

许亚吉、杨晶琼、蔡明军等,2019,云南测震台网台站场地响应与 M_L 震级测定的讨论,中国地震,35(1),84~95.

云南测震台网台站场地响应 与 M_L 震级测定的讨论

许亚吉 杨晶琼 蔡明军 李丹宁

云南省地震局,昆明 650224

摘要 利用 2016 年云南测震台网记录到的地脉动数据,运用 H/V 谱比法计算分析了 47 个测震台站在 0.1~20.0Hz 频段内的场地响应。选取 2012~2016 年期间云南测震台网记录到的 $M_L \geq 2.5$ 地震做单台震级偏差统计分析,挑出受场地放大作用而出现单台震级大于台网平均震级的台站做去场地放大校正,然后重新统计单台震级偏差情况。计算结果显示云南测震台网的台站受台基条件和所处位置等地质构造因素影响,均存在一定程度的场地放大作用,大部分台站场地响应的卓越频率为 1~6Hz,放大倍数为 2~4 倍。受场地放大作用的影响,大姚、芒市等 19 个台站的单台 M_L 震级大于台网平均震级。在去除场地放大作用后,台站单台震级与台网平均震级的偏差有所减小。

关键词: 场地响应 H/V 谱比法 震级偏差

[文章编号] 1001-4683(2019)01-0084-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

场地响应是指场地基岩之上覆盖的松软土层对地震动的影响。基岩上覆盖的松软土层,由于其密度和波速相对较低,造成介质的阻抗较小,而地震波的振幅与阻抗的平方根成反比,当地震波传播到低速、低密度固体中时,振幅会增大。因此与同震中距基岩场地相比,沉积层上面的场地受同一个地震产生的晃动更加剧烈 (Shearer, 1999)。

目前在场地响应分析上运用最多的是经验方法,即利用地震观测资料,或是地脉动资料来进行分析。根据是否引入参考台站,经验方法又可分为参考台站法和非参考台站法。参考台站法是最早用于分析场地响应的方法,由 Borchardt(1970)首先提出。该方法需选取架设在理想基岩上的台站作为参考台站,再将所要研究的台站与其作比较。Andrews(1986)后来将该方法进行扩展,提出线性反演方法,可从地震记录中分离出震源、传播路径和场地响应,但在实际应用中很难找到理想的参考台站。于是,研究者们提出了非参考场地方法 (Nakamura, 1989; Moya et al, 2000)。Moya 方法(地面运动反演法)通过多台多震联合反演地震的震源谱和台站的场地响应,避开了难以选取参考台站的问题。该方法需要对震源模型的有效性及其样本事件震源谱的准确性进行检验 (张红才等, 2015)。 H/V 谱比法(水平与垂

[收稿日期] 2018-11-09; [修定日期] 2019-01-25

[项目类别] 中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20170621)、云南省地震局青年地震科学基金(2018k02)共同资助

[作者简介] 许亚吉,男,1983年生,工程师,主要从事地震监测、数字地震学工作。E-mail: xu5149381@163.com

直向之比法)也是常用的一种非参考场地方法,该方法利用地动记录的水平向和垂直向的振幅谱之比来评估场地的卓越频率和放大系数。 H/V 谱比法选用的分析数据可以是地脉动数据,也可以是地震数据。国内外许多研究者利用此方法进行了大量的相关研究(郭明珠等, 2000; 马淑芹等, 2001、2007; Ducellier et al, 2013)。王赟赟(2009)利用 2007 年 6 月 3 日宁洱地震时记录到的 S 波资料和脉动观测资料,分别计算了宁洱震区 12 个台站的场地响应,对比发现:当台站场地为基岩或覆盖层较薄时,由脉动数据和地震波数据分别计算的谱比曲线一致性较好。 H/V 谱比法方法操作简便,计算得到的场地响应曲线与 Moya 方法的结果有较好的一致性(华卫等, 2010)。

台站记录到的地震波振幅受地震波几何扩散、记录场地情况等因素影响而出现不同特征。测震台网在计算震级时,用量规函数来补偿地震波在传播路径上的衰减,而台基情况一般没有考虑。因为,通常认为固定台站建在理想的基岩场地上,台站记录到的地震动是没有经过放大的。但从近年来的许多相关研究中(刘丽芳等, 2007; 朱荣欢等, 2007; 李丹宁, 2016)可知,大多数架设在基岩上的台站并不是完全无放大作用的。本文利用云南测震台网记录到的地脉动数据,采用 H/V 谱比法得到 47 个台站的场地响应。通过单台震级偏差统计分析,得到各台站的单台震级偏差情况。对受场地放大作用明显且单台震级大于台网平均震级的台站做校正。对比分析校正前后台站单台震级的偏差情况。

1 场地响应计算

1.1 计算方法

H/V 谱比法的基本原理为:设 V_s 、 H_s 分别为地表处垂直分量和水平分量的地震动振幅谱, V_b 、 H_b 为基底处垂直分量和水平分量的地震动振幅谱,传递函数为(马淑芹等, 2001)

$$S = \frac{H_s}{H_b} \quad (1)$$

Nakamura(1989)根据深井微震实验,证明井下基岩处地震动水平分量及垂直分量的振幅谱之比近似等于 1,即

$$\frac{H_b}{V_b} \approx 1 \quad (2)$$

马淑琴(2001)利用唐山强震观测台阵提供的井下和地面数字测震资料证实了井下基岩处地震动水平分量和垂直分量大致相等,垂直分量经过软土层之后基本没有被放大,因此有

$$V_s \approx V_b \approx H_b \quad (3)$$

则传递函数可简化为 H/V 谱比

$$S = \frac{H_s}{V_s} \quad (4)$$

根据式(4),用台站记录到的水平向与垂直向的地震动振幅谱之比,可得到台站的场地响应。

1.2 数据的挑选

为较好地反映场地动力特性,本文从云南测震台网 47 个台站(图 1)2016 年 1~12 月观测到的地脉动数据中,挑选人工噪声干扰最小的时段(0~6 时),根据各台站及仪器的运行情

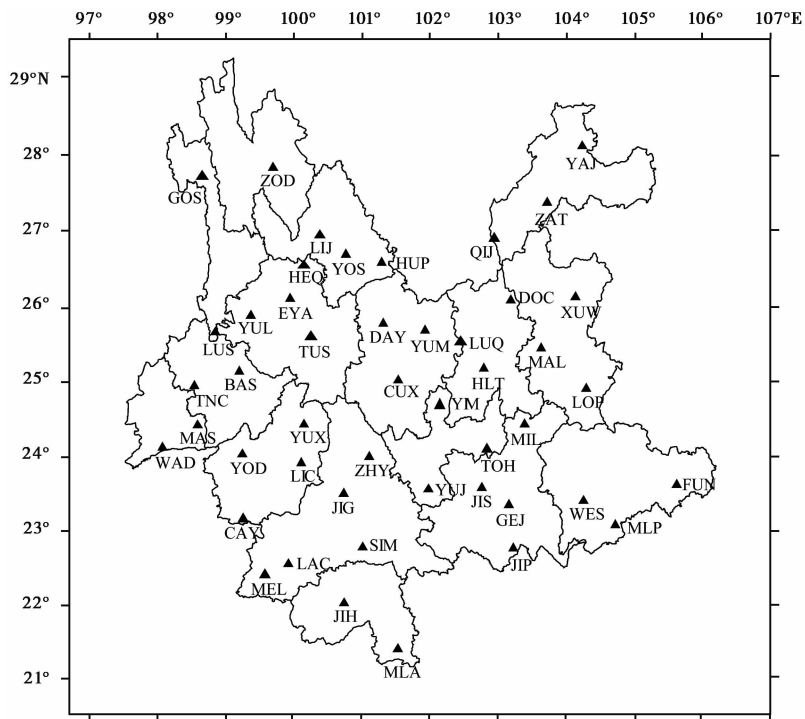


图 1 云南台网台站分布

BAS:保山台;CAY:沧源台;CUX:楚雄台;DAY:大姚台;DOC:东川台;EYA:洱源台;FUN:富宁台;GEJ:个旧台;GOS:贡山台;HEQ:鹤庆台;HLT:黑龙潭台;HUP:华坪台;JIG:景谷台;JIH:景洪台;JIP:金平台;JIS:建水台;LAC:澜沧台;LIC:临沧台;LIJ:丽江台;LOP:罗平台;LUQ:禄劝台;LUS:泸水台;MAL:马龙台;MAS:芒市台;MEL:孟连台;MIL:弥勒台;MLA:勐腊台;MLP:麻栗坡台;QIJ:巧家台;SIM:思茅台;TNC:腾冲台;TOH:通海台;TUS:团山台;WAD:畹町台;WES:文山台;WUX:宣威台;YAJ:盐津台;YIM:易门台;YOD:永德台;YOS:永胜台;YUJ:元江台;YUL:云龙台;YUM:元谋台;YUX:云县台;ZAT:昭通台;ZHY:镇沅台;ZOD:中甸台

况,每月挑选地脉动记录较平稳的一天,如遇地震、标定或其他干扰,则把数据的时间延后至正常地脉动部分。

1.3 数据的计算

地脉动数据按照 600s 一段,每段数据叠加前面数据的 50% 截取。各台站采样率均为 100Hz,每段数据有 6 万个采样点,每个台站一年 852 段数据。对数据段进行去均值、去直流偏移等处理。在每一段数据的起始和末尾均加 5% 的余弦边窗,使数据段两端平滑地衰减至零,从而减少有限长度数据序列进行快速傅里叶变换时所造成的频率渗漏。应用 FFT 分别计算垂直向振幅谱 $V_s(f)$ 和水平向振幅谱 $H_s(f)$,并采用 Konno 等(1998)的平滑方法对振幅谱进行平滑处理。水平向振幅谱采用 NS 向和 EW 向的合成谱,即

$$H_s(f) = \sqrt{H_{EW}^2(f) + H_{NS}^2(f)} \quad (5)$$

根据平滑后的水平向振幅谱 $H_s(f)$ 和垂直向振幅谱 $V_s(f)$,即可计算得到该时段内的台站场地响应

$$S = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} \quad (6)$$

再将所有时段内的场地响应结果进行平均化,得到各台站的场地响应结果。

2 计算结果与讨论

运用上述计算方法,本文计算了云南测震台网 47 个台站在 0.1~20.0Hz 频段内的场地响应。根据各台站在不同频率点的放大特征,将台站分作 4 类:

(1)0.1~20.0Hz 频段内无明显放大的台站。保山台(BAS)、泸水台(LUS)等 14 个台属于这种情况(图 2)。这些台站的台基情况和观测环境普遍较好,场地响应曲线变化比较平缓且没有明显放大,放大倍数不超过 2 倍,能较好地记录该频段内的地震动。

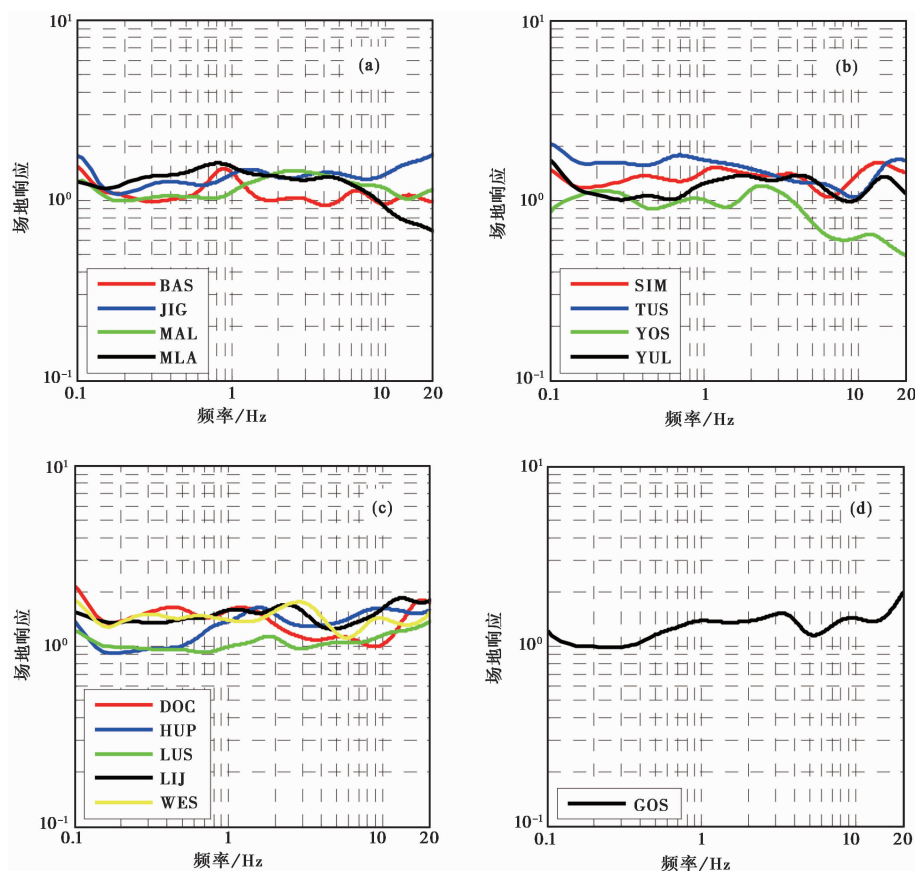


图 2 0.1~20Hz 频段无明显放大的台站场地响应

BAS:保山台;DOC:东川台;GOS:贡山台;HUP:华坪台;JIG:景谷台;LIJ:丽江台;LUS:泸水台;
MAL:马龙台;MLA:勐腊台;SIM:思茅台;TUS:团山台;WES:文山台;YOS:永胜台;YUL:云龙台

(2)0.1~20.0Hz 频段内有较明显放大的台站。云南台网的台站中仅易门台(YIM)出现这种情况(图 3)。易门台虽然建在出露地表的灰岩之上,但该台记录到的地震动在大部分分析频点上有明显的放大,放大倍数在 2.0~2.7 倍之间。这可能与易门地区地质结构复杂,断裂带附近次生裂隙较发育有关。

(3)1~10Hz 频段(中频段)内有明显放大的台站。沧源台(CAY)、楚雄台(CUX)等 27

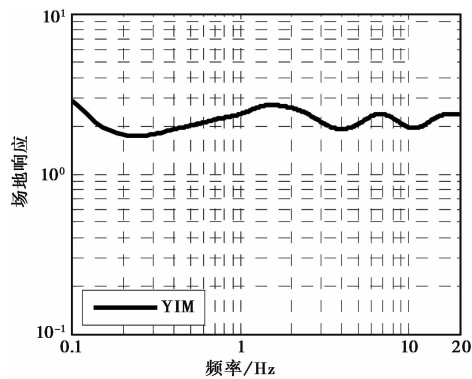


图3 0.1~20Hz频段有明显放大的台站场地响应
YIM:易门台

个台站在1~6Hz的频段内有较明显的场地放大作用,放大倍数为1~3倍。腾冲台在0.3~3.0Hz的低中频段内放大作用明显,放大倍数为1~3倍。金平台(JIP)、大姚台(DAY)2个台由于架设在土石混杂的场地上,在1~2Hz频带内放大4倍左右(图4)。

(4) 10Hz以上频段(高频段)内有频率放大的台站。云南台网仅有建水台(JIS)、弥勒台(MIL)等5个台站属于这类情况。对于这类台站,高频段地震动会受到较明显场地放大作用(图5)。在这类台中,宣威台由于摆房附近土石混杂,其放大倍数在3~5倍之间。

李丹宁等(2016)采用Moya方法,利用2011~2015年云南台网记录到的70个地震S波记录,计算了46个台站在1~15Hz间的场地响应。与本文得到的场地响应结果对比发现:对于大部分台站,2种方法得到的场地放大作用在1~6Hz频段均比较明显;在该频带内2种方法的场地响应变化曲线形态有一定的相似性,但H/V谱比法的结果比Moya方法的结果小,场地响应曲线比较平缓。图7是以文山台(WES)等4个台站为例,用这两种方法得到的场地响应曲线对比图。

从47个台站的场地响应曲线来看,云南台网的台站均存在一定程度的场地放大作用。对于0.1~1.0Hz的地震动,台站的场地放大作用较小,放大倍数在2倍以内;即台站场地对面波的放大作用不明显。对于1~20Hz的地震动,大部分台站有较明显的放大,其卓越频率在1~6Hz,放大倍数为2~4倍。对上述台站,从空间分布上分析,并未发现其具有明显的空间集聚特征。例如:位于滇东南的麻栗坡台,仪器架设时作了挖坑处理,其放大作用相比同样位于滇东南、同为灰岩台基的个旧台和金平台要小,且场地响应曲线也较为平缓。从台基的岩性上分析发现,对于硬度较高的花岗岩和玄武岩台站,场地放大作用较其他岩性的台站要小,且场地响应曲线变化平缓。灰岩台站较砂岩台站变化总体要平缓(图6)。云南地区地质结构复杂,相同岩性的台站,场地响应存在较大差异。例如:芒市台由于台基有一定程度的风化,场地放大作用在1~3Hz时达3倍;而同为砂岩台基的保山台,其放大作用在1.5倍以内。可见云南台网台站的场地响应特征并不能简单归结于某一个因素,台基条件和台站所处位置的地质构造等因素对其均有影响。

3 单台 M_L 震级的偏差统计

地震事件的最终震级是由所有记录台站的单台震级的算术平均值确定的,因此台站的

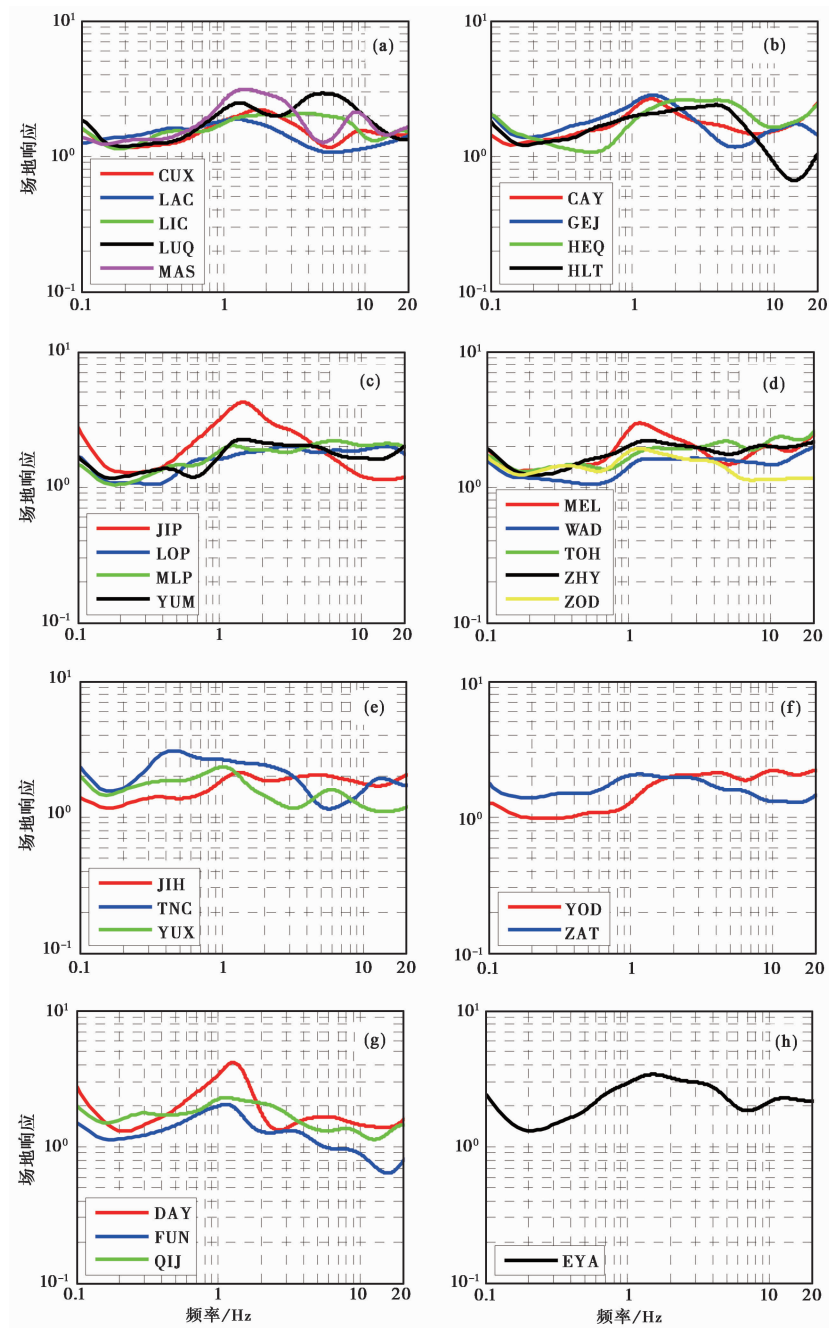


图 4 1~10Hz 频段有明显放大的台站场地响应

CAY: 沧源台; CUX: 楚雄台; DAY: 大姚台; EYA: 洱源台; FUN: 富宁台; GEJ: 个旧台; HEQ: 鹤庆台; HLT: 黑龙潭台; JIH: 景洪台; JIP: 金平台; LAC: 澜沧台; LIC: 临沧台; LOP: 罗平台; LUQ: 禄劝台; MAS: 芒市台; MEL: 孟连台; MLP: 麻栗坡台; TNC: 腾冲台; QIJ: 巧家台; TOH: 通海台; WAD: 畹町台; YOD: 永德台; YUM: 元谋台; YUX: 云县台; ZAT: 昭通台; ZHY: 镇沅台; ZOD: 中甸台

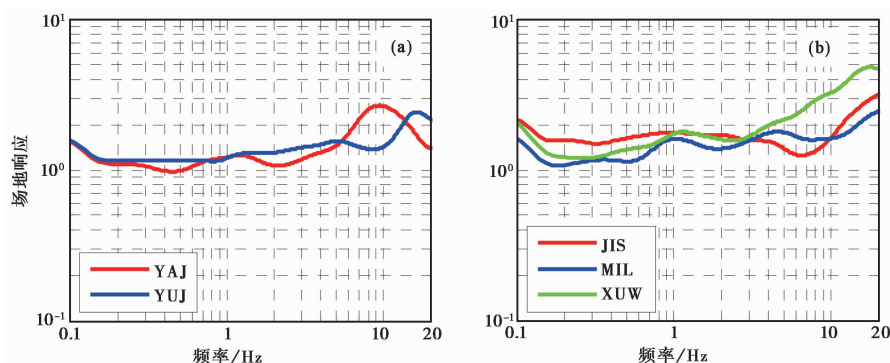


图 5 10Hz 以上频段有明显放大的台站场地响应

MIL: 弥勒台; JIS 建水台; XUW: 宣威台; YAJ: 盐津台; YUJ: 元江台

单台震级和台网平均震级的偏差能很好的评价测震台站计算震级的可靠性,同时也可以作为该台站的单台震级校正值。

设定第 i 个地震第 j 个子台的震级偏差 ΔM_{ij} 为

$$\Delta M_{ij} = M_{ij} - M_i \tag{7}$$

该台的震级偏差均值为

$$\Delta \bar{M}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta M_{ij} \tag{8}$$

其中, M_{ij} 为第 j 个台站测定的第 i 个地震的单台震级; M_i 为第 i 个地震的台网平均震级。选取 2012~2016 年, 云南台网记录到的 $M_L \geq 2.5$ 的地震作为分析样本, 限定每个地震至少有 3 个以上台站记录。由于观测报告中含有大量邻省的台站, 因此我们重新计算台网平均震级, 使邻省台站不参与到云南台网的震级估算, 最终得到地震事件 5128 个, 单台震级记录 40177 条。各台站参数及单台震级偏差情况见表 1。

从各台站的震级偏差情况来看, 保山台 (BAS)、泸水台 (LUS) 等 14 个场地放大作用不明显的台站, 其单台震级小于或接近于台网平均震级。位于滇西北地区的鹤庆台 (HEQ)、洱源台 (EYA)、中甸台 (ZOD), 滇中地区的黑龙潭台 (HLT)、罗平台 (LOP)、弥勒台 (MIL)、通海台 (TOH)、金平台 (JIP)、建水台 (JIS)、元谋台 (YUM)、易门台 (YIM)、元江台 (YUJ), 滇东地区的宣威台 (XUW)、盐津台 (YAJ)、昭通台 (ZAT), 虽然有明显的场地放大作用; 但是在实际震级测定中, 只有洱源台的震级接近台网平均震级 (震级偏差 0.08), 其余单台的震级均小于台网平均震级。这可能与滇西北地区、滇中地区以及滇东地区属于低 Q 值地区 (苏有锦等, 2006), 地震波衰减较强, 以及大姚等 19 个台站导致台网平均震级偏大有关。

对于场地放大作用明显且单台震级偏差大于 0.1 的大姚 (DAY)、芒市 (MAS) 等 19 个台站, 我们根据的 M_L 计算公式

$$M_L = \lg A + R(\Delta) \tag{9}$$

重新计算去除场地放大作用后的单台震级, 并统计单台震级的偏差情况 (表 1)。式中, A 为两水平向地动位移最大振幅的算术平均值; $R(\Delta)$ 为地方性震级的量规函数。去除场地

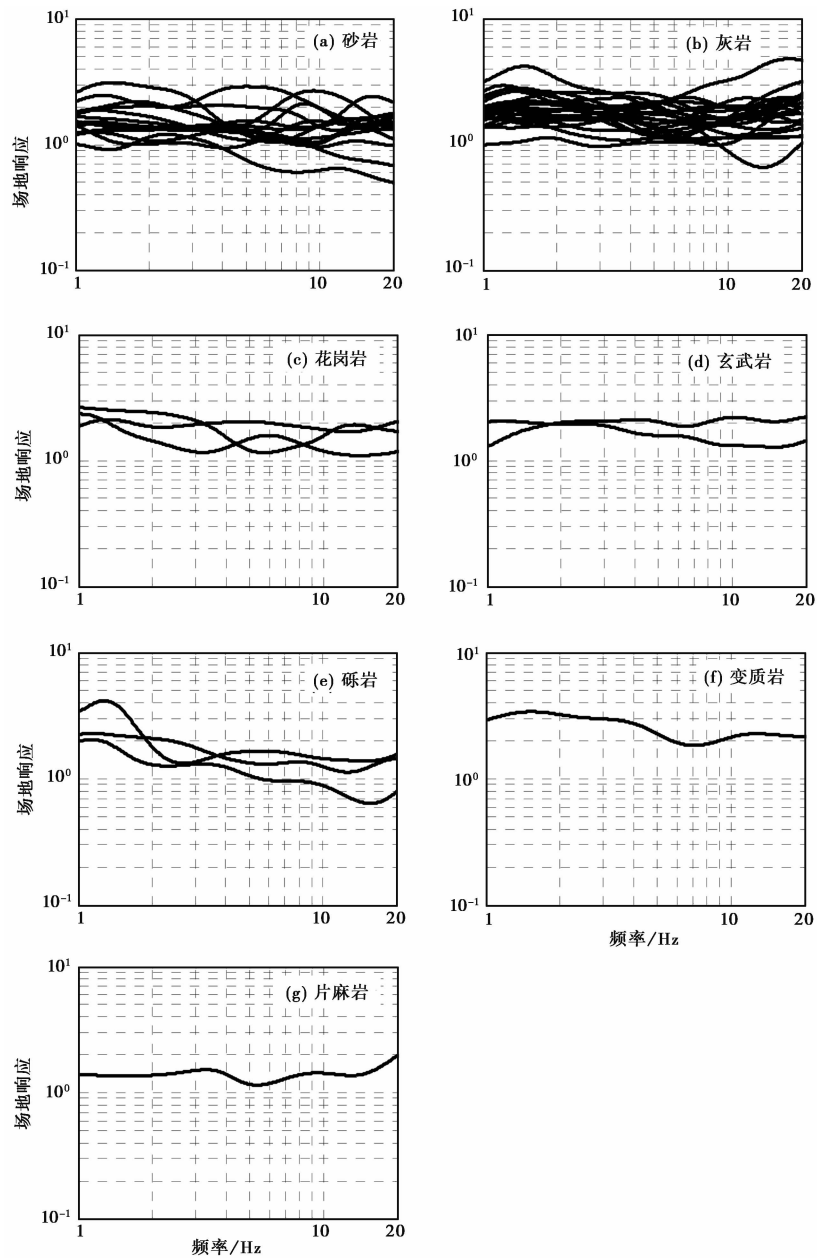


图 6 1~20Hz 频段不同基岩类型的台站场地响应

放大作用后的水平向振幅 $A = \frac{A_N A_E}{\frac{S_N}{2} + \frac{S_E}{2}}$ 。 A_N 、 A_E 分别为 NS 向和 EW 向 S 波的最大振幅； S_N 、 S_E 分别为北南向和 EW 向 S 波振幅的放大倍数，该放大倍数根据实际量取地震波周期对应的频率获取。从表 1 中可以看出：大姚等 19 个台在去除场地放大作用之后，单台震级偏差明显减小；校正之前震级偏差为负值的大部分台站，单台震级偏差值更接近于 0。以 2014 年 5

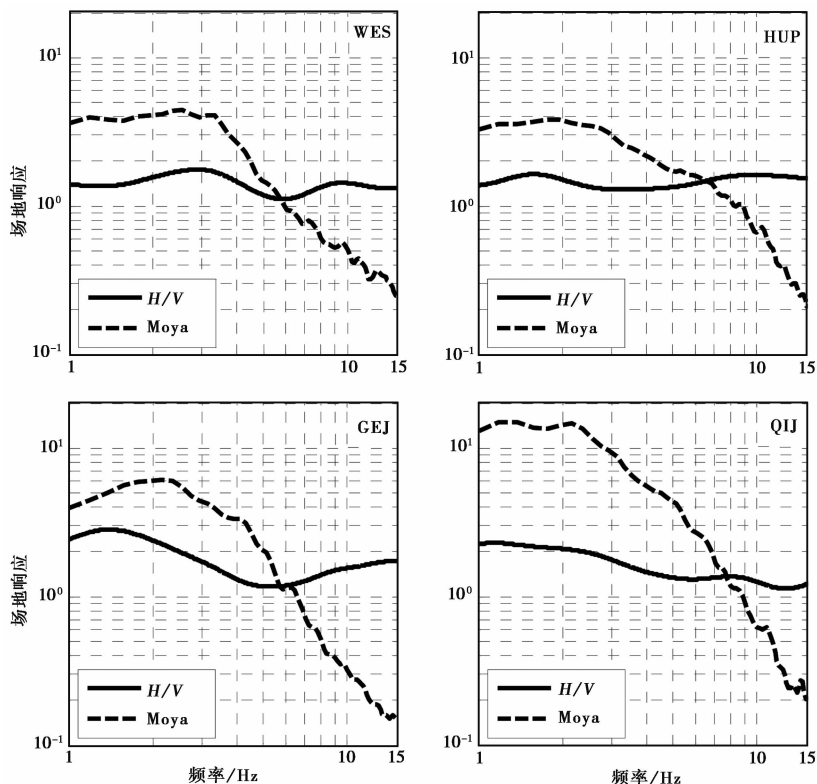


图 7 不同方法得到的场地响应曲线

WES:文山台;HUP:华坪台;GEJ:个旧台;QIJ 巧家台

月 28 日 20:29:10 盈江 M_L 2.9 地震为例,该地震有 9 个台站记录到。各台站计算的 M_L 震级分别为:腾冲 2.7、芒市 3.4、畹町 3.0、保山 2.5、泸水 2.6、永德 3.0、云县 3.0、洱源 3.0、沧源 3.1。根据实际量取地震波的周期,对腾冲、芒市、畹町、永德、云县、沧源做去场地放大校正后, M_L 震级分别为:腾冲 2.3、芒市 2.8、畹町 2.8、永德 2.6、云县 2.8、沧源 2.7,台网平均震级为 M_L 2.7。经过校正,各台站的单台震级离散度减小,震级偏差减小。

4 结论

本文利用云南测震台网各台站记录到的地脉动数据,采用 H/V 谱比法计算分析台站的场地响应情况,并通过分析各台站的单台震级与台网平均震级的偏差情况得到以下结论:

(1) 云南测震台网的 47 个台站均存在一定程度的场地放大作用。保山台、泸水台等 14 个台基情况和观测环境普遍较好的台站放大倍数不超过 2 倍。其余大部分台站场地响应的卓越频率为 1~6Hz,放大倍数为 2~4 倍。建水台、弥勒台等 5 个台站对 10Hz 以上的高频段地震动有明显场地放大作用。大姚、金平、宣威由于台站附件场地土石混杂,场地放大超过 4 倍。

(2) 基岩硬度越大,场地放大作用越小,且场地响应曲线变化平缓。同类型基岩的台站受台站的台基条件和所处位置的地质构造等因素影响,场地响应特征出现较大差异。

表 1 云南台网 47 个测震台的台站参数及单台震级偏差统计情况

台名	代码	基岩类型	地震计		样本数	震级偏差情况			
			仪器型号	频带范围		校正前		校正后	
						偏差范围	均值	偏差范围	均值
保山台	BAS	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	1624	-0.8~0.50	-0.13	-0.50~0.70	0.12
沧源台	CAY	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	1267	-1.7~1.20	0.16	-1.77~1.05	0.04
楚雄台	CUX	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	843	-0.4~0.70	0.18	-0.95~0.37	0.04
大姚台	DAY	砾岩	KS-2000M	60s~50Hz	828	-0.3~1.00	0.36	-1.08~0.71	0.04
东川台	DOC	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	735	-0.6~0.60	-0.03	-0.50~0.80	0.10
洱源台	EYA	变质岩	CTS-1E	120s~50Hz	1465	-0.7~0.70	0.08	-0.40~0.80	0.05
富宁台	FUN	砾岩	CTS-1E	120s~50Hz	74	-0.1~0.90	0.42	-0.36~0.76	0.30
个旧台	GEJ	灰岩	CTS-1E	120s~50Hz	291	-0.6~0.70	0.20	-1.24~0.21	0.09
贡山台	GOS	片麻岩	GL-S60	60s~50Hz	726	-0.8~1.00	-0.15	-0.60~1.30	0.01
鹤庆台	HEQ	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	1110	-1.3~0.80	-0.14	-1.10~1.10	0.06
黑龙潭台	HLT	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	342	-0.7~0.40	-0.17	-0.50~0.70	0.07
华坪台	HUP	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	1262	-0.8~0.80	-0.09	-0.80~1.00	0.09
景谷台	JIG	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	1149	-1.4~0.90	-0.15	-0.90~1.20	0.07
景洪台	JIH	花岗岩	GL-S60	60s~50Hz	682	-1.2~1.10	0.13	-1.44~0.89	0.03
金平台	JIP	灰岩	BBVS-120	120s~50Hz	287	-0.9~0.50	-0.21	-0.50~0.80	0.05
建水台	JIS	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	352	-0.7~0.50	0.18	-1.07~0.40	0.10
澜沧台	LAC	砂岩	KS-2000M	60s~50Hz	722	-0.6~0.70	0.15	-0.67~0.67	0.02
临沧台	LIC	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	1326	-0.8~1.40	0.17	-1.00~0.90	-0.12
丽江台	LIJ	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	950	-0.9~0.70	-0.15	-0.70~0.90	-0.01
罗平台	LOP	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	110	-0.7~0.30	-0.06	-0.50~0.50	0.10
禄劝台	LUQ	砂岩	KS-2000M	60s~50Hz	611	-0.4~0.80	0.19	-1.10~0.38	-0.13
泸水台	LUS	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	1474	-1.0~1.20	-0.14	-0.60~1.40	0.03
马龙台	MAL	砂岩	KS-2000M	60s~50Hz	299	-0.9~0.70	-0.12	-0.60~0.80	-0.04
芒市台	MAS	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	1466	-0.2~1.00	0.46	-0.78~0.73	0.10
孟连台	MEL	灰岩	CTS-1E	120s~50Hz	772	-0.7~0.80	0.20	-1.01~0.61	0.02
弥勒台	MIL	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	252	-0.9~0.40	-0.31	-0.70~0.70	-0.06
勐腊台	MLA	砂岩	BBVS-120	120s~50Hz	519	-1.2~0.80	0.00	-1.00~1.10	0.13
麻栗坡台	MLP	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	162	-0.6~1.00	0.29	-0.89~0.60	0.25
巧家台	QIJ	砾岩	BBVS-60	60s~50Hz	998	-0.2~0.90	0.35	-0.83~0.70	0.17
思茅台	SIM	砂岩	GL-S60	60s~50Hz	846	-0.6~0.90	0.03	-0.40~0.90	0.12
腾冲台	TNC	花岗岩	KS-2000M	60s~50Hz	1474	-0.6~0.80	0.24	-0.81~0.67	0.03
通海台	TOH	灰岩	CTS-1EF	120s~50Hz	313	-0.7~0.50	-0.13	-0.50~0.70	0.10
团山台	TUS	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	926	-0.7~0.90	0.05	-0.40~1.00	0.13
畹町台	WAD	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	1419	-0.9~1.00	0.16	-1.08~0.93	0.09
文山台	WES	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	163	-0.7~1.20	0.02	-0.50~1.30	0.15
宣威台	XUW	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	563	-0.8~0.40	-0.35	-0.70~0.40	-0.20
盐津台	YAJ	砂岩	GL-S60	60s~50Hz	618	-0.7~1.30	-0.10	-0.50~1.30	0.06

续表 1

台名	代码	基岩类型	地震计		样本数	震级偏差情况			
			仪器型号	频带范围		校正前		校正后	
						偏差范围	均值	偏差范围	均值
易门台	YIM	灰岩	BBVS-60	60s~50Hz	743	-0.9~0.50	-0.15	-0.60~0.80	0.15
永德台	YOD	玄武岩	KS-2000M	60s~50Hz	1683	-0.4~0.90	0.16	-0.63~0.61	0.10
永胜台	YOS	砂岩	GL-S60	60s~50Hz	1324	-0.7~0.80	0.05	-0.50~0.90	0.13
元江台	YUJ	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	778	-1.2~0.30	-0.45	-0.80~0.70	-0.11
云龙台	YUL	砂岩	BBVS-60	60s~50Hz	1873	-1.5~0.50	-0.08	-1.10~0.80	0.01
元谋台	YUM	灰岩	GL-S60	60s~50Hz	805	-1.3~0.50	-0.23	-1.00~0.80	0.01
云县台	YUX	花岗岩	BBVS-60	60s~50Hz	1696	-0.6~0.80	0.20	-0.77~1.00	0.13
昭通台	ZAT	玄武岩	CTS-1E	120s~50Hz	784	-0.6~0.80	-0.10	-0.50~0.90	0.08
镇沅台	ZHY	灰岩	GL-S120	120s~50Hz	719	-0.6~1.00	0.19	-0.84~0.60	0.05
中甸台	ZOD	灰岩	BBVS-120	120s~50Hz	752	-1.1~0.60	-0.15	-0.90~0.80	-0.03

(3) 台站记录的 S 波振幅受地震波衰减、记录场地等因素的共同作用。从云南台网的震级偏差统计情况来看,虽然云南测震台网的 47 个台站均存在一定程度的场地放大作用,但 M_L 震级受场地放大作用影响而出现单台震级大于台网平均震级的台站只有大姚、芒市等 19 个台站。去除场地的放大作用后,单台震级与台网平均震级的偏差有所减小。

致谢: 本文在撰写过程中得到福建省地震局张红才、于培青的支持与帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献

郭明珠、宋泽清,2000,论地脉动场地动力特性分析中的 Nakamura 方法,世界地震工程,16(2),88~92.

华卫、陈章立、郑斯华,2010,利用不同方法估算流动台站的场地响应,地震,30(3),30~44.

李丹宁、马志斌、续外芬等,2016,云南地区非弹性衰减系数及场地响应研究,大地测量与地球动力学,36(12),1041~1046.

刘丽芳、苏有锦、刘杰等,2007,用 Moya 方法反演云南数字地震台站场地响应,地震研究,30(1),39~42.

马淑芹、龚绍京、栗连弟等,2001,使用地面单台三分向地震记录资料评估场地效应方法的研究,西北地震学报,23(3),269~273.

马淑芹、栗连弟、卞真付等,2007,用 Nakamura 技术评估天津地区场地效应,中国地震,23(1),25~34.

苏有锦、刘杰、郑斯华等,2006,云南地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究,地震学报,28(2),206~212.

王赟赟、钱进、崔建文等,2009,利用宁洱地震强震记录分析场地响应,地震研究,32(2),151~154.

张红才、徐嘉隽、陈智勇,2015,基于噪声谱比法的福建台网观测台站的场地响应研究,地震学报,37(6),1045~1058.

朱荣欢、苏有锦,2007,用 H/V 谱比法计算云南区域数字地震台站的场地响应,地震研究,30(3),248~252.

Andrews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, In: Das S, Boatwright J, Scholz C H, Earthquakes Source Mechanics, 29~267, Washington D.C.: AGU.

Borcherdt R D, 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull Seismol Soc Am, 60(1), 29~61.

Ducellier A, Kawase H, Matsushima S, 2013, Validation of a new velocity structure inversion method based on horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake motions in the Tohoku area, Japan, Bull Seismol Soc Am, 103(2A), 958~970.

Konno K, Ohmachi T, 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, Bull Seismol Soc Am, 88(1), 228~241.

Moya A, Aguirre J, Irikura K, 2000, Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic

algorithms, Bull Seismol Soc Am, **90**(4), 977~992.

Nakamura Y, 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quart Rep Railway Tech Res Inst, **30**(1), 25~33.

Shearer P M, 1999, Introduction to Seismology, New York: Cambridge University Press.

Discussion of Site Response and Magnitude (M_L) Determination in Yunnan Digital Seismic Network

Xu Yaji Yang Jingqiong Cai Mingjun Li Danning

Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

Abstract Using micro tremors noise data recorded by the Yunnan Digital Seismic Network in 2016, we analyzed the site response of 47 seismic stations in 0.1~20Hz frequency band, based on the H/V spectral ratio method. We analyzed the single magnitude deviation recorded from earthquakes of $M_L \geq 2.5$ in the Yunnan Digital Seismic Network from 2012 to 2016. The stations with single magnitude greater than the average magnitude of network are selected, and their single magnitude deviation are recalculated. The results show that all stations of the Yunnan Digital Seismic Network have a degree of site amplification because of many factors, such as the situation of site platform and geological structure. For most seismic stations, the excellent site response frequency is 1~6Hz, and the amplification is 2~4 times. Due to the effect of the site amplification, the single M_L magnitudes of 19 stations such as Dayao and Mangshi are greater than the average magnitude of the network. The deviations between the single magnitude and the average magnitude of the network are decreased, after the removal of the site amplification.

Key words: Site response; H/V spectral ratio method; Magnitude deviation