

王亚丽,于晨,岳冲,等,2021. 2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震前多尺度电磁异常现象. 中国地震,37(4):797~805.

# 2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震前 多尺度电磁异常现象

王亚丽<sup>1)</sup> 于晨<sup>1)</sup> 岳冲<sup>1)</sup> 胡源<sup>2)</sup> 姚丽<sup>1)</sup>

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 甘肃省地震局张掖地震监测中心站,甘肃高台 734300

**摘要** 2019 年 9 月 16 日甘肃张掖发生 5.0 级地震,地震发生前既有空间范围跨度较大的地磁低点位移异常,也有单台电磁扰动异常;既有震前 2 年开始出现的山丹台视电阻率的年变形态畸变,也有震前 3 个月之内出现的高台钻孔应变和高台大庄低频电磁扰动异常。本次地震震级不高却记录到丰富的电磁场的异常信号,表明该地区处于地震电磁异常的敏感区。高台钻孔应变在震前观测到同步的异常变化,揭示孕震区应力状态发生了显著的变化。

**关键词:** 电磁异常 多尺度 应力状态 张掖 5.0 级地震 敏感区

[文章编号] 1001-4683(2021)04-0797-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

电磁场是宇宙中最重要、最普遍的物理场,是地球基本物理场之一,也是联系空间、地表、地下各圈层信息的基本场量(范莹莹等,2014)。国内外地震电磁波的观测实践表明,地震电磁异常现象是客观事实。国内外学术界有很多关于地震相关电磁异常现象的报道(Varotsos et al, 1991、2013; Michel et al, 1998; 赵和云等, 2002; 李宁, 2007; Wang et al, 2019),不同学者在地电场、地磁场前兆现象的生成机制、传播机理方面做了大量加载实验以及理论研究工作(郭自强等,1988; Yamada et al, 1989; 钱书清等,2003),证明了地震电磁场前兆现象的可观测性(赵国泽等,2003、2015)。

2019 年 9 月 16 日甘肃张掖 5.0 级地震发生在祁连山北缘断裂,震源深度 11km。由于 5.0~5.9 级地震的前兆异常优势展布范围为 0~150km(赵和云等,1997),故本文将对震中附近 150km 范围内的电磁观测资料进行重点分析。

张掖 5.0 级地震震中附近 150km 范围内共有山丹台和高台大庄 2 个电磁定点观测台站,其中山丹台采用视电阻率、地电场和地磁 3 种观测手段,高台大庄采用地电场和低频电磁扰动 2 种观测手段。另外,震中 150km 范围内还有莺乐峡、石灰窑口、扁都口、红寺湖、童子坝等 5 个水准观测站,以及肃南台水管仪观测和高台 4 分量钻孔应变观测。震前该区域

[收稿日期] 2020-04-21 [修定日期] 2020-06-28

[项目类别] 2020 年度震情跟踪定向工作任务(2020020404)、国家重点研发计划(2017YFC1500502)共同资助

[作者简介] 王亚丽,女,1979 年生,副研究员,主要从事电磁方法地震预报研究工作。E-mail:wang\_violin@163.com

内视电阻率、地磁场和电磁扰动观测资料存在不同时间尺度和空间尺度的异常变化,同时高台钻孔应变 NE 和 NW 两个分量也存在显著的年变形态畸变异常(图 1)。

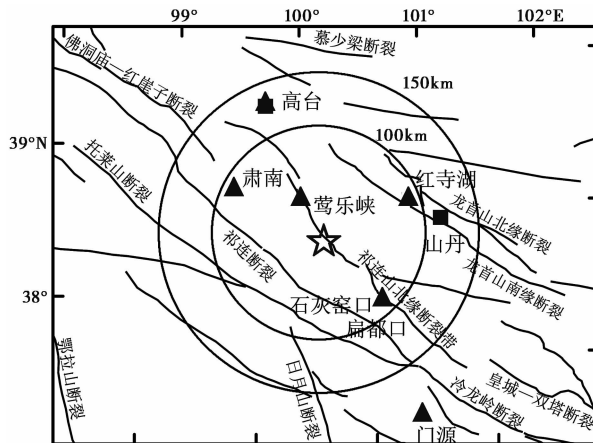


图 1 震中距 150km 范围内的电磁和形变观测台站分布  
三角形为形变观测台站; 正方形为电磁观测台站

## 1 震前异常特征

### 1.1 山丹台视电阻率异常

山丹地电台为国家基本台,位于祁连山北缘断裂与龙首山断裂带之间,距离 2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震震中约 63km。该台采用对称四极装置方式,布设 EW 向、NS 向和 N45°W 共 3 条测线(图 2(a)),各供电电极距均为 1000m,测量极距为 200m,接地电阻小于 10Ω,观测仪器为 ZD-8 数字地电仪。由于仪器故障和外线路漏电,山丹台视电阻率 NS 测道在 2014—2015 年发生不规则变化,于 2016 年 10 月进行外线路改造。但 NW 和 EW 测道观测数据质量比较可靠。图 2(d)为山丹台电阻率 EW 测道 2014—2018 年观测日均值曲线,可以发现年变幅度在 2017—2018 年出现明显减小。图 2(e)中的实线为利用观测数据拟合的 EW 测道年变趋势线,2017 年 7 月底至 2018 年 8 月初,变化形态打破之前的变化趋势,出现变化形态畸变异常(其中虚线为该时间年变趋势的估计值)。2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震前,EW 测道 2017 年以来的年变化形态的畸变一直作为异常跟踪,张掖 5.0 级地震发生时,该异常已经处于转折回升阶段。

### 1.2 高台大庄低频电磁扰动异常

高台大庄地电观测站距离张掖 5.0 级地震震中约 94km,该台采用地壳应力研究所研制的 DCRD-1 电磁扰观测系统对电磁扰动进行观测,仪器观测频率范围 0.1~10Hz,产出 NS、EW 向电场和磁场的强度数据。由于仪器记录为分钟值,即 1 次/min,故电磁扰动观测实际上是记录了电场、磁场的脉冲变化。

电场 EW 向和 NS 向观测在震前未发现明显的异常信号,而磁场 NS 向分量自 2019 年 9 月 7 日起开始出现大幅度脉冲信号,2019 年 9 月 16 日地震发生后脉冲信号消失;由于同期测区有宜宣高压直流输电干扰,因此不作为地震异常考虑。而磁场 EW 向分量自 2019 年 7

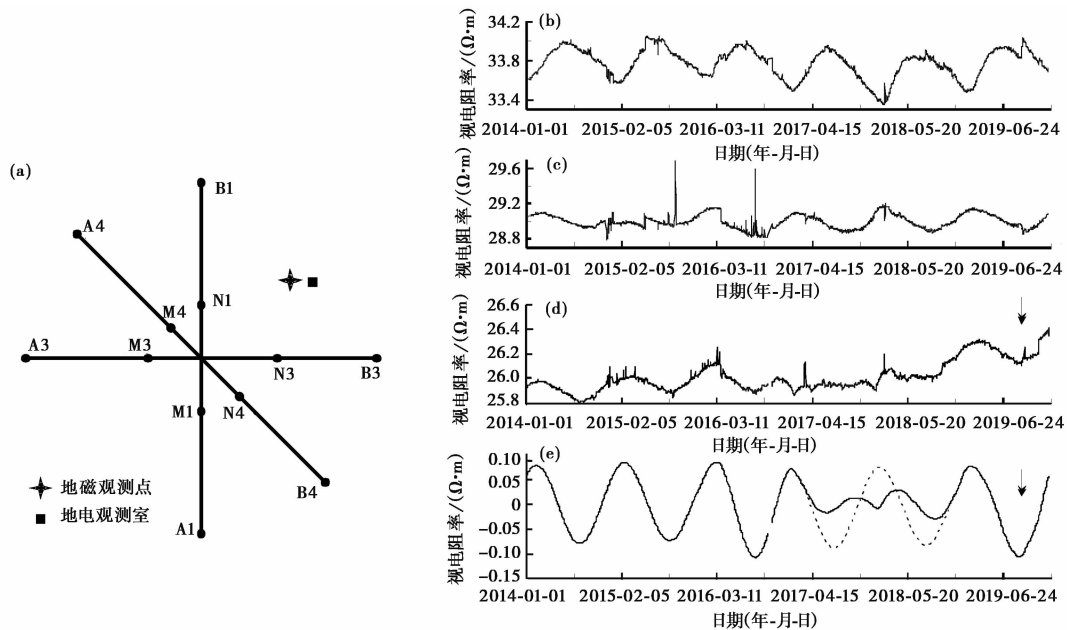


图 2 山丹台视电阻率观测布极图及各测道观测值变化曲线

(a) 山丹台视电阻率观测布极图(据李宁(2007)); (b) NS 测道日均值; (c) NW 测道日均值; (d) EW 测道日均值; (e) EW 测道年变趋势; 箭头指示发震时间

月 24 日开始同时出现大幅度上升以及高频信号增强现象,震后异常开始缓慢恢复。截至 2019 年 12 月 31 日,磁场 EW 向的变化幅度仍未恢复到震前水平(图 3)。

### 1.3 高台钻孔应变异常变化

高台地震台布设的 4 分量钻孔应变观测与高台大庄低频电磁扰动观测站相距仅 15km,其 NS 和 EW 分量年变趋势与往年一致,而 NE 和 NW 分量自 2019 年 6 月 20 日开始明显低于往年变化值,出现破年变异常,并在张掖 5.0 级地震发生后逐步转折上升。截至 2019 年年底,NE 和 NW 分量的幅值仍未达到往年的变化水平,但年变趋势基本恢复(图 4)。

### 1.4 变化磁场区域性异常

变化磁场的强弱既与外场有关,又与地下介质导电率的大小有关。单台地磁日变幅逐日变化复杂,即使变化较大也不能算作地震前兆异常(王武星等,2009)。地震孕育过程中,在构造应力作用下断层区域岩石磁化率和剩余磁化强度发生变化,引起孕震区局部岩石圈磁场发生变化(顾春雷等,2010),因此震前可能观测到与地震有关的局部性或区域性磁异常。

#### 1.4.1 地磁低点位移异常

震前地磁 Z 分量日变化异常主要表现在幅度和相位上的变化偏离正常背景场。地磁低点位移方法即利用地磁日变幅极小值出现时间(低点时间)在空间上的区域性异常特征进行地震预测的方法(王武星等,2009)。由大量震例统计得出,发震日期大多数为异常日后(27±4)天或(41±4)天,发震地区在低点位移突变分界线附近(丁鉴海等,2009)。

2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震前,中国大陆出现 2 次地磁低点位移异常(图 5),一

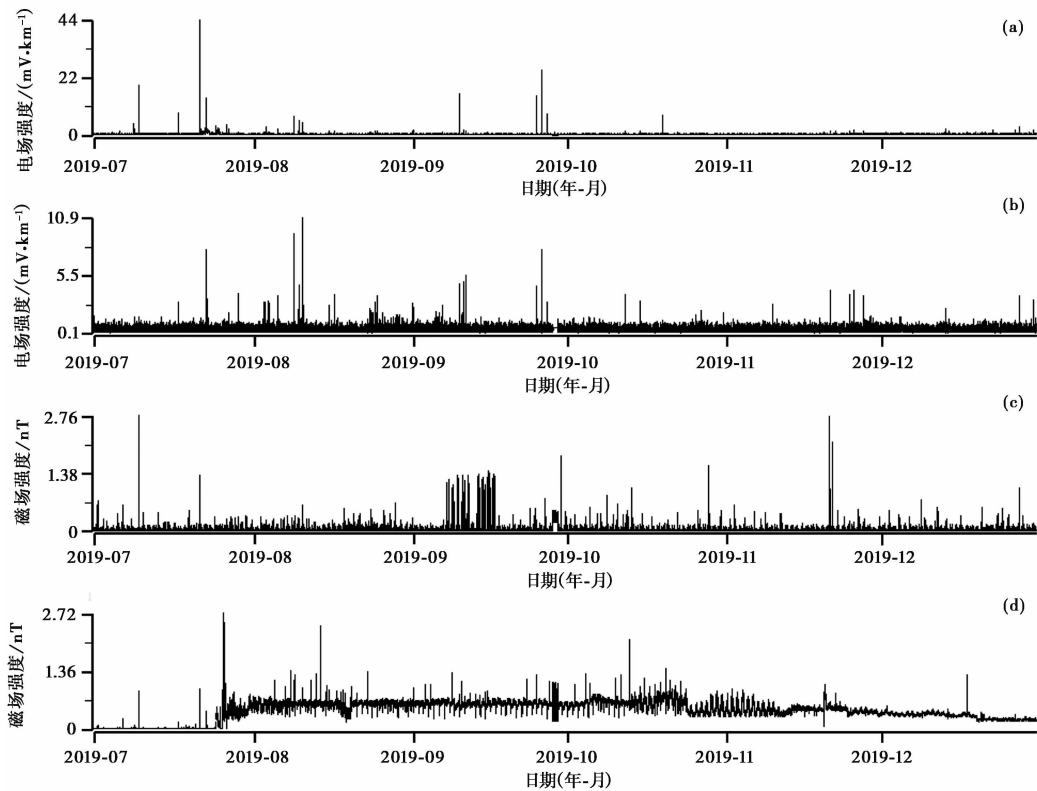


图3 高台大庄低频电磁扰动异常

(a) 低频电扰动观测 NS 分量; (b) 低频电扰动观测 EW 分量;  
(c) 低频磁扰动观测 NS 分量; (d) 低频磁扰动观测 EW 分量

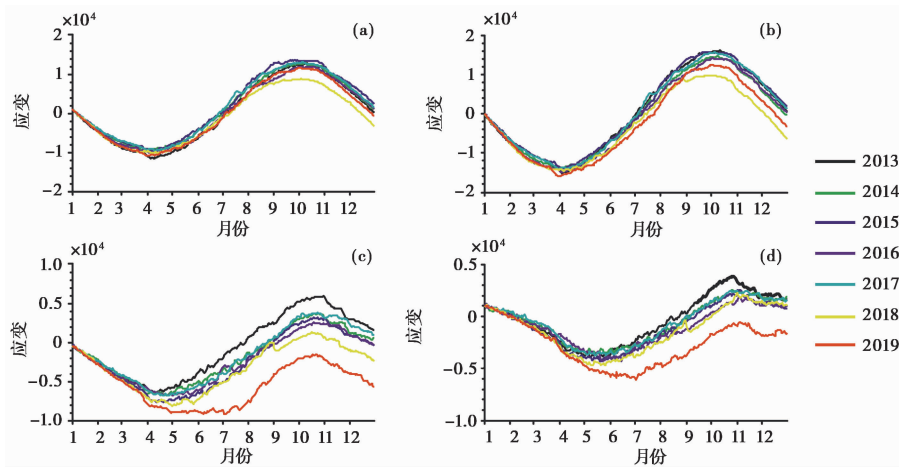


图4 高台钻孔应变年变曲线

(a) NS 分量; (b) EW 分量; (c) NE 分量; (d) NW 分量

条(图 5 中虚线表示)为 8 月 3 日地磁低点位移异常,突变分界线位于  $85^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$  之间,大致呈 NE-SW 向穿过内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海西藏等地,异常后 44 天在低点位移分界线附近发生张掖 5.0 级地震;另一条(图 5 中实线表示)为 2019 年 8 月 18 日地磁低点位移异常,突变分界线位于  $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 、 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$  之间,大致呈 NE-SW 向穿过内蒙古、甘肃、青海、陕西、山西、河北和山东等地,张掖 5.0 级地震发生在该异常后第 29 天。2 条低点位移分界线在甘肃、青海交界地区交汇,张掖地震发生在 2 条低点位移分界线的交汇地区附近。

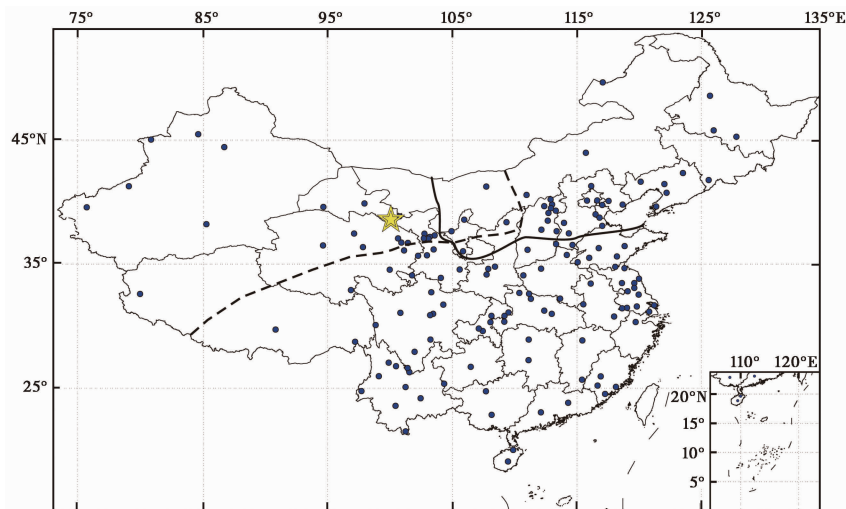


图 5 地磁低点位移分界线

五角星为张掖 5.0 级地震;虚线为 8 月 3 日低点位移分界线;实线为 8 月 18 日低点位移分界线

#### 1.4.2 地磁 $Z$ 分量日变化形态区域性异常

地磁  $Z$  分量日变化形态呈现近似余弦曲线形态,即 2 个极大值点和 1 个极小值点。尽管日变波形的幅度、极值时间与地理经度、纬度有关,但同一天在不同台站观测到的日变波形具有广域相似性(李宁,2007)。

2019 年 8 月 3 日中国大陆范围内观测到的地磁  $Z$  分量日变化形态非常规则,符合正常的近余弦曲线形态(图 6(b))。而 2019 年 8 月 18 日在地磁低点位移曲线的两侧出现日变化形态不一致的现象,其中在分界线的东北侧,台站观测到的  $Z$  分量日变化出现多次低值点,分界线另一侧观测到的则是基本正常的日变化形态(图 6(d))。由于多次低值点的  $Z$  分量变化幅度相差较小,因此地磁低点位移分界线的位置存在一定的不确定性,8 月 18 日的地磁低点位移异常实际上就是由当天  $Z$  分量日变形态区域性异常引起的。2 次低点位移异常出现当天,空间天气均处于比较平静的状态,无明显磁暴现象, $Z$  分量的形态畸变可能与地下介质的电性变化有关。

## 2 讨论

2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震前,电磁场出现不同时间和空间尺度的异常变化。

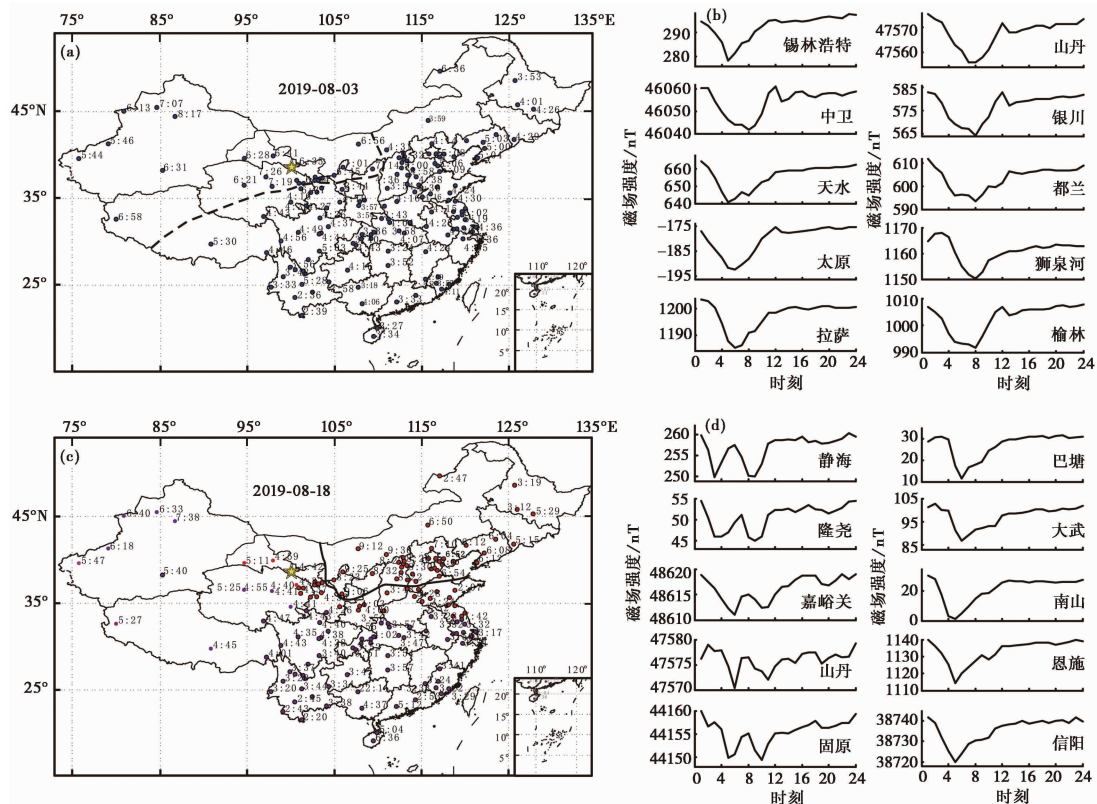


图6 地磁低点位移分界线和Z分量日变曲线

(a) 2019年8月3日地磁低点位移分界线,其中黄色五角星为张掖5.0级地震震中位置;(b) 2019年8月3日Z分量日变化曲线;(c) 2019年8月18日地磁低点位移分界线,其中红色圆点为Z分量日变化形态出现畸变的台站;(d) 2019年8月18日Z分量日变化曲线

### 2.1 异常的空间尺度

2019年8月3日和2019年8月18日2次地磁低点位移异常涉及的空间范围较广,包括西藏、西北和华北等地区。丁鉴海等(2009)提出2条以上地磁低点位移突变分界线交汇地点可能是未来发生地震的高概率地区,例如2005年2月15日新疆乌什6.2级地震就发生在2条地磁低点位移线交汇区附近。此次张掖5.0级地震之前出现的2条低点位移线在甘肃、青海交界地区交汇,地震发生在交汇地区附近。此次震例成为“地磁低点位移突变分界线交汇法”(丁鉴海等,2009)缩小预报范围方法的例证之一。8月3日当地磁Z分量日变化形态非常规则,而8月18日在分界线两侧呈现出完全不同的日变形态,产生这种日变化形态畸变的原因可能非常复杂。由于空间天气的扰动极易引起地磁日变化形态的畸变,导致多个低值点的产生,从而引起低点位移分界线位置的不确定性,通常认为这种由于地磁日变形态畸变引起的低点位移异常作为地震前兆异常的信度不高。从本次震例来看,仅仅利用当天是否出现日变化形态畸变判定异常信度是不可靠的。

### 2.2 异常的时间尺度

2017年7月底至2018年8月初,山丹台视电阻率EW向变化形态打破之前的变化趋

势,之后开始缓慢恢复,至 2019 年 9 月 16 日张掖 5.0 级地震发生时已经恢复到正常水平。震例统计结果表明,地震多发生在异常极值附近或恢复过程中,也有个别地震发生在异常恢复之后(王志贤等,1999)。

钱复业等(1982)用统一方法系统分析了自 1967 年开展观测以来积累的全部震例(40 余个),得到视电阻率异常持续时间  $T$  与震级  $M$  之间的统计关系为: $M=0.5+2.5\lg T$ 。山丹台视电阻率异常持续时间长达一年多,按照上述统计关系计算,预测震级可达 6.9 级,而 2019 年 9 月 16 日张掖地震为 5.0 级,远低于经验模型预测的震级。

张掖 5.0 级地震前观测到丰富的前兆异常,既有接近 2 年尺度的视电阻率年变趋势异常,也存在 3 个月尺度的高台大庄电磁扰动和高台钻孔应变异常,同时也有震前 1 个月尺度的地磁低点位移异常(图 7)。这表明该区域可能是电磁现象的敏感区域,或者预示着该区域具有较大的区域应力场的改变。

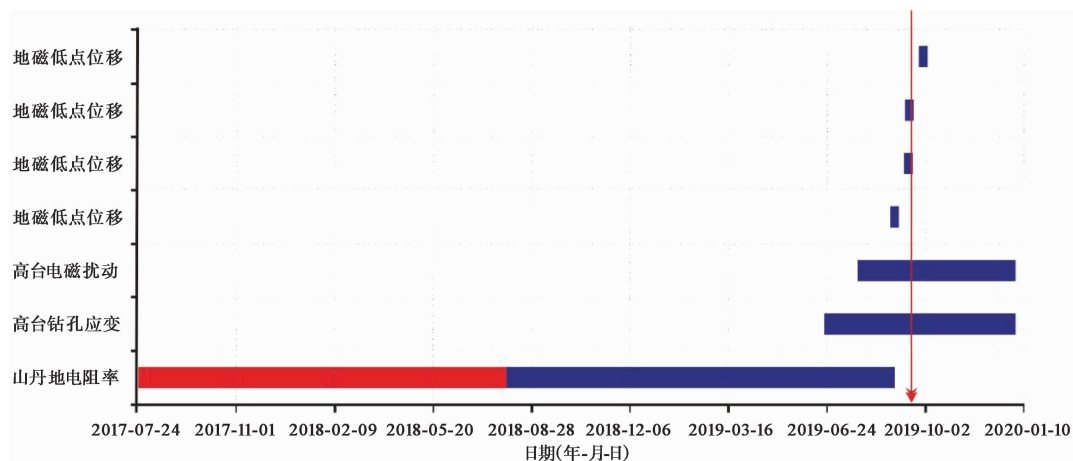


图 7 震前异常进程图

红色代表山丹台视电阻率年变形态畸变阶段;蓝色代表畸变恢复阶段

### 2.3 不同异常的协同变化

高台大庄低频电磁扰动磁 EW 分量自 2019 年 7 月 24 日开始出现大幅度上升以及高频信号增强现象,而高台 4 分量钻孔应变的 NE 和 NW 分量自 6 月 20 日开始出现破年变异常。张掖 5.0 级地震发生后,钻孔应变和电磁扰动异常并未立即消失,而是经历了一个缓慢的过程,对于应变和电磁场的异常变化,无论是异常出现的时间还是变化过程均高度一致,可以推断二者均是由于局部应力场的改变引起的。

2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前,祁连山北缘断裂带上的山丹视电阻率和高台应变资料也曾出现同步的临震异常变化(李兴坚等,2002),表明处于同一应力-应变地震带上的高台应变和山丹台电磁场观测对于祁连山北缘断裂带应力-应变的变化及青藏高原整体活动均非常敏感,这与何康等(2016)的统计结果一致。

地震孕育过程中可能会造成较大范围的区域应力场发生变化,局部地区应力-应变的积累造成该区域内多种前兆在时间上存在内在的协调一致性。高台电磁扰动和分量钻孔应变的同步变化是孕震区应力场改变在不同物理量上的表现。

### 3 结论

2019年9月16日张掖5.0级地震虽然震级不高,但是观测到不同时间尺度和不同空间尺度的电磁异常现象,该区域可能处于地震电磁信号的“敏感区”,同时也表明电磁异常是对短临地震反应敏感的前兆现象。张掖5.0级地震发生在2条地磁低点位移异常交汇区域附近,成为地磁“突变分界线交汇法”缩小预报范围的范例。

致谢:感谢审稿专家认真细致的审读,为本文质量的提高提供了重要帮助。

### 参考文献

- 丁鉴海,车时,余素荣,等,2009. 地磁日变地震预报方法及其震例研究. 北京:地震出版社.
- 范莹莹,解滔,安张辉,等,2014. 2008年汶川 $M_s$ 8.0与2010年玉树 $M_s$ 7.1地震前电磁现象研究. 地震学报, **36**(2): 275~291.
- 顾春雷,张毅,徐如刚,等,2010. 地震前后岩石圈磁场变化特征分析. 地球物理学进展, **25**(2):472~477.
- 郭自强,周大庄,施行觉,等,1988. 岩石破裂中的电子发射. 地球物理学报, **31**(5):566~571.
- 何康,郑海刚,李军辉,等,2016. 基于震例的地震电磁异常特征研究. 地震, **36**(4):144~152.
- 李宁,2007. 天祝地震空区地震电磁前兆现象研究. 硕士学位论文. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 李兴坚,周丽萍,陈兰新,等,2002. 昆仑山口西 $M_s$ 8.1地震前地电阻率资料异常变化分析. 高原地震, **14**(3):48~51.
- 钱复业,赵玉林,于谋明,等,1982. 地震前地电阻率的异常变化. 中国科学:(B辑), (9):831~839.
- 钱书清,郝锦琦,周建国,等,2003. 岩石受压破裂的ULF和LF电磁前兆信号. 中国地震, **19**(2):109~116.
- 王武星,丁鉴海,余素荣,等,2009. 汶川 $M_s$ 8.0地震前地磁短临异常与强震预测探索. 地震学报, **31**(2):172~179.
- 王志贤,张学民,李永庆,等,1999. 地电中期前兆异常特征及其对强震中期趋势的判断. 地震学报, **21**(2):187~193.
- 赵国泽, Bi Y X, 王立凤,等,2015. 中国地震交变电磁场观测数据处理技术新进展. 中国科学:地球科学, **45**(1):22~33.
- 赵国泽,陆建勋,2003. 利用人工源超低频电磁波监测地震的实验与分析. 中国工程科学, **5**(10):27~33.
- 赵和云,钱家栋,夏玉胜,等,1997. 甘肃、宁夏和青海地区地震前兆的某些特征. 西北地震学报, **19**(3):1~10.
- 赵和云,阮爱国,扬荣,等,2002. 天祝大地电场异常与1995年永登5.8、1996年天祝5.4级地震. 西北地震学报, **24**(1): 56~64.
- Michel S, Zlotnicki J, 1998. Self-potential and magnetic surveying of La Fournaise volcano (Réunion Island): Correlations with faulting, fluid circulation, and eruption. *J Geophys Res*, **103**(B8):17845~17857.
- Varotsos P, Lazaridou M, 1991. Latest aspects of earthquake prediction in greece based on seismic electric signals. *Tectonophysics*, **188**(3~4):321~347.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skordas E S, et al, 2013. Seismic electric signals: an additional fact showing their physical interconnection with seismicity. *Tectonophysics*, **589**:116~125.
- Wang Y L, Xie T, An Y R, et al, 2019. Characteristics of the coseismic geomagnetic disturbances recorded during the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan Earthquake and two unexplained problems. *Earth Planet Phys*, **3**(6):435~443.
- Yamada I, Masuda K, Mizutani H, 1989. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Phys Earth Planet Inter*, **57**(1~2):157~168.



## Multi-scale Electromagnetic Anomalies Prior to the Zhangye *M*5.0 Earthquake on September 16, 2019

Wang Yali<sup>1)</sup> Yu Chen<sup>1)</sup> Yue Chong<sup>1)</sup> Hu Yuan<sup>2)</sup> Yao Li<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Zhangye Central Earthquake Monitoring Station, Gansu Earthquake Agency, Gaotai 734300, Gansu, China

**Abstract** On September 16, 2019, when a *M*5.0 earthquake occurred in Zhangye, Gansu Province, the geophysical anomalies of multiple time and spatial scales were observed before the event, including “geomagnetic low-point displacement” that spanned an area of square kilometers and electromagnetic disturbance on a single observatory. In addition, there exist both annual distortion of apparent resistivity of Shandan observatory which lasted for 2 years and borehole strain anomalies and low frequency electromagnetic disturbance at Gaotai observatory which appeared within 3 months prior to the Zhangye earthquake. Abundant abnormal signals were observed although the magnitude of the Zhangye earthquake is not a very big one, which indicates that the fault of northern margin of the Qilian Mountain is a sensitive region of seismic electromagnetic signal. The synchronous abnormal changes of the borehole strain at Gaotai observatory revealed that the stress in the seismogenic region had changed significantly before the earthquake.

**Keywords:** Electromagnetic anomalies; Multi-scale; Stress; The Zhangye *M*5.0 earthquake; Sensitive region