

# 云南盈江地区地震波非弹性衰减 $Q$ 值、 场地响应及震源参数研究\*

秦 敏, 李丹宁, 张会苑, 高 洋, 姜金钟

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用云南盈江地区 19 个固定和流动台站记录到的 2014—2016 年数字地震波形资料, 分别使用 Atkinson 方法和 Moya 方法反演得到了盈江地区的非弹性衰减系数和台站场地响应, 并在精确扣除余震区地震波衰减与台站场地响应的基础上, 联合反演了 2014 年盈江  $M_s 5.6$  和  $M_s 6.1$  地震序列共 1 524 次  $M_L \geq 2.0$  地震的震源参数。结果显示: (1) 盈江地区  $Q$  值和频率的关系为:  $Q(f) = 201.1f^{0.4454}$ 。(2) 台站场地响应总体上呈现出明显的低频放大、高频衰减的现象。(3) 盈江地震序列的地震矩的变化范围为  $3.16 \times 10^{11} \sim 1.50 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$ , 与震级呈现较好的线性关系; 震源破裂尺度的变化范围为  $87 \sim 790 \text{ m}$ , 与地震矩具有一定的正相关关系; 拐角频率的变化范围为  $1.6 \sim 15 \text{ Hz}$ , 与地震矩呈负相关关系; 应力降的变化范围为  $0.01 \sim 5.16 \text{ MPa}$ , 有随震级增大而增大的趋势, 但无明显的线性统计关系。(4) 通过分析  $M_L 3.0 \sim 3.5$  地震的应力降时空演化过程, 发现  $M_s 5.6$  与  $M_s 6.1$  地震序列的应力降的空间分布表现出明显的差异性, 可能主要受到各自发震断层的控制;  $M_s 5.6$  地震序列的应力降均值高于  $M_s 6.1$  地震序列的应力降均值,  $M_s 6.1$  地震序列余震密集区的应力降小于后期余震的应力降;  $M_s 5.6$  地震序列的应力降时空演化特征对  $M_s 6.1$  地震的发生具有一定的指示作用;  $M_s 6.1$  地震序列中多次较大余震发生在应力降值下降后的缓慢上升过程中, 其震中位置多位于应力降高值分布区域。

**关键词:** 盈江地震;  $Q$  值; 场地响应; 震源参数; 应力降; 云南

**中图分类号:** P315.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)04-0583-11

## 0 引言

在地震孕育过程中, 地壳介质通常处于高应力状态, 其辐射的地震波频谱特征、衰减特性等与低应力状态不同。用数字地震观测资料反演中小地震的震源参数 (包括地震矩、震源尺度、应力降等), 提取孕震过程中震源区应力状态及孕震状态的变化特征, 并将其应用于地震趋势的估计、地震前兆信息的探求以及震源物理过程的研究, 已成为现今许多学者的研究课题 (秦嘉政等, 2003, 2004; Shearer *et al.*, 2006; Annemarie *et al.*, 2006; Giampiccolo *et al.*, 2007; Allmann, Shearer, 2007, 2009; 陈章立, 李志雄, 2008; 华卫等, 2009; 赵翠萍等, 2005, 2011; 吴微微等, 2017; 段云歌等, 2018; 李丹宁等, 2016)。

目前, 震源参数的计算方法已比较成熟, 主要在频率域对台站记录的地震波形资料进行几何扩散、非弹性衰减、场地响应、仪器响应等校正后, 采用 Brune (1970, 1971) 的震源模型, 获得震源谱参数, 再根据理论公式计算即可获得震源参数。利用该方法, 华卫等 (2009) 获得了 2008 年汶川 8.0 级地震序列中 1 070 次地震的震源参数, 并分析了应力降的时空演变过程; 赵翠萍等 (2005, 2011) 对中国大陆主要地震活动区中小地震的震源参数和新疆北天山中东段地区 2001 年以来的共 105 次地震的震源参数进行研究; 吴微微等 (2017) 研究了川滇活动块体中-北部主要活动断裂带现今应力状态的分区特征。以上研究在一定程度上说明了, 中小地震的震源参数尤其是应力降的计算及其时空分布特征, 可为预测中强震发生的时间和地点提供重要依据。

\* 收稿日期: 2017-12-20.

基金项目: 中国地震局三结合课题 (CEA-JC/3JH-162504)、云南省科技计划项目基础研究青年项目 (2018FD158) 和地震科技星火计划项目 (XH18043) 联合资助。

2014 年 5 月 24 日和 5 月 30 日, 云南省盈江县相继发生  $M_s 5.6$  和  $M_s 6.1$  地震。震中所在盈江地区地质构造复杂, 强震活动频繁, 为剧烈的地震新活动区 (徐彦等, 2012)。自 2008 年以来, 该地区已连续发生多次  $M_s \geq 5.0$  地震, 此次盈江  $M_s 6.1$  地震是该地区 2008 年以来强度最大的一次地震, 给当地人民的生产生活造成严重的影响和巨大的损失。该地震发生前后有大量的前震和余震序列, 为震源参数的研究提供了丰富的波形资料。前人利用云南地区 S 波非弹性衰减  $Q$  值 (杨晶琼等, 2010; 苏有锦等, 2006) 和区域数字台站的场地响应结果 (杨晶琼等, 2010; 刘丽芳等, 2007), 分别对 2008 年和 2011 年盈江地震序列的震源参数进行了研究, 获取了相应地震序列发展过程中应力的释放水平, 加深了人们对震源破裂过程的认识 (杨晶琼等, 2010; 邓菲等, 2014, 2016)。由于云南地区的  $Q$  值具有明显的区域性差异特征 (苏有锦等, 2006), 且盈江地区区域数字台站具有分布较为稀疏、对地震包围性较差等特点。为了得到数量更多且更加精确的震源参数, 本文选用盈江地区 19 个台站记录的中小地震的波形资料, 利用互相衔接的三段几何衰减模型 (Atkinson, Mereu, 1992), 采用 Atkinson 和 Boore (1995), Moya 等 (2000) 的方法分别计算盈江地区的非弹性衰减  $Q$  值和台站的场地响应; 在精确扣除研究区域地震波衰减与台站场地响应的基础上进行联合反演, 得到 2014 年盈江  $M_s 5.6$  和  $M_s 6.1$  地震序列的震源参数, 并综合分析有关参数的相似关系及应力降的时空演化特征, 探讨盈江地震序列发展的物理过程及震源区应力状态的动态演化。

## 1 震源参数计算原理

地震仪所记录的地震波是一种综合信息, 包含地震震源效应、地震波的传播路径效应、台站场地响应和仪器响应等。在频率域中, 台站观测到的任一地震地面运动的剪切波位移谱可以表示为:

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) P_{ij}(f) S_j(f) I_j(f) \quad (1)$$

式中:  $f$  为频率;  $A_{ij}(f)$  为第  $j$  个台站观测到的第  $i$  个地震的位移谱;  $A_{i0}(f)$  是第  $i$  个地震的震源谱;  $P_{ij}(f)$

为第  $i$  个地震到第  $j$  个台站的传播路径;  $S_j(f)$  为第  $j$  个台站的场地响应;  $I_j(f)$  为第  $j$  个台站的仪器响应。其中  $P_{ij}(f)$  可表示为:

$$P_{ij}(f) = G(R_{ij}) e^{-c(f)R_{ij}} \quad (2)$$

式中:  $G(R_{ij})$  为几何衰减函数;  $R_{ij}$  为震源距;  $c(f)$  为非弹性衰减系数, 其与介质品质因子  $Q(f)$  之间的关系为:

$$Q(f) = \frac{\lg(e) \pi f}{c(f) V_s} \quad (3)$$

对某种类型的地震仪, 仪器响应可以用地震计的传递函数表示, 在频率域中可扣除。如果几何衰减函数、介质品质因子及场地响应均为已知, 则地震的震源谱为:

$$A_{i0}(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (\frac{f}{f_c})^2} \quad (4)$$

式中:  $\Omega_0$  表示零频极限;  $f_c$  表示拐角频率, 反映了震源尺度的大小, 地震越小, 拐角频率越大, 震源谱中包含的高频成分越多。

要测定震源参数, 首先必须计算研究区域的地震波衰减特性和所使用台站的场地响应, 即  $G(R_{ij})$ ,  $Q(f)$  和  $S_j(f)$ 。其中,  $G(R_{ij})$  采用 Atkinson 和 Mereu (1992) 的三分段几何衰减模型计算:

$$G(R_{ij}) = \begin{cases} R_{01}^{-b_1} R_{01}^{b_2} R_{02}^{-b_2} R_{02}^{b_3} R_{ij}^{-b_3}, & R_{02} < R_{ij} \\ R_{01}^{-b_1} R_{01}^{b_2} R_{ij}^{-b_2}, & R_{01} < R_{ij} \leq R_{02} \\ R_{ij}^{-b_1}, & R_{ij} \leq R_{01} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  分别为三分段几何扩散中第 1 段和第 2 段的转折点到震源的距离; 根据 Atkinson 和 Mereu (1992) 的研究结果,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  分别取值为 1.0, 0, 0.5。

$Q(f)$  的取值通过 Atkinson 和 Boore (1995) 提出的多台多震源联合反演计算得到。该方法假定不同台站记录到的同一地震的震源谱相同, 根据式 (3) 和式 (5), 利用遗传算法, 不断调整  $c(f)$ ,  $R_{01}$  和  $R_{02}$ , 通过反复迭代, 使得同一地震得到的震源谱振幅的残差最小。具体计算步骤详见刘杰等 (2003) 和黄玉龙等 (2003) 文献。

对于所使用台站的  $S_j(f)$ , 利用 Moya 和 Boore (2000) 和刘杰等 (2003) 提出的多台多震源联合

反演的方法进行计算,该方法以 Brune (1970, 1971) 的震源模型为基础,运用遗传算法,通过不断调整震源谱参数,使得不同事件得到的同一个台站的场地响应标准差最小。在获得震源谱参数后,利用经过几何扩散和非弹性衰减校正后的位移振幅谱与震源谱的比值,即可得到每个台站的场地响应。具体计算步骤详见刘杰等 (2003) 和黄玉龙等 (2003) 文献。

运用以上方法精确计算地震波的  $Q(f)$  和台站的  $S_j(f)$  后,利用 Arkinson 和 Boore (1995) 单个地震、多台平均的反演方法从地震观测谱中扣除地震波的传播路径效应和场地响应等因素的影响,分离出震源部分,得到每个地震的平均震源谱。再利用遗传算法搜索与每个地震的平均震源谱吻合最好的理论震源位移谱,进而得到震源谱参数:  $\Omega_0$  和  $f_c$ 。最后根据 Brune (1970, 1971) 圆盘型震源模型,采用以下表达式计算出地震矩  $M_0$ 、震源破裂半径  $r$  和应力降  $\Delta\sigma$  等震源参数:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (7)$$

$$r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_c} \quad (8)$$

式中:  $\rho$  为介质密度,本文取  $2.9 \text{ g/cm}^3$ ;  $S$  波速度取为  $3.58 \text{ km/s}$ ;  $R_{\theta\varphi}$  是地震波的辐射图像因子,  $\theta$  和  $\varphi$  分别表示地震到台站的方位角、离源角,对 SH 波,  $R_{\theta\varphi} = \sqrt{\frac{2}{5}}$ 。

## 2 资料选取

2014 年盈江  $M_s 5.6$  地震前,在震中周边区域  $300 \text{ km}$  范围内共有 15 个正常运行的固定台站,其中包括云南数字测震台网 11 个区域台站、1 个缅甸密支那 (MYI) 境外共享台站以及腾冲火山台网 3 个火山台站。这些台站主要分布在震中东侧,震中西侧仅有 MYI 一个境外台站,方位角覆盖较弱,且近震台站较少,其中箐口台 (QKT) 距离震中最近,震中距约为  $57 \text{ km}$ 。盈江  $M_s 5.6$  和  $M_s 6.1$  地

震发生后,为了取得近震源数字化地震波资料,云南省地震局先后在震中附近架设了卡场 (KAC)、勐弄 (MNO)、昔马 (XIM)、盏西 (ZHX) 及新城 (XIC) 共 5 个短周期流动数字测震台站,其中 KAC 及 MNO 台均位于余震区内。由固定台、火山台和流动台构成的地震监测网对盈江地震余震区形成了较好的方位覆盖,明显改善了台网对震区的监测能力,多台记录地震下限可达到  $M_L 0.1$ ,完整记录了盈江地震序列的发展过程。根据云南省地震局测震台网提供的目录统计,截至 2014 年 12 月 31 日,盈江地震序列共发生  $M_L \geq 0.0$  地震 11 126 次 (不包括单台记录地震),其中  $M_L 0.0 \sim 0.9$  地震 771 次,  $M_L 1.0 \sim 1.9$  地震 7 593 次,  $M_L 2.0 \sim 2.9$  地震 2 472 次,  $M_L 3.0 \sim 3.9$  地震 273 次,  $M_L 4.0 \sim 4.9$  地震 14 次,  $M_L 5.0 \sim 5.9$  地震 2 次,  $M_L 6.0 \sim 6.9$  地震 1 次,为该区域震源参数的研究提供了丰富的波形资料。

本文选取 2014—2016 年云南省地震台网中的 11 个台站和布设在震中附近的 4 个流动数字地震台站 (盏西台因波形记录缺失除外)、3 个火山台网台站和 1 个境外共享台站共 19 个台站观测记录到的地震波形资料,按照每个地震至少被 3 个以上台站记录到、每个台站至少要记录到 3 个以上的地震和 2 倍信噪比以及对受前一次地震尾波或后一次地震初至波影响的地震不予采用的原则,进行该区域的地震波衰减特征、场地响应和震源参数的研究。

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 地震波衰减特征与台站场地响应

本文共选取了 2014—2016 年的 57 次  $M_L \geq 3.0$  地震的观测资料计算盈江地区地震波衰减特征与台站场地响应。图 1 给出了参与计算的地震震中、台站分布与射线路径分布图,从图中可以看出,地震射线基本覆盖了整个研究区域。基于此,采用 Atkinson 和 Boore (1995) 的方法计算得到盈江地区的非弹性衰减结果为  $Q(f) = 201.1f^{0.4454}$ ,这一结果介于苏有锦等 (2006) 利用云南地震台网 22 个台站数据得到的结果  $Q(f) = 238f^{0.388}$  和李丹宁等 (2016) 利用云南地震台网 46 个台站数据得到的结果  $Q(f) = 193.8f^{0.528}$  之间,这种差异与本

文选取了不同的台站、地震以及研究区域有关。图 2 给出了反演得到的  $Q$  值与  $f$  的拟合关系, 由图可见,  $f > 2$  Hz,  $Q$  值与  $f$  拟合较好; 在  $1 \sim 2$  Hz,  $Q$  值与  $f$  拟合则稍偏离了线性关系, 这可能是由  $f$

$< 2$  Hz 的震源谱对地震计标定的参数较为敏感, 具有较大的不确定性引起的 (Hartzell *et al.*, 1996)。计算所得的低  $Q_0$  及  $\eta$  值反映了盈江地区的构造复杂性及频繁的地震活动。

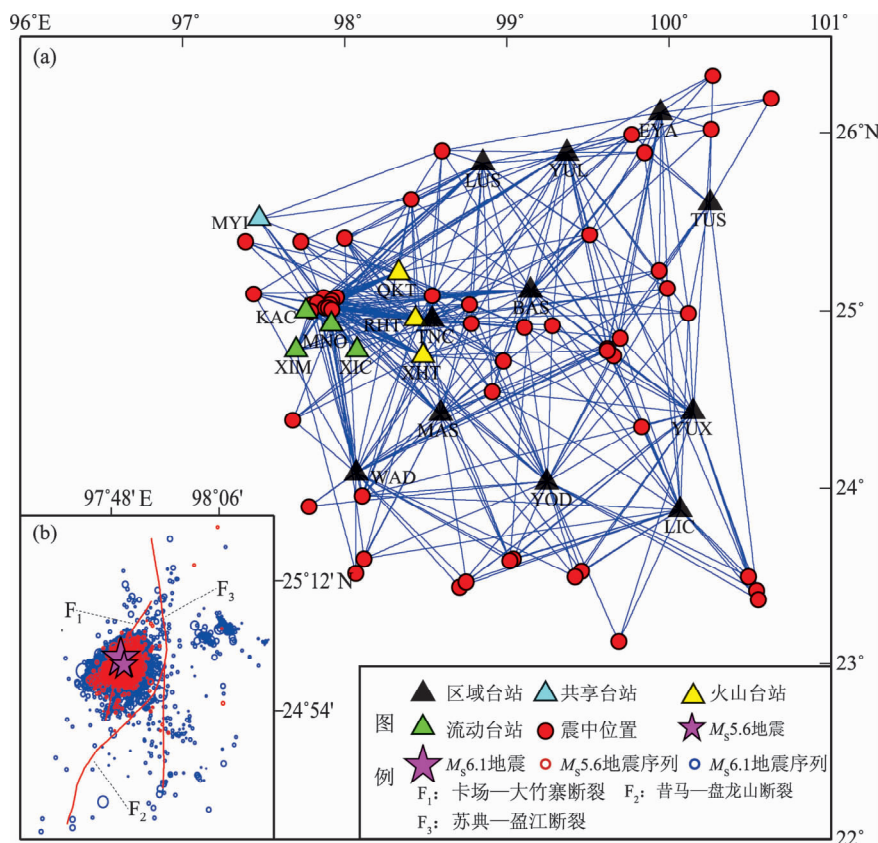


图 1 盈江地区所选台站、震中及射线分布 (a) 和 2014 年盈江地震序列 (b) 分布图

Fig. 1 Distribution of the selected stations, epicentres and rays (a) and 2014 Yingjiang earthquake sequence (b) used in this research

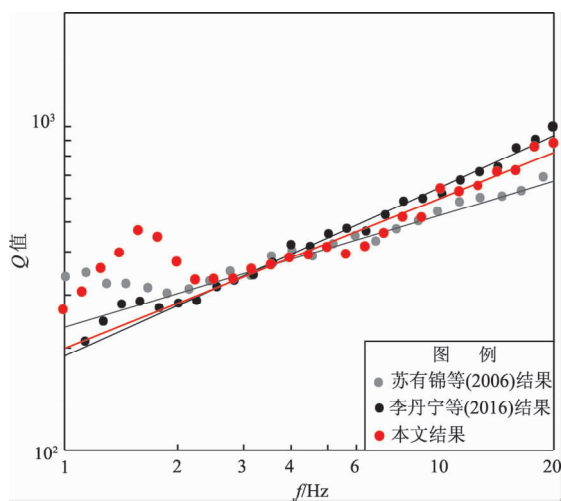


图 2  $Q(f)$  与频率  $f$  的拟合曲线

Fig. 2 Fitted curve of  $Q(f)$  and frequency  $f$

图 3 是利用 Moya 等 (2000) 和刘杰等 (2003) 的方法反演得到的 19 个台站的场地响应, 由图可见, 这 19 个台站的场地响应总体上呈现出不同程度的低频放大和高频衰减特征。在  $1 \sim 6$  Hz 的低频段场地放大作用比较明显, 大多为  $1 \sim 6$  倍, 其中位于震源区的 KAC 和 MNO 2 个流动台站的场地放大作用最为明显, KAC 台在 3 Hz 处最高达到 30 多倍, MNO 台在 4 Hz 处放大 20 多倍, 这可能由于流动台站受到布设时间紧和布设区域地点的限制, 布设的场地条件往往不是很好。在 6 Hz 以上的高频段, 这 19 个台站场地响应表现为明显的高频衰减特征。本文得出的台站场地响应结果与李丹宁等 (2016) 反演的 12 个相同的台站场地响应表现形态相近。

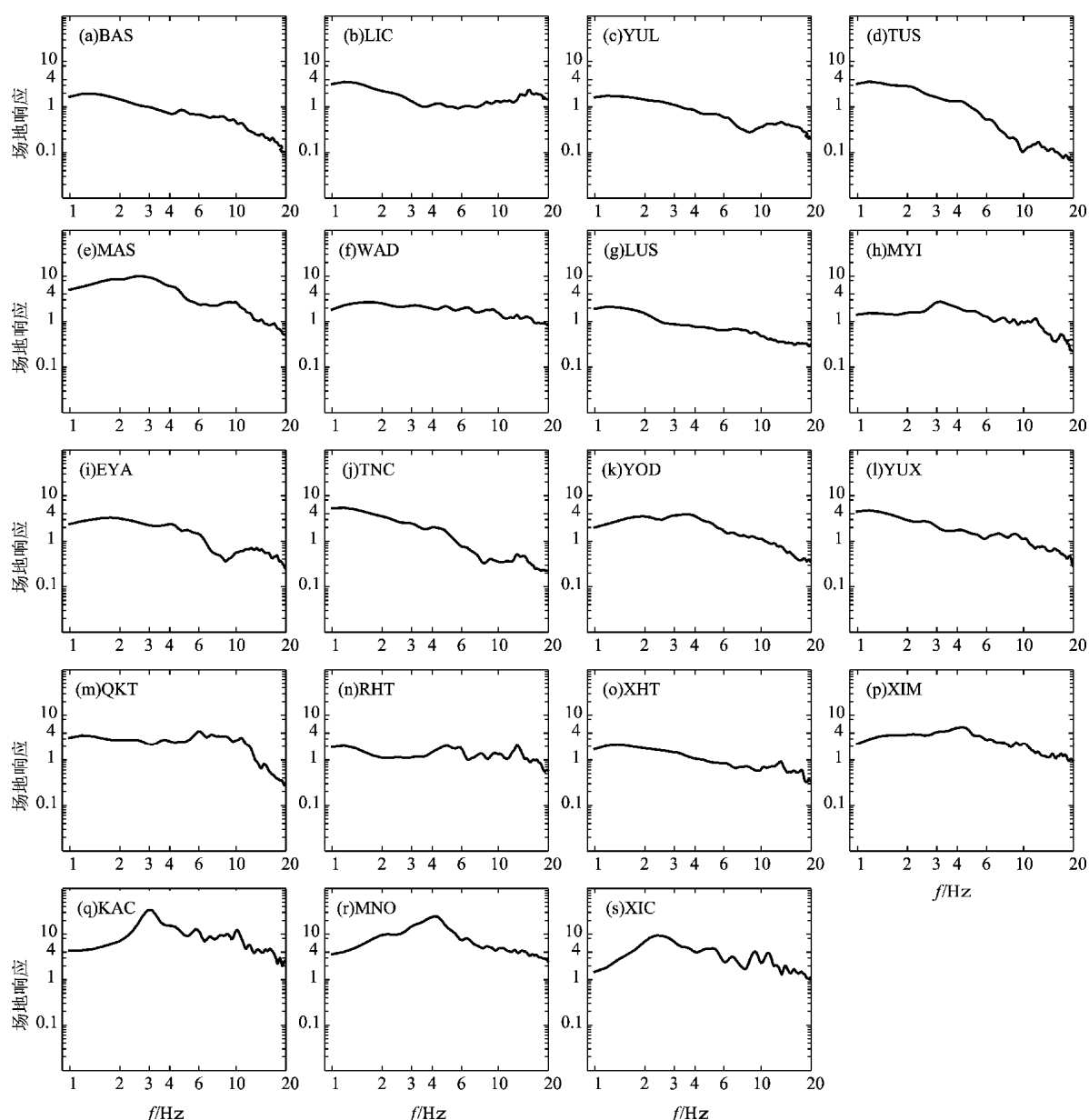


图3 反演得到的19个台站的场地响应

Fig. 3 The site responses of 19 stations inversed by genetic algorithm

### 3.2 震源参数及其定标关系

本文反演得到了2014年5月24日至12月31日1524次 $2.0 \leq M_L \leq 5.0$ 地震(其中, $M_{s5.6}$ 地震序列187次、 $M_{s6.1}$ 地震序列1337次)的震源参数。计算结果显示,盈江 $M_{s5.6}$ 和 $M_{s6.1}$ 地震序列的 $M_0$ 的变化范围均在 $3.16 \times 10^{11} \sim 1.50 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$ ;  $r$ 的变化范围分别为 $87 \sim 423 \text{ m}$ ,  $87 \sim 790 \text{ m}$ ;  $f_c$ 的变化范围分别为 $3 \sim 15 \text{ Hz}$ ,  $1.6 \sim 15 \text{ Hz}$ ;  $\Delta\sigma$ 的变化范围分别为 $0.06 \sim 2.92 \text{ MPa}$ ,  $0.01 \sim 5.1 \text{ MPa}$ 。震源参数的标度关系,一定程度上可以反映该地区地震的发生规律。利用盈江地

震序列的波形资料计算得到该地震序列的震源参数,统计得到了 $M_0$ ,  $r$ ,  $f_c$ 和 $\Delta\sigma$ 等与 $M_L$ 的关系,并对各参数的拟合关系及定性关系进行探讨,揭示各震源参数之间可能存在的内在联系,为盈江地震序列分析提供依据。

#### 3.2.1 地震矩与震级的关系

地震矩是对断层滑动引起的地震强度的直接量度,体现了震源处破裂的大小。地震矩与震级的线性关系与震源区介质的应力水平、非均匀程度等有关,能反映不同地区的地下介质状态和地震活动特点。利用最小二乘法拟合,得到盈江

$M_{S5.6}$  和  $M_{S6.1}$  地震序列  $M_0$  与  $M_L$  的关系分别为  $\lg M_0 = 1.17M_L + 9.54$ ,  $\lg M_0 = 1.15M_L + 9.66$ , 其拟合曲线如图 4a 所示。从图中可见, 在单对数坐标下, 随着  $M_L$  的增加,  $M_0$  相应的增大,  $M_0$  与  $M_L$  呈现很好的相关性, 且同一震级范围内,  $M_{S5.6}$  与  $M_{S6.1}$  地震序列的  $M_0$  无明显差别。对比杨晶琼等 (2010) 得到的 2008 年盈江地震序列的结果  $\lg M_0 = 1.09M_L + 10.01$ , 发现  $M_0$  与  $M_L$  都具有很好的线性关系, 且线性关系的系数都比较接近。

### 3.2.2 地震矩与震源破裂尺度的关系

利用最小二乘法拟合, 得到盈江  $M_{S5.6}$  和  $M_{S6.1}$  地震序列  $M_0$  与  $r$  的关系分别为:  $\lg M_0 = 0.0070r + 11.4399$ ,  $\lg M_0 = 0.0051r + 11.5455$ , 其拟合曲线如图 4b 所示。由图可见,  $M_0$  与  $r$  呈现出一定的正相关关系。盈江  $M_{S5.6}$  和  $M_{S6.1}$  地震序列的  $r$  主要集中在 87 ~ 300 m 范围内;  $M_{S6.1}$  地震序列的  $r$  大于  $M_{S5.6}$  地震序列, 但在  $r \geq 300$  m

所对应的  $M_0$  分布较为离散。

### 3.2.3 拐角频率与地震矩的关系

$f_c$  是震源谱低频和高频趋势线的交点, 是震源参数研究中的基本参数之一, 主要反映了地震波高低频能量的分布特征, 它不仅与震区应力状态有关, 也与发震过程相联系。经计算得到盈江  $M_{S5.6}$  和  $M_{S6.1}$  地震序列的  $f_c$  为 1.6 ~ 15 Hz, 均值为 7.9 Hz, 其中,  $M_{S5.6}$ ,  $M_{S6.1}$  地震序列的  $f_c$  的均值分别为 9.1 Hz, 7.7 Hz。盈江  $M_{S5.6}$  和  $M_{S6.1}$  地震序列的  $f_c$  与地震矩  $M_0$  的关系分别为  $\lg f_c = -0.1991 \lg M_0 + 3.4360$ ,  $\lg f_c = -0.2165 \lg M_0 + 3.5714$ 。其拟合曲线见图 4c, 由图明显可见,  $M_{S5.6}$  地震序列的  $f_c$  普遍高于  $M_{S6.1}$  地震序列; 较小的  $M_0$  对应着较大的  $f_c$ , 反之亦然,  $f_c$  与  $M_0$  呈现出明显的负相关关系, 其他相关研究 (张天中等, 2000; 康英等, 2004; 潘颖等, 2015) 也显示同样的结果。

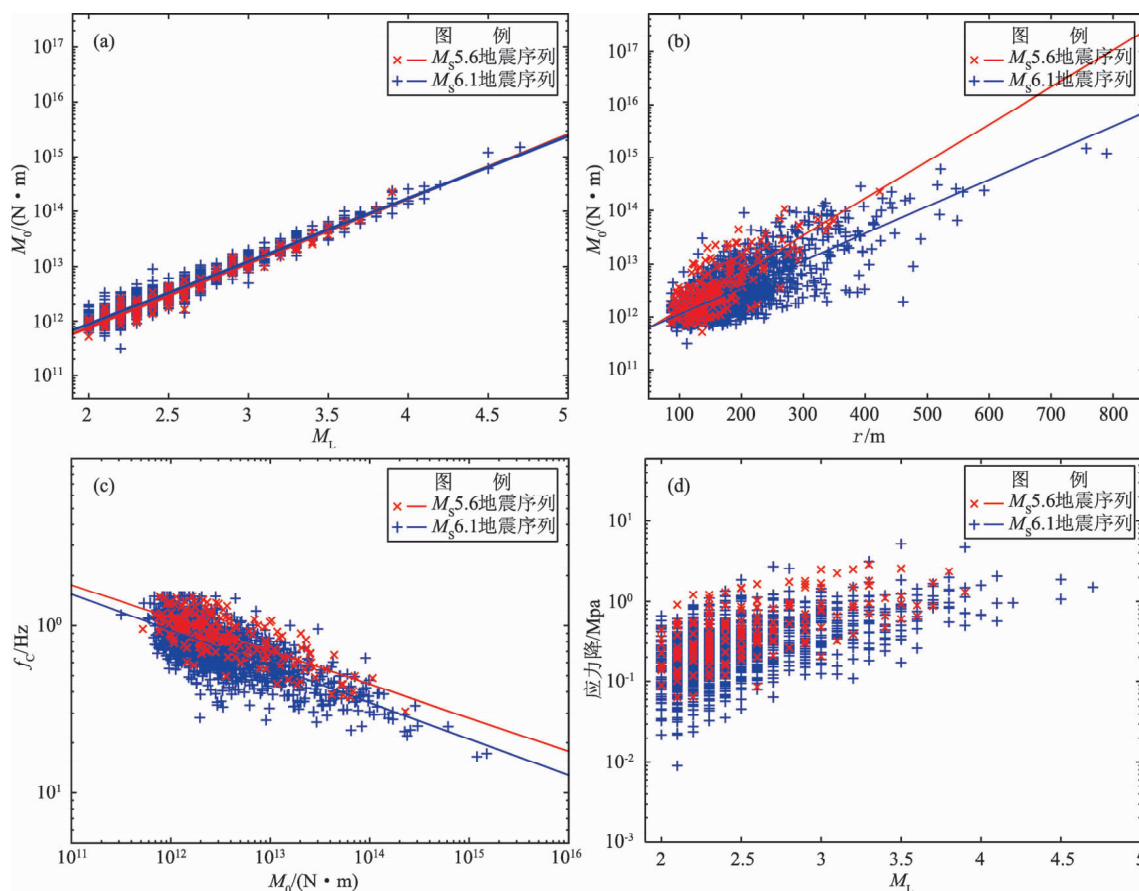


图4 2014年盈江地震序列地震矩  $M_0$  与震级  $M_L$  (a)、震源破裂尺度  $r$  (b)、拐角频率  $f_c$  (c) 的关系, 和应力降与震级  $M_L$  (d) 的关系

Fig. 4 Relationships between seismic moment  $M_0$  and  $M_L$  (a), focal rupture size  $r$  (b), corner frequency  $f_c$  (c), and relationship of stress drop and  $M_L$  (d) of 2014 Yingjiang earthquake sequence



3.2.4 应力降与震级的关系

应力降是表征地震瞬间断层错动时位错面上的应力变化，与震源位置、震源介质和区域构造应力水平都有联系。通过分析研究地震的应力降可以了解震前和地震发生过程中构造应力释放水平，从而间接地认识震中附近区域的构造背景应力和破裂过程。应力降的标度性，即应力降如何随地震强度的大小而变化，是震源参数研究中广泛讨论的问题，也是地震预报实践首先要考虑的基本问题（陈章立，李志雄，2008）。本文对计算所得的应力降与震级之间的关系进行了统计分析，如表 1 所示，可以看出盈江  $M_s5.6$  和  $M_s6.1$  地震序列的应力降的变化范围为 0.06 ~ 5.16 MPa，均值为 0.38 MPa，在均值以下的应力降占 68%，应力降值整体偏低。其中  $M_s5.6$  地震序列的应力降

的变化范围为 0.06 ~ 2.92，均值为 0.62 MPa，在均值以下的应力降占 67%； $M_s6.1$  地震序列的应力降的变化范围为 0.01 ~ 5.16 MPa，均值为 0.35 MPa，均值以下的应力降也占 67%。相关研究资料表明，应力降与震级之间的关系表现为 2 种不同的结果：一是应力降与震级存在正相关关系；二是应力降与震级不存在明显的相关性（Abercrombie, 1995；赵翠萍等，2011）。盈江地区应力降与  $M_L$  之间的关系（图 4d）表明，应力降有随  $M_L$  增大而增大的趋势，但无明显的线性统计关系。总体来看，在  $M_L \leq 3.0$  时，应力降值波动相对较大，分布较为离散； $M_L > 3.0$  时，应力降有逐渐收敛的趋势，分布范围变小。通过对比发现  $M_s6.1$  地震序列的应力降波动较大，且相同震级档范围内， $M_s5.6$  地震序列的应力降均值高于  $M_s6.1$  地震序列。

表 1 2014 年盈江  $M_s5.6$  和  $M_s6.1$  地震序列应力降分布统计  
Tab. 1 The statistics of stress drop of 2014 Yingjiang  $M_s5.6$ ,  $M_s6.1$  earthquake sequence

震级范围 $M_s$	$M_s5.6$ 地震序列			$M_s6.1$ 地震序列			地震 总个数	应力降均值/ MPa
	个数	应力降分布范围/ MPa	应力降均值/ MPa	个数	应力降分布范围/ MPa	应力降均值/ MPa		
2.0 ~ 2.9	152	0.06 ~ 1.81	0.48	1 154	0.01 ~ 2.73	0.28	1 306	0.35
3.0 ~ 3.9	35	0.22 ~ 2.92	1.24	173	0.11 ~ 5.16	0.74	208	0.83
4.0 ~ 4.9	0	—	—	10	0.57 ~ 2.08	1.20	10	1.20
总计	187	0.06 ~ 2.92	0.62	1 337	0.01 ~ 5.16	0.35	1 524	0.38

3.3 应力降时空演变过程

通过分析研究地震序列的应力降，可以了解地震发展过程中的构造应力释放水平，从而间接地认识发震区的构造背景应力变化过程。前文的研究表明，应力降有随震级增大而增大的趋势，因此为了扣除部分震级对应力降的影响，且又保证有足够多的地震样本数，通过对比分析不同震级档范围内的地震的应力降时空演变过程，发现  $M_L3.0 \sim 3.5$  地震更适合于盈江地区有关应力降的跟踪与研究。因此，本文仅抽取  $M_L3.0 \sim 3.5$  共 169 次地震的应力降，讨论盈江地震序列应力降的时空演化过程。这 169 次地震的应力降变化范围为 0.11 ~ 5.16 MPa，均值为 0.75 MPa。其中包含  $M_s5.6$  地震序列 29 次地震的应力降，变化范围为 0.21 ~ 2.92 MPa，均值为 1.23 MPa； $M_s6.1$  地震序列 140 次地震的应力降，变化范围为 0.11 ~ 5.16 MPa，均值为 0.66 MPa；其时间变化曲线如

图 5 所示，空间分布如图 6 所示。

从图 5 可以看出，5 月 24 日  $M_s5.6$  地震发生之后，应力降出现高值，明显高于背景应力水平，随后在其余震密集区应力降有所降低，经过短暂的回调后，又表现为缓慢上升的过程，在应力降上升的过程中发生了  $M_s6.1$  地震。这说明  $M_s5.6$  地震发生后，盈江地区的区域构造应力还没有得到充分释放，仍处于应力降加速积累的过程中。5 月 30 日  $M_s6.1$  地震发生后，在 10 min 内盈江地区连续发生了 4 次  $M_L \geq 4.0$  的强余震，大量的应力得以释放，应力降处于逐步加速释放的过程。5 月 31 日至 6 月 1 日，应力降出现一小段时间的低值，最低达到 0.17 MPa，随后应力降又逐渐上升，在此过程中发生了 6 月 3 日  $M_L4.5$  余震。同样的 6 月 13 日  $M_L3.9$ ，6 月 17 日  $M_L4.5$ ，6 月 19 日  $M_L4.0$ ，6 月 30 日和 7 月 2 日  $M_L3.8$ ，8 月 1 日  $M_L3.7$ ，9 月 23 日  $M_L3.6$ ，10 月 17 日  $M_L4.2$  余震发生之前，

应力降均表现为一段时间的低值,在应力降逐渐回升的背景中发生了这些余震。总体上,去除 $M_{\text{s}}6.1$ 地震后短时间内部分余震高应力释放的影响, $M_{\text{s}}5.6$ 地震序列的应力降大于 $M_{\text{s}}6.1$ 地震序列余震密集区的应力降, $M_{\text{s}}6.1$ 地震序列余震密集区的应力降小于后期余震的应力降。在余震密集期内,应力降呈现高值-低值的起伏状态;在余震衰减后期,随着余震活动趋向结束,应力降逐渐回调,恢复至正常背景水平。

从图6可以看出,盈江 $M_{\text{s}}5.6$ 和 $M_{\text{s}}6.1$ 地震均位于卡场一大竹寨断裂的东侧,相对于 $M_{\text{s}}5.6$ 地震, $M_{\text{s}}6.1$ 主震的震中位置更靠近卡场一大竹寨断裂,该断裂位于近年来盈江地区相对活跃的苏典-盈江断裂的西侧。169次 $M_{\text{L}}3.0 \sim 3.5$ 地震的应力降主要沿卡场一大竹寨断裂走向(NNE向)展布,主要分布在该断裂的东侧,沿断裂呈现出明显的不对称性,可能与卡场一大竹寨断裂两侧介质的力学性质或流体等分布的不均匀性有关。

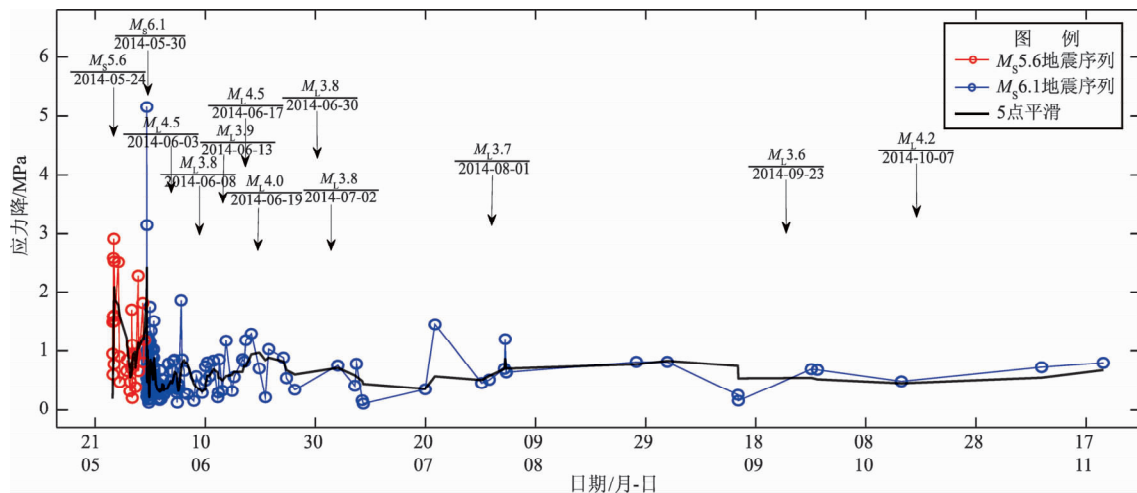


图5 2014年盈江地震序列( $M_{\text{L}}3.0 \sim 3.5$ )应力降随时间的变化过程

Fig. 5 The temporal evolution of stress drop of 2014 Yingjiang  $M_{\text{L}}3.0 \sim 3.5$  earthquake sequence

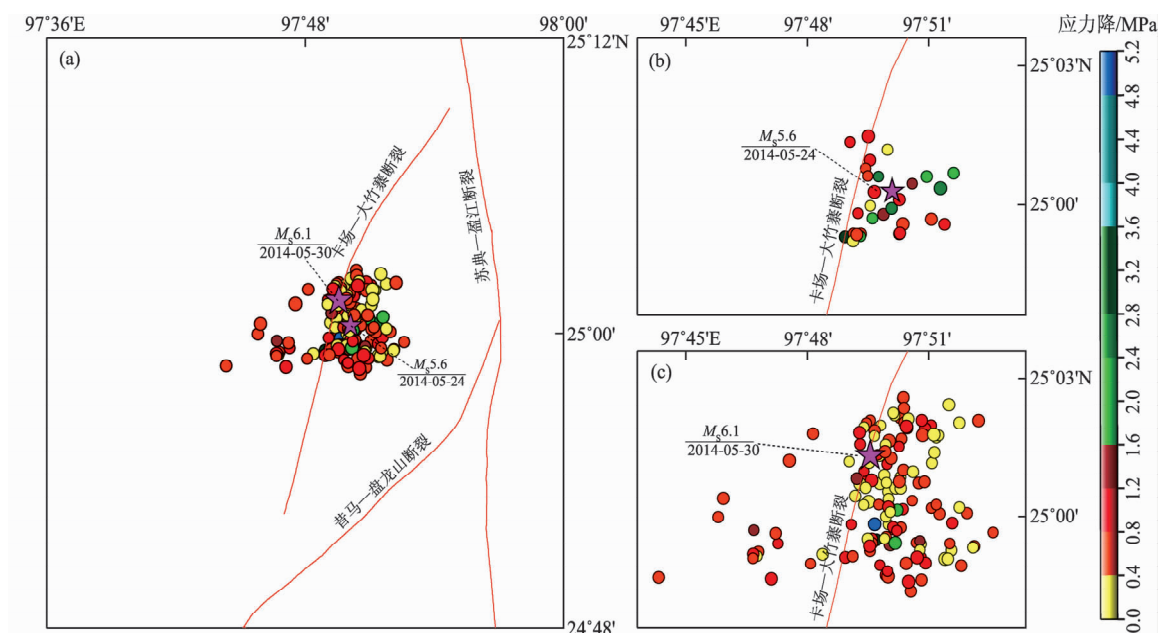


图6 2014年盈江地震序列( $M_{\text{L}}3.0 \sim 3.5$ ) (a),  $M_{\text{s}}5.6$  (b) 及  $M_{\text{s}}6.1$  (c) 地震序列应力降空间分布图

Fig. 6 The spacail distribution map of stress drop of 2014 Yingjiang  $M_{\text{L}}3.0 \sim 3.5$  (a),  $M_{\text{s}}5.6$  (b) and  $M_{\text{s}}6.1$  (c) earthquake sequence



$M_{\text{s}}5.6$  地震序列的应力降呈现出 2 个优势分布方向: 沿苏典—盈江断裂的 SN 向, 和沿昔马—盘龙山断裂的 NE 向,  $M_{\text{s}}5.6$  地震的震中位于 2 个优势分布方向的交汇处, 表明震源破裂为双侧破裂, 其序列的应力降高值主要分布在第二个优势分布方向上, 表现为  $M_{\text{s}}5.6$  地震之后孕震区的高应力释放状态。

2014 年盈江地震序列的精定位结果表明 (徐甫坤等, 2015),  $M_{\text{s}}5.6$  地震序列后期的余震存在向未来的  $M_{\text{s}}6.1$  地震的震源集中的时空演化特征。结合  $M_{\text{s}}5.6$  地震序列应力降时间变化曲线特征 (图 5) 分析表明,  $M_{\text{s}}5.6$  地震序列后期, 孕震区的应力状态经过短暂回调后的应力积累过程主要分布在第一个优势分布方向上, 即沿苏典—盈江断裂的 SN 向, 在该优势分布方向的北段发生了此次  $M_{\text{s}}6.1$  地震。 $M_{\text{s}}6.1$  地震序列的应力降的空间分布与  $M_{\text{s}}5.6$  地震序列存在较大的差异, 其分布范围更广, 主要受 SN 向苏典—盈江断裂的控制, 呈近 SN 向的弧状分布, 其应力降高值主要分布在优势分布方向的南段, 表现出沿 SN 向断层迁移的特征。此外, 有少量在均值左右的应力降扩展至卡场—大竹寨断裂的左侧。其余震序列中大多数  $M_{\text{L}} \geq 4.0$  地震均发生在应力降高值分布区域, 即沿 SN 向苏典—盈江断裂方向的南段。总体上,  $M_{\text{s}}5.6$  地震序列的应力降与  $M_{\text{s}}6.1$  地震序列的应力降的空间分布表现出明显的差异性, 可能主要受到各自发震断层控制。 $M_{\text{s}}5.6$  地震序列的应力降的时空演化特征对  $M_{\text{s}}6.1$  地震的发生具有一定的指示作用。 $M_{\text{s}}6.1$  地震序列中多次较大余震发生在应力降值下降后的缓慢上升过程中, 其震中位置多位于应力降高值分布区域。

地震烈度和发震断层的地表调查工作 (黄小龙等, 2015) 表明,  $M_{\text{s}}5.6$  地震的发震断层为 NE 向左旋走滑的昔马—盘龙山断裂,  $M_{\text{s}}6.1$  地震的发震断层为近 SN 向右旋走滑的苏典—盈江断裂, 这 2 次地震的发生应为区域块体在近 SN 向右旋剪切变形作用下, SN 向断裂所夹持的 NE 向次级块体断块首先发生顺时针旋转引发次级断裂活动, 进而触动近 SN 向主断层活动所致。历史地震资料显示, 在地质构造复杂和断裂活跃的盈江地区的地震活动多以 5~6 级的中强震为主, 具有明显的群发性特征。陈章立和李志雄 (2008) 的研究表明

震群地震的应力降随时间增大是前震序列的重要标志; Hardebeck 和 Allegra (2009) 的相关研究表明, 高应力降类型的地震发生于滑动断层上的闭锁段周围, 这里是应变累积或者存在更高强度介质的区域, 表明了应力降与外施剪应力存在正相关, 即排除计算因素外, 高应力降集中分布的区域也许是中强以上地震的潜在震源成核区。华卫等 (2009) 对汶川余震序列震源参数的研究表明, 分析应力降随时间和空间的演化过程, 可以在一定程度上了解震源区应力状态, 对后续强余震的预测可能有一定的意义。本文对盈江地震序列应力降的时空演变过程的分析结果与上述观点基本是一致的。

## 4 结论

本文利用 2014—2016 年盈江地区 19 个台站记录的地震波形资料, 研究了盈江地区 S 波非弹性衰减  $Q$  值和台站场地响应, 在精确扣除余震区地震波衰减与台站场地响应的基础上联合反演计算获得了 2014 年盈江  $M_{\text{s}}5.6$ ,  $M_{\text{s}}6.1$  地震序列共计 1 524 次 ( $M_{\text{s}}5.6$  地震序列 187 次、 $M_{\text{s}}6.1$  地震序列 1 337 次)  $2.0 \leq M_{\text{L}} \leq 5.0$  地震的震源参数, 并初步分析了  $M_{\text{L}}3.0 \sim 3.5$  地震应力降的时空演变过程, 研究结果表明:

(1) 盈江地区的  $Q$  值和  $f$  之间的关系为  $Q(f) = 201.1f^{0.4454}$ , 说明盈江地区处于低  $Q_0$  及  $\eta$  值范围, 反映了该地区的构造复杂性及频繁的地震活动。

(2) 台站的场地响应总体上呈现出不同程度的低频放大和高频衰减特征。场地的放大作用在低频段 (1~6 Hz) 比较明显, 大多在 1~6 倍; 而在 6 Hz 以上的高频段, 场地响应表现出不同程度的高频衰减特征。

(3) 整个盈江地震序列的拐角频率的变化范围为 1.6~15 Hz; 应力降的变化范围为 0.01~5.16 MPa; 震源尺度的变化范围 87~790 m; 地震矩的变化范围为  $3.16 \times 10^{11} \sim 1.50 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。其中, 地震矩与震级呈现很好的相关性; 破裂尺度与地震矩具有一定的正相关关系; 拐角频率与地震矩呈负相关关系; 应力降有随震级增大而增大的趋势, 但无明显的线性统计关系。

(4) 盈江  $M_{\text{s}}5.6$  地震序列的应力降大于  $M_{\text{s}}6.1$  地震序列余震密集区的应力降,  $M_{\text{s}}6.1$  地震序列余震密集区的应力降小于后期余震的应力降。说明  $M_{\text{s}}5.6$  地震发生之后, 盈江地区的区域构造应力还没有得到充分释放, 仍处于应力降加速积累的过程中, 直至  $M_{\text{s}}6.1$  地震发生, 大量的应力得以释放, 应力降处于逐步加速释放的过程, 在余震密集期内, 应力降呈现高值-低值的起伏状态; 在余震衰减后期, 随着余震活动趋向结束, 应力降逐渐回调, 恢复至正常背景水平。 $M_{\text{s}}5.6$  与  $M_{\text{s}}6.1$  地震序列的应力降的空间分布表现出明显的差异性, 可能主要受各自发震断层的控制。 $M_{\text{s}}5.6$  地震序列的应力降的时空演化特征对  $M_{\text{s}}6.1$  地震的发生具有一定的指示作用。 $M_{\text{s}}6.1$  地震序列中多次较大余震发生在应力降值下降后的缓慢上升过程中, 其震中位置多位于应力降高值分布区域, 即沿 SN 向苏典—盈江断裂方向的南段。

华卫研究员、赵翠萍研究员、付虹研究员、杨晶琼高级工程师、吴微微高级工程师对本文给予了悉心的指点与帮助, 研究中使用的软件由中国地震局地震预测研究所提供, 在此一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

陈章立, 李志雄. 2008. 对地震预报的科学思考(二)—前兆观测研究及加强地震综合预报研究的方向和重点[J]. 地震, 28(2): 1-16.

邓菲, 刘杰, 杨文. 2016. 2011 年盈江 5.8 级地震序列的震源参数和震源机制相关系数研究[J]. 地球物理学进展, 31(1): 33-43.

邓菲, 刘杰. 2014. 2008 年盈江地震序列的震源参数和震源机制相关系数研究[J]. 地震, 34(2): 22-34.

段云歌, 陈天长, 苏金蓉, 等. 2018. 2013 年芦山  $M_{\text{s}}7.0$  地震余震序列震源机制一致性的时空变化[J]. 地震研究, 41(2): 251-257.

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.

华卫, 陈章立, 郑斯华. 2010. 利用不同方法估算流动台站的场地响应[J]. 地震, 30(3): 30-44.

黄小龙, 吴中海, 赵小艳, 等. 2015. 2014 年 5 月云南盈江  $M_{\text{s}}5.6$ 、 $M_{\text{s}}6.1$  地震发震构造分析[J]. 地球学报, 36(6): 761-770.

黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 2003. 广东地区地震波衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 46(1): 54-61.

康英, 郑斯华, 刘杰, 等. 2004. 中小地震震源参数的求解及其相似关系[J]. 华南地震, 24(2): 11-21.

李丹宁, 马志斌, 徐彦. 2016. 反投影远震 P 波记录法在实皆断裂上中强地震震源破裂过程研究中的应用[J]. 地震研究, 39(2):

196-206.

李丹宁, 马志斌, 续外芬, 等. 2016. 云南地区非弹性衰减系数及场地响应研究[J]. 大地测量与地球动力学, 36(12): 1041-1046.

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, 苏有锦, 刘杰, 等. 2007. 用 Moya 方法反演云南数字地震台站场地响应[J]. 地震研究, 30(1): 39-42.

潘颖, 张晓东, 付虹. 2015. 糯扎渡水库地区地震活动和震源参数研究[J]. 地震, 35(3): 31-43.

秦嘉政, 邬成栋, 钱晓东. 2004. 2001 年永胜 6.0 级地震的余震序列应力降研究[J]. 地震研究, 27(2): 146-152.

秦嘉政, 叶建庆, 钱晓东. 2003. 2000 年云南姚安地震的震源参数[J]. 地球物理学报, 46(5): 56-67.

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.

吴微微, 吴朋, 魏娅玲, 等. 2017. 川滇活动块体中-北部主要活动断裂带现今应力状态的分带特征[J]. 地球物理学报, 60(5): 1735-1745.

徐甫坤, 张彦珍, 苏有锦. 2015. 2014 年云南盈江  $M_{\text{s}}6.1$  地震前后序列分布差异研究[J]. 地震研究, 38(4): 525-534.

徐彦, 高洋, 李丹宁, 等. 2012. 盈江中强地震序列震源机制及区域地壳流变特征和断层性质研究[J]. 地球物理学进展, 27(6): 2358-2368.

杨晶琼, 杨周胜, 刘丽芳, 等. 2010. 2008 年盈江 5.9 级地震序列震源参数研究[J]. 地震研究, 33(4): 308-312.

张天中, 马云生, 黄蓉良, 等. 2000. 1995 年陡河地震前后小震震源参数及其相互关系[J]. 地震学报, 22(3): 233-240.

赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. 地球物理学报, 54(6): 1478-1489.

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.

Abercrombie R E. 1995. Earthquake source scaling relationships from -1 to  $5M_{\text{L}}$  using seismograms recorded at 2.5-km depth[J]. Journal of Geophysical Research, 100: 24015-24036.

Allmann B P, Shearer P M. 2007. Spatial and temporal stress drop variations in small earthquakes near Parkfield[J]. California Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112 (B4): B04305, doi: 10.1029/2006JB004395.

Allmann B P, Shearer P M. 2009. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111 (B1): B01310, doi: 10.1029/2008JB005821.

Annemarie B, Satoshi I, German P. 2006. Variability in earthquakes stress drop and apparent stress[J]. Geophys Res Lett, 33, L06303, doi: 10.1029/2011GL046698.

Atkinson G M, Boore D M. 1995. Ground-motion relations for eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 85(1): 17-30.

Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(5): 2014-2031.

- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 75(26):4997–5009.
- Brune J N. 1971. Correction[J]. *J Geophys Res*, 76(20):5002.
- Giampiccolo E D, Amico S, Patane D, *et al.* 2007. Attenuation and source parameters of shallow microearthquakes at Mt. Etna Volcano, Italy [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1):184–197.
- Hardebeck J L, Allegra A. 2009. Earthquake stress drops and inferred fault strength on the Hayward fault, East San Francisco Bay, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3):1801–1814.
- Hartzell S, Leeds A, Frankel A, *et al.* 1996. Site response for urban Los Angeles using aftershock of the Northridge earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(Suppl), Part B: S168–S192.
- Moya C A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4):977–992.
- Shearer P M, Prieto G A, Hauksson E. 2006. Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6), doi: 10.1029/2005JB003979.

## Research on Inelastic Attenuation $Q$ – value, Site Response and Source Parameters in Yunnan Yingjiang Region

QIN Min, LI Danning, ZHANG Huiyuan, GAO Yang, JIANG Jinzhong  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Based on the digital seismic waveform data recorded by 19 fixed and temporary stations around the Yunnan Yingjiang region, we calculated the inelastic attenuation coefficients and site responses by the Atkinson method and Moya method. And through accurate deduction of seismic attenuation and site response in aftershock area, we calculated source parameters of 1 524  $M_L \geq 2.0$  earthquakes of the Yingjiang  $M_s 5.6$  and  $M_s 6.1$  earthquake sequence. The results show that: (1) The relationship between  $Q$  – value and frequency is  $Q(f) = 201.1f^{0.4454}$ ; (2) The site responses of 19 stations obtained by genetic algorithm show the characteristic of obvious low frequency amplification and high frequency attenuation; (3) There is a good linear relation between seismic moments  $M_0$  ( $3.16 \times 10^{11} \sim 1.50 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$ ) and local magnitude  $M_L$ . The source rupture radius range between 87 m and 790 m, which have a certain positive correlation with  $M_0$ ; The corner frequency ranges between 1.7 Hz and 15 Hz, which is negatively correlated with  $M_0$ . The stress drop ranges between 0.01 MPa and 5.16 MPa, and increases with  $M_L$ , but there is no obvious linear statistical relationship between them; (4) The temporal and spatial evolution process of stress drops of  $M_L 3.0 \sim 3.5$  earthquakes shows that the spatial distribution of the stress drops of  $M_s 5.6$  and  $M_s 6.1$  earthquake sequence show obvious difference, which was mainly controlled by their own seismogenic fault. The mean stress drop of  $M_s 5.6$  earthquake sequence is higher than that of the  $M_s 6.1$  earthquake sequence, and the stress drop of  $M_s 6.1$  earthquake sequence in the aftershock concentration zone is lower than that of the later aftershock. The temporal and spatial evolution process of stress drops of  $M_s 5.6$  earthquake sequence have a certain directive effect on the  $M_s 6.1$  earthquake. The most aftershocks of  $M_s 6.1$  earthquake sequence occurred in the process of stress drop decreasing and slowly turning up, whose epicentres located in the high stress drop area.

**Keywords:** Yingjiang earthquake;  $Q$  value; station site response; source parameter; stress drop; Yunnan