

地电阻率突变序列的变化与地震预报^{*}

刘心恒 周郅生

(中国昆明 650041 云南省地震局)

摘 要

从断裂力学观点出发,分析研究了大量的实际观测资料,发现强震前震中周围附近的台站将观测到有关地震的异常地电阻率突变序列. 序列中最大突变的出现将随着震中距的加大而往后推移,震级的增强而提前. 而且最大突变还将由震中逐渐向外围扩展. 从而提出了利用突变序列、突变频度、最大突变扩展速度与时距积预报地震三要素的可能性.

关键词 岩石破裂;地电阻率突变;突变频度;扩展速度;地震三要素

1. 引 言

地电阻率法是当今地震监测预报重要前兆观测手段之一. 这不仅是它有明确的测量物理量,更重要的是它研究的是人工场,完全不同于其它前兆手段观测的是自然场. 由于人工场较自然场有更多的优点,诸如场的变化更为稳定、场强可人为控制、某些干扰可通过场的再建立加以识别等等. 另外,它不但可研究平面问题,还可从立体的三度空间研究介质的电性变化提取全空间信息. 因此,对该法的研究应引起人们足够的重视. 特别是对如何应用该法于短临监视的研究. 这里准备采用与传统完全不同的研究思路,引进断裂力学于该法研究,并力图以它的概念与理论来解释震前出现的地电阻率变化现象,以寻求具体预报新方法.

2. 裂纹扩展前缘的应力分布

为简化问题起见,这里先研究平面问题. 设一厚板内有一穿透裂纹,长为 $2a$. 裂纹端部的应力分布,从许多材料力学教科书及陈培善等(1977)可知:

张开型. 无限平板受一均匀拉力 σ_0 , 拉力垂直于裂纹平面,即似张裂断层.

^{*} 地震科学联合基金会资助项目.

1991年7月3日收到本文初稿,1992年4月26日决定采用.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \sigma_y = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_{xy} = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \\ k = \sqrt{\pi a \sigma_0} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, 是三个方向的正应力; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 是三个切应力, ν 是泊松比, r 是到裂纹尖端的距离, k 是应力强度因子。

至于滑开型与撕开型这里从略。

从断裂力学可知, 材料里原有的裂纹, 在外力作用、应力腐蚀与孔隙流体的表面化学作用下, 会使原有裂纹缓慢扩展, 使裂纹长度不断增大, 或由于外加应力的增加, 结果使应力强度因子 k 不断增大, 当它超过其临界值时, 破裂迅速进入失稳扩展。裂纹将以很大速度扩展。Anderson (1977) 指出, 破裂过程是不可逆的突变性破坏, 其破裂传播速度为 10^3m/s 的量级, 与地震有关的破裂速度约为 3km/s 。在突变性断裂之前, 早期的破裂传播速度小于 10^{-1}m/s 。

由此可见, 由于 a 的迅速增大必将导致应力的突变。根据 (1) 式便可粗略地从理论上估计突变量级。

众所周知, 在地壳, 特别是地壳上部, 岩石多为脆性。岩石中通常存在着大量的裂纹, 如微裂纹、节理、片理到大小小断层。这些裂纹端部也会产生应力集中, 一些裂纹在一定的条件下会缓慢扩展, 甚至发展到失稳扩展, 导致地震的发生。

岩石加压电阻率变化实验结果表明, 电阻率将随压力的变化而变化。王新华 (1984) 报道过王其允的摩擦粘滑实验, 在摩擦粘滑之前, 观测到了电阻率的可观变化:

第一类对饱和花岗岩, 随剪切位移的增加, 电阻率开始时几乎为常数, 而在第一次粘滑前突然下降约 6%, 以后每次粘滑前都有约 1—2% 的下降。

第二类情况, 在电阻率持续下降中, 对每一次应力突然释放, 它都出现一定的突降。

由此可见, 不管是理论上还是实验结果都表明: 由于台站附近裂纹的迅速扩展, 引起地电阻率百分之几的突变是完全可能的。

此外, 刘心恒和周勖生 (1991) 还指出, 诸如地下水位的急剧升降、含盐度不同的深浅层水的一旦串通等, 也能直接与间接地引起地电阻率一定的突变。

还有许多岩石加压破裂实验结果也表明, 岩石受压过程中, 先是出现少量微破裂, 随着压力的不断增大, 微破裂逐渐增多, 规模不断扩大, 出现加速破裂现象。当加速破裂发展到顶峰后, 声发射开始减弱, 说明新生微破裂开始减少, 直至最后岩石破碎。在野外实际情况下, 考虑到地壳介质在受压过程中, 除震源区主裂纹 (酝酿断裂) 发生加速扩展外, 由于继续不断受压还可能使周围地区次一级裂纹的加速扩展和更远一些地区更次一级裂纹的加速扩展, 从而引起这些地区介质地电阻率出现突变。因此, 震中附近的台站震前将可能

观测到地电阻率的突变(超过一定数值的日相对变化速率)逐渐加强达到出现最大突变,而后又逐渐减弱直至发震.最大突变的出现还将有由震中逐渐向外围扩展的趋势.这里把突变随时间的变化称为“突变序列”.那么,在野外实际条件下又是如何呢?下面将作具体讨论.

3. 强震前突变序列的变化

这里处理了全国有关的数十个地电台站长期观测资料,编制其突变序列.结果发现:自我国地电台网建立以来发生在台网及其附近地区(距台站 400km 左右范围内), $M>7.0$ 大震共 10 次(其中包括 1991 年 1 月 5 日缅甸曼德勒 7.6 级地震).震前一定时间里一般都出现有相当于加速破裂达到高潮的一次最大突变.有的地震在其最大突变前后还可看到有突变逐渐加强与减弱的趋势.全部距震中 400km 左右范围内有 4 个以上台站的大震(炉霍 7.6、昭通 7.1、唐山 7.8、松潘 7.2、道孚 6.9 与澜沧 7.6),还能清楚地看到最大突变有由震中逐渐向外围扩展的趋势.它们都出现了较为稳定的、相似的震前突变序列变化图象.

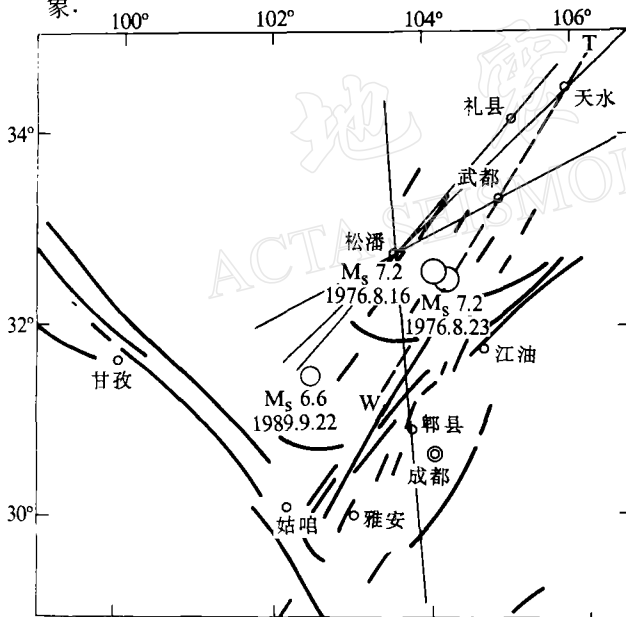


图 1 四川北部及其邻区地电台站分布图

图中松潘台停测于 1981 年,姑咱台停

测于 1983 年,江油台起测于 1978 年

值得指出,上述最大突变按断裂力学观点突变应为不可逆的,即应出现单向突变.但由于一般地电台站多建于深大断裂附近,这些地区一般多为富含水.因此,一旦出现新生裂纹使地电阻率升高,后因周围水的迅速充填,又会使得地电阻率快速下降,所以还会有双向(正负向)突变情况.还有从表面上看来,最大突变只是由 1—2 个日均值变化造成.其实它不同于一般的一次简单观测读数,它是由每昼夜 6—12 次观测(各台不等),每次重复测量 5 组数,即由 30—60 组数、60—120 个读数综合而成的.

下面以 1976 年 8 月 16 日松潘 7.2 级地震进行讨论.图 1 给出震中周围 400km 内全部台站分布.其中除

江油台建于震后外,均为震前所建.陕西的宝鸡虽在 400km 内,但考虑它与震源分属渭南古陆与四川盆地两个构造单元,且其间还穿插有秦岭大地向斜褶皱带未被采用外,其它台站全部选用.其观测结果经处理见图 2.从图可以看出,最早出现最大突变的是距震中最近的松潘,最晚出现最大突变的是距震中最远的姑咱与甘孜.在震中距相近情况下,最大突变出现时间虽略有前后,但最大突变由震中向外围扩展的总趋势是明显的(见图上虚线

所示). 这些突变序列特征的基本参数, 见表 1. 从表可知, 这些最大突变均超出正常标准偏差 4 倍以上, 因此, 这些突变是可靠的.

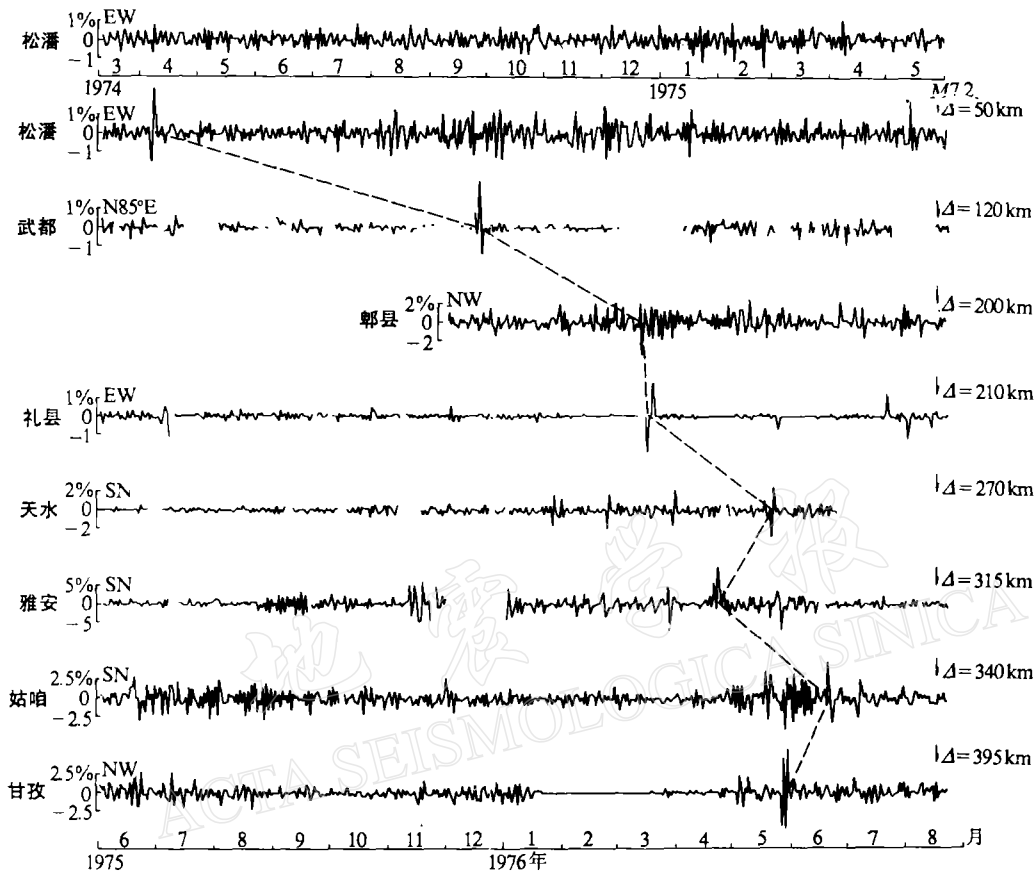


图 2 1976 年 8 月 16 日松潘 7.2 级地震地电阻率突变序列

表 1 松潘大震突变序列基本参数

| 台站 名称 | 震中距 Δ (km) | 测量方向 | 最大突变幅度 $A(\%)$ | 平均标准偏差 $\bar{\sigma}$ | $\frac{A}{\bar{\sigma}}$ | 最大突变至发震 时间(d) |
|----------|----------------------|-------|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| 松潘 | 50 | EW | 2.4 | 0.4 | 8.0 | 414 |
| 武都 | 120 | N85°E | 1.5 | 0.3 | 5.0 | 242 |
| 郫县 | 200 | NW | -3.5 | 0.8 | 4.4 | 156 |
| 礼县 | 210 | EW | -1.9 | 0.1 | 19.0 | 153 |
| 天水 | 270 | SN | -2.6 | 0.4 | 6.5 | 87 |
| 雅安 | 315 | SN | -10.1 | 1.5 | 6.7 | 115 |
| 姑咱 | 340 | SN | 4.9 | 1.1 | 4.5 | 57 |
| 甘孜 | 395 | NW | 6.9 | 0.7 | 9.9 | 79 |

根据表 1 作震中距 Δ 与最大突变至发震时间 t 关系图, 见图 3. 求其线性相关, 便得图上线①关系

$$\Delta = 383.9 - 0.9t \tag{2}$$

其相关系数为 -0.91. 如按 $\Delta < 250\text{km}$ 与 $> 200\text{km}$ 的台站, 分段求其线性相关便得线②、③关系.

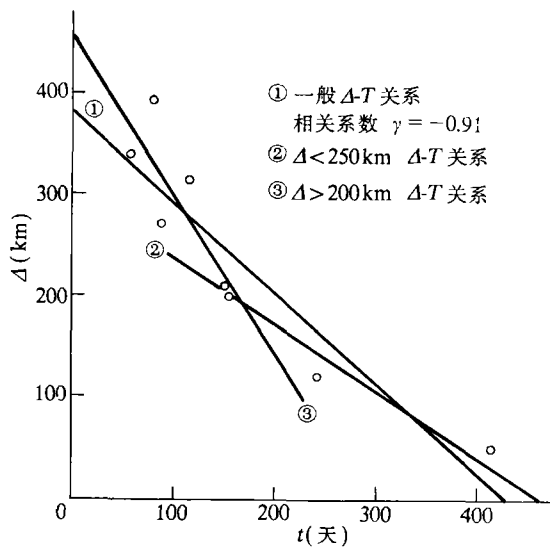


图3 1976年8月16日松潘
7.2级地震 Δ - t 关系图

它们的最大突变也均超出平均标准偏差4倍以上,因此突变是可信的.从图可以清楚地看出,其变化特征确与大震相似.

表2 我国 $M > 6.5$ 地震最大突变扩展速度

| 地震名称 | 炉霍 7.6 (1973.2.6) | 昭通 7.1 (1974.5.11) | 唐山 7.8 (1976.7.28) | 松潘 7.2 (1976.8.16) | 盐源 6.7 (1976.11.7) | 道孚 6.9 (1981.1.24) | 澜沧 7.6 (1988.11.6) | 小金 6.6 (1989.9.22) | 平均速度 (km/d) |
|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| 速度 (km/d) | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.3 | 0.9 | 0.7 | 2.4 | 1.0 |

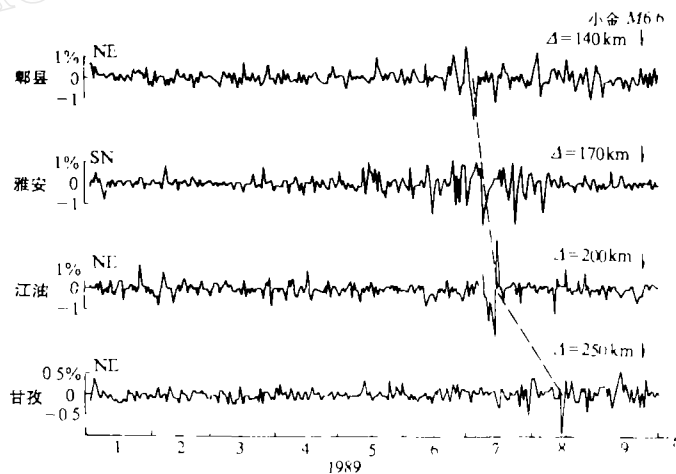


图4 1989年9月22日四川小金6.6级地震地电阻率突变序列

这种变化特征的客观性还可从地震活动性方面得到一定证实.现以1988年云南澜沧7.6级地震为例进行讨论.首先,统计地震目录上以澜沧与地电台站所在地为震中地区的

从以上关系便可求得最大突变由震中向
外围扩展速度,近处为0.66km/d,远处为1.
56km/d.一般为0.9km/d.

按同样方法我们处理了其它的 $M > 6.5$
地震,结果见表2.从表可知,它们扩展速度
变化范围为0.3—2.4km/d,平均为1.0km/
d.对近7级($M > 6.9$)以上地震扩展速度比
较稳定为0.7—0.9km/d,平均为0.83km/
d.

对于距震中200多km范围内有4个以
上台站的 $6.9 > M > 6.5$ 地震,也有类似大震
前的变化特征.现以1989年9月22日四川
小金6.6级地震为例.这里处理了距震中
250km范围内所有台站,其分布见图1.其中
松潘与姑咱两台在震前多年就已停测,仅有
郫县、雅安、江油与甘孜4台,其结果见图4.

$M \geq 1.0$ 地震及其周围 30—40km 内的 $M \geq 4.0$ 地震, 作月频度及月最大强度变化曲线, 见图 5 上 N 与 M 线. 考虑以频度的增加与强度的增大作为地下介质加速破裂的标志, 并将澜沧在 1987 年 11 月前后出现的第一次明显加速破裂与此后外围各地出现的最明显的加速破裂加以连线, 即图 5 上的点虚线①. 再将这些地区的地电阻率突变序列中最大突变也连线, 即图 5 上的虚线②. 比较线①线②明显可见, 两种变化趋势大体相近. 另外, 从图上还可看出, 澜沧 1988 年 8 月前后出现的第二次明显加速破裂时段也正是与最外围的元谋出现突变序列时段相当, 说明加速破裂由震中向外扩展的同时, 震中地区应力也一直不断加强. 由此可见, 地震活动性也一定程度地支持了上述论点.

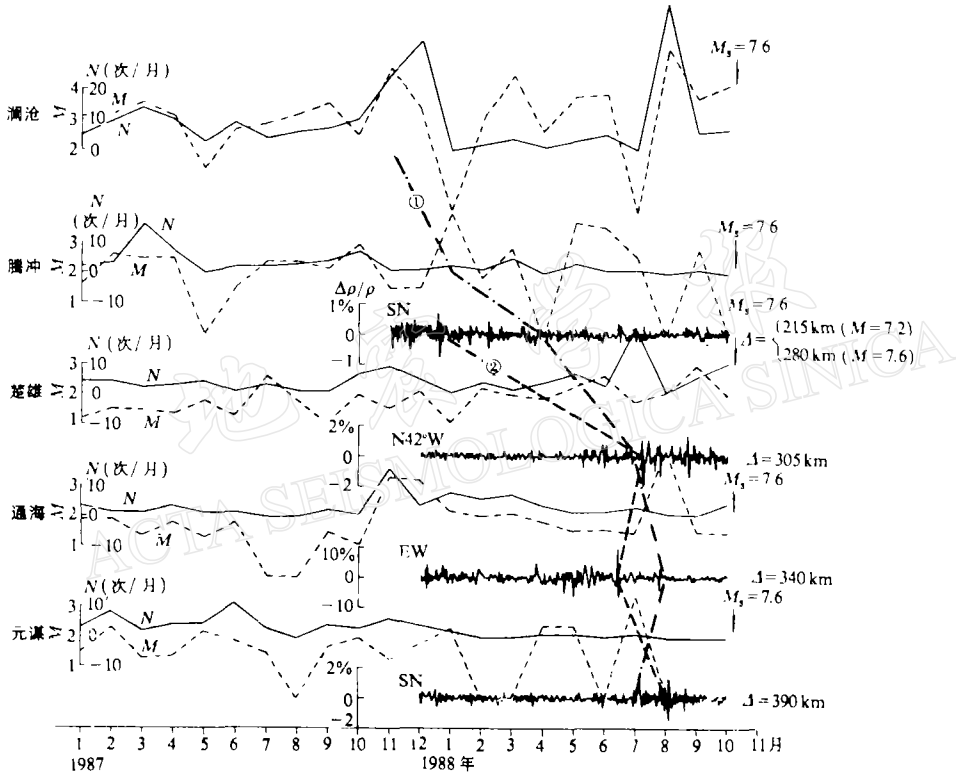


图 5 澜沧 7.6 级地震前地震活动性与地电阻率突变序列对比图

4. 预测地震时、空、强三要素

以上事实表明, 震前在震中周围附近的台站将观测到有关地震的突变序列, 序列中的最大突变还将由震中逐渐向外围扩展. 因此, 最早出现最大突变的台站应是最靠近震中, 最晚出现最大突变的台站应是最远, 但其出现时间应是最接近发震时刻. 这是判断未来震情的基本原则. 如要更细的预报, 可用下述几种方法:

4.1 预测发震时间可用“频度法”

从上面讨论已知, 地电阻率的突变与岩石的加速破裂与扩展有着密切联系. 由于地震的发生过程实质上就是地下介质加速破裂与扩展的过程. 因此, 也可将一次较为明显的突

变作为相当于一次小震活动事件看待。众所周知,在以往预报实践中,人们常用小震活动频度来估计未来的地震形势。那么,是否也能用超过一定强度的突变频度来判断未来震情,这是很吸引人的问题。对此将通过两个实例予以讨论:其一为云南通海,研究时段为1980—1989年,前后共10年,分别作 $>2\%$ 与 $>3\%$ 日相对变化突变年频度曲线。标上全部100km内 $M>5$ 的地震、200km内 $M>6$ 地震与400km内 $M>7$ 地震。年频度曲线由于样本较少,取其均值 \bar{N} 为异常判定标准。凡超出均值线者以阴影表示为异常,见图6a;其二为四川甘孜,研究时段为1971—1989年前后近20年,按前例相同方法处理,结果见图6b。从这两例可以看出,凡出现连续一年以上异常者,其后1—2年内多有 $M>6$ 地震发生。至于有些异常在地震后未能迅速恢复,仍保持高值,这可能与周围近处中强震或强余震有关。

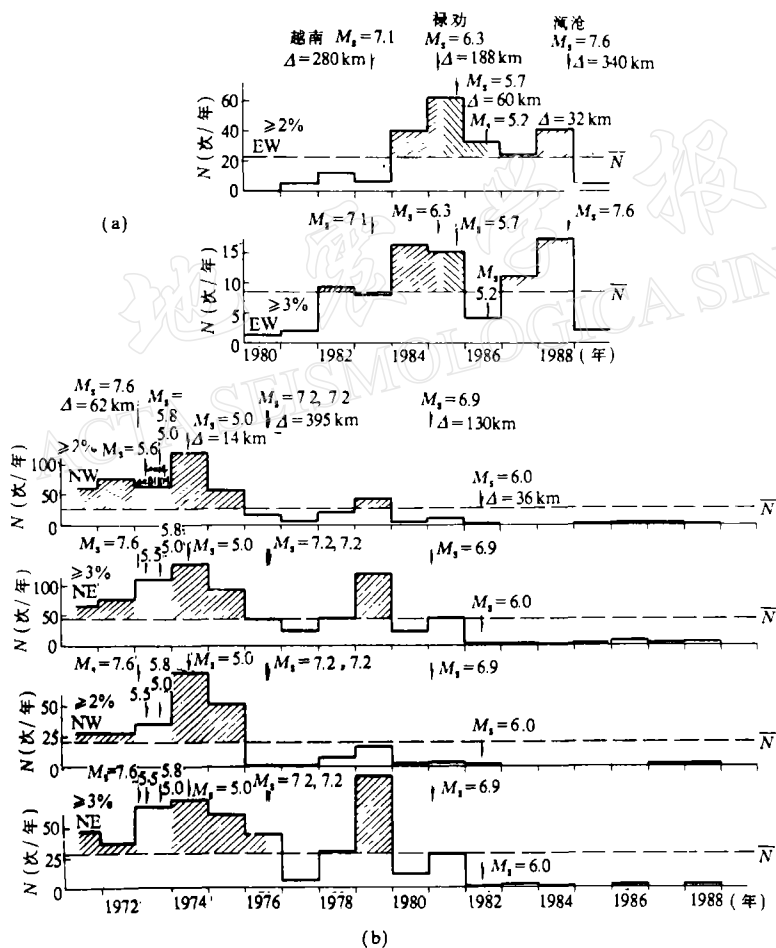


图6 地电阻率突变频度曲线

(a) 云南通海台; (b) 四川甘孜台

考虑到对 $M>6$ 的强震,如果同时有两震孕育,其间距离是不会很近。若在同一地区重复出现,其复发期也不会很短。换句话说,两强震出现的时域与地域的段差一般都不会很小。因此,在判断未来1—2年强震趋势时是不会出现两震混淆情况。

对于出现较大突变序列(超过一定标准偏差的突变较多,且持续时间较长)或出现多次小序列年份的台站,可考虑为该地区应力一直在不断增加,从而不断产生破裂引起突变.我们把这种不断产生破裂的地区,作为日后可能发生强震的危险地区考虑应是合乎推理的.

由此可见,利用突变频度曲线估计未来地震趋势的可能性是存在的.

4.2 预测发震地点可用“交会法”

考虑到基本处于同一构造单元的台阵比跨越多个构造单元的台阵其下介质均匀程度显然要好些.这里就把位于同一构造单元的台阵,粗略地视为处于均匀介质.如华北台阵(京津及河北地区)就全部落于河淮凹陷.四川台阵就基本位于四川盆地.

在假定地下介质基本是均匀的、各向同性的前提下,那么沿以震中为圆心的所有径向的岩石加速破裂扩展速度就应相同.再考虑由震中向外扩展的平均速度基本不变,则根据任意两点见到的破裂加速现象,以其出现的时差与间距求得的扩展速度,一旦与介质平均扩展速度接近时,即可认为这两点应基本位于以震中为圆心的同一径向上.其延长线就应通过震中附近.如有多条径向的连线,即可交出一点或通过连线较为密集的地区作为可能发生的危险地点.现以 1976 年松潘 7.2 级地震为例进行讨论.根据表 2 求得的 $M > 6.5$ 平均速度为 1km/d 与 $M > 6.9$ 平均速度为 0.83km/d .松潘震前震中周围附近共有 8 个台站,任取两台以其最大突变时差(单位:d)与台距(单位:km)求其扩展速度,见表 3.从此表可知,武都—天水扩展速度为 1km/d ,故其连线延长线应通过震中附近,见图 1 上的 WT 虚线,它正是通过震中.如取 $0.83 \pm 0.04\text{km/d}$ 变化范围内的速度作连线,则松潘附近通过连线最为密集,故应考虑其为危险区,见图 1 上的细线条.其判断结果与实际情况接近.又如 1976 年唐山地震,按前例相同办法处理,求得扩展速度见表 4.从表中可知,张山营—马坊扩展速度为 1km/d ,故其连线延长线应通过震中附近,实际情况正是如此.

表 3 单位:km/d

| 松潘 | | | | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|------|-------|----|
| 0.82 | 武都 | | | | | | |
| 0.85 | 3.45 | 郫县 | | | | | |
| 0.80 | 1.09 | 65.83 | 礼县 | | | | |
| 0.87 | 1.00 | 6.45 | 1.17 | 天水 | | | |
| 1.11 | 3.31 | 3.00 | 14.66 | 19.76 | 雅安 | | |
| 0.93 | 2.43 | 1.77 | 5.81 | 19.75 | 1.41 | 姑咱 | |
| 1.07 | 3.06 | 4.68 | 7.75 | 90.00 | 0.94 | 12.05 | 甘孜 |

若以 $0.83 \pm 0.04\text{km/d}$ 变化范围内的速度作连线,通过连线最密集的地区为唐山附近,判断结果与实际情况一致.

(表中除青县台因部分数据尚待查实与小汤山台震前观测时间过短未采用外,震中周围其它台站全部选用.)

表 4 单位:km/d

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------|-------------------|-------------------|------|-------------------|-------------------|--------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|------|----|
| 唐山 ⁽¹⁾ | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.37 | 昌黎 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.44 | 4.35 | 塘沽 ⁽²⁾ | | | | | | | | | | | | |
| 0.65 | 2.19 | 2.36 | 宝坻 ⁽³⁾ | | | | | | | | | | | |
| 0.41 | 3.26 | 0.64 | 0.50 | 青光 | | | | | | | | | | |
| 0.49 | 7.27 | 2.23 | 0.37 | 2.90 | 马坊 ⁽⁴⁾ | | | | | | | | | |
| 0.72 | 9.52 | 5.50 | 0.87 | 0.95 | 0.93 | 西集 ⁽⁵⁾ | | | | | | | | |
| 0.54 | 5.00 | 0.86 | 1.19 | 5.00 | 9.41 | 2.33 | 徐庄子 ⁽⁶⁾ | | | | | | | |
| 0.49 | 2.20 | 1.05 | 0.41 | 2.00 | 0.70 | 0.14 | 2.87 | 八里桥 | | | | | | |
| 0.49 | 1.78 | 0.88 | 0.39 | 1.18 | 0.71 | 0.24 | 1.74 | 0.75 | 忠兴庄 | | | | | |
| 0.58 | 2.11 | 1.02 | 0.56 | 1.47 | 1.06 | 0.45 | 1.91 | 2.00 | 8.25 | 马各庄 | | | | |
| 0.66 | 1.97 | 1.27 | 0.67 | 2.02 | 1.00 | 0.64 | 2.30 | 2.14 | 2.96 | 4.29 | 张山营 ⁽⁷⁾ | | | |
| 0.79 | 2.92 | 1.33 | 0.98 | 2.51 | 1.69 | 1.14 | 2.28 | 1.08 | 6.05 | 6.00 | 4.70 | 徐水 ⁽⁸⁾ | | |
| 1.58 | 8.77 | 3.86 | 2.98 | 298 | 12.60 | 4.53 | 2.30 | 8.29 | 4.36 | 9.61 | 4.22 | 52.50 | 大柏舍 | |
| 1.20 | 3.00 | 1.84 | 1.70 | 2.99 | 2.92 | 2.03 | 2.38 | 5.28 | 8.88 | 7.50 | 18.00 | 2.67 | 0.35 | 邢台 |

注:表中经纬度①N39°37',E118°13';②N39°05',E117°35';③N39°43'46",E117°16'52";④N40°03',E117°00';⑤N39°49',E116°53';⑥N38°39'25",E117°11'45";⑦N40°28.5',E115°31';⑧N39°03'00",E115°31'09".

4.3 预测未来地震强度用“时距积法”或称“J 值法”

从上文已知,最大突变出现的时间将随震级的增强而提前、震中距的加大而推后.因此,如能引入能综合考虑时间与距离两因素的新参数,就有可能取得该参数与不同地震强度间的某种直接联系.现命名此参数为“时距积 J”.定义为

J = st (3)

式中,s 是同一地震事件、同一地方台阵出现最大突变相隔最远的两台站的台距,t 为其最大突变出现的时差.

根据我国建网以来,所有在震中周围附近(7 级 400km 左右范围内;6 级 250km 范围内)有 4 个以上台站的 M>6.5 地震的 s 与 t,见表 5.作 M-lgJ 关系图,求其线性关系得“最佳”曲线

M = 2.9443 + 0.9099lgJ (4)

其相关系数为 0.851.考虑有的点偏离上述直线近 0.5 级.因此,估计 M 时应加上±0.5 级误差.

表 5 M>6.5 地震的台距与时差

| 地震时间 (年·月·日) | 震中位置 | | 震中地区 | 震级 | 出现最大突变相隔 最远的两台站名称 | 台距 s (km) | 时差 t (d) |
|-----------------|--------|---------|------|-----|----------------------|--------------|-------------|
| | 北纬 | 东经 | | | | | |
| 1973.02.06 | 31°18' | 100°42' | 炉霍 | 7.6 | 甘孜—西昌 | 490 | 378 |
| 1974.05.11 | 28.2° | 104.1° | 昭通 | 7.1 | 西昌—红格 | 162 | 148 |
| 1976.07.28 | 39.4° | 118.0° | 唐山 | 7.8 | 昌黎—邢台 | 495 | 165 |
| 1976.08.16 | 32°36' | 104°06' | 松潘 | 7.2 | 松潘—姑咱 | 332 | 356 |
| 1976.11.07 | 27.6° | 101.1° | 盐源 | 6.7 | 西昌—渡口 | 150 | 119 |
| 1981.01.24 | 31°00' | 101°10' | 道孚 | 6.9 | 姑咱—郛县 | 175 | 128 |
| 1988.11.06 | 22°50' | 99°43' | 澜沧 | 7.6 | 腾冲—元谋 | 350 | 233 |
| 1989.09.22 | 31.5° | 102.6° | 小金 | 6.6 | 郛县—甘孜 | 360 | 41 |

下面以 1983 年 6 月 24 日越南莱州 7.1 级地震为例进行讨论.震中周围 400km 左右

范围内,仅有通海($\Delta=280\text{km}$)与楚雄($\Delta=410\text{km}$)两台. 通海最大突变出现在 1982 年 12 月 28 日,楚雄最大突变出现在 1983 年 5 月 28 日,其时差 t 为 151d,台距为 160km. 根据 (4) 式求得 $M=6.9$,估计震级应为 6.9 ± 0.5 . 与实际情况接近.

5. 结 语

综上所述,这里采用了与传统的地电研究方法完全不同的思路. 应用断裂力学的观点解释震前观测到的各种地电阻率变化现象.

研究结果表明,强震前震中周围附近的台站将可能观测到有关地震的异常地电阻率突变序列,序列中的最大突变出现的时间将随震级的增强而提前、震中距的加大而推迟. 另外,最大突变还将由震中逐渐向外围扩展,其速度近 7 级以上的地震平均为 0.83km/d .

参 考 文 献

- 陈培善、谷继成、李文香,1977. 从断裂力学观点研究地震的破裂过程与地震预报. 地球物理学报, **20**, 185—201.
刘心恒、周生,1991. 可作为地震短临前兆的一种地电阻率加速变化. 地震学报, **13**, 243—247.
王新华,1984. 前兆电阻率的实验研究. 华北地震科学, **2**, 70—76.
Anderson, O. L., 1977. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **15**, 77—94.

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA