

# 提取多参数无量纲地震前兆信息的 均方差方法的物理基础<sup>①</sup>

陈有发 雷建设 丁 卉 董奇珍 马钦忠 康好林

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 本文研究了提取多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法的物理基础。该方法的物理基础是地震孕育过程中当破裂应力达到50%以上时, 岩石弹性、变形性、电性、磁性和热性等性质都会发生显著变化, 结果导致岩体物理参数绝对值及其变化速率和测量误差的改变。利用均方差方法来计算这些变化, 一方面消除了前兆参数的季节性干扰, 另一方面突出了前兆信息。

**关键词:** 地震前兆 信息处理 均方误差 物理基础

## 1 前言

在本题目下的第一部分工作<sup>[1,2]</sup>中, 通过对现行无量纲地震前兆信息提取方法和表示方法(归一化方法、相对变化量方法、比值方法、斜率方法、从属函数方法和相关系数方法)的研究, 提出了提取多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法。笔者认为这种方法是目前多参数无量纲地震前兆信息的最佳提取方法。这种方法的物理基础是孕震过程中岩体的成分、结构、温度、湿度、孔隙度等都可能发生变化, 进而引起岩体弹性、变形性、电性、磁性、热性等的变化; 当达到岩体破裂应力50%以上时, 这些物理性质会发生显著变化, 物理参数绝对值变化、变化速率涨落变化又势必给地震前兆方法的单次测量带来很大的误差。这3种变化可以通过多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法来收集, 以突出地震前兆特征。具体做法是把多参数前兆台( $n \geq 5$ )某一天的日均值资料经过变量标准化、变量正规化处理, 利用类似均方差公式来计算这一天的无量纲地震前兆信息  $I_i$ 。下面就详细地论证上述方法的物理基础。

## 2 方法的物理基础

事实表明, 地震震源深度不超过700 km, 而绝大多数地震特别是破坏性极强的地震都发生在结构颇为复杂的地壳之中。这说明地壳发育与地球深部, 首先是上地幔, 特别是软流圈的作用密切相关, 发生着强烈的物质交换。地壳是主要的孕震层, 它具有地震形成、发展和发生的环境<sup>[3]</sup>。在这里不讨论地震为何主要发生在地壳里, 而要比详细地论述地震孕育过程引起地壳岩体物理和化学性质变化的特征以及这些变化所引起的地震前兆参数特征的变

<sup>①</sup> 地震科学联合基金资助, 课题号: 94105.

化,以说明提取多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法的物理基础,而不是该方法的数学基础。

## 2.1 地壳浅层岩体的物理性质

岩石的物理性质包括磁性、电性、变形性、弹性、塑性、放射性、热性、密度、比重、孔隙度、温度和应力等。在地震孕育过程中这些性质都可能发生变化,而岩石密度、温度、比重、孔隙度、温度和应力的变化又会导致岩体弹性、磁性、电性、热性和放射性的变化,最终出现直接的或间接的复杂地震前兆,其中包括形态和量值<sup>[4,5]</sup>。全球地震的事实证明,地球内部存在着应力。根据大多数地震波和地震区地表露头变形性质可以确认,地震产生是剪切应力发育而引起的<sup>[3]</sup>。因此,通过研究应力作用下岩体物理参数的变化特征来认识和拟定地震孕育过程中多参数无量纲地震前兆信息的提取方法。

### 2.1.1 岩体弹性波速度

岩石弹性波速度的绝对值取决于岩石的成分、结构、孔隙度、含水性、变质程度等,而弹性波速度的变化则取决于岩石的压力、温度、湿度和孔隙度的变化。图 1 是灰岩的纵波速度和衰减系数  $\alpha$  (表示弹性振动在岩石中的衰减) 的变化与压力的关系<sup>[5]</sup>。由图可看出,在 1.5 kb 压力的范围内弹性波的传播速度  $V=f(p)$  呈现增大的趋势,特别是在 0.5 kb 范围内变化更为显著;正向加压和反向卸压两个过程的纵波速度变化不完全一致,呈现出不太明显的滞后现象。弹性波速度  $V=f(p)$  变化规律与岩石的成分、结构、孔隙度、温度、湿度和变质程度都有关系,其中温度  $t \geq 100^\circ\text{C}$  时岩石结构中出现裂纹和发生破裂会导致纵波速度  $V=f(t)$  降低;岩石弹性波各向异性随压力增大而减小。从压力约在 1.4 kb 开始,衰减系数增大,这与纵波速度  $V=f(p)$  的变化形态相一致。

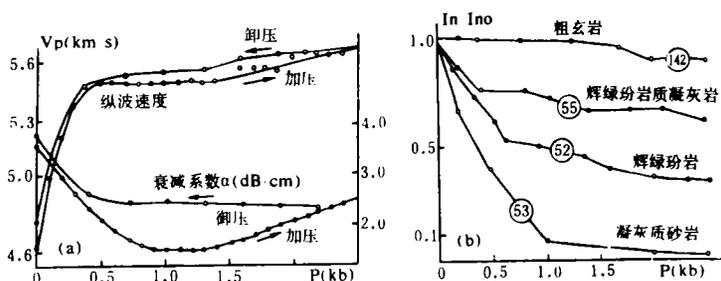


图 1 (a) 灰岩纵波速度  $V_p$  变化与压力  $P$  的关系 (b) 岩石天然剩  
余磁化强度相对变化量 ( $I_n/I_0$ ) 与压力  $P$  的关系

Fig. 1 (a) Relationship between variation of compressional velocity  $V_p$  of limestone and pressure  $P$ ; (b) Relationship between relative variation ( $I_n/I_0$ ) of natural rock remanent magnetization and pressure  $P$ .

### 2.1.2 电性

岩石电性包括导电性、自然极化、人工激发、压电效应、震电效应和电磁辐射等。在压力作用下岩体电阻率  $\rho=f(p)$  的变化特征与岩石成分、结构、湿度、温度和孔隙度有直接关系。图 2 给出了岩石电阻率  $\rho$  与压力  $P$  的关系曲线,由图 2a 可以看出,饱和度对岩石  $\rho=f(p)$  变化形态的影响是十分显著的,干岩石  $\rho_d=f(p)$  随压力几乎不变化,部分饱和岩石  $\rho_n=f(p)$  是

先随压力增大而下降,而后转平,最后又上升;饱和岩石  $\rho_s=f(p)$  是随压力的增大而增大<sup>[7]</sup>。图 2b 表明,在破坏应力达到 50%以后微破裂增多,体积  $\Delta V/V_0$  增大,电阻率  $\rho=f(p)$  在破坏应力达到 80%以后也呈现下降的趋势。岩(土)层的自然电位  $V_{sp}=f(p)$  随应力的增大而变化,呈现升降、脉动和突跳三种形态<sup>[8]</sup>。

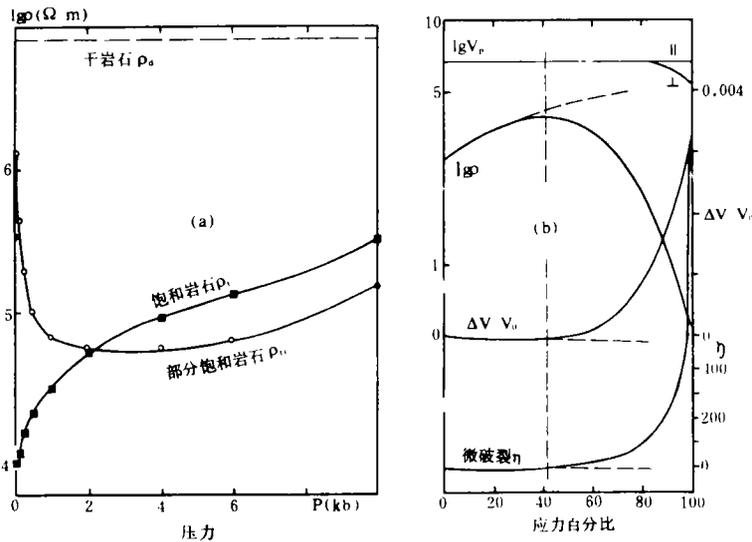


图 2 韦斯特利花岗岩电阻率  $\rho$  变化与压力  $P$  的关系

(a) 饱和度  $S$  对岩石电阻率  $\rho=f(p)$  的影响; (b) 微破裂  $\eta$ 、体应变  $\Delta V/V_0$ 、电阻率  $\rho=f(p)$  和波速  $V_p$  的对比

Fig. 2 Relationship between variation of Westly granite resistivity  $\rho$  and pressure  $P$ . (a) Influence of saturation level  $S$  on rock resistivity  $\rho=f(p)$ ; (b) Comparison between microfracture ( $\eta$ ), body strain ( $\Delta V/V_0$ ), resistivity  $\rho=f(p)$  and wave velocity  $V_p$ .

### 2.1.3 岩石的介电性

岩石的介电常数(介电性)是岩石的重要物理性质,它是表征岩石和矿物在电场中极化程度的一个物理量,在应力作用下它也会发生变化。干岩石或小湿度(0.12%)和中等湿度(0.4—2.7%)岩石的介电常数  $\epsilon=f(p)$  随压力的增大而增大;湿度大于 3% 的岩石介电常数  $\epsilon=f(p)$  随压力的增大而减小。小湿度岩石和饱和岩石电阻率  $\rho_s=f(p)$  随压力增大而分别减小和增大<sup>[8]</sup>。

### 2.1.4 岩石的磁性

磁性是岩石的重要的物理性质之一,它包括磁化强度、磁化率、天然剩余磁化强度 ( $I_n$ )。在地震孕育过程中剩余磁化强度  $I=f(p)$  会发生明显变化,随着压力的增大而减少,如图 1b 所示,曲线圆圈内的数字为矫顽磁力的数值<sup>[5]</sup>。由图可以看出,在高静压力作用下岩石天然剩余磁化强度  $I_n=f(p)$  都呈现下降变化,但下降的形态和程度是各不相同的。

### 2.1.5 岩石的变形性

压力作用下岩石物理性质变化特征与其成分、结构、孔隙度、湿度有密切关系;研究这些

关系有助于解决地震物理问题。但问题的另一方面是通过研究高压下岩石变形性质和强度性质来了解塑性变形和岩石破裂的规律及机制,进而认识岩石物理参数变化的特征。围压能提高岩石的强度,当围压为 3.5 kb 时岩石强度比常压大 2—3 倍。改变围压值和差载(差应力)增大的速度能够把岩石变形和破裂过程(破裂发生的临界裂隙度为 0.0025)的特征由弹—脆性调节到可塑性或不可塑性。岩石破裂具有四种不同类型:没有微裂隙也没有声脉冲的塑性变形;只产生一条主裂缝且与压力轴成 45° 夹角的脆性断口破裂;平行压力形成一条或几条裂缝的脆性破裂;具有破碎带的准塑性破裂或破碎带断口型破裂<sup>[5]</sup>。后三种破裂都有越来越多的声脉冲,而且微震活动性在第四种破裂类型上尤为明显。研究类似地震孕育过程的断口型和破碎带断口型破裂孕育过程中岩石物理参数变化就显得特别有意义。图 3 给出两种类型变形和破裂时岩石物理参数随时间的变化形态,横坐标为试验时间,纵坐标表示差应力  $\sigma$ 、轴向变形  $\Delta L_{//}$ 、垂向变形  $\Delta L_{\perp}$ 、纵波速度  $V_p$  和电阻率  $\rho$ 。在横坐标上确定出破裂之前的时间段  $\Delta t$ 。由图 3a 可以看出,在断口产生时应力发生急剧下降;纵波速度  $V_p=f(p)$  降低;

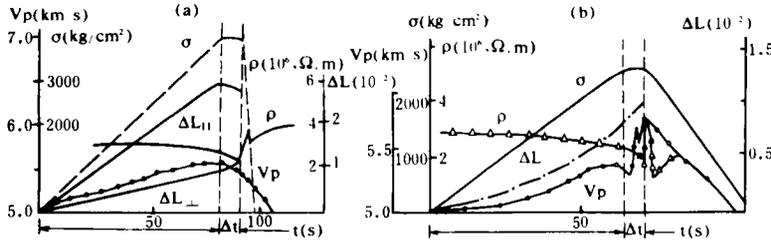


图 3 (a) 1.35 kb 压力下正长—闪长岩断口型变形和破裂时物理参数值随时间 t 的变化; (b) 1.3 kb 压力下花岗—片麻岩变形和发生破碎带断口型破裂时物理参数值随时间 t 的变化。

Fig. 3 (a) The variation of physical parameter values with time when syenite-diorite rent-type deformation and fractures occur under the pressure of 1.35 kb; (b) the variation of physical parameter values with time when granite-gneiss rent-type deformation and fractures occur under the pressure of 1.3 kb.

电阻率  $\rho=f(p)$  急剧增大,形变  $\Delta L_{//}=f(p)$  下降,形变  $\Delta L_{\perp}=f(p)$  增大。由图 3b 看出,在破碎带断口产生时,应力逐渐减小;开始时纵波速度  $V_p=f(p)$  下降,然后又极大地增高;电阻率  $\rho=f(p)$  跳跃式变化;形变  $\Delta L=f(p)$  增大。有关裂隙形成和滑动过程中电阻率  $\rho=f(p)$  变化的实验表明,在磨擦滑动过程中饱和花岗岩电阻率  $\rho=f(p)$  随剪切应力的增大而下降 10% 左右<sup>[10]</sup>,岩石破裂时电磁辐射  $I=f(p)$  实验证明,一方面电磁辐射谱较宽(10<sup>0</sup>—10<sup>3</sup> kHz),另一方面与裂隙长度成正比的辐射强度也大起大落(如图 4 所示)<sup>[11,12]</sup>。差应力的增加会改变声脉冲在时间上的分布特征;在孕震和破裂过程中水饱和岩石的脉冲数比干燥岩石的要大得多,但幅度要小若干倍,同时加载速度对固体的破裂应力值也有很大影响,岩石的抗剪强度与增加负载的速度有很大关系,与岩石的变形性能也有很大关系。这些大起大落的变化都为提取多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法提供了可靠的基础。

## 2.2 压力作用下岩石物理参数变化的特征

### 2.2.1 多种多样的变化形态

从图 1—4 中可以看出,压力作用下岩石变形、磨擦和破裂时物理参数变化形态是多种多样的,随着应力的增大物理参数变化形态呈现下降、上升、起伏和涨落的图象,有的甚至不

变化,从形态上呈现出地震前兆的复杂多样性,在不同的台址上同一物理参数的变化形态也是如此。这些参数变化形态多样性的起因与岩石成分、结构、孔隙度、变形、温度、湿度以及受力的方式和应力增大速度等因素有关系,例如,湿度对电阻率  $\rho=f(p)$  变化形态影响甚大(如图 2a 所示)。这一特点常常使预报人员犯经验主义的错误,导致漏报或错报地震。

### 2.2.2 初期的快速变化

援引的 4 幅图中物理参数在低压条件下变化速率都比高压时要大,其中电阻率  $\rho=f(p)$  和纵波速度  $V_p=f(p)$  尤其明显,亦即低压阶段的应力灵敏度  $G$  值比高压阶段的要大,如表 1 所示。由表可以看出,在小压力时岩石的物理参数应力灵敏度  $G$  值是比较大的,这主要是岩石孔隙闭合所引起的,因为容积孔隙度在压力  $P \geq 2 \text{ kb}$  时就减小,而裂隙状孔隙(微裂隙)在  $P=1-2 \text{ kb}$  时就封闭;若有几个巴的压力变化便能引起为前兆仪器检测出来的地震前兆信息。这时,多参数无量纲地震前兆信息均方差方法所提取到的前兆信息为早期地震孕育指标,它在地震预报中占有特别重要的科学地位。

### 2.2.3 破裂前岩石物理参数的突跳

在岩石破裂前  $\Delta t$  时间内岩石物理参数表现出剧烈跳动,一方面物理参数绝对值变化幅度大,另一方面变化速度很快,比整个岩石破裂过程中物理参数变化都显著(如图 4 所示),因此这种变化也给前兆方法的单次测量带来很大的误差。总的效果应是岩石物理参数值呈现剧烈波动起伏的不稳定状态。但是,并不是所有前兆参数都有这种突跳。 $\Delta t$  时间段或地震前兆出现突跳的时间段相当于破裂应力达到 50% 以后的阶段,特别是破裂应力达到 85% 以后的阶段,如图 5 所示<sup>[13]</sup>。由

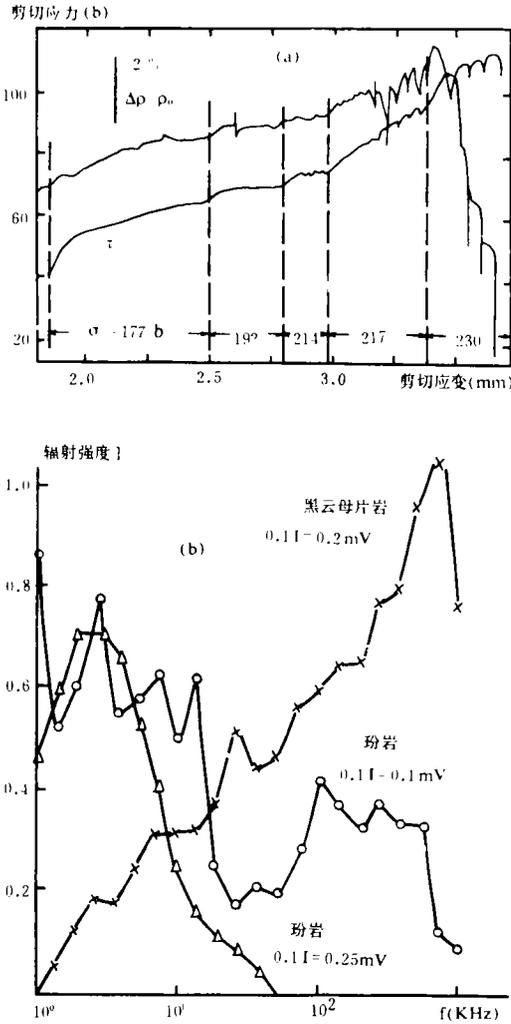


图 4 (a)在不同正应力下应力( $\tau$ )和岩石电阻率变化与剪切位移的关系;(b)岩石破裂时的电磁辐射谱。

Fig. 4 (a) Relation of stress ( $\tau$ ) under different positive stress and variation of rock resistivity to shear displacement; (b) electromagnetic radiation spectrum when rock fractures.

图可以看出, 电位  $\Delta\phi=f(p)$  急剧变化和形变  $\Delta L=f(p)$  的加速时间与波速  $V_p=f(p)$  的极小值相对应, 主破裂前电位呈现较高频的振动。多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法最有效地提取这个阶段不稳定变化的地震前兆信息, 以作为地震的短临预报指标。

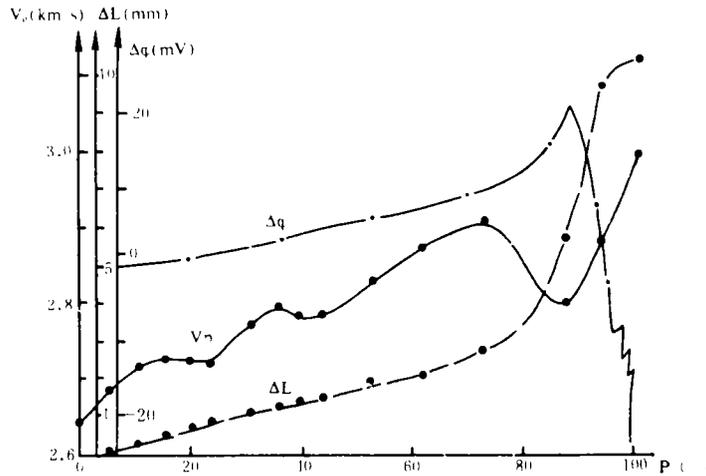


图5 单向压缩下试样物理参数变化  
 $\Delta L$  形变,  $\Delta\phi$  电位,  $V_p$  波速

Fig. 5 Variation of physical parameters of samples under simplex normal pressure.  $\Delta L$ —deformation,  $\Delta\phi$ —electrical potential,  $V_p$ —wave velocity.

### 2.3 地震震源体的范围

在复杂应力状态下, 岩石变形和破裂规律已为与震源机制有关的断裂孕育和发展模式所证实。普遍认为地震是因剪切应力逐步发育引起主破裂而发生的。主裂隙形成前, 一定有较小裂隙大量生长, 它们因相互作用而连结, 最后发生裂隙向未来主裂隙表面集中的现象。破裂过程的主要特点是物理特性和状态的变化, 并在各种物理场内出现主裂隙的前兆现象。根据里兹尼钦科<sup>[14]</sup>的研究得到震源长度  $L$  (km) 和震源宽度  $W$  (km) 与震级  $M$  之间的关系为

$$\lg L = 0.440M - 1.289 \quad (1)$$

$$\lg W = 0.401M - 1.448 \quad (2)$$

由(1)和(2)式可得: 7—8级地震的震源长度为62—170 km, 震源宽度为23—58 km。在震源体内岩石的剧烈变形、磨擦和破裂都可能发生, 进而引起岩体物理参数的变化。根据1976年7月28日唐山7.8级地震灾害调查, 发现地震烈度Ⅶ度区(240×159 km<sup>2</sup>)内沿海砂基液化区大面积喷水冒砂, 路基沉陷, 河堤产生裂缝<sup>[15]</sup>。这反映震时或在此之前岩体就已发生变形、磨擦和破裂。如果认为烈度Ⅶ度区为震源明显变形区, 亦即地震前兆出现突跳的区域, 那么利用多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法就可能收集和提取该范围内的地震信息。对于不同震级的地震, 烈度Ⅶ度区的大小是不同的。据统计,  $5.8 \leq M \leq 7.8$  ( $h \leq 10$  km) 地震的Ⅶ度区长轴  $R_{7a}$ 、短轴  $R_{7b}$  与震级  $M$  之间的关系为<sup>[16]</sup>

$$\lg R_{7a} = 0.402M - 0.784, \quad n=8, \quad r=0.886 \quad (3)$$

$$\lg R_{7b} = 0.403M - 0.988, \quad n=8, \quad r=0.887 \quad (4)$$

由此可得到不同震级的地震Ⅶ度区范围  $R_7$  (如表2所示)。表2和公式(3)~(4)均表明,多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法是在这个范围或稍大范围内得到有效应用的。

表1 电阻率—应力灵敏度  $G$  (%/b) 与压力 (b) 的关系<sup>[7]</sup>

G 岩名	压力				
	50—100	100—250	250—500	500—1000	1000—2000
卡斯科花岗岩	自来水 $\rho_s: 0.9$ 盐水 $\rho_s: 0.9$	0.7/0.7	0.2/0.4	0.2/0.2	0.1/0.1
斯通山花岗岩	0.6/0.9	0.4/0.6	0.3/0.4	0.2/0.2	0.1/0.2
陆特兰石英岩	0.5/1.0	0.4/0.6	0.2/0.3	0.1/0.2	0.1/0.1
韦斯特利花岗岩	0.4/0.7	0.3/0.4	0.1/0.2	0.1/0.1	0.1/0.1
卡普考德花岗岩闪长岩	0.6/1.0	0.2/0.7	0.1/0.2	0.1/0.1	0.0/0.1
沃德哈姆斯斜长岩	0.3/2.0	0.2/0.7	0.1/0.2	0.1/0.1	0.1/0.1
马里兰辉绿岩	2.7/3.8	0.2/0.6	0.1/0.1	0.1/0.1	0.1/0.1
阿载纯橄榄岩	2.6/3.0	1.2/0.9	0.4/0.3	0.1/0.1	0.1/0.1

表2 不同震级的Ⅶ度区范围  $R_7$  (km)

震级 M	$R_{7a}$ (km)	$R_{7b}$ (km)
5	19	11
6	42	27
7	107	68
8	270	172

### 3 结束语

综上所述,多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法的物理基础是牢固的,亦即在地震孕育过程中震源区及其近区受压初期和破裂前岩体物理参数的绝对值、变化速率及其测量误差三者都会发生明显的变化。这三种变化必然会被多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法所收集和突出出来,成为地震的早期和短临预报指标。关于多参数无量纲地震前兆信息的均方差方法的具体应用和震例将在本项课题第五篇文章中详细研究。

### 参考文献

- 1 陈有发,等. 现行无量纲地震前兆信息提取方法的分析研究. 华南地震,1995,(3).
- 2 陈有发. 无量纲地震前兆信息提取方法的研究现状. 地震科技情报,1995,(7).

- 3 别洛乌索夫. 地球构造圈. 地震出版社, 1983. 438—472.
- 4 马宗晋, 等. 中国九大地震. 地震出版社, 1982. 1—22, 57—75.
- 5 伏拉罗维奇等著. 高温高压下岩石和矿物物理性质的研究. 地震出版社, 1982. 24—26, 85—89, 114—129.
- 6 力武常茨. 地震预报. 地震出版社, 1978. 153—155.
- 7 Brece W. F., et al. Further studies of the effects of pressure on electrical resistivity of rocks. J. G. R., 1968, 73 (16): 5407—5420.
- 8 陈有发. 也谈地震前异常的原因. 地震战线, 1977, (4): 7—29.
- 9 Воларонч, М. П. Электрические механические свойства пород при высоких давлениях. 1977. 200—205.
- 10 Chi-yuen Wang, et al. Electrical resistivity of granite frictional sliding: Application in the earthquake prediction. Geophysical Research Letter, 1975: 525—528.
- 11 Хатишвили, Н. Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галлюидных кристаллах и горных породах. Физика Земли, 1984, (9): 13—19.
- 12 Хатишвили, Н. Г. Возможные механизмы электромагнитного излучения при разрушения кристаллов и горных пород. Геофизический журнал, 1988, 10(5): 45—53.
- 13 索鲍列夫. 破裂前兆的实验研究. 地震前兆探索. 地震出版社, 1980. 45—51.
- 14 Рязниченко, Ю. В. Исследования по физика землетрясении. Наука, 1976.
- 15 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, 1982. 1—65.
- 16 时振梁. 中国地震考察(二). 地震出版社, 1990. 1—310.

**PHYSICAL BASE OF THE MEAN SQUARE DEFLECTION METHOD EXTRACTING  
INFORMATIONS OF MULTI—PARAMETER NON—DIMENSIONAL  
EARTHQUAKE PRECURSORS**

Chen Youfa, Lei Jianshe, Ding Hui, Dong Qizhen, Ma Qinzong and Kang Haolin

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

**Abstract**

In this paper, the physical base of the mean square deflection method extracting information of multi-parameter earthquake precursors has been studied. The physical base of this method is that rock properties including elasticity, deformational property, electric property, magnetic property, thermal property and so on will change obviously when crushing stress reaches up to more than 50 percent during earthquake preparation, which results in changes of absolute value, variation rate and measuring error of rock physical parameters. To calculate the changes by using the mean square deflection method, on one hand, eliminates the seasonal interference of precursor parameters, on the other hand, gives prominence to the precursory informations.

**Key words:** Earthquake precursor, Information processing, Mean square error,  
Physical base