

胡隽,谭玉阳,张海江,等,2021. 基于微震监测的页岩气开采区 b 值特征研究. 中国地震,37(2):483~493.

基于微震监测的页岩气开采区 b 值特征研究

胡隽^{1,2)} 谭玉阳³⁾ 张海江⁴⁾ 曹俊兴^{1,5)}
梁春涛⁵⁾ 王权锋²⁾ 徐彬²⁾

1) 成都理工大学,油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都 610059

2) 成都理工大学,数学地质四川省重点实验室,成都 610059

3) 中国海洋大学,山东青岛 266100

4) 中国科学技术大学,合肥 230026

5) 成都理工大学,地球物理学院,成都 610059

摘要 四川盆地南部的长宁页岩气开发区附近地震频发,近年来已发生近 10 次 $M_L > 4.0$ 的中型地震和万余次 $M_L 1.0 \sim 3.0$ 的小微地震,灾害风险持续增高。由于国家地震台网的固定台站较为分散,难以捕捉到 1 级以下微震事件的精确信息,通过近场微震监测数据来分析页岩气开发区的地震风险演化趋势,已经成为势在必行的科学问题。本文基于专门布设的 13 个近场流动台站和国家地震台网固定台站 2017 年 2 月至 2018 年 6 月监测拾取到的 1 万余个地震事件,采用最大似然估计法计算了双差定位后地震目录的 b 值,详细探讨了长宁页岩气开发区的 b 值演化特征。基于更低的最小完整震级,估计出区域总体 b 值为 0.98 ± 0.02 ,略高于前人研究结果。拟合直线的双线性特征和错位分布指示出 b 值演化可能存在明显的时空差异特征。通过分析验证了这一结果,并且发现 5 个地震事件数量快速增加的时间段恰好伴随着 b 值的强振荡特征和相关空间距离 SCL 值的稳定低值分布,认为可能与附近的页岩气压裂开采存在关联。分析认为 4 个较大震级事件发生之前出现的 b 值下降应归因于震前的应力累积过程,类似于一般的大型天然地震事件。

关键词: 页岩气 水力压裂 b 值 SCL 值 诱发地震

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0483-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

利用水力压裂技术改造储层来开采页岩气可能会诱发中小级别的地震,其原因是快速扩展的水力裂缝可能延伸到附近处于临界状态的断层并改变滑动面的应力状态,导致断层活化(Ellsworth, 2013; Bao et al, 2016; Hu et al, 2018b; Tan et al, 2020)。从全球范围看,虽然只有小比例页岩气开发地发生了疑似被水力压裂所诱发的地震,但是一些诱发地震的频数和震级足以引起政府和民众的重视(Foulger et al, 2018)。加拿大阿尔伯塔地区弯曲湖

[收稿日期] 2021-02-05 [修定日期] 2021-03-25

[项目类别] 国家自然科学基金(41604050, 41804040)资助

[作者简介] 胡隽,男,1981 年生,博士,副教授,主要从事诱发地震的力学机制、演化规律和风险评估研究。

E-mail: hujuan07@cdut.edu.cn

(Crooked lake)附近的诱发地震序列与附近多个水力压裂在时间上高度吻合,震级范围主要在 M_w 1.7~3.9 之间 (Schultz et al, 2015; Atkinson et al, 2016)。同一地区靠近 Fox Greek 地区的 Duvern 地层中的水力压裂作业与附近发生的异常地震丛集也存在强时空关联,地震诱发强度与注水量之间存在吻合较好的线性关系 (Schultz et al, 2017, 2018)。美国俄克拉荷马州和俄亥俄州在进行页岩水力压裂后发生了一系列 2 级以上的地震事件,诱发关系显著 (Holland, 2013; Darold et al, 2014; Skoumal et al, 2015)。中国四川省宜宾地区自 2014 年进行压裂开采以来,珙县、筠连县、长宁县附近的地震事件数量明显增加,诱发地震风险逐年上升,2017 年至 2019 年发生的数次 $M_L > 4.0$ 和 2 次 $M_L > 5.0$ 地震,均可能与页岩气开发区的水力压裂活动有关 (Lei et al, 2017, 2019; Meng et al, 2019)。

上述现象表明,很可能因为水力压裂岩层产生的巨大弹塑性应力和高速扩展的流体压力使附近的既有断层被再次活化,显著增加区域地震风险。在此背景下,科学评估和识别地震风险更高的区域,把握风险演化的动态过程,成为一个极其重要的研究方向。一些学者分别采用单元细胞分割估算方法 (Ghofrani et al, 2016)、改进的贝叶斯网络法 (Hincks et al, 2018)、蒙特卡罗方法 (Shabarchin et al, 2017)、数据统计法 (Schultz et al, 2018)、模糊层次评价法 (Hu et al, 2018a)、机器学习算法 (Pawley et al, 2018) 对加拿大西部地区、美国得克萨斯州、俄克拉荷马州、堪萨斯州和中国四川盆地南部的诱发地震风险进行评价,得到区域地震风险概率估计分布图。上述方法对诱发地震风险的估计具有科学价值,但主要采用数据统计方法,并未直接针对指针构造风险的地震学参数进行讨论。另一些相关研究计算了较大时空范围内的 b 值 (Bao et al, 2016; Schultz et al, 2018; Lei et al, 2017; Atkinson et al, 2016), 发现诱发地震的 b 值存在双线性特征 (Igonin et al, 2018), 但仍然缺乏基于页岩气开发区微震监测数据的 b 值演化分析研究。

本研究针对中国四川省宜宾市长宁页岩气开发区,联合使用专门布设的 13 个流动台站监测获得的微震数据和国家地震台网的较大震级数据,对 2017 年 2 月至 2018 年 7 月的区域 b 值及其时空演化过程进行详细分析,讨论了 b 值振荡和演化的规律和可能成因,为页岩气开发区的地震风险评估提供了新思路。

1 资料与方法

位于中国四川省宜宾市珙县上罗镇的长宁页岩气开发区块,大地构造上位于青藏高原东缘和四川盆地南缘的盆山结合带,虽远离龙门山断裂带、华蓥山断裂带等大型构造单元,但是局部上位于长宁大背斜以南,隐伏断裂发育,构造环境仍较为复杂 (Lei et al, 2017)。

长宁区块设计了密集的水力压裂平台,自 2014 年起开展了总体上由南至北的规模性压裂开采,页岩气产量和地震数量一度同时攀高。2017 年 2 月在长宁页岩气开发区内布设了 13 台高灵敏度检波器 (图 1(b) 中的白色倒三角),获取了一年半时间的近场微地震监测数据。由于检波器限幅原因,临时台阵对于较大震级的地震波形记录并不完整。基于数据的完整性考虑,另收集了中国地震数据共享中心提供的国家地震台网固定台站记录到的远场地震目录。分别对近场和远场两类地震数据进行双差精定位,删去重复数据 (基于精度考虑,小震级范围删去远场数据,保留近场数据),得到本研究使用的综合地震目录。本研究的震级均采用里氏震级,只有发生在 2017 年 5 月 4 日的震级最大的 M_s 4.8 事件,采用 Lei 等

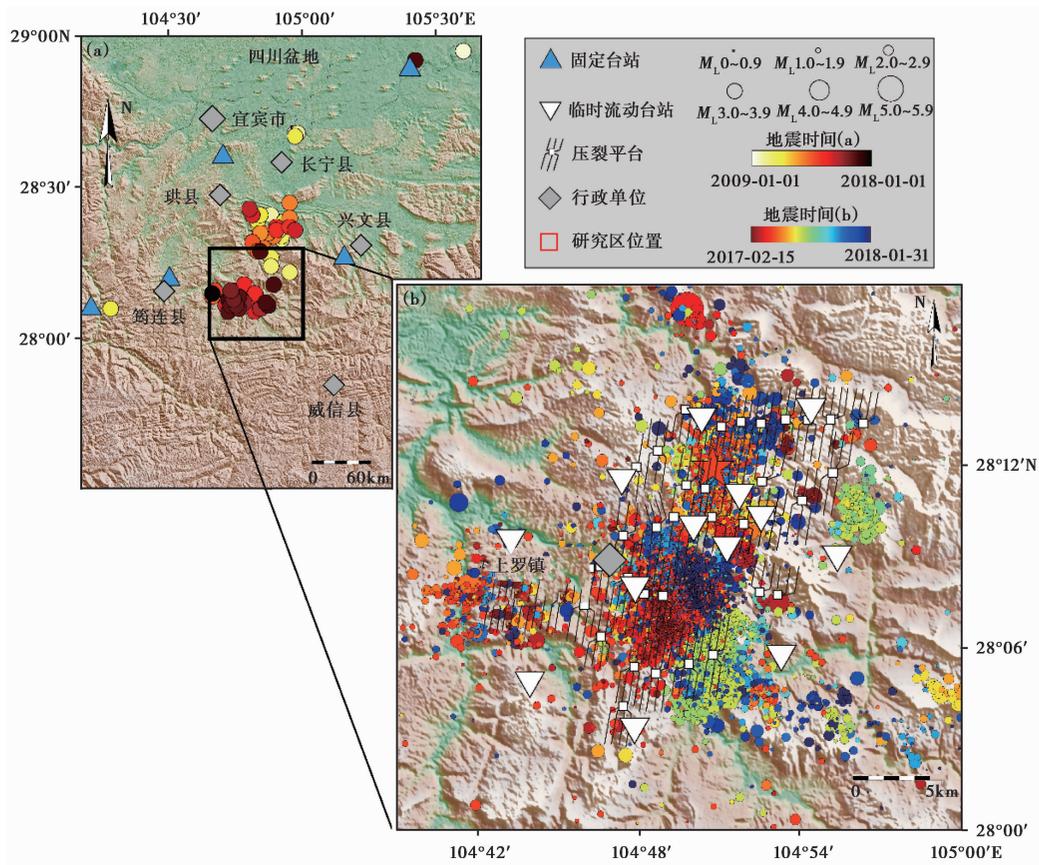


图 1 研究区位置与地震事件投影

(a) 绘制了 2009—2018 年间发生的 2 级以上地震事件 (数据来源于国家地震台网), 颜色对应地震发生时间, 红框表示的研究区位于四川盆地南缘, 放大后显示在 (b) 图中; (b) 中的地震事件由布置的临时流动台站监测并精定位, 圆圈大小对应不同震级

(2017) 通过 CAP 法得到的更可靠的 M_w 4.56 矩震级。压裂平台位置数据和生产信息来自相关研究 (Lei et al, 2017; Hu et al, 2018a; Meng et al, 2019; Tan et al, 2020)。

b 值是地震学中的重要参数, 是描述地震频度和震级关系的系数, 常用于表示区域内不同震级地震的相对分布特征, 其概念由 Gutenberg 等 (1955) 提出

$$\lg N(M_c) = a - b \times M_c \quad (1)$$

式中, M_c 表示地震最小完整震级, $N(M_c)$ 表示大于等于 M_c 的地震事件数, a 为历史地震活动水平的常数。

岩石实验结果和一些较大震级实例表明 b 值大小与环境应力累积程度成反比, 低 b 值往往对应高地震风险 (Scholz, 1968; Fiedler, 1974; Sahu et al, 1994; Guha, 1979; Molchan et al, 1990, 1999; Imoto, 1991; Amitrano, 2003; Schorlemmer et al, 2005), 其是一个能够衡量区域应力累积状态的重要指标 (Chan et al, 2001)。本文采用更适用于分析小震活动性的最大似然法对 b 值进行估计 (王辉等, 2012)

$$b = \frac{\lg(e)}{\bar{M} - M_c} \quad (2)$$

式中, M_c 为最小完整震级,也是本研究采用的起算震级, \bar{M} 表示平均震级, $\lg(e)$ 值取 0.4343。 b 值的标准偏差 δb 为 (Shi et al, 1982)

$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

式中, M_i 为第 i 个地震事件的震级, n 为地震事件总数。

本文就长宁页岩气开发区块在近场监测期间的地震 b 值进行时间和空间维度的综合分析,结合空间相关距离 (SCL)、地震频度和丛集性特征探讨 b 值的演化规律和可能成因。

2 结果与讨论

2.1 精定位结果和 b 值

采用双差成像算法 TomoDD (Zhang et al, 2003、2006) 和四川盆地南部的速度模型 (Lei et al, 2017) 对 13 个流动台站监测到的 10499 个地震事件进行了精定位,获得 10287 个重新定位后的地震事件 (图 2(a))。计算获得了较高的定位精度, X 、 Y 、 Z 方向的相对误差均仅有 0~20m (图 2(d)), 其中 3 个方向相对定位误差的均值分别为 7.10m、7.04m 和 8.69m, 标准差分别为 4.29m、4.12m 和 5.85m, 可见 Z 方向具有相对更大的误差均值和方差。为提高流动台站监测 3 级以下的微震事件的效率,对监测设备进行了限幅,因此可能存在较大震级地震事件的遗漏。为了保证目录的完整性,将国家地震台网固定台站测定的 3 级以上地震事件纳入地震目录,形成用于本研究的综合目录。

图 2(a) 中的精定位地震事件呈现出一定的区域集中性,可能与附近的页岩气开发平台的压裂开采作业有关。AB 和 CD 两条剖面从 EW 向和 SN 向给出了垂向地震分布 (图 2(b)、2(c)),剖面上能够观察到条带状地震集中区,预示着该区域可能存在一些产状较为陡峭的隐伏断层 (图中的白色虚线)。这些疑似断层的产状基本均大于 60° ,与相关研究中的震源机制解吻合 (Lei et al, 2017; Tan et al, 2020)。

基于上述综合目录,本文计算了 2017 年 1 月至 2018 年 6 月间 $40\text{km} \times 40\text{km}$ 范围内的 b 值。由于估算 b 值需要采用大于最小完整震级 (M_c) 的地震事件,因此首先采用最大曲率方法估计出 M_c 值。图 3(a) 中的灰色柱状数据指示出近正态分布的震级特征,对应的 M_c 值仅有 0.51,误差为 ± 0.04 ,其精度比区域台网监测事件所估计的 M_c 值 (大于 1) 有较大提升,这一结果显然得益于 13 个流动台站的近场微震监测。然后,将研究区分割为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的等间距网格,设定每个网格的最少地震数目为 50 条,采用最大似然法 (Aki, 1965) 计算每个网格的 b 值。由于网格尺度较小,绝大部分网格估计出的 b 值误差能够控制在 0.01~0.05 之间。基于上述方法,得出 2017 年 2 月至 2018 年 7 月间长宁页岩气开发区的 b 值为 0.98,误差为 ± 0.02 , a 值为 4.31,误差为 ± 0.01 (图 3(a))。这一 b 值表示本文讨论的全时空平均水平。Lei 等 (2017) 利用 2014 年至 2016 年区域台网和国家台网地震目录,基于最小完整震级 $M_L 1.0$ 计算出本区域的 b 值为 0.9。Meng 等 (2019) 利用区域临时流动台站在 2015 年 2 月至 2017 年 12 月期间监测的地震目录,基于最小完整震级 $M_L 1.1$ 计算出本区域的 b 值为

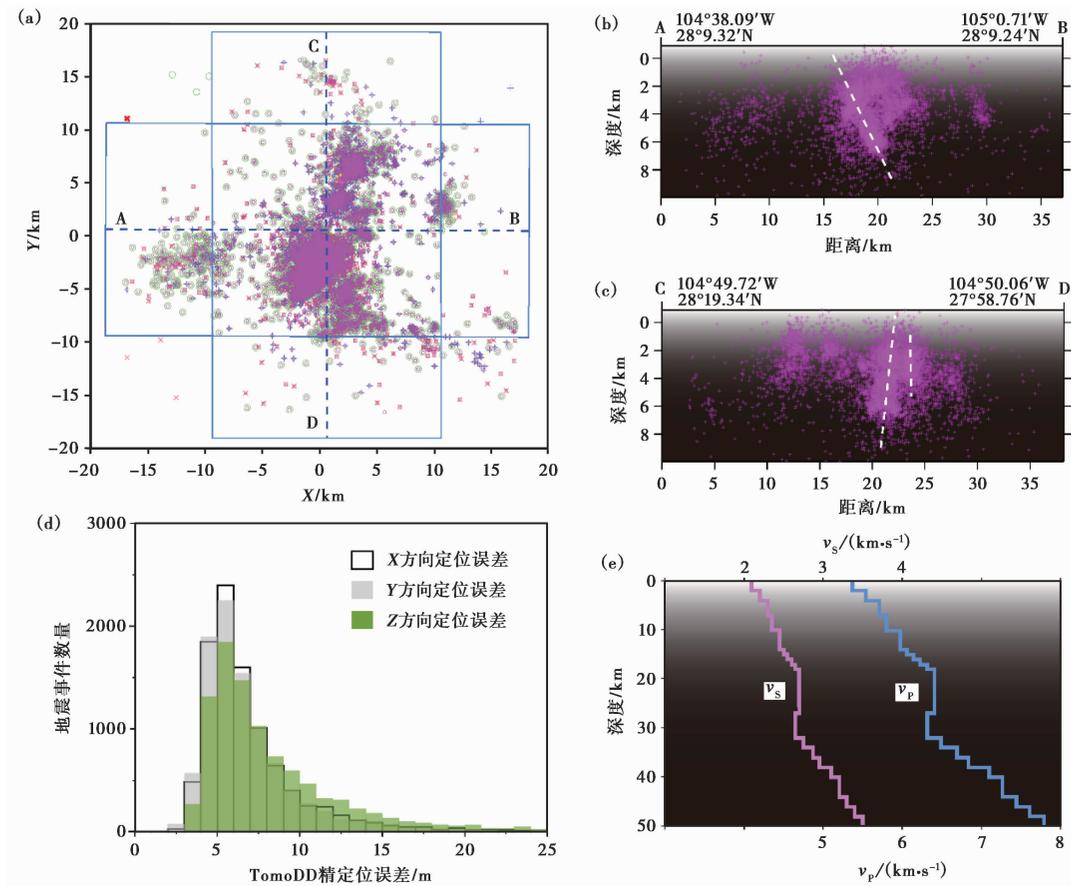


图 2 TomoDD 精定位后的地震事件分布

(a) 为研究区内部发生的深度 10km 以内的精定位地震事件平面分布图,不同颜色对应不同深度,AB 和 CD 为两条剖面;(b)、(c) 分别为 AB 剖面 and CD 剖面在方框内部提取的精定位事件的纵向投影,深度约为 -10~0.5km,白色虚线为可能的断层走向;(d) 给出了 3 个方向的精定位相对误差;(e) 为精定位采用的地层速度模型(Lei et al,2017)

0.93。上述 b 值较本文的计算结果略低,可能的原因有两方面:一是研究时间段不同,我们研究的是 2017 年 2 月至 2018 年 6 月的地震目录,晚于前人研究;二是通过近场监测获得了更多 $M_L 1.0$ 以下的微震事件,使得估计出的 b 值更高。一般情况下,大多数水力压裂诱发地震的震级较小(小于 $M_L 3.0$),因此更多地震事件集中在小震级区域,拟合 b 值的直线斜率相应增大,估计出的 b 值更高。

图 3(a)中给出的拟合直线(红色)与地震数据(蓝色)之间存在较大空隙,置信度不高。这里存在较明显的双线性特征(黑色虚线),大于和小于 $M_L 2.5$ 的 b 值拟合斜率明显不同,与加拿大西部盆地相关研究中类似(Igonin et al,2018)。这一现象的根本原因在于部分震级较大的诱发地震的余震震级较低,导致 2.5~4.0 级的中等震级地震事件数非常少。5 个大于 3.0 级的地震(其中 1 个大于 4.0 级)的余震震级普遍较低,此特征不完全满足描述天然地震余震序列特征的大森定律,而在一定程度上更符合诱发地震的余震特征(Lei et al,2019)。这表明本区域地震的成因有很大一部分与外界应力的扰动有关,最大的怀疑对象即是附近

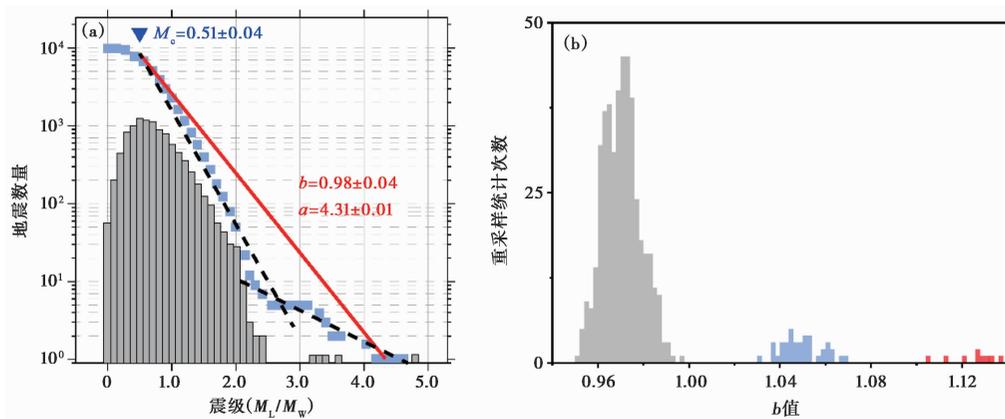


图3 根据精定位后的地震事件估计出的 b 值分布特征

(a) 为最大似然估计得到的 b 值、 a 值和最小完整震级 (M_c), 采用 bootstrap 重采样方法通过 1000 次检验得到; (b) 1000 次重采样估计的 b 值

的页岩气压裂开采。另外, 采用的 1000 次 Bootstrap 重采样结果显示出 b 值的错位分布 (图 3(b)), 大部分 b 值为灰色部分, 位于 $[0.95, 1.00]$ 区间, 但是同样存在 1.05 和 1.12 左右的另 2 个 b 值丛集 (图 3(b) 中蓝色和红色), 这一现象表明 b 值存在时空差异性。

2.2 b 值时空演化及分布特征

为了更全面和深入地探讨 b 值特征, 首先从时间和空间的演化角度进行进一步分析。地震震级、累积数量、地震频率、 b 值和 SCL 值随时间演化的计算结果, 如图 4 所示。计算中采用固定样本数目 50 个事件进行扫描, 即相邻统计点之间均发生了 50 次地震。图 4(a) 中地震事件的颜色对应于不同的地震发生时间, 地震事件更为集中的 4 个时间段用红色圆圈标识, 其位置正好对应了累计地震数量曲线的快速增长部分, 即曲线斜率突然上升的位置。图 4(b) 中用红色柱体表示的地震频度也能提取出相同的地震丛集特征。图 4(c) 中的 b 值在上述 5 个地震快速增加的时间段也同步展现出了较大的振荡。

前人研究表明, 郯庐断裂带南段、龙门山断裂带南段和鲜水河断裂带道孚段等大型断裂构造附近的 b 值均体现出一定程度的低值特征 (王辉等, 2012; 易桂喜等, 2013; 吴萍萍等, 2015)。因此, b 值的分布依赖于地壳介质的不均匀性和大型断裂带。 b 值的定义 (公式 (1)) 表明其值直接反映地震频度和震级之间的相关性, 可以认为在远离大型构造活动带的、地震频度少而稳定的地区, b 值一般不会出现较大波动。长宁页岩气开发区块距离最近的大型断裂华蓥山断裂有 40 余千米, 在 2014 年 11 月进行大规模压裂开采页岩气之前, 地震频度很低, 属于稳定地区。然而, 自该时间点以后区域地震数量和震级均呈现出截然不同的陡增态势 (Lei et al, 2017)。

图 4(a)、4(c) 中的 5 个红圈标注出了 b 值振荡的主要部分, 其刚好对应地震频率显著增高的 5 个时区 (图 4(a) 中的红圈和图 4(b) 中的红色柱体), 并且能够观测到一些竖直线带状的地震丛集。上述现象说明某些时间点地震事件数的激增会使得 b 值出现明显波动。另外, 借助 Geotao Map 软件包^①, 采用 Single-link Cluster 方法 (Bruce et al, 1989) 对丛集地震

① <https://staff.aist.go.jp/xinglin-lei/>

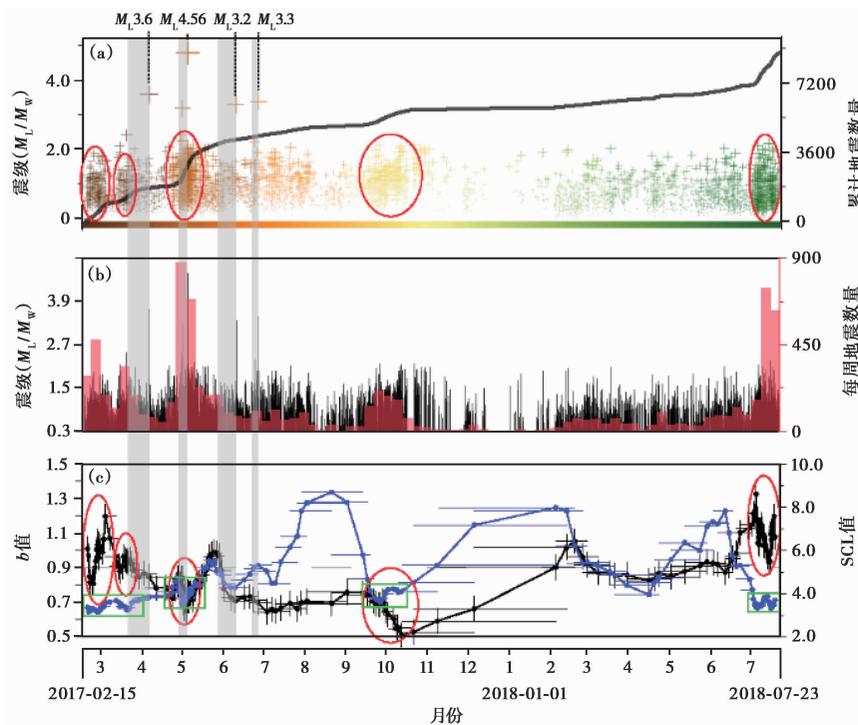


图 4 地震的震级-频度-时间分布及其对应的 b 值演化特征

(a) 监测期间的地震事件的震级-时间分布图,不同事件颜色对应不同发震时间,黑色曲线表示累积地震数量;(b) 地震频度-时间分布图,红色柱体表示每周的地震数量;(c) 监测期间研究区的 b 值和 SCL 值演化趋势

的空间相关距离 SCL 值 (Lei et al, 2007) 进行同步分析,其结果用蓝色线条描绘在图 4(c) 中。总体上讲,所有 $40\text{km} \times 40\text{km}$ 范围内的地震事件的 SCL 值均小于 10km ,直接阐明地震事件随时间发生存在时空丛集性的显著特点。同时,不难观察到每当密集地震丛集出现(图 4(a)、4(c)中红圈所示),即 b 值开始振荡的时域,SCL 值均呈现出较为稳定的低值特征(图 4(c)中绿色方框)。这说明 5 个地震丛集对应的空间相关距离仅有 $3 \sim 5\text{km}$,基本符合水力压裂诱发地震的 5km 控制范围 (Schultz et al, 2017)。

其次,进一步探讨地震事件激增的原因。结合相关研究数据 (Lei et al, 2019; Tan et al, 2020) 和遥感卫星图片,能够大致了解在 b 值振荡的对应时间段均存在正在进行的水力压裂作业活动,出现的密集地震丛集可能正是由这类人类活动所诱发。这一结论具有较好的灾害预警意义,因为 b 值的波动对应该地区的应力状态的变化,如果实时监控到大量的诱发微震事件伴随着 b 值的急剧变化,可能识别出继续压裂活动的地震高风险和低风险特征。值得注意的是,这并不意味着只要进行水力压裂就一定会触发大量微地震,因为很多压裂时间段内并未出现显著的地震丛集,例如 2017 年 11 月至 2018 年 1 月 H7 平台在压裂期间区域地震活动性较低。

另外, b 值的演化过程体现出另一个规律,即 4 个较大震级的中型地震发生之前 b 值均存在下降的趋势。图 4(a) 中用十字符号标注了监测时间段内区域内发生的 4 个 $M_L > 3.0$ 的有感地震,虚线顶端标注了对应的具体震级。20 世纪 60 年代的岩石物理实验 (Scholz,

1968;Mogi,1962)认为低 b 值对应高应力状态,是岩石破裂的前兆,也是强震孕育的重要条件,这一观点在诸如汶川 8.0 级地震、川滇地区若干 6.0 级以上地震、苏门答腊地震等事件中均得到了较好的验证(史海霞等,2018;王辉等,2012;Nanjo et al,2012)。本文讨论的大多数地震事件并不属于典型的天然地震事件,而更可能是与人类活动相关的诱发地震事件。震前低 b 值现象说明这些诱发事件仍然具有与天然地震类似的应力累积-释放特征,然而应力累积过程一定程度上被人为缩短了。图 4 中表征 4 个 3 级以上地震的虚线左侧的灰色条带直接对应 b 值下降区间,其中震级最大的 M_w 4.56 事件在发生后 b 值发生了显著的反弹回升,与大震级天然地震发生前后的 b 值特征变化模式最为吻合。

最后,继续分析 b 值的空间分布和不同深度的演化规律。图 5(c) 显示了地震事件数量随深度的分布,显然在 2~4km 深处达到最大值,更深和更浅的两侧逐渐下降,呈现出类正态分布特征。因此,选择了 3km 和 10km 为目标深度,并选取上、下 2km 范围内的地震事件扫描 b 值的空间分布。能够估计出 b 值在 3km 深度的投影范围大于 10km,这与地震事件密度有关。中部区域的 b 值较高,外围则较低。并且随着深度增大, b 值呈现出减小的趋势。这说明更深部的应力累积程度随着结晶基底的出现而增大。同时,扫描了 M_c 值的空间分布,总体趋势为中部有效震级较小,外围较大,深度越深 M_c 值越大。这一特征仍然与地震事件的空间分布密度相关,3km 深处地震密集的区域能够获得更小的最小完整震级。

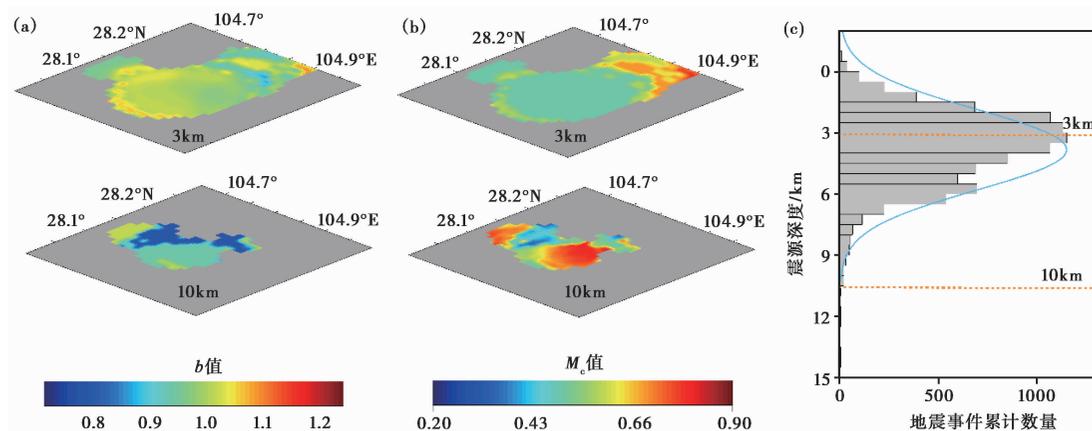


图 5 3km 和 10km 深度的 b 值和 M_c 值的水平向分布特征

(a) b 值分布特征;(b) M_c 值分布特征;(c) 不同深度的频度分布

3 结论

本研究基于 13 个流动台站和国家地震台网固定台站监测到的 12000 余个地震事件,采用双差成像算法进行精定位,获得 10499 个重新定位后的地震事件。精定位后的地震剖面能够观察到条带状地震集中区,可能指示出一些产状较为陡峭的隐伏断层被活化。采用最大曲率方法估计出 M_c 值为 0.51 ± 0.04 , b 值为 0.98 ± 0.02 , a 值为 4.31 ± 0.01 , b 值的估计结果略高于已有研究。 b 值拟合直线存在双线性特征,重采样进一步发现其分布的差异性,指示出 b 值演化存在明显的时空差异特征。通过分析 b 值的时空演化过程,发现 5 个 b 值振荡的主要部分刚好对应地震频率显著增高的 5 个时区,且能观测到一些垂直条带状的地震丛集,

说明地震事件数的激增会使得 b 值出现明显波动。同时, b 值振荡位置的 SCL 值均呈现出较为稳定的低值特征, 说明 5 个地震丛集仅约束于 3~5km 的空间相关距离, 符合水力压裂诱发地震的距离控制范围。另外, 发现 4 个较大震级的中型地震发生之前 b 值均呈现出下降的趋势, 说明这些诱发事件仍然具有与天然地震类似的应力累积-释放特征, 但其应力累积过程被人为缩短了。最后分析发现随着深度增大, b 值减小, M_c 值增大, 说明更深部的应力累积程度随着结晶基底的出现而增大。

本文选取描述地震风险的重要指标 b 值, 对压裂过程中的长宁页岩气开发区的风险演化特征进行了深入研究, 得到了一些初步的结果。这些结论可能具有较好的灾害预警意义, 由于 b 值的波动对应该地区的应力状态的变化, 如果实时监控到大量的诱发微震事件伴随着 b 值的急剧变化, 可能识别出继续压裂活动的地震高风险和低风险特征。当然, 由于监测时间、研究手段和生产数据的限制, 本文的部分观点仅为科学推测, 更加准确的结论仍有待进一步讨论。

参考文献

- 史海霞, 孟令媛, 张雪梅, 等, 2018. 汶川地震前的 b 值变化. 地球物理学报, **61**(5): 1874~1882.
- 王辉, 曹建玲, 荆燕, 等, 2012. 川滇地区强震活动前 b 值的时空分布特征. 地震地质, **34**(3): 531~543.
- 吴萍萍, 李振, 叶庆东, 等, 2015. 郯庐断裂带南段及邻区地震 b 值的空间分布特征. 中国地震, **31**(2): 372~381.
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等, 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究. 地球物理学报, **56**(4): 1112~1120.
- Aki K, 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. Bull. Earthquake Res. Inst., **43**: 237~238.
- Amitrano D, 2003. Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value. J Geophys Res: Solid Earth, **108**(B1): 2044.
- Atkinson G M, Eaton D W, Ghofrani H, et al, 2016. Hydraulic fracturing and seismicity in the western Canada Sedimentary Basin. Seismol Res Lett, **87**(3): 631~647.
- Bao X W, Eaton D W, 2016. Fault activation by hydraulic fracturing in western Canada. Science, **354**(6318): 1406~1409.
- Bruce A, Wallace D, 1989. Critical point phenomena: universal physics at large length scales. In: Davis P. The New Physics. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 236~267.
- Chan L S, Chandler A M, 2001. Spatial bias in b -value of the frequency-magnitude relation for the Hong Kong region. J Asian Earth Sci, **20**(1): 73~81.
- Darold A, Holland A A, Chen C, et al, 2014. Preliminary analysis of seismicity near Eagleton 1-29, Carter County, July 2014. Oklahoma Geological Survey Open-file Report OF2-2014.
- Ellsworth W L, 2013. Injection-induced earthquakes. Science, **341**(6142): 1225942.
- Fiedler G B, 1974. Local b -values related to seismicity. Tectonophysics, **23**(3): 277~282.
- Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, et al, 2018. Global review of human-induced earthquakes. Earth-Sci Rev, **178**: 438~514.
- 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**(19): 10164~10172.
- Guha S K, 1979. Premonitory crustal deformations, strains and seismotectonic features (b -values) preceding Koyna earthquakes. Tectonophysics, **52**(1~4): 549~559.
- Gutenberg B, Richter C F, 1955. Magnitude and energy of earthquakes. Science, **176**(4486): 795.
- Hincks T, Aspinall W, Cooke R, et al, 2018. Oklahoma's induced seismicity strongly linked to wastewater injection depth. Science, **359**(6381): 1251~1255.
- Holland A A, 2013. Earthquakes triggered by hydraulic fracturing in south-central Oklahoma. Bull Seismol Soc Am, **103**(3): 1784~1792.

- Hu J, Chen J, Chen Z, et al, 2018a. Risk assessment of seismic hazards in hydraulic fracturing areas based on fuzzy comprehensive evaluation and AHP method (FAHP): A case analysis of Shangluo area in Yibin City, Sichuan Province, China. *J Petrol Sci Eng*, **170**: 797~812.
- Hu J, Cao J X, He X Y, et al, 2018b. Numerical simulation of fault activity owing to hydraulic fracturing. *Appl Geophys*, **15**: 367~381.
- Igonin N, Zecevic M, Eaton D W, 2018. Bilinear magnitude-frequency distributions and characteristic earthquakes during hydraulic fracturing. *Geophys Res Lett*, **45**(23): 12866~12874.
- Imoto M, 1991. Changes in the magnitude-frequency b -value prior to large ($M \geq 6.0$) earthquakes in Japan. *Tectonophysics*, **193**(4): 311~325.
- Lei X L, Huang D J, Su J R, et al, 2017. 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 L, Satoh T, 2007. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage. *Tectonophysics*, **431**(1~4): 97~111.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R, 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. *Seismol Res Lett*, **90**(3): 1099~1110.
- Meng L Y, McGarr A, Zhou L Q, et al, 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**(1): 348~357.
- Mogi K, 1962. Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquakes phenomena. *Bull Earthq Res Inst*, **40**: 125~173.
- Molchan G M, Dimitrieva O E, 1990. Dynamics of the magnitude-frequency relation for foreshocks. *Phys Earth Planet Inter*, **61**(1~2): 99~112.
- Molchan G M, Kronrod T L, Nekrasova A K, 1999. Immediate foreshocks; time variation of the b -value. *Phys Earth Planet Inter*, **111**(3~4): 229~240.
- Nanjo K Z, Hirata N, Obara K, et al, 2012. Decade-scale decrease in b value prior to the M_9 -class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes. *Geophys Res Lett*, **39**(20): L20304.
- Pawley S, Schultz R, Playter T, et al, 2018. The geological susceptibility of induced earthquakes in the Duvernay play. *Geophys Res Lett*, **45**(4): 1786~1793.
- Sahu O P, Saikia M M, 1994. The b value before the 6th August, 1988 India-Myanmar border region earthquake—a cases study. *Tectonophysics*, **234**(4): 349~354.
- Scholz C H, 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull Seismol Soc Am*, **58**(1): 399~415.
- Schorlemmer D, Wiemer S, Wyss M, 2005. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, **437**(7058): 539~542.
- Schultz R, Atkinson G, Eaton D W, et al, 2018. Hydraulic fracturing volume is associated with induced earthquake productivity in the Duvernay play. *Science*, **359**(6373): 304~308.
- Schultz R, Stern V, Novakovic M, et al, 2015. Hydraulic fracturing and the Crooked Lake Sequences: Insights gleaned from regional seismic networks. *Geophys. Res. Lett.*, **42**(8): 2750~2758.
- Schultz R, Wang R J, Gu Y J, et al, 2017. A seismological overview of the induced earthquakes in the Duvernay play near Fox Creek, Alberta. *J Geophys Res: Solid Earth*, **122**(1): 492~505.
- Shabarchin O, Tesfamariam S, 2017. Risk assessment of oil and gas pipelines with consideration of induced seismicity and internal corrosion. *J Loss Prev Process Ind*, **47**(4): 85~94.
- Shi Y L, Bolt B A, 1982. The standard error of the magnitude-frequency b value. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(5): 1677~1687.
- Skoumal R J, Brudzinski M R, Currie B S, 2015. Earthquakes induced by hydraulic fracturing in Poland township, Ohio. *Bull Seismol Soc Am*, **105**: 189~197.
- Tan Y Y, Hu J, Zhang H J, et al, 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**(4):e2019GL084885.
- Zhang H J, Thurber C H, 2003. Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(5):1875~1889.
- Zhang H J, Thurber C H, 2006. Development and applications of double-difference seismic tomography. *Pure Appl Geophys*, **163**(2~3):373~403.

Study on b -value Characteristics of Shale Gas Exploration Field Based on Microseismic Monitoring

Hu Jun^{1,2)} Tan Yuyang³⁾ Zhang Haijiang⁴⁾ Cao Junxing^{1,5)} Liang Chuntao⁵⁾
Wang Quanfeng²⁾ Xu Bin²⁾

- 1) State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 2) Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 3) Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China
- 4) University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
- 5) College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract In recent years, the Changning Shale gas exploration in the Southern Sichuan Basin has experienced frequently small earthquakes, as well as a number of medium-sized earthquakes with $M_L > 4.0$. Since the risk of disaster continues to increase, it has become an urgent scientific problem to analyze the evolution trend and development law of seismic risk in shale gas development zone by means of microseismic monitoring. From 13 portable near-field temporary seismic stations and national fixed network, more than 10,000 seismic events were picked up from February 2017 to June 2018. The maximum likelihood estimation method is used to analyze the seismic catalogue after double difference precise positioning and the evolution characteristics of b value in Changning shale gas development zone are put forward. The overall b value is estimated to be 0.98 ± 0.02 , slightly higher than previous results. The bilinear characteristics and differential distribution of the fitted line indicate that there exist obvious spatiotemporal differences in the evolution of b value, which has been verified with subsequent analysis. We found that the 5 periods of rapid increase of seismic events just corresponded to the oscillation characteristics of b value and the stable low value distribution of SCL value of relevant spatial distance, which was suspected to be associated with the nearby shale gas fracturing exploitation. The decrease of b value before the occurrence of four large magnitude events corresponds to the stress accumulation process before the earthquake.

Keywords: Shale gas; Hydraulic fracturing; b value; SCL value; Induced seismicity