

# 地球深部电性变化及相变机制

徐文耀 祁睽 王仕明

(国家地震局兰州地震研究所)

## 前 言

在一些中强地震之前，我们观测到震中附近地磁场各分量发生特殊的相关变化，据此我们在1970年提出地磁预报地震的“特征线”法（又称“斜率法”）。本文从高斯位理论出发，应用电磁感应原理讨论这种方法的理论依据，并阐明预报指标的物理意义以及特征线变化所反映的物理过程。

### 一、特征线斜率法概述

考察同一观测点上地磁场水平分量H和垂直分量Z的变化，发现它们有很强的相关性。

图1所示是兰州地磁台1959年3月到4月的H、Z日均值曲线，其相关系数3月份是-0.94，4月份是-0.86。H、Z的这种相关性在月均值图上也表现得很清楚<sup>(1)</sup>（图2）。

从图2还可看出偏角D（或东向分量Y）的变化较小，所以在这里先不考虑D的变化。这样地磁总向量就在H—Z平面内变化。由于H、Z变化是线性相关的，所以总向量端点轨迹大致为一直线：

$$Z = KH + b \quad (1)$$

我们把这条直线称为“特征线”。

由(1)式可得

$$\frac{\Delta Z}{\Delta H} = K \quad (2)$$

也就是说这条直线的斜率K就是H、Z两分量变化的比例系数

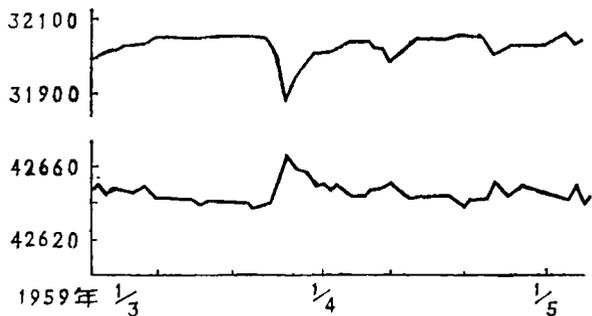


图1 兰州地磁台水平磁场分量H和垂直分量Z的日均值曲线

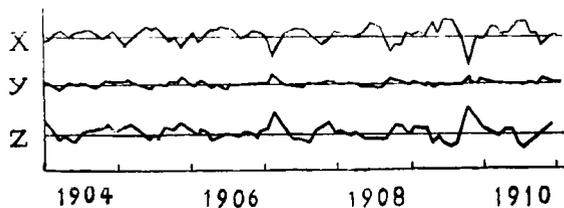


图2 波茨坦地磁台1904—1910年各分量月均值图

(图3)。

不同地磁台,其K值不同(见表1)。对于某个固定的台站,通常情况下K随时间变化

表1 我国一些地磁台的特征线斜率K (1957年—1961年)

台 站	长 春	北 京	兰 州	上 海	拉 萨	广 州
K	-0.157	-0.136	-0.130	-0.128	-0.113	-0.051

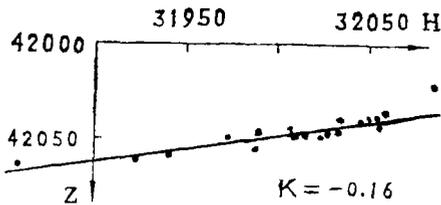


图3 兰州地磁台1959年3月总方量端点轨迹(特征线)

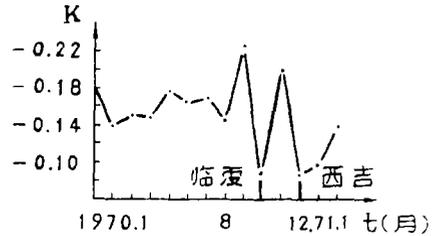


图4 1970年10月17日甘肃临夏地震和1970年12月3日宁夏西吉地震前兰州地磁台K值的异常变化

的幅度不大。但是在中强地震发生之前一月至数月,震中附近的K值往往出现明显的异常变化,震后K值恢复正常水平(图4)(图5)

### 二、特征线法的理论依据

如果我们考虑一个月之内的地磁场变化,则长期变、年变可以忽略不计或者采取一定方

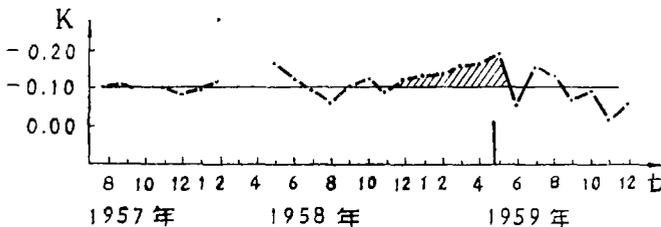


图5 1959年4月27日唐古拉山口东北6级地震前拉萨地磁台K值的异常变化

法加以消除。此时引起地磁场日均值起伏的主要原因是磁暴和磁扰。由于日均值可将日变化及短周期地磁变化平滑掉,所以日均值曲线的起伏主要反映了暴时变化Dst和暴后效应Dm。它们的基本特征是H分量下降,Z分量增加(在北半球)。大的磁暴和小的磁扰仅在效应的强弱程度上有所区别,

趋势是一样的<sup>(1)</sup>。

因此研究地磁场各分量日均值变化的相关性就归结为研究Dst和Dm变化中各分量的相关性。

根据磁暴成因的现代理论,与磁暴有关的地磁场变化按其起源位置的不同可以分成三部分:<sup>(2)(3)(4)</sup>

(1) 太阳微粒流在磁层边界上引起的电流体系所产生的磁场变化,它使地表H分量增

加, 这主要表现在磁暴初相。

(2) 环电流场: 太阳等离子流中的带电粒子被范·艾伦带俘获, 这些粒子绕磁力线旋进, 同时发生横向漂移。这样就产生了一个西向的环电流, 这个环电流使H分量下降, 形成了磁暴主相。此后, 被俘获的粒子逐渐逃逸, 主要被电离层吸收, 环电流逐渐减弱, 磁暴即进入恢复期, 在磁暴结束后很长时间, 环电流的减弱过程仍在进行, 这就形成了暴后效应。

(3) 电离层电流产生的场: 在幅射带与电离层极区部分相连的地方, 带电粒子不断落下, 于是在电离层极区产生强大的电流, 这是磁扰的主要来源。

磁暴初相持续很短, 且幅度不大, 所以对日均值影响不大。短周期磁扰在日均值曲线中也被平滑掉了。所以地磁场分量日均值的波动主要反映了环电流效应。因此暴时变化 Dst 和暴后效应 Dm 可用带谐函数来表示:

$$W = a \sum_n \left[ e_n \left( \frac{\gamma}{a} \right)^n + i_n \left( \frac{a}{\gamma} \right)^{n+1} \right] P_n(\cos \theta) \quad (3)$$

式中 W 是磁暴的磁位

a —— 地球半径

$\gamma$  —— 由地心算起的径向距离

$\theta$  —— 地磁余纬

$e_n, i_n$  —— 外源场和内源场系数, 它们是时间的函数。

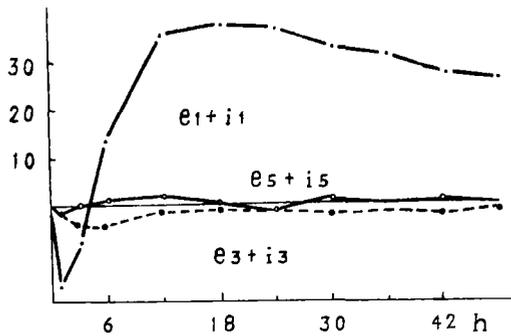


图 6 Dst 磁位中各阶球谐项随时间的变化

$P_n(\cos \theta)$  零次伴随勒让德函数 (带谐函数)。

由于环电流对称于赤道面, 所以在 W 的表达式中只应包含  $n=1, 3, 5, \dots$  等奇阶项。其中  $P_1$  最重要, 而  $P_3/P_1 \sim (a/R)^2$ , 这里 R 是环电流半径, 约为  $3.5a$ , 所以  $P_3/P_1 < 10\%$  即  $P_3$  的贡献不到  $P_1$  的十分之一, 高于三阶的项则更小<sup>(6)</sup>。Chapman 对实测资料的分析证实了这一点<sup>(6)</sup>, 如图 6 所示。根据以上分析, 我们可以用一阶带谐函数近似地表

示暴时变化 Dst:

$$W = W_e + W_i$$

$$= a \left( e_1 \frac{\gamma}{a} + i_1 \frac{a^2}{\gamma^2} \right) P_1(\cos \theta) \quad (4)$$

由公式  $\vec{H} = -\text{grad} W \quad (5)$

可求出地球表面相应的磁场值:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta X = \left( \frac{1}{Y} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right) \gamma = \alpha = -(e_1 + i_1) \sin \theta \\ \Delta Y = - \left( \frac{1}{Y \sin \theta} \frac{\partial W}{\partial \lambda} \right) \gamma = \alpha = 0 \\ \Delta Z = \left( \frac{\partial W}{\partial \gamma} \right) \gamma = \alpha = (e_1 - 2i_1) \cos \theta \end{array} \right. \quad (6)$$

式中 $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ 分别是磁场的北向分量、东向分量和垂直分量。这里的 $\Delta X$ 就是我们前面所说的 $\Delta H$ ，所以由(6)式可得：

$$\frac{\Delta Z}{\Delta H} = \frac{1 - 2 \frac{i_1}{e_1}}{1 + \frac{i_1}{e_1}} \operatorname{Ctg} \theta = \frac{1 - 2 \frac{i_1}{e_1}}{1 + \frac{i_1}{e_1}} \tan \phi \quad (7)$$

式中 $\phi$ 是磁纬， $\phi = 90^\circ - \theta$

(7)式中 $\frac{i_1}{e_1}$ 是磁场的内源部分对外源部分之比，即地球对外加磁场的响应特征。它既取决于地球内部的电导率分布，也取决于外加磁场的频率和时变特征。在我们所研究的变化周期范围内(约2天到10天)，地球响应特征基本上不随周期改变<sup>(6)</sup>，所以可以近似地认为 $\frac{i_1}{e_1}$ 单值地取决于地球内部的电导率分布。由(7)式可知， $\frac{\Delta Z}{\Delta H}$ 也只取决于地球内部的电导率分布，如果地下电性不变，则 $\frac{i_1}{e_1}$ ， $\frac{\Delta Z}{\Delta H}$ 也不变。总而言之，地磁特征线的斜率 $K$ 反映了地下的电导率结构， $K$ 的稳定性反映了地下电导率结构的稳定性。

### 三、地震前 $K$ 值变化所反映的物理过程

既然特征线斜率 $K$ 反映的是地下电导率结构，那么，地震前 $K$ 值的异常变化表明地下电导率结构有一个较显著的异常变化。

许多学者对地磁变化的研究指出<sup>(7)</sup>，在地下几百公里的深度上，电导率急剧增加约两个数量级，所以地球可以近似地看作由不导电的外壳和导体内核组成，导体核的电导率可以

表 2 由变化磁场分析得出的均匀核模型

变 化	作 者	非导电壳厚度DKm	导体核电导 emu	有效深度Km
Sq	Chapman	250	$3.6 \times 10^{-12}$	700
	永田武	400	$1.5 \times 10^{-12}$	850
	永田武	400	$5.1 \times 10^{-12}$	850
SD	力武常次	与Sq结果大致相同		
Dst	Chapman和 Price	400	$4.4 \times 10^{-12}$	1100
bay	力武常次	260	$10^{-12}$	320
s.f.e	"	400	$10^{-12}$	420
	"	600	$>10^{-12}$	—

假定为常数（即Lamb模型），也可以假定随深度而变（即Lahiri—price模型<sup>(8)</sup>），还可以假定导体核是由一些同心球层组成的，每一层电导率是常数（即 Price—McDonald 模型）<sup>(9)</sup>。表2列出一些学者的结果，图7画出几种主要模型的电导率结构。可以看出，电导率的急增发生在400Km左右的深度上，这个深度正好是上地幔到下地幔的“转变带”开始的深度。地震波资料指出，在400Km深度附近，波速有一急速增长，P波速度约增大0.6—1.0 Km/sec<sup>(10)</sup>（图8）。

这个带被称作“20°不连续带”，在650Km上还有一个不连续带，P波速度急增0.9~1.1 Km/sec。这两个带是转变带内两个最重要的不连续带。

根据晶体化学、热力学的研究，认为上地幔的主要化学成分

相当于三份橄榄岩加一份玄武岩组成的混合物（称作地幔岩），它可结晶为由橄榄石、辉石

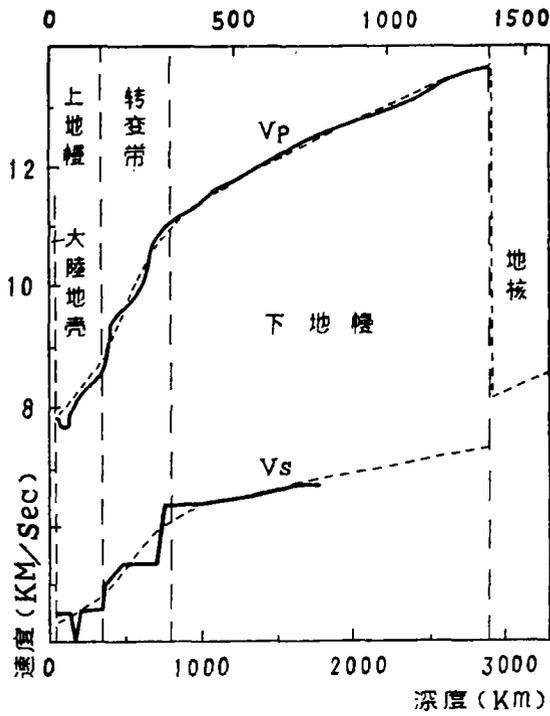


图7 上地幔电导率

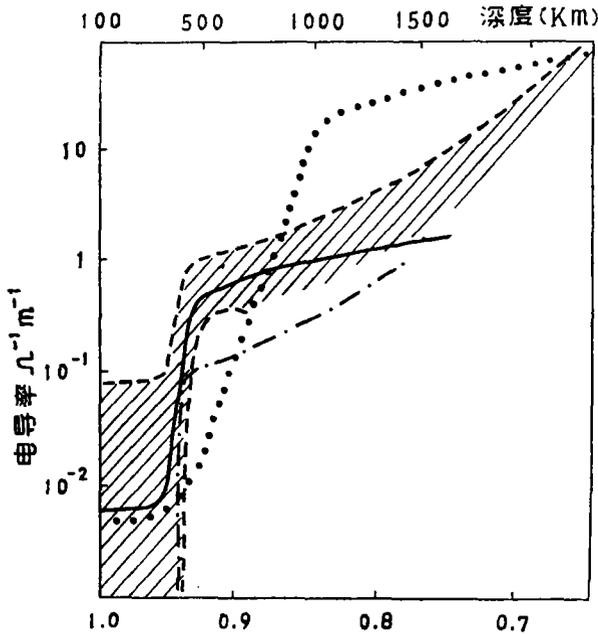


图8 地幔内地震波速的分布虚线表示Jeffreys的结果(1937, 1939) P波(实线)是Johnson的结果(1967, 1969) S波(实线)是Nuttli的结果(1969)

和石榴石组成的矿物组合体,在400Km左右的深度发生两种相变:橄榄石—尖晶石— $\beta$ - $Mg_2SiO_4$ 相变和辉石—石榴石的相变,在这些相变发生时,密度增大,电导率增高。例如当橄榄石变为尖晶石时,密度增加约10%,电导率增加约两个数量级,这正好与地磁研究结果相吻合。地球内密度变化如图9所示。

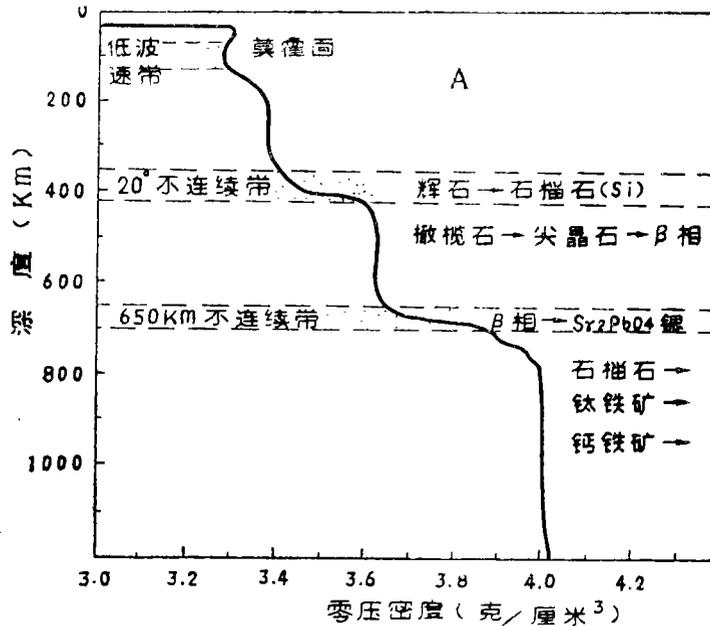


图9 地幔模型—可能的矿物组合和相应的零压密度。  
根据直接静压实验得出达600Km深度的矿物,根据间接方法和冲击波方法推断出更深处的矿物

综上所述可知,400Km和650Km既是电性不连续面,也是密度、波速不连续面,其原因是相变,所以我们在研究地球内部的变化,特别是这种变化的急变形式—地震的时候,不应该忽视这里所发生的过程的重要性。

在特征线法中,我们所考虑的地磁变化主要是Dst变化,由表2可以看出,其感应电流主要分布在地幔“转变带”内,所以特征线斜率K的变化主要反映了这个深度范围内电性的变化。浅部电导率对Dst影响很小,Lahiri和Price估计如果地球表面均匀复盖1公里厚的海水,引起 $\frac{i_1}{e_1}$ 的变化不到2%,从图7也可看出,400公里以上,只要电导率小于 $0.1\Omega^{-1}m^{-1}$ 。

都与观测结果符合。所以K值变化不会在地球浅部。

引起K值变化的原因可能有二:

(1) 导体核电导率不变,非导壳厚度D变化。当D增大时地面上观测到的内源部分减小,从而 $\frac{i_1}{e_1}$ 减小,|K|值增大;相反,当D减小时, $\frac{i_1}{e_1}$ 增大,|K|值减小。

(2) 非导壳厚度D不变, 导体核电导 $\sigma$ 变化。当 $\sigma$ 增大时, 感应效应加强,  $\frac{i_1}{e_1}$ 增大,

|K|值减小; 相反 $\sigma$ 减小时,  $\frac{i_1}{e_1}$ 减小, |K|增

大。图10画出我国几个基准地磁台  $\frac{i_1}{e_1} \sim K$  的变化曲线, 它是根据(7)式作出的。

简言之, |K|增加相应于深部电导率减小, |K|减小相应于深部电导率增加。这就是地震前特征线斜率K异常变化的物理本质。

#### 四、深部电导率变化的一种可能机制——地幔转变带的相变

总结过去的震例发现|K|值在震前通常为增加, 震后即恢复, 异常时间为震前数月。这就是说在地震之前数月地下400Km或更深处电导率要减小, 而在地震后又恢复到原值。

地磁短周期变化的研究发现震前数月地下几十公里深处电导率要增大, 震后恢复正常值。地震前地下电导率的这两种相反的变化(深处减小、浅处增大)如何用统一的震源过程来解释呢? 是一种什么样的过程能在如此巨大的体积内(深度从几百公里到几十公里甚至更浅处)发生, 而整个过程又是如此快速(必须在几个月内完成)? 为了解释震后恢复, 这个过程还必须是可逆的。

一个合理的机制, 必须能同时恰当地解释以上各种特性, 至少不能与之矛盾。

我们认为深部物质相变是一种可能的机制, 具体来说, 地幔转变带的相变是造成上述地磁异常的根本原因, 这种相变可能主要发生在400Km和650Km两个间断面附近。下面以400Km间断面的相变为例来说明, 650Km面的情况也与此相类似。

400km间断面附近的物质处在一种临界的温度和压力状态, 其上为橄榄石, 其下是尖晶石。由于临界态是一种不稳定态, 只要温、压条件有一个不大的变化, 就会引起相变。当压力降低时, 就会发生尖晶石 $\rightarrow$ 橄榄石的相变。从而使400Km间断面下降, 当这种相变发生时, 相变物质密度减小, 体积膨胀, 因而对周围介质施加一种压力, 使周围介质变形, 此种力学效应以很快速度向上传递, 结果引起M界面上升和地表隆起(如图11a所示)。另一方面, 由于地壳的刚性和强度抵抗上述形变, 结果使M界面附近的压力增大, 压力增大可能引起玄武岩 $\rightarrow$ 榴辉岩的相变, 即一部分地壳物质变成地幔物质, 这种相变使M界面升高, 同时由于相变时密度变大, 体积缩小, 会牵拉地表向下拗陷。概括以上所述, 400Km间断面发生尖晶石 $\rightarrow$ 橄榄石相变时, 使此间界面下降。它对M界面的影响有二: 一个是直接的压缩变形作用使M界面上升, 另一个是使M界面附近发生玄武岩 $\rightarrow$ 榴辉岩相变, 使M界面上升, 两种效应都使M界面上升。对地面的变形也有两种影响, 一种是400Km相变产生的直接压缩形变

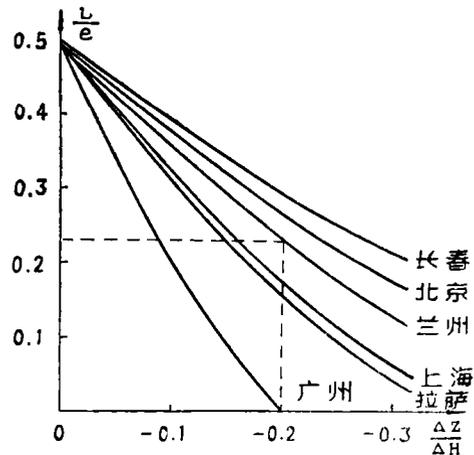


图10 我国几个基准地磁台的  $\frac{i_1}{e_1} \sim K$  变化曲线

效应使地面上升, 另一种是M界面的相变使地面下降, 这两种相反的效果会使地面总的形变不大。以上过程如图11所示。关于400Km间断面发生橄榄石→尖晶石相变的情形也可同样得出。

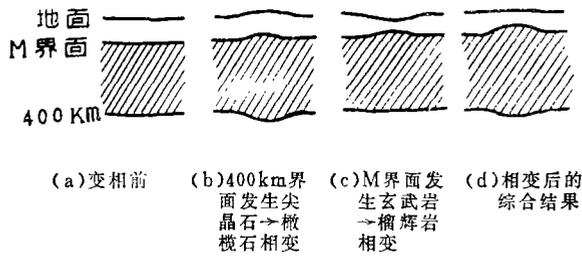


图11 相变引起电导率变化的示意图

可能引起变化较快、持续时间较短的异常, 而地磁变化所反映的深、浅电导率几乎同时变化, 同时结束也可以得到说明。又由于相变是可逆的, 所以这种机制有利于解释震后异常恢复的特点。日本学者吉松隆三郎曾观测到地震前地磁长周期先变化, 短周期后变化, 并推论地震力源从深部向浅部逐渐移动也可以用上述机制解释。

### 五、相变机制可能作为解释其他地震异常的一种机制

相变发生时, 除了电导率发生变化外, 还有伴随出现形变、重力等其他物理场的变化, 如果上述机制成立, 则它不仅应能解释地磁异常, 而且也应能解释同时出现的其他一些地震异常。本节试图用“转变带相变”机制解释地震前观测到的一些异常特征。

#### 1. 地震前兆异常的空间分布:

大量的观测事实表明, 一个大地震发生之前, 前兆异常的分布范围相当大, 而且不一定与地震构造有关。据此付承仪先生提出了“红肿学说”, 把异常范围形象地比作“红肿区”。但是从震源力源出发的所有理论计算所得出的异常范围要少得多。这就使我们有理由怀疑, 引起异常的根本原因是否一定在震源本身。

地幔转变带的相变可能为大范围前兆现象提供一种解释。

#### 2. 地震前兆异常的时间变化特征

根据前兆异常出现的早晚, 我们一般把它分成长期、中期、短期、临震四类。很多显著的前兆现象出现在震前若干天到数月(即属中、短期前兆), 其展布范围之广, 时间之短(相对于地震孕育过程而言), 很难用地壳内发生的过程同时得到满意的解释。而地幔相变机制提供了一种可能的解释。因为相变过程可以在一个较短的时间内完成, 所以它可以使大范围在短时间内出现显著异常。

此外用相变的可逆性可以解释震后异常恢复。同时还克服了“前兆异常震时无突变”的困难, 而“震时无突变”是力学观点解释地震异常所遇到的共同难点。

#### 3. 外因触发问题:

从统计分析得出结论: 磁暴、地球自转、日月引力、气压等外因对地震有触发作用。如果这些触发因素直接作用于震源, 往往嫌能量太小, 不好理解。如果考虑这种触发作用是加在处于临界状态的相变区(例如磁暴引起的地下感应电流、地球自转速度变化产生的力等), 则由于相变区已处于临界状态, 只要少许能量即可引起大规模相变, 而后者产生的形变、电

导率变化、热量变化所提供的能量比前者要大得多。这种“二次触发”过程既可克服触发因素能量太小的困难，又可说明触发延时性等特点。

## 六、讨 论

1. 根据文献<sup>[12]</sup><sup>[13]</sup>的研究，在地震孕育过程中，垂直力可能起着一种重要作用，地球深部的相变可能提供这种力源。

2. 地震前地磁特征线斜率的异常变化表明，在地震孕育过程中，参予活动的不仅仅是地壳。地下几百公里深处也同样在积极地活动着，参予了这一过程，提供了部分或全部能量，决定着或部分决定着前兆异常的时空分布特点。如果我们把这个范围统统包括在“孕震体积”之内的话，则孕震体积的概念也许要更完整一些。

目前的地震预报，在水平尺度上积累了大量的资料，多少能够说出异常的水平展布范围（几百公里甚至上千公里），但在垂直方向上（从地面向上和向下）则视野要小得多，与前者极不相称。向上只到低层大气，向下只到地壳或再深一点，最多不过几十公里。至于更高处和更深处则研究得很少。这样一来，地震预报工作者的活动空间实际上局限在一个二度空间内—水平方向达千公里量级，垂直方向仅几十公里。

我们认为，地震过程所涉及的范围更应该是一个三度空间，既然在水平方向上可以达到几百公里甚至上千公里，那么在垂直方向上，它也可能达及同量级范围，这样上至几十公里到几百公里的电离层，下至几百公里甚至更深处，都应成为我们注目的空间。在这个范围内，很可能包括了地震能源在内。所以探索和研究深部的物理过程，可能为地震预报和震源物理的研究提供有用的情报。目前电离层与地震的关系已开展研究，并初现端倪<sup>[14]</sup>。类似“地磁特征线”这样的方法也希冀在这一思路下找到自己的立足点。

以上认识仅仅是根据有限的地磁观测资料得到的，带有很多推测的成分。目前能探测地下几百公里到几千公里变化的手段太少，而且研究得很不够。从几百公里的深部寻找地震异常的原因，尤其是寻找中、短、临异常的原因还做得不够。也有人认为长期异常来源也许深，而中、短、临异常的原因不会在深部。所有这些有待进一步收集资料和深入研究。

## 参 考 文 献

1. S. Chapman & J. Bartels  
Geomagnetism 1940 Oxford
2. И. И. Рохитяский  
Исследование аномалий электропроводности методом магнетовариационного профилирования. 1975 Киев
3. S. Akasofu & S. Chapman  
Solar-terrestrial physics 1972 Oxford
4. S. Chapman  
Solar Plasma, Geomagnetism & Aurora 1964
5. R. J. Banks  
Geomagnetic Variations & the Electrical conductivity of the upper mantle

- Geophys J. R. astr. Soc (1969) 17 457—487
6. S. Chapman & A. T. Price  
The Electric & magnetic state of the interior of the Earth, as inferred from Terrestrial magnetic Variations  
Phil. Trans. Roy. Soc. London. A  
(1930) 229 427—460
7. 力武常次 Electromagnetism & the Earths interior  
1966 Amsterdam-London-New York
8. B. R. Lahiri & A. T. Price  
Electromagnetic induction in non-uniform conductors, & the determination of the conductivity of the earth from terrestrial magnetic variation  
Phil. Trans. Roy. Soc. London. A  
(1939) 237 509—540
9. K. L. McDonald  
Penetration of the geomagnetic secular field through a mantle with variable conductivity  
J. Geophys. Res (1957) 62 117—141
10. A. E. Ringwood  
深地幔矿物学的现状和发展趋向 国外地质1973年第4期 1—11
11. С. И. Сүбботан, Г. Л. Наумичик, И. Ш Рахимова  
Процессы в верхней тантии земли, 1964 Киев
12. 郭增建、秦保燕  
地震预报中的某些力学问题 力学 1977 1 68—74
13. 郭增建、秦保燕、张远孚、黎在良  
从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育和发生  
地球物理学报 1977年第20卷第3期 242—250
14. 郭增建、秦保燕、李海华、徐文耀  
《预报地震的“倍九法”》 地震战线 1977.5.