

地电阻率突变序列与地震^{*}

刘心恒 周郅生

(中国昆明 650041 云南省地震局)

摘 要

根据断裂力学观点,分析研究了大量的实测资料,发现地电阻率的突变与地下介质的破裂存在着一定联系.多数中强以上地震前的突变序列中总有一次较为突出的最大突变出现,从它的出现至发震所需时间与震级、震中距间还存在有近似线性关系.另外,它还有由震中向外围扩展的趋势.从而提出了利用地电阻率突变序列预报地震的可能性.文章最后对预报中的一些实际问题作了讨论.

关键词 岩石破裂;地电阻率突变;突变序列;地震

一、引言

自人们开展地电阻率监测预报地震研究以来,至今已有近30年的历史.我国虽起步晚些,却建立了世界上唯一最强大的地电观测台网.最多时地电台站超过120个,积累了大量的、丰富的实测结果.尤其自台网建立以来,在台网及其附近地区先后发生了9次 $M > 7$ 的强震,取得了极为宝贵的大震前地电阻率变化资料.如何充分使用这些资料,这是我们面临的一个重要课题.尽管在过去的地震监测预报实践中这些资料已起到过一定作用,但对如何进行短临监视问题的研究,至今取得的进展很少,而人们最感兴趣的、最有现实意义的却是短临预报问题.因此加强这方面的研究有其重要的实际意义.本文的目的就在于寻求解决这方面问题的途径.提出了通过研究地电阻率突变随时间变化的规律,对未来的地震形势作出判断的“地电阻率突变序列法”.

二、方法的物理基础

众所周知,地震发生的过程,实质上就是地壳介质在应力作用下发生破裂或位错的过程.因此,如能及时地发现岩石的破裂及其扩展过程,我们就能对未来的岩石大破裂与地震的发生作出估计.

由于地壳内部通常存在着大量的裂纹,如岩石的节理、片理到大大小小的断层.从断

^{*} 地震科学联合基金会资助项目.

1990年9月14日收到本文初稿,1991年5月31日决定采用.

裂力学观点来看,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.地震就是裂纹失稳扩展的结果.

陈培善等(1977)曾给出裂纹顶端的应力分布

$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad k \propto \sqrt{a} \sigma \quad (1)$$

这里 σ_{ij} 为三个轴向正应力和三个轴面切应力, r 为离开裂纹尖端的距离, k 为应力强度因子, a 为裂纹半长, σ 为外加应力. 应力场随方位的分布由 $f_{ij}(\theta)$ 决定.

由此可见,一旦裂纹进入失稳扩展,出现 a 迅速增长,就将导致裂纹端部的应力突变. 另外,大量的岩石加压对其电阻率影响的实验结果表明,电阻率将随着压力的变化而变化. 所以,岩石的破裂,加速破裂(包括加速扩展与新裂纹的迅速增加)与缝合是有可能引起地电阻率突变的.

另外,考虑到地壳介质在变压过程中,除震源区主裂纹(孕震断裂)将发生加速扩展外,由于继续不断受压,还可能使周围附近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. 从而导致这些地区地电阻率突变的出现. 因此,突变也可能出现由震中逐渐向外围扩展的情况.

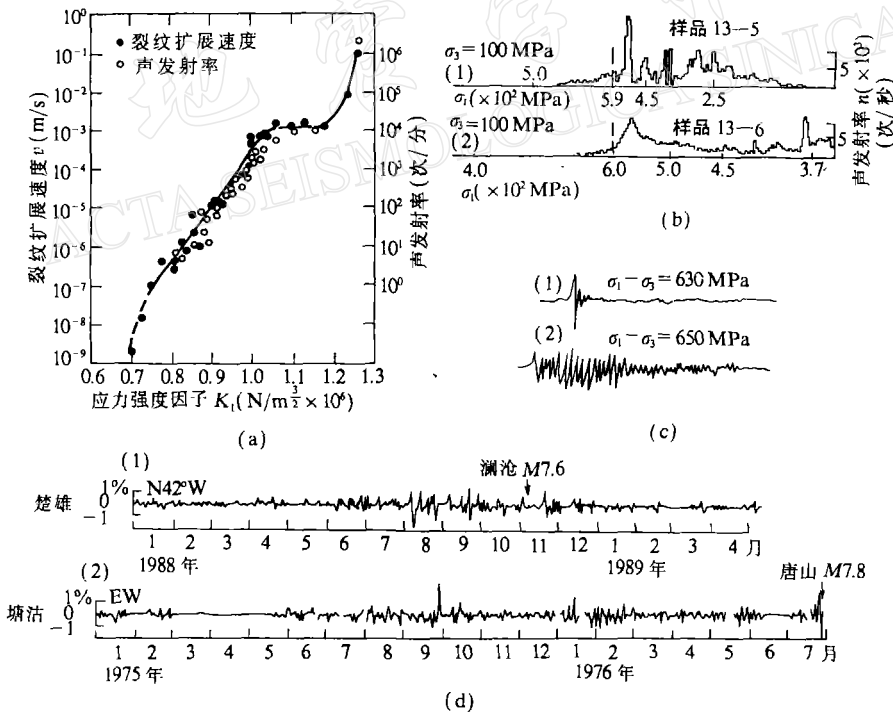


图1 岩石破裂的声发射与地电阻率突变序列

- (a) 陶瓷材料的裂纹扩展速度、声发射和应力强度因子之间关系
 (b) 拼合样品三轴实验声发射记录
 (c) A面三轴压缩下岩石的声发射波形
 (d) 似声发射波形的地电阻率突变序列

除此之外,刘心恒等(1991)还从其它许多方面论证了地电阻率突变与岩石破裂的关系.

下面再从许多岩石加压破裂实验结果来看,岩石加压过程中先是出现少量破裂,继之破裂不断增多,随后新生破裂逐渐减少直至破碎.整个破裂过程通常使用声发射予以检测,如图 1a 所示,见陈颢(1983).从声发射的变化形态来看,对拼合样品较典型的有图 1b 所示的两种,见耿乃光等(1981),先是逐渐加强达到最大,然后逐渐减弱直至破碎,有时在破碎前还有个短暂的加强.对于单一样品较典型的有图 1c 所示的两种,见陈 (1981):其一,只有一次较强的声发射;其二,一直都有声发射直至破碎,但略有逐渐加强而后又逐渐减弱的趋势.由此可见,不管是那种样品,在破裂扩展过程中都有一次最强的声发射出现.根据声发射的上述变化特征人们便可预告破碎到来的时刻.声发射所以能够预告破碎是因为它与破裂有着密切联系.而从前面讨论已知地电阻率突变也与破裂有着密切联系.因此,利用地电阻率突变序列(地电阻率突变随时间变化过程)变化特征预报地震的可能性也应是存在的.这里的突变指的是超过一定指标的日相对变化速率的变化.根据突变序列变化预报地震的方法称为突变序列法.图 1d 给出两例,其一为震中距约 300km 的楚雄在澜沧大震前的突变序列,它是该台震前多年从未有过的变化,见刘心恒等(1990);其二为震中距 80km 的塘沽在唐山大震前的突变序列.从变化形态来看,它们确与图 1b(1),1c(1)声发射波形很相似.下面将以更多事实予以证实.

三、资料处理及其结果

这里,我们系统地处理了分布在全国各地的几十个地电台站资料,计算了它们的全部日相对变化,作出日相对变化曲线和突变序列对比图.突变判定的依据及有关数学推导在刘心恒等(1991)中已有讨论,此处不再重复.不同的只是除超过日相对变化标准差 3 倍的变化定为可靠突变外,大于 2 倍的定为较可靠突变,超过 1 倍的为突变.后者仅作辅助判断趋势变化存在与否的依据.对于所有可靠突变中突变量最大的,且与次大突变相差超过目前仪器可能检测精度的定为最大突变.如两者差异小于检测精度,取它们出现时间的平均值作为最大突变出现时刻.或参考附近台站变化予以确定.

结果发现,强震前出现的突变序列与岩石破碎前的声发射波形确很相似.图 2 给出了九大地震前的突变序列,其中尽量采用较近的台站.这些大震也是自我国地电台网建立以来,发生在距台站 400km 左右范围内的全部强震.图中除受观测起始时间限制外,都尽可能地给出较长时间的变化.可以看出,所有震前的突变序列中都出现过一次最大的、较为明显的突变.如以震过一年后的旱季变化为正常波动,唐山台因震后停测故取建台后的首次旱季变化为正常变化.那么它们一般均超过观测方差 3 倍以上.其中仅渤海大震的最大突变为两倍以上.唐山台的这次最大突变也是建台以来的最大突变,且其前后超过 3 倍方差的可靠突变也大为增多.

至于中强地震前突变序列变化,图 3(见 666 页)分别给出 4—6 级地震各两个.可以看出它们也有类似强震前的变化.以云南地区为例,自 1979 年以来,凡发生在距台站 100km 以内 $M > 5$ 的地震都有一定反映.在东北、华北与四川等地亦有所见.

由此可见,中强以上地震前的突变序列,基本上有个共同特征,即在突变序列中都将

有个最大突变出现,有时还能清楚地见到它位于突变逐渐加强而后逐渐减弱的转折部位.

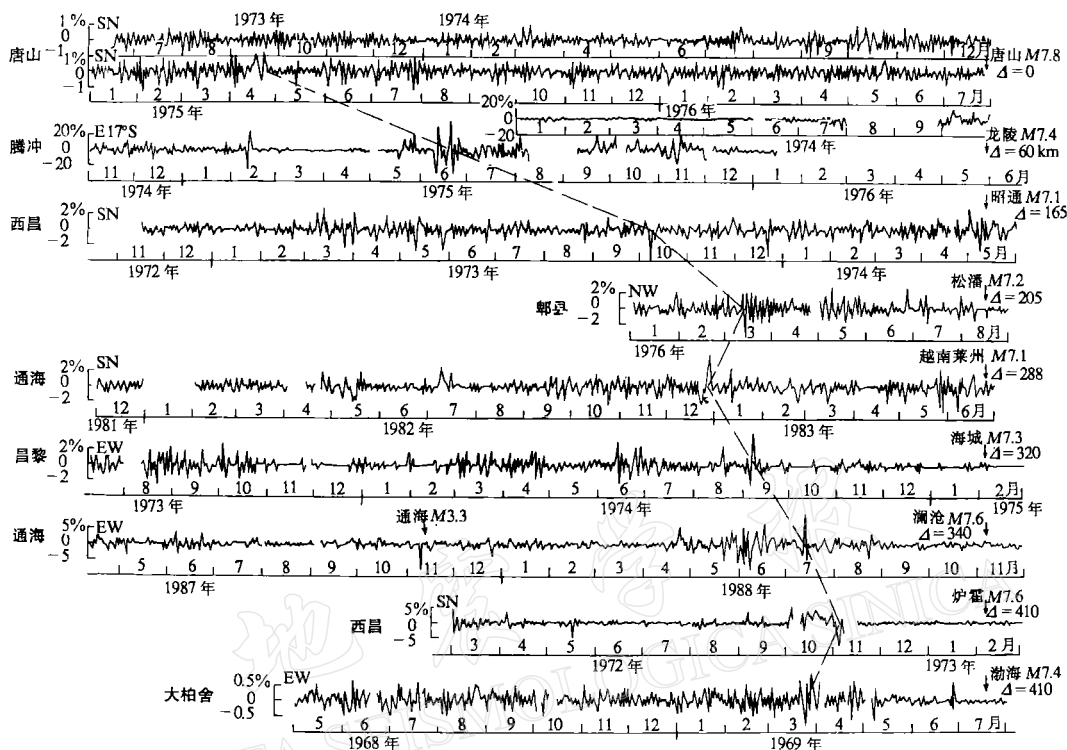


图2 九大地震前地电阻率突变序列

此外,从图2,3还能看到,我国西南地区的一些台站,由于勘探体内的岩性多不单一,其突变序列多出现类似拼合样品的声发射波形.而华北的一些台站,因多建于沉积较厚的地区,勘探体内岩性较为单一,故多出现类似单一样品声发射波形的序列.

四、讨 论

1. 震前地电阻率突变序列的一般特征

(1)最大突变至发震所需时间 T 与震中距 Δ 的关系 将图2上的各大震最大突变直接联起,即图2上的虚线.再考虑这些地震强度都在 7.1 ± 0.1 级范围内.为讨论需要,将它们强度差异视为定级误差0.4造成,即极其粗略地把它们强度视为大体相近.从图2虚线的变化趋势可以清楚地看出:最大突变出现的时间将随着震中距的加大而逐渐往后推移.尽管在具体细节上,各台由于岩性差异,抗压能力的不同,最大突变出现时间略有前后,但总的变化趋势是存在的.如将 T 与 Δ 作图,见图4a.再求其线性相关,便得图上线①关系

$$\Delta = 471.9 - 1.17T \quad (2)$$

其相关系数为-0.93. 如按 $1<250\text{km}$ 与 $>200\text{km}$ 的地震,分段求其线性相关,便得线②,③关系.

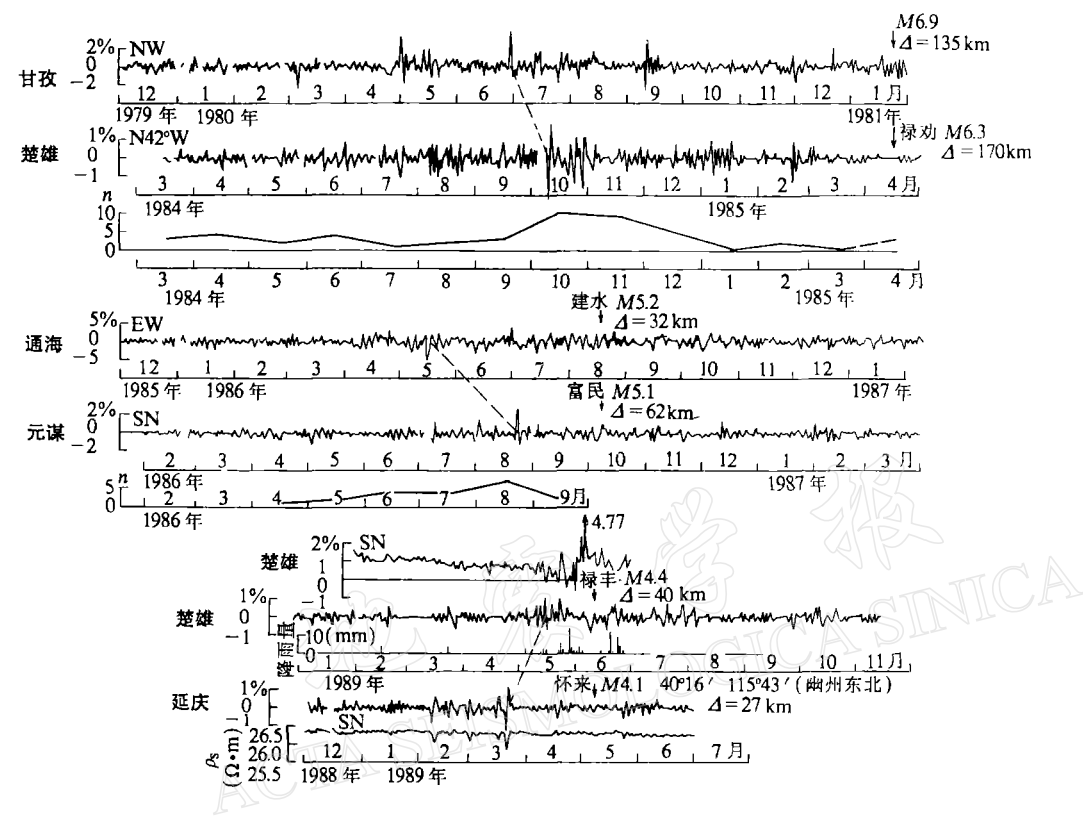


图3 中强地震前地电阻率突变序列

根据以上关系,便可求得最大突变由震中向外扩展速度,近处为 0.68 km/d,远处为 1.99km/d,一般速度为 1.12km/d.

表1 5级以上地震 1 与 T 的关系

| 异常台 站名称 | 最大突变至发 震时间 T(d) | 测量方向 | 地震日期 a. mo. d | 震中位置 | | 震中地区 | 震级 | 震中距 l (km) |
|------------|--------------------|-------|------------------|-------------|-------------|------|-----|---------------|
| | | | | φ_N | λ_E | | | |
| 楚雄 | 91 | N42°W | 1975. 1. 12 | 24°54' | 101°30' | 楚雄 | 5.6 | 19 |
| 腾冲 | 81 | S5°E | 1979. 8. 9 | 25°10' | 98°56' | 保山 | 5.1 | 38 |
| 腾冲 | 31 | SN | 1981. 7. 7 | 25°08' | 97°55' | 盈江 | 5.1 | 57 |
| 通海 | 51 | SN | 1985. 8. 14 | 23°37' | 102°39' | 建水 | 5.7 | 60 |
| 通海 | 94 | EW | 1986. 8. 18 | 23°53' | 102°56' | 建水 | 5.2 | 32 |
| 元谋 | 45 | SN | 1986. 10. 7 | 25°34' | 102°25' | 富民 | 5.1 | 45 |
| 腾冲 | 31 | SN | 1990. 2. 14 | 25°57' | 98°55' | 六库 | 5.1 | 106 |

对于中强地震,我们选用云南地区 1979 年以来,距台站 100km 左右范围内发生的全部 5 级以上的地震,见表 1. 同样考虑它们为 5.4 级的强度,其间±0.3 差异亦视为定级误

差造成. 作 Δ - T 关系图, 见图 4b, 再求其线性相关得图上线①关系

$$\Delta = 105.9 - 0.87T \quad (3)$$

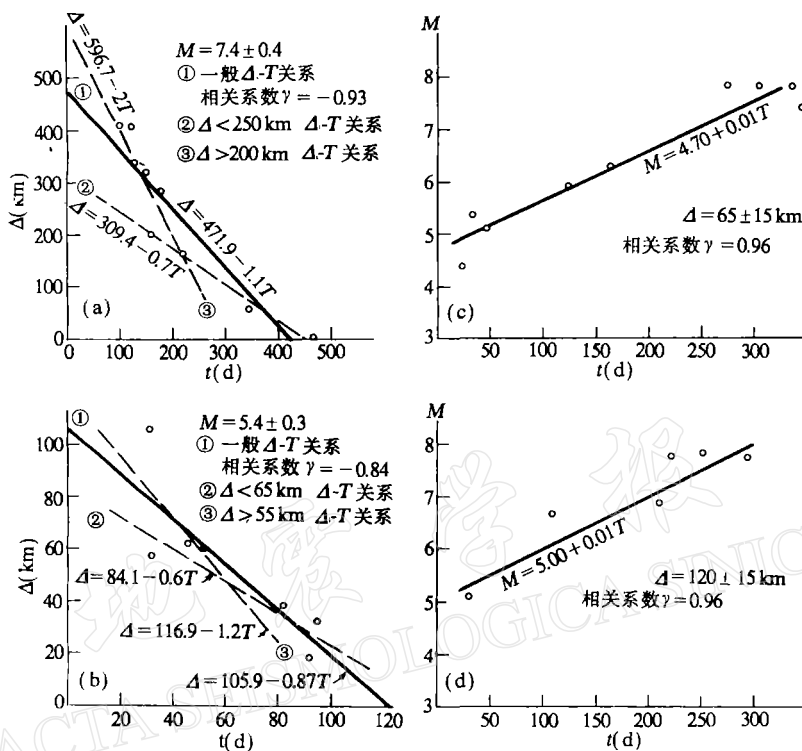


图 4 Δ - T 与 M - T 关系图

(a)、(b) 为 Δ 与 T 的关系; (c)、(d) 为 M 与 T 的关系

其相关系数为 -0.84 . 再按 $\Delta < 65$ km 与 > 55 km 的地震分段求其线性相关, 便得图上线②、③关系.

根据以上关系, 可得扩展速度, 近处为 0.60 km/d, 远处为 1.15 km/d, 一般速度为 0.89 km/d. 上述两结果基本一致. 其物理意义应是岩石的加速破裂从震中向外扩展, 先较慢而后才加快. 这种关系, 从唐山大震前震中周围台站所测得的变化也能看到. 这里由于篇幅所限不再讨论. 我们将在另文进行详细讨论.

(2) 最大突变至发震所需时间 T 与震级 M 关系 鉴于受到资料的限制, 我们也采取研究 Δ - T 关系相似的办法, 所用的地震见表 2. 表中序号 1—9 与 10—15 地震分别为发生在震中距为 $65 \pm$ 与 120 ± 15 km 范围内的地震. 这里也将 ± 15 km 的误差视为定位造成的. 分别作这两种震中距的 M - T 关系图, 见图 4c, 4d. 求其线性相关便得如下关系:

$$M = 4.70 + 0.01T \quad (\Delta = 65 \pm 15) \quad (4)$$

$$M = 5.00 + 0.01T \quad (\Delta = 120 \pm 15) \quad (5)$$

它们相关系数均为 0.96.

表 2 5 级以上地震 M 与 T 的关系

| 序号 | 异常台 站名称 | 最大突变至发 震时间 $T(d)$ | 测量方向 | 地震日期 a. mo. d | 震中位置 | | 震中地区 | 震级 | 震中距 l (km) |
|----|------------|----------------------|-------|------------------|-------------|-------------|------|------|-----------------|
| | | | | | φ_N | λ_E | | | |
| 1 | 盘山 | 124 | NE | 1978. 5. 18 | 40°43' | 122°37' | 营口 | 5.9 | 68 |
| 2 | 腾冲 | 344 | E17°S | 1976. 5. 29 | 24. 6° | 98. 7° | 龙陵 | 7. 4 | 60 |
| 3 | 昌黎 | 272 | SN | 1976. 7. 28 | 39. 4° | 118. 0° | 唐山 | 7. 8 | 70 |
| 4 | 塘沽 | 303 | EW | 1976. 7. 28 | 39. 4° | 118. 0° | 唐山 | 7. 8 | 80 |
| 5 | 宝坻 | 339 | SN | 1976. 7. 28 | 39. 4° | 118. 0° | 唐山 | 7. 8 | 80 |
| 6 | 腾冲 | 31 | SN | 1981. 7. 7 | 25°08' | 97°55' | 盈江 | 5. 4 | 57 |
| 7 | 元谋 | 161 | SN | 1985. 4. 18 | 25°51' | 102°49' | 禄劝 | 6. 3 | 80 |
| 8 | 元谋 | 45 | SN | 1986. 10. 7 | 25°24' | 102°25' | 富民 | 5. 1 | 62 |
| 9 | 元谋 | 28 | EW | 1989. 6. 10 | 25°17' | 101°53' | 禄丰 | 4. 4 | 52 |
| 10 | 米易 | 110 | SN | 1976. 11. 7 | 27. 6 | 101. 1° | 盐源 | 6. 7 | 130 |
| 11 | 青光 | 219 | SN | 1976. 7. 28 | 39. 4 | 118. 0° | 唐山 | 7. 8 | 110 |
| 12 | 马坊 | 250 | N70W° | 1976. 7. 28 | 39. 4° | 118. 0° | 唐山 | 7. 8 | 110 |
| 13 | 西集 | 293 | SN | 1976. 7. 28 | 39. 4° | 118. 0° | 唐山 | 7. 8 | 110 |
| 14 | 甘孜 | 209 | NW | 1981. 1. 24 | 31°00' | 101°10' | 道孚 | 6. 9 | 135 |
| 15 | 腾冲 | 31 | SW | 1990. 2. 14 | 25°57' | 98°55' | 六库 | 5. 1 | 106 |

由此可见,不管震中距是较近的还是较远的,所得的 $M-T$ 关系是很接近的. 其意义是从加速破裂出现至发震所需时间将随震级的加大而增长.

2. 关于地电阻率突变与岩石破裂关系的再论证

它们之间的关系前面已作过许多讨论,这里不再重复. 现在要补充的是从另一角度出发,通过其它前兆手段同时发生的特殊变化予以论证:

(1)地震活动性 对此突变序列与震中附近的小震活动,图 2 已给出了两例. 其一为 1985 年 4 月 18 日云南禄劝 6.3 级地震,图中第 2 条曲线是 Δ 为 170km 的楚雄突变序列,第 3 条曲线为震中周围 50km 内 $M \geq 1.0$ 的小震频度曲线. 其二为 1986 年 10 月 7 日云南富民 5.1 级地震,图中第 5 条曲线是 Δ 为 62km 的元谋突变序列,第 6 条曲线为震中周围 15km 内 $M \geq 1.0$ 的小震频度曲线. 可以清楚看出,最大突变出现时段都与小震活动频度最高时段一致. 这些事实有力地说明了,地电阻率最大突变的出现确与震源区及其周围附近介质的加速破裂有关.

(2)定点形变 将形变观测结果与突变序列进行对比,图 2 已给出实例. 它是 1989 年 6 月 10 日云南禄丰 4.4 级地震前对比图形. 图上第 7 条曲线是震中距为 40km 的楚雄台石英伸缩仪 SN 向日相对变化曲线,第 8 条是该台突变序列,第 9 条是楚雄降雨量. 对比它们清楚可见,出现最大突变的同时也出现了形变加速变化. 出现加速变化当天雨量只有 0.5mm,前一天为 4mm. 该形变台的台址、墩基与观测条件系属一类台,其室温的恒定是得到保证的. 因此,这次加速形变应是可靠的. 这事实也支持了最大突变的出现与加速

破裂密切有关的论点。

3. 关于实用中一些具体问题的讨论

(1) **三要素的预报问题** 预报主要是根据突变序列形态以及上述所得的 M , Δ 与 T 的关系进行。

时间:对于最大突变前后有趋势变化的序列,地震应考虑在趋势减弱至正常波动后 1—3 个月内。对于无趋势变化的单个突变,在我国西部地区,多与近期本地小震活动有关。例如,图 2 中第 9 条曲线上 1987 年 11 月 9 日一次突变,第三天就在本地发生 3.3 级地震。倘若一个月内仍无本地小震对应,则应考虑远处随时还有更大一些地震发生的可能。

地点:一般应考虑为最早出现最大突变的台站附近。

强度:应综合考虑 Δ , M 与 T 的关系。如考虑为几十 km 以外的地震, T 已超过 1 个月,则应报有 5 级左右地震。

(2) **方法特点** 有较强的异常分辨能力,有一定的可对比性,计算简单,易于推广。当年建台当年即可投入监测预报,无需掌握年变。如图 3 给出一例,它是 1989 年 5 月 7 日华北怀来附近一次 4.1 级地震,图上第 10 条曲线为 $\Delta=27\text{km}$ 的延庆突变序列,第 11 条曲线为该台地电阻率日均值变化。按传统方法,如此平直的均值曲线是无法判定其异常的。用突变序列法判断异常就很容易。

五、结 语

综上所述,本方法采用了与传统完全不同的思路,提出利用地电阻率突变序列监视地下介质破裂过程的可能性。指出最大突变有由震中向外围扩展的趋势,从它的出现至发震的时间将随震级增大而增长、震中距加大而缩短。

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.
- 陈颙,1983. 断裂力学在地震学中的应用. 地震科学研究, **6**, 64—67.
- 陈颙,1981. 不同应力途径三轴压缩下岩石的声发射. 地震学报, **3**, 41—48.
- 耿乃光、陈颙、姚孝新,1981. 拼合岩石样品破裂的初步研究. 地球物理学报, **24**, 238—241.
- 刘心恒、周郎生,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.
- 刘心恒、周郎生,1990. 澜沧 7.6 级地震前云南地电台网地电阻率变化特征. 地震研究, **13**, 344—352.