引文格式: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),2025,50(2):223-235.DOI:10.13203/j.whugis20230490

Citation: HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake on the Landslide Hazard Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2): 223-235. DOI: 10.13203/j.whugis20230490

甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡易发区的变形影响分析

黄观文[1,2,3] 景 策[1] 李东旭[1] 黄晓宇[1] 王立阳[4] 张 凯[1]
杨 欢[1] 解世超[1] 白正伟[1] 王 铎[1,5]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室,陕西 西安,710054
3 智能北斗陕西省高校工程研究中心,陕西 西安,710054
4 甘肃省测绘工程院,甘肃 兰州,730051
5 卡尔加里大学,加拿大卡尔加里市,AB T2N 1N4

摘 要:地震极易诱发或加速滑坡灾害发生,2023-12-18甘肃积石山县发生Ms 6.2地震,震源深度仅为10 km,周边滑坡易发区面临突发性破坏甚至提前发生灾害的风险,亟需对易发区变形进行快速分析与评估。基于此,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定位系统(global navigation satellite system,GNSS)和加速度计实时监测数据,采用精密单点定位、实时动态差分定位技术、GNSS加速度计自适应融合技术以及小波变换等方法综合分析了主震和余震对边坡体的破坏性影响。研究结果表明,距震中64 km的黑方台滑坡体监测到1 cm的弹性位移以及0.5 cm的永久形变,距震中240 km的舟曲滑坡体监测到明显的加速度冲击事件,捕捉到的地表振动频率在0~10 Hz之间,加速度峰值达0.035 m/s^2,增加了滑坡易发区的失稳风险。此次地震对滑坡造成的位移和振动影响在水平方向上较为显著。建议相关部门尽快对震源64 km范围内的滑坡易发区进行勘察和评估,避免突发性滑坡灾害的发生。

关键词:2023年积石山地震;远场同震位移;GNSS;滑坡破坏评估;滑坡易发区

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-12-22

DOI:10.13203/j.whugis20230490 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0223-13

Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake on the Landslide Hazard Areas

HUANG Guanwen[1,2,3] *JING Ce*[1] *LI Dongxu*[1] *HUANG Xiaoyu*[1] *WANG Liyang*[4]
ZHANG Kai[1] *YANG Huan*[1] *XIE Shichao*[1] *BAI Zhengwei*[1] *WANG Duo*[1,5]

1 College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China
3 Engineering Research Center of Intelligent BDS, Univesity of Shanxi Provinve, Xi'an 710054, China
4 Gansu Academy of Surveying and Mapping Engineering, Lanzhou 730051, China
5 University of Calgary, Calgary AB T2N 1N4, Canada

Abstract: **Objectives**: Earthquake events can easily induce or accelerate the landslide failure. On 18th December 2023, an Ms 6.2 earthquake occurred in Jishishan County, Gansu province, with a focal depth of only 10 km. The surrounding landslide disaster-prone areas are faced with great hidden danger of sudden or advanced failure, and it is urgent to conduct rapid analysis and assessment of deformation in prone areas.

基金项目:国家自然科学基金(42374025);中央高校基本科研业务费专项资金(300102260707,300102263401);中央高校基本科研业务费专项资金—长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300102263716)。

第一作者:黄观文,博士,教授,主要从事卫星导航与大地测量研究。guanwen@chd.edu.cn

通讯作者:景策,博士生。jingce@chd.edu.cn

Methods: In this paper, the global navigation satellite system (GNSS) and accelerometer real-time observation data of four landslide prone areas at different distances (64 km, 111 km, 140 km and 240 km) from the seismic center, and the damage effects of the main shock and aftershock on the landslide were comprehensively analyzed with precise point positioning, real-time kinematic, GNSS & accelerometer adaptive coupled technology and wavelet transform. **Results**: The results show that the elastic displacement of 1 cm and the permanent displacement of 0.5 cm aredetected in the Heifangtai landslide, 64 km away from the seismic center, while the obvious impact responses are detected in the Zhouqu landslide, 240 km away from the seismic center. The vibration frequency was between 0-10 Hz, and the peak acceleration reached 0.035 m/s^2, which increased the risk of landslide failure. **Conclusions**: The displacement and vibration effects of the earthquake on the landslide are mainly concentrated in the horizontal direction, and the vertical direction is not significant. It is suggested the landslide disaster-prone areas within 64 km of Jishishan County should be investigated and evaluated as soon as possible to prevent secondary disaster damage.

Key words: 2023 Jishishan earthquake; far-field landslide coseismic displacement; GNSS; landslide damage assessment; landslide hazard areas

地震灾害极易对环境造成严重破坏,并导致重大的人员伤亡和巨额的财产损失[1],严重制约了经济和社会的健康发展。同时地震也会诱发其他次生灾害,是滑坡灾害发生的重要原因之一[2-3]。据中国地震台网发布,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,震源深度10 km,震中位于35.70°N,102.79°E。此后4 h内,共记录到3.0级及以上余震9次,其中3.0~3.9级余震7次,4.0级以上余震2次,最大为北京时间12月19日0时59分发生的4.1级余震(https://www.cea.gov.cn)。此次积石山地震的孕育背景为拉脊山-积石山构造带,该构造带西接右旋的日月山断裂带,东接左旋的西秦岭断裂带,是调节二者应力应变的过渡构造带[4],研究资料显示,该构造带至少发生过两次6.0级以上中强地震[5]。

地震发生以来,中国国内多个研究团队即时开展相关研究,中国科学院青藏高原研究所碰撞隆升及影响团队分析了此次地震震源机制和震源破裂过程[6];国家自然灾害防治研究院许冲研究团队根据模拟地震烈度分布结果与地震滑坡发生概率模型,计算得到了本次地震同震崩滑发生概率图[7];清华大学陆新征课题组利用密布强震台网在震后获取的实时地震动信息,分析地震动对典型城市区域的破坏能力,并根据当地地形数据、岩性数据和实测地面运动记录,分析了台站附近的地震滑坡分布[8];地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室利用前期已研发的地震诱发地质灾害预测模型,实现了地震诱发地质灾害近实时空间分布概率的快速预测[9];中国地震局地震研究所利用精密单点定位(precise point positioning, PPP)对20 km内的连续运行参考站进行快速解算,对主震进行快速响应和分析,获取了该地震的震源机制[10]。

以上有关同震灾害链的研究均是针对震中及活动断层附近的区域[11-12],但对远场地质灾害,特别是滑坡易发区的关注度不高,一些灾害防控的重点地区缺乏即时的评估分析资料,其中全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术可即时获得地表的变形位移序列,为滑坡次生灾害防控提供重要保障[13-15]。针对上述问题,本文充分调集该区域周边的GNSS数据资源,对地震诱发次生滑坡灾害进行快速反应,采集了距离震中64~240 km的4处远场滑坡灾害易发区GNSS和加速度计监测数据开展研究,分别是位于构造带东北侧、距离震中64 km的永靖县黑方台黄土滑坡,此前,该地区曾发生过多起突发性黄土滑坡灾害[16-17],距离震中111 km的兰州市什川镇滑坡,距离震中140 km的西宁市大石沟滑坡[18],以及距离震中240 km的舟曲县大小湾滑坡[19]。本文对上述重点地区部署的GNSS和加速度多源同震监测数据进行全面分析,并结合前期历史变形位移信息,指出潜在的滑坡失稳隐患点,对震后的滑坡灾害精准防范具有重要意义。

1 试验区与数据处理方法

本文采集了2023-12-18积石山地震远场4处滑坡(地理位置如图1所示)的GNSS原始观测数据,数据采样率均为1 Hz,部分测站安装低成本三轴加速度计传感器,采样频率为100 Hz。其中甘肃省永靖县黑方台滑坡属于典型的滑移型黄土滑

坡,位于刘家峡水库下游,在过去5年已发生过数次突发性滑坡灾害。甘肃省兰州市什川镇滑坡位于黄河谷地,曾在2007年遭受严重的滑坡泥石流灾害,目前有关部门已介入治理。青海省西宁市大石沟滑坡所处地区水土流失严重,长期受到滑坡泥石流等地质灾害侵扰。甘肃省舟曲县大小湾滑坡所处地区为典型的高山峡谷地貌,曾遭受特大滑坡泥石流灾害,至今在雨季面临地质灾害风险。

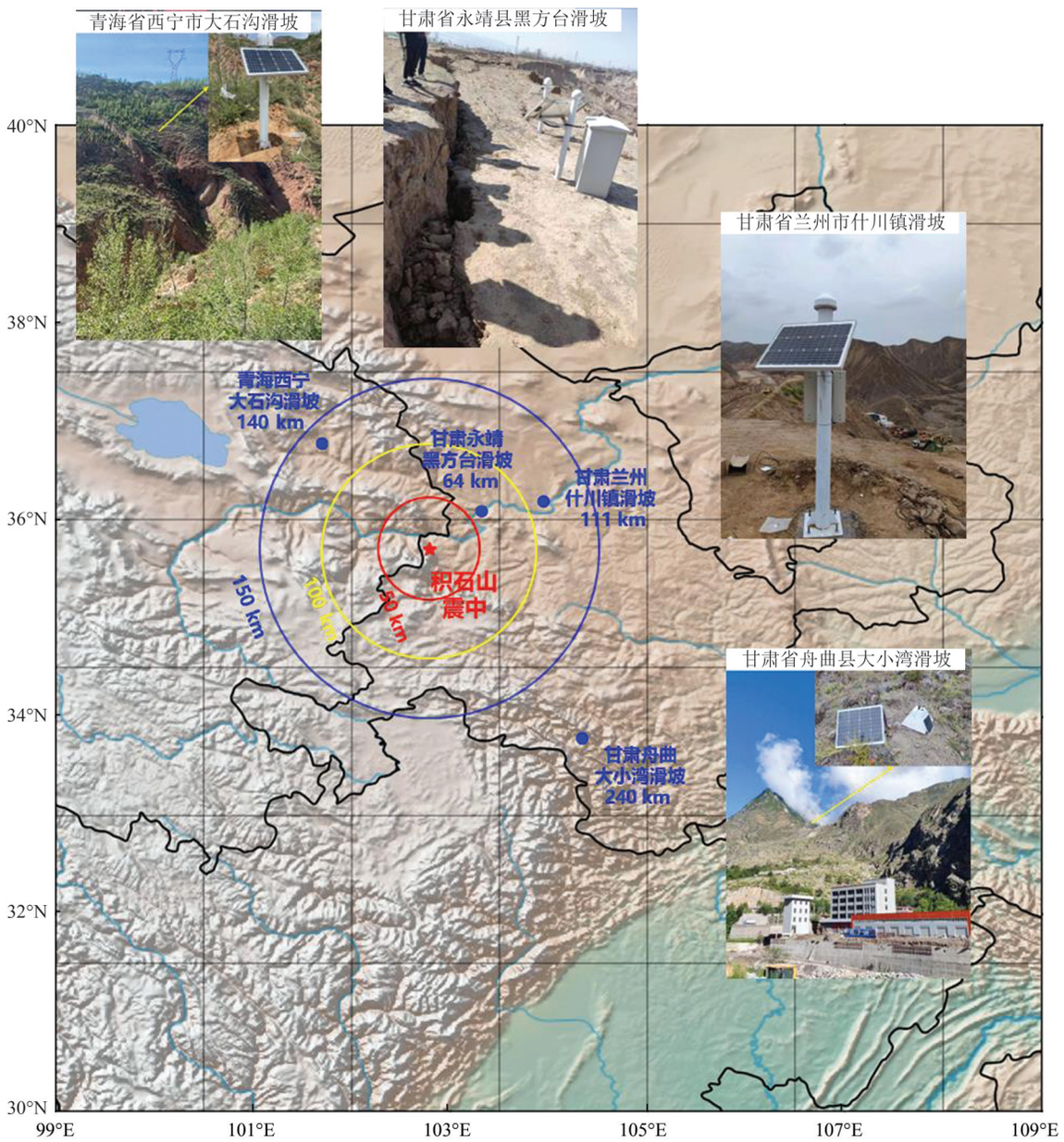


图1　甘肃积石山地震与本文研究的4处远场滑坡区域地理位置分布图

Fig. 1　Geographical Distribution Map of Seismic Center and Four Far-Field Landslide Areas Studied in This Paper

由于地震波会影响GNSS基准站的稳定性,因此在进行短基线GNSS差分解算时,首先采用PPP技术获取基准站震间的绝对变形信息[20-21],进而对基准站进行位移补偿[22]。由于PPP依赖的最终精密轨道/钟差等产品存在7~14 d延迟[14],本文在数据处理时尚无法获取,因此采用快速轨道/钟差产品进行解算。

在滑坡环境中,GNSS监测站极易受到山体遮挡和植被衍射等信号干扰的影响,不可避免地会导致变形序列出现粗差,影响灾害预警的准确判断。本文通过引入高频加速度信号,利用GNSS和加速度计两种技术手段的冗余互补特性[23-24],构建更加鲁棒的多源融合监测模型[25],提高复杂环境中滑坡变形监测精度。在数据处理中,采用Huber选权迭代法的方差膨胀模型来优化GNSS变形位移的噪声模型[26],基于加速度信号的标准差(standard deviation,STD)时变信息对系统噪声进行在线建模,降低外部环境扰动对

GNSS加速度计融合模型的影响[27]。

本文通过小波变换计算加速度信号的时频信息[28]。小波变换可以表示为[29]:

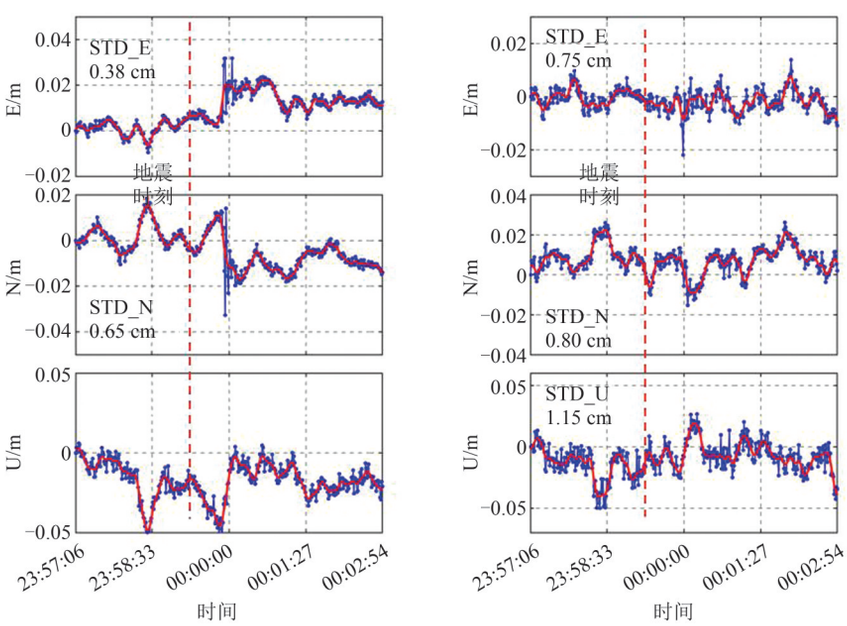
$$W_s(a,b)=\{s(t),\zeta_{a,b}(t)\}=$$
$$|a|^{-1/2}\int_R s(t)\bar{\zeta}\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中,$\zeta(t)$为母小波函数;任意信号$s(t)\in L^2(R)$;a、b分别为平移和伸缩因子;$\bar{\zeta}(t)$是$\zeta(t)$的共轭函数。

2 远场不同距离震前震后滑坡变形位移分析

本文首先搜集了近场距离震中5 km和30 km的两个GNSS监测站观测数据,采用PPP技术获取了同震位移序列,如图2所示。可以发现LXJS测站(5 km)在地震发生后出现显著变形,E和N方向分别出现3.5 cm和4.0 cm的峰值波动,并最终分别产生约1.5 cm和2 cm的永久位移,而高程方向位移变化并不显著。LXYJ测站(30 km)在E和N方向分别出现峰值约1.8 cm和2.2 cm的同震位移,但没有产生显著永久位移。考虑到此次地震已对震区中心造成了巨大破坏,并波及到青海海东的部分地区,因此本文重点对震中周边的滑坡易发区开展同震变形位移分析。

如图3所示,在距离震源64 km的黑方台滑坡,6个GNSS滑坡监测站都受到此次地震的影响,产生不同程度的位移变化。特别是HF03、HF04和HF24监测点,其平面方向产生的峰值位移均超过1 cm,其整体波动持续时间达24 s。并且部分监测站在发生波动后,其稳定性也受到永久性影响,如HF04监测点的E和N方向均发生了0.4 cm的永久性位移,HF24监测点的E和N方向分别发生了0.5 cm和0.3 cm的永久性位移。而其余4个较为稳定的监测站在发生短暂弹性回跳后趋于平稳,暂时未发现显著的永久性位移。



(a) LXJS(5 km)同震位移序列 (b) LXYJ(30 km)同震位移序列

图2 GNSS监测站同震变形位移序列

Fig. 2 Coseismic Deformation Displacement Time Series of GNSS Monitoring Stations

这一现象也与滑坡的累计变形有关,本文借助滑坡监测预警云平台获取了以上监测点近1 a的变形位移曲线[16],如图4所示。HF04和HF24在前期均已产生了较大的历史变形,E、N、U 3个方向分别达到0.054、0.138、0.201 m和0.090、0.038、0.505 m,具有显著的不稳定性。此次该滑坡再叠加地震波的影响,即使处于远场区域,也发生了永久性位移。而其余4个监测站的历史位移形变量较小,整体仍处于稳定状态,受此次地震波的破坏程度较小。综合而言,此次地震对不稳定滑坡体有加剧失稳的作用。

本文还采集了距离震源111 km的兰州什川镇滑坡9个GNSS监测站观测数据,经计算发现均未对此次积石山地震产生位移反应,如图5所示。原因在于该滑坡距离震源处较远,当地震波到达此处时能量已大幅度衰减,对地表位移的影响十分有限。该现象同样出现在距离震源140 km的西宁大石沟滑坡和距离震源240 km的舟曲大小湾滑坡,如图6所示。

从上述结果可以看出,积石山地震对震源64 km以内的滑坡(参考黑方台滑坡)会产生显著变形影响,使其发生显著位移弹性回跳。对已有较大历史

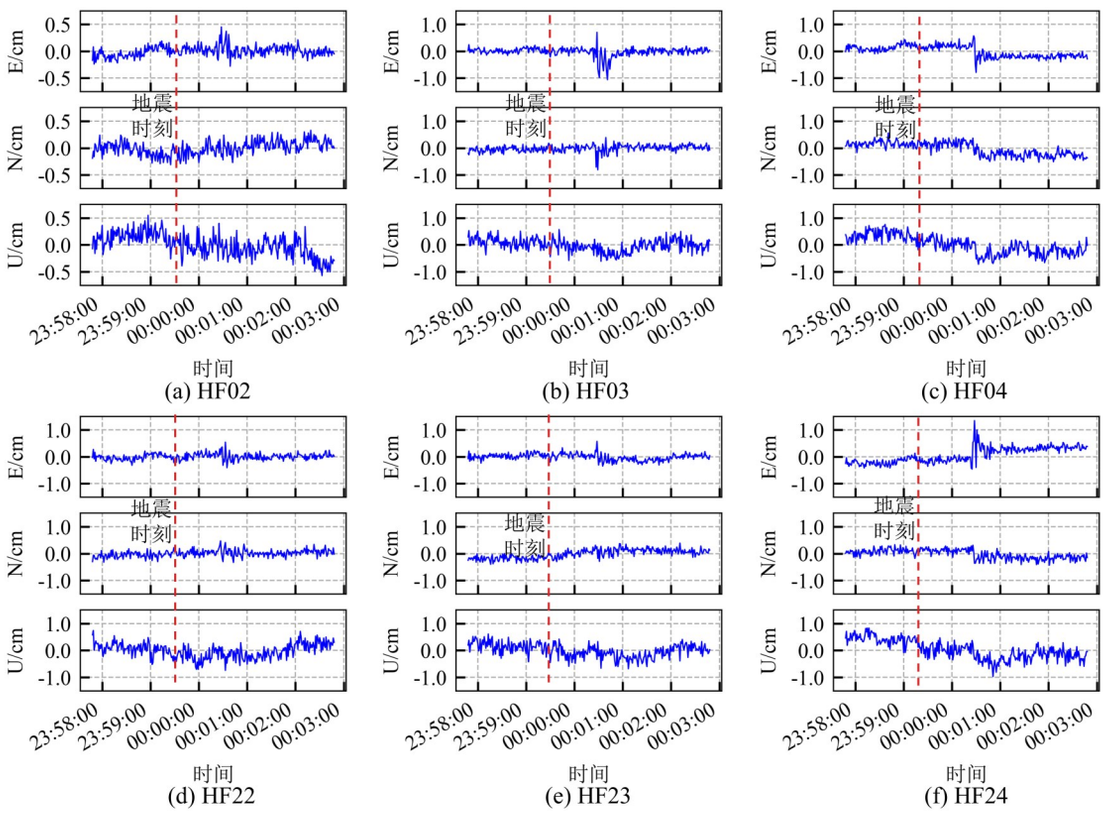


图 3　积石山地震前、后黑方台滑坡位移变形监测信息

Fig. 3　Deformation Displacement Time Series of Heifangtai Landslide Before and After the Jishishan Earthquake

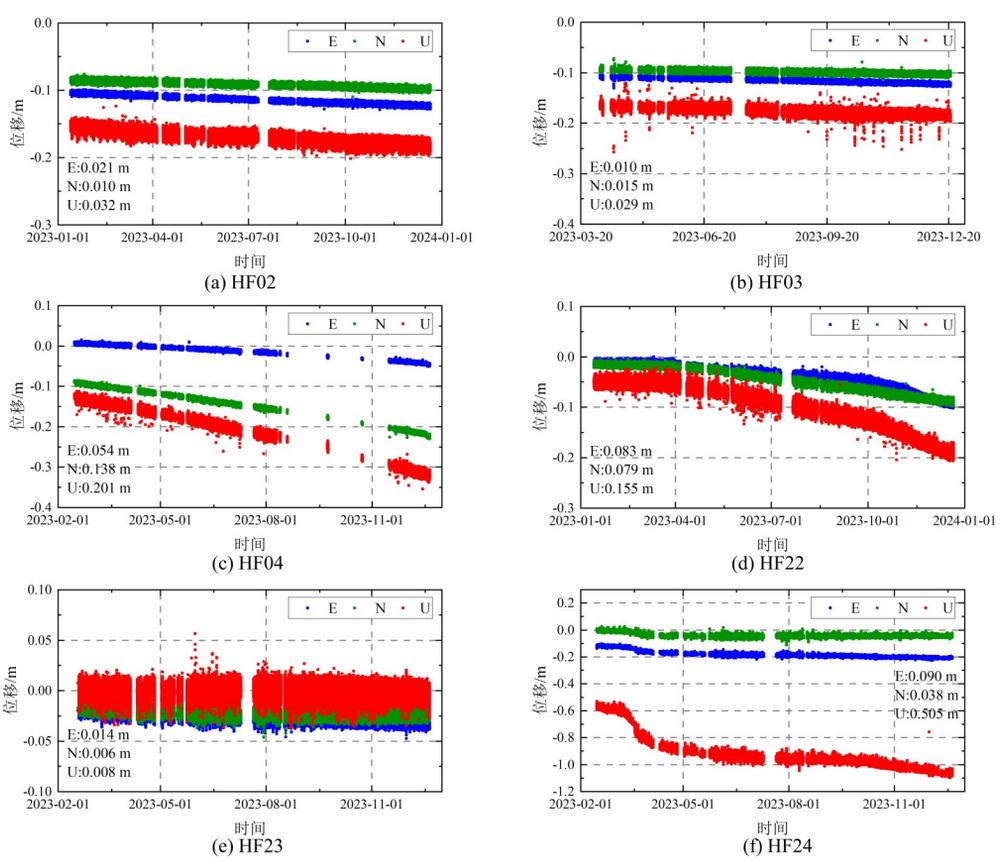


图 4　黑方台滑坡近一年历史位移变形监测信息

Fig. 4　Deformation Displacement Time Series of Heifangtai Landslide in the Recent One Year

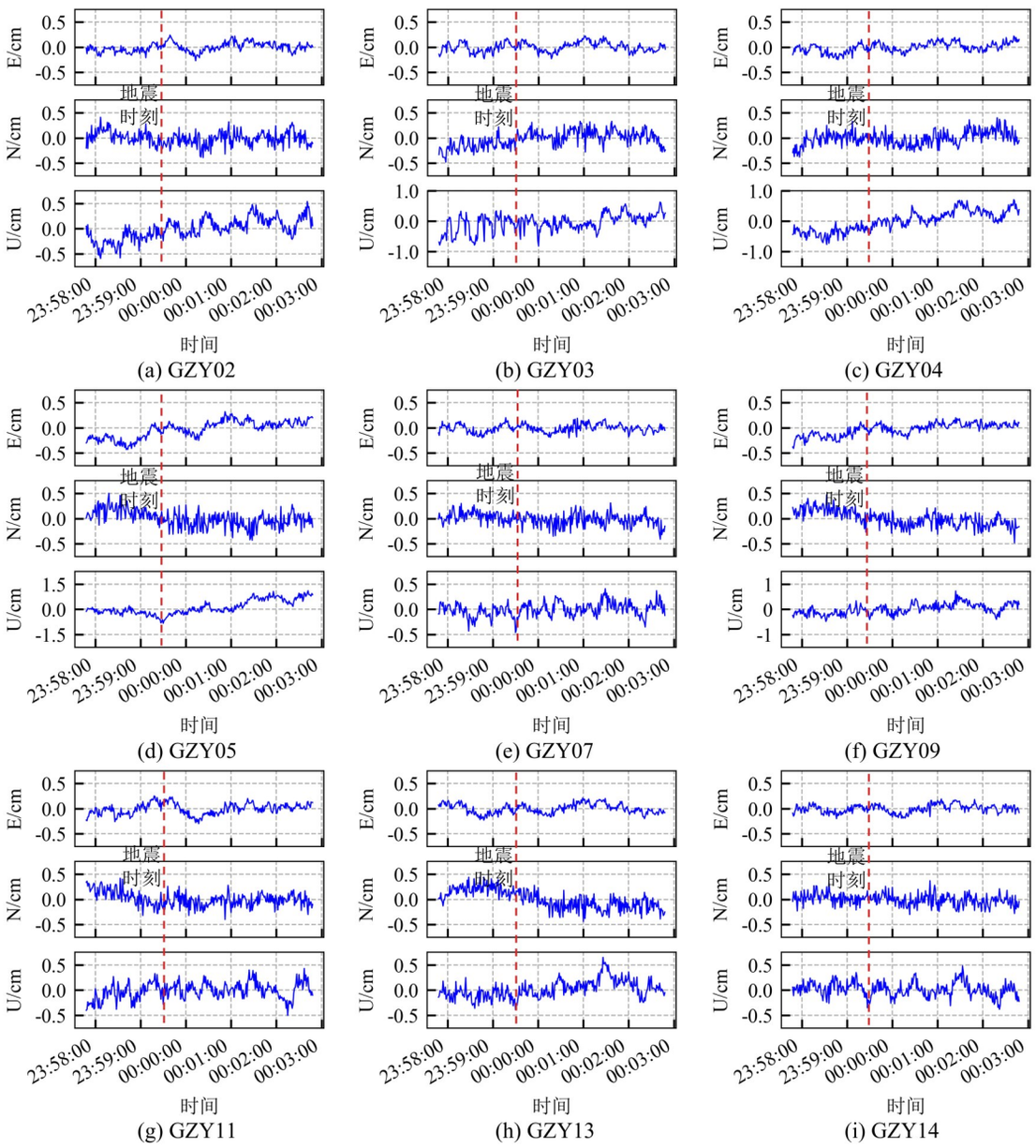


图5 积石山地震前、后兰州市什川镇滑坡变形位移序列

Fig. 5 Deformation Displacement Time Series of Shichuan Town Landslide Before and After the Jishishan Earthquake

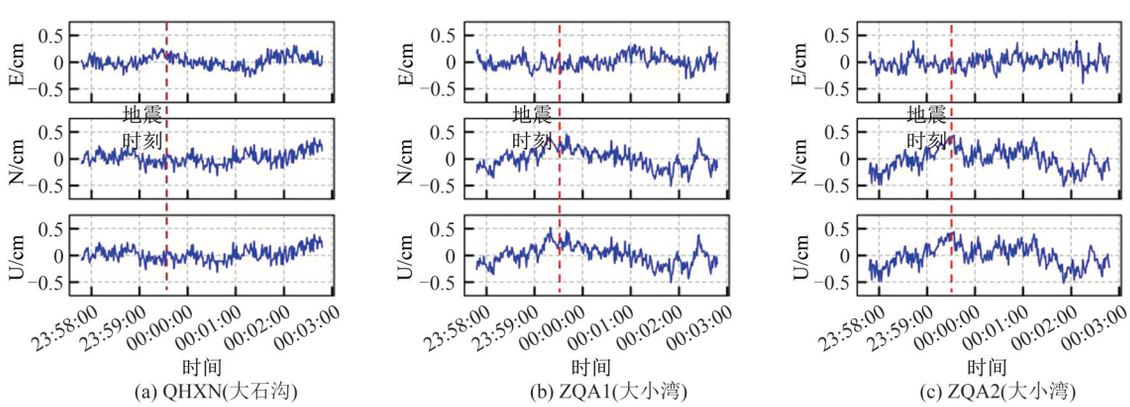


图6 积石山地震前、后西宁大石沟和舟曲大小湾滑坡位移变形监测信息

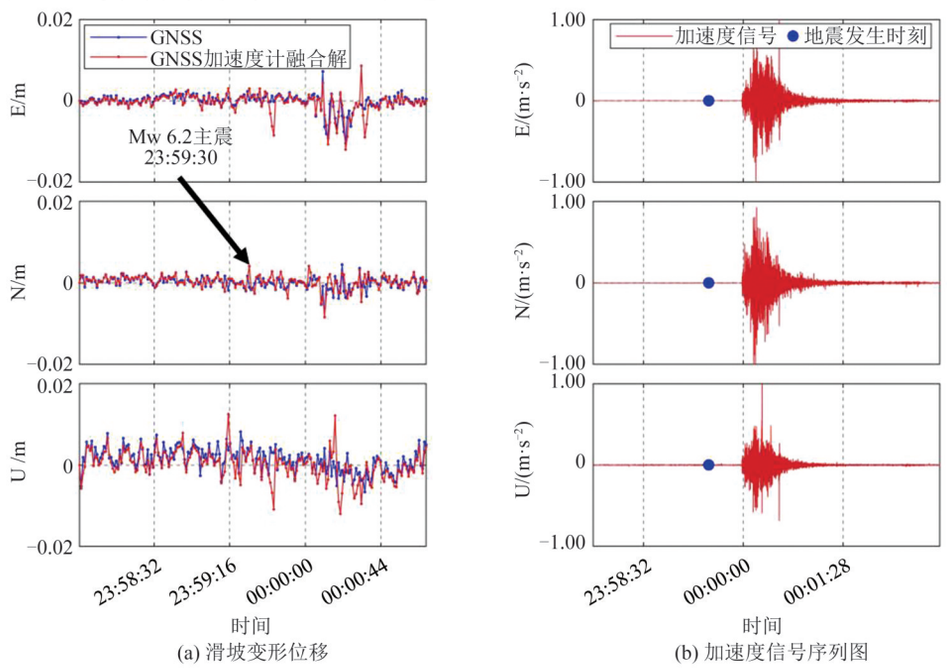
Fig. 6 Deformation Displacement Time Series of Dashigou Landslide (Xining City) and Daxiaowan Landslide (Zhouqu County) Before and After the Jishishan Earthquake

位移变形的滑坡体而言,此次地震可能会使其产生较大永久性位移,有加剧滑坡失稳的风险。另一方面,从变形位移序列上来看,该地震对震源 64 km 以外的滑坡影响较小,仅会使其发生微小的震动,对滑坡整体变形趋势不会产生严重影响。但是仍然不能忽略微小振动是否会改变临滑边坡内部地质体孔隙压变化等不确定因素对临滑边坡构成的潜在威胁。此外,考虑到 64 km 滑坡存在显著的同震位移变形,而 111 km 处的滑坡变形位移不明显,因此把滑坡灾害勘察评估工作主要集中在震源 64 km 范围内,并在此基础上适当扩大勘察范围。

3　主震和余震对滑坡的破坏性对比分析

3.1　滑坡变形位移及加速度信号分析

地震是诱发滑坡加速和失稳的主要原因之一[30-31]。为分析此次地震对远场滑坡易发区的影响,本文采用 GNSS 实时差分技术和 GNSS 加速度计融合算法计算甘肃永靖县黑方台 HF03 监测点主震期间的同震三维变形位移序列,如图 7 所示。该监测点距离震中约 64 km,从 23:59:30 地震横波产生到该点约需传播 25 s,因此变形序列在 00:00:00 时刻开始出现显著同震波动,持续时间约 12 s,并最终在 E 和 N 方向分别产生约 5 mm 的永久位移。高程方向的 GNSS 变形序列并不显著,而融合算法获得的峰值位移超过 1 cm,这可能是因为 GNSS 接收机采样率(1 Hz)较低,难以捕获到地震引起的地表高频位移变化。从加速度信号序列上看,当积石山地震主震发生 29 s 后,HF03 点位布设的加速度计捕捉到了明显的地震波高频信号,递增约 10 s 后 E、N、U 3 个方向的加速度达到峰值,分别达到 0.83 m/s^2、0.79m/s^2、0.46 m/s^2,并持续约 4 s 后开始衰减,而后逐渐趋于稳定,80 s 左右再无明显波动。但通过该过程可以发现加速度信号在震后趋于稳定后的峰值仍然显著高于震前,因此可以判断地震对该远场滑坡造成了持续性的破坏。



(a) 滑坡变形位移　　(b) 加速度信号序列图

图 7　主震时 HF03 监测点滑坡变形位移和加速度信号序列图

Fig. 7　Deformation Displacement and Acceleration Signal Time Series of HF03 Monitoring Station During the Main Shock

此次地震发生后的 1 h 内,又伴随发生了多次余震,本文统计了其中 4 次震级较大的余震。如图 8 所示,在余震期间,GNSS 和融合算法获得的滑坡体变形位移序列均较为平稳,尽管 GNSS 序列不存在显著粗差,但融合算法在一定程度上仍能起到平滑效果。两种解算方案的变形序列水平方向均在 0.5 cm 范围内波动,高程方向均在 1 cm 范围内波动,并且都没有随余震发生显著趋势性变化。因此从位移维度上来看,余震没有对滑坡体造成显著变形影响。而从同步采集的高频加速度信号来看,该测站实际上仍然可以敏感到地震波的微弱影响,如图 9 所示,余震引起的加速度波动在竖直方向较小,但在 00:36:18 4.0 级余震期间,E 和 N 方向仍会造成峰值超过 0.04 m/s^2 的波动。因此,尽管余震发生时滑坡体没有明显变形,但其带来潜在的微小震动依然可能对临滑边坡构成一定的威胁。

同时,本文对距离震中 240 km 的甘肃舟曲大小湾滑坡上布设的 GNSS/加速度计融合监测设备 ZQA2 所采集的信息进行了分析。如图 10 所示,GNSS 三维位移变形序列含有显著的厘米级

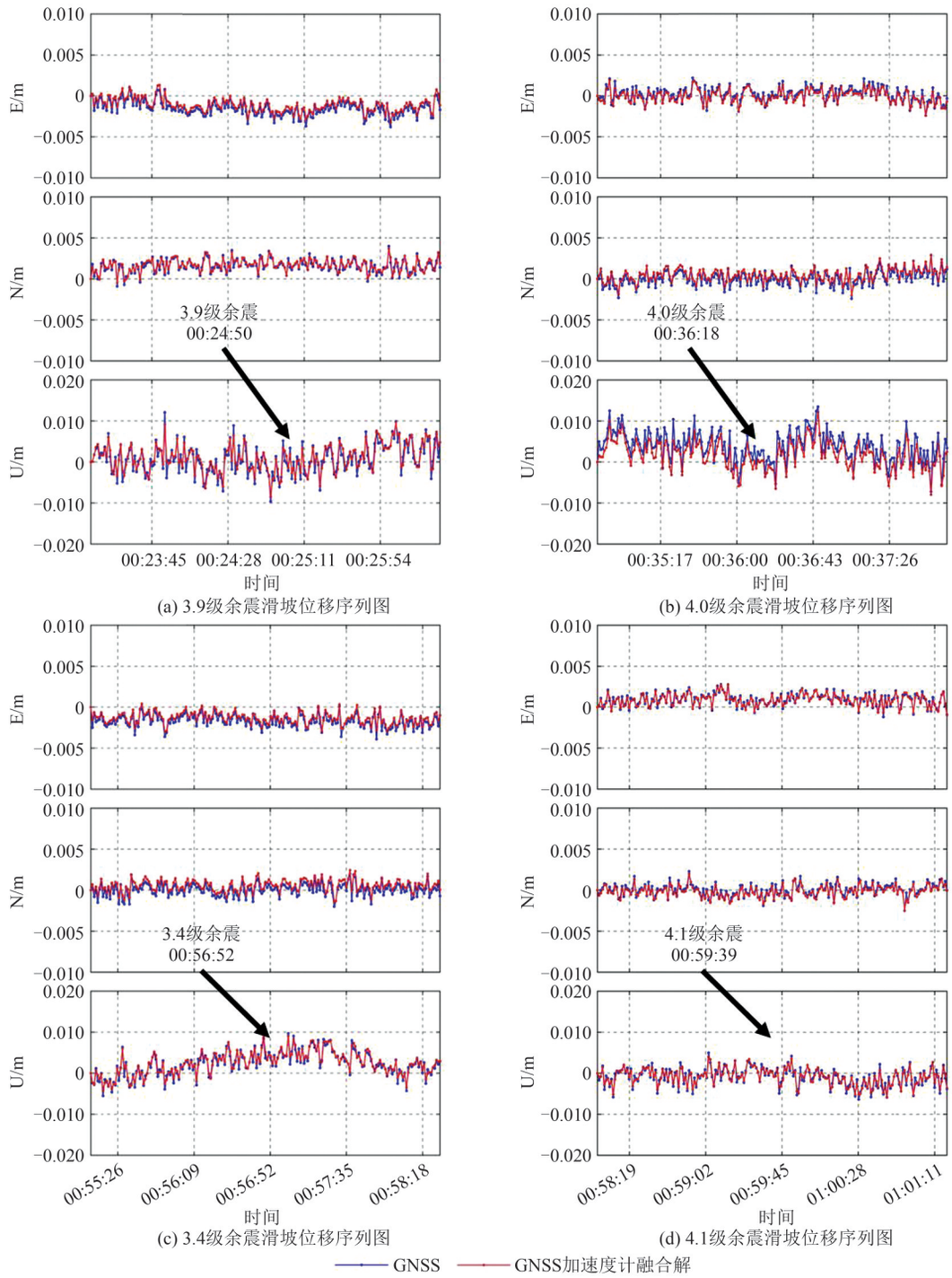


图8 4次余震时HF03监测点滑坡变形位移序列图

Fig. 8 Deformation Displacement Time Series of HF03 Monitoring Station During the Four Aftershocks

粗差,原因是该测站受山体遮挡的影响,且受到大量的植被衍射和信号干扰。而采用融合算法可以充分利用加速度计不受外部电磁信号干扰的特性,获得更加可靠的变形序列。基于融合算法处理后的位移序列可以看出,ZQA2监测点位移序列水平方向波动小于5 mm,高程方向波动小于2 cm,综合该监测点所处的复杂环境,可认为此次地震没有对该监测站造成明显位移影响。在加速度方面,可以看出地震主震对舟曲监测点位造成了峰值为0.02 m/s^{2}的加速度波动,与余震对黑方台地区的影响相当(图9)。

3.2 地震加速度对滑坡产生的能量分析

为了进一步分析地震波能量对滑坡的破坏性,本文选择Morlet小波作为母小波函数,获取平移参数a与频率f之间的唯一关系,进而保证时频分析中的准确性[32]。

本文采集了距离震中64 km的黑方台区域GNSS/加速度计多源观测数据,并对捕获的加速度信号采用小波变换进行分析。图11是对主震

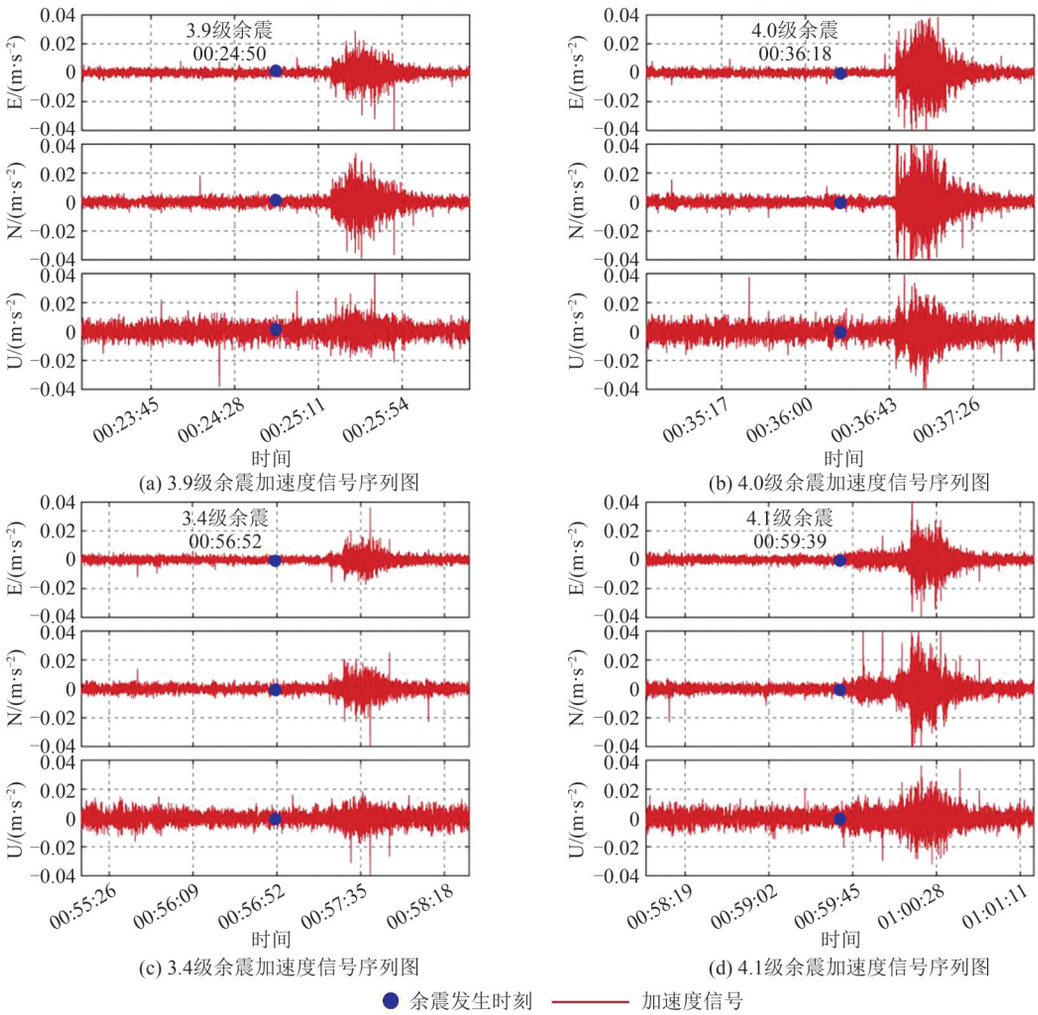


图 9　4 次余震时 HF03 监测点加速度信号序列图

Fig. 9　Acceleration Signal Time Series of HF03 Monitoring Station During the Four Aftershocks

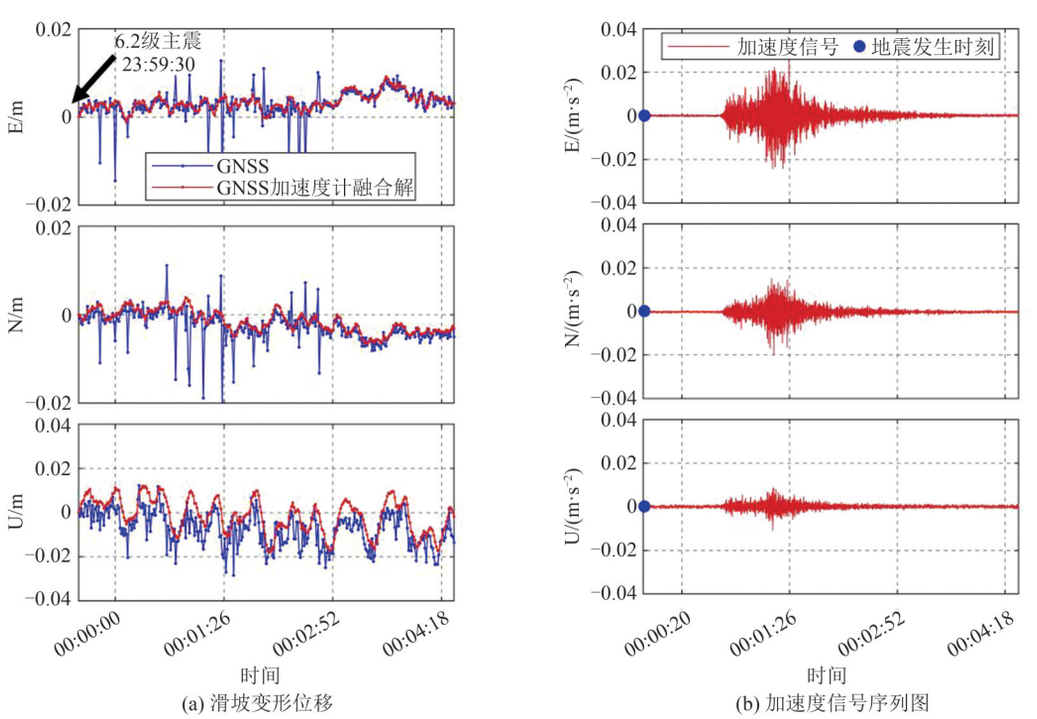


图 10　主震时 ZQA2 监测点滑坡变形位移和加速度信号序列图

Fig. 10　Deformation Displacement and Acceleration Signal Time Series of ZQA2 Monitoring Station During the Main Shock

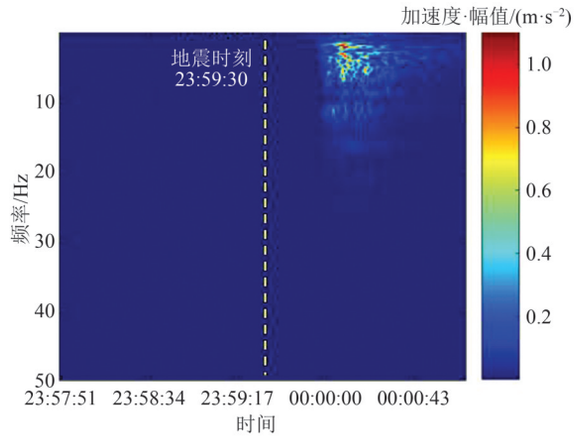


图11 黑方台地区捕获的主震加速度信号的时频图

Fig. 11 Time-Frequency Diagram of the Main Shock Acceleration Signal Captured in the Heifangtai Area

前、后200 s加速度序列进行分析得到的0～50 Hz信号能量变化,可以发现加速度信号的频率主要集中在0～15 Hz,说明地震震动信号的频率主要集中在0～15 Hz范围内,故可采用更高频率的GNSS接收机对同震滑坡灾害进行监测。时频图的颜色深浅表示加速度幅值大小,可以看出较大的能量主要集中在00:00:04—00:00:26时间段内,说明该时间段对应着一个冲击事件,经过进一步分析,该时间与地震波传播到该点的时刻较为一致。此外,从该时段内GNSS获得的变形位移序列可以发现永久位移(图3(b)),再次说明该地震产生的能量对滑坡体稳定性造成了影响。

图12(a)～12(d)分别对应中国地震台网公布的4次较大余震的时频图,与积石山4次余震产生时刻相比仍然具有一定滞后性。结合图9进行分析,4次余震均对监测点位造成异常扰动,从加速度幅值来看,4次余震峰值均小于0.06 m/s²,显著小于主震。结合GNSS变形位移序列进行分析,没有捕获到明显永久位移变化,说明余震对监测点位位移变形影响很小。但是结合4次余震的加速度时频图进行分析,地震波到达监测点位前后时段内,振动频率和振动幅度均产生一定变化。地震波到达前,加速度计获取的振动幅值在0.005 m/s²附近,主要振动频率为7.42 Hz,可认为该振动为加速度计背景噪声。在地震波到达时,加速度幅值变大,达到0.06 m/s²,主要振动频率在0～15 Hz范围内,产生了异常扰动,说明4次余震对该滑坡体均造成了一定影响,该异常扰动有可能对临滑边坡造成潜在的威胁。

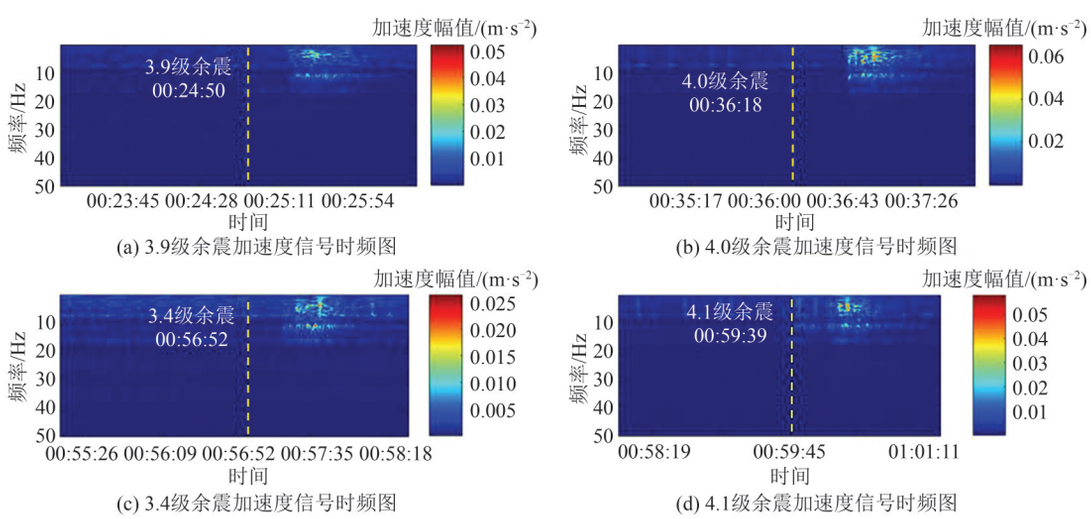


图12 甘肃黑方台地区捕获的4次余震加速度信号的时频图

Fig. 12 Time-Frequency Diagrams of the Four Aftershocks Acceleration Signal Captured in the Heifangtai Area

舟曲大小湾滑坡两个GNSS加速度计监测点ZQA1和ZQA2距离震中约240 km,均捕捉到了地震波信号,峰值均小于0.03 m/s²,与黑方台地区的4次余震量级接近。在主震期间,从GNSS变形序列图中没有发现显著的永久位移变化,说明主震地震波对该滑坡体的变形位移影响很小,但是结合图10和图13进行分析,主震期间加速度计捕获到了异常扰动,说明主震对该滑坡体造成了一定影响。

4 结 语

本文对2023年甘肃积石山地震做出快速响应,充分采集4处积石山地震远场滑坡GNSS监测数据和加速度数据,利用GNSS加速度计融合处理方法以及小波变换,即时获取到滑坡监测点震前、震中、震后的变形位移和加速度信息,分析了此次地震的主震及余震对不同距离远场边坡的影响。实验分析结果总结如下:

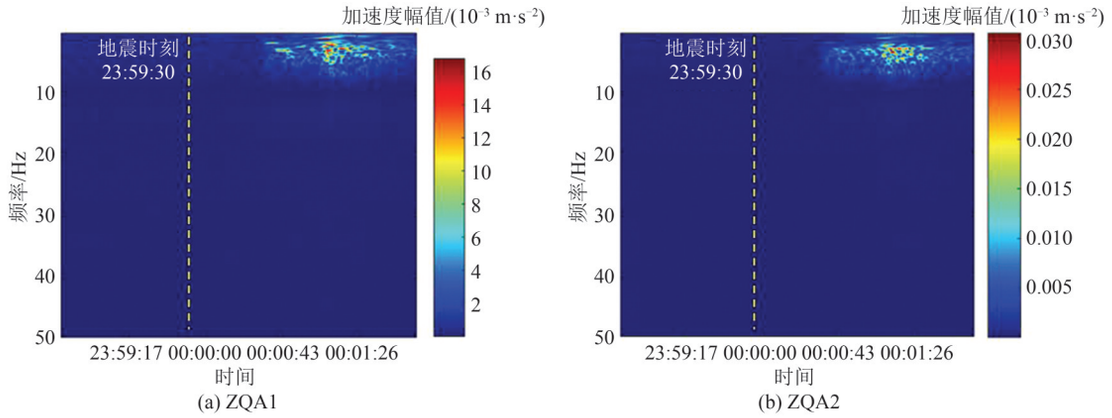


图 13　主震加速度信号的时频图

Fig. 13　Time-Frequency Diagrams of the Main Shock Acceleration Signal

1）积石山地震对震源 64 km 以内的滑坡影响较为显著，尤其对历史变形明显的点位影响更为严重，地震导致黑方台滑坡平面方向弹性回跳峰值达 1 cm，永久性位移达 0.5 cm，增加了滑坡失稳风险。然而仅从位移指标来看，地震对震源 64 km 以外的滑坡影响较轻，对整体变形状态影响有限，但是仍有可能对临滑边坡造成潜在的威胁。建议对 64 km 以内滑坡灾害开展勘察评估工作，并在此基础上适当扩大勘察范围。

2）利用小波变换分析主震及余震的加速度信号，得到震时的时频信息显示，距震源 240 km 以外的舟曲滑坡同样监测到明显的冲击事件，捕捉到的振动频率在 0～10 Hz 之间，加速度峰值达 0.035 m/s²，会增加滑坡易发区的失稳风险。

3）从 GNSS 变形位移和加速度信号来看，此次地震对滑坡造成的水平方向位移和振动较为显著，高程方向受限于 GNSS 监测精度没有呈现较为明显的位移，但其对震中区域的破坏和影响仍然是不容忽视的。

本文利用实时 GNSS 和加速度数据对 2023 年积石山地震进行快速响应，对同震灾害链中远场易发区滑坡潜在危害性进行评估，为隐患排除、灾情预警提供及时、准确、稳定的保障。后期也将持续关注震区远场滑坡位移序列，对地震灾害对滑坡易发区的长期影响进行深入分析。

参　考　文　献

[1] FENG G C, LI Z W, SHAN X J, et al. Geodetic Model of the 2015 April 25 Mw 7.8 Gorkha Nepal Earthquake and Mw 7.3 Aftershock Estimated from InSAR and GPS Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(2): 896-900.

[2] 张晓超，裴向军，张茂省，等. 强震触发黄土滑坡流滑机理的试验研究：以宁夏党家岔滑坡为例[J]. 工程地质学报，2018，26(5)：1219-1226.
ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, ZHANG Maosheng, et al. Experimental Study on Mechanism of Flow Slide of Loess Landslides Triggered by Strong Earthquake—A Case Study in Dangjiacha, Ningxia Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1219-1226.

[3] 王家鼎，张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报，1999，21(6)：670-674.
WANG Jiading, ZHANG Zhuoyuan. A Study on the Mechanism of High Speed Loess Landslide Induced by Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 670-674.

[4] ZHUANG W Q, CUI D X, HAO M, et al. Geodetic Constraints on Contemporary Three-Dimensional Crustal Deformation in the Laji Shan - Jishi Shan Tectonic Belt[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2023, 14(6): 589-596.

[5] 李智敏，李延京，田勤俭，等. 拉脊山断裂古地震与喇家遗址灾变事件关系研究[J]. 地震研究，2014，37(S1)：109-115.
LI Zhimin, LI Yanjing, TIAN Qinjian, et al. Study on the Relationship Between Paleoseismic on Laji Mountain Fault and Catastrophic Event on Lajiashan Site[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(S1): 109-115.

[6] 中国科学院青藏高原研究所. 甘肃临夏M 6.2级地震震源破裂过程反演初步结果[EB/OL]. (2023-12-19). https://mp.weixin.qq.com/s/SuKbTgq8-0EV2FbNcdlYqQ.
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences. Preliminary Results of the Inversion of the Rupture Process of the Seismic Source of the Gansu Linxia M 6.2 Magnitude Earthquake[EB/OL]. (2023-12-19). https://mp.weixin.qq.com/

s/SuKbTgq8-0EV2FbNcdlYqQ.

[7] 复合链生自然灾害. 同震滑坡发生概率! 2023年12月18日甘肃临夏积石山县Ms 6.2地震[EB/OL]. (2023-12-20). https://mp.weixin.qq.com/s/D4nDhPw_MAoNN54YBGsQ4g.
National Institute of Natural Hazards. Probability of Coseismic Landslides! December 18, 2023 Ms 6.2 Earthquake in Jishishan County, Gansu, China[EB/OL]. (2023-12-20). https://mp.weixin.qq.com/s/D4nDhPw_MAoNN54YBGsQ4g.

[8] 清华大学陆新征课题组. RED-ACT |12月18日夜甘肃6.2级地震破坏力分析[EB/OL]. (2023-12-19). https://mp.weixin.qq.com/s/oZJDAaFtOPm33mF38fRIKA.
Lu Xinzheng Research Group, Tsinghua University. RED-ACT |Analysis of the Destructive Power of the 6.2-Magnitude Earthquake in Gansu on the Night of December 18th[EB/OL]. (2023-12-19). https://mp.weixin.qq.com/s/oZJDAaFtOPm33mF38fRIKA.

[9] 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室. 甘肃积石山6.2级地震诱发地质灾害空间概率预测[EB/OL]. (2023-12-19). https://www.sklgp.cdut.edu.cn/info/1025/6599.htm.
State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection. Spatial Probability Prediction of Geologic Hazards Induced by the 6.2 Magnitude Earthquake in Jishishan, Gansu Province[EB/OL]. (2023-12-19). https://www.sklgp.cdut.edu.cn/info/1025/6599.htm.

[10] 湖北地震局. 2023年12月18日甘肃临夏M 6.2地震GNSS快速响应[EB/OL]. (2023-12-20). https://mp.weixin.qq.com/s/xvZUVy4rHqeAqlEzeulY6A.
Hubei Earthquake Agency. GNSS Rapid Response to the December 18, 2023 Gansu Linxia M 6.2 Earthquake[EB/OL]. (2023-12-20). https://mp.weixin.qq.com/s/xvZUVy4rHqeAqlEzeulY6A.

[11] FAN X M, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421-503.

[12] WU Z L, MA T F, JIANG H, et al. Multi-scale Seismic Hazard and Risk in the China Mainland with Implication for the Preparedness, Mitigation, and Management of Earthquake Disasters: An Overview[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2013, 4: 21-33.

[13] 张勤, 白正伟, 黄观文, 等. GNSS滑坡监测预警技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 1985-2000.
ZHANG Qin, BAI Zhengwei, HUANG Guanwen, et al. Review of GNSS Landslide Monitoring and Early Warning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 1985-2000.

[14] HUANG G W, DU S, WANG D. GNSS Techniques for Real-Time Monitoring of Landslides: A Review[J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 5.

[15] LIU X H, DU Y, HUANG G W, et al. Mitigating GNSS Multipath in Landslide Areas: A Novel Approach Considering Mutation Points at Different Stages[J]. *Landslides*, 2023, 20(11): 2497-2510.

[16] 白正伟, 张勤, 黄观文, 等. "轻终端+行业云"的实时北斗滑坡监测技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(11): 1424-1429.
BAI Zhengwei, ZHANG Qin, HUANG Guanwen, et al. Real-Time BeiDou Landslide Monitoring Technology of "Light Terminal Plus Industry Cloud"[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(11): 1424-1429.

[17] 杜源, 王纯, 张勤, 等. 顾及黄土滑坡灾害状态特征的实时GNSS滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1216-1222.
DU Yuan, WANG Chun, ZHANG Qin, et al. Real-Time GNSS Filtering Algorithm Considering State Characteristics of Loess Landslide Hazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1216-1222.

[18] 魏正发, 张俊才, 曹小岩, 等. 青海西宁南北山滑坡、崩塌成因及影响分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 47-55.
WEI Zhengfa, ZHANG Juncai, CAO Xiaoyan, et al. Causes and Influential Factor Analysis of Landslides and Rockfalls in North & South Mountain Areas of Xining City, Qinghai Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 47-55.

[19] 代聪, 李为乐, 陆会燕, 等. 甘肃省舟曲县城周边活动滑坡InSAR探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 994-1002.
DAI Cong, LI Weile, LU Huiyan, et al. Active Landslides Detection in Zhouqu County, Gansu Province Using InSAR Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 994-1002.

[20] DU Y, HUANG G W, ZHANG Q, et al. A New Asynchronous RTK Method to Mitigate Base Station Observation Outages[J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3376.

[21] 王铎, 黄观文, 杜源, 等. 顾及运动状态改正的GNSS滑坡监测基准站切换方法[J]. 测绘学报,

2022, 51(10): 2117-2124.
WANG Duo, HUANG Guanwen, DU Yuan, et al. Switching Method of GNSS Landslide Monitoring Reference Station Considering the Correction of Motion State[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2117-2124.

[22] WANG D, HUANG G W, DU Y, et al. Stability Analysis of Reference Station and Compensation for Monitoring Stations in GNSS Landslide Monitoring [J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 29.

[23] BOCK Y, MELGAR D, CROWELL B W. Real-Time Strong-Motion Broadband Displacements from Collocated GPS and Accelerometers[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(6): 2904-2925.

[24] GENG J H, BOCK Y, MELGAR D, et al. A New Seismogeodetic Approach Applied to GPS and Accelerometer Observations of the 2012 Brawley Seismic Swarm: Implications for Earthquake Early Warning [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(7): 2124-2142.

[25] 景策, 黄观文, 张勤, 等. 方差膨胀模型用于GNSS/加速度计融合变形监测[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(5): 491-497.
JING Ce, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, et al. GNSS/Accelerometer Fusion Deformation Monitoring Based on Variance Inflation Model[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(5): 491-497.

[26] JING C, HUANG G W, ZHANG Q, et al. GNSS/Accelerometer Adaptive Coupled Landslide Deformation Monitoring Technology [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3537.

[27] JING C, HUANG G W, LI X, et al. GNSS/Accelerometer Integrated Deformation Monitoring Algorithm Based on Sensors Adaptive Noise Modeling [J]. *Measurement*, 2023, 218: 113179.

[28] 匡翠林, 戴吾蛟. GPS监测高层建筑风致振动变形及小波应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(9): 1024-1028.
KUANG Cuilin, DAI Wujiao. Measurement of Wind-Induced Vibration of Tall Buildings Using GPS and Wavelet Application [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(9): 1024-1028.

[29] KIJEWSKI T, KAREEM A. Wavelet Transforms for System Identification in Civil Engineering [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2003, 18(5): 339-355.

[30] SHAO X Y, XU C. Earthquake-Induced Landslides Susceptibility Assessment: A Review of the State-of-the-Art [J]. *Natural Hazards Research*, 2022, 2(3): 172-182.

[31] NOWICKI JESSEE M A, HAMBURGER M W, FERRARA M R, et al. A Global Dataset and Model of Earthquake-Induced Landslide Fatalities [J]. *Landslides*, 2020, 17(6): 1363-1376.

[32] MEO M, ZUMPANO G, MENG X L, et al. Measurements of Dynamic Properties of a Medium Span Suspension Bridge by Using the Wavelet Transforms [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(5): 1112-1133.