

廖晓峰, 祁玉萍, 杨星, 等. 2025. 泸定 M_s 6.8 地震前地电阻率的异常特征研究. 中国地震, 41(1): 126~136.

泸定 M_s 6.8 地震前地电阻率的异常特征研究

廖晓峰 祁玉萍 杨星 王玮铭 任越霞 何畅

四川省地震局, 成都 610041

摘要 对泸定 M_s 6.8 地震前四川地区的地电阻率异常演化特征进行总结, 发现不同时间阶段出现了不同的异常形态, 主要有: ①甘孜站、江油站、红格站 3 个台站在强震发生前的 1~4.2 年出现了长趋势变化的转折, 目前多数测项已显示为持续性的趋势上升; ②出现长趋势转折变化后, 红格站、江油站分别在 2020 年 11 月、2021 年 4 月出现了年变幅减小的现象; ③甘孜站、江油站、冕宁站 3 个台站在泸定 6.8 级地震前出现了较为明显的中短期异常变化, 震后 3 个台站的异常恢复, 且再未出现此类异常变化。综上, 长趋势变化的转折可能表明未来一段时间区域内强震风险升高, 而加速上升/下降、反向变化等异常特征可能更具有中短期的指示意义。

关键词: 泸定 M_s 6.8 地震 四川地区 地电阻率 趋势转折 短期异常

[文章编号] 1001-4683(2025)01-0126-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

电阻率是表征岩土介质导电性的物理参数, 与矿物成分、裂隙率、裂隙结构、裂隙内溶液成分、溶液饱和度以及温度等因素有关 (Nover, 2005)。从地震与电阻率关系来看, 在孕震过程中震中及附近区域应力场的改变, 会引起岩土介质内裂隙率以及裂隙之间的连通性发生变化, 进而引起介质电阻率发生变化, 从而建立起地电阻率变化与地震孕育过程之间的联系。1966 年河北邢台 7.2 级地震发生后, 我国开始了地电阻率定点连续观测, 通过固定观测装置位置和极距的方式, 连续监测地下固定探测体积内介质电阻率随时间的变化。为提高监测效率和能力, 每个观测站在地表布设 2~3 个不同方向的观测装置, 其中两个测道通常相互正交, 供电极距为数百米至 2.4 km。

早期, 地电阻率定点观测以地表观测为主, 电极埋深 2~5 m。随着我国城镇化的发展, 地电阻率观测台站周边的工农业用电日益增多, 而这种情况会对浅表地电阻率观测造成严重干扰, 具体表现为在正常的地电阻率数据变化之中叠加出现数据大幅扰动, 严重时会导致地电阻率观测日变形态畸变, 观测方差变大, 进而影响到观测数据的质量和应用效果 (林向东等, 2007; 张宇等, 2017)。因此, 近几年来又发展出了井下地电阻率观测, 井下地电阻率观测是将原本埋在地表的电极装置深埋在地下, 在地下水平向开展对称四极以及在垂直向 (同

[收稿日期] 2023-11-06 [修定日期] 2025-02-25

[项目类别] 中国大地震科学志 (四川卷) 编纂项目 (2023FY10150204)、2023 年和 2024 年震情跟踪定向工作任务 (2023010412, 2024010413) 共同资助

[作者简介] 廖晓峰, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事电磁数据处理及分析工作。E-mail: 490551007@qq.com

一井下电极埋深不同)进行地电阻率观测,这一观测方式能够有效抑制地表干扰(解滔等, 2016、2019; 赵斐等, 2018)。

从我国近 60 年的地电阻率观测及震例总结来看,绝大多数地电阻率台站均有正常的年变形态,主要呈现“夏高冬低”或“夏低冬高”型(解滔等, 2023c)。在正常年变形态之外,主要存在两种异常变化(杜学彬, 2010):一是观测数据出现明显的年变形态畸变,或者基于历史同期的形态对比,出现漏斗形下降或上升变化,反映震前震源附近因微破裂所导致的地电阻率下降过程,一般情况下,此类异常形态所对应地震的震级比较大,距离震源也比较近;二是数据积累时间较长,出现年变化形态完整并持续 3 年以上的趋势变化,呈现下降或上升的背景趋势变化,且这种变化在几年周期内接近线性。

以往地电阻率与地震的研究主要集中于震前几天至几个月的地电阻率数据中短期变化(钱复业等, 1990; 解滔等, 2020a; 解滔等, 2022a、2022b; 姚赛赛等, 2023; 解滔等, 2023a; 韩盈等, 2023),基于不同方法总结了很多震例成果(王同利等, 2020; 解滔等, 2020a、2020b; 于晨等, 2023; 李新艳等, 2024)。但中强地震前,针对震中周围台站地电阻率的长期趋势变化及异常演化过程的研究较少。2022 年泸定 $M_s6.8$ 地震发生后,解滔等(2023d)对震中周围的地电阻率中短期变化进行分析,讨论了这些异常与此次地震孕育过程之间的关系,但并未讨论地震前地电阻率更长时间尺度的趋势变化。本文拟对 2022 年 9 月 5 日泸定 $M_s6.8$ 地震前四川地区地电阻率台站中短期异常的趋势变化进行分析,基于强震前不同时间尺度内地电阻率异常的不同形态,总结地电阻率异常演化的过程,探索其机理和前兆意义,以期对四川地区的震情跟踪工作提供一定参考。

1 四川地电阻率台站简介

四川地区现有 5 个地电阻率观测站,分别为甘孜站、成都站、江油站、冕宁站和红格站。其中,成都站和江油站为地表地电阻率观测站,红格站、甘孜站、冕宁站 3 个站为井下地电阻率观测站。江油站、红格站、甘孜站、冕宁站分别从 2016 年、2014 年、2018 年、2020 年开始进行新场地观测,目前台站仪器运行正常,数据连续率高。成都站由于受周围环境和成都地铁 2 号线的影响,数据波动变化较大,数据质量低,震前也未发现显著异常变化,故本文不对其进行分析。四川省内地电阻率观测站与泸定地震的位置如图 1 所示。

2 四川地电阻率台站的趋势变化特征

使用原始形态法及傅里叶滑动去年变方法分析甘孜站、江油站、红格站、冕宁站地电阻率数据自观测以来的趋势变化情况,发现除冕宁站积累资料短(地电阻率数据积累仅 3 年)而无法识别趋势变化以外,甘孜站、江油站、红格站均存在多年尺度的趋势变化,且趋势变化清晰(图 2(a)、图 2(b)、图 3(a)、图 3(b)、图 4(a)、图 4(b))。

分析发现:①江油站、红格站、甘孜站分别在近 8 年、近 10 年、近 6 年的数据中各存在 2 次、2 次、1 次趋势转折变化(转折时间如图 2、图 3、图 4 中蓝色竖线标志)。②江油站、红格站、甘孜站在转折之前或之后均呈现近线性变化(见图 2(a)、图 2(b)、图 3(a)、图 3(b)、图 4(a)、图 4(b)红色虚线)。③三个台站各个测项出现第一次转折变化的时间一致。④三个台站的不同测项在转折变化前后的趋势存在不一致的现象,如江油站两测项在 2016 年 1

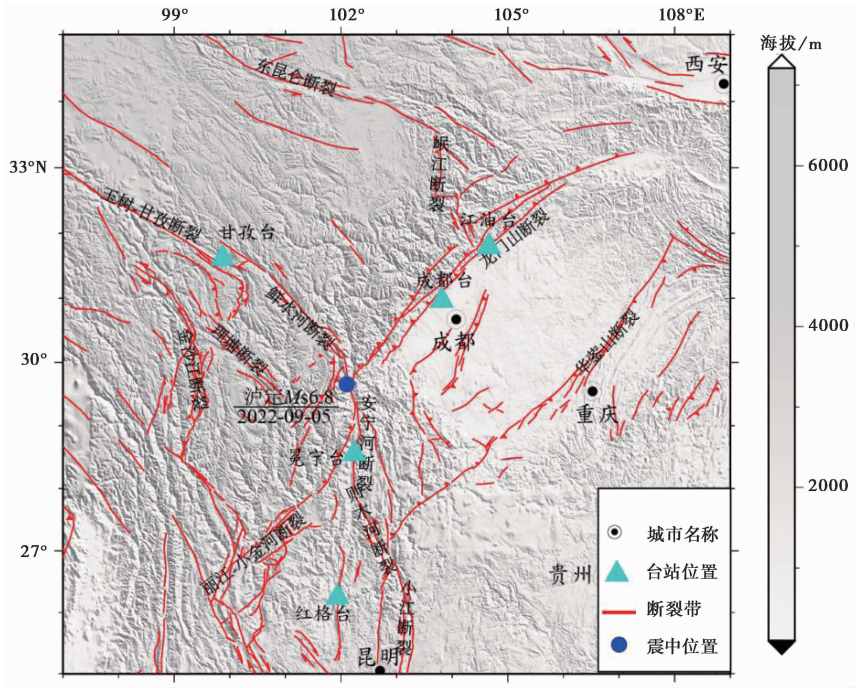


图 1 研究台站、震中位置及主要断裂带分布

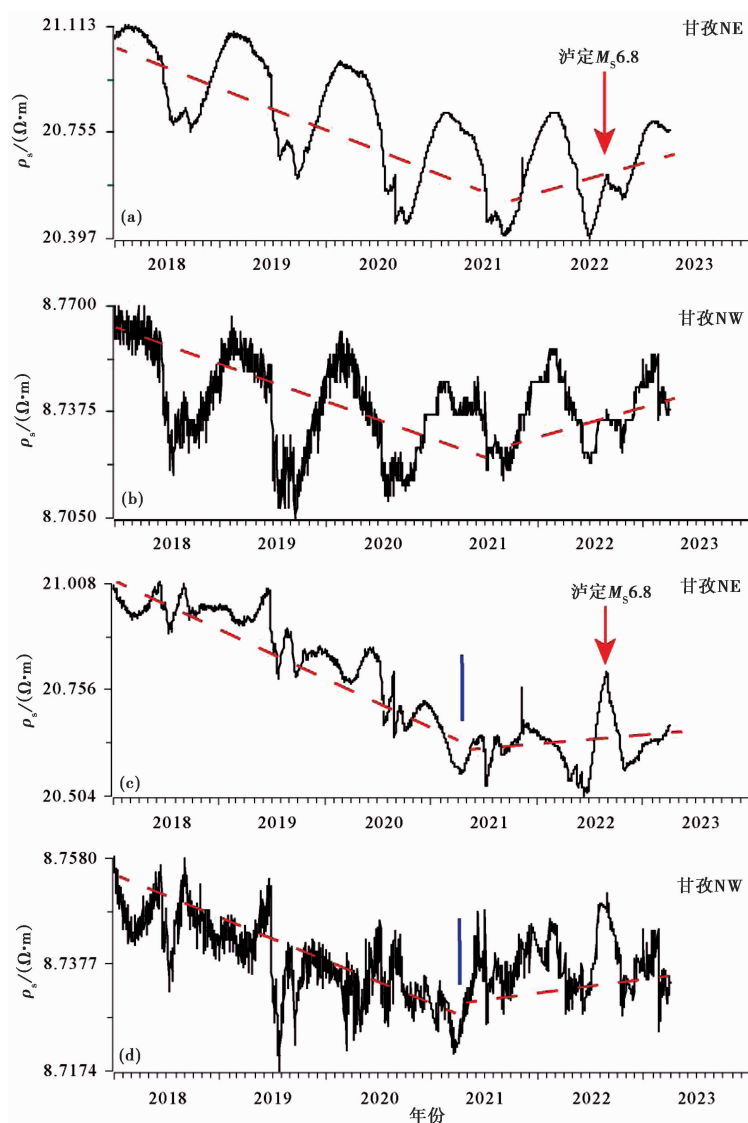
月至 2018 年 7 月间持续多年的趋势下降状态,但转折变化后,目前 NS 向为趋势上升,EW 为趋势下降状态。红格站两测项自 2014 年 1 月至 2020 年 6 月,持续多年的趋势上升,2020 年 6 月至 2021 年 7 月均趋势下降,2021 年 7 月至今又同步趋势上升。而甘孜站两测项趋势转折前是持续下降变化,转折后则出现了趋势上升的变化。三个台站的具体统计信息如表 1 所示。

表 1 各个地电阻率台站长趋势异常变化统计

台站	测项	转折前趋势持续时间	趋势特点	趋势转折时间	转折后变化	转折距泸定地震时间
甘孜	NE	至少 3 年	趋势下降	2021 年 4 月	趋势上升	约 1.5 年
	NW	至少 3 年	趋势下降	2021 年 4 月	趋势上升	约 1.5 年
江油	NS	至少 2.6 年	趋势下降	2018 年 7 月	趋势上升 2 年后再趋势上升	约 4.2 年
	EW	至少 2.6 年	趋势下降	2018 年 7 月	趋势上升 1 年后再趋势下降	约 4.2 年
红格	NS	至少 5.5 年	趋势上升	2020 年 6 月	趋势下降 1 年后再趋势上升	约 1 年
	EW	至少 5.5 年	趋势上升	2020 年 6 月	趋势下降 1 年后再趋势上升	约 1 年

3 泸定 6.8 级地震前的异常现象

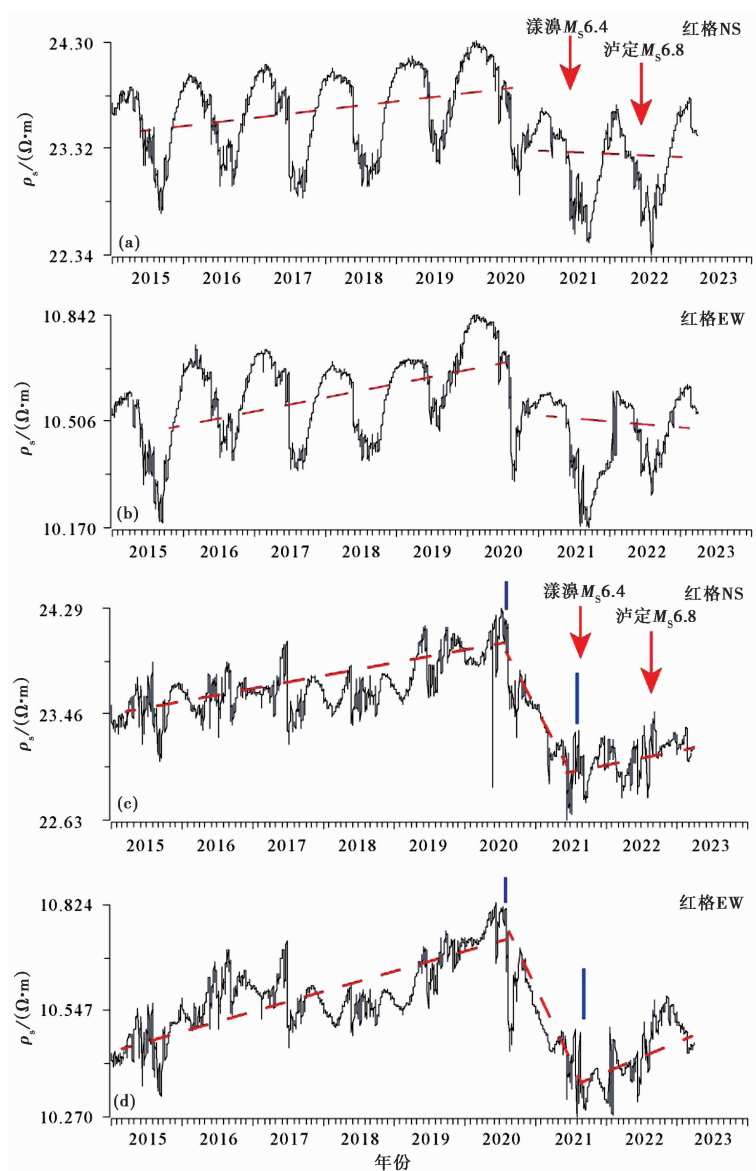
四川地区地电阻率台站出现长趋势转折变化之后,至 2023 年 9 月 5 日泸定 6.8 级地震前,还出现了长期和中短期的异常特征。其中长期异常为:红格站两测项自 2020 年 8 月开始、江油站两测项自 2021 年 4 月开始,均出现年变幅减小的趋势异常(图 5),其中江油站 NS



注: (a)、(b)为日均值曲线; (c)、(d)为去年变周期后的残差曲线; 蓝色竖线为转折时间。

图2 2018年1月1日—2023年3月31日甘孜站地电阻率时序曲线

向、EW 向年变幅分别减小 $0.058 \Omega \cdot m$ 和 $0.095 \Omega \cdot m$ 。3 个台站在震前半年内, 出现了中短期的异常变化, 具体为: 甘孜站 NE 测项自 2022 年 4 月出现破年变且加速下降的显著异常, 累计下降幅度值为 $0.2 \Omega \cdot m$; 江油站、冕宁站共 4 个测项均于 2022 年 6 月出现测值反向上升的破年变异常(图 5(a)、图 5(b)、图 6 红色虚线至发震的时段), 其中江油站 NS 向测值上升幅度达 $0.254 \Omega \cdot m$, 冕宁站 NS 向、EW 向、NW 向上升幅度分别为 $1.501 \Omega \cdot m$ 、 $2.147 \Omega \cdot m$ 、 $1.842 \Omega \cdot m$ 。解滔等(2023d)结合岩石物理实验结果、电阻率模型和断层虚位错模式, 认为甘孜站、冕宁站和江油站在泸定地震前出现的地电阻率中短期异常变化, 可能存在“介质变形-电阻率变化”形式的关联, 即三个地电阻率台站在 2022 年出现的异常变化可能与泸



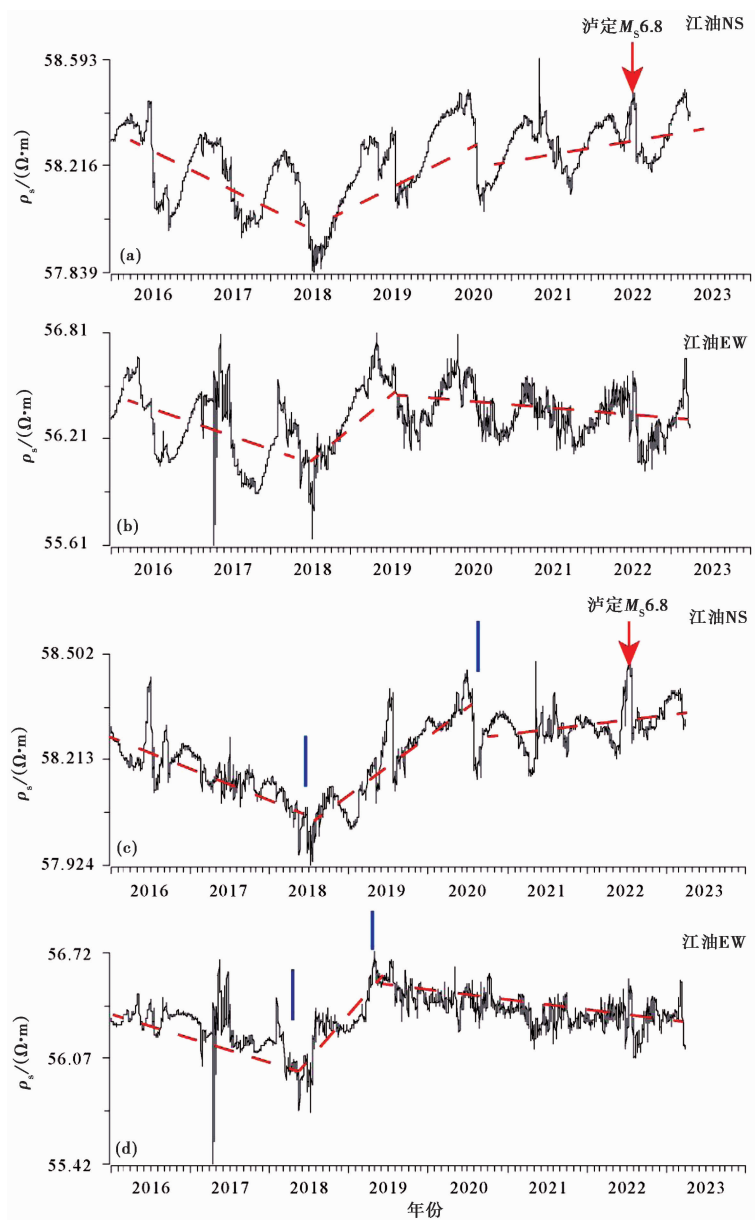
注：(a)、(b)为日均值曲线；(c)、(d)为去年变周期后的残差曲线；蓝色竖线为转折时间。

图3 2014年1月1日—2023年3月31日红格站地电阻率时序曲线

定地震有关。但红格站自2020年8月出现测值下降的破年变异常后,一直维持破年变的异常状态,在泸定地震前的中短期阶段无异常显示,认为该观测数据的变化不仅仅受到此次地震孕育的影响,可能是2021年5月漾濞6.4级地震的震前异常(解滔等,2023d)。各个台站的长中短期异常信息详见表2。

4 讨论

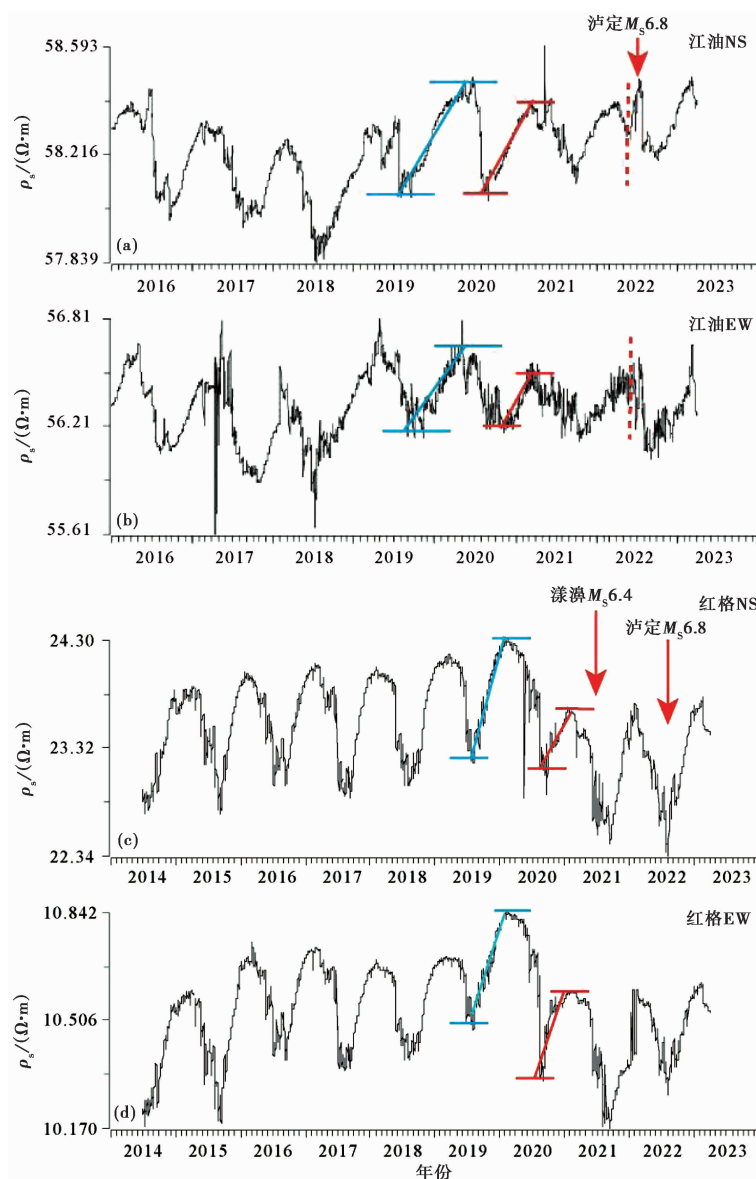
前人研究指出(杜学彬,2010;沈红会等,2017;解滔等,2023c),在长期观测中,地电阻



注: (a)、(b)为日均值曲线; (c)、(d)为去年变周期后的残差曲线; 蓝色竖线为转折时间。

图4 2016年1月1日至2023年3月31日江油站地电阻率时序曲线

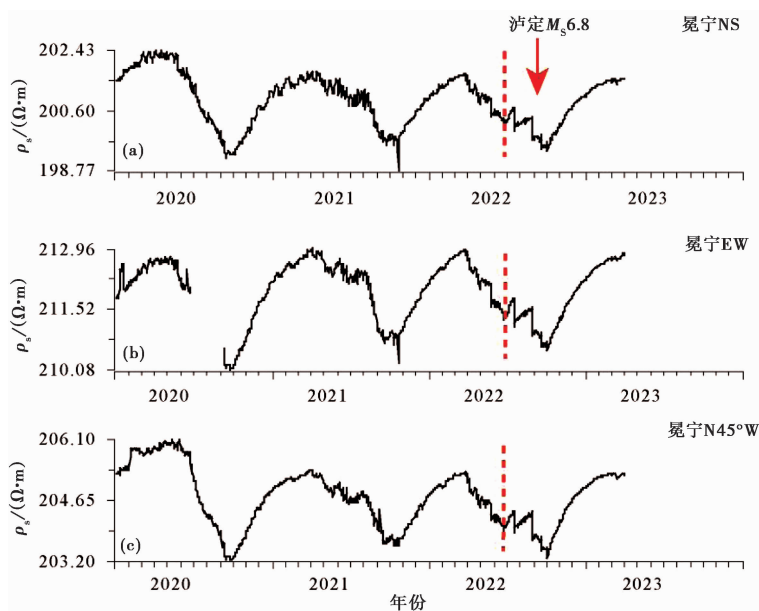
率的异常变化主要包括破年变变化和保留年变形态的一年以上趋势变化两类。趋势变化更多地反映了周围应力场的变化,破年变则体现了周围岩石破裂的过程。沈红会等(2017)对地电阻率台站出现的两种长趋势变化(即多年持续上升或下降的两种形态)进行了分析;杜学彬等(2007、2010)应用各向异性介质近似震源区及附近的介质,参考克拉耶夫(1954)的研究,提出了垂直最大加载方向的电阻率和平行最大加载方向的电阻率变化,由其提出的公式可知,当主应力张性变化时,垂直最大加载方向的电阻率和平行最大加载方向的电阻率呈



注：(a)、(b)为江油站测项；(c)、(d)为红格站测项；红色实线段为破年变异异常幅度；红色虚线为短期异常出现时间。

图5 江油站、红格站地电阻率破年变异异常

下降趋势；而主应力压性变化时，垂直最大加载方向的电阻率和平行最大加载方向的电阻率呈上升趋势。从这一理论出发，分析认为甘孜站、江油站、红格站各测项先后出现转折变化，可能表明该区域大范围的应力场发生了变化。三个台站自转折变化后，除江油台 EW 向显示趋势下降外，其余各测项均显示趋势上升，显示台站周围应力场总体处于主应力压性变化阶段，而泸定地震发生在三个台站的长趋势上升阶段，可能表明构造活动中四川地区存在较强的主压应力，随着应力的不断积累，使孕震区周围的地电阻率测项出现长趋势的转折变



注: 红色虚线为短期异常出现时间。

图 6 冕宁站地电阻率异常

化,也导致了强震的发生。

从 2022 年四川省内发生多次强震和各个地电阻率台站长时间尺度下的异常演化来看,首先,震中附近地电阻率台站各测项出现了不同于以往几年的趋势转折变化,特别是当一个区域内多个台站前后或者同步出现趋势转折变化后,可能表明未来几年区域内发生强震的危险性在升高。另外,对强震发生的时间紧迫性而言,需要结合台站出现趋势转折变化后,而后出现破年变异常,如年变幅减小/增大的变化,距强震发震的时间尺度可能在 2 年至 0.5 年内。至地震发生前的中短期内(0.5 年以内),可能会出现地电阻率测项明显的加速上升/下降、反向变化(与历史同期对比分析)等,以不同时期可能出现的不同异常特征达到对强震发震时间的判定。

震后甘孜站、红格站、江油站的地电阻率数据显示,三个台站总体上仍处于趋势上升状态,表明目前四川地区应力场处于压性状态,未来一段时间内的中强震风险仍然较高,对台站的地电阻率变化仍需持续跟踪关注。

从表 2 可以发现,同一台站不同方向观测的地电阻率异常幅度不一致,较为显著的是甘孜站在泸定地震前 NE 向出现了较为明显的异常,而 NW 向却不明显;冕宁站在泸定地震前 EW 向的变化幅度大于 NW 向和 NS 向,呈现出与 P 轴方位有关的各向异性异常变化。具体来看,泸定 $M_s 6.8$ 地震主震的 P 轴方位为 123° ,呈 NW 向(易桂喜等,2023)。甘孜站垂直于主震最大主应力的测项为 NE 向,而 NW 向与该主震基本平行;冕宁站无垂直于主震最大主应力的测项,但与 P 轴方位夹角最大的测项为 EW 向,NS 向次之;甘孜站和冕宁站出现异常最大的测项分别为 NE 向和 EW 向(图 7),与他人统计的地电阻率异常各向异性的认识,即垂直于最大主应力方向变化幅度最大,平行方向最小,斜交方向介于两者之间(解滔等,2020b; 何康等,2023; 解滔等,2023b)较为一致。

表 2 趋势转折异常后至泸定地震前各个地电阻率台站长/中/短期异常统计

台站	测项	趋势异常 开始时间	异常特征 /($\Omega \cdot m$)	中短期异常 开始时间	异常特征 /($\Omega \cdot m$)	震中距 /km	中短期异常 提前时间/天
甘孜	NE	无	无	2022 年 4 月	加速下降 0.200,破年变	300	157
	NW	无	无	无	无		
江油	NS	2021 年 4 月	年变幅减小 0.058	2022 年 6 月	测值反向上升 0.254	330	96
	EW	2021 年 4 月	年变幅较小 0.095	无	无		
冕宁	NS	无	无	2022 年 6 月	测值反向上升 1.501	130	96
	EW	无	无	2022 年 6 月	测值反向上升 2.147		
	NW	无	无	2022 年 6 月	测值反向上升 1.842		
红格	NS	2020 年 11 月	测值偏低,年变幅减小 0.514	无	无	230	293
	EW	2020 年 11 月	测值偏低,年变幅减小 0.09	无	无		

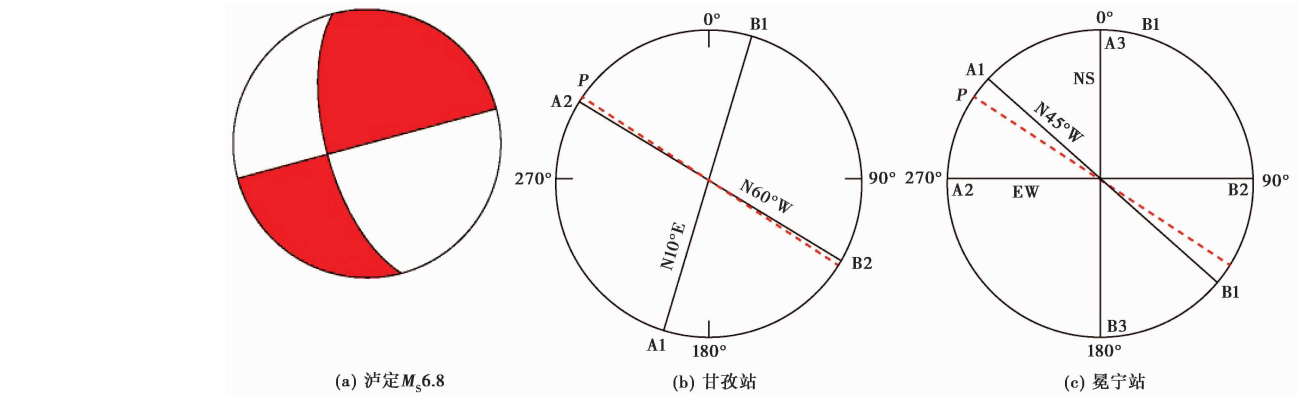


图 7 泸定 $M_s6.8$ 地震震源机制解最大主压应力方位与观测站测道

5 结论

通过对 2022 年 9 月 5 日四川泸定 $M_s6.8$ 地震前,震中周围地电阻率台站各测项长时间段的异常演化特征进行研究,得出以下结论:

- (1) 甘孜站、江油站、红格站三个台站在强震发生前,均出现了长趋势转折变化。但出现变化的时间并不一致,其中江油台最早出现此种变化且转折次数为 2 次,距离强震发震时间约 4.2 年;甘孜站出现类似变化 1 次,距强震发震时间约 1.5 年;红格站出现类似变化 2 次,距强震发震时间约 1 年。震后数据资料显示,除江油站 EW 向外,3 个台站其他测项均处于持续性趋势上升阶段。
 - (2) 红格站、江油站在出现长趋势转折变化后,又分别在 2020 年 11 月、2021 年 4 月出现了年变幅减小的趋势异常。
 - (3) 甘孜站、江油站、冕宁站 3 个台站在泸定 6.8 级地震前出现了较为明显的中短期异常变化,这些变化可能对应了此次地震,震后 3 个台站的中短期异常快速消失。
- 综合以上对四川省内各个地电阻率台站所积累的长时间尺度的数据分析和总结,认为

在 2022 年 9 月 5 日泸定 6.8 级强震前,四川多个台站首先出现趋势转折变化,而后再出现年变幅减小的破年变趋势异常,最后至地震发生前,震中周围 3 个台站又相继出现加速下降/反向上升等中短期的异常变化。

需要指出的是,本文仅对泸定地震前四川地区地电阻率台站数据进行了长时间尺度下的异常分析和总结,所得结论均基于泸定 6.8 级强震的震例样本,未来仍需加强对地电阻率台站异常数量、异常测项、震例的研究和总结。但不可否认的是,诸多震例表明,中强地震前,震中周围地电阻率会出现异常变化,以地电阻率异常特征来分析未来震情形势具有重要的现实意义。此外,分析地电阻率异常特征,特别是中短期异常特征应与其他学科的异常相结合,有利于做出依据更加充分、更加科学的综合分析意见。

致谢: 感谢江苏省地震局提供的地电阻率分析程序,感谢匿名专家提出的修改意见。江油站、甘孜站、红格站等地电阻率数据来源于四川省地震局地球物理前兆数据库。

参考文献

- 杜学彬, 李宁, 叶青, 等. 2007. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因. 地球物理学报, **50**(6): 1802~1810.
- 杜学彬. 2010. 在地震预报中的两类视电阻率变化. 中国科学: 地球科学, **40**(10): 1321~1330.
- 韩盈, 于晨, 解滔. 2023. 中国大陆 $M_s \geq 6.0$ 地震前地电阻率异常特征. 地震地磁观测与研究, **44**(5): 81~94.
- 何康, 解滔, 王焱坤, 等. 2023. 2011 年安庆 $M4.8$ 地震前合肥台地电阻率异常变化分析. 地震, **43**(2): 72~84.
- 克拉耶夫. 1954. 地电原理(上册). 中央人民政府地质部编译室, 译. 北京: 地质出版社, 25~62.
- 李新艳, 解滔, 曾宪伟, 等. 2024. 断层虚位错模式揭示的 2022 年 1 月 8 日青海门源 $M_s6.9$ 地震前的地电阻率变化. 地震学报, **46**(2): 292~306.
- 林向东, 徐平, 鲁跃, 等. 2007. 地电场观测中几种常见干扰. 华北地震科学, **25**(1): 16~22.
- 钱复业, 赵玉林, 刘捷, 等. 1990. 唐山 7.8 级地震地电阻率临震功率谱异常. 地震, (3): 33~39.
- 沈红会, 王丽, 王维, 等. 2017. 地电阻率长期趋势变化及其预测意义. 地震学报, **39**(4): 495~505.
- 王同利, 崔博闻, 叶青, 等. 2020. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震地电阻率变化时空演化分析. 地球物理学报, **63**(6): 2345~2356.
- 解滔, 杜学彬, 卢军. 2016. 井下视电阻率观测影响系数分析. 中国地震, **32**(1): 40~53.
- 解滔, 韩盈, 于晨. 2023a. 2021—2022 年川滇地区 4 次 $M_s \geq 6.0$ 地震前井下地电阻率观测的异常变化. 地震地质, **45**(6): 1370~1384.
- 解滔, 李晓帆, 岳冲, 等. 2022a. 大地震前视电阻率各向异性变化及可能原因. 地震地磁观测与研究, **43**(sup 1): 213~216.
- 解滔, 卢军. 2023b. 中国中强地震前地电阻率中短期异常特征及其可能原因. 中国地震, **39**(1): 45~63.
- 解滔, 卢军. 2023c. 地电阻率观测常见变化形态及其可能原因分析. 中国地震, **39**(1): 128~142.
- 解滔, 卢军, 杜学彬. 2022b. 自适应变化幅度方法提取直流视电阻率中短期异常. 中国地震, **38**(1): 52~60.
- 解滔, 任越霞, 廖晓峰, 等. 2023d. 2022 年四川泸定 $M_s6.8$ 地震前地下介质视电阻率变化特征及其机理分析. 地球物理学报, **66**(4): 1428~1437.
- 解滔, 王同利, 肖武军, 等. 2020a. 2020 年 7 月 12 日唐山 $M_s5.1$ 地震前通州台井下地电阻率变化. 中国地震, **36**(3): 375~382.
- 解滔, 于晨, 卢军. 2019. 开展小极距井下地电阻率观测的可行性分析. 中国地震, **35**(1): 14~24.
- 解滔, 于晨, 王亚丽, 等. 2020b. 基于断层虚位错模式讨论 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前视电阻率变化. 中国地震, **36**(3): 492~501.
- 姚赛赛, 高曙德, 陈雪梅, 等. 2023. 2022 年青海门源 $M_s6.9$ 地震前地电阻率变化分析. 大地测量与地球动力学, **43**(2): 141~147.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2023. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 $M_s6.8$ 地震序列发震构造. 地球物理学报, **66**(4): 1363~1384.
- 于晨, 卢军, 解滔, 等. 2023. 2017—2019 年松原地区 4 次中强地震前绥化台地电阻率异常分析. 中国地震, **39**(2):

314~324.

张宇,王兰伟,赵家骝,等. 2017. 地电观测中电磁干扰源定位方法研究. 地震学报, **39**(3):367~373.

赵斐,叶青,解滔,等. 2018. 平凉台井下地电阻率观测影响系数分析. 中国地震, **34**(1):104~111.

Nover G. 2005. Electrical properties of crustal and mantle rocks-a review of laboratory measurements and their explanation. Surv Geophys, **26**(5):593~651.

Characteristics of Anomalous Evolution of Ground Resistivity in Sichuan Region before the Luding $M_s6.8$ Earthquake

Liao Xiaofeng, Qi Yuping, Yang Xing, Wang Weiming, Ren Yuexia, He Chang
Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China

Abstract By analyzing the anomalous evolution of ground resistivity in the Sichuan region before the Luding $M_s6.8$ earthquake, distinct abnormal patterns were observed at different stages. The key findings are as follows: (1) Long-term trend reversals occurred at Ganzi, Jiangyou, and Hongge stations 1 – 4.2 years before major earthquakes, with most measurement indicators currently exhibiting a sustained upward trend. (2) Following these long-term trend shifts, Hongge and Jiangyou stations experienced reductions in annual variation in November 2020 and April 2021, respectively. (3) Significant short-term anomalies were detected at Ganzi, Jiangyou, and Mianning stations just before the Luding earthquake, after which these anomalies disappeared and did not recur. In conclusion, long-term trend shifts may indicate an increasing risk of strong earthquakes, while features such as accelerated rises/falls and sudden reversals could serve as more indicative signals in the medium to short term.

Keywords: The Luding $M_s6.8$; Sichuan region; Earth resistivity; Trend turning point; Short term anomalies