

杨亚运,汪建,李翠平,等. 2024. 基于 H/V 谱比法的重庆测震台网场地响应研究[J]. 地震研究, 47(4): 528–540, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0047.

Yang Y Y, Wang J, Li C P, et al. 2024. Site response of the Chongqing Seismic Networks based on the H/V spectral ratio method[J]. Journal of Seismological Research, 47(4): 528–540, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0047.

基于 H/V 谱比法的重庆测震台网场地响应研究*

杨亚运,汪建,李翠平,马伟

(重庆市地震局, 重庆 401147)

摘要: 利用重庆测震台网 36 个子台地脉动噪声数据, 采用 H/V 谱比法计算分析场地响应。根据各台站 0.5 ~ 20 Hz 场地响应曲线形态特征, 将这些子台分为平坦类、低频放大类、中频放大类、中频衰减类和高频放大类。结合 7 个钻孔应变同址观测台站地质剖面图, 分析了浅层地质构造对台站场地响应的影响, 结果表明: 台基岩性差异和分层结构对场地放大效应有直接影响, 台站局部低密度介质会造成低频段 (0.5 ~ 1 Hz) 的场地放大效应, 而岩性单一的地下结构场地放大效应不明显。对比 3 个台基改造台站在改造前后的场地响应曲线, 发现台基观测形式的改变对台站场地响应会产生实质性的影响, 地震计墩加高后的独立柱体结构, 明显增大了中高频段场地放大效应。重庆地区场地响应等值线分布与区域地形地貌之间无必然联系, 但台基局部地势和所处山体的位置会影响观测频带范围内场地响应曲线表现形态。综合来看, 台基岩性差异和工艺水平、浅层地质构造和介质密度、局部地形特征和山体部位等均会影响台站场地响应的表现形式。

关键词: H/V 谱比法; 场地响应; 台基形式; 重庆地区

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0528-13
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0047

0 引言

合格的地震台站能够尽可能真实地记录地脉动噪声和地震事件波形。在估算中小地震的震源参数时, 如果不能合理地考虑场地响应, 那么场地的低频放大作用将很容易掩盖震源原来的拐角频率, 而拐角频率很小的数值变化都将显著影响应力降的估算结果。因此, 给出与频率有关的台站场地响应, 有助于提高利用数字地震记录估算中小地震震源参数的准确性 (张红才等, 2015)。台站台基场地响应也会影响震级计算结果, 在进行震级偏差校正时, 统计台站震级偏差平均值的方法存在一定的缺陷, 还必须充分考虑台站的台基场地响应 (华卫等, 2010)。因此, 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, 还可以为单台震级的校正提供依据。

场地响应一般是指场地附近理想基岩上覆盖的松软土层对地震波振幅的影响, 而理想基岩本身则被认为对地震波振幅没有影响 (Shearer, 1999)。但近年来国内外的相关研究 (Nakamura, 1989; 刘丽芳等, 2007) 发现, 上述情况在场地条件很好的基岩台站上作为一种近似是可以的, 然而大多数台站的场地响应曲线并不是完全无地表放大作用的。场地响应可通过地面运动反演法、参考台站法和 H/V 谱比法这 3 种方法来测量, 其中 H/V 谱比法假设地面运动垂直分量的振幅谱对场地响应相对不敏感, 利用 H/V 峰值估计共振频率, 适合快速评估场地特性。相比基于地震记录

* 收稿日期: 2023-03-02.

基金项目: 中国地震局 2022 年三结合课题 (3JH-202201001).

第一作者简介: 杨亚运 (1990-), 工程师, 主要从事地震台站运行维护工作. E-mail: 534275705@qq.com.

的方法,该方法具有数据获取简单、数据处理快捷、适用多种仪器、受场地限制少、无需等待地震发生等优点,尽管其理论解释还存在一些争议,但依然在工程地震领域获得了广泛应用(马淑芹等,2007;华卫等,2010)。本文应用 H/V 噪声谱比法,利用地脉动噪声数据,开展重庆测震台网子台场地响应研究。

1 H/V 谱比法原理

H/V 谱比法又称为中村(Nakamura)法,是一种基于同一地表测点地脉动水平分量与竖向分量傅立叶幅谱比值来估计场地特征的方法。其基本原理为:设 V_s 和 H_s 分别为地表处垂直向和水平向的地震动振幅谱, V_b 和 H_b 分别为基底处垂直向和水平向的地震动振幅谱。实验证明,基底处地震动的垂直分量与水平分量大致相等,假定地表处垂直分量基本未被放大,则有 $H_b \approx V_b \approx V_s$, 因此台站噪声谱比值可表示为(马淑芹等,2001):

$$S = H_s/H_b = H_s/V_s \quad (1)$$

利用快速傅立叶变换计算所选地脉动噪声数据,以 V_{UD} 表示地表处垂直分向傅立叶振幅谱,水平分量的傅立叶谱 H_s 采用地表 NS、EW 向振幅谱 H_{NS} 和 H_{EW} 的合成谱,经验传递函数可用 Nakamura 谱比表示为:

$$(H/V)_s = \frac{\sqrt{H_{NS}^2 + H_{EW}^2}}{V_{UD}} \quad (2)$$

根据式(2),用地表记录到的水平向地震波振幅谱和垂直向地震波振幅谱之比就可以计算得到各台站的场地响应。

2 数据处理方法步骤

重庆测震台网共有36个子台(图1),其中17个台基岩性为砂岩,其余均为灰岩。台基观测形式有3种,重庆(CQT)为山洞观测,开县临江(LIJ)、忠县善广(SHG)、合川云门(YUM)原本为摆坑式观测,国家预警重庆子项目开展期间改造为地表摆墩观测(表1),其余台站均为地表

摆墩。观测仪器主要是2 s ~ 50 Hz 速度型短周期地震计和60 s ~ 50 Hz 宽频带地震计,采样频率均为100 sps。

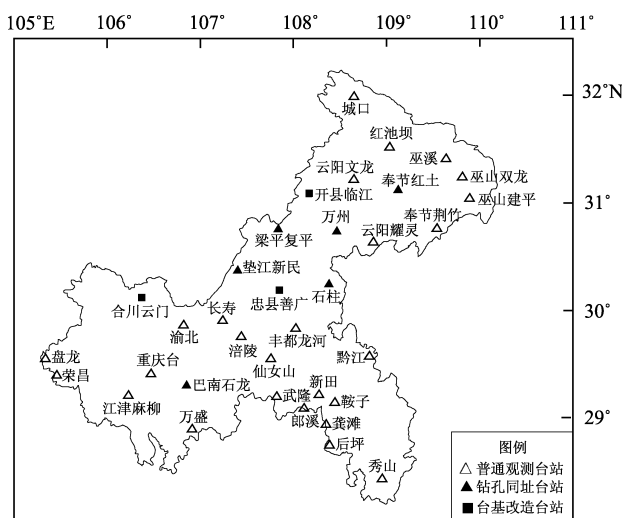


图1 重庆测震台网子台分布

Fig. 1 Distribution of the sub-stations of the Chongqing Seismic Networks

从2021年重庆测震台网各月归档波形数据中,按照每个月挑选一天的方式,每个台站共选出12 d的噪声记录。进行截取、对齐、去均值和去倾斜等处理,拼接成每个台站一条的预处理数据,然后利用短时窗平均比长时窗平均(STA/LTA)触发算法(Withers *et al*, 1998)反向选择相对稳态的时窗信号。为消除持续短瞬变干扰信号,筛选地震动中相对平静的部分,将算法的短时窗长度设置为1 s,长时窗长度设置为30 s(图2a),以0.5 ~ 2.5为阈值选择稳态信号(Bard *et al*, 2008;彭菲等,2020;邵媛媛等,2022)。使用Konno和Ohmachi(1997)的平滑方法进行平滑处理($b=40$),每个选定的数据段都生成一条 H/V 曲线(图2b),将所有 H/V 曲线进行几何平均计算,得到目标台站平均场地响应及峰值频率(图2c)。本文重点分析0.5 ~ 20 Hz 各台站场地响应(图2d)。

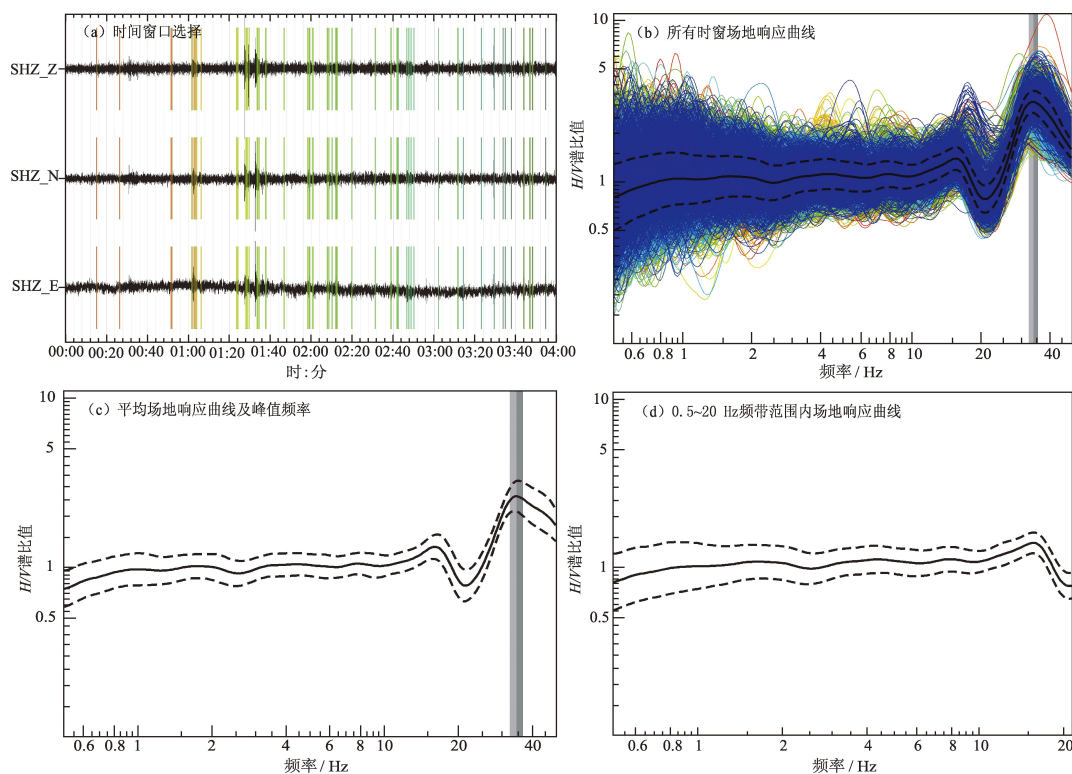
3 结果分析

根据上述步骤,对重庆测震台网36个子台的地脉动噪声数据进行噪声谱比计算,得到

0.5 ~ 20 Hz 的场地响应曲线（图 3）。图 3 表明，各台站场地响应曲线不尽相同，1 Hz 以下的低频段，绝大多数台站场地响应曲线平坦，噪声谱比值在 1 附近，仅梁平复平（FUP）噪声谱比值整体大于 2，而合川云门（YUM）噪声谱比值整体小于 0.9。1 ~ 10 Hz 中频段和 10 ~ 20 Hz 高频段各台站场地响应结果差异明显，部分台站存在明显峰值或低值。

表 1 重庆测震台网各子台基本信息
Tab. 1 Basic information of the sub-stations of the Chongqing Seismic Networks

序号	台站名称	台站代码	高程/m	台基类型	场地类型	地震计	频带范围
1	鞍子	ANZ	464	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
2	城口	CHK	840	灰岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
3	长寿	CHS	350	砂岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
4	重庆	CQT	255	灰岩	山洞	BBVS-120	120 s ~ 50 Hz
5	涪陵	FUL	695	砂岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
6	梁平复平	FUP	440	砂岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
7	龚滩	GOT	676	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
8	红池坝	HCB	1825	灰岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
9	后坪	HOP	703	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
10	奉节红土	HOT	888	砂岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
11	巫山建坪	JIP	1318	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
12	奉节荆竹	JIZ	1227	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
13	朗溪	LAX	701	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
14	开县临江	LJ	200	砂岩	摆坑改地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
15	丰都龙河	LOH	820	砂岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
16	鹿角	LUJ	324	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
17	江津麻柳	MAL	420	砂岩	地表	GL-S60	60 s ~ 50 Hz
18	荣昌盘龙	PAL	400	砂岩	地表	GL-S60	60 s ~ 50 Hz
19	黔江	QIJ	430	灰岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
20	荣昌	ROC	430	砂岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
21	忠县善广	SHG	910	砂岩	摆坑改地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
22	巫山双龙	SHL	400	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
23	石柱	SHZ	1552	砂岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
24	巴南石龙	SLO	590	砂岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
25	万盛	WAS	488	灰岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
26	万州	WAZ	493	砂岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
27	云阳文龙	WEL	530	砂岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
28	武隆	WUL	330	砂岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
29	巫溪	WUX	284	灰岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
30	垫江新民	XIM	430	砂岩	地表	GL-S60	60 s ~ 50 Hz
31	秀山	XIS	385	灰岩	地表	CTS-2F	60 s ~ 50 Hz
32	新田	XIT	325	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
33	仙女山	XNS	1823	灰岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
34	云阳耀灵	YAL	490	砂岩	地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz
35	渝北	YUB	230	灰岩	地表	CMG-3ESP	60 s ~ 50 Hz
36	合川云门	YUM	220	砂岩	摆坑改地表	DS-4A	2 s ~ 50 Hz

图2 H/V 时间窗选择及场地响应计算结果Fig. 2 H/V time window selection and site response calculation results

3.1 台站场地响应分类

依据场地响应曲线形态对台站进行分类是研究场地响应的重要内容,如张红才等(2015)根据福建台网各台站在 $0.1 \sim 50$ Hz 的场地响应曲线形态,将 85 个台站大致分为 4 类;张珂等(2020)根据各频段内噪声谱比值的中位数大小,将内蒙古西部地区 12 个台站分为平坦型、中频放大型 ($1 \sim 10$ Hz) 及高频放大型 (10 Hz 以上) 3 类;姜秀璇等(2021)依据各台站在 $1 \sim 20$ Hz 的场地响应曲线形态,将祁连山主动源观测台网中 40 个观测台站分为 3 类:平坦型、放大型和高频衰减型。鉴于噪声谱比值受深部地质构造影响的情况较为复杂,所表现出的场地响应曲线形态具有多样性,本文在进行场地响应曲线分类时,根据 $0.5 \sim 1$ Hz、 $1 \sim 10$ Hz 和 $10 \sim 20$ Hz 3 个频带范围内各子台场地响应曲线形态特征,结合噪声谱比值的大小综合定义场地响应曲线类型。首先定义不同频带范围内的场地响应曲线类型,当频段内曲线有优势特征出现时直接定义为该种类型,36 个子台分类结果包括:平坦类、中频放大类、高频放大类、中频衰减类和低频放大类(图 4)。

3.1.1 平坦类

平坦类台站包括长寿(CHS)、江津麻柳(MAL)、石柱(SHZ)、巴南石龙(SLO)、云阳文龙(WEL)、垫江新民(XIM) 6 个砂岩台基台站和重庆(CQT)、龚滩(GOT)、红池坝(HCB)、鹿角(LUJ)、巫山双龙(SHL)、万盛(WAS)、新田(XIT)、仙女山(XNS)和渝北(YUB) 9 个灰岩台基台站,此类台站场地响应曲线形态上整体平坦(图 4a),无明显峰值(大于 2)和低值(小于 0.8)。台站的台基状况和观测环境普遍较好,能较好地记录观测频段内的地震动信号,此类型台站占重庆台网台站总数的 41%。

3.1.2 中频放大类

此类台站在 $1 \sim 10$ Hz 频带范围内有频点噪声谱比值大于 2,且频点放大比在高频段明显,包括城口(CHK)、巫山建平(JIP)、奉节荆竹(JIZ)、丰都龙河(LOH)、荣昌盘龙(PAL)、忠县善广(SHG)、秀山(XIS)、合川云门(YUM) 8 个台站(图 4b)。这些台站中砂岩和灰岩台基各占一半。其中,忠县善广(SHG)和合川云门(YUM)台基从摆坑观测改造为地表观测,其台站场地放大

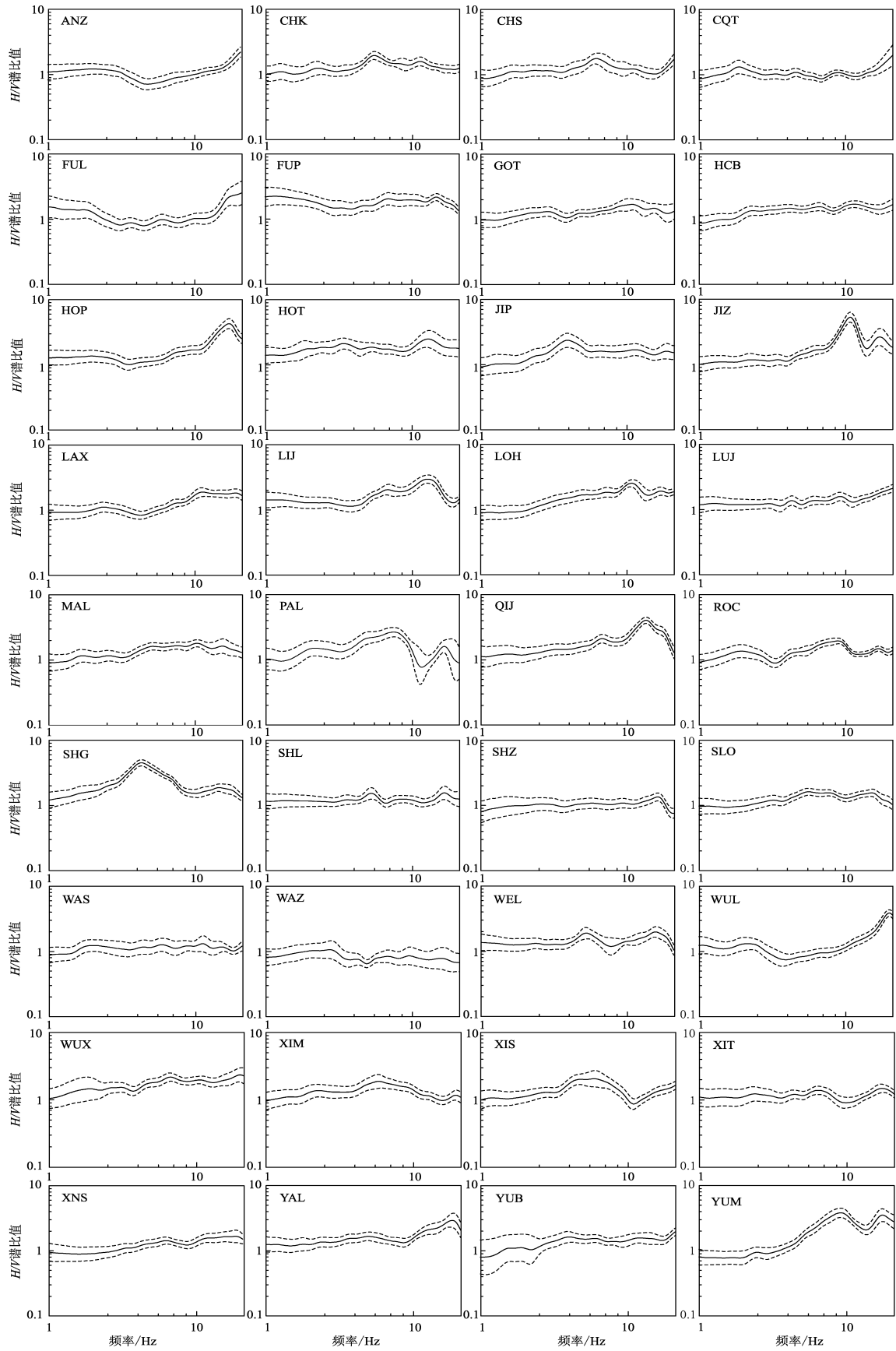


图3 重庆测震台网 36 个子台场地响应曲线

Fig. 3 Site response curves of 36 sub-stations of the Chongqing Seismic Networks

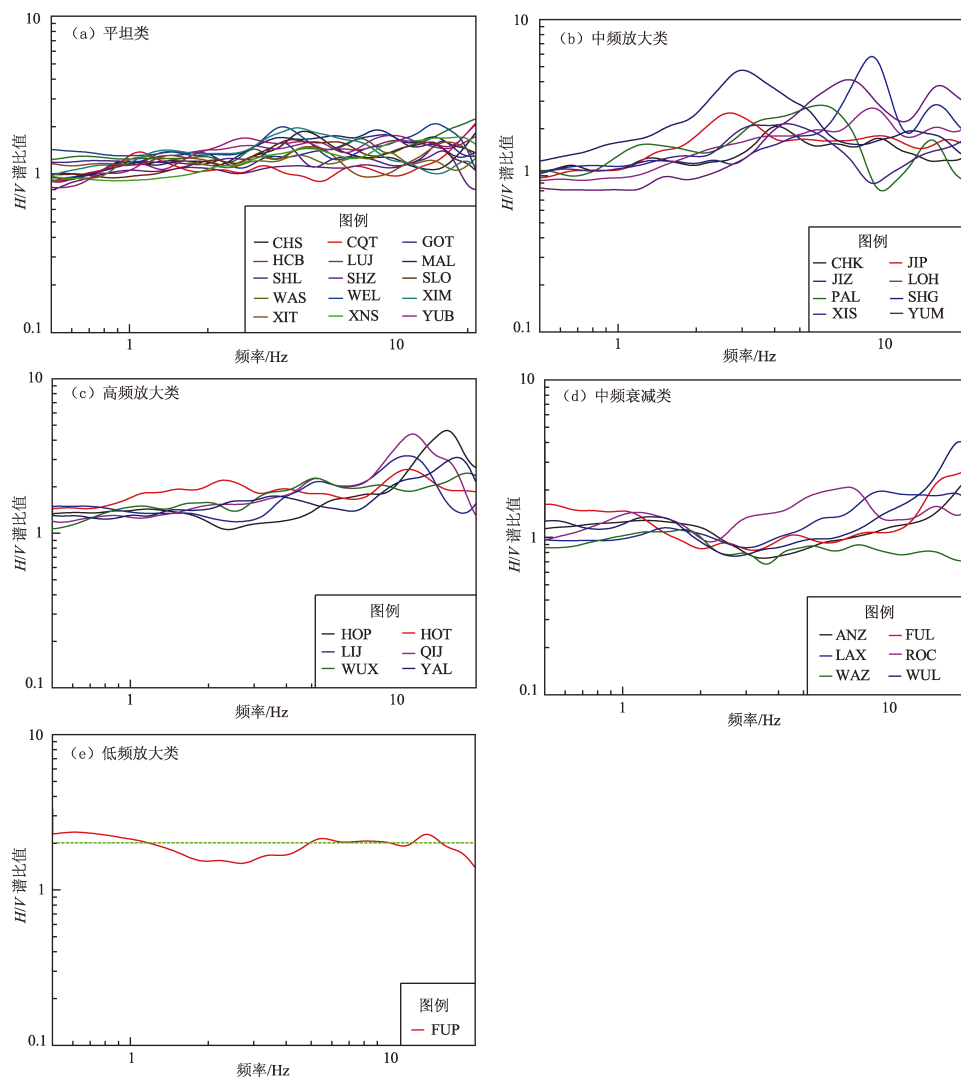


图4 5 种类型台站的场地响应曲线

Fig. 4 Site response curves of five kinds of stations

效应是否与台基改造有关，将在下文进行论述。

图4b表明，中频放大类台站场地响应曲线在中频段有较显著的高值区，会对该频段及其附近的地震动成分产生较明显的放大作用。吴微微等(2016)研究表明，岩石台基对地震波信号在不同频率的放大作用并不相同，因近震震级卓越频段为1~4 Hz，与此类台站场地响应放大频段一致。因此在震源参数分析过程中，可能出现单台震级大于台网平均震级的现象。因此，在做震源参数校正时需要重点关注此类台站。

3.1.3 高频放大类

此类台站包括后坪(HOP)、奉节红土(HOT)、开县临江(LIJ)、黔江(QIJ)、巫溪(WUX)和云阳耀灵(YAL)共6个台站(图

4c)，灰岩和砂岩台基也各占一半，此类台站从低频段开始，噪声谱比值随频率增加而增大，最大放大倍数超过4，在10~20 Hz达到峰值后下降，且该频带范围内存在多个噪声谱比值大于2的频点，场地放大效应也明显高于中频段。

3.1.4 中频衰减类

此类台站有鞍子(ANZ)、涪陵(FUL)、郎溪(LAX)、荣昌(ROC)、万州(WAZ)和武隆(WUL)共6个(图4d)，该类台站在1~10 Hz部分频段的噪声谱比值小于0.9，其中万州(WAZ)最小值达到0.7以下；场地响应曲线整体呈现“中间小，两头大”的形态，主要在3 Hz左右表现为中频衰减特征。因而此类台站参与台网分析时，可能会导致震级偏小。

3.1.5 低频放大类

仅梁平复平 (FUP) 1 个台站表现为在 1 Hz 以下的低频段场地响应有显著放大 (图 4e), 这一频段范围内噪声谱比值明显大于 2, 且噪声谱比值大于其它频段范围内的值。该台站台基岩性为砂质泥岩, 此类沉积岩硬度低于砂岩和灰岩, 且较易风化, 形成地表松软层, 使台站的场地响应值存在局部放大现象。

3.2 台站场地响应影响因素

朱荣欢和苏有锦等 (2007)、张红才等 (2015) 研究表明, 台站的场地响应受台站地形地貌、局部地质构造和台基工艺状况等因素影响, 台站台基岩性也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 (姜秀璇等, 2021)。重庆地区台站虽然均为基岩台基, 但场地响应曲线平坦的台站中, 灰岩台基台站占比高于砂岩台基, 表明台基局部的岩性状况、基底层以上介质密度大小以及台站所处地区地质背景等多种因素, 均会影响台站场地响应曲线的具体表现形态。

姜秀璇等 (2021) 研究发现, 位于高原地区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平坦些。重庆地区海拔 1 500 m 以上的 3 个台站红池坝 (HCB)、仙女山 (XNS)、石柱 (SHZ), 其场地响应曲线均表现为平坦的特征也证明了这一点。场地响应曲线在中高频段有明显放大的台站中, 城口 (CHK)、丰都龙河 (LOH)、黔江 (QIJ) 等台站的台基位于山体半山坡上, 坡度均较为陡峭; 巫山建平 (JIP)、忠县善广 (SHG)、合川云门 (YUM)、奉节红土 (HOT)、巫溪 (WUX)、开县临江 (LIJ)、云阳耀灵 (YAL) 等台位于山体顶部位置或相对独立山体, 周围均存在陡崖地形; 奉节荆竹 (JIZ) 台位于山体鞍部, 周围存在熔岩空洞区。可见, 台站局部地形地貌环境, 也会影响部分频点场地放大效应。

4 台站场地响应影响因素分析

重庆测震台网有 7 个台站同时开展钻孔应变观测 (图 1), 台站建设时获取了地表以下一定

深度的地质剖面图, 结合相应台站场地响应曲线形态特征, 可探讨台站场地响应与地质构造的关系。另有合川云门 (YUM)、开县临江 (LIJ)、忠县善广 (SHG) 3 个台站的台基观测形式从摆坑观测改造为地表摆墩, 对比改造前后的场地响应曲线, 可分析台基形式的改变对台站场地响应的影

4.1 地质构造

场地响应幅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震源信号的能力成正比, 高质量的观测台站可以减少获取较高信噪比的震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。对在基岩条件下, 不同介质密度及所处地区空间地质背景进行研究, 可为后续待建或改建的地震台站台基遴选提供帮助。

从图 5a 可看出, 各台站场地响应曲线形态有一定差异, 这些台站包含了 5 类场地响应类型, 其中平坦类有石柱 (SHZ)、巴南石龙 (SLO)、垫江新民 (XIM), 低频放大类有梁平复平 (FUP), 中频放大类有合川云门 (YUM), 中频衰减类有万州 (WAZ), 高频放大类有奉节红土 (HOT)。一般来说, 地震波的振幅与介质阻抗的平方根成反比 (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, 因此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相反 (史海霞, 2008; 姜秀璇等, 2021)。

以各台站不同频带范围内最大噪声谱比值表示场地放大程度 (表 2), 与对应的钻孔剖面图 (图 5b) 反映的台基岩性和岩层结构存在一定的联系。各台站地层年代均为侏罗系时期, 除石柱 (SHZ) 台基岩性单一、岩层较厚以外, 其余台站均为泥岩和砂岩交替出现。梁平复平 (FUP) 台基处第一层为砂质泥岩, 且深度达到 83.03 m, 第二层仅有 12.5 m 厚的砂岩, 再深处又是泥岩, 这种软-硬-软的地质结构使台站场地响应曲表现为低频放大, 且显著区别于其它台站。一般砂岩密度和硬度大于泥岩, 因此泥岩对地震波振幅放大作用更明显, 说明地表低密度介质主要影响低频段场地放大作用。

表 2 钻孔同址台站 H/V 谱比值与地层结构

Tab. 2 Noise spectrum ratios, the borehole parameters and the strata underneath the sub-stations for both borehole strain monitoring and earthquake monitoring

台站 代码	H/V 谱比最大值			钻孔深 度/m	地层年代	第一层		第二层		第三层	
	0.5 ~ 1 Hz	1 ~ 10 Hz	10 ~ 20 Hz			深度/m	岩性	深度/m	岩性	深度/m	岩性
FUP	2.4	2.1	2.3	103	侏罗系中统	0 ~ 83.0	砂质泥岩	83.0 ~ 95.5	砂岩	95.5 ~ 103.0	砂质泥岩
HOT	1.7	2.3	2.6	90.2	侏罗系中统	0 ~ 38.4	砂岩	38.4 ~ 83.0	泥岩	83.0 ~ 90.2	砂岩
SHZ	1.1	1.2	1.4	60.1	侏罗系中统	0 ~ 60.1	砂岩	—	—	—	—
SLO	1	1.7	1.6	95.4	侏罗系上统	0 ~ 16.3	砂岩	16.3 ~ 86.2	泥岩	86.2 ~ 95.4	砂岩
WAZ	1	1.1	0.8	49.7	侏罗系中统	0 ~ 48.3	砂岩	48.3 ~ 49.7	泥岩	—	—
XIM	1.2	2	1.2	90.6	侏罗系上统	0 ~ 14.8	砂岩	14.8 ~ 90.6	泥岩	—	—
YUM	0.8	4.1	3.8	41.2	侏罗系中统	0 ~ 16.7	砂岩	16.7 ~ 32.8	泥岩	32.8 ~ 41.4	砂质泥岩

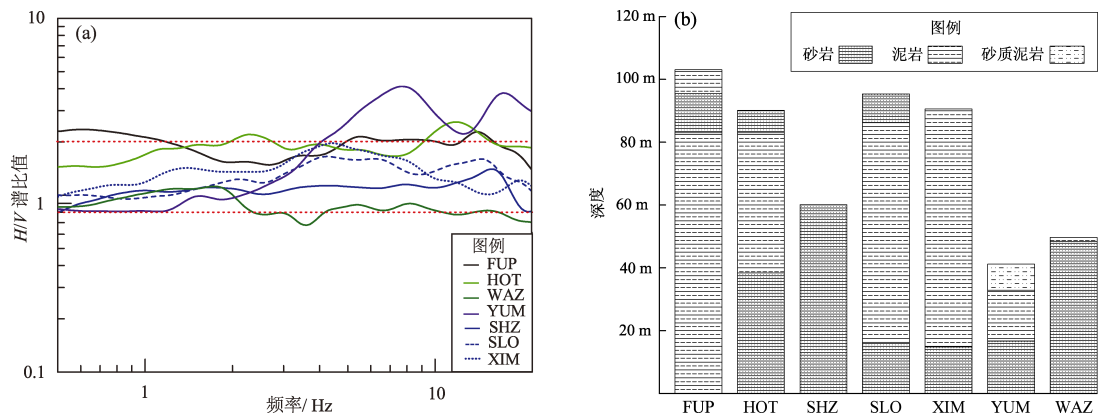


图 5 7 个钻孔同址观测台站的场地响应曲线 (a) 及钻孔剖面 (b)

Fig. 5 Site response curves (a) and borehole profile (b) of 7 sub-stations for both borehole strain monitoring and earthquake monitoring

钻孔同址观测台站中有 3 个属于平坦类台站，但在整个频带范围内的场地响应曲线石柱 (SHZ) 表现最为平坦，巴南石龙 (SLO) 次之，垫江新民 (XIM) 居后。相应钻孔深度资料表明，石柱 (SHZ) 台基地表以下 60 余米深度仅存在砂岩成分，而巴南石龙 (SLO) 和垫江新民 (XIM) 地表以下 10 多米均为砂岩 (图 5b)，随后均出现泥岩层，岩层厚度分别为 69.9 m 和 75.8 m，说明分层的地质结构中夹杂低密度岩层介质，会增加一定的场地放大效应。奉节红土 (HOT) 台基交替出现砂岩 - 泥岩 - 砂岩的地质结构，其场地放大效应更加明显。合川云门 (YUM) 台基仅在地表以下 16.7 m 为相对高密度的砂岩，之后从泥岩过渡到砂质泥岩。这种硬 -

软 - 软型地质结构造成台站场地响应出现明显的中高频放大。可见，台站台基局部岩层结构和岩性特征是影响台站场地响应曲线形态的一个重要因素。

4.2 台基观测形式

开县临江 (LIJ)、忠县善广 (SHG)、合川云门 (YUM) 3 个台站原本是摆坑观测，地震计安放于地下几米深处。2019 年底至 2020 年初，按照地震预警台站建设规范，将摆墩整体浇筑出地面，地震计安放空间位置相对分别抬升 2.9 m、4.3 m 和 3.5 m。基于噪声谱比法分别计算 2019 年和 2021 年 0.5 ~ 50 Hz 的场地响应曲线 (图 6)，对比台站改造前后场地响应变化情况。开县临江 (LIJ) 在 4 Hz 以上频段，改造后的噪声谱

比值相比改造前有明显增大,改造前的最大值仅为 1.94,改造后最大值为 3.18,在 10 Hz 处,最大相差 1.5;峰值频率也从改造前的 5 Hz 左右变为改造后的 11 Hz 左右;整体形态从平坦类变为中频放大类。忠县善广 (SHG) 在改造前后场地响应曲线形态变化不大,峰值频率也较为一

致;但在 6 Hz 以上频段,改造后的噪声谱比值明显增大,最大增加了 0.8。合川云门 (YUM) 在改造后峰值频率略有变化,从 7 Hz 移动到 8 Hz,场地响应曲线形态在峰值频率后发生明显改变,3 Hz 以上噪声谱比值均有所增大,在 16 Hz 附近,增加值最大为 2.5。

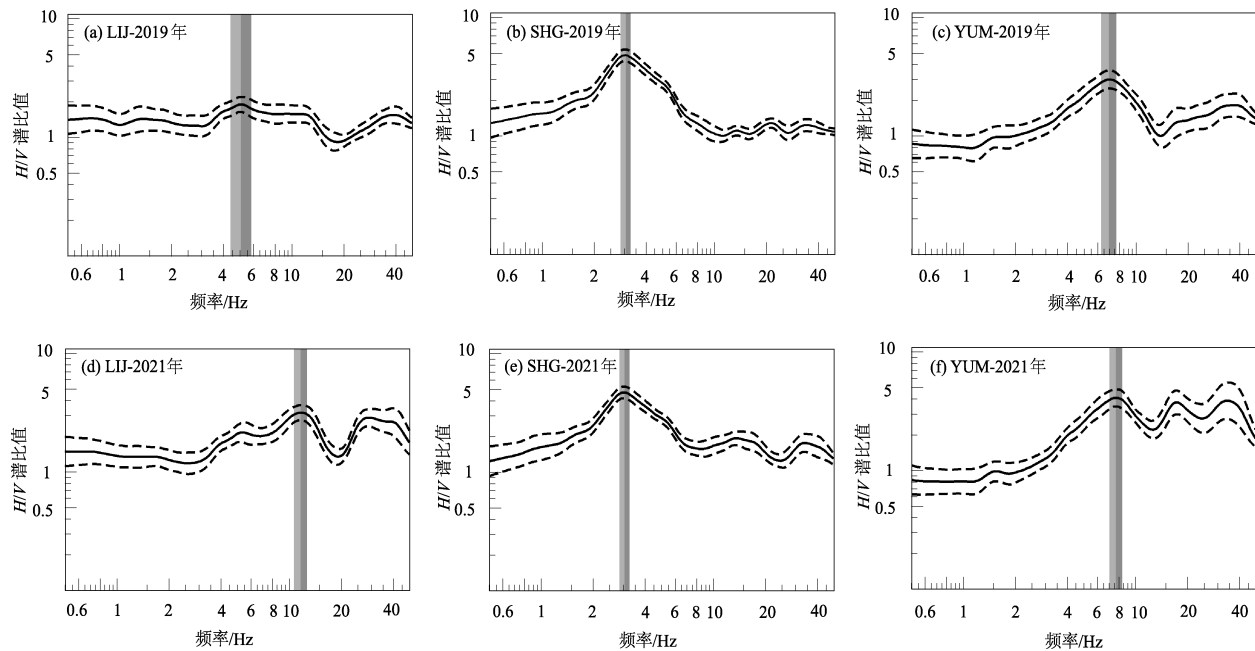


图 6 台站改造前 (2019 年) 和改造后的 (2021 年) 场地响应曲线

Fig. 6 Site response curves of 3 sub-stations in 2019 and 2021

基于噪声谱比法所计算的台站场地响应结果一般是比较稳定的。台基改造后 3 个台站的场地响应曲线均发生一定变化。从中频段开始,改造后的噪声谱比值明显大于改造前,表明同一台站不同的台基形式会影响台站场地响应曲线表现形态。其原因是摆墩加高改造后的柱体形墩体与原始台基存在物理分层,且改造后仪器墩的高宽比增大,运动中的仪器墩底部接触碰撞使得地震动记录呈现显著的不对称 (周正华等, 2010),即改造后记录三分向数据存在“瀑布”现象,在中高频段对地震波振幅表现出一定的放大作用。

5 讨论

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”的假设之上,而事实上垂直分量具有一定的场地放大效应

(郭明珠等, 2004)。虽然基于 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,但可作为场地放大倍数的下限进行分析研究 (卢滔等, 2006; 秦形威等, 2021)。本文将 H/V 谱比法 (实线) 与 L_g 波衰减法 (虚线) 计算出的各台站场地响应结果进行比较,如图 7 所示。由图可见,两种方法得到场地响应曲线形态具有相似性,多数台站在 1~20 Hz 频带内的变化趋势基本一致,长寿 (CHS)、红池坝 (HCB)、石柱 (SHZ)、城口 (CHK)、巫溪 (WUX)、万州 (WAZ) 等台站在对应频点的放大倍数十分接近。但由于方法、原理不同,幅值大小有一定差异, H/V 谱比法计算结果整体偏小,但仍然能够反映台站频点放大的情况,与 L_g 波衰减法计算结果中存在明显放大效应的台站基本对应,因此在缺乏地震事件的情况下,使用噪声谱比法分析台站场地响应具有一定的可靠性。

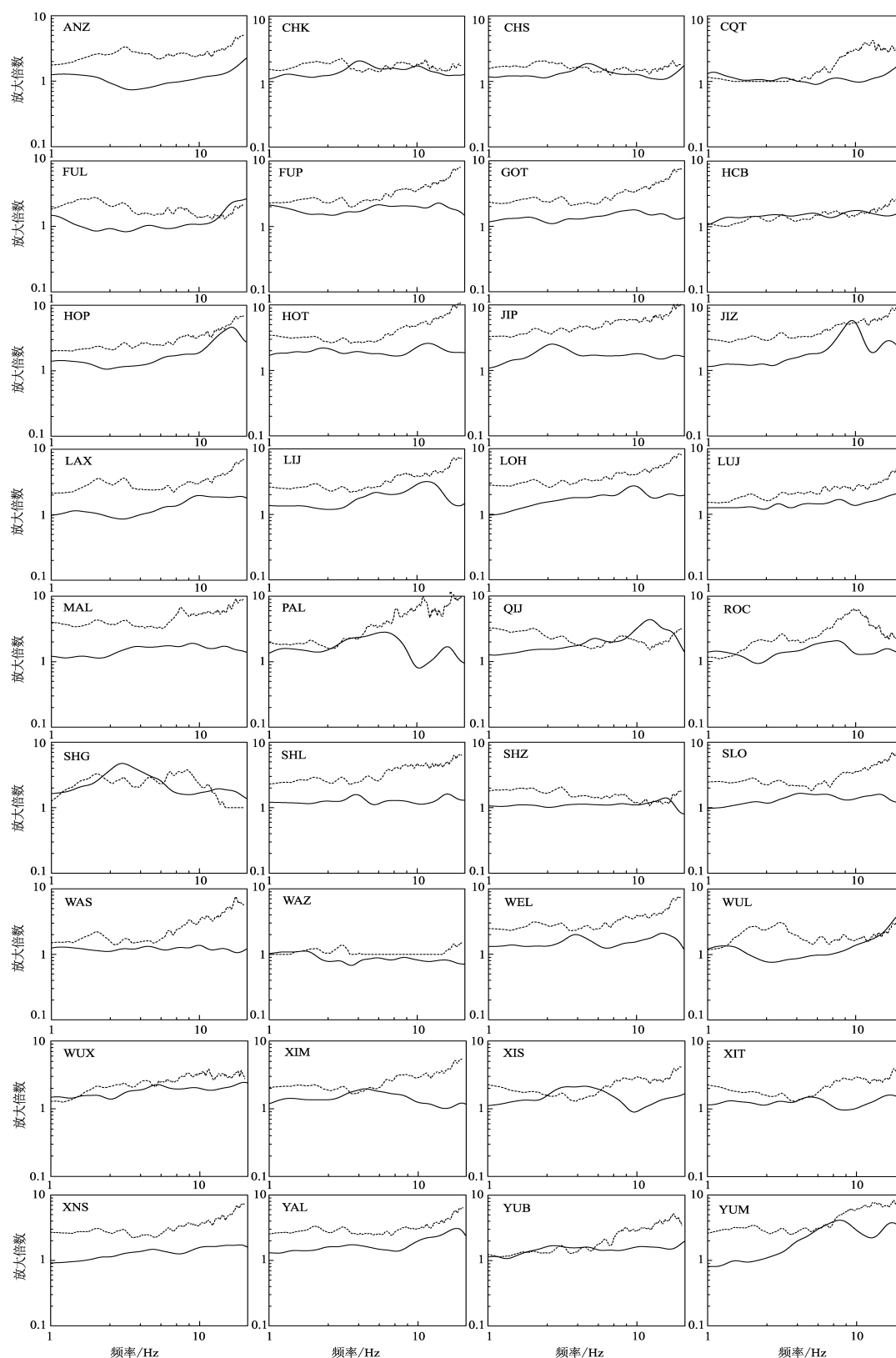


图7 H/V 谱比法与 L_g 波衰减法得到的重庆测震台网 36 个子台的场地响应曲线
(实线: H/V 谱比法, 虚线: L_g 波衰减法)

Fig. 7 Site response curves of 36 sub-stations of the Chongqing Seismic Networks by H/V spectral ratio method and L_g -wave attenuation method (Solid line: H/V spectral ratio method, Dashed line: L_g -wave attenuation method)

为进一步分析重庆测震台网子台的场地响应空间分布特征,比较 H/V 谱比法和 L_g 波衰减法的计算结果,分别拾取两种方法在 $1 \sim 20$ Hz 的最大幅值进行插值,得到场地响应等值线分布图(图 8)。结果表明,用这两种方法得到的台站场地响应分布高值区和低值区较为一致,荣昌(ROC) - 合川云门(YUM)、奉节红土(HOT) - 奉节荆竹(JIZ)、忠县善广(SHG) - 丰都龙河(LOH)连线区域均为高值区,万州(WAZ) - 石柱(SHZ)、渝北(YUB) - 重庆台(CQT)、长寿(CHS) - 巴南石龙(SLO)连线区域均为低值区。

重庆地区地形是东南部和东北部高,中部和西部低,沿南北向长江河谷逐级降低。从图 8 可以看出,渝西低山丘陵区台站场地响应以放大为主,而渝东丘陵低山区不同台站场地响应差异较大,

渝东北大巴山区台站场地响应基本无放大,渝东南武陵山区不同台站场地响应差异较大。前述表明区域地形对台站场地响应的影响有待进一步研究,而局部地形对场地响应的影响可能仅限于台站所处山体的位置。对比不同类型台站周围地形特征发现,红池坝(HCB)、长寿(CHS)、垫江新民(XIM)、石柱(SHZ)等场地放大效应不明显的台站主要位于平缓山顶或地势平坦地带,周围地形高程落差较小;忠县善广(SHG)、奉节红土(HOT)、合川云门(YUM)、巫山建平(JIP)等场地放大效应明显的台站,附近存在陡崖地形,周围地势有较大落差;万州(WAZ)、涪陵(FUL)、荣昌(ROC)、武隆(WUL)等场地放大效应偏小的台站均处于山体缓坡中段山腰位置。因此,地震台站的场地响应特征受台站所处位置地形地貌的影响。

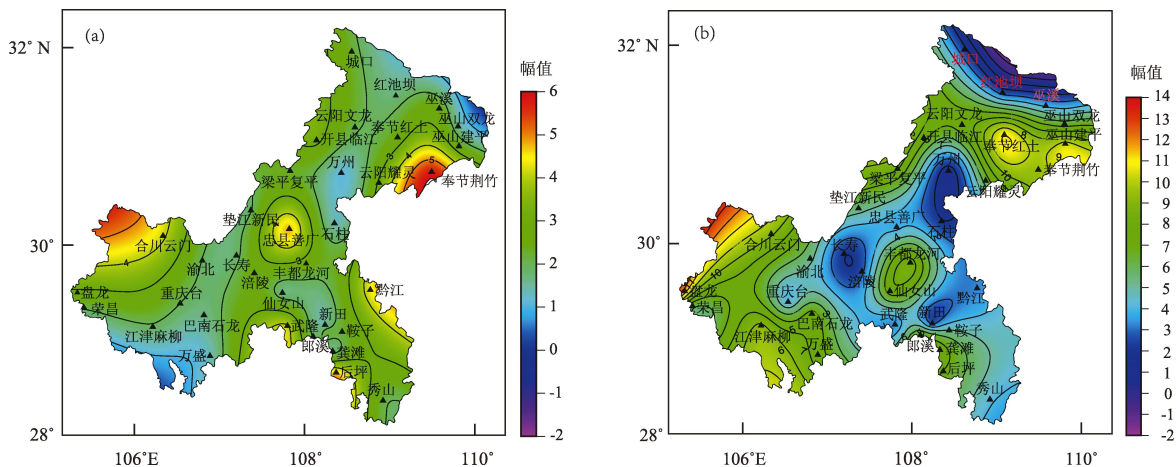


图 8 H/V 谱比法 (a) 和 L_g 波衰减法 (b) 得到的重庆测震台网 36 个子台场地响应等值线分布

Fig. 8 Contour map of the site response of 36 sub-stations of the Chongqing Seismic Networks by H/V spectral ratio method (a) and L_g -wave attenuation method (b)

6 结论

本文使用重庆测震台网 36 个子台的地脉动噪声记录,应用 H/V 谱比法研究了台站场地响应,通过分析钻孔同址台站及台基改造台站场地响应曲线,并结合台站局部地形地貌特征,对影响重庆测震台网台站场地响应的因素进行分析,得到以下主要结论:

(1) 根据重庆测震台网子台 $0.5 \sim 20$ Hz 频带

范围内场地响应曲线形态特征,可将重庆测震台网观测台站分为 5 类,即平坦类、低频放大类、中频放大类、中频衰减类和高频放大类。

(2) 结合部分钻孔应变同址观测台站地质剖面资料,发现台基岩性差异和分层结构对场地放大效应有一定影响,台基局部浅层低密度介质主要影响低频段 ($0.5 \sim 1$ Hz) 场地响应,表现为具有一定放大作用,而岩性单一的地下结构场地放大效应不明显。

(3) 台站台基改造后的场地响应曲线会产生

明显改变,主要表现在中高频段,表明基岩上一定高度独立墩体结构具有明显场地放大效应,是否开展摆墩加高的施工改造需要慎重考虑。

(4) 使用噪声谱比法与 L_g 波衰减法获得的多数台站的场地响应曲线形态基本一致,而且部分台站的场地响应数值也较为接近。但噪声谱比法与 L_g 波衰减法的原理与方法均存在不同,导致结果也存在一定差异。

(5) 重庆台网测震台站基岩性均为基岩,多数台站场地放大效应不明显,但不同台站场地响应曲线有一定差异,主要原因是不同频点场地放大效应受台站基岩性、局部地形地貌特征和浅层地质结构的综合影响。

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[J]. 世界地震工程, 16(2): 88–92.
- Guo M Z, Song Z Q. 2000. On Nakamura method for dynamic analysis of ground characteristics with microtremor[J]. World Earthquake Engineering, 16(2): 88–92. (in Chinese)
- 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[J]. 地震, 30(3): 30–44.
- Hua W, Chen Z L, Zheng S H. 2010. Estimation of site responses for temporary stations using various methods[J]. Earthquake, 30(3): 30–44. (in Chinese)
- 姜秀璇, 郭晓, 范兵, 等. 2021. 祁连山主动源观测台站场地响应分析[J]. 地震工程学报, 43(6): 1343–1351.
- Jiang X X, Guo X, Fan B, et al. 2021. Site response of active-source observation stations in the Qilian Mountains[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(6): 1343–1351. (in Chinese)
- 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[J]. 地震研究, 30(1): 39–42.
- Liu L F, Su Y J, Liu J, et al. 2007. Site effects at Yunnan regional digital seismic stations inversed by Moya method[J]. Journal of Seismological Research, 30(1): 39–42. (in Chinese)
- 卢滔, 周正华, 周雍年, 等. 2006. 关于 Nakamura 方法有效性的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 27(1): 43–48.
- Lu T, Zhou Z H, Zhou Y N, et al. 2006. Discussion on validation of Nakamura's technique[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamic, 27(1): 43–48. (in Chinese)
- 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[J]. 西北地震学报, 23(3): 54–58.
- Ma S Q, Gong S J, Li L D, et al. 2001. Study on method evaluating site effect using three-component seismograms of single station on surface[J]. Northwestern Seismological Journal, 23(3): 269–273. (in Chinese)
- 马淑芹, 栗连弟, 下真付, 等. 2007. 用 Nakamura 技术评估天津地区场地效应[J]. 中国地震, 23(1): 25–34.
- Ma S Q, Li L D, Bian Z F, et al. 2007. Study on site response in Tianjin by Nakamura technique[J]. Earthquake Research in China, 23(1): 25–34. (in Chinese)
- 彭菲, 王伟君, 寇华东. 2020. 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, 63(10): 3775–3790.
- Peng F, Wang W J, Kou H D. 2020. 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, 63(10): 3775–3790. (in Chinese)
- 秦彤威, 王少瞳, 冯宣政, 等. 2021. 微动 H/V 谱比方法[J]. 地球与行星物理论评, 52(6): 587–622.
- Qin T W, Wang S H, Feng X Z, et al. 2021. A review on microtremor H/V spectral ratio method[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(6): 587–622. (in Chinese)
- 邵媛媛, 王岩, 郑勇, 等. 2022. 辽宁地区 L_g 波衰减与场地响应的分区特征[J]. 地震研究, 45(4): 552–559.
- Shao Y Y, Wang Y, Zheng Y, et al. 2022. Distribution characteristics of L_g -wave attenuation and site response in Liaoning area[J]. Journal of Seismological Research, 45(4): 552–559.
- 史海霞. 2008. 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, 46–51.
- Shi H X. 2008. Study on the site effect of ground motion in the capital region[D]. Beijing: Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, 46–51. (in Chinese)
- 吴微微, 苏金蓉, 魏娅玲, 等. 2016. 四川地区介质衰减、场地响应与震级测定的讨论[J]. 地震地质, 38(4): 1005–1018.
- Wu W W, Su J R, Wei Y L, et al. 2016. Discussion on attenuation characteristics, site response and magnitude determination in Sichuan[J]. Seismology and Geology, 38(4): 1005–1018. (in Chinese)
- 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[J]. 地震学报, 37(6): 1045–1058.
- Zhang H C, Xu J J, Chen Z Y. 2015. Site response of Fujian seismic monitoring stations based on Nakamura H/V spectral ratio method[J]. Acta Seismologica Sinica, 37(6): 1045–1058. (in Chinese)
- 张珂, 王鑫, 王树波, 等. 2020. 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, 40(6): 646–651.
- Zhang K, Wang X, Wang S B, et al. 2020. Site response of Western Inner Mongolia based on noise spectral ratio method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 40(6): 646–651. (in Chinese)
- 周正华, 温瑞智, 卢大伟, 等. 2010. 汶川地震中强震动台基墩引起的记录异常分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 18(2): 304–312.
- Zhou Z H, Wen R Z, Lu D W, et al. 2010. Analysis on anomaly of ac-

- celerograms in the Wenchuan Earthquake caused by the instrument pier[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 18 (2): 304 – 312. (in Chinese)
- Bard P Y, Acerra C, Aguacil G, *et al.* 2008. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on Ambient vibrations measurements, processing and interpretation[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 6(4): 1 – 2.
- Konno K, Ohmachi T. 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(1): 228 – 241.
- Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Quarterly Report of RTRI, 30(1): 25 – 33.
- Shearer P M. 1999. An introduction to seismology[M]. New York: Cambridge University Press.
- Withers M, Aster R, Young C, *et al.* 1998. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(1): 95 – 106.

Site Response of the Chongqing Seismic Networks Based on the H/V Spectral Ratio Method

YANG Yayun, WANG Jian, LI Cuiping, MA Wei
(Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China)

Abstract

Using the microseismic noise data recorded by 36 sub-stations of the Chongqing Seismic Networks, the site response of each of these sub-stations is calculated by the method of H/V spectral ratio. According to the form of the site response curves of these sub-stations within the 0.5 – 20 Hz frequency band, these sub-stations are divided into five categories: stations with flat curves, stations with low – frequency-amplification curves, stations with intermediate – frequency amplification curves, stations with the curves of intermediate – frequency attenuation and high – frequency amplification. By the help of the geological profiles of the borehole strain monitoring at 7 stations, the influence of the shallow geological structure on the site response of the sub – stations is analyzed. results show that the lithological difference and layered structures on the station site have a certain impact on the site response of the seismic stations. Partial low – density media around the stations will cause site amplification effect in low frequency band (0.5 – 1 Hz), while the site amplification effect of structures with single lithology is not obvious. Comparing the site response curves recorded by 3 reconstructed stations in 2019 and 2021, it is found that the change of the seismometer pillar will have a substantial impact on the site response curves; the independent pillar has obvious site amplification effect. In Chongqing area, the site response contour lines are not necessarily related to the regional terrain and geomorphology, but the small – scale terrain around the station and the location of the station in the mountains will affect the form of the site response curves within the frequency band. In conclusion, the lithology underneath the station, the differences of the shallow media, the construction quality of the seismometer pillar, the regional terrain, and the shallow geological structures all affect the site response at the stations.

Keywords: H/V spectral ratio method; site response; platform form; Chongqing area