



移动阅读

徐伟, 铁永波, 李江, 等, 2024. 边坡雷达在重大突发性滑坡应急监测中的应用研究[J]. 沉积与特提斯地质, 44(1): 150–161. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02013](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02013)

XU W, TIE Y B, LI J, et al., 2024. Applied research of slope radar in emergency monitoring of major sudden landslides[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(1): 150–161. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02013](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02013)

边坡雷达在重大突发性滑坡应急监测中的应用研究

徐 伟^{1,2,3}, 铁永波^{1,2,3}, 李 江⁴, 李宗亮^{1,2,3}, 巴仁基⁵, 田 凯^{1,2,3},
冉 涛^{1,2,3}, 王家柱^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 610000; 3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站, 四川 成都 610000; 4. 中安国泰(北京)科技发展有限公司, 北京 100020; 5. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036)

摘要: 西南地区突发性重大地质灾害常发生于深切河谷区, 在应急抢险过程中, 存在人员难到达、地面调查与监测困难、灾害持续变形破坏造成的危害大等问题。以西藏自治区江达县白格滑坡和四川丹巴县阿娘寨滑坡应急抢险为例, 应用边坡雷达对白格滑坡残留体和阿娘寨滑坡复活体进行应急监测和变形特征研究。结果表明: 通过边坡雷达获取各测点的累计视向变形量、变形速率、变形加速度等监测数据绘制监测区变形云图和监测曲线, 判识滑坡区变形破坏及发展趋势、研判各变形区所处的变形演化阶段, 快速对临滑破坏区进行识别与预报。边坡雷达能对突发性重大地质灾害开展非接触式全天候实时监测, 既能实时掌握灾害变形特征, 也保证了监测人员安全, 对今后类似的突发性地质灾害应急监测和预警预报具有参考借鉴意义。

关键词: 白格滑坡; 阿娘寨滑坡; 边坡雷达; 变形规律; 匀速变形阶段

中图分类号: P642

文献标识码: A

Applied research of slope radar in emergency monitoring of major sudden landslides

XU Wei^{1,2,3}, TIE Yongbo^{1,2,3}, LI Jiang⁴, LI Zongliang^{1,2,3}, BA Renji⁵, TIAN Kai^{1,2,3},
RAN Tao^{1,2,3}, WANG Jiazhu^{1,2,3}

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. Technology innovation center for risk prevention and mitigation of geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, China; 3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, China; 4. Cathay Safety Technology Co., Ltd., Beijing 100020; 5. Civil-military Integration Center of Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu 610036, China)

Abstract: Landslides often occur in deep river valleys with high altitudes in remote regions in southwest China. In the process of emergency rescue, there are some difficulties, such as difficulty in arrival of personnel, difficulty in ground investigation and

收稿日期: 2022-06-30; 改回日期: 2023-01-13; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 白永健

作者简介: 徐伟(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查评价和岩土体稳定性方向研究。E-mail: 052054@163.com

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“川西地区特大地质灾害链调查评价”(DD20221746)

monitoring, and great damage caused by sustained deformation. In this paper, we use interferometric synthetic aperture radar to carry out real-time monitoring of a landslide mass and study deformation characteristics using the emergency monitoring of Baige Landslide in Jiangda County of Tibet Autonomous Region and Aniangzhai Landslide in Danba County of Sichuan Province as examples. Through the real-time deformation map in the monitoring area obtained by S-SAR-I, we have identified the ranges of strong deformation regions. Through the cumulative apparent deformation, deformation velocity and deformation acceleration of each monitoring point, we have monitored the whole deformation law of each deformation area in real time and judged the deformation evolution stage of each deformation area. In addition, we have successfully identified and forecasted the local sliding failures in each deformation area. The slope radar can carry out non-contact all-weather real-time monitoring of sudden major geological disasters. This method not only captures the deformation characteristics of the disaster in real time, but also ensures the safety of the monitoring personnel. This approach has great significance for the future emergency monitoring and early warning and forecast of sudden geological disasters.

Key words: Baige Landslide; Aniangzhai Landslide; Interferometric Synthetic Aperture Radar; freeze-thaw; constant velocity deformation Stage

0 引言

我国是一个地质灾害较为频繁的国家,每年因灾死亡的人数达数百上千人,直接经济损失数十甚至上百亿元,严重威胁着人民群众的生命财产安全,制约着地质灾害多发地区的经济发展。虽然 1990 年建立的群测群防体系在地质灾害防治领域取得了较为显著的成果,但近年来仍不断有灾难性重大地质灾害事件发生(许强等, 2019),如 2017 年四川茂县“6.24”新磨村滑坡(许强等, 2017; Fan et al., 2017)、贵州纳雍“8.28”山体滑坡(郑光等, 2018)、2018 年金沙江白格“10.11”“11.03”两次滑坡-堰塞堵江事件(许强等, 2018; Fan et al., 2019)、2020 年丹巴县梅龙沟-阿娘寨滑坡灾害链(张海泉等, 2021; 胡凯衡等, 2020)等,都造成了惨重的生命财产损失,引起广泛社会关注。面对已经出现临灾前兆或者突发的滑坡灾害,如何快速开展实时监测并获取灾害的变形信息,为迅速救灾、应急决策和评估灾害损失提供数据支撑是当今面临的首要问题。近些年飞速发展的调查监测技术,尤其是边坡雷达技术(林德才等, 2016)、国产卫星技术(陆会燕等, 2019)及机载激光雷达技术(李强等, 2019)等被广泛应用于重大地质灾害应急调查及监测。

地基合成孔径雷达(GB-SAR, Ground-based Synthetic Aperture Radar)简称边坡雷达(S-SAR, Slope-Synthetic Aperture Radar),是一种非接触式监测方法。该监测技术可以实现实时连续的全天时和全天候大范围监测区域变形监测(刘国祥等, 2019)。相比星载平台 SAR、机载平台 SAR,边坡

雷达具有重访周期短、操作方便、监测视角更优、成本低等优点(蒋留兵等, 2020)。边坡雷达已广泛应用于大坝现场变形(邱志伟等, 2014; 邢诚等, 2014)、大坝放水前后变形(张昊宇等, 2017)、煤矿露天采场边坡变形(李如仁等, 2017)等方面。同时,边坡雷达也逐渐应用于地质灾害的应急监测和形变特征分析,许多学者在滑坡灾后形变(刘斌等, 2016)、岩质边坡形变(李翔宇等, 2020)、提取滑坡数字高程模型和监测滑坡(Luo et al., 2014)等方面开展了相关研究工作。

在滑坡长期监测与形变特征分析方面,许多学者开展了一系列研究并取得了大量成果:比如使用模糊数学中多级模糊综合评判的理论与方法,建立了黄土滑坡演变阶段两级模糊综合评判模型(王念秦等, 1999);使用地面三维激光扫描仪可不受干扰独立进行滑坡的“面”式测量,为预测预报滑坡的发生时间提供第一手连续可靠的数据资料(王尚庆等, 2006);采用免疫克隆神经网络的方法,对边坡进行变形位移的预测,结果表明此方法拥有较高的预测精度(薛源等, 2007);对滑坡时间预测预报的研究现状和研究进展作了系统的总结(许强等, 2004);利用 GPS 监测丹巴县甲居滑坡、干桥沟滑坡、红军桥滑坡和亚喀则滑坡,对监测效果进行了研究(郑万模等, 2008; 张青志等, 2010; 邓国仕等, 2011);对具有蠕变特点的滑坡从开始变形到失稳破坏全过程中的累积位移、变形速率和加速度等的变化规律进行系统地分析和研究(许强等, 2009)。

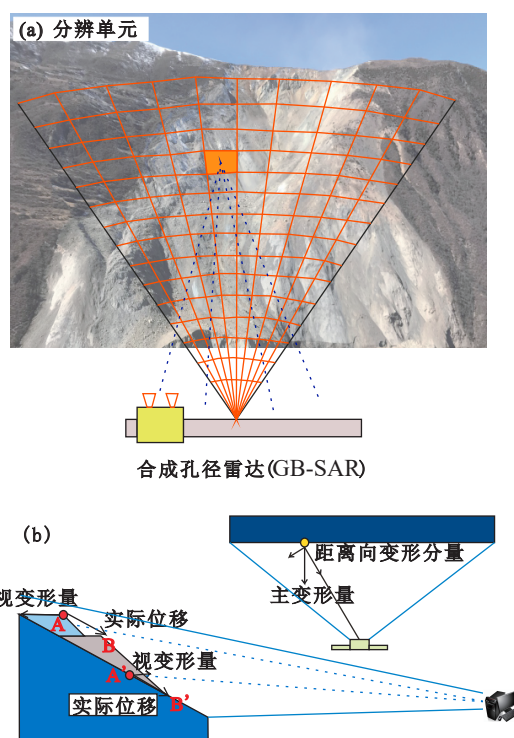
本次研究以西藏自治区江达县白格滑坡残留体和四川丹巴县阿娘寨滑坡复活体的应急监测为

例,在现场调查基础上,采用边坡雷达开展滑坡变形应急监测和变形特征分析,通过边坡雷达获取的实时测点云形变图,识别与划定滑坡发生后残留体或复活体的强变形区;通过各测点的累计视变形量-时间曲线、变形速率-时间曲线、变形加速度-时间曲线,实时监控残留体或复活体各变形区的整体变形规律,判断各变形区所处的变形演化阶段;实现对残留体或复活体变形区的局部临滑破坏识别与预报,为应急抢险期间的专家研判和指挥决策提供数据支持。通过实践证明边坡雷达是滑坡监测的有效技术手段之一,尤其是针对高山峡谷地区的突发性重大滑坡灾害,人员到达现场困难、调查与监测困难的情况下,边坡雷达的非接触式、便于携带、操作方便、全天时全天候、大范围监测区域变形的优势更为凸显,为重大突发性滑坡灾害的应急监测和预警预报提供参考和借鉴。

1 边坡雷达 (S-SAR) 工作原理

边坡雷达是融合地基合成孔径雷达技术(GB-SAR)、零基线重复轨道差分干涉技术及地面变形灾害预警技术的边坡失稳遥感监测预警一体化系统。(Zheng et al., 2018)。这套系统可对大范围边坡进行定点连续监测,通过优化预置边坡变形量和变形速率阈值对具有滑坡风险区域内的灾害进行预警。

边坡雷达采用高精度直线轨道搭载雷达主机及收发分置天线以固定极化方式连续发射高频电磁波信号,经边坡目标区域反射并连续接收回波信号(图 1a)。回波信号经正交合成,组成复数据后经脉冲压缩、波束锐化及成像处理后得到监测区域的 SAR 复图像。以固定重返时间间隔(revisiting time interval)扫描监测边坡,两幅 SAR 复图像组成复图像对。若边坡上某目标点或目标区域在两次扫描期间发生微小形变,即空间目标发生位移从 A 点移动至 B 点、从 A'点移动至 B'点,边坡雷达通过复图像对获得干涉图,干涉图相应图像单元内的相位值,反映的是边坡雷达天线与该目标的视线方向(line of sight, LOS)的距离变化,为实际位移沿 LOS 方向分量(图 1b)。值的大小称为形变量,符号反映了形变目标相对远离雷达或靠近雷达移动。通过比较目标在不同时刻的相位差,可连续获得目标的毫米级精度形变信息,通过累积干涉图分析法,获得边坡所有测点的时序累积形变曲线及形变速



a. “黄色”高亮单元为边坡雷达信号空间与真实边坡区域的对应关系,一个分辨单元是由距离向分辨率及空间方位向分辨率构成的扇形小面元; b. 监测边坡上某点目标实际位移与边坡雷达监测形变量的距离向剖面及方位。

图 1 边坡雷达形变监测原理图

Fig. 1 Schematic diagrams of S-SAR deformation monitoring

度曲线。

2 边坡雷达系统组成及数据处理流程

2.1 边坡雷达系统组成与参数

本研究采用中国安全生产科学研究院研发的 S-SAR-I 型边坡雷达,系统主要包括:雷达主机、直线轨道、运动控制单元、电源控制单元、连接线缆、数据采集电脑 6 个部分,如图 2 所示。雷达主机采用步进频连续波信号(Stepped Frequency Continuous Waveform, SFCW),具有较好的距离分辨率和穿透能力,能够提高对目标边坡的监测精度。雷达主机上的小天线沿着直线轨道等速移动并收发微波信号,通过信号分析技术构建出 1 m 的等效长天线。运动控制单元和电源控制单元能够将数据采集电脑的控制指令稳定地传输给雷达主机,并对微波输出功率进行控制。具有全天候监测(有效穿透空气中的颗粒物,对雨雾等天气干扰容忍性远高于光学和激光设备)、非接触式监测、监测范围大精度高

(测距可达到 5 km、测角 120°、精度 0.1 mm)、成像图分辨率高(0.25 m×4 m@1 km)、数据采集周期短等优点。

主要缺点有:无法观测微观质点沿物体表面移动但宏观无位移无变形的运动,这种极限情况在岩土体中不会发生,所以当边坡雷达观测对象为连续小变形时,某时刻某质点的视变形量近似等于该质点位移沿视线的分量;边坡雷达可以实现滑坡自动预警但做不到预报,要实现较准确的预报需要结合人工分析。

S-SAR-I 型边坡雷达基本参数见表 1,不同型号的边坡雷达主要参数对比见表 2。系统能够在西南地区高温高湿的河谷气候下稳定运行,对目标边坡进行全天时、全天候微波遥感监测,有效获取到 0.1 mm 精度的视向变形监测成果。

2.2 边坡雷达数据处理流程

如图 3a 所示,数据采集程序对回波信号进行成像处理后,进行噪声去除和大气校正处理,形成成像图。如图 3b 所示,对相邻 2 组成像图进行干涉相位的计算并评价其相干系数,得到相干图。如图 3c 所示,从相干图中选择始终保持高相干性的点,例如裸露的岩石等,作为永久散射体(PS, Persistent Scatterer)点,进一步生成雷达视向的二维变形图。



图 2 S-SAR-I 型边坡雷达系统组成
Fig. 2 System composition of S-SAR-I

如图 3d 所示,利用雷达直线轨道坐标与同一坐标系下的目标边坡坐标,可以计算出雷达与目标边坡的空间关系,即每一个目标边坡三维点相对于雷达的方位角及斜距。如图 3e 所示,将二维变形图中记录的方位角及斜距信息,与三维空间真实的方位角及斜距做匹配,实现变形图的地理配准,使得每一个二维变形图像素(M, N)能够对应若干个目标边坡三维点(X, Y, Z),并将对应关系制作为索引文件(M, N, X, Y, Z)。如图 3f 所示,将二维变形图按照时间序列不断叠加,并利用索引文件显示在实景三维模型上,实现直观的监测效果。

3 边坡雷达在西藏金沙江“11.03”白格滑坡残留体应急监测中的应用

3.1 西藏金沙江“11.03”白格滑坡地质概况

2018 年 10 月 11 日凌晨,西藏自治区江达县白格村发生大规模高位滑坡,堵塞金沙江形成堰塞湖,后经自然泄洪,险情得以解除。2018 年 11 月 3 日 17 时 40 分,滑坡区后缘再次滑坡(以下简称

表 1 S-SAR-I 型边坡雷达基本参数
Table 1 The basic parameters of S-SAR-I

信号频段	Ku
信号类型	SFCW
监测距离	10~5 000 m
监测范围	60°×30°
监测精度	0.1 mm
合成孔径长度	1 m
方位向分辨率	4 mrad
距离向分辨率	0.3 m
数据采集周期	10 min
防护等级	IP65
供电电源	220 V/50 Hz
工作温度	-30℃~65℃
工作湿度	0~95%

表 2 不同型号边坡雷达主要参数对比
Table 2 Comparison of main parameters of different types of slope radar

国家	瑞士	意大利	荷兰	中国
型号	GAMMA	IBIS-FM	FastGBSAR	S-SAR-I
类型	真实孔径雷达	合成孔径雷达	合成孔径雷达	合成孔径雷达
最大监测距离	/	4 km	/	5 km
距离分辨率	0.75 m	0.5 m×4.4 mrad	0.5 m	0.3 m
方位分辨率	6.9 m@1 km	/	/	4 mrad
采集时间	< 20 min	< 3 min	5 s	< 10 min
监测精度	< 2 mm	±0.1 mm	/	0.1 mm

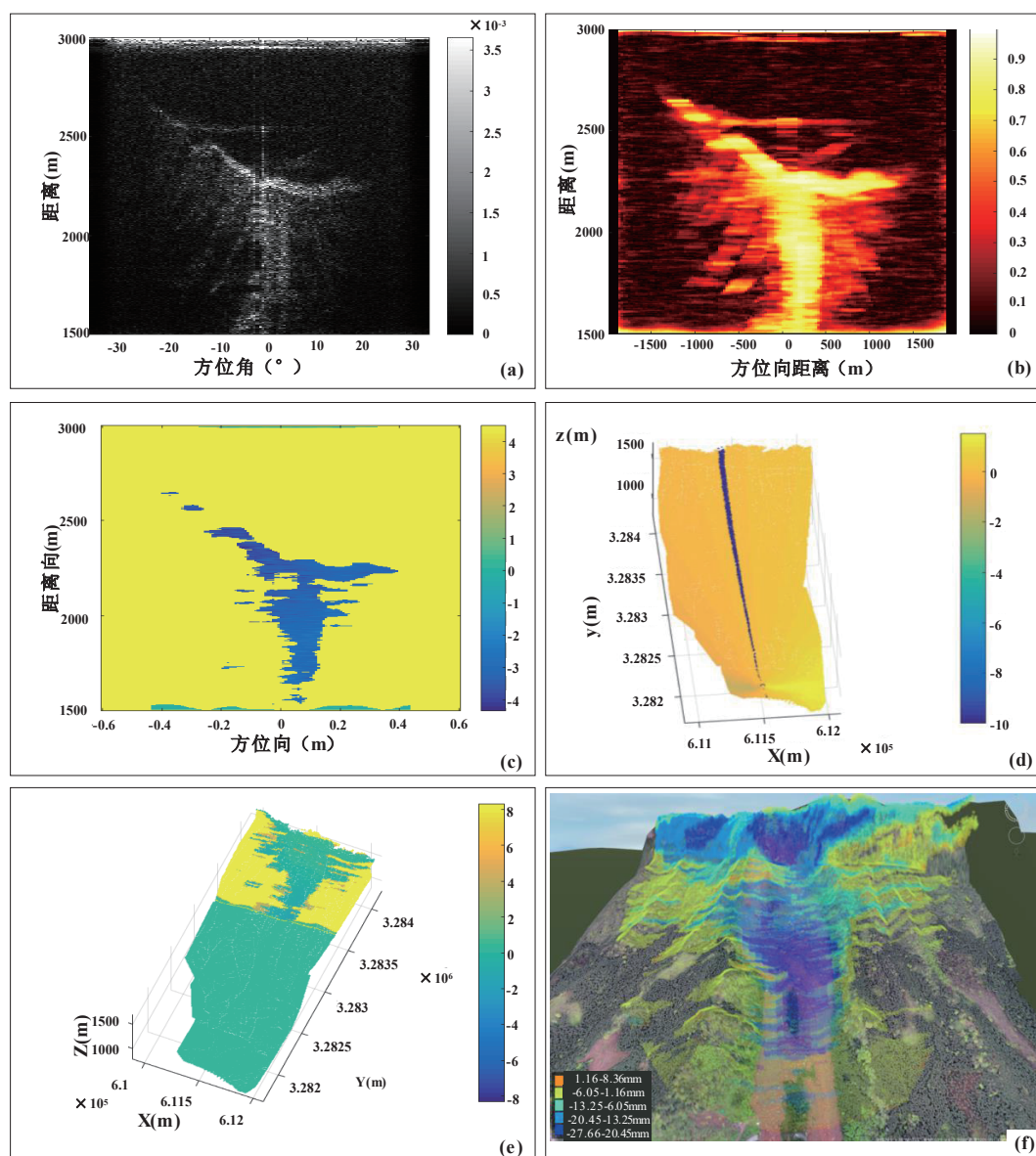


图3 边坡雷达数据处理流程

Fig. 3 Data processing process of S-SAR-I

“11.03”滑坡), 堵塞金沙江, 形成规模更大的堰塞湖。

滑坡位于西藏自治区江达县白格村, 地理坐标为东经 $98^{\circ}41'52.15''$, 北纬 $31^{\circ}4'54.91''$, 滑坡平面图如图4所示。滑坡高程 $2\,880\text{ m} \sim 3\,720\text{ m}$, 前后缘高差约 840 m , 整体坡向约 85° 。滑坡后缘边界以及左右两侧边界均以裸露新鲜基岩为界; 剪出口位于河面以上约 70 m 的坡脚处; 滑坡剖面形态呈上陡-中缓-下陡的折线形, 平均斜长约 $1\,420\text{ m}$, 滑坡右侧发育有冲沟, 沟内可见季节性流水。平面形态呈中部后缘宽、前缘窄的不规则长方形, 平均坡宽约 570 m ; 滑坡区面积约 $60 \times 10^4\text{ m}^2$ 。

滑坡发生后, 结合地形地貌和地表变形迹象, “11.03”滑坡的残留体可分为 K1、K2、K3 三个变形区, 如图4所示。K1 变形区为两次滑坡后的后部残余, 估计残留体方量约 $55 \times 10^4\text{ m}^3$, K2 变形区为滑坡右侧坡体, 估计残留体方量约 $240 \times 10^4\text{ m}^3$, K3 变形区为滑坡左侧坡体, 分为两部分, K3-1 为滑坡上游侧中上部, 估计残留体方量约 $120 \times 10^4\text{ m}^3$, K3-2 为滑坡上游侧下部, 估计残留体方量约 $62 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

3.2 西藏“11.03”白格滑坡残留体应急监测分析

边坡雷达设置在滑坡对岸的一个宽敞、稳定的场地上, 设备前方视野开阔, 无任何物体遮挡, 扫描区域能够完全覆盖滑坡区, 观测区域无植被覆盖,

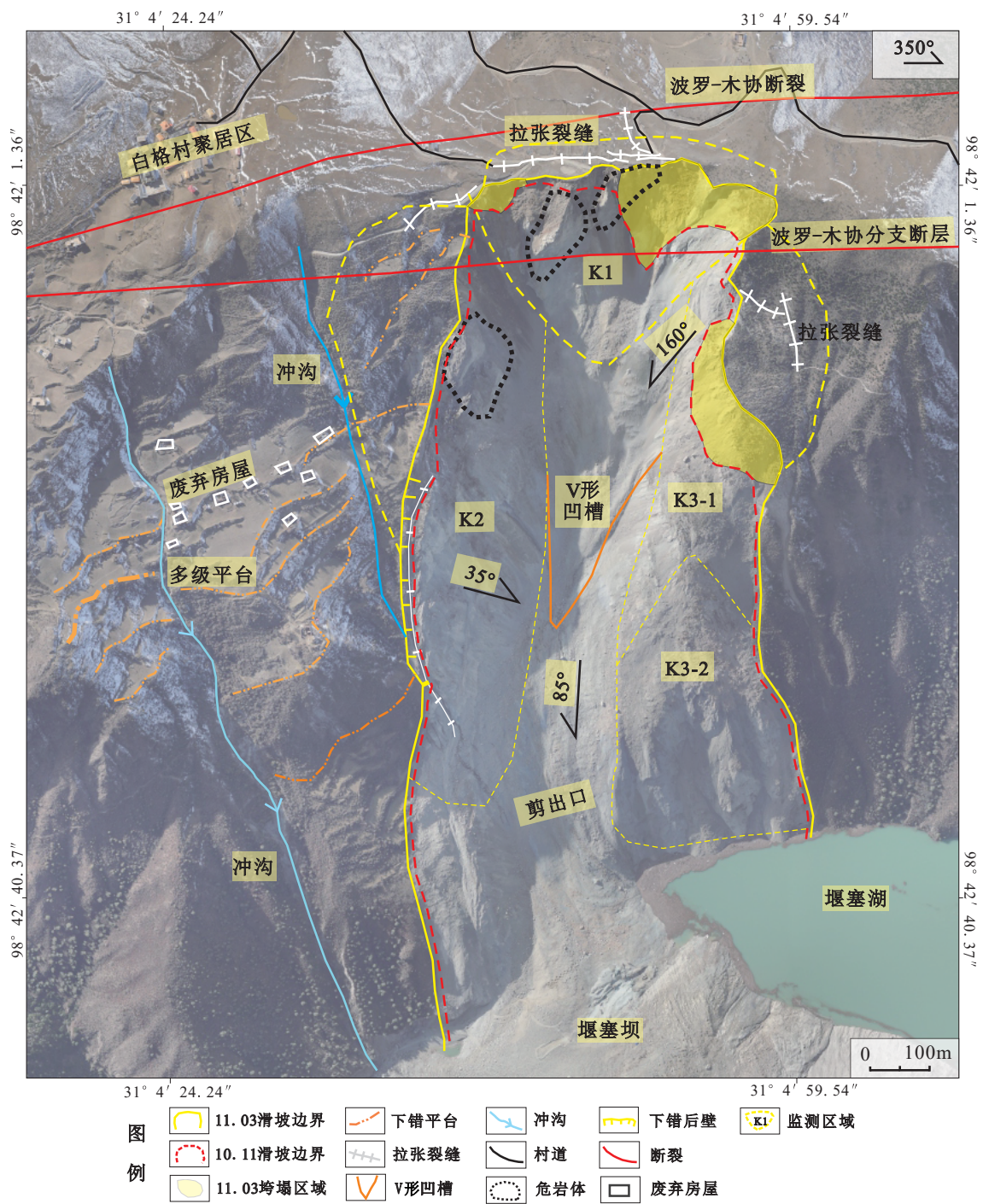


图 4 “11.03” 白格滑坡平面图

Fig. 4 Plane of "11.03" Baige Landslide

满足了监测的基本条件,如图 5 所示。开展了 24 小时不间断监测,监测周期为每 15 分钟(min)一次,监测始于 2018 年 11 月 8 日 14:20,止于 2018 年 11 月 16 日 4:04,为期 8 天。

雷达自动生成的实时点云视向形变图如图 6(a) 所示,可直观反映出三个变形区的累计视变形量的变形强弱,在形变图上共布设了 48 个测点,在滑坡

全貌图中标出了测点的实际位置,并用黄线划定了强变形区范围,如图 6(b)所示。各强变形区特征如表 3 所示。

边坡雷达可实时生成测点的累计视变形量-时间曲线,以 K1 变形区为例,图 7 为累计视变形量-时间曲线(不含累计变形量很小和无变形的测点)。在应急施工阶段,J5 所在位置的累计视变形量最

大, 达到 49.7 mm; 在堰塞湖泄流后, J40 所在位置的累计视变形量最大, 达到 75.8 mm。曲线整体表现出一定的波状起伏的振荡特性。同时, 在 13 日 19:10 至 14 日 3:27、14 日 19:03 至 15 日 2:05 两个时间段, 曲线出现陡增, 发生短时加速变形, 平均变形速率分别达 1.88 mm/h、1.39 mm/h。图 8 为 K1 区上部各测点变形速率-时间曲线图, 可以看出各测点变形速率基本在 $0 \text{ mm} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$ 上下振荡, 振荡幅度在 $0.4 \text{ mm} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$ 范围内, 较大变形速率分别出现在 11 月 10 日 1:56、11 月 14 日 20:33、



图 5 边坡雷达现场监测照

Fig. 5 Photo of slope radar field monitoring

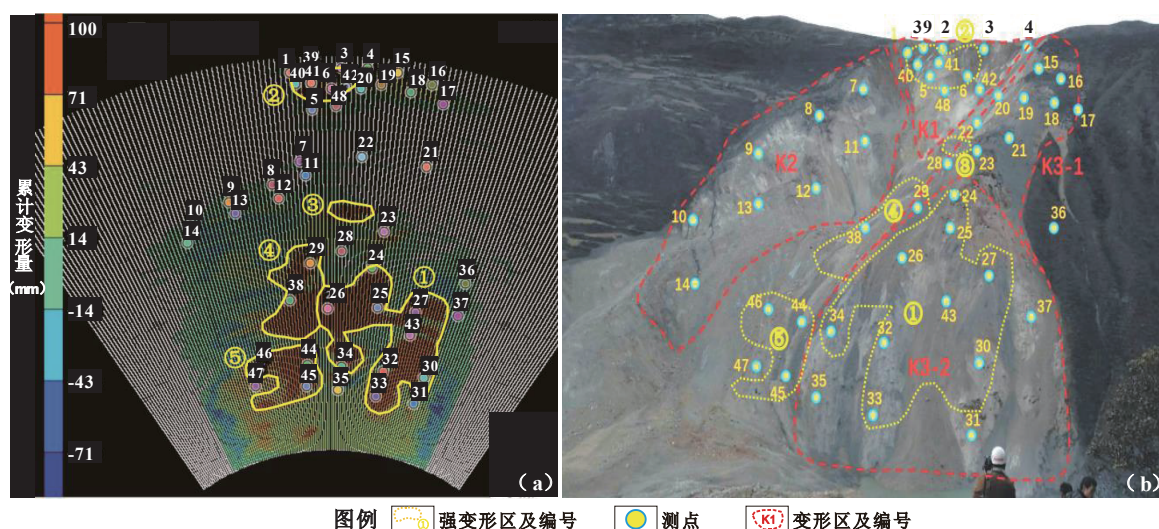
11 月 15 日 22:20, 变形速率分别达到了 $0.34 \text{ mm} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$ 、 $0.378 \text{ mm} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$ 、 $0.372 \text{ mm} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$ 。多数测点显示出较明显的等速变形特点, 但在多个时间点上曲线出现了峰值, 表明局部监测区域变形强烈, 发生加速变形, 如在 13 日 19:10 至 14 日 3:27、14 日 19:03 至 15 日 2:05 两个时间段, 变形速率出现多频次突增, 表现出的加速变形特征与累计视向变形量-时间曲线的变形特征是一致的。

监测期间, K1 变形区于 11 月 10 日 16:30 整体出现加速, 如图 7 所示, 累计变形量-时间曲线斜率突然增大, 出现加速变形, 再结合 K1 区上部各测点的变形速率-时间曲线, 11 月 10 日 13:45 后, K1 区多个测点的变形速率出现多频次突增, 至 11 月 11 日 9:45, 至少出现了 14 次较大的变形速率峰值, K1 区上部呈现出明显的局部加速变形的规律特征, 边坡雷达监测结果与其他监测手段监测结果基本吻合, 具体可参看 4 号裂缝计的实时监测曲线(许强等, 2018)。将边坡雷达监测的情况实时汇报给指挥部和专家组后, 专家组综合判断后于 11 月 11 日 15:50, 向前线指挥部发布了预警, 现场人员避让撤离后, 约 30 分钟后, K1 区上部发生较大规模垮塌, 施工人员成功避险。

4 边坡雷达在丹巴阿娘寨古滑坡复活体应急监测中的应用

4.1 丹巴阿娘寨古滑坡地质概况

2020 年 6 月 17 日, 丹巴县梅龙沟发生山洪泥



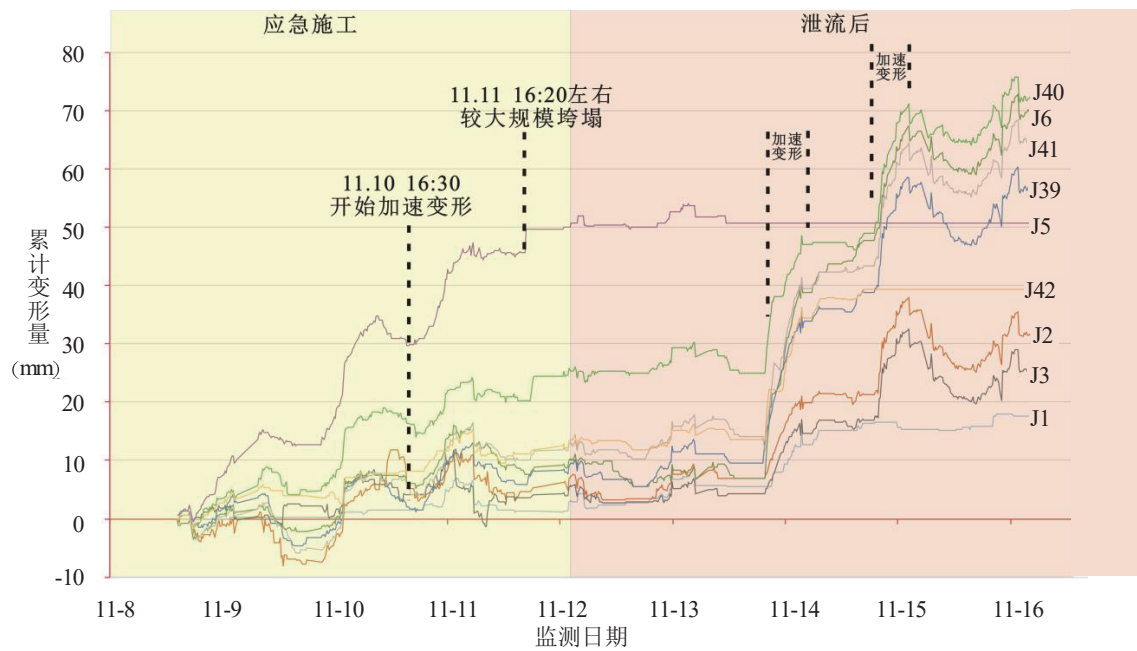
图例 ⑤ 强变形区及编号 ④ 测点 K1 变形区及编号

图 6 实时点云视向形变图(监测时间为 11 月 8 日 14:20~11 月 16 日 23:59) (a) 和边坡雷达测点部署图 (b)

Fig. 6 Real-time cumulative deformation map (November 8th, 14:20 to November 16th, 23:59) (a); Deployment of S-SAR target pixels (b)

表 3 各强变形区特征表
Table 3 Characteristics of each deformation zone

序号	位置	估算面积/m ²	强变形原因
①	K3区下部及坡脚	61 000	浅表层残坡积土和碎裂岩体垮塌
②	K1区下游侧临空面	14 000	临空面松动块石掉落
③, ④	V形凹槽区域	13 200	V形凹槽上部及两侧滚落的块石铲刮地表
⑤	剪出口处	15 400	地表滑坡堆积物、浅表层残坡积土和碎裂岩体垮塌



注：正值代表变形目标相对远离雷达移动，即目标发生滑塌或掉落；负值代表变形目标相对靠近雷达移动，即目标被岩土体堆积覆盖，下同。

图 7 K1 区各测点累计视向变形量-时间曲线图
Fig. 7 Cumulative apparent deformation-time curve of each target pixel in the K1 area

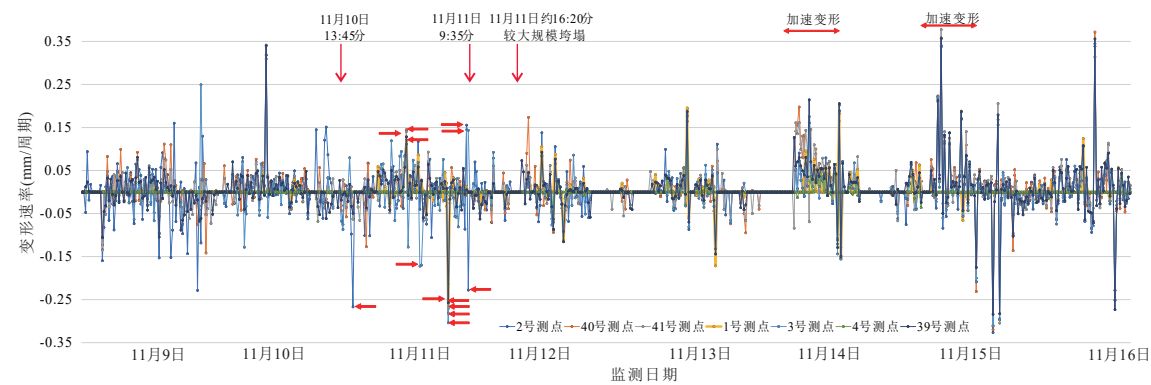


图 8 K1 区上部各测点变形速率-时间曲线图
Fig. 8 Deformation rate-time curve of each target pixel in the K1 area

石流-堰塞湖-溃决洪水链式灾害, 强烈冲刷河流左岸的阿娘寨古滑坡体, 造成古滑坡复活, 如图 9 所示。古滑坡面积约 0.62 km², 估算复活体方量约 1 800×10⁴ m³, 平面呈“扇形”展布, 后缘古滑坡陡壁清晰可见, 陡壁坡度 60°~70°, 上游测边界出露第四系冰水堆积层, 下游侧边界出露泥盆系碛组

(D₁P)千枚岩、板岩。复活体物质组成为古滑坡堆积块碎石土。按变形时序、变形性质、破坏机制将复活体分为四个区域: I 区(前缘滑塌区)、II 区(中间鼓胀变形区)、III 区(上游侧拉裂)、IV 区(下游侧拉裂区)。

4.2 丹巴阿娘寨古滑坡复活体应急监测分析

灾害发生后,将边坡雷达设置在古滑坡河对岸山顶的一个宽敞、稳定的场地上,设备前方视野开

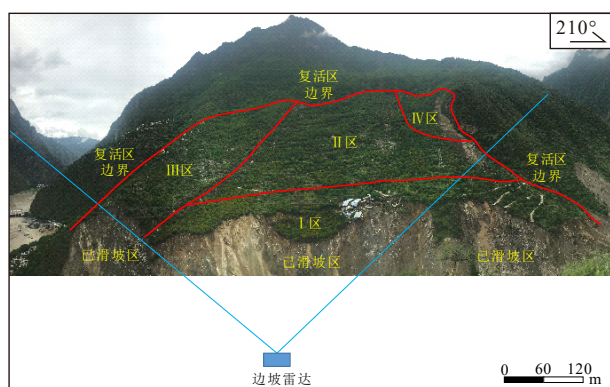


图9 阿娘寨滑坡全貌图

Fig. 9 Plane of Aniangzhai Landslide

阔,无任何物体遮挡,扫描区域能够完全覆盖滑坡区,观测区域植被覆盖较少,满足了监测的基本条件。开展了为期 32 天的古滑坡复活体应急监测,监测始于 6 月 23 日 00:00,止于 7 月 23 日 12:00。在古滑坡区内布设了 72 个测点,古滑坡复活体 32 天的累计变形三维展示图如图 10 所示。

颜色由浅蓝至深蓝,代表区域的堆积或鼓胀程度由小变大;颜色由绿色至红色,代表区域的滑塌程度由小变大。深蓝色区域累计变形量大于 0.3 m,最大处变形量达 0.88 m,主要分布在 I 区(前缘滑塌区)的临空面附近和 II 区(中间鼓胀变形区)的中部、后部的局部区域;红色区域代表累计变形量大于 3.18 m,最大处变形量达 3.75 m,主要集中在 III 区(上游侧拉裂)的中部,以及 III 区和 II 区交界的陡坎部位。

以 III 区(上游侧拉裂区)各测点(测点 45-59)为例,图 11 为 III 区各测点累计变形曲线图,大多数测点的变形量值明显呈现为三个阶段:第一阶段是河流疏浚之前,古滑坡坡脚持续受到冲刷,复活体上游侧拉裂区持续发生变形,最大累计变形量由 0 m 增大至 1.6 m 左右,且变形速率较大;第二阶段是

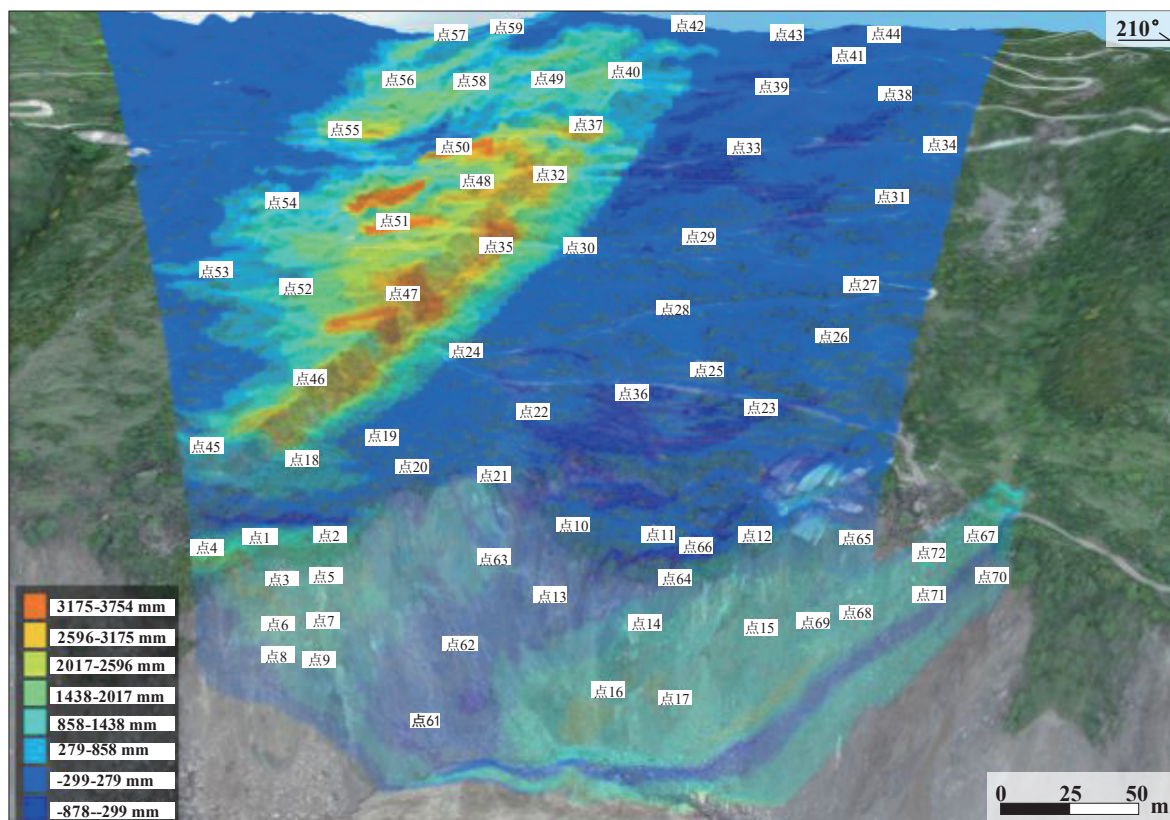


图10 阿娘寨古滑坡残留体累计变形三维分布图

Fig. 10 Cumulative deformation 3D distribution map of Aniangzhai Landslide

河流疏浚之后,古滑坡坡脚受到的河流冲刷减弱,最大累计变形量由 1.6 m 增大至 2.6 m,变形曲线斜率减小,代表复活体上游侧拉裂区变形速率明显减小;第三阶段是持续的强降雨过程,最大累计变形量由 2.6 m 增大至 3.5 m,变形曲线斜率在此阶段增大,代表复活体上游侧拉裂区变形速率再次因强降雨增大。以 I 区(前缘滑塌区)各测点(测点 1~10、13、61~63)为例,图 12 为 I 区各测点累计变形速率图。变形速率在 7 月 10 日至 16 日期间逐渐减小,在此期间最大变形速率达 11 mm/小时;17 日之后速率明显增大,在此期间,最大变形速率达 18 mm/小时,主要原因为 17 日以后经历了几次强降雨,小金川河水位上涨,河水加剧冲刷 I 区古滑坡坡脚,导致 I 区变形加速。

5 讨论

西南地区的突发性重大地质灾害常发生于深

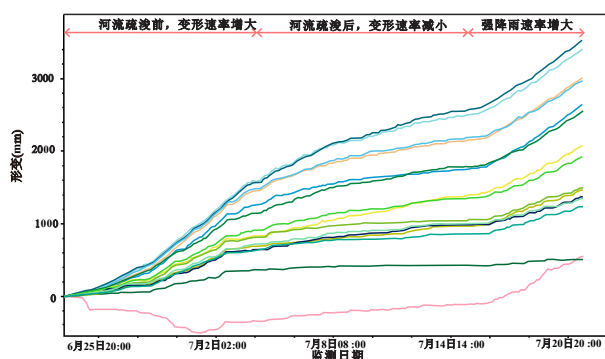


图 11 III 区(上游侧拉裂区)各测点累计视向变形量-时间曲线图

Fig. 11 Cumulative apparent deformation-time curve of each target pixel in the III area

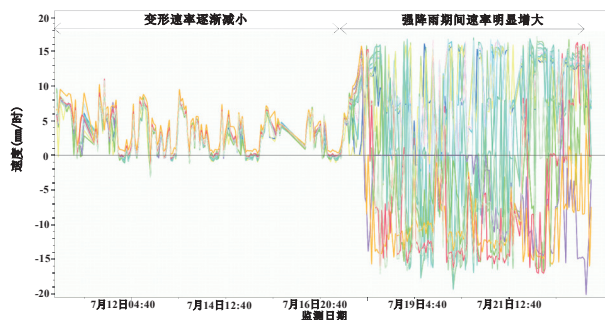


图 12 I 区(前缘滑塌区)上游各测点变形速率-时间曲线图(7月10日 00:00 至 23 日 12:00)

Fig. 12 Deformation rate-time curve of each target pixel in the I area (July 10th, 00:00 to July 23rd, 12:00)

切河谷区,且灾害常具有高位远程、滑坡-堵江-溃坝等特征。针对这类突发性重大地质灾害应急抢险过程中存在的人员到达现场困难、调查与监测困难、灾害可能再次发生变形破坏威胁现场人员等问题,边坡雷达能在灾害所在地对面谷坡上开展 24 小时不间断监测,既保障了监测人员的安全,又能实时监测灾害变形。

边坡雷达与 GNSS、裂缝计等其他监测手段相比,其缺点在于:监测得到的数据为视向变形量,该数值是目标边坡实际位移在雷达视线方向上的一个分量,而不是实际变形位移,由于边坡各区域的变形方向是复杂多样且随机变化的,不具有统一性和稳定性,因此无法通过雷达测量的视向分量反算出目标边坡的实际位移。所以能通过累计视变形量-时间曲线、变形速率-时间曲线准确掌握监测目标的变形特征,但无法与其他监测手段进行实际变形位移值的对比分析。

6 结论

在现场调查基础上,采用边坡雷达开展重大突发性滑坡灾害应急监测,在介绍边坡雷达工作原理、系统组成及数据处理流程的基础上,得到以下几点结论和应用成果:

(1)对西藏“11.03”白格滑坡残留体开展为期 8 天的应急监测,K1 变形区在应急施工阶段和堰塞湖泄流后,各测点的累计视变形量最大值分别为 49.7 mm、75.8 mm;在堰塞湖泄流后出现了两次短时加速变形,平均变形速率分别达 1.88 mm/h、1.39 mm/h。自 11 月 10 日至 11 月 11 日,K1 区至少出现了 14 次较大的变形速率峰值,K1 区上部呈现出明显的局部加速变形的规律特征,边坡雷达监测结果与其他监测手段监测结果基本吻合,向前线指挥部发布预警后约 30 分钟,K1 区上部发生较大规模垮塌,施工人员成功避险。

(2)对丹巴阿娘寨古滑坡复活体开展为期 32 天的应急监测。III 区(上游侧拉裂区)的变形分为河流疏浚前、河流疏浚后和持续强降雨期间三个阶段,变形速率呈现“增大-减小-再增大”的过程,累计变形量最大值分别为 1.6 m、2.6 m 和 3.5 m。I 区(前缘滑塌区)在持续强降雨前后的变形速率明显不同,持续强降雨前后的最大变形速率分别达 11 mm/小时和 18 mm/小时。

(3)通过边坡雷达获取的实时点云形变图,可

识别与划定滑坡发生后残留体或复活体的强变形区,通过各测点的累计视变形量-时间曲线、变形速率-时间曲线、变形加速度-时间曲线,可实时监控残留体或复活体各变形区的整体变形规律,判断各变形区所处的变形演化阶段。

(4)边坡雷达应急监测,提供的监测数据和分析,可实现对残留体或复活体变形区的局部临滑破坏识别与预报。通过对比分析累计变形量-时间曲线、变形速率-时间曲线,再结合其他监测手段结果,可为应急抢险期间的专家研判和指挥决策提供数据支持,边坡雷达是重大突发性地质灾害应急监测和抢险救灾的有力手段之一。

References

- Deng G S, Zheng W M, Yang G H, et al., 2011. GPS monitoring of the Jiayu landslide in Danba, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31 (2): 99 – 104 (in Chinese with English abstract).
- Fan X, Xu Q, Gianvito S, et al., Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2017, 14 (3): 2129–2146.
- Fan X, Xu Q, Alonso-Rodríguez A, et al., Successive land sliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response[J]. *Landslides*, 2019, 16 (5): 1003–1020.
- Hu K H, Zhang X P, Luo H, et al., 2020. Investigation of the “6.17” Debris Flow Chain at the Meilong Catchment of Danba County, China[J]. *Mountain Research*, 38 (6): 945 – 951 (in Chinese with English abstract).
- Jiang L B, Yang K, Che L, 2020. Monitoring of 3D deformation of target by ground-based synthetic aperture radar[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3): 35 – 38 (in Chinese with English abstract).
- Liu B, Ge D Q, Zhang L, et al., 2016. Application of Monitoring Stability after Landslide Based on Ground-Based InSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 36 (8): 674 – 677 (in Chinese with English abstract).
- Lin D C, Ma H T, Song B H, 2016. Application of slope radar in emergency rescue of landslide[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 12 (Suppl): 284 – 289 (in Chinese with English abstract).
- Li R R, Yang Z, Yu B, 2017. Slope Deformation Monitoring of Open Pit Coal Mine by GIS Integrated GB-InSAR[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 26 – 30 (in Chinese with English abstract).
- Liu G X, Zhang B, Zhang R, et al., 2019. Monitoring Dynamics of Hailuoguo Glacier and the Secondary Landslide Disasters Based on Combination of Satellite SAR and Ground-Based SAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44 (7): 980 – 995 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Y, Li W L, Xu Q, et al., 2019. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44 (9): 1342 – 1354 (in Chinese with English abstract).
- Li Q, Zhang J F, 2019. Investigation on earthquake-induced landslide in Jiuzhaigou using fully polarimetric GF-3 SAR images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 23 (5): 883–891.
- Li X Y, Lei T J, Chen W J, et al., 2020. Deformation Monitoring and Application of Dam Slope Based on Ground-based Radar Interferometry[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 48 (9): 221 – 225 (in Chinese with English abstract).
- Luo Y, Song H, Wang R, et al., 2014. Arc FMCW SAR and applications in ground monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52 (9): 5989 – 5998.
- Qiu Z W, Yue J P, Wang X Q, 2014. Application of Ground-based Radar System IBIS-L to Dam Deformation Analysis[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31 (10): 104 – 107 (in Chinese with English abstract).
- Wang N Q, Zeng S W, Wu W J, et al., 1999. A Study on Forecasting Method of The Comprehensive Analysis of Macroscopic Signs of Landslide[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 11 (1): 34 – 38 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, Xu J J, 2006. New Method to Monitor and Forecast Landslide Disaster in Short-term[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 28 (5): 385 – 388 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Huang R Q, Li X Z, 2004. Research Progress in Time Forecast and Prediction of Landslides[J]. *Advance in Earth sciences*, 19 (3): 478 – 483 (in Chinese with English abstract).
- Xue Y, Hu D, Guo K, et al., 2007. Displacement Forecast of Slope Deformation Based on A New Type of Bionic and Intelligent Method[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 29 (5): 446 – 449 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Zeng Y P, 2009. Research on Acceleration Variation Characteristics of Creep Landslide and Early-Warning Prediction Indicator of Critical Sliding[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28 (6): 1099 – 1106 (in Chinese with English abstract).
- Xing C, Han X Q, Zhou X, et al., 2014. Application of GB-SAR to Dam Monitoring[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31 (7): 128 – 134 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Li W L, Dong X J, et al., 2017. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36 (11): 2612 – 2628 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Zheng G, Li W L, et al., 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26 (6): 1534 – 1551 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Dong X J, Li W L, 2019. Integrated Space-Air Ground Early

- Detection, Monitoring Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44 (7) : 957–966 (in Chinese with English abstract).
- Yin Y P, 2004. Initial study on the hazard-relief strategy of geological hazard in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, (2) : 4–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q Z, Zheng W M, Liu Y P, et al., 2010. An application of GPS monitoring: A case study of the Yakaze landslide in Suopo village, Danba, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30 (1) : 111–114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H Y, Zhou K Q, Song Y T, et al., 2017. A New Methodology of Landslide Hazard Mapping by Kernel Density Estimation and Value-at-Risk Measurement in Heifangtai Area, Gansu Province of China[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34 (12) : 33–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H Q, He W X, Zhao B, et al., 2021. Analysis of Field Investigation and Monitoring of "6. 17" Meilong Valley Debris Flow-Aniangzhai Landslide Disaster Chain in Danba County, Sichuan Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 21 (29) : 12481–12489 (in Chinese with English abstract).
- Zheng G, Xu Q, Ju Y Z, et al., 2018. The Pusacun Rock Avalanche on August 28, 2017 in Zhangjia-wan Nayongxian, Gui zhou: Characteristics and Failure Mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26 (1) : 223–240 (in Chinese with English abstract).
- Zheng W M, Deng G S, Liu Y P, et al., 2008. GPS monitoring on the representative landslides in Danba, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28 (3) : 30–34 (in Chinese with English abstract).
- Zheng X T, Yang X L, Ma H T, et al., 2018. Integrated Ground-Based SAR Interferometry, Terrestrial Laser Scanner, and Corner Reflector Deformation Experiments[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18 (12) : 4401.
- 附中文参考文献
- 邓国仕, 郑万模, 杨桂花, 等, 2011. 四川丹巴县甲居滑坡 GPS 监测结果及分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 31 (2) : 99–104.
- 胡凯衡, 张晓鹏, 罗鸿, 等, 2020. 丹巴县梅龙沟“6.17”泥石流灾害链调查[J]. *山地学报*, 38 (6) : 945–951.
- 蒋留兵, 杨凯, 车俐, 2020. 地基合成孔径雷达对目标三维形变的监测[J]. *测绘通报*, (3) : 35–38.
- 刘斌, 葛大庆, 张玲, 等, 2016. 地基雷达干涉测量技术在滑坡灾后稳定性评估中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 36 (8) : 674–677.
- 林德才, 马海涛, 宋宝宏, 2016. 边坡雷达在滑坡应急救援行动中的应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 12 (Suppl) : 284–289.
- 李如仁, 杨震, 余博, 2017. GB-InSAR 集成 GIS 的露天煤矿边坡变形监测[J]. *测绘通报*, (5) : 26–30.
- 刘国祥, 张波, 张瑞, 等, 2019. 联合卫星 SAR 和地基 SAR 的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 44 (7) : 980–995.
- 陆会燕, 李为乐, 许强, 等, 2019. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 44 (9) : 1342–1354.
- 李强, 张景发, 2019. 高分三号卫星全极化 SAR 影像九寨沟地震滑坡普查[J]. *遥感学报*, 23 (5) : 883–891.
- 李翔宇, 雷添杰, 陈文晋, 等, 2020. 基于地基雷达干涉测量技术的大坝边坡变形监测及应用[J]. *安徽农业科学*, 48 (9) : 221–225.
- 邱志伟, 岳建平, 汪学琴, 2014. 地基雷达系统 IBIS-L 在大坝变形监测中的应用[J]. *长江科学院院报*, 31 (10) : 104–107.
- 王念秦, 曾思伟, 吴玮江, 等, 1999. 滑坡宏观迹象综合分析预报方法研究[J]. *甘肃科学学报*, 11 (1) : 34–38.
- 王尚庆, 徐进军, 2006. 滑坡灾害短期临滑预报监测新途径研究[J]. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 28 (5) : 385–388.
- 许强, 黄润秋, 李秀珍, 2004. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. *地球科学进展*, 19 (3) : 478–483.
- 薛源, 胡丹, 郭科, 等, 2007. 基于新型仿生智能方法的边坡变形位移预测[J]. *物探化探计算技术*, 29 (5) : 446–449.
- 许强, 曾裕平, 2009. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 28 (6) : 1099–1106.
- 邢诚, 韩贤权, 周校, 等, 2014. 地基合成孔径雷达大坝监测应用研究[J]. *长江科学院院报*, 31 (7) : 128–134.
- 许强, 李为乐, 董秀军, 等, 2017. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 36 (11) : 2612–2628.
- 许强, 郑光, 李为乐, 等, 2018. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. *工程地质学报*, 26 (6) : 1534–1551.
- 许强, 董秀军, 李为乐, 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 44 (7) : 957–966.
- 殷跃平, 2004. 中国地质灾害减灾战略初步研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, (2) : 4–11.
- 张清志, 郑万模, 刘宇平, 等, 2010. GPS 在滑坡监测中的应用-以四川省丹巴县亚喀则滑坡为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 30 (1) : 111–114.
- 张昊宇, 周克勤, 宋亚腾, 等, 2017. 基于新型 FMCW 地基合成孔径雷达的大坝变形监测[J]. *长江科学院院报*, 34 (12) : 33–37.
- 张海泉, 何文秀, 赵波, 等, 2021. 四川丹巴县“6.17”梅龙沟泥石流-阿娘寨滑坡灾害链现场调查与监测分析[J]. *科学技术与工程*, 21 (29) : 12481–12489.
- 郑光, 许强, 巨袁臻, 等, 2018. 2017 年 8 月 28 日贵州纳雍县张家湾镇普酒村崩塌特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 26 (1) : 223–240.
- 郑万模, 邓国仕, 刘宇平, 等, 2008. 四川丹巴县典型滑坡 GPS 监测效果研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 28 (3) : 30–34.