

张致伟,曾宪伟,王迪,等. 2024. 2022年四川芦山  $M_s6.1$  地震前应力状态研究[J]. 地震研究, 47(4): 483–492, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0061.

Zhang Z W, Zeng X W, Wang D, et al. 2024. Study on the stress state before the 2022, Lushan, Sichuan  $M_s6.1$  earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 47(4): 483–492, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0061.

## 2022年四川芦山 $M_s6.1$ 地震前应力状态研究\*

张致伟<sup>1,2</sup>, 曾宪伟<sup>3</sup>, 王迪<sup>1</sup>, 路茜<sup>1</sup>, 王伟铭<sup>1</sup>, 杨鹏<sup>1</sup>, 龙锋<sup>1</sup>

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059;  
3. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

**摘要:** 为研究2022年6月1日四川芦山  $M_s6.1$  地震的孕育和发生过程, 采用CAP方法反演了2013年芦山  $M_s7.0$  主震及  $M_s \geq 5.0$  余震的震源机制解, 并基于应力张量方差与  $b$  值时空分布特征, 探讨了芦山  $M_s6.1$  地震的力学机制和震源区的应力状态。结果表明: 2022年芦山  $M_s6.1$  地震震源机制表现出与2013年芦山  $M_s7.0$  主震和5级余震相似的逆冲型破裂特征, 压应力轴方位与龙门山断裂带南段区域应力场一致。2013年芦山  $M_s7.0$  地震后震中及附近的应力张量方差和  $b$  值长期处于低值状态, 2022年芦山  $M_s6.1$  地震前震中及附近出现了应力张量方差和  $b$  值的低值异常, 表明芦山余震区处于较高的应力水平。分析认为: 巴颜喀拉块体持续东向运动受到华南块体的阻挡, 震中所在区域长期受挤压逆冲作用, 从而使芦山余震区长期处于应力积累的状态, 芦山  $M_s6.1$  地震也是在这种动力学背景下发生的。

**关键词:** 芦山  $M_s6.1$  地震; 芦山  $M_s7.0$  地震; 震源机制解; 应力张量方差;  $b$  值; 应力状态

**中图分类号:** P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0483-10  
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0061

### 0 引言

据中国地震台网测定, 2022年6月1日四川省雅安市芦山县(30.37°N, 102.94°E)发生  $M_s6.1$  地震, 震源深度17 km。此次地震位于2013年4月20日芦山  $M_s7.0$  地震的西北侧, 震中仅相距9 km, 属于芦山  $M_s7.0$  地震的晚期强余震。

2013年芦山  $M_s7.0$  地震发生后, 众多学者就芦山地震序列震源机制及震区的应力状态开展了相关研究(单斌等, 2013; 罗艳等, 2015; 梁春涛等, 2018)。芦山  $M_s7.0$  地震震源机制断层面走向NE、倾向NW, 为NWW-SEE向水平挤压应力

作用下发生的一次逆冲型地震(刘杰等, 2013); 芦山余震区最大主压应力( $S_1$ )方向存在局部空间差异, 余震区南段  $S_1$  方向总体呈NWW向, 而余震区北段  $S_1$  方向表现出由NW经EW向NE的逆时针旋转(张致伟等, 2015a); 单斌等(2013)计算了芦山  $M_s7.0$  地震的同震静态库仑应力场变化, 发现主震破裂面附近以及破裂面的东北和西南端为库仑应力增强区, 余震也主要发生在破裂面附近的库仑应力增强区; 易桂喜等(2013)基于芦山地震前的资料获得了龙门山南段的  $b$  值图像, 显示震前在天全—芦山段应力水平相对较高; 梁春涛等(2018)利用密集监测台阵的走时定位发现芦山余震区东边的大邑断裂及一些隐伏断裂

\* 收稿日期: 2024-02-27.

**基金项目:** 国家重点研发计划专题(2021YFC3000705-07); 国家自然科学基金地震科学联合基金(U2139203); 中国地震局“大震短临跟踪技术研究团队”项目; 四川省地震局“防震减灾公共服务平台建设创新团队”项目。

**第一作者简介:** 张致伟(1983-), 正高级工程师, 主要从事地震综合预测与数字地震学应用研究。

E-mail: zzw1983107@163.com.

上地震比较活跃,认为应力在这些断裂上有所积累;张致伟等(2023)研究认为2022年芦山 $M_s6.1$ 地震序列发生在2013年芦山 $M_s7.0$ 地震发震断层北西侧的一条倾向南东的反冲断层上,且 $M_s7.0$ 地震对 $M_s6.1$ 地震有显著的触发作用。

地震的发生与应力状态密切相关,强震震源区应力状态的时空变化对了解地震过程和预测地震具有重要意义。震源机制一致性和 $b$ 值作为表征区域应力状态的参数,被广泛应用于地震危险性分析和地震预测研究中(Wiemer *et al.*, 2002; Wyss, Stefansson, 2006; 易桂喜等, 2013; 曾宪伟等, 2020)。在大地震孕育的过程中,震源区附近的构造应力场控制作用会增强,特别是临近发震的时候,中小地震的震源机制趋于一致,应力张量方差显著降低,反映了震源区应力水平升高;大震后震源区应变能得以充分释放,中小地震的震源机制趋于紊乱,应力张量方差明显升高,表明震源区应力水平降低(Wiemer *et al.*, 2002; 付虹等, 2011; 张致伟等, 2015b)。 $b$ 值本质上反映的是不同震级地震之间的比例关系,代表了介质内部应力水平的高低,其随着介质应力水平的增加而减小,介质应力水平高,在岩石破裂面的边界上处于高水平的应力点所占的比重越大,大破裂的比例也越大, $b$ 值越小;介质应力水平低,破裂面的边界上就越容易碰上低水平的应力点而停止,小破裂所占的比例大, $b$ 值越高(Wyss, Wiemer, 2000; 易桂喜等, 2013)。

时隔9年芦山 $M_s7.0$ 地震余震区再次发生 $M_s6.1$ 地震,震源力学机制与震源区应力状态是理解芦山 $M_s6.1$ 地震孕育和发生的关键问题之一。本文采用CAP方法反演了2013年以来芦山 $M_s \geq 5.0$ 地震震源机制解,基于余震区应力张量方差与 $b$ 值时空分布特征,探讨了芦山 $M_s6.1$ 地震前震源区的应力状态。

## 1 计算方法

### 1.1 震源机制反演方法

在求取震源机制解的多种方法中,相比以往的P波初动法、体波反演或面波反演法,CAP方法是

一种全波形的反演方法,将地震波形记录分解为面波和Pn两部分,搜索观测波形与理论波形之间拟合误差函数最小的机制解,在获得震源机制解的同时还能给出最佳拟合震源深度(Tan *et al.*, 2006; 郑勇等, 2009; Zhang *et al.*, 2022)。

CAP方法的主要原理是将任意一个双力偶震源的理论合成位移 $s(t)$ 表示为:

$$s(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_i(\theta - \varphi, \delta, \lambda) G_i(t) \quad (1)$$

式中: $i=1,2,3$ 时分别对应垂直走滑、垂直倾滑和 $45^\circ$ 倾滑3种最基本的断层类型; $M_0$ 为标量地震矩; $A_i$ 为震源辐射图因子; $G_i$ 为格林函数; $\theta$ 为台站方位角; $\varphi, \delta, \lambda$ 依次为所求震源机制解的走向、倾角和滑动角参数。

在反演过程中,以理论地震位移 $s(t)$ 与观测地震位移 $u(t)$ 一致作为判断标准:

$$u(t) = s(t) \quad (2)$$

可定义一个误差目标函数来衡量 $s$ 与 $u$ 的差异:

$$e = \left\| \left( \frac{r}{r_0} \right)^p \right\| \cdot \|u - s\| \quad (3)$$

式中: $r$ 为震中距; $r_0$ 为选定的参考震中距; $p$ 是考虑到几何扩散因子对地震波形的影响而采用的指数因子,它使得地震的矩震级大小较为可靠。经参考前人研究的经验(吕坚等, 2008; 郑勇等, 2009)及反复尝试,一般情况下体波可给定 $p=1.0$ 、面波 $p=0.5$ 。

### 1.2 $b$ 值计算方法

常用的 $b$ 值计算方法有最小二乘法和最大似然法(中国地震局监测预报司, 2020)。在特定条件下最小二乘法可由最大似然法替代,最大似然法计算 $b$ 值的公式为:

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - (M_c - \Delta M/2)} \quad (4)$$

式中: $M_c$ 为最小完整性震级; $\Delta M$ 为震级精度(对于仪器记录的地震,通常取0.1); $\bar{M}$ 为 $M \geq M_c$ 的所有地震震级的平均值; $e$ 表示自然常数。

其误差  $\delta b$  计算公式为 (Shi, Bolt, 1982):

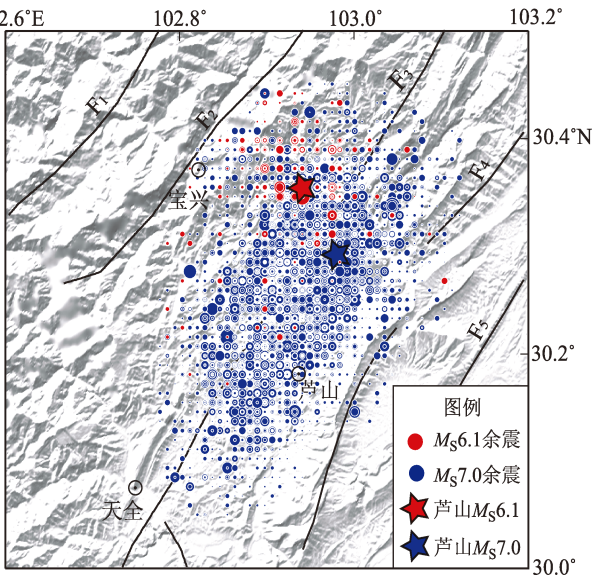
$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M})}{n(n-1)}}$$

(5)

式中： $n$  为地震个数。

2 地震序列特征

2013 年 4 月 20 日芦山县发生  $M_s7.0$  地震, 时隔 9 年主震西北侧再次发生芦山  $M_s6.1$  地震, 震中附近发育有 NE 走向的 5 条断裂, 它们构成了叠瓦状逆断层体系 (Hubbard, Shaw, 2009; 徐锡伟等, 2013), 余震长轴展布与断裂走向一致 (图 1)。截至 2022 年 12 月 31 日, 芦山  $M_s7.0$  地震序列共记录到 0 级以上余震 18 092 次, 其中  $M_s \geq 3.0$  地震 157 次, 3.0~3.9 级 126 次, 4.0~4.9 级 26 次, 5.0~5.9 级 4 次, 6.0~6.9 级 1 次, 最大余震为 2022 年 6 月 1 日芦山  $M_s6.1$  地震, 表 1 列出了芦山 7.0 级地震及 5 次  $M_s \geq 5.0$  余震目录。



(蓝色: 2013-04-20—2022-05-31;  
红色: 2022-06-01—2022-12-31)  
F<sub>1</sub>: 耿达—陇东断裂; F<sub>2</sub>: 盐井—五龙断裂; F<sub>3</sub>: 大川—  
双石断裂; F<sub>4</sub>: 新开店断裂; F<sub>5</sub>: 大邑断裂

图 1 芦山  $M_s7.0$  余震及震区断裂分布  
Fig. 1 Distribution of the aftershocks and faults  
in the 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake zone

表 1 芦山  $M_s7.0$  地震及  $M_s \geq 5.0$  余震目录  
Tab. 1 Catalog of the 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake and its  $M_s \geq 5.0$  aftershocks

序号	发震时间	$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$	震级( $M_s$ )	震源深度/km	参考发震地点
①	2013-04-20 08:02:46	30.30	103.00	7.0	13	芦山县
②	2013-04-20 08:07:32	30.30	102.90	5.1	10	芦山、宝兴县交界
③	2013-04-20 11:34:15	30.18	102.88	5.3	11	天全、芦山县交界
④	2013-04-21 04:53:44	30.37	103.02	5.0	16	芦山县、邛崃市交界
⑤	2013-04-21 17:05:22	30.32	103.02	5.4	7	芦山县、邛崃市交界
⑥	2022-06-01 17:00:08	30.37	102.94	6.1	17	芦山县

图 2a 给出了 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震序列的  $M-t$  图, 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震前, 芦山  $M_s7.0$  地震序列呈现正常的衰减过程, 4 次  $M_s \geq 5.0$  余震均发生在震后前两天, 最大为 4 月 21 日芦山、邛崃交界  $M_s5.4$  地震。2016 年以来余震活动较为稳定, 仅发生 1 次 4 级以上余震, 即 2019 年 5 月 2 日芦山  $M_s4.5$  地震。图 2b 给出了 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震序列的  $M-t$  图, 截至 2022 年 12 月 31 日, 芦山  $M_s6.1$  地震序列共记录到 2 次  $M_s \geq 3.0$  余震, 分别为 6 月 1 日宝兴县  $M_s4.5$  和 6 月 2 日芦山县  $M_s3.2$

地震。余震活动强度弱, 主要为 3 级以下余震, 且集中发生在震后前 3 天, 随后余震序列迅速衰减。

3 震源机制和应力张量方差特征

3.1 芦山  $M_s \geq 5.0$  余震震源机制特征

选取四川区域测震台网记录到的震中距小于 250 km、且信噪比高的数字波形, 采用 CAP 方法反演获得了 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震 (①) 及  $M_s \geq 5.0$  余震的震源机制解 (图 3), 详细参数列于表 2。

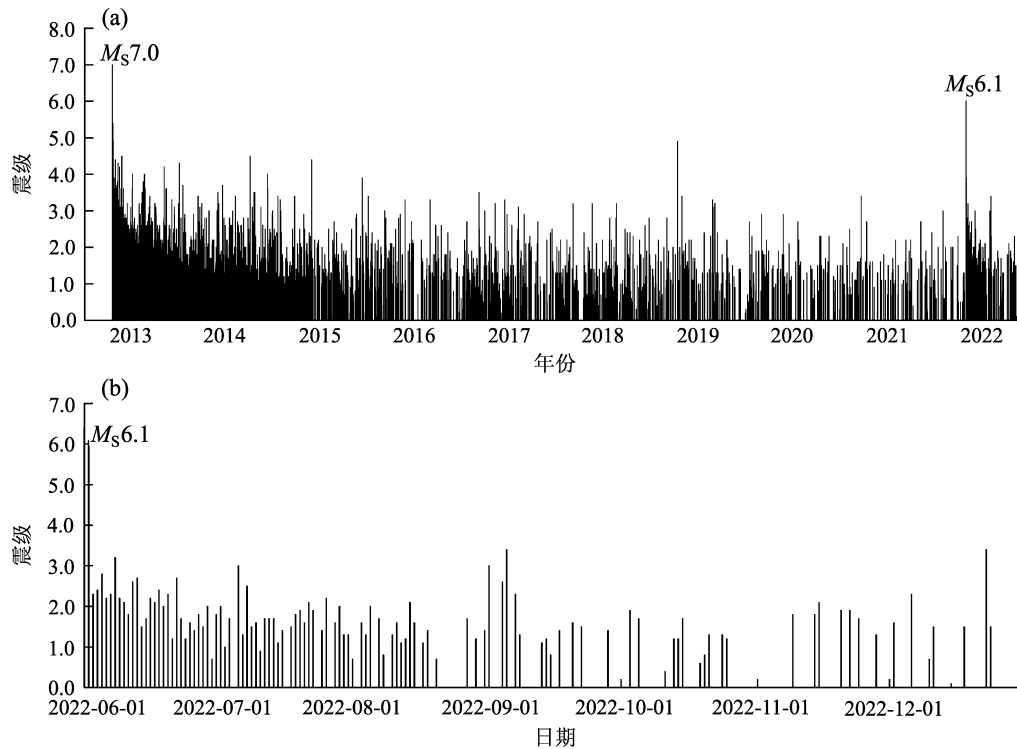


图2 芦山  $M_s7.0$  (a)、 $M_s6.1$  (b) 地震序列  $M-t$  图

Fig. 2 The  $M-t$  diagrams of the 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake sequence (a) and the 2022 Lushan  $M_s6.1$  earthquake sequence (b)

由于2013年4月20日8时7分发生的芦山、宝兴交界  $M_s5.1$  余震(②)距主震仅5 min, 导致其波形记录受主震波形干扰严重, 因此无法反演出震源机制解。2013年4月20日芦山  $M_s7.0$  地震的矩心深度为13 km, 断层面走向、倾角和滑动角分别为  $216^\circ$ 、 $47^\circ$  和  $94^\circ$ ,  $P$  轴方位角和倾角分别为  $303^\circ$  和  $2^\circ$ , 震源机制呈现走向 NE、倾向 NW, 为 NWW-SEE 向水平挤压应力作用下的逆冲型地震。4月20日11时34分天全、芦山交界  $M_s5.3$  余震(③)位于主震南南西侧约24 km处, 矩心深度为16 km, 断层面走向、倾角和滑动角分别为  $217^\circ$ 、 $46^\circ$  和  $94^\circ$ ,  $P$  轴方位角和倾角分别为  $304^\circ$  和  $1^\circ$ , 震源机制同样表现为受 NWW-SEE 向水平挤压作用的逆冲型。4月21日4时53分、17时5分芦山、邛崃交界  $M_s5.0$  (④) 和  $M_s5.4$  (⑤) 余震发生在余震区北东端, 两次余震虽相距较近, 但震源机制略有差异, 矩心深度分别为17 km 和13 km;  $M_s5.0$  余震(④)的断层面走向、倾角和滑动角分别为  $182^\circ$ 、 $39^\circ$  和  $74^\circ$ ,  $P$  轴方位角和倾角分别为  $103^\circ$  和  $7^\circ$ , 呈现为受近 EW 向水平作用

力的逆冲型, 而  $M_s5.4$  余震(⑤)的断层面参数分别为  $228^\circ$ 、 $44^\circ$  和  $95^\circ$ ,  $P$  轴方位角和倾角分别为  $134^\circ$  和  $1^\circ$ , 表现为受 NW-SE 向水平作用力的逆冲型。2022年6月1日芦山  $M_s6.1$  地震(⑥)位于主震西北侧9 km, 断层面走向、倾角和滑动角分别为  $22^\circ$ 、 $52^\circ$  和  $78^\circ$ ,  $P$  轴方位角和倾角分别为  $120^\circ$  和  $6^\circ$ , 震源矩心深度14 km。芦山  $M_s6.1$  地震的震源机制表现出与2013年芦山  $M_s7.0$  主震及5级余震类似的逆冲型破裂特征, 压应力轴方位与龙门山断裂带南段区域应力场 NWW-SEE (阚荣举等, 1977) 一致, 表明此次  $M_s6.1$  地震仍是在巴颜喀拉块体东向挤压的动力学背景下发生的。

### 3.2 应力张量方差特征

为了求解空间非均匀震源机制解的应力场特征, Michael (1991) 提出了叠加应力场反演方法, 它通过在均匀应力场上叠加扰动来模拟非均匀的空间应力场, 获得张应力轴、中等应力轴和压应力轴的方向以及反演方差。应力张量方差被定义为单个地震的滑动矢量与在假设应力张量作用下产生的理论滑动矢量之间的夹角与其平均数之差

表 2 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震及  $M_s\geq5.0$  余震的震源机制解参数

Tab. 2 Focal mechanism parameters of the $M_s \geqslant 5.0$ aftershocks of the 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake sequence																		
序号		地震事件			深度/ km	节面 I / (°)			节面 II / (°)			$P$ 轴 / (°)		$T$ 轴 / (°)		$B$ 轴 / (°)		
						走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角	
①	2013-04-20	08:02	芦山 $M_s 7.0$			13	216	47	94	30	43	86	303	2	180	87	33	3
③	2013-04-20	11:34	天全、芦山交界 $M_s 5.3$			16	217	46	94	31	44	86	304	1	193	87	34	3
④	2013-04-21	04:53	芦山、邛崃交界 $M_s 5.0$			17	182	39	74	22	53	103	103	7	339	78	195	10
⑤	2013-04-21	17:05	芦山、邛崃交界 $M_s 5.4$			13	228	44	95	41	46	85	134	1	242	86	44	3
⑥	2022-06-01	17:00	芦山 $M_s 6.1$			14	221	40	105	22	52	78	120	6	242	79	29	10

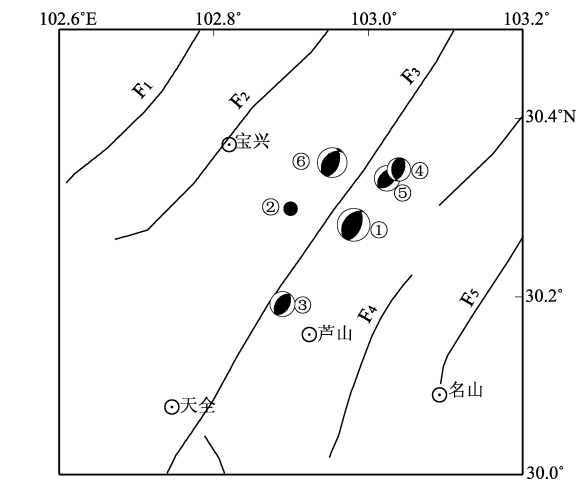


图 3 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震及  $M_s\geq5.0$  余震的震源机制解 (断层同图 1)

Fig. 3 Focal mechanism solutions of the  $M_s\geq5.0$  aftershocks of the 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake sequence (faults are the same as the ones in Figure 1)

的平方和的平均数，是衡量区域构造应力场与地震震源释放应力场一致性程度的指标 (Michael, 1987, 1991)。已有研究表明，当方差大于 0.2 时，表明区域应力场在时空上是非均匀的；当方差小于 0.1 时，意味着区域应力场是均匀的 (Lu et al, 1997)。

基于 2013 年 4 月 20 日—2022 年 5 月 31 日芦山 129 次  $M_s\geq3.0$  余震震源机制解 (图 4a)，将芦山余震区划分为  $0.01^\circ\times0.01^\circ$  的网格，选取每个网格节点及其周围至少 8 个地震震源机制解，采用 Michael (1991) 提出的应力场反演方法计算了芦山余震区的应力张量方差 (图 4b)。

2022 年 6 月 1 日芦山  $M_s6.1$  地震前，余震区呈现的应力张量方差分布特征与早期的研究结果 (张致伟等, 2015b) 较为一致。芦山  $M_s7.0$  地震两侧的应力张量方差存在明显差异，主震震中及其北侧的应力张量方差明显低于南侧，余震区北侧的应力张量方差小于 0.1，说明该区域的应力水平较高， $M_s6.1$  地震就发生在余震区北侧的应力张量方差低值区。以往研究也有类似的发现：Wiemer 等 (2002) 分析认为 1992 年兰德斯  $M_s7.3$  和大熊  $M_s6.4$  地震均发生在应力张量方差低值区；张致伟等 (2015b) 研究发现汶川  $M_s\geq5.5$  强余震也发生在应力张量方差低值分布区或其边缘附近；李金等 (2015) 研究认为天山中东段地区的  $M_s\geq5.5$  地震大多发生在应力张量方差相对较低的区域，新源一和静  $M_s6.6$  地震位于低值区中心。

4 余震区  $b$  值时空变化特征

4.1 余震区  $b$  值时间变化特征

基于 2000 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日芦山余震区的地震，采用最大似然法估算了芦山余震区整个时段的  $b$  值 (图 5)。鉴于震级-频次关系式中高、低震级段出现的“摆尾”和“掉头”现象会对  $b$  值计算产生影响 (曾宪伟等, 2020)，本文在计算  $b$  值时同时考虑了高震级截断地震和最小完整性震级的影响。根据震级-频次关系，选取最小完整性震级  $M_c$  为 0.8，高震级的截断震级为 5.5，扣除高、低震级段的影响后，计算获得的芦山余震区的平均  $b$  值为  $0.75\pm0.06$ 。

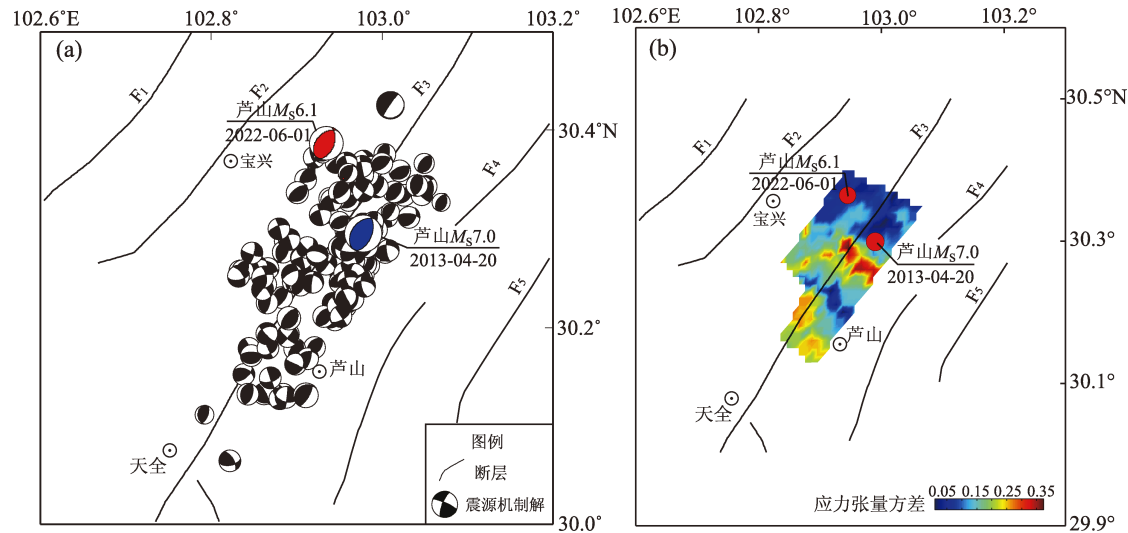


图4 芦山  $M_s \geq 3.0$  余震震源机制 (a) 及余震区应力张量方差空间图像 (b) (断层同图1)

Fig. 4 Focal mechanisms of the  $M_s \geq 3.0$  aftershocks (a) of the 2013 Lushan  $M_s 7.0$  earthquake sequence and the distribution of the stress tensor variance in the Lushan aftershock zone (b) (faults are the same as the ones in Figure 1)

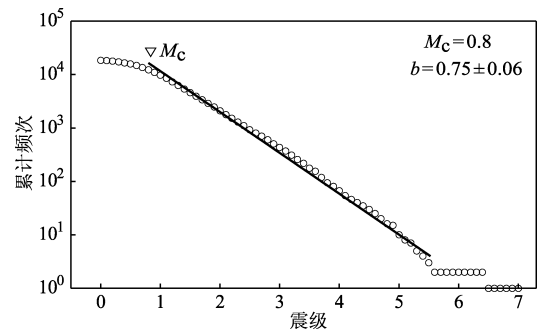


图5 芦山余震区地震震级-频次关系

Fig. 5 Magnitude - frequency relationship in the Lushan aftershock zone

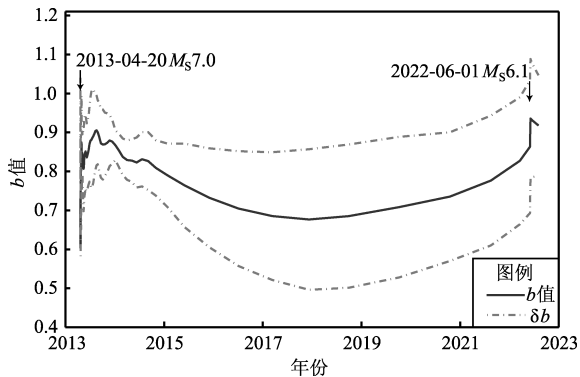


图6 芦山余震区的  $b$  值时间曲线

Fig. 6 The curve of  $b$  value with time in Lushan aftershock zone

以2013年芦山  $M_s 7.0$  地震序列为研究对象,选取500个地震样本作为一个时间窗,且步长取为一个时间窗,逐步滑动样本窗计算每个窗口内的  $b$  值,绘制了2013年芦山  $M_s 7.0$  地震以来余震区的  $b$  值时间进程曲线(图6)。结果显示,地震后  $b$  值出现短时间上升,2013年7月达到最高值0.9后开始下降,2018年下降到最低值0.68后开始缓慢上升直至发生2022年芦山  $M_s 6.1$  地震。马鸿庆(1978)在研究华北地区大震前的  $b$  值异常变化时,同样发现  $b$  值随时间先升高后降低,达到最低值后又回升直至发震;高雅婧等(2022)研究认为台湾集集地震发生后十天至5个月内  $b$  值迅速且

连续升高,6~7个月后  $b$  值出现降低趋势,表明区域应力水平经历了恢复后又处于积累的状态。

2016—2021年芦山余震区的  $b$  值低于2000年以来的平均  $b$  值(0.75)水平,表明芦山  $M_s 7.0$  地震后余震区长期处于低  $b$  值状态。史海霞等(2018)研究发现汶川震源区  $b$  值从2002年开始至地震前呈现一个长期趋势性下降;易桂喜等(2013)分析了龙门山断裂带南段应力状态,认为2008年汶川  $M_s 8.0$  地震后,天全—芦山以及宝兴北部地区  $b$  值有较明显的降低;蒋海昆等(2000)通过花岗岩变形过程中的声发射实



验, 研究认为  $b$  值的系统降低表征研究区所处环境应力的进一步增强。分析认为, 芦山余震区长期处于低  $b$  值的现象可能源于巴颜喀拉块体持续东向运动受到华南块体的阻挡, 余震区长期受挤压逆冲作用所致。

#### 4.2 余震区 $b$ 值空间分布特征

将芦山余震区划分为  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  的网格, 以每个网格节点为中心点, 搜索半径逐步增大, 当地震数达到 200 个时停止搜索并计算  $b$  值。根据余震区  $b$  值时间变化过程, 考虑到芦山  $M_s7.0$  地震对余震区  $b$  值的影响, 本文选取  $b$  值相对稳定的 2016 年作为起始时间, 将研究时段划分为 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日 (第 I 时段)、2016 年 1 月 1 日至 2022 年 5 月 31 日 (第 II 时段) 和 2016 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日 (第 III 时段) 共 3 个时段分析  $b$  值空间扫描图像 (图 7)。

余震区  $b$  值在不同时段的空间图像显示, 3 个时段芦山  $M_s7.0$  主震震中及附近  $b$  值均处于低值

( $<0.75$ ) 状态, 表明主震震中及附近长期处于应力积累。2022 年芦山  $M_s6.1$  地震发生前, 震中附近的  $b$  值 (图 7b) 较第 I 时段 (图 7a) 有所下降, 地震发生后短期内震源区仍表现为低  $b$  值 (图 7c)。易桂喜等 (2011) 研究发现龙门山断裂带中北段的绵竹—茂县段与江油—平武段具有异常低  $b$  值, 这两个段落也是汶川 5 级以上强余震集中发生的区域; Nanjo 等 (2012) 研究发现 2011 年日本东北  $M_s9.0$  和 2004 年苏门答腊  $M_s9.1$  两次地震前震源区均存在异常低  $b$  值; 冯建刚等 (2016) 研究发现 2013 年岷县漳县  $M_s6.6$  地震发生在临潭—宕昌断裂与西秦岭北缘断裂之间的低  $b$  值区边缘。对比前文给出的应力张量方差空间分布, 可以看出 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震前, 震源区的低  $b$  值与应力张量方差低值区吻合较好。由此可见, 应力张量方差和  $b$  值均可反映区域应力状态, 结合应力张量方差和  $b$  值的空间分布可作为识别强震危险地点的方法之一。

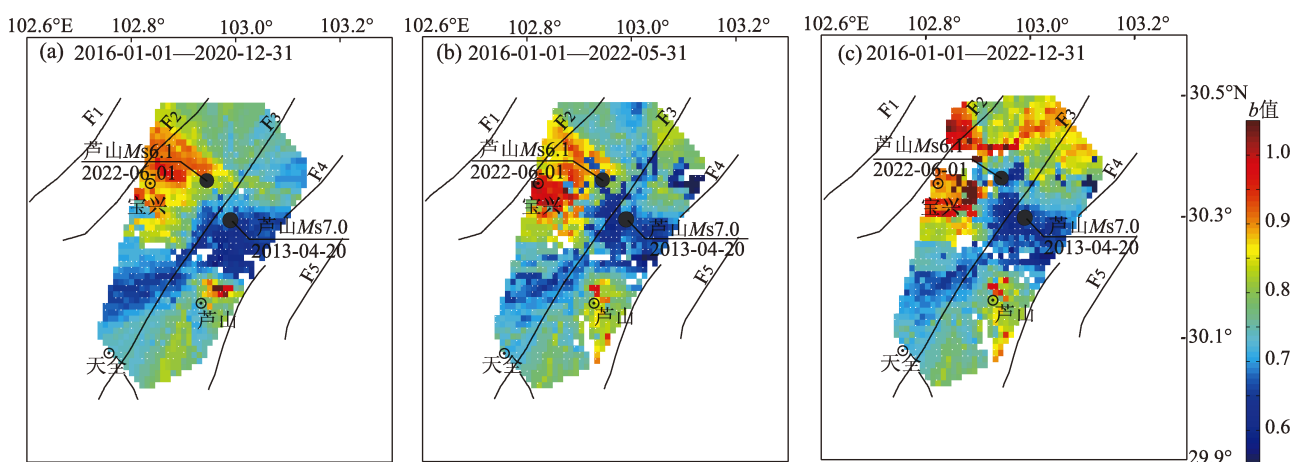


图 7 芦山余震区不同时段  $b$  值空间图像

Fig. 7 Spatial images of  $b$  value in Lushan aftershock zone at different times

## 5 结论

基于四川地震台网记录的观测资料, 采用 CAP 方法反演了 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震及  $M_s \geq 5.0$  余震震源机制解, 并基于应力张量方差及  $b$  值时空分布特征, 探讨了 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震的力学机制及余震区的应力状态。获得的主要认识如下:

(1) 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震发生在 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震余震区北西侧约 9 km 处, 属于芦山  $M_s7.0$  地震的晚期强余震。芦山  $M_s6.1$  地震震源机制断层面走向、倾角和滑动角分别为  $22^\circ$ 、 $52^\circ$  和  $78^\circ$ ,  $P$  轴方位  $120^\circ$ , 倾角  $6^\circ$ 。表现出与芦山  $M_s7.0$  主震和 5 级余震相似的逆冲型破裂特征, 压应力轴方位与龙门山断裂带南段区域应力场一致。揭示芦山  $M_s6.1$  地震仍是在巴颜喀拉块体东向挤压的动力学背景下发生的。

(2) 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震后, 主震震中附近始终表现为较低的应力张量方差和  $b$  值, 其中应力张量方差小于 0.1,  $b$  值小于 0.75。2016—2021 年期间芦山余震区的  $b$  值均低于 2000 年以来的平均  $b$  值 (0.75) 水平, 反映出芦山  $M_s7.0$  地震震中及附近长期处于应力积累状态。上述现象可能源于巴颜喀拉块体持续东向运动受到华南块体的阻挡, 震中所在区域长期受挤压逆冲作用所致。

(3) 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震前, 震中及附近的应力张量方差和  $b$  值均呈现低值异常, 表明芦山  $M_s6.1$  地震前震源区处于较高的应力水平。由此可见, 应力张量方差和  $b$  值均可作为表征区域应力状态的参数, 结合两者的空间分布可用于识别强震危险地点。

四川地震台为本研究提供了地震目录和波形数据, CAP 波形反演程序来源于美国圣路易斯大学的朱露培教授,  $b$  值计算和绘图程序来自 ZMAP 程序包。在此一并表示衷心感谢!

## 参考文献:

- 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[J]. 地震, 36(1): 32–37.
- Feng J G, Zhang H, Yang P. 2016. Anomalies of  $b$  value Changes before the 2013 Minxian – Zhangxian  $M_s6.6$  Earthquake[J]. Earthquake, 36(1): 32–37. (in Chinese)
- 付虹, 王绍晋, 李丽, 等. 2011. 滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J]. 地震研究, 34(2): 114–118.
- Fu H, Wang S J, Li L, et al. 2011. Spatial – temporal distribution of the parameters of the focal mechanism and strong seismicity in central Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 34(2): 114–118. (in Chinese)
- 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[J]. 地球物理学报, 65(6): 2137–2152.
- Gao Y J, Sun Y Q, Luo G. 2022. Temporal and spatial evolution characteristics of  $b$  value and stress field in Taiwan before and after the 1999 Chi – Chi earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(6): 2137–2152. (in Chinese)
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000. 不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J]. 地球物理学报, 43(6): 812–826.
- Jiang H K, Zhang L, Zhou Y S. 2000. Behavior of acoustic emission time sequence of granite in deformation and failure process under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 43(6): 812–826. (in Chinese)
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 96–109.
- Kan R J, Zhang S C, Yan F T, et al. 1977. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in southwestern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 20(2): 96–109. (in Chinese)
- 李金, 周龙泉, 龙海英, 等. 2015. 天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征[J]. 地震地质, 37(3): 792–803.
- Li J, Zhou L Q, Long H Y, et al. 2015. Spatial – temporal characteristics of the focal mechanism consistency parameter in TianShan( within Chinese territory) seismic zone[J]. Seismology and Geology, 37(3): 792–803. (in Chinese)
- 梁春涛, 黄焱玲, 王朝亮, 等. 2018. 汶川和芦山地震之间地震空区综合研究进展[J]. 地球物理学报, 61(5): 1996–2010.
- Liang C T, Huang Y L, Wang C L, et al. 2018. Progress in the studies of the seismic gap between the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(5): 1996–2010. (in Chinese)
- 刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M7.0$  级地震介绍[J]. 地球物理学报, 56(4): 1404–1407.
- Liu J, Yi G X, Zhang Z W, et al. 2013. Introduction to the Lushan, Sichuan  $M7.0$  earthquake on 20 April 2013[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(4): 1404–1407. (in Chinese)
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 等. 2008. 2005 年 11 月 26 日九江 – 瑞昌  $M_s5.7$ 、 $M_s4.8$  地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报, 51(1): 158–164.
- Lyu J, Zheng Y, Ni S D, et al. 2008. Focal mechanisms and seismogenic structures of the  $M_s5.7$  and  $M_s4.8$  Jiujiang – Ruichang earthquakes of Nov. 26, 2005[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(1): 158–164. (in Chinese)
- 罗艳, 赵里, 曾祥方, 等. 2015. 芦山地震序列震源机制及其构造应力场空间变化[J]. 中国科学: 地球科学, 45: 538–550.
- Luo Y, Zhao L, Zeng X F, et al. 2015. Focal mechanisms of the Lushan earthquake sequence and spatial variation of the stress field[J]. Scientia Sinica Terrae, 45: 538–550. (in Chinese)
- 马鸿庆. 1978. 华北地区几次大地震前的  $b$  值异常变化[J]. 地球物理学报, 21(2): 126–141.
- Ma H Q. 1978. Variations of the  $b$  – values before several large earthquakes occurred in north China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 21(2): 126–141. (in Chinese)
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2013. 2013 年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1002–1009.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2013. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake, and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake[J]. Scientia Sinica Terrae, 43(6): 1002–1009. (in Chinese)
- 史海霞, 孟令媛, 张雪梅, 等. 2018. 汶川地震前的  $b$  值变化[J]. 地球



- 物理学报, 61(5):1874–1882.
- Shi H X, Meng L Y, Zhang X M, *et al.* 2018. Decrease in  $b$  value prior to the Wenchuan earthquake ( $M_s8.0$ ) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(5):1874–1882. (in Chinese)
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 2013. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. 地学前缘, 20(3):11–20.
- Xu X W, Chen G H, Yu G H, *et al.* 2013. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake [J]. Earth Science Frontiers, 20(3):11–20. (in Chinese)
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2011. 2008年汶川 $M_s8.0$ 地震前龙门山–岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. 地球物理学报, 54(6):1490–1500.
- Yi G X, Wen X Z, Xin H, *et al.* 2011. Distributions of seismicity parameters and seismic apparent stresses on the Longmenshan – Minshan tectonic zone before the 2008  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(6):1490–1500. (in Chinese)
- 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[J]. 地球物理学报, 56(4):1112–1120.
- Yi G X, Wen X Z, Xin H, *et al.* 2013. Stress state and major – earthquake risk on the southern segment of the Longmen Shan fault zone [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(4):1112–1120. (in Chinese)
- 曾宪伟, 龙锋, 任家琪, 等. 2020. 2019年6月17日长宁 $M_s6.0$ 地震前后 $b$ 值时空变化分析[J]. 地震, 40(3):1–14.
- Zeng X W, Long F, Ren J Q, *et al.* 2020. Spatial and temporal variation of  $b$  value before and after the Changning  $M_s6.0$  earthquake on June 17, 2019 [J]. Earthquake, 40(3):1–14. (in Chinese)
- 张致伟, 龙锋, 石富强, 等. 2023. 2022年6月1日四川芦山 $M_s6.1$ 地震的发震构造与力学机制探讨[J]. 地球物理学报, 66(10):4095–4110.
- Zhang Z W, Long F, Shi F Q, *et al.* 2023. Discussion on seismogenic structure and mechanical mechanism of the 1 June 2022  $M_s6.1$  Sichuan Lushan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(10):4095–4110. (in Chinese)
- 张致伟, 周龙泉, 程万正, 等. 2015a. 芦山 $M_w6.6$ 地震序列的震源机制及震源区应力场[J]. 地球科学, 40(10):1710–1722.
- Zhang Z W, Zhou L Q, Cheng W Z, *et al.* 2015a. Focal mechanism solutions of Lushan  $M_w6.6$  earthquake sequence and stress field for aftershock zone [J]. Earth Science, 40(10):1710–1722. (in Chinese)
- 张致伟, 周龙泉, 龙锋, 等. 2015b. 汶川8.0和芦山7.0级地震序列应力场时空特征[J]. 地震地质, 37(3):804–817.
- Zhang Z W, Zhou L Q, Long F, *et al.* 2015b. Spatial and temporal characteristic of stress field for Wenchuan  $M_s8.0$  and Lushan  $M_s7.0$  earthquake sequence [J]. Seismology and Geology, 37(3):804–817. (in Chinese)
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 2009. 汶川地震强余震( $M_s \geq 5.6$ )的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学:地球科学, 39(4):413–426.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, *et al.* 2009. Source mechanism of strong aftershocks ( $M_s \geq 5.6$ ) of the Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics [J]. Scientia Sinica Terrae, 39(4):413–426. (in Chinese)
- 中国地震局监测预报司. 2020. 测震分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社.
- Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. 2020. Working manual of seismic analysis and prediction technology [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- Hubbard J, Shaw J H. 2009. Uplift of the Longmen Shan Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan ( $M_w7.9$ ) earthquake [J]. Nature, 458:194–197.
- Lu Z, Wyss M, Pulpan H. 1997. Detail of stress directions in the Alaska Subduction Zone from fault plane solutions [J]. Journal of Geophysical Research, 102(B3):5385–5402.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study [J]. Journal of Geophysical Research, 92(B1):357–368.
- Michael A J. 1991. Spatial variations in stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results [J]. Journal of Geophysical Research, 96(B4):6303–6319.
- Nanjo K Z, Hirata N, Obara K, *et al.* 2012. Decade – scale decrease in  $b$  value prior to the  $M9$  – class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes [J]. Geophys Res Lett, 39:L20304.
- Shi Y, Bolt B A. 1982. The standard error of the magnitude – frequency  $b$  – value [J]. Bull Seism Soc Am, 72(5):1677–1687.
- Tan Y, Zhu L, Helmberger D V, *et al.* 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations [J]. J Geophys Res, 111:B11.
- Wiemer S, Gerstenberger M, Hauksson E. 2002. Properties of the aftershock sequence of the 1999  $M_w7.1$  Hector Mine earthquake: Implications for aftershock hazard [J]. Bull Seism Soc Amer, 92(4):1227–1240.
- Wyss M, Stefansson R. 2006. Nucleation points of recent mainshocks in Southern Iceland, mapped by  $b$  – values [J]. Bull Seism Soc Am, 96(2):599–608.
- Wyss M, Wiemer S. 2000. Change in the probability for earthquakes in southern California due to the Landers magnitude 7.3 earthquake [J]. Science, 290(5495):1334–1338.
- Zhang Z W, Liang C T, Long F, *et al.* 2022. Spatiotemporal variations of focal mechanism solutions and stress mechanism solutions and stress field of the 2019 Changning  $M_s6.0$  Earthquake sequence [J]. Front Earth Sci, 9:797907.

## Study on the Stress State before the 2022, Lushan, Sichuan $M_s6.1$ Earthquake

ZHANG Zhiwei<sup>1,2</sup>, ZENG Xianwei<sup>3</sup>, WANG Di<sup>1</sup>, LU Qian<sup>1</sup>, WANG Weiming<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>, LONG Feng<sup>1</sup>

(1. *Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

(2. *College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

(3. *Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China*)

### Abstract

On June 1, 2022, an  $M_s6.1$  earthquake struck Lushan Country, Ya'an City of Sichuan Province. The earthquake is another significant event that occurred in the aftershock zone of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake on May 20, 2013. To figure out the genesis and occurrence of the Lushan  $M_s6.1$  earthquake, the CAP inversion method is used to calculate the focal mechanism of the Lushan  $M_s7.0$  mainshock and its  $M_s \geq 5.0$  aftershocks. And the mechanical mechanism and the stress state in the source area before the Lushan  $M_s6.1$  earthquake are discussed based on the spatial and temporal distribution of the stress tensor variance and  $b$  value. The main insights are as follows: The focal mechanism of the Lushan  $M_s6.1$  earthquake is featured as a thrust rupture, which is similar to the feature of the focal mechanism of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake and its  $M_s \geq 5.0$  aftershocks. The direction of the principal compressive stress is consistent with the regional stress field of the southern section of the Longmenshan fault zone. The stress tensor variance and  $b$  value around the epicenter of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake are in a low state in a long period. What is more, shortly before the Lushan  $M_s6.1$  earthquake, in its focal area there appeared low  $-$  value anomalies of the stress tensor variance and  $b$  value, indicating that the Lushan  $M_s7.0$  earthquake aftershock zone had been keeping a higher stress level. The continuous eastward movement of the Bayan Har block is blocked by the South China block. Thus, the aftershock zone of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake is under the action of the horizontal extrusion and thrust, which leads to the long  $-$  term stress accumulation in this zone. Hence in this dynamic background, the Lushan  $M_s6.1$  earthquake occurred.

**Keywords:** the Lushan  $M_s6.1$  earthquake; the Lushan  $M_s7.0$  earthquake; focal mechanism solution; stress tensor variance;  $b$  value; stress state