

林国良, 崔建文, 杨黎薇, 刘琼仙, 2016. 景谷  $M_S6.6$ 、 $M_S5.8$  和  $M_S5.9$  地震强震动记录初步分析与场地效应研究. 震灾防御技术, 11 (2): 331—341. doi: 10.11899/zzyf20160216

# 景谷 $M_S6.6$ 、 $M_S5.8$ 和 $M_S5.9$ 地震强震动记录初步分析与场地效应研究<sup>1</sup>

林国良 崔建文 杨黎薇 刘琼仙

(云南省地震局, 昆明, 650224)

**摘要** 2014 年云南景谷先后发生  $M_S6.6$ 、 $M_S5.8$  和  $M_S5.9$  中强地震, 云南强震动台网获取了丰富的加速度记录。本文整理了各次地震中固定台和流动台获取的强震动加速度记录资料, 分别进行了地震动衰减关系和加速度反应谱分析, 结果表明, 所观测到的加速度峰值比云南地区地震动衰减关系预测值高, 反应谱谱值随震级的增加有增大趋势。最后将益智强震台作为典型台站, 分析了该台站在地震中的场地放大效应。

**关键词:** 景谷地震 强震动记录 衰减关系 场地效应 H/V 谱比

## 引言

2014 年 10 月 7 日 21 时 49 分 39 秒, 云南省普洱市景谷傣族彝族自治县 ( $23.4^\circ\text{N}$ ,  $100.5^\circ\text{E}$ ) 发生  $M_S6.6$  地震, 震源深度 5km。时隔仅两个月的 12 月 6 日 2 时 43 分、18 时 20 分, 又在景谷 ( $23.3^\circ\text{N}$ ,  $100.5^\circ\text{E}$ ) 先后发生  $M_S5.8$ 、 $M_S5.9$  两次强余震, 震源深度分别为 9km、10km, 两次余震震中相距 1km, 距主震震中约 10km。

在这三次地震中, 云南数字强震动台网固定台、烈度台、活断层台、存储台及流动观测台获取了丰富的强震动记录。本文通过对强震动加速度记录的处理, 从峰值特征、衰减关系等方面对地震动基本特征加以分析, 了解三次地震的异同; 对典型强震动台站益智台及流动场地影响台阵获取的余震数据进行分析, 了解场地效应对地震动和震害现象的影响。

## 1 地震地质背景

依据微观震中定位和宏观考察结果, 三次地震震中位于酒房断裂与漫罗-困龙山断裂的交汇部位<sup>2, 3</sup> (图 1)。酒房断裂带总体近南北走向 ( $350^\circ$ — $20^\circ$ ), 倾向东, 倾角  $70^\circ$ — $80^\circ$ , 全

1 基金项目 云南省地震局青年科学基金项目 (201204) 资助

[收稿日期] 2015-09-01

[作者简介] 林国良, 男, 生于 1986 年。硕士, 工程师。主要从事强震动观测与工程地震研究。Email: linguoliang1986@126.com

2 云南省地震局. 2014.2014 年 10 月 7 日云南景谷 6.6 级地震灾害直接经济损失评估报告。

3 云南省地震局. 2014.2014 年 12 月 6 日云南景谷 5.8、5.9 级地震灾害直接经济损失评估报告。

长约 310km, 北起无量山西麓, 经安乐、民乐、永平、勐养至帕当进入缅甸, 该断裂由次级断裂呈反 S 状右阶雁列展布。漫罗-困龙山断裂走向北东 ( $40^{\circ}$ — $52^{\circ}$ ), 全长约 67km, 南西起于澜沧江断裂, 向北东经班洒、蔗放、中寨延入景谷县城附近, 由 3 条次级断裂组成。根据中国地震局地球物理研究所反演得到的矩张量结果, 再结合震区的断层构造背景、烈度分布图和余震序列分布图, 判定走向  $334^{\circ}$ , 倾角  $83^{\circ}$  的断层为发震断层 (石峰等, 2014)。历史上, 震中 50km 范围内发生的最大地震为 1953 年 6 月 26 日双江 5.5 级地震。

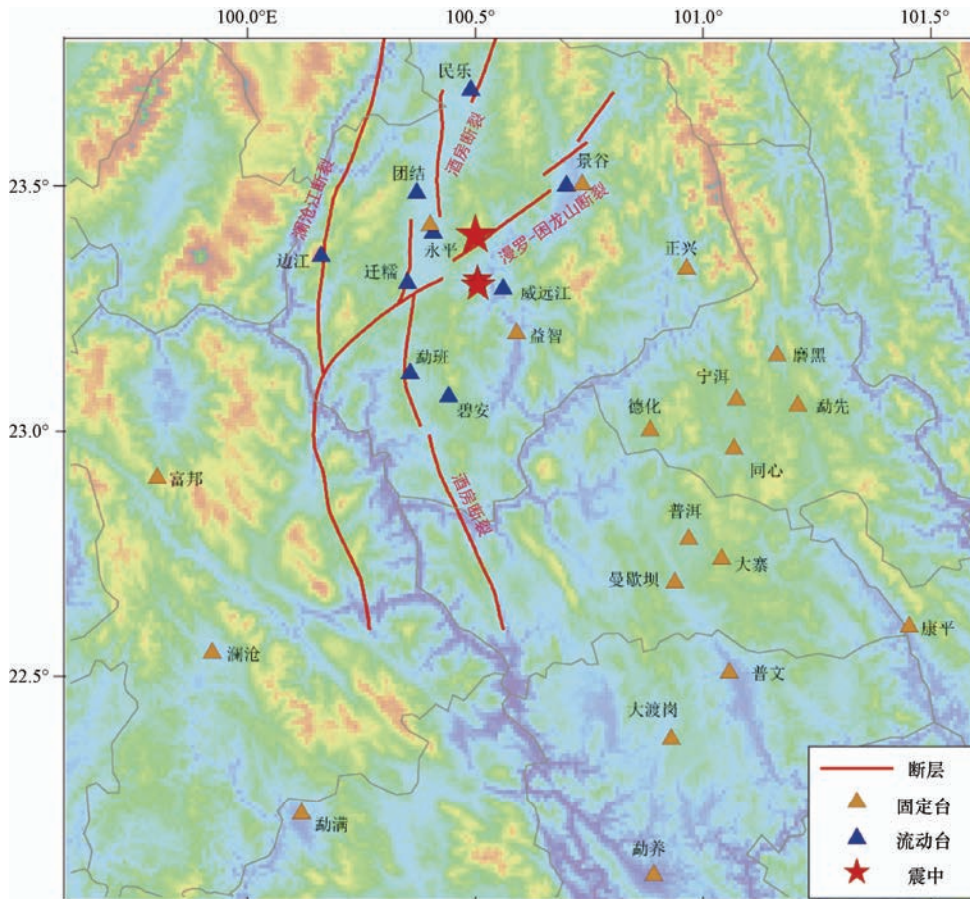


图 1 三次景谷地震震中及台站分布

Fig. 1 Distribution of three Jinggu earthquake epicenters and strong motion stations

## 2 台站获取记录情况

### 2.1 观测台站

云南省 39 个强震动台站获取到  $M_S 6.6$  地震的记录, 32 个强震动台站获取到  $M_S 5.8$  和  $M_S 5.9$  地震的记录 (其中 26 个固定台, 6 个流动台)。台站大部分建在土层上, 个别建在基岩上, 土层台站均进行过钻孔、剪切波速测试和土工实验。地震发生时观测设备运行正常, 生成的触发记录可靠。观测仪器采用三种类型, 固定台以美国 Kinematics 公司生产的 ETNA 型强震仪为主, K2 型为辅, 流动台为珠海泰德公司生产的 TAG-33M 型强震仪。表 1 列出了震中距

100km 内台站基本情况。

表 1 震中距 100km 内强震动台站基本参数

Table 1 Basics parameters of strong motion stations within 100km from the epicenter

台站名称	台站代码	经度	纬度	高程 (km)	仪器类型	场地类别
景谷永平	53JYP	100.4°E	23.4°N	1059	ETNA	土层
景谷	53JGX	100.6°E	23.2°N	787	ETNA	基岩
益智	53JYZ	100.7°E	23.5°N	1014	ETNA	土层
景谷正兴	53JZX	100.9°E	23.3°N	1052	ETNA	土层
宁洱德化	53PDH	100.9°E	23.0°N	1305	ETNA	土层
宁洱	53NRX	101.1°E	23.1°N	1298	K2	土层
宁洱磨黑	53NRM	101.2°E	23.2°N	1187	ETNA	土层
宁洱同心	53NRT	101.7°E	23.0°N	1192	ETNA	土层
普洱	53PRX	101.0°E	22.8°N	1276	ETNA	土层
宁洱勐先	53PMX	101.2°E	23.1°N	1405	ETNA	土层
富邦	53LFB	99.8°E	22.9°N	1857	ETNA	土层
普洱曼歇坝	53SMM	100.9°E	22.7°N	1089	ETNA	土层
普洱大寨	53PRD	101.0°E	22.7°N	1442	ETNA	土层
思茅港	53SSM	100.6°E	22.5°N	582	ETNA	土层

## 2.2 观测记录情况

$M_S6.6$  地震获取 3 分量加速度记录共 39 组,  $M_S5.8$  地震获取加速度记录共 28 组 (其中流动台 5 组),  $M_S5.9$  地震获取加速度记录共 30 组 (其中流动台 6 组)。进行强震记录分析之前对这些记录进行噪声滤波和基线校正处理 (谢礼立等, 1982; Boore, 2001), 最终获取震中距 100km 内强震动记录峰值加速度计算结果, 如表 2 所示。图 2 分别为三次地震加速度峰值最大的 3 个台站加速度记录图。 $M_S6.6$  和  $M_S5.9$  地震中, 震中距分别为 6.91km 和 15.21km 的景谷永平台获取到最大峰值加速度, 其东西向峰值加速度分别为  $488.8\text{cm/s}^2$ 、 $-195.5\text{cm/s}^2$ , 南北向分别为  $627.1\text{cm/s}^2$ 、 $-358.5\text{cm/s}^2$ , 竖向分别为  $-421.4\text{cm/s}^2$ 、 $-90.0\text{cm/s}^2$ 。 $M_S5.8$  地震中, 益智台获得最大峰值加速度, 该台的震中距比距离震中最近的景谷永平台远约 15km, 东西、南北和竖向峰值加速度分别为  $-171.0\text{cm/s}^2$ 、 $190.0\text{cm/s}^2$  和  $106.8\text{cm/s}^2$ 。

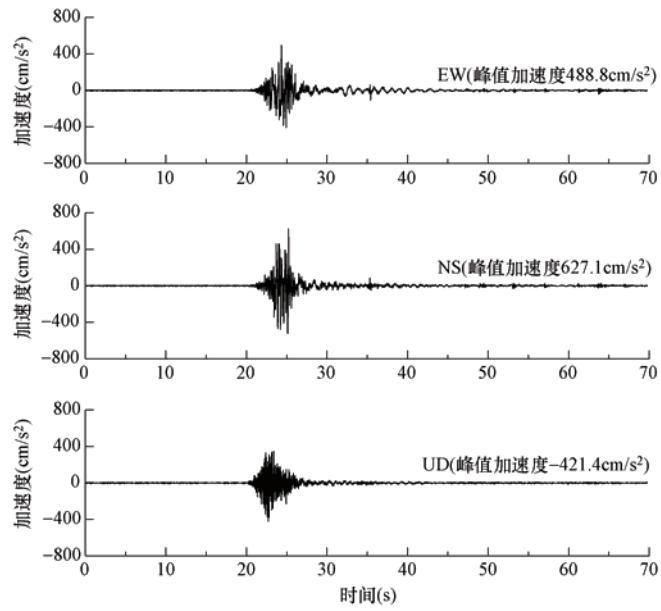
表 2 震中距 100km 内强震动记录参数

Table 2 Parameters of strong motion recordings within 100km from the epicenter

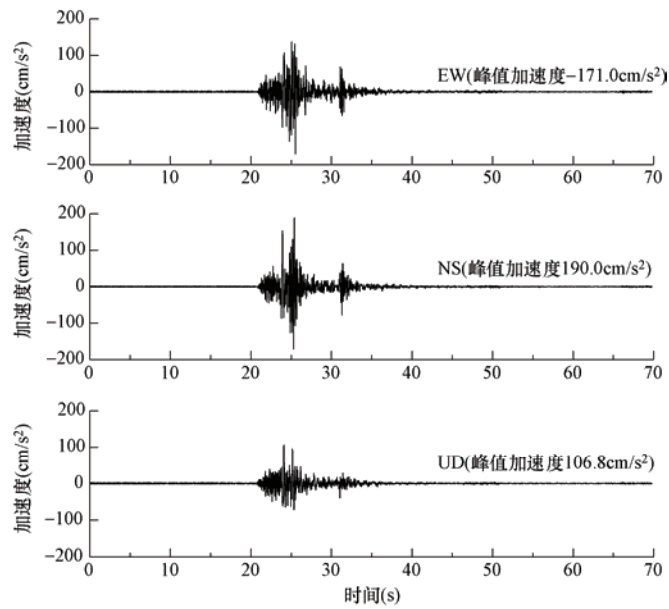
地震	序号	台站名称	震中距 (km)	震源距 (km)	峰值加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )		
					EW	NS	UD
$M_S6.6$	1	景谷永平	6.91	8.53	488.8	627.1	-421.40
	2	景谷	24.91	25.41	-16.6	19.8	12.00
	3	益智	30.84	31.24	-136.3	129.1	-75.00

续表

地震	序号	台站名称	震中距 (km)	震源距 (km)	峰值加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )		
					EW	NS	UD
$M_s6.6$	4	景谷正兴	51.98	52.22	79.0	91.0	36.10
	5	宁洱德化	60.96	61.16	-31.6	21.1	9.40
	6	宁洱	72.38	72.55	22.3	18.1	-13.00
	7	宁洱磨黑	76.40	76.66	21.8	-19.7	-5.50
	8	宁洱同心	78.03	78.19	-12.7	-14.3	4.60
	9	普洱	85.38	85.52	22.0	12.9	8.40
	10	宁洱勐先	85.06	85.21	13.8	-14.1	6.20
	11	富邦	86.11	86.25	19.9	24.0	14.70
	12	普洱曼歇坝	91.78	91.91	-11.9	8.3	-7.80
	13	普洱大寨	93.49	93.63	-9.3	15.7	-4.00
$M_s5.8$	1	景谷永平	16.24	18.57	143.4	169.5	-79.70
	2	景谷	14.97	17.47	-6.0	-7.3	5.10
	3	益智	31.88	33.12	-171.0	190.0	106.80
	4	宁洱德化	51.53	52.31	13.1	-14.9	-5.90
	5	宁洱	64.21	64.84	-7.9	-11.4	-7.00
	6	宁洱磨黑	69.4	69.98	6.7	11.8	5.20
	7	宁洱同心	69.14	69.72	6.3	-7.5	-2.70
	8	普洱	75.55	76.09	9.1	-8.2	3.30
	9	宁洱勐先	77.27	77.79	-5.7	-6.6	3.60
	10	普洱曼歇坝	81.81	82.30	4.4	5.0	2.00
	11	普洱大寨	83.74	84.22	3.5	4.3	1.70
	12	思茅港	91.28	91.72	10.0	9.5	3.00
$M_s5.9$	1	景谷永平	15.21	18.20	-195.5	-358.5	-90.00
	2	景谷	16.05	18.91	9.5	-10.9	-8.80
	3	益智	31.37	32.93	120.9	-113.7	-71.20
	4	宁洱德化	52.50	53.44	16.6	-14.6	7.80
	5	宁洱	64.96	65.73	-11.3	14.6	6.60
	6	宁洱磨黑	69.98	70.69	10.4	-10.0	5.00
	7	宁洱同心	70.01	70.72	8.0	-9.4	-2.90
	8	普洱	76.61	77.26	-11.7	8.1	4.50
	9	宁洱勐先	77.97	78.60	9.3	8.9	-4.20
$M_s5.9$	10	普洱曼歇坝	82.91	83.51	-4.0	4.6	3.20
	11	普洱大寨	84.78	85.37	-3.4	4.4	2.00
	12	思茅港	92.41	92.95	13.8	-19.0	4.20



(a) 永平台



(b) 益智台

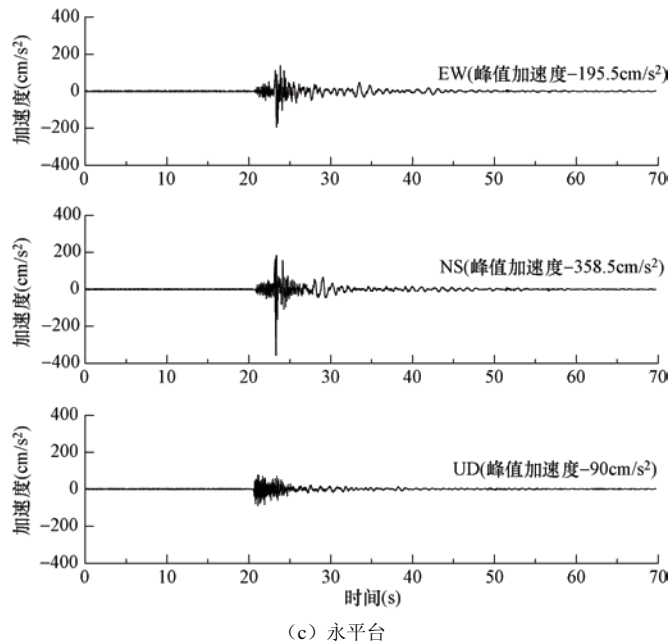


图2 永平台 (a)、益智台 (b)、永平台 (c) 分别获取的三次地震的加速度记录

Fig. 2 Acceleration record data at Yongping (a), Yizhi (b) and Yongping (c) stations for three earthquakes respectively

### 3 强震动记录特征分析

#### 3.1 地震动衰减关系

本文中地震动参数主要包括水平向、竖向地震动峰值加速度 (PGA), 所用地震动衰减关系模型分别见式 (1)、式 (2), 该模型由崔建文等 (2006) 利用云南地区地震资料将整个云南地区作为一个区域计算得到。

$$\lg \alpha_v = 3.14699 + 0.13032M - (2.15929 - 0.10714M) \cdot \lg(R+15), \quad \sigma = 0.16168 \quad (1)$$

$$\lg \alpha_h = 3.15549 + 0.1288M - (2.17317 - 0.10889M) \cdot \lg(R+13), \quad \sigma = 0.15314 \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) 中,  $a_v$  和  $a_h$  分别为竖向和水平向加速度峰值,  $M$  为震级,  $R$  为震中距,  $\sigma$  为标准差。

图 3 分别给出了三次地震震中距 200km 以内台站的地震动水平向、竖向 PGA 的衰减关系与离散值的比较。可以看出, 在水平方向上, 除个别台站 (近场景谷基岩台), 各台站记录的加速峰值比预测值高, 尤其在震中距小于 50km 范围内尤其明显; 竖直方向上, 除个别台站 (近场景谷基岩台) 外, 在震中距小于 50km 范围内峰值比预测值高, 而较远震中距的观测峰值比预测值略低, 说明竖直向地震动分量衰减较快。王玉石等 (2013) 利用 2007 年以来在川滇地区破坏性地震及汶川地震强余震中获得的加速度记录进行衰减关系统计分析, 结果也显示西南地区的中强地震在近场会产生较大的峰值加速度。三次地震中,  $M_S5.8$  和  $M_S5.9$  地震因震级和震源深度相近, 各台站观测值也差异较小, 而  $M_S6.6$  地震在景谷永平各观测峰值偏高, 可能与震源深度较浅有关。但三次地震中益智台水平向和竖向观测到的加速度峰值均比预测值大许多, 尤其  $M_S5.8$  地震中, 益智台震中距比永平台大, 而加速度峰值却更大,

很明显是受局部地形的影响。

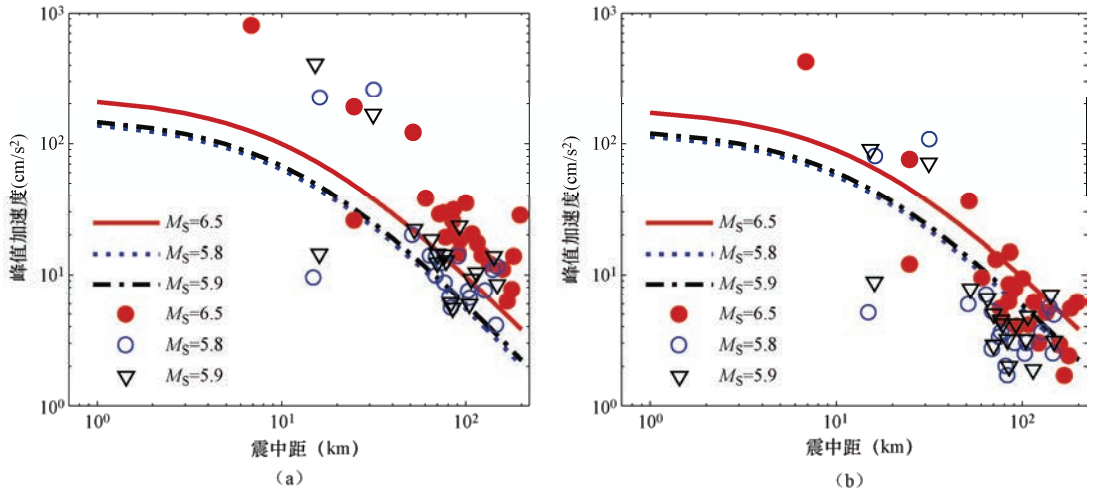


图 3 三次地震水平向 PGA (a) 与竖向 PGA (b) 衰减关系

Fig. 3 Attenuation curves of the horizontal PGA (a) and vertical PGA (b) for three earthquakes

### 3.2 加速度反应谱

由于三次地震的记录台站数量及震中分布情况相接近,使得地震动的反应谱之间具有可比性。根据所选台站在这三次地震中所获得的加速度记录,计算各台的加速度反应谱(阻尼比为 5%),其中  $M_S6.6$  地震共选取 23 个台站,  $M_S5.8$  和  $M_S5.9$  地震分别选取 18、17 个台站。将三次地震的加速度反应谱进行平均,结果如图 4 所示。可以看出,无论水平向还是竖向,在 0.1s—10s 周期段,  $M_S6.6$  地震反应谱谱值比  $M_S5.8$  和  $M_S5.9$  地震大,表明  $M_S6.6$  地震长周期成分相对丰富。三次地震反应谱谱值随震级的增加有增大趋势,反应谱值在周期 0.2s 附近有最大值。

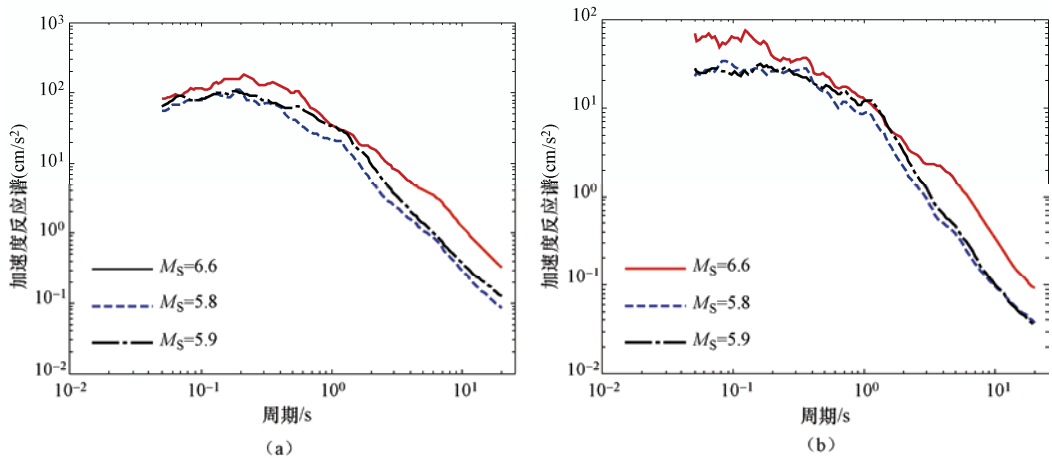


图 4 三次地震地震动反应谱平均值水平向 (a) 与竖向向 (b) 的比较

Fig. 4 Comparison of the horizontal (a) and vertical (b) response spectrum mean value for three earthquakes

## 4 典型台站场地效应研究

### 4.1 固定台主震记录分析

地震动衰减关系分析显示益智强震台在三次地震中峰值加速度均明显偏高,地震现场灾害调查结果也表明,益智台所在地区宏观烈度为Ⅶ度,房屋损坏情况与强震动记录相吻合。益智强震台位于山脊平台上的益智中心小学院内,地形地貌为侵蚀构造浅切割低中山缓坡地形,出现峰值加速度值明显偏高的现象可能是由于局部地形地貌对地震动影响较大(郭明珠,2013)。本文采用单点谱比法(H/V方法),通过计算观测记录水平向和垂直向的傅立叶频谱比,估计观测点场地效应。

H/V方法最早由Nakamura提出,用于研究地脉动(环境振动)的水平向和竖向谱比,以评价地震动的场地放大效应(Nakamura,1989)。单点谱比法经验关系式如下:

$$H/V = \frac{A_{SH}(f)}{A_{UD}(f)} = \frac{\sqrt{A_{EW}(f)^2 + A_{NS}(f)^2}}{A_{UD}(f)} \quad (3)$$

式中, $A_{SH}(f)$ 、 $A_{EW}(f)$ 、 $A_{NS}(f)$ 、 $A_{UD}(f)$ 分别表示观测场地水平向、东西向、南北向和垂直向傅立叶谱幅值; $H/V$ 表示水平向与竖向谱比值。

在对强震动记录进行傅立叶谱分析时,为避免发生谱比失稳,对各分量的傅立叶谱采用5%汉宁窗(Hanning Taper)进行滤波(章文波,2001),然后再计算平滑后的傅立叶幅值谱比。图5为利用H/V方法分析益智台三次地震强震动记录的结果,从图5可以看出,同一台站对不同震级地震的H/V傅立叶幅值谱比形状基本相似,不同频率场地效应值较接近,在5Hz—6Hz之间,三次地震均存在明显的放大效应,其中 $M_S5.8$ 地震放大效应最大,与实际观测结果一致。

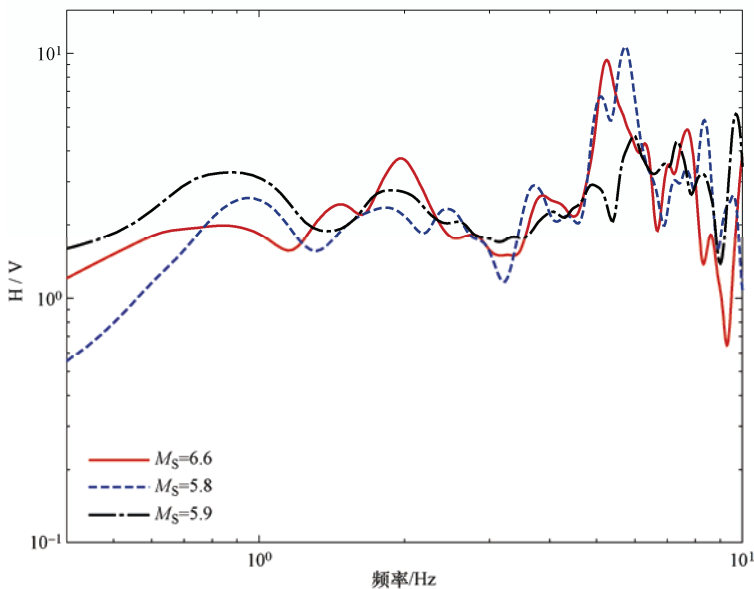


图5 三次地震益智台H/V谱比

Fig. 5 H/V spectrum ratio of Yizhi station for three earthquakes



## 4.2 地形影响台阵余震记录分析

景谷  $M_S6.6$  级地震发生后, 云南省地震局派出强震动流动观测组, 在震区架设流动台, 并对固定强震台进行实地考察, 详细调查各台站的场地条件与建筑物破坏情况。2014 年 10 月 11 日, 工作人员在对益智台进行现场考察时, 布设了 4 个流动观测点组成的地形影响调查台阵。流动观测仪为珠海泰德公司生产的 TAG-33M 型强震仪, 益智固定台为美国凯尼公司的 ETNA, 采样率均为 200sps。流动观测点相对位置见图 6。

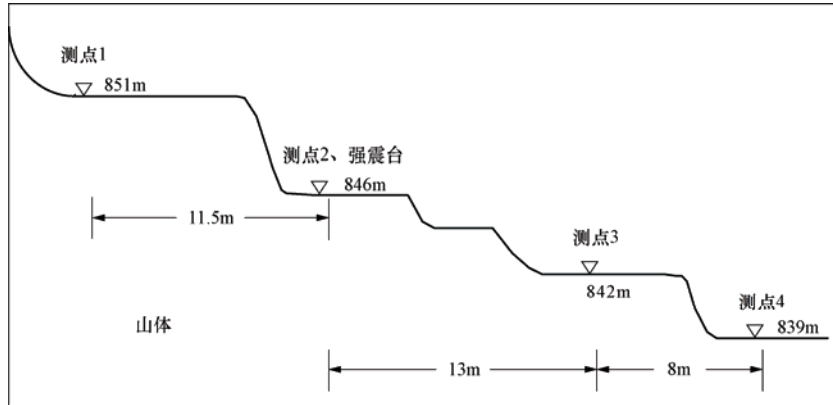


图 6 益智流动观测点相对位置示意图

Fig. 6 Location of mobile observation stations in Yizhi

流动台观测期间, 4 个台均获取到 2014 年 10 月 11 日 14 时 05 分  $M_S4.7$  地震强震记录, 震中距为 30.6km。表 3 为 5 个台站获取强震记录参数, 从表 3 可看出, 除位于靠近山体(有基岩出露)边缘的测点 1 的峰值加速度偏小, 其余测点的峰值加速度值有随高程增加而增大的规律, 尽管此处的峰值差异较小, 但这种规律性随着高差增大、震级越大或震中距越近更趋明显(王兰民, 2010)。最大峰值频率集中在 5.0Hz—5.9Hz 之间, 比较一致。因为 2 号流动观测点的仪器架设在益智台上, 故其所获取的各分量峰值加速度与益智台较接近。

表 3  $M_S4.7$  余震强震动记录参数

Table 3 Parameters of strong motion recordings of  $M_S4.7$  aftershock

序号	测点	峰值加速度度 ( $\text{cm/s}^2$ )			主要频率		
		EW	NS	UD	EW	NS	UD
1	测点 1	5.3	-5.9	3.1	5.8	5.8	5.7
2	测点 2	-7.0	-8.9	3.2	9.2	5.8	5.5
	益智台	6.7	8.5	-3.5	5.2	5.9	5.5
3	测点 3	-4.8	8.0	3.0	5.2	5.0	5.5
4	测点 4	4.9	5.7	2.9	5.0	5.2	4.8

## 5 结语

2014 年底景谷地区连续发生三次中强地震, 为地震动特性的比较研究提供了难得的基础数据。本文整理分析了云南强震动台网获取的主震与余震加速度记录, 从地震动衰减规律特

征、加速度反应谱、H/V 谱比等几个方面考查了三次地震的地震动特征,主要得到以下认识:

(1) 衰减规律特征显示,无论水平向还是垂直向分量,地震动观测值在震中距较小处偏高,初步认为与震源深度较浅和局部场地效应有关。竖向分量在震中距较大处比预测值偏低,说明竖向地震动峰值随距离衰减较快。

(2) 加速度反应谱分析显示,随震级的增加长周期反应谱成份增多,三次地震反应谱值在周期 0.2s 附近有最大值。

(3) 益智强震台获取的强震记录 H/V 谱比分析表明,三次地震均存在明显的放大效应, $M_S5.8$  地震放大效应最大,与实际观测结果一致。应用强震动数据的单台 H/V 谱比对确定强震台站场地卓越周期并划分场地类型具有重要的意义(温睿智,2015),但文中益智台谱比峰值比温睿智所得平均谱比峰值高,是因为后者计算结果基于多条强震记录,该方法在今后的应用中应注意数据的完备性。

(4) 对流动地形影响台阵获取的余震加速度记录分析表明,地形起伏对于观测点的峰值加速度影响明显。

## 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. 地震研究, **29** (4): 386—391.
- 郭明珠,赵芳,赵凤仙,2013. 场地地震动局部地形效应研究进展. 震灾防御技术, **8** (3): 311—318.
- 石峰,何宏林,袁仁茂等,2014. 2014 年景谷地震震中附近地裂缝成因初析. 震灾防御技术, **9** (4): 782—789.
- 王兰民,吴志坚,2010. 汶川地震场地条件对地震动放大效应的影响. 土木建筑与环境工程, **32** (2): 175—178.
- 王玉石,李小军,周正华,2013. 川滇地区水平向强地震动衰减关系研究. 地震学报, **35** (2): 238—249.
- 温睿智,冀昆,任叶飞等,2015. 基于谱比法的我国强震台站场地分类. 岩土力学与工程学报, **34** (6): 18.
- 谢礼立,于双久,1982. 强震观测与分析原理.北京:地震出版社.
- 章文波,谢礼立,郭明珠,2001. 利用强震记录分析场地的地震反应.地震学报, **23** (6): 604—614.
- Boore D. M., 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am, **91** (5): 1199—1211.
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. QR of RTRI, **30** (1): 25—33.

## Preliminary Analysis of Strong Motion Observation and Site Effect in Jinggu $M_S6.6$ , $M_S5.8$ and $M_S5.9$ Earthquakes

Lin Guoliang, Cui Jianwen, Yang Liwei and Liu Qiongxian

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

**Abstract** In 2014, three strong earthquakes ( $M_S6.6$ ,  $M_S5.8$  and  $M_S5.9$ ) occurred in Jinggu, Yunnan Province. Numerous strong motion recordings were recorded by Yunnan Digital Strong Motion Network. In this paper, those acceleration recordings from both permanent and mobile stations are collected and processed, and the ground attenuation relationship and acceleration response spectrum are statistically analyzed. The results show that the observed peak accelerations are larger than predictions by Yunnan attenuation relationship in near and middle field, and the response spectrum increases with an increase in magnitude value. Finally, we take Yizhi strong motion station as a typical station to study its site effect during earthquakes.

**Key words:** Jinggu earthquake; Strong motion recordings; Attenuation relationship; H/V spectrum ratio; Site effect