

# 福建地区地震波非弹性衰减 $Q$ 值、场地响应及震源参数研究\*

李祖宁, 杨 贵, 陈 光

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

**摘要:** 利用 Atkinson 方法结合福建数字地震台网 28 个数字地震台记录的 70 个地震事件波形资料, 对福建地区的非弹性衰减系数进行研究, 得出福建地区介质平均  $Q$  值与频率  $f$  的关系式。利用 Moya 方法分别计算了福建台网“九五”和“十五”系统的台站场地响应, 共获得 37 个地震台站的场地响应。最后根据 Brune 模型计算了 2000 年 1 月 1 日至 2011 年 9 月 30 日福建台网记录的省内及临近海域  $M_L 2.5$  以上 157 次地震的震源参数, 这些地震  $M_L$  震级与地震矩  $M_0$  在单对数坐标下成线性关系, 与震源尺度及应力降没有明显相关性。

**关键词:** 福建地区; 地震波衰减; 台站场地响应; 几何扩散函数; 震源参数

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2012)03-0381-06

## 0 引言

数字地震记录资料包含了震源、地球内部介质以及台站场地响应等信息, 由地震波形资料研究地震波衰减、台站场地响应, 估算地震震源参数, 如地震矩、应力降、破裂半径等, 对探索地震震源性质、进行地震预测以及分析地震危险性都具有十分重要的意义。

要求得震源参数, 就必须在地震观测谱中精确扣除台站场地响应、传播路径效应、仪器响应及噪声的影响。Atkinson 和 Mereu (1992) 利用多台、多地震联合反演的方法研究了加拿大东南地区地震波的衰减, 该方法对于计算几何扩散系数和非弹性衰减有比较好的结果。Moya 和 Aguirre (2000) 假定已知几何扩散和非弹性衰减, 并假设同一台站对不同地震的场地响应相同, 利用遗传算法多台多地震联合反演, 较好求得震源谱参数和场地响应。这两种方法已被广泛应用于我国许多区域的地震台网的非弹性衰减、台站场地响应和震源参数的计算(高立新, 郑斯华, 2004; 王卫东等, 2004; 邹振轩, 2006; 周连庆等, 2008; 杨晶琼等, 2010)。

福建地震台网“九五”系统由 29 个测震台站组成, 从 1998 年 10 月 1 日正式运行; “十五”网

络项目测震分项目完成后, 台站数增加到 41 个, 并于 2008 年 10 月 1 日开始正式运行。台网的建设与升级, 提高了地震的监测能力和监测水平, 记录了丰富的中小地震资料, 还为测定中小地震的震源参数以及地壳介质参数提供了基础。本文应用福建台网“九五”系统记录的 70 个地震事件波形资料, 采用 Atkinson 和 Mereu (1992) 多台、多地震联合反演的方法计算了福建地区地壳平均非弹性衰减, 再用 Moya 和 Aguirre (2000) 提出的方法, 分别采用“九五”和“十五”系统记录的地震事件波形资料反演了相应的台站场地响应, 最后根据 Brune 模型 (Brune, 1970) 计算了 2000 年 1 月 1 日至 2011 年 9 月 30 日, 福建地震台网记录的省内及临近海域  $M_L 2.5$  以上 157 次地震的震源参数, 并对结果进行了讨论。

## 1 资料选取与预处理

笔者整理了福建省数字地震台网 2000 年 1 月 1 日至 2008 年 9 月 30 日“九五”系统, 2008 年 10 月 1 日至 2011 年 9 月 30 日“十五”系统记录的福建及临近海域  $M_L 2.5$  以上地震波形及目录、震相数据、仪器传递函数、台站信息等。在整理仪器传递函数时, 使用仪器出厂值, 确保台站仪器传递函数的正确。

\* 收稿日期: 2011-11-11.

基金项目: 地震行业基金“新参数地震目录及其在地震预报中的应用(20070826)”资助.

在地震波谱资料处理过程中，通常选取从 S 波开始到包括 S 波总能量 90% 的时间段，即“S 窗”。对同一次地震，随着震中距的改变，各台记录地震的“S 窗”长度也不同，一般这两者成正比关系。利用福建地震台网 29 个台站记录的  $M_L2.5$  以上地震的 344 条到时记录和包含 S 波 90% 能量的截止时间，获得“S 波”窗长  $t_{(Se-Sn)}$  与直达波 P 和 S 波的到时差  $t_{(Sg-Pg)}$  的关系为  $t_{(Se-Sn)} = 0.60t_{(Sg-Pg)} + 13.23$ 。获得“S 窗”内的波形数据后，采用平移窗谱方法获得稳定的观测信号的傅立叶谱，将“S 窗”内的波形分为若干个包含有 256 个采样点的小段，使相邻小段之间有 50% 重叠，在每小段波形的起始和末尾加上 5% 的余旋边瓣，通过快速傅立叶变换得到每一小段的傅立叶谱，并对其进行仪器响应校正和噪声校正，最后在频率域内合成得到 S 波总的谱振幅。

在计算福建区域平均非弹性衰减系数时，由于福建多属丘陵与山地地区，仅闽南少部分地区为平原，地表及地貌特征变化不明显，而且福建省的面积也相对较小，因此只分一个区进行  $Q$  值计算。采用分区范围为矩形： $21^{\circ} \sim 29^{\circ}N$ ， $115^{\circ} \sim 121^{\circ}E$ 。在资料选取时，考虑地震和台站的空间分布尽可能均匀，地震射线能较好覆盖研究区域，

并且地震的信噪比要大于 2，地震记录满足信噪比的台站数要大于 3 个，每个台站至少要记录到 3 次地震，满足要求的地震和台站射线分布足够多。最后选取了 2000 ~ 2007 年福建数字地震台网记录到的福建及临近海域  $M_L2.5$  以上的 70 个地震事件，实际用于计算的地震记录为 561 条。图 1 给出了参加计算的地震震中、台站分布与射线路径分布图，从图中可以看出，地震射线基本覆盖了福建省及其临近海域的大部分地区，但福建省北部地震和台站均相对较稀少，射线覆盖较差，计算的结果可能只代表了福建中南部地区介质的平均  $Q$  值。

## 2 计算方法和结果

### 2.1 品质因子 $Q$ 值

为了准确扣除自由表面效应，将东西向和南北向记录的波形经旋转获得 S 波的 SH 分量，在扣除仪器响应、噪声和自由表面效应后，第  $i$  个地震在第  $j$  个台站观测的剪切波傅立叶谱 SH 分量可表示如下：

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

式中， $A_{ij}(f)$  是第  $j$  个台站观测到的第  $i$  个地震的傅立叶谱振幅； $A_{i0}(f)$  为第  $i$  个地震的震源谱振幅； $R_{ij}$  为震源距； $G(R_{ij})$  为几何扩散衰减函数； $S_j(f)$  为第  $j$  个台站的场地响应； $Q(f)$  为品质因子； $v$  为 S 波速度。

将式 (1) 两边取对数并令  $c(f) = \lg(e) \cdot \pi f / [Q(f)v]$ ，得到

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

式中， $c(f)$  为非弹性衰减系数；本文采用三段线性回归衰减模型 (Atkinson, Mereu, 1992)。

求解非弹性系数的原理如下 (Atkinson, Mereu, 1992)：首先假定所有台站的场地响应均为 1 (即不考虑场地响应)，在非弹性衰减系数值给定的情况下，对各台站记录进行几何扩散和衰减校正，得到相应地震的震源谱振幅，通过调整  $c$  值使各台站记录得到的同一地震的震源谱振幅残差最小；其次设定某次地震的震源谱是不同台站记录获得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

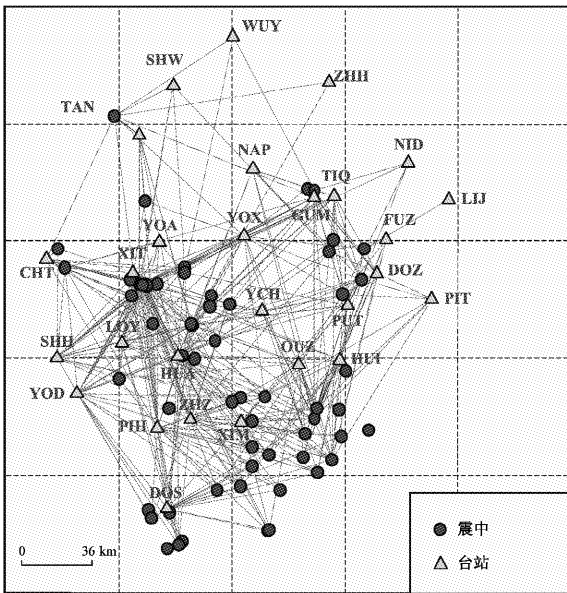


图 1 计算  $Q$  值和场地响应所选用地震的震中和射线分布图

Fig. 1 Epicenters of earthquakes which are selected to calculate  $Q$ -value and site response and ray distribution

与该地震的震源谱振幅对数之差的平均值；最后考虑各台站得到的场地响应，重新计算各台站经过校正后的震源谱振幅，通过调整  $c$  值，使同一地震得到的震源谱的残差最小，通过反复迭代反演，可得到该区域的非弹性衰减系数，进而得到区域介质的品质因子。

利用上述方法得到福建地区介质品质因子  $Q$  值与频率  $f$  的关系（图 2），且拟合结果较好，介质品质因子与频率的关系为  $Q(f) = 366.50f^{0.4282}$ ，对比李祖宁等（2005）所得的结果  $Q(f) = 504.1f^{0.332}$ ，可以发现  $Q$  值减小了，但衰减系数增大。本文得出的结果可能与本次反演所使用的地震样本更多，地震射线在福建南部覆盖更密集有关，因为福建南部平原和盆地较北部地区分布更广，其沉积层覆盖更厚而导致  $Q$  值的下降。

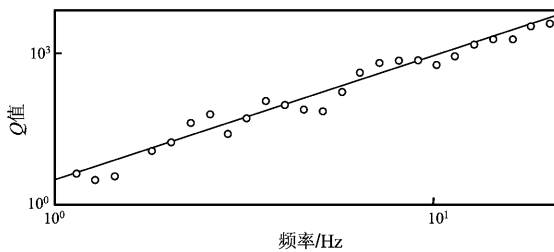


图 2 福建地区介质品质因子与频率的关系

Fig. 2 Relationship between  $Q$ -value and frequency in Fujian area

介质的品质因子  $Q$  值是地球介质的重要物理参数。反映了地震波在地球介质中通过时能量的耗损特征。地震波在  $Q$  值较大的介质里传播时，能量耗损较小，地震波衰减较慢。一般构造活动较稳定的地区，介质的均匀程度相对较高， $Q$  值较高；构造活动强烈的地区， $Q$  值较小。与地震活动较强烈的地区如云南  $Q(f) = 238.0f^{0.388}$ （周连庆等，2008）相比，福建地区  $Q$  值较高；而与周边地震活跃度不高的浙江  $Q(f) = 361.00f^{0.458}$ （邹振轩，2006），广东省  $Q(f) = 437.50f^{0.3937}$ ， $Q(f) = 423.60f^{0.3912}$ （康英等，2010）相比， $Q$  值相对接近。因此笔者认为反演得到的福建地区  $Q$  值较准确地反映了该区构造相对稳定及地震活动性相对较弱的特征，结果较为合理。

## 2.2 场地响应的确定

采用 Moya 和 Aguirre（2000）提出的方法计算场地响应：首先选择 Brune（1970）的  $\omega^2$  震源谱

模型，假设每一个台站对于不同地震事件的场地响应相同，应用遗传算法，通过调整震源谱参数，使得不同事件得到的同一台站场地响应的标准差最小。在获得震源谱参数后，利用经过几何扩散和非弹性衰减校正后的位移振幅谱与震源谱对比就可以得到每个台站的场地响应。

首先对第  $i$  个地震在第  $j$  个台站观测到的  $S$  波傅立叶振幅谱，进行几何扩散与衰减的校正：

$$O_{ij}^{\text{corr}}(f) = O_{ij}(f) R_{ij} \exp\left(\frac{\pi R_{ij} f}{Q(f) v}\right) / 2\pi f. \quad (3)$$

通过设定每个震源的震源谱参数（震源谱的低频水平和拐角频率），从而得到每次地震的理论位移震源谱。在第  $k$  个频率点，由第  $i$  次地震事件对第  $j$  个台站的场地响应为

$$G_{ij}(f_k) = \frac{O_{ij}^{\text{corr}}(f_k)}{S_i(f_k)}. \quad (4)$$

式中， $O_{ij}^{\text{corr}}(f_k)$  为经过校正后的振幅谱； $S_i(f_k) = \frac{\Omega_{0i}}{1 + (f_k/f_c)^2}$  为震源谱； $\Omega_0$  和  $f_c$  分别为频谱的低频水平和拐角频率。

计算在第  $k$  个频率点上第  $j$  个台站由不同地震得到的场地响应的平均值和标准偏差，采用遗传算法，通过调整每次地震的震源谱参数，使式（5）的值最小。

$$\text{sum} = \sum_j \sum_k \frac{\text{std}[G_{ij}(f_k)]}{\text{mean}[G_{ij}(f_k)]}. \quad (5)$$

（对  $i$  求平均值和标准差）

式中， $\text{std}[G_{ij}(f_k)]$  为场地响应的标准差； $\text{mean}[G_{ij}(f_k)]$  为场地响应的平均值。

在反演台站场地响应时，应用“九五”与“十五”系统记录数据分别进行反演。“九五”系统反演使用了反演福建地区介质品质因子时使用的 70 个地震事件；“十五”系统由于运行时间短，记录到符合计算条件的地震少，仅使用了 12 个地震事件。2 个系统的反演结果见图 3。

2 次反演共得到 37 个台站的场地响应，目前 YCTM 台已停测，其它 36 个台仍在“十五”系统运行。使用“九五”系统的计算得到 28 个台的场地响应，使用“十五”系统得到 24 个台的场地响

应, 2 次反演都有结果的有 15 个台。比较这 15 个相同台的 2 次反演结果, 有部分台站 2 次计算的场地响应相近且值基本在 1 附近, 如 PTTC、GTSK、HAHF、YAXT, 尤其是 PTTC 台场地响应基本稳定为 1, 是条件最好的场地, 这与其致密的花岗岩地

基是相符的; 另有部分台站在“九五”系统中计算的场地响应比“十五”系统的大很多, “十五”系统计算的部分场地响应偏小, 可能与地震样本少, 射线、台站布局不理想有关, 因此“九五”系统计算的结果更可靠。

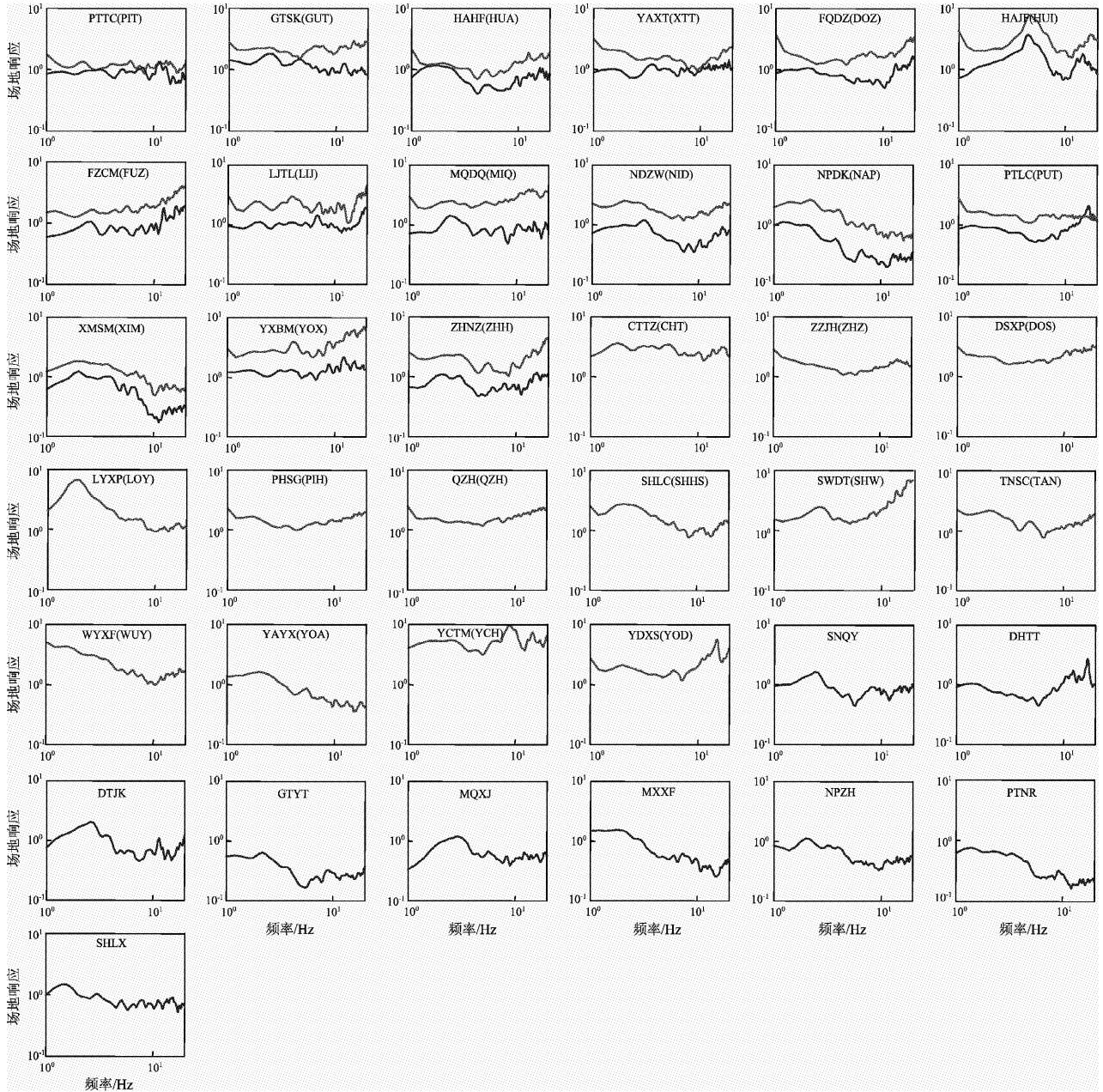


图3 福建地震台网台站场地响应平均值

(红线为采用“九五”系统记录的数据进行计算的结果, 蓝线为采用“十五”系统记录的数据进行计算的结果, 台站代码为“十五”使用代码, 括号内代码为“九五”系统使用代码)

Fig. 3 Average site response of the stations in Fujian seismic network

(Red line is the average site response of stations in Ninth Five-year Plan, blue line is the average site response of stations in Tenth Five-year Plan, the station codes represent the Tenth Five-year Plan stations, while the stations code of Ninth Five-year Plan are in brackets)

2 个系统计算的台站场地响应可看出各台站的场地响应都与频率有关，并且随频率的增加，有的呈较稳定值，有的呈高频衰减状，有的呈高频放大状，比较突出的是 HAJF 和 LYXP 这两个台站的场地响应在某些频带上的放大效应较大，其中 HAJF 台站为花岗岩岩性，但是比较破碎，而 LYXP 台站所在的地区溶洞比较发育。上述的台站响应计算结果已应用于福建地震台网震源参数的计算，其中使用“九五”系统计算的场地响应来计算“九五”系统的震源参数；而“十五”系统震源参数计算时，台站场地响应使用由“九五”系统计算的 27 个（YCTM 除外）台站场地响应和“十五”系统计算得到的新增 9 个台站的场地响应。

2.3 震源参数计算结果

根据 Brune (1970) 圆盘型震源模型，求解中小地震震源参数的公式，应用上面求得的震源谱参数，可以求得相应的震源参数。

对于地震矩：

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{2R_{\theta\phi}} \tag{6}$$

式中， $\rho$  是密度，取为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ； $V_s$  是 S 波速度，取为  $3.55 \text{ km/s}$ ； $R_{\theta\phi}$  是 S 波的辐射花样系数，对于 SH 波平均取值为  $\sqrt{2/5}$ 。

震源半径：

$$r = \frac{2.34V_s}{2\pi f_c} \tag{7}$$

应力降：

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \tag{8}$$

矩震级（Kanamori, 1977）：

$$M_w = \frac{2}{3}\lg M_0 - 6.033. \tag{9}$$

笔者计算了“九五”和“十五”系统记录的省内及临近海域  $M_L 2.5$  以上 157 次地震的震源参数。这些地震的震级分布为  $M_L 2.5 \sim 4.7$ ，标量地震矩为  $1.60 \times 10^{12} \sim 4.19 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ ，应力降值为  $0.12 \sim 10.61 \text{ MPa}$ ，震源半径为  $86 \sim 347 \text{ m}$ 。在单

对数坐标下，地震矩与地方震震级  $M_L$  有很好的线性关系，用最小二乘法拟合其关系式为  $\lg M_0 = 0.99M_L + 9.91$ 。与李祖宁等（2005）所得出的  $\lg M_0 = 1.05M_L + 9.88$  相近。震源尺度与震级虽有随震级增大相应增大的趋势，且相关性不大；应力降也有随震级增大而增加的趋势，但相关性也不明显，见图 4。

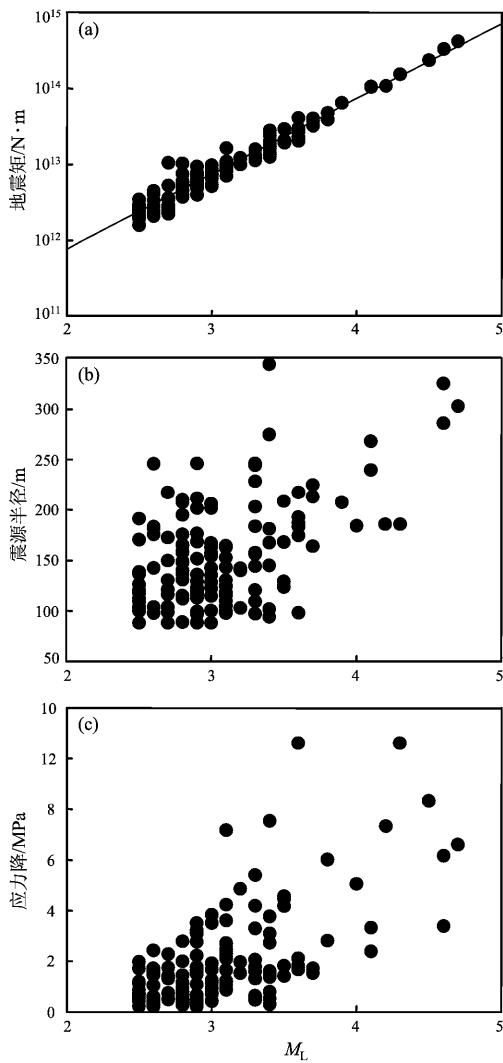


图 4 地震矩、震源半径、应力降与震级  $M_L$  关系图  
Fig. 4 Relationship between seismic moment, seismic source radius, stress drop and magnitude  $M_L$

3 结论与讨论

本文利用 Atkinson 和 Mereu (1992) 的方法反演了福建地区地壳的  $Q$  值与频率的关系为  $Q(f) = 366.50f^{0.4282}$ ；采用 Moya 和 Aguirre (2000) 的方

法计算了台站的场地响应,得到现运行的“十五”系统 36 个台站的场地响应;根据 Brune (1970) 的震源模型,计算了福建省内及临近海域  $M_L \geq 2.5$  以上 157 次地震的震源参数。

反演所得的福建地区地壳介质的品质因子,由于受台站布局与震中分布的影响,在局部地区如闽北一带,地震射线覆盖较差,从射线覆盖范围看,计算的结果可能只代表了福建中南部地区介质的平均  $Q$  值。该结果与周边省反演的  $Q$  值相近,但明显大于地震活动强烈地区的  $Q$  值,反映了该区构造相对稳定及地震活动性较弱的特征。

反演所得的 37 个台站场地响应,大部分都有一定的放大效应,有的相对稳定,有的在某些频段放大效应较明显,这可能与台站的台基情况有关。PTTC 台是目前场地最好的台站,而 HAJF 和 LYXP 两个台站由于台基较破碎和周边溶洞比较发育,场地的放大效应较明显。

反演所得的 157 次地震的震源参数显示,地震矩的单对数与地震的震级  $M_L$  有较好的线性关系,而震源半径、应力降与震级虽有随震级增大而增大的趋势,但相关性不大。

随着福建地震台网“十一五”的建设,台点密度更高,布局更加合理,能记录更多的地震事件,可以开展计算福建区域更加精细的区域介质品质因子,并补充新增台点的场地响应。

本文所用程序由中国地震局地震预测研究所赵翠萍研究员和华卫博士提供,他们在理论与方法上给予诸多指导和帮助,在此深表谢意。

## 参考文献:

- 高立新,郑斯华. 2004. 内蒙古中西部地区中小地震震源参数反演和相互关系探讨[J]. 地震研究, 27(4): 296-300.
- 康英,吕金水,杨选,等. 2010. 广东新地震参数目录的编制[J]. 华南地震, 30(增刊): 19-27.
- 李祖宁,周峰嵘,林树,等. 2005. 利用数字地震台网资料联合反演福建地区  $Q$  值、场地响应和震源参数[J]. 地震地质, 27(3): 437-445.
- 王卫东,张永志,狄秀玲,等. 2004. 陕西省关中及邻区地震的震源参数研究[J]. 地震研究, 27(4): 330-333.
- 杨晶琼,杨周胜,刘丽芳,等. 2010. 2008 年盈江 5.9 级地震序列震源参数研究[J]. 地震研究, 33(4): 308-312.
- 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): 1-7.
- 邹振轩. 2006. 应用 Moya 方法反演浙江地震震源参数和台站场地响应[J]. 东北地震研究, 22(1): 40-46.
- 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 spectrum of seismic shear waves from earthquakes[J]. JGR, 75(26): 4997-5009.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquake[J]. JGR, 82(20): 2981-2987.
- Moya C A, Aguirre J. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. BSSA, 90(4): 977-992.

# Research on Inelastic Attenuation $Q$ - value, Site Response and Source Parameters in Fujian Region

LI Zu-ning, YANG Gui, CHEN Guang

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

## Abstract

Firstly, using 70 seismic events waveform recorded by 28 digital seismic stations in Fujian digital seismic network, we calculated the inelastic attenuation coefficient by Atkinson's method and obtained the relationship between average  $Q$  - value and frequency in Fujian region. Secondly, we calculated site responses of stations in the "Ninth Five-years" and "Tenth Five-years" plans respectively in Fujian digital seismic network by Moya Method, and obtained site responses of 37 stations. Finally, according to Brune model, we calculated the source parameters of 157  $M_L \geq 2.5$  earthquakes which is recorded by Fujian digital seismic network occurred in Fujian and its adjacent sea area from Jan. 1, 2000 to Sep. 3, 2011. There was a linear relationship between  $M_L$  of these earthquakes and seismic moment  $M_0$  in the single-logarithmic coordinates, but there wasn't evident correlation between  $M_L$  and source scale, stress drop.

**Key words:** Fujian region; seismic wave attenuation; site response of station; geometric attenuation function; source parameters