

王伟, 刘必灯, 刘欣, 杨明亮, 周正华. 2015. 基于汶川 $M_s8.0$ 地震强震动记录的山体地形效应分析. 地震学报, 37(3): 452–462. doi:10.11939/jass.2015.03.008.

Wang W, Liu B D, Liu X, Yang M L, Zhou Z H. 2015. Analysis on the hill topography effect based on the strong ground motion records of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 37(3): 452–462. doi:10.11939/jass.2015.03.008.

基于汶川 $M_s8.0$ 地震强震动记录 的山体地形效应分析^{*}

王 伟^{1),*} 刘必灯¹⁾ 刘 欣¹⁾ 杨明亮²⁾ 周正华³⁾

1) 中国河北三河 065201 防灾科技学院

2) 中国北京 100055 北京建土木工程有限公司

3) 中国南京 210000 南京工业大学岩土工程研究所

摘要 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震中, 固定和流动地形影响台阵记录到大量主余震记录, 本文通过对其均方根加速度、相对持时、频谱等要素进行分析, 讨论了山体地形效应的特征及其影响因素. 对于自贡西山公园地形台阵各测点的分析结果显示: 该台阵山脚基岩位置地震动的均方根加速度和相对持时明显低于山体周边土层场地和山体基岩测点; 随着高程的增加, 山体基岩测点的均方根加速度逐渐变大, 相对持时则变化不大, 傅里叶谱形状也大体一致, 在 2.0—5.0 Hz 频段内有所放大; 山体周边土层场地和山体地形对于相同地震动输入中不同频段内地震动能量的放大水平不同, 从而导致二者的地表地震动强度产生显著差异, 且前者对地震动持时的增加更加显著.

关键词 山体地形效应 强震动观测 均方根加速度 相对持时 频谱
doi:10.11939/jass.2015.03.008 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Analysis on the hill topography effect based on the strong ground motion records of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

Wang Wei^{1),*} Liu Bideng¹⁾ Liu Xin¹⁾ Yang Mingliang²⁾ Zhou Zhenghua³⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China

2) Beijing Civil Engineering Co., LTD, Beijing 100055, China

3) Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 210000, China

Abstract: It is important for the large-scale engineering seismic fortification in the mountain area to analyze the hill topography effect of the strong ground motion based on the earthquake records. In 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, a lot of strong ground motion data were recorded by fixed and mobile observation arrays. By analyzing the root-mean-square (RMS) acceleration, this paper discusses 90% duration and spectrum characteristics, the hill topography effect

* 基金项目 中国地震局教师科研基金项目(20150107)、国家自然科学基金(51308118, 51208107)以及中央高校基本科研业务费专项资金(ZY20120103)联合资助.

收稿日期 2014-07-07 收到初稿, 2014-11-20 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: wwwiem@163.com

characteristics and its influencing factors. As to the Xishan park topography array in Zigong city, with the altitude increasing, the RMS acceleration becomes larger, however, the 90% duration does not change obviously; the shape of the Fourier spectra is similar except the amplitude in the frequency bandwidth 2.0—5.0 Hz is amplified to some extent; the ground motion energy is amplified differently in the different frequency bandwidth by the soil site around the hill and the hill topography, which makes the ground motion different; the soil site around the hill makes the ground motion duration last longer compared with the hill.

Key words: hill topography effect; strong ground motion observation; root-mean-square acceleration; relative duration; frequency spectrum

引言

地震动的山体地形效应问题属于局部场地条件对地震动的影响范畴。不规则山体地形对地面运动的影响主要体现在使局部地表地震动放大并在空间分布上呈现非均匀性。随着大量水利水电、道路交通等大型、特大型工程在山区的开展建设,山体地应对这些重大工程的抗震设计影响不可低估。

强震动记录是研究地形效应的基础数据,通过对其进行分析,可以直观获取地形效应的特征。通过对大坝、山体进行地形效应观测,可以研究地震动的地形放大系数、放大频带宽度、地震波放大机制等与山体几何参数、地质构造之间的关系(Boore, 1972; Davis, West, 1973; Tucker *et al.*, 1984)。Hartzell 等(1994)对 1989 年 Loma Prieta 地震的余震记录进行分析,结果表明地震动记录形式极其复杂,故有必要研究三维地形效应。水平向地震波的慢度和质点运动轨迹图的分析表明,震源方位角的变化以及体波、瑞雷波、勒夫波之间复杂的相互作用会导致地震动产生很大变化。Paolucci(2002)对地形效应观测数据的研究表明,基准参考台站的选取以及地震动记录中不同方向分量交叉耦联效应对地形放大系数的计算影响较大。Spudich 等(1996)对 Tanaza 小山包所记录到的 1994 年北岭地震余震进行研究后认为,地震动放大系数与频率和山体延伸方向相关,同时观测到山体的共振效应以及从山底到山顶质点运动偏振方向的偏转效应。

2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震期间,自贡西山公园固定地形影响台阵获得了一组汶川主震记录。王海云和谢礼立(2010)、杨宇等(2011)和唐晖等(2012)分别利用传统傅里叶谱谱比法和 H/V 法对山体地震动放大系数进行分析,然而由于这两种方法对基准参考台站和基岩水平、竖向地震动分量比值假定条件有所影响,故其分析结果的可靠性尚需进一步验证。中国地震局兰州地震研究所在文县县城附近架设在同一地点不同高度的 3 个流动观测台站获取了 7 次强余震记录,通过对原始记录作零线调整并计算记录时程均方根值,以此来分析局部地形高差对强震地震动的影响。结果表明,局部孤突地形对地震动加速度有明显的放大作用(孙崇绍等, 2011)。中国地震局工程力学研究所在四川省江油市武都镇境内的窦圉山和青川县三锅乡槲木坪村的三锅山布设的山体地形效应流动观测台阵共获取 30 余组汶川余震的高质量强震动记录。本文将基于以上地震动记录,对地震动的山体地形效应特征予以分析。

1 地形效应观测台阵简介

本文分析地震动山体地形效应所使用的数据,主要来自于 2008 年汶川地震期间固定台阵和流动观测台阵的强震动记录. 其中,自贡西山公园地形影响台阵为固定台阵,在山地不同部位共布设 8 台强震仪,获得汶川地震主震记录 1 组;窦圉山和三锅山两个地形影响台阵为流动观测台阵,每个台阵在山底和山顶各布设 1 台强震仪,共获得汶川地震余震记录 30 余组.

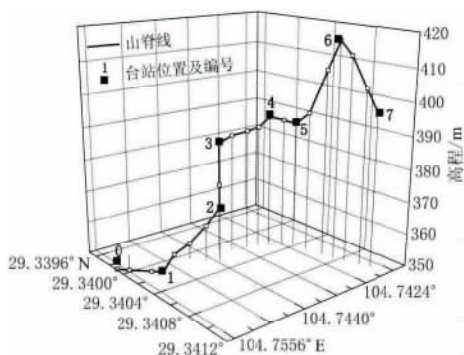


图 1 自贡西山公园地形台阵测点位置示意图

Fig. 1 Location schematic diagram of the topography array observation points in Xishan park of Zigong

自贡西山公园地形影响台阵位于四川盆地的自贡市自流井区西山公园内,为“十五”国家重大项目——中国数字地震观测网络项目中的固定台阵. 为获取反映地表地形对地震动影响的多点实测数据,台阵在水平自由地表场、山脚、山底及山脊等位置布设了 8 个观测点,其中 0 号测点为水平自由地表土层测点,1 号测点为山脚基岩测点,其余测点为山体基岩测点,各测点位置如图 1 所示.

窦圉山位于四川省江油市武都镇境内,在汶川地震中位于Ⅷ度烈度区,山体由砾岩组成,在山底和山顶各布设 1 台 Etna 强震仪. 山底测点的高程为 995.0 m,该位置地形开阔平坦,具有一定厚度的坡积土层;山顶测点的高程为 1058.0 m,两测点相对高差为 63.0 m,其具体位置如图 2 所示. 此处台阵共获取 9 次余震记录,具体信息详见附录表 1.

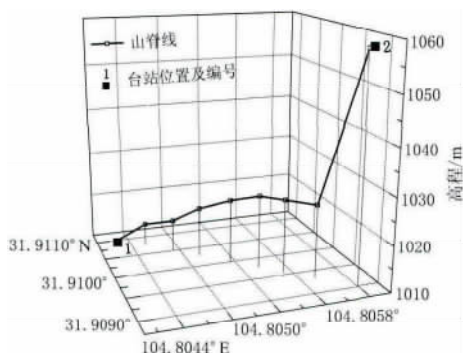


图 2 窦圉山地形台阵测点位置示意图

Fig. 2 Location schematic diagram of the topography array observation points on the Douchuanshan mountain

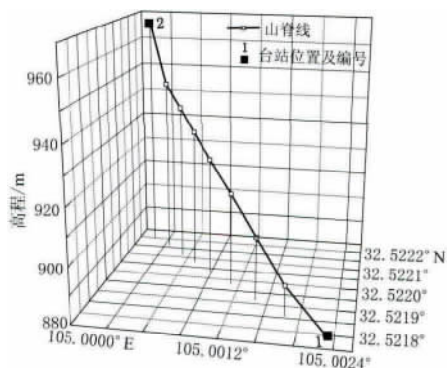


图 3 三锅山地形台阵测点位置示意图

Fig. 3 Location schematic diagram of the topography array observation points on the Sanguoshan mountain

2 地震动记录分析

2.1 地震动均方根加速度分析

从随机过程观点看, 加速度过程 $a(t)$ 中的最大峰值是一个随机量, 而方差则是表示振幅大小特性的一个统计特征(胡聿贤, 2006). Arias 强度可以很好地衡量地震动过程中的总强度, 具体表示为

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a^2(t) dt, \quad (1)$$

式中 T_d 为震动持时. 若取 T_d 为强震动阶段的持时, 则地震动加速度过程 $a(t)$ 在该持时内可以近似看作平稳过程, 单位持时的能量则与方差成正比, 以此定义均方根加速度 a_{rms} 为

$$a_{rms}^2 = \sigma_a^2 = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} a^2(t) dt. \quad (2)$$

对于地震动持时, 大部分研究均采用相对持时. Husid(1969)曾提出用 $\int_0^t a^2(t) dt$ 表示地震动的能量随时间的增长, 或用其正规化后的值

$$I(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^T a^2(t) dt} \quad (3)$$

表示, $I(t)$ 是个取值为 0—1 的函数. 现在最常用的持时为相对持时 T_d , 其值为 T_2 与 T_1 之差, 其中 T_1 和 T_2 由

$$\begin{cases} I(T_1) = 0.05 \\ I(T_2) = 0.95 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} I(T_1) = 0.15 \\ I(T_2) = 0.85 \end{cases} \quad (4)$$

确定. 前者称为 90% 持时, 后者称为 70% 持时, 本文采用前者进行地震动持时衡量.

Hanks(1979)通过对 Oroville 系列的强震观测和其它地震的研究指出, 地震动峰值加速度所表示的地震动高频成分的振幅, 受地震震源断裂面的局部特征影响很大, 在大震级时, 震中或断层附近的加速度最大值可能会饱和; 另外, 震级、距离和场地条件对加速度峰值影响明显. 因此, 为了更合理地衡量加速度时程的幅值特性, 需对自贡西山公园、筓圖山和三锅山地形台阵记录进行均方根加速度分析.

自贡西山公园所有测点的均方根加速度的空间分布如图 4 所示. 可以看出: 山体基岩测点的地震动水平明显低于 0 号水平自由地表土层测点, EW 向和 NS 向的地震动强度明显高于 UD 向; 1 号山脚基岩测点的地震动峰值明显低于土层测点和其它山体测点, 该现象与地震震害调查现场看到的山脚房屋震害轻微的调查结果相吻合. 随着高程的增加, 山体基岩测点地震动均方根加速度水平明显增强, 山顶 6 号测点在 EW 向、NS 向和 UD 向的峰值加速度相对于山脚基岩测点分别放大 1.77, 1.59 和 1.34 倍.

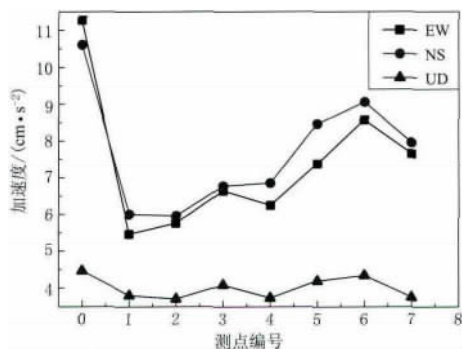


图 4 自贡西山公园 0—7 号测点均方根加速度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of RMS acceleration at the observation points Nos. 0—7 in Xishan park array of Zigong

窦圉山和三锅山地形效应观测台阵记录的余震均方根加速度分析结果分别列于表 1 和表 2. 可以看出, 对于山底和山顶, EW 向和 NS 向地震动均方根加速度明显大于 UD 向. 对于绝大多数地震动记录, 山顶与山底的均方根加速度比值有大有小, 与山底地震动均方根加速度相比, 山顶地震动强度放大效应不显著, 甚至有相当数量的记录出现地震动强度

表 1 窦圉山台阵余震记录的均方根加速度

Table 1 RMS acceleration of the aftershock records from the Douchuanshan array

余震 序号	山底测点均方根 加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			山顶测点均方根 加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			山顶均方根加速度与山 底均方根加速度之比		
	EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD
1	2.2	1.1	0.5	1.4	1.4	0.8	0.64	1.18	1.46
2	2.2	1.4	1.8	3.1	1.9	1.0	1.41	1.31	0.55
3	1.1	0.9	0.5	1.0	0.9	0.7	0.86	0.94	1.35
4	14.7	20.2	11.4	18.2	21.7	14.6	1.23	1.07	1.28
5	3.4	4.6	1.6	2.9	3.0	1.7	0.84	0.65	1.08
6	1.0	2.2	0.3	1.8	1.2	0.3	1.82	0.53	1.07
7	0.6	1.4	0.4	0.6	0.9	0.4	0.90	0.66	1.00
8	0.7	1.4	0.4	0.8	1.1	0.6	1.24	0.74	1.30
9	2.1	6.9	1.8	2.3	3.3	1.9	1.05	0.48	1.05

表 2 三锅山台阵余震记录的均方根加速度

Table 2 RMS acceleration of the aftershock records from the Sanguoshan array

余震 序号	山底测点均方根 加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			山顶测点均方根 加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)			山顶均方根加速度与山 底均方根加速度之比		
	EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD
1	0.911	1.121	1.231	1.032	0.834	0.795	1.13	0.74	0.65
2	3.306	7.112	5.776	3.708	3.473	1.320	1.12	0.49	0.23
3	4.139	2.951	1.207	6.636	2.616	0.815	1.60	0.89	0.68
4	10.845	6.274	2.881	10.754	6.253	1.615	0.99	1.00	0.56
5	0.322	0.435	0.223	0.517	0.382	0.230	1.61	0.88	1.03
6	4.689	4.875	1.514	3.051	1.713	2.143	0.65	0.35	1.42
7	0.976	0.865	0.481	0.953	0.795	0.425	0.98	0.92	0.88
8	29.868	44.050	7.823	28.987	22.552	8.673	0.97	0.51	1.11
9	0.686	0.907	0.450	1.188	1.034	0.526	1.73	1.14	1.17
10	1.313	1.669	0.963	1.255	2.336	1.124	0.96	1.40	1.17
11	1.115	1.402	1.181	1.198	1.218	0.669	1.07	0.87	0.57
12	18.678	17.552	12.437	13.732	12.011	12.639	0.74	0.68	1.02
13	3.218	1.542	1.006	4.913	2.544	1.177	1.53	1.65	1.17
14	1.223	1.169	0.753	2.268	1.270	0.569	1.85	1.09	0.76
15	9.756	6.103	2.492	8.843	7.418	2.667	0.91	1.22	1.07
16	1.471	1.782	1.013	1.872	1.573	0.962	1.27	0.88	0.95
17	0.998	1.449	0.566	1.498	1.414	0.536	1.50	0.98	0.95
18	1.967	2.254	1.760	2.647	2.801	1.284	1.35	1.24	0.73
19	4.453	9.726	2.063	9.406	8.516	3.643	2.11	0.88	1.77
20	1.688	3.530	0.593	4.622	2.879	0.644	2.74	0.82	1.09
21	1.916	2.128	0.476	3.729	1.890	0.734	1.95	0.89	1.54
22	7.474	8.985	2.380	14.345	3.934	1.649	1.92	0.44	0.69
23	6.536	7.676	1.434	8.783	8.692	1.631	1.34	1.13	1.14

降低的现象，这是由于山体周边土层场地和山体地形两种不同局部场地条件对地震动的作用差异引起的，例如窦圉山台阵观测记录中，5—9 号余震记录的 NS 向山顶均方根加速度明显小于山底，其原因将在下文详细阐述。

2.2 地震动相对持时分析

将地震震害实例与地震动加速度记录进行对比分析可知，强震持时是导致结构破坏的一个重要因素。图 5 给出了自贡西山公园地形效应观测台阵各测点的 90% 地震动持时。可以看出，1 号山脚基岩测点的地震动持时明显低于水平土层场点和其余山体基岩测点，该现象也可以解释地震中山脚房屋震害较轻的特征。对于 NS 向和 UD 向分量，水平自由地表土层测点的地震动持时略高于山体基岩 2—7 号测点，而 EW 向分量水平自由地表土层测点的地震动持时略低于山体基岩 2—7 号测点。山体基岩 1 号测点位于山脚，其三分量地震动持时差别较小，而其余山体基岩测点 EW 向和 UD 向地震动持时则大于 NS 向，且对于同一分量地震动持时差别不大。

窦圉山和三锅山地形效应观测余震记录的分析数据分别列于表 3 和表 4。由山顶与山底的持时比值可以看出，对于大多数记录，山顶地震动持时明显小于山底，这与图 5 中自贡西山公园地形效应观测台阵中山底土层测点与山体测点的相对持时比较结果相似，即山底台站所在的土层场地与山体相比，其对地震动的场地效应更有利于持时的增加。

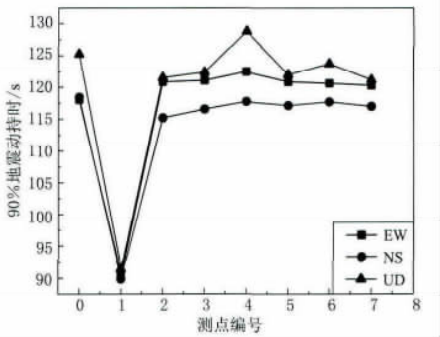


图 5 自贡西山公园台阵各测点 90% 地震动持时的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of 90% relative duration for the eight observation points in Xishan park array

表 3 窦圉山台阵记录余震的山顶、山底地震动持时比较

Table 3 Duration comparison of the aftershock records between the hilltop and the hillfoot of Douchuanshan array

序号	山底测点持时/s			山顶测点持时/s			山顶持时与山底持时之比		
	EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD
1	7.23	12.16	14.29	8.09	7.94	10.87	1.12	0.65	0.76
2	7.03	11.86	5.84	3.31	6.05	11.28	0.47	0.51	1.93
3	23.89	29.64	31.54	22.54	28.44	29.78	0.94	0.96	0.94
4	12.90	9.11	10.05	8.25	7.22	9.04	0.64	0.79	0.90
5	3.12	3.16	7.32	3.99	3.89	6.74	1.28	1.23	0.92
6	3.52	1.74	9.17	1.29	2.16	7.91	0.37	1.24	0.86
7	12.29	6.54	11.92	9.86	5.10	11.36	0.80	0.78	0.95
8	11.15	6.16	9.72	6.54	5.21	7.66	0.59	0.84	0.79
9	16.35	5.51	9.92	11.09	7.85	11.68	0.68	1.43	1.18

2.3 地震动频谱分析

地震动的频谱对于结构反应有重要的影响，因此基于山体地形影响台阵强震动记录的频谱分析可为山体周边结构的抗震设计提供依据。本文中地震动记录频谱分析的滤波频带设为 0.05—25.0 Hz，并采用谱窗中的 Parzen 窗进行平滑，谱窗带宽取为 0.5 Hz。

表 4 三锅山台阵记录余震的山顶、山底地震动持时比较

Table 4 Duration comparison of the aftershock records between the hilltop and the hillfoot of Sanguoshan array

序号	山底测点持时/s			山顶测点持时/s			山顶持时与山底持时之比		
	EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD
1	16.35	15.685	13.87	14.65	14.155	14.105	0.90	0.90	1.02
2	1.21	0.725	0.68	1.035	0.795	2.8	0.86	1.10	4.12
3	1.6	2.38	5.7	0.88	1.875	6.31	0.55	0.79	1.11
4	0.46	0.955	1.365	0.435	0.765	2.13	0.95	0.80	1.56
5	22.445	21.67	23.96	17.49	16.73	20.085	0.78	0.77	0.84
6	0.425	0.38	1.255	0.65	0.74	0.695	1.53	1.95	0.55
7	7.075	9.775	15.545	6.755	6.725	12.485	0.95	0.69	0.80
8	0.35	0.255	0.96	0.885	0.98	1.19	2.53	3.84	1.24
9	16.555	14.155	18.13	12.25	11.23	15.71	0.74	0.79	0.87
10	7.46	6.465	10.54	9.255	3.3	7.295	1.24	0.51	0.69
11	7.045	6.45	6.17	5.975	3.8	8.11	0.85	0.59	1.31
12	0.645	0.645	0.935	0.925	0.67	0.815	1.43	1.04	0.87
13	0.855	2.01	3.03	0.555	0.8	1.83	0.65	0.40	0.60
14	9.955	12.43	15.58	5.67	7.785	15.125	0.57	0.63	0.97
15	4.25	9.03	15.835	5.615	5.235	11.32	1.32	0.58	0.71
16	19.265	19.045	20.265	19.93	19.76	21.185	1.03	1.04	1.05
17	5.235	4.195	10.46	3.185	2.815	7.845	0.61	0.67	0.75
18	1.815	2.065	2.215	1.465	1.2	2.375	0.81	0.58	1.07
19	1.59	0.82	3.445	0.76	0.67	1.41	0.48	0.82	0.41
20	4.245	2.015	12.355	1.105	1.46	8.585	0.26	0.72	0.69
21	1.015	1.135	6.9	0.525	0.75	3.01	0.52	0.66	0.44
22	1.675	1.635	5.845	0.84	3.79	6.18	0.50	2.32	1.06
23	0.69	0.755	2.575	0.655	0.38	1.515	0.95	0.50	0.59

图 6 给出了自贡西山公园地形台阵自由地表土层测点与山体测点不同分量的傅里叶谱。可以看出,对于相同分量,各测点低频段的傅里叶谱幅值有较好的一致性,随着测点高程的增加,在 2.0—5.0 Hz 频段内,傅里叶谱幅值明显变大,即山体地形对该频段地震动强度有明显的放大,由于地震动峰值主要由较高频率成分决定,因此不难解释山体不同位置地震动峰值随着高程的增加而增大。水平自由土层场地测点相对于其它山体基岩测点,在 5.0—9.0 Hz 频段内出现明显峰值,表明土层场地与山体基岩地形场地相比对地震动中该段频率成分的放大作用更为显著,山体基岩场地由于其振动特性,对该频段地震波产生明显滤波作用,这也是导致水平土层测点地震动峰值高于山体测点的主要因素之一。对于山脚基岩测点,虽然与自由地表土层测点位于相同高程,但是由于位于山体基岩上,因此其地震动特性与其余山体基岩测点具有较好的一致性。

图 7 给出了窦圉山地形效应观测台阵余震记录的加速度傅里叶谱,以对比山底与山顶测点在不同频段范围内傅里叶谱幅值的相对变化。可以看出,在小于 1.0 Hz 频段内,所有余震记录的山顶与山底傅里叶谱幅值一致性很好,这是由于低频地震动波长较长而容易透射穿过山体传播所致;在 1.0—4.0 Hz 频段范围内,山顶傅里叶谱幅值相对于山底有明显的增幅,表明山顶对该频段范围内地震动能量有明显放大,这与山体的振动特性相关,1 号、3 号、4 号和 9 号中强余震由于在该频段内能量较高,因此放大效应更为明显,而 2 号、

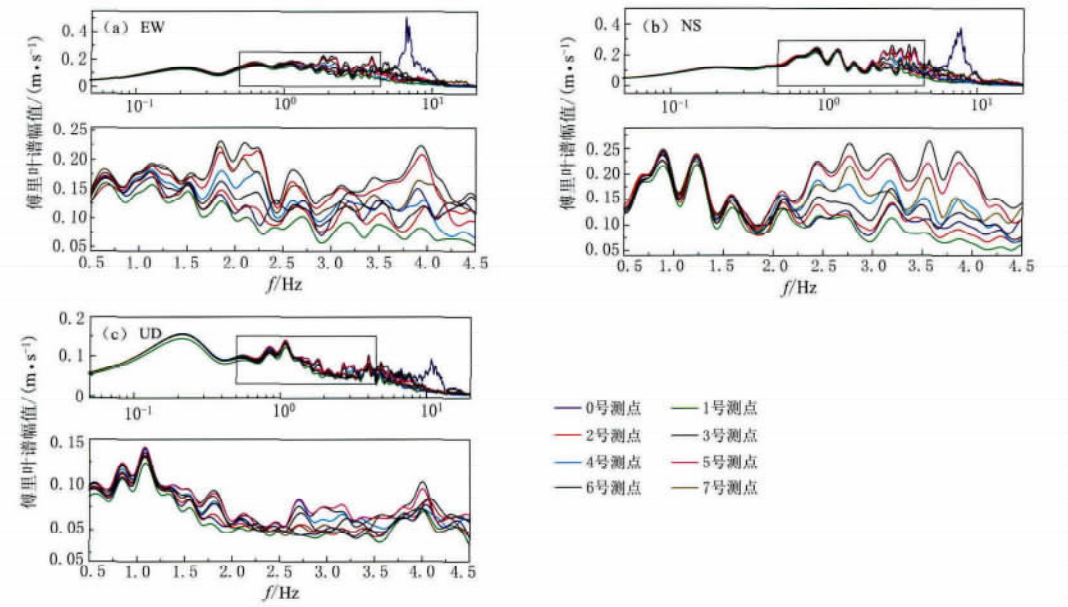


图6 自贡西山公园地形台阵各测点EW向(a)、NS向(b)和UD向(c)分量的傅里叶谱
Fig.6 Fourier spectra of EW (a), NS (b) and UD (c) components for the eight observation points in Xishan park array

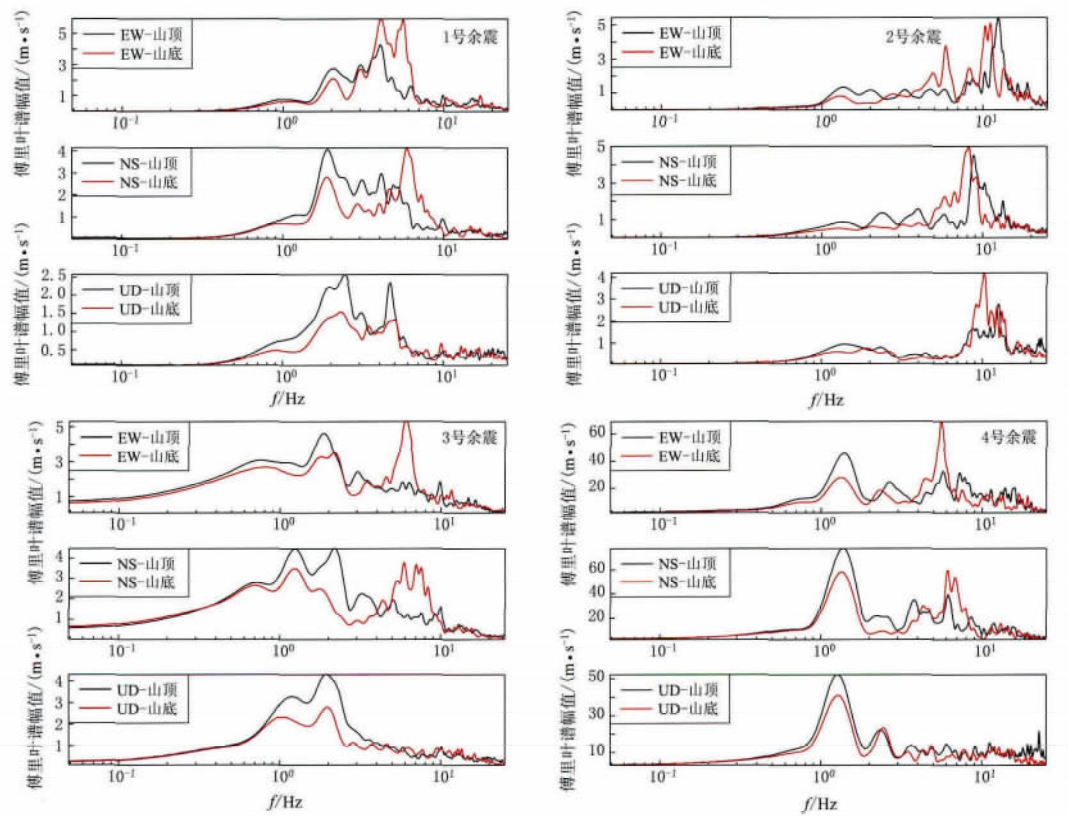


图7 9次余震记录的山顶、山底加速度傅里叶谱的比较(1—4号余震)
Fig.7 Fourier spectra comparison between the hilltop and hillfoot for Nos. 1—4 aftershock

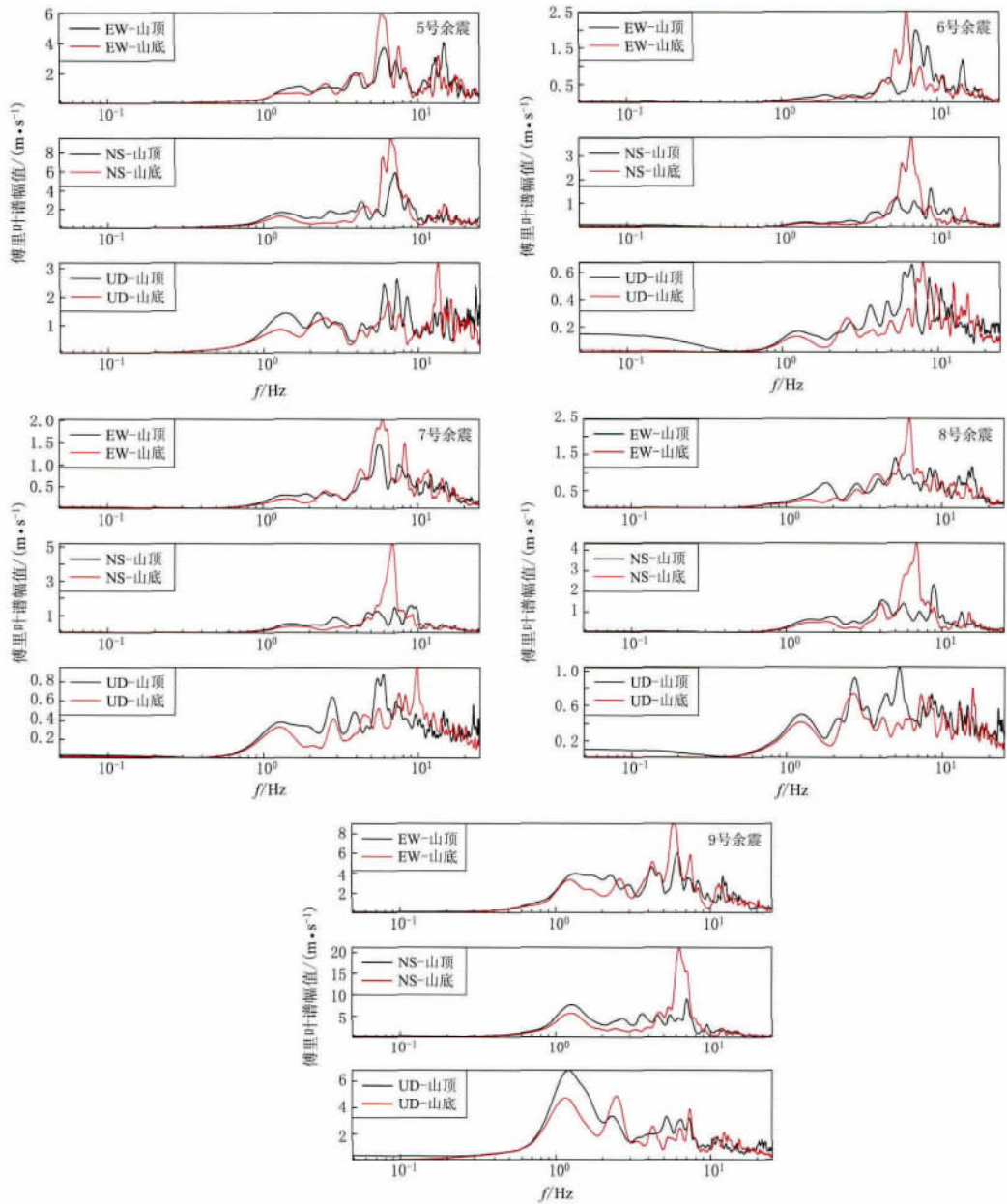


图 7 9 次余震记录的山顶、山底加速度傅里叶谱的比较(5—9 号余震)

Fig. 7 Fourier spectra comparison between the hilltop and hillfoot for Nos. 5—9 aftershock

5—8 号小震在该频段内能量较低, 因此增幅相对较低; 在 5.0—10.0 Hz 频段内, 大多数余震的山顶傅里叶谱幅值明显低于山底幅值, 表明山体对输入地震动中该频段范围内的频率成分产生滤波作用. 由于地震动的中高频成分对加速度峰值贡献明显, 因此不难解释表 1 中窦圉山多数山底测点的地震动均方根加速度明显大于山顶, 特别是 5—9 号余震在 NS 向的均方根加速度尤为明显. 三锅山的山顶与山底地震动加速度傅里叶谱在不同频段范围内的相对变化特征及其与均方根加速度大小的对应关系亦与窦圉山类似.

3 讨论与结论

本文基于自贡西山公园、窦圉山和三锅山地形效应观测台阵的地震动记录, 从均方根加速度、相对持时、频谱特征等方面进行分析, 得到以下结论:

1) 对于自贡西山公园地形台阵, 其山脚基岩测点的地震动幅值和持时明显低于山体周边土层场地和山体基岩测点; 对于该台阵山体基岩测点, 随着测点高程的增加, 其地震动峰值逐渐增大, 而且同一测点的两个水平向地震动强度明显大于竖直向; 山体基岩测点除山脚测点外, 其余测点相同分量的强震动持时变化不大; 山体基岩测点的加速度傅里叶谱相同分量的谱形状走势大体一致, 且随着测点高程的增加相应频段范围内谱幅值亦增加。

2) 山体周边土层场地和山体地形由于自身振动特性差异, 对于相同的地震动输入, 不同频段内的地震动能量放大水平不同, 从而导致二者地表地震动强度产生显著差异; 山体周边土层场地与山体地形相比, 对地震动持时的增加更为明显。这两种局部场地条件对地震动的场地效应机制尚需深入研究。

参 考 文 献

- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社: 94.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering* [M]. Beijing: Seismological Press: 94 (in Chinese).
- 孙崇绍, 闵祥仪, 周民都. 2011. 陇南山区局部地形对地震动强度的影响[J]. 西北地震学报, 33(4): 331–335.
- Sun C S, Min X Y, Zhou M D. 2011. Influence of local topography on ground motion in mountain region of southern Gansu Province[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 33(4): 331–335 (in Chinese).
- 唐晖, 李小军, 李亚琦. 2012. 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. 振动与冲击, 31(8): 74–79.
- Tang H, Li X J, Li Y Q. 2012. Site effect of topography on ground motions of Xishan park of Zigong city[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 31(8): 74–79 (in Chinese).
- 王海云, 谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 53(7): 1631–1638.
- Wang H Y, Xie L L. 2010. Effects of topography on ground motion in the Xishan park, Zigong city[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(7): 1631–1638 (in Chinese).
- 杨宇, 李小军, 贺秋梅. 2011. 自贡西山公园山脊地形和土层效应数值模拟[J]. 震灾防御技术, 6(4): 436–447.
- Yang Y, Li X J, He Q M. 2011. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan Park[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 6(4): 436–447 (in Chinese).
- Boore D M. 1972. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 62(1): 275–284.
- Davis L L, West L R. 1973. Observed effects of topography on ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 63(1): 283–298.
- Hanks T C. 1979. b values and seismic source models: Implications for tectonic stress variations along active crustal fault zones and the estimation of high-frequency strong ground motion[J]. *J Geophys Res*, 84(B5): 2235–2242.
- Hartzell S H, Carver D L, King K W. 1994. Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood Ridge, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 84(5): 1336–1349.
- Husid R L. 1969. Analisis de terremotos: Analisis general[J]. *Revista del IDIEM*, 8(1): 21–42.
- Paolucci R. 2002. Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 31(10): 1831–1853.
- Spudich P, Hellweg M, Lee W H K. 1996. Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake: Implications for mainshock motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*,

86(1B): S193–S208.

Tucker B E, King J L, Hatzfeld D, Nersesov I L. 1984. Observations of hard-rock site effects[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 74(1): 121–136.

附录

表 1 窦圉山流动观测台阵余震记录信息

Table 1 Information of aftershocks recorded by the Douchuanshan mobile observation array

序号	发震时间		M_s	震中位置		震中距/km	方位角
	年-月-日	时:分:秒		北纬/°	东经/°		
1	2008-06-28	05:42:11	5.00	32.32	104.90	46.65	N11°E
2	2008-06-29	07:55:20	4.60	32.09	104.56	30.67	N311°E
3	2008-07-24	15:09:28	6.10	32.82	105.47	118.28	N31°E
4	2008-08-01	16:32:42	5.90	32.07	104.64	24.08	N319°E
5	2008-08-01	16:39:19	4.20	32.12	104.67	26.83	N331°E
6	2008-08-01	18:18:44	3.50(M_L)	32.10	104.62	27.55	N321°E
7	2008-08-01	20:55:27	4.10	32.06	104.62	24.35	N314°E
8	2008-08-02	05:03:03	3.4	32.10	104.86	22.0	N13°E
9	2008-08-07	16:15:34	5.40	32.14	104.59	32.83	N322°E

注：方位角为震中位置相对于山体山顶测点的角度。

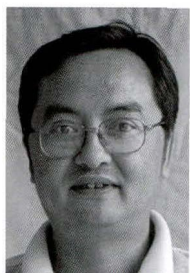
表 2 三锅山流动观测台阵余震记录信息

Table 2 Information of aftershocks recorded by the Sanguoshan mobile observation array

序号	发震时间		M_s	震中位置		震中距/km	方位角
	年-月-日	时:分:秒		北纬/°	东经/°		
1	2008-08-14	18:36:49	4.00	32.39	104.94	15.83	N201.01°E
2	2008-08-15	09:07:49	—	—	—	—	—
3	2008-08-15	21:54:11	3.1(M_L)	32.41	104.93	14	N208.0°E
4	2008-08-16	06:39:12	3.60	32.46	105.09	10.86	N129.27°E
5	2008-08-17	17:18:34	3.70	32.32	104.84	26.87	N213.7°E
6	2008-08-18	03:40:24	—	—	—	—	—
7	2008-08-18	16:04:28	4.00	32.26	104.69	41.24	N225.19°E
8	2008-08-19	14:11:05	3.3	32.40	105.02	14	N172.0°E
9	2008-08-31	15:24:51	4.20	32.77	105.60	62.57	N63.60°E
10	2008-08-31	17:53:12	4.00	32.59	105.29	28.14	N74.05°E
11	2008-09-03	23:20:41	3.80	32.46	104.75	24.72	N253.72°E
12	2008-09-07	22:59:03	3.60	32.57	105.09	10.03	N57.15°E
13	2008-09-10	10:08:55	—	—	—	—	—
14	2008-09-10	13:00:36	4.20	32.59	105.31	30.05	N75.46°E
15	2008-09-11	10:53:44	4.60	32.44	105.17	18.46	N120.04°E
16	2008-09-12	01:38:59	6.00	32.96	105.62	75.73	N49.85°E
17	2008-09-15	02:05:26	3.1(M_L)	32.37	104.91	19	N206.0°E
18	2008-09-15	23:06:58	2.8(M_L)	32.53	105.16	15	N86.0°E
19	2008-09-17	02:28:51	3.3(M_L)	32.21	105.06	35	N171.0°E
20	2008-09-18	18:50:24	3.60	32.34	105.02	20.36	N175.62°E
21	2008-09-20	02:46:44	—	—	—	—	—
22	2008-09-22	12:44:36	3.90	32.37	104.99	17.05	N183.16°E
23	2008-09-23	23:35:55	2.9(M_L)	32.56	105.01	4	N12.0°E

注：“—”表示缺少资料，方位角为震中位置相对于山体山顶测点的角度。

作者简介



钱晓东 云南省地震局地震预报研究中心副研究员。1985 年云南大学地球物理学专业毕业, 获学士学位。曾从事数字地震学、地震活动性方面的研究工作, 现从事地震预测预报研究工作。中国地震学会成员。



李伟华 北京交通大学土木建筑工程学院副教授。2004 年北京交通大学岩土工程专业毕业, 获工学博士学位。现主要从事土动力学、地震波动理论及地下结构抗震方面的研究工作。中国振动工程学会土动力学分会青年工作委员会会员。



耿冠世 中国地震局第一监测中心测量工程院工程师。2009 年中国地质大学(北京)地球物理学专业毕业, 获理学学士学位; 同年进入中国地震局地球物理研究所硕博连读, 于 2015 年获固体地球物理学博士学位。现主要从事被动源面波探测及场地放大效应的研究工作。



王圣柱 中石化胜利油田西部新区研究院高级工程师。2006 年中国石油大学(华东)矿产普查与勘探专业毕业, 获工学硕士学位; 现为中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业在读博士生。现主要从事地球物理方法研究和油气勘探区带评价等方面的工作。



王 伟 防灾科技学院防灾工程系讲师。2005 年吉林大学建设工程学院勘查技术与工程专业毕业, 获工学学士学位; 2008 年中国地震局工程力学研究所岩土工程专业毕业, 获工学硕士学位; 2011 年中国地震局工程力学研究所防灾减灾工程及防护工程专业毕业, 获工学博士学位。现主要从事局部场地条件下强地面运动的研究工作。



肖 卓 中国地震局地震预测研究所读硕士研究生。2011 年中国地质大学(武汉)地球物理学专业毕业, 获理学学士学位。现主要从事重复地震、尾波干涉等方面的研究工作。



王 飞 北京市地震局副研究员。2003 年青岛农业大学土木工程专业毕业, 获工学学士学位; 2006 年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业, 获理学硕士学位。现主要从事场地地震反应分析和强震动观测等方面的研究工作。

注: 李大虎、刘泽民、郭星、陈鲲、徐龙军、王梅、杨陈、朱涛等的简介分别见本刊 Vol. 34, No. 3; Vol. 33, No. 5; Vol. 36, No. 6; Vol. 32, No. 2; Vol. 27, No. 6; Vol. 31, No. 6; Vol. 35, No. 2; Vol. 23, No. 4.