

# 天祝大地电场异常与1995年永登5.8、 1996年天祝5.4级地震\*

赵和云<sup>1</sup>, 阮爱国<sup>2</sup>, 扬 荣<sup>1</sup>, 梁子斌<sup>1</sup>, 韩德胜<sup>2</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:**利用中法合作的天祝电测台从1994年10月至1997年6月每分钟的观测资料, 使用常规分析方法、分数维方法、垂直极化方向投影法和MT定点测深二维反演方法处理后, 发现在1995年7月22日永登5.8级地震( $\Delta = 84$  km)和1996年6月1日天祝5.4级地震( $\Delta = 65$  km)前, 4种方法、5种参数不同程度地显现出短临异常, 并表现出较好的协调性, 其中分数维异常和主轴视电阻率异常显示了明显的方向性, 地电场异常对与台站同处一条断裂带上天祝地震的孕震过程反映更敏感, 还从4个方面讨论了异常的可靠性, 并提出了产生异常的可能机理, 认为永登5.8级地震前大地电场异常由主要是震源处的电磁辐射以及台站下方7 km左右介质电性变化共同产生; 而天祝地震前异常主要由台站下方5~30 km范围内沿断裂走向的岩石电阻率变化所致。

**关键字:** 大地电场; 短临异常; 异常特征; 异常机理

**中图分类号:** P315.72+2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0056-09

## 0 引言

利用长期连续、高精度的大地电场观测资料预报地震, 在我国仍然为探索性较强的新方法, 根据岩石压力实验结果<sup>[1~4]</sup>和国内外已经取得的震例<sup>[15~31]</sup>, 大地电场短临前兆在孕震环境处于强挤压、高应力、高地温的地区更为突出, 1994年10月初, 兰州地震研究所与法国科学家(Zlotnick等)合作, 在甘肃省天祝县海原—北祁连大断裂带上(37°07'N, 103°30'E)建立了一个以大地电场为主的地电、地磁综合观测台, 其地磁观测由两套数字化磁力仪分别测量北向、东向分量, 仪器精度为0.02 nT; 地电场是沿磁南北、磁东西方向各布设2种极距(250 m, 110 m), 使用法国产Pb/PbCl<sub>2</sub>固体不极化电极(埋深约2 m)进行测量, 观测数据的采集间隔为1分钟, 即每道每天有1440个数据, 6道(2道磁分量, 4道电场分量)数据记录在一磁卡上, 约90天左右更换一次磁卡, 观测设备由使用太阳能板充电的12 V蓄电池供电, 对取得的1994年10月至1997年6月的全部观测资料(个别时段因磁卡未安装好, 资料有缺失), 我们首先进行了观测物理量分析<sup>[28]</sup>, 认为观测到的变化主要为地电场变化, 其中对大地电场(即

收稿日期: 2001-04-14

\* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2002013

作者简介: 赵和云(1946—), 男(汉族), 山西阳泉市人, 研究员, 现从事地电预报地震的理论和方法研究。

快变化)记录得真实可靠;对自然电场(即慢变化)记录得大体正确.所谓不极化电极并非其电极电位绝对稳定,而仍有微小的漂移,15天内一对电极约有不大于0.8 mV/km的同向偏移.这种漂移对于分析大地电场和几天内的自然电场变化无大的影响,但对于分析长趋势异常即构成干扰.观测期间,1995年7月22日永登县境内(36°22'N,103°15'E)发生了5.8级地震,1996年6月1日天祝县西(37°17'N,102°45'E)发生了5.4级地震(图1).天祝电磁台对于这两次地震的震中距分别为84 km和65 km.此外,附近的兰州地电台每日各整点也使用法国不极化电极进行地电场观测.对这2次震例和部分观测资料我们已作过初步研究<sup>[28~30]</sup>,在此基础上,本文使用更长时间的观测资料和增加某些新参数,以进一步介绍大地电场的异常特征和判别方法,并且着重讨论异常的可靠性及其产生的可能机理.

## 1 天祝大地电场震前异常的判别方法及其特征

### 1.1 日变形态畸变

取时均值后,地电场日变形态有较稳定的双峰、双谷特征.永登5.8级地震前7天,两测道的日变形态显现出畸变,呈多齿状<sup>[29]</sup>.经查6、7月份无磁暴,与降雨也无直接关系.对比兰州地电台三道地电场的观测结果<sup>[29]</sup>,震前7天也有日变形态畸变现象.进一步对每天的时均值资料进行最大熵谱分析,发现频率更低的非正常谱(周期为9.6小时)在震前几天有明显的增大(图2).Zlotnick在研究永登5.8级地震时也发现震前低频分量显著增强<sup>[31]</sup>.这表明天祝地电异常是客观真实的,但在天祝5.4级地震前无此异常现象.

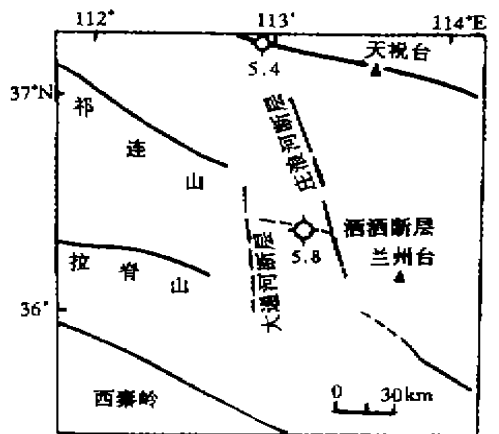


图1 地震、台站和断裂分布图

Fig. 1 Distribution of earthquakes, station and fault.

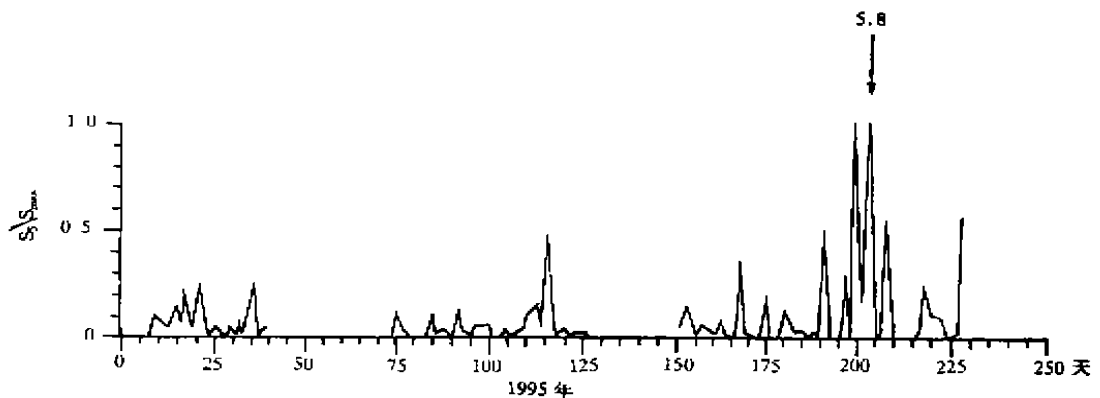


图2 1995年每日非正常谱(9.6小时)随时间的变化

Fig. 2 The variation of unconventional spectral composition with time in 1995.

### 1.2 分数维计算

天祝台的观测资料密集,适宜进行关联维计算.以14天为一时段,分别计算了NS、EW 250 m两测道全部观测数据的分数维(EW道因电极问题,1996年年底之后资料不正常).结果如图3所示.图内上、中为分数维随时间的变化曲线;下为台站所在断裂带两旁各1.5经度范围内小震(>2.0级)的月频次曲线.可以看出,NS道(与断层大体垂直)有4处异常,其中以

永登 5.8 级地震前最为明显,天祝 5.4 级地震前不太明显,另外 2 处对应着台站所处断裂带上小震次数超常增强. EW 道的分维异常也有 4 处,与地震的关系恰和 NS 道相反,即在永登 5.8 级地震和小震次数超常增加之前,分维异常显著;而在永登 5.8 级地震前无异常,只是震后有少许异常变化. 这表明大地电场分维异常有明显的方向性. 其特征是在震前 1~2 个月维数上升, 达到极大值后发震或下降中发震.

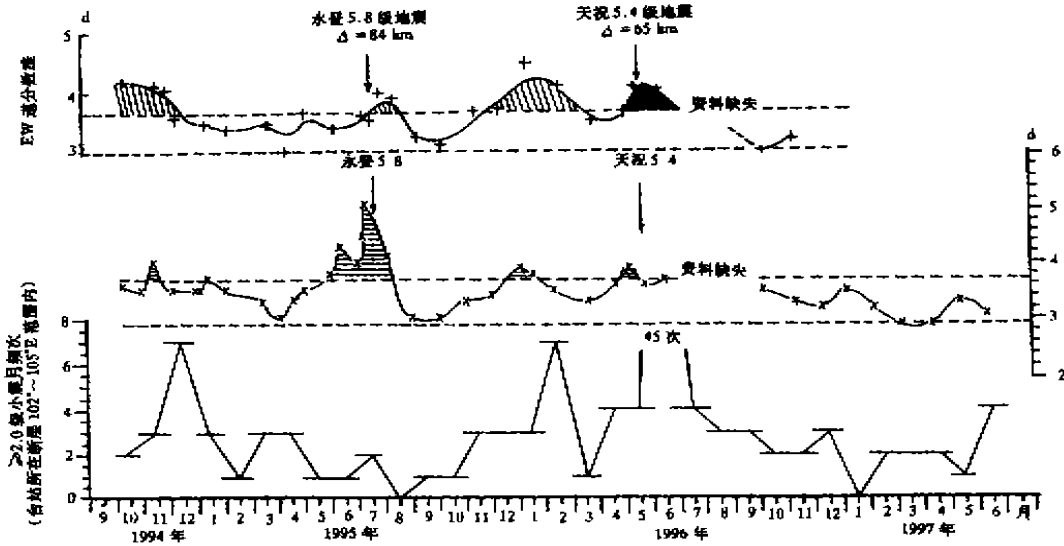
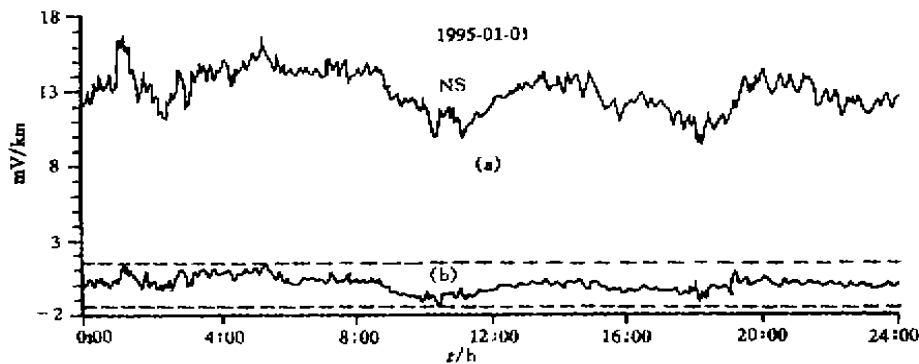


图 3 大地电场分维变化与地震活动之间的关系

Fig. 3 The relationship between seismicity and fractional dimension of telluric electric field.

### 1.3 垂直极化方向投影法

天祝大地电场在 1 小时至数小时,甚至一天内都大体呈线性极化,是当地正常电磁场变化的结果. 如果有其它信息(如地震前兆信息)迭加在正常变化之上,可将坐标旋转、平移,使得新坐标系的一个坐标轴与极化方向重合,而在垂直极化方向的另一坐标上就能得到消除了正常地电场背景变化的曲线,大体上为一条起伏很小的近似直线(图 4). 若某一段时间内(几分钟~几小时)有明显偏离正常变化的值,即认为出现了异常. 利用此方法处理了 1995~1996



(a) NS 向原图, (b) 处理后的结果

图 4 1995 年 1 月 1 日大地电场垂直极化方向投影处理后的结果与原南北向分量对比

Fig. 4 Comparison of geoelectric field curves on Jan. ,1995 before and after using the projection method.

年的资料,发现永登地震前 28 天(6 月 24 日、25 日)有幅度约为 10 mV/km 左右的异常变化,天祝地震前 37 天(1996 年 4 月 25 日)有形态与永登地震前相似的变化<sup>[30]</sup>.此方法在椭圆极化时不宜使用.

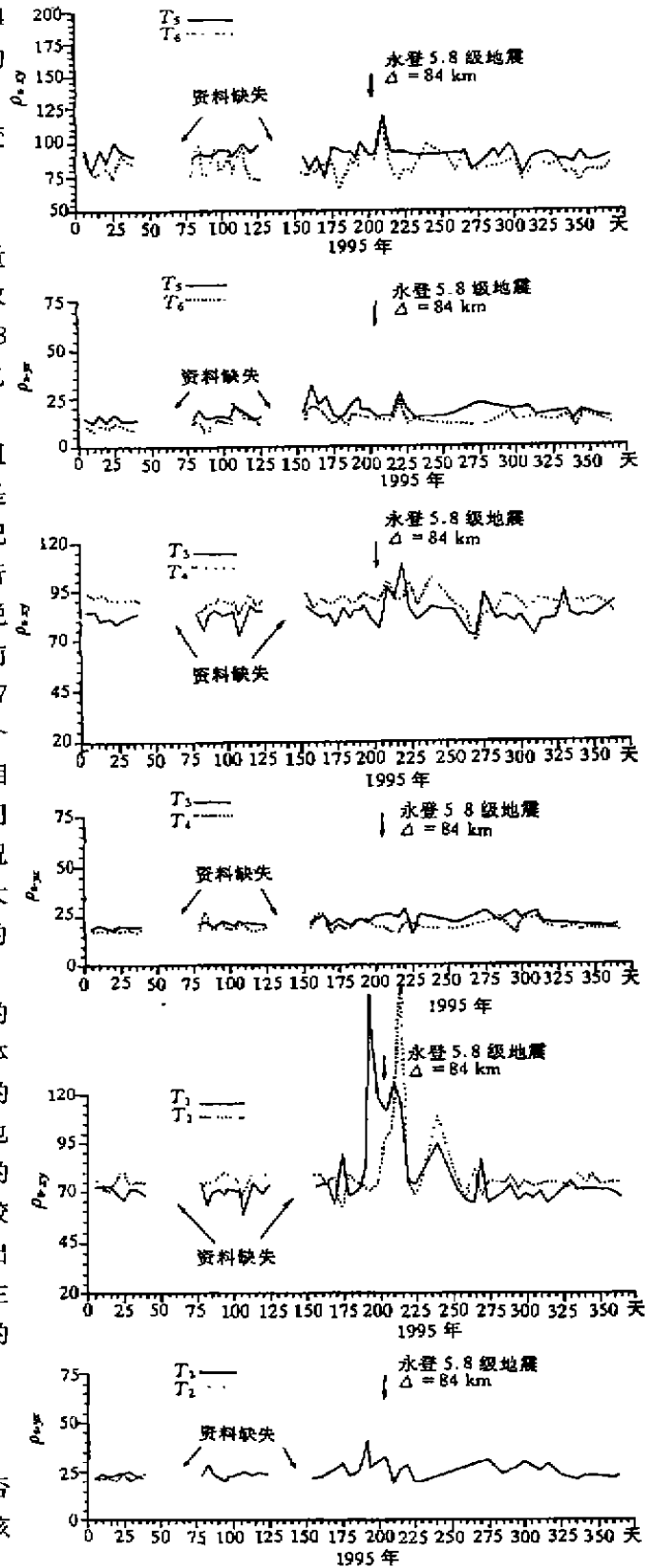
#### 1.4 MT 探测法:

对天祝台的地磁北向分量和东向分量观测数据利用二维大地电磁介质模型求取了二维主轴视电阻率<sup>[29]</sup>,可看到在永登 5.8 级地震前和天祝 5.4 级地震前均出现视电阻率的增加,而其它时段无此现象(图 5).值得指出的是:(1)不同地震的主轴视电阻率异常的方向不同.永登 5.8 级地震前是  $\rho_{xy}$  出现异常(与断裂垂直方向),而天祝 5.4 级地震前是  $\rho_{yx}$  出现异常(与断裂平行方向).(2)出现异常的频段不同,或者说出现异常的深度不同.永登 5.8 级地震前仅周期为 160 s 的  $\rho_{xy}$  出现异常(相当于 7 km 左右深度),而天祝 5.4 级地震前各个周期(160 s ~ 900 s)的  $\rho_{yx}$  均出现异常(相当于 5 ~ 30 km 深度).(3)异常超前的时间不同.永登 5.8 级地震前为 7 天,而天祝 5.4 级地震前为 1 个月.这些差异表明,大地电场视电阻率异常对处同一断裂带上的强震孕育反映更敏感一些.

图 6 是主轴视电阻率方位角随时间的变化.一般情况下不同频率的方位角大体相当,约为北东 30°,与区域最大主应力的方向一致;各频率间随时间的变化特征也基本相同.但是在地震前几天,某些频率的方位角减小,尤其天祝 5.4 级地震前比较明显.地震当天,不同频率的方位角还会出现相反的变化(永登地震最明显).表明主轴视电阻率方位角的减小是一种几天内的临震前兆.

## 2 异常的可靠性分析

2 次地震前天祝大地电场的异常是否可靠,是众所关注的问题.笔者以为应该从以下几方面论证:



(1) 原始资料的可靠性. 文献[29]从观测物理量的性质入手, 通过观测量的日变化形态和幅度特征、与地磁场相应分量的关系、不同极距观测到地电场的一致性以及地电场的矢量属性等几方面的讨论, 证明了天祝台观测到了真实的地电场变化. 在观测中除发现累积起来的电极电位微小漂移外, 别无其它干扰, 台站场地开阔平坦, 周围几十公里内无工厂和大型用电设备, 2 km 范围内无电灯、电话等小型电器. 磁暴和当地雷雨天气均有记载, 因而原始资料极为可靠.

(2) 全部分析均为全时域内扫描处理. 在长达3年多时间内, 每种方法中异常仅在临近地震前的一段时间里出现, 因此不能看作为一种偶然现象.

(3) 所用4种方法识别异常的原理均不相同, 有的来自台站下方介质电性变化, 有的侧重识别地电场中存在的低频电磁扰动, 有的侧重鉴别与正常大地电场变化规律不一致的较高频率变化, 但都集中在震前发生异常, 也说明了异常的可靠性.

(4) 异常特征的协调一致性. 以异常的方向特征为例: 永登5.8级地震前分数维异常仅出现在大地电场NS向分量中; 而MT异常也只在近南北向的主轴视电阻率中出现. 同样, 在天祝5.4级地震前分数维异常仅出现在EW向大地电场分量中, 而MT异常也出现在近EW向主轴视电阻率变化中. 说明异常的方向与孕震过程有某种内在的联系, 同时也表明了异常的可靠性. 同时还可利用震前、震后异常的变化是否协调来证明其可靠性: 如有人根据电性能反映应变变化的原理认为, 电阻率后效的出现是衡量震前电阻率异常是否真实的重要标志. 图8所示, 2次地震的震后效应均十分显著. 除此之外, 还有其它的协调关系, 在此不一一赘述.

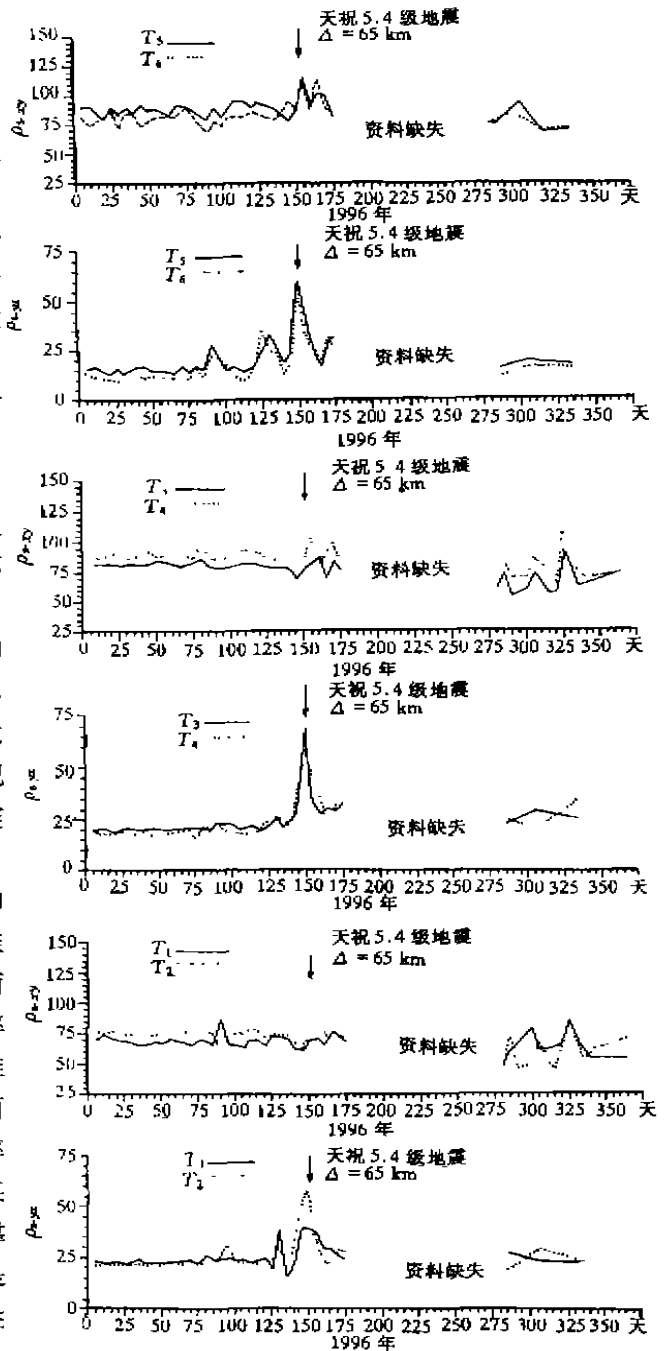


图5 各频点主轴视电阻率变化曲线  
 Fig.5 The variation of apparent resistivity on the main axis in different frequency.

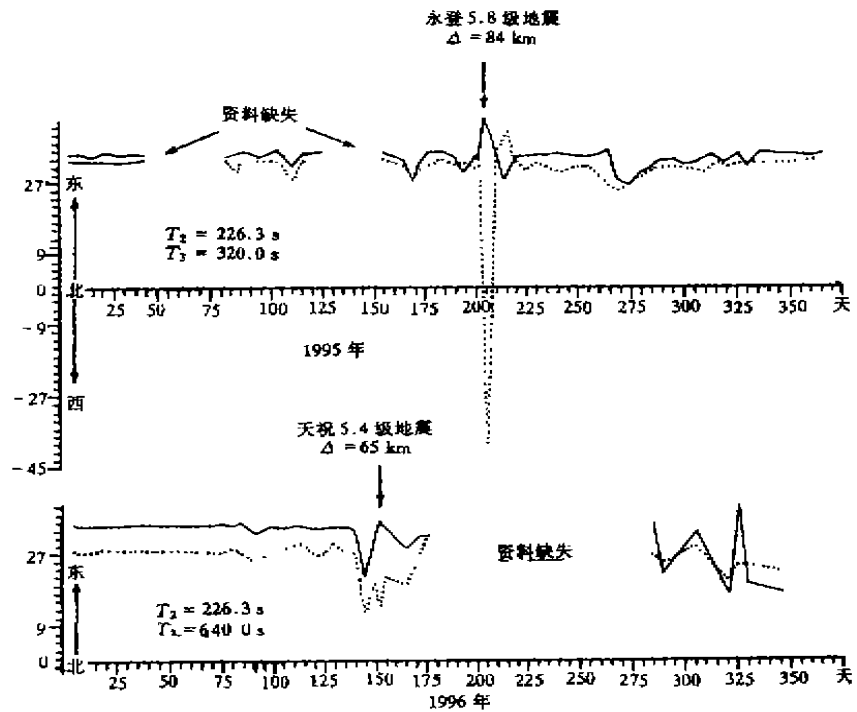


图 6 主轴视电阻率方位角随时间的变化

Fig. 6 The variation of main axis azimuth angle of apparent resistivity with time.

### 3 异常机理的初步分析

许多学者曾对地电场异常的机理提出过种种认识,本文仅以上述 4 种方法、5 种异常参数的基本原理出发,讨论产生天祝大地电场异常的可能机理。

首先让我们简述一下 4 种判别方法的基本原理:(1) 时间序列的分数维 在自相似基础上反映了数据序列复杂程度的变化,有下列因素之一时,大地电场分数维的维数会发生变化:① 外界的电磁干扰,如雷电、降水、电气化列车等。② 地下有非正常场的电磁扰动,如震源处的电磁辐射。③ 测点下方介质电性变化。(2) 时均值显示的日变形态畸变,反映了正常地电场背景中迭加了更低频率变化的电磁扰动,并且其变幅较大。(3) 垂直极化方向投影法 反映了大地电场中存在与原极化规律完全不同、频率较高的电磁变化。(4) MT 法则反映台站下方介质电性是否发生了变化,怎样变化,在此基础上,根据不同方法异常出现的先后次序以及自身和相互间的关系,能大体对异常机理作出判断。

表 1 给出了 4 种识别方法、5 种参数在 2 次地震前的异常时间,看出永登 5.8 级地震前分数维异常出现的最早,接着为极化规律异常,而日变形态畸变和介质 NS 向电阻率异常均出现在震前 7 天,由前述可知,天祝台无外界电磁干扰;MT 观测在震前 50 天左右也无变化,说明地下电性无大的变动;那么分数维异常只能是孕震体的电磁辐射所致,分钟值的异常表明其频率相对较高,但强度较低,所以仅在分维计算中才能被发现,这可能与大破裂前微破裂的初

期丛集相联系. 随着地震孕育的进程, 电磁辐射的强度也在增强并影响正常场的极化规律, 使之出现异常. 当临近发震时, 微破裂已逐渐贯通为小破裂, 电磁辐射的波长增大(即频率降低)、强度增强, 使震中附近正常大地电场日变形态严重畸变; 同时一定范围内岩石的电阻率也会随着震源应力集中影响范围的扩大, 呈现出新的各向异性. 由此可见, 永登 5.8 级地震前天祝大地电场异常是由震源处电磁辐射和台站下方介质电阻率变化共同产生的, 而以震源处电磁辐射的影响为主. 根据钱书清等<sup>[42]</sup>的实验研究, 完整岩石的电磁辐射比破碎又粘合岩石的强, 而永登 5.8 级地震处于岩石相对比较完整的地区, 因此孕震过程中存在产生强电磁辐射的介质条件.

在天祝 5.4 级地震前, 4 种方法中的 3 种异常时间大体相同, 而直观日变形态无明显畸变, 表明孕震体电磁辐射并不明显, 台站下方介质电性变化是异常的主要机理. 特别是 MT 异常从周期 160~900 s 的各频点上都有显示, 反映了台站下方沿断裂走向从浅部到深部的电性都有变化, 与台站和地震处于同一断层的破碎带有关. 视电阻率方位角在临震前减小为北东十几度, 与 5.4 级地震的发震应力场大体相同.

表 1 各种方法的异常出现时间

	7月22日永登5.8地震	6月1日天祝5.4地震
日变形态畸变	提前7天	无明显异常
分数维异常	NS向; 6月1日~8月14日, 提前51天	EW向; 5月1日~6月23日, 提前30天
垂直极化方向投影异常	6月24日、25日, 提前28天	4月25日, 提前37天
MT异常	$\rho_{xy}(T=160\text{ s})$ ; 提前7天; 方位角; 提前7天	各频点 $\rho_{xy}$ ; 提前30天; 方位角; 提前12天

#### 4 结语

综上所述, 天祝台的观测资料真实反映了当地电场的正常变化. 在两次中强震前后, 出现了多种形式的异常, 这些异常从不同的侧面反映出孕震过程中不同物理机制对观测值的干扰, 因而异常之间有协调一致的关系, 也显示了大地电场异常的可靠性. 特别强调的是, 天祝大地电场异常纯属短临变化, 有明显的方向性, 对与台站处同一断裂带上的孕震过程反映比较灵敏, 所有这些特征对于地震短临预报有实际意义.

#### [参考文献]

- [1] Ogawa T, Oike K. Electromagnetic radiation from rocks[J]. J. G. R., 1985, 90(D4): 6245—6249.
- [2] Cress G O, Brady B T, Rowell G A. Source of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory[J]. Geophys. Res. Lett., 14: 331—334.
- [3] Brady B T, Rowell A. Laboratory investigation of the electrodynamics of rock fracture[J]. Nature, 1989, 321(29): 448—492.
- [4] Martell G, Smith P N, Woodward A J. Light, radio frequency emission and ionization effects associated with rock fracture[J]. Geophys. J. Int., 1989, 98: 397—401.
- [5] Yamada I, Masuda K, Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture[J]. Phys. Earth Planet Inter., 1989, 57: 157—168.
- [6] Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks[J]. Geophys. Res. Lett., 1997, 14(8): 333—336.
- [7] 钱书清, 等. 花岗岩洞爆破时伴随岩石破裂的电磁辐射[J]. 地球物理学报, 26(增刊): 887—893.

- [8] 陈宝华,等.1989,水压致裂过程中的地电效应研究[J].地震学报,1989,11(3):309—318.
- [9] Перекльман М Е, Хатиашвили Н Г. 破裂电磁辐射理论研究[A].见:萨多夫斯基 М А.主编.苏联地震预报研究文集(三)[C].北京:地震出版社,1993.35—39.
- [10] 钱书清,等.伴随岩石破裂的 VLF, MF, HF, 和 VHF 电磁辐射特性的实验研究[J].地震学报,1996,18(3):346—351.
- [11] 刘焯洲,等.岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理[J].地震学报,1997,19(4):418—425.
- [12] 金安忠,等.小尺度岩石爆破引起电磁辐射的野外实验观测结果[J].地震学报,1997,19(1):45—50.
- [13] 钱书清,等.地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验研究[J].地震学报,1998,20(5):535—540.
- [14] 郭自强.岩石破裂中的电声效应[J].地球物理学报,1999,42(1):74—83.
- [15] Varotsos P, Alexopoulos K, Lazaridou M. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals[J]. Tectonophysics(II), 1993, 224(1/3):1—3.
- [16] Tselentis G A, Ifantis A. Geoelectric variations related to earthquakes observed during a 3 year independent investigation[J]. Geophys. Res. Lett., 1996, 23(11):1145—1148.
- [17] 刘心恒.利用地下电流异常变化预报地震的探讨[J].地震研究,1978,1(3):1—5.
- [18] 张全喜,等.云南地区中强与强烈地震电磁辐射的观测研究[J].地震学报,14(3):325—331.
- [19] 张云琳,等.青海共和7.0级地震临震电磁辐射前兆振幅谱的研究[J].地震学报,1993,15(2):186—193.
- [20] 郝建国,张云福,潘怀文,等.震前极低频电磁异常及频谱特征[J].地震学报,1995,17(1):81—88.
- [21] 陈宝华,黄声明,杨德英,等.闽台地区震前电磁辐射和自然电位特征的研究[J].地震学报,1996,18(3):404—408.
- [22] 国家地震局预测预防司.电磁学分析预报的方法[M].北京:地震出版社,1998.192—206.
- [23] 郝建国,唐天明,李德瑞,等.一种地震短临前兆信息——震前大气电场异常研究[J].地震学报,1998,20(1):101—108.
- [24] Мопоз Ю Ф,等.梁金仓译.堪察加地震前的大地电流效应[J].世界地震译丛,2000,(4):29—34.
- [25] 关华平,陈智勇,余冀平.首都圈及其邻近地区电磁辐射映震效果研究[J].地震,2000,20(1):65—70.
- [26] 陈有发,马钦忠,张杰,等.震前自然电场的前兆及可能机理[J].华南地震,1999,19(3):26—34.
- [27] 毛桐恩,席继楼,王燕琼,等.地震过程中大地电场变化特征[J].地球物理学报,1999,42(4):520—528.
- [28] 赵和云,阮爱国,梁子斌,等. Pb—PbCl<sub>2</sub> 固体不极化电极在地电场观测中的作用和效能[J].地震,1998,18(增刊):46—52.
- [29] 赵和云,阮爱国,扬荣,等.天祝地电场三年观测资料的分析和讨论[A].见:地震地电学发展与展望[C].兰州:兰州大学出版社,1998.123—137.
- [30] 阮爱国,赵和云.提取地震地电场异常的垂直极化方向投影法[J].地震学报,2000,22(2):171—175.
- [31] Zlotnicki J, et al. Frequency spectral properties of an ULF electromagnetic signal around the 21 July 1995,  $M = 5.7$ , Yong Deng (China) earthquake. Tectonophysics, 2001, (特刊).
- [32] 钱书清,郭自强,郭子琪,等.岩石在剪切破裂中的电磁特征[Z].见:中国地震学会第六次学术大会论文摘要集[C].北京:地震出版社,1996.272.



THE GEOELECTRIC FIELD ANORMALY OF TIANZHU AND RELATIONSHIP  
WITH YONGDENG EARTHQUAKE ( $M_s 5.8$ ) IN 1995 AND  
TIANZHU EARTHQUAKE ( $M_s 5.4$ ) IN 1996

ZHAO He-yun<sup>1</sup>, RUAN Ai-guo<sup>2</sup>, YANG Rong<sup>1</sup>, LIANG Zi-bin<sup>1</sup>, HAN De-sheng<sup>2</sup>

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China;*

2. *Geophysical Institute, CSB, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** After processing the data of geoelectric field and geomagnetic component from Tianzhu sino-France cooperate station in Oct. 1994 to Jun. 1997, with methods of mean value analysis, fractional dimension, vertical polarization direction projection and two-dimension inversion of fixed-set MT, it is found out that the 5 parameters in the 4 methods take on short-impending anomalies in different extent before Yongdeng  $M_s 5.8$  earthquake ( $\Delta = 84$  km) on July 22, 1995 and Tianzhu  $M_s 5.4$  earthquake ( $\Delta = 65$  km) on June 1, 1996. All these anomalies show good coordination, and the fractional dimension and principal-axis apparent resistivity anomalies show clear orientation. The anomalies of geoelectric field is more sensitive to the earthquake preparation process of Tianzhou event which took place on the same fault with the station. The anomaly reliability is discussed from 4 points and the anomaly possible mechanism is given. It is suggested that the geoelectric anomaly before Yongdeng  $M_s 5.8$  earthquake is produced mainly by the focus electromagnetic radiation, comline with electric property variation of medium under the station at depth of 7 km, while before Tianzhu  $M_s 5.4$  earthquake mainly by the resistivity variation of rock along the fault strike at depth of 5~30 km under the station.

**Key words:** Geoelectric field; Short-impending anomaly; Anomaly characteristics; Anomaly mechanism