

王卫东, 张钰诚, 赵云峰, 等. 渭河盆地及邻区场地响应和非弹性衰减研究 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 1-5. [WANG Weidong, ZHANG Yucehng, ZHAO Yunfeng, et al. Study of Inelastic Attenuation and Site Response in Weihe Basin and Its Adjacent Area [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 1-5]

渭河盆地及邻区场地响应和非弹性衰减研究

王卫东¹, 张钰诚¹, 赵云峰², 郑 怡³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 中国地震局第二监测中心, 西安 710054;
3. 陕西省地震局, 西安 710068)

摘要: 使用 2002—2012 年渭河盆地及邻区 20 个地震的 98 条地震资料, 采用遗传算法反演了渭河盆地及邻区的场地响应和非弹性衰减关系。研究结果表明: 渭河盆地及邻区的非弹性衰减 Q 值随频率 f 的变化关系为 $Q(f)=(623.0\pm 127)f^{0.479\pm 0.116}$, 1 Hz 处的 Q_0 值明显大于山西、甘肃东南部等地质构造活跃区, 与鄂尔多斯地块比较接近, 表明其构造活动程度与鄂尔多斯地块接近, 明显低于山西地区和甘肃东南部。6 个台站的场地响应值均在 1 附近变化, 最大值不超过 4, 未显示明显的放大效应, 蓝田台场地响应与其它台站相比有所差别, 其原因有待进一步的研究。

关键词: 渭河盆地; 地震动衰减; 场地响应; Q 值; SH 波

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-001-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.01

Study of Inelastic Attenuation and Site Response in Weihe Basin and Its Adjacent Area

WANG Weidong¹, ZHANG Yucehng¹, ZHAO Yunfeng², ZHENG Yi³

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Second Crust Monitoring and Application Center; CEA, Xi'an 710054, China;
3. Shanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China)

Abstract: Based on 98 pieces of digital seismic data of 20 seismic events recorded at 6 seismic stations in Weihe basin and its adjacent area from 2002 to 2012, the relation of inelastic attenuation Q value with frequency in the crust of this region and site response of the 6 stations are inverted by using genetic algorithms. The results show that the frequency-dependent Q in this region is estimated as $Q(f)=(623.0\pm 127)f^{0.479\pm 0.116}$, and the Q value at 1 Hz is 623 in this region, which is much larger than the result in the geologically active tectonic region such as Shanxi and southeastern Gansu, but is close to the Ordos block, indicating that its activity is close to that of the Ordos

收稿日期: 2019-06-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (创新团队) (2013G3262012); 国家自然科学基金 (41274005)

作者简介: 王卫东 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事地震学、灾害学的教学与研究工作。

E-mail: chdwwd@163.com

block, indicating that its activity is close to that of the Ordos block, but significantly lower than that of Shanxi and southeastern Gansu. The site responses of 6 stations do not show clear amplifying effect with the maximum value less than 4, which is consistent with their basement on rock. The site response in Lantian station shows some difference, and the reason should be studied further.

Keywords: Weihe basin; Attenuation of ground motion; Site response; Q value; SH wave

过去几十年间强地面振动及其工程应用的研究取得了很大的进展^[1-7],地面振动依赖于震源、传播路径和场地响应等方面,这几种效应的分离对于精确确定地震参数十分重要。其中,场地响应可通过实际地面振动数据经验估计或S波速度剖面的数值模拟得到;地震波衰减(*Q*值)是描述地壳介质非均匀程度的确定性指标,反映了介质的非均匀性和非弹性特征。使用实测地震波资料估算场地响应和地震波衰减特征有多种方法^[8],Atkinson方法较好地解决了震源、路径和场地响应的分离,演化出多种具体计算方法并得到广泛的应用^[9-13]。

渭河断陷盆地位于鄂尔多斯地块南缘,其南方是分隔华北克拉通与华南地块的秦岭造山带,历史上曾发生过华县8¹/₄级地震等多次强震,但现代地震活动强度较低。本文采用

Atkinson方法来研究渭河盆地及邻区场地响应和非弹性衰减。

1 观测资料

从2002年1月至2012年12月陕西省数字地震台网的记录中,挑选波形清晰,信噪比较高的 $M_L \geq 2.5$ 地震记录,且要求每个台站至少记录到3个地震,每个地震至少有3个台站记录,共选择了6个台站20次地震的98条地震记录。首先对波形数据进行零线校正、去倾,仪器响应校正,进行方向旋转合成SH波;然后采用平移窗方法计算SH波位移谱,并消除SH波的自由表面效应;最后采用Atkinson方法反演渭河盆地及邻区场地响应和非弹性衰减。表1为台站参数,图1为震中、台站位置和射线分布。

表 1 台站参数表
Table 1 Parameters of the stations used in this study

台站名称	代码	纬度 / (°)	经度 / (°)	海拔 /m	台基岩性
蓝田	LAN	34.2	109.3	1300	花岗岩
乾陵	QIA	34.6	108.2	885	石灰岩
周至	ZHO	34.1	108.3	610	片麻岩
合阳	HEY	35.4	110.1	1160	砂岩
蒲城	PUC	35.1	109.4	1010	灰岩
泾阳	JIN	34.7	108.8	685	石灰岩

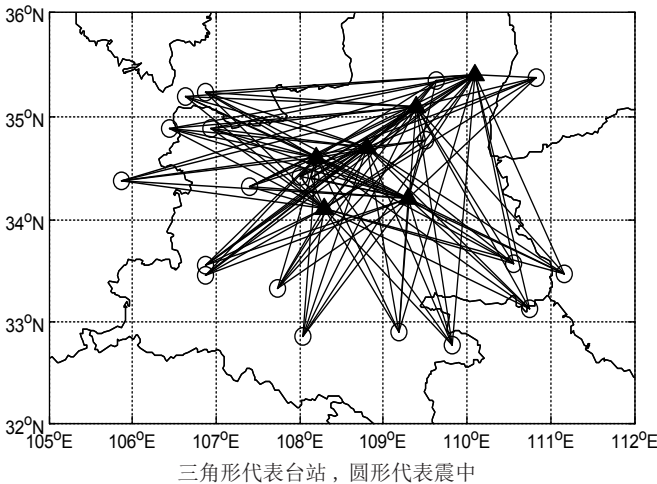


图 1 台站、震中和射线路径分布图

Fig.1 The distribution of seismic stations, epicenters and ray paths

2 研究方法

进行仪器响应校正和自由表面效应处理后，在频率域地震波的位移谱为^[7]：

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

式中， $A_{ij}(f)$ 为入射第 j 个台站记录的第 i 个地震 SH 波的位移谱振幅， $A_{i0}(f)$ 为第 i 个地震的震源谱， $G(R_{ij})$ 为几何扩散， R_{ij} 为震源距， $Q(f)$ 为品质因子， β 为 S 波速度， $S_j(f)$ 为第 j 个

$$G_{ij}=\begin{cases} R_{ij}^{-b_1} & R_{ij}\leq R_1 \\ R_1^{-b_1}\cdot R_1^{b_2}\cdot R_{ij}^{-b_2} & R_1\leq R_{ij}\leq R_2 \\ R_1^{-b_1}\cdot R_1^{b_2}\cdot R_{ij}^{-b_2}\cdot R_2^{b_3}\cdot R_{ij}^{b_3} & R_2\leq R_{ij}\leq R_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中 R_1, R_2, b_1, b_2, b_3 为常数。根据已有的研究，取 $b_1=1, b_2=0, b_3=0.5$ ，一般取 $R_1=1.5H, R_2=2.5H, H$ 为研究地区的地壳厚度，本文取 $H=36\text{ km}, D=36\text{ km}$ 。

采用 Atkinson 多台多震源联合反演法^[11]，定义残差为：

$$\varepsilon=\sum_{i=1}^{n_0}\sum_{j=1}^{n_i}|D_{ij}(f)| \quad (5)$$

$$D_{ij}(f)=[\lg A_{i0}(f)]-\frac{\sum_{j=1}^{n_i}[\lg A_{i0}(f)]_j}{n_i} \quad (6)$$

式中为 n_i 为记录到第 i 个地震的台站数， n_0 为所分析的地震数目。

利用遗传算法进行反演计算^[11-12]，求解步骤如下：

(1) 首先令各台站的场地响应为 1，即 $\lg S_j(f)=0$ ，此时 ε 的大小仅取决于参数 b_1, b_2, b_3 和 $C(f_k)$ 。

(2) 用遗传算法求得使 ε 为最小的 b_1, b_2, b_3 和 $C(f_k)$ 。

(3) 利用求得的参数，计算出各台站的场地响应：

$$\lg S_j(f)=\frac{\sum_{i=1}^{m_j} D_{ij}(f)}{m_j} \quad (7)$$

式中 m_j 为第 j 个台站记录到的地震数目。

(4) 将场地响应代入，重复步骤 (2) 和 (3)，直至使 ε 不再减小，即得到在中心频率 f_k 的 $b_1, b_2, b_3, C(f_k)$ 和 $S_j(f_k)$ 。

得 $Q(f_k)$ 为

$$Q(f_k)=\frac{\pi \lg e}{\beta C(f_k)} f \quad (8)$$

台站的场地响应。

(1) 式两边取对数，得：

$$\lg A_{ij}(f)=\lg A_{i0}(f)+\lg G(R_{ij})-C(f)R_{ij}+\lg S_j(f) \quad (2)$$

式中：

$$C(f)=\frac{\pi \lg e}{Q(f)\beta} f \quad (3)$$

本次研究采用 Atkinson 三段几何衰减模型^[11]描述几何扩散与震源距的关系：

对各频率点 f_k 重复以上步骤，得到一系列的 $b_1, b_2, b_3, Q(f_k)$ 和 $S_j(f_k)$ 。

对各频率点 f_k 得到的 b_1, b_2 和 b_3 值求平均得到 b_1, b_2 和 b_3 ，由各频率点的 $Q(f_k)$ 拟合，得到 $Q(f)=Q_0 f^n$ ，同时也得到了 $S_j(f)$ ^[11]。

3 计算结果及分析

利用上述方法资料，本文得到了渭河盆地及邻区非弹性衰减系数 $C(f)$ 和介质品质因子 Q 值与频率关系（图 2 和图 3），拟合得到渭河盆地及邻区 $Q(f)$ 与频率的关系为： $Q(f)=(623.0\pm 127)f^{0.479\pm 0.116}$ ，其误差范围是 95% 置信度下得到的。可见，渭河盆地及邻区 Q 值与频率关系与鄂尔多斯地块 $Q(f)=585.2f^{0.579[14]}$ 比较接近，与山西地区 $Q(f)=323.2f^{0.506[15]}$ 和甘肃东南区域 $Q(f)=374.0f^{0.308[16]}$ 相比， Q_0 明显较大，说明渭河盆地及邻区构造活动程度明显低于山西地区和甘肃东南区域。一般认为，构造活动相对稳定的地区 Q 值较高，构造活动强烈地区 Q 值低，介质均匀程度高， Q 值也较高^[17]。从本研究所用的地震、台站和地震路径分布（图 1）看，其主要覆盖区域为渭河构造体系，基本处于秦岭褶皱带的北缘。秦岭褶皱带由太古一元古代变质岩及燕山期花岗岩组成，基底统一，介质具有较好的整体性，局部运动水平差异较小，现代地震以中、小震为主，属弱震、少震区^[18]，这种构造特征造成了渭河盆地及邻区 Q 值相对较高。

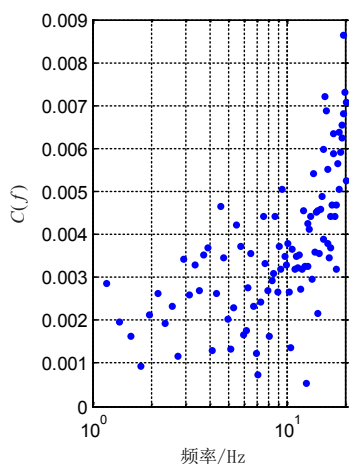
图2 非弹性衰减系数 $C(f)$ 与频率关系图

Fig.2 The relationship between inelastic attenuation coefficient $C(f)$ and frequency

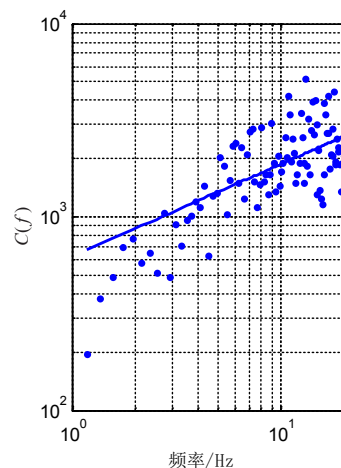
图3 介质品质因子 Q 值与频率关系图

Fig.3 The relationship between Q value and frequency

由反演得到的场地响应图(图4)可见,蓝田台的场地放大效应最强,在5~10 Hz 区间多个频点的场地响应值大于3,除蓝田台外,其余台站的场地响应值均在1附近变化,台站的各频率点场地响应值都小于3。总体而言,由于各台站均为基岩场地,故均未表现出明显的放大效应。周至台(ZHO)台多个频点的场地响应

值小于1,可能与其处于秦岭褶皱带,基岩整体性较好且地壳厚度较大有关。蓝田台场地响应与其它台站相比有所差别,其原因有待进一步研究。我们认为可能与其处于秦岭山区与渭河平原交界处的孤峰上,构造较为复杂^[19],可能受到局部地质构造和地形的影响有关。

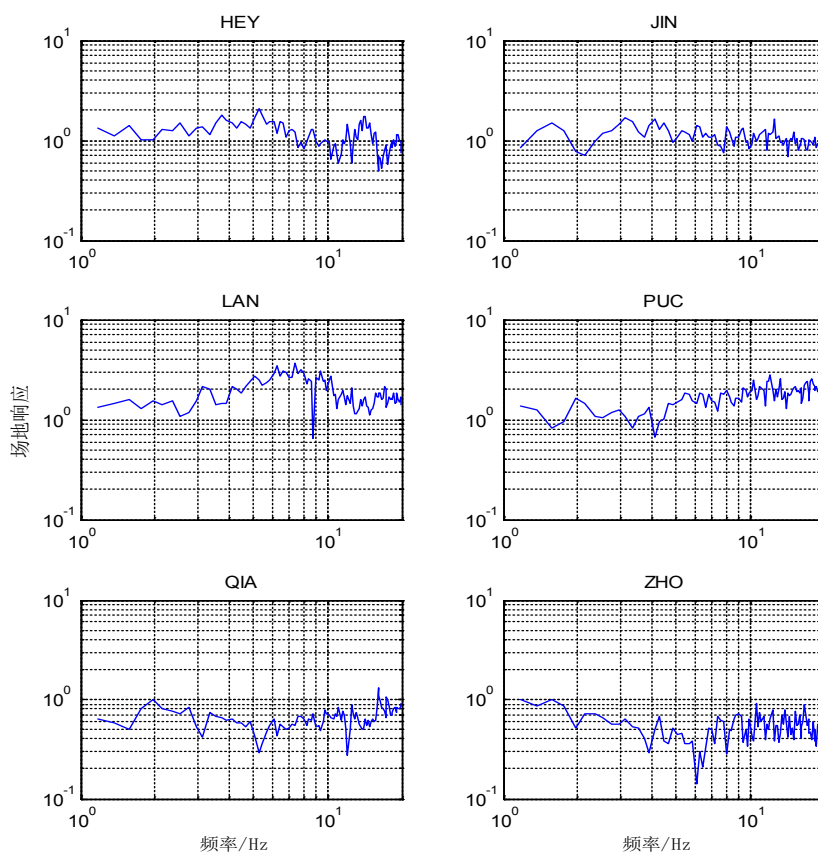


图4 台站场地响应

Fig.4 The site responses obtained by iteration inversion

4 结语

本文利用 2002—2012 年渭河盆地及邻区 20 个地震的 98 条地震资料,应用 Atkinson 法,采用遗传算法反演了渭河盆地及邻区的场地响应和非弹性衰减关系。研究结果表明,渭河盆地及邻区的 Q 值随频率 f 的关系为 $Q(f)=(623.0\pm 127)f^{0.479\pm 0.116}$,与鄂尔多斯地块比较接近,与山西地区和甘肃东南区域相比,渭河盆地及邻区 Q_0 明显较大,说明渭河盆地及邻区构造活动程度明显低于山西地区和甘肃东南区域。渭河盆地及邻区 6 个台站的场地响应值均在 1 附近变化,最大值不超过 4,未显示明显的放大效应,蓝田台场地响应与其它台站相比有所差别,其原因有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Singh SK, Lermo J, Domínguez T, et al. The Mexico earthquake of September 19, 1985—a study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill zone site[J]. *Earthquake Spectra*, 1988 (4): 653–673.
- [2] Iwata T, Irikura K. Source parameters of the 1983 Japan Sea earthquake sequence[J]. *J Phys Earth*, 1988 (36): 155–184.
- [3] Andrews D J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size[A]. // Das S, Boatwright J, Scholz C H eds. *Earthquake source mechanics*[C]. Washington, D. C.: AGU, 1986.
- [4] 周大鹏, 姜慧, 吴彬. 填海场地软弱夹层的地震响应特征分析[J]. *华南地震*, 2017, 37(2): 48–52.
- [5] 申学林, 魏贵春, 丁文秀, 等. 湖北地区地震震源参数研究[J]. *中国地震*, 2018, 34(4): 781–787.
- [6] Ö. T. Özmen, H. Yamanaka, H. E. Zaineh, et al. Estimation of site effects using strong motion data of BYTNet array in Turkey[J]. *J Seismol*, 2017, 21: 137–154.
- [7] Hartzell S H. Site response estimation from earthquake data[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1992 (82): 2308–2327.
- [8] Parolai S, Bindi D, Baumbach M, et al. Comparison of different site response estimation techniques using aftershocks of the 1999 Izmit Earthquake[J]. *Bull Seism Soc Am*, 2004, 94(3): 1096–1108.
- [9] 秦敏, 李丹宁, 张会苑, 等. 云南盈江地区地震波非弹性衰减 Q 值、场地响应及震源参数研究[J]. *地震研究*, 2018, 41(4): 583–593.
- [10] 赵燕杰. 福建仙游 $M_L 5.0$ 震群序列震源参数研究[J]. *华南地震*, 2017, 37(3): 74–80.
- [11] Atkinson G M, Mereu B F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. *Bull Seism Soc Am*, 1992, 82(5): 2014–2031.
- [12] Moya A, Aguirre J, Irikura K. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. *Bull Seism Soc Am*, 2000, 90(4): 977–992.
- [13] 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*, 2003, 25(2): 211–218.
- [14] 刘红桂, 啜永清, 陈书清, 等. 鄂尔多斯地块地壳内 S 波衰减特征的研究[J]. *地震学报*, 2005, 27(5): 488–497.
- [15] 啜永清, 苏燕, 贾建喜, 等. 山西地区非弹性衰减系数、场地响应和几种震源参数的研究[J]. *地震学报*, 2004, 26(4): 369–378.
- [16] 陈继锋, 赵翠萍, 杨立明, 等. 甘肃地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究[J]. *地震*, 2010, 30(1): 125–130.
- [17] 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(6): 1478–1489.
- [18] 王平, 邵辉成, 狄秀玲, 等. 关于 1998 年 1 月 5 日泾阳地震震级研究[J]. *高原地震*, 2010, 22(3): 30–32.
- [19] 狄秀玲, 王平, 张春芳. 陕西省数字地震台网与模拟地震台网地震参数比较[J]. *地震地磁观测与研究*, 2004, 25(2): 39–43.