

熊成, 叶秀薇, 张严心. 广东测震台站的场地响应以及对震级确定的影响分析[J]. 华南地震, 2020, 40(4): 18-28. [XIONG Cheng, YE Xiuwei, ZHANG Yanxin. Site Response of Guangdong Seismic Stations and Its Influence on Determination of Earthquake Magnitude [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(4): 18-28]

# 广东测震台站的场地响应以及对震级确定的影响分析

熊成<sup>1,2,3</sup>, 叶秀薇<sup>1,2,3</sup>, 张严心<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;  
3. 广东省地震局广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070)

**摘要:** 认识台站场地响应对提高台网产出数据的准确性具有重要的意义。分析了广东台网 72 个测震台站的地脉动记录数据, 利用谱比法计算得到各台站 0.1~20Hz 的场地响应。结果表明有 32 个台站场地响应曲线平缓, 无明显频率放大点; 有 32 个台站的场地响应曲线在部分频率范围表现出较高值; 还有 4 个台站场地响应曲线表现轻微场地缩小作用和 4 个台站场地响应曲线呈起伏剧烈的形态。综合台基岩性分析, 发现台站的基岩硬度越大、结构越致密, 场地放大作用越小。进一步利用 2011 年 1 月至 2019 年 10 月广东台网记录到的 852 次地震事件 ( $M_L \geq 2$ ), 分析了台站场地响应对单台震级的影响, 结果发现大部分台站的震级偏差结果与场地响应具有一定关系, 考虑场地响应的单台震级校正值能够在一定程度上减小单台震级偏差, 提高单台震级的准确性。

**关键词:** 广东地震台网; H/V 谱比法; 场地响应; 震级校正

**中图分类号:** P315.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)04-0018-011

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2020.04.03

## Site Response of Guangdong Seismic Stations and Its Influence on Determination of Earthquake Magnitude

XIONG Cheng<sup>1,2,3</sup>, YE Xiuwei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yanxin<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. CEA Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China;  
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Researching the site response of the stations is of great significance to improve the accuracy of the output data of the seismic network. The paper processed the microtremors noise data recorded by 72 stations of Guangdong Seismic Network, and calculated the site response of each station at 0.1–20 Hz based on horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio method. The results show that the site response curves of 32 stations are flat, and there were no obvious frequency amplification points. The site response curves of 32 stations showed higher values in some frequency ranges. In addition, there were 4 stations showing slight site reduction and 4 stations

收稿日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金广东联合基金项目 (U1901602); 广东省科技计划项目 (2018B020207011) 联合资助

作者简介: 熊成 (1993-), 男, 助理工程师, 主要从事地震监测及地壳结构成像研究。

E-mail: xiongcheng15@mails.ucas.ac.cn.

with sharply fluctuating response curves. Based on comprehensive lithology analysis of the platform, it is found that the greater the hardness of the bedrock and the denser the structure, the smaller the site amplification effect. This paper further uses the 852 earthquake events with  $M_L \geq 2$  recorded by the Guangdong Station Network from January 2011 to October 2019 to analyze the effect of the station site response on the magnitude of a single station. As a result, the magnitude deviation of most stations has a certain relationship with the site response. The single magnitude correction value obtained from the site response can reduce the deviation between the single magnitude and the average magnitude of the network to a certain extent and improve the accuracy of the single station magnitude

**Keywords:** Guangdong Digital Seismic Network; H/V spectral ratio method; Site response; Magnitude deviation

## 0 引言

场地响应是指场地上覆盖层对地震波振幅的影响，很多震害调查表明地震波在传播到地表的沉积层时，振幅一般会有增大现象，松软沉积层的振幅放大倍数远大于基岩场地<sup>[1]</sup>。测震台站的场地响应影响到台网数据的产出，台网测定的震级结果也会受到影响。因此，研究台站场地响应进行研究不仅能服务于地震预测和地震危险性研究，而且可以提高台网产出数据的准确性。

场地响应的计算方法主要有传统谱比法和线性反演法等参考场地法<sup>[2-3]</sup>，以及 Moya 法和 H/V 谱比法等非参考场地方法<sup>[4-5]</sup>。参考场地法对参考场地的要求比较严格，实际工作中往往很难找到合适的理想场地，而非参考场地法则可避免这一难题。但是非参考场地法中被广泛采用的 Moya 法则需要丰富的地震事件，若地震事件的数目不足，就会导致射线覆盖稀疏，从而不能得到准确的场地响应。

广东地区历史上曾经多次发生 6 级以上地震，造成了较为严重的经济损失和人员伤亡。历史地震记录和现代地震记录数据都表明广东地区存在一定的地震威胁<sup>[6-9]</sup>，因此对广东地区的场地响应分析是十分必要的。黄玉龙等<sup>[10]</sup>曾利用 44 个地震的 249 条记录得到了广东地区 14 个台站的场地响应，结果显示这些台站均没有明显的放大效应。随着地震观测网络的加密，广东台网的数字测震台站已经增加到了 72 个（图 1）。然而，目前对于这些台站的场地响应研究却比较缺乏。而且广东地区地震活动分布不均<sup>[6]</sup>，部分区域射线覆盖密度较小，因此用 Moya 法很难全面地反映广东地区场地响应的真实情况。而近年来比较流行的 H/V 噪声谱比法既避开了

参考场地的选择困难，又不依赖于丰富的地震事件，操作简便且结果可信<sup>[11]</sup>，近年来得到了广泛的应用和发展<sup>[12-17]</sup>。本文基于 H/V 谱比法，利用广东测震台网记录的背景噪声数据，得到了各台站的场地响应新结果。

## 1 方法

场地放大效应的经验转换函数的谱比法<sup>[3]</sup>为：

$$S_e = \frac{H_s(f)}{H_B(f)} \quad (1)$$

式中  $H_s(f)$  和  $H_B(f)$  分别为沉积场地和基岩观测记录的水平分量频谱。Nakamura<sup>[5]</sup>利用深井微震实验发现，在基岩处地震动的水平分量  $H_B(f)$  和垂直分量频谱  $V_B(f)$  基本相等，且基岩处的垂直分量频谱  $V_B(f)$  和沉积场地的垂直分量频谱  $V_s(f)$  也大致相当，即  $H_B(f) \approx V_B(f) \approx V_s(f)$ ，因此将  $S_e$  简化为：

$$S_e = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} \quad (2)$$

场地观测的地脉动水平分量  $H_s(t)$  和垂直分量  $V_s(t)$  由环境噪声源（S）、传播路径（P）、场地效应（T）、仪器响应（I）等信息组成。因此，信号的水平分量  $H_s(t)$  和垂直分量  $V_s(t)$  可以表示为

$$H_s(t) = S(t) * P(t) * T_H(t) * I(t) \quad (3)$$

$$V_s(t) = S(t) * P(t) * T_V(t) * I(t) \quad (4)$$

方程式（2）和（3）可转换为频域，并表达为：

$$H_s(f) = S(f) * P(f) * T_H(f) * I(f) \quad (5)$$

$$V_s(f) = S(f) * P(f) * T_V(f) * I(f) \quad (6)$$

（5）式和（6）式相除可得

$$S_e = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} = \frac{T_H(f)}{T_V(f)} \quad (7)$$

因此, 通过频率域中的水平分量和垂直分

量 ( $H/V$ ) 频谱比, 可以有效的剔除不同噪声源、传播路径和仪器响应的影响, 获得反映场地频率特性的信息<sup>[15, 18, 19]</sup>。

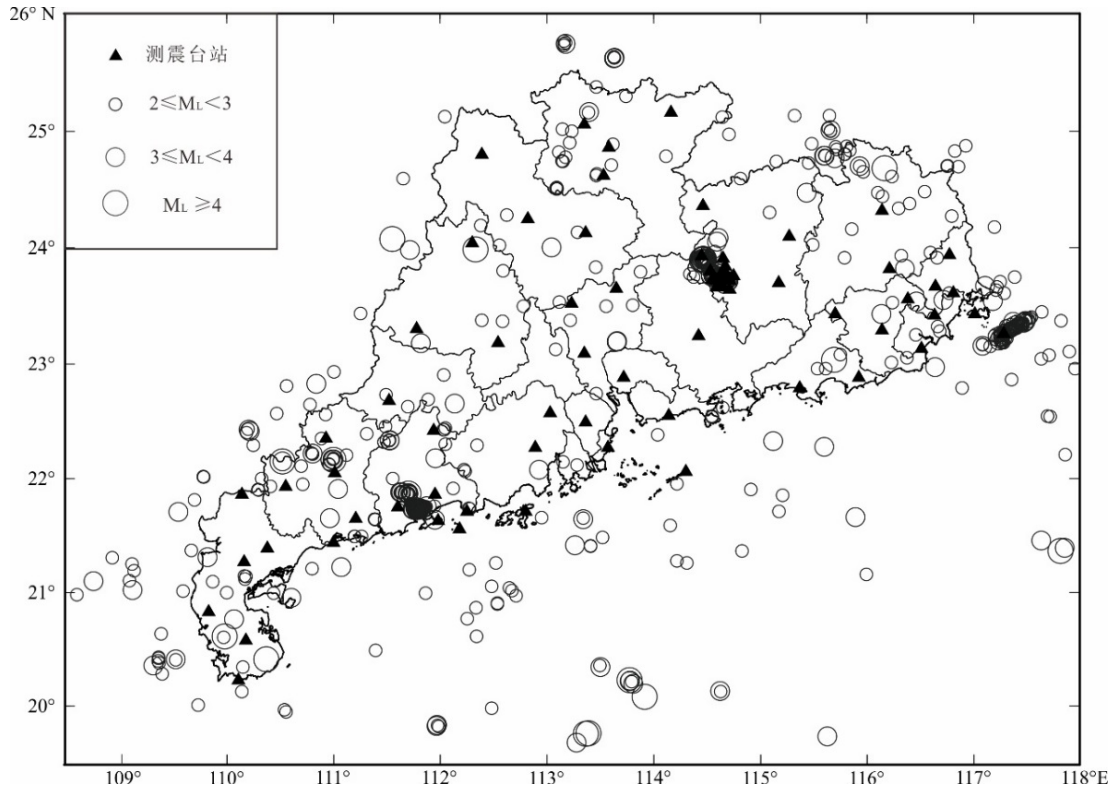


图1 广东地区测震台站及本文所用地震分布图

Fig.1 Distribution of seismic stations in Guangdong and earthquakes used in this paper

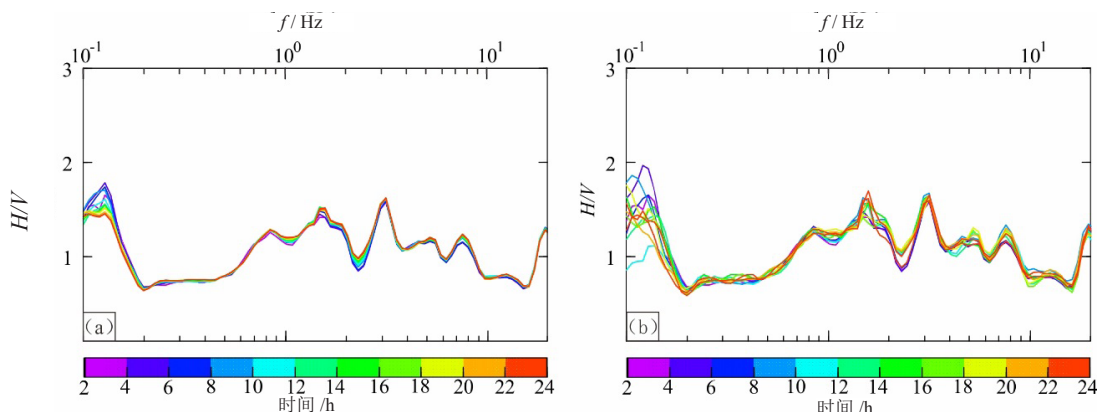
## 2 噪声数据与处理

本文挑选广东台网 72 个测震台站 (图 1) 的地脉动波形数据进行分析。为了得到更准确的  $H/V$  谱比曲线, 使用长短时窗平均振幅比算法 (STA/LTA) 来剔除瞬时信号, 长时窗取 30 s, 短时窗取 1.0 s, STA/LTA 比最小值设为 0.2, 最大值设为 2.5。预处理后的数据以 100 s 窗长进行分段处理, 分别计算垂直向和水平向傅立叶谱 (由东西向和南北向信号谱均方根得到), 并采用 Konno-Ohmachi 平滑算法 (取平滑系数为 40) 计算该时窗的  $H/V$  谱比<sup>[20]</sup>; 最后对得到的所有时窗  $H/V$  谱比加以平均, 得到每个观测点的  $H/V$  谱比曲线。

为了了解观测数据的时长对  $H/V$  谱比曲线的影响, 我们对不同时间长度的数据进行分

析。以 SHG 台为例, 先测试时间长度为 2 h 的数据, 然后以 2 h 的增量依次递增到时间长度为 24 h, 共计算得到 12 组数据的  $H/V$  谱比曲线 (图 2a)。结果显示, 12 组曲线形态几乎完全一致, 即 2~24 h 的数据得到的  $H/V$  谱比结果几乎没有差别。因此为了减少工作量, 本文对各台站均截取 2 h 的数据进行计算。

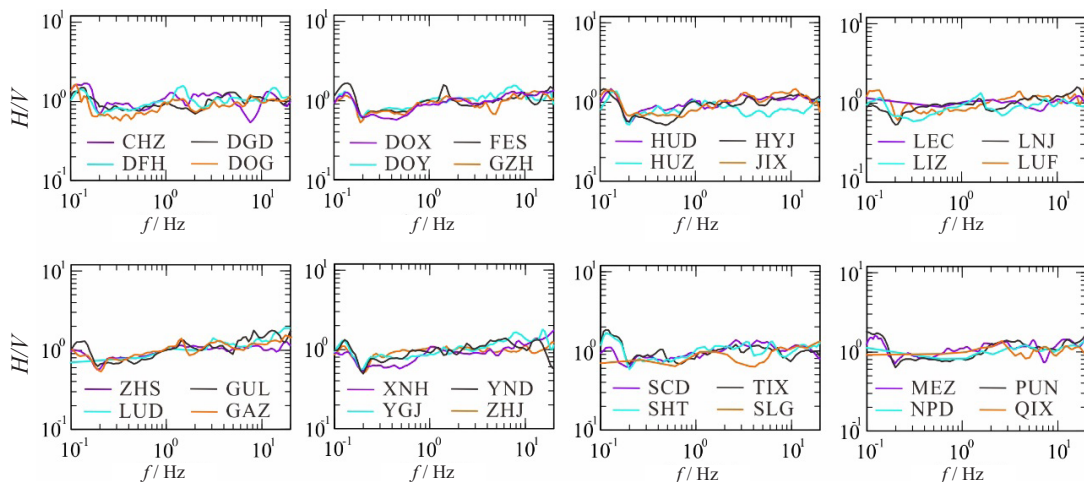
为了进一步了解一天中不同时段的数据对  $H/V$  谱比曲线的影响, 我们将一天的数据 (00:00~24:00) 以 2 h 为间隔分为 12 组, 计算得到每一组的  $H/V$  谱比曲线 (图 2b)。结果显示, 12 组曲线的形态十分相似, 只有 0.2 Hz 以下的低频段有部分差异, 这种差异很可能是由人类活动噪声产生的。因此为了减少人类活动的影响, 我们选取各台站凌晨时间 (02:00~04:00) 数据进行计算。



(a) 波形数据时长对  $H/V$  谱比曲线的影响, 时间长度从 2 h 逐渐增加到 24 h, 间隔 2 h; (b) 一天中不同时段  $H/V$  谱比曲线, 00:00-24:00 中每隔 2 h 计算一次曲线。

图 2 观测数据时长和时段的参数对比

Fig.2 Parameter comparison of time length and time period of observation data



CHZ: 潮州台; DFH: 东方红; DGD: 担杆岛台; DOG: 东莞台; DOX: 东星台; DOY: 洞源台; FES: 丰顺台; GAZ: 高州台; GUL: 桂林台; GZH: 广州台; HUD: 花都台; HUZ: 惠州台; HYJ: 湖羊角台; JIX: 揭西台; LEC: 乐昌台; LIZ: 连州台; LNJ: 廉江台; LUD: 罗定台; LUF: 陆丰台; MEZ: 梅州台; NPD: 南鹏岛台; PUN: 普宁台; QIX: 清新台; SCD: 上川岛台; SHT: 汕头台; TIX: 田心台; XFI: 新丰江台; XNH: 新会台; YGJ: 阳江台; YND: 英德台; ZHJ: 湛江台; ZHS: 中山台

图 3 无明显放大的台站场地响应

Fig.3 Site response of stations without obvious amplification

### 3 场地响应与分析

#### 3.1 场地响应计算结果

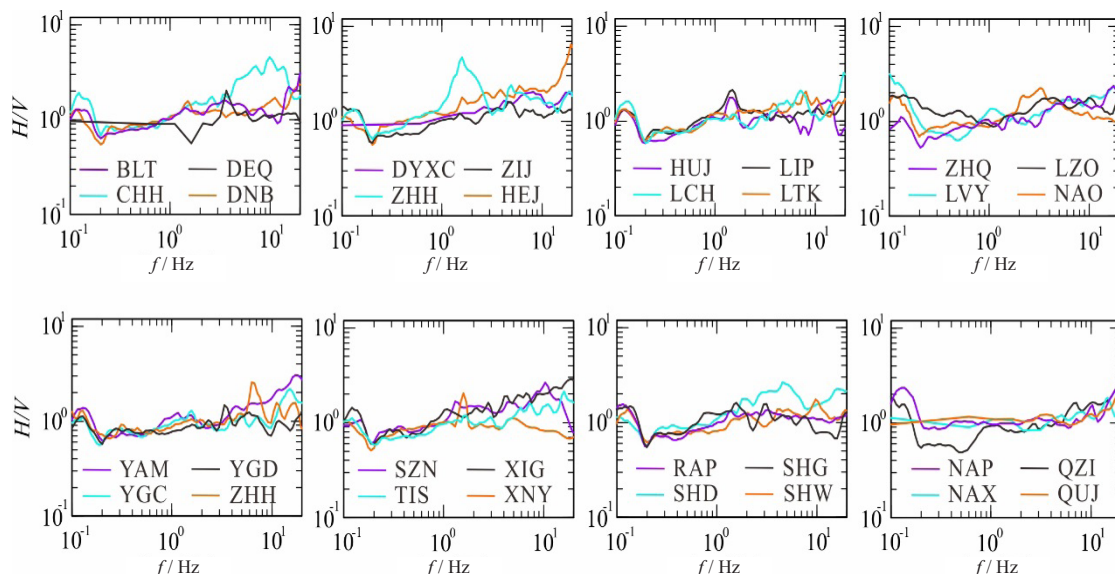
运用上述分析方法和数据, 得到了广东测震台网 72 个台站在 0.1~20.0 Hz 内的场地响应。根据各台站的  $H/V$  谱比曲线形态, 可将广东台网的台站分为 4 类。

(1) 无明显场地放大作用的台站 (图 3)。担杆岛台 (DGD)、潮州台 (CHZ) 等 32 个台站属于这种类型。此类台站在 0.1~20 Hz 内的场地响应曲线平缓, 无明显波峰, 放大倍数在 1 附近。说明这些台站没有明显的放大效应, 观测环境较好。

(2) 局部频段有明显场地放大作用的台站 (图 4)。澄海台 (CHH)、电白台 (DNB) 等 32 个台站属于这种类型。此类台站在大部分频率范围无明显放大现象, 仅在部分频段出现高值。不同台站的放大频率点不同, 以超过 5 Hz 的高频居多, 放大频率点对应的场地放大倍数也不同, 但基本小于 3。说明这些台站在部分频段具备一定的放大效应。

(3) 有轻微场地缩小作用的台站 (图 5a)。和平台 (HEP)、揭阳台 (JIX) 等 4 个台站属于这种类型。此类台站在 0.1~20 Hz 内大部分频段的谱比值都略小于 1。说明这些台站在表现出一定的缩小效应, 需要后续进一步研究出现这种现象的原因。





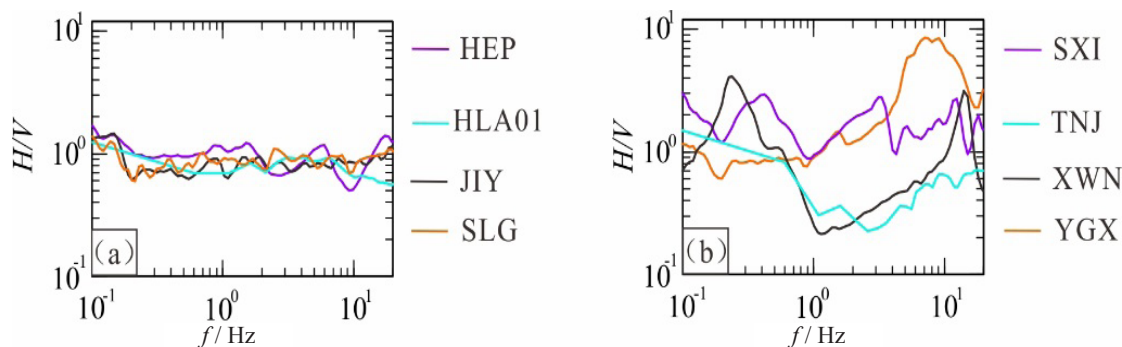
BLT: 白岭头台; CHH: 澄海台; DEQ: 德庆台; DNB: 电白台; DYXC: 东源锡场台; HEJ: 合江台; HUJ: 怀集台; LCH: 龙川台; LIP: 连平台; LTK: 龙潭口台; LUD: 罗定台; LVY: 绿缘台; LZO: 雷州台; NAO: 南澳台; NAP: 南彭岛台; NAX: 南雄台; QZI: 七寨台; QUJ: 曲江台; RAP: 饶平台; SHD: 水东台; SHG: 韶关台; SHW: 汕尾台; SZN: 深圳台; TIS: 台山台; XIG: 新港台; XNY: 信宜台; YAM: 杨梅台; YGC: 阳春台; YGD: 阳东台; ZHH: 珠海台; ZHQ: 肇庆台; ZHX: 樟下台; ZIJ: 紫金台

图 4 有较明显放大的台站场地响应

Fig.4 Site response of stations with more obvious amplification

(4) 场地响应曲线起伏大的台站 (图 5b)。遂溪台 (SXI)、徐闻台 (XWN) 和阳西台 (YGX) 这 3 个台站的场地响应曲线具有 1 个或多个明显的波峰, 波峰处放大效应较大。

唐家台 (TNJ) 的场地响应比较异常, 大部分频段的场地响应都明显小于 1。这些台站的场地响应曲线起伏变化剧烈大, 对观测质量产生影响, 需要关注并改善。



HEP: 和平台; HLA01: HLA01 台; JIY: 揭阳台; SLG: 石榴岗台; SXI: 遂溪台; TNJ: 唐家台; XWN: 徐闻台; YGX: 阳西台

图 5 有轻微缩小的台站场地响应 (a) 和场地响应曲线起伏大的台站 (b)

Fig. 5 Site response of stations with slightly reduce (a) and stations with larger fluctuation of  $H/V$  spectrum ratio curve.

### 3.2 基岩对结果的影响

通过对这些台站的基岩分析发现, 硬度较大的花岗岩和灰岩台站场地放大作用较小, 场地响应曲线变化平缓, 仅少量花岗岩台站的场地响应在部分频段偏大, 可能与其基底被风化有关; 砂岩台站的场地响应差异较大, 部分台站场地响应在 1 附近, 而部分台站的峰值接近

10, 这与不同砂岩的致密程度有关; 玄武岩台站全部分布在雷州半岛, 场地响应曲线起伏剧烈, 多数表现出明显的放大现象, 这应该是玄武岩基底结晶程度较差、发育气孔构造引起的; 其他岩性基底的台站由于样本较少不能总结出明显的规律。总体上来看, 台基岩石越坚硬、结构越致密, 场地响应越接近于 1 (图 6)。

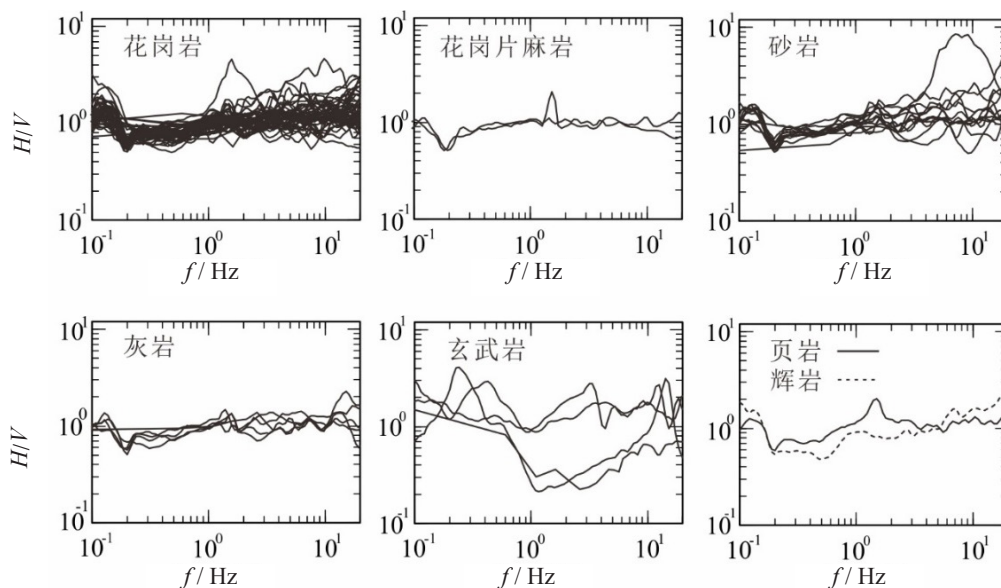


图 6 各类型基岩的台站场地响应  
Fig.6 Site response of stations on various types of bedrock.

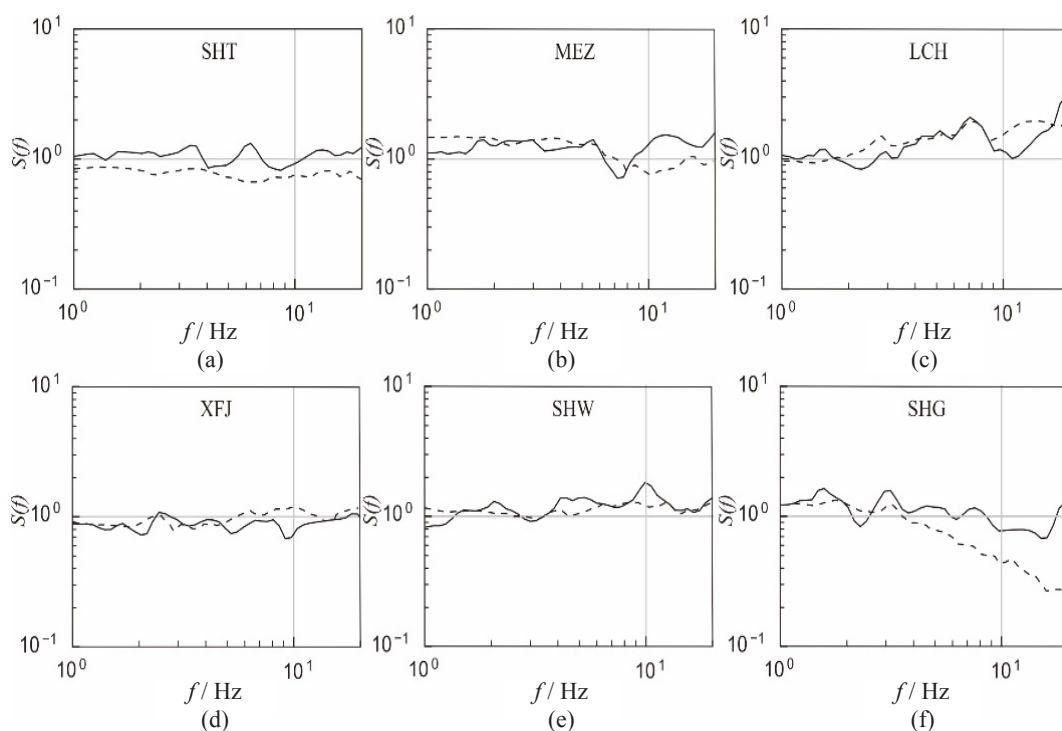
### 3.3 与前人结果对比

黄玉龙等<sup>[10]</sup>曾挑选 1999—2001 年期间 44 次  $M_L \geq 2.5$  地震的 249 条记录，对广东地区 14 个台站的场地响应进行了研究。为了比较前人的场地响应结果与本文结果的差异，我们对其中 11 个台站进行了对比（图 7）。

可以发现，除了当年地震计标定参数可能出问题的台山台（TIS）以外<sup>[10]</sup>，大部分台站的场地响应结果都十分接近。一方面是由于各台

站的台基情况普遍较好，场地响应均在 1 附近；另一方面也说明两种不同的方法对场地响应的计算都是比较可靠的。

另外也可以发现，两种方法所得结果在韶关台（SHG）和信宜台（XNY）部分频段中有少许差异，我们认为这是由于黄玉龙等<sup>[10]</sup>所选用的地震事件对这两个台站的射线覆盖不足，从而导致场地响应结果出现误差，而本文所用的  $H/V$  谱比法不受地震事件的限制。



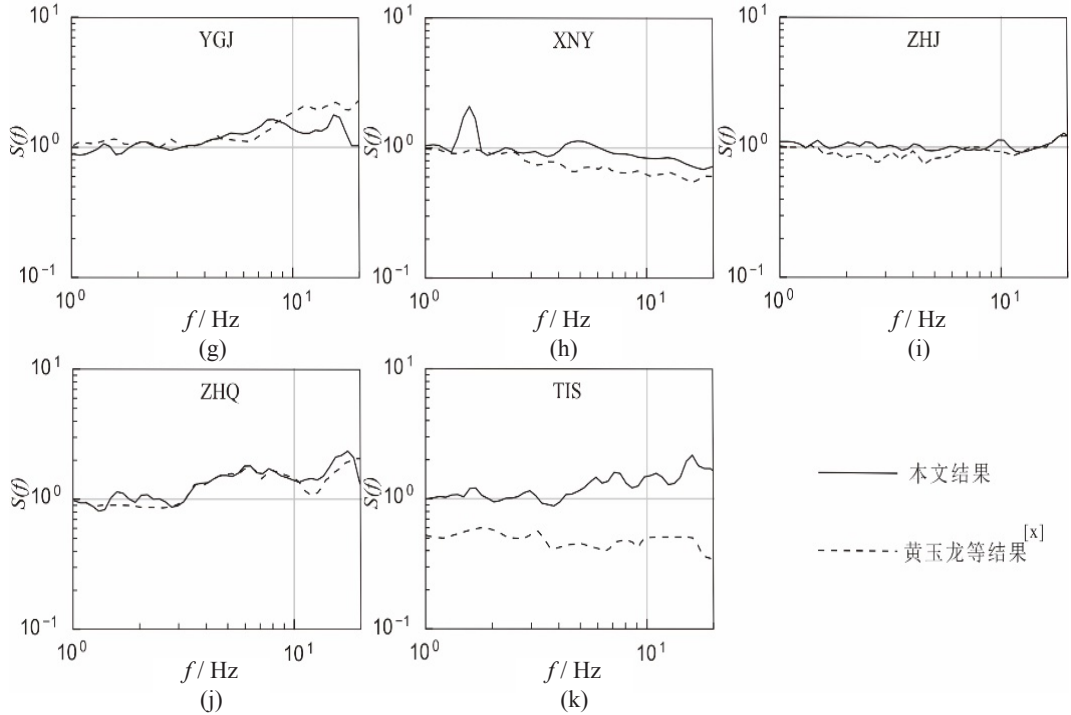


图7 本文结果与黄玉龙等<sup>[10]</sup>得到的场地响应结果对比  
Fig.7 Comparison of results between this paper and Huang. et al<sup>[10]</sup>.

## 4 场地响应对 $M_L$ 震级的校正

### 4.1 震级计算方法

很多学者发现如果在测量震级时消除场地响应的影响<sup>[16-17]</sup>,可以有效提升震级计算结果的精确度。测定单台地方性震级的计算公式<sup>[21]</sup>为,

$$M_L = \lg A + R1(\Delta) \quad (8)$$

式中,  $A$  为以  $\mu m$  为单位的两水平向地动位移最大振幅的算术平均值,  $A = \frac{A_{EW} + A_{NS}}{2}$ ;  $R1(\Delta)$  为量规函数。地震事件的最终震级是由所有记录台站单台震级的算术平均值确定。

设定地震事件总数为  $P$ , 每个地震事件所记录到的子台数量为  $N$ , 由式 (8) 求得第  $i$  个地震事件中第  $j$  个子台测定的单台震级  $M_{Lij}$ , 由式 (9) 求得第  $i$  个地震事件的台网平均震级  $M_{Li}$

$$M_{Li} = \frac{\sum_{j=1}^N M_{Lij}}{N} \quad (9)$$

然后, 由式 (10) 求第  $i$  个地震事件中第  $j$  个子台的单台震级与台网平均震级的偏差  $\Delta M_{Lij}$ ,

$$\Delta M_{Lij} = M_{Lij} - M_{Li} \quad (10)$$

最后, 由以下公式可得到第  $j$  个子台记录到的所有地震事件单台震级的平均偏差  $\Delta M_{Lj}$ 。

$$\Delta M_{Lj} = \frac{\sum_{i=1}^P \Delta M_{Lij}}{P} \quad (11)$$

### 4.2 数据与处理

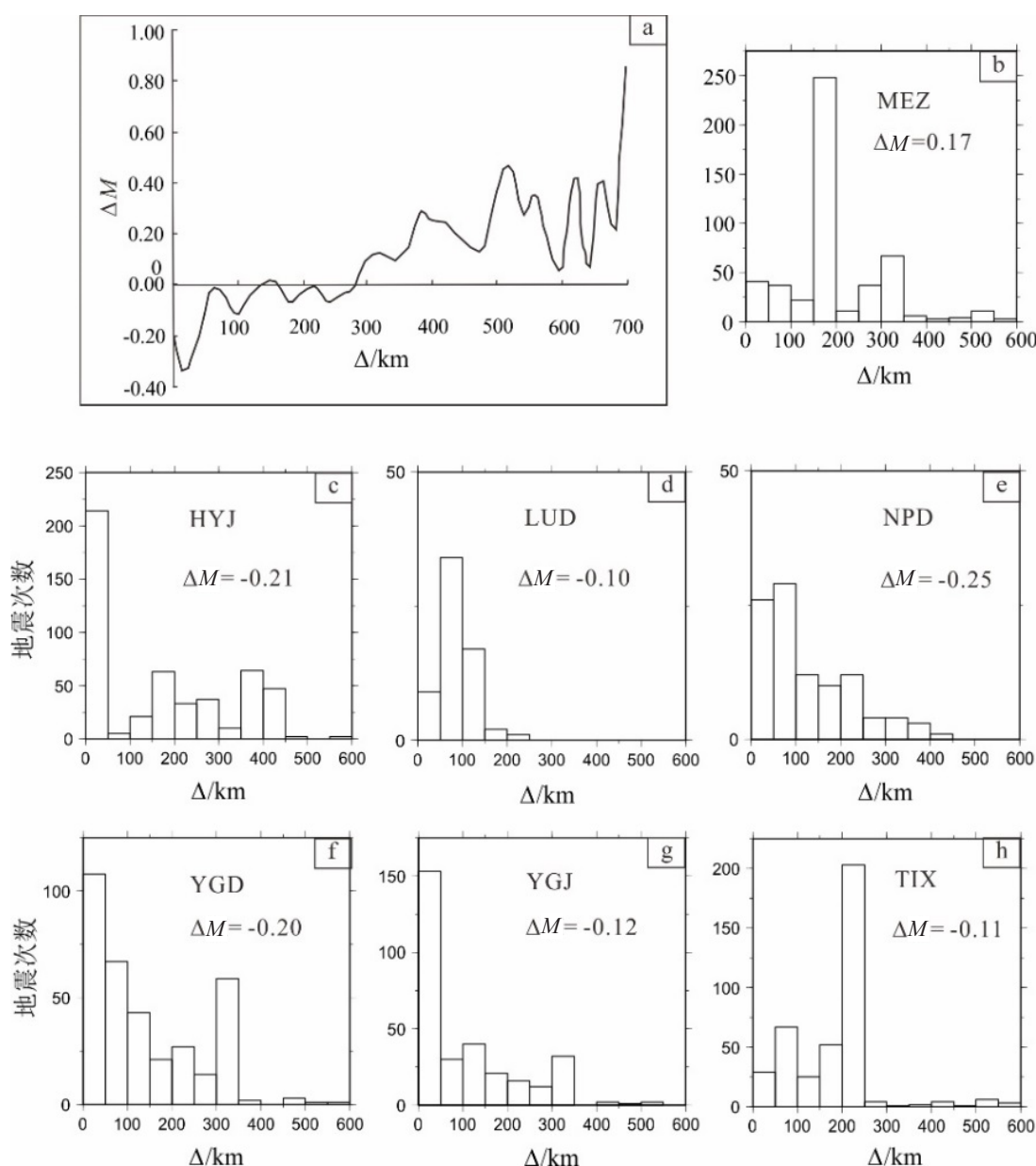
为了分析广东测震台站的震级偏差与其场地响应之间的关系, 我们选取了 2011 年 1 月至 2019 年 10 月广东台网记录到的地震进行分析。为保证数据的质量和结果的可靠性, 本文按以下条件对数据进行挑选: (1) 地震震级  $M_L \geq 2$ ; (2) 每个地震至少有 5 个台站的记录数据; (3) 去除记录地震次数少于 100 次的台站; (4) 去除场地响应曲线起伏非常大的台站。按上述原则我们重新计算台网平均震级, 最终得到地震事件 852 个, 单台震级记录 16 790 条, 参与计算的台站 48 个。参与计算的台站参数及单台平均震级残差见表 1。

对比这 48 个台站的场地响应结果 (图 3~图 5) 和震级残差结果 (表 1), 发现大部分台站的场地响应结果与震级偏差具有较好的关系, 即场地响应放大的台站, 震级偏大; 场地响应缩小的台站, 震级偏小; 场地响应无放大缩小的台站几乎无震级偏差。以 LIZ、HEP 和 HEJ

为例，这3个台站场地响应分别表现出无放大、缩小和放大作用，它们的震级偏差分别为-0.05、-0.23和0.37。

但是另外有HYJ、MEZ、NPD、TIX、XFJ、YGD、YGJ等7个台站，它们的震级残差却与场地响应结果不相符，例如HYJ台站，场地响应值在1左右，理论上不会出现大的震级偏差，但它的震级残差却为-0.21。这是因为造成震级偏差的因素很多，除了场地响应外，还有量规函数、方位角等<sup>[22]</sup>。陈贵美等曾对广东台网的震级偏差进行了研究<sup>[23]</sup>，发现量规函数对震级计算有较大影响，并给出了震中距与震级

差的关系（图8a），大体规律是：震中距0~100 km，震级平均偏差为负；震中距100~300 km，震级平均偏差在0附近；震中距超过300 km，震级平均偏差为正。本文统计了HYJ等7个台站所使用地震样本的震中距（图8b~图8h），发现它们震级偏差很可能是量规函数的误差造成的，震级偏差为负的台站，震中距小于100 km的地震数比例较高；反之，震级偏差为正的台站，震中距大于300 km的地震数比例较高。对于量规函数导致的震级偏差，本文暂不深入讨论。



a. 震级偏差与震中距关系（修改自陈贵美等<sup>[22]</sup>）；b-h: 各台站使用地震样本的震中距统计

图8 量规函数对震级的影响

Fig.8 The influence of the calibration function on the magnitude



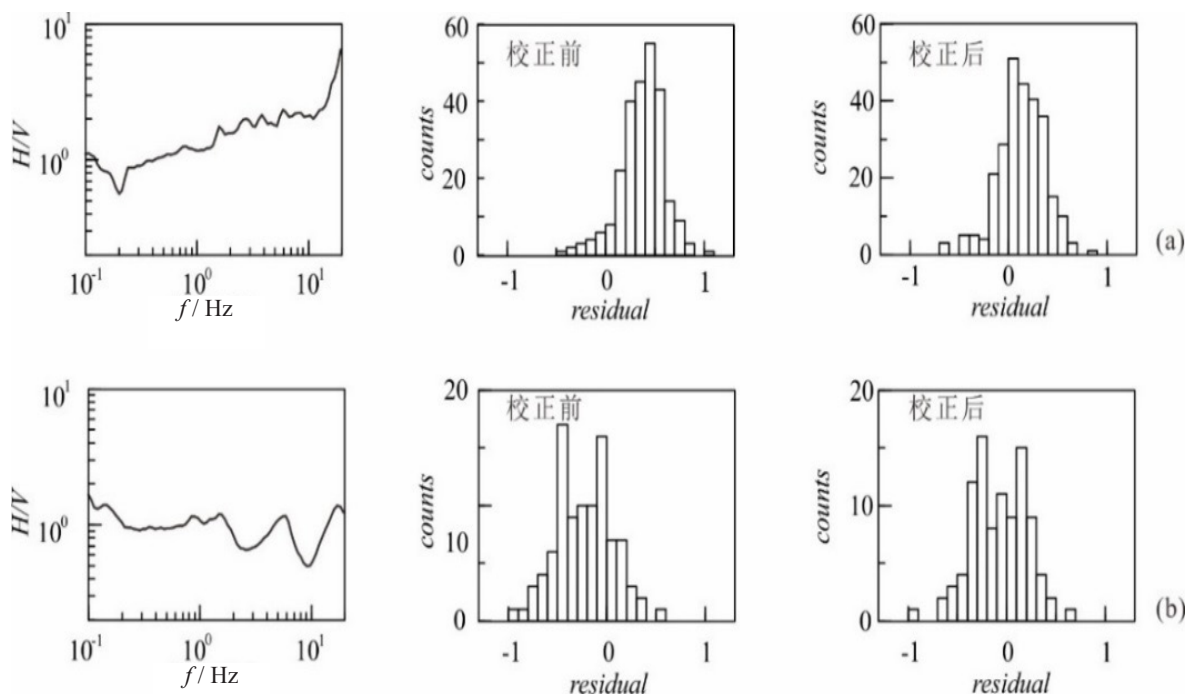
### 4.3 场地响应对震级的影响

为了分析场地响应对震级的影响,我们挑选了场地响应明显或者平均震级偏差较大的22个台站进行场地响应校正(表1),受量规函数影响比较大的台站不进行校正。根据式(8)重新计算22个校正台去除其场地响应后得到的单台震级,式中, $A$ 为去除场地响应

后两水平向地动位移最大振幅的算术平均值,

$$A = \frac{\frac{A_{EW}}{S_{EW}} + \frac{A_{NS}}{S_{NS}}}{2}, A_{EW}、A_{NS} \text{ 分别为 EW 向和 NS}$$

向 S 波的最大振幅; $S_{EW}、S_{NS}$  分别为 EW 向和 NS 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频率的场地响应获取。



(a) HEJ 台站的场地响应、校正前的单台震级残差统计和校正后的单台震级残差统计;(b) HEP 台站的场地响应、校正前的单台震级残差统计和校正后的单台震级残差统计

图9 HEJ 台站和 HEP 台站的场地响应和单台震级残差统计

Fig.9 Statistics of site response and single magnitude residuals of HEP Station and HEJ Station

校正完成后,再根据公式(9)、(10)和(11)重新计算得到852个地震新的平均震级和48个台站新的平均震级残差(表1)。由于新的震级残差是由新的平均震级计算而来,因此即使未进行校正台站的震级残差也会发生轻微变化。

从表1中校正效果(负值代表残差减小,正值代表残差增加)来看,残差减少的居多,这在一定程度上能减小整个台网测震的震级残差,说明对台站进行场地响应校正是有意义的。校正后大部分台站的震级残差变化不大,多数在0.10以内,这是因为广东台网台站的台基情况普遍较好,绝大多数台站无放大效应或者仅局部频段有一定放大效应(图3~图5),因此对他们进行场地响应校正的作用有限。同时可

以看出,部分台站的震级偏差有明显改善,如HEJ、HEP、LTK、SHD等台站的平均震级残差减小了0.10~0.25。以HEP和HEJ台站为例(图9),这2个台站的场地响应明显偏离1,校正前的平均震级残差分别为-0.23和0.37,震级残差直方图的整体分布明显偏离0,校正后这两个台的平均震级残差分别为-0.07和0.13,残差分别减少了0.16和0.24,震级残差直方图的整体分布更靠近0。说明对于场地响应明显的台站,场地响应的校正可以有效提高其震级准确性。

综上说明,应用场地响应分析结果能够减小在一定程度上减小整个台网测震的震级残差,可以非常显著地改善部分台站的单台震级残差。

表 1 广东台网 48 个台站校正前后的平均震级残差统计

Table 1 Statistics of average magnitude deviation of 48 stations in Guangdong Seismic Network before and after correction

台站	地震数	校正前震级残差	场地响应分类	场地响应校正	校正后震级残差	校正效果	台站	地震数	校正前震级残差	场地响应分类	场地响应校正	校正后震级残差	校正效果
CHZ	375	0.01	a	否	-0.02	+0.01	RAP	132	0.15	b	是	0.11	-0.04
DGD	248	0.07	a	否	0.10	+0.03	SCD	336	-0.08	a	否	-0.03	-0.05
DNB	334	0.05	b	是	-0.01	-0.04	SHD	304	0.43	b	是	0.18	-0.25
DOG	450	0.02	a	否	0.06	+0.04	SHG	371	0.14	b	是	0.10	-0.04
FES	490	-0.01	a	否	0.03	+0.02	SHT	405	-0.08	a	否	-0.04	-0.04
GAZ	333	0.00	b	是	-0.01	+0.01	SHW	406	0.01	b	是	-0.01	0
GZH	366	0.11	a	否	0.14	+0.03	SLG	156	0.04	c	否	0.08	+0.04
HEJ	256	0.37	b	是	0.13	-0.24	SZN	271	0.02	b	是	-0.05	+0.03
HEP	101	-0.23	c	是	-0.07	-0.16	TIS	443	-0.03	b	是	-0.03	0
HUD	430	0.10	a	否	0.14	+0.04	TIJ	391	-0.11	a	否	-0.07	-0.04
HUJ	407	0.04	b	是	0.05	+0.01	XFJ	401	-0.22	a	否	-0.13	-0.09
HUZ	381	0.01	a	否	0.05	+0.04	XIG	415	0.05	b	是	-0.03	-0.02
HYJ	486	-0.21	a	否	-0.16	-0.05	XNH	440	0.02	a	否	0.07	+0.05
JIX	494	-0.07	a	否	-0.04	-0.03	XNY	269	-0.08	b	是	0.01	-0.07
LCH	451	0.17	b	是	0.09	-0.08	YGC	382	0.06	b	是	0.12	+0.06
LIP	437	0.08	b	是	0.02	-0.06	YGD	338	-0.20	b	是	-0.15	-0.05
LIZ	246	-0.05	a	否	0.00	-0.05	YGJ	300	-0.12	a	否	-0.07	-0.05
LTK	404	0.13	b	是	0.01	-0.12	YND	380	-0.03	a	否	0.01	-0.02
LUD	111	-0.10	a	否	-0.05	-0.05	ZHH	397	-0.03	b	是	-0.04	+0.01
MEZ	482	0.17	a	否	0.21	+0.04	ZHJ	278	-0.08	a	否	-0.02	-0.06
NAO	404	0.00	b	否	0.03	+0.03	ZHQ	414	-0.01	b	否	0.03	+0.02
NAP	213	0.01	b	是	0.00	-0.01	ZHS	422	0.00	a	否	0.04	+0.04
NPD	204	-0.25	a	否	-0.20	-0.05	ZHX	103	0.11	b	是	-0.09	-0.02
PUN	404	-0.08	a	否	-0.04	-0.04	ZIJ	529	0.03	b	是	0.00	-0.03

注：场地响应分类中，a 为无明显放大作用，b 为有较明显放大作用，c 为有缩小作用；校正效果中，负值代表校正后震级残差更接近于 0，效果好，正值代表校正后震级残差更偏离 0，效果差

5 结语

采用谱比法对广东测震台网 72 个台站记录到的地脉动数据进行分析处理，得到了各台站的场地响应，并进一步分析了各台站的震级偏差与场地响应之间的关系。得到以下结论：

(1) 广东测震台网 72 个台站中有 32 个无明显场地放大作用的台站，32 个台站有较明显场地放大作用，另外还有 4 个表现轻微场地缩小作用的台站和 4 个场地响应曲线起伏剧烈的台站。

(2) 总体而言，基岩的硬度越大，场地放大作用越小，且场地响应曲线变化平缓。基岩的

结构对场地作用影响较大，发育气孔构造的玄武岩普遍表现出明显的场地放大作用。

(3) 大部分台站的震级偏差结果与它们的场地响应具有一定关系，即场地响应放大的台站，震级偏大；场地响应缩小的台站，震级偏小；场地响应无放大缩小的台站几乎无震级偏差。场地响应校正能够在一定程度上减小整个台网测震的震级残差，对于场地效应明显的台站，可以非常显著地改善其震级偏差。

(4) 部分台站的震级偏差结果与他们的场地响应结果不符，这种偏差很可能是量规函数的误差造成的。

**致谢：**感谢审稿专家给出的宝贵意见，本文绘图均使用 GMT 程序绘制，在此一并表示感谢。

## 参考文献

- [1] Rogers, A.M., J.C. Tinsley, W.W. Hays, et al. Evaluation of the relation between near-surface geological units and ground response in the vicinity of Long Beach, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 5 (69).
- [2] Andrews D J. Objective Determination of Source Parameters and Similarity of Earthquakes of Different Size[M]. Washington, D. C: American Geophysical Union, 1986: 259-267.
- [3] Borchardt, R. . Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay[J]. Bulletin of the Seismological Society of AMERICA, 1970, 1 (60) : 29-61.
- [4] Moya, A. . Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records using Genetic Algorithms[J]. 2000, 90 (4) : 977-992.
- [5] Nakamura, Y.. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 1989, 1 (30) : 25-33.
- [6] 刘特培, 杨向东, 万永芳. 广东及邻区地震活动特征及近期地震危险性分析 [J]. 华南地震, 2003, 23 (3) : 35-40.
- [7] 任镇寰, 罗振暖, 秦乃岗. 华南地震区地震活动基本特征与地震大形势再研究 [J]. 华南地震, 1998 (01) : 41-50.
- [8] 曹敬贺, 孙金龙, 徐辉龙, 等. 珠江口海域滨海断裂带的地震学特征 [J]. 地球物理学报, 2014, 57 (02) : 498-508.
- [9] 熊成, 曹敬贺, 孙金龙, 等. 珠江口外海域滨海断裂带沿构造走向的变化特征 [J]. 地球科学, 2018, 43 (10) : 3682-3697.
- [10] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究 [J]. 地球物理学报, 2003 (01) : 54-61.
- [11] 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 (03) : 30-44.
- [12] Bao, F., Z. Li, D.A. Yuen, et al. Shallow structure of the Tangshan fault zone unveiled by dense seismic array and horizontal-to-vertical spectral ratio method[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2018, 281: 46-54.
- [13] Sánchez-Sesma, F.J., M. Rodríguez U. Iturrarán-Viveros, et al. A theory for microtremor  $H/V$  spectral ratio: application for a layered medium[J]. Geophysical Journal International, 2018, 186 (1) : 221-225.
- [14] 冀昆. 基于  $H/V$  谱比法的场地特征研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- [15] 陈棋福, 刘澜波, 王伟君, 等. 利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应 [J]. 科学通报, 2008 (18) : 2229-2235.
- [16] 许亚吉, 杨晶琼, 蔡明军, 等. 云南测震台网台站场地响应与  $M_L$  震级测定的讨论 [J]. 中国地震, 2019, 35 (01) : 84-95.
- [17] 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 (06) : 1045-1058.
- [18] Lesparre, N., F. Boudin, C. Champollion, et al. New insights on fractures deformation from tiltmeter data measured inside the Fontaine de Vaucluse karst system[J]. Geophysical Journal International, 2017, 208 (3) : 1389-1402.
- [19] 温瑞智, 冀昆, 任叶飞, 等. 基于谱比法的我国强震台站场地分类 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (06) : 1236-1241.
- [20] Konno, K., T. Ohmachi. Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 1 (88) : 228-241.
- [21] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范 (地震观测), 北京: 地震出版社, 2001.
- [22] 陈培善, 秦嘉政. 量规函数、台站方位、台基及不同测量方法对近震震级  $M_L$  的影响 [J]. 地震学报, 1983 (01) : 87-98.
- [23] 陈贵美, 胡文灼, 刘军. 广东数字遥测地震台网台站震级偏差的研究 [J]. 华南地震, 2010, 30 (S1) : 113-121.