

文章编号:1004-4116(2022)01-0056-07

地基 InSAR 在滑坡应急治理效果监测方面的应用

——以兰州市北环路滑坡为例

石鹏清,郭富赞,周小龙,李攀龙,闫沛初

(甘肃省地质环境监测院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:2018年8月9日,兰州北环路发生山体滑坡,滑动体积约有 $66 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体造成北环路双向车道被掩埋,交通中断,严重影响了兰州市民的安全出行,当地政府采取削坡减灾等措施对滑坡实施了应急治理。为保障车辆安全通行提供决策依据,对滑坡开展了地基InSAR监测工作。本文在现场调查的基础上,以R/HYB 1000型地基雷达系统作为监测工具,开展了针对滑坡应急治理后的效果监测,通过地基雷达获得滑坡地表监测数据并结合宏观调查,对滑坡应急治理后的稳定性进行了分析,为滑坡治理和道路恢复通行提供了科学依据。同时,也验证了地基雷达在黄土裸露区的应用效果,为甘肃滑坡应急监测技术推广应用提供了依据。

关键词:滑坡;地基InSAR;应急监测;效果

中图分类号:P 627

文献标志码:B

InSAR,即合成孔径雷达干涉测量(Synthetic Aperture Radar Interferometry),是近二十年迅速发展起来的对地观测技术,其核心是通过干涉的方式实现测量的目标,而所用的信息载体是SAR卫星观测时获取的“相位”信息关系提取地表三维变形信息^[1]。星载雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术监测在突发地质灾害早期识别、长期动态监测等方面得到广泛应用并取得了显著效果^[1-4]。但就突发地质灾害应急监测而言,受制于卫星重访周期的限制,其监测数据的实时性、连续性尚不能满足需求,由此地基InSAR的研究与试验应运而生^[5]。相对星载InSAR技术系统,地基InSAR可根据场地条件灵活布置,能够在远距离处对大范围的地面目标实现雷达成像,并精确测量被监测目标的位移变化及位移速度,从而实现对被监视目标的全天时、全天候、非接触、高精度、时空连续的远程监测,已应用在大坝、桥梁、边坡工程、冰川等方面的变形监测工作中^[6-10]。

在滑坡监测领域,国外对地基InSAR应用较早,2003年,Leva等同时利用地基InSAR和GPS对澳大利亚某处滑坡体进行监测,与同时获得的GPS

数据比较,说明了地基InSAR技术监测快速变形体的准确性^[11]。2006年,Noferini等利用意大利某处滑坡体的监测数据对地基InSAR的各项误差源进行分析,采用永久性散射体技术消除了气象因素以及时间去相关的影响^[12]。2009年,RTomás利用地基InSAR监测数据,研究了西班牙某处滑坡降雨敏感性,并建立了基于土力学原理的滑坡预测模型^[13]。2013年,Kazunori Takahashi等对位于日本某处滑坡采用地基InSAR进行监测,并结合山体的DEM数据,建立了高精度的滑坡位移场^[14]。刘斌等将地基雷达干涉测量技术应用在滑坡灾后稳定性评估工作中,取得了很好的效果^[15]。郭延辉等利用国产地基InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用,验证了技术有效性^[16]。总体说,地基InSAR在边坡、滑坡等监测领域应用逐渐成熟,为滑坡应急监测提供了有效的技术手段。

2018年8月9日,兰州北环路发生山体滑坡,滑坡体造成北环路双向车道被掩埋,交通中断,严重影响了兰州市民的安全出行。北环路滑坡发生后,当地政府采取削坡减灾等措施对滑坡实施了应急治理。但滑坡应急治理效果如何?滑坡目前的稳定状态

收稿日期:2021-08-23

基金项目:甘肃省科技重大专项—社会发展类(19ZD2FA002)

作者简介:石鹏清(1988~)男,工程师,硕士,主要从事水工环地质和地质灾害防治研究工作。E-mail:fyg51913@163.com

能否允许车辆通行? 需要通过监测手段获取滑坡变形数据进行滑坡治理后状态分析, 为保障车辆安全通行提供决策依据。基于保障道路安全运行的需求, 甘肃省地质环境监测院郭富赉技术团队以国产 R/HYB1000 型地基雷达系统作为监测工具, 开展了针对滑坡应急治理后的地基 InSAR 效果监测, 通过地基 InSAR 获得滑坡地表监测数据并结合宏观调查, 对滑坡应急治理后的稳定性进行了分析, 为滑坡治理和道路恢复通行提供了科学依据。同时, 也验证了地基雷达在黄土裸露区的应用效果, 为甘肃滑坡应急监测技术推广应用提供了依据。

1 北环路滑坡特征

1.1 滑坡基本特征

北环路滑坡位于甘肃省兰州市城关区北环路(K 7 + 590 ~ 940 m 处)(图 1), 于 2018 年 8 月 9 日下午 1 时 30 分发生滑动, 滑坡中心位置经纬度为: 103°49'23"E、36°05'02"N。滑坡斜长约 220 m, 滑体后缘至前缘剪出口高差约为 92 m, 前缘宽约 200 m(图 1)。滑坡部分滑塌处造成前缘双向车道被掩埋, 交通中断, 暂无人员伤亡。

该滑坡为一中型黄土—泥岩推移式切层滑坡, 原始坡体主要由 Q₃ 的黄土、河流相的卵砾石层、以及白垩系砂质泥岩组成(图 2), 滑体平面形态呈椭圆状, 由主滑坡和一小型次级滑坡组成, 主滑坡平面长 197 m, 宽 262 m, 滑体厚约为 25 m, 次级滑坡平面长 74 m, 宽 91m, 总共滑动体积约有 66 万 m³, 规模为中型。

1.2 滑坡引发因素

该地段原为一老滑坡体, 修建北

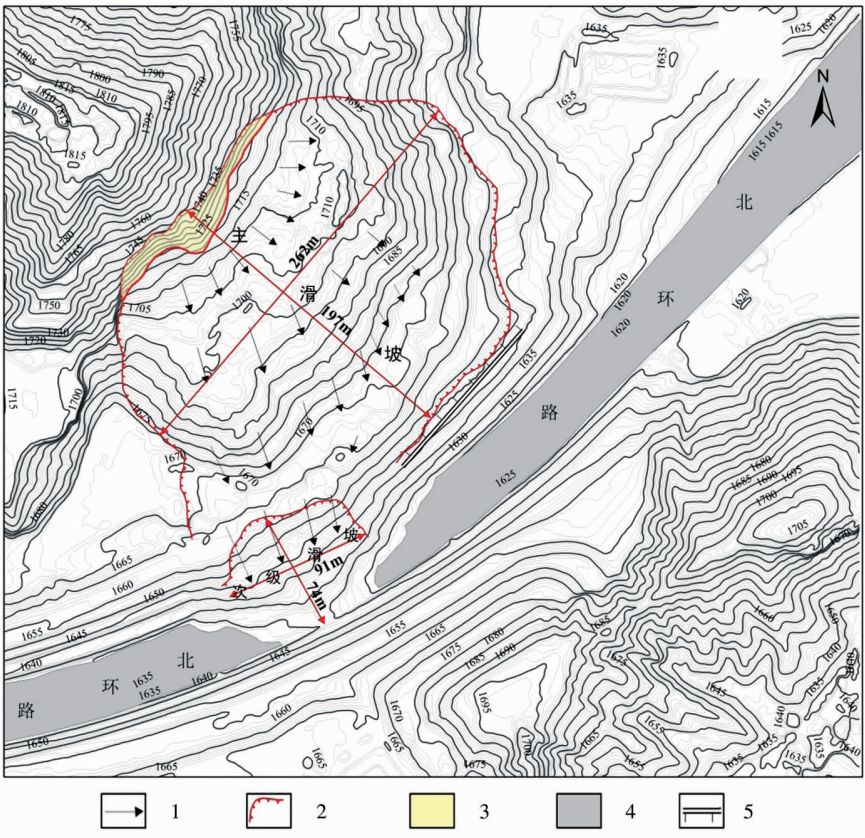


图 1 滑坡平面图

Fig. 1 Landslide plan

1—位移矢量;2—滑坡边界;3—滑坡后壁;4—公路;5—抗滑桩

环路时, 开挖原始斜坡坡脚, 使的老滑坡体前缘的阻滑体消失, 前缘形成高 18 m、坡度约 50°的陡直坡面, 增大了坡体的临空面, 为老滑坡的复活创造了有利条件, 是引发滑坡的主要因素。

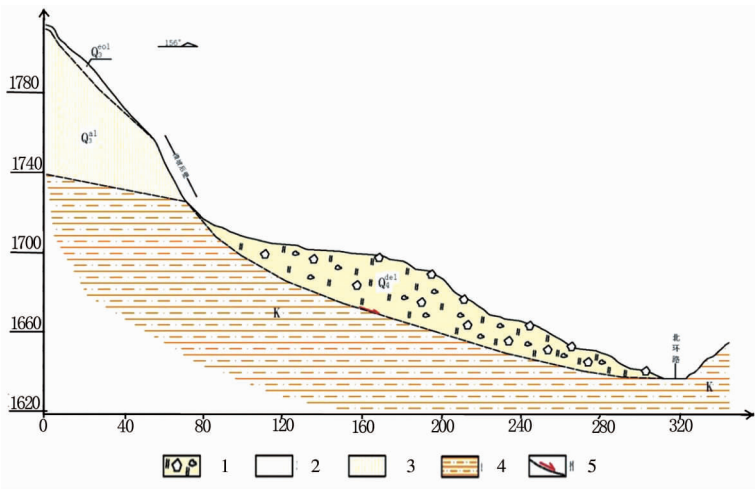


图 2 滑坡剖面图

Fig. 2 Landslide profile

1—滑坡堆积物;2—马兰黄土;3—粉土、粉质粘土;4—砂质泥岩;5—滑动面

据现场实际调查,滑坡体存在多级平台且有人工林,坡体中上部有蓄水池、泵房和管道,且部分管道架设处可见水管破裂漏水后形成的落水洞和水蚀陡坎,滑坡后可见坡面散落已毁的管道,由此可知,滑坡体上存在人工绿化灌溉活动。在绿化灌溉水体长期入渗作用下,滑坡体自重增加、岩土软化、强度降低,加剧了滑坡的复活变形。因此,绿化灌溉也是导致本次滑坡灾害发生的因素之一。

兰州市区多年平均降水量为 311.7 mm。2018 年 1~8 月份,兰州降水 355.4 mm,已超过兰州市全年历史平均降水量,为 1978 年以来最多。其中 8 月份降水 137.9 mm,较常年同期偏多 1.1 倍,为 1979 年以来最多;6~8 月份降水 254.9 mm,较常年同期偏多 55%,为 1994 年以来最多。尤其进入 8 月以来,自 8 月 7 日~8 月 24 日,兰州市累计降水量达 108.2 mm,为 39 年来同期降水量之最。降雨是引发本次滑坡的触发因素。

2 R/HYB1000 功能及测量原理

2.1 R/HYB 1000 功能

R/HYB 1000 型地质灾害监测雷达能够在远距离处对大范围的地面目标实现雷达成像,并精确测量被监测目标的位移变化及位移速度,从而实现对被监视目标的全天时、全天候、非接触、高精度、时空连续的远程监测。其功能特点主要有:非接触式测量、高精度快速实时测量、大范围空间连续测量、开放的用户接口、三维显示界面、DEM 独立扫描功能。

2.2 测量原理

地基 InSAR 形变测量示意图如图 3 所示。

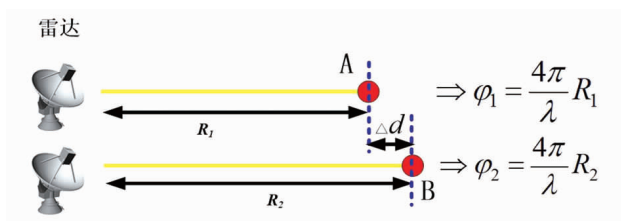


图 3 GB-InSAR 形变测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of GB-InSAR

观测基站观测目标点 P 形变前后的主副图像相位分别为 φ_M 和 φ_S , 两者的干涉相位可表示为。

$$\Delta\varphi_{MS} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{4\pi(SP-MP)}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda}d \quad (1)$$

可得目标点 P 的形变量为:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi_{MS} \quad (2)$$

干涉相位的完整表达式为:

$$\Delta\varphi_{MS} = \varphi_{geom} + \varphi_{defo} + \varphi_{atmo} + \varphi_{noise} + 2k\pi \quad (3)$$

φ_{geom} 为地面起伏引起的地形相位, φ_{defo} 为两次成像期间因地表位移引起的 LOS 向形变相位, φ_{atmo} 为两次 SAR 影像获取时大气的非均匀性引起的延迟相位, φ_{noise} 为随机噪声相位。

2.3 时序工作流程

地基 InSAR 形变时序分析流程主要包括原始数据聚焦、影像质量检查、特征点选取和形变分析。

2.3.1 原始数据聚焦处理

天线波束内单个目标的回波信号会出现在线性轨道的每一个位置以及所有频率的原始数据中,此时的图像处于散焦状态。对原始数据的每一个像元来说,理想点目标具有相同的强度,并且相位是发射频率和传感器在轨道上位置的函数,强度和相位观测值需要转换到具有空间分辨率的格网上。图像聚焦分为距离向和方位向聚焦,聚焦使得图像具有距离向和方位向空间分辨率。

2.3.2 影像质量检查

由于 SAR 系统采用侧视成像,将会在 SAR 影像中产生叠掩、阴影和透视收缩等几何失真现象,可利用地基 InSAR 初步观测一组数据,通过强度图、热信噪比、估计信噪比、时间相干性、空间相干性和相位稳定度等查看该组影像的观测质量,以判断地基 InSAR 观测位置、方位和仰角等是否满足要求,及时调整观测角度以满足监测要求。

2.3.3 特征点选取

地基 InSAR 形变时序分析是基于相干点目标进行的,一般通过设置估计信噪比、相干系数和相位稳定度满足一定阈值的像元,筛选出稳定的相干点目标。由于 R/HYB 1000 系统采用 Ku 波段雷达(波长 λ 为 17.4 mm),其对形变信息非常敏感,初始形变时序分析得到的形变信息不但包含实际形变,还包括温度、湿度、气压和粉尘等环境变化引起的相位变化。因此,需要在稳定区域内选取一定数量的估计信噪比、相干系数和相位稳定度高的点作为地面控制点(ground control point, GCP),通过对所有 GCP 在视线向的形变时序曲线加权平均,建立环境相位时序校正函数,消除环境因素的影响。

2.3.4 形变分析

地基 InSAR 时序分析主要采用简单网络和冗余网络组合方式对聚焦后的影像对进行干涉处理,为提高处理效率,工作中可采用简单网络组合方式对相邻时刻影像两两干涉处理。R/HYB 1000 系统一般采用连续观测模式,且观测距离较短,空间基线为 0,因此无需进行图像配准和地形相位补偿。由于连续模式观测数据采集时间短,目标的形变速率 v 在相邻的 SAR 影像获取时间间隔 Δt 内,一般能够满足 $|v| < \lambda / 4 \Delta t$, $v < \lambda / 4 \Delta t$, 因此避免了相位解缠。

3 北环路滑坡地基 InSAR 应急监测方案

3.1 监测条件分析

北环路滑坡总体植被覆盖程度较小,滑坡发生后表面的植被在应急处置过程中大多被铲除,同时,滑坡对面为北环路修建时形成的高陡路堑,道路通行方便,可直达滑坡对面路堑边坡顶部,为地基 InSAR 应急监测应用创造了良好的条件。

本文采用的边坡雷达系统信号处于 Ku 波段 (16.2 GHz), 可以获得最高方位向分辨率为 4 mrad, 距离向分辨率为 0.3 m@1 km 处。通过合成孔径雷达技术 (SAR) 和调频连续波技术 (FMCW) 的结合, 监测区域被分割成很多二维的小单元, 如图 4 所示。

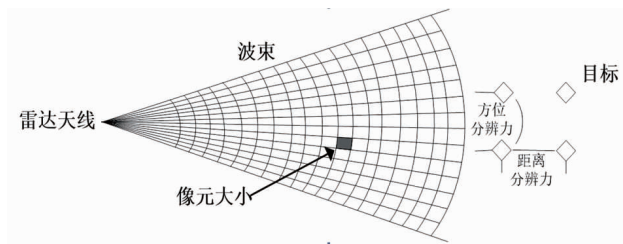


图 4 GB-InSAR 空间分辨单元

Fig. 4 GB-InSAR spatial resolution unit

边坡雷达系统获取目标区域数据过程中, 由于天线运动轨道固定, 对某一区域目标重复监测成像时天线都处于相同的空间位置, 所以空间基线为零。雷达信号往返的路径之差等于雷达视线方向的目标距离变化, 具体可以表现为相位之差。

3.2 监测点部署

针对边坡场景实际形变特点, 地基雷达拟布设



图 5 地基 InSAR 监测区域及位置

Fig. 5 GB-InSAR monitoring area and location

雷达监测地址为对面上坡, 实现对整个边坡的实时监测。雷达架设位置距离边坡底部直线距离约 100 m。监测区域(如图 5)。

4 数据分析及讨论

根据监测边坡的实际形变特点, 架设备自 2018 年 9 月 11 日 21 时 00 分开始运行, 至 2018 年 9 月 14 日 12 时 00 分结束观测, 选取系统连续监测时间约 22 小时为基准数据进行分析。即此阶段进行了 224 轨监测, 平均 6 分钟进行一次雷达数据监测。雷达软件设定的场景成像距离为从 50 m 到 450 m。

积累形变结果的时间变化序列分析图 6, 结果显示随着时间递增, 场景中局部点位的形变量逐渐增大。22 小时的观测期结束之后, 点 1 形变量达到 -4.5 mm, 点 2 形变量达到 -4.5 mm。其中, 负值 (颜色为蓝色) 在雷达场景中代表的意义是接近雷达方向的形变分量, 正值 (颜色为红色) 在雷达场景中代表的意义是远离雷达方向的形变分量。下面分别对 1、2 点形变进行分析。

图 6 中的点 1 距离雷达位置距离大概有 146 m, 在雷达观测视野中处于中部位置; 点 2 距离雷达位置距离大概有 178 m, 在雷达观测视野左部。在实际场景中, 因雷达分辨率为 0.3 m × 4 m, 即合成孔径雷达的 SAR 图像中, 单个像素点代表着地面 0.3 m × 4 m 的区域。

从图 6 的积累形变结果看, 点 1 区域位置有一定的形变量。经过 22 小时的连续形变监测发现, 形变值累计增大, 最大形变为 -4.5 mm。为了更好的描述点 1 形变的趋势, 系统软件对形变曲线进行了滤波平滑处理, 用经过高斯滤波后的形变曲线结果代

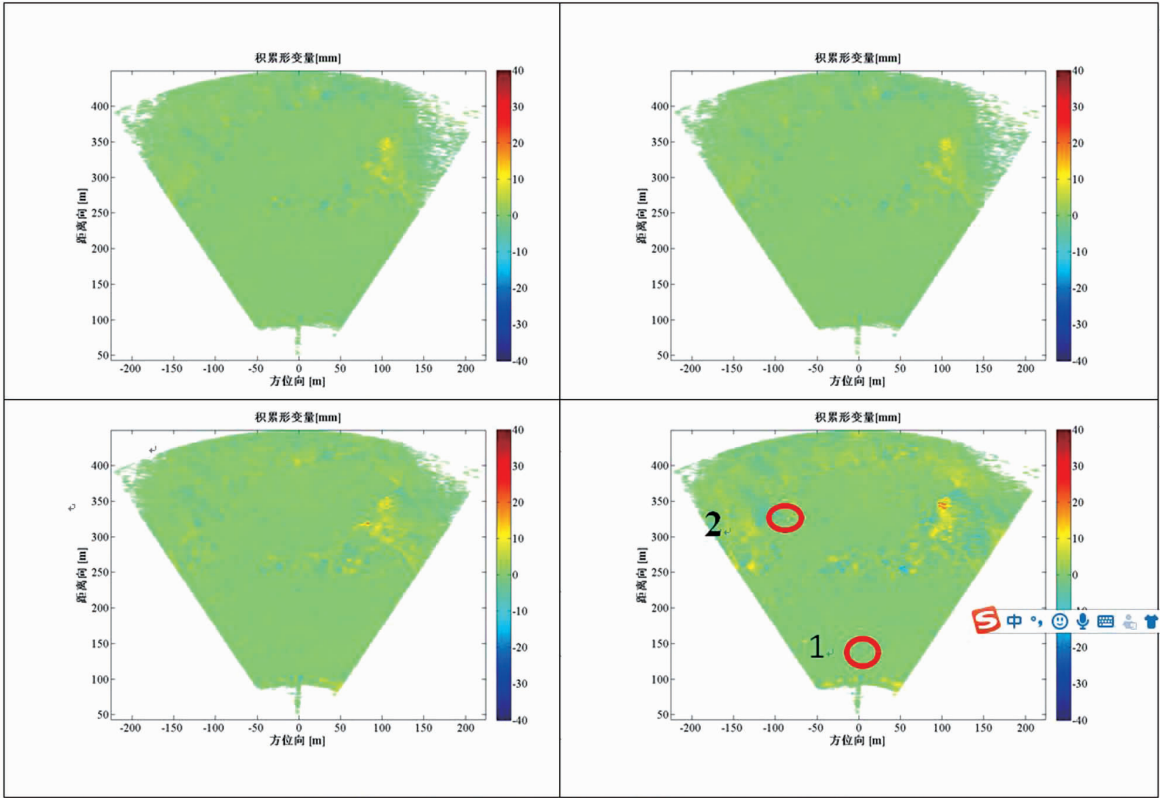


图 6 积累形变结果时间变化分析图

Fig. 6 Cumulative deformation of slope line of sight for 20 consecutive hours

表过去 22 小时的形变特点(图 7)。结果显示,滤波显示出的 1 点时间序列曲线比原始曲线也更为平滑,有效的解决因为常规像素点形变噪声引起的形变曲线跳动,在形变速率计算上具有明显优势。图 8 是点 1 位置基于高斯滤波计算的形变速率曲线。在这种形变速率较小的点位,常规方法直接计算速率获取的曲线基本全是在 0 附近波动的毛刺状“粗

线”,基本看不出速率走势。但是这里采用高斯滤波方式计算的速率结果可以明显看出形变速率最大达到 -2 mm/h 的量级,从图 9 的同一时刻也可以看出明显的形变曲线加速下滑,验证了速率计算结果的正确性。同样对点 2 数据进行处置,计算出形变速率最大达到 -2.8 mm/h 的量级(图 10)。

通过本次边坡状态实地监测分析,可以看出:

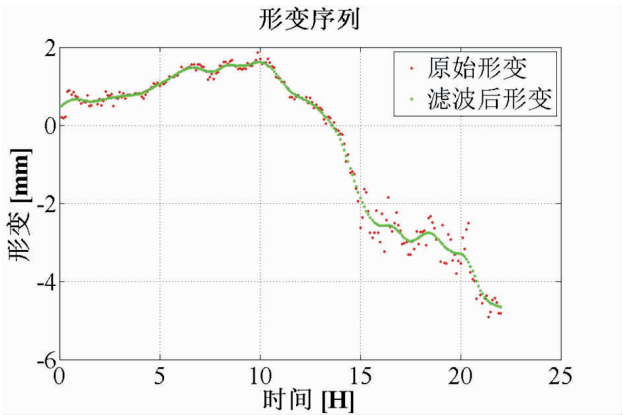


图 7 点1形变时间序列

Fig. 7 Deformation time series of point 1

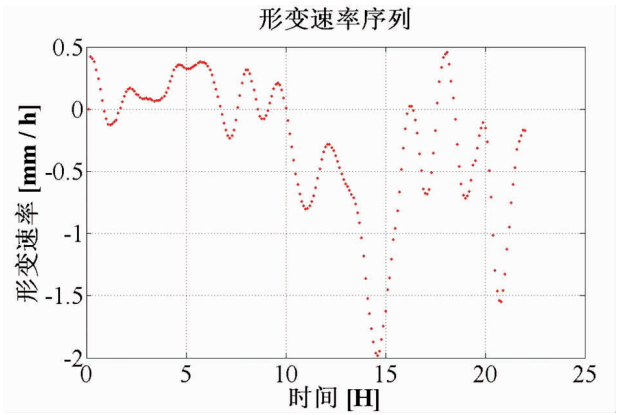


图 8 点1速率时间序列曲线

Fig. 8 Rate time series curve of point 1

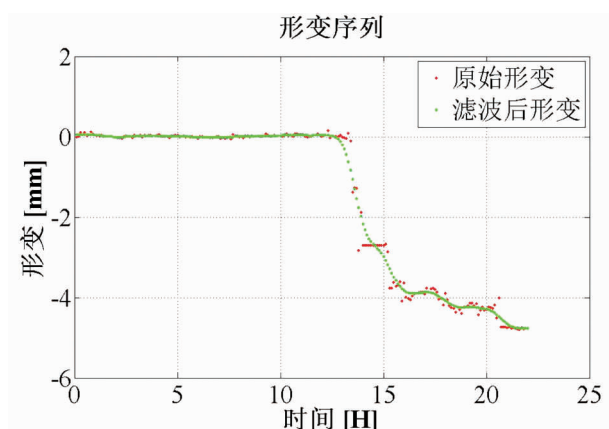


图9 点2形变时间序列

Fig. 9 Deformation time series of point 2

1) 观测期中,点1代表区域方位向和距离向(-38.48,325.3),雷达二维坐标系下坐标(1107,146)的积累形变量达到-4.5 mm,最终表现为接近雷达方向的运动。观测开始累积达到10小时,形变逐渐增加,达到1.6 mm。在10小时后,形变变化特别迅速,计算显示此时的形变速率最大达到-2 mm/h,观测时间累积达到22小时,形变累计达到-4.5 mm。

2) 观测期中,点2代表区域方位向和距离向为(2.673,143),雷达二维坐标系下坐标(2727,178)的积累形变量达到-4.5 mm,最终表现为接近雷达方向的运动。观测时间开始至13小时,无明显形变。累积达到13小时时,形变速率突然变大,计算显示此时的形变速率达到-2.8 mm/h。至第15小时时速率出现波动反弹,形变速率在-1 mm/h。观测时间累积达到22小时时,形变速率在0.1 mm/h。

从观测期22小时的结果看,监测区域形变依然在积累,滑坡仍处于缓慢变形状态。这和调查人员发现滑坡局部即1号点、2号点存在拉张裂缝、滑坡前缘局部掉土块等现象是一致的,说明滑坡尚未达到完全稳定的状态。经监测人员向指挥部汇报后,对滑坡上部进一步实施了局部削方减载,保证了滑坡的初步稳定,并确定了滑坡前缘路段设置临时挡土板,以保障临时通车后车辆的正常运行。

本次部署的地基 InSAR 经连续22小时工作,设备运行稳定,观测数据每6分钟一轨,数据采集频率较高、连续性强;在裸露黄土—基岩滑坡,雷达反射率高,监测精度高,可达毫米级,说明地基 InSAR 在黄土裸露区具有较好的监测效果,今后可进一步推广利用该技术,为甘肃滑坡应急监测开辟一条新的技术路线和方法。

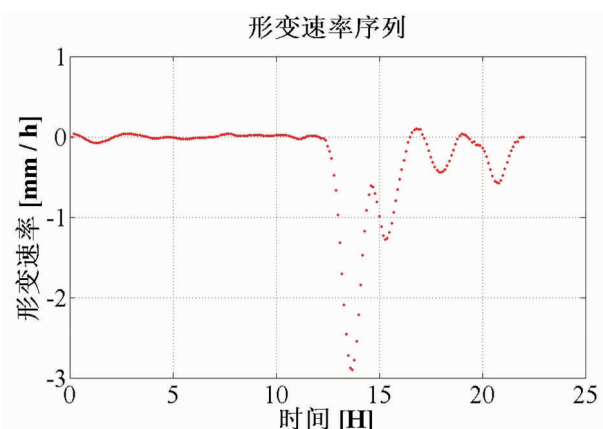


图10 点2速率时间序列曲线

Fig. 10 Rate time series curve of point 2

5 结论

北环路滑坡是甘肃省首次利用地基 InSAR 对黄土—基岩滑坡进行应急处置后的效果监测,经试验研究,得出以下结论:

(1) 边坡雷达系统性能稳定、观测速度快、有效射程满足现场监测需求,可以高精度、全天时、全天候、大面积获取边坡形变结果。

(2) 通过对滑坡的测试结果表明,边坡雷达可以监测出长距离边坡的高精度形变,从监测结果看出监测点1区域及点2区域出现一定形变,即测试结果验证了边坡形变监测雷达对监测区域发生的形变监测效果明显,可以实现对边坡稳定性判定和预警的目标。

(3) 地质雷达在黄土裸露区具有很好的适应性,针对处于匀速蠕动变形阶段的滑坡,地基 InSAR 具有较好的监测时效性,可在滑坡应急处置中推广应用,为抢险提供依据。

参 考 文 献

- [1] 胡明城. 空间大地测量的最新进展 (一)[J]. 测绘科学, 2001(03): 56-59
- [2] Delacourt, C.; Raucoles, D.; Le Mouelic, S.; Carnec, C.; Feurer, D.; Allemand, P.; Cruchet, M. Observation of a Large Landslide on La Reunion Island Using Differential Sar Interferometry (JERS and Radarsat) and Correlation of Optical (Spot5 and Aerial) Images. Sensors 2009, 9, 616-630
- [3] Herrera G, JA Fernández-Merodo, Mulas J, et al. A landslide forecasting model using ground based SAR data: The Portalet case study[J]. Engineering Geology, 2009, 105(3-4): 220-230

- [4] Raucoules, D. ; de Michele, M. ; Malet, J. P. ; Ulrich, P. Time variable 3D ground displacements from high-resolution synthetic aperture radar (SAR). Application to La Valette landslide (South French Alps). *Remote Sens. Environ.* 2013, 139, 198–204
- [5] GBarla. 利用先进和传统技术监测 Beauregard 滑坡 (意大利 Aosta 山谷)[J]. *水文地质工程地质技术方法动态*, 2012, 000 (001): P69–86
- [6] 姜春生, 汪剑, 何玉童, 等. 地基合成孔径雷达在大坝安全监测中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 02 (v. 28; No. 110): 152–155
- [7] 戚斌, 岳顺, 宋亚宏. GBInSAR 技术在桥梁变形监测中的应用 [J]. *地理空间信息*, 2017, 15(007): 97–98
- [8] 刘斌, 葛大庆, 李曼, 等. 地基 InSAR 评估爆破作业对露天采矿边坡的稳定性影响 [J]. *遥感学报*, 2017, 22(s1)
- [9] 孙建勋, 郑会歌. 关于地基 InSAR 新技术及水利工程变形监测应用的研究 [J]. *水利建设与管理*, 2017(11): 7–10
- [10] 柳林, 江利明, 高斌斌, 等. 山地冰川运动地基 InSAR 监测试验 [J]. *测绘通报*, 2016(004): 54–57
- [11] Leva DNico G, Tarchi D, et al. Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer [C]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2003, 41(4), pp. 745–752
- [12] Noferini L, Pieraccini M, Mecatti D, et al. Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide [J]. *Engineering Geology*, 2007, 95(3): 88–98. Calo, F. ; Ardizzone, F. ; Castaldo, R. ; Lollino, P. ; Tizzani, P. ; Guzzetti, F. ; Lanari, R. ; Angeli, M. G. ; Pontoni, F. ; Manunta, M. Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: The Ivancich case study, Assisi, Italy. *Remote Sens. Environ.* 2014, 142, 69–82
- [13] R Tomás, Herrera G, Delgado J, et al. A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain) [J]. *Engineering Geology*, 2010, 111(1–4): 19–30
- [14] Takahashi K, Matsumoto M, Sato M. Monitoring of displacement on a landslide slope by GB-SAR interferometry [C]// *Synthetic Aperture Radar. IEEE*, 2013.
- [15] 刘斌, 葛大庆, 李曼, 等. 地基 InSAR 技术及其典型边坡监测应用 [J]. *中国地质调查*, 2018, 005(001): 73–81
- [16] 郭延辉, 杨溢, 杨志全, 等. 国产 GB-InSAR 在特大型水库滑坡变形监测中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 32(2): 7

APPLICATION OF GB-SAR IN MONITORING TREATED LANDSLIDE IN BEIHUAN ROAD OF LANZHOU CITY

SHI Peng-qing, GUO Fu-yun, ZHOU Xiao-long, LI Pan-long, YAN Pei-reng
(*Institute of Geo-environmental Monitoring of Gansu Province, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: On August 9, 2018, a landslide occurred in Beihuan Road, Lanzhou, with a sliding volume of $66 \times 10^4 \text{ m}^3$. The landslide buried the bidirectional lanes of the north ring Road and interrupted traffic, seriously affecting the safety of Lanzhou citizens. The local government took measures such as slope cutting and load reduction to implement emergency treatment of the landslide. In order to guarantee the safe passage of vehicles, ground-based InSAR monitoring was carried out. In this paper, on the basis of field investigation, in order to R/HYB1000 ground radar system as a monitoring tool, the effect after the emergency management for landslide monitoring, the monitoring data of landslide surface were obtained through the ground radar and combining the macroscopic investigation, analyses the stability of the landslide after emergency treatment, for landslide governance and road traffic provides scientific basis for recovery. At the same time, the application effect of ground-based radar in loess exposed area is verified, which provides a basis for the popularization and application of landslide emergency monitoring technology in Gansu Province.

Key words: landslide; GB-inSAR; emergency monitoring; effect