

云南双震型地震序列震源参数特征研究*

叶建庆, 李 勇, 段 毅, 蒋飞蕊

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要:采用云南区域测震台网资料,运用布伦模式方法测算云南地区震源参数,对盐津、腾冲和川滇交界地区3个典型的双震型地震序列震源参数进行了综合分析研究。结果表明双震型地震震源参数中,首次强震的应力降较低,可能是受震源区存在障碍体的影响,构造应力未能在首次地震中得以完整释放,再次发震其应力降值较高,表明已突破障碍体。从地震预测角度,首次地震的应力降大小,可以初步判定震区未来是否可能再次发震。

关键词:双震型地震;震源参数;应力降;障碍体;地震预测

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0594-09

0 引言

一次中强地震的类型判定的正确与否,直接关系到后续的地震应急、救灾和灾区的稳定。近百年来,有了仪器观测记录以后,人们对地震的类型有了一个较为量化的认识,安艺敬一和理查兹(1986)从地震断层运动的应力聚集与释放,提出了障碍体模式,较好地解释了地震序列产生的原因。从观测角度,以地震序列中的能量分布,主震能量所占比例和活动形态作为判别标志,将地震序列分为主震型、强震群型和孤立型(时振梁等,1992)。目前,地震学界普遍将 $M \geq 5.0$ 的地震序列划分为孤立性、主震—余震型、双震型和震群型,其中双震型地震序列定义为两次主要地震的震级差小于等于0.5级,且时间间隔大于两分钟(中国地震局,1998)。云南是一个多地震地区,其境内地震类型呈多样性,皇甫岗等(2010)从地震序列类型和震源机制解两方面对云南地区的地震类型进行研究,给出了云南地震类型分区特征。滇东区为走滑—主余震型区,滇西北为倾滑—震群型区,滇西区为准走滑—双震型区,滇西南为走滑—主余震型区,这类分区特征在震型的初步判定上有一定的指示意义。陈学忠等(2003),钟羽云等(2004)从地震释放的能量和应力的角度预测地震类型,利用强震应力降和视应力大小探讨震后趋势的快速判定。

云南是内陆地区,其内发生的地震属于板内地震。纵观历史上云南 $M \geq 5.0$ 强震,可以看出,云南境内几乎所有地方均发生过中强地震。境内断层纵横交错,不同的地质时期形成的断裂带或断层,所能承受的应力具有明显的差异性,使云南地区的地震活动类型呈多样性特征,其中双震型和多震型地震约占三分之一(皇甫岗等,2010)。本文从强震应力释放的角度探讨云南境内双震型地震震源参数特征,从预测的角度探讨第二次强震可能的强度和发震时间。

1 观测资料及数学处理方法

1.1 观测资料

云南数字测震台网自1998年12月1日开始正式运转以来,至2013年12月31日已累计记录到云南省及周边地区 $1.0 \leq M_{(L,S)} \leq 7.0$ 地震11万余次,其中 $3.0 \leq M_{(L,S)} \leq 3.9$ 地震2240次, $4.0 \leq M_{(L,S)} \leq 4.9$ 地震245次, $5.0 \leq M_{(L,S)} \leq 5.9$ 地震42次, $6.0 \leq M \leq 6.9$ 地震6次。

1.2 数学处理方法

对云南数字地震台网的地震记录的波形数据进行识别,选取震中附近的7个左右台站记录波形数据进行数据格式处理,应用MATLAB语言对格式转换后的波形数据进行回放,在事件波形的回放过程中扣除各台的仪器响应,回放以后的地震波数据直接反映的是地面运动的速度($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

* 收稿日期: 2014-03-13.

基金项目: 云南省重点项目“青藏高原东缘强震活动规律与板缘动力学机制”项目(2010CC006)资助.

对地震波形数据进行零点校正，倾斜校正和高通滤波等预处理。

震源参数计算采取对 S 波取固定窗，窗长 20 s，用快速傅立叶变换（FFT）对 S 波窗数据计算地震波位移谱。根据地震位移谱的低频部分确定波谱零频值 $\Omega(0)$ ，由谱的高低频渐近线确定频谱的拐角频率，地震矩为

$$M_0 = \Omega(0)4\pi\rho r^3(V)^{-1}(P_c)^{-1}.$$

(1)

其中， $\Omega(0)$ 是由地震位移谱确定的波谱零频值； ρ 是介质密度，为 2.8 g/cm^3 ； r 为震源距； V 是震源处 P 波或 S 波的速度，分别取为 $V_\alpha = 6.0\text{ km/s}$ 和 $V_\beta = 3.5\text{ km/s}$ 。 R 为辐射图型因子，取平均值 0.63，由于参与计算的台站位于不同的方位，计算结果为多台平均，可有效消除 S 波辐射图型影响； P_c 为地震波的路径校正， $P_c = Ce^{(-\pi f/Q)}$ ，其中 C 为自由表面影响，按一般算法取 $C = 2$ ， f 为波的主频率， t 为地震波走时， Q 为介质的品质因子，根据秦嘉政和阚荣举（1986）、苏有锦等（2006）的研究，云南地区的 Q 值存在地区差异。本文研究比较了 Q 值分别取 500、300、200 和 100 对震源参数的影响，结果表明其计算结果差异仅为 1% 左右，因此取 Q 值为 200。

用 Brune（1970）的圆位错模式计算震源参数，有下述关系式：

$$r = \frac{2.34V_{(P,S)}}{2\pi f_{0(P,S)}},$$

(2)

$$A = \pi r^2,$$

(3)

$$U = \frac{M_0}{\mu A},$$

(4)

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3}.$$

(5)

其中， r 是震源的等效圆位错半径； $f_{0(P,S)}$ 是 P 波或 S 波的拐角频率； $V_{(P,S)}$ 是震源处 P 波或 S 波的速度； $\Delta\sigma$ 为应力降； A 为断层面面积； U 是断层面上的错动距离； μ 为切变模量，取 $\mu = 3.4 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$ 。

采用 S 波计算 1999 ~ 2013 年云南省 $3.0 \leq M_{(L,S)} \leq 6.6$ 的 2 533 次地震震源参数，S 波取值从 S 波起始到 S 波最大值至 S 波衰减，数据窗长 20 s，地震矩和拐角频率计算值均为两水平分量的平均结果，各震源参数均为多台的平均计算结果。地震矩和拐角频率计算值均为三分量的平均结果。表 1 列出了近 15 年来云南省 $3.0 \leq M_{(L,S)} \leq 6.6$ 地震各震源参数取值范围。

表 1 1999 ~ 2013 年云南省 $3.0 \leq M_{(L,S)} \leq 6.5$ 地震震源参数取值范围

Tab. 1 Source parameter range of $3.0 \leq M_{(L,S)} \leq 6.5$ earthquakes in Yunnan between 1999 and 2013

地震矩 $M_0/\text{N} \cdot \text{m}$	拐角频率 F_0/Hz	震源半径 r/km	破裂面积 A/km^2	位错 U/cm	应力降 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
$10^{12} \sim 10^{17}$	0.31 ~ 4.06	0.350 ~ 4.141	0.384 ~ 62.311	0.039 ~ 68.67	0.011 ~ 25.77

根据震源参数计算结果，将地震应力降与震级作线性回归分析（图 1），得到

$$\lg(\Delta\sigma) = 0.65M_L - 2.74.$$

(6)

表 2 列出了由式（6）得到的相关震级对应的应力降值，并给出实际震源参数的最大值和最小值。

1.3 误差分析

由图 1 和表 2 可知，应力降计算结果较为离散，同一震级的应力降值存在较大的差异，一般由多台资料测定 M_0 的误差为 2（对数尺度 ± 0.3 ）， f_0 的误差为 1.5（对数尺度 ± 0.2 ）（郑治真，1983）。应力降计算结果为多台平均，本文引入应力降的标准偏差概念，将应力降标准偏差与测定结果本身的比值定义为相对标准偏差（吴忠良等，

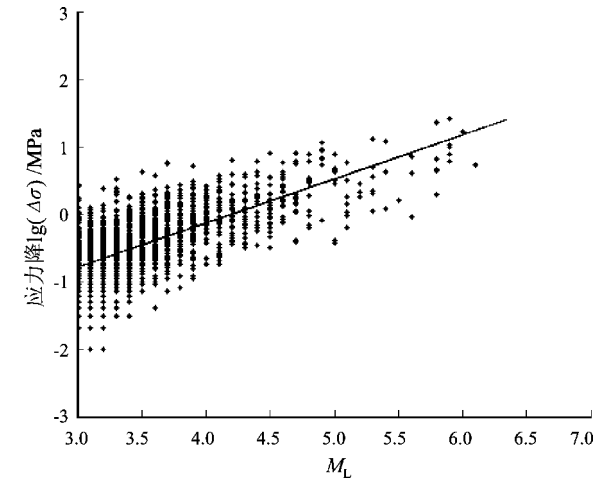


图 1 云南地震应力降与震级的线性回归关系图
Fig. 1 Linear regression relationship between magnitude and stress drop in Yunnan

表 2 震级与对应的应力降值
Tab. 2 Relationship between magnitude and stress drop

M_L	应力降/MPa	最小值/MPa	最大值/MPa	M_L	应力降/MPa	最小值/MPa	最大值/MPa
3.0	0.16	0.02	2.66	4.9	2.84	0.79	11.44
3.1	0.19	0.01	1.24	5.0	3.30	0.37	7.79
3.2	0.22	0.01	2.39	5.1	3.83	0.62	5.91
3.3	0.26	0.03	3.28	5.2	4.46	1.82	2.78
3.4	0.30	0.03	1.82	5.3	5.18	1.09	12.91
3.5	0.35	0.07	4.25	5.4	6.02	1.21	11.76
3.6	0.40	0.04	3.65	5.5	6.99	1.57	1.57
3.7	0.47	0.07	5.84	5.6	8.12	0.91	6.99
3.8	0.54	0.08	2.70	5.7	9.44		
3.9	0.63	0.11	5.09	5.8	10.97	1.98	22.50
4.0	0.74	0.18	2.60	5.9	12.75	6.08	25.77
4.1	0.85	0.18	3.79	6.0	14.81	16.3	16.30
4.2	0.99	0.35	6.21	6.1	17.21		
4.3	1.15	0.31	3.83	6.2	20.00		
4.4	1.34	0.34	6.10	6.3	23.24		
4.5	1.56	0.31	7.87	6.4	27.01		
4.6	1.81	0.73	5.78	6.5	31.38	4.84	19.40
4.7	2.10	0.38	7.97	6.6	36.47	18.70	18.70
4.8	2.44	0.63	7.60				

2002)。图 2a 给出了应力降与震级之间的关系，图 2b 为应力降测定的相对标准偏差分布。从图中可以看出，应力降测定的相对标准偏差主要分布于 2.0 以下，峰值在 1.0 左右，其相对标准偏差可能出自多台资料的 M_0 、 f_0 的测量误差。

2 震例分析

2.1 2006 年盐津地震

2006 年 7 月 22 日盐津县豆沙镇发生 5.1 级地震，其应力降为 1.42 MPa，明显低于表 2 中 5.1 级地震相应的应力降值，表明该地震应力释放并不充分，在其后的余震中未发生 3.0 级以上的地震，直至 8 月 25 日 8 时 57 分发生的一次 3.3 级余震后应力降为 2.24 MPa，其应力释放高于主震，当日 13 时 51 分在原震区内再次发生 5.1 级地震。第二次 5.1 级地震应力降为 2.80 MPa。间隔 34 d 在原震源区内再次发生相同量级的地震，叶建庆等（2008）从监测的角度对盐津 5.1 级双震做了研究，认为一种可能的震源机制为震源体内存在障碍体，震源区在应力作用下，较为脆弱的岩层首先破裂，引发第一次强震，但由于障碍体的存在，应力释放较小，通过一段时间的应力调整和

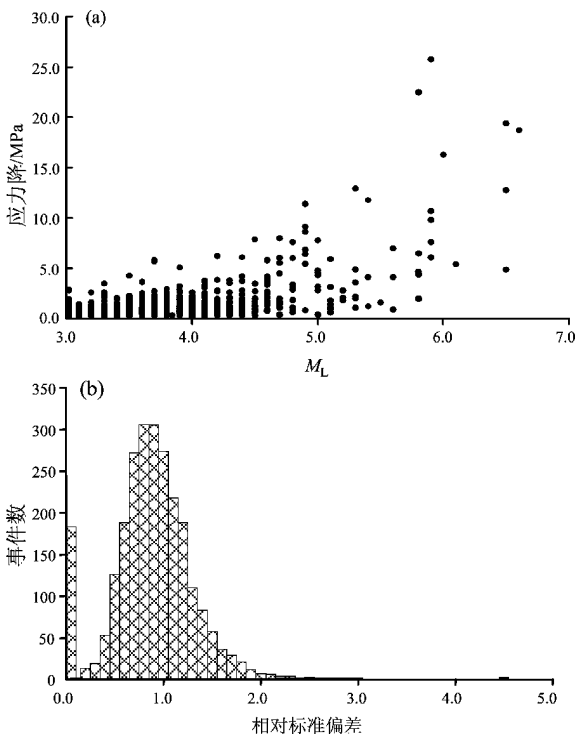


图 2 应力降与震级之间的关系 (a) 及应力降测定的相对标准偏差分布 (b)
Fig. 2 Relationship between stress drop and magnitude (a) and relative standard deviation determined by stress drop (b)

积累,突破障碍物,引发第二次强震。图3给出了四川攀枝花地震台记录的两次盐津5.1级地震的时域波形图和频域谱图,从图中可以看出两次5.1级地震波形及频谱极其相似,表明盐津两次5.1级地震震源环境和介质相同,地震波的传播路径相同,

不同的是两次地震所释放的应力。第一次5.1级地震及其余震累积应力降为3.65 MPa,第二次5.1级地震及其余震累积应力降为7 MPa,是前一次的两倍,说明第二次地震后应力释放较为充分,原震区在短时间内再次发生较大地震的可能性较小。

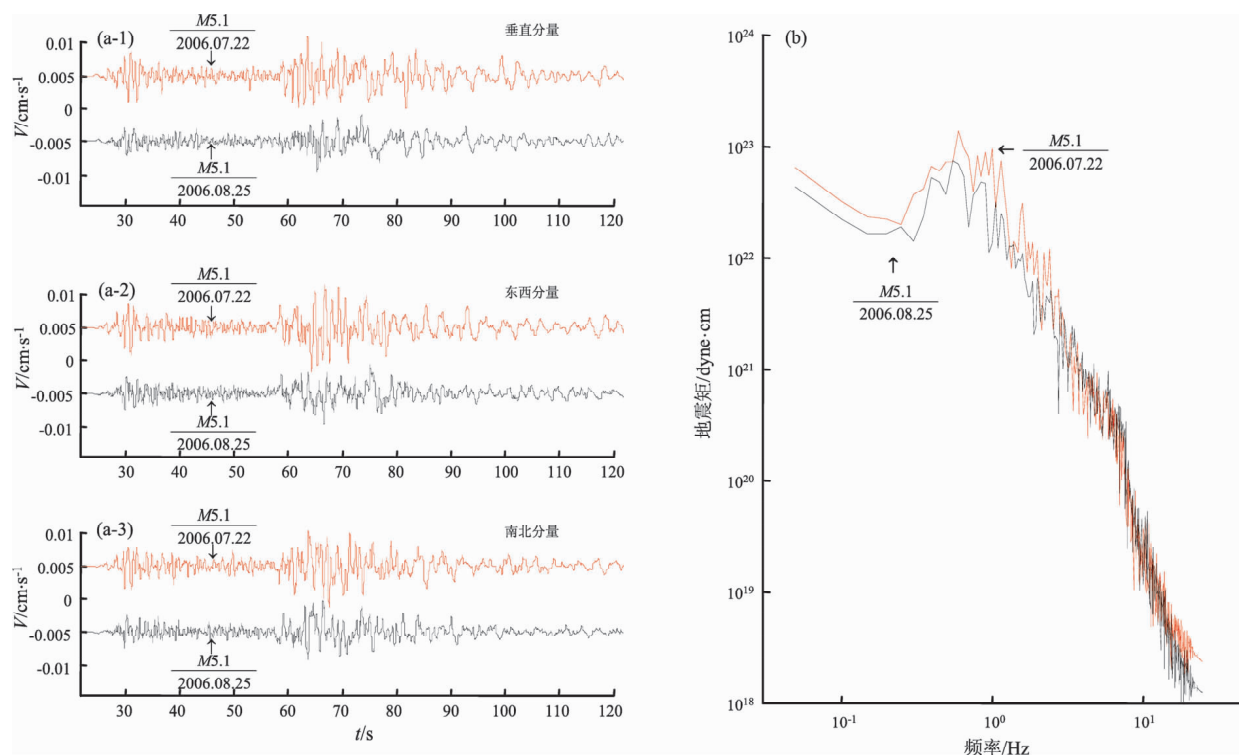


图3 四川攀枝花地震台记录的两次盐津5.1级地震的时域波形图(a)和频域位移振幅谱(b)

Fig. 3 Waveform in time domain (a) and amplitude spectrum of displacement in frequency domain (b) of Yanjin $M_{5.1}$ double shock earthquakes recorded by Panzhihua Station

2.2 2011年腾冲地震

2011年6月20日腾冲县上营街发生5.2级地震,8月9日再次发生5.2级地震,属于双震型地震。但腾冲地震有明显的震前活动,在5月25日至6月20日第一次地震前,密集发生了8次 $M_L \geq 3.0$ 地震,其中有1次4.7级地震。因此,2011年的腾冲地震属于前震—双震型地震,这类地震在第一次强震发生后,人们很容易认为是前震—主震—余震型地震,从而忽略第二次强震。如何认识该类型地震,正确判定和预测第二次强震,就需要从区域地震活动的整体背景和所处的构造应力环境加以综合分析。

2008年3月21日盈江5.3级地震以后,盈江腾冲一带地震持续活跃,应力降较高,表明该区域地震应力背景值较高。2011年3月10日盈

江5.8级地震发生在北东向的大盈江断层上,该断层贯穿至腾冲止于北南走向的怒江断裂带。在这样的地震活动大背景下,处于盈江断裂与怒江断裂交汇的上营街从5月25日开始有小震活动,与盈江地震相呼应,处在同一构造带上不同的部位相继发生较高量级的地震活动,且应力降较高,累积达到3.56 MPa,其中5月31日发生的4.7级地震,应力降为1.47 MPa,低于表2中相应震级的应力降值,表明应力释放不充分,预示后续仍有较高应力降的地震。6月20日第一次5.2级地震,应力降为4.12 MPa,其值仍然低于表2中相应震级的应力降,应力释放仍不充分。因此,不能排除后续仍有发生强震的可能性,经过近50 d的应力调整和积累,8月9日在原震区再次发生5.2级地震,此次地震应

力降为 6.99 MPa, 高出表 2 中相应震级应力降值的 50%, 应力释放较为充分。整个腾冲地震序列应力降约为 24.35 MPa。图 4 为保山地震台记录的两次腾冲 5.2 级地震的时域波形图和频

域谱图。由图可见, 两次 5.2 级地震的图像极其相似, 表明腾冲两次 5.2 级地震震源环境和介质相同, 地震波的传播路径相同, 不同的是两次地震所释放的应力。

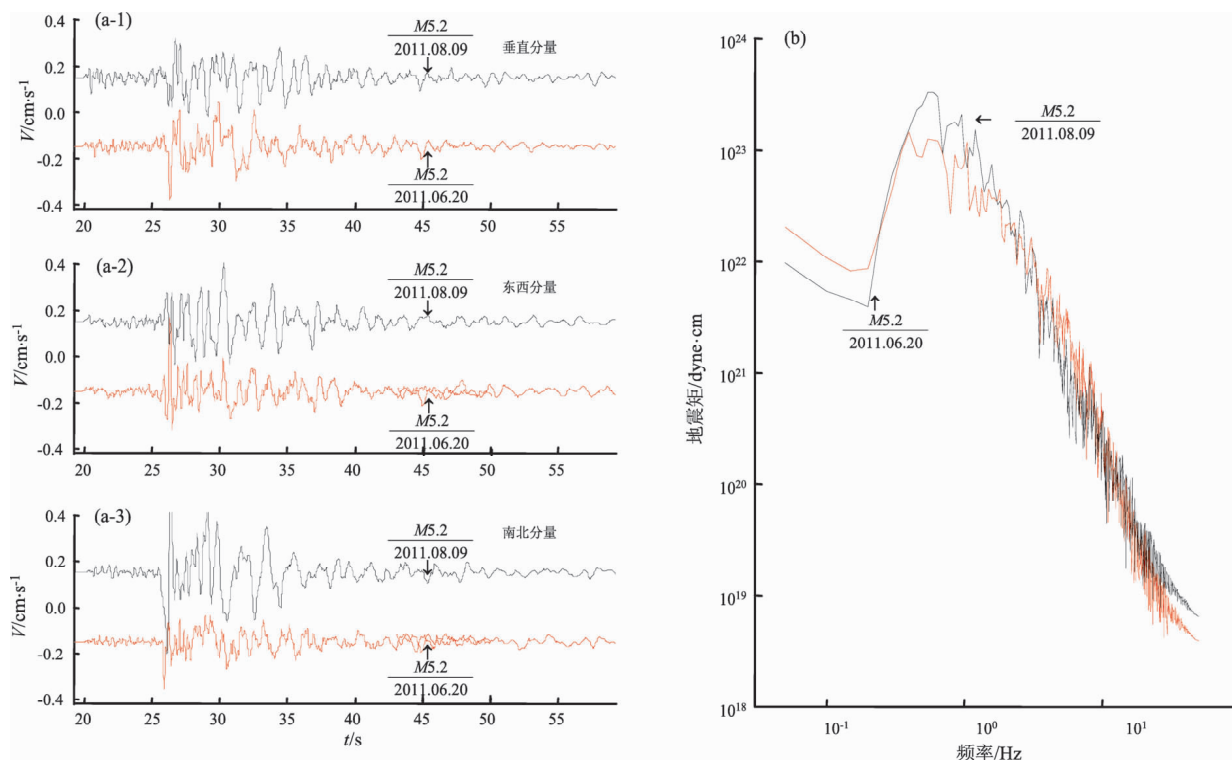


图 4 保山地震台的两次腾冲 5.2 级地震的时域波形图 (a) 和频域位移振幅谱 (b)

Fig. 4 Waveform in time domain (a) and amplitude spectrum of displacement in frequency domain (b) of Tenchong M5.2 double shock earthquakes recorded by Baoshan Station

2.3 2013 年四川得荣云南德钦香格里拉交界地震

2013 年 8 月 28 日四川省得荣县与云南省德钦县和香格里拉县交界地区发生 5.1 级地震, 震前无任何前震, 震后余震较多, 3.0 ~ 4.4 级地震发生了 15 次, 其中一次为 4.4 级, 给人一种主余震型的假象。但从 5.1 级地震的应力降计算值分析可知, 该地震应力降很小, 仅有 0.94 MPa, 仅相当于一个 4.2 级地震所释放的应力降 (表 2), 其后的余震应力降也只有 2.82 MPa, 累积应力降为 3.76 MPa。一个基本认识是 5.1 级地震及其余震应力释放严重不足, 其后应当有一次较大的地震应力释放过程。8 月 31 日在原震区再次发生 5.9 级地震, 应力降为 6.08 MPa, 结合表 2 中相应震级所对应的应力降值, 其应力降值仍然是偏小的。如何看待此问题呢, 一种可能的解释是滇西北及川滇交界地区其地震构造应力背景值较小, 在较

小的构造应力作用下, 就能引发构造断层发生位移; 另一种可能是通过其后大量的余震来释放剩余的应力。截至 2014 年 3 月 31 日, 5.9 级地震后发生了 137 次 3 级以上余震, 余震应力降累积达到 42.1 MPa。5.1 级和 5.9 级地震及其余震应力降累积达到 52 MPa。图 5 展示了四川省乡城地震台记录的 5.1、5.9 级地震时域波形图和频域水平分量合成位移振幅图, 由图可见, 5.1 和 5.9 级地震图像极为相似, 表明两次地震的震源环境和应力作用方式相同, 地震波的传播路径相同。震源体内障碍体的存在, 使得构造体以两次突破的方式完成构造位移, 将积蓄的构造应力通过大量的余震进行调整和释放。图 6 为该次地震震级与应力降时序图像, 由图可见, 5.1 级地震后为低应力降时序, 5.9 级地震及余震为相对高的应力降时序, 随着时间逐渐衰减。

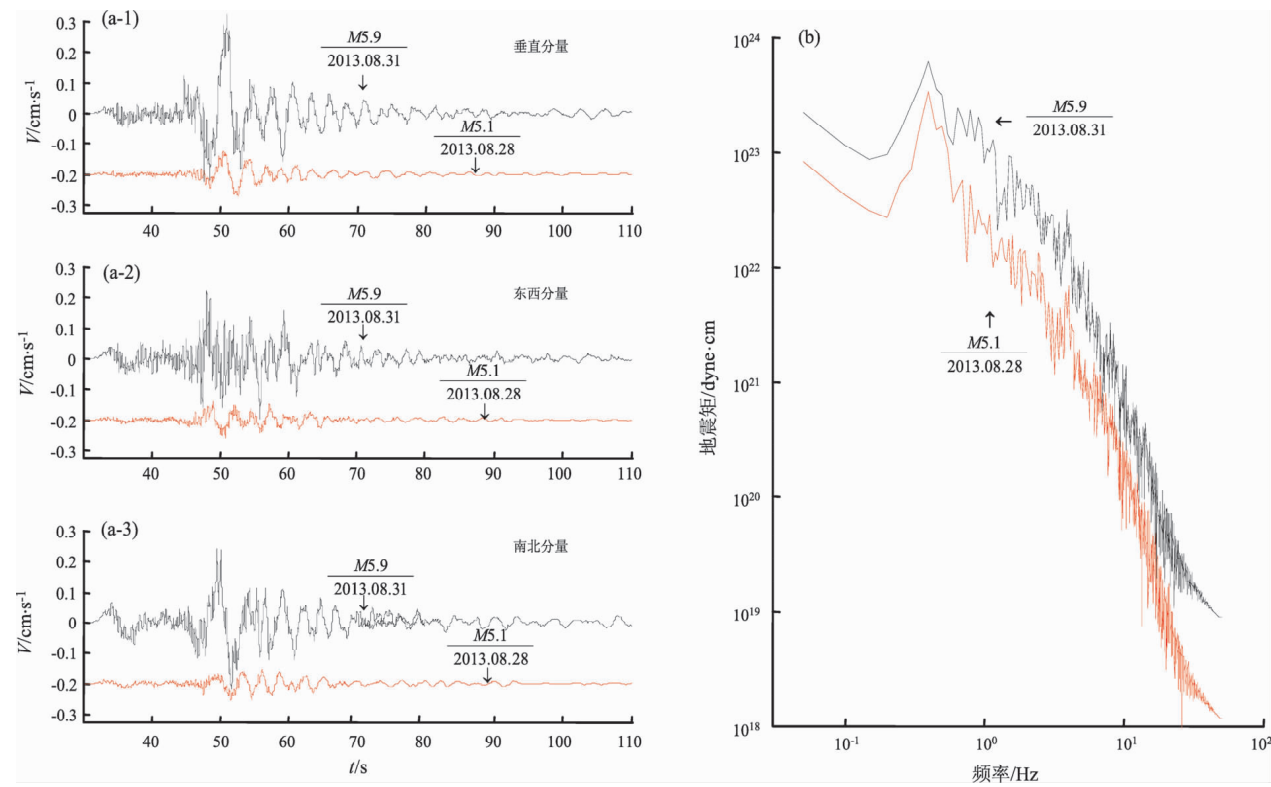


图5 四川省乡城地震台记录的川滇交界5.1、5.9级地震时域波形图 (a) 和频域位移振幅谱 (b)

Fig. 5 Waveform in time domain (a) and amplitude spectrum of displacement in frequency domain (b) of Yunnan-Sichuan junction $M5.1$, $M5.9$ double shock earthquakes recorded by Xiangcheng Station in Sichuan

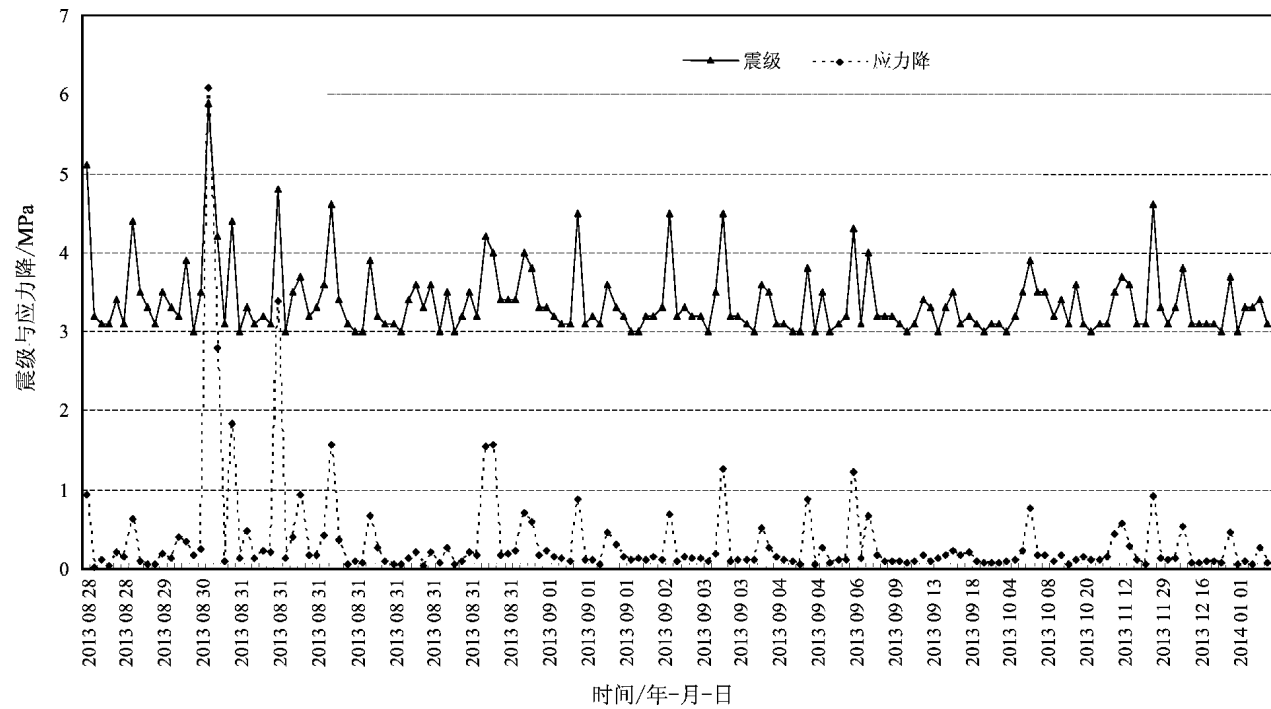


图6 四川省乡城地震台记录的川滇交界5.1、5.9级地震震级与应力降时序图像

Fig. 6 Time sequence chart of magnitude and stress drop in the junction area of Yunnan and Sichuan $M5.1$, $M5.9$ double shock earthquakes recorded by Xiangcheng Station in Sichuan

2.4 2012 年彝良地震

2012 年 9 月 7 日昭通市彝良县洛泽河镇发生 5.7、5.6 级地震,震前无任何前震,11 时 19 分 5.7 级地震发生后,发生了 5 次 3~4 级余震,紧接着 12 时 16 分发生了 5.6 级地震,形成双震型地震。在不到 1 小时的时间内连续发生两次震级相当的地震,从地震应力降分析可知,5.7 级

地震应力降为 4.4 MPa,由表 2 可知,与相应震级的应力降对比,4.4 MPa 低于相应震级的应力降,属于震区应力释放不充分,其后 5.6 级地震应力降为 22.5 MPa,远高于相应震级的应力降,应力释放较为充分,尽管余震较多,但 3 级以上余震应力降较低。图 7 为彝良地震震级与应力降时序图。

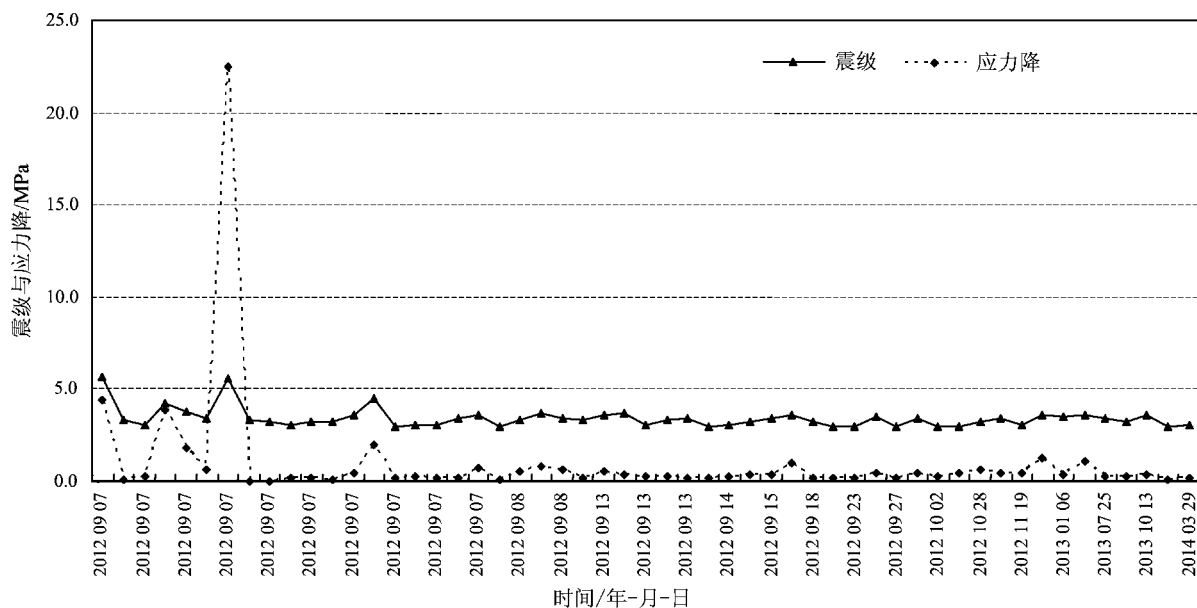


图 7 彝良地震震级与应力降时序图

Fig. 7 Time sequence chart of magnitude and stress drop of Yiliang M5.7, 5.6 earthquakes in 2012

3 讨论与结论

应力降是表征地震瞬间错动时位错面上的应力变化。通常指的是地震发生后震源处的应力比震前降低,即震前应力与震后剩余应力之差,表示为 $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma$, σ_0 和 σ 分别为震前、震后的构造应力。正是这种应力的降落,促使断层两盘克服静摩擦力而发生运动并产生地震波。应力降是直接地震的发生、震源介质和构造应力密切相关的参数。

Das 和 Aki (1977) 在研究自然破裂传播动力学时提出的震源障碍体模式表明,当裂纹尖端通过这样一个障碍体时,可能发生 3 种不同的状况,它们取决于障碍体强度与初始应力的相对大小。类型一:若初始应力相对较高,障碍体一下就破碎;类型二:若初始应力相对较低,裂纹尖端超越障碍体时,会留下一个未破碎的障碍体;类型

三:若初始应力适中,裂纹尖端在开始通过时,障碍体并不破碎,但最后由于应力增加而破裂。如果类型一的障碍体是在整个断层面上发生的话,那么破裂传播是平滑的,产生的地震是一个简单的脉冲,并导致一个高的平均应力降。如果类型二在断层面上许多障碍体上发生,破裂传播就变得粗糙,产生一个长序列的高频波,以及一个低平均应力降结果。对于类型三,产生具有在长周期运动上叠加一些波动的地震图。地震辐射变得不像其它类型那样依赖于破裂传播方向,因而在裂纹中心处滑动或多或少是同时产生的,结果导致了一个有效的对称震源。

云南地区双震型或多震型地震基本符合 Das 和 Aki (1977) 提出的震源障碍体模式中的第二、第三类震源破裂状况。表 3 列出了本文讨论的 3 个震例的基本情况。盐津地震在第一次 5.1 级地震后 34 d 再次发生 5.1 级地震,震级相同,震源环境相同,但应力降不同,初次地震应力降较小,再次

5.1 级地震应力降大于初次 5.1 级地震，整个地震序列应力降为 11 MPa，应力降较低，属于构造应力环境较低地区发生的低应力降地震。而腾冲地震发震之前的构造应力环境与盐津地震有明显的差异，震前有盈江 5.8 级地震，其序列应力降较高，构造应力得以较充分的释放。处在盈江地震发震断层另一端的腾冲地震震源区，其地震应力的积累是否与盈江地震有关，还是本身已具备了发震条件，两震源区相距不到 100 km，相互间的影响肯定是存在的。腾冲第一次 5.2 级地震前发生的密集小震，预示着该地区存在发生中强地震的应力背景，且地震应力降较小，相隔 50 d 再次发生 5.2 级地震的应力降较高，也就是突破震源障碍物所需的构造应力较高。腾冲地震序列累积应力降约 24 MPa。四川省得荣县与云南省德钦县和香格里拉县交界地区受川藏地区构造应力影响较为明显，震前在震区以北的西藏昌都左贡县发生了 6.0 级地震，受来自南东向构造挤压应力的影响，

时隔 16 d 后，川滇地区金沙江断裂与德钦—中甸断裂交汇处发生 5.1 级地震。地震及余震应力降较低，预示震源区存在障碍物，地震应力未得到充分释放，时隔 3 d，原震区再次发生 5.9 级地震，应力降较大，说明障碍物已突破，但震源破裂面较粗糙，剩余应力及调整累积应力将重塑震源区，4 级左右余震达 150 余次，累积地震应力降达到 52 MPa。

通过 3 个双震型震例震源参数的分析研究，可以得到以下几点认识：

(1) 根据近 15 年的云南地震应力降与震级的回归分析，以及几次双震震源参数分析，双震型地震的首个强震其应力降值偏低，再次发震的应力降值可能较高。

(2) 震区存在障碍物，首次破裂将障碍物附近较弱介质发生变形，受到障碍体的阻碍，构造应力未能较好地释放，其应力施加在障碍物上，当累积应力大于障碍体的静摩擦力时，突破障碍物，因此再次发震的应力降大于初次强震。

(3) 第二次强震的发震地点是确定的，即在原震源区，位置变化不大。发震时间从上述 3 个震例可以初步判定，短则 3 d，长则 50 d。有前震的腾冲双震型地震，第二次强震的发震时间较长，为 50 d。

(4) 双震型地震可以通过震源参数的分析和对区域构造应力环境的认识及综合分析，可以预测第二次强震的强度和时间段。

表 3 3 个震例基本情况表

Tab. 3 Basic information of three earthquakes used in the study

序号	震区	震型	发震时间 /年-月-日	震级	应力降 /MPa
1	昭通市	双震	2006-07-22	5.1	1.42
	盐津县		2006-08-25	5.1	2.80
2	腾冲县	前双主 余震	2011-05-31	4.5	1.47
			2011-06-20	5.2	4.12
			2011-08-09	5.2	6.99
3	四川得荣—云南德钦、香格里拉交界	前主余震 或双震型	2013-08-28	5.1	0.94
			2013-08-28	4.4	0.63
			2013-08-31	5.9	6.08
			2013-08-31	4.2	2.79
			2013-08-31	4.4	1.84
			2013-08-31	4.8	3.38
			2013-08-31	4.6	1.58
			2013-08-31	4.2	1.55
			2013-08-31	4.0	1.57
			2013-08-31	4.0	0.72
			2013-09-01	4.5	0.88
			2013-09-02	4.5	0.70
			2013-09-03	4.5	1.26
			2013-09-06	4.3	1.23
			2013-09-08	4.0	0.68
			2013-11-29	4.6	0.92

参考文献：

安艺敬一,理查兹 P. G. . 1986. 定量地震学——理论和方法(第二卷)[M]. 北京:地震出版社,318-383.

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[J]. 国际地震动态,(7):1-4.

皇甫岗,陈颢,秦嘉政,等. 2010. 云南地震活动性[M]. 昆明:云南科技出版社,94-107.

秦嘉政,阚荣举. 1986. 用近震尾波估算昆明及其周围地区的 Q 值和地震矩[J]. 地球物理学报,29(2):145-156.

时振梁,张少泉,赵荣国,等. 1992. 地震工作手册[M]. 北京:地震出版社,265-267.

苏有锦,刘杰,郑斯华,等. 2006. 云南地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究[J]. 地震学报,28(2):206-212.

吴忠良,黄静,林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报,24(3):293-301.

叶建庆,陈慧,刘学军,等. 2008. 2006 年云南盐津 5.1 级双震的监测与研究[J]. 地震研究,31(2):134-141.

郑治真. 1983. 波谱分析基础[M]. 北京:地震出版社,238-299.

中国地震局. 1998. 地震现场工作大纲和技术指南[M]. 北京:地震

- 出版社, 25 – 26.
- 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[J]. 防震减灾工程学报, 24(1): 8 – 14.
- Brune J. N. . 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. J. Geophys. Res. , 75(26): 4997 – 5009
- Das S. , Aki K. . 1977. Fault Plane with Barriers: A versatile Earthquake Model[J]. Journal of Geophysical Research, 82(36): 5658 – 5670.

Study on Characteristics of Source Parameters of Double Shock Earthquake Sequence in Yunnan

YE Jian-qing, LI Yong, DUAN Yi, JIANG Fei-rui

(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650024, Yunnan, China*)

Abstract

Basing on the data in Yunnan Regional Seismic Network, we calculated the source parameters of 2 533 $3.0 \leq M_{(L,S)} \leq 6.6$ earthquakes in Yunnan from 1999 to 2013 by Brune circle model method, and analyzed the source parameters of three typical double shock earthquake sequence in the junction area of Yanjin, Tengchong and Yunnan-Sichuan. The result shows that in the source parameter of double shock earthquakes, the stress drop of the first shock is lower, which indicate the tectonic stress cannot be fully released by the effects of the existence of obstacle in focal region, however, the stress drop of the second shock is much higher than the first one, which indicate the obstacle has been broken through. In the aspect of earthquake prediction, the scaling of stress drop of the first shock can be used to make a preliminary determination whether the earthquake would happen again in focal region.

Key words: double shock earthquake; source parameter; stress drop; obstacle; earthquake prediction