

洪玉清, 杨选. 利用 Aki 模型对新丰江水库地区尾波 Q 值的研究[J]. 华南地震, 2015, 35 (3):66-71. [HONG Yuqing, YANG Xuan. Q Value Research of Coda Wave in Xinfengjiang Reservoir Area Based on Aki Model[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(3):66-71.]

利用 Aki 模型对新丰江水库地区尾波 Q 值的研究

洪玉清^{1, 2, 3}, 杨选^{1, 2, 3}

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070))

摘要: 选取 2013 年 1 月至 2014 年 12 月广东地震台网记录到 $M_L \geq 2.0$ 的新丰江水库库区及其周边地震的数字地震波资料, 利用单次散射的 Aki 模型, 计算得到该区尾波 Q 值, 并拟合 Q 值对频率的依赖关系。结果表明: 与国内其他区域相比, 新丰江水库库区 Q 值较地震频发地区要高, 但低于整个广东地区和国内地震少发地区, 且 Q 值对频率依赖性较高。按震中分 4 区对樟下台拟合尾波 Q 值与频率的关系研究地质构造体对 Q 值计算的影响, 并很好的解释了樟下、东兴等台 Q 值偏小的原因。

关键词: 尾波 Q 值; Aki 模型; 新丰江库区及周边; 流逝时间

中图分类号: P319.24 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2015) 03-0066-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.03.010

Q Value Research of Coda Wave in Xinfengjiang Reservoir Area Based on Aki Model

HONG Yuqing^{1, 2, 3}, YANG Xuan^{1, 2, 3}

(1. *Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China*; 2. *Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China*;
3. *Key Laboratory of Guangdong Province Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangzhou 510070, China*)

Abstract: Based on digital seismic wave data of earthquakes with $M_L \geq 2.0$ in Xinfengjiang reservoir area and adjacent region from January, 2013 to December, 2014, which were recorded by Guangdong Seismic Network, the paper calculates the Q values of coda wave and fits the relationship of Q values versus frequency by using the Aki single scatter model. Comparing with other domestic regions, the Q value of Xinfengjiang reservoir area is relatively higher than that of earthquake-prone regions, but it is lower than that of the whole Guangdong region and earthquake low frequency region, and the dependence on frequency is higher. According to different location of the epicenter recorded by Zhangxia station, fitting relationship between Q value and frequency in four areas, the paper studies the influence of geological structure to the calculation of Q value. Meanwhile, it explains well why Q value is smaller in Zhangxia, Dongxing station etc.

Keywords: Q value of coda wave; Aki model; Xinfengjiang reservoir area and adjacent region; Elapsed time

收稿日期: 2015-02-19

作者简介: 洪玉清 (1986-), 男, 助理工程师, 现主要从事监测预报工作.

E-mail: 594706459@qq.com.

0 引言

Q 值是衡量地震波在地球介质中衰减特性的主要物理量,是地震波传播介质非均匀性和非弹性的反映。Aki^[1]给出尾波单次散射模型,并提出利用尾波振幅随时间衰减确定尾波 Q 值的方法,后来又对此方法不断进行修正^[2],此方法因为原理简单、易于数据运算而广泛应用于 Q 值的研究中。许多地震工作者对尾波 Q 值做了大量的研究,并取得了许多研究成果。诸多研究表明:地壳和上地幔横波 Q 值的区域性特征比较显著,在构造稳定地区 Q 值高,地震波尾波衰减慢,地震活动水平低;反之,在构造不稳定地区 Q 值低,尾波衰减快,地震活动水平较高。

新丰江水库自建成蓄水后,于 1962 年发生 6.1 级地震,此后一直余震不断,2013 年 1 月至 2105 年 1 月(本文研究的时间范围)广东省台网(图 1)便记录到 8 210 次 $M_L > 0$ 级的新丰江水库库区及附近地震。本文选取新丰江水库周边 14 个台站记录到的数字地震资料,依据 Aki 模型对新丰江水库及周边地区的尾波 Q 值进行计算,分析尾波 Q 值对频率的依赖性特征,同时对 Q 值与区域构造的关系等问题进行研究。

1 方法简介

研究采用单次散射模型的方法求解 Q 值,通过以某频率为中心频率的一定带宽滤波器滤波后的尾波振幅可表述为:

$$A(f, t) = S(f) \cdot t^{-u} \cdot e^{-\pi f t / Q_c(f)} \quad (1)$$

其中 $A(f, t)$ 为尾波振幅谱,即对应 t 时刻一个采样周期的振幅最大值, $S(f)$ 为震源因子, t 为发震时刻算起的地震波流逝时间, u 为常数,体波 $u=1$,面波 $u=0.5$,本文研究对象为地方震,故 u 取值为 1, $Q_c(f)$ 为对应于中心频率点 f 的尾波 Q 值。

对式(1)两边取自然对数并整理变为:

$$\ln(A(f, t) \cdot t^u) = \ln S(f) + k \cdot t \quad (2)$$

其中 $K = -\frac{\pi f}{Q_c(f)}$,上式表明 $\ln(A(f, t) \cdot t^u)$ 和 t 之间存在线性关系。

对于体波 u 取值为 1,故上式为:

$$\ln(A(f, t) \cdot t) = \ln S(f) + k \cdot t \quad (3)$$

对于某个地震记录在某一频率 f_c (中心频率点)上测量不同流逝时间 t 的振幅 $A(f_c, t)$,即可用式(3)拟合求得斜率 k ,从而得到:

$$Q_c(f) = \pi f_c / k \quad (4)$$

通过计算不同频率下的尾波 Q 值及其平均值

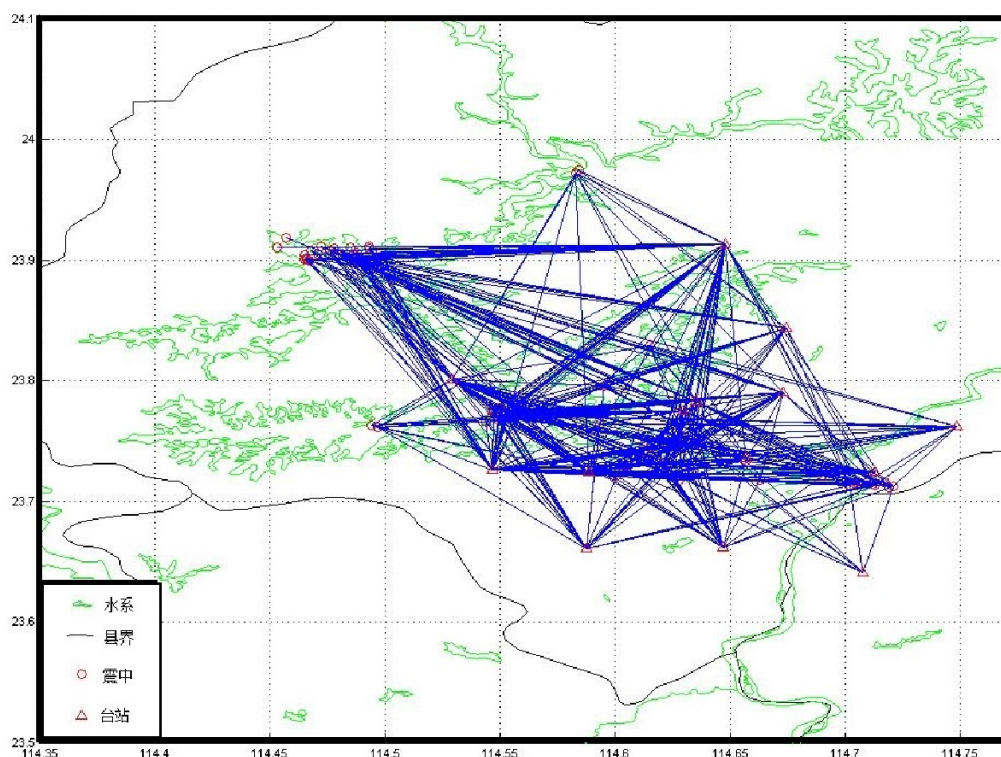


图 1 地震及台站分布图(连线表示震中到台站的射线路径)

Fig.1 Distribution map of earthquakes and stations (lines stand for ray paths from epicenter to station)

Q_0 , 利用 $Q_c(f)=Q_0f^\eta$, 即可拟合求得频率与 Q 值的关系。

2 观测资料

本研究使用新丰江水库地区 14 个数字地震台的地震波形记录, 各台站基本情况见表 1。选取地震记录为发生在 2013 年 1 月至 2014 年 12 月期间, 震中位于新丰江水库库区及其周边, 震级 $M_L \geq 2.0$ 的地震; 在此基础上逐个台筛选, 选取出信噪比高、干扰少且震相清晰的地震事件。

表 1 台站参数表

Table 1 Parameters table of stations

序号	台站代码	台站名	台基类型	地震计	数采	采样频率/Hz
1	XIG	新港	花岗岩	KS-2000M-60	TDE-324CI	100
2	LTK	龙潭口	花岗岩	CMG-3ESPC-60	TDE-324CI	100
3	HYJ	湖羊角	花岗岩	CMG-3ESPC-60	TDE-324CI	100
4	XFJ	新丰江	花岗岩	BBVS-120	EDAS-24IP	100
5	DOX	东星	花岗岩	EDAS-BS60	EDAS-24IP	100
6	QZI	七寨	辉岩	BKD-2B	EDAS-24IP	100
7	GUL	桂林	花岗岩	BKD-2B	EDAS-24IP	100
8	HEP	和平	砂岩	FSS-3BDH	EDAS-24IP	100
9	DFH	东方红	砂岩	BKD-2B	EDAS-24IP	100
10	DOY	洞源	花岗岩	EDAS-BS60	EDAS-24IP	100
11	ZHX	樟下	花岗岩	EDAS-BS60	EDAS-24IP	100
12	YAM	杨梅	花岗岩	BKD-2B	EDAS-24IP	100
13	BLT	白岭头	砂岩	EDAS-BS60	EDAS-24IP	100
14	LVY	绿缘	花岗岩	BKD-2B	EDAS-24IP	100

高频率点采样点密, 具体做法为以相应频率点的对应周期作为采样窗长。取 P_g 波开始前 2 s 作为噪声窗, 与等长尾波窗相比求取信噪比, 以信噪比为 $\sqrt{2}$ 作为信号截断点^[4]。在有效尾波窗中限定流逝时间为 40 ± 5 s, 求解地震记录的 Q 值及其平均值 Q_0 , 最后拟合 Q 值随频率的变化关系。

3.2 采样深度

Q 值的大小反映了地震波在以震源和台站为两个焦点的散射椭球体之间传播时的衰减特性。震源距、横波速度以及流逝时间决定着散射椭球体的形状:

$$\frac{x^2}{(\beta t/2)^2} + \frac{y^2}{(\beta t/2)^2 - r^2/4} + \frac{z^2}{(\beta t/2)^2 - r^2/4} = 1 \quad (5)$$

式(5)中, x 、 y 、 z 为坐标点, t 为流逝时间, β 为横波速度, r 为震源距。

由式(5)可知, 在震源和台站固定的情况下,

3 数据处理及结果

3.1 数据处理过程

采用朱新运等^[3]研制的基于 Aki 模型的尾波 Q 值求解分析软件, 对挑选的数字地震波形记录进行分析。本研究分析频率段为 4~18 Hz, 以整数频率为中心频率点 f , 共计 15 个频率点。原始波形记录加窗宽为 0.05 的 hanning 窗后, 通过带宽为 $[0.7f, 1.3f]$ 的六阶 Butterworth 滤波器滤波。数据采用动态采样^[4]方式采样, 即低频率点采样点疏,

流逝时间决定了散射椭球的形状。根据 Pulli (1984) 的研究, 可把椭球体投影到地面, 其椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{(\beta t/2)^2} + \frac{y^2}{(\beta t/2)^2 - r^2/4} = 1 \quad (6)$$

式(6)中, 短半轴 $b = \sqrt{(\beta t/2)^2 - r^2/4}$ 与椭球的深度相关, 当震源深度为 d 时, 采样体深度表示为 $h = \sqrt{(\beta t/2)^2 - r^2/4} + d/2$ ^[5]。本研究所挑选的地震记录震中距均在 40 km 内, 而本区地震深度基本在 10 km 内, 以横波速度 3.6 km/s 计算得 40 ± 5 s 流逝时间所对应的的采样深度约为 70 km。因此本研究产出的数据主要反映的是新丰江水库库区及周边地壳和上地幔顶部的尾波 Q 值衰减特征。

3.3 数据处理结果

利用尾波 Q 值求解分析软件分别对 385 条地震记录(85 个地震事件)以 40 ± 5 s 流逝时间求解

Q 值, 对每个台站每个频率点的所有 Q 值求平均值 Q_0 作为该频率点该台站研究区域的 Q 值, 拟合平均 Q 值与对应频率之间的关系, 各台拟合结果见表 2。用所有记录拟合出新丰江库区及周边区域

尾波 Q 值与对应频率之间的关系为:

$$Q(f)=(104.3\pm37.54) \cdot f^{0.8734\pm0.1447} \tag{7}$$

为研究采样深度与 Q 值大小的关系, 本研究在对上述地震记录进行再次筛选, 挑选出有效尾

表 2 各台站 Q 值与频率关系

Table 2 The relationship of Q values and frequency in each station

序号	台站代码	台站名	Q_0	Q_0 标准差	η	η 标准差	选用地震数
1	XIG	新港	114.2	42.80	0.834 8	0.159 5	43
2	LTK	龙潭口	115.3	40.78	0.873 9	0.128 5	27
3	HYJ	湖羊角	103.9	36.55	0.885 5	0.130 4	50
4	XFJ	新丰江	116.4	47.47	0.855 2	0.165 2	24
5	DOX	东星	96.5	33.77	0.932 9	0.110 0	53
6	QZI	七寨	112.5	42.43	0.868 9	0.143 5	31
7	GUL	桂林	98.1	23.89	0.956 8	0.159 7	8
8	HEP	和平	89.4	22.31	0.957 4	0.120 5	18
9	DFH	东方红	99.2	31.23	0.864 0	0.148 9	17
10	DOY	洞源	102.9	39.12	0.869 5	0.134 6	54
11	ZHX	樟下	90.6	31.24	0.886 1	0.152 1	62
12	YAM	杨梅	113.0	21.18	0.7621	0.0854	21
13	BLT	白岭头	109.6	37.50	0.840 8	0.164 0	36
14	LVY	绿缘	107.3	41.77	0.861 9	0.151 9	40
15		全区	104.3	37.54	0.8734	0.1447	485

波窗大于 80 s 的地震记录 70 条。以大于 80 s 的流逝时间求解 Q 值, 拟合出整个区域的尾波 Q 值与对应频率之间的关系为:

$$Q(f)=(424.3\pm63.81) \cdot f^{0.6021\pm0.0982} \tag{8}$$

通过图 1 的射线路径, 樟下台的地震记录可以很好的研究水平向地质构造对 Q 值大小测定的影响, 故依据樟下台分 4 个区(图 2)拟合尾波 Q 值与对应频率之间的关系(图 3), 结果见表 3。

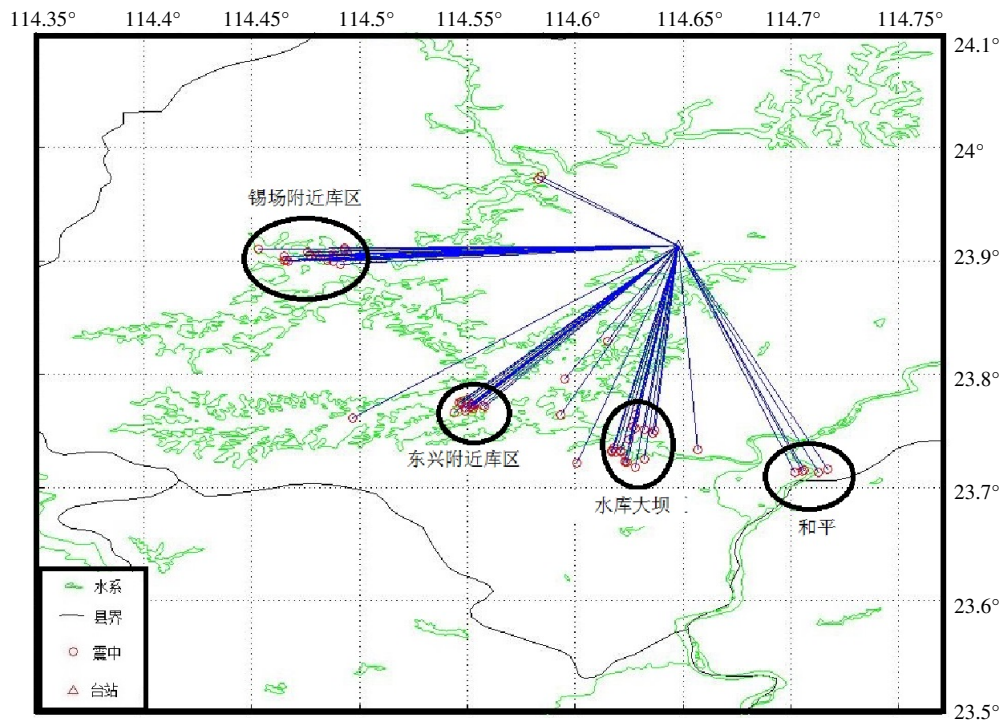


图 2 樟下台记录地震震中分区情况

Fig.2 Epicenters distribution of earthquakes recorded by Zhangxia station

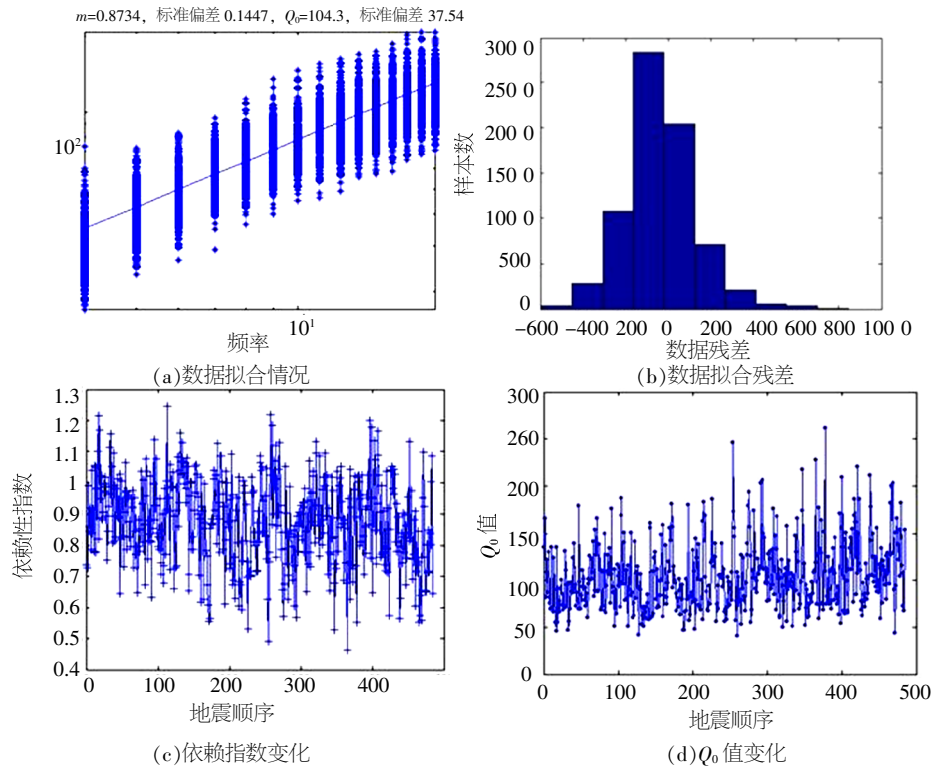


图 3 Q 值拟合过程

Fig.3 Fitting process of Q value

表 3 樟下台各分区 Q 值与频率关系

Table3 The relationship of Q values and frequency in each partition of ZhangXia station						
序号	分区名	Q_0	Q_0 标准差	η	η 标准差	选用地震数
1	锡场附近库区	88.3	32.50	0.919 3	0.147 6	12
2	东兴附近库区	106.6	33.76	0.746 2	0.110 5	17
3	水库大坝	83.4	23.16	0.931 9	0.128 0	19
4	和平	77.6	38.98	1.027 0	0.297 1	9

4 讨论和结论

(1) 不同的流逝时间反映了不同深度的 Q 值, 利用不同流逝时间求解的 Q 值不具有可比性。本研究以 40 ± 5 s 为流逝时间求解 Q 值, 结果所反映的仅为本区 40 ± 5 s 流逝时间所对应采样深度范围内尾波的衰减特性。为了能和黄玉龙等所计算的广东地区 Q 值做比较, 本研究采用 >80 s 的流逝时间(与黄玉龙等截取的尾波相当)重新求解 Q 值。结果表明利用较小流逝时间求解的 Q_0 值相对要小, 即采样深度较小时 Q_0 值小, 随着采样深度的增加值变大, 原因是地壳表层介质的非均匀性最显著, 而随着深度加大, 介质趋向稳定, 其非均匀性逐渐变低。因此 Q_c 值不仅是频率的函数, 还应该是采样深度的函数。

(2) Q 值的大小反映了地震波的衰减程度, 低

Q 值区地震活动相对频繁, Q 值对频率的依赖程度相对较大。与国内不同区域 Q 值及其对频率的依赖关系相比(见表 4)^[6-10], 本区 Q_0 值比地震频发地区要大, 但会低于地震活动水平低的地区。在广东范围内, 本区 Q_0 值较整个广东地区要偏小, 且对频率表现出较强的依赖性。可认为本区地震活动东水平较整个广东地区和国内地震少发地区要高, 但要低于国内地震频发地区。

(3) 在小区域范围内, 地质构造体会较大影响到对 Q 值大小的求解。从对樟下台分区拟合尾波 Q 值与对应频率之间关系的结果来看, 和平附近地震和樟下台之间射线路径穿过¹¹¹河源断裂和人字石断裂, 水库大坝附近地震穿过人字石断裂, 而上述两个断裂是本区规模大、活动性最强的断裂, 且为深部构造, 向地下延伸有数公里到数十公里, 因此这两区地震拟合的 Q_0 值相对较小。锡

表 4 Q 值与对应频率之间关系的相关研究结果比较表

Table 4 Comparison table of related research results for the relation of Q value versus frequency					
序号	地区	Q_0	η	流逝时间/s	作者
1	青海玉树	82.3	0.876	30~70	王培玲
2	云南	21.4(33.9)	0.9(0.87)	合适时间	马宏生
3	山西	165.7	0.6084	40	宁亚灵
4	北京	115	0.91	30~60	马云生
5	广东	481.5	0.31	S 波总能量的 90%	黄玉龙
6	本区	424.3	0.6021	>80	本研究
7	本区	104.3	0.8734	40+5	本研究

场附近库区地震则穿过石角断裂带，该断裂带规模虽没有河源断裂和人字石断裂大，但也是本区活动性表现最为突出的断裂构造，且该断裂北段也为深部构造，而锡场附近库区地震和樟下台之间射线路径穿过的刚好是该断裂的北段，因此这一区地震拟合的 Q_0 值也相对偏小。东兴附近库区地震和樟下台之间射线路虽然穿过石角-新港-白田断裂的中断，但该段与该断裂北端的石角断裂带不同，其规模较小，且向地下延伸的也较浅，不是深部构造，因此其拟合的 Q_0 值相对偏大。查看分台拟合时选取的地震震中分布情况，发现上述情况便是造成东方红、和平、桂林、樟下、东兴等台 Q_0 值偏小的原因。

致谢：本文采用朱新运、刘杰研制的尾波分析软件进行计算，深表感谢！

参考文献：

[1] Aki K.Analysis of seismic coda of local earthquakes as scattered wave[J]. J.Geophys.Res., 1969, 74: 61-631.

[2] Aki K, Chouet B.Origin of Coda wave:source, attenuation and sattering effects [J]. J.Geophys.Res., 1975, 80: 3 322-3 342.

[3] 朱新运, 刘杰, 张帆. 基于 Aki 模型的近震 S 波尾波 Q 值求解及分析软件研制[J]. 地震研究报, 2006, 29 (1): 76-80.

[4] 朱新运. 影响尾波 Q 值数据结果的算法因素分析[J]. 东北地震研究, 2006, 22 (3): 8-13.

[5] 陈光, 陈金鹏.福建顺昌尾波 Q 值衰减特性初探[J]. 高原地震, 2009, 21 (2): 24-27.

[6] 王培玲, 孙洪斌, 陈玉华. 青海玉树单台地震序列的尾波 Q 值研究[J]. 高原地震, 2007, 19 (3): 21-24.

[7] 马宏生, 刘杰, 张国民, 等. 云南地区尾波 Q_c 值的分布特征及其初步解释[J]. 地震, 2006, 26 (3): 37-43.

[8] 宁亚灵, 靳玉科, 许家姝. 利用 Aki 模型对山西地区尾波 Q 值的研究[J]. 山西地震, 2012 (4): 5-7.

[9] 马云生, 张天中, 张焕生. 北京及其周围地区尾波 Q 值分布特征的研究[J]. 地震学, 1995, 17 (4): 448-458.

[10] 黄玉龙, 郑斯华, 刘 杰, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46 (1): 54-61.

[11] 丁原章, 常宝琦, 肖安予, 等. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989.