

云南和四川中小地震应力降时空特征研究^{*}

刘丽芳¹, 苏有锦¹, 刘 杰², 杨晶琼¹

(1. 云南省地震局, 昆明 650224 2. 中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 通过消除 S 波观测谱中的传播路径、场地响应、仪器响应、噪声等的影响, 得到中小地震的震源谱。根据 Brune 震源模型, 运用遗传算法计算了云南地区 2 121 次 M_L 2.0~5.3 地震和四川地区 323 次 M_L 3.0~5.1 地震的应力降参数 $\Delta\sigma$, 分析了云南地区和四川地区中小地震应力降时空变化特征。结果表明: 云南地区的地震应力降范围为 0.03~47.55 MPa, 其中 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa (高应力降) 的地震占 4.8%, $\Delta\sigma$ 的年均值在 2.30~5.05 MPa 之间; 四川地区应力降范围为 0.19~47.47 MPa, 其中 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa (高应力降) 的地震占 21.7%, $\Delta\sigma$ 的年均值在 5.11~8.72 MPa 之间。 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa (高应力降) 的地震主要分布在滇西北至滇东北及川滇交界一带, 尤其是在龙门山断裂带有较明显分布。龙门山断裂带 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震占 35.8%, $\Delta\sigma$ 的年均值在 5.20~12.09 MPa 之间。2004~2007 年高应力降地震事件明显增多, 反映了汶川 8.0 级大震前的高应力变化过程。

关键词: 应力降; 遗传算法; 中小地震; 龙门山断裂带; 云南; 四川

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2010)03-0314-06

0 引言

应力降表征地震发生瞬间错动时位错面上的应力变化, 通过研究应力降可以了解地震过程中的构造应力释放水平。对应力降在主震前后的变化的研究已有报道, 如张天中等 (2000) 和肖蔚文 (1990) 的研究结果给出, 主震发生前约 1 年的时间内, 在其周围地区曾多次发生高应力降地震, 主震发生后应力降相对变低; 韦士忠和李玉萍 (1992) 认为, 1989 年山西大同地震前, 小震应力降明显升高, 震后恢复正常; 震前和震后应力降的变化与应力变化有关。秦嘉政等 (2005) 对 2001 年施甸地震序列的研究结果表明, 前震序列的平均应力降比余震序列的平均应力升高 1.0 倍; 梁秀英 (1985) 通过考察应力降变化与大震的时空相关性, 发现大震前该地区中小地震的应力降普遍较低。可见, 地震前应力降的变化具有一定的前兆意义。

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震发生时, 沿龙门山中央主断裂带, 从映秀镇至北川发生了长 200 km 的断裂贯通。龙门山前山断裂带从都江堰到汉旺镇段也发生了长 60 km 的贯通。主震发生

前, 震源区及附近地区应力的动态变化是值得关注和研究的问题。

本文利用由震源谱分析方法计算得到的中小地震的应力降, 分析了云南和四川的应力降的时空分布特征及汶川地震前龙门山断裂带的构造应力特征。

1 计算方法

任意台站观测到的地震地面运动的傅立叶谱可以表示为

$$A_0(f) = A_b(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_0(f) \cdot I(f) \cdot \frac{\pi R_{ij} f}{e^{Q(f)\beta}} \quad (1)$$

式中, $A_0(f)$ 是第 j 个台观测到的第 i 个地震的傅立叶谱振幅, $A_b(f)$ 为第 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, $S_0(f)$ 为第 j 个台站的场地响应项, $I(f)$ 为第 j 个台站的仪器响应项, $Q(f)$ 为频率依赖的品质因子, β 为地震波速度。

对式 (1) 两边取对数, 并令 $c(f) = [\log(e) \pi f / Q(f)\beta]$ 整理得

* 收稿日期: 2009-10-18.

基金项目: 云南省人民政府十项重大措施“数字地震学参数在地震预测预报中的应用研究”、地震科学联合基金“腾冲火山区三维 Q 值反演及地壳内部构造特征研究”(C08065) 和地震行业专项 (200708026) 联合资助。

$$\log A_0(\hbar) = \log A_j(\hbar) - \log G(R_{ij}) + \alpha \hbar R_j - \log S(\hbar) - \log I(\hbar) \quad (2)$$

式中， $\alpha \hbar$ 称为非弹性衰减系数。

对某种类型的地震仪，仪器响应 $I(\hbar)$ 是已知的。如果几何衰减函数 $G(R_{ij})$ 、非弹性衰减系数 $\alpha \hbar$ 或品质因子 $Q(\hbar)$ 及场地响应 $S(\hbar)$ 均为已知，则由式 (2) 可从观测谱 $A_j(\hbar)$ 中求出第 j 个台站记录的第 i 个地震的震源谱 $[A(\hbar)]_i$ 。

通过下式求平均震源谱，并以此作为该地震的震源谱

$$\bar{A}(\hbar) = \frac{1}{R_N} \sum_{j=1}^{R_N} A_j(\hbar) \quad (3)$$

式中 R_N 为该地震的波形记录数。

采用 Brune 震源谱模型 (Brune, 1970) 作为理论震源谱 $A_{\text{theo}}(\hbar)$ ，利用遗传算法求解由 $\bar{A}(\hbar)$ 和 $A_{\text{theo}}(\hbar)$ 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。

利用下面的关系求震源参数：

地震矩

$$M_0 = \frac{4\pi \rho \beta^3 \Omega_0}{2R_{\text{sp}}} \quad (4)$$

式中， ρ 为密度，取为 2.9 g/cm^3 ； V_s 是 S 波速度，取值为 3.5 km/s ； R_{sp} 是辐射花样系数，取值为 $\sqrt{2/5}$ 。

震源半径

$$r = \frac{2.34\beta}{2\pi f} \quad (5)$$

利用式 (4) 和式 (5)，可求得应力降

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (6)$$

2 资料处理

云南区域数字地震台网于 1999 年 6 月正式投入观测，最初由 23 个子台组成，2001 年新增了个旧、洱源和腾冲 3 个子台。每个台均安装了 FBS-3A 型中长周期三分向速度地震计，这些地震仪在 $0.1 \sim 20 \text{ Hz}$ 区间基本上具有速度平坦的响应，信号采样率为 50 Hz 。四川区域数字地震台网于 2000

年 5 月正式运行，最早由 14 个子台组成，2003 年新增了理塘台。各子台采用的 FBS-3A 或 JC-V100 宽频带地震计的三分向地动速度响应均为 $0.05 \sim 20 \text{ Hz}$ 。郭达山、油罐顶、马尔康和金鸡寺 4 个子台的采样率为每秒 100 个样点，其余台站的采样率为每秒 50 个样点。由于昆明子台噪音干扰大，笔者选取除昆明子台外的云南和四川地震台网 39 个信噪比较高的子台。图 1 给出了云南和四川区域数字地震台网子台分布情况。

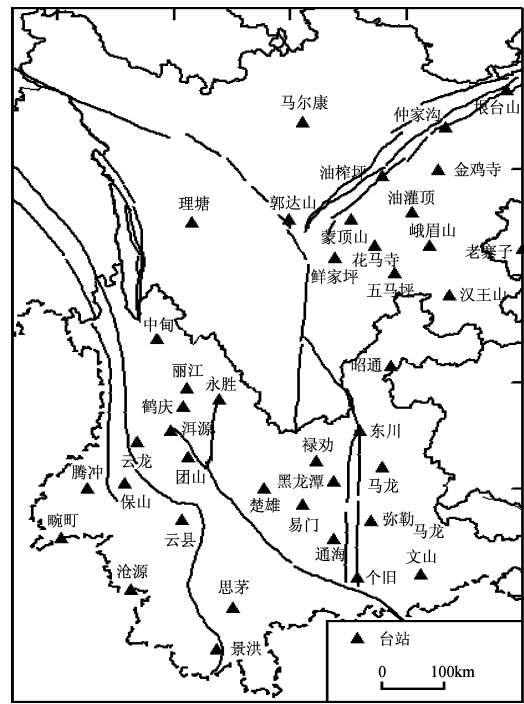


图 1 云南和四川区域数字地震台网台站分布
Fig 1 Distribution of the Regional Digital Seismic Network in Sichuan and Yunnan region

笔者用 S 波数据进行分析。对于 S 波的两个水平分量 (NS、EW 分量)，首先进行带通滤波 (Butter 滤波器，带宽 $0.1 \sim 22 \text{ Hz}$) 和水平校正处理，然后取“S 窗”和“噪声窗”，选用信噪比大于 2 倍的波形记录进行信噪比分析。最后合成 S 波两个水平分量得到合成位移谱 (苏有锦等，2005)。用以上处理方法，按每个地震至少被 3 个以上台记录到、每个台至少有 3 条记录的原则，挑选波形较好、能经过信噪比检验的地震记录用于本研究。

由于所用数据分别来自云南、四川两个区域台网，数据处理和震源参数测定是按每个台网的

记录分别进行的。云南台网各子台的场地响应值采用刘丽芳等（2007）的结果；非弹性衰减 Q 值与频率的关系采用 $Q(f)=238.0f^{.388}$ （苏有锦等，2005）。四川区域台网各台站的场地响应值采用乔慧珍等（2006）的结果；川西北地区 Q 值与频率的关系为 $Q(f)=334.4f^{.581}$ （乔慧珍等，2006），四川盆地 Q 值与频率的关系为 $Q(f)=217.8f^{.816}$ （张永久等，2007）。几何衰减采用三段几何衰减模型（苏有锦等，2005；乔慧珍等，2006；张永久等，2007）。

对每个台站记录按（2）式经过各项影响改正后，最终得到每个地震的震源谱。按前述方法就可进行震源谱参数 Ω_0 和 f 的反演和震源参数（ M_0 ， r ， $\Delta\sigma$ ）的计算。

3 结果与分析

3.1 川、滇地区应力降 $\Delta\sigma$ 的基本特征

通过分析云南地区 9 045 次 $M \geq 2.0$ 地震和四

川地区 542 次 $M \geq 3.0$ 地震的 S 波谱，最终测定了云南地区 2 121 次 $M_{2.0} \sim 5.3$ 地震和四川地区 323 次 $M_{3.0} \sim 5.1$ 地震的应力降参数。

云南地区 2 121 次 $M_{2.0} \sim 5.3$ 地震的应力降 $\Delta\sigma$ 的范围为 0.03 ~ 47.55 MPa，其中 $\Delta\sigma < 1.0$ MPa 的地震 587 次，占总数的 27.7%； $1.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0$ MPa 的地震 1 157 次，占总数的 54.5%； $5.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0$ MPa 的地震 276 次，占总数的 13.0%； $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震 101 次，占总数的 4.8%。四川地区 323 次 $M_{3.0} \sim 5.1$ 地震的应力降 $\Delta\sigma$ 的范围为 0.19 ~ 47.47，其中 $\Delta\sigma < 1.0$ MPa 的地震 44 次，占总数的 13.6%； $1.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0$ MPa 的地震 146 次，占总数的 45.2%； $5.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0$ MPa 的地震 63 次，占总数的 19.5%； $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震 70 次，占总数的 21.7%，表明云南和四川地区的中小地震的应力降值主要在 0.1 ~ 10.0 MPa 之间，但四川地区 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震所占比例比云南地区同样地震所占比例要高（图 2）。

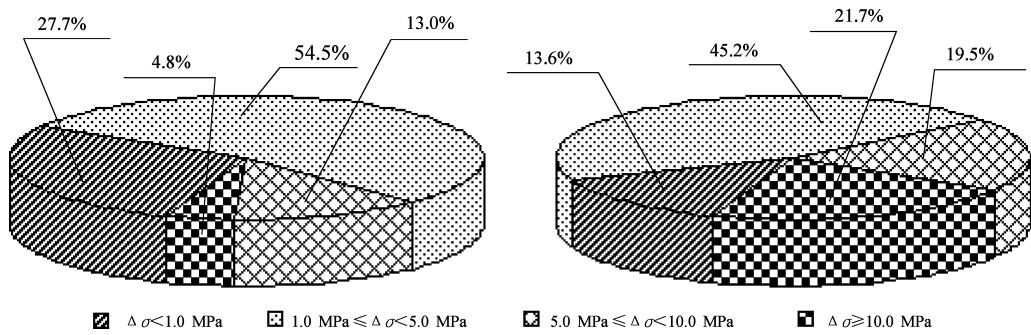


图 2 云南 (a) 和四川 (b) 地震应力降 $\Delta\sigma$ 分布比例
Fig 2 Proportion of stress drop $\Delta\sigma$ in Yunnan (a) and Sichuan (b) region

下面进一步分析云南和四川地区中小地震的应力降年均值变化情况。对云南地区，若震级范围取为 2.0 ~ 5.3 级，年地震数为 64 ~ 443 次，得到应力降年均值为 2.30 ~ 5.05 MPa，标准偏差为 2.47 ~ 6.00；若震级范围取为 3.0 ~ 5.3 级，年地震数为 35 ~ 186 次，得到应力降年均值为 2.76 ~ 6.49 MPa，标准偏差为 2.85 ~ 8.00。对四川地区，震级范围取为 3.0 ~ 5.1 级，年地震数为 10 ~ 62 次，得到应力降年均值为 5.11 ~ 8.72 MPa，标准偏差为 6.31 ~ 9.21。统计结果表明，云南地区应力降年均值随着统计起始震级的增大有一定的增大，反映了震级对应力降一定程度的影响；四川地区应力降年均值比云南地区

取不同震级得到的相应年份的年均值都偏高。本文应力降的测定是按云南台网和四川台网的记录分别进行的，为了使用尽可能多的资料来反映区域应力降基本特征，笔者基于云南地区 $M_{2.0} \sim 5.3$ 地震和四川地区 $M_{3.0} \sim 5.1$ 地震的应力降结果进行分析。表 1 给出了云南和四川地区应力降的年均值。由表 1 和图 3 可见，四川地区应力降的年均值比云南地区的偏高，云南地区应力降年均值在 2.30 ~ 5.05 MPa 之间变化，而四川地区应力降年均值在 5.11 ~ 8.72 MPa 之间变化。这就是云南地区和四川地区地震应力变化的基本背景值，对进一步开展相关研究和把应力降参数应用于地震预测研究有重要意义。

表 1 云南和四川地区应力降年均值和标准偏差
Tab 1 Annual average of stress drop and Standard Deviation in Yunnan and Sichuan region

年份		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
云南地区	应力降年均值 /MPa	3. 08	3. 75	2. 30	3. 87	2. 33	5. 05	3. 82	3. 93	3. 22
	标准偏差	2. 59	4. 31	2. 47	5. 20	3. 10	6. 00	4. 18	3. 88	4. 43
四川地区	应力降年均值 /MPa	/	8. 70	8. 72	6. 08	6. 52	7. 31	5. 11	6. 86	5. 94
	标准偏差	/	7. 69	9. 21	6. 71	6. 54	6. 31	8. 02	8. 40	7. 90

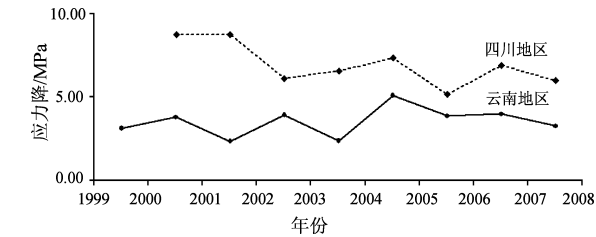


图 3 云南和四川地震应力降 $\Delta\sigma$ 年均值变化图
Fig 3 Annual average diagram of stress drop in Yunnan and Sichuan

正如前述，川滇地区中小地震的应力降为 1.0

$\text{MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0 \text{ MPa}$ ，图 4 给出了应力降在该范围内的空间分布情况。图 4 b 给出了川滇地区 $\Delta\sigma < 1.0 \text{ MPa}$ (低应力降) 或 $\Delta\sigma \geq 10.0 \text{ MPa}$ (高应力降) 空间分布。通常认为地震前的震源应力背景越高，地震的应力降越大 (张天中等，2000; 秦嘉政等，2005)。也有研究人员认为，大震前该地区中小地震的应力降值普遍较低 (梁秀英，1992)。由图 4 b 可见， $\Delta\sigma \geq 10.0 \text{ MPa}$ (高应力降) 地震在滇西北—滇东北及川滇交界一带，尤其是在龙门山断裂带上有较明显分布。

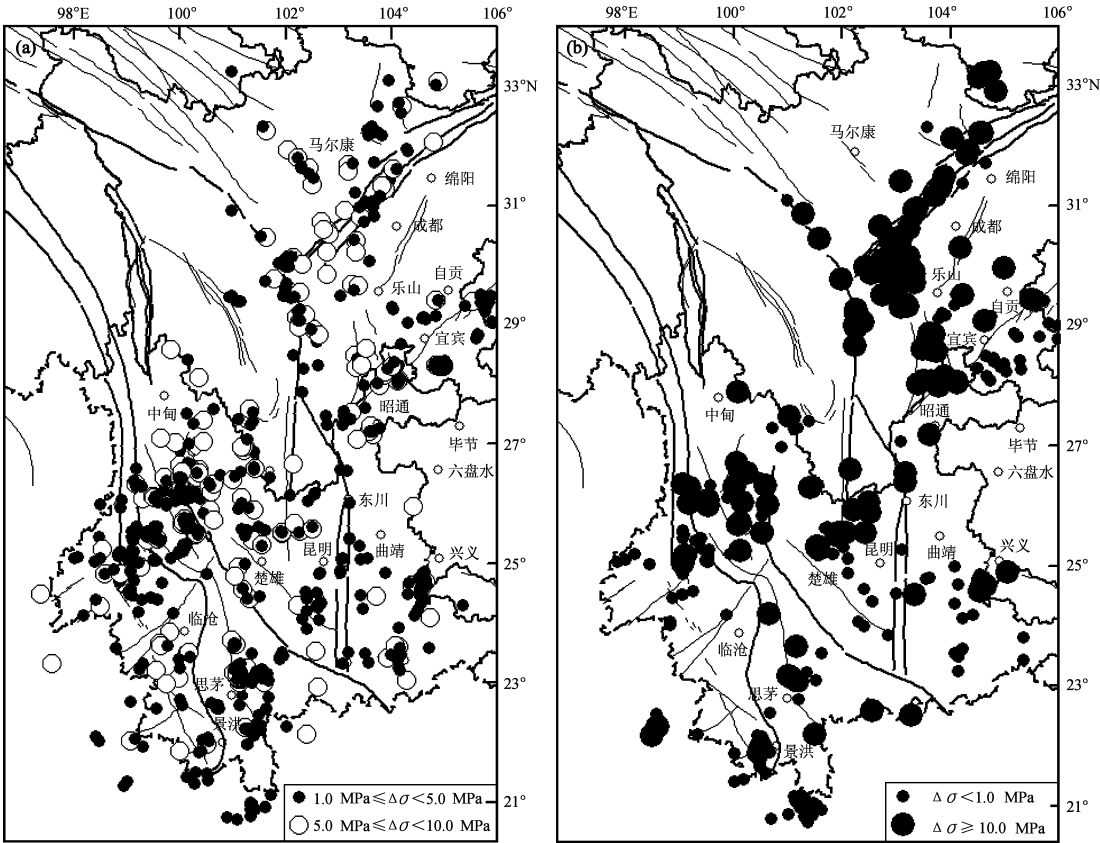


图 4 川滇地区中小地震应力降空间分布
(a) $1.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0 \text{ MPa}$ 和 $5.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0 \text{ MPa}$ 地震; (b) $\Delta\sigma < 1.0 \text{ MPa}$ 或 $\Delta\sigma \geq 10.0 \text{ MPa}$ 地震
Fig 4 Distribution of stress drop $\Delta\sigma$ for low to moderate earthquakes in Sichuan-Yunnan region

(a) $1.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0 \text{ MPa}$ and $5.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0 \text{ MPa}$ (b) $\Delta\sigma < 1.0 \text{ MPa}$ or $\Delta\sigma \geq 10.0 \text{ MPa}$

3.2 汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带高应力降背景

从图 4b 可以看出, 龙门山断裂带及附近地区大于等于 10.0 MPa 的应力降分布较为显著, 这是否与 2008 年 5 月 12 日汶川地震有关? 下面将做进一步的分析。龙门山断裂带 109 次 $M_{3.0} \sim 4.4$ 地震应力降的空间分布见图 5 应力降 $\Delta\sigma$ 的范围为 0.22~47.47 MPa; 其中 $\Delta\sigma < 1.0$ MPa 的地震有 6 次, 占总数的 5.5%; $1.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 5.0$ MPa 的地震共 37 次, 占总数的 33.9%; $5.0 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma < 10.0$ MPa 的地震共 27 次, 占总数的 24.8%; $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震共 39 次, 占总数的 35.8%。由此可见, 龙门山断裂带 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震所占比例明显高于四川地区 (21.7%) 和云南地区 (4.8%), 这可能反映了该断裂带上的高应力降背景。

由表 2 可看出, 龙门山断裂带 $M_{3.0} \sim 4.4$ 地震的应力降年均值在 5.20~12.09 MPa 之间变化, 高于四川地区 5.11~8.72 MPa 的值。自 2004 年应力降年均值开始出现逐年增高变化过程, 至 2007 年达到了 11.98 MPa 的高值。进一步分析龙门山断裂带高应力降 ($\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa) 地震所占比例, 由图 6 可见, 2003 年高应力降地震的比例为 0 达到最低值, 之后逐渐上升, 至 2006 年和 2007 年高应力降地震的比例分别达到了 53.3% 和 41.2%。高应力降地震事件的显著

增多, 一定程度上反映了汶川 8.0 级大震前龙门山断裂带的应力变化过程。

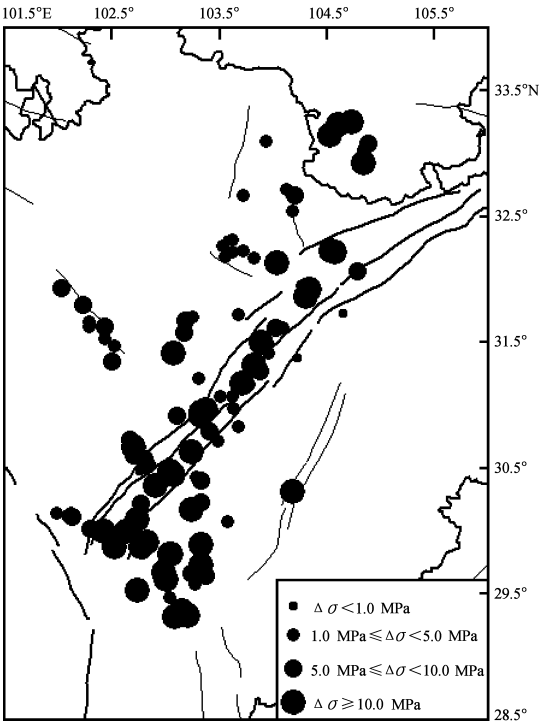


图 5 龙门山断裂带地震应力降 $\Delta\sigma$ 的空间分布图
Fig 5 Distribution of stress drop $\Delta\sigma$ in Longmenshan Mountain Fault Belt

表 2 龙门山断裂带 $M_{3.0} \sim 4.4$ 地震的应力降年均值和标准偏差
Tab 2 Annual average of stress drop in Longmenshan Mountain Fault Belt

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
应力降年均值 /MPa	11.34	12.09	9.21	5.20	9.70	7.62	11.50	11.98

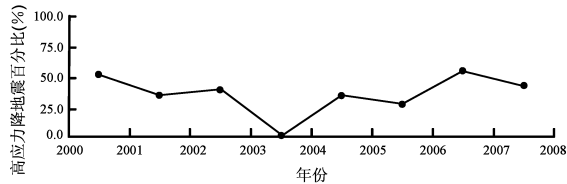


图 6 龙门山断裂带高应力降 ($\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa) 地震比例随时间变化曲线
Fig 6 Percentage of earthquakes with $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa in Longmenshan Mountain Fault Belt

4 讨论和结论

通过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。从力学观点

出发, 处于高应力状态下发生的一些中小地震, 其应力降必然会与正常应力状态或低应力状态下的应力降有所不同, 中强地震前后会有明显差异, 这是应力状态和介质性质的反映。因此, 汶川地震前, 龙门山断裂带及附近地区中小地震应力降的升高很可能与应力升高和介质变化有关。Jones 和 Heineberger (1998) 在研究美国加州东部剪切带发生的多个地震序列的震源参数时, 对高应力降地震提出了一种新的观点加以解释, 认为这可能与断层存在剪应力背景有关。

通过分析云南地区 2 121 次 $M_{2.0} \sim 5.3$ 地震和四川地区 323 次 $M_{3.0} \sim 5.1$ 地震应力降的时空变化特征, 得到以下认识:

(1) 云南地区的地震应力降范围为 0.03~47.55 MPa, 年均值在 2.30~5.05 MPa 之间; 四川

地区的地震应力降范围为 0.19~47.47 MPa, 年均值在 5.11~8.72 MPa 之间。川滇地区的地震应力降主要集中在 0.1~10.0 MPa 之间。四川地区应力降 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震所占比例 (21.7%) 高于云南地区同样性质的地震所占比例 (4.8%)。

(2) 川滇地区的高应力降 ($\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa) 主要分布在滇西北至滇东北及川滇交界一带, 尤其在龙门山带断裂带有较明显分布。龙门山断裂带 $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa 的地震占 35.8%, 年均值在 5.20~12.09 MPa 之间, 2004~2007 年高应力降地震事件明显增多, 反映了汶川 8.0 级大震前高应力变化过程。

本文所得结果是基于 1999~2007 年云南和四川区域数字地震台网资料, 汶川地震后区域应力降是否如我们预期的那样有所降低, 还有待于进一步的研究。

参考文献:

梁秀英. 1985. 云南地震的震源参数特征 [J]. 地震研究, 8(4): 439

~449.

刘丽芳, 苏有锦, 刘杰, 等. 2007. 用 M^0 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.

乔慧珍, 张永久, 程万正, 等. 2006. 川西北地区介质衰减特征研究 [J]. 地震地磁观测与研究, 27(4): 1—7.

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. 2005. 云南地区 S 波非弹性衰减 Q 研究 [J]. 地震学报, 28(2): 1—7.

韦士忠, 李玉萍. 1992. 大同地震前后介质 Q 值和小震震源参数的变化 [J]. 地震, (2): 30—38.

肖蔚文. 1990. 1982 年卢龙地震前后的小震震源参数 [J]. 地震学报, 12(1): 1—11.

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.

张永久, 乔慧珍, 程万正, 等. 2007. 四川盆地地区介质衰减特征研究 [J]. 地震研究, 30(1): 43—48.

Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes [J]. GR 75(26): 4997—5009.

Jones L E, Helmberger D V. 1998. Earthquake source parameters and fault kinematics in the eastern California shear zone [J]. BSSA 88(6): 1337—1352.

Study on Temporal and Spatial Features of Stress Drop for Low to moderate Earthquakes in Sichuan and Yunnan Region

LU Liliang, SU Youjin, LU Jie, YANG Jingqiong

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

(2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

The observational S-waveform data are corrected by removing influential factors including the propagation route, site effects, instrument response and noise. Then we obtained source spectra for the medium-small earthquakes. Based on Brune source model and by means of generalized inversion technique, we determined the stress drop ($\Delta\sigma$) of 121 earthquakes with $M_L 2.0-5.3$ in Yunnan region and those of 323 earthquakes with $M_L 3.0-5.1$ in Sichuan region, and we analyzed temporal and spatial features of the medium-small earthquakes in Yunnan and Sichuan Region. The results show that in Yunnan region the stress drop ($\Delta\sigma$) is 0.03—57.55 MPa. The earthquakes with $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa (higher stress drop) is 4.8% of the total, and the annual average of stress drop is 2.30—5.05 MPa. In Sichuan region, the stress drop is 0.19—47.47 MPa. The earthquakes with $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa (higher stress drop) is 21.7%, and the annual average of stress drop is 5.11—8.72 MPa. The earthquakes with $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa (higher stress drop) mainly distribute from the Northwest to Northeast of Yunnan region and along the boundary of Yunnan and Sichuan, especially in Longmenshan Mountain Fault Belt. The earthquakes with $\Delta\sigma \geq 10.0$ MPa in Longmenshan Mountain Fault Belt is 35.8%, and the annual average varies from 5.20 MPa to 12.09 MPa. The increase in the events with high stress drop from 2004 to 2007 reflects the high tectonic stress before the $M_s 8.0$ Wenchuan Sichuan earthquake.

Key words: stress drop; generalized inversion technique; low to moderate earthquake; Longmenshan Mountain Fault Belt; Yunnan; Sichuan