

# 2014年云南鲁甸6.5级地震强震动 观测记录及初步分析\*

崔建文, 刘琼仙, 段建新, 杨黎薇, 高东, 李世成,  
徐硕, 林国良, 张潜, 包一峰, 段洪杰

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 2014年8月3日云南鲁甸发生 $M_s6.5$ 地震, 在震中及其周边地区分布的中国数字强震动台网的81个台站获取了这次地震的主震强震动记录。特别是位于极震区鲁甸龙头山镇财政所强震动台, 完整记录到这次地震的地震动时程, 其东西向PGA达 $948.5\text{ cm/s}^2$ , 该台站周边多栋多层建筑物底层完全倒塌和损毁, 与记录所反映的强烈震动相吻合。初步分析强震动观测记录, 讨论了本次地震的震中位置、破裂方向和强震动衰减速率等问题。

**关键词:** 云南鲁甸6.5级地震; 强震动记录; PGA; 极震区

**中图分类号:** P315.914

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)04-0542-07

## 0 概况

2014年8月3日16时30分, 云南鲁甸发生 $M_s6.5$ 地震, 震中位置( $27.1^\circ\text{N}$ ,  $103.3^\circ\text{E}$ ), 震源深度12 km。地震造成震区建筑物严重破坏、多处山体滑坡, 人员伤亡和经济损失严重。中国数字强震动台网(NSMONS)(周雍年, 2006; Li *et al.*, 2008; 崔建文等, 2006a)分布于云南、四川区域的80多个强震动台站获取了这次地震的主震记录, 特别是位于鲁甸龙头山镇财政所的台站记录到东西向近1个重力加速度的记录, 是我国大陆迄今为止在极震区记录到的最大地面加速度峰值。该记录清晰地显示出极震区地震加速度时程, 该时程呈现的振动强度与台站周边财政办公楼、镇政府办公楼等多栋多层建筑物底层倒塌、损毁现象一致, 为研究极震区建筑物破坏现象提供了数据基础。

## 1 强震动观测台站及记录的强地面运动

鲁甸 $M_s6.5$ 地震发生在滇东北与四川相邻的地区, 该地区地震活动强烈, 有多条活动断裂通过, 是云南地震危险重点监视防御区。历史上该地区曾发生过多起破坏性地震, 2003年11月15日、26日以及2004年8月10日, 在本次地震震

中附近的鲁甸县桃源乡和昭阳区永丰镇, 曾连续发生 $M_s5.1$ 、 $M_s5.0$ 和 $M_s5.6$ 破坏性地震(解丽等, 2008; 非明仑等, 2006; 阮强, 程万正, 2008)。根据地震活动性及活动断裂的分布特征, 该地区也成为NSMONS重点布设区域, 在该区沿北东向的断裂带上, 布设了较为密集的强震动台站, 并在台站建设时, 进行了相应的场地岩性和

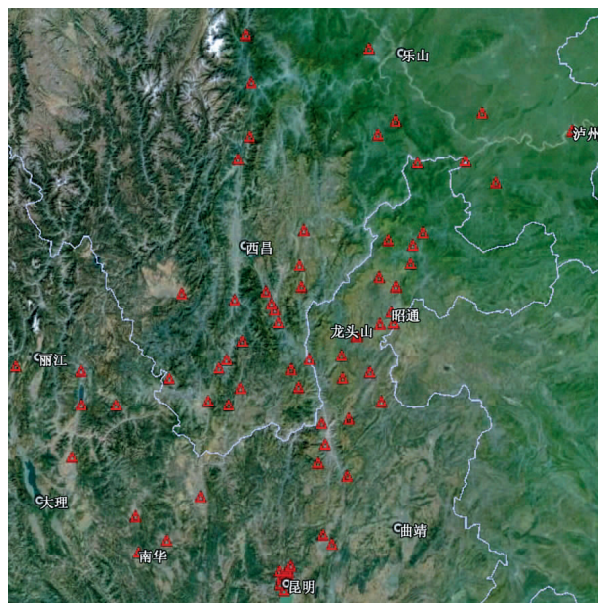


图1 获取记录的强震动台站分布

Fig. 1 Distribution of strong motion stations of obtaining the main shock recording

\* 收稿日期: 2014-08-29.

基金项目: 地震行业科研专项“地震紧急处置关键技术及在快速轨道交通中的应用”(201108003)资助.

剪切波速测试。这些台站及布设于周边地区的部分台站记录了这次地震的强震动，获取记录的台站中，位于震中的鲁甸龙头山镇强震动台震中距最小，为4.4 km，玉龙县九河乡强震动台震中距最大，为334 km。图1为获取记录的强震动台站分布情况，表1是部分强震台记录参数的情况，图2是震中距小于100 km的台站记录东西向地震动加速度时程。

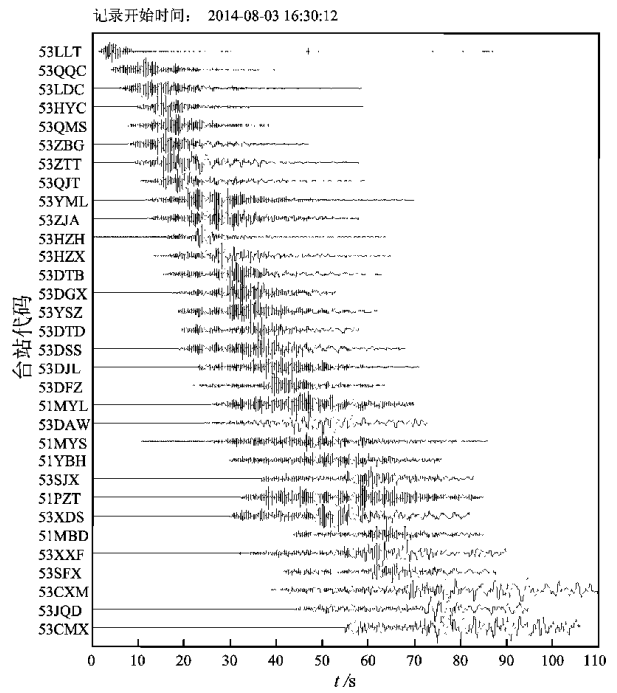


图2 部分台站东西向加速度时程  
Fig.2 Acceleration time histories in EW component recorded by some stations

图3是位于极震区震中鲁甸龙头山强震动台获取的地面加速度时程，其东西向最大加速度峰值达 $948.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ，是我国大陆在极震区内获取的

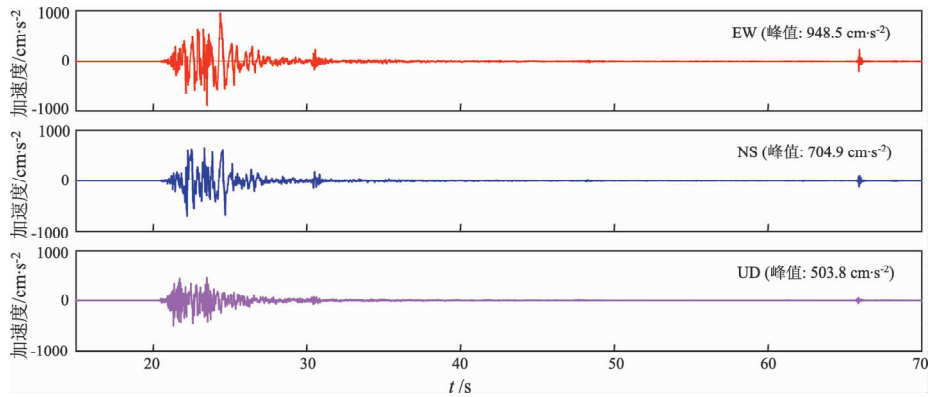


图3 鲁甸龙头山台站加速度时程  
Fig.3 Acceleration time history recorded by Longtoushan Strong Motion Station

表1 震中距 $\leq 50\text{ km}$ 或 $\text{PGA} \geq 10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 的强震动台站  
Tab.1 Strong motion stations that the epicenter distance $\leq 50\text{ km}$  or  $\text{PGA} \geq 10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$

台站名称	台站代码	场地类型	震中距 <sup>*</sup> /km	PGA/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ )		
				东西	北南	垂直
鲁甸龙头山	53LLT	土层	4.4	948.5	704.9	503.8
巧家铅厂	53QQC	土层	20.2	145.9	140.2	52.8
鲁甸茨院	53LDC	土层	29.1	45.8	44.7	25.6
会泽迤车	53HYC	土层	36.0	88.2	87.6	47.5
巧家马树	53QJX	土层	39.1	135.1	133.2	64.9
布嘎花鹿坪**	53ZBG	土层	41.4	56.4	33.7	17.5
昭通地震台	53ZTT	基岩	44.1	9.4	8.6	6.4
巧家地震局	53QJT	基岩	46.4	24.7	20.6	13.1
大关茂林	53YML	土层	62.8	24.7	18.0	10.9
昭阳靖安	53ZJA	土层	63.6	10.1	12.0	6.1
会泽者海	53HZH	土层	65.9	50.2	69.2	16.0
会东新街	51HDX	土层	66.7	12.4	12.7	3.7
布拖拖觉	51BTT	土层	69.6	11.9	17.3	7.9
会东铅锌	51HDQ	土层	70.1	22.5	22.4	6.7
会泽地震局	53HZX	土层	76.4	16.1	17.8	8.8
普格白水	51PGB	土层	79.6	15.2	14.9	6.7
普格地办	51PGD	土层	84.8	18.6	12.6	4.6
东川拖布卡	53DTB	土层	86.3	16.5	16.5	13.3
昆明佳华23楼	53JHE	楼板	238.3	11.2	8.3	1.9
昆明佳华31楼	53JHS	楼板	238.3	13.6	11.7	2.2
昆明佳华38楼	53JHB	地面	238.3	16.1	13.1	1.8

注：\* 震中位置采用云南省地震监测中心的速报结果： $(27.0994^{\circ}\text{N}, 103.3400^{\circ}\text{E})$ 。 \*\* 该台站为震前临时架设的台站。

第一条PGA近1个重力加速度的近场强地面运动记录。该记录中，在相对于记录零时的30.5 s和66 s附近，有两次东西向PGA同为 $227\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ，北南向PGA分别为 $183\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 $118\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ，竖向PGA分别为 $72.6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 $56.2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 的

短时振动,应为紧邻台站的围墙倒塌和财政所办公楼一楼倒塌所产生的振动,围墙距台站不足 1 m,财政所办公楼距台站近 10 m。对于  $PGA \geq 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  的台站,表 2 给出了台站的场地情况。位于昆明的省地震局大楼和佳华广场超高

层建筑结构台阵也获取了这次地震的结构响应加速度记录,图 4 是位于佳华 38 楼(138 m)仪器记录的加速度时程,其为近乎单一频率的振动,其振动主频为 0.464 Hz,谱分析显示,存在频率为 1.6 Hz 和 3.04 Hz 高频振动。

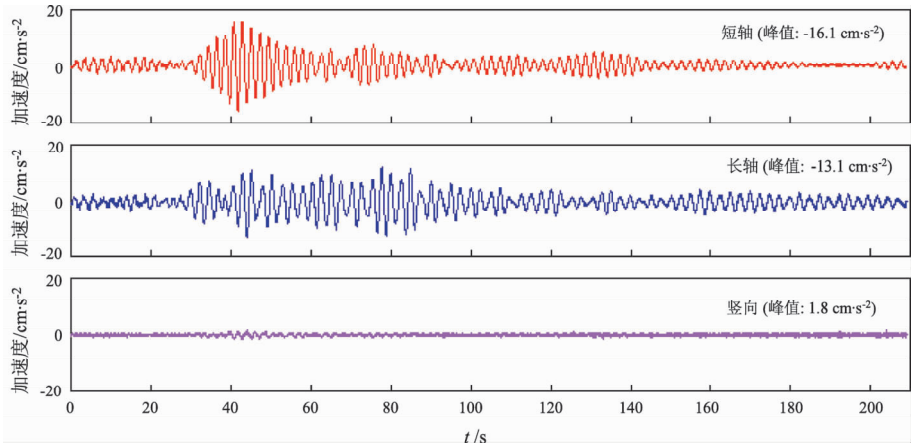


图 4 佳华广场 38 楼结构响应加速度时程

Fig. 4 Acceleration time history recorded by strong motion in the 38<sup>th</sup> floor of Jiahua Hotel

表 2  $PGA \geq 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  强震动台站场地条件

Tab. 2 Site Condition of Strong Motion Stations of  $PGA \geq 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$

台站	台址描述	土层情况	剪切波速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	场地分类
鲁甸龙头山	位于紧靠山体的坡地上	场地为土层,但距台址不远处即有山体基岩裸露,但周边岩体显示为陡峭的断崖。场地土为山体的坡积物		I
鲁甸茨院	位于鲁甸盆地内,地形较平坦	基岩埋深 18.6 m,土层为:①人工填土,厚 1.9 m。②粘土,厚 3.9 m。湿,软塑—可塑状,顶部含少量有机质。③粉砂,厚 1.6 m。>2 mm 颗粒含量约占 1%,未胶结,饱和,密实。④粘土,厚 2.9 m。湿,软塑—可塑状。⑤粉砂,厚 0.7 m。>2 mm 颗粒含量约占 20%,未胶结,饱和,密实。⑥粘土,厚 5 m,湿,软塑—可塑状,夹砾石。⑦粉砂,厚 1 m。>2 mm 颗粒含量约占 20%,未胶结,饱和,密实。⑧粘土,厚 1.6 m。湿,软塑—可塑状,>2 mm 颗粒含量约占 30%,夹砾石,部分石块呈次棱角状。⑨砂岩,第三系(N)强风化细粒长石石英砂岩夹砂层。岩石呈块状	① 138 ② 123 ③ 197 ④ 174 ⑤ 215 ⑥ 207 ⑦ 231 ⑧ 227	II
巧家马树	位于马树山间谷地陡坎台地上	基岩埋深 18.2 m,土层为:①人工填土,厚 0.6 m。②粘土,厚 17.6 m。湿,软塑—可塑状,中下部含强风化玄武岩。③杏仁状玄武岩、斑状玄武岩、致密块状玄武岩、蚀变玄武岩。湿、硬塑—坚硬,属上古生界二叠系上统地层	① 141 ② 236	II
巧家铅厂	位于大的缓坡上	场地为土层,但距台址不远处即有基岩裸露。场地土主要为风化粘土		I
会泽者海	位于缓坡上	土层为:①人工填土,厚 0.7 m。②粘土,厚 7.8 m。湿,软塑—可塑状,夹砾石、卵石,部分石块呈次棱角状、次圆状、圆状。③卵石,厚,5.3 m(未穿)。干,松散,部分石块呈次棱角状、次圆状	① 146 ② 189 ③ 430	II
会泽迤车	位于缓坡平台上	基岩埋深 5 m,土层为:①粘土,厚 5 m。湿,软塑—可塑状,下部夹砾石。②玄武岩。上部呈褐色,密实,饱和,为强风化玄武岩;下部松散、坚硬,块状、颗粒状,为弱风化玄武岩,属上古生界二叠系上统地层	① 187	II
昭通布嘎花鹿坪	位于缓坡上	场地为土层。未钻孔。从周边出露的土层看,以坡积风化土层为主。场地应为 II 类		II

## 2 强震动基本特征

### 2.1 衰减

本次地震的地震动衰减非常迅速,从龙头山到震中距为20 km的铅厂,PGA从 $948.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 迅速下降为 $145.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。图5显示了观测的PGA随震中距变化的情况,同时给出了崔建文等(2006b)统计的该地区地震动衰减规律和俞言祥等(2013)为第五代地震动区划图建立的青藏地区地震动衰减规律,其中,CUI为崔建文等(2006b)的结果;LU为拟合鲁甸主震强震动数据结果;YU为俞言祥等(2013)结果。从图中可以看出,崔建文等(2006b)的结果在近场区( $R < 10 \text{ km}$ )与实测结果相差较大,在震中距 $R > 30 \text{ km}$ 后,与实测结果吻合很好,这一差异的原因主要在于,他在统计时,缺乏近场强震动观测数据。俞言祥等(2013)的结果近场区偏小,远场区偏大。因此,这次的地震动,与以往的统计的衰减规律相比,衰减更急剧。

采用如下的地震动衰减模型拟合这次主震的PGA数据:

$$\lg Y = A + BM + C \lg(R + 12). \quad (1)$$

式中, $Y$ 为加速度峰值PGA, $M=6.5$ 为主震震级, $R$ 为震中距, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为回归系数,其结果同时显示在图5中。

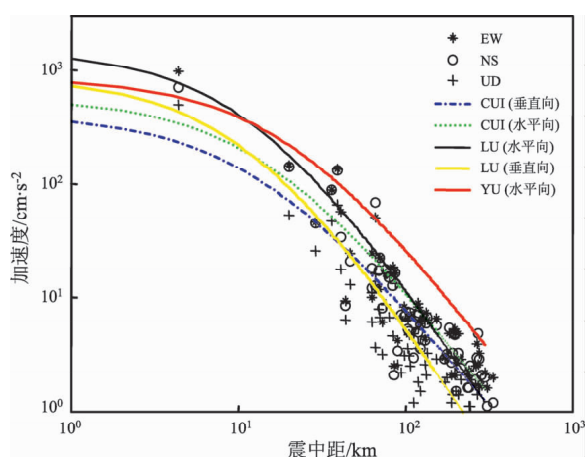


图5 鲁甸地震实测PGA随震中距的变化

Fig. 5 PGA Attenuation of the Ludian main shock varied with distance

### 2.2 频谱分析

图6是龙头山强震动台站记录的傅立叶幅值

谱。从图中可以看到,其主频位于1~4 Hz之间,随着震中距的增加,主频向高频端偏移。

图7是龙头山强震动记录的加速度反应谱。从图中可以看到,0.06~1 s的周期内,其东西、南北两个方向具有近2个重力加速度的平台,台站位于震害最重的区域,该区域内建筑物以4层以下建筑物为主,这些建筑物的卓越周期均小于1 s,震害现象与地震动的强度分布特征吻合。

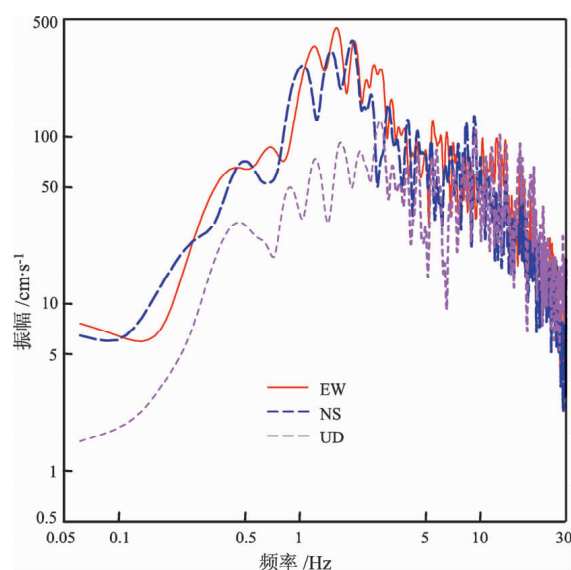


图6 龙头山强震动记录傅氏振幅谱

Fig. 6 Fourier amplitude spectrum of strong motion recording at Longtoushan Station

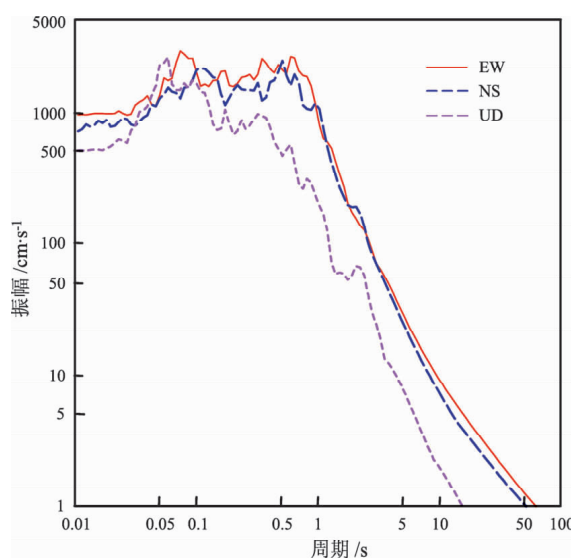


图7 龙头山强震动记录加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration response spectrum of strong motion recording at Longtoushan Station

### 3 分析与讨论

#### 3.1 震中位置

中国地震台网中心、云南省地震监测中心和 USGS 定位的震中位置和深度分别为：(27.1°N, 103.3°E)、12 km；(27.0994°N, 103.34°E)、12 km；(27.245°N, 103.427°E)、10.0 km。中国地震台网与云南省地震台网中心震中定位结果较为一致，只是前者小数仅取一位，与后者相比，平面位置最大会出现 5 km 的偏差。而 USGS 的定位结果与云南省地震监测中心定位结果相差 18.3 km。从震害现象和强震动观测记录来看，龙头山应处于震中区。因此，云南省地震监测中心的定位结果更为可靠。

从获取的记录可以看到，没有显著的初至 S 波。为检测记录中的 S 波初至，对龙头山强震动台东西向记录进行小波 3 层分解并重构（刘明才，2005）。在图 8 所示的重构信号中，有明显的 S 波初至，重构记录主要为低频信号。P 波初至可从原记录读取，或者从小波分解的高频细节信号中读取。P 波初至时刻为 20.41 s，S 波初至时刻为 21.45 s，两者时差 1.04 s，取虚波速度为  $8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，则龙头山强震动台的震源距为 8.3 km，如果震中位置仍然取云南省地震监测中心的定位结果，则震源深度应为 7 km，由于其它台站不能提供 P、S 波初到信息，不能提供更可靠的信息以确定震中位置。

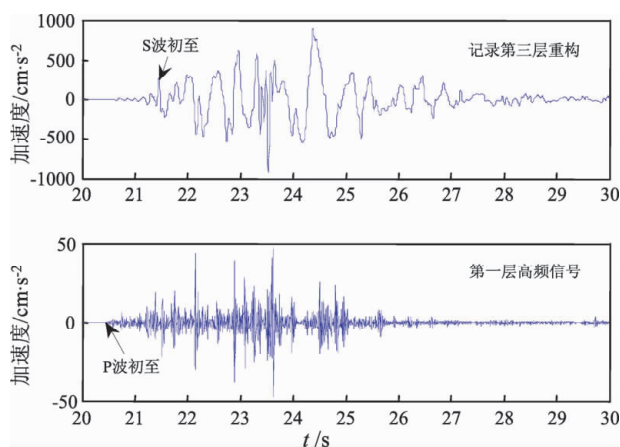


图 8 龙头山强震动记录小波 3 层重构

Fig. 8 Third layer wavelet reconstruction of strong motion recording at Longtoushan Station

#### 3.2 震源的破裂及方向

图 9 是龙头山强震动记录小波 6 层重构结果，图中可以清楚地看到，振动由 2 次大的事件构成，但后面可以看到，是否对应 2 次破裂，值得商榷。

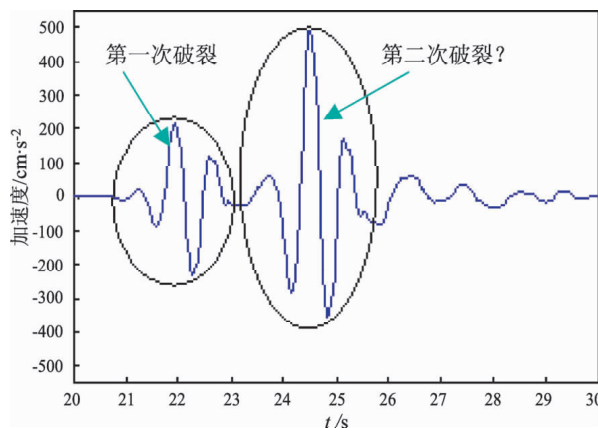


图 9 龙头山强震动记录小波 6 层重构

Fig. 9 Sixth layer wavelet reconstruction of strong motion recording at Longtoushan Station

图 10 是台站记录东西向 PGA 等值线图。从图中可以看到，等值线长轴呈北西向，与余震的分布一致。在龙头山镇，除有一条大的北东向断裂通过外，还有一条小的北西向包谷垭—小河断裂通过（闻学泽等，2013）。震源机制解显示出北东和北西向两个截面。综合地震动优势方向、余震的分布及震源机制解，可以确定本次地震震断裂为北西向的包谷垭—小河断裂。图 11 是龙头山强震动记录显示的地震时地面运动位移轨迹，图 12 是龙头山强震动记录在不同时刻的位移运动轨迹。从图中可以看到有北东、北西两个明显的运动方向，地面运动从 20 s（相对时间）到 23 s，运动主要呈北西向，在 23 ~ 24 s 之间，运动从北西向转为北东向，并在 24 ~ 25 s 间产生了强烈的北东向运动，此后，也主要呈该方向的运动，这一北东向的运动应与图 9 第二个大的运动有关。在距震中 20 km 的铅厂，可看到其优势运动方向仅为单一北西向（图 10）。推测产生图 11 这种两个方向优势运动的原因认为，地震正好发生在两个断裂的交汇处，虽然产生地震的包谷垭—小河断裂，即震源破裂方向是北西向，但也同时引起以其相交的北东向断裂大的局部运动，这种局部运动仅对断层附近产生大的影响，因此，图 9 第二个大的

震动，应不属于二次断层破裂。局部断层影响与局部场地条件相结合，导致了龙头山镇有大量的北东向震害破坏现象。

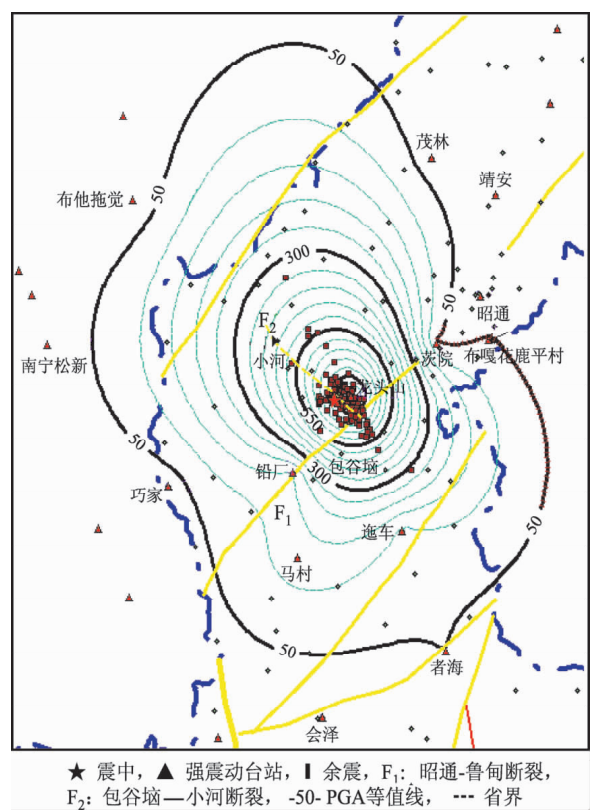


图 10 鲁甸  $M_s6.5$  地震记录 PGA 等值线图

Fig. 10 PGA isoline of Ludian  $M_s6.5$  main shock

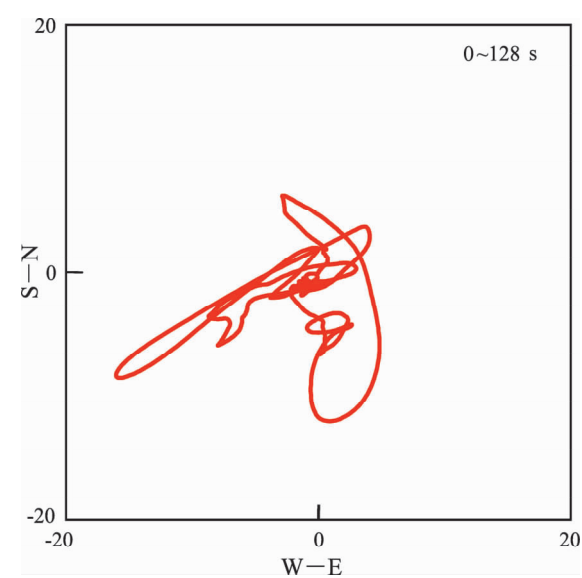


图 11 龙头山强震动记录地面运动位移轨迹

Fig. 11 Displacement orbit of the strong motion ground motion recording at Longtoushan Station

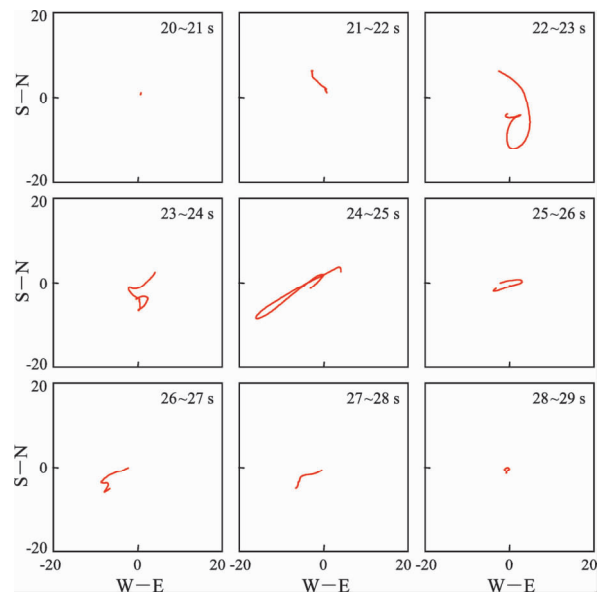


图 12 龙头山强震动记录地面运动不同时刻的位移轨迹（图中时刻为相对时间）

Fig. 12 Displacement orbit of the ground motion at Longtoushan Station at different time (time is the relative time in the Figure)

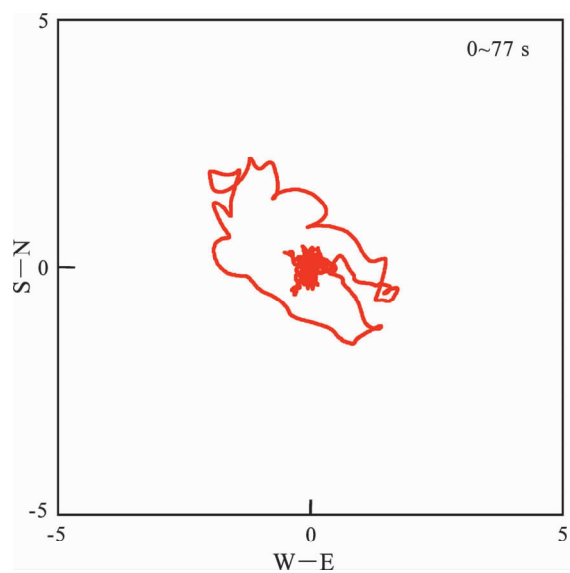


图 13 巧家铅厂强震动记录地面运动位移轨迹

Fig. 13 Displacement orbit of the ground motion at strong motion station located in Qianchang, Qiaojia County

4 结语

在 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震中有 80 多个台站记录到近、中、远场地震动时程，给该地震多

方面的分析研究提供了数据基础。尤其是龙头山强震动记录,是我国大陆首次在极震区记录到的接近 1 个重力加速度的强地面运动时程,其强烈的地震动与台站周边建筑物的严重损毁现象吻合,国际上类似的记录也不多见。

这次地震产生的地震动具有衰减快的特点,与以往统计的地震动衰减规律有较大的偏离,与震源深度浅、震区地形地貌起伏急剧有较大的关系。强震动台观测记录 PGA 等值线长轴显示了与余震的一致性,可快速确定震源破裂方向。

龙头山强震动记录其大幅值的持续时间仅约 4 s,但在其两个水平向记录上,均具有多个超过  $500 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  的峰值,有着比汶川地震卧龙强震动记录更宽的反应谱平台。该记录显示出两个大的运动方向,正好与穿过龙头山镇两条断裂的走向吻合。也显示出在龙头山镇,两条断裂都有强烈的运动,但北东向的断裂运动是与其相交的北西向断裂运动引起的,仅对交汇部位的龙头山镇有大的影响,一定距离后这种影响很快消失。

## 参考文献:

- 崔建文,高东,李世成,等. 2006a. 新的云南数字强震动观测台网[J]. 地震研究,29(增刊):453-458.
- 崔建文,李世成,高东,等. 2006b. 云南分区地震动衰减关系[J]. 地震研究,29(4):386-391.
- 非明伦,余庆坤,谢英情,等. 2006. 鲁甸 5.6 级地震震害分析[J]. 地震研究,29(1):87-91.
- 解丽,谢英情,非明伦,等. 2008. 2003 年鲁甸 5.1、5.0 级地震震害异常影响因素分析[J]. 地震研究,31(增刊):607-611.
- 刘明才. 2005. 小波分析及其应用[M]. 北京:清华大学出版社出版.
- 阮祥,程万正. 2008. 云南鲁甸 3 次  $M_s \geq 5.0$  地震破裂参数的研究[J]. 地震学报,30(1):97-102.
- 闻学泽,杜方,易贵喜,等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险性背景[J]. 地球物理学报,56(10):3361-3367.
- 俞言祥,李山有,肖亮. 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术,8(1):24-33.
- 周雍年. 2006. 中国大陆的强震动观测[J]. 国际地震动态,(11):1-6.
- LI X. J., ZHOU Z. H., YU H. Y., et al. 2008. Strong Motion Observation and Recordings from Great Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,7(3):235-246.

## Strong-Motion Recordings of $M_s 6.5$ Ludian Earthquake in Yunnan in 2014 and their Preliminary Analysis

CUI Jian-wen, LIU Qiong-xian, DUAN Jian-xin, YANG Li-wei, GAO Dong, LI Shi-cheng,  
XU Shuo, LIN Guo-liang, ZHANG Qian, BAO Yi-feng, DUAN Hong-jie  
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

A  $M_s 6.5$  earthquake occurred in Ludian County of Yunnan Province on Aug. 3, 2014. The strong motion caused by the mainshock was recorded by 81 strong motion observation stations which are located around the epicenter and its adjacent area. Especially, the strong motion station which is located at Longtoushan Office of Finance in the meizoseismal area perfectly recorded the strong ground motion time history of the mainshock, and the PGA of it is  $948.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  in EW. The ground floors of many buildings around the Longtoushan strong motion stations damaged seriously or collapsed, which was consistent with the strong shock reflected in the recording. A preliminary analysis on the strong motion recordings were also done, based on these analysis, the problems about epicenter location, rupture direction and the attenuation of strong motion of Ludian  $M_s 6.5$  earthquake are also discussed.

**Key words:** Yunnan Ludian  $M_s 6.5$  earthquake; strong motion recordings; PGA; meizoseismal area