

马钦忠. 2008. 地电场多极距观测装置系统与文安 $M_s5.1$ 地震前首都圈地电场异常研究. 地震学报, **30**(6): 615-625.
Ma Qinzong. 2008. Multi-dipole observation system and study on the abnormal variation of the geoelectric field observed at Capital Network before the 2006 Wen'an, Hebei of China, $M_s5.1$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(6): 615-625.

地电场多极距观测装置系统与文安 $M_s5.1$ 地震前首都圈 地电场异常研究^{*}

马钦忠[†]

(中国上海 200062 上海市地震局)

摘要 2006 年 7 月 4 日河北文安县发生了 $M_s5.1$ 地震, 有 6 个地电场观测台布设在北京周围. 本文阐述了地电场多极距观测系统的噪音识别原理及其在地电场数据分析中的应用方法. 通过对首都圈 6 个地电场台观测资料的研究分析, 在所选出的众多震前地电场异常信号中逐一排除, 最后选定的 5 组地电场异常信号基本上被认为是震前地电场前兆异常信号. 结果表明: ① 文安 $M_s5.1$ 地震前存在着地电场异常前兆信号; ② 文安地震前地电场异常前兆信号的出现存在着“敏感点”效应; ③ 地电场异常前兆信号在不同的台站存在着不同步出现的现象, 并且异常结束至发震时间间隔也不同; ④ 离震中区最近的宝坻台记录到的震前地电场异常幅度较小, 而离震中区较远的昌黎台记录到的震前地电场异常幅度则较大.

关键词 文安地震 地电场 多极距观测 信号识别

文章编号: 0253-3782(2008)06-0615-11

中图分类号: P315.72⁺2

文献标识码: A

Multi-dipole observation system and study on the abnormal variation of the geoelectric field observed at Capital Network before the 2006 Wen'an, Hebei of China, $M_s5.1$ earthquake

Ma Qinzong[†]

(Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China)

Abstract: On July 4, 2006, an $M_s5.1$ earthquake occurred in Wen'an county of Hebei Province, near Beijing. Six geoelectric field monitoring stations have been in operation for several years around the Beijing area to examine the relationship between electric field changes and earthquakes. This paper firstly explains the principle of the eliminating noise method by using multi-dipole observation system of the geoelectric field. Then the data observed at the stations are

* 基金项目 地震科学联合基金(106079)资助.

收稿日期 2007-04-25 收到初稿, 2008-09-25 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: mqz1234@sina.com

studied and a lot of abnormal signals preceding the Wen'an earthquake are selected, of which five abnormal signals of the geoelectric field are finally recognized as the precursory signals. The result shows that: ① there probably exists the precursory signals of the geoelectric field preceding the Wen'an earthquake; ② there are sensitive sites in the spatial distribution of the abnormal variation of the geoelectric field before the quack; ③ the anomalous signals do not appear synchronously, and their durations are not same at different stations; ④ the amplitudes of the abnormal signals recorded at Baodi station are small, but large at Changli station, while the latter is farther from the epicentral area than the former.

Key words: Wen'an earthquake; geoelectric field; multi-dipole observation; signal recognition

引言

地电场观测和地磁场观测,都是地球物理场观测的重要组成部分,而且是相互关联最密切的两个分支.然而,由于地电场观测需要埋地电极作为信号接收器,接地条件和接地电极技术要求较高,因而地电场观测规模在世界的普及程度远远低于地磁场的观测规模.近十几年来,由于电极技术的改善,为地电场观测的发展创造了有利的条件.在此基础上,“九五”计划开始实施以来,我国已建成了由 80 个台站组成的数字化地电场观测网,其孔径和覆盖范围之大、台站数量之多,为世界之最.充分利用这个新建台网的数字化观测资料,开展地电场预测地震的研究,对于推动我国地电场观测与研究的深入,具有十分重要的意义.

地电场主要包括大地电场和自然电场.大地电场的场源是高空电离层、磁层、对流层的电流体系的电磁感应,其影响分布于整个地表广大地区.自然电场场源主要来自地球内部(特别是地壳的浅层)由于正负电荷分离而产生的电流体系.与大地电场相比,它们主要影响较为局部的范围.地电场既受源的控制,又受局部介质电性结构的影响,而显示出区域性差异.不过一般说来,自然电场场源的空间尺度与大地电场的场源相比要小得多,因此局部结构所造成的场的空间分布的差异,自然电场比大地电场要大.在地震预测研究中,场量前兆和物质电性参数前兆是地震地电学关注的两类重要参数.自然电场前兆属于场量前兆,而大地电场主要为提取地球介质的物性前兆的方法之一.许多研究表明,在地震预测研究中,自然电场的震前异常现象是值得重视的研究内容之一(Corwin, Morrison, 1977; 赵玉林, 钱复业, 1981; Kinoshita *et al*, 1989; Varotsos *et al*, 1993, Nagao *et al*, 1996; 钱复业等, 1998; 毛桐恩等, 1999; Uyeda *et al*, 2000; Tsutsui, 2002; Orihara *et al*, 2002; Telescal *et al*, 2004; 马钦忠等, 2004; Varotsos, 2005). 因此分析和研究地电场中自然电场变化的特点,是将地电场观测用于地震预测研究的重要分支之一.

物理学中电场是一个矢量.地电场是地球介质中的电场,因此也是矢量.对于矢量的测量,基本的手段是通过测定给定坐标系各坐标分量,即矢量在各坐标轴上的投影,进而确定矢量的大小和方向.在地电场观测中,目前主要研究的是地电场在地球表面投影的部分,可以作为平面矢量,其大小和方位可以通过平面坐标系各分量来确定.地电场分量的

测量,则是在特定的方位上(一般取 NS 和 EW 方位),布设一对电极接收电场信号,用该对电极上测得的电位差与电极距之间的距离的商,作为电场在该方位上分量的度量.当场源随时间变化时,地电场也将随之改变.研究地电场的时间变化特征及其与地震孕育过程的关联,是地震地电学方法的主要任务之一.由于装置系统中必需有接地电极的特殊要求,地电场观测有着与地磁场观测的许多不同的特点.其中,电极电位差的大小及其稳定性,对地电场及其时间变化观测的客观性有重要的影响.此外,与所有的地学观测一样,环境干扰的识别与排除,也必然成为地电场观测及其数据处理的基本技术要求.因此,在我国大规模地电场观测网建设时,广泛采用了以下两类技术措施:① 使用固体不极化电极作为测量电极,并对电极埋设提出特殊的技术要求,以保证电极电位差较小并且具有较好的长期稳定性;② 在观测站布设多极距装置系统,以实现尽可能识别和排除环境干扰,保证地电场观测的客观性.

本文利用了我国首都圈地区 6 个地电场观测站数据,讨论多极距装置系统在地电场数据分析中的应用,并在此基础上对 2006 年 7 月 4 日发生在地电场观测网内的河北文安县(38.9°N, 116.3°E)的 5.1 级地震进行了震例研究.

1 地电场多极距装置系统及其在地电场数据分析中的应用

利用多极距装置开展地电场观测,并实现排除观测噪音的目的,始于 1982 年希腊雅典大学“VAN”小组(Varotsos, Alexopoulos, 1984a, b).他们将地电场的装置系统,由单极距改造为多极距,即在 EW 方向和 NS 方向分别布设多道长、短不一的电极距,组成地电场装置系统.通过比较同一方位上、极距不同的装置系统上的地电场分量的大小,判断地电场是否受到台站附近某种干扰因素的影响.这种方法的原理如图 1 所示.图中假设某个方位上布设了由长极距 AB、短极距 A'B'的装置系统,分别测量电位差 $V_A - V_B$ 、 $V_{A'} - V_{B'}$,通过式(1)和式(2)计算出该方位电场强度分量 E_{AB} 和 $E_{A'B'}$

$$E_{AB} = (V_A - V_B) / L_{AB} \tag{1}$$

$$E_{A'B'} = (V_{A'} - V_{B'}) / L_{A'B'} \tag{2}$$

$$V_{O_i} \propto 1/r_{O_i} \quad i = 1, 2; j = A, B \tag{3}$$

其中, $V_A, V_B, V_{A'}$ 和 $V_{B'}$ 分别表示各点的电位; L_{AB} 和 $L_{A'B'}$ 分别表示相应的电极长度.图中设想了远源和近源两类不同的地电场信号源,并比较了它们对地电场观测信号的影响. r 为地电场信号源到观测点的距离.

由于电位 V 与距离 r 成反比,所以对于具有相同强度的信号源,距离观测点远的,在观测点上两个不同极距上产生的电场强度分量,大小会大体相等,或者差别不大;而距离观测点近的,在观测点上两个不同极距上产生的电场强度分量,大小会差别较大;如果信号源位于测区内部,则两个极距上观测到的地电场分量值甚至会符号相反.因此,采用多极距装置系统观测地电场,可以使地电场观测中相对近源的信号和相

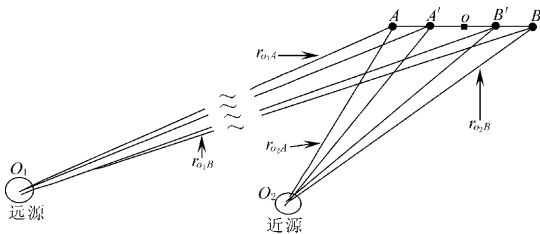


图 1 长、短电极距的比较示意图

Fig. 1 Comparison between long and short electric dipole

对远源信号的特征得到区分. 也就是说, 远源的场是均匀的或准均匀的; 而近源的场, 是非均匀的. 多极距观测装置测量地电场的要求, 实际上是对地电观测站装置系统范围内地电场均匀度的要求.

在前人研究中, 为了提取自然电场震前信息, 噪音识别是一项十分重要的工作. 这些噪音有: ① 工业游散电流流过测区在测量电极上引起的附加电信号; ② 降雨和温度变化引起的台站附近地下介质电性变化导致地电场的局部畸变; ③ 由于电极性能的改变或埋设条件不良而产生的电极本身噪音等. 这些噪音影响的特点是: 它们一般具有近源特征, 即噪音源位于测点不远的位置上, 其在长、短极距上产生的电场分量在测区局部不均匀性明显. 图 2 是这类记录不均匀性的例子. 图中分别给出了在河北昌黎地电观测站记录的 2006 年 4 月 1 日(图 2c)和 6 月 16 日(图 2a, b)EW、NS 和 NE 三个方位上地电场事件的观测结果(用字母“L”和“S”分别表示长、短极距, 虚线框中信号为事件信号). 从图中可以明显看出, 同一方位长、短极距间的地电场分量值相差甚大, 表明所记录的地电场异常信号

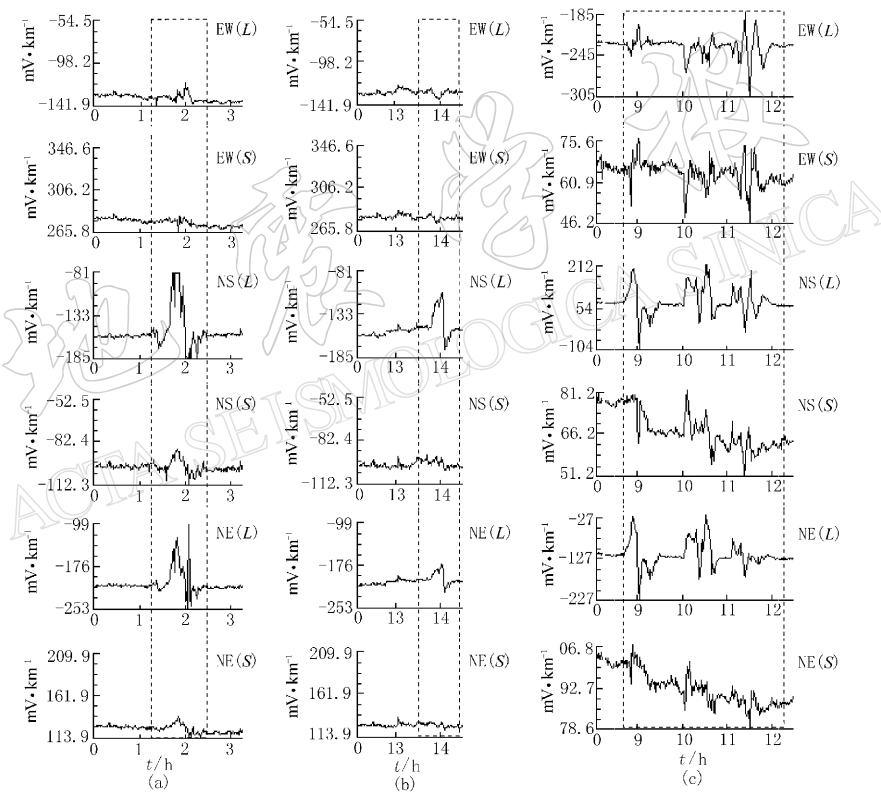


图 2 昌黎台站记录的地电场不均匀性典型示例

(a) 2006 年 6 月 16 日 1 时 30 分—2 时 30 分; (b) 2006 年 6 月 16 日 13 时 30 分—14 时 30 分; (c) 2006 年 4 月 1 日. EW(L)、EW(S)、NS(L)、NS(S)、NE(L)、NE(S) 分别为东西、南北、北东方向的长、短极距

Fig. 2 Typical examples of the nonuniformity of the geoelectric field recorded at a station (a) Geoelectric field event was recorded at Changli station at 1:30—2:30 on June 16, 2006; (b) a geoelectric field event was recorded at Changli station at 13:30—14:30 on June 16, 2006; (c) a geoelectric field event was recorded at Changli station on April 1, 2006. EW(L), EW(S), NS(L), NS(S), NE(L), NE(S) represent the long dipole and short dipole in the direction of east-west, north-south and northeast-southwest, respectively

很可能是一种干扰, 尽管其原因尚无法搞清.

依据上述方法, 把同一方位上两个不同极距上的地电场分量计算结果进行对比, 其相关系数大于 0.9 作为均匀度指标的判据, 以此来识别噪音是否存在. 实际上电极极化不稳定也会在地电场测量中引起附加电位差. 由于极化不稳定的影响只与电极本身及该电极周围的环境有关, 因此长短装置之间不可能同步. 可见电极极化的不稳定必定会导致不同极距的装置系统的地电场分量测量结果存在差异, 反映出地电场均匀度的下降, 它们也可能为多极距装置系统的检测所识别.

一般来说, 大地电场的信号, 属于远源场, 它们肯定能满足均匀度的要求. 自然电场信号分为下述两类情况: ① 来自地下震源区的信号, 其与观测站的距离比测区尺寸大得多, 一般也可划归远源场特征, 也应当能够满足测量均匀度的要求; ② 来自非震影响源的信号, 如上所述, 在测区范围内的或距离测区不太远的, 其信号一般不会满足上述要求, 远区的非震自然电场信号, 一般由于其尺度不会很大, 它们对观测站的干扰程度会相应较小, 可能不会进入我们的视野, 可以不在我们的考虑之列.

大地电场与自然电场之间的区别, 主要在于前者比后者具有更大的空间地电场均匀度, 因而在一个区域的不同的观测点上, 能够获得同步的变化. 图 3 是 2006 年 5 月 6 日北京时间 22 时 30 分至 24 时发生的一次强磁扰(上海地磁台地磁指数 $K=5$)中, 首都圈 6 个地电观测站记录的地电场同步(或反同步)变化的例子. 其中静海站 NE 分量、昌黎站和

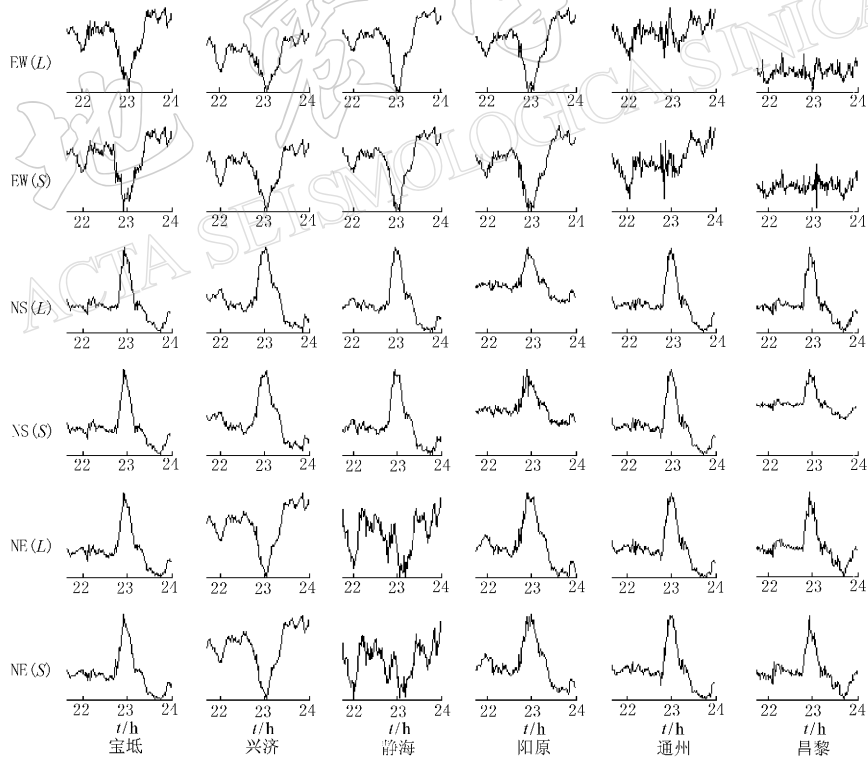


图 3 2006 年 5 月 6 日 23 时宝坻、兴济、静海、阳原、通州、昌黎地电暴异常变化形态
Fig. 3 Abnormal variation form of a geoelectrical storm recorded at 23:00 on 6 May 2006, at the station of Baodi, Xingji, Jinghai, Yangyuan, Tongzhou and Changli, respectively

通州站 EW 分量与其它观测站未能记录同步或反同步,似有较高频干扰存在所致. 这种同步性的产生,与地磁活动所反映的高空异常电流体系的强度有关,也与大地电场的场源空间尺度与观测点的距离有关. 一般说来,它们均比自然电场的场源大得多.

在本文的数据分析中,作者将沿着上述思路,按照多极距装置提供的条件,对那些同方位长、短极距观测结果形态不一致、计算所得的电场变化幅度差异大的地电场信号,视为噪音或干扰. 它们或者是已经查清楚的扰动源,也可能是暂时无法查清的待查疑似干扰源.

2 首都圈地电场观测网及单台记录的异常信号

首都圈地区有 6 个地电场观测站,即宝坻站、静海站、通州站、兴济站、阳原站和昌黎站(图 4). 这 6 个观测站的装置系统布设及其技术参数(方位和极距长短)如图 5 所示. 其中,除宝坻台两条测线采用十字形布设外,其余各观测站均采用三角形布设,并有一个公共电极. 各观测站各方位的长、短极距的尺度比为 2 : 1.

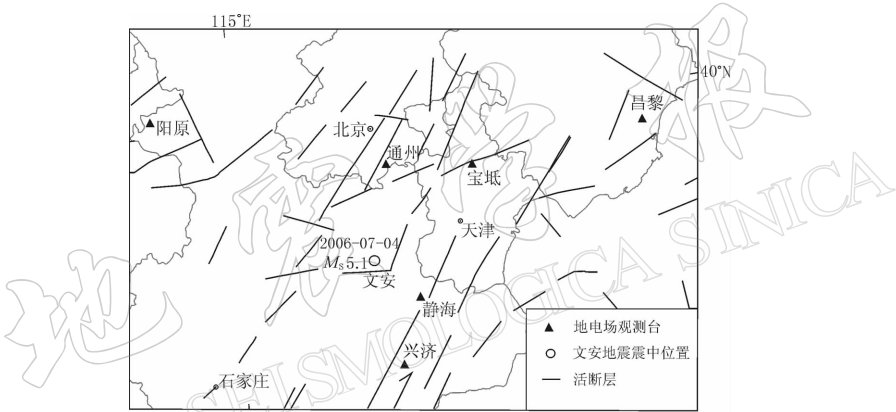


图 4 首都圈地电场观测台站及文安地震震中位置示意图

Fig. 4 Distribution of the geoelectric field stations around Beijing and the epicenter location of the 2006 $M_{5.1}$ Wen'an earthquake

本文利用多极距地电场观测去噪音原理,对上述 6 个地电场观测站 2006 年的地电场观测资料进行了认真检查与分析. 主要检测到下列两类信号:多台同步变化的地电场异常信号和单台记录的异常信号. 前者与电离层扰动的发生关联;后者则需要排查是否与观测点附近的干扰有关. 它们均通过多极距观测结果的检验而认定.

2006 年在 6 个地电场观测站还观测到一些单台异常信号. 所谓单台异常信号是指在一个观测站记录到的变化,不能在其它台站中同时被检测到,因此它们不可能起源于电离层这样的信号源. 应用多极距观测数据分析方法,将其中不能被判定为自然电场变化的信号作为干扰信号予以鉴别和排除. 图 6 是这两类信号识别的例子. 图中虚线框标识不满足多极距分析方法要求的信号,即本文作为干扰排除的信号;实线框标识满足多极距分析方法要求的信号,即本文所识别的自然电场异常信号.

图 7 和图 8 中给出的是检测出的自然电场异常信号. 这些信号集中在宝坻台和昌黎台站上.

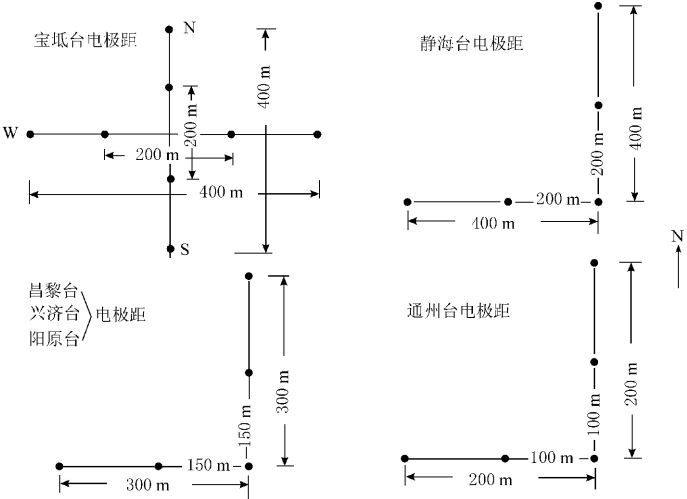


图 5 宝坻、昌黎、兴济、阳原、静海和通州台站电极布设图
Fig. 5 Allocation of electrodes at the station of Baodi, Changli, Xingji, Yangyuan, Jinghai and Tongzhou

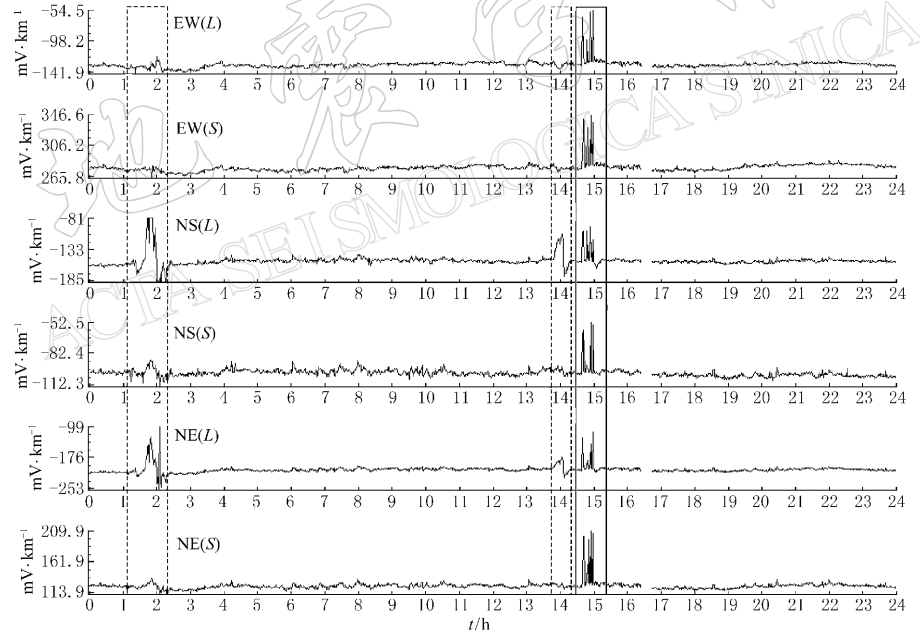


图 6 昌黎台 2006 年 6 月 16 日观测的地电场异常信号识别。图中实线框标识为满足多极距分析方法要求的信号，虚线框标识为不满足多极距分析方法要求的信号
Fig. 6 Abnormal signal recognition of the geoelectric field recorded at Changli station on 16 June 2006. The signals in solid frame satisfy the requirement of multi-dipole analysis method, while that in dashed does not

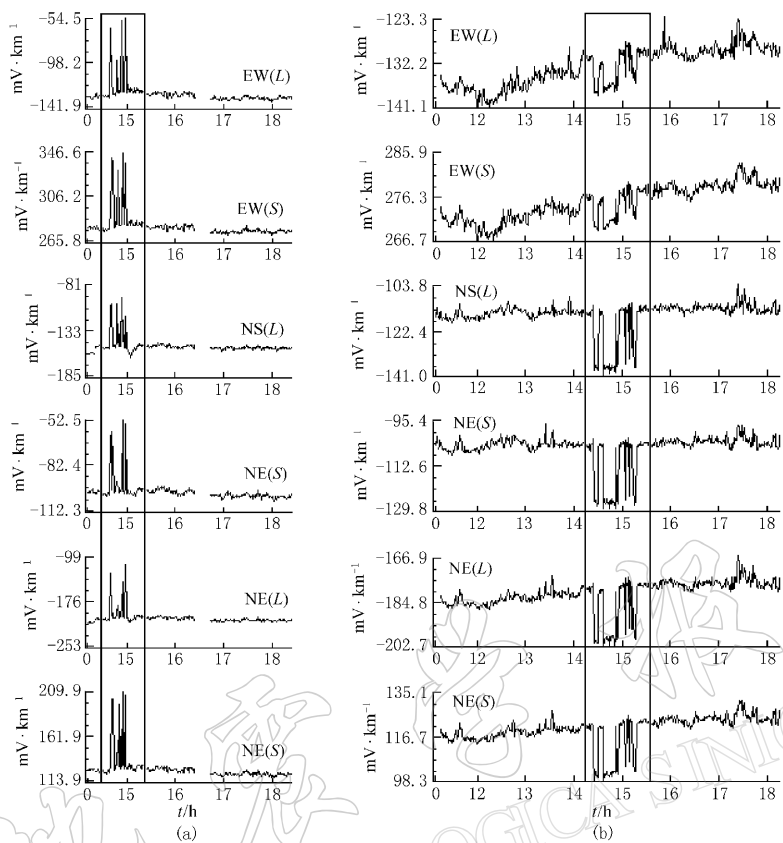


图 7 昌黎台 2006 年 6 月 16 日(a)和 6 月 21 日(b)观测到的经过鉴别的自然电场异常信号

Fig. 7 Abnormal signals of spontaneous electric field recorded at Changli station on June 16 (a) and June 21 (b) are distinguished

表 1 给出了 2006 年 7 月 4 日文安 $M_s5.1$ 地震前, 首都圈地电场观测异常信号及其特征. 它们是作者所发现的 2006 年 4—7 月的全部异常. 其中被称为前兆异常的信号, 是指那些满足多极距观测分析要求、与观测站附近的环境干扰及电极噪音无关的异常信号.

3 文安 $M_s5.1$ 地震前地电场前兆异常信号特征

由上述分析可知, 2006 年 7 月 4 日文安 $M_s5.1$ 地震前首都圈地电场观测异常信号的特征主要为:

1) 个别观测站的异常效应. 在所考察的 6 个观测站中, 利用多极距信号识别原理, 天津宝坻台和河北昌黎台于震前记录到了文安 $M_s5.1$ 地震前的地震电信号, 而其它 4 个台站(静海台、通州台、兴济台和阳原台)则没有记录到震前地震电信号. 其中包括最近的静海台和通州台也没有观测到异常信号, 是这次震例所揭示的特征之一.

对宝坻台 2006 年全年的观测资料分析, 没有发现类似如图 8 所示的地电场异常信号; 对昌黎台 2006 年全年的观测资料分析, 没有发现类似如图 7 所示的地电场异常信号.

2) 在时间上两个观测台记录到的地电场异常前兆信号不同步出现: 宝坻台记录到的异常时间分别是 6 月 10 日至 14 日、26 日 10:00—18:20 和 27 日 6:00—17:00; 而昌黎台

表 1 2006 年 7 月 4 日文安 $M_s5.1$ 地震前首都圈地电场观测的异常信号及其特征
Table 1 Abnormal signals of geoelectric field and their characteristics recorded before the July 4, 2006, Wen'an $M_s5.1$ earthquake at Capital Network

异常台站	极距	最大幅度 / $\text{mV} \cdot \text{km}^{-1}$	起 始 时 间		异常原因	前兆异常距发震时间	
			月-日	时:分		天	时:分
宝坻	EW, NS, NE	12.5	4-5	20:00—21:00	磁暴		
宝坻	EW, NS, NE	24	4-14	18:00—19:00	磁暴		
宝坻	EW, NS, NE	23.2	5-6	22:30—23:30	磁暴		
宝坻	EW, NS, NE	20	6-10—14		前兆异常	24	5:42
宝坻	EW, NS, NE	13.2	6-15	22:00—23:00	磁暴		
宝坻	EW, NS, NE	4.6	6-26	10:00—18:20	前兆异常	8	1:56
宝坻	EW, NS, NE	5.7	6-27	06:00—17:00	前兆异常	7	5:56
昌黎	EW, NS, NE	28	4-5	20:00—21:00	磁暴		
昌黎	EW, NS, NE	28.5	4-14	18:00—19:00	磁暴		
昌黎	EW, NS, NE	20	5-6	22:30—23:30	磁暴		
昌黎	EW, NS, NE	23	6-15	22:00—23:00	磁暴		
昌黎	EW, NS, NE	90	6-16	14:30—15:00	前兆异常	17	21:26
昌黎	EW, NS, NE	25	6-21	14:30—15:20	前兆异常	12	21:26
昌黎	EW, NS, NE	40.8	6-26	18:00—19:00	附近干扰源		
通州	EW, NS, NE	14	4-5	20:00—21:00	磁暴		
通州	EW, NS, NE	10.3	4-14	18:00—19:00	磁暴		
通州	EW, NS, NE	8.0	5-6	22:30—23:30	磁暴		
通州	EW, NS, NE	18	5-26	15:00—16:00	附近干扰源		
通州	EW, NS, NE	23.5	6-15	22:00—23:00	磁暴		
通州	EW, NS, NE	28.2	6-24	19:00—21:00	附近干扰源		
静海	EW, NS, NE	18	4-5	20:00—21:00	磁暴		
静海	EW, NS, NE	12.6	4-14	18:00—19:00	磁暴		
静海	EW, NS, NE	10.2	5-6	22:30—23:30	磁暴		
静海	EW, NS, NE	7.3	6-15	22:00—23:00	磁暴		
兴济	EW, NS, NE	16.5	4-5	20:00—21:00	磁暴		
兴济	EW, NS, NE	11.8	4-14	18:00—19:00	磁暴		
兴济	EW, NS, NE	9.3	5-6	22:30—23:30	磁暴		
兴济	EW, NE	145	5-26	16:30—17:00	电极极化		
兴济	EW, NS, NE	246	6-13	02:00—03:00	附近干扰源		
兴济	EW, NS, NE	6.0	6-15	22:00—23:00	磁暴		
兴济	EW, NS, NE	121	6-17	05:00—06:00	附近干扰源		
阳原	EW, NS, NE	23	4-5	20:00—21:00	磁暴		
阳原	EW, NS, NE	21.5	4-14	18:00—19:00	磁暴		
阳原	EW, NS, NE	13.4	5-6	22:30—23:30	磁暴		
阳原	EW, NS, NE	34.75	5-26	15:40 左右	附近高频干扰		
阳原	EW, NS, NE	10.5	6-15	22:00—23:00	磁暴		

记录到的异常信号时间则分别是 6 月 16 日 14:30—15:00 和 21 日 14:30—15:20. 其异常结束至发震时间间隔也不同. 许多震例也说明此种现象是存在的.

3) 从异常电信号的幅度特征来看, 并非观测台站距离震中区越近, 其观测到的异常电信号的幅度就越大. 例如, 在离震中区近的宝坻台记录到的震前地电场异常幅度较小, 最大值为 20 mV/km; 而在离震中区较远的昌黎台则记录到的震前地电场异常幅度较大, 最大值为 90 mV/km. 其机理主要是地下电性介质的非均匀性所致.

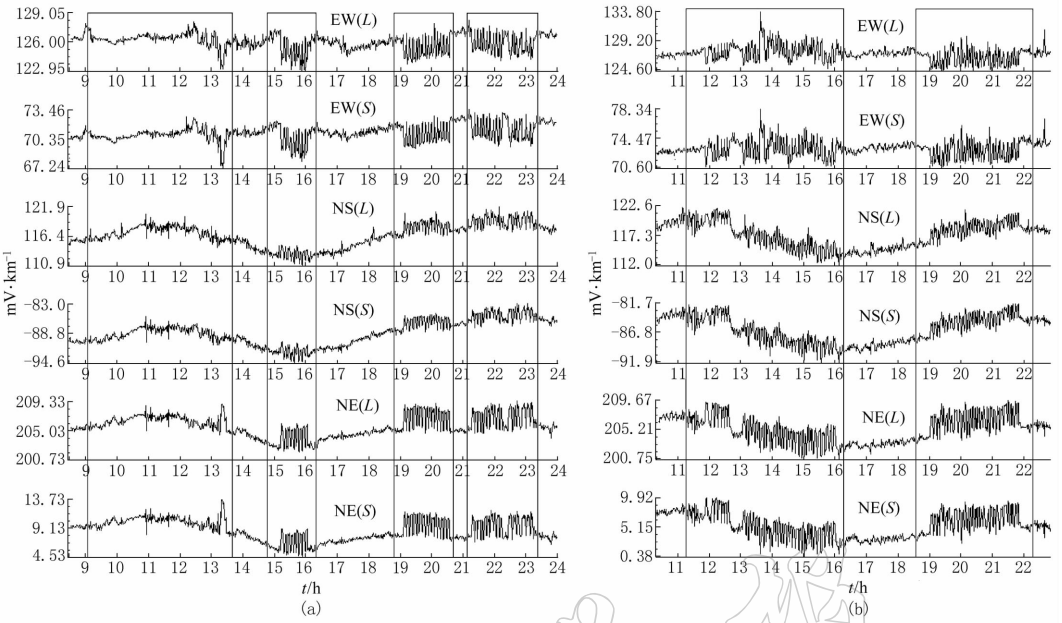


图 8 宝坻台 2006 年 6 月 26 日(a)和 27 日(b)观测的结果鉴别的自然电场异常信号

Fig. 8 Abnormal signals of spontaneous electric field recorded at Baodi station on June 26 (a) and June 27 (b) are distinguished

4) 地电场异常信号的形态不同. 在宝坻台, 首次出现异常的时间长, 异常下降从 6 月 10 日一直延续到 14 日结束; 第二次和第三次分别出现在 26 日 10:00—18:20、27 日 6:00—17:00 期间, 形态与国外一些观测结果类似(Varotsos *et al*, 1993, 2005). 而昌黎台所记录的震前地电场异常形态 6 月 16 日为持续 30 分钟的正向脉冲丛, 6 月 21 日为持续 50 分钟的负向脉冲丛.

4 结语

通过对地电场多极距观测系统识别噪音原理的阐述, 根据数据分析方法得到的噪音信号和地震异常信号的识别方法, 为开展地电场预测地震的研究, 推动我国地电场观测与研究的深入, 提供了重要的基础. 通过对 2006 年 7 月 4 日河北省文安 $M_s5.1$ 地震前后首都圈 6 个地电场台观测资料的研究分析, 得到以下的初步认识:

1) 文安 $M_s5.1$ 地震前存在着地电场异常前兆信号. 在震前 24 天 5 小时 42 分、8 天 1 小时 56 分和 7 天 5 小时 56 分前宝坻台分别记录到了震前地电场异常前兆信号; 在震前 17 天 21 小时 26 分、12 天 21 小时 26 分前昌黎台记录到了地电场异常前兆信号.

2) 震前首都圈地电场观测表明, 震前地电场异常前兆信号的出现存在着敏感点效应: 天津宝坻台和河北昌黎台于震前记录到了文安 $M_s5.1$ 地震前的地震电信号, 而在静海台、通州台、兴济台和阳原台则没有记录到震前地震电信号, 尤其在离震中区最近的静海台和兴济台也没有观测到异常信号.

3) 地电场异常前兆信号在不同的台站存在着不同步出现的现象, 并且异常结束至发震时间间隔也不同.

4) 距震中区较近的宝坻台记录到的震前地电场异常幅度较小, 而在距震中区较远的昌黎台则记录到的震前地电场异常幅度较大。

上述事实表明, 地电场前兆异常信号的出现存在着某种程度的“敏感点”效应。“敏感点”是在地震预测研究中使用频率较高的一个词汇, 是在经验性预报阶段, 当人们尚无法从机制上清晰地认识异常的物理原因时常用的一个词汇。所谓“敏感点”, 是指那些点位它们距离震源的距离不一定比其它点位近, 但相对于其它点位却更能够容易显示异常效应的部位, 如本文中天津宝坻台和河北昌黎台, 虽然相对于台网的其它台站距离震中较远, 却记录到较清晰的前兆。当然, 在地震电磁学的理论研究中, 对这些所谓可能的“敏感点”, 可以从理论上给出某种程度的解释: 不同测点地下电性结构的差异性, 是导致地电场信号差异的基本控制因素; 甚至地电场的异常变化与测点下方介质的电阻率的异常变化相关联也可能导致地电场异常的差异性。也就是说, 把地电场观测与台站基础电性结构联系起来, 是推进地电场观测和发挥其在地震预测中的效能的重要环节之一。

参 考 文 献

- 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.
- 毛桐恩, 席继楼, 王燕琼, 尹淑芝. 1999. 地震过程中的大地电场变化特征[J]. 地球物理学报, **42**(4): 519-528.
- 钱复业, 赵玉林, 卢军, 薛顺章. 1998. 孔压弱化失稳的系统辨识及大地电场短临前兆[G]//地震地电学发展与展望. 兰州: 兰州大学出版社: 151-155.
- 赵玉林, 钱复业. 1981. 大地电场的临震周期[J]. 地震, **3**(2): 13-16.
- Corwin R F, Morrison H F. 1977. Self-potential variation preceding earthquakes in Central California[J]. *Geophys Res Lett*, **4**: 171-174.
- Kinoshita M, Uyeshima M, Uyeda S. 1989. Earthquake prediction research by means of telluric potential monitoring. Progress-Rep. 1: Installation of monitoring network[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **64**: 255-311.
- Nagao T, Uyeda S, Asai Y, Kono Y. 1996. Anomalous changes in geoelectric potential preceding four earthquakes in Japan[C]//Lighthill J ed, *A Critical Review of VAN*. Singapore: World Scientific: 292-300.
- Orihara Y, Noda Y, Nagao T, Uyeda S. 2002. A possible case of SES selectivity at Kozu-shima Island, Japan[J]. *J Geodynamics*, **33**: 425-432.
- Telesca L, Colangelo 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.
- Tsutsui M. 2002. Detection of earth-origin electric pulses[J]. *Geophys Res Lett*, **29**(8): 10.1029/2001GL013713.
- Uyeda S, Nagao T, Orihara Y, Yamaguchi T, Takahashi I. 2000. Geoelectric potential changes: Possible precursors to earthquakes in Japan[J]. *Proc Nat Acad Sci*, **97**: 4561-4566.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984a. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I [J]. *Tectonophysics*, **110**: 73-98.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984b. Physical properties of the electric field of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude[J]. *Tectonophysics*, **110**: 99-125.
- Varotsos P, Alexopoulos K, Lazaridou M. 1993. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II [J]. *Tectonophysics*, **224**: 1-37.
- 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]. *ACTA Geophysica Polonica*, **53**(3): 293-298.
- Varotsos P A. 2005. *The Physics of Seismic Electric Signals*[M]. Tokyo: Terra Scientific Publ Co: 388.