

苏中沿海地区尾波 Q_c 值特征研究

杨 云^{1,2}, 霍祝青²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘 要: 利用 2000 年至 2008 年苏中沿海地区射阳地震台和海安地震台记录到的 100 km 范围内 $M_L 2.0$ 以上地震波形资料, 基于 Sato 模型, 采用不同的固定流逝时间, 计算了该区域的尾波 Q_c 值。结果表明: 该区为尾波 Q_c 值低值区域, 随着流逝时间的增大尾波 Q_c 值也变大; 在 2006 年 11 月份东台 $M_L 4.1$ 震群和 2007 年 5 月 6 日响水 $M_L 4.0$ 地震前尾波 Q_c 值有明显增大现象。

关键词: 尾波 Q_c 值; Sato 模型; 苏中沿海地区; 流逝时间

中图分类号: P315.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)02-0166-05

Characteristics of Coda Wave Q_c Value in the Coastal Area of Central Jiangsu Province

YANG Yun^{1,2}, HUO Zhu-qing²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the scatter model(Sato), using earthquake wave form data with $M_L \geq 2.0$ from 2000 to 2008 recorded by Sheyang and Hai'an seismic stations in the coastal areas of central Jiangsu province, the Q_c values of coda with different lapse time in this region is calculated. The result indicates that this region has low Q_c value, and the Q_c values increase with lapse time increasing. Before Dongtai $M_L 4.1$ earthquake swarm in November, 2006 and Xiangshui $M_L 4.0$ earthquake on May 6, 2007, the Q_c values of coda increased apparently.

Key words: Coda wave value Q_c ; Sato scatter model; Coastal area of central Jiangsu province; Lapse time

0 引言

在地震波的研究中, 对地震尾波的研究近年来受到高度重视^[1-3]。地震尾波是由地下介质的不均匀性所激发的, 它是介质不均匀性的最直接证据之一。Jeffreys 最早将尾波研究用于地震学。上世纪 60—70 年代 Aki 用散射模型解释了尾波的形成^[4-6]。由于地球介质的不均匀性, 弹性波在传播过程中遇到这些不均匀体发生散射, 地震尾波就是台站记录到的这些延迟了的散射波。尾波 Q_c 值就是描述地球介质非均匀程度的确定性指标, 其大小及对频率的依赖程度反映了介质的非均匀性和非弹性特征。

目前尾波 Q_c 值衰减特征的研究已经取得了一些重要的成果^[7-13]。很多地震研究工作者利用地方震尾波衰减探索了尾波 Q_c 值在大震前后的变化, 以此寻找大震的前兆信息。研究结果表明, 虽然存在地震前尾波 Q_c 值下降的震例, 但是在震前一两年靠近发震地点的地区尾波 Q_c 值出现明显升高, 并且在主震后该地区尾波 Q_c 值迅速降低是更为普遍的现象。有研究者将该现象总结为: 大震前由于受较强应力作用, 地壳介质特别是韧性层破裂的增加可使尾波 Q_c 值减小; 但临近破裂时由于应力增强导致裂隙闭合, Q_c 值反而增大; 大震后由于作用在地壳韧性层的应力得到释放, 从而介质松弛, 致使反映其介

收稿日期: 2009-12-23

作者简介: 杨 云(1979—), 男(汉族), 江苏兴化人, 研究实习员, 现主要从事地震预报工作。

质衰减特征的尾波 Q_c 减小。

本文利用江苏苏中沿海地区的射阳地震台和海安地震台记录到的 2000 年至 2008 年的地震波形资料,采用 Sato 单次散射模型,计算这两个台站 100 km 范围内的地震尾波 Q_c 值,并对其特征进行讨论。

1 构造背景及资料的选取

苏中沿海地区属于长江中下游—南黄海地震带,在地质构造上位于南黄海南部坳陷和勿南沙隆起区。该区域地质构造复杂,断裂分布众多,主要断裂走向为 NEE 向,有些断裂迄今仍活动强烈。在苏中沿海沿岸发育有 NW 向滨海大断裂,穿经南部坳陷和勿南沙隆起区,研究表明该断裂具挤压右旋走滑性质,全新世以来有明显活动,是一条具有发生破坏性地震条件和能力的活动断裂。南部坳陷和勿南沙隆起的交界地带存在一条近东西向的拼茶河断裂,研究表明它是一条现今活动强烈的孕震构造。历史地震统计表明,苏中沿海地区的地震强度和频度都较高,是江苏及邻区中强地震活动的主体区域。但是该区域覆盖层较厚,地震波记录中噪声较大,对数字地震工作的开展造成了一定的困难。且该地区的地震台站较少,可用来开展研究的波形资料也较少。本文选取了台站周围 100 km 范围内 2000 年至 2008 年的 $M_L2.0$ 以上波形记录较好的地震,其震中分布如图 1。

2 数据分析原理及资料处理

2.1 数据分析原理

依据 Sato 模型,在一定频率下尾波振幅与时间的函数关系可以表示为

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

其中 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; $a = t/t_s$, t_s 为 S 波的流逝时间; K 是依赖于时间的传播因子。 K 及 A_c 分别由式(2)和(3)给出:

$$K(a) = 1/a \ln[(a + 1)/(a - 1)] \tag{2}$$

$$A_c(t) = (A_T^2 - A_n^2)^{1/2} \tag{3}$$

式中 A_T 是所取时间窗内地震波均方根; A_n 为 P 波到达前适当时间段记录的均方根,用于进行地震波的噪声校正。

式(1)中 $C(f)$ 是与频率有关的影响因子,对相同地震的同一频率 $C(f)$ 为常数,可见 $F(t)$ 和 $t - t_s$

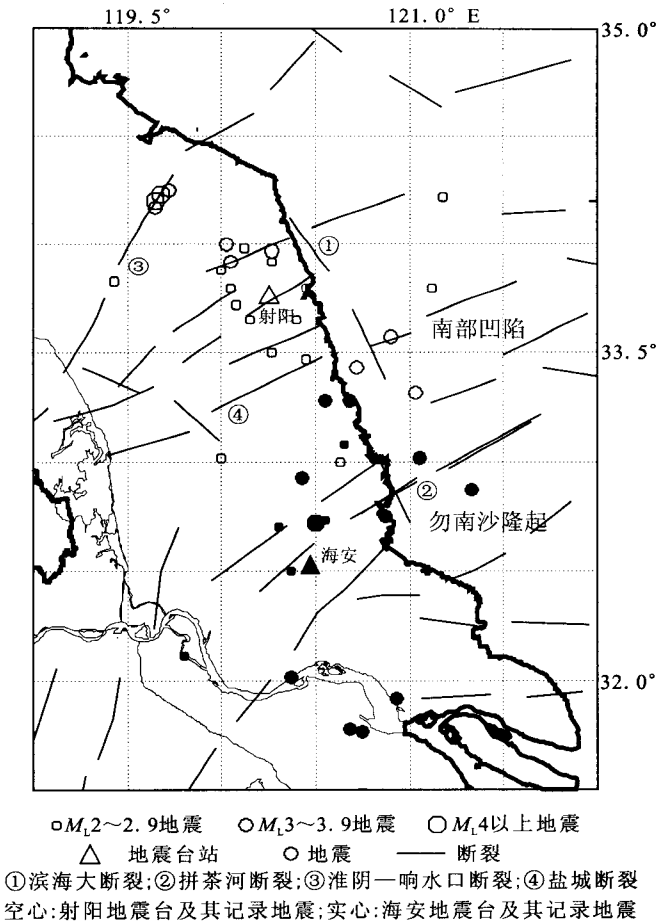


图 1 苏中沿海地区地震台站及震中分布图
Fig. 1 Distribution of seismic stations and epicenters in the coastal area of central Jiangsu province.

之间存在线形关系,因此可根据式(1)拟合得到 b , b 与 Q_c 的关系式为

$$Q_c(f) = (2\pi f l g e)/b \tag{4}$$

$$Q_c(f) = Q_0 f^\eta \tag{5}$$

2.2 资料处理

资料处理过程中我们采用朱新运等研制的基于 Sato 模型的近震 S 波尾波 Q_c 值求解及分析软件^[14],对每一条地震记录的三分向数字波形进行频谱分析。选用 6 级巴特沃斯滤波器进行滤波处理。为了更好的对尾波 Q_c 值进行对比讨论,采用固定流逝时间 70 s, 100 s 和 140 s 分别进行计算。图 2 给出了典型波形的计算实例。

3 计算结果及分析

我们利用选取的地震数据进行拟合,获得了射阳地震台和海安地震台记录到的每个地震不同流逝时间下的尾波 Q_c 值(频率为 1 时的 Q_c 值)(表 1, 表 2)。

表 1 射阳地震台记录到的地震不同流逝时间下的尾波 Q_c 计算结果比较

地震		不同流逝时间下的计算结果					
		70 s		100 s		140 s	
		时间	震级/M	Q_0	η	Q_0	η
2000-04-10	4.0			84.89	0.838	130.44	0.789
2000-04-10	3.2			41.41	1.126	47.76	1.153
2000-12-26	3.6			24.53	1.282	67.46	1.059
2001-04-16	2.6			33.03	1.189	36.28	1.357
2002-09-11	3.4			85.79	0.871	100.02	0.858
2003-03-08	2.5			26.04	1.205	35.6	1.316
2003-03-22	3.0			50.77	0.967	89.97	0.854
2003-11-02	2.6			38.75	1.073	47.29	1.166
2004-05-27	3.9			20.12	1.52	69.96	1.05
2005-09-07	2.3			53.23	0.967	61.96	1.205
2006-01-05	2.7			9.94	2.285	59.74	1.773
2006-02-03	2.1			50.01	0.972	78.32	1.018
2006-08-19	2.4			85.06	0.813	126.23	0.936
2007-01-03	2.2			42.84	1.033	80.44	0.975
2007-01-26	3.1			75.27	0.876	53.05	1.141
2007-05-06	4.0			29.66	1.285	81.45	0.968
2008-05-13	3.8			40.4	1.014	63.58	0.941
2008-05-22	2.5			26.71	1.329	43.08	1.264
2008-08-22	2.7			27.08	1.175	29.15	1.369
2008-08-24	3.0			43.20	1.013	89.04	0.820
2008-09-14	3.2			32.04	1.346	40.06	1.43

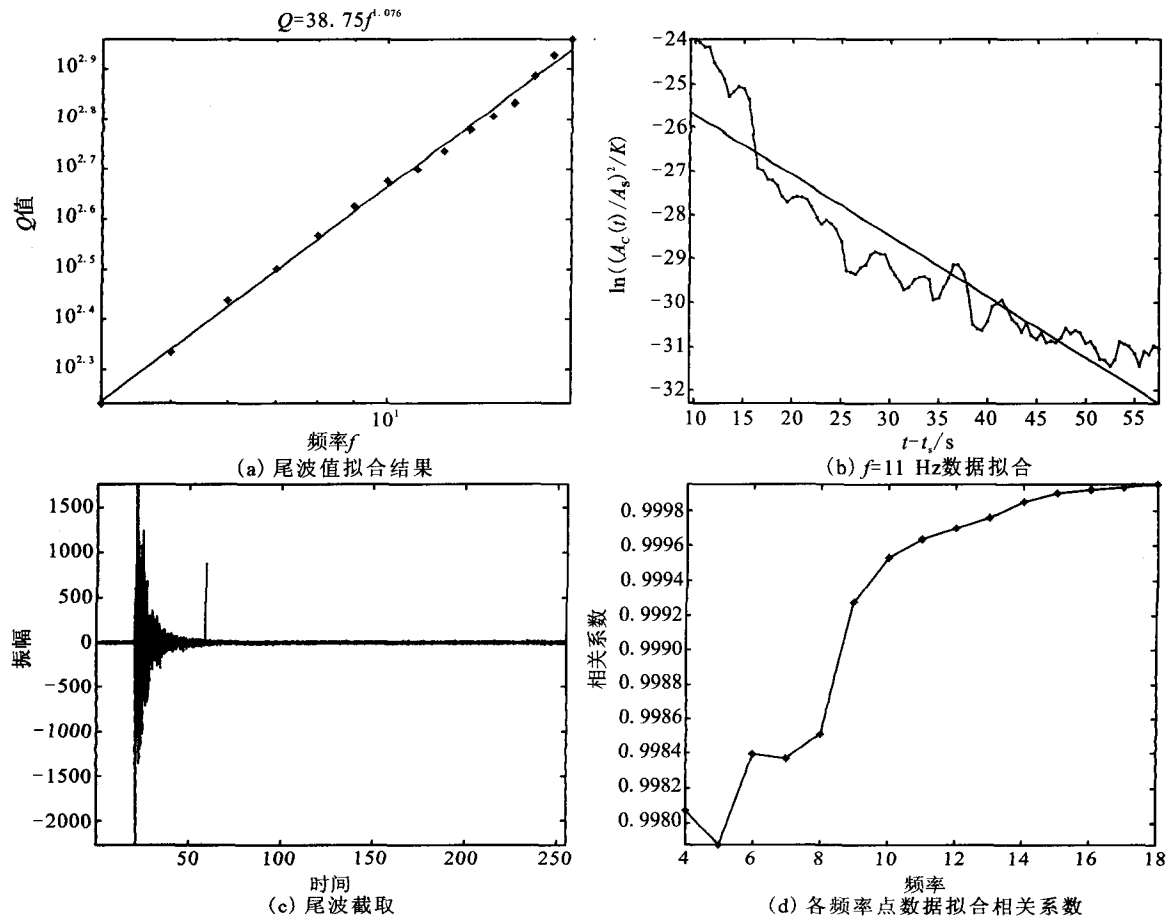


图 2 流逝时间 70 s 尾波 Q_c 计算实例
Fig. 2 Example of coda Q_c value with 70 s lapse time.

表 2 海安地震台记录到的地震不同流逝时间下的尾波 Q_0 计算结果比较

地震		不同流逝时间下的计算结果					
		70 s		100 s		140 s	
		时间	震级/ M	Q_0	η	Q_0	η
2000-02-06	3.2			38.46	1.111	58.09	1.047
2000-03-03	3.9			65.20	0.98	84.34	0.957
2000-04-26	2.8			31.94	1.4	203.52	0.82
2001-11-03	3.7					117.51	0.829
2001-12-25	3.9			46.17	1.041	85.91	0.914
2002-06-14	3.5			88.04	0.863	115.83	0.863
2002-06-15	3.1			38.31	1.206	31.21	1.675
2003-03-17	2.7			65.32	1.075	106.12	1.109
2004-04-21	3.7			32.41	1.217	58.94	1.073
2004-05-27	3.9			48.01	1.150	90.25	0.93
2004-06-21	3.8			76.49	0.927	54.91	1.119
2004-12-06	3.8			41.80	1.151	92.47	0.909
2005-11-15	2.6			57.97	1.088	127.09	0.988
2006-08-10	2.5			93.42	1.024	270.78	0.817
2006-09-12	2.1			190.45	0.788	342.02	0.780
2006-11-16	3.2			42.17	1.049	62.35	1.067
2006-11-19	3.1			34.32	1.101	61.28	1.068
2006-11-20	2.0			81.13	1.37	78.81	1.725
2006-11-21	2.3			67.97	1.162	85.47	1.334
2006-11-25	4.1			35.35	1.169	65.60	1.014
2007-05-16	3.2			21.14	1.492	153.04	0.867

由表 1 和表 2 的结果可以看出,对同一地震,流逝时间越大得到的 Q_0 值越大,并且 Q_0 值和地震的震级大小无关,这和理论计算以及前人的结果是一致的。在较小流逝时间(70 s)条件下尾波 Q_0 值结果较稳定;而在 100 s 和 140 s 流逝时间下尾波 Q_0 值的稳定性没有 70 s 条件下好。其原因可能是:流逝时间越长,涉及散射波波阵面围成的椭球体的范围越大,而苏中沿海地区与周围邻近地区的地质构造背景有一定的差异,所以造成了长流逝时间下的尾波 Q_0 值结果稳定性稍差。

研究中我们发现,不同的流逝时间得到的尾波 Q_0 值绝对值虽然不同,但是随时间序列分布的变化形态是基本一致的。以 70 s 流逝时间为例,对两个台站得到的尾波 Q_0 作时间序列特征分析:射阳地震台附近的尾波 Q_0 均值为 43.879, η 值均值为 1.151;海安地震台附近的尾波 Q_0 均值为 59.804, η 均值为 1.144;表明该地区属于尾波 Q_0 低值,对频率依赖强的地区。

在射阳地震台记录到的地震中(图 3(a)),2006 年 8 月 19 日和 2007 年 1 月 26 日两次地震的尾波 Q_0 较高,分别达到 85.06 和 75.27,其后在 2007 年 5 月 6 日发生响水 $M_L4.0$ 地震。在海安地震台记录到的地震中(图 3(b)),2006 年 8 月 10 日和 2006 年 9 月 12 日两次地震的尾波 Q_0 较高,分别达到

93.420 和 190.453,其后 2006 年 11 月份在原地发生了最大为 $M_L4.1$ 地震的东台震群活动;并且在主震后尾波 Q_0 值迅速回复到原先的均值水平。可见在 2006 年东台震群和 2007 年响水地震前该区域的区域应力场都有一个增强过程,反应在尾波 Q_0 值上就是出现明显增高,并且在地震之后应力迅速得到释放,尾波 Q_0 值回复到均值水平。

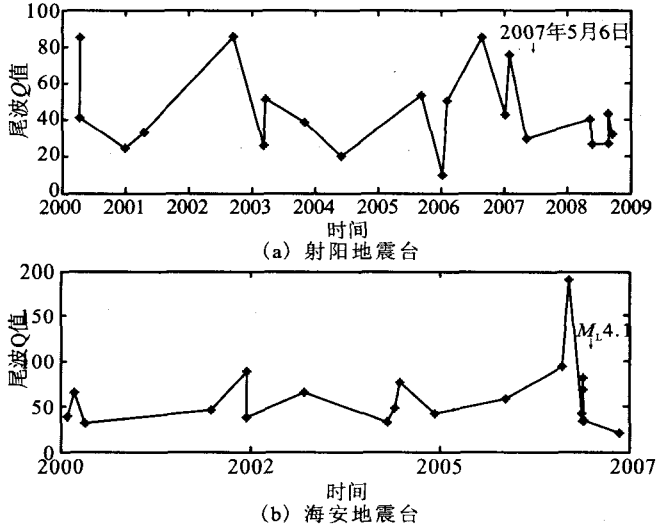


图 3 两个台记录的地震尾波 Q_0 值曲线(流逝时间 70 s, 频率 1 Hz)

Fig. 3 The coda Q_0 value curves recorded by two stations (lapse time=70 s, 1 Hz).

另外我们对相同流逝时间下不同频率点的 Q_0 值作时间序列特征分析发现,不同频率点下的尾波 Q_0 值变化形态基本相似。

4 结论和讨论

尾波 Q_0 值是通过尾波衰减特征的研究求取区域介质品质因子的一种方法, Q_0 值的大小反映了地壳介质对地震波衰减程度的高低。 Q_0 值对频率的依赖程度与地壳的均匀程度有关,依赖性越强,地壳介质均匀程度越低,地震活动水平越高。从计算结果来看,本文研究区域属于低 Q_0 值且对频率强依赖地区。

由不同地震的尾波测量得到的品质因子对应于不同的地震波射线路径,品质因子的时间变化除了与区域应力场的变化因素有关之外,还与区域介质的横向和纵向非弹性程度和散射波波阵面围成的椭球体的范围有关。 Q_0 值和 η 值的大小反映了地震波在震源和记录台站为两个焦点的散射椭球体范围内介质中传播时的衰减特征。计算过程中不同的流逝时间、震源距对应于不同的散射椭球体的体积。为了便于在时间轴上对计算结果进行比较,我们采用了相同的流逝时间结果做对比。鉴于研究过程中波形资料选取的限制,我们选择了台站 100 km 范围内的地震,震中距相对较大,所以固定的流逝时间也较长,分别选取了 70 s, 100 s 和 140 s。三种不同的流逝时间计算结果对比显示,相同地震的流逝时间选取越长所得到的尾波 Q_0 值越大,和理论计算以及前人的结果一致;相同的一组地震,不同流逝时间条件下虽然尾波 Q_0 值的绝对值不相同,但是它们随着时间变化的形态基本一致。

理论上可以根据观测台站记录的具有相同或相近射线路径的地震波尾波品质因子的时间变化动态特征来探讨其与地震孕育过程间的关系,也有很多研究取得了很好的成果。在本文的研究时段内苏中沿海地区没有发生 M_5 以上破坏性地震,但是 2006 年 11 月在江苏东台发生最大震级为 $M_L 4.1$ 的震群活动和 2007 年 5 月 6 日在江苏响水发生 $M_L 4.0$ 地震,属于本地区显著性地震事件,分别距离海安地震台和射阳地震台的距离都小于 100 km。在对两个台站得到的尾波 Q_0 值作时间序列特征分析时发

现,在这两次显著地震事件前尾波 Q_0 值都出现了明显增大,并且震后迅速回复到原均值水平。这个现象对该地区的中强地震的预报有一定的意义。目前本地区的尾波 Q_0 值都处于均值水平,没有明显的增大迹象。

本文研究过程中得到浙江省地震局朱新运老师、江苏省地震局周云好研究员以及张鹏博士的热情帮助和悉心指导;在波形获取过程中得到江苏省地震台网中心全体同志的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

[参考文献]

- [1] Andesong D L, R S Hart. Q of the Earth[J]. J. Geophys. Res., 1978, 83(B12): 5869-5882.
- [2] 周连庆,赵翠萍,修济刚,等.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,2008,2:1-11.
- [3] 徐彦,苏有锦,秦嘉政. Q 值研究动态[J].地震研究,2004,27(4):385-389.
- [4] Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves[J]. J. Geophys. Res., 1969, 74: 615-631.
- [5] Aki K, Chouet B. Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects[J]. J. Geophys. Res., 1975, 80: 3322-3342.
- [6] Sato H. Energy propagation including scattering effect: Single isotropic scattering, approximation[J]. BSSA, 1977, 68: 923-948.
- [7] Jin A, Aki K. Temporal change in Q_c before the Tanshan earthquake of 1976 and the Haicheng earthquake of 1975[J]. J. Geophys. Res., 1986, 91: 665-673.
- [8] 李白基,秦嘉政,钱晓东,等.云南姚安地区的尾波衰减[J].地震学报,2004,24(1):47-52.
- [9] 马宏生,刘杰,张国民,等.尾波值随时间变化在地震预测中应用的研究[J].地震,2005,25(4):39-48.
- [10] 刘希强,石玉燕,曲均浩,等.品质因子的尾波测定方法讨论[J].中国地震,2009,25(1):11-23.
- [11] 朱新运,张帆.浙江及邻区尾波 Q 值研究[J].西北地震学报,2006,28(2):108-113.
- [12] 魏红梅,贺曼秋,黄世源,等.重庆荣昌地区尾波 Q 值特征[J].西北地震学报,2009,31(1):97-101.
- [13] 李兴坚,许玉红,陈建军,等.利用 Sato 模型研究明乐—山丹地震值特征[J].西北地震学报,2009,31(2):191-195.
- [14] 朱新运,杨钢宇,张震峰.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,2005,26(3):64-70.