引文格式:赵庆志,王鹏程,姚宜斌,等.甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡形变及近地空间环境影响分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):247-256.DOI:10.13203/j.whugis20240080

Citation:ZHAO Qingzhi,WANG Pengcheng,YAO Yibin,et al.Impact Analysis of the Ms 6.2 Earthquake on Landslide Deformation and Near-Earth Space Environment in Jishishan,Gansu Province[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):247-256.DOI:10.13203/j.whugis20240080

甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡形变及近地空间环境影响分析

赵庆志[1] 王鹏程[1] 姚宜斌[2] 高余婷[1] 吴 侃[3] 李祖锋[4]
缪志选[4] 刘 晨[5] 王 卫[1] 孙婷婷[1] 常璐璐[1] 马 智[1]

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054
2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
3 空军军医大学航空航天医学教育部重点实验室,陕西 西安,710032
4 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安,710065
5 天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室,天津,300251

摘 要:2023-12-18甘肃省临夏回族自治州积石山发生Ms 6.2地震,为减少地震及其次生灾害对人民生命财产造成的损失,研究震后滑坡及近地空间环境变化对地震次生灾害的防治具有重要意义。采集距离震源中心51 km左右的滑坡、大坝以及基准站的全球导航卫星系统原始观测数据进行精密单点定位解算,通过统计站点位移、天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay,ZTD)和大气可降水量的变化情况,分析了地震对滑坡作用及近地空间环境的影响。实验结果表明,本次地震并未对该处滑坡造成瞬时破坏,但地震会破坏滑坡稳定性,在地震后一天部分滑坡点位缓慢位移高达10 mm以上;此外,在地震后天顶对流层延迟呈现出异常增高的变化趋势;对影响其异常变化的原因进行分析,发现气压变化对震后ZTD变化有一定影响,但其主要是由于水汽异常变化所导致,证明了地震会导致震区水汽异常增大。该研究为后续地震所引发滑坡变形和空间环境变化等相关研究提供参考。

关键词:积石山地震;全球导航卫星系统;滑坡;天顶对流层延迟;大气可降水量

中图分类号:P227;P426 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-10

DOI:10.13203/j.whugis20240080 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0247-10

Impact Analysis of the Ms 6.2 Earthquake on Landslide Deformation and Near-Earth Space Environment in Jishishan, Gansu Province

ZHAO Qingzhi[1] *WANG Pengcheng*[1] *YAO Yibin*[2] *GAO Yuting*[1] *WU Kan*[3] *LI Zufeng*[4]
MIAO Zhixuan[4] *LIU Chen*[5] *WANG Wei*[1] *SUN Tingting*[1] *CHANG Lulu*[1] *MA Zhi*[1]

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
3 School of Aerospace Medicine, Key Laboratory of Aerospace Medicine of Ministry of Education, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China
4 PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China
5 Tianjin Key Laboratory of Rail Transit Navigation Positioning and Spatiotemporal Big Data Technology, Tianjin 300251, China

Abstract: **Objectives:** An Ms 6.2 earthquake that struck Jishishan, Linxia Hui Autonomous Prefecture, Gansu Provinve on 18 December 2023 is highly prone to causing landslides and other disasters. In order to reduce the damage caused by the earthquake and its secondary disasters to people's lives and properties, it is necessary to monitor the landslide area and its near-earth spatial environment as soon as possible. **Methods:** The raw global

基金项目:国家自然科学基金(42274039,41904036,42330105,42204034);天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室开放课题基金(TKL2024B03)。

第一作者:赵庆志,博士,副教授,主要从事GNSS导航定位与空间环境气候变化相关研究。zhaoqingzhia@163.com

通信作者:姚宜斌,博士,教授。ybyao@whu.edu.cn

navigation satellite system observation data of the landslide, the dam and the re-ference station, which are about 51 km away from the epicentre of the earthquake, are collected for precise point positioning solving, and the site displacements are counted. The effects of the earthquake on the landslide and the near-earth spatial environment were studied and analyzed by counting the changes in zenith tropospheric delay (ZTD) and precipitable water vapor (PWV). **Results:** The experimental results show that the earthquake did not cause transient damage to the landslide, but the earthquake will damage the stability of the landslide, in the day after the earthquake part of the landslide site slow displacement of up to 10 mm or more. In addition, the zenith tropospheric delay after the earthquake showed anomalous increase in the trend of change, which is mainly due to the water vapour anomalous changes. **Conclusions:** The vicinity of this landslide, stations HP03 and HP04, requires timely and focused surveys to assess the potential for hazard. Long-term monitoring of other landslide sites is also required to keep abreast of the risk of landslide hazards. Since this earthquake occurred in winter, the climate is dry and the PWV value is small, there is a lack of rainfall conditions, although the ZTD and PWV changed abnormally, it will not lead to abnormal rainfall in the earthquake area, which is conducive to the rescue work after the earthquake.

Key words: Jishishan earthquake; global navigation satellite system; landslide; zenith tropospheric delay; precipitable water vapor

2023-12-18T23:59:30甘肃省临夏回族自治州积石山发生Ms 6.2地震,此次地震是该地区近年来发生的最大等级的地震。截至2023-12-20 8时,共记录到余震423次,其中3.0级及以上余震10次(https://news.ceic.ac.cn/CC20231218235930.html)。地震中心(35.70°N,102.79°E)位于甘肃省临夏市积石山柳沟乡,震源深度10 km,等震线长轴呈北北西走向,长轴124 km,短轴85 km,地震波及甘肃和青海两省的共5市、13县和超过110个乡镇[1],造成151人遇难、979人受伤[2-3]。积石山地震灾害还造成甘肃省直接经济损失5.32亿元[4]。

地震除了对人民的生命财产安全构成威胁,其所带来的滑坡、泥石流等次生灾害一样会影响当地人民的生命、生产安全[5]。地震导致空气中粉尘数量增加[6],大气质量发生变化,从而导致天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay,ZTD)及大气可降水量(precipitable water vapor,PWV)产生异常变化[7-13];地震波同样会对近地空间产生扰动[14],地震后出现降雨的概率较大[15-17],从而引发次生灾害,增加救援抢险的难度[18]。因此,研究震后滑坡及近地空间环境变化对地震次生灾害的防治具有重要意义。

积石山地震发生后,中国地震局地球物理研究所立即对地震发生的原因、地震类型和震源特征等进行了分析和认定[19];陈博等[20]利用卫星影像对灾区易发生滑坡的区域分布进行了统计研究;黄观文等[21]利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)监测站对距震源60 km以上的滑坡区域进行了形变监测和研究;李志才等[22]基于高频GNSS对地震同震形变进行了观测;许强等[23]对地震触发区域的滑坡的特征与成因机理进行了分析。虽然以上研究对于了解地震成因、防止地震导致的滑坡造成生命财产损失能提供参考,但是并未对震源较近的滑坡体变形进行分析。此外,目前尚缺乏针对积石山地震震后的近地空间环境变化的研究。因此,本文采集了距离震中51 km左右的一处滑坡区域的GNSS监测站数据以及基准站数据,重点对该区域滑坡受地震影响的程度进行了研究分析,指出受影响较严重的点位以及可能存在的隐患区域;同时,对该区域的ZTD以及PWV的变化进行研究,分析发生降雨天气的可能性,这对地震导致的滑坡和强降雨等次生灾害的防治具有重要的意义。

1 数据与处理方案

1.1 数据介绍

本文采用了2023年12月15日—21日共7天的GNSS原始观测数据,数据采样率均为15 s,其来源是距离震中51 km的一处滑坡及大坝的监测站数据。该处滑坡监测站于2023年8月建立,共包含6个滑坡点。此外,在大坝坝体上建立了7个监测点,在附近1 km处的稳定基岩上建立了3个基准点。图1给出了测站分布情况及研究区到震源中心的距离。本文利用精密单点定位(precise point positioning,PPP)技术获取监测站坐标及ZTD,

PPP的具体参数配置可参照文献[24]。利用15日和16日的观测数据进行PPP解算取均值,得到各测站点地震前的坐标参考位置。此外,本文还利用欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)的第五代再分析资料(ECMWF reanalysis v5,ERA5)提供的气温、气压及PWV对数据进行分析和评估。

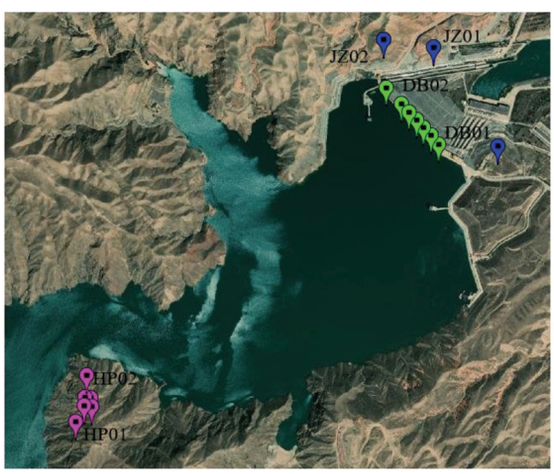


图1　滑坡/大坝监测站点地理分布图

Fig. 1　Geographical Distribution of Landslide/Dam Monitoring Sites

1.2　计算方法

1)测站位移与ZTD估计

为获取站点位移和ZTD变化,对站点数据进行了PPP无电离层组合(ionospheric-free,IF)处理,其模型方程如下[25]:

$$\begin{cases} P^s_{r,\mathrm{IF}} = \rho^s_r + t_r + t^s + m^s_{r,w}\cdot Z_{r,w} + \\ \qquad b_r - b^s + e^s_{r,\mathrm{IF}} \\ L^s_{r,\mathrm{IF}} = \rho^s_r + t_r + t^s + m^s_{r,w}\cdot Z_{r,w} + \\ \qquad B_r - B^s + \lambda_{\mathrm{IF}} N^s_{r,\mathrm{IF}} + \varepsilon^s_{r,\mathrm{IF}} \end{cases} \tag{1}$$

式中,$P^s_{r,\mathrm{IF}}$表示伪距观测量(单位:m);$L^s_{r,\mathrm{IF}}$为载波相位观测量(单位:m);ρ^s_r为星地几何距离;t_r和t^s分别为接收机和卫星钟差;$Z_{r,w}$与$m^s_{r,w}$分别表示天顶对流层湿延迟及投影函数;b_r和b^s分别表示接收机端和卫星端的伪距硬件延迟;B_r和B^s分别表示接收机端和卫星端的相位硬件延迟;$N^s_{r,\mathrm{IF}}$为整周模糊度;$e^s_{r,\mathrm{IF}}$和$\varepsilon^s_{r,\mathrm{IF}}$分别表示伪距与相位观测的测量误差、多路径、模型残余误差的总和。ZTD作为PPP的一个待估参数并非被直接估计,而是先通过经验公式计算天顶干延迟(zenith hydrostatic delay,ZHD),将ZHD作为初始值估计天顶湿延迟(zenith wet delay,ZWD),从而计算ZTD,其中ZHD计算公式如下[26]:

$$Z_{\mathrm{ZHD}} = \frac{0.002\,276\,8P}{1 - 0.002\,66\cos(2\varphi) - 0.000\,28H} \tag{2}$$

式中,P为气压;φ为站点纬度;H为测站大地高。

2)PWV计算

通过GNSS解算的ZTD和ERA5计算的ZHD即可得到ZWD,对ZWD乘以转换因子即可得到GNSS PWV,计算公式如下[26]:

$$Z_{\mathrm{ZWD}} = Z_{\mathrm{ZTD}} - Z_{\mathrm{ZHD}} \tag{3}$$

$$\Pi = \frac{1\times 10^6}{\rho_{\mathrm{water}} R_w [(k_3/T_m) + k'_2]} \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{PWV}} = \Pi * Z_{\mathrm{ZWD}} \tag{5}$$

式中,k'_2、k_3和R_w为常数,其值分别为16.48 K·hPa^{-1}、(3.776±0.014)×10^5 K^2·hPa^{-1}和461 J·kg^{-1}K^{-1};ρ_{water}是水汽密度;T_m为大气加权平均温度。

3)精度评估指标

为了验证实验中使用的GNSS PWV数据的准确性,本文利用ERA5 PWV对GNSS PWV的精度进行评估,采用偏差(B)、平均绝对偏差(M)与均方根误差(R)作为评价指标,其计算公式如下:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{\mathrm{PWV\ GNSS},i} - P_{\mathrm{PWV\ ERA5},i})}{n} \tag{6}$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|P_{\mathrm{PWV\ GNSS},i} - P_{\mathrm{PWV\ ERA5},i}\right|}{n} \tag{7}$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{\mathrm{PWV\ GNSS},i} - P_{\mathrm{PWV\ ERA5},i})^2}{n}} \tag{8}$$

式中,n为PWV值个数。

2　滑坡位移及空间ZTD变化分析

2.1　滑坡体地震前后站点位移分析

为了证明地震会对滑坡产生影响,对该区域地震当天的16个观测站数据进行分析。图2给出了DB01、DB02、JZ01、JZ02、HP01和HP02 6个站点地震发生前后2 h E、N、U方向位移变化图。由图2可知,基准站及大坝站坐标在震前、震中、震后都保持平稳变化,其最大变化不超过2 mm。滑坡站点解算结果明显有所不同,HP01和HP02从结果上来看其位移波动明显比较大,其精度略差于基准站。HP01在E方向与U方向误差较小,但在N方向误差明显较大,平均误差超过5 mm;HP02站点解算结果显示,U方向表现平稳,E、N方向相较于基准站和大坝站均变化更大,但变化均在±5 mm之内,时间超过10 min,并不符合地

震波的瞬时波动情况,且坐标在地震前后无明显偏移,表明本次地震对滑坡无明显瞬时影响。为了探究余震对上述站点的影响情况,对4次较大的余震时间在时间轴上进行了显示,4次余震的协调世界时(coordinated universal time,UTC)分别为16:24、16:36、16:43以及16:59;最终结果表明,余震结果与主震类似,均未对上述站点造成明显瞬时影响。这与数据有一定关系,本文所使用的数据采样率为15 s,地震波到达时间不超过30 s,且持续时间小于15 s,故在数据中并不能体现出其地震期间站点波动的情况,但依然需要观测地震对站点的长期影响。

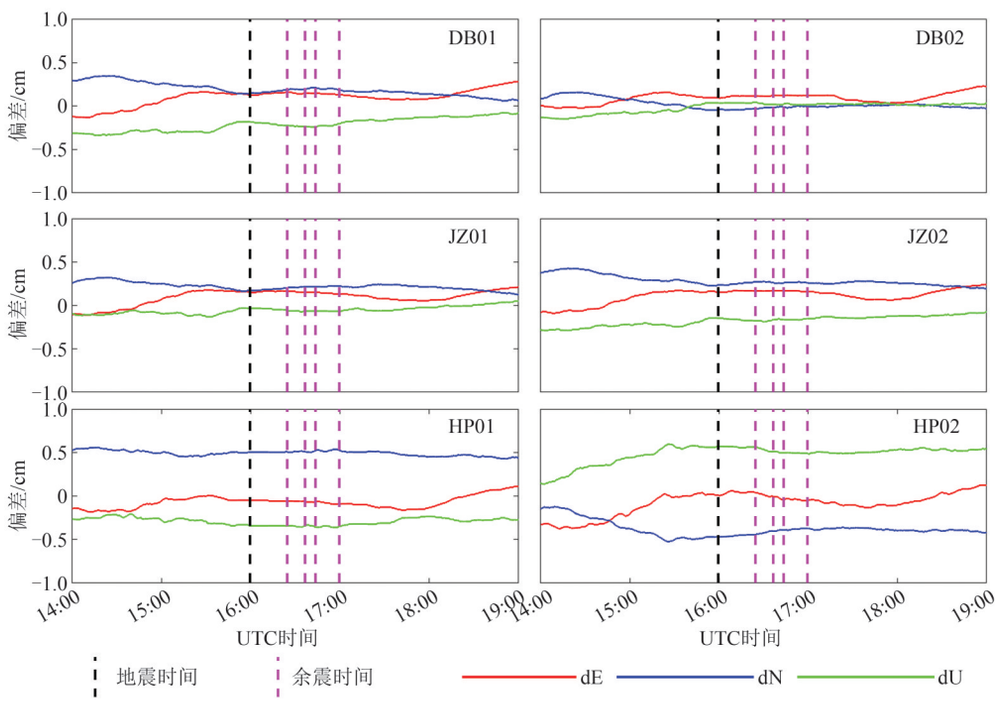
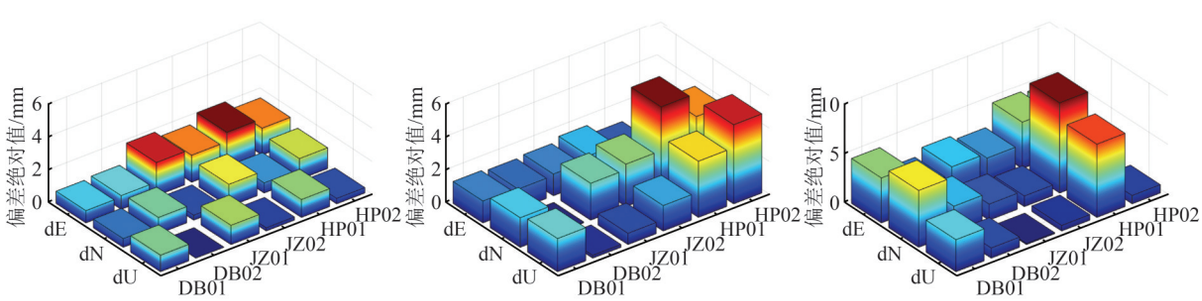


图2 2023-12-18 6个站点E、N、U方向位移变化时序图

Fig. 2 Temporal Diagram of E, N, and U Displacement Changes of the Six Stations on December 18, 2023

短期内地震或许并未对监测站造成明显变化,但需要考虑地震对滑坡内部孔隙构造的影响。为了确定是否对内部结构发生破坏,防止地震次生灾害造成更大损失,对地震前后的滑坡分别进行一天的位移监测,图3给出了地震前后一天及地震当天的总位移变化量。图3(a)为地震前一天的站点位移变化统计,可以看出,各类型站点均有小幅度变化,但都不超过3 mm,在PPP解算误差的变化范围内。图3(b)为地震当天的位移变化,可以明显看出在HP01和HP02站点有明显的位移,特别是N、U方向有接近6 mm的变化,其他站点均变化正常。图3(c)为地震后一天累积变化,可以看出,在DB01站的E、N方向位移均有5 mm左右的变化;而HP01的E方向也有5 mm的变化,变化最大的为该站点N方向,有接近10 mm的变化,这表明地震加剧了滑坡的失稳。因此,对于HP01站点,建议及时进行监测,从而更好地进行风险把控。



(a) 地震前一天位移变化 (b) 地震当天位移变化 (c) 地震后一天累积变化

图3 2023年12月17日—19日6个站点E、N、U方向位移变化偏差绝对值

Fig. 3 Absolute Deviation of Displacement in E, N, and U Directions of Six Stations from December 17 to 19, 2023

为了解站点地震前、后位移变化情况,对所有的站点地震前、后一天的位移变化进行了统计,表1给出了地震前、后站点累积位移变化的统计结果。由表1可知,地震对基站基本无影响,对大坝的影响较小,对滑坡的影响最为严重。地震发生前一天,3处基准站的位移变化保持平稳,最大为JZ03的E方向存在−3 mm位移变化,大坝点在E、N、U 3个方向最大位移不超过3 mm,而滑坡点相对来说不够稳定,其中HP03点在E、N、U 3个方向变化均超过7 mm,HP05和HP06在N方向也存在4 mm以上的位移变化;地震当天基准点同样保持平稳,但大坝点发生了一定的变化,其中DB03点在N和U方向分别有−6.2 mm和4.9 mm的位移变化,其余大坝点保持平稳,滑坡点变化较大,HP03在U方向存在9.9 mm的变化,HP04点在E方向存在−9.9 mm的变化;此外,HP05、HP06在U方向亦存在−13.2 mm、−8.6 mm的位移变化;地震后一天基准点保持平稳,大坝点仅DB03的U方向存在11.6 mm位移变化,其余点为稳定,但滑坡点均存在大小不一的位移变化,其中HP03、HP04点位位移变化最大,相对于原坐标HP03点N方向变化15.9 mm,U方向变化−22.8 mm,而在前一天的位移基础上,N方向变化超过20 mm,U方向更是达到−32.7 mm位移变化,其他滑坡点同样有着接近10 mm左右的位移变化。上述结果表明,基准点最稳定,地震几乎对其未造成影响;大坝点较为稳定,个别点位在地震的影响下出现了位移变化;而滑坡点最不稳定,本身在没有外界的影响下就有部分点位存在微小变化,地震更是加剧了这一变化幅度,使得滑坡失稳,造成更大的位移变化。建议对HP03、HP04站进行重点跟踪监测,确保其无发生滑坡的风险,其余滑坡点也要进行风险监测评估。

表1　2023年12月17日—19日16个站点在E、N、U方向的累积位移变化统计表

Table 1　Statistics of Cumulative Displacement Changes of 16 Stations in the E, N, and U Directions on December 17 to 19, 2023

站点名	dE/mm			dN/mm			dU/mm		
	17日	18日	19日	17日	18日	19日	17日	18日	19日
DB01	−0.07	1.3	4.5	0.052	1.8	−5.7	1	−2	3.2
DB02	−0.08	1.2	2.2	0.098	−0.05	−2.8	−0.47	0.17	1
DB03	−2.9	1.6	4.3	0.048	−6.2	−14.5	1.3	4.9	11.6
DB04	−2.1	−0.31	3.3	−1.5	−2.4	−3	2	1.5	1.4
DB05	−1.1	−0.19	3.3	2.1	−0.26	−4.5	−0.75	0.89	2.1
DB06	−2.3	1.8	0.94	0.14	0.31	−2.5	1.1	0.49	0.75
DB07	−1.8	1.2	0.73	0.56	1.2	−1.8	0.47	−1.1	0.42
JZ01	−2	1.3	2.9	0.29	2.2	−1.6	1.2	−0.68	−0.1
JZ02	−1.6	1.6	2.4	1.3	2.6	−1.1	−0.19	−1.5	−0.55
JZ03	−3	−0.07	2.6	0.84	2.3	−2.3	0.97	−1.4	1.6
HP01	−2.2	−1	4.7	0.61	5.2	−9.1	1.1	−3.4	7.4
HP02	−1.6	−0.43	4.5	1.3	−3.8	−0.36	−0.32	4.8	−0.84
HP03	8.6	2.1	−1.5	−8	−4.8	15.9	7.4	9.9	−22.8
HP04	−3.1	−9.9	14.6	1.5	−0.21	−5.3	1.1	4.7	2
HP05	−2.5	1.9	−0.82	4.6	13.9	−8.2	−0.6	−13.2	6.5
HP06	−2.3	−1.9	4.2	5.3	8.8	−9.7	−3.3	−8.6	8.3

综上可知,地震有加剧滑坡失稳的风险。对基准站来说,在距离震源51 km的情况下,该地震并不会对其站点及附近区域产生破坏;但对大坝来说,地震依然可能会对其产生缓慢、长期的微小位移;地震对滑坡造成的破坏最大,短期来看地震并未对监测站点造成明显的位移变化,但由于地震对滑坡内部地质体结构造成了破坏,从而导致滑坡发生缓慢形变。对该滑坡体而言,HP03和HP04站附近需要及时进行重点勘测,评估其发生危险的可能性。同时,对其他滑坡站点亦需要长期监测,以随时掌握发生滑坡灾害的风险。

2.2　地震前后空间ZTD变化

为了分析地震对空间的影响,分别选取滑坡、大坝及基准站估计天顶对流层延迟ZTD,并对其进行每小时取均值处理。图4给出了不同站点7天的ZTD变化趋势,其中绿色虚线代表其他天的地震相同时刻。地震时刻为23:59:30,在地震当天,该时刻往后的ZTD与地震前、后3天有

明显不同。地震发生的前、后3天,该时刻往后ZTD呈下降趋势,而在地震当天,该时刻后的ZTD总体呈现上升趋势。在地震的前3天,从凌晨开始,ZTD开始下降,平均下降超过1 cm。DB01、DB02以及HP01最大下降达到2 cm。地震后3天与前3天的变化趋势相同,DB02、JZ02以及HP02的最大下降均超过2 cm,其余站点也有明显下降趋势。地震当天,ZTD自地震时刻后开始有了明显的异常变化,HP02站点ZTD均值基本保持不变,其余在大部分站点ZTD均值出现略微上升趋势,这与已知ZTD变化周期不符。此外,在DB01、JZ02以及HP01站点,ZTD呈现明显增长趋势,最大增长超过1.5 cm,平均增长0.5 cm。

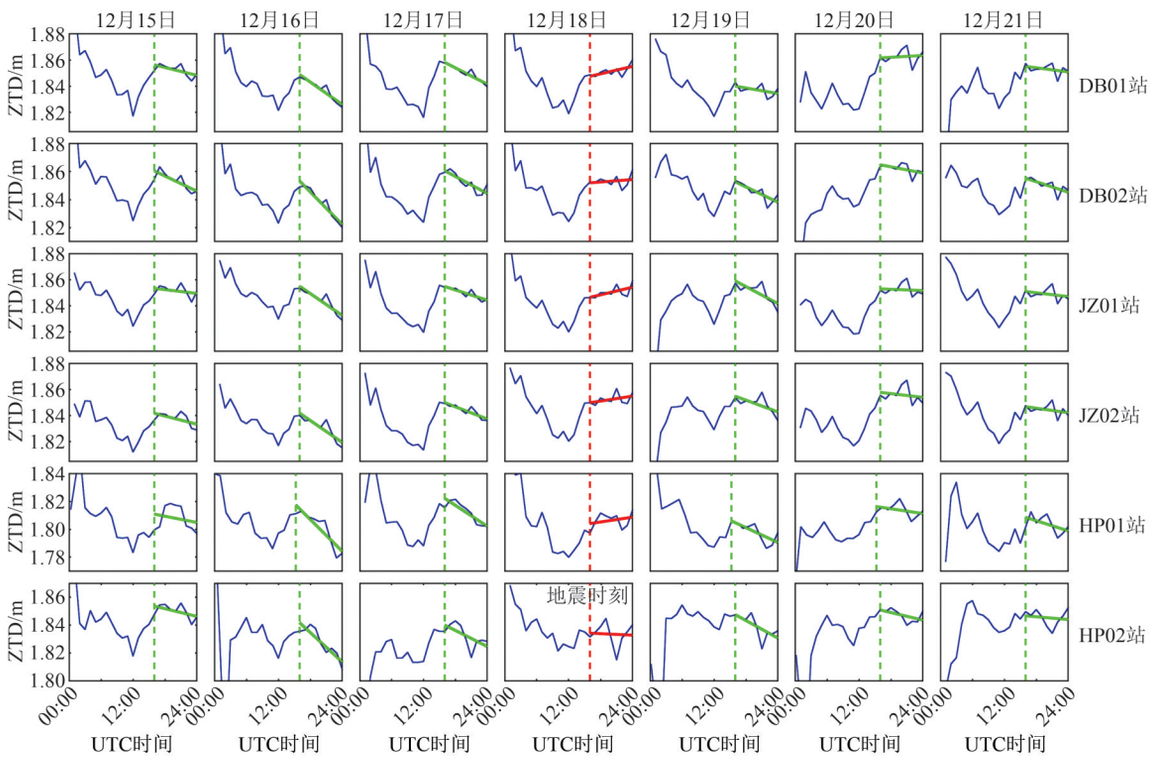


图4 2023年12月15日—21日6个站点ZTD时序变化图

Fig. 4 ZTD Time Series of Six Sites from December 15 to 21, 2023

综上,地震当天ZTD变化出现了明显异常,其变化趋势与前后3天的在地震同时刻之后完全相反。为进一步分析ZTD异常变化的原因,利用ERA5计算了地震当天及前、后一天的气温、气压数据,以此来判断是否是大气参量改变导致的ZTD发生异常变化。

2.3 ZTD异常变化原因分析

由于ZTD为ZHD和ZWD两部分组成,为确定ZTD异常变化与地震之间的关系,需要对影响ZHD和ZWD的主要参数进行分析。首先对影响ZHD最大的变量气温、气压进行分析。由于研究区范围及高程差异较小,因此选择研究区中心温度气压变化代表整个研究区。图5给出了滑坡附近地震前、后一天的气温、气压变化。其中,图5为该滑坡附近3天气温、气压变化趋势图,可以看出,气温在这3天呈现出先上升再下降的变化趋势,且3天的气温变化高度一致,这表明ZTD变化与气温无关;气压变化趋势基本一致,其中地震前一天与后一天在地震同时刻后下降较为明显;而在地震当天,气压在地震后明显有所波动,但仍旧呈现略微下降趋势,只是相对不够明显,这说明ZTD在地震当天受到了气压变化的影响,但是气压并非是使ZTD趋势发生改变的最大影响因素。此外,从该图能够反映出地震波或可能会导致气压在一定程度上发生变化。根据气温、气压变化趋势可知,地震当天,两者变化均与前、后一天的变化趋势基本保持一致,气压在地震发生后有不同的微小变化,故ZTD的异常变化与气温关系不大,与气压的变化有一定关系。因此,从上述分析中可以基本推断ZTD的异常变化与ZHD关系较小,故需对影响ZWD的因素进行分析。

ZWD的大小主要与水汽相关,因此利用ERA5数据及GNSS ZTD数据对PWV进行了反演。为验证GNSS PWV的可靠性,利用ERA5提供的PWV数据进行对比。图6给出了2023年12月15日—21日6个站点GNSS PWV与ERA5 PWV之间残差的

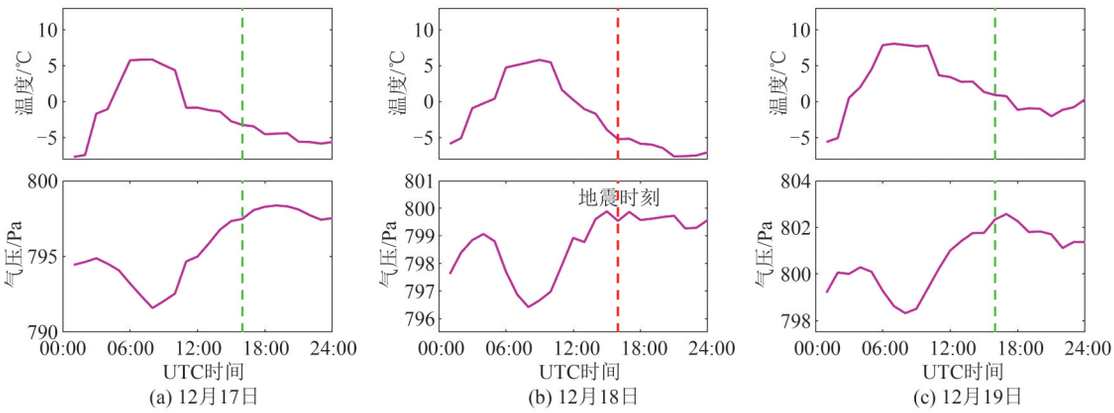


图5　2023年12月17日－19日滑坡区域内平均气温、气压时序变化图

Fig. 5　Temporal Variation of Mean Air Temperature and Pressure in the Landslide Area from December 17 to 19, 2023

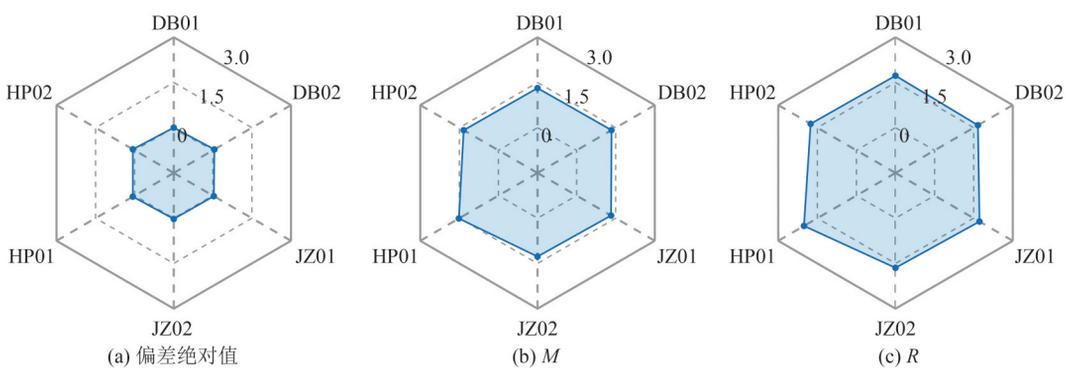


图6　2023年12月15日－21日6个站点GNSS PWV与ERA5 PWV之间残差的偏差绝对值、M和R

Fig. 6　Absolute Bias, M, and R of the Residuals Between GNSS PWV and ERA5 PWV at Six Stations from December 15 to 21, 2023

偏差绝对值、M和R，其中两者的偏差绝对值最大不超过0.5 mm，平均为0.044 mm；M变化约1.5 mm；R最大为2 mm左右，最小为1.6 mm。这表明GNSS PWV与ERA5 PWV之间的误差很小，计算的GNSS PWV有较高的可靠性。

为确定ZTD异常变化与水汽的关系，对PWV在地震前、后的变化进行分析，图7给出了地震当天及前、后3天站点PWV的变化趋势。从图7中可以明显发现，PWV的变化趋势与ZTD基本一致，地震当天均在地震同时刻与前、后3天出现了相反的变化趋势。在地震前、后3天同时刻往后，PWV平均下降超过2 mm；但地震当天PWV异常上升，最大超过1 mm，这表明地震在某种程度上影响了大气中的水汽含量，进一步导致ZWD异常变化，从而最终导致ZTD发生了异常变化。

综上所述，地震会导致空间ZTD发生异常变化。具体来说，地震会导致气压出现一定程度的变化，影响到ZHD，但主要会导致PWV发生异常变化，影响ZWD，从而使得ZTD异常增大。出现上述异常的原因可能是由于地震波会对空中释放能量，造成空气扰动从而导致气压发生波动；此外，因地震发生房屋坍塌等会导致空气中的粉尘和微粒大大增加，其中一部分会升上高空，作为水汽的凝结素，从而导致PWV发生异常变化，聚集到一定程度后，便可能发生降雨事件。但由于本次地震发生在冬季，气候干燥，且PWV值较小，缺乏降雨发生条件，故虽然ZTD及PWV发生了异常变化，但不会导致震区出现异常降雨，有利于地震后续的救援工作的展开。

3　结　语

本文以距离震区中心51 km左右的一处滑坡为例，详细分析了地震前、后该处滑坡监测站的位移变化。首先，对地震当天及前、后1天的站点位移数据进行了统计，发现本次地震对该滑坡未立即造成影响但存在缓慢位移，证明地震对滑坡体有加剧失稳的影响；然后对站点连续7天的ZTD变化进行分析，发现地震当天ZTD发生了异常变化；最后，利用ERA5数据对震区的气温、气压及PWV变化进行分析，进一步证明了ZTD异常变化是由于地震导致的，同样证明了地震有可能导致异常降水。

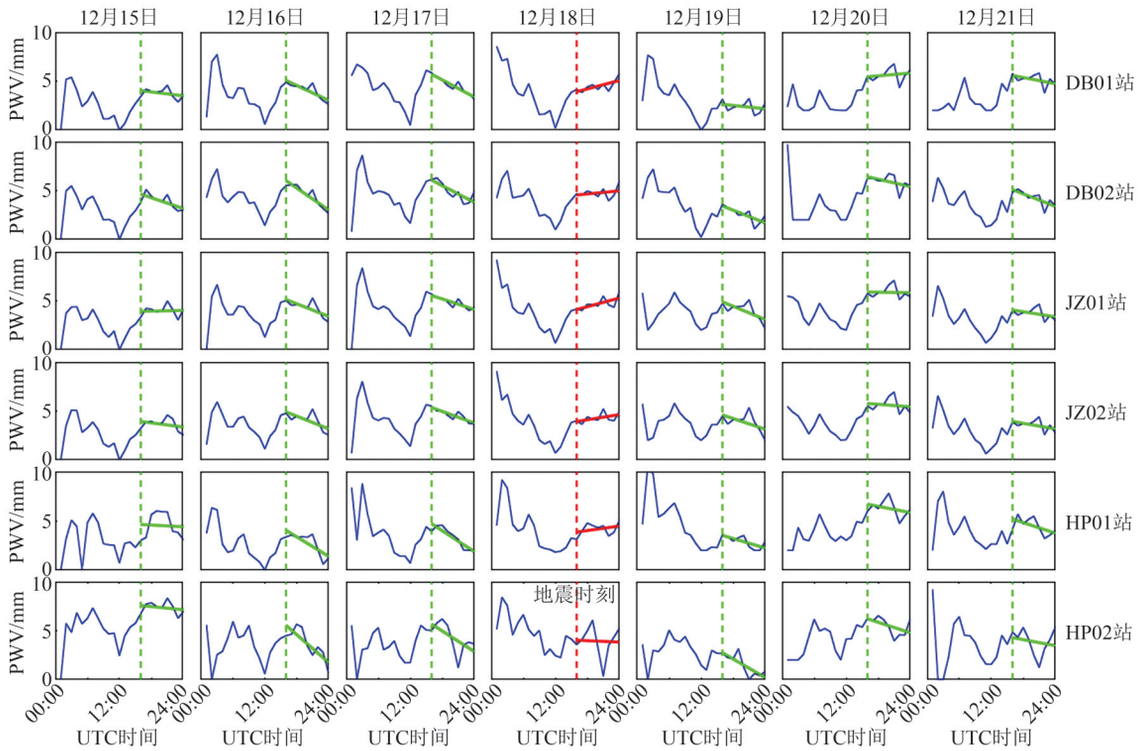


图7 2023年12月15日—21日6个站点PWV时序变化图

Fig. 7 Time Series of PWV at Six Stations from December 15 to 21, 2023

实验分析表明:(1)积石山地震对该滑坡并未产生瞬时位移变化,但地震可能会破坏山体内部孔隙构造,从而加剧滑坡失稳,使得滑坡产生缓慢形变。积石山地震对该处基准站点几乎无影响,对大坝点产生了小幅度影响,对滑坡影响最大。(2)积石山地震导致该区域ZTD产生了明显的异常变化。在地震发生的前、后3天,ZTD变化为先降低再增大最后降低,而地震当天ZTD最后的变化呈现增长的趋势。(3)导致ZTD发生异常变化的原因与气温无关,与气压有一定关系,与水汽变化关系最大。在地震时刻后气压发生异常波动,但依然呈现下降趋势,PWV在地震时刻后呈现出异常上升的变化。由此推断,地震波会导致空气气压发生波动,地震也会使得近地空间粉尘含量增大,具体表现为PWV和ZTD在地震后的异常增大。

致谢:感谢中国地震台网提供相关地震信息,以及ECMWF提供的气象参数。

参 考 文 献

[1] 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)[2024-03-08]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml.
The Ministry of Emergency Management Released the 6.2 Magnitude Seismic Intensity Map of Jishishan in Gansu Province[EB/OL]. (2023-12-22)[2024-03-08]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml.

[2] 积石山6.2级地震最后两名失联人员已找到[EB/OL]. (2023-12-31)[2024-03-08]. https://news.cctv.com/2023/12/31/ARTIYqlIxUyTnbdQ2Nirren4231231.shtml.
The Last Two Missing People in the 6.2 Magnitude Earthquake in Jishishan have Been Found[EB/OL]. (2023-12-31)[2024-03-08]. https://news.cctv.com/2023/12/31/ARTIYqlIxUyTnbdQ2Nirren4231231.shtml.

[3] 积石山6.2级地震已造成甘肃117人遇难[EB/OL]. (2023-12-22)[2024-03-08]. https://news.cctv.com/2023/12/22/ARTI5QGeiSwnx Cdb1UGmzabn231222.shtml.
The 6.2 Magnitude Earthquake in Jishi Mountain has Killed 117 People in Gansu[EB/OL]. (2023-12-22)[2024-03-08]. https://news.cctv.com/2023/12/22/ARTI5QGeiSwnxCdb1UGmzabn231222.shtml.

[4] 积石山6.2级地震已造成甘肃农牧渔业直接经济损失5.32亿元[EB/OL]. (2023-12-23)[2024-03-08]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202312/23/t20231223_38840635.shtml.
The 6.2 Magnitude Earthquake in Jishi Mountain has Caused Direct Economic Losses of 532 Million

Yuan in Agriculture, Animal Husbandry and Ffishery in Gansu[EB/OL]. (2023-12-23)[2024-03-08]. http://www. ce. cn/xwzx/gnsz/gdxw/202312/23/t20231223_38840635. shtml.

[5] 付国超. 地震滑坡概率危险性分析[D]. 北京：中国地震局地球物理研究所，2022.
FU Guochao. Probability Risk Analysis of Earthquake Landslide[D]. Beijing: Institute of Geophysics China Earthquake Administation, 2022.

[6] YAMAMOTO R, NAGAI N, KOIZUMI N, et al. Dust Concentration Around the Sites of Demolition Work After the Great Hanshin-Awaji Earthquake [J]. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 1999, 3(4): 207-214.

[7] OKADA Y, MUKAI S, SINGH R P. Changes in Atmospheric Aerosol Parameters After Gujarat Earthquake of January 26, 2001[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(3): 254-258.

[8] JING F, SHEN X H, KANG C L, et al. Variations of Multi-parameter Observations in Atmosphere Related to Earthquake[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(1): 27-33.

[9] AKILAN A, PADHY S, DIMRI V P, et al. Co-Seismic and Post-Seismic Changes in ZTD and TEC of the 2015 Nepal Earthquake[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 178(9): 3339-3354.

[10] JIN S G. GNSS Atmopheric Seismology: A Case Study of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012.

[11] JIN S G, HAN L, CHO J, Lower Atmospheric Anomalies Following the 2008 Wenchuan Earthquake Observed by GPS Measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, 2011, 73(7 - 8):810-814.

[12] YAO Y B, LEI X X, LIU Q, et al. Anomalies of Zenith Tropospheric Delay Following the Mw 7.8 Haida Gwaii earthquake[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 2(5):3533 - 3559.

[13] 王勇，娄泽生，刘严萍，等. 基于小波变换的地震前后 GNSS ZTD 异常变化分析[J]. 全球定位系统，2019，44(3)：62-68.
WANG Yong, LOU Zesheng, LIU Yanping, et al. Abnormal Change of GNSS ZTD Before and After Earthquake Based on Wavelet Transform [J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(3): 62-68.

[14] DONN W L, POSMENTIER E S. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69 (24): 5357-5361.

[15] TANG C, ZHU J, QI X, et al. Landslides Induced by the Wenchuan Earthquake and the Subsequent Strong Rainfall Event: A Case Study in the Beichuan Area of China[J]. *Engineering Geology*, 2011, 122 (1/2): 22-33.

[16] TIWARI B, TRAN D, AJMERA B, et al. Effect of Pre-and Post-Earthquake Rainfall Events on the Deformation and Stability of Slopes[C]//Geotechnical and Structural Engineering Congress, Phoenix, Arizona, USA, 2016.

[17] QIU H Z, KONG J M, WANG R C, et al. Response Mechanism of Post-Earthquake Slopes Under Heavy Rainfall [J]. *Journal of Seismology*, 2017, 21(4): 869-884.

[18] YANG Z H, LAN H X, LIU H J, et al. Post-Earthquake Rainfall-Triggered Slope Stability Analysis in the Lushan Area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(1): 232-242.

[19] 罗艳，朱音杰，高原. 区域地震记录揭示的2023年甘肃积石山 6.2 级地震震源破裂过程[J]. 地震，2024，24(1)：189-194.
LUO Yan, ZHU Yinjie, GAO Yuan. Source Rupture Process of the 2023 Jishishan Magnitude 6.2 Earthquake in Gansu Province Revealed by Regional Seismic Records[J]. *Earthquake* , 2024, 24(1): 189-194.

[20] 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 University*, 2024, DOI: 10.13203/J. whugis20230497.

[21] 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.

[22] 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)，2024，DOI：10. 13203/J. whugis20240004.

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*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240004.

[23] 许强,彭大雷,范宣梅,等. 甘肃积石山Ms 6.2地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240007.
XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Town Flowslide Triggered by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Pro-vince[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240007.

[24] XIAO G W, LIU G Y, OU J K, et al. MG-APP: An Open-Source Software for Multi-GNSS Precise Point Positioning and Application Analysis[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 66.

[25] ODIJK D, AFFILIATIONS A. Ionosphere-Free Phase Combinations for Modernized GPS[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2003, 129(4): 165-173.

[26] 赵庆志, 杨鹏飞, 李祖锋, 等. 突发公共卫生事件期间中国区域AOD与气象因子时空特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 2019-2032.
ZHAO Qingzhi, YANG Pengfei, LI Zufeng, et al. Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Meteorological Factors in China During the Period of Public Health Emergencies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(12): 2019-2032.