兰州市及其附近地区介质衰减特征研究

郭 晓^{1,2},张元生^{1,2},何 斌¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃 兰州 730000)

摘 要:根据兰州临时徽震台网的数字化微震记录,采用三段几何衰减模型拟合,利用 Atkinson 方 法和遗传算法,得到兰州市及其附近地区介质的几何衰减函数,非弹性衰减 Q 值随频率的关系为 Q(f) = 45.1f^{1.488}。并对研究结果对比其他地区进行了分析讨论。

关键词:兰州;非弹性衰减;品质因子;遗传算法;微震

中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 0844(2010)03 - 0244 - 04

Study on the Inelastic Attenuation of the Medium in Lanzhou City and Adjacent Regions

GUO Xiao^{1,2}, ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, HE Bin¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;
 2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: On the base of micro-earthquake seismogram records of Lanzhou temporary digital micro-earthquake network, and a presumed trilinear geometrical spreading model, the inelastic attenuation Q value is investigated by using genetic algorithm and the method proposed by Atkinson. The frequency-dependent of inelastic attenuation Q value in Lanzhou City and adjacent regions is estimated as $Q(f) = 45.1 f^{4.488}$. And the result is discussed and analyzed with the results from other regions.

Key words: Lanzhou; Inelastic attenuation; Quality factor; Genetic algorithm; Micro-earthquake

0 引言

地震波衰减性质的研究是地震学研究的重要课题。地震台站(地震仪)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。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,用介质品质因子 Q (f)值来度量。Q(f)值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质(如震源 参数的测定等)所必需的重要参数。同时,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,剪切波的衰减特征对于工程地震中的地 震危险性分析也具有十分重要的意义。

本文根据"十五"期间在兰州市周围架设的临时数字地震台网记录的微震数字化波形资料,采用 互相衔接的三段几何衰减模型拟合,通过在频率域 内的分析,利用 Atkinson 方法^[1-5]得到了兰州市及其 附近地区介质 *Q*(*f*)值,并对研究结果进行分析讨 论。

1 资料处理

分析的微震资料取自"十五"期间在兰州市周 围架设的临时数字地震台网,该台网由7个地震台

收稿日期:2009-03-02

基金项目:国家自然科学基金(40874029);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);中国地 震局兰州地震研究所论著编号:LC2010005

作者简介:郭 晓(1974-),男(汉族),江西上高人,助理研究员,主要从事地震学及卫星遥感应用研究.

쇫。这些台站都位于基岩上,每个台站都安装了三 分量数字地震仪(型号为 MDSR - 1)。所有地震仪 在1~20 Hz 之间具有速度平坦的响应,采样率为 125 Hz。临时微震台网自 2004 年 6 月到 2007 年 5 月共记录微震数百次。通过波形考察,初步选出兰 州及其附近地区微震 53 个,共 347 条记录作为候选 的分析资料,然后通过信噪比的计算挑选出 20 个地 震的 106 条记录用于分析(图 1)。这些地震的震级 范围为 *M*₁0.2~2.0,震中距为 5~78 km。



图1 兰州临时微震台网和本文使用的微震 分布及传播路径

Fig. 1 Distribution of stations in Lanzhou temperaty micro-earthquake network and events, as well as paths of seismic records used in the study.

对于 S 波的的两个水平分量(NS、EW 分量), 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 行傅里叶变换信噪比分析。

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",如图2所示。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,采用了平移窗谱方法^[4]。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125 Hz 的地震记录来说,进行重采样为50 Hz 的地震记录,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 傅里叶变换得到每个信号段的傅里叶谱,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)的傅里叶谱;最后,对每个信号段的傅 里叶谱进行仪器校正,并通过式(1)得到整个"S 窗"内信号的速度振幅谱

$$\overline{V}(f) = \left\{ \left(\sum_{i=1}^{n} v_i^2(f) \right) \cdot \frac{T}{nt} \right\}^{1/2}$$
(1)

式中 v_i(f) 是经过仪器校正的第 i 信号段的傅里叶 谱;T 为"S 窗"的持续时间。该"S 窗"内包含了 n 个时间长度 t 为 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 式(2)得到与信号相同频率间隔的噪声谱

$$N(f) = \left\{ n^2(f) \; \frac{t_s}{t} \right\}^{1/2} \tag{2}$$

式中 n(f) 是经过仪器校正的 256 个数据点的噪声 傅里叶谱。



然后,得到经过噪声校正的速度振幅谱

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

由于兰州临时微震台网的资料是速度记录,最 后还需要把 V(f)除以 2πf,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 过式(4)得到 S 波水平分量合成位移谱

$$A(f) = \{u_{\rm FW}^2(f) + u_{\rm NS}^2(f)\}^{\frac{1}{2}}$$
(4)

用以上处理方法,按每次地震至少有3个台站 记录到,每个台站至少有3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zjx(邹家岘)台记录 到的2005年7月7日一个微震的两个水平分量原 始波形及其S波合成位移谱。

2 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,任一地震记录观测谱与震源谱均有如下关 系:

 $\log O_{ij}(f) =$

 $\log S_{i}(f) - \log G(R_{ij}) - c(f)R_{ij} - \log G_{j}(f)$ (5) 其中f 是频率; $O_{ij}(f)$ 是第 j 个台站观测到第 i 个地 震的谱振幅; $S_{i}(f)$ 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_{ij} 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

$$Q(f) = \frac{\log(e) \pi f}{c(f)\beta}$$
(6)

式中 β 为S波速度,取3.5 km/s。

几何衰减函数 $G(R_{ij})$,参考黄玉龙等^[7],采用 互相衔接的三段几何衰减函数:

$$G(R) = \begin{cases} R^{-b_1} & R \le R_{01} \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{-b_2} \cdot R^{-b_2} & R_{01} < R \le R_{02} \\ R_{01}^{-b_1} & R^{b_2} & R^{-b_2} & R_{01} < R \le R_{02} \end{cases}$$

 $(R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R_{02}^{b_3} \cdot R^{-b_3} = R > R_{02}$ 式中 $R \le R_{01}$ 时,对应于直达波的几何衰减;当 R_{01} $< R \le R_{02}$ 时,对应于过渡区,在该源距范围内,直达 波加入了在地壳几间断面和莫霍面上的反射波;当 $R > R_{02}$ 时,对应于多次折射反射波。根据兰州地区 平均地壳厚度 H 约 45 km^[6],有关模型参数取值为 $b_1 = 1.0, b_2 = 0.0, b_3 = 0.5, R_{01} = 1.5H = 67.5$ km, $R_{02} = 2.5H = 112.5$ km。如果把该几何衰减函数 G $(R_{ij})代入式(5),则式(5)变为对参数 <math>c(f)$ (非弹 性衰减系数)和 $G_i(f)$ (台站场地响应)进行联合反 演的问题。

定义残差为

$$k_{ij} = [\log S_i(f)]_j - \log S_i(f)$$
(7)

式中 $logS_i(f)$ 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 $logS_i(f)$ 求平均。

非弹性衰减系数 c(f)的求解采用计算式(8)求 极小值得到:

$$sum = \sum_{i} \sum_{j} |k_{ij}| \qquad (8)$$

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_i(f))设为1,选择合适的参数 c(f),使式(8)的残差总和极小;

(2) 利用得到的参数,求场地响应

$$\log G_j(f) = \frac{\sum_{j=1}^{m_j} k_{ij}}{m_i}$$
(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,使上述残差总和达到最小。





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,进而利用式 (6)得到区域介质的品质因子 Q(f)。在考虑频率 依赖的 Q(f)模型时,通常用频率的幂函数,即 Q(f) $= Q_0(f)$ "的形式来拟合 Q(f)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。

品质因子 Q(f) 与频率的关系是

$$Q(f) = 45.1 f^{1.488} \tag{11}$$

第3期

3 讨论和结论

利用 Atkinson 方法和遗传算法联合反演了非弹 性衰减系数,得到的兰州及其附近地区介质的品质 因子计算结果为 $Q(f) = 45.1f^{1.488}$ 。该方法较成熟, 对于研究同一构造区的介质特性具有较高的可信 度。与郭晓^[7-9]等计算的青藏高原东北缘地区介质 的品质因子结果($Q(f) = 564.7f^{0.3}$)、甘东南地区介 质的品质因子结果($Q(f) = 404.2f^{0.264}$)、祁连山中 东段地区的品质因子结果($Q(f) = 687.9f^{0.46}$)相 比,兰州及其附近地区的介质非弹性衰减在频率小 于9 Hz 时明显低于青藏高原东北缘等地区,说明频 率小于9 Hz 的地震波在兰州及其附近地区衰减比 青藏高原东北缘等地区得快;而当频率大于9 Hz 时 兰州及其附近地区的介质非弹性衰减又高于青藏高 原东北缘等地区,说明频率大于9 Hz 的地震波在兰 州及其附近地区衰减比青藏高原东北缘等地区得 慢。这可能与兰州及其附近地区使用的地震射线相 对较短(地震射线平均路径长度 38 km)、地震震源 深度较浅(绝大部分在5 km 左右)、反映的是该区 域浅部介质的 Q 值特征有关, 而青藏高原东北缘等 地区使用的地震射线相对较长,反映的是区域更深 部介质的 Q 值特征有关。

Castro^[10]等计算的墨西哥 Oaxaca 地区介质的 品质因子结果($Q(f) = 56f^{4.01}$)总体上与本文兰州及 其附近地区介质的品质因子计算结果较为接近,使 用的小震射线平均路径长度也相对较短,仅为 33 km,地震震源深度也较浅,均在 34 km 以上(大部分 为 10~20 km)。结果显示墨西哥 Oaxaca 地区与兰 州及其附近地区地震波的衰减吸收快且与频率的依 赖性强(低 Q_0 高 η),并且兰州及其附近地区地震波 的衰减与频率的依赖性更强,可能与使用的地震震 源深度更浅有关,反映的是该区域较浅部介质的 Q 值特征,同时表明兰州及其附近地区浅部介质的非 均匀性特别大。

致谢:本文所用程序由中国地震局台网中心刘 杰研究员提供,在此深表谢意!

[参考文献]

- Atkinson G M, Boore D. New ground motion relations for eastern North America [J]. Bull Seism Soc Amer, 1995, 85:17-30.
- [2] 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.
- [3] 刘杰,郑斯华,黄玉龙,等.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,2003,25(2):211-218.
- [4] 苏有锦, 刘杰, 郑斯华,等. 云南地区S波非弹性衰减Q值研究[J]. 地震学报, 2006, 28(2):206-212.
- [5] 黄玉龙,郑斯华,刘杰,等. 广东地区地震波衰减和场地响应的 研究[J]. 地球物理学报,2002,46(1):54-61.
- [6] 周民都, 吕太乙, 张元生, 等. 青藏高原东北缘地质构造背景及 地壳结构研究[J]. 地震学报, 2000, 22(6):645-653.
- [7] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J]. 西北地震学报,2007,29
 (4):319-325.
- [8] 郭晓,张元生,莘海亮,等.甘东南地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J].中国地震,2007,23(4):383-392.
- [9] 郭晓,张元生, 莘海亮,等. 青藏高原东北缘地区非弹性衰减 Q 值和场地响应的研究[J]. 地震研究, 2008, 31(2):114-118.
- [10] Castro R R, L Munguia. Attenuation of P and S waves in Oaxaca , Mexico subduction zone [J]. Phys. Earth Planet. Interiors, 1993, 76(2):179-187.