

杨兴悦,王燕,张俏丽,等.甘肃张掖 $M_s5.0$ 地震前山丹地电异常探讨[J].地震工程学报,2021,43(2):296-305.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.296

YANG Xingyue, WANG Yan, ZHANG Xiaoli, et al. Geoelectric Anomalies at Shandan Station before the Zhangye $M_s5.0$ earthquake in Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 296-305. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.296

甘肃张掖 $M_s5.0$ 地震前山丹地电异常探讨

杨兴悦, 王 燕, 张俏丽, 高振生, 李 亮

(兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2019 年 9 月 16 日在甘肃省张掖市甘州区发生 $M_s5.0$ 地震,震前山丹地电阻率和地电场观测资料出现了较为明显的短临异常,震中距 63 km。本文对该异常进行分析总结,排除周围观测环境,观测系统,自然环境,磁暴等因素外,认为该异常是较为可信的地震前兆异常。地电阻率观测资料异常形态 NS 测道表现为转折快速上升-缓慢下降,EW 测道为转折缓慢上升,N45°W 测道为缓慢下降-转折缓慢上升。地电场观测资料异常形态长极距 NS 道、长极距 N45°E 道、短极距 NS 道表现为转折同步缓慢上升,长极距 EW 道和短极距 EW 道转折同步缓慢下降,短极距 N45°E 道异常不明显。地震在异常持续过程中出现转折变化或上升(下降)速率发生改变时发生。

关键词: 张掖地震; 地电异常; 地电阻率; 地电场

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)02-0296-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.296

Geoelectric Anomalies at Shandan Station before the Zhangye $M_s5.0$ Earthquake in Gansu Province

YANG Xingyue, WANG Yan, ZHANG Xiaoli, GAO Zhensheng, LI Liang

(Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The middle section of Qilian Mountains is considered to be a key area where strong earthquakes might occur in recent years, but the earthquake situation in the study area is still unclear. Therefore, it is of great practical significance to study the anomaly characteristics of geoelectric observation data recorded by Shandan station in Zhangye City, Gansu Province. On September 16, 2019, an $M_s5.0$ earthquake occurred in Ganzhou District, Zhangye City, Gansu Province. Before the earthquake, there were obvious short-impending anomalies in the observation data of Shandan earth resistivity and geoelectric field, with an epicenter distance of 63 km. In this paper, the anomalies were analyzed and summarized, and they were considered to be reliable earthquake precursor anomalies after excluding the surrounding observation environment, obser-

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 甘肃省地震局科技发展基金野外站项目(2018Y01)

第一作者简介: 杨兴悦,男,高级工程师,主要从事地震监测与质量管理工作。E-mail: yxy_wy@163.com。

通信作者: 王 燕,高级工程师,主要从事地球物理台网数据处理工作。E-mail: 170210916@qq.com。

vation system, natural environment, magnetic storm, and other factors. The abnormal forms of earth resistivity and geoelectric field observation data in different channels were also discussed. It is found that the earthquake occurred when the above-mentioned observation data had a turning change or the rising (falling) rate changed during the anomaly duration

Keywords: Zhangye earthquake; geoelectric anomaly; geoelectric resistivity; geoelectric field

0 引言

据中国地震台网中心测定,2019 年 9 月 16 日 20 时 48 分,在甘肃张掖市甘州区(38.60°N , 100.35°E)发生了 $M_s5.0$ 地震,震源深度 11 km^[1]。地震震中位于甘州区花寨乡附近,张掖市甘州区、临泽县有明显震感;酒泉市肃州区、金昌市有震感,无人员伤亡。

祁连山中段被认为是未来可能发生强震的重点区域^①,震情形势较为严峻,受到相关人员的广泛关注。张掖市甘州区 $M_s5.0$ 地震位于中国地震局和甘肃省地震局划定的 2019 年度强震危险区域,该地震发生后,该区域未来的震情形势依然不明朗,仍需要重点关注。

地电观测是地球物理场观测的重要组成部分^[2],用于地震观测的地电观测主要进行地电阻率和地电场观测。地电阻观测对介质应变状态有灵敏响应,观测数据无须进行复杂的数学处理,通过直观的形态变化就能发现异常^[3]。地电场分为大地电场和自然电场两部分,地电场主要是地球外部空间的各种电流在地球内部所产生的感应电场;自然电场主要是地壳中某些物理、化学作用引起的电场^[4],国内外已开展的大量地电观测用于地震预测研究,取得了良好的效果^[2,5-10]。地电观测是我国地震监测预报的重要手段之一,经历了近 50 余年的发展,积累了丰富的观测数据和丰富的观测经验,为地震探索研究提供了基本保障^[11]。但地震预测至今还是世界上未解决的难题,各级政府对地震预测研究高度重视,社会公众对地震预测预报的需求仍然很高^[12]。因此在祁连山地区地震形势依然严峻的情况下,有必要行分析总结张掖 5.0 地震前的地球物理观测资料,排除观测资料包含的各种干扰信息^[13],提取异常信息,总结经验,为后序地震预测研判提供参考。

1 山丹台地电简介

山丹台位于河西走廊中部,东邻永昌,南接青海、北靠内蒙古阿拉善右旗。地电测区在距离山丹县城 8 km 的清泉镇南湾村,处于荒山丘陵,地表为旷野型戈壁沙土堆,覆盖层较深,地形稍有起伏,地

表几乎没有植被,地下潜水位埋深在 50 m 以下,观测环境好。构造上位于祁连山地震带,所处的断裂带是河西走廊区域性主干大断裂,切割地壳较深,呈 NWW 走向,测区地质岩性为砂岩^[14]。台站主要进行地电阻率、地电场、地磁和气象三要素观测。

2019 年 9 月 16 日在甘肃张掖市甘州区发生的 $M_s5.0$ 地震,震中位于山丹台西偏南 15° 方向 63 km 处。

1.1 地电阻率观测

地电阻率观测开始于 1972 年,2006 年 9 月起使用 ZD8BI 型地电仪,采用水平对称四极法观测,分别进行南北(NS)、东西(EW)、北 $N45^{\circ}$ 西($N45^{\circ}\text{W}$)三测道时值观测。三个测道供电电极极距均为 1 000 m,NS 和 $N45^{\circ}\text{W}$ 测道测量极极距为 200 m,EW 测道测量极极距为 226 m,布极示意图如图 1(a)。电极采用 1 000 mm $\times$ 800 mm $\times$ 5 mm 的铅板,埋深 1.8 m,外线路架设采用空架方式。

1.2 地电场观测

地电场观测开始于 2006 年,使用仪器为 ZD9A-II 型地电场仪,采用三角形布极,正交长极距为 300 m,短极距为 200 m,斜长极距为 424 m,斜短极距为 283 m,布极示意图如图 1(b),分别进行 NS、EW 和 $N45^{\circ}\text{E}$ 三个方向长、短极距六测道分钟值观测。采用固体不极化电极,埋设在地表冻土层以下,埋深约 4.2 m,各电极基本处于同一平面。外线路全部为铠装电缆,采用空架方式。

2 山丹台地电异常分析

2.1 山丹地电阻率

2006 年以来山丹地电阻率采用 ZD8BI 型地电仪进行 NS、EW、 $N45^{\circ}\text{W}$ 三测道观测,观测资料稳定可靠,NS、和 $N45^{\circ}\text{W}$ 测道时值观测数据年动态清晰,2018 年 10 月前 EW 测道时值数据年变形态不清晰,2018 年 10 月更换配电箱后该道观测资料出现了较为清晰的年变形态,EW 和 $N45^{\circ}\text{W}$ 测道资料年变形态较为相似(图 2)。

① 2019 年度甘肃省震情趋势会商报告,2018.

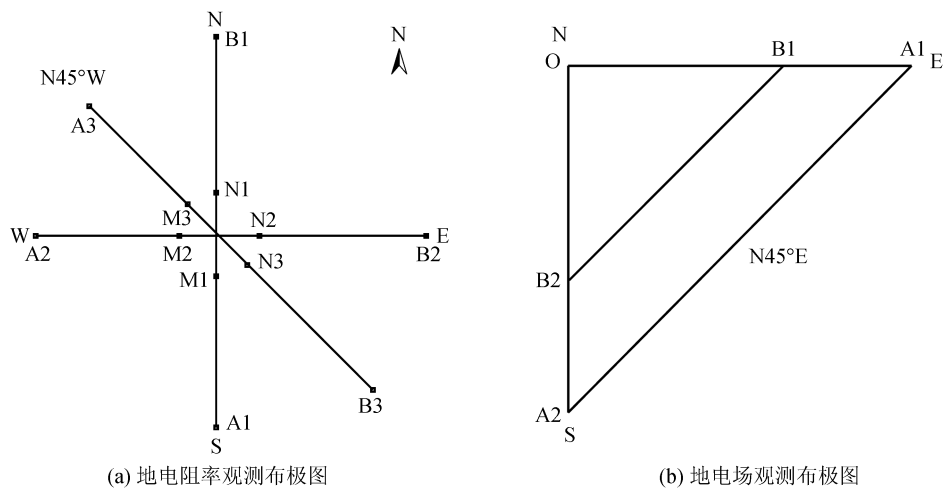


图 1 山丹地电阻率和地电场观测布极示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrode arrangement of geoelectrical resistivity and geoelectric field at Shandan station

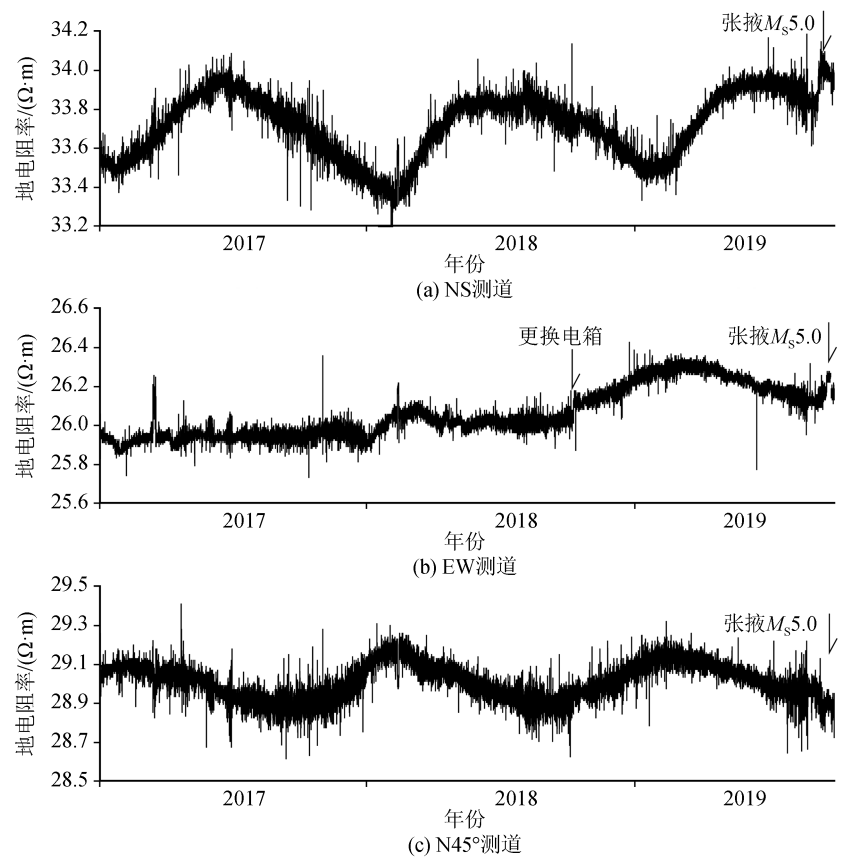


图 2 2017—2019 年山丹地电阻率时值曲线

Fig.2 Hourly value curves of geoelectrical resistivity at Shandan station from 2017 to 2019

2019 年 9 月 16 日 20 时 48 分,在甘肃张掖市甘州区发生了 $M_s5.0$ 地震,震源深度 11 km,地震发生在山丹台西偏南 15° 方向 63 km 处。2019 年 9 月 9 日(震前 8 天)山丹地电阻率资料开始出现较为同步异常(图 3)。经调查,震前观测场地和观测环境无变化,观测资料出现异常变化后观测人员检查观测系统正常。

山丹台 2018 年 12 月 17 日安装气象三要素仪,从一年来记录的降雨量资料来看,2019 年 1 月 28 日降大雪,冰雪融化后换算成降雨量为 37.5 mm,对山丹地电阻率观测资料影响不明显(图 3)。2019 年 6—9 月山丹降雨量相对集中,其中 6 月和 7 月降雨量比 8 月多且频繁,地电阻率观测资料 6—7 月变化不明显(图 3)。由于之前没有降雨量记录,无法深

度分析降雨对山丹地电阻率的影响,但是河西地区干旱少雨,每年降雨集中在夏季,从近几年地电阻率观测曲线来看,少量降雨对山丹地电阻率观测资料影响不明显(图 2)。而 2019 年 9 月 8—12 日降雨分别为 24.8 mm、15.6 mm、0 mm、8.5 mm、20.8 mm,观

测资料从 8—15 日出现不同程度的趋势性变化,综合分析认为降雨对山丹地电阻率影响不明显,但是此次地震前恰逢降雨相对较多,认为此次震前异常是较为可信的地震前兆异常,但可能夹杂一定程度的降雨影响。

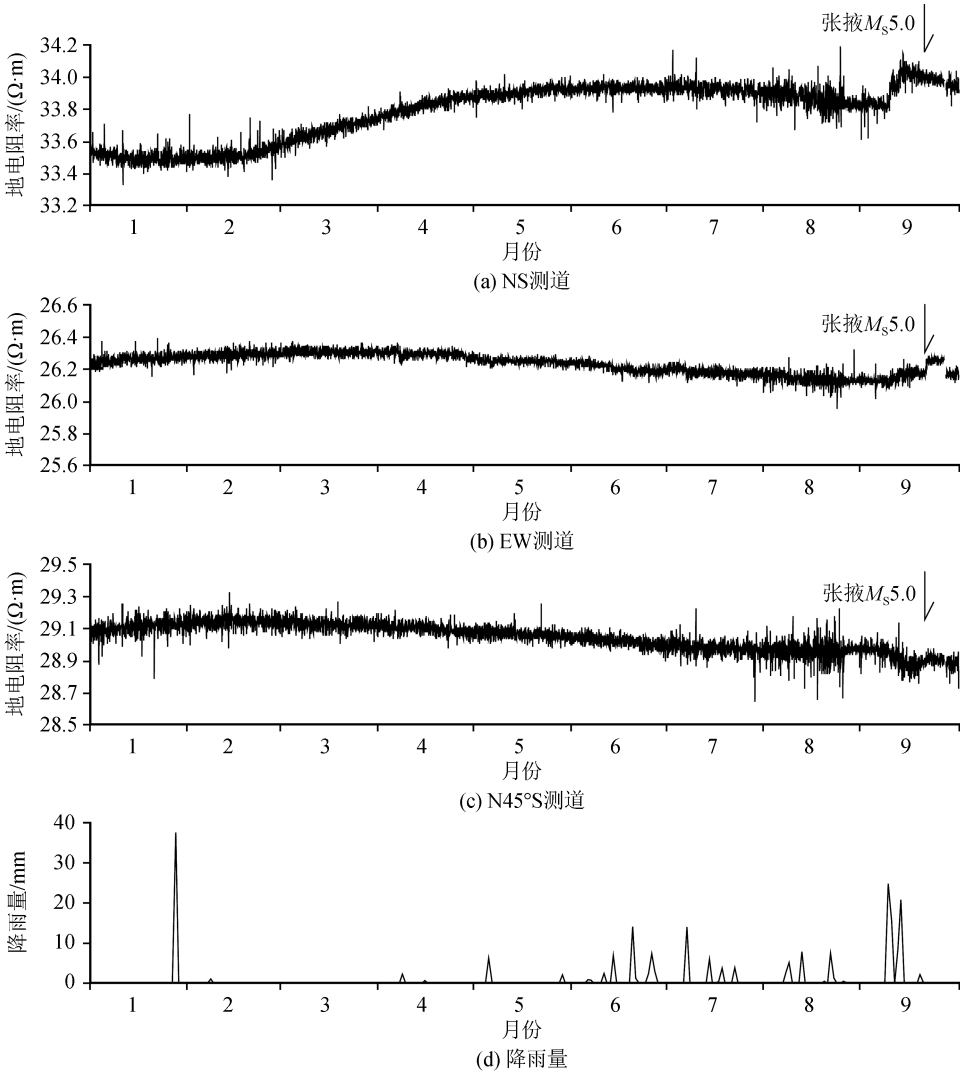


图 3 2019 年 1—9 月山丹地电阻率时值与降雨量日值曲线

Fig.3 Hourly value curves of geoelectrical resistivity and daily rainfall curve at Shandan station from January to September 2019

山丹地电阻率 NS 测道测值总体从 6 月中旬左右开始趋势性缓慢下降,9 月 8 日转折呈快速上升趋势,8 日 07 时—12 日 14 时累计上升幅度为 $0.38 \Omega \cdot m$ (相对变化 1.12%),9 月 12 日 13 时开始测值转折呈缓慢下降趋势,16 日发生地震,震后继续呈缓慢下降趋势。EW 测道测值从 3 月中旬左右开始趋势性缓慢下降,9 月 9 日转折缓慢上升,9 日 02 时—13 日 17 时累计上升幅度为 $0.19 \Omega \cdot m$ (相对变化 0.73%)。N45°W 测道测值从 2 月中旬左右开始趋势性缓慢下降,9 月 8 日下降速率加快,8 日 20

时—15 日 14 时累计下降幅度为 $0.34 \Omega \cdot m$ (相对变化 0.86%),2019 年 9 月 26 日 9—21 时缺记的原因是仪器故障停测(图 4)。

另外,2019 年 7 月 31 日—8 月 26 日山丹地电阻率三个测道测值出现“毛刺增多”现象(图 3)。天水井下地电阻率在芦山 $M_s7.0$ 、岷县漳县 $M_s6.6$ 、天水 $M_s3.8$ 、临洮 $M_s4.5$ 、阿拉善左旗 $M_s5.8$ 和九寨沟 $M_s7.0$ 地震前均出现了“毛刺增多”现象^[12,15-16],因此山丹地电阻率在震前出现的毛刺增多现象也可能为地震前兆异常。

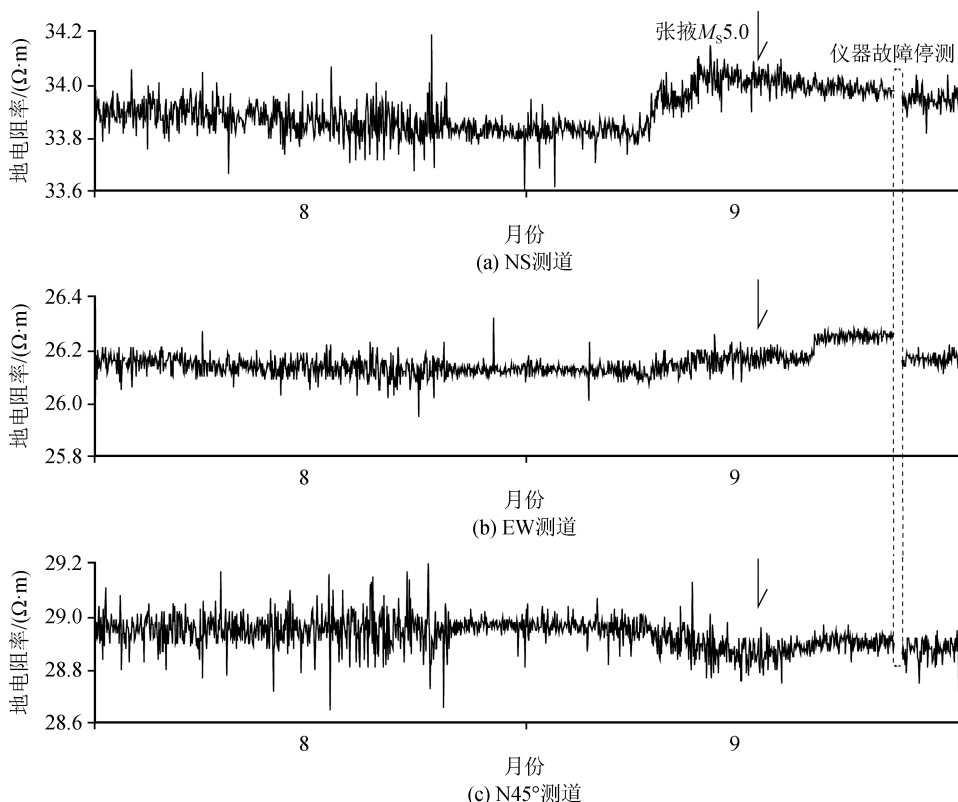


图 4 2019 年 8—9 月山丹地电阻率时值曲线

Fig.4 Hourly value curves of geoelectrical resistivity at Shandan station from August to September 2019

2.2 山丹地电场

山丹地电场 NS、EW 道长、短极距时值观测资料年动态较为清晰;N45°E 道长、短极距时值观测资料年动态不明显,正常情况下观测资料变化幅度小(图 5)。张掖 5.0 级地震前山丹地电场出现了两次较为明显的异常变化,其中一次为 2019 年 5 月 9 日 18 时—12 日 18 时,是由于地电场仪器出现故障导致的,排除故障后重启数采,观测资料恢复正常(图 5)。另一次是 9 月 12 日观测资料开始出现快速上升或下降变化异常,经调查,观测场地和观测环境较平时无变化,异常出现后经观测人员检查观测系统正常(图 5),经查数据异常期间北京时间 9 月 9 日 17—19 时发生急始磁暴, K 指数为 5,从观测曲线看磁暴对地电场影响不明显(图 6)。

山丹台 2018 年 12 月 17 日安装气象三要素仪,2019 年 1 月 28 日降大雪,冰雪融化后换算成降雨量为 37.5 mm,对山丹地电场观测资料影响不明显,2019 年 6—8 月山丹降雨量相对较多,从地电场观测曲线上看少量降雨对山丹地电场影响不明显(图 5)。而 2019 年 9 月 8—12 日降雨分别为 24.8 mm、15.6 mm、0 mm、8.5 mm、20.8 mm,观测资料从 12

日开始出现异常变化,综合分析认为少量降雨对山丹地电场影响不明显,此次观测资料变化异常认为是地震前兆异常(图 6)。

2019 年 9 月 12 日山丹地电场除 N45°E 测道短极距观测资料无明显异常外,其余 5 个测道观测资料均出现了准同步的快速上升或下降变化。震前 NS 道长极距 12 日 02 时左右出现转折,上升速率明显变大,累计上升幅度约 21.12 mV/km,9 月 16 日 11 时左右观测资料变化变为平稳。EW 道长极距 12 日 00 时左右出现转折,下降速率明显变大,累计下降幅度约 12.64 mV/km,9 月 22 日 17 时左右观测资料变化变为平稳。N45°E 道长极距 11 日 23 时左右出现转折,上升速率明显变大,累计上升幅度约 12.74 mV/km,9 月 16 日 11 时左右观测资料变化变为平稳。NS 道短极距 12 日 14 时左右出现转折,上升速率明显变大,累计上升幅度约 18.24 mV/km,9 月 21 日 9 时左右观测资料变化变为平稳。EW 道短极距 12 日 00 时左右出现转折,下降速率明显变大,累计下降幅度约 17.95 mV/km,9 月 22 日 14 时左右观测资料变化变为平稳(图 6)。

谭大诚等^[7]对青藏高原中强地震前的地电场潮

汐波进行了研究,认为一些地电场资料在震前出现短临波形畸变异常,其中新疆和田地电场 NS 道观测资

料在汶川 8.0 级地震前 20 天开始的异常形态与山丹地电场在张掖地震前畸变异常形态非常相似。

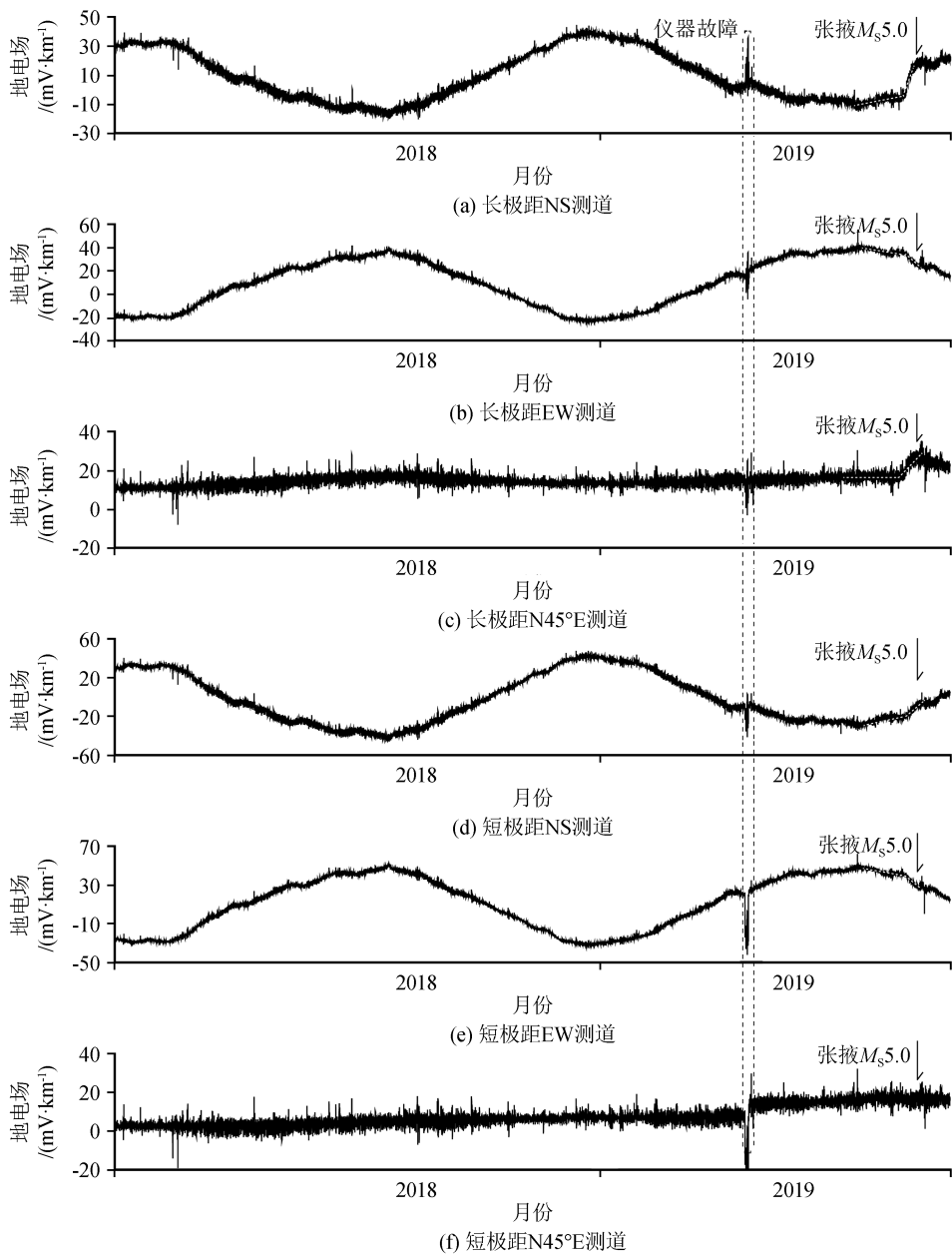


图 5 2018 年 1 月—2019 年 9 月山丹地电场时值曲线

Fig.5 Hourly value curves of geoelectric field at Shandan station from January 2018 to September 2019

另外,2015 年 11 月 23 日祁连 $M_s5.2$ 地震前,山丹地电场长极距 NS 测道、长极距 EW 测道、短极距 NS 测道、短极距 EW 测道观测资料也出现了与上述形态一致的地震前兆异常,长、短极距 $N45^\circ E$ 测道异常不明显。该地震与山丹地电场震中距为 102 km。山丹地电场 NS 道长极距 2015 年 10 月 31 日 06 时左右至 11 月 2 日 23 时左右,观测数据呈现快速转折上升趋势,累计上升幅度为 14.31

mV/km。EW 道长极距 10 月 30 日 22 时左右至 11 月 3 日 08 时左右,观测数据呈现快速转折下降趋势,累计下降幅度为 35.79 mV/km。NS 道短极距 10 月 26 日 17 时左右至 11 月 3 日 11 时左右,观测数据呈现快速转折上升趋势,累计上升幅度为 16.78 mV/km。EW 道短极距 10 月 26 日 17 时左右至 11 月 2 日 09 时左右,观测数据呈现快速转折下降趋势,累计下降幅度为 13.17 mV/km(图 7)。

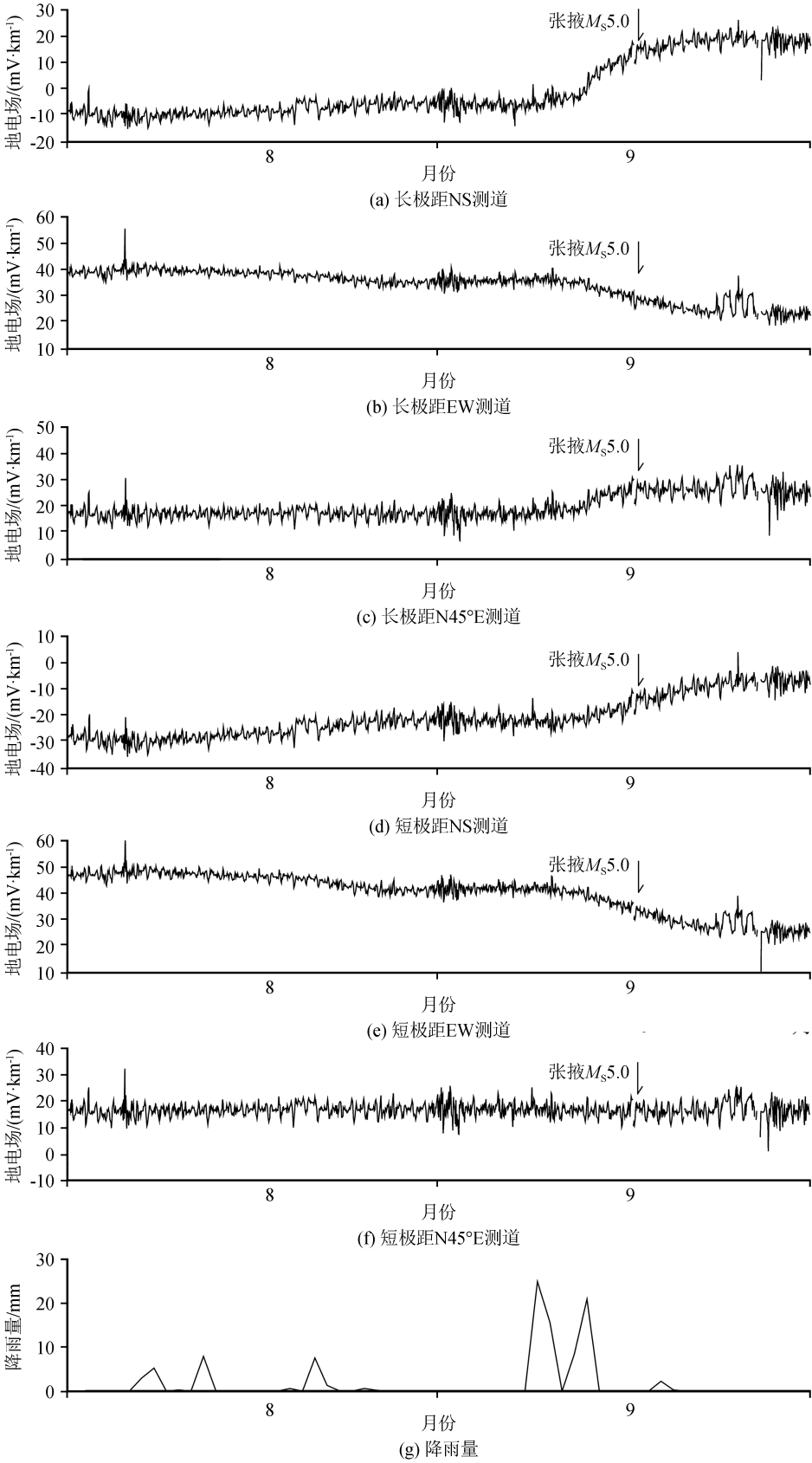


图 6 2019 年山丹地电场时值与降雨量日值曲线

Fig.6 Hourly value curves of geoelectric field and daily rainfall curve at Shandan station in 2019

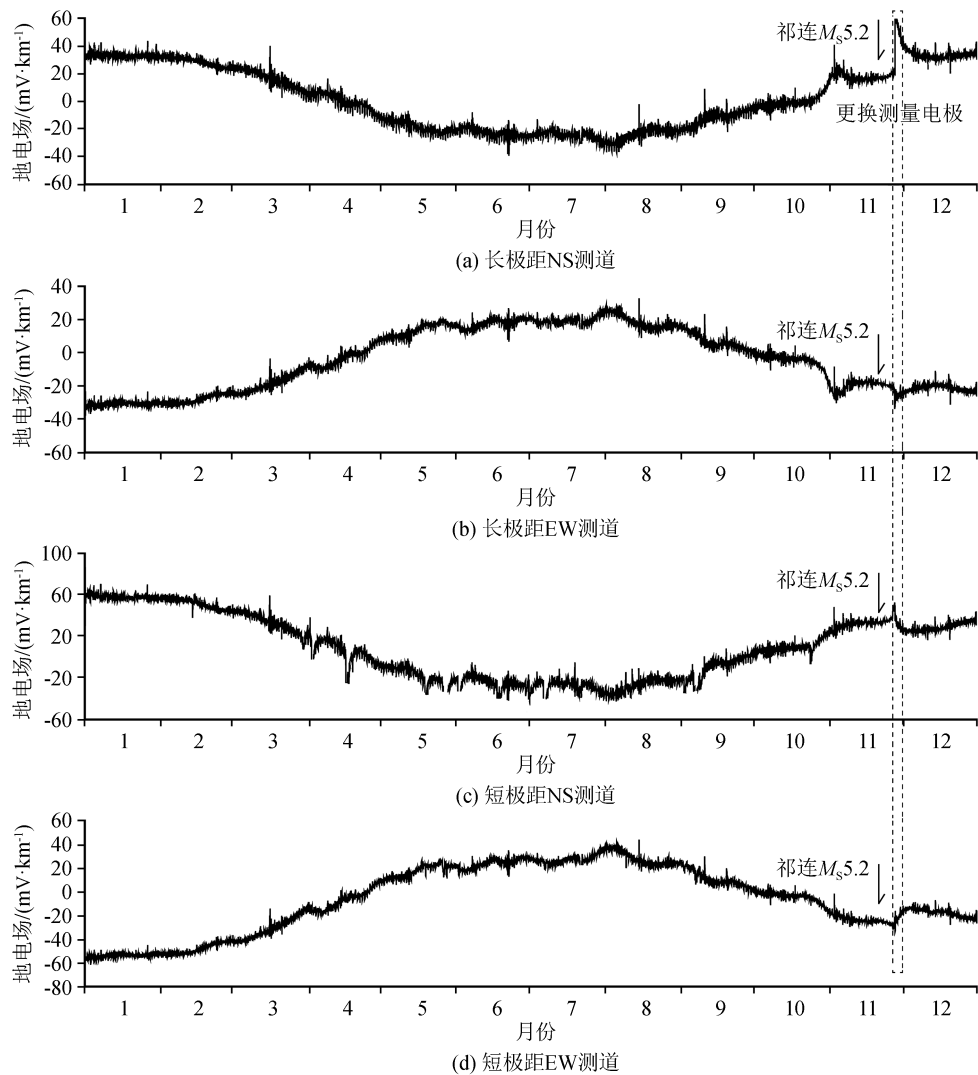


图 7 2015 年山丹地电场时值曲线

Fig.7 Hourly value curves of geoelectric field at Shandan station in 2015

山丹地电场 2015 年 11 月 28 日观测资料出现台阶状变化,随后逐渐恢复正常,该异常变化是由于 11 月 28 日 09:45—16:46 改造观测系统,更换测量电极所造成的数据干扰(图 7)。

3 认识与讨论

(1) 张掖 $M_s5.0$ 地震震中位于山丹台西偏南 15° 方向,震中距 63 km。山丹地电阻率与地电场观测资料在张掖 $M_s5.0$ 地震前均出现了较为明显的异常,排除场地周围观测环境,观测系统,自然环境等因素外,认为该异常是较为可信的地震短临前兆异常。另外 2015 年 11 月 23 日祁连发生了 $M_s5.2$ 地震,震中位于山丹台西偏南 55° 方向,震中距 102 km。震前山丹地电场观测资料也出现了与张掖地震前形态相似的地震前兆短临异常。谭大诚研究认

为一些地电场资料在震前出现短临波形畸变异常,山丹地电场在上述两次地震前异常形态与列举的畸变异常形态非常相似,进一步增加了山丹地电异常的可信度。

(2) 山丹地电阻率观测资料异常开始于震前 8 天,结束于震前 2 天,异常持续时间为 6 天,异常结束后发生地震。异常形态表现为 NS 测道转折快速上升-缓慢下降,EW 测道为转折缓慢上升,N 45° W 测道为缓慢下降-转折缓慢上升。山丹地电场观测资料异常开始于震前 4 天,最晚结束于震后 6 天,异常持续时间最长为 11 天,异常持续过程中发生地震。地电场观测资料异常形态长极距 NS 道、长极距 N 45° E 道、短极距 NS 道表现为转折同步缓慢上升,长极距 EW 道和短极距 EW 道转折同步缓慢下降,短极距 N 45° E 道异常不明显。

(3) 山丹台位于河西地区,当地年降雨量少,7—9 月降雨相对较多,由于山丹台 2018 年 12 月 17 日安装气象三要素仪,之前未记录降雨资料,不能深入分析降雨对地电阻率与地电场观测资料的影响程度,但是对比分析一年来有记录的降雨资料与地电观测资料,认为少量降雨对山丹地电阻率和地电场观测资料影响不明显。但是 2019 年张掖 5.0 级地震前恰逢当地降雨相对较多,地电阻率观测资料开始变化时间基本与降雨量开始变化时间同步变化,地电场观测资料在持续降雨 4 天结束后开始出现异常变化,另外 2015 年 11 月祁连 5.2 级地震前地电场出现的异常形态与此次异常形态非常相似,理论上 2015 年 11 月无大降雨,异常可信度高。综合分析认为此次地电阻率和地电场异常是较为可信的地震前兆异常,但地电阻率可能夹杂一定程度的降雨影响,而降雨对地电场较小。

参考文献(References)

- [1] 中国地震台网中心.9 月 16 日 20 时 48 分在甘肃张掖市甘州区发生 5.0 级地震[EB/OL].<http://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/356005/index.html>.
China Earthquake Networks Center. At 20:48 on September 16, a Magnitude 5.0 Earthquake Struck Ganzhou District, Gansu Province [EB/OL]. <http://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/356005/index.html>.
- [2] 马钦忠.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[J].地震学报,2008,30(6):615-625.
MA Qinzong.Multi-Dipole Observation System and Study Oil the Abnormal Variation of the Geoelectric Field Observed at Capital Network before the 2006 Wen'an, Hebei of China, $M_s5.1$ Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(6): 615-625.
- [3] 赵和云.地电阻率趋势变化的形态特征与地震[J].地震学报,1994,16(3):368-375.
ZHAO Heyun. Morphological Characteristics of Geoelectrical Resistivity Trend Changes and Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 16(3): 368-375.
- [4] 李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.
LI Jinming. Geoelectric Field and Electrical Exploration [M]. Beijing: Geology Press, 2005.
- [5] 杜学彬,刘君,崔腾发,等.两次近距离大震前成都台视电阻率重现性、相似性和各向异性变化[J].地球物理学报,2015,58(2):576-588.
DU Xuebin, LIU Jun, CUI Tengfa, et al. Repeatability, Similarity and Anisotropy Changes in Apparent Resistivity Recorded by Station Chengdu at near Distances before Two Great Earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(2): 576-588.
- [6] 高曙德,郭安宁,王军燕,等.四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震前地电阻率的异常变化[J].地震工程学报,2017,39(4):645-651.
GAO Shude, GUO Anning, WANG Junyan, et al. Earth-Resistivity Anomalies before the Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake in Sichuan Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2017, 39(4): 645-651.
- [7] 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 Dacheng, ZHAO Jialiu, XI Jilou, 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.
- [8] 田山,张磊,王建国,等.汶川、玉树大地震前的地电场异常[J].地球物理学进展,2012,27(3):878-887.
TIAN Shan, ZHANG Lei, WANG Jianguo, et al. Geoelectric Field Anomaly before Wenchuan and Yushu Earthquake [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 878-887.
- [9] 范莹莹,安张辉,陈军营,等.岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前平凉台地电场变化[J].地震工程学报,2013,35(4):827-834.
FAN Yingying, AN Zhanghui, CHEN Junying, et al. The Variation of Geoelectrical Field at Pingliang Station, Gansu Province, before the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 827-834.
- [10] YE Q, DU X B, ZHOU K C, et al. Spectrum Characteristics of Geoelectric Field Variation [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 20(4): 405-415.
- [11] 叶青,张翼,黄兴辉,等.2015 年内蒙古阿拉善 $M_s5.8$ 地震前地电阻率变化特征研究[J].地震,2017,37(4):123-133.
YE Qing, ZHANG Yi, HUANG Xinghui, et al. Characteristics of Resistivity Variations before the April 15, 2015 Alashan Zuoqi $M_s5.8$ Earthquake [J]. Earthquake, 2017, 37(4): 123-133.
- [12] 杨兴悦,王燕,张立红,等.天水井下地电阻率资料应用研究[J].震灾防御技术,2015,10(1):173-183.
YANG Xingyue, WANG Yan, ZHANG Lihong, et al. Analysis of Geoelectrical Resistivity Data from Underground Well at Tianshui Station [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(1): 173-183.
- [13] 孙昱,张炜超,张创军,等.陕西省地电阻率观测干扰因素分析研究[J].地震工程学报,2019,41(2):489-499.
SUN Yu, ZHANG Weichao, ZHANG Chuangjun, et al. Interference Factors in the Earth Geo-Resistivity Observation in Shaanxi Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 489-499.
- [14] 张新基,赵仅全,刘耀炜,等.甘肃省地震监测志[M].兰州:兰州大学出版社,2005.
ZHANG Xin-ji, ZHAO Yi-quan, LIU Yao-wei, et al. Seismic Monitoring Records of Gansu Province [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005.

[15] 曾文浩,杨兴悦,史继平,等.2013 年甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘东南地区前兆异常分析[J].地震研究,2015,38(3):341-351.
ZENG Wenhao,YANG Xingyue,SHI Jiping,et al.Analysis on the some Typical Precursory Anomalies before Minxian — Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake in Southeast Area of Gansu Province in 2013[J].Journal of Seismological Research,2015,38(3):341-351.

[16] 曾文浩,杨兴悦,王燕,等.天水地电阻率观测资料映震能力探讨[J].大地测量与地球动力学,2017,37(增刊Ⅳ):108-112.
ZENG Wen-hao,YANG Xing-yue,WANG Yan,et al.Discussion on Earthquake Reflecting Ablity on Geo-Electrical Resistivity Data in Underground Well at Tianshui Station[J].Journal of Geodesy and Geodaynaics,2017,37(Supp.Ⅳ):108-112.

(上接第 278 页)

[6] 姚孝新.破裂速度和地震[J].地球物理学报,1976,19(2):118-124.
YAO Xiaoxing. Rupture Velocity and Earthquake [J]. Acta Geophysica Since,1976,19(2):118-124.

[7] DIETERICH.Preseismic Fault Slip and Earthquake Prediction [J].Journal of Geophysical Research(Solid Earth)[J],1978,83:3940-3948.

[8] 李普春,刘力强,郭玲莉,等.粘滑过程中的多点错动[J].地震地质,2013,35(1):125-137.
LI Puchun,LIU Liqiang,GUO lingli,et al.Multi-Point Dislocation in Stick-slip Process[J].Seismology and Geology,2013,35(1):125-137.

[9] SONG Lili.A Novel Experiment Method of Evaluating the Brittleness of Rock[J].SPE 2014,167730,1-4.

[10] 车用太,鱼金子,张淑亮,等.山西朔州井水位的“前驱波”记录及其讨论[J].地震学报,2002,24(2):210-216.
CHE Yongtai,YU Jinzi,ZHANG Shuliang,et al.The Records of Water Level “Precursors” and Their Discussion in Well Shuozhou, Shanxi Province [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002,24(2):210-216.

[11] HIROO Kanamori,JOHN J Cipar.Focal Process of the Chilean Earthquake May 22,1960[J].Physics of the Earth and Planetary Interiors,1974,9:128-136.

[12] ROGERS G,DRAGERT H.Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone:the Chatter of Silent Slip[J].Science,2003,300:1942-1943.

[13] 许健生,隗永刚,周建超.中国数字地震仪台网(CDSN)典型震相图集[M].北京:石油工业出版社,2014:13-32.
XU Jiansheng,WEI Yonggan,ZHOU Jianchao.The Atlas of Typical Seismic Phase of China Digital Seismograph Network (CDSN)[M].Beijin:Petroleum Industry Press,2014,13-32.

[14] 董树华,刘元壮.地声观测研究[J].地震学报,1986,8(4):439-443.
DONG Shuhua,LIU Yuanzhan.Geosound Observation and Research[J].Acta Seismological Since,1986,8(4):439-443.

[15] 郭彦双,马瑾,云龙.拐折断层黏滑过程的实验研究[J].地震地质,2011,33(1):26-35.
GUO Yanshuang,MA Jin,YUN Long.Experimental Study on Stick-Slip Process of Bending Faults[J].Seismology and Geology,2011,33(1):26-35.