

# 宁夏灵武—吴忠地区地震尾波前兆特性的初步研究

董卫国

(宁夏地震局)

## 摘 要

本文根据K. Aki等的尾波理论, 使用台网的三分向地震记录资料, 通过数值计算, 连续测定了宁夏灵武—吴忠地区三次中强震前后地壳上层介质 $Q_c$ 值、振幅衰减系数 $\alpha$ 值以及尾波优势频率随推移时间衰减的指数 $m$ 值等尾波物理量, 并给出了相应的误差估计。结果发现,  $Q_c$ 值在上述区域中强震前上升, 幅度可达常年均值的30%左右,  $\alpha$ 及 $m$ 值则在震前下降, 或下降后又回升。这表明, 经过及时、适当的处理, 有可能从区域地震记录的尾波物理量的特征变化中获取强震的前兆信息。

## 一、引 言

随着近年来对短周期地震波的深入研究, 人们认识到断层带和构造活动区整个岩体中存在着显著的小尺度不均匀性, 并且由此激发的短周期反向散射S波迭加形成了区域地震记录中的尾波。当上述区带孕育地震时, 该处介质将受到增大的应力场作用, 使得原有的不均匀性发生改变, 从而导致了尾波观测物理量的改变。因此我们可以通过监测区域地震尾波物理量的改变, 进而研究孕震区构造不均匀性的变化所反映的强震前兆特性。本文根据K. Aki等的尾波理论, 用宁夏灵武—吴忠地区地震的三分向记录资料, 由两种方法对比研究了该区域1971年6月28日5.1级地震、1984年11月23日5.3级地震和1987年8月10日5.5级地震前后尾波介质品质因子 $Q_c$ 。随时间的变化特性, 以及尾波振幅衰减特性和尾波优势频率随时间的变化特性, 并给出了相应的误差估计。三者的综合观测结果基本上同步显示了一定的前兆特性, 从而表明从区域地震记录的尾波物理量中获取强震的前兆信息是有可能的。以下将上述三次地震分别称为“第一次地震”、“第二次地震”和“第三次地震”。

## 二、理论及方法

1. 本文使用了尾波推移时间的两种不同指数来计算介质品质因子 $Q_c$ 。为了区别, 不妨

称为方法一和方法二。其公式分别为

$$Q_c = -\pi / (B_1 \ln 10) \quad (1)$$

和  $Q_c = -\pi / (B_2 \ln 10) \quad (2)$

$B_1$ 和 $B_2$ 的回归误差为

$$\delta B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{(1-r^2)/(n-2)}} \quad (3)$$

其中 $r$ 为相关系数,  $n$ 为数据组个数。因此, 可由 $B_1$ 或 $B_2$ 的误差来估计 $Q_c$ 的误差。

因目前对尾波起始时间尚有不同取法, 本文根据以往的做法<sup>[2]</sup>, 将尾波起始时间取为 $t \geq 1.7\Delta/\beta$ 。等间隔( $\Delta t = 5$ 秒)量取尾波双振幅 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 并用零交点法测量相应的尾波优势频率, 然后通过数值计算求出尾波的暂时介质品质因子 $Q_c$ 。

可以认为, 上述方法是以震源为球心,  $r$ 为半径的球型尾波平均散射模式的简化结果。

2. K. Aki曾对他所使用的仪器系统和研究区域建立了尾波推移时间与相应频率之间的经验关系

$$(f/0.82)^{-1.15} = t/100 \quad .$$

这里也可假设对本文的研究区域和仪器系统有与该式类似的关系存在

$$f = f_0 t^m \quad , \quad (4)$$

将(4)式取对数, 并设 $\lg f = Y$ ,  $\lg t = X$ ,  $\lg f_0 = a_0$ , 则有

$$Y = a_0 + mX \quad . \quad (5)$$

将测量得到的数据 $(f_i, t_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 代入(5)式, 并用最小二乘法回归其系数 $m$ 。观测各次地震的 $m$ 值可用于探讨尾波优势频率随推移时间衰减的特性, 又可作为第二种方法中的待定参数, 用于求解 $Q_c$ 。 $m$ 的误差可由(3)式求得。

3. 由文献<sup>[4]</sup>给出的方法, 计算尾波振幅衰减系数

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

以及一次地震的单台尾波振幅平均衰减系数

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

其中 $T$ 为所取尾波记录中一定的时间段长度,  $A_i$ 和 $A_{i+1}$ 分别为第 $i$ 和第 $(i+1)$ 个时间段中的振幅,  $n$ 为时间段个数。

### 三、资料及测定结果

根据使用资料中的地震震级不要太大的考虑, 本文选用了宁夏微震仪台网1970年—1987年记到的灵武—吴忠地区48个地震中的164张记录图。这些记录中的可测量尾波推移时间较长, 可以保证测定结果具有一定的精度。这些震中分布于北纬 $37^{\circ}38' - 38^{\circ}18'$ , 东经 $105^{\circ}55' - 106^{\circ}30'$ 的一个 $74 \times 55 \text{ km}^2$ 区域内, 其中多数震中位于灵武—吴忠地区。震中展布范围及台站分布如图1所示。

宁夏微震仪台网配有473、573、B73、DD—1等窄频带仪器，其典型频率特性曲线如图2所示。显然这四类仪器的频率特性是很相近的。

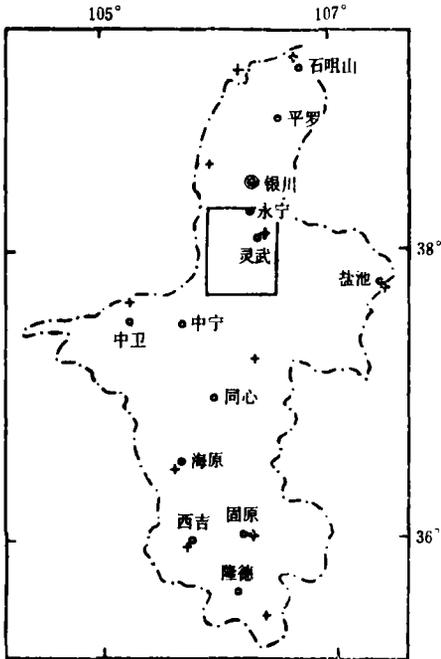


图 1 震中展布范围及台站  
 Fig. 1 Distribution of the epicenters and the seismic stations

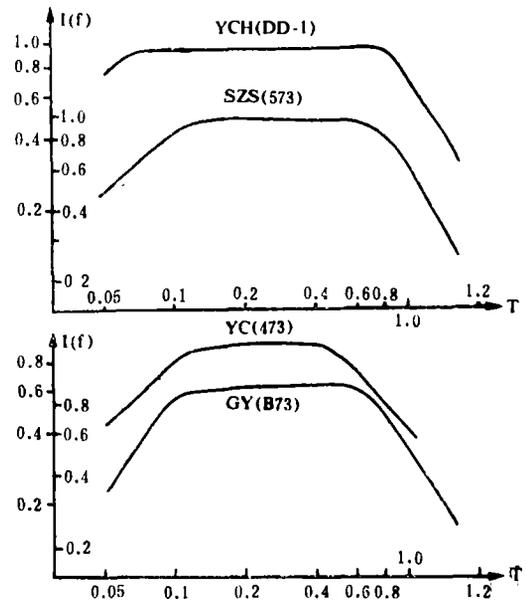


图 2 地震仪幅频特性  
 Fig. 2 Amplitude-frequency response of the seismographs

先用读数放大镜在各台地震记录图上尽量读取三分向的记录数据，然后在IBM兼容机上分别计算 $Q_c$ 值，最后取其均值（表1）。

图3绘制了用上述两种方法分别求得的各台 $Q_c$ 值的均值 $\overline{Q_c}$ 随时间 $t$ 的变化曲线及 $\overline{Q_c}$ 随 $t$ 变化的三点滑动均值曲线。图4绘制了台网的 $\alpha-t$ 曲线， $\alpha$ 随 $t$ 变化的三点滑动均值曲线， $m-t$ 曲线和 $m$ 随 $t$ 变化的三点滑动均值曲线。各条曲线以整体或分段均值作为基线，并标以相应的标准方差。

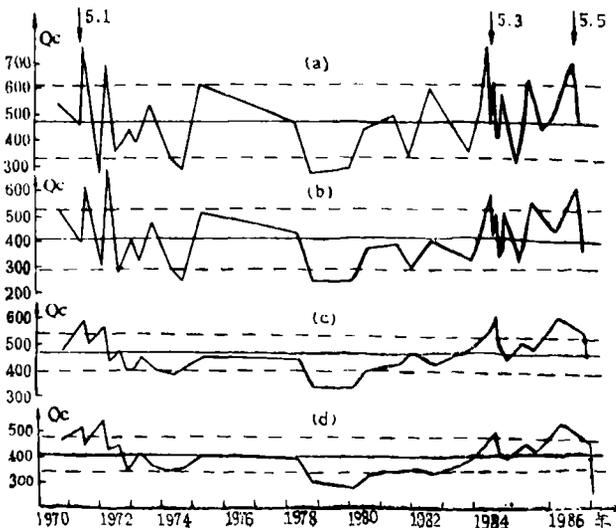


图 3

- a. 方法一的 $\overline{Q_c}-t$ 曲线
- b. 方法二的 $\overline{Q_c}-t$ 曲线
- c. 方法一的 $\overline{Q_c}$ 随 $t$ 的三点滑动均值曲线
- d. 方法二的 $\overline{Q_c}$ 随 $t$ 的三点滑动均值曲线

表 1

地震 (Ms)	$\bar{Q}_{e1}$	$\bar{Q}_{e2}$	$\bar{m}$	$\bar{\alpha}$	地震 (Ms)	$\bar{Q}_{e1}$	$\bar{Q}_{e2}$	$\bar{m}$	$\bar{\alpha}$
吴忠 2.7	586 ± 495	520 ± 282	-0.5695 ±0.0380	0.0530	灵武西南 2.5		695 ± 569	-0.4917 ±0.1047	0.0371
青铜峡南 4.2	466 ± 165	435 ± 162	-0.8776 ±0.2103	0.0123	永宁西北 2.9	318 ± 142	293 ± 126	-1.0463 ±0.1530	0.0267
青铜峡南 3.7	394 ± 51	352 ± 45	-0.2843 ±0.0968	0.0199	吴忠东南 2.4	954 ± 294	576 ± 288	-0.3771 ±0.0878	0.0221
吴忠东南 2.6	708 ± 200	510 ± 183	-0.9464 ±0.1187	0.0261	吴忠南 3.0	247 ± 100	227 ± 94	-0.7851 ±0.1399	0.0272
吴忠南 2.1	435 ± 269	393 ± 244	-0.8044 ±0.1310	0.0432	吴忠 2.3	352 ± 184	321 ± 177	-0.9525 ±0.0648	0.0394
吴忠东南 3.3	402 ± 71	358 ± 57	-0.5891 ±0.0758	0.0228	灵武南 2.9	508 ± 259	430 ± 245	-0.7358 ±0.2016	0.0299
吴忠东南 3.0	476 ± 213	391 ± 143	-0.8292 ±0.1592	0.0298	灵武西南 3.0	759 ± 145	594 ± 103	-0.3588 ±0.1201	0.0315
吴忠东南 3.0	860 ± 431	620 ± 330	-0.8216 ±0.2332	0.0217	吴忠 3.9	445 ± 186	407 ± 151	-0.5910 ±0.0969	0.0231
吴忠东南 2.7	179 ± 47	176 ± 44	-0.8487 ±0.1819	0.0410	吴忠东南 2.9	627 ± 254	516 ± 166	-0.5140 ±0.0992	0.0321
吴忠东南 2.3	258 ± 58	294 ± 71	-0.6267 ±0.0720	0.0293	灵武西 2.8	398 ± 112	336 ± 88	-0.4467 ±0.1228	0.0362
吴忠东南 2.7	690 ± 405	694 ± 347	-0.6242 ±0.2516	0.0303	灵武西南 3.7	403 ± 151	362 ± 134	-0.6014 ±0.1839	0.0255
吴忠东南 2.4	345 ± 150	265 ± 57	-0.4707 ±0.1723	0.0572	青铜峡东 北 3.9	582 ± 222	520 ± 202	-0.7230 ±0.1589	0.0234
吴忠 3.3	386 ± 80	345 ± 71	-0.4222 ±0.1124	0.0241	灵武西南 2.5	414 ± 63	431 ± 77	-0.3245 ±0.0610	0.3473
吴忠东南 3.2	440 ± 198	413 ± 184	-0.9155 ±0.1693	0.0269	青铜峡西 北 2.3	687 ± 305	524 ± 280	-0.4360 ±0.0896	0.0335
吴忠东南 3.0	378 ± 266	322 ± 225	-0.7058 ±0.1326	0.0256	灵武西南 2.3	296 ± 105	305 ± 111	-0.4743 ±0.1012	0.0493
灵武西南 3.8	525 ± 161	430 ± 144	-0.9425 ±0.1603	0.0191	灵武西南 2.9	638 ± 294	564 ± 249	-0.5194 ±0.1372	0.0352
青铜峡西南 2.5	324 ± 222	290 ± 219	-0.8036 ±0.1623	0.0362	吴忠南 2.7	425 ± 63	356 ± 50	-0.4372 ±0.0752	0.0350
灵武东北 2.4	281 ± 71	243 ± 68	-0.5684 ±0.0842	0.0336	灵武南 2.8	463 ± 136	420 ± 122	-0.5181 ±0.1678	0.0410
吴忠东南 2.8	609 ± 206	512 ± 154	-0.5348 ±0.1313	0.0325	灵武东南 3.1	453 ± 89	391 ± 69	-0.3721 ±0.0996	0.0290

续表 1

地震 (Ms)	$\bar{Q}_{e1}$	$\bar{Q}_{e2}$	$\bar{m}$	$\bar{\alpha}$	地震 (Ms)	$\bar{Q}_{e1}$	$\bar{Q}_{e2}$	$\bar{m}$	$\alpha$
永 宁 3.8	464 ± 212	432 ± 192	-0.6421 ± 0.2221	0.0220	灵 挥 南 3.2	587 ± 152	473 ± 121	-0.5972 ± 0.0949	0.0230
灵武东南 2.5	258 ± 73	235 ± 61	-0.7248 ± 0.1204	0.0375	灵武西 3.4	701 ± 258	622 ± 227	-0.6242 ± 0.1597	0.0266
青铜峡东北 2.6	282 ± 109	236 ± 90	-0.4917 ± 0.1047	0.0371	武 灵 2.9	359 ± 80	333 ± 71	-0.5930 ± 0.1135	0.0335
吴 忠 3.5	439 ± 106	374 ± 92	-0.4078 ± 0.0613	0.0564	灵 武 2.4	588 ± 277	522 ± 139	-0.4499 ± 0.1164	0.0365
永 宁 2.8	487 ± 195	392 ± 145	-0.4300 ± 0.1231	0.0312	灵 武 2.4	464 ± 145	343 ± 86	-0.4350 ± 0.0928	0.0411

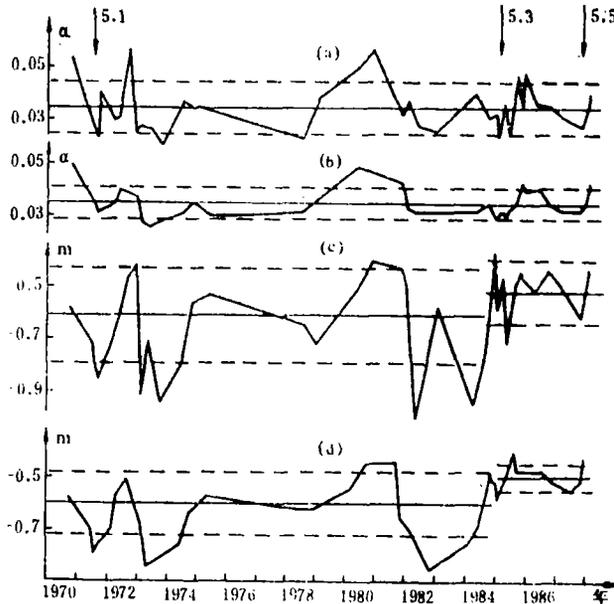


图 4

a.  $\bar{\alpha}$ -t 曲线  
 b.  $\bar{\alpha}$ -t 的三点滑动均值曲线  
 c.  $\bar{m}$ -t 曲线  
 d.  $\bar{m}$ -t 的三点滑动均值曲线

### 四、分析与讨论

由表 1 可知，本文利用区域地震尾波测定的  $Q_e$  值大多在 100—1000 之间，与国内外目前测定的地壳上部的  $Q$  值大体一致。

从图 3 可看出，4 条曲线显示了较好的同步性。曲线 c、d 较曲线 a、b 起伏小，标准误差也较小，趋势形态更为突出。在三次中强震前台网  $\bar{Q}_e$  呈现上升趋势，并超过了误差限。其中第三次地震前  $\bar{Q}_e$  异常时间较前两次地震长，可能与该次地震后不久发生的另外两次中强震有关。上述观测结果还反映出  $\bar{Q}_e$  异常时段似乎与震级成正比。

图 4 中的曲线 a 和曲线 b 与图 3 中的 4 条曲线呈反向同步变化，上述三次中强震前均出现低值。其中第一次地震发生于两条曲线下降过程中，而后两次中强震则发生于曲线下降即

又回升的过程中。曲线c、d在前两次中强震前与曲线a、b形态相似，但在第三次地震前未显示出明显的下降。考虑到后两次中强震震中很接近，且发震时间也相隔不长，因此第三次地震前后的 $\bar{m}$ 值可能受前次地震的影响，故从1984年6月—1987年10月另求曲线基值及标准差。经这样处理后，曲线c、d显示出地震发生在曲线下降后又回升的过程中。

此外，图4中4条曲线在1973年—1974年间，以及曲线d在1982年2月—1984年4月间不同程度地低于误差限，而此期间研究区域内未发生中强震。由此看来，除了观测误差的影响外， $\alpha$ 及 $m$ 值反映孕震区介质不均匀性变化与中强震发生的对应关系不如 $\bar{Q}_e$ 那样好。曲线a和曲线c表明， $\alpha$ 、 $m$ 值出现异常的次数与所对应中强震的比率分别为67%和57%。

在工作中发现，用不同的台站的记录对同一地震的 $Q_e$ 、 $\alpha$ 和 $m$ 值的测定结果有时差别很大，其原因可能有：尾波衰减对方位具有一定的依赖性，或者说，除了地震波的散射造成的衰减外，不同路径上的吸收也是不容忽观的；还有台站的影响以及波形迭加，使记录图上的零交点数不准等等。

实际上，区域地震尾波的非弹性吸收不仅与散射S波通过的介质性质有关，还与介质的温度状态有关，尤其与作用在介质上的应力场的大小、方向有关。由地球的内外因素引起的地壳应力场的调整、变化，在某些断层带和构造活动区易于形成应力集中，从而引起应变，使这些区域内的介质不均匀性发生改变，于是导致了尾波特性的变化。

需要说明的是，尾波的 $Q_e$ 值是否与频率有关目前尚无定论。本文忽略了频率对 $Q_e$ 的影响，因而可将观测得到的 $Q_e$ 值作为优势尾波频段内的平均 $Q_e$ 值。

此外，本文用两种方法测定的 $Q_e$ 值的结果相近。计算结果显示，第二种方法的置信度多较第一种方法略高些。

由观测情况来看，由于台网恰在所研究区域的周围，并且对同一地震采用多台三分向记录的均值，因此减少了方位及路径的影响以及其它随机因素的干扰，从而比较正确地反映了孕震区介质不均匀性的前兆变化。

## 五、结束语

本文的观测及研究结果反映出 $\bar{Q}_e$ 、 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{m}$ 值一般在震前几个月内出现前兆性异常， $\bar{Q}_e$ 的异常时段呈现出随震级的升高而增长的现象， $\bar{Q}_e$ 的异常幅度约为年均值的30%左右，因此对上述各量的跟踪观测对于中短期预报工作具有一定的意义。并且 $\bar{Q}_e$ 值所反映的介质不均匀性变化与地震孕育和发生之间的对应关系较 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{m}$ 值更为可靠，故对尾波前兆特性中 $\bar{Q}_e$ 值的异常升高应给予更多的重视。

(本文1989年1月23日收到)

## 参 考 文 献

- [1] K. Aki, 近震地震学, 世界地震译丛, No. 1—2, 1983.
- [2] 杨明芝、董卫国, 利用地方震出格记录尾波测定宁夏北部及邻区 $Q$ 值, 西北地震学报, Vol. 7, No. 2, 1985.
- [3] R. B. Herrmann,  $Q$  estimates using the coda of local earthquakes, B.S.S.A., Vol. 70, No. 2, 1980.
- [4] 顾瑾平、虞雪君、吕广庭、盛国英, 地震尾波的某些特性的探讨, 西北地震学报, Vol. 7, No. 2, 1985.

PRELIMINARY STUDY OF THE SEISMIC CODA PRECURSOR  
CHARACTERISTICS OF LINGWU-WUZHONG REGION IN NINGXIA

Dong Weiguo

(*Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan*)

Abstract

In this paper, on the basis of K. Aki's theory of coda, with the data of three component seismic records from the seismic network,  $Q_c$  value for the upper crust medium,  $\alpha$  value for the amplitude attenuation coefficient and  $m$  value for the attenuation exponent of the coda predominant frequency versus time after origin are continuously estimated, and their errors are also appraised, around three moderate earthquakes of Lingwu-Wuzhong region in Ningxia. As a result,  $Q_c$  value increases about 30% of the normal value,  $\alpha$  and  $m$  value decrease or first decrease and then increase in aforesaid region before the moderate earthquakes. It shows that it is possible to gain some precursor informations of strong earthquakes from the feature changes of coda physical quantity with the regional seismic record if the available data are properly and timely processed.