

地下资源开采与诱发地震:现状与进展

陈鹏^{1,2,3)}, 吴中海^{1,2,3)}, 马立成¹⁾, 周春景^{1,2,3)}

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京, 100081;

3) 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京, 100081



内容提要:页岩气、地热等清洁能源正成为全球能源开发日益重要的组成部分,也是我国未来能源产量增长的主体,对保障能源资源安全、支撑双碳目标意义重大。然而随着页岩气、地热等地下工业开采活动规模的不断扩大,由此引发的地震灾害问题正日益受到人们的关注。强化工业活动与诱发地震关系研究、管控相关诱发地震灾害风险成为全球面临的重要课题和挑战。基于此,笔者等调研了工业活动诱发地震的全球典型案例,系统介绍了不同国家(美国、加拿大和韩国)工业活动诱发地震的现状及其差异,并对流体注入诱发地震的主要途径、物理机制、相关作业参数和诱发地震关系等做了全面的综述。发现诱发地震不仅与流体注入参数(体积、速率等)相关,还受控于特定的区域地质背景和断裂条件。合理管控地震灾害风险、促进相关能源的开采,应该统筹开采区地质地球物理的综合调查和开采过程的动态监测。

关键词:能源开采;流体注入;注入参数;诱发地震;断裂条件

诱发地震是指因人类活动(水库蓄水、采矿、地热或油气开采过程中流体的抽取和注入、CO₂封存、人工爆破与地下核试验等)引起地壳上部应力、应变状态发生变化,致使岩石破裂或先存的断层或破裂失稳滑动而产生的地震(McGarr et al., 2002)。

人类最早关注到的诱发地震是水库蓄水诱发的地震,近年来随着包括页岩气等地下能源的大规模开采、增强型地热系统的使用和CO₂气体的地下封存等人类活动的不断增加,与之相关的诱发地震显著增多,正日益得到越来越多的关注(Ellsworth, 2013; Davies et al., 2013; White et al., 2016; Mignan et al., 2017; Tang Lanlan et al., 2018; Verdon et al., 2021)。已有研究表明在工业活动中通过人工压力将流体注入超过2~3 km的地下深部是诱发地震的重要原因(Foulger et al., 2018; Atkinson et al., 2020),这一过程会改变或扰动地下岩石和断层的应力状态,导致岩石产生新的破裂或地壳浅部已有断层出现失稳滑动。其中,工业开采与流体注入相关的水力压裂和废水灌注技术被认为

是诱发地震活动的直接原因,对石油和天然气生产、地热利用等工业活动产生了严重威胁。如美国俄克拉荷马州2011年发生的Prague Mw 5.7地震和2016年发生的Pawnee Mw 5.8地震,被认为是由油气开采过程中废水增压注入作业所诱发的(Keranen et al., 2014; Foulger et al., 2018)。与油气开采水力压裂技术类似,地热开采由于需要向地下注入大量流体,也会导致诱发地震的发生,如韩国2017年浦项Mw 5.5地震(Lee et al., 2019)。

我国能源资源需求量大,但对外依存度高,包括页岩气、干热岩等在内的非常规能源将是我国未来能源安全保障的重要组成部分,也是“双碳”目标实现的关键所在(邹才能等, 2021)。在这些能源资源的开采过程中,我国都普遍采用了水力压裂工艺和不同程度的废水回注,伴随相关工业大规模的开发,诱发破坏性地震及其潜在风险进一步加大。我国川南页岩气主产区出现了明显的区域地震活动增强现象,而且近年来发生了多次有感地震,如2018年兴文M 5.7地震,2019年长宁M 6.0地震,2021年泸

注:本文为国家科技基础资源调查专项(编号:2021FY100104);中国地质调查局项目(编号:DD20221644)和地质力学研究所基本科研业务费(编号:DZLXJK202107)的成果。

收稿日期:2022-04-02;改回日期:2022-07-28;网络首发:2022-08-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.061

作者简介:陈鹏,男,1990年生,助理研究员,活动构造与地震地质专业;Email: pengchen1208@sina.cn。通讯作者:吴中海,男,1974年生,研究员,主要从事于新构造与活动构造研究;Email: wuzhonghai8848@foxmail.com, wzhh4488@sina.com。

县 M 6.0 地震等,致使多人受伤和房屋破坏 (Lei Xinglin et al., 2019; Atkinson et al., 2020; Wang Maomao et al., 2020; Li Tao et al., 2021; 易桂喜等, 2019; 雷兴林等, 2020)。此外,青海共和的干热岩开发、新疆呼图壁的地下储气等活动,也诱发了不同级别的地震活动。

尽管针对某些具体的地震活动是否与工业开采相关仍存在争议,但随着工业活动的增加,在某些构造稳定区地震频次和强度逐渐增加的现象愈发明显 (雷兴林等, 2020),甚至在一些原本构造地震很少或几乎没有的地方,由于抗震措施和防震意识的不足,诱发地震反倒造成了大于天然地震的经济损失和人员伤亡 (Atkinson et al., 2020)。科学认识地下能源开采与地震活动之间的关系已成为国际普遍关注的重要课题。弄清诱发地震的物理机理和力学条件、有效管控工业活动诱发地震灾害的风险是学术界和产业界共同面对的科学挑战。

因此,本文将就工业活动诱发地震的全球典型案例、物理机制和力学过程及国际上通用的管控措施等进行全面的综述,以期推动我国地下能源安全、健康的开采和利用。

1 典型案例

美国中部地区长期以来被认为是地质构造稳定区,很少发生 $M \geq 4.0$ 有感地震,但近十年来,在北美大陆这一稳定地块中出现了地震频次急剧增加的现象,并发生了数次 $M \geq 5.0$ 的破坏性地震。1973~2008 年的 35 年间,震级 3 级以上地震共 852 次,而自 2009 年页岩气大规模开发以来,在 2009~2018 的 9 年间,震级 3 级以上地震达 3427 次,这些地震频次和强度显著增加的时段与该区广泛使用水力压裂和废水灌注技术在时间上完全一致 (图 1)。以俄克拉荷马州 2011 年 11 月的 Prague Mw 5.7 和 2016 年 9 月的 Pawnee Mw 5.8 地震为代表,出现了多次规模较大的破坏性地震。其中, Pawnee Mw 5.8 级地震是目前美国页岩气开采中废水灌注诱发的最大地震,也是全球已知的与页岩气开采相关的最大诱发地震 (Kolawole et al., 2019),并成为该州决定关闭震中区及附近大量页岩气井的直接原因。

加拿大西部不列颠哥伦比亚省 (卑诗省) 的哈恩河盆地是一个主要的页岩气产区。该区水力压裂始于 2006 年,天然气产量在 2010 年和 2011 年达到顶峰 (Farahbod et al., 2015)。哈恩河盆地页岩气开采区地震活动的实时观测结果发现,该区在开展

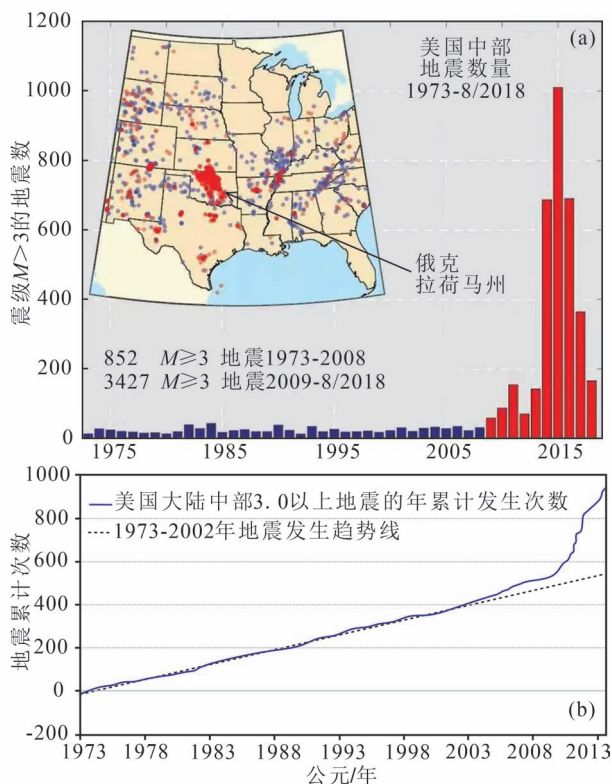


图 1 美国大陆中部 1973 年以来的 3.0 级及以上地震频次统计图 (数据来源于 USGS)

Fig. 1 Statistical diagrams showing the $M \geq 3.0$ earthquakes in central United States since 1973 (data from <https://www.usgs.gov>)

水力压裂作业之前,地震频率很低,两年内仅发生 24 次 1.8~2.9 级小震。但水力压裂开始后,地震频率激增到 100 次地震每年 (图 2a),在水力压裂停止后几周内,地震活动频率又迅速降低 (图 2b),从而证实了两者之间存在直接关联性 (图 2a,b; Farahbod et al., 2015; Kao et al., 2015)。

此外,观测结果还显示该区 2006 年以来的地震矩、最大震级和注入体积之间也存在显著的正相关关系 (图 2c),但与注入压力相关性不明显,而且地震活动性的增强主要表现为频率增加,而震级的增加并不显著 (多以 3.0 级以下地震为主),只有当每月的流体注入体积达到约 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 强度时,才有 3.5 级较大震级地震出现 (Kao et al., 2015)。发生于 2018 年 11 月 29 日圣约翰堡 Mw 4.6 地震被认为是加拿大目前水力压裂诱发的最大地震。基于这些结果,加拿大学界普遍认为水力压裂作用是页岩气开发中诱发地震的主要因素,并强调水力压裂过程中的流体注入体积在诱发地震强度方面起决定因

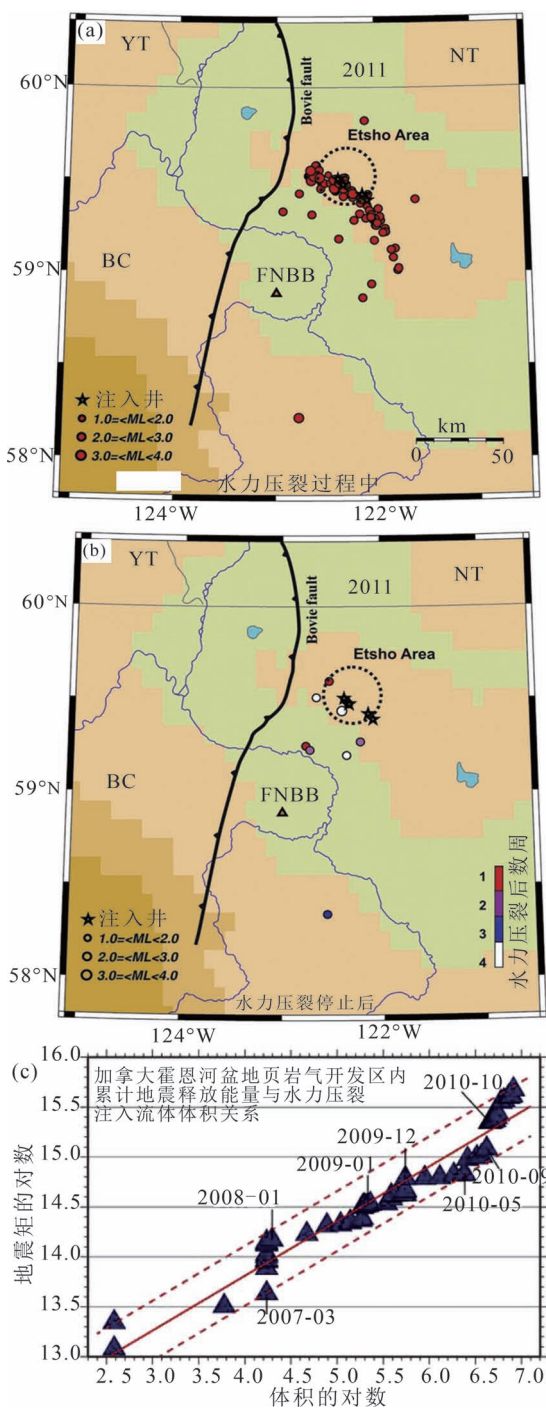


图 2 加拿大哈恩河盆地页岩气开采区监测到的水力压裂与地震活动关系图

Fig. 2 Diagrams showing the relationship between hydraulic fracturing and earthquake activity in Hahn river basin in Canada

(a) 水力压裂过程中; (b) 水力压裂停止后; (c) 地震矩与注入流体体积的双对数图 (据 Farahbod et al., 2015; Kao et al., 2015)

(a) In the process of hydraulic fracturing; (b) after hydraulic fracturing; (c) log-log plot of seismic moment and injected fluid volume (from Farahbod et al., 2015 and Kao et al., 2015)

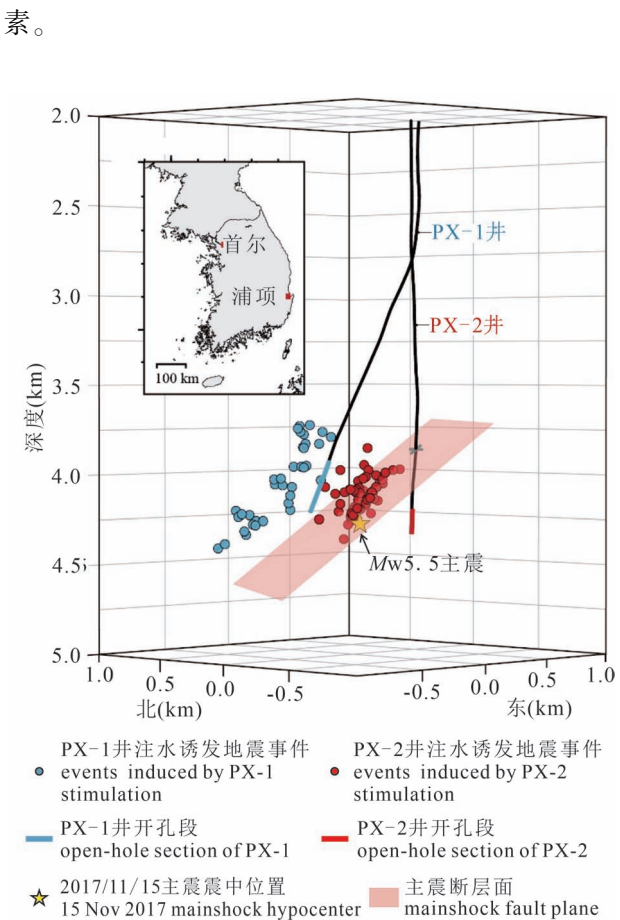


图 3 韩国浦项增强型地热系统注水诱发地震

(修改自 Lee et al., 2019)

Fig. 3 Induced earthquakes activated by injections in enhanced geothermal system (EGS) near Pohang in South Korea (modified from Lee et al., 2019)

然而,2017 年,在韩国浦项的增强型地热系统钻井现场,浦项 PX-2 井掘进到 3.8 km 深处时碰到一条未知的隐伏断层,触发了多次微震,意味着钻井穿过的这条断层已经达到了应力临界状态,但当时并未引起重视。因后期注水水力压裂进一步激活了该断层,最终触发了 Mw 5.5 破坏性地震(图 3),造成数亿美元的经济损失。该案例否定了注水总量决定诱发地震最大震级的猜想,认为以此为基础的现行方法和举措,对地震发生风险考虑不足,难以正确评估和管理诱发地震灾害。对浦项注水诱发地震事件的教训警示进行总结后, Lee 等 (2019) 在 Science 发表题为“地下注水诱发地震的风险管理”的报告中,提出诱发地震的大小并非简单地受控于注水量、压力、速度和注水位置,而且与区域地质构造条件,以及能够诱发的地震数量密切相关。

近些年,随着我国川南地区页岩气的开采,地震

活动不同程度地有所增加。历史地震记录显示,四川盆地内部 1600~2019 年期间共记录 $M \geq 5.0$ 地震 36 次。但 2012 年页岩气工业化开采之前,该区无 6.0 级及以上地震,历史最大地震为 1896 年富顺 $5\frac{3}{4}$ 级地震。但自 2012 年以来,该区出现了包含大量 $M \geq 2.0$ 地震的地震丛集事件,并有多组 $M \geq 4.0$ 地震丛集事件(雷兴林等,2020)。研究发现四川盆地内部存在的天然气田废水处理和盐井注水采盐(通常是持续数年至数十年的长期注水),以及页岩气水力压裂的短期注水等工业活动,均可能诱发地震(张致伟等,2012; Lei Xinglin et al., 2013, 2019; Meng Lingyuan et al., 2019; Tan Yuhang et al., 2020; Wang Maomao et al., 2020),甚至会导致越来越频繁的有感地震和破坏性地震。与世界其它地点的注水诱发地震活动相似,我国目前发生的破坏性中—强地震主要出现在一些地质构造情况较为复杂的局部地区。如在四川盆地的几个页岩气示范区中,长宁区块表现出了最强烈的诱发地震活动,其次是威远,而重庆涪陵的页岩气田最弱。

从上述典型案例可以看出,不同国家工业活动诱发地震的方式不尽相同,诱发地震的最大震级是否与流体注入体积有关也存在争论,流体注入的速率等对地震活动是否有影响尚不清楚。因此,要实

现工业活动诱发地震的有效管控,弄清其基本原理十分必要。

2 流体注入诱发地震的主要途径及物理机制

关于工业活动诱发地震的孕震过程和发震机理是目前学术界研究的热点和难点。理论研究和现场试验发现,工业活动中流体注入主要以这几种途径诱发地震或影响所在区域的地震活动性:①水力压裂过程在岩石中产生新的破裂,这通常以引发对人类不产生影响的 $M \leq 1.0$ 级以下微小地震为主(Atkinson et al., 2016);②工业注水后增加断裂带孔隙压力,形成流体超压力驱动或通过孔隙弹性压力扩散等方式使得原本不活动断裂失稳活动,并可能诱发 $M \geq 3.5$ 级及以上有感地震和破坏性地震(Rubinstein and Mahani, 2015);③水力压裂或废水回注靠近先存活动断层时,可通过降低断层面摩擦力而导致地震活动频率增加或破坏性地震的提前出现(Langenbruch and Zoback, 2016)。

摩尔—库伦(Mohr—Coulomb)准则是表示岩石破坏条件和断层滑动的主要理论基础(Jaeger et al., 2007),其公式为:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu(\sigma_n - P) + \tau_0$$

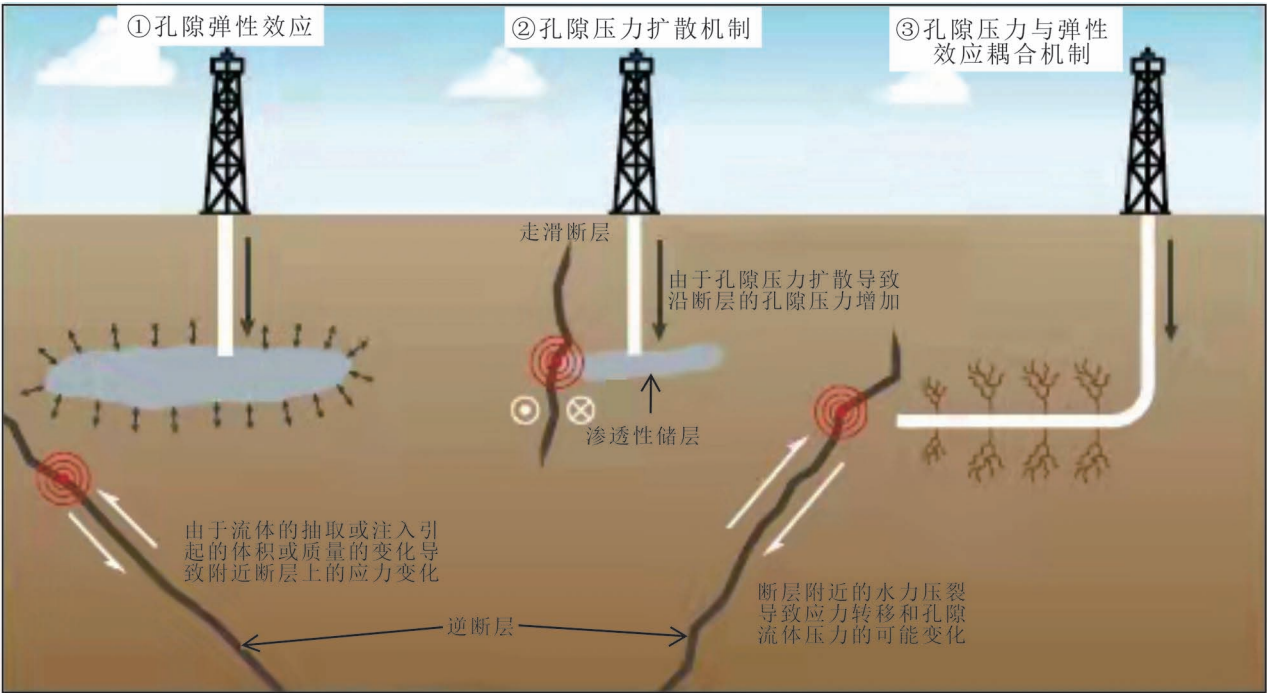
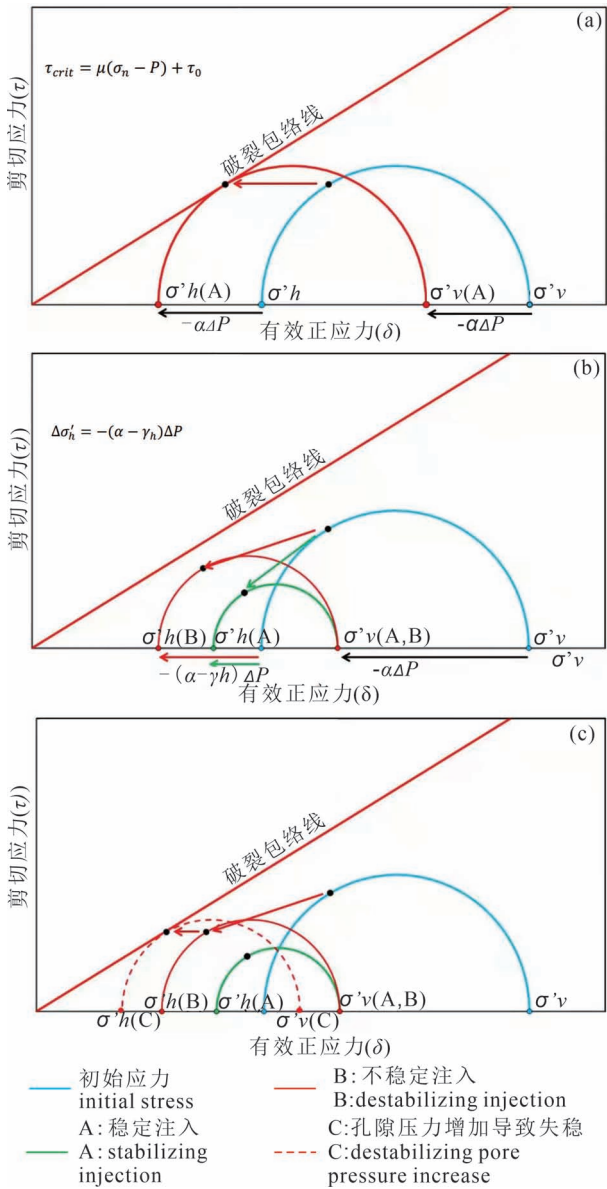


图 4 水力压裂激活先存断层诱发地震的 3 种机制 (修改自 Eaton, 2018)

Fig. 4 Three types of induced mechanism of earthquakes produced by activating pre-existing fault through hydraulic fracturing (modified from Eaton, 2018)

其中, τ_{crit} 为岩石破裂或发生滑动的临界剪应力, μ 为岩石摩擦系数, σ_n 为正应力, P 为孔隙压力, τ_0 为岩石内聚力。流体填充于地下破裂或断层引起的孔隙压力 P 可平衡岩石施加在这些破裂上的正应力 σ_n 。当流体压力过高而有效法向应力过低时, 剪切运动变得更加容易, 这通常被认为是引起地震的主要原因。因此, 理论上诱发地震的震级没有上限。目前工业开采中虽然主要以诱发对人类影响不大的 2.0 级以下的微小地震为主, 但当流体注入激活附近先存断裂时, 便可能在注入井 2 km 或更远范围内触发 2.0 级以上有感地震, 甚至破坏性地震 (Eaton, 2018)。

目前认为, 相关工业活动中因流体注入触发已有断层活动的机理主要包括 3 种: 孔隙压力扩散、孔隙弹性效应以及孔隙压力与弹性效应耦合 (图 4)。



孔隙压力扩散: 注入流体使岩石孔隙中的流体压力增加, 直接引起断层面正应力减小, 或者通过高渗透性渗流通道传递至较远距离断层, 通过降低摩擦力导致断层更易滑动, 这种诱发机制需要流体到达断层。因此, 孔隙压的增大主要限于注入井周围有限的区域, 通常集中在水力压裂井 1~2 km 范围内 (图 5a)。

孔隙弹性效应: 通过注水对周围的岩石产生压强, 使之产生弹性应变, 即孔隙弹性, 可以在水不进入断层的情况下, 对远处断层施加压力。该诱发机制不需要流体到达断层, 影响范围广 (图 5b)。

孔隙压力与弹性效应耦合: 对于黏土含量高的非常规储层, 在靠近断层处的孔隙压力扩散引起无震蠕滑, 再经孔隙弹性效应传导, 引起远端断层的应力扰动和最终破裂。这一远程触发机制通常作用时间较长, 与水力压裂后几周或几年内还可能诱发地震的现象相吻合 (图 5c)。

工业开采中诱发地震的具体触发机制、触发距离以及发生概率在很大程度上取决于区域地质构造条件, 通常需具备 3 个条件: 引发显著的应力扰动, 开采区附近存在一定规模的处于临界应力状态的断层, 以及两者之间存在直接或间接的耦联机制 (即应力扰动可通过某种方式改变断层原有的应力状态)。因此, 地质构造条件的差异, 包括活动构造背景和断裂发育程度等的不同, 是导致不同区域内工

图 5 激活断层诱发地震 3 种机制的摩尔—库伦破坏准则 (TNO, 2014)

Fig. 5 Mohr—Coulomb failure criteria of induced earthquakes on activated pre-existing fault

(a) 孔隙压力扩散, τ_{crit} 为临界剪应力, σ_n 为正应力, P 为孔隙压力, τ_0 为内聚力, α 为有效应力系数, 流体注入使孔隙压力 P 增大, 垂向有效应力 σ_v 和水平有效应力 σ_h 均减小 $\alpha\Delta P$; (b) 孔隙弹性效应, 在稳定流体注入和不稳定流体注入过程中, 垂向有效应力 σ_v 减小 $\alpha\Delta P$, 水平有效应力 σ_h 减小 $(\alpha - \gamma_h)\Delta P$, 其中 $\gamma_h = \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}$, ν 为泊松比; (c) 孔隙压力扩散与孔隙弹性效应耦合, 二者的联合效应使断层失稳破裂

(a) Pore pressure increase, τ_{crit} , σ_n , P , τ_0 , α are critical shear stress, the total normal stress on the fault, pore pressure, cohesion and Biot's coefficient, respectively, the vertical and horizontal effective stress reduce $\alpha\Delta P$ during fluid injection; (b) poroelastic stress changes, the vertical and horizontal effective stress reduce $\alpha\Delta P$ and $(\alpha - \gamma_h)\Delta P$, respectively during injection in permeable reservoir; (c) combined effect of poroelastic stressing and pore pressure increase brings the fault to failure

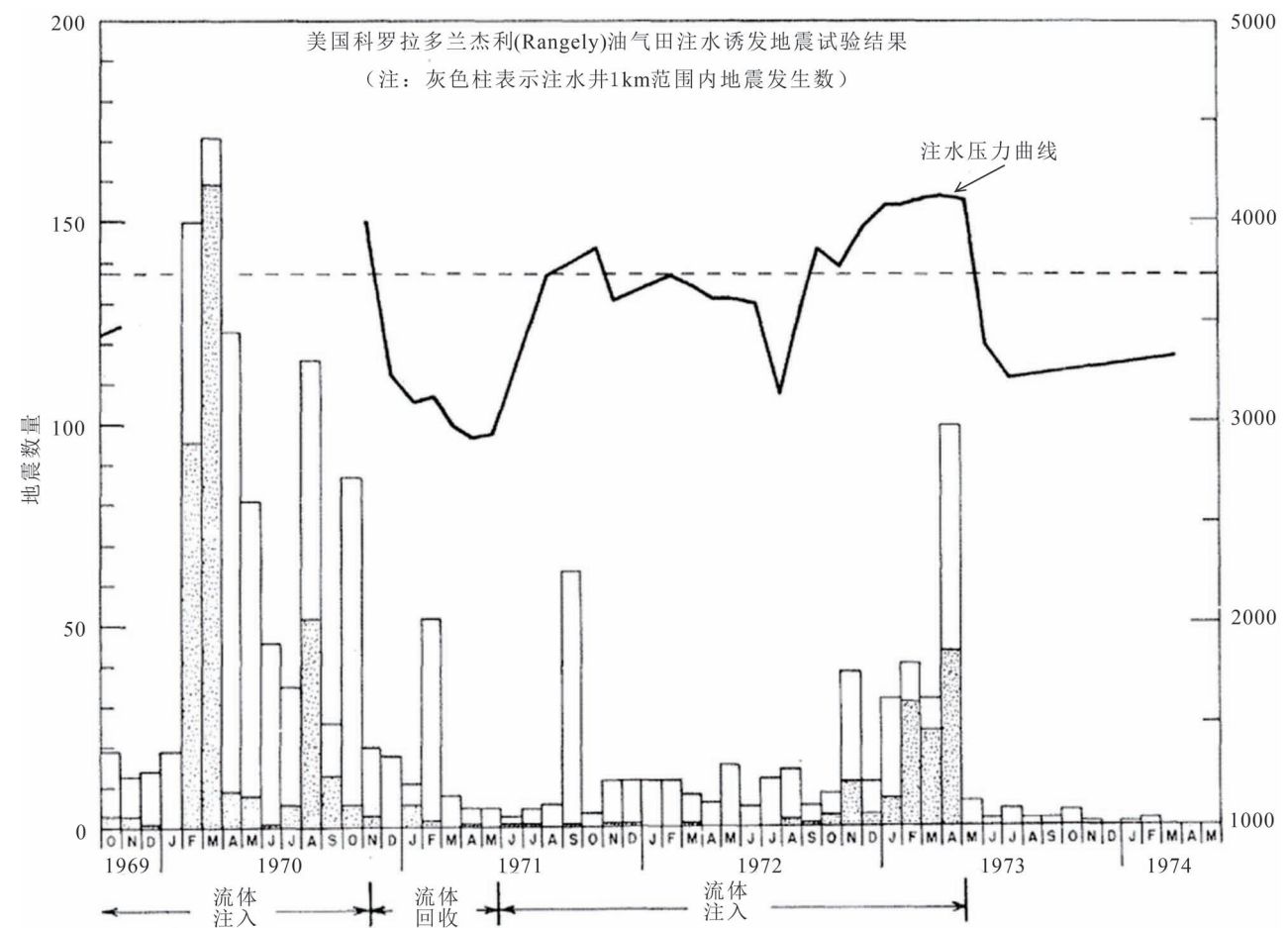


图 6 美国科罗拉多兰杰利油气田注水诱发地震试验结果(据 Raleigh et al. , 1976)

Fig. 6 Experimental results of induced earthquakes by injection of fluid at Rangely oil—gas field in Colorado, USA
(from Raleigh et al. , 1976)

业开采过程中诱发地震情况差异的主要原因(Cornet, 2015; Guglielmi et al. , 2015)。如中美大部分页岩开采区的诱发地震问题都并不突出,而仅在俄克拉荷马州和四川盆地南部相对较为典型。

3 流体注入参数与诱发地震关系

既然流体注入是诱发地震的主要因素之一,那么是否可以通过控制流体注入来控制诱发地震的频率和强度呢?这是能否对诱发破坏性地震实现有效防范和管控的关键科学问题。

20 世纪 60 年代在美国科罗拉多州兰格里油田进行了著名的注水诱发地震实验,发现地震活动性的差异是由地震活动带中流体压力的变化引起的(Raleigh et al. , 1976, 图 6),从而提出了通过控制断裂带的流体压力对诱发地震进行管控的可行性。后来的断层带注水实验提出如果在流体注入过程中

可以连续监测地震滑移,则可以通过调整注入流量使滑移率保持在可控的地震运动范围内(Guglielmi et al. , 2015; Cornet, 2015)。然而,在更深的注水过程中实现实时监测地震滑移是一个难点。

流体注入过程中主要涉及到 3 个参数的变化,即注入体积 V 、流体压力 P 和注入速率 R 。注入作业过程因流体参数变化诱发地震的规模也会有所不同。

正常情况下,诱发地震的潜在震级与流体注入体积 V 成正比,即注入的流体体积越大,可能诱发的潜在震级也越大(McGarr, 2014)。流体注入所产生的压力是通过改变正应力 σ_n 和孔隙压力 p 来实现对诱发地震的影响。此外,控制流体注入速度,确保在流体注入后钻井附近岩石地层单元充分完成应力调整,达到新的力学平衡也是管控诱发地震的有效方法。然而,一些学者认为将注入量或注入速率

作为防控标准并不可靠。如韩国浦项 2017 年出现的 Mw 5.5 级的诱发地震,项目实施中注入的流体量很小,甚至不到能够产生如此大地震所需注入量的 1/500 (Lee et al., 2019)。因而否定了之前认为的“最大地震震级受流体注人体量控制”的认识。实际上,调控 V 、 P 和 R 大小的本质是改变可能诱发地震的断层面上的正应力 σ_n 、孔隙压力 p 和摩擦系数 u 之间的相对数值关系。通过综合管控 V 、 P 和 R 之间的数值耦合关系,确保剪切应力小于岩石破裂强度,这样就有可能实现对诱发地震的管控。

此外,先存构造的差异对诱发地震具有重要影响。2021 年 9 月 16 日泸县地震表明,此次地震发生在 NWW 向构造带上,而不是区域上已知的 NE 向断裂带。这说明页岩气开采过程中,不同空间产状的先存断裂容易被激活的程度也不尽相同 (Wang Maomao et al., 2020)。在流体注入方向、体积、速度一致的情况下,平行断层面向的剪切应力越大,断层越容易滑动,反之,垂直断层面向的正应力越大,断层则更易处于闭锁状态。根据这一原理,如果可以准确掌握断裂的深部产状和延伸,同时调控流体注入的方向和角度,把作业过程在断层面上产生的剪应力降到最低,便可能实现对诱发地震强度的人为控制。

4 应对措施

目前,国际上常用的应对措施是开发前进行的事前地质安全评估和开发过程中的交通灯预警制度等。先存的、处于应力临界状态的断层通常是水力压裂触发破坏性地震的先决条件,理论上可以通过增大水力压裂和这些断层之间的避让距离来防范地震灾害风险。然而也有诱发地震发生在之前未知的断裂上,如我国川南 2021 年 9 月 16 日泸县地震发生在未知的 NWW 向构造带上,而不是区域上已知的 NE 向断裂带。交通灯预警制度是针对油气田开发等工业活动诱发地震的 3 中状态而采取的相应行动 (Mignan et al., 2017; Verdon and Bommer, 2021; 邱宇等, 2021),即地震较小时,工业活动正常进行(绿灯),当地震活动与震级达到某一阈值时,生产过程需要马上进行调整(黄灯),当地震震级进一步增大预示高风险时,则需要马上停止相关作业(红灯)。建立交通灯系统,目前已成为国际上最常用的风险控制策略之一。但是由于诱发地震引起的灾害严重程度随人口密度等因素而变,不同国家和地区的预警阈值也相差很大 (Atkinson et al., 2020)。

除此之外,也有利用物理—统计模型预测诱发地震发生概率 (Shapiro et al., 2010; Broccardo et al., 2017),通过应力预处理降低风险 (Fryer et al., 2020) 和基于过程的多学科方法 (Hager et al., 2021) 等不同方式来实现对诱发地震的科学管控,优劣之处不尽相同。

5 讨论

工业活动诱发地震因与人工作业强度具有密切的时空相关性,因此表现出不同于天然构造地震的典型特征。通常诱发地震活动的范围一般在钻井 1~10 km 范围内,其中水力压裂一般集中在 1~2 km,废水灌注可影响到 10 km 或更大范围 (Kim, 2013; Ellsworth, 2013)。地震震源深度浅,一般在 5 km 以上,常以震群的形式出现,在开采期间出现明显的丛集性活动 (Keranen et al., 2014)。

关于地震活动与工业开采的时空相关性, Davis 等 (1992) 提出了识别地下流体注入是否是诱发地震主因的 7 类标志,包括:这些事件是否是该区首次发生此种性质的地震;流体注入或提取与地震活动时间是否重叠;震中是否在钻井附近等判别标志。

随着全球地下能源开发利用规模的扩大,部分开采区出现地震活动频率增加、强度变大的现象已是不争的事实,但主要为 3.0 级以下的非破坏性地震,诱发 3.0 级及以上地震仍属于低概率事件。如在水力压裂诱发地震现象相对突出的加拿大西部,也仅有 0.3% 的水平井出现过 $M \geq 3.0$ 以上的诱发地震现象 (Atkinson et al., 2016)。

流体注入究竟能诱发多大的地震仍存在较大的争议,争议的焦点是最大震级究竟是由注入参数决定还是由地质构造条件决定。前人通过统计注入流体的体积、速率和压力等与诱发地震的关系,曾提出了不同作业参数下诱发地震震级的上限 (McGarr, 2014)。然而,也有案例显示如果诱发地震发生在应力方向有利的构造断层上,那么诱发地震可能主要受区域构造和断层的水文连通性影响,而并非简单受控于注水量、压力、速度和注水位置等,并可能诱发与区域构造地震相当的地震 (Van der Elst et al., 2016)。我国四川兴文发生的 2018 年 Mw 5.3 地震,被认为是全球已知的水力压裂诱发的最大震级地震,引起了显著的地表破坏 (Lei Xinglin et al., 2019)。

尽管诱发地震与工业生产过程具有密切的关系,但不可否认的是,区域地质构造环境和断裂条件

是影响诱发地震强度的关键控制性因素。全球案例的统计结果表明在已有的工业开采区,绝大部分区域的诱发地震问题并不突出,仅在相对特殊的地质环境下才会出现较明显的诱发破坏性地震 (Foulger et al., 2018)。这种特定的地质条件受局部断裂和地层发育状况的影响。如美国俄克拉荷马州的 Kingfisher 页岩气田周缘地质构造复杂、断层发育,自规模化开发以来,3.5 级以上地震年均发生 65 次,是之前的 10 倍 (Kolawole et al., 2019)。而在地质构造相对稳定的美国宾夕法尼亚州中部的 Marcellus 页岩气田和北达科他州的 Bakken 页岩气田,无诱发 3.5 级以上地震的报道。同样,在我国的重庆涪陵与川南两地,因地质构造条件不同,页岩气规模化开采以来的地震活动差别较大。重庆涪陵没有出现有感地震在数量和强度上的增加,而川南长宁、荣县、泸县和威远等地 3.5 级以上有感地震频率和强度都显著增强。

目前,尽管科学界对诱发地震的发震机制尚未达成一致认识,孕震、发震理论等仍需深入探索和研究。然而,国际上关于诱发地震的监测预警技术和控震理论在不断进步,页岩气开发过程的地震灾害风险防控也取得了显著成效。研究与实践表明,在准确认识地质构造条件、断层分布与空间结构的基础上,通过实时监测水力压裂过程中储层的应力应变、地震震级和强度,可以对诱发地震风险进行预警和防控。如美国在俄克拉荷马州页岩气开采区通过交通灯系统管控,近年来诱发地震事件已有所减少。意大利瓦尔阿格里油田、芬兰赫尔辛基地热田通过管控流体注入量和注入速率,控震取得明显实效 (Hager et al., 2021; Kwiatak et al., 2019)。

6 结论

(1) 工业开采诱发地震以 3.0 级及以下的非破坏性地震为主,但在特定的地质背景和断裂条件下,也有可能诱发 3.0 级以上的有感地震甚至破坏性地震,灾害风险不容忽视。

(2) 不同国家工业活动诱发地震的方式不尽相同,同一国家不同工业开采区诱发地震活动情况差别较大,诱发地震除了与流体注入过程相关,起决定因素的是该区域的地质构造背景和断裂条件。

(3) 开展诱发地震与区域构造地震的判定标准及其关联性研究可能是今后的研究重点。页岩气等能源开发活动改变了震源区域的应力状态,增加了地震发生的风险。我国四川和新疆都是大陆构造地

震多发地区,同时由于页岩气资源丰富,进行了大规模页岩气开采活动。近年来四川地震与开采页岩气是否有关联,存在着不同意见,需要进一步论证。如何区分某区域发生的地震属于构造地震还是诱发地震,以及两者之间的关联性是一个科学难题。需要今后在进行大量资料分析与研究的基础上,得出令人信服的科学结论。

致谢:感谢评审专家和责任编辑对本文修改提出的宝贵意见。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1505~1532.
- 邱宇, 房立华, 王蕊嘉, 范莉萍, 蒋长胜. 2021. “交通灯”系统及其在诱发地震监测中的应用. 中国地震, 37(2): 1~24.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 赵敏, 王思维, 宫悦, 乔慧珍, 苏金蓉. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 Ms 6.0 地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 62(9): 3432~3447.
- 张致伟, 程万正, 梁明剑, 王晓山, 龙锋, 许艳, 陈文康, 王世元. 2012. 四川自贡—隆昌地区注水诱发地震研究. 地球物理学报, 55(5): 1635~1645.
- 邹才能, 赵群, 丛连铸, 王红岩, 施振生, 武瑾, 潘松圻. 2021. 中国页岩气开发进展、潜力及前景. 天然气工业, 41(1): 1~14.
- Atkinson G M, Eaton D W, Ghofrani H, Walker D, Cheadle B, Schultz R, Shcherbakov R, Tiampo K, Gu J, Harrington R M, Liu Y J, Baan M, Kao H. 2016. Hydraulic fracturing and seismicity in the Western Canada sedimentary basin. Seismological Research Letters, 87(3): 631~647.
- Atkinson G M, Eaton D W, Igonin N. 2020. Developments in understanding seismicity triggered by hydraulic fracturing. Nature Reviews Earth & Environment, 1: 264~277.
- Broccardo M, Mignan A, Wiemer S, Stojadinovic B, Giardini D. 2017. Hierarchical Bayesian modeling of fluid-induced seismicity. Geophysical Research Letters, 44: 11357~11367.
- Cornet F H. 2015. Earthquakes induced by fluid injections. Science, 348: 1204~1205.
- Davis S D, Frohlich C. 1993. Did (or will) fluid injection cause earthquakes—Criteria for a rational assessment. Seismological Research Letters, 64(4): 207~224.
- Davies R, Foulger G, Bindley A, Styles P. 2013. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons, Marine and Petroleum. Geology, 45: 171~185.
- Eaton D W. 2018. Passive Seismic Monitoring of Induced Seismicity: Fundamental Principles and Application to Energy Technologies. Cambridge University Press, UK, 121.
- Ellsworth W L. 2013. Injection-induced earthquakes. Science, 341, 1225942.
- Farahbod A M, Kao H, Walker D M, Cassidy J. 2015. Investigation of regional seismicity before and after hydraulic fracturing in the Horn River Basin, northeast British Columbia. Canadian Journal of Earth

- Sciences, 52: 112~122.
- Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, Julian B R, Davies R J. 2018. Global review of human-induced earthquake. *Earth Science Reviews*, 178:438~514.
- Guglielmi Y, Cappa F, Avouac J P, Henry P, Elsworth, D. 2015. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip. *Science*, 348: 1224~1226.
- Hager B H, Dieterich J, Frohlich C, Juanes R, Mantica S, Shaw J H, Bottazzi F, Caresani F, Castineira D, Cominelli A, Meda M, Osculati L, Petroselli S, Plesch, A. 2021. A process-based approach to understanding and managing triggered seismicity. *Nature*, 595: 685~689.
- Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R W. 2007. *Fundamentals of rock mechanics* (Fourth edition). Blackwell Publishing Ltd, USA.
- Kao H, Farahbod A M, Cassidy J F, Lamontagne M, Snyder D, Lavoie D. 2015. Natural Resources Canada's induced seismicity research. *Proceedings of the Schatzalp Induced Seismicity Workshop*, Davos, Switzerland, 10~13.
- Keranen K M, Weingarten M, Abers G A, Bekins B A, Ge S. 2014. Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science*, 345: 448~451.
- Kim W Y. 2013. Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118: 3506~3518.
- Kolawole F, Johnston C S, Morgan C B, Chang J C, Marfurt K J, Lockner D A, Reches Z, Carpenter B M. 2019. The susceptibility of Oklahoma's basement to seismic reactivation. *Nature Geoscience*, 12(10): 839~844.
- Kwiatek G, Saarni T, Ader T, Bluemle F, Bohnhoff M, Chendorain M, Dresen G, Heikkinen P, Leonhardt M, Malin P, Martinez-Garzon P, Passmore K, Passmore P, Valenzuela, S, Wollin C. 2019. Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland. *Science Advances*, 5: eaav7224.
- Langenbruch C, Zoback, M D. 2016. How will induced seismicity in Oklahoma respond to decreased saltwater injection rates? *Science Advances*, 2(11): e1601542.
- Lee K K, Ellsworth W L, Giardini D, Townend J, Ge S M, Shimamoto T, Yeo I W, Kang T S, Rhie J, Sheen D H, Chang C D, Woo J U, Langenbruch C. 2019. Managing injection-induced seismic risks. *Science*, 364(6442): 730~732.
- Lei Xinglin, Ma Shengli, Chen Wenkang, Pang Chunmei, Zeng Jie, Jiang Bing. 2013. A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, Southwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(8): 1099~1110.
- Lei Xinglin, Wang Zhiwei, Su Jinrong. 2019. The December 2018 M_L 5.7 and January 2019 M_L 5.3 earthquakes in south Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing. *Seismological Research Letters*, 90(3): 1099~1110.
- Lei Xinglin, Su Jinrong, Wang Zhiwei. 2020#. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities. *Science China: Earth Sciences*, 63(11): 1633~1660.
- Li Tao, Sun Jianbao, Bao Yuxin, Zhan Yan, Shen Zhengkang, Xu Xiwei, Cecile Lasserre. 2021. The 2019 M_w 5.8 Changning, China earthquake: A cascade rupture of fold—accommodation faults induced by fluid injection. *Tectonophysics*, 801: 228721.
- McGarr A. 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2): 1008~1019.
- McGarr A, Simpson D, Seeber L. 2002. Case histories of induced and triggered seismicity, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Waltham: Academic Press: 647~661.
- Meng Lingyuan, McGarr A, Zhou Longquan, Zang Yang. 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan Basin of China based on data from a temporary seismic network. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 109(1): 348~357.
- Mignan A, Broccardo M, Wiemer S, Giardini D. 2017. Induced seismicity closed-form traffic light system for actuarial decision-making during deep fluid injections. *Scientific Reports*, 7(1), 13607.
- Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO). 2014. Literature review on injection-related induced seismicity and its relevance to nitrogen injection. TNO 2014 R11761, <http://inducedearthquakes.org/reports>.
- Qiu Yu, Fang Lihua, Wang Ruijia, Fan Liping, Jiang Changsheng. 2021#. Traffic light system and its application on induced earthquake monitoring. *Earthquake Research in China*, 37(2): 349~367.
- Raleigh C B, Healy J H, Bredehoeft J D. 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, 191: 1230~1237.
- Rubinstein J L, Mahani A B. 2015. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity. *Seismological Research Letters*, 86(4): 1060~1067.
- Shapiro S A, Dinske C, Langenbruch C, Wenzel F. 2010. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations. *The Leading Edge*, 29(3): 304~309.
- Tang Lanlan, Lu Zhou, Zhang Miao, Sun Li, Wen Lianxing. 2018. Seismicity induced by simultaneous abrupt changes of injection rate and well pressure in Hutubi gas field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 123(7): 5929~5944.
- Tan Yuhang, Hu Jun, Zhang Haijiang, Chen Yukuan, Qian Jiawei, Wang Quanfeng, Zha Huasheng, Tang Pan, Nie Zhou. 2020. Hydraulic fracturing induced seismicity in the southern Sichuan Basin due to fluid diffusion inferred from seismic and injection data analysis. *Geophysical Research Letters*, 47(4): e2019GL084885.
- Van Der Elst N J, Page M T, Weiser D A, Goebel T, Hosseini S M. 2016. Induced earthquake magnitude are as large as (Statistically) expected. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(6): 4575~4590.
- Verdon J P, Bommer J J. 2021. Green, yellow, red, or out of the blue? An assessment of traffic light schemes to mitigate the impact of hydraulic fracturing-induced seismicity. *Journal of Seismology*, 25: 301~326.
- Wang Maomao, Yang Hongfeng, Fang Lihua, Han Libo, Jia Dong, Jiang Danqi, Yan Bing. 2020. Shallow Faults Reactivated by Hydraulic Fracturing: The 2019 Wei Yuan Earthquake Sequences in Sichuan, China. *Seismological Research Letters*, 91(6): 3171~3181.
- White J A, Foxall W. 2016. Assessing induced seismicity risk at CO₂ storage projects: recent progress and remaining challenges. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49: 413~424.
- Yi Guixi, Longfeng, Liang Mingjian, Zhao Min, Wang Siwei, Gong Yue, Qiao Huizhen, Su Jinrong. 2019#. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 M_s 6.0 Sichuan Changning earthquake sequence. *Chinese Journal of*

Geophysics, 62(9): 3432~3447.

Zhang Zhiwei, Cheng Wanzhegn, Liang Mingjian, Wang Xiaoshan, Long Feng, Xu Yan, Chen Wenkang, Wang Shiyuan. 2012&. Chinese Journal of Geophysics, 55(5): 1635~1645.

Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, Wang Hongyan, Shi Zhensheng, Wu Jin, Pan Songqi. 2021&. Development progress, potential and prospect of shale gas in China. Natural Gas Industry, 41(1): 1~14.

Underground resource exploiting and induced earthquake: State and progress

CHEN Peng^{1, 2, 3)}, WU Zhonghai^{1, 2, 3)}, MA Licheng¹⁾, ZHOU Chunjing^{1, 2, 3)}

- 1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;*
- 2) *Key Laboratory of Active tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing, 100081;*
- 3) *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing, 100081*

Abstract: Clean energy such as the Shale gas and geotherm is becoming an increasingly important part of global energy exploiting and has been a major growth point of China future energy output, which would exert positive effect on ensuring energy security and peaking carbon emissions and carbon neutral. However, the induced earthquakes caused by underground industrial exploiting is increasingly attracting people’s attention. Understanding the relationship between industrial activity and induced earthquake and managing the seismic risk of induced earthquake have been important project and challenge for the current world. Therefore, this study surveys the global typical cases of induced earthquakes and introduces their basic characteristics and differences among different countries. Also, the main manner, physical mechanism and the relationship with fluid injection of induced earthquake are analyzed and summarized. We suggest that the induced earthquake is not only closely related with the fluid injection itself, but also is controlled and determined by the local geology and fault condition.

Keywords: Energy exploiting; Fluid injection; Injection parameters; Induced earthquake; Fault condition

Acknowledgements: This study is financially supported by the National Science and Technology Basic Resources Investigation Program of China (No. 2021FY100104); China Geological Survey project (No. DD20221644) and Basic Science Foundation of Institute of Geomechanics (No. DZLXJK202107). Two anonymous reviewers and the editor are thanked for their constructive comments

First author: CHEN Peng, male, born in 1990, assistant professor, majoring in active tectonics and earthquake geology; Email: pengchen1208@sina.cn

Corresponding author: WU Zhonghai, male, born in 1974, professor, specializing in Neotectonics and active tectonics; Email: wuzhonghai8848@foxmail.com, wzhh4488@sina.com

Manuscript received on: 2022-04-02; Accepted on: 2022-07-28; Network published on: 2022-08-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 08. 061

Edited by: LIU Zhiqiang

