

姜佳佳,冯建刚.2017年九寨沟7.0级地震前应力状态及 b 值异常特征研究[J].地震工程学报,2021,43(3):575-582.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.575

JIANG Jiajia,FENG Jian'gang.Stress State and b -value Anomalies before the Jiuzhaigou $M_S7.0$ Earthquake in 2017[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(3):575-582.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.575

2017年九寨沟7.0级地震前应力状态 及 b 值异常特征研究

姜佳佳¹,冯建刚^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站,甘肃兰州730000)

摘要:2017年8月8日青藏高原东缘四川九寨沟地区发生7.0级强震,依据前人研究结果分析九寨沟7.0级地震发震构造,并计算震前应力状态。结果显示:本次地震受到构造和历史强震的影响,是发生在历史强震引起的应力加载区域。另外,采用中国地震台网1990年以来的地震目录,在评估目录完整性的基础上,利用最大似然法计算得到2017年8月8日九寨沟7.0级地震前震源区及邻区地震 b 值空间图像。结果显示,九寨沟7.0级地震发生在四川北部地区显著低 b 值高应力异常区域内部($0.82 > b > 0.75$)。所以,研究区域内外历史强震可能促进了九寨沟7.0级地震的发生。

关键词:地震 b 值;应力变化;地震危险性;2017年九寨沟7.0级地震

中图分类号:P315

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2021)03-0575-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.575

Stress State and b -value Anomalies before the Jiuzhaigou $M_S7.0$ Earthquake in 2017

JIANG Jiajia¹, FENG Jian'gang^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: On August 8, 2017, an $M_S7.0$ earthquake occurred in Jiuzhaigou area, Sichuan Province. Based on the results of previous research, the seismogenic structure of the earthquake was analyzed and the stress state before the earthquake was calculated. The results showed that the $M_S7.0$ earthquake was affected by tectonic activity and historical strong earthquakes, and occurred in the stress loading area caused by historical strong earthquakes. In addition, based on the integrity evaluation of the earthquake catalogue of China Earthquake Network since 1990, the spatial images of seismic b -value in the epicenter area and adjacent areas before the Jiuzhaigou $M_S7.0$ earthquake were calculated by adopting the maximum likelihood method. The calculation

收稿日期:2020-10-12

基金项目:甘肃省地震局地震科技发展基金(2014Q04);甘肃省地震局地震科技发展基金(2021M2);甘肃省地震局科研创新团队(2019TD-02-01);中国地震局地震科技星火计划(XH14049);甘肃省科技计划项目(20JR10RA502)

第一作者简介:姜佳佳(1984-),女,工程师,主要从事地震活动性和地下流体学等研究。E-mail:285973114@qq.com。

通信作者:冯建刚(1977-),男,副研究员,主要从事地震活动性和数字地震波应用等研究。E-mail:fjgspring@163.com。

results showed that the $M_s7.0$ earthquake occurred in the region with significant low b -value and high stress anomalies of northern Sichuan ($0.82 > b > 0.75$). Therefore, the historical strong earthquakes in the study area may promote the occurrence of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake.

Keywords: seismic b -value; stress change; seismic risk; Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in 2017

0 引言

Gutenberg-Richter 公式反映了区域内地震震级与活动频次之间的关系^[1],其中 b 值表示区域内各个震级档地震次数间的比例关系,可用来表征研究区域的介质特征和应力状态^[2-5]。 b 值的异常变化与大地震的发生有一定的相关性^[6], b 值偏低时,介质内部应力较高,导致大破裂发生的可能性会增大,两者之间呈反相关^[2-3]。李全林等^[4]研究认为,介质承受平均应力的程度和接近强度极限的程度可用 b 值的高低表示,活动断裂带不同段落现今应力积累的相对水平也可用 b 值空间分布的高低程度揭示和推断,可能存在的凹凸体也可参照 b 值的大小来圈定,据此可进一步判断现今活动断裂带的强震危险性。另外, b 值可以作为所研究区域的地质构造指标^[7]。 b 值的高低与断层的尺度有关系,尤其是断层的宽度 W ,断层宽度与震级大小呈正相关,震级越大,断层宽度越大,当震级大到 $\lg M_0 = 27.2$ (M_0 为地震矩,该值单位为 $10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}$) 时, b 值会明显增大^[8]。

2017年8月8日四川九寨沟地区发生7.0级地震,震中位于东昆仑断裂带东端与岷山构造带交汇部位,构造上处于青藏高原东缘的巴颜喀拉块体东北部。该区域历史强震频发,最近三百多年相继发生了1713年叠溪7.0级地震、1748年漳腊北 $6\frac{1}{2}$ 级地震、1933年叠溪 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1938年松潘6.0级地震、1960年漳腊 $6\frac{3}{4}$ 级地震,以及1976年松潘—平武7.2、6.7、7.2级地震^[9,10](图1)。自1976年之后该地区进入平静期,九寨沟7.0级地震是该地区时隔41年来的又一次7级以上强震。国内外很多学者对于大地震之间的关系进行了研究,结果表明强震之间存在相互影响和相互作用的关系,主要表现在应力变化方面。Freed^[11]和King等^[12]研究表明强震所引起的同震或震后应力场变化,会使库伦应力增加区域的断层上负荷加载,促进地震的发生;反之则会推迟地震发生的时间。

本文依据前人研究成果分析了九寨沟地震前的应力状态,并采用中国地震台网观测资料,通过扫描计算得到了九寨沟7.0级地震前震源区及邻区地震 b 值的空间图像,并在误差分析的基础上,总结了该

区域震前 b 值的异常特征,为今后地震 b 值在该区域强震危险性判定中的应用积累了经验。

1 九寨沟 7.0 级地震构造背景及应力状态分析

从大区域的构造背景来看,印度板块以 $40 \sim 50 \text{ mm/a}$ 的相对速率俯冲于欧亚板块之下,经历 $50 \sim 55$ 百万年的时间造就了平均海拔超过 $4\ 000 \text{ m}$ 的青藏高原和广泛发育的活动断裂系统^[13]。青藏高原向东运动与四川盆地挤压碰撞,使巴颜喀拉块体东缘形成了陡立的地貌特征和复杂的构造格局^[14](图1),而松潘—甘孜块体就处于巴颜喀拉块体东缘,该块体记录了青藏高原向东北的运动过程和该区域新生代以来陆陆碰撞的远程效应^[15-16]。本次九寨沟7.0级地震就发生在晚第四纪构造活动强烈的巴颜喀拉块体东缘。

从九寨沟7.0级地震的发震位置来看,位于岷山构造带与东昆仑断裂带东端的交汇区域,附近主要断裂有岷江断裂、虎牙断裂与塔藏断裂^[17]。对于九寨沟7.0级地震具体的发震构造目前主要倾向于三种结论。易桂喜等^[17]研究了九寨沟7.0级地震震源机制解,结果显示本次地震和其余震的发震断裂为树正断裂,该断裂位于塔藏断裂与岷江断裂之间,其性质为左旋走滑。季灵运等^[20]通过对本次地震的研究揭示:本次地震同震位错以左旋走滑为主,大部分余震发生在库仑应力增加的区域;从构造上看是巴颜喀拉块体南东向运动与华南块体碰撞的结果,其发震断裂为树正断裂,该断裂可能属于虎牙断裂向NW方向延伸的一部分。付国超等^[21]研究认为,九寨沟7.0级地震属于走滑型地震,是晚第四纪以来塔藏断裂活动的表现,发震断裂可能是塔藏断裂的一条分支。谢祖军等^[22]通过对该地震的构造背景及库仑应力场等分析认为,本次地震震中位于东昆仑断裂带的转换区域,震源参数显示其性质为左旋走滑,与震中东北边的塔藏断裂性质较为一致,但位置不符;从发震位置来看,震中位于虎牙断裂西北端延长线附近,但其性质与虎牙断裂的性质不符;目前,众多专家的研究并未给出较为统一的发震断层。

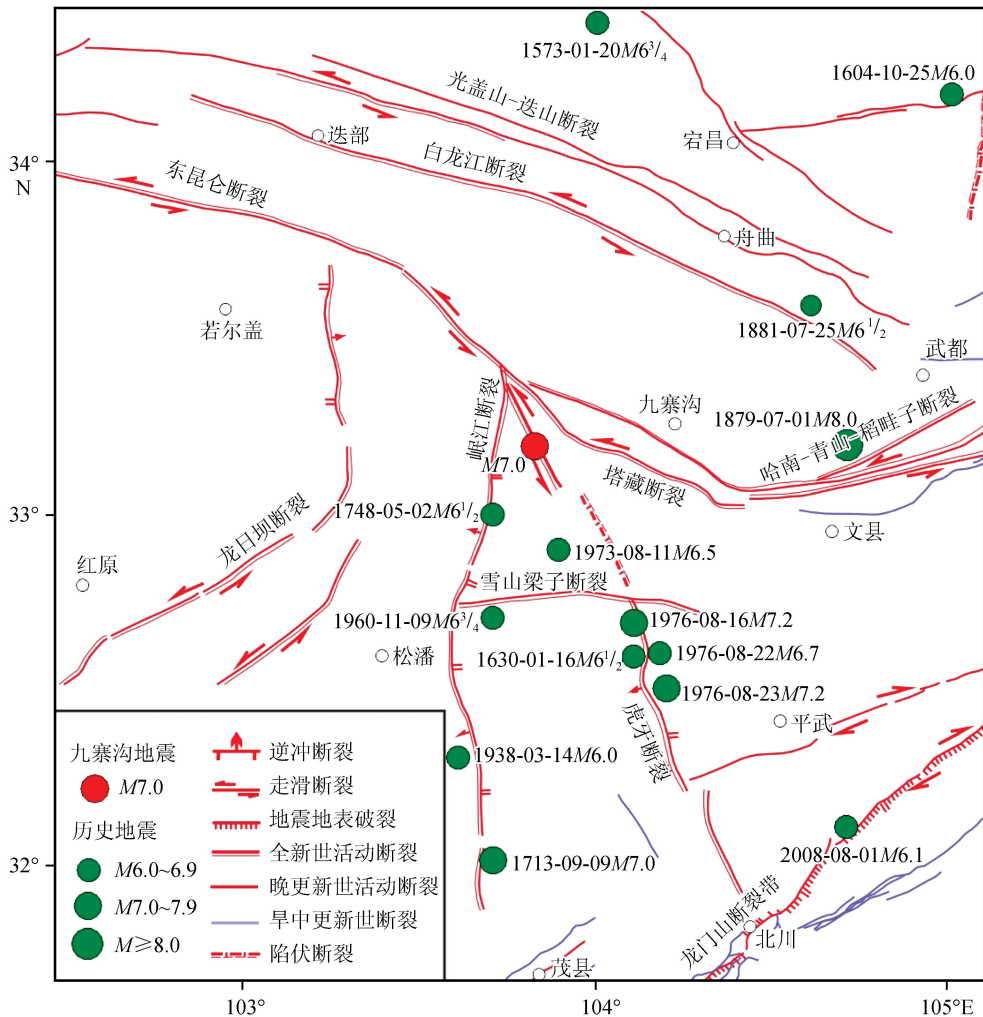


图 1 九寨沟 7.0 级地震附近区域活动构造与历史地震分布(据文献[17])

Fig.1 Distribution of active faults and historical earthquakes around the epicenter area of the Jiuzhaigou $M_S7.0$ earthquake (After reference[17])

从历史地震活动来看,九寨沟地震周边区域的强震活动较为活跃;虎牙断裂在 1973—1976 年间发生了 4 次大于 6.5 级的强震,其中含有 1976 年 8 月 16 日至 23 日松潘—平武 7.2 级、6.7 级、7.2 级三次地震组成的强震群^[23-25];岷江断裂自 20 世纪以来也发生了 2 次强震,分别为 1933 年叠溪 7.5 级地震和 1960 年漳腊 6.7 级地震;此外,2008 年 5 月 12 日,位于松潘—甘孜块体东南的龙门山断裂带上发生了汶川 8.0 级地震;2013 年 4 月 20 日芦山又发生了 7.0 级地震(图 1)。上述表明,研究区域主要断裂上都存在发生强震的可能。

从应力角度研究发现,强震的发生会引起震源区及周边区域断层上应力的加载或卸载,而周边区域和断层上应力的变化会促进和延迟后续地震的发生,因此可用强震同震及震后形变引起的应力变化来定量描述强震间的相互作用,并据此来研判相关

断裂带及区域的危险性,为震情判定提供参考依据^[26]。徐品等^[27]分析了巴颜喀拉块体东端历史强震的相互作用,认为 1976 年以来历史地震对于 2017 年九寨沟 7.0 级地震的发生具有促进作用,历史强震引起的应力变化在触发阈值附近波动。熊维等^[13]基于历史地震资料和岩石圈黏弹性分层介质模型,计算得到了 1654 年以来研究区历史地震序列同震及震后效应对九寨沟 7.0 级地震的影响,结果显示 1654—2008 年间历史强震的同震及震后效应引起了 2017 年九寨沟地震震源区的累积库伦应力增加,促进了九寨沟 7.0 级地震的发生。万永革等^[23]研究了巴颜喀拉地块东端 1976 年松潘地震序列,结果显示该强震序列、特别是该序列中 1976 年 8 月 16 日 7.2 级地震对 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震的发生具有显著的促进作用。单斌等^[28]研究认为汶川地震造成的同震及震后应力变化显著增

强了九寨沟地震震源处的应力积累,有效的促进了九寨沟地震的发生。

综合上述分析结果显示,本次九寨沟7.0级地震受到构造活动及历史强震的影响,发生在强震引起的应力加载区域内,历史强震可能促进了九寨沟7.0级地震的发生。

2 数据及方法

2.1 数据

研究范围为九寨沟7.0级地震震源区及其邻近区域(33.3~35.6°N, 101.6~106.6°E),该区域位于四川北部地区、甘川交界附近。计算九寨沟7.0级地震前震源区及邻区 b 值所选取的目录来自中国地震台网统一地震目录,即1990年1月1日至2017年8月7日的原始地震目录。首先对研究区域测震台网地震目录完整性进行分析,采用研究区域1990年以来 $M_L \geq 1.5$ 地震,震中分布如图2所示。通过计算得到研究区域 $M_L \geq 1.5$ 地震的震级-频度关系(图3),结果显示地震 b 值的拟合结果为 0.97 ± 0.016 。因此,在计算研究区域 b 值时,采用的最小完整性震级的下限为 $M_L \geq 1.9$ 。

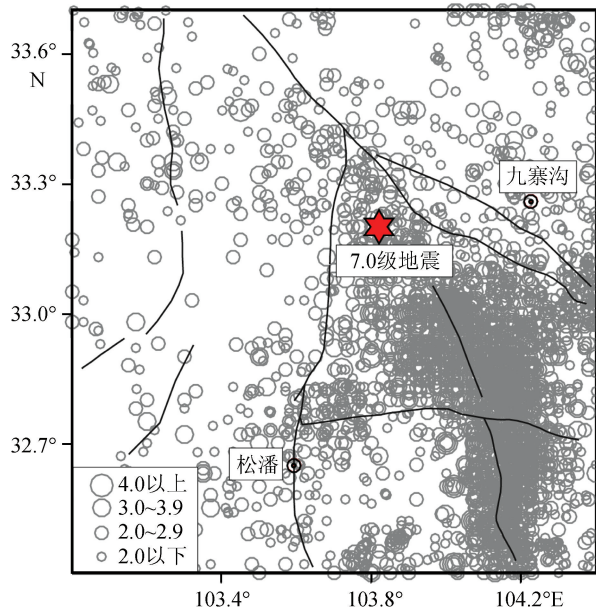


图2 九寨沟7.0级地震邻区小震震中分布图

Fig.2 Epicenter distribution of small earthquakes in the vicinity of the Jiuzhaigou 7.0 earthquake

2.2 地震 b 值计算方法及参数选择

目前计算 b 值最常用方法主要有:最大似然法和最小二乘法。通过比较,最大似然法相对于最小二乘法计算相对较为简便,并且在一定程度上可以

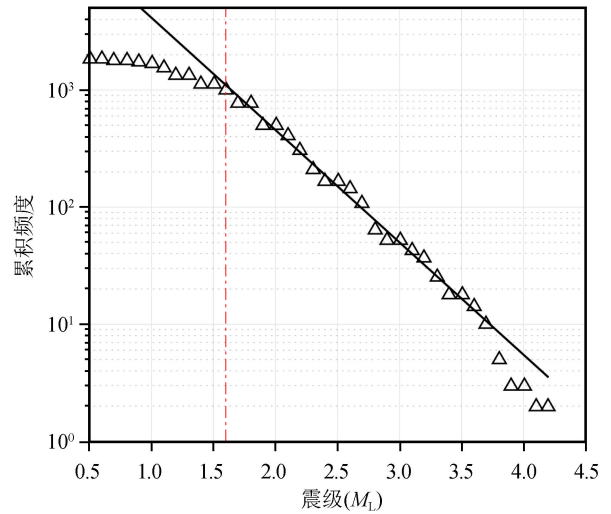


图3 九寨沟地震邻区地震震级-频度关系(1990-01-01—2017-08-07)

Fig.3 Magnitude-frequency relationship in the adjacent area of the Jiuzhaigou M_S 7.0 earthquake (1990-01-01—2017-08-07)

去除计算时样本中因个别较大地震所引起的 b 值突变,可避免个别大地震造成的较大误差,使最后得到的 b 值扫描结果更为科学、准确的反映研究区域的应力状态。因此,本文采用最大似然法计算九寨沟7.0级地震前震源区及邻区地震 b 值,在研究区域内进行网格化时,分别按0.05的步长对经纬度划分格点,选出以 r 为半径的圆形统计单元内 $M_L \geq 1.9$ 的地震事件。采用最大似然法[式(1)]计算各个网格点的地震 b 值,并且采用式(2)对 b 值的计算误差进行估计。

$$b = \frac{\lg e}{M - (M_c - \Delta M/2)} \quad (1)$$

$$\delta b = 2.30b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

式中: ΔM 代表震级分档,本文采用0.1进行分档; \bar{M} 代表大于等于起算震级的地震事件的平均震级; n 为计算 b 值所用的样本量(即研究区域内的每个网格内计算 b 值时所采用的地震的总次数)。在计算研究区域内的地震 b 值时,首先要计算区域内地震的最小完整性震级,一般采用累计频数法计算^[29-31],具体方法如下:按照时间顺序对每个网格区域内的地震事件进行线性累加,然后查找累加后累计曲线上出现的拐点(M_c),拐点对应的横坐标震级为研究区域内最小完整性震级,且 $M_c > M$,另外剔除小于 M_c 的地震后的样本数要 ≥ 40 个才能进行计算,如样本数小于40将不进行计算;之后对研究区域内每

个网格区域的 b 值分别进行计算,得到研究区域内的 b 值空间扫描结果。

已有的研究成果揭示,进行 b 值空间扫描时,区域内统计单元的半径 r 的大小会影响 b 值的高低,为了得到更加可靠可信的 b 值,计算时要依据研究区域内地震事件分布的集中程度来设置统计单元的半径 r 。所以,在计算本研究区域 b 值时,每个统计单元内地震事件样本量要 ≥ 40 个,首先将统计单元的半径 r 值设置为 15 km,如果统计单元内的样本量 < 40 个,不满足计算要求的条件,则将 r 值放大至 40 km 再进行计算。

3 地震 b 值在地震前的异常分析及特征

3.1 地震 b 值空间扫描结果及分析

通过对四川九寨沟 7.0 级地震前震源区及邻区的地震 b 值的空间扫描,得到了研究区域内不同网格区域的 b 值分布如图 4 所示,图中不同颜色代表了地震 b 值的高低。研究区域内的地震 b 值在 0.6~1.8 之间变化,存在 1 个明显的低 b 值区域($b < 0.82$),主要分布于塔藏断裂、岷江断裂和虎牙断裂的交汇区域。从低 b 值区域的大小与震级强度之间的可能关系来看,低 b 值异常范围越大,其强震潜在的危险性就越大^[32]。2017 年九寨沟 7.0 级地震就发生在扫描出的低 b 值异常区域内的边缘位置。1900 年以来本次地震震源区周围 100 km 范围内共记录到 5 级以上地震 19 次,其中 5.0~5.9 级 12 次、6.0~6.9 级 4 次、7.0~7.9 级 3 次。这些地震大多发生在 1977 年以前,主要集中区域为本次地震

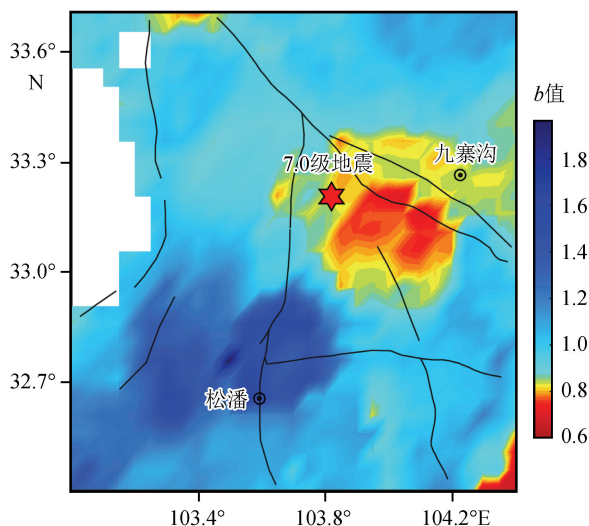


图 4 九寨沟地震前地震 b 值空间扫描结果

Fig.4 Spatial scanning results of seismic b -value before the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake

东南部;1977 年之后,该区域地震活动较为平静,至 2017 九寨沟 7.0 级地震前,41 年间仅在 2006 年发生过一次 5 级地震,即甘肃武都、文县间 5.0 级地震。2017 年九寨沟 7.0 级地震是发生在该区域长期平静的背景下。

3.2 地震 b 值空间扫描误差估计

本文用公式(2)来估算 b 值误差,从公式中可以看出,地震 b 值估计误差的大小与参与计算的地震震级下限、样本量多少等参数直接相关。一般来说,每个网格区域内参与计算的样本量越多,地震 b 值的估计误差就越小;震级下限选择必须大于等于研究区域内测震台网的最小完整性震级 M_c ^[33-37]。本文通过计算分析,得到研究区域的最小完整性震级 $M_c \geq 1.6$,依据该结果并结合研究区域内的实际地震样本量,将研究区域内参与 b 值计算的地震震级设定为 $M_L \geq 1.9$,结果显示参与计算 b 值的地震样本量 ≥ 40 的网格区域占 89.15%,可信度较高。图 5 给出了 1990 年 1 月 1 日至 2017 年 8 月 7 日地震 b 值空间扫描计算误差,结果显示绝大多数地震 b 值估计误差介于 0.025~0.165 之间,只有个别网格点的计算 b 值误差较大(> 0.2),误差估计高于 0.2 的占 3.16%。研究区域的地震 b 值空间扫描结果范围为 0.6~1.8,本次九寨沟 7.0 级地震前震源区及邻区的误差相对较小(< 0.09),误差均小于地震 b 值的变化范围,可信度较高。

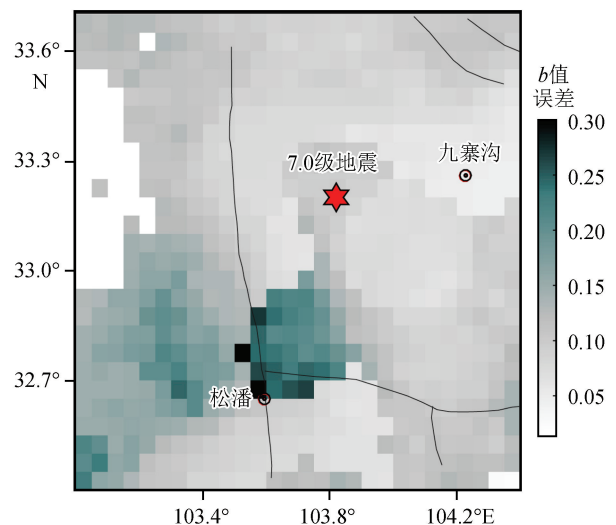


图 5 地震 b 值空间扫描计算误差分布图

Fig.5 Error distribution map of seismic b -value space scanning

4 结论与讨论

通过对 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地

震的发震构造、震前应力状态分析及震前震源区及邻区地震 b 值的空间扫描和误差分析,得到研究结果如下:

(1) 通过分析九寨沟 7.0 级地震发震构造和震前应力状态,结果显示本次地震是发生在历史强震引起的应力加载区域,是受到构造和历史强震影响的;主震发震构造主要倾向于震中附近的 3 条断裂:树正断裂、虎牙断裂和塔藏断裂。

(2) 研究区域内 b 值空间扫描结果显示:2017 年九寨沟 7.0 级地震前该区域为显著的低 b 值异常区域;从构造上看主要位于虎牙断裂、岷江断裂和塔藏断裂交汇区域。

(3) 本次地震前震源区及邻区 b 值误差分析结果显示均小于 0.09,小于地震 b 值的变化范围,可信度较高。

地震 b 值的空间扫描和应力分析相结合来判定地震发生的危险区域,能更有效的确定并缩小异常区域的范围,两者相结合可进一步确定强震危险区。九寨沟 7.0 级地震前 b 值扫描结果显示该区域处于低 b 值高应力状态;另外,通过对九寨沟 7.0 级地震震源区及邻区应力状态分析,该区域受到板块构造活动和历史强震活动的影响,震前也处于显著的应力加载区域,与震前地震 b 值空间扫描结果相符;两者均指示九寨沟 7.0 级地震发生在震前高应力区域。

参考文献(References)

- [1] GUTENBERG B, RICHTER, C. F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration [J]. *Bull Seism Soc Amer*, 1942, 32: 163-191.
- [2] MOGI K. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena [EB/OL]. 1962.
- [3] SCHOLZ C H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(1): 399-415.
- [4] 李全林, 陈锦标, 于泳, 等. b 值时空扫描: 监视破坏性地震孕育过程的一种手段 [J]. *地球物理学报*, 1978, 21(2): 101-125.
- LI Quanlin, CHEN Jinbiao, YU Lu, et al. Time and space scanning of the b -value—A method for monitoring the development of catastrophic earthquakes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1978, 21(2): 101-125.
- [5] 易桂喜, 闻学泽, 范军, 等. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性 & 地震危险性 [J]. *地震学报*, 2004, 26(3): 294-303.

- YI Guixi, WEN Xueze, FAN Jun, et al. Assessing current faulting behaviors and seismic risk of the Anninghe—Zemuhe fault zone from seismicity parameters [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(3): 294-303.
- [6] 冯建刚, 张辉, 杨萍. 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*, 2016, 36(1): 32-37.
- FENG Jianguang, ZHANG Hui, YANG Ping. Anomalies of b -value changes before the 2013 Minxian—Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake [J]. *Earthquake*, 2016, 36(1): 32-37.
- [7] QIN C, PAPADIMITRIOU E E, PAPAACHOS B C, et al. Spatial distribution of time-independent seismicity in China [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1999, 154(1): 101-119.
- [8] PACHECO J F, SCHOLZ C H, SYKES L R. Changes in frequency-size relationship from small to large earthquakes [J]. *Nature*, 1992, 355(6355): 71-73.
- [9] 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录 (公元 1912 年—1990 年) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [10] JONES L M, HAN W B, HAUKSSON E, et al. Focal mechanisms and aftershock locations of the songpan earthquakes of August 1976 in sichuan, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B9): 7697-7707.
- [11] FREED A M. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33(1): 335-367.
- [12] KING G C P, STEIN R S, LIN J. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(2): A50-A51.
- [13] 熊维, 王迪晋, 余鹏飞, 等. 历史强震对 2017 九寨沟 $M_w 6.5$ 地震的应力影响及区域地震危险性 [J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(1): 19-26.
- XIONG Wei, WANG Di Jin, YU Pengfei, et al. Coulomb stress impact on 2017 Jiuzhaigou $M_w 6.5$ earthquake induced by historical earthquakes and regional seismic hazard [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 19-26.
- [14] BURCHFIEL B C, CHEN Z L, YUPINC L, et al. Tectonics of the longmen shan and adjacent regions, central China [J]. *International Geology Review*, 1995, 37(8): 661-735.
- [15] 王椿镛, 韩渭滨, 吴建平, 等. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构 [J]. *地震学报*, 2003, 25(3): 229-241, 342.
- WANG Chunyong, HAN Weibin, WU Jianping, et al. Crustal structure beneath the songpan-garze orogenic belt [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, 25(3): 229-241, 342.
- [16] 单斌, 熊熊, 金笔凯, 等. 松潘—甘孜块体东北端强震间相互作用及地震危险性研究 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(7): 2329-2340.
- SHAN Bin, XIONG Xiong, JIN Bikai, et al. Earthquake stress interaction in the northeastern songpan-garze block and its implication for earthquake hazard [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(7): 2329-2340.

- [17] 易桂喜,龙锋,梁明剑,等.2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析[J].地球物理学报,2017,60(10):4083-4097.
YI Guixi, LONG Feng, LIANG Mingjian, et al. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 august 2017 $M7.0$ Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4083-4097.
- [18] YEATS R. Active Faults of the world[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [19] 陈威,乔学军,刘刚,等.基于 GNSS 与 InSAR 约束的九寨沟 $M_s7.0$ 地震滑动模型及其库仑应力研究[J].地球物理学报,2018,61(5):2122-2132.
CHEN Wei, QIAO Xuejun, LIU Gang, et al. Study on the coseismic slip model and coulomb stress of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake constrained by GNSS and InSAR measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 2122-2132.
- [20] 季灵运,刘传金,徐晶,等.九寨沟 $M_s7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析[J].地球物理学报,2017,60(10):4069-4082.
JI Lingyun, LIU Chuanjin, XU Jing, et al. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4069-4082.
- [21] 付国超,吕同艳,孙东霞,等.2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震发震构造浅析[J].地质力学学报,2017,23(6):799-809.
FU Guochao, LU Tongyan, SUN Dongxia, et al. Seismogenic structure of the $M_s7.0$ earthquake on august 8, 2017 in Jiuzhaigou, Sichuan[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(6): 799-809.
- [22] 谢祖军,郑勇,姚华建,等.2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源性质及发震构造初步分析[J].中国科学(地球科学),2018,48(1):79-92.
XIE Zujun, ZHENG Yong, YAO Huajian, et al. Preliminary analysis on the source properties and seismogenic structure of the 2017 $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(1): 79-92.
- [23] 王永革,沈正康,曾跃华,等.青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响[J].地震学报,2007,29(2):115-129.
WAN Yongge, SHEN Zhengkang, ZENG Yuehua, et al. Evolution of cumulative coulomb failure stress in northeastern Qinghai—Xizang (tibetan) plateau and its effect on large earthquake occurrence[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(2): 115-129.
- [24] 闻学泽.巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与 2008 年汶川、2013 年芦山和 2017 年九寨沟地震[J].地震学报,2018,40(3):255-267.
WEN Xueze. The 2008 Wenchuan, 2013 Lushan and 2017 Jiuzhaigou earthquakes, sichuan, in the last more than one thousand years of rupture history of the eastern margin of the bayan har block[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(3): 255-267.
- [25] 朱航,闻学泽.1973—1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程[J].地球物理学报,2009,52(4):994-1003.
ZHU Hang, WEN Xueze. Stress triggering process of the 1973 to 1976 songpan, sichuan, sequence of strong earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(4): 994-1003.
- [26] 熊维,谭凯,刘刚,等.2015 年尼泊尔 $M_w7.9$ 地震对青藏高原活动断裂同震、震后应力影响[J].地球物理学报,2015,58(11):4305-4316.
XIONG Wei, TAN Kai, LIU Gang, et al. Coseismic and post-seismic coulomb stress changes on surrounding major faults caused by the 2015 nepal $M_w7.9$ earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 4305-4316.
- [27] 徐晶,邵志刚,刘静,等.基于库仑应力变化分析巴颜喀拉地块东端的强震相互关系[J].地球物理学报,2017,60(10):4056-4068.
XU Jing, SHAO Zhigang, LIU Jing, et al. Analysis of interaction between great earthquakes in the eastern bayan har block based on changes of coulomb stress[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4056-4068.
- [28] 单斌,郑勇,刘成利,等.2017 年 $M7.0$ 级九寨沟地震同震库仑应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系[J].中国科学:地球科学,2017,47(11):1329-1338.
SHAN Bing, ZHEN Yong, LIU Chengli, et al. Coseismic coulomb failure stress changes caused by the 2017 $M7.0$ Jiuzhaigou earthquake, and its relationship with the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(11): 1329-1338.
- [29] 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等.甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J].地震学报,2012,34(5):646-658,727.
FENG Jiangan, JIANG Changsheng, HAN Libo, et al. Analysis on the monitoring capability of seismic networks and completeness of earthquake catalogues in Gansu region[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(5): 646-658, 727.
- [30] 易桂喜,闻学泽,辛华,等.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,2013,56(4):1112-1120.
YI Guixi, WEN Xueze, XIN Hua, et al. Stress state and major-earthquake risk on the southern segment of the Longmen shan fault zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1112-1120.
- [31] WYSS M. Fractal dimension and b -value on creeping and locked patches of the San andreas fault near parkfield, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 410-421.
- [32] 易桂喜,闻学泽,苏有锦.川滇活动地块东边界强震危险性研究[J].地球物理学报,2008,51(6):1719-1725.
YI Guixi, WEN Xueze, SU Youjin. Study on the potential strong-earthquake risk for the eastern boundary of the Si-

- chuan-Yunnan active faulted-block, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1719-1725.
- [33] 吴忠良. 关于 b 值应用于地震趋势预测的讨论[J]. 地震学报, 2001, 23(5): 548-551.
- WU Zhongliang. A Discussion on the application of b -value to the prediction of seismic tendency[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(5): 548-551.
- [34] 郑兆苾, 刘东旺, 沈小七, 等. 华北 b 值全时空扫描结果的可靠性及与地震的相关性[J]. 地震, 2001, 21(3): 8-14.
- ZHENG ZhaoBi, LIU Dongwang, SHEN Xiaoqi, et al. Reliability of time-space scanning results of b value and correlativity between b values and earthquakes with $M \geq 5.0$ in north China[J]. Earthquake, 2001, 21(3): 8-14.
- [35] 韩渭宾. b 值在地震预测中的三类应用及其物理基础与须注意的问题[J]. 四川地震, 2003(1): 1-5.
- HAN Weibin. Three applications of b -value in earthquakes prediction, its physical meanings and some tips[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2003(1): 1-5.
- [36] 刘正荣. b 值特征的研究[J]. 地震研究, 1995, 18(2): 168-173.
- LIU Zhengrong. Feature studies of b value[J]. Journal of Seismological Research, 1995, 18(2): 168-173.
- [37] 杨马陵, 曲延军. b 值的稳健估计及其在地震预报中的应用[J]. 地震, 1999, 19(3): 253-260.
- YANG Maling, QU Yanjun. Robust estimation of b value and its application to earthquake prediction[J]. Earthquake, 1999, 19(3): 253-260.
- *****
- (上接第 574 页)
- [27] 蒋锋云, 朱良玉, 王双绪, 等. 川滇地区地壳块体运动特征研究[J]. 地震研究, 2013, 36(3): 263-268.
- JIANG Fengyun, ZHU Liangyu, WANG Shuangxu, et al. Research on the characteristics of crustal block movement in Sichuan-Yunnan area[J]. Journal of Seismological Research, 2013, 36(3): 263-268.
- [28] 何畅, 冯志生. 极化方法在成都地磁台的应用研究[J]. 地震学报, 2017, 39(4): 558-564, 633.
- HE Chang, FENG Zhisheng. Application of polarization method to geomagnetic data from the station Chengdu[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(4): 558-564, 633.