

岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前平凉台地电场变化

范莹莹^{1,2,3}, 安张辉^{1,2,3}, 陈军营^{1,2,3}, 刘 君^{1,2,3}, 王建军^{1,2,3}, 崔腾发^{1,2,3}, 王 丽^{1,2,3}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:应用2013年甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前263天及震后9天的平凉台观测数据研究了该台地电场在时间域、频率域内的变化, 得到: (1) 在岷县漳县 $M_s6.6$ 地震以及在2013年四川芦山 $M_s7.0$ 地震前平凉台地电场观测记录了显著的自然电场变化, 在近距离的岷县漳县地震前自然电场变化更显著, 异常变化的持续时间长; (2) 平凉台地电场最大熵功率谱密度在4月20日四川芦山地震前发生连续增大的现象, 并持续到甘肃岷县漳县地震后。最后讨论了本次地震地电场极低频成分异常变化的机理。

关键词: 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震; 地电场; 异常; 熵功率谱密度

中图分类号: P315.722 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-827-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.827

The Variation of Geoelectrical Field at Pingliang Station, Gansu Province, before the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake

FAN Ying-ying^{1,2,3}, AN Zhang-hui^{1,2,3}, CHEN Jun-ying^{1,2,3}, LIU Jun^{1,2,3},

WANG Jian-jun^{1,2,3}, CUI Teng-fa^{1,2,3}, WANG Li^{1,2,3}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou Gansu 730000, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology of China Earthquake Administration, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: On July 22, 2013, an $M_s6.6$ earthquake occurred at a depth of 20 km in the border region of Minxian and Zhangxian (34.5°N , 104.2°E). The earthquake was on the Lintan-Tanchang dislocation of the north-south seismic belt. The north-south seismic belt became active after the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake in Sichuan Province. The 2010 Yushu $M_s7.1$ earthquake in Qinghai Province and the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake in Sichuan Province show that activity has continued unabated. Pingliang Station (35.55°N , 106.68°E) was built in December 2007, and is located in the eastern part of the north Qilianshan fold belt and the southern part of the Helan-Liupan Mountain inland organic belt. The system for observing the geo-electric field runs well, the electromagnetic environment is good, and there is no remarkable interference around the station. The observation device makes observations in three directions and has a total of six channels, with a sampling interval of one

收稿日期: 2013-08-27

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2012IESLZ06)

作者简介: 范莹莹(1984-), 女, 主要从事地震电磁现象研究和全国地电台网技术管理方面的工作. E-mail: fyy416@163.com

minute. This paper studied changes in the geo-electric field for the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in Gansu Province in 2013 using data from Pingliang Station. The data used were from November 1, 2012 to July 31, 2013, which covers a period of 163 days before and nine days after the Minxian-Zhangxian earthquake. The results showed: (1) significant self-potential changes were recorded at Pingliang Station, situated on the northeastern edge of the Qingzang-Tibet Plateau, before the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake of 2013 in Gansu Province and the Lushan $M_s7.0$ earthquake of 2013 in Sichuan Province. These changes were more prominent and lasted longer before the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake than before the Lushan $M_s7.0$ earthquake. The anomalies began on April 7, 2013, about 100 days before the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake. (2) An increased power spectrum density (PSD) of the geo-electric field (in particular, PSD anomalies in the low-frequency components, under 5×10^{-3} Hz) was recorded at Pingliang Station before the Lushan $M_s7.0$ earthquake, and lasted until the end of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake. Finally, the mechanism of the extremely low frequency phenomenon was discussed. The observed electric field at Pingliang station is in the southern part of the Haiyuan-Liupan Mountain dislocation, and so the medium under the station is weak. The station is close to the epicenter of the Minxian-Zhangxian earthquake, and it is easy to change the physical environment of the underground medium and thus cause this significant electromagnetic phenomenon. From our preliminary analysis, we consider that tectonic movement associated with the source region caused changes in the physical conditions of the medium under the station because of the unusual tectonic setting. During non-linear development of numerous micro-cracks and their directional arrangement in the media of the focal region before the earthquake, influencing factors such as underground water migration and electro-mechanical transformation function induced geo-electromagnetic anomalies. The focal process of the earthquake and the local media action under these geo-electric stations led to the spatially and temporally complicated evolution of geo-electric anomalies.

Key words: Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake; geo-electric field; anomaly; power spectrum density

0 引言

地电场包括大地电场和自然电场两部分。大地电场是固体地球外的空间各种电流体系在地球介质内部感应产生的;自然电场是地壳中的物理、化学过程引起的局部稳定的电场。目前地电场观测已广泛应用于地震等灾害事件的监测预报,报道了大量的被认为是与地震有关的电磁现象^[1-10]。我国从1966年邢台 $M_s7.2$ 地震后开始了定点、连续的以地震监测预报为目的地电场观测试验,从“十五”期间开始了大规模、规范化的数字化地电场观测。全国现运行的地电场台站100多个。台网内发生了多次中等以上地震,震前记录了被认为是与地震有关的地电场异常变化。2013年07月22日7时45分51秒在甘肃省定西市岷县、漳县交界地区(北纬34.5°、东经104.2°)发生了 $M_s6.6$ 地震,这是上个世纪70年代以来甘肃东部及邻近地区发生的最大震级地震,震源深度20 km。本文从时间域、频率域两个方面研究本次地震前甘肃平凉台的地电场变化,探索和认识地震前的地电场异常,对今后本

区及周围地震监测预报有实际意义。

1 台站基本情况与数据处理

2013年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震周围500 km范围内共有中国地震局“九五”、“十五”期间建设的18个地电场台站,台站具体位置见图1。根据岷县漳县地震简报^①,其中9个台站在本次地震前的中短期阶段观测到了地电场数据异常,10个地电场台站记录了短临阶段的数据异常,2个地电场台站记录了同震、震后异常(表1)。据震后考察落实异常:甘肃汉王、天水台、兰州台、红沙湾和景泰台,青海大武台和宁夏银川台,陕西宝鸡台,四川成都台存在不同程度的环境干扰。存在环境干扰也不一定就否定地震前兆信息,但地震前兆信息的甄别与确认比较困难,前兆异常的可靠存在质疑。因此本文仅选取平凉台研究岷县漳县地震前后地电场异常变化,其原因为:(1)本次地震震中区距离平凉台210 km,属于近距离台站;(2)平凉台地电场观测在近3年的全国地电场台站观测资料质量评

^①范莹莹,刘君,谭大诚.2013年07月22日甘肃省岷县漳县交界 $M_s6.6$ 地震地电台网观测.甘肃省地震局,2013.

比中连续获得前三名成绩,观测数据可靠,异常变化的可信度高;(3)平凉台地电场观测资料曾多次应用于汶川 M_s8.0(震中距 548 km)、玉树 M_s7.1 地震(762 km)以及地电场潮汐变化的研究^[11-12],其研究结果可以相互对比分析。

平凉台(106.68°E,35.55°N)始建于2007年12月,位于北祁连褶皱带东缘,鄂尔多斯盆地西侧,贺兰—六盘山陆内造山带偏南段。该台地电场观测系统运行正常,台站周围电磁环境优越,无明显干扰源,符合地电台建设规范^[13]。该台是无人值守台站,未见人为干扰。观测装置布设NS、EW和NE三个观测方向、长短极距共6个测道,测量电极使用不极化电极,数据产出周期为1分钟。据已有的研究,地电场主要反映地震短临信息^[1-4],所以研究中选取平凉台地电场观测资料的时段为2012年11月1日至

2013年7月31日共273天的地电场分钟值观测数据,即震前263天震后9天的观测资料。这个数据长度对于研究本次地震前的短临异常来说是足够长的。

地电场波形分析方法是最常用的方法,最大熵谱估计法(MEM)曾多次应用于汶川 M_s8.0大震(2008年)、于田 M_s7.3地震(2008年)、玉树 M_s7.1地震(2010年)前后地电场变化以及甘肃天祝地区几次中等地震附近中法国际合作台站的地电场/磁场研究^[10,14-15]。据已有研究结果,地电场/磁场极低频成分MEM功率谱密度PSD在发震前几十天~几天出现数量级的增大、减小等变化,反映了明显的地震短临信息,故认为最大熵谱法能够反应地电场频谱信息。本文应用平凉台分钟值数据分析研究岷县漳县地震前后地电场波形变化,以每天1440个地电场观测数据为1个数据单元,逐天计算地电场功率谱密度的变化。

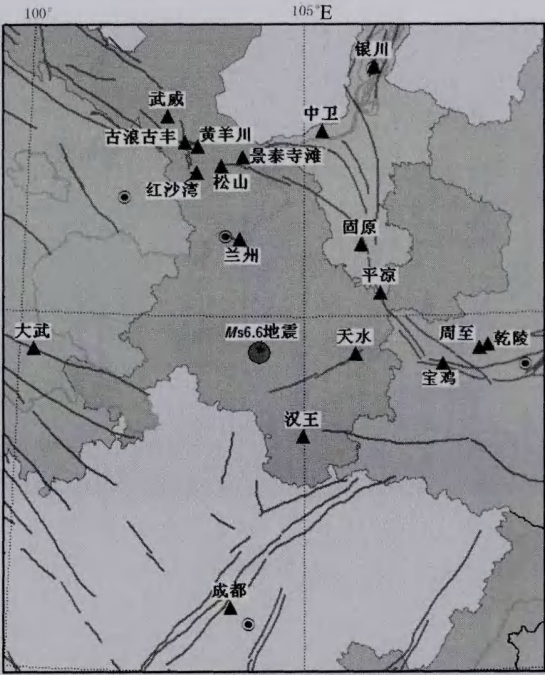


图1 震中和地电台站分布图

Fig.1 Distribution of the earthquake epicenter and geoelectrical stations

表1 平凉台岷县漳县 M_s6.6地震地电场数据异常(500 km 范围内)

Table1 The variation of waveform of geoelectrical field at PingLiang Station before the M _s 6.6 Minxian–Zhangxian Earthquake									
区域台网	台站	震中距/km	测项分量	趋势异常		短临异常		同震、震后变化	
				起始月份	幅度/(mV·km ⁻¹)	起始日期	幅度/(mV·km ⁻¹)	起始时间	幅度
甘肃	汉王	150	NS,EW,NE	2012.05	>150	2013-06-29	>32	—	—
	天水	150	NS,EW,NW	2012.10	>400	—	—	—	—
	平凉	210	NS,NE,EW	2012.10	>40	2013-06-07	>30	—	—
	兰州	180	NS,EW,NW	2012.03	>100	2013-07-09	>30	—	—
	景泰	300	NS,EW,NW	2012.09	>100	—	—	—	—
	红沙湾	300	NS,EW,NW	2011.04	>50	2013-06-18	>40	—	—
	黄羊川	330	NE	—	—	2013-06-12	>100	—	—
青海	古丰	350	NS,EW,NW	2012.02	>10	—	—	—	—
	大武	360	NS,EW,NE	—	—	2013-07-03	>600	—	—
宁夏	固原	240	EW,NE	2011.12	>500	—	—	—	—
	银川	400	NS,NE	—	—	2012-06-03	>800	—	—
陕西	宝鸡	290	EW	—	—	2013-06-29	>7	2013-07-22	>25
	周至	350	EW,NW	—	—	2013-06-14	>10	2013-07-22	>10
四川	成都	400	NS,EW,NE	2012.05	>150	2013-07-03	>70	—	—

2 磁情分析

研究地电场变化需要特别关注磁情影响,磁扰会引起地电场的电扰动。地磁指数是描述每一段时间内磁情的一种分级指标,或某类磁扰强度的一种物理量。地磁指数可以分为两类:(1)描述每一时间段内地磁扰动强度的指数,可用 K_p 指数表示。(2)专门描述某类磁扰强度的指数,在中低纬度的测站使用的地磁指数称为 D_{st} 指数,这个指数每小时测量一次,最主要是测量地磁水平分量的强度变化,系统监控全球环电流感应场的强度。 K_p 指数具体用来描述每日每个3小时内地磁扰动强度的指数,在0~9内取值; $\sum K_p$ 指数表示每天的8个 K_p 指数之和,如果 $\sum K_p > 30$,则认为当天的地磁活动强烈^[16]。普遍认为当 D_{st} 指数低于-50 nT并持续2 h以上时,表示可能发生

了磁暴^[10]。图2是2012年11月1日至2013年7月31日共273天两类磁情指数。据图2,2013年3月1日、3月17日、6月1日、6月29日 $\sum K_p$ 指数超过了30; D_{st} 指数在2012年11月1—2日、14—15日、21日、24日以及2013年1月17—18日、26—27日,2月17日,3月1—2日、17—21日、27—30日,4月24日,5月1—2日、18—19日、25—26日,6月1日、6—7日、24—25日、28—30日,7月1日、6—7日、10—11日、14—15日低于-30 nT并持续2 h以上。所以认为上述44天地磁活动强烈,在计算功率谱密度时删除了这44天的数据。

图2中 K_p 指数数据来自 <http://www-app3.gfz-potsdam.de/obs/niemegk/monrep/index.html>, D_{st} 指数数据来自 http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/。

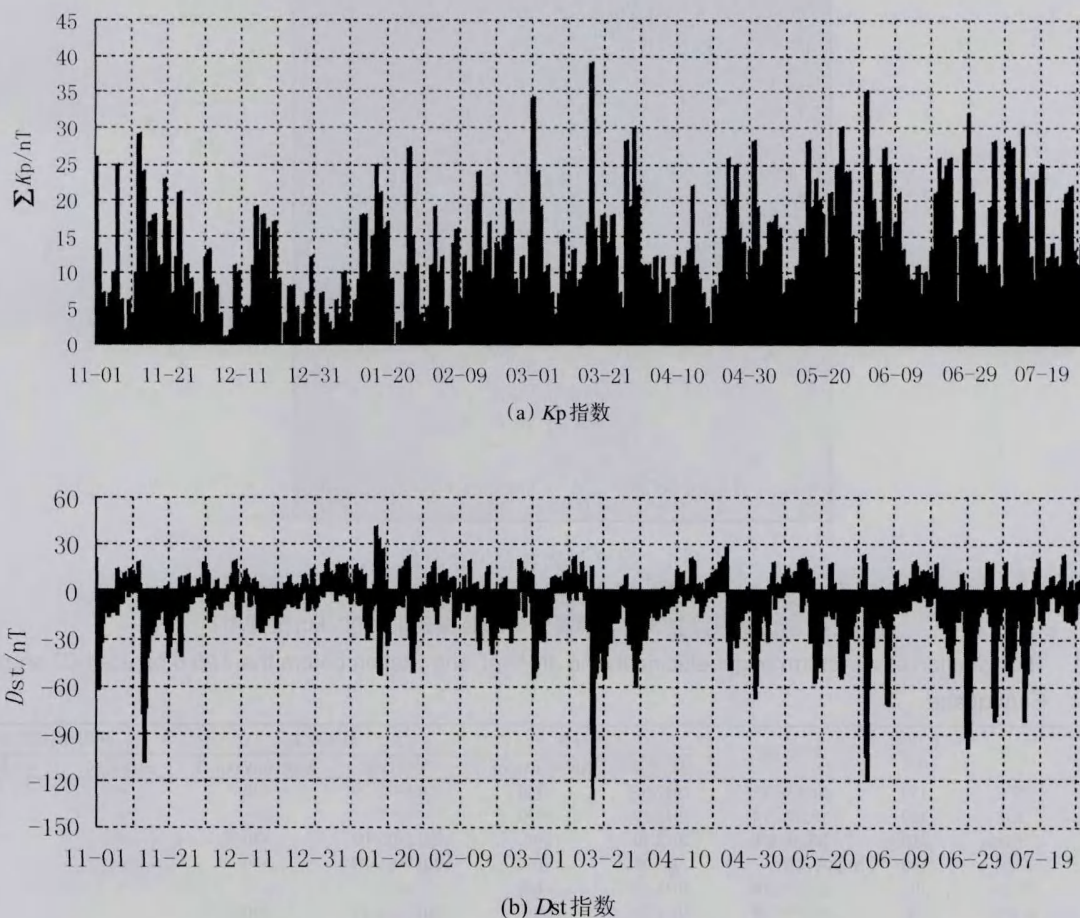


图2 2012年11月至2013年7月地磁 K_p 、 D_{st} 指数

Fig.2 Geomagnetic K_p -index, D_{st} -index from November 2012 to July 2013

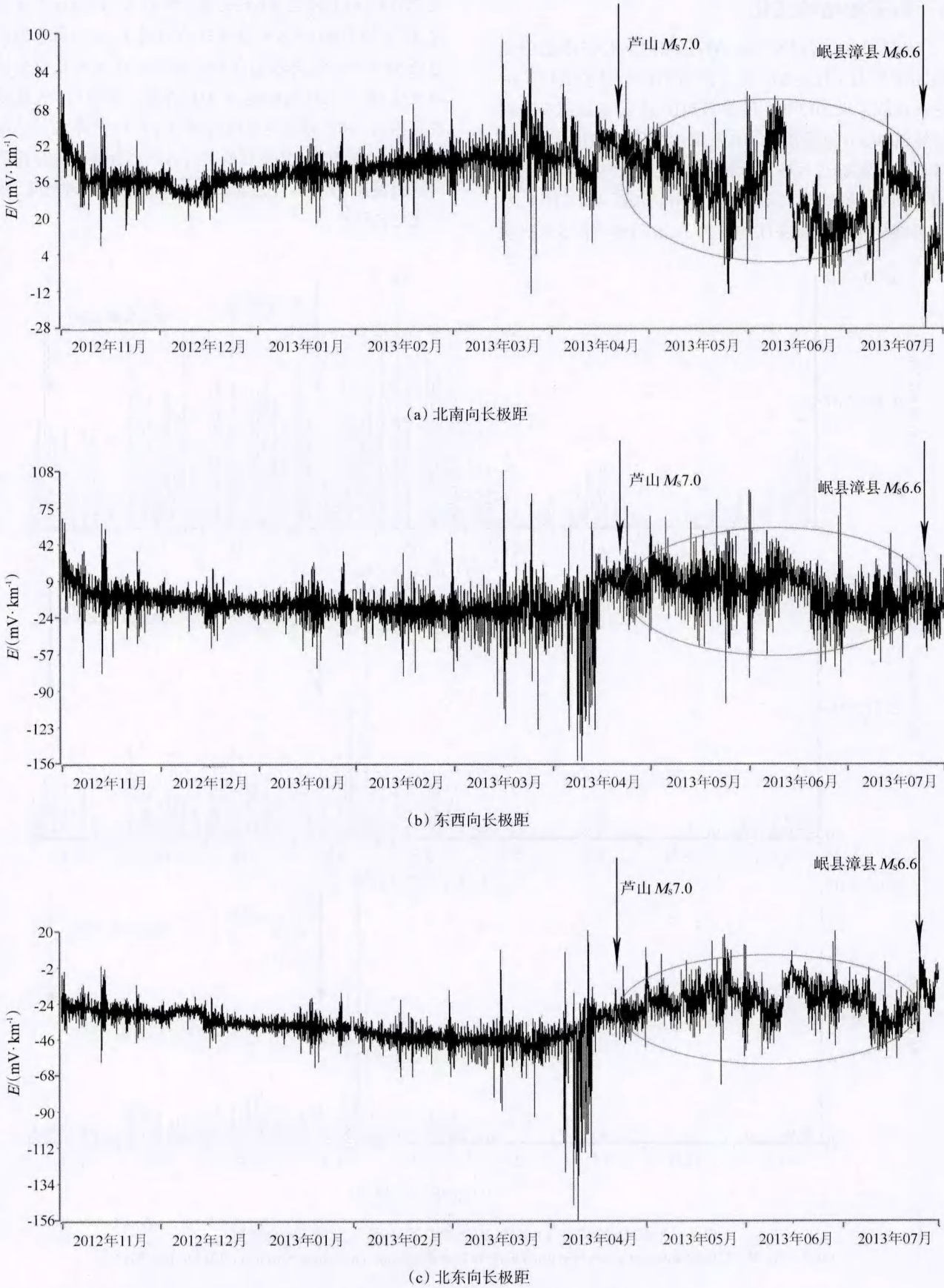


图3 岷县漳县地震前平凉台地电场变化
Fig.3 Changes of geoelectric field at Pingliang station before the Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ earthquake

3 震前地电场变化

图3是平凉台NS、EW、NE北东测向长极距地电场2012年11月1日至2013年7月31日的分钟值曲线。由图(a)可见,从2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震前夕至岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前约100天的时间(4月7日~7月15日),自然电场 V_{sp} 发生了大幅度变化,最大变化幅度超过60 mV/km;由图3(b),地电场EW向长极距4月5日 V_{sp} 发生大幅度扰动现象,4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震前5天扰动

现象消失,岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前约37天, V_{sp} 出现下降变化,幅度约为80 mV/km;与图3(b)相同,图3(c)所示的地电场NE向长极距分钟值在庐山地震前约15天 V_{sp} 发生扰动变化,最大变化幅度超过100 mV/km,震前约5天扰动现象消失,岷县漳县地震前约40天, V_{sp} 缓慢降低。总体来看,庐山地震、岷县漳县地震前后平凉台地电场分钟值曲线明显比2012年11月至2013年2月起伏波动变化、扰动变化强烈。

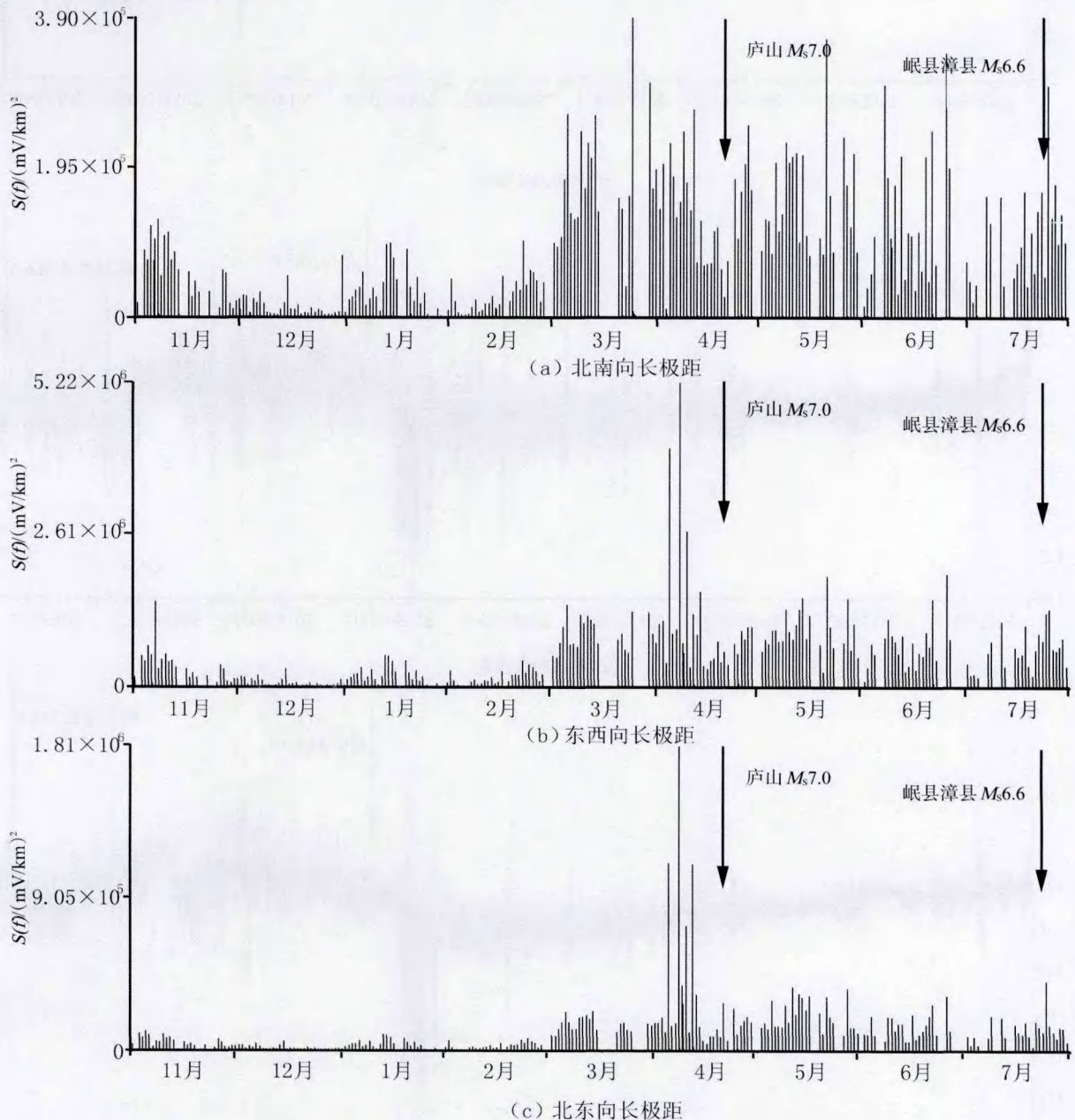


图4 平凉台2012年11月至2013年7月地电场MEM时-频图

Fig.4 The MEM time - frequency curves of geoelectric field at Pingliang station from November 2012 to July 2013

应用MEM方法计算对应图3时段数据的谱密度PSD 随时间变化 $S(f)-t$ (图4)。计算时应用每天连续的分钟值

数据构成一个时间序列计算 $S(f)-t$ 变化,平凉台 NS 向长极距地电场 3 月初至 7 月 31 日出现 PSD 连续增大的现象(图 4(a)),3 月中下旬增幅最大,最大增幅大于 300%;EW 向长极距从 3 月初开始出现 PSD 连续增大的现象,4 月 10 日左右突发 PSD 大幅度增大的现象(图 4(b)),这与 NE 向长极距地电场 PSD 迅速明显增大现象在时间上一致(图 4(c))。至 7 月 31 日 PSD 增大现象仍在持续,不过 $M_s6.6$ 地震后有 PSD 减小的趋势。在 PSD 增大期间先后发生了 4 月 20 日芦山地震、7 月 22 日岷县漳县地震。平凉台地电场观测环境优越,周围无电磁环境干扰,在出现上述 PSD 增大变化前的 3 个月内无类似变化,并且在计算时已将 Dst 指数低于 -30 nT 和 $\sum Kp$ 超过 30 的共 44 天数据剔除,故上述 PSD 显著、连续增大的变化不是随机、噪声、磁扰等干扰造成。其次,在 2012 年 11 月至 2013 年 7 月期间除芦山 $M_s7.0$ 地震和岷县漳县 $M_s6.6$ 地震外,距离平凉地电场观测台 $1\,000\text{ km}$ 范围内未发生 $M_s > 6.0$ 地震,因此可以基本确认上述地电场 PSD 增大的现象与芦山、岷县漳县地震有关。

4 震前异常变化的机制讨论

平凉台地电场 NS、EW 和 NE 测向长极距观测到在两次地震前发生了明显的自然电场异常变化,特别是在近距离的岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前自 5 月 20 日以来出现显著的波动形态的异常变化。同时在芦山 $M_s7.0$ 地震前 50 天左右地电场出现了 PSD 连续增大的现象,直至岷县漳县地震发生后此现象仍在继续,但 PSD 相较于震前有所下降。这种地电场 PSD 增大的现象在 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震、2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震、2010 年玉树 $M_s7.1$ 地震前也出现了,是一种地电场极低频甚至于准直流成分的电磁辐射现象^[10,14]。为了探索地震地电场异常的物理机制,国内外学者进行了实验室试验研究^[17-21],为已观测到的地震前的电磁辐射现象提供了依据。文献[20]根据零磁空间岩石破裂实验认为,约 DC~20 Hz 频段的磁场和自电位的变化与岩石破裂过程有关,描述了在岩石破裂的不同阶段磁场和自电位变化的时间进程和空间分布。文献[5、10]联系地震前近震中区视电阻率各向异性变化讨论了极低频地电场变化产生的原因,认为在加载环境下,在地下介质内部微裂隙非线性发展、定向排列的过程中,同步发生“机-电转换”作用以及水运移等因素激发了极低频强电磁辐射现象。上述研究支持了本文得到的对应两次地震的平凉台地电场异常现象。平凉地电场观测台分布在海原—六盘山 NW 向大断裂南段附近,台址地下介质“薄弱”,且距离岷县漳县 $M_s6.6$ 地震距离近,震前地下介质易发生物理环境的改变,从而激发本次地震前的显著电磁

现象。

其次,从大构造上讲,芦山 $M_s7.0$ 地震发生在南北地震带中段,平凉台位于南北地震带北段,尽管平凉台距离芦山地震较远,震中距已达 667 km ,但从震源区、台址同位于南北地震带的相联系的角度看,芦山地震前显示的异常也是能理解的。

5 结论

本文研究了 2013 年 4 月 20 日芦山地震、7 月 22 日岷县漳县地震前后甘肃平凉台观测的地电场变化,得到以下结论:

(1) 在岷县漳县地震前,平凉台 NS、EW 和 NE 测向长极距测道地电场发生了大幅度的上、下起伏波动变化的自然电场异常变化,最大变幅超过 60 mV/km 。同时,在较远距离的南北地震中段发生的 2010 年芦山 $M_s7.0$ 地震前也出现了明显的自然电场变化。

(2) 从 4 月 20 日芦山 $M_s7.0$ 地震前约 50 天,平凉台 NS、EW 和 NE 测向长极距开始观测到地电场功率谱密度 PSD 连续增大的现象,PSD 增大现象至台站附近 7 月 22 日甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震发生后,仍在持续,但比震前谱值低。

(3) 初步认为,平凉台地电场台址位于南北地震带北段附近断层的特殊构造位置,两次地震分别发生在南北地震中段和北段,在两次地震前与震源区相联系的构造活动引起了台址地下介质物理条件变化,发生了“机-电转换”作用以及水运移等,进而激发了该台地电场时域、频域内极低频电磁现象的发生。

参考文献(References)

- [1] Varotsos P, Alexopoulos K, Nomicos K, et al. Earthquake Prediction and Electric Signals[J]. Nature, 1986, 322: 120.
- [2] Uyeda S, Hayakawa M, Nagao T, et al. Electric and Magnetic Phenomena Observed before the Volcano-seismic Activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan[J]. Proc Nat Acad Sci USA, 2002, 99(11): 7352-7355.
- [3] Michel S, Zlotnicki J. Self-potential and Magnetic Surveying of La Fournaise Volcano (Reunion Island): Correlations with Faulting, Fluid Circulation, and Eruption[J]. J Geophys Res, 1998, 103(B8): 17845-17857.
- [4] Zlotnicki J, Mouel L, Sasai Y, et al. Self-potential Changes Associated with Volcanic Activity: Short-term Signals Associated with March 9, 1998 Eruption on La Fournaise Volcano (Reunion Island)[J]. Annali di geofisica, 2001, 44(2): 335-354.
- [5] 杜学彬. 在地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学: D 辑, 2010, 40(10): 1321-1330.
- DU Xue-bin. Two Types of Changes in Apparent Resistivity in

- Earthquake Prediction[J]. Science in China: Series D, 2011, 54(1): 145-156.(in Chinese)
- [6] 康云生, 安海静, 马可兴, 等. 天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 190-195.
- KANG Yun-sheng, AN Hai-jing, MA Ke-xing, et al. Test Analysis on Geoelectrical Resistivity Observation Combining the Surface and Deep-well Methods at Tianshui Seismic Station in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 190-195.(in Chinese)
- [7] 解滔, 杜学彬, 郑国磊, 等. 水平两层均匀介质中井下电阻率观测信噪比的理论计算[J]. 西北地震学报, 2012, 1(34): 18-22.
- XIE Tao, DU Xue-bin, ZHENG Guo-lei, et al. Theoretical Calculation for the Signal Noise Ratio of the Underground Electric Resistivity Observation in the Two-layered Horizontal Homogeneous Medium[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 18-22.(in Chinese)
- [8] Varotsos P, Lazaridou M. Latest Aspects of Earthquake Prediction in Greece Based on Seismic Electric Signals[J]. Tectonophysics, 1991, 188: 321-347.
- [9] Nagamoto H, Fukushima T, Ida Y, et al. Disturbances in VHF/UHF Telemetry Links as a Possible Effect of the 2003 Hokkaido Tokachi-oki Earthquake[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2008, 8: 813-817.
- [10] 刘君, 杜学彬, Jacques Zlotnicki, 等. 几次大震前的地面和空间电磁场变化[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2885-2897.
- LIU Jun, DU Xue-bin, Jacques Zlotnicki, et al. The Changes of the Ground and Ionosphere Electric/Magnetic Fields before Several Great Earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(11): 2885-2897.(in Chinese)
- [11] 谭大诚, 赵家骝, 席继楼, 等. 青藏高原中强地震前的地电场变异及构成解析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 875-885.
- TAN Da-cheng, ZHAO Jia-liu, XI Ji-lou, et al. The Variation of Waveform and Analysis of Composition for the Geoelectrical Field before Moderate or Strong Earthquakes in Qinghai-Tibetan Plateau Regions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 875-885.(in Chinese)
- [12] 谭大诚, 王兰炜, 赵家骝, 等. 潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1842-1853.
- TAN Da-cheng, WANG Lan-wei, ZHAO Jia-liu, et al. Influence Factors of Harmonic Waves and Directional Waveforms of Tidal Geoelectrical Field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(7): 1842-1853.(in Chinese)
- [13] 杜学彬, 席继楼, 谭大诚, 等. 地震台站建设规范 地电台站 第2部分: 地电场台站. 中华人民共和国地震行业标准[S]. 北京: 地震出版社, 2006: 2-5.
- DU Xue-bin, XI Ji-lou, TAN Da-cheng, et al. Technical for the Observational Environment of Seismic Stations-Part 2: Electromagnetic Observation. The Standard of the PRC[S]. Beijing: Seismological Press 2004: 14-29.(in Chinese)
- [14] 范莹莹, 杜学彬, Zlotnicki J, 等. 汶川 $M_s 8.0$ 大震前的电磁现象[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2887-2898.
- FAN Ying-ying, DU Xue-bin, Zlotnicki J, et al. The Electromagnetic Phenomena before the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(12): 2887-2898.(in Chinese)
- [15] 李宁, 杜学彬, 谭大诚, 等. 松山观测台地震短临电磁现象[J]. 地震, 2007, 27(增刊): 103-111.
- LI Ning, DU Xue-bin, TAN Da-cheng, et al. Imminent Electromagnetic Phenomenon Related to Earthquakes Recorded at the Songshan Station[J]. Earthquake, 2007, 27(Suppl.): 103-111.(in Chinese)
- [16] 曾中超, 张蓓, 方广友, 等. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 11-19.
- ZENG Zhong-chao, ZHANG Bei, FANG Guang-you, et al. The Analysis of Ionospheric Variations before Wenchuan Earthquake with DEMETER Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 11-19.(in Chinese)
- [17] Varotsos P, Sarlis N, Lazaridou M, et al. Transmission of Stress Induced Electric Signals in Dielectric Media[J]. J Appl Phys, 1998, 83(1): 60-70.
- [18] Huang Q H. Controlled Analogue Experiments on Propagation of Seismic Electromagnetic Signals[J]. Chin Sci Bull, 2005, 50(17): 1956-1961.
- [19] Huang Q H, Ikeya M. Seismic Electromagnetic Signals (SEMS) Explained by a Simulation Experiment Using Electromagnetic Waves[J]. Phys Earth Planet Inter, 1998, 109(3-4): 107-114.
- [20] 郝锦琦, 钱书清, 高金田, 等. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常[J]. 地震学报, 2003, 25(1): 102-111.
- HAO Jin-qi, QIAN Shu-qing, GAO Jin-tian, et al. ULF Electric and Magnetic Anomalies Accompanying the Cracking of Rock Sample[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(1): 102-111.(in Chinese)
- [21] Huang Q H. One Possible Generation Mechanism of Co-seismic Electric Signals[J]. Proc. Japan Academy, 2002, 78(7): 173-178.