

姜秀璇,郭晓,范兵,等.祁连山主动源观测台站场地响应分析[J].地震工程学报,2021,43(6):1343-1351.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1343

JIANG Xiuxuan, GUO Xiao, FAN Bing, et al. Site response of active-source observation stations in the Qilian Mountains[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1343-1351. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1343

# 祁连山主动源观测台站场地响应分析

姜秀璇<sup>1</sup>, 郭 晓<sup>1,2</sup>, 范 兵<sup>1,2</sup>, 邹 锐<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 场地响应是精确测定震源参数和稳健估计出高精度地壳介质衰减变化的关键影响因素之一, 采用  $H/V$  尾波谱比法, 对祁连山主动源观测台网中 40 个短周期观测台站的场地响应进行了分析。结果表明, 祁连山主动源观测台网中 40 个短周期观测台站均存在不同程度的放大(衰减)作用, 根据 40 个台站观测波形的尾波场地响应曲线特征, 可将其分为平坦类、放大类、高频衰减类, 在 1~20 Hz 频段内部分台站场地响应曲线呈现平坦, 场地响应值为 1~2 倍; 而大部分台站在不同频段有明显放大(衰减)作用, 场地响应值为 0.3~9 倍。台站基岩性可能是决定场地响应曲线特征和大小的主要因素, 且与台基介质密度具有反相关性。

**关键词:** 甘肃地区; 主动源观测台网;  $H/V$  谱比法; 场地响应

**中图分类号:** P319

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2021)06-1343-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1343

## Site response of active-source observation stations in the Qilian Mountains

JIANG Xiuxuan<sup>1</sup>, GUO Xiao<sup>1,2</sup>, FAN Bing<sup>1,2</sup>, ZOU Rui<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** Site response is one of the key factors affecting the accurate determination of source parameters and robust estimation of high-precision crustal medium attenuation. In this paper, the site responses of 40 short-period observation stations in the active-source observation network of Qilian Mountains were analyzed by using the  $H/V$  spectra ratio method. The results showed that the 40 short-period observation stations in the Qilian Mountains active-source observation network have amplification (attenuation) effect in varying degrees. According to the characteristics of coda site response curves of 40 stations, they can be divided into three types: flat, amplifica-

收稿日期: 2021-04-11

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH20060); 国家重点研发计划课题(2018YFC150 3206)

第一作者简介: 姜秀璇(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事主动震源技术应用研究。E-mail: j\_xx1116@163.com。

通信作者: 郭 晓(1974—), 男, 副研究员, 主要从事主动震源技术应用、地震波衰减研究。E-mail: guox@gsdzj.gov.cn。

tion, and high-frequency attenuation. The site response curves of some stations are flat in the frequency band of 1–20 Hz, and the site response value is 1–2 times; Most stations have obvious amplification (attenuation) effect in different frequency bands, and the site response value is 0.3–9 times. The lithology of station foundation may be the main factor determining the characteristics and size of site response curve, which has an inverse correlation with the medium density of station foundation.

**Keywords:** Gansu area; active-source seismic network;  $H/V$  spectra ratio method; site response

## 0 引言

场地响应描述为观测台站附近地下浅层介质对地震动放大(衰减)的作用。在测定地震震源参数时,除了传播路径效应与仪器响应影响,台站的场地响应也是关键影响因素之一。研究台站的场地响应不仅可以提高利用地震波形数据分析震源参数的可信度,同时还可以为单台震级的校正提供依据<sup>[1]</sup>。监测地壳介质衰减状态及其时空分布特征,特别是地壳介质衰减动态变化的信息,能够揭示中强地震的孕育过程,加深对发震构造环境及其动力学过程的认识,进而为防震减灾提供必要保障,场地响应的获得可稳健估计出高精度的地壳介质衰减变化<sup>[2]</sup>。目前计算台站场地响应的方法主要有两种:Moya方法和 $H/V$ 谱比法。Moya方法为基于Brune的 $\omega^2$ 震源谱参数来计算绝对场地响应的方法,采用该方法时需要确定低频段水平幅值和拐角频率的准确性; $H/V$ 谱比法为地震波水平分量与垂直分量做比值的方法,其根据数据类型又可分为噪声谱比法与地震数据谱比法,该方法操作简单且可信度较高,是最常用的非参考场地法之一<sup>[3-4]</sup>。尾波所描述的是各个方向的综合地震信息,且默认尾波仅由于衰减和几何扩散而导致的振幅减少,故利用尾波研究场地响应,其结果具有一定的可靠性。

由于 $H/V$ 谱比法操作简单,且往往能获得较高可信度的结果,故诸多学者都应用 $H/V$ 谱比法做了大量的研究<sup>[5-12]</sup>;朱荣欢等人通过 $H/V$ 谱比法对云南区域数字地震台网台站的场地响应进行研究,得到了各台站场地响应在低频段相对平坦、在高频段有一定放大的结论;张红才等人将 $H/V$ 谱比法与Moya方法得到的场地响应结果进行对比分析发现,两种方法所得结论具有较好的一致性,表明谱比法结果具有一定可信度;张珂等人运用 $H/V$ 噪声谱比法得到内蒙古西部12个台站的场地响应,根据特征分为平坦类、中频放大类和高频放大类。为

获取祁连山主动源野外观测台站场地响应,基于祁连山主动源野外观测系统记录到的天然地震波形资料,本文拟采用 $H/V$ 谱比法计算祁连山主动源系统的40个短周期观测台站的场地响应,并对场地响应结果和影响因素进行了讨论分析。

## 1 台站资料及地震记录选取

甘肃祁连山主动源重复探测系统旨在对祁连山地区地壳速度结构进行动态监测,对地震孕育过程实时监测,且提高了该区域微震监测能力,对研究断层深部活动有重要作用。甘肃祁连山主动源于2015年7月9日正式建成并投入运行,至今已经运行了近六年,期间积累了大量的天然地震资料和主动源资料,这为获得该区域主动源观测台站场地响应提供了数据支持。甘肃祁连山主动源观测台网主要由40个短周期观测台站组成,均采用REFTEK-130数据采集器和CMG-40T短周期地震计(频带范围为2 s~50 Hz),采样率为100点/秒。观测台站自西至东覆盖从酒泉到金昌距离约400 km的祁连山中段区域,主要沿断裂带分布,主要构造包括祁连山北缘断裂带、昌马—俄博断裂带、榆木山断裂带以及龙首山南缘断裂带<sup>[13]</sup>。表1给出了祁连山主动源观测台网中40个观测台站的基本参数,包括编号、高程、经纬度、台基岩性及地震计的型号。

观测台站台基岩性分为基岩和非基岩,非基岩台基主要有黄土、砂土、黏土和碎石土台基。当台站台基岩性为基岩时,仅需人工将基岩表面磨平再放置地震计;当台站台基岩性为非基岩时,采取深挖2 m的观测坑,坑内浇筑摆墩架设地震计。2015年7月至2020年12月,主动源观测台网共记录到区域 $M_L \geq 2.5$ 以上地震1 039次,经过地震分布的考察,初步挑选出地震85次共3 480条记录,然后经过信噪比、震中距的筛选并同时要求满足每个台站选取至少6个地震事件记录的条件,最后筛选出57次地震共298次记录用于分析。

表 1 祁连山主动源观测台网中 40 个观测台站的基本参数

Table 1 Basic parameters of 40 stations in the active-source seismic network of Qilian Mountains

| 编号    | 纬度    | 经度     | 高程/m  | 台基岩性 | 仪器参数    |
|-------|-------|--------|-------|------|---------|
| ZDY01 | 39.6° | 98.1°  | 1 919 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY02 | 39.6° | 98.4°  | 1 800 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY03 | 39.5° | 98.5°  | 1 928 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY04 | 39.9° | 98.8°  | 1 311 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY05 | 39.6° | 99.0°  | 1 423 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY06 | 39.3° | 99.0°  | 2 106 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY07 | 39.3° | 99.1°  | 1 863 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY08 | 39.1° | 99.2°  | 2 373 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY09 | 39.1° | 99.3°  | 2 155 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY10 | 38.8° | 99.4°  | 2 869 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY11 | 39.8° | 99.5°  | 1 300 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY12 | 39.0° | 99.4°  | 2 799 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY13 | 39.4° | 99.4°  | 1 438 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY14 | 38.4° | 99.5°  | 3 326 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY15 | 39.7° | 99.6°  | 1 316 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY16 | 39.2° | 99.8°  | 1 603 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY17 | 38.4° | 99.9°  | 2 887 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY18 | 38.8° | 99.9°  | 2 896 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY19 | 38.9° | 99.9°  | 1 960 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY20 | 38.6° | 100.0° | 2 139 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY21 | 39.2° | 100.0° | 1 525 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY22 | 39.0° | 98.0°  | 1 935 | 破碎基岩 | CMG-40T |
| ZDY23 | 38.9° | 100.1° | 1 661 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY24 | 39.4° | 100.1° | 1 402 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY25 | 38.8° | 100.2° | 1 738 | 碎石土  | CMG-40T |
| ZDY26 | 39.2° | 100.4° | 1 494 | 砂土   | CMG-40T |
| ZDY27 | 38.6° | 100.3° | 2 282 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY28 | 38.5° | 100.4° | 2 605 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY29 | 38.8° | 100.6° | 1 540 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY30 | 38.4° | 100.6° | 2 585 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY31 | 38.4° | 100.7° | 2 550 | 基岩   | CMG-40T |
| ZDY32 | 39.2° | 100.8° | 1 883 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY33 | 38.2° | 100.9° | 2 897 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY34 | 38.9° | 101.1° | 2 067 | 破碎基岩 | CMG-40T |
| ZDY35 | 38.1° | 101.2° | 3 168 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY36 | 38.5° | 101.2° | 2 098 | 黄土   | CMG-40T |
| ZDY37 | 38.0° | 101.6° | 2 875 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY38 | 37.9° | 101.8° | 2 717 | 黏土   | CMG-40T |
| ZDY39 | 38.4° | 102.2° | 1 607 | 基岩   | CMG-40T |
| ZDY40 | 38.3° | 101.5° | 2 463 | 碎石土  | CMG-40T |

2 原理及方法

2.1 原理

$H/V$  谱比法,简称为单台谱比法,为最常用的非参考场地方法之一,此法是基于“垂直分量不放大”这一假设推导得到的。该方法基本原理为:设  $V_s$  和  $V_b$  分别为地表处与基底处垂直向地震波振幅谱, $H_s$  和  $H_b$  分别为地表处和基底处水平向地震波振幅谱,则表层经验函数可表示为:

$$S = \frac{H_s}{H_b} \tag{1}$$

Nakamura 谱比率为:

$$S_N = \frac{H_s}{V_s} \tag{2}$$

实验已证实基底处地震波的水平分量与垂直分量大致相等;且经实际观测记录证实,地表土层对垂直分量的放大作用远小于其对水平分量的放大作用<sup>[4]</sup>,因此可以得到:

$$H_b \approx V_b \approx V_s \tag{3}$$

在此基础上,经验函数可简化为 Nakamura 谱比率,即

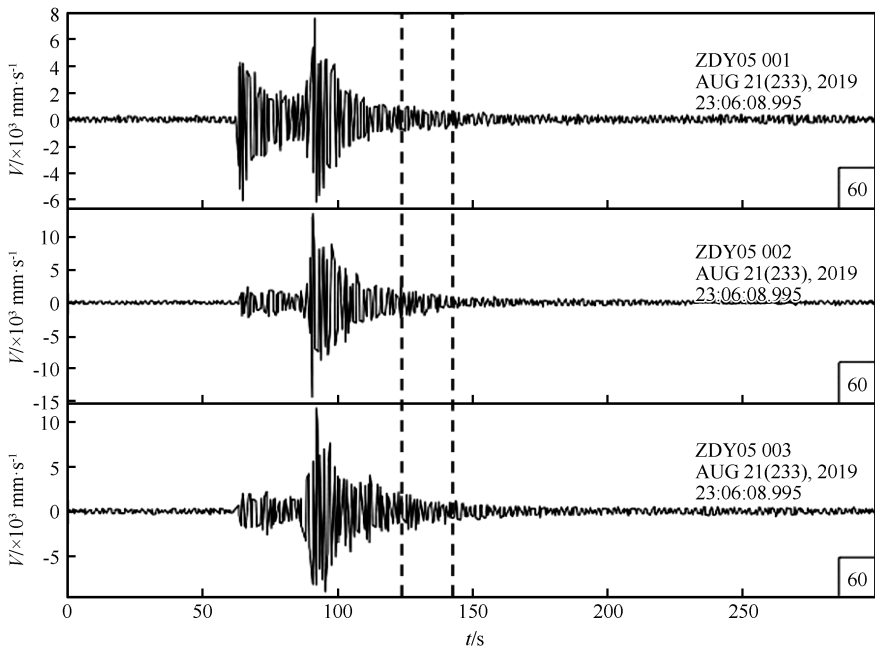
$$S = \frac{H_s}{V_s} \tag{4}$$

各台站场地响应可表示为各台站水平向地震波振幅谱与垂直向地震波振幅谱之比。

## 2.2 处理流程

(1) 数据预处理。为减小误差,首先对波形资料进行去线性、去均值、带通滤波(Butter 滤波器,带宽 0.5~22 Hz)。其次,为避免计算时间过长,简化数据处理过程,将主动源野外观测台网中各观测台站采样率由 100 点/s 重采样到 50 点/s。由于各个地震事件的震中距不同,截尾波的持续时间也不

同,据实际观测得来的经验和前人研究结果<sup>[14]</sup>,一般尾波开始时间选在 2 倍 S 走时处,尾波窗口至少采用 15 s,以此获得较为稳定的尾波衰减。本文使用的尾波窗长为 20~30 s。图 1 为 ZDY05 台站记录的 2019 年 8 月 22 日青海 3.2 级地震的三分量原始波形记录及尾波窗的选取。最后,为减少傅里叶变换导致的频率渗漏,需要对截选尾波窗进行波形灭尖,在该段波形的起始与末尾加 5% 的余弦边窗。



(由上到下分别为 Z,N,E 分量,两条虚线标出尾波窗的截取范围)

图 1 ZDY05 台站记录到的 2019 年 8 月 22 日青海 3.2 级地震的三分量原始波形

Fig.1 Three-component original waveform of the Qinghai  $M_s3.2$  earthquake on August 22, 2019 recorded by ZDY05 station

(2) 计算振幅谱。对预处理得到的地震尾波波形资料进行短时傅里叶变换。采用平移窗谱法,对所截取的尾波窗内的波形分为若干个含有 256 个采样点的小段,并使相邻小段有 50% 的重叠,并在每段波形的起始与末尾加 5% 的余弦边窗,旨在获得相同频率间隔的振幅谱。对于重采样后的波形数据,每一小段的时间长度为 5.1 s,可得到频率间隔为 0.196 Hz 的傅里叶谱。最后通过公式(5)得到整个尾波窗内信号的振幅谱

$$u-(f)=\sqrt{\frac{T\sum_{i=1}^m u_i^2(f)}{mt}} \tag{5}$$

式中: $u_i^2(f)$  是第  $i$  信号段的傅里叶谱; $T$  为尾波窗的持续时间,包含了  $m$  个时间长度为  $t$  的信号段,每个信号段包含 256 个采样点。由于波形资料为速度

记录,所以除以  $2\pi f$  把速度谱转换成位移谱。然后通过内插,得到对数频率为 0.0,0.05,0.10,0.15,...,1.30 的共计 27 个频率点的位移谱振幅值。仪器响应校正的问题在这里可以不用考虑,通过对水平分量及垂直分量频率域中的频谱值对比,仪器响应校正这一项最终被有效剔除。最后将尾波的水平分量(NS 分量和 EW 分量)振幅谱合成水平向振幅谱

$$H(f)=\sqrt{u_{\text{EW}}^2(f)+u_{\text{NS}}^2(f)} \tag{6}$$

(3)  $H/V$  谱比计算。根据得到的水平向位移振幅谱  $H(f)$  和垂直向位移振幅谱  $V(f)$ ,可以计算得出每个台站接收到的每条地震记录的场地响应,每个台站至少选取 6 条地震记录计算,最后计算选取的地震记录的场地响应的平均值,得到每个台站的场地响应  $S(f)$ 。

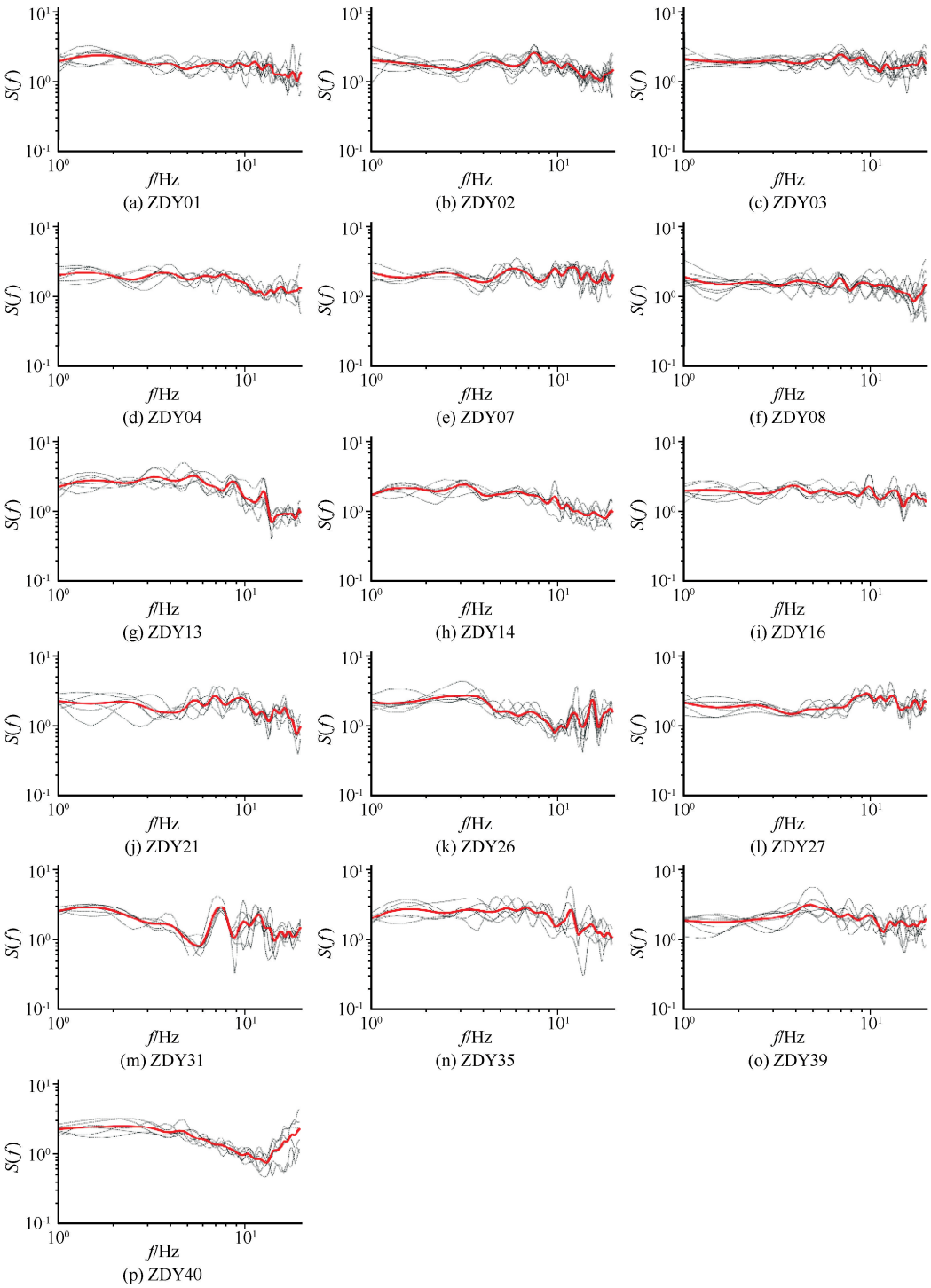


3 结果与讨论

3.1 甘肃祁连山主动源观测台网观测台站场地响应分类

参照上述数据处理及计算过程,对每个台站至少选取 6 条地震记录,取平均值后得到的  $H/V$  谱

比值为每个台站的场地响应值,最后得到祁连山主动源观测台网中 40 个观测台站的场地响应(图 2~4)。依据各台站在分析频段内(1~20 Hz)的场地响应曲线形态,祁连山主动源观测台网中 40 个观测台站大致分为 3 类:平坦类、放大类、高频衰减类。



(黑色虚线为该台站每条记录的场地响应值;红色实线为该台站平均场地响应值)

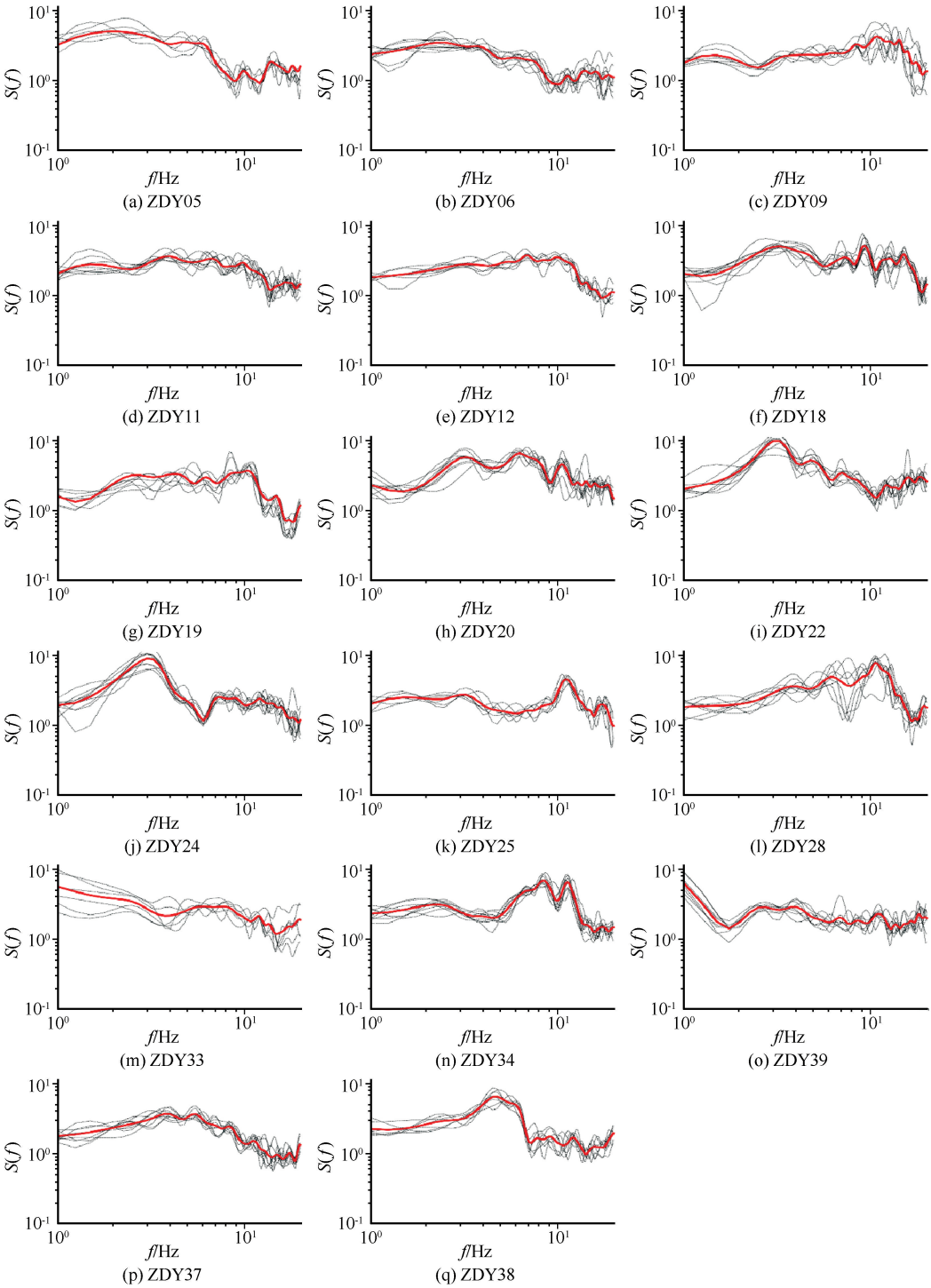
图 2 甘肃祁连山主动源观测台网 16 个平坦类观测台站的场地响应

Fig.2 Site response of 16 flat stations in the active-source seismic network of Qilian Mountains, Gansu Province

(1) 平坦类。ZDY01、ZDY02、ZDY03、ZDY04、ZDY07、ZDY08、ZDY13、ZDY14、ZDY16、ZDY21、ZDY26、ZDY27、ZDY35、ZDY40 共 14 个非基岩台站和 ZDY31、ZDY39 共 2 个基岩台站场地响应曲线特征整体呈平坦型,该类台站约占甘肃祁连山主动源观测台站总数的 40%,在 1~20 Hz 频域内放大

程度较小,放大值约为 1~2 倍。

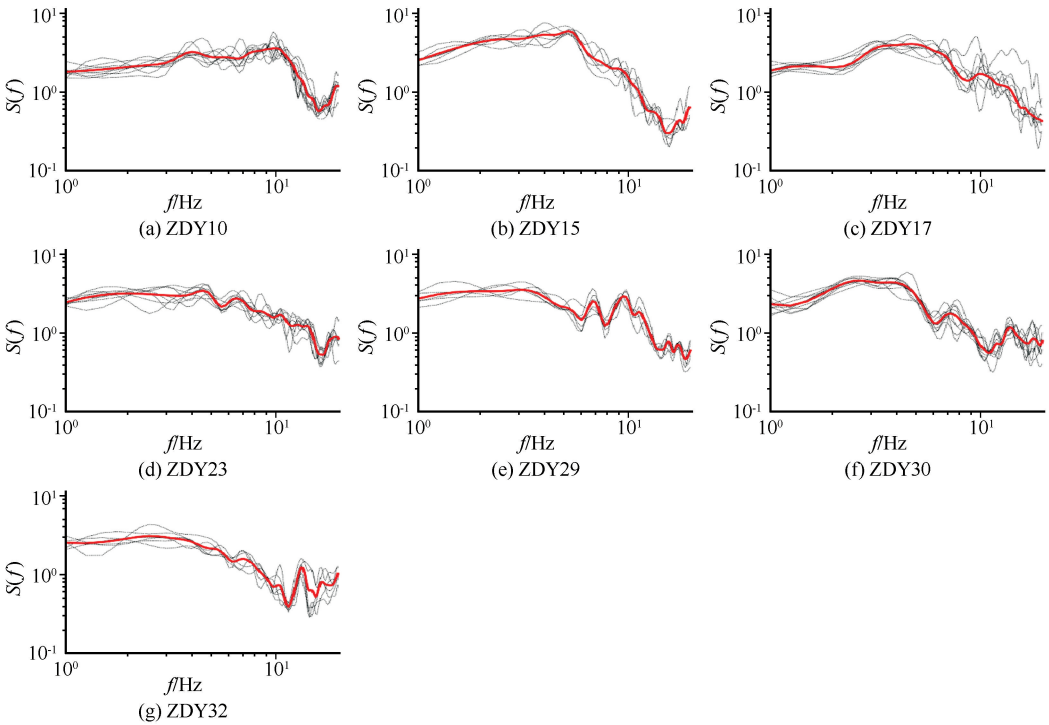
(2) 放大类。ZDY05、ZDY06、ZDY09、ZDY11、ZDY12、ZDY18、ZDY19、ZDY20、ZDY24、ZDY25、ZDY28、ZDY33、ZDY36、ZDY37、ZDY38 共 15 个非基岩台站和 ZDY22 台站、ZDY34 台站(基岩台站)场地响应曲线特征属于放大类,该类台站较多,约占



(黑色虚线为该台站每条记录的场地响应值;红色实线为该台站平均场地响应值)

图 3 甘肃祁连山主动源观测台网 17 个放大类观测台站的场地响应

Fig.3 Site response of 17 amplification stations in the active-source seismic network of Qilian Mountains, Gansu Province



(黑色虚线为该台站每条记录的场地响应值;红色实线为该台站平均场地响应值)

图 4 甘肃祁连山主动源观测台网 7 个高频衰减类观测台站的场地响应

Fig.4 Site response of 7 high-frequency attenuation stations in the active-source seismic network of Qilian Mountains,Gansu Province

总台站数的 43%。此类台站场地响应曲线在频域 1~20 Hz 范围内均有明显放大效应,且部分台站个别频段放大效应尤为明显,其中 ZDY24 台站场地响应值在 3 Hz 左右达到 9 倍。

(3) 高频衰减类。ZDY10、ZDY15、ZDY17、ZDY23、ZDY29、ZDY30、ZDY32 共 7 个非基岩台站的场地响应曲线呈现高频衰减的特征。其中 ZDY23、ZDY29、ZDY32 台站场地响应曲线低频部分较平稳,场地响应值在 2 倍左右,随着频率的增加,场地响应值也随之减小,直至衰减结束,最小衰减可达 0.4 倍。ZDY10、ZDY15、ZDY17、ZDY30 台站场地响应曲线呈低频明显放大高频衰减的特征,此类场地响应曲线起伏较大,在低频呈明显场地放大效应,在高频呈场地衰减效应,低频场地响应值最大可达 6 倍,高频部分场地响应值最小可达 0.3 倍。

3.2 讨论

祁连山主动源观测台网 40 个观测台站大致可分为 3 类:平坦类、放大类、高频衰减类。影响台站场地响应特征的因素比较复杂,主要因素有台站台基岩性状况、和台站所处地区空间地质状况等。

(1) 场地响应与台基岩性的关系

16 个平坦类台站中,台基岩性为基岩的有 2

个,砂土的有 5 个,黄土、碎石土和黏土的各有 3 个; 17 个放大类台站中,台基岩性为基岩的有 2 个,黄土的有 5 个,碎石土和砂土的各有 4 个,黏土台站有 2 个; 7 个高频衰减类台站中台基岩性为碎石土的有 3 个,黄土的有 2 个,砂土的有 1 个,黏土的有 1 个。在基岩台站中,2 个为平坦类台站,2 个为放大类台站。在 4 种非基岩台站中,10 个砂土台站中有 5 个平坦类台站; 6 个黏土台站中 3 个为平坦类台站;黄土台站和碎石土台站各有 10 个,其中各有 3 个为平坦类台站。以上数据表明:破碎基岩台站的场地响应也存在明显放大效应;在 36 个非基岩台站中砂土台站的场地响应曲线较为良好,黏土台站的场地响应次之,碎石土台站和黄土台站的场地响应大多具有明显放大(衰减)效应。

(2) 场地响应与空间地质构造背景的关系

本文研究的 40 个观测台站中有 16 个台站位于高原,13 个台站位于山区,11 个台站位于山区高原交界处。16 个平坦类台站中有 8 个台站位于高原,4 个台站位于山区高原交界处,4 个台站位于山区; 17 个放大类台站中有 5 个台站位于高原,4 个台站位于山区高原交界处,8 个台站位于山区; 7 个高频衰减类台站中有 3 个台站位于高原,2 个台站位于

山区高原交界处,2 个台站位于山区。位于高原的台站有约 50%属于平坦类台站,位于山区高原交界处的台站有 36.3%属于平坦类台站,而位于山区的

台站有 30%属于平坦类台站。由此可以得出:位于高原的台站的场地响应曲线一般比位于山区及山区与高原交界处的台站的场地响应曲线较平坦些。

表 2 场地响应特征与台基岩性的关系

Table 2 Relationship between site response characteristics and lithology of platform foundation

|       | 基岩 | 砂土 | 黄土 | 黏土 | 碎石土 |
|-------|----|----|----|----|-----|
| 平坦类   | 2  | 5  | 3  | 3  | 3   |
| 放大类   | 2  | 4  | 5  | 2  | 4   |
| 高频衰减类 | 0  | 1  | 2  | 1  | 3   |

表 3 场地响应特征与空间地质构造背景的关系

Table 3 Relationship between site response characteristics and geological structure background

|       | 高原 | 高原与山区交界处 | 山区 |
|-------|----|----------|----|
| 平坦类   | 8  | 4        | 4  |
| 放大类   | 5  | 4        | 8  |
| 高频衰减类 | 3  | 2        | 2  |

(3) 场地响应与介质密度的关系

一般来说,地震波的振幅与介质阻抗  $\rho c$  的平方根成反比(介质阻抗等于密度与波速的乘积),低速低密度的介质对地震波振幅有放大作用。松散的场地,因介质阻抗较小,其对地震动有较大的放大作用;而坚硬的台基场地则反之<sup>[15-16]</sup>。已有研究表明,台站台基的风化程度可影响  $H/V$  谱比法获得的场地放大效应的幅值,风化程度越高,场地放大效应的幅值越高,在中高频段的形态就越弯曲;且  $H/V$  谱比值可以反映台站场地的地形效应<sup>[17]</sup>。甘肃省地形地貌复杂,大部分地区地表稀疏、破碎,同时伴有不同程度的风化。甘肃省祁连山主动源野外观测台网中 40 个观测台站的场地响应均存在不同程度的放大(衰减),根据对台站实地考察,大部分台站台基介质密度较小,有破碎松散等情况,这在一定程度上反映了该地区的场地响应值与台基介质密度具有反相关性。

4 结论

本文根据祁连山主动源观测台网中 40 个观测台站接收到的天然地震波形资料,采用尾波  $H/V$  谱比法计算研究了各台站场地响应,获得的结论如下:

(1)  $H/V$  谱比法本质上是一种参考场地法,该方法的推导过程建立在“垂直分量无放大”这一假设之上,而事实上垂直分量具有一定的场地放大效应<sup>[18]</sup>。基于  $H/V$  谱比法得到的场地效应比实际台站场地对地震波的放大作用要小<sup>[19]</sup>,因此  $H/V$  谱比法得到的场地响应结果只能作为绝对场地响应的

一种近似值。

(2) 祁连山主动源观测台站均具有不同程度的场地放大(衰减)效应。祁连山主动源观测台网 40 个观测台站可根据场地响应特征分为平坦类、放大类、高频衰减类。根据场地响应结果可以看出,部分台站在观测频段内呈现平坦特征,场地响应值基本在 1~2 倍;而多数台站明显具有放大(衰减),场地响应值在 0.3~9 范围内。

(3) 台站场地响应主要受台站台基岩性状况、台站所处地区空间地质背景和台站台基处介质密度等多种因素的综合影响。台站台基岩性可能是决定场地响应曲线特征和大小的主要因素,场地响应与台基介质密度具有反相关性。位于高原且台基介质密度较大的基岩台站,理论上其场地放大(衰减)作用最小。场地响应值的大小可以反映观测台站的质量好坏,观测台站质量与台站接收主动源激发信号的能力成正比,高质量的观测台站可以减少获取较高信噪比的主动源激发信号的叠加次数,也可在同等叠加次数下获取更远的传播距离<sup>[21]</sup>。为减少观测台站对主动源激发信号的影响(祁连山主频介于 2~8 Hz)<sup>[20]</sup>,主动源观测系统台站应尽可能选择基岩或介质密度较大的砂土作为台基,同时使用叠加技术压制噪声,提高信噪比。本文研究结果可供后续待建或改建的主动源观测台站台基堪选提供参考。

参考文献(References)

[1] 张红才,徐嘉隽,陈智勇.基于噪声谱比法的福建台网观测台站的场地响应研究[J].地震学报,2015,37(6):1045-1058.  
ZHANG Hongcai,XU Jiajaun,CHEN Zhiyong.Site response of Fujian seismic monitoring stations based on Nakamura  $H/V$  spectral ratio method[J].Acta Seismologica Sinica,2015,37(6):1045-1058.

[2] 武安绪,武敏捷,林向东,等.气枪主动源区  $Q$  值估算方法及其初步应用[J].国际地震动态,2019,2019(8):41.  
WU Anxu,WU Minjie,LIN Xiangdong,et al. $Q$ -value estimation measurement and preliminary application of air-gun active



- source area[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2019, 2019 (8): 41.
- [3] MOYA A, AGUIRRE J, IRIKURA K. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bull Seismol Soc Am, 2000, 90 (4): 977-992.
- [4] NAKAMURA Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Quart Rep RTRI, 1989, 30(1): 25-33.
- [5] 朱荣欢, 苏有锦. 用  $H/V$  谱比法计算云南区域数字地震台站的场地响应[J]. 地震研究, 2007, 30(3): 248-252.
- ZHU Ronghuan, SU Youjin. Site response of Yunnan regional digital seismic station calculated with  $H/V$  spectral ratios method[J]. Journal of Seismological Research, 2007, 30(3): 248-252.
- [6] DUCCELLIER A, KAWASE H, MATSUSHIMA S. 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[J]. Bull Seismol Soc Am, 2013, 103 (2A): 985-970.
- [7] 徐嘉隽, 杨贵, 陈家樑, 等. 2014. 运用谱比法计算福建地区观测台网台站响应[J]. 震灾防御技术, 9(增刊 1): 695-701.
- XU Jiajuan, YANG Gui, CHEN Jialiang, et al. Site response of seismic stations in Fujian region calculated by spectra ratio method[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(Suppl01): 695-701.
- [8] 孙海霞, 杨选, 林向东, 等. 北京及邻区  $Q$  值及台站场地响应分析[J]. 华北地震科学, 2018, 36(3): 1-11.
- SUN Haixia, YANG Xuan, LIN Xiangdong, et al. Analysis on the  $Q$  value and station site response in Beijing and its adjacent areas[J]. North China Earthquake Sciences, 2018, 36(3): 1-11.
- [9] 姚鑫鑫, 任叶飞, 温瑞智, 等. 强震记录  $H/V$  谱比法计算处理的若干关键环节[J]. 震灾防御技术, 2019, 14(4): 719-730.
- YAO Xinxin, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. Some technical notes on the data processing of the spectral ratio based on the strong-motion records[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(4): 719-730.
- [10] 张珂, 王鑫, 王树波, 等. 基于噪声谱比法的内蒙古西部地区台站场地响应研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(6): 646-651.
- ZHANG Ke, WANG Xin, WANG Shubo, et al. Site response of Western Inner Mongolia stations based on noise spectral ratio method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(6): 646-651.
- [11] 彭菲, 王伟君, 寇华东. 三河—平谷地区地脉动  $H/V$  谱比法探测: 场地响应、浅层沉积结构及其反映的断层活动[J]. 地球物理学报, 2020, 63(10): 3775-3790.
- PENG Fei, WANG Weijun, KOU Huadong. Microtremor  $H/V$  spectral ratio investigation in the Sanhe—Pinggu area: site responses, shallow sedimentary structure, and fault activity revealed[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(10): 3775-3790.
- [12] 华卫, 陈章立, 郑斯华. 利用不同方法估算流动台站的场地响应[J]. 地震, 2010, 30(3): 30-44.
- HUA Wei, CHEN Zhangli, ZHENG Sihua. Estimation of site responses for temporary stations using various methods[J]. Earthquake, 2010, 30(3): 30-44.
- [13] 张元生, 郭晓, 秦满忠, 等. 甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析[J]. 中国地震, 2016, 32(2): 209-215.
- ZHANG Yuansheng, GUO Xiao, QIN Manzhong, et al. The construction of active source repeated monitoring in the Qilian Mountains of Gansu Province[J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 209-215.
- [14] RAUTIAN T G, KHALTURIN V I. The use of coda for determination of the earthquake source spectrum[J]. Bull Seismol Soc Am, 1978, 68(4): 923-948.
- [15] 史海霞. 首都圈地区地震动场地效应研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2008, 46-51.
- SHI Haixia. Study on site effects of earthquake ground motions of the capital region, China[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2008, 46-51.
- [16] 王鑫, 尹战军, 郝美仙, 等. 内蒙古地区场地响应区域特征分析[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(1): 163-172.
- WANG Xin, YIN Zhanjun, HAO Meixian, et al. Regional characteristic analysis on site response of digital stations in Inner Mongolia[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(1): 163-172.
- [17] 姜慧. 地震动随机模拟方法中的场地效应[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005, 44-62.
- JIANG Hui. Study on site effects of stochastic simulation of earthquake ground motion[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2005, 44-62.
- [18] 郭明珠, 周嗣平, 徐国栋, 等. 基岩表面地脉动谱比研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1068-1071.
- GUO Mingzhu, ZHOU Siping, XU Guodong, et al. Research on microtremors spectral ratio of horizontal to vertical component on half elastic space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1068-1071.
- [19] 卢滔, 周正华, 周雍年, 等. 关于 Nakamura 方法有效性的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 43-48.
- LU Tao, ZHOU Zhenghua, ZHOU Yongnian, et al. Discussion on validation of Nakamura's technique[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 43-48.
- [20] WEI C X, QIN M Z, ZHANG Y S, et al. Airgun excitation experiments at different placement depths in the Qilian Mountain of Gansu Province[J]. China Smological Research Letters, 2018, 89(3): 974-982.
- [21] 秦满忠, 刘旭雷, 邹锐, 等. 甘肃祁连山大容量气枪主动源最大探测范围[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1070-1075.
- QIN Manzhong, LIU Xuzhou, ZOU Rui, et al. Maximum detective range of large-volume airgun active source in Qilian Mountains, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1070-1075.