

内蒙古中西部地区震源参数和场地响应反演

高立新¹, 郑斯华², 丁风和^{1,3}

(1. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古自治区 呼和浩特 010051, 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036, 3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:采用 Atkinson 方法, 基于遗传算法, 利用呼和浩特数字地震台网 7 个子台记录的 9 次质量较高的地震事件资料, 计算了内蒙古中西部地区的品质因子 Q 值和非弹性衰减系数 $c(f)$ 。在所研究的频率范围内, 前者与频率 f 有很好的线性关系: $Q(f) = 116.8f^{1.000}$; 后者与频率 f 的变化关系不明显。在此基础上采用 Moya 方法反演了 7 个地震台的场地响应和地震的震源参数, 并对它们之间的相互关系进行了讨论。结果显示在所研究的频率域内 7 个基岩台站的场地均不同程度的存在放大作用, 其次震源参数间具有较好的线性关系。本文还详细介绍了 Atkinson 方法和 Moya 方法的原理和计算步骤。

关键词: 内蒙古中西部; 遗传算法; 场地响应; 震源参数

中图分类号: P315.3⁺1; P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2005)02-0109-06

The Inversion for Source Parameters and Site Effect in Midwest Area of Inner Mongolia

GAO Li-xin¹, ZHENG Si-hua², DING Feng-he^{1,3}

(1. Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China;

2. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, the quality factor (Q) and the non-elasticity attenuation coefficient $c(f)$ in Midwest area of Inner Mongolia are calculated using data of nine events recorded by 7 stations of Hohhot digital seismic net based on genetic algorithm and Atkinson method. In the scope of studying frequency, the correlation of the non-elasticity coefficient $c(f)$ and frequency f is not obvious, but the quality factor Q and frequency f have good linearity connection: $Q(f) = 116.8f^{1.000}$. Meanwhile, the source parameters are inverted by using Moya method, and the relationships between the source parameters are discussed. The result shows that the correlation of the source parameters has good linearity connection. The site effects for seven stations are also obtained by GA and the Moya methods from nine earthquakes, the result shows there is the amplification at the rock sites in the whole frequency band. The principle and approach of the Atkinson and Moya methods are introduced in this paper.

Key words: Midwest area of Inner Mongolia; Genetic algorithm; Site effects; Source parameters

0 引言

地震记录是一种综合信息, 包含了地震震源、地震波的传播途径及场地响应等特征。随着呼和浩特

数字化地震台网的建成, 利用其记录的大量地震波形资料, 可提取地震的震源参数如地震矩、应力降等。虽然震源参数的计算从原理上讲比较简单, 研

收稿日期: 2004-04-21

基金项目: 中国地震局地震图像与数字化资料应用实验资助。

作者简介: 高立新(1965-), 男(汉族), 内蒙古丰镇人, 高级工程师, 主要从事地震预报及相关研究工作。

究也比较成熟,但要精确得到这些参数并不是很容易,至少两个方面的因素影响计算结果的稳定。第一个因素是传播途径和场地响应对信号的影响。根据研究不同震中距上地震波的几何扩散系数是不同的,目前比较好的方法是引入三段几何衰减模型^[1-2]。另外传统上场地响应主要是相对于岩石台站进行估计,如线性反演法^[3],但相对估计在选择台站时会引入某些偏差,近期的一些研究表明岩石台站在地表并不是完全没有场地响应^[4-5]。第二个因素是从位移谱中读取低频水平和拐角频率时,大多数情况下是由眼睛判断,主观性较强,而拐角频率一个较小的变化将显著影响应力降的结果^[4]。在地震学和勘查地球物理中品质因子 Q 值是一个重要的参数,在实验室中利用高频能量小的岩石样本以及天然地震和爆破资料已经能够对其进行测定^[6],一般来说 Q 值在 0.1 Hz 到 30 Hz 之间, Q 随频率 f 的增加而增加^[7-8]。

要想得到精确的各种参数,必须设法区分地震记录中震源效应、传播途径及场地响应。Atkinson 提出的方法比较好的解决了这个问题^[4-5],但该方法是基于固定台网的地震波资料,台站的场地响应基本上与频率无关,在一个常数附近波动。对流动台网资料,由于一些台站的场地响应变化较大,采用这种方法计算的震源参数会出现一定偏差,但对几何扩散和非弹性衰减的结果不会造成太大影响。为解决流动台网资料的处理,Moya 等提出了一种利用遗传算法同时计算震源谱参数和场地响应的方法^[9],但该方法是在假定已知几何扩散和非弹性衰减参数进行的。因此,本文使用内蒙古中西部地区 2001 年至 2003 年间 9 个质量较高的地震事件波形资料,综合上面的两种方法计算内蒙古中西部地区介质的品质因子 Q 值、台站的场地响应和中小地震的震源参数,并详细介绍这两种方法的原理和计算步骤。

表 2 地震参数及记录台站

序号	地震参数				台站及记录地震						
	日期	$\varphi_N/^\circ$	$\lambda E/^\circ$	M_L	JIN	WLH	QSH	BLM	DSH	XSZ	WUH
001	2001-06-05	40.45	108.24	5.0	1	1	1	1	1	1	1
002	2003-06-10	40.34	111.28	4.6	1	1	1	1	1	1	1
003	2001-07-22	40.37	109.54	4.3	1	1	1	1	1	1	1
004	2006-06-22	40.26	109.21	4.2	0	0	1	1	1	1	1
005	2003-01-23	39.43	107.03	3.8	0	0	1	1	0	1	1
006	2002-01-12	41.23	107.47	3.6	0	1	0	1	0	0	1
007	2001-02-11	40.49	107.03	3.5	0	1	0	1	0	1	1
008	2003-10-07	42.05	112.69	3.4	1	1	1	1	0	0	0
009	2003-11-16	41.20	113.30	3.4	1	1	1	1	0	0	0

注:表中“1”表示该台站记录到该地震,“0”表示该台站没有记录到该地震

1 观测资料及处理

本文使用的资料为呼和浩特数字地震观测台网记录到的 9 个地震 ($M_L = 3.4 \sim 5.0$),规定每个地震至少被 3 个台站记录到,而且每个台站至少记录 3 个地震。表 1 给出了 7 个台站的基本参数。表 2 给出了地震参数及取得记录的台站。

对于数据的处理,首先从地震记录的时程曲线中确定 P、S 波的到时。到时差小于 10 s 时采用 S-P 的到时差来计算震中距;若到时差大于 10 s 时采用台站的经纬度和震源位置参数来计算震中距。本文所有台站记录均为速度记录,采样率为 0.02 s。在进行 Fourier 变换时,仅对信噪比大于 2 的信号进行分析。并对这些信号扣除噪声,得到经过噪声校正的速度振幅谱。对于 S 波的两个水平分量分别进行上述处理,每个分向除以 $2\pi f$,然后得到经过仪器响应校正和噪声校正的位移振幅谱,最后在频率域内合成得到 S 波水平分量的总的位移振幅谱。

表 1 呼和浩特数字台网基本参数

台站	代码	高程/m	岩性	数采类型	地震计类型
集 宁	JIN	1 359	花岗岩	EDAS-3	短周期
乌兰花	WLH	1 519	花岗岩	EDAS-3	短周期
清水河	QSH	1 519	花岗岩	EDAS-3	短周期
百灵庙	BLM	1 194	花岗岩	EDAS-3	宽频带
东 胜	DSH	1 445	花岗岩	EDAS-3	宽频带
西山咀	XSZ	1 177	花岗岩	EDAS-3	宽频带
乌 海	WH	1 177	花岗岩	EDAS-3	短周期

2 几何衰减和震源谱模型的选择

在地震定量问题中,经常需要考虑的不仅是近震源的地震波传播特性,而且还需要考虑区域震中距范围内的地震波传播特性问题^[2]。针对内蒙古数字化子台少且分布零散的情况,我们参照 Atkinson 和 Mereu 提出的互相衔接的三段几何衰减函数

$$G(R_{ij}) = \begin{cases} R^{-b_1} & R \leq R_{01} \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R^{-b_2} & R_{01} < R \leq R_{02} \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R_{02}^{-b_2} \cdot R_{02}^{b_3} \cdot R^{-b_3} & R > R_{02} \end{cases} \quad (1)$$

根据有关研究,几何扩散系数一般取 $b_1 = 1, b_2 = 0, b_3 = 0.5, R_{01} = 1.5H, R_{02} = 2.5H$ (H 为区域地壳厚度)。当 $R \leq R_{01}$ 时,直达波衰减; $R_{01} < R \leq R_{02}$ 时,对应于转换带,直达波和各种壳内界面和 Moho 面上的反射波; $R_{02} < R$ 时,对应多个反射、折射 S 波的衰减。

内蒙古中西部地区的地壳厚度约为 42 km,所使用的资料最大震中距超过 63 km,所以地震谱振幅随距离的几何扩散系数采用三段几何衰减模型进行计算^[4-5]。

采用 Brune 的 ω^2 震源模型作为理论震源谱:

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

其中 Ω_{0i} 为低频幅值; f_{ci} 为拐角频率。

3 计算方法和结果

3.1 品质因子 Q 值

第 i 个地震在第 j 个台站观测到的 S 波 Fourier 速度振幅谱可表示为^[10](本文仅给出 $R \leq R_{01}$ 的表达式)

$$O_{ij}(f) = S_i(f)G_j(f) \frac{e^{-\frac{\pi R_{ij} f}{Q(f)V_s}}}{R_{ij}} \quad (3)$$

其中 $S_i(f)$ 是第 i 个地震的震源谱振幅; $G_j(f)$ 是第 j 个台站的场地响应; R_{ij} 是第 i 个地震至第 j 个台站的震中距; V_s 是 S 波速度; $Q(f)$ 是 S 波的品质因子。对上式取对数,可得

$$\log O_{ij}(f) = \log S_i(f) - \log R_{ij} - c(f)R_{ij} + \log G_j(f) \quad (4)$$

非弹性系数 $c(f)$ 与介质品质因子 $Q(f)$ 之间的关系

$$Q(f) = \frac{\log(e)\pi f}{c(f)V_s} \quad (5)$$

采用 Atkinson 提出的方法计算非弹性衰减系数 Q 值^[4-5],其原理为:在 1~20 Hz 范围内以 0.196 Hz 为采样间隔,共计 27 个频率点。首先在某个频率上设定区域的品质因子 Q 值,对台站记录进行几何扩散和非弹性衰减校正,得到相应地震的谱振幅;对同一地震的谱振幅求平均,利用各台站与平均振幅之间的差异确定台站的场地响应;再考虑各台站场地响应,重新计算各台站的经过校正后平均谱振幅;调整 Q 值反复计算,使各台站得到的上述谱振幅的残差最小。残差定义为

$$k_{ij} = [\log S_i(f)]_j - \overline{\log S_i(f)} \quad (6)$$

这里 $\overline{\log S_i(f)}$ 是第 i 个地震的所有台站平均震源谱振幅。

非弹性系数 $c(f)$ 的求解是采用计算

$$\text{sum} = \sum_i \sum_j |k_{ij}| \quad (7)$$

求极小方式得到。因此上述方法的计算步骤为

(1) 将所有台站场地响应项设为零,选择合适的参数 $c(f)$,使式(5)的残差总和极小;

(2) 利用得到的参数,求场地响应:

$$\log G_j(f) = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} k_{ij}}{m_j} \quad (8)$$

其中 m_j 为第 j 个台站记录的地震事件数。

(3) 将场地响应的计算结果代入,重新计算 $c(f)$ 。

重复(2)、(3)步,使上述残差总和达到最小。通过反复迭代,可得到该区域的非弹性衰减系数 $c(f)$,进而利用式(2)得到介质的品质因子 $Q(f)$ 。图 1 给出了本文的计算结果,可以看到在 1~20 Hz 范围内,非弹性衰减系数 $c(f)$ 与频率的依赖性关系较差,但是 Q 值在整个所研究的频率范围内与频率有较好的线性关系。品质因子 $Q(f)$ 与频率的拟合关系是

$$Q(f) = 116.8 f^{1.000} \quad (9)$$

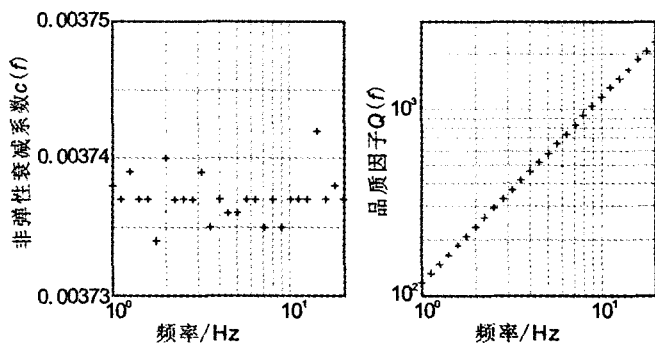


图 1 非弹性衰减系数 $c(f)$ 、品质因子 $Q(f)$ 与频率 f 的关系

Fig. 1 Relation among the non-elastic attenuation coefficient $c(f)$, quality factor $Q(f)$ and frequency f .

3.2 震源谱参数

采用 Moya 的方法确定每个地震的震源谱参数和台站的场地响应^[9]。该方法首先对每个地震选择 Brune 震源谱参数^[11]用于计算已记录地震的台站的场地响应。假定每个台站的场地响应无论那个地震事件均应一样,运用遗传算法通过寻找不同的震源谱参数使不同事件得到的台站的场地响应的标准

偏差最小。

首先对第 i 个地震在第 j 个台站观测到的 S 波 Fourier 振幅谱进行几何扩散和非弹性衰减的校正, 并从速度谱转换成位移谱。设定每个震源的位移震源谱参数(震源谱的低频水平 Ω_0 和拐角频率 f_c), 可得到每个地震的理论位移震源谱。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

$$G_{ij}(f_k) = O_{ij}^{orn}(f_k) / S_i(f_k) \quad (10)$$

计算第 j 个台站由不同地震得到的场地响应的平均值和标准偏差(对 i 求标准方差和平均值)

$$\delta_{jk} = \frac{\text{std}(G_{ij}(f_k))}{\text{mean}(G_{ij}(f_k))} \quad (11)$$

利用遗传算法, 调整所有地震的震源谱参数, 使下式极小

$$\text{sum} = \sum_j \sum_k \delta_{jk} \quad (12)$$

图 2 是 4 个地震的震源谱, 可以看出理论震源谱曲线和平均震源谱曲线大多拟合关系较好。这时的震源谱已经分别经过仪器响应、几何扩散、非弹性衰减、场地响应的校正。

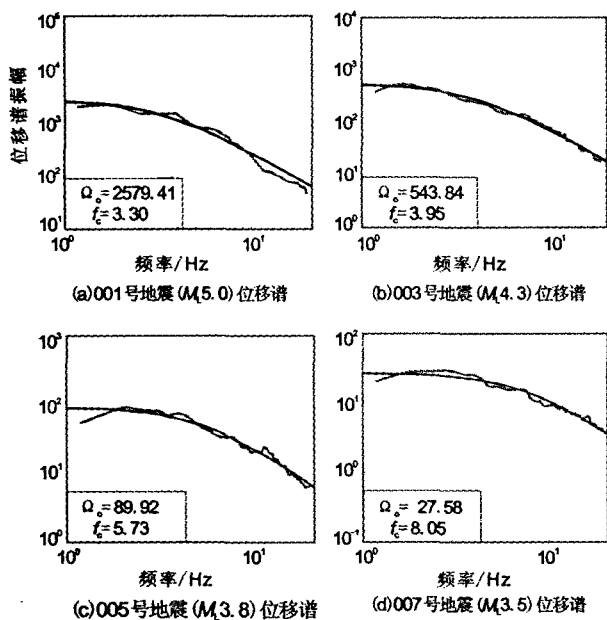


图 2 震源谱和理论震源谱比较(光滑线是拟合的理论震源谱曲线, 非光滑曲线是由各个台站记录得到的平均震源谱曲线)

Fig. 2 The average source spectras and GA proposed theory source model spectras.

3.3 场地响应

通过以上计算可以得到内蒙古呼和浩特 7 个台站的场地响应(图 3)。从图中可以看到大多数台站的场地响应并非为理论值 1, 在不同的频率段有不

同程度放大作用。值得注意的是台站(JIN、DSH)几乎在整个频率段存在较大的场地作用; 其他台站的场地响应较为理想, 但仍然存在不同程度的放大作用。可见基岩台站也存在场地响应。

Moya 等的方法^[9]由于事先对场地响应没有限制, 得到场地响应更接近实际情况。而 Atkinson 方法^[4-5]在第一次迭代时将场地响应人为地设为 1, 误差将不可避免, 具体工作时应注意这个问题。

3.4 震源参数

根据 Brune 模型^[11], 利用得到的震源谱参数求各种震源参数。

(1) 地震矩:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{R_{\theta}} \quad (13)$$

这里 ρ 是密度, 本研究取为 2.7 g/cm^3 ; V_s 是 S 波速度, 本研究取为 3.2 km/s ; R_{θ} 是辐射花样系数, 由于我们没有每个地震的断层面解, 所以令 R_{θ} 为一常数; 并取 SH 波在全震源球上的平均值为 0.48。对于震源尺度, 采用圆盘型震源模型^[11]。

(2) 震源半径为

$$r = \frac{2.34 V_s}{2\pi f_c} \quad (14)$$

(3) 应力降:

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (15)$$

根据上述公式计算得到 9 个地震的震源谱参数和震源参数, 图 4 给出了 9 个地震的地震矩 (M_0) 与震级 (M_L) 的关系、地震矩 (M_0) 与拐角频率的关系。从图中可以看出, 地震矩与震级的依赖关系较为明显, 具有一定的线形关系; 另外地震矩和拐角频率的依赖关系也较为明显, 拐角频率越小, 地震矩越大。

图 5 给出了 9 个地震的地震矩与源半径以及应力降之间的关系。可以看到源半径与地震矩大致呈现正比关系, 随着源半径的增大地震矩也逐渐增大。另外地震矩和应力降也大致呈现一定的正比关系, 地震矩增大应力降也增大, 这是否可以说明地震矩和应力降之间也存在正比关系? 如果这个关系成立, 震级和应力降是否也存在一定的正比关系? 当然这个结果是可以解释和理解的, 也是在实际地震危险性分析中期望出现的结果。

图 6 给出了 9 个地震的震级和源半径及应力降的关系。从图中可以看出, 震级和源半径、应力降存在一定的正比关系, 随着震级的增大源半径和应力

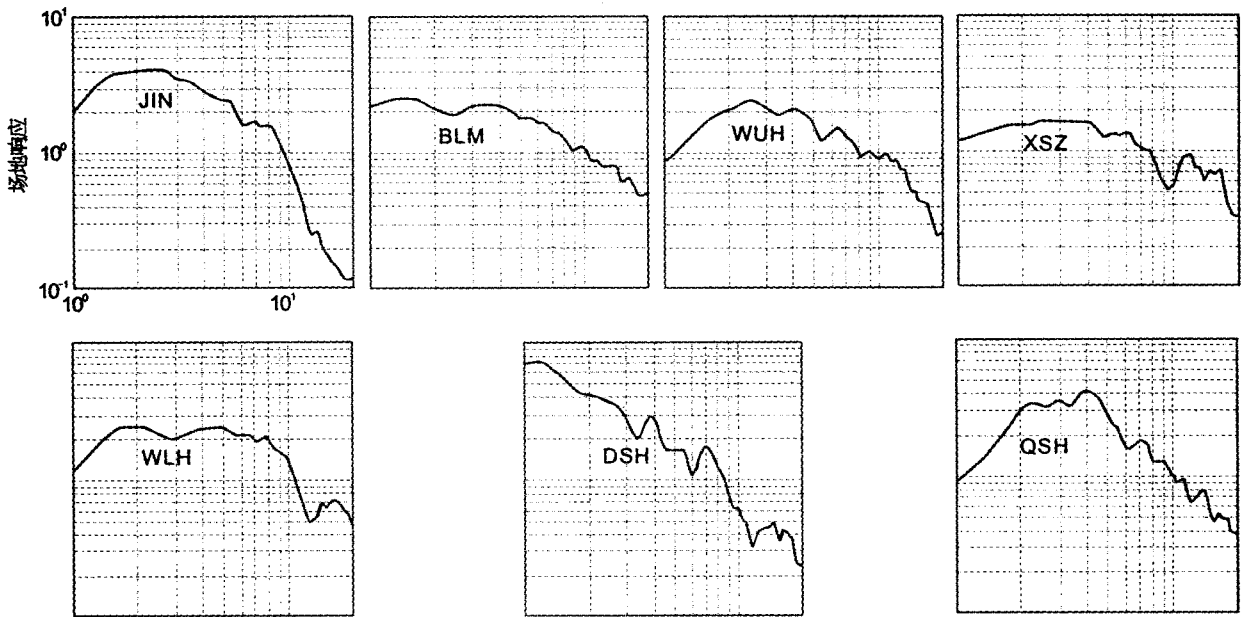


图 3 7 个台站的场地响应

Fig. 3 Site effects obtained by GA inversion of seven stations.

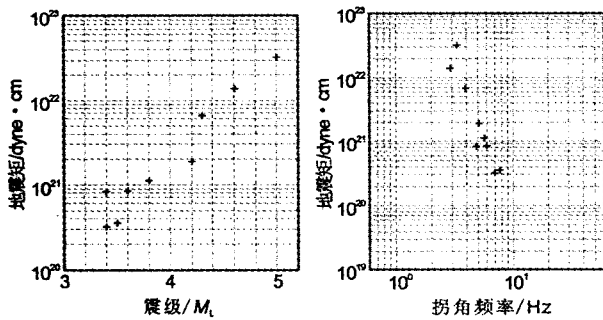


图 4 地震矩与震级、拐角频率的关系

Fig. 4 Relationships between seismic moment and magnitude, corner frequency.

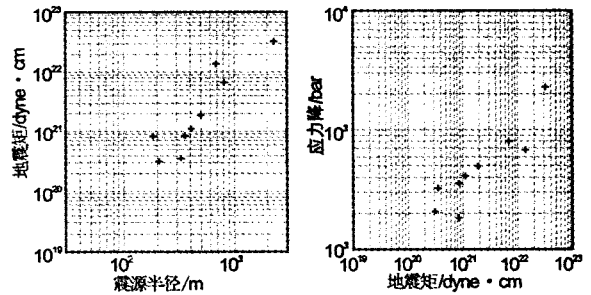


图 5 地震矩与源半径及应力降的关系

Fig. 5 Relationships between seismic moment and source radius, stress drop.

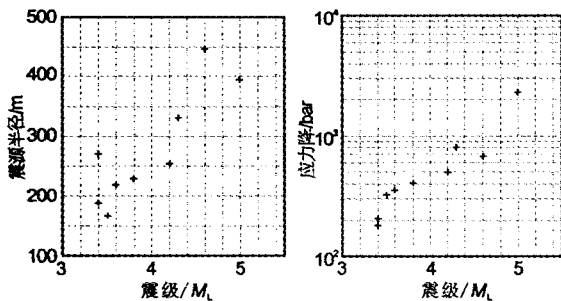


图 6 震级和源半径、应力降的关系

Fig. 6 Relationships between magnitude and source radius, stress drop.

降逐渐增大。也就是说,大地震的源半径大,小地震的源半径小;大地震的应力降大,小地震的应力降小。

4 讨论

本文所得的非弹性衰减系数在所研究的频率域内与频率的关系较差,几乎不随频率的变化而变化。而品质因子与频率的依赖关系较强,从品质因子与频率的拟合图来看几乎是完美的线性关系。

分析得到了呼和浩特数字台网 7 个台站的场地响应,发现 7 个基岩台站均不同程度的存在场地响应。场地响应的误差表现在量归函数上,现在使用的量归函数已长时间未经过校正,对震级的准确测定影响在所难免。因而对呼和浩特数字台进行台站校正即量归函数的进一步修订是必要的。

另外在研究中还发现, Q_0 值的结果对求取场地响应有较大的影响。使用的地震事件不同,得到的

台网的场地响应会有所差别,但是这种差别基本不会影响场地响应的基本形态或影响很小。

需要指出的是,在实际工作中发现一些台站的实际仪器响应在 1~20 Hz 之间,并不象标定函数给出的那样是平坦的。如果不用 Moya 方法进行场地响应计算并对观测谱进行校正,所得得震源谱函数根本不满足 Brune 二次方模型,这时得到的场地响应并不是真正的场地响应,它包含了仪器不平坦部分的校正。因此,在利用 Moya 方法得到的场地响应研究地震工程问题(如土层放大作用)时,一定要注意仪器校正是否完全。

地震震级和源半径、应力降之间存在一定的线性关系;另外地震矩和源半径、应力降以及拐角频率之间也存在一定的线性关系。这在理论上是可以理解和解释的,也是在地震分析预报工作中期望得到的一种确定的关系。不同类型地震的应力降是否存在差别,主震和余震的应力降关系如何,等等这些问题,都是我们在地震预测实践中非常关心和希望了解的。

许多人对震源参数及其相互关系进行过研究。特别是 Moya 等的结果显示^[9]地震矩和应力降没有明显的相关关系,源半径和应力降也没有明显的相关关系,与本文的结果相差较大。由于一些因素的限制,特别是呼和浩特遥测台网建设时间晚,台网孔径大,分布不均匀,高质量、路径覆盖均匀的地震少,所以本文仅采用了 9 个地震事件进行研究。由于样本量较少,结果可能包含了较多的不确定性;但无论如何本文所得的结果也是一种客观反映。

本文计算程序是中国地震局分析预报研究中心研究员刘杰提供的,在此表示感谢。

[参考文献]

- [1] 刘杰,郑斯华,黄玉龙. 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, 2002, 25(3): 211—218.
- [2] 章文波,谢礼立,郭明珠. 利用强震记录分析场地的地震反应[J]. 地震学报, 2001, 23(6): 604—614.
- [3] Andrews D J. Separation of source and propagation spectra of seven Mammoth lakes aftershock [A]. in: Proceedings of workshop X VI. Dynamic characteristics of faulting[C]. U. S. Geol Sur Open File Rep, 1981, 82—591.
- [4] Atkinson G M, Boore D. New ground motion relations for eastern North America[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1995, 85: 17—30.
- [5] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1992, 82: 2014—2031.
- [6] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1970, 75: 4997—5009.
- [7] Hartzell S H. Site respond estimation from earthquake data [J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1992, 82: 2308—2327.
- [8] Mitchell B J. Regional variation and frequency dependence of Q in the crust of the united States[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1981, 71: 1531—1538.
- [9] Moya C A, Aguirre J, Irikura K. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 2000, 90(4): 977—992.
- [10] Rovelli A. On the frequency dependence of Q in Friuli from short-period digital records[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1982, 72: 2369—2372.
- [11] Toksoz M N, D H Johnston. Seismic Wave attenuation[A]. in: Geophysics Report Series no. 2[C]. Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists, 1981.