2017年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震的地震学特征

安艳茹^{1,2}, 苏金蓉³, 薛艳¹, 张莹莹¹, 白兰淑¹, 刘杰^{1*}, 何少林¹, 杨志高¹, 杜广宝¹, 魏娅玲³, 吴微微³, 黄春梅³, 潘颖⁴

1. 中国地震台网中心, 北京 100045;
2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 四川省地震局, 成都 610041;
4. 江苏省地震局, 南京 210014

* 联系人, E-mail: liujie@seis.ac.cn

2017-11-02 收稿, 2017-12-05 修回, 2017-12-05 接受, 2018-02-11 网络版发表

中国地震局地震科技星火计划(XH17048)和中国地震局地震行业科研专项(201508012)资助

摘要 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震位于巴颜喀喇地块东边界带附近的虎牙断裂NNW方向的延长线上, 震源深度20 km, 震源机制解为左旋走滑型, 矩震级为 $M_w6.5$. 震后6 d内共记录到3000多次余震, 最大震级为 $M4.8$, 余震活动强度偏低但衰减正常. 主震位于余震区中部, 为双侧破裂. 余震区呈NNW向线性分布, 断层面近乎直立, 长度超过30 km, 破裂宽度约15 km. 余震区中部、东南部余震的震源机制大多与主震震源机制一致, 而西北部余震的震源机制均为逆冲型, 可能与岷江断裂有关. 余震区中部、东南部的应力也较西北部释放充分. 九寨沟地震最大烈度为9度, 记录的峰值加速度值NS向最大, EW向次之, 垂直向最小, 最近的强震台是九寨百河台, 其加速度反应谱低于九寨沟地区的8度设防烈度. 静态库仑应力研究表明, 汶川地震对九寨沟地震具有较明显的触发作用. 沿虎牙断裂发生的1973年松潘东北 $M_s6.5$ 地震, 1976年松潘 $M_s7.2$ 地震和本次九寨沟地震的余震区沿NNW方向相连. 结合主震破裂位移分布、余震的震源机制及应力降分析认为, 九寨沟地震余震区中部、东南部发生强余震的危险性不大, 但需注意余震区西北部及岷江断裂地震活动的发展.

关键词 九寨沟 $M_s7.0$ 地震, 地震震源机制, 余震精定位, 峰值加速度, 虎牙断裂, 库仑应力触发, 汶川地震

据中国地震台网测定, 2017年8月8日21时19分46秒在四川九寨沟(33.2°N, 103.82°E)发生 $M_s7.0$ 地震, 震源深度20 km. 截至8月13日20时, 地震共造成25人死亡, 525人受伤, 6人失联, 176492人受灾, 73671间房屋不同程度受损, 涉及阿坝州九寨沟、松潘、若尔盖、红原等4个县53个乡(镇)309个村(社区)(<http://www.sc.gov.cn/10462/12771/2017/8/14/10430678.shtml?winzoom=1>). 本文是九寨沟地震后中国地震局应急工作期间在地震学方面部分研究成果的汇总, 研究中使用了中国历史地震目录^[1,2]、速报目录、快报目录和

震相报告(<http://data.earthquake.cn>).

四川九寨沟地震是继2008年5月12日四川汶川 $M8.0$ 地震, 2013年4月20日四川芦山 $M7.0$ 大地震后, 四川地区再次发生的破坏性大地震. 从大地构造学上来看, 这3次地震都位于青藏高原的巴颜喀喇地块东边界带附近, 与印度板块向欧亚板块的汇聚有关, 汇聚造成了青藏高原的广泛隆升和地壳物质沿大型走滑断裂带块体状的东向运移, 受到华南地块四川盆地高强度块体的阻挡, 在青藏高原东缘形成了局部挤压推覆构造带及其前陆盆地系统^[3,4]. 从具体的

引用格式: 安艳茹, 苏金蓉, 薛艳, 等. 2017年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震的地震学特征. 科学通报, 2018, 63: 663–673

An Y R, Su J R, Xue Y, et al. Seismologic characteristics of the 2017, $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake, Sichuan, China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 663–673, doi: 10.1360/N972017-00919

地质构造情况看,九寨沟地震又与汶川和芦山地震不同. 汶川和芦山地震均发生在龙门山断裂带上, 它是一条SW-NE走向的断裂带^[5-7], 而九寨沟地震的震中位于龙门山断裂带以北, 已经超出了龙门山断裂带的范围.

九寨沟地震北部的塔藏断裂^[8]位于东昆仑断裂东段, 总体呈NW走向, 西起若尔盖盆地北缘, 以NNW向延伸至下黄寨村, 向东转为NW向, 经东北、塔藏、九寨沟, 至马家磨转为NNW向至沙尔里以东, 向南与岷江断裂^[9]衔接. 九寨沟地震距岷江断裂的北段最近处约为13 km, 且位于虎牙断裂^[10]的延长线附

近(图1).

1 主震震级与震源机制解

中国地震台网中心(China Earthquake Network Center, CENC)共使用107个国家地震台站测量九寨沟地震的面波震级, 从图2可以看出, 主震东部台站测量的面波震级值明显高于西部台站(表1), 方位角为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的台站中 $M_s \geq 7.0$ 的台站占总台站数的42.1%, 而 $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的台站中 $M_s \geq 7.0$ 的台站仅占总台站数的5.6%. 这种与台站方位角相关的震级优势分布与地震的震源破裂方向和地震波的辐射花样

图1 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的区域构造背景^[11]和历史强震分布

Figure 1 The distribution of historical strong earthquakes and tectonic setting in the $M_s 7.0$ Jiuzhaigou earthquake region

图2 CENC测量的台站面波震级(M_s)与方位角分布的关系. (a) 测量台站方位角的分布(绿色方块表示 $M_s < 7.0$ 的台站, 蓝色叉表示 $M_s = 7.0$ 的台站, 红色圆点表示 $M_s > 7.0$ 的台站); (b) 震级统计直方图

Figure 2 The relationship between distribution of stations' azimuth and M_s magnitude determined by CENC. (a) The distribution of stations' azimuth (green squares represent stations on which $M_s < 7.0$, blue crosses represent stations on which $M_s = 7.0$, and red points represent stations on which $M_s > 7.0$, respectively); (b) the histogram of magnitude

表 1 CENC及USGS发布的九寨沟 $M_s7.0$ 地震的震源机制解参数

Table 1 The focal mechanism solution parameters of $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake published by CENC and USGS

来源	矩震级(M_w)	深度(km)	节面1参数(°)			节面2参数(°)		
			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
CENC	6.5	11	326	62	-15	64	77	-151
USGS	6.5	13.5	153	84	-33	246	57	-173

有关^[12,13].

1966年1月以来,中国地震局一直采用郭履灿和庞明虎^[14]提出的以北京白家疃地震台为基准的面波震级公式进行测量:

$$M_s = \lg \left(\frac{A}{T} \right)_{\max} + 1.66 \lg \Delta + 3.5, \quad (1)$$

式中, A 是两水平分向面波地动位移的矢量和,以 μm 为单位; T 是相应的周期,以s为单位;震中距要求为 $1^\circ < \Delta < 130^\circ$,选用的面波周期值要求为 $3 \text{ s} \leq T \leq 25 \text{ s}$ ^[15,16].

另一方面,美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)使用的是由IASPEI^[17](<http://www.iaspei.org/commissions>)提出的公式计算面波震级:

$$M_s = \lg \left(\frac{A}{T} \right)_{\max} + 1.66 \lg \Delta + 3.3. \quad (2)$$

震中距要求为 $2^\circ < \Delta < 160^\circ$,选用的面波周期值要求为 $3 \text{ s} \leq T \leq 60 \text{ s}$.

对于此次地震,USGS使用了全球地震台网566个台站垂直向资料进行测定,平均结果为 $M_s6.8$ (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a5x1#executive>).对比CENC和USGS,除了测量方法存在差别以外,从计算公式的形式看,二者相差0.2.因此,扣除这些差异,两个机构的面波震级一致.

CENC利用Wphase方法^[18~20],使用 25° 震中距范围内的国家台,反演得到的九寨沟 $M_s7.0$ 主震的矩震级 M_w 为6.5,波形拟合的质心深度为11 km,推断此次地震为一次走滑型事件(图3,表1).该结果与USGS给出的矩震级、深度、断层性质的结果是一致的,但断层面走向在数值上相差近 180° ,显示其断层面方向一致,倾向相反,另外,倾角也存在一定差别(表1).其他学者给出的研究成果也各有不同,如易桂喜等人^[21]利用CAP波形反演方法给出的断层面倾向和倾角与USGS较为一致,但拟合的质心深度为5 km;杨宜海等人^[22]利用近震全波形反演方法给出的断层面倾向和倾角也与USGS较为一致,但拟合深度为

图 3 CENC与USGS发布的九寨沟 $M_s7.0$ 地震的震源机制解及CENC使用的台站分布

Figure 3 The focal mechanism solutions of $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake published by CENC and USGS, and the stations used by CENC

22 km, 这些差异与使用的台站及反演方法有关.

2 地震序列

截至2017年8月13日20时, 九寨沟 M_s 7.0地震共记录到余震3463次, 其中 M 4.0~4.9地震3次, M 3.0~3.9地震26次, 最大余震为 M 4.8. 表2给出了九寨沟地震序列 $M \geq 4.0$ 的余震目录, 图4给出了余震分布, 可以看出余震主要分布在岷山断块内, 呈NNW向线性分布, 在东南部更为紧凑. 所有4级及以上余震都分布在东南部, 这表明东南部的活动性比西北部要强, 这与主震破裂的位移分布一致(<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/275883.html>).

九寨沟地震序列的余震活动随时间呈起伏衰减, 震后3 d内比较活跃, 此后出现明显衰减, 计算得到的余震频度衰减系数 P 值^[23]为1.03, b 值^[24]为0.68(图S1), 与中国大陆强震序列的参数比较一致, 为正常余震活动. 但与震级值相同的2013年4月20日四川芦山地震相比, 九寨沟地震序列的余震强度明显偏低, 震后5 d内芦山地震共发生 $M \geq 3.0$ 的余震108次, 而九寨沟地震仅发生 $M \geq 3.0$ 的余震29次. 一般情况下, 7级地震后会有5级以上余震发生, 如芦山地震发生 $M \geq 5.0$ 的余震3次, 而九寨沟却未发生. 余震活动差异较大原因可能与震源破裂方式和震源区域构造复杂程度有关. 本文采用双差方法^[25]对地震序列进行精定位. 截至2017年8月13日20时, 重定位后得到了603个余震的位置(图5), 其中EW向、NS向和垂直向的定位误差分别为0.81, 0.84和1.59 km. 余震主要呈NNW方向分布, 余震区长度超过30 km, 东南部余震分布较集中, 西北部有些分散. 主震位于余震区中部, 深度较深, 根据余震展布情况, 可以看出此次地震为双侧破裂. 一方面, 断面面近乎直立, 破裂宽度约15 km, 向NE方向有一定倾斜, 据此推测本文得到的主震震源机制解节面1为发震断层(表1), 与USGS

表2 九寨沟 M_s 7.0地震和 $M \geq 4.0$ 余震目录

Table 2 The catalogue of M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake and aftershocks of $M \geq 4.0$

日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒)	纬度(N)	经度(E)	深度 (km)	震级 (M)
2017-08-08	21:19:46	33.20°	103.82°	20	7.0
2017-08-09	10:17:02	33.16°	103.86°	26	4.8
2017-08-10	05:05:54	33.16°	103.85°	26	4.3
2017-08-10	17:48:34	33.22°	103.85°	26	4.1

图4 九寨沟 M_s 7.0地震余震序列(截至2017年8月13日20时). (a) 九寨沟 M_s 7.0地震余震分布图; (b) 九寨沟 M_s 7.0地震 M - t 图

Figure 4 The aftershock sequence of M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake (up to 20:00 on August 13th, 2017). (a) The aftershock distribution of M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake; (b) the M - t cartogram

给出的倾向为SE方向不同; 另一方面, USGS给出的倾角为 84° , 而本文得到的倾角为 62° , 对比上述精定位结果, USGS得到的倾角更合理. 上述分析可能反映, 对这种近乎直立的走滑断层的震源机制解, 目前反演得到的震源机制解在倾角上误差比较大, 当然, 与所用台站分布对结果的约束也有关系(图3), 本文结果在西北方向分布的台站数量比较少.

3 余震震源机制及应力降

截至2017年8月13日20时, 采用CAP方法^[26-28]反演得到了九寨沟 M_s 7.0地震的余震震源机制. 余震区西北部4次余震的震源机制均为逆冲型, 这可能与西侧的岷江断裂有关; 余震区中部及东南部的12次余震中有11次地震的震源机制均为走滑型事件(图6), 其中 M 4.0及以上的3次余震全部为走滑型事件, 与主

图5 九寨沟 $M_{5.7.0}$ 地震序列余震精定位图(截至2017年8月13日20时)

Figure 5 Relocated aftershock sequence of $M_{5.7.0}$ Jiuzhaigou earthquake (upto 20:00 on August 13th, 2017)

图6 2017年8月8日九寨沟 $M_{5.7.0}$ 地震的余震震源机制及应力降(截至2017年8月13日20时)

Figure 6 Focal mechanism solutions and stress drop of $M_{5.7.0}$ Jiuzhaigou earthquake aftershocks (upto 20:00 on August 13th, 2017)

震一致,表明主震后震区持续以左旋走滑的方式释放应力。

余震的应力降^[29]分布结果显示东南部较低,西北部较高(图6)。结合主震的破裂过程,余震区中部、东南部为这次地震双侧破裂的主破裂区,应力释放

较西北部释放更为充分。考虑到与主震具有不同类型的震源机制,需注意西北部有发生强余震的危险。

4 强震动观测

据国家强震动台网中心产出的“强震动观测简报”2017年第4期资料^[30],本次主震共收到67组加速度记录,其中四川九寨沟百河强震台测得的震中距为30.5 km,原始记录见图S2,其东西、南北、垂直向加速度峰值分别为 -129.5 , -185.0 , -124.7 cm/s^2 ,速度峰值分别为 -3.9 , 6.6 , 2.5 cm/s ,计算仪器地震烈度为6.2度。与2013年四川芦山 $M7.0$ 地震类似震中距的结果相比明显偏低^[31],这可能与九寨沟地震的震源深度较深、震源机制为走滑有一定关系。

图7给出九寨沟地震现场发布的烈度分布、台站记录的峰值加速度以及仪器烈度分布图。九寨沟地震发布的最高烈度为9度,6度圈内共有4个台站,仪器烈度与发布烈度相比有些偏低。从图7可以看出:随震中距增加,加速度峰值衰减很快,在震中距83 km的甘肃沙湾台,加速度峰值三分向最大已衰减至20 gal,即仪器地震烈度4.1度;对多数台站,三分向加速度峰值记录中,南北向(NS)最大、东西向(EW)

图7 九寨沟地震的烈度、峰值加速度、仪器烈度分布图

Figure 7 Distribution of intensity, peak acceleration and instrumental intensity in $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake region

次之、垂直向(UD)相对最小,尤其在40 km近场内,NS向达到EW向的1.5倍,这种情况可能与地震的破裂方向相关。

图S3是震中距最近的九寨沟百河台加速度反应谱图,高值主要分布在0.1~0.5 s的周期范围。2008年汶川地震后九寨沟地区建筑物基本经过重建,抗震性能较好,设防烈度达到8度^[32,33],高于百河台的地震反应谱,而这次地震的9度区位于景区内部,地震发生在晚上,当时人员稀少,这些因素可能是这次地震造成伤亡较低的原因。

5 虎牙断裂历史地震序列

岷山断块位于巴颜喀喇地块东边界附近,西以岷江断裂为界,东边界为虎牙断裂^[34]。历史地震活

动的空间分布特征表明,岷山断块6级以上强震丛集于断块边界断裂带上,如岷江断裂上的1748年 $6^{1/2}$ 级地震和1960年 $6^{3/4}$ 级地震,以及虎牙断裂上的1630年 $6^{1/4}$ 级地震、1973年 $M_s6.5$ 地震和1976年 $M_s7.2$, $M_s6.7$ 和 $M_s7.2$ 地震等(图1),而中小地震往往发生于新构造隆起区和近EW向断裂上^[35]。岷江断裂带第四纪以来表现为明显的推覆逆掩运动并具有一定的左旋走滑分量,其平均左旋滑动量与垂直位错量大致相同,虎牙断裂也具有一定的左旋走滑性质^[35]。其中,1976年松潘3次6级以上地震都发生在虎牙断裂上,均是以倾向滑动为主带走滑成分的左旋逆掩错动^[36]。

图8给出1973年8月松潘东北 $M_s6.5$ 地震、1976年8月松潘 $M_s7.2$ 地震以及这次九寨沟地震的余震分布,可以看到,这3组地震的余震区基本上连接在一起,

图8 1973年松潘东北 $M_{\text{s}}6.5$ (绿色点)、1976年松潘 $M_{\text{s}}7.2$ (蓝色点)与2017年九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$ (红色点)地震及其余震空间分布图

Figure 8 The distribution of main shock and the corresponding aftershocks of $M_{\text{s}}6.5$ earthquake at Northeast of Songpan in 1973 (green point), $M_{\text{s}}7.2$ Songpan earthquake in 1976 (blue point), and $M_{\text{s}}7.0$ Jiuzhaigou earthquake in 2017 (red point)

走向沿NNW分布,与虎牙断裂方向大体一致.因此,根据九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$ 地震的地质构造背景、震源机制解、余震分布及历史地震的发震构造,可综合判断出此次地震主要是受虎牙断裂的控制,即虎牙断裂在深部可能向NW方向延伸.同时,这也表明九寨沟余震区东南部再次发生强余震的可能性较小.

6 汶川地震以来4次强震对九寨沟地震的静态应力触发

本文利用Coulomb3.3软件^[37]计算2008~2013年甘青川交界附近发生的4次 $M6.5$ 以上地震对2017年8月8日九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$ 地震的静态库仑应力触发情况^[38,39].

运用库仑准则,断层面上库仑破裂应力可以表示为

$$\sigma_f = \tau' + \mu' \sigma_n, \quad (3)$$

其中, τ' 为滑动方向的剪应力, σ_n 为滑动面上所受的正应力,其中剪应力右旋为正,正应力拉张为正.在计算中,参照Stein等人^[40]和King等人^[41]的研究,选取视摩擦系数 $\mu'=0.4$.

2008年5月12日四川汶川 $M8.0$,2010年4月14日青海玉树 $M7.1$,2013年4月20日四川芦山 $M7.0$ 和2013

年7月20日甘肃岷县-漳县 $M6.6$ 地震的震源模型主要来源于王卫民等人^[42,43]、王洵等人^[44]、孙蒙等人^[45]利用地震波反演给出的结果.本文将该结果直接加入到断层分段模型中,计算这些地震在本文给出的九寨沟质心深度11 km处的库仑应力变化情况.接收断层参数来源于本文震源机制解参数,即断层走向为 326° ,倾角 62° ,滑动角 -15° .

计算结果显示,汶川 $M8.0$ 、玉树 $M7.1$ 、芦山 $M7.0$ 与岷县-漳县 $M6.6$ 地震在本次 $M_{\text{s}}7.0$ 地震的质心矩震源处(103.82°E , 33.2°N)分别造成库仑破裂应力增加了 0.0130803 , -0.000007 , -0.00001 与 0.0001027 MPa(图S4),即汶川地震与岷县-漳县地震有利于九寨沟地震的发生,而芦山地震与玉树地震对九寨沟地震具有相对微小的抑制作用.在这4次地震中,仅汶川地震对九寨沟地震具有触发作用,达到触发阈值 0.01 MPa^[46],其他3次地震引起的应力变化非常小.汪建军等人^[47]给出的库仑应力变化结果表明,汶川 $M8.0$ 地震对九寨沟地震具有一定的促进作用,而芦山 $M7.0$ 地震对此次地震的触发作用可以忽略不计,这与本文的研究结果一致.

7 讨论与结论

2017年8月8日四川九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$ 地震是继2008年5月12日四川汶川 $M8.0$,2013年4月20日四川芦山 $M7.0$ 大地震后,四川地区再次发生的破坏性地震.本文通过对九寨沟地震多方面地震学特征的研究,对这次地震的地震学特征取得如下认识.

本文使用107个中国国家地震台站测量得到的面波震级为 $M_{\text{s}}7.0$,与CENC速报的震级一致,不考虑系统定义差异,与USGS结果也是一致的.震级值随台站的方位角变化出现明显差别,其中东部台站的测量值明显高于西部台站,这与震源破裂方向和地震波的辐射花样有关,因此选择分布均匀、小孔隙角的台网对获得合理的面波震级至关重要.

利用W-phase方法反演得到的震源机制解为左旋走滑型,断层面为NNW方向,矩震级为 $M_{\text{w}}6.5$,质心深度为11 km,而此次地震的初始破裂深度即震源深度为20 km,精定位也显示主震的震源深度大于20 km.与一般地震质心深度为几千米,震源深度十几千米相比,这次九寨沟地震的震源深度相对较深.上述结果与USGS结果一致,但在断层面倾向和倾角上有所差异,结合精定位结果,我们认为该断层面近乎直立.

经统计,震后6 d震区共发生3000多次余震,最大余震震级为 $M4.8$,余震频度衰减系数 P 值为1.03,震级频度关系中的 b 值为0.68,与中国大陆其他强震序列相比,余震活动强度偏低但余震衰减正常.精定位结果显示:主震位于余震区中段的下部,为双侧破裂;余震区呈NNW向线性分布,断层面近乎直立,长度超过30 km,破裂宽度约15 km.余震主要分布在岷山断块内,与塔藏断裂、岷江断裂方向不一致,但与虎牙断裂向NNW方向延伸相一致.

本文反演得到了震后6 d内余震的震源机制解及应力降,结果表明余震区西北部余震的震源机制均为逆冲型,这可能与西侧的岷江断裂有关;主震中部、东南部12次地震中有11次地震的震源机制均为走滑型.应力降的结果显示余震区西北部比东南部高,分析认为余震区中部、东南部应力释放较西北部充分,应注意西北部有发生强余震的危险.

九寨沟地震最高烈度为9度,峰值加速度值随震中距衰减很快,NS向最大、EW向次之、垂直向最小.最近九寨百河台强震台的峰值加速度、峰值速度和仪器地震烈度,较芦山 $M7.0$ 地震相似震中距的结果明显偏低.2008年汶川地震后九寨沟地区建筑物基本经

过重建,抗震性能较好,设防烈度达到8度,高于九寨百河台的地震反应谱,而9度区位于景区内部,地震发生时人员稀少,这些因素可能是这次地震造成伤亡较低的原因.

从构造上来看,九寨沟地震发生在岷山断块边界附近,位于虎牙断裂NNW方向的延长线上.一方面,综合考虑九寨沟地震的地质构造背景、震源机制解、余震分布及历史地震发震构造等,可判断出此次地震主要是受虎牙断裂控制,即虎牙断裂在深部可能向西北方向延伸.另一方面,考虑到虎牙断裂上1973年以来强震的余震区分布已相连,认为九寨沟地震余震区东南部再次发生强余震的危险性不大.然而,由于九寨沟地震距西侧NS向的岷江断裂最近处仅为13 km,且西北部的部分余震的震源机制显示,该地区余震活动与岷江断裂有关,推测九寨沟地震可能会增强岷江断裂地震的活动.

大地震的发生会导致构造区域大范围的应力调整,本文计算了2008~2013年甘青川交界附近发生的4次 $M6.5$ 及以上地震对此次地震的静态库仑应力情况.结果表明,仅汶川地震的触发作用较为明显,即九寨沟地震与汶川地震后该地区的应力调整有关.

致谢 本文是在九寨沟地震发生后很短时间内完成的,中国地震台网中心和四川省地震局在第一时间快速产出的速报目录、快报目录、震相报告,中国地震局工程力学研究所“国家强震动台网中心”提供的强震数据,任叶飞老师提供的加速度反应谱数据,均成为本文重要的研究资料,在此一并致谢!

参考文献

- 1 Earthquake Prevention and Defense Department of National Earthquake Administration. Catalogue of Strong Earthquakes in Chinese History: Twenty-third Century BC–1911 (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1995 [国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录: 公元前 23 世纪—公元 1911 年. 北京: 地震出版社, 1995]
- 2 Earthquake Prevention and Defense Department of China Earthquake Administration. Catalogue of Chinese Earthquakes 1912–1990, $M_s \geq 4.7$ (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1999 [中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录: 公元 1912 年~1990 年, $M_s \geq 4.7$. 北京: 中国科学技术出版社, 1999]
- 3 Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure (in Chinese). Seismol Geol, 2008, 30: 597–629 [徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, 30: 597–629]
- 4 Niu Z J, Wang M, Sun H R, et al. Contemporary velocity field of crustal movement of Chinese mainland from Global Positioning System measurements. Chin Sci Bull, 2005, 50: 939–941
- 5 Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, Sichuan, China (in Chinese). Chin J Geophys, 2008, 51: 1066–1073 [张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, 51: 1066–1073]
- 6 Chen L C, Ran Y K, Wang H, et al. The Lushan $M_s 7.0$ earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone (in Chinese). Chin Sci Bull, 2013, 58: 1925–1932 [陈立春, 冉勇康, 王虎, 等. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性. 科学通报, 2013, 58: 1925–1932]
- 7 Chen G G, Ji F J, Zhou R J, et al. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since Late Quaternary (in Chinese).

- Seismol Geol, 2007, 29: 657–673 [陈国光, 计凤桔, 周荣军, 等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究. 地震地质, 2007, 29: 657–673]
- 8 Zhang J L, Ren J W, Fu J D, et al. Earthquake rupture features and tectonics significance of the Tazang fault in the eastern part of the east Kunlun fault zones (in Chinese). Earthquake, 2012, 32: 1–16 [张军龙, 任金卫, 付俊东, 等. 东昆仑断裂带东部塔藏断裂地震地表破裂特征及其构造意义. 地震, 2012, 32: 1–16]
- 9 Qian H, Zhou R J, Ma S H, et al. South segment of Minjiang fault and Diexi earthquake in 1933 (in Chinese). Earthq Res China, 1999, 15: 333–338 [钱洪, 周荣军, 马声浩, 等. 岷江断裂南段与 1933 年叠溪地震研究. 中国地震, 1999, 15: 333–338]
- 10 Zhao X L, Deng Q D, Chen S F. Tectonic geomorphology of the Minshan uplift in western Sichuan, Southwestern China (in Chinese). Seismol Geol, 1994, 16: 429–439 [赵小麟, 邓起东, 陈社发. 岷山隆起的构造地貌学研究. 地震地质, 1994, 16: 429–439]
- 11 Deng Q D. Maps of Active Tectonics of China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007 [邓起东. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社, 2007]
- 12 Cesca S, Heimann S, Stammler K, et al. Automated procedure for point and kinematic source inversion at regional distances. J Geophys Res, 2010, 115: 1–24
- 13 Wan Y G. Introduction to Seismology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [万永革. 地震学导论. 北京: 科学出版社, 2016]
- 14 Guo L C, Pang M H. Surface-wave magnitude of earthquakes and its station correction (in Chinese). Acta Seismol Sin, 1981, 3: 312–320 [郭履灿, 庞明虎. 面波震级和它的台基校正. 地震学报, 1981, 3: 312–320]
- 15 Han X J, Ma Y L, Liu R F. The measurement method research of the new IASPEI standard broadband surface wave magnitude (in Chinese). Seismol Geomag Obs Res, 2011, 32: 9–12 [韩雪君, 马延路, 刘瑞丰. IASPEI 宽频带面波震级的测定方法研究. 地震地磁观测与研究, 2011, 32: 9–12]
- 16 Bormann P, Liu R, Xu Z, et al. First application of the new IASPEI teleseismic magnitude standards to data of the China National Seismographic Network. Bull Seism Soc Am, 2009, 99: 1868–1891
- 17 The Working Group on Magnitudes of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI) Commission on Seismological Observation and Interpretation. Summary of Magnitude Working Group recommendations on standard procedures for determining earthquake magnitudes from digital data. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), 2013
- 18 Duputel Z, Rivera L, Kanamori H, et al. W-phase fast source inversion for moderate to large earthquakes (1990–2010). J Geophys Res, 2012, 117: 1125–1147
- 19 Hayes G P, Rivera L, Kanamori H. Source inversion of the W-phase: Real-time implementation and extension to low magnitudes. Seismol Res Lett, 2009, 80: 800–805
- 20 Kanamori H, Rivera L. Source inversion of W phase: Speeding up seismic tsunami warning. Geophys J Int, 2008, 175: 222–238
- 21 Yi G X, Long F, Liang M J, et al. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 $M7.0$ Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan (in Chinese). Chin J Geophys, 2017, 60: 4083–4097 [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. 地球物理学报, 2017, 60: 4083–4097]
- 22 Yang Y H, Fan J, Hua Q, et al. Inversion for the local mechanisms of the 2017 Jiuzhaigou $M7.0$ earthquake sequence using near-field full waveforms (in Chinese). Chin J Geophys, 2017, 60: 4098–4104 [杨宜海, 范军, 花茜, 等. 近震全波形反演 2017 年九寨沟 $M7.0$ 地震序列震源机制解. 地球物理学报, 2017, 60: 4098–4104]
- 23 Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks. Geophys Mag, 1961, 30: 521–605
- 24 Sornette D, Sornette A. General theory of the modified Gutenberg-Richter law for large seismic moments. Bull Seismol Soc Am, 1999, 89: 1121–1130
- 25 Wald H F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. Bull Seismol Soc Am, 2000, 90: 1353–1368
- 26 Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms. Bull Seismol Soc Am, 1994, 84: 91–104
- 27 Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. Bull Seismol Soc Am, 1996, 86: 1634–1641
- 28 Zhu L, Rivera L A. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. Geophys J Int, 2002, 148: 619–627
- 29 Kanamori H. Mechanics of earthquakes. Annu Rev Earth Planet Sci, 1994, 22: 207–237
- 30 Station Network Center of Strong Motion. The brief report of strong motion observation (in Chinese). 2017, 4 [国家强震动台网中心. 强震动观测简报. 2017, 4]
- 31 Ren Y F, Wen R Z, Zhou B F, et al. The characteristics of strong ground motion of Lushan earthquake on April 20, 2013 (in Chinese). Chin J Geophys, 2014, 57: 1836–1846 [任叶飞, 温瑞智, 周宝峰, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析. 地球物理学报, 2014, 57: 1836–1846]

- 32 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Building GB50011-2010 (in Chinese). Beijing: China Architecture Industry Press, 2010 [中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范 GB50011-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010]
- 33 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China GB18306-2015 (in Chinese). Beijing: Standard Press of China, 2015 [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图 GB18306-2015. 北京: 中国标准出版社, 2015]
- 34 Deng Q D, Gao X, Chen G H, et al. Recent tectonic activity of Bayankala fault-block and the Kunlun-Wenchuan earthquake series of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2010, 17: 163–178 [邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 青藏高原昆仑-汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动. *地学前缘*, 2010, 17: 163–178]
- 35 Zhou R J, Pu X H. Recent activity of Minjiang fault zone, uplift of Minshan block and their relationship with seismicity of Sichuan (in Chinese). *Seismol Geol*, 2000, 22: 285–294 [周荣军, 蒲晓虹. 四川岷江断裂带北段的新活动, 岷山断块的隆起及其与地震活动的关系. *地震地质*, 2000, 22: 285–294]
- 36 Fang G R, Zhou H L. Rupture mechanism of the Songpan earthquake of $M_{6.7}$ on 22 August 1976 (in Chinese). *Earthq Res China*, 1986, 2: 75–78 [房桂荣, 周惠兰. 1976年8月22日松潘6.7级地震的破裂机制. *中国地震*, 1986, 2: 75–78]
- 37 Toda S, Stein R S, Sevilgen V, et al. Coulomb 3.3 graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching user guide. Open File Report. Reston: U.S. Geological Survey, 2011
- 38 Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L17305, doi: 10.1029/2008GL034903
- 39 Lin J, Stein R S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *J Geophys Res Sol Earth*, 2004, 109: B02303, doi: 10.1029/2003JB002607
- 40 Stein R S, King G C, Lin J. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.4 Landers earthquake. *Science*, 1992, 258: 1328–1332
- 41 King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seismol Soc Am*, 1994, 84: 935–953
- 42 Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the $M_{8.0}$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 1403–1410 [王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川8.0级地震震源过程. *地球物理学报*, 2008, 51: 1403–1410]
- 43 Wang W M, Hao J L, Yao Z X. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 1412–1417 [王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果. *地球物理学报*, 2013, 56: 1412–1417]
- 44 Wang X, Zhou Y, Sun M, et al. Rupture process of the 2010 $M_{6.9}$ Yushu earthquake in Qinghai Province. *Geol Bull Chin*, 2014, 33: 517–523 [王洵, 周云, 孙蒙, 等. 青海玉树 $M_{6.9}$ 级地震震源破裂过程. *地质通报*, 2014, 33: 517–523]
- 45 Sun M, Wang W M, Wang X, et al. Rupture process of the Minxian-Zhangxian, Gansu, China $M_{6.6}$ earthquake on 22 July 2013 (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1909–1918 [孙蒙, 王卫民, 王洵, 等. 2013年7月22日甘肃岷县-漳县 $M_{6.6}$ 地震震源破裂过程. *地球物理学报*, 2015, 58: 1909–1918]
- 46 Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24347–24358
- 47 Wang J J, Xu C J. Coseismic Coulomb stress changes associated with the 2017 $M_{6.5}$ Jiuzhaigou earthquake (China) and its impacts on surrounding major faults (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2017, 60: 4398–4420 [汪建军, 许才军. 2017年 $M_{6.5}$ 九寨沟地震激发的同震库仑应力变化及其对周边断层的影响. *地球物理学报*, 2017, 60: 4398–4420]

补充材料

- 图 S1 九寨沟 $M_{7.0}$ 地震序列
图 S2 四川九寨沟台强震动记录图
图 S3 九寨沟台加速度反应谱图
图 S4 静态库仑应力研究

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “2017 年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震的地震学特征”

Seismologic characteristics of the 2017, $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake, Sichuan, China

Yanru An^{1,2}, Jinrong Su³, Yan Xue¹, Yingying Zhang¹, Lanshu Bai¹, Jie Liu^{1*}, Shaolin He¹, Zhigao Yang¹, Guangbao Du¹, Yaling Wei³, Weiwei Wu³, Chunmei Huang³ & Ying Pan⁴

¹ China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;

² Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

³ Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China;

⁴ Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

* Corresponding author, E-mail: liujie@seis.ac.cn

The $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake with the hypocenter depth of 20 km occurred at the NNW extension line of the Huya fault located next to the eastern boundary of the Bayan Har block. The focal mechanism solution of the mainshock based on the W-phase source inversion showed a sinistral slip and the moment magnitude was M_w 6.5. Over 3000 aftershocks were recorded within six days, among which the largest was $M4.8$ and three others were larger than $M4.0$. The value of the aftershock frequency attenuation coefficient P was 1.03, and the b value of the magnitude-frequency relationship was 0.68. The aftershock activities were relatively inactive but the attenuation was normal. Relocation results of 603 aftershocks were obtained by using the double-difference earthquake location algorithm and the location errors of the EW, NS and the vertical directions were 0.81, 0.84 and 1.59 km respectively. The mainshock occurred in the center of the aftershock region and ruptured on both sides along the strike direction. The aftershocks were distributed linearly along a NNW direction, and the fault plane was nearly vertical with a length over 30 km and a width of about 15 km. Aftershocks were more concentrated in the southeast than in the northwest. The focal mechanism solutions of most aftershocks in the central and southeastern regions were consistent with the mainshock, while those in the northwest were thrust-types, which might be related to the Minjiang fault. Meanwhile, the regional stress was released more in the central and southeastern regions than in the northwest. The maximum intensity investigated in the damage zone was up to IX. The maximum intensity region was located in scenic areas, therefore few people were present when the earthquake occurred at night. The peak acceleration was highest in the NS records, followed by the EW and vertical records. The design spectra of intensity for Jiuzhaigou was VIII, which is higher than the acceleration response spectra obtained from the Jiuzhaibaihe station, the nearest station which had strong motion recordings. These aforementioned factors may have contributed to the minor casualties resulting from this earthquake. The aftershock regions of the Jiuzhaigou earthquake, the 1973 $M_s6.5$ Songpan northeast earthquake, and the 1976 $M_s7.2$ Songpan earthquake are connected along the Huya fault which may extend to the northwest in the deep earth. Considering the rupture displacement distribution of the mainshock, the focal mechanism of aftershocks, and the stress drop, strong aftershocks are unlikely to occur in the central and southeastern Jiuzhaigou aftershock regions; however, the development of seismicity in the northwest and the Minjiang River fault should be noted. Static Coulomb stress triggering of other 4 earthquakes larger than $M6.5$ occurred near the Gan-qingchuan border were calculated using the Coulomb 3.3 software. The results indicated that the Jiuzhaigou earthquake was triggered by the Wenchuan earthquake and related to the stress adjustment in the study area.

$M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake, focal mechanism, aftershock relocation, peak acceleration, Huya fault, Coulomb stress triggering, Wenchuan earthquake

doi: 10.1360/N972017-00919