

# 用 Moya 方法反演门源地区数字地震台站场地响应<sup>\*</sup>

赵燕杰

(青海省地震局, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 基于 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震 100 个  $M_s \geq 1.0$  余震序列资料, 运用 Atkinson 法测得青海门源地区  $Q$  值, 并用 Moya 法反演了其中 24 个台站的场地响应。结果表明: 在 1~20 Hz 范围内 24 个子台的场地响应与频率有关, 其中位于震中南部的 11 个台站场地响应平稳变化, 接近 1; 位于震中东南的 11 个台站场地响应在低频部分接近 1, 高频部分衰减至 0.1; 震中西南的 2 个台站场地响应高频部分持续放大后衰减。

**关键词:** 门源地震;  $Q$  值; 场地响应; Moya 法

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)增刊 1-0104-06

## 0 引言

地震台站场地响应是指地震台站的局部地下介质对地震信号的放大作用, 是地震信号频率的函数。在地震工程学中, 场地响应是评估地震对建筑物破坏程度的重要参数, 估算不同地区的场地放大效应对防震减灾工作具有实际意义。Atkinson 和 Mereu (1992) 利用多台、多地震联合方法对台站响应进行了反演。Moya (2000), 刘杰等 (2003) 提出的利用遗传算法联合反演台站场地响应的方法弥补了 Atkinson 方法的局限性, 反演出品质因子  $Q$  值、台站场地响应。利用该方法, 苏有锦等 (2005) 进行了云南地区 S 波非弹性衰减  $Q$  值研究, 刘丽芳等 (2007) 研究了云南台站场地响应, 金春花等 (2012) 研究了宁夏及邻区地震动衰减和场地响应的分区特征。

据中国地震台网测定, 2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分 37.65 秒, 青海省海北藏族自治州门源回族自治县 ( $37.68^\circ\text{N}$ ,  $101.62^\circ\text{E}$ ) 发生 6.4 级地震, 截至 1 月 31 日 23 时 59 分 59 秒, 已发生 1 733 个余震。本文采用青海数字地震台网记录到的门源 6.4 级地震后 1 月 21~31 日发生的  $M_s \geq 1.0$  地震, 用 isdp 软件计算青海门源地区介质的品质因子  $Q$  值 (Atkinson, Mereu, 1992), 使用 Moya 方法反演台网的 24 个台站的场地响应, 并对计算结果进行了讨论。

## 1 青海台网简介及资料选取

青海台网“九五”期间台站分布稀疏, 全省只有 8 个台站, 多数地区地震监测能力低, “十五”之后, 在青海地震局背景场探测项目、中国地震科学台阵探测——南北地震带项目的支持下, 青海地震局广泛开展流动台站架设, 目前台站数已增加至 93 个。本文计算青海门源地区  $Q$  值, 选取资料时要求地震的信噪比要大于 2 倍脉动噪声, 每个地震至少被 3 个台站记录, 参与计算的每个台站至少记录到 3 个地震, 并且要求地震射线覆盖较好。根据以上条件, 从 1 月 21 日 6.4 级地震发生至 1 月 31 日 23 时 59 分 59 秒已发生的 1 733 条余震记录中, 筛选出 100 个地震事件, 利用这些地震反演 24 个台站的场地响应 (表 1、图 1)。

## 2 介质的品质因子测定原理与计算方法

介质的品质因子  $Q$  值测定原理可以简述为以下 3 个步骤:

(1) 设定所有台站的场地响应为 1 (即不考虑场地响应), 对给定的非弹性衰减系数  $c(f)$  通过对台站记录进行几何扩散和非弹性衰减校正, 得到相应地震的震源谱振幅, 调整  $c(f)$  值大小, 使各台站得到的同一地震的震源谱振幅残差最小;

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 青海省地震局科技基金 (201603B) 资助.

表 1 台站信息列表

Tab. 1 Station information list

序号	台站	地震计	岩性	关联地震/个
1	63010	CMG-3T	砂岩	84
2	63011	CMG-3T	砂岩	35
3	63026	CMG-3T	砂岩	21
4	63047	CMG-3T	砂岩	44
5	63002	CMG-3T	砂岩	79
6	63009	CMG-3T	砂岩	75
7	63013	CMG-3T	砂岩	25
8	63017	CMG-3T	砂岩	36
9	63022	CMG-3T	砂岩	40
10	GTA	BBVS-120	海西期花岗岩	26
11	HJT	CMG-3ESPC-60	砂岩	94
12	HUY	CTS-1	片麻状花岗岩	58
13	JXG	BBVS-60	砂岩	16
14	DAT	BBVS-60	花岗岩	44
15	LED	BBVS-60	花岗闪长岩	39
16	LWS	BBVS-60	火山岩	69
17	LYX	BBVS-60	花岗岩	4
18	MEY	BBVS-60	砂岩	96
19	QIL	CTS-1	花岗岩	8
20	QSS	BBVS-60	灰岩	26
21	TIJ	BBVS-60	砂岩	17
22	IJS	BBVS-60	砂岩	30
23	MIH	BBVS-60	砂岩	10
24	LJX	BBVS-60	石英片岩	8

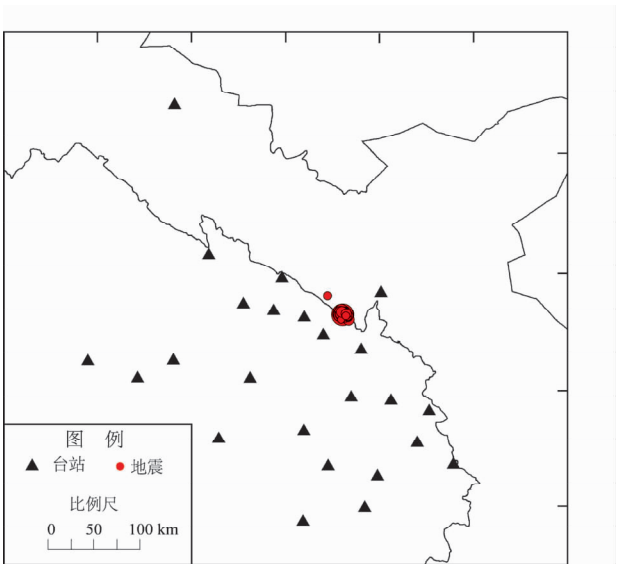


图 1 门源地区台站、震中分布图

Fig. 1 Distribution of 24 stations and 100 earthquake events used in Menyuan area

(2) 设定某个地震的震源谱是不同台站得到的震源谱振幅的平均, 而各个台站的场地响应的对数就是该台站得到的震源谱振幅对数与该地震的震源谱振幅对数之差的平均值;

(3) 考虑各台站得到的场地响应, 重新计算经过校正后各台的震源谱振幅, 通过调整  $c(f)$  值, 使对同一地震得到的震源谱振幅的残差最小。

在频率域中, 经过仪器响应校正后的地震波的傅里叶谱振幅为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) G(R_{ij}) S_j(f) e^{-\frac{\pi R_{ij}}{Q(f) V_s}}. \quad (1)$$

式中,  $f$  是频率,  $A_{ij}(f)$  是第  $j$  个台站观测到第  $i$  个地震的谱振幅;  $A_{i0}(f)$  是第  $i$  个地震的震源谱振幅;  $R_{ij}$  是第  $i$  次地震至第  $j$  个台站的震中距,  $G(R_{ij})$  为几何衰减系数,  $Q(f)$  为品质因子,  $V_s$  是 S 波速度,  $c(f)$  是非弹性衰减系数;  $S_j$  是第  $j$  个台站上的场地响应。

以上每步骤对应的计算方法如下:

(1) 假设不同台站得到的同一地震的震源谱是相同的, 残差定义为

$$k_{ij} = [\log A_{i0}(f)]_j - \overline{\log A_{i0}(f)}. \quad (2)$$

式中,  $\log A_{i0}(f)$  是第  $i$  个地震的震源谱振幅对数, 对记录到该地震的所有台站计算得到的结果取平均得到:

$$\overline{\log A_{i0}(f)} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} [\log A_{i0}(f)]}{n_i} j. \quad (3)$$

式中,  $n_i$  为记录到第  $i$  个地震的台站数。

(2) 参数的求解采用以下计算公式:

$$sum = \sum_i \sum_j |k_{ij}|. \quad (4)$$

利用遗传算法求极小方式, 得到参数的解。

(3) 将所有台站场地响应项设为零, 计算  $c(f)$ , 求得场地响应后再代入公式 (5) 重新计算  $c(f)$ :

$$[\log A_{i0}(f)]_j = \log A_{ij}(f) + b_1(f) \log R_{ij} + c(f) R_{ij} - \log S_j(f). \quad (5)$$

式中,  $b_1$  是值为 1 的幂指数, 转换得到非弹性衰

减系数  $c(f)$  与介质品质因子  $Q(f)$  之间的关系为

$$Q(f) = \frac{\log(e) \pi f}{c(f) V_s}. \quad (6)$$

通过反复迭代，可得到该地区的非弹性衰减系数  $c(f)$ ，利用式 (6) 可得到介质的品质因子  $Q(f)$ 。

### 3 利用 Moya 方法反演场地响应

用 Moya 方法反演场地响应的测定原理可以简述为以下 4 个步骤：(1) 对每个地震选择 Brune 震源谱参数  $\Omega_0$ 、 $f_c$  (Brune, 1970)；(2) 场地响应可在震源参数已知情况下，由不同地震事件得到的台站记录得到；(3) 假设每个台站的场地响应无论由哪个地震事件得到均一样；(4) 运用遗传算法通过寻找不同的震源谱参数，使由不同事件得到的台站的场地响应的标准偏差最小。

相应具体计算步骤如下：

(1) 从观测谱中扣除仪器响应、噪声和自由表面效应后，任一个地震在某一台站观测到的地面运动的剪切波傅里叶谱 SH 分量为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) R_{ij}^{-b} e^{-c(f) R_{ij}} S_j(f). \quad (7)$$

式中， $A_{ij}(f)$  是第  $j$  个台站观测到第  $i$  个地震的谱振幅； $A_{i0}(f)$  是第  $i$  个地震的震源谱振幅； $R_{ij}$  是震中距； $b$  是几何扩散系数； $c(f)$  是非弹性衰减系数； $S_j$  是第  $j$  个台站上的场地响应。

对第  $j$  个 S 波几何扩散  $G_{ij}$  采用三段模型 (Atkinson, Mereu, 1992)：

$$G_{ij} = \begin{cases} R_{ij}^{-b_1}, & R_{ij} \leq R_1; \\ R_1^{-b_1} R_1^{b_2} R_{ij}^{-b_2}, & R_1 \leq R_{ij} \leq R_2; \\ R_1^{-b_1} R_2^{b_2} R_1^{-b_2} R_2^{-b_3} R_{ij}^{-b_3}, & R_{ij} \geq R_2. \end{cases} \quad (8)$$

式中， $R_1$  与  $R_2$  分别为三段几何衰减中第一段和二段转折点距震源的距离； $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  分别为幂指数。

(2) 根据不同频率点计算得到的位移振幅与震源距的关系表明，幂指数  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的值分别为 1、0、0.5；根据 CRUST 2.0 全球地壳速度模型 (Gabi et al, 2012) 给出的门源地区地壳厚度为 54 km，根据 Brune 模型，地震的理论震源谱为

$$A_{i0}(f) = \frac{\Omega_{0i}}{1 + (f/f_{ci})^2}. \quad (9)$$

其中， $\Omega_{0i}$  为第  $i$  个地震的零频幅值， $f_{ci}$  为第  $i$  个地震的拐角频率。这样在第  $k$  个频率上，第  $i$  个地震对第  $j$  个台站的场地响应为

$$S_{ij}(f_k) = \frac{A_{ij}^{\text{corr}}(f_k)}{\frac{\Omega}{1 + (f/f_{ci})^2}}. \quad (10)$$

其中， $A_{ij}^{\text{corr}}$  为校正的地面运动位移谱。

(3) 所有台站的所有频点场地响应的归一化标准偏差为

$$\text{sum} = \sum_j \sum_k \frac{\text{std}(S_{ij}(f_k))}{\text{mean}(S_{ij}(f_k))}. \quad (11)$$

式中， $\text{std}(S_{ij}(f_k))$  是由  $i$  个地震得到的第  $j$  个台站在频点  $k$  的场地响应的标准偏差； $\text{mean}(S_{ij}(f_k))$  是由  $i$  个地震得到的第  $j$  个台站的频点  $k$  的场地响应的平均值。

(4) 利用遗传算法使归一化标准偏差最小，即可求出每一个地震的震源谱参数和  $f_c$ 。于是可得到台站场地响应为

$$S_j(f) = \frac{\sum_{i=1}^m S_{ij}(f)}{m}. \quad (12)$$

式中， $m$  是第  $j$  个台站的记录谱数。

### 4 计算结果

利用 Atkinson 方法反演门源地区 S 波非弹性衰减  $Q(f) = 137.0f^{0.8343}$  (图 2)。 $Q_0$  值 (即频率为 1 Hz 的  $Q$  值) 大小与介质的均匀程度相关联，根据周连庆等 (2008) 统计结果，中国大陆的  $Q$  值在 116 ~ 585， $\eta$  值在 0.3 ~ 1.0。 $Q$  值较低的区域介质均匀程度低，地震波经过时，能量耗损大，衰减较快，构造活动强烈； $Q$  值较高则反之。介质均匀程度较低的地区， $Q$  值与频率的依赖关系较强，稳定地区  $Q$  值相对较大；构造活动强烈的地区， $Q$  值较小。门源地区属于多震区域， $Q$  值较小， $\eta$  值较大，反映出青海门源地区介质的均匀程度较低。

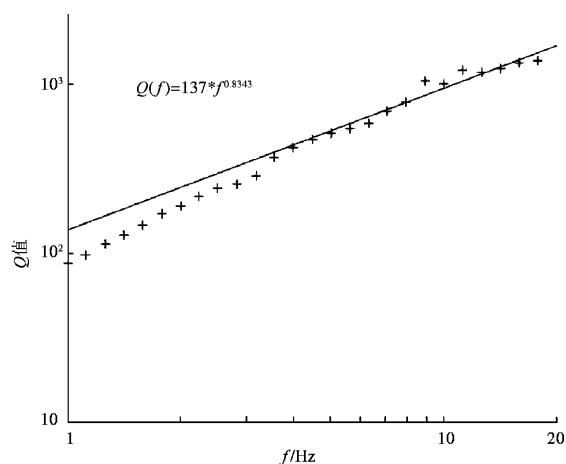
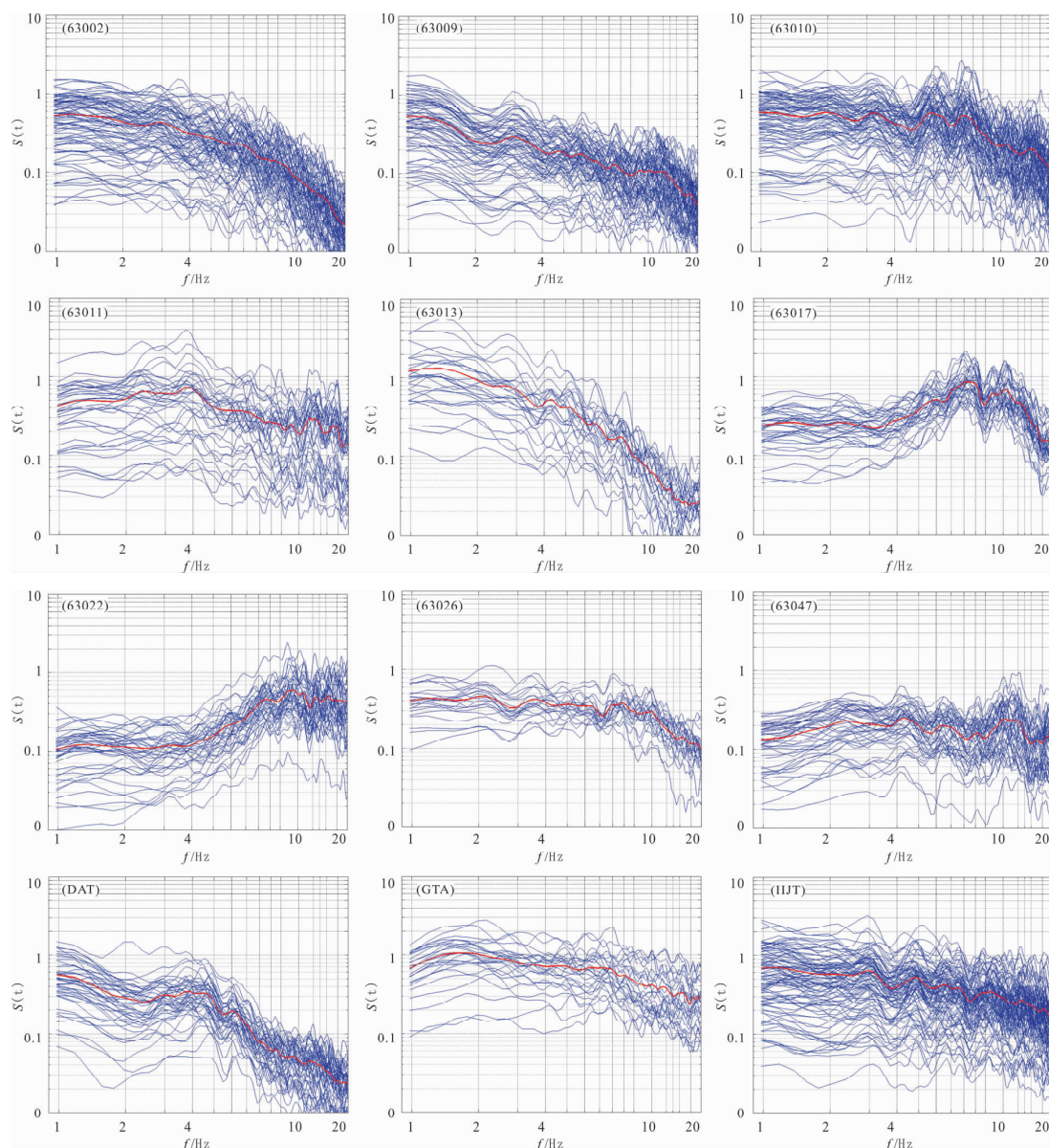


图2 介质品质因子  $Q$  值与频率的关系

Fig. 2 The relationship between medium quality factor  $Q$  - value and frequency

图3给出了24个台站的场地响应, 图中蓝线为由每次地震计算得到的台站场地响应, 红线表示由全部地震计算得到的台站场地响应的平均值。由图中可见, 24个台站的场地响应在1~20 Hz范围内接近1。其中, 有11个台站变化平稳, 这些台主要位于门源地震震中南部, 台站代码分别为63010、63011、63026、63047、63017、63022、GTA、HJT、HUY、JXG、MIH。有11个台站在低频部分接近1, 高频部分衰减至0.1, 主要位于震中的东南, 其台站代码为63002、63009、63013、DAT、LED、LWS、LYX、MEY、QIL、QSS、TIJ。有2个台站低频放大, 高频衰减, 主要位于震中的西南, 分别为LJS、LJX。





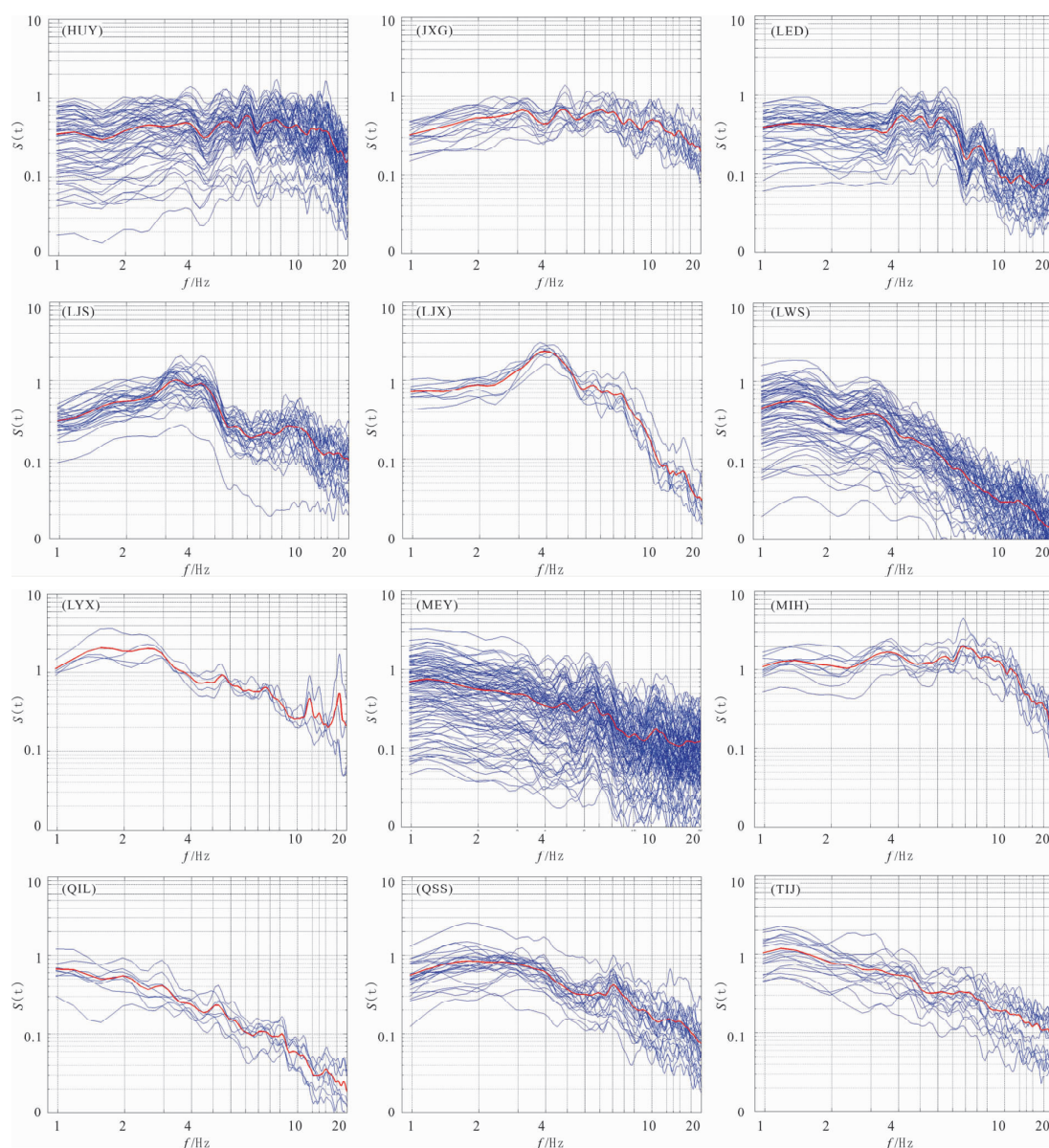


图 3 青海数字台网 24 个台站场地响应

Fig. 3 Site responses of 24 stations of Qinghai Digital Network

## 5 结论与讨论

利用 Atkinson 方法，反演得到门源 6.4 级地震震中周边区域 S 波非弹性衰减  $Q$  值与频率的关系，用 Moya 法反演了青海门源地区 24 个台站的场地响应，结果表明：在 1~20 Hz 范围内 24 个子台的场地响应与频率有关。24 个台站中 11 个台站平稳变化接近 1；有 11 个台站在低频部分接近 1，高频部分衰减至 0.1；2 个台站高频部分持续放大后衰减。本文场地响应计算中部分台站所用的地震较多，其中 MEY（门源台）用到 96 个地震，为最多；

LYX（龙羊峡）台最少，只用到 4 个地震，所有台站都架设在基岩上，采用宽频带以上地震计。大部分台站都能连接 10 个以上地震，说明此次所采用的台站与地震的连接较好。

根据胡朝忠等（2016）的研究资料可知，本次门源 6.4 级地震震中 50 km 范围内发育着众多断裂，主要包括大坂山断裂、门源盆地北缘断裂、冷龙岭断裂、托勒山北缘断裂、肃南—祁连山断裂、民乐—大马营断裂、皇城—双塔断裂等。该区地质条件复杂，我们得出的门源地区  $Q$  值较低，验证出门源地区地下介质的均匀程度较低，构造活动强烈。

利用 Moya 方法计算场地响应,发现 11 个台站场地响应在 1 ~ 20 Hz 范围内接近 1,有 11 个台站平稳变化,主要位于震中南部,其中如 HUY (湟源)、GTA (高台) 的国家台平稳性较好。有 11 个台站在低频部分接近 1,高频部分衰减至 0.1,主要位于震中的东南,主要有以 DAT (大通)、LED (乐都) 为主的地方台及无人值守台。有 2 个台站低频放大,高频衰减,主要位于震中的西南,分别为 LJS (拉脊山)、LJX (李家峡) 无人台及水库台。与马建新等 (2015) 计算柴达木盆地场地响应时得到的 HUY (湟源) 等少数台平稳性较好、LJX (李家峡) 先放大再衰减的计算结果一致,笔者认为场地响应平稳的台站中,国家台较多 (如湟源台、高台等),其台基、观测环境较好,而场地响应曲线不理想的台站可能与观测环境及台基有关。

#### 参考文献:

- 胡朝忠,杨攀新,李智敏等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震发震机制探讨[J]. 地球物理学报,59(5):1637-1646.
- 金春花,李鸿庭,盛菊琴. 2012. 宁夏及邻区地震动衰减和场地响应的分区研究[J]. 地震地磁与研究,33(5/6):24-29.
- 刘杰,郑斯华,黄玉龙. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 地震学报,25(2):211-288.
- 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.
- 马建新,姚家骏,陈继峰. 2015. 青海地区 S 波非弹性衰减、场地响应特征研究[J]. 地震地磁观测与研究,36(3):38-42.
- 苏有锦,刘杰,郑斯华等. 2005. 云南地区 S 波非弹性衰减  $Q$  研究[J]. 地震研究,28(2):1-7.
- 周连庆,赵翠萍,修济刚等. 2008. 利用天然地震研究地壳  $Q$  值的方法和进展[J]. 国际地震动态,(2):1-11.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. BSSA,82(5):2014-2031.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. JGR,75(75):4997-5009.
- Gabi L, Guy M, Christine R. 2012. CRUST 2.0, A New Global Crustal Model at 2x2 Degrees[CP/OL]. (2012-08)[2016-08-23]. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
- Moya A. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. BSSA,90(4):977-992.

## Site Response of Digital Seismic Stations in Menyuan Area Inversed by Moya Method

ZHAO Yanjie

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

#### Abstract

Based on the 100  $M_s \geq 1.0$  aftershock sequence data of Qinghai Menyuan  $M_s 6.4$  earthquake on Jan. 21, 2016, we obtained the  $Q$  value in Qinghai Menyuan area by applying the method of Atkinson, and inversed the site responses of 24 stations by Moya method. The results show that the site response of 24 stations is related to the frequency within the range of 1 ~ 20 Hz. The site responses of 11 stations located in the south of epicenter change smoothly, and are close to 1. The low frequency part of site response of 11 stations located in the south-east of epicenter is close to 1, the high frequency part attenuate to 0.1. The high frequency part of site response of 2 stations located in the southwest of epicenter attenuates after continuous amplification.

**Key words:** Menyuan earthquake;  $Q$  value; site response; Moya method