

田山, 王建国, 徐学恭, 董洪军, 崔晓峰, 马骥. 2009. 大地电场观测地震前兆异常提取技术研究. 地震学报, 31(4): 424-431.

Tian Shan, Wang Jianguo, Xu Xuegong, Dong Hongjun, Cui Xiaofeng, Ma Ji. 2009. Research on the technique of extracting seismic precursory anomaly from telluric electric field observation. *Acta Seismologica Sinica*, 31(4): 424-431.

大地电场观测地震前兆异常 提取技术研究^{*}

田 山^{*} 王建国 徐学恭 董洪军 崔晓峰 马 骥

(中国天津 300201 天津市地震局)

摘要 首都圈地区布设的 11 个大地电场观测台于 2001 年 9 月已正式投入观测, 现已积累了近 7 年的资料. 使用大地电场观测系统中同一测向的长、短极距测值的比值方法, 对其中的 10 个台和邻区 2 个台的资料进行了处理, 发现该方法能够较好地排除来自大地电场及自然电场远场的变化信息, 突出了可识别的地震前兆异常信息. 研究结果表明, 2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_{\text{S}}5.1$ 地震前, 多数台站的地电场观测资料出现比值异常变化, 从而证明了这次地震前地电场观测存在着短临异常前兆变化信息, 只是由于这些信息混杂于正常大地电场变化的背景中, 使用常规的分析方法无法识别和提取. 研究结果还表明, 地电场观测的台址条件和台址到震中区的距离与震前地电场比值异常出现的时间和幅度有关.

关键词 地电场 短临前兆 异常提取 多极距 比值

文章编号: 0253-3782(2009)04-0424-08 中图分类号: P315.72⁺ 文献标识码: A

Research on the technique of extracting seismic precursory anomaly from telluric electric field observation

Tian Shan^{*} Wang Jianguo Xu Xuegong Dong Hongjun Cui Xiaofeng Ma Ji
(Earthquake Administration of Tianjin, Tianjin 300201, China)

Abstract: Eleven stations for telluric electric field observation have been running normally in the area around the capital of China since September, 2001. Up to now the data have been accumulated for nearly seven years. In this paper, we processed the data from 10 stations in the capital region and 2 other stations in its neighbor area by finding the ratio of long to short electrode spacing observation in the same measuring direction. The result indicates that this method can effectively exclude disturbing information from telluric electric field and from remote spontaneous electricity field, and then identify seismic precursory anomaly. Many stations observed short-term anomalous variations before the $M_{\text{S}}5.1$ Wen'an earthquake of 4 July 2006, but researchers could not identify and distill them

* 基金项目 天津市科技支撑计划重点项目(09ZCKFSF00700, 07ZCGYSF03100)和“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01B02-04-03)资助.

收稿日期 2008-07-26 收到初稿, 2008-12-27 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: ts520739@sina.com; tianshan@mail.tjdzj.com.

because they were merged into background variation. The study result also indicates that the appearing time and variation amplitude of the precursory anomaly have bearing to the station condition and station-to-epicenter distance.

Key words: telluric electric field; short-term precursory; anomaly pick-up; multi-spacing electrodes; ratio

引言

地电场分为大地电场和自然电场两部分,是重要的地球物理场之一。大地电场是太阳、太阴活动和地球自转及星际磁场等引起的地球外部的各种电流系,在地球内部感应产生的分布于整个地球表面或较大区域的变化电场;自然电场是地下局部介质的物理、化学变化引起的局部性电场及地下介质电性结构变化引起的地电场变化。

国内外已开展了大地电场观测用于地震预测的研究,并记录到了部分地震电信号(Varotsos *et al*, 2005; Dologhiu, 1993; Telescal *et al*, 2004; 黄清华, 刘涛, 2006; 马钦忠等, 2004; 赵玉林等, 2001)。从理论研究和室内岩石力学实验的结果出发,不少地震学家预言地震前有异常电信号存在,但这些信号混杂于正常大地电场变化的背景中不易识别。显然,寻找分离正常变化与异常信号的方法是大地电场法预报地震的一项重要内容。

自从中国地震局实施“首都圈示范工程”项目以来,在北京周围地区(首都圈)已经建立了11个地电场观测台站:昌平、延庆、通州、昌黎、兴济、新乐、阳原、宝坻、静海、白家疃和十三陵。台站的布极方式有十字型和L型,观测极距在磁东西、磁南北和北东(或北西)方向布设,每个测向都分别设置长、短两道观测极距(图1),观测数据的采样密度为每分钟一个观测值。资料分析表明,由于观测系统的传感器——电极存在长期稳定性问题,致使长趋势(数月以上)资料在系统运行一段时间后产生快速的、大幅度的升降变化,需更换新电极才能恢复正常。但短期(数天以内)资料一般不存在这一现象。因此,地电场观测的短期变化资料中可能蕴含地震前兆信息。

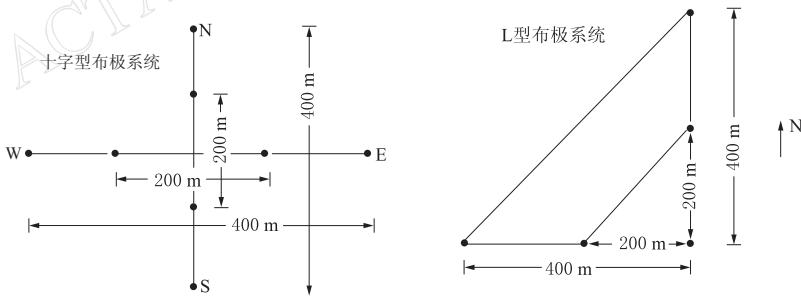


图1 大地电场观测系统布极方式示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of electrode arrangement on the system of telluric electric field

如何从观测资料中提取可靠的地震前兆,是地震短临预报的关键技术之一。以往的观测资料处理方法大都采用数据处理的各种数学方法,常常忽略了各前兆观测手段的内在特性——物理基础,得到的所谓异常信息往往不具可操作性和重复性。因此,需要对所观测前兆资料的物理内涵进行分析和研究,从而建立具有明确物理意义的资料处理方法。本文

给出了一种较为简单有效的方法——长、短极距测值的比值法.

1 地电场观测长、短极距比值原理

地电场是地球内部的电场，由大地电场和自然电场所组成。大地电场主要是地球高层大气中的各种电流体系(电离层、磁层、对流层的电流系等)在地球内部所产生的感应电场；自然电场是地壳中的某些物理、化学作用引起的电场。

大地电场随时间变化、大尺度变化的主要部分与变化磁场的起源基本是一致的，所以前者的谐波成分与后者几乎可以一一对应。与地磁场一样，在这些谐波成分中，主要是日变化。起源于磁场变化的大地电场按一定形式分布于广大地区，有其区域特征，称为区域电场。

自然电场是地球表层局部电场的一种。常见的自然电场主要有：①接触扩散电场，岩层、金属矿层、含水地层与矿化水等之间的接触是地壳中形成局部电场的重要原因；②电化学电场，即岩石的电化学活动形成的电场，主要是氧化还原电场；③过滤电场，也叫渗流电场，是地下水在多孔的岩石中流动所形成的电场。

多数学者认为，与地震有关的自然电场异常成因是因为在孕震体及其周围，受统一应力场变化的影响，地下流体的冲流、过滤、定向作用使自然电场出现异常(马钦忠等，2004)。

电磁场满足麦克斯韦(Maxwell)方程组，这组方程表达了电磁场的场矢量与电荷、电流之间的关系。若采用矢量微分算符，用SI单位制，这组方程为

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

式中， $\nabla \cdot$ 为散度算子， $\nabla \times$ 为旋度算子， H 为磁场强度， J 为电流密度， D 为电通量密度， E 为电场强度， B 为磁通密度， ρ 为电荷密度， t 为时间。在采用其它单位制时，方程中有些项将出现一常数因子，如 4π 、光速 c 等。

若对式(1)等号两边取散度，左边因对旋度取散度恒为零，并由式(4)消去 D ，可得

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

式(5)表明，场中任一处流出的电流必等于该处的电荷减少率，这就是电荷守恒定律。

当有介质存在时， E 和 B 都与介质的性质有关。要完整地说明宏观电磁现象，除了上述 4 个方程外，还要加上下面 3 个关系式，为各向同性均匀电磁介质中表示场矢量之间关系的本构方程，由介质性质所决定，表示如下：

$$D = \epsilon E \quad (6)$$

$$H = B/\mu \quad (7)$$

$$J = \sigma E \quad (8)$$

式中, ϵ 为电容率(介电常数), μ 为磁导率, σ 为电导率。式(8)又称为欧姆定律的微分形式。在简单情况下, 当介质为均匀、线性、各向同性时, 这些参数为常数。

麦克斯韦方程组与电磁介质的本构方程联立, 使未知量的个数与独立方程的个数一致, 成为电磁场方程的限定形式。它全面描述了电磁场矢量(包括电荷及电流)的空间分布和时间变化所遵循的规律。

目前国内布设的地电场为多极距观测系统。利用多极距地电场观测来排除观测站附近噪音的方法, 1982 年始于希腊雅典大学“VAN”小组(Varotsos, Alexopoulos, 1984)。其方法是在 EW 方向和 NS 方向布设多道长、短不一的电极距(图 1)。当来自台站附近的噪音, 如电极极化噪音、降雨引起的台站附近地下介质电性局部不均匀性的噪音、温度变化引起的噪音、人为噪音的干扰噪音等在不同长、短极距上都会记录到, 但这些噪音在同方向不同长、短的极距上所呈现的信号形态特征是不同的; 而大地磁场的感应电场会在所有台站的长、短极距上同时被记录到。

当地电场的场源距观测点足够远时, 在各向同性的均匀连续介质中, 同一方向的长短极距观测到的地电场的强度应该是一致的。例如图 2(马钦忠等, 2004) 所示的长极距 AB、短极距 A'B' 上, 长极距上所观测到的电场强度为 E_{AB} , 短极距上所观测到的电场强度分量为 $E_{A'B'}$, 其表达式为

$$E_{AB} = \frac{J_{AB}}{\sigma_{AB}} (V_A - V_B) / L_{AB} \quad (9)$$

$$E_{A'B'} = \frac{J_{A'B'}}{\sigma_{A'B'}} = (V_{A'} - V_{B'}) / L_{A'B'} \quad (10)$$

式中, V_A , V_B , $V_{A'}$ 和 $V_{B'}$ 分别表示各测量电极的电位; L_{AB} , $L_{A'B'}$ 分别表示相应的长、短电极距的长度; J_{AB} , $J_{A'B'}$ 分别表示相应长、短电极距介质的电流密度; σ_{AB} , $\sigma_{A'B'}$ 分别表示相应长、短电极距内地下介质的电导率; E_{AB} , $E_{A'B'}$ 分别表示相应长、短电极距的电场强度。

由式(5)可知, 当地下介质各向同性、均匀、连续以及被测场源足够远时, 则有

$$J_{AB} = J_{A'B'} \quad \sigma_{AB} = \sigma_{A'B'} \quad E_{AB} = E_{A'B'} \quad (11)$$

式(11)表明大地电场长、短极距测值的比值是一个无量纲的常量。

实际观测结果表明, 由于测量电极的极化电位不同, 以及测量区域的场地条件的差异等原因, 使得这一比值在不同的台站、不同的测向均有所不同, 但观测系统稳定后, 其比值基本稳定在一个固定的数值上变化(图 3)。因此, 利用这一特征, 可以从中识别和提取地震前兆信息。需要指出的是, 比值法得到的异常信号还不一定是地震前兆信息, 测区附近的降雨、浇地、雷电、漏电和电极极化电位的改变等都可使大地电场的比值产生变化, 只有通过与地电场的原始观测资料和观测条件、环境改变情况等对比分析, 才能对比值数据序列中的异常信息作出正确的分析和判定, 最终识别和提取地震前兆信息。

2 资料处理与异常提取方法

2001 年底首都圈地区的大地电场项目正式投入观测以来, 已积累了近 7 年的电场观测

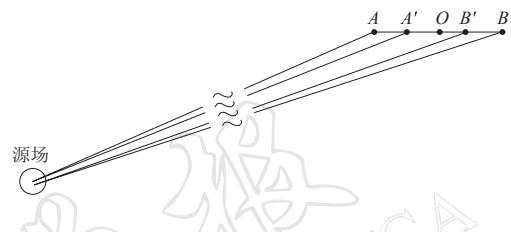


图 2 多极距地电场观测系统(马钦忠等, 2004)

Fig. 2 Multi-electrode-spacing measuring system of telluric electric field

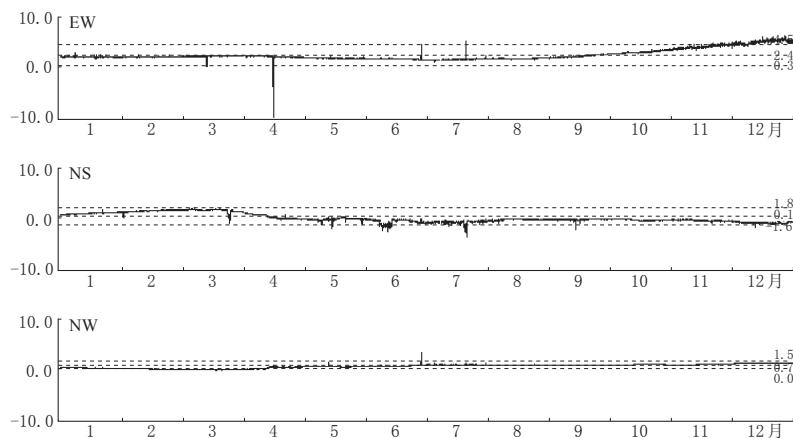


图 3 2005 年宝坻台大地电场长、短极距比值的正常变化

Fig. 3 Normal variation of the ratio of long to short electrode spacing measurements of telluric electric field

资料。在此期间于 2006 年 7 月 4 日河北文安县 ($38.9^{\circ}\text{N}, 116.3^{\circ}\text{E}$) 发生了 5.1 级地震，这是该时段首都圈地区发生的最大地震，地震前、后用以往的资料分析处理方法均未发现电磁观测资料中有异常变化。本文用地电场的长、短极距测值的比值法，处理了首都圈地区 10 个台（白家疃未收集到资料除外）及邻区 2 个台（山东安丘、辽宁新城子）的资料，在逐一排除了各种因干扰产生的变化后，从中提取出文安地震前的电场观测的短临前兆异常信息。首都圈地区大地电场观测台站的空间分布如图 4 所示。

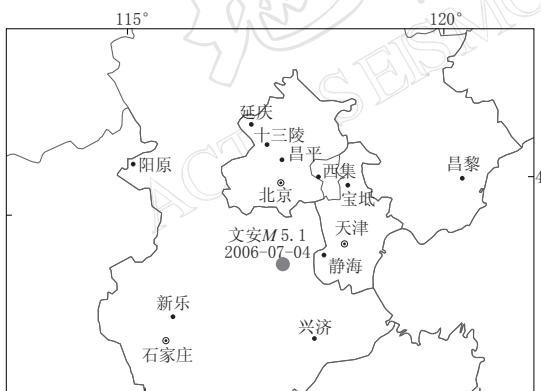


图 4 首都圈电场观测台分布图

Fig. 4 Observatories in the region around the Capital of China

的短临异常信息，有效排除了地电场观测资料中来自空间场源（太阳黑子活动、磁暴、电离层、磁层、对流层的电流系等）在地球内部感应而产生的电场变化，减小了远源自然电场对观测的影响。

对于图中出现的变化“事件”，经过与原始观测资料对比分析，从中剔除了来自局部地区的雷电、降雨、浇地等环境因素的干扰和观测系统（主要是电极）的长期不稳定造成的干扰

由于大地电场数字观测提高了对样本的采样密度（每分钟 1 组测值），使得观测资料中蕴含了更加丰富的前兆信息，但分钟值观测数据中的扰动事件（含各种随机干扰）较多。为了减少随机扰动事件对处理结果的影响，本文对地电场观测资料的比值处理采用了时均值。通过对上述 12 个台的地电场观测资料的 3 个测向分别进行长、短极距的比值计算后，发现有 12 个台项在 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震前出现了异常变化（图 5）。

由图 5 可见，地电场的长、短极距测值的比值结果能够比较清晰地展示地震前

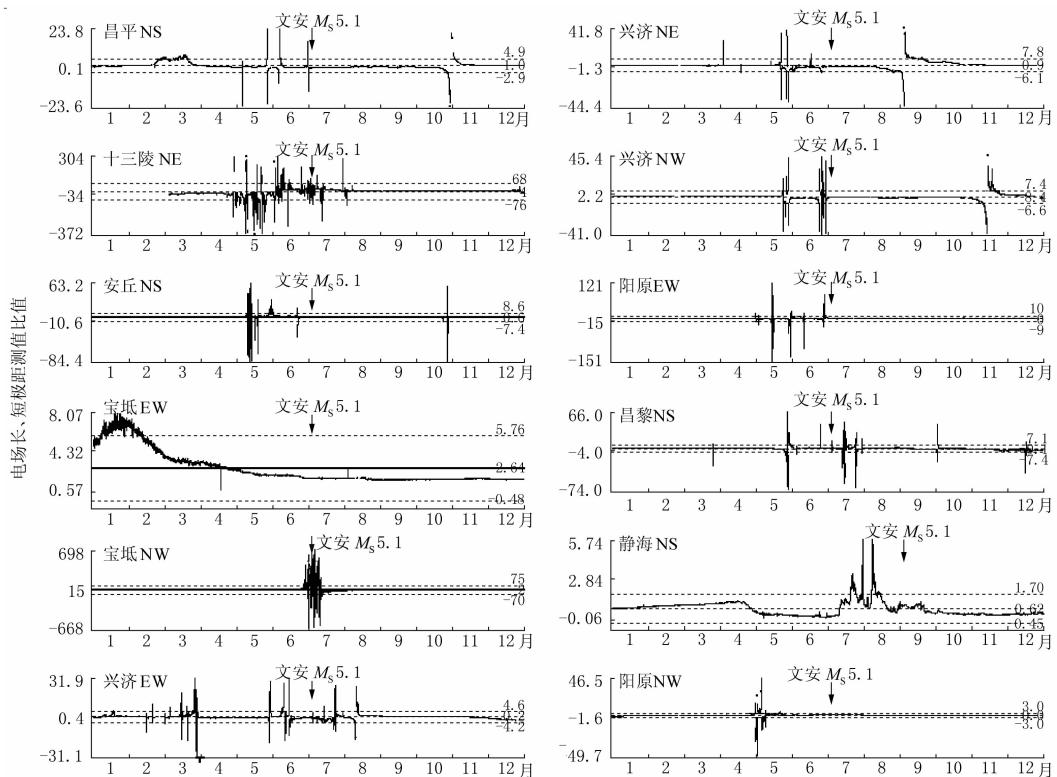


图 5 2006 年地电场长、短极距比值的异常变化

Fig. 5 Variation of the ratios of long to short electrode spacing measurements

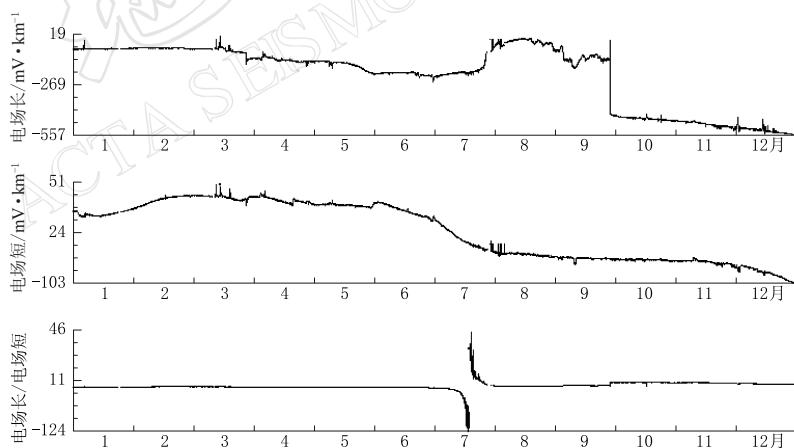


图 6 2002 年通州台 NW 向电场比值变化与原始数据曲线

Fig. 6 Variation of the ratio (lower) of NW telluric electric field
and the raw data (upper and middle) at Tongzhou station

变化(图 6). 余下的经过多年资料检验无重复变化形态特征、具有一定物理意义的变化“事件”作为地震前兆信息. 文安 5.1 级地震前各台长、短极距测值的比值前兆异常信息见表 1.

表 1 文安 5.1 级地震前地电场观测台站异常特征统计表

Table 1 Anomalous characteristics of telluric electric field before Wen'an M_s 5.1 earthquake

台名	震中距 /km	异常起始时间	比值变化异常形态	持续时间 /d
静海	48	2006-05-28	NS 向比值上升, >5	20
兴济	73	2006-05-25	NS 向比值下降, <-5	20
通州	114		无异常	
宝坻	125	2005-11-01	EW 向比值上升, >5 ; 比值曲线变粗	150
宝坻	125	2005-11-01	NW 向比值出现大幅度双向扰动, >5	10
昌平	131	2006-05-10	EW 向比值异向变化过程中曲线变粗	15
十三陵	150	2006-04-15	NS 向出现小幅度的单向扰动, NE 向比值连续 60 天 大幅度双向扰动, >5	60
新乐	156	2006-05-25	NS 向出现小幅度的单向扰动, NW 向 6 月 10 日后 有 20 天比值上升, >5	40
延庆	178		无异常	
阳原	230	2006-04-10	3 个测向在不同时段出现多次较大的比值双向扰动	80
昌黎	253	2006-01-01	NS 向比值双向扰动, EW 向比值曲线变粗	40
安丘	378	2006-05-01	NS 向比值上升, >5	60
新城子	595		无异常	

本文选取了静海、宝坻、通州台 2002 年至今的电场观测资料, 通过对资料进行仔细调查研究, 在原始观测资料中剔除了各类干扰变化, 然后使用比值法处理了以上 3 个台站 2002 年至现在的全部数据, 结果发现除系统原因和局部干扰造成的短时间比值双向大幅度变化外(图 6), 近 7 年的资料中各测向均未出现与文安 5.1 级地震前异常信息相同的变化, 表明该项前兆具有较高的信度.

2001 年 9 月首都圈地区正式投入大地电场观测以来, 该地区发生的 5 级以上地震仅有 1 次, 即 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震. 上述 3 个台站的资料研究结果表明, 该区发生的震级为 M_{L4} 左右地震前, 该项观测手段无明显前兆异常信息.

3 震前异常特征分析

由地电场多极距观测系统同一测向的长、短极距测值的比值原理及对上述 12 个地电场台站地电场观测资料的分析表明, 该方法可以有效地排除来自大地电场的正常变化以及自然电场的远场变化, 从而可以甄别出地震前源自孕地震区的地电场异常前兆信息, 并对其变化特征通过震例知识的积累逐步加以认识和提高. 2006 年 7 月 4 日文安 M_s 5.1 地震前首都圈地区地电场观测异常信号的特征主要表现为:

- 1) 地电场比值前兆异常变化多出现在地震发生前 3 个月内, 多数台的前兆变化特征为异常结束后发震(表 1、图 5).
- 2) 异常变化形态多为连续出现比值趋势升高(或降低, 绝对值 >5) 的变化, 以及比值在时间上出现离散度变大(时间序列曲线变粗)的地电场异常前兆信号. 表明此时地电场测区内连续出现来自于震源区的或附近断层构造活动产生的不稳定电流场变化.
- 3) 地电场的比值出现单一的大幅度双向快速升降变化, 一般是由系统的不稳定造成的, 不是地震前兆信息. 但在短时间内连续多次出现这一变化, 则可能与地震前兆有关.

4) 从地电场观测原始资料中发现同一测向的观测数据有长、短极距测值出现异向变化的形态, 也是造成比值产生双向大幅度变化的原因之一。目前对该变化产生的原因尚缺乏清楚地认识, 还需作进一步的模拟试验和理论研究。

4 讨论与结论

通过对首都圈地区及邻区的 12 个地电场台观测资料于 2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_{\text{S}}=5.1$ 地震前后(1 年资料), 以及对静海、宝坻、通州台 2002 年至今的全部资料的分析, 得到如下初步结论:

1) 本文所建立的地电场多极距观测系统的长、短极距测值的分析处理方法是有理论依据和观测基础的分析方法。该方法可有效排除来自外空场电磁系感应的大地电场变化和自然电场的远场变化, 使处理后的数据序列比较简洁, 从而突出了自然电场的近场信息和来自地震孕育过程中的断层构造活动信息, 简化了震电信息的识别和提取方法。使得识别近场的地电场干扰信息和震前地电场资料中的异常前兆信息较为容易和简捷, 由此可建立比较有效的地电场观测的地震前兆短临异常的识别与提取技术。

2) 震前地电场观测资料中能否观测到地震前兆异常信息, 是与地电台站的台址条件有关的。基岩上覆盖层较厚的通州、延庆台没有记录到异常信息, 而在同一构造体系内的安丘台 NS 向记录到可能的异常变化; 离震中区最近的静海台和兴济台虽然存在基岩上覆盖层较厚的情况, 但在震前也出现了震电异常信息; 宝坻台位于活动性较强的宝坻深大断裂的北部 3 km 处(邵永新, 王俊国, 2008), 其异常出现的时间最早, 持续时间最长, 异常幅度也最大。由此可以证明, 震前的地电场异常变化不一定全部来自于震中区, 处于同一构造区域的与发震断层相邻的构造在地震前也产生了相应的变化, 只是应力的焦点在震中区。

以上认识基于地震的物理机制与地电场研究的理论基础和观测技术, 由于目前地电场观测资料积累的时间不长, 相关的震例资料也不多, 因此本文提出的异常识别方法和提取技术只是初步的, 尚有待于更深入的研究和更多地震事件的检验。

参 考 文 献

- 黄清华, 刘涛. 2006. 新岛台地电场的潮汐响应与地震[J]. 地球物理学报, **49**(6): 1745–1754.
- 马钦忠, 冯志生, 宋治平, 赵卫国. 2004. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析[J]. 地震学报, **26**(3): 304–312.
- 邵永新, 王俊国. 2008. 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震短临预测的实践[J]. 地震, **28**(2): 108–114.
- 赵玉林, 卢军, 张洪魁, 钱卫, 钱复业. 2001. 电测量在中国地震预报中的应用[J]. 地震地质, **23**(2): 277–284.
- Dologlou E, 1993, A three year continuous sample of officially documented predictions issued in Greece using the VAN method[J]. *Tectonophysics*, **224**: 189–202.
- Telesca L, Colangelol G, Hattori K, Lapenna V. 2004. Principal component analysis of geoelectrical signals measured in the seismically active area of Basilicata Region (southern Italy)[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**: 663–667.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I[J]. *Tectonophysics*, **110**: 73–98.
- Varotsos P, Sarlis N, Skordas E, Tanaka H, Lazaridou M. 2005. Additional evidence on some relationship between seismic electric signals and earthquake source parameters[J]. *ACTC Geophysica Polonica*, **53**(3): 293–298.