

# 云南测震台网记录汶川 8.0 级地震波形分析初探<sup>\*</sup>

李桂华, 刘国华, 闵照旭

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用云南测震台网记录的汶川  $M_s 8.0$  地震及其余震序列共 28 个数字地震波形, 对  $M_s \geq 6.0$  余震进行波形特征分析、 $M_s \geq 5.0$  余震进行地震定位分析。根据主震波形分析结果, 汶川 8.0 级主震有别于其它余震。比较四川台站和云南台站的定位结果, 云南测震台网的地震定位精度与台站布局关系密切。

关键词: 汶川 8.0 级地震; 地震波形; 地震位置; 测震台网; 云南; 四川

中图分类号: P315.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)增刊-0486-06

## 0 引言

据中国地震台网测定, 2008 年 5 月 12 日 14 点 28 分 04.0 秒, 在四川省汶川县境内 ( $31.0^\circ\text{N}$ ,  $103.4^\circ\text{E}$ ) 发生  $M_s 8.0$  特大地震, 此次地震震源深度仅为 15 km (陈运泰等, 2008), 属于内陆浅源地震。地震释放的巨大能量通过地震波广泛向外传播, 影响范围极广, 全国绝大部分地区乃至境外均有不同震感, 造成了生命财产的巨大损失。主震之后余震活动不断, 截至 6 月 12 日, 中国地震台网中心测定  $M_s \geq 4$  余震就有 90 多个<sup>①</sup>。这些地震, 云南测震台网均有波形记录。作为地震监测的最前沿, 云南测震台网承担着云南省及周边地区的大震速报任务。四川处于云南的北面, 是云南测震台网定位的难点地区之一, 但本次主震及其众多余震, 为我们认识这一地区的地震波形特征提供了良好的条件。研究及探讨这些资料, 可用于掌握这一地区的波形特征及定位方法, 为快速和准确地定位地震提供条件。

## 1 地质构造及地震资料

### 1.1 地质构造

汶川大地震发生在位于我国南北地震带的四川盆地和青藏高原东部之间的龙门山断裂带上, 该断裂带自青川起, 经北川、茂县、绵竹、汶川、

都江堰、大邑等地, 到泸定附近为止, 呈 EN-WS 走向, 是一条长达 470 km 宽 100 km 的地震带 (陈运泰等, 2008), 其地质构造与自然地理条件十分复杂 (图 1)。龙门山断裂带是四川强烈地震带之一, 自公元 1169 年以来, 共发生破坏性地震 26 次, 其中 6 级以上地震 20 次 (葛剑雄, 2008)。由于印度洋板块向亚欧大陆板块俯冲, 造成青藏高原快速隆升, 使青藏高原的地层不断向东推移, 受到四川盆地的阻挡后, 聚集了巨大的能量, 最终在龙门山断裂带北川—映秀地区突然释放, 形成本次特大地震。地震在地壳深部的岩石中形成

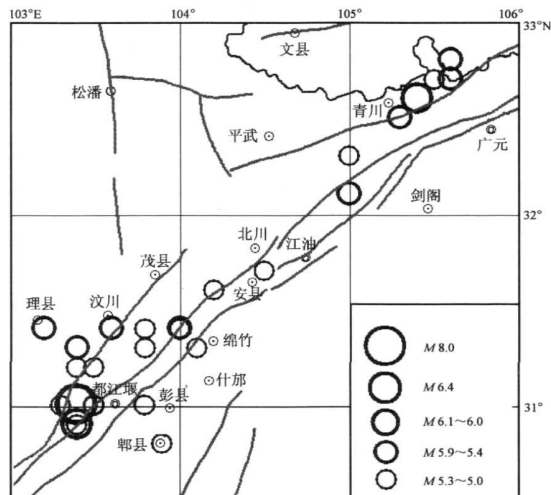


图 1 龙门山断裂带及 2008 年 5 月 12 日至 6 月 12 日  $M_s \geq 5.0$  地震震中分布图

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-07-15.

<sup>①</sup> 中国地震台网中心, 国家台网速报目录 (2008-05-12~06-12).

了一条长约 300 km 深达 30 km 的大断裂，其中约 200 km 出露地表，形成沿映秀—北川断裂分布的地表破裂带。该破裂带从映秀镇以南开始向 EN 方向延伸，经北川县，过平通镇和南坝镇，止于青川县的石坎乡附近。另外，龙门山与成都平原交界的都江堰—江油断裂也发生了 60 km 的破裂（张培震，2008）。经统计，目前已发生余震 2 万多次，其中最大余震的震级为  $M_s 6.4$ 。这些余震主要分布在从汶川到青川的龙门山断裂带的中北段，形成长达 300 km 左右的余震带。

## 1.2 地震资料

由于汶川地震及其序列已超出云南测震台网速报范围 ( $20^{\circ} \sim 30^{\circ}N$   $96^{\circ} \sim 107^{\circ}E$ )，所以我们选取国家台网速报目录<sup>①</sup>中 5 个  $M_s \geq 6.0$  地震进行地震波形特征的初步分析，其中汶川 3 个（5 月 12 日 19 时 10 分 58 秒的  $M_s 6.0$  地震因叠加无法辨认震相被剔除）、江油 1 个、青川 1 个；同时选取 28 个  $M_s \geq 5.0$  地震（剔除叠加及初始震相不清的地震）进行地震位置的测定分析。这些地震的分布范围为  $30.9^{\circ} \sim 32.8^{\circ}N$   $103.2^{\circ} \sim 105.6^{\circ}E$ （图 1）。从图 1 中可见序列地震是沿断裂呈 WS—EN 方向分布。由于国家台网速报目录没有给出深度，而云南测震台网台站距汶川地震及其余震距离较远，震源深度无法测定，因此本文不讨论震源深度。

## 2 地震波形特征分析

汶川主震及余震序列对于云南测震台网来说均属于近震范围，最近的台站是盐津台，最远的是孟连台。为了直观，我们仅选用记录较好、离汶川主震最近的盐津台记录到的数字地震波形作为研究对象，对 4 个  $M_s \geq 6.0$  地震的特征进行初步分析。

### 2.1 5 月 12 日 14 时 28 分 $M_s 8.0$ 主震

汶川主震震中位置为  $31.0^{\circ}N$   $103.4^{\circ}E$  距盐津台约 334 km。从图 2 中可见波形十分特殊，由于多次破裂显示相当复杂，波形变化明显。在 0 ~ 60 s 之间地震波可分为 3 个部分，每个部分之间振幅相差很多倍，需经多次放大才能看到（图 2<sup>a</sup>，时间标尺 600 s）。第 1 部分在 0 ~ 16 s 左右，它被后续的大地震波压缩得几乎看不出来，经放大才

可清楚地看到初至波 PN 波（图 2<sup>b</sup> 时间标尺 120 s），但后面的波形就不能分辨了，说明 Pn 波初动很弱，与大部分相同震级的地震相比有较大区别；第 2 部分在 17 ~ 46 s 左右（图 2<sup>c</sup> 时间标尺 120 s），从图中可看到在之前和之后波形都有明显变化，在理论上 SN 波应在 14 : 29 : 25 附近出现，但是在实际记录中，此时间段无法清楚辨识出 SN 波震相，说明震相复杂；第 3 部分在 48 ~ 60 s 左右（图 2<sup>c</sup> 时间标尺 120 s），波形呈大周期、大振幅，已经限幅，其它震相已无法辨认。在 60 s 内波形记录特征与破裂大致由 3 个主要的子事件组成（陈运泰等，2008）。

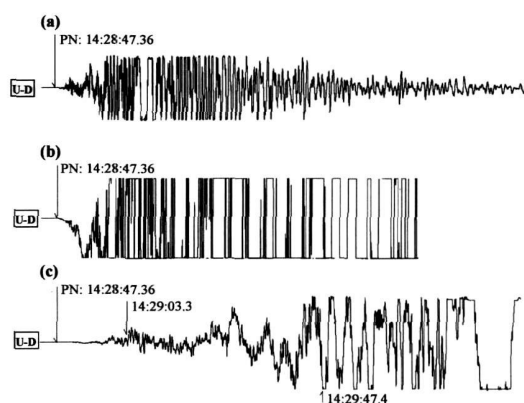


图 2 汶川主震地震波形图

### 2.2 5 月 13 日 15 时 07 分汶川 $M_s 6.1$ 地震

此地震震中位置为  $30.9^{\circ}N$   $103.4^{\circ}E$  距盐津台约 320 km。从图 3（时间标尺 300 s）中可以看

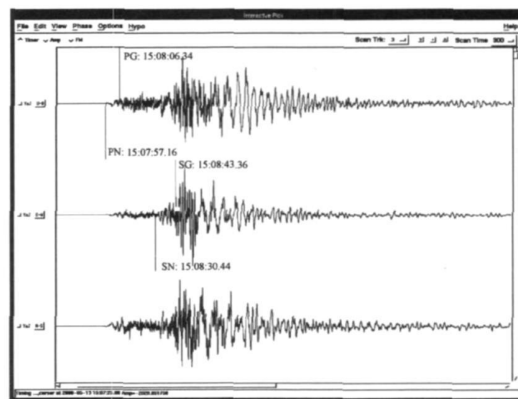


图 3 汶川  $M_s 6.1$  地震波形图

① 中国台网中心：国家台网速报目录（2008—05—12—06—12）。

到,  $P_n$   $P_g$   $S_n$   $S_g$ 波发育完整, 可清楚辨识。初至波不清晰, 为一系列周期与振幅均较小的波形组成, 单个波形无明显的方向性, 但三分向震相发育趋势均有明显的方向性。 $S_g$ 波之后, 有  $LR$ 波出现 (库尔哈奈克, 1992), 周期大约为  $5\text{ s}$ ; 垂直向振幅明显大于水平向。

2.3 5月18日01时08分江油  $M_s6.0$ 地震

此地震震中位置为  $32.1^\circ\text{N}$   $105.0^\circ\text{E}$  距盐津台约  $440\text{ km}$ 。从图4 (时间标尺  $300\text{ s}$ ) 中可以看到,  $P_n$   $P_g$   $S_n$   $S_g$ 波发育完整, 可清楚辨识。此次地震有清晰的初至波, 其后有两个周期与振幅较大的完整波形。 $S_g$ 波之后, 有一组发育不完全的  $LR$ 波出现 (库尔哈奈克, 1992), 此组波形周期大约为  $7\text{ s}$   $UD$ 向振幅明显大于水平向。

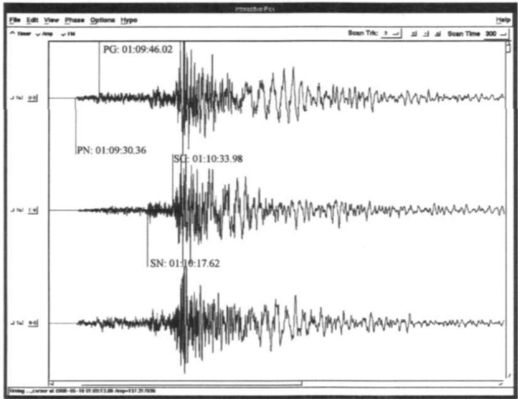


图4 江油  $M_s6.0$ 地震波形图

2.4 5月25日16时22分  $M_s6.4$ 青川地震

此地震震中位置为  $32.6^\circ\text{N}$   $105.4^\circ\text{E}$  距盐津台约  $510\text{ km}$ 。从图5 (时间标尺  $300\text{ s}$ ) 中可以看

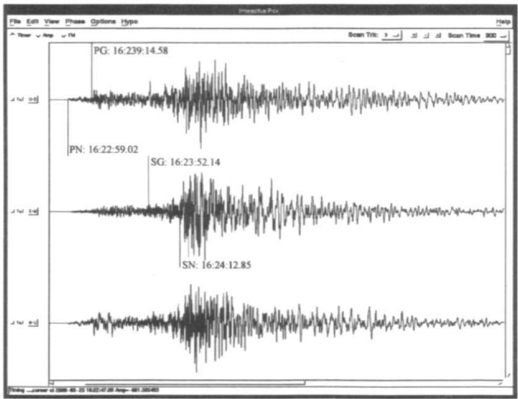


图5 青川  $M_s6.4$ 地震波形图

到, 初至波三分向均有尖锐的突跳, 且周期也比较大, 半周期大约为  $1\text{ s}$  而且  $UD$ 向与  $NS$ 的初至振幅明显大于  $EW$ 向。 $S_n$ 波到达之后, 水平向出现了一组高频震相, 时间持续大约  $9\text{ s}$  垂直向对此无明显记录。

从以上图形可见, 由于主震震级巨大使波形限幅, 加之波形较复杂, 除初至波经放大可辨认, 其它震相都难以分辨。另外三个地震其波形各有其特征, 这与地质构造、传播途径及距离有关。

3 地震位置分析

“十五”项目完成后, 云南测震台网增加了一定数目的台站, 使台网布局更加合理, 沿四川边界从东至西有盐津、昭通、巧家、东川、华坪、永胜、中甸等台站, 并接入了四川高县、雷波、普格、盐源、乡城等台站数据 (图6) 大大提高了对沿云南行政区边界的四川地震的监控能力。但汶川地震及其余震序列对于云南测震台网还是属于网外地震, 观测能力较弱, 地震定位有一定难度。经过探索, 我们认为, 对于这一地区的地震, 只要初至波清楚, 用以下方法定位效果最好。(1) 用距地震最近、张角最大呈弧形状分布的  $5\sim10$ 个台; (2) 全部选用初至  $P$ 波定位,  $S$ 波明显时, 也可用  $1\sim2$ 个台的  $S$ 波, 但位置变化不大 (李桂华, 2005)。

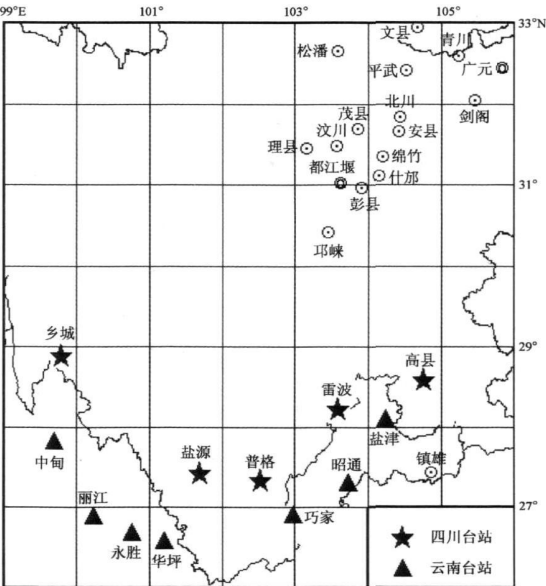


图6 定位台站位置分布图

### 3.1 定位方法

设用于定位的子台数为  $n$ ，第  $i$  个子台的位置坐标为  $(x_i, y_i)$ ，震中位置坐标为  $(x_0, y_0)$ ，于是第  $i$  个子台到震中的距离  $\Delta_i$  有

$$\Delta_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2. \tag{1}$$

另一方面，在  $n$  个用于定位的子台中，各子台的初动到时记为  $t_{0i}$ ，用最小的初动到时作为发震零时  $t_0$ ，于是各子台的初动走时  $t_i$  就是

$$t_i = t_{0i} - t_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \tag{2}$$

根据  $n$  个子台的初动走时  $t_i$ ，由最小走时计算公式即可得到与最小走时  $t$  相应的震中距  $\Delta$ ，于是方程 (1) 中只有两个未知量  $x_0$  和  $y_0$ 。由  $n$  个用于定位的子台的初动到时即可构成  $n$  个方程组成的非线性方程组，方程组中两两方程相减，非线性方程组就简化成线性方程组：

$$a_{ij} \times x_0 + b_{ij} \times y_0 = c_{ij}. \tag{3}$$

其中  $a_{ij} = 2(x_i - x_0)$ ， $b_{ij} = 2(y_i - y_0)$ ， $c_{ij} = \Delta_i^2 - \Delta_j^2$ ， $\Delta_i$ 、 $\Delta_j$  是  $i$  子台到坐标原点的距离。

于是用最小二乘法得到现有发震时刻  $t$  对应的震中位置  $(x_0, y_0)$ ，这就是发震时刻  $t$  设定后，计算出各台地震波初动的走时和相应的震中距，“交切”法得到震中位置  $(x_0, y_0)$ 。对于得到的震中位置  $(x_0, y_0)$ ，容易计算出各子台的震中距和相应的初动理论走时  $t_{ci}$ ，由此得到各子台的初动理论走时  $t_{ci}$  和观测走时  $t_{0i}$  的差，定义它们的代数和为  $a_0 t$ ，即：

$$a_0 t = \sum_{i=1}^n (t_{ci} - t_{0i}). \tag{4}$$

定义走时残差  $\epsilon$  为

$$\epsilon^2 = \frac{1}{n-2} \left[ \sum_{i=1}^n (t_{ci} - t_{0i})^2 \right]. \tag{5}$$

用  $a_0 t$  修改设定的发震时刻  $t$

$$t'_0 = t + \mu \times a_0 t. \tag{6}$$

其中  $\mu$  是阻尼系数。用  $t'_0$  代替  $t_0$ ，重复上述从 (2) 式开始的过程，直到  $a_0 t$  或  $\epsilon$  小于某一给定值，或者迭代次数大于某一给定值。在迭代过程

中，阻尼系数  $\mu$  逐渐趋于零。

速度模型采用国内平均双层模型的“中国地区地震走时表”（国家地震局地球物理研究所，1979）（表 1）。

表 1 云南遥测台网现采用的地壳速度结构模型

$h_1 = 16 \text{ km}$	$V_{h1} = 5.71$	$V_{s1} = 3.40$
$h_2 = 24 \text{ km}$	$V_{h2} = 6.53$	$V_{s2} = 3.77$
	$V_{h3} = 7.97$	$V_{s3} = 4.45$

### 3.2 定位结果比较

分别选用四川台站定位和云南台站定位与中国台网定位的结果进行比较，结果见表 2。在分析 28 个地震的位置时，四川台站选用的是云南测震台网接入的高县、雷波、普格、盐源和乡城台，云南台站选用的是盐津、昭通、巧家、华坪、永胜和中甸台。由于地震发生后，四川省的所有台站因通讯、电力中断而瞬间停止工作，云南测震台网没有汶川 8.0 主震的波形记录而无法定位。5 月 17 日的汶川  $M_s 5.1$  余震，因云南有省内地震，初至波有干扰无法定位。震源深度没有讨论故而未列在表中。由表 2 可见，由于四川台站弧形分布较云南台站好，且距汶川及其余震稍近，除 6 月 11 日 6 时 23 分 20 秒的 28 号地震定位  $\Delta d$  偏大为  $0.82^\circ$ ，其余的地震  $\Delta d$  与中国台网的一致，均在  $0^\circ \sim 0.35^\circ$  之间；仅用云南台站定位结果就差一些， $\Delta d$  在  $0.1^\circ \sim 1.16^\circ$  之间。由于四川乡城台的线路故障，28 号地震无波形记录，只有偏东的 4 个台参与定位，其张角比有乡城台参与定位小很多，因此  $\Delta d$  稍大。这也从一个侧面反映了定位台站选择的重要性。

## 4 讨论与结论

(1) 汶川 8.0 级主震是一个很特殊的地震，它的许多独有特征值得我们探讨和研究。随着对该地震的深入研究，对其显现出的独特现象可能会有更好的解释；

(2) 汶川地震的余震波形各有其特征，这与地质构造、传播途径及距离有关；

(3) 对于汶川地震及其余震序列的定位，选用距地震最近、张角最大呈弧形状分布的 5~10 个

台站, 全部选用初至 P波定位, 效果最好;

(4) 把沿云南行政区边界的外省台站接入是

十分必要的, 这可以提高地震的监控能力和定位精度。

表 2 四川台站、云南台站与中国台网定位的结果比较

序号	日期	震中地名	发震时间	中国局参数			四川台站参数				云南台站参数			
				经纬度		震级	经纬度		震级	Δ d	经纬度		震级	Δ d
				$\varphi_N$	$\lambda_E$		$\varphi_N$	$\lambda_E$			$\varphi_N$	$\lambda_E$		
1		四川汶川县	14 :28 :04.0	31.0°	103.4°	8.0	无四川台波形数据				30.9°	103.4°	7.7	0.10°
2		四川绵竹县	16 :21 :47.3	31.3°	104.1°	5.2	31.3°	104.0°	4.9	0.09°	31.2°	104.0°	4.9	0.13°
3		四川彭县	17 :07 :03.1	31.3°	103.8°	5.0	31.3°	103.9°	4.7	0.09°	29.7°	102.6°	4.7	1.91°
4		四川什邡县	17 :42 :26.4	31.4°	104.0°	5.2	31.4°	104.0°	5.0	0.00°	31.2°	104.0°	4.8	0.20°
5		四川汶川县	18 :23 :40.0	31.0°	103.3°	5.0	31.0°	103.5°	4.6	0.17°	30.2°	103.3°	4.6	0.80°
6	5.12	四川汶川县	19 :10 :58.4	31.4°	103.6°	6.0	31.4°	103.7°	6.1	0.08°	31.1°	103.7°	6.1	0.31°
7		四川汶川县	21 :40 :54.3	31.0°	103.5°	5.1	31.1°	103.6°	4.8	0.13°	30.7°	103.6°	4.8	0.31°
8		四川青川县	22 :46 :09.5	32.7°	105.5°	5.1	32.8°	105.6°	4.8	0.13°	31.9°	105.2°	4.8	0.84°
9		四川彭县	23 :05 :34.1	31.0°	103.8°	5.0	31.1°	103.7°	5.0	0.13°	31.1°	103.1°	5.0	0.60°
10		四川都江堰市	23 :28 :56.2	31.0°	103.5°	5.0	31.1°	103.6°	4.9	0.13°	31.1°	103.5°	4.8	0.10°
11		四川郫县	01 :54 :36.1	30.8°	103.9°	5.0	30.9°	103.8°	4.8	0.13°	31.2°	104.5°	4.7	0.65°
12		四川什邡县	04 :08 :50.1	31.4°	104.0°	5.7	31.2°	104.1°	5.4	0.21°	31.5°	104.0°	5.4	0.10°
13	5.13	四川安县	04 :45 :31.7	31.7°	104.5°	5.2	31.7°	104.3°	5.1	0.17°	31.3°	104.3°	5.1	0.44°
14		四川汶川县	07 :46 :22.6	31.2°	103.4°	5.3	31.2°	103.4°	5.1	0.00°	30.7°	103.5°	5.1	0.51°
15		四川汶川县	15 :07 :10.9	30.9°	103.4°	6.1	31.0°	103.4°	5.7	0.10°	31.2°	103.4°	5.6	0.30°
16		四川汶川县	10 :54 :36.5	31.3°	103.4°	5.6	31.2°	103.6°	5.5	0.20°	30.7°	103.5°	5.6	0.61°
17	5.14	四川什邡县	17 :26 :44.0	31.4°	104.0°	5.1	31.2°	104.2°	4.8	0.26°	31.3°	104.1°	4.8	0.13°
18	5.15	四川安县	05 :01 :08.0	31.6°	104.2°	5.0	31.9°	104.4°	4.5	0.35°	31.7°	104.2°	4.5	0.10°
19	5.16	四川理县	13 :25 :49.0	31.4°	103.2°	5.9	31.3°	103.4°	5.6	0.20°	31.3°	103.4°	5.5	0.20°
20	5.17	四川汶川县	00 :14 :46.3	31.2°	103.5°	5.1	31.2°	103.6°	4.7	0.09°	P波初动有云南省内地震干扰			
21	5.18	四川江油市	01 :08 :23.4	32.1°	105.0°	6.0	32.2°	105.0°	6.0	0.10°	32.2°	104.8°	6.0	0.20°
22	5.19	四川青川县	14 :06 :54.9	32.5°	105.3°	5.4	32.3°	105.3°	5.5	0.20°	32.8°	105.9°	5.4	0.59°
23	5.25	四川青川县	16 :21 :46.9	32.6°	105.4°	6.4	32.6°	105.5°	6.1	0.08°	31.9°	104.8°	6.1	1.00°
24		四川青川县	16 :03 :24.1	32.7°	105.6°	5.4	32.6°	105.6°	5.1	0.10°	32.2°	105.2°	5.0	0.60°
25	5.27	陕西宁强县	16 :37 :53.1	32.8°	105.6°	5.7	32.7°	105.7°	5.5	0.13°	31.8°	104.9°	5.6	1.16°
26	6.05	四川青川县	12 :41 :08.2	32.3°	105.0°	5.0	32.0°	104.9°	4.7	0.31°	31.7°	104.6°	4.7	0.69°
27	6.09	四川彭县	15 :28 :36.0	31.4°	103.8°	5.0	31.3°	103.9°	4.6	0.13°	31.1°	103.8°	4.6	0.30°
28	6.11	四川汶川县	06 :23 :20.2	30.9°	103.4°	5.0	31.7°	103.6°	4.4	0.82°	31.4°	103.8°	4.4	0.60°

参考文献:

陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008年 5月 12日汶川特大地震震源特性分析报告 [ N/OI]. 中国地震信息网, 2008-05-18. (2008-05-18) [ 2008-07-15].

葛剑雄. 2200 年的地震史: 震不垮的四川 [ N/OI]. 东方早报, 2008-05-26. (2008-05-26) [ 2008-07-15]. <http://press.kdncn.com.cn/detail/articles/20080526002B071/>.

国家地震局地球物理研究所. 1979. 震相走时便查表 [ M]. 北京: 地震出版社.

李桂华, 何家斌, 颜其中. 2005. 云南区域数字地震遥测台网近震速报 [ J]. 地震地磁观测与研究, 26 (3): 56-62.

时振梁, 张少泉, 赵国荣, 等. 1992. 地震工作手册 [ K]. 北京: 地震出版社.

张培震. 专家详解四川汶川特大地震的特征与成因 [ N/OI]. 新华网, 2008-06-26. (2008-06-26) [ 2008-07-15]. [http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008-06/26/content\\_8445879.htm](http://news.xinhuanet.com/newscenter/2008-06/26/content_8445879.htm).

中国科学院地球物理研究所. 1977. 近震分析 [ M]. 北京: 地震出版社.

○库尔哈奈克著. 刘启元, 吴宁远, 修济刚译. 1992. 地震图解析 [ M]. 北京: 地震出版社.

# Waveform Analysis of the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake by Yunnan Seismic Network Records

LIGuìhuá LIUGuohuá M N Zhao-xu

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

## Abstract

We analyze 28 waveforms of the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake and the aftershock sequence recorded by the Yunnan seismic network and give the waveform characteristics of  $M_s \geq 6.0$  earthquakes and the location results of  $M_s \geq 5.0$  earthquakes. The analysis of the mainshock waveform shows that the mainshock is obviously different from the aftershocks. Comparing the location result of the Yunnan seismic network to that of the Sichuan seismic network, we find that the accuracy of the former's location is closely related with the distribution of stations.

**Key words:** Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake; waveform; earthquake location; seismic network; Yunnan; Sichuan