

2006 年云南盐津 5.1 级双震的监测与研究^{*}

叶建庆, 陈 慧, 刘学军, 郭志华, 蔡绍平

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用 2006 年云南省盐津两次 5.1 级地震现场流动台网的近场地震监测资料, 结合云南区域地震台网地震波资料进行精确定位, 给出了盐津地震主、余震的震源参数, 并分析讨论了这两次地震的震源过程。结果显示, 这两次地震处于同一构造区, 发震构造为 NE 向断裂, 主破裂走向约 $N53^{\circ}E$ 倾向 NW 倾角约 80° , 断层性质为走滑型。断层破裂长度约 9 km, 宽度约 3 km, 破裂面深度 3~9 km, 断层走向与宏观等震线长轴方向基本一致。震源参数研究表明, 盐津震区地震矩为 $10^9 \sim 10^{16} N \cdot m$, 震源破裂半径为 90~300 m, 应力降为 0.000 2~32 MPa。高应力降地震事件主要发生在 5~10 km 深度范围内, 表明该深度区是盐津地震的主要活动区。定位结果还显示, 第 1 次地震的破裂面在深度 7~9 km 之间为余震空白区, 认为该空白区是盐津地震主破裂面上的障碍体, 第 2 次地震将障碍体贯穿。地震破裂面障碍体的存在是盐津震区发生两次地震的主要成因, 说明地震空白区图像对地震预测具有十分重要的意义。

关键词: 近场地震观测; 震源过程; 震源参数; 双震; 云南盐津

中图分类号: P315.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)02-0134-08

0 引言

2006 年 7 月 22 日和 8 月 25 日, 云南省盐津县境内先后发生两次 5.1 级中强地震, 震区位于滇东北高原的乌蒙山区, 山势陡峭, 峡谷深切, 相对高差近 1 500 m。由于地形复杂, 地震引起滑坡、滚石, 巨大滚石砸毁内昆铁路。两次地震均对民用建筑、公路交通、电力、通讯、水利等设施造成不同程度的破坏, 震中区烈度为 VI 度, 个别破坏点达到 VII 度 (非明伦等, 2006)。

主震发生后, 云南省地震局立即派出工作人员携带数套流动数字化地震仪, 在震区展开现场监测工作, 密切监视余震的时、空、强分布及发展趋势, 为震情的正确判定提供测震学依据。秦嘉政等 (2003^a) 利用云南姚安 6.5 级地震现场台网观测资料, 研究了该地震序列的地震物理过程。叶建庆等 (2002^a, 2002^b) 在 2001 年永胜 6.0 级地震现场布设监测台网, 密切监视地震的发展趋势, 准确地判定了永胜地震的类型; 秦嘉政等 (2003^b, 2005) 通过对现场监测资料进行科学处理, 给出了姚安、永胜和大姚地震的新参数观测报告, 为这些地震的进一步研究提供了翔实的基

础资料。笔者利用盐津两次 5.1 级地震的现场流动台网监测资料进行精确定位, 得到了盐津地震活动构造面的空间分布、走向、倾向及倾角, 并结合云南区域地震台网地震波资料, 给出了这两次地震主、余震的震源参数, 并分析和讨论了这两次地震的震源过程。

1 现场监测与观测资料

2006 年 7 月 22 日 09 时 10 分云南盐津县发生 5.1 级地震。地震发生后, 云南省地震局数字流动台网工作小组在震中区架设了豆沙、吉利、柿子、万古 4 个临时观测站, 结合盐津地震台, 形成一个以 5 个观测台站为主的地震现场监测网, 截止到 7 月 26 日台网撤离, 共记录到余震 1 037 次, 震级范围为 -1.8~3.5 级。8 月 25 日 13 时 51 分盐津再次发生 5.1 级地震。地震发生后, 数字流动台网工作小组在震中区架设了豆沙、吉利和柿子 3 个临时观测站, 结合盐津地震台, 形成一个以 4 个观测台站为主的地震现场监测台网。截止到 8 月 31 日台网撤离, 共记录到余震 1 339 次, 震级范围为 -2.2~4.9 级。表 1 列出了两次地震现场监测台网基本参数。台网分布见图 1。

^{*} 收稿日期: 2007-12-03.

基金项目: 地震重点强化短临跟踪研究项目资助。

表 1 地震现场流动台网台站基本参数

编号	台站名	东经 / (°)	北纬 / (°)	高层 /m	台基岩性	响应灵敏度 $\text{Count}/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			现场台网 监测时间
						垂直向	东西向	南北向	
1	豆沙	104.119 1	28.037 9	566.52	土层	291	291	291	7月 22~26 日
2	盐津	104.231 5	28.111 6	475.22	砂岩	291	291	291	7月 23~26 日
3	柿子	104.184 6	27.980 3	463.93	石灰岩	291	291	291	7月 23~26 日
4	吉利	104.006 7	28.010 9	556.67	土层	291	291	291	7月 23~26 日
5	万古	104.142 7	28.069 9	694.21	土层	291	291	291	7月 23~26 日
6	豆沙	104.119 1	28.037 9	566.52	土层	291	291	291	8月 25~31 日
7	盐津	104.231 5	28.111 6	475.22	砂岩	291	291	291	8月 25~31 日
8	柿子	104.184 6	27.980 3	463.93	石灰岩	291	291	291	8月 25~31 日
9	吉利	104.006 7	28.010 9	556.67	土层	291	291	291	8月 25~31 日

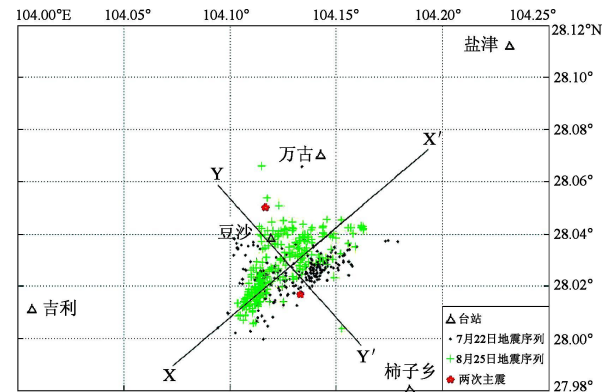


图 1 盐津地震序列及地震现场流动测震台站分布

在盐津地震区布设的小孔径数字化流动地震监测台网由 5 套 EDAS—24I3 型数据采集器和 JC—VI04 型短周期地震计组成，数据采集器 A/D 转换为 24 位，动态范围大于 130 dB，内置 20 GB 硬盘和 GPS 接收机，时间服务精度达到 0.5 ms，台站定位误差小于 20 m。地震计拾取的是地动速度信号，固有周期为 1 s，频率测量范围为 1~40 Hz，动态范围大于 80 dB。云南区域台网盐津台地震数据采集器为 EDAS—24 II 型，A/D 转换为 24 位，I² 传输，地震计为 KS—2000M 型宽频带速度计，频率范围为 0.008 3~50 Hz，动态范围为 150 dB，响应灵敏度为 2 000 V/s·m。

云南台网测定的微观震中均位于盐津县豆沙镇，第 1 次地震震中为 28°01′N，104°08′E，震源深度 9 km；第 2 次地震震中为 28°03′N，104°07′E，震源深度 7 km。第 1 次地震现场台网多台记录到可定位余震事件有 241 个，第 2 次地震现场台网多台记录到可定位余震事件有 288 个。笔者用 2 个主震和 529 个余震作震源参数研究，余震震级由近震震级测定公式确定：

$$M_L = \lg A + R(\Delta), \tag{1}$$

式中， A 为根据两水平向 S 波最大振幅给出的地动位移， $R(\Delta)$ 是震级测定的量规函数，它与距离相关。根据秦嘉政等（2000）对震级定量化的研究，对云南地区采用公式

$$R(\Delta) = 0.43 + 1.49 \lg \Delta. \tag{2}$$

式中， Δ 是震中距（单位为 km）。流动台网数字化观测仪器为速度型记录，则地面运动速度与位移的关系（叶建庆等，2000）为

$$A(\omega) = \frac{A_s(\omega)}{\omega}, \tag{3}$$

$$A_s(\omega) = \frac{A_s(\omega)}{SV}. \tag{4}$$

式中， $A(\omega)$ 为地震波在频率为 ω 时的地动位移， $A_s(\omega)$ 为相应的地动速度， $A_s(\omega)$ 为最大记录振幅， S 为拾震器的电压灵敏度（ $\text{count}/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）， V 为记录前置放大器倍数。

2 地震定位

采用美国地质调查局 HYP98 定位程序对 529 个多台记录事件进行定位。地壳分层速度模型采用中国大陆平均双层地壳模型，即地壳上层厚度 16 km，纵波速度 5.75 km/s，横波速度 3.38 km/s，地壳下层厚度 24 km，纵波速度 6.51 km/s，横波速度 3.75 km/s。各观测点的记录时间精度在毫秒量级，通过事件合并软件将同一地震事件的各台地震记录合并成一个地震事件文件，直接在计算

机上精确量取各观测点记录的直达 P波和 S波到时,量取两水平分量 S波振幅值及相对应的周期值。由于是近源观测,豆沙台的最小震源距为 3 km P波初动清晰尖锐, S波初至与 P波尾波可从其周期和幅值变化中明显地识别, S波震相波形的判读误差小于 10 ms 震源位置测定残差表明,震中定位相对误差小于 1.0 km 深度定位相对误差小于 1.5 km 图 1给出了这些地震定位结果的震中分布,两次 5.1级地震震中也同时在图 1中展现。由图 1可见,余震沿约 NE53°方向展布,长轴约 9 km 其分布与宏观烈度等震线的长轴方向一致(非明伦等, 2006)。图 2给出了定位地震事件的空间分布。

由图 2可见,盐津地震的震源深度在 1.0 ~ 10.0 km范围内,绝大多数在 3.0 ~ 10.0 km范围。由 NE53°的方向,沿深度剖面可见地震破裂面向 NW倾斜,由此可以推断盐津地震断层主破裂面的

走向为 NE53°,倾向 NW 倾角约 80°,断层性质可以判定为走滑型。从余震震源分布面可以清楚地确定地震断层破裂长度约为 9 km 断层破裂带宽度约为 3 km 断层破裂面深度为 3~10 km。

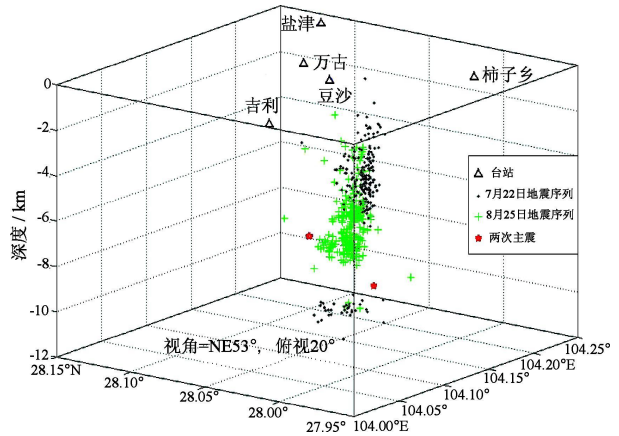


图 2 盐津地震序列三维分布

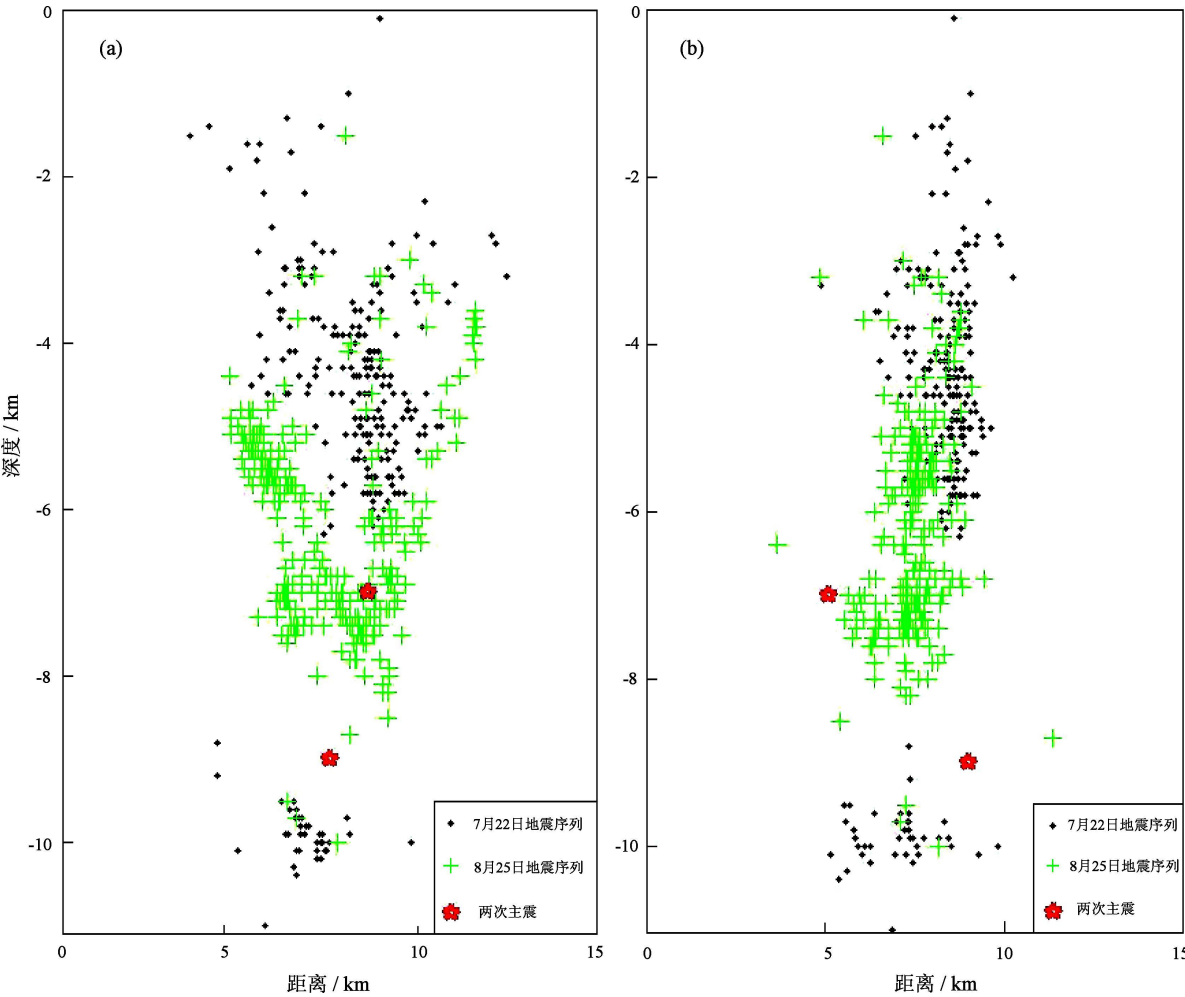


图 3 盐津地震序列震源深度剖面
(a) 沿 N53°E方向; (b) 沿 N37°W方向

图 3a、b 分别给出了主、余震沿 NE33°方向（图 1 中 XX' 剖面，主、余震分布长度方向）和沿 NW37°方向（图 1 中 YY' 剖面，主、余震分布短轴方向）上的震源深度分布。由图中可见，第 1 次主震震中位于豆沙镇的东南，震源深度为 9 km，余震深度分为两个不同区域，一个余震区分布在深 10 km 左右，另一个余震区分布在深 7 km 以上区域，在 7~9 km 深度区间形成地震空区。至于深度空区的存在原因，一种较为合理的解释是该区间存在较大的障碍体。第 1 次 5.1 级地震没有有效地突破该障碍体，使余震在障碍体两端展布，随着震区应力调整和再积累，第 2 次 5.1 级地震位于豆沙镇西北，深度 7 km，即在障碍体的上端发生，突破该障碍体。第 2 次 5.1 级地震序列定位结果显示，余震分布贯穿 6~9 km 深度的地震空区，使前后两次的地震区形成整体。

3 震源参数

利用两水平分量 S 波形数据估算盐津地震震源参数。即对 S 波取 5 固定窗，扣除仪器响应和路径校正，用快速傅立叶变换（FFT）确定位移谱，取介质品质因子 Q=200 作衰减校正。根据地震位移谱的低频部分确定波谱零频值 Ω(0)，由谱的高低频渐近线求出拐角频率，地震矩为

$$M_0 = \Omega(0) 4\pi \rho V^3 (R)^{-1} (P_c)^{-1} \tag{4}$$

其中，Ω(0) 是由地震位移谱确定的波谱零频值；ρ 是介质密度；ρ=2.8 g/cm³；r 为震源距；V 是震源处 S 波的速度，取 V_s=3.5 km/s；R 为辐射图型因子，取平均值 0.63；P_c 为路径校正，P_c=C e^{-π f t Q}；C 为自由表面影响，按一般算法取 C=2；f 为波的主频率；t 为地震波走时。

用 Brune 的圆位错模式计算震源参数，它们有下述关系：

$$r = \frac{2.34 V}{2\pi f} \tag{5}$$

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16 r^3} \tag{6}$$

$$A = \pi r^2 \tag{7}$$

$$U = \frac{M_0}{\mu A} \tag{8}$$

其中，r 是震源的等效圆位错半径；f 是 S 波的拐角频率；Δσ 为应力降；A 为断层面积；U 是断层面上的错动距离；μ 为切变模量，取 μ=3.4×10¹⁰ N/m²。

3.1 地震强度参数

地方震震级 M_L、地震矩 M₀、矩震级 M_w 均是表征地震本身强度的物理量。地方震震级 M_L 的原始定义的计算公式为 M_L=lgA-₀。式中 A 为两水平分量最大记录振幅的平均值，A₀ 为伍德—安德生式标准地震仪定义的零级地震的记录振幅，根据定义，震级 M_L 的定量标度与观测仪器、传播介质、地震波震相和频率强烈相关。标量地震矩 M₀ 是表征地震强度的物理量（安艺敬一等，1986）。为解决常用震级“饱和”问题，金森博雄（时振梁等，1992）引入一相对震级标度——矩震级 M_w，M_w 与地震波能量直接相关，其关系式为

$$M_w = (lgM_0 - 16.1)/1.5 \tag{9}$$

其中 M₀ 为地震矩。为了探讨矩震级 M_w 与地方震震级 M_L 的关系及在云南地区应用的适用范围，我们对盐津地震主、余震强度引入矩震级标度，采用（9）式给出盐津地震矩震级标度。使用的盐津地震震级范围为 -0.8 ≤ M_L ≤ 5.1，利用最小二乘法求得盐津地区地方震震级 M_L 与矩震级 M_w 的线性回归关系：

$$M_w = 0.70M_L + 0.49 \tag{10}$$

图 4 为盐津地震矩震级 M_w 与震级 M_L 的线性

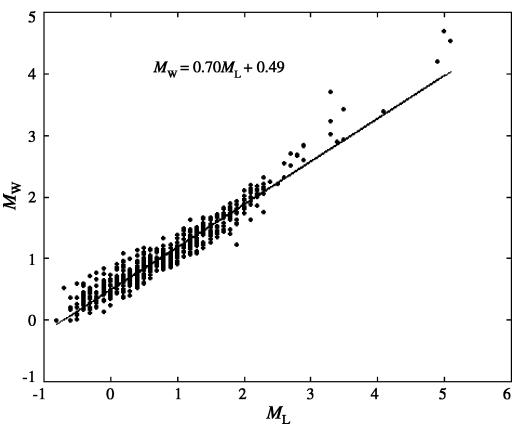


图 4 盐津地震矩震级 M_w 与震级 M_L 的线性回归关系

回归关系。李一正等（1985）通过研究滇西实验场区数字化台网记录的滇西实验场及周边地区的地震数据，得到滇西地区矩震级 M_w 与地方震震级 M_L 的线性回归关系为 $M_w = 0.65M_L + 0.71$ 。

盐津地震主震和余震的地震矩在 $10^9 \sim 10^{16}$ $N \cdot m$ 范围内。主震利用云南区域台网数字化记录的 S 波波形数据计算震源参数，余震采用现场流动台网记录的地震波形数据计算震源参数。其中第 1 次 5.1 级地震的震源参数分别为：地震矩为 8.60×10^{15} $N \cdot m$ ，矩震级为 4.5，拐角频率 0.98 Hz，位错半径为 1.38 km，破裂面积 6.32 km²，断层错动位移 4.04 m，应力降为 14 MPa；第 2 次 5.1 级地震震源参数分别为：地震矩为 1.80×10^{16} $N \cdot m$ ，矩震级为 4.7，拐角频率为 0.9 Hz，位错半径为 1.56 km，破裂面积为 8.39 km²，断层错动位移为 8.13 m，应力降为 28 MPa。

由统计分析给出盐津地震区的地震矩 M_0 与地方震震级 M_L 的线性回归关系：

$$\lg M_0 = 1.05M_L + 9.9 \quad (11)$$

上式是基于盐津地震序列 ($-0.8 \leq M_L \leq 5.1$) 的 S 波震源位移谱参数回归分析得到的结果 (图 5)。

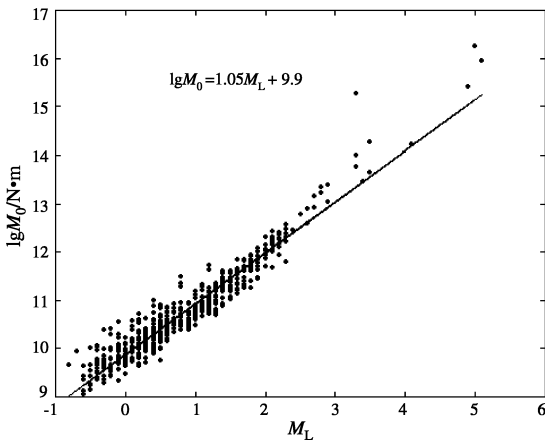


图 5 盐津地震地震矩 M_0 与震级 M_L 线性回归关系

曾有研究者在其它地区用不同类型的地震资料也得到了相似的结果，其关系式有：

美国中加州地区 (Bakun, 1984)：

$$\lg M_0 = 1.2M_L + 10 \quad (12)$$

滇西实验场地区 (李一正等, 1985)：

$$\lg M_0 = 1.19M_L + 9.91 \quad (13)$$

昆明地区 (秦嘉政等, 1986)：

$$\lg M_0 = 1.18M_L + 11.10 \quad (14)$$

澜沧地区 (李立平等, 1990)：

$$\lg M_0 = 1.13M_L + 10.14 \quad (15)$$

耿马地区 (李立平等, 1990)：

$$\lg M_0 = 1.10M_L + 10.21 \quad (16)$$

姚安地区 (叶建庆等, 2001)：

$$\lg M_0 = 0.99M_L + 10.43 \quad (17)$$

上述各回归关系中，原地震矩单位为 “ $dN \cdot m$ ”，现统一换算为 “ $N \cdot m$ ”。(12) 式是研究者对美国中加州圣安德列斯断层上的地震 ($1.5 \leq M_L \leq 3.5$) 进行分析得到的；(13) 式是研究者对滇西实验场内及周边地区不同震源的分散地震 ($1.5 \leq M_L \leq 5.0$) 进行回归分析的结果；(14) 式是研究者对昆明地区零散地震 ($1.8 \leq M_L \leq 4.7$) 研究得到的结果；(15)、(16)、(17) 式是研究者对 1988 年澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震的部分余震 ($1.7 \leq M_L \leq 6.1$) 及 2000 年姚安 6.5 级地震 ($0.9 \leq M_L \leq 6.5$) 分析得到的结果。

3.2 应力降

应力降是表征地震瞬间错动时位错面上的应力变化。通过分析研究地震的应力降可以了解地震过程中构造应力释放水平，从而间接地认识地震区的构造背景应力状况。盐津地震现场流动数字化地震台网记到的 500 余次余震应力降约在 0.000 2 ~ 31.85 MPa 范围内，所研究的地震为多台记录，应力降值为多台算数平均，基本上代表了地震应力降的主流水平。图 6 给出了 500 余次余震的震源半径与地震矩分布，图中同时标出了应力降等值线。由图 6 可见，盐津地震主、余震地震矩 $M_0 < 10^{16}$ $N \cdot m$ ，位错半径 $\leq 10^3$ m，应力降小于 32 MPa，主余震应力降主要分布在 0.000 2 ~ 32 MPa 范围内，位错半径在 90 ~ 300 m 范围，地震矩主要分布在 $10^9 \sim 10^{16}$ $N \cdot m$ 范围。由图 6 可以看出，盐津地震余震震源参数显示出应力降对地震矩的强烈依赖关系，震源半径和地震矩同样显示出类似的倾向。地震矩、破裂半径和应力降值的总体分布区间在正常值范围内，应力降与震级的相关性较弱。

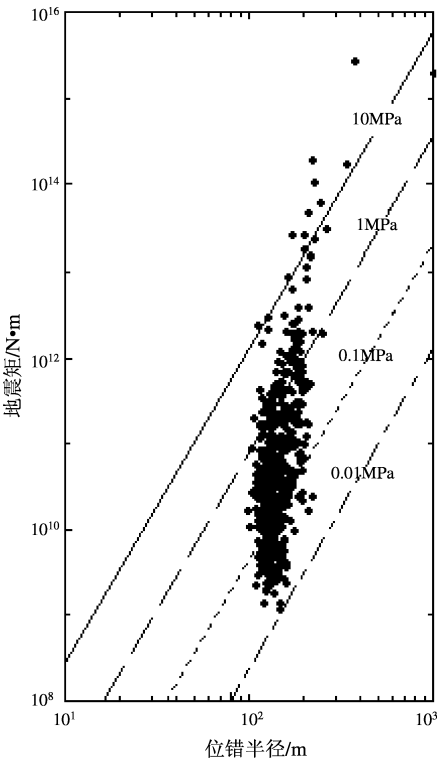


图 6 盐津地震震源半径与地震矩分布图
(图中的斜线为应力降等值线)

根据云南区域台网资料计算，第 1 次 5.1 级地震应力降为 14.2 MPa，主震发生后 4 天时间内，盐津地震现场流动台网共记录到 1 037 次余震，其中最大余震 2.8 级，应力降为 2.37 MPa。其它余震应力降较小，均小于 0.1 MPa。由区域台网盐津地震台的记录可知，盐津地震的低应力降余震事件一直持续到 8 月 25 日，25 日 8 时 57 分的 3.3 级地震应力降为 22.36 MPa，发生了高应力降事件，紧接着在 13 时 51 分发生了 5.1 级地震，其应力降为 28.02 MPa。此后高应力降余震事件频繁发生，构造应力得以较大的释放，是主震发生后构造应力的主要释放时期。从 7 月 22 日至 8 月 31 日，盐津地震累积释放应力约 140.2 MPa，余震 2 000 余次。图 7 为盐津地震序列主体时间与应力降量值分布图，表 2 为盐津地震震源深度与地震应力释放情况。由表 2 可见，高应力降地震主要分布在 5 ~ 10 km 深度范围内，观测表明余震也主要分布在该深度范围，表明这一深度区域是盐津地震能量的集中释放区域。

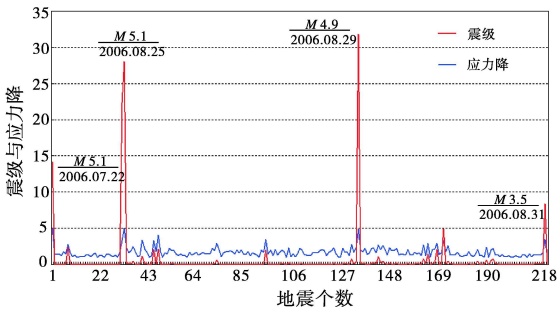


图 7 盐津地震序列 ($M \geq 1.0$) 震级与应力降
随时间变化趋势图

表 2 不同深度层地震应力释放情况表

深度范围 / km	地震个数	累积应力降 / MPa
$0 \leq h < 5.0$	177	1.45
$5.0 \leq h < 10.0$	357	138.78

4 讨论与结论

震中区流动数字化地震台网近源记录给出的高精度余震定位及能量释放分布结果表明，盐津两次 5.1 级地震处于同一构造区，是震区经过应力积累—释放—调整—再释放的过程而发生的。分析认为这两次地震的发震构造为 NE 向断裂，主破裂走向约 N53°E，倾向 NW，倾角约 80°，断层性质可以判定为走滑型断裂。从余震震源分布面可以清楚地确定地震断层破裂长度约为 9 km，断层破裂带宽度约为 3 km，断层破裂面深度 3 ~ 8 km，断层走向与宏观等震线长轴方向基本一致。区域地质测量报告^①表明，NE 向的华莹山深断裂西南端延伸至盐津县的中和场。震中区豆沙、中和等地是本次地震的 VI 度区，该区构造复杂，存在 NW、EW 向断层，华莹山深断裂是否延伸至豆沙，从盐津两次地震破裂面走向分析，其发震构造可能与华莹山深断裂存在关联。

用震中区现场流动台网近源观测资料及云南区域台网盐津地震台监测资料估算的盐津两次地震序列震源参数表明，地震矩与近震震级有很好的线性关系，其结果与云南地区以往发生的震例研究结果相一致。地震矩、震源破裂半径和应力

① 中华人民共和国区域地质测量报告，筠连幅，H-48-XXXIII，1973。
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

降与其它地区的地震定标律结果相当(秦嘉政等, 2003; 叶建庆等, 2002; 李一正等, 1985)。监测研究结果显示 $\Delta\sigma \geq 10.0 \text{ MPa}$ 的高应力降事件主要发生在震源深度 $5 \sim 10 \text{ km}$ 范围, 并以 $M_t \geq 2.5$ 地震出现, 表明这一深度范围是盐津地震应力主集中区, 主震及较大余震主要在这一深度范围活动。从定位结果的空间分布上看, 第 1 次 5.1 级地震序列活动受控于主震断层走向, 主震在 9 km 处, 其余震在主断裂面上沿深度分两个不同层面展开, 1 个层面在 9 km 以下, 另一层面在 7 km 以上, 在深度 $7 \sim 9 \text{ km}$ 之间形成余震的空白区。这个空区可视为主断裂面上存在较大的障碍物, 主破裂没有贯穿该障碍物。第 2 次 5.1 级地震在障碍物上部发生, 前后两次 5.1 级地震使主破裂面得以贯穿。从地震活动的时间上看, 第 1 次 5.1 级地震发生后无 3 级以上余震发生, 显示震区应力释放调整不充分, 存在障碍物。通过一段时间的应力积累, 在原震区再次发生 5.1 级地震, 突破障碍物, 其后的余震释放出较高的应力降, 使盐津震区应力得到充分调整。

通过监测研究, 盐津两次 5.1 级地震的模式对双震型地震近场监测和第 2 次主震的预测预报具有十分重要的意义。近场监测精细展示的地震活动图像, 为地震的科学预测提供了可供借鉴的“盐津双震模式”。

第 1 次 5.1 级地震应力降为 14 MPa , 与其它地区相当规模的地震相比, 应力降绝对值偏小。其后无 3.0 级以上余震, 震区应力没有得到较大的释放。

盐津 5.1 级双震的主、余震定位结果显示, 第 1 次 5.1 级地震主破裂面上存在余震活动空区, 笔者认为该空区是主破裂面上的障碍物, 障碍物位于深度 $7 \sim 9 \text{ km}$ 。

第 2 次 5.1 级地震在障碍体的上端发生, 应力

降为 28 MPa , 其余震贯穿空区, 并向破裂面边缘扩展, 形成一个无空白区的破裂面。

根据深度空白区, 第 2 次地震序列的主震是可以预测的。

参考文献:

- 安艺敬一, 理查兹 P G 著. 1986. 定量地震学——理论和方法 (第二卷) [M]. 北京: 地震出版社.
- 非明伦, 周光全, 谢英情, 等. 2006. 盐津 5.1 级地震现场调查与烈度分布 [J]. 地震研究, 29 (4): 411—417.
- 李立平, 叶建庆, 谢庆茵. 1990. 澜沧—耿马地震震源动力学参数研究 [J]. 地震研究, 13 (3): 223—233.
- 李一正, Bakun W H, 金亚夫, 等. 1985. 滇西地区震级与地震矩标度 [J]. 地震研究, 8 (6): 617—632.
- 秦嘉政, 阚荣举. 1986. 用近震尾波估算昆明及其周围地区的 Q 值和地震矩 [J]. 地球物理学报, 29 (2): 145—156.
- 秦嘉政, 李白基, 叶建庆, 等. 2000. 用数字记录资料测定腾冲火山区的微震参数 [J]. 地震研究, 23 (2): 124—132.
- 秦嘉政, 叶建庆, 钱晓东, 等. 2003^a. 2000 年姚安地震的震源参数 [J]. 地球物理学报, 46 (5): 633—641.
- 秦嘉政, 叶建庆, 蔡绍平, 等. 2003^b. 云南姚安—永胜地震近源数字地震观测与现代新参数报告 [M]. 北京: 地震出版社.
- 秦嘉政, 叶建庆, 蔡绍平, 等. 2005. 云南大姚地震近源数字地震观测与现代新参数报告 [M]. 北京: 地震出版社.
- 时振梁, 张少泉, 赵国荣, 等. 1992. 地震工作手册 [S]. 北京: 地震出版社, 135—136.
- 叶建庆, 秦嘉政. 2000. 火山区数字地震观测 [G] //皇甫岗, 姜朝松. 腾冲火山研究. 昆明: 云南科技出版社, 176—231.
- 叶建庆, 秦嘉政. 2001. 数字地震记录震源参数测定 [G] //毛玉平, 万登堡. 2000 年云南姚安 6.5 级地震. 昆明: 云南科技出版社, 55—99.
- 叶建庆, 秦嘉政, 蔡绍平, 等. 2002^a. 永胜地震观测与研究 [J]. 地震研究, 25 (B): 64—73.
- 叶建庆, 苏有锦, 刘学军, 等. 2002^b. 2001 年云南中强地震序列震源参数 [J]. 地震研究, 25 (2): 115—123.
- Bakun W H. 1984. Seismic moments, local magnitudes and coda duration magnitudes for earthquakes in central California [J]. BSSA, 74: 439—458.

Research and Monitoring of the 2006 M_{5.1} Double Shocks in Yanjin, Yunnan, China

YE Jian-qing CHEN Hui LIU Xue-jun GUO Zhi-hua CAI Shao-ping
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Two M_{5.1} earthquakes occurred in Yanjin, Yunnan, China, in 2006. We located the events with high precision, solved the source parameters of the Yanjin earthquake sequences, and discussed the rupture processes of the Yanjin doublet by using the near field and regional seismic waveforms. The result shows that the two M_{5.1} earthquakes lie in the same tectonic region. The main fracture at depth 3—9 km is strike slip with a dimension about 9 km × 3 km approximately, a strike about N53°E, and a dip about 80°. The strike of the fracture is consistent with that of the long axis of isoseismals. The seismic moment, rupture radius and stress drop are 10^{16} N·m, 90—300 m and 0.000 2—32 MPa respectively in the seismic area. The events with higher stress drop concentrated at depth 5—10 km, so this depth range is the main active zone of the Yanjin earthquakes. The spatial distribution of the aftershocks displays that the main rupture plane of the former M_{5.1} earthquake has an absent shock zone at depth 7—9 km, which is regarded as the asperity on main rupture plane, and the following M_{5.1} earthquake ruptured through the asperity. This suggests that the asperity on the rupture plane resulted in the Yanjin double shocks. So the absent shock zone mapping is important for earthquake prediction.

Key words: near field earthquake observation, rupture process, source parameter, double shocks, Yanjin of Yunnan