

李冬梅,李小晗,郑建常. 2023. 2022 年泸定  $M6.8$  地震前地震活动参数变化研究. 中国地震, **39**(3):609~621.

# 2022 年泸定 $M6.8$ 地震前 地震活动参数变化研究

李冬梅 李小晗 郑建常

山东省地震局, 济南 250102

**摘要** 2022 年 9 月 5 日四川泸定发生  $M6.8$  地震,为研究泸定地震孕震区的应力变化,选取  $b$  值、小震调制比和丛集率这 3 个参数,对泸定地震前的区域地震活动状态进行计算研究。结果显示:泸定及周边区域几次强震发生前,区域地震活动均存在持续时间较长的低  $b$  值时段,且在低  $b$  值状态下震前短期内出现小震高丛集、高调制比的现象;鲜水河断裂带的地震活动状态分析显示,此次泸定地震前该断裂带存在持续时间近 10 个月的低  $b$  值状态,且短期内出现丛集率升高、调制比高值现象。通过对比分析,认为泸定地震是鲜水河断裂带构造运动的结果。综合分析认为,结合应力场背景和构造条件研究地震活动  $b$  值、固体潮调制比和丛集率的时空变化有助于理解大地震的孕育演化过程。

**关键词:** 泸定地震  $b$  值 调制比 地震丛集率 孕震过程

[文章编号] 1001-4683(2023)03-0609-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

大地震发生前,受构造应力场作用的影响,区域内小震的活动状态会发生相应的变化,前人对此已经有大量的研究,如梅世蓉等(2009)发现在汶川  $M8.0$  和昆仑山口西  $M8.1$  地震前,不同时段、不同范围内均出现了多项相似的地震活动性异常;马瑾等(2013)总结了龙门山断裂带大震孕育过程中地震活动时空演化的现象;聂晓红等(2014、2020)分别对 2014 年 2 月 12 日新疆于田  $M7.3$  和 2020 年 1 月 19 日新疆伽师  $M6.4$  地震前的地震活动特征进行了分析;赵小艳等(2014)分析了 2013 年芦山  $M7.0$  地震前川滇地区中等地震密集活动;王静静等(2015)从多地震活动参数角度定量分析了芦山地震的背景活动性;刘月等(2016)认为 2014 年鲁甸  $M6.5$ 、2012 年彝良  $M5.7$  和  $M5.6$  地震前均出现地震活动增强现象;薛艳等(2018)对汶川  $M8.0$  地震前地震活动异常特征的普遍性及其机理进行了探讨。

区域地震活动的时空变化能反映与大震孕育有关的实际地壳形变过程中应力积累和集中的趋势,实际情况表明,大震前区域中小地震活动会有别于正常的背景活动而出现某种活

[收稿日期] 2022-10-21 [修定日期] 2023-05-11

[项目类别] 中国地震科学实验场地震可预测性国际合作项目(2018YFE0109700)、山东省地震局科研基金项目(JJ1805Y)与山东省地震局科技创新团队共同资助

[作者简介] 李冬梅,女,1987 年生,工程师,主要从事地震活动性和地震综合预测研究。E-mail:ldmeqsd@yeah.net

郑建常,通讯作者,男,1978 年生,研究员,主要从事地震活动性与数字地震学研究。E-mail:zjemail@yeah.net

动状态的变化,这正是大震孕育过程应力积累和发展演化的表征(张国民等,2001a)。衡量或者描述一定时空范围内地震活动状态的参数有很多,但归根结底离不开地震目录在时间、空间、强度三个维度的分布特征。

根据长中短临渐进式地震预报思想<sup>①</sup>,大震前一两年左右或更长时间应力处于增高的阶段。作为反映应力场的重要参数,地震的震级-频度关系中的  $b$  值常用来研究重要断裂带、地震带的应力分布,应用于不同活动构造的强震危险性分析(易桂喜等,2013;Page et al,2015;刘静伟等,2016;冯建刚等,2016;孙安辉等,2022;Tiwari et al,2022)。

强震孕育的中短期阶段,孕震区范围内小震活动往往会表现出时间、空间上的丛集特点,从而出现如地震窗“开窗”、前兆震群或者地震活动密集增强等异常现象(中国地震局监测预报司,2020)。岩石实验也显示大的破裂发生之前会出现微破裂的增加和集中(Stanchits et al,2006;Aben et al,2019);最新提出的大震破裂的渐进式局部集中变形模型(Kato et al,2021)认为,大地震发生前,区域弱化会在最终破裂区周围逐渐形成局部化变形,在局部集中变形过程中,包含多种规模断层的区域会发生大量成丛的地震活动。

进入强震孕育的短临阶段,震源系统岩石中的构造应力达到或处于临界状态时,固体潮汐应力扰动有可能触发地震(中国地震局监测预报司,2020)。Wang 等(2022)使用南加州的模板匹配目录研究发现某些区域存在显著的潮汐触发作用。秦保燕等(1983)通过统计地震活动与月相的关系提出了小震的固体潮调制比  $R_m$ ,多年预报实践显示该参数较为有效,也是中强地震危险性分析中常用的方法之一(韩颜颜等,2017;李文君等,2022)。

2022年9月5日12时52分,四川泸定发生  $M6.8$  地震,该地震是四川地区自2017年九寨沟  $M7.0$  地震后发生的最大地震,造成了较大的人员伤亡和严重的经济损失。本研究选择具有明确物理意义且能够直接反映应力场作用的3个参数: $b$ 值、固体潮调制比以及丛集率,针对泸定地震前震源区及周边地区小震活动特征进行研究并开展对比分析,以此来研究强震孕育过程中在区域应力场作用下小震活动状态可能的发展演化。

## 1 理论与方法

### 1.1 $b$ 值

$b$  值是震例-频度经验关系式( $\lg N = a - bM$ )中的拟合系数(Gutenberg et al,1944),其描述了区域小地震与大地震数目的比例;在一定介质物性条件下, $b$  值与应力呈反比例关系(Wyss,1973;Urbancic et al,1992),因此,地震  $b$  值时空分布及演化被认为是地震孕育研究及地震危险性评价的重要指标(Senatorski,2020;高雅婧等,2022)。传统计算  $b$  值的方法主要有最小二乘法和最大似然法,本研究对  $M_L \geq M_c$  的目录使用稳健回归方法(杨马陵等,1999)来求取小震  $b$  值,该方法的优点是能更准确地衡量数据变化趋势,而不受孤立异常点限制。方法简介如下:

对于一组观测值  $x_i$ , 有一般回归模型

$$y_i = \sum_{j=1}^p x_i \beta_j + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

<sup>①</sup> 马宗晋,高旭,丁鉴海,等. 2004. 渐进式地震预报及其三个理论问题的讨论. 国内地震预报文献汇编(上册).

其中,  $\beta_j$  为未知回归系数,  $e_i$  为误差项。最小二乘法是找到一组  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ , 使得下述表达式达到最小

$$\sum_{i=1}^n \left( y_i - \sum_{j=1}^p x_{ij} \right)^2 = \min \quad (2)$$

但由于在震级-频度关系中, 低震级和高震级端往往会出现“掉尾”的现象, 这些偏离线性关系的值对残差平方和的影响会比其他数据大得多, 稳健回归的基本思想是采用迭代加权最小二乘估计回归系数, 根据回归残差的大小确定各点的权重  $\omega_i$ , 以达到稳健的目的, 其优化的目标函数  $G_{\min}$  定义为

$$G_{\min} = \sum_{i=1}^n \omega_i \left( y_i - \sum_{j=1}^p x_{ij} \right)^2 \quad (3)$$

其中, 根据回归残差的大小确定各点的权重  $\omega_i$ , 反复迭代以改进权重系数, 采用迭代加权最小二乘方法来求解回归系数  $\beta_j$ ; 最后使用 `nlparci` 函数, 根据稳健回归的拟合残差  $R$  和 Jacobian 矩阵计算  $b$  值的误差。

### 1.2 固体调制比 $R_m$

固体潮调制比是一定时间范围受到固体潮调制模式发生地震的个数与地震总数之间的比值, 其既可以反映系统的应力状态, 也可以表示地震发生前受调制模式随时间的变化过程 (秦保燕等, 1983)。传统计算调制比主要是将阴历日期的朔望前后一段时间视为受调制时段 (张国民等, 2001b; 韩颜颜等, 2017), 分别统计朔望时段地震数目  $m$  和全月的地震总数  $N$ , 定义调制比为

$$R_m = m/N \quad (4)$$

如果把地震作为等概率事件, 在固体潮高期发生地震的自然概率  $P=0.27$ , 考虑实际的起伏以及诸多的预测实践检验结果 (国家地震局预测预防司, 1997; 张晓东等, 2000; 王伟等, 2001), 本研究将  $R_m \geq 0.30$  作为异常。

此外, 不同研究者对受月相调制的朔望时段的定义不尽相同 (秦保燕等, 1983; 王伟等, 2001; 张国民等, 2001b; 韩颜颜等, 2017)。林眉等 (2021) 基于 Duffett-Smith (1981) 的算法和对任意给定时刻计算月相的程序, 以  $[0, 1]$  之间的数字表示月相大小, 0 为新月, 1 为满月, 并选择一个月相周期内月相大小超过 95% 和小于 5% 的时间作为调制时段, 研究发现调制比的高值变化对山东地区几次中等地震有较好的对应。

### 1.3 丛集率

丛集地震是相对背景地震而言的概念。地震丛集是一个涉及时间、空间和能量域的多维的问题。Baiesi 等 (2004) 综合考虑了地震的时、空分布及能量大小等因素, 给出了不同事件之间的距离定义, 即

$$n_{ij} = \begin{cases} c\tau_{ij} r_{ij}^d 10^{-b(m_i-m_0)} & , \tau_{ij} \geq 0 \\ \infty & , \tau_{ij} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\tau_{ij} = t_j - t_i$ ,  $r_{ij}$  是两次事件的空间距离,  $m_0$  为参考震级,  $c$  为常量系数,  $d$  为震中分布的分形维,  $b$  为 G-R 关系中的  $b$  值。在此基础上, Zaliapin 等 (2008, 2011) 定义了地震的最邻近事件距离 (Nearest Neighbor Distance)  $\eta_j^*$ , 即

$$\eta_j^* = \min_i n_{ij} \quad (6)$$

此外,可利用  $\eta^*$  时空分量的展布来定性地区分背景地震和丛集地震,近年来的应用结果显示出较好的效果(Zaliapin et al,2016a、2016b)。

在最邻近事件距离计算结果的基础上,李小晗等(2021)对其进一步统计分析。一般情况下, $\eta^*$  的统计直方图呈现出“双峰”的分布形态(郑建常等,2014),其中峰值靠左的对应丛集地震,而峰值靠右的对应背景地震。李小晗等(2021)通过引入混合概率密度分解,用2个正态分布的线性叠加来拟合  $\eta^*$  的统计分布,将区域地震事件定量地区分了背景地震和丛集地震。定义混合密度分布函数为

$$\text{PDF} = \omega \cdot \text{pdf}_1 + (1 - \omega) \cdot \text{pdf}_2 \quad (7)$$

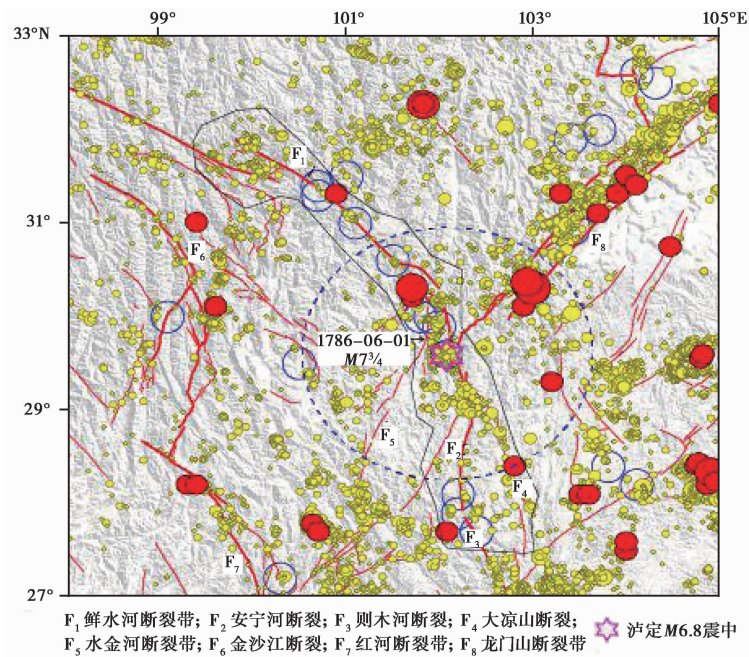
其中, $\text{pdf}_1$  和  $\text{pdf}_2$  分别代表丛集地震和背景地震的2个正态分布的概率密度函数, $\omega$  为相对权重。计算完成一组地震的最邻近事件距离  $\eta^*$  后,对其概率分布进行公式(7)的最佳拟合,由此得到的相对权重  $\omega$ ,即可视为这组地震的地震丛集率(Clustering Ratio)  $C_r$ ,这样便定量地得到了背景地震和丛集地震的比例关系。

## 2 数据与资料

泸定  $M6.8$  地震发生在青藏高原周缘二级构造单元川滇菱形块体东边界,该地区是中国大陆晚第四纪构造变形和强震活动最为强烈的地区之一。块体东边界主要由鲜水河—安宁河—则木河断裂带和小江断裂带组成,其中,鲜水河断裂为一条左旋走滑性质、全新世强烈活动的断裂带,有记录以来其北段发生8次  $M \geq 7.0$  地震,震级最大的为1786年6月1日康定、泸定、磨西一带发生的  $M7\frac{3}{4}$  地震。此次泸定  $M6.8$  地震发生鲜水河断裂带的磨西段(图1),据闻学泽等(2013)的研究,地震震中位于1786年  $M7\frac{3}{4}$  地震南侧的破裂空段内。

近些年,泸定  $M6.8$  地震震中附近区域先后发生了2013年4月20日芦山  $M7.0$ 、2014年10月1日越西  $M5.0$ 、2014年11月22日康定  $M6.3$ 、 $M5.8$ 、2015年1月14日乐山  $M5.0$  和2022年6月1日芦山  $M6.1$  地震以及此次泸定地震,说明该区域处于中强地震活跃时段。为分析泸定地震前区域应力状态,本研究选取2009年1月1日—2022年9月3日川滇交界地区的地震目录,并从中选择距泸定地震震中150km范围内的40322个事件来研究泸定地震孕震区的应力变化。

2000年后,中国数字地震观测网络在我国中西部布局显著优化,根据史翔宇等(2020)对川滇地震科学实验场地震目录的最小完整性震级的分析,2009年后实验场地区  $M_c$  整体为  $M_L 1.2 \sim 1.9$ ,尤其是泸定地震周边涉及的鲜水河、安宁河断裂带、松潘—龙门山带等地区,大部分降低至  $M_L 1.5$  以下。本研究计算的震级-频度分布(图2)与史翔宇等(2020)研究结果一致,为稳妥起见,本文选择  $M_c$  为  $M_L 1.5$ ,在后续的应力状态分析中均以  $M_L \geq 1.5$  的目录为研究对象。通过对  $M_L 1.5 \sim 5.0$  地震的震级-频度关系进行线性拟合,得到泸定地震及周边地区背景  $b$  值( $b_0 = 0.982$ ),该值与其他研究者计算给出的附近地区的研究结果基本一致,如易桂喜等(2010)计算四川南部马边地区平均  $b$  值为1.03;易桂喜等(2013)计算得到龙门山断裂带南段目前整体平均  $b$  值约1.02;冯建刚等(2016)研究得到甘肃岷县漳县地区地震  $b$  值在0.53~1.65之间。



注：图中红色实线表示断裂，黄色实心圆为 2009 年以来  $M_L \geq 1.5$  地震，红色实心圆为  $M \geq 5.0$  地震，蓝色空圈为历史  $M \geq 7.0$  地震，紫色六角星表示泸定  $M6.8$  地震，蓝色虚线表示震中距  $\Delta = 150\text{km}$ ，黑色实线区域为挑选鲜水河断裂带小震目录的范围。

图 1 泸定  $M6.8$  地震周边断裂及 2009 年以来地震震中分布

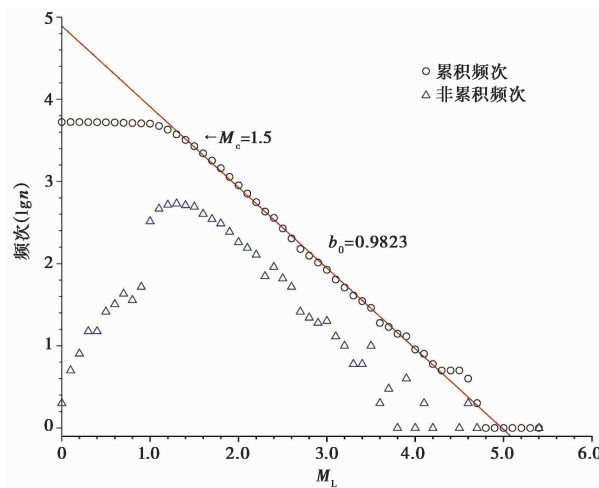


图 2 泸定地震周边地区 ( $\Delta \leq 150\text{km}$ )  $M_L \geq 0$  事件的震级-频度分布

### 3 区域小震活动背景

以泸定  $M6.8$  地震为中心、半径 150km 作为研究区域。由于 2013 年 4 月 20 日芦山  $M7.0$  和 2022 年 6 月 1 日芦山  $M6.1$  两次地震的震中距泸定  $M6.8$  地震约 120km，大量余震

也包含在了该范围内,为避免余震影响,选择 2009 年 1 月 1 日—2013 年 3 月 31 日该区域  $M_L \geq 1.5$  地震,使用本文上述方法计算该区域的背景地震活动,结果见图 3。从最邻近事件距离  $\eta^*$  的统计结果(图 3(b))看,该区相对以背景地震活动为主,但仍有一定比例的丛集地震;从  $\eta^*$  的时空分布(图 3(a)、3(c))同样可以看出,背景地震在图中右上侧呈椭圆状密集分布,而在图中右下侧有一簇相对较少的近水平的分布,对应了受“父事件”地震影响发生的丛集地震(郑建常等,2014)。使用混合正态分布模型,对图 3(b)所示的统计结果进行拟合,结果见图 3(d),计算得到两类地震的相对权重  $\omega_1 = 0.384$ 、 $\omega_2 = 0.616$ ,本文定义前者为该时空范围内地震活动的丛集率。

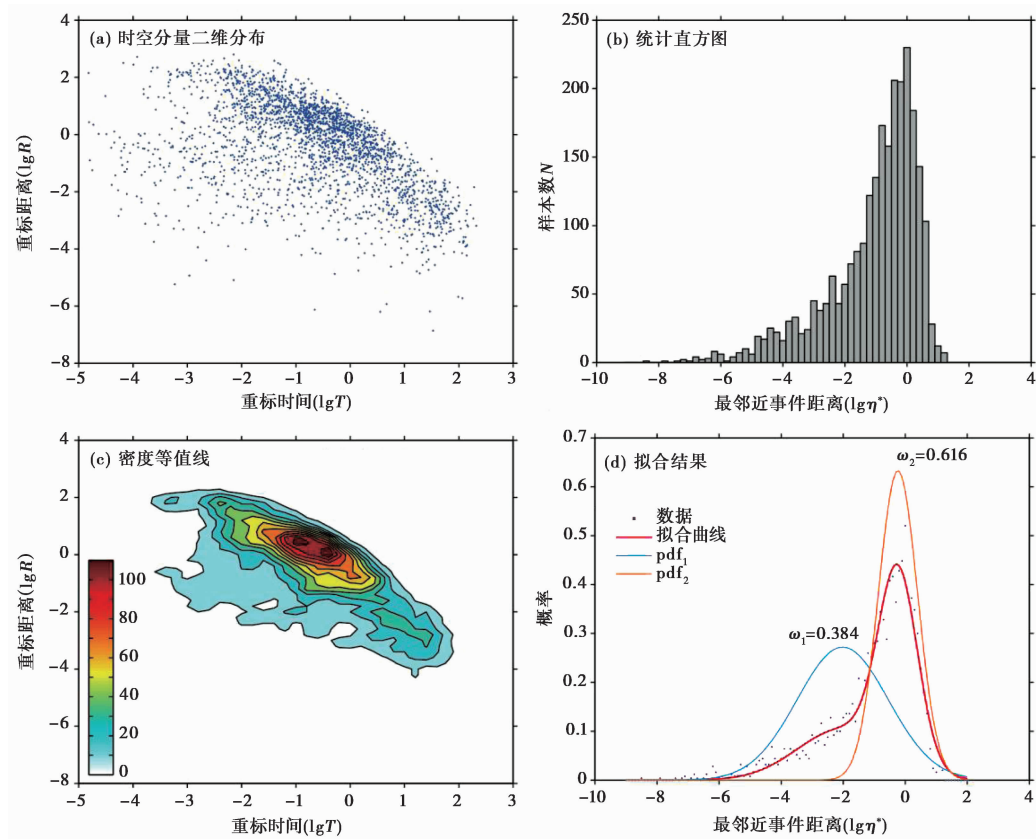
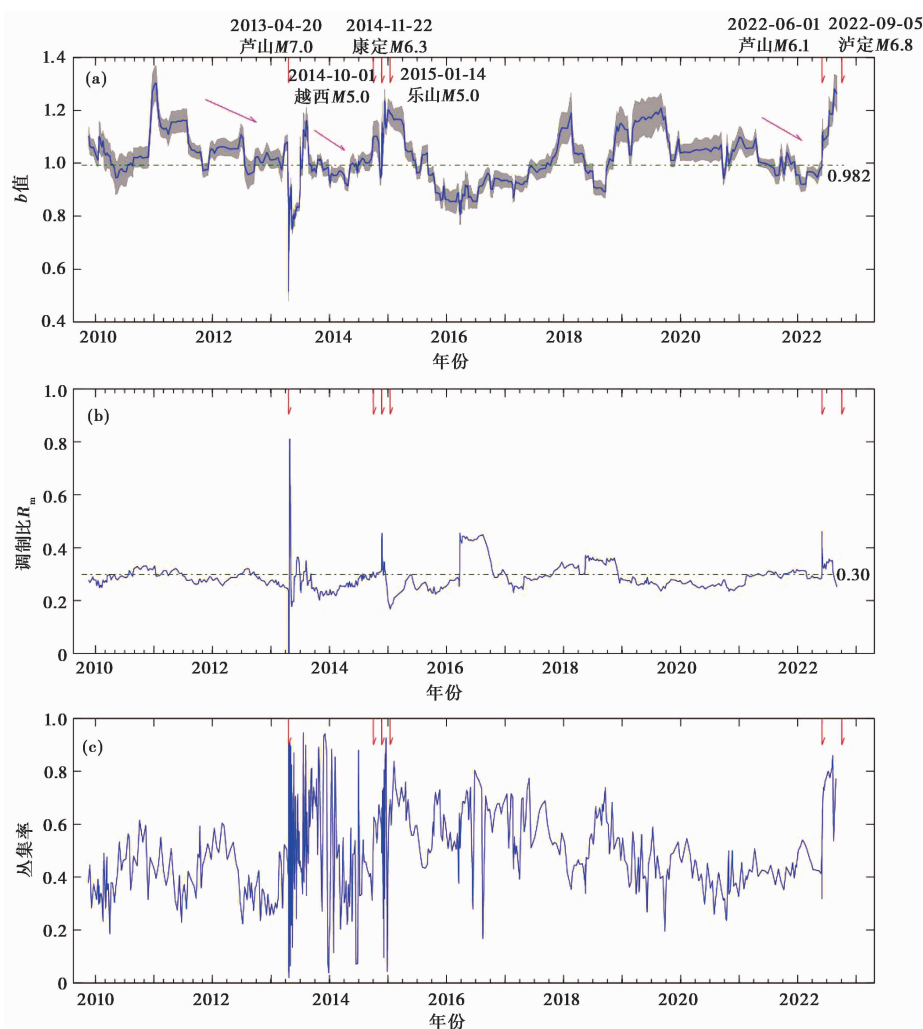


图 3 泸定  $M6.8$  地震震中周边地震  $\eta^*$  的分析结果

#### 4 区域地震活动参数变化分析

强震的孕育和发生与区域应力状态密切相关。本文选取的泸定  $M6.8$  地震周边 150km 范围内的地震目录中,  $M_L \geq 1.5$  的事件共 13050 次,为避免因数据量不足造成  $b$  值等参数估计不准确,以 500 个地震事件为计算窗长,以 4% 的样本量(20 个事件)为滑动步长,等次滑动计算地震的  $b$  值、 $R_m$  值和丛集率,结果见图 4。



注：图中绿色虚线表示均值。

图 4 泸定 M6.8 地震震中周边  $M_L \geq 1.5$  地震参数随时间变化曲线

### 4.1 b 值变化分析

由图 4(a) 可以发现,  $b$  值曲线在 2019 年底开始较前期有所下降, 2021 年一季度以后呈现持续下降的状态, 从 1.10 下降至 0.920, 下降约 16.3%。直到 2022 年 6 月 1 日芦山 M6.1 地震, 受该地震及其余震活动的影响,  $b$  值迅速恢复升高。以往研究发现, 区域地震  $b$  值在大地震前后存在由低到高的变化, 反映了应力由累积到释放的过程(刘雁冰等, 2017; 史海霞等, 2018)。

同样的过程也出现在 2014 年底至 2015 年初该区域的 3 次中强地震集中活动前后, 即 2013 年底至 2014 年上半年,  $b$  值从 1.162 持续下降至 0.914, 下降约 21.4%, 2014 年下半年开始恢复上升, 恢复过程中发生了 2014 年 10 月 1 日越西 M5.0、2014 年 11 月 22 日康定 M6.3 和 2015 年 1 月 14 日乐山 M5.0 等一组中强地震活动。

另外值得注意的是, 在 2013 年芦山 M7.0 地震前后, 2011—2013 年该区域  $b$  值也存在持

续下降过程,从 1.163 下降至 0.958,下降约 17.7%,直至发生芦山  $M7.0$  地震;芦山 7.0 级地震后  $b$  值出现了短时间内的显著低值,但随即回到高值状态。本研究认为震后短期内出现的显著低值与芦山  $M7.0$  地震后短时间内的目录不完整有关(Wu et al,2017)。

2017 年 8 月 8 日九寨沟  $M7.0$  地震距离此次泸定地震约 430km,但在九寨沟地震前,这一区域也出现了可能与此次地震孕育过程有关的变化: $b$  值曲线 2016—2017 年上半年整体处于均值以下,2017 年恢复过程中发生了邻近区域的九寨沟  $M7.0$  地震,震后该区域  $b$  值曲线升高。但参考同一时段内小震调制比和丛集率曲线的变化,这一低  $b$  值变化更可能是受水库库区震群活动的影响。

#### 4.2 固体潮调制比变化分析

小震调制比反映的是岩石介质在高应力状态下受潮汐触发的敏感程度,从其物理含义上来说,更多地是一个偏短期的指标。Wang 等(2022)研究发现加州卡索(Coso)地热场地的的小震活动存在强烈的潮汐触发现象;陈大庆等(2011)对新丰江水库的研究发现,该区几次中等和中强地震前短期内存在显著的调制比异常。

从泸定地震震源区附近小震活动的调制比曲线(图 4(b))来看,2013 年芦山  $M7.0$  地震后的剧烈变化与大量密集的余震活动有关,而 2016 年的高值与 2016 年四川甘孜泸定震群有关。这次震群发生在 2016 年 3—9 月,共记录到  $M_L \geq 1.0$  地震 700 余次,其中  $M_L 4.0$  地震 5 次, $M_L 3.0$  地震 8 次;有研究显示大岗山水库蓄水后,研究区域内地震发生频率随着水位的变化发生了明显的增加(朱家正等,2022)。2016 年泸定震群可能与大岗山水库蓄水有关(阮祥等,2017),该水库于 2015 年 5 月 29 日开始蓄水,蓄水过程中,库区基底的应力水平增加,诱发震群活动,容易受月相调制影响;孙洪斌等(1997)研究发现,水库地震活动的  $b$  值下降,小震调制比显著增高。大岗山水库库区发生的泸定震群也符合这一特征。

对比该区域几次中强地震前调制比曲线的变化可以发现,3 次(组)强震前均出现了高调制比异常。2013 年芦山  $M7.0$  地震前,2012 年 6 月 27 日—9 月 15 日, $R_m \geq 0.3$ ,最大超过 0.32;康定  $M6.3$  地震前,调制比曲线自 2014 年初开始趋势上升,与  $b$  值下降变化基本同步,2014 年 7 月 28 日开始出现超 0.3 阈值变化,且在 2014 年 10 月 1 日越西  $M5.0$  地震后显著升高,直至 12 月 16 日  $R_m$  下降至阈值以下;芦山  $M7.0$  地震前的高调制比短时出现在震前约半年时间,康定  $M6.3$  地震前的高调制比异常出现在震前 4 个月,而 2022 年芦山  $M6.1$  地震前,2021 年初开始出现调制比高值,并持续到 2022 年 2 月。

#### 4.3 小震丛集率变化分析

此次泸定  $M6.8$  和芦山  $M6.1$  地震之前,2021—2022 年初该区域  $b$  值持续下降,小震调制比持续偏高,显示该区正处于高应力背景下,且受月球引潮力调制现象显著;在此情形下,出现了小震丛集率的升高,2022 年初达到极值(大于 0.54)后快速下降,随即发生了这 2 次 6 级强震。据李小晗等(2022)的研究,高应力水平不一定触发较强的地震活动,低  $b$  值异常背景下的小震丛集活动可能是大震前更具物理意义的前兆现象。

同样在 2013 年芦山  $M7.0$  地震前,短时间内也出现了低  $b$  值背景下的丛集率高值(2013 年 3 月 28 日  $C_r$  为 0.523)。2014 年康定  $M6.3$  地震前,虽然受芦山地震余震的影响,多数时间内丛集率处于高值状态,但在 2014 年的年中附近仍然出现了丛集率升高的现象,从 2014 年 4 月的均值不足 0.30 上升到 8 月的均值超过 0.46。



## 5 鲜水河断裂带地震活动参数变化分析

本文以震中距选择的区域小震活动包含了龙门山断裂带上 2013 年芦山  $M_{7.0}$  和 2022 年芦山  $M_{6.1}$  地震及其余震,尤其是芦山  $M_{6.1}$  和此次泸定  $M_{6.8}$  地震,时空非常接近,难以具体地区分曲线变化究竟是受哪次地震孕育过程的影响。为此,本文按构造单元划分,单独挑选出鲜水河断裂带的地震活动进行分析(图 1),同时为避免 2014 年康定  $M_{6.3}$  地震的影响,目录时间自 2015 年 1 月 1 日—2022 年 9 月 3 日,计算结果见图 5。由鲜水河断裂带的结果可以看出,2016 和 2018 年的低  $b$  值、高调制比、高丛集率的变化仍然存在,根据上述分析,认为该变化主要是由水库库区震群活动造成的。

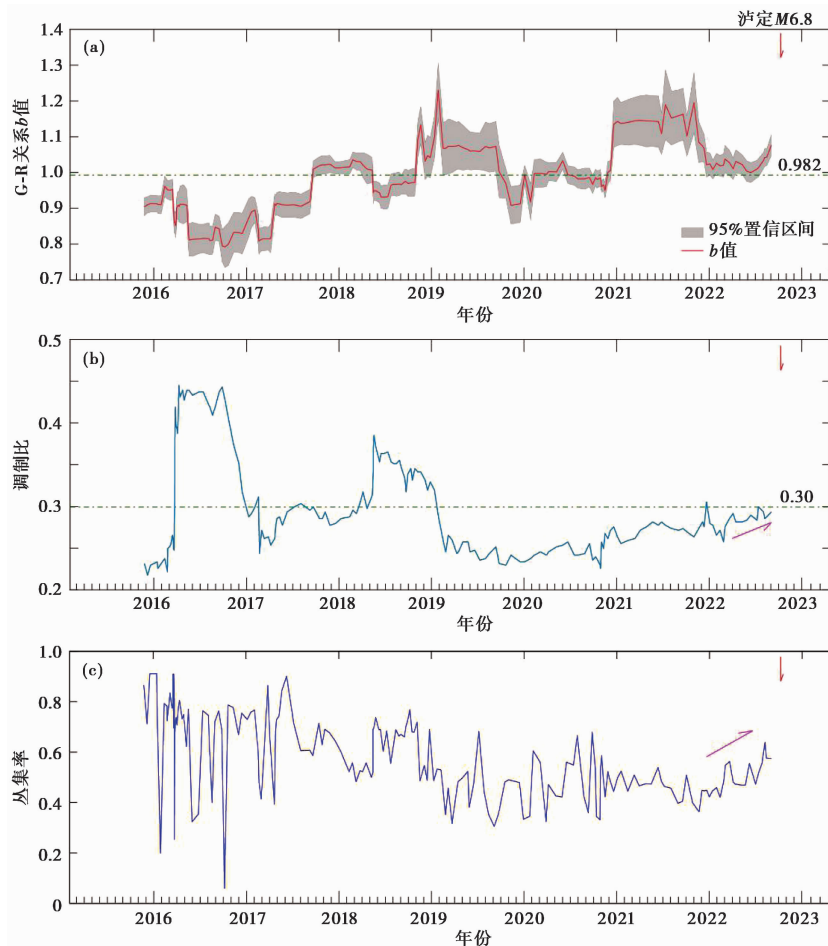


图 5 鲜水河断裂带  $M_{\text{L}} \geq 1.5$  地震参数随时间变化曲线

分析鲜水河断裂带的小震活动参数变化,可以看到 2016—2017 年断裂带处于高应力的状态,但并未发生强震,应力以震群活动的形式得到了释放;2020 年断裂带同样应力水平较高,小震丛集率波动明显但没有趋势性升高现象,且调制比曲线始终处于低值,说明鲜水河断裂带虽然处于较高应力状态,但尚未到达触发强震的临界状态;同一时期,鲜水河断裂带

外围的清水河断裂发生 2020 年 4 月 1 日四川甘孜州石渠县  $M5.6$  地震,莲峰—昭通断裂带发生 2020 年 5 月 18 日云南巧家县  $M5.0$  地震,但鲜水河断裂带没有中强地震发生,甚至未发生  $M \geq 4.0$  的中等地震,最大地震仅为 2020 年 6 月 3 日四川道孚—炉霍间的  $M3.6$  ( $M_L4.2$ ) 地震,表明该断裂带这一时期的高应力主要受外围区域应力场影响。

自 2021 年底开始,鲜水河断裂带  $b$  值明显下降,从 2021 年 11 月 1 日的 1.196 下降至 2022 年 1 月 15 日 1.009,下降约 15.6%,然后持续约半年时间,同期小震调制比趋势升高,出现超过 0.3 阈值的高值异常,小震丛集率也趋势升高,从 2021 年 11 月 20 日的 0.363 上升至 2022 年 8 月 7 日 0.639,反映出此次泸定  $M6.8$  地震的孕震过程,也符合 Kato 等(2021)最新提出的关于大震破裂的渐进式局部集中变形模型所描述的变化过程。与图 4 相比,鲜水河断裂带的计算结果(图 5)明显排除了芦山  $M6.1$  地震的影响,说明此次泸定  $M6.8$  地震更多地是鲜水河断裂带构造运动的结果,这对于判定该区域未来强震危险性具有一定的参考意义。

## 6 讨论与结论

根据长中短临渐进式预报思想,本研究选择具有明确物理意义且能够直接反映应力场作用的  $b$  值、固体潮调制比和丛集率 3 个参数开展相关研究,对 2022 年 9 月 5 日泸定  $M6.8$  地震前的区域地震活动状态进行了研究,结果显示:

(1) 泸定及周边区域几次强震发生前,区域地震活动均存在持续时间较长的低  $b$  值时段,并且在低  $b$  值状态下短期内出现了小震高丛集、高调制比的现象。

(2) 鲜水河断裂带的地震活动状态分析显示,此次泸定  $M6.8$  地震前,该断裂带存在持续时间近 10 个月的低  $b$  值状态,并且短期内出现了丛集率升高和调制比高值异常,该现象与此次泸定  $M6.8$  地震的孕震过程有关。通过对比分析,认为泸定地震是鲜水河断裂带构造运动的结果。

通过该区几次震例前曲线变化形态的对比分析,本研究认为低  $b$  值反映的高应力状态,是未来大震发生的必要条件;高应力状态下小震丛集率的升高,可能意味着变形的局部集中,同时再出现小震高调制比代表的临界状态,则更可能预示未来大的破裂。当然,该结论仅对天然的构造地震而言,对如水库诱发震群等非天然地震,其低  $b$  值、高丛集率、高调制比的异常更加突出,因此在震情跟踪分析中应排除该类数据。

Kato 等(2020)认为,大地震的发生包括复杂的、多尺度的过程,这些过程在不同的构造环境中可能具有不同的显著特征。例如,同样是低  $b$  值下的高丛集率、高调制比,但不同地震前异常出现次序不尽相同。2013 年芦山  $M7.0$  地震前,先有高调制比,然后震前短期出现小震高丛集;而 2014 年康定  $M6.3$  地震前,则是先出现高丛集率,而调制比延续到震前持续升高。当然,正如利用鲜水河断裂带的小震活动对泸定  $M6.8$  地震的分析,地震目录选择范围不同,可能对大震孕震过程的识别也造成一定差异。

综上所述,结合应力场背景和构造条件研究地震活动  $b$  值、固体潮调制比和丛集率的时空变化有助于探索大震活动的孕育机理。

致谢:审稿人提出了宝贵的意见和建议,计算月相的原始程序源自网站 <http://www.fourmilab.ch/moontoolw/moont32s.zip>,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 陈大庆, 杨马陵, 蒋海昆, 等. 2011. 广东新丰江水库地震垂向引潮力的调制作用研究. 华南地震, **31**(2): 29~36.
- 冯建刚, 张辉, 杨萍. 2016. 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前地震  $b$  值异常特征研究. 地震, **36**(1): 32~37.
- 高雅婧, 孙云强, 罗纲. 2022. 1999 年集集地震前后台湾地区地震  $b$  值及应力场时空演化特征. 地球物理学报, **65**(6): 2137~2152.
- 国家地震局预测预防司. 1997. 测震学分析预报方法. 北京: 地震出版社, 112~115.
- 韩颜颜, 孟令媛, 刘桂萍, 等. 2017. 西北地区中强震前固体潮调制比时空特征分析. 地震学报, **39**(5): 738~750.
- 李文君, 曾宪伟, 马钟之. 2022. 中国大陆 6 级以上强震及震前小震固体潮调制异常特征分析. 地震工程学报, **44**(3): 638~648.
- 李小晗, 郑建常. 2021. 青海玛多  $M_{7.4}$  地震时空丛集特征研究. 地震地磁观测与研究, **42**(增刊 1): 17~19.
- 林眉, 郑建常. 2021. 长清 M4.1 地震前区域小震调制比异常分析. 大地测量与地球动力学, **41**(11): 1207~1210.
- 刘静伟, 吕悦军, 谢富仁. 2016. 利用  $b$  值空间分布解析 2014 年 11 月 22 日康定  $M_{6.3}$  地震的发生. 地球物理学进展, **31**(2): 553~558.
- 刘雁冰, 裴顺平. 2017. 汶川地震前后  $b$  值的时空变化及构造意义. 地球物理学报, **60**(6): 2104~2112.
- 刘月, 田勤俭, 吕晓健, 等. 2016. 鲁甸  $M_{6.5}$  地震前地震活动性分析及川滇东边界中部未来地震危险性研究. 地球物理学报, **59**(9): 3269~3279.
- 马瑾, 刘培均, 刘远征. 2013. 地震活动时空中看到的龙门山断裂带地震孕育的几个现象. 地震地质, **35**(3): 461~471.
- 梅世蓉, 薛艳, 宋治平. 2009. 汶川 8.0 级与昆仑山口西 8.1 级地震前地震活动异常特征与启示. 地震, **29**(1): 1~14.
- 聂晓红, 刘建明, 向元, 等. 2020. 2020 年 1 月 19 日新疆伽师  $M_{6.4}$  地震前地震活动特征分析. 内陆地震, **34**(1): 10~19.
- 聂晓红, 王琼. 2014. 2014 年 2 月 12 日新疆于田  $M_{7.3}$  地震前地震活动特征分析. 中国地震, **30**(2): 208~218.
- 秦保燕, 姚立珣, 徐纪人, 等. 1983. 西海固地区小震调制特征. 西北地震学报, **5**(增刊 1): 1~5.
- 阮祥, 韩进, 谢蓉华, 等. 2017. 大岗山水库天然地震活动本底特征. 地震, **37**(3): 157~168.
- 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.
- 史翔宇, 王晓青, 邱玉荣, 等. 2020. 川滇地震科学实验场地震目录最小完整性震级分析. 地球物理学报, **63**(10): 3683~3697.
- 孙安辉, 高原, 赵国峰, 等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地震的震源区结构特征和  $b$  值意义初探. 地球物理学报, **65**(3): 1175~1183.
- 孙洪斌, 张敏, 黄泽荣. 1997. 龙羊峡水库诱发地震特征. 水力发电学报, (2): 29~40.
- 王静静, 张怀, 庞亚瑾, 等. 2015. 从多地震活动参数角度定量分析芦山地震的背景活动性. 中国科学院大学学报, **32**(2): 235~242.
- 王炜, 宋先月, 谢端, 等. 2001. 地震调制比及其在华北地震中短期预报中的应用. 地震研究, **24**(3): 202~207.
- 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景. 地球物理学报, **56**(10): 3361~3372.
- 薛艳, 刘杰, 宋治平, 等. 2018. 汶川地震前地震活动特征的普遍性及其机理探讨. 地球物理学报, **61**(5): 1891~1906.
- 杨马陵, 曲延军. 1999.  $b$  值的稳健估计及其在地震预报中的应用. 地震, **19**(3): 253~260.
- 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.
- 易桂喜, 闻学泽, 张致伟, 等. 2010. 川南马边地区强震危险性分析. 地震地质, **32**(2): 282~293.
- 张国民, 傅传祥, 桂燮秦, 等. 2001a. 地震预报引论. 北京: 科学出版社, 22~30.
- 张国民, 李丽, 黎凯武, 等. 2001b. 强震成组活动与潮汐力调制触发. 中国地震, **17**(2): 110~120.
- 张晓东, 秦保燕. 2000. 调制块比在地震中期预报中的应用. 地震, **20**(1): 27~31.
- 赵小艳, 苏有锦, 王强, 等. 2014. 芦山 7.0 级地震前川滇地区中等地震密集活动. 地震研究, **37**(3): 347~353.
- 郑建常, 李东梅, 王鹏, 等. 2014. 基于最邻近事件距离算法的丛集地震识别方法及应用. 地震, **34**(4): 100~109.
- 中国地震局监测预报司. 2020. 测震学分析预报技术方法工作手册. 北京: 地震出版社, 61~189.
- 朱家正, 孙玉军. 2022. 四川大岗山水库蓄水对地震活动影响的数值模拟研究. 地球物理学报, **65**(10): 3930~3943.
- Aben F M, Brantut N, Mitchell T M, et al. 2019. Rupture energetics in crustal rock from laboratory-scale seismic tomography.

- Geophys Res Lett, **46**(13):7337~7344.
- Baiesi M, Paczuski M. 2004. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Phys Rev E*, **69**(6):066106.
- Duffett-Smith P. 1981. *Practical Astronomy with Your Calculator*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1~208.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull Seismol Soc Amer*, **34**(4):185~188.
- Kato A, Ben-Zion Y. 2021. The generation of large earthquakes. *Nat Rev Earth Environ*, **2**(1):26~39.
- Page M, Felzer K. 2015. Southern San Andreas Fault seismicity is consistent with the Gutenberg-Richter magnitude-frequency distribution. *Bull Seismol Soc Amer*, **105**(4):2070~2080.
- Senatorski P. 2020. Gutenberg-Richter's *b* value and earthquake asperity models. *Pure Appl Geophys*, **177**(5):1891~1905.
- Stanchits S, Vinciguerra S, Dresen G. 2006. Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite. *Pure Appl Geophys*, **163**(5-6):975~994.
- Tiwari R K, Paudyal H. 2022. Frequency magnitude distribution and spatial correlation dimension of earthquakes in north-east Himalaya and adjacent regions. *Geologos*, **28**(2):115~128.
- Urbancic T I, Trifu C I, Long J M, et al. 1992. Space-time correlations of *b* values with stress release. *Pure Appl Geophys*, **139**(3-4):449~462.
- Wang W, Shearer P M, Vidale J E, et al. 2022. Tidal modulation of seismicity at the Coso geothermal field. *Earth Planet Sci Lett*, **579**:117335.
- Wu J, Yao D D, Meng X F, et al. 2017. Spatial-temporal evolutions of early aftershocks following the 2013  $M_w$ 6.6 Lushan earthquake in Sichuan, China. *J Geophys Res: Solid Earth*, **122**(4):2873~2889.
- Wyss M. 1973. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophys J R Astr Soc*, **31**(4):341~359.
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2011. Asymmetric distribution of aftershocks on large faults in California. *Geophys J Int*, **185**(3):1288~1304.
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2016a. A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophys J Int*, **207**(1):608~634.
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2016b. Discriminating characteristics of tectonic and human-induced seismicity. *Bull Seismol Soc Amer*, **106**(3):846~859.
- Zaliapin I, Gabrielov A, Keilis-Borok V, et al. 2008. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification. *Phys Rev Lett*, **101**(1):018501.

## Study on Variation of Seismicity Parameters Prior to the 2022 Luding $M6.8$ Earthquake

Li Dongmei, Li Xiaohan, Zheng Jianchang

Shandong Earthquake Agency, Jinan 250102, China

**Abstract** On September 5, 2022, a magnitude 6.8 earthquake occurred in Luding, Sichuan Province. In order to study the stress variation in the seismogenic zone of Luding earthquake, in this paper we selected three parameters, namely,  $b$  value, small earthquake modulation ratio and clustering rate, to calculate and study the regional seismicity prior to the Luding earthquake. The results are as follows. Before several strong earthquakes occurred in Luding and its surrounding areas, the regional seismicity had a long duration of low  $b$  value period, and the phenomenon of high clustering of small earthquakes and high modulation ratio appeared in the short term before earthquakes in the low  $b$  value state. The analysis of the seismic activity state of the Xianshuihe fault zone shows that before the Luding earthquake, the fault zone had a low  $b$  value state that lasted for nearly 10 months, and in the short term, the clustering rate increased and the modulation ratio increased. Through comparative analysis, it is believed that the Luding earthquake is the result of the tectonic movement of the Xianshuihe fault zone. The analysis shows that the temporal and spatial variation of  $b$  value, modulation ratio and clustering ratio of seismicity combined with the background of stress field is helpful to study the evolution process of large earthquakes.

**Keywords:** The Luding earthquake;  $b$  value; Modulation ratio; Earthquake clustering rate; Seismogenic process