

37-43

P 315.7

前兆性地震平静在中期预报中的定量研究

宋俊高 王 炜 陆锦花

(上海市地震局, 上海 200062)

摘要 对中国东部14次中强地震前地震活动的中期平静特征进行了深入研究. 使用了归一化的 $N-T$ 和 $L-T$ 图及地震活动统计量 β_0, β_1 等值线分布中的每一点给出了地震活动程度及其相应的持续时间和结束时间, 由此可以定量确定中期平静时间段. 还总结了中强地震前几种不同的地震活动方式. 总的特征是主震前地震活动的速率增强, 然后转为低活动速率, $N-T$ 与 $L-T$ 曲线呈现非规则的正弦波形变化.

关键词: 地震平静, 地震活动特征, 强震, 地震预报, 中期预报

1 引言

大地震前地震活动平静是国内外地震界普遍关注的前兆现象之一. 日本学者 Mogi^[1] 在1969年首先注意到某些主震前震源区地震活动速率减小的现象, Ohtake等^[2] 利用地震前兆平静成功地预报了1978年1月29日墨西哥瓦哈卡7.7级大地震, Kisslinger等^[3] 则根据震前平静现象预报了阿留申群岛7.7级大震. 还有一些中等强度地震也是根据平静这一前兆异常被成功地预报了.

近年来, 我国不少学者^[4] 研究了几次7级大震震例后发现, 在多数情况下区域地震活动性增强并不延续到主震发生的时刻, 其中有一段明显的地震平静段, 并根据震例研究得到, 从地震活动性增强至主震发生, 其间地震活动方式主要有两种: 一种是增强-平静-主震; 另一种是增强-平静-前震活动-主震.

目前研究前兆性地震平静基本上有两种方法: 一种是地震活动的时空分布演变图, 还有一种是地震活动速率随时间的变化. 在研究地震活动速率时, 文献[5]提出了前兆地震活动性平静的定义, 即在同一个研究区内, 与背景平均地震活动速率相比, 主震前的活动速率在统计上显著减小. 在空间上, 速率减小出现在主震震源体及其附近区域内; 在时间上, 速率的减小或持续到主震发生, 或临近主震有短期的增强. 本文在上述研究的基础上, 着重研究了中国东部14次中强地震前的前兆性地震平静特征, 并试图给出定量判据.

2 震例和资料

本文的研究范围为东经 $105^{\circ} \sim 128.5^{\circ}$, 北纬 $30^{\circ} \sim 43.5^{\circ}$. 14次中强地震的资料来源于国家地震局分析预报中心编纂的中国东部地震目录以及全国地震月报目录.

本文1996年12月19日收到, 1997年3月1日改回.

第一作者简介: 宋俊高, 男, 1945年11月生, 高级工程师, 主要从事地震活动、地震预报、防震减灾等研究工作.

研究主震前地震平静现象要求我们要有均匀的地震目录,台网的监测能力要保持稳定,这样才能观测到整个时段上地震活动速率变化的真实情况.因此在研究某一区域的地震活动速率变化时,我们对资料先作了如下的处理:(1)根据台网的监测能力和震级-频度关系图确定所使用的地震目录的最小震级在1.5~2.0之间;(2)为了使地震目录保持均匀,我们去掉了震群或序列中的余震部分,从而反映了整个研究区域内而不是个别点上的地震活动情况.

在实际研究中,以主震震中为中心,以 $2^{\circ} \times 2^{\circ} \sim 3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的尺度作为研究范围比较适中.如果在这种尺度的区域内出现地震平静异常,则对此区域中任何位置发生的地震都有预报意义,否则讨论的区域太大,会对未来主震位置的确定造成困难.从另一角度考虑,我们研究的是震源区及其附近区域的地震活动特征,因此,区域也不宜选得过大,区域太大,研究结果将受到远处外围地震活动的影响.

3 强震前地震活动中期平静特征

3.1 β_n 统计

对于给定的地震目录,设 $S(t)$ 为观测时段 $[0, T]$ 内 t 时刻的累计地震数,则原始过程 $S(t)$ 是由基本背景过程 $N(t)$ 与高度丛集的相关时间过程 $D(t)$ 组成的:

$$S(t) = N(t) + D(t)$$

可以通过某种算法去掉 $S(t)$ 中的丛集部分,而将过程 $N(t)$ 分离出来. Matthews等^[6]曾指出,包含异常活动速率子区间的地震序列全过程,可以看作是具有强度函数 $\lambda(t)$ 的非齐次泊松过程.地震平静的假设是用非齐次泊松过程模式中强度函数状态来表示的.给定 $[0, T]$ 区间上的 $N(t)$,设 A 为 $[0, T]$ 上的任一子间隔,则

$$\lambda(t) = \begin{cases} \rho B & \text{如果 } t \in A \\ B & \text{其它} \end{cases}$$

式中 B 为背景活动率, ρ 为异常活动率对背景活动率的比值, B 与 ρ 为正常数.在第一项中,如果 $\rho < 1$,则认为 A 子区间为平静.为此,我们引入统计量 $\beta_n(t, \delta)$ 描述非齐次泊松过程中子区间 $|t - \delta, t|$ 和过程的其余部分之间地震活动速率的差异程度^[6]. t 为子区间的结束时间, δ 为子区间的长度, $\beta_n(t, \delta)$ 则描述该子区间的地震活动速率变化程度. β_n 的表达式为

$$\beta_n(t, \delta) = \frac{M(t, \delta) - n\delta}{\sqrt{n\delta(1 - \delta)}}$$

式中 $M(t, \delta)$ 为子区间 $|t - \delta, t|$ 中的地震次数, n 为 $|0, T|$ 区间中的地震总次数.实际上上述公式已将区间 $|0, T|$ 归一化为区间 $|0, 1|$,则 δ 必定小于等于1.如果 $\delta = 1$,则定义 $\beta_n = 0$.

在计算 β_n 时,我们将二维空间 (t, δ) 中的 δ 增量定为两个月,即子区间的变化为 $|t - 2, t|$, $|t - 4, t|$, $|t - 6, t|$, ..., $|0, t|$.对每个震例给出二维空间 (t, δ) 的 β_n 等值线图. $\beta > 0$ 和 $\beta < 0$ 则分别表示子区间与背景区间相比后,地震活动速率的增加和减小.一般来说,我们通常取 $\beta_n > +2.0$ 为地震活动速率显著增加, $\beta_n < -2.0$ 为地震活动速率显著减小,即为平静.在 β_n 的等值线分布图中,用两种不同的阴影将它们区别开来,结果示于图1(因版面有限,仅选用4个震例)和表1.

对上述震例,我们采用不同的起始震级、不同的区域范围以及不同的时间段长度做了大量的 β_n 等值线分布图.图1中所列出的 β_n 等值线分布图是一些较为典型的图象.从这些图我们可以看到,中强地震前震中附近区域的地震活动在背景活动(β_n 在-1和+1之间)的基础上

开始增强,这时的 β_n 一般大于2.0,之后不久出现明显的平静,平静期间的 β_n 一般小于-2.0,然后地震活动恢复正常值,最后发生中强震(主震):取地震活动增强期以及平静期内,绝对值为最大并且增强持时2个月以上,平静持时在6个月以上的 β_n 值分别作为显著增强和显著平静的指标.由表1可见,除了个别一二个出现较大值外,地震活动增强的平均持时大致为4~6个月,平静的平均持时大致为10个月,而由平静结束日期到主震发生的时间间隔平均为12个月左右.

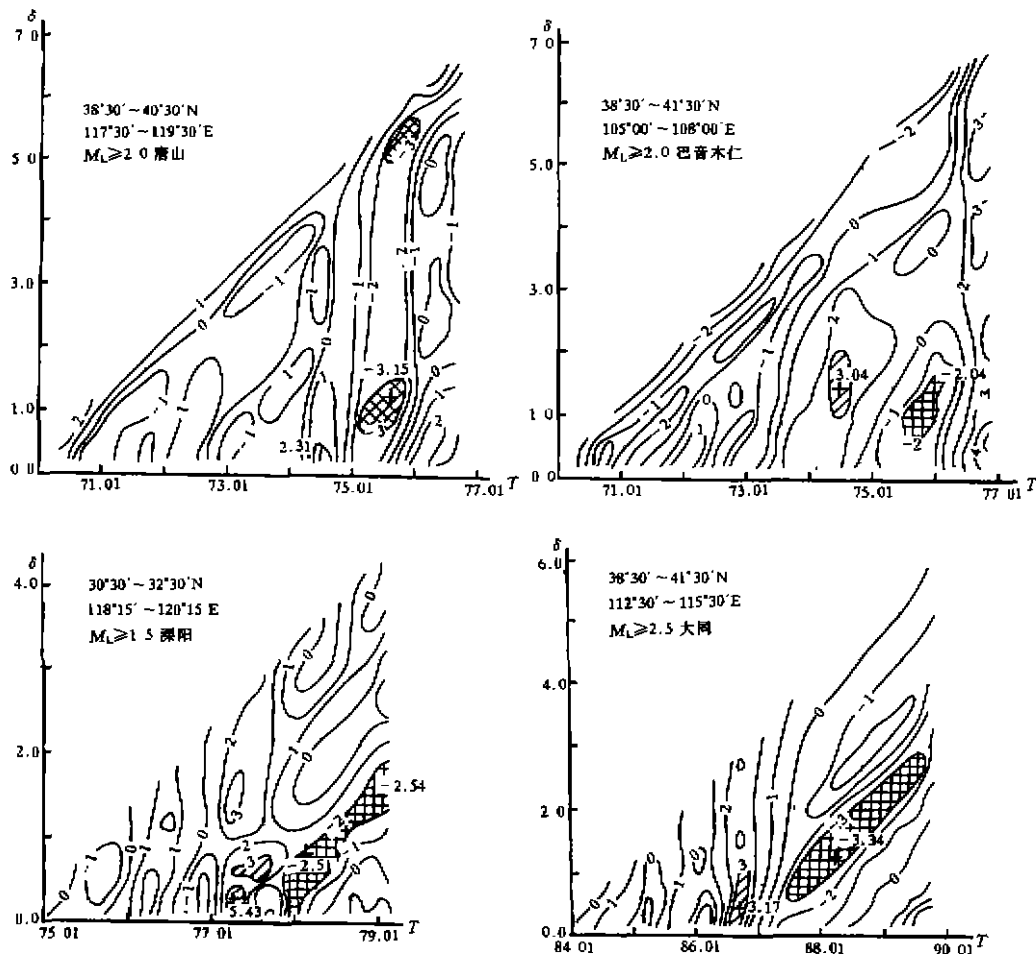


图1 中强地震前 β_n 等值线分布图

Fig. 1 Isopleth maps of β_n before moderate and strong earthquakes.

在14次震例中,有12次震例是在地震活动增强结束后即转为平静或间隔3~7个月后再转为平静,所以相对来说,平静比较容易识别,就是说地震活动增强之后,意味着平静即将开始.在这些震例中,仅有一次震例的增强 β_n 不到2.0,有三次震例的平静 β_n 不小于-2.0,但从总体上来看,这14次中强地震前的地震活动的增强与平静是显著的.

我们以主震震中为中心分别采用 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 以及 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的范围作为研究区域,计算 β_n 值.现以渡口5.1级地震(图2)为例来分析三种范围的区域的 β_n 值的变化情况.从图2可以看到, β_n 总体变化趋势基本上是一致的,反映了地震活动都由背景活动开始,经过增强阶段,在增强之后,地震活动又恢复到正常,接着出现显著性平静直到主震发生.由于 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 区域

表1 14次中强地震前地震活动平静统计表

地震	研究区域范围	增强		平静		平静结束到主震发生
		时段	持时 $\delta(\beta_n)$	时段	持时 $\delta(\beta_n)$	
1975-02-04 海城 7.3 级	38°42'~42°42'N 120°42'~123°42'E	1972-03~1974-04	26 个月(5.71)	1974-05~1974-10	6 个月[-1.53]	4 个月
1976-04-06 和林格尔 6.3 级	39°00'~41°31'N 111°00'~113°30'E	1972-11~1974-04	6 个月(3.14)	1974-11~1975-04	6 个月[-1.58]	12 个月
1976-07-28 唐山 7.8 级	38°30'~40°30'N 117°30'~119°30'E	1974-05~1974-06	2 个月(2.31)	1974-07~1975-08	14 个月(-3.15)	12 个月
1976-09-23 巴音木仁 6.2 级	38°30'~41°30'N 105°00'~108°00'E	1973-03~1974-06	16 个月(3.04)	1974-07~1975-12	18 个月(-2.04)	9 个月
1976-12-02 宝坻 5.5 级	38°30'~40°30'N 116°30'~118°30'E	1973-05~1973-06	2 个月[1.84]	1975-11~1976-06	8 个月(-2.57)	5 个月
1979-03-02 固镇 5.0 级	32°00'~35°00'N 116°30'~119°00'E	1974-11~1975-02	4 个月(2.21)	1975-05~1976-08	16 个月(-2.24)	30 个月
1979-07-09 溧阳 6.0 级	30°30'~32°30'N 118°15'~120°15'E	1977-03~1977-06	4 个月(5.43)	1977-07~1978-04	10 个月(-2.51)	15 个月
1979-08-25 五原 6.0 级	39°44'~42°44'N 107°00'~109°00'E	1976-05~1976-08	4 个月(3.24)	1976-09~1979-04	32 个月(-2.54)	5 个月
1981-08-13 丰镇 5.5 级	39°00'~42°00'N 112°00'~115°00'E	1979-09~1979-12	4 个月(3.42)	1980-01~1980-06	6 个月(-2.34)	13 个月
1981-11-09 邢台 5.8 级	36°30'~38°30'N 114°00'~116°00'E	1977-09~1977-12	4 个月(5.35)	1978-01~1981-02	38 个月(-2.05)	8 个月
1983-01-17 礓口 5.1 级	39°15'~41°45'N 105°45'~108°15'E	1979-01~1980-08	20 个月(3.08)	1980-09~1982-12	28 个月(-2.88)	0.5 个月
1983-11-07 菏泽 5.9 级	34°00'~36°00'N 114°30'~116°30'E	1977-07~1977-10	4 个月(3.80)	1978-09~1980-06	22 个月(-2.72)	41 个月
1984-05-21 南黄海 6.2 级	31°45'~34°15'N 120°15'~122°45'E	1982-03~1982-12	10 个月(3.53)	1983-07~1983-12	6 个月[-1.80]	5 个月
1989-10-19 大同-阳高 6.1 级	38°30'~41°30'N 112°30'~115°30'E	1986-07~1986-10	4 个月(3.17)	1987-03~1988-04	14 个月(-3.34)	17 个月

中的地震个数相对要少一些,其变化过程没有 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 和 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 区域那样明显,即使是这样,地震活动增强的持续时间和结束时间以及活动平静的持续时间和结束时间基本上是相同的,尤其是结束时间没有任何差别。 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 区域的 β_n 为 1.54(80.8, 26) 和 -2.28(82.12, 4); $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 区域的 β_n 为 3.08(80.8, 20) 和 -2.88(82.12, 28); $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 区域的 β_n 为 3.39(80.8, 20) 和 -2.84(82.12, 4)。对其它一些震例的研究结果也大致相同,即在一定区域范围内的 β_n 变化所反映的地震活动增强或平静的持续时间和结束时间具有较好的稳定性,特别是增强或平静的结束时间相当一致。由图 1 我们还可以总结出 14 次地震前的地震活动方式,见表 2。

从以上震例的地震活动方式来看,以背景-增强-平静-正常-发震和背景-增强-平静-增强-发震这两种活动方式所占的比例比较大,其次是背景-增强-平静-发震的活动方式,有不少震例在地震活动增强与平静之间有短暂的正常活动时段。有前震序列活动的震例,如海城与宝坻,

则其地震活动方式为背景-增强-平静-前震活动+主震.

3.2 地震的 $E^{1/3}$ 和频次 N 随时间变化

能量 E 的三次方根即 $E^{1/3}$ 相当于地震的断层长度 L (以下 $E^{1/3}$ 用 L 表示). $E^{1/3}$ 曲线的变化幅度不是很大, 比较连续, 其异常也更明显. 但考虑到每个区域(或震例)之间地震的 $E^{1/3}$ 和 N 量值各不相同, 所得到的异常量值也各不相同, 这样就会出现对不同区域(或震例), 其变化幅度或异常量值也随之而变. 为了统一说明问题, 对 $E^{1/3}$ 和 N 数据作了归一化处理^[7].

设 G_i 为每个时间段内的累计 $E^{1/3}$ 或 N , m 为时间段的个数, 则平均值 $G = \sum_{i=1}^m G_i / m \quad i = 1, \dots, m$

$$\text{标准偏差} \quad \sigma_m = \sqrt{\frac{\sum (G_i - G)^2}{m}}$$

$$\text{正态归一化值} \quad R_{G_i} = \frac{\Delta G_i}{\sigma_m}, \quad \Delta G_i = G_i - G$$

经过上述处理后, 对所有震例, 其 $E^{1/3}$ 和 N 曲线的变化范围基本上在 -3 和 $+3$ 之间.

在计算过程中, 对 L 和 N 采用不同的累计时段, 如 12 个月, 9 个月, 6 个月, 4 个月和 3 个月等, 发现累计时段长的异常信息不突出, 曲线变化过分平缓, 累计时间短的, 则曲线上下跳动变化大, 不易识别出异常, 而用 6 个月作为累计时段、逐月滑动所得到的曲线比较理想, 便于摄取异常信息. 将 L 与 N 这两个指标的曲线绘制在同一坐标系中, 见图 3. 由图 3 可见, 这两条曲线基本上是同步变化的, 说明区域地震活动强度与频次的变化是同步的; 在背景地震活动(曲线在 0 附近变化)的基础上, 曲线上升(活动加强), 而后下降(出现平静), 上升和下降这一段曲线呈现非规则的正弦图形; 上升部分的高值一般要大于 1.5, 而下降部分的低值一般小于 -1.0 (典型值应小于 -1.5).

图 3 中的 $N-T$ 和 $L-T$ 曲线的变化基本上与图 1 中的 β_0 等值线分布图相一致, 由于累计时段的缘故, 从图 3 中不太好确定地震活动增强和减弱的准确时间.

4 结语

通过对上述震例的讨论和分析, 可以认为前兆性地震平静在中强地震前的地震活动中是客观存在的. 分析 β_0 等值线分布图可以定量地了解地震活动情况, 包括活动的强度及持续时间. 一般来说, 对于 5 年以上的地震资料, β_0 等于 $+2.0$ 和 -2.0 分别为地震活动性增强与减弱的阈值; 而对于不到 5 年的资料, 取 β_0 等于 $+1.5$ 和 -1.5 为地震活动性增强与减弱的阈值, 其绝对值越大, 则表明地震活动性越强或者越弱, 选取它们中的最大值和最小值所对应的

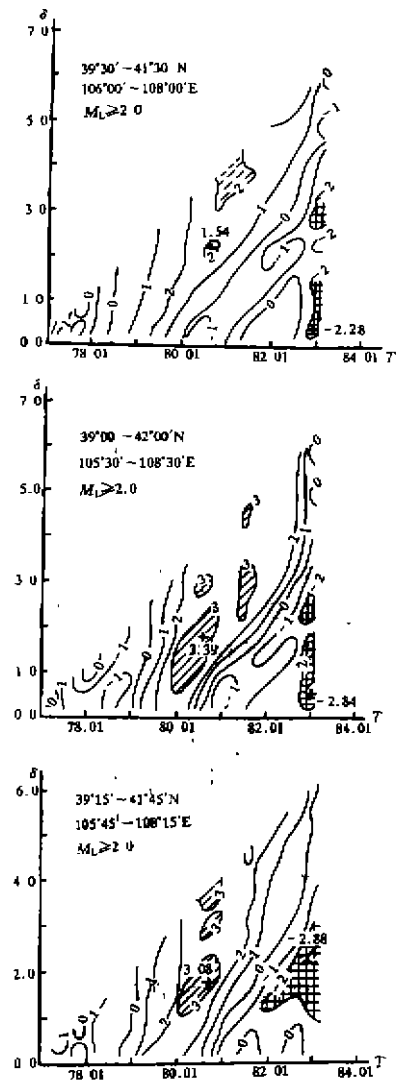


图 2 磴口地震前不同区域范围 ($2^\circ \times 2^\circ, 2.5^\circ \times 2.5^\circ, 3^\circ \times 3^\circ$) 的 β_0 等值线分布图

Fig. 2 Isopleth maps of β_0 in different scale ranges before the Dengkou earthquake.

时刻分别作为地震活动性增强或减弱的结束时间。

表2 14次地震前的地震活动方式

地震	震前地震活动方式	地震	震前地震活动方式
海城	背景-增强-平静-前震活动+主震	五原	背景-增强-平静-正常-发展
和林格尔	背景-减弱-增强-平静-正常-发展	丰镇	背景-增强-平静-正常-发展
唐山	背景-增强-平静-正常-发展	邢台	背景-增强-平静-正常-发展
巴音木仁	背景-增强-平静-增强-发展	澄口	背景-增强-平静-发展
宝坻	背景-增强-正常-平静-前震活动+主震	菏泽	背景-增强-正常-平静-正常-增强-发展
固镇	背景-增强-平静-正常-增强-正常-发展	南黄海	背景-增强-正常-平静-发展
溧阳	背景-增强-平静-正常-发展	大同	背景-增强-正常-平静-正常-发展

在计算 β_n 时,选取的时段一般在5年以上,但也不宜太长,时段太长有可能掩盖震前地震活动增强和平静的异常信息量,最合适的时段是5~8年。

在计算时,尽可能避开前一次中强震期间的地震活动,通常在前一次中强震的余震结束后,再开始研究下一次中强震前的地震活动性变化。

地震平静起始时间不得确定在地震活动增强结束时间之前,即 β_n 图中的平静持时,由平静结束时间向前量度延伸时,不得进入增强的时段中,也就是说,平静向前延伸最多到增强结束时为止。

从 β_n 图及 $L-T$ 和 $N-T$ 图可见,前兆性平静出现在地震活动增强之后,在 β_n 图上一般先出现高活动率($\beta_n > +2.0$)的等值区,接着出现低活动率($\beta_n < -2.0$)的等值区;在 $N-T$ 与 $L-T$ 图中,曲线的变化是先上升,然后下降到最低谷,其典型的曲线为非规则正弦波图形。

前兆性地震平静之后,小震活动会逐渐聚集在未来主震区及其附近,并且呈规则分布,实际上在前兆性地震平静之后震源区及其附近并不是没有地震发生,而是出现小震的多少不同,有的恢复正常活动,有的出现活跃,这些平静后的小震活动多少携带了大震前的短期或短临信息。

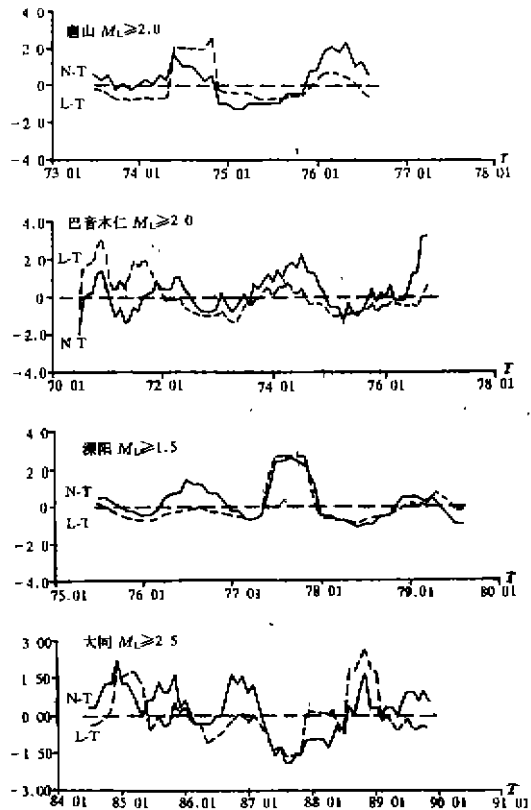


图3 中强地震前的 $N-T$ 与 $L-T$ 图

Fig. 3 $N-T$ and $L-T$ curves before moderate and strong earthquakes.

参考文献

- 1 Mogi K. Some features of recent seismic activity in and near Japan(2), activity before and after great earthquakes. Bull Earthq Res Inst Univ, Tokyo, 1969, (47): 295~417.
- 2 Ohtake M, Matumoto T and Latham G V. Evaluation of the forecast of the 1978 Oaxaca Southern Mexico earthquake based on a precursory seismic quiescence. In Earthquake Prediction. Maurice Ewing Series(Amer Geophys Union 4). 1981 53~62.
- 3 Kisslinger C, McDonald C and Bowman J R. Precursory time-space patterns of seismicity and their relation to fault processes in the Central Aleutian Islands seismic zone(Abstract). IASPEI Meeting Proceedings, Tokyo, 1985
- 4 陆远忠, 陈章立, 王碧泉, 刘蒲雄, 刘文龙, 戴维乐. 地震预报的地震学方法. 北京: 地震出版社, 1985.
- 5 Wyss M and Habermann R E. Precursory seismic quiescence. PAGEOPH, 1988, 126(2~4): 319~332.
- 6 Matthews M V and Reasenber P A. Statistical Method for investigating quiescence and other temporal seismicity pattern. PAGEOPH, 1988, 126(2~4): 357~372.
- 7 田耀吾. 概率统计基础. 北京: 电子工业出版社, 1984.

**QUANTITATIVE STUDY OF PRECURSORY SEISMIC QUIESCENCE
FOR MEDIUM-TERM EARTHQUAKE PREDICTION**

SONG Jungao WANG Wei LU Jinhua

(Seismological Bureau of Shanghai City, Shanghai 200062)

Abstract

The characteristics of the medium-term seismic quiescence before 14 moderate or strong earthquakes in Eastern China are studied. The normalized $N-T$ and $L-T$ curves and the statistical parameter β_n are adopted. Each point in the isopleth map of β_n can show the level of seismic activity and its corresponding duration and end date, which can be utilized to determine the time span of the medium-term quiescence quantitatively. The several seismic activity patterns, with general feature of seismic activity rate from increasing to decreasing before the main shocks and fluctuation variation of irregular sine wave in $N-T$ and $L-T$ curves, appeared before moderate and strong earthquakes are also summarized.

Key words: Seismic quiet, Seismicity feature, Strong earthquake

(上接 36 页)

**THE VARIATION FEATURES OF ENERGY LOGARITHM MIGRATION PARAMETER
V VALUE BEFORE $M \geq 7$ EARTHQUAKES IN CHINA**

LIU Xiqiang LI Hong HUA Aijun LIN Huaicun

(Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250021)

Abstract

A new characteristic quantity-energy logarithm migrating parameter V value which relates time-space seismicity patterns is put forward. On the basis of time-space scanning results, V value shows an abnormal process which is normal fluctuation-tendency going down-the lowest value-tendency going up-earthquake occurring with time. Earthquakes occur during or after V value tendency going up. Eight strong earthquakes which form 72.7 percent in total events took place during 1~24 months after the lowest V value ending.

Key words: Earthquake precursor, Anomalous shape, Energy logarithm migrating parameter V value, Low value anomaly