

邱玉荣、刘春、杨宜海等,2017,四川九寨沟 M_s 7.0 地震序列视应力时空特征,中国地震,33(4),511~520。

四川九寨沟 M_s 7.0 地震序列视应力时空特征

邱玉荣 刘春 杨宜海 邵辉成 石军 石富强 刘洁

陕西省地震局,西安市边家村水文巷4号 710068

摘要 利用中国测震台网记录到的数字地震波形资料,通过波形分析和反演,获得了2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震序列的视应力。研究表明:①在震后早期阶段九寨沟地震序列视应力水平较高,主震发生后不到1天视应力开始下降,主震发生1周后基本稳定,略有起伏;②震源区应力状态存在时空分段差异,余震区东南段视应力下降较快,而西北段下降较缓,最大余震发生前,东南段视应力水平略高或相当于西北段,最大余震发生至震后70天,西北段视应力水平高于东南段,这可能与余震区东南段比西北段破裂充分有关;③最大余震发生在主震震中东南侧视应力较高的区域,高视应力余震位于主震震中两侧靠近端部,与主震双侧扩展端部应力相对集中的结果一致。

关键词: 地震序列 视应力 双侧扩展 九寨沟7.0级地震

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0511-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定,2017年8月8日21:19:46四川省阿坝藏族自治州九寨沟县(震中 33.20°N , 103.82°E)发生7.0级地震,震源深度20km。此次7.0级地震发生在东昆仑断裂带东段扫帚状分支断裂上,震源机制解显示为走滑型,发震断裂推测为虎牙断裂的北西延伸隐伏段(易桂喜等,2017;杨宜海等,2017;季灵运等,2017)。虎牙断裂为岷山隆起的东边界,岷山隆起及两侧的岷江断裂和虎牙断裂分解了龙门山断裂带的现代构造活动(邓起东等,1994)。1973年松潘黄龙6.5级地震(距此次地震震中约40km)、1976年松潘平武7.2级双震型地震(距此次地震震中约60km)均发生在虎牙断裂上(朱航等,2009)。此次7.0级地震的发生反映出在青藏高原地壳物质东向挤压下,震源区及附近断裂带上应力应变积累速度较快。此外,地震活动性和地震地质学研究表明,包括塔藏断裂和岷江断裂在内的东昆仑断裂带东段存在一个明显的地震空区(Wen et al,2007;徐锡伟等,2017)。因此,开展九寨沟7.0级地震序列的视应力研究对于理解震源区及附近断裂的应力状态具有重要意义。

地震视应力可揭示震源区应力状态(吴忠良,2001;吴忠良等,2002;易桂喜等,2013)。地震视应力越高,表明震源区应力水平越高(Scherbaum et al,1984;Choy et al,1995;Harris et al,1998;Newman et al,1998;Pulid et al,2000;陈学忠等,2003)。余震序列视应力随时间

[收稿日期] 2017-10-30; [修定日期] 2017-11-24

[项目类别] 地震科技星火计划(XH17034Y)、陕西省地震局启创与创新基金课题(QC201713)共同资助

[作者简介] 邱玉荣,女,1986年生,硕士,工程师,主要研究方向为数字地震与地震活动性。E-mail:qyr2660130@163.com

的变化可反映震源区应力状态的变化过程,对于强余震活动的时间、地点预测具有重要的参考价值(Zúñiga et al, 1987; 陈学忠等, 2003、2007、2011; 王琼等, 2005; 王林瑛等, 2005; 华卫等, 2006; 刘红桂等, 2006; 李艳娥等, 2012、2015; 周少辉等, 2017)。

根据中国地震台网提供的目录,截至 2017 年 10 月 17 日,九寨沟地震序列记录到 $M_L \geq 3.0$ 余震 94 次,其中, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 余震 79 次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 余震 14 次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 余震 1 次,最大为 2017 年 8 月 9 日 $M_L 5.2$ 地震。余震在空间上呈 NW 向窄带分布,主震震中基本上位于整个序列的中部,将余震区分为东南、西北 2 段(图 1)。余震区分段地震序列 $M-t$ 图(图 2)显示,震后早期,西北段余震活动水平低于东南段;主震 2 周后,西北段余震活动水平明显高于东南段。此外,九寨沟 7.0 级地震序列精定位结果和震源机制类型存在空间差异(易桂喜等, 2017; 杨宜海等, 2017)。

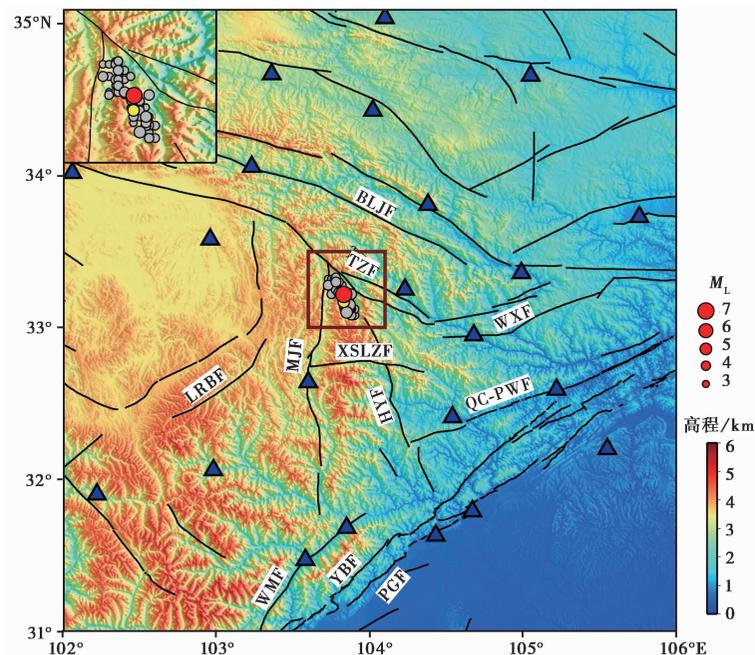


图 1 九寨沟地震序列和台站位置分布

圆圈为 $M_L \geq 3.0$ 地震,其中红色为主震,黄色为最大余震;蓝色三角形为地震台站;BLJF:白龙江断裂;TZF:塔藏断裂;MJF:岷江断裂;HYF:虎牙断裂;XSLZF:雪山梁子断裂;WXF:文县断裂;LRBF:龙日坝断裂;QC PWF:青川-平武断裂;WMF:汶川-茂县断裂;YBF:映秀-北川断裂;PCF:彭县-灌县断裂

本文根据中国测震台网记录的波形资料计算九寨沟 7.0 级地震序列中 $M_L 3.0 \sim 5.2$ 余震的视应力。对于不适合 Brune 圆盘模型的主震,利用 USGS 提供的标量地震矩等数据估算其视应力,并对震源区的应力状态进行初步探讨。

1 方法原理

地震视应力 σ_{app} 是一个可由地震波信息获得、与区域平均应力成正比的物理量 (Mcgarr, 1999)。在有关震源介质均匀弹性、地震脆性破裂等假定下, σ_{app} 定义为 (Wyss et al, 1968)

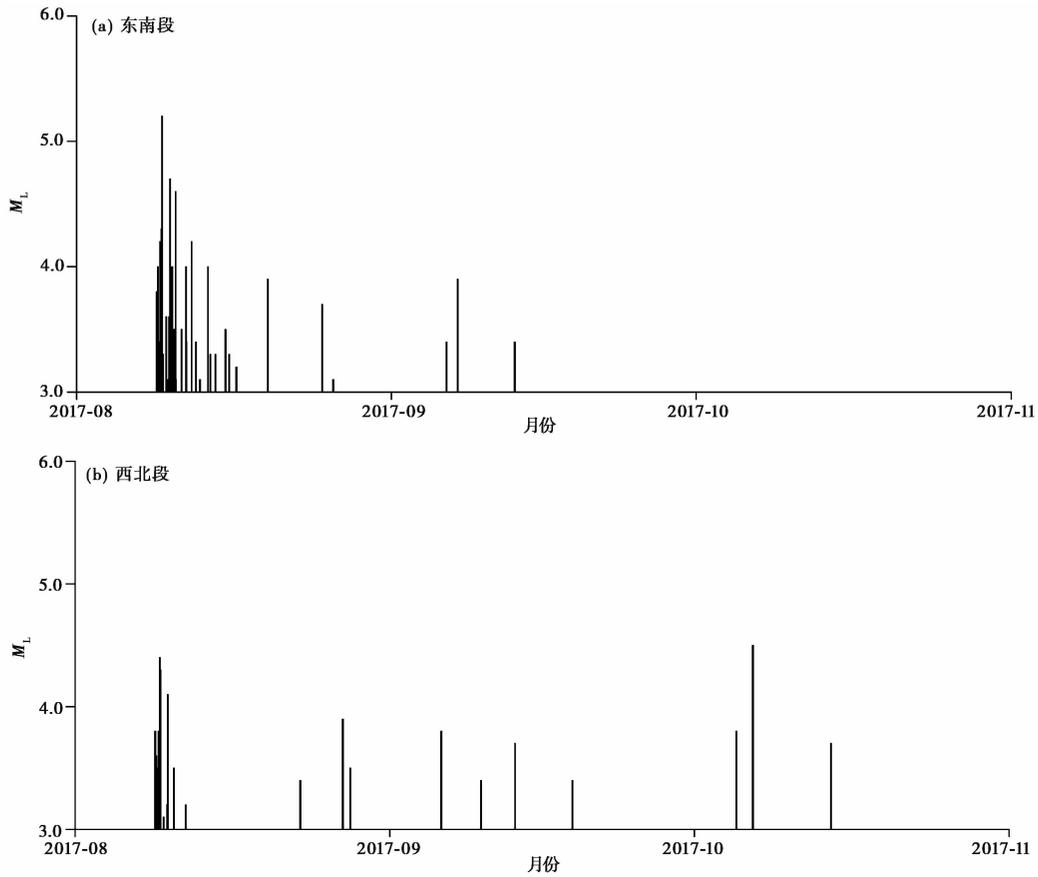


图 2 震源区分段地震序列 $M-t$ 图

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \tag{1}$$

式中, E_s 为地震波辐射能量; M_0 为标量地震矩; μ 为震源区介质的剪切模量, 对地壳介质而言通常取 $3.0 \times 10^4 \text{MPa}$ 。

在近震源情况下, 根据 Brune 模型, 震源谱可表示为

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \tag{2}$$

式中, Ω_0 为震源谱零频极限值; f_c 为拐角频率。 Ω_0 和 f_c 可根据陈学忠等 (2007) 的方法测定。进而可求得标量地震矩 M_0

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0 d}{R} \tag{3}$$

式中, ρ 为地壳介质密度 (取 2.71gm/cm^3); v 为波速 (横波取 3.5km/s); d 为震源距; R 为辐射因子, 可用其均方根代替, 对横波为 0.63 (Aki et al, 1980)。

地震波能量 E_s 通过考虑低频和低频补偿的速度谱平方积分法 (Andrews, 1986; Snoke,

1987)求得

$$E_s = 8\pi\rho\nu\left\{\frac{1}{3}[2\pi f_1\Omega_0]^2 f_1 + \int_{f_1}^{f_3} V(f)^2 df + [2\pi f_3\Omega(f_3)]^2 f_3\right\} \quad (4)$$

式中, $V(f)$ 为速度谱; $\Omega(f_3)$ 为频率为 f_3 时的振幅值。

2 数据及处理

本文选取震中距在 200km 范围内的台站(图 1), 根据各台站记录的波形情况, 采用信噪比较高、记录较清晰的地震波形数据进行去倾斜、去仪器响应、去台站和去路径效应等处理。其中, 去路径效应时, 采用九寨沟及邻近地区 $Q(f) = 136.6f^{0.5813}$ 的衰减模型(吴微微等, 2016)。在此基础上, 计算了九寨沟 7.0 级地震序列 79 次 $M_L 3.0 \sim 5.2$ 余震(占序列地震数目的 84%)的辐射能量和标量地震矩。图 3 给出了余震序列辐射能量与标量地震矩间的关系。图 3 中 θ 为能量地震矩比率判别参数, 定义为(Newman et al, 1998)

$$\theta = \lg 10\left(\frac{E}{M_0}\right) \quad (5)$$

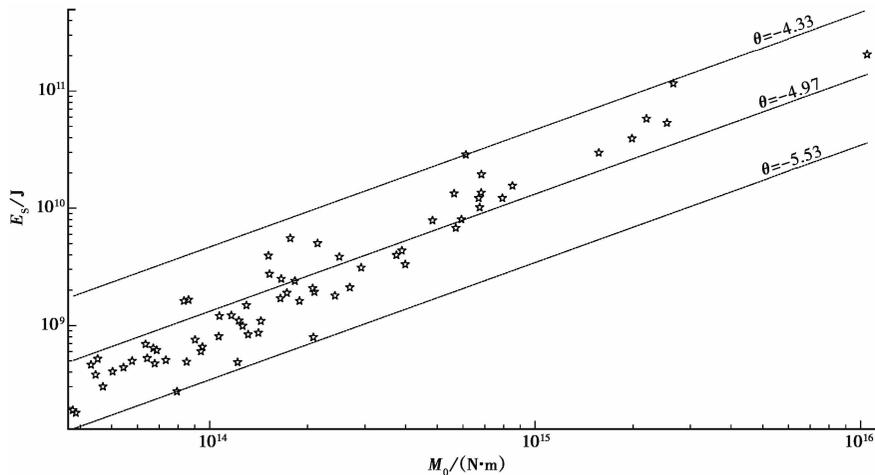


图 3 余震序列的地震波辐射能量与标量地震矩间的关系

图 3 显示余震序列 θ 值为 $-4.33 \sim -5.53$, 均值为 -4.97 。标量地震矩 M_0 约为 2.0×10^{14} $N \cdot m$, 震级上约相当于 $M_L 3.5$, 为余震序列 θ 值的一个显著分界点; 当 $M_0 \geq 2.0 \times 10^{14}$ $N \cdot m$ 时, 可对应序列中 $M_L 3.5 \sim 5.2$ 余震, 其 θ 值大多为 $-4.97 \sim -4.33$; 当 $M_0 < 2.0 \times 10^{14}$ $N \cdot m$ 时, 可对应序列中 $M_L 3.0 \sim 3.4$ 余震, 其 θ 值大多为 $-5.53 \sim -4.97$ 。根据余震序列 θ 值分布情况, 我们假定在这 2 个震级区间内, 视应力与震级间的相关性可被接受(Convers et al, 2011)。因此, 为最大可能减少震级对视应力的影响, 同时在考虑 θ 值分布和样本量的情况下, 本文选取 $M_L 3.0 \sim 3.4$ 、 $M_L 3.5 \sim 5.2$ 震级区间内的余震进行视应力随时间变化的研究。

3 结果

3.1 主震视应力估计

由于 Brune 圆盘模型不适用于大地震的发震模式,因此,本文采用 USGS 提供的标量地震矩和根据震级-能量关系得到的地震波辐射能量来估计主震视应力。地震波能量与震级间的关系为(Gutenberg, 1945)

$$\lg E_s = 1.5M_s + 4.8 \quad (6)$$

式中, E_s 为地震波辐射能量,单位为 J; M_s 为面波震级(周期约为 20s)。USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a5x1#executive>) 给出九寨沟 7.0 级地震标量地震矩为 $7.2 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$ 和由 1131 个台站测定的面波(周期 20s)震级 M_s 为 6.8,根据式(6)求得地震波辐射能量为 $1.0 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$,由此可估算此次九寨沟 7.0 级地震视应力为 4.15MPa。

陈学忠等(2003)对强震视应力与后续地震强度间的关系进行了研究,结果显示低视应力地震多数属于主-余型,震区后续发生较强地震的可能性较小。钟羽云等(2004)对中国大陆 107 次 5 级以上地震视应力计算结果也表明,对走滑型地震而言,若视应力大于 6MPa,则可能为多震型地震,其后发生较大或更大地震的可能性相对较大;若地震视应力 $\leq 6\text{MPa}$,则可能为孤立型或主-余型,其后发生较大或更大地震的可能性较小。

因此,基于本文主震视应力研究结果,并结合主震的发震机制(易桂喜等,2017;杨宜海等,2017)认为,此次九寨沟 7.0 级地震断层错动驱动力较小,序列为主-余型或孤立型的可能性较大。据中国地震台网中心震情监视报告^①,九寨沟地震序列类型为主-余型。这与前人应用强震视应力进行地震序列类型判定的研究结果一致(陈学忠等,2003;钟羽云等,2004)。

3.2 余震序列视应力随时间的变化及分段视应力特征

图 4 为余震序列视应力随时间的变化。由图 4 可见,序列在震后早期阶段视应力水平较高,主震发生后不到 1 天视应力开始降低,主震发生 1 周后基本平稳,略有起伏。2 个震级区间的视应力变化基本一致,因此,结果比较可靠。

在讨论整个余震序列视应力随时间变化的基础上,考虑到余震区东南段和西北段地震活动和地震数量等因素(图 2),本文选用 3 个时间段探讨 2 个空间段的视应力状态。表 1 给出了余震区东南段与西北段 M_L 3.0~3.4 地震视应力平均值和绝对偏差,其中,表中的差值是指平均视应力差值,即东南段平均视应力值与西北段平均视应力值之差,绝对偏差差值可由表 1 中数据得到。在主震发生后至最大余震发生(包括最大余震),东南段视应力平均值为 2.8bar,西北段为 2.7bar,平均视应力差值为 0.1,绝对偏差差值为 -0.2,反映了东南段视应力水平略高于西北段,或两段相当;最大余震发生至震后 2 周,东南段视应力平均值为 2.5bar,西北段为 2.7bar,与第 1 阶段相比,东南段视应力下降,西北段维持;震后 2 周至震后 70 天,东南段视应力平均值为 1.8bar,西北段为 2.4bar,与第 2 阶段相比,西北段、东南段视应力均下降,但西北段高于东南段。表 2 给出了余震区东南段与西北段 M_L 3.5~5.2 余震视应力平均值和绝对偏差。由表 2 可见,第 1 阶段,东南段平均视应力值为 7.4bar,西北段为 6.6ba,平均视应力差值为 0.8,绝对偏差差值为 -0.86,反映了东南段视应力水平略高于西北段,或两

^① 中国地震台网中心,2017,中国地震局震情监视报告(2017)第 9 期月会商意见

段相当;第2阶段,东南段视应力平均值为4.5bar,西北段为6.6bar,反映了东南段视应力下降,西北段维持;第3阶段,东南段视应力平均值为2.5bar,西北段为3.4bar,反映了西北段和东南段视应力均下降,但西北段高于东南段。

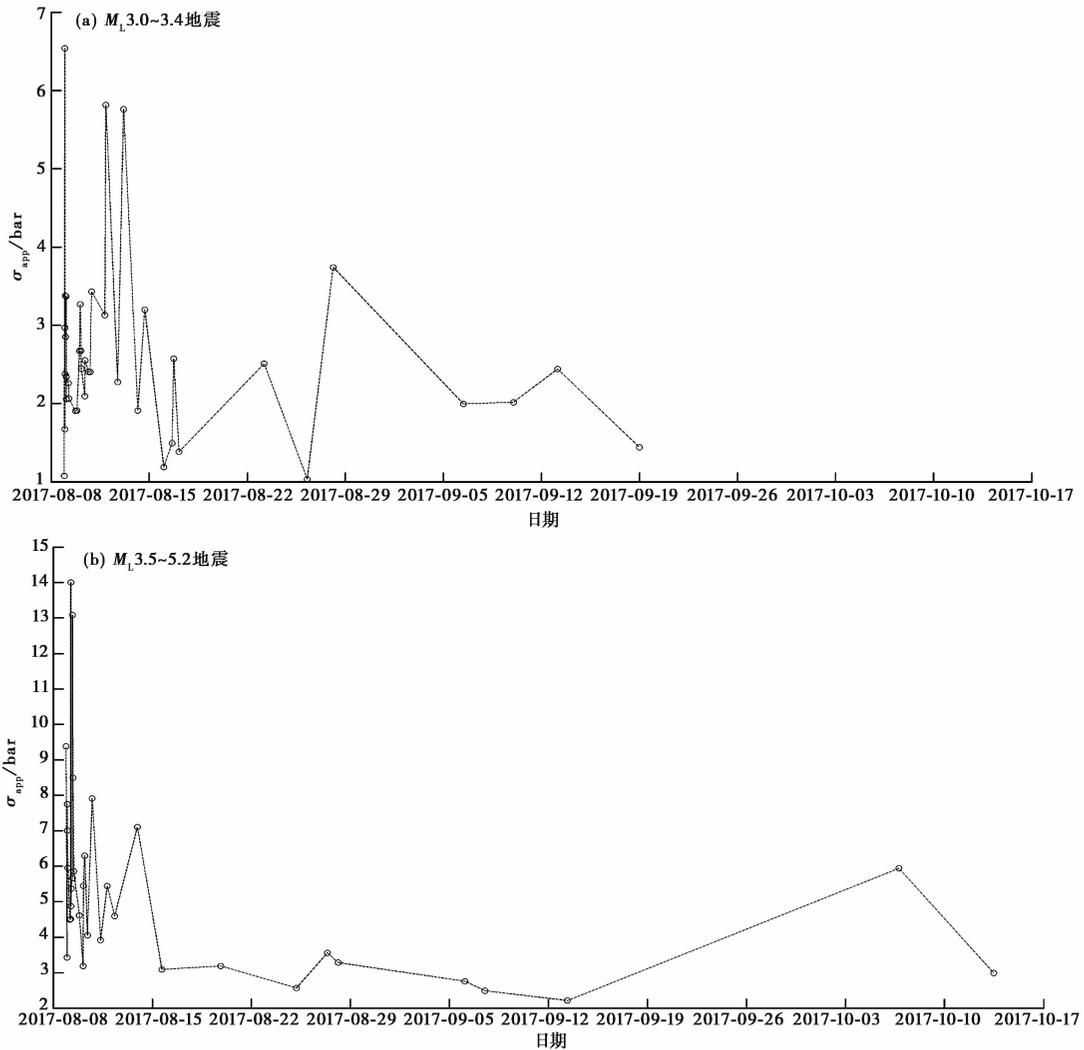


图4 余震序列视应力随时间的变化

表1 余震区东南段与西北段 M_L 3.0~3.4 地震视应力对比

时段 (年-月-日)	东南段			西北段			差值
	平均视应力/bar	绝对偏差	样本数	平均视应力/bar	绝对偏差	样本数	
2017-08-08~2017-08-09 (主震至最大余震发生)	2.8	0.72	4	2.7	0.92	10	0.1
2017-08-09~2017-08-22 (最大余震至震后2周)	2.5	0.73	15	2.7	0.82	8	-0.2
2017-08-23~2017-10-17	1.8	0.52	3	2.4	0.69	4	-0.6

表 2 余震区东南段与西北段 $M_L 3.5 \sim 5.2$ 地震视应力对比

时段 (年-月-日)	东南段			西北段			差值
	平均视应力/ $\bar{\sigma}$	绝对偏差	样本数	平均视应力/ $\bar{\sigma}$	绝对偏差	样本数	
2017-08-08 ~ 2017-08-09 (主震至最大余震发生)	7.4	2.15	9	6.6	3.01	5	0.8
2017-08-09 ~ 2017-08-022 (最大余震至震后 2 周)	4.5	1.06	10	6.6	1.23	2	-2.1
2017-08-23 ~ 2017-10-17	2.5	0.04	2	3.4	0.74	7	-0.9

由表 1、2 可见,其结果的一致性较好,均揭示了余震区应力状态存在时空分段差异,东南段视应力下降较快,西北段下降较缓,最大余震发生前,东南段视应力水平略高或相当于西北段,最大余震发生至震后 70 天,西北段视应力水平高于东南段。上述分析是在 2 个震级区间分别进行的,结果具有较好的一致性,因此,结论较可靠。

九寨沟 7.0 级地震震中西北方向东昆仑断裂带东段存在明显地震空区 (Wen et al, 2007),东南方向虎牙断裂上发生过 1973~1976 年四川松潘强震序列 (朱航等,2009),因此,不排除此次地震震中东南方向与其破裂段贯通的可能,这或对余震区西北段破裂不充分和视应力下降较缓而东南段破裂相对较充分和视应力下降相对较快有贡献。

3.3 余震序列视应力空间分布

九寨沟 7.0 级地震序列不同时段视应力的空间分布如图 5 所示,图 5(a) 给出了主震震后至 $M_L 5.2$ 最大余震 (震中位于主震震中东南侧附近,发生在主震后约 13h) 之前视应力空间分布。由图 5(a) 可见,最大余震发生在主震震中东南侧视应力值比较高的区域,较高视应力余震分布在主震震中两侧接近端部。相关研究表明,九寨沟 7.0 级地震破裂模式为双侧扩展 (张旭等,2017)。在扩展端部,应力相对容易集中,震后早期高视应力余震分布在主震震

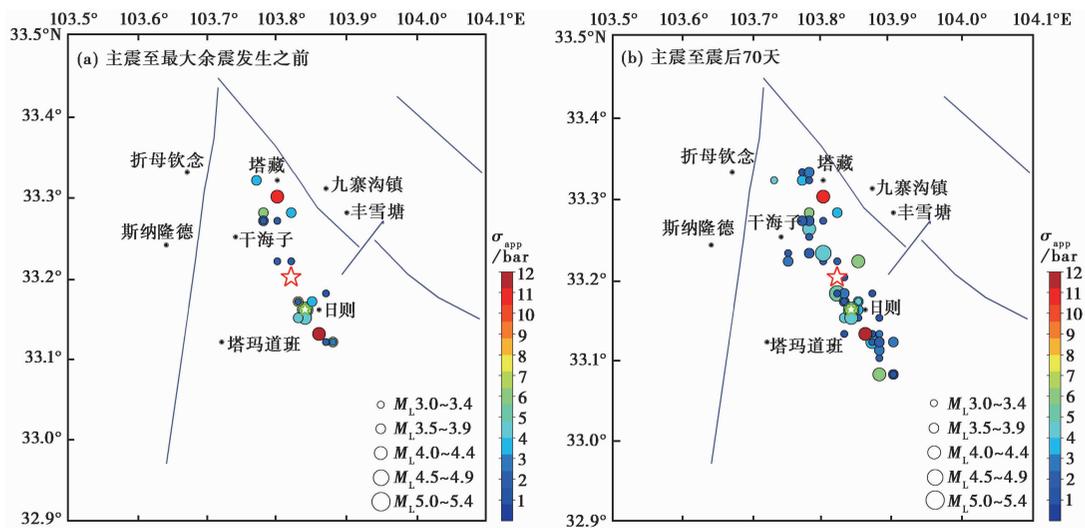


图 5 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震 $M_L 3.0 \sim 5.2$ 余震视应力空间分布
红色五角星为主震;绿色五角星为最大余震

中两侧靠近端部与其一致。图 5(b) 给出了主震后 70 天内余震视应力空间分布。由图 5(b) 可见,在主震震中两侧靠近端部的高视应力地震周围发生了一定数量的 $M_L \geq 3.0$ 地震。

4 结论与讨论

本文利用截至 2017 年 10 月 20 日的数字地震波形资料,采用波形分析和反演方法,获得 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震序列 79 次 $M_L 3.0 \sim 5.2$ 余震的视应力,对于不适合 Brune 圆盘模型的主震,采用 USGS 提供的标量地震矩和根据震级-能量关系得到的地震波辐射能量估算其视应力,并分析了震源区的应力状态。

(1) 九寨沟 7.0 级地震视应力为 4.15MPa,结合主震的发震机制认为,此次地震断层错动驱动力较小,序列为主-余型或孤立型的可能性较大。据中国地震台网中心震情监视报告^①,九寨沟地震序列类型为主-余型。这与前人应用强震视应力进行地震序列类型判定的研究结果一致。本文估计主震视应力时,采用 USGS 提供的地震矩 M_0 ,但辐射能量 E_s 是利用面波震级通过经验关系换算得到的,其虽具有一定的不确定因素,但若采用合适的面波震级和经验关系,仍具有参考价值。

(2) 九寨沟地震余震序列视应力随时间的变化显示,震后早期阶段视应力较高,主震发生后不到 1 天视应力开始降低,主震发生 1 周后基本平稳,略有起伏。余震区应力状态存在空间差异,余震区东南段视应力下降较快,而西北段下降较缓,震后早期东南段余震平均视应力水平略高于西北段,或两段相当(考虑绝对偏差),最大余震发生至震后 2 周,东南段视应力降低显著,西北段维持;震后 2 周至 70 天,西北段视应力开始下降,但明显高于东南段,这可能反映了震源区东南段比西北段破裂充分。此次地震西北方向存在地震空区(Wen et al, 2007),东南方向虎牙断裂上发生过 1973~1976 年四川松潘强震序列(朱航等, 2009),不排除与其破裂段贯通的可能,这或与东南段比西北段破裂充分有关。余震视应力空间分布特征为,最大余震发生在主震东南侧视应力值较高的区域,较高视应力余震分布在主震震中两侧接近端部,与主震双侧扩展端部应力相对集中的结果一致(张旭等, 2017)。

(3) 为了减小震级对视应力的影响,本文依据获得的余震序列能量地震矩比率判别参数 θ 的分布特征,同时在考虑样本量的情况下,将余震序列分为 2 个震级区间讨论视应力的变化。这种划分法虽较为粗糙,但是从 2 个震级区间获得的结果和揭示的现象比较一致来看,本文的结论较可靠,该划分法具有一定合理性。此外,震源机制类型和震源深度对视应力有一定的影响,具体影响程度还需进一步深入研究。

参考文献

- 陈学忠、李艳娥, 2007, 2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_s 5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化, 中国地震, **23**(4), 327~336。
- 陈学忠、李艳娥、郭祥云, 2011, 河北文安 $M_s 5.1$ 地震前首都圈及邻区震源动力学参数时空变化特征, 地震, **31**(4), 15~25。
- 陈学忠、王小平、王林瑛等, 2003, 地震视应力用于震后趋势快速判定的可能性, 国际地震动态, (7), 1~4。
- 邓起东、陈社发、赵小麟, 1994, 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学, 地震地质, **16**(4), 389~403。
- 华卫、刘杰、郑斯华等, 2006, 2003 年云南大姚 6.2、6.1 级地震序列特征分析及地震触发研究, 中国地震, **22**(1), 10~23。
- 季灵运、刘传金、徐晶等, 2017, 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的 InSAR 观测及发震构造分析, 地球物理学报, **60**(10), 4069~4082。
- 李艳娥、陈丽娟、王生文等, 2015, 山东地区地震视应力时空变化特征研究, 地震, **35**(2), 80~90。

- 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。
- 刘红桂、刘杰、丁页岭等, 2006, 地震视应力在云南地震序列中的前兆特征, *地震学报*, **28**(5), 462~471。
- 王林瑛、陈佩燕、陈学忠等, 2005, 辽宁岫岩地震序列地震运动学参数时变特征的研究, *地震*, **25**(2), 1~8。
- 王琼、陈学忠、王林瑛, 2005, 岫岩地震序列视应力变化及其预测意义, *地震*, **25**(2), 91~97。
- 吴微微、苏金蓉、魏娅玲等, 2016, 四川地区介质衰减、场地响应与震级测定的讨论, *地震地质*, **38**(4), 1005~1018。
- 吴忠良, 2001, 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义, *中国地震*, **17**(1), 8~15。
- 吴忠良、黄静、林碧苍, 2002, 中国西部地震视应力的空间分布, *地震学报*, **24**(3), 293~301。
- 徐锡伟、吴熙彦、于贵华等, 2017, 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用地震地质, **39**(2), 219~275。
- 杨宜海、范军、花茜等, 2017, 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*, **60**(10), 4098~4104。
- 易桂喜、龙锋、梁明剑等, 2017, 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*, **60**(10), 4083~4097。
- 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。
- 张旭、冯万鹏、许力生等, 2017, 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震震源过程反演与烈度估计, *地球物理学报*, **60**(10), 4105~4116。
- 钟羽云、张帆、张震峰等, 2004, 应用强震应力降和视应力进行震后趋势快速判定的可能性, *防灾减灾工程学报*, **24**(1), 8~14。
- 周少辉、蒋海昆, 2017, 景谷 6.6 级、鲁甸 6.5 级地震序列应力降变化对比研究, *中国地震*, **33**(1), 23~37。
- 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。
- Aki K, Richards P G, 1980, *Quantitative seismology, theory and methods*, Freeman & Company San Francisco, California.
- Andrews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, In: Das S, Boatwright J, Scholz CH, *Earthquake source mechanics*, Washington D C: AGU, 259~267.
- Choy G L, Boatwright J L, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, *J Geophys Res*, **100**(B9), 18205~18228.
- Convers J A, Newman A V, 2011, Global evaluation of large earthquake energy from 1997 through mid-2010, *J Geophys Res*, **116**(B8), B08304.
- Gutenberg B, 1945, Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **35**(1), 3~12.
- Harris R A, Simpson R W, 1998, Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure, *J Geophys Res*, **103**(B10), 24439~24452.
- Mcgarr A, 1999, On relating apparent stress to the stress causing earthquake fault slip, *J Geophys Res*, **104**(B2), 3003~3012.
- Newman A V, Okal E A, 1998, Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The E/M0 discriminant for tsunami earthquakes, *J Geophys Res*, **1032**(B11), 26885~26898.
- Pulido N, Irikura K, 2000, Estimation of dynamic rupture parameters from the radiated seismic energy and apparent stress, *Geophys Res Lett*, **27**(23), 3945~3948.
- Scherbaum F, Kisslinger C, 1984, Variations of apparent stresses and stress drops prior to the earthquake of 6 May 1984 ($m_b = 5.8$) in the Adak Seismic Zone, *Bull Seism Soc Am*, **74**(6), 2577~2592.
- Snoke J A, 1987, Stable determination of (Brune) stress drops, *Bull Seism Soc Am*, **77**(2), 530~538.
- Wen X Z, Yi G X, Xu X W, 2007, Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the 8.1, 2001, Kokoxili earthquake, China, *Journal of Asian Earth Sciences*, **30**(1), 63~72.
- 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.
- Zúñiga F R, Wyss M, Wilson M E, 1987, Apparent stresses, stress drops, and amplitude ratios of earthquakes preceding and following the 1975 Hawaii $M_s = 7.2$ main shock, *Bull Seism Soc Am*, **77**(1), 69~96.

Temporal and spatial characteristics of apparent stress of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake sequence

Qiu Yurong Liu Chun Yang Yiha Shao Huicheng Shi Jun Shi Fuqiang Liu Jie
Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

Abstract In this paper, we apply the waveform analysis and inversion to determine the apparent stresses of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake sequence by using the digital seismic waveform from the China Digital Seismograph Network. The main conclusions are: ① The apparent stress of the Jiuzhaigou earthquake sequence was at relative high level in the early stage, and began to decrease in less than a day after the main shock. The apparent stress is at a stable level after the first week since the main shock, although the apparent stress curve had a slight fluctuation. ② The apparent stress showed temporal and spatial differences, the apparent stress level in the southeast section decreased more rapidly than the northwest section, and the mean apparent stress level in the southeast section was slightly higher than or equal to the northwest section in the early stage; while from the largest aftershock to 70 days after the main shock, the stress level in the northwest section was higher than the southeast section, which might be related to the more full rupture of the southeast section than the northwest section. ③ The largest aftershock occurred on the southeast side of the main shock, where the apparent stress was at a relative high level. The aftershocks of high apparent stress were nearly located at the both ends of the source areas, which was consistent with the relative concentration of the stress at these areas under the bilateral expansion of the main shock.

Key words: Earthquake sequence; Apparent stress; Bilateral expansion; Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake