

# 小江断裂带及邻区应力降特征分析\*

刘丽芳, 杨晶琼, 秦嘉政

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:**在对S波观测记录位移谱进行传播路径、场地响应和仪器响应等校正的基础上,根据Brune圆盘震源模型,利用遗传算法估算了小江断裂带及邻区335次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的应力降,分析了应力降的时空特征。结果表明: $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa的高应力降地震主要分布在小江断裂带的东川、巧家及其以北地区和元谋、武定一带。小江断裂带北段、中段、南段 $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa的地震所占比例分别为10.2%、10.9%和1.6%,据此结合地震活动性分析了该断裂带不同段的强震危险性。结合震源位置和速度结构联合反演方法得到的震源位置精确定位结果,分析了应力降和震源深度变化情况及其所反映的断层深部延伸和分布情况。

**关键词:**应力降;中小地震;小江断裂带

**中图分类号:** P315.3+3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)04-0498-06

## 0 引言

小江断裂带作为一条大型活动断裂和强震发生带,是我国南北地震带的一个重要组成部分。小江断裂带呈近南北走向,全长约400 km,北起巧家,在会泽蒙姑以南分为东、西两支,东支在建水西南交于红河断裂,西支达通海盆地。该断裂带经历了多期构造运动,新构造运动以来断裂表现为强烈的左旋走滑运动以及两侧地块垂直差异运动(毛玉平,韩新民,2003)。断裂带由多次级剪切断层和张剪切断层组成,内部结构十分复杂,地震活动强烈(毛玉平,韩新民,2003)。小江断裂带以地震频度低、强度大著称。1500年至今,小江断裂带曾发生过11次6.0~6.9级地震,3次7.0~7.9级地震,1次8.0级地震(1833年嵩明8.0级地震)。2005年小江断裂带及其邻近地区中小地震活动明显增强,2005年1月至2010年12月发生4级以上地震18次,仅2010年8~12月巧家就连续发生了3次4级地震。

钱晓东和秦嘉政(2008)、易桂喜等(2008)根据地震 $b$ 值分析了小江断裂带及周边地区未来强震的潜在危险性;闻学泽(1993)进行了小江断

裂带的破裂分段与地震潜势概率估计;钱晓东(2010)采用破裂时间法模拟了发生在小江断裂带上的19次主震事件的前兆地震序列能量加速释放过程,并对小江断裂带未来中期6~7级强震的可能危险区进行了预测。

本文利用1999~2010年云南数字地震台网记录的小江断裂带及其邻区(23.5~28.5°N, 102~104°E)  $M_L \geq 2.0$ 地震的数字波形记录,估算了该地区335次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的应力降,分析探讨了应力降的时空分布特征及其对强震危险性的指示意义。

## 1 方法和资料

要想得到震源参数,必须设法区分地震记录中的震源效应、传播路径、场地响应和仪器响应。目前一般采用Atkinson和Mereu(1992)提出的三段几何衰减模型来计算传播路径的影响(黄玉龙等,2003;刘杰等,2003),采用多台、多地震联合反演的Moya方法(Moya *et al.*, 2000)计算台站场地响应。本文使用苏有锦等(2006)研究得到的云南地区非弹性衰减 $Q$ 值关系 $Q(f) = 238.0f^{0.388}$ 和刘丽芳等(2007)反演的云南区域数字台站场

\* 收稿日期: 2011-04-20.

基金项目: 云南省应用基础研究重点项目(2010CC006)和云南省重点项目(JCYB-20080601-4)联合资助.

地响应结果。

先在观测谱中扣除传播路径效应、场地响应和仪器响应等因素的影响，得到震源位移谱，然后，利用遗传算法对震源位移谱进行拟合，得到震源谱参数零频振幅  $\Omega_0$  和拐角频率  $f_c$ ，再根据 Brune 模型（Brune, 1970, 1971），利用下列表达式计算地震矩  $M_0$ 、震源半径  $r$  和应力降  $\Delta\sigma$ （Keilis – Borok, 1959；Brune, 1970）

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v_s^3 \Omega_0}{R_{\theta\phi}}, \tag{1}$$

$$r = \frac{2.34v_s}{2\pi f_c}, \tag{2}$$

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

式中， $\rho$  为密度，取  $2.9\text{ g/cm}^3$ ； $v_s$  是 S 波速度，取  $3.5\text{ km/s}$ ； $R_{\theta\phi}$  是辐射花样系数，由于没有每次地震的断层面解，所以对水平向的 S 波取震源球上的平均值为  $\sqrt{2/5}$ 。

笔者利用 S 波数据进行分析，对每个记录进行波谱资料处理（刘杰等，2003；苏有锦等，2006）。按照每个地震至少被 3 个以上台站记录到、每个台至少有 3 条记录和 2 倍信噪比的原则，最终挑选并计算得到了 335 次  $M_L \geq 2.0$  地震的应力降，其中 2.0 ~ 2.9 级地震 171 次，3.0 ~ 3.9 级地震 136 次，4.0 ~ 4.9 级地震 23 次，5.0 ~ 5.3 级地震 5 次，用于小江断裂带及邻区应力降时空分布特征研究。

2 应力降空间分布特征

应力降是地震瞬间错动时位错面上的应力随变形增长而下降的现象，通过分析研究地震的应力降可以了解地震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构造背景应力和构造破裂过程。因此，笔者重点分析应力降的时空分布特征。

小江断裂带及其邻区 335 次  $M_L 2.0 \sim 5.3$  地震的应力降  $\Delta\sigma$  计算结果介于  $0.03 \sim 18.25\text{ MPa}$ ，应力降平均值为  $3.69\text{ MPa}$ 。其中，应力降  $\Delta\sigma < 1.0\text{ MPa}$  的

地震 60 个，占总数的 17.9%； $1.0\text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0\text{ MPa}$  的地震 191 个，占总数的 57.0%； $5.0\text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0\text{ MPa}$  的地震 60 个，占总数的 17.9%； $\Delta\sigma \geq 10.0\text{ MPa}$  的地震 24 个，占总数的 7.2%（图 1）。

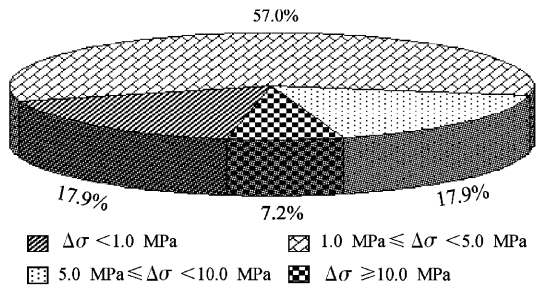


图 1 小江断裂带及邻区应力降  $\Delta\sigma$  分布比例  
Fig. 1 Proportion of stress drop  $\Delta\sigma$  in Xiaojiang Fault Zone and its adjacent area

断裂带及邻区中小地震的应力降主要在  $1.0 \sim 10.0\text{ MPa}$  范围内（占总数的 74.9%），了应力降的空间分布情况。由图 2 可见， $\Delta\sigma \geq 10.0\text{ MPa}$ （高应力降）的地震主要分布在小江断裂带的东川、巧家及其以北地区和元谋、武定一带。

小江断裂带沿南北走向分为北、中、南三段：北段自巧家经蒙姑到东川小江村，呈单一结构；中段自东川小江村分成东、西两支，往南分别经寻甸到宜良、嵩明到阳宗海，两支相距  $12 \sim 16\text{ km}$ ；南段自宜良、阳宗海往南，东、西两支断裂各分成  $2 \sim 4$  条分支平行发育或斜裂交叉，宏观上呈辫状（皇甫岗等，2010）。

进一步对小江断裂带及邻区北、中、南三段的应力降分布情况进行统计分析得出：北段（东川以北区域）98 次  $M_L 2.0 \sim 5.3$  地震中，应力降  $\Delta\sigma < 1.0\text{ MPa}$  的地震 8 次，占总数的 8.2%； $1.0\text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0\text{ MPa}$  的地震 58 次，占总数的 59.2%； $5.0\text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0\text{ MPa}$  的地震 22 次，占总数的 22.4%； $\Delta\sigma \geq 10.0\text{ MPa}$  的地震 10 次，占总数的 10.2%。中段（东川—宜良区域）110 次  $M_L 2.0 \sim 4.6$  地震中，应力降  $\Delta\sigma < 1.0\text{ MPa}$  的地震 19 次，占总数的 17.3%； $1.0\text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0\text{ MPa}$  的地震 53 次，占总数的 48.2%； $5.0\text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0\text{ MPa}$  的地震 26 次，占总数的 23.6%； $\Delta\sigma \geq 10.0\text{ MPa}$  的地震 12 次，占总数的 10.9%。南段（宜良—建水区域）127 次  $M_L 2.0 \sim 5.2$  地震

中, 应力降  $\Delta\sigma < 1.0$  MPa 的地震 33 次, 占总数的 26.0%;  $1.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0 \text{ MPa}$  的地震 80 次, 占总数的 63.0%;  $5.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0 \text{ MPa}$  的地

2 次, 占总数的 1.6%。图 3 给出了小江断裂带及邻区北、中、南三段应力降的分布情况。总体而言, 在同等震级范围内, 南段  $\Delta\sigma < 5.0$  MPa 的地震所占比例达 89%, 明显高于北段 (67.4%) 和 中段 (65.5%) 的地震所占比例。北段、中段、南段  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa (高应力降) 的地震所占比例分别为 10.2%、10.9% 和 1.6%。

中段  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa 的地震主要分布在武定至元谋一带, 构造上与汤郎—易门断裂和元谋—绿汁江断裂相关, 该区及附近地区自 1999 年以来中强地震频发, 6 级地震多达 5 次。而且  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa 的地震与该区及附近地区的中强地震活动密切相关。如 2000 年 8 月 21 日武定 5.1 级地震的 3 次 3 级余震的应力降值分别达 16.45、15.78 和 14.52 MPa; 2008 年 8 月 30 日攀枝花 6.1 级地震前, 3 级地震的应力降值最高达 12.69 MPa。

北段  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa 的地震有两个方面特点: 一是 5 级地震的应力降偏高。1999 年以来小江断裂带北段共发生 4 组 6 次 5 级地震, 最大震级为 5.3 级, 2003 年 11 月 15 日鲁甸 5.0 级地震和 2005 年 8 月 5 日会泽 5.3 级地震, 应力降分别为 18.25 MPa 和 15.35 MPa; 二是高应力降的中小地震对 5 级地震的指示意义不明显, 6 次 5 级地震发生前的 3 个月, 出现明显的高应力降的震例仅占 1 组 2 次。图 4 给出了小江断裂带北段的应力降时间进程曲线。由图 4 可见,  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa 的地震共 9 次 (含 2 次 5 级高应力降地震), 其中仅有 1 次高应力降的 3 级地震后 3 个月内对应发生了 5 级地震, 即 2006 年 7 月 17 日大关 3.6 级地震应力降达 10.65 MPa, 随后的 4 天和 1.2 个月对应发生了 7 月 22 日盐津 5.1 级地震和 8 月 25 日盐津 5.1 级地震。据此笔者认为, 小江断裂带北段高应力降地震比例偏高, 可能反映了该区的高应力背景。张天中等 (2000) 和秦嘉政等 (2005) 认为, 地震前的震源应力背景越高, 地震的应力降越大。从目前的地震活动背景来看, 小江断裂带自 1966 年东川 6.5、6.2 级地震至今已有 44 年未发生 6 级以上强震。笔者计算所得的高应力降地区与张世民和谢富仁 (2001) 根据鲜水河—小江断裂强震区的地质构造和构造地貌特征和闻学泽等利用历史地震破裂空

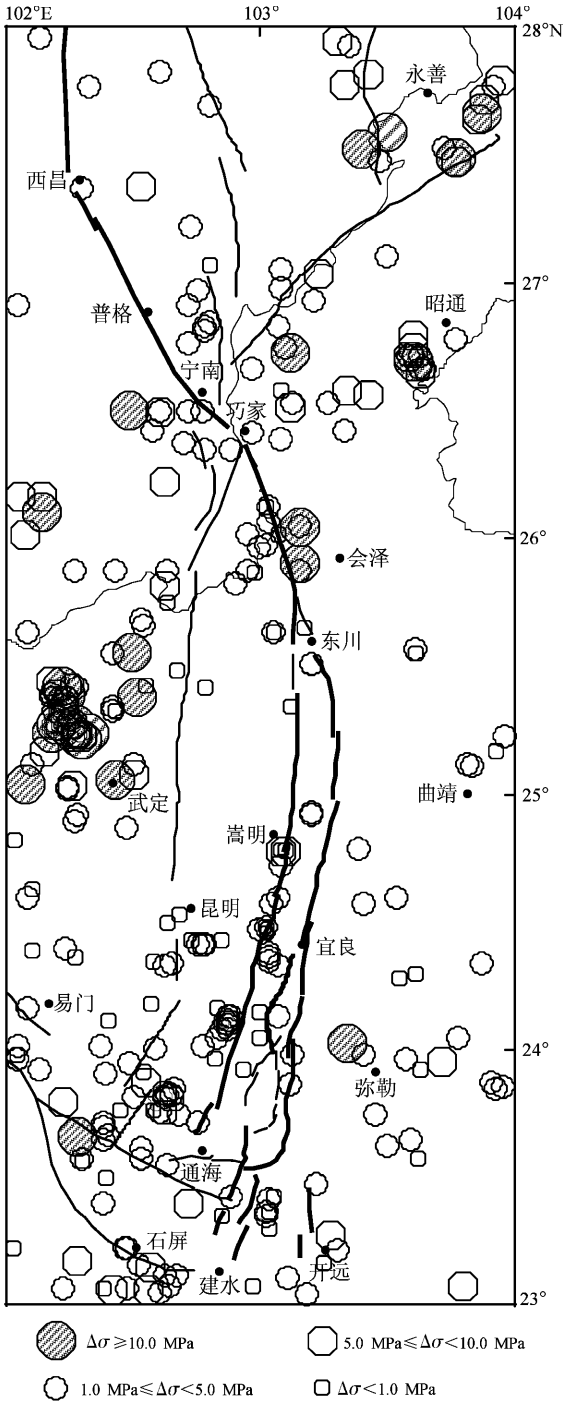


图 2 小江断裂带及邻区中小地震应力降  $\Delta\sigma$  空间分布  
Fig. 2 Distribution of stress drop  $\Delta\sigma$  of moderate – and small-earthquakes in Xiaojiang Fault Zone and its adjacent area

震 12 次, 占总数的 9.4%;  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa 的地震

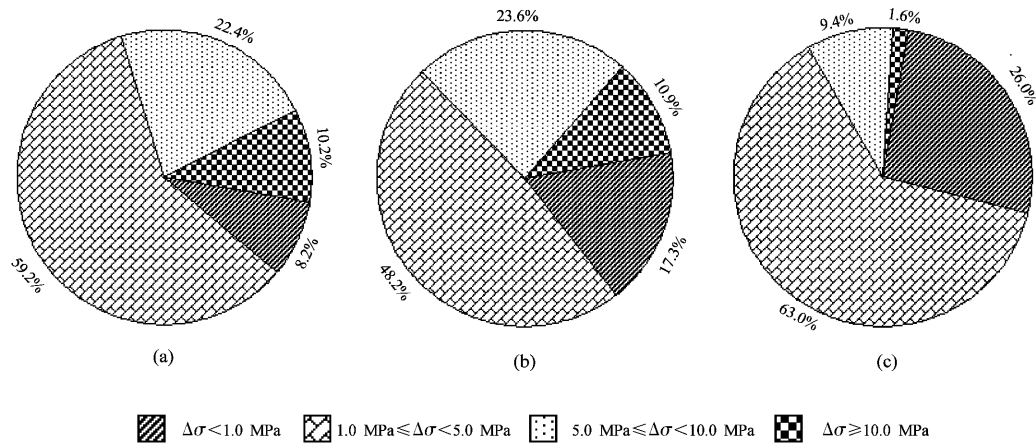


图 3 小江断裂带及邻区不同分段应力降  $\Delta\sigma$  分布比例  
(a) 北段；(b) 中段；(c) 南段

Fig. 3 Proportion of stress drop  $\Delta\sigma$  in diffetent section of Xiaojiang Fault Zone and its adjacent  
(a) northern section; (b) middle section; (c) southern section

段对小江断裂带强震危险性所作的分析<sup>①</sup>具有一致性。

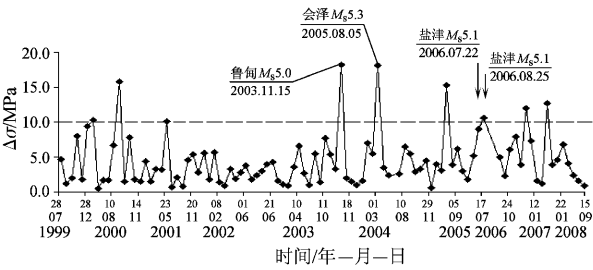


图 4 小江断裂带北段应力降时间进程曲线  
Fig. 4 Temporal curve of stress drop in the northern section of Xiaojiang Fault Zone

3 应力降随深度的变化

震源位置的精度主要受台网布局、震相判定、地震波到时读数精度和地壳速度结构模型的影响 (Pavlis, 1986; Gomberg *et al*, 1990)。在地震层析成像过程中加入震源项，同时确定三维速度结构和地震震源参数，即震源和速度结构的联合反演方法 (Crosson, 1976; Pavlis, Booker, 1980;

Spencer, Gubbins, 1980; Thurber, 1983; 刘福田, 1984; Michael, 1988; Kissling *et al*, 1994)，在提高定位精度的同时得到速度结构，这有助于对地震的孕震环境提供物理解释。笔者利用震源位置和速度结构的联合反演方法 (周龙泉等, 2009; 马宏生, 2007)，结合马宏生 (2007) 反演的川滇地区三维速度结构模型，利用云南和四川区域地震台网 3 个及以上台站记录的地震观测报告，计算得到了小江断裂带及邻区  $M_L \geq 2.0$  地震震源位置精确定位结果<sup>②</sup>，分析了小江断裂带沿纬度方向应力降随深度的变化情况。结果表明：重新定位前，35.8% 的地震没有给出深度，震源深度主要分布在 0 ~ 23 km；重新定位后，仅有 5% 的地震不能给出深度，震源深度主要分布在 0 ~ 47 km 范围内，平均值为 7.53 km，震源深度下界 (95% 以上地震数) 17.7 km，0 ~ 15 km 深度范围内的地震占总数的 92.0%。震源深度剖面与应力降之间的关系表明，大多数地震发生在 0 ~ 15 km 的上地壳内 (图 5)。

① 闻学泽，杜方，易桂喜，等. 2010. 红河断裂带以北的云南地区大地震危险背景的讨论 [R] // 云南新一轮强震活跃期强震危险性研讨会报告。  
② 刘丽芳，周龙泉. 2010. 西南地区震源位置及区域速度结构的联合反演 [R] // 地震行业科研专项“全国地震活动状态动态评价系统的研制” (200708020) 分项研究报告。

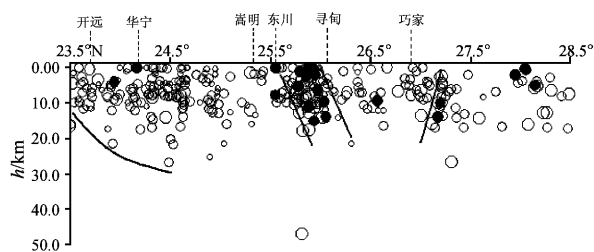


图5 小江断裂带及邻区沿纬度方向震源深度剖面及应力降之间的变化

Fig. 5 Changes of depth section along latitudinal direction and stress drop in Xiaojiang Fault Zone and its adjacent area

由图5可见,小震活动和应力降变化具有分段活动性,这反映了活动断裂几何结构和活动性状的变化,表明小江断裂带对地震活动的控制作用很强。小江断裂带南段,地震分布较分散、高应力地震的震源深度较浅,可以勾画出倾向北东、低角度的逆冲断裂,地震主要分布在断裂的上盘。已有研究表明,该区域显示出复杂的地表断裂活动,发育有倾向北东、倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 、右旋逆冲性的曲江断裂以及倾向北东、倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 、右旋压扭性的石屏—建水断裂(毛玉平,韩新民,2003)。小江断裂带寻甸—东川和会泽—巧家地区,地震活动相对集中,沿深度剖面呈高倾角陡立状,高应力值地震密集并随深度增加,显示出典型的走滑断裂垂向结构特征,也与地表断裂活动性质基本吻合。小江断裂带北段地震活动分散,高应力降值地震的震源深度分布较浅。重新定位后的震源深度和应力降变化情况可以大致显示出断层不同段的深部延伸和分布情况。

## 4 讨论和结论

高应力状态下发生的一些中小地震,可能反映了中强地震前后的应力状态和介质性质。局部非均匀性和交汇构造能产生应力集中(Andrews, 1989)。Jones和Helmberger(1998)研究认为,高应力降地震可能与断层存在剪应力背景有关。因此,笔者分析了小江断裂带及邻区335次 $M_L 2.0 \sim 5.3$ 地震的应力降时空特征,得到以下结论:

(1) 小江断裂带及邻区地震的应力降 $\Delta\sigma$ 范围

为 $0.03 \sim 18.25$  MPa,其中 $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa的地震占总数的7.2%,这些高应力降地震主要分布在小江断裂带东川、巧家及其以北地区及元谋、武定一带。小江断裂带北段、中段、南段 $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa的地震所占比例分别为10.2%,10.9%和1.6%,结合小江断裂带不同段地震活动特征,认为小江断裂带北段高应力降地震比例偏高,可能反映了该区的高应力背景。

(2) 小江断裂带及邻区大多数地震发生在 $0 \sim 15$  km的上地壳。小震活动和应力降变化具有分段活动性,断裂带南段及昭通以北地区地震分布较分散、高应力值地震震源深度较浅,断裂带上的寻甸—东川和会泽—巧家地区,地震活动相对集中,震源沿深度剖面呈高倾角陡立状,高应力值地震密集并随深度增加,这在一定程度上反映了断层深部延伸和分布情况,也有助于对孕震环境提供物理解释。

## 参考文献:

- 黄玉龙,郑斯华,刘杰,等. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 46(1): 54-61.
- 皇甫岗,陈顺,秦嘉政,等. 2010. 云南地震活动性[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 刘福田. 1984. 震源位置和速度结构的联合反演(1)——理论和方法[J]. 地球物理学报, 27(2): 167-175.
- 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.
- 马宏生. 2007. 川滇地区强震孕育的深部动力学环境研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 毛玉平,韩新民. 2003. 云南地区强震( $M \geq 6$ )研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 钱晓东,秦嘉政. 2008. 小江断裂带及周边地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 31(4): 354-361.
- 钱晓东. 2010. 破裂时间法在云南小江断裂带强震预测中的应用[J]. 地震研究, 33(2): 138-146.
- 秦嘉政,钱晓东,叶建庆. 2005. 2001年施甸 $M_s 5.9$ 地震序列的震源参数研究[J]. 地震学报, 27(3): 250-259.
- 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.
- 闻学泽. 1993. 小江断裂带的破裂分段与地震潜势概率估计[J]. 地震学报, 15(3): 323-330.
- 易桂喜,闻学泽,苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研

- 究[J]. 地球物理学报, 51(6): 1719 – 1725.
- 张世民, 谢富仁. 2001. 鲜水河—小江断裂带7级以上强震构造区的划分及其构造地貌特征[J]. 地震学报, 23(1): 36 – 44.
- 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.
- 周龙泉, 刘杰, 马宏生, 等. 2009. 2003年大姚6.2级、6.1级地震序列震源位置及震源区速度结构的联合反演[J]. 地震, 29(2): 12 – 29.
- Andrews D J. 1989. Mechanics of fault junctions[J]. JGR, 94(B7): 9389 – 9397.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. BSSA, 82(5): 2014 – 2031.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. JGR, 75(26): 4997 – 5009.
- Brune J N. 1971. Correction[J]. JGR, 76(20): 5002.
- Crosson R S. 1976. Crustal structure modeling of earthquake data, 1, Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters[J]. JGR, 81(B17): 3036 – 3046.
- Jones L E, Helmberger D V. 1998. Earthquake source parameters and fault kinematic in the eastern California shear zone[J]. BSSA, 88(6): 1337 – 1352.
- Kissling E, Ellsworth W L, Eberhard – Phillips D, *et al.* 1994. Initial reference models in local earthquake tomography[J]. JGR, 99(B10): 19635 – 19646.
- Michael A J. 1988. Effects of three – dimensional velocity structure on the seismicity of the 1984 Morgan Hill, California, aftershock sequence[J]. BSSA, 78(3): 1199 – 1221.
- 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.
- Pavlis G L. 1986. Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete, practical approach for single – event locations[J]. BSSA, 76(6): 1699 – 1710.
- Pavlis L G, Booker J R. 1980. The mixed discrete – continuous inverse problem: application to the simultaneous determination of earthquake hypocenters and velocity structure[J]. JGR, 85(B9): 4801 – 4810.
- Spencer C, Gubbins D. 1980. Travel time inversion for simultaneous earthquake location and velocity structure determination in laterally varying media[J]. Geophys J R Astron Soc, 63(1): 95 – 116.
- Thurber C H. 1983. Earthquake locations and three – dimensional crustal structure in the Coyote lake area, Central California [J]. JGR, 88(B10): 8226 – 8236.

## Analysis on the Features of the Stress Drop in Xiaojiang Fault Zone and Its Adjacent Areas

LIU Li-fang, YANG Jing-qiong, QIN Jia-zheng

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Doing the propagation path correction, site effect correction, and instrument response correction, etc. for the observational S-wave data, we obtained source spectra for the small – and moderate – earthquakes. Using Brune Source Model and by means of generalized inversion technique, we calculated the stress drop of 335 earthquakes ( $M_s 2.0 \sim 5.3$ ) in Xiaojiang Fault Zone and its adjacent areas. The temporal and spatial features of the stress drop showed that earthquakes with higher stress drop ( $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa) mainly distribute in Dongchuan, Qiaojia and the areas in the north of Qiaojia, Yuanmou, and Wuding region. The earthquakes with  $\Delta\sigma \geq 10.0$  MPa account separately for 10.2%, 10.9% and 1.6% of the total in the northern, middle and southern segment of the Xiaojiang Fault Zone. According to the seismicity in the Zone, we analyzed the strong earthquake risk in different segments of the Zone. On the basis of the precisely-relocated results from the simultaneous inversion of location and velocity structure, we also analyzed the variation of stress drop and focal depth, and the extension and distribution of the Zone in the deep Earth.

**Key words:** stress drop; small – and moderate – earthquake; Xiaojiang Fault Zone