

地震尾波的某些特性的探讨

顾瑾平 虞雪君 吕广庭 盛国英

(国家地震局 兰州地震研究所)

摘 要

本文在对人工地震资料的尾波特性进行探讨的基础上,进一步以天然地震的资料为对象,讨论了尾波振幅衰减特性 α 的变化情况和尾波频率随时间的变化特性。天然地震的资料分两类,一是用本区(强震震源区)发生的小震资料,二是用外区(强震震源区以外)发生的中小震资料。两类地震均由同一组台站记录。

通过一些天然地震震例的分析、对此,可得到以下结果:

- (1) 对尾波散射区的考虑。
 - (2) 尾波特征参量携带强震前兆信息的可能性。
 - (3) 不同物量参量变化一致性的初步认识。
 - (4) 天然地震源,人工地震源、实验三者的尾波参量随时间变化的良好吻合。
 - (5) 品质因素相对变化趋势的简易估计。
- 不可否认方法的局限性及各种干扰因素的存在。

一、前 言

由于地球内部的不均匀性,地震激起的体波、面波及其转换波都会在不均匀处一次或多次散射产生次生波,一定范围内次生波的迭加形成尾波。当散射区孕震时,该区的介质受应力作用,会发生应变,积累应变能,並出现大量的微裂隙,相当于增加了若干不均匀处,从而导致散射尾波的各项物理特性的变化。

在1982年的工作〔1〕中,我们曾以江苏溧阳1979年7月9日6.0级地震前后的安徽马鞍山爆破资料为基础,探讨了二个固定台上的记录尾波中,主震以前尾波的走时持续时间特性、频率随时间的变化特性及振幅衰减特性等的变化情况〔1〕,可以看到三者基本上同步的变化,且在目前的观测和分析水平上,分辨不出途径的影响。(详细的内容已有专文)。我们认为尾波的这些参量的讨论还可以进一步引伸来求地区的品质因素 Q 、地震矩等等。而且只要经过简单的统计、计算就可以得到相似的结果。下面将这方面的工作作一简要介绍。

二、由尾波资料确定散射区品质因素的相对变化

由于地球介质的非完全弹性,地震波在传播过程中由于能量被吸收而使振幅衰减。 Q 值是衡量地震波在地球介质中衰减程度的一个主要物理参数。

地震波在传播过程中能量的吸收主要表现在地震波位移随距离和时间的衰减。在一般的品质因素的求解方法中,所使用的台站资料往往要体现地震波位移随距离和时间的衰减过程。不同的散射距离,在同一台上记录到的尾波到时不一样,而地震波位移的衰减主要由于波经过的散射距不同,被吸收的能量不同引起,所以只要用一个台的尾波资料即可估计散射区中的品质因素的相对变化趋势。但因震源过程不是“脉冲”状,震源过程的延续将造成散射波相当错综复杂的迭加和干涉,这样求得的品质因数称之为 Q_1 。

地震波位移随时间的衰减函数为 $e^{-\alpha t}$,而能量与振幅的平方成正比。因而在一个周期 T 内,能量的消耗为:

$$\frac{\Delta E}{E} = 1 - e^{-2\alpha T} \quad (1)$$

$$\text{则} \quad \frac{1}{Q} = \frac{1 - e^{-2\alpha T}}{2\pi} \approx \frac{2\alpha T}{2\pi} = \frac{\alpha T}{\pi} \quad (2)$$

利用(2)式可求出 Q 值。

设尾波的形状函数为

$$A = A_0 e^{-\alpha t} \quad (3)$$

根据(3)式,取对应尾波段中一定的时间段长度为 T ,取第 i 及第 $i+1$ 个时间段中的最大振幅为 A_i 和 A_{i+1} ,则对每两个相邻时间段有:

$$\ln \frac{A_i}{A_{i+1}} = (t_{i+1} - t_i) \alpha_i$$

$$\alpha_i = \frac{1}{T} \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (4)$$

对每两个相邻时间段可以得到一个 α_i 值,对于同一个地震,尾波的振幅的平均衰减系数为:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \quad (5)$$

其中 n 为时间段的个数。

将(5)式代入(2)可推算 Q_1 值,并作出 Q_1 值的随时间变化曲线。我们利用了马鞍山矿山爆破时在太平山台记录的尾波资料作出了散射区内平均的 Q_1 值。有关爆破源与台站资料的情况参见文献[1](图1)。

Q_1 值的变化曲线如图2所示。由图2可以看出正常期平均 Q_1 值为54,异常期上升为108,异常期幅度超过基值误差的4倍,异常十分明显。1979年7月9日溧阳6.0级地震前,于4—7月 Q_1 均值降到65,震后于1979年10月—1980年3月,平均 Q_1 值为79。对比 Q_1 值的变化曲线与南京台的应力曲线(图2)[2],可见两者的变化比较同步,只是 Q_1 异常提前一些。其原因可能是:当孕震区应力增加时,其介质变得紧密,造成地震波在介质中传播时能量损耗小,因而 Q_1 值就大。 Q_1 值是随着应力的变化而变化,所以研究 Q_1 值的变化有可能

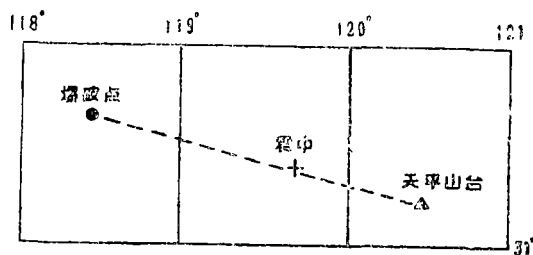
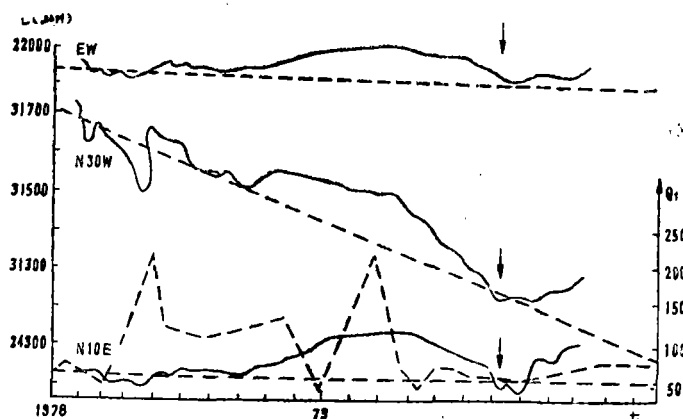


图1 爆破点、震中与台站的相对位置

Fig. 1 The Locations of explosion, epicenter and station.

为研究该地区介质的应力状况提供一定的信息。对于某区域，相对大的 Q_1 值的出现将是发生大震的可能条件之一。

这种方法虽有一是局限性，但比较简便、易行。 Q_1 值的绝对值较小的原因是由于所使用的是人工地震资料、震源浅。在本方法中没有考虑震源情况，因此对品质因素相对变化只是一种估计。

图2 南京台应力曲线和天平山尾波品质因数 Q_1 曲线(虚线)Fig. 2 The stress curve of Nanjing and Q_1 curve of Tianpingsan station.

三、松潘地震前后天然地震尾波特性变化

我们以孕震区及邻近外区的天然地震为资料，探讨了1976年四川松潘7.2级地震前后一系列天然地震的尾波特性的变化。

由于很难严格确定尾波持续时间，我们只按(4)式求得的 α 和(6)式求得的 K 值^[1]进行讨论。

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i t_i - \left(\sum_{i=1}^n f_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{n \sum_{i=1}^n f_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (6)$$

1. 以孕震区即南坪—松潘—平武—一带的天然地震资料（即本区地震），求松潘地震前后的 α 、K值的变化。

图3是台站与所取天然震源的位置，武都、甘谷、兰州、文县各台所记的地震射线大都来自孕震区。这四个台处于不同的距离上，相应的散射区的大小各不相同，有利于对比观测尾波特性曲线的变化情况。

α 值随时间的变化曲线如图4所示。由图可见，四条曲线的同步性较好。1971年底出现一个高值，1972年~1975年上半年 α 均处于低值，到1975年下半年回升，这可能与1976年的7.2级地震有关。从形态来分析，武都台与文县台更相似、甘谷台与兰州台更相似。从图中还可以看出，四条曲线中兰州台的 α 值几乎在任何时候都低于其它三个台。

K值随时间的变化曲线如图5所示。1971年底K与 α 一样也出现一个高值，继而1972—1974年均处于低值，75年—76年K值回升，数值明显增高，震后呈锯齿状的跳跃，K值曲线与大震的对应关系似乎比较明显。兰州台由于距所选用的天然地震震源远，而这些地震的震级一般较小，兰州台无法作出有足够资料的K值曲线。

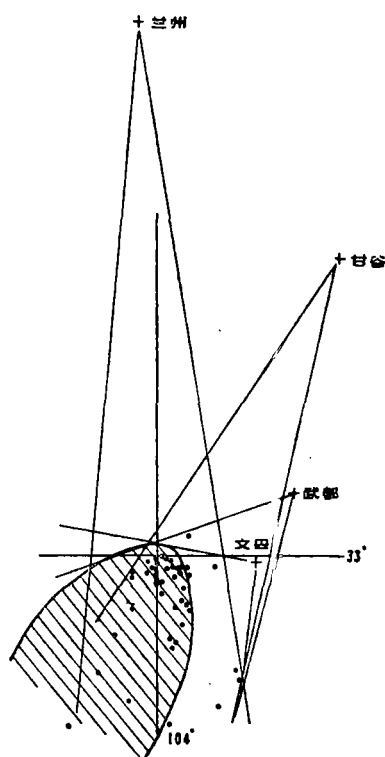


图3 松潘地震、孕震区与台站的相对位置（黑点为天然地震的震源，阴影区为大震孕震区）

Fig. 3 The relative locations of the inside epicenters prepared seismic region and stations.

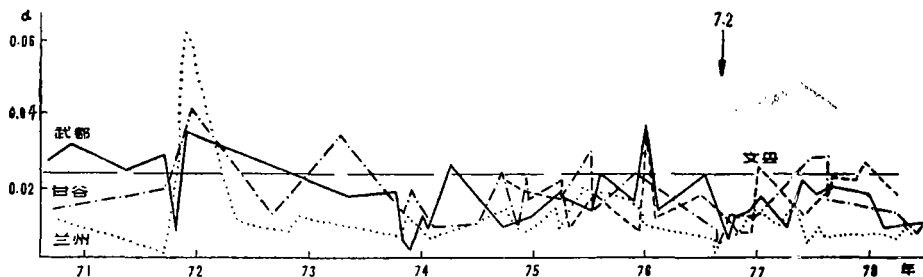


图4 甘谷、兰州、武都、文县台的 α 值变化图

Fig. 4 The α curves changed with time at some stations.

2. 以外区即阿坝—马尔康—壤塘一带天然地震为资料求松潘地震前后各台 α 、K值的变化。

图6是台站与所取天然震源的位置，由图6可见，武都台所取的地震射线均经过大震震

源区，而岷县台与兰州台所取的地震射线未经过震源区。

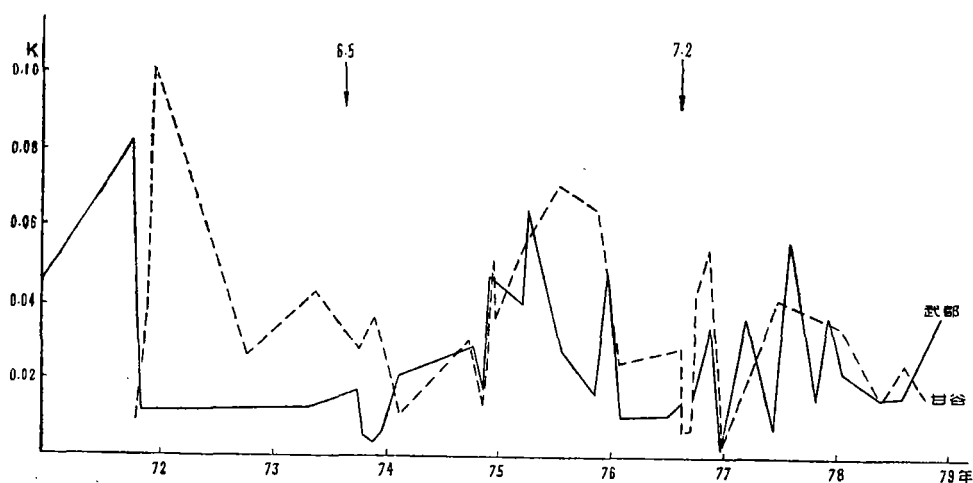


图5 武都台、甘谷台的K值变化图
Fig. 5 The K curves changed with time.

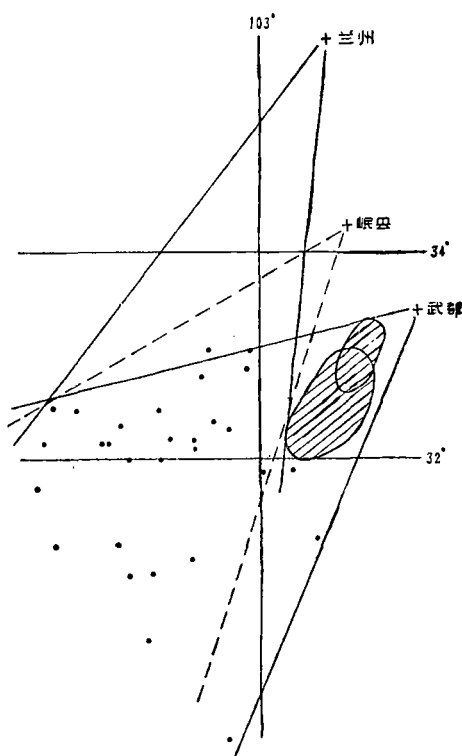


图6 外区地震、孕震区与台站的相对位置
(黑点为外区地震的震中、阴影区为大震孕震区)
Fig. 6 The relative locations of the outside epicenters.
prepared seismic region and stations.

α 值随时间的变化曲线如图7所示。1972年武都台无资料，但与70年、71年初比较，73

年南坪6.5级地震后，武都台 α 值逐步下降，74年全年均处于低值，75年底、76年初又上升，最大变化幅度达百分之四十，异常比较明显。同样岷县的异常也较明显

三个台所反应的 α 值变化同步性较好。尽管兰州台距离较远，其变化趋势却与武都、岷县台基本一致。

岷县台的地震源射线几乎不穿越孕震区，但其变化也能与大震相对应，说明尾波能够携带散射区域内孕震的前兆信息。

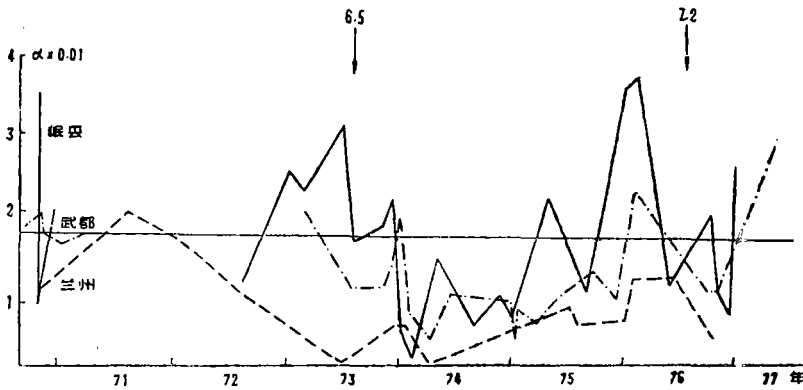


图7 武都台、岷县台和兰州台的外区地震尾波的 α 值变化图

Fig. 7 The α curves changed with time of outside epicenters at some stations.

K值随时间的变化曲线如图8所示。三个台所得的曲线形态差不多（其中兰州台距离最远，其K值低而稳定），震前K值回升很不明显，这一点与利用孕震区资料所作K值大不一样，其原因有待探讨。

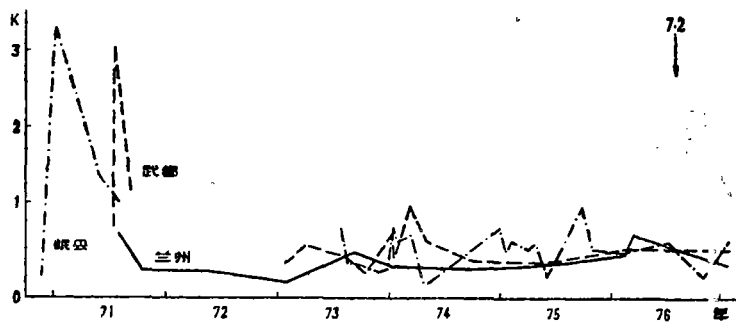


图8 武都台、岷县台和兰州台的外区地震尾波的K值变化图

Fi. 8 The k curves changed with time of outside epicenters at some stations.

四、台湾地震尾波的处理结果

取1975年7月到1978年12月在台湾发生的一些天然地震为资料，求在福建省的福州台

泉州台所记录的尾波的 α 参数变化。这段时间内从源到台之间的区域没有大震发生，只是在相反方向上发生了一次7.0级地震及一次7.3级地震。从结果来看（图9），二个台的曲线同步性很好，对相反方向上两次大震的反映显然是不明显的。

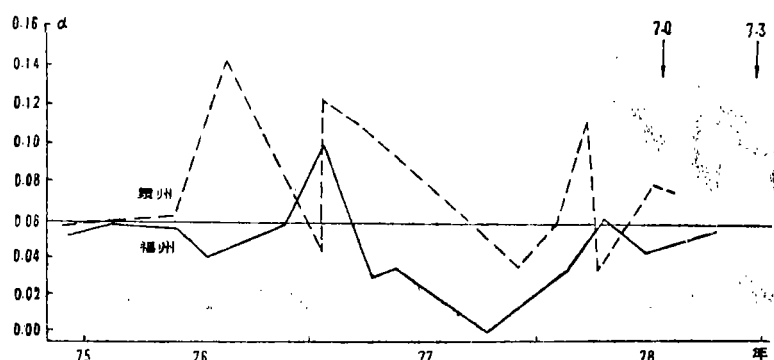


图9 台湾地震的 α 值变化图

Fig. 9 The α curve changed with time before the Taiwan earthquake.

五、实验结果

为了研究地震前出现的地震波参数的异常变化，对岩石破裂前弹性波参数的变化进行了实验研究^[4]。实验采用的岩石标本是砂岩。试件共分三组。第一组为干燥砂岩标本，第二组为部份饱和，第三组为饱和的岩石标本。其平均吸收率见表1。

图10给出了 α 参数的实验结果。其中（1）、（2）、（3）为不同饱和状态的试件。由图可见，随压力的增加， α 均表现为下降趋势。干试件的这种下降一直持续到破裂，而湿试件在 P/P_B 等于70~80%处， α 值回升。这与用人工震源或天然震源的观测结果吻合较好。

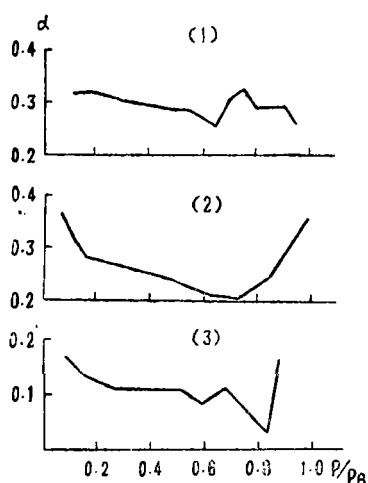


图10 衰减系数 α 随压力的变化

(1) 干试件 (2) 部份饱和试件 (3) 饱和试件
Fig. 10 The α curve changed with pressure in a experiment.

岩石样本的平均吸水率 表1

岩石标本	干燥	部份饱和	全饱和
吸收率(%)	0	0.94	1.05

在以上的实验中，水的饱和程度是影响试件结果的一个重要因素。

六、讨 论

1. 有关尾波散射区的范围

MaLim (1978) 研究了作为尾波起因的一级散射，认为在一定的时刻 t ，影响尾波振幅的一级散射区域将是地震和地震仪为焦点的椭圆区。 A_k 认为散射区的散射半

径可用以下公式来估计:

$$r = ut/a \quad (7)$$

其中 u 为群速度, t 为所取的时刻, a 为参数。以上二种结果有一个共同点, 即尾波谱基本上不受传播距离的影响^[5], 只与台站周围一定半径 r 范围中地壳的破坏程度有关。

从以上震例来看, 利用外区天然震源观测 α 值的变化, 可以获得强震的信息。如图7所示, 兰州台的 α 值与强震的对应关系差一些, 不能单独用来预报。岷县台记录的地震射线基本上是不经过强震孕震区的, 地震波的散射半径估计可达200公里, 该台观测到的 α 值震前异常很明显。对于参量 K 而言, 利用孕震区内的地震观测到的 K 值震前异常变化似乎比利用外区地震明显。这是由于 α 、 K 的物理意义不同。从预报的角度讲, 用 K 参量时, 散射半径应取小一点, 大约100~150公里, 而且最好选用孕震区内的地震。如图9所示, 散射半径达350公里左右, 观测到的前兆信息就很弱了。

2. 有关尾波几个物理参量的初步讨论

根据前面的讨论可知, α 实质上是表征介质应力状态的一种物理量, 它可能反应震源外圍应力场的变化状态, 因此在稍远的距离上, 且地震射线不经过孕震区, 也能观测到一些强震的前兆信息。 K 值反应了地震波所包含的频率随时间的变化情况, 在震源的附近, 地震波的频率变化复杂, 反应孕震过程, 相应的近场可能比远场好, 因为远场本身波的频率可能变得比较单一。这可能是利用孕震区地震观测到的 K 值异常变化与强震对应较好的原因。

在[1]文中, 我们曾经用尾波的持续时间 L 作参量, 但对于天然地震, τ 受震级的影响太大, 不宜使用。对 α 、 K 而言, 震级越大, 可取的时间段越多, 从而 α 、 K 的精度高些。但时间段太长了, 会受仪器放大倍数的影响, 一般的短周期仪器的频率特征曲线在边缘部位急骤下降, 放大倍数的差异较大, 所以时间段也不宜过多。我们所选用的地震的震级(M_s)一般为3.0—5.0, 作出几个台的震级与 α 、 K 的相关系数为0.04~0.05, 说明震级对 α 、 K 的影响不大。

3. 实验结果讨论

本文用天然地震(分孕震区与外区震源二种)的研究结果与实验结果及[1]文中的采用人工震源的研究结果, 可以得出以下几点认识:

(1) α 、 K 变化趋势一致, 尤其是 α 与实验结果吻合良好。

(2) 无论是用天然地震还是用人工地震观测, 当到达台站的地震射线不经过孕震区时, 只要在一定的散射半径范围内, 都能观测到一定的前兆信息。

(3) 在各个台和各个震例中 α 、 K 的变化趋势显示了同步性, 同步性正好反映了参量的稳定性, 这在逐步认识其物理实质的基础上, 提供了使用 α 、 K 的可能性。

(4) 尾波前兆的初步物理解释

对描述尾波衰减特性的参量 τ 、 α 、 K 、 Q_1 的震前异常变化可作这样的定性解释: 由于尾波散射区域中孕震区的存在, 改变了散射区介质的不均匀性, 原生波入射到这些不均匀部位, 散射次数增加, 次生波也相应加强, 使次生波的迭加过程拉长, τ 就变大。由于 τ 的增大, 使尾波的形状变得平缓, 即波的吸收减小, 衰减系数 α 变小, 而反映吸收能力的 Q_1 变大。同时由于衰减系数 α 减小, 最易被衰减的高频成分的衰减相应变小, τ — t 变平, 相应的 K 值变小。因而强震以前, Q_1 值变大。衰减系数 α 减小、 K 值也减小、 τ 增大这些变化并不矛盾而且有一致的物理基础。

最后，不可否认由于仪器和各种干扰影响及方法本身及资料的局限性，较大的误差在所难免。

(本文1984年8月14日收到)

参 考 文 献

- [1] 顾瑾平、冯德益、虞雪君，区域地震的尾波特征，地震研究，Vol. 5，№4，1982.
- [2] 江苏省地震局分析预报研究室，从溧阳六级地震的前兆特征讨论中强震的预报问题，西北地震学报，Vol. 4，№2，1982.
- [3] 冯德益、王周元、顾瑾平、盛国英、李克龙，1976年四川省松潘—平武地震前波速比的异常变化，地震学报，Vol. 2，№1，1980.
- [4] 吕广庭等，单轴压缩下砂岩的P波动力学特征的实验研究，西北地震学报，Vol. 6，№4，1984.
- [5] Keiiti Aki, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, J.G.R, Vol. 74, №2, 1969.

RESEARCH ON SOME CHARACTERISTICS OF THE SEISMIC CODA

Gu Jinping Yu Xuejun Lu Guangting Sheng Kuoying

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

Abstract

Based on studying seismic coda characteristics of both artificial and natural sources, we have discussed the coda amplitude decline, the coda frequency and the other parameter Q_1 , which change as time goes by.

The results indicate that the different parameters α , K , Q get identity of variation. Comparing the results from seismic source and from the experiment, we believe that they are similar to each other. So it is possible to carry some prophetic information in some parameters of coda before an earthquake occurs.

we will improve our work in future.