

李永臣, 罗子金, 马科迪, 等. 二氧化碳封存断层构造区微震活动规律新认识——以美国 Decatur 项目为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(3): 65-77.

LI Yongchen, LUO Zijin, MA Kedi, et al. New understanding of microseismic activity in fault zones for geological carbon storage: a case study of the Decatur project in the United States[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(3): 65-77.

二氧化碳封存断层构造区微震活动规律新认识 ——以美国 Decatur 项目为例

李永臣¹, 罗子金¹, 马科迪¹, 方小宇^{2,3,4,5*}, 田华丰⁶, 吕言新², 辛毅⁷

(1 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524006; 3 青岛市海洋地质碳封存重点实验室, 青岛 266237; 4 青岛市海洋地质碳封存工程研究中心, 青岛 266237; 5 海洋地质碳封存山东省工程研究中心, 青岛 266237; 6 中石化中原油田石油工程技术研究院, 濮阳 457000; 7 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 长春 130061)

摘要:基于美国 Decatur 二氧化碳封存项目, 探讨碳封存过程中地层厚度、构造应力状态以及 CO₂ 注入引发的微地震活动之间的相互关系, 为碳封存选址和安全性评估提供科学依据。通过 Decatur 项目的储层 (Mt. Simon 砂岩) 和盖层 (Argenta 地层) 厚度特性, 研究其对注入压力扩散的影响; 结合构造应力分布和历史累积数据, 分析前寒武基底断层滑动的敏感性。CO₂ 注入点附近的 Argenta 地层较薄或缺失, 没有足够的厚度来抑制压力向基底断层迁移, 导致微地震事件主要发生在前寒武基底。CO₂ 注入到 Mt. Simon 砂岩储层后, 孔隙压力升高先集中在注入点附近, 随后压力扩散到更大范围, 单纯的 CO₂ 注入并不足以完全诱发大规模的微地震活动。前寒武基底因历史构造应力多次累积, 对流体注入引发的应力释放更为敏感。在 Decatur 项目中, 当 CO₂ 注入速率达到 125~140 万 t/a 时, 诱发了断层滑动和微地震活动。碳封存选址应从地层厚度、构造应力状态和注入诱发机制上进行全面评估, 确保注入的安全性和长期稳定性。

关键词:CO₂ 地质封存; 微震活动; 断层构造; Decatur 项目; THMC 多场耦合

中图分类号:P313

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.235

0 引言

温室气体排放, 尤其是二氧化碳(CO₂)的过量排放, 是导致全球变暖的主要原因。气温升高引发的极端天气事件频发、海平面上升、生态系统破坏等一系列连锁反应, 对人类社会和自然环境造成了严重威胁^[1-2]。2023 年 global 的平均温度比工业化前高约 1.5 °C, 尤其在欧洲、北美洲和亚洲的部分地

区, 极端高温事件频发, 导致全年平均气温创下新高^[3]。CO₂ 地质封存 (Carbon Geological Storage, CGS) 是一种关键的减碳技术, 旨在将捕集的 CO₂ 永久封存在地下地质结构中, 防止其进入大气层, 从而减缓气候变化。深部咸水层、枯竭油气藏、玄武岩、页岩、煤层等均为 CO₂ 地质封存的有利场所, 碳封存介质的选择需要根据具体地质条件、经济性和环境影响等因素综合考虑。深部咸水层广泛分布于全球的陆海沉积盆地, 具有存储空间大、封闭性好、泄露风险少、封存成本低等优势, 有助于 CO₂ 永久封存。

在断层构造区进行 CO₂ 地质封存确实面临一些特殊风险, 注入的 CO₂ 可能导致局部压力异常升高, 需要精确控制注入压力和速率。CO₂ 注入会导致地层压力不稳定, 当地层压力增加到断层滑动阈值时, 会诱发断层滑动或者小型地震。当断层面存在裂缝或缺陷时, 断层可能成为 CO₂ 的泄露通道^[4]。

收稿日期: 2024-10-11

资助项目: 国家自然科学基金“深层干热岩钻进井壁围岩宏观破裂机理及稳定性控制研究”(52274231), “超深超高压气藏高效开采科学问题”(52034006)

第一作者: 李永臣(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事非常规油气勘探开发地质方面的工作。E-mail: 2358432202@qq.com

* 通讯作者: 方小宇(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事二氧化碳地质封存方面的工作。E-mail: fangxy@zjblab.com

断层区域地质结构复杂, CO_2 的运移路径和封存体积难以预测, 需要进行长期监测, 包括压力、地震和 CO_2 浓度的监测, 确保其封存长期稳定性。

微震监测和分析是确保 CO_2 封存安全的重要方法^[5], 微震活动可以反映出 CO_2 在储层中的流动和分布情况, 如果微震活动比较频繁, 意味着 CO_2 在深部流动与储层相互作用。微震活动如果发生在断层附近, 暗示着断层正经历额外应力, 增加了断层活化或者滑动的风险^[6]。微震活动可能揭示 CO_2 封存泄露路径, 也可能导致裂缝扩展并形成新的泄露通道, 逸出地表或者污染地下水系统; 通过实时监测微震活动, 可以监测潜在碳封存安全事故, 并通过调整注入的压力或速率, 以降低风险, 起到监测预警的作用。 CO_2 封存长期微震监测可以提供储层地质体在长时间尺度上的稳定性信息。

美国 Decatur 项目作为一个典型的 CO_2 封存示范项目, 选址于地质构造复杂的区域, 为 CO_2 封存技术提供了宝贵的研究数据^[7]。该项目特别关注断层构造区 CO_2 注入对微震活动的影响。由于微震活动是反映地下应力变化的一个重要标志, 可能会影响到封存系统的稳定性, 因此, 深入研究 Decatur

项目微震活动的规律和机制对于优化封存策略和提高安全性至关重要^[8]。

在 Decatur 项目中, Argenta 地层没有足够的厚度来抑制压力向基底断层迁移, 导致微地震事件主要发生在前寒武基底。 CO_2 注入不仅会改变储层的孔隙压力, 还可能通过断层和裂隙扩散压力, 从而引发局部应力的变化; 这种压力传播及其引发的应力变化可能会影响断层的稳定性, 增加微震活动的风险, 引发断层滑动等地质现象。在进行 CO_2 注入前, 对注入点附近地层应力状态的评估也至关重要。通过地震勘探、地质测绘和应力测试等手段, 可以详细了解地层局部构造的应力状态, 特别是在断层分布区域。这些评估有助于识别潜在的风险区域, 避免因流体注入引发的应力释放导致断层滑动、微震活动或更大规模的地质活动。

1 Decatur 项目概况

美国伊利诺伊盆地二氧化碳封存项目 (Decatur 项目, 1 期简称 IBDP, 2 期简称 ICCS) 是一个大型的二氧化碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 示范项目 (图 1), 由伊利诺伊州地质调查



图 1 Decatur 项目注入井和监测井分布示意图

Fig.1 Locations of the injection wells and monitoring wells of the Decatur Project

局(ISGS)主导,阿彻丹尼尔斯米德兰公司(ADM)提供场地和支持,联合多个研究机构和工业合作伙伴开展。项目的主要目标是验证深部咸水层中安全、有效地封存大规模 CO₂ 的可行性,为未来的 CCS 技术提供重要的科学和技术数据支持。项目位于伊利诺伊州迪凯特市的一个工业区,深部咸水层坐落于 Mt. Simon 砂岩地层下方,地质条件良好,非常适合 CO₂ 封存。

Decatur 项目共有 6 口主要井,包含注入井和监测井(表 1)^[9]。CCS1 井的 CO₂ 注入工作自 2011 年开始,持续到 2014 年^[10-12],通过 CCS1 井封存了约 100 万 t 的 CO₂,注入量符合项目的设计目标,并展示了大规模 CO₂ 封存的可行性。CCS1 井的注入压力被严格控制在适合储层特性的范围内,以避免引发地应力过大或断层滑动。VW1 井主要功能是用于观测和监测而非直接注入 CO₂,用于监测注入过程中储层中的压力变化、CO₂ 扩散情况以及地质反应。VW1 井通过感应装置,特别是地层压力传感器,监测注入的 CO₂ 在 Mt. Simon 砂岩储层中的扩散情况。VW1 井作为微地震监测的一部分,协助捕捉因 CO₂ 注入引发的微地震活动。GM1 井是一口用于地球物理监测的井,监测地下储层的压力变化、地震活动和流体流动,提供储层动态信息。GM1 井安装了压力传感器,监测注入过程中的储层压力变化,可以判断 CO₂ 的流动速率和扩散范围。CCS2 井是继 CCS1 井之后的第 2 口注入井,主要用于支持和扩展项目的 CO₂ 封存能力,CCS2 井的注入速率根据储层的响应进行调节。CCS2 井开始时的注入速率较低,以避免对储层产生过大压力。随着时间的推移,注入速率逐渐增加,确保 CO₂ 在储层中的有效扩散,CCS2 井的注入量为 100 万 t/a。VW2 井用于监测和验证,旨在实时监控 CO₂ 的扩散和储层的响应。VW2 井的主要功能是通过压力、温度和化学成分的监测,捕捉注入到 Mt. Simon 砂岩储

层中的 CO₂ 扩散情况。VW2 井定期进行地下流体的采样,分析 CO₂ 与地下水和其他地层流体的反应。通过化学监测,可以确定 CO₂ 是否发生溶解、矿化等反应。VW2 井配备了微地震监测系统,可以探测由 CO₂ 注入引发的微地震活动。GM2 井与 GM1 井类似,用于地球物理监测,主要监测 CO₂ 在储层中的扩散情况、压力变化和微地震活动。Decatur 项目注入井(CCS1、CCS2 井)和监测井(GM1、VW1、GM2、VW2 井)协同工作,确保注入过程中的每个阶段都有全面的监测覆盖。

2 Decatur 区域地质概况

2.1 Decatur 项目层位解释

Decatur 项目的主要地层是前寒武系基底、Argenta 砂岩、Mt. Simon 砂岩和 Eau Claire 页岩等(表 2,图 2、图 3)^[13]。在伊利诺伊州北部,上寒武统 Mt. Simon 砂岩层被认为是由古代河流系统沉积而成,以砂岩(石英)为主,含有高达 15% 的黏土和 25% 的正长石。Mt. Simon 砂岩层是一个渗透性和孔隙度良好的地层,位于区域性的 Eau Claire 页岩下方,从 Eau Claire 页岩底部延伸至其下方的 Argenta 地层顶部(图 3)。前寒武基底由花岗岩/流纹岩组成,其上部覆盖着一层较薄的 Mt. Simon 砂岩单元,该层由粗粒砂组成,包含有圆润的卵石砾岩,整体结构较为致密。

2.2 Decatur 项目储盖层岩性与物性特征

CCS1 和 CCS2 井岩石物理特性对评估储层的注入性能、封存能力以及微震活动等至关重要(图 4)。综合分析 CCS1 和 CCS2 井储层与盖层的岩石物理特性,可以为 CO₂ 封存提供科学依据和实践指导,同时降低潜在的环境风险。

表 1 注入井和监测井汇总表

Table 1 Summary of the injection wells and monitoring wells

井名	用途	项目名称	运行时间	数据来源
CCS1	CO ₂ 注入井1(总注入量100万 t)	IBDP	2011-11	文献[9]
VW1	监测井1	IBDP	2011-11	文献[9]
GM1	IBDP三维地震剖面 IBDP微震监测	IBDP	2011-11	文献[9]
CCS2	CO ₂ 注入井2(注入量100万 t/a)	ICCS	2017-04	文献[9]
VW2	监测井2	ICCS	2017-04	文献[9]
GM2	ICCS地球物理监测	ICCS	2012	文献[9]

Table 2 Information of the litho-stratigraphy in the Decatur project

地层名称	地层用途	CCS1地层顶部深度/ft	地层岩性	地层厚度/ft
Eau Clair页岩	顶部盖层	5221	致密粉砂岩、石灰岩、砂岩和页岩	324
Mt. Simo砂岩	上部	Mt. Simon E	泥岩和砂岩	376
	中部	Mt. Simon D	致密区, 细—中等粒度的砂岩	201
		Mt. Simon C	致密区, 细—粗粒度的砂岩	306
		Mt. Simon B	平面层理砂岩	252
	下部	Mt. Simon A-上	粗—细粒度的砂岩	250
		Mt. Simon A-下	砂岩和砾岩, 有一个薄的低渗透区, 作为CO ₂ 向上迁移的天然屏障	121
Argenta砂岩 前寒武系基底	底部隔离层	7051	砾岩和粗砂岩	114
		7165	风化的流纹岩, 高度破碎	—

系	统	岩性	地层	说明
奥陶系	辛辛那提统		Maquoketa 组	次封闭层
	尚普兰统		Galena 组	
			Platteville 组	
			Joachim	
			Dutchtown	
			St. Peter	
	加拿大统		Everton	
			Shakopee	
			Oneota	
			Eminence	
寒武系	克罗克西统		Potosi	
			Franconia	
			Eau Clair	主封闭层
			Mt. Simon	主要封存区域
			Argenta	
前寒武系			Granite-Rhyolite	

据文献 [9] 修改

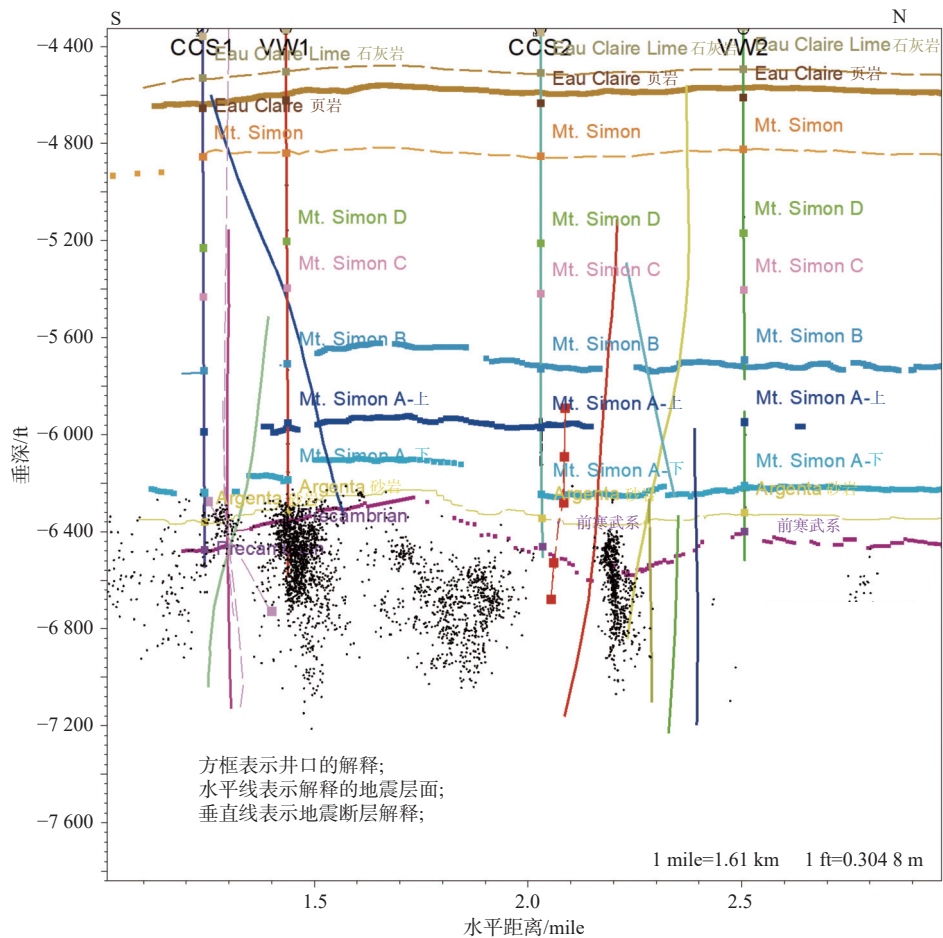
图 2 Decatur 项目地层柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Decatur project

(1) 储层 Mt. Simon 砂岩层底部区域(1 960~2 149 m)具有最高的平均孔隙率和良好的渗透率。Mt. Simon A-下层是主要的注入区, 平均孔隙率为 16.9%, 但在某些区段, 孔隙率接近 30%, 该区的平均渗透率为 $55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 但实际注入区段的渗透率范围在 $60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 到数百 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。通过对比 VW1 和 CCS1 井中的这些区段, Mt. Simon A-下层中存在一些不连续的薄页岩层, 认为这些页岩层更可能充当流体缓冲层。Mt. Simon 砂岩层的中部区域(1 946~1 960 m), 平均孔隙率为 8.7%, 平均渗透率仅为 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 该区域的大部分流体似乎为束缚流体, 该区域并不是 CO₂ 流动的密封层, 但它

将显著阻碍 CO₂ 向上的流动。Mt. Simon 砂岩层的上部区域(1 690~1 946 m), 平均孔隙率为 10.5%, 平均渗透率为 $71 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 这一区段的总孔体积比底部区域小, 但孔径较大, 因此渗透率更高。

(2) 盖层 Eau Claire 页岩是 Mt Simon 砂岩注入 CO₂ 的主要封闭层, Eau Claire 页岩厚约 152 m, 覆盖范围为 CCS1 和 VW1 井处 1 530~1 690 m。通过 Eau Claire 页岩分析识别出的黏土矿物主要为伊利石和绿泥石, 含少量高岭石。Eau Claire 页岩中的孔隙尺寸非常小, 因此渗透率也非常低, 只有少数小区段的渗透率 $> 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。



据文献 [9] 修改

图 3 Decatur 项目层位解释

Fig.3 Profile interpretation for the Decatur project

2.3 Decatur 项目圈闭类型

Decatur 项目的圈闭类型以地层圈闭为主, 其核心封存机制是通过 Mt. Simon 砂岩储层与 Eau Claire 页岩盖层的岩性差异形成垂向封闭系统。地层圈闭依赖于储层和盖层的岩性变化, 而非复杂的构造变形, Eau Claire 地层的完整性是封存 CO_2 的关键因素。构造因素(如区域缓倾构造)对封存的稳定性起到了一定辅助作用, 但并不是决定性因素。Mt. Simon 砂岩呈轻微的缓倾斜形态, 有助于增强储层的封存稳定性, 但这并非主导圈闭因素, 构造因素(如断层)在封存过程中起的作用较小。

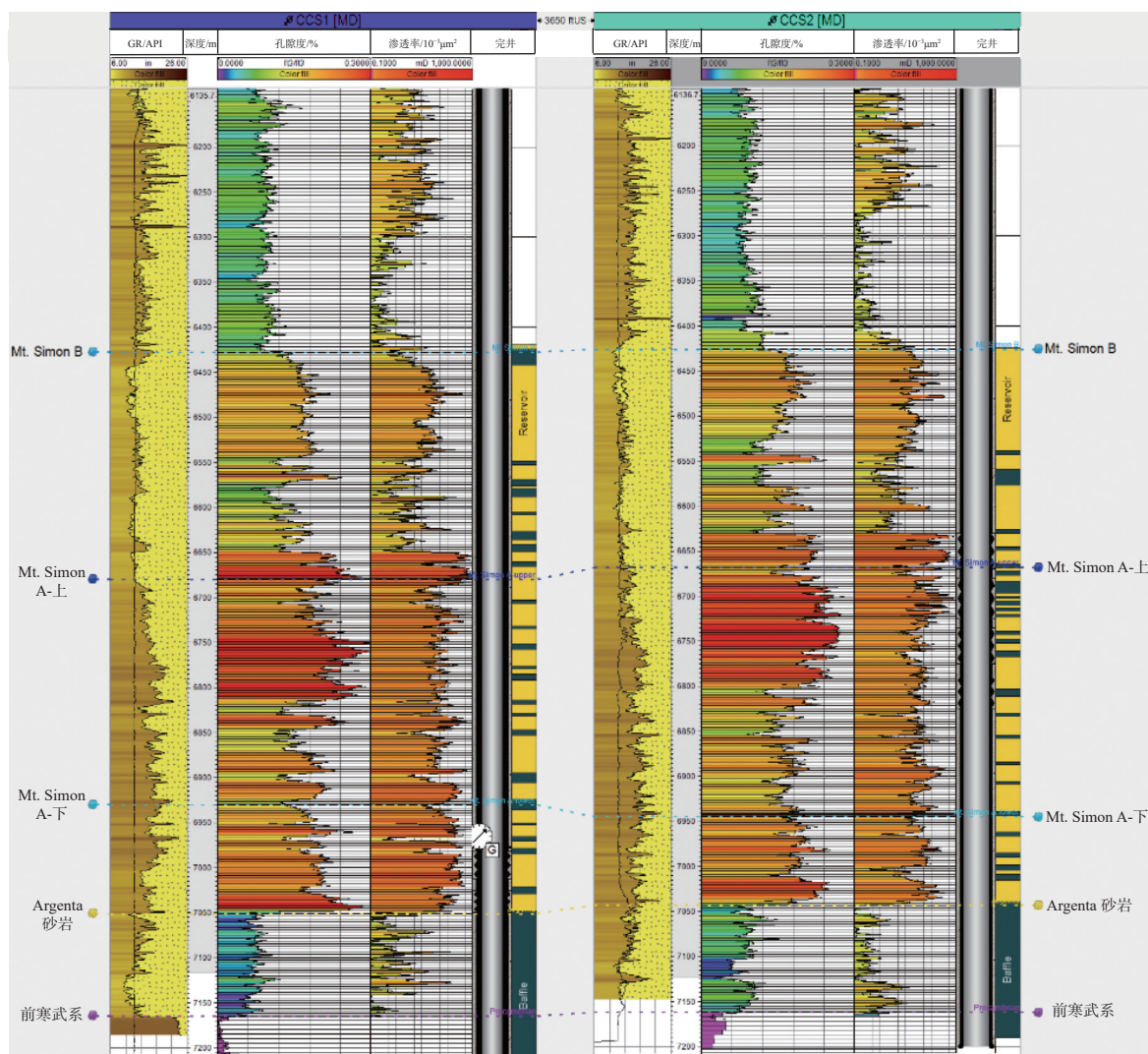
2.4 Decatur 项目断层空间分布

Decatur 项目地震数据表明, 许多断层穿过 Mt. Simon 砂岩层、Argenta 砂岩层并延伸至前寒武基底(图 5、6), 这些断层在不同地层中的位移情况差异较大。大多数解释的断层位移较小, 位移范围

为 0~9.1 m, 其中有 9 条解释断层具有相对较大的位移, 位移范围为 9.1~18 m, 这些具有较大位移的断层可能对碳封存的安全性存在潜在影响。

3 Decatur 项目微地震事件

微地震活动通常发生在断层附近, 因为, 断层是地壳应力集中和释放的主要区域^[14-15]。Decatur 区域主要断层类型为正断层, 断层面较平滑, 这种断层通常在张性应力环境中形成, 具有向下扩展的特征。断层的摩擦系数通常为 0.6~0.8, 具有中等滑动阻力, 有助于断层稳定性。Decatur 项目中的微地震监测显示, 部分微地震事件与已解释的断层在空间上存在一定的重叠, 这说明断层可能对地应力场的变化敏感, 特别是在 CO_2 注入导致储层压力增加时。断层的存在为微地震事件提供了一个潜在的触发点, 地层压力变化可能会增加断层周围的孔隙压力, 降低断层的有效应力, 进而引发微地震^[16-20]。



据文献 [9] 修改

图 4 CCS1 和 CCS2 连井对比图

Fig.4 Inter-well correlation between CCS1 and CCS2

CCS1 井的射孔位置位于 Mt. Simon A-下地层的底部, Argenta 地层在地形高处可能较薄或缺失, 没有足够的厚度来抑制压力向基底断层迁移, 注入的流体可能会通过低渗透层向下渗透, 导致压力越过 Argenta 地层而迁移至前寒武系基底, 引发断层滑动或者活化。Decatur 项目微地震事件主要发生在前寒武系基底, 并呈 NE 向分布(图 7), 鉴于此, CCS2 井的射孔位置选在更靠近上部的 Mt. Simon A-上区域(图 8), 以避免前寒武系基底的断层活跃区域和 CCS1 井射孔处的高压区。

4 THMC 多场耦合作用下断层稳定性分析

Toughreact 是一款能够模拟多相流体运移、热

力学反应和化学反应的工具, Flac3D 是一款用于模拟地质环境下岩土力学行为的有限差分软件, 基于 Toughreact-Flac3D 软件框架^[21-26], 建立热-流-固-化多场耦合数值模型(图 9), 模拟 Decatur 项目 CO₂ 注入后的储层应力场变化, 计算断层上的剪应力和法向应力, 结合库仑摩擦准则, 评估断层滑动的可能性。

4.1 多场耦合数值模型

在 Decatur 项目中对 CCS1 井建模, Mt. Simon 砂岩层、Argenta 地层和前寒武系基底岩层是关键地质单元, Mt. Simon 砂岩层具有高孔隙度和渗透性, 是 CO₂ 主要的封存储层, 前寒武系基底岩层中分布有 4 条断层(图 10)。

Mt. Simon 砂岩层最小主应力为水平向($\sigma_h =$

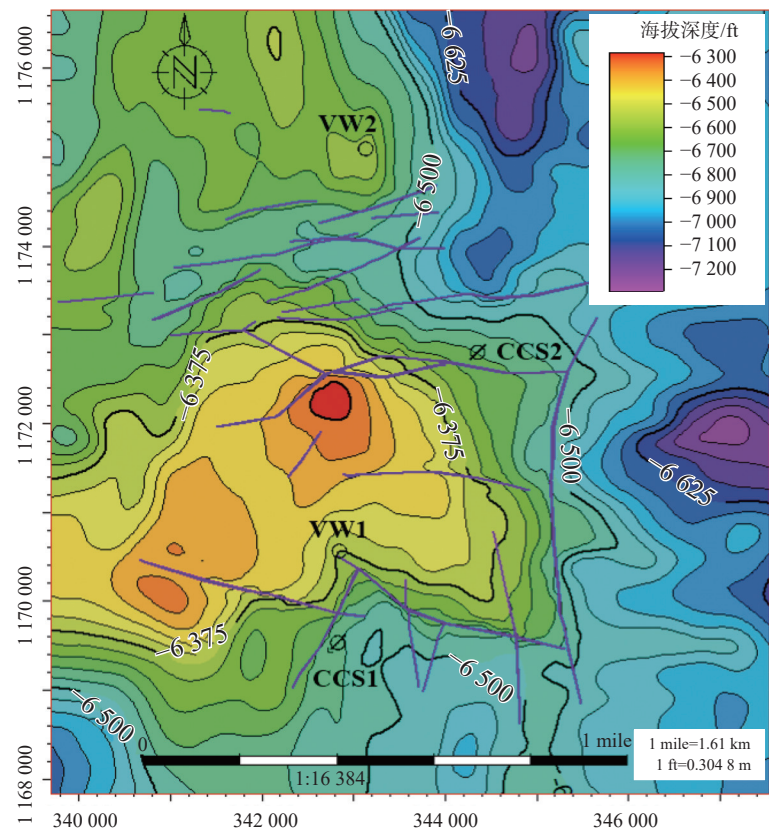


图 5 CO₂ 封存区构造示意图

Fig.5 Geological structure of the CO₂ storage area

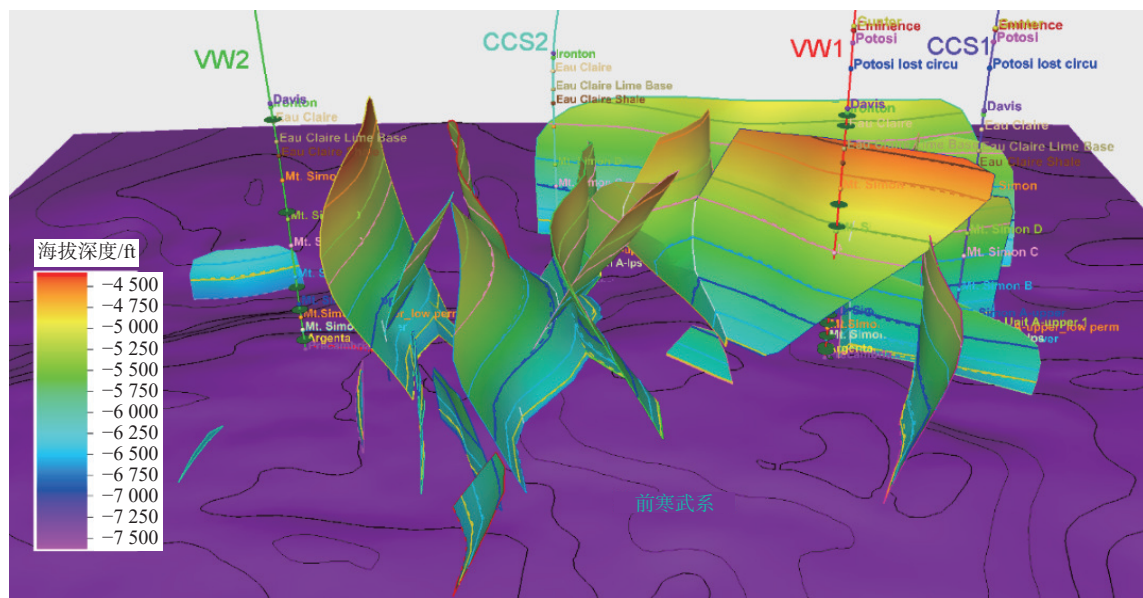


图 6 前寒武系层位和断层示意图

Fig.6 The Precambrian layers and faults

34.2 MPa), 中间主应力为垂直向($\sigma_v=50.8$ MPa), 最大主应力为水平向($\sigma_H=61.6$ MPa), 孔隙压力接近静水压力($p_f=21.8$ MPa)^[27]。假设最大主应力方向沿着模型的水平方向, 最小主应力方向为面外的

水平方向, 有利于走滑断层的形成, 与实际情况比较相符。Mt. Simon 砂岩层、Argenta 地层、前寒武系基底和断层材料参数(表 3)对储层 CO₂ 封存能力和断层稳定性有重要的影响。

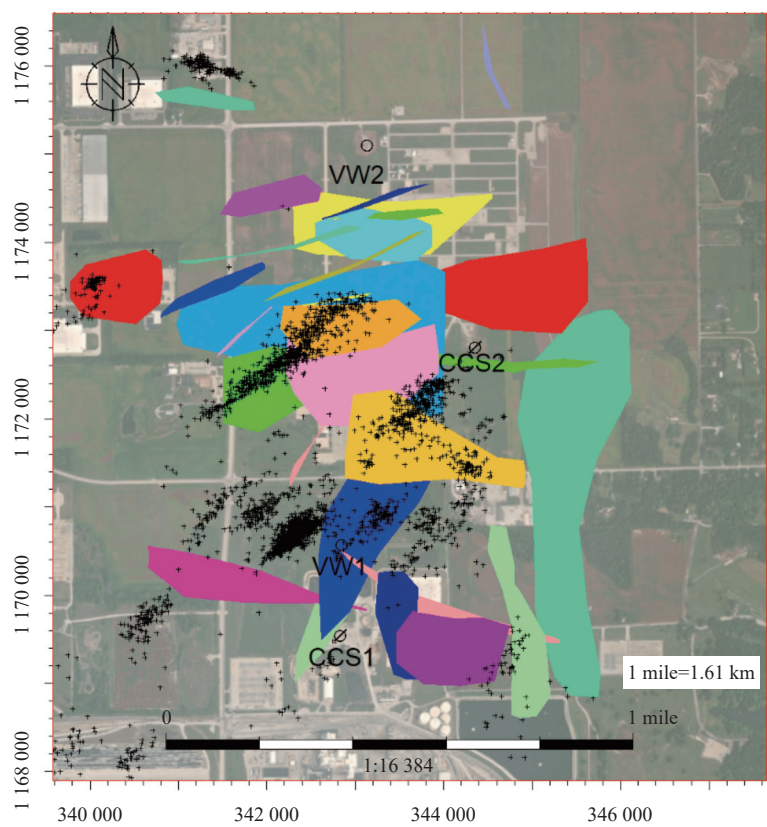
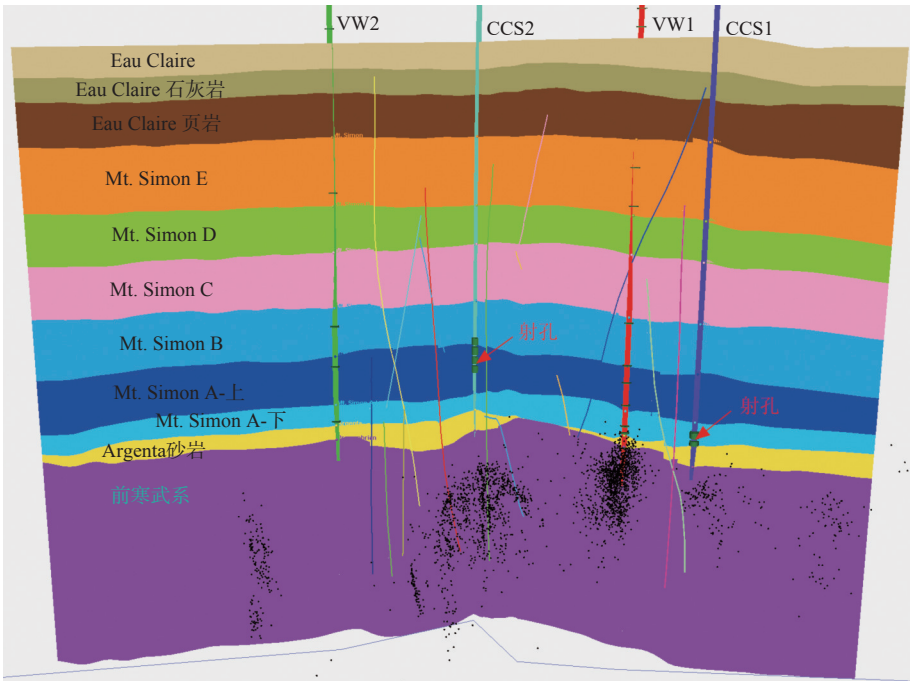


图 7 Decatur 项目断层和微地震事件

Fig.7 Injection-induced microseismic events and interpreted faults of the Decatur project



据文献 [9] 修改

图 8 连井剖面上微地震事件

Fig.8 The cross-well section displaying microseismic events

4.2 区域孔隙压力

Decatur 项目的 CO₂ 注入过程中, 孔隙压力的

变化是影响地层稳定性和断层滑动风险的关键因素。CO₂ 注入到 Mt. Simon 砂岩储层后, 孔隙压力逐渐升高。起初, 压力变化集中在注入点附近, 随

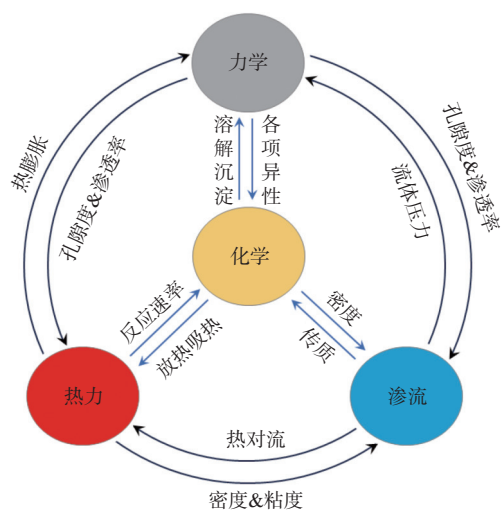


图 9 热-流-固-化多物理场耦合机理

Fig.9 The THMC (thermo-hydro-mechanical-chemical) multi-field coupling

着时间推移和流体在储层中的扩展,压力扩散到更大范围(图 11)。随着 CO₂ 的扩散,离注入点较远的区域孔隙压力会逐渐增加,但比注入点附近区域的压力上升速率要慢。前寒武系基底处的断层分布复杂,CO₂ 注入过程中,压力传递到断层区域,可能诱发微震活动或者断层活化。

4.3 断层库伦破坏应力

库伦破坏应力(Coulomb Failure Stress, CFS)表示断层或裂缝在给定应力状态下的破坏倾向,计算公式如下^[28-30]:

$$CFS = |\tau| + \mu(\sigma_n + p)$$
(1)

式中: τ 为作用在断层面上的切向应力,其正负号与方向无关,通常取绝对值, Pa;

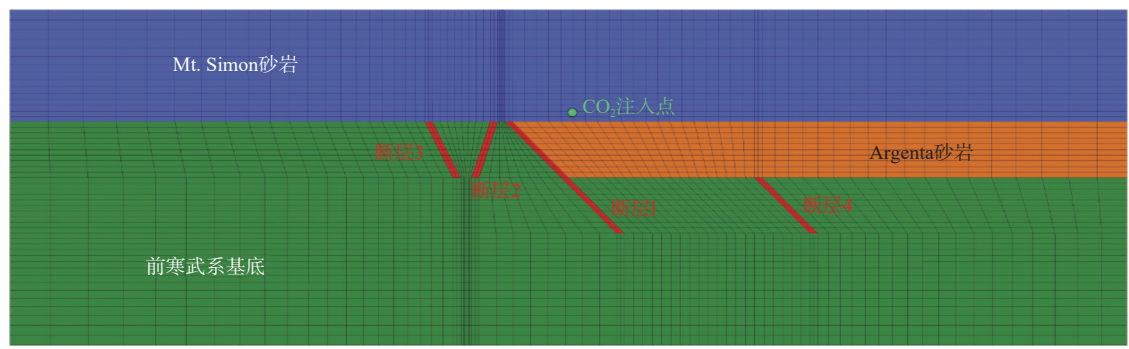


图 10 多物理场耦合简化模型

Fig.10 Simplified simulation model of the THMC coupling

表 3 数值模拟地层材料参数汇总表

Table 3 Summary of material parameters for numerical simulation

材料参数	Mt. Simon砂岩层	Argenta地层	前寒武系基底	断层
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.285	1.65×10^{-3}	1.76×10^{-6}	5.85
孔隙度/%	0.115	0.138	0.005	0.180
体模量/GPa	37.27	43.52	70.2	3.8
剪切模量/GPa	24.2	27.9	45.0	1.2
泊松比	0.23	0.22	0.22	0.22
粘聚力/MPa	25.2	11.2	0.8	2
摩擦角/(°)	47	42	60	31

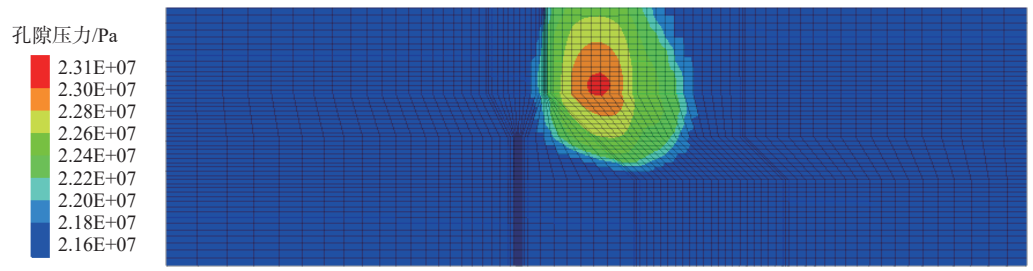


图 11 区域孔隙压力示意图

Fig.11 Regional pore pressure distribution

σ_n 为垂直于断层面的应力,压应力为正值,拉应力为负值, Pa;

μ 为断层面的摩擦系数,无量纲;

p 为孔隙流体压力,流体压力增加为正值, Pa。

断层上的法向应力和切向应力计算公式如下:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (2)$$

$$\tau_a = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \quad (3)$$

式中: σ_x 是x方向的正应力, Pa;

σ_y 是y方向的正应力, Pa;

τ_{xy} 是xy平面的切应力, Pa;

α 是平面的法向与x方向的夹角, (°)。

在 Decatur 项目中,微地震监测显示注入过程中前寒武系基底和断层处出现微震事件。通过 CFS 的计算,可以评估这些断层是否处于临界滑动状态, CO_2 的注入是否可能诱发断层滑动。 CO_2 注入区域孔隙压力增加会降低有效法向应力,进而影响断层稳定性。 Decatur 项目中的断层多为高角度断层,随着 CO_2 注入,孔隙压力增加,可能引发滑移的风险。 CO_2 注入后,断层 1 处的 CFS 值增加,表明断层 1 断层局部进入了滑移的临界状态(图 12)。

通过断层的 CFS 变化趋势,可以识别出最可能发生滑移的断层位置。

将摩尔圆与摩尔-库仑破裂包络线对比,可以判断断层是否处于临界破裂状态。在 Decatur 项目中,尽管 CO_2 的注入对孔隙压力有明显的提升作用,但单纯的 CO_2 注入并不足以完全诱发大规模的微地震活动或者断层 1 滑动(图 13)。通过摩尔圆分析,要想由 CO_2 注入诱发断层破裂,仍需注入 CO_2 (孔隙压力增加 2 MPa),摩尔圆向左移动(法向应力减小),此时莫尔圆接近摩尔-库仑破裂包络线,才可能接近破裂。

Decatur 项目的 CO_2 注入速率约为 100 万 t/a,孔隙压力升高幅度可能为 6~8 MPa(根据项目地质条件推测)。当 Decatur 项目的 CO_2 注入速率约为 125~140 万 t/a 时, CO_2 注入会引发微震活动或者断层活化,导致 ΔCFS 值可能为 0~2 MPa,是引发前寒武系基底微震活动的关键因素,当 ΔCFS 值达到 4.0 MPa 时,断层会进入滑移临界状态。前寒武系基底由坚硬的结晶岩石组成,主要为流纹岩,在历史上经历了多次构造应力的累积。在 CO_2 注入过程中,基底断层和裂隙结构由于孔隙压力增加而

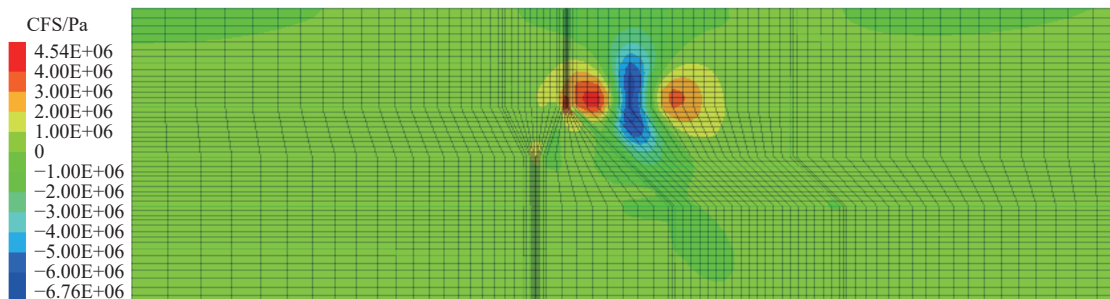


图 12 库伦破裂应力示意图

Fig.12 The stress field and the Coulomb failure

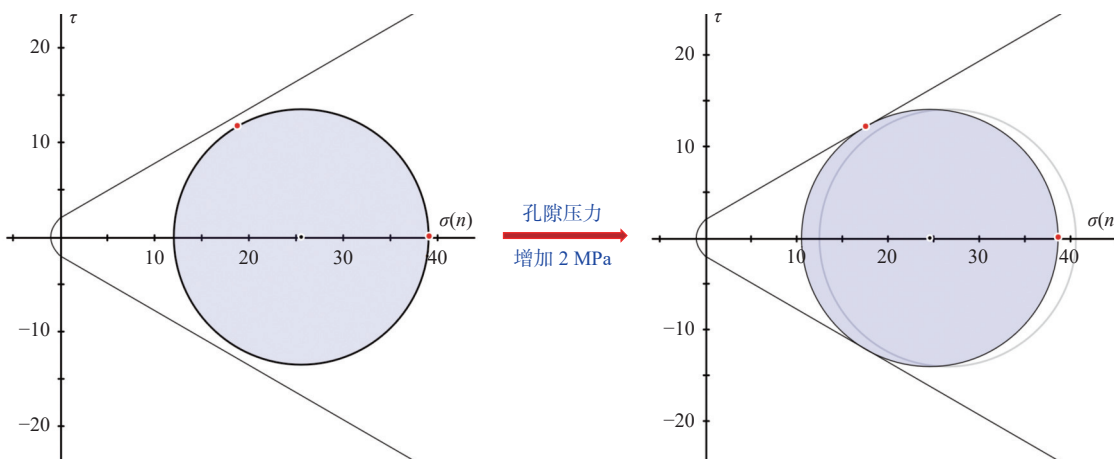


图 13 断层 1 的摩尔库伦图

Fig.13 The Mohr-Coulomb diagram of Fault1

可能释放部分累积的构造应力。Decatur 项目微地震事件的定位显示, 大多数微震事件发生在注入点附近的前寒武系基底中, 这表明压力注入诱发了应力变化, 微地震分布模式与断层和孔隙压力扩散路径密切相关。

5 结论

(1) 在选择碳封存位置时, 地层的厚度和完整性直接影响碳封存项目的安全性和有效性, Decatur 项目的 Argenta 地层没有足够的厚度来抑制压力向基底断层迁移, 导致微地震事件主要发生在前寒武系基底, CCS2 井的射孔位置选在上部地质条件更有利的区域, 以避免注入压力向基底断层活跃区域迁移。

(2) 在 CO₂ 封存前, 必须通过地震勘探、地质测绘和应力测试等手段评估当地的构造应力状态。特别是在有断层分布的区域, CO₂ 封存必须充分考虑地层和断层的构造应力积累, 以避免因流体注入而引起的应力释放, 避免触发断层滑动、微地震或更大的地质活动。

(3) 在 Decatur 项目中, 单纯的 CO₂ 注入并不足以完全诱发大规模的微地震活动。该项目的 CO₂ 每年注入 100 万 t, 孔隙压力升高 6~8 MPa, 当注入量达到 125~140 万 t/a 时, CO₂ 的注入会引发微震活动或者断层活化。

(4) 碳封存选址应确保储层厚度足够且盖层完整, 防止压力迁移至敏感区域, 同时关注断层的初始应力状态, 通过注入速率、孔隙压力和 CFS(库仑破坏应力)分析, 确定临界注入条件并优化注入方案, 以保障碳封存的安全性和长期稳定性。

参考文献:

- [1] 陈建文, 孙晶, 杨长清, 等. 东海陆架盆地新生界咸水层二氧化碳封存地质条件及封存前景 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 14-21.
- [2] 可行, 陈建文, 龚建明, 等. 东海陆架盆地 CO₂ 地质封存适宜性评价 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 1-12.
- [3] 李永臣, 孙晶, 杨长清, 等. 东海陆架盆地新生界咸水层二氧化碳封存地质条件及封存前景 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 14-21.
- [4] 可行, 陈建文, 龚建明, 等. 珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 55-65.
- [5] 李姜辉, 余凤玲, 牛雄伟, 等. 海底碳封存监测技术体系研究及未来发展 [J]. 地球科学进展, 2023, 38(11): 1121-1144.
- [6] 魏晓琛, 李琦, 邢会林, 等. 地下流体注入诱发地震机理及其对 CO₂ 地下封存工程的启示 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1226.
- [7] FINLEY R J. An overview of the Illinois Basin Decatur project[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2014, 4(5): 571-579.
- [8] GOLLAKOTA S, MCDONALD S. Commercial-scale CCS project in Decatur, Illinois-construction status and operational plans for demonstration[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 5986-5993.
- [9] ZALUSLI W, LEE S Y. IBDP final static geological model development and dynamic modelling. CO₂ datashare, 2020 [EB/OL]. [2024-06-12]. <https://co2datashare.org>.
- [10] 马馨蕊, 梁杰, 李清, 等. 咸水层 CO₂ 地质封存研究进展及前景展望 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(10): 1-18.
- [11] 赵改善. 二氧化碳地质封存地球物理监测: 现状、挑战与未来发展 [J]. 石油物探, 2023, 62(2): 194-211.
- [12] GREENBERG S. An assessment of geological sequestration options in the Illinois Basin-Phase II and III[R]. Washington: U. S. Department of Energy, 2020.
- [13] FREIBURG J T, RITZI R W, KEHOE K S. Depositional and diagenetic controls on anomalously high porosity within a deeply buried CO₂ storage reservoir: the Cambrian Mt. Simon sandstone, Illinois Basin, USA[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2016, 55: 42-54.
- [14] WU X W, QIN S Q, XUE L, et al. Physical mechanism of major earthquakes by earthquake cases[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024.

- physics, 2016, 59(10): 3696-3710.
- [15] 秦四清, 徐锡伟, 胡平, 等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 1001-1014.
- QIN S Q, XU T W, HU B, et al. Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics., 2010, 53(4): 1001-1014.
- [16] 惠钢, 陈胜男, 顾斐. 流体-地质力学耦合建模表征水力压裂诱发地震: 以加拿大 Fox Creek 地区为例 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 864-875.
- HUI G, CHEN S N, GU F. Coupled fluid-geomechanics modeling to characterize hydraulic fracturing-induced earthquakes: case study in Fox Creek, Canada[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 864-875.
- [17] RUTQVIST J, RINALDI A P, CAPP A F, et al. Fault activation and induced seismicity in geological carbon storage: lessons learned from recent modeling studies[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8: 789-804.
- [18] ZOBACK M D, GORELICK S M. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(26): 10164-10168.
- [19] MAZZOLDI A, RINALDI A P, BORGIA A, et al. Induced seismicity within geological carbon sequestration projects: maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 10: 434-442.
- [20] VERDON J P. Significance for secure CO₂ storage of earthquakes induced by fluid injection[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064022.
- [21] TARON J, ELSWORTH D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(5): 855-864.
- [22] TARON J, ELSWORTH D, MIN K B. Numerical simulation of thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in deformable, fractured porous media[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(5): 842-854.
- [23] LYU Y, YUAN C, ZHU X, et al. Influence of permeability anisotropy on rock damage and heat transfer in geothermal reservoir[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(13): 1293.
- [24] LYU Y X, YUAN C, ZHU X, et al. THMD analysis of fluid injection-induced fault reactivation and slip in EGS[J]. *Geothermics*, 2022, 99: 102303.
- [25] GAN Q, ELSWORTH D. Analysis of fluid injection-induced fault reactivation and seismic slip in geothermal reservoirs[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(4), 3340-3353.
- [26] GAN Q, LEI, Q. Induced fault reactivation by thermal perturbation in enhanced geothermal systems[J]. *Geothermics*, 2020, 86: 101814.
- [27] BONDARENKO N, PODLADCHIKOV Y, MAKHNENKO R. Hydromechanical impact of basement rock on injection-induced seismicity in Illinois Basin[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 15639.
- [28] KIVI I R, PUJADES E, RUTQVIST J, et al. Cooling-induced reactivation of distant faults during long-term geothermal energy production in hot sedimentary aquifers[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 2065.
- [29] GIUNTOLI F, MENEGON L, SIRON G, et al. Methane-hydrogen-rich fluid migration may trigger seismic failure in subduction zones at forearc depths[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 480.
- [30] URPI L, RINALDI A P, RUTQVIST J, et al. Fault stability perturbation by thermal pressurization and stress transfer around a deep geological repository in a clay formation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 8506-8518.

New understanding of microseismic activity in fault zones for geological carbon storage: a case study of the Decatur project in the United States

LI Yongchen¹, LUO Zijin¹, MA Kedi¹, FANG Xiaoyu^{2,3,4,5*}, TIAN Huafeng⁶, LYU Yanxin², XIN Yi⁷

(1 PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524006, China; 3 Qingdao Key Laboratory of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China; 4 Qingdao Engineering Research Center of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China; 5 Shandong Engineering Research Center of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China; 6 Petroleum Engineering Institute of Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Puyang 457000, China; 7 College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Based on the U.S. Decatur CO₂ storage project, the interrelationships between the formation thickness, tectonic stress state, and microseismic activity induced by CO₂ injection during the carbon storage process were investigated in this study, providing a scientific basis for site selection and safety assessment of carbon storage. By analyzing the characteristics of the reservoir (Mt. Simon Sandstone) and caprock (Argenta Formation) thickness of the Decatur Project, the impact of these factors on pressure diffusion during injection was explored. Combining the distribution of tectonic stress and data accumulated in history, the sensitivity of fault slip in the Precambrian basement was analyzed. The Argenta Formation near the CO₂ injection point is relatively thin or absent, lacking sufficient thickness to prevent pressure migration towards the basement fault, which resulted in microseismic events occurring mostly in the Precambrian basement. After CO₂ injection into the Mt. Simon Sandstone reservoir, the pore pressure initially increased near the injection point, and then diffused over a larger area. Simple CO₂ injection alone was not strong enough to trigger large-scale microseismic activity. The Precambrian basement is more sensitive to the stress release caused by fluid injection due to the tectonic stresses accumulated in history. In the Decatur Project, when the CO₂ injection rate reached 1.25~1.4 million tons per year, fault slip and microseismic activity were induced. The selection of CO₂ storage sites should be evaluated comprehensively based on the strata thickness, tectonic stress state, and the injection-induced mechanism to ensure the safety and long-term stability of the injection.

Key words: CO₂ geological storage; microseismic activity; fault structure; Decatur project; THMC coupling