

# 云南姚安地震序列震源参数研究\*

范军<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>3</sup>, 郑斯华<sup>4</sup>, 陈银<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地球物理学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省地震局, 四川 成都 610041;  
3. 中国地震台网中心, 北京 100045; 4. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

**摘要:** 2000年1月15日云南姚安发生5.9级和6.5级地震, 利用布设在震中附近的6个流动数字地震台所记录的地震波资料, 采用波谱分析和Brune理论的方法, 得到姚安地震序列震源谱参数和震源参数。结果表明: 地震序列的地震矩在 $10^8 \sim 10^{14}$  N·m之间, 应力降在0.005~10 MPa之间, 震源半径分布在50~660 m之间, 并得到地震矩 $M_0$ 和震级 $M_L$ 的关系为:  $\lg M_0 = 8.24 + 1.4M_L$ 。随着地震矩增大应力降增加, 拐角频率反而减小; 随震级的增大震源半径变大, 但震源半径与应力降之间不存在明显的相关关系。

**关键词:** 姚安地震; 地震序列; 震源参数; 流动数字地震台

**中图分类号:** P315.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2012)03-0303-06

## 0 引言

2000年1月15日, 在云南姚安县先后发生了5.9级和6.5级2次地震, 为了取得近震源数字化地震波资料, 云南省地震局在姚安地震现场附近围绕震中布设了6套数字地震仪, 形成一个近震源监测台网, 对姚安地震序列进行监测。自2000年1月15日16时36分至2月1日7时26分止, 共记录到单台和双台记录的余震共2 829次。

笔者利用在姚安地震现场布设的6套数字化地震仪组成的流动数字化地震台网数字地震波形数据资料, 选取有3个台站以上记录的1 306次余震, 在已知研究区内的介质品质因子 $Q$ 值(苏有锦等, 2006; 毛燕等, 2005; 胡家富等, 2003)和由固定数字地震台网的地震台站得到的姚安地震序列震源谱参数(刘丽芳等, 2006; 刘学军等, 2002)的基础上, 求取各流动数字地震台站的场地响应, 再采用遗传算法(刘杰等, 2003; Moya *et al*, 2000), 从而得到地震的震源谱参数(低水平值、拐角频率)和震源参数(包括地震矩、震源破裂半径、应力降等)。图1为姚安地震序列

震中分布和数字流动地震观测台站分布图, 表1列出了6个数字流动地震观测台站信息。

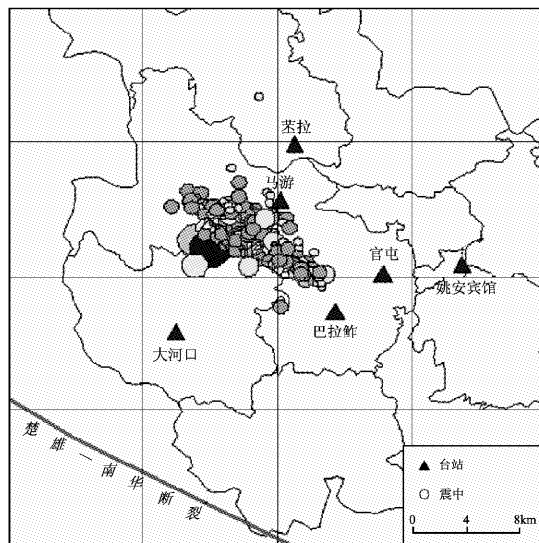


图1 姚安地震序列震中分布和数字流动地震观测台站分布图<sup>①</sup>

Fig. 1 Distribution of epicenters of Yao'an earthquake sequence and flow digital seismic observational stations

\* 收稿日期: 2012-04-05.

基金项目: 中国地震局地震预测研究所地震图像与数字化地震观测资料应用实验室资助.

① 云南省地震局. 2003. 2000年云南姚安地震现场台网新参数目录.

表 1 数字流动地震观测台站信息表<sup>①</sup>

Tab. 1 Information of flow digital seismic observational stations

台号	台名	高程/m	岩性	运行时间
				年-月-日~月-日
1	姚安宾馆	1 900	沉积层	2000-01-15~02-01
2	官电	1 920	沉积层	2000-01-15~01-31
3	大河口	1 840	沉积层	2000-01-15~01-31
4	茈拉	2 000	砂岩	2000-01-16~01-31
5	马游	1 840	沉积层	2000-01-16~01-31
6	巴拉蚌	2 000	沉积层	2000-01-16~01-31

1 地面运动的傅立叶谱振幅

地面运动的观测傅立叶谱可以用下式来描述：

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_j(f) \cdot e^{-\frac{\pi R_{ij} f}{Q(f) V_s}} \tag{1}$$

式中,  $A_{ij}(f)$  是第  $j$  个台站记录到的第  $i$  地震的观测

傅立叶谱振幅,  $A_{i0}(f)$  是第  $i$  个地震的震源谱振幅,  $R_{ij}$  为震源距,  $G(R_{ij})$  为几何衰减函数。笔者采用三段几何衰减模型来计算传播路径的影响 (黄玉龙等, 2003; Atkinson *et al*, 1992),  $S_j(f)$  为第  $j$  个台站的场地响应,  $V_s$  是 S 波速度,  $Q(f)$  是 S 波的品质因子。

2 台站场地响应

根据 Brune (1970) 震源模型的谱参数, 采用 (1) 式, 用云南地区  $Q$  值与频率的关系  $Q(f) = 238.0 f^{0.388}$  (苏有锦等, 2006), 在介质品质因子  $Q$  值和地震的震源参数为已知的情况下 (刘丽芳等, 2006), 可以确定每个台站的场地响应：

$$S_j(f) = A_{ij}(f) \cdot e^{\frac{\pi R_{ij} f}{Q(f) V_s}} / (A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij})) \tag{2}$$

各台站的场地响应如图 2 所示。

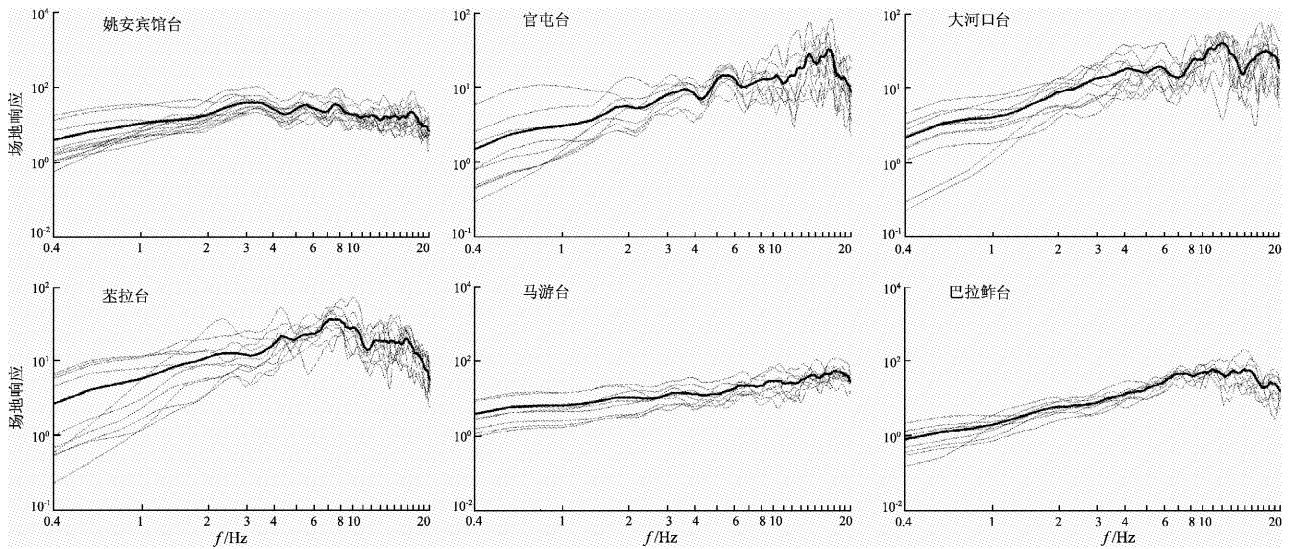


图 2 6 个流动数字地震台站的场地响应  
(粗线表示平均值, 细线表示各台站值)

Fig. 2 Site response of 6 flow digital seismic observational stations

(thick line represents average site response, thin line represents site response of each station)

3 震源谱参数

选择 Brune (1970) 震源模型谱参数, 对地震在第  $i$  个台站观测到的 S 波傅立叶位移振幅谱进行

几何衰减、非弹性衰减和台站场地响应的校正：

$$A_i^{corr}(f) = A_i(f) \cdot G^{-1}(R_i) \cdot S_i^{-1} \cdot e^{\frac{\pi R_i f}{Q(f) V_s}} \tag{3}$$

设定地震震源的震源谱参数, 也就是设定震源谱的低频水平值  $\Omega_0$  和拐角频率  $f_c$ , 可以得到地震的

① 云南省地震局. 2003. 2000 年云南姚安地震现场台网新参数目录.

理论位移震源谱

$$A^{\text{theo}}(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^2} \tag{4}$$

式中  $\Omega_0$  为地震震源谱的低频水平值,  $f_c$  是拐角频率。在  $k$  个频率上, 利用遗传算法计算使下式定义的残差为最小:

$$\delta = \sum_k \frac{A^{\text{theo}}(f_k) - A^{\text{corr}}(f_k)}{(A^{\text{theo}}(f_k) \cdot A^{\text{corr}}(f_k))^{1/2}} \tag{5}$$

由 (3) ~ (5) 式可求得所求地震的震源谱参数低频水平值  $\Omega_0$  和拐角频率  $f_c$ 。图 3 为所得到的 10 个地震序列的震源谱参数图。

4 震源参数

根据 Brune (1970) 理论, 利用已得到的震源谱参数求取震源参数。

(1) 地震矩

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{FR_{\theta\varphi}} \tag{6}$$

式中,  $\rho$  是密度, 取  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_s$  是 S 波速度, 取  $3.2 \text{ km/s}$ ,  $F$  为自由表面校正, 取值 2,  $R_{\theta\varphi}$  是辐射花样因子, 在没有断层面解的情况下, 假设  $R_{\theta\varphi}$  为常数, 并取 S 波在全震源球上的平均值 0.63, 对于震源尺度, 采用圆盘型震源模型 (Brune,

1970), 震源半径为

$$r = \frac{2.34 V_s}{2\pi f_c} \tag{7}$$

(2) 应力降

$$\Delta\delta = \frac{7M_0}{16r^3} \tag{8}$$

根据 (6) ~ (7) 式, 计算得到姚安地震序列的震源参数地震矩、应力降、震源半径。结果表明, 余震序列的地震矩在  $10^8 \sim 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$  之间, 应力降在  $0.005 \sim 10 \text{ MPa}$  之间, 震源半径分布在  $50 \sim 660 \text{ m}$  之间。表 2 为从所计算的地震序列中选出的 10 个地震序列的震源参数。图 4 为地震矩、应力降、拐角频率、震源半径及震级之间的关系。

从 (7) 式可知, 震源半径与拐角频率成反比关系, 地震的震级越大, 震源半径越大, 拐角频率反而越小。

从图 4a 可以看出, 拐角频率与地震矩之间存在相关关系, 即拐角频率随着地震矩增大而减小, 这与从理论上得到的结果是一致的。图 4b 中, 地震矩和震级有很好的相关性, 震级随地震矩的增大而增大, 用最小二乘法拟合得到的 1 306 次余震序列的地震矩  $M_0$  和震级  $M_L$  的关系为

$$\lg M_0 = 8.24 + 1.4M_L \tag{9}$$

与毛燕 (2007) 用矩张量反演得到的结果  $\lg M_0 = 9.29 + 1.3M_L$ , 刘丽芳等 (2006) 的结果  $\lg M_0 =$

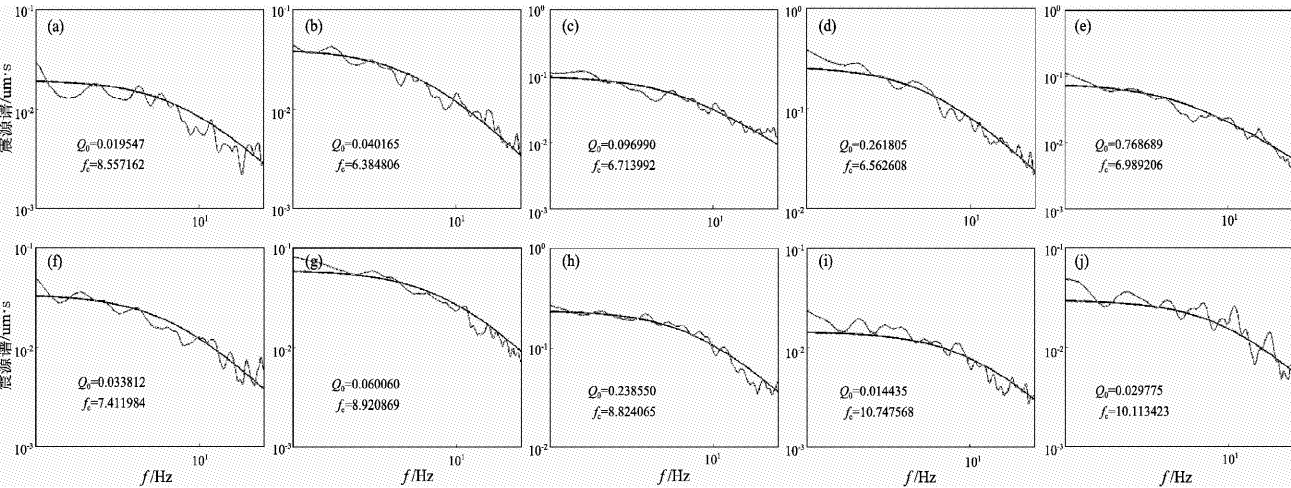


图 3 地震序列的震源谱参数 (平滑曲线表示理论拟合值, 弯曲曲线表示实际观测平均值)

Fig. 3 Source spectra parameters of the Yao'an earthquake sequence (smooth line represents source spectra parameters of theoretical fitting, bending line represents actual observation average)

$10.06 + 1.05M_L$ , 刘学军等 (2002) 区域台网的结果  $\lg M_0 = 12.0 + 0.80M_L$ , 现场流动台网数据结果  $\lg M_0 = 10.43 + 0.99M_L$  进行比较, 与本研究的结果也基本一致, 其小的差别可能是由于资料选取的台站、地震震级范围和选取的地震序列中的地震数量和震级大小不同。由于本研究采用流动观测台站的资料, 所以选取了数量较大, 震级范围主要集中在  $0.5 \sim 3.5$  之间的序列资料。同时, 由于采

用流动观测台的位置更靠近余震序列的位置, 波传播的射线路径很短, 干扰很小, 所记录的波形的信噪比更高。

该地区地震矩  $M_0$  和震级  $M_L$  相关关系的建立后, 利用 Kanamori (1977) 地震矩  $M_0$  和矩震级  $M_w$  的关系式  $M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.73$  可以为用  $M_L$  计算  $M_w$  提供方便。

表 2 地震序列的震源参数表

Tab. 2 Source parameters of the earthquake sequences

编号	$M_w$	低频水平值	拐角频率/Hz	地震矩/ $N \cdot m$	应力降/MPa	半径/m
1	0.9	0.019 547	8.557 162	2.414 56e+010	0.298 877 9	152.326 086
2	1.1	0.040 165	6.384 806	4.961 3e+010	0.255 096 3	204.153 272
3	1.3	0.098 990	6.713 992	1.222 77e+011	0.731 058 6	194.143 661
4	1.6	0.261 805	6.562 608	3.233 92e+011	1.805 614 1	198.622 107
5	1.9	0.768 589	5.989 206	9.493 93e+011	4.029 210 9	217.638 011
6	1.0	0.033 812	7.411 984	4.176 54e+010	0.335 959 2	175.861 010
7	1.2	0.060 060	8.920 869	7.418 91e+010	1.040 465 0	146.115 702
8	1.6	0.238 550	8.824 065	2.946 67e+011	3.999 485 5	147.718 659
9	0.8	0.014 435	10.747 568	1.783 06e+010	0.437 283 3	121.281 298
10	1.0	0.029 775	10.113 423	3.677 94e+010	0.751 563 5	128.886 034

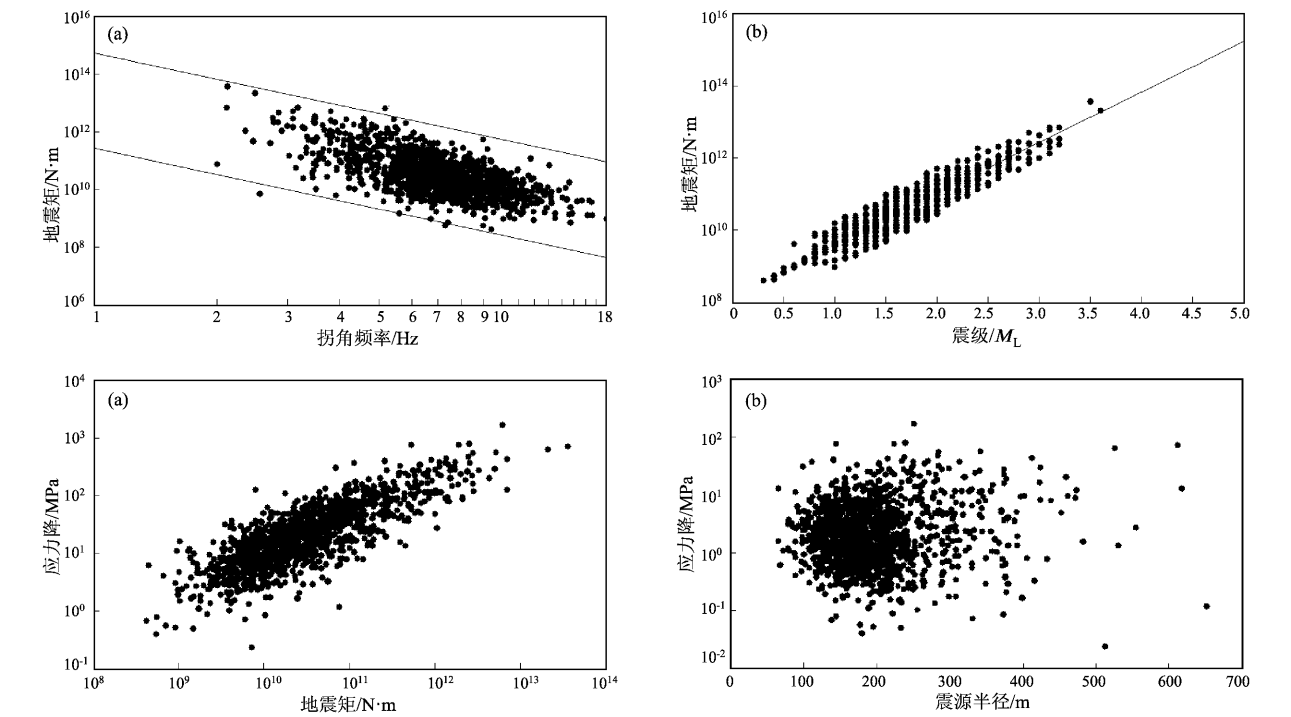


图 4 地震矩、应力降、拐角频率、震源半径及震级之间的关系

Fig. 4 Relations among seismic moment, stress drop, corner frequency, source radius and  $M_L$

对地震应力降和震源半径的研究对于震源理论和工程抗震甚至地震趋势分析都具有重要意义,应力降反映了一个地区的应力释放状况,应力降大小和释放频度可以为该地区的地震趋势分析提供有价值的参考。图4c显示,应力降和地震矩之间存在一定的关系,即应力降随着地震矩增大而增加。陈运泰(2000)认为,对于小地震,应力降随地震矩增大而增大。赵翠萍等(2005)的结果也显示出对于  $M_L < 4$  的地震,应力降随地震矩增大而增大,应力降与地震强度有弱相关关系,  $M_L > 4$ , 其相关性不明显。Shi 等(1998)研究认为,地震矩  $M_0 < 2 \times 10^{20} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$  时,应力降随地震矩增大而增大,地震矩  $M_0 > 2 \times 10^{20} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$  时大于应力降和地震矩没有明显的依赖关系。王培德等(1988)也认为,随着震级的增加,应力降有增加的趋势。

图5给出了序列震级和震源半径之间的关系,除少数地震较为离线外,可看出震级和震源半径之间存在相关的关系:随地震震级的增大震源半径变大,这与刘丽芳等(2006)的结果是一致的。而从图4d中看到,震源半径与应力降呈离散分布,不存在明显的相关关系。

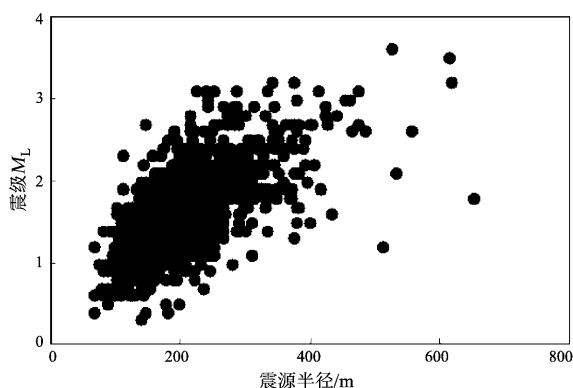


图5 震源半径与震级之间的关系

Fig. 5 Relations between source radius and  $M_L$

## 5 结论与讨论

笔者对2000年1月15日云南姚安5.9级、6.5级地震序列的震源参数进行了研究。采用波谱分析和Brune理论的方法,得到了地震序列的震源谱参数低频水平值和拐角频率及地震震源参数地震矩、应力降和震源半径等,并对它们之间的关

系进行了讨论研究。结果表明:地震矩和震级有很好的相关性,震级随地震矩的增大而增大,而拐角频率随着地震矩增大而减小;应力降和地震矩之间存在一定的关系,即应力降随着地震矩增大而增加;震级和震源半径之间存在相关的关系,随震级的增大震源半径变大;震源半径与应力降呈离散分布,不存在明显的相关关系。笔者认为,通过以上对余震震源参数的求取和各参数拟合关系及定性关系探讨,可以揭示各震源参数之间可能存在的内在联系,为序列分析和强余震预测等方面提供更可靠地依据。

由于流动地震台布设于距离地震序列发生较近的区域内,因此对震级较小地震的记录也有很高的信噪比,对于更接近点源地震模型假设的小地震,能得出更为真实可信的地震震源参数值,实际计算中也获得了好的结果。因此,本研究方法对于地震序列中大量的小地震的震源参数也是有效的。

由于用于地震序列观测的流动地震台受到布设时间紧和布设区域地点的限制,往往布设的场地条件不是很好,所以台站场地的有效计算对地震震源参数的结果有较大的影响。本研究采用由固定台网得到的部分地震序列的震源参数和该地区的介质品质因子 $Q$ 值作为已知条件,求取流动台站的场地响应。在此基础上,用效果较好的遗传算法得到地震序列的震源谱参数及震源参数,从理论推导和实际计算结果的情况来看,本文获得的结果是科学和可信的。

云南省地震局提供了相关地震资料,苏有锦研究员和刘丽芳高级工程师分别提供了该研究区的 $Q$ 值研究结果和由固定地震台网所得到的姚安部分地震序列的震源参数结果,在此一并感谢。

## 参考文献:

- 陈运泰,吴忠良,王培德. 2000. 数字地震学[M]. 北京:地质出版社.
- 胡家富,丛连理,苏有锦. 2003. 云南及周边地区 $L_g$ 尾波 $Q$ 值的分布特征[J]. 地球物理学报,46(6):809-813.
- 黄玉龙,郑斯华,刘杰. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究,地球物理学报,46(1):54-61.
- 刘杰,郑斯华,黄玉龙. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 地震学报,25(2):211-218.
- 刘丽芳,刘杰,苏有锦. 2006. 姚安地震序列与大姚震源参数的对比研究[J]. 地震,26(1):10-18.
- 刘学军,叶建庆,蔡绍平. 2002. 姚安地震序列的震源参数研究[J].

- 地震研究, 25(3): 240–245.
- 毛燕, 徐彦, 胡家富. 2005. 用叠加谱比法研究四川地区 Lg 尾波  $Q$  值的区域性变化[J]. 云南大学学报(自然科学版), 27(2): 123–128.
- 毛燕. 2007. 姚安地震余震序列研究[J], 地震研究, 30(2): 142–145.
- 苏有锦, 刘杰, 郑斯华. 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.
- 王培德, 吴大铭, 程云泰. 1988. 地震矩、震级、震源尺度及应力降之间的相互关系的研究[J]. 地壳形变与地震, 8(2): 109–123.
- 赵翠萍, 夏爱国, 郑斯华. 2005. 新疆北天山中东段地区震源参数研究[J]. 中国地震, 21(1): 61–69.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. J Geophys Res, 75(26): 4 997–5 009.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 82(20): 1 981–1 987.
- Moya C A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. BSSA, 90(4): 977–992.
- Shi Jin Hua, Kim W Y, Richards P G. 1998. The corner frequencies and stress drops of intraplate earthquakes in the Northeastern United States[J]. BSSA, 88(2): 531–542.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada[J]. BSSA, 82(5): 2 014–2 031.

## Research on Source Parameters of Yao'an Earthquake Sequence in Yunnan

FAN Jun<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>3</sup>, ZHENG Si-hua<sup>4</sup>, CHENG Yin<sup>2</sup>

(1. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

(2. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China)

(3. China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China)

(4. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

### Abstract

Using the digital waveform data recorded by six temporary digital seismic stations which was closed to the epicenters of the Yao'an  $M5.9$  and  $M6.5$  earthquakes in Jan. 15, 2000, applying the methods of the spectrum analysis and Brune' theory, we obtained source spectrum parameters and source parameters of Yao'an earthquake sequence. The result shows that the seismic moments of Yao'an earthquake sequence are between  $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$  and  $10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ , the stress drops are between 0.005 MPa and 10 MPa, and the source radius is between 50 m and 660 m, and we obtain the relationship between seismic moment  $M_0$  and local magnitude  $M_L$ . With the seismic moment increases the corner frequency reduces, but the stress drop increases. The source radius increases with the magnitude increases, but there is no evidence relationship between source radius and stress drops.

**Key words:** Yao'an earthquake; earthquake sequence; source parameter; temporary digital seismic station