

红寺堡地电阻率变化与2025年1月2日银川 4.8级、4.6级地震孕震过程研究

杨学锋, 刘廷晰, 马丽君, 胡春阳, 金小芳

宁夏回族自治区地震局中卫地震监测中心站, 宁夏 中卫

收稿日期: 2025年8月11日; 录用日期: 2025年9月15日; 发布日期: 2025年9月23日

摘要

2025年1月2日, 银川相继发生4.8级、4.6级地震, 震中150 km范围内有3个地电阻率观测台。其中, 距离震中约122 km的红寺堡地电阻率NS向在地震发生前16个月开始出现年变畸变异常。通过定性与定量分析该变化与测区土壤水分和地下水位的关系, 发现该异常与二者无关联; 利用定量拟合及自适应变幅方法计算红寺堡地电阻率NS向变化幅度, 结果显示, 银川地震前该测道数据显著超出阈值线, 呈现高阈值异常特征; 依据断层虚位错模型的研究, 红寺堡台位于震前区域应力应变的膨胀区, 结合岩石实验分析结果, 认为其NS向年变畸变的上升变化与含水岩石应力加载实验中观测到的上升变化规律一致。因此, 红寺堡地电阻率NS向年变的畸变异常极有可能是银川地震前区域应力变化的客观反映。

关键词

红寺堡地电阻率, 银川地震, 自适应变幅, 断层虚位错模式

Study on the Change of Geoelectric Resistivity of Hongsibao and the Seismic Process of Magnitudes 4.8 and 4.6 Earthquakes in Yinchuan on January 2, 2025

Xuefeng Yang, Tingxi Liu, Lijun Ma, Chunyang Hu, Xiaofang Jin

Zhongwei Seismic Monitoring Center Station, Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Zhongwei Ningxia

Received: Aug. 11th, 2025; accepted: Sep. 15th, 2025; published: Sep. 23rd, 2025

文章引用: 杨学锋, 刘廷晰, 马丽君, 胡春阳, 金小芳. 红寺堡地电阻率变化与2025年1月2日银川4.8级、4.6级地震孕震过程研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(9): 1328-1339. DOI: 10.12677/ag.2025.159123

Abstract

On January 2, 2025, two earthquakes of magnitudes 4.8 and 4.6 occurred successively in Yinchuan. Within a 150-kilometer radius of the epicenter, there were three geoelectric resistivity observation stations. Among them, the NS direction of the Hongsibao geoelectric resistivity station, approximately 122 km from the epicenter, began to show an abnormal annual variation distortion 16 months before the earthquake. Through qualitative and quantitative analysis of the relationship between this change and the soil moisture and groundwater level in the survey area, it was found that there was no correlation between the anomaly and the two. By using quantitative fitting and adaptive amplitude variation methods to calculate the change amplitude of the NS direction of the Hongsibao geoelectric resistivity, the results showed that the data of this measurement channel significantly exceeded the threshold line before the Yinchuan earthquake, presenting a high-threshold anomaly feature. Based on the research of the fault virtual dislocation model, the Hongsibao station was located in the expansion zone of the regional stress and strain before the earthquake. Combined with the results of rock experiments, it was believed that the upward change of the annual variation distortion in the NS direction was consistent with the upward change observed in the stress loading experiments of water-bearing rocks. Therefore, the abnormal annual variation distortion of the NS direction of the Hongsibao geoelectric resistivity was very likely an objective reflection of the regional stress changes before the Yinchuan earthquake.

Keywords

Hongsibao Geoelectric Resistivity, Yinchuan Earthquake, Adaptive Amplitude Variation, Fault Virtual Dislocation Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1966 年河北邢台 7.2 级地震开始,我国将物探电法勘探中的直流电阻率观测方法引入到地震监测,用以监测固定范围内介质电阻率随时间的变化,并称之为地电阻率。由此开展了大规模的以地震监测预报为主要目的的地电阻率观测,经过五十余年的摸索与践行,地电阻率观测已成为中国地震局地球物理场观测体系的重要手段之一。大量研究表明,这一方法在地震前兆捕捉方面具有显著成效,如在 2008 年四川汶川 $M_s8.0$ 地震、1976 年四川松平 $M7.2$ 地震、1976 年唐山 $M7.8$ 地震等一系列中强地震发生前,均记录到明显的地电阻率前兆异常[1]-[4]。目前,地电阻率观测方法在地震监测预报中的应用已被国内外广泛关注 and 认可。我国现有 92 个地电阻率观测站持续开展常态化地震监测工作,为地震预报预警提供重要的数据支撑。这些观测站组成的地电阻率台网,在地震灾害防御体系中发挥着不可替代的作用。

地电阻率的相对变化,可通过测区内不同区域介质电阻率相对变化的加权求和加以量化表达,该参数能够精准刻画测区地下介质导电特性的综合状态[5]-[7]。在长期观测中,几乎所有台站都存在季节性的年周期变化(简称年变化或年变),对年变的分析研究显示,其主要源于地电阻率测区表层介质的季节性变化[8]-[11]。但这种变化的驱动机制具有显著复杂性,其不仅可能是地震孕育阶段应力调整的电学响应,还与测区地下水位升降、降雨强度变化及地温波动等环境因素存在紧密耦合关系[12]。因此,在实际观测中,地电阻率观测曲线往往是多种影响因素重叠结果的显示,而且非震异常与震兆异常在形态特征上存

在高度相似性,这给地震异常信号的识别与分析带来极大挑战,显著增加了地震预测判识的不确定性[13]。为推动地电阻率在地震预报领域实现技术突破,几代科研工作者深耕不辍,相继研发了同年对比分析、傅氏滑动去年周期、滑动速率分析及自适应变幅法等系列研究方法。大量实践与研究数据表明,在众多分析手段中,自适应变幅法展现出显著优势。该方法创新性地构建了动态阈值调节机制,能够实时捕捉数据的特征变化,精准调整异常识别的幅度阈值。当地电阻率数据的波动特性发生改变时,无论是季节性正常波动还是环境干扰导致的幅度变化,该方法均能快速响应并自适应调节,既避免将正常波动误判为异常信号,又能确保微弱异常信息不被漏检,为地震前兆的精准捕捉提供了可靠的技术支撑。

宁夏地处我国南北地震带这一强震活动密集区,是地震灾害高发区域。历史上,1793年平罗8级地震与1920年海原8.5级地震震惊中外,另有多次6~7级破坏性地震记录。首府银川市所在的银川盆地,地质构造上属于“银川地堑”,处于贺兰山断裂带与鄂尔多斯盆地西缘断褶带之间,受多组活动断裂体系相互作用,地壳应力分布呈现显著的非均匀性,形成多个应力集中区域,为地震孕育提供了地质构造条件。地电阻率异常作为重要的地震前兆信息,具有大尺度、广域性的映震特征。红寺堡地电阻率观测站作为宁夏中部地区唯一的地电观测项目,不仅承担着监测本地震情动态的核心任务,其观测数据对周边区域地震形势研判同样具有重要的参考价值。本文聚焦红寺堡地电阻率变化特征,系统分析其与2025年1月2日银川连续发生的4.8级、4.6级地震(以下简称“银川地震”)孕震过程的关联性,旨在为地震前兆异常识别提供实证依据,同时全面评估红寺堡地电阻率监测系统的实际效能。

2. 区域地震地质概况

2.1. 红寺堡台地质条件

红寺堡地电台坐落于宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区新庄集乡南角湾村,作为中卫地震监测中心站的下属子台,是宁夏中部地区唯一的地电监测站点。台站距红寺堡城区约10 km,距吴忠市区约70 km。该台站地处内陆干旱沙漠气候区,气候特征鲜明,年温差达28℃左右,年平均气温15.8℃,年均降水量仅约252 mm,而蒸发量却高达2803 mm。观测场地为引黄灌溉农田,地势平坦开阔,地形起伏高差不足15 m。台站北侧及北西方向分布有居民住户,距铁路11.5 km,距高速公路13.3 km,交通、电力供应及通信条件均十分便利。

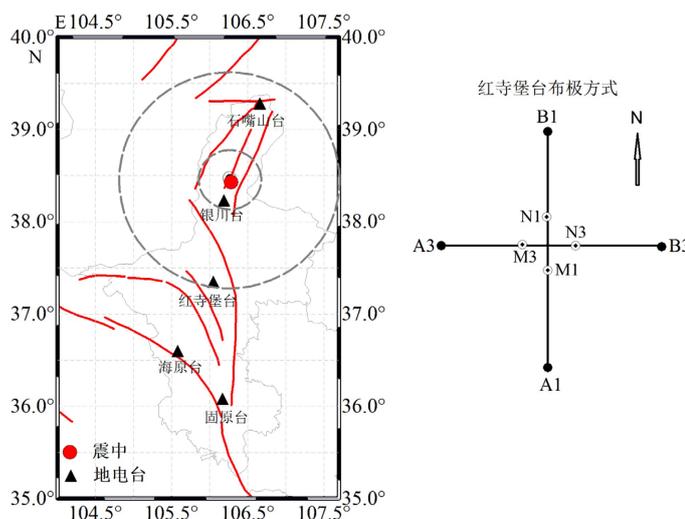


Figure 1. Distribution map of Yinchuan earthquake and geoelectric resistivity stations near the epicenter
图 1. 银川地震及震中附近地电阻率台站分布图

从地质构造角度来看,红寺堡地电台位于红寺堡盆地内部。该盆地受罗山东麓断裂与烟筒山断裂夹持,长轴呈北东向展布。盆地内新近系与古近系地层产状平缓,第四系沉积厚度较薄,地表主要为粉沙土层。台站与罗山东麓断裂相距 23.5 km,距烟筒山断裂仅 10 km (图 1)。由于地处地震活动相对活跃区域,历史上距台站 25 km 处曾发生 7.2 级强烈地震,独特的构造位置使红寺堡地电台具备监测区域中强地震的重要条件。

2.2. 银川台地质条件

银川台是银川地震监测中心站的子台之一,位于宁夏银川市永宁县望洪镇农丰四队,距离永宁县望洪镇约 3 km,距永宁县城约 8 km,京藏高速公路从其东侧经过,布设了北南、东西和北 45°东三个测道,最大供电极距 1000 m,观测仪器为 ZD8M,电极采用的是 1000 mm × 1000 mm × 5 mm 的铅板,设计埋深 20 m 左右,外线路为铠装绝缘电缆地埋敷设,观测项目于 2014 年正式投入使用。观测室年温度变化范围 16℃~29℃,湿度年变化范围 29%~43%。

此台在区域构造上位于银川断陷盆地内,该盆地东、西两侧和北边界皆为正断层,西南边界为逆断层,盆地内存在两条隐伏的北东向正断层,地层年代为第四系,据推断盆地内第四系最大厚度为 2400 m。在地貌上位于黄河二级阶地之上,地表为黄河冲积土,地表至地层 150 m 深度的岩性为细砂及砂粘土。该台测区为黄河灌溉农田,周围地势平坦开阔,地形高差小于 10 m。

2.3. 银川地震概述

2025 年 1 月 2 日 10 时 01 分,银川市永宁县(北纬 38.43 度,东经 106.28 度)发生 4.8 级地震,震源深度 10 km;同日 16 时 43 分,银川市金凤区(北纬 38.41 度,东经 106.26 度)发生 4.6 级地震,震源深度 10 km。地震发生在银川隐伏断裂西支断裂南段,最高烈度达到 6 度,6 度区及以上区域等震线长轴约 7 km,短轴约 4 km。银川隐伏断裂是一条北东南西走向纵贯银川盆地的主要断裂带,也是 1739 年银川-平罗 8 级地震的破裂段,区域地质构造复杂,历史上中小地震活动频繁,自 1970 年有仪器记录以来,共发生 20 次 3 级以上地震。距离震中 150 km 范围内现有 3 个地电阻率观测台,即红寺堡台、石嘴山台和银川台(表 1),这些台均地处断裂带附近,属于能捕捉震前地电阻率变化的敏锐区域。而此次地震前,红寺堡台是这 3 个台站中唯一出现异常的台站。而位于震中附近的银川台并未监测到异常信号,这可能与位于灌溉频率较高的农田区,数据易受水文因素干扰有关。

Table 1. Information of geoelectric resistivity observation stations within 150 km from the epicenter of Yinchuan earthquake
表 1. 银川地震距离震中 150 km 范围内地电阻率观测台站信息

序号	台站	经度/(°E)	纬度/(°N)	测道	震中距/km	观测极距/km	装置系数/km
1	银川台	106.19	38.23	NS	24	AB = 1.000 MN = 0.200	3.77
				EW			
2	石嘴山台	106.66	39.28	N45°E	99	AB = 1.000 MN = 0.200	3.77
				EW			
3	红寺堡台	106.05	37.35	NS	122	AB = 1.000 MN = 0.200	3.77
				EW			

3. 红寺堡地电阻率年变化分析

红寺堡地电阻率台于 2013 年依托背景场项目建设, 2014 年起采用 ZD8M 型地电仪开展正式观测工作。基于 2014~2024 年 NS、EW 两测道地电阻率整点值数据, 经计算分析年均值得出: $\rho_{NS} = 4.73 \Omega \cdot m$, 年变幅为 0.0%~0.6%; $\rho_{EW} = 5.11 \Omega \cdot m$, 年变幅为 0.1%~1.3% (表 2)。本文使用的数据是由整点观测值计算的日均值和月均值。

Table 2. Annual variation range of geoelectric resistivity in Hongsibao

表 2. 红寺堡地电阻率年变幅

年份	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
NS 向年变幅/%	0	-0.2	-0.2	-0.6	-0.4	-0.4	-0.2	-0.5	-0.1	0.3	0.4
EW 向年变幅/%	-0.9	-0.9	-1.1	-1.0	-0.8	-1.1	-0.7	-1.1	-1.3	-0.4	-0.1

注: 表中“-”代表趋势下降。

NS 向观测数据显示, 2014~2021 年期间呈现稳定的反向年动态特征, 即“夏高冬低”: 每年 4 月起数据持续上升, 9 月达到峰值后逐渐回落, 至当年 12 月或次年 1 月触底。值得注意的是, 该时段内下降趋势速率呈现显著阶段性差异: 2014 年 1 月至 2016 年 11 月, 数据下降较为平缓, 年变幅维持在 $0 \Omega \cdot m \sim 0.01 \Omega \cdot m$ 区间; 而 2016 年 12 月至 2021 年 12 月期间, 下降趋势显著加速, 年变幅扩大至 $0.01 \Omega \cdot m \sim 0.03 \Omega \cdot m$ 。2022 年数据趋势发生明显转折, 尽管当年仍保持年动态变化规律, 但自 2023 年 9 月起, NS 向地电阻率打破往年下降态势, 转而呈现持续性上升趋势, 这种背离历史变化规律的现象, 标志着年变畸变的出现。值得关注的是, 在总结震例时发现, 该测道在阿左旗 5.0 和九寨沟 7.0 级地震前均存在不同程度的异常变化, 说明此测道观测数据可信度较高。EW 向自观测以来总体表现为趋势下降, 年变规律不明显, 且长期存在漏电导致观测系统不稳定, 数据可信度不高 (图 2)。因此, 本文只针对可信度较高的 NS 向展开研究。

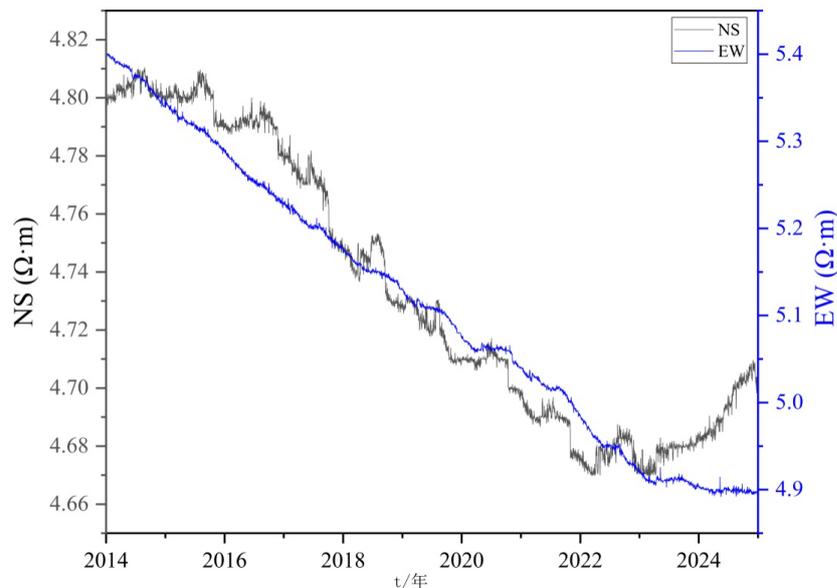


Figure 2. Daily average value curve of geoelectric resistivity in Hongsibao from January 2014 to December 2024
图 2. 红寺堡地电阻率 2014 年 1 月至 2024 年 12 月日均值曲线

基于红寺堡地电阻率 NS 向电测深曲线(图 3 左), 测区可解释为 QH 型 4 层电性断面结构(图 3 右)。影响系数结果表明(B1、B2、B3、B4 分别为第一、二、三、四层介质影响系数), 当供电电极距处于 $35\text{ m} < AB/2 < 250\text{ m}$ 范围时, 浅层介质影响系数呈负值。若供电电极与测量极之间存在影响系数为负的地域时, 该区域介质电阻率上升变化会导致地电阻率观测值下降[14]-[17], 此特征与实际观测中 NS 向因浅层介质变化产生的“夏高冬低”反向年变规律相契合。

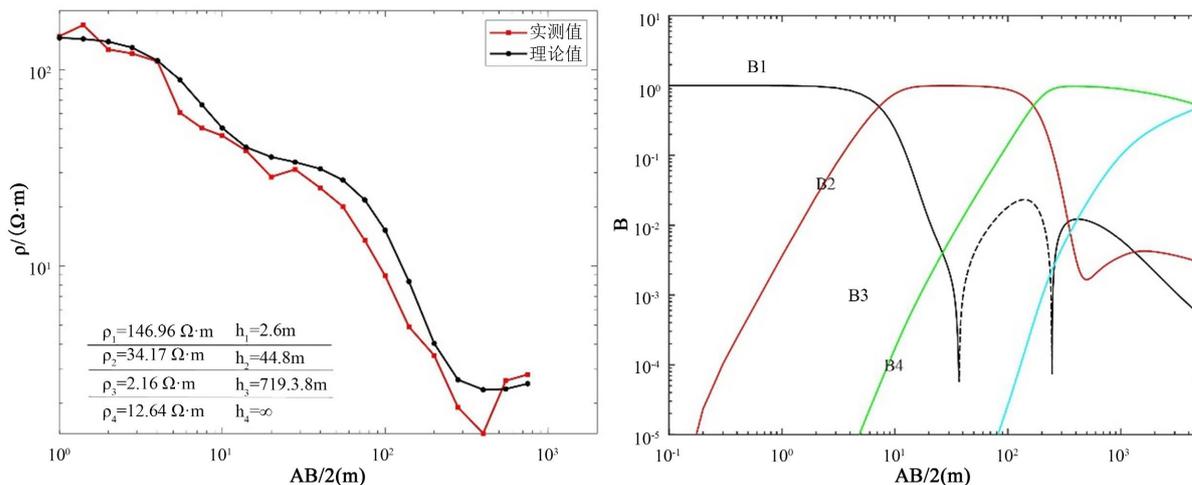


Figure 3. Measured values and theoretical values of the NS-directional electrical sounding of geoelectric resistivity in Hongsibao (left) and influence coefficients of each layer (right) (solid lines represent positive values, dashed lines represent negative values)
图 3. 红寺堡地电阻率 NS 向电测深实测值与理论值(左)和各层影响系数(右) (实线为正, 虚线为负)

3.1. 土壤水分对红寺堡地电阻率 NS 向的影响

土壤中的水分是电解质溶液, 含有各种离子, 离子的存在使土壤具有一定的导电性。当土壤水分含量增加时, 离子的移动性增强, 能够更自由地在土壤孔隙中传导电流, 从而降低地电阻率。反之, 土壤水分减少, 离子移动受限, 地电阻率会升高。因此, 表层土壤水分的变化是引起地电阻率年动态的重要因素。但要想定量研究土壤水分对地电阻率的影响是一个十分复杂的过程, 它不仅与测区的降雨量、蒸发量、灌溉量等多种因素有关, 而且还存在一定时间的滞后效应。为方便研究, 本文从欧空局气象服务中心(<https://cds.climate.copernicus.eu>)获取了 2018~2024 年 ERA5 同化数据集中的土壤水分垂向多层数据, 包括, swvl1 (0 cm~7 cm)、swvl2 (7 cm~28 cm)、swvl3 (28 cm~100 cm)和 swvl4 (100 cm~289 cm)。经分析研究表明(图 4), 浅层土壤水分 swvl1 和 swvl2 数据季节变化显著, 通常于每年 7~10 月出现相对高值, 这与地电阻率“夏高冬低”的年变规律相吻合, 深层土壤水分 swvl3 虽然整体变化趋势与浅层土壤水分一致, 但变化幅度明显较小, 而 swvl4 数据变化近似恒定值, 几乎不受地表因素的影响, 通过月均值计算地电阻率与土壤水分之间的相关系数也证实了这一观点(表 3)。但是从 2023~2024 年的数据来看, 土壤水分的高值并未引起地电阻率大幅度变化。由此说明红寺堡地电阻率 NS 向年变畸变异常与土壤水分无关。

Table 3. Correlation coefficients between the NS-directional geoelectric resistivity in Hongsibao and soil moisture and soil temperature in different layers

表 3. 红寺堡地电阻率 NS 向与不同层土壤水分和土壤温度的相关系数

测向	stl1	stl2	stl3	stl4	swvl1	swvl2	swvl3	swvl4
NS 向	0.70	0.72	0.73	0.40	0.30	-0.40	0.24	-0.10

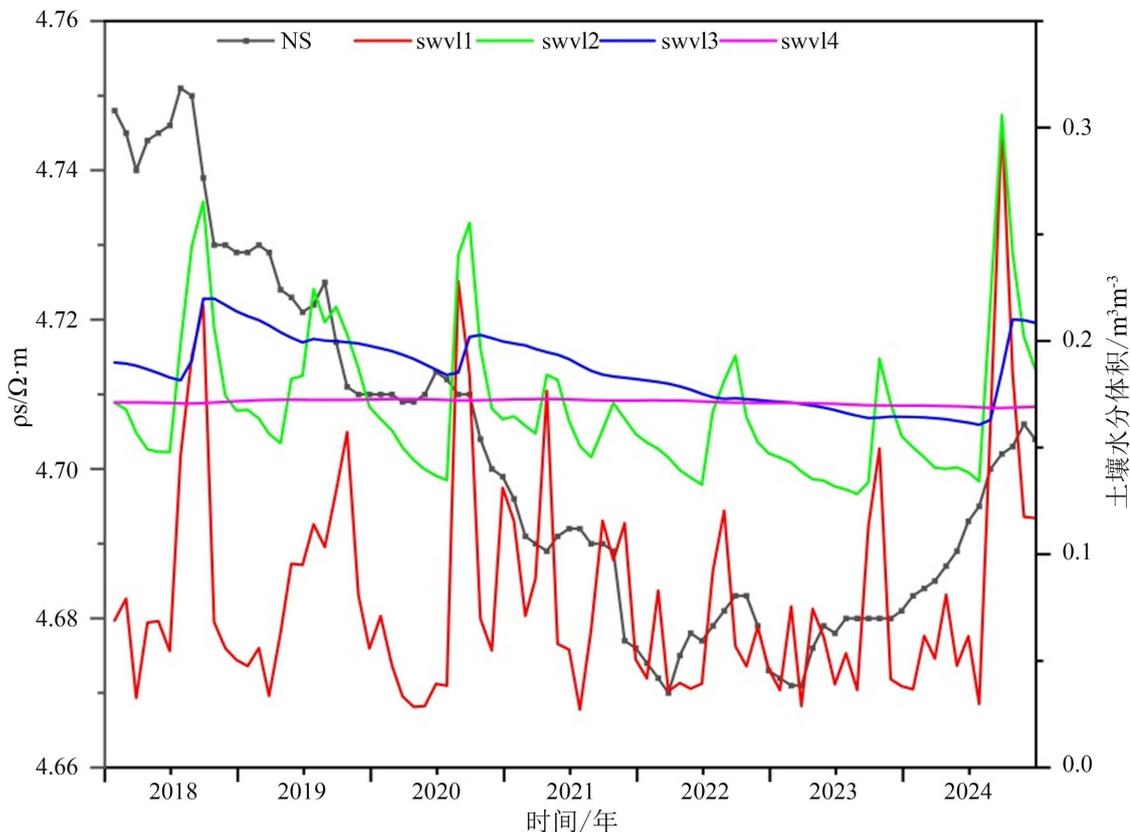


Figure 4. Soil moisture and NS-directional geoelectric resistivity in Hongsibao
图 4. 土壤水分与红寺堡地电阻率 NS 向

3.2. 红寺堡地电阻率年变化成因

红寺堡地电阻率 NS 向长时间序列中，既包含了趋势下降变化，也包含每年“夏高冬低”的年动态变化，还包含由于测区灌溉和降雨引起的短时变化。因此，利用小波变换对红寺堡地电阻率 NS 向进行分解和重构，获得小波变换细节部分和尺度部分(图 5)。结果表明，小波尺度部分(图 5(c))可以反映 NS 向的趋势下降信息 d3，小波细节部分扣除尺度部分后分别可以反映年动态的周期变化 d2 和短时细节变化 d1。因此，分别获取影响 d1、d2 和 d3 部分的因素，获取相关系数(表 4)。结果表明，细节部分 d1 浅层和土壤水分与土壤温度存在相关性；周期部分 d2 与深层土壤水分存在弱相关，与浅层土壤温度强相关，这也表明 NS 向年动态变化受到温度的影响较为显著；d3 与深层土壤水分和地下水位密切相关(水位数据来源于《中国地质环境监测地下水位年鉴》2018~2023)，说明多年来的趋势变化可能受到深层地下水的影响。

Table 4. Correlation coefficients between different components and soil moisture, soil temperature, and groundwater level in Hongsibao

表 4. 红寺堡不同成分与土壤水分、土壤温度和地下水位的相关系数

	swvl1	swvl2	swvl3	swvl4	stl1	stl2	stl3	stl4	水位	tp
d1	0.30	0.25	-0.39	-0.12	0.73	0.75	0.75	0.42	-0.21	0.60
d2	0.20	0.12	-0.47	-0.11	0.88	0.89	0.87	0.42	-0.26	0.53
d3	-0.02	0.17	0.17	-0.68	-0.03	-0.05	0.10	-0.20	0.96	0.10

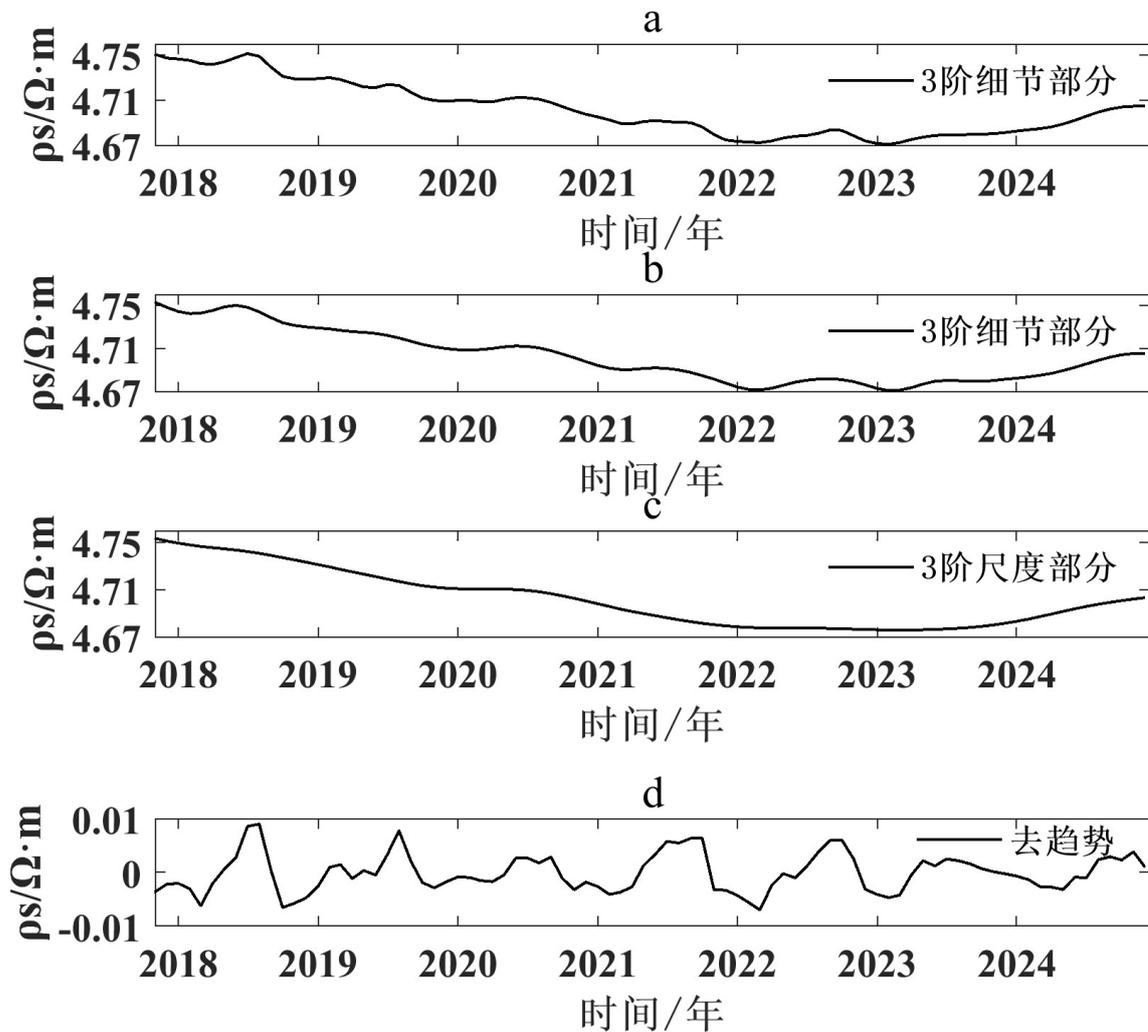


Figure 5. Wavelet transform and detrending results of the NS-directional geoelectric resistivity in Hongsibao
图 5. 红寺堡地电阻率 NS 向小波变换及去趋势结果

4. 地电阻率异常机理分析

为拟合出地电阻率在土壤温度、土壤水分和地下水位共同影响下的时序序列，进而扣除环境因素的影响，本文选用 2018~2021 年与地电阻率明显相关的参数参与拟合(表 4 中加粗参数)，建立线性回归方程(式(1)):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_mx_m \quad (1)$$

式中， y 为地电阻率实测月均值， $x_1, x_2 \cdots x_m$ 分别为与地电阻率存在显著相关的各层土壤水分和土壤温度的月均值， a_0 为常数项， $a_1, a_2 \cdots a_m$ 分别为地电阻率对不同层土壤水分和土壤温度的回归系数。

基于拟合得到的正常年动态的基础上，计算拟合值与实测值的残差，从而获取地震前地电阻率的异常变化(式(2)):

$$diff = y_i - \mu_i \quad (2)$$

式中， μ_i 为第 i 个测道拟合得到的正常年动态月均值， y_i 为相应台站的地电阻实测月均值。本文采用四分位距法提取超阈值异常[18]。

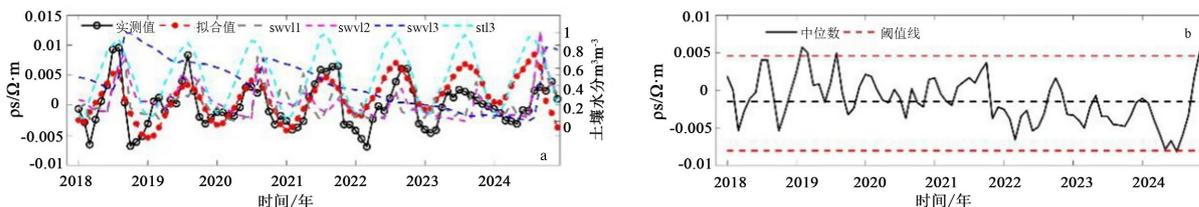


Figure 6. Fitting of detrended annual variations and residuals in the NS direction of Hongsibao
图 6. 红寺堡 NS 向去趋势年变化拟合及残差

结果显示(图 6), 扣除土壤温度、土壤水分及地下水位引起的环境变化部分后, 2024 年 5~7 月红寺堡地电阻率 NS 向处于相对低值, 8 月后开始快速上升, 11 月开始出现了高值超阈值异常, 至震前一直处于高值水平。为进一步深入分析研究此次异常变化与银川地震的关系, 本文采用自适应变化幅度方法[19], 通过年变化消除、趋势提取、变化幅度计算、阈值线计算等环节, 基于分析时段内变化速率的均方差设定异常阈值, 从而提取地电阻率异常变化特征。从红寺堡地电阻率 NS 向自适应变化幅度曲线来看(图 7), 也是自 2024 年 11 月开始, 银川地震前出现了明显的上升幅度超过阈值线的异常。这也与扣除环境变化的结果一致, 说明了此次红寺堡地电阻率高值超阈值异常是真实的。采用相同方法对红寺堡台自建台以来的 NS 向数据开展异常检测后发现: 该台站 150 km 范围内, 历史上共发生 4 次 $M \geq 4.0$ 地震, 且均未记录到同类异常变化。这一现象或与研究样本量有限、地震发生的地质构造差异等因素相关, 后续需在本次异常的基础上, 持续跟踪观测数据的动态变化。

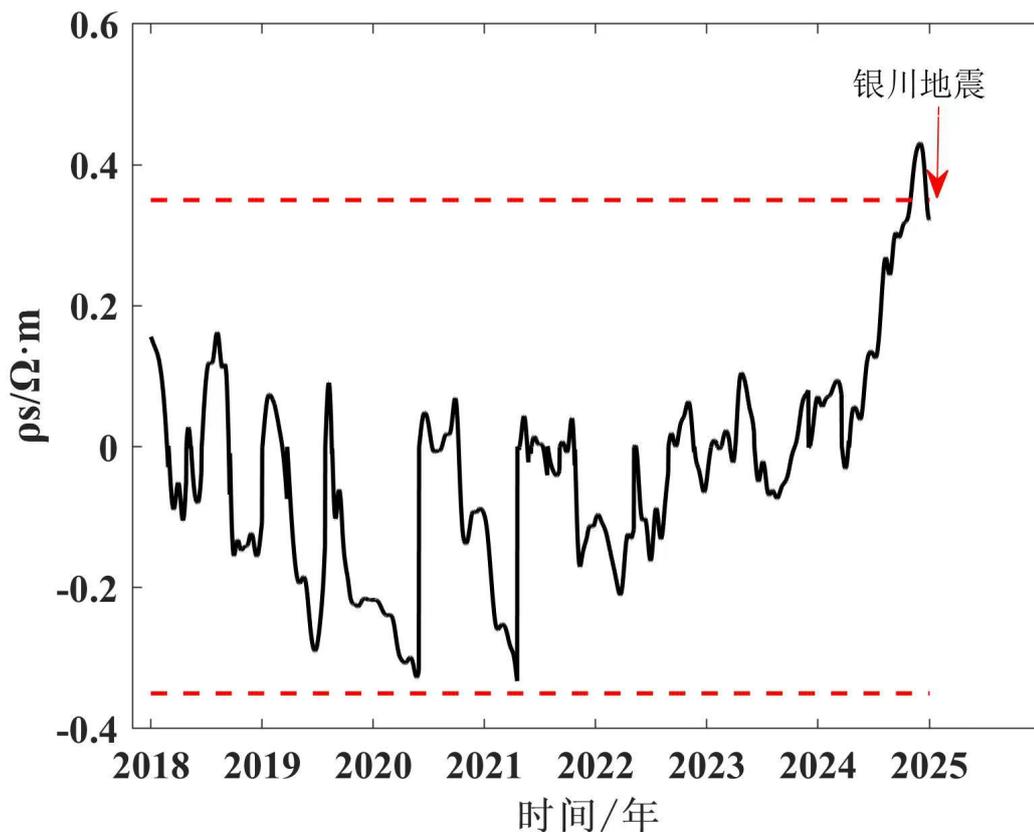


Figure 7. Adaptive variation amplitude curve of Hongsibao geoelectric resistivity
图 7. 红寺堡地电阻率自适应变化幅度曲线

地震是构造应力经长期持续积累,最终致使断层失稳错动的产物。震前断层两侧积聚的部分应变能,会借助断层错动得以释放,进而产生同震位错。地震虚位错模式是一种用于研究地壳形变和应变场的方法,而应变的积累和释放与地震的孕育和发生密切相关,假设孕震阶段的应变场是由一个加载在断层上,但与同震时刻产生的实际错动方向相反、大小相等的虚位错造成的[20][21]。岩土力学的相关理论和实验表明,对于初始含有裂隙的介质,当应力积累到一定程度后,随着新生裂隙不断生成,最终形成的新裂隙系统会沿最大主应力方向开展[22]。室内、野外实验及含裂隙介质模型分析表明,对称四级装置观测的不饱和岩土介质视电阻率,在小应变下压缩时下降,卸载时上升。中国大陆多次强震震前地电阻率研究显示,多数地震前存在中期或短期升降变化:呈下降的台站多位于虚位错模式揭示的震前应力挤压区,上升的则位于相对膨胀区[23]。

基于银川地震震源相关参数,利用虚位错模式计算了震前震中区域的主应变及面应变(图 8)。结果表明,震中附近面应变的压缩区与膨胀区呈现“四象限”分布,而红寺堡台位于体应变膨胀区,因为三四层影响系数是正的,膨胀会引起深部电阻率上升,也就是低阻层 p3 和高阻基底 p4 上升,从而导致整体地电阻率增加,这与大多数中强前地电阻率变化震例研究结果一致。表明此次红寺堡地电阻率异常变化与银川地震的孕震过程存在关联。为了更进一步验证前述结论,利用相关学者研究总结的中强地震前地电阻率变化的异常持续时间与发震震级的经验关系[24][25], $M_s = 0.5 + 2.55 \lg(T)$, 式中 T 为异常持续天数,银川地震前,红寺堡台异常持续时间约为 63 天,估算得到的发震震级约为 $M_s 5.0$,与实际震级 4.8 级也较为接近。

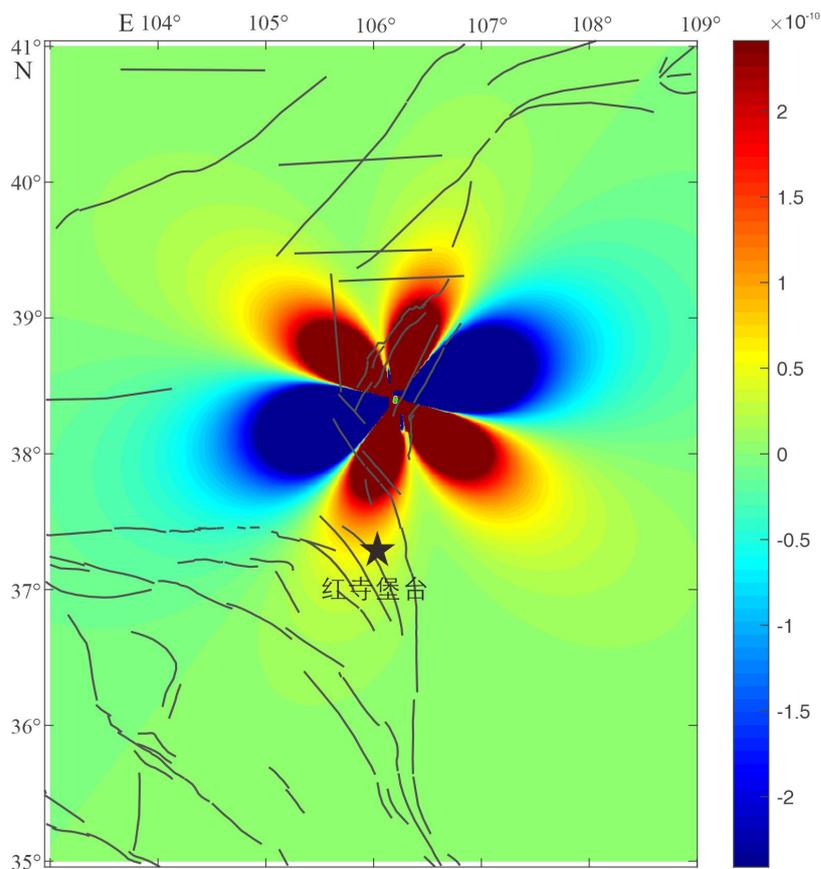


Figure 8. Volume strain before the Yinchuan earthquake calculated based on the fault virtual dislocation model
图 8. 基于断层虚位错模型计算的银川地震前的体应变

5. 结论

本文总结银川地震震例时发现：震前 150 km 范围内的 3 个地电阻率台站中，仅红寺堡台的地电阻率 NS 向出现年变畸变异常。通过定性与定量分析该台 NS 向数据变化与测区土壤水分的关系，发现此年变畸变异常与二者无关联。利用定量拟合及自适应变幅方法计算其 NS 向变化幅度，结果显示，银川地震前该测道数据显著超出阈值线，呈现高阈值异常特征。同时，基于断层虚位错模型的研究表明，红寺堡台处于震前区域应力应变膨胀区，其 NS 向年变畸变的上升变化，与含水岩石应力加载实验及大量虚位错研究结果一致。因此，该台地电阻率的年变畸变异常极有可能是银川地震前区域应力变化的客观反映。

此次地震前，距离震中仅 20 km 的银川地电阻率台未监测到异常，这或许与该台位于灌溉频率较高的农田区且地电阻率表层影响系数较大有关。后续可考虑将其改造为井下观测，以进一步提升区域电磁监测能力。

基金项目

宁夏自然科学基金项目：“宁夏地电阻率中-短-临地震预测指标体系建设”(2023AAC03820)；宁夏地震局科技创新团队“强震孕震过程多圈层耦合研究创新团队”(CX2023-2)。

参考文献

- [1] 解滔, 卢军. 地电阻率观测常见变化形态及其可能原因分析[J]. 中国地震, 2023, 39(1): 128-142.
- [2] 叶青, 张翼, 黄兴辉, 等. 2015 年内蒙古阿拉善 Ms5.8 地震前地电阻率变化特征研究[J]. 地震, 2017, 37(4): 123-133.
- [3] 钱家栋, 张学民, 王亚璐, 等. 2008 年汶川 Ms8.0 地震前成都台 NE 向地电阻率趋势异常的数值模拟[J]. 地震, 2018, 38(2): 107-116.
- [4] 肖武军, 关华平. 汶川 8.0 级地震以及其它大震前的地电阻率异常特征[J]. 西北地震学报, 2009, 31(4): 349-354, 384.
- [5] 钱家栋, 陈有发, 金安忠. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [6] 钱家栋, 赵和云. 地电阻率的数值模拟和多极距观测系统[J]. 地震学报, 1988(1): 77-89, 114.
- [7] 钱家栋, 马钦忠, 李劲秋. 汶川-Ms8.0 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究[J]. 地震学报, 2013, 35(1): 4-17, 137.
- [8] 金安忠. 地电阻率正常变化的初步研究[J]. 地球物理学报, 1981, 24(1): 92-106.
- [9] 王志贤. 地电阻率年变化的一种物理解释——大柏舍台不同极距地电阻率观测结果[J]. 西北地震学报, 1981(3): 45-49.
- [10] 刘允秀, 陈华静. 地电阻率与地下水位、大气降水关系研究[J]. 中国地震, 1999, 15(2): 91-96.
- [11] 张学民, 李美, 关华平. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J]. 地震, 2009, 29(1): 108-115.
- [12] 李新艳, 曾宪伟, 卢军, 等. 基于断层虚位错模式分析 2015 年内蒙古阿左旗 Ms5.8 地震前地电阻率变化[J]. 地震, 2022, 42(2): 89-99.
- [13] 解滔, 李飞, 沈红会, 等. 新沂地震台地电阻率反向年变分析[J]. 地震学报, 2013, 35(6): 856-864.
- [14] 解滔, 卢军. 地电阻率三维影响系数及其应用[J]. 地震地质, 2015, 37(4): 1125-1135.
- [15] 刘允秀, 陈华静, 程瑞年, 等. 地电阻率与地下水位、大气降水关系研究[J]. 中国地震, 1999(2): 91-96.
- [16] 李发, 翟洪涛, 王焱坤, 等. 合肥地震台地电阻率与气温、降水、地下水位关系的初步研究[J]. 高原地震, 2014, 26(4): 10-13.
- [17] 钱家栋, 曹爱民. 1976 年唐山 7.8 级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究[J]. 地震, 1998(S1): 1-9.
- [18] 李新艳, 解滔, 曾宪伟, 等. 断层虚位错模式揭示的 2022 年 1 月 8 日青海门源 Ms6.9 地震前的地电阻率变化[J]. 地震学报, 2024, 46(2): 292-306.
- [19] 解滔, 于晨, 王亚丽, 等. 基于断层虚位错模式讨论 2008 年汶川 Ms8.0 地震前视电阻率变化[J]. 中国地震, 2020,

36(3): 492-501.

- [20] 解滔, 卢军, 杜学彬. 自适应变化幅度方法提取直流视电阻率中短期异常[J]. 中国地震, 2022, 38(1): 52-60.
- [21] 李新艳, 解滔, 刘小鹏, 等. 2023年12月18日甘肃积石山 Ms6.2地震前地电阻率异常特征及机理分析[J]. 地球物理学报, 2024, 67(10): 3721-3734.
- [22] 徐靖南, 朱维申, 白世伟. 压剪应力作用下多裂隙岩体的力学特性——本构模型[J]. 岩土力学, 1993(4): 1-15.
- [23] 解滔, 李晓帆, 岳冲, 等. 大地震前视电阻率各向异性变化及可能原因[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(S1): 213-216.
- [24] 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辑化学生物学农学医学地学), 1982(9): 831-839.
- [25] 杜学彬. 在 earthquake 预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1321-1330.