

# 2004年甘肃临泽震群序列 $Q_c$ 值特征研究\*

李兴坚, 许玉红, 李东生, 刘小明, 刘鸿斌, 丁宏, 陈建军

(甘肃省地震局 高台地震台, 甘肃 高台 734300)

**摘要:** 采用 Sato 单次散射模型, 利用高台地震台的近场数字地震记录, 研究了临泽震群序列尾波  $Q_c$  值在 60 s 流逝时间下的变化特征, 得到  $Q_c$  值随频率的变化关系  $Q_c(f) = (27.67 \pm 2.94)f^{(0.9924 \pm 0.0411)}$ 。分析发现: 在中等地震频发时段,  $Q_c$  值变化起伏较弱且偏低; 研究结果与民乐—山丹地震序列接近, 故认为这个结果近似了祁连山地震带中段地区的介质特性。

**关键词:** Sato 模型;  $Q_c$  值特征; 临泽震群

**中图分类号:** P315.63

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2009)04-0377-05

## 0 引言

尾波的存在可以认为是介质不均匀性的最明显证据之一。从 Aki (1969) 发表尾波散射理论, 到 Aki 和 Chouet (1975) 用简单的单次散射模型解释了 S 波尾波的振幅衰减现象, 随后, Herrmann (1980) 研究发现, 尾波衰减系数和 S 波衰减系数一致, 尾波成为研究地震波衰减的一种简便有效方法。近年来, 国内外地震学家广泛开展了这方面的研究工作, 取得了许多有意义的研究成果。诸多研究 (Chouet, 1979; Jin, Aki, 1986; 秦嘉政等, 1989, 1995, 2001; 李白基等, 2000, 2004; 钱晓东等, 2004; 王彩勤等, 2004; 啜永清等, 2004; 王伟君等, 2004) 发现, 地震活动频繁地区的  $Q_c$  值低, 地震活动相对平静地区的  $Q_c$  值高; 年代久远的地质单元或构造运动稳定地区  $Q_c$  值高, 晚近代地质单元或构造活跃地区  $Q_c$  值低。同一个地区, 较大地震发生前后  $Q_c$  值在时间上往往存在一些前兆性变化, 这就为中强地震和地震序列中显著地震的预测提供了一个新的途径。本文利用 Sato 单次散射模型和高台地震台的近场数字地震记录, 研究了 2004 年 6 月甘肃临泽震群序列  $Q_c$  值的变化特征。

## 1 方法与原理

依据 Sato 单次散射模型 (Sato, 1977; Dominguez, Rebollar, 1997), 在一定频率下, 尾波

振幅与时间的函数关系可表示为

$$F(t) = \lg \left[ (A_c(t)/A_s)^2 K^{-1}(a) \right] = C(f) - b(t - t_s). \quad (1)$$

式中:  $A_s$  是 S 波的最大振幅,  $A_c(t)$  是流逝时间  $t$  附近的尾波均方根振幅,  $K(a)$  是依赖于时间的传播因子:

$$A_c(t) = (A_T^2 - A_N^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$K(a) = 1/\ln \left[ (a+1)/(a-1) \right]; a = t/t_s. \quad (3)$$

其中,  $A_T$  为所取时间窗内地震波均方根振幅,  $A_N$  为 P 波到达前适当时段的地震波均方根振幅, 用以进行地震波的噪声校正 (Pulli, 1984; 李白基等, 2004)。  $t_s$  为 S 波到时从地震发震时刻起计算的尾波流逝时间,  $C(f)$  是与频率  $f$  有关的因子, 对于特定的频率, 可视为常数。  $b = (\pi f l g e)/Q$ , 对于不同的频率点拟合  $F(t)$  和  $(t - t_s)$  线性关系求出斜率  $b$ , 即可得到该频率点的  $Q_c$  值。最后, 由各个频率点的  $Q_c$  值, 拟合出  $Q_c(f) = Q_0 f^\eta$ 。

## 2 资料处理及结果

2004 年 6 月 3 日以来相继在临泽发生了 6 月 3 日  $M_L 4.4$ 、6 月 5 日  $M_L 4.5$ 、6 月 6 日  $M_L 3.7$ 、6 月 7 日  $M_L 4.3$ 、6 月 10 日 2 次  $M_L 4.5$  等显著的中等地震, 已经发展成了中地震震群, 至 2004 年 12 月 31 日累计发生地震 99 次, 它们在空间上呈南北向展布 (图 1)。

\* 收稿日期: 2008-09-26.

基金项目: 中国地震局三结合项目 (676) 资助.

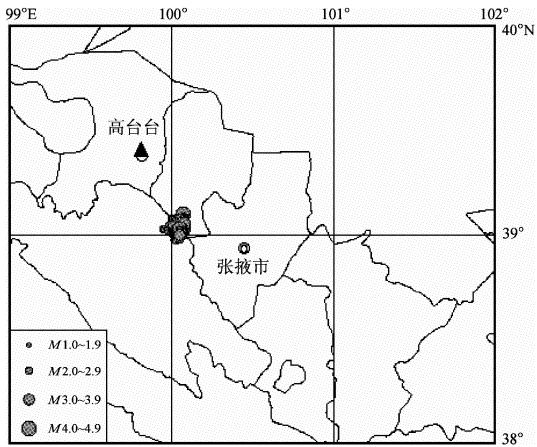


图1 高台地震台位置及临泽地震分布  
Fig. 1 Distribution of Linze earthquake and location of Gaotai station

如此强烈的中等地震持续活动，在这一地区是罕见的，这也是自 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹  $M_s6.1$ 、5.8 地震以来，祁连山东中段地区最为强烈的地震活动。距离该次震群活动震中 50 km 范围内只有高台地震台有近场观测记录，因此我们利用该台 2004 年 6 月 3 日至 12 月 31 日记录到的此次震群活动的三分量数字地震记录，分析研究本

次震群的  $Q_c$  值的变化特征。高台地震台高程为 1 340 m，台基为花岗岩，使用 JCZ-1 型地震计，观测频带为 DC ~ 20 Hz，采样率为 50，数据采集器为 EDAS-C24，动态观测范围为 140 dB。

本研究采用在时间域中求取尾波  $Q$  值的方法（朱新运等，2005，2006），分析频率段为 2 ~ 18 Hz，间隔 1 Hz，对原始波形进行带宽  $[0.7f, 1.3f]$  的 6 阶 Butterworth 滤波器滤波。对滤波后的数据，从 S 波到时开始，取窗长 2 s，步长 0.5 s 滑动计算求出不同时间点的均方根振幅。因为不同的流逝时间反映了不同深度的  $Q$  值，计算时同一台站记录到不同地震所取的尾波流逝时间应尽量一致。同时，为保持线性拟合的稳定性，所截取的尾波窗长不能太短。根据高台地震台对地震序列的实际记录情况，我们选取的尾波最大流逝时间为 60 s，尾波起算时间为 S 波到达后 15 s，背景噪声取 P 波初动前 10 s 左右的平均信号。这样共挑选出符合条件的地震 49 次，由此可以得到各频率点  $Q$  值随时间的演化过程；在此基础上再用关系式来拟合  $Q$  值随频率的变化关系， $Q_0$  为频率 1 Hz 时的  $Q$  值。图 2 给出了 2004 年 6 月 6 日 07 时 34 分  $M_L3.7$  地震  $f=10$  Hz 的计算结果。

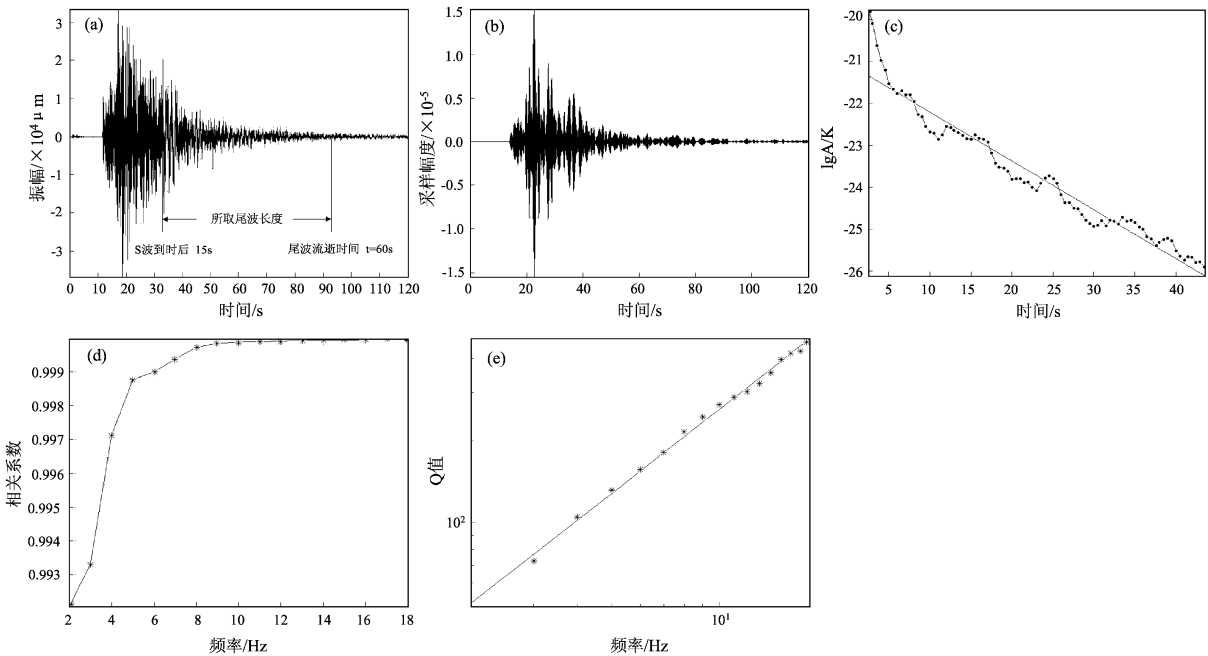


图2 2004 年 6 月 6 日 07 时 34 分  $M_L3.7$  地震计算结果

(a) 原始波形及尾波截取；(b)  $f=10$  Hz 时波形滤波；(c)  $f=10$  Hz 时数据拟合；  
(d) 相关系数；(e)  $Q$  值与频率关系 ( $Q=25.17f^{1.014}$ )

Fig. 2 The calculating result of  $M_L=3.7$  earthquake occurred at 07:34 on June 6, 2004.

(a) The original waveform and coda interception; (b) The filter of  $f=10$  Hz; (c) The data fitting  $f=10$  Hz;  
(d) The correlation coefficient; (e) The relation between  $Q$  value and frequency

尾波  $Q_c$  值是通过尾波衰减特性的研究求取区域介质因子的一种方法， $Q_c$  值的大小反映了地震波衰减程度； $Q_c$  值对频率的依赖程度与地壳介质均匀程度有关。我们利用 Sato 单次散射模型和高台地震台的近场数字地震记录，研究得到了 60 s 流逝时间下临泽地震序列尾波  $Q_c$  值的变化特征， $Q_c$  值随频率的变化关系为  $Q_c(f) = (27.67 \pm 2.94) f^{(0.9924 \pm 0.0411)}$  (图 3)，这个结果可近似体现临泽震源区的尾波衰减特征。

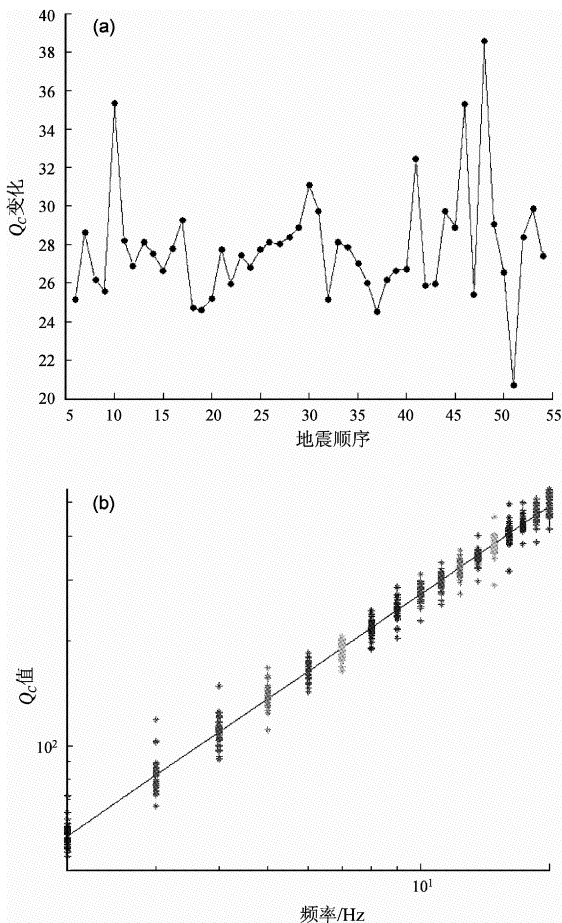


图 3 临泽地震序列  $Q_c$  值变化 (a) 及其频率的关系 (b)

Fig. 3 The  $Q_c$  value sequence and the relation between  $Q_c$  values and frequency of Linze earthquake

通过对不同的频率点  $Q_c$  值变化形态作对比发现，随着频率的增大， $Q_c$  值的变化形态也会发生明显的变化。在序列的发展阶段  $Q_c$  值的变化起伏较大，且在高值变化。图 4 给出频率分别为 3 Hz、6 Hz 和 16 Hz 时  $Q_c$  值随时间的变化情况。从  $Q_c$  值演变过程看，以 2004 年 6 月 14 日 05 时 16 分发

生的  $M_L 3.2$  地震为界将  $Q_c$  值变化分为 2 个时段：第一时段为整个序列的发展阶段， $Q_c$  值随时间的变化起伏相对比较平稳，但地震强度较大，此期间共发生 5 次  $M_L > 4$  地震。分析该次震群序列的后 4 次  $M_L > 4$  地震前的  $Q_c$  值变化形态，我们发现存在“低值—高值（增大）—低值（降小）—发震”的变化形态。第二时段， $Q_c$  值随时间的变化相对较大，但地震活动强度不大。分析认为是该震群打破了该地区的应力平衡状态，整个序列发展到后期，该地区的应力状态也随之调整分布。

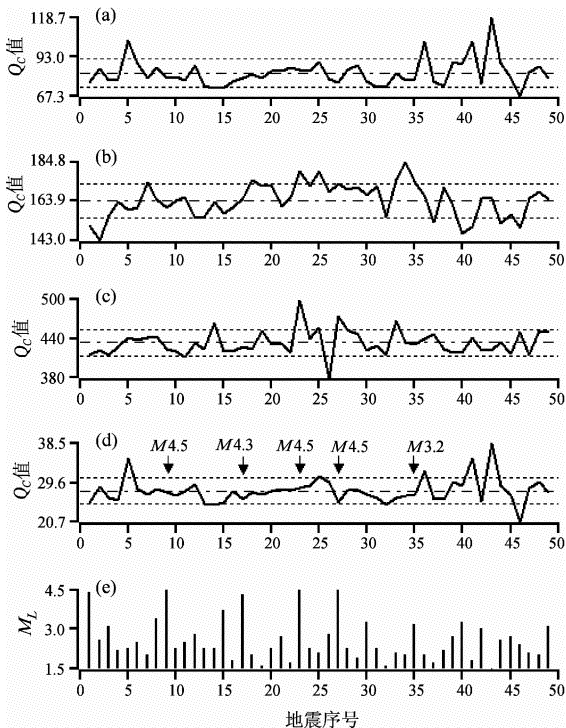


图 4 不同中心频率点的尾波  $Q_c$  值随时间变化过程 (a)  $f=3$  Hz; (b)  $f=6$  Hz; (c)  $f=16$  Hz; (d)  $f=1$  Hz; (e) 震级分布

Fig. 4  $Q_c$  values changing with time at different centre frequency pots

3 结论与讨论

我们利用 Sato 单次散射模型，使用高台地震台的近场数字地震记录，研究了临泽震群序列尾波  $Q_c$  值的变化特征，得到  $Q_c$  值随频率的变化关系  $Q_c(f) = (27.67 \pm 2.94) f^{(0.9924 \pm 0.0411)}$ 。与国内其他研究相比，本文得出的值相对较低。按照 Mogi (1962) 岩石实验研究结果，一般的中小地震震群是在介质极不均匀的地区发生的，而大震的直接

前震序列则是在介质不均匀的地区发生。 $Q$  值的大小与介质的均匀程度有关,因此一般的中小地震震群活动地区应具有低  $Q_0$  值的特征。

对于不同中心频率点  $Q_c$  值变化形态不一致,随着频率的增大, $Q_c$  值的变化形态也发生着明显的变化,在序列的发展阶段  $Q_c$  值的变化起伏较大,在序列初期和末期  $Q_c$  值变化起伏较弱。从本次震群的  $Q_c$  值演变过程看,在中等地震频发时段, $Q_c$  值变化起伏较弱, $Q_c$  值偏低。在  $M_L > 4$  强余震前  $Q_c$  值变化形态具有“低值—高值(增大)—低值(降小)—发震”的变化形态;

随频率的变化关系为  $Q_c(f) = (28.38 \pm 4.49)f^{(0.9732 \pm 0.05035)}$ ,李兴坚等(2009)对比民乐—山丹地震序列尾波  $Q_c$  值发现,这两个结果非常接近,可以认为这个计算结果可近似祁连山地震带中段地区的介质特性。

从序列变化形态来看,两次地震序列后期  $Q_c$  值相对变化都较大,分析认为是由于随着地震序列的演化而发生,使得发生地震的这两个地区的应力结构状态有了新的变化和调整,进而认为临泽地震震群是民乐地震后,祁连山地震带中段地区应力调整的反应。

本研究采用浙江省地震局朱新运、中国地震台网中心刘杰研制的尾波分析软件进行计算。朱新运博士、甘肃省地震局监测中心何少林研究员给予了悉心指导和帮助。在此表示衷心感谢!

## 参考文献:

- 陈俊华,甘家思.2006.九江—瑞昌 5.7 级地震余震尾波  $Q_c$  值分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (3): 65—68.
- 陈学庭.1992. 澜沧和耿马大地震  $Q$  值随时间的变化 [M]. //中国地球物理学学会年刊. 北京:地震出版社.
- 啜永清,张淑亮,苏燕,等.2004. 大同地震序列的尾波  $Q$  值变化特征研究 [J]. 地震, 24 (2): 66—72.
- 郭晓,张元生,莘海亮,等.2008. 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, 31 (2): 114—118.
- 韩晓明,荣代璐.2006. 2004 年 6 月甘肃临泽震群前地震学参数变化研究 [J]. 高原地震, 18 (3): 1—7.
- 李白基,秦嘉政,钱晓东,等.2004. 云南姚安地区的尾波衰减 [J]. 地震学报, 24 (1): 47—52.
- 李白基,秦嘉政,谢庆茵,等.2000. 云南武定 1995 年地震余震尾波  $Q_c$  值 [J]. 地震地磁观测与研究, 21 (2): 1—6.
- 李兴坚,许玉红,陈建军,等.2009. 利用 Sato 模型研究民乐—山丹地震尾波  $Q_c$  值特征 [J]. 西北地震学报, 31 (2): 191—195.
- 吕坚,朱新运,高建华,等.2007. 利用 Sato 模型研究九江—瑞昌

- 地震序列的  $Q_c$  值特征. [J] 大地测量与地球动力学, 27 (2): 33—36.
- 马宏生,刘杰,张国民,等.2005. 尾波  $Q_c$  值随时间变化在地震预测中应用的研究 [J]. 地震, 25 (4): 39—48.
- 毛燕,徐彦,王彬,等.2005. 四川及邻区  $L_g$  尾波的  $Q$  值分布特征 [J]. 地震研究, 28 (1): 38—42.
- 钱晓东,李白基,秦嘉政.2004. 2001 年云南施甸  $M_s 5.9$  地震余震序列尾波  $Q_c$  值研究 [J]. 地震地磁观测与研究, 25 (1): 9—17.
- 秦嘉政,李白基,钱晓东,等.2001. 云南武定地震余震近场尾波衰减的区域特征 [J]. 地震学报, 23 (1): 87—97.
- 秦嘉政,刘祖荫,龙晓帆.1995. 滇西实验场两次中强地震前后尾波衰减的区域特征分析 [J]. 中国地震, 11 (3): 212—221.
- 秦嘉政.1989. 云南地区短周期波区域  $Q$  值与地震烈度衰减 [C]. //云贵地区地震危险性研究文集. 昆明:云南科技出版社.
- 王彩勤,郑斯华,刁桂苓,等.2004. 张北地震序列的尾波  $Q$  值研究 [J]. 防震减灾工程学报, 24 (1): 37—40.
- 王伟君,刘杰.2004. 1999 年岫岩地震序列尾波  $Q_c$  的变化过程 [J]. 地震, 24 (4): 38—44.
- 王伟君,刘杰.2006. 云南 4 个地震序列  $Q_c^{-1}$  值变化特征对比研究 [J]. 地震, 26 (1): 19—25.
- 徐彦,苏有锦,秦嘉政.2004.  $Q$  值研究动态 [J]. 地震研究, 27 (4): 385—389.
- 张小涛,韩利萍,吕凤章,等.2007. 利用 Sato 模型研究邢台震区尾波  $Q_c$  值特征 [J]. 西北地震学报, 29 (3): 218—223.
- 朱新运,刘杰,张帆.2006. 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, 29 (1): 76—80.
- 朱新运,杨钢宇,张震峰,等.2005. 基于 Sato 模型的近震 S 波尾波  $Q$  值求解及分析软件研制 [J]. 地震地磁观测与研究, 26 (3): 63—70.
- Aki K, Chouet B. 1975. Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects [J]. JGR, 80: 3322—3342.
- Aki K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves [J]. JGR, 74: 651—681.
- Beroza G C, Cole A T, Ellsworth W L. 1995. Stability of coda wave attenuation during the Loma Prieta, California earthquake sequence [J]. JGR, 100 (B3): 3977—3987.
- Chouet B. 1979. Temporal variation in the attenuation of earthquake coda near Stone Canyon, California [J]. Geophys Res Lett, 6: 143—146.
- Dominguez T, Rebollar C J. 1997. Attenuation of coda waves at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico [J]. BSSA, 87 (1) 368—1 374.
- Herrmann R B. 1980. Estimates using the coda of local earthquakes [J]. BSSA, 70: 447—468.
- Jin A, Aki K. 1986. Temporal changes in coda  $Q$  before the Tangshan earthquake of 1976 and the Haicheng earthquake of 1975 [J]. JGR, 91: 665—673.
- Puller J. 1984. Attenuation of coda wave in New England [J]. BSSA, 1149—1166.
- Sato H. 1977. Energy propagation including scattering effect: Single isotropic scattering, approximation [J]. BSSA, 68: 923—948.
- Sato H. 1988. Temporal changes in scattering and attenuation associated

with the earthquake occurrence – areviewof recentstudies on coda waves [J]. Pure App Geophys, 126: 465 –497.

Yoshihiro H, Nobuhiko H, Muneyoshi F, *et al.* 2000. Temporalchanges in coda  $Q$  and b value due to the static stress than – ges associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake [ J ]. JGR, 105 (B3): 6141 –6151.

Study on the  $Q_c$  Value Characteristics for Sequence of Gansu Linze Swarm in June 2004

LI Xing-jian, XU Yu-hong, LI Dong-sheng,  
LIU Xiao-ming, LIU Hong-bin, DING Hong, CHEN Jian-jun  
(Gaotai seismostation, the seismology bureau of Gansu province, Gaotai 734300, Gansu, China)

Abstract

By means of Sato scattering of single model and Gaotai seismic station of the near-field digital seismic records, this paper studies the characteristics of Linze swarm sequence coda  $Q_c$  value, also draws a conclusion of  $Q_c$  value changing with frequency, which is  $Q_c(f) = (27.67 \pm 2.94)f^{(0.992 \pm 0.0411)}$ . Analysis found that during the period of frequent middle earthquake, ups and downs of  $Q_c$  values is weak and  $Q_c$  value is low; The results of this study is similar with the Minle-Shandan earthquake sequence. So we believe that this result is similar with the medium characteristics in the middle section of Qilian mountain.

**Key words:** Sato model;  $Q_c$  value characteristics; Linze swarm