| 第41卷 第1期(1~10) | 中 国 地 震 | Vol. 41 No. 1 |
|----------------|------------------------------|---------------|
| 2025 年 3 月 | EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA | Mar. 2025 |

解滔,于晨,韩盈,等. 2025. 基于视电阻率观测对 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 M_s6.2 地震的预测. 中国地震,**41**(1): 1~10.

基于视电阻率观测对 2023 年 12 月 18 日 甘肃积石山 *M*_s 6.2 地震的预测

解滔¹) 于晨¹) 韩盈¹) 张丽琼²) 高曙德²)

1)中国地震台网中心,北京 100045
2)甘肃省地震局,兰州 730000

摘要 2023 年 12 月 18 日甘肃临夏积石山 *M*_s6.2 地震前,震中 300km 范围内运行有 9 个视电阻率观测站,其中 5 个观测站数据质量较好,其余 4 个观测站因测区内环境因素影响而难以为日常跟踪提供稳定的动态背景。定西站自 2021 年 7 月开始出现下降异常,2022 年 1 月 8 日门源 *M*_s6.9 地震发生之后,该异常一直未恢复。2023 年 6 月以来,武胜驿和武威站出现下降异常变化。此外,自 2023 年 6 月开始,距离震中 335km 的武都站也出现上升异常变化。依据这 4 个观测站的异常,分析认为祁连山地震带东段至甘东南地区存在发生 6 级左右地震的危险性,且地震类型最可能为逆冲型。2023 年 10 月通渭站出现"快速下降一转折回升"形态的短期异常变化,随后在 10 月 27 日的周震情例会上对该预测区域给出了短期预测意见,12 月 18 日 *M*_s6.2 地震发生在预测区内,且震源机制解类型也为预测的逆冲型。

关键词: 积石山 M_s6.2 地震 视电阻率 地震预测 异常变化 虚位错模式 震源机制解 [文章编号] 1001-4683(2025)01-0001-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定,2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分 30 秒,中国甘肃省临夏回族自治 州积石山县发生 M_s6.2 地震^①。截至 12 月 24 日 23 时,此次地震已造成 149 人死亡、2 人失 联、979 人受伤^②。实现具有防震减灾实效的地震短临预测,是广大地震工作者孜孜以求的 目标。开展科学的地震预测,需要与地震晚期孕育过程存在关联的异常作为支撑依据。目 前,主要围绕地震活动性、地壳变形、地球物理和地球化学的连续观测,开展地震预测的研究 和应用实践。

电阻率是岩土介质最基本的物性参数之一,表征介质导电能力的强弱,与组成介质的岩 土基质(骨架)、裂隙(孔隙)率、裂隙结构、裂隙内充填的流体/气体、饱和度、温度等因素有

E-mail:xtaolake@163.com

0 https://news.ceic.ac.cn

[[]收稿日期] 2024-02-26 [修定日期] 2024-07-08

[[]项目类别] 国家自然科学基金项目(42474116,42104075)资助

[[]作者简介] 解滔,男,1986 年生,研究员,研究方向为地震电磁观测与预测方法,电磁异常与地震晚期孕育过程。

②https://baike.baidu.com//item/12·18 积石山地震/63857970?fr=ge_ala

中国地震

关(Glover et al,1992; Nover,2005)。地震孕育过程伴随着震中周围区域地层的变形(武艳强等,2016),连续测量地下固定探测体积内岩土介质因变形导致的电阻率随时间的变化,在地震晚期孕育过程的动态监测中得到应用(钱家栋等,1985;国家地震局预测预防司,1998;杜学彬,2010)。我国采用直流电法开展的视电阻率定点连续观测,始于1966年河北邢台*M*_s7.2 地震之后,截至2024年全国有90余个观测站,分布在主要活动断裂带和大中城市附近。在近60年的观测与预测实践过程中,相关文献报道了上百次*M*_s5.0~8.0 地震前,震中附近观测数据偏离之前多年背景变化范围、持续数月至两年左右的中短期异常变化(钱复业等,1982;钱家栋等,1985;汪志亮等,2002;杜学彬,2010;解滔等,2022),部分强震发生前后的同震阶跃变化,以及大地震后与之前异常变化形态(下降/上升)相反的恢复过程,且许多大地震前视电阻率的各向异性变化特征与实验结果一致(钱复业等,1996;杜学彬等,2007;Xie et al,2022)。对1969年以来观测站附近65次6级以上地震前视电阻率异常的分析显示(解滔等,2022、2023;Xie et al,2023),应力作用下岩土介质电阻率变化的微观机制,与出现异常的观测站所在区域的相对变形特征较为相符,从而揭示出视电阻率异常变化与地震晚期孕育过程之间存在力学机制上的联系。基于视电阻率观测开展的地震预测,已经逐步由传统的统计预测向基于因果关联的物理预测方向转进。

2023 年 12 月 18 日积石山 M_s6.2 地震前,对地震发生的地点、震级、时间和类型进行了中期至短期时间尺度的渐进式预测。本文简要介绍此次地震的预测过程和依据,以期为今后的地震预测研究和实践提供一定的参考。

1 视电阻率观测

2023年12月18日积石山 M_s6.2 地震前,震中 300km 范围内运行有9个视电阻率观测站(图1)。此外,出现异常变化的武都站距离此次地震 335km,各观测站的基本信息示于表1。在这10个观测站中,武都站和通渭站布设有井下观测系统,其余8个站为地表观测。观测采用对称四级装置,观测极距最大的为武威站,供电极距 AB=2400m,极距最小的为武都站井下垂向观测,供电极距 AB=100m。观测采用直流供电的方式,每小时进行一次测量。

临夏站、玛曲站和拦隆口站 3 个观测站测区内存在较多的铁丝围栏、蔬菜大棚金属支架,观测数据受干扰严重(图2(a)~(f)),金银滩站 NS 测道附近也存在类似情况。2021 年海原站测区内修建高速公路,数据失去正常的背景变化(图2(g)~(h))。因此,此次地震前,震中 300km 范围内仅武威站、武胜驿站、定西站和通渭站 4 个观测站,以及金银滩站的 EW 测道可用于跟踪分析。

通渭站始建于 1970年,于 2021年同址新建井下观测系统,2022年正式投入运行。武都 站的观测始于 1975年,2014年原址建设的井下观测系统投入运行,以替换受干扰的地表观 测。定西站始建于 1979年,2014年搬迁至目前的新场地。武威站的新址观测始于 2018年, 以替换 2013年停测的旧场地。金银滩站 2014年建成并正式投入运行。武胜驿站为新建观 测站,于 2022年开始观测。

2 视电阻率异常变化

视电阻率观测数据的正常变化形态,表现为年变化形态较为规则,多数观测站存在持续

2

СМҮК

41 卷

СМҮК



图 1 2023 年 12 月 18 日积石山 M_s6.2 地震周围视电阻率观测站分布

3年以上近似线性的趋势性上升或下降变化,异常分析时通常对年变化和趋势变化予以扣除(杜学彬,2010;杜学彬等,2017)。自2023年6月开始,武威站NS测道年变化幅度较往年同期减小(图3(a)),扣除年变化后呈现下降异常;武胜驿NE测道自2023年6月开始也出现年变化幅度减小的现象(图3(b));武都站Z1和Z2测道在2023年6月至9月期间年变化形态几近消失(图3(c)~(d)),而往年同期为下降变化,扣除年变化后为上升异常;定西站NS和EW测道自2021年7月开始出现下降变化,且年变化幅度减小,2022年1月8日门源*M*_s6.9 地震发生后,NS测道恢复正常,但EW测道年变化幅度减小的现象一直未恢复(图3(e));通渭站地表观测NE测道、井下观测NE测道和NW测道自2023年10月6日开始出现同步的快速下降变化(图3(f)~(h)),正常情况下此时段观测数据应处于年变化形态的上升阶段。

上述异常出现后,甘肃省地震局前往观测站开展了异常现场核实,并与中国地震局电磁 学科组进行了讨论,其中武威站、武胜驿站、武都站和定西站4个观测站的测区内,异常出现 之前及其间无新增环境干扰源。通渭站测区外的西南方向存在污水处理厂的改造施工,与 地表和井下观测的 NE 测道供电电极的距离分别为 30m 和 448m。工程开始于 2023 年 6 月 底,8 月完成地基开挖,9 月开始浇筑钢筋混凝土。考虑到施工早于异常出现时间,且距离井 下观测区域较远,理论上对地表观测的影响大于井下观测,而观测数据却是井下观测 NE 测

| 4 | | | | 仹 | 1 国 地 | 震 | | 41 卷 | |
|---|-------|-------------|-------------|------------|----------------|------------|-----------|--------|--|
| 表 1 积石山 M _s 6.2 地震周围视电阻率观测站基本信息和异常变化 | | | | | | | | | |
| 序号 | 观测站 | 经度 /(°E) | 纬度 /(°N) | 震中距 /km | 测道 | 异常出现时间 | 异常形态 | 异常幅度 | |
| 1 | 书武 | 102 72 | 38.33 | 292 | NS | 2023年6月 | 年变幅度减小,下降 | -0.30% | |
| 1 | 武威 | 102.72 | | | EW | 无异常 | | | |
| | | | 36.93 | 139 | N39° E | 2023年6月 | 年变幅度减小,下降 | -0.19% | |
| 2 武胜 | 武胜驿 | 103.02 | | | N84° E | 无异常 | | | |
| | | | | | $N51^{\circ}W$ | 无异常 | | | |
| | · | | 35.47 | 172 | NS | 无异常 | | | |
| 3 定西 | 定西 | 定西 104.52 | | | EW | 2021 年 7 月 | 年变幅度减小,下降 | -0.68% | |
| | | 105 28 | | | N20°W | 无异常 | | | |
| 4 通渭 | 7里 ⁄油 | | 3 35.20 | 240 | N70° E | 2023年10月6日 | 快速下降 | -0.24% | |
| | 週仴 | 105.28 | | | N20°W' | 2023年10月6日 | 快速下降 | -0.29% | |
| | | | | | N70° E' | 2023年10月6日 | 快速下降 | -0.08% | |
| 5 | 武都 | 104.98 | 33.35 | 335 | Z1 | 2023 年 6 月 | 年变消失,上升 | +1.8% | |
| | | | | | Z2 | 2023 年 6 月 | 年变消失,上升 | +1.7% | |
| 6 | | 临夏 103.26 | 35.63 | 52 | NS | | 无异常 | | |
| | 临夏 | | | | EW | | 无异常 | | |
| 7 | | 玛曲 101.98 | 34.04 | 197 | N34° E | | 无异常 | | |
| | 玛曲 | | | | N68°W | | 无异常 | | |
| 8 | 拦隆口 | 隆口 101.51 | 36.75 | 158 | N70° E | | 无异常 | | |
| | | | | | N30°W | | 无异常 | | |
| 9 | 金银滩 | 艮滩 100.94 | 36.99 | 213 | N15° E | | 无异常 | | |
| | | | | | N75° E | | 无异常 | | |
| 10 | 海原 | 每原 105.58 | | 278 | NS | | 无异常 | | |
| | | | 5.58 36.61 | | EW | | 无异常 | | |

注:通渭站N20°W和N70°E测道为井下水平向观测;武都站Z1和Z2测道为井孔中的垂向观测。

道的下降幅度大于地表观测的 NE 测道,因此认为通渭站此次异常变化与施工无关,具备短期预测意义。

3 预测过程

СМҮК

电阻率作为岩土介质的一种物性参数,其变化与应力作用下地下介质因变形而诱发的 微裂隙活动有关(Mjachkin et al,1975;钱家栋等,1985;国家地震局预测预防司,1998;杜学 彬等,2007)。据岩石物理实验,压应力加载超过岩石破裂强度的50%~80%时,岩石样品出 现相对扩容现象(Brace,1975;Scholz et al,1973;Xue et al,2014),显示其内部存在新生裂隙 的不断生成和扩展。在低围压条件下,微裂隙系统将大致沿最大主压应力方向展布 (Crampin et al,1984;张恒等,2015;张志强等,2020)。地壳浅层岩土介质通常是含裂隙的 非连续介质,在较低的应力增量作用下,微裂隙的产生和扩展可通过松散颗粒的再移动来实 现(马瑾,1982)。实验结果表明,含水岩土介质受轴向挤压变形时,电阻率呈现下降变化,原





有挤压变形卸载时,呈上升变化(Brace et al, 1965;赵玉林等, 1983; Jouniaux et al, 2006)。 理论分析表明,对于含裂隙介质,在裂隙未闭合之前,沿裂隙优势排列方向,裂隙长度对电阻 率的影响大于裂隙体积的影响;在裂隙扩展过程中,沿裂隙扩展方向的电阻率为下降变化, 且变化幅度最大(解滔等,2020)。

地震发生时,震中附近区域的同震位移存在象限性分布(杨君妍等,2021;张克亮等, 2021: 单新建等, 2023), 可能预示着地震发生前震中周围的变形积累也存在与之对应的象 限性分布。因此,与地震孕育过程有关的视电阻率异常,其预期变化形态为:观测站位于挤 压增强区域时,为下降变化;位于相对膨胀区域时,为上升变化。大量的震例分析结果显 示,大地震前视电阻率异常的空间分布范围约400km(杜学彬,2010),且震中距越近的区域, 观测站出现异常变化的比例越高(韩盈等,2023)。采用断层虚位错模式,获取地震前震中周 围区域相对的变形积累特征,对1969年以来观测站附近65次6级以上地震前视电阻率异 常的分析显示,7级以上地震和6级地震前,异常形态符合理论预期的比例分别为92%和

СМҮК

5





74%(解滔等,2022; Xie et al,2023)。

根据上述信息,可以对潜在的发震地点进行分析。异常分布区域最北侧的武威站至最 南侧的武都站,空间距离约 600km,此次分析研判时将其视为一个整体来对待。首先,考虑 到视电阻率异常为近源型异常(杜学彬,2010),可圈定这 5 个出现异常的观测站所包络的大 尺度区域及附近区域。其次,武威站、武胜驿站、定西站和通渭站为下降变化,武都站为上升 变化,为了将其分别置于变形的挤压增强区域和相对膨胀区域内,在异常区东侧的六盘山断 裂带、或者异常区的西侧发生逆冲型地震可大致满足上述要求。而六盘山断裂带附近的其 他观测站并未出现异常,因而最终将预测区域置于异常区的西侧,即祁连山地震带东段至甘 东南地区(图4)。

对震级的估计主要参考异常持续时间与震级的经验关系 *M*_s = 0.5+2.5lg(*T*),式中持续时间 *T* 的单位为天(钱复业等,1982)。定西站异常持续时间最长,但考虑到其年变幅度减小的现象已持续两年,且在 2022 年 1 月门源 *M*_s6.9 地震前已经出现,将其作为背景性异常来

СМҮК



图 4 积石山 M_s6.2 地震前的预测区域

对待。而武威站、武胜驿站和武都站 3 个观测站的异常均始于 2023 年 6 月,截至 10 月 27 日 给出短期预测意见时,异常持续为 150 天,计算震级约为 M_s5.9。

依据视电阻率观测开展的地震预测为过程性预测,在既有异常出现转折回返,或出现快速变化时,可实施短期预测(汪志亮等,2002;赵玉林等,2001)。通渭站2023年10月6日开始出现快速下降,甘肃省地震局于10月26日前往观测站开展了异常现场核实,并于当晚与中国地震台网中心预报部电磁预测研究室开展了讨论,确认了该变化的真实性。在10月27日的周震情例会上,电磁预测研究室对该预测区域给出了短期内存在发生6级左右地震危险性的预测意见。

积石山 M_s6.2 地震发生后,根据震源机制解信息³,采用断层虚位错模式(赵玉林等, 1996;解滔等,2020)计算了此次地震前震中周围变形积累的空间分布(图5),武胜驿站、定 西站、通渭站 3 个观测站位于地震发生前的挤压增强区域,武都站位于相对膨胀区域,这 4 个观测站的异常形态与区域变形特征相符。而武威站则位于挤压增强与相对膨胀的过渡区 域附近,其异常变化与此次地震的关联性较弱。

7

③ https://earthquake.usgs.gov





图 5 积石山 M_s6.2 地震的断层虚位错模式计算结果(挤压为负)

4 结论

2023 年 12 月 18 日甘肃临夏积石山 M_s6.2 地震前,震中周围 5 个视电阻率观测站出现 了中短期异常变化,依据这些异常的形态、空间分布以及通渭站的短期变化,在 10 月 27 日 的周震情例会上对此次地震给出了短期预测意见,地震发生的地点、震级、时间以及类型与 预测结果相符。地震孕育过程极为复杂,与地震有关的前兆异常也同样复杂,在此次研判过 程中也存在不严谨的地方。今后仍需要加强观测站网的建设与运维,深入研究视电阻率变 化与地震孕育过程之间的关系。

致谢:甘肃省地震局武威、兰州、天水和陇南4个中心站的工作人员参与了异常现场核实工作,就异常的预测意义与中国地震局地震预测研究所钱家栋研究员进行了讨论,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

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. 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, 孙君嵩, 陈军营. 2017. 地震预测中的地电阻率数据处理方法. 地震学报, **39**(4):531~548. 国家地震局预测预防司. 1998. 电磁学分析预报方法. 北京: 地震出版社. 韩盈, 于晨, 解滔. 2023. 中国大陆 $M_s \ge 6.0$ 地震前地电阻率异常特征. 地震地磁观测与研究, **44**(5):81~94. 马瑾. 1982. 岩石力学与地震预报. 地震科学研究, **2**(4):37~42.

8

СМҮК

41 卷

1 期 解滔等:基于视电阻率观测对 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 M_s6.2 地震的预测

钱家栋,陈有发,金安忠. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用. 北京: 地震出版社.

СМҮК

钱复业,赵玉林,黄燕妮. 1996. 地电阻率各向异性参量计算法及地震前兆实例. 地震学报,18(4):480~488.

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),12(9):831~839.

单新建,李彦川,高志钰,等. 2023. 2022 年泸定 M_s6.8 地震同震形变特征及周边强震危险性. 科学通报,**68**(8):944~953. 汪志亮,郑大林,余素荣. 2002. 地震地电阻率前兆异常现象. 北京: 地震出版社.

武艳强,黄立人,陈长云,等. 2016. 1976 年唐山 M_s7.8 地震同震及现今形变特征. 地震学报,38(4):609~617.

解滔,卢军. 2020. 含裂隙介质中的视电阻率各向异性变化. 地球物理学报,63(4):1675~1694.

解滔,任越霞,廖晓峰,等. 2023. 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,薛艳,卢军. 2022. 中国 M_s≥7.0 地震前视电阻率变化及其可能原因. 地球物理学报,65(8):3064~3077.

解滔,于晨,王亚丽,等. 2020. 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.

杨君妍,孙文科,洪顺英,等. 2021. 2021 年青海玛多 7.4 级地震的同震变形分析. 地球物理学报,64(8):2671~2683.

张恒,唐世斌,王龙,等. 2015. 压缩作用下岩石预置裂隙贯通机制的研究. 应用力学学报,32(5):762~767.

张克亮,甘卫军,梁诗明,等. 2021. 2021 年 5 月 21 日 M_s6.4 漾濞地震 GNSS 同震变形场及其约束反演的破裂滑动分布.地 球物理学报,64(7):2253~2266.

张志强,陈方方,李宁,等. 2020. 裂纹雁行分布岩体试样应力场特征与破坏模式研究. 应用力学学报,37(5):2280~2287.

赵玉林,卢军,李正南,等. 1996. 唐山地震应变-电阻率前兆及虚错动模式. 地震学报,18(1):78~82.

赵玉林,卢军,张洪魁,等. 2001. 电测量在中国地震预报中的应用. 地震地质, 23(2):277~285.

赵玉林,钱复业,杨体成,等. 1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报,5(2):217~225.

Brace W F. 1975. Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks. Pure Appl Geophys, 113(1):207~217.

Brace W F, Orange A S, Madden T R. 1965. The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks. J Geophys Res, **70**(22):5669~5678.

Crampin S, Evans R, Atkinson B K. 1984. Earthquake prediction: a new physical basis. Geophys J Int, 76(1):147~156.

Glover P W J, Vine F J. 1992. Electrical conductivity of carbonbearing granulite at raised temperatures and pressures. Nature, **360** (6406):723~726.

Jouniaux L, Zamora M, Reuschlé T. 2006. Electrical conductivity evolution of non-saturated carbonate rocks during deformation up to failure. Geophys J Int, 167(2):1017~1026.

Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, et al. 1975. Two models for earthquake forerunners. Pure Appl Geophys, 113 (1): 169~181.

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

Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. 1973. Earthquake prediction: a physical basis. Science, 181(4102):803~810.

Xie T, Han Y, Ye Q, et al. 2023. Changes and mechanisms of apparent resistivity before earthquakes of $M_{\rm S}6.0 \sim 6.9$ on Chinese mainland. Front Earth Sci. 11:1187660.

Xie T, Xue Y, Ye Q, et al. 2022. Anisotropic change in apparent resistivity before earthquakes of $M_s \ge 7.0$ in China mainland. Geomat Nat Haz Risk, $13(1):1207 \sim 1228$.

Xue L, Qin S Q, Sun Q, et al. 2014. A study on crack damage stress thresholds of different rock types based on uniaxial compression tests. Rock Mech Rock Eng, 47(4); 1183~1195.

9

Apparent Resistivity Observation-based Prediction of the Jishishan $M_s6.2$ Earthquake of December 18, 2023, Gansu Province, China

Xie Tao¹⁾, Yu Chen¹⁾, Han Ying¹⁾, Zhang Liqiong²⁾, Gao Shude²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China

Nine DC apparent resistivity stations within a 300km radius of the Jishishan M_{s} 6.2 Abstract earthquake, which occurred on December 18, 2023, were in normal operation. Among these, five stations provided high-quality data, while the remaining four were rendered ineffective due to environmental disturbances in the monitoring areas. Notably, anomalous variations at the Dingxi station were first observed in June 2021 and have persisted without recovery following the Menyuan $M_{\rm s}6.9$ earthquake in January 2022. Since June 2023, both the Wushengyi and Wuwei stations have exhibited declining anomalous trends, while the Wudu station, located 335km from the epicenter, has shown an upward trend during the same period. Based on the anomalies recorded at these four stations, a potential risk of a magnitude 6 earthquake was identified within the region spanning the eastern section of the Qilian Mountain seismic belt to southeastern Gansu Province. The anticipated focal mechanism was predominantly of the thrust type. Furthermore, following the emergence of short-term anomalous variations at the Tongwei station in October 2023, a short-term seismic forecast was presented during the weekly earthquake situation meeting on October 27. Subsequently, the Jishishan $M_{\rm s}6.2$ earthquake on December 18 occurred within the predicted region, and its focal mechanism solution confirmed a thrust-type event.

Keywords: The Jishishan $M_s6.2$ earthquake; Apparent resistivity; Earthquake prediction; Anomalies; Virtual dislocation model; Source mechanism solution

СМҮК