.* Saturated CO₂ inhibits microbial processes in CO₂-vented deep-sea sediments[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5 639-5 649.
- [44] HASSENRÜCK C, FINK A, LICHTSCHLAG A, *et al.* Quantification of the effects of ocean acidification on sediment microbial communities in the environment: the importance of ecosystem approaches[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 92(5). DOI:10.1093/femsec/fiw027.
- [45] LICHTSCHLAG A, JAMES R H, STAHL H, *et al.* Effect of a controlled sub-seabed release of CO₂ on the biogeochemistry of shallow marine sediments, their pore waters, and the overlying water column [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38: 80-92.
- [46] WALLMANN K, HAECKEL M, LINKE P, *et al.* Best practice guidance for environmental risk assessment for offshore CO₂ geological storage [R]. ECO₂ Deliverable D14.1, 2015.
- [47] ULFSNES A, MØSKELAND T, BROOKS L, *et al.* Report on environmental risks associated to CO₂ storage at Sleipner [R]. ECO₂ Deliverable D5.1, 2015.
- [48] WAARUM I K, BLOMBERG A E A, EEK E, *et al.* CCS leakage detection technology-industry needs, government regulations, and sensor performance [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3 613-3 627.
- [49] GCCSI. Brazilian atlas CO₂ capture geological storage [R]. Melbourne, Australia, 2014.
- [50] KIM H, KIM Y H, KANG S G, *et al.* Development of environmental impact monitoring protocol for offshore Carbon Capture and Storage (CCS): a biological perspective[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, 57: 139-150.
- [51] 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. DOI:10.1016/J.IJGGC.2020.103237.
- [52] CONNELLY D P, BULL J M, FLOHR A, *et al.* Assuring the integrity of offshore carbon dioxide storage[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 166. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112670.
- [53] BLOMBERG A E A, WAARUM I K, TOTLAND C, *et al.* Marine monitoring for offshore geological carbon storage—a review of strategies, technologies and trends [J]. *Geosciences*, 2021, 11(9). DOI:10.3390/geosciences11090338.
- [54] BLACKFORD J, BULL J M, CEVATOGLU M, *et al.* Marine baseline and monitoring strategies for Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 38: 221-229.
- [55] WHITE D, DALEY T M, PAULSSON B, *et al.* Borehole seismic methods for geologic CO₂ storage monitoring [J]. *The Leading Edge*, 2021, 40(6): 434-441.
- [56] WILSON G A, WILLIS M E, ELLMAUTHALER A. Evaluating 3D and 4D DAS VSP image quality of subsea carbon storage[J]. *The Leading Edge*, 2021, 40(4): 261-266.
- [57] SIDENKO E, TERTYSHNIKOV K, GUREVICH B, *et al.* Distributed fiber-optic sensing transforms an abandoned well into a permanent geophysical monitoring array: a case study from Australian South West [J]. *The Leading Edge*, 2022, 41(2): 140-148.
- [58] CHUGUNOV N, ALTUNDAS Y B, RAMAKRISHNAN T S, *et al.* Global sensitivity analysis for crosswell seismic and neutron-capture measurements in CO₂ storage projects [J]. *Geophysics*, 2013, 78(3): WB77-WB87.
- [59] COUËSLAN M L, ALI S, CAMPBELL A, *et al.* Monitoring CO₂ injection for carbon capture and storage using time-lapse 3D VSPs[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(10): 1 268-1 276.
- [60] HU L W, DOETSCH J, BRAUCHLER R, *et al.* Characterizing CO₂ plumes in deep saline formations: comparison and joint evaluation of time-lapse pressure and seismic tomography [J]. *Geophysics*, 2017, 82(4): ID1-ID18.
- [61] ZHAO Gaishan. Geophysical monitoring for geological carbon sequestration: present status, challenges, and future development [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(2): 194-211. [赵改善. 二氧化碳地质封存地球物理监测: 现状、挑战与未来发展[J]. 石油物探, 2023, 62(2): 194-211.]
- [62] SKURTVEIT E, CHOI J C, OSMOND J, *et al.* 3D fault integrity screening for smeaheia CO₂ injection site [J]. *SSRN Electronic Journal*, 2019. DOI:10.2139/ssrn.3366335.
- [63] DUBOS-SALLÉE N, RASOLOFOSON P N J. Estimation of permeability anisotropy using seismic inversion for the CO₂ geological storage site of Sleipner (North Sea) [J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): WA63-WA69.
- [64] VERDON JAMES P. Microseismic monitoring and geomechanical modelling of CO₂ storage in subsurface reservoirs[D]. Bristol, South West England, UK: University of Bristol, 2011.
- [65] OYE V, ZHAO P, KÜHN D, *et al.* Monitoring of the Krechba In Salah CO₂ storage using microseismic data analysis [C]. 3rd. EAGE CO₂ Geological Storage Workshop, Edinburgh, UK, 2012.
- [66] GOERTZ-ALLMANN B P, OYE V, GIBBONS S J, *et al.* Geomechanical monitoring of CO₂ storage reservoirs with microseismicity[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3 937-3 947.
- [67] BROWN S, BUSSOD G, HAGIN P. AVO monitoring of CO₂ sequestration: a benchtop-modeling study [J]. *The Leading Edge*, 2007, 26(12): 1 576-1 583.
- [68] GRUDE S, LANDRØ M, OSDAL B. Time-lapse pressure-saturation discrimination for CO₂ storage at the Snøhvit field [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 19: 369-378.

- [69] SAWADA Y, TANAKA J, SUZUKI C, *et al.* Tomakomai CCS demonstration project of Japan, CO₂ injection in progress [J]. *Energy Procedia*, 2018, 154: 3-8.
- [70] TANASE D. CO₂ injection and monitoring of the Tomakomai CCS demonstration project [C]// 5th International Workshop on Offshore Geologic CO₂ Storage, 2022.
- [71] DUNN R A, TOOMEY D R. Crack-induced seismic anisotropy in the oceanic crust across the East Pacific Rise (9°30'N) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 189(1/2): 9-17.
- [72] LIU Bin, ZHANG Heng. Full waveform inversion of OBS data from ocean gas hydrate: synthetic example [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(1): 379-384. [刘斌, 张衡. 海底水合物 OBS 数据全波形反演数值例子 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 379-384.]
- [73] DICKENS G R. The blast in the past [J]. *Nature*, 1999, 401(6755): 752-755.
- [74] WESTBROOK G K, THATCHER K E, ROHLING E J, *et al.* Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15). DOI:10.1029/2009GL039191.
- [75] CHABERT A, MINSHULL T A, WESTBROOK G K, *et al.* Characterization of a stratigraphically constrained gas hydrate system along the western continental margin of Svalbard from ocean bottom seismometer data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B12). DOI:10.1029/2011JB008211.
- [76] HUSTOFT S, MIENERT J, BÜNZ S, *et al.* High-resolution 3D-seismic data indicate focussed fluid migration pathways above polygonal fault systems of the mid-Norwegian margin [J]. *Marine Geology*, 2007, 245(1/2/3/4): 89-106.
- [77] PLAZA-FAVEROLA A, BÜNZ S, MIENERT J. Fluid distributions inferred from P-wave velocity and reflection seismic amplitude anomalies beneath the Nyegga pockmark field of the mid-Norwegian margin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 46-60.
- [78] GOSWAMI B K, WEITEMEYER K A, MINSHULL T A, *et al.* A joint electromagnetic and seismic study of an active pockmark within the hydrate stability field at the Vestnesa Ridge, West Svalbard margin [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(10): 6797-6822.
- [79] SHA Z B, ZHANG M, ZHANG G X, *et al.* Using 4C OBS to reveal the distribution and velocity attributes of gas hydrates at the northern continental slope of South China Sea [J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12(4): 555-563.
- [80] QIAN Bozhang, ZHU Jianfang. Natural gas hydrate: immense potential energy [J]. *Natural Gas and Oil*, 2008, 26(4): 47-52. [钱伯章, 朱建芳. 天然气水合物: 巨大的潜在能源 [J]. 天然气与石油, 2008, 26(4): 47-52.]
- [81] SHA Zhibing, ZHEN Tao, ZHANG Guangxue, *et al.* An optimal design of a high-frequency ocean bottom seismometer (HF-OBS) and its application to the natural gas hydrate exploration in the South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(7): 136-142. [沙志彬, 郑涛, 张光学, 等. 海底高频地震仪观测系统优化设计及其在南海天然气水合物勘探中的应用 [J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 136-142.]
- [82] JOHNSTON D H. Practical applications of time-lapse seismic data [M]. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2013.
- [83] WAAGE M, BÜNZ S, LANDRØ M, *et al.* Repeatability of high-resolution 3D seismic data [J]. *Geophysics*, 2019, 84(1): B75-B94.
- [84] CHADWICK R A, WILLIAMS G A, FALCON-SUAREZ I. Forensic mapping of seismic velocity heterogeneity in a CO₂ layer at the Sleipner CO₂ storage operation, North Sea, using time-lapse seismics [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 90. DOI:10.1016/j.ijggc.2019.102793.
- [85] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks [J]. *Geophysical Journal International*, 1981, 64(1): 133-150.
- [86] CRAMPIN S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting [J]. *Geophysics*, 1985, 50(1): 142-152.
- [87] THOMSEN L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock I [J]. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43(6): 805-829.
- [88] CHAPMAN M. Frequency-dependent anisotropy due to meso-scale fractures in the presence of equant porosity [J]. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51(5): 369-379.
- [89] JAKOBSEN M, CHAPMAN M. Unified theory of global flow and squirt flow in cracked porous media [J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): WA65-WA76.
- [90] BAYRAKCI G, CALLOW B, BULL J M, *et al.* Seismic anisotropy within an active fluid flow structure: scanner pockmark, north sea [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9. DOI: 10.3389/feart.2021.626416.
- [91] JOONSANG P, ANN B, IVAR-KRISTIAN W, *et al.* Integrated monitoring approach for offshore geological CO₂ storage [C]// Offshore Technology Conference, 2019.
- [92] VERDON J P, KENDALL J M, MAXWELL S C. A comparison of passive seismic monitoring of fracture stimulation from water and CO₂ injection [J]. *Geophysics*, 2010, 75(3): MA1-MA7.
- [93] ROBINSON A H, CALLOW B, BÖTTNER C, *et al.* Multi-scale characterisation of chimneys/pipes: fluid escape structures within sedimentary basins [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 106. DOI: 10.1016/j.ijggc.2020.103245.
- [94] SULTAN N, RIBOULOT V, KER S, *et al.* Dynamics of fault-fluid-hydrate system around a shale-cored anticline in deepwater Nigeria [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B12). DOI:10.1029/2011JB008218.
- [95] BHUYIAN A H, LANDRØ M, JOHANSEN S E. 3D CSEM modeling and time-lapse sensitivity analysis for subsurface CO₂ storage [J]. *Geophysics*, 2012, 77(5): E343-E355.
- [96] PICOTTI S, GEI D, CARCIONE J M, *et al.* Sensitivity analysis from single-well ERT simulations to image CO₂ migrations along wellbores [J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(5): 504-512.
- [97] JEWELL S, ZHOU X B, APPLE M E, *et al.* Bulk electric conductivity response to soil and rock CO₂ concentration during controlled CO₂ release experiments: observations and analytic

- modeling[J]. *Geophysics*, 2015, 80(6): E293-E308.
- [98] WAGNER F M, GÜNTHER T, SCHMIDT-HATTENBERGER C, *et al.* Constructive optimization of electrode locations for target-focused resistivity monitoring[J]. *Geophysics*, 2015, 80(2): E29-E40.
- [99] GASPERIKOVA E, LI Y G. Time-lapse electromagnetic and gravity methods in carbon storage monitoring[J]. *The Leading Edge*, 2021, 40(6): 442-446.
- [100] DAVIS K, LI Y G, BATZLE M. Time-lapse gravity monitoring: a systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery[J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): WA61-WA69.
- [101] KRAHENBUHL R A, MARTINEZ C, LI Y G, *et al.* Time-lapse monitoring of CO₂ sequestration: a site investigation through integration of reservoir properties, seismic imaging, and borehole and surface gravity data[J]. *Geophysics*, 2015, 80(2): WA15-WA24.
- [102] BONNEVILLE A, BLACK A J, HARE J L, *et al.* Time-lapse borehole gravity imaging of CO₂ injection and withdrawal in a closed carbonate reef[J]. *Geophysics*, 2021, 86(6): G113-G132.
- [103] PARK J, TVEIT S, MANNSETH T, *et al.* Geophysical monitoring [R]. FME SUCCESS Synthesis Report Vol 4, 2018.
- [104] TVEIT S, MANNSETH T, PARK J, *et al.* Combining CSEM or gravity inversion with seismic AVO inversion, with application to monitoring of large-scale CO₂ injection[J]. *Computational Geosciences*, 2020, 24(3): 1 201-1 220.
- [105] BOHLOLI B, BJØRNARÅ T I, PARK J, *et al.* Can we use surface uplift data for reservoir performance monitoring? A case study from in Salah, Algeria[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 76: 200-207.
- [106] BJØRNARÅ T I, BOHLOLI B, PARK J. Field-data analysis and hydromechanical modeling of CO₂ storage at in Salah, Algeria [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 79: 61-72.
- [107] VASCO D W, DIXON T H, FERRETTI A, *et al.* Monitoring the fate of injected CO₂ using geodetic techniques[J]. *The Leading Edge*, 2020, 39(1): 29-37.
- [108] MATHIESON A, MIDGLEY J, DODDS K, *et al.* CO₂ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria[J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(2): 216-222.
- [109] COMOLA F, JANNA C, LOVISON A, *et al.* Efficient global optimization of reservoir geomechanical parameters based on synthetic aperture radar-derived ground displacements[J]. *Geophysics*, 2016, 81(3): M23-M33.
- [110] ZHANG R L, WINTERFELD P H, YIN X L, *et al.* Sequentially coupled THMC model for CO₂ geological sequestration into a 2D heterogeneous saline aquifer[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 27: 579-615.
- [111] PAFFENHOLZ J. Introduction to this special section: the role of advanced modeling in enhanced carbon storage [J]. *The Leading Edge*, 2021, 40(6): 408-412.
- [112] LUMLEY D. 4D seismic monitoring of CO₂ sequestration[J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(2): 150-155.
- [113] MUR A, BARAJAS-OLALDE C, ADAMS D C, *et al.* Integrated simulation to seismic and seismic reservoir characterization in a CO₂ EOR monitoring application [J]. *The Leading Edge*, 2020, 39(9): 668-678.
- [114] HAO Y J, YANG D H, ZHOU Y J. A feasibility study of CO₂ geologic sequestration integrating reservoir simulation, rock-physics theory, and seismic modeling[J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): M71-M82.
- [115] RAHMAN M J, FAWAD M, MONDOL N H. Potential effect of Biot's coefficient on rock failure in CO₂ storage site smeaheia, northern north sea [C]// 83rd EAGE annual conference & exhibition. Madrid, Spain: European Association of Geoscientists & Engineers, 2022.
- [116] FAWAD M, RAHMAN M J, MONDOL N H. Seismic-derived geomechanical properties of potential CO₂ storage reservoir and cap rock in Smeaheia area, northern North Sea [J]. *The Leading Edge*, 2021, 40(4): 254-260.
- [117] DUPUY B, ROMDHANE A, NORDMANN P L, *et al.* Bayesian rock-physics inversion: application to CO₂ storage monitoring[J]. *Geophysics*, 2021, 86(4): M101-M122.
- [118] LI J H, ROCHE B, BULL J M, *et al.* Broadband acoustic inversion for gas flux quantification—application to a methane plume at scanner pockmark, central north sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(9). DOI: 10.1029/2020JC016360.
- [119] ZHANG W Y, ZHOU T, LI J H, *et al.* An efficient method for detection and quantitation of underwater gas leakage based on a 300-kHz multibeam sonar [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17). DOI: 10.3390/rs14174301.
- [120] BLOMBERG A E A, SÆBØ T O, HANSEN R E, *et al.* Automatic detection of marine gas seeps using an interferometric sidescan sonar [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 42(3): 590-602.
- [121] EDGAR R. Introduction to synthetic aperture sonar [M]// Sonar systems. London: InTech, 2011.
- [122] PEDERSEN R B, BLOMBERG A E, LANDSCHULZE K, *et al.* Discovery of 3 km long seafloor fracture system in the Central North Sea [C]. AGU Fall Meeting, 2013.
- [123] ROCHE B, BULL J M, MARIN-MORENO H, *et al.* Time-lapse imaging of CO₂ migration within near-surface sediments during a controlled sub-seabed release experiment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103363.
- [124] LI J H, WHITE P R, BULL J M, *et al.* A noise impact assessment model for passive acoustic measurements of seabed gas fluxes [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 183: 294-304.
- [125] LEIGHTON T G, WHITE P R. Quantification of undersea gas leaks from carbon capture and storage facilities, from pipelines and from methane seeps, by their acoustic emissions [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 468(2 138): 485-510.
- [126] LI J H, ROCHE B, BULL J M, *et al.* Passive acoustic monitoring of a natural CO₂ seep site—implications for carbon capture

- and storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 93. DOI:10.1016/j.ijggc.2019.102899.
- [127] LI J H, WHITE P R, ROCHE B, *et al.* Acoustic and optical determination of bubble size distributions-quantification of seabed gas emissions [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 108. DOI:10.1016/j.ijggc.2021.103313.
- [128] LI J H, WHITE P R, BULL J M, *et al.* Passive acoustic localisation of undersea gas seeps using beamforming [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 108. DOI: 10.1016/J.IJGGC.2021.103316.
- [129] BOZEC Y, THOMAS H, SCHIETTECATTE L S, *et al.* Assessment of the processes controlling the seasonal variations of dissolved inorganic carbon in the North Sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(6): 2 746-2 762.
- [130] BLACKFORD J C, GILBERT F J. pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1/2/3/4): 229-241.
- [131] BOTNEN H A, OMAR A M, THORSETH I, *et al.* The effect of submarine CO₂ vents on seawater: implications for detection of subsea carbon sequestration leakage [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(2): 402-410.
- [132] ALENDAL G, DEWAR M, ALI A, *et al.* Technical report on environmental conditions and possible leak scenarios in the North Sea. Deliverable Number D3.4: technical report on the CO₂ storage site Sleipner [R]. Kiel, Germany: ECO₂ Deliverable, D3.4. ECO₂ Project Office, 2014.
- [133] TIAN B Q, GUO J W, SONG Y B, *et al.* Research progress and prospects of gliding robots applied in ocean observation [J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2023, 9(1): 113-124.
- [134] DEWAR M, SALEEM U, FLOHR A, *et al.* Analysis of the physicochemical detectability and impacts of offshore CO₂ leakage through multi-scale modelling of *in situ* experimental data using the PLUME model [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110. DOI:10.1016/j.ijggc.2021.103441.
- [135] HVIDEVOLD H K, ALENDAL G, JOHANNESSEN T, *et al.* Layout of CCS monitoring infrastructure with highest probability of detecting a footprint of a CO₂ leak in a varying marine environment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 37: 274-279.
- [136] BELLWALD B, WAAGE M, PLANKE S, *et al.* Monitoring of CO₂ leakage using high-resolution 3D seismic data-examples from Snøhvit, vestnesa ridge and the western Barents Sea [C]// Proceedings, fifth CO₂ geological storage workshop. Utrecht, Netherlands. Netherlands: EAGE Publications BV, 2018.
- [137] SHCHIPANOV A A, KOLLOTTN L, BERENBLYUM R. Characterization and monitoring of reservoir flow barriers from pressure transient analysis for CO₂ injection in saline aquifers [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 91. DOI:10.1016/j.ijggc.2019.102842.
- [138] LORANGER S, PEDERSEN G, BLOMBERG A E A. A model for the fate of carbon dioxide from a simulated carbon storage seep [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 107. DOI:10.1016/j.ijggc.2021.103293.
- [139] UCHIMOTO K, NISHIMURA M, WATANABE Y, *et al.* Bubble detection with side-scan sonar in shallow sea for future application to marine monitoring at offshore CO₂ storage sites [J]. *American Journal of Marine Science*, 2019, 7(1): 1-6.
- [140] von DEIMLING J S, GREINERT J, CHAPMAN N R, *et al.* Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: sensing bubbles controlled by variable currents [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2010, 8(5): 155-171.
- [141] VIELSTÄDTE L, LINKE P, SCHMIDT M, *et al.* Footprint and detectability of a well leaking CO₂ in the Central North Sea: implications from a field experiment and numerical modelling [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 84: 190-203.
- [142] European Commission. Implementation of directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide: guidance document 2: characterisation of the storage complex, CO₂ stream composition, monitoring and corrective measures [Z]. European Commission Guidance Documents, 2011.
- [143] JENKINS C, CHADWICK A, HOVORKA S D. The state of the art in monitoring and verification—ten years on [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 312-349.
- [144] LI Qi, LI Yanzun, XU Xiaoyi, *et al.* Current status and recommendations of offshore CO₂ geological storage monitoring [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023, 29(1): 1-12. [李琦, 李彦尊, 许晓艺, 等. 海上 CO₂ 地质封存监测现状及建议 [J]. 高校地质学报, 2023, 29(1): 1-12.]
- [145] Unites States Internal Revenue Code. Section 45Q credit for carbon oxide sequestration [Z]. United States, 2021.

Advances and Future Development of Monitoring Technologies for Marine Carbon Storage*

LI Jianghui¹, YU Fengling¹, NIU Xiongwei², ZHOU Tian³,
ZHANG Yunxiu⁴, LI Wenling¹

(1. *College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China*; 2. *Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*; 3. *College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*; 4. *State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*)

Abstract: Marine carbon storage plays a crucial role in reducing global greenhouse gas emissions. To ensure the efficient and safe storage of CO₂, it is imperative to monitor the potential migration of CO₂ before, during, and after injection. Current methods for monitoring marine carbon storage encompass built-in sensor monitoring focusing on the seabed wellbore, geophysical monitoring targeting reservoirs and caprocks, and marine environmental monitoring focusing on the seafloor and water column. These three methods can be used to obtain temperature/pressure/acoustic data near the injection/monitoring wellbore, seismic/electromagnetic/gravity data of deep reservoirs and caprocks, and acoustic/chemical/oceanographic data of near-bottom sedimentary layers and seawater, respectively. Analyzing these datasets is expected to reveal the migration characteristics of CO₂ injected into the formation. However, the integrated use of relevant monitoring methods and technologies and the design of high-quality monitoring strategies currently pose significant challenges for both academic and engineering communities. To enable scientific and systematic monitoring of the safety of marine carbon storage, offering essential guidance for offshore storage operations, and concurrently enhancing monitoring efficiency while reducing monitoring costs, we have compiled the fundamental principles, application status, and challenges encountered by different monitoring methods and technologies. We also anticipate future development of monitoring technologies for marine carbon storage.

Key words: Marine Carbon Storage; CO₂ monitoring; Inner-sensing; Geophysics; Marine environment.

* **Foundation item:** Project supported by the Consultation Project of the Ministry of Ecology and Environment (Grant No. 20233160A0073).

First author: LI Jianghui, Professor, research areas include offshore carbon capture, utilization, and storage, as well as underwater acoustics. **E-mail:** jli@xmu.edu.cn