

臧阳、孟令媛、周龙泉等,2017,2017年8月8日九寨沟 M_s 7.0 地震序列分析,中国地震,33(4),480~492。

2017 年 8 月 8 日九寨沟 M_s 7.0 地震序列分析

臧阳^{1,2)} 孟令媛²⁾ 周龙泉²⁾ 韩颜颜²⁾ 官悦³⁾

1) 中国地震局地球物理研究所,北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

2) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

3) 四川省地震局,成都 610041

摘要 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟发生 M_s 7.0 地震,该地震发生在巴颜喀喇块体的东北边界,震中区域构造条件复杂,是巴颜喀喇块体北侧左旋走滑环境向东侧逆冲挤压环境过渡的位置,附近地区历史强震较多。九寨沟地震是一次主-余型地震,余震活动水平较弱,主震发生后短时间内 $M_L \geq 4.0$ 余震的“等待时间”存在异常,震后较长时间余震活动恢复到正常状态,序列 h 值、余震视应力等符合主-余型序列特征。序列 b 值为 0.84,G-R 关系推测序列最大余震的震级约为 M_L 5.4(M_s 5.0),8 月 9 日发生的 M_s 4.8 地震是目前该序列的最强余震。通过与 1970 年以来附近地区 7 级左右地震序列的对比认为,九寨沟地震与 1976 年松潘-平武 2 次 7.2 级地震序列在余震空间位置、发震构造和震源机制等方面存在较大差异,因此,不具备发育为震群型序列的条件。九寨沟地震主震视应力为 0.36~0.38MPa,属于应力下调模型,序列余震的平均视应力水平接近龙门山断裂带附近中小地震的平均背景水平。

关键词: 九寨沟 M_s 7.0 地震 序列类型 视应力 h 值

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0480-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川省阿坝州九寨沟县(33.2°N,103.8°E)发生 M_s 7.0 地震,震源深度 20km。震中距九寨沟县城 35km,距阿坝州政府 210km,距成都市 290km,距甘肃陇南市 100km。四川、甘肃、青海、宁夏、陕西等多省有明显震感,局部地区较为强烈。阿坝州地貌错综复杂,震区 50km 范围内人口密度为 9 人/km²,截至 8 月 14 日 10 时地震共造成 25 人死亡,525 人受伤,近 100 间房屋倒塌,5400 余间严重损坏,6.7 万间一般损坏(<http://www.mca.gov.cn/article/ywjzjqkbzqhz201708/20170800005460.shtml>)。

九寨沟 M_s 7.0 地震发生在巴颜喀喇块体的东北边界,巴颜喀喇块体是青藏高原中部一个 SEE 方向延伸的长条形次级块体,其南北边界均为走滑断裂,北缘断裂为具有左旋走滑性质的东昆仑断裂,巴颜喀喇块体运动学特征为向 SE 方向滑移(邓起东等,2014),东边界受到

[收稿日期] 2017-10-23; [修定日期] 2017-12-21

[项目类别] 国家自然科学基金(41504047、41404045)、川滇国家地震监测预报实验场项目(2016CESE0101)和 2017 年度震情跟踪定向工作任务(2017010106)共同资助

[作者简介] 臧阳,男,1988 年生,助理研究员,在读博士,主要从事地震活动性及强地面运动研究。

E-mail: zangyang@seis.ac.cn

强烈的挤压作用,东边界南侧 2008 年曾发生汶川 $M_s8.0$ 大地震。九寨沟地震发生在巴颜喀喇块体北侧左旋运动向东侧逆冲运动的过渡区域,地震发生后没有观察到明显的地表破裂带,发震断裂推测为东昆仑断裂向南延伸的分支断裂——树正断裂,该发震断裂走向为 NNW 向,与南侧的虎牙断裂近平行。周边 100km 范围内 1900 年以来共发生 5 次 6 级以上地震(图 1),其中,7 级以上地震 2 次,分别为 1976 年 8 月 22、23 日发生在虎牙断裂上的松潘-平武 2 次 7.2 级地震,距离最近的为 1973 年松潘 6.5 级地震,该地震震中位于 1976 年松潘-平武 7.2 级震群和九寨沟 7.0 级地震之间。

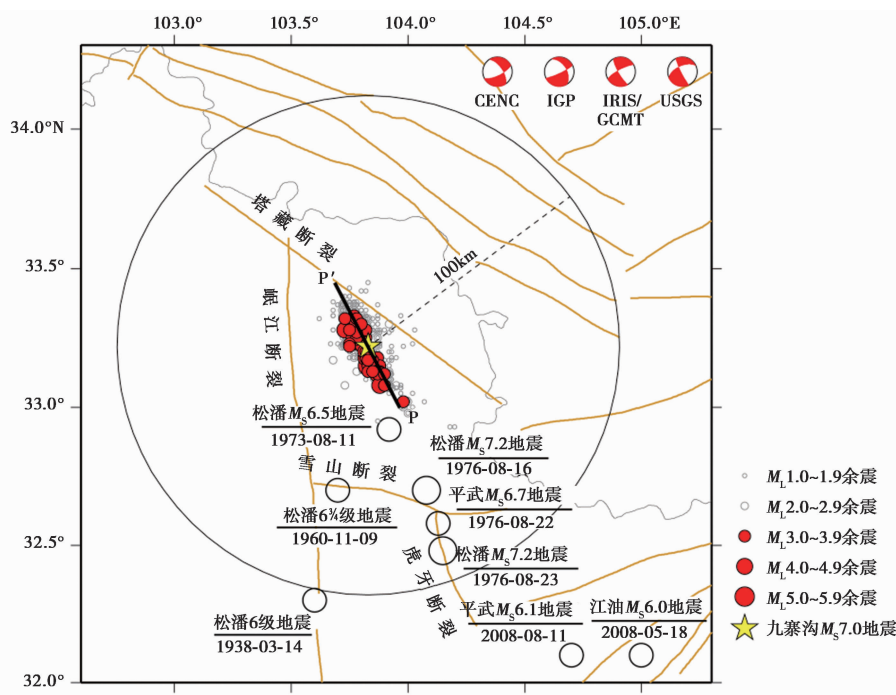


图 1 九寨沟 $M_s7.0$ 地震震中、余震分布,以及周边历史地震

黄色五角星为九寨沟地震震中;灰色空心圈为 $M_L1.0\sim2.9$ 余震;

红色实心圈为 $M_L\geq 3.0$ 余震;黑色空心圈为周边历史地震;PP'为断层破裂方向

1 九寨沟地震序列

图 1 中的红色圆圈为九寨沟地震序列中 $M_L\geq 1.0$ 余震,其整体沿 NNW 方向展布,主震位于余震区中心位置,该次地震为典型的双侧破裂,余震区宽度较为狭窄,推测发震断裂近于直立。图 2 为 $M_L\geq 3.0$ 余震沿断层破裂方向(图 1 中直线 PP')的投影位置。由图 2 可见,在主震后 3 天时间内,主震两侧均有 $M_L\geq 3.0$ 余震发生,8 月 12~23 日的 11 天时间内,序列中 $M_L\geq 3.0$ 余震均位于主震南侧,主震北侧无 $M_L\geq 3.0$ 余震发生,8 月 23 日后主震北侧开始出现 $M_L\geq 3.0$ 余震。

图 3 为九寨沟地震序列 $M-t$ 图。由图 3 可见,九寨沟 $M_s7.0$ 地震发生后余震活动水平整体偏低,第 1 个 $M_L\geq 4.0$ 的余震发生在主震后 3h,即 8 月 9 日 0 时 35 分的 $M_L4.0$ 地震

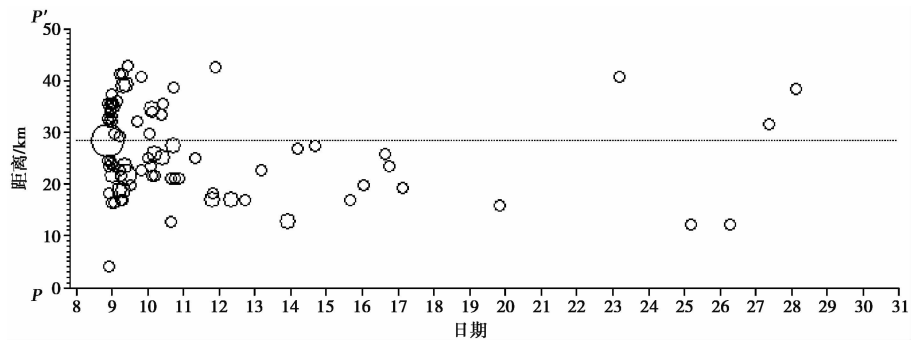


图2 2017年8月8~30日九寨沟地震序列中 $M_L \geq 3.0$ 余震沿断裂方向的分布

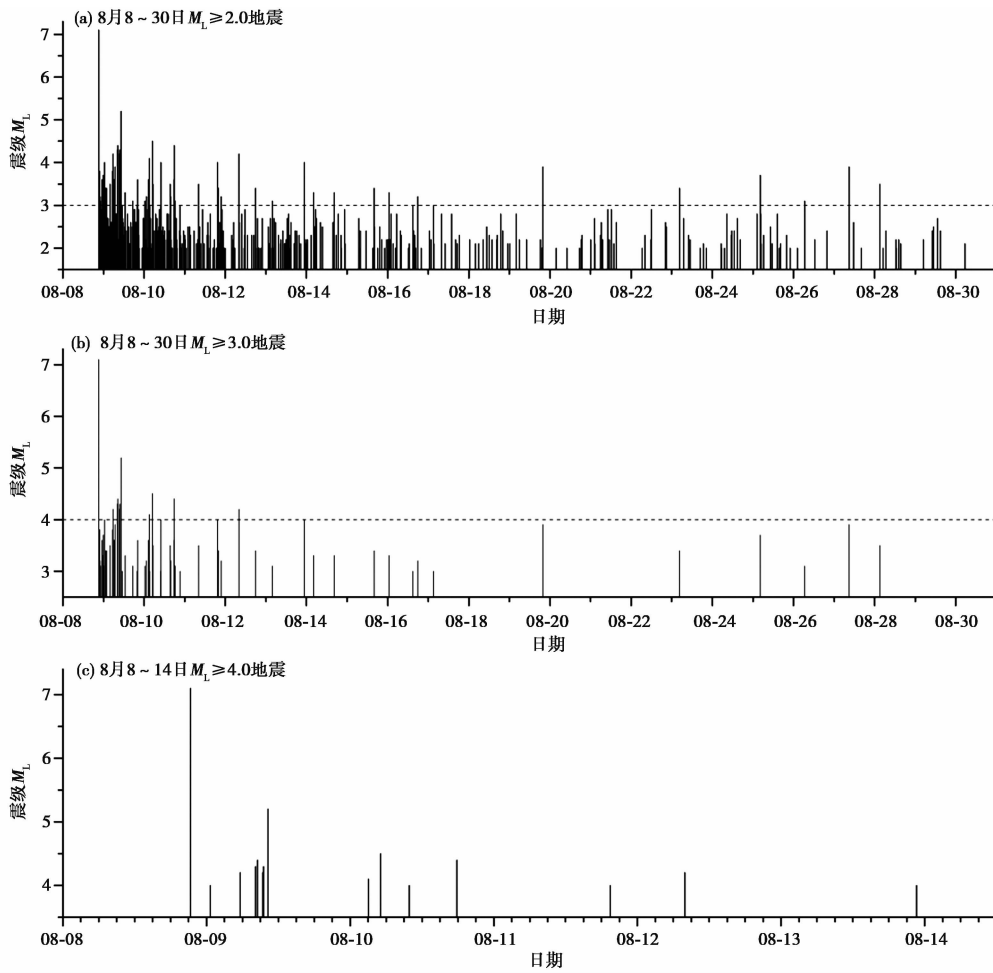


图3 九寨沟地震序列 $M-t$ 图

(表1),在主震发生后近13h内无 $M_S \geq 4.0$ 余震发生。截至10月31日,序列最大余震为8月9日10时17分发生的 $M_S 4.8$ 地震,截至8月30日12时,序列共发生 $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震2373次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震516次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震70次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震13次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地

表 1 九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列 $M_L \geq 4.0$ 地震目录

序号	发震日期 (年-月-日)	发震时刻 (时:分)	北纬 /(°)	东经 /(°)	震源深度 /km	震级 M_L	参考地名
1	2017-08-08	21:19	33.2	103.8	20	7.2	四川阿坝州九寨沟县
2	2017-08-09	00:35	33.2	103.8	22	4.0	四川阿坝州九寨沟县
3	2017-08-09	05:37	33.1	103.9	23	4.2	四川阿坝州九寨沟县
4	2017-08-09	08:10	33.1	103.9	19	4.3	四川阿坝州九寨沟县
5	2017-08-09	08:29	33.3	103.8	18	4.4	四川阿坝州九寨沟县
6	2017-08-09	09:22	33.2	103.8	20	4.2	四川阿坝州九寨沟县
7	2017-08-09	09:32	33.3	103.7	16	4.3	四川阿坝州九寨沟县
8	2017-08-09	10:17	33.1	103.9	20	5.2	四川阿坝州九寨沟县
9	2017-08-10	03:02	33.3	103.8	13	4.1	四川阿坝州九寨沟县
10	2017-08-10	05:05	33.2	103.9	20	4.8	四川阿坝州九寨沟县
11	2017-08-10	09:54	33.2	103.8	14	4.0	四川阿坝州九寨沟县
12	2017-08-10	17:48	33.2	103.9	20	4.6	四川阿坝州九寨沟县
13	2017-08-11	19:26	33.1	103.9	16	4.0	四川阿坝州九寨沟县
14	2017-08-12	07:56	33.1	103.9	16	4.2	四川阿坝州九寨沟县
15	2017-08-13	22:38	33.1	103.9	16	4.0	四川阿坝州九寨沟县

震 1 次,即 8 月 9 日最大余震 $M_L5.2$ ($M_s4.8$) 地震。

与大多数主震震级为 $M_s7.0$ 的地震相比,九寨沟地震序列 $M_L \geq 4.0$ 余震个数仅为 14 次,明显偏少。由图 3(c)可见, $M_L \geq 4.0$ 余震主要集中在 9 日 8~10 时发生,即主震发生后 10h 内余震区仅发生了 2 次 $M_L \geq 4.0$ 余震,表明主震发生后短时间内余震释放的能量较少,序列中 $M_L \geq 4.0$ 余震发生的时间间隔较长。谷继成等(1979)对我国约 50 年时间内发生的 28 次大地震的余震序列进行统计发现,对于主-余型地震序列,其强余震的等待时间,即 2 次强余震的时间间隔,与强余震的发生时间在对数坐标系下呈线性统计关系

$$\lg \Delta t = A \lg t + B \tag{1}$$

其中, Δt 为等待时间, A 、 B 为常数。用该方法统计九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列中 $M_L \geq 4.0$ 余震的等待时间与地震发生时间的关系,结果如图 4 所示。由图 4 可见,地震发生后短时间内等待时间与发震时间并不满足对数坐标系下的线性拟合关系,这主要是受地震发生短时间内余震区缺少 $M_L \geq 4.0$ 余震的影响,在震后较长时间余震等待时间与发震时间逐渐恢复对数线性关系,逐渐符合主-余型序列的特征。

图 5 给出了九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列 b 、 h 值的计算结果。由图 5(a)九寨沟地震序列 G-R 关系的拟合结果可见, b 值较高,为 0.8,推测序列最大余震震级为 $M_L5.5$,与目前序列实际发生的最大余震震级大小相当($M_L5.2$)。 h 值为修正后的大森公式(刘正容,1984;刘正荣等,1979、1986)中地震频度随时间的衰减系数,当 h 值小于 1 时,从物理上可以理解为还有相当大的地震能量要释放,在这种情况下则认为地震序列存在异常,即已发生的地震属于前震。截至 8 月 30 日,序列 h 值计算结果为 1.12,符合主-余型地震类型。

综上所述,九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列 b 、 h 值分别为 0.84、1.12,可初步认为九寨沟地震序列

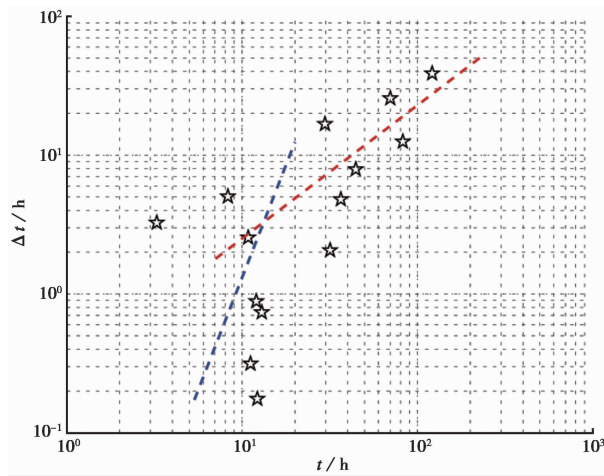


图4 九寨沟地震序列 $M_L \geq 4.0$ 余震时间等待法线性拟合结果

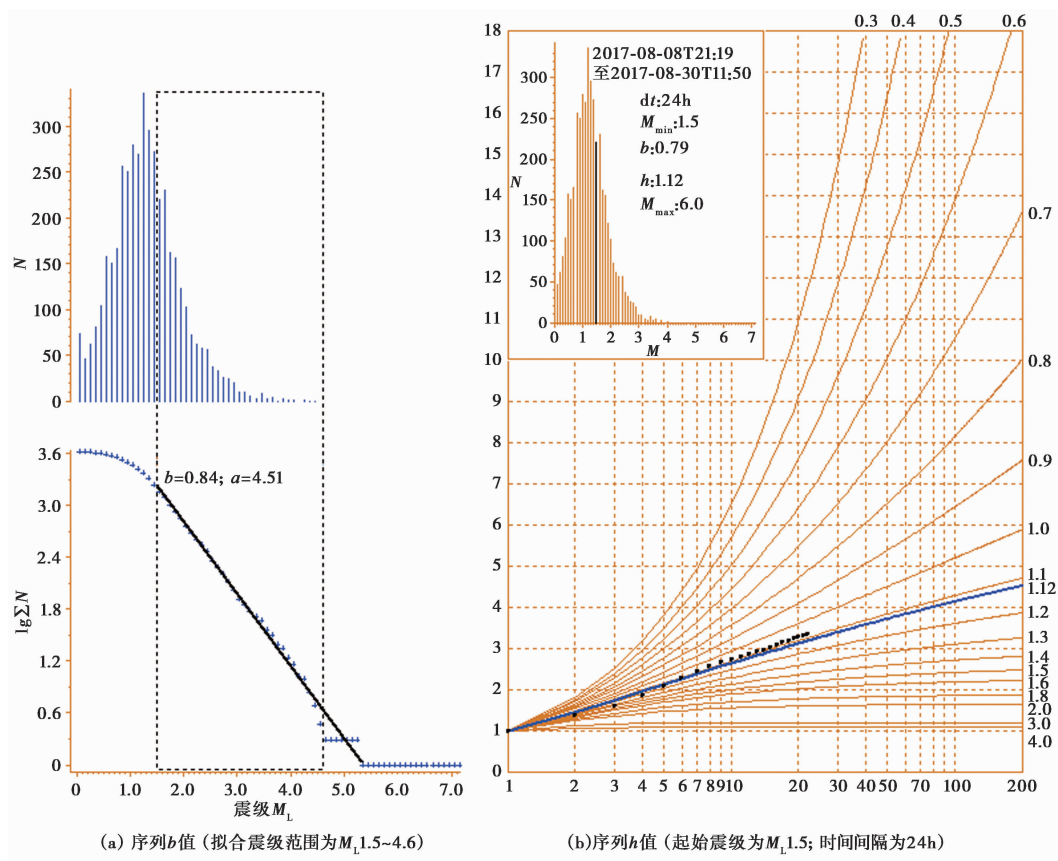


图5 2017年8月8~30日九寨沟 $M_s 7.0$ 地震序列 b, h 值计算结果

的类型为主-余型。据蒋海昆等(2006b)对中国大陆7级以上地震序列的统计,在95%置信概率条件下,7级主-余型地震的最大余震震级范围为 $M_s 4.8 \sim 6.5$,平均约为 $M_s 5.6$,截至10月31日,九寨沟地震序列最大余震震级为 $M_s 4.8$,尽管余震水平明显低于平均值,但仍在统

计结果范围内。

2 周边历史地震序列

如图 1 所示,1970 年以来在九寨沟 $M_s7.0$ 地震震中 100km 范围内共发生 6 级以上地震 4 次,其中,3 次均属 1976 年松潘-平武震群型序列,即 1976 年 8 月 16 日 7.2 级、8 月 22 日 6.7 级和 8 月 23 日 7.2 级地震,另外,1973 年 8 月 11 日松潘附近发生 1 次 6.5 级地震。

2.1 1976 年松潘-平武 7.2 级地震

1976 年松潘-平武一带发生 2 次 7.2 级地震,震中位于九寨沟 $M_s7.0$ 地震 SSE 方向约 70km 附近。该地震序列发生在 NNW 走向的虎牙断裂上,8 月 16 日第 1 次 7.2 级地震发生后,震后 3h 的余震沿虎牙断裂呈狭长带状分布,余震区长约 30km。8 月 22 日发生的 6.7 级地震“跳出”余震主体活动区,震中位于第 1 次 7.2 级地震余震区南侧,余震分布呈 NEE 方向,余震长轴约 12km。8 月 23 日再次发生 7.2 级地震,地震位于 22 日 6.7 级地震 SSE 方向约 15km 处,为双侧破裂,走向与 16 日第 1 次 7.2 级地震近平行,余震区长轴 20~25km (Jones et al,1984;程式等,1990)。

松潘-平武 2 次 7.2 级地震的震源机制解均为逆冲型,兼具一定左旋走滑分量,与虎牙断裂的运动特征相一致(唐荣昌等,1981),其间 8 月 22 日发生的 6.7 级地震则为一次纯逆冲型地震(周蕙兰等,1985;刁桂苓等,1996;)。朱航等(2009)通过静态库仑应力计算研究了 1976 年松潘-平武 3 次 6 级以上地震之间的触发关系,研究表明,第 1 次 7.2 级地震对随后发生的 6.7 级地震存在应力触发作用,而 6.7 级地震的发生又触发了第 2 次 7.2 级地震。该结果与 Jones 等(1984)对 1976 年松潘-平武地震序列的研究结果相一致,其从应力传递角度解释了 1976 年 3 次强震沿虎牙断裂的迁移过程,其中,8 月 22 日 6.7 级地震起到了较为关键的作用。

2.2 1973 年松潘 6.5 级地震

1973 年 8 月 11 日,四川省阿坝藏族自治州松潘县黄龙乡发生 6.5 级地震,震中位于 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震震中 SSE 方向约 30km 处,震区位于近 SN 向的岷江断裂以东、EW 向的雪山断裂以北(图 1)。地震发生后,通过卫星影像解译以及野外地质调查,均未在震中附近区域发现明显的断裂构造。在 6.5 级主震发生前 3 个月,在震中附近南坪县南侧 8 月 11 日发生 1 次 5.1 级地震,1973 年 8 月 11 日~1974 年 12 月 25 日,共记录到余震 625 次,其中,5.0~5.9 级 2 次,4.0~4.9 级 12 次,3.0~3.9 级 484 次,最大震级余震为 1974 年 1 月 16 日 5.8 级地震,序列地震活动持续时间将近 1.5 年。

对该地震序列的类型判定存在一定异议,据蒋海昆等(2006a)对序列类型的研究,以序列中 2 次最大震级地震的震级差 ΔM 作为序列分类的判据,当 $\Delta M \geq 2.5$ 时为孤立型, $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$ 时为主余型, $\Delta M < 0.6$ 时为多震型,根据该判定标准,1973 年松潘 6.5 级地震序列 ΔM 为 0.7,属于主-余型;而程式等(1990)认为,1973 年松潘 6.5 级地震序列主要由包括 1973 年 5 月 8 日 5.1 级地震在内的 4 个 5 级以上地震组成,主震的能量在整个序列中约占 57%,根据周蕙兰等(1982)对序列类型的判定标准,即参考主震所释放能量占全序列所释放总能量的比例 R_E ,当 $R_E < 90\%$ 时为震群型,则 1973 年松潘 6.5 级地震符合震群型序列特征。

九寨沟 $M_s7.0$ 地震是发生在巴颜喀喇块体东北边界自 1976 年 8 月 23 日之后再次发生

的1次7.0级地震,与1976年松潘-平武2次7.2级地震和1973年松潘6.5级地震不同,此次九寨沟地震震前周边未出现4~5级中等地震活动,震后也无5级以上地震发生,序列的余震活动水平明显偏弱,为此,本文进一步研究了九寨沟地震的震源特征。

3 震源参数特征

表2为各家研究机构针对九寨沟 M_s 7.0地震公布的震源参数结果,其中,矩震级的结果较为一致,均为 M_w 6.5,震源机制解均显示该地震为一次走滑型地震,结合余震分布能够确定地震的破裂面走向为NNW。CENC和IGP震源机制解结果显示,断层倾向NE,倾角为 $48^\circ \sim 62^\circ$;USGS、IRIS和GCMT震源机制结果显示,断层倾向WS,倾角为 $78^\circ \sim 84^\circ$ 。结合IGP的小震精定位结果以及余震展布较窄的特点,我们认为九寨沟地震为一次高倾角的走滑型地震。

表2 2017年九寨沟 M_s 7.0地震震源、断层参数

研究机构	震中		矩震级 M_w	深度 /km	走向 /($^\circ$)	倾角 /($^\circ$)	滑动角 /($^\circ$)	地震矩 /($N \cdot m$)	地震波辐射能 /J
	北纬/($^\circ$)	东经/($^\circ$)							
CENC ^①	33.20	103.82	6.5	11	326	62	-15	—	—
IGP ^②	33.22	103.84	6.5	10	328	48	-11	—	—
USGS ^③	33.19	103.86	6.5	13.5	153	84	-33	$7.228e^{18}$	—
IRIS ^④	33.19	103.86	6.5	9	150	78	-13	—	9.07×10^{13}
GCMT ^⑤	33.21	173.90	6.5	14.9	150	78	-13	$7.62e^{18}$	—

①CENC,中国地震台网中心,http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05_LargeEQ/201708082119M7.0/zonghe.html

②IGP,中国地震局地球物理研究所,http://www.cea-igp.ac.cn/pxw275881.html

③USGS,美国地质调查局,https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a5x1#moment-tensor

④IRIS,美国地震学研究联合会,http://ds.iris.educspudeqenergy/14133645

⑤GCMT,全球大震矩心矩张量解,http://www.globalcmt.org

IRIS给出了九寨沟地震的地震波辐射能 E_s 为 $9.07 \times 10^{13} J$,地震波辐射能是地震发生时以地震波形式传播出去的能量,其与发震断层破裂所消耗的能量 E_R 以及断层克服摩擦力所做的功 W_f 共同构成了地震产生的总能量 E ,即

$$E = E_s + E_R + W_f \tag{2}$$

根据地震波辐射能与震级间的经验统计关系(Choy et al,1995),则有

$$\lg E_s = 1.5M_s + 4.4 \tag{3}$$

1次 M_s 7.0地震所产生的地震波辐射能理论计算结果为 $7.94 \times 10^{14} J$,大于IRIS公布的实测结果。视应力 σ_{app} 由Wyss等(1968)最早提出,其定义式为

$$\sigma_{app} = \mu E_s / M_0 \tag{4}$$

式中, E_s 为地震波辐射能,单位为J; M_0 为地震矩,单位为 $N \cdot m$; μ 为介质剪切模量,取值为 $\mu = 3 \times 10^4 MPa$ 。 σ_{app} 为视应力,指单位面积发震断层上地震波平均辐射能量的大小,由于地震效率 η 恒小于等于1,视应力 σ_{app} 可认为是平均应力的下限。USGS和GCMT公布的地震矩 M_0 分别为 7.228×10^{18} 、 $7.62 \times 10^{18} N \cdot m$ 。根据式(4)可计算得到九寨沟 M_s 7.0地震的视应力 σ_{app} 为 $0.36 \sim 0.38 MPa$ 。

通常在不考虑断裂能的情况下,可将震源动态模型过程分为 3 种,即完全应力降模型、应力上调模型和应力下调模型等 (Brune, 1970; Savage et al, 1971; Brune, 1976; Smith et al, 1991),比较摩擦应力与断层面上终止剪切应力可判断震源过程属于应力上调模型还是应力下调模型,即

$$\text{应力上调模型} \quad 2\sigma_{\text{app}} < \Delta\sigma_s \quad (5)$$

$$\text{应力下调模型} \quad 2\sigma_{\text{app}} > \Delta\sigma_s \quad (6)$$

式中, $\Delta\sigma_s$ 为静态应力降,对于不同运动性质的断层,静态应力降 $\Delta\sigma_s$ 计算公式为 (Starr, 1928; Knopoff, 1958; Keilis-Borok, 1959)

$$\text{倾滑断层} \quad \Delta\sigma_s = 8\mu\bar{D}/3\pi W \quad (7)$$

$$\text{走滑断层} \quad \Delta\sigma_s = 2\mu\bar{D}/\pi W \quad (8)$$

$$\text{圆盘形断层} \quad \Delta\sigma_s = 7\mu\bar{D}/16\pi R \quad (9)$$

式中, \bar{D} 为断面上的平均滑动位移; W 为断层宽度; R 为圆盘半径。

图 6 为九寨沟地震主震发震断层面上滑动位移分布图。由图 6 可见, IGP 给出的九寨沟地震最大滑动位移为 0.5m, 断层面宽度约为 20km, 取平均滑动位移为 $\bar{D} \approx 2/3D$, 九寨沟地震为走滑型地震, 由式 (8) 可计算得到地震的静态应力降 $\Delta\sigma_s$ 约为 0.32MPa。由于 $2\sigma_{\text{app}} > \Delta\sigma_s$ 符合式 (6), 因此, 九寨沟地震为应力下调模型。该结果表明, 在主震发生过程中断层破裂不够充分, 这也与地震未破裂至地表的事实一致。

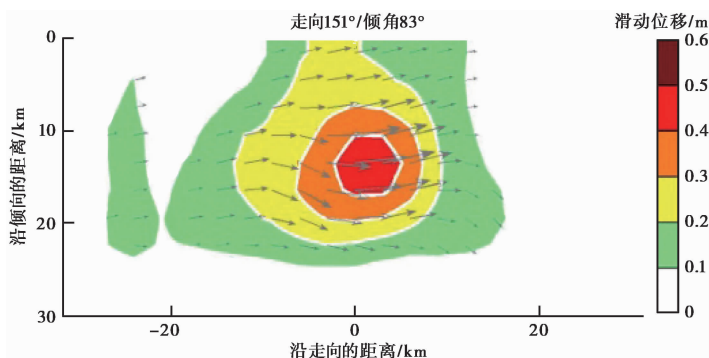


图 6 九寨沟地震主震发震断层面上滑动位移分布

小震视应力的大小通常可以反映出研究区整体应力水平,而余震序列的视应力同样可以反映震源区的应力状态,能够为序列后续强余震的发生提供一定的判断依据。李赫等 (2015) 通过计算 2010 年滦县 M_L 4.5 地震序列的余震视应力发现,震级 $M_L \leq 3.3$ 时,余震震级与其视应力的大小大体呈正相关。王生文等 (2014) 通过计算 1999 年岫岩 M_s 5.4 地震序列的视应力认为,主震与最大余震之间,视应力通常处于较高的水平,最大余震发生后,视应力逐渐降低,并恢复到震前区域背景水平;钱晓东等 (2007) 通过对 2007 年宁洱 6.4 级地震序列视应力的计算研究也得到了类似的结论。

表 3 为九寨沟地震序列 8 月 8~19 日 30 次 $M_L \geq 3.5$ 余震的视应力计算结果。由表 3 可见,8 月 10 日 17 时 48 分发生的 M_L 4.4 余震视应力最大,为 0.38MPa;序列最大余震 M_L 5.2 地震的视应力为 0.3MPa,30 次余震平均视应力为 0.123MPa。余震视应力与余震震级大体呈

正相关(图 7(a)),最小二乘法得到的拟合直线,与李赫等(2015)对余震视应力研究得到的统计结果一致。易桂喜等(2011)对汶川 8.0 级地震前龙门山-岷山构造带 14 次 M_L 3.5~4.3 地震进行了视应力的计算,得到的视应力为 0.022~0.379MPa,1 次 M_L 4.2 地震的视应力最大,为 0.379MPa,14 次地震的平均视应力为 0.113MPa。将九寨沟地震序列视应力与这 14 次地震视应力进行对比发现,整体上对于同等震级,九寨沟地震序列的视应力小于汶川地震前的视应力(图 7(b))。李艳娥等(2012)研究了汶川 8.0 级地震前四川地区地震视应力的时空变化。宫悦等(2013)计算了芦山 7.0 级地震前后龙门山断裂带南段的视应力,与上述研究结果相比,九寨沟地震余震的视应力普遍小于汶川地震前、芦山地震前龙门山及附近地区的平均应力水平,接近该地区的背景应力水平。

3 结论和讨论

九寨沟 M_s 7.0 地震是发生在巴颜喀喇块体东北边界的一次强震,该地震未发育较明显的断层破裂带,地震灾害总体较轻。初步研究结果表明,九寨沟地震是一次主-余型地震,尽管主震发生后短时间内存在余震活动水平明显偏弱的现象, $M_L \geq 4.0$ 余震的等待时间存在异常,但震后较长时间

余震水平逐渐恢复到正常状态,且序列 h 值、视应力等符合主-余型地震序列的特征,G-R 关系显示序列最大余震震级较小,8 月 9 日发生的 M_s 4.8 地震可能是该地震序列的最大余震。

九寨沟地震主震视应力为 0.36~0.38MPa,属于应力下调模型,余震活动水平整体偏低。余震序列的平均视应力为 0.02~0.38MPa,视应力与余震震级整体上呈正相关。与汶川地震前、芦山地震前相比,九寨沟地震余震的视应力明显偏低,接近龙门山断裂带附近中小地震的平均背景水平。

表 3 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震序列
 $M_L \geq 3.5$ 余震视应力计算结果

序号	发震日期 (年-月-日)	发震时刻 (时:分)	震级 M_L	视应力 /MPa	应力降 /MPa
1	2017-08-08	21:27	3.6	0.043	0.143
2	2017-08-08	21:28	3.8	0.083	0.305
3	2017-08-08	21:41	3.8	0.055	0.187
4	2017-08-08	23:04	3.6	0.022	0.074
5	2017-08-08	23:49	3.6	0.040	0.135
6	2017-08-08	23:51	3.7	0.072	0.271
7	2017-08-09	00:35	4.0	0.093	0.320
8	2017-08-09	05:16	3.8	0.054	0.180
9	2017-08-09	05:37	4.2	0.138	0.469
10	2017-08-09	05:41	3.8	0.042	0.142
11	2017-08-09	06:24	3.6	0.084	0.286
12	2017-08-09	06:49	3.9	0.138	0.468
13	2017-08-09	06:49	3.8	0.093	0.312
14	2017-08-09	08:10	4.3	0.180	0.604
15	2017-08-09	08:29	4.4	0.187	0.627
16	2017-08-09	09:22	4.2	0.112	0.374
17	2017-08-09	09:32	4.3	0.184	0.631
18	2017-08-09	10:17	5.2	0.303	1.019
19	2017-08-09	20:03	3.6	0.063	0.216
20	2017-08-10	02:30	3.6	0.077	0.261
21	2017-08-10	03:02	4.1	0.095	0.319
22	2017-08-10	05:05	4.5	0.235	0.786
23	2017-08-10	09:54	4.0	0.089	0.297
24	2017-08-10	17:38	3.6	0.062	0.219
25	2017-08-10	17:48	4.4	0.375	1.264
26	2017-08-11	08:05	3.5	0.053	0.180
27	2017-08-11	19:26	4.0	0.182	0.617
28	2017-08-12	07:56	4.2	0.155	0.525
29	2017-08-13	22:38	4.0	0.208	0.727
30	2017-08-19	19:52	3.9	0.178	0.612

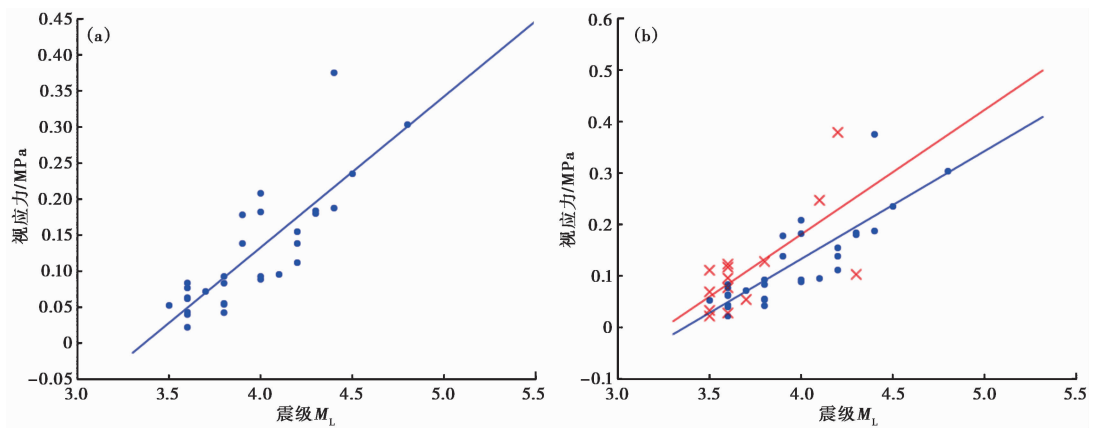


图 7 九寨沟地震序列视应力随震级的变化 (a) 及九寨沟地震序列视应力与汶川地震前龙门山-岷山构造带地震视应力对比 (b)

蓝色圆圈、直线为九寨沟地震序列视应力及拟合直线;红叉和红线为汶川地震前龙门山-岷山构造带地震视应力及拟合直线

九寨沟地震震构造推测为东昆仑断裂向南的一条分支断裂——树正断裂,构造部位属于巴颜喀喇块体北侧左旋走滑向东侧逆冲挤压的过渡位置,由于震中位置构造环境复杂,九寨沟地震与距震中 100km 范围内的 1973、1976 年发生的 2 次地震序列既存在一定联系,也存在较显著的差异。图 8 为 3 次地震序列的空间位置。由图 8 可见,3 次地震序列的 $M_L \geq 1.0$ 余震在空间上重叠在一起,其中,1973 年松潘 6.5 级地震的余震位于 1976 年松潘-平武 7.2 级震群与 2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列之间的空段。从余震分布上来看,九寨沟地震

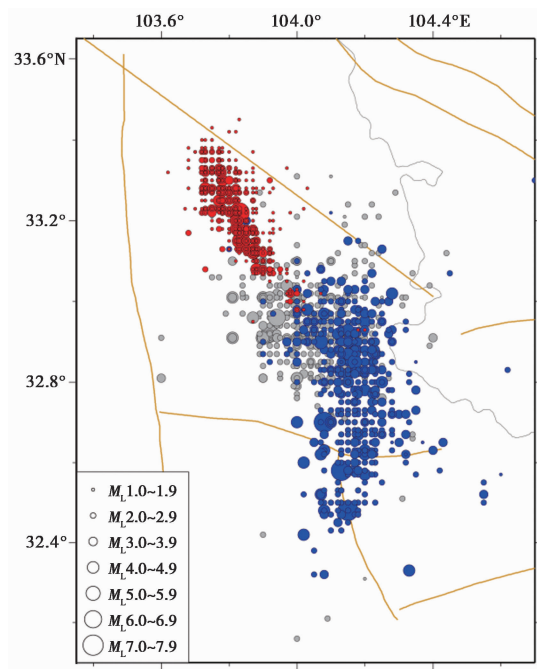


图 8 1973 年松潘 6.7 级地震、1976 年松潘-平武 7.2 级双震及九寨沟 7.0 级地震 $M_L \geq 1.0$ 余震分布
灰色圆圈为松潘地震;蓝色圆圈为松潘-平武双震;红色圆圈为九寨沟地震

序列似乎是1973、1976年2次地震的发震断裂在原有破裂的基础上向北侧的扩展,1973、1976年地震的余震区有部分区域重叠,由于当时监测能力较差,余震分布较分散,但整体呈NW方向延伸,九寨沟地震余震序列分布较为集中,主震位置与1973年6.5级以及1976年3次6级以上主震近似呈一条直线,且该直线为虎牙断裂向北延伸的方向。

由图8还可见,3次地震序列在空间展布上存在一定的联系,余震展布几乎沿着同一方向并首尾相接,但由于构造位置的特殊性,彼此间主震发生的力学机制存在显著差异。发生在南侧的1976年松潘-平武2次7.2级地震主要受到近EW向的挤压推挤作用的影响,发震构造为南侧具有明显逆冲性质的虎牙断裂,并且在2次7.2级主震间发生了1次6.7级地震,同时,1976年松潘-平武地震序列的余震区存在明显的扩展现象,即以22日6.7级地震为转折点,余震主体活动区域和余震展布方向均出现显著变化。九寨沟 M_s 7.0地震主要受到断层两侧地块水平相对运动的影响,主震的震源机制解均显示为左旋走滑,九寨沟地震余震区没有明显的扩展现象(图1),九寨沟地震余震分布呈一狭长带状沿NNW方向分布,余震较均匀地分布在主震的两侧。由于运动性质的差异,且不具备如1976年松潘-平武地震序列第1次主震对后续强震的触发条件,因此,九寨沟地震序列未发展为震群型序列。

九寨沟地震与1973年松潘6.5级地震之间存在一定的相似性。首先是发震构造方面,2次地震均发生在NW向的隐伏构造上,2次地震均未发现明显的地表破裂,尽管震前在震中附近区域没有明确的断裂构造信息,但从2次地震序列的发震位置、余震展布方向以及烈度区的几何形状,有理由相信这2次地震的发震断裂可能属于同一构造系,即东昆仑断裂向南侧的分支断裂。其次,2次地震的震源机制解也存在较好的一致性,根据全国基准台、四川区域台网及甘肃、云南部分台站的P波初动资料(程式等,1990),不同研究者所确定的主震震源动力学参数均显示1973年松潘6.5级地震为一次走滑型为主的地震,地震破裂面为NW方向,运动性质为左旋走滑,与九寨沟 M_s 7.0的震源机制解基本一致。但2次地震之间也存在一定的差异,主要表现在序列余震的活动强度上,即1973年松潘6.5级地震首先在震前存在5.1级前震,且最大余震与主震震级差仅为0.7,但最大余震与主震间隔时间较长,且在主震后长达1年零3个月的时间又在余震区发生1次5.2级强余震;而九寨沟地震序列在震前没有发生较大震级的前震,截至10月31日,最大余震仅为1次4.8级地震,其与主震的震级差为2.2级。

致谢:感谢中国地震台网中心刘桂萍、蒋海昆、张永仙、晏锐等对本文给与的悉心指导,感谢四川省地震局吴微微、张致伟等在论文撰写过程中提出的宝贵意见,特别感谢中国地震台网中心预报部测震组提供的支持和帮助。

参考文献

- 程式、任昭明,1990,1976年8月16日四川省松潘7.2级地震,见:张肇诚,中国震例(1976-1980),105~132,北京:地震出版社。
- 邓起东、马冀、杜鹏,2014,青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势,地球物理学报,57(7),2025~2042。
- 刁桂苓、程万正、李桂芳等,1996,1976年松潘地震序列的小震震源机制,地震地磁观测与研究,17(5),34~41。
- 官悦、龙锋、易桂喜等,2013,芦山地震前后龙门山断裂带南段视应力研究,震灾防御技术,8(4),389~396。
- 谷继成、谢小碧、赵莉,1979,强余震的时间分布特征及其理论解释,地球物理学报,22(1),32~46。
- 蒋海昆、李永莉、曲延军等,2006a,中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征,地震学报,28(4),389~398。

- 蒋海昆、曲延军、李永莉等, 2006b, 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征, 地球物理学报, **49**(4), 1110~1117。
- 李赫、刘文兵、王熠熙等, 2015, 2010 年滦县地震序列视应力变化研究, 地震, **35**(1), 47~54。
- 李艳娥、陈学忠、王恒信, 2012, 汶川 8.0 级地震前四川地区地震视应力时空变化特征, 地震, **32**(4), 113~122。
- 刘正荣, 1984, 根据地震频度衰减预报地震的工作细则, 地震, **4**(1), 35~37。
- 刘正荣、孔昭麟, 1986, 地震频度衰减与地震预报, 地震研究, **9**(1), 1~12。
- 刘正荣、钱兆霞、王维清, 1979, 前震的一个标志——地震频度的衰减, 地震研究, **2**(4), 1~9。
- 钱晓东、李琼、秦嘉政, 2007, 2007 年宁洱 6.4 级地震序列视应力研究, 地震研究, **30**(4), 311~317。
- 唐荣昌、陆联康, 1981, 1976 年松潘、平武地震的地震地质特征, 地震地质, **3**(2), 41~47。
- 王生文、李艳娥、郭祥云等, 2014, 1999 年 11 月 29 日岫岩 M_s 5.4 地震序列视应力的再研究, 地震, **34**(3), 50~61。
- 易桂喜、闻学泽、辛华等, 2011, 2008 年汶川 M_s 8.0 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, 地球物理学报, **54**(6), 1490~1500。
- 周蕙兰、房桂荣、弥铁强, 1985, 1976 年 8 月松潘两大地震的破裂机制, 中国科学技术大学学报, **15**(1), 84~91。
- 周蕙兰、房桂荣、章爱娣等, 1982, 余震序列的持续时间, 地震学报, **4**(1), 45~54。
- 朱航、闻学泽, 2009, 1973~1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程, 地球物理学报, **52**(4), 994~1003。
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J Geophys Res.*, **75**(75), 4997~5009.
- Brune J N, 1976, The physics of earthquake strong motion. In: Lomnitz C, Rosenblueth E, Seismic risk and engineering decisions, New York: Elsevier Sci Publ Co, 14~177.
- Choy G L, Boatwright J L, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, *J Geophys Res.*, **100**(B9), 18205~18228.
- Jones L M, Han W, Haoksson E, et al, 1984, Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China, *J Geophys Res.*, **89**(B9), 7697~7707.
- Keilis-Borok V, 1959, On estimation of the displacement in an earthquake source and source dimension, *Annali di Geofisica*, **12**, 205~214.
- Knopoff L, 1958, Energy release in earthquake, *Geophys J Int.*, **1**, 44~52.
- Savage J C, Wood M D, 1971, The relation between apparent stress and stress drop, *Bull Seism Soc Am.*, **61**(5), 1381~1388.
- Smith K D, Brune J N, Priestly K F, 1991, The seismic spectrum, radiated energy, and the Savage and Wood inequality for complex earthquakes, *Tectonophysics*, **188**(188), 303~320.
- Starr A T, 1928, Slip in a crystal and rupture in a solid due to shear, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **24**(4), 489~500.
- Wyss M, Brune J N, 1968, Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region, *J Geophys Res.*, **73**(14), 4681~4694.

A study on the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake sequence, August 8, 2017, in Sichuan Province

Zang Yang^{1,2)} Meng Lingyuan²⁾ Zhou Longquan²⁾ Han Yanyan²⁾ Gong Yue³⁾

1) Institute of Geophysics, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

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

Abstract On August 8, 2017, an earthquake occurred near Jiuzhaigou County, Sichuan Province with $M_s7.0$. The earthquake happened near the northeast boundary of the Bayan Har fault block where the geological structure is very complicated. The earthquake is located at the transitional position from the north boundary of the Bayan Har fault block with a left-lateral tectonic environment to the east boundary with a strike-slip tectonic environment and many strong earthquakes happened near this field in history. The Jiuzhaigou earthquake sequence belongs to mainshock-aftershock type with an extremely low seismic activity of the aftershocks. Although the time intervals between the aftershocks with $M_L \geq 4.0$ is abnormal in a short time after the mainshock, the seismic activities of the aftershocks returned to normal soon after that, and the h value of the sequence and the apparent stress of the aftershocks show that the characteristics of the sequence is in accordance with the mainshock-aftershock type. The b value of the sequence is 0.84, the magnitude of the largest aftershock deduced from the G-R relationship is about $M_L5.4$ ($M_s5.0$) and the $M_s4.8$ earthquake on August 9 is the largest aftershock of the sequence up to now. With the comparison between the Jiuzhaigou earthquake sequence and the other sequences with the magnitude about $M_s7.0$ near the field since 1970, we find that there are many apparent differences between the Jiuzhaigou sequence and the two $M_s7.2$ earthquakes near the Songpan-Pingwu area in 1976 in the spatial position of the aftershocks, the seismogenic structure and the focal mechanism of the mainshocks. Therefore, the conditions were not sufficient for the Jiuzhaigou earthquake to develop into a multiple mainshock sequence. The apparent stress of the mainshock of the Jiuzhaigou sequence is 0.36~0.38MPa. It shows that the earthquake belongs to the undershoot model. The average apparent stresses of the aftershocks are close to the background average stresses of the moderate and minor earthquakes near the Longmenshan fault zone.

Key words: Jiuzhaigou earthquake; Sequence type; Apparent stress; h value