

唐山地震可能伴随的地电导率变化

龚绍京 吴占峰

(天津市地震局)

摘 要

本文研究短周期地磁变化转换函数的时间变化,以探索可能与唐山地震有关的电导率异常。结果表明,在离余震区 5 km 和 60 km 的两个台站,转换函数 A 有明显的负异常。但在余震区以西 145 km 的另一台站, A 的异常变化不明显。如果存在电导率的异常变化,那么变化最大的深度是与周期为 14—20 min 对应的深度。在昌黎台,地下导电体界面的倾角可能减小了约 2.7° 。

一、引 言

应用地球内部的电磁感应理论研究地球内部的电性结构,是一个既有理论基础又有广阔实际应用前景的课题。在六十年代的上地幔计划中,曾广泛研究地壳和上地幔横向不均匀的电性结构,取得了丰硕的成果,用来分析月球的磁场。Sonett 等发现月球大约在 250 km 深度有一个高电导率层。电磁感应理论在地震学和地震预报领域内可能的应用,是利用地球变化磁场的短周期成份,包括脉动、急始、湾扰等快速地磁扰动变化,其感应的深度在地壳和上地幔范围内,这恰恰是地震孕育的深度。

地球的变化磁场包括内源场和外源场,外源场来源于外空电流体系,内源场部份是外源场感应的结果。内源场不仅与外源场的强度和分布有关,而且取决于地球内部的电导率分布。地震的孕育过程很可能伴随有地下深部电导率及其分布状况的变化。电导率的明显变化将影响地磁场的感应磁场部分,产生地震的感应磁效应。短周期地磁变化的转换函数,是一个既与地下电导率的分布有关,又与磁变周期有关的参量。因而可利用一定周期范围的短周期地磁变化的转换函数,来探索在孕震过程中地下深部是否有电导率的变化。

七十年代以来,国外陆续报道了帕金森矢量系数和转换函数在地震前后变化的少数震例^[1-3]。但每个震例只有一个台站离震中较近,因而只有一个台的转换函数发生变化。为了探明究竟是否有地下电导率的异常变化,以及引起转换函数变化的物理机制,获得多台转换函数变化的震例显然是十分必要的。本文利用了唐山附近三个磁变仪台九年的资料,研究转换函数随时间的变化以查明有无异常,并初步探讨异常分布的时、空特点。

二、资 料

1976 年 7 月 28 日在唐山发生 $M_s = 7.8$ 级地震,主震、余震区和地磁台的位置示于图 1。昌黎、青光和白家疃台至主震震中的距离,分别约为 70 km、110 km 和 170 km。距余震区边缘的最近距离,分别约为 5 km、60 km 和 145 km。

本文用昌黎、青光、白家疃地磁台三分量磁变仪 1971—1979 年的资料(青光台 1974 年以前没有资料)。主要选用地磁场瞬时扰动和急始。用地磁量板量取事件的前沿时间 τ ,用最小刻度为 0.1 mm 和 0.2 mm 的刻度放大镜量取三个分量的变化幅度,乘以标度值得出它们的伽偶值 ΔZ 、 ΔH 、 ΔD 。前沿时间 τ 为 2—20 min 的事件总计约 2,500 个,其中 4—10 min 的事件约占 70%。

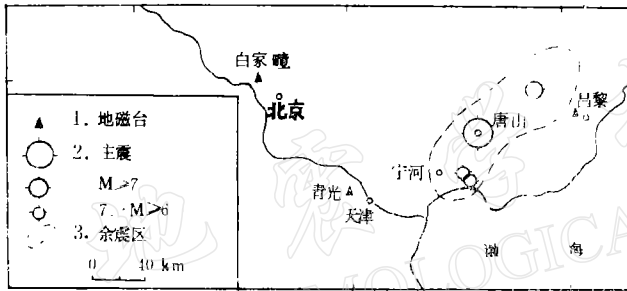


图 1 唐山余震区及地磁台的位置

Fig. 1 Tangshan aftershock area and the locations of geomagnetic observatories
(1. Observatories, 2. Main shock, 3. Aftershock area)

三个台站中,昌黎和青光的资料质量不是很稳定。在用到的资料中,约 4% 的月份采用标度值误差较大,如青光台 1974 年 8 月和 1976 年 8 月,昌黎台 1974 年 2 月、1976 年 4 月和 1979 年 10、11 月。但为得到十二个月滑动平均值,这些数据还是利用了。一般采用标度值的误差小于 2%。青光台有 57 型和 72 型两套仪器,两套仪器的日变化和短周期变化的一致性相当好。用 1975 年 4—6 月中的 6 天资料做日变化的一致性对比,日变图形相当一致,它们变化幅度差别的相对值: H 是 1.7%, Z 是 -2.5%。一致性对比结果也说明了采用标度值误差的大小。这些情况说明,对所利用的资料,昌黎和青光采用的标度值基本上是可靠的。

三、转 换 函 数

在数学和工程控制领域内,转换函数(或称传递函数)是一个有着更广泛含义的概念。它表达输出和输入之间的函数关系。由于对不同的频率,输出和输入之间有不同的响应,而且还有不同的相位关系,所以转换函数是复频率域内的概念,并用以描述复频率域内线性系统的动态特性。

对地球内部的电磁感应问题,1964 年 Schmucker 首先引入转换函数的概念。把变化磁场分成正常场 H_n 和异常场 H_a 两部分。正常场包括外源场和正常分层地球内部的磁

场。异常场则来源于地下横向不均匀的电性结构。鉴于麦克斯韦方程的线性性质,异常场和正常场之间有下列关系:

$$\begin{pmatrix} H_a \\ D_a \\ Z_a \end{pmatrix} = \mathbf{T}_s \begin{pmatrix} H_n \\ D_n \\ Z_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_s = \begin{pmatrix} T_{HH} & T_{HD} & T_{HZ} \\ T_{DH} & T_{DD} & T_{DZ} \\ T_{ZH} & T_{ZD} & T_{ZZ} \end{pmatrix}$$

\mathbf{T}_s 是一个张量(感应张量),其中每一个元素都是复数且是周期的函数。 \mathbf{T}_s 称为转换函数。在实际问题中,若外源场是准均匀的,考虑到正常水平分层地球的特点,可假定: $Z_n \approx 0$; Z_n 与 H_n, D_n 无关;且 $H_a/H, D_a/D$ 很小。这样,实际记录的变化磁场垂直分量 Z 近似等于 Z_a ,而 H_n 和 D_n 可分别用实际记录的 H 和 D 代替。于是,对垂直场转换函数,得到下述简化表达式:

$$Z = AH + BD \quad (2)$$

A, B 是对 $\mathbf{T}_{ZH}, \mathbf{T}_{ZD}$ 的一种近似,它也是一种转换函数,且是复数和周期的函数。当选定不大的周期范围,用正弦形变化的幅度 $\Delta H, \Delta D, \Delta Z$ 代替 H, D, Z ,并且三个分量之间的相位差可忽略时,(2)式就变成(3)式:

$$\Delta Z = A\Delta H + B\Delta D \quad (3)$$

(3)式中的 A, B 为实系数。它与帕金森和威斯经验关系式形式上相同,但他们得出此公式的推导过程却完全是另一条思路。采用帕金森的量图和表示方法,用(3)式算出来的 A, B 称为帕金森矢量系数。

由转换函数的概念可知:地下电导率分布状况的改变会导致转换函数发生变化。本文选用的周期段是 $\tau = 4-10\text{min}$ 和 $\tau = 2-20\text{min}$,因此用(3)式求出的 A, B ,可反映在这个周期段所对应的深度范围内电导率分布状况的综合效应。

转换函数 A, B 的计算采用线性回归分析方法。将(3)式改写成下述形式:

$$\Delta Z / \Delta H = A + B\Delta D / \Delta H$$

令 $X = \Delta D / \Delta H, Y = \Delta Z / \Delta H$,则可按文献[6]中的公式计算 A, B 和它们的标准差 σ_a, σ_b ,以及剩余标准差 S 和相关系数 R 。按回归分析的概念,对于给定的 N, R 必须大于相关系数检验表中相关系数的起码值,才能认为 X 和 Y 之间存在线性关系, A, B 才有意义。本文遇到了一般数理统计书中未曾谈到的一个特殊情况:观测点 $(X_i, Y_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ 沿大体平行于 X 轴的直线分布的情况。此时虽然存在一条直线,但 $B \rightarrow 0$,因而 $R \rightarrow 0$,相关系数不大于表中的起码值。但就转换函数的物理意义而言,此种 $B \rightarrow 0$ 的情况是有意义的。为对回归分析结果进行严格的相关系数检验,必须区别下述两种情况:(1) $R \rightarrow 0, X, Y$ 之间不存在回归直线,所以不存在线性关系;(2) $R \rightarrow 0, B \rightarrow 0$,有平行于 X 轴的回归直线。为此,将坐标旋转 -45° 。 (X_i, Y_i) 在新坐标系中的值为 (X'_i, Y'_i) ,它们之间有如下关系:

$$\begin{aligned} X'_i &= 0.7071(X_i - Y_i) \\ Y'_i &= 0.7071(X_i + Y_i) \end{aligned}$$

定义用 $\{X_i, Y_i\}$ 求出的相关系数为 R_1 , 用 $\{X'_i, Y'_i\}$ 求出的相关系数为 R_2 . 当 R_1 和 R_2 中有一个大于表中的起码值时, 就认为存在回归直线, A, B 是有意义的. 而对情况 (1), R_1 和 R_2 都不可能大于表中的起码值.

取前沿时间 $\tau = 4-10\text{min}$ 的事件, 两月为一组进行计算. 考虑到季节变化的特点, 分组次序是: 2—3 月, 4—5 月, …… , 12—1 月. 平均每组事件数大约是 30. 本文所有各组的相关系数都满足上述条件.

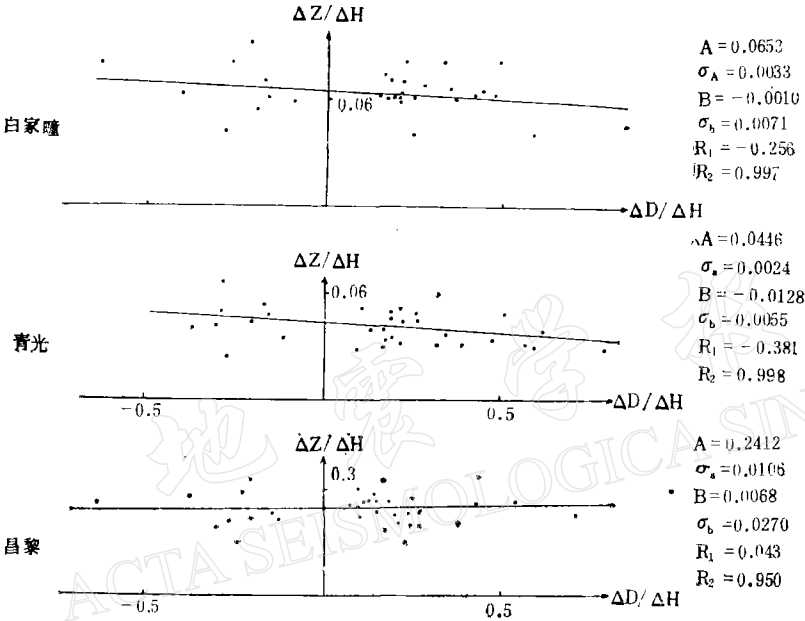


图 2 回归分析结果

Fig. 2 Results of regression analysis

图 2 是 1976 年 6—7 月三个台的回归分析结果. 各台 A, B 和 σ_a, σ_b 的均值列于表 1.

表 1 A, B 及它们的标准差的平均值

Table 1 The mean values of A, B and their standard deviations

| 台 站 名 | \bar{A} | $\bar{\sigma}_a$ | $\bar{\sigma}_a/\bar{A}$ | \bar{B} | $\bar{\sigma}_b$ |
|-------|-----------|------------------|--------------------------|-----------|------------------|
| 昌 黎 | 0.242 | 0.0124 | 5.1% | 0.029 | 0.030 |
| 青 光 | 0.044 | 0.0029 | 6.6% | -0.0010 | 0.0063 |
| 白 家 疃 | 0.058 | 0.0033 | 5.7% | 0.0002 | 0.0071 |

四、结 果

1. 转换函数 A, B 随时间的变化

A , B 随时间变化的曲线示于图 3. 图中的竖直线段为误差棒, 表示 σ_a 和 σ_b 的大小. 由图 3 看出: 昌黎和青光台的 A 值在唐山地震前后有明显的负异常. 异常的幅度昌黎约 0.05, 相对变化量约 18%; 青光约 0.01, 相对变化约 21%. A 值的标准差一般在 4%—7%, 因此异常量级已超过两倍标准差. 昌黎异常大约从 1973 年秋开始, 持续到 1977 年冬天, 约四年多. 青光可能从 1975 年下半年开始, 到 1977 年春, 至少持续一年多. 白家疃无超过两倍标准差的明显异常. 三个台的 A 值似乎都有隐含的季节变化, 因此在图 3 中又画出了 A 的十二个月滑动平均值.

三个台的转换函数 B 均无明显异常. 青光、白家疃的 B 值在零线附近摆动, 昌黎的 B 值虽为正, 但亦很小.

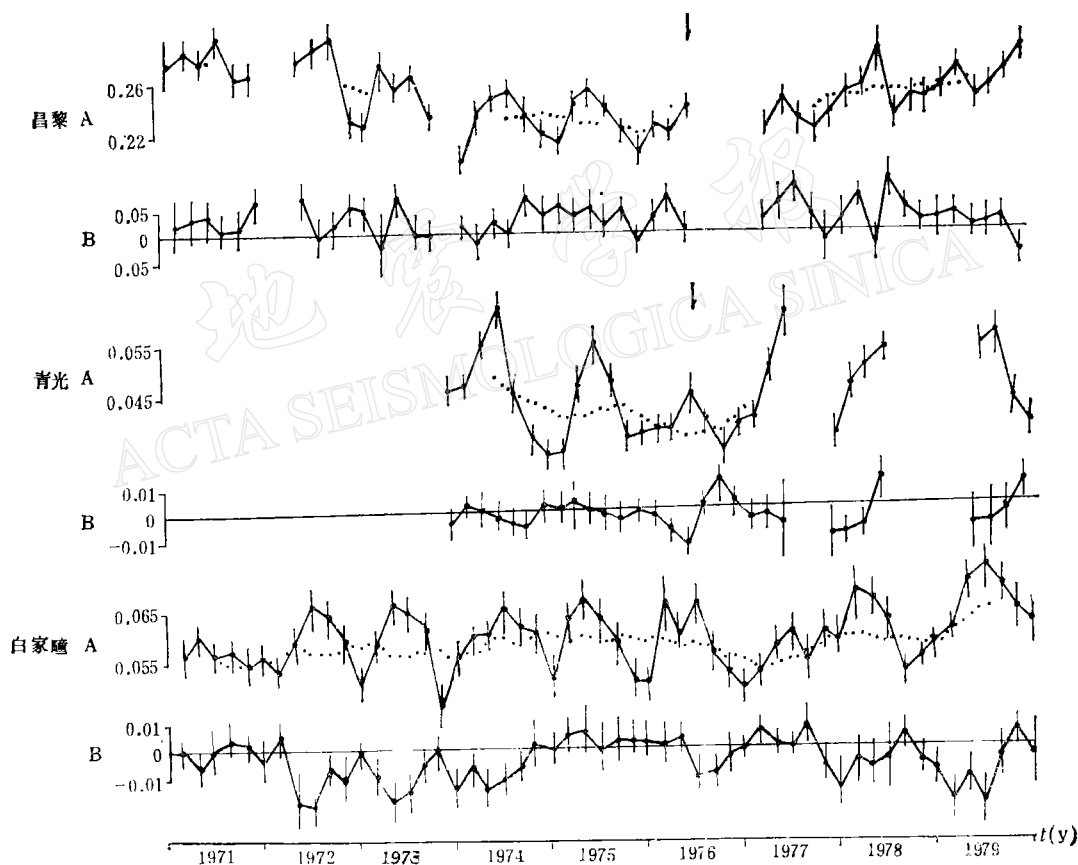


图 3 转换函数 A , B 的时间变化

Fig. 3 Time changes of transfer functions A , B

$B \equiv 0$ 为 $\Delta Z/\Delta H$ 均值与 A 值等效的充分必要条件. B 值等于零或很小, 说明 ΔD 对 ΔZ 的影响等于零或很小, 感应矢量指向或大体指向磁北. 加之 B 并无明显的异常变化. 这两个情况表明: 对这三个台来说, $\Delta Z/\Delta H$ 均值与 A 值是近于等效的. 作者做出的 $\Delta Z/\Delta H$ 均值曲线与 A 值曲线十分相似也进一步说明这一点. 2—20min 事件的 A 值图形也大致相同. 限于篇幅就不列出了.

2. 异常幅度与前沿时间 τ 的关系

把事件按前沿时间 τ 分类.对4—6min和7—10min 的两类,分别计算 $\Delta Z/\Delta H$ 的两月均值;对 2—3min 和 11—20min 的两类,分别计算 $\Delta Z/\Delta H$ 的四个月均值.发现它们异常变化的幅度与 τ (也就是与周期)有关(见图 4).昌黎和青光 4—6min 和 7—10min 事件的 $\Delta Z/\Delta H$ 均值都出现了异常,7—10min 的异常最明显;11—20min 的一类似乎有些变化,但不明显;而2—3min 的一类却看不出明显异常变化.昌黎 7—10min 的异常幅度达 22%,平均每组事件数 \bar{N} 是 11.4—6min 的异常其次,约 14%, \bar{N} 是 20。2—3min 的 \bar{N} 约 14.11—20min 的 \bar{N} 约为 10。

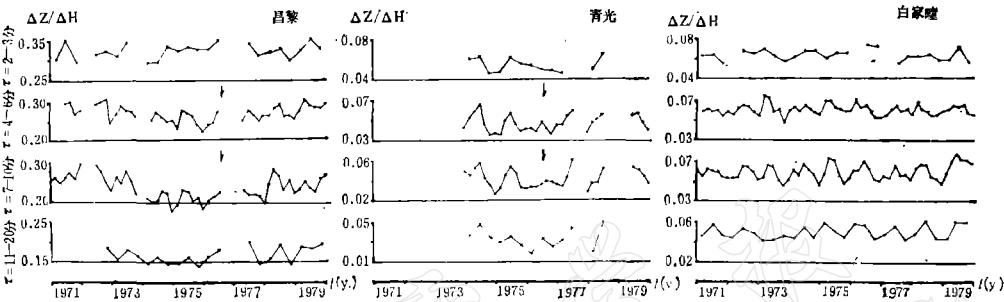


图 4 各种 τ 值的 $\Delta Z/\Delta H$ 均值曲线
Fig. 4 Curves of $\Delta Z/\Delta H$ means for Various τ

3. 感应矢量方向的变化

(3) 式表明：短周期地磁变化的磁场矢量有限制在一个平面内的趋势，这个平面反映地下导体界面的产状,它的倾向和倾角可用平面的法线矢量来表示.为此,用“正常”和“异常”年份 A, B 的年均值计算出地磁感应矢量的方向,列于表 2,以判断在这两种年份它们的方向是否有明显的变化.表中的 α 是法线矢量的磁方位角, $\alpha = \text{tg}^{-1}B/A$. I 是法线矢量与垂直向上方向的夹角, $I = \text{tg}^{-1}\sqrt{A^2 + B^2}$,它反映地下导体界面的倾角.误差 $\Delta\alpha$ 和 ΔI 是用表 1 中的 σ_a 和 σ_b 计算出来的.表 2 中三个台的 α 虽有变化,但都未超

表 2 感应矢量方向的变化
Table 2 Changes in directions of inductive vectors

| 台 站 | 时 间 | α | I | $\Delta\alpha$ | ΔI |
|-------|---------------|----------|-------|----------------|------------|
| 昌 黎 | 1971.1—12 | 5.6° | 15.3° | 7.3° | 0.86° |
| | 1975.8—76.7 | 6.6° | 12.6° | | |
| | 1978.12—79.11 | 4.2° | 14.2° | | |
| 青 光 | 1974.2—75.1 | 0.4° | 2.7° | 8.3° | 0.17° |
| | 1976.2—77.1 | —0.5 | 2.2° | | |
| | 1978.1—79.12 | 1.4° | 2.7° | | |
| 白 家 疃 | 1971.2—72.1 | 2.4° | 3.2° | 7.0° | 0.10° |
| | 1976.2—77.1 | 0.2° | 3.3° | | |
| | 1978.2—79.1 | —4.0 | 3.4° | | |

过误差范围;但昌黎台和青光台 I 的变化却是明显的,超过各自标准差的二倍。昌黎台 I 的变化达 2.7° 。

五、结论和讨论

由于至今还未见发表多个台转换函数在震前变化的震例,因而本文的一些结果涉及许多有待深入研究的问题。从实际资料可归纳出以下几点认识:

1. 昌黎台和青光台的转换函数 A 的变化幅度,已超过了它的标准差的两倍,也大大超过采用标度值所可能带来的偏差,而且持续了相当长的时间,因此可以认为异常变化是明显的、确实的。转换函数 B 没有明显的异常,这可能与 B 值近于零而 σ_B 又比较大有关。

2. 三个台 A 值的时间变化曲线,初步揭示了转换函数异常的某些时、空特点。第一,异常时间相当长,在昌黎台至少有四年多;第二,异常是在地震之后才出现恢复趋势;第三,距余震区近的台站异常开始得早,持续时间长,恢复得晚;第四,震中距 110 km 的青光台仍在转换函数的异常区之内,而震中以西 170 km 的白家疃台,按现在的误差水平和认识水平,看不出明显异常,表明它可能处于异常区边缘或边缘之外。由图 1 看出,余震区是一个北东向的长椭圆,青光处于椭圆长轴延伸线附近,离余震区近;白家疃处于椭圆短轴延伸线附近,离余震区远。看来转换函数异常的范围,可能不是依赖于到主震震中的距离,而是取决于到余震区边缘的距离。假若唐山地震转换函数的异常区也是椭圆形,在现有的信噪比条件下,该区域的短半轴 b 可能不超过 170 km;第五,从图 4 看出异常幅度随周期分异的现象,它表明不是所有深度都有明显的异常变化。在 $\tau = 7-10\text{min}$ 对应的深度上变化最大,而地壳的浅部和地壳更深部的地方变化却不大显著。这说明电导率的变化是发生在一定的深度范围内。

3. 表 2 列出的数据表明:青光和白家疃地下的电性结构比较均匀且接近于水平分层,倾角只有 3° 左右;昌黎台地下导体的界面是倾斜的,倾向北略偏东(按地磁坐标),倾角达 15° 。这一结果与陈伯舫(1974)^[7]、祁贵仲等(1981)^[8] 的结果符合。青光可能处于地下高导层隆起区顶部附近,昌黎则处于隆起区北侧的斜坡上。在地震的孕育过程中,这一斜坡的倾角减小了 2.7° 。青光地下导体界面的倾角也减小了 0.5° 。

对地磁短周期变化转换函数的异常,有两种解释。一种解释认为地下导体界面斜度的变化引起了转换函数的变化。这种导体界面斜度的变化可能是局部的,仅与地震有关;也可能与较大范围的构造活动有关,只是在此构造活动过程中发生了地震,如文献[1]中提到的。此种电性结构变化的深度可以从地壳至上地幔。电性结构变化的原因可能与高导层的隆起、热流活动、板块运动等有关。

力武常次提出另一种解释。按肖尔茨的膨胀模式理论,膨胀区里的水浸入新产生的裂隙,会引起未来震源区及其周围的电导率发生变化。饱和含水岩石标本的室内实验表明,在接近破裂应力时,电阻率可降低一个量级之多。因此,力武常次提出用短周期地磁变化的方法探测地下膨胀区的可能性^[9]。如果转换函数的异常变化起因于膨胀引起的电导率变化,则异常的区域应当是局部的,仅与地震有关,而且电导率变化的深度应当在地壳内。若膨胀区正处在高导层隆起区的斜坡上,也会引起地下导体界面斜度的变化,从而

引起转换函数变化。

究竟哪种解释较为合理?有待于积累更多的多台转换函数变化的震例,进一步分析转换函数异常变化的时、空特点,同时也需积累更长时间的资料,以查明是否有与构造活动有关的长期变化。由于地球内部的电磁感应问题存在“源场效应”,转换函数有季节变化的事实说明源场的空间特征可能影响 A, B 。假若有高空原因引起的变化,那么,由于相距仅 200—300 km 的三个台有着共同的源场,这种变化应有一致之处,可以设法辨认或消除。此外,还需做细致的磁测深工作,较确切地探明 $\tau = 7-10\text{min}$ 的地磁短周期变化所对应的感应深度。尽管对转换函数变化的物理机制尚需深入探讨,但本文中白家瞳无明显的异常变化的事实表明:昌黎和青光的异常变化不是由于三个台共同的外部原因造成的,而可能是由于地下电性结构发生了变化,此变化过程在时间上与唐山地震的发生巧合,说明可能与地震的孕育有关。转换函数存在与地震相关的异常变化的事实,提供了研究地震预报和震源物理的一种新途径,继续进行这方面的研究工作,将会是有价值的。

参 考 文 献

- [1] Yangihara, K., Secular variation of the electrical conductivity anomaly in the central part of Japan, *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, **15**, 1—11, 1972.
- [2] Rikitake, T., Changes in the direction of magnetic vector of short-period geomagnetic variations before the 1972 Sitka, Alaska, earthquake, *J. Geomagn. Geoelec.*, **31**, 441—448, 1979.
- [3] Chen Bofang (陈伯舫), A search for correlation between time change in transfer functions and seismic activity in north Taiwan, *J. Geomagn. Geoelec.*, **33**, 635—643, 1981.
- [4] Miyakoshi, J., Secular variation of Parkinson vectors in a seismically active region of middle Asia, *J. Fac. General Education, Tottori Univ.*, **8**, 209—218, 1975.
- [5] Beamish, D., A geomagnetic precursor to the 1979 Carlisle earthquake, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **68**, 531—543, 1982.
- [6] 中国科学院数学研究所数理统计组,回归分析方法,科学出版社,1974.
- [7] 陈伯舫,渤海西岸的电导率异常,地球物理学报, **17**, 169—172, 1974.
- [8] 祁贵仲,詹志佳,侯作中,范国华,王志刚,白彤霞,渤海地区地磁短周期变化异常,上地幔高导层的分布及其与唐山地震的关系,中国科学, 1981, 7: 869—879.
- [9] Rikitake, T., Crustal dilatancy and geomagnetic variations of short period, *J. Geomagn. Geoelec.*, **28**, 145—156, 1976.

POSSIBLE CHANGES OF EARTH CONDUCTIVITY ACCOMPANYING THE TANGSHAN EARTHQUAKE OF 1976

GONG SHAOJING AND WU ZILANFENG

(*Tianjin Seismological Bureau*)

Abstract

Time changes in transfer functions of short period geomagnetic variations are studied in order to investigate the possible anomaly of earth conductivity in relation to the Tangshan earthquake of 1976. The results indicate that there are appreciable negative anomalies in the transfer functions A at two observatories located respectively 5 km and 60 km from the aftershock area. But the anomalous change of A is not obvious at another observatory, 145 km to the west of the aftershock area. If anomalous change of earth conductivity exists, then the depth of greatest change is that corresponding with the period of 14—20 min., and the inclination of the boundary of the conductor under ground may have decreased about 2.7° at Changli.