

甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前的地电阻率变化

刘 君^{1,2,3}, 杜学彬^{1,2,3}, 范莹莹^{1,2,3}, 安张辉^{1,2,3}, 陈军营^{1,2,3}, 谭大诚^{1,2,3},
崔腾发^{1,2,3}, 王建军^{1,2,3}

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

摘要:应用富氏滑动、归一化变化月速率等方法处理了2013年7月22日甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震中400 km范围内9个地电阻率观测台2002–2013年的观测资料,研究了本次地震前的地电阻率变化。结果显示,尽管震中周围的地电阻率台站存在环境干扰等影响,但在本次地震前地电阻率异常变化仍然很明显,表现出震前以下降为主、大幅度异常的特点。最后初步讨论了本次地震前地电阻率异常变化的可能成因。

关键词:岷县漳县 $M_s6.6$ 地震; 地电阻率; 异常;

中图分类号: P315.722 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-819-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.819

The Geo-electrical Resistivity Anomaly before the Minxian–Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake in Gansu

LIU Jun^{1,2,3}, DU Xue-bin^{1,2,3}, FAN Ying-ying^{1,2,3}, AN Zhang-hui^{1,2,3},
CHEN Jun -ying^{1,2,3}, TAN Da-cheng^{1,2,3}, CUI Teng-fa^{1,2,3}, WANG Jian-jun^{1,2,3}

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

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

3. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The $M_s6.6$ earthquake occurred at the junction of Minxian County and Zhangxian County. The earthquake focal depth was 20 km. It was the largest event since the Shandan $M_s7.25$ earthquake of 1954. The epicentral area was already known to be earthquake-prone, as there have been 25 earthquakes with magnitudes greater than five in recorded history within about 200 km of the epicenter. This earthquake occurred on the northeastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, which is formed by the subduction of the Indian plate in the north of China. Therefore, the earthquake was caused by the push from the Indian plate. The north-south seismic belt in which this earthquake happened has entered a new active period since May 12, 2008, after the Wenchuan earthquake. The Wenchuan earthquake, the Yushu earthquake, and the Lushan earthquake show that its activity has not decreased. There are nine apparent resistivity stations within 400 km of from the epicenter. These are at Tongwei, Hanwang, Tianshui, Lanzhou, and Linxia in Gansu Province, Guyuan in the Ningxia Hui Autono-

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 地电观测数据评价与井下地电观测方法研究(中国地震局专项, 2012–2013年度); 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: 刘 君(1984–), 女, 主要研究方向为地震电磁现象研究。E-mail: liujun19840822@163.com

mous Region, and Baoji, Zhouzhi, and Qianli in Shanxi Province. The Tianshui seismic station in Gansu uses the deep bore-hole technique, and the electrode depth is 100 m. This station is 156 km from the epicenter of the earthquake. This paper analyzed apparent resistivity observation data from these stations for 2002 to 2013 using the Fourier slide method and the normalized variation rate method. The Fourier slide method is used to exclude annual variation in geo-electrical resistivity observation data. The normalized variation rate method avoids the difficulties and arbitrariness of using human judgment to determine the abnormal changes in the base value. At the same time, this method retains the abnormal change patterns of the original curve. The results show, (1) for the geo-electrical resistivity anomaly phenomena before the earthquake, the relation between the abnormality and the earthquake is significant in time. The normalized variation rate method is better for the extraction of mid-term and short-term anomaly effects, and there were obvious abnormal changes. (2) The medium-term anomalies mainly decreased, and the amplitude of the anomalies increased with distance from the epicenter. The Tongwei, Lanzhou, Tianshui, and Zhouzhi stations recorded sustained medium-term anomalies for months or about a year. However, examination of the observation environment of the stations with abnormal changes showed that the recorded anomalies at some stations require further study. (3) Although the geo-electrical resistivity stations had environmental interference and other effects in the area surrounding the epicenter, abnormal changes in the geo-electrical resistivity were quite clear before the earthquake. There were large-amplitude seismic anomalies before the earthquake, as well as a decline in the main anomaly. Finally, we discussed the preliminary causes of the apparent resistivity anomalies. During the gestation of the earthquake, geo-electrical resistivity anomaly changes in the source area were associated with the accumulation of stress and ultimately result in progressive failure of rock. When the stress had accumulated up to the critical strength of the medium, micro-fractures started to form, this time because of the stress load in the later part of the preparation period. The accelerated change in this medium produced prominent geo-electrical resistivity anomalies. Decreasing anomalies are credible precursors in earthquake preparation processes.

Key words: Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake; geo-electrical resistivity; anomaly

0 引言

地电阻率(也称“视电阻率”)方法在地震前的异常变化得到了实验、理论研究的支持,以及大量中等以上地震特别是 $M_s7.0$ 以上大震前实际观测结果的检验。如: Yamazaki Y^[1], Bapcyko O M 和 Morrow C^[2-3], 钱复业和赵云等^[4], 钱家栋和陈有发等^[5], Brace W.F 和 Orange A S^[6], 杜学彬等^[7-9]的工作。特别是在中国自 1966 年以来建设了大规模的地电阻率台网,在台网内发生了数十次中等地震和数次 $M_s7.0$ 以上大震,震前异常积累十分丰富。2013 年 7 月 22 日 7 时 45 分 51 秒在甘肃省定西市岷县、漳县交界地区发生了 $M_s6.6$ 地震,震源深度 20 km,本次地震是甘肃省内自 1954 年山丹 $M_s7\frac{1}{4}$ 地震以来发生的最大地震,在震中附近及周围分布有甘肃、陕西、四川省和宁夏自治区的大量地电阻率台站。本文对岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震中 400 km 范围内的 9 个地电阻率台站的观测数据进行处理,使用富氏滑动、矩平、动态矩平、归一化月变化速率等

方法,应用这些台站的观测资料研究本次地震前的地电阻率异常变化。其结果是对这样一次大震级地震前的地电阻率方法地震监测效能的有益评价。

1 基本情况

岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震发生在甘肃省临潭—宕昌断裂附近,目前推测发震构造为临潭—宕昌断裂。该断裂为左旋逆冲性质,走向为 NW—NNW,倾向 NE,倾角在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间,属晚更新世活动断裂^[10]。本次地震震中区为历史上地震多发区,有历史记录以来,震中附近 200 km 范围内共发生 5 级以上地震 25 次,震级最大的地震是 1654 年 7 月 21 日甘肃天水南 8.0 级地震,距离 121 km。

在距本次地震震中 400 km 范围内分布有甘肃省的天水、汉王、通渭、临夏、兰州,宁夏的固原和陕西宝鸡、周至、乾陵等 9 个地电阻率台站(图 1)。每个台站布 2~3 个测道,采用电阻率对称四级观测装置,固定电极位置,供电电极距 $\overline{AB}$ 最大为临夏台 1.5 km,最小为天水台(深井)

0.39 km,使用的观测仪器有模拟仪器DDC-2A、产出数据为日值和ZD8B、ZD8BI数字地电仪,每小时观测1组数

据。台站的详细运行情况,观测环境以及数据可用性 etc 可参见表1。

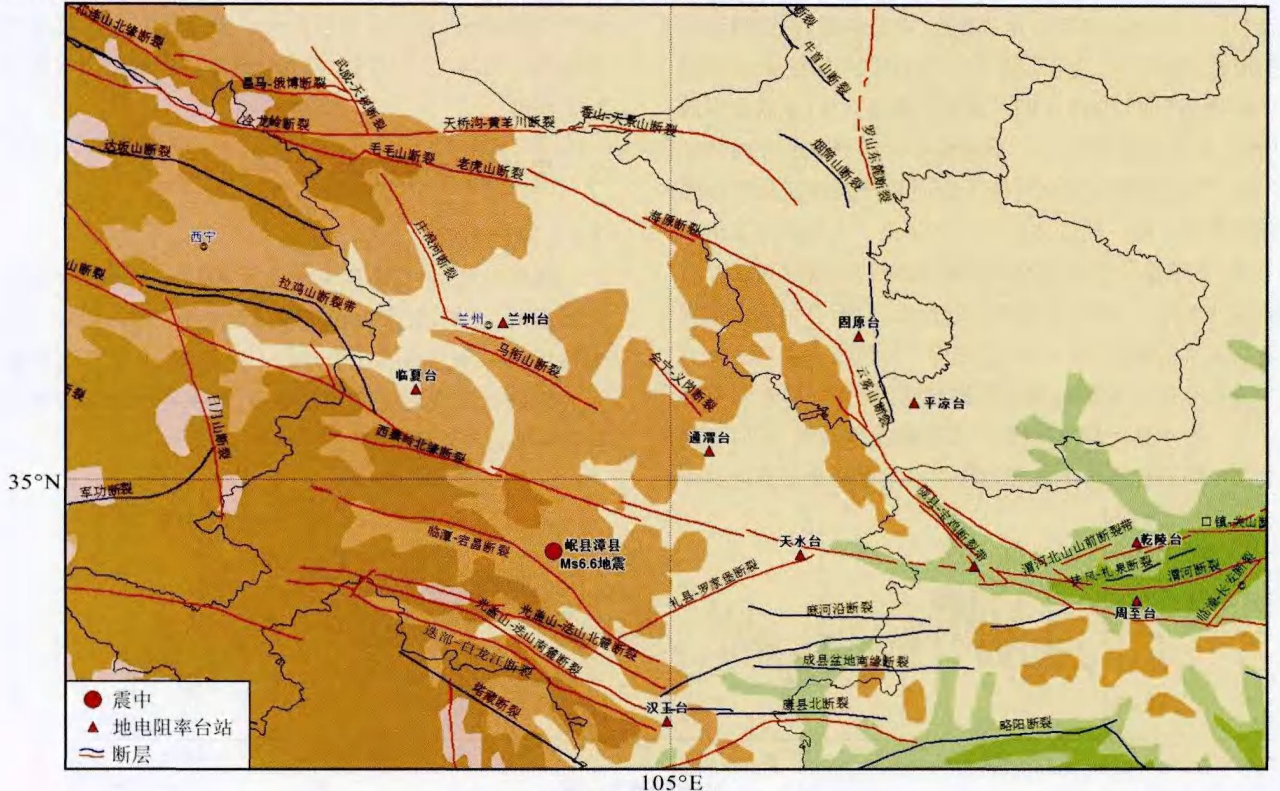


图1 台站、震中、断层分布示意图
Fig.1 Distributions of stations, epicenter and faults

2 数据处理方法

文中的地电阻率数据主要是利用“九五”期间地电学 科杜学彬等开发的应用软件GSEP(地电学地震预报方法 软件系统)完成^①,处理方法主要包括以下几种:

(1) 常规处理方法:包括富氏滑动、矩平、动态矩平 方法等。富氏滑动方法用于排除地电阻率观测数据中的 年变成分;矩平方法用于处理年变规律强,且相、幅差异

变化不大的资料;动态矩平方法也是排除年变的有效方 法之一,对于年变规律不强,相、幅差异变化较大的地电 观测时序序列,甚至某些年份无明显年变的情况下,处理 效果更好一些。本文采用这些方法排除地电阻率年变 化,处理后的数据图像直观,适用于对各种等时间间隔 的地电观测数据排除年变,进而在排除年变后的时间序列 上人为跟踪,判定中期、中短期、短期和临震异常。

表1 地电阻率台网运行情况

Table 1 The operation status of the geo – electrical resistivity network

区域台网	台站	震中距/km	仪器型号	运行情况	观测环境	观测系统	数据可用性
甘肃	天水	156	ZD8BI	正常	正常	正常	可用
	汉王	150	ZD8B	正常	存在干扰	正常	基本可用
	通渭	125	ZD8BI	正常	存在干扰	正常	基本可用
	临夏	151	DDC-2A	正常	正常	基本正常	可用
	兰州	180	ZD8B	正常	存在干扰	基本正常	基本可用
陕西	宝鸡	267	ZD8B	正常	存在干扰	正常	基本可用
	周至	373	ZD8BI	正常	基本正常	正常	可用
	乾陵	369	ZD8B	正常	正常	正常	可用
宁夏	固原	252	ZD8B	正常	正常	正常	可用

① 杜学彬,卢军,王志贤,等.地电中短期前兆识别、标志体系及预报方法研究.“九五”地震科技攻关项目《强地震预测预报技术研究》 95-04-01-01-09 子专项研究报告.甘肃省地震局,1999.

(2) 归一化变化速率方法。由于常规处理方法存在人为甄别和确定地电阻率背景值、异常值的困难,不同学者对同一次异常确定的异常参数(震前幅度、持续时间甚至形态)有差异。为克服常规处理方法的不足,杜学彬等^[11]在“九五”期间提出了归一化变化速率方法(也就是以前所称的“月速率方法”)。不同地电台站测区的介质特征不同,其地电阻率变化对测区介质物理条件变化的敏感程度不同。归一化变化速率方法避免了人为判定基值和上升、下降等异常变化的困难和随意性,同时保留了原有曲线的下降、上升等异常变化的形态,对所有台站识别异常与正常的标准统一。杜学彬等^[11]利用归一化月速率方法分析全国大量地电阻率数据异常,统计出异常限差为 ± 2.4 。由于是大样本量统计,其标准是客观的,同时利用大型花岗岩标本自然破裂过程中电阻率变化计算的速率

异常也符合上述限差标准^[12]。利用归一化月速率方法提取异常的关键是首先要对资料时段去倾,排除年变化、非年变周期成份,对存在阶段性长趋势变化的资料要分时段处理。文献^[11,13-14]对归一化变化速率方法的应用效能进行了评价。

3 异常时空强分布

3.1 空间分布

据震后总结,在距离本次地震400 km范围内分布的甘肃通渭、兰州、天水台和陕西周至共4个台站记录了震前持续的一年左右或几个月的中期异常,但是对这些显示异常的台站观测环境考察得知,其中有的台站记录的异常需要进一步研究、考证。

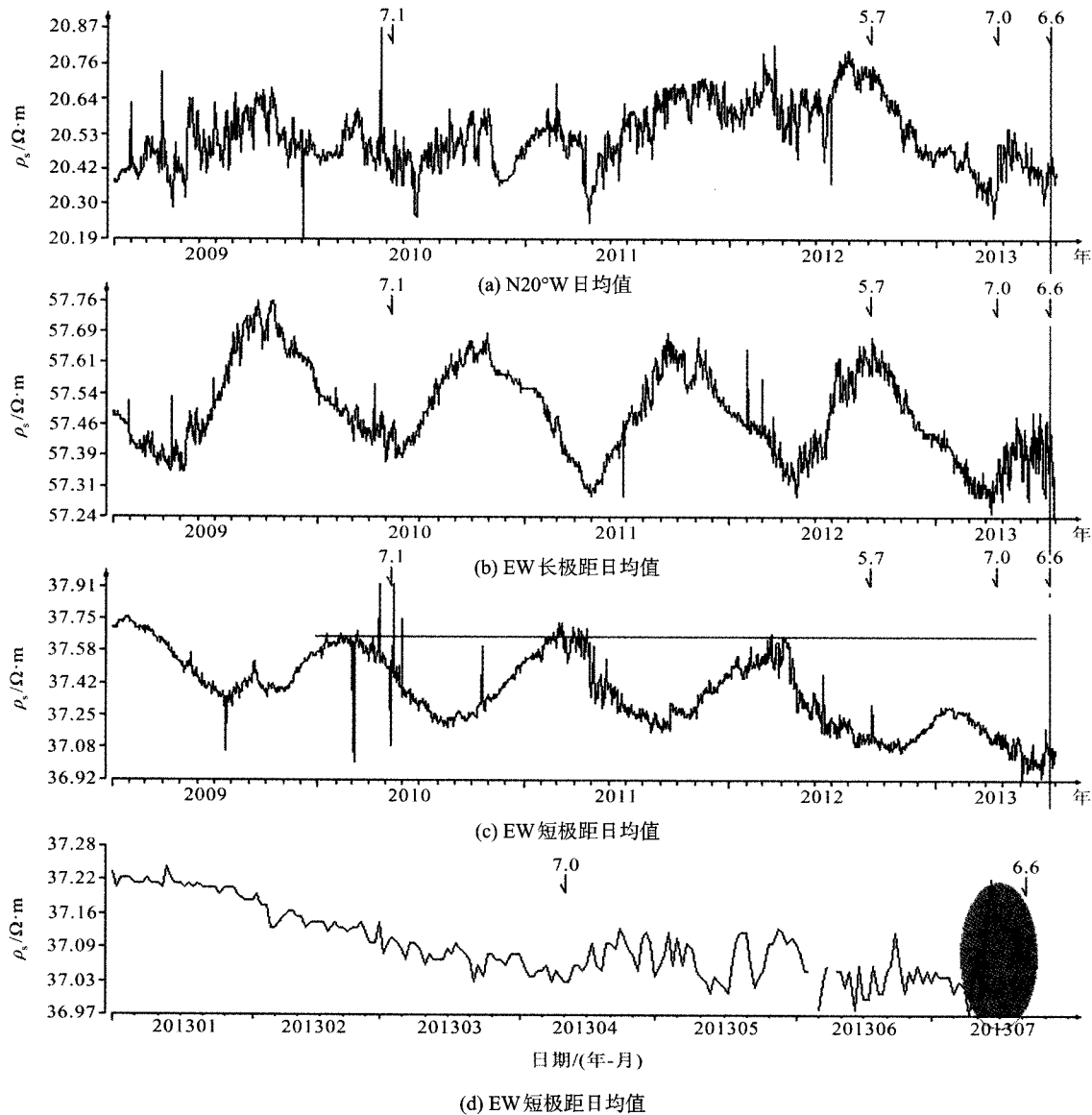


图2 通渭台地电阻率变化

Fig. 2 The daily mean value curves of apparent resistivity at Tongwei station

甘肃通渭台距离本次地震最近(125 km)。图2为通渭台三个测道的地电阻率日均值曲线。由图可见,N20°W测道从2012年大约8月份起出现了显著下降异常,且年变化畸变,相对变化幅度为-3.0%;EW长极距测道从2013年起地电阻率年变化发生了畸变,且在本次地震发生前的3个月地电阻率日均值出现高频次的交替变化;EW短极距测道从2012年7月起发生了下降变化,尽管幅度仅为-0.8%,但异常变化的形态清晰,且从2013年6月底开始(大约震前1个月开始)又在下降背景上出现上升变化,幅度为0.5%,未达到习惯上认为的异常指标1%,但上升形态明显。在震后的2013年8月8日对通渭台地电阻率观测环境进行了现场考察,得知:该台自2012年8月下旬开始在布极区大面积的修建工厂、2012年3月开始在布极区开挖土坑或填沟,显然造成了一定程度的干扰。于是该台出现的上述异常变化就显得有问题了。但是如果把上述3个测道出现的异常全部归结为干扰,也存在矛盾的诠释:第一,N20°W测道的干扰主要是NW测量极周围挖坑取土,使该测量极孤立面积几个平方米的残留的土堆上,但是该测道地电阻率却是下降变化,反之,EW测道长/短极距分别是填埋和电极一侧附近开挖

取土,地电阻率仍然是下降。对台站地下电性结构来讲是相对长期不变的,一般来说地表开挖取土将使表层电阻率增大、电极深度填埋使表层电阻率减小,然而为什么上述该台中期阶段电阻率变化却全部为下降呢?第二,EW长极距测道在震前1个月出现了高频次的交替变化,EW短极距测道在临震前出现了下降背景上的上升形态变化,这又表现出了以往研究的地电阻率短期异常的特点。在以往震例总结以及实验、理论研究都揭示,在贴近震源区附近的台站地电阻率会出现震前中期阶段下降基础上的上升(即“回升”)现象。第三,本次地震震源机制解的最大主压应力方位是NE向,从图2可见,三个测道中尤以N20°W测道中期下降异常最突出,显示了与最大加载方向有关的视电阻率各向异性变化,吻合以往关于震源机制解最大主压应力与台站地电阻率最大下降方向的研究结果^[8]。所以,本文认为尽管该台出现了环境干扰影响问题,但震前的视电阻率异常变化仍然包含了相对变化幅度的地震前兆信息。当然,该台在震前的地电阻率异常变化还需要进一步深入研究,能定量的区分前兆异常或干扰引起的数据异常为好。

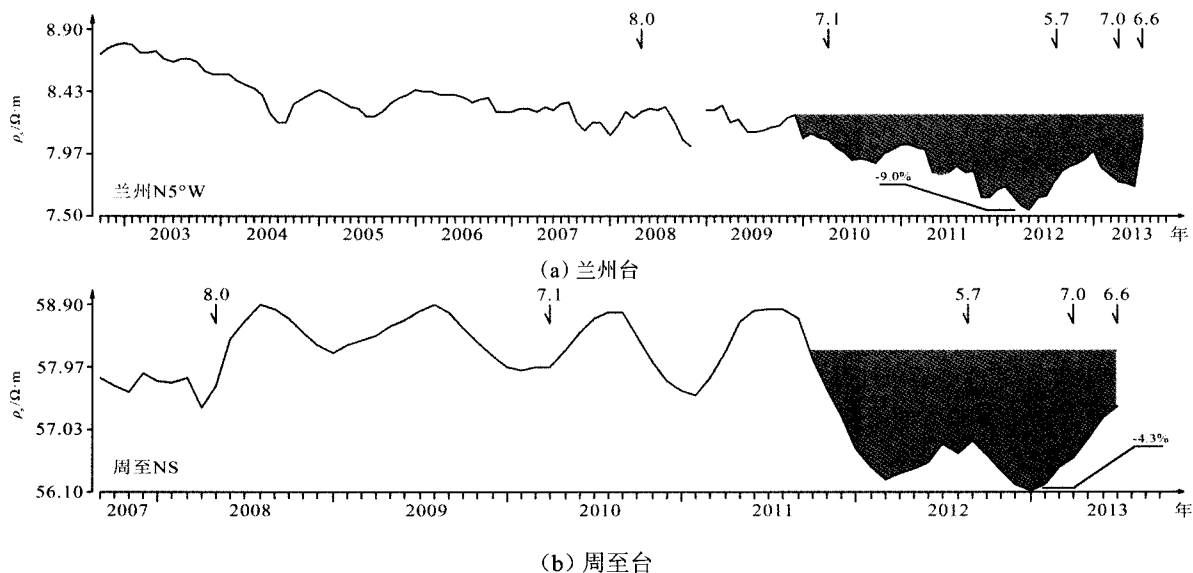


图3 兰州和周至台地电阻率月均值曲线

Fig. 3 The monthly mean value curves of apparent resistivity at Lanzhou and Zhouzhi stations

图3(a)是甘肃兰州台 N5°W测道的地电阻率月均值曲线。由图可见,从大致2010年青海玉树 $M_s7.1$ 地震(733 km)前开始出现地电阻率显著下降异常,幅度为-9.0%,大约从2012年5月起开始上升,在2013年4月20日四川芦山 $M_s7.0$ 地震(648 km)和本次岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前夕出现了上升过程中的下降,本次地震前夕回升变化。另外,从图4(a)所示的地电阻率归一化变化速率曲

线上也可以明确看出2012年该测道出现了显著下降异常,在芦山地震和本次地震前出现了显著上升的中短期异常。实际上,甘肃兰州台地电阻率观测布设N5°W、N50°W、N40°E三个测道,其他两个测道由于外线路和环境干扰等问题,数据不可用。

陕西周至台(图3(b))距离本次地震较远(373 km),从2011年开始周至台NS测道地电阻率出现明显的下降

趋势异常,其异常变化幅度在-4.3%。

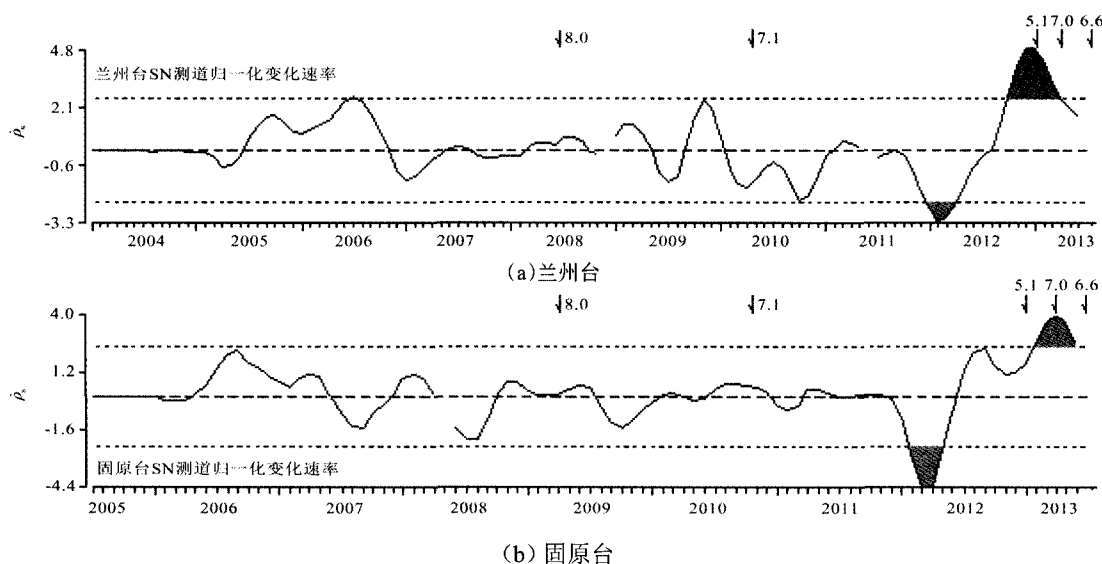


图4 兰州和固原台地电阻率归一化月速率变化

Fig.4 The monthly mean value NVRM curves of apparent resistivity at Lanzhou and Guyuan stations

固原台距本次地震震中252 km。图4(b)为该台2005年7月以来的归一化变化速率曲线。由图可见,固原台站SN测道归一化变化速率在2012年初下降,与兰州台(图4(a))NS测道同期,在2013年2-7月出现超过异常指标的上升异常变化。该测道的下降、上升异常非常类似兰州台NS测道的下降、上升异常变化,且同步。不过,对固原台2012年初的下降异常也有疑问,因为2012年1月该台电极深埋,从原始月均值曲线看或多或少存在一些影响。

甘肃天水台(井下观测,井深0.1 km)距本次地震震中156 km。图5为该台2012年1月至2013年7月31日的小时值原始曲线。由图可见EW、NW、NS测道从2013年芦山 $M_s7.0$ 地震前三天3个测道同时记录到了大幅度的高频次交替变化,完全不同于之前的变化。这种现象一直持续到本次地震前夕,特别是EW、NW测道在本次地震前基本恢复。我国从2007年开始先后在江苏海安、河北大柏舍、陕西郃阳、甘肃天水^[9]、陇南、平凉以及浙江长兴(其中甘肃深井观测是从2012年开始)进行地电阻率深井观测。从已记录到的震前地电阻率异常变化来看,大致变化形态与地面观测的异常变化形态相同,但天水井下地电阻率观测在2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震(529 km)、岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震前的异常变化是高频次交替变化的地电阻率异常,且幅度也小于1%,变化形态完全不同于以往震例,这是一个值得关注和研究的课题。

3.2 时间分布

(1) 中期异常。如果不考虑环境干扰的影响,从本次

地震前异常的时间分布上来看兰州、通渭、固原、周至台有明显的中期异常。最早的是兰州台约在2010年玉树地震后1月开始就出现明显的异常变化;对临夏台EW测道的日均值做富氏滑动,可以得到在2012年4月有大于-3.2%的下降异常;周至台NS测道有大于-4.3%的下降异常。

(2) 短期异常。在这次地震发生之前在震中距离400 km范围内有7个台站记录到了不同程度的短期震前阶段的异常。天水台在这次地震前纪录了明显的短临异常。该台自2012年1月地电阻率数据已非常平稳,有很好的抗地表干扰性,在芦山 $M_s7.0$ 地震前三天三测道同时纪录到了明显的大幅度、高频次的突跳增大的现象,一直持续到本次地震前夕。临夏台NS和EW测道、固原台NS测道、周至台NS和EW测道都反应出了在震前2~3个月的短期异常。

3.3 异常强度

如果在目前情况下暂不考虑环境干扰对各台站的影响,上述所说的表现出中期异常和短期异常的台站有明显的随震中距增大异常幅度衰减的特性。这与1976年唐山 $M_s7.8$ 、2008年汶川 $M_s8.0$ 地震前成都、江油、甘孜地电阻率台的变化趋势一致^[14]。例如,甘肃通渭台NW测道、兰州台NS $^{\circ}$ W测道、固原台NS测道表现出的震前1年尺度一短期异常随震中距的衰减现象。不过陕西周至台变化幅度大,距离远,其次天水井下观测地电阻率变化幅度较小。

4 震前异常变化的机制讨论

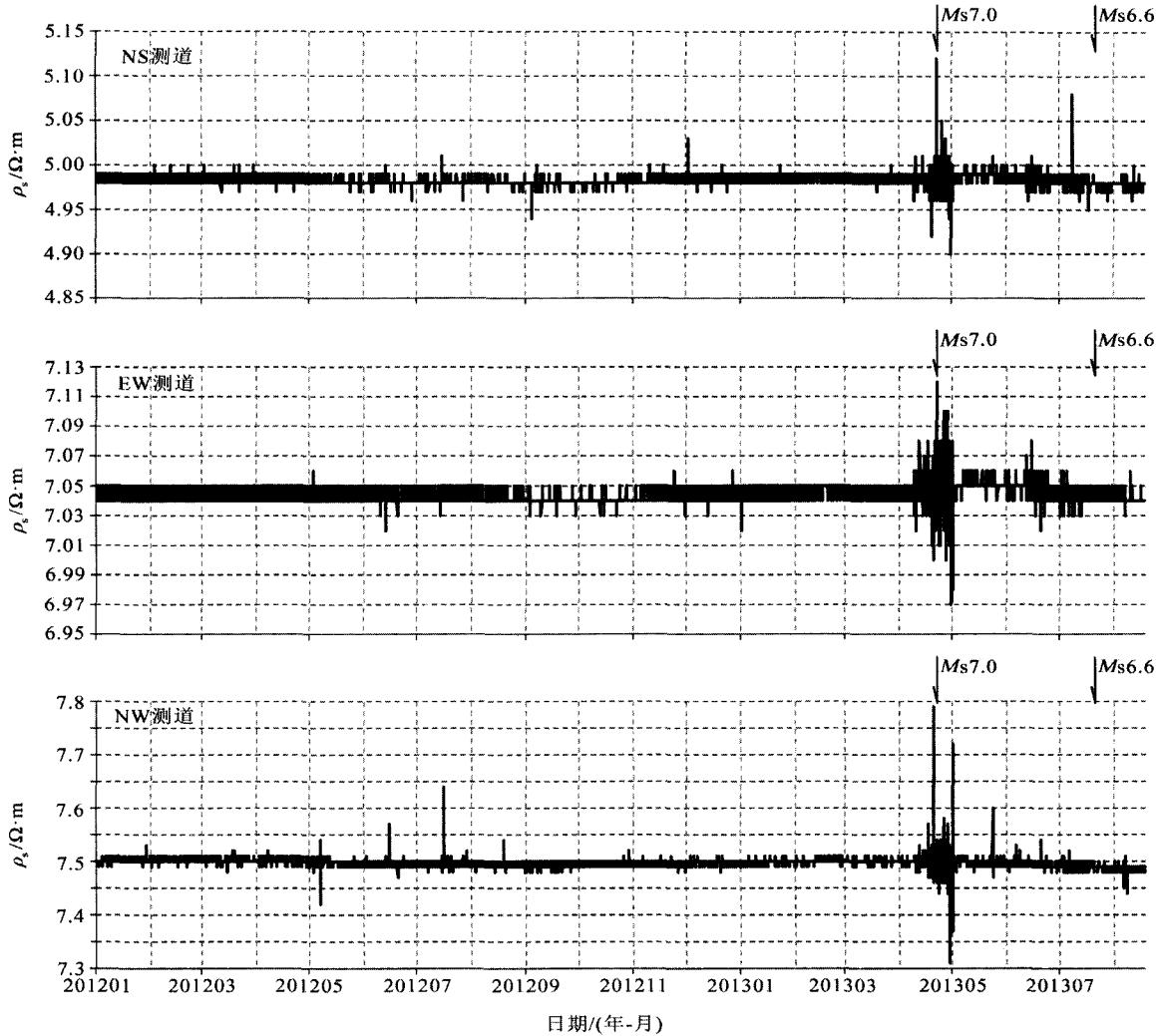


图5 天水台地电阻率小时测值变化曲线
Fig.5 The change of apparent resistivity for station Tianshui

震源区地电阻率异常变化是与地震孕育过程中应力的积累并最终导致岩石介质破裂的过程相关的。在应力积累到介质临界强度时介质开始产生微破裂,这时由于应力加载到孕震后期震源区介质的加速变化并产生突出的地电阻率前兆异常。地电阻率台站所在的地块在边界应力的持续作用下使得地块内部介质的原生微裂隙张开或是闭合,可能会有少量的新生微裂隙产生,特别是在地块边界的断层附近由于介质较地块内部介质更为软弱,在同样的应力作用下更容易发生体积变化,地电阻率也发生相应的变化。在这次地震的震中400 km范围内分布的地电阻率台站基本都分布在主要活断层附近,在地震孕育的过程中这些地带的应力容易集中,而且往往也是介质强度相对较弱的地区,在构造应力的作用下这些地区的介质容易变形,地电阻率更容易变化^[12]。

根据对距离岷县漳县 $M_6.0$ 地震震中400 km范围内7个地电阻率台站的观测值进行分析发现异常主要集中在

在震源区周围的活断层和附近,接近或近似发震断层走向的地电阻率测向更容易出现明显的异常现象。通过分析也发现异常主要以下降变化为主,这些中期、短期的下降异常可能与震源孕育直接有关,是近距离的孕震前兆。目前电阻率台 $\overline{AB}/2$ 极距对等的地下深度的介质富含水,下降异常的集中范围与震源断层破裂尺度对等的关系还揭示了水在震前介质物理过程中起到了积极的作用^[14]。

5 结论

(1) 分别对距离岷县漳县 $M_6.0$ 地震震中400 km范围内7个地电阻率台站的原始月均值曲线、日均值曲线和经富氏滑动、归一化变化速率曲线进行了分析。据震后总结,本次地震前出现了地电阻率异常,在时间上与本次地震对应关系较好。

(2) 本次地震前中期异常主要以下降型异常为主,

异常幅度随震中距增大而衰减。

(3) 尽管本次地震前出现的地电阻率中期—短期异常与本次地震有很好的时间对应,但由于存在台站环境干扰影响,甄别、确认这些异常究竟属于环境干扰影响还是与本次地震有关,仍需进一步研究。从目前来看,本文认为既存在环境干扰影响,也记录到了与本次地震有关的地电阻率前兆异常信息。

参考文献(References)

- [1] Yamazaki Y. Electrical Conductivity of Strained Rocks (2nd paper), Further Experiments on Sedimentary Rocks[J]. Bull Earthq Res Inst Tokyo Univ, 1966, 44 (4): 1553-1570.
- [2] Balsukev O M, Sorokin O N Variations. In Apparent Resistivity of Rocks in the Seismically Active Garm Regin[J]. Izv. Acad. Sci U S S R (Phys Solid Earth), 1973, 8: 865-678.
- [3] Morrow C 著. 薛顺章, 杜学彬 译. 应力作用下凝灰岩电阻率变化[G]// 钱家栋, 陈有发, 金安忠, 编, 著. 地震地电学论文集. 北京: 地震出版社, 1989: 111-125.
Morrow C (write) XUE Shun- Zhang, DU Xue- bin, (translate). Electrical Resistivity Changes in Tuffs due to stress[G]// QIAN Jia- dong, CHEN You- fa, JIN An- zhong, et al. edit. Translation Collections of Seismic Geoelectrics. Beijing: Seismological Press, 1989: 111-125. (in Chinese)
- [4] 钱复业, 赵玉林, 于谋明, 等. 地震前地电阻率的异常变化[J]. 中国科学: B辑, 1982, (9): 831-839.
QIAN Yu- ye, ZHAO Yu- lin, YU Mou- ming, et al. Anomalous Changes in Geoelectric resistivity before Earthquakes[J]. Sci China: Ser B, 1982, (9): 831-839. (in Chinese)
- [5] 钱家栋, 陈有发, 金安忠. 地电阻率发在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1985: 48-132, 226-266.
QIAN Jian- dong, CHEN You- fa, JIN An- zhong. The Application of Geoelectrical Resistivity Method in Earthquake Prediction[M]. Beijing: Seismological Press, 1985: 48-132, 226-266. (in Chinese)
- [6] Brace W F, Orange A S. Electrical Resistivity Changes in Saturated Rocks during Fracture and Fractional Sliding[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(4): 1433-1444.
- [7] 杜学彬, 马占虎, 叶青, 等. 与强地震有关的视电阻率各向异性变化[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 93-100.
DU Xue- bin, MA Zhan- hu, YE Qing, et al. Anisotropic Changes in Earth Resistivity Associated with Strong Earthquakes [J]. Progr Geophys, 2006, 21(1): 93-100. (in Chinese)
- [8] 杜学彬, 李宁, 叶青, 等. 强地震附近地电阻率各向异性变化的原因[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1803-1810.
DU Xue- bin, LI Ning, YE Qing, et al. A Possible Reason for the Anisotropic Changes in Apparent Resistivity near the Focal Region of Strong Earthquake[J]. Chin J Geophys, 2007, 50 (6): 1803-1810. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 中国地震局地质研究所治断层研究中心徐锡伟, 于贵华提供. 甘肃省定西市 6.6 级地震构造图.
<http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/dizhen2.pdf>.
- [11] 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 等. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, 2001, 14(3): 303-304.
DU Xue- bin, Ruan Ai- guo, Fan Shi- hong, et al. Anisotropy of the Apparent Resistivity Variation Rate Near the epicentral Region for Strong Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 14(3): 303-314. (in Chinese)
- [12] 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, 34 (1): 18-22.
XIE Tao, DU Xue- bin, ZHENG Guo- lei. 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)
- [13] 张学民, 武有文. 河北张北地震前后地电阻率异常分析[J]. 山西地震, 2000, (4): 21-23
Zhang Xue- min, Wu You- wen. Analysis of Ground Resistivity Anomalies before and after Zhangbei Earthquake[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2000, (4): 21-23. (in Chinese)
- [14] 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: D Series, 2010, 40(10): 1321-1330 (in Chinese)
- [15] 杜学彬, 赵和云, 陈宝智. 地电阻率临震突变与活断层、发震应力场[J]. 地震学报, 1993, 15(5): 303-312.
DU Xue- bin, Zhao He- Yun, CHEN Bao- zhi. On the Relation of Imminent Sudden in Earth Resistivity to the Active fault and Generating- earthquake Stress Field[J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 15(5): 663-673. (in Chinese)