

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-03

张本浩, 魏云杰, 杨成生, 等. 西藏然乌地区地质灾害隐患点 InSAR 识别与监测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 18-26.
ZHANG Benhao, WEI Yunjie, YANG Chengsheng, *et al.* InSAR identification and monitoring of geological hazards in Ranwu region of Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 18-26.

西藏然乌地区地质灾害隐患点 InSAR 识别与监测

张本浩¹, 魏云杰², 杨成生¹, 熊国华¹, 董继红¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081)

摘要: 西藏东南地区地处青藏高原东南部, 地势陡峭。多期次板块构造运动、岩体间相互挤压运动导致地质灾害频繁发生且规模大。针对该区域的地质灾害调查与监测研究工作对防灾减灾具有重要意义。文章以藏东南然乌地区为研究区, 分别利用升降轨 Sentinel-1A 卫星数据对该区域隐患灾害点进行识别, 并分析了 SAR 影像几何畸变对地质灾害识别的影响。通过对 InSAR 监测结果进行分析, 文章最终共圈定了区域内的滑坡、冰川隐患灾害点 67 处。同时, 为了更好的分析灾害体的形变特征和规律, 选取了然乌区域安目错北岸三处典型冰川灾害体, 利用多维小基线子集(MSBAS)技术获取了坡体的二维(水平东西向和垂直向)形变速率和时间序列。通过对吉穷隆冰川、迫弄冰川和瓦巴村冰川三处典型冰川的形变时间序列结果进行分析, 发现从 2018 年 1 月到 2020 年 10 月, 三个冰川水平东西方向上的最大累计位移量分别达到了 202 mm、283 mm、194 mm, 垂直方向上最大累计位移量分别达到了 97 mm、-155 mm、-163 mm。水平方向上三处典型冰川表现为加速变形趋势, 垂直方向上表现为缓慢蠕滑变形趋势。同时分析了瓦巴村冰川二维形变时间序列与降雨量和温度相关性, 结果表明降雨和温度的变化对坡体冰川形变具有一定的影响。研究成果对高山峡谷区地质灾害隐患点的识别具有较好的参考价值。

关键词: InSAR; 干涉图堆叠技术; 多维小基线子集技术; 隐患点识别; 然乌镇

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0018-09

InSAR identification and monitoring of geological hazards in Ranwu region of Tibet

ZHANG Benhao¹, WEI Yunjie², YANG Chengsheng¹, XIONG Guohua¹, DONG Jihong¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring(Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards,MNR), Beijing 100081, China)

Abstract: Southeast Tibet, located in the southeast part of Qinghai-Tibet Plateau, is characterized by steep terrain, frequent occurrence and large scale of geological disasters due to multiple plate tectonic movements and compression movements between rock masses. It's of great significance to investigate and monitor geological disasters in this region. In this paper,

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2022-01-20

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42174032); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637); 国家重点研发计划项目(2021YFC3000404); 第二次青藏高原综合科学考察研究专题“重大工程扰动灾害及风险”(2019QZKK0904)

第一作者: 张本浩(1996-), 男, 安徽六安人, 测绘工程专业, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 技术在地质灾害应用方面的研究。

E-mail: zbhinsar@qq.com

通讯作者: 魏云杰(1973-), 男, 河南柘城人, 地质工程专业, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害与岩土工程等相关方面的研究。E-mail: wyj1973@126.com

Ranwu area in southeast Tibet is taken as the study area, and the potential disaster points in this area are identified by using sentinel-1A satellite data, and the influence of geometric distortion of SAR image on geological disaster identification is analyzed. Through the analysis of InSAR monitoring results, 67 hidden danger points of landslides and glaciers in the region were delineated. At the same time, in order to better analyze the deformation characteristics and laws of the disaster bodies, three typical glacial disaster bodies in the north bank of Anmuco in Ranwu region were selected, and the two-dimensional (horizontal EAST-west and vertical) deformation rates and time series of the slope bodies were obtained by using multidimensional small baseline subset (MSBAS) technology. Based on the analysis of the deformation time series results of Jiqilong Glacier, Polong Glacier and Waba Village Glacier, it's found that the maximum cumulative displacement in the horizontal east-west direction from January 2018 to October 2020 is 202 mm, 283 mm and 194 mm respectively. The maximum cumulative displacement in vertical direction is 97 mm, -155 mm and -163 mm respectively. In the horizontal direction, the three typical glaciers show an accelerated deformation trend and slow creep deformation trend in vertical direction. At the same time, the correlation between the two-dimensional deformation time series of Wabacun glacier and precipitation and temperature is analyzed. The results show that the variation of precipitation and temperature has certain influence on the deformation of slope glacier. The research results of this paper have a good reference value for the identification of geological hazards in alpine and canyon areas.

Keywords: InSAR; stacking-InSAR technology; MSBAS; potential point identification; Ranwu town

0 引言

我国地质构造运动频繁,地形结构复杂,地质灾害隐患多、分布广、高易发^[1]。地质灾害往往具有强大的破坏力,严重威胁群众的生命和财产安全、阻碍当地经济发展^[2]。如何准确地识别灾害隐患所在位置、可能发生的时间并提前预警,是当前地质灾害工作人员关注的首要问题^[3]。因此,开展地质灾害早期识别与监测,确定灾害体空间分布及活动规律,对防灾减灾工作具有重要意义。

嘉黎断裂地处青藏高原东南缘,地势高陡,经过多次构造变形运动,形成了大量节理、断层等^[4-5]。唐得胜等^[6]通过对然乌湖到通麦镇典型冰湖溃决泥石流灾害链的成因分析,得出该区域为内外应力耦合作用形成地质灾害链的结论。郭佳宁等^[7]通过总结并分析前人对藏东南地区滑坡地质灾害的研究得出林芝—然乌段共存在 8 个大型滑坡、6 个大型崩塌,其中通麦—波密段有 102 个滑坡群^[7]。赵聪等^[8]利用遥感数据解译发现帕隆藏布江流域(波密—然乌段)冰川退缩,大量冻融松散物源进入沟道,导致流域内冰川泥石流大规模发育^[8]。这类地质灾害一般规模较大、易堵河,对当地群众的生命财产安全构成严重威胁。如 2017 年 8 月 3 日,波密县倾多镇暴发泥石流;2018 年 10 月,林芝东部色东普沟暴发大规模冰川泥石流;2020 年 6 月,嘉黎县金翁错暴发冰碛湖溃决事件。目前对然乌地区的监测集中在波密县到然乌镇的冰川和泥石流地质灾害发

育情况和构造部位的运动特征^[4,9],观测方法主要是光学遥感数据分析,大部分学者关注重点部位地质灾害发育情况^[10-12],对区域地质灾害形变特征和规律的分析研究较少。

然乌镇地区地质灾害易发,地形陡峭复杂、落差大、植被茂密,传统地面监测手段难以开展。合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)作为一种大范围地表形变监测技术,其穿透能力强、覆盖范围广、能快速获取区域形变信息,已经被广泛用在冰川^[13]、滑坡^[14]、泥石流^[15]等的调查和监测,为地质灾害的防治工作提供了新的技术手段。因此文章在分析 InSAR 技术在该地区适应性的基础上,利用 InSAR 技术对然乌地区开展地质灾害隐患早期识别和形变监测研究,为该区域防灾减灾提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于藏东南然乌地区(图 1),属嘉黎断裂东部,川藏铁路康定—林芝段的必经路线。研究区内相对高差最大超过 2 000 m。受季风环流影响,夏季湿凉、冬季干冷漫长多大风。由于该区域属于典型的高山峡谷地貌,且受嘉黎断裂带活动和气候的影响,地面切割强烈,地质灾害易发。研究区内灾害主要有泥石流、滑坡等。2016 年田小平^[16]通过野外调查结合文献资料,统计得到然乌—波密段泥石流共有 118 条,1994—

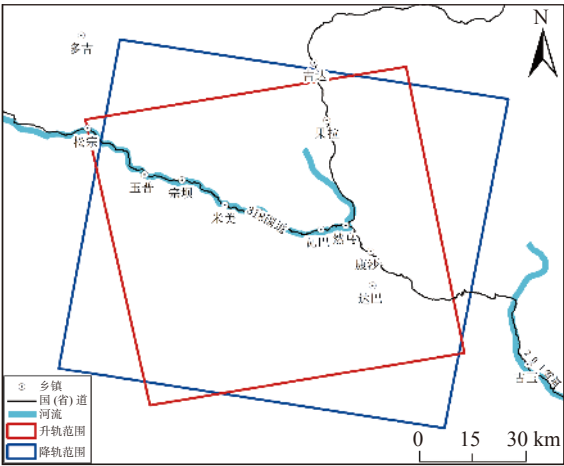


图 1 研究区影像覆盖示意图
Fig. 1 Image coverage diagram of the study area

2015 年国道 318 线波密县至然乌镇段降雨泥石流和冰川泥石流总计 64 处。泥石流会引发堰塞湖、阻断交通、毁坏基础设施等^[17]问题。

1.2 数据来源

为了利用 InSAR 技术对然乌地区开展地质灾害隐患识别和监测,文中收集了覆盖研究区从 2018 年 1 月至 2020 年 11 月的 Sentinel-1A 升轨 SAR 影像 82 景,从 2018 年 1 月至 2020 年 10 月的 Sentinel-1A 降轨 SAR 影像 75 景,表 1 列出使用的 SAR 数据基本参数。使用日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)发布的 AW3D30(<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>)全球数字地表模型数据消除 InSAR 干涉图中的地形相位^[14]。同时为了分析 SAR 成像几何对地表观测的影响,AW3D30 被用来计算 SAR 影像的叠掩和阴影区。为了改正基线误差,使用了 Sentinel-1A 的 POD 精密轨道卫星星历(Precise Orbit Ephemerides, POD)数据,数据下载网址(https://s1qc.asf.alaska.edu/aux_poeorb/),定位精度优于 5 cm^[17]。

表 1 SAR 数据基本参数
Table 1 Basic parameters of SAR data

卫星	Sentinel-1A	Sentinel-1A
轨道方向	升轨	降轨
航向角/(°)	-12.56	-167.32
入射角/(°)	33.90	33.87
波段	C	C
方位向分辨率/m	2.32	2.32
距离向分辨率/m	13.98	13.98
影像数量	82	75
时间间隔	2018-1-5— 2020-11-2	2018-1-12— 2020-10-28

注:以正北方向为基准,顺时针方向为正。

2 技术方法

2.1 基于 InSAR 堆叠技术的滑坡探测

本次实验使用干涉图堆叠技术(Stacking-InSAR)进行大范围地质灾害隐患调查。Stacking-InSAR 技术由 SANDWELL 等^[18]在 1998 年提出,通过对多幅解缠干涉图进行加权平均。在对解缠干涉图堆叠处理之前,需要将参与计算的干涉对重新采样到相同投影坐标系下。与传统的差分技术(D-InSAR)相比^[19],该技术能够明显的减弱数字高程模型误差和大气误差的影响^[14]。因此,Stacking-InSAR 技术用于然乌地区地质灾害隐患点识别具有较好的技术优越性。

Stacking 技术假设任意一幅干涉图是独立、大气误差是随机且相等的、形变速率是线性的。在此基础上,将多幅解缠相位图按干涉对时间间隔进行加权平均,就可以得到研究区的形变相位信息。根据误差传播定律,加权平均后大气相位误差与解缠相位图数量之间并不是倍数关系,而是平方根关系。从而增加了形变和大气相位的信噪比,提高了形变监测精度,其数学模型可以表示为:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^M (\Delta T_i^{-1} \times \varphi_i)}{\sum_{i=1}^M \Delta T_i^{-1}} \tag{1}$$

式中: V ——年均形变速率;
 M ——参与加权平均计算的干涉图数量;
 ΔT_i ——第 i 幅干涉图的时间基线;
 φ_i ——第 i 个干涉图的解缠相位值。

由于原始 Sentinel-1A 影像覆盖范围较大(250 km×190 km),为提高数据处理效率,仅选择了与研究区相关的区域进行处理。数据处理过程中,时空基线阈值分别为 60 d 和±200 m,升降轨影像分别产生 368 和 317 个干涉对,通过挑选相干性高且无明显解缠误差干涉对,最终分别选择 205 个和 189 个高质量干涉对进行 Stacking 技术处理。

为了抑制数据处理中噪声影响,提高干涉图的相干性,数据处理过程中对 SAR 影像进行了多视处理,多视比为 4 : 1,多视处理后 SAR 影像分辨率约为 15 m,并采用 16×16 和 8×8 窗口进行两次自适应滤波^[20]。对残余轨道误差,采用二次多项式拟合方法进行去除。我们将 InSAR 识别出的疑似隐患点,叠加到谷歌光学影像中,通过与实际地形条件对比分析,圈定最终的地质灾害隐患点,具体实验流程如图 2 所示。

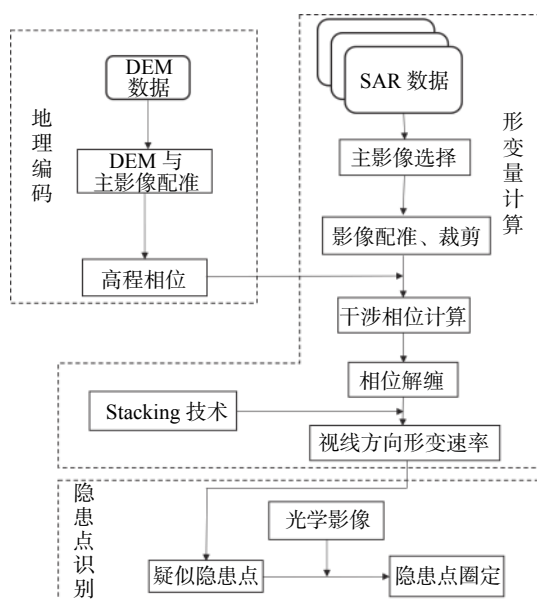


图2 实验流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental flow

2.2 二维形变解算

由于 SAR 系统侧视成像特点, 导致单一轨道的 SAR 数据在高山峡谷区进行地质隐患点探测中会存在漏判情况^[21], 而采用升轨和降轨数据组合的观测方法, 则可以增加对地观测的可见范围, 有利于减少隐患点的漏判, 且通过不同方向的形变特征能够更好地反映隐患点的形变特征。文中采用多维小基线子集 (Multidimensional Small Baseline Subset, MSBAS) 技术, 联合升、降轨数据对研究实验区开展地质灾害隐患点的二维形变监测。MSBAS 技术是由 SAMSONOV 等^[22]在 2013 年提出, 和传统小基线技术 (Small Baseline Subset, SBAS) 有所区别, 该技术可以计算隐患点的二维 (水平东西向、垂直向) 形变速率和时间序列, 称为 MSBAS-2D 技术^[23]。

MSBAS-2D 技术利用两个不同轨道在相同时间段覆盖相同区域的影像, 常用升轨影像和降轨影像, 获取该区域的二维形变时间序列。其数学模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \hat{A} \\ \lambda B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\hat{A}$ ——矩阵, $\hat{A} = \{S_E B, S_U B\} = \{-\cos\theta \sin\varphi, \cos\varphi\}$;

θ ——方位角;

φ ——航向角;

λ ——正则化参数;

V_E 、 V_U ——表示水平东西向速率和垂直向速率;

$\hat{\varphi}$ ——同一个坐标系下多个干涉测量结果。

当升轨和降轨数据获取时间存在差异时, 利用吉洪

诺夫正则化矩阵 B 和参数 λ 相乘, 得到正则化的时间序列结果, 类似于利用低通滤波的方法去除高频信号的噪声。再应用奇异值分解 (SVD) 方法获得二维形变速率, 在形变速率的基础上, 使用数值积分法获得形变时间序列^[23]。

3 一维形变监测结果与分析

3.1 研究区几何畸变分析

由于 SAR 系统的侧视成像模式, 在较小范围内, 可将微波看作为平面波且入射角视为固定。若地面不平坦则表示地表存在起伏, 导致几何畸变现象的产生 (顶底倒置、阴影、透视收缩) (图 3)^[24]。当隐患点位于叠掩区时 (图 3b), 会造成滑坡体形变特征被压缩且点数量较少; 当隐患点位于阴影区域时 (图 3c), 雷达卫星不能接收到该区域的任何后向散射信息, 则导致隐患点的漏判。因此, 同一区域采用不同视角的卫星 (如升降轨联合观测), 则可以提高隐患点的识别范围。我们根据升降轨数据的成像参数和地形数据计算了研究区的叠掩阴影分布如 (图 4)。从图 4 中可以看出, 升轨受到叠掩和阴影几何畸变影响, 且在整个影像上均有分布, 其面积占比分别为 22.72% 和 0.86%; 降轨受到叠掩和阴影几何畸变影响, 且空间分布集中在西部, 面积占比分别为 7.45% 和 3.77%。升轨和降轨数据几何畸变空间分布和占比面积均存在差异, 其原因主要是卫星的航向角和入射角的不同, 导致几何畸变的分布和占比面积存在差异。对位于几何畸变区域中的隐患点, 将会在 InSAR 识别结果中进行综合判断以减少误判。

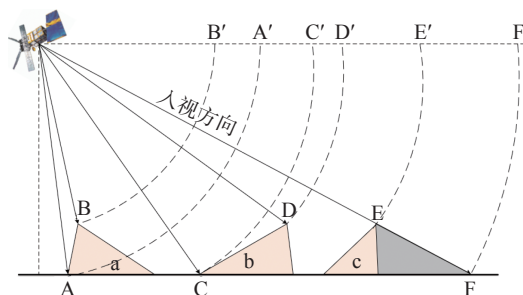


图3 SAR 成像几何畸变示意图 (a: 顶底倒置; b: 透视收缩; c: 阴影)

Fig. 3 Geometric distortion diagram of SAR imaging (a: top bottom inversion; b: fluoroscopic contraction; c: shadow)

3.2 大范围识别结果

相比较 D-InSAR 技术, Stacking 技术能够明显的削弱数字高程模型误差和大气误差的影响^[25], 研究中利用 Stacking 技术获取了然乌地区沿卫星视线方向年均形变速率结果。结合然乌地区地形和地质灾害的活动

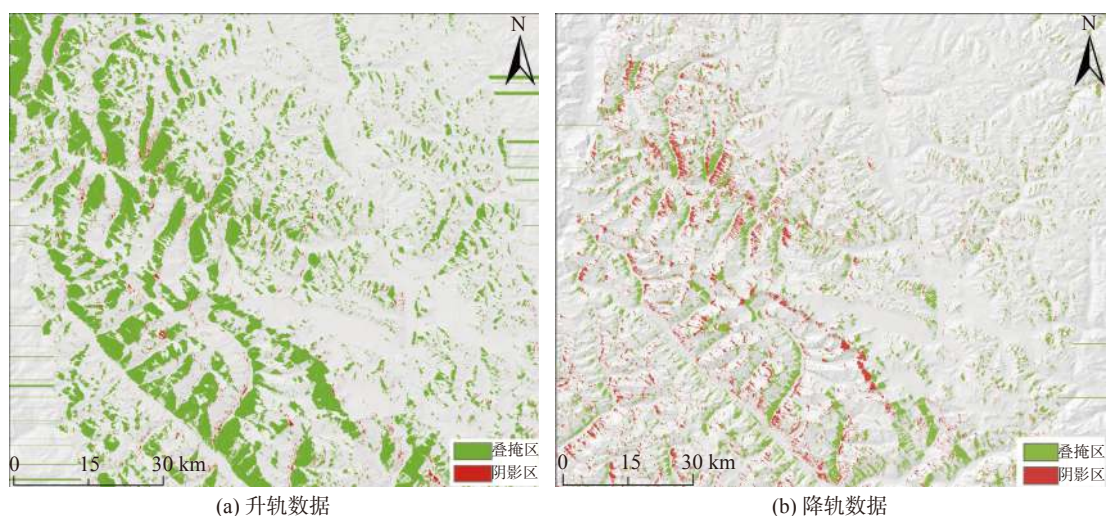


图 4 然乌地区升降轨叠掩阴影分布图

Fig. 4 Overlay shadow distribution of lifting rails in Ranwu area

特性,选择然乌地区人工建筑物作为稳定区,计算标准差为 1.96 mm/a ,最大形变速率为 8.3 mm/a 。因此选择形变量级 $\pm 10 \text{ mm/a}$ 的区域作为稳定区,当形变速率超过这个阈值时,则将其判定为地质灾害疑似隐患点。然后,结合光学影像和地形条件,对识别出的地质灾害疑似隐患点进行对比分析,最终共圈定潜在隐患点 67 处,隐患点分布如图 5 所示。升轨和降轨影像分别识别出隐患点 41 处和 45 处,其中共同识别 19 处。灾害类型主要为滑坡和冰川,部分典型隐患点 InSAR 结果如图 6 所示。从识别结果的空间分布看:识别隐患点主要集中在 318 国道附近,且在然乌附近分布较多的隐患点;识别隐患点在空间分布上有所差异,升轨影像主要集中在然乌到吉达乡,降轨影像隐患点主要集中在然乌

到玉普乡。分析原因是由于升降轨影像入射角差异和叠掩阴影空间位置分布不同导致的。

3.3 典型隐患点时空形变特征

为了更好地分析识别的隐患点在时间和空间上的形变特征,选择形变特征明显、对附近居民点或交通路线存在隐患的两个隐患点,分别是日曲滑坡(1 号点)、莫格曲冰川(2 号点)(图 5),提取得到了这两个隐患点的时间序列结果。日曲滑坡位于古绕村日曲北岸陡峭山体上,坡体西侧为 318 国道。根据该滑坡体在 2018 年 1 月至 2020 年 11 月的时间形变序列和整体的年均形变速率结果(图 7),可以看到该滑坡体处于等速蠕滑阶段,结合其剖线图(图 8)发现,在距离山顶 0.56 km 处滑坡的形变速率达到最大值 -94.8 mm/a ,随着坡度增大,形变速率增大且两年多时间累计形变量达到 278 mm 。莫格曲冰川位于莫格曲东岸,通过光学影像发现冰川上部存在两个冰湖,根据 2018 年 1 月至 2020 年 11 月时间形变序列和整体的年均形变速率结果,可以看出相比日曲滑坡,莫格曲冰川体的形变速率更大,结合其剖线图(图 7)发现该冰川形变主要集中于冰川中部,最大年均形变速率处距离山顶 0.64 km ,且在雷达视线方向达到 107 mm/a ,两年多时间累计形变量达 472 mm 。根据这两个隐患点的剖线结果,可以看出变形趋势均是先增大后减小,呈漏斗状,最后形变速率均趋近稳定。

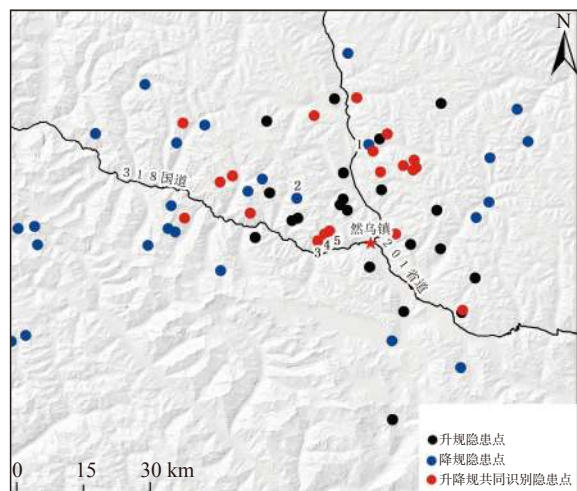


图 5 然乌地区地质灾害隐患点 InSAR 判识结果分布图

Fig. 5 Distribution of InSAR identification results of geological hazard hidden spots in Ranwu area

4 二维形变监测结果与分析

4.1 二维时序形变监测结果

从图 5 结果可以发现,然乌镇附近安目错北岸的升轨、降轨数据均存在明显的冰川群形变信息,其中包括

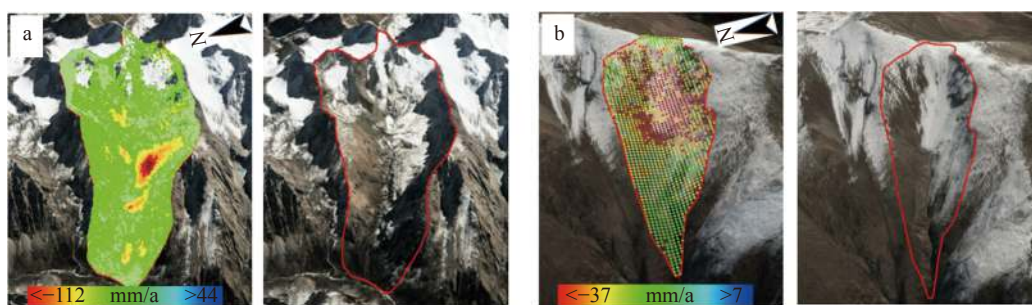


图 6 典型隐患点 InSAR 结果及遥感影像 (图 a 和图 b 分别对应图 5 中 1 号和 2 号点)

Fig. 6 InSAR results and remote sensing images of typical hidden trouble points (Fig. a and b correspond to no. 1 and no. 2 in Fig. 5 respectively)

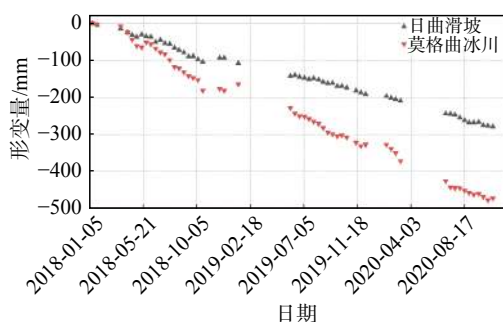


图 7 典型隐患点时间序列

Fig. 7 Time series of typical hidden trouble points

吉穷隆冰川、迫弄冰川、瓦巴村冰川(图 5 中 3、4、5 号点)等多处典型隐患点。因此对该区域采用 MSBAS-2D 技术处理,反演该区域隐患点的二维形变结果(图 9),其中水平东西向正值和负值分别代表向东和向西运动;垂直方向正值和负值分别代表向上和向下运动。由于该区域没有实地监测数据,为了评价 MSBAS-2D 结果的精度,选取升轨、降轨数据的解缠参考区域,通过计算得到标准差在 2.2 mm/a 内,小于隐患点判识的阈值(± 10 mm/a),证明了反演结果的可靠性。从图 9(a)可以发现,三个冰川(吉穷隆冰川、迫弄冰川、瓦巴村冰川)在水平东西向主要表现为正值,最大能达到

90 mm/a,表明这些冰川在水平方向均向东运动,结合区域实际地形可以发现这三个冰川的朝向均为偏向东,即沿坡体方向向下运动;从图 9(b)可以发现,这三个冰川在垂直向均表现为负值,最大超过 -90 mm/a,即沿近似坡向的向下的主滑方向运动。

针对然乌区域 3 个典型冰川,我们选择了 5 个特征点(图 9 中 A、B、C、D、E),并提取了他们的形变时间序列结果(图 10)。结果显示:吉穷隆冰川在水平方向为正值,近 3 年时间内水平东西方向最大累计形变量达到了 202 mm,且在该冰川前缘垂直方向同样表现为加速变形趋势;迫弄冰川是 3 个典型冰川中面积最大的冰川,通过光学影像计算该冰川面积约为 $2.26 \times 10^6 \text{ m}^2$,冰川形态为狭长条带状,两年多的时间内水平东西方向最大累计形变量为 283 mm,且该冰川前缘同样表现为水平方向加速位移趋势;瓦巴村冰川运动方向近似平行东西方向,从形变时间序列结果上发现该冰川在东西和垂直方向变形状态仍然表现为加速,其中水平和垂直方向最大累计形变量均超过 150 mm,且都呈现加速趋势。因此,建议后续加强对这三个典型冰川的形变监测,关注该冰川后期形变趋势。

4.2 形变外界驱动因素分析

瓦巴村冰川位于瓦巴村北方的山坡上,面积约

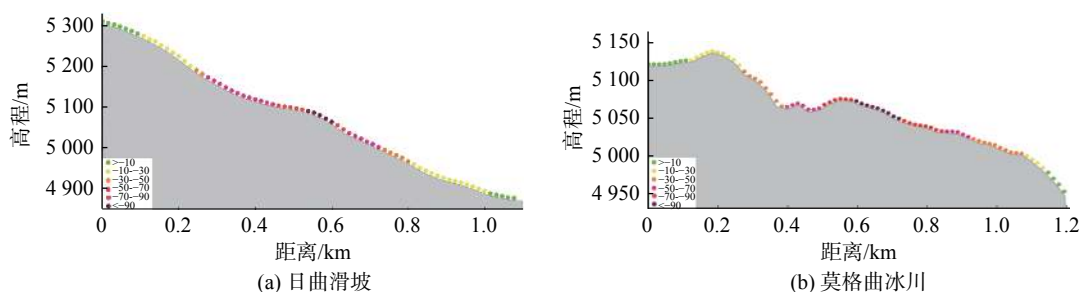


图 8 典型隐患点剖面图

Fig. 8 Section diagram of typical hidden danger points (Riqu landslide on the left and Mogeqi Glacier on the right)

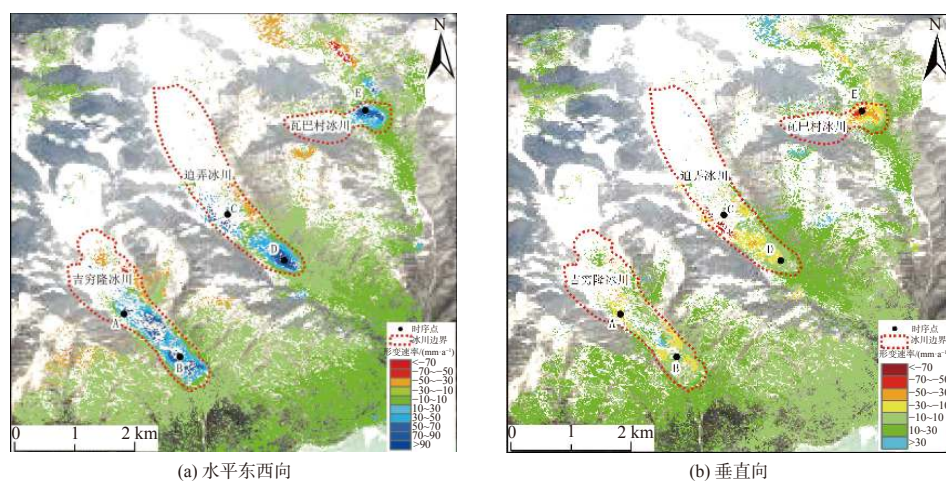


图 9 重点地区冰川群二维年均形变速率图

Fig. 9 Time series of horizontal east-west and vertical deformation in key areas

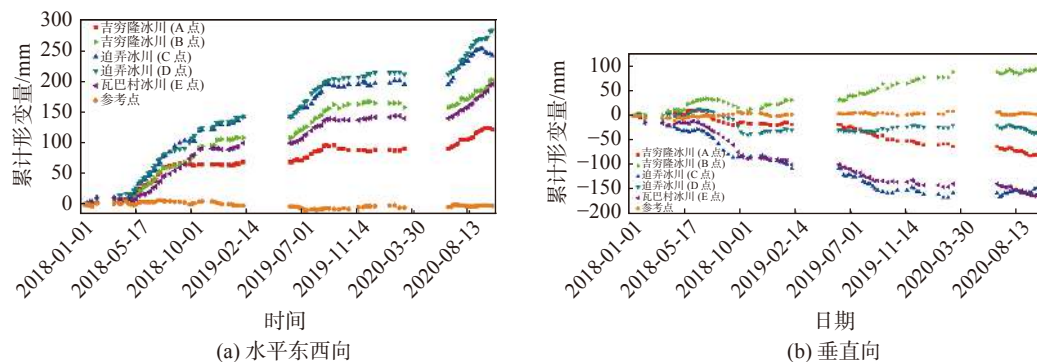


图 10 重点区域水平东西向和垂直向形变时间序列

Fig. 10 Time series of horizontal ew and vertical deformations in key areas

$63 \times 10^4 \text{ m}^2$, 在升降轨年均形变速率结果中均发现该滑坡形变特征明显。文中选取瓦巴村冰川来分析其形变特征, 为此, 在该坡体上选取了一处特征点 (图 9 中 E 点), 获得了其二维时间序列结果 (图 10)。从结果上可以发现, 无论水平方向还是垂直方向, 其累积形变量均超过 150 mm, 且 2020 年 6 月以后表现为加速趋势。

为了探讨降雨和温度对瓦巴村冰川形变速率的影响, 收集了与 InSAR 覆盖时间段一致的降雨量和温度数据。经对比分析, 降雨量和温度变化对冰川形变存在一定的影响 (图 11)。在每年雨季期间, 冰川的形变量会产生加速趋势, 其他月份冰川较稳定, 且随着温度的升高, 冰川变形也表现出部分加速趋势。

5 结论

文章通过采用 Stacking 技术和 MSBAS 技术对然乌镇附近区域地质灾害进行识别和形变特征的研究。

(1) 在影像覆盖范围内共识别出 67 处灾害隐患点, 其中 19 处疑似隐患点为升降轨影像共同识别。识别出的滑坡体主要集中于然乌镇 318 国道和 201 省道两侧, 且最大滑坡速率可达 -168 mm/a , 威胁两侧道路的安全。利用 MSBAS 技术获取了然乌镇附近安目错北岸冰川群二维形变时间序列, 分析表明冰川位移沿坡体方向向下运动, 垂向位移速率超过 90 mm/a , 由于严重的位移失相干, 冰川体物源区的位移未能获取。选取其中的瓦巴村冰川进行分析表明, 其中水平和垂直方向最大累积形变量均超过 150 mm, 且都呈现加速趋势。需加强对该冰川后续形变监测, 同时研究表明降雨和温度对冰川位移速率有一定的影响。

(2) 文中仅利用了 InSAR 方法对然乌区域地质灾害隐患点识别与监测技术方法的适用性进行了研究分析, 缺乏野外实地调查资料。通过野外调查对 InSAR 结果进行验证, 并采取不同角度分析然乌区域地质灾害隐患点的形变特征是下一步将要做的事。

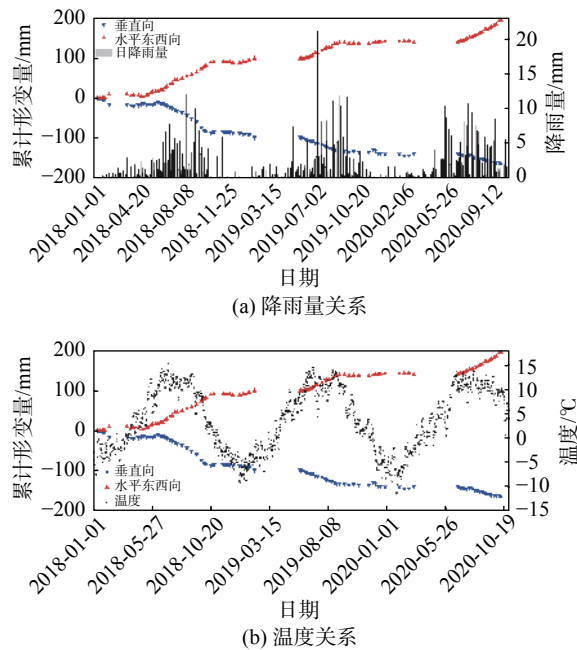


图 11 瓦巴村冰川二维时间序列月降雨量和温度关系

Fig. 11 Relationship between monthly rainfall and temperature in two-dimensional time series of Waba glacier

参考文献 (References) :

- [1] 张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望 [J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 89-97. [ZHANG Zhuoyuan. The present status, technical advance and development trends of landslide remedial measures [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2): 89-97. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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. A dynamic erosion plowing model of long Run-out landslides initialized at high locations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1513-1521. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(7): 949-956. [GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949-956. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李鸿儒, 白玲, 詹慧丽. 嘉黎断裂带活动性研究进展 [J]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(2): 182-193. [LI Hongru, BAI Ling, ZHAN Huili. Research progress of Jiali fault activity [J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2021, 52(2): 182-193. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 黄星. InSAR和GPS技术在震间和同震形变领域的应用研究: 以嘉黎断裂西段和2015年皮山地震为例[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2020. [HUANG Xing. Application of InSAR and GPS techniques in interseismic and coseismic deformation—cases of the western Jiali fault and 2015 Mw6.4 Pishan earthquake[D]. Beijing: Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 唐得胜, 杨永红, 常鸣. 藏东南地区冰湖溃决泥石流灾害链成因分析及防治措施 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 174-178. [TANG Desheng, YANG Yonghong, CHANG Ming. Cause analysis and preventive measures of debris flow disaster-chain due to glacial lake outburst in southeastern Tibet [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 174-178. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郭佳宁, 山克强, 程捷. 藏东南地区滑坡发育规律分析 [J]. 资源与产业, 2009, 11(2): 132-139. [GUO Jiajing, SHAN Keqiang, CHENG Jie. Study on landslide development regularity in southeast Tibet [J]. Resources & Industries, 2009, 11(2): 132-139. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 赵聪, 梁京涛, 王军朝, 等. 帕隆藏布流域(波密-然乌段)冰川动态变化遥感分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 56-62. [ZHAO Cong, LIANG Jingtao, WANG Junchao, et al. Remote sensing analysis of glacier dynamic changes in Parlung Zangbo river [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 56-62. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 宋键, 唐方头, 邓志辉, 等. 青藏高原嘉黎断裂晚第四纪运动特征 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2013, 49(6): 973-980. [SONG Jian, TANG Fangtou, DENG Zhihui, et al. Late quaternary movement characteristic of Jiali fault in Tibetan Plateau [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(6): 973-980. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵华秋, 王欣, 赵轩茹, 等. 2008—2018年中国冰川变化分析 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 976-986. [ZHAO Huaqiu, WANG Xin, ZHAO Xuanru, et al. Analysis of glacier changes in China from 2008 to 2018 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 976-986. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 柳金峰, 程尊兰, 陈晓清. 帕隆藏布流域然乌-培龙段冰湖溃决危险性评估 [J]. 山地学报, 2012, 30(3): 369-377. [LIU Jinfeng, CHENG Zunlan, CHEN Xiaoqing. The hazard assessment of glacier-lake outburst in Palong Zangbu river from Ranwu to Peilong [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(3): 369-377. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 鞠建廷, 朱立平, 黄磊, 等. 基于监测的藏东南然乌湖现

- 代过程:湖泊对冰川融水的响应程度[J]. 科学通报, 2015, 60(1): 16–30. [JU Jianting, ZHU Liping, HUANG Lei, et al. Ranwu lake, a proglacial lake with the potential to reflect glacial activity in SE Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(1): 16–30. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵志男, 李滨, 高杨, 等. 西藏然乌湖口高位地质灾害变形特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 25–32. [ZHAO Zhinan, LI Bin, GAO Yang, et al. Analysis on deformation characteristics of geological hazards in Ranwu lake estuary[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 25–32. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨成生, 董继红, 朱赛楠, 等. 金沙江结合带巴塘段滑坡群InSAR探测识别与形变特征[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(2): 398–408. [YANG Chengsheng, DONG Jihong, ZHU Sainan, et al. Detection, identification and deformation characteristics of landslide groups by InSAR in Batang section of Jinsha river convergence zone, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(2): 398–408. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 翟会楠. 基于D-InSAR参数优化的泥石流沟谷地表形变特征研究: 以武都地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [ZHAI Huinan. Surface deformation characteristics of debris flow gully based on parameter optimization of D-InSAR technology—A case study of Wudu[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 田小平. 川藏公路然乌—波密段泥石流发育特征及危险性评价[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016. [TIAN Xiaoping. Development characteristics and hazard assessment of debris flows along the Ranwu-Bomi section of Sichuan-Tibet highway[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴文豪, 周志伟, 李陶, 等. 精密轨道支持下的哨兵卫星TOPS模式干涉处理[J]. 测绘学报, 2017, 46(9): 1156–1164. [WU Wenhao, ZHOU Zhiwei, LI Tao, et al. A study of sentinel-1 TOPS mode co-registration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(9): 1156–1164. (in Chinese with English abstract)]
- [18] SANDWELL D T, SICHIOX L. Topographic phase recovery from stacked ERS interferometry and a low-resolution digital elevation model[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105(B12): 28211–28222.
- [19] 云焱, 吕孝雷, 付希凯, 等. 星载InSAR技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 73–85. [YUN Ye, LYU Xiaolei, FU Xikai, et al. Application of spaceborne interferometric synthetic aperture radar to geohazard monitoring[J]. Journal of Radars, 2020, 9(1): 73–85. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 葛令贵. 高效高精度InSAR自适应滤波方法与工程化应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018. [GE Lingui. Study on high-efficiency and high-precision adaptive InSAR filtering methods and engineering application[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717–1733. [ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717–1733. (in Chinese with English abstract)]
- [22] SAMSONOV S V, FENG W P, PELTIER A, et al. Multidimensional Small Baseline Subset (MSBAS) for volcano monitoring in two dimensions: opportunities and challenges. Case study Piton de la Fournaise volcano[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2017, 344: 121–138.
- [23] 熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 等. 基于MSBAS技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 1–9. [XIONG Guohua, YANG Chengsheng, ZHU Sainan, et al. Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha river based on MSBAS technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 1–9. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘国祥, 陈强, 罗小军. InSAR原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [LIU Guoxiang, CHEN Qiang, LUO Xiaojun. Principle and Application of InSAR[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)]
- [25] 康亚. InSAR技术在西南山区滑坡探测与监测的应用[D]. 西安: 长安大学, 2016. [KANG Ya. Application of InSAR technology to landslide detection and monitoring in southwest mountainous area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)]