

2008 年盈江 5.9 级地震序列震源参数研究^{*}

杨晶琼, 杨周胜, 刘丽芳, 苏有锦, 张 森

(云南省地震局 昆明 650224)

摘要: 2008 年 8 月 21 日在云南省盈江县发生了 $M_{\text{S}} 5.9$ 地震。利用云南区域数字地震台网记录的 $M_{\text{L}} \geq 2.5$ 余震波形记录, 通过对 S 波观测记录谱进行传播路径、场地响应和仪器响应等影响的逐一消除, 得到了 196 个 $M_{\text{L}} \geq 2.5$ 地震的震源谱, 进而根据 Brune 圆盘震源模型, 利用遗传算法计算了地震矩、应力降、震源半径等震源参数, 结果表明, 该地震序列的地震矩在 $10^{12} \sim 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$ 间, 与近震震级有很好的线性关系, 与震源半径也呈线性关系; 应力降与近震震级有一定的线性趋势相关性; 拐角频率和地震矩之间有明显的依赖关系。

关键词: 震源参数; 遗传算法; 震源谱; 地震序列; 盈江 5.9 级地震

中图分类号: P315.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)04-0308-05

0 引言

研究震源参数, 通常是在根据实际的地震波记录反演震源谱的基础上进行的。由于地震波在传播过程中出现几何扩散, 在从震源到接收点的传播过程中受到传播介质吸收和扩散以及接收点场地的影响等, 因此观测记录得到的地震谱不是真实的震源谱, 称之为观测谱。实际工作中, 人们常常采用对上述各种影响因素分别进行补偿的办法从观测谱得到震源谱。

通常认为在地震孕育过程中, 地壳介质处于高应力状态, 其辐射的地震波频谱特征、衰减特性和低应力状态是不相同的。因此, 对某一地震序列进行波谱分析, 就可以得到表征震源破裂特征的震源参数 (包括震源尺度、应力降等), 并由此推断震源区的构造应力环境, 能够使人们在一定程度上了解震源区的应力状态 (中国地震局监测预报司, 2005)。

2008 年 8 月 21 日盈江 5.9 级地震, 是云南“十五”数字地震台网建成并正式运行后记录到的一个中强地震。本文利用 2008 年 8 月 20 日至 2009 年 2 月 28 日, 云南区域数字地震台网记录到的盈江 5.9 级地震序列 $M_{\text{L}} \geq 2.5$ 余震的波形资料, 在对地震记录设法区分震源效应、传播路径、场地响应及仪器

响应的基础上, 得到了 196 个 $M_{\text{L}} \geq 2.5$ 地震的震源谱, 并采用 Brune 二次方衰减震源谱模型作为理论震源谱, 利用遗传算法精确搜索每个地震震源谱的零频谱值和拐角频率, 进而估算地震序列的地震矩、震源半径和应力降等震源参数。这些震源参数能使我们更好地研究序列的基本特征和应力变化过程。

1 分析方法

在任一台站观测到的任一地震地面运动的傅立叶谱可以表示为:

$$A_j(\omega) = A_0(\omega) \cdot G(R_j) \cdot S(\omega) \cdot I(\omega) \cdot e^{\frac{\pi R_0 f}{Q(\omega)}} \quad (1)$$

式中 $A_j(\omega)$ 是在第 j 个台站观测到的第 i 个地震的傅立叶振幅谱 (观测谱), $A_0(\omega)$ 为第 i 个地震的震源振幅谱 (震源谱), R_0 为震源矩 (第 i 个地震到第 j 个台站), $G(R_j)$ 为几何衰减函数, $Q(\omega)$ 为频率依赖的品质因子, β 为地震波速度 (在本研究中仅分析 S 波), $S(\omega)$ 为第 j 个台站的场地响应项, $I(\omega)$ 为第 j 个台站的仪器响应项。

由式 (1) 可见, 在频率域内对台站的观测位移谱 $A_j(\omega)$ 进行几何衰减、非弹性衰减、场地响应及仪器响应校正后, 才能得到震源谱 $A_0(\omega)$ 。目前一般采用 Akinsor 和 Mereu (1992) 提出的三段几何衰减模型来计算传播路径的影响, 采用多台、

* 收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 地震行业科研专项 (200708026) 资助

多地震联合反演的 Moya 方法 (Maya et al, 2000) 计算台站的场地响应, 仪器响应可通过仪器标定进行校正。笔者采用上述方法, 利用云南 “十五” 区域数字地震台网资料, 反演得到了云南地区的介质品质因子 $Q(f)=231.0 f^{0.480}$ 和各台站的场地响应。

通过以上计算, 对每个地震、每个台站记录的位移谱逐一校正后, 就得到了每个地震多个台站的震源谱, 求其平均值以消除方向性效应, 得到每个地震的平均震源谱。这样对某个地震, 就可以得到第 i 个台站记录的该地震的震源位移谱 $[A_i(f)]$, 再对台站得到的震源谱求平均, 即是该地震的震源谱 $\bar{A}(f)$ 。采用 Brune 二次方衰减震源谱模型作为理论震源谱 $A_{theo}(f)$, 利用遗传算法求解由 $\bar{A}(f)$ 和 $A_{theo}(f)$ 定义的残差为极小的震源谱参数 Ω_0 和 f 这里 Ω_0 是零频振幅, f 是拐角频率。

由上面得到的震源谱参数 Ω_0 及拐角频率 f 就可分别计算地震矩 M_0 、震源半径 r 应力降 $\Delta\sigma$ (Brune, 1970):

$$M_0=\frac{4\pi\rho\beta^3\Omega_0}{2R_\varphi},$$

(2)

$$r=\frac{2.34\beta}{2\pi f},$$

(3)

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

(4)

式中 ρ 是密度, 取为 2.9 g/cm^3 ; β 是 S 波速度, 取为 3.5 km/s ; R_φ 是辐射花样系数, 由于没有每次地震的断层面解, 所以令 R_φ 为常数, 并取为 S 波在震源球上的平均值 $\sqrt{2/5}$ 。

2 资料选取

经过 “十五” 建设的云南区域数字地震台网, 子台均为基岩台, 使用 24 位的 EDAS-24 II 型数据采集器, 并分别安装了 KS-2000M 和 CTS-1E 两种中长周期三分向速度地震计, 采样率均为 100 Hz 在 $50\sim120\text{ Hz}$ 频带范围具有速度平坦的响应。

本文选取云南区域数字地震台网记录到的盈江 5.9 级地震后 6 个月 $M\geq 2.5$ 余震的波形数据。对于所有的余震记录, 采用包含所有可识别 S 震相

的 “S 窗” 内的信号进行分析, 其中 “S 窗” 的定义为从 S 波开始到包括 S 波总能量的 90% 的时间段。同时, 采用平移窗谱方法, 获得具有同样频率间隔的观测信号的傅立叶谱, 取 P 波初动前 256 个采样点的记录作为噪声记录, 计算与观测信号相同持续时间的噪声位移振幅, 依此对观测信号进行去噪处理。之后, 按照信噪比大于 2 为标准选择可以使用的波形记录, 以及 1 个地震至少有 3 个以上台站记录的原则, 最终挑选了 196 次 $M\geq 2.5$ 地震的波形记录用于震源参数的联合反演研究, 其中, 2.5~2.9 级 110 次, 3.0~3.9 级 78 次, 4.0~4.9 级 7 次, 5.0~5.9 级 1 次。图 1 为参与计算的地震震中及周围台站分布。

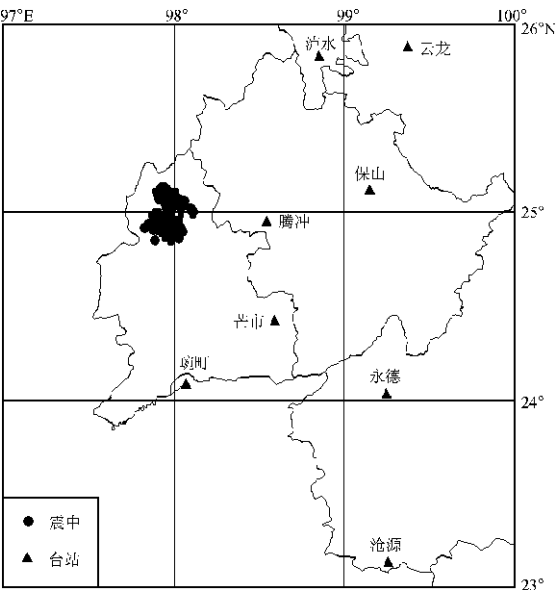


图 1 参与计算地震震中及周围台站分布图
Fig 1 Distribution of earthquakes and location of station region

3 各种震源参数结果及其相互关系分析

由以上计算方法和步骤, 我们得到了盈江 5.9 级地震序列中 196 次 $M\geq 2.5$ 地震的震源参数。

3.1 地震矩 M_0 与震级 M_s 、震源半径 r 的关系

地震矩 M_0 是对断层滑动引起的地震强度的直接量度, 它是由地震波振幅低频成分的大小决定的, 反映了震源处破裂的大小。震级与地震矩之间的线性回归关系能反映不同地区的地下介质状

态和地震活动特点。我们所选用的 196 次余震的震级 M_L 介于 2.5 ~ 5.1 之间, 计算得到的地震矩结果介于 $10^{12} \sim 10^{16}$ N·m 间, 震源破裂半径 在 127 ~ 671 m 间, 用最小二乘法拟合出地震矩 M_0 与震级 M_L 之间的关系 (图 2) 为

$$\lg M_0 = 1.09 M_L + 10.01.$$

(5)

可见, 该序列地震的 M_0 与震级 M_L 存在着较好的线性关系。

其他研究者在其他地区用不同类型的地震资料也得到了相似的结果, 这些关系式有:

美国中加州地区 (Bakun, 1984):

$$\lg M_0 = 1.2 M_L + 10.0$$

澜沧地区 (李立平, 1990):

$$\lg M_0 = 1.13 M_L + 10.14$$

耿马地区 (李立平, 1990):

$$\lg M_0 = 1.10 M_L + 10.21;$$

姚安地区 (刘丽芳等, 2006):

$$\lg M_0 = 1.05 M_L + 10.06$$

滇西实验场地区 (李一正, 1985):

$$\lg M_0 = 1.19 M_L + 9.91;$$

小湾水库近场区 (邬成栋等, 2010):

$$\lg M_0 = 1.11 M_L + 9.65$$

汶川 8.0 级余震区 (华卫等, 2009):

$$\lg M_0 = 1.10 M_L + 9.31.$$

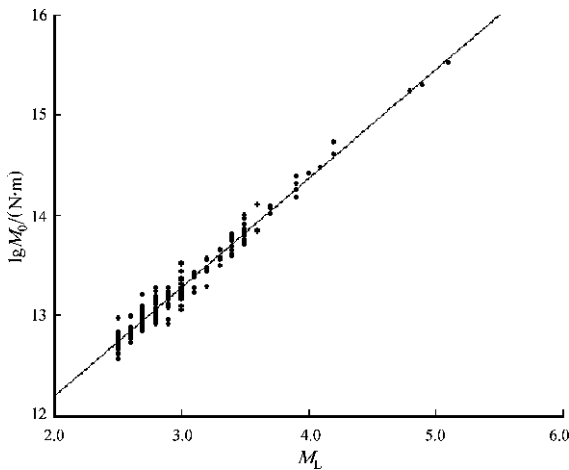


图 2 地震矩 M_0 与震级 M_L 间的关系
Fig 2 Relation between M_0 and M_L

图 3 给出了盈江地震序列地震矩 M_0 与震源破裂半径 的关系, 由图可见两者呈线性关系。

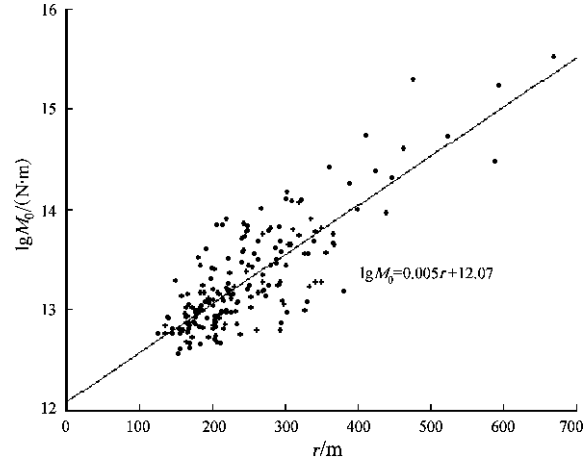


图 3 地震矩 M_0 与震源半径 的关系
Fig 3 Relation between M_0 and r

3.2 应力降 $\Delta\sigma$ 、拐角频率 f 与震级 M_L 的关系

盈江余震序列应力降 $\Delta\sigma$ 在 0.11 ~ 7.93 MPa 间, 其中 148 次地震 $\Delta\sigma < 1.0$ MPa, 占地震总数的 75.5%; 47 次地震 $1.0 \leq \Delta\sigma < 5.0$ MPa, 占地震总数的 24.0%, 1 次地震 $\Delta\sigma \geq 5.0$ MPa, 占地震总数的 0.5%。

应力降的标度性, 即应力降如何随地震强度大小而变化, 是震源参数研究中被广泛讨论的问题。对应力降比较一致的看法是: 在同样 M_0 释放的条件下, 板内地震的应力降大于板缘地震的应力降, 板内地震的破裂尺度小于板缘地震的破裂尺度 (赵翠萍等, 2005)。图 4 给出了盈江地震序列应力降 $\Delta\sigma$ 与震级 M_L 之间的关系。从图 4 可以看出, 应力降与震级有一定的线性趋势相关性, 应力降随震级增大有着某种增大的趋势, 因此笔

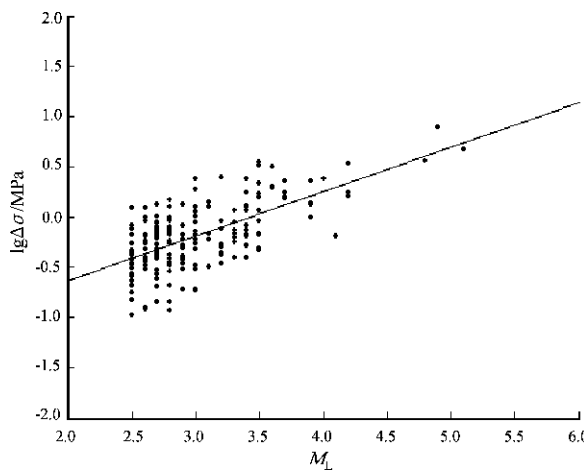


图 4 应力降 $\Delta\sigma$ 与震级 M_L 的关系
Fig 4 Relation between $\Delta\sigma$ and M_L

者认为盈江地震序列的应力降与震级有一定的依赖关系，用最小二乘法拟合出的关系式为：

$$\lg \Delta \sigma = 0.44 M_L - 1.52.$$

(6)

在震源参数研究中，拐角频率是个基本参数，它随震级的增大而减小，两者之间有较强的依赖关系。为得到相对客观的拐角频率的变化值，首先要消除震级（地震矩）对拐角频率的影响，根据 Brune 模型，可推导出拐角频率与地震矩之间的关系式为： $\lg f = -\frac{1}{3} \lg M_0 + \frac{1}{3} \lg (\Delta \sigma) + C'$ 。假定应力降是常数，本文采用函数 $\lg f = -\frac{1}{3} \lg M_0 + C$ 进行最小二乘拟合。

图 5 为盈江地震序列拐角频率 f 与地震矩 M_0 之间的关系，它们之间呈线性关系，用最小二乘法拟合出的关系式为：

$$\lg f = -\frac{1}{3} \lg M_0 + 5.17.$$

(7)

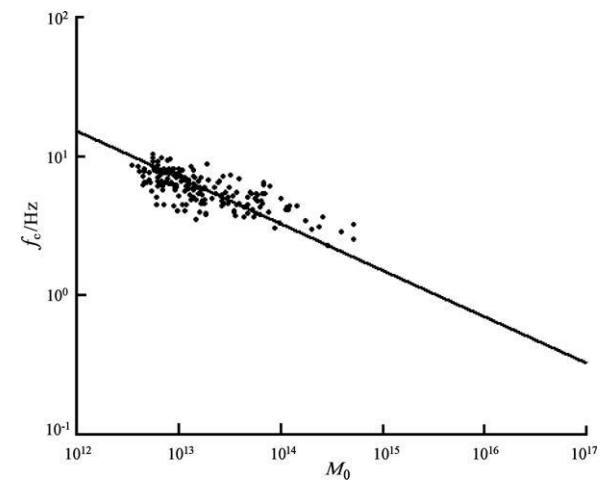


图 5 拐角频率 f 与地震矩 M_0 的关系
Fig 5 Relation between f and M_0

3.3 余震应力降 $\Delta \sigma$ 随时间的变化

通常认为，地震是在一个区域内应力积累超过某一局部临界强度时发生的，应力降为地震时断层面上所释放的应力。因此，应力降是一个与地震发生、震源介质、区域构造应力水平密切相关的参数。确定地震的应力降可以得到震前应力状态和构造应力变化过程的信息。我们通过分析研究地震的应力降可以了解地震破裂过程中的构造应力释放水平，从而间接地认识地震发生地区的构造背景应力和构造破裂过程。在不停的地壳

构造运动过程中，区域构造应力场时空分布也处在不断的调整变化过程中。图 6 给出了盈江地震序列应力降随时间的变化曲线，应力降除了两次较大余震的较大外，其余的均小于 4.0 MPa，多数情况下 $\Delta \sigma < 1.0 \text{ MPa}$ ，最大的两次应力降分别为 7.93 MPa 和 4.70 MPa，对应 2008 年 8 月 21 日的 $M_{s4.9}$ 和 2008 年 8 月 20 日的 $M_{s5.1}$ 地震。通过分析盈江地震序列强余震发生前后的应力降变化，我们发现：在盈江地震序列 $M_s \geq 4.0$ 强余震发生之前会出现 $\Delta \sigma \geq 2.0 \text{ MPa}$ 的高应力降值异常，如 2008 年 8 月 22 日 4.8 级和 31 日 4.2 级余震前分别出现了 3.25 MPa 和 2.30 MPa 的应力升高值异常点；9 月 3 日 4.2 级余震前应力降值为 2.47 MPa，9 月 7 日 4.2 级余震前出现了 3.46 MPa 和 2.13 MPa 的应力升高值异常点；12 月 26 日 4.1 级余震前出现了 2.29 MPa 和 2.40 MPa 的应力升高值异常点。

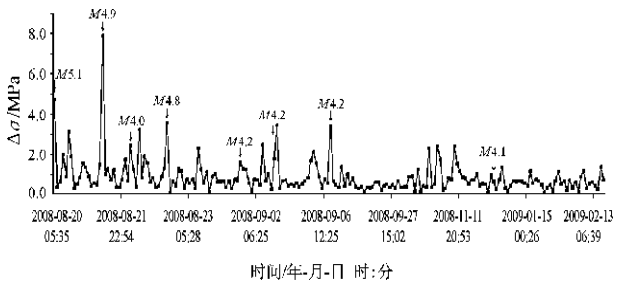


图 6 余震应力降 $\Delta \sigma$ 随时间的变化
Fig 6 $\Delta \sigma$ of aftershock variation with time

3.4 余震拐角频率 f 随时间的变化

根据式 (7)，计算盈江地震序列给定震级得到拐角频率的估计值 \hat{f} ，由此可分析实际计算的拐角频率 f 与估计值之差 $(f - \hat{f})$ 的时间变化曲线。事实上，当 $(f - \hat{f})$ 值为正时，其含义是该地震的应力降比其他同等大小地震产生的应力降高；反之，则应力降低。

图 7 为盈江地震序列实际计算的拐角频率与估计值之差 $(f - \hat{f})$ 随时间的变化曲线，图中实线表示两者之差为 0。由图可见， $(f - \hat{f})$ 在序列强余震发生前会出现高值异常，或地震发生在 $(f - \hat{f})$ 连续出现正值后下降过程中，例，2008 年 8 月 21 日 4.9 级地震前 $(f - \hat{f})$ 值出现了 2.85 H 的高值异常；8 月 22 日 4.0 级和 4.8 级地震前分别出现 3.30 H 和 3.00 H 的高值异常；8 月 31 日、9 月 3 日的 4.2 级和 12 月 26 日 4.1 级地震发生在 $(f - \hat{f})$ 连续出现正值后下降并处于负值过程中。

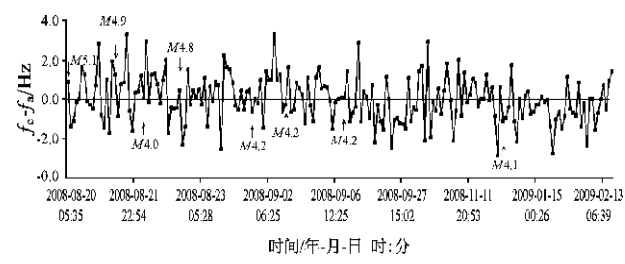


图 7 余震拐角频率 $(f - f_a)$ 随时间的变化
Fig 7 $f - f_a$ of aftershock variation with time

4 结论

- (1) 盈江地震序列地震矩在 $(10^{12} \sim 10^{16}) \text{ N} \cdot \text{m}$ 之间, 震源破裂半径 在 $127 \sim 671 \text{ m}$ 间, 地震矩的对数与震级呈线性关系, 拟合关系为: $\lg M_0 = 1.09M_L + 10.04$; 地震矩的对数与震源半径呈线性关系, 拟合关系式为: $\lg M_0 = 0.005r + 12.07$.
- (2) 拐角频率与地震矩呈线性关系, 拟合关系式为: $\lg f = -\frac{1}{3} \lg M_0 + 5.17$.
- (3) 应力降的对数与震级呈线性关系, 拟合关系式为: $\lg \sigma = 0.44M_L - 1.52$ 因此认为盈江地震序列应力降与震级有一定的依赖关系。
- (4) 由盈江地震序列应力降随时间的变化曲线可以看出, 除了两次较大余震的应力降较大外, 其余时间应力降均小于 4.0 MPa , 多数情况下应力降小于 1.0 MPa .

(5) 盈江地震序列实际计算的拐角频率与估计值之差 $(f - f_a)$ 在序列强余震发生前会出现高值异常, 或地震发生在 $(f - f_a)$ 连续出现正值后下降过程中。

参考文献:

华卫, 陈章立, 郑斯华. 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 365—371.
李立平. 1990. 澜沧—耿马地震震源动力学参数研究[J]. 地震研究, 13(3): 223—232.
李一正. 1985. 滇西地区震级与地震矩标度[J]. 地震研究, 8(6): 617—632.
刘丽芳, 刘杰, 苏有锦. 2006. 姚安地震序列与大姚地震序列震源参数的对比研究[J]. 地震, 26(1): 10—18.
郭成栋, 付虹, 赵小艳. 2010. 小湾水库近场区地震震源参数初步研究[J]. 地震研究, 33(1): 50—54.
赵翠萍, 夏爱国, 郑斯华, 等. 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.
中国地震局监测预报司. 2005. 华北地区强地震短期前兆特征与预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社.
Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. BSSA, 82: 2014—2031.
Bakun W H. 1984. Seismic moments, local magnitudes and coda—duration magnitudes for earthquakes in central California[J]. BSSA, 74: 439—458.
Brune J N. 1970. Ectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. J Geophys Res 75(26): 4997—5009.
Moya C A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithm[J]. BSSA, 90(4): 977—992.

Study on the Source Parameters of the Yingjiang
M_s5.9 Earthquake Sequence in 2008

YANG Jing-qiong YANG Zhou-sheng LIU Li-fang SU You-jing ZHANG Sen
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Yingjiang M_s5.9 earthquake On August 21, 2008 occurred in Yunnan. Using waveforms of the M_L ≥ 2.5 earthquakes recorded by Yunnan Regional Digital Network. BY removing propagation site and instrument effects from the displacement spectra of the S-wave recordings, we obtain the source parameters of 196 M_L ≥ 2.5 earthquakes based on the Brune disc model and Genetic algorithm, namely the seismic moment M₀, stress drop Δσ and rupture radius r. The results show that there is a good linear relation between M₀ ($10^{12} \sim 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$) and local magnitude M_L, M₀ and rupture radius r. Δσ seems dependent on M_L; f increases with M₀ decreasing according to the lg f-M₀ relation.

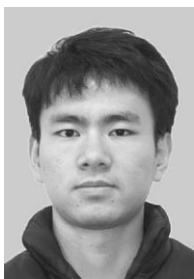
Key words: source parameters, genetic algorithm, source spectra, earthquake sequence, Yingjiang M_s 5.9 earthquake



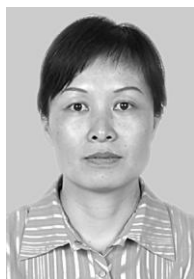
徐桂明 江苏省地震局高级工程师。毕业于河海大学水文地质与工程地质专业，获学士学位。主要从事地震流体预报地震工作。中国地震学会地震流体专业委员会委员。



刘 锦 广东省地震局工程师。1991年毕业于防灾技术学院应用地球物理系，获大专学历；2004年毕业于华南理工大学工商管理系，获管理学学士学位。主要从事地下流体分析预报等研究。



阮 祥 四川省地震局预报研究所助理工程师。2004年云南大学固体地球物理专业毕业，获理学学士学位；2007年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业毕业，获理学硕士学位。目前从事地震学与地震预报方面的研究。



杨晶琼 云南省地震局高级工程师。1990年毕业于云南师范大学地理系，获学士学位。主要从事地震分析编目与数字地震资料应用研究工作。



蒋翠荣 河北省地震局张家口中心台工程师。1985年毕业于河北电大。现主要从事地震台站监测工作。



王建军 甘肃省地震局工程师。1996年毕业于防灾科技学院地球物理系；2008年兰州地震研究所固体地球物理专业毕业，获硕士学位。曾参与开发中国地震前兆数据处理系统、中国地震前兆数据管理系统，现主要从事地震监测、软件开发、地磁基本场研究等方面的工作。



郭婷婷 山东省地震局助理研究员。2004年毕业于西北农林科技大学水利与建筑工程学院，获硕士学位；现就读于中国地震局地质研究所攻读博士学位。主要从事构造应力场分析及其相关数值模拟等工作。



马文娟 宁夏地震局工程师。1999年毕业于宁夏大学数学系软件工程专业，获理学学士学位；现为同济大学在读硕士研究生。主要从事前兆观测技术、数据处理、数据库开发利用等研究。2009年中国地震局地壳应力研究所交流访问学者。



单维锋 防灾科技学院讲师。1998年毕业于山东大学威海分校计算机应用专业；2005年毕业于云南大学软件工程专业，获硕士学位；现于北京工业大学计算机学院攻读博士学位。主要从事地震前兆数据处理、并行计算等方面研究工作。ACM专业会员、新加坡国际计算机科学与技术协会（IACSII）会员。

注：钱晓东、张希、苏琴、张昱、刘强、施伟华、吴立辛、曾宪伟、何案华、周光全的简历分别刊登在本刊 Vol.29 No.1; Vol.30 No.3 Vol.32 No.2 Vol.31 No.3 Vol.30 No.4 Vol.30 No.4 Vol.30 No.1; Vol.31 No.2 Vol.31 No.3 Vol.29 No.4