

攀枝花  $M_s$  6.1 地震余震强震动流动观测\*

李世成, 张 潜, 郑定昌, 高 东, 刘琼仙, 崔建文

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 对 2008 年 8 月 30 日攀枝花发生的 6.1 级地震强余震流动观测记录进行了分析处理, 绘制了余震等值线图, 讨论了相关问题。通过对 P 波分析看出: P 波显示出明显的方向性, 强余震的地震动加速度时程呈现出多普勒效应。为今后强震动观测资料的使用及强震动流动台站的布设, 提供了有益的经验。

关键词: 攀枝花; 强震动观测; 地震动; 多普勒效应

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2009)增刊-0449-07

0 概况

2008 年 8 月 30 日 16 时 30 分 50 秒, 四川省攀枝花市仁和区与凉山彝族自治州会理县交界处发生 6.1 级地震, 震中位置 101.9°E、26.2°N。极震区覆盖四川省的仁和区、会理县和云南省元谋县的部分乡镇。地震发生后, 云南省地震局地震应急指挥部派出强震动流动观测组, 在震中地区架设了 4 个强震动台。从 8 月 31 日布设仪器开始观测, 到 9 月 3 日, 共捕获 22 个强余震事件、264 条记录。其中包括 5.6 级在内的所有  $M_s \geq 4$  地震, 最大加速度峰值 502 Gal。这些记录为现场震情趋势分析、地面灾情快评以及为进一步研究近源区地震动特征和震源过程提供了有价值的信息。同时, 通过对强震动记录的时程分析发现: 各流动台记录的 P 波显示出明显的方向性, 强余震的地震动加速度时程呈现出多普勒效应。这为今后强震动观测资料的使用及强震动流动台站的布设, 提供了有益的经验。

1 震区地震地质环境及地震参数

震区地处川滇菱形块体内部的滇中—川南块体的中部地区。此次 6.1 级、5.6 级地震的震源机制解、余震分布及强震记录等证据表明: 其发震构造为磨盘山—绿汁江断裂。该断裂为一条纵贯滇中—川南块体中部的深大断裂, 北起冕宁的牦牛山, 向南经磨盘山、昔格达、鱼鲊、元谋盆地东缘、一平浪等地, 在罗川附近沿绿汁江延至易门三家厂以南消失, 走向南北, 倾向东和西, 倾角 27°~85°之间, 长度约 410 km。断裂带上, 曾发生过 6 次破坏性地震, 最大地震为 1955 年鱼鲊 6 级(李坪, 1977)。此次 6.1 级地震就震中就在断裂中段的鱼鲊附近。

继 8 月 30 日 6.1 级主震后, 次日又接连发生了 5.6 级、4.9 级和 4.4 级强余震。表 1 列出了云南地震台网和中国地震台网测定的这三次余震的参数(表 1)。

表 1  $M_s \geq 4$  地震参数测定及对比  
Tab. 1 Parameters setting and comparison of  $M_s \geq 4$  earthquakes

台网名	发震时间		震级	震中位置		震源深度 /km	断层面		
	年-月-日	时:分:秒		北纬/(°)	东经/(°)		走向/(°)	倾向/(°)	滑角/(°)
云南地震台网	2008-08-31	16:31:09	5.6	26.25	101.97	12	191	80	-23
	2008-08-31	17:34:18	4.9	26.23	101.97	12			
	2008-08-31	19:00:28	4.4	26.23	101.95	11			
中国地震台网	2008-08-31	16:31:11	5.6	26.2	101.9	10			
	2008-08-31	17:34:49	4.9	26.2	101.87				
	2008-08-31	19:00:30	4.4	26.2	101.83				

\* 收稿日期: 2009-10-30。  
基金项目: 行业基金项目(200808061):“宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究”子项目“基于强震动记录的烈度复核”资助。

2 强震动观测台的布设及获取记录情况

2.1 仪器设备

此次流动观测使用美国 Kinometrics 公司生产的 1 台 Etna 型和 3 台 K2 型集三分相力平衡加速度计（传感器）、记录器和 GPS 于一体的固态数字存储强震仪。仪器主要性能见表 2（Li *et al.*, 2008）。

表 2 强震动记录仪及传感器主要技术指标  
Tab. 2 Main technical specification of the data acquisitions and sensor in the mobile observation

记录器	K2	Etna
通道数	3	3
动态范围	108 db	120 db
输入范围	± 2.5 V	± 2.5 V
频率响应	0 ~ 80 Hz	0 ~ 80 Hz
分辨率	18 bit	24 bit
噪声	≤1 LSB (RM <sub>S</sub> )	≤1 LSB (RM <sub>S</sub> )
数据存储	2 × 32 Mb 固态硬盘	2 × 64 Mb 固态硬盘
时间服务	GPS 授时	GPS 授时

传感器	ES - T	SLJ - 100
类型	力平衡式加速度计	力平衡式加速度计
满量程	± 2 gn	± 2 gn
带宽	0 ~ 200 Hz	0 ~ 80 Hz
动态范围	≥155 db	≥120 db
噪声	≤10 - 7 gn	≤10 - 6 gn

2.2 台站布设

地震应急的强震动流动观测是以获取近场地震动记录为主，在条件允许时可通过有针对性地布设某一类或多类观测台阵，以兼顾获取有更广

泛使用价值的强震动观测资料的一种灵活机动性很强的观测手段（胡聿贤，2006；温瑞智，2008；李山有，2004；、崔建文等，2007；李世成等，2008）。本次强震流动台布设依据震区地震构造分布和地震现场震情趋势判断意见，将携带的 4 台观测仪在震中区沿此次地震的发震构造带布设。由于该发震构造在地表显示出近南北向的线性展布特征，因此，在制定布设方案时，亦考虑了各观测点尽可能构成沿断层走向分布的地震动台阵（表 3、图 1。）

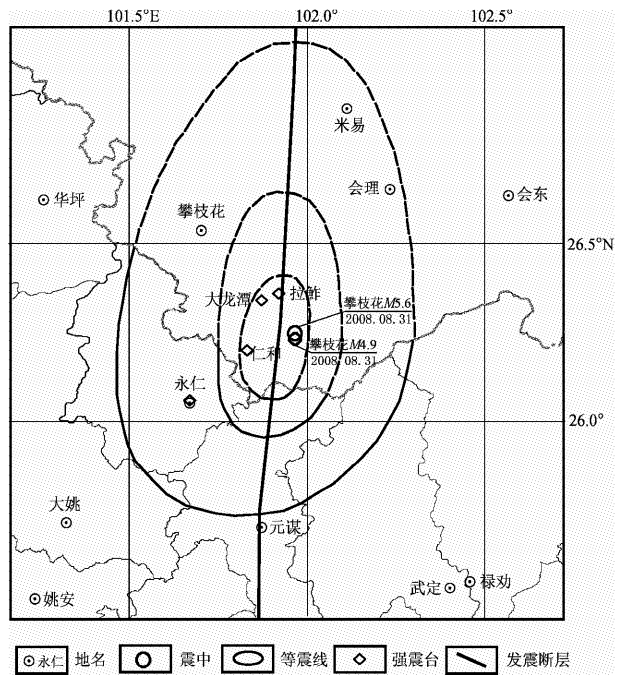


图 1 攀枝花地震流动观测台分布示意图  
Fig. 1 Distributive map of the strong motion movable observation stations in the M<sub>5</sub>6. 1Panzhihua

表 3 攀枝花 6.1 级强震动流动观测台布台简况					
Tab. 3 Informations of the strong motion movable observation stations for the M <sub>5</sub> 6. 1Panzhihua					
架设地点	放置点//架设时间	北纬/ (°)	东经/ (°)	仪器及编号//方向	场地概况
永仁县地震局	三层办公楼一楼水泥地面 //8 月 31 日 3 时。	26. 06	101. 67	Enta - 5218//Y 对北	盆地边缘、残坡积缓坡地带。 土层，Ⅱ类场地
攀枝花市平地镇	三层办公楼一楼水泥地面 //8 月 31 日 3 时	26. 20	101. 83	K2 - 2288//Y 对南	河流分水岭顶部，残坡积层， 地形相对平坦。土层，Ⅱ类场地
攀枝花市拉鲊村委会	村委会平房水泥地面 //8 月 31 日 15 时 50 分	26. 37	101. 92	K2 - 2572//Y 对北	河谷右岸、Ⅱ级冲积 - 基座阶地。土层，Ⅱ类场地
攀枝花市大龙潭村委会	二层办公楼一楼水泥地面 //8 月 31 日 18 时 50 分。	26. 34	101. 87	K2 - 2557//Y 对北	侵蚀-溶蚀槽地边缘山麓、 冲一坡积层。土层，Ⅱ类场地。

3 获取记录处理结果

自8月31日布台至9月3日撤台，4个流动观测台共捕获22个地震事件264条地震动加速度记录，其中包括5.6级、4.9级和4.4级强余震的记录。记录中峰值加速度大于200 Gal的有13条，最大地震动峰值为502 Gal。由于大龙潭村台18点

55才架设，该台没能记录到此前发生的5.6级和4.9级地震。对这些记录要进行噪声滤波、零漂校正处理（谢礼立，于双久，1982；Boore *et al*, 2005；Douglas，2003）（表4、图2）。

表4中震源距是在强震记录图上读取各事件的 $\bar{S}$ 、 $\bar{P}$ ，由公式： $D = V_{\phi}(\bar{S} - \bar{P})$ 计算求得。式中， $V_{\phi}$ 为虚拟波速度，取8.0 km/s。

表4 2008年8月31日~9月3日强震动流动观测主要地震动事件  
Tab. 4 Strong motion recordings of the main aftershocks during August 31 – September 3, 2008

序号	观测点	震源参数				峰值加速度/Gal			震源距 /km	
		震级 $M_s$	发震时间 日:时:分:秒	深度/km	纬度/(°)	经度/(°)	EW	SN		UD
1	平地镇政 府拉钵 村委会 龙潭乡 政 府永仁 地震局	2.9	31:15:20:17	9	26.32	101.97	8.0	6.4	6.6	17.6
2		2.7	15:23:55	10	26.307	101.97	17.8	23.5	8.7	16.8
3		5.6	16:31:09	12	26.257	101.97	272.5	502.0	313.5	15.2
4		3.5	16:35:16	3	26.207	101.957	90.8	86.5	36.6	16.0
5		3.2	16:35:45	9	26.22	102.00	9.1	6.2	4.2	16
6		3.3	16:40:51		26.20	101.93	47.2	41.7	25.9	13.6
7		4.9	17:34:48	12	26.23	101.97	209.2	265.1	83.3	16.0
8		2.6	17:46:21	16	26.20	101.93	7.1	8.1	4.7	13.7
9		2.5	18:12:17	2	26.22			24.5	8.8	12.8
10		2.3	18:49:45	11	26.20	101.92	6.8	5.2	3.1	12.8
11		4.4	19:00:29	5	26.23	101.95	203.3	311.2	57.5	13.6
12		3.2	19:41:21	10	26.22	101.95	50.9	34.1	14.5	14.4
13		2.6	01:0:26:46	2	26.23	101.95	21.6	26.3	9.4	15.2
14		3.2	1:56:45	13	26.22	101.95	29.8	75.4	25.3	13.6
15		2.7	2:11:30	6	26.18	101.88	15.3	21.4	11.2	13.7
16		2.2	03:1:20:32	3	26.22	101.92	6.4	8.2	3.3	14.4
17		3.0	1:23:41	8	26.22	101.90	12.7	14.2	6.7	13.6
18		2.2	8:37:36	4	26.22	101.90	10.7	10.0	4.2	13.6
19		2.0	11:26:54	5	26.22	101.93	20.9	18.3	16.0	13.7
20	5.6	31:16:31:09	12	26.25	101.97	219.5	259.3	111.2	22.4	
21	4.9	17:34:48	12	26.23	101.97	57.9	92.6	31.8	24.0	
22	4.4	19:00:29	11	26.23	101.95	34.2	35.7	24.0	24.8	
23	3.2	19:41:21	10	26.22	101.95	6.4	7.4	4.6	24.0	
24	3.2	01:01:56:45	13	26.22	101.95	9.2	9.2	6.6	21.6	
25	2.7	02:20:25:41	6	26.32	101.92	4.3	3.8	3.6	14.4	
26	3.0	03:01:23:41	8	26.22	101.90	2.3	2.3	1.9	24.0	
27	4.4	31:19:00:29	11	26.23	101.95	58.1	76.5	25.4	21.6	
28	3.2	19:41:21	10	26.22	101.95	8.6	12.6	9.1	20.8	
29	3.2	01:01:56:45	13	26.22	101.95	18.5	24.6	15.9	21.6	
30	2.7	02:20:25:41	6	26.32	101.92	9.0	7.2	8.1	14.4	
31	3.0	03:01:23:41	8	26.22	101.90	2.9	4.2	5.2	20.8	
32	5.6	31:16:31:09	12	26.25	101.97	271.7	404.4	171.6	30.4	
33	3.5	16:35:16	3	26.20	101.95	8.2	5.5	4.8	30.2	
34	3.3	16:40:52		26.20	101.93	7.2	6.4	3.3	29.6	
35	4.9	17:34:48	12	26.23	101.97	67.5	71.7	47.3	28.8	
36	4.4	19:00:29	11	26.23	101.95	22.5	17.9	18.4	29.6	
37	3.2	19:41:21	10	26.22	101.95	10.7	8.9	7.1	29.6	
38	3.0	03:01:23:41	8	26.22	101.90	4.2	2.5	2.5	29.6	

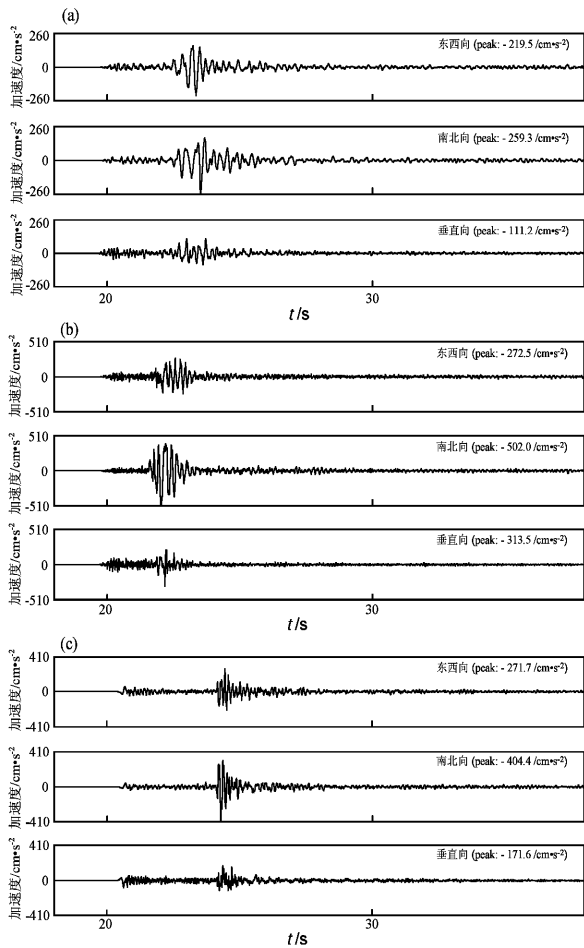


图2 攀枝花5.6级余震流动观测加速度记录  
(a) 拉鲊村台; (b) 仁和镇台; (c) 永仁地震局台  
Fig.2 Strong motion recordings of the main  
aftershocks of  $M_s6.1$  Panzhihua.  
(a) Lazha station; (b) Renhe station; (c) Yongren station

## 4 地震动的一些特征

### 4.1 5.6级强余震等震线图

利用现场流动强震台观测结果, 结合周边固定强震台的记录, 绘制出  $M_s5.6$  强余震地震动等值线图 (图3)。虽然东南部未建强震台而缺乏记录, 使图中等震线在东南部缺失, 但从图中仍可以看出, 5.6级等震线长轴方位与6.1级主震地震动等值线<sup>①</sup>的方位较为一致, 与此次地震的灾评烈度长轴方向大体一致, 这反映出了主、余震区域应力环境的同一性。

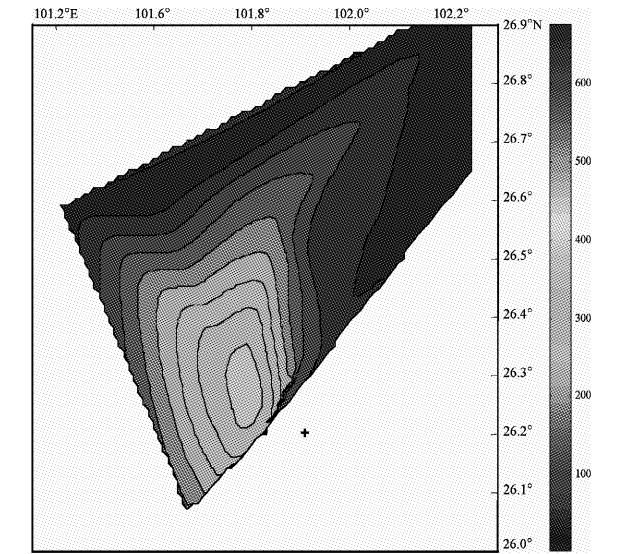


图3 5.6级强余震等值线图 (+ :  $M_s5.6$  地震震中)  
Fig.3 Acceleration contour (isoline) of  $M_s5.6$   
(+ : the epicenter of  $M_s5.6$ )

### 4.2 强震动峰值特征与震源机制

表5给出了攀枝花6.1级主震与5.6级余震的震源机制解<sup>②</sup>, 节面I与节面II正交, 其走向分别呈近东西向和近南北向。从表7中可知, 分别位于震中南面、南西面和北面的永仁地震局台、平地镇台、拉鲊村台的  $M \geq 4$  强余震观测台记录的加速度峰值, 除了永仁地震局台4.4级地震记录的出现EW向外, 其余均出现在SN向上。这表明发震构造运动为近南北向走滑错动。由此可判定5.6级强余震的震源机制解的节面II即为震源错动面、发震构造亦即为近南北走向的磨盘山—绿汁江断裂。

表5 攀枝花6.1级主震与5.6级余震震源机制解  
Tab.5 Dissolution of focus mechanism for  $M_s6.1$   
and  $M_s5.6$  in Panzhihua

地震	节面	Strike	Dip	Rake	应力轴	Azimuth	Plunge
6.1级	I	294	75	-179	P	158	11
	II	204	89	-15	T	250	10
					N	114	1
5.6级	I	285	67	-169	P	146	23
	II	191	80	-23	T	240	8
					N	101	10

① 李世成, 崔建文. 2009. 攀枝花6.1级地震加速度记录分析.  
② 刘丽芳. 2008. 攀枝花6.1级及5.6级地震震源机制解.

4.3 P 波段频谱特征及多普勒效应

很多研究者研究了地震波的多普勒效应（周云好等，2002；许向彤等，1995）。这种效应，在攀枝花地震强余震的强震动观测记录中也存在。在地震破裂传播方向上，地震波的周期变短，在其相反方向上，地震波的周期变长，对某些较大地震，这种地震多谱勒效应从宽频数字化记录中能够比较清楚地观测到（陈运泰等，1990；Aki，

Richards，1980）；同样，在强震动数字化记录图也能较清楚地显示出来。

由于 5.6 级与 4.9 级余震相对于 3 个流动观测台的震源距均在 31 km 内，且  $\bar{S} - \bar{P}$  在 1.75 ~ 3.75 s 之间，故将 3 个台记录的强震动加速度时程 S 波震相之前部分的 P 波裁截下来，绘制出 5.6 级与 4.9 级余震的 P 波三分向波形图（图 4），并分别计算该段 P 波的主频（表 6）。

表 6 攀枝花 5.6 级、4.9 级强余震加速度记录三分向 P 波主频

Tab. 6 Predominant frequency of three channels of P wave of  $M_s$  5.6 and  $M_s$ 4.9

观测台	震源距/km	P 波主频			地脉动卓越频率判断场地类别		
		E - W	S - N	U - D	$f/\text{Hz}$	场地类别	
5.6 级	拉鲊村台	22.4	3.3	4.5	8.6	7.1	Ⅱ类，中硬场地土
	平地镇台	16	7.0	14.8	10.5	9.6	Ⅱ类，中硬场地土
	永仁地震局台	30.4	7.8	6.8	11.1	8.3	Ⅱ类，中硬场地土
4.9 级	拉鲊村台	24	5.6	5.4	8.5	7.1	Ⅱ类，中硬场地土
	平地镇台	15.2	8.6	11.5	10.5	9.6	Ⅱ类，中硬场地土
	永仁地震局台	28.8	8.2	9.7	10.9	8.3	Ⅱ类，中硬场地土

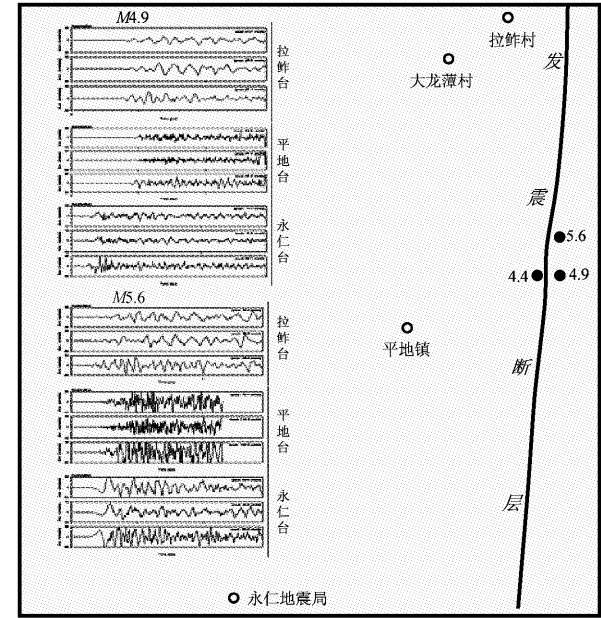


图 4 攀枝花 5.6 级、4.9 级地震 3 个流动台加速度记录 P 波波形比较

Fig. 4 Comparison with P wave shapes of acceleration records for  $M_L$  5.6 and  $M_L$  4.9 in three stations

从图 4 和表 6 中可见：① P 波显示出了明显的方向性效应。震中北面的拉鲊台记录到的 P 波周期较长，衰减慢；而位于震中西南方向的平地台和永仁地震局台记录到的 P 波周期短、衰减较快。

这种差别在 P 波水平向分量的频率上表现得突出，在垂直向分量上相对小一些；② 从表 7 和图 2 中可知，拉鲊台记录的三分向加速度峰值，比其余两个观测台的记录要小 19% ~ 72.3%，差别大，而拉鲊台的震源距只是永仁台的 73. % ~ 83%。这与区域地震动衰减特征相背（崔建文等，2006；李世成等，2003）；③ 3 个台台址的地脉动卓越频率很相近、场地类别一样，并且 3 个台均架设在建筑物内水泥地面上。这些说明场地作用对造成各台地震动记录频谱间差异的贡献应较小；④ 过分别对震中以北的拉鲊台和震中以南的永仁台记录的 5.6 级地震 P 波加速度，作窗长 20 Hz 的频谱滑动分析，结果表明：拉鲊台 P 波的频率随时间变小，永仁台 P 波的频率则随时程变大；⑤ 由震源机制解、强震动记录推断本次发震构造运动为近南北向的走滑错动。综合以上 5 点，可以推测：强余震的震源破裂是由初始破裂点开始向南延伸的；3 个台 P 波主频的差异，以及震中距比永仁地震局台小的拉鲊台、其三分向加速度峰值记录却大幅低于前者记录值的衰减异常现象，正是地震波多普勒效应的表现。

4.4 强余震地震动衰减特征

此次强震动流动观测，获取了 6.1 级主震的全部  $M \geq 4.0$  余震的近场记录，表 7 列出了各流动观

测点余震的强震动加速度峰值参数及它们的震源距。由于流动观测点大致沿发震断层走向布设,从表中可看出:①随着震源距的加大,各分向加速度峰值总体上呈逐渐衰减变小的变化;②处在

震中北西面的拉鲊台,尽管震源距比震中南西面的永仁台要小,但记录的加速度峰值在 4 个流动观测台的记录中为最小。推测这是由地震动多普勒效应所致。

表 7 各流动观测点获取的  $M \geq 4.0$  地震的峰值加速度及  $\bar{S} - \bar{P}$

Tab. 7 Max acceleration value and  $\bar{S} - \bar{P}$  of  $M \geq 4.0$  aftershakes observed by mobile observation stations

地震事件	观测点	震中距/km		峰值加速度/gal			$\bar{S} - \bar{P}/s$	震源距/km
		中国地震台网	云南地震台网	EW 向	NS 向	UD 向		
$M_s5.6$	平地镇政府	7.1	15.1	272.5	502.0	313.5	1.9	15.2
	拉鲊村	18.5	13.6	219.5	259.3	111.2	2.8	22.4
	永仁地震局	27.8	36.7	271.7	404.4	171.6	3.8	30.4
$M_s4.9$	平地镇政府	4.1	14.5	209.2	265.1	83.3	2.0	16
	拉鲊村	19.1	15.7	57.9	92.6	31.8	3.0	24
	永仁地震局	25.4	35.0	67.5	71.7	47.3	3.6	28.8
$M_s4.4$	平地镇政府	0.3	12.5	203.3	311.2	57.5	1.7	13.6
	大龙潭村	16.5	14.9	58.1	76.5	25.4	2.7	21.6
	拉鲊村	20.6	15.2	34.2	35.7	24.0	3.1	24.8
	永仁地震局	22.7	33.8	22.5	17.9	18.4	3.7	29.6

4 结语

攀枝花 6.1 级地震后,强震流动观测快速响应,在震区迅速、合理地布设了由 4 个观测点组成的沿发震构造走向分布的强震动观测台阵,获取了一批有价值的强余震近场地面运动记录。特别是后期通过对本次台阵所取得的强震记录分析,首次找到了存在于强地震动加速度时程中的多普勒效应。这为今后强震动观测资料的使用、以及强震动流动台流动站的布设,提供了有益的经验。

参考文献:

崔建文,李世成,高东,等. 2006. 云南分区地震动衰减关系[J]. 地震研究,29(4):386-391.

崔建文,李正光,赵云旭. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震强震动观测记录[J]. 地震研究,30(4):384-387.

胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京,地震出版社,91-104.

李坪. 1977. 西南地区地震地质及烈度区划探讨[M]. 北京:地震出版社.

李山有. 2004. 强震动观测的应用[J]. 东北地震研究,20(4):64-741

李世成,崔建文,韩新民. 2003. 云南地区地震烈度衰减特征研究[J]

. 中国地震,2003,19(3):287-294.

李世成,周攀,崔建文,等. 2008. 2006 年盐津 5 级中强地震群的强震动观测[J]. 地震研究,31(增刊):556-562.

温瑞智. 2009. 汶川  $M_s8.0$  地震的强余震流动观测[J]. 地震学报,31(2):219-225.

谢礼立,于双久. 1982. 强震观测与分析原理[M]. 北京:地震出版社.

许向彤,陈运泰,王培德. 1999. 1995 年 7 月 20 日怀来盆地  $M_L = 4.1$  地震的破裂过程[J]. 地震学报,21(6):570-582.

周云好,许力生,陈运泰. 2002. 2000 年 6 月 4 日印度尼西亚苏门答腊南部  $M_s8.0$  地震的震源机制[J]. 地震学报,24(5):462-469.

Aki K,Richards P G. 1980. Quantitative Seismology. Theory and Methods [M]. San Francisco:W. H. Freeman and Co,28-119.

Boore D M,Bommer J J. 2005. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,25(2):93-115.

Boore D M,Stephens C D ,Joyner W B. 2002. Comments on baseline correction of digital strong motion data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake[J]. BSSA,92(4):1543-1560.

GB/T17742-2008,中国地震烈度表[S].

Li xiaojun,Zhou zhenghua,Yu haiyin, et al. 2008. Strong motion observation and recordings from the great Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,7(3):1-12.

## Mobile Observations of the Aftershocks in Panzhihua $M_s6.1$

LI Shi-cheng, ZHANG Qian, ZHENG Ding-chang, GAO Dong, LIU Qiong-xian, CUI Jian-wen

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

### Abstract

The strong motion recordings of mobile observations for the aftershocks of Panzhihua  $M_s6.1$  in 30 August 2008 are processed and analyzed. The isoline of aftershock  $M_s5.6$  are drawn. The relevant questions are discussed. It is found that P wave shows the directionality; strong aftershocks of acceleration time history presents the Doppler effect through analysis for the  $P$  wave. This would provide useful experiences for the arrangement of the strong motion mobile observation stations and the utilization of the strong-motion recordings in future.

**Key words:** Panzhihua earthquake, strong ground motion, mobile observation, the Doppler effect