

# 地震孕育过程的扩展和地震 地电阻率法的统计预报

陈 有 发

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

本文采用扩展——膨胀各向异性假设,对地震地电阻率前兆持续时间 $T$ 及其相应的空间分布 $\Delta$ 与震级 $M$ 的关系进行了统计分析,得到一种比较合理的预报方法。

## 一、前 言

地震地电阻率法( $\rho_s$ 法)的统计预报已有许多人作过工作<sup>[1,2]</sup>。这些工作促进了地震预报水平的提高和 $\rho_s$ 前兆特征与地震之间内在联系的认识。但是,地震孕育过程与 $\rho_s$ 前兆特征量之间以何种物理关系相联系,又以何种数学关系表达出来却有待于更加广泛和深入的研究。笔者以地震孕育的过程是随时间由震源逐渐向外围扩展的观点为指导思想来处理 $\rho_s$ 法的统计预报,亦即在震中区出现 $\rho_s$ 前兆较早,前兆持续时间 $T$ 较长,随着震中距的增大 $\rho_s$ 前兆出现的时间就越来越晚, $T$ 就越来越短,最后就观测不到前兆信息, $T$ 就趋近零。

## 二、地震孕育过程的扩展

现代地震孕育过程的假设是由于地球裂隙——断裂的形成。许多地震模式都反应出一点,即未来震源处有一障碍物或断层的闭锁段。<sup>[2,6]</sup>这是应力或应变积累的条件。它们的强度越高,积累的应变就越大,未来地震就越强烈,由于大地构造的定向运动会使未来震源区的应变越来越大,并且随时间的推移,震源体向外围日益扩展,其影响区也越来越大,从而在相应的范围激发起地震 $\rho_s$ 前兆的出现。当障碍物或闭锁段被破坏就发生地震,此后 $\rho_s$ 就呈现恢复的形态。裂隙的密度、分布情况和水饱和度的变化是大多数地震前兆的可能激发机制。

可是,在地震模式中通常所谓的岩石膨胀都只能发生在紧靠震源区范围内应力集中的地方,而不能发生在观测到大量前兆的远离震源的低应力区<sup>[2,5,2,6]</sup>。象我国 $\rho_s$ 法在7—7.9级地震特别是唐山7.8级地震前离震中700—800km,甚至上千km的地方都观测到有较长 $T$ 的 $\rho_s$ 前兆<sup>[1][3-5]</sup>,而且,唐山地震断层面为北东—南西走向,长度才110—140km<sup>[7]</sup>。对这种膨胀范围狭小而 $\rho_s$ 前兆范围广阔作如何解释呢?我以为下述观点有利于解释这种现象。苏格兰学者S·Crampin等人(1984)提出了扩展——膨胀各向异性假说(Extensive-clilat-

1)宁夏地震队资料室,1977,7,地电阻率前兆现象的持续时间在地震预报中的意义,

ancy anisotropy, 简称 EDA 机制)<sup>(26)</sup>。这个学说是指在比较低的应力条件下孕震区及其邻近地区震前发生的扩展—膨胀现象, 其范围距离震中可达数百至一千公里左右。在本文中只承认这个结论, 具体扩展—膨胀的细节参见文献<sup>(26)</sup>。

因此, 无论从一般的膨胀理论还是扩展—膨胀各向异性机制都可以看出, 地震孕育过程在时间和空间上都是由震源向外围逐渐扩展, 最终停止。Ю·М·沃尔可夫估计  $\rho$  前兆随  $M=4.3$  级地震孕育扩展的速度为 0.7—1.1 公里每天<sup>(27)</sup> 钱复业等人估计  $M=7.8$  级地震的为 0.27 公里每天<sup>(8)</sup>。

### 三、地震地电阻率法的统计预报

从上面的讨论可以得出重要结论,  $\rho$  前兆持续时间  $T$  是随着震中距  $\Delta$  的增大而减少的。根据实测资料, 当震级  $M$  一定时,

$$\Delta \cdot T \approx \text{常数}, \quad (1)$$

亦即  $\Delta$  与  $T$  成反比。这是本文统计预报的重要特点, 也是与国内其他作者在作  $\rho$  法统计预报方面的不同之处。(1) 式也是衡量一次地震多个  $\rho$  前兆特征量 ( $T$ ) 可靠性的标准之一。

#### 1. 资料

本文收集了 1967 年 4 月 19 日至 1986 年 12 月 31 日 3.7—7.9 级地震 70 个震例 共计 199 个  $\rho$  前兆持续时间  $T$ <sup>(1-2)</sup>。资料处理遵从下述原理: (1) 根据每个震例的资料只要满足 (1) 式就作为统计计算的数据, 并规定舍去那些与平均值之差大于一倍均方根误差的数据; 一个震例只有两个资料但又符合扩展规律并比较接近时也作为统计资料; (2) 当震级相同的  $\rho$  前兆持续时间  $T$  若符合上述规律时也收集在内。图 1 是 199 个资料绘成的, 它没有经过任何处理。由图可以看出, 总的趋势是震级  $M$  越大,  $\Delta \cdot T$  也越大。但是, 资料比较分散。图 2 是经过统一处理, 取舍后 114 个资料作成的。由图可以看出, 除具有  $\Delta \cdot T$  随  $M$  增大的特点外,



图 1.  $M$  与  $\Delta \cdot T$  的相关场  
Fig. 1 the relative field between  $M$  and  $\Delta \cdot T$  (original)

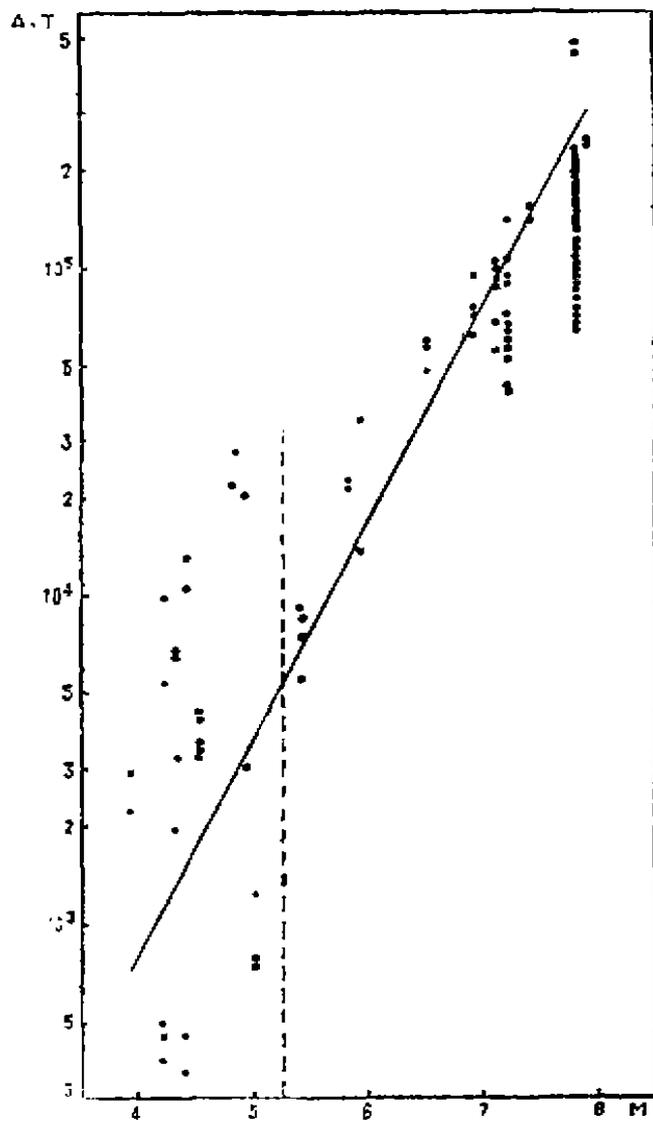


图2 M与 $\Delta \cdot T$ 的相关场  
Fig.2 the relative field between M and  $\Delta \cdot T$  (handled by the method)

表1 M与 $\lg(\Delta \cdot T)$ 相关统计公式  
Table 1 statistical formula of relations between M and  $Lg(\Delta \cdot T)$

资料来源	公 式	n	r	$\sigma_r$	$t/t_0$ ( $\phi=0.99$ )	M
赵玉林等	$M=1.37lg(\Delta \cdot T)+0.44 \pm 0.52$ (2)	22	0.93	0.03	34.84/2.845	4.2-7.8
陈有发	$M=2.28lg(\Delta \cdot T)-3.61 \pm 0.31$ (3)	6	0.99	0.01	84.59/4.032	3.9-7.8
连纪仁	$M=2.26lg(\Delta \cdot T)-4.71 \pm 0.28$ (4)	17	0.83	0.08	10.89/2.947	6.5-7.8
	$M=1.20lg(\Delta \cdot T)+1.54 \pm 0.12$ (5)	15	0.91	0.05	19.41/3.169	7.1-7.9
陈 力	$M=1.51lg(\Delta \cdot T)-1.18 \pm 0.49$ (6)	8	0.76	0.15	5.05/4.032	4.2-5.9
钱家栋	$M=1.89lg(\Delta \cdot T)-1.67 \pm 0.20$ (7)	5	0.74	0.20	3.68/	7.1-7.9
集 体	$M=1.51lg(\Delta \cdot T)-0.38 \pm 0.59$ (8)	114	0.89	0.02	45.30/2.660	3.9-7.9

资料比较集中，线性也较好。

## 2. 统计公式

M与 $\lg(\Delta \cdot T)$ 二者之间的统计关系如表1所示。表中n为资料个数；r和 $\sigma_r$ 分别为相关系数及其误差， $\sigma_r = (1-r^2)/\sqrt{n}$ ；t和 $t_0$ 分别为线性关系可靠程度的实测值和理论值，或者叫做r的可靠程度、 $t = |r|/\sigma_r$ ；

$\phi$ 为或然率。由表1可以看出，所得出的关系式的或然率均大于0.99，它们是可靠的。M与 $\lg(\Delta \cdot T)$ 之间的关系不是偶合，而是一种内在的物理联系。它们预测M的误差相对较小，约1级左右。

但是，应该指出，资料来源不一样所得关系式也不完全一样，在图1和2上出现 $\Delta \cdot T$ 资料有较大的离散性。下面就讨论资料分散的原因。

## 3. 资料分散的原因

资料分散的原因归纳起来有三点。

第一是人差。它是由于不同作者有各自判定前兆持续时间T的标准所致。因此，对于同一个地震的T的估计出入很大。在此以唐山7.8级地震的T为例来说明这个问题如表2所示。表中 $\beta$ 为震前应变速率显著增大的地壳加速运动过程阶段、 $\beta_1$ 为地壳进入扩容状态，

表2 不同作者对唐山7,8级地震 $\rho_s$ 的T的估计Table 2 T of  $\rho_s$  at the earthquake  $M_s=7.3$  estimated by some authors

作者	T 天	台名、震中距 (km)	唐山	马家沟	昌黎	宝坻	塘沽	青光	西集	八里桥	忠兴庄	青县	小汤山	马各庄	大圩河	大柏舍
			0	10	70	80	80	110	120	140	150	160	170	180	320	390
桂燮泰			957		957	926		1322		1157	607	1	3			
钱家栋			1124		1124	1307					1307					
赵玉林等			973		1154	897		608	1154	1154	608		360			
陈有发					1425	1425										
连纪仁 ( $\beta_1$ )												1965			1510	1170
( $\beta_2$ )					1740	1520		1100	1185	1010	1050	1030		910	705	565

$\beta_2$ 为 $\beta_1$ 后不稳定和脉动的地形变过程,在这两个阶段中 $\rho_s$ 前兆持续时间T相应为 $T_1$ 和 $T_2$ 。由表可以看出,不同作者估计唐山7,8级地震 $\rho_s$ 的T之差是惊人的,甚至有的作者认为无T的,而别的作者却认为T长得可观。这一点是造成资料分散的主要原因之一。

第二,是 $\rho_s$ 台址条件的差异。研究表明 $\rho_s$ 台的构造,岩体力学,电性,水文地质和电磁干扰条件直接响影到 $\rho_s$ 的T和前兆量 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的大小<sup>[22, 23]</sup>。第四纪松散覆盖层有抑制 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 的作用,推迟 $\rho_s$ 前兆的出现,缩短 $\rho_s$ 的T。覆盖层越厚这种抑制作用就越显著<sup>[24]</sup>。表2中塘沽、昌黎和宝坻台至唐山7,8级地震震中的距离都差不多,而它们的覆盖层厚度分别大于600米,80米和180米,结果 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 也只有后面两个台明显,T也较长。在唐山7,8级地震周围390公里范围内有21个 $\rho_s$ 台,反应较好的只有三分之一左右,较多的 $\rho_s$ 台址不能满足 $\rho_s$ 法应用的技术条件,导致 $\rho_s$ 法检测不到 $\rho_s$ 前兆。

第三,是观测系统技术条件不满足。这是较多地电台存在的普遍问题,如线路漏电,仪器性能不稳定,停电停测等就会造成有震期间 $\rho_s$ 的T和 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 失真。

总之,响影M与 $\rho_s$ 的 $\lg(\Delta \cdot T)$ 关系式可靠程度的因素是较多的,但是, $\rho_s$ 法的台址条件是关键,要突破 $\rho_s$ 法预报地震的难关首先要使 $\rho_s$ 台符合 $\rho_s$ 法应用的技术条件<sup>[23]</sup>。

#### 4. 公式的优点

这种统计的最大优点是把地震在空间上 $\Delta$ 和相应出现的 $\rho_s$ 前兆持续时间T有机地联系在一起,反应出T依赖于 $\Delta$ 的内在联系。既有理论依据又有观测结果。同时,按扩展理论来统计地震三要素得到预报地震震级的公式比只用T来预报M的精度要高,如表3所示。表中(9)式相关系数为0.75,  $\sigma_r=0.03$ ,  $t=24.18$ ,  $n=199$ 。由表可以看出,(9)-(10)式要比(2)-(8)式的误差大2-11倍之多。这表明用 $\lg(\Delta \cdot T)$ 参数来估计地震的

表3 统计公式误差比较

Table 3 error comparison of the statistical formula

作者	公式	参数	误差
陈有发	(2)-(8)	M, $\lg(\Delta \cdot T)$	$\pm 0.12 - \pm 0.59$
陈有发	$M=2.89\lg T - 0.28 \pm 1.24$	(9) M, T	$\pm 1.24$
力武常茨	$M=1.32\lg T + 2.41 \pm 1.32$	(10) M, T	$\pm 1.32$

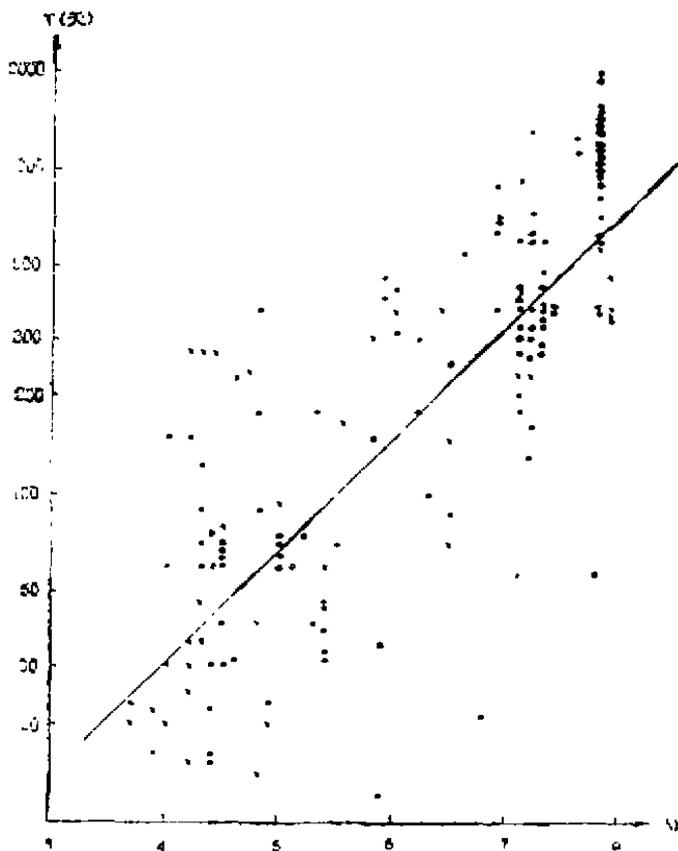


图3 M与T的相关场

Fig. 3 relative field between M and T

震级精度要比用参数  $\lg T$  的高得多。实际上这个结果很好理解。只考虑前兆时间  $T$  而忽略震中距  $\Delta$  对  $T$  的影响，其结果必定是把一次地震的长、中、短、临前兆的  $T$  都用来估计该次地震的大小，其误差之大是不言而喻如图3所示。表2也表明了这一点。由于方法本身没有给出取舍标准，即使对资料进行取舍，也不能从根本上提高统计关系式的精度。相反，用参考数  $\lg(\Delta \cdot T)$  来预测震级  $M$  客观上给出了评定  $\rho_s$  资料的标准，亦即同一地震的多个  $\rho_s$  的  $\Delta \cdot T$  必须接近一个常数，这就为判别资料优劣程度提供了一个较合理的标准。这种统计关系式的可靠程度无疑是会提高的，表3中两种统计的对比就充分说明了这一点。

应当指出，在(1)式中当  $T$  趋近于零或  $\Delta$  趋近于无穷大时，这个物理意义是清楚的。但是，当  $\Delta$  趋近于零时， $T$  趋近于无穷大，这

与理论和观测结果都不相符，它应该是一个有限量。实际上地震孕育过程对  $\rho_s$  的  $T$  的影响不仅取决于震中距，而且也取决于震源深度  $h$ ，即  $\rho_s$  的  $T$  与震源距  $\Delta_s$  (震源到  $\rho_s$  台之间的距离， $\Delta_s = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$ ，单位为公里) 成反比。在  $\Delta$  趋于零时  $\Delta_s = h$ ，即使位于极震区的  $\rho_s$  台，它的  $\Delta$  也不为零而应为震源深度  $h$ 。由于本文收集的70余个地震的资料多数没有震源深度的数据，所以，在统计时仅使用了参数  $\Delta$ 。因此，这种统计在  $\Delta \gg h$  条件下或浅部地震时是适用的。对于具体的  $\rho_s$  台和分析人员要根据地方性特点作出适合本地区的公式。

### 5. 公式的应用

表1中各式把地震三要素联系在一起，为地震预报提供了一个定性中有定量的预报方法。根据这种方法要预报未来一次  $M$  级地震，就必须按照(1)式对  $\rho_s$  资料进行取舍，而且至少要有三个以上  $\rho_s$  台的资料。因此，这种方法应采用多个  $\rho_s$  台一假设未来地震震中一逐步逼近的办法来预报地震三要素。具体作法如下。

设有  $N$  ( $N \geq 3$ ) 个  $\rho_s$  台，观测到  $\rho_s$  的  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )，假设未来震中离各  $\rho_s$  台的距离为  $\Delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。根(1)式应有

$$\Delta_1 T_1 \approx \Delta_2 T_2 \approx \dots \approx \Delta_N T_N \approx \text{常数} \quad (11)$$

但由于是假设震中， $\Delta_i$  与实际不完全相符，造成(11)式不近似相等，超出了允许的变化

范围。这时就要移动假设震中，改变 $\Delta_i$ ，再计算 $\Delta_i T_i$ 。直到N个 $\rho_i$ 台的 $\Delta_i T_i$ 彼此接近为止。然后再求出平均值

$$\overline{\Delta \cdot T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta_i T_i) \quad (12)$$

将 $\overline{\Delta \cdot T}$ 代入(2)－(8)式计算出M。另外，也可以先计算出 $M_i$ ，再求出M。这时的M和地点都是未来地震的可能参数。

应该指出，这种预报方法本身就是对 $\rho_i$ 前兆真实性的一次检验。如果没有共同的孕震过程(地球或其他动力学过程的作用)，那末(1)式和(11)式是不会得到满足。因此，这种预报方法避免了错报地震，从而提高了预报地震的水平。

#### 四、结束语

当震级M一定时出现 $\rho_i$ 前兆的T与其相应空间范围 $\Delta_i$ 成反比是地震孕育扩展过程的必然结果，这是本文统计预报的基础。这种预报方法要求多台 $\rho_i$ 的 $\Delta \cdot T$ 一致性，客观上起着去伪存真的作用。因此，它比单独用T来预测震级M的精度要高得多。因此，目前它可能是一种较好的预报方法。

#### 参 考 文 献

- [1] 钱复业等，中国科学(B辑)，No. 9, 1982。
- [2] 钱家栋等，地电阻率法在地震预报中的应用，地震出版社，1985。
- [3] 陈有友，东北地震研究，No. 3, 1987。
- [4] 国家地震局一九七六年唐山地震编辑组，一九七六年唐山地震，地震出版社，P212—217, 1982
- [5] 国家地震局科研处，唐山地震考察与研究，地震出版社，P215—226, 1981。
- [6] 钱复业等，地震预测—地电方法论文集，福建科学技术出版社，P79—92, 1985。
- [7] 同4，P33—70。
- [8] 河北省地震局，1966年邢台地震，地震出版社，P210—226, 1986。
- [9] 同6，P113—121。
- [10] 王德富，四川地震，No. 1, 1985。
- [11] 王德富，四川地震，No. 2, 1987。
- [12] 李有才，四川地震，No. 3, 1982。
- [13] 王志贤，华北地震科学，No. 2, 1987。
- [14] 王帮本，地震研究，No. 1, 1985。

- [15] 陈力, 地震观测与预报, No. 2, 1987.
- [16] 朱凤鸣等, 一九七五年海城地震, 地震出版社, 1982.
- [17] 钱复业等, 地震学报, No. 2, 1980.
- [18] 丁国瑜等, 国际地震预报讨论会论文选, 地震出版社, P50—54, 1981.
- [19] 赵玉林等, 地球物理学报, No. 3, 1978.
- [20] 钱复业等, 西北地震学报, No. 2, 1982.
- [21] 安维光, 地震, No. 3, 1987.
- [22] 陈有发等, 西北地震学报, No. 2, 1986.
- [23] 陈有发等, 地震监测与预报方法清理成果汇编(地磁地电分册), 地震出版社, P180—185, 1988.
- [24] 陈有发等, 西北地震学报, No. 3, 1984.
- [25] S·Crampin et al., G·j·R, 76, P147—156, 1984.
- [26] М·А·Садовский, Электромагнитные предвестники Землетрясений, 1982.
- [27] Ю·М·Волков, природа No. 7, 1933.

## THE DEVELOPMENT EARTHQUAKE BREEDING PROCESS AND THE STATISTICAL PREDICTION OF EARTHQUAKE AND EAR-RESISTIVITY

Chen Youfa

( Seismological Institute of Lanzhou, SSB )

### Abstract

By using a hypothesis of extensive and expansive anisotropy and statistically analysing the precursor continued time (T) of seismic and earth-resistivity and the relations between the relative spatial distribution ( $\Delta$ ) and magnitude (M), a reasonable method of prediction is gained.