



综述

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

雷兴林^{1*}, 苏金蓉², 王志伟³

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan;

2. 四川省地震局, 成都 610041;

3. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: xinglin-lei@aist.go.jp

收稿日期: 2020-02-19; 收修改稿日期: 2020-05-28; 接受日期: 2020-06-22; 网络版发表日期: 2020-09-22

教育部国家留学基金项目(编号: 201804190004)资助

摘要 处于稳定扬子地块西北边缘的四川盆地, 其西北和西南边界为强烈地震活动带, 东北和东南部边界为变形强烈的褶皱带, 但盆地内部具有很小的应变速度, 历史上地震活动本来不高, 但在过去几十年以来, 发生了一系列中强地震. 尤其2015年以来, 地震活动出现前所未有的持续增长趋势, 且震级越来越大. 最近, 继2018年12月18日兴文5.7级地震后, 主震震级达6.0级的震群活动(长宁双河震群)袭击了长宁双河镇及周边地区. 初步研究表明, 兴文地震可能是迄今为止页岩气水力压裂诱发的最大地震. 而长宁双河6级地震有可能与附近深井采盐注水有关. 实际上, 除近年方兴未艾的页岩气开发以外, 过去40年, 在四川盆地西南部天然气田和井盐矿区存在持续的以废水回注和井盐开采为目的的注水活动, 并诱发了不同规模的地震活动. 各个注水现场具有不同的构造环境和注水规模, 为研究与注水诱发地震相关的科学问题提供了很好条件. 在这里, 文章对四川盆地内部尤其南部地区的历史地震及最近几十年来观测到的主要地震活动进行总结分析. 首先, 对1600年以来的5级以上地震进行了归纳, 得到背景地震活动频度及最近几十年的异常增加的地震活动趋势与工业注水活动的可能关联. 其次, 针对1970年以来主要地震或地震序列, 在综述以往研究结果的基础上, 结合最新数据, 综合分析了盆地内部天然成因和与注水有关的地震活动的特征和破坏性诱发地震的发生条件, 并提出一个基于地质力学分析的诱发地震风险评估管控宏观框架. 为开发规避或减轻诱发地震风险相关技术并最终使相关产业能够更加安全和有效的开展, 提出一些有关的断层活化和诱发地震研究的一些急需解决的科学问题.

关键词 诱发地震, 注水, 水压致裂, 四川盆地, 页岩气, 废水储存, 井盐

1 引言

增强性地热系统(EGS)、非常规油气开发、二氧

化碳和其他废液的地质封存等被认为在解决全球可持续发展的能源问题及缓解全球温暖化趋势方面有重要作用. 在这些工业活动中, 高压流体被压入地下, 势必

中文引用格式: 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, doi: 10.1360/N072020-0045

英文引用格式: Lei X, Su J, Wang Z. 2020. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities. Science China Earth Sciences, 63(11): 1633–1660, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9646-x>

引起深部流体压力增加, 岩石温度变化和地层变形, 并有可能导致已存断层活化. 与此有关的诱发的地震活动在全球多个地区出现持续增长的趋势, 引起了越来越多的关注. 为了这些工业应用有效且安全地进行, 如何避免或减轻与断层活化及诱发地震有关的风险已成当务之急(例如, Ahmad和Smith, 1988; Bachmann等, 2011; Kanamori和Hauksson, 1992; Kerr, 2012; Kim等, 2018; Langenbruch等, 2020; Lei等, 2008; Majer和Peterson, 2007; Yang等, 2017).

在许多学术论文中, “诱发(induce)”和“触发(trigger)”几乎不加区别而交互使用. 而在有的论文中, 仅使用“诱发”一词, 但包含两种含义(Ellsworth, 2013). 不过在涉及与工业活动有关的地震时, 客观上需要能够区分二者, 这就要求一个明确的可操作的定义. 众所周知(但未被广泛接受)的定义有两个: (1) 有的学者把只能释放人类活动所引起的附加应力的地震定义为诱发. 否则, 如果地震可以释放构造应力则定义为触发(McGarr等, 2002). 但这个定义尚难获得普遍认可, 因为较大(有感)地震释放的主要都是构造应力. (2) 如地震的震源断层破裂范围在相应活动直接影响体积之内, 当为诱发, 否则为触发. 那么, 对那些成核于影响体积之内但破裂扩展到了影响体积以外的地震呢? 有许多破坏性地震恰恰属于这种情况, 如2017年的韩国浦项 M_w 5.5地震, 目前被定义为触发地震(Ellsworth等, 2019).

中立的定义必须考虑在特定构造加载速度下, 工业活动对地震发生时间的提前量. 这只能通过综合分析和可靠的数值模拟进行估算(详见第6节). 在诸如四川盆地这样的构造加载速度非常小的地区, 很小的附加应力便会大大提前潜在地震的发生时间. 此外, 如果没有额外的附加应力, 地震可能永远不会发生, 构造应力将通过活动褶皱等缓慢的变形形式而释放. 因此, 在没有可靠的模拟结果的情况下, 尽管某些情况可能属于“触发”类别, 但本文更倾向于使用“诱发”一词.

目前, 在世界多个地区观测到了注水等工业活动引起的地震活动. 针对具体注水诱发地震实例已有大量研究成果和数以千计的学术论文. 但对涵盖了不同构造背景区域的实例进行综合性对比分析的研究成果还相对较少. 在中国四川盆地, 为废水处理和井盐生产而进行的长期注水(持续数年数十年)(Lei等, 2013, 2008; 张致伟等, 2012)和页岩气水力压裂的短期注水

(单一井场断续几个月)(Lei等, 2017a, 2019a; Meng等, 2019; Tan等, 2020)均已诱发了大量有感地震, 包括越来越频繁的破坏性地震. 与世界其他地点的注水诱发地震活动(Atkinson等, 2016)相似, 四川盆地高水平的诱发地震活动尤其是破坏性中强地震也局限于某些地区. 例如, 在四川盆地的几个页岩气示范区中, 长宁区块表现出最强烈的诱发地震活动, 其次是威远, 最弱的涪陵焦石坝(图1). 在长宁地区, 在被认为是水力压裂诱发的2018年12月18日兴文 $M_5.7$ 地震之后(Lei等, 2019a), 附近发生了 $M_6.0$ 级地震, 被初步认为与这里长达40年的注水采盐活动有关(Lei等, 2019b; Liu和Zahradnik, 2020; 易桂喜等, 2019). 在本文中, M 指地方震级 M_L 或面波震级 M_S , 矩震级明记为 M_W . 在四川盆地4级以上中强震的 M_W 往往小于 M_S 或 M_L . 近年来, 与注水相关的诱发地震的震级和频度断续增加, 导致产业界、学术界以及社会上对潜在的与断层活化有关的风险意识增强. 加上其对社会经济意义的影响, 导致了对诱发地震活动的科学兴趣激增. 除需要进行水力压裂的活动以外, 在诸如废水及二氧化碳的封存处理和井盐生产等注水活动中, 地震或微震是不需要的, 但有时又不可避免. 与此相反, 水力压裂的目的是为了在致密的岩层中产生新的裂缝和/或打开已存裂缝, 以增强储层的渗透性, 从而实现经济的油气产出. 脆性岩石的压裂必然有微震伴生, 其震级通常小于0, 多数在-1级以下(Chen等, 2018). 这样的微震活动, 本文称之为“压裂微震”, 不但不会造成危害, 反而通过对微地震事件的成像为评估压裂效果提供一个有用的替代方法(Mayerhofer等, 2010).

通常所说的诱发地震, 是指那些在注水活动期间或其后, 已存断层的活动导致的震级更大的地震, 其中备受关注的是有感地震和破坏性地震. 一般2级左右的浅源地震便会有感, 而在历史上不曾经历过强震的地区, 频繁的3级以上地震便会产生一定破坏, 5级以上地震可导致严重的经济损失甚至人员伤亡. 当然, 因为诱发地震没有明确的震级下限, 压裂微震与诱发地震二者之间并无严格界限. 低概率而高影响的诱发地震风险是四川盆地南部页岩气开采迅速发展所遭遇的新问题. 为了确保可以有效而安全地进行有关工业活动, 必须避免或减轻破坏性地震的发生. 因此, 弄清诱发地震的机理和地质力学条件, 从而进一步以预测给定地点可能诱发的潜在地震的最大震级为主的风险

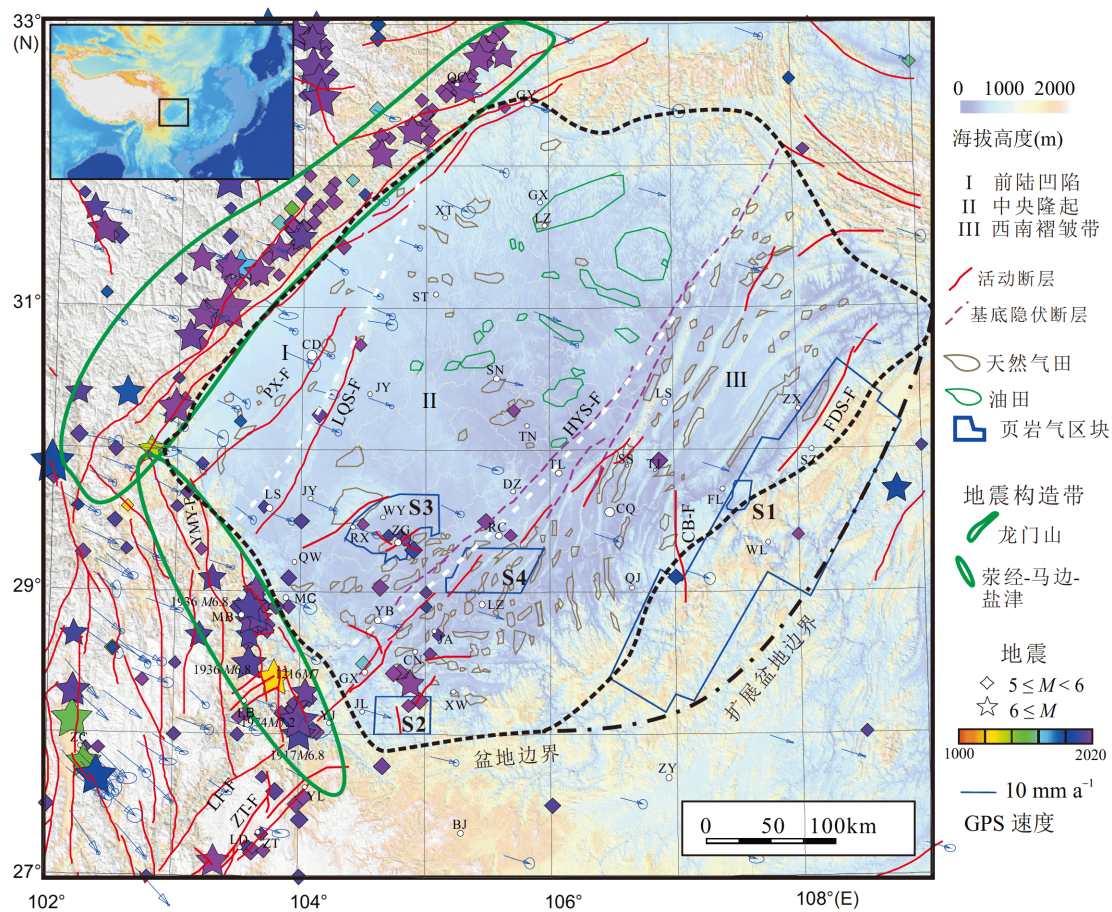


图 1 四川盆地及周边地形特征、活动断层、主要油/气田、页岩气示范区及 $M \geq 5$ 地震分布

断层数据来源“中国活动构造图”(邓起东等, 2007). 油/气田的概略轮廓是根据公开报告(Ryder等, 1994)和论文(Zhao和Yang, 2015)而得. 蓝色箭头显示的GPS速度场(Zheng等, 2017). 背景地形基于SRTM3数字高程数据制作(<http://srtm.csi.cgiar.org/SRTM3>). 地震目录数据由中国地震数据中心(<http://data.earthquake.cn>)提供. 构造: FDS-F, 方斗山断裂; PX-F, 浦江-新津断裂; LQS-F, 龙泉山断裂; YMY-F, 荣经-马边-盐津断裂带; LF-F, 连峰断裂; ZT-F, 昭通断裂; CB-F, 长岭-半边山断裂; YMY-F, 荣经-马边-盐津地震构造带. 地名: CN, 长宁; FL, 涪陵; GX, 高县; LB, 雷波; LS, 乐山; MB, 马边; QW, 犍为; RC, 荣昌; RX, 荣县; SN, 遂宁; TJ, 统景; TN, 潼南; WL, 武隆; WY, 威远; XW, 兴文; YB, 宜宾; YJ, 盐津

评估是学术界和产业界共同面临的科学挑战. 在四川盆地, 已经观察到大量的在不同地质条件和不同注水条件下的诱发地震活动, 对于诱发地震研究又是机遇. 因此, 从这里获得的教训和认识对于地震学研究和安全有效的工业生产都具有极大帮助.

本文结合最新数据对四川盆地内部地震活动的有关研究结果和现状进行了全面综述. 首先, 我们概要地分析了盆地内部自1600年以来5级以上的地震活动, 获得对四川盆地长期背景地震活动的总体认识, 总结近几十年来相对频繁的中强地震活动趋势, 列举可能的诱发地震. 其次, 在回顾以往研究成果的基础上, 结合一些最新观测数据和处理结果, 对四川盆地自然成因

的和注水诱发的主要地震活动的地震学特征和构造条件进行了综合分析. 最后, 归纳了从四川盆地实例研究获得的一些认识和见解, 提出急需解决的科学问题和可用于评估管控诱发地震有关风险的基于构造力学分析的概念性框架, 为进一步深入研究提供一些线索.

2 四川盆地地质构造背景和断层稳定性分析

2.1 四川盆地地质构造背景

位于中国西南部的四川盆地, 构造上是稳定的扬子地块的西北部分(图1和2). 盆地西北和西南边缘与构造活跃的青藏高原相接, 其特征是复杂的新生代构

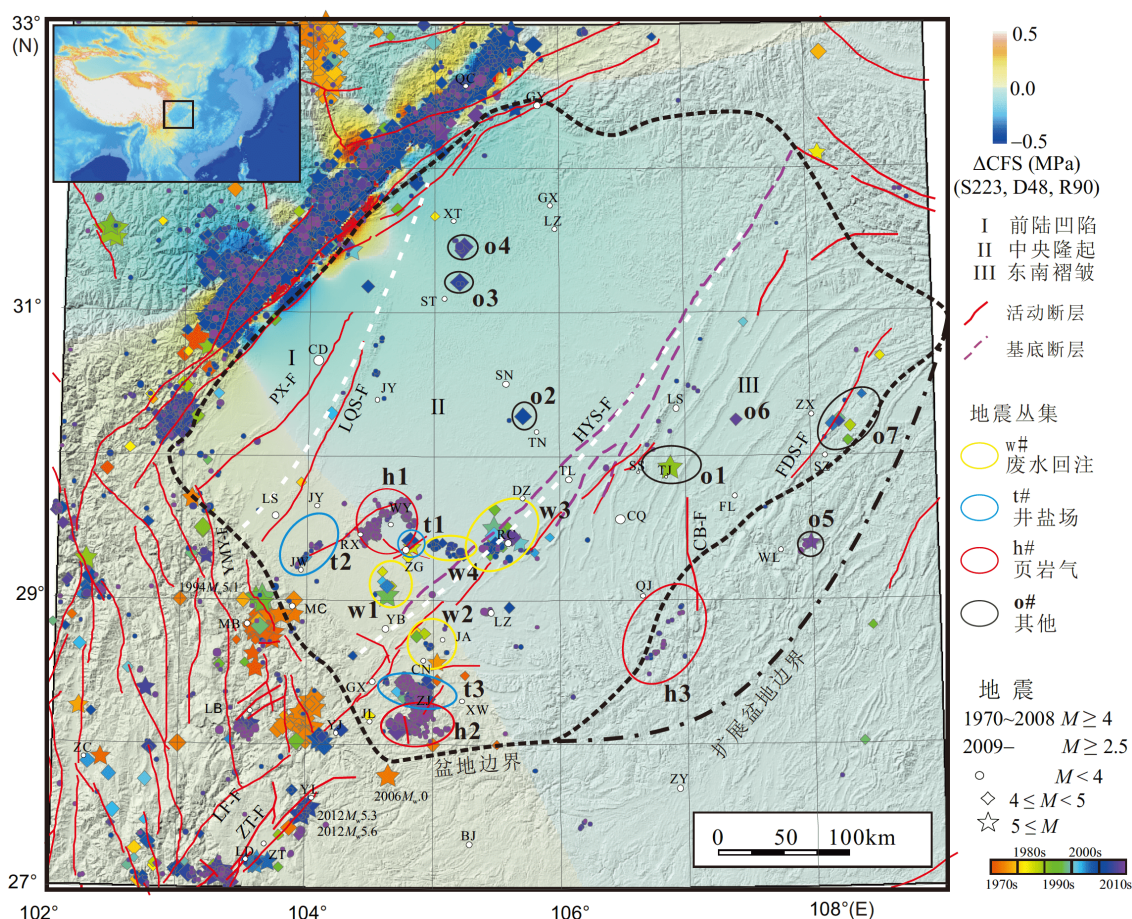


图 2 四川盆地及周边地区过去50年主要地震震中分布图

背景彩色表示2008年汶川地震在北东走向的逆断层(走向/倾角/前倾=223°/48°/90°)引起的同震库伦应力变化(ΔCFS)，滑移模型为基于将远震波形和局部地震位移相结合的反演结果(王卫民等, 2008)。网络版附图S1(<http://earthcn.scichina.com>)是同震体积应变的分布, 其他参见图1说明

造和强烈的地壳运动和高水平的地震活动,包括频繁的大震活动.盆地西北边界非常清晰,与龙门山逆冲断裂带相对应,是一个地震构造带,2008年发生了汶川 M_w 7.9地震,2013年发生了雅安 M_w 6.9地震(图1和2).西南边界对应于荣经-马边-盐津断裂带(图1中的“YMY-F”),该断裂带以左旋走滑断层为主.YMY断裂带的北段显示出相对较弱的地震活动.中部地区以马边县为中心,发生过6.8级地震.南部地区以强烈地震为特征,最大地震为1972年的7.2级地震.

从地图上看,四川盆地有三个主要构造单元:(1)西北侧的山前冲积地陷盆地,为龙泉山脉以西以成都平原为中心的三角形区域;(2)东北向延伸的中央隆升带,地貌上为丘陵地带,具有宽缓的背斜向斜构造特征;(3)东南侧的褶皱带,主要由一系列NE-SW延伸

的山脉构成, 构造特征为狭窄背斜和宽缓向斜交互, 褶皱翼部下方发育铲状逆冲断层(cf. [Korsch等, 1991](#)). 龙泉山脉和华蓥山脉分别是三个单元的边界. 在垂直剖面上, 四川盆地具有两个不同的地层单元: 下部的古老结晶基底和上部沉积层. 上部与前述三个主要构造单元对应具有不同变形特征和断层分布. 沿不同深度的蒸发盐岩层存在广泛分布的滑脱层. 结晶基底具有强烈的变质岩特征. 基底顶部边界在西北侧较深(可达13km), 东南测较浅(7km左右), 背斜部位更浅, 有的不到6km. 有几条隐伏的规模很大的基底断裂, 对沉积层的构造变形有一定作用. 其中最重要的是沿华蓥山系(中央隆升带与东南褶皱带的边界)北东向延伸的基底逆断层.

在更广泛的背景下，四川盆地位于稳定的华南地

块的西北部, 具有强的岩石圈, 被称为相对稳定的大陆区域. GPS数据显示, 该盆地与华南地区运动一致, 目前的总应变率非常小(Gan等, 2007; Zheng等, 2017), 而四川盆地南部的剪切应变率为 $(4\sim 8)\times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ (Wang和Shen, 2020).

四川盆地是特提斯构造域巨型油气富集带中一个大型古生代-中生代海相-陆相叠合盆地, 以井盐和天然气闻名于世. 同时, 它也是中国页岩气开发潜力最大的地区之一. 井盐生产和天然气利用已有2000多年的历史, 天然气的工业化勘探和开发已经持续了50多年, 深井注水采盐生产也进行了70多年. 页岩气开发始于2008年, 自2015年开始规模化压裂以来发展迅速.

2.2 断层稳定性分析

越来越多的研究表明, 已存断层的快速失稳滑动是诱发地震(不包括压裂微震)的必要条件之一, 因此有必要在此介绍一下有关断层滑动的基本理论. 除了断层的规模和密度以外, 应力模式和断层的方向也是诱发地震活动出现地区性差异的重要因素. 因此, 定量的断层稳定性分析对于与诱发地震有关的风险评估和管理很有意义(Streit和Hillis, 2004). 根据库仑破裂准则, 已存断层滑动失稳的临界条件为

$$\tau = \mu \sigma_c = \mu(\sigma - P_f), \quad (1)$$

式中, τ 和 σ 分别是作用在断层面的剪切应力和法向应力(压缩为正), P_f 是孔隙压力, μ 表示断面上的滑动摩擦系数(摩擦强度). 在断层活化分析中, 讨论注水等对断层的应力扰动时, 更直接的是断层的库仑破坏应力(CFS)的变化, 其定义为

$$\Delta \text{CFS} = \Delta \tau - \mu \Delta \sigma_c. \quad (2)$$

另外, 断层滑动趋势(slip-tendency)也是评估断层活化风险的更直观的变量. 断层在给定应力场下的滑动趋势(T_s)取决于断层面的摩擦系数以及作用在其上的剪切应力与法向应力之比(Morris等, 1996):

$$T_s = \tau / \sigma_c. \quad (3)$$

$$\Delta T_s = \Delta \tau / (\Delta \sigma - \Delta P). \quad (4)$$

在主应力轴坐标系(s_1, s_2, s_3)下, 作用在给定方向余弦(l, m, n)的断面上的剪应力和正应力可以从三个主应力大小($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)计算获得:

$$\begin{aligned} \tau^2 &= (\sigma_1 - \sigma_2)^2 l^2 m^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 m^2 n^2 \\ &\quad + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 n^2 l^2, \\ \sigma &= \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2. \end{aligned} \quad (5)$$

在许多情况下, 如用具有不同产状的震源断层反演区域应力场时, 只能得到主应力的方向和主应力差的比值(R)或应力形状比(ϕ)(Etehecopar等, 1981; Gephart和Forsyth, 1984):

$$R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}, \quad (6)$$

$$\phi = 1 - R = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}. \quad (7)$$

在给定的区域应力场下, 断层滑动趋势是断层面与最大主应力轴之间的夹角的函数, 一般情况下($\mu=0.6$)这个角度为 30° 左右时, 滑动趋势为最大, 这样的断层被描述为具有优势产状(optimally-oriented或者favorably-oriented), 最容易活化. 一个地区的应力场往往受那些具有优势产状断层控制, 其他断层则相对稳定, 甚至无法活动. 对于处于压缩环境的四川盆地而言, 假设垂直应力等于上覆地层覆盖压, 同时假设优势产状的断层处于临界状态, 这样的最坏假设对于评估诱发地震风险来说是个最安全的假设.

库伦准则确定断层能不能滑动, 但如何滑动取决于断层的摩擦本构属性, 因为断层一旦开始滑动, 其摩擦系数跟滑动速度及滑动历史有关, 是动态变化的. 摩擦滑动行为有速度(或位移)强化和速度(位移)弱化两种. 强化模式下, 摩擦系数随滑动速度的增加而增加, 只能产生稳定的滑动(aseismic slip), 反之则导致快速滑动而引起地震. 地壳浅层的断层, 尤其是成熟低的断层的摩擦属性也是诱发地震研究的一个重要课题.

图3是一个针对四川盆地注水诱发地震及深部天然流体驱动天然地震机理的概念图. 使用可靠的震源机制解数据反演得到了不同地区的现今应力场模式(详见后续各节), 从而可以计算滑动趋势与断层走向和倾角的关系(图3a). 临界或亚临界状态断层可以通过来自不同类型的流体注入和/或抽取作用于断层的外部应力(以断层滑动趋势的形式表述)被活化而发生诱发地震.

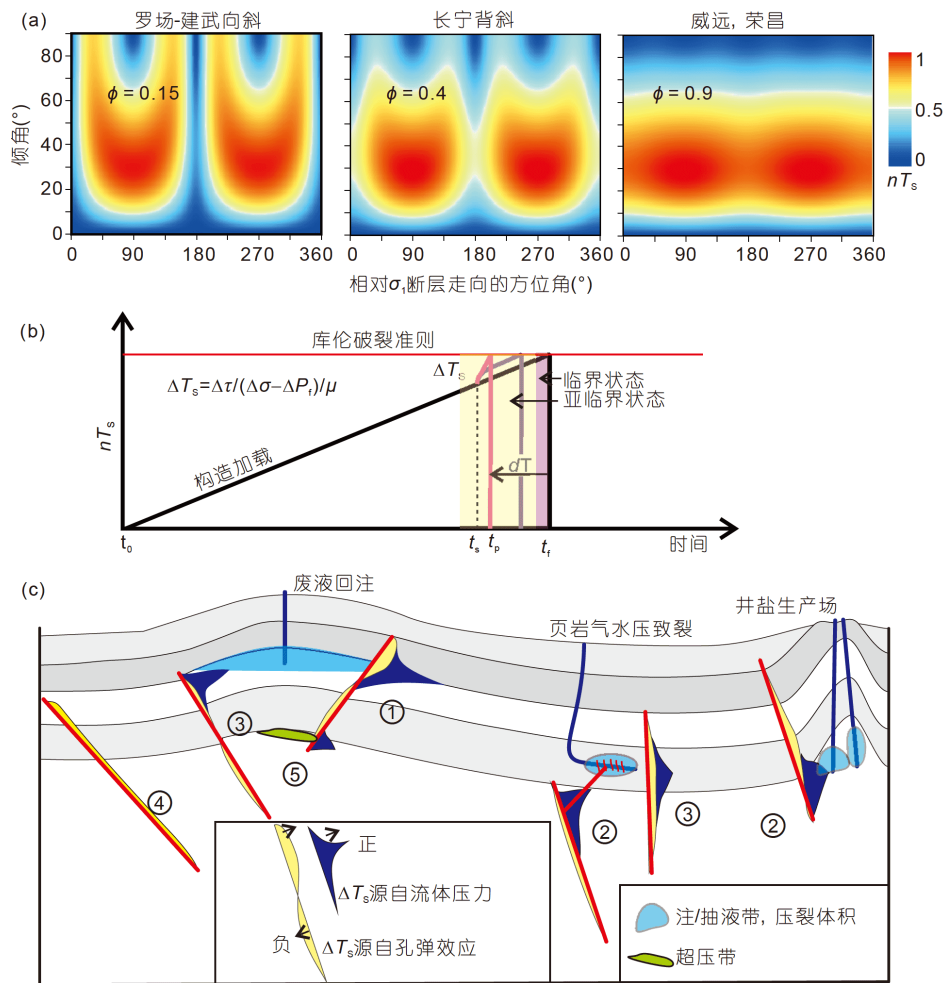


图 3 注水诱发地震机制示意图

(a) 长宁页岩气示范区(罗场-建武向斜)、长宁背斜及威远页岩气示范区(包括荣昌废水回注场)断层滑动趋势在断层走向-倾角坐标中的分布。落在红色区域中的断层具有较高的滑动趋势, 容易被活化。(b) 库仑准则和在外扰动(以断层滑动趋势 ΔT_s 形式表述)作用下的地震发生提前时间示意图。 t_0 是无扰动时的发生时间, t_p 是考虑外部扰动的地震发生时间, t_s 是外部扰动开始时间, $dT=t_f-t_p$ 是地震发生提前时间, t_0 是地震周期起点。(c) 来自不同类型的流体注入和/或抽采的外部扰动载荷对已存断层的影响示意图。可能通过增加作用在断层上的滑动趋势来诱发地震, 滑动趋势的大小和分布与应力模式, 断层位置和方向以及流体注入/提取因素有关。①, 断层穿过储层, 流体压力起主要作用; ②, 断层与高压流体通过渗透通道连接; ③, 断层靠近高压流体分布区域; ④, 断层远离高压流体分布区域, 孔弹性作用导致的应力变化占主导; ⑤, 断层与超压储层相连。沿断层的外部扰动的分布是不均匀的, 并且孔弹性效应会导致正负滑动趋势变化

3 四川盆地内部的主要地震

首先有必要明确一下“四川盆地”的定义。西北和西南边界很明确, 突变的地形和与之对应的断裂带就是明确的边界。盆地东北和东南边界不是那么明确, 很难给出严格的界线。本文在以往定义(Korsch等, 1991)的基础上, 对东南边界做了适当扩充, 使盆地区域覆盖了主要油气田和页岩气区块(图1)。本文主要关

注盆地内部的“主要地震活动”, 包括: (1) 有大量(100以上)2级以上地震的地震丛集; (2) 含多个4级以上的地震丛集; (3) 含1个以上5级以上地震或序列。我们把西北边界和西南边界上几个地震, 也纳入四川盆地的范畴。在非常小的现今地壳应变速率条件下, 四川盆地表现出较低的背景地震活动。但是, 在过去几百年来, 也记录到了几十个5级以上地震, 历史地震的最大震级为1896年2月14日富顺地震的 $5\frac{3}{4}$ 级。

3.1 四川盆地5级以上地震概况

表1列出了自1600年以来震中落在本文定义的四川盆地内部的所有5级以上($M \geq 5$)地震. 在四川盆地, 5

级以上地震在很大范围引起强烈震感. 即使在现今, 5级以上地震也会造成严重破坏. 不像盆地外缘地区, 盆地内部自古人口密集. 因此5级以上地震理应在诸如地

表 1 四川盆地5级以上地震的发生时间及分类等信息^{a)}

编号	日期	纬度	经度	$H(\text{km})$	$H_{\text{CMT}}(\text{km})$	M_S	M_W	分类	地名或来源
1	1610-02-03	28.5°N	104.5°E			5.5		O	高县庆府
2	1734-03-05	30.2°N	103.5°E			5.0		O	浦江
3	1854-12-24	29.1°N	107.0°E			5.5		O	南川
4	1892-02-10	28.9°N	105.0°E			5.0		O	南溪
5	1896-02-14	29.3°N	104.9°E			5.8		O	富顺
6	1905-11-09	29.4°N	104.7°E			5.0		O	自流井
7	1913-07-16	29.6°N	103.7°E			5.0		O	乐山
8	1935-12-20	29.5°N	104.0°E			5.5		O	犍为
9	1936-05-16	29.1°N	103.9°E			5.5		O	犍为
10	1936-09-25	28.7°N	105.1°E			5.0		O	江安
11	1954-10-24	29.4°N	104.8°E			5.0		S	自贡
12	1959-11-13	29.00°N	105.00°E			5.0		W?	江安, 南溪
13	1962-07-01	29.90°N	103.20°E			5.1		O	洪雅
14	1967-06-24	30.25°N	104.13°E			5.5		O	籍田
15	1973-06-29	28.90°N	103.90°E			5.2		O	沐川
16	1975-12-04	28.57°N	105.03°E			5.1		W?	江安
17	1985-03-29	29.37°N	104.83°E	7		5.0		S	张伯崇等, 1993
18	1989-11-20	29.92°N	106.88°E	5		5.2		OD	丁人杰和李克昌, 2004
19	1989-11-20	29.92°N	106.88°E	5		5.4		OD	丁人杰和李克昌, 2004
20	1996-02-28	29.03°N	104.63°E	0		5.4		W	杜芳等, 2002
21	1997-08-13	29.50°N	105.48°E	0		5.6		W	Lei等, 2008
22	1999-08-17	29.40°N	105.68°E	0		5.0		W	Lei等, 2008
23	2010-01-31	30.28°N	105.71°E		2.8	5.1		OD	Lei等, 2017a
24	2017-01-28	28.09°N	104.72°E		1.8	5.0	4.67	F	Lei等, 2019a
25	2017-11-23	29.39°N	107.99°E			5.0		OD?	本研究
26	2018-12-16	28.24°N	104.95°E		3	5.7	5.17	F	Lei等, 2019a
27	2019-01-03	28.20°N	104.86°E		1.8	5.3	4.82	F	Lei等, 2019a
28	2019-02-25	29.48°N	104.49°E		1.7	5.0	4.54	F	
29	2019-06-17	28.36°N	104.89°E		3.3	6.1	5.69	S	Lei等, 2019b
30	2019-06-17	28.42°N	104.80°E		2	5.4	5.01	S*	余震
31	2019-06-18	28.39°N	104.88°E		4.8	5.4	4.82	S*	余震
32	2019-06-22	28.44°N	104.79°E		1.6	5.6	5.05	S*	余震
33	2019-07-04	28.43°N	104.74°E		7.6	5.6	5.05	S*	余震
34	2019-09-08	29.58°N	104.82°E		2.4	5.4	4.99	F	本研究
35	2019-12-19	29.59°N	104.82°E		2.58	5.2	4.73	F	本研究
36	2020-02-03	30.74°N	104.46°E		3.3	5.1	4.57	OD?	青白江

a) 可能分类: F(水力压裂诱发), S(注水采盐诱发), W(废水回注诱发), O(天然地震), OD(天然深部流体驱动或触发的天然地震). ?表示该成因推测有较大不确定性. *表示该地震是震群里面的余震, 其成因具有间接性

方志等古代文献中留下记录. 实际文献中有不少4级地震的记录(四川地震资料汇编编辑组, 1980). 自20世纪40年代在重庆市北碚建设了第一个地震台后, 5级以上地震便有了仪器记录. 因此就盆地内部而言, 尤其是1600年以来, 5级以上地震记录应该还是比较完备的, 不会有严重缺失. 不过对于历史地震, 其震级是根据文献记载的震感和破坏程度而推测的, 其精度无法与仪器记录的相比. 但用来圈定历史上发生过中强地震的构造位置和评估四川盆地整体上的背景地震活动频度和特征没有太大问题.

以下是根据古代文献记录整理出来的1940年之前发生的历史地震的概要(四川地震资料汇编编辑组, 1980). 1940年以后, 有仪器记录到的地震将在后续章节中介绍.

(1) 1610年2月3日庆符 $5\frac{1}{2}$ 级地震. 震中位于高县庆福镇(图2中的GX), 构造上位于华蓥山系西南端的帚状山脉中, 邻近四川盆地的西南边界.

(2) 1734年3月浦江5级地震. 该事件发生在浦江-新津断裂带, 到目前为止, 该带仅发生了2次5级地震. 另一次是1962年7月1日的洪雅5级地震, 位于断层西南端, 邻近四川盆地西南边界.

(3) 1854年12月24日南川 $5\frac{1}{2}$ 级地震. 根据光绪二年(1875年)的《南川县志》, 这次地震之后, 有感余震持续了大约1年. 宏观震中位于南北走向长岭-半边山断裂与一些北东走向断裂的交汇处(王宏超等, 2009; 丁人杰和李克昌, 2004).

(4) 1892年2月12日南溪5级地震. 位于富顺南溪边界的这个地震的记载不是太多. 但2020年1月1日, 几乎在同一地点发生了 $M4.3$ 地震, 是个孤立地震. 此事件的矩张量反演结果表明, 地震的CMT深度很浅, 约为2km. 两个节面的走向/倾角/滑动角分别为 $155^\circ/40^\circ/55^\circ$ 和 $17^\circ/58^\circ/116^\circ$ (图S1).

(5) 1896年2月14日富顺 $5\frac{3}{4}$ 级地震. 此次地震是四川盆地2019年长宁6级地震发生前的最大地震, 在许多县的县志中都有记载, 很大范围内震感强烈. 这次地震之后, 有感余震持续了四个多月.

(6) 1905年11月9日自贡5级地震. 在这次地震发生一天前就发生了一些前震, 随后还发生了一些余震. 另外, 1927年5月22日在附近发生了一个4.8级地震.

(7) 1913年7月16日乐山5级地震. 此事件的震级也许被过高评估, 因为没有任何重大损毁记录.

(8) 1935年12月20日犍为 $5\frac{1}{2}$ 级地震. 地震后3min发生强烈余震, 在10h后又有一次有感余震. 此事件造成了严重破坏, 包括乐山城墙的部分坍塌. 有趣的是, 附近的盐矿1970年开始的注水采盐诱发了高达4.2级的一系列地震(参见3.3.3).

(9) 1936年5月16日沐川 $5\frac{1}{2}$ 级地震. 该事件震中在犍为县和沐川县的交界处, 位于盆地的西南边缘靠近马边-盐津地震带. 1936年4月沿着NS走向的马边-盐津断层系发生 $6\frac{3}{4}$ 级地震序列. 马边-盐津断裂带是一个非常活跃的构造, 经常发生~6级地震. 沐川地震与马边-盐津断裂系统相距30km, 可能是1936年马边地震序列触发的震源断层以外的地震. 另外, 在这个地震南15km处, 于1973年6月29日发生了另一个5.5级地震. 这两个地震具有类似的背景.

(10) 1936年9月25日江安5级地震. 在地震之前一天, 发生了几次前震, 并在3天后发生了有感余震.

3.2 自然成因主要地震或地震序列

3.2.1 $M_{5.1}$ 遂宁-潼南地震

发生在磨溪气田的2010年遂宁-潼南 $M5.1$ 地震是一个时间上和空间上都孤立的事件(图2中的o2所示). 重庆地震局在地震发生后大约10h便在震中附近安装了临时地震仪, 但没有观测到明显的余震活动(重庆地震局王小龙, 个人交流). 与利用深度震相分析的结果(Luo等, 2011)一致, 矩张量反演得到的CMT深度为2.8km, 与三叠系嘉陵江组超压气藏(压力比高达~2.2)的顶部边界深度一致. 推测的震源断层的走向/倾角/滑动角为 $223^\circ/48^\circ/122^\circ$, 与该地区的地质构造和区域应力状态协调. 综合分析结果表明, 该地震很可能是由下部超压储藏的高压流体向上部已生产多年的天然气田的间歇性流体移流所诱发或驱动的断层活动所致, 原理上与地壳脆柔转换带的断层阀门行为类似(Lei等, 2017b).

3.2.2 龙泉山脉籍田 $M5.5$ 地震和青白江 $M5.1$ 地震

1967年1月24日沿龙泉山断裂带发生 $M5.5$ 浅源地震, 震源深度4km左右, 是有记录以来龙泉山断裂

带的最大地震(许水森等, 2006). 北北东走向的龙泉山脉, 北起中江过仁寿南达乐山, 是川西平原和川中丘陵的分界线, 沿山脉两侧分布一系列走向NE20°~30°的雁列状展布的逆冲或压扭性断层(Li等, 2013). 2020年2月2日在该断裂带北段发生一个M5.1地震, 是个孤立型地震. 矩张量反演结果为, 深度3.3km, 两个节面的走向/倾角/滑动角分别为205°/54°/96°和15°/36°/82°. 不管那个节面对应较高角度逆断层活动. 但根据InSAR数据(将另文发表)判断, 西北倾向倾角54°的节面可能是震源断层. 除此之外, 除上述两个5级地震外, 古文献记录了17次有感地震, 自1958年有仪器记录以来还发生了6次4.0~4.9级地震(许水森等, 2006). 因此在四川盆地内部, 沿龙泉山断裂带的地震活动是相对较高的. 沿断层有明显氦气异常(刘亮等, 2019). 另外, 多条穿越龙泉山的隧道有天然气浓度异常(苏培东等, 2014), 还有多处多次天然气漏出地表, 表明这些断层(其中的一些部位)是深部流体(主要是天然气)的泄漏通道而且流体有可能是地震活动的驱动因素.

3.2.3 统景M5.2及M5.4双震序列

1989年9月9日, 在位于四川盆地东南褶皱带的统景地区发生了3.7级地震, 仅2min后再次发生M3.8级地震(图2中的o1). 两个月后, 又在2min内连续发生了两次更大地震, 震级依次为5.2和5.4. 实际上, 该地区自1989年2月13日以来有感地震就频繁发生, 于是安装了一个临时地震台, 随后改建为固定台, 即现在的统景地震台. 该台共记录了2700多个 $M \geq 0.6$ 地震, 除了上述4个地震外, 最大震级只有2.9级. 统景台的地震波记录显示, 大多数事件集中在深度约为5km以浅的非常狭窄的范围内. 地震灾害烈度图和震源机制表明, 这些地震与北东向延伸的铜锣峡背斜北部东南翼分布的逆断层有关(丁人杰和李克昌, 2004). 有趣的是地震后出现了大量温泉, 延续至今. 温泉水源为埋深2.5km左右的下三叠系嘉陵江灰岩含水层. 震前就有些温泉, 但数量和规模都不大. 与2008年遂宁-潼南的孤立地震类似, 统景地震序列也可能是与深部高压流体活动有关, 不过流体的压力可能低些, 但源头和补给要丰富得多, 因此不仅引发一系列地震, 激发的温泉活动也持续到现在. 附近也有天然气田, 但没有资料揭示天然气生产与统景地震序列之间有关联.

3.2.4 2017年11月23日武隆5级地震

2017年11月23日, 在重庆武隆区发生一个5级地震. 该地区的地震活动始于2011年夏季(图4), 与蓄水量为3.2亿立方米的银盘水库蓄水时间相吻合. 之前没有观测到过任何地震活动, 因此可以合理地假设5级地震之前的地震活动与该水库的蓄水有关. 使用gCAP (Zhu和Ben-Zion, 2013)方法获得的矩张量反演结果显示纯双力偶分量的正断层机制, CMT深度为9.4km, 与常规方法确定的10km的震源深度一致(图S2). 至于主震可能是由于自然原因造成的, 但不能排除水库蓄水起了一定的触发作用. 5级地震后, 有一定余震活动, 但最大余震不到3级, 1年以后发生一个3.2级地震.

3.2.5 2016年8月11日垫江 M_w 4.1地震

2016年8月11日, 在重庆垫江地区发生 M_w 4.1地震(图2中的o6). 地震矩张量反演和大地测量结果支持中心深度约为1km的逆断层震源机制. 有证据表明, 这个震源深度非常浅的地震是由于为修建汽车试验场而进行的土木平地工事所导致的盲断层上盘卸载而诱发的(Qian等, 2019). 这个地震也是个时空孤立性地震.

3.2.6 方斗山断裂带的南段地震活动

方斗山断裂带的南段(图2, FDS-F)可能是四川盆地东南褶皱带最活跃的断裂带了, 经常观测到中小地震. 自1965年以来, 共发生 $M \geq 4$ 地震7次, 如2004年11月21日的M4.6地震, 2005年2月11日的M4.2地震. 2013年7月13日的M4.3地震的震源机制解为(走向, 倾角, 倾角)=(24°, 36°, 81°), 质心深度为4.4km(郭欣等, 2014), 表明, 发震断层, 在当今的应力状态下, 具有较优势的产状, 容易失稳活动.

除了上述5个地震或序列外, 在中央隆升区的北部(图2中的o3和o4)还有2个地震丛, 包括一些大于4级的地震. 二者都位于生产气田附近, 由于缺乏资料, 尚无法回答这些地震活动是否与天然气生产有关.

3.3 与深井长期注入采盐相关的地震

3.3.1 自流井M4.6~5.0地震

自流井背斜(图2“t1”)的地质构造与强震震中如图5所示. 背斜上出露的岩石主要是侏罗系红色砂岩. 此区沉积盖层厚为3~7km. 背斜轴走向大体N60°E. 背斜

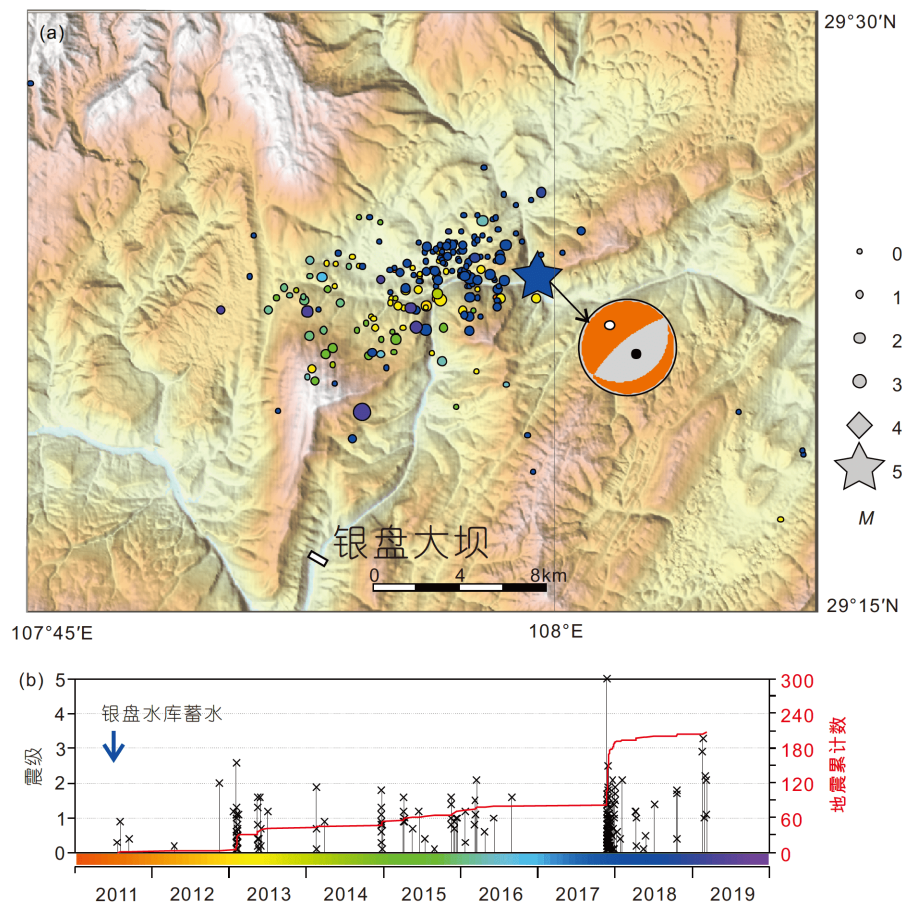


图4 重庆武隆地震时空分布

(a) 重庆武隆5级地震周边的地形特征和地震分布. (b) 2011年至2019年8月30日, 0级以上地震的震级-时间分布和累积次数(红线), 银盘水库(库容3.2亿立方米)开始蓄水时间

的西南段被黄葛坡断层切割. 背斜东南翼有一组与背斜轴平行的隐伏断裂, 倾向北西倾角 50° 左右, 隐伏断裂呈叠瓦状分布, 大致深入地下4~5km切割从侏罗系到奥陶系的岩层. 背斜西翼也有隐伏断裂, 但不如东南翼发育. 断层均为逆断层. 该区自1947年以来发生过4次较强地震($M_s4.6\sim5.0$), 震中烈度都偏高, 因此判断震源深度均较浅(张伯崇等, 1993).

大山铺岩盐体位于自流井背斜的东北部的东南翼. 单井注水对流采盐自1967年开始, 先后钻了十几口井. 20世纪80年代末期形成连通生产, 卤水年产量达30万立方米以上. 采盐注水压力多在7MPa左右. 1985年的5级地震位于大山铺岩矿, 与注水关联密切(张伯崇等, 1993).

在大安盐矿进行过注水采盐期间, 发生在1954年和1965年的两个中强地震的震中位于大安到自流井一

带的隐伏断裂带上. 20世纪70年代注水停止以后, 未发生过明显地震活动, 因此这两次地震也被认为是注水诱发地震. 这样, 自1947年以来自流井背斜上的地震都有可能与采盐注水有关. 该地区采盐已有两千多年的历史, 早期只是抽取较浅的侏罗系地层的黄卤, 长期的开采势必引起地下水位变化. 历史上的几次地震是否与长期的采卤有关, 就无从判断了. 在此, 姑且作为天然地震.

3.3.2 长宁双河盐矿区的采盐与地震活动

双河盐矿位于长宁县双河古镇(图2中的“t3”). 主要的岩盐体以灯影组白云岩为边界, 距地表深度2800m左右. 在地质上, 该矿位于长宁背斜, 如2节所示, 这里构造复杂, 发育不同走向和倾角的断层. 在1970~1989年, 就观测了一些零星的震级小于4级的地

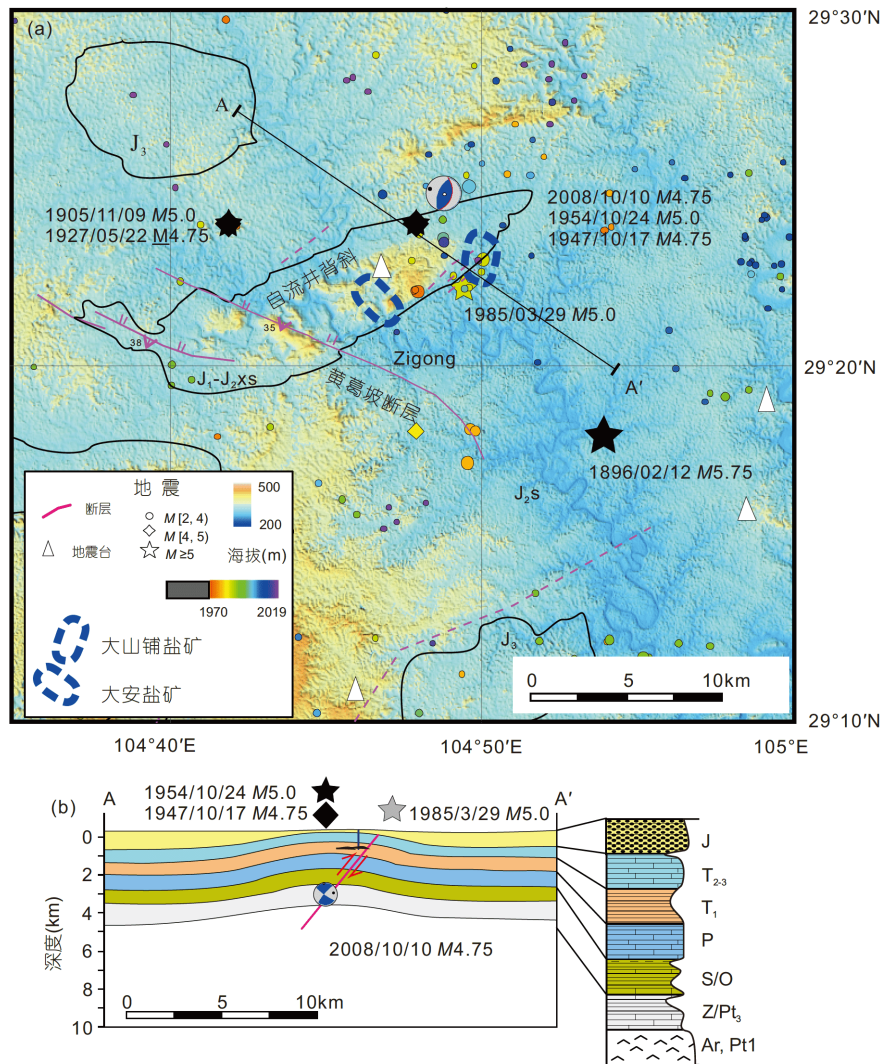


图 5 自流井背斜及周边地区地震活动

(a) 主要构造和地震震中分布. (b) 简化地质剖面及主要地震. 2008年4月8日4.8级地震的震源机制解在剖面上的投影及其震源断层. 其他地震的震源深度没有得到很好的限制, 因此绘制在该部分的顶部

震. 这些地震可能代表了背景活动, 也可能与宁-2(N-2)井的钻井和开发过程有关, 该井是在1970~1971年为石油/天然气勘探而钻的. 没有发现天然气, 却发现了厚达几百米的岩盐, 也就成了盐场的第一口生产井. 即使假设这些早期地震事件代表了该地区的背景地震水平, 自20世纪90年代初以来地震频度和最大震级的增加也是十分明显的.

1980年开始, 过去的40年中, 一直利用包括前述宁-2井在内的几口深度为2700~3000m的深井开展了规模化注水采盐, 注水压力设计为8~10MPa. 注入采盐

开始后, 尤其是开始跨井注水采盐并通过水平井将一些垂直井对接之后, 盐场周围地震活动在发生频度和最大震级上都出现了增加的趋势. 而且, 地震活动性的增加与注水损失量之间具有明显的正相关性, 表明注水活动诱发了一系列地震活动(Lei等, 2019b; Sun等, 2017; 阮祥等, 2008).

在2019年6月17日深夜, 长宁县双河镇发生了6级地震, 创下了四川盆地内部最大地震记录(Lei等, 2019b; 易桂喜等, 2019). 此事件之后, 几天内发生了一系列M4~M5.6级地震, 显示了典型震群特征. 不仅长

宁6级地震的震中与盐矿临近, 而且震源深度也只有4~5km(CMT深度为3.3km), 位于采盐溶腔下方不到2km深度, 因此这个6级地震也可能是注入诱发所致(Lei等, 2019b). 最新研究认为, 主震深度约4km, 在一条逆断层上成核, 随后沿一条未知的走向SE的走滑断层传播(Liu和Zahradnik, 2020).

利用该区记录到的信赖度较好的10个 $M_w > 4$ 地震的震源机制解数据得到的应力场反演结果表明, 该区应力形状比($\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$)为 0.4 ± 0.15 , 具有较大的不确定性. 最大主应力轴接近水平(倾角: $6.2^\circ \pm 4.4^\circ$), 其方位角为 77° (Lei等, 2019b), 与四川盆地整体最大水平应力方向有明显差异. 估算的流体超压为0.1~67MPa. 其中有5个地震小于10MPa, 可以用长期注水(压力~10MPa)加以解释, 其他必须考虑别的因素, 如更小尺度的应力场非均匀性, 深部超压天然流体等.

由于长期高压注水采盐活动, 岩盐空腔范围越来越大, 因此盐层周围的白云岩层可以通过直接暴露或渗透性较好的断层带与高压水连通. 由于脆性岩石中的断层具有高渗透性, 因此超压水会沿着已存断层外流, 起到削弱相关断层的作用并导致注水损失. 断层带流体压力的扩散, 使越来越多的不同产状的断层达到临界状态, 为发生震群性地震活动提供了条件.

3.3.3 长山及罗城盐矿区地震序列

位于常山-罗城背斜的常山(位于荣县)和罗城(位于犍为县)盐矿(图2中的“t2”, 图6)于20世纪70年代初开始生产. 与这些深度超过1000m的盐矿中的注水采盐相吻合, 该地区的地震活动变得活跃了. 最大的地震是1979年9月15日发生的4.2级地震(吕贵选等, 2009). 后来, 在该地区建造了一个水坝, 在最初的几年(1992~1995年)中观察到了一些频度较高的小震活动, 最大震级为3.5级, 相当部分被认为是水库诱发地震. 随后, 连续注水采盐直到现在, 断断续续地发生了一些地震. 迄今为止, 共观测到4次 $M \geq 4$ 地震, 包括2016年最新的M4.0事件(吕贵选等, 2009). 必须指出的是, 1935年11月20日发生的犍为M5.5地震(见3.1)位于该盐矿地震丛集区北部(图6), 表明该地区原本就有发生中强地震的构造条件, 高压注水采盐引起地震活动加剧就没什么奇怪了.

3.4 与长期废水回注相关的地震活动

3.4.1 孔滩5.4级地震序列

孔滩背斜(图2中的“w1”)是一个宽缓背斜, 其长轴沿东北方向延伸约30km, 是该地区天然气储集层的圈闭构造(图7b). 自1980年以来, 孔-12井被用于向深度2.6km处的二叠系石灰岩地层回注废水(杜芳等, 2002). 日注入量一般保持在200~600m³范围内, 最大井口压力为10.84MPa. 1985年2月20日, 在注水井附近发生M4.1地震, 引起了当地地震部门的注意. 但由于附近没有地震台站, 无法观测小地震, 因此与注入有关的地震活动的确切开始时间并不清楚. M4.1地震发生后, 安装了几个便携式地震仪, 总共观察到6次4级以上地震. 最大的是1996年2月28日的5.4级地震. 地震活动在2008年底逐渐消失. M5.4地震的震中区域没有任何地表断层. 然而, 地震勘探数据揭示在三叠系和二叠系地层中发育了一组逆冲盲断层, 其深度达到了地表以下约3km, 长度达6km(杜芳等, 2002). 这些断层的走向与背斜平行. 地震烈度分布和震源机制解指示, 这个地震是某个盲断层的重新活动所引起的. 由于一系列地震活动与注入活动之间存在时空相关性, 因此该地震序列被认为是废水回注所诱发的(杜芳等, 2002).

3.4.2 江安、南溪、宜宾和长宁县交界地区的地震

江安、南溪、宜宾和长宁县边界地区的地震活动(图2中的“w2”)可能与废水注入有关. 该区在1981~1992年期间, 观察到了明显的地震活动, 包括1981年的M4.5、1987年和1991年的两个4.2级地震. 最近的地震活跃期是2008~2012年, 最大震级为M3.2. 该地区的35口生产井中, 有15口井也以每年15万立方米的速度产出污水. 如付-8井自1966年10月开始生产天然气, 1978年以后用作废水回注井. 自2002年开始, 还使用了长-11、付-6、老-5和牟-20进行回注(中国油气田开发志总编纂委员会, 2011). 由于数据不足, 这期间的地震活动和废水处理之间的关联尚不清楚. 从2008年2月到2009年, 牟-14产生的63700m³的废水均有牟-20回注, 可能诱发了2008年开始的地震活动. 由于这里的枯竭气田的总容量巨大(仅付-8的总容量为8800000m³), 这些回注井将长期使用. 来自威远示范区的页岩气井的废水便是运到这里处理的. 因此, 该地区值得继续关注. 1936年9月25日的5级地震和1975年12

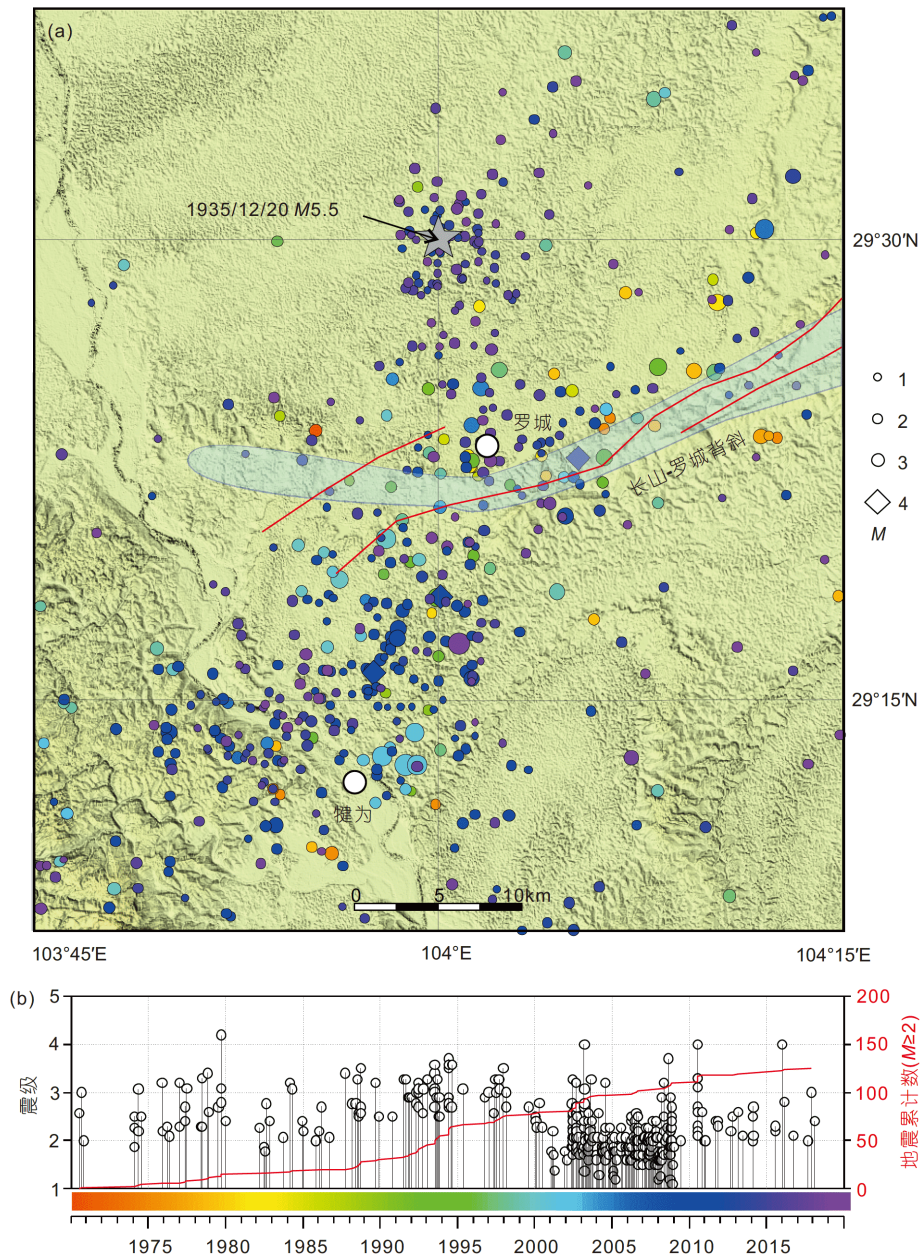


图6 罗城和键力地区地震时空分布

(a) 地形和构造简图及1970年以来该区的地震震中分布。(b) 震级与 $M \geq 2.0$ 地震累计数

月4日的5.1级地震, 应该是自然成因, 表明该区断层及现今应力状态有发生5级地震的条件。

3.4.3 荣昌天然气田诱发地震

荣昌天然气田的地震丛(图2中的“w3”)是中国废水回注诱发地震活动的一个著名实例。该地区自1978年7月1日开始废水回注以来, 至少持续了35年。附近

天然气井产出的废水, 通过几口枯竭气井往深度约为近3km的二叠系茅口组灰岩储层回注。自1978~2006年的28年期间, 地表地震仪便记录到了超过1万次地震, 地震最大震级越来越大, 最大地震为1997年8月13日的 $M5.2$ (Lei等, 2008)。在此期间, 有公开的回注数据, 地震发生的月频度与月注水量之间存在良好的相关。但由于地震台站密度的限制, 早期的震源位置误差较

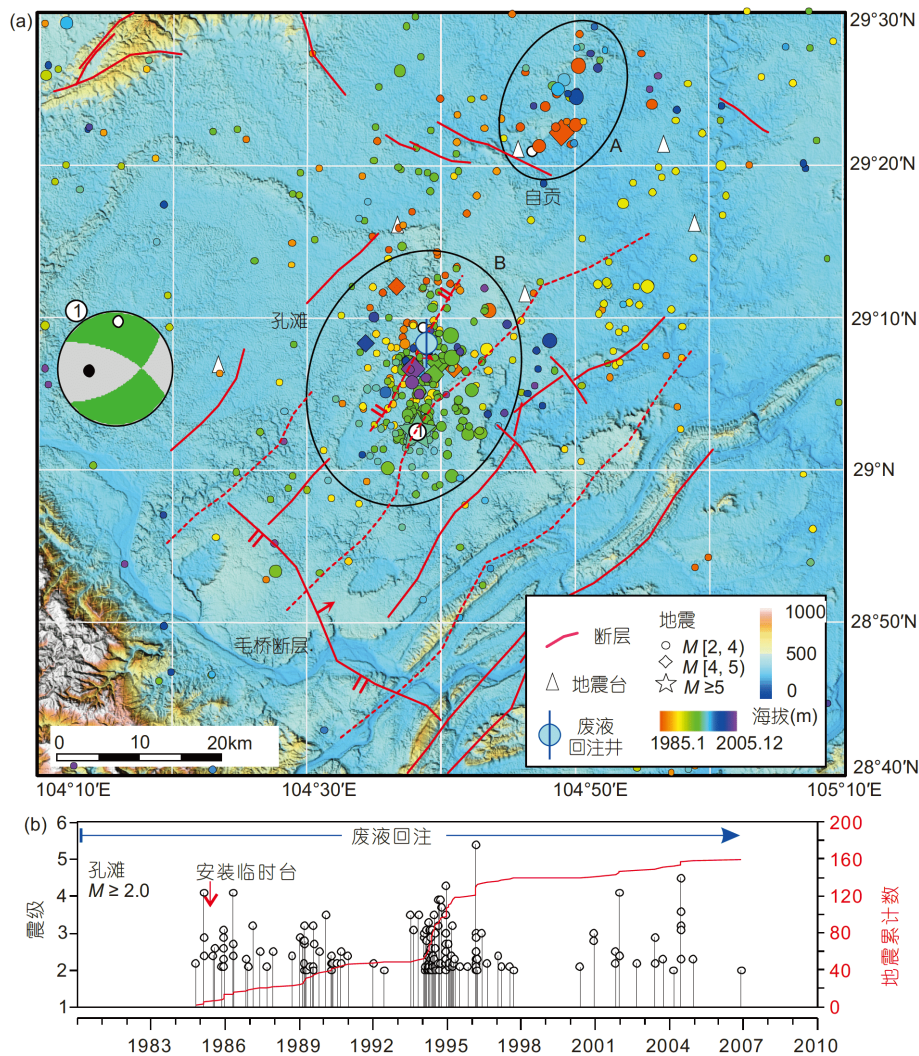


图 7 孔滩天然气田及周边地区地震时空分布

(a) 地形特征、主要构造、主要废水回注井、地震台站及1980~2010年观测到的地震分布. (b) 废水回注时间窗、 $M \geq 2.0$ 地震的累积次数和震级-时间分布

大. 于2008年末安装了一个由5个站组成的临时观测网. 截至2012年底, 已记录了2000多个0.5级以上地震, 包括2009年10月16日发生的4.6级地震(Wang等, 2018)(图8). 地震震源时空迁移展示较好的触发前沿, 可以通过合理的水力扩散系数说明($\sim 0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)(图9). 2001年7月1日, 主要回注井(螺-4)停止了注水, 原因是: (1) 回注井与附近的破坏性地震之间的相关性得以落实; (2) 注水压力已达到设计压力上限. 后来附近的其他的回注井也先后关闭. 自2008年以后的地震活动被认为与包-11井和包-24井的注水有关(Wei和Liu, 2014). 非常有趣的是, 这些注入井分布在地震空间分布范围的

外缘. 2013年这些外围的注水井也关闭了, 地震活动($M \geq 1.5$ 级以上)有明显下降, 符合预期. 但是自2016年底以来, 事件发生率再次上升, 并于2016年12月27日发生了4.9级地震, 第二天发生了4.0级地震. 从那时起, 地震活动度一直保持在较高水平. 如果我们聚焦 $M \geq 2.5$ 的地震, 则发现事件发生率没有明显变化(图9c). 非常有趣的是, 小地震对注水的停止有明显而迅速的响应, 但大地震显示持续性活动. 值得一提的是该区北部及南部的页岩气开发已经开始, 近几年的地震活动的加速可能是水力压裂所致. 因此, 该区今后的地震活动趋势值得持续关注.

利用该区2009年以后发生的12个 $M_w > 3.5$ 地震的震源机制解数据进行应力场反演结果表明, 该区主应力形状比($\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$)为 0.94 ± 0.03 , 最大和中间主应力轴接近水平, 最大主应力轴的倾角为 $2.6^\circ \pm 1.7^\circ$, 其方位角为 120° (Wang等, 将另文发表). 在这样的应力场下, 任何走向的倾角 30° 左右的断层都很容易被活化(图3a).

3.4.4 自贡黄家场气田诱发地震

位于自贡市东部黄家场天然气田(图2中的“w4”)的家-33井的注水诱发地震, 有比较好的地震观测数据和注水数据, 得到了比较详细的研究(Lei等, 2013; 张致伟等, 2012). 家-33井是牛佛渡-普台寺背斜构造的一口生产井. 该鼻状背斜长轴方向的方位角为 80° 左右. 家-33井产气在2007年之前就已枯竭, 2007年以来, 用来向深度为2500m的茅口组储藏回注废水. 二叠系的茅口组灰岩/白云岩地层含有发育良好的裂缝, 储层具有较好连通性, 初期回注是自重流入, 直到2008年底才需要加压. 在自重流入阶段, 仅记录到了几次小于2.5级的地震. 当井口压力在2009年1月底超过2MPa时, 地震发生频度迅速增加, 并于2009年2月16日发生最大地震, 震级M4.4, 震感强烈, 震中附近的受到了轻微的破坏. 在2009年初至2010年10月的高压注入期间, 一共注入了 130000m^3 的废水, 观测到7000多次0.5级以上地震. 事件发生频度与注水速率有明确相关, 在2010年10月停止注水后, 地震活动性迅速衰减并基本消失(Lei等, 2013).

地图上, 重新定位的震中集中在以注水井为中心大约6km长的NNW延伸的狭窄区域, 于牛佛渡-普台寺鼻状背斜的西侧斜坡一致. 但与斜切背斜中部且出露地表的北西走向的牛佛渡断层并无关系. 震源密度分布图表明地震可能受一组已存共轭断层控制, 其产状与背斜构造和区域应力场协调. 但小地震震源机制解复杂多样, 可能反应小尺度的应力场非均匀性(Kozłowska等, 2018; 张致伟等, 2012). 在剖面图中, 超过90%的震源位于2.5~4km的深度范围内, 刚好对应二叠系石灰岩地层. 上层和下层的页岩和泥岩起着流体扩散的屏障作用, 并阻止了小断层的进一步扩展. 地震分布外沿可能受较大的隐伏逆断层的限制, 一方面限制了流体外围扩散, 一方面使地震分布沿断层呈现向上和向下的迁移现象(Lei等, 2013).

3.5 与页岩气水力压裂的短期注入有关的地震活动——长宁上钵镇周边页岩气示范区

上钵镇页岩气区块(也称为长宁示范区块)位于中国四川盆地南部边界的褶皱带(图2中的“h2”). 该区块对应于罗场-建武宽缓向斜, 目标层是志留系龙马溪组泥岩/页岩, 埋藏深度从不到2km到3km以上. 自2008年开始垂直井钻探, 2010年开始水平井的钻探和评估性压裂. 规模化水平井压裂于2014年12月开始(Lei等, 2017a, 2019a; Tan等, 2020). 与这些里程碑相同步, 该地区的地震活动出现跳跃式急剧增加. 地震分布范围随压裂平台的增加而扩大. 迄今为止, 已观测到10次 $M \geq 4.0$ 地震, 包括4次 $M \geq 5.0$ 地震. 2018年12月16日发生的M5.7级地震刷新了页岩气水力压裂诱发地震的最大震级记录, 造成严重的破坏和经济损失. 矩张量反演结果得到的两个断层节面的(走向, 倾角, 倾角)是 $(170^\circ, 83^\circ, 10^\circ)$ 和 $(79^\circ, 78^\circ, 173^\circ)$. 震源位于在当时正在压裂的一个页岩气平台的一组水平井顶端附近, 震源矩心深度3.1km, 略深于最近的水平井. 从线状延伸的滑坡等地表破坏情况来看, 兴文M5.7地震的震源断层可能是在压裂影响区域内成核, 沿近南北走向的直立走滑断层北向单方向破裂了7~8km(Lei等, 2019a).

利用该区18个 $M_w > 3.5$ 地震的震源机制解数据, 反演得到了三个主应力轴的方向、应力比及断层活化条件. 最大主应力轴的接近水平(倾角: $5.7^\circ \pm 3.3^\circ$), 其方位角为 117° . 所得应力形状比为 $\phi = 0.15$, 标准误差为0.08. 在这样的应力场下, 具有优势产状的走滑断层和逆断层都比较容易活化(图3a). 断层活化分析表明, 断层上的流体压力增加0.2~3.5MPa便可以这些 $M_w > 3.5$ 地震的震源断层活动, 断层流体压力的增加可能是主要的因素(Lei等, 2019a).

4 威远-荣县页岩气示范区地震活动

如前所述, 中国页岩气行业的突破始于2010年, 在位于四川盆地中部隆起的威远背斜的东南翼(图2中的“h1”)建造了首个志留系页岩气井. 自2015年开始在水平井中进行系统的水力压裂作业后, 地震活动急剧增加并且丛集在页岩气开发水平井簇平台周围.

由于还没有有关威远-荣县页岩气示范区(简称威远页岩气示范区)近期地震活动研究的公开研究成果. 在这里简单介绍一些我们的初步研究结果. 根据目前

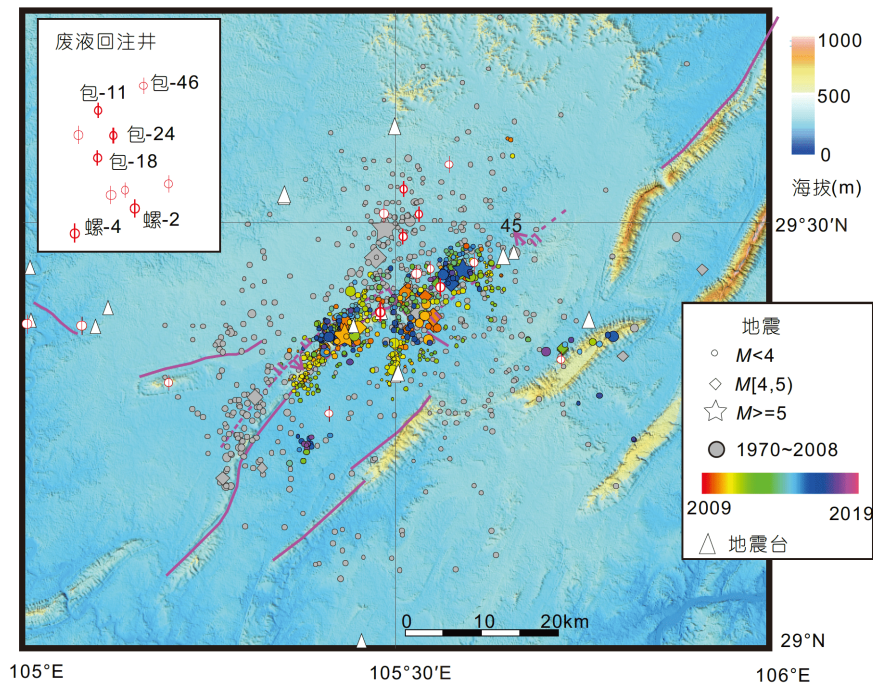


图 8 荣昌气田及周边地区1970~2019年观测到的地震台、主要结构、处置井和地震震源的地图视图

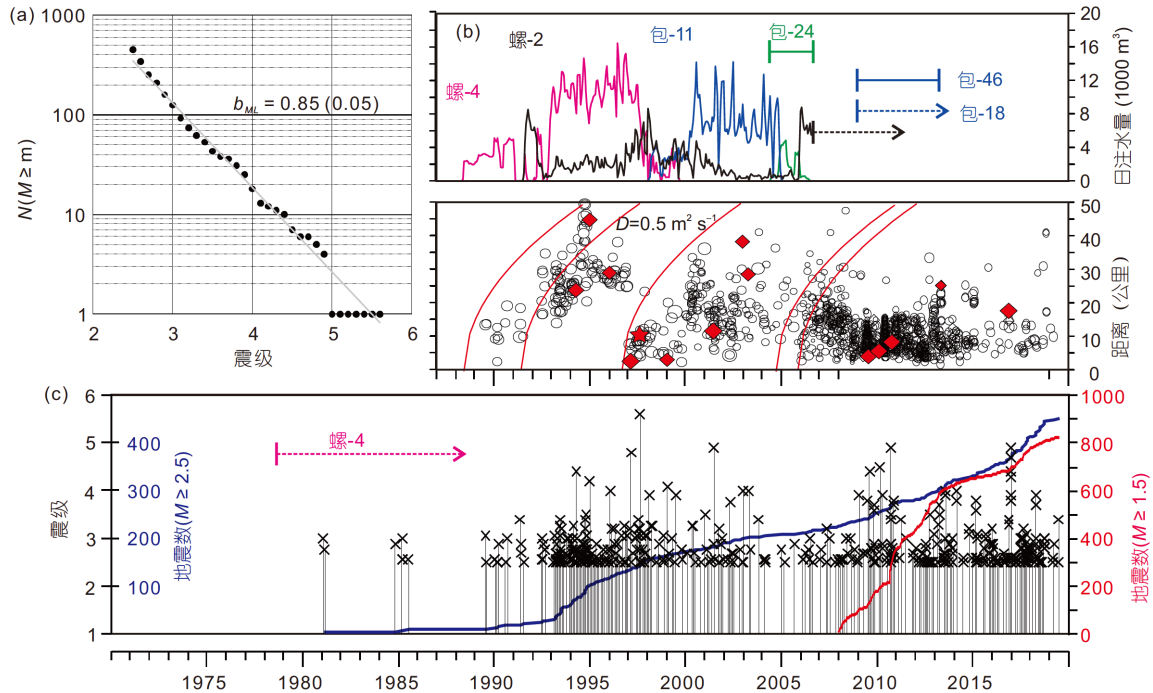


图 9 荣昌气田及周边地区注入速率、地震烈度、累积事件数和震源迁移模式(距螺-4井的距离)的比较

的地震活动情况, 威远页岩气区块可分为两个邻接子区块: 西侧的威西子区块和东侧的威东子区块, 在图 10 中分别表示为“A”和“B”. 为了进行地震震源重新定

位和矩张量反演, 我们根据地震环境噪声层析成像的结果(王小龙等, 2013)构建了1维速度模型. 首选模型“ctSC_NT和esSC_NT”分别基于四川盆地中部和南部

的平均S速度(图S3). 对于威远-荣县地区, 震源重定位和矩张量反演均使用“ctSC_NT”.

利用四川地震局人工分析和汇编的震相数据和双差震源定位(HypoDD)方法(Waldhauser和Ellsworth, 2000), 我们对发生在2015年到2019年2月期间的6051(威远西2071, 威远东3980)个 $M \geq 1.5$ 的地震进行了精定位处理, 10次迭代后获得5404(威西1904, 威东3500)事件的定位结果. 2019年3月至2020年3月, 共有7547(威西3300, 威东4247)个 $M \geq 1.2$ 事件, 重新定位后有7192个(威西3053, 威东4139). 对于2015年至2019年2月间发生的地震, 由于台网稀疏, 震中位置得到一定改善, 但震源深度仍不精确. 在2019年2月25日M4.9发生后, 安装了额外的地震台, 2019年3月1日以后的地震, 水平和垂直精度都得到了极大改善(图10).

我们进一步使用宽带地震仪记录的体波和面波的全部波形数据和广义剪切和粘贴(gCAP)方法(Zhu和Ben-Zion, 2013; Zhu和Helmberger, 1996)反演了 $M_w > 3.5$ 地震的机制解和矩张量. 通过网格搜索来估算矩张量, 矩震级步长为0.01, 走向、倾角和滑动角步长为5°. 得到的最优解矩张量分解为双力偶(DC)、各向同性(ISO)和补偿线性矢量偶极(CLVD)分量(Zhu和Ben-Zion, 2013). 总共获得了11个 $M_w > 3.5$ 地震的可靠结果. 所有这些事件都具有以逆冲为主的震源机制, 而且非DC分量可忽略不计(图10, 表2, 图S4和S5).

在威东子区块, 规模化压裂开始后的前面四年多的时间里, 观测到大量的震级不到4级的中小地震, 震级最大M3.6, 大于完备震级下限M1.5以上的就有近5000个. 基于井下监测获得的个别单井压裂期间详细地震数据也证实, 除了压裂本身直接引起的震级小于0(多数小于负1级)的压裂体积内的微震外, 还有一些沿断层呈条带状延伸到设计压裂体积以外的包括震级大于0的地震(Chen等, 2018). 压裂体积内的地震具有较大的 b 值(远大于1), 而区域外压裂体积外的地震具有低 b 值(接近或小于1), 显然与已存断层的活化有关. 在2019年9月8日发生一个M5.4地震, 并于同年12月18日在其东北方向大约4km处又发生一次M5.2. 两次地震的震源机制类似, 其走向/倾角/滑动角分别为25°/39°/70°和20°/41°/71°(表2, 图S5). 重新定位的震源深度集中在1~5km, 部分地震定在结晶基底里面(图10b). 上述5.4级地震精定位震中非常靠近(定位误差范围)压裂井平台W204-H37, 矩心深度也与水平井深度一致

(图10b). 5.2级地震时, 已知就有附近(4km)的W204-H42平台正在压裂(图10和11), 其他更近的平台是否压裂尚不知晓. 综合各种数据, 尤其是5.4级地震后两周余震的分布(图10d), 我们推测的发震断层是走向为北25°东, 倾向东南倾角40°左右的逆断层断层.

在威西子区块, 现已观测到M1.5以上的地震近3000次. 与威东子区块相比, 威西子区块发生了更多的破坏性地震. 自2015年以来, 共观测到7次4~4.9级地震. 特别是, 2019年2月24~25日相继发生了3次中强地震, 震级分别为4.7、4.3和4.9, 造成2人丧生和多数农房开裂和坍塌. 荣县境内的所有压裂活动都被迫中断了数周, 部分已钻好的井也可能被永久放弃, 经济损失巨大. 在这几次地震附近, 随后又发生两次大于4级地震, 分别是2019年9月8日4.3级和2020年2月17日4.4级. 震源深度集中在1~5km(图10b). 威西2019年2月25日的三个4级以上地震发生时, 附近的W202-55平台压裂结束不久, W202-62平台正在压裂(图10和11). 3个 $M > 4$ 事件震中非常靠近W202-H62井场位置, CMT深度等于或小于水平井深度(图10b). 这几个重要地震震中地图上靠近墨林场断层, 但已有的水平井在压裂深度处与该断层有2km以上距离. 综合各种数据, 我们认为发震断层是走向近南北, 向东倾斜的隐伏逆断层或其共轭产状断层(图10). 不过, 随着压裂的展开, 墨林场断层也值得关注, 有不少个计划中的水平井, 在压裂深度上, 非常靠近断层面. 2020年2月25日发生的M4.3, 有可能就在墨林场断层面上(图10c).

为了测试地震活动是否具有一定的周期性, 我们计算了地震活动的舒斯特谱, 这对于检测未知的周期性和地震活动的非均匀性很有用(Ader和Avouac, 2013). 结果清楚地显示地震活动有一个明显昼夜周期(附图S6a). 由于没有检测到半日周期, 而且一个周期是精确的一天, 因此观察到的周期性不能归因于潮汐作用. 此外, 北京时间的地震小时频度分布表明, 白天的地震频度(上午9点至下午20点)明显大于夜间(附图S6b). 因此, 与长宁页岩气区块早期的地震活动类似(Lei等, 2019b), 这种地震活动的周期性和非均匀性反映的是有关压裂作业密度分布, 天然地震是不会具有这样的特征的. 更加有趣的是, 从2020年1月20日至3月8日期间的地震活动显著下降. 这个现象反映因为春节假期及随后为COVID-19病毒抗疫期间的压裂暂停.

利用该区的11个4级以上地震的震源机制解数据

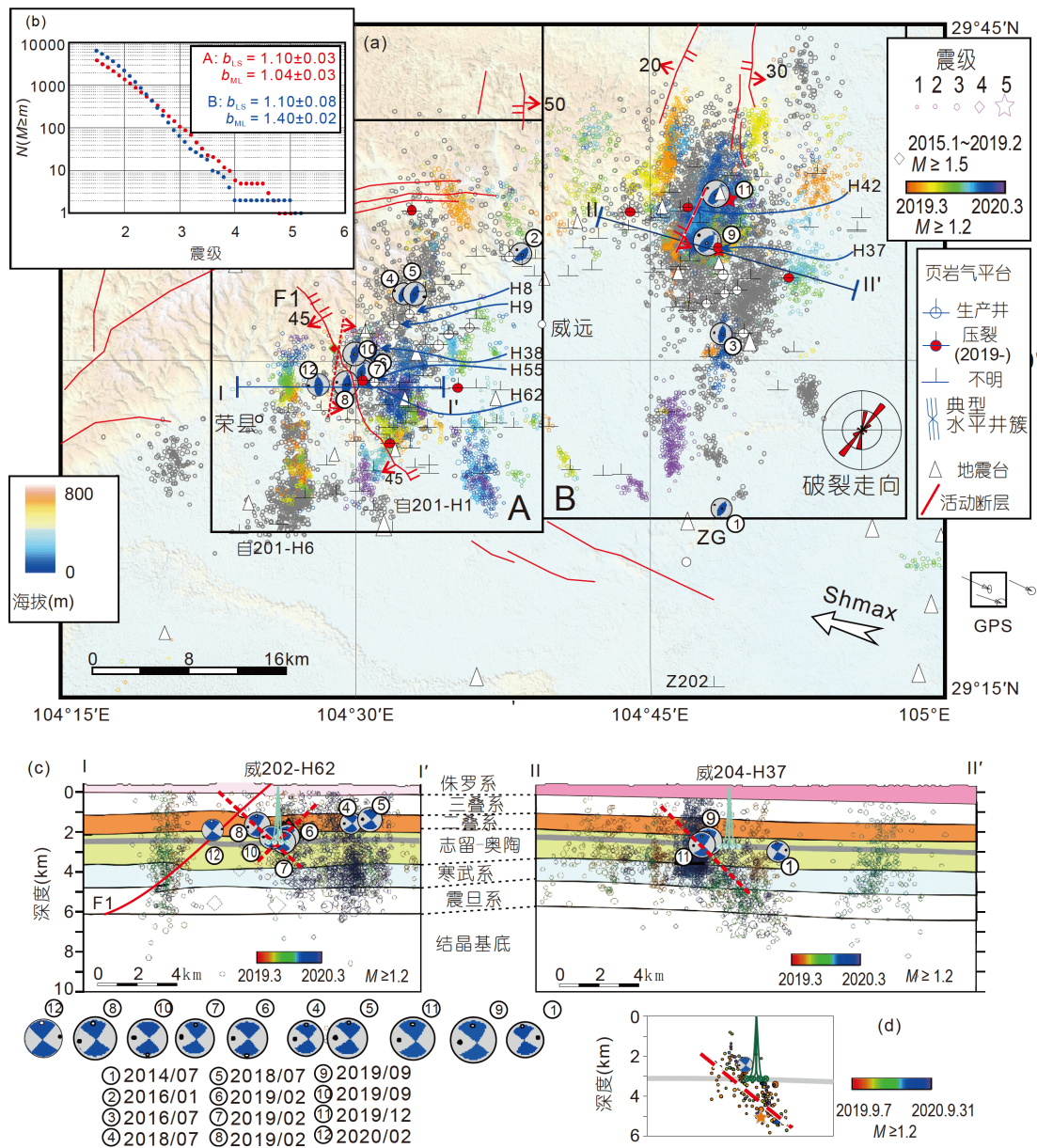


图 10 威远页岩气开发示范区地震活动

(a) 地形阴影图、主要断层、2015年以后地震分布及 $M_w > 3.5$ 地震的震源机制解的下半球投影; (b) 频度-震级关系及 b 值; (c) 简易地质剖面上(Zou等, 2015)地震分布及震源机制解在剖面上的投影; (d) 5.4级地震后两周内震源分布. 红色虚线为推测主要地震的发震断层, Sh_{max} 表示根据应力场反演得到最大主应力方位, 破裂走向依据Chen等(2018)

进行应力场反演结果表明(表2), 该区应力场特征与附近荣昌枯竭天然气田废水回注场的结果比较接近. 应力形状比 $\phi = 0.87 \pm 0.09$, 最大主应力轴接近水平(倾角: $6.2^\circ \pm 3.0^\circ$), 其方位角为 106° , 中间主应力轴也接近水平(图12). 最大水平应力轴方位与根据钻孔资料推测的结果, 即 90° (Chen等, 2018), 有一定差异. 断层活化

分析表明, 1.3~10.6MPa的流体压力增加便足以诱发这些地震(表2).

5 来自四川盆地的认识与机遇

四川盆地虽然总体上是一个稳定的区域, 但具有

表 2 基于震源机制解反演得到的驱动 $M_w>3.5$ 地震震源断层活动的流体超压

编号	日期	H	M_w	$H(\text{km})$	$\Delta P_f(\text{MPa})$	Fault-1			Fault-2		
						走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
1	2014-07-11	19	3.58	2	7.1	25°	41°	87°	209°	49°	93°
2	2016-01-07	12	3.74	3.5	1.3	45°	20°	91°	224°	70°	90°
3	2016-07-27	07	3.71	2.9	6.9	4°	33°	85°	190°	57°	93°
4	2018-07-23	07	3.73	1.6	3.9	15°	44°	86°	201°	46°	94°
5	2018-07-23	07	4.15	1.4	2.1	13°	47°	85°	200°	43°	95°
6	2019-02-24	05	4.27	2.31	5.4	10°	46°	90°	190°	44°	90°
7	2019-02-25	08	4.06	2.53	3.3	5°	50°	76°	206°	42°	106°
8	2019-02-25	13	4.53	1.74	4.5	0°	36°	77°	195°	55°	99°
10	2019-09-08	06	4.92	2.48	7.3	25°	39°	70°	230°	54°	105°
9	2019-09-08	10	4.15	2.30	4.6	11°	46°	90°	191°	44°	90°
11	2019-12-18	08	4.73	2.54	10.6	20°	41°	71°	225°	52°	106°

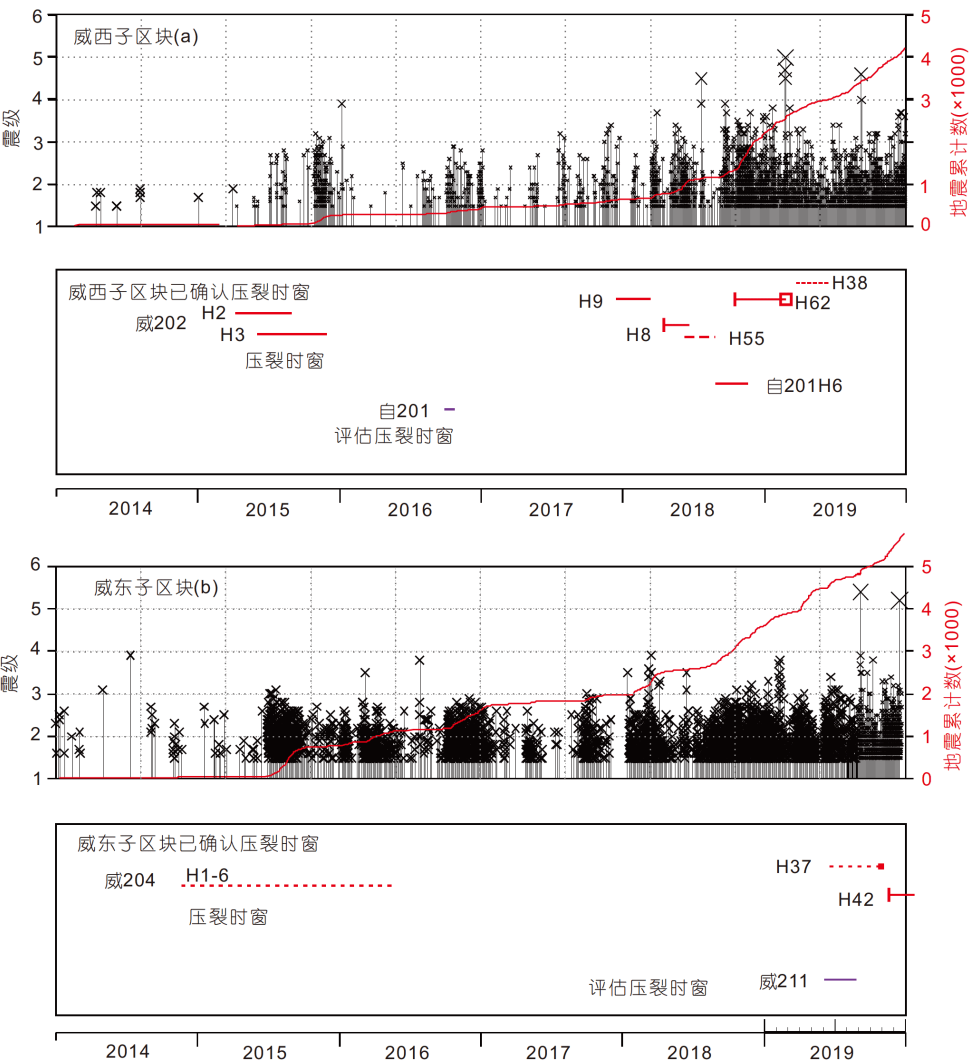


图 11 $M \geq 1.5$ 地震的震级和累积次数随时间变化及部分已知的水力压裂井场及其压裂作业概略时间窗口
(a) 威西子区块; (b) 威东子区块

广泛的地质和构造环境, 例如断层的成熟度和产状以及应力场都具有较大的变化。构造和应力场的多样性使该地区的地震活动对于理解地震学有关问题非常有帮助。此外, 不同类型、不同规模、不同持续时间的工业注入活动、注水压力、深度、速率和体积均涵盖很大范围。频繁的诱发地震活动, 为研究有关诱发地震科学问题和解决有关工业活动有效性和安全性, 提供了不可多得的机遇和科学挑战。到目前为止, 在四川盆地南部地区观察到的典型注入诱发地震活动实例为开展综合研究提供了很好的机会。为了加深我们对注水诱发地震活动的认识, 并最终找到减低和平衡与诱发地震有关风险的方法, 一方面, 学术界与产业界要密切合作, 详细的注水数据和稠密的地震观测数据是深入研究的关键。同时, 建立和完善有关政府规章制度对于快速发展的中国来说也迫在眉睫。

5.1 四川盆地诱发地震

如第3节所述, 自1600年以来, 除去2019年6月17日长宁 $M_{\text{L}}6.1$ 震群的4次余震, 四川盆地内部共发生了32次 $M \geq 5$ 的地震, 其分布如图1和2所示。在这些事件中, 至多有20个事件是天然地震, 与人类活动没有明确的关联性。1900年后地震频度有所增加, 但总体上, 5级以上地震的长期背景事件发生率为每年0.05次, 平均20年左右发生一次。这些天然地震零星地分布在四川盆地内的各地, 但多数发生在南部地区。尽管目前盆地内部的应变速率非常低, 但地壳的应力水平却较高, 具有优势产状的断层的应力状态是接近临界强度的。在天然地震活动中, 有几个5级左右地震是在时间和空间上都是孤立的, 没有明确的前震和余震。有些地震序列空间上丛集, 有不同规模前震和大量余震, 延续几个月到至多两年。还有些序列具有二者之间的过渡性特征, 有一定余震, 但最大余震震级明显低于典型的主震-余震类型地震活动的Båth律(Båth, 1965)期待: 即与主震震级无关最大余震一般比主震低1.1~1.2级。有半数地震可能受深部天然流体的作用, 呈现出的地震活动的多样性很有可能受深部流体的压力, 体积及流通性控制。

而自1950年以来发生的5级以上地震中, 除了遂宁-潼南、武隆、清白江孤立地震, 籍田地震及统景序列外, 至少有12个可能与工业注水活动有一定关联。工业注水活动包括: (1) 枯竭气田的长期废水回注; (2) 深井岩盐开采; (3) 页岩气开发的水力压裂。因为诱发地

震的频发, 平均事件发生率提升为0.17次/年。因此注水活动使 $M \geq 5$ 地震的发生率增加了至少3倍。如果把焦点放在1970年以后4级以上地震上, 年频度在20世纪70年代是0.57次/年, 然后出现阶梯式上升, 自2015~2019年长宁地震之前到达5.2次/年。中强地震近30年的持续增加是十分明显的(图S7)。

对于荣昌气田和自贡黄家场气田的地震活动, 长宁双河盐场的长期地震活动, 长宁及威远页岩气示范区的地震活动, 已有相对完备的证据链支持这些大规模的地震活动和附近的工业注水有关。而更早的几个实例, 如自流井井盐区、长山-罗城井盐区、孔滩气田废水回注区、江安南溪一带废水回注区等, 地震与注水的关联主要是依据是二者在时空上的一致性。近年的实例, 反过来可以审视过去的一些研究结果, 与注水活动在时空上一致的重要地震活动, 是很难用偶然一致来解释的。总而言之, 四川盆地的诱发地震活动, 从全球来看也是十分显著的。到目前为止, 在废水处理场(Skoumal等, 2018)和增强型地热开发区(Kim等, 2018)已观测到的比较确切的注水诱发地震的最大震级为 $M_{\text{w}}5.5$ 左右。兴文的 $M_{\text{L}}5.7$ 级地震是目前为止最大的页岩气水力压裂诱发地震。

在双河盐矿区, 地震活动与盐矿的注采历史和失水量明显相关。我们同意先前研究的结论(Sun等, 2017; 阮祥等, 2008), 即长期深井注水采盐活动不仅诱发了一系列地震活动, 还为6级震群提供了条件。长宁双河的6级地震应该是与井盐开采有关的最大地震了。

值得注意的是, 地震数据共享中心的原始地震目录包含不少爆破事件, 在任何研究中均应仔细排除。图S8显示了长宁背斜西端珙县东北东南的水泥厂及其周围采的石场的分布和该区目录事件分析结果。事件发生时间的北京时间小时频度分布在中午12点和傍晚18点显示两个突出的高峰, 而且绝大部分事件发生在白天, 反映的是放炮时间。但有趣的是, 在夜间也有一些事件。此外, 地震频度-震级分布遵循GR关系, 并显示 b 值接近1, 这是地震的平均值。另外, 放炮事件一般低于2.5级。因此, 可能有些被爆破所诱发/触发的地震活动, 这是值得进一步研究的问题。

5.2 超压流体在自然起源和诱发地震中的作用

针对4级以上地震的震源断层活化分析来看, 在均

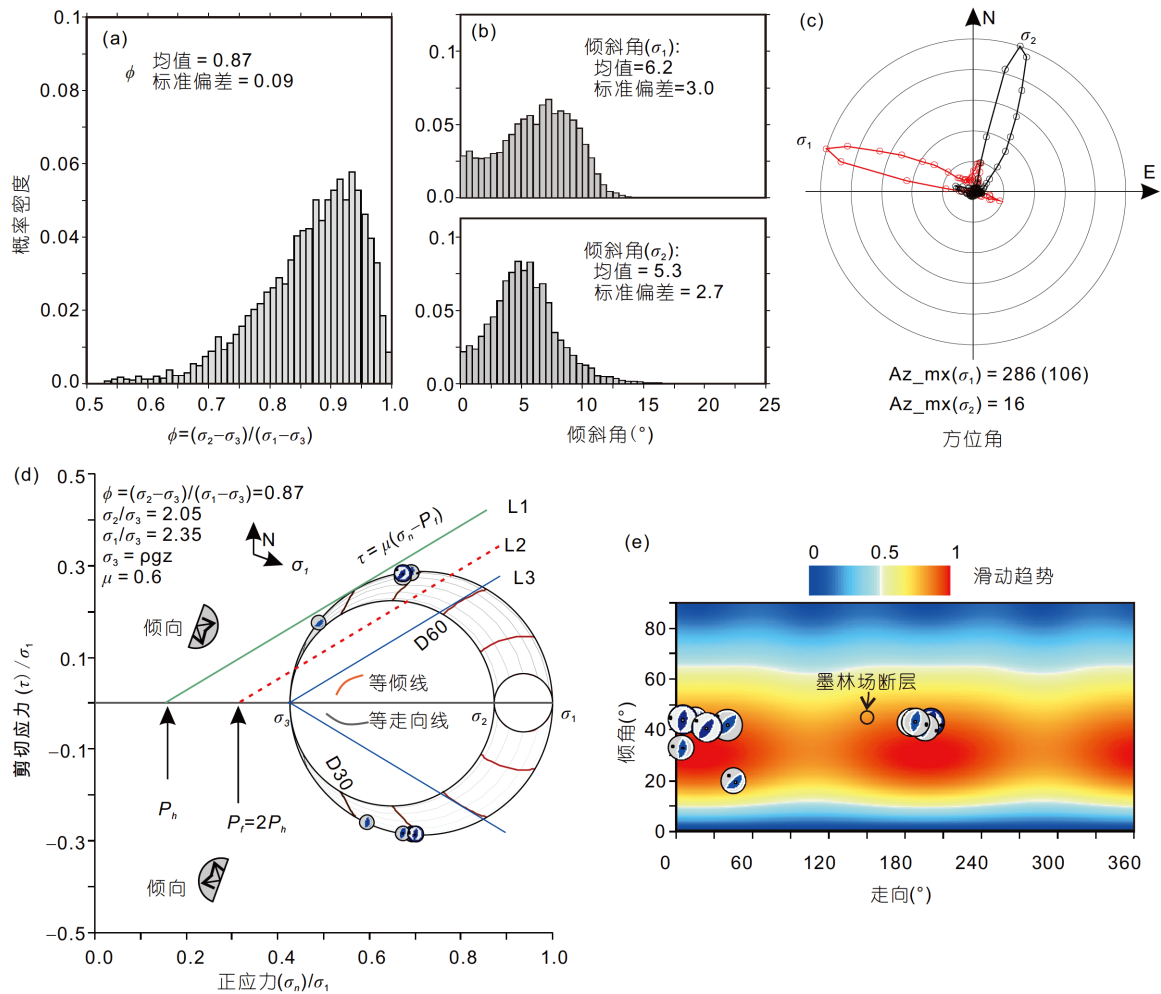


图 12 威远页岩气示范区块应力场反演结果

主应力差的比值(a)及最大和中间主应力轴的倾角(b)和方位角(c)的分布; (d) 归一化正应力-剪应力坐标下摩尔圆; (e) 归一化断层滑动趋势及4级以上地震在断层走向-倾角坐标中的分布

匀应力场的假设下, 需要的额外库伦破坏应力 ($\Delta CFS = \Delta \tau + \mu(\Delta P - \Delta \sigma)$) 范围从小于 1 MPa 到几十 MPa. 表明在现今应力场下, 有的断层的产状是易于滑动的, 而更多断层不具有优势的产状. 大多数情况下, 相应的注水活动足以通过流体压力(忽略固体框架应力变化的话, $\Delta CFS = \mu \Delta P$)使断层活化(Lei 等, 2019a). 但是, 对于某些地震, 例如双河盐场的震源深度较大的地震, 还需要其他因素才能给出合理解释. 应力不均匀, 深层储层中的超压流体是可能的因素. 在诸如长宁背斜那样的构造复杂地区, 应力场的非均匀性会比较强. 在四川盆地, 压力系数大于 2 的超压天然气藏并不罕见, 磨溪气田的嘉陵江组(T1j)储层就是个实例. 如前所述, 深

部超压流体可能是一些天然地震的驱动因素, 如 2010 年遂宁 M5.1 孤立地震和统景 M5.2、5.4 序列. 浅层的油气开采, 地震活动可能触发深部天然流体活动. 当深部流体是主要驱动力时, 取决于流体的储藏体积和连通性, 断层系统的复杂性以及应力临界程度, 所产生的地震活动会显示出各种模式(孤立型、震群及过渡型).

如 3 节所示, 四川盆地有不少孤立地震及余震活动异常低下的序列, 包括天然的和诱发的. 对于这些地震活动, 可以做一些比较合理的推测. 对于整体上应力低于临界状态(亚临界)的断层, 深部流体的压力很高的话, 便足以推动亚临界压断层滑动, 但如果流体源头和补给乏力, 往往只能引发一个较大地震和异常低下

的余震活动。对于诱发地震和稳定地区偶发性中强地震活动, 这是一个十分有趣非常值得进一步研究的问题。

5.3 2008年汶川地震对四川盆地地震活动的影响

2008年5月12日, 四川盆地北缘的龙门山断裂带发生 $M_w7.9$ 汶川大震。因此, 近年来四川盆地持续增长的地震活动是否是汶川地震影响的结果就值得探讨。为此, 我们计算了汶川地震断层位移对四川盆地的影响。计算中采用了基于远场体波波记录结合近场同震位移数据反演得到双“铲状”有限地震断层模型(王卫民等, 2008)。结果发现, 针对四川盆地主流的北东走向逆断层而言, 四川盆地大部分地区处于负的附加库伦应力区域(图2)。盆地西南边缘部位, 包括长宁页岩气区块, 虽然具有正的附加库伦应力, 但其值很小。也就是说, 汶川地震对四川盆地大部来说是卸载, 因此我们认为, 近年来四川盆地持续增长的地震活动与汶川地震关系不大。同时, 汶川地震在四川盆地中部及东南部产生较大的附加拉张体积应变。而几次可能与深部天然流体有关的地震全部分布在这个区域(图S9)。拉张作用具有促进断层阀门活动作用, 从而激发高压流体驱动的断层活化。这是十分有趣而值得深入研究的课题。

5.4 诱发地震的特征

首先, 以下列举四川盆地与各种工业注水活动有关的诱发地震的一些共同特征。

(1) 4级以上地震矩张量反演表明, 在不确定性范围内, 除长宁6级地震外, 所有地震只有纯双力偶成分, 是已存断层的剪切破裂。

(2) 在许多情况下, 由于注水引起的流体压力增加便足以引起关断层活化。在四川盆地, 远场触发尚不明显。由于孔弹性耦合作用而引起的应力变化可能有一定作用, 但似乎不那么重要。

(3) 均匀的区域应力场基本可以解释大部分4级以上地震的发震机制, 但有些地震, 尤其是4级以下地震和深度偏深的地震的震源机制表明在储层尺度应力场不均匀性是存在的。

(4) 诱发地震的数量取决于注入影响区域的地力学(geomechanics)条件。

(5) 诱发地震的最大震级的决定性因素是断层大

小等地质条件而不是注入压力和累计注入量。但是, 随压裂平台和注入量的增加, 遭遇更大断层的可能性也会增加。因此从整体上看, 可以预期总注水量和最大震级之间存在一定的相关性。这种关系对于以统计方式进行全局风险评估具有重要意义。

(6) 一般诱发地震活动的大森型余震活动率很低, 反映在ETAS模型中的特征是较小的 $\alpha(<1.0)$ 和很大比例的强迫(背景)地震活动(forced-seismicity)(可达50~90%)(Lei等, 2017a, 2013, 2019a, 2008)。这些特征与周边地震带的天然构造地震明显不同, 可以作为注水诱发地震的判据之一。在一些长期注水地区, 例如荣昌废水回注场, 还观察到强迫地震活动随时间而有所增加。

(7) 在地震学特征方面, 对于 $M \geq 4$ 的诱发地震, 没有发现与天然地震有明显差异。识别诱发地震活动的可靠方法取决于一系列证据链条, 包括地震活动和注入之间的时空相关性, 统计模型的参数以及断层活化分析等。

(8) 最大地震可能发生在注水的开始阶段(Lei等, 2013), 也可以在中后期(Lei等, 2008)。可能与注水位置与震源断层之间的距离有关。在某些情况下, 地震活动频度和最大震级均有逐渐增加的过程(例如, 荣昌废水处理场)。而在其他情况下, 最大震级可以从小于2级跳跃到大于4级。

(9) 在短期注水的情况下, 注水关闭后的地震活动度通常会迅速下降。如自贡黄家场, 连续注水的近两年期间, 地震活动一直很频繁, 但停止注水后, 地震活动很快就基本平息了。在长期(数十年)注水的现场, 例如在荣昌和孔滩的废水处理场, 注水停止后的地震活动会保持相对较长的时间。

(10) 几次较大地震, 如兴文5.7级地震、长宁6.0级地震和威远5.4级地震等都是在影响体积内成核, 破裂扩展到影响体积外一定距离, 而且都是单向破裂。

(11) 几乎所有发生了明显注水诱发地震的现场, 只要注水活动不停, 地震活动就不会停息。这也是与天然地震不同之处。

同时, 不同类型注水活动诱发的地震活动也表现出一些独特的特征。在废水处理的情况下, 当废水以自流方式流入井中时, 没有明显的地震活动。通常在开始在用压力泵送水后的几天内出现明显的地震活动。反映可能存在压力阈值, 枯竭气田的原始(开采前)

压力可能就是一个阈值。

对于页岩气水力压裂, 注水压力很高, 高于最小主应力(在四川盆地是垂直覆盖压), 但在每个压裂段注水时间却很短(几小时)。当压裂移至下一段时, 已压裂体积的还有很高的压力, 会进一步扩散。在一口井所有段完成压裂后, 压裂液回流将释放一定压力, 然后开始生产, 气压由产量等控制, 气压过低时, 还需要空气加压。因此, 投产后的地震活动也值得关注。

5.5 四川盆地高水平注入诱发地震活动的条件

首先, 必须注意的是, 与世界上其他注水诱发地震类似(Ghofrani和Atkinson, 2016), 四川盆地注水诱发地震活动在不同地区、不同构造部位、不同井段之间存在很大差异, 也有许多注水活动没有诱发明显的有感地震活动。因此, 局部的地质构造背景是关键因素。

脆性地层中已存断层是发生较大地震的必要条件, 尤其3级以上的有感地震, 断层规模至少得百米级别以上。至于直接由水力压裂所产生的微震, 震级小于0级, 多数小于负1级。四川盆地脆性地层中大小尺度的已存断层(包括裂纹)是诱发地震活动度高的原因。尤其是威远背斜的翼部, 盆地南部褶皱带普遍存在。

迄今为止, 在四川盆地, 已在三个示范区进行了规模化页岩气开发: (1) 涪陵的焦石坝区块, (2) 威远区块, (3) 长宁区块。在这些示范区块中, 长宁区块表现出最高水平的诱发地震活动。从3.5节可以看出, 到目前为止, 共观测到10次 $M \geq 4.0$ 地震, 包括4次 $M \geq 5.0$ 。威远页岩气区块可分为两个不同的子区块: 东部的威东和西部的威西。威西也具有较高的诱发地震活动。自2016年以来, 共观测到6次4~4.9级地震。威东也显示出高水平的注入诱发地震活动性, 而且最近还发生了2个5级以上地震。焦石坝的地震活动水平最低。

根据2.2节, 已存断层的滑动趋势是应力场模式和断层产状的函数, 因此在主应力轴坐标下断层空间展布也是关键因素。经历了多次构造运动后, 四川盆地出现了多组断层。在目前的应力场下, 少数断层具有较大的滑动趋势利于破裂, 而更多的断层具有较小的滑动趋势不利于破裂。这可能是某些地区(如涪陵页岩气示范区块)的地震活动度很低, 而其他地区(如长宁和威远)的地震活动度很高的原因。

在构造应力场方面, 足够的差应力也是断层活动

的必要条件。由2.2节的断层稳定性分析可见, 在没有差应力的情况下, 所有断层面上剪切应力为0, 因此不可能产生滑动。四川盆地内部零星分布的天然地震, 表明任何地点都有足够的差应力, 使那些优势产状的断层活动。四川盆地总体上是压缩应力场, 最大主应力轴近水平, 方向SEE到近东西(东南褶皱带局部地区, 如长宁背斜, 方向有一定变化)。最小主应力是垂向应力。中间主应力也是近水平的, 但其大小有很大的变化范围, 主应力形状比值在0.1~0.9之间变化。图3a为不同地区断层滑动趋势在断层走向-倾角坐标中的分布, 落在红色区域中的断层具有较高的滑动趋势, 容易被活化。威远页岩气开发区及荣昌废水回注地区, $\phi=0.91\sim0.94$, 即最大主应力略大于中间主应力, 二者远大于最小主应力。因此容易滑动的断层是各种走向, 倾角为 $25^\circ\sim30^\circ$ 的逆断层。与此形成对比, 位于罗场-建武向斜的页岩气区块, $\phi=0.15$, 容易活动的断层是走向与最大水平主应力方向(方位角 117°)垂直的倾角为 $25^\circ\sim30^\circ$ 逆断层, 以及走向最大水平主应力方向夹角为 $25^\circ\sim30^\circ$ 的近直立的走滑断层。长宁背斜双河盐场一带, $\phi=0.4$, 易动断层的产状分布也有所不同。如前所述, 经历了多次构造运动后, 四川盆地尤其是南部褶皱带地层中往往有多组断层, 而且较多的断层具有较小的滑动趋势, 需要较大的附加库伦应力才能使之活化。这也是诱发地震活动在不同地区、不同构造部位、不同井段之间存在很大差异的原因之一。

威东子区块和威西子区块的诱发地震活动差异可以通过已存断层的大小和密度的差异来解释。威东子区块位于四川盆地的中部隆起, 沉积层变形相对较弱, 沉积层中的断层的规模较小, 密度也小, 因此遇到公里级别的较大断层的概率相对较低。而威西子区块位于著名的威远背斜的南翼, 断层的规模和密度都要大得多, 遇到较大断层的概率也大。焦石坝与长宁页岩气区块一样均位于东南褶皱带, 开发规模也不低, 但迄今尚微观测到明显的诱发地震活动。由于没有任何4级以上地震, 尚无法反演应力场。但局部深度应力测量显示, 焦石坝的最大和最小水平原地应力之间的差很小(3~7MPa), 远小于长宁区块(~22MPa)(王玉满等, 2016), 因此焦石坝的区域应力场可能与威远地区类似。诱发地震活动低下的原因有可能与滑动趋势较大的逆断层不太发育有关, 这也是应该通过深入研究搞清楚的重要问题。

5.6 注水诱发地震最大震级是否如预期般大?

鉴于大的地震是由于较大断层的活化而发生的事实, 潜在地震的最大震级最终由可能活化的已存断层的大小确定。而注水因素可以控制最大地震能否发生, 何时发生。注水压力和累计注入体积也是重要的因素, 因为较高的注入压力和较大的注入体积会导致流体压力在较大空间范围上升, 从而增加遭遇较大断层的概率。

就迄今为止的地震活动来看, 总体上, 研究区域观测到的最大震级与GR关系的统计预测是一致的(Lei等, 2019b), 这与世界上其他地区的结果类似(van der Elst等, 2016)。但是从局部来看, 最大地震发生时刻, 往往超出以往地震活动的震级-频度GR关系的预期值, 表现为极端事件。在其他地区, 如加拿大艾伯塔省也观察到了此类事件(Eyre等, 2019)。这无疑增加了破坏性地震的评估难度, 是需要进一步研究的紧急问题。

断层尺度达到公里级别, 则可能引起4级以上地震, 如果震源很浅, 还会导致严重破坏。与全球其他地区的情况一致(Ellsworth等, 2019; Norbeck和Rubinstein, 2018), 在某些条件下, 地震破裂能够以持续破裂的形式传播到影响体积之外。如前所述, 兴文M5.7地震的破裂便有可能是在一个平台的几口压裂井前缘成核, 并向北沿断层走向单向传播了数公里。双河M6.0地震在双河盐矿采空区下部1km左右成核, 并向西单向传播了超过10km。注意, 注入的流体不需要从注入井迁移到断层以重新激活断层。是断层上流体压力的增加诱发了发断层滑动, 由于水的低可压缩性, 流体压力的传递比流体本身的传播距离大得多。

6 见解与挑战

6.1 检测断层活化的早期迹象

如5.4节所示, 某些情况下最大地震震级是逐渐增加的(例如荣昌废水回注场)。而在其他情况下, 最大震级可以从小于2跃升至大于4。因此, 简单的交通信号系统(TLS)不能很好规避风险。不同类型现场需要建立不同的智能化高级操作管理系统。在废水回注现场, 利用的是枯竭的二叠纪石灰岩地层中断层圈闭的背斜气藏, 具有非常好的渗透性, 因此可能导致断层的快速响应。在长宁页岩气压裂现场, 由于缺乏详细的注水数

据, 无法建立压裂活动与较大地震之间的详细关联。正如先前的研究(Lei等, 2019a)所指出的那样, 破坏性地震之前有明显的“前震”的增加, 从而增加了从早期地震活动中发现某些断层活化迹象的可能性。地震 b 值和其他有关体积外地震活动的详细信息是一个潜在的指标。最终, 通过建立详细而精确的数值模型, 并考虑断层力学、流体流动和热力学的耦合, 以研究地震成核、破裂传播和停止过程。地震活动的统计特征(如 b 值和地震活动的时空迁移)和数值分析结果, 可用于建立可信和可操作的智能化管理系统。

在没有大规模已存断层的现场, 诱发地震活动仅限于设计的影响体积内, 且主要受注水参数控制。由于地震活动在注水停止后迅速消失, 因此可以较好地控制诱发地震活动。对于这种情况, 如一些EGS项目所示, 实时地震监测已允许通过精心设计的交通信号系统来控制诱发地震(Kwiattek等, 2019)。但是, 对于遭受了破坏性事件的更坏情况, 主要地震活动是由于具有不同成熟度的较大规模已存断层活化所致(Kozłowska等, 2018; Lei等, 2019b)。一方面, 基底的成熟断层和沉积物中的未成熟断层表现出对注入操作的地震响应不同(Kozłowska等, 2018)。另一方面, 与成熟断层的地震相比, 未成熟断层的地震在所有频率上都会产生更强的地震波动(Radigue等, 2009)。因此, 断层的结构成熟度是应考虑的重要参数, 具有不同成熟度的断层的摩擦滑动失稳特性应在所有尺度上进行充分研究。对于发育程度低又无明显垂直断错的断层及走滑断层, 油气物探也难以准确把握, 是最大的不确定因素。探测断层活化的早期迹象的可能性(是结构成熟度的函数)是风险评估和减轻诱发地震活动危害的关键问题。

井下观测与地表密集台阵观测结合, 精确的微震成像有助于识别未知断层(Chen等, 2018; 邓起东等, 2007)。特别是对于未成熟的沉积层断层, 由于可忽略的滑移历史, 断层表面比较粗糙, 因此在能够导致破坏性事件的足够大范围破裂之前会发生较多的小规模的破裂。而沿断层面的微震震源扩散正是断层活化的早期迹象。为了能够检测这样的迹象, 需要精确确定地震震源位置, 并且检测到尽可能小的地震。使用来自多个站的地震图的互相关来检测和定位小地震的模板匹配技术是一种有前途的方法。

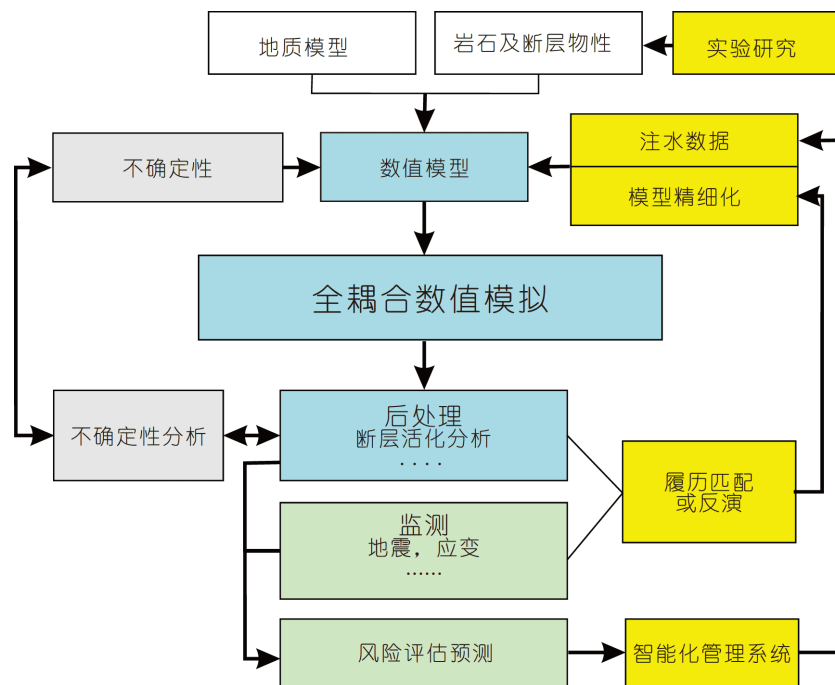


图 13 评估和管理与诱发地震有关的风险的通用框架的示意图

6.2 诱发地震相关风险评估和管理的总体框架

图13为评估和管理与诱发地震有关的风险的通用框架的示意图。耦合的THM(传热、流体流动、岩石力学)模拟起着关键作用。首先,基于现有的地质和地球物理数据,储层系统中主要岩石的力学属性,建立以注入点为中心的储层系统的数值模型。尤其重要的是,尽可能包括详细的断层数据。然后在假定的注水条件下进行数值模拟。具体地区的岩石物性及断层的摩擦属性对断层失稳起主导作用(Kolawole等, 2019),应在控制良好的实验室条件下对现场采集的岩石标本进行系统实验研究。由于数值模型的许多方面都存在不确定性,例如小尺度的岩石物性的不均匀性。因此不确定性分析对于基于概率的预测是必要的。后处理用于将压力、温度、应力、应变等基本变量转换为地球物理观测量和断层滑动趋势分析数据。然后,评估与诱发地震有关的风险,通过优化注水操作进行风险管控。在注水作业过程中,使用实际观测到的数据与模型预测的匹配来改进完善数值模型,并重复进行风险评估和管理。在管理模块中构建可行可信的智能化管理系统。这里,详细的监测有助于建立更好的模型和获得更精确的预测。

在四川盆地已积累了大量注水诱发地震数据,应该得到充分的研究。尽管地震观测不够细致,在加上详细的注水数据和三维地质数据的基础上,是可以极大提高已有认识的。为此,学术界、工业界和监管机构应共同开展工作,搞清楚四川盆地南部高水平诱发地震的控制因素,推进诸如页岩气开发等产业的安全有效发展。

致谢 感谢三位匿名审稿人及刘静教授的及时审阅和建设性意见。

参考文献

- 邓起东, 冉永康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2007. 中国活动构造图 (1:400000). 北京: 地震出版社
- 丁人杰, 李克昌. 2004. 重庆地震研究. 北京: 地震出版社
- 杜芳, 吴江, 李桂芳, 官致君, 吴小平. 2002. 1996年2月28日四川宜宾 5.4级地震. 见: 陈棋富, 邓大林, 刘桂萍, 李明, 编. 中国震例 (1995~1996). 北京: 地震出版社
- 郭欣, 王小龙, 周银兴, 勾宪斌, 张一鸣. 2014. 基于CAP方法反演石柱 $M_s4.3$ 地震矩张量解. 地震地磁观测与研究, 35: 32-37
- 刘亮, 梁斌, 燕中林, 李江涛, 杨立朝, 杨宇东. 2019. 龙泉山断裂带隐伏断层氢气特征及其活动性分析. 沉积与特提斯地质, 39: 45-53

- 吕贵选, 彭云金, 高福海. 2009. 乐山市诱发地震及对策研究的进展. 国际地震动态, (2): 19–22
- 阮祥, 程万正, 张永久, 李军, 陈银. 2008. 四川长宁盐矿井注水诱发地震研究. 中国地震, 24: 226–234
- 四川地震资料汇编编辑组. 1980. 四川地震资料汇编. 成都: 四川人民出版社
- 苏培东, 廖军兆, 王奇, 文理黎. 2014. 四川盆地龙泉山含油气构造浅层天然气对隧道工程危害研究. 工程地质学报, 22: 1287–1293
- 王宏超, 王赞军, 尹功明, 秦娟. 2009. 渝南长岭-半边山断裂带第四纪活动性与潜在地震能力预览. 四川地震, (4): 42–45
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 2008. 四川汶川8.0级地震震源过程. 地球物理学报, 51: 1403–1410
- 王小龙, 马胜利, 郭志, 雷兴林, 夏英杰, 郭欣, 余国政, 勾宪斌, 蒋霞东. 2013. 利用地震背景噪声成像技术反演三峡库区及临近地区地壳剪切波速度结构. 地球物理学报, 56: 4113–4124
- 王玉满, 黄金亮, 王淑芳, 董大忠, 张晨晨, 管全中. 2016. 四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页岩气刻度区精细解剖. 天然气地球科学, 27: 423–432
- 王志伟, 王小龙, 马胜利, 雷兴林, 刘培洵. 2018. 重庆荣昌地区注水诱发地震的时空分布特征. 地震地质, 40: 523–538
- 魏红梅, 刘国彪. 2014. 重庆荣昌地震活动特征与深井注水关系探讨. 地震地磁观测与研究, 35: 187–191
- 许水森, 任寰, 宋杰. 2006. 龙泉山断裂带地震活动浅析. 四川地震, (2): 21–27
- 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 $M_{\text{w}}6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 62: 3432–3447
- 张伯崇, 陈韪, 李宏, 祁英男, 毛吉震, 刘鹏, 李方全. 1993. 自流井背斜地震活动与注水关系的研究. 地震学报, 15: 253–256
- 张致伟, 陈万正, 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: 1635–1645
- 中国油气田开发志总编纂委员会. 2011. 中国油气田开发志: 西南中国石油油气区油气田卷. 北京: 石油工业出版社
- Ader T J, Avouac J P. 2013. Detecting periodicities and declustering in earthquake catalogs using the Schuster spectrum, application to Himalayan seismicity. *Earth Planet Sci Lett*, 377–378: 97–105
- Ahmad M U, Smith J A. 1988. Earthquakes, injection wells, and the Perry nuclear power plant, Cleveland, Ohio. *Geology*, 16: 739–742
- 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, van der Baan M, Kao H. 2016. Hydraulic fracturing and seismicity in the western Canada sedimentary basin. *Seismol Res Lett*, 87: 631–647
- Bachmann C E, Wiemer S, Woessner J, Hainzl S. 2011. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: Introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems. *Geophys J Int*, 186: 793–807
- Báth M. 1965. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2: 483–514
- Chen H, Meng X, Niu F, Tang Y, Yin C, Wu F. 2018. Microseismic monitoring of stimulating shale gas reservoir in SW China: 2. Spatial clustering controlled by the preexisting faults and fractures. *J Geophys Res-Solid Earth*, 123: 1659–1672
- Ellsworth W L. 2013. Injection-induced earthquakes. *Science*, 341: 1225–1229
- Ellsworth W L, Giardini D, Townend J, Ge S, Shimamoto T. 2019. Triggering of the Pohang, Korea, earthquake ($M_{\text{w}}5.5$) by enhanced geothermal system stimulation. *Seismol Res Lett*, 90: 1844–1858
- van der Elst N J, Page M T, Weiser D A, Goebel T H W, Hosseini S M. 2016. Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 4575–4590
- Etchecopar A, Vasseur G, Daignieres M. 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J Struct Geol*, 3: 51–65
- Eyre T S, Eaton D W, Zecevic M, D'Amico D, Kolos D. 2019. Microseismicity reveals fault activation before $M_{\text{w}}4.1$ hydraulic fracturing induced earthquake. *Geophys J Int*, 218: 534–546
- Gan W, Zhang P, Shen Z K, Niu Z, Wang M, Wan Y, Zhou D, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J Geophys Res*, 112: B08416
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *J Geophys Res*, 89: 9305–9320
- Ghofrani H, Atkinson G M. 2016. A preliminary statistical model for hydraulic fracture-induced seismicity in the Western Canada Sedimentary Basin. *Geophys Res Lett*, 43: 10164–10172
- Kanamori H, Hauksson E. 1992. A slow earthquake in the Santa Maria Basin, California. *Bull Seismol Soc Am*, 82: 2087–2096
- Kerr R A. 2012. Learning how to not make your own earthquakes. *Science*, 335: 1436–1437
- Kim K H, Ree J H, Kim Y H, Kim S, Kang S Y, Seo W. 2018. Assessing whether the 2017 $M_{\text{w}}5.4$ Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360: 1007–1009
- 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. *Nat Geosci*, 12: 839–844
- Korsch R, Huazhao M, Zhao Cai S, Gorter J. 1991. The Sichuan basin, southwest China: A late proterozoic (Sinian) petroleum province. *Precambrian Res*, 54: 45–63
- Kozłowska M, Brudzinski M R, Friberg P, Skoumal R J, Baxter N D,

- Currie B S. 2018. Maturity of nearby faults influences seismic hazard from hydraulic fracturing. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: E1720–E1729
- Kwiatek G, Saarni T, Ader T, Bluemle F, Bohnhoff M, Chendorain M, Dresen G, Heikkinen P, Kukkonen I, Leary P, Leonhardt M, Malin P, Martínez-Garzón P, Passmore K, Passmore P, Valenzuela S, Wollin C. 2019. Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland. *Sci Adv*, 5: eaav7224
- Langenbruch C, Ellsworth W L, Woo J U, Wald D J. 2020. Value at Induced Risk: Injection-induced seismic risk from low-probability, high-impact events. *Geophys Res Lett*, 47: e85878
- Lei X, Huang D, Su J, Jiang G, Wang X, Wang H, Guo X, Fu H. 2017a. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to $M_w 4.7$ induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. *Sci Rep*, 7: 7971
- Lei X, Ma S, Chen W, Pang C, Zeng J, Jiang B. 2013. A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 4296–4311
- Lei X, Ma S, Wang X, Su J. 2017b. Fault-valve behaviour and episodic gas flow in overpressured aquifers-evidence from the 2010 $M_s 5.1$ isolated shallow earthquake in Sichuan Basin, China. *Prog Comput Fluid Dyn*, 17: 2
- Lei X, Wang Z, Su J. 2019a. 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. *Seismol Res Lett*, 90: 1099–1110
- Lei X L, Wang Z W, Su J R. 2019b. Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and shale gas site in Changning, south Sichuan Basin, China. *Earth Planet Phys*, 3: 510–525
- Lei X, Yu G, Ma S, Wen X, Wang Q. 2008. Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. *J Geophys Res*, 113: B10310
- Li Z G, Jia D, Chen W. 2013. Structural geometry and deformation mechanism of the Longquan anticline in the Longmen Shan fold-and-thrust belt, eastern Tibet. *J Asian Earth Sci*, 64: 223–234
- Liu J, Zahradník J. 2020. The 2019 $M_w 5.7$ Changning earthquake, Sichuan Basin, China: A shallow doublet with different faulting styles. *Geophys Res Lett*, 47: e85408
- Luo Y, Ni S D, Zeng X F, Xie J, Chen Y, Long F. 2011. The $M 5.0$ Suining-Tongnan (China) earthquake of 31 January 2010: A destructive earthquake occurring in sedimentary cover. *Chin Sci Bull*, 56: 521–525
- Majer E L, Peterson J E. 2007. The impact of injection on seismicity at The geysers, California Geothermal field. *Int J Rock Mech Min Sci*, 44: 1079–1090
- Mayerhofer M J, Lolon E, Warpinski N R, Cipolla C L, Walser D W, Rightmire C M. 2010. What is stimulated reservoir volume? *SPE Prod Operat*, 25: 89–98
- McGarr A, Simpson D, Seeber L, Lee W. 2002. Case histories of induced and triggered seismicity. *Inter Geophys Ser*, 81: 647–664
- Meng L, McGarr A, Zhou L, Zang Y. 2019. An investigation of seismicity induced by hydraulic fracturing in the Sichuan basin of China based on data from a temporary seismic network. *Bull Seismol Soc Am*, 109: 348–357
- Morris A, Ferrill D A, Brent Henderson D B. 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 24: 275
- Norbeck J H, Rubinstein J L. 2018. Hydromechanical earthquake nucleation model forecasts onset, peak, and falling rates of induced seismicity in Oklahoma and Kansas. *Geophys Res Lett*, 45: 2963–2975
- Qian Y, Chen X, Luo H, Wei S, Wang T, Zhang Z, Luo X. 2019. An extremely shallow $M_w 4.1$ thrust earthquake in the Eastern Sichuan Basin (China) likely triggered by unloading during infrastructure construction. *Geophys Res Lett*, 46: 13775–13784
- Radiguet M, Cotton F, Manighetti I, Campillo M, Douglas J. 2009. Dependency of near-field ground motions on the structural maturity of the ruptured faults. *Bull Seismol Soc Am*, 99: 2572–2581
- Ryder R, Rice D, Sun Z, Zhang Y, Qiu Y, Guo Z. 1994. Petroleum geology of the Sichuan basin, China: Report on US Geological Survey and Chinese Ministry of Geology and Mineral Resources field investigations and meetings. Report. US Geological Survey, doi: 10.3133/ofr94426
- Skoumal R J, Ries R, Brudzinski M R, Barbour A J, Currie B S. 2018. Earthquakes induced by hydraulic fracturing are pervasive in Oklahoma. *J Geophys Res-Solid Earth*, 123: 10918–10935
- Streit J E, Hillis R R. 2004. Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO_2 in porous rock. *Energy*, 29: 1445–1456
- Sun X, Yang P, Zhang Z. 2017. A study of earthquakes induced by water injection in the Changning salt mine area, SW China. *J Asian Earth Sci*, 136: 102–109
- Tan Y, Hu J, Zhang H, Chen Y, Qian J, Wang Q, Zha H, Tang P, Nie Z. 2020. Hydraulic fracturing induced seismicity in the Southern Sichuan Basin due to fluid diffusion inferred from seismic and injection data analysis. *Geophys Res Lett*, 47: e84885
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, 90: 1353–1368
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications.

- [J Geophys Res-Solid Earth](#), 125: e18774
- Yang H F, Liu Y J, Wei M, Zhuang J C, Zhou S Y. 2017. Induced earthquakes in the development of unconventional energy resources. [Sci China Earth Sci](#), 60: 1632–1644
- Zhao X, Yang Y. 2015. The current situation of shale gas in Sichuan, China. [Renew Sustain Energy Rev](#), 50: 653–664
- Zheng G, Wang H, Wright T J, Lou Y, Zhang R, Zhang W, Shi C, Huang J, Wei N. 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements. [J Geophys Res-Solid Earth](#), 122: 9290–9312
- Zhu L, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data. [Geophys J Int](#), 194: 839–843
- Zhu L, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. [Bull Seismol Soc Am](#), 86: 1634–1641
- Zou C, Dong D, Wang Y, Li X, Huang J, Wang S, Guan Q, Zhang C, Wang H, Liu H, Bai W, Liang F, Lin W, Zhao Q, Liu D, Yang Z, Liang P, Sun S, Qiu Z. 2015. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I). [Pet Explor Dev](#), 42: 753–767

(责任编辑: 刘静)