

赣南地区 P 波、S 波随频率衰减关系研究*

汤兰荣, 董非非, 曾新福, 项月文

(江西省地震局, 江西 南昌 330039)

摘要: 利用发生在赣南地区的 183 次 $M_L \geq 1.0$ 地震资料, 采用尾波归一化方法对寻乌、安远和龙南 3 个台站的 P 波、S 波品质因子 Q_P 和 Q_S 值进行了计算, 分析了该地区地壳介质的衰减特征。研究表明, 寻乌 (流逝时间 35 s) 和龙南台 (流逝时间 40 s) Q_P 值较可靠且值相近, 拟合平均值为 $Q_P(f) = (20.76 + 1.67) * f^{(1.03 \pm 0.04)}$, 寻乌台和安远台 (流逝时间均为 21 s) 拟合平均值为 $Q_S(f) = (18.86 + 1.46) * f^{(0.84 \pm 0.04)}$ 。 Q 值总体呈现低 Q_0 和高 η 值的特点, 这是构造运动活跃地区的特征体现, 也和该地区中强地震比较活跃的特征相符。

关键词: 尾波归一化; P 波衰减; S 波衰减; Q 值; 赣南地区

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)01-0131-06

0 引言

Q 值是量度地球介质对地震波衰减 (Q^{-1}) 的基本物理参数之一, 是描述地壳介质非均匀程度的确定性指标 (Roecker *et al.*, 1982), Q 值的大小及其对频率的依赖程度反映了介质的非均匀性和非弹性特征, 既包含介质对地震波能量的吸收, 也包含了对地震波的散射, 因此, 不同的构造区有不同的衰减特性。由于品质因子与区域构造活动、地震活动密切相关, 可以作为评价区域构造活动的基本指标, 用以分析区域地震活动水平。

用于计算 Q 值的方法很多, 目前国内外利用天然地震的体波、尾波、Lg 波开展地壳介质品质因子 Q 值研究应用比较广泛的方法主要有: 多台多震联合反演方法计算 S 波衰减 (Atkinson, Mereu, 1992; Singh *et al.*, 1999; 黄玉龙等, 2003)、叠加谱比 (Xie, Mitchell, 1990)、单次散射模型的尾波 Q 值计算方法 (Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977) 和尾波归一化方法 (Aki, 1980; Sato, 1980; Yoshimoto *et al.*, 1993; Sharma *et al.*, 2007; Lorenzo *et al.*, 2013) 等, 李祖宁等 (2012) 利用 Atkinson 方法研究得出福建地区介质平均 Q 值与 f 的关系式。本文采用尾波归一化方法研究计算 P 波和 S 波的衰减, 王勤彩等 (2005) 首次利用此方法得到云南地区的 P 波、S 波衰减规

律, 华卫等 (2009) 和董非非等 (2013) 分别对龙滩水库地区和赣西北地区 P 波、S 波随频率的衰减关系进行了研究。

赣南地区属于东南沿海地区, 地质构造比较复杂, 是中强地震比较活跃的区域。江西省“十五”数字化地震观测网络项目完成后, 积累了大量的数字地震资料, 这为研究赣南地区介质衰减特征提供了条件。本文使用 2009 年 1 月~2013 年 2 月赣南地区地震波形资料, 对 P、S 波衰减特征进行研究, 从而对地震预报、工程抗震及减小地震灾害提供一些有明确物理意义的信息。

1 方法原理

Aki (1980) 首先考虑通过一个记录中的 S 波谱振幅与尾波谱振幅之比, 以消除震源和台站场地项, 用 S 波尾波归一化方法得到日本关东地区与频率有关的 S 波衰减; Yoshimoto 等 (1993) 在上述研究的基础上, 指出鉴于 P 波谱振幅与 S 波谱振幅成比例, 假设在很小的震级范围, 很窄的频带内, 就可以把此方法扩展到 P 波, 得到能同时测定 P 波、S 波衰减的体波归一化方法。

对于地方震, 在扣除了噪音、仪器响应和台站场地响应后, S 波谱振幅为

$$A_S(f) = S(f, \theta) R^{-1} e^{-\frac{\pi R f}{\beta Q_S(f)}} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2014-04-22.

基金项目: 地震科技星火计划项目 (XH12027) 资助.

式中, $S(f, \theta)$ 为包含了震源辐射图像效应的震源谱, R 代表震源矩, β 表示 S 波速度。扣除噪音、仪器响应和台站场地效应后, 对于地方震, 尾波的振幅可用式 (2) 表示 (Aki, Chouet, 1975), 只是这时 $S(f)$ 仅为震源谱。

$$A_c(f, t_c) = S(f) C(f, t_c). \quad (2)$$

$$C(f, t_c) = t_c^{-1} e^{-\frac{\pi f}{Q_s(f)} t_c}. \quad (3)$$

式中, t_c 为尾波的走时, 即从地震发震时间算起至尾波测量的时间, 一般 $t_c > 2R/\beta$ 。

将式 (1) 除以式 (2), 并取对数, 整理后得

$$\ln \frac{A_s(f) R}{A_c(f, t_c)} = \ln \frac{S(f, \theta)}{S(f)} - \ln C(f, t) - \frac{\pi f}{\beta Q_s(f)} R. \quad (4)$$

为了消除震源辐射图像的影响, 即消去上式右边的第一项, 对展布在 $R \pm \Delta R$ 范围 (R 不同, θ 不同) 的多个地震求平均, 即对不同的 R 进行回归计算 (用 $\langle \rangle$ 表示), 即有

$$\langle \ln \frac{A_s(f) R}{A_c(f, t_c)} \rangle_{(R \pm \Delta R)} = -\ln C(f, t_c) - \frac{\pi f}{\beta Q_s(f)} R. \quad (5)$$

根据式 (3), $C(f, t_c)$ 仅是频率和走时 t_c 的函数, 与震源和台站的位置无关, 故当对所有地震都取同样的走时 t_c 时, 则对某中心频率 f_k , $\ln C(f_k, t_c)$ 为常数, 这里令

$$a = -\ln C(f_k, t_c); \quad b = \frac{\pi f_k}{\beta Q_s(f_k)}. \quad (6)$$

即有

$$\langle \ln \frac{A_s(f_k) R}{A_c(f_k, t_c)} \rangle_{(R \pm \Delta R)} = a - bR. \quad (7)$$

在对地震记录滤波后, 对各中心频点 f_k 在 S 波窗和尾波窗 (对于每次地震, t_c 相同, 在 t_c 前后取一定长度的尾波记录) 分别计算 S 波和尾波的均方根振幅, 然后对式 (7), 以 R 为变量, 用最小二乘法进行回归计算, 得到斜率 b , 从而得到

$$Q_s(f_k) = \frac{\pi f_k}{b\beta}. \quad (8)$$

由一系列的 $Q_s(f_k)$ 即得到 $Q_s(f) = Q_0 f^n$ 。由于 P 波的谱振幅 $A_p(f)$ 与 S 波谱振幅 $A_s(f)$ 成正比, 故有 $A_p(f) \sim A_c(f)$, 于是用该方法也可求得 P 波的 Q 值 $Q_p(f)$ 。

2 资料选取与处理

赣南“十五”数字地震台网于 2007 年 10 月开始投入运行, 有数字地震台站 7 个, 运行初期观测波形数据不够完整, 2009 年 1 月开始观测资料较齐全, 因此选用 2009 年 1 月~2013 年 2 月赣南及邻区 $M_L \geq 1.0$ 地震 (图 1) 进行研究。由于尾波归一化方法对地震数量和地震相对台站分布有一定要求, 安远 (ANY)、龙南 (LON) 和寻乌 (XUW) 3 个台站周边地区小震活动较活跃, 断裂构造发育, 在赣南地区具有代表性, 因此选这三个台站进行 Q_p 和 Q_s 研究。寻乌和龙南台地震计为 KS-2000 宽频带速度地震计 (平坦范围 120 s ~ 50 Hz), 安远台地震计为 BBVS-60 宽频带速度地震计 (平坦范围 60 s ~ 40 Hz), 3 个台站数采型号均为 EDAS-24IP, 采样率为 100 sps。

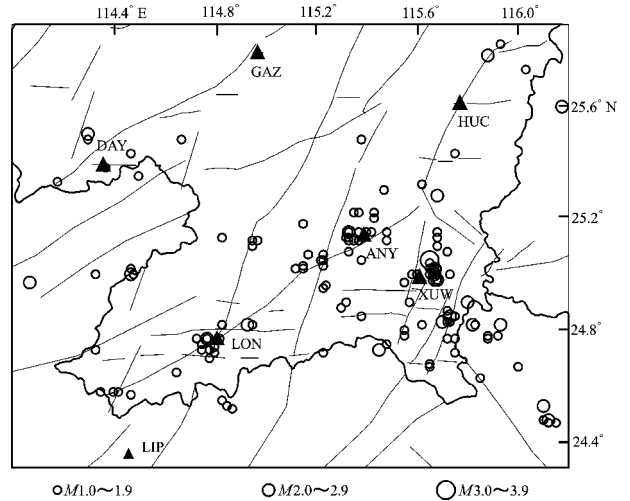


图 1 赣南地区台站和地震活动分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations and seismicity in south of Jiangxi Province

对台站和地震初步选定后, 首先在 5 个不同频带范围内利用巴特沃斯带通滤波器进行滤波, 在此基础上, 选取尾波信号大于 2 倍噪声的地震计算每个台站的尾波归一化值, 由于地震到各台站的距离不相同, 每个台站选取的尾波结束的流逝时间也不一样, 3 个台站选用的流逝时间在 21 ~ 40 s 之间, 求出每个台站的 Q_p 、 Q_s 后, 再计算拟合平均值。

3 计算结果与分析

表 1、2 给出了寻乌、安远和龙南台各频带的 P

波、S 波衰减值、所用地震数以及衰减与频率关系的拟合结果。图 2 以寻乌台为例展示了各频带上经尾波归一化后 S 波振幅与震源距关系，图 3 给出了该台站得到的 S 波 Q 值拟合曲线，图中显示 Q 值随频率增大而增大， Q 值与频率呈现较强的依赖关系。

由于计算方法对地震相对台站的分布和波形信噪比要求较高，挑选出来参与计算的地震波形

数远远少于准备的基础波形资料。计算安远台采用的流逝时间均为 21 s，由于多数地震距离龙南台更远，所以龙南台 Q_p 和 Q_s 流逝时间值取值更大，均为 40 s。为了保证拟合质量，寻乌台计算 Q_p 和 Q_s 选用的流逝时间不同，计算 Q_p 的流逝时间为 35 s，和龙南台相近，计算 Q_s 的流逝时间为 21 s，和安远台相同。

表 1 3 个台站各频带的 P 波 Q 值结果 ($M_L \geq 1.0$)

Tab. 1 Q value of P wave at different frequencies of three seismic satations ($M_L \geq 1.0$)

台站	流逝时间/s	1 ~ 2 Hz	2 ~ 4 Hz	4 ~ 8 Hz	8 ~ 16 Hz	16 ~ 32 Hz	Q_0	η	地震数
XUW	35	29.33 ± 0.80	102.60 ± 1.34	167.19 ± 1.61	346.62 ± 1.17	441.25 ± 0.85	27.03 ± 3.31	0.96 ± 0.06	8
ANY	21	7.00 ± 0.89	14.91 ± 0.63	23.98 ± 0.74	46.97 ± 0.74	100.65 ± 0.55	4.87 ± 0.17	0.93 ± 0.02	21
LON	40	21.94 ± 0.80	62.13 ± 0.97	102.09 ± 0.71	225.92 ± 0.76	542.63 ± 0.74	15.18 ± 0.83	1.11 ± 0.03	14

表 2 3 个台站各频带的 S 波 Q 值结果 ($M_L \geq 1.0$)

Tab. 2 Q value of S wave at different frequencies of three seismic stations ($M_L \geq 1.0$)

台站	流逝时间/s	1 ~ 2 Hz	2 ~ 4 Hz	4 ~ 8 Hz	8 ~ 16 Hz	16 ~ 32 Hz	Q_0	η	地震数
XUW	21	23.30 ± 0.88	55.83 ± 0.58	76.12 ± 0.62	132.81 ± 0.66	303.94 ± 0.67	17.64 ± 1.16	0.87 ± 0.03	29
ANY	21	25.67 ± 0.85	63.25 ± 0.77	78.23 ± 0.77	123.33 ± 0.56	309.62 ± 0.56	20.09 ± 1.79	0.81 ± 0.04	21
LON	40	64.58 ± 0.98	136.84 ± 0.90	431.37 ± 0.67	597.40 ± 0.62	1289.67 ± 0.84	45.28 ± 3.84	1.08 ± 0.04	14

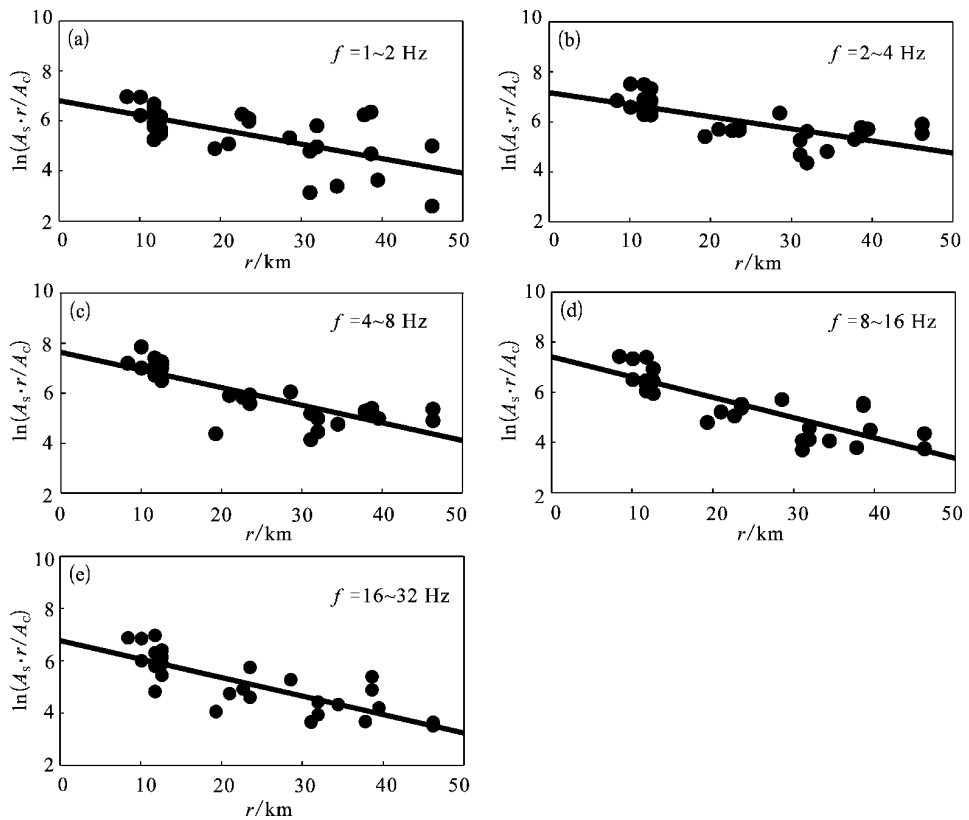


图 2 寻乌台经尾波归一化后 S 波振幅随震源距的衰减

Fig. 2 The peak amplitude of S wave attenuated with epicenter distance derived by using the extended coda-normalization method at Xunwu Station

流逝时间的大小对于 Q 值有一定影响, 选取寻乌台 Q_s 计算结果为例, 随着流逝时间的增大, S 波尾波归一化 Q_0 值有逐渐增大的趋势 (表 3), 6 个流逝时间对应的 P 波 Q_0 中, 有一个点偏离这种趋势, 去掉该点后拟合结果线性关系较好 (图 4)。由此可以推断表 1 中安远台 P 波 Q_0 值明显低于龙南和寻乌台的 Q_0 值, 可能与选用的流逝时间

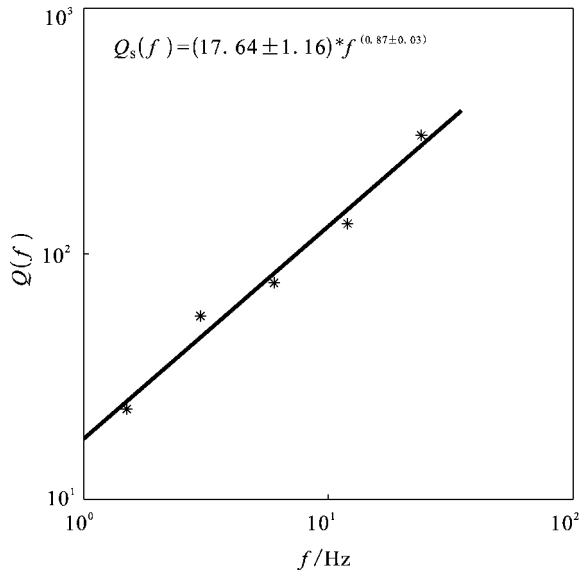


图 3 寻乌台 S 波尾波归一化 Q 值频率曲线图
Fig. 3 Q -value frequency curve for S wave after coda-normalization at Xunwu Station

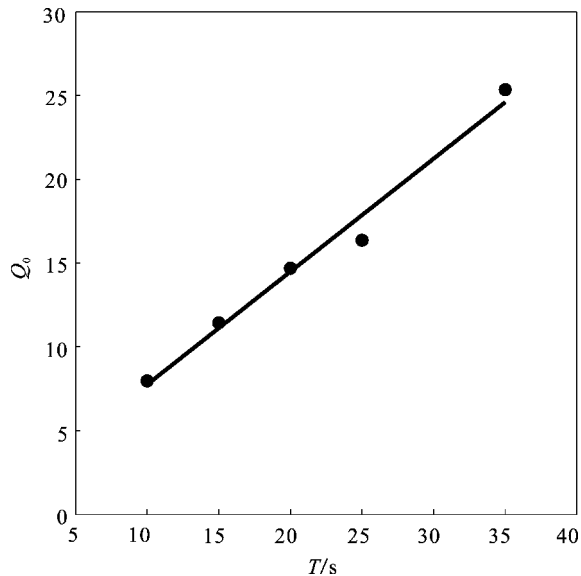


图 4 寻乌台 S 波尾波归一化 Q_0 值随流逝时间的变化
Fig. 4 Q_0 value varied with lapse time for S wave derived by using the extended coda-normalization method at Xunwu Station

明显小于寻乌和龙南台, 从而导致选用地震的震中距范围较小有关。表 2 中龙南台 Q_s 值明显大于寻乌台和安远台的 Q_s 值, 可能是与龙南台选取的流逝时间较大, 从而选用地震震中距范围较大有关。

表 3 寻乌台不同流逝时间对应的 S 波尾波归一化 Q_0 值

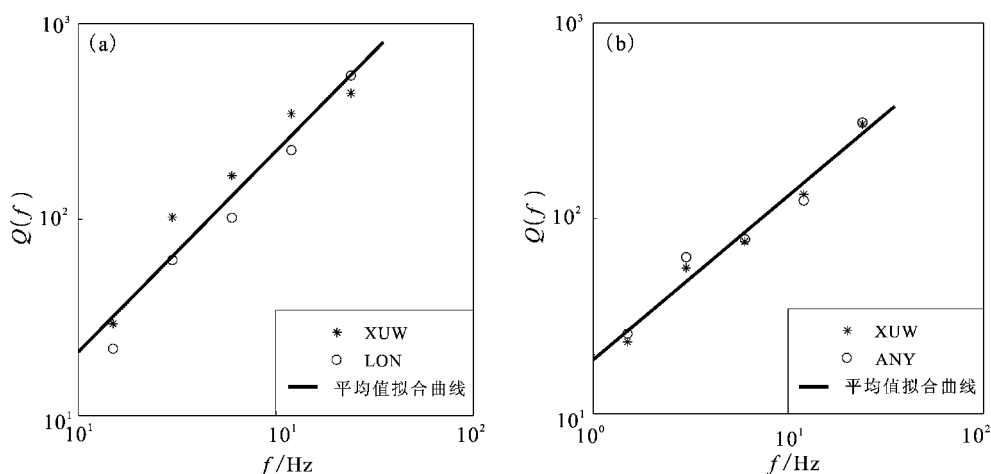
Tab. 3 Q_0 value for S wave in different lapse time derived by using the extended coda-normalization method at Xunwu Station

流逝时间/s	所用地震数	Q_0
10	24	7.98 ± 1.75
15	27	11.44 ± 0.89
20	28	14.69 ± 0.91
25	22	16.37 ± 1.79
30	12	10.77 ± 0.32
35	9	25.35 ± 2.57

对于 Q 值平均值的计算, 考虑到流逝时间对结果的影响以及各台站拟合结果的可靠性, 选用流逝时间相近的寻乌台 (35 s) 和龙南台 (40 s), 将各频点的 P 波 Q 值平均后重新拟合, 得到寻乌龙南地区的 P 波平均 Q 值 $Q_p(f) = (20.76 + 1.67) * f^{(1.03 \pm 0.04)}$; 选用流逝时间相同的寻乌台和安远台 (21 s), 将各频点的 S 波 Q 值平均后重新拟合, 得到寻乌安远地区的 S 波平均 Q 值 $Q_s(f) = (18.86 + 1.46) * f^{(0.84 \pm 0.04)}$ (图 5)。 P 波与 S 波平均 Q 值接近, Q_p 略大可能与流逝时间选择不同有一定关系。参与平均值计算的台站各频点对应的 Q 值比较相近, 反映了上述结果的可靠性。

4 结论与讨论

使用扩展的尾波归一化方法要求研究区内有较多的地震且分布均匀, 以消除辐射花样和入射角的影响; 另外要求尾波信号大于 2 倍噪声 (王勤彩等, 2005), 为了保证计算地震的样本数和拟合精度。本文对寻乌、安远和龙南台进行尾波归一化 Q 值计算时, Q_p 和 Q_s 计算选取流逝时间不完全一致, 但参与平均值拟合的不同台站选取流逝时间接近或相同, 尽量减小由于流逝时间不同而产生的 Q 值差别, 因为流逝时间的长短直接影响所用资料的震中距范围, 而 Q_0 值的高低与所用资料震中距离的范围有关 (Dinesh *et al.*, 2005,

图5 尾波归一化 Q 值频率曲线图

(a) 寻乌龙南区域 (P 波); (b) 寻乌安远区域 (S 波)

Fig. 5 Q -value frequency graph derived by using the extended coda-normalization method

(a) Xunwu-Longnan regions (P wave); (b) Xunwu-Anyuan regions (S wave)

2006; Sharma *et al.*, 2007)。计算寻乌台 S 波 Q 值时, 选用 6 个不同流逝时间进行 Q_0 值对比发现流逝时间与 Q_0 值大小具有线性关系 (表 3, 图 4)。从图 5 可以看出参与 Q_p 或 Q_s 平均值拟合的流逝时间相近的台站 Q_p 或 Q_s 值都较接近, 特别是流逝时间相同的寻乌台和安远台, 其 Q_s 值更加接近, 因为这两个台站相距仅 28 km, 计算选择的地震波形穿透的区域有部分重叠。最终得出的寻乌龙南地区的 P 波平均 Q 值比寻乌安远地区的 S 波平均 Q 值略大一些, 与某些 $Q_s/Q_p > 1$ 的研究结果 (华卫等, 2009; Sharma *et al.*, 2007) 有所不同, 原因是采用平均值计算的台站不完全相同, 且计算 Q_p 选取的流逝时间更大。

本研究中得到的 P 波、S 波的 Q_0 值不高, 分别为 20.76、18.86, 与赣西北地区相同方法计算 Q_p 和 Q_s 值 (董非非等, 2013) 所用资料的震中距离相近, Q 值结果相差不大。比华卫等 (2007) 对龙滩水库地区的计算结果高, 造成这种现象的原因除了区域介质均匀程度不同造成数值差别以外, 另外一个原因是本文研究区域比龙滩水库地区计算所用资料的震中距要大。本文未参与 Q_p 值平均值拟合的安远台选用的地震震中距范围就相对较小, 因此 Q_p 值明显低于寻乌和龙南台 (表 1)。最终 P 波、S 波 Q 值平均值结果 η 值较高, 分别为 1.03 和 0.84, 说明 Q_p 和 Q_s 值与频率的依赖程度较高, 本文所使用的地震资料的震源深度大部分在 4 ~ 11 km 之间, 高 η 值反映了地壳浅层

介质非均匀性较高, 与华卫等 (2007), 董非非等 (2013) 研究结果相似。赣南地区受台湾板块边界带强震活动直接影响, 是华南内陆地震活动水平较高的地区, 区内 1500 年以来发生 4 $\frac{3}{4}$ 级以上地震 10 次, 最大地震为 1806 年 1 月 11 日会昌 6 级地震, 1980 年以来也发生了 1982 年 2 月龙南 5.0 级地震、1987 年 8 月寻乌 5.5 级强震群和一系列的 4 级以上显著地震, 沿河源—邵武断裂带、南岭纬向构造带温泉广泛分布, 非常发育 (何昭星, 1989)。本研究得到该地区的 Q 值结果总体呈现低 Q_0 和高 η 值的特点, 是构造运动活跃地区的特征体现, 和上述地震活动实况是较为吻合的。

本文所用程序由中国地震局地震预测研究所华卫博士提供, 他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:

- 董非非, 汤兰荣, 潘林山, 等. 2013. 赣西北地区 P 波 S 波随频率衰减关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 33(增刊 I): 97-105.
- 何昭星. 1989. 江西寻乌震区地震地质特征初步研究[J]. 华南地震, 9(2): 14-21.
- 华卫, 赵翠萍, 陈章立, 等. 2009. 龙滩水库地区 P 波、S 波和尾波衰减[J]. 地震学报, 23(6): 620-628.
- 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 2003. 广东地区地震衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 46(1): 54-61.
- 李祖宁, 杨贵, 陈光. 2012. 福建地区地震波大弹性衰减 Q 值场地响应及震源参数研究[J]. 地震研究, 35(2): 381-386.
- 王勤彩, 刘杰, 郑斯华, 等. 2005. 云南地区与频率有关的 P 波、S 波

衰减研究[J].地震学报,27(6):588-597.

Aki K., Chouet B. . 1975. Origin of Coda Waves; Source, Attenuation and Scattering Effects[J]. J. Geophys. Res. 80(23):3322-3342.

Aki K. . 1980. Attenuation of Shear Waves in the Lithosphere for Frequencies from 0.05 to 25 Hz[J]. Phys. Earth Planet, 21(1):50-60.

Atkinson G. M. , Mereu R. F. . 1992. The Shape of Ground Attenuation Curves in Southeastern Canada [J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 82(5):2014-2031.

Dicesh K. , Sriram V. , Khattri K. N. . 2006. A Study of Source Parameters, Site Amplification Functions and Average Effective Shear Wave Quality Factor Q_{seff} from Analysis of Accelerograms of the 1999 Chamoli Earthquake, Himalaya [J]. Pure Appl Geophys, 163:1369-1398.

Dinesh K. , Sarkar I. , Sriram V. , *et al.* . 2005. Estimation of the Source Parameters of the Himalaya Earthquake of October 19, 1991, Average Effective Shear Wave Attenuation Parameter and Local Site Effects from Accelerograms[J]. Tectonophysics, 407:1-24.

Lorenzo S. D. , Bianco F. , Pezzo E. D. . 2013. Frequency Dependent Q_s and Q_p in the Umbria-Marche (Italy) region using a Quadratic Approximation of the coda-Normalization Method [J]. Geophys J. Int. ,

193:1726-1731.

Roecker S. W. , Tucker B. , King J. , *et al.* . 1982. Estimation of in Central Asia as a Function of Frequency and Depth using the Coda of Local Recorded Earthquakes [J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 72:129-149.

Sato H. . 1977. Energy Propagation Including Scattering Effects; Single Isotropic Scattering Approximation [J]. J. Phys. Earth, 25:27-41.

Sato H. . 1980. Q^{-1} Value for S-wave under the Kanto District in Japan [J]. Zisin, 33:541-543.

Sharma B. , Teotia S. S. , Kumar D. . 2007. Attenuation of P, S, and Code Waves in Koynaregion, India [J]. J. Seismol. , 11:327-344.

Singh S. K. , Ordaz M. , Dattatrayam R. S. . 1999. A Spectral Analysis of the 21 May 1997 Jabalpur India, Earthquake and Estimation of Ground Motion from Future Earthquakes in the India Shield Region [J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 89(6):1620-1830.

Xie J. , Mitchell B. J. . 1990. A back Projection Method for Imaging Large-scale Lateral Variation of Lg coda Q with Application to Continental Africa [J]. Geophys J. Int. , 100(1):161-181.

Yoshimoto K. , Sato H. , Yoshihisa, *et al.* . 1993. Frequency-dependent Attenuation of P and S Waves in the Kanto area, Japan, Based on the Coda-normalization Method [J]. Geophys J. Int. , 114:165-174.

Research on Attenuation Relationship of P and S Waves with Frequency in South of Jiangxi Province

TANG Lan-rong, DONG Fei-fei, ZENG Xin-fu, XIANG Yue-wen
(Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang 330039, Jiangxi, China)

Abstract

Using 183 $M_L \geq 1.0$ earthquakes occurred in south of Jiangxi province, we calculate the quality factors for P (Q_p) and S waves (Q_s) of the Xunwu, Anyuan and Longnan stations by the extended coda-normalization method, and investigated the seismic attenuation properties of the crust medium in the study area. The results show that the Q_p value of Xunwu (lapse time is 35s) and Longnan stations (lapse time is 40s) is reliable and close, the average value of the fitting result is $Q_p(f) = (20.76 \pm 1.67) * f^{(1.03 \pm 0.04)}$, and the average value of Q_s of Xunwu and Anyuan stations (lapse time is 21s) is $Q_s(f) = (18.86 \pm 1.46) * f^{(0.84 \pm 0.04)}$. The characteristic of Q value indicates low Q_0 and high η , which means that the tectonic movement is active, and is consistent with the characteristic of the moderately strong earthquakes which are active in the study area.

Key words: coda normalization; attenuation of P wave; attenuation of S wave; Q value; south of Jiangxi province