

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): 1 226-1 241. doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2014. 11. 1226. [Wei Xiaochen, Li Qi, Xing Huilin, et al. Mechanism of underground fluid injection induced seismicity and its implications for CCS projects[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1 226-1 241. doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2014. 11. 1226.]

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*

魏晓琛¹ 李琦^{1*} 邢会林² 李霞颖¹ 宋然然¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. Centre for Geosciences Computing, School of Earth Sciences, The University of Queensland, St. Lucia, QLD 4072, Australia)

摘 要: 二氧化碳地质封存(CO₂ Capture and Storage, CCS)项目应当评估诱发地震的潜在可能性。中强震、强震危及人类生命财产安全,有感地震甚至微震也对 CO₂ 储区的盖层完整性构成威胁,增加泄漏风险。地热开发、页岩气开发及油气增产等的水压致裂过程中都伴随有地下流体的注入,且时有地震诱发的案例。诱发地震活动通常在流体注入压力较高时沿已有断层发生,因此可通过应力分析等对其发生机理进行研究。超临界状态 CO₂ 密度比水小,在地层深部可能会形成密度流或者与构造中先存的水岩发生相互作用,进而导致渗透率和压力变化并引发地震活动。综述了全球相关的研究进展,主要从地震成因机理入手,考虑超临界 CO₂ 性质的特殊性,结合商业尺度和实验尺度的流体注入项目和地震监测分析,研究其对储区盖层完整性的影响。以期通过适当的选址、注入方法及监测方案的优化来避免破坏性地震的发生。

关 键 词: 地下注水; CCS; 超临界 CO₂; 诱发地震; 盖层完整性

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2014)11-1226-16

1 引 言

在当下全球环境问题中,控制 CO₂ 的排放是世界各国制定环境经济政策的重要目标和导向,共同推进温室气体减排已成为全球性共识^[1]。1970—2004 年 CO₂ 的排放呈逐年上升趋势,占 2004 年总排量的 76%。据国际能源署(The International Energy Agency, IEA)预测,2010 年全球 CO₂ 排放总量达到创纪录的 300.6 亿 t,我国的 CO₂ 排放增速一直居世界前列^[2]。为应对全球气候变化,我国向全世

界承诺,到 2020 年单位 GDP 的 CO₂ 排放强度要比 2005 年下降 40%~45%^[3]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)于 2005 年特别推荐了碳捕集和封存技术(CO₂ Capture and Storage, CCS),以期实现温室气体大幅减排。2007 年世界自然基金会(World Wide Fund for Nature, WWF)明确将 CCS 作为应对全球气候变化的 6 种途径之一。2010 年的坎昆全球气候大会将 CCS 纳入清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM);美国、加拿大、欧盟等已将 CCS 作为未来能源战略和碳减排战略的重要组

* 收稿日期:2014-05-30;修回日期:2014-09-15。

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目“酸气—咸水作用下岩石特异性破坏机理研究”(编号:41274111);国土资源部公益性行业科研专项项目“井筒安全注入压力的确定及盖层力学稳定性评价方法研究”(编号:201211063-4-1)资助。

作者简介:魏晓琛(1987-)男,河南驻马店人,博士研究生,主要从事地下流体注入诱发地震研究。E-mail: achencumt@163.com

* 通讯作者:李琦(1972-)男,山东青州人,研究员,主要从事酸气回注、CO₂ 地质封存与利用研究。E-mail:qli@whrsm.ac.cn

成部分,制定了相应的技术研究规划并开展了相应的研发和项目示范^[4]。中国若要实现控制温室气体排放的目标,现有的和前瞻性低碳技术的部署与应用至关重要,因此合理规划技术路线图,包括明确重要技术领域识别关键技术、发展路径探索以及技术创新的政策保障都是成就中国特色低碳之路的重要保障^[5]。随着深部注入流体有关产业,如油气生产、地热开发、工业废液回注、页岩气开发以及 CO₂ 封存等项目的增多,与之有关的注水诱发地震数量亦呈增加趋势。商业化 CCS 项目需要往深部地下储层注入巨量的 CO₂ 流体,一般大于 1 Mt/a。本文的目的是通过回顾以往发生的流体注入诱发地震案例,包括其选址、注入方法及监测方案,并考虑超临界状态 CO₂ 的特殊性,探讨地下流体注入诱发地震机理及降低 CCS 诱发地震的风险和实践方法。

2 诱发地震概述

地震是地球上主要的自然灾害之一,主要包括构造地震、火山地震及诱发地震等。构造地震多发生于板块边界以及板块内主断层附近^[6]。Zoback 等^[6]认为地震的发生预示着在现今构造应力场中,地壳中的原有断层都具有潜在活性化可能。在这些条件下,影响断层稳定性的微小扰动,如流体的注入和抽取,都存在诱发地震的可能性^[7~9]。理解地震诱发的原因及其破坏性影响,是地震学研究的重点。1962 年美国丹佛地震首次将地震活动与深井流体注入联系起来,自此流体注入诱发地震成为世界范围内的新课题^[10]。在开展 CCS 项目之前需要注意,注入诱发的微震虽无法察觉,未曾破坏基础设施或者威胁人类生命安全,但往往有可能诱发较大的地震。地震活动会对注入系统产生影响,地震产生的断裂不仅危及注入井的套管,甚至会穿透上覆盖层,对盖层完整性形成威胁,增大 CO₂ 泄漏的风险,并且会导致项目被迫停止、失去投资者支持、甚至引发公众反对等一系列负面影响^[11]。然而,在对注入诱震机理深刻理解的基础上,通过适当的选址和地质调查,地震诱发的风险可以人为大大降低。故流体注入诱震机理及其影响是 CCS 面临的关键科学问题之一。

3 诱发地震的相关问题

3.1 地震震级简介

划分震源放出的能量大小的等级简称震级,震级是通过仪器给出地震大小的一种量度。地震震级

划分比较通用的震级是 Ms 震级,即统一震级,可直接用 M 表示。

将 <1 级的地震称为超微震; ≥1 级, <3 级的称为弱震或微震; ≥3 级, <4.5 级的称为有感地震; ≥4.5 级, <6 级的称为中强震; ≥6 级, <7 级的称为强震,巨大地震; ≥7 级, <8 级的称为大地震,巨大地震; 8 级以及 8 级以上的称为巨大地震^[12]。

3.2 诱发地震机理

据以往文献,应力场变化、孔隙水压力变化、岩石体积变化以及受力或荷载等因素都可能诱发地震活动,这 3 类诱震因素都可能由人为引起^[13],储区流体的注入和抽取都会引起孔隙水压力变化,进而引起有效应力变化,随时间变化导致断层破坏引发地震,图 1 为流体注入诱发地震活动过程的概念模型^[14]。

Nicholson 等^[15]在 1988 年发现,深井注入常在不稳定的区域诱发地震活动。在这些地区常存在已有断层,在保持压差恒定时,注入压力抵消了一部分围压和轴向压力,使断层盘之间的摩擦力减小,导致断裂破坏或已有断层活化(图 2)。

可以将诱震机理分为以下 3 类,每种机理对应一种地震诱发模式,用莫尔圆表示致裂的力学过程^[16]。

I 型:有效应力减小。流体注入水压致裂引发断层错动,此类地震多小于 3 级(图 3a)。

II 型:储区流体减少导致孔隙水压力降低。储区流体抽出引发地层结构扰动,多孔弹性机制次扰动从储区传导至围岩和盖层,此类地震多小于 5 级。

III 型:上地壳卸载导致地壳变动。大规模油气开采中产生的大于 6 级的破坏性地震多属于此类型(图 3b)。

在 CCS 项目中所诱发的地震多属于 I 型,应力变化导致的失稳是弹塑性变形的二阶过程。Hubbert 等^[17]指出断层中孔隙水压力的增加会降低有效岩石强度,引发断层破坏。Healy^[18]指出工业废水注入深井后,流体压力是地震的触发因素。构造中剪应力小于岩石接触强度时,断层将保持闭锁,而人类活动导致的已有断层活化和新断层断裂的形成都会诱发地震。断层破坏条件通常依照临界剪应力 (τ_{crit}) 公式:

$$\tau_{crit} = \mu(\sigma_n - P) + \tau_o \quad (1)$$

由公式(1)可知,降低正应力 σ_n 以及提高孔隙水压 P 都能造成断层破坏,形成地震核^[19]。考虑到力场的因素,水力压裂可能会在孔隙水压达到最小

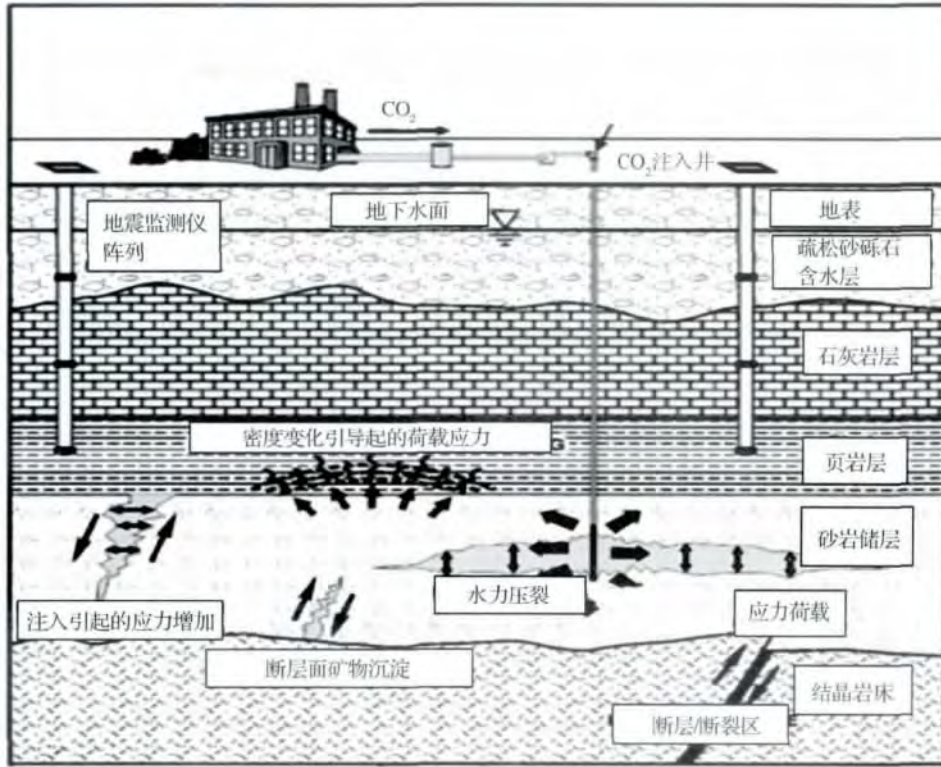


图 1 流体注入诱发地震活动过程概念模型^[11]

Fig. 1 Conceptual model of the fluid injection induced seismicity process^[11]

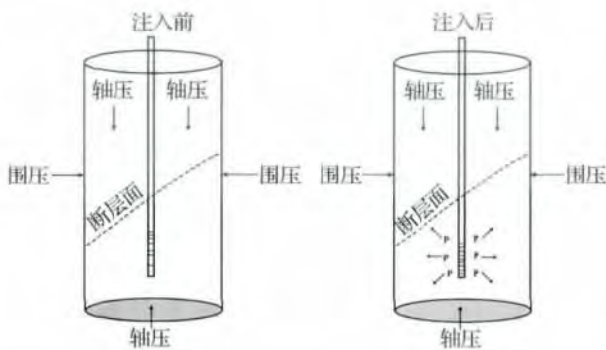


图 2 注入压力对围压和轴向压力的影响^[13]

Fig. 2 Effects of injection pressure on the confining pressure and axial pressure^[13]

主应力之前发生。由于脆性地壳中构造剪应力随深应度增加而增大,注入区与断裂的水力联系也与诱发地震息息相关^[20]。另外,断层规模越大,由其产生的地震也往往越强烈。地震诱发的过程可大致分为以下 3 个步骤:

- (1) 注入井围岩内部断层中孔隙水压力上升^[13]。
- (2) 沿旧断层的有效正应力减小,摩擦系数减

小引发断层滑动,进而导致已有断层活化^[12]。

(3) 流体注入使应力大于岩石强度,使其失去完整性,水压致裂形成新的断层和断裂诱发地震活动^[21]。

以往对 I 型诱震的研究中,把孔隙水压力的增加作为首要因素,失稳模型可大致分为 2 种:地表水库蓄水诱震和流体注入诱震^[22],其中后者的研究多基于摩尔—库伦破坏准则。但是该准则无法解释美国科罗拉多州丹佛注水井 5 km 外在开始注入 1~2 年间发生的数次大于 5 级的地震,为此, Hsieh 等^[23]提出应力通过流体压力传播到先存应力接近破坏临界值的区域,这种应力转移可能是大地震的诱因。俄亥俄州一个距注水井 5~10 km 的地震事件表明,在构造应力接近破坏临界值的地区,数兆帕的流体压力变化都可能引发 3~4 级的地震^[15]。在特定的注入流体体积和压力下,若一定规模的先存断层具备合适的流体力学特征,可能形成数千米应力连接区域,正如丹佛和俄亥俄州案例所示,诱发地震分析测得的原位应力方向和原位推测区域方向具备良好的相关性^[24]。这些地震活动主要来源于先存断层的活化,而由于水压致裂引起的小型新断裂对诱

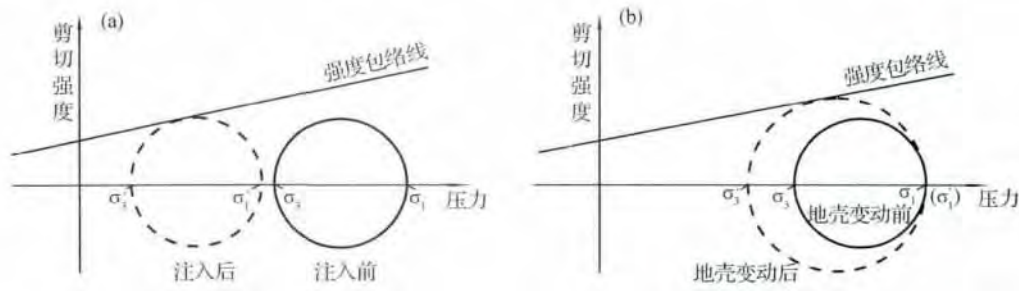


图 3 致裂的力学过程的莫尔圆表示

Fig.3 Mechanics of the fracturing processes expressed by Mohr circles

(a) 莫尔圆表示流体注入导致有效应力减小; (b) 莫尔圆表示致裂的力学过程

(a) Mohr circle represents the fluid injection resulted in effective stress reduction; (b) Mohr circle represents the fracturing process

发地震无显著影响。

3.3 流体注入和地震之间的联系

深井流体注入和地震活动在很多方面有相互联系^[25,26]。最明显的注—震联系是注入活动开始后地震频次的增加,在注入影响半径区域内地震活动的震级可能由于注入影响增大或减小,如在注入活动开始后常伴随一系列的微震,通过对比地震频次—震级变化图可得出其变化趋势^[27]。另外,震源深度也会由于注入活动发生改变,虽然注入可能会在地下数千米处诱发地震活动,但是其诱发的主要地震活动的震源多处于注入区上部,多为浅源地震。

注入井的注入压力及注入量对研究地震事件具有重要意义,地震活动的频率通常与历史注入压力及注入量有关^[28]。在时间分布上,由于压力波传播的延迟性,其触发的相邻 2 次地震事件可能相隔数年之久,另外,注入压力改变也可能会诱发地震^[29]。

触发断层活化的临界压力也是注—震关系的重要研究对象,已知地层应力和负载压力的情况下,摩尔—库伦破坏准则可以用来确定是否满足新断裂形成的条件。但此方法的准确度远不如监测仪器直接测得的数值^[30]。Davis 等^[31]在对 Cogdell 油田 1974—1982 年间诱发地震活动的研究中发现,地下数千米处注入压力已高于计算诱震临界注入压力,但在该点并无地震发生。因此,在实践中界定临界压力要根据场地的具体情况,将数值计算和仪器监测结合使用。

3.4 地震监测、地质勘查和物理模型

地震监测是商业规模 CCS 项目的重要组成部分。国际经验表明,针对每个监测场地的特殊性,如其所处位置、CO₂ 注入总量、注入目的、地质条件、技术要求以及微震数据的预期用途等具体情况而设计

其监测方案^[32]。另外,诱发地震可追踪储区压力的时空变化,由此定位 CO₂ 前缘的位置,尤其对于缺乏监测井和 4D 地震反射数据来定位羽流的地区,微地震监测(或被动地震监测)技术具有重要价值。

微地震监测中地震仪阵列的设计取决于以下因素:监测最低震级下限、定位精确度、储区深度、背景地震活动水平、与环境噪声源的距离以及地理位置和设备的限制^[33]。表 1 详列了 CCS 场地诱震监测所采集的参数和技术要求。

断层或裂缝勘察的主要方法归纳如下:

2D/3D 地震监测; 钻探中钻芯样品采集; 井下井径测井探测断层; 井下电阻率测井探测裂缝和岩

表 1 CCS 诱震监测采集参数和技术要求^[33]

Table 1 CCS induced seismicity monitoring acquisition parameters and technical requirements^[33]

采集参数	技术要求
储区深度 0.8 ~ 3 km	安装地震仪阵列靠近储区以减少对信号衰减效应,提供最佳的定位精度
震级 ≥ M1	安装 3 组及以上地震仪阵列连续监测,允许对小于 M1 的地震后期处理
绝对定位精度 ≤ ± 50 m	安装 3 组及以上地震仪阵列以提供最佳的定位精度,储区监测数据对精定位分析提供支持。定位精度受信号频率和采样率影响,采样率 ≤ 0.5 ms
实时监控和数据 分析	实时监控各个井下传感器的数据并返回到一个集中监控单元。实时分析需校准特定储层的位置参数,要求传感器的数量 > 10 和背景的低人为噪声水平频率 > 20 Hz
地面运动峰值加 速度测量	井下约 100 m 深处合理范围内安装 3 组感应器
基准地震记录	在 50 ~ 201 m 的深度上布置一个子传感器阵列面,包括 3 组组件,每组至少 4 个传感器,以监测储区周边 > M1 的背景地震活动

性变化; 井下自然电位记录; 井下伽马测井探测地层变化; 井下密度测井; 对地层样本压缩测试, 以确定岩石强度; 对地层岩土样本测试(孔隙度, 密度, 渗透性); 注入流体与地层单元和隔水层的兼容性测试; 示踪剂法。

此外 物理模型是评估深井灌注触发地震潜能的重要工具。对于地震活动 建模^[34]可以用来预测地震敏感

区是否会达到临界压力以及何时达到临界压力^[35]。

4 注入诱发地震案例简述

目前记录在案的诱发地震活动的案例包括油气增产(EOR)、地热开发(EGS)、工业废液中回注以及 CCS 等^[21] 图 4 标示出本文涉及地下流体注入诱发地震活动的案例。

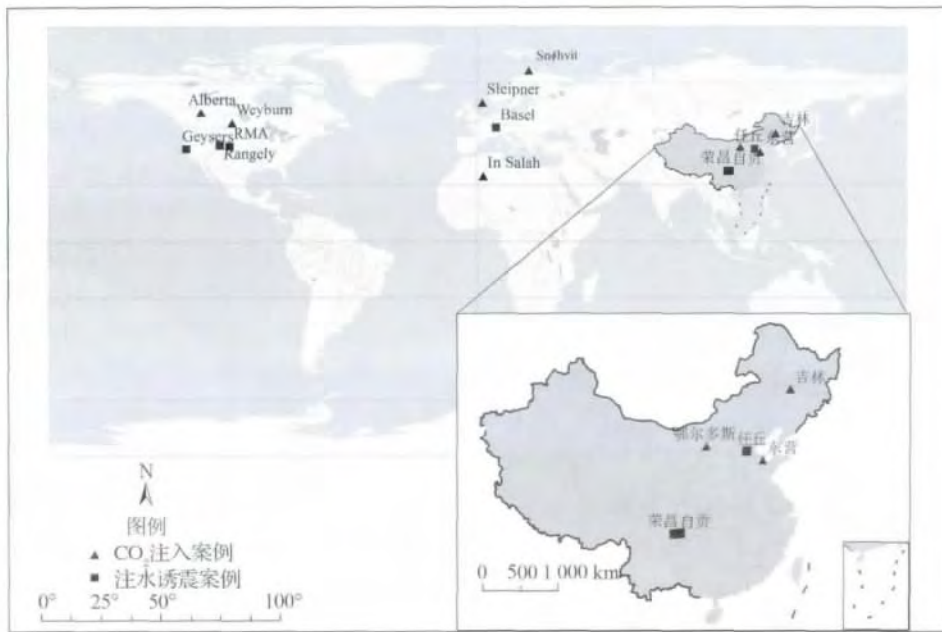


图 4 本文涉及主要地下流体注入诱发地震案例及全球主要 CO₂ 注入案例

Fig. 4 The main injection induced seismicity cases and CO₂ injection sites mentioned in this paper

4.1 注水诱震案例

4.1.1 RMA 废液中回注案例

落基山兵工厂(Rocky Mountain Arsenal, RMA)位于美国科罗拉多州丹佛市东北,其废液深井注入起始于1961年,井深3600m。1965年之后废液注入率由750万L/月上升至1700万L/月,期间最大注入率为478L/min^[14]。1966年由于引发附近地震,废液注入停止。注入开始数月后监测站开始监测到地震活动,注入结束前4级及以上地震发生次数超过13次。

落基山兵工厂是第一批流体注入体积、压力与诱发地震表现出明确关系的案例之一。Hsieh等^[34]建立模型评估丹佛地震,模拟地震发生断裂带上的临界压力水平,指出地震可以通过监测注入压力和微震活动加以控制。图5展示了流体注入体积、地震数和流体注入压力间的关系^[18],表明大震的延迟期会反映应力随水压力传播沿注入区的已有断层转

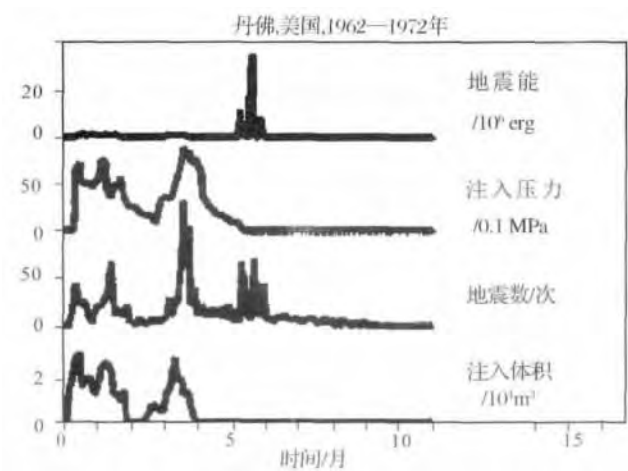


图 5 RMA 流体注入体积、地震数和流体注入压力间的关系
Fig. 5 Relationships among fluid injection volume, accumulated number of earthquakes and fluid injection pressure in RMA

移。因此,落基山兵工厂诱震表明已有断层孔隙水压力扩散会诱发注水井数千米外的地震活动,其延迟期长达数月甚至数年^[10]。

4.1.2 Rangely 油井注水诱震实验

美国地质调查局于 1976 年在科罗拉多州 Rangely 油井现场附近开展注入率—储区压力—诱发地震关系研究,分析控制地震发生的机理^[36]。

Rangely 油气田位于美国科罗拉多州 Rangely 背斜,自 1945 年投产以来,98% 以上的油气主要产自宾夕法尼亚系和二叠系韦伯砂岩,此段砂岩埋深 1 700 m,厚度 350 m 左右^[37]。位于油气产区的细粒砂岩平均孔隙度和平均渗透率分别为 12% 和 1 mD,由于低渗透率及低储层压力,自油气生产开始生产率迅速下降。为解决此问题,油气田自 1957 年开始进行地下注水以达到增产目的,至 1986 年转为注入 CO₂。1962 年 11 月至 1970 年 1 月,犹他州盆地天文台记录了油气田及其周边地区由于注水引发的微震^[38]。依照 1966 年废液经高压注入地下诱发地震的模式,美国地质调查局为 Rangely 设计了一套试验方法以研究控制地震产生的可能性,于 1967 年利用 4 台地震仪组成的可移动台网,监测注水区地下断层的地震活动性。1969 年开始注入率—储区压力—诱发地震之间的关系实验研究,安装了一套由 14 台地震仪组成的新台网来记录地震活动。该实验首先提高注水率,注入压力均升高到临界水平,记录的地震事件由此增加,地震发生的频率降低后的初始压力下降。随后提高附近断层的抽水率,地震频次呈下降趋势。Rangely 实验不仅显示注水诱震受人控制,并且表明注水量和地震事件数呈正相关关系。

4.1.3 Geysers 地热田诱震案例

Geysers 地震诱发区位于北美加利福尼亚板块活动带上,自 1975 年就开始作为蒸汽主导的地热系统被广泛研究。Oppenheimer^[39]认为注入场地构造背景为伸展型,储区经几十年开采后收缩引起区域应力场变化。需要注意的是,虽然此区域靠近北加利福尼亚走滑断层,但是在 Geysers 流体注入场地并没有发现近 1 万年内的活动断层。

Geysers 地下注入项目已经开展多年。第一次开始于 1997 年, Lake County 产生的废水和湖泊水处理后经 46.4 km 长的管道以约 2 200 万 L/d 的速度注入地下。第二次开始于 2003 年, Santa Rosa 处理后的废水通过 64 km 的管道到达 Geysers,随即以 3 000 万 L/d 的速度注入地下。

地震监测网在全场地布置,来监测流体注入对整个区域的影响,每年测得的 1.5 级以上的地震事件有近 1 000 次,每年均有 1~2 次 4 级以上的地震。另外,前期数据表明在商业生产活动前 10 年之前并无地震发生。自地热开发活动开展后,地震活动多发生于生产区域中部或上部(图 6)^[40],储区蒸汽产量先增后逐渐下降,地震频次与注水率呈正相关关系。地震的产生包含多种诱发机制,包括由于净流体损失以及应力变化引起的孔隙水压力变化、冷缩及体积变化等。

许多学者对 Geysers 热气抽取和注水量与诱震的关系进行研究,观察得到每年的注水体积和地震频次呈近似的正相关关系。其主要机制包括:①在稳定的注入条件下,孔隙水压力的微小波动会引发地震活动;②浅层地震更易受抽水活动影响,从抽水到地震活动发生的延迟期取决于断层间孔隙水压力的扩散率^[41];③深部地震活动可以解释为残存孔隙水蒸发冷凝引起的热弹性应力与诸如水的对流冷却的热应力共同作用的结果。近年来,在 Geysers 地热高温区形成一个环形低密度地震活动区,这暗示着该地区的注水量已经达到最大值^[42]。由于诱震机制的多样性,以及压力、温度、注入流体的相态变化,目前对 Geysers 地震活动诱发原因仍未形成一致结论。

4.1.4 瑞士 Basel 深热矿井诱震案例

Basel 深热采矿项目位置在瑞士巴塞爾市的中间,而巴塞爾本身位于瑞士历史上规模最大,最具破坏性的地震相关的高应力区域,在 1356 年巴塞爾市曾遭 6.5 级以上的地震^[43]。自 2000 年开始, Basel 矿区开始自 GPK-2 孔的裸眼井段(深 4 431~5 084 m)注水,注水总体积约 23 000 m³,注水量设计为 30, 40, 50 L/s,各 7 天,但注入 7 天后监测到 2.4 级地震,其注水率和地震频次数据如图 7 所示^[44]。经过注入井所在地层强度后, Basel 于 2006 年 12 月 2 日再次开展大规模注入,注水总量为 11 566 m³。最大井口压力达到 29.6 MPa,注入率上升到最高的 62.5 L/s。12 月 8 日在注水井附近发生 3.4 级地震。该注水井附近的最高地震动速度峰值(Peak Ground Velocity, PGV)为 9.3 mm/s,其最低值为 5 mm/s,也超过其他 3 个监测站^[45]。注水井附近的最高地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)值为 0.05 g,通常 PGA 超过 0.2 g 可视为正常,但不是破坏发生的充分条件^[46]。

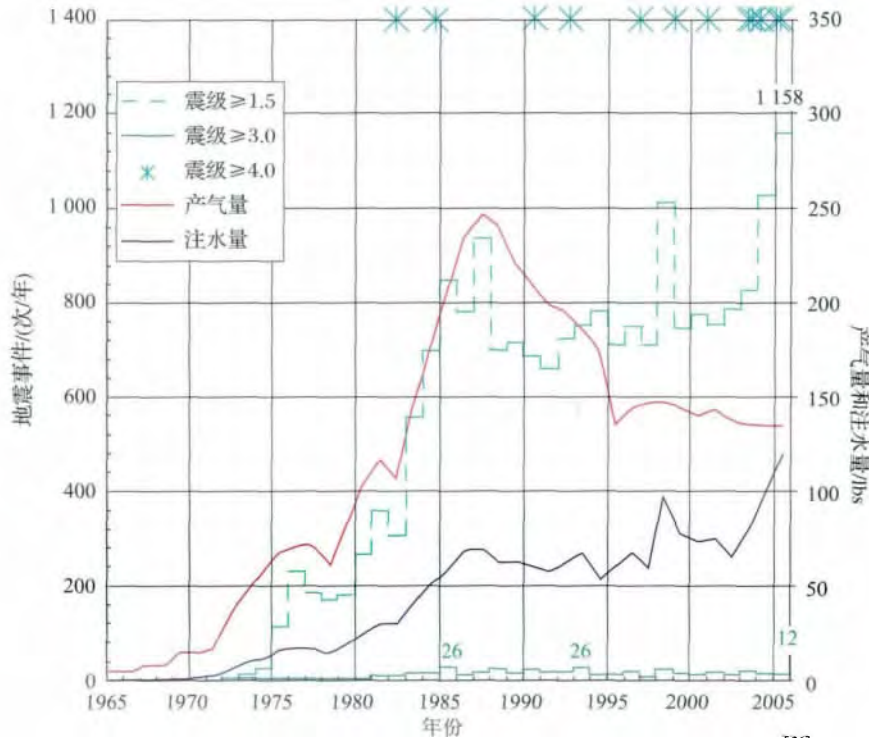


图 6 1965—2006 年 Geyers 年均注水量、产气量和地震活动数关系图^[36]

Fig. 6 Relationship between annual water injection/production volume and seismic activity from 1965 to 2006 in Geyers^[36]

红线表示产气量，蓝线表示注水量，绿色虚线表示 1.5 ~ 3.0 级地震，绿色实线表示 3.0 ~ 4.0 级地震发生数，绿色星号表示 4 级以上地震发生

The red line indicates gas production, while blue line indicates water injection, green dashed line, solid line and asterisk indicates occurred earthquake magnitude range M 1.5 ~ 3.0, M 3.0 ~ 4.0 and larger than M4, respectively

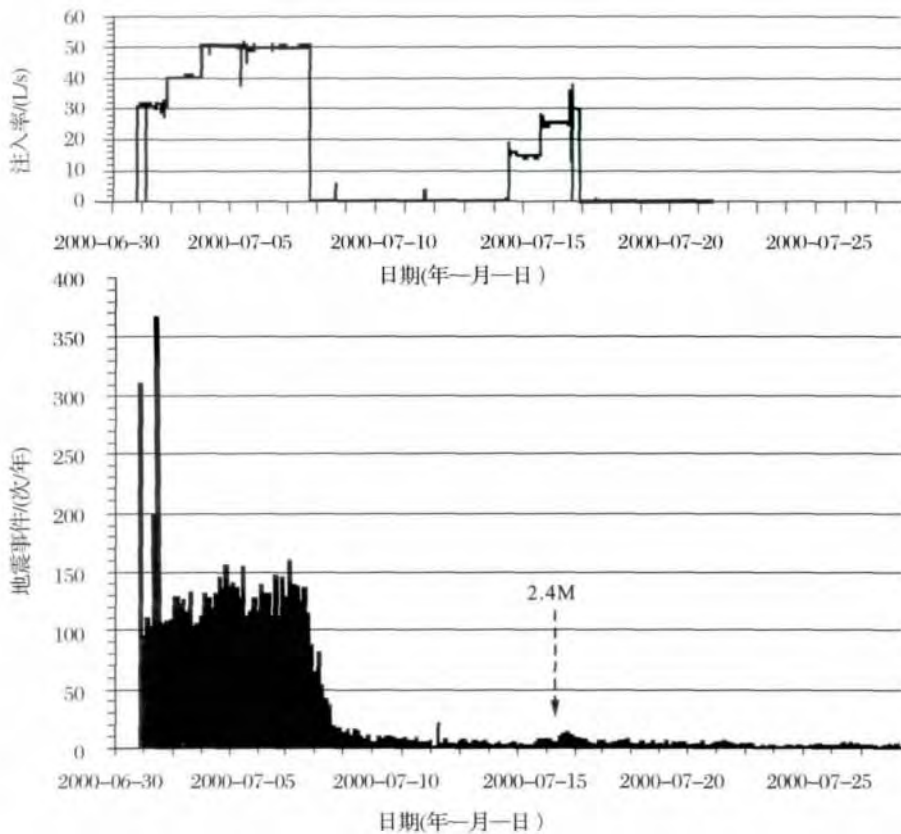


图 7 Basel 2000 年 6 ~ 7 月间注水率和地震频次数据^[44]

Fig. 7 Monthly water injection rate and seismic rate between June to July in Basel, 2000^[44]

4.1.5 中国重庆荣昌气田注水诱震案例

荣昌位于四川盆地东侧弱地震活动区,荣昌气田内自 1980 年以来的地震活动统计分析显示,从 1988 年 7 月开始陆续地对该场地 2 600 ~ 2 900 m 的深度注入废水,截至 2006 年年底注水期间同时观测到了超过 32 000 次地震。其中包括 2 次 5.0 级以上的地震,14 次 4.0 级以上的地震及超过 100 次 3.0 级以上的地震^[47]。2001 年 4.9 级地震后,该地震活动水平一直很低。虽然自 1970s 开始有天然气开采,但是直至 1989 年该地区都没有明显的地震活动报告。然而注水操作开始后不久,在 1977—1988 年该地区发生了几次震级为 3.0 ~ 4.0 级的地震,但没有呈现破坏性地震的历史记录^[48]。

水由 2 个恒定速率的注水泵以 683 L/min 的速率注入井中,最大值为 2.1 ~ 2.9 MPa,第一次注水开始于 1988 年 7 月,1988 年的月平均注水量约为 2 000 m³。1900 年增加到约 10 000 m³。在随后的几年月平均注水量在 6 000 ~ 15 000 m³ 之间变化,平均值为 10 000 m³。主注水井 200 m² 的范围内有 18 个地震台,最近的荣昌台站于 1990 年安装完成,此时人们已经认识到荣昌地区频繁的地震活动与深井注水活动相关连。从 1997 年起注水率持续减少,到 2001 年注水完全停止。如图 8 所示,月地震发生次数与月注水量明显呈正相关关系^[47]。

4.1.6 中国自贡气田注水诱震案例

该区位于四川盆地南部,属典型川东南丘陵地貌,其西侧紧邻云贵高原,南端有 NE-SW 走向的华蓥山断裂带穿过。区内有若干中型断裂分布,如具有第四纪活性的长山镇断裂,具有中晚新世活性的墨林场断裂和自贡断裂^[49]。从历史资料上看,该区属于地震少发区弱震区,偶有中强震记录,到目前为止最大的地震为 1896 年的 5.8 级地震。

自贡气田注水从 2006 年开始作业,每天注水量为 200 ~ 300 m³,注水井深度约 2 500 m;2008 年 8 月后注水流量增加至 300 ~ 500 m³/d,高峰时超过 600 m³/d,此时在该地激发了一小丛地震,包括有台网记录以来的最大地震为 4.8 级;从 2009 年开始由于矿井被注满,当地采取了加压注水的工作方式,注水压力约为 3 MPa,研究区域内发生了大量中小地震,频度为历史之最^[50]。在图 9 中,从注水流量、注水压力与地震活动的相关性可以看出,2008 年 8 月以来自贡地区中小地震频发与当地矿井注水似乎存在一定的关联。累积地震事件与累积注水量的相关性曲线显示,地震活动性随注水量增加显著上升^[51]。

4.1.7 任丘油田注水诱发地震案例

任丘油田位于河北平原中部,所处构造位于冀中拗陷、任西大断裂东侧,呈北东—南西向条带状分布,是我国最大的古潜山碳酸盐油藏。1975 年 9

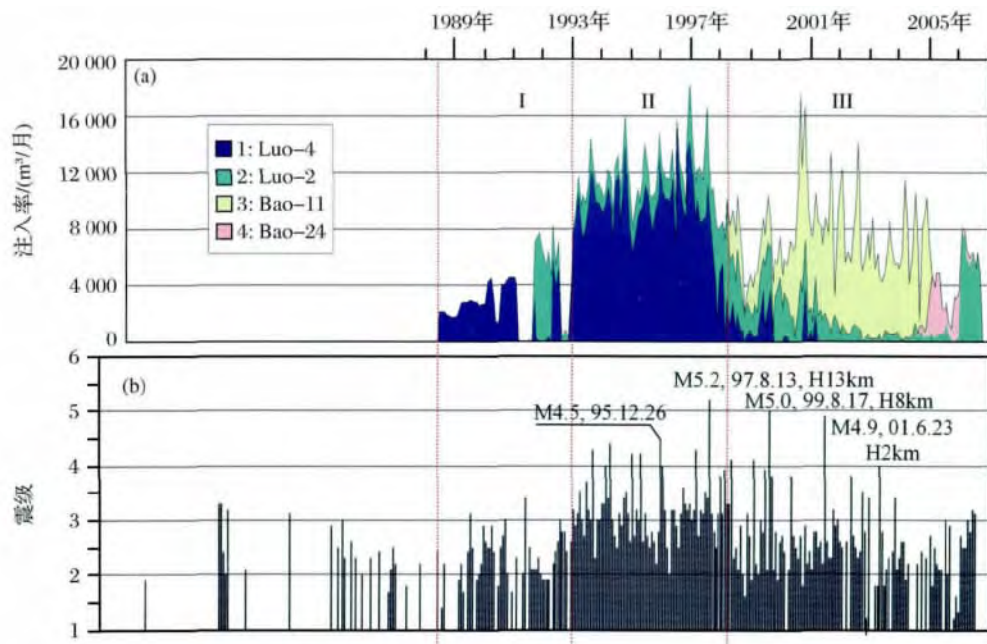


图 8 荣昌气田月地震发生次数与月注水量相关性^[47]

Fig. 8 Relevance of monthly water injection and earthquake frequency in Rongchang gas field^[47]

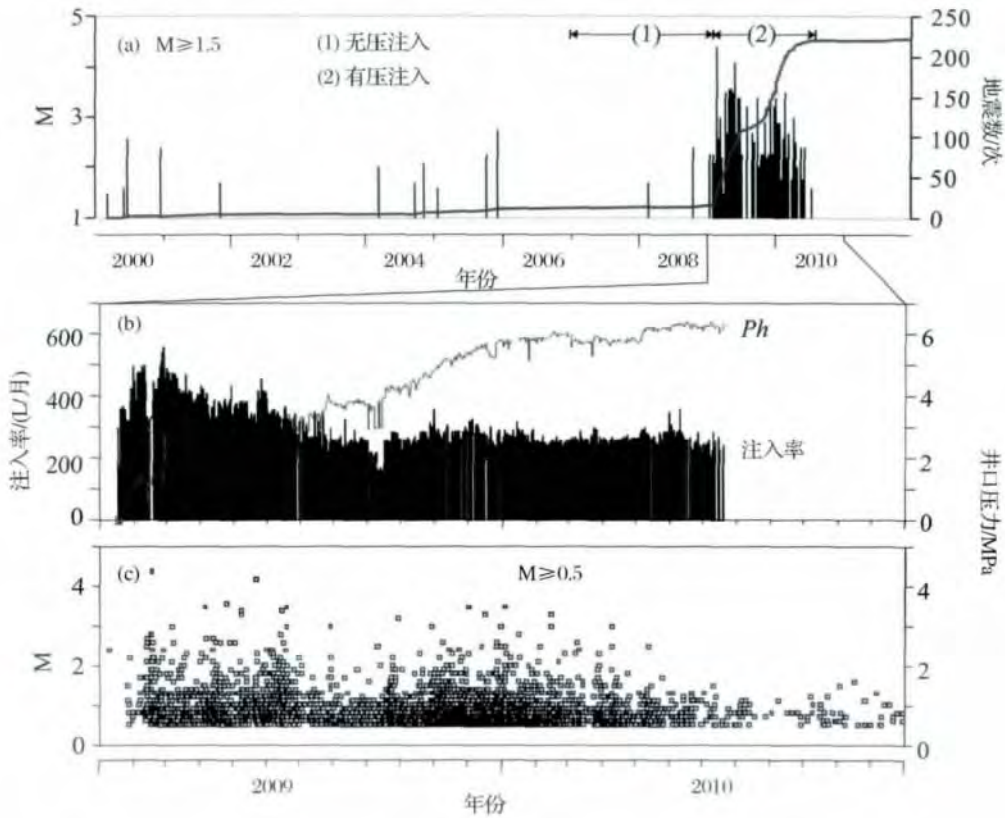


图 9 注水流量注水压力与地震活动的相关性^[51]

Fig. 9 Correlation between injection pressure and seismic activity^[51]

(a) 2000—2010 年地震活动; (b) ~ (c) 2008—2010 年注入率和地震活动

(a) Seismic activity from 2000 to 2010; (b) ~ (c) Annual injection rate and seismic activity from 2008 to 2010

月试采,1976 年 12 月开始对奥陶系油藏注水,1977 年 10 月以后月注水量超过 100 万 m³,1980 年 1~5 月注水量最大,月注水量平均在 150 万 m³左右,1981—1983 年注水量开始减少,月注入量由 110 万 m³减少至 100 万 m³左右^[52]。

注水驱油方式引起了油田内部频繁的地震活动,仅 1980 年前后的 3 年中,在油区内发生了 2 级以上地震近 20 次,地震强度及注入率如图 10 所示^[53]。这些地震基本上沿着油田开发区活动,而任丘地区在油田未投入开发前几十年都没有发生过地震,因此我们通过各种数据找出了油田地震活动的一些特征如:发震事件与注水量增加时间关系密切,地震分布在油田区内特定地段,震源浅、烈度高、影响范围小,油田区内不同地点的地震活动大体集中在某一时段内同时发生、同步活动等^[53]。

4.2 CO₂ 注入案例

根据地质封存区域的差异,CO₂ 注入储层可以分为枯竭油气层封存、煤层封存和地下咸水层封存,

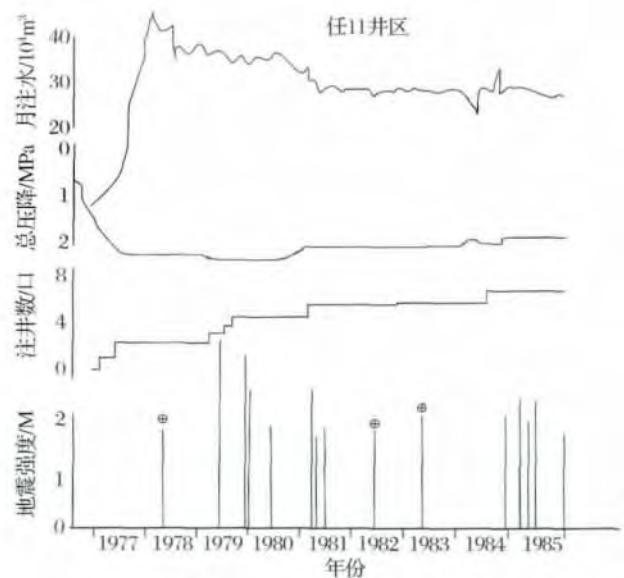


图 10 任丘油田 11 井区注水和地震的关系^[53]

Fig. 10 The relationship between water injection and seismicity in Renqiu 11 well area^[53]

其中地下咸水层封存在全球范围内具有最大的封存潜力^[54]。根据其目的、注入率和注入周期的不同可以将 CCS 项目分为 3 种尺度: 实验尺度、示范尺度和商业尺度。其中实验尺度 CCS 目的是探索以及测试注入和监测技术, 注入率一般大约为 10 kt/a, 注入周期为数周到数年; 示范尺度 CCS 的目的主要是验证在商业尺度下注入系统的安全性, 注入率约为 1 Mt/a, 注入周期 1 年以上; 商业尺度 CCS 的目的在于减少温室气体的排放, 注入率大于 1 Mt/a, 注入周期大于 10 年^[55]。第一个商业规模的 CO₂ 咸水层封存项目于 20 世纪 90 年代在加拿大 Alberta 盆地开展, 油气田中与天然气伴生的 H₂S 与 CO₂ 一起注入深部咸水层^[56]。1996 年为了避免支付庞大的碳税, 挪威国家石油公司将天然气中脱除的 CO₂ 注入挪威 Sleipner 气田油气层上部的一个咸水层, 据 1999 年的地震探测调查, 封存区的 CO₂ 形成气泡未曾逸散, 取得了良好的经济和环境效益^[57]。在此成功案例的推动下, 阿尔及利亚的 In Salah 和挪威的 Snøhvit 分别在 2004 年和 2008 年将其天然气中脱除的 CO₂ 注入地下。更多地区的 CCS 项目正在筹划中, 如澳大利亚的 Gorgon 等。除却商业规模的 CCS 项目外, 近年来小规模注入更是如雨后春笋般涌现, 如在日本 Nagaoka 以及美国 Frio 等地^[58]。我国由神华集团开展的中国神华集团 10 万 t/a CCS 试验项目是中国首例全流程 CCS 实践示范项目^[59, 60], 在吉林油田大情字井开展 CO₂-EOR 示范工程^[61], 此外, 在东营也正在布局 CO₂ 注入驱油的 CCUS 项目^[30]。

在 CO₂ 咸水层封存中, 通常使压力大于 6.9 MPa 以上, 储区深度必须大于 1 000 m 来保证 CO₂ 处于超临界状态。超临界状态的 CO₂ 密度为 0.60 ~ 0.75 g/mL, 并且其黏性比咸水低, 这种特性会产生均匀流体运移。另外, 由于超临界 CO₂ 部分溶于水, 注入的 CO₂ 应作为多相流考虑^[62]。

注入的流体与地层水和岩石的相互作用也应作为考虑的因素之一。就诱发地震活动而言, 矿物质的溶解和沉淀对断层的形成有重大影响。若 CO₂ 注入过程中形成矿物沉淀, 这些沉淀可能使构造的孔隙度和渗透率降低。这些变化会引起压力突变以及构造断裂破坏。沿断层面方向矿物质的沉积和溶解会影响断层系统的应力结构。反之, 超临界状态的 CO₂ 具有溶解性, 因此在注入过程中, CO₂ 溶解其接触的岩石表面矿物质。岩石结构的弱化使水压致裂的可能性增大。在断层中超临界状态的 CO₂ 溶解断层面中的沉积物, 断层强度降低并可能引发

错动^[11]。

若不考虑水和超临界 CO₂ 性质的不同, 其诱发地震的模式具有一定的相似之处。因此可以将这 2 类事件做类比, 与注水相比较, 在 CCS 储层中超临界状态的 CO₂ 压缩性强, 密度更低。其较强的压缩性使储区注入产生的压力相对较小, 地震频次较低。

4.2.1 Sleipner 气田诱震案例

第一个商业规模的 CO₂ 注入项目于 1996 年在挪威 Sleipner 气田近海咸水层启动。Sleipner 天然气田产出的天然气中脱出的 CO₂ 在超临界状态下注入进晚新生代的 Utsira 构造, 这种砂岩储层中的砂岩孔隙率为 35% ~ 42.5%, 渗透率为 1 ~ 8^[57]。自 1996 年起每年约有 100 万 t 的 CO₂ 注入, 至 2008 年就有 1 100 万 t CO₂ 被封存。25 °C 的 CO₂ 在 6.2 ~ 6.4 MPa 的压力下, 通过 1 012 m 深处的水平井注入 Utsira 构造储区, 注入后储层压力增量小于 0.5 MPa^[63]。被注入的 CO₂ 在超临界状态下比咸水密度低, 由于浮力向上移动。CO₂ 羽流曾在 1999 年达到了储层顶部。

Sleipner 位于挪威北海维京地堑, 其南侧为中度地震活动区, 自 CO₂ 开始注入后区域地震台网记录了 Sleipner-A 地台 50 km 区域内的数次 2 ~ 3 级地震。由于缺少微地震监测, 故虽在注入场地内并无监测到的地震活动和能被感知的地震活动发生, 并不能排除注水诱发微震的可能性^[64]。

4.2.2 In Salah 气田诱震诱震

In Salah CCS 项目位于阿尔及利亚中部, 是世界首个枯竭气田中的 CCS 项目。自 2004 年始, 每年有 50 ~ 100 万 t 的 CO₂ 注入地下 1 800 ~ 1 900 m 约 20 m 厚的石炭系砂岩中^[65]。该砂岩孔隙率为 17%, 渗透率仅为 1.3e × 10⁻¹⁴ D, 故使用 3 条 1 ~ 1.5 m 的长触 (long-touch) 及水平井实施注入, 确保 CO₂ 泵入目标储层。使用 4D 地震法、VSP、深浅观测井以及 InSAR 等方法密切监测分析羽流位置和盖层完整性。在 10 ~ 480 m 深度内架设了 48 组地震检波器, 组成微地震检测波阵列。每组地震检波器都由三分量检波器组成, 同一时间有 6 ~ 8 组检波仪监测微地震活动的发生^[66]。

自 2009 年起, 微地震检测波阵列记录了超过 1 000 次地震活动, 2010 年曾发生地震活动聚集, 最大震级为 0.5。目前监测到的 In Salah 地震数据并不能证明该地点的地震活动是由 CO₂ 的注入所诱发。另外, 数据显示 3 口注入井底边隆起约 25 mm, 其对应的岩土力学物理模型的数值模拟结果显示,

储层变型很可能受断层破坏的影响。

4.2.3 Weyburn 油田诱震案例

Weyburn 油田位于加拿大萨斯喀彻温省东南,自 2000 年 10 月开始,由加拿大政府(Natural Resources Canada 主导)、美国能源部资助、加拿大石油研究院(PTRC)和国际能源署温室气体研究与开发计划机构(IEAGHG),在 Cenovus Energy Inc. 和 Apache Canada Ltd. 石油公司 2 个区块开展 CO₂ 注入驱油项目,预期注入 15 年至 2015 年停止,CO₂ 纯度为 95%,起始注入率为 5 000 t/d,注入 1 430 m 的密西西比纪查尔斯组的 Marly 层白云岩和 Vuggy 层石灰岩 2 套碳酸盐岩储层中,单井注入率为 20 ~ 500 t/d。该储层厚度为 20 ~ 30 m,孔隙率为 10% ~

30%,渗透率为 10 ~ 50 mD^[67]。预期封存 CO₂ 总量大约为 20 万 t。注入开始后注入率由初始的 269 万 m³/a 逐渐增加至大于 300 万 m³/a^[68]。至 2010 年初,有约 2 800 万 m³CO₂ 被注入。

2003 年距 CO₂ 注水井 50 m 处垂直监测井中安装微地震监测点,由 8 个 20 Hz 三分量地震检波器组成,分布于埋深 1 181 ~ 1 356 m 间 25 m 厚的地层中。监测结果如图 11 所示,2003 年 8 月至 2004 年 12 月间有近 100 次 1 ~ 3 级地震发生^[68]。由于震级较低和地震仪阵列分布的设计,震源的准确位置难以精定位,并且难以区分地震活动和环境噪音,为此,监测井中需要合理安装更多的地震检波器。

在地震台网安装之前,Weyburn 油田曾开展注

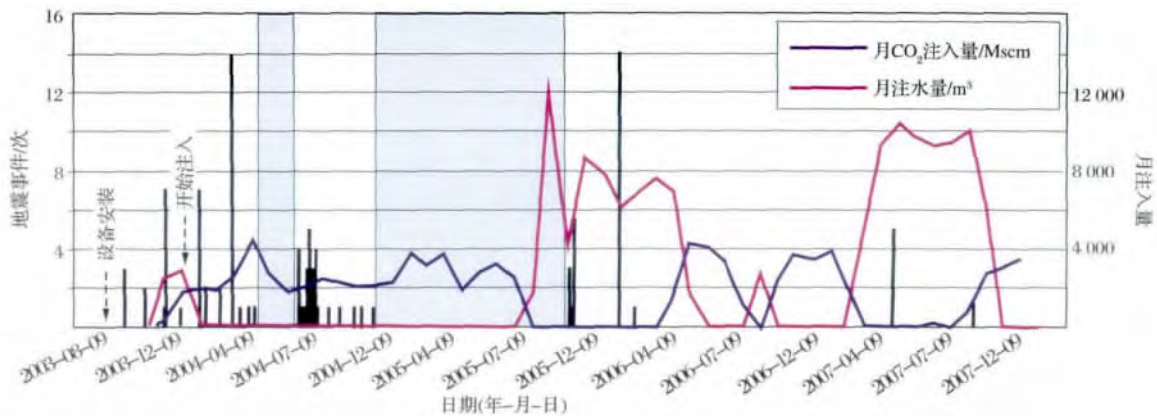


图 11 Weyburn 油田 2003 年 8 月至 2008 年 1 月间流体注入诱发地震^[68]

Fig. 11 Injection induced seismicity from August/2003 to January/2008 in Weyburn^[68]

水活动,对 CO₂ 注入和地震相关性的研究形成干扰,Verdon 等^[68]指出若增大 CO₂ 注入量,并同时增大邻近抽水井产出量可能使地震频次升高。一些地震活动的定位需要考虑确定 CO₂ 的区域饱和度,CO₂ 的区域饱和度和地震事件的空间分布表明地震分布还可能受储区化学性质变化影响。由 Weyburn 项目可知,低地震频次和低震级的地震对整个 CCS 项目的影响微乎其微。

5 CCS 诱发微震的效益

诱发地震相关研究主要集中于风险及危害的阐述,然而,在某些情况下若处理适当,这些地震则有利于 CCS 项目的开展。诱发地震的效益主要体现在 2 个方面:有利于 CO₂ 前缘和早期渗漏的监测以及提高储区渗透性。

诱发地震的震中一般靠近注入井或者抽出井,其空间分布一般认为可以直接反映注入和抽水所产

生的孔隙水压力的变化程度^[69],因此,微震活动性监测是识别 CO₂ 注入引起的压力扩散前缘的潜在方法。1997 年 House 等^[70]就提出利用统计方法监测微震来推测水压致裂破裂带中的地下流体流径。但压力前缘的移动并不需要流体运移,在许多情况下其扩散速度比 CO₂ 羽流迁移更快。因为速度不同,储层压力的变化范围可能超越 CO₂ 羽流扩散前缘,初步表明,地震活动的 R-T 图(距离—时间图)的外部包络线反映了 CO₂ 前缘迁移和孔隙压力扩散过程。然而,我们需要做更多的研究来加深对诱发地震位置、储层压力变化以及 CO₂ 羽流之间关系的理解。

由于 CO₂ 注入储区压力上升,压裂会引起储层渗透率和注入量上升^[17]。事实上,诱发地震只是压裂所产生副产品,特别是在低渗透率储层,水利压裂提高渗透率是一个很有价值的增产方法,并在一定程度上降低注入成本。此广泛应用于石油工业并取

得良好的效果。但是,必须确保压裂发生在储层内,不会对盖层完整性产生不利影响。此外,由于公众对水力压裂支持度不高^[71],因此,这项技术在使用时应权衡其优劣势并谨慎使用,以免对 CCS 项目的公众认可程度造成不利影响。

6 盖层完整性和安全选址

从世界范围来看,对于少震区或欠发达地区 6 级及以上地震会造成重大人员伤亡和财产损失。震级高低与断层规模息息相关,能形成 6 级地震的断层常达到千米规模。大多数情况下,在 CCS 选址时这些巨型断层可以通过物探方法识别以避免危险发生,但诱发中小型地震的小型断层则有可能存在且被忽略^[72]。我们最关心的问题并不仅仅是 CCS 所可能诱发的大规模地震,事实上,中小型地震仍然会对 CO₂ 储区盖层完整性形成威胁。CO₂ 储区所处地质构造往往深达 2 km 以保证足够的封闭性,但在此深度上构造的渗透率仍偏高。当大量 CO₂ 封闭于此储区几十年之久时,中小型地震一旦发生,则很可能对储区盖层完整性造成破坏。若 CCS 诱发 4 级地震,则可能引起数千米规模的大断层几厘米的滑动^[73]。Cappa 等^[74]实验研究显示仅数毫米的剪切位移就足以提高裂隙和节理的渗透率,数厘米的滑移则可能形成新的渗透水力路径,危及 CO₂ 储区盖层完整性,引起 CO₂ 泄漏。目前许多学者对 CO₂ 泄漏的原因展开研究。CCS 泄漏风险罗列如下:盖层中断层活化;储层水力联系区断层活化;盖层剪切破坏;水力压裂;通过井筒泄漏;突破毛细血管膜密封压泄漏。

盖层是地质封存项目的一个重要组成部分。为保持 CO₂ 在超临界状态盖层所处深度需合理设计,与此同时它应该是远离任何大规模断层以免泄漏。盖层应致密完整,并应具较低的渗透,从而能在一个较长的时期内封存注入的 CO₂^[75],但在初始咸水—CO₂—矿物相互作用也可能导致堵塞孔隙通道降低注入率^[72]。另外,盖层必须具备高强度以承受注入后的应力场变化下的压缩和拉伸,在安全的 CO₂ 封存系统中,良好的盖层需具备上述性能,并应针对 CCS 项目的具体情况彻底研究,合理设计。

现如今,全球许多 CCS 项目正在筹备展开^[76]。Sleipner 天然气田的 CCS 项目就是一个好的案例,CO₂ 注入高孔隙率、高渗透率的储区,储区被致密的页岩层隔离,注入产生的压力使弱胶结的砂岩缓慢变形,但又不至由于发生断裂破坏,从安全封存角度

考虑,此类储区非常理想。若不具备这些条件,可以根据实际情况选择条件相对理想的储区,比如美国伊利诺伊州盆地 Mount Simon 砂岩,此类砂岩有良好的孔隙率和渗透率,但该区域靠近沃巴什地震带,对其未来的注入构成一定的风险^[77]。枯竭油气田也是 CCS 的理想储区,除了较完整的地质资料外,此类地区往往还配备了井口和管道设施,从诱发地震方面考虑,即使 CO₂ 开始注入目的储区,其孔隙压力仍然会比油气开采前低,故在大量的 CO₂ 注入后整个储区的孔隙压力才会出现较为明显的上升,降低了诱发地震的风险。

7 结 论

CCS 存在诱发地震活动的可能。相对于工业废液地中回注和地热开发等项目,CCS 注入地下的流体总体积相对较小,且现场地震监测网在精度上和密度上多有不足。商业规模的 CCS 项目目前存在诱发浅层地震(震源 < 5 km)的可能性,但其震级一般较小,一般为微震甚至超微震。目前还没有监测到 CCS 诱发中强级以上规模地震。

若不考虑水和超临界 CO₂ 性质的不同,其诱发地震的模式具有一定的相似之处,因此可以将这 2 类事件做类比研究。与水相比,超临界状态的 CO₂ 具有更强的压缩性和更低的密度。其较强的压缩性使储区注入产生的压力相对较小,诱发地震频次相对较低。CO₂ 封存诱震往往有很多共同特征:地震事件较少(< 100 次/a),震级较低(1~2 级),诱发的地震大多发生在地震多发区,岩层已经接近破坏或高度断裂。CCS 诱发地震会发生在应力分布区,也可能发生于应力分布区深部或周边。在时间上,有时诱发地震会在注入活动开始后即刻发生,但也可能存在延迟,发生于注入停止一段时间之后。因此,诱发地震的判断需要综合考虑震级分布、地震时空效应和构造应力场中的断裂情况。正确的选址、测试、运行和监控可以使注入所带来的风险降到最低。同时 CCS 诱发地震监测中存在一些问题,首先,出于成本效益考虑,监测地震活动的地震检波器阵列设计并非最优;其次,环境噪音和低震级地震很难区分。尤其在砂岩构造和咸水层中,地震事件振幅低,这些问题更为突出。另外,地震数据存在不确定性和局限性,主要表现在以下 4 个方面:①地震震源和震级的不确定性;②地震实时监测的不完整性和不精确性;③人为诱震和天然地震难以区分;④公布的地震数据偏向 3 及以上的有感地震^[78]。

合理地选址有助于有效控制地震诱发活动,降低 CCS 项目的风险。已有证据证实,地壳中脆性岩石中的老断层会因孔隙应力增加而发生微小破坏,中小型地震都会给盖层完整性带来风险,故 CCS 选址显得尤其重要。选址包括现场地质条件、构造和地震历史背景的调查,此外,场地周边和井下测试可以进一步确定该场地的适用性。理想的储区条件包括完整的无渗透性盖层,适当的孔隙率和渗透率,弱胶结和大水平延伸范围。最后,应考虑到注入流体为 CO₂ 时的特殊性。超临界 CO₂ 会溶解或沉淀矿物,改变应力条件;超临界 CO₂ 和地下咸水之间的密度差也可能形成密度流,产生诱发地震的可能性。总体而言,CCS 未来的工作应致力于评估潜在的储区,通过诱发地震问题的以往经验和最新认识减小 CCS 的风险,在选址和设计方面的进一步研究将增强 CCS 项目的安全性。

致 谢:感谢日本地质调查所雷兴林博士在初稿形成过程中的建议和帮助。感谢澳大利亚地球科学局(GA)对中国科学院武汉岩土力学研究所与昆士兰大学合作研究项目(CAGS)的协助和支持。感谢审稿人严谨而极富建设性的修改意见,使本文得到提高和完善。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [2] IEA. Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage [R]. Paris, France: IEA, 2013.
- [3] Yan Li, Yang Jintian. Discussion on China CO₂ emission characteristics of thermal power industry [J]. *Environmental Pollution & Control* 2010 9: 2-4. [燕丽, 杨金田. 中国火电行业 CO₂ 排放特征探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2010, 9: 2-4.]
- [4] Chen Z, Li Q, Zhang X. The Implementation of european energy programme for recovery CCS demonstration projects and inspirations to China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013 23(10): 81-86.
- [5] Li Q, Chen Z, Li X, et al. Inspiration to a future update of CCUS technology roadmap in China-based a synthetic analysis on global CCS roadmaps [J]. *Low Carbon World*, 2014 (55): 7-8.
- [6] 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): 10 164-10 168.
- [7] Zoback M. State of stress in the conterminous United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1980 85(B11): 6 113-6 156.
- [8] Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies, Committee on Earth Resources, Committee on Geological and Geotechnical Engineering, et al. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies [M]. Washington DC, USA: The National Academies Press, 2012.
- [9] Xia Yang, Zhang Lifei. The advance of petrologic mechanism of dehydration embrittlement in intermediate-depth earthquakes [J]. *Advances in Earth Science*, 2013 28(9): 997-1 006. [夏阳, 张立飞. 中源地震脱水脆变机制的岩石学研究进展 [J]. *地球科学进展* 2013 28(9): 997-1 006.]
- [10] Ellsworth W L. Injection-induced Earthquakes [J]. *Science*, 2013, 341: 142-150.
- [11] Byrer C, Bengnan P. Issues related to seismic activity induced by the injection of CO₂ in deep Saline Aquifers [C] // Sminchak J, Gupta N, Byrer C, et al eds. First National Conference on Carbon Sequestration. Washington DC: National Energy Technology Laboratory, 2001.
- [12] Wang Suyun, Yu Yanxiang. Magnitude conversion relationship and its impact on seismic activity parameters [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2009 4(2): 141-149. [汪素云, 俞言祥. 震级转换关系及其对地震活动性参数的影响研究 [J]. *震灾防御技术* 2009 4(2): 141-149.]
- [13] McGarr A, Fletcher J. Mapping apparent stress and energy radiation over fault zones of major earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002 92(5): 1 633-1 646.
- [14] Nicholson C, Wesson R L. Earthquake Hazard Associated with Deep Well Injection: A Report to the U. S. Environmental Protection Agency [R]. Washington DC: U. S. Government Printing Office, 1990.
- [15] Nicholson C, Roeloffs E, Wesson R. The northeastern Ohio earthquake of 31 January 1986: Was it induced? [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988 78(1): 188-217.
- [16] Grasso J. Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1992, 137(3/4): 507-534.
- [17] Hubbert M, Rubey W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1959, 70(2): 115-166.
- [18] Healy J H. The Denver earthquakes [J]. *Science*, 1968, 161(3 848): 1 301-1 310.
- [19] Lei X. How do asperities fracture? An experimental study of unbroken asperities [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213(3/4): 347-359.
- [20] Cladouhos T, Petty S, Foulger G, et al. Injection induced seismicity and geothermal energy [J]. *GRC Transactions*, 2010, 34: 1 213-1 220.
- [21] Sminchak J, Gupta N. Aspects of induced seismic activity and deep-well sequestration of carbon dioxide [J]. *Environmental Geosciences*, 2003, 10(2): 81-89.

- [22] Gupta H , Rao C , Rastogi B , *et al.* An investigation of earthquakes in Koyna region , Maharashtra , for the period October 1973 through December 1976 [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 1980 , 70(5) : 1 833-1 847.
- [23] Hsieh P , Bredehoeft J. A Reservoir Analysis of the Denver Earthquakes: A Case of Induced Seismicity [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1981 , 86(B2) : 903-920.
- [24] Raleigh C , Healy J , Bredehoeft J , *et al.* Faulting and crustal stress at Rangely , Colorado [J]. *Geophysical Monograph Series* , 1972 , 16 (2) : 275-284.
- [25] Gan W , Frohlich C. Gas injection may have triggered earthquakes in the Cogdell oil field , Texas [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 2013 , 110(47) : 18 786-18 791.
- [26] Horton S. Disposal of hydrofracking waste fluid by injection into subsurface aquifers triggers earthquake Swarm in Central Arkansas with potential for damaging earthquake [J]. *Seismological Research Letters* , 2012 , 83(2) : 250-260.
- [27] Cornet F , Helm J , Poitrenaud H , *et al.* Seismic and aseismic slips induced by large-scale fluid injections [J]. *Pure and Applied Geophysics* , 1997 , 150(3/4) : 563-583.
- [28] Keranen K M , Weingarten M , Abers G A , *et al.* Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection [J]. *Science* , 2014 , 345(6 195) : 448-451.
- [29] Bell M , Nur A. Strength changes due to reservoir-induced pore pressure and stresses and application to Lake Oroville [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012) , 1978 , 83 (B9) : 4 469-4 483.
- [30] Li Qi , Liu Guizhen , Zhang Jian , *et al.* Status and suggestion of environmental monitoring for CO₂ geological storage [J]. *Advances in Earth Science* , 2013 , 28(6) : 718-727. [李琦, 刘桂臻, 张建. 二氧化碳地质封存环境监测现状及建议 [J]. *地球科学进展* , 2013 , 28(6) : 718-727.]
- [31] Davis S , Wayne P. Induced seismic deformation in the Cogdell oil field of west Texas [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 1989 , 79(5) : 1 477-1 495.
- [32] Jenkins C , Cook P , Ennis J. Safe storage and effective monitoring of CO₂ in depleted gas fields [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 2012 , 109(2) : E35-E41.
- [33] Liu Jianzhong , Tang Chunhua , Zuo Jianjun. Development and application of microseismic monitoring technology [J]. *Engineering Sciences* , 2013 , 10(7) : 1 054-1 058. [刘建中, 唐春华, 左建军. 微地震监测技术发展方向及应用 [J]. *中国工程科学* , 2013 , 10(7) : 1 054-1 058.]
- [34] Hsieh P , Bredehoeft J. A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012) , 1981 , 86(B2) : 903-920.
- [35] Baisch S , Harjes H. A model for fluid-injection-induced seismicity at the KTB , Germany [J]. *Geophysical Journal International* , 2003 , 152 (1) : 160-170.
- [36] Raleigh C , Healy J , Bredehoeft J. An experiment in earthquake control at Rangely , Colorado [J]. *Science* , 1976 , 191(4 233) : 1 230-1 237.
- [37] Haimson B. Earthquake Related Stresses At Rangely Colorado [C]//The 14th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS) . Alexandria , Virginia: American Rock Mechanics Association , 1972.
- [38] Gibbs J , Healy J , Raleigh C , *et al.* Seismicity in the Rangely , Colorado , area: 1962-1970 [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 1973 , 63(5) : 1 557-1 570.
- [39] Oppenheimer D. Extensional tectonics at the Geysers geothermal area , California [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012) , 1986 , 91(B11) : 11 463-11 476.
- [40] Majer E , Baria R , Stark M , *et al.* Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems [J]. *Geothermics* , 2007 , 36 (3) : 185-222.
- [41] Segal P , Fitzgerald S. A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs [J]. *Tectonophysics* , 1998 , 289(1) : 117-128.
- [42] Boyle K , Jarpe S , Hutchings L , *et al.* Preliminary investigation of an aseismic ‘doughnut hole’ region in the northwest Geysers , California [C]//Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering , 2011 (2) : 595-601.
- [43] Shapiro D , Langenbruch C. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations [J]. *The Leading Edge* 2010 , 29(3) : 304-309.
- [44] Baria R , Michelet S , Baumgärtner J , *et al.* Creation and Mapping of 5 000 m deep HDR/HFR Reservoir to Produce Electricity [C]//Proceedings World Geothermal Congress. Antalya , Turkey: IGA , 2005: 24-29.
- [45] Deichmann N , Giardini D. Earthquakes induced by the stimulation of an enhanced geothermal system below Basel (Switzerland) [J]. *Seismological Research Letters* , 2009 , 80(5) : 784-798.
- [46] Elnashai A , Bommer J , Martinez-Pereira A. Engineering implications of strong-motion records from recent earthquakes [C]//Proceedings of 11th European Conference on Earthquake Engineering CD-ROM. Paris , 1998.
- [47] Lei X , Yu G , Ma S , *et al.* Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field , Chongqing , China [J]. *Journal of Geophysical Research* , 2008 , 113(B10) : 1-12.
- [48] Wang Xiaolong , Ma Shengli , Lei Xinglin. Seismology and geology encryption observation on injection induced seismicity area in rongchang , Chongqing [J]. *Seismology and Geology* , 2011 , 33 (1) : 151-155. [王小龙, 马胜利, 雷兴林. 重庆荣昌地区注水诱发地震加密观测 [J]. *地震地质* , 2011 , 33(1) : 151-155.]
- [49] Tang Rongchang , Han Weibin. Active Faults and Earthquakes in Sichuan [M]. Beijing: Earthquake Press , 1993. [唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.]
- [50] Long Feng , Du Fang , Ruan Xiang. Analysis of induced seismicity with ETAS model in Zigong mine [J]. *Earthquake Research in China* , 2010 (2) : 164-171. [龙锋, 杜方, 阮祥. 用 ETAS 模型分析自贡矿井注水触发地震 [J]. *中国地震* , 2010 , (2) : 164-171.]

- [51] Lei X, Ma S. A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China [J]. *Solid Earth*, 2013, 118(8): 4 296-4 311.
- [52] Zhang Deyuan, Zhao Genmo, Wang Youlong. Geological structure and water injection induced seismicity in RenQiu oil field [J]. *North China Earthquake Sciences*, 1985, (Suppl.): 105-110. [张德元, 赵根模, 王优龙. 任丘油田地质构造与注水诱发地震[J]. *华北地震科学*, 1985, (增刊): 105-110.]
- [53] Chen Xiaoling, Fu Lijun. Applications of water injection and its relationship between induced seismicity in RenQiu oil field [J]. *The Guide of Science & Education*, 2011 (19): 243-244. [陈小玲, 付立俊. 任丘油田注水与诱发地震的关系及应用[J]. *科教导刊*, 2011 (19): 243-244.]
- [54] Bachu S, Gunter W E P. Aquifer disposal of CO₂: Hydrodynamic and mineral trapping [J]. *Energy Conversion and Management*, 1994, 35(4): 269-279.
- [55] Michael K, Golab A, Shulakova V, et al. Geological storage of CO₂ in saline aquifers—A review of the experience from existing storage operations [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(4): 659-667.
- [56] Bachu S, Gunter W. Acid-gas injection in the Alberta basin, Canada: A CO₂ storage experience [J]. *Geological Society*, 2004, 233(1): 225-234.
- [57] Torp T, Gale J. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects [J]. *Energy*, 2004, 29(9): 1 361-1 369.
- [58] Global C. Institute (GCCSI): The Global Status of CCS: 2013 [R]. Canberra, Australia, 2013.
- [59] Li Q, Liu G, Liu X, et al. Application of a health, safety, and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 17: 504-514.
- [60] Kuang Dongqin, Li Qi, Wang Yongsheng, et al. Numerical investigation of CO₂ migration in Shenhua CCS demonstration project [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2014, 35(9): 2 623-2 641. [匡冬琴, 李琦, 王永胜, 等. 神华碳封存示范项目中的 CO₂ 注入分布模拟[J]. *岩土力学* 2014, 35(9): 2 623-2 641.]
- [61] Yang D, Zeng R, Zhang Y, et al. Numerical simulation of multi-phase flows of CO₂ storage in saline aquifers in Daqingzijing oil-field, China [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2012, 14(4): 609-618.
- [62] Qi L. Coupled reactive transport model for heat and density driven flow in CO₂ storage in saline aquifers [J]. *ASCE Journal of Hazardous Toxic and Radioactive Waste*, 2011, 15(4): 251-258.
- [63] History-matching flow simulations and time-lapse seismic data from the Sleipner CO₂ plume [C]// Chadwick R, Noy D, eds. *Petroleum Geology Conference Series*. London: Geological Society, 2010, 7: 1 171-1 782.
- [64] Arts R, Eiken O, Chadwick A, et al. Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time-lapse seismic data [J]. *Energy*, 2004, 29(9): 1 383-1 392.
- [65] Ringrose P, Atbi M, Mason D. Plume development around well KB-502 at the In Salah CO₂ storage site [J]. *First Break*, 2009, 27(1): 85-89.
- [66] Daley T, Peterson J, Korneev V. GEO-SEQ Subtask 2.3.4: Microseismic Monitoring and Analysis [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [67] Ma J M I. AVO modeling of pressure-saturation effects in Weyburn CO₂ sequestration [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(2): 178-183.
- [68] Verdon J, Kendall J, White D, et al. Passive seismic monitoring of carbon dioxide storage at Weyburn [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(2): 200-206.
- [69] Shapiro S, Krüger O, Dinske C, et al. Magnitudes of induced earthquakes and geometric scales of fluid-stimulated rock volumes [J]. *Geophysics*, 2011, 76(6): WC55-WC63.
- [70] House L P W, Fehler M. Can hydraulic fracture-induced microearthquakes show where the fluid went? [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 133.e1-133.e15.
- [71] De Pater C, Baisch S. Geomechanical study of Bowland Shale seismicity [R]. Lancashire, UK: Synthesis Report, 2011.
- [72] Chen Z, Song R, Rahman S. An experimental investigation of hydraulic behaviour of fractures and joints in granitic rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1 061-1 071.
- [73] Bouchard R, Delaytermoz A. Integrated path towards geological storage [J]. *Energy*, 2004, 29(9): 1 339-1 346.
- [74] Cappa F, Rutqvist J. Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO₂ [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(2): 336-346.
- [75] Li Q, Wu Z S, Li X C. Prediction of CO₂ leakage during sequestration into marine sedimentary strata [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3): 503-509.
- [76] Bachu S. Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change [J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(3): 277-289.
- [77] Gaus I, Azaroual M, Czernichowski-Lauriol I. Reactive transport modelling of the impact of CO₂ injection on the clayey cap rock at Sleipner (North Sea) [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217(3): 319-337.
- [78] Majer E, Nelson J, Robertson A. Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems [R]. US Department of Energy 2012.

Mechanism of Underground Fluid Injection Induced Seismicity and Its Implications for CCS Projects

Wei Xiaochen¹, Li Qi¹, Xing Huilin², Li Xiaying¹, Song Ranran¹

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Wuhan 430071, China*; 2. *Centre for Geosciences Computing, School of Earth Sciences, The University of Queensland, St. Lucia, QLD 4072, Australia*)

Abstract: CO₂ capture and storage projects must consider the potential possibility of injection induced seismicity. Moderate earthquakes and strong earthquakes may endanger human life and property, and even felt earthquakes and microquakes also pose a threat to seal integrity of CO₂ reservoir and increase the risk of leakage. Underground-fluid injection induced seismicity usually happens in some geoenvironmental projects such as waste fluid disposal, EOR and EGS, and it occurs when fluid is injected along the fault. Therefore, it can be studied through stress analysis. The density of supercritical CO₂ is smaller than water, which may develop density flow in the deep strata or water-rock interactions in pre-existing structures, and cause the variation in permeability and pressure to induce a seismic activity. In this paper, we reviewed the mechanism of underground fluid injection induced seismicity with the focus of CCS combined with fluid injection projects and seismic monitoring analysis in both commercial scale and experimental scale, to investigate its impact on the integrity of the cap rock of the reservoir. Finally, we summarized the appropriate site selection, injection methods and monitoring programs to prevent the occurrence of induced seismicity.

Key words: Injection; CCS; Supercritical CO₂; Induced seismicity; Caprock integrity.