

青藏高原东北缘地区非弹性衰减 Q 值和场地响应的研究^{*}

郭 晓^{1,2}, 张元生^{1,2}, 莘海亮¹, 李 稳¹, 张武民¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000 2 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 兰州 730000)

摘要: 根据甘肃数字地震台网 21 个子台的 437 条波形记录, 采用三段几何衰减模型, 利用 Atkinson 方法和遗传算法, 研究了青藏高原东北缘地区的非弹性衰减 Q 值和各台站的场地响应, 得到该地区非弹性衰减 Q 值与频率 f 的关系为: $Q(f) = 564.7f^{0.3}$; 21 个子台中, 除了武都、合作、湟源、定西和迭部等台的场地响应总体上没有放大效应以外, 其余台站均存在较明显的放大效应。

关键词: 非弹性衰减 Q 值; 场地响应; 青藏高原东北缘地区

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)02-0114-05

0 引言

地震波衰减性质的研究是地震学研究的重要课题。地震仪器记录到的地震波, 包含了地震震源效应、地震波的传播路径效应、台站场地响应及仪器响应。在使用地震波资料研究震源性性质时, 必须要扣除地震波传播路径效应、台站场地响应及仪器响应的影响。地震波传播的路径效应 (地震波衰减) 除了随距离存在几何衰减外, 还有一个重要的影响因素即介质的非弹性衰减, 可用介质品质因子 Q 值来度量。 Q 值是地球介质的基本物理参数之一, 是通过远离震源的观测资料对地震记录进行定量分析和研究震源性性质所必需的重要参数。同时, 地震波的衰减特征对于地震危险性分析也具有十分重要的意义, 是地震工程研究人员最关心的基础资料之一。由于剪切波的振幅通常比 P 波振幅大, 在有的情况下可达 5 倍左右, 因此对于地震工程来说, 研究剪切波衰减的特征将具有更重要的意义。

理论研究和实际观测结果表明, 场地响应是影响地震破坏的重要因素, 对地震破坏起着重要的作用。已有不少震害调查结果证实, 大地震时松软地基上的建筑物的破坏率要比坚硬地基上的

建筑物的破坏率高得多。Rogers 等 (1979) 采用内华达试验场核爆破记录的波谱, 计算了 Long Beach 的场地响应, 结果表明在 0.2~6 Hz 频段冲积层相对于岩石的场地放大倍数可高达 11 倍。

随着我国区域数字地震台网的建立与完善, 地震工作者获取了大量的地震波形资料, 数字地震波资料的分析与应用研究逐渐成为一项重要工作, 而地震波非弹性衰减 Q 值和场地响应特征研究是深入开展该项工作的一个重要基础。笔者根据甘肃数字地震台网记录到的青藏高原东北缘地区的中小地震的波形资料, 采用互相衔接的三段几何衰减模型, 通过在频率域内的分析, 采用 Atkinson 方法和遗传算法 (Atkinson 等, 1992 黄玉龙等, 2003 刘杰等, 2003) 研究了青藏高原东北缘地区剪切波的非弹性衰减 Q 值以及场地响应的征。

1 观测资料

本研究的资料取自甘肃数字地震台网的波形记录, 该台网由 21 个子台组成。这些台站都位于基岩上, 表 1 列出了各台站所用仪器的型号和台基岩性。每个台站都安装了三分量数字地震仪, 大部分地震仪在 1~20 Hz 之间具有速度平坦的响应。地震信号以 50 Hz 的采样率通过有线或无线通讯实

* 收稿日期: 2007-09-19.

基金项目: 中国地震局“十五”项目“兰州市活断层探测与地震危险性评价”(1-4-28-1)资助; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20070063.

时地传到设在兰州市内的台网中心。

表 1 地震台站、仪器型号和台基岩性一览表

台站名称	地震计型号	台基岩性
武都	FBS-3 A	板岩
成县	JC- V100	灰岩
天水	FBS-3 A	沉积岩
岷县	JC- V100	粉砂岩
合作	FBS-3 A	变质岩
平凉	FBS-3 A	砂砾岩
静宁	FBS-3 A	沉积岩
安宁	FBS-3 A	变质岩
景泰	FBS-3 A	砂页岩
石岗	FBS-3 A	砂岩
红崖山	FBS-3 A	变质岩
河西堡	FBS-3 A	花岗岩
山丹	JC- V100	砂砾岩
肃南	JC- V100	红砾岩
湟源	FBS-3 A	花岗岩
定西	JD-2	砂砾岩
文县	JC- V100	砂岩
迭部	JC- V100	变质岩
永登	JC- V100	粉砂岩
海原	JC- V100	沉积岩
祁连	JC- V100	变质岩

甘肃数字地震台网从 2001 年开始有正式的地震记录。通过地震目录和波形考察，我们初步选出 3.0 级以上的地震 159 个共 749 条记录作为候选分析资料。然后，通过信噪比的计算，挑选出 81 个地震的 437 条记录用于分析（图 1）。这些地震的震级范围为 M_L 3.0 ~ 5.1，震中距为 10 ~ 500 km。

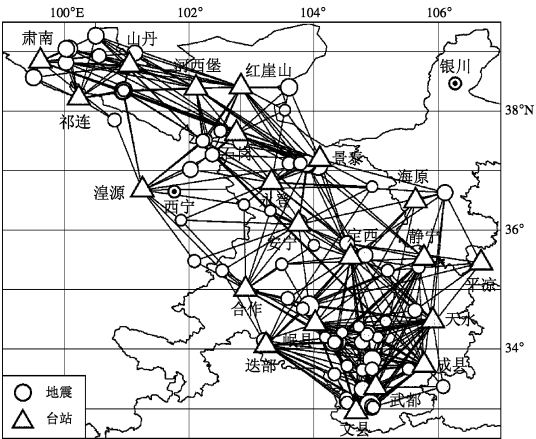


图 1 青藏高原东北缘地区 21 个台站和 81 个地震的分布及 437 条地震记录的传播路径

2 资料处理

对于 S 波的两个水平分量（NS、EW），首先进行带通滤波（Butter 滤波器，带宽 0.1 ~ 22 Hz）和水平校正处理，然后取“S 窗”和“噪声窗”，进行傅立叶变换信噪比分析。

如图 2 所示，把从 S 波开始到包括 S 波总能量的 90% 的时间段定义为“S 窗”。对于不同地震，由于震源深度和震中距不同，“S 窗”内包含的震相也不尽相同。对于同一次地震，由于各台站的震中距不同，“S 窗”的持续时间也不同。为了得到具有相同频率间隔的振幅谱，笔者采用了平移窗谱方法（苏有锦等，2006）。具体步骤如下：把“S 窗”内的波形信号分成若干个包含有 256 个采样点的小段，并使相邻信号段有 50% 的重叠；对于采样率为 50 Hz 的地震记录来说，可得到每个信号段的时间长度是 5.12 s；在每一信号段的起始和末尾各加 5% 的 cos 边瓣后，通过傅立叶变换得到每个信号段的傅立叶谱，这样对于每一个台站的记录就可以得到相同频率间隔（0.196 Hz）的傅立叶谱；最后，对每个信号段的傅立叶谱进行仪器校正，并通过下式得到整个“S 窗”内信号的速度振幅谱：

$$\overline{V}(f)=\left\{\left[\sum_{i=1}^nV_i^2(f)\right]\cdot\frac{T}{n}\right\}^{1/2}.$$
 (1)

式中 $V_i(f)$ 是经过仪器校正的第 i 个信号段的傅立叶谱，T 为“S 窗”的持续时间。该“S 窗”内包含了 n 个时间长度为 t 每个时间长度包含 256 个采样点的信号段。取 P 波初动前 256 个采样点（1 个信号段）的噪声信号，通过（2）式得到与信号相同频率间隔的噪声谱：

$$N(f)=\left\{n\overline{v}^2(f)\cdot\frac{1}{t}\right\}^{1/2}.$$
 (2)

式中， $\overline{v}(f)$ 是经过仪器校正的 256 个数据点的噪声傅立叶谱。然后，得到经过噪声校正的速度振幅谱：

$$V(f)=\left\{\overline{V}(f)-N(f)\right\}^{1/2}.$$
 (3)

由于甘肃数字地震台网的资料是速度记录,最后还需要把 $V(f)$ 除以 $2\pi f$ 把速度谱转换成位移谱。对于 S波的两个水平分量分别进行上述处理,并通过 (4) 式得到 S波水平分量合成位移谱:

$$A(f)=\left\{ \dot{u}_{EW}(f)+\dot{u}_{NS}(f) \right\}^{1/2} \tag{4}$$

用以上处理方法,按每次地震至少被 3个台站记录到、每个台站至少有 4条记录的原则,挑选波形较好、能经过信噪比检验的地震记录用于本研究。图 2给出了其中的一个实例,为文县台记录到的 2005年 8月 12日卓尼 3.6级地震的两个水平分量原始波形及其 S波合成位移谱。图 2a中,虚线间为“S窗”的范围;图 2b中,上部曲线为经过噪声校正的位移谱曲线,下部曲线为噪声谱曲线。

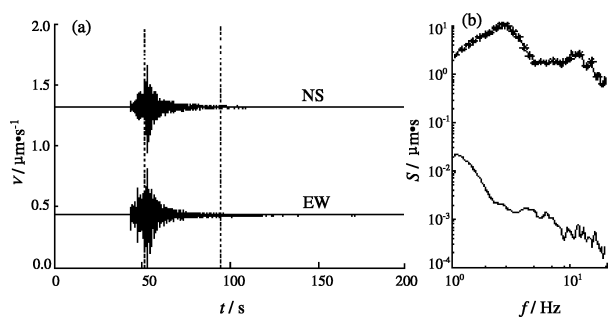


图 2 文县台记录到的 2005年 8月 12日卓尼 3.6级地震的两个水平分量原始波形 (a) 及其合成位移谱 (b)

3 计算方法和结果

根据地震波谱的一般表达,经过上述资料预处理后,任一地震观测记录谱与震源谱均有如下关系:

$$\lg O_{ij}(f)=\lg S(f)-\lg G(R_{ij})-C(f)\beta_j- \lg G_j(f) \tag{5}$$

其中 f 是频率, $O_{ij}(f)$ 是第 j 个台站观测到的第 i 个地震的谱振幅, $S(f)$ 是第 i 个地震的震源谱振幅, $G(R_{ij})$ 为几何衰减函数, $C(f)$ 为非弹性衰减系数, R 是第 i 个地震至第 j 个台站的震中距, $G_j(f)$ 是第 j 个台站的场地响应。

非弹性衰减系数 $C(f)$ 与区域介质的品质因子 $Q(f)$ 之间的关系为

$$Q(f)=\frac{\lg Q\pi f}{C(f)\beta} \tag{6}$$

式中, β 为 S波速度,取 3.5 km/s

参考 Atkinson等 (1992)、黄玉龙等 (2002) 文献,几何衰减函数 $G(R_{ij})$ 采用互相衔接的三段几何衰减函数表示:

$$G(R)=\begin{cases} R^{-b_1}, & R\leq R_{b1}; \\ R_{b1}^{-b_1}\cdot R_{b1}^{-b_2}\cdot R^{-b_2}, & R_{b1}<R\leq R_{b2}; \\ R_{b1}^{-b_1}\cdot R_{b1}^{-b_2}\cdot R_{b2}^{-b_2}\cdot R_{b2}^{-b_3}\cdot R^{-b_3}, & R>R_{b2}. \end{cases}$$

上式中 $R\leq R_{b1}$ 时,对应于直达波的几何衰减;当 $R_{b1}<R\leq R_{b2}$ 时,对应于过渡区,在该震源距范围内,直达波加入了在地壳几个间断面和莫霍面上的反射波;当 $R>R_{b2}$ 时,对应于多次折射反射波。根据青藏高原东北缘地区平均地壳厚度 H 约 50 km (李永华等, 2006),有关模型参数取值为 $b_1=1.0$, $b_2=0.0$, $b_3=0.5$, $R_{b1}=1.5H=75\text{ km}$, $R_{b2}=2.5H=125\text{ km}$ 。如果把该几何衰减函数 $G(R_{ij})$ 代入式 (5),则式 (5) 变为对参数 $C(f)$ (非弹性衰减系数) 和 $G_j(f)$ (台站场地响应) 进行联合反演的问题。

定义残差为

$$k_j=\left[\lg S(f) \right]_j-\overline{\lg S(f)} \tag{7}$$

式中 $\overline{\lg S(f)}$ 是第 i 个地震的震源谱振幅对数的平均值,是对记录到该地震的所有台站计算得到的 $\lg S(f)$ 求平均。

非弹性衰减系数 $C(f)$ 的求解采用计算 (8) 式求极小值得到,即

$$sm=\sum_i\sum_j\left| k_j \right| \tag{8}$$

采用 Atkinson方法反演品质因子 $Q(f)$ 值和场地响应的计算步骤可归纳为:

- (1) 先将所有台站场地响应 $G_j(f)$ 设为 1,选择合适的参数 $C(f)$,使 (8) 式的残差总和极小。
- (2) 利用得到的参数,可求得场地响应:

$$\lg G_j(f) = \frac{\sum_{j=1}^{m_j} k_{ij}}{m_j} \tag{9}$$

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，使残差总和达到最小。

通过上述迭代反演可同时求得该地区的非弹性衰减系数 $C(f)$ 和各台站的场地响应，进而利用 (6) 式得到区域介质的品质因子 Q 。在考虑频率依赖的 Q 模型时，通常用频率的幂函数，即 $Q(f) = Q_0 f^p$ 的形式来拟合 Q 与频率的关系。图 3 给出了其计算结果，由图可见结果拟合较好。

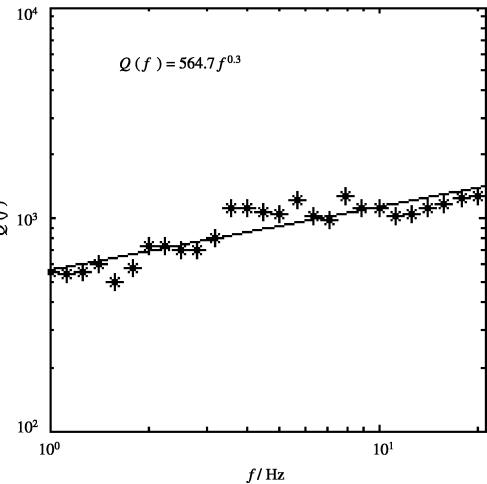


图 3 品质因子 $Q(f)$ 与频率 f 的关系

品质因子 $Q(f)$ 与频率的关系为

$$Q(f) = 564.7 f^{0.3} \tag{11}$$

图 4 是迭代反演得到的 21 个子台的场地响应。由图可见，除了武都、合作、湟源、定西和迭部等台的场地响应总体上接近或小于 1 以外，其余台站的场地响应均存在较明显的放大效应。

4 结 语

本研究得到的青藏高原东北缘地区 Q 值与频率的关系，总体上与广东地区的结果 ($Q(f) = 150 f^{0.5}$) 和欧洲中部地区的结果 ($Q(f) = 400 f^{0.42}$) 较为接近。

采用 Akinson 方法计算非弹性衰减系数 $C(f)$ 或品质因子 Q 时，由于各台站的场地响应是通过

与平均值比较来确定的，对于场地响应较小的台站（如基岩台站），该方法所得到的场地响应的对数将是负值，即台站响应将小于 1（图 4），因此得到的场地响应是相对的，不是真实的场地响应。这表明研究得到的 21 个台站的场地响应，除了武都、合作、湟源、定西、迭部等台的场地响应总体上没有放大效应以外，其余台站的场地响应均存在较明显的放大效应。

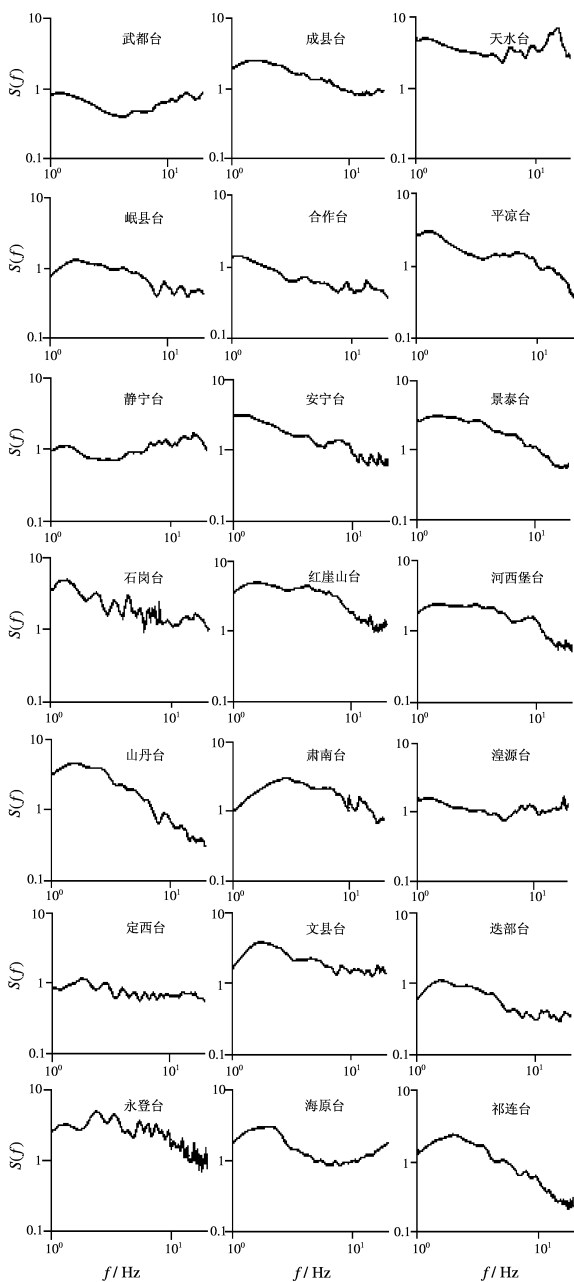


图 4 由 437 条记录通过迭代反演得到的 21 个子台的场地响应

本文所用程序由中国地震局台网中心刘杰研

究员提供, 此外刘杰、郑斯华研究员在理论与方法上也给予了诸多指导和帮助, 在此深表谢意。

参考文献:

黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 2002 广东地区地震波衰减和场地响应的研究 [J]. 地球物理学报, 46 (1): 54—61.

李永华, 吴庆举, 安张辉, 等. 2006 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究 [J]. 地球物理学报, 49 (5): 1359—1368.

刘杰, 郑斯华, 黄玉龙, 等. 2003 利用遗传算法反演非线性衰减系数、震源参数和场地响应 [J]. 地震学报, 25 (2): 211

—218

苏有锦, 刘杰, 郑斯华, 等. 2006 云南地区 S波非弹性衰减 Q值研究 [J]. 地震学报, 28 (2): 206—212

Atkinson G M, Boore D. 1995. New ground motion relations for eastern North America [J]. BSSA, 85: 17—30.

Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada [J]. BSSA, 82: 2014—2031.

Rogers A M, Tinsley J C, Hays W H, et al. 1979. Evaluation of the relation between near surface geological units and ground response in the vicinity of Long Beach, California [J]. BSSA, 69: 1603—1622

Inelastic Attenuation Value Q and Site Response in the Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

GUO Xiaod², ZHANG Yuan-sheng², XIN Hai-lan^g, LI Wei^h, ZHANG Wu-min^j
(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)
(2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

According to 437 horizontal component seismograms recorded at 21 stations of Gansu Digital Seismic Network, we used Genetic Algorithm and Atkinson's method to study the inelastic attenuation value Q of the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau and the site response of each station based on the tri-linear geometrical spreading model. The results indicate that the frequency-dependent of inelastic attenuation value Q in the studied area is estimated as $Q(f)=564.7f^{0.3}$. The site response shows significant amplification at every station except for the Wudu, Hezuo, Huangyuan, Dingxi, Diebu stations.

Key words: inelastic attenuation value Q; site response; Northeastern margin of Tibet Plateau



王福昌 中国地震局防灾科技学院副教授。1997年毕业于曲阜师范大学数学系,获学士学位;2000年毕业于大连理工大学应用数学系应用数学专业,获硕士学位。主要从事多元统计分析和现代最优化方法的应用研究。



郭晓 中国地震局兰州地震研究所助理研究员。2005年毕业于中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业,获硕士学位。主要从事卫星遥感应用及地震预报研究工作。



赖加成 福建省地震局泉州地磁台助理工程师。1994年毕业于防灾技术高等专科学校(现为防灾技术学院)。主要从事地震地磁监测工作。



曾宪伟 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2005年毕业于青岛大学物理系,获学士学位。主要从事数字化观测数据的处理和分析工作。



莘海亮 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2005年毕业于河北大学物理科学与技术学院,获学士学位。研究方向为地震精定位与地壳三维速度结构。

注:陈立德、刘翔、叶建庆、常祖峰的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol.30 No.1 Vol.28 No.4 Vol.30 No.3 Vol.29 No.2