

综合InSAR技术和多源SAR数据在滑坡变形监测中的应用

于海明, 张熠斌, 方向辉, 徐思瑜, 徐誉维, 张旭晴

Application of multiple InSAR techniques and SAR data from multi-sources to landslide deformation monitoring: A case study of the Zhixincun landslide in Jilin Province

YU Haiming, ZHANG Yibin, FANG Xianghui, XU Siyu, XU Yuwei, and ZHANG Xuqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用——以兰州普兰太公司滑坡为例

Application of “Air-Space-Ground” integrated technology in early identification of landslide hidden danger: taking Lanzhou Pulantai Company Landslide as an example

侯燕军, 周小龙, 石鹏卿, 郭富 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 12-20

国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

基于MSBAS技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析

Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha River based on MSBAS technology

熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 董继红, 张勤 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 1-9

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

潘建平, 邓福江, 徐正宣, 向淇文, 涂文丽, 付占宝 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 98-104

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209021

于海明, 张熠斌, 方向辉, 等. 综合 InSAR 技术和多源 SAR 数据在滑坡变形监测中的应用——以吉林治新村滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 155-162.

YU Haiming, ZHANG Yibin, FANG Xianghui, et al. Application of multiple InSAR techniques and SAR data from multi-sources to landslide deformation monitoring: A case study of the Zhixincun landslide in Jilin Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 155-162.

综合 InSAR 技术和多源 SAR 数据在滑坡变形 监测中的应用 ——以吉林治新村滑坡为例

于海明¹, 张熠斌¹, 方向辉², 徐思瑜¹, 徐誉维¹, 张旭晴³

(1. 吉林省地质环境监测总站(吉林省地质灾害应急技术指导中心), 吉林 长春 130021;
2. 吉林省航测遥感院, 吉林 长春 130061; 3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 为实现对吉林省治新村滑坡的有效监测, 文章选取 2017 年 27 景 Sentinel-1A 数据, 基于小基线雷达干涉测量技术 (SBAS-InSAR) 对治新村滑坡进行形变监测, 分析了其时序演化态势。选用 2016、2017 年 2 景 ALOS-2 数据, 采用差分雷达干涉测量技术 (D-InSAR) 监测了该滑坡形变体的特征。SBAS-InSAR 对滑坡形变时序演化态势进行监测, 而 D-InSAR 则主要对滑坡具体的形变体进行形变监测, 且 L 波段的 ALOS-2 数据穿透性强于 C 波段的 Sentinel-1A 数据, 可以获得更完整的干涉信息, 两者监测结果可交叉验证, 提高结果的可靠性。SBAS-InSAR 监测结果表明: 治新村滑坡汇水区滑坡后缘在监测期间发生了沉降, 并且在 2017 年 7 月 5—29 日期间滑坡后缘地表沉降达 12.47 mm, 监测期间平均沉降速率为 2.88 mm/a; 位于山谷的受威胁居民区发生了抬升, 至 2017 年 12 月 8 日平均累计抬升达 19.59 mm, 监测期间平均抬升速率 19.99 mm/a。D-InSAR 结果显示: 治新村滑坡汇水区斜坡存在 5 处主要变形体, 面积最大变形体 17 973 m², 位于西侧斜坡, 最不稳定变形体位于斜坡东侧, 监测期间平均累计形变量最大达 49.9 mm。两种监测方法都表明, 滑坡灾害威胁主要来自植被覆盖较差的西侧斜坡, 雨季是治新村滑坡灾害防治的重点时期。

关键词: 滑坡; 治新村; SBAS-InSAR; D-InSAR; ALOS-2; Sentinel-1A

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)01-0155-08

Application of multiple InSAR techniques and SAR data from multi-sources to landslide deformation monitoring: A case study of the Zhixincun landslide in Jilin Province

YU Haiming¹, ZHANG Yibin¹, FANG Xianghui², XU Siyu¹, XU Yuwei¹, ZHANG Xuqing³

(1. Jilin Geological Environment Monitoring Center (Jilin Geological Disaster Emergency Technical Guidance Center), Changchun, Jilin 130021, China; 2. Jilin Provincial Institute of Aerial Surveying and Remote Sensing, Changchun, Jilin 130061, China; 3. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China)

收稿日期: 2022-09-14; 修订日期: 2022-11-15

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171407; 42077242)

第一作者: 于海明 (1972—), 男, 吉林吉林人, 硕士, 研究员, 主要从事地质灾害防治、地质环境调查评价等方面的研究。

E-mail: 1378698439@qq.com

通讯作者: 张熠斌 (1983—), 男, 甘肃天水人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环遥感、地质环境信息化等方面的研究。

E-mail: 914345427@qq.com

Abstract: In order to realize effective monitoring of Zhixincun landslide, this paper selected 27 sentinel-1A data in 2017, and conducted deformation monitoring of Zhixincun landslide based on small baseline radar interferometry technology (SBAS-InSAR), and analyzed its temporal evolution situation. Using ALOS-2 data from 2016 and 2017, differential radar interferometry (D-InSAR) was used to monitor the characteristics of the landslide variant. SBAS-InSAR monitors the temporal evolution situation of landslide deformation, while D-InSAR mainly monitors the deformation of specific landslide shape and variation. Moreover, the penetration of L-band ALOS-2 data is stronger than that of C-band sentinel-1A data, which can obtain more complete interference information. The monitoring results of both can be cross-verified. Improve the reliability of the results. The SBAS-InSAR monitoring results showed that the slope end of the landslide catchment area in Zhixincun had subsidence during the monitoring period, and the surface subsidence at the landslide end reached 12.47mm from July 5 to July 29, with an average subsidence rate of 2.88mm/a during the monitoring period. Uplift occurred in the threatened residential areas in the valley, with an average cumulative uplift of 19.59mm on December 8 and an average uplift rate of 19.99mm/a during the monitoring period. The D-InSAR results showed that there were five major deformations on the slope of Zhixincun landslide catchment area. The largest deformations with an area of 17 973m² were located on the west side of the slope, and the most unstable deformations were located on the east side of the slope. The average cumulative shape variable reached 49.9mm during the monitoring period. Both monitoring methods showed that the threat of landslide disaster mainly came from the west slope with poor vegetation cover, and the rainy season was the key period of landslide disaster prevention and control in Zhixincun.

Keywords: landslide; Zhixincun; SBAS-InSAR; D-InSAR; ALOS-2; Sentinel-1A

0 引言

新世纪以来,人类活动对环境和气候的影响逐渐增大,生态环境及各种地质条件也随之发生了较大的改变。中国构造运动频繁,地形结构复杂,地质灾害频发,滑坡、崩塌等地质灾害呈现出分布广、高易发等特点。地质灾害严重威胁群众的生命财产安全,并限制区域经济发展^[1-2]。滑坡是斜坡岩石体以及大面积冰雪覆盖体沿着贯通的剪切面所发生的体位滑动现象,由于气候、天气、地形、交通、通讯等因素的影响,很难做到早期预警和提前防范^[3]。由于环境限制,传统测量手段如水准测量、GPS 测量难以大范围开展地质灾害监测^[4];光学遥感技术易受气候条件影响,并且难以实现对缓慢变形地质灾害隐患的识别^[5-6]。

合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)作为一种新型地表形变监测技术,具有空间分辨高、时间分辨率高、精度高以及大范围空间连续覆盖等优势,已成为地质灾害监测的重要手段之一,被众多学者用于地震^[7]、滑坡灾害应急排查^[8]、滑坡发育监测^[9]、地面沉降^[10]等的形变监测研究。法国学者 Fruneau 等^[11]于 1996 年首次将 InSAR 技术应用于滑坡监测领域,采用差分雷达干涉技术(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)技术处理 ERS-1 数据获取了 6 景差分干涉图,监测结果清晰的呈现了滑坡的形变特征,且与实测结果一致。由于不同时

期获取的 SAR 影像间的相干性较差或失相干,以及大气效应的影响制约了 D-InSAR 技术在滑坡形变监测领域的应用,而差分干涉测量短基线集时序分析技术(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)^[12-13]可实现对目标区域的连续时空监测,意大利学者 Ferretti 等^[14]提出的永久散射体差分干涉测量技术(persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)以及 Berardino 等^[15]SBAS-InSAR,能够获取地面较高精度的地形数据以及地表时序形变数据,较大程度提升了 SAR 数据干涉测量的精度。姚佳明等^[16]利用 SBAS-InSAR 技术对煤层开采诱发的地表形变模式进行了研究,证实了 SBAS-InSAR 技术监测地表形变的准确性;赵富萌等^[17]采用 SBAS-InSAR 技术识别了 Karakorum 公路沿线滑坡点;Zhang 等^[18]利用了传统经验模型与 SBAS-InSAR 监测相结合的方式成功实现了甘肃省中部黄河黑泰河潜在滑坡的分析评价。InSAR 技术已被广泛应用于滑坡地质灾害监测,但单一 SAR 数据监测的局限性限制了对滑坡形变的监测效果。C 波段的 Sentinel-1A 影像时间基线小,影像数据多,适合应用时序 InSAR 技术监测滑坡时序形变特征,但在植被覆盖区因相干性过低而获得的监测点稀少;L 波段的 ALOS-2 数据时间基线长,影像数量少,适合利用 D-InSAR 技术进行滑坡形变特征监测。采用少量长波段 ALOS-2 影像和大量短波段 Sentinel-1A 影像结合进行滑坡形变监测,能够在具有一定植被覆盖度的山区探测到较为明显的滑坡

地表形变^[19-20]。

治新村滑坡是吉林市内非常典型的土质滑坡,在 2017 年 7 月强降雨过程中发生了滑动,滑坡体滑到村民住宅墙根处,造成住宅后墙变形,雨水进入民房内,但未造成人员伤亡。以往对该滑坡的监测,只是传统的人工地面调查,基于 InSAR 技术对治新村滑坡进行形变监测的研究却鲜有报道。本文选取 2017 年 1 月 6 日—2017 年 12 月 8 日的 27 景 Sentinel-1A 数据,使用 SBAS-InSAR 技术对治新村滑坡及周边区域进行了地表形变监测,并进行形变特征及趋势分析。考虑到滑坡所在区域植被覆盖情况及东北地区季节性积雪对 SAR 影像相干性的影响,选取 2 景穿透性更强的 L 波段 ALOS-2 数据监测滑坡体变形特征,综合运用 SBAS-InSAR 和 D-InSAR 技术,以及 C 波段的 Sentinel-1A 数据和 L 波段 ALOS-2 数据,以期验证监测结果的可靠性。研究结果对治新村滑坡灾害防治具有重要的指导意义,并可为后期类似滑坡地质灾害监测和研究提供参考依据。

1 研究区概况及数据

1.1 治新村滑坡

治新村滑坡位于吉林省吉林市船营区大绥河镇治新村 12 社(图 1)。滑坡前缘高程 306.8 m,后缘高程 322.8 m,长约 327 m,宽约 48 m,滑坡面积达 15 696 m²。平面形态为不规则扇形,滑动面剖面形态为凹形,产状:151°∠33°。土质滑体,平均厚 1.2 m。地层岩性为残坡积物砂砾质土,滑床岩性为范家屯组板岩、粉砂岩。滑坡陡坎、后壁发育状况一般,尚可辨认。侧边界不发育,前缘、剪出口发育一般,尚可辨认。拉张裂缝、剪切

裂缝较发育,裂缝宽度一般在 0.4 m,长 1~5 m 不等,规模较小,贯通性较差,见有树木歪斜现象。滑坡体在雨水的浸润作用下,沿基覆界面滑动形成滑坡,为自然滑坡。目前,该滑坡现处于蠕变阶段,不稳定。

1.2 SAR 影像和 DEM 数据

文中用于 SBAS-InSAR 的 C 波段数据为欧空局于 2014 年发射的 Sentinel-1A 卫星影像,该卫星轨道高度 693 km,重访周期 12 d,覆盖范围达到 42 500 km²,方位向分辨率为 13.98 m,斜距向分辨率为 2.33 m,雷达波长为 5.6 cm,具有条带模式(strip map, SM)、宽幅干涉模式(interferometric wide, IW)、极宽模式(extra-wide swath, EW)和波模式(wave mode)4 种成像模式;用于 D-InSAR 处理的 L 波段数据采用日本陆地观测卫星 ALOS PALSAR-2 影像,L 波段的 ALOS PALSAR-2 数据具有较强的穿透力,可以很好地监测地壳运动,获取较准确的数据。

本文选用了 C 波段(2017-01-06—2017-12-08)27 景降轨影像(表 1),成像模式为 IW 模式,极化方式为 VV;L 波段(2016-07-26—2017-08-22)2 景影像(表 2),成像模式为 ScanSAR 扫描模式,极化方式为 HH。DEM 数

表 1 Sentinel-1A 数据集
Table 1 Sentinel-1A data set

序号	成像日期	时间基线/d	空间基线/m
01	2017-01-06	60	43.8
02	2017-01-18	48	19.9
03	2017-01-30	36	75.9
04	2017-02-11	24	170.1
05	2017-02-23	12	109.8
06	2017-03-07	0	0
07	2017-03-19	12	-15.5
08	2017-03-31	24	32.9
09	2017-04-12	36	57.4
10	2017-04-24	48	128.3
11	2017-05-06	60	92.7
12	2017-05-18	72	47.9
13	2017-05-30	84	-70.3
14	2017-06-11	96	104.5
15	2017-06-23	108	95.2
16	2017-07-05	120	25.1
17	2017-07-29	144	43.2
18	2017-08-10	156	71.3
19	2017-08-22	168	27.8
20	2017-09-03	180	62.6
21	2017-09-15	192	107.1
22	2017-09-27	204	62.3
23	2017-10-09	216	70.1
24	2017-10-21	228	122.2
25	2017-11-02	240	145.3
26	2017-11-26	264	56.1
27	2017-12-08	276	61.5

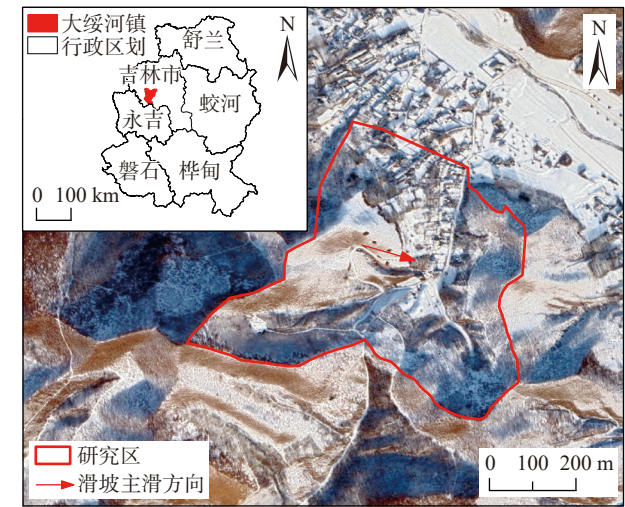


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of study area

据可用于去除地形相位以及高程误差相位计算,是 SAR 数据处理的辅助数据,选用 NASA 和 NIMA 联合发布的分辨率为 90 m 的 SRTM3 数据。

表 2 ALOS-2 影像信息
Table 2 ALOS-2 image information

序号	成像日期	时间基线/d	空间基线/m
01	2016-07-26	392	-225.5
02	2017-08-22		

2 研究方法

数据处理使用 ENVI SARscape 平台。采用 SBAS-InSAR、D-InSAR 方法分别对 C 波段和 L 波段 SAR 数据进行处理,SBAS-InSAR 对配准好的多幅 SAR 影像通过设定的时间基线和空间基线阈值选取合适的干涉对组合,并基于相干目标进行相位解缠和参数解算获取长时间序列的形变信息,相较于 D-InSAR,SBAS-InSAR 可以分析更大时间序列数据,更好地克服了时空失相干的影响,并减小了大气延迟误差、地形误差、高程误差

和其余噪声误差。SBAS-InSAR、D-InSAR 数据处理流程如图 2 所示。

SBAS-InSAR 是一种基于分布式目标的时间序列分析技术,将时空基线较短的影像两两配对成干涉像对,应用奇异值分解的方法求解单点的形变相位方程,解算高程误差及形变速率,通过残余相位对大气相位和非线性形变进行反演后获得该时间段内的形变时间序列。本文通过设置时间基线、空间基线阈值控制 Sentinel-1A 数据集生成干涉像对的数量,时间基线长度为 60 d,空间基线阈值为理论空间基线值的 45%,C 波段 27 景 SAR 影像共获取干涉像对 98 对,其中主影像日期为 2017 年 3 月 31 日,干涉像对以及基线连接情况如图 3 所示。然后基于干涉像对进行 SLC 影像配准,生成干涉图,经过 Goldstein 滤波处理提高干涉条纹的清晰度。选取近 30 个控制点进行轨道精炼和重去平处理,选择 automatic refinement 方法消除可能的斜坡相位。历经 2 次 SBAS 反演,精确估计且去除地形残余相位、大气效应相位,最后结合 DEM 数据进行地理编码后获取各期累计形变图和平均形变速率图。

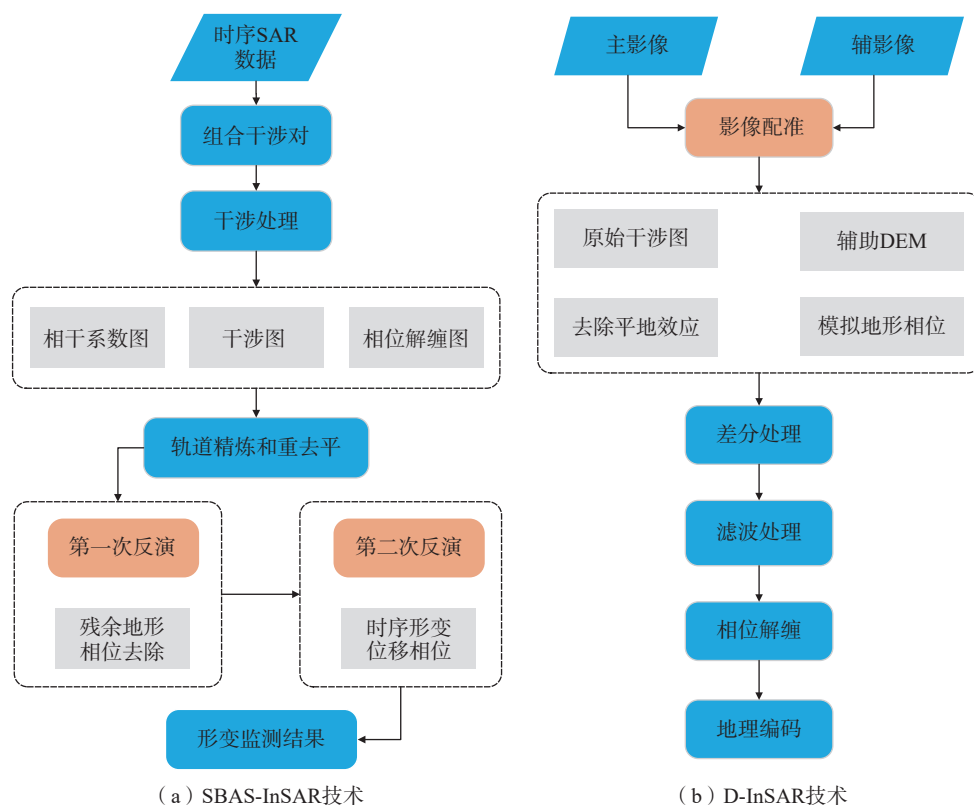


图 2 SAR 数据处理流程图

Fig. 2 Workflow of SAR data processing

D-InSAR 技术是对 2 景 SAR 影像进行差分干涉,同时需要外部的 DEM 数据模拟地形相位,进而去除

掉地形相位的影响,仅保留形变相位。首先估算 2 景 ALOS-2 影像基线情况,包括像对的时间基线、空间基

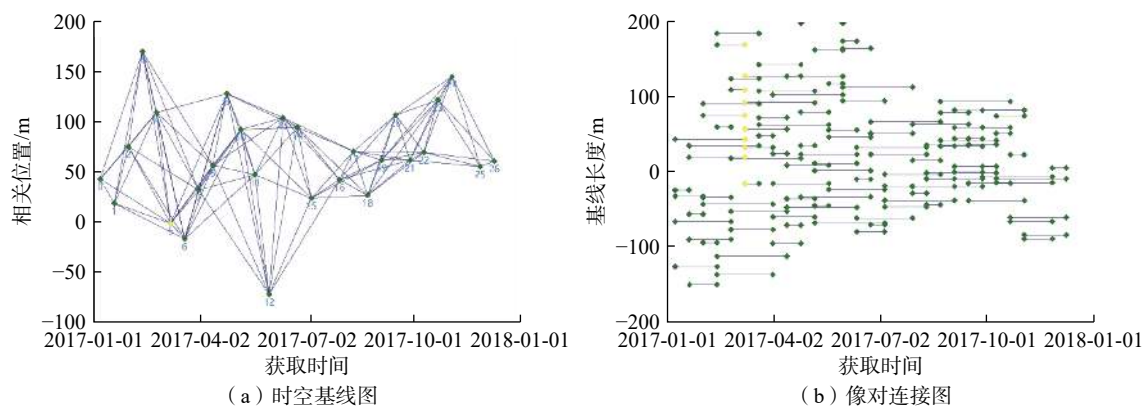


图3 SBAS-InSAR 时空基线图与像对连接图

Fig. 3 SBAS-InSAR space-time baseline diagram and image pair connection diagram

线、多普勒频移、相位代表的高程变化值等,作为 InSAR 形变监测的前提,然后基于 DEM 数据对主辅影像配准和干涉处理,获取干涉相位图,本文选取 2016 年 7 月 26 日影像为主影像,2017 年 8 月 22 日影像为辅影像。采用 Goldstein 滤波提高干涉条纹的清晰度,减少由于时空基线引起的失相干的噪声,使用最小费用流 (minimum cost flow, MCF) 进行相位解缠,解决相位模糊度的问题。在相对稳定区域选择 GCP 进行轨道精炼与重去平处理,采用 automatic refinement 方法消除可能的斜坡相位。最后将经过绝对校准和解缠的相位结合,并将合成相位通过地理编码转换到制图坐标系统。

3 结果与分析

3.1 SBAS-InSAR 监测结果

由于治新村滑坡低矮植被覆盖和冬季积雪影响,对于 C 波段的 Sentinel-1A 数据,干涉测量时失相干较严重,获取的监测点主要位于滑坡后缘和滑坡前缘居民区(图 4)。SBAS-InSAR 监测结果显示,滑坡后缘斜坡在 2017 年发生沉降,而山谷村落地表发生抬升。滑坡后缘斜坡 LOS 向平均沉降速率为 2.88 mm/a,山谷村落 LOS 向平均抬升速率为 19.99 mm/a。

为进一步获取滑坡后缘斜坡及山谷居民区地表形变特征,对滑坡后缘监测点 P1、P2、P3(图 4)进行累计形变量时序分析,同时综合分析居民区最大抬升点和平均抬升累计形变特征,分析滑坡对居民区的影响。图 5 说明了滑坡后缘 3 个监测点(P1、P2、P3)沿雷达视线方向(LOS 向)的累计形变特征。滑坡后缘在 2017 年 1 月 6 日—4 月 12 日期间处于缓慢抬升阶段,至 4 月 12 日累计抬升达 10.95 mm; 4 月 12 日—7 月 5 日发生剧烈沉降后处于稳定状态; 7 月 5 日—7 月 29 日期间滑坡后缘地表沉降达 12.47 mm,此后地表抬升

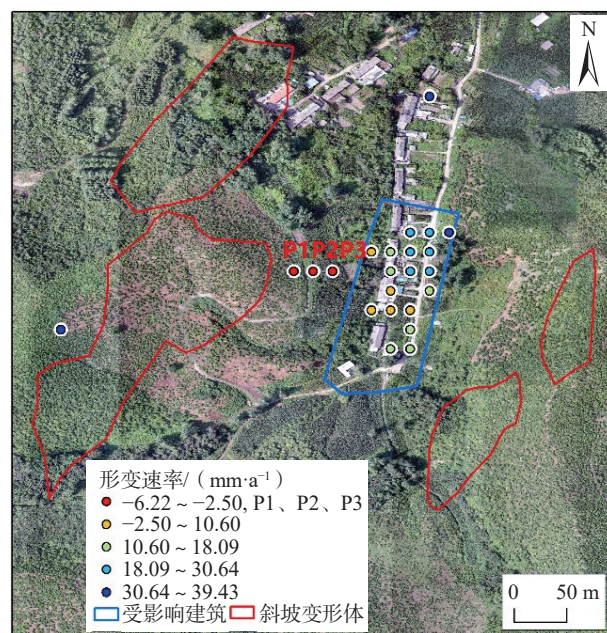


图4 SBAS-InSAR 监测结果

Fig. 4 SBAS-InSAR monitoring results

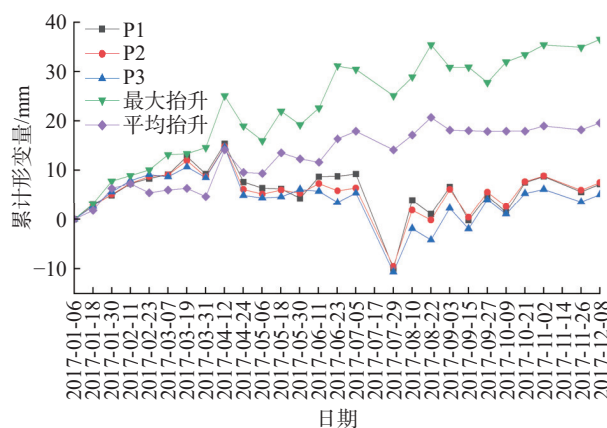


图5 SBAS-InSAR 监测点时序特征

Fig. 5 Temporal characteristics of SBAS-InSAR monitoring points

8.21 mm 后处于相对稳定的起伏变化,最终累计地表累计抬升 4.81 mm。同时,图 4 展示了受滑坡威胁的山谷村落监测点平均累计形变量变化图,山谷村落地表在 1 月 6 日—4 月 24 日期间同滑坡后缘形变趋势相似,但在 4 月 24 日之后便持续抬升,至 12 月 8 日平均累计抬升达 19.59 mm,最大抬升点累计抬升达 36.62 mm。

2017 年 7 月 13 日 8 时—14 日 8 时,吉林市遭受罕见暴雨天气影响;7 月 19 日 8 时—21 日 8 时,吉林地区再次出现大范围暴雨、大暴雨天气,结合图 4 可以看出,治新村滑坡后缘在 1 月 6 日—7 月 5 日期间地表处于相对稳定状态,而在 7 月 5 日—8 月 10 日出现剧烈的沉降抬升变化,7 月 5 日—7 月 29 日期间的高强度降雨导致了此次滑坡灾害的发生,具体表现为滑坡后缘先沉降后抬升。因此,雨季是治新村滑坡监测与防治的重点时期。

3.2 D-InSAR 监测结果

D-InSAR 监测结果表明,监测期间在治新村滑坡斜坡上存在 5 处主要变形体(图 6、表 3)。1 号变形体位于治新村滑坡汇水区西南侧斜坡顶端,变形体面积达 5 318 m²,监测期间最大沉降量为 58.6 mm,最小沉降量为 29.4 mm,平均沉降量达 43.2 mm;2 号变形体位于滑坡汇水区西侧斜坡中上部,变形体面积达 17 973 m²,监测期间最大沉降量为 50.6 mm,最小沉降量为 24.2 mm,平均沉降量达 36.4 mm;3 号变形体位于滑坡汇水区东侧斜坡顶端,变形体面积为 4 636 m²,监测期间最大沉降量为 68.7 mm,最小沉降量为 29.8 mm,平均沉降量达 43.5 mm;4 号变形体位于滑坡汇水区东侧斜坡顶端,与 3 号变形体北侧相接,变形体面积 3 043 m²,监测期

间最大沉降量为 71.8 mm,最小沉降量为 31.3 mm,平均沉降量达 49.9 mm;5 号变形体位于滑坡汇水区西侧斜坡北部顶端,较接近居民区,变形体面积达 11 281 m²,监测期间最大沉降量为 47.6 mm,最小沉降量为 20.1 mm,平均沉降量达 38.3 mm。

表 3 斜坡变形体
Table 3 Deformation of slope

编号	面积/m ²	最大沉降量/mm	最小沉降量/mm	平均沉降量/mm
1	5 318	58.6	29.4	43.2
2	17 973	50.6	24.2	36.4
3	4 636	68.7	29.8	43.5
4	3 043	71.8	31.3	49.9
5	11 281	47.6	20.1	38.3

汇水区两侧斜坡变形体分布及变形体沉降量显示,西侧斜坡大面积处于不稳定状态,并向斜坡下端逐步延伸;东侧斜坡虽然顶端变形体形变量较大,但是变形体面积较小,整个东侧斜坡大部分区域由于植被覆盖程度较好,处于相对稳定状态。因此,治新村滑坡威胁主要来源于汇水区植被覆盖程度较差的西侧斜坡。

根据斜坡两侧变形体特征及斜坡地形特征,针对剖面 AA'、BB'、CC'、DD'作形变量及高程变化剖面分析,对比二者变化特征(图 7)。从图 7 可以看出,区域形变累计量与斜坡高程存在明显负相关,即斜坡高处相对沉降量较大,而随着斜坡高程降低,沉降量亦逐渐减小,局部居民区由于滑坡物质累积,地表呈现抬升现象。

4 结论

(1)SBAS-InSAR 技术可以监测滑坡形变演化特征,D-InSAR 技术可以监测滑坡形变体特征,二者结合进行监测可以更全面地反映滑坡时空演化态势。受研究区低矮植被和冬季积雪的影响,通过 C 波段 Sentinel-1A 影像获取的滑坡体监测点较少,使用 L 波段 ALOS-2 数据则可以很好的解决影像失相干的问题。

(2)滑坡后缘在监测期间发生了明显形变,该区域在 7 月份强降雨过程中发生了先沉降后抬升的形变,期间沉降量达 12.47 mm,监测期间平均沉降速率为 2.88 mm/a。同时,山谷居民区地表也在降雨后处于持续抬升阶段,至 12 月 8 日平均累计抬升达 19.59 mm,最大抬升点累计抬升达 36.62 mm,监测期间平均抬升速率 19.99 mm/a。因此,雨季是治新村滑坡灾害防治的重点时期。

(3)基西侧斜坡大面积处于不稳定状态,有向斜坡

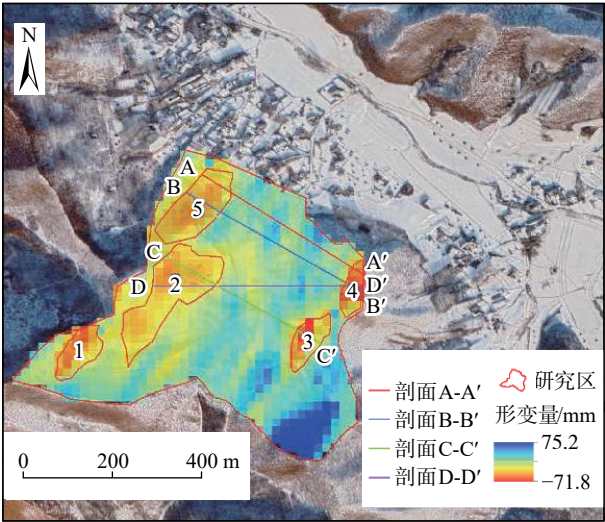


图 6 D-InSAR 监测结果
Fig. 6 D-InSAR monitoring results

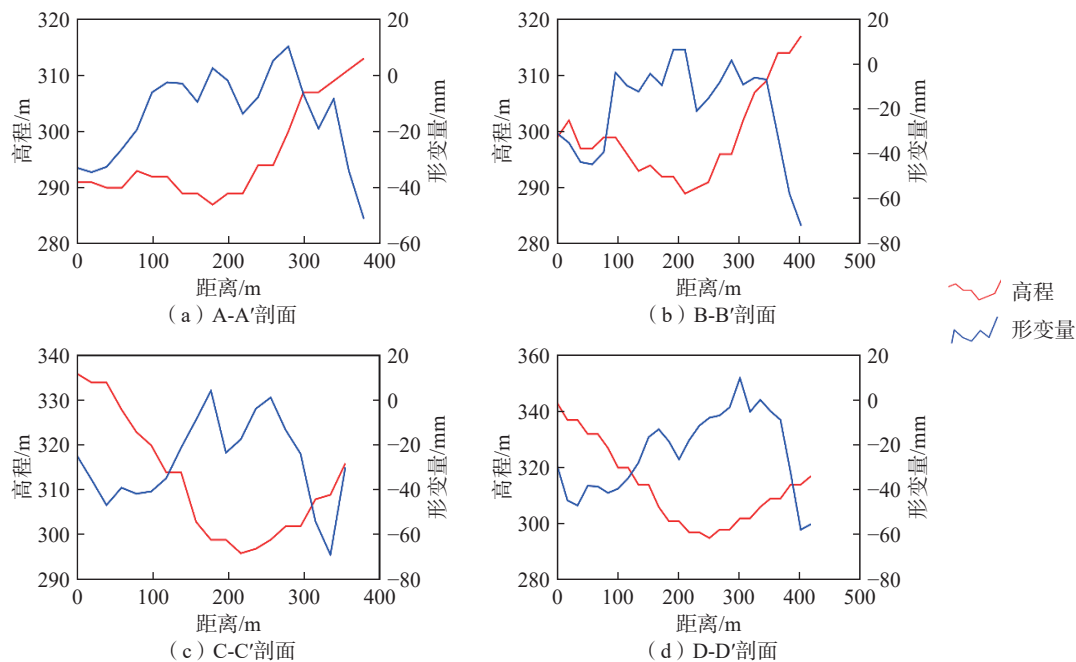


图 7 治新村滑坡剖面特征

Fig. 7 Profile characteristics of Zhixincun landslide

下端逐步延伸的趋势,最大变形体面积 17 973 m²,平均沉降量 36.4 mm;东侧斜坡变形体面积小于西侧,但变形体形变量较大,平均沉降量 49.9 mm。结合实际调查,东侧斜坡大部分区域由于植被覆盖程度较好,处于相对稳定状态。因此,治新村滑坡灾害的主要威胁来源于汇水区植被覆盖程度较差的西侧斜坡,且形变同地形相关明显,斜坡顶端沉降量几乎是最大的,随着斜坡高度降低,沉降量亦逐渐降低,但山谷居民区由于滑坡物质累积则呈现地表抬升。

参考文献(References):

[1] 殷跃平,王文沛.高位远程滑坡动力侵蚀犁切计算模型研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1513-1521. [YIN Yueping, WANG Wenpei. Study on calculation model of dynamic erosion plowing of high-level remote landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1513-1521. (in Chinese with English abstract)]

[2] 黄海峰,林海玉,吕奕铭,等.基于小型无人机遥感的单体地质灾害应急调查方法与实践[J].工程地质学报,2017,25(2):447-454. [HUANG Haifeng, LIN Haiyu, LYU Yiming, et al. Micro unmanned aerial vehicle based remote sensing method and application for emergency survey of individual geohazard[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 447-454. (in Chinese with English abstract)]

[3] 朱庆,曾浩炜,丁雨淋,等.重大滑坡隐患分析方法综述

[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1551-1561. [ZHU Qing, ZENG Haowei, DING Yulin, et al. A review of major potential landslide hazards analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1551-1561. (in Chinese with English abstract)]

[4] 张勤,黄观文,杨成生.地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J].测绘学报,2017,46(10):1300-1307. [ZHANG Qin, HUANG Guanwen, YANG Chengsheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1300-1307. (in Chinese with English abstract)]

[5] 刘文,王猛,朱赛楠,等.基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析——以金沙江上游典型堵江滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(5):29-39. [LIU Wen, WANG Meng, ZHU Sainan, et al. An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: A case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 29-39. (in Chinese with English abstract)]

[6] XIE Mingli, ZHAO Weihua, JU Nengpan, et al. Landslide evolution assessment based on InSAR and real-time monitoring of a large reactivated landslide, Wenchuan, China[J]. Engineering Geology, 2020, 277: 105781.

[7] 王洵,周云,孙蒙,等.青海玉树 Mw6.9 级地震震源破裂过程[J].地质通报,2014,33(4):517-523. [WANG

- Xun, ZHOU Yun, SUN Meng, et al. Rupture process of the 2010 Mw6.9 Yushu earthquake in Qinghai Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(4): 517–523. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘星洪, 姚鑫, 周振凯, 等. 滑坡灾害InSAR应急排查技术方法研究 [J]. *地质力学学报*, 2018, 24(2): 229–237. [LIU Xinghong, YAO Xin, ZHOU Zhenkai, et al. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(2): 229–237. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张佳佳, 田尤, 陈龙, 等. 澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制 [J]. *地质通报*, 2021, 40(12): 2024–2033. [ZHANG Jiajia, TIAN You, CHEN Long, et al. Development and formation mechanism of landslides along Changdu section of Lancang River [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2024–2033. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许军强, 马涛, 卢意恺, 等. 基于SBAS-InSAR技术的豫北平原地面沉降监测 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(4): 1182–1191. [XU Junqiang, MA Tao, LU Yikai, et al. Land subsidence monitoring in North Henan plain based on SBAS-InSAR technology [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(4): 1182–1191. (in Chinese with English abstract)]
- [11] FRUNEAU B, ACHACHE J, DELACOURT C. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry [J]. *Tectonophysics*, 1996, 265(3/4): 181–190.
- [12] MADSEN S N, ZEBKER H A, MARTIN J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 246–256.
- [13] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载SAR技术发展趋势 [J]. *雷达学报*, 2020, 9(1): 1–33. [DENG Yunkai, YU Weidong, ZHANG Heng, et al. Forthcoming spaceborne SAR development [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 1–33. (in Chinese with English abstract)]
- [14] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [C] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. January 2001, IEEE, 2002: 8–20.
- [15] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [16] 姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 等. 基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 135–146. [YAO Jiaming, YAO Xin, CHEN Jian, et al. A study of deformation mode and formation mechanism of a bedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 135–146. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 赵富萌, 张毅, 孟兴民, 等. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 142–152. [ZHAO Fumeng, ZHANG Yi, MENG Xingmin, et al. Early identification of geological hazards in the Gaizi valley near the Karakoran highway based on SBAS-InSAR technology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 142–152. (in Chinese with English abstract)]
- [18] ZHANG Y, MENG X M, DIJKSTRA T A, et al. Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 241: 111738.
- [19] 季灵运, 王庆良, 崔笃信, 等. 利用SBAS-DInSAR技术提取腾冲火山山区形变时间序列 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(4): 149–153. [JI Lingyun, WANG Qingliang, CUI Duxin, et al. Time series of deformation in Tengchong volcanic area extracted by SBAS-DInSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 149–153. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 葛伟丽, 李元杰, 张春明, 等. 基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 198–206. [GE Weili, LI Yuanjie, ZHANG Chunming, et al. An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 198–206. (in Chinese with English abstract)]