

# 2003年岷县5.5级地震地震学前兆特征及预报意义

李亚荣, 荣代潞, 韩晓明

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**研究了2003年甘肃岷县5.5级地震的地震学前兆的变化特征, 显示尾波 $Q_c$ 值和地震空间相关长度在震前都呈增长趋势, 用幂次率关系对这种变化进行了拟合。结果为利用尾波 $Q$ 值和地震空间相关长度的监测资料建立预测地震发生时间的方法和指标打下了基础。

**关键词:** 岷县5.5级地震; 时间预测; 尾波 $Q_c$ 值; 相关长度

**中图分类号:** P315.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2007)02-0150-06

## The Seismological Precursor Characteristics before M<sub>L</sub>5.5 Earthquake in 2003 and Its Significance for Earthquake Prediction

LI Ya-rong, RONG Dai-lu, HAN Xiao-ming

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In the paper, the characteristics of seismological precursors (seismic spatial correlation length and coda  $Q_c$ ) associated with the earthquake ( $M=5.5$ ) occurred in Minxian, Gansu Province, on Nov. 13, 2003, are studied. The result shows an increasing trend of the both parameters before the earthquake. And a power exponent relation is used to fit the increasing variation form of the parameters. The study provides a basis for creating a method and finding indexes to predict earthquake occurrence time by using the monitored seismic spatial correlation length and coda  $Q_c$ .

**Key words:** Minxian  $M_L 5.5$  earthquake; Time prediction; Coda  $Q_c$ ; Correlation length

### 0 前言

目前对于中强地震的预报特别是短期预报来说, 在各类前兆中地震学方面的前兆被认为是最具有物理意义, 因而也是较为可靠的一种。这种地震学前兆包括反应震源及附近地区介质不均匀性质的地震学参数和地震活动性参数。如何在大震前的地震学参数中找到可以用于预测的定量指标, 是人们关注研究的重要问题之一。但由于问题本身的难度和以往观测手段的局限, 在这方面迄今为止还没有找到有效的预测方法和指标, 没有取得明显的突破性的进展。

本文研究了2003年10月25日甘肃山丹—民乐6.1级地震前的地震学前兆特征<sup>[1]</sup>, 发现震前两种地震学前兆参数尾波 $Q$ 值和地震空间相关长度都呈上升变化, 并且可以用幂次律关系拟合。为检

验这种变化特征对于其他中强地震的适用性, 作为另外一个震例, 本文研究了2003年11月13日甘肃岷 $M_L 5.5$ 地震前这两种地震学参数方面的前兆特征, 为进一步研究利用这种变化特征进行地震预测特别是地震发生时间预测提供基础。

### 1 尾波 $Q$ 值和地震空间相关长度

作为地震学参数, 建立在地震监测系统的宽频带和数字化以及地震学特别是数字地震学相关理论的发展的基础上的地震尾波 $Q$ 值( $Q_c$ )和地震空间相关长度在中强地震前的变化特征越来越受到人们的重视。

地震记录的尾波 $Q$ 值称为介质的品质因子, 是研究地壳介质性质和地震活动性的一个十分重要的

收稿日期: 2006-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号40574026); 地震科学联合基金(D07024)资助; 兰州地震研究所论著编号: LC20070032

作者简介: 李亚荣(1954—), 女(汉族), 甘肃天水人, 高级工程师, 主要从事地震学研究。

物理量。Aki 和 Chouet<sup>[2]</sup> 首先建立了地震尾波的衰减理论。很多研究者注意到尾波  $Q_c$  值在地震前的变化<sup>[3-7]</sup>。这些研究表明虽然存在地震前尾波  $Q_c$  值下降的震例,但是地震前在震源区附近尾波  $Q_c$  值升高是一种较为普遍的现象,并且这种尾波  $Q_c$  值的增大与震源区应力积累增强的物理机制是吻合的。尾波  $Q_c$  值与地震波的频率  $f$  有关:

$$Q_c(f) = Q_0 f^n \quad (1)$$

其中  $n$  的大小反映了  $Q_c$  值对频率的依赖程度; $Q_0$  是频率  $f = 1$  时的  $Q$  值。 $n$  和  $Q_0$  与构造活动、地壳介质的均匀程度有关,不同频带的尾波  $Q_c$  值反映了地壳介质不同尺度的不均匀性的特征。在孕震过程中,震源区的应力积累不断增强,介质中的裂隙和流体分布发生变化,介质的不均匀性和非弹性特征就要发生变化,可以预见反映介质不均匀性和非弹性特征的尾波  $Q_c$  值也会发生变化。

地震空间相关长度即某一区域分布的一定数目的地震之间的距离(震中距)的特征尺度。1990 年 Frohlich 和 Davis<sup>[8]</sup> 将单键群分析方法用于地震目录的分析研究中,可以在全局和局部区域的不同层次上定义群或分立事件之间的特征尺度。按照地震的自组织临界系统的观点,如果系统接近临界点,那么将出现以幂次律为特征的长程相互作用。这时地震的相关长度  $\xi$  应增长,可用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$\xi(t) \sim (t_f - t)^{-k} \quad (2)$$

式中,  $t_f$  为中强地震的发震时间,即震源系统达到临界点的时间; $k$  为一正数,决定于相关长度增长的速率。

Zoller 等<sup>[10]</sup> 研究了美国加州 1952 年以来发生的 9 次  $M \geq 6.5$  的地震,本文作者<sup>[11]</sup> 研究了近 17 年来甘肃及邻近地区 6 次 6 级左右的地震,发现在震前都不同程度存在相关长度增长的现象。

## 2 尾波 $Q$ 值和空间相关长度的计算方法

尾波  $Q_c$  值的计算和研究是建立在数字地震记录的基础上的。根据 Aki 和 Chouet<sup>[2]</sup> 建立的震源距为零时的单次散射模型的结果,在以频率  $\omega$  为中心的一频带上,地震记录的尾波功率谱可以表示为

$$P(\omega | t) = C(\omega) t^m e^{-\omega/Q_c} \quad (3)$$

其中  $t$  为从发震时刻开始测量的流逝时间; $m$  为常数,对于体波  $m = 2$ ,面波  $m = 1$ 。通过变换可以得到

$$\ln[P(\omega | t)t^2] = \ln C(\omega) - \frac{\omega}{Q_c} t \quad (4)$$

由于  $\ln C(\omega)$  与时间无关,对于某一频率可把它当作常数对待。因此用移动时间窗对尾波进行谱分析,计算出对若干中心频率和一定带宽的尾波功率谱值,然后对式(4)进行线性回归,即可得到这一频带的尾  $Q_c$  值。

对于震源距不为零的单次和多次散射模型<sup>[12-13]</sup>,当经过震源距校正后,流逝时间和折合的功率谱之间仍然存在某种线性关系,可以同样根据上面的方法来求得尾波  $Q_c$  值。

相关长度  $\xi(t)$  可用单键群分析方法来估算,具体方法 Frohlich 和 Davis<sup>[8]</sup> 有详细的论述。概括地说,如果选定一个地区分布有  $N$  次地震,我们可以首先将每次地震与其空间分布最邻近的地震相连构成一个小震群。然后每一个小震群与其最近的震群相连。如此循环下去,直到  $N$  次地震用  $N-1$  个键相连在一起,键长即是两个地震的震中距(这里仅考虑二维情况)。这样可以得到一个由  $(N-1)$  个键长组成的序列。Zoller 等人<sup>[10]</sup> 用键长小于等于  $\xi$  的概率为 0.5 的条件来定义相关长度  $\xi$ 。

为了得到相关长度的时间演化进程,使用滑动时间窗方法。在选定的空间范围内,以在主震发生前一段时间(一般是数年)的地震序列为基础,以一定数目的地震作为时间窗。用上面所说的单键群分析方法计算这个时间窗内的地震的相关长度。然后以一定的步长使这个时间窗移动,重复上面计算相关长度的步骤。这样就得到主震发生前一段时间内相关长度随时间的演化过程。

## 3 岷县 5.5 级地震的地震学(尾波 $Q_c$ 值和地震相关长度)前兆特征

地震参数:发震时间:2003 年 11 月 13 日 10 时 35 分;震中位置:北纬  $34^{\circ}48'$ ,东经  $103^{\circ}56'$ ;震源深度:10 km;震级: $M_L 5.5$ 。

### 3.1 不同频率的尾波 $Q$ 值特征

#### 3.1.1 资料选取

尾波  $Q$  值的计算是建立在数字地震记录的基础上的。甘肃省数字地震台网从 2000 年 6 月建成运行,因此我们选取资料的时间从 2000 年 6 月 1 日至 2003 年 11 月 13 日主震发生时为止。

所选取的地震的空间范围要考虑两个因素。一是考虑一次中强地震在震源区的应力积累引起可能出现前兆的空间范围;另一个是要考虑在所选取的

范围内有足够的地震参加计算。

秦保燕等<sup>[14]</sup>讨论过大地震的有效前兆范围,郭增建等<sup>[15]</sup>据此得到这种前兆范围可以用下式表示:

$$R = 10^{0.508M-1.377} \quad (5)$$

其中  $R$  为以震中为中心的半径 (km),  $M$  为震级。对于一次 5.5 级地震, 根据 (5) 式算得  $R=26$  km。我们理解这里所说的“有效前兆”是地震前由于震源区的应力积累我们在地表附近所能观测到的一些目前认为是前兆的参数。上述公式也是基于震源孕育的组合模式和对于观测资料的统计而得出的经验关系。实际上一次地震的孕育过程中它的应力积累的范围应当比这个范围大, 因此由于应力积累引起的地壳介质性质的变化范围也要比这个范围大。基于这种认识并考虑到有足够的地震参加计算, 我们将上述范围扩大一倍, 即选取以地震震中为中心半径 60 km 的区域所发生的地震作为研究对象, 我们检查了周围各台的记录质量, 用距离震中最近的岷县地震台的数字记录进行计算。上述地震 (包括主震) 分布和台站位置见图 1。

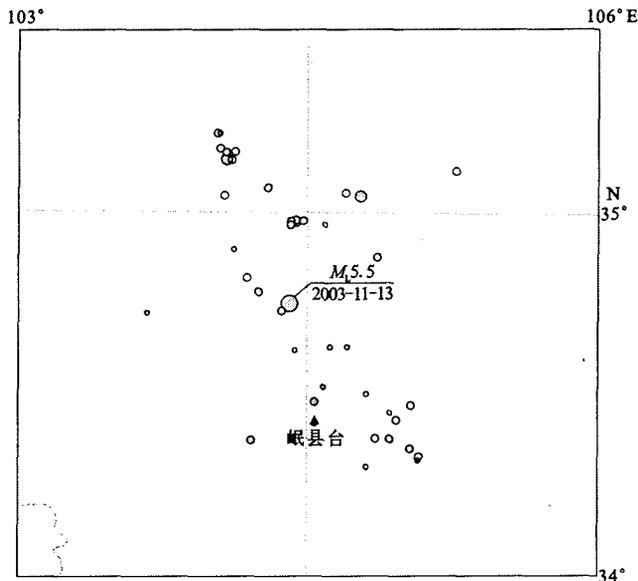


图 1 研究区的地震分布和台站位置

Fig. 1 Distribution of selected earthquakes and station location in the research area.

应当指出, 上述对于空间范围的选取也带有一定的经验性质。根据我们的试验, 只要有足够多的地震参加计算, 空间范围的不太大的变化对结果的总的趋势变化影响不是太大。

### 3.1.2 计算中选取的参数

(1) 频率选取: 考虑到仪器的频率响应, 选取 4~18 Hz, 间隔 1 Hz 的频率范围。

(2) 仪器校正: 由于利用同一台站的记录分别

计算各频率点的  $Q_c$  值, 并且仪器在所选取的频率段的响应是平坦的, 所以对记录波形不做仪器校正。

(3) 尾波截断时间: 根据 Aki 和 Chouet<sup>[2]</sup> 的结果, 选取记录中从 S 波到时  $t_s$  开始, 两倍  $(t_s - t_p)$  的时间为尾波的开始时间 ( $t_p$  为 P 波到时)。研究表明,  $Q_c$  值对尾波截断时间的取值非常敏感, 不同的作者往往以各自不同的标准来界定并截断尾波, 这就有可能造成不同研究者采用相同的方法研究相同的地震获得差别很大的结果。我们在计算中取信噪比为  $\sqrt{2}$  时截断信号, 以尽量保证计算结果的客观性。对于用这种条件不能得出计算结果的记录 (通常是记录噪声大) 予以舍去。在图 1 中能够计算出尾波  $Q_c$  值的地震用实心圆表示, 记录噪声大而不能计算出结果的地震用空心圆表示。可以看出所选范围的绝大多数地震都能计算出  $Q_c$  值, 只有少数距离台站较远或震级很小的地震不能用于计算。

图 2 给出不同震源距的地震波形的例子, 可以看到不同震源距的记录波形都有很好的信噪比, 这为我们计算尾波  $Q$  值提供了很好的数据基础。

### 3.1.3 计算结果

计算出的每一次地震的不同频带的尾波  $Q_c$  值, 按照地震发生的时间作图, 在主震发生前用下面的指数形式进行拟合:

$$Q = a_1 (t_0 - t)^{-a_2} \quad (6)$$

$t$  为时间, 通常从选定的地震目录的第一个地震前的某一时间起算;  $t_0$  为主震的发震时间;  $a_1, a_2$  为拟合的系数。

图 3 为计算频带中 4 个频率点 (4 Hz, 8 Hz, 12 Hz 和 16 Hz) 的尾波  $Q_c$  值的计算结果和相应的拟合曲线。

### 3.2 地震空间相关长度变化特征

为了与地震尾波  $Q$  值的计算对应, 我们仍然选取同样的时间和空间范围。考虑到该地区的地震活动水平和有足够的地震用于计算, 计算地震的空间相关长度时选取的起始震级为 1.5 级。每组选取 20 个地震, 计算的“时间”步长为 5 个地震。各个参数的具体选取原则详见文献<sup>[11]</sup>。

图 4 为地震空间相关长度的计算结果和相应的幂次率拟合曲线。

## 4 结论和讨论

(1) 本文结果表明, 从 2000 年 6 月到本次地震前 3 年多的时间, 震源及附近地区的尾波  $Q$  值和地震空间相关长度呈增长的趋势, 临近地震前快速增

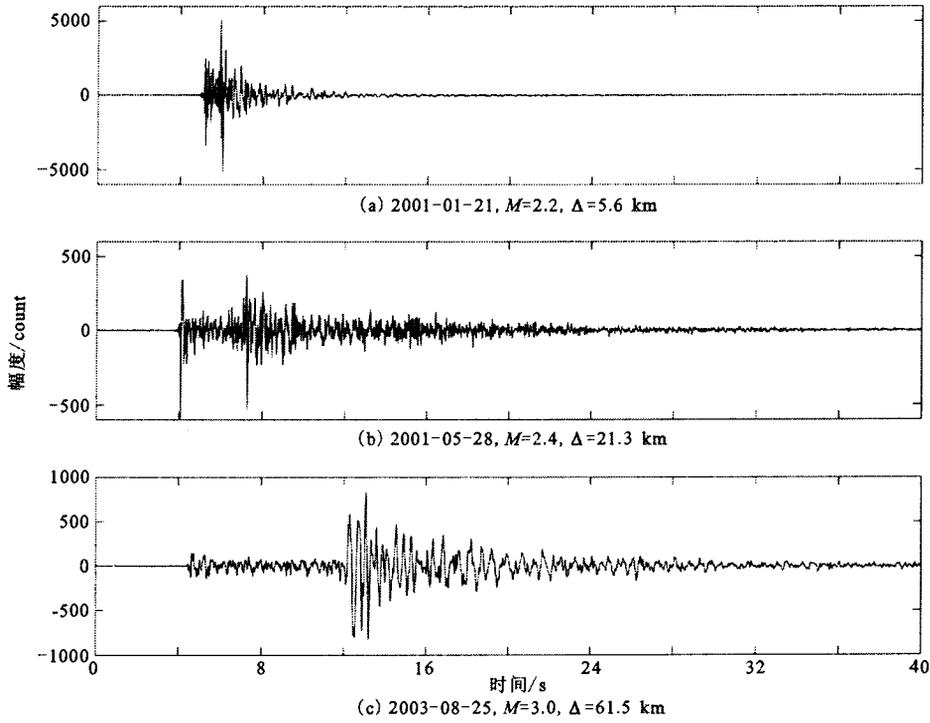


图 2 不同震源距的地震波形

Fig. 2 Seismic waveforms for different distances from sources to station.

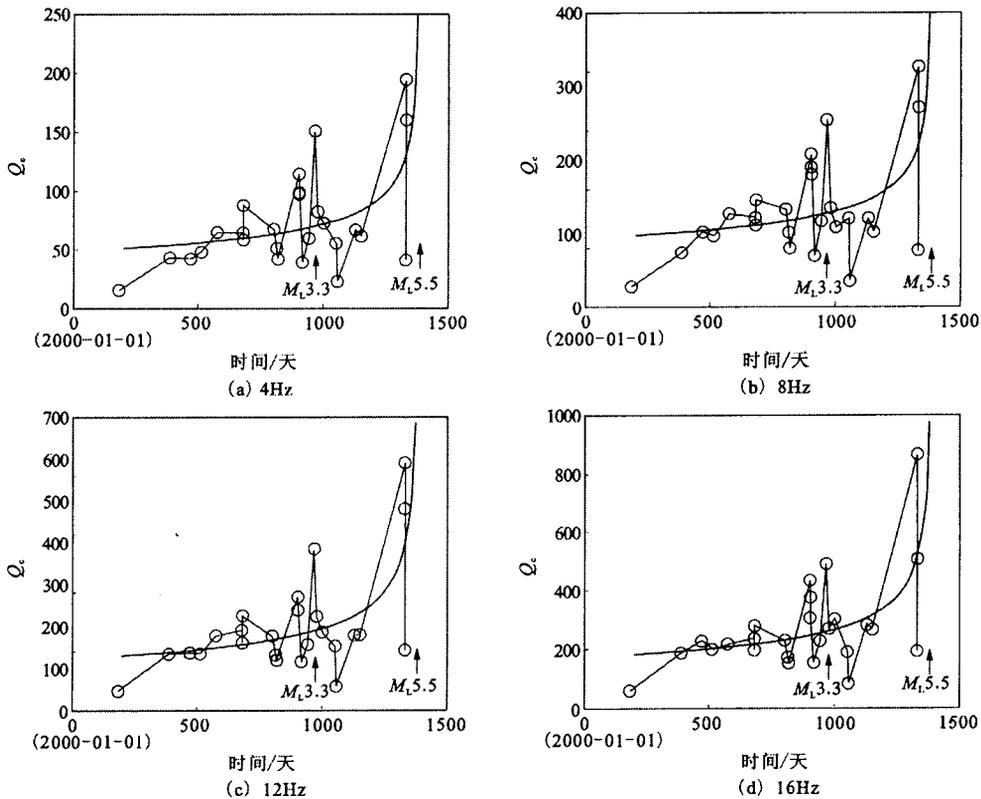


图 3 尾波  $Q_c$  值计算结果和相应的幂次律拟合曲线

Fig. 3 Calculating results of coda  $Q_c$  and the corresponding power exponent curves fitting the data.

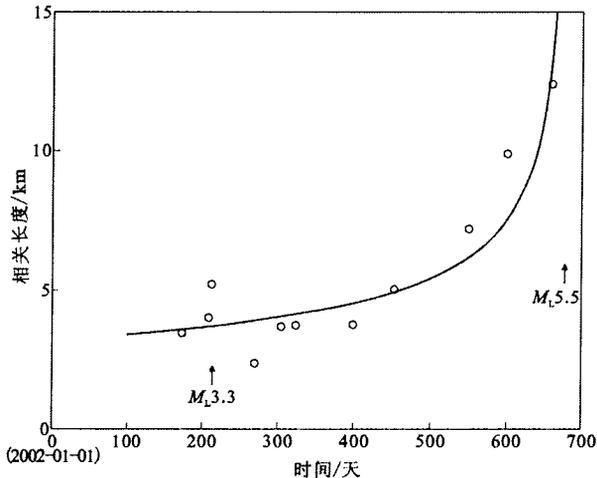


图 4 地震空间相关长度的计算结果和相应的幂次率拟合曲线

Fig. 4 Calculating result of the seismic spatial correlation length and the corresponding power exponent curves fitting the data.

长,可以用幂次律增长关系来较好地拟合。

(2) 从尾波  $Q_c$  值的计算结果(图 3)看到,尾波  $Q_c$  值随时间表现出振荡增长的特点,这说明尾波  $Q_c$  值对区域应力场十分敏感。2002 年 7 月 31 日 3.3 级地震前尾波  $Q$  值表现较小幅度的增长,地震后  $Q$  值表现一段时间的持续下降,然后随着应力的积累上升,直到主震前上升到最大值。这种特征在空间相关长度的时间进程上也表现出来(图 4)。

(3) 尾波  $Q_c$  值反映震源和记录台站之间的一个椭球体内地壳介质的平均性质,且震源距越大,反映介质性质的深度越深。不同地震得出的尾波  $Q_c$  值反映的介质性质的区域不同,因而有一定的波动。不过从结果看到,随着时间的进程尾波  $Q_c$  值变化的总的趋势是上升的,这也正好说明尾波  $Q_c$  值的上升变化是震源区周围较大范围介质的总体平均性质。

(4) 我们用幂次律关系来拟合震前尾波  $Q$  值和地震空间相关长度变化的时间进程。这种幂指数的变化形式最早应用于震前的加速释放模型<sup>[16-18]</sup>;国内一些研究者用这种模型研究了一些震例并进行了模拟实验研究<sup>[19-21]</sup>。这种模型是建立在震前应变积累释放的基础上的,我们可以预期一些直接与震源区应力积累相关的物理量也可能具有这种幂指数变化的特征。

(5) 1982 年法国科学家 Allegre<sup>[22]</sup> 在分形理论的基础上,利用重整化群方法研究了地壳介质破裂的尺度定律,在此基础上指出了这种方法在地震预测中的应用前景。作者在文献[1]中研究的山丹—

民乐 6.1 级地震以及本文对岷县 5.5 级地震的研究表明,甘肃近期发生的这两次地震前在震源区及其附近地区都出现了两种地震学方面的前兆,即地震空间相关长度和地震尾波  $Q_c$  值增长,并且都可以用幂次律增长关系来拟合。这种现象与 Allegre 提出的地壳介质破裂的尺度定律的理论是相符合的。这两种代表地壳介质中在区域应力场作用下不同尺度的物理参数在震前的变化进程提示我们可以找到一种预测中强地震发生时间的方法。前面我们是已知地震发生的时间对两种参数的变化进行了幂次律拟合,也就是说,在拟合关系  $\xi(t) \sim (t_f - t)^{-k}$  中发震时间  $t_f$  是已知的。但是在地震监测与预测中发震时间正是我们要求取的参数,我们是否可以根据一个地区对地震相关长度和尾波  $Q_c$  值的监测得到的时间变化进程来预测发震时间,从而实现中强地震的中短期预测甚至短临预测呢? 作者对山丹—民乐 6.1 级地震和本文对甘肃岷县 5.5 级地震震例的研究显示了达到这一目标的希望。同时也看到,要达到这样一个目标还需要进行更深入的研究,包括研究更多的震例以及进一步开拓对资料的应用深度。

#### [参考文献]

- [1] 荣代游,李亚荣,韩晓明. 地壳介质破裂的尺度理论在研究山丹—民乐 6.1 级地震地震学前兆特征中的应用[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 438-447.
- [2] Aki K, Chouet B. Origin of Coda wave; source, attenuation and scattering effects[J]. J. Geophys. Res, 1975, 80: 3322-3342.
- [3] Jin A, Aki K. Temporal change in coda before the Tangshan earthquake of 1976 and the Haicheng earthquake of 1975[J]. J Geophys Res, 1986, 91: 665-673.
- [4] Novelo-Casanova D A, Berg E, Hsu V, et al. Time-space variation seismic S-wave coda attenuation ( $Q^{-1}$ ) and magnitude distribution (b-value) for the Petatlan earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 1985, 12: 789-792.
- [5] Peng J Y, Aki K, Lee W H K, et al. Temporal change in coda Q associated with 1984 Round Valley earthquake in California[J]. J. Geophys. Res, 1987, 92: 3507-3536.
- [6] 秦嘉政,李宁,胡克坚. 1985 年禄劝地震余震尾波值的某些研究[J]. 地震学报, 1987, 9(3): 239-252.
- [7] 王勤彩,郑斯华,刁桂苓,等. 张北地震序列的尾波值研究[J]. 防震减灾工程学报, 2004, 24(1): 37-40.
- [8] Frohlich C, Davis D. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues[J]. Geophys. J. Int., 1990, 100: 19-32.
- [9] Bruce A, Wallace D. Critical point phenomena; universal physics at large length scales[A]// P Dawis edit. New Phys-

- ics[C]. New York:Cambridge Univ. Press, 1989;236-267.
- [10] Zoller G, Hainzl S, Kurths J. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106(2): 2167-2175.
- [11] 荣代澍, 李亚荣, 刘旭宙. 甘肃及邻近地区几次中强地震前地震空间相关长度增长的研究[J]. 地震学报, 2004, 26(5): 509-515.
- [12] 曾健, 聂永安. 单次和多次散射对地方震尾波的作用[J]. 地震学报. 1989, 11(1):12-23.
- [13] 聂永安, 曾健, 冯德益. 三维尾波散射问题的理论研究[J]. 地震学报. 1995, 17(1):68-71.
- [14] 秦保燕, 汪进. 组合模式与地震图上的终止相[J]. 西北地震学报, 1987, 9(4):1-14.
- [15] 郭增建, 秦保燕. 地震成因和地震预报[M]. 北京:地震出版社. 1991. 78-79.
- [16] Bufe C G, Varnes D J. Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay Region[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98:9871-9883.
- [17] Brehm D J, Braile L W. intermediate-term earthquake prediction using precursory events in the New Madrid seismic zone [J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1998, 88:564-580.
- [18] Brehm D J, Braile L W. intermediate-term earthquake prediction using the modified time-to-failure method in Southern California[J]. Seism. Soc. Amer., 1999, 89:275-293.
- [19] 蒋长胜, 吴忠良, 史勇军. 中强地震前地震活动矩释放加速现象(AMR)的普遍性问题[J]. 中国地震, 2004, 20(2):119-125.
- [20] 蒋长胜, 吴忠良. 2004 年 12 月 26 日印尼北苏门答腊以西近海 9.0 地震与地震的类临界点模型[J]. 地震学报, 2005, 27(3):269-275.
- [21] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 地震临界点理论的实验研究[J]. 地震学报, 2004, 26(增刊):122-130.
- [22] Allegre C J, Le Mouel J L, Provost A. Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction [J]. Nature, 1982, 297: 47-49.

\*\*\*\*\*  
(上接 136 页)

#### [参考文献]

- [1] 鲁晓兵, 谈庆明, 王淑云, 等. 饱和砂土液化研究新进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1):87-96.
- [2] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 砂性土液化势的评估方法[J]. 地震学刊, 1996, (3):11-22.
- [3] 薛新华, 张我华, 刘红军. 基于遗传神经网络的地震砂土液化判别研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(1):42-45.
- [4] 师旭超, 范量, 韩阳. 基于支持向量机方法的砂土地震液化分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004, 25(3):74-77.
- [5] 陈荣淋, 林建华, 黄群贤. 支持向量机在砂土液化预测中的应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2):15-23.
- [6] Vapnik V. 统计学习理论[M]. 许建华, 张学工, 译. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [7] Cristianini N, Shawe-Taylor J. 支持向量机导论[M]. 李国正, 王猛, 曾华军, 译. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [8] J A K Suykens, T Van Gestel, J De Brabanter, et al. Least Squares Support Vector Machines[M]. Singapore: World Scientific, 2002. (ISBN 981-238-151-1).
- [9] 蔡冬松, 靖继鹏. 基于最小二乘支持向量机的数据挖掘应用研究[J]. 情报科学, 2005, 23(12):1877-1880.
- [10] 周锡元, 王广军, 苏经军. 场地、地基、设计地震[M]. 北京:中国地震出版社, 1990.