

2009年姚安 M_s 6.0 强震动应急观测^{*}

李世成, 崔建文, 张 潜, 高 东, 刘琼仙, 段建新, 包一峰, 黄晓东

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 介绍了2009年姚安 M_s 6.0 地震强震动应急流动观测台站的布设、记录获取及初步处理结果等情况, 并对此次地震余震的高加速度峰值、低地震烈度等有关问题予以讨论, 结果认为: 场地条件对地面地震动峰值影响较大; 高地震动峰值的相对持时短是此次4.7级余震震害轻的主要原因。

关键词: 姚安地震; 流动观测; 峰值加速度; 震灾快评

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0322-09

0 引言

强震动观测是利用强震仪记录地震, 尤其是强震产生的地面运动过程和工程结构的地震反应过程, 为地震动特性及工程结构的地震反应等研究提供可靠的资料。随着观测技术、通讯技术等不断进步, 强震动观测的应用范围在不断拓展。近些年来, 强震观测不仅服务于大震应急的烈度速报、地震速报、城市及重大工程的地震预警及其紧急处置等应急领域, 还广泛用于强震的震源机制、地震动特性、地震动衰减关系及其标准设计反应谱等研究以及场地地震影响、土-结相互作用、结构地震反应及结构地震破坏机理、抗震分析方法检验等地震学和地震工程学方面的研究, 直接服务于地震科研与防震减灾工作(李小军等, 2008; 温瑞智, 2009; 李山有等, 2002, 2004; 崔建文等, 2007, 2008, 李世成, 2008, 2009)。因此, 获取有价值的强震记录是强震观测的基本及首要任务。

2009年7月9日19点19分云南省姚安县发生 M_s 6.0 地震, 随后云南省地震局应急队员携带5台强震观测仪立即赶赴震区开展强震动流动观测工作。自7月9日23点至7月13日12点, 5台流动强震仪共捕获196个地震事件, 共计588条加速度记录, 其中包括观测期间震区发生的5.2级、4.7级和4.6级强余震在内的所有 $M_s \geq 3.0$ 余震。记录中地震动峰值加速度大于200 Gal 的有9条, 最

大地震动峰值为官屯乡台记录的4.7级地震, 其峰值加速度为684 Gal, 创云南同震级档加速度峰值记录之最。这些记录弥补了地震区周边因无固定强震台站而缺乏近震记录的空白, 不仅对分析确定此次地震震害具有定量的佐证作用, 而且为研究近场小震的加速度高峰值低烈度现象, 以及地震动的峰值、持时、频谱等与地震宏观烈度之间的关系等提供了重要数据。

1 震区构造背景、地震参数及烈度分布简况

姚安 M_s 6.0 地震发生在川滇菱形块体南部的滇中—新生代沉积盆地区的中南部。震区处于楚雄—建水断裂与通海—牟定断裂这两条北西向展布的区域性地震活断层北西端隐伏段所挟持的上地幔小隆起构造内(毛玉平, 万登堡, 2001)。震区内地表未见深大活动断裂。震区所在的姚安、大姚地区, 中强地震活动频繁, 仅最近一个活动期的十几年内, 就先后发生了1993年2月1日大姚 M_s 5.3、1993年8月14日姚安 M_s 5.6、2000年1月15日姚安 M_s 6.5、2003年7月21日大姚 M_s 6.2、2003年10月16日大姚 M_s 6.1, 以及此次2009年7月9日姚安 M_s 6.0 地震。与云南其他地区相比, 震区的地震活动具有中等强度频发及显著的原地重复性的特点。表1列出了2009年7月9日 M_s 6.0 主震及主要强余震参数。

^{*} 收稿日期: 2010-09-16.

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。

表 1 2009 年姚安 $M_s6.0$ 地震序列的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of earthquake sequence of Yao'an $M_s6.0$ earthquake on July 9, 2009

| 序号 | 震级 M_s | 发震时间 | | 震中位置 | | | 震源深度/km |
|----|----------|------------|------------|-------------|-------------|--------|---------|
| | | 年-月-日 | 时:分:秒 | φ_N | λ_E | 参考地名 | |
| 1 | 6.0 | 2009-07-09 | 19:19:14.2 | 25.60° | 101.05° | 官屯、左门间 | 10 |
| 2 | 5.2 | 2009-07-10 | 17:02:00.8 | 25.57° | 101.00° | 官屯、左门间 | 14 |
| 3 | 4.6 | 2009-07-10 | 20:57:29.7 | 25.59° | 101.00° | 官屯 | 14 |
| 4 | 4.7 | 2009-07-13 | 00:01:19.3 | 25.55° | 101.05° | 官屯 | 9 |

姚安 $M_s6.0$ 地震宏观震中位于姚安县官屯乡官屯村至马游村一带。地震造成姚安、大姚等县的部分房屋破坏, 生命线工程及水利等基础设施的损坏。极震区烈度为Ⅷ度, 呈椭圆形分布在姚安县境内的官屯乡和左门乡部分地区。Ⅶ度区亦呈椭圆形分布在姚安县与大姚县境内的部分地区。椭圆长轴走向北西。此次流动观测台站主要布设在Ⅷ度区和Ⅶ度区内 (图 1)。

2 观测仪器及主要技术参数

流动观测使用了 5 台 K2 型美国 Kinemetrics 公司生产的集三分向力平衡加速度计、记录器和 GPS 于一体的固态数字存储强震仪。使用的传感器为内置力平衡式 3 分量 ES-T 加速度计。仪器系统的动态范围大于等于 108 dB, 频响范围为 DC 到 80 Hz, 可记录的最大加速度值为 $\pm 2g$ 。时间服务系统采用 GPS 授时。近几年的观测使用情况表明, 此类仪器记录质量好、温度适应范围较大、传感器零位温度漂移小, 仪器稳定性能好, 携带方便 (Li *et al*, 2008; 李世成等, 2008)。

3 流动观测台网布设

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, 以获取有更广泛使用价值的强震动资料的一种机动性很强的观测手段 (胡聿贤, 2006; 温瑞智, 2009; 李山有等, 2004; 崔建文等, 2007; 李世成等, 2008)。由于震区地表活动构造显露不明显, 在制定此次强震流动台布设

方案时, 主要根据现场震情趋势判断意见, 并兼顾仪器运行环境、巡检维护及交通等因素, 将观测点布设在震中区附近民居集中的乡镇、村落和水库坝基上 (表 2、图 1)。

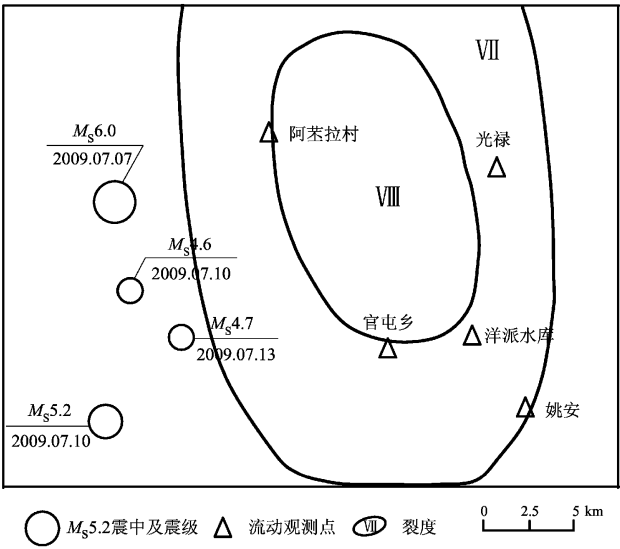


图 1 姚安地震主余震及强震动流动观测台分布示意图

Fig. 1 Distribution of the strong motion mobile observation stations and mainshock-aftershock of Yao'an $M_s6.0$ earthquake

4 强震动记录

此次流动观测, 5 台强震仪共捕获 196 个强余震事件。对这些原始加速度记录进行处理 (谢礼立, 于双久, 1982; Boore, Bommer, 2005; 金星等, 2008), 主要包括噪声滤波、记录校正、速度和位移时程计算、地震动 70% 和 90% 的相对能

表 2 流动观测强震台布设简况

Tab. 2 Informations of mobile observation stations of strong motion

| 地 点 | 仪器—编号/方位 | 场地条件简述 | 观测对象 | 触发值/Gal | 观测时间 |
|--------|------------|-------------|---------|---------|-----------------------|
| 姚安县县城 | K2—2290Y/北 | Ⅲ类,盆地内、土层 | 自由地表 | 2 | 7月9日23:40~7月13日12:00 |
| 官屯乡政府 | K2—2282Y/南 | Ⅱ类,低丘坡麓、土层 | 二层砖混房地面 | 2 | 7月10日00:55~7月13日13:00 |
| 官屯小学 | K2—2293Y/北 | Ⅱ类,低丘边坡、土层 | 平房内 | 4 | 7月10日01:50~7月10日10:00 |
| 左门乡阿基村 | K2—2545Y/北 | Ⅰ类,山坡,基岩风化层 | 二层砖混房地面 | 4 | 7月10日10:20~7月13日11:00 |
| 光禄镇政府 | K2—2555Y/南 | Ⅱ类,盆地内,土层 | 平房内 | 4 | 7月10日13:10~7月13日14:10 |
| 洋派水库 | K2—2293Y/南 | Ⅰ类,山坡,基岩风化层 | 二层砖混房地面 | 4 | 7月10日16:55~7月13日15:00 |

量持时及 1/5 峰值持时的计算、反应谱和傅立叶谱等的计算，以及绘制加速度时程图。表 1 中的地震参数引自云南防震减灾网^①。

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_{ϕ} 为虚拟波速度，取 $V_{\phi} = 8.0 \text{ km/s}$ 。现将主要事件的处理结果分台论述。

4.1 姚安县地震局流动观测台

该台架设在姚安县城内县地震局办公楼前的绿化草坪内。将 K2 - 2290 型强震仪安置在已建成

的仪器墩上，接入 220 V 交流电源。参数设置：触发值 2 Gal，采样率 200 sps，前置时间 20 s，后置时间 20 s。自 7 月 10 日至 13 日共记录到 21 个地震事件（表 3、图 2）。

4.2 官屯乡政府流动观测台

台站架设在官屯乡政府单层会议大楼储存间内。将 K2 - 2282 型强震仪安置水泥地面上，接 220 V 交流电源。触发值 2 Gal，采样率 200 sps，前置时间 20 s，后置时间 20 s。自 7 月 10 日至 13 日共记录 78 个地震事件（表 4、图 3）。

表 3 姚安县城流动观测台站获取的主要地震动事件的强震动记录

Tab. 3 Strong motion recordings of main seismic event recorded at mobile station in Yao'an

| 序号 | 地震参数 | | | | | | 峰值加速度/Gal | | | 震源距 /km | 持时/s | | |
|----|----------|------|----------|-------|--------|--------|-----------|------|------|------------|------|-----|------|
| | 震级 M_s | 发震时间 | | 深度/km | 纬度/(°) | 经度/(°) | EW | SN | UD | | 90% | 70% | 1/5 |
| | | 日 | 时:分:秒 | | | | | | | | | | |
| 1 | 3.0 | 10 | 01:11:51 | 13 | 25.33 | 101.02 | 1.8 | 2.9 | 1.0 | 30.8 | | | |
| 2 | 3.4 | | 03:51:07 | 14 | 25.34 | 101.02 | 2.9 | 3.6 | 2.9 | 25.7 | | | |
| 3 | 3.5 | | 04:56:49 | 11 | 25.32 | 101.06 | 7.9 | 11.6 | 4.6 | 21.3 | | | |
| 4 | 3.3 | | 05:43:43 | 13 | 25.34 | 101.03 | 2.9 | 3.2 | 4.0 | 27.9 | | | |
| 5 | 3.9 | | 08:36:30 | 14 | 25.35 | 101.01 | 28.3 | 19.7 | 8.3 | 29.7 | | | |
| 6 | 5.2 | | 17:02:00 | 14 | 25.34 | 101.01 | 88.1 | 70.1 | 30.3 | 29.8 | 16.8 | 6.7 | 11.8 |
| 7 | 3.3 | | 18:04:35 | 12 | 25.34 | 101.01 | 6.3 | 3.6 | 2.3 | 29.1 | | | |
| 8 | 4.6 | | 20:57:29 | 14 | 25.35 | 101.00 | 53.7 | 37.6 | 16.8 | 28.8 | 7.6 | 3.1 | 7.7 |
| 9 | 3.4 | | 23:16:49 | 13 | 25.32 | 101.06 | 7.7 | 10.7 | 5.7 | 23.3 | | | |
| 10 | 3.7 | 11 | 01:49:40 | 14 | 25.35 | 101.00 | 4.4 | 4.9 | 4.4 | 30.7 | | | |
| 11 | 3.3 | 12 | 18:29:06 | 8 | 25.36 | 101.01 | 6.6 | 7.0 | 3.6 | 31.6 | | | |
| 12 | 4.7 | 13 | 00:01:19 | 9 | 25.33 | 101.03 | 97.6 | 91.2 | 64.3 | 26.4 | 11.8 | 4.3 | 10.6 |
| 13 | 3.6 | | 01:04:28 | 10 | 25.32 | 101.04 | 5.1 | 11.1 | 7.1 | 24.9 | | | |
| 14 | 3.3 | | 01:08:34 | 10 | 25.34 | 101.04 | 5.2 | 4.9 | 15.3 | 24.8 | | | |

① 2009 年姚安 6.0 地震强震动流动观测的数据处理及震害启示. 待刊.

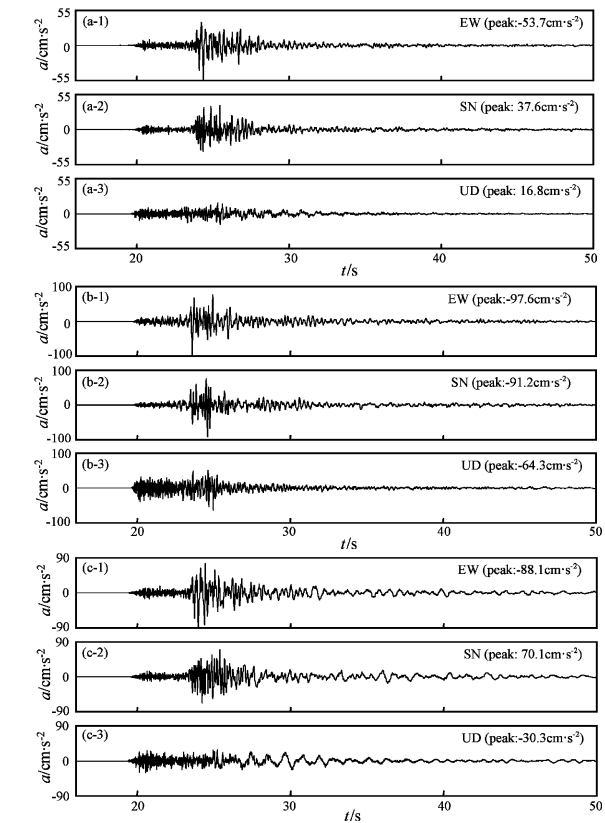


图2 姚安县城流动观测台地震加速度记录
(a) $M_s4.6$; (b) $M_s4.7$; $M_s5.2$

Fig. 2 Seismic acceleration recordings recorded at mobile station in Yao'an.

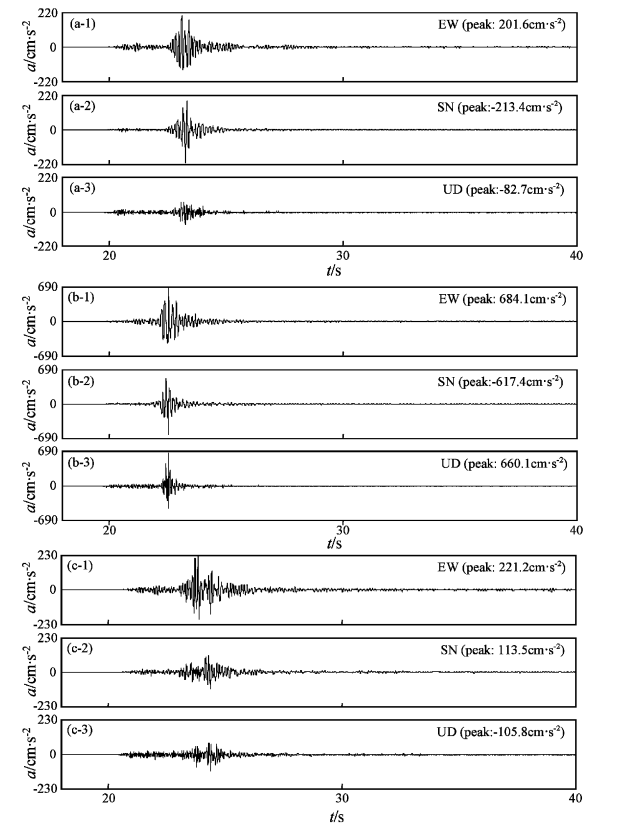


图3 官屯乡政府流动观测台地震加速度记录
(a) $M_s4.6$; (b) $M_s4.7$; (c) $M_s5.2$

Fig. 3 Seismic acceleration recordings recooded at mobile station in the court yard of Guantun country goverment.

表4 官屯乡政府流动观测台获取的主要地震动事件的强震动记录

Tab. 4 Strong motion recordings of the main seismic events recorded at mobile station in the courtyand of Guantun government

| 序号 | 地震参数 | | | | | | 峰值加速度/Gal | | | 震源距 /km | 持时/s | | |
|----|----------|-----------------|----------|-------|------------------------|------------------------|-----------|------|------|------------|------|-----|-----|
| | 震级 M_s | 发震时间 日 时:分:秒 | | 深度/km | $\varphi_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | EW | SN | UD | | 90% | 70% | 1/5 |
| 1 | 3.0 | 10 | 01:11:51 | 13 | 25.33 | 101.02 | 8.3 | 4.3 | 2.8 | 17.7 | | | |
| 2 | 2.3 | | 01:13:05 | 5 | 25.44 | 101.19 | 2.6 | 0.9 | 0.6 | 18 | | | |
| 3 | 2.3 | | 01:27:22 | 12 | 25.33 | 101.02 | 3.5 | 1.6 | 0.8 | 16.8 | | | |
| 4 | 2.9 | | 01:29:35 | 13 | 25.33 | 101.02 | 6.2 | 3.8 | 2.9 | 22.4 | | | |
| 5 | 2.0 | | 02:50:23 | 14 | 25.32 | 101.05 | 8.2 | 5.1 | 4.0 | 13.1 | | | |
| 6 | 2.5 | | 02:53:24 | 15 | 25.34 | 101.03 | 7.8 | 3.2 | 2.3 | 17.5 | | | |
| 7 | 1.9 | | 03:41:31 | 12 | 25.31 | 101.04 | 2.8 | 1.3 | 0.8 | 12.9 | | | |
| 8 | 3.4 | | 03:51:07 | 14 | 25.34 | 101.02 | 26.8 | 13.4 | 6.8 | 19.2 | | | |
| 9 | 2.7 | | 04:28:43 | 13 | 25.33 | 101.02 | 5.9 | 4.4 | 2.4 | 17.3 | | | |
| 10 | 2.7 | | 04:31:57 | 13 | 25.33 | 101.02 | 5.1 | 2.4 | 1.9 | 18.9 | | | |
| 11 | 2.0 | | 04:54:51 | 12 | 25.33 | 101.02 | 2.9 | 1.5 | 0.8 | 14.6 | | | |
| 12 | 3.5 | | 04:56:49 | 11 | 25.32 | 101.06 | 23.4 | 19.9 | 13.7 | 12.8 | | | |
| 13 | 2.4 | | 05:24:38 | 11 | 25.31 | 101.06 | 2.2 | 2.9 | 1.4 | 13.1 | | | |
| 14 | 2.5 | | 05:26:56 | 12 | 25.34 | 101.03 | 4.4 | 2.6 | 1.8 | 19.5 | | | |
| 15 | 3.3 | | 05:43:43 | 13 | 25.34 | 101.03 | 8.5 | 8.6 | 5.3 | 17.1 | | | |
| 16 | 1.5 | | 05:44:16 | 14 | 25.35 | 101.04 | 2.5 | 1.2 | 1.2 | 17.6 | | | |
| 17 | 2.7 | | 05:56:42 | 12 | 25.31 | 101.06 | 9.1 | 8.2 | 7.9 | 12.6 | | | |

续表 4

| 序号 | 地震参数 | | | | | 峰值加速度/Gal | | | 震源距 /km | 持时/s | | |
|----|----------|-------------|-------|------------------------|------------------------|-----------|-------|-------|------------|------|------|------|
| | 震级 M_s | 发震时间 | 深度/km | $\varphi_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | EW | SN | UD | | 90% | 70% | 1/5 |
| | | 日 时:分:秒 | | | | | | | | | | |
| 18 | 2.8 | 06:05:45 | 12 | 25.32 | 101.05 | 3.7 | 2.9 | 1.7 | 13.0 | | | |
| 19 | 2.3 | 06:08:20 | 15 | 25.34 | 101.04 | 5.9 | 3.5 | 3.8 | 10.6 | | | |
| 20 | 2.1 | 06:24:59 | 12 | 25.34 | 101.04 | 3.0 | 1.2 | 1.0 | 22.6 | | | |
| 21 | 2.4 | 06:32:33 | 12 | 25.34 | 101.02 | 6.6 | 2.7 | 2.6 | 18.9 | | | |
| 22 | 3.9 | 08:36:30 | 14 | 25.35 | 101.01 | 133.3 | 61.4 | 66.1 | 18.5 | | | |
| 23 | 2.3 | 09:47:21 | 13 | 25.35 | 101.03 | 6.4 | 3 | 2.4 | 18.4 | | | |
| 24 | 2.5 | 09:51:12 | 5 | 25.33 | 101.02 | 5.1 | 4.7 | 2.3 | 16.6 | | | |
| 25 | 2.0 | 10:06:04 | 13 | 25.33 | 101.04 | 2.6 | 1.9 | 1.2 | 18.9 | | | |
| 26 | 2.2 | 10:44:06 | 5 | 25.44 | 101.19 | 5.2 | 1.8 | 2.8 | 10.6 | | | |
| 27 | 2.4 | 11:30:23 | 16 | 25.34 | 101.04 | 3.8 | 2.4 | 1.4 | 19.4 | | | |
| 28 | 1.9 | 13:55:59 | 12 | 25.32 | 101.03 | 2.6 | 0.9 | 1 | 20.3 | | | |
| 29 | 2.2 | 15:43:19 | 5 | 25.44 | 101.19 | 2.4 | 3.2 | 1.5 | 10.2 | | | |
| 30 | 5.2 | 17:02:00 | 14 | 25.34 | 101.01 | 221.2 | 113.5 | 105.8 | 20.2 | 3.86 | 1.48 | 3.18 |
| 31 | 2.9 | 17:05:11 | 12 | 25.35 | 101.01 | 3.2 | 2.2 | 3.0 | 33.2 | | | |
| 32 | 2.1 | 17:06:52 | 2.1 | 25.44 | 101.19 | 4.7 | 2.7 | 2.6 | 20.8 | | | |
| 33 | 2.5 | 17:08:30 | 5 | 25.44 | 101.19 | 4.5 | 3.9 | 1.9 | 18.0 | | | |
| 34 | 1.5 | 17:13:59 | 5 | 25.44 | 101.19 | 2.5 | 0.9 | 0.9 | 18.5 | | | |
| 35 | 3.0 | 17:29:52 | 13 | 25.33 | 101.03 | 2.9 | 2.2 | 2.1 | 16.6 | | | |
| 36 | 3.3 | 18:04:46 | 12 | 25.34 | 101.01 | 10.8 | 9.6 | 6.6 | 19.3 | | | |
| 37 | 2.6 | 18:57:08 | 12 | 25.31 | 101.06 | 5.1 | 4.2 | 4.3 | 9.5 | | | |
| 38 | 2.5 | 19:18:32 | 15 | 25.35 | 101.04 | 14.7 | 6.0 | 5.8 | 18.9 | | | |
| 39 | 1.9 | 19:33:56 | 5 | 25.35 | 101.04 | 4.8 | 1.5 | 1.8 | 18.0 | | | |
| 40 | 4.6 | 20:57:29 | 14 | 25.35 | 101.00 | 201.6 | 213.4 | 82.7 | 20.8 | 2.0 | 0.75 | 1.97 |
| 41 | 2.8 | 21:11:38 | 13 | 25.35 | 101.00 | 5.0 | 3.8 | 2.6 | 18.5 | | | |
| 42 | 2.6 | 21:19:52 | 5 | 25.33 | 101.02 | 2.4 | 1.6 | 1.2 | 18.9 | | | |
| 43 | 3.0 | 21:21:44 | 9 | 25.35 | 101.02 | 20.6 | 8.8 | 8.3 | 18.8 | | | |
| 44 | 2.8 | 22:36:27 | 5 | 25.34 | 101.01 | 2.5 | 2.2 | 1.2 | 18.9 | | | |
| 45 | 2.7 | 22:46:37 | 5 | 25.33 | 101.02 | 4.7 | 2.6 | 2.5 | 16.5 | | | |
| 46 | 2.3 | 23:13:06 | 8 | 25.35 | 101.02 | 2.5 | 0.9 | 0.8 | 14.7 | | | |
| 47 | 3.4 | 23:16:49 | 13 | 25.32 | 101.06 | 34.0 | 24.8 | 20.1 | 10.9 | | | |
| 48 | 2.6 | 23:23:40 | 5 | 25.32 | 101.06 | 7.0 | 3.8 | 3.4 | 11.3 | | | |
| 49 | 2.6 | 23:31:33 | 5 | 25.33 | 101.03 | 10.5 | 6.1 | 3.8 | 12.6 | | | |
| 50 | 2.5 | 11 01:05:51 | 13 | 25.34 | 101.03 | 5.1 | 4.3 | 2.0 | 17.1 | | | |
| 51 | 3.7 | 01:49:40 | 14 | 25.35 | 101.00 | 37.9 | 19.3 | 15.3 | 21.1 | | | |
| 52 | 1.8 | 02:36:11 | 5 | 25.31 | 101.06 | 2.7 | 1.9 | 1.2 | 11.1 | | | |
| 53 | 2.0 | 04:59:08 | 5 | 25.32 | 101.05 | 2.7 | 2.2 | 2.5 | 13.4 | | | |
| 54 | 2.4 | 09:53:35 | 12 | 25.34 | 100.59 | 2.4 | 1.3 | 0.8 | 19.4 | | | |
| 55 | 1.9 | 11:27:24 | 10 | 25.35 | 101.02 | 2.4 | 1.2 | 1.2 | 20.3 | | | |
| 56 | 2.3 | 12:47:44 | 16 | 25.35 | 101.00 | 4.2 | 2.3 | 2.4 | 19.9 | | | |
| 57 | 2.1 | 13:39:39 | 5 | 25.33 | 101.04 | 3.7 | 2.1 | 1.3 | 11.6 | | | |
| 58 | 3.1 | 21:42:19 | 16 | 25.36 | 101.01 | 11.8 | 5.2 | 5.8 | 21.1 | | | |
| 59 | 1.8 | 22:07:37 | 17 | 25.34 | 101.08 | 2.6 | 2.8 | 2.3 | 13.8 | | | |
| 60 | 2.8 | 12 02:34:38 | 16 | 25.35 | 101.01 | 6.7 | 2.6 | 1.3 | 13.4 | | | |
| 61 | 2.9 | 04:38:50 | 15 | 25.34 | 101.02 | 13.7 | 5.8 | 6.7 | 18.9 | | | |
| 62 | 2.4 | 07:04:33 | 8 | 25.35 | 101.02 | 3.0 | 2.0 | 1.1 | 16.6 | | | |
| 63 | 1.8 | 08:47:30 | 6 | 25.32 | 101.02 | 3.5 | 1.4 | 1.4 | 5.6 | | | |
| 64 | 3.3 | 18:29:06 | 8 | 25.36 | 101.01 | 14.4 | 7.7 | 5.0 | 20.4 | | | |
| 65 | 2.9 | 20:17:48 | 6 | 25.35 | 101.01 | 7.0 | 2.5 | 2.5 | 20.3 | | | |
| 66 | 4.7 | 13 00:01:19 | 9 | 25.33 | 101.03 | 684.1 | 617.4 | 660.1 | 18.1 | 1.63 | 0.64 | 0.95 |
| 67 | 2.3 | 00:54:30 | 10 | 25.33 | 101.01 | 4.1 | 1.7 | 1.3 | 19.4 | | | |
| 68 | 3.6 | 01:04:28 | 10 | 25.32 | 101.04 | 55.9 | 32.5 | 42.7 | 13.6 | | | |
| 69 | 3.3 | 01:08:34 | 10 | 25.34 | 101.04 | 33.1 | 25.3 | 17.0 | 13.5 | | | |
| 70 | 2.0 | 06:11:57 | 5 | 25.33 | 101.03 | 2.7 | 1.6 | 1.0 | 17.1 | | | |
| 71 | 2.0 | 09:42:56 | 5 | 25.34 | 101.03 | 2.7 | 2.0 | 0.9 | 18.0 | | | |

4.3 官屯小学、洋派水库流动观测台

7 月 10 日 1 点 30 分，在 $M_s6.0$ 地震极震区内的官屯小学教学平房内水泥地面上，架设 K2 - 2293 型观测仪，使用仪器自带电池供电。仪器参数设置：触发值 4 Gal，采样率 200 sps，前置时间 20 s，后置时间 20 s。由于极震区供电线路破坏，不能使用外接交流电源维持仪器运行，7 月 10 日 10 点将该台撤销，移至洋派水库，于 16 点 50 分开始运行。7 月 10 日至 13 日，该套观测仪共记录到地震事件地震事件 24 个（表 5、图 4）。

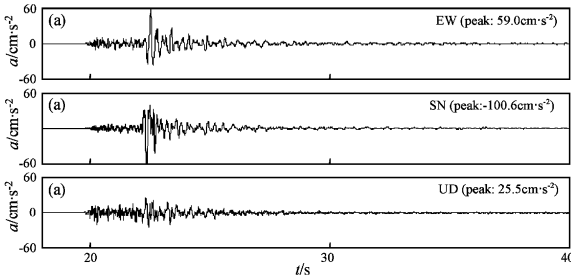


图 4 洋派水库流动观测台 $M_s4.7$ 地震加速度记录
Fig. 4 Seismic acceleration recordings recorded at mobile station in Yangpai reservoir

表 5 官屯小学、洋派水库流动观测台获取的主要地震动事件的强震动记录

Tab. 5 Strong motion recordings of the main seismic events recorded at mobile station in Guantun primary school-Yangpai reservoir

| 序号 | 地震参数 | | | | | 峰值加速度/Gal | | | 震源距 /km | 持时/s | | |
|----|----------|-----------------|-------|------------------------|------------------------|-----------|-------|------|------------|------|-----|-----|
| | 震级 M_s | 发震时间 日 时:分:秒 | 深度/km | $\varphi_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | EW | SN | UD | | 90% | 70% | 1/5 |
| 1 | 2.8 | 10 02:43:13 | 12 | 25.33 | 101.05 | 1.9 | 2.4 | 1.4 | | | | |
| 2 | 2.7 | 02:50:23 | 14 | 25.32 | 101.05 | 2.8 | 3 | 3.3 | 13.6 | | | |
| 3 | 2.5 | 02:53:24 | 15 | 25.34 | 101.03 | 3.6 | 3.3 | 2.6 | 13.6 | | | |
| 4 | 3.4 | 03:51:07 | 14 | 25.34 | 101.02 | 6.1 | 4.9 | 4.7 | 18.4 | | | |
| 5 | 2.7 | 04:28:43 | 13 | 25.33 | 101.02 | 2.5 | 3.5 | 1.8 | 16.5 | | | |
| 6 | 2.7 | 04:31:57 | 13 | 25.33 | 101.02 | 2.1 | 3.5 | 1.3 | 18.0 | | | |
| 7 | 3.5 | 04:56:49 | 11 | 25.32 | 101.06 | 28.6 | 19.9 | 9.1 | 11.8 | | | |
| 8 | 2.4 | 05:24:10 | 11 | 25.31 | 101.06 | 1.8 | 2.8 | 1.4 | 11.6 | | | |
| 9 | 3.3 | 05:43:43 | 13 | 25.34 | 101.03 | 3.5 | 4 | 5.6 | 18.2 | | | |
| 10 | 2.7 | 05:56:42 | 12 | 25.31 | 101.06 | 5.4 | 5.9 | 5.6 | 13.4 | | | |
| 11 | 2.8 | 06:05:45 | 12 | 25.32 | 101.05 | 4.5 | 3.3 | 3.1 | 12.6 | | | |
| 12 | 3.9 | 08:36:30 | 14 | 25.35 | 101.01 | 64.2 | 55.1 | 35.3 | 19.7 | | | |
| 13 | 5.2 | 17:02:00 | 14 | 25.34 | 101.01 | 23.5 | 30.9 | 15.9 | 22.5 | 8.4 | 3.3 | 9.8 |
| 14 | 4.6 | 20:57:29 | 14 | 25.35 | 101.00 | 13.7 | 23.1 | 15 | 24.6 | 8.5 | 1.9 | 7.7 |
| 15 | 4.7 | 13 00:01:19 | 9 | 25.33 | 101.03 | 59.0 | 100.6 | 25.5 | 21.1 | 5.3 | 1.7 | 4.3 |
| 16 | 3.6 | 01:04:28 | 10 | 25.32 | 101.04 | 6.5 | 9.6 | 5.6 | 16.2 | | | |
| 17 | 3.3 | 01:08:34 | 10 | 25.34 | 101.04 | 7.5 | 8.1 | 4.3 | 18.0 | | | |

4.4 阿苳拉流动观测台

K2 - 2545 型观测仪架设在姚安县左门乡阿苳拉村委会二层办公房一层。由 220 V 交流电源供电，参数设置：触发值 4 Gal，采样率 200 sps，前置时间 20 s，后置时间 20 s。7 月 10 日至 13 日共记录 43 个地震事件（表 6、图 5）。

4.5 光禄镇政府流动观测台。

该台架设在姚安县光禄镇政府会议室平房水泥地面上。仪器 K2 - 2555，接入 220 V 交流电源。参数设置：触发值 4 Gal，采样率 200 sps，前置时间 20 s，后置时间 20 s。7 月 10 日至 13 日共记录 39 个地震事件（表 7、图 6）。

表 6 阿芭拉流动观测台站获取的主要地震动事件的强震动记录

Tab. 6 Strong motion recordings of the main seismic events recorded at mobile station in Apiela

| 序号 | 地震参数 | | | | | | 峰值加速度/Gal | | | 震源距 | 持时/s | | | |
|----|----------|------|----------|-------|------------------------|------------------------|-----------|-------|-------|------|------|-----|------|-----|
| | 震级 M_S | 发震时间 | | 深度/km | $\varphi_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | EW | SN | UD | | /km | 90% | 70% | 1/5 |
| | | 日 | 时:分:秒 | | | | | | | | | | | |
| 1 | 5.2 | 10 | 17:02:00 | 14 | 25.34 | 101.01 | 265.6 | 155.3 | 144.5 | 12.5 | 2.8 | 1.9 | 2.7 | |
| 2 | 2.9 | | 17:05:11 | 12 | 25.35 | 101.01 | 6.8 | 4.4 | 7.7 | 23.2 | | | | |
| 3 | 2.1 | | 17:06:52 | 2.1 | 25.44 | 101.19 | 3.9 | 2.0 | 4.3 | 14.4 | | | | |
| 4 | 2.5 | | 17:08:30 | 5 | 25.44 | 101.19 | 5.7 | 4.1 | 3.2 | 26.9 | | | | |
| 5 | 3.0 | | 17:29:52 | 13 | 25.33 | 101.03 | 4.6 | 4.8 | 4.7 | 9.7 | | | | |
| 6 | 3.3 | | 18:04:46 | 12 | 25.34 | 101.01 | 18.3 | 15.5 | 7.8 | 14.7 | | | | |
| 7 | 2.2 | | 18:24:05 | 5 | 25.44 | 101.19 | 3.7 | 2.2 | 2.0 | 13.4 | | | | |
| 8 | 2.6 | | 18:57:08 | 12 | 25.31 | 101.06 | 3.0 | 2.9 | 5.1 | 11.5 | | | | |
| 9 | 2.5 | | 19:18:32 | 15 | 25.35 | 101.04 | 3.9 | 6.9 | 4.0 | 13.1 | | | | |
| 10 | 1.9 | | 19:33:56 | 5 | 25.35 | 101.04 | 3.5 | 2.2 | 1.4 | 12.8 | | | | |
| 11 | 2.0 | | 19:46:12 | 16 | 25.32 | 101.02 | 3.1 | 2.7 | 2.0 | 15.1 | | | | |
| 12 | 4.6 | | 20:57:29 | 14 | 25.35 | 101.00 | 103.5 | 88.7 | 56.6 | 17.2 | 3.3 | 2.1 | 3.5 | |
| 13 | 2.8 | | 21:11:38 | 13 | 25.35 | 101.00 | 2.6 | 3.9 | 6.7 | 8.9 | | | | |
| 14 | 2.6 | | 21:19:52 | 5 | 25.33 | 101.02 | 2.8 | 3.2 | 2.6 | 15.2 | | | | |
| 15 | 3.0 | | 21:21:44 | 9 | 25.35 | 101.02 | 21.2 | 20.2 | 9.5 | 13.9 | | | | |
| 16 | 2.7 | | 22:46:37 | 5 | 25.33 | 101.02 | 3.7 | 3.1 | 3.3 | 14.8 | | | | |
| 17 | 3.4 | | 23:16:49 | 13 | 25.32 | 101.06 | 11.8 | 10.3 | 7.9 | 11.9 | | | | |
| 18 | 2.6 | | 23:31:33 | 5 | 25.33 | 101.03 | 3.4 | 3.5 | 3.0 | 11.8 | | | | |
| 19 | 2.5 | 11 | 01:05:51 | 13 | 25.34 | 101.03 | 5.7 | 2.5 | 2.2 | 14.7 | | | | |
| 20 | 3.7 | | 01:49:40 | 14 | 25.35 | 101.00 | 34.5 | 15.4 | 22.2 | 14.7 | | | | |
| 21 | 2.4 | | 09:53:35 | 12 | 25.34 | 100.59 | 3.7 | 2.2 | 2.1 | 14.4 | | | | |
| 22 | 2.3 | | 12:47:44 | 16 | 25.35 | 101.00 | 4.6 | 3.9 | 3.7 | 15.2 | | | | |
| 23 | 3.1 | | 21:42:19 | 16 | 25.36 | 101.01 | 9.1 | 5.5 | 9.9 | 16.0 | | | | |
| 24 | 2.8 | 12 | 02:34:38 | 16 | 25.35 | 101.01 | 3.3 | 2.7 | 3.8 | 14.0 | | | | |
| 25 | 2.9 | | 04:38:50 | 15 | 25.34 | 101.02 | 12.4 | 9.4 | 9.4 | 14.4 | | | | |
| 26 | 3.3 | | 18:29:06 | 8 | 25.36 | 101.01 | 12.2 | 12.6 | 12.1 | 15.2 | | | | |
| 27 | 2.9 | | 20:17:48 | 6 | 25.35 | 101.01 | 6.7 | 5.6 | 5.7 | 14.1 | | | | |
| 28 | 4.7 | 13 | 00:01:19 | 9 | 25.33 | 101.03 | 263.0 | 358.5 | 76.8 | 16.1 | 2.9 | 0.6 | 0.74 | |
| 29 | 2.5 | | 00:08:18 | 6 | 25.33 | 101.05 | 5.7 | 3.9 | 3.3 | 13.6 | | | | |
| 30 | 3.6 | | 01:04:28 | 10 | 25.32 | 101.04 | 28.3 | 17.1 | 10.8 | 13.2 | | | | |
| 31 | 3.3 | | 01:08:34 | 10 | 25.34 | 101.04 | 25.3 | 25.1 | 16.4 | 13.4 | | | | |
| 32 | 2.0 | | 06:28:57 | 5 | 25.33 | 101.03 | 2.9 | 1.4 | 1.4 | 13.9 | | | | |

表 7 光禄镇观测台站获取的主要地震动事件的强震动记录

Tab. 7 Strong motion recordings of the main seismic events recorded at mobile station in Guanglu

| 序号 | 地震参数 | | | | | | 峰值加速度/Gal | | | 震源距 | 持时/s | | | |
|----|----------|------|----------|-------|------------------------|------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 震级 M_S | 发震时间 | | 深度/km | $\varphi_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | EW | SN | UD | | /km | 90% | 70% | 1/5 |
| | | 日 | 时:分:秒 | | | | | | | | | | | |
| 1 | 5.2 | 10 | 17:02:00 | 14 | 25.34 | 101.01 | 39.1 | 50.5 | 28.6 | 23.7 | 17.7 | 12.4 | 21.2 | |
| 2 | 3.3 | | 18:04:46 | 12 | 25.34 | 101.01 | 3.5 | 3.3 | 2.2 | 22.8 | | | | |
| 3 | 2.6 | | 18:57:08 | 12 | 25.31 | 101.06 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 18.1 | | | | |
| 4 | 4.6 | | 20:57:29 | 14 | 25.35 | 101.00 | 22.1 | 14.5 | 15.1 | 22.0 | 18.1 | 9.6 | 17.9 | |
| 5 | 3.3 | | 21:21:44 | 9 | 25.35 | 101.02 | 2.5 | 1.9 | .02 | 20.8 | | | | |
| 6 | 3.4 | | 23:16:49 | 13 | 25.32 | 101.06 | 6.4 | 3.7 | 5.9 | 16.6 | | | | |
| 7 | 3.7 | 11 | 01:49:40 | 14 | 25.35 | 101.00 | 3 | 3.1 | 3.5 | 18.2 | | | | |
| 8 | 3.3 | 12 | 18:29:06 | 8 | 25.36 | 101.01 | 3.8 | 4.1 | 3.4 | 6.4 | | | | |
| 9 | 4.7 | 13 | 00:01:19 | 9 | 25.33 | 101.03 | 75.5 | 80.4 | 46.6 | 17.8 | 10.1 | 3.7 | 10.5 | |
| 10 | 3.6 | | 01:04:28 | 10 | 25.32 | 101.04 | 19.9 | 13.8 | 12.1 | 18.8 | | | | |
| 11 | 3.3 | | 01:08:34 | 10 | 25.34 | 101.04 | 12.7 | 15.4 | 7.6 | 18.4 | | | | |

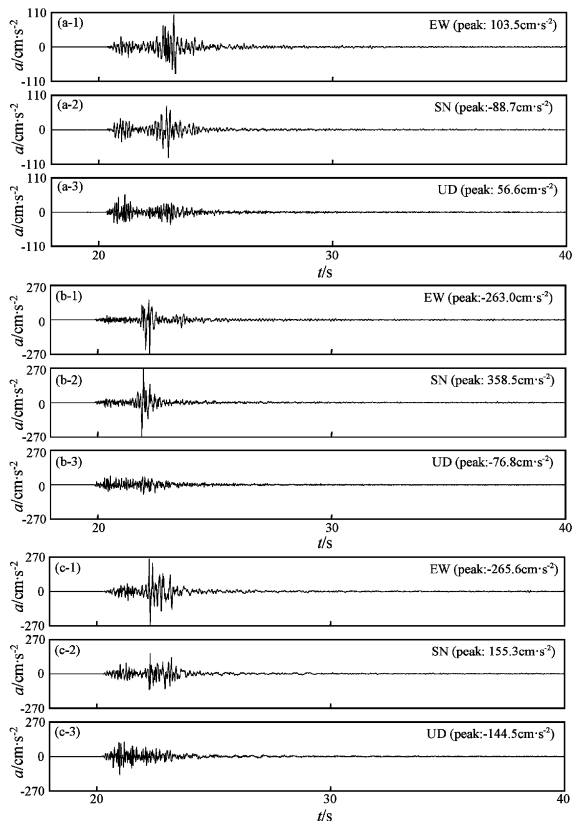


图5 阿荃拉流动观测台地震加速度记录
(a) $M_s4.6$; (b) $M_s4.7$; (c) $M_s5.2$
Fig. 5 Seismic acceleration recordings recorded at mobile station in Apiela

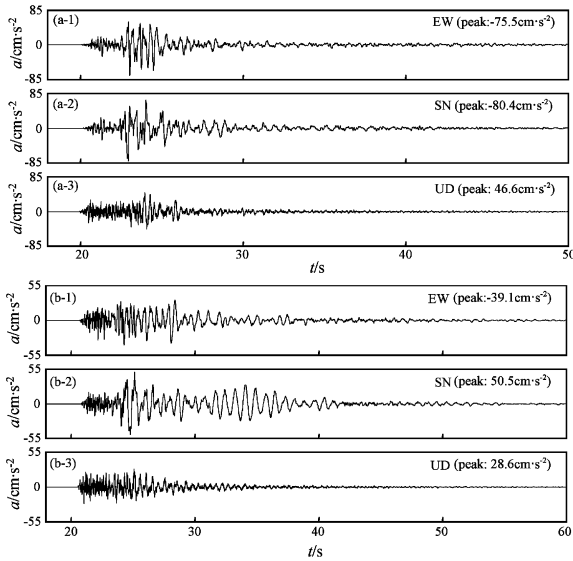


图6 光禄镇流动观测台地震加速度记录
(a) $M_s4.7$; (b) $M_s5.2$
Fig. 6 Seismic acceleration recordings recorded at mobile station in Guanglu

5 讨论

(1) 4.7级余震官屯记录点高峰值加速度与低烈度现象

此次观测，5个流动台获取了4.6级、4.7级余震的30条加速度时程记录，其中大于50 Gal的有20条，大于200 Gal的有7条。最大地震动峰值为官屯乡台记录的4.7级地震的684 Gal（E-W分向），且水平向合成地震动峰值达825 Gal（按《中国地震烈度表》（GB/T17742-2008）对应的地震烈度为X，这与该处震害及宏观烈度相差很大）。虽然地面加速度峰值大小与震源距直接相关（图7），但是场地条件的影响作用明显，有时甚至很大。图7中，光禄镇台与官屯台震源距相近，但峰值加速度相差8倍多。就此次流动观测台而言，震源相同，基底下传播介质同源，而各台站所处的盖层之沉积建造、地质构造发育、地形地貌等各不相同。官屯台地处低丘上部，与震中同处于姚安盆地，北西缘断裂西侧，台址土层为强风化基岩；光禄镇台位于姚安断陷盆地内，且与震中之间有姚安盆地北西缘断裂相隔，台址场地土层为第四系冲洪积堆积。两台站的场地条件差异很大。这些差异直接影响到地面地震动峰值的大小。尽管该处4.7级地震峰值加速度水平向合成达825 Gal、对应的地震烈度为X，但其地震动能量90%和70%的相对持时分别只有1.62 s和0.64 s，短持时是高加速度峰值的地震作用未使该处及周围震害加大加重的主要原因（记录仪安放的一层大

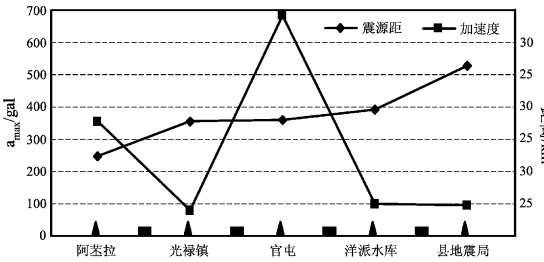


图7 4.7级余震各记录台加速度峰值与震源距分布关系

Fig. 7 Relation between the PGA recorded at different stations and focal distance from the stations in $M4.7$ aftershock

跨度钢混会议大楼未出现结构损坏或墙体开裂等地震破坏现象)。基于近些年获取的强震记录,深入开展中小地震的高加速度峰值低地震烈度新现象及其场地影响作用的专题研究,是很有意义的。

(2) 强震动记录与震灾快评

决定或影响构筑物地震震害轻重的因素复杂且多,包括地震动加速度的强度、频谱分布及持时,场地及地基条件,结构类型、工程材料及施工质量等。地表强震动记录真实地反映了地震弹性波在传播空间的强度分布。虽然用强震动记录很难把各点上的建构筑物震害程度表示出来,但是,采用适当的方法建立起地震动参数与地面某种典型建筑物破坏程度之间的关系,并广泛用于震灾快评、烈度速报等应急工作,是十分必要的。

感谢李小军博士、温瑞智博士亲临姚安地震现场对此次强震流动观测工作的指导。

参考文献:

- 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.
- 崔建文,卢大伟,高乐,等. 2008. 基于合成地震动的震区烈度划分[J]. 地震研究,31(4):388-392.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社.

- 金星,张红才,韦永祥. 2008. 基于地震台网资料快速发布的震动烈度标准及其应用研究[J]. 国际地震动态,(10):20-27.
- 李山有,金星,陈先,等. 2002. 地震动强度与地震烈度速报研究[J]. 地震工程与工程振动,22(6):2-8.
- 李山有,金星,马强,等. 2004. 地震预警系统与智能应急控制系统研究[J]. 世界地震工程,20(4):21-26.
- 李世成,张潜,崔建文,等. 2009. 2009 年攀枝花 M_s 6.1 地震余震的强震动观测[J]. 地震研究,32(增刊):449-455.
- 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.
- 李小军,周正华,于海英,等. 2008. 汶川 8.0 级地震强震动观测及记录初步分析[J]//《汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告》[C]. 中国建筑工业出版社.
- 毛玉平,万登堡. 2001. 2000 年云南姚安 6.5 级地震[M]. 昆明:云南科学技术出版社.
- 温瑞智. 2009. 汶川 M_s 8.0 地震的强余震流动观测[J]. 地震学报,31(4):220-224.
- 谢礼立,于双久. 1982. 强震观测与分析原理[M]. 北京:地震出版社.
- 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.
- GB/T17742-2008,中国地震烈度表[S].
- Li X J, Zhou Z H, Huang Moh, et al. 2008. Preliminary Analysis of Strong-Motion Recordings from the Magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of May, 2008[J]. Seismological Research Letters, 79(6):doi:10.1785/gssrl.79.6.844.

Emergent Strong-motion Observation of Yao'an M_s 6.0 Earthquake in 2009

LI Shi-cheng, CUI Jian-wen, ZHANG Qian, GAO Dong, LIU Qiong-xian,
DUAN Jian-xin, BAO Yi-feng, HUANG Xiao-dong
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Firstly, we introduce the emergency actions we took against the Yao'an M_s 6.0 earthquake on July 9, 2009, such as the deployment of the mobile stations of strong motion, the capture and process of the strong motion recordings of the Yao'an aftershocks, etc. Then, through discussing the phenomenon of the highpeak acceleration and low intensity of the M_s 4.7 aftershock, we find that the site condition has a significant effect on the peak of ground motion, and it is the short relative-duration of the peak-value of the aftershock that mainly caused serious damage despite the low intensity.

Key words: Yao'an earthquake; mobile observation; peak ground acceleration; earthquake damage rapid assessment