**引文格式**:李志才,陈智,武军郦,等.基于高频GNSS观测的甘肃积石山Ms 6.2地震同震形变[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):236-246.DOI:10.13203/j.whugis20240004

**Citation**: LI Zhicai, CHEN Zhi, WU Junli, et al. Coseismic Deformation of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2):236-246. DOI:10.13203/j.whugis20240004

# 基于高频GNSS观测的甘肃积石山Ms 6.2地震同震形变

李志才[1] 陈 智[1] 武军郦[2] 周 星[3] 张鸣之[4] 赵利江[5]
余博尧[6] 周 佳[1] 张 澍[6]

1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京,100083
2 国家基础地理信息中心测绘基准部,北京,100830
3 甘肃省测绘工程院,甘肃 兰州,730000
4 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心),北京,100081
5 青海省基础测绘院,青海 西宁,810001
6 北京讯腾智慧科技股份有限公司,北京,100029

**摘 要**:2023-12-18发生的甘肃积石山6.2级地震造成了重大的人员伤亡。收集了不同系统32个卫星导航定位基准站(continuously operating reference stations, CORS)当天的高频全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测数据,进行了高精度动态单历元数据处理。结果发现,震中附近50 km以内的高频GNSS可以监测到明显的同震形变波形,峰值变化最大达到50~60 mm;地震永久变形主要影响范围为距离震中30 km的区域,距离震中5 km的测站记录到东西向永久变形~13 mm、南北向变形~10 mm,以及~8 mm的垂向变形。采用自适应噪声完全集合经验模态分解方法对高频GNSS波形信号进行分解,可分离出明显的同震形变信号,最远可探测到距离震中100 km。采用模态分解方法可探测出更多的同震信号,这为利用丰富的CORS资源监测地震的同震形变提供更多可行性。

**关键词**:定位基准站;高频GNSS观测;同震形变;2023年积石山地震

**中图分类号**:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-08

**DOI**:10.13203/j.whugis20240004 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0236-11

# Coseismic Deformation of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation

*LI Zhicai*[1] *CHEN Zhi*[1] *WU Junli*[2] *ZHOU Xing*[3] *ZHANG Mingzhi*[4]
*ZHAO Lijiang*[5] *YU Boyao*[6] *ZHOU Jia*[1] *ZHANG Shu*[6]

1 School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2 Geodesy Depaetment, National Geomatics Centere of China, Beijing 100830, China
3 Surveying and Mapping Engineering Institute of Gansu Province, Lanzhou 730000, China
4 China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazard, MNR), Beijing 100081, China
5 Qinghai Institute of Basic Surveying and Mapping, Xining 810001, China
6 Beijing CNTEN Smart Technology Co. Ltd, Beijing 100029, China

**Abstract**: **Objectives**: The aim of this study is to obtain a high-precision coseismic deformation field of an Ms 6.2 magnitude earthquake occurred in Jishishan County, Gansu Province, China from high-frequency global navigation satellite system (GNSS) observation data, which will enable the real-time monitoring of deformations for earthquakes with a magnitude of 6 or higher using a massive network of continuously operating reference stations (CORS). **Methods**: This study employed the PRIDE 3.0 software developed by Wuhan University for high-precision dynamic processing of 32 CORS with high- frequency data, obtaining

**基金项目**:国家重点研发计划(2021YFC3000503);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费(CEAIEF2022010101)。

**第一作者**:李志才,博士,教授,主要从事卫星导航定位及大地测量反演研究。zcli@cumtb.edu.cn

coseismic deformation time series for each station. For stations showing significant coseismic responses in close proximity, dynamic solutions with large changes at the seismic moment were first excluded. The smoothed single-epoch results before and after the earthquake were retained. For stations with less obvious coseismic responses, the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) method was used to detect high-frequency coseismic signals. **Results:** The main range of permanent deformation caused by earthquake is in the area 30 km away from the epicenter. Stations 5 km away from the epicenter recorded permanent deformation in the east-west direction of 13 mm, north-south direction of 10 mm, and vertical deformation of 8 mm. Modal decomposition identified 13 stations with seismic responses in the east or north directions, including CORS LXJS, GUTI, LXYJ within a 40 km radius from the epicenter. It could detect the seismic deformation far from 100 km better than the original GNSS results, which means this method could be used for waveform signal reconstruction, noise removal, and expanding the distance of CORS monitoring for coseismic signals. **Conclusions:** This study indicate that various types of CORS equipment with different foundation can monitor earthquake signals. The CEEMDAN method for signal decomposition can detect coseismic signals faraway, providing feasibility for monitoring seismic coseismic deformation information using a large number of CORS resources in the future.

**Key words:** continuously operating reference stations (CORS); high-frequency GNSS observation; coseismic deformation; the 2023 Jishishan earthquake

根据中国地震台网中心测定，北京时间2023-12-18T23:59:30，甘肃省临夏回族自治州积石山县发生Ms 6.2地震，震中位于(35.70°N，102.79°E)。地震发生在青藏高原东北缘，构造部位上属于左旋走滑的西秦岭断裂与右旋走滑的日月山断裂之间的拉脊山挤压构造带，从区域构造和震中位置判断，发震断裂应为拉脊山南缘断裂[1]。该地震是中国大陆2023年内发生的最大地震，距离上一次甘肃2013年岷县6.6级地震已过去10年[2]。地震发生后，相关机构和单位快速开展了震源特征、震动强度预测、余震序列特征和危险性估计。中国地震局地球物理研究所的研究结果表明，此次地震为逆冲型地震(兼有少量走滑分量)，地震矩震级为6.0，最佳矩心震源深度为8 km，破裂持续时间约为8 s，破裂由震中主要向北西方向延伸，由深层向浅层扩展[3]。王勤彩等[4]使用区域地震台网资料，采用CAP(cut and paste)方法反演了该地震的震源机制解，结果显示，该地震为逆冲型地震，与美国地质调查局、德国地学研究中心和美国地质勘探局的震源机制解基本一致，震源机制解节面Ⅱ的走向与积石山东缘断裂大致相同。黄观文等[5]采集了积石山地震远场不同距离(64 km、111 km、140 km和240 km)的4处滑坡隐患区全球导航卫星系统(global navigation satellite system，GNSS)观测站和加速度计实时监测数据，综合分析了主震和余震对边坡体的破坏性影响。陈博等[6]基于光学和遥感卫星影像获取了积石山地震同震滑坡易发性空间分布和地震建筑物损毁代理图，对同震滑坡进行了应急识别，探讨了地震、地形地貌和人类活动等因素对同震滑坡的影响。王立朝等[7]基于甘肃、青海两省震后迅速开展的地震地质灾害调查结果，对积石山地震诱发地质灾害的特征、控制因素、发展趋势进行了分析，提出防灾减灾措施建议。

地震产生的强烈信号可导致地表产生永久性的变形，通过事后的水准测量、三角测量等技术手段可以得到精确的变形结果[8]。随着卫星导航定位技术的出现，很多学者开始采用静态全球定位系统(global positioning system，GPS)观测来获取地表的永久形变，进而研究地震断层的发震机制等，如2001年昆仑山地震、2008年汶川地震、2013年芦山地震、2021年玛多地震、2023年泸定地震等，不同学者采用了静态GPS成果获得高精度的同震形变，进而展开相关的研究工作[9-14]。近10年来，随着定位基准站(continuously operating reference stations，CORS)布设的密度增加，以及网络实时通信技术的进步，利用高频GNSS信号获取同震形变开展地震研究工作也逐渐发展起来，如2011年日本地震、2021年玛多地震、2022年门源地震、2023年泸定地震等，相关学者利用高频数据开展了大量的研究工作，极大促进了高频GNSS观测技术在地震反演中的应用[15-19]。

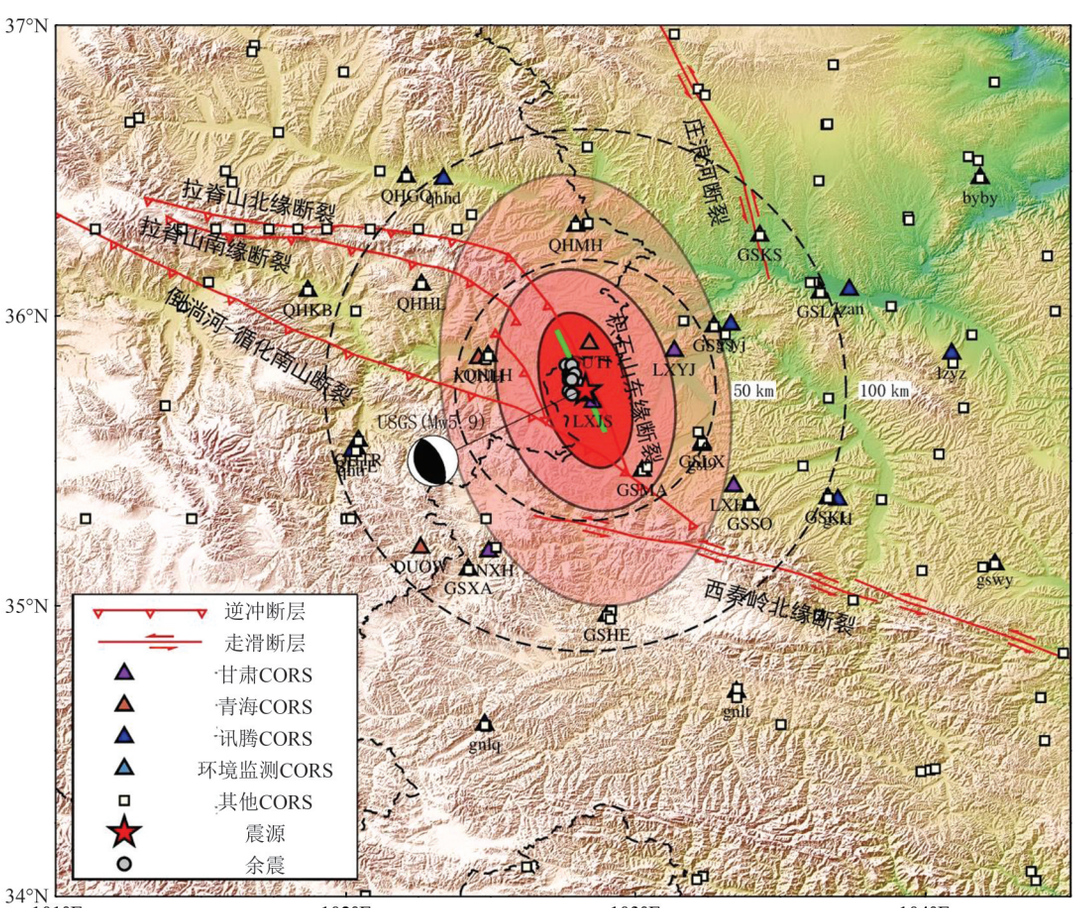
当前中国政府和企业投入了大量资金建设了约2.5万座CORS，根据各自业务不同对外提供服务。如自然资源系统在全国已建设2 656座CORS，基本实现省级层面的实时动态定位技术

(real-time kinematic,RTK)服务,国家级层面的广域实时精密单点定位(precise point positioning,PPP)服务[20]。中国移动公司于2020年在全国范围内建设了4 500座CORS,目前已正式对外提供精密实时定位服务;此外,千寻位置、六分科技、讯腾智慧等公司在全国也分别建设了大量的CORS,根据各自业务不同,提供诸如导航、无人驾驶、燃气巡检等实时定位服务[20]。自然资源部在全国布设了超5万个地质灾害监测台站,可对包括GNSS位移在内的多要素指标进行实时监测与风险预警[21]。海量的CORS已经为地震实时动态监测提供了便利,Ding等[16]认为以中国现有CORS网的站点密度、覆盖范围和通信条件,有能力为未来西部7级以上大震预警和应急救援提供震源快速(震后数分钟内)测定服务。

那么对于低于7级的地震,如此次积石山Ms 6.2地震,如何利用现有海量CORS实时数据监测地震准实时形变,是本文的研究重点。本文整理了研究区域现有CORS资源,收集了不同系统32个CORS地震当天的高频GNSS观测数据,首先对原始数据开展了质量分析,梳理可用的观测数据;然后对观测数据进行高精度处理,提取了可靠的同震形变成果;最后基于模态分解方法提取了高频同震信号,为利用海量CORS高频数据开展6级以上地震破裂监测提供解决方案。

## 1 研究区域基本信息

研究区域位于甘肃省临夏回族自治州积石山县,处于青藏高原东北缘、祁连山断裂东侧。发震地点周边有兴隆山-马衔山断裂、倒淌河-循化南山断裂、西秦岭北缘断裂以及拉脊山断裂带(见图1)。拉脊山断裂带是此次地震范围内的主要断裂带,该断裂带主要体现为向北东方向突出的弧形断裂,是左旋走滑的西秦岭北缘断裂和右旋走滑的日月山断裂之间的挤压构造区和构造转换带,也是西宁-民和盆地、循化-化隆盆地以及临夏盆地的重要边界[22]。拉脊山断裂的活动性质主要以向盆地内的挤压逆冲为主,西段受




注:绿色线条表示发震断层的地表投影线;三角形标记的为本文收集的站点资源;浅黄色正方形标记的为研究区域其他单位分布的站点。

图1 地质构造与测站分布图

Fig. 1 Geological Structure and Distribution of CORS

日月山断裂右旋挤压影响,具有一定的走滑分量。通过地质和大地测量研究表明,拉脊山断裂右旋滑动速率为1～2 mm/a,拉张速率为2～3 mm/a,不同段落之间存在一定差异性[23]。基于水准和GPS资料的研究结果表明,拉脊山断裂带西段水平运动速率约为3 mm/a,垂直运动速率约为1±0.5 mm/a[24]。历史上沿拉脊山南北两侧发生了20余次5级左右中等破坏性地震,上一次该区发生的6级以上地震为2013年的岷县地震[2,25]。

积石山地震后,笔者团队通过合作收集了震中附近甘肃省级CORS 4座、青海省级CORS 4座、北京讯腾智慧科技有限公司(以下简称讯腾公司)站点9座以及地质环境监测站点15座等,共计32个站点的数据资源,开展高频GNSS地震形变研究,这些站网相关信息见表1,具体分布见图1。根据表1统计信息,可发现因为应用目的不同,CORS建设的标准和采用的设备也不尽相同。通过收集相关资料发现,在这一区域还有中国移动、千寻位置以及华测公司等CORS共计85座。图1中红色区域表示为地震烈度等级,由内往外依次为Ⅷ度、Ⅶ度、Ⅵ度,最远距离约距震中60 km[26];黑色虚线50 km基本与地震烈度重合,是本文重点研究区域,主要讨论在这个区域CORS监测地震形变的能力是否与地震烈度一致。另放大2倍距离到100 km范围,看能否通过一定的技术手段捕捉到同震信号。经统计,在地震发生周边区域,CORS合计117座,其中距震中50 km范围内有15座、100 km范围内有54座,如能统筹更多数据资源,将极大提高对该区域地震形变的监测能力。

**表1　本文所用CORS基本信息**

Table 1　Basic Information of the CORS Used in This Paper

| 序号 | 站点类型 | 站点数量/个 | 建设运行单位 | 接收机型号(地震区域) | 主要用途 | 技术特征 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 基岩/土层 | 139 | 甘肃省测绘工程院 | Trimble R9 | 省级CORS服务 | 实时RTK | 覆盖本省 |
| 2 | 基岩/土层 | 114 | 青海省基础测绘院 | Trimble R9 | 省级CORS服务 | 实时RTK | 覆盖本省 |
| 3 | 楼顶/土层 | 超2 500 | 北京讯腾智慧科技有限公司 | CHC P5U | 燃气泄漏检测 | 实时 | 覆盖全国 |
| 4 | 标准观测墩/混凝土墩/钢结构等 | 超5万 | 中国地质环境监测院 | NOV OEM729-2.03 | 地质滑坡等灾害监测 | 实时 | 覆盖全国 |

## 2　数据处理与分析

### 2.1　原始数据分析

根据表1信息可知,甘肃、青海两省CORS建设的观测墩均为地面土层或基岩墩,其参照了国家相关标准建设,采集数据的设备为Trimble R9。讯腾公司建设的站点观测墩大部分为楼顶墩,也有部分土层墩,震区周边站点的采集设备为CHC P5U。服务地质灾害监测的基准站参考了省级CORS的建设标准,观测墩结构包括标准观测墩、混凝土墩和钢结构等,震区周边站点的采集设备为NOV OEM729-2.03。总体而言,省级CORS建设的标准要高于讯腾公司和地质灾害监测站的站点。考虑到数据来源、设备型号、站点用途以及地质基础等不同,可能会影响原始观测数据的质量,导致同震形变结果不可靠,本文首先采用自研软件对32个原始观测数据进行了质量检查与分析,包括数据可利用率、多路径和周跳比等。质量检查结果表明,不同系统建设的站点在数据采集功能上水平已基本相当,在数据观测质量上看不出明显差别。

为方便统计哪些测站能监测到同震形变,本文对所有采集的数据还进行了站点代码、震中距、震中方位信息以及所属位置等信息统计,按照距离震中位置远近顺序排序,具体信息见表2(为节省篇幅,本文仅列出后续章节使用站点的基本统计信息)。从表2可以看出,距离震中方位东、南、西、北4个方向,不同方位的CORS均能捕获到同震形变。表2所列站点分属不同系统建设,相比较地震引发的比较大的形变,讯腾公司和地质灾害监测站的站点因为建设标准不如省级CORS带来的影响几乎可以忽略不计,因此在未来,一些低标准建设的CORS(或者类似的监测站点)完全可用于同震形变监测与分析工作。

### 2.2　数据处理

本文利用武汉大学研发的PRIDE 3.0软件对

**表2 站点距震中距离与方位信息**

Table 2 Distance and Azimuth Information Between Stations and Epicenter

| 序号 | 站点代码 | 震中距离/km | 距震中方位 | 位置 | 来源 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LXJS | 5 | 震中附近 | 甘肃省 | 甘肃省CORS |
| 2 | GUTI | 23 | 正北方向 | 青海省 | 青海省CORS |
| 3 | LXYJ | 31 | 近东方向 | 甘肃省 | 甘肃省CORS |
| 4 | QHLH | 33 | 西北方向 | 青海省 | 讯腾公司 |
| 5 | XUNH | 35 | 东北方向 | 青海省 | 青海省CORS |
| 6 | GSMA | 36 | 东南方向 | 甘肃省 | 讯腾公司 |
| 7 | gsl9 | 42 | 东南方向 | 甘肃省 | 地质灾害监测站 |
| 8 | QHMH | 63 | 西北方向 | 青海省 | 讯腾公司 |
| 9 | QHHL | 65 | 西北方向 | 青海省 | 讯腾公司 |
| 10 | GSXA | 78 | 西南方向 | 甘肃省 | 讯腾公司 |
| 11 | GSLA | 82 | 东北方向 | 甘肃省 | 讯腾公司 |
| 12 | lzan | 91 | 东北方向 | 甘肃省 | 地质灾害监测站 |
| 13 | QHGO | 99 | 西北方向 | 青海省 | 讯腾公司 |

收集到的CORS高频数据进行高精度动态解算,该软件基于PPP-AR(ambiguity resolution)技术,可以获取高频数据的单历元解[27]。数据解算采用动态处理模式,采样率设置为1 s,截止高度角为7°,采用武汉大学发布的精密轨道、钟差产品以及电离层改正、伪距偏差改正产品,对GPS、北斗卫星导航系统、伽利略卫星导航系统观测数据进行了处理,基于非差非组合模型进行平差获得最终计算结果,各类表文件以及接收机和卫星天线相位中心模型产品均来自IGS(international GNSS service)分析中心提供的最新产品。

本文对收集的32个站点数据进行动态处理获得单历元解,图2(a)给出了有明显同震形变的站点在发震前后250个历元的东、北、垂向3个方向的动态变化,主要覆盖范围为图1中50 km的圆圈内,与地震烈度结果基本一致。图2(a)显示,地震发生后,距震中25 km范围内的LXJS和GUTI测站完整清晰地记录到了地震引起的瞬时变形;距震中5 km的LXJS测站东西向瞬时位移约为35 mm,南北向瞬时位移约为50 mm;距离震中23 km的GUTI测站东西向瞬时位移约为65 mm,南北向瞬时位移约为60 mm。从高频信号反映的变形来看,位于地震左上方的GUTI测站监测到的瞬时变形明显要大于距离震中5 km的LXJS测站,反映了地震破裂主要向西北方向传递,这与地震波反演的结果基本一致[3]。距离震中31 km的LXYJ测站、35 km的XUNH测站和42 km的gsl9测站也不同程度监测到了地震波的信号,地震波形出现了较明显的瞬时变化,但并未造成明显的永久变形。在垂向变化上,此次也监测到了相对明显的变化,说明此次地震除了有走滑分量之外,也有逆冲信号,这与已有的结果基本保持一致。图2(b)主要为距离震中50~100 km范围的CORS高频变化,尽管能看出有一定的同震形变,但是量级较小,与解算精度相当,可认为是误差或者噪声,无法获得量化的同震形变。

### 2.3 同震形变提取

GNSS观测到的瞬时形变反映了台站接收到的地震的波动信号,并不能真正反映地震区域永久形变,因此需从高频GNSS动态序列中提取同震形变。采用方法与参考文献[13]类似,首先剔除发震时刻变化较大的动态解,保留发震前后比较平滑的单历元结果,分别选择地震前后各100个历元,计算地震前后坐标平均值,然后由震后平均值减去震前平均值即可得到较可靠的同震形变(见表3);至于误差计算,则以地震前后各自平均值为真值,以地震前后100个历元分别减去对应的真值,取差值平方和除以$n-1$($n=100$)再开方,计算出地震前后统计的各自中误差,根据误差传播定律可计算出同震形变的中误差。表3说明高频GNSS观测的同震形变在水平方向上误差相对较小、可靠性略高;垂向误差较大、可靠性较差,这可能与本次地震震级较小有关。距离震中最近的LXJS站点精度计算较高,说明结果比较可靠,该站点发生永久性的东向形变为13.6±2.6 mm,北向形变为−10.9±5.1 mm,垂向形变为8.6±6.4 mm。GUTI、LXYJ、XUNH、gsl9等站点发生的永久形变较小,可靠性不是很高。图3给出了图2(a)中5个站点计算的水平变形和垂向变形以及各自误差椭圆(置信度仅为35%),

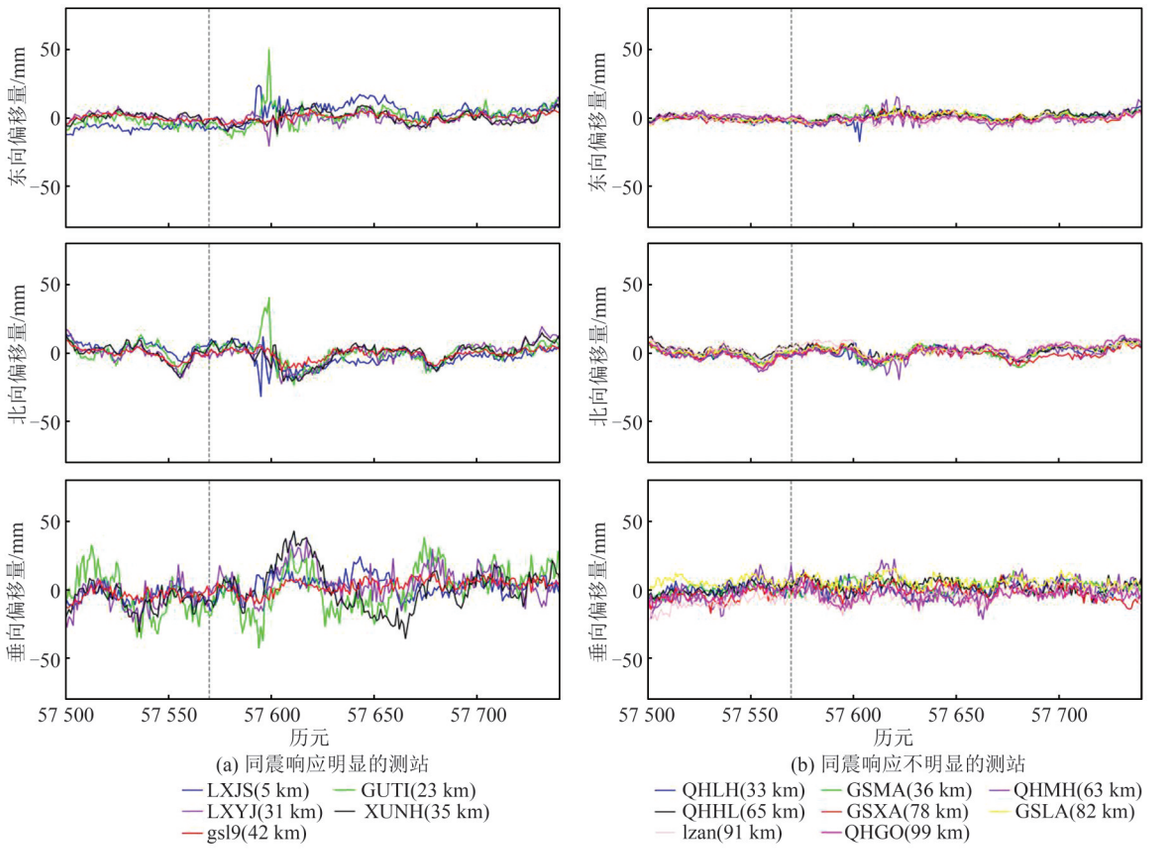


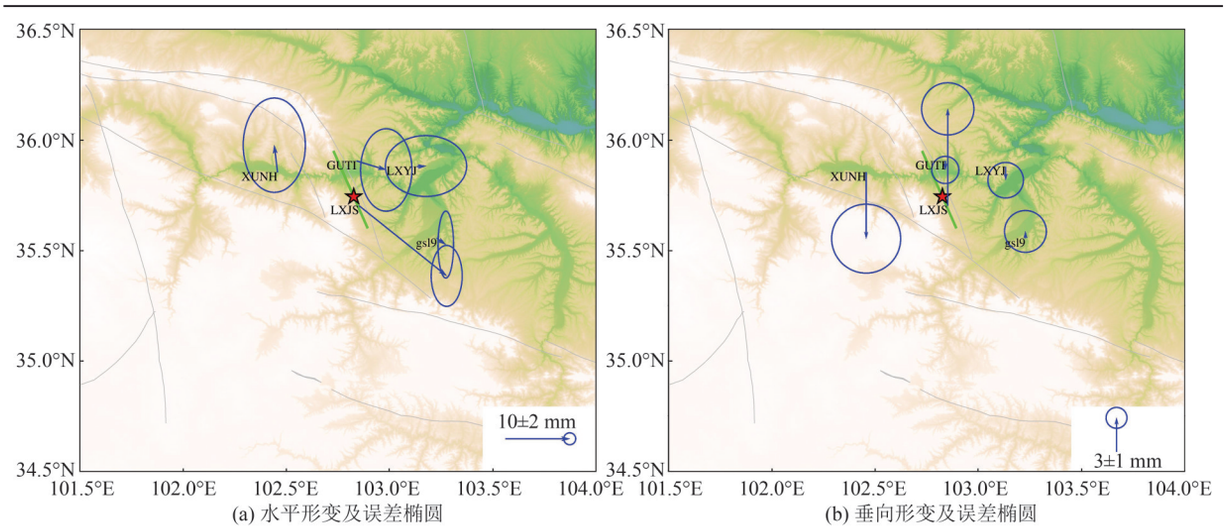

图 2　高频 GNSS 观测的单历元解

Fig. 2　Single Epoch Solutions for High-Frequency GNSS Observations

**表 3　高频 GNSS 同震永久位移**

Table 3　Coseismic Permanent Displacement from High-Frequency GNSS

| 站点代码 | 经度/(°E) | 纬度/(°N) | 东向形变 /mm | 北向形变 /mm | 垂向形变 /mm | 东向误差 /mm | 北向误差 /mm | 垂向误差 /mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LXJS | 102.853 | 35.702 | 13.6 | −10.9 | 8.6 | 2.6 | 5.1 | 6.4 |
| GUTI | 102.841 | 35.905 | 4.6 | −1.4 | −0.8 | 4.3 | 6.9 | 1.7 |
| LXYJ | 103.134 | 35.879 | 1.4 | 0.1 | −1.2 | 6.8 | 5.1 | 3.2 |
| XUNH | 102.457 | 35.854 | −0.5 | 4.2 | −5.9 | 5.2 | 7.9 | 11.5 |
| gsl9 | 103.230 | 35.555 | 1.4 | −1.0 | 0.6 | 1.3 | 5.6 | 4.4 |




注:箭头的误差椭圆置信度为 35%;红色五角星表示震中;灰色线条表示断裂带。

图 3　高频 GNSS 观测的永久同震形变场

Fig. 3　Permanent Coseismic Deformation Fields Observed by High-Frequency GNSS Observations

可看出除LXJS计算的精度尚可外,其他站点计算的同震形变误差都比较大,说明解算结果还存有较大的噪声,需考虑研究其他方法降低噪声,提高同震形变计算精度。

## 3 高频GNSS同震信号模态分解

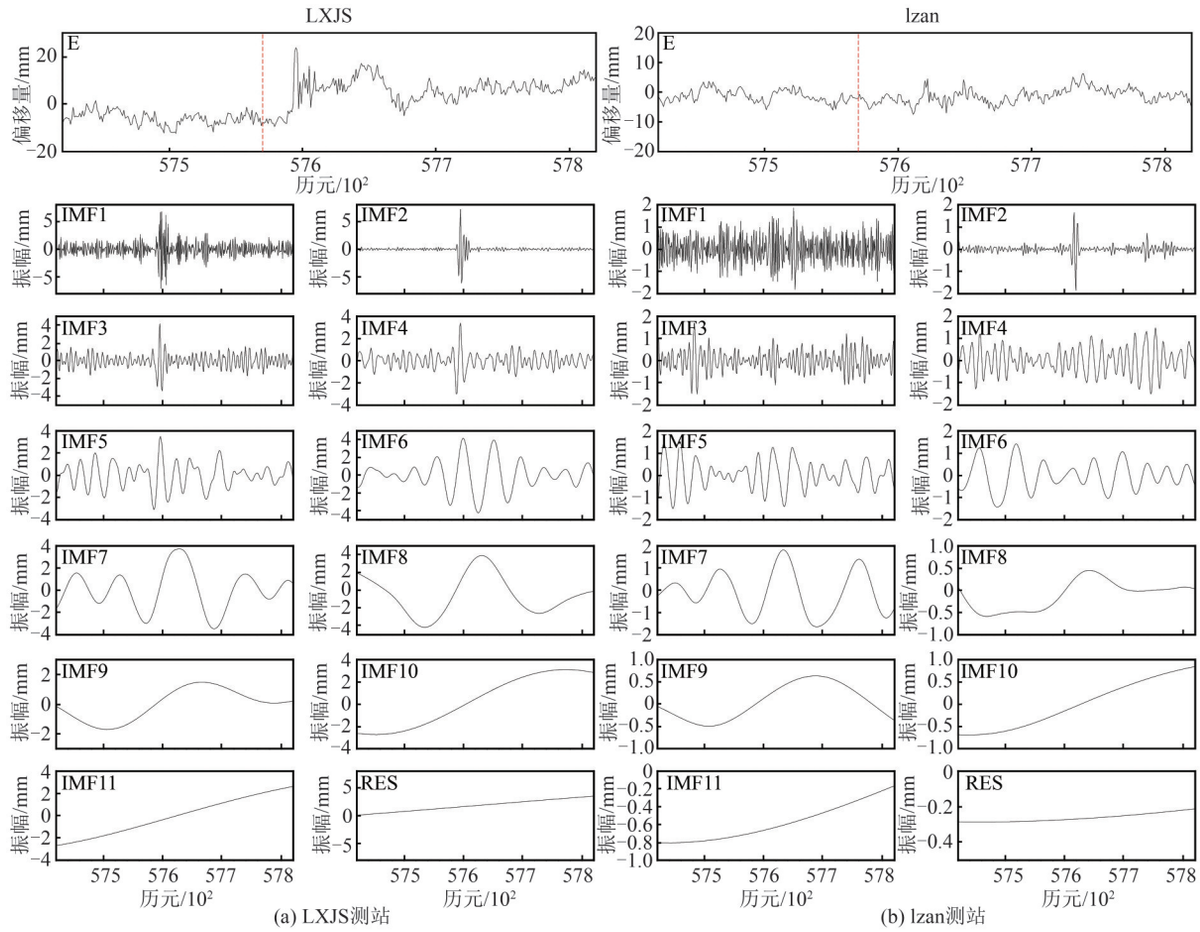
### 3.1 分解方法

针对图2中高频GNSS信号弱、无法探测和提取高频同震形变的问题,本文利用模态分解方法来探测同震形变信号,为提取高可靠同震形变做准备。模态分解方法可对非平稳、非线性信号进行自适应的分解,用于识别及提取井水位观测数据中同震响应信息[28],也被用于重力潮信号的提取[29]。相比较地下水位记录数据,高频GNSS结果也是一个非平稳、非线性信号,因此可尝试利用模态分解方法来分离高频地震信号。本文主要采用了自适应噪声完全集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,CEEMDAN)方法来探测高频同震信号的可行性,该方法由Torres等[30]针对经验模态分解(empirical mode decomposition ,EMD)方法存在模态混叠问题、集合经验模态分解(ensemble EMD ,EEMD)方法和互补集合经验模态分解(complementary EEMD, CEEMD)方法存在白噪声残留问题提出的一种改进算法。该方法从两个方面对以上问题进行解决:(1)不直接将高斯白噪声信号加入到原始信号中,而是将EMD分解后加入含有辅助噪声的内涵模态分量(intrinsic mode functions, IMF);(2)CEEMDAN方法在获得第一个IMF分量后立即计算总体均值,获得最终的IMF1分量,接着对剩余部分重复以上操作,相对于EEMD和CEEMD方法将经验模态分解后再进行总体平均的处理,该方法有效地解决了白噪声从高频到低频的转移传递问题[31]。徐华明等[32]使用CEEMDAN方法对采样率为1 Hz的边坡变形监测GNSS数据进行了去噪研究,结果表明,相对于EMD去噪方法,该方法的去噪结果相关系数和信噪比更大,均方根误差更小,去噪效果更好。

### 3.2 分解结果与分析

本文选取积石山地震同震位移时间序列通过CEEMDAN方法进行同震信号分解,噪声系数设定为0.2,噪声添加次数为500,最大迭代次数设置为5 000次,信号分解后采用文献[33]提出的多尺度排列熵(multiscale permutation entropy, MPE)方法对信号频带进行分组。由于篇幅限制,本文仅选取LXJS和lzan两个站点E方向的时间序列作为说明。首先对距离震中5 km的LXJS站点的高频时间序列进行分解,共得到12个信号分量,如图4(a)所示,其中前11个时间序列为IMF分量,第12个时间序列RES(residual)为残余分量。随着对信号分解次数增加,信号变得更平滑,频率也越来越低。通过MPE法确定IMF1~IMF4为高频分量,其中IMF1分量主要包含白噪声,但还是分辨出了1次高频事件,其原因可能是该站点距离震中较近,受到地震影响较大;IMF2分量可明显检测到1个高频事件,通过与LXJS时间序列对比可知,该事件是由积石山地震引起,IMF3、IMF4分量对此次高频事件的分辨率逐渐变差;IMF5~IMF9分量存在明显周期性变化,文献[29]指出这样的周期变化主要是由固体潮变化引起,因此可使用该频带信息进行固体潮的相关研究;IMF10、IMF11分量主要包含低频的变化信息;RES分量为残余项。再对距离震中91 km的lzan站的E方向高频时间序列进行模态分解,如图4(b)所示,由于该站点距离震中较远,高频GNSS的同震位移波形已经很难看出明显的地震事件,包括IMF1分量也未见地震信号,但IMF2分量仍然能探测到一个明显的高频突变信号,通过与LXJS站点的结果进行比对,可确定该事件是由此次地震造成。该示例说明采用CEEMDAN方法进行高频GNSS信号分解,可探测到远场CORS的同震记录。

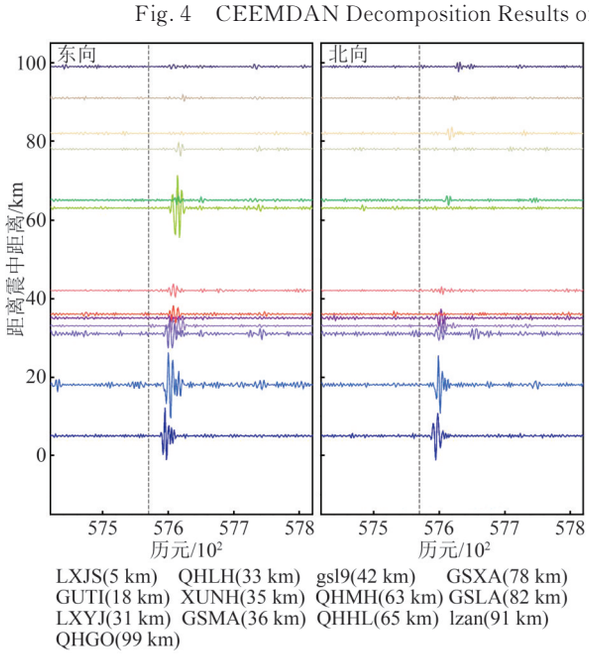
利用此方法共检测到13个CORS在东方向或北方向上对此次地震有较明显的响应,如图5所示。在50 km范围内探测到7个站点有强烈的同震变形信号,依照距离远近分别为LXJS、GUTI、LXYJ、QHHL、XUNH、GSMA和gsl9,包括2个甘肃省CORS、2个青海省CORS、2个讯腾公司CORS和1个地质环境监测站CORS,说明4家单位的站点均能探测到明显的同震信号。在距离震中63 km的QHMH测站,探测到其在东方向上同震响应非常剧烈,经检查发现该站点位于震中的西北方向,与GUTI测站位于同一个方位(见图1)。猜测可能是该站点位于地震破裂的传播方向上,因而出现较大的同震响应,而该响应在原始的高频GNSS波形序列中表现得并不明显,也验证了此次地震的破裂主要由震中向西北方向传播[3],这个现象也与地震烈度的分布结果基本保持一致(图1)。




注：红色虚线表示发震时刻。

图 4　积石山地震东方向 CEEMDAN 分解结果

Fig. 4　CEEMDAN Decomposition Results of the Jishishan Earthquake on the Eastward Direction




注：黑色虚线表示发震时刻。

图 5　积石山地震各站点 IMF2 分量

Fig. 5　IMF2 Components at Various Stations of the Jishishan Earthquake

从 60 km 开外的 QHHL、GSXA、GSLA、lzan 站到接近 100 km 的 QHGO 站，也均探测到较明显同震信号。图 5 说明采用模态分解方法可探测到距离震中 100 km 的 CORS 的同震信号，相比较原始观测数据解算的高频单历元时间序列无法探测同震信号，利用该方法可以探测出更远距离的同震信号。因此将来可采用此方法对波形信号进行重构，通过剔除噪声信号，获得更可靠的同震形变信息，拓展 CORS 监测同震信号的距离和范围，从而能更大程度利用地震周边 CORS，获得更多站点同震形变信息，进而为研究地震破裂机制、断层滑动分布等提供更多、更有用的观测信息。

## 4　结　语

对于 2023-12-18 发生的甘肃省积石山县 Ms 6.2 地震，本文梳理了研究区域现有 CORS 资源，收集了不同系统 32 个 CORS 地震当天高频 GNSS 观测数据，对原始数据开展了质量分析和高精度处理，提取了可靠同震形变成果，再基于模态分解方法研究了探测高频同震信号的可行性。取得的研究成果主要如下：

1)对研究区域不同单位CORS类型设备的原始观测数据进行了质量检查和高精度数据处理,发现不同类型观测墩上的观测设备均能不同程度监测到地震信号,因此将来可集中国国内众多CORS资源开展地震同震形变监测与研究。

2)高频GNSS可监测到明显同震形变波形,其中GUTI和LXJS站记录的同震信号最为明显,峰值变化达到50~60 mm;随着震中距离的增加,同震信号逐渐淹没到噪声当中,捕捉到同震信号的距离范围大致在50 km以内,与地震烈度结果基本一致。

3)本次地震永久形变主要影响范围为距离震中30 km的区域,位于震中东南侧5 km的LXJS测站具有最大同震形变,其东西向永久形变达到13 mm,南北向变形达到10 mm,以及垂向变形为8 mm,证明本次地震不仅有走滑运动,还有逆冲运动。

4)采用CEEMDAN方法进行高频GNSS信号分解,可探测到50 km范围内CORS的同震记录,最远可探测到距离震中100 km的CORS同震信号。相比较原始观测数据解算的高频单历元时间序列无法探测远场同震信号,利用该方法可探测出更多同震信号,为将来利用海量CORS资源监测地震的同震形变提供可行性。

## 参 考 文 献


[1] 中国地震台网中心. 甘肃临夏回族自治州积石山县6.2级地震[EB/OL]. (2024-01-05) https://news.ceic.ac.cn/CC20231218235930.html.
The 6.2 Magnitude Eearthquake in Jishishan County, Linxia Hui Autonomous Prefecture, Gansu Province [EB/OL]. (2024-01-05) https://news.ceic.ac.cn/CC20231218235930.html.

[2] 陈继锋, 林向东, 何新社. 2013年甘肃岷县Ms 6.6地震矩张量反演及发震构造初探[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 425-431.
CHEN Jifeng, LIN Xiangdong, HE Xinshe. Moment Tensor Inversion and Seismogenic Tectonics of the 2013 Minxian Ms 6.6 Earthquake in Gansu [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 425-431.

[3] 中国地震局地球物理研究所. 2023年12月18日甘肃临夏回族自治州积石山县6.2级地震科技支撑简报[EB/OL]. (2023-12-19) https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/ 280418.html.
Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. Brief Report on Scientific and Technological Support for the 6.2 Magnitude Earthquake in Jishishan County, Linxia Hui Autonomous Prefecture, Gansu Province on December 18, 2023 [EB/OL] (2023-12-19) https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280418.html.

[4] 王勤彩, 罗钧, 陈翰林, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制解[J]. 地震, 2024, 44(1): 185-188.
WANG Qincai, LUO Jun, CHEN Hanlin, et al. Focal Mechanism for the December 18, 2023, Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 185-188.

[5] 黄观文,景策,李东旭等. 甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡易发区的变形影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230490.
HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake on the Landslide Hazard Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230490.

[6] 陈博,宋闯,陈毅,等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20230497.
CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan Universit*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20230497.

[7] 王立朝,侯圣山,董英,等. 甘肃积石山Ms 6.2地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 35(3): 108-118.
WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic Characteristics of Coseismic Geological Hazards Induced by Jishishan Ms 6.2 Earthquake and Suggestions for Their Risk Control[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 35(3): 108-118.

[8] 万永革, 万永魁, 靳志同, 等. 用形变资料反演1976年唐山地震序列的破裂分布[J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3378-3395.
WAN Yongge, WAN Yongkui, JIN Zhitong, et al. Rupture Distribution of the 1976 Tangshan Earthquake Sequence Inverted from Geodetic Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(9): 3378-3395.

[9] 万永革, 王敏, 沈正康, 等. 利用GPS和水准测量

资料反演2001年昆仑山口西8.1级地震的同震滑动分布[J]. 地震地质, 2004, 26(3): 393-404.
WAN Yongge, WANG Min, SHEN Zhengkang, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2001 West of Kunlun Mountain Pass Earthquake Inverted by GPS and Leveling Data[J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26(3): 393-404.

[10] 李志才, 张鹏, 金双根, 等. 基于GPS观测数据的汶川地震断层形变反演分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 108-113.
LI Zhicai, ZHANG Peng, JIN Shuanggen, et al. Wenchuan Earthquake Deformation Fault Inversion and Analysis Based on GPS Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(2): 108-113.

[11] JIANG Z S, WANG M, WANG Y Z, et al. GPS Constrained Coseismic Source and Slip Distribution of the 2013 Mw 6.6 Lushan, China, Earthquake and Its Tectonic Implications[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 407-413.

[12] LI Z C, WEN Y M, ZHANG P, et al. Joint Inversion of GPS, Leveling, and InSAR Data for the 2013 Lushan (China) Earthquake and Its Seismic Hazard Implications[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 715.

[13] 李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS观测的2021年青海玛多地震(Mw 7.4)同震形变及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1489-1497.
LI Zhicai, DING Kaihua, ZHANG Peng, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of 2021 Mw 7.4 Madoi Earthquake from GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1489-1497.

[14] 吴伟伟, 孟国杰, 刘泰, 等. 2022年泸定6.8级地震GNSS同震形变场及其约束反演的破裂滑动分布[J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2306-2321.
WU Weiwei, MENG Guojie, LIU Tai, et al. Coseismic Displacement Field and Slip Distribution of the 2022 Luding Ms 6.8 Earthquake Derived from GNSS Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(6): 2306-2321.

[15] WRIGHT T J, HOULIÉ N, HILDYARD M, et al. Real-Time, Reliable Magnitudes for Large Earthquakes from 1 Hz GPS Precise Point Positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): L12302.

[16] DING K H, WANG Q, LI Z C, et al. Rapid Source Determination of the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake by a Dense High-Rate GNSS Network in the Tibetan Plateau[J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(6): 3234-3245.

[17] ZANG J F, WEN Y M, LI Z C, et al. Rapid Source Models of the 2021 Mw 7.4 Maduo, China, Earthquake Inferred from High-Rate BDS3/2, GPS, Galileo and GLONASS Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(9): 58.

[18] LI Z C, ZANG J F, FAN S J, et al. Real-Time Source Modeling of the 2022 Mw 6.6 Menyuan, China Earthquake with High-Rate GNSS Observations[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5378.

[19] 郑佳伟, 李敏, 方荣新, 等. 联合高频GNSS和强震数据快速反演四川泸定6.8级地震断层破裂特征[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1419-1427.
ZHENG Jiawei, LI Min, FANG Rongxin, et al. Rapid Inversion of Fault Rupture Characteristics for the Luding M 6.8 Earthquake in Sichuan with High-Rate GNSS and Strong-Motion Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1419-1427.

[20] 熊伟. 世界主要国家和地区卫星导航定位基准站建设与应用有关情况[J]. 测绘地理信息发展动态, 2023, 10:1-9.
XIONG Wei. Construction and Application of Satellite Navigation and Positioning Reference Stations in Major Countries and Regions of the World[J]. *Development Trends of Surveying, Mapping and Geographic Information*, 2023, 10:1-9.

[21] 张鸣之,杨飞,马娟,等. 区块链技术在全国地质灾害风险预警系统建设中的应用探索[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6):168-174.
ZHANG Mingzhi, YANG Fei, MA Juan, et al. Exploration of Blockchain Technology Application in the Construction of National Risk Warning System on Landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(6): 168-174.

[22] 李智敏, 田勤俭, 屠泓为. 拉脊山断裂带遥感特征研究[J]. 高原地震, 2009, 21(1): 26-31.
LI Zhimin, TIAN Qinjian, TU Hongwei. Remote Sensing Characteristics of Lajishan Fault[J]. *Plateau Earthquake Research*, 2009, 21(1): 26-31.

[23] 徐化超, 王辉, 曹建玲. 青藏高原东北缘主要断裂滑动速率及其动力学意义[J]. 地震, 2018, 38(3): 13-23.
XU Huachao, WANG Hui, CAO Jianling. Slip Rates of the Major Faults in the Northeastern Tibetan Plateau and Their Geodynamic Implications[J]. *Earthquake*, 2018, 38(3): 13-23.

[24] 周琳, 王庆良, 李长军, 等. 基于GPS和水准资料的拉脊山断裂带西段地壳形变研究[J]. 大地测量

与地球动力学, 2016, 36(12): 1056-1059.
ZHOU Lin, WANG Qingliang, LI Zhangjun, et al. The Study of Crustal Deformation on Western End of Lajishan Fault Based on GPS and Leveling Data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(12): 1056-1059.

[25] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘肃东南地区构造活动与2013年岷县-漳县Ms 6.6级地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4058-4071.
ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Geometric Pattern and Active Tectonics in Southeastern Gansu Province: Discussion on Seismogenic Mechanism of the Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake on July 22, 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12): 4058-4071.

[26] 应急管理部发布甘肃积石山6.2级地震烈度图[EB/OL]. (2023-12-22) http://mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml.
The Ministry of Emergency Management has Issued a 6.2 Magnitude Earthquake Intensity Report for the Jishishan earthquake in Gansu Province [EB/OL] (2023-12-22) http://mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml.

[27] GENG J H, YANG S F, GUO J. Assessing IGS GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 Phase Bias Products with PRIDE PPP-AR [J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 1-15.

[28] 孙和平, 张苗苗, 徐建桥, 等. 基于集合经验模态分解法的重力极潮提取与研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 521-530.
SUN Heping, ZHANG Miaomiao, XU Jianqiao, et al. Etraction and Study of the Gravity Pole Tide Using EEMD [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(2): 521-530.

[29] 余丹, 刘春国, 王晓, 等. 集合经验模态分解(EEMD)在地下水位数据处理中的应用初探[J]. 中国地震, 2019, 35(2): 337-346.
YU Dan, LIU Chunguo, WANG Xiao, et al. Application of Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) in Underground Fluid Data Processing[J]. *Earthquake Research in China*, 2019, 35(2): 337-346.

[30] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Rrague, Czech Republic, 2011.

[31] 梁阿全, 高双玲. CEEMDAN和小波包方法在地震信号降噪中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2023, 44(5): 29-36.
LIANG Aquan, GAO Shuangling. Application of CEEMDAN and Wavelet Packet Analysis in Noise Reduction of Seismic Signals[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2023, 44(5): 29-36.

[32] 徐华明, 孟飞飞, 俞春燕. 边坡GNSS变形监测数据去噪方法研究[J]. 测绘技术装备, 2023, 25(3): 31-36.
XU Huaming, MENG Feifei, YU Chunyan. Denoising Method for Slope GNSS Deformation Monitoring Data[J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2023, 25(3): 31-36.

[33] 马晓燕, 王文波. 联合同步挤压小波变换和多尺度排列熵的局部放电类型识别[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 131-135.
MA Xiaoyan, WANG Wenbo. Partial Discharge Recognition Based on Synchrosqueezing Wavelet Transform and Multi-scale Permutation Entropy [J]. *Computer Measurement & Control*, 2020, 28(2): 131-135.