引用格式：周远剑，高广亮，张浩，等，2025. 微地震监测在地下储气库运营中的应用进展[J]. 地质力学学报，31（4）：673−689. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025032

Citation: ZHOU Y J，GAO G L，ZHANG H，et al.，2025. Progress in the application of microseismic monitoring in the operation of underground gas storage[J]. Journal of Geomechanics，31（4）：673−689. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025032

微地震监测在地下储气库运营中的应用进展

周远剑[1]，高广亮[2]，张　浩[1]，李　聪[2]，李超锋[2]，李　楠[2]，杨　彧[2]，杨智斌[2]，胡彩云[2]，孙东生[1]，张重远[1]，李　磊[3]

ZHOU Yuanjian[1]，GAO Guangliang[2]，ZHANG Hao[1]，LI Cong[2]，LI Chaofeng[2]，LI Nan[2]，YANG Yu[2]，YANG Zhibin[2]，HU Caiyun[2]，SUN Dongsheng[1]，ZHANG Chongyuan[1]，LI Lei[3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 中国石油冀东油田分公司，河北 唐山 063200；
3. 中南大学地球科学与信息物理学院，湖南 长沙 410083

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Petro China Jidong Oilfield Company*, *Tangshan* 063200, *Hebei*, *China*;
3. *School of Geosciences and Info-physics*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hu'nan*, *China*

Progress in the application of microseismic monitoring in the operation of underground gas storage

Abstract: ［**Objective**］Underground gas storage (UGS) systems are critical for ensuring the flexibility, reliability, and safety of natural gas supply. Microseismic monitoring has emerged as a key technology for assessing the integrity of caprock seals and evaluating dynamic geomechanical responses during gas injection and withdrawal operations. This study aims to systematically summarize the technical framework, implementation practices, and engineering benefits of microseismic monitoring in UGS applications. ［**Methods**］The study integrates technical principles and field experiences from a range of UGS types, including depleted reservoirs, aquifers, and salt caverns. Monitoring approaches are categorized into surface, shallow-borehole, and deep-borehole networks. Key procedures including signal preprocessing, phase picking, event detection, location methods (arrival-time based and waveform stacking), and mechanism analysis are reviewed. Case studies from China (e.g., Hutubi, Tangshan M, and Jintan UGS) and Europe (e.g., Minerbio, Stenlille, Castor) are analyzed to demonstrate the effectiveness of microseismic monitoring under varying geological conditions. ［**Results**］Quantitative findings from multiple UGS sites indicate that microseismic events typically range from M_L −3.0 to 2.0, reflecting subtle stress perturbations. For instance, 229 events were recorded at the Hutubi UGS, exhibiting scattered distributions away from major faults and indicating effective caprock sealing. At the Jintan salt cavern UGS, 419 events within 23 days revealed dense clustering near cavern boundaries, enabling real-time evaluation of cavern stability. At the Tangshan M oilfield-based UGS, limited events were detected despite pressures exceeding 30 MPa, with analysis revealing insufficient sensitivity of surface and shallow monitoring arrays for 4-km-deep reservoirs. Comparative analysis of injection parameters and microseismicity demonstrated a stronger correlation with pressure variation than with injection volume. Additionally,

基金项目：国家科技重大专项（2024ZD1000701，2024ZD1000704）；国家自然科学基金项目（421174122）；中国地质科学院基本科研业务费专项（JKYQN202342，JKYQN202410，DZLXJK202407）

This research is financially supported by the National Science and Technology Major Projects (Grant Nos. 2024ZD1000701 and 2024ZD1000704), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 421174122), and the Basic Research Funds of the Chinese Academy of Geological Sciences (Grant Nos. JKYQN202342, JKYQN202410 and DZLXJK202407).

第一作者：周远剑（2001—），男，在读硕士，主要研究方向为应用地球物理微地震监测与反演。Email：3285363534@qq.com

通信作者：张浩（1983—），男，副研究员，主要从事主动源勘探地震成像与参数反演、被动源微地震监测与储层地质力学研究。Email：zhhao@cags.ac.cn

收稿日期：2025−03−26；**修回日期**：2025−06−30；**录用日期**：2025−07−01；**网络出版日期**：2025−07−07；**责任编辑**：范二平

the Castor UGS failure case in Spain, where delayed detection of fault reactivation led to M 4+ earthquakes and project termination, highlights the consequences of inadequate real-time monitoring. [**Conclusion**] Microseismic monitoring enables real-time assessment of stress evolution and caprock integrity, supporting risk mitigation and operational optimization throughout the UGS lifecycle. Gas and oil reservoir-type UGSs prioritize deep fault reactivation monitoring, while salt cavern UGSs focus on cavern wall deformation. Deep borehole sensors and dense arrays are essential for improving detection thresholds and depth accuracy. Future advancements should integrate fiber-optic sensing, machine learning algorithms, real-time data streaming, and interdisciplinary modeling to enhance early warning capability and ensure long-term operational safety of UGS systems.

Keywords: underground gas storage; microseismic monitoring technology; in-situ stress variation; real-time monitoring; optimization of operating parameters

摘　要：地下储气库在调节天然气供需、保障能源安全及优化市场运营中具有重要作用，其安全运行依赖微地震监测技术。微地震监测通过捕捉天然气注采过程中应力扰动引起岩体破裂产生的微弱信号，为储气库盖层密封性评估与风险预警提供关键数据支持。文章系统综述了微地震监测技术的原理、方法及应用。首先阐述微地震监测的技术框架，包括系统部署、数据采集与信号处理流程；进而结合国内外典型实例（新疆H储气库、唐山M储气库、金坛盐穴储气库、意大利Minerbio Stoccaggio储气库、丹麦Stenlille储气库和西班牙Castor储气库）分析该技术在实时监测、运行参数优化及安全评估中的有效性；最后展望未来发展趋势，提出技术智能化、多学科融合、实时远程监测及国际标准化的研究方向，为储气库安全运营与技术创新提供参考。

关键词：地下储气库；微地震监测技术；地应力变化；实时监测；运行参数优化

中图分类号：P315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)04−0673−17

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025032

0　引言

在全球能源结构低碳转型的背景下，地下储气库作为调节天然气供需、保障国家能源安全和实现能源弹性运行的关键设施，正得到广泛建设与应用。然而，其运营过程中面临诸多挑战，包括储层压力调控、盖层密封性下降、断层稳定性变化以及注采引起的诱发地震等问题(丁国生等, 2023; 张涛等, 2023; 胡勇等, 2024)。这些问题不仅关系到储气库的安全运行，也直接影响能源供应体系的可靠性与经济性(丁国生和魏欢, 2020; 完颜祺琪等, 2023; 阳小平, 2023)。

微地震监测技术通过实时捕捉注采过程中岩体破裂产生的低震级地震事件，反映地下应力变化与结构响应，是储气库安全评估与风险预警的重要手段(Maxwell et al., 2010; 魏路路等, 2018)。其在设计阶段可用于储层适应性评估与结构选型；在建设期监控地质响应、提升工程质量；在运营期辅助压力调控、识别潜在断层活动。然而，当前监测系统在震源定位精度、深层探测能力和实时性等方面仍面临瓶颈；尤其在复杂构造条件或深埋油藏型储气库中，现有方法难以有效识别弱微地震事件。为此，亟需发展高精度、高密度、智能化的监测技术，推动储气库地震风险管理从“被动响应”走向“主动预警”(井岗等, 2018a; 魏路路等, 2018; 廖伟等, 2020, 2023)。

基于此背景，文章系统梳理了微地震监测技术在储气库全生命周期中的应用原理与流程，重点回顾其在气藏型、油藏型与盐穴型储气库中的典型工程实践。结合新疆H库、唐山M库、金坛盐穴库等多种地质类型的储气库案例，深入剖析微地震技术在不同构造条件下的技术效能与局限性。在此基础上，提出了适应深部复杂构造与弱事件探测需求的监测优化建议，强调未来向高精度、智能化、远程化方向发展，为储气库的安全运行与数字化转型提供理论支撑与技术路径。

1　国内外地下储气库现状

地下储气库(Underground Gas Storage, UGS)是将天然气注入地下特定地层以储存备用的设施，广泛应用于天然气调峰、战略储备、输气调节、价格套利与应急供气等方面(完颜祺琪等, 2023; 阳小

平, 2023), 在保障天然气稳定供应和提升运行效率中发挥着重要作用。

1.1　地下储气库类型介绍

目前, 应用最为广泛的地下储气库类型主要包括气藏型、油藏型和盐穴型 3 类。其在储层介质、结构条件、密封性能及建库技术等方面存在一定差异, 决定了其各自的适用场景与运行模式。为了深入理解不同类型储气库在运营过程中的地质特性与监测需求, 以下将分别对 3 类储气库的基本特征、关键技术难点及典型工程案例进行相关介绍。

1.1.1　气藏型储气库

气藏型储气库是指将已开发或枯竭的天然气气藏改造为用于天然气调峰与应急供应的储存设施。该类储气库具备良好的气密封性, 原储层结构和盖层条件通常具备改建潜力, 但在运行过程中需重点评估注采引起的动态密封性变化。动态密封性评价主要聚焦于盖层和断层在压力波动下的稳定性, 防止天然气沿不利结构泄漏(Zheng et al., 2017)。由于多数气藏存在原生气顶, 库容参数设计需基于有效孔隙空间的精确估算, 确保储气能力满足调峰要求。

此外, 气藏型储气库往往承担短周期、大流量的注采任务, 要求注采井网布局科学合理, 实现高效注入与采出。监测方案方面, 则需结合井工数据、圈闭密封性分析与微地震监测手段, 综合保障库体结构稳定与运行安全。以新疆 H 储气库为例, 其前身为大型天然气气藏, 经改建后于 2013 年投运, 目前为中国库容最大、调峰能力最强的气藏型储气库之一(廖伟等, 2021)。该库通过部署地面与井中联合监测系统, 成功实现盖层动态行为的实时追踪, 体现了微地震监测在此类储气库中的技术优势。

1.1.2　油藏型储气库

油藏型储气库是指以枯竭或低效油藏为基础, 经技术改造后形成的天然气储存设施。与气藏型储气库相比, 油藏型储气库多不具备原生气顶, 其盖层主要具备油密封性, 而非天然气的气密封性, 因此在建库过程中需对盖层在天然气注采条件下的密封可靠性进行重新评估。

此外, 油藏长期开发过程中形成的大量老井孔和排液需求也对建库提出了技术挑战。大量老井需通过有效封堵与再利用评估以避免成为潜在泄漏通道; 同时, 需攻关高效排液与井筒处置技术, 以腾出有效库容空间(丁国生等, 2023)。在设计层面, 油藏型储气库需从地质适宜性、圈闭时效性、库容评估与注采能力等方面进行系统论证, 并制定差异化的建库方案(高广亮等, 2023)。

典型案例如冀东油田唐山 M 储气库, 位于京津冀核心区域, 是中国首批油藏型储气库之一, 地质构造复杂、断层发育。在注气试验期间, 通过布设地面与浅井联合的微地震监测网络, 初步揭示其盖层在高压注气下的力学响应, 为后续监测系统优化和安全注采策略提供了重要参考。

1.1.3　盐穴型储气库

盐穴型储气库是通过人工溶腔工艺, 在岩盐层中溶解出大型空腔用于天然气储存。得益于岩盐优异的气密封性与可塑性, 该类储气库具有高密闭性、注采转换灵活、响应速度快等优势, 适用于日调峰、周调峰及应急调配需求(李思辉和段金利, 2023)。其运行周期可达数 10 年, 具备显著的经济与调度效益。

然而, 盐穴储气库的工程挑战同样显著。一方面, 储腔受溶蚀控制形成, 形态复杂、壁面稳定性敏感, 存在腔体变形、蠕变与局部坍塌等风险; 另一方面, 扩容速度较慢、单位容积建设成本偏高, 限制了其规模化应用(Liu et al., 2023)。因此, 在盐穴型储气库运行过程中, 需要部署高灵敏度的微地震监测系统, 实时感知腔体边界的微破裂与结构扰动, 预警潜在地质灾害。

以金坛盐穴储气库为例, 其为中国首座盐穴型地下储气库, 采用井中检波器阵列进行连续监测, 在短期运行内成功识别数百次与注采活动相关的微地震事件, 有效提升了腔体稳定性的评估能力(完颜祺琪等, 2018)。该案例表明, 微地震监测在盐穴型储气库中不仅可用于安全保障, 还可辅助运行参数的优化与运行策略的制定。

1.2　国外地下储气库建设现状

自 1915 年加拿大建成全球首座地下储气库以来, 欧洲和美国等发达国家开始研究地下储气库, 经过一个多世纪的技术积累, 储气库建设技术已经相当成熟和完善, 运行也非常规范, 进入了成熟稳定的发展阶段。根据相关资料, 截至 2023 年全球共有超过 650 座地下储气库, 总工作气量已经超过了 $4000\times10^8\ m^3$, 占全球天然气总消费量的 10% 左右(图 1)。

北美地区是世界天然气消费最多的区域之一, 其中美国所拥有的地下储气库数目位居世界第一, 与之相关的工作气容量也居于世界第一。枯竭油

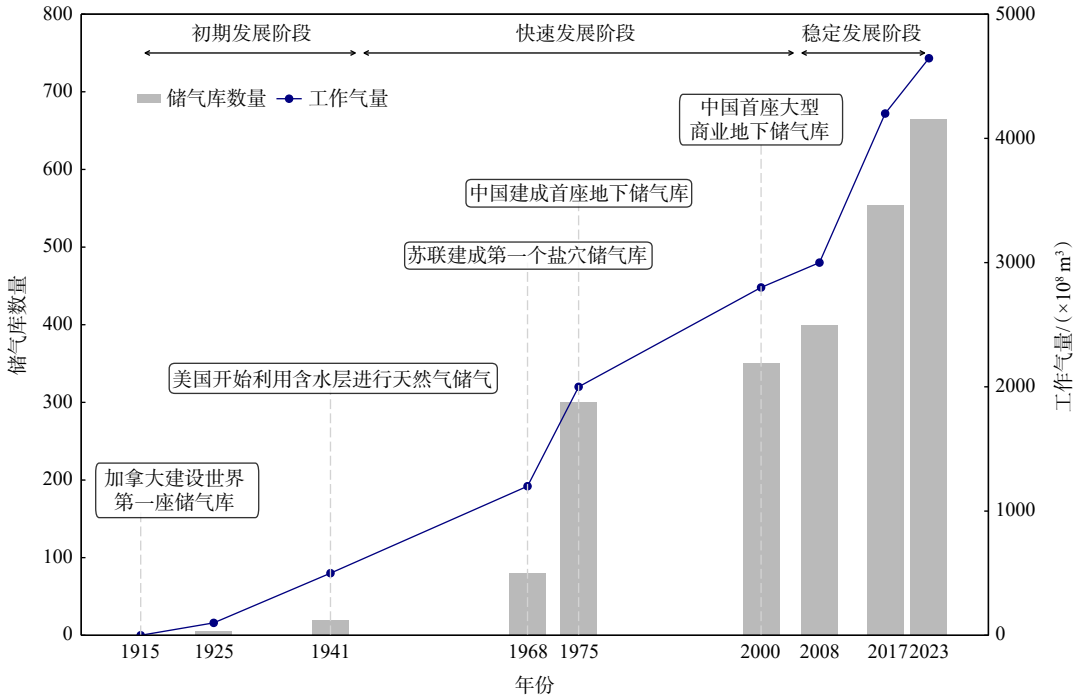


图 1 全球储气库发展情况（International Gas Union，2023）

Fig. 1 Global development of gas storage (International Gas Union, 2023)

气藏型储气库在美国的储气库占比远远超过其他类型的储气库，美国也有一些是含水层型和盐穴型储气库以及废弃矿坑型储气库，换句话说，美国的储气库包括了现今世界上的所有地下储气库类型。与之相比欧洲和俄罗斯的地下储气库建设相对较晚，都开始于 20 世纪 50～60 年代，但是发展速度很快。俄罗斯的地下储气库分布比较集中，其单库气容量规模在世界上也是独一无二的。欧盟的地下储气库系统由多个成员国共同构成，总体工作气量位居世界第三，但分布非常不均。全世界地下储气库总工作气量的 80% 左右储存在枯竭油气藏型储气库中，盐穴型储气库和含水层型储气库大约占总气量的 20%，废弃矿坑等其他类型储气库的工作气量几乎可以忽略不计（张福强等，2021）。

1.3 国内地下储气库现状

中国自 1999 年第一座商用储气库——大港大张坨储气库开始建设以来，地下储气库建设由此进入了一个新的发展阶段。经过 20 多年的努力，已经成为世界上储气库建设发展最快的国家。虽然与美国、俄罗斯等发达国家还有一定差距，但中国地下储气库建设近年来发展也十分迅速。储气库建设历程主要分为 3 个阶段。

（1）建设初期

中国的地下储气库建设起步较晚，最早在 20 世纪 70 年代曾在大庆油田做过利用已经开采完的枯竭油气藏来建设地下储气库的尝试。直到 20 世纪 90 年代初，随着陕京天然气输气管道的建设，为保障京津地区的安全供气，国家开始加大力度研究地下储气库建设的相关技术。之后随着大张坨地下储气库的顺利建成，中国的地下储气库已形成较为成熟的建设运行体系。

（2）发展阶段

2005 年开始建设西气东输的重要调峰设施——金坛盐穴地下储气库，其为中国建立的第一座盐穴型地下储气库。该储气库开创了中国利用深部洞穴实施能源储存的先河，填补了中国关于如何利用盐穴来改建地下储气库的历史空白，并取得了一系列的研究成果，中国地下储气库由此进入了快速发展的阶段（井岗等，2018b）。此后，中国又先后建立了西南相国寺、新疆呼图壁等一系列的气藏型地下储气库，为中国在气藏型地下储气库的建设中不断提供新方向（丁国生和魏欢，2020；廖伟等，2021）。

（3）成熟阶段

现今中国在油气藏型、盐穴型储气库建库上，无论是在理论方面，还是在技术层面上都比较成熟，获得了许多的科研成果，同时创下了全球地下储气库建设的多项第一，发展十分迅速。2021 年 10 月，冀东 M 储气库增注项目顺利投产，标志着中

国地下储气库建设完成了从气藏型到油藏型的成功转型。油藏型储气库的独特之处在于其是利用已有的油藏结构转型而来的，这使得其在地质条件、流体性质、开发特征以及建库技术等方面与常规的气藏型储气库有显著不同。油藏型储气库通常面临更复杂的地质条件，包括油−气−水三相流体的共存、储层非均质性以及可能的应力敏感性等问题。在建库过程中，需要特别关注油藏的密封性评价、库容参数设计、注采井网优化以及与油藏开发相结合的气驱采油协同策略，以确保储气库的安全性、高效性和经济性。此外，油藏型储气库在提高原油采收率的同时，还能为天然气供应提供季节性调峰和应急保障，具有重要的能源战略意义（高广亮等，2023）。冀东 M 储气库的建设为中国地下储气库的建设提供了新的方向，为今后油藏型地下储气库建设打下了理论基础，具有非常重要的借鉴和指导意义（李建君，2022）。

虽然中国在地下储气库的建设中获得了许多重要成就，但是仍然面临着许多的问题。未来，中国地下储气库的技术发展和建设方向将更加注重集约、高效、智能、科技和经济等方面的要求，并在致力于打造天然气“全国一张网”的背景下，国内地下储气库将形成联网协调的储气库群，以满足中国天然气调峰和战略储备的需求。

1.4　国内外地下储气库面临的问题和挑战

地下储气库的建设和运营虽取得了显著进展，但仍面临着多方面的技术、地质、环境及管理挑战。首先，地质与工程条件复杂是核心问题之一。储气库选址常涉及断层发育区域，如西班牙 Castor 储气库因注气压力变化激活断层，诱发 4.0 级以上地震并导致项目终止（Vilarrasa et al., 2021）。盖层动态密封性评价同样十分困难，尤其是油藏型储气库中，老井的长期开发可能导致盖层疲劳或对天然气的密封性下降（丁国生等，2023）。此外，盐穴型储气库因溶腔形态复杂，易受溶蚀或应力变化影响，存在腔体变形风险（Liu et al., 2023）。注采作业引发的地应力重新分布也可能导致岩石破裂和微地震活动，若监测不足可能累积安全隐患（Maxwell, 2014）。

技术与设备限制进一步加剧了挑战。微地震监测定位精度不足是典型问题，如深层储层中事件定位误差过大。地面监测易受噪声干扰，而深井监测成本高昂，导致实际应用受限。此外，现有传感器对微弱信号（震级−3～0 级）的捕捉能力有限，事件漏检率较高。数据处理方面，传统初至时间定位法在复杂地质条件下精度不足，波形叠加方法虽能提高定位精度，但计算资源需求大且对速度模型精度要求较高，实时性也相对较差（Li et al., 2019）。尽管人工智能技术（如深度学习）展现出潜力，但其在微地震信号识别与解释中的应用尚未普及（Wamriew et al., 2021）。

环境与安全风险亦不容忽视。储气库密封性失效可能导致天然气泄漏，威胁生态环境，如丹麦 Stenlille 储气库在 1995 年因技术问题发生泄漏（Dahl-Jensen et al., 2021）。盐穴型储气库的卤水处理若管理不当，可能污染地下水（井岗等，2018a）。此外，注采活动可能诱发地震，西班牙 Castor 储气库的失败案例警示了断层稳定性评估不足的严重后果（Vilarrasa et al., 2021）。

经济与政策障碍同样制约发展。盐穴型储气库建设周期长、单位容积成本高（Liu et al., 2023），油藏型储气库需大量排液腾空库容，经济性受限（丁国生等，2023）。老旧储气库设施的更新维护成本高昂，如北美部分枯竭气藏型储气库面临技术老化问题。政策层面，国际技术标准不统一阻碍了储气库群联网协调，如中国“全国一张网”战略推进困难。同时，环保法规趋严要求储气库建设需兼顾生态评估与能源需求，进一步增加了实施难度。

在运营与管理层面，注采参数优化是核心难题。注气速率与压力需平衡调峰需求和地质安全，过度注气可能引发地层失稳（魏路路等，2018）。盐穴腔体在长期注采中可能发生蠕变或坍塌，需持续监测以维护稳定性（井岗等，2018b）。此外，多类型储气库（如气藏型、油藏型）的差异化运营策略尚未形成统一标准，增加了管理复杂度。

上述挑战凸显了储气库运行开展微地震监测工作的必要性。通过实时捕捉盖层变形或破裂等微地震信号，微地震监测能够对气体泄漏和断层活化进行示踪预警。如新疆 H 储气库通过监测微地震事件，有效保障了储气库运行期间的密封完整性（廖伟等，2023）。然而，在利用微地震监测技术解决上述问题的过程中，仍然存在背景噪声干扰、事件定位精度有限以及数据处理复杂等技术挑战，需要进一步研究加以克服。随着光纤传感与人工智能技术的融合，微地震监测系统正朝着智能化、高密度和高精度方向发展，为优化注采参数、提升储

气库安全性提供了更加可靠的科学依据(Karrenbach et al., 2019)。未来需持续推进技术创新,加强多学科协作与国际合作,努力突破微地震监测领域的技术瓶颈,为地下储气库全生命周期的安全管理提供更为坚实的技术支撑。

2 微地震监测技术

2.1 微地震监测原理及应用

微地震监测技术是指利用水力压裂等工业活动中由于应力扰动导致岩体破裂过程中产生的微地震信号,来监测地下岩石破裂及其稳定性等问题的一种地球物理监测方法。该技术最早应用于北美矿山工程领域,用于监测矿井中岩体的破裂和稳定性(Mendecki, 1996)。其核心在于捕捉、记录和解释由岩石破裂、流体流动等地下活动产生的微弱地震波。当岩体发生微破裂时,会产生弹性波向周围介质传播,形成可被监测的地震信号。其中,最先到达接收器的纵波(P波)为压缩波,传播速度较快;随后到达的横波(S波)为剪切波,传播速度相对较慢。通过在监测区域布设地面或井下检波器阵列记录这些波形,并分析各台站记录的P波和S波的到达时间差,可实现对震源位置的反演(邵晓光等, 2018)。微地震通常指震级较低(一般震级介于−3～3级)的地震事件,虽然其振幅小、持续时间短,但蕴含着丰富的地质结构变化和储层动力学信息(Maxwell, 2014)。

微地震的产生机制与地下应力状态的变化密切相关。在自然条件下,如构造活动、火山喷发或地下水位变化等因素都会引起岩体内部应力的重新分布,当应力超过岩石的强度极限时,就可能发生破裂并释放能量,从而形成微地震事件(Maxwell, 2014)。此外,在人为诱发条件下(如地下流体的大量注入与采出、矿山开采等工程活动),同样会扰动局部应力场,当由注采操作引起的应力增量超过岩体强度时也将诱发微地震事件。这类由工程活动诱导的微地震在地下储气库运营中较为常见,其监测对于评估注采过程对储层和盖层稳定性的影响具有重要意义(魏路路等, 2018)。

目前,微地震监测技术在地下矿山开采、水力压裂、干热岩开发、地下储气库监测等领域具有广泛的应用:①在地下矿山开采中,微地震监测技术可以用于实时监测并分析震源的位置,从而判断矿山危险区域,进而提高采矿的安全性(Peng et al., 2020)。②在水力压裂活动中,微地震监测技术可以用于监测流体注入和采出时产生的微地震事件,以及评估改造裂缝的几何结构和优化水力压裂作业参数等(Van Der Baan et al., 2013; Maxwell, 2014; Afshari Moein et al., 2018; Li et al., 2019)。③在干热岩开发中,微地震监测技术可以通过监测微地震事件对压裂效果加以评估,通过优化改造为增强型地热系统的建立提供重要的热储层信息,进而提高干热岩的开发利用效率(Kim et al., 2018; Li et al., 2018; Tezuka and Niitsuma, 2000)。④在地下储气库运行监测中,微地震监测技术可用于捕捉注气与采气过程中产生的微地震事件。注气期间,储层孔隙压力升高、有效应力降低,当应力变化超过岩体强度或诱发断层滑动时,岩体会发生细小破裂并释放出弹性能量,从而引发微地震事件;在采气过程中,压力降低导致的应力重分布也可能促使岩层发生微破裂。微地震事件的形成过程本质上反映了储层−盖层体系对注采压力循环的力学响应。通过监测并分析这些微地震事件的空间分布、频次和能量等特征,可以评估地下储气库在注采运行中的盖层密封性和储层稳定性,为及时预警泄漏风险和优化运行方案提供科学依据(Ma et al., 2016; 魏路路等, 2018)。

2.2 微地震监测系统部署与数据采集

微地震监测系统的设计与布置对监测效果影响显著,其目的是更有效地监测到地下微小震动事件,从而为地质研究、工程安全评估以及资源开发等提供重要数据。在地面或井中布置的地震传感器,即检波器,是监测系统的核心组成部分。这些检波器设计精密,能够敏感地捕捉到由岩石破裂、流体流动或其他地下活动引起的微弱震动信号(Maxwell, 2014; McClellan et al., 2018)。在布置监测系统时,首先需要对目标区域的地质结构和监测地层目标进行深入分析,以确定最佳的监测点位置和所需的监测设备类型(速度型检波器或者加速度型检波器)。

井中监测是将检波器安装在井下靠近潜在的震源位置处,即贴近微地震事件的发生区域。相比于地面监测可能会受到多种因素的影响,如交通、天气和人类活动产生的噪声;井中监测,特别是深井监测则能够避免和减轻这些地面干扰,提供更高信噪比的地震波形信号。然而,井中监测也有其局限性,如成本较高、需要有现有井或邻井作为监测

井、监测范围在平面空间上受到限制等(柳云龙等, 2013; Akram and Eaton, 2016; 邵晓光等, 2018)。

地面监测则是在地表布置检波器阵列,这种方法适用于地表条件允许且需要覆盖较大范围的监测场景。地面监测的优势在于施工方便、成本相对较低,且能够对较大范围内的微地震信号进行接收采集。然而,地面监测可能受到地表噪声的影响,导致信噪比较低,因此需要对数据进行严格的处理和分析,才能获得较好的事件定位结果(柳云龙等, 2013; 邵晓光等, 2018)。

数据采集是微地震监测系统中的基础环节,其目的是捕捉并记录地下微小震动事件产生的地震波信号(Grechka, 2010)。这些信号包含了地震波的到达时间、振幅、频率等关键信息,是后续分析和研究的原始数据。为了确保数据采集的质量,监测系统的设计必须综合考虑多种因素,包括信噪比、采样率、数据存储容量以及数据传输的稳定性。信噪比决定了信号的清晰度,采样率影响数据的分辨率,而数据存储和传输则确保了长时间连续监测的可行性。在地下储气库的具体应用中,通常会根据储层和盖层的地质条件布置微地震传感器及记录装置,如可在储气库的注采井内及周边部署高灵敏度三分量地震检波器阵列,并辅以地表监测台阵,以全面捕捉注气和采气作业诱发的微地震信号。通过这样的优化部署,微地震监测系统能够最大限度地记录有效信号,为后续的数据处理、事件定位和机制分析奠定坚实基础。

2.3　微地震监测数据处理与解释

微地震监测技术的核心在于对微弱地震信号的有效捕捉与深入分析。在数据处理阶段,首先需要对收集到的信号进行预处理,包括滤波去噪(通过高通、低通或带通等滤波器去除环境噪声)以增强信噪比。这一步骤提高了数据质量,确保后续分析的准确性(Wang et al., 2016; Akram, 2018)。实际处理中常采用多种滤波方法,如 Kalman 滤波(Baziw and Weir-Jones, 2002)、小波滤波(Mousavi et al., 2016)等,从复杂背景中提取出有用的微地震信号特征,为事件识别打下基础。这些预处理步骤对于后续的震相拾取和事件定位至关重要(柳云龙等, 2013; 邵晓光等, 2018)。随后进入事件检测阶段:常用长短时窗比值法(STA/LTA)等触发算法来自动检测波形中的异常变化,以判别微地震事件的发生时间和大致范围。通过计算短时间窗能量与长时间窗能量的比值,STA/LTA 算法可以有效从连续波形中触发潜在事件,提高弱事件的捕捉率。近年来,人工智能算法也开始用于事件检测和震相拾取,如训练深度神经网络自动识别微地震波形中的 P 波初至和 S 波等震相,从而实现对微地震事件的智能识别(Wamriew et al., 2021)。这一系列预处理和事件检测步骤,为后续精确定位和解释提供了可靠基础。

在震源定位方面,微地震监测主要采用基于初至时间拾取的传统方法和基于波形叠加的方法。传统的初至时间拾取通常是指拾取各台站记录的 P 波初至时间,然后结合地震波速度模型,利用三角测量算法快速确定震源位置。该方法计算简便、实时性强,但在复杂地质环境下易受噪声影响,定位精度有限。相比之下,波形叠加方法是将多个台站记录的完整地震波形(包括 P 波、S 波等不同震相)同步叠加,以提高信噪比,从而更精确地确定事件位置。这种方法由于综合利用了更多信号信息,定位精度较高,但需要较大的计算资源和精确的速度模型支持,在实时性方面相对较弱。实际应用中,两类方法各有优劣:初至时间方法适用于实时快速定位以应对潜在风险,而波形叠加方法适用于事后精细分析以获得高精度结果。在地下储气库运营过程中,常常将二者结合使用:先用初至时间方法进行快速初步定位,再对重要事件应用波形叠加方法精确复定位。这样的组合能够兼顾实时性和精度需求,有效提升储气库微地震监测的可靠性与效率,促进对储层动态变化和岩石破裂机制的深入理解(Li et al., 2013, 2016, 2019; Zhebel and Eisner, 2015)。

微地震监测数据的解释不仅涉及对单一事件的分析,还包括对一系列事件的综合评估。通过对微地震活动的时空分布、震级序列和能量释放模式的分析,可以揭示地下应力状态的变化趋势和裂缝网络的发展情况,通过计算震源机制来判断破裂活动性质等。这些信息对于油气田开发、矿山安全监测以及地热资源勘探等领域具有非常重要的应用价值。此外,微地震监测数据的解释还需结合地质背景、生产活动类型和储层特性,对地下活动提供更为全面和深入的理解。微地震监测的数据处理与解释通常包括数据预处理、事件检测与定位、震源参数计算和微地震活动模式分析等主要步骤(图 2),各环节协同作用以最终评估地下储气库的稳定性和安全性。

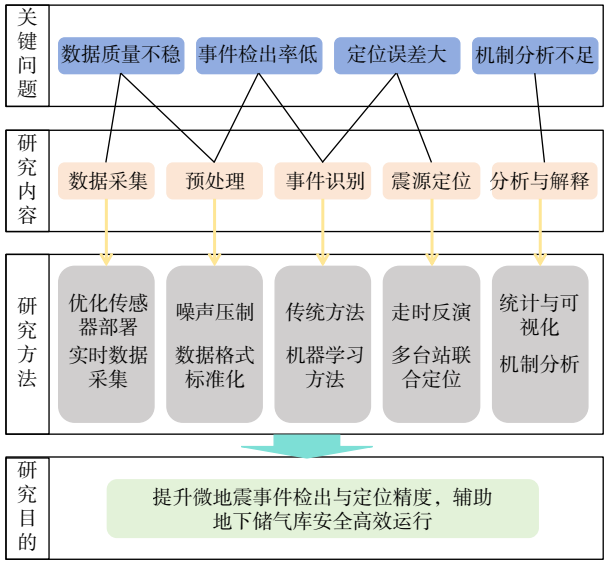


图 2 微地震监测数据处理与解释流程图

Fig. 2 Flow chart for microseismic monitoring data processing and interpretation

展望未来，微地震监测技术的发展既有赖于硬件设备的升级（如更高灵敏度的传感器、更高效的数据采集系统），也有赖于数据处理和解释方法的持续创新（陈海潮等，2016）。随着计算机技术的飞速进步，深度学习、机器学习等人工智能方法正越来越多地融入微地震数据处理。例如，利用卷积神经网络对连续波形进行模式识别，可以自动提取微地震事件，从复杂信号中更高效、准确地获取有用信息（Wamriew et al., 2021; Feng et al., 2022）。又如，一些研究开始尝试将全波形反演与机器学习相结合，以同时定位事件和更新速度模型，进一步提高定位精度。除此之外，微地震监测技术在多学科交叉应用方面展现出巨大潜力：结合地质学的构造模型与工程学的应力分析，可为微地震数据解释提供更丰富的背景信息；融入环境科学视角，有助于评估注采活动的环境影响等。可以预见，随着技术的不断进步，微地震监测将在地球科学和工程领域发挥越来越重要的作用，并不断拓展新的应用前景。

3 微地震监测在地下储气库建设中的作用

微地震监测技术是地下储气库建设与运行中至关重要的一项技术手段。其通过捕捉地下岩石破裂产生的微小地震波，为储气库地质活动提供了精准监测和动态评估。无论是气藏型、油藏型还是盐穴型储气库，该技术都在安全性保障、运行优化以及决策支持中发挥核心作用。

3.1 微地震监测技术在不同储气库类型中的应用

（1）气藏型储气库的特点是动态密封性评价和高频注采作业的需求突出。微地震监测技术在此类储气库中的关键作用包括通过捕捉注采过程中盖层和断层的微小活动，实时监测动态密封性，评估气藏的圈闭稳定性。同时，微地震监测技术能够识别因高压注采引起的潜在断层活化风险，从而起到安全预警作用，预防气体泄漏。此外，监测数据还揭示了储气库注采压力与储层应力的动态关系，为井网优化设计提供了重要支持（Zheng et al., 2017; 魏路路等，2018; 廖伟等，2023）。

（2）油藏型储气库涉及大量排液作业和复杂的力学环境。微地震监测技术在此类储气库中的应用主要体现在以下几个方面。首先其能够监控油藏储层盖层的稳定性。由于油藏的盖层可能因长期开发进入疲劳状态，微地震监测技术通过实时跟踪盖层的力学变化，有效保障了储气库的安全性。其次微地震监测可以捕捉排液过程中可能引发的局部断层滑动，为老井的再利用提供科学依据。此外，结合微地震数据调整注采流量，可以避免过度压力导致地质失稳，进一步优化储气库的注采能力（高广亮等，2023）。

（3）盐穴型储气库具有密封性优越但易受局部溶蚀或腔体变形影响的特点。微地震监测技术在盐穴型储气库中的主要应用包括通过捕捉盐穴在气体注采过程中可能发生的微小变形，对腔体的稳定性进行有效监测。微地震监测还可以识别盐层边界裂缝或溶蚀引起的异常地震活动，起到安全预警的作用，防止气体泄漏。与此同时，微地震事件数据能够帮助调整注采节奏，优化运行周期，从而延长盐穴储气库的安全使用寿命（井岗等，2018a; Liu et al., 2023）。

3.2 微地震监测技术的全景作用

微地震监测技术贯穿储气库生命周期的各个环节。建设阶段，微地震监测技术为储气库的选址和施工设计提供了地质活动参考，优化了库容和布局设计。在运行阶段，该技术通过实时监测地质变化，优化注采参数，保障了储气库的安全高效运行。应急响应方面，微地震监测能够提供精准的地质风险预警，指导应急方案的实施，有效规避地质灾害。最后，在维护与升级阶段，微地震监测技术

为储气库的长期密封性和结构稳定性评估提供了科学依据，助力储气库的安全与高效运营。

4　国内外储气库微地震监测案例

4.1　新疆 H 储气库

新疆 H 储气库是国内大型气藏型储气库之一，其复杂的断裂发育和快速变化的砂体对安全运行提出严峻挑战（廖伟等，2020）。为保障其数 10 年运行周期内的安全稳定，项目引入了微地震实时监测技术作为重要补充手段。监测系统采用了浅井与半深井相结合的综合监测井布局方案，充分考虑了断层分布、盖层埋深和地应力等地质特征，实现对微小地震事件的有效捕捉和定位。

微地震监测自 2015 年系统投运以来共记录到 229 个微地震事件，震级主要介于−3.0～2.0 级，表明以微观形变为主（廖伟等，2020）。这些事件在平面上分散分布，未在储气库盖层或主要断裂附近形成明显的应力集中，现场未出现天然气泄漏，说明储气库整体动态密封性良好（廖伟等，2020）。微地震监测的应用为储气库安全运行提供了实时预警依据。一方面，通过监测盖层和储层内部的应力变化，可及时发现异常并为安全管理提供依据；另一方面，监测结果指导了注采参数的优化调整，避免过高压力诱发不必要的微地震活动，确保储气库在安全范围内运行。综上所述，新疆 H 储气库的实践证明了微地震监测技术的有效性和可靠性，为类似地质条件的储气库提供了宝贵的参考。

4.2　唐山 M 储气库

油藏型储气库在高速注采过程中，其盖层完整性对储气库安全运行至关重要，而微地震监测是评估盖层完整性的重要手段。以正在建设中的冀东唐山 M 区块超深层油藏型储气库为对象（位于河北省唐山市近海浅水人工岛区域），通过地表和浅井结合的微地震监测验证了微地震技术用于该储气库安全注采监控的有效性，并为后续长期监测设计提供了依据。该区块油藏呈背斜构造，断层发育，近地表为人工填海岛体，这种独特环境也为监测带来了挑战。

2024 年 2 月至 4 月开展了为期 3 个月的监测试验，设计并部署了 1 套地面与浅井联合的微地震观测网络，监测深度覆盖到约 4000 m。根据规范要求共布设 16 个地面台站及 1 套浅井监测仪（利用已有套管井），所有设备通过 4G 网络将数据实时传输至中心服务器，实现注采活动的连续监控。自 2 月 1 日正式注气并开始监测起，将每日注气量、油管与套管压力等关键参数与微地震事件频率、震级随时间变化进行了对比分析（图 3），以评估微地震活动与注气过程的关系。

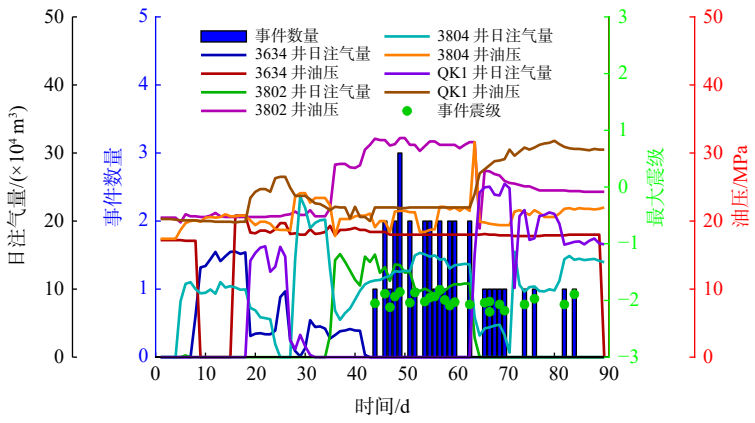


图 3　微地震事件发展与注气参数变化图

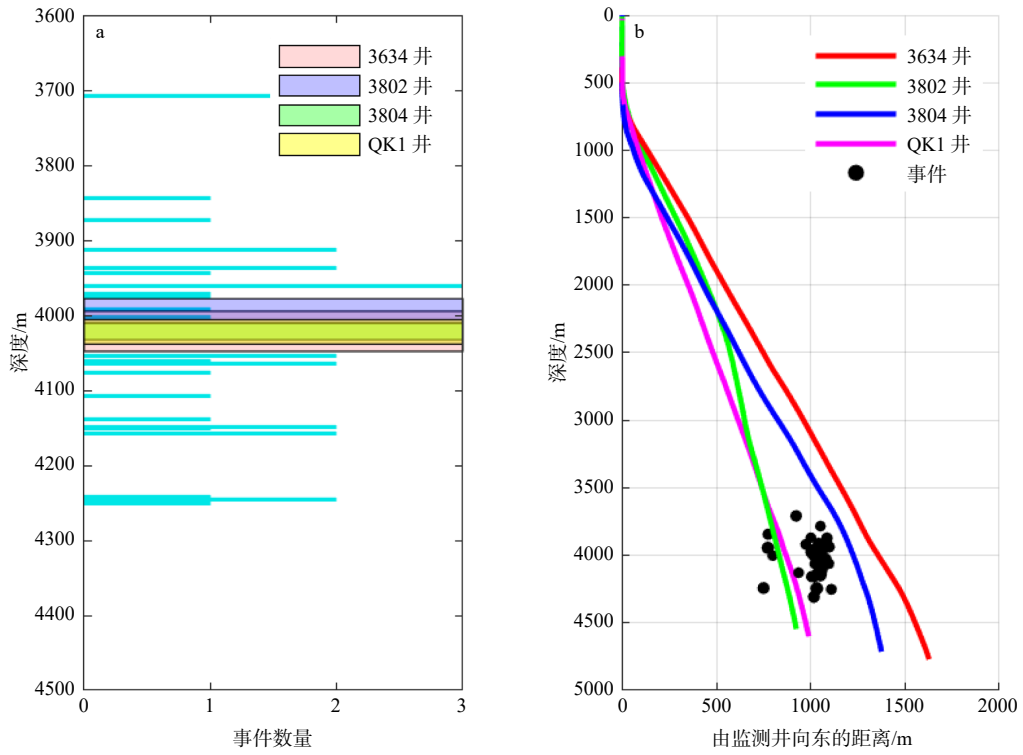
Fig. 3　Correlation diagram between microseismic event evolution and gas injection parameters

在 2 月 1 日至 3 月 6 日初期，注气压力维持在约 20 MPa 的较低水平，监测未检出明显微地震事件。自 3 月 7 日起，主要注气井（如 3802 井）井底压力逐步升至 31 MPa，部分时段出现弱微地震事件。整体上，微地震事件的发生频率与压力升高阶段呈一定相关性，而与注气量相关性不显著，说明压力变化对微地震活动的影响更为直接（图 3）。

在连续监测过程中，对海量波形数据进行了严格分析。首先按照常规流程采用 STA/LTA 长短窗比值算法进行事件触发和走时拾取，但是在为期

3个月的记录中未能检测到明显事件，这反映出M储气库监测环境下微地震信号的信噪比较低，无论地表台站还是浅井检波器都难以获取清晰的初至波。随后，通过波形叠加增强和网格搜索等手段提高检测能力，虽识别出少量微地震事件并给出了定位结果，但定位深度误差较大，难以满足盖层完整性精确评估的需求。

注气井段深度与检测到微地震事件的震源深度对比如图4所示，使用地面+浅井组合监测时事件定位深度误差较大，难以直接用于评价盖层完整性。因此，试验表明仅依靠地表和浅井布设的监测系统对深埋(4 km)储层的微地震监测效果有限。在未来正式建立长期监测网络时，建议引入深井监测手段(如部署更深的井中检波器)，以提高对深部微地震事件的探测能力。值得注意的是，此次注气试验在所采用的压力条件下未诱发明显微地震活动，从侧面说明当前注气压力下M储气库运行是安全可控的，尚有一定压力提升空间。这一原创研究案例凸显了超深层储气库微地震监测的技术挑战(深度大、噪声高、震源弱)，也为后续监测网络优化提供了宝贵经验。



a—微地震事件定位图；b—微地震事件深度与注气段深度对比图

图4 微地震事件定位结果、事件深度与注气段深度对比图

Fig. 4 Comparison of microseismic event location, event depth, and gas injection zone depth

(a) Microseismic event location map; (b) Comparison of event depth and gas injection zone depth

4.3 金坛盐穴储气库

金坛盐穴储气库部署了井下微地震监测系统以实时监测地下洞腔的稳定性(井岗等, 2018b)。监测井内安装了高精度三分量检波器阵列，靠近储气层段布置以提高事件检测精度。监测结果显示，在连续23天的观测中共检测到419个微地震事件(图5)，震级范围为−2.64～−0.35级。微地震事件主要集中在部分相邻井之间，而在其他井附近检测到的事件较少。定位和分析表明，大部分微地震事件与储气库的运行活动直接相关(如注水排卤、注气作业引发的微地震)，少数微地震事件可能由天然裂缝或断层的活动引起，并通过三维地震和b值(频次−震级关系参数)分析得到验证。密集的微地震活动为洞腔稳定性提供了直接观察：通过事件数量和分布的变化，可评估储气库的运行参数是否处于安全范围，并对可能的岩层破裂或腔体变形发出预警，使

运营者能够及时采取措施防范风险。此外，这些监测数据为优化储气库的管理和运行提供了科学依据，有助于延长盐穴储气库的安全使用寿命并提高其运行的可靠性（井岗等，2018b）。

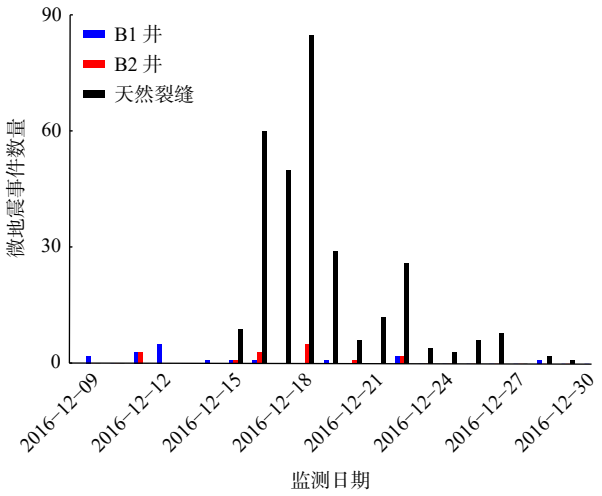


图 5　盐穴储气库微地震事件数量随时间演变图（据井岗等，2018b 修改）

Fig. 5　Time-depended microseismic event counts of salt cavern gas storage (modified from Jing et al., 2018b)

4.4　Minerbio Stoccaggio 储气库

意大利 Minerbio 地下储气库逐步升级了微地震监测网络，以提高事件检测能力（Carannante et al., 2020）。1979 年建立初始监测网络后，2016 年起通过增设区域地震台站和浅钻孔传感器扩大了监测覆盖；2018 年进一步增加了一批地表及井下台站，使监测网络更为密集。升级后的网络检测阈值显著降低，在噪声背景下可定位震级≥0.8 级的储气库深部事件。监测结果对储气库运营提供了多方面支撑：首先，根据意大利经济发展部 2014 年指导方针，微地震监测数据用于验证储气设施的安全运行条件；其次，持续监测及时揭示与储气活动相关的潜在地震风险，便于运营方采取预防措施；再次，改进的监测网络提高了对小震级事件的捕捉能力，从而更全面地监控储气库周围的地震活动，这对评估储气库安全性及制定风险缓解策略至关重要。此外，这些监测工作的改进也为科学研究提供了宝贵数据，有助于深化对诱发地震机制的认识。

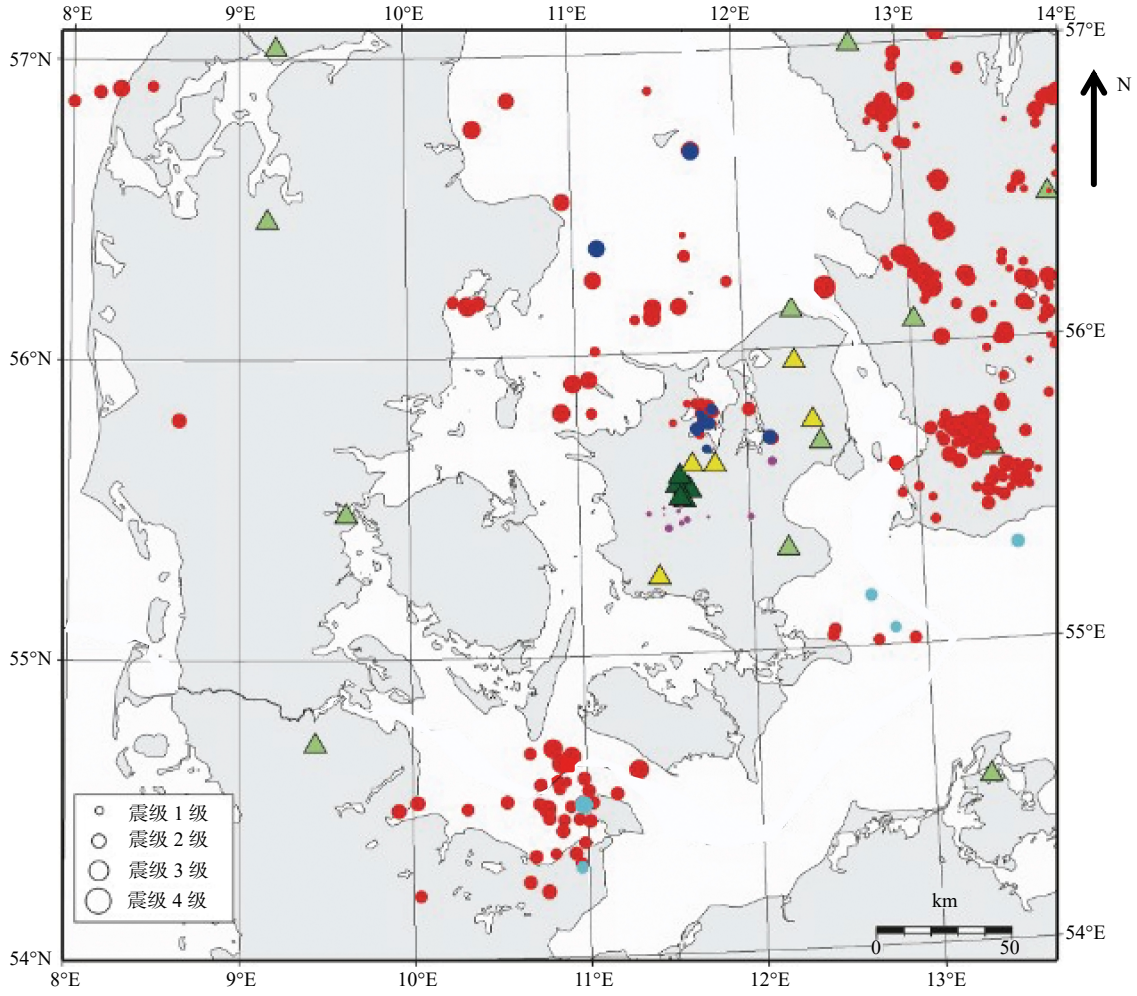
4.5　Stenlille 储气库

丹麦 Stenlille 地下储气设施于 2018 年部署了由 6 个地震仪组成的监测网络（覆盖主泵站周围约 5 km 范围），以研究大规模注气对局部地震活动的影响（Dahl-Jensen et al., 2021）。监测数据显示，在 2018 年 10 月—2020 年 3 月期间，自动触发检测到数百次事件，其中绝大多数经人工甄别后被确定为雷暴等噪声源。最终仅有 32 个事件被证实为与储气库相关的可定位微地震事件（图 6）。这一结果表明，Stenlille 储气库在监测期内仅产生了有限数量的小震级事件，同时也凸显了噪声干扰对微地震监测的影响。通过滤除误触发噪声，研究人员获得了该储气库注气期间的背景微地震活动水平，为评估大规模注气的地震影响提供了参考。

4.6　Castor 地下储气库

西班牙 Castor 地下储气库是典型的复杂地质条件下诱发严重地震风险的案例（Vilarrasa et al., 2021）。该项目位于临界应力状态的 Amposta 断层之上，由于缺乏全面的地质稳定性评估和有效的微地震实时监测系统，在 2013 年注气过程中诱发了一系列地震事件，其中包括 3 次震级超过 4.0 级的中小地震，最终导致项目永久终止并造成高额的经济损失（Vilarrasa et al., 2021）。监测系统尤其是在海底区域严重不足，未能及时捕获早期应力变化信号，错过了潜在的预警与风险干预时机。事件分析显示，即使注气停止后，孔隙压力继续扩散，诱发了深层基底断层的后续破裂，这凸显了实时高分辨率微地震监测在注气全过程（包括注气停止后的阶段）中的关键作用。Castor 项目的失败为全球类似储气库项目提供了深刻的教训，即在敏感地质环境中，详细的地质风险评估与完善的实时微地震监测技术至关重要，以便及时识别和干预可能出现的地震风险，确保储气库安全稳定运行。Castor 平台与断层系统的空间关系及断层滑移趋势如图 7 所示，为理解其地震诱发机制提供了直观参考。

综观以上不同类型储气库的微地震监测案例，可以发现储气库类型差异带来不同的监测难点和效果。气藏型储气库（如新疆 H 储气库）通常具有原有气藏地质条件，盖层完整且应力变化平缓，在安全运行情况下微地震事件较少且震级低，监测主要起到确认密封性良好和提供风险预警的作用。其技术难点在于覆盖较大范围并检测到深部可能发生的小震级事件。油藏型储气库（如唐山 M 储气库）往往埋藏深、构造复杂且存在大量油井遗孔，盖层可能经历长期开采而力学性能下降。这类储气库的微地震监测面临信号弱、噪声强等挑战。由于储层深达数千米且上覆地层（如人工岛填海区）对



图中红色圆圈表示丹麦地震局检测到的地震与爆炸事件，蓝色圆圈表示筛选发现的地震，浅蓝色圆圈为爆炸或疑似爆炸事件，紫色圆圈为伪事件，不同大小的圆圈对应不同震级（1～4 级）；三角形为地震台站：深绿色三角形为 Stenlille 地震网络台站，浅绿色三角形为国家地震台站，黄色三角形为 Raspberry Shake 台站；图中灰色区域为陆地

图 6 通过筛选 Stenlille 地震网络的数据检测到的地震事件（据 Dahl-Jensen et al.，2021 修改）

Fig. 6 Seismological events detected by screening data from the Stenlille seismic network (modified from Dahl-Jensen et al., 2021)

Red circles: events detected by the Danish Seismological Service; blue circles: earthquakes; light blue circles: explosions or suspected explosions; lilac circles: spurious events. Circle size indicates magnitude (1–4). Triangles represent seismic stations: dark green for the Stenlille network, light green for the national network, and yellow for the Raspberry Shake stations. Gray background: landmass.

信号衰减显著，常规地表/浅井监测难以检出微小事件。因此，在油藏型储气库中，需要提高监测灵敏度（如部署更深井下传感器）来捕捉可能的断层滑移或微破裂事件。值得注意的是，如果注采操作保持在安全范围内（如唐山 M 储气库当前阶段），微地震事件可能极为稀少，监测的意义更多在于验证“静默”状态确属安全。相比之下，盐穴型储气库（如金坛盐穴储气库）由于人工溶腔的存在，岩盐腔体受注气和采卤影响会产生大量微地震事件。监测结果往往表现为事件频次高、震级分布较广，但空间上主要局限于腔体及其邻近围岩。这反映出盐穴型储气库的监测重点在于洞室稳定性。微地震活动的突增往往预示腔壁破裂或塌陷的风险，因此需要密切监视事件率的变化。总的来说，气藏型和油藏型储气库更关注盖层和断层的长期稳定（通常事件稀少，重在有无异常事件出现），技术难点是深部小事件的捕获与精确定位；而盐穴型储气库微地震活动更为频繁，监测需及时分辨哪些事件可能预示腔体结构变化，以便采取工程干预措施。不同类型储气库微地震监测效果的差异表明，应根据储气库类型量身定制监测方案，如调整传感器布设深度和密度、选取合适的数据处理方法等，以克服各

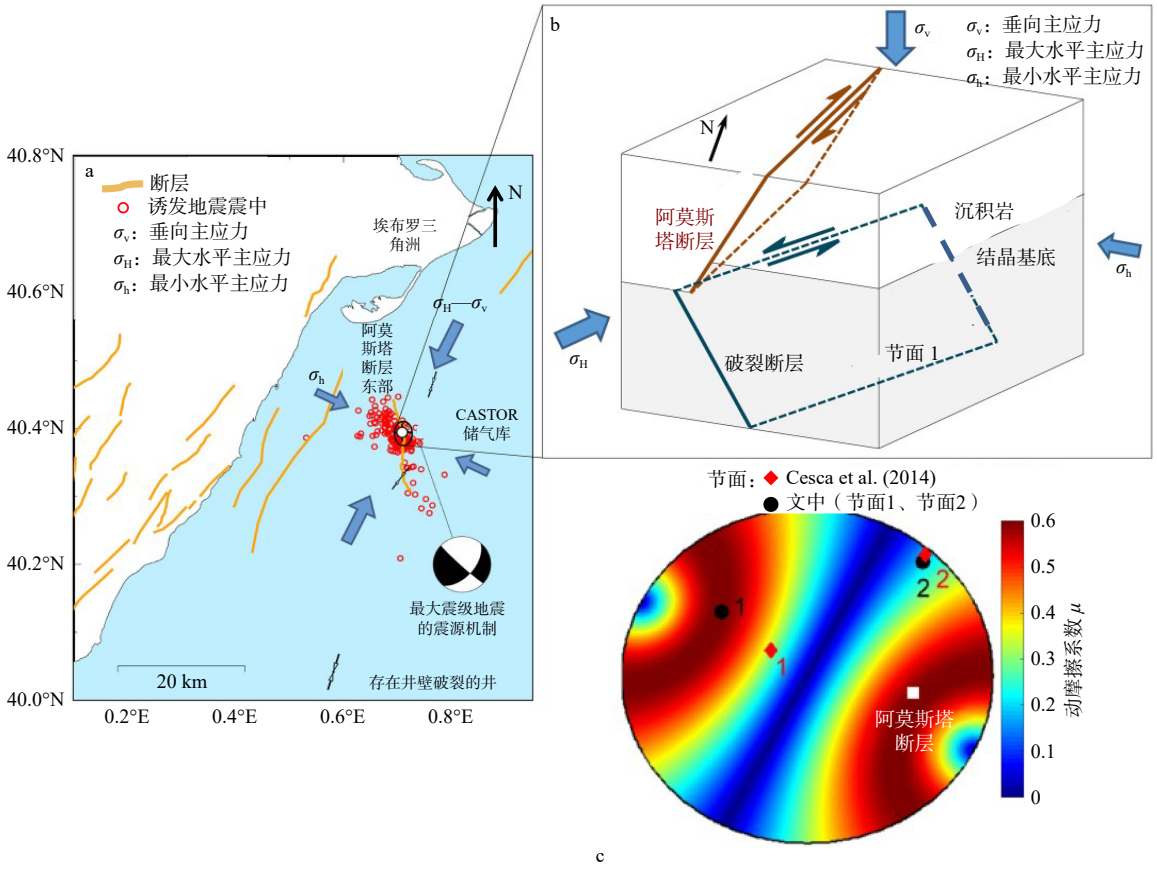


图 a 中展示了 Castor 储气库区域的构造环境、主应力方向及诱发地震的空间关系，所示断层包括储气层西界的阿莫斯塔断层及晶质基底中的潜在破裂断层，最大地震的震源机制和估算的应力张量用于揭示破裂模式与区域主应力的匹配关系；图 c 反映断层面在初始应力状态下的破裂潜势，其中红色区域表示更易发生剪切破裂的方位，红色和黑色圆点分别为不同研究获得的震源机制解，白色方块表示阿莫斯塔断层在构造模型中的位置

a—Castor 平台及周边区域的位置图；b—阿莫斯塔断层与位于晶质基底中的破裂断层相对于主应力方向的空间示意图；c—注入前 Castor 储气层的滑移趋势立体投影图

图 7　Castor 储气库诱发地震的构造背景与应力分析（据 Vilarrasa et al.，2021 修改）

Fig. 7　Tectonic setting and stress analysis of induced seismicity at Castor Underground Gas Storage (modified from Vilarrasa et al., 2021).

(a) Location map of the Castor platform and its surrounding area; (b) Schematic diagram showing the spatial relationship between the Amposta fault and the rupture fault in the crystalline basement with respect to the principal stress directions; (c) Stereonet of the slip tendency for the Castor storage formation prior to gas injection

The figure illustrates the tectonic setting, the principal stress orientations, and the spatial relationships of the induced earthquakes in the Castor Underground Gas Storage area. The faults shown include the Amposta fault bounding the storage formation and a potential rupture fault within the crystalline basement. The focal mechanism of the largest earthquake and the estimated stress tensor help reveal the compatibility between rupture modes and regional stress orientations. The slip tendency diagram reflects the potential for shear failure under the initial stress conditions, with red areas indicating orientations more susceptible to failure. Red and black dots represent focal mechanisms from different studies, and the white square marks the location of the Amposta fault within the structural model.

自的技术瓶颈，最大化监测效能。

5　未来发展方向

综上所述微地震监测技术在储气库建设和运营中应用已取得丰富的建树和成果，但未来仍可以朝着以下几个方向不断发展。

（1）长期密集型监测系统

微地震监测及地下储气库的发展将趋向于采用密集台阵和光纤传感器监测，实现高密度的数据采集（Karrenbach et al., 2019; Verdon et al., 2020）。光纤传感器具有高灵敏度、抗电磁干扰和可大规模布

设的优势，能够在储气库周围形成密集的监测网络，捕捉更为细微的地震信号（Karrenbach et al., 2017）。这种高密度采集不仅提升了微地震事件的检测能力和定位精度，还能实时监控储层的动态变化，及时发现潜在的地质风险和气体泄漏，从而显著提高储气库的安全性和运营效率。此外，光纤传感器的长期稳定性和维护成本较低，有助于构建更加智能化和可靠的监测系统，为地下能源储运提供坚实的技术支持（Liu et al., 2024; Skinner et al., 2024）。

（2）技术集成与智能化

在智能井和数字化油田技术的发展浪潮下，微地震监测系统正加速与其他先进传感器和自动化平台的集成。这种多传感器融合不仅提高了数据采集的时空分辨率，也为后续分析提供了丰富的数据源。更重要的是，各种人工智能算法被引入微地震数据处理流程，实现数据分析的自动化与智能化。例如，机器学习方法可用于自动识别微地震事件和滤除噪声信号，神经网络算法可用于实时拾取震相甚至直接定位事件，大幅提升了数据处理的准确性和速度。一个智能化的监测系统将能够自主识别异常微地震活动并及时报警，对储气库内部的微小变化实现实时响应，为储气库的安全管理提供更加主动、强有力的技术支撑（Zhu et al., 2019; Wamriew et al., 2021; Anikiev et al., 2023; Chen et al., 2023）。

（3）数据精细处理与解释

随着计算能力和算法的进步，微地震事件的定位精度和解释深度将进一步提高。目前已经出现了一系列高精度定位技术，例如，利用事件间波形互相关提高相对定位精度的互相关定位方法（通过比对多个台站记录提高到时测定的精确度）、利用观测波形与模拟波形匹配的全波形反演技术（直接反演震源位置和震源参数）以及基于深度学习的智能定位方法（训练神经网络根据波形特征直接预测震源位置）。这些新方法相较传统定位可显著降低震源定位误差，揭示储气库内部更复杂精细的构造对注采活动的细微响应特征。同时，微地震事件的综合解释将更加深入，通过序列事件的时空分布、震源机制解等分析，可细致刻画储气库库体的动态变化过程。这些技术进步将为储气库优化运营和风险管理提供更加可靠的数据支持，显著提升微地震监测的应用价值。

（4）实时监测与远程操作

未来的微地震监测系统将更加强调实时数据的采集、传输和处理能力。通过远程操作和监控，监测系统能够跨越地理限制，实现对储气库的实时监控。这不仅提高了对突发事件的响应速度，也增加了监测系统的灵活性和适应性，使其能够在各种复杂环境下稳定运行。

（5）多学科融合

微地震监测技术的未来发展将更加注重多学科交叉融合，与地质学、地球物理学、岩石力学、工程学以及计算机科学等领域紧密结合。具体的协同机制包括：建立地质−地球物理耦合模型，将地质构造模型、岩石力学参数与微地震观测数据结合起来，对储气库内部的应力演化和破裂机制进行联合模拟和校验，从而提高对微地震活动成因的认识；实施注采与监测联动策略，将工程注采数据与微地震监测实时反馈相互结合，根据监测到的地震活动变化动态调整注气采气方案，形成监测−决策的闭环，避免过度注采引发地质风险。这种跨学科融合将大大完善储气库监测与评估体系，为储气库的综合管理提供科学依据。同时，不同学科的知识交叉还为解决复杂地质问题提供了新视角和新方法，有望突破当前单一技术手段的局限，全面提升储气库安全监测与运行优化的水平。

（6）环境影响评估

随着全球对环境保护的重视，微地震监测技术在评估储气库运营对环境影响方面的作用日益凸显。通过监测储气库活动可能引发的地震活动，可以评估其对周围环境的潜在影响，确保储气库的运营活动既高效又环保，符合可持续发展的要求。

（7）国际合作与标准化

随着全球储气库建设的不断推进，国际间的技术交流和合作变得尤为重要。通过共享微地震监测技术的最新研究成果，各国可以在技术标准化方面取得共识，推动全球储气库安全运营水平的提升。这种国际合作不仅有助于技术的传播和应用，也将为全球能源安全和环境保护作出贡献。

6 结论

文章全面介绍了微地震监测技术在国内外地下储气库运营中的应用现状，并揭示了其在保障储气库安全稳定运行中的关键作用。微地震监测技术，作为一种被动源地球物理学方法，通过检测地下岩石破裂产生的微地震波，为地下储气库的安全

性和稳定性提供了实时、精确的监测手段。该技术不仅能够实时监测储气库在注采过程中的地层岩石破裂情况，还能通过对微地震事件的时空分布分析，结合储层的地质结构，进行更为精准的安全预警与评估。优化后的运行参数可以在不损害储气库结构稳定性的前提下，提升其生产效率。此外，微地震监测技术在其广泛的监测范围内展现了显著的成本效益，特别是在早期预防重大灾害方面。

在实际案例分析中，新疆 H 储气库、唐山 M 储气库、金坛盐穴储气库、意大利 Minerbio Stoccaggio 储气库和丹麦 Stenlille 储气库的监测实践证明了微地震监测技术的有效性和可靠性。这些案例展示了微地震监测技术在提高储气库运行效率、降低安全风险以及为储气库的长期稳定运行提供科学依据方面的巨大潜力。

结合西班牙 Castor 地下储气库项目的失败教训，进一步强调了微地震监测技术在储气库项目中的关键作用。该项目因缺乏实时、全面的微地震监测系统，未能在早期捕捉到断层的微小活动信号，导致最终发生大规模地震，迫使项目关闭。为避免类似的失败，未来的储气库项目应优先部署先进的微地震监测系统，确保在运营期间地层应力变化得到及时监控和预警，从而降低潜在风险。

未来，随着技术的不断进步，微地震监测技术在地下储气库中的应用将更加成熟和广泛。通过不断地技术创新和实践探索，这一技术将为地下储气库的安全稳定运行提供更加坚实的保障，同时也为类似地下储气设施的稳定性评估提供了宝贵的经验。此外，随着传感器设备性能改进和数据处理方法持续创新，微地震监测技术将在地球科学和工程领域发挥越来越重要的作用。

References

AFSHARI MOEIN M J, TORMANN T, VALLEY B, et al., 2018. Maximum magnitude forecast in hydraulic stimulation based on clustering and size distribution of early microseismicity[J]. Geophysical Research Letters, 45(14): 6907-6917.

AKRAM J, 2018. An application of waveform denoising for microseismic data using polarization–linearity and time–frequency thresholding[J]. Geophysical Prospecting, 66(5): 872-893.

AKRAM J, EATON D W, 2016. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data[J]. Geophysics, 81(2): KS71-KS91.

ANIKIEV D, BIRNIE C, WAHEED U B, et al., 2023. Machine learning in microseismic monitoring[J]. Earth-Science Reviews, 239: 104371.

BAZIW E, WEIR-JONES I, 2002. Application of Kalman filtering techniques for microseismic event detection[J]. Pure and Applied Geophysics, 159(1-3): 449-471.

CARANNANTE S, D'ALEMA E, AUGLIERA P, et al., 2020. Improvement of microseismic monitoring at the gas storage concession "Minerbio Stoccaggio" (Bologna, Northern Italy)[J]. Journal of Seismology, 24(5): 967-977.

CHANG X, LI Z, WANG P, et al., 2018. Micro-seismic location based on frequency attenuation compensation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(1): 250-257. (in Chinese with English abstract)

CHEN H C, TANG Y C, NIU F L, et al., 2016. Recent advances in microseismic monitoring and implications for hydraulic fracturing mapping[J]. Petroleum Science Bulletin, 1(2): 198-208. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y K, SAVVAIDIS A, FOMEL S, et al., 2023. RFloc3D: a machine-learning method for 3-D microseismic source location using P- and S-wave arrivals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61: 5901310.

DAHL-JENSEN T, JAKOBSEN R, BECH T B, et al. , 2021. Monitoring for seismological and geochemical groundwater effects of high-volume pumping of natural gas at the Stenlille underground gas storage facility, Denmark[J]. GEUS Bulletin, 47.

DING G S, WEI H, 2020. Review on 20 years' UGS construction in China and the prospect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 39(1): 25-31. (in Chinese with English abstract)

DING G S, WANG Y, WANYAN Q Q, et al., 2023. Construction difficulties and research directions of various complex UGSs[J]. Natural Gas Industry, 43(10): 14-23. (in Chinese with English abstract)

FENG Q, HAN L G, PAN B Z, et al., 2022. Microseismic source location using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60: 4510209.

GAO G L, LIU W, LI C, et al., 2023. A calculation method for the storage capacity of UGS rebuilt from oil reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 43(10): 132-140. (in Chinese with English abstract)

GRECHKA V, 2010. Data-acquisition design for microseismic monitoring[J]. The Leading Edge, 29(3): 278-282.

HU Y, WANG M Y, LUO Y, et al., 2024. Technical basis and development idea for the construction of "Gas Storage Capacity in Southwest China"[J]. Natural Gas Industry, 44(2): 1-13. (in Chinese with English abstract)

International Gas Union. 2023. Global Gas Storage Development [R]. International Gas Union.

JING G, HE J, CHEN J S, et al., 2018a. Application of real time micro-seismic technique to the stability monitoring of salt cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 37(7): 751-756. (in Chinese with English abstract)

JING G, LI L, BA J H, et al., 2018b. Real-time microseism monitoring of stability of salt-cavern gas storage in Jintan[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 40(5): 140-146. (in Chinese with English abstract)

KARRENBACH M, KAHN D, COLE S, et al., 2017. Hydraulic-fracturing-

induced strain and microseismic using in situ distributed fiber-optic sensing[J]. The Leading Edge, 36(10): 837-844.

KARRENBACH M, COLE S, RIDGE A, et al., 2019. Fiber-optic distributed acoustic sensing of microseismicity, strain and temperature during hydraulic fracturing[J]. Geophysics, 84(1): D11-D23.

KIM K I, MIN K B, KIM K Y, et al., 2018. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91: 1182-1191.

LI H J, WANG R Q, CAO S Y, et al., 2016. Weak signal detection using multiscale morphology in microseismic monitoring[J]. Journal of Applied Geophysics, 133: 39-49.

LI J L, ZHANG H J, RODI W L, et al., 2013. Joint microseismic location and anisotropic tomography using differential arrival times and differential backazimuths[J]. Geophysical Journal International, 195(3): 1917-1931.

Li J J, 2022. Development status and prospect of underground gas storage in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 41(7): 780-786. (in Chinese)

LI J, TIAN J X, WANG B, et al., 2023. Accumulation conditions and exploration potential of deep natural gas in the Qaidam Basin[J]. Journal of Geomechanics, 29(5): 618-630. (in Chinese with English abstract)

LI L, TAN J Q, XIE Y J, et al., 2019. Waveform-based microseismic location using stochastic optimization algorithms: a parameter tuning workflow[J]. Computers & Geosciences, 124: 115-127.

LI S H, DUAN J L, 2023-06-30(001). Yang Chunhe: "Energy Guard" who dares to ask for space underground[N]. China Science Daily. (in Chinese)

LI X, MAIN I, JUPE A, 2018. Induced seismicity at the UK 'hot dry rock' test site for geothermal energy production[J]. Geophysical Journal International, 214(1): 331-344.

LI Z, CHANG X, YAO Z X, et al., 2019. Fracture monitoring and reservoir evaluation by micro-seismic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(2): 707-719. (in Chinese with English abstract)

LIAO W, LIU G L, DAI Y, et al., 2020. Design and application of micro-seismic monitoring system for gas reservoir-type gas storage: case study of Xinjiang H gas storage[J]. Natural Gas Geoscience, 31(11): 1654-1662. (in Chinese with English abstract)

LIAO W, LIU G L, CHEN R H, et al., 2021. Evaluation on the dynamic sealing capacity of underground gas storages rebuilt from gas reservoirs: a case study of Xinjiang H underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 41(3): 133-141. (in Chinese with English abstract)

LIAO W, WEI L L, LUO H T, et al., 2023. Application of microseismic monitoring in evaluation of geological body integrity for UGS in oil-gas fields[J]. Oil Geophysical Prospecting, 58(4): 913-921. (in Chinese with English abstract)

LIU J X, LIU Y, 2022. Development status and prospects of China's underground gas storage construction[J]. Applied Chemical Industry, 51(4): 1136-1140, 1145. (in Chinese with English abstract)

LIU T X, LI Q, LI X Y, et al., 2024. A critical review of distributed fiber optic sensing applied to geologic carbon dioxide storage[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 14(4): 676-694.

LIU W, LI Q H, YANG C H, et al., 2023. The role of underground salt caverns for large-scale energy storage: a review and prospects[J]. Energy Storage Materials, 63: 103045.

LIU Y L, TIAN Y, FENG X, et al., 2013. Review of microseism technology and its application[J]. Progress in Geophysics, 28(4): 1801-1808. (in Chinese with English abstract)

MA K, TANG C A, WANG L X, et al., 2016. Stability analysis of underground oil storage caverns by an integrated numerical and microseismic monitoring approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 54: 81-91.

MAXWELL S, 2014. Microseismic imaging of hydraulic fracturing: improved engineering of unconventional shale reservoirs[M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists: 1-197.

MAXWELL S C, RUTLEDGE J, JONES R, et al., 2010. Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring[J]. Geophysics, 75(5): 75A129-75A137.

MCCLELLAN J H, EISNER L, LIU E T, et al., 2018. Array processing in microseismic monitoring: detection, enhancement, and localization of induced seismicity[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 35(2): 99-111.

MENDECKI A J, 1996. Seismic monitoring in mines[M]. Dordrecht: Springer.

MOUSAVI S M, LANGSTON C A, HORTON S P, 2016. Automatic microseismic denoising and onset detection using the synchrosqueezed continuous wavelet transform[J]. Geophysics, 81(4): V341-V355.

PENG P A, HE Z X, WANG L G, et al., 2020. Automatic classification of microseismic records in underground mining: a deep learning approach[J]. IEEE Access, 8: 17863-17876.

SHAO X G, DONG H L, DAI L Y, 2018. Review of microseismic monitoring technology[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 36(1): 55-61. (in Chinese with English abstract)

SKINNER N G, MAIDA JR J L, STARK D, 2024. Fiber optic sensing in the oil and gas industry[M]//UDD E, SPILLMAN JR W B. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 3rd ed. Hoboken: Wiley: 495-512.

SU X, ZHANG L, LI Y, 2007. Status and development trend of foreign underground gas storages[J]. Natural Gas and Oil, 25(4): 1-4, 7. (in Chinese with English abstract)

TEZUKA K, NIITSUMA H, 2000. Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot dry rock reservoir[J]. Developments in Geotechnical Engineering, 84: 55-70.

VAN DER BAAN M, EATON D, DUSSEAULT M, 2013. Microseismic monitoring developments in hydraulic fracture stimulation[C]//Proceedings of ISRM international conference for effective and sustainable hydraulic fracturing. Brisbane: ISRM.

VERDON J P, HORNE S A, CLARKE A, et al., 2020. Microseismic monitoring using a fiber-optic distributed acoustic sensor array[J]. Geophysics, 85(3): KS89-KS99.

VILARRASA V, DE SIMONE S, CARRERA J, et al., 2021. Unraveling the causes of the seismicity induced by underground gas storage at castor, Spain[J]. Geophysical Research Letters, 48(7): e2020GL092038.

WAMRIEW D, PEVZNER R, MALTSEV E, et al., 2021. Deep neural networks for detection and location of microseismic events and velocity model inversion from microseismic data acquired by distributed acoustic sensing array[J]. Sensors, 21(19): 6627.

WANG H, LI M, SHANG X F, 2016. Current developments on micro-seis-

mic data processing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 32: 521-537.

WANG L C, CHANG X, WANG Y B, 2016. Locating micro-seismic events based on interferometric traveltime inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 3037-3045. (in Chinese with English abstract)

WANYAN Q Q, DING G S, ZHAO Y, et al., 2018. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. Natural Gas Industry, 38(5): 111-117. (in Chinese with English abstract)

WANYAN Q Q, WANG Y, LI D X, et al., 2023. Technical progress of construction and safe operation of underground gas storage under complex geological conditions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 42(10): 1092-1099. (in Chinese with English abstract)

WEI L L, JING G, XU G, et al., 2018. Application of microseismic monitoring technology in underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 38(8): 41-46. (in Chinese with English abstract)

YANG X P, 2023. Construction demand and key technology development direction of underground gas storage in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 42(10): 1100-1106. (in Chinese with English abstract)

ZHANG F Q, ZENG P, ZHOU L J, et al. , 2021. Underground gas storage research status quo and application expectations at home and abroad[J]. Coal Geology of China, 33(10): 39-42, 52. (in Chinese with English abstract)

ZHANG T, ZHU J J, ZHANG S Y, et al., 2023. Optimization of UGS capacity under the "Two-Part Pricing" model[J]. Natural Gas Industry, 43(6): 148-155. (in Chinese with English abstract)

ZHAO F F, MA T, XU T, 2014. A review of the travel-time calculation methods of seismic first break[J]. Progress in Geophysics, 29(3): 1102-1113. (in Chinese with English abstract)

ZHEBEL O, EISNER L, 2015. Simultaneous microseismic event localization and source mechanism determination[J]. Geophysics, 80(1): KS1-KS9.

ZHENG D W, XU H C, WANG J M, et al., 2017. Key evaluation techniques in the process of gas reservoir being converted into underground gas storage[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(5): 794-801. (in Chinese with English abstract)

ZHENG D W, XU H C, WANG J M, et al., 2017. Key evaluation techniques in the process of gas reservoir being converted into underground gas storage[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(5): 840-849.

ZHU W Q, MOUSAVI S M, BEROZA G C, 2019. Seismic signal denoising and decomposition using deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(11): 9476-9488.

ZOU X B, LI X J, SHAO Y X, et al., 2024. Tectonic deformation and seismic mechanism of the 2021 Aksai M_S 5.5 earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 978-990. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈海潮，唐有彩，钮凤林，等，2016. 利用微地震参数评估水力压裂改造效果研究进展[J]. 石油科学通报，1(2)：198-208.

丁国生，魏欢，2020. 中国地下储气库建设20年回顾与展望[J]. 油气储运，39(1)：25-31.

丁国生，王云，完颜祺琪，等，2023. 不同类型复杂地下储气库建库难点与攻关方向[J]. 天然气工业，43(10)：14-23.

高广亮，刘伟，李聪，等，2023. 油藏改建地下储气库库容量计算方法[J]. 天然气工业，43(10)：132-140.

胡勇，王梦雨，罗瑜，等，2024.“中国西南储气能力”建设的技术基础与发展思考[J]. 天然气工业，44(2)：1-13.

井岗，何俊，陈加松，等，2018a. 盐穴储气库稳定性的实时微地震监测[J]. 油气储运，37(7)：751-756.

井岗，李龙，巴金红，等，2018b. 实时微地震监测金坛盐穴储气库稳定性[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，40(5)：140-146.

李建君，2022. 中国地下储气库发展现状及展望[J]. 油气储运，41(7)：780-786.

李思辉，段金利，2023-06-30(001). 杨春和：敢向地下要空间的“能源卫士”[N]. 中国科学报.

廖伟，刘国良，戴勇，等，2020. 气藏型储气库微地震监测系统设计及应用：以新疆H储气库为例[J]. 天然气地球科学，31(11)：1654-1662.

廖伟，刘国良，陈如鹤，等，2021. 气藏型地下储气库动态密封性评价：以新疆H地下储气库为例[J]. 天然气工业，41(3)：133-141.

廖伟，魏路路，罗海涛，等，2023. 微地震监测在油气藏型储气库地质体完整性评价中的应用[J]. 石油地球物理勘探，58(4)：913-921.

柳云龙，田有，冯晅，等，2013. 微震技术与应用研究综述[J]. 地球物理学进展，28(4)：1801-1808.

邵晓光，董宏丽，代丽艳，2018. 微地震监测技术综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版)，36(1)：55-61.

完颜祺琪，丁国生，赵岩，等，2018. 盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J]. 天然气工业，38(5)：111-117.

完颜祺琪，王云，李东旭，等，2023. 复杂地质条件下储气库建设安全运行技术进展[J]. 油气储运，42(10)：1092-1099.

魏路路，井岗，徐刚，等，2018. 微地震监测技术在地下储气库中的应用[J]. 天然气工业，38(8)：41-46.

阳小平，2023. 中国地下储气库建设需求与关键技术发展方向[J]. 油气储运，42(10)：1100-1106.

张福强，曾平，周立坚，等，2021. 国内外地下储气库研究现状与应用展望[J]. 中国煤炭地质，33(10)：39-42, 52.

张涛，主俊杰，张霜艳，等，2023. 基于“两部制”背景的地下储气库库容优化[J]. 天然气工业，43(6)：148-155.