



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

2013年岷县-漳县 M_S 6.6地震前天水地区地震台地球物理场观测异常分析

姚赛赛 刘兴旺 苏小芸 陈丽君 安振宁 孙常青

Analysis of geophysical field observation anomalies at seismic stations in Tianshui area before 2013 Minxian-Zhangxian M_S 6.6 earthquake

Yao Saisai, Liu Xingwang, Su Xiaoyun, Chen Lijun, An Zhenning, Sun Changqing

引用本文:

姚赛赛, 刘兴旺, 苏小芸, 陈丽君, 安振宁, 孙常青. 2025. 2013年岷县-漳县 M_S 6.6地震前天水地区地震台地球物理场观测异常分析. *地震学报*[J], 47(5): 632–648. DOI: 10.11939/jass.20240032

Yao S S, Liu X W, Su X Y, Chen L J, An Z N, Sun C Q. 2025. Analysis of geophysical field observation anomalies at seismic stations in Tianshui area before 2013 Minxian-Zhangxian M_S 6.6 earthquake. *Acta Seismologica Sinica*[J], 47(5): 632–648. DOI: 10.11939/jass.20240032

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20240032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2013年岷县漳县 M_S 6.6地震和2017年九寨沟 M_S 7.0地震震前地球物理观测异常空间分布机理分析

Mechanism analysis of spatial distribution of the geophysical observation anomalies before the 2013 Minxian-Zhangxian M_S 6.6 earthquake and the 2017 Jiuzhaigou M_S 7.0 earthquake

地震学报. 2024, 46(2): 307–326 <https://doi.org/10.11939/jass.20230118>

断层虚位错模式揭示的2022年1月8日青海门源 M_S 6.9地震前的地电阻率变化

Variations of apparent resistivity before the 2022 M_S 6.9 Menyuan earthquake in Qinghai Province revealed by the virtual fault dislocation model

地震学报. 2024, 46(2): 292–306 <https://doi.org/10.11939/jass.20230027>

2017年精河 M_S 6.6地震的断层参数和破裂过程

Fault parameters and rupture process of the Jinghe M_S 6.6 earthquake in 2017

地震学报. 2021, 43(2): 137–151 <https://doi.org/10.11939/jass.20200057>

球形地球模型的地震位错理论及其应用

Seismic dislocation theory of spherical Earth model and its application

地震学报. 2022, 44(4): 711–731 <https://doi.org/10.11939/jass.20210134>

2013年3月3日洱源 M_S 5.5地震前地磁转换函数异常研究

Geomagnetic transform function anomaly before the M_S 5.5 Eryuan earthquake on March 3, 2013

地震学报. 2021, 43(2): 215–226 <https://doi.org/10.11939/jass.20200047>

2021年青海玛多 M_S 7.4地震前大武台地电场优势方位角异常特征分析

Characteristics of the dominant azimuth anomalies of geoelectric field at Dawu station before M_S 7.4 Maduo, Qinghai earthquake in 2021

姚赛赛, 刘兴旺, 苏小芸, 陈丽君, 安振宁, 孙常青. 2025. 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 地震前天水地区地震台地球物理场观测异常分析. 地震学报, 47(5): 632-648. doi: 10.11939/jass.20240032.
Yao S S, Liu X W, Su X Y, Chen L J, An Z N, Sun C Q. 2025. Analysis of geophysical field observation anomalies at seismic stations in Tianshui area before 2013 Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake. Acta Seismologica Sinica, 47(5): 632-648. doi: 10.11939/jass.20240032.

2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 地震前天水地区 地震台地球物理场观测异常分析*

姚赛赛^{1,2), †} 刘兴旺^{1,2)} 苏小芸¹⁾ 陈丽君¹⁾
安振宁¹⁾ 孙常青¹⁾

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国兰州 730000 兰州地球物理国家野外科学观测研究站

摘要 基于 2013 年天水地区内地震台的地球物理场资料, 对地球物理定点观测的两个台站(天水地电台、武山台)和四个测项(天水地电阻率、武山 1 号泉水氡、武山台 22 号井水氡和武山台竖直摆钻孔倾斜)在 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 地震前出现的异常变化进行分析, 并利用归一化速率法、从属函数法和潮汐因子法分别提取了地电阻率、模拟水氡、钻孔倾斜在岷县-漳县地震前后的异常变化, 采用断层虚位错模型分析了地球物理场异常与岷县-漳县地震的对应关系. 结果表明: 在岷县-漳县地震前, 天水台四项资料的异常为地震前兆异常, 具有清晰的时空演化特征, 能够真实地反映区域地下介质的变化, 这一变化过程可能与区域构造应力场在孕震阶段的加卸载作用密切相关.

关键词 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 地震 地球物理场异常 虚位错模型

doi: 10.11939/jass.20240032 中图分类号: P315.72⁺2 文献标识码: A

Analysis of geophysical field observation anomalies at seismic stations in Tianshui area before 2013 Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake

Yao Saisai^{1,2), †} Liu Xingwang^{1,2)} Su Xiaoyun¹⁾ Chen Lijun¹⁾
An Zhenning¹⁾ Sun Changqing¹⁾

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, China

Abstract: On June 17, 2013, the Tianshui central seismic station submitted an earthquake prediction report based on observed anomalies in downhole georesistivity, groundwater radon concentrations from Wushan Well No.22 and Wushan Spring No.1, and borehole tilt measure-

* 基金项目 甘肃省地震局地震科技发展基金(2022Y-03)和中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202301005)共同资助.

收稿日期 2024-03-24 收到初稿, 2024-05-19 决定采用修改稿.

作者简介 姚赛赛, 本科, 工程师, 主要从事地电阻率监测及资料应用工作, e-mail: 995377254@qq.com



ments from the Wushan vertical pendulum. On July 22 of the same year, an earthquake with $M_s6.6$ struck the border region between Minxian and Zhangxian counties in Gansu Province. This event confirmed that the four sets of geophysical field observations from the Tianshui station had effectively captured pre-seismic changes within the regional subsurface medium. In this study, we analyze anomalies from these four datasets using the normalized rate method, subordinate function method, and tidal factor method, respectively. We systematically summarize the anomalous characteristics of each observation item and examine their correlation with the Minxian-Zhangxian earthquake. Finally, incorporating the focal mechanism solution, we investigate the spatio-temporal characteristics of the geophysical anomalies based on a fault virtual dislocation model.

The Tianshui georesistivity observation station is located in Yawan Village, Mapaoquan Town, Maiji District. The current downhole observation system, implemented as part of a post-disaster reconstruction project, commenced formal operation in January 2012, with electrodes installed at a depth of 100 m. From April 9 to May 9, 2013, the hourly georesistivity values along the NS, EW, and $N45^\circ W$ directions at the Tianshui station exhibited synchronous high-frequency disturbances, with maximum variation amplitudes of 1.83%, 1.00%, and 4.28%, respectively. The Lushan $M_s7.0$ earthquake in Sichuan Province on April 20, 2013 occurred during this anomalous interval. A second episode of synchronous high-frequency disturbances was recorded between June 12 and August 8, 2013, with peak amplitudes of 1.41%, 0.85%, and 0.94%, respectively, during which the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013, took place. Notably, the disturbance amplitudes were more pronounced prior to the Lushan event, which may be attributed to differences in deep geological structure and seismogenic environment between the two earthquake sequences. Furthermore, the daily variation pattern of georesistivity at Tianshui aligns broadly with the source region resistivity changes described by the DD (dilatancy-diffusion) mode, in which pore fluids play a critical role.

Wushan Spring No.1, Well No.22, and the vertical pendulum borehole tiltmeter are all situated at the Wushan seismic station in Wenquan Town, Wushan County. The spring is naturally exposed, while the well is fully confined; the two are spaced approximately 100 meters apart. Their background radon concentrations are 240 Bq/L and 470 Bq/L, respectively. Radon variations in both the well and the spring were largely synchronous. Starting in April 2012, concentrations generally followed a “low–high–low” pattern, with the elevated phase lasting about one year. A short-term pre-seismic anomaly began on June 25, 2013, exhibiting a “rise–earthquake–decline” sequence. The maximum pre-seismic variations reached 6.36% in Well No.22 and 9.59% in Spring No.1. Following the earthquake, radon levels decreased but did not fully return to pre-anomaly background values. In contrast, the NS and EW components of the borehole tiltmeter recorded opposing trends: the NS component decreased while the EW component increased. The tilt rate accelerated from $3.11 \times 10^{-3}/d$ during July 2012–February 2013 to $5.66 \times 10^{-3}/d$ from February to June 2013. Post-seismic deformation was marked by a clear co-seismic strain step.

Prior to the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, the normalized rate values for all three georesistivity components exhibited synchronous increasing anomalies, with a predefined threshold of 0.8. The monthly average radon concentration at Wushan Well No.22 increased from March to August 2012, reaching a maximum variation of 13.6%, while its 13-point moving average rose from February to September 2012, with a peak variation of 8.7%. The subor-

dinate function μ for this well exceeded the threshold three times before the earthquake, starting 14 months prior to the event. Similarly, the monthly average radon concentration at Wushan Spring No. 1 began to increase from March 2012, with a maximum variation of 15.7%, and its 13-point moving average rose from February to November 2012. The μ value for the spring also surpassed the threshold three times, commencing 14 months before the earthquake. Following both the Lushan $M_S7.0$ and Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquakes, the μ values began to recover in August 2013. Significant changes in the tidal factor were also observed before the Minxian-Zhangxian earthquake. The tidal factor γ values for the NS and EW components showed a marked step-like decrease from April 2012 to January 2013, indicating a medium- to long-term trend change. The earthquake occurred approximately six months after the γ values began to rebound.

The following conclusions can be drawn: ① All four observation items are situated within a region characterized by compressive stress enhancement; ② The geophysical field anomalies recorded at the Tianshui station were mainly distributed within 200 km of the epicenter. Their evolution and amplitude exhibited clear “long-term–intermediate-term–short-term–imminent-term” staging characteristics relative to the epicentral distance, demonstrating notable spatio-temporal correspondence with the Minxian-Zhangxian earthquake; ③ The seismogenic process is reflected in the geophysical field through long-term background trends, intermediate-term anomalies, and short-term/imminent changes. After the occurrence of regional earthquakes, it is necessary to systematically analyze observation items with anomalous data, accurately identify precursory signals based on their spatio-temporal distribution, intensity, and waveform morphology, and build a representative database of typical regional earthquake cases.

Key words: Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquake in 2013; geophysical anomaly; fault virtual dislocation model

引言

北京时间 2013 年 7 月 22 日 7 时 45 分 55 秒, 在甘肃省定西市岷县与漳县交界处发生了 $M_S6.6$ 地震, 震中位置为 (34.52°N, 104.23°E), 震源深度约 20 km, 极震区烈度为 VIII 度, 等震线长轴呈北西走向(中国地震局, 2013). 历史上该区域内曾发生过 1573 年岷县 $M6\frac{3}{4}$, 1837 年临潭-岷县 $M6$, 2003 年岷县 $M_S5.2$, 2004 年岷县 $M_S5.0$ 等多次中强地震(郑文俊等, 2013).

我国地震预报实行“场的动态监视”与“源的过程追踪”相结合的预测思路.“场的动态”指强震成组孕育及多种前兆场的整体性特征;“源的过程”指震源孕育、发展和破裂过程的个体特征(张国民, 罗兰格, 1990). 地震预测中监测地震前兆以地球物理方法为主, 此外还有大地形变测量和地球化学等方法(陈运泰, 2009). 2013 年岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震发生后, 多位学者从不同学科角度对此次地震进行了跟踪. 杜学彬等(2013)对甘东南地区地电阻率异常进行分析讨论, 认为在此次地震前通渭台出现的地电阻率异常存在不确定性; 刘君等(2013)分析震中 400 km 范围内 9 个地电阻率台站记录, 认为通渭、兰州、天水、周至等四个台站存在异常, 其中兰州和周至两台站受环境干扰严重, 通渭台虽受环境干扰但异常信号中仍包含了地震前兆信息; 解滔等(2022a, b)从应力-应变-地电阻率变化角度对此次地震进行了分析, 结果显示通渭的视电阻率变化与地震孕育过程之间很可能存在力学机制上的联系; 杨兴悦等(2013)结合甘东南地下流体中短临异常, 得出武山台水氡异常较为明显; 姜振海等

(2013)对此次地震震中 300 km 范围内的 15 项形变资料进行了统计分析,认为包括武山台竖直摆钻孔倾斜在内的四项异常均与此次地震有关. 综上,由于地震异常提取和认定的复杂性,前人对岷县-漳县地震的研究主要侧重单一学科或测项讨论.

2013 年天水地震台下辖地球物理测项共 30 项(电磁 9 项、流体 15 项、形变 2 项、辅助测项 4 项),分布在通渭县、清水县、武山县和麦积区. 2013 年天水台地球物理资料异常丛集出现后,天水台基于前期开展的异常核实工作,将天水台地电阻率、武山台 22 号井水氡、1 号泉水氡和武山台竖直摆钻孔倾斜观测数据异常作为地震前兆异常,并于 2013 年 6 月 17 日向甘肃省地震局提交地震预测意见. 这些经核实的异常现象,构成了探讨前兆机理的关键证据与研究对象.

本文拟基于以上四个测项的原始异常数据,利用归一化速率、从属函数、潮汐因子等方法提取数据异常,总结各测项异常特征与岷县-漳县地震的关系,并采用断层虚位错模型,从应力-应变-地球物理场变化角度探讨地球物理场异常变化时空演化特征,以期为该区域中长期地震预测模型的构建建立地球物理约束.

1 概况

1.1 区域地质背景

岷县、漳县及天水地震台位于甘东南区域,地处青藏高原东北部、南北地震带中段,两县城南北两侧被西秦岭北缘断裂和东昆仑断裂围限,可以看作是这两条大型左旋走滑断裂带之间的左阶岩桥区(袁道阳等, 2004). 区内活动构造发育(图 1), 迭部-白龙江断裂带、光盖山-迭山断裂带、临潭-宕昌断裂带、文县-康县-略阳断裂带、康县-略阳断裂带、两当-江洛断裂和礼县-罗家堡断裂等多条规模较大的断裂带共同组成了该地区复杂的“V”

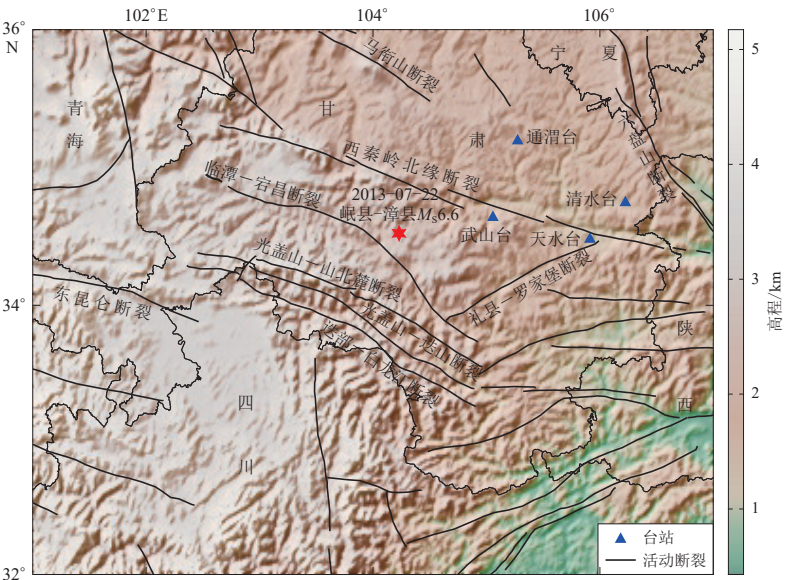


图 1 2013 年岷县-漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震震中位置及周边台站、断裂(邓起东, 2007)分布
Fig. 1 Location of the epicenter of Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake in 2013 and distribution of stations and faults (Deng, 2007)

型构造体系(郑文俊等, 2005). 这些断裂在继承原有挤压逆冲活动的基础上, 表现出左旋走滑的活动特征(甘卫军等, 2004). 受青藏高原向东北方向挤压影响, 东昆仑断裂带表现出显著的向北挤压和向东运动, 这成为甘东南地区构造应力集中的主要动力, 也是甘东南地区中强地震孕育和发生的重要原因(张培震等, 2003).

1.2 台站介绍

天水地电阻率台位于麦积区马跑泉镇崖湾村(105°54'E, 34°29'N), 海拔 1153 m. 测区地处崖湾村与白石村之间的永川河 I 和 II 级河谷阶地上, 第四系覆盖层厚度为 20—30 m, 其下为第三系黏土层, 厚约 450—500 m, 基底为古生界变质岩(图 2). 本文选用井下观测方式进行观测, 电极埋深 100 m, 布设 NS, EW 和 N45°W 等三个方向的测道(图 3), 电测深曲线为 QH 型(图 4), 地下介质电阻率呈高一低一次高型.

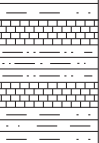
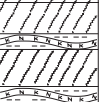
孔深/m	岩性示意	岩性描述
9.0		黄土
30.14		现代河床沉积, 上部以流沙为主, 下部以卵石为主, 其成分为紫红色粗砂岩及肉红色花岗岩等, 与第三系角度不整合接触
86.16		灰色粉砂质泥岩, 无层理, 为粉砂泥质结构, 含钙质, 局部含石膏, 中部和上部夹有浅灰色具交错层理的泥质粉砂岩, 偶夹灰绿色粉砂质-泥质隐晶灰岩
261.20		上部(86.16—115.16 m)为灰白色隐晶灰岩、碎屑灰岩, 夹灰色粉砂质泥岩; 中部(116.16—219.69 m)为灰色、深灰色粉砂质泥岩与灰绿色粉砂质-泥质隐晶灰岩互层, 偶尔夹杂钙质石膏岩及假鲕状灰岩; 下部(219.69—261.20 m)为灰绿色粉砂质-泥质隐晶灰岩与咖啡色泥质灰岩, 咖啡色-红色钙质泥岩互层
333.82		红色粉砂质泥岩, 为粉砂质泥质结构, 无层理, 含少量钙质和铁质; 底部有黑云母二长片麻岩碎块, 与下伏寒武系秦岭群为断层接触
402.29		大多为糜棱岩, 局部形成条带状石英透辉角岩, 糜棱主要成分为泥质及长英质碎屑, 偶能见到残留的流纹质晶屑凝灰岩碎块; 本层中夹有黑云母二长片麻岩, 具萤化石, 糜棱岩化程度由上而下有变弱之趋势. 此层存在一压扭性断裂

图 2 天水地电台岩性柱状图(修改自张新基, 2005)

Fig. 2 Petrographic histogram of Tianshui georesistivity station (revised from Zhang, 2005)

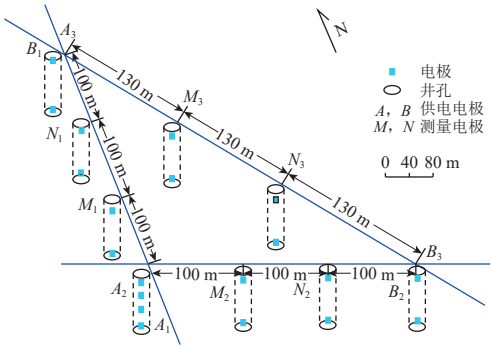


图 3 天水地电台布极示意图

Fig. 3 Electrode configuration schematic of Tianshui georesistivity station

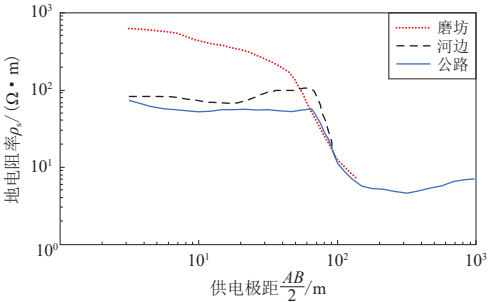


图 4 天水地电台电测深曲线

Fig. 4 Electrical sounding curve of Tianshui georesistivity station

武山台1号泉、22号井、竖直摆钻孔倾斜仪均位于天水市武山县温泉镇武山地震台。武山温泉出露于台站南侧聂河东岸的大汤沟、小汤沟之中,武山台1号泉观测点为天然出露泉,泉水为断裂带的深层裂隙脉状水;武山台22号井属于完全承压井,各个含水层分布深度、厚度及岩性等如图5所示,1号泉与22号井之间相距约100 m。CK821井于1982年建成,井深55 m,起初用于地应力观测;2011年CK821井经清洗施工后,架设了竖直摆钻孔倾斜仪。

各台站详细运行情况、观测环境及数据质量情况列于表1。对前期异常核实的结果显示,天水地电台、武山台观测环境正常、观测系统稳定,产出资料可靠性较高。

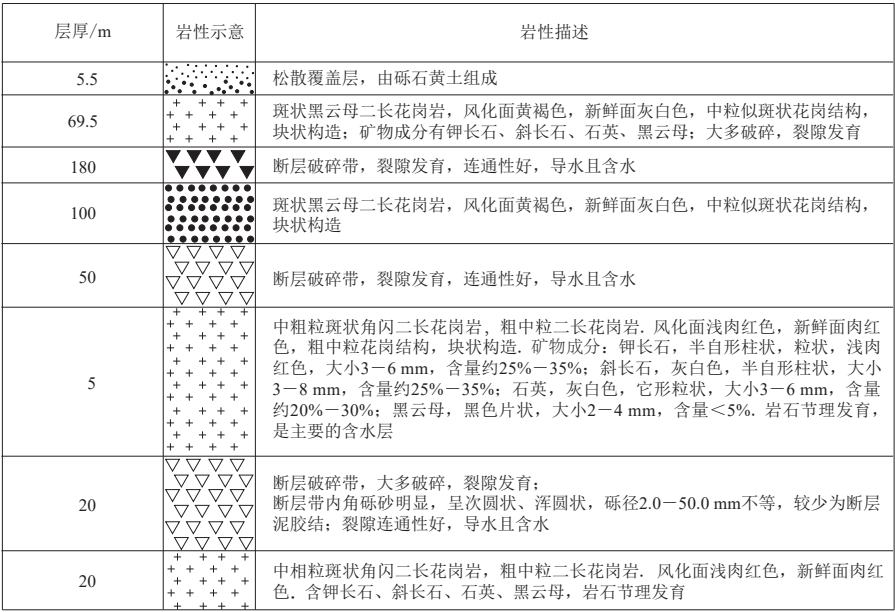


图5 武山台22号井钻孔柱状图(修改自张新基, 2005)
Fig. 5 Borehole log of Wushan Well No.22 (modified from Zhang, 2005)

表1 四个测项的基础信息

序号	测项	观测起始年	仪器型号	观测点位置		测点类型	震中距/km	观测环境
				东经/°	北纬/°			
1	天水台地电阻率	2011	ZD8BI	105.90	34.48	井下观测	153	正常
2	武山台1号泉水氡	1990	FD-125	105.03	34.39	上升泉	75	正常
3	武山台22号井水氡	1982	FD-125	105.05	34.64	热水井	75	正常
4	武山台竖直摆钻孔倾斜	2012	CZB-2A	105.05	34.65	井下探头	76	正常

2 资料分析

2.1 原始数据分析

2.1.1 天水地电阻率数据

已有地表地电阻率震例总结显示, $M_S\geq 7.0$ 地震前异常空间分布范围上限为400 km(杜

学彬等, 2000). 天水台 NS, EW 和 N45°W 向三个测道的小时值数据自 2013 年 4 月 9 日至 2013 年 5 月 9 日出现同步高频扰动异常, 最大扰动幅度分别为 1.83%, 1.00%, 4.28% (图 6a), 异常期间发生了 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_S7.0$ 地震(震中距 540 km). 2013 年 6 月 12 日至 2013 年 8 月 8 日再次同步出现高频扰动异常, 最大扰动幅度分别为 1.41%, 0.85% 和 0.94%, 异常期间发生了 2013 年 7 月 22 日岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震(图 6b). 对比显示, 芦山 $M_S7.0$ 地震高频扰动幅度更为明显, 可能与两次地震的深部结构和孕震环境不同有关. 芦山 $M_S7.0$ 地震发生在巴颜喀拉地块与华南地块碰撞的边界断裂带, 即龙门山推覆构造南段, 该地震属于盲逆断层型地震, 符合断展背斜模型(徐锡伟等, 2013); 而岷县-漳县地震的发震断裂为临潭-宕昌断裂, 震源区处于倒梯形高阻体西秦岭造山带核部(赵凌强等, 2015).

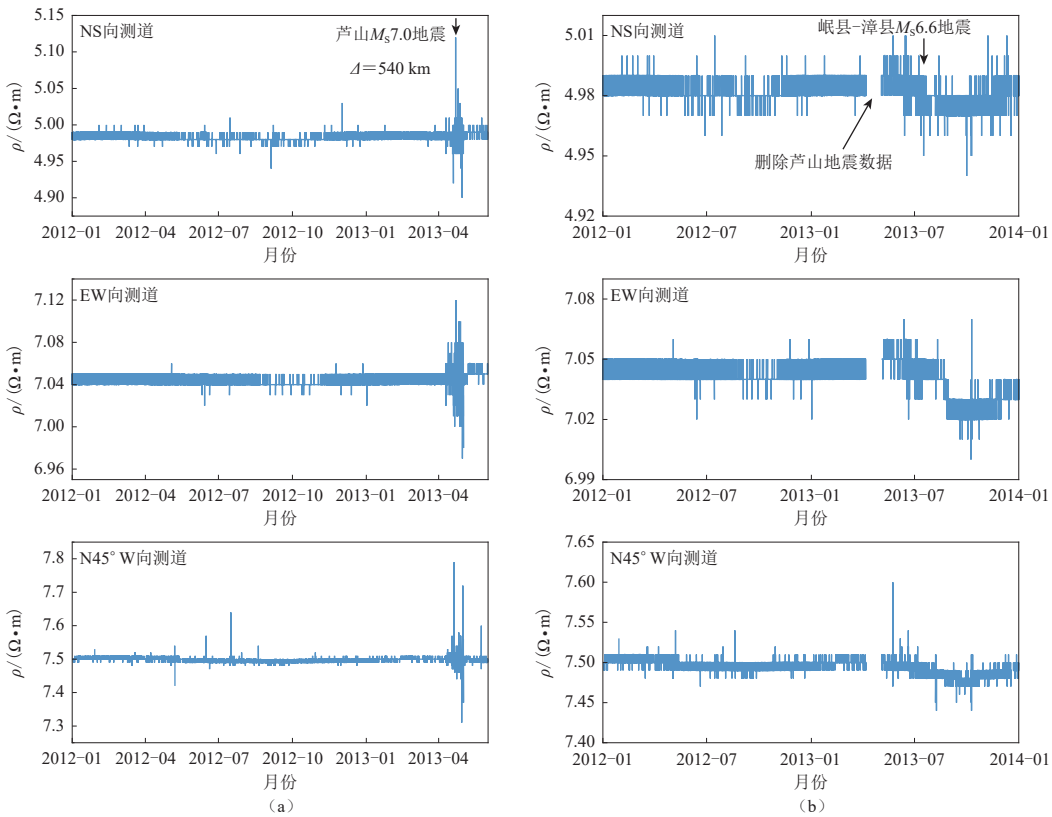


图 6 芦山 $M_S7.0$ (a)和岷县-漳县 $M_S6.6$ (b)地震前天水台地电阻率 ρ 小时值曲线(2012—2013 年)

Fig. 6 Hourly georesistivity curve at Tianshui station before the Lushan $M_S7.0$ (a) and Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ (b) earthquakes (2012–2013)

图 7 为 2012—2013 年地电阻率日均值数据曲线. 可见: NW 和 EW 向两测道的地电阻率自 2013 年 6 月 10 日至 2013 年 11 月 5 日下降, 最大变幅分别为 0.41% 和 0.46%; N45°W 向测道自 2013 年 5 月 20 日至 2013 年 9 月 16 日下降, 最大变幅为 0.28%, N45°W 向测道异常出现的时间早于前两测道, 而异常结束时间晚于前两测道.

岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震前后, 天水地电阻率日均值变化基本符合膨胀-扩散模式 (dilatancy-diffusion mode, 缩写为 DD) 描述的震源区电阻率变化过程(图 8), 即地震可能是由

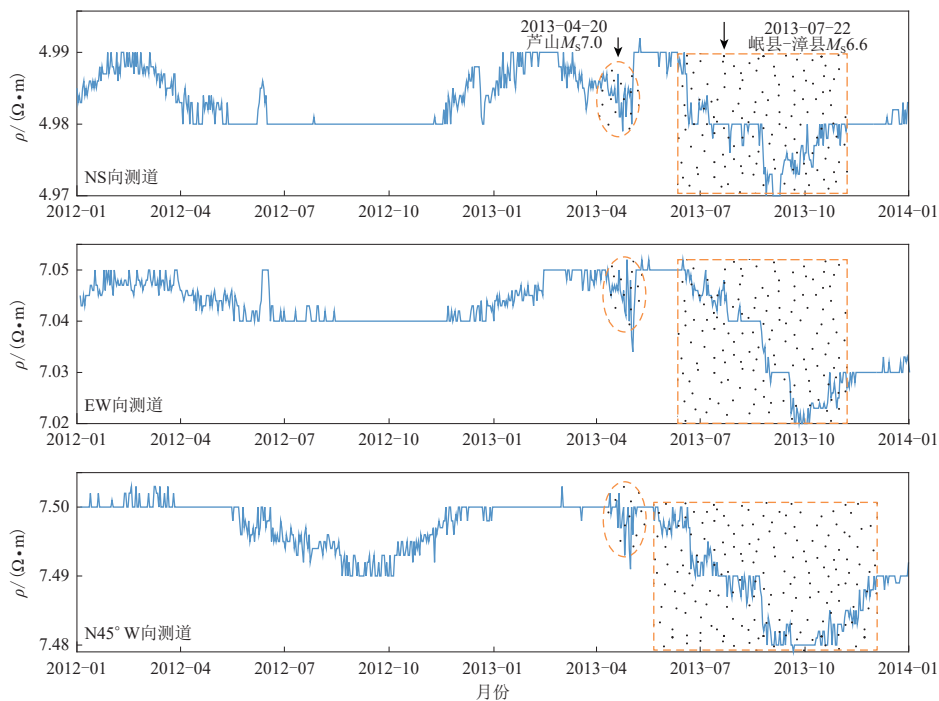


图 7 天水台地电阻率 ρ 日均值曲线(2012—2013 年)
Fig. 7 Daily mean value of georesistivity at Tianshui station (2012–2013)

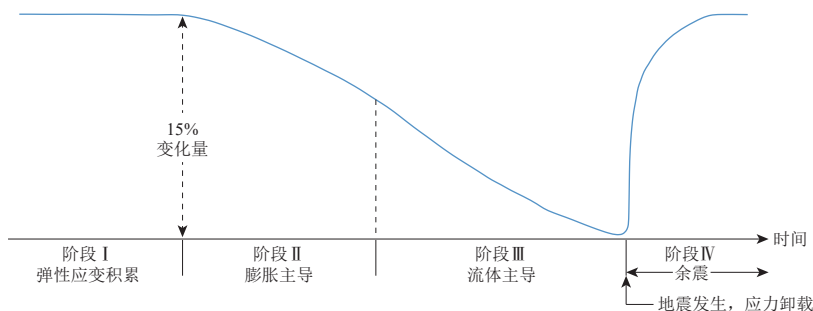


图 8 地电阻率膨胀-扩散模式(修改自 Mjachkin *et al*, 1975)
Fig. 8 Dilatancy-diffusion mode in electrical resistivity (modified from Mjachkin *et al*, 1975)

预先存在断层的运动引起的，它不需要大规模的断裂，孔隙流体在此模型中起核心作用 (Mjachkin *et al*, 1975)。

2.1.2 武山台水氡观测数据

在地震孕育和发生的过程中，地下水中溶解氡的含量将发生显著的异常变化，在孕震过程中以趋势性升高为主(车用太等, 1997; 张慧等, 2005)。武山台 22 号井的背景水氡浓度为 240 Bq/L，1 号泉的背景水氡浓度为 470 Bq/L，两个测点的水氡浓度变化基本同步，自 2012 年 4 月开始上升，整体呈低值—高值—低值趋势，高值异常持续约 1 年；从 2012 年 6 月 25 日开始呈临震变化，整个过程表现为抬升—发震—下降。22 号井和 1 号泉水氡浓度震前的最大变幅分别为 6.36% 和 9.59%，震后水氡浓度下降但未恢复至原有背景值(图 9)。

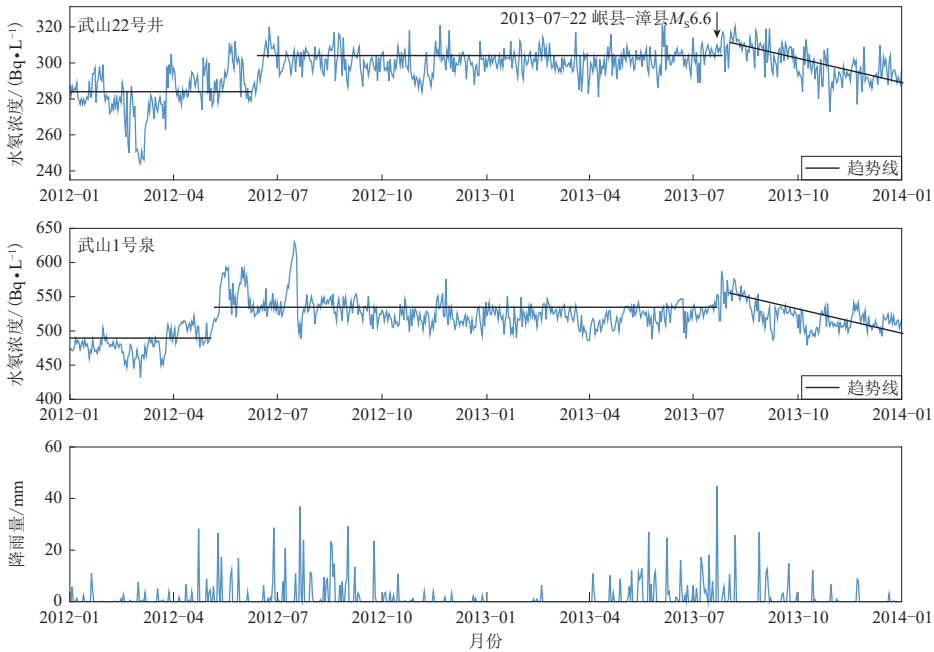


图 9 武山台 22 号井、1 号泉的水氢浓度和降雨量日值曲线(2012—2013 年)
Fig. 9 Diurnal variation of water Random concentration for Wushan Well No. 22 and
Wushan Spring No. 1 and rainfall at Wushan station (2012–2013)

2.1.3 武山台竖直摆钻孔倾斜观测数据

定点形变依照原始曲线异常形态可分为速率型、破年变型、趋势转折型异常，其中最突出的异常类型为速率型，其核心表现为变化速率的改变(中国地震局监测预报司，2020)。武山台竖直摆钻孔倾斜自观测以来 NS 和 EW 向分量分别呈下降和上升趋势。2013 年 6 月 27 日进行年中标定造成了缺数，NS 向分量在标定前未见明显异常，EW 分量在标定前的上升(6 月 15 日开始)显示出异常变化，2012 年 7 月至 2013 年 2 月应变速率为 $3.11\times10^{-3}/\text{d}$ ，2013 年 2 月至 2013 年 6 月应变速率升至 $5.66\times10^{-3}/\text{d}$ ，震后出现的数据畸变为同震应变阶变(图 10)。

2.2 异常提取

2.2.1 归一化速率法

归一化速率法是一种通过计算地电阻率月均值在滑动时间窗口内的斜率，并用背景标准差对其进行标准化，从而得到一个可用于识别显著异常的统一指标的数据处理方法。异常阈值统一为 ± 2.4 ，变化速率 < -2.4 是地电阻率下降异常，变化速率 ≥ 2.4 是地电阻率上升异常，判定电阻率是否异常的标准是根据该台站和测道以往对应地震情况而确定的(杜学彬等，2013)。

岷县-漳县 $M_{\text{s}}6.6$ 地震前三个测道的归一化速率曲线出现同步上升异常，异常阈值确定为 0.8，与已有地电阻率阈值 ± 2.4 有所区别。这是因为目前阈值是根据地表地电阻率统计而得，而井下电阻率数据变化幅度小，因此阈值更小(图 11)。

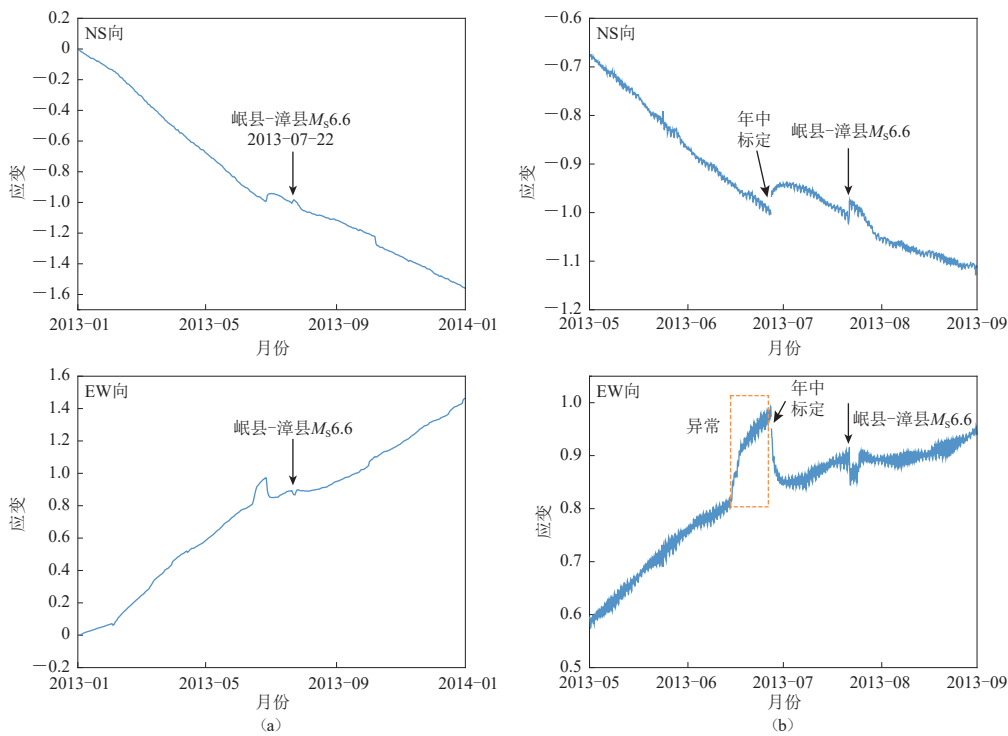


图 10 武山钻孔倾斜北南向、东西向长期应变趋势(a)和短临异常(b)曲线
Fig. 10 The long-term strain trend (a) and short-term imminent anomaly (b) curves from the north-south and east-west components

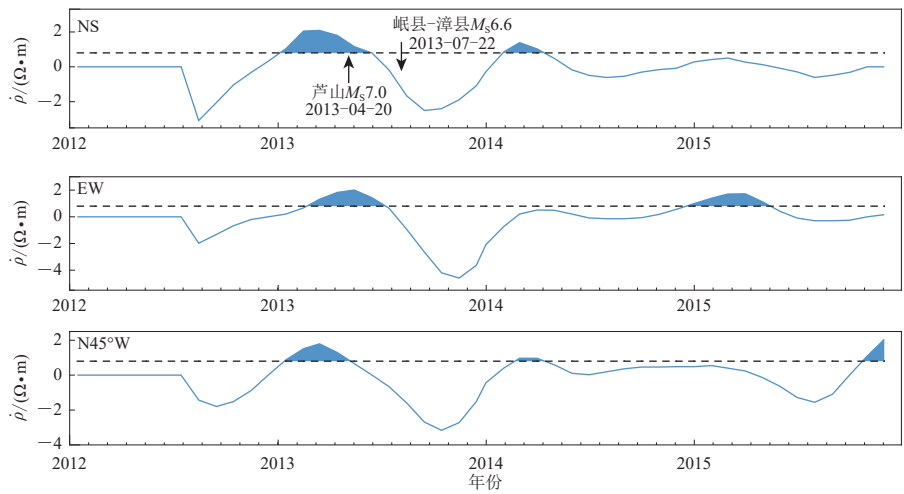


图 11 2012—2015 年天水台地电阻率归一化速率曲线
Fig. 11 The normalized rate curve of georesistivity in Tianshui station (2012–2015)

2.2.2 从属函数方法

从属函数方法的本质是观测曲线上异常关于时间轴的斜率 μ 的变化. μ 值序列上 $\mu \geq 0.5$ 的异常可反映地震信息量随时间的变化过程, 对比后认为甘肃地区使用13点滑动平均值作为数据序列计算结果较好(杨兴悦等, 2006).

武山台 22 号井水氡浓度月均值自 2012 年 3 月至 8 月呈上升趋势, 最大变幅为 13.6%, 9 月水氡浓度下降; 13 点滑动水氡浓度在 2012 年 2 月至 9 月呈上升趋势, 最大变幅 8.7%, 而该浓度 10 月表现为下降. μ 值在震前出现三次大于阈值的异常(震前 14 个月), 自 2013 年 3 月下降, 之后发生岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震(图 12).

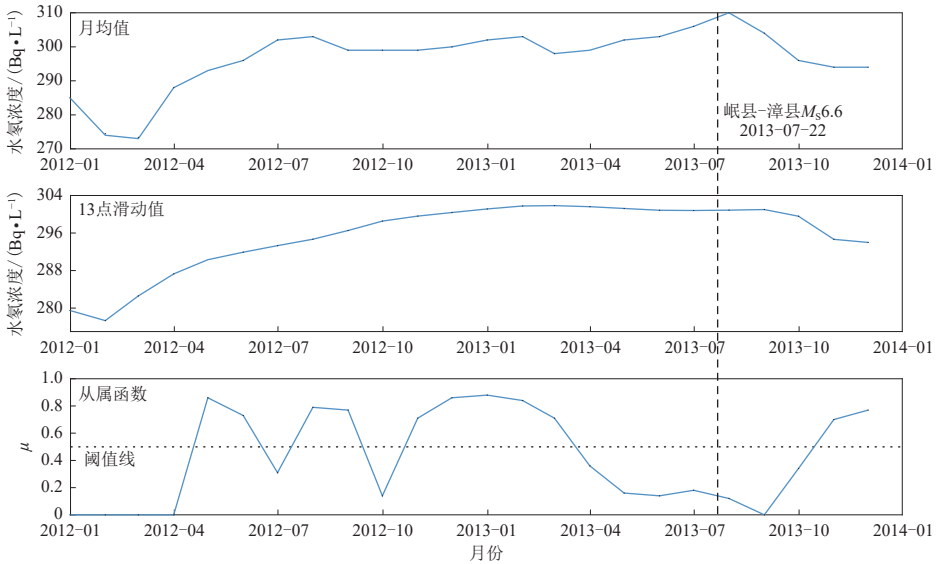


图 12 武山台 22 号井水氡浓度月均值及其 13 点滑动值和从属函数 μ 曲线(2012—2013 年)

Fig. 12 Monthly mean value of water Radon concentration and its 13-point sliding value, and subordinate function μ curves of Wushan Well No. 22 (2012–2013)

武山台 1 号泉水氡月均值自 2012 年 3 月开始上升, 最大变幅 15.7%, 在 2013 年 9 月水氡值开始下降; 而 13 点滑动水氡值自 2012 年 2 月至 11 月上升, 之后缓慢下降: μ 值震前出现 3 次大于阈值的异常(震前 14 个月时), 2013 年 4 月 μ 值下降, 2013 年 4 月 20 日发生芦山 $M_S7.0$ 地震, 2013 年 7 月 22 日发生岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震, μ 值自 2013 年 8 月开始回升(图 13).

2.2.3 潮汐因子调和分析

倾斜观测信息的优势是潮汐信息, 潮汐信息中包含地球介质力学性质变化信息. 调和分析法可有效地去除潮汐频段中的局部气象干扰, 多表现为中短期异常(郗钦文, 侯天航, 1986; 张雁滨等, 2001). 由于 M_2 波的振幅最大, 因此通常计算 M_2 波段的潮汐因子和相位滞后来提取异常. 岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震前潮汐因子 γ 出现显著变化, 即南北、东西分量的 γ 值在 2012 年 4 月至 2013 年 1 月出现显著台阶下降, 属中长期趋势变化, 而在 γ 值回升 6 个月后发现此次地震(图 14).

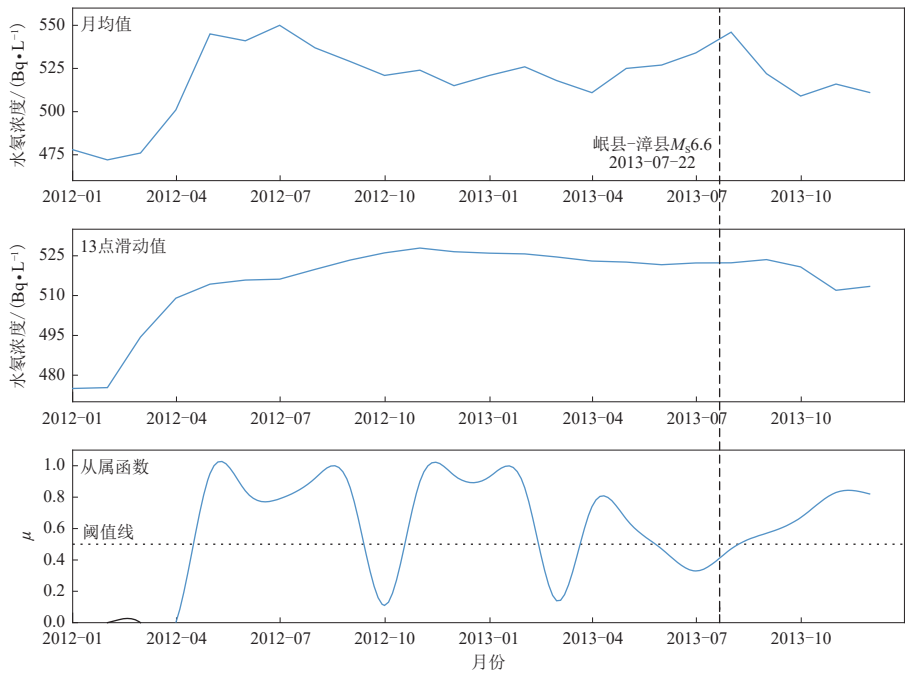


图 13 武山台 1 号泉的水氡浓度月均值及其 13 点滑动值和从属函数 μ 曲线(2012—2013)

Fig. 13 Monthly mean value of water Radon concentration and its 13-point sliding value, and subordinate function μ curves of Wushan Spring No. 1 (2012–2013)

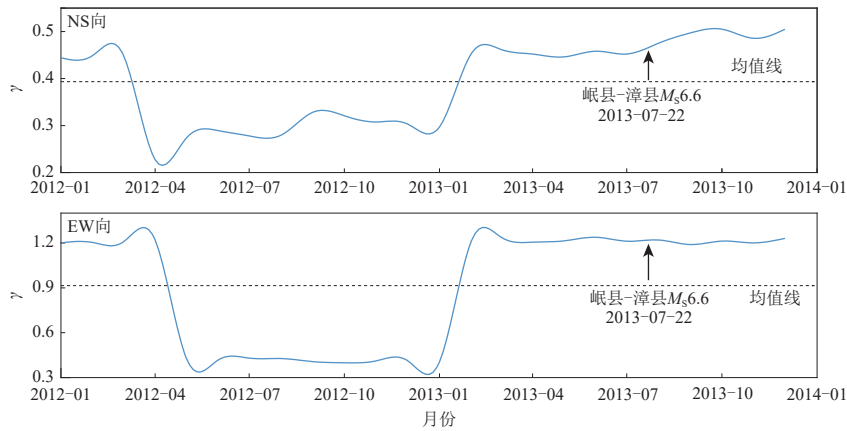


图 14 2012—2013 年潮汐因子 γ 的时序变化曲线

Fig. 14 Time-series variation curve of tidal factor γ during 2012–2013

3 讨论

本文利用 2.2 节所述方法从数据中提取到了异常,但缺少从“数据异常—介质变形—地球物理场变化”这一演化过程及其内在联系分析.为探究天水台地球物理场数据变化与 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 地震的关系,利用断层虚位错模式模拟该区域的震前应变积累(Toda *et al.*, 1998).断层虚位错模型将地震的同震位错按大小相等但方向相反的方式进行加载,获取地

震前能够产生这部分同震滑动所需的应力-应变积累的空间分布特征(赵玉林等, 1996; 解滔等, 2022a). 根据芦山和岷县-漳县地震的震源参数(表 2), 计算此次地震介质变形的空间分布特征(图 15).

表 2 2013 年岷县-漳县 $M_S6.6$ 地震震源参数

Table 2 The source parameters of the 2013 Minxian-Zhangxian $M_S6.6$ earthquake

断层中心位置		长度/km	宽度/km	位错量/cm	震源机制解		
东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$				走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$
104.23	34.52	14.42	8.75	0.26	305	61	46

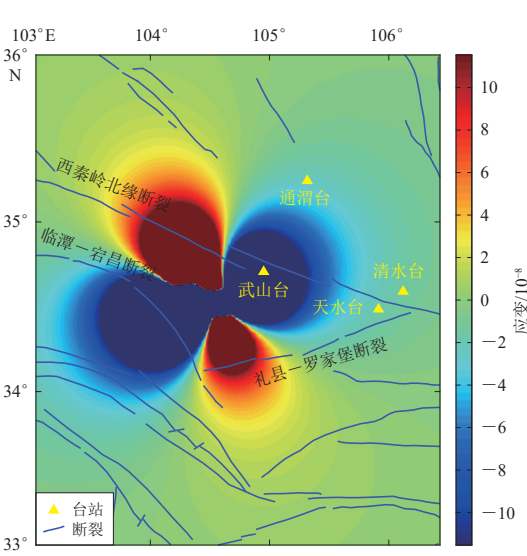


图 15 岷县-漳县地震断层虚位错模型的体应变分布(扩张为正)

Fig. 15 Volumetric strain distribution of Minxian-Zhangxian earthquake based on the fault virtual dislocation model (expansion is positive)

天水地电台、武山台均位于应力挤压区域, 岷县-漳县主震的震源性质为逆冲兼走滑型, 余震震源机制则表现出显著的逆冲特性, 与临潭-宕昌断裂的性质相符合(李晓峰等, 2013; 郑文俊等, 2013). 原地测量地电阻率变化实验显示: 非饱和层、土层受压时, 地电阻率一般会下降, 非饱和岩、土层拉伸时地电阻率一般会上升(赵玉林等, 1983); 实验室三类岩石样品受压破裂后氡浓度均出现不同程度的增长(罗光伟, 石锡忠, 1980; 张慧等, 2005).

地电阻率年变化主要是浅层介质电阻率随季节性变化, 因此井下地电阻率观测可以减小由于季节性变化引起的地电阻率年变化幅度. 震前小时值出现的短临异常呈上下突跳形态, 能够真实地反映地震孕育过程中应力积累导致岩石破裂的过程(康云生等, 2013; 刘君等, 2013; 曾文浩等, 2017; 叶青等, 2022). 芦山、岷县-漳县地震前天

水台地电阻率小时值表现为高频扰动异常, 属短临异常; 日均值表现为趋势下降或转平后的趋势下降和破年变异常, 属于中期异常; 归一化速率异常为上升异常, 异常阈值为 0.8, 此阈值作为天水台地电阻率归一化速率的固定阈值, 对不同地震均须使用同一阈值(表 3). 地电阻率异常变化的原因可能是在强震孕震晚期, 地下深处的介质微裂隙发育, 走向沿最大主压应力方向, 低阻水进入微裂隙、导电通道连通导致介质电性发生改变(杜学彬, 2010). 而三个测道异常的起止时间不同, 表现出地电阻率震兆的各向异性, 可能是由于临震前主应力方向变化导致(赵玉林等, 1995).

武山台 22 号井和 1 号泉的水氡浓度变化大致相同: 在震前 3 个月出现了转折上升, 且均出现了“临震快速上升—发震—最大值—下降”变化, 震后开始下降; 两测点水氡浓度 13 点滑动值的变化形态也相似, 在震前 14 个月缓慢上升, 震后开始下降; 两测点的从属函数曲线均在震前 14 个月出现了 3 次超阈值现象, 地震发生在从属函数曲线的下降阶段, 震后从属

表3 芦山地震和岷县-漳县地震前天水地电阻率数据变化情况
Table 3 Changes of georesistivity data at Tianshui station before the Lushan and Minxian-Zhangxian earthquakes

地震	震中距/km	测项分量	异常起止时间	小时值形态	小时值异常幅度	日均值形态	日均值异常幅度	归一化速率异常
四川芦山 $M_{\text{s}}7.0$	540	NS	2013-04-06—2013-05-03	高频扰动	1.83%	趋势下降、破年变	0.16%	上升异常 阈值0.8
		EW	2013-04-06—2013-05-03	高频扰动	1.00%	转平—下降、破年变	0.26%	
		N45°W	2013-04-09—2013-05-04	高频扰动	4.28%	转平—下降、破年变	0.15%	
甘肃岷县-漳县 $M_{\text{s}}6.6$	153	NS	2013-06-10—2013-11-05	高频扰动	1.41%	趋势下降、破年变	0.41%	
		EW	2013-06-10—2017-11-05	高频扰动	0.85%	趋势下降、破年变	0.46%	
		N45°W	2013-05-20—2013-12-01	高频扰动	0.94%	趋势下降、破年变	0.28%	

函数曲线开始呈上升趋势。武山台 22 号井和 1 号泉的水氡异常特征一致性较好，且符合水氡前兆特征及物理解释。

武山台竖直摆钻孔倾斜观测的原始数据变化属于速率型异常，主要表现为 EW 向分量震前上升速率加快，且在 2023 年 6 月 15 日出现大幅抬升，NS 向分量虽然下降速率有异常，但幅度较小。NS 向和 EW 向分量震后畸变是地震发生时断层强烈破裂引起的同震应变阶(邱泽华, 石耀霖, 2004)。震前潮汐因子出现中短期异常即潮汐因子偏离正常值。武山台竖直摆钻孔倾斜异常变化符合孕震过程中定点形变呈阶段性的特征，即引起形变速率、形变方向和岩石弹性力学性质的变化(吕品姬等, 2010)。

4 结论

本文以 2013 年岷县-漳县 $M_{\text{s}}6.6$ 地震前后天水台地电阻率、武山台 1 号泉水氡、武山台 22 号井水氡和武山台竖直摆钻孔倾斜观测资料为研究对象，通过原始数据分析和归一化速率、从属函数、潮汐因子等异常提取方法，结合断层虚位错模式分析了两个台站地球物理场的异常特征及变化机理，得到以下结论：

1) 四个测项对应的观测点均位于岷县-漳县地震孕震过程中的挤压增强区域。从异常变化形态来看，地电阻率短临异常表现为小时值上下突跳，日均值趋势下降，归一化速率为上升异常且阈值为 0.8；水氡的原始数据长期异常呈高值变化，短临异常表现为快速上升—发震—到最大值—下降，从属函数表现为震前三次超过阈值；竖直摆钻孔倾斜观测的东西分量长期异常呈速率异常，短临异常表现为鼓包畸变，潮汐因子震前出现明显下降台阶变化。从异常出现时间来看，武山台水氡和竖直摆钻孔倾斜的长期异常起止时间基本一致(2012 年 5 月至 2013 年 7 月)，短临异常出现在震前 3 个月，地电阻率的短临异常出现在震前 1 个月，异常出现时间由震中向外、异常变化幅度也逐渐衰减。

2) 天水台地球物理场异常主要集中在距震中 200 km 范围内，且异常演化和异常幅度随震中距变化呈现长—中—短—临特征，竖直摆钻孔倾斜在地震发生时还出现了同震应变阶现象，天水台四个测点的异常变化与岷县-漳县地震在时空上存在一定对应关系。

地震的孕育发生是一个极其复杂的过程，涉及到地球物理场的长趋势背景、中期异常和短临变化等方面，因此地震异常的跟踪分析及预测需要多学科、多方法的综合研判。区域地震发生后，须对出现数据异常的测项进行分析总结，根据前兆异常的时空强及形态特征准确识别异常属性并建立区域典型震例库，对该区域预测指标的建立及地震预测具有重要意义。

参 考 文 献

- 车用太, 鱼金子, 刘五洲. 1997. 水氡异常的水动力学机制[J]. 地震地质, **19**(4): 353–357.
- Che Y T, Yu J Z, Liu W Z. 1997. The hydrodynamic mechanism of water radon anomaly[J]. *Seismology and Geology*, **19**(4): 353–357 (in Chinese).
- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, **39**(12): 1633–1658.
- Chen Y T. 2009. Earthquake prediction: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Science*, **39**(12): 1633–1658 (in Chinese).
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图(1:400 万)[M]. 北京: 地震出版社: 1.
- Deng Q D. 2007. *Map of Active Tectonics in China* (1:4 000 000)[M]. Beijing: Seismological Press: 1 (in Chinese).
- 杜学彬, 薛顺章, 郝臻, 张世中. 2000. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报, **22**(4): 368–376.
- Du X B, Xue S Z, Hao Z, Zhang S Z. 2000. On the relation of moderate-short term anomaly of earth resistivity to earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **22**(4): 368–376 (in Chinese).
- 杜学彬. 2010. 在地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学: D 辑, **40**(10): 1321–1330.
- Du X B. 2011. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction[J]. *Science in China: Series D*, **54**(1): 145–156.
- 杜学彬, 严玲琴, 范莹莹, 安张辉, 刘君, 陈军营, 谭大诚, 王建军, 崔腾发. 2013. 2013 年岷县漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震前/后地电观测引起的思考[J]. 地震工程学报, **35**(3): 513–521.
- Du X B, Yan L Q, Fan Y Y, An Z H, Liu J, Chen J Y, Tan D C, Wang J J, Cui T F. 2013. Geo-electrical forecasting and observation prior to and following the Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake of 2013[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 513–521 (in Chinese).
- 甘卫军, 沈正康, 张培震, 任金卫, 万永革, 周德敏. 2004. 青藏高原地壳水平差异运动的 GPS 观测研究[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(1): 29–35.
- Gan W J, Shen Z K, Zhang P Z, Ren J W, Wan Y G, Zhou D M. 2004. Horizontal crustal movement of Tibetan Plateau from GPS measurements[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **24**(1): 29–35 (in Chinese).
- 姜振海, 崔伟, 王小娟. 2013. 甘肃岷县漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震与甘肃形变异常情况探讨[J]. 地震工程学报, **35**(3): 549–556.
- Jiang Z H, Zhai W, Wang X J. 2013. Analysis of the relationship between abnormal ground deformation of Gansu and the Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 549–556 (in Chinese).
- 康云生, 安海静, 马可兴, 谭大成. 2013. 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, **35**(1): 190–195.
- Kang Y S, An H J, Ma K X, Tan D C. 2013. 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*, **35**(1): 190–195 (in Chinese).
- 李晓峰, 裴惠娟, 徐辉, 张辉. 2013. 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震震源机制解[J]. 地震工程学报, **35**(3): 459–462.
- Li X F, Pei H J, Xu H, Zhang H. 2013. Focal mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 459–462 (in Chinese).
- 刘君, 杜学彬, 范莹莹, 安张辉, 陈军营, 谭大诚, 崔腾发, 王建军. 2013. 甘肃岷县漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震前的地电阻率变化[J]. 地震工程学报, **35**(4): 819–826.
- Liu J, Du X B, Fan Y Y, An Z H, Chen J Y, Tan D C, Cui T F, Wang J J. 2013. The geo-electrical resistivity anomaly before the Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake in Gansu[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(4): 819–826 (in Chinese).
- 罗光伟, 石锡忠. 1980. 岩石标本受压时氦和钍射气量的实验结果[J]. 地震学报, **2**(2): 198–204.
- Luo G W, Shi X Z. 1980. Experimental results of radon and thorium emanations from rock specimen under pressure[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **2**(2): 198–204 (in Chinese).
- 吕品姬, 陈志遥, 赵斌, 李正媛, 林穗平. 2010. 定点倾斜观测映震能力综述[J]. 大地测量与地球动力学, **30**(S2): 50–56.

- Lü P J, Chen Z Y, Zhao B, Li Z Y, Lin S P. 2010. Summary of ability for catching precursors before earthquake from fixed-tilt observations[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **30**(S2): 50–56 (in Chinese).
- 邱泽华, 石耀霖. 2004. 观测应变阶在地震应力触发研究中的应用[J]. *地震学报*, **26**(5): 481–488.
- Qiu Z H, Shi Y L. 2004. Application of observed strain steps to the study of remote earthquake stress triggering[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(5): 481–488 (in Chinese).
- 郝钦文, 侯天航. 1986. 固体潮汐与引潮常数[J]. *中国地震*, **2**(2): 30–41.
- Xi Q W, Hou T H. 1986. Earth tides and generating tide constants[J]. *Earthquake Research in China*, **2**(2): 30–41 (in Chinese).
- 解滔, 薛艳, 卢军. 2022a. 中国 $M_S \geq 7.0$ 地震前视电阻率变化及其可能原因[J]. *地球物理学报*, **65**(8): 3064–3077.
- Xie T, Xue Y, Lu J. 2022a. Changes in apparent resistivity and its possible reasons before earthquakes of $M_S \geq 7.0$ in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **65**(8): 3064–3077 (in Chinese).
- 解滔, 于晨, 王亚丽, 李美, 王中平, 姚丽, 卢军. 2022b. 2013年岷县-漳县 $M_S 6.6$ 地震前通渭台的视电阻率变化[J]. *地震地质*, **44**(3): 701–717.
- Xie T, Yu C, Wang Y L, Li M, Wang Z P, Yao L, Lu J. 2022b. Apparent resistivity variation of Tongwei seismic station before the Minxian-Zhangxian $M_S 6.6$ earthquake in 2013[J]. *Seismology and Geology*, **44**(3): 701–717 (in Chinese).
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 程佳, 谭锡斌, 朱艾斓, 闻学泽. 2013. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. *地学前缘*, **20**(3): 11–20.
- Xu X W, Chen G H, Yu G H, Cheng J, Tan X B, Zhu A L, Wen X Z. 2013. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake[J]. *Earth Science Frontiers*, **20**(3): 11–20 (in Chinese).
- 杨兴悦, 王燕, 闫万生. 2006. 武山22号井水氡中期异常与地震关系的探讨[J]. *西北地震学报*, **28**(4): 379–380.
- Yang X Y, Wang Y, Yan W S. 2006. Discussion on relationship between middle-team anomalies of radon in No. 22 Well at Wushan station and earthquakes[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **28**(4): 379–380 (in Chinese).
- 杨兴悦, 王燕, 王建荣, 田野, 周建强. 2013. 甘东南地下流体异常与甘肃岷县6.6级地震关系探讨[J]. *地震工程学报*, **35**(4): 808–815.
- Yang X Y, Wang Y, Wang J R, Tian Y, Zhou J Q. 2013. The relationship between underground fluid anomalies in southeastern Gansu and the Minxian $M_S 6.6$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(4): 808–815 (in Chinese).
- 叶青, 王晓, 杜学彬, 解滔, 范晔, 周振贵, 刘高川. 2022. 中国地震井下地电阻率研究进展[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, **52**(3): 669–683.
- Ye Q, Wang X, Du X B, Xie T, Fan Y, Zhou Z G, Liu G C. 2022. Research progress of seismic underground geo-resistivity in China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, **52**(3): 669–683 (in Chinese).
- 袁道阳, 张培震, 刘百麓, 甘卫军, 毛凤英, 王志才, 郑文俊, 郭华. 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. *地质学报*, **78**(2): 270–278.
- Yuan D Y, Zhang P Z, Liu B C, Gan W J, Mao F Y, Wang Z C, Zheng W J, Guo H. 2004. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, **78**(2): 270–278 (in Chinese).
- 曾文浩, 杨兴悦, 王燕, 马辉源. 2017. 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*, **37**(S4): 108–111.
- Zeng W H, Yang X Y, Wang Y, Ma H Y. 2017. Discussion on earthquake reflecting ability on geo-electrical resistivity data in underground well at Tianshui station[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **37**(S4): 108–111 (in Chinese).
- 张国民, 罗兰格. 1990. 地震综合预报的某些进展与展望[J]. *地震*, (5): 25–32.
- Zhang G M, Luo L G. 1990. Some progress in comprehensive earthquake prediction and prospects[J]. *Earthquake*, (5): 25–32 (in Chinese).
- 张慧, 张新基, 苏鹤军. 2005. 强震水氡前兆异常特征及其物理解释[J]. *西北地震学报*, **27**(3): 228–232.
- Zhang H, Zhang X J, Su H J. 2005. Anomaly characteristics of radon precursory fields in groundwater before strong earthquakes and their physical explanation[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **27**(3): 228–232 (in Chinese).
- 张培震, 王敏, 甘卫军, 邓起东. 2003. GPS观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约[J]. *地学前缘*,

10(S1): 81–92.

- Zhang P Z, Wang M, Gan W J, Deng Q D. 2003. Slip rates along major active faults from GPS measurements and constraints on contemporary continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(S1): 81–92 (in Chinese).
- 张新基. 2005. 甘肃省地震监测志[M]. 兰州: 兰州大学出版社: 98–113.
- Zhang X J. 2005. *Gansu Earthquake Monitoring Chronicles*[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press: 98–113 (in Chinese).
- 张雁滨, 蒋骏, 陈绍绪, 李胜乐, 王宝坤, 李旭东, 牛安福, 张燕. 2001. 连续形变的前兆参量、判别方法及实用化研究[J]. *内陆地震*, **15**(1): 1–10.
- Zhang Y B, Jiang J, Chen S X, Li S L, Wang B K, Li X D, Niu A F, Zhang Y. 2001. Precursory parameters, discriminant methods and practical research of continuous deformation[J]. *Inland Earthquake*, **15**(1): 1–10 (in Chinese).
- 赵凌强, 詹艳, 赵国泽, 陈小斌, 杨皓, 姜峰. 2015. 基于深部电性结构特征的 2013 年甘肃岷县漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震孕震环境探讨[J]. *地震地质*, **37**(2): 541–554.
- Zhao L Q, Zhan Y, Zhao G Z, Chen X B, Yang H, Jiang F. 2015. The seismogenic environment of the 2013 Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake based on the deep electrical structure[J]. *Seismology and Geology*, **37**(2): 541–554 (in Chinese).
- 赵玉林, 钱复业, 杨体成, 刘建毅. 1983. 原地电阻率变化的实验[J]. *地震学报*, **5**(2): 217–225.
- Zhao Y L, Qian F Y, Yang T C, Liu J Y. 1983. Experiments in situ of electrical resistivity changes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **5**(2): 217–225 (in Chinese).
- 赵玉林, 卢军, 李正南, 钱复业, 张洪魁. 1996. 唐山地震应变-电阻率前兆及虚错动模式[J]. *地震学报*, **18**(1): 78–82.
- Zhao Y L, Lu J, Li Z N, Qian F Y, Zhang H K. 1996. Strain-resistivity precursors and fault virtual dislocation modes of the Tangshan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **18**(1): 78–82 (in Chinese).
- 赵玉林, 李正南, 钱复业, 王玲, 陈宝华, 黄燕妮. 1995. 地电前兆中期向短临过渡的综合判据[J]. *地震*, (4): 308–314.
- Zhao Y L, Li Z N, Qian F Y, Wang L, Chen B H, Huang Y N. 1995. Comprehensive criteria for the transition from the middle-term to the short-term and impending anomalies of geoelectric precursors[J]. *Earthquake*, (4): 308–314 (in Chinese).
- 郑文俊, 刘小凤, 赵广堃, 马尔曼. 2005. 2003 年 11 月 13 日甘肃岷县 $M_{\text{S}}5.2$ 地震基本特征[J]. *西北地震学报*, **27**(1): 61–65.
- Zheng W J, Liu X F, Zhao G K, Ma E M. 2005. Principal Features of Minxian $M_{\text{S}}5.2$ earthquake in Gansu Province, on Nov. 13, 2003[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **27**(1): 61–65 (in Chinese).
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 闵伟, 任治坤, 刘兴旺, 王爱国, 许冲, 葛伟鹏, 李峰. 2013. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县-漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 级地震孕震机制[J]. *地球物理学报*, **56**(12): 4058–4071.
- Zheng W J, Yuan D Y, He W G, Min W, Ren Z K, Liu X W, Wang A G, Xu C, Ge W P, Li F. 2013. Geometric pattern and active tectonics in southeastern Gansu Province: Discussion on seismogenic mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ earthquake on July 22, 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(12): 4058–4071 (in Chinese).
- 中国地震局. 2013. 中国地震局发布甘肃岷县漳县 6.6 级地震烈度图[EB/OL]. [2013–07–24]. <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/dzdt/3571682/3571683/3575764/index.html>.
- China Earthquake Administration. 2013. China Earthquake Administration releases the seismic intensity map of the Minxian-Zhangxian, Gansu $M6.6$ earthquake[EB/OL]. [2013–07–24]. <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/dzdt/3571682/3571683/3575764/index.html>.
- 中国地震局监测预报司. 2020. 形变分析预测技术方法工作手册[M]. 北京: 地震出版社: 14–18.
- Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. 2020. *Technical Methods Manual for Deformation Analysis and Prediction*[M]. Beijing: Seismological Press: 14–18 (in Chinese).
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, Dieterich J H. 1975. Two models for earthquake forerunners[J]. *Pure Appl Geophys*, **113**(1): 169–181.
- Toda S, Stein R S, Reasenberg P A, Dieterich J H, Yoshida A. 1998. Stress transferred by the 1995 $M_{\text{W}}=6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **103**(B10): 24543–24565.