



中国地质  
*Geology in China*  
ISSN 1000-3657, CN 11-1167/P

## 《中国地质》网络首发论文

题目： 二氧化碳地质封存地球物理监测技术研究进展与应用展望  
作者： 章月华，刘彦，吕庆田，陈召曦，严加永  
网络首发日期： 2024-05-28  
引用格式： 章月华，刘彦，吕庆田，陈召曦，严加永. 二氧化碳地质封存地球物理监测技术研究进展与应用展望[J/OL]. 中国地质.  
<https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240527.1112.002>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 二氧化碳地质封存地球物理监测技术研究进展与应用展望

章月华<sup>1,2</sup>, 刘彦<sup>1,3</sup>, 吕庆田<sup>1,3</sup>, 陈召曦<sup>2</sup>, 严加永<sup>1,3</sup>

(1.中国地质科学院, 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037; 2.中国地质大学(北京), 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 3.中国地质调查局中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

**提要:**【研究目的】全球升温是当今世界面临的严峻挑战之一, 应运而生的二氧化碳地质封存是降碳减排的有效途径, 但该过程对储层和盖层都可能带来一系列影响, 存在二氧化碳泄露的风险。二氧化碳注入前后储层物性参数的改变为测井、地震、电磁及重力等地球物理监测方法奠定了理论依据。【研究方法】本文首先概述了二氧化碳地质封存可能面临的风险及相应的地球物理监测方法, 接着探讨了各种地球物理监测技术在二氧化碳地质封存领域的研究进展, 最后分析了当前地球物理监测技术面临的技术挑战和应用限制, 同时也展望了其发展前景。【研究结果】面对二氧化碳地质封存过程中可能出现的各种地质力学问题, 我们可以针对性地采用各种地球物理监测方法。如地表变形问题, 我们可采用 INSAR、微震及时延重力方法; 诱发地震问题, 我们可采用微震方法; 破坏井筒完整性问题, 我们可采用测井方法。而在追踪二氧化碳羽流运移及潜在泄露情况时, 时延重力/地震、微震及电阻率层析成像等多种方法都能够发挥重要作用。地球物理监测技术的研究进展给我们的实际应用带来了很大信心, 但技术本身的局限性、数据处理的复杂性以及现场环境制约等因素依然是不容忽视的挑战。借助深度学习浪潮、综合利用多源信息等是地球物理监测技术的发展机遇。【结论】二氧化碳地质封存是双碳目标为地球物理行业带来的新机遇, 大力发展相适应的长期稳定的二氧化碳地质封存监测体系, 是地球物理开拓新市场的一个重要应用领域。借助深度学习浪潮、综合运用多种地球物理方法来监测二氧化碳地质封存项目是未来的发展趋势。

**关键词:** 二氧化碳地质封存; 地质力学风险; 地球物理监测; 研究进展; 碳捕获-利用与封存工程

**创新点:** 分析二氧化碳地质封存项目可能面临的风险及其对应的地球物理监测方法, 总结地球物理监测二氧化碳地质封存的研究进展, 分析其面临的挑战与机遇, 展望地球物理监测的发展潜力。

**基金项目:** 国家自然科学基金(42174169)、中国地质调查项目(DD)和中央级公益性科研院所基本科研业务费(JKY)联合资助。

**作者简介:** 章月华, 女, 2000年生, 硕士研究生, 主要从事二氧化碳地质封存的重力监测研究; E-mail:zhangyh27@email.cugb.edu.cn。

**通讯作者:** 刘彦, 女, 1975年生, 博士生导师, 正高级工程师, 主要从事地球物理勘探技术和深部探测研究; E-mail:liuy@cags.ac.cn。

# Research progress and application prospect of geophysical monitoring technology in the carbon dioxide geological storage

ZHANG Yuehua<sup>1,2</sup>, LIU Yan<sup>1,3</sup>, LÜ Qingtian<sup>1,3</sup>, CHEN Zhaoxi<sup>2</sup>, YAN Jiayong<sup>1,3</sup>

*(1.Chinese Academy of Geological Sciences,Deep Earth Science and Exploration Technology*

*Laboratory,Ministryof Natural Resources,Beijing 100037,China; 2.School of Geophysics and Information*

*Technology,China University of Geosciences,Beijing 100083,China; 3.SinoProbe Center,Chinese Academy of*

*Geological Sciences and China Geological Survey,Beijing 100037,China)*

**Abstract:** **[Objective]** Global warming is one of the serious challenges facing the world today, and the emergence of carbon dioxide geological storage is an effective way to reduce carbon emissions, but the process may bring a series of impacts on both the reservoir and the cap layer, and there is a risk of carbon dioxide leakage. The change of reservoir physical parameters before and after carbon dioxide injection lays a theoretical basis for geophysical monitoring methods such as well logging, seismic, electromagnetic and gravity. **[Methods]** This paper firstly outlines the possible risks of carbon dioxide geological storage and the corresponding geophysical monitoring methods, then discusses the research progress of various geophysical monitoring techniques in the field of carbon dioxide geological storage, and finally analyzes the technical challenges and application limitations faced by the current geophysical monitoring techniques, and at the same time looks forward to the prospect of their development. **[Results]** In the face of various geomechanical problems that may arise in the process of carbon dioxide geological storage, we can adopt various geophysical monitoring methods in a targeted manner. For example, we can use INSAR, microseismic and time-lapse gravity methods for surface deformation; microseismic methods for induced seismicity; and well logging methods for damaging the integrity of the wellbore. For tracking carbon dioxide plume transportation and potential leakage, time-lapse gravity/seismic, microseismic, and resistivity tomography methods can all play important roles. The research progress in geophysical monitoring technology has brought us great confidence in practical applications, but the limitations of the technology itself, the complexity of data processing, and the constraints of the field environment are still challenges that cannot be ignored. Leveraging the wave of deep learning and the comprehensive utilization of multi-source information are opportunities for the development of geophysical monitoring technology. **[Conclusion]** Carbon dioxide geological storage is a new opportunity for

the geophysical industry brought by the dual-carbon target, and vigorously developing a suitable long-term and stable monitoring system for carbon dioxide geological storage is an important application field for geophysics to develop new markets. With the wave of deep learning, it is the future development trend to utilize multiple geophysical methods to monitor the carbon dioxide geological storage project.

**Keywords:** carbon dioxide geological storage; geomechanical risks; geophysical monitoring; research progress; CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) engineering

**Highlights:** Analyze the possible risks of carbon dioxide geological storage projects and their corresponding geophysical monitoring methods, summarize the research progress of geophysical monitoring of carbon dioxide geological storage, analyze the challenges and opportunities it faces, and look forward to the development potential of geophysical monitoring.

**About the first author:** ZHANG Yuehua, female, born in 2000, postgraduate student, mainly engaged in gravity monitoring of geological storage of carbon dioxide; E-mail: zhangyh27@email.cugb.edu.cn.

**About the corresponding author:** LIU Yan, female, born in 1975, doctorate, seniorengineer, mainly engaged in geophysical exploration techniques and deep exploration research; E-mail: liuy@cags.ac.cn.

**Fund support:** Supported by the Projects of National Natural Science Foundation of China (42174169), China Geological Survey (DD), and the Basic Research Operating Expenses of Central-level Public Welfare Research Institutes (JKY).

## 1 引言

二氧化碳捕集利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)是指将能源等相关产业排放的二氧化碳捕获后分离、利用, 输送至封存地点进行长期封存的过程, 是实现碳中和愿景的重要途径之一, 也是控制温室效应、实现人类社会可持续发展最具潜力的技术之一(秦积舜等, 2020; 张凯等, 2023)。在 CCUS 的整个流程中, 二氧化碳地质封存是最后的关键环节, 指将二氧化碳封存于具有良好封闭性的地质体中。封存点通常会选取 800 m 深度以下渗透性良好且盖层渗透性低的储层, 如咸水层、枯竭油气藏及深层不可开采煤层等。具体来说, 依照封存地质体的不同特点, 二氧化碳地质封存可分为多种类型,

包括：二氧化碳驱替煤层气封存技术(CO<sub>2</sub>-ECBM)、二氧化碳利用枯竭油气田强化采气技术(CO<sub>2</sub>-EGR)、二氧化碳气驱强化采油技术(CO<sub>2</sub>-EOR)和咸水层封存技术(CO<sub>2</sub>-EWR)等，这些封存手段不仅有助于减少温室气体排放，还能通过资源的再利用创造经济效益，因而被视为增值型封存方式（张阳等, 2022）。经过长时间的技术探索和示范应用，二氧化碳地质封存已经展现出规模化应用的巨大潜力和较好的商业化应用前景。在全球范围内，CO<sub>2</sub>-EOR 凭借其高效性和实用性，已经率先进入商业应用阶段；CO<sub>2</sub>-EWR 技术也在稳步推进，目前已进入产业化示范阶段；至于其他技术，虽然目前仍处于中试或更早阶段，但其发展潜力和应用前景同样值得期待（张贤等, 2021）。

近年来，随着一系列 CCUS 试点项目的推进，国内外的研究重心逐渐聚焦于二氧化碳地质封存的监测技术进展。这是因为当大量二氧化碳注入地下进行地质封存时，可能会对储层和盖层产生一系列影响，如引起地表变形、诱导地震产生等。封存的二氧化碳若沿注入井或废弃井的井筒、地层裂缝、断层等发生泄漏，泄漏气体会对周围环境造成危害，威胁植被生长、污染地表水和地下水，甚至会损坏人类健康、破坏生态系统（Unwin et al., 2011; Liu G, 2012; Jung et al., 2013; Li et al., 2016）。因此，监测技术的完善性、周密性、高效性和准确性显得尤为重要，这是确保 CCUS 项目顺利实施、实现安全封存的关键（张琪等, 2011; Yang et al., 2019; 赵改善, 2023）。理想的监测方法应当能够估计流体驱替效应，追踪储层中的流体运移路径并预测其空间分布状况，从而尽早发现可能存在的泄漏迹象。虽然二氧化碳地质封存可以通过地球化学（Kim et al., 2019; Bickle et al., 2020; Patidar et al., 2022）方法进行直接监测，但非地球物理手段往往局限于地表或是浅地下的短程监测，所覆盖的研究区域相对有限，难以充分观测到地下流体的动态运移过程（Appriou et al., 2020）。

地球物理方法贯穿于二氧化碳地质封存的全过程，从注入前的选址决策到注入中的状态检测，再到注入后的长期安全性监测，均发挥着不可或缺的作用。在二氧化碳注入前，地球物理勘探技术为选址决策提供了关键信息，确保所选封存地点封存条件的适宜性。随着二氧化碳的注入，储层的电阻率、波速及密度等物性参数发生变化，这为后续地球物理监测二氧化碳地质封存提供了必要的物性基础。在注入过程中，我们利用地球物理观测手段获取储层及盖层的相应数据，进而对二氧化碳羽流的运移形态、方向及空间展布情况进行有效表征、检测、定位、归因和量化，同时可借助数值模拟进行深入的分析 and 预测，以便及时发现并处理可能的泄露问题，确保注入量与地质封存量的一致性，并据此优化后续的注入方案。在二氧化碳停止注入后，地球物理监测工作仍需长期或重复进行，通过比较测量数据与基线数据之间的差异，评估二氧化碳地质封存

的有效性和安全性（李姜辉等, 2023）。

总的来说，地球物理监测二氧化碳地质封存是比较理想且经济实用的方法，可助力双碳目标的实现。本文从二氧化碳地质封存可能面临的风险及相应可采用的地球物理监测方法出发，结合地球物理监测技术的研究进展，分析了各方法面临的困难与挑战，同时展望了其可能的发展机遇，为未来监测工作的开展提供经验参考。

## 2 二氧化碳地质封存风险及地球物理监测方法

由于地质条件的复杂性和不确定性，二氧化碳地质封存始终面临气体泄露的风险，潜在的泄露通道包括注入井及断层裂缝等。大量的二氧化碳注入地层可能引发一系列地质力学问题，包括地表变形、诱发地震及破坏井筒完整性等（Rutqvist, 2012）。图 1 详细展示了二氧化碳地质封存过程中可能面临的地质风险，表 1 介绍了相应的典型地球物理监测方法。

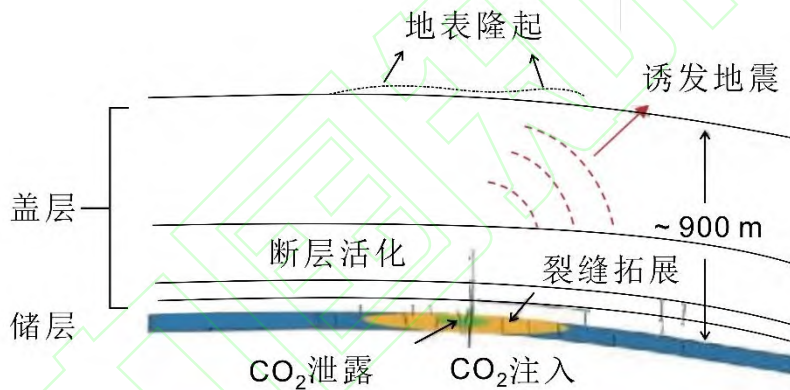


图 1 二氧化碳地质封存过程中的地质力学风险（据于恩毅等, 2023）

Fig1. Geomechanical risks during CO2 geological storage (after Yu Enyi et al.,2023)

表 1 二氧化碳地质封存风险及地球物理监测方法

Table 1 Risks of geological storage of carbon dioxide and corresponding geophysical monitoring methods

风险	监测方法	优势	弊端	实例	
地质力学问题	INSAR	可检测到 mm 级变形，不受昼夜、天气影响	可探测性受坡度、地形和地貌的影响	阿尔及利亚 In Salah 项目	
	地表变形	微震	可解释地表变形机制	监测成本高	加拿大 Weyburn 项目
		时延重力	覆盖范围广	多作为补充数据	美国彭德尔顿市 ASR 项目
	诱发	微震	具有很强的时空	需结合精确模型及储	美国伊利诺斯州

地震		相关性, 受地表环境影响较小	层地质信息以准确评估储层状态变化	盆地 Decatur 项目	
	破坏井筒完整性	测井	高效检测井筒完整性	存在泄露风险	日本长冈 Nagaoka 项目
		时延重力	经济实用	灵敏度阈值对二氧化碳注入量有要求	挪威 Sleipner 项目
二氧化碳羽流运移及泄露		时延地震	分辨率高	成本高昂	澳大利亚 CO <sub>2</sub> CRC Otway 项目
		微震	广泛适用于各类储层	成本较高	中石油吉林油田 CO <sub>2</sub> -EOR 项目
		电阻率层析成像	经济实惠	分辨率较低	德国 Ketzin CO <sub>2</sub> -EWR 项目

## 2.1 地表变形

二氧化碳注入引起的地表变形, 主要源于两大驱动力: (1) 注入区域有效应力降低, 孔隙体积膨胀; (2) 二氧化碳聚集至盖层对其产生浮托作用, 使得盖层弯曲拱起 (李小春等, 2016)。这两种驱动力相互叠加, 对上覆岩体产生挤压作用, 上覆地层发生变形。如果累积变形足够大, 地表将在一定范围内出现隆起变形, 这些迹象可以指示地下地层的地质力学响应及二氧化碳羽流的空间变化。

为了确定地表的时空变形及实际的流体位移, 我们可以综合采用合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)、地震及时延重力等成本效益较高的地球物理监测技术。InSAR 是一种“距以千里、感知毫厘”的对地微波观测技术, 利用同一地区的两幅具有相干性的雷达图像的重复观测相位信息获取地表形变, 在区域性地表形变监测中具有较高的垂向监测精度, 是监测地表形变最具性价比的方法之一 (Zhang et al., 2021); 微震监测技术通过在井中或地表布置一系列地震传感器, 实时采集并记录微震事件的地震信号, 推测地下岩体在应力作用下的稳定性和变形状态, 从而了解二氧化碳注入过程中地层发生的变化 (Meng et al., 2023); 时延重力监测技术是观测地下密度分布随时间变化的一种高效方法, 对动态变化的储层进行至少两次的三维重力勘探, 其响应与储层密度变化线性相关 (Topham et al., 2020)。

阿尔及利亚 In Salah 二氧化碳地质封存项目已经通过 InSAR 技术观测到由二氧化碳注入引起的地表隆起现象, 在活跃的二氧化碳注入井上方, 地表每年隆起约 5 mm (Vasco et al., 2008; Verdon et al., 2013); 美国德克萨斯州西部 2014 年 11 月至 2019 年 1 月的 InSAR 结果显示, 在油田作业活跃的佩科斯附近

可检测到多达 13 cm 的沉降和 7 cm 的地表隆起信号 (Lee et al., 2023)。在这两个案例中, InSAR 数据的分辨率都比较高。一个重要原因在于, 这两个地区均为无植被覆盖的沙漠地带, 地表条件良好, 主要由坚硬的沙漠沉积物和裸岩构成, 可最大限度地提高雷达波相位一致性, 以便于 InSAR 分析地表变形现象。

在上述 In Salah 项目的 KB-502 注入井周边, 能够观测到双叶状地表隆起现象, 如图 2 所示。为了进一步刻画其细节特征、解释其地表变形机制, 2009 年开始部署微震监测系统, 在注入点上方的垂直钻孔中安装了六个三分量地震检波器, 深入地下 500 m, 这也意味着只能追踪到部分二氧化碳羽流运移轨迹。布置微震检波器的主要目标是识别微震事件的发生, 遗憾的是, 由于技术故障, 仅有一个地震检波器提供了有效的数据。尽管如此, 我们仍能够确定微震事件的发生频率, 2010 年共人工识别出 700 个事件, 其中一天内最多发生 35 个事件。Verdon, J.P. 等人分析了微震事件的波形, 确定事件的发生与流体注入激活断裂带密切相关 (Verdon et al., 2013)。加拿大 Weyburn 项目同样运用微震技术来监测地质力学变形。2003 年, 该项目部署了一个由八个三分量检波器组成的单一井下阵列。所有记录到的微震事件均发生在储层顶部 200 m 的范围内, 这表明诱发的形变并未为流体泄露提供通道。在覆盖层中产生的变形是由应力传递造成的, 因此, 目前的变形情况不会对封存安全构成直接威胁。从整个监测系统的实施情况和以往研究成果来看, 微震监测技术不仅能更好地监测地下活动, 协助探测从注入到封存过程中的宝贵信息, 还能提供比其他监测方法更灵敏的预警 (Meng et al., 2023)。但在这两个案例中, 地震检波器的布置均局限在一定区域, 若要更全面地分析整个区域, 势必要布设更多检波器, 如此一来微震监测成本将会大大增大。



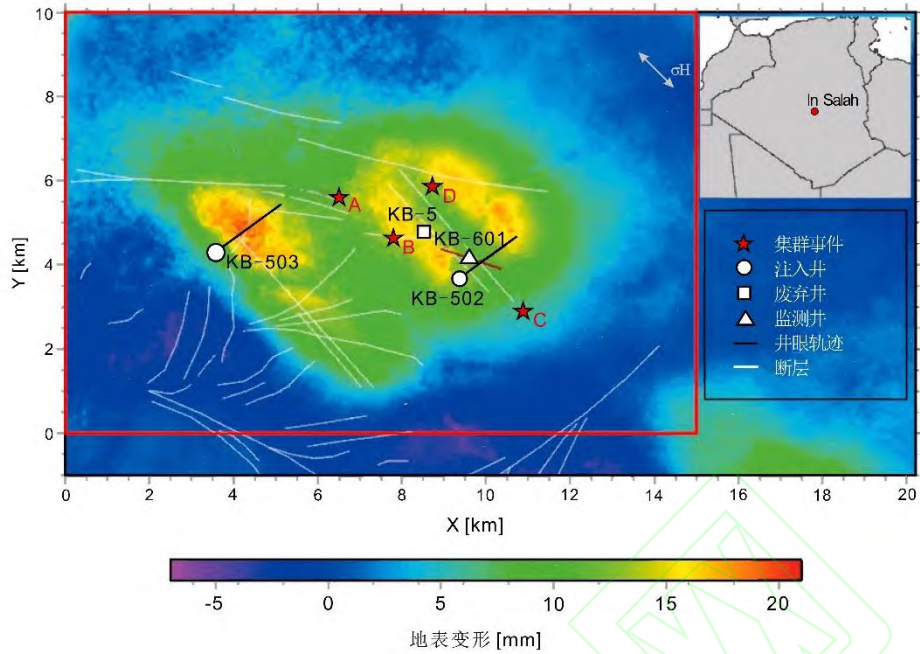


图 2 In Salah 项目监测布局及 InSAR 结果示意图 (据 Cao et al., 2021)

两口注入井: KB-502、KB-503 (KB-501 未显示); 弃用的试验井: KB-5; 微震监测井: KB-601; 背景轮廓显示卫星测量二氧化碳注入引起的地表变形, 展现了 KB-502 周边地表双叶状隆起; 白线代表已知的至 2000 m 深度的断层; 红色五角星标识微震事件。

Fig. 2 Schematic diagram of the monitoring layout and InSAR results for the In Salah project (after Cao et al., 2021).

Two injection wells: KB-502, KB-503 (KB-501 not shown); abandoned test well: KB-5; microseismic monitoring well: KB-601; background contours show surface deformation caused by satellite measurements of carbon dioxide injection, demonstrating the bilobate uplift of the surface around KB-502; white lines represent known faults up to 2,000 m in depth; and red pentagrams identify microseismic events.

美国俄勒冈州彭德尔顿市含水层储存与回采项目(Aquifer Storage and Recovery, ASR)于 2011 年 6 月 5 日、7 月 25 日和 9 月 25 日采用 LaCoste & Romberg D 型相对重力仪先后三次开展时延重力测量, 时间分别对应于接近储存高峰期、开采三周后和接近开采完成时。重力测量结果表明, 彭德尔顿 ASR 项目的注水井周围局部地区出现了明显的重力异常, 与合成孔径雷达差分干涉测量 (Differential InSAR, DInSAR) 监测到的亚厘米级地表变形相对应。此外, 重力信号可提供有关地下流体再分布的更多信息 (Bonneville et al., 2015)。

## 2.2 诱发地震

二氧化碳注入目标地层并开始置换流体进行地质封存时, 地层的孔隙压力

会随之增加，这将打破原有的应力平衡，进而改变地层的稳定性。一旦作用于断裂或断层表面的外部剪应力超过其剪切强度，注入地下的流体可能会诱发岩石的剪切拉伸活动，进而释放地震能量、触发微震事件。

二氧化碳地质封存通常选定高渗透储层，二氧化碳能够运移较远距离，诱发地震的空间分布也就往往较为广泛，此外长时间的运移和封存会导致注入压力逐渐消散，因此大多数与二氧化碳注入相关的地震事件都属于微震，但偶尔也会记录到较大震级的地震。例如，美国 Cogdell CO<sub>2</sub>-EOR 项目在 2006-2011 年间记录到 18 次  $M \geq 3$  级的地震，其中最大的一次发生在 2011 年，震级达到了  $M 4.4$  级。

鉴于二氧化碳地质封存通常涉及长期、大规模的超临界二氧化碳注入，近年来由二氧化碳注入诱发的地震问题已引起了广泛关注。大规模的二氧化碳注入可能导致广泛的岩体应力扰动，进而激活构造断层，从而有诱发大地震的风险。此外，即使是小到中等震级的地震也可能对盖岩的完整性造成威胁，增加二氧化碳泄漏的风险（Cheng et al., 2023）。因此，深入了解与现场二氧化碳注入相关的诱发地震情况至关重要。

向储层注入流体诱发的微震活动具有很强的时空相关性，其活动强度受注入速度、注入压力和注入规模等因素的影响，通过微震监测，我们可以获取到充分反映当前储层状态的信息。为了确保项目的安全实施并避免泄漏事件的发生或扩大，我们可以系统地开展微震监测工作，深入分析微震事件的机理，并准确评估二氧化碳地质封存对储层可能造成的破坏。

加拿大 Weyburn 项目于 2003 年安装了由八个三分量检波器组成的井下监测阵列，在 2010 年 10 月二氧化碳注入停止后的一个月内监测到了 92 个微震事件，震级从 -3 到 -1  $M_w$  不等，其中 -2  $M_w$  震级事件是在距离储层 500 m 处探测到的；加拿大阿尔伯塔省 Pembina 油田在距注入井水平距离 300 m 处设置了一口监测井，利用八个三分量井眼检波器进行微震监测，在 2005-2008 年间未探测到超过 -1.5  $M_w$  的微震事件；美国伊利诺斯州盆地 Decatur 项目（IBDP）的微震监测由两个独立的检波器观测系统组成，在二氧化碳注入开始后的两个月内仅监测到低震级事件（小于 1.2  $M_w$ ），其中约 90% 发生在注入层以下 280 m 的范围内；美国密歇根盆地巴斯群岛白云岩油田向地下 1050 m 深处注入了约 10000 吨超临界二氧化碳后，监测到了超过 200 个微震事件，通过对这些事件的震源定位、频率特性分析和地震机制分类，现这些微震事件是由充满流体的裂缝中二氧化碳气体混合物的膨胀振荡产生的，且大多发生在靠近井眼的位置（Meng et al., 2023）。

## 2.3 破坏井筒完整性

在 CCUS 项目中，井筒完整性是评估井内二氧化碳泄漏风险的关键标准，井筒完整性的监测也就显得尤为重要。井筒完整性的破坏可能会导致井筒中二氧化碳的泄漏，而这种破坏主要可归因于两个关键因素：完井和作业中的不当操作以及井筒水泥和套管材料的快速降解（Su et al., 2023）。在完井和作业方面，风险通常源于水泥与周围地层岩石的粘结力不足，水泥护套内存在气道和微裂缝，或水泥与套管之间形成微环状结构；此外，二氧化碳与油井水泥和钢套管之间的化学作用会导致在井筒中形成新的泄漏通道。

油井一方面是二氧化碳从封存地层向外运移的主要潜在途径，同时也是监测技术实施的重要载体。因此，全面评估井筒完整性对于保障二氧化碳地质封存项目的长期稳定至关重要。我们必须充分考虑到地质力学等因素的影响，并采取相应的监测技术和管理措施，通过识别和解决井筒完整性被破坏引起的潜在问题，尽可能降低二氧化碳泄漏的风险，从而提高二氧化碳地质封存的整体效益。

井筒完整性监测，特别是在高泄漏风险井的周边，是一项长期且成本较高的工作，主要通过测井技术实现，目的是确保井筒的完整性并检测潜在的二氧化碳泄漏。其中声波测井便基于岩石等介质的声学特性，旨在研究钻井地质剖面并评估油井完整性。例如，Takahiro Nakajima 等利用时延超声波测井和水泥胶结测井 CBL 数据，对日本长冈 Nagaoka 项目二氧化碳注入点的油井完整性进行了评估，结果显示储层深处的套管并未发生严重损坏或变形，Nagaoka 项目也未发现二氧化碳泄漏的明显证据（Nakajima et al., 2013）；Duguid 等在对美国 SECARB 油田项目的 CFU31F-2 和 CFU31F-3 两口监测井的完整性评估中发现，附着在长套管上的监测设备可以看到连续的低声阻抗特征，可能存在泄漏风险（Duguid et al., 2017）。这些测井监测技术为识别和解决与二氧化碳泄漏相关的潜在风险提供了重要信息。但值得注意的是，在评估井筒完整性时，仪器的井中布设需经过精心设计与评估，以限制泄露风险并最大限度地提高井筒完整性（Duguid et al., 2017）。

## 2.4 二氧化碳羽流运移及泄露

二氧化碳羽流通常指的是二氧化碳在地下储层中的分散和运移现象，其中，二次羽流特指在预定注入及封存储层之外的地层中积聚的二氧化碳。羽流的运移方向及分布范围等受到地质构造、二氧化碳注入量及渗透率各向异性等多重

因素的影响 (Gonzalez and Misra, 2022)。二氧化碳羽流运移情况是指示二氧化碳地质封存泄露的唯一直接依据, 为确保二氧化碳地质封存的安全性, 防止其沿井筒或跨岩层泄漏, 对地层中的二氧化碳羽流进行长期监测至关重要 (Glubokovskikh et al., 2021)。准确掌握羽流的位置和运移信息对封存风险评估极为关键, 旨在确保封存地层中的二氧化碳质量满足监管要求, 并向公众证明封存的安全有效性。

地球物理方法能够有效地对二氧化碳羽流进行成像, 以追踪其在储层中的运移路径以及可能通过盖岩层发生的泄漏情况。密度、地震速度及电阻率的变化与气体饱和度的变化密切相关, 时延重力/地震、微震及电阻率层析成像 ERT 等方法, 已成为监测注入的二氧化碳流向的有力工具。时延重力/地震是指对动态变化的储层进行至少两次的三维重力/地震勘探, 包括初始基线调查以及后续的跟踪调查, 提供流体随时间变化的图像以监测储层的流体动态变化情况; 电阻率层析成像通过向地下供电, 形成以供电电极为源的等效点电源激发的电场, 通过观测不同方向的电位或电位差来研究探测区的电阻率分布, 因其施工方便、成本低、效率高等突出优势, 在监测二氧化碳羽流时具有良好的应用潜力。上述方法若是在井中开展测量, 有望提升监测二氧化碳羽流时的分辨率, 进而增强其探测泄漏的能力。

无论注入的二氧化碳处于何种状态, 重力都能直接提供储层密度变化信息, 但重力方法应用时对二氧化碳的注入量有一定要求, 因为过小的注入量可能使微小变化难以被探测到。挪威 Sleipner 项目通过操纵部署了 Scintrex CG5 相对重力仪的水下机器人 ROV, 于 2002 年开始进行重力基线观测并在海底置放永久测点, 随后在 2005、2009、2013 年开展了多次重复调查 (Alnes et al., 2008, 2011)。Sleipner 项目最初是在互相垂直的两条线上布置了 30 个测点, 覆盖了东西 7 km、南北 3 km 的区域。如图 3 所示, 随着时间的推移, 二氧化碳羽流的运移面积逐渐扩大, 后续又增加了 13 个测点覆盖更大监测区域, 使用多种重力仪对每个监测点都进行了至少 3 次的观测, 300 万吨不同密度的二氧化碳将带来  $-10\mu\text{Gal}$  至  $-4\mu\text{Gal}$  不等的重力变化。

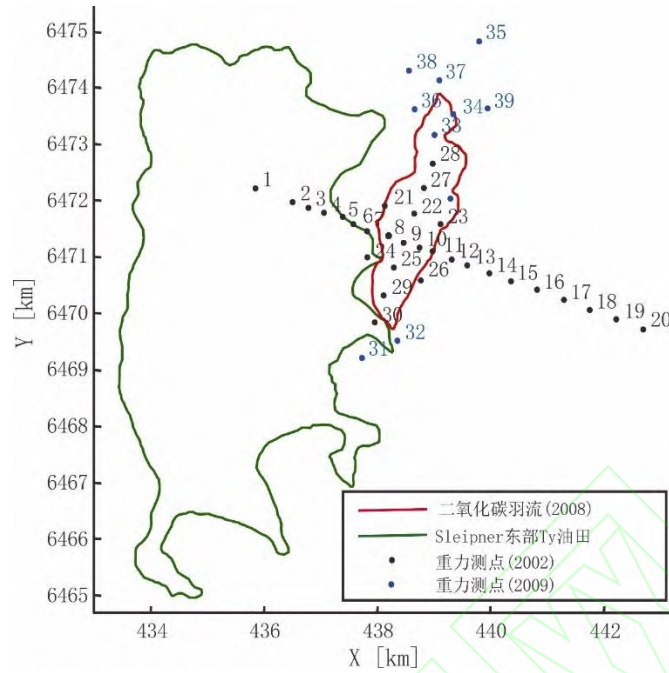


图 3 Sleipner 项目重力测点布置

Fig3. Gravity observation point arrangements for the Sleipner project

鉴于注入的二氧化碳为超临界状态，其声波速度信号显著，这为地震监测提供了有利条件。时延地震可以通过对不同时刻的三维地震图像作差比较，从而揭示流体的动态变化信息。为保证时延地震监测技术的应用效果，多在孔隙度高、流体饱和度变化显著且埋藏位置不会过深的储层中开展工作，咸水层封存往往满足该条件，事实上时延地震监测技术在 CO<sub>2</sub>-EWR 项目中应用效果也大都不错。以 Sleipner 项目为例，该项目在 1999、2001、2002、2004、2006、2008、2010、2013 及 2016 年进行了多次时延地震重复监测，成功实现二氧化碳羽流成像 (Fabriol et al., 2011)；澳大利亚 CO<sub>2</sub>CRC Otway 项目通过采用永久部署的检波器，成功开展了时延地震监测，其结果清晰揭示了二氧化碳羽流朝东南方向运移的迹象 (Popik et al., 2020)。然而，加拿大 Pembina Cardium 试验项目开展三维地震勘探的效果并不理想，这可能是由于储层地层过薄 (20 m)，难以分辨振幅变化。时延地震在绘制二氧化碳羽流、量化储层注入量及探明早期泄漏方面无疑能够重要作用，但在设计监测方案、评估成本效益时应当考虑到不同项目储层地质特点各异，此外可能还需要其他补充数据以增强时延地震监测结果的准确性和可靠性。时延地震在绘制二氧化碳羽流、量化储层注入量及探明早期泄漏方面无疑发挥着重要作用，但在设计监测方案以及评估成本效益时，我们必须充分考虑到不同项目储层地质特点的差异性。

微震监测技术广泛适用于各类储层，通过分析微震事件的震级、机理、时空频率及能量分布等，有效识别二氧化碳羽流的动态运移，在国内 CCUS 项目

中的应用效果也比较理想。中石油吉林油田 CO<sub>2</sub>-EOR 项目于 2009 年开展微震监测，结合不同位置监测到的微震事件密度，通过反演来判断二氧化碳在储层中的运移方向；中联煤层气山西 CO<sub>2</sub>-ECBM 项目采取的近地表微震监测，由于目标煤储层渗透率低、孔隙度小、破裂压力小，微震事件位置不能直接精确对应流体运移范围，但通过分析微震事件的密集分布趋势，我们依然能够大致描绘出羽流的分布范围（Meng et al., 2023）。

电阻率层析成像 ERT 的分辨率虽不及地震方法，但可以作为地震监测结果的重要补充。目前电阻率层析成像多应用于工程环境领域，以检测地下含水层的流体流向抑或是探测环境泄漏物（Uttam and Sharma, 2022; Issaoui et al., 2023）。如 Dana Kiessling 等在德国 Ketzin CO<sub>2</sub>-EOR 项目约 650 m 深度处盐水含水层采用 ERT 技术对二氧化碳注入后的扩展运移进行监测，结果显示二氧化碳的注入致使电阻率增大约 2 倍（Kiessling et al., 2010; 崔方智等, 2020）。然而，需要注意的是，大多数现有或设想的二氧化碳注入深度多介于 800-1000 m，与这一深度相比，若具有足够孔隙度和渗透性的储层相对较薄（<100 m），可能无法探测到储层中的电阻率变化。此外，ERT 无法对远小于电极间距的二氧化碳饱和度细节进行成像，但可以提供二氧化碳分布的大致信息。

### 3 地球物理监测技术研究进展

在二氧化碳地质封存项目的实施阶段及后续运营管理中，动态监测与评估封存的有效性和安全性至关重要。如表 2 所示，围绕不同项目的背景条件及监测目标，我们可以针对性地发展适配的地球物理监测技术，制定相应的技术应用流程，以确保监测工作的精确性和高效性，为项目的长期稳定运行提供有力保障。在本章节中，我们将探讨这些地球物理监测技术的最新研究进展。

表 2 典型地球物理监测方法

Table 2 Typical geophysical monitoring methods

监测方法	观测参数	监测目的	典型应用
------	------	------	------

测井	盐水饱和度 声波速度 CO <sub>2</sub> 饱和度和度	追踪储层 CO <sub>2</sub> 运移 校准三维地震调查地震波速	Nagaoka (Xue et al., 2006)、 Frio (Hovorka et al., 2006)、Ketzin (Ivanova et al., 2012)
电磁监测	地层电导率 电磁感应	追踪储层 CO <sub>2</sub> 运移	Ketzin (Kiessling et al., 2010)、中联煤 CO <sub>2</sub> 驱煤层气项目 (崔方智等, 2020)
地震监测	P 波和 S 波速度 反射界面 地震振幅衰减	追踪储层 CO <sub>2</sub> 的运移及分布	Weyburn (Wilson et al., 2004)、Frio (Hovorka et al., 2006)、 Otway (Dodds et al., 2009)、Snøhvit (Eiken et al., 2011)、In Salah (Ringrose et al., 2013)、Sleipner (Furre et al., 2017)、神 华 CCS 示范工程 (赵海英等, 2018)、Tomakomai (Tanase et al., 2019)、中联煤 CO <sub>2</sub> 驱煤层气项目 (Li et al., 2022)
重力监测	流体驱替引起的密度变化	追踪储层 CO <sub>2</sub> 的向上运移 地下 CO <sub>2</sub> 的质量分布	Sleipner (Alnes et al., 2008)、Dover 33 (Bonneville et al., 2021)

### 3.1 测井监测

二氧化碳运移发生在不同尺度上，包括大尺度（整个储层）、宏观尺度（储层数值模拟中使用的网格块）、中尺度（岩心）和微观尺度（孔隙）（Sato et al., 2011）。监测技术的选取在很大程度上取决于目标尺度，每种技术都有其适用范围。对于中尺度到宏观尺度的监测，测井方法非常实用，它通过探测声波时差、自然伽马等参数曲线来分析声学及放射性等特征。在美国 Frio、Bell Creek 油田、SECARB 油田、德国 Ketzin、加拿大 Aquistore 及日本长冈 Nagaoka 等多

个项目的应用均取得了显著成效 (Sakurai et al., 2006; Ivanova et al., 2012; Nakajima & Xue, 2013; Braunberger et al., 2014; Duguid et al., 2017; Topham et al., 2020)。国内, 中石油组建的 CCUS 工作团队同样开展了诸多工作, 包括在长庆油田实施多维成像、动态监测等技术试验, 在吉林油田重新厘定二氧化碳驱第三类储层划分标准, 优化套后饱和度测井方案, 开展井筒完整性评价等。这些实践探索也为未来 CCUS 项目监测方案的部署提供了经验启示。

在二氧化碳地质封存过程中, 声波测井方法因其对水和二氧化碳声波速度差异的敏感性而备受推崇。Nakajima 等人在长冈 Nagaoka 项目中, 通过时延声波测井观测到的地震波振幅及速度变化, 发现在二氧化碳饱和度较低时, 时延声波测井数据的振幅衰减可被明显探测到 (Nakajima et al., 2019)。这进一步证实了纵波衰减在评估二氧化碳饱和度及早期泄漏监测中的可靠性, 也将鼓励我们在声波测井监测时加强振幅分析, 以获取更多关于地层中二氧化碳饱和度的信息, 并在早期发现沿井的二氧化碳泄漏方面发挥优势。

对于 CCUS 项目中的二氧化碳饱和度变化监测, 脉冲中子测井 (PNG) 等技术因其高精度和适用性而备受青睐 (Baumann et al., 2014)。近年来, 测井仪器研发也取得了显著进展, 如斯伦贝谢公司开发的储层饱和度测井仪 (RST) 提高了求解饱和度的精度, 多探测器脉冲中子 (MDPN) 测井能够更好地估计低孔隙度储层中的气体饱和度, 三探头脉冲中子测井仪器则能同时同步测量多个地层性质, 从而实现二氧化碳饱和度的定量监测 (Fan et al., 2022)。这些观测仪器的进步不仅提高了监测精度, 也降低了监测阈值, 为二氧化碳地质封存的安全性和有效性提供了有力保障。

## 3.2 电磁监测

由 Archie 公式可知, 二氧化碳注入前后储层电阻率会发生显著变化, 这种变化可以被电磁技术检测到, 这便为电磁监测提供了理论依据。随着电磁仪器研发的持续进步和数据处理技术的突破, 瞬变电磁、音频大地电磁 AMT、可控源电磁 CSEM 及电阻率层析成像 ERT 等电磁方法已经成功应用于多个二氧化碳地质封存项目中, 如德国的 Ketzin CO<sub>2</sub>-EWR 项目和山西沁水盆地柿庄北区块的 CO<sub>2</sub>-ECBM 项目, 均取得了比较理想的监测效果 (Kiessling et al., 2010; 崔方智等, 2020)

近年来, 研究者们对电磁监测技术进行了更深入的研究。Börner 等人通过数值模拟, 探讨了时延电磁监测中源/接收器几何形状及灵敏度模式对监测效果的影响, 发现将发射或接收装置定位在目标体附近时, 监测效果最佳 (Börner et al., 2015)。这一发现对于优化电磁监测的布局具有重要指导意义。此外, Ayani 等人提出了一种随机优化方法来反演时延海洋 CSAMT 数据, 以预测二氧



化碳羽流位置 (Ayani et al., 2020)。该方法通过随机生成的模型, 结合测量数据和预测的电磁响应之间的差异进行迭代更新, 能够更准确地描述流体前缘位置。以挪威沿海 Johansen 地层为例, 如图 4 所示, 与传统的确定性反演方法相比, 该随机反演方法展现出了更高的精确性。但高效利用这种随机反演方法的前提是能够选取一个恰当的初始岩石物理模型, 这仍然是一个挑战, 需要后续研究的深入探索。

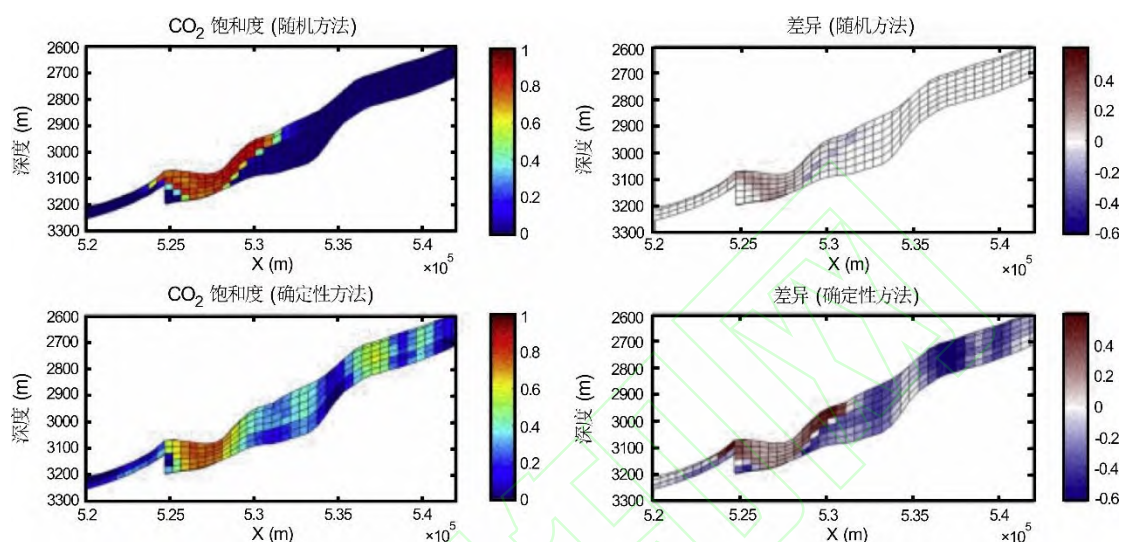


图 4 挪威沿海 Johansen 地层第 60 年的随机反演 (上图) 和 Occam 确定性反演 (下图) 所得二氧化碳饱和度模型比较: 左图显示反演模型; 右图显示预测饱和度值与真实饱和度值之间的差异 (Ayani et al., 2020)

Fig. 4 Comparison of carbon dioxide saturation models obtained from stochastic inversion (top panel) and Occam deterministic inversion (bottom panels) for the Johansen Formation off the coast of Norway at year 60: the left panel shows the inversion model; the right panel shows the difference between predicted saturation values and true saturation values (Ayani et al., 2020).

### 3.3 地震监测

储层的各项物性参数会随着二氧化碳的注入而发生显著改变, 这种变化可以通过地震监测技术中的速度、振幅与旅行时间差异等参数变化来反映。研究表明, 孔隙度、二氧化碳饱和度等参数的数值大小对多相储层中的地震波频散具有重要影响, 而温度、压力等参数则会对地震波波速产生一定影响。因此, 在二氧化碳封存项目中, 地震监测技术显得尤为重要。垂直地震剖面 (VSP)、微震、井间地震和时延地震等都是常见的监测方法, 并在全球多个 CCUS 项目中得到了广泛应用, 如 Sleipner、Weyburn、Frio、Otway 等国外项目及神华 CCS、吉林油田、胜利油田等国内项目。

时延井间地震监测技术在追踪二氧化碳羽流运移方面表现出色, 能够准确

捕捉地震波在储层中的传播特性，从而反映出储层物性变化，在美国 Frio 和日本 Nagaoka 等项目中的应用已经展现出该方法的灵敏度（Spetzler et al., 2008; Onishi et al., 2009）。此外，Zhu 等学者提出了通过监测地震尾波来追踪二氧化碳羽流的时空演变的新方法，并在美国 Frio-II 试验项目中成功应用，为定量监测二氧化碳羽流运移提供了新的思路（Zhu et al., 2019）；Bhakta 等研究发现光纤分布式声波传感（DAS）数据能够监测二氧化碳羽流运动，这为地震监测技术增添了新的手段（Bhakta et al., 2022）。

传统的纵波勘探在区分地震监测结果差异来源时存在局限性，难以明确是压力变化还是二氧化碳饱和度改变所致。为了突破这一限制，多分量地震监测技术应运而生，并逐渐成为地震勘探领域的前沿发展方向（马劲风等, 2022）。西北大学马劲风课题组对目标层转换波剖面 and 纵波剖面进行了深入研究，发现前者在揭示薄层信息方面更具优势（杨扬等, 2015）；Klokov 等展示了一种对二氧化碳储层进行剪切波成像的低成本方案，伊利诺伊盆地-迪凯特项目(IBDP)的实验发现，SV-P 模式对二氧化碳羽流敏感性较低，但其具有转换波的优点，且只需要最简单的垂直检波器接收配置，这种模式有助于在 CCUS 项目中对地表地震数据进行多分量分析（Klokov and Hardage, 2017）。这些探索为地震监测技术的实践应用提供了宝贵的研究经验。加拿大 Weyburn 油田在 1999-2007 年先后 5 次开展三维三分量 3D3C 地震采集（Preston et al., 2009），1999-2008 年先后 8 次开展四维三分量 4D3C 地面地震采集（马劲风和张小莉, 2010），科罗拉多矿业大学的 Davis 团队在 2000-2002 年期间先后 3 次开展三维九分量 3D9C 地面地震采集（Davis et al., 2003），为地震监测技术的实践应用提供了宝贵的实践经验。

在反演方法方面，传统的全波形反演在预测储层弹性参数方面具有很高的准确性，但它依赖于低频信息和数据质量，需要大量计算成本。为此，Li Dong 等学者提出了一种基于曲波变换的多尺度时延反演方法，该方法在保持精度的同时提高了计算效率，为二氧化碳地质封存监测提供了新的解决方案（Li et al., 2021）。此外，Huang Chao 等学者提出的 TLFWI 数据同化和 QFWI 粘声介质全波形反演方法，在构建高分辨率监测数据和恢复速度模型方面表现出色，并在 Frio 项目中印证了其适用性（Huang et al., 2023）。

### 3.4 重力监测

二氧化碳注入到地下储层后，会驱替储层中原位孔隙流体，若二者之间存在密度差异，那么储层密度、质量等参数在二氧化碳注入前后都会发生变化，继而引起相应重力场的变化，这便为重力监测二氧化碳地质封存提供了坚实的

物性依据。重力监测通常包含地表及井下两种途径：地表重力监测覆盖范围广、重复周期短，适用于探测浅层富集的低密度二氧化碳，并结合地震数据资料估算二氧化碳封存潜力。然而，其井周围饱和度信息的分辨率较低，且不适用于二氧化碳与储层流体密度相近的情况。井下重力监测能够克服地表测量分辨率较低的局限，使监测井底附近二氧化碳的扩展和运移成为可能（任韶然等, 2012; Feitz et al., 2022）。重力监测已成功应用于挪威 Sleipner 项目、Snøhvit 项目、美国 SECARB Cranfield 项目、Farnsworth 油田项目、Dover 33 项目、加拿大 Aquistore 项目及日本 Tomakomai 项目等多个项目中（Alnes et al., 2011; Dodds et al., 2013; Sugihara et al., 2014; Black et al., 2016; Goto et al., 2019; Ruiz et al., 2020; Bonneville et al., 2021）。

为了确定在噪声水平之上可以观察到重力响应，需综合考虑多种影响密度变化的因素，孔隙度、渗透率等参数可定义储层类型如致密储层或正常储层等，间接指示异常；而储层深度、二氧化碳质量及密度等信息可直接影响观测阈值（Kabirzadeh et al., 2020）。以渗透率为例，Capriotti 从时延重力数据和注采数据的组合中直接构建储层渗透率分布模型，结合多孔介质中的流体流动与时延重力响应进行正演模拟，再非线性反演重建储层中的渗透率分布（Capriotti and Li, 2015）。如此所得模型满足所有数据集，同时遵守流体通过多孔介质的流体力学，数值模拟表明，两个动态数据集富含的大量信息可以作为渗透率分布的约束条件，但最终的渗透率模型的分辨率可能低于预期。Goto 在此基础上进一步深入考虑了不同深度条件下储层渗透率对于重力变化数值的影响（Goto et al., 2020），研究发现检测重力变化所需的时间取决于渗透率。当储层渗透率较低时，在二氧化碳注入阶段重力下降速度很慢，注入结束后重力下降幅度会比较明显。在 800 m 深度处二氧化碳逼近临界点，这种效应会更明显。高渗透率条件下，在注入结束的初始阶段由于浮力及二氧化碳羽流横向运移的缘故，重力数值兴许会增加；低渗透率条件下，由地面变形带来的重力变化是不容忽视的，必须要借助测量数据进行修正。

正反演模拟是重力勘探资料解释中的一个核心内容。Karaoulis 等提出了一种确定的时延算法，结合图像聚焦技术和时间约束正则化特性，有效过滤不相关的含噪声数据，成功应用于密度变化的监测和 CO<sub>2</sub>-EOR 项目（Karaoulis et al., 2013）；Appriou 等借助 TOUGH2 软件构建了 Kimberlina 地区一个详细的地质模型，旨在模拟二氧化碳的运移和泄露过程。该模型正演模拟了地面及垂直钻孔中二氧化碳羽流沿断层泄漏，并运移到不同深度高渗透层的重力响应。此外，他们还介绍了其中一种情景的反演结果，以展示该方法在估算泄漏二氧化碳质量方面的潜力（Appriou et al., 2020）。

## 4 地球物理监测技术挑战与机遇

地球物理监测技术在二氧化碳地质封存领域扮演着至关重要的角色。然而，实际应用过程中，地球物理监测技术同样面临着诸多挑战，包括地下环境的不确定性、数据处理与解释的复杂性等，这些挑战限制了其在学术研究和实际应用中的进一步发展。不过，正是这些挑战推动了技术的不断创新与突破。

### 4.1 地球物理监测技术研究挑战

我们将从测井、电磁、地震、重力等多种地球物理监测方法出发，探讨这些技术在数据采集及处理解释环节可能遇到的难题。

#### 4.1.1 测井监测

在探讨二氧化碳地质封存的监测技术时，测井技术作为直观评价二氧化碳地质封存安全性的重要方法，在研究及应用过程中面临着多重挑战。尽管测井数据能够直接反映地层中二氧化碳饱和度的变化，但精确测定这一参数仍然十分复杂。

以 Weyburn 和 Sleipner 等成熟项目为例，尽管提出了钻专用监测井的设想，但由于其高昂的监测成本、技术成熟度不足以及潜在的泄露风险，这些建议最终未被采纳。而在日本 Nagaoka 项目中，尽管进行了多次灌注后的测井作业，但所获取的二氧化碳饱和度数据与理论计算值之间仍存在显著差异，这反映出当前岩石物理理论和方法仍有待完善。此外，裸眼井测井和套管井测井的不同形式也增加了观测的不确定性，使得测井数据的解释变得更为复杂。为获取地下地层准确的二氧化碳信息，数据解释往往需要结合岩石物理等信息。

在监测二氧化碳地质封存安全性时，测井方法还面临着井周无盖层及断层泄露风险等限制，且其监测范围相对有限。为准确判断二氧化碳是否向其他地层运移，进而验证封存的安全性，我们需要发展先进的成像技术，以获取不同地层中二氧化碳的空间分布特征。然而，考虑到钻探及深层钻井的高昂成本，我们必须在二氧化碳地质封存试点研究中寻求更高效、更经济的监测手段。

#### 4.1.2 电磁监测

瞬变电磁法作为常用的电磁监测手段，其测得的电阻率基于感应电压计算，这一过程中存在人为影响因素。在沁水盆地柿庄 CO<sub>2</sub>-ECBM 类封存项目中，应用瞬变电磁法时需充分考虑多种因素。例如，注入井套管可能降低观测到的地层视电阻率，但不影响灌注导致的煤层电阻率增大的整体趋势。因此，利用数

值模拟等手段来排除套管等因素影响，对于准确划分二氧化碳运移富集区域至关重要。此外，焖井时间长短及焖井过程中储层参数的改变、二氧化碳的不同运移扩散路径等，都会对周围地层电阻率数值产生直接影响，具体的影响机制有待进一步分析研究。

可控源电磁 CSEM 的商业应用在本世纪初达到顶峰，其数据依赖于岩石电阻率，因此对流体饱和度甚至是岩石孔隙度展现出高度的敏感性。电阻率层析成像 ERT 技术同样依赖电阻率信息，并能反映气态及溶解二氧化碳的综合效应。然而，ERT 在当前的应用中尚无法明确区分这两种不同的影响，这在一定程度上限制了其应用的精确性。

为了更深入地了解 ERT 技术的局限性，Raab 等利用精细网格电阻率模型模拟了多种可能的不同观测条件下的响应，结果显示 ERT 对二氧化碳羽流有足够的分辨率，但探测少量注入的二氧化碳时却面临挑战 (Raab et al., 2020)。进一步的研究表明，ERT 和大地电磁测深 MT 的检测阈值分别为视电阻率变化的 10% 和 20%，两种方法均能检测到深度小于 600 米的 20000 吨或更多的二氧化碳羽流，推断实际应用时会存在探测深度较浅的问题 (屈文璋和安志国, 2020)。

为了获取更精准的结果，ERT 的应用需要更加标准化的数据采集、处理及解释流程。事实上单独的 ERT 观测得到的二氧化碳饱和度往往较低，可将井间-地表 ERT 与地震方法相结合，利用地震资料作为先验信息约束电阻率反演 (Bergmann et al., 2014)，可以提高二氧化碳饱和度测量的准确性，并有效追踪储层内二氧化碳羽流的运移方向 (Yang et al., 2015, 2019)。

电磁技术成本较低，可以根据不同的封存场地来选择监测间隔，出于成本预算选择电磁监测是合理的，但相应的电磁方法的分辨率也比较低，因此需要开展更多研究来提高电磁监测手段的分辨率和整体效率 (Gasperikova et al., 2022)。如果电磁方法检测到任何超出预期变化的响应信号，可能还是需要采取更高分辨率的地震调查来进一步确认，而且金属设施如管道套管等会干扰到潜在地质响应的接收，Orujov 等分析了井中套管对时延近地表电磁测量的影响 (Orujov et al., 2022)，结果表明当源或接收器靠近套管时，导电套管能够降低电阻阻碍电流的能力并扭曲时延响应。目前的技术水平不能完全消除金属设施影响，数据处理解释时必须考虑到该因素的作用。鉴于储层组分的多样性、多变性，CCUS 项目开展电磁监测难度相对较大，缺乏深度、成熟的应用经验。

#### 4.1.3 地震监测

以时延地震为例，尽管油气行业已经积累了近 30 年的时延地震监测经验，但在将其应用于二氧化碳地质封存项目时，仍面临着多重挑战 (马劲风和张小莉, 2010)。

首先，多次采集的地震数据的可重复性是当前时延地震监测面临的关键问

题，包括震源和检波器的一致性。为克服这一难题，研究者们进行了大量的实践探索。例如，Couëslan 等人在 IBDP 项目中发现，三维垂直地震剖面的震源可重复性更易实现，并且井中检波器的布设能减小近地表变化和地表噪声的影响，提高数据分辨率（Couëslan et al., 2013）。CO<sub>2</sub> CRC 项目通过永久埋设的地震检波器大幅提升了信噪比和数据可重复性，固定检波器几何形状同时也缩短了地震数据处理时间。此外，在地下布设检波器就无需在地面使用通信电缆，大大减少了对该地区生产生活的干扰（Popik et al., 2020）。Aquistore 项目则通过埋设一系列稀疏排布的永久检波器并选用可控震源来解决数据采集的一致性和可重复性问题，但稀疏布设节省项目成本的代价是覆盖次数及信噪比的降低，如何平衡多方因素去设计永久地震观测系统，是值得考虑的问题。

其次，关于监测的时间间隔问题，挪威 Sleipner 项目提供了宝贵的经验。该项目在前 15 年内每两年进行一次监测，发现所得数值变化不大，随后考虑成本等因素，调整为每四年一次。第一次监测应当在开始注入二氧化碳后尽快进行，CO<sub>2</sub> CRC 项目在二氧化碳注入后的一年和两年先后开展两次监测工作（Popik et al., 2020），而 Anyosa 等通过挪威西部的 Smeaheia 储层实例研究，指出最佳监测时间可能是灌注开始后的 10 年左右（Anyosa et al., 2021）。这表明不同项目应根据地质背景条件灵活调整监测计划。

然而，即便在监测仪器布设和监测计划安排上有所突破，地震监测在二氧化碳地质封存领域仍缺乏统一的标准解释方法。如何充分挖掘和利用地震数据中的丰富信息，成为地震监测方法未来发展的主要方向。

此外，定量能够探测到的异常阈值也是当前地震监测面临的挑战之一。时延地震本身具有探测范围广的优点，理想条件下能够有效监测到即使注入量较小的二氧化碳，但不同 CCUS 项目和地质条件下的监测效果差异显著。例如，挪威 Sleipner 项目和加拿大 Weyburn 项目在灌注前后得到的参数变化幅值就存在明显差异，这反映了不同储层条件下地震监测的复杂性（Ma et al., 2009; 马劲风和张小莉, 2010）。Ketzin 项目综合了储层岩心样本进行的岩石物理实验和时延地震数据的频谱分解，研究结果表明二氧化碳注入引起的储层孔隙压力变化对地震振幅的影响很小，观测到的振幅异常可归因于二氧化碳饱和（Ivandić et al., 2018）。

地震勘探在识别流体类型和反映中高二氧化碳饱和度变化方面存在局限。一般而言，3000 m 深度内，高孔隙度（>25%）、软砂岩、厚储层条件下开展时延地震监测能够较为理想地监测到流体前缘及其动态特征。但当地震方法应用于注入枯竭油气藏的二氧化碳监测时，灵敏度会降低，因为地层中的空隙体积可能导致大量气体残留。因此，在开展地震监测时，不仅要考虑储层物性变化产生的异常能否被捕捉到，还需考虑如何排除地震观测的噪声干扰因素。同时，如何弹性安排监测的时间间隔、减小环境因素的影响、提高多次采集数据的可

重复性，以及如何平衡昂贵的成本及精确的监测效果等，这都是未来研究需要解决的问题。

#### 4.1.4 重力监测

在二氧化碳地质封存领域，重力监测虽然具有广泛应用的潜力，但也面临着诸多挑战。在选择重力监测方法时，需要特别考虑封存的二氧化碳质量、深度等先决条件。例如，在 CO<sub>2</sub>-EOR 项目中，由于二氧化碳的注入量相对较少或分布较广，重力变化往往较小，而在 CO<sub>2</sub>-ECBM 项目中，由于二氧化碳密度较大，重力信号则相对明显。

重力监测并非总是能够顺利实施。重力基站的选择和传感器的布置方式对监测结果具有显著影响 (Gettings et al., 2008)。此外，重力异常大小随目标体与测点之间的距离平方衰减，这使得深层变化的探测变得较为困难。例如，加拿大 Quest CCS 项目就因储层深度达 2 km 而放弃了地表重力监测方案 (Bourne et al., 2014)。

两种流体的密度对比是决定重力勘探有效性的关键因素。而储层属性、地质条件、测井数据及地震等先验信息的可用性都取决于具体项目，这使得没有一种方法适用于所有情况。因此，实际监测方案需要根据具体需求和现场条件进行深入分析。

为提高重力监测的精确性和应用效果，Sugihara 等采用了弹簧重力仪、绝对重力仪、超导重力仪等多种重力仪器混合监测的方法 (Sugihara et al., 2013)。但在美国 Farnsworth CO<sub>2</sub>-EOR 油田的实际应用中，由于储层较薄且位置较深，地表重力信号微弱且易受地下水文变化影响 (Sugihara et al., 2014)，即便采用了混合监测方法，仍面临诸多挑战。

开展时延重力监测时，为提高测量结果的可重复性并降低其不确定性，许多项目选择布设永久性基准装置。然而，这些装置在实际运行中也可能面临各种挑战。例如，海床上的永久性探测器阵列虽然能够收集高频数据，但必须能够抵御拖网等渔具的干扰，以免对设备造成不可逆的损坏 (Nooner et al., 2007; Paradis et al., 2021)。此外，基准周围的地质活动、沉积物冲刷迁移及生物干扰等因素也可能对重力观测结果产生影响。日本 Tomakomai 项目在开展重力观测时，将超导重力仪安装在混凝土重力平台上，并设置围栏保护，其目的仍然是提供一个稳定的平台，从而最大限度地减少各种干扰。

重力监测在二氧化碳地质封存领域的研究虽然取得了显著进展，但仍面临着诸多挑战。为了克服这些挑战并进一步提高监测效果，我们需要不断深入研究、优化监测方案并加强现场监测设备的保护和管理。

## 4.2 地球物理监测技术应用限制

在二氧化碳地质封存项目中，已采取了包括测井、电磁、地震及重力等多种地球物理监测方法。这些技术通过直接或间接方式探测和成像地下深层的二氧化碳羽流变化等，最终目的皆是确保注入的二氧化碳在工程运行阶段被有效且安全地封存在地下储层中（Gasperikova et al., 2022）。

测井监测多用于评估井筒完整性，所得测井资料多为后续的监测设计和作业决策提供宝贵的先验信息与背景支持。可深部钻井的高昂成本以及二氧化碳泄露的潜在风险，这些因素同样需要被审慎考虑。但在此，我们不再深入讨论测井监测，而是聚焦于电磁、地震及重力这些可追踪二氧化碳羽流的地球物理监测方法。如表 3 所示，每一种方法都有其独特的适用性和局限性。地震方法因其高穿透深度和高空间分辨率，在大型项目中常用于注入前的基线研究和注入过程中的时延监测，但其高昂的成本也是长期监测过程中的一项重大挑战；电磁技术对流体性质变化敏感，而重力法能直接估算深层二氧化碳质量分布。电磁和重力方法虽空间分辨率较低，但对地震监测有补充作用。如果电磁或重力勘探发现任何超出预期变化的信号反应，就需要进行更高分辨率的地震监测。监测工具的多样性凸显了二氧化碳地质封存项目监测方案设计过程中灵活选用方法的重要性，我们需要将实验室研究成果与示范工程应用经验相结合，从而助力双碳目标的落实（吴江等, 2022）。

表 3 电磁、地震及重力监测方法比较

Table 3 Comparison of electromagnetic, seismic and gravity monitoring methods

方法	最低二氧化碳注入量级（吨）	地质限制	应用限制
电磁	$10^4$	浅层低电阻率薄层	受金属设备影响较大；分辨率相对较低
地震	$10^3$	低孔隙度较厚层	时延数据可重复性、背景噪声变化不可预测；数据覆盖范围有限、野外采集工作繁杂
重力	$10^4$	季节性地表变化	分辨率相对较低；不能成像显示 CO <sub>2</sub> 的溶解

国外的二氧化碳地质封存及地球物理监测技术已较为成熟，并已在许多 CCUS 项目中成功应用，达到了增产减排的双重功效。但在我国，对二氧化碳地质封存监测的相应研究主要集中在地表或大气、土壤层面，对深层地球物理监测技术的研究还不够深入，离成熟的应用还有很长一段路要走，如表 4 所示。

表 4 国内典型 CCUS 项目

Table 4 Typical CCUS projects in China



项目名称	所在省市	CO <sub>2</sub> 来源	CO <sub>2</sub> 输送	CO <sub>2</sub> 利用/封存		设施状态	投运年份	地球物理监测手段
				负责单位/企业	处置技术			
中联煤 CO <sub>2</sub> 驱煤层气项目 (柿庄)	山西沁水	外购气	罐车	中联煤	ECBM	运行中	2004	AMT; 地震 (微震、VSP)
国家能源集团煤制油 CCS 项目	内蒙古鄂尔多斯	煤制油	罐车	神华煤制油化工有限公司	EWR	于 2016 年停止注入, 监测中	2011	地震 (4D 地震、VSP)
大庆油田 EOR 项目	黑龙江大庆	天然气处理	罐车+管道	中石油大庆油田	EOR	运行中	2003	测井
新疆油田 EOR 项目	新疆克拉玛依	甲醇厂	罐车	中石油新疆油田	EOR	运行中	2015	测井
长庆石油 EOR 项目	陕西西安	甲醇厂	罐车	中石油长庆油田	EOR	运行中	2017	测井
中石油吉林油田 EOR 项目	吉林松原	天然气处理	管道	中石油吉林油田	EOR	运行中	2008	测井; 井中自然电位测量; 地震 (微震、井中地震)
中石化华东油田 EOR 项目	江苏东台	化工厂	罐车+船舶	中石化华东分公司	EOR	运行中	2005	测井
中石化中原油田 EOR 项目	河南濮阳	化肥厂	罐车	中石化中原油田	EOR	运行中	2015	测井
中石化胜利油田 EOR 项目	山东东营	燃煤电厂	罐车	中石化胜利油田	EOR	运行中	2010	4D 地震
延长石油煤化工 CO <sub>2</sub> 捕集与驱油示范项目	陕西榆林/延安	煤制气	罐车	延长石油靖边/吴起油田	EOR	运行中	2013	测井/3D 地震

各大油田经过多年勘探开发, 积累了数量众多的钻井及地震、测井和地质研究资料, 有助于观测二氧化碳的羽流状态, 而对缺乏相应资料地区的二氧化碳运移模型构建和监测还需要积累和发展。总的来说, 目前我国尚未形成完备的二氧化碳地质封存监测标准规范, 大多依据项目背景个性化设定。由于当前国内 CCUS 项目成本普遍较高, 发展低成本监测技术将是未来 CCUS 项目重点关注的方向之一。

### 4.3 地球物理监测技术发展机遇

地球物理监测技术正迎来前所未有的发展机遇。飞速发展的深度学习为地球物理监测提供了更高效的数据处理手段, 此外, 多种地球物理方法的综合运

用，使得我们能够获取更丰富、更详尽的地下信息。在这一章节中，我们将探讨地球物理监测技术如何借助深度学习的浪潮以及如何综合利用多源信息，实现 CCUS 项目的高效监测。

#### 4.3.1 借助深度学习浪潮

首先，电磁方法作为储层流体成像的常用手段，其与流体电阻率的强耦合性使其具有独特的优势。然而，数据获取和解释的时间成本一直是个问题。Strack 等利用人工智能和基于云平台的数据采集技术，成功将电磁数据的作业反馈时间缩短到接近实时，解释时间也缩短至 24 小时左右，该方法在噪音较大的环境中也展现出良好的适用性 (Strack et al., 2021)。Attias 等通过反演挪威近海 Nyegga 地区的海底和拖曳式电磁接收机数据，有效地垂直划分了浅层天然气水合物特征，该方法可应用于二氧化碳地质封存的监测 (Attias et al., 2018)；Colombo 等借助深度学习神经网络，结合流体动态运移模拟，测试了深度学习反演对多种电磁成分、数据噪声、泛化问题以及三维重建的敏感性，结果表明机器学习反演可充分利用电磁技术对流体饱和度的敏感性，且不会影响结果的分辨率和准确性 (Colombo et al., 2020)。

在地震监测领域，深度学习同样为处理监测数据提供了一种更便捷、更高效的工具。Li Dong 等基于全卷积神经网络提出的二氧化碳地质封存监测方法，通过模拟 2800 套时延差异数据及相应的速度变化来训练网络，结果显示，基于全卷积神经网络的监测方法相较于传统的时延全波形反演，效率更高、精度也更高 (Li et al., 2021)；Evan Schankee 等提出的基于 U-Net 架构的深度学习全波形反演方法，能够实时成像二氧化碳饱和度，并借助蒙特卡洛和集成学习算法来量化其不确定性 (Um et al., 2022)；Sheng Hanlin 构建了二氧化碳羽流形状、大小和位置各不相同的三维阻抗模型，从野外地震数据中提取噪声并将这些噪声添加到训练集中以提高真实性，最终能够以 95.8% 的准确率将二氧化碳羽流从预先存在的流体、噪声中区分出来 (Sheng et al., 2023)。

多项试验结果表明，深度学习反演方法可以作为一种稳定的实时监测工具来监测二氧化碳地质封存储层特征随时间的变化 (Um et al., 2022)。Glubokovskikh 提出了一种数据驱动的方法，根据过去观测到的图像预测未来的时延地震图像，并在 Otway 项目的阶段数据上对这种方法进行了测试 (Glubokovskikh et al., 2021)。预测器的核心部分是一个卷积神经网络，它将后续羽流图视为颜色层，一旦预测器经过训练，它就能近乎实时地预测羽流的演变，并有效地适应不断变化的二氧化碳运移动态。Gonzalez 和 Misra 提出了一种基于多级聚类的无监督学习方法，以可视化地下二氧化碳羽流，并将其应用于 SECARB Cranfield 项目的井间地震层析成像数据 (Gonzalez and Misra,

2022)。这种方法具有自适应和可扩展性，无需结合预定义的地球物理模型，可快速监测地下二氧化碳的含量和分布。

在重力资料的处理解释方面，深度学习也提供了很多新思路。Celaya 等提出了两种反演时延重力数据的算法，包括数据驱动的深度学习方法及考虑地面重力时间演化的数据驱动方法，以模拟二氧化碳羽流（Celaya et al., 2023）。为克服  $L_2$  反演模型偏离及深度学习反演数据偏离的问题（Yang et al., 2022），Celaya 等建议先进行深度学习建模预测，再进行  $L_2$  反演，这种算法相较于传统反演方法，展现出了更高的分辨率，并被证实为监测二氧化碳地质封存有效且受干扰小的方法。但应用于实际 CCUS 项目时能够获得的数据量是有限的，建立起详细的储层模型也具有挑战性。Alyousuf 等基于前馈神经网络的机器学习方法，使用从油田储层模型得出的相关重力响应来训练神经网络，以反演时延三轴钻孔重力数据并预测二氧化碳羽流位置，在挪威近海 Johansen 地层演示的结果表明该方法可监测二氧化碳相关密度变化（Alyousuf et al., 2022）。Yang Xianjin 等构建了一种基于 U-Net 网络的深度学习模型，用于地表重力数据反演，以预测二氧化碳地质封存过程中井筒泄漏的二氧化碳的垂向分布（Yang et al., 2022）。该方法生成的预测结果可重复、误差可接受，空间分辨率也有所提高，能准确地划定目标体边界，并探测到深层、小型或低饱和度的二氧化碳羽流。

总的来说，深度学习为电磁、地震及重力等地球物理方法提供了强大的技术支持，使得这些方法在监测二氧化碳地质封存的地下流体分布方面更加高效。但上述基于深度学习处理监测数据的方法依然还面临着两个较大的挑战：数据集标签缺乏、模型泛化能力有限。此外，实际应用时得根据项目需要选取准确的反演方式。

#### 4.3.2 综合利用多源信息

在二氧化碳地质封存过程中，综合利用多源信息和多种方法，可以帮助我们更好地监测和评估封存的安全有效性。Wang Yichuan 等结合测井数据，提出了一种比较完善的声波阻抗反演方法，该方法适用于基线数据的分析，无需主观选择参数或正则化方法，也无需先验模型（Wang and Morozov, 2019）；Tveit 等提出了一种分步反演方法，该方法结合了不同分辨率的地球物理数据，首先处理 CSEM 或重力观测数据，再利用这些先验信息改进地震 AVO 反演结果（Tveit et al., 2020）；Fawad 和 Mondol 引入了一个新的岩石物理模型，利用声阻抗并结合时延地震叠前反演得到的纵横波速度比，对二氧化碳饱和度、羽流划分及储层内压力变化进行时延估算（Fawad and Mondol, 2022），如图 5 所示，我们能够清晰地观察到二氧化碳羽流随着时间推移向西南方向的运移；Wang Haofan 等基于 Landrø 提出的时延地震 AVO 反演方法，区分了注入二氧化碳后的流体饱和度和压力效应，并进行了定量分析（Wang et al., 2022）。上述方法

的有效试验均为监测二氧化碳地下运移和封存状态提供了依据。

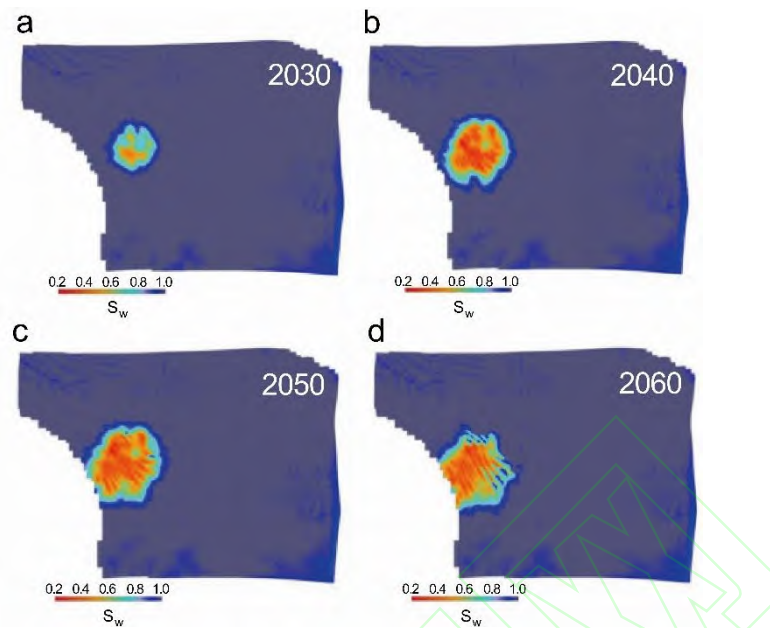


图 5 Sognefjord 储层 (a) 2030 年、(b) 2040 年、(c) 2050 年、(d) 2060 年二氧化碳饱和度预测成像 (Fawad and Mondol, 2022)

Fig. 5 Projected carbon dioxide saturation imaging of the Sognefjord reservoir (a) 2030, (b) 2040, (c) 2050, (d) 2060 (Fawad and Mondol, 2022)

## 5 结论

二氧化碳地质封存是 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的重要途径。为了预防和阻止封存环境下二氧化碳泄漏安全事故的发生，国内外学者开展了广泛的理论研究，但针对二氧化碳地质封存可能面临的风险及相应可采取的地球物理监测方法，当前研究及应用缺乏系统性整合，监测方案未形成体系化建设。我们在上述章节提到了当前地球物理监测技术的研究进展，但实际应用时仍然存在着不少困难。

各地球物理监测技术均有其独特优势与局限性。测井是评估二氧化碳封存安全性最为直观的方法，但其高精度数据受制于其有限的观测范围，且深部钻监测井不仅需要考虑成本问题，还要顾及该井是否会成为二氧化碳泄露潜在路径。电磁监测与之相较具备成本较低的优势，可测量与流体饱和度相关的独立参数，但其受金属设备影响较大，且分辨率较低。地震勘探是当前公认的应用最广泛、最成熟的监测方法 (Sambo et al., 2020)，主要提供地下储层的构造信息，但若要在一个地点进行频繁的监测应用，地震数据采集的成本可能高得令人望而却步 (Krahenbuhl et al., 2011; Ma et al., 2014)。这样的价格往往决定了只有在出现泄露预警或间隔时间较长的情况下，才会采取该方法。但地震勘探对目标储层的充分了解为重力监测方法的应用提供了理想的约束条件，作为一

种低成本、高性价比的监测方法，重力测量对流体驱替引起的密度变化直接敏感，可以检测全范围的二氧化碳饱和度。多项学术研究及工业应用均验证了重力勘探适用于监测二氧化碳流体驱替及运移等问题（Sherlock et al., 2006; Alnes et al., 2008; Sugihara et al., 2013; Krahenbuhl et al., 2015; Wilkinson et al., 2017; Furre et al., 2017; Topham et al., 2020）。

地球物理监测二氧化碳地质封存在实际应用过程中，对技术水平和经济成本都有一定的要求，任何单一监测方法均无法全面满足监测需求，因此，构建一个融合多种地球物理监测技术的综合监测体系，可以提供丰富的地下信息，是分析二氧化碳封存状态最准确的一种手段（Fibbi et al., 2023）。此外，深度学习的飞速发展也为地球物理监测数据的处理与解释提供了新的可能性。随着技术的进步和监测体系的完善，地球物理监测技术在二氧化碳地质封存中的应用将更加广泛。

## References

- Alcalde J, Marzán I, Saura E, et al., 2014. 3D geological characterization of the Hontomín CO<sub>2</sub> storage site, Spain: Multidisciplinary approach from seismic, well-log and regional data[J]. *Tectonophysics*, 627: 6-25.
- Alnes H, Eiken O, Nooner S, et al., 2011. Results from Sleipner gravity monitoring: Updated density and temperature distribution of the CO<sub>2</sub> plume[J]. *Energy Procedia*, 4: 5504-5511.
- Alnes H, Eiken O, Stenvold T, 2008. Monitoring gas production and CO<sub>2</sub> injection at the Sleipner field using time-lapse gravimetry[J]. *GEOPHYSICS*, 73(6): WA155-WA161.
- Alyousuf T, Li Y, Krahenbuhl R, 2022. Machine learning inversion of time-lapse three-axis borehole gravity data for CO<sub>2</sub> monitoring//Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists: 3099-3103.
- Anyosa S, Bunting S, Eidsvik J, et al., 2021. Assessing the value of seismic monitoring of CO<sub>2</sub> storage using simulations and statistical analysis[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105: 103219.
- Appriou D, Bonneville A, Zhou Q, et al., 2020. Time-lapse gravity monitoring of CO<sub>2</sub> migration based on numerical modeling of a faulted storage complex[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 95: 102956.
- Attias E, Weitemeyer K, Hölz S, et al., 2018. High-resolution resistivity imaging of marine gas hydrate structures by combined inversion of CSEM towed and ocean-bottom receiver data[J]. *Geophysical Journal International*, 214(3): 1701-1714.
- Ayani M, Grana D, Liu M, 2020. Stochastic inversion method of time-lapse controlled source electromagnetic data for CO<sub>2</sub> plume monitoring[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 100: 103098.
- Baumann G, Hennings J, De Lucia M, 2014. Monitoring of saturation changes and salt precipitation during CO<sub>2</sub> injection using pulsed neutron-gamma logging at the Ketzin pilot site[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28: 134-146.
- Bergmann P, Ivandic M, Norden B, et al., 2014. Combination of seismic reflection and constrained resistivity inversion with an application to 4D imaging of the CO<sub>2</sub> storage site, Ketzin, Germany[J]. *GEOPHYSICS*, 79(2): B37-B50.
- Bhakta T, Paap B, Vandeweyer V, et al., 2022. Monitoring of CO<sub>2</sub> plume movement using time-lapse distributed acoustic sensing (DAS) data//Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists: 478-482.
- Bickle M J, Stevenson E I, Haese R R, 2020. Sr-isotopic ratios trace mixing and dispersion in CO<sub>2</sub> push-pull injection experiments at the CO<sub>2</sub>CRC Otway Research Facility, Australia[J]. *Chemical Geology*, 538: 119489.
- Black A, Hare J, Macqueen J, 2016. Borehole gravity monitoring in the Aquistore CO<sub>2</sub> sequestration well//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016. Dallas, Texas: Society of Exploration Geophysicists: 768-772.
- Bonneville A, Black A J, Hare J L, et al., 2021. Time-lapse borehole gravity imaging of CO<sub>2</sub> injection and withdrawal in a closed carbonate reef[J]. *GEOPHYSICS*, 86(6): G113-G132.
- Bonneville A, Heggy E, Strickland C, et al., 2015. Geophysical Monitoring of Ground Surface Deformation Associated with a Confined Aquifer Storage and Recovery Operation[J]. *Water Resources Management*, 29(13): 4667-4682.

- Börner J H, Wang F, Weißflog J, et al., 2015. Multi-method virtual electromagnetic experiments for developing suitable monitoring designs: A fictitious CO<sub>2</sub> sequestration scenario in Northern Germany[J]. *Geophysical Prospecting*, 63(6): 1430-1449.
- Bourne S, Crouch S, Smith M, 2014. A risk-based framework for measurement, monitoring and verification of the Quest CCS Project, Alberta, Canada[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 26: 109-126.
- Braunberger J, Hamling J, Gorecki C, et al., 2014. Characterization and time-lapse monitoring utilizing pulsed-neutron well logging: associated CO<sub>2</sub> storage at a commercial CO<sub>2</sub> EOR project[J]. *Energy Procedia*, 63: 3935-3944.
- Caesary D, Song S Y, Yu H, et al., 2020. A review on CO<sub>2</sub> leakage detection in shallow subsurface using geophysical surveys[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 102: 103165.
- Cao W, Shi J-Q, Durucan S, et al., 2021. Evaluation of shear slip stress transfer mechanism for induced microseismicity at In Salah CO<sub>2</sub> storage site[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 107: 103302.
- Capriotti J, Li Y, 2015. Inversion for permeability distribution from time-lapse gravity data[J]. *GEOPHYSICS*, 80: WA69-WA83.
- Celaya A, Denel B, Sun Y, et al., 2023. Inversion of Time-Lapse Surface Gravity Data for Detection of 3-D CO<sub>2</sub> Plumes via Deep Learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 1-11.
- Cheng Y, Liu W, Xu T, et al., 2023. Seismicity induced by geological CO<sub>2</sub> storage: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 239: 104369.
- Colombo D, Li W, Sandoval-Curiel E, et al., 2020. Deep-learning electromagnetic monitoring coupled to fluid flow simulators[J]. *GEOPHYSICS*, 85(4): WA1-WA12.
- Davis T L, Terrell M J, Benson R D, et al., 2003. Multicomponent seismic characterization and monitoring of the CO<sub>2</sub> flood at Weyburn Field, Saskatchewan[J]. *The Leading Edge*, 22(7): 696-697.
- Dodds K, Daley T, Freifeld B, et al., 2009. Developing a monitoring and verification plan with referenceto the Australian Otway CO<sub>2</sub> pilot project[J]. *The Leading Edge*, 28(7): 812-818.
- Dodds K, Krahenbuhl R, Reitz A, et al., 2013. Evaluating time-lapse borehole gravity for CO<sub>2</sub> plume detection at SECARB Cranfield[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18: 421-429.
- Duguid A, Guo B, Nygaard R, 2017. Well Integrity Assessment of Monitoring Wells at an Active CO<sub>2</sub>-EOR Flood[J]. *Energy Procedia*, 114: 5118-5138.
- Eiken O, Ringrose P, Hermanrud C, et al., 2011. Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, In Salah and Snøhvit[J]. *Energy Procedia*, 4: 5541-5548.
- Fabriol H, Bitri A, Bourgeois B, et al., 2011. Geophysical methods for CO<sub>2</sub> plume imaging: Comparison of performances[J]. *Energy Procedia*, 4: 3604-3611.
- Fan J, Zhang F, Tian L, et al., 2022. A Monitoring CO<sub>2</sub> Method by the Dual Cross Section Pulsed Neutron Logging Technology in Heavy Oil Reservoirs/SPWLA 63rd Annual Symposium Transactions. Society of Petrophysicists and Well Log Analysts.
- Fawad M, Mondol N H, 2022. Monitoring geological storage of CO<sub>2</sub> using a new rock physics model[J]. *Scientific Reports*, 12(1): 297.
- Feitz A, Radke B, Ricard L, et al., 2022. The CO<sub>2</sub>CRC Otway shallow CO<sub>2</sub> controlled release experiment: Fault characterization and geophysical monitoring design[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 118: 103667.
- Fibbi G, Del Soldato M, Fanti R, 2023. Review of the Monitoring Applications Involved in the Underground Storage of Natural Gas and CO<sub>2</sub>[J]. *Energies*, 16(1): 12.
- Furre A-K, Eiken O, Alnes H, et al., 2017. 20 Years of Monitoring CO<sub>2</sub>-injection at Sleipner[J]. *Energy Procedia*, 114: 3916-3926.
- Gasperikova E, Appriou D, Bonneville A, et al., 2022. Sensitivity of geophysical techniques for monitoring secondary CO<sub>2</sub> storage plumes[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 114: 103585.
- Gettings P, Chapman D S, Allis R, 2008. Techniques, analysis, and noise in a Salt Lake Valley 4D gravity experiment[J]. *GEOPHYSICS*, 73(6): WA71-WA82.
- Glubokovskikh S, Wang R, Ricard L, et al., 2021. Toward Automated Early Detection of Risks for a CO<sub>2</sub> Plume Containment From Permanent Seismic Monitoring Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(5): e2020JB021087.
- Gonzalez K, Misra S, 2022. Unsupervised learning monitors the carbon-dioxide plume in the subsurface carbon storage reservoir[J]. *Expert Systems with Applications*, 201: 117216.
- Goto H, Ishido T, Sorai M, 2020. Numerical study of reservoir permeability effects on gravity changes associated with CO<sub>2</sub> geological storage: implications for gravimetric monitoring feasibility[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 10(3): 557-566.
- Goto H, Sugihara M, Ikeda H, et al., 2019. Continuous gravity observation with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CCS demonstration site, Japan: applicability to ground-based monitoring of offshore CO<sub>2</sub> geological storage[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 9.
- Hovorka S, Benson S, Doughty C, et al., 2006. Measuring permanence of CO<sub>2</sub> storage in saline formations: The Frio experiment[J]. *Environmental Geosciences*, 13: 105-121.
- Huang C, Zhu T, Xing G, 2023. Data-assimilated time-lapse visco-acoustic full-waveform inversion: Theory and application for injected CO<sub>2</sub> plume monitoring[J]. *GEOPHYSICS*, 88(1): R105-R120.
- Issaoui W, Nasr I H, Khaskhoussi S, et al., 2023. Monitoring of soil contamination from olive mill wastewater (OMW) using physico-chemical, geotechnical analysis and electrical resistivity tomography (ERT) investigation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 82(13): 331.
- Ivandic M, Bergmann P, Kummerow J, et al., 2018. Monitoring CO<sub>2</sub> saturation using time-lapse amplitude versus

- offset analysis of 3D seismic data from the Ketzin CO<sub>2</sub> storage pilot site, Germany[J]. *Geophysical Prospecting*, 66(8): 1568-1585.
- Ivanova A, Kashubin A, Juhonjuntti N, et al., 2012. Monitoring and volumetric estimation of injected CO<sub>2</sub> using 4D seismic, petrophysical data, core measurements and well logging: a case study at Ketzin, Germany[J]. *Geophysical Prospecting*, 60(5): 957-973.
- Jung Y, Zhou Q, Birkholzer J T, 2013. Early detection of brine and CO<sub>2</sub> leakage through abandoned wells using pressure and surface-deformation monitoring data: Concept and demonstration[J]. *Advances in Water Resources*, 62: 555-569.
- Kabirzadeh H, Kim J W, Sideris M G, et al., 2020. Analysis of surface gravity and ground deformation responses of geological CO<sub>2</sub> reservoirs to variations in CO<sub>2</sub> mass and density and reservoir depth and size[J]. *Environmental Earth Sciences*, 79(7): 163.
- Karaoulis M, Minsley B, Todesco M, et al., 2013. Time-lapse gravity inversion with an active time constraint[J]. *Geophysical Journal International*, 196.
- Kiessling D, Schmidt-Hattenberger C, Schuett H, et al., 2010. Geoelectrical methods for monitoring geological CO<sub>2</sub> storage: First results from cross-hole and surface-downhole measurements from the CO<sub>2</sub>SINK test site at Ketzin (Germany)[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(5): 816-826.
- Kim J, Yu S, Yun S-T, et al., 2019. CO<sub>2</sub> leakage detection in the near-surface above natural CO<sub>2</sub>-rich water aquifer using soil gas monitoring[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 88: 261-271.
- Klovov A, Hardage B, 2017. Seismic characterization and monitoring of a deep CO<sub>2</sub> storage reservoir with 3D VSP using direct shear waves[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 155: 109-119.
- Krahenbuhl R A, Li Y, Davis T, 2011. Understanding the applications and limitations of time-lapse gravity for reservoir monitoring[J]. *The Leading Edge*, 30(9): 1060-1068.
- Krahenbuhl R A, Martinez C, Li Y, et al., 2015. Time-lapse monitoring of CO<sub>2</sub> sequestration: A site investigation through integration of reservoir properties, seismic imaging, and borehole and surface gravity data[J]. *GEOPHYSICS*, 80(2): WA15-WA24.
- Lee H P, Staniewicz S, Chen J, et al., 2023. Subsurface deformation monitoring with InSAR and elastic inversion modeling in west Texas[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 231: 212299.
- Li D, Peng S, Guo Y, et al., 2021. CO<sub>2</sub> storage monitoring based on time-lapse seismic data via deep learning[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 108: 103336.
- Li D, Peng S, Huang X, et al., 2021. Time-lapse full waveform inversion based on curvelet transform: Case study of CO<sub>2</sub> storage monitoring[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 110: 103417.
- Li D, Peng S, Yang R, et al., 2022. Joint monitoring of CO<sub>2</sub>-ECBM based on multiple geophysical methods: A case study of Shizhuang Town, Shanxi Province, China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 121: 103795.
- Li Q, Song R, Xuehao L, et al., 2016. Monitoring of Carbon Dioxide Geological Utilization and Storage in China: A Review[M]//*Acid Gas Extraction for Disposal and Related Topics*. .
- Liu G, 2012. Carbon Dioxide Geological Storage: Monitoring Technologies Review[M]. .
- Ma J, Gao L, Morozov I, 2009. Time-Lapse Repeatability in 3C-3D Dataset from Weyburn CO<sub>2</sub> Sequestration Project[J].
- Ma Jinfeng, Wang X, Gao R, et al., 2014. Jingbian CCS Project, China: Second Year of Injection, Measurement, Monitoring and Verification[J]. *Energy Procedia*, 63: 2921-2938.
- Meng C, Fehler M, 2021. The role of geomechanical modeling in the measurement and understanding of geophysical data collected during carbon sequestration[J]. *The Leading Edge*, 40(6): 413-417.
- Meng L, Zheng J, Yang R, et al., 2023. Microseismic Monitoring Technology Developments and Prospects in CCUS Injection Engineering[J]. *Energies*, 16(7): 3101.
- Nakajima T, Wang L, Xue Z, 2019. Utilization of wave attenuation in the time-lapse sonic logging at the Nagaoka site for a near well monitoring of CO<sub>2</sub> migration[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 88: 342-352.
- Nakajima T, Xue Z, 2013. Evaluation of a resistivity model derived from time-lapse well logging of a pilot-scale CO<sub>2</sub> injection site, Nagaoka, Japan[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12: 288-299.
- Nakajima T, Xue Z, Watanabe J, et al., 2013. Assessment of Well Integrity at Nagaoka CO<sub>2</sub> Injection Site Using Ultrasonic Logging and Cement Bond Log Data[J]. *Energy Procedia*, 37: 5746-5753.
- Nooner S L, Eiken O, Hermanrud C, et al., 2007. Constraints on the in situ density of CO<sub>2</sub> within the Utsira formation from time-lapse seafloor gravity measurements[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(2): 198-214.
- Onishi K, Ueyama T, Matsuoka T, et al., 2009. Application of crosswell seismic tomography using difference analysis with data normalization to monitor CO<sub>2</sub> flooding in an aquifer[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(3): 311-321.
- Orujov G, Swidinsky A, Streich R, 2022. Do metal infrastructure effects cancel out in time-lapse electromagnetic measurements?[J].
- Paradis S, Goñi M, Masqu  P, et al., 2021. Persistence of Biogeochemical Alterations of Deep-Sea Sediments by Bottom Trawling[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(2): e2020GL091279.
- Patidar A K, Joshi D, Dristant U, et al., 2022. A review of tracer testing techniques in porous media specially attributed to the oil and gas industry[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(12): 3339-3356.
- Popik S, Pevzner R, Tertysnikov K, et al., 2020. 4D surface seismic monitoring the evolution of a small CO<sub>2</sub> plume during and after injection: CO<sub>2</sub>CRC Otway Project study[J]. *Exploration Geophysics*, 51(5): 570-580.

- Preston C, Whittaker S, Rostron B, et al., 2009. IEA GHG Weyburn-Midale CO<sub>2</sub> monitoring and storage project—moving forward with the Final Phase[J]. *Energy Procedia*, 1(1): 1743-1750.
- Raab T, Weinzierl W, Wiese B, et al., 2020. Development of an Electrical Resistivity Tomography Monitoring Concept for the Svelvik CO<sub>2</sub> Field Lab, Norway//*Advances in Geosciences*. Copernicus GmbH: 41-53.
- Ringrose P S, Mathieson A S, Wright I W, et al., 2013. The In Salah CO<sub>2</sub> Storage Project: Lessons Learned and Knowledge Transfer[J]. *Energy Procedia*, 37: 6226-6236.
- Ruiz H, Lien M, Vatselle M, et al., 2020. Monitoring the Snøhvit gas field using seabed gravimetry and subsidence//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020. Virtual: Society of Exploration Geophysicists: 3768-3772.
- Rutqvist J, 2012. The geomechanics of CO<sub>2</sub> storage in deep sedimentary formations.
- Sakurai S, Ramakrishnan T S, Boyd A, et al., 2006. Monitoring Saturation Changes for CO<sub>2</sub> Sequestration: Petrophysical Support of the Frio Brine Pilot Experiment[J].
- Sambo C, Iferobia C C, Babasafari A A, et al., 2020. The Role of Time Lapse(4D) Seismic Technology as Reservoir Monitoring and Surveillance Tool: A Comprehensive Review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 80: 103312.
- Sato K, Mito S, Horie T, et al., 2011. Monitoring and simulation studies for assessing macro- and meso-scale migration of CO<sub>2</sub> sequestered in an onshore aquifer: Experiences from the Nagaoka pilot site, Japan[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(1): 125-137.
- Sheng H, Wu X, Sun X, et al., 2023. Deep learning for characterizing CO<sub>2</sub> migration in time-lapse seismic images[J]. *Fuel*, 336: 126806.
- Sherlock D, Toomey A, Hoversten M, et al., 2006. Gravity Monitoring of CO<sub>2</sub> Storage in a Depleted Gas Field: A Sensitivity Study[J]. *Exploration Geophysics*, 37(1): 37-43.
- Spetzler J, Xue Z, Saito H, et al., 2008. Case story: time-lapse seismic crosswell monitoring of CO<sub>2</sub> injected in an onshore sandstone aquifer[J]. *Geophysical Journal International*, 172(1): 214-225.
- Strack K, Davydycheva S, Passalacqua H, et al., 2021. Using Cloud-Based Array Electromagnetics on the Path to Zero Carbon Footprint during the Energy Transition[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8): 906.
- Su X, Liu S, Zhang L, et al., 2023. Wellbore leakage risk management in CO<sub>2</sub> geological utilization and storage: A review[J]. *Energy Reviews*, 2(4): 100049.
- Sugihara M, Nawa K, Nishi Y, et al., 2013. Continuous Gravity Monitoring for CO<sub>2</sub> Geo-sequestration[J]. *Energy Procedia*, 37: 4302-4309.
- Sugihara M, Nawa K, Soma N, et al., 2014. Continuous Gravity Monitoring for CO<sub>2</sub> Geo-sequestration (2) a Case Study at the Farnsworth CO<sub>2</sub>-EOR Field[J]. *Energy Procedia*, 63: 4404-4410.
- Tanase D, Saito H, Sasaki T, et al., 2019. Progress of CO<sub>2</sub> Injection and Monitoring of the Tomakomai CCS Demonstration Project. SSRN Electronic Journal.
- Topham A, Lofts J, Du Z, et al., 2020. 3-Axis Borehole Gravity: Method and Application to CO<sub>2</sub> Storage Monitoring and Oil/Gas Production//Day 3 Wed, October 28, 2020. Virtual: SPE: D031S025R004.
- Tveit S, Mannseth T, Park J, et al., 2020. Combining CSEM or gravity inversion with seismic AVO inversion, with application to monitoring of large-scale CO<sub>2</sub> injection[J]. *Computational Geosciences*, 24(3): 1201-1220.
- Um E S, Alumbaugh D, Lin Y, et al., 2022. Real-time deep-learning inversion of seismic full waveform data for CO<sub>2</sub> saturation and uncertainty in geological carbon storage monitoring.
- Unwin S D, Sadovsky A, Sullivan E C, et al., 2011. Risk-Informed Monitoring, Verification and Accounting (RI-MVA). An NRAP White Paper Documenting Methods and a Demonstration Model for Risk-Informed MVA System Design and Operations in Geologic Carbon Sequestration: PNNL-20808. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States).
- Uttam S, Sharma P K, 2022. Seasonal groundwater monitoring using surface NMR and 2D/3D ERT[J]. *Environmental earth Sciences*, 81(7): 198-198.
- Vasco D W, Ferretti A, Novali F, 2008. Reservoir monitoring and characterization using satellite geodetic data: Interferometric synthetic aperture radar observations from the Krechba field, Algeria[J]. *GEOPHYSICS*, 73(6): WA113-WA122.
- Verdon J P, Kendall J-M, Stork A L, et al., 2013. Comparison of geomechanical deformation induced by megatonne-scale CO<sub>2</sub> storage at Sleipner, Weyburn, and In Salah. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30).
- Wang Y, Morozov I, 2019. Time-lapse acoustic impedance variations during CO<sub>2</sub> injection in Weyburn oilfield, Canada[J]. *Geophysics*, 85: 1-58.
- Wang H, Wang Z, Ma J, et al., 2022. Effective pressure prediction from 4D seismic AVO data during CO<sub>2</sub>-EOR and storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 113: 103525.
- Wilkinson M, Mouli-Castillo J, Morgan P, et al., 2017. Time-lapse gravity surveying as a monitoring tool for CO<sub>2</sub> storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 60: 93-99.
- Wilson M, Monea M, Whittaker S, et al., 2004. IEA GHG Weyburn CO<sub>2</sub> monitoring and storage project: summary report 2000-2004.
- Xue Z, Tanase D, Watanabe J, 2006. Estimation of CO<sub>2</sub> Saturation from Time-Lapse CO<sub>2</sub> well Logging in an Onshore Aquifer, Nagaoka, Japan[J]. *Exploration Geophysics*, 37(1): 19-29.
- Yang X, Buscheck T A, Mansoor K, et al., 2019. Assessment of geophysical monitoring methods for detection of brine and CO<sub>2</sub> leakage in drinking water aquifers[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 90: 102803.
- Yang X, Chen X, Smith M M, 2022. Deep learning inversion of gravity data for detection of CO<sub>2</sub> plumes in overlying aquifers[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 196: 104507.



- Yang X, Lassen R N, Jensen K H, et al., 2015. Monitoring CO<sub>2</sub> migration in a shallow sand aquifer using 3D crosshole electrical resistivity tomography[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42: 534-544.
- Zhang T, Zhang W, Yang R, et al., 2021. CO<sub>2</sub> capture and storage monitoring based on remote sensing techniques: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 281: 124409.
- Zhu T, Ajo-Franklin J, Daley T M, et al., 2019. Dynamics of geologic CO<sub>2</sub> storage and plume motion revealed by seismic coda waves[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(7): 2464-2469.

## 附中文参考文献

- 崔方智, 周韬, 张兵, 2020. 煤层中 CO<sub>2</sub> 注入运移瞬变电磁法监测技术探索[J]. *物探与化探*, 44(3): 573-581.
- 李姜辉, 余凤玲, 牛雄伟, 等, 2023. 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*, 38(11): 1121-1144.
- 李小春, 袁维, 白冰, 2016. CO<sub>2</sub> 地质封存力学问题的数值模拟方法综述[J]. *岩土力学*, 37(6): 1762-1772.
- 马劲风, 李琳, 王浩璠, 等, 2022. 二氧化碳捕集与封存——历史与未来之路[J]. *Engineering*, 14: 44-51.
- 马劲风, 张小莉, 2010. CO<sub>2</sub> 地质封存的地球物理监测技术现状、挑战与对策. 科技部、山东省人民政府、中国可持续发展研究会: 229-234.
- 秦积舜, 李永亮, 吴德彬, 等, 2020. CCUS 全球进展与中国对策建议[J]. *油气地质与采收率*, 27(1): 20-28.
- 屈文璋, 安志国, 2020. 时移音频大地电磁监测数值模拟研究[J]. *地球物理学进展*, 35(4): 1595-1604.
- 任韶然, 任博, 李永钊, 等, 2012. CO<sub>2</sub> 地质埋存监测技术及其应用分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 36(1): 106-111.
- 吴江, 任思源, 孙一景, 等, 2022. 基于“双碳”背景的 CCUS 技术研究与应用[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 50(7): 89-100.
- 杨扬, 马劲风, 李琳, 2015. CO<sub>2</sub> 地质封存四维多分量地震监测技术进展[J]. *地球科学进展*, 30(10): 1119-1126.
- 于恩毅, 邸元, 吴辉, 等, 2023. CO<sub>2</sub> 地质封存风险分析的多场耦合数值模拟技术综述[J]. *力学学报*, 55(9): 2075-2090.
- 张贤, 李阳, 马乔, 等, 2021. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 23(6): 70-80.
- 张凯, 陈掌星, 兰海帆, 等, 2023. 碳捕集、利用与封存技术的现状及前景[J]. *特种油气藏*: 1-12.
- 张琪, 崔永君, 步学朋, 等, 2011. CCS 监测技术发展现状分析[J]. *神华科技*, 9(02): 77-82.
- 张阳, 孙佳文, 赵海东, 等, 2022. 碳达峰碳中和目标下内蒙古 CO<sub>2</sub> 地质封存的生态产品价值实现路径[J]. *干旱区资源与环境*, 36(11): 19-26.
- 赵改善, 2023. 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*, 62(2): 194-211.
- 赵海英, 陈沅忠, 李彦鹏, 等, 2018. CO<sub>2</sub> 地质封存时移垂直地震监测技术[J]. *岩土力学*, 39(8): 3095-3102.