

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-03

周定义, 左小清, 喜文飞, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 16-24.

ZHOU Dingyi, ZUO Xiaoqing, XI Wenfei, *et al.* Early identification of landslide hazards in deep cut alpine canyon using SBAS-InSAR technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 16-24.

# 基于 SBAS-InSAR 技术的深切割高山峡谷区 滑坡灾害早期识别

周定义<sup>1</sup>, 左小清<sup>1</sup>, 喜文飞<sup>1,2</sup>, 肖波<sup>1,3</sup>, 毕瑞<sup>1</sup>, 范馨<sup>4</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093; 2. 云南师范大学地理学部, 云南昆明 650500; 3. 云南交通职业技术学院公路学院, 云南昆明 650500; 4. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059)

**摘要:**近年来, 高山峡谷区滑坡灾害频频发生, 给人民生命和财产安全带来严重威胁。针对多数学者利用 SAR 单轨道数据对高山峡谷区滑坡进行早期识别, 存在 SAR 成像几何畸变造成部分滑坡不能识别、识别结果不全面等问题。为全面准确的对高山峡谷区滑坡隐患进行早期识别, 文章采用 SBAS-InSAR 技术, 以东川小江沿线两侧深切割高山峡谷区为研究区, 通过升降轨 SAR 数据结合互补的方式进行滑坡灾害隐患识别, 引入高分辨率光学影像等作为辅助识别, 最终共识别出 18 处滑坡灾害体, 其中 5 处为高风险潜在滑坡, 并对三类典型潜在滑坡进行分析。分析结果表明: 利用升降轨 SAR 数据结合互补的方式, 能有效避免 SAR 单轨道数据在高山峡谷地区产生的几何畸变问题, 同时, 该方法能更为准确全面地对高山峡谷区滑坡隐患进行早期识别, 为防灾减灾事业及政府部门决策提供一种有效的手段。

**关键词:**高山峡谷区; SBAS-InSAR; 滑坡灾害; 早期识别; 东川小江

**中图分类号:** P642; P208

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-8035(2022)02-0016-09

## Early identification of landslide hazards in deep cut alpine canyon using SBAS-InSAR technology

ZHOU Dingyi<sup>1</sup>, ZUO Xiaoqing<sup>1</sup>, XI Wenfei<sup>1,2</sup>, XIAO Bo<sup>1,3</sup>, BI Rui<sup>1</sup>, FAN Xin<sup>4</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China; 3. Institute of Highway, Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming, Yunnan 650500, China; 4. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** In recent years, landslides occurred frequently in mountain and gorge areas, which brought serious threats to people's life and property safety. Most scholars use SAR single-track data for early identification of landslides in alpine and canyon areas, but some landslides cannot be identified due to geometric distortion of SAR imaging, and the identification results are not comprehensive. In order to carry out comprehensive and accurate early identification of landslide hazards in alpine valley area,

收稿日期: 2021-06-17; 修订日期: 2021-08-17

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761081); 云南省应用基础研究计划面上项目(2018FB078)

第一作者: 周定义(1995-), 男, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 沉降监测研究。E-mail: 1246550757@qq.com

通讯作者: 左小清(1972-), 男, 江西井冈山人, 教授, 主要从事遥感影像处理、时空数据挖掘、InSAR 沉降监测等研究。

E-mail: 514012196@qq.com

this paper adopts bas-INSAR technology, takes the deep cut alpine valley area along the Xiaojiang River in Dongchuan as the research area, and adopts the combination of SAR data of lifting and lowering orbit to identify landslide hazards, and introduces high-resolution optical images as auxiliary identification. Finally, 18 landslide disaster bodies were identified, among which 5 were high-risk potential landslides, and three types of typical potential landslides were analyzed. The analysis results show that the use of elevator rail SAR data combined with complementary way, can effectively avoid the SAR single orbital data geometric distortion problem in mountain valley area, at the same time, this method can more accurately comprehensively to early identification of alpine valley area of landslide hazard, the cause of disaster prevention and mitigation and government decision-making provides a effective means.

**Keywords:** alpine canyon area; SBAS - InSAR; landslide disaster; early recognition; Dongchuan Xiaojiang

## 0 引言

中国是地质灾害高发的国家, 各类地质灾害给人们的生命财产造成了巨大的损失<sup>[1]</sup>。滑坡作为一种主要的地质灾害, 具有隐蔽性强、危害性大、突发性高等特点, 广泛分布于中国山区和峡谷地带<sup>[2-4]</sup>。近年来, 高山峡谷滑坡频频发生。因此, 对高山峡谷地区的滑坡灾害开展早期识别, 能够为防灾减灾事业及政府部门决策提供一种有效的手段。

地表形变是反应当前坡体稳定性及运动状态最直接的物理量, 因此, 监测地表形变可以为探测滑坡等地质灾害的隐患点提供重要信息<sup>[1]</sup>。传统的地表形变监测方法主要采用精密水准测量、全球定位系统 (GPS) 等。但这些监测方法存在变形监测工作量大、费时、花费大、测点难以保存等缺陷, 同时, 传统的监测方法无法对大区域滑坡形变进行探测<sup>[5-6]</sup>。与传统地表形变相比, 合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术是近几年发展起来的一种新型大地测量手段。具有覆盖范围广、穿透云层、全天候运作、精度高的特点, 理论上可以获得非常精确的数字高程模型和毫米量级的地表形变信息, 已被成功用于滑坡灾害监测<sup>[7-9]</sup>。目前, 利用 InSAR 技术对滑坡早期识别的研究取得了一些成功范例: 张路等<sup>[2]</sup>采用自主研发的相干散射体时序 InSAR 方法, 成功识别出了 17 处持续变形中的不稳定坡体。Dai 等<sup>[10]</sup>利用 InSAR 对潜在的滑坡进行早期识别, 10 个潜在滑坡区域被早期发现, 结果表明, 利用 InSAR 可以作为获取滑坡早期识别的有效手段。韩守富等<sup>[11]</sup>证明了 InSAR 技术在黄土高原地区地质灾害早期识别方面的适用性和准确性, 可以应用于黄土高原地区地质灾害隐患识别预警。冯文凯等<sup>[12]</sup>利用 SBAS-InSAR 技术对金沙江流域沃达村滑坡进行地表形变监测, 表明 SBAS-InSAR 技术在复杂山区地质灾害监测预警领域有较为广阔的应用前景, 为类

似老滑坡监测预警提供了新的思路与借鉴。戴可人等<sup>[13]</sup>利用时间序列 InSAR 技术对雅砻江流域雅江县—木里县段的高山峡谷区域进行了滑坡灾害隐患广域早期识别, 成功探测到 8 处隐患区域。以上方法能够有效识别滑坡灾害, 但对于深切割高山峡谷区的滑坡早期识别, 仅利用 SAR 单轨道数据监测会致使 SAR 成像几何畸变造成部分滑坡不能识别, 只有通过升降轨数据结合的方式才能全面准确的对滑坡灾害进行早期识别。

文章利用 SBAS-InSAR 技术, 采用升降轨数据结合的方式对深切割高山峡谷区的滑坡进行早期解译识别, 并根据识别结果, 对不同潜在滑坡类型进行了分析与讨论, 为高山峡谷地区防灾减灾及滑坡灾害早期识别提供一种更为全面的方法。

## 1 SBAS-InSAR 技术简介

小基线集 (SBAS-InSAR) 是在差分 InSAR 基础上发展起来的一种新的时间序列分析方法, 能够降低相位噪声和误差<sup>[14]</sup>。

假定在时间  $t_A$  至  $t_B$  内获取同一地区的  $S$  幅 SAR 影像, 然后根据干涉组合条件, 在短基线距的条件下形成  $N$  幅干涉条纹图, 且满足:

$$\frac{S}{2} \ll N \ll \frac{S(S-1)}{2} \quad (1)$$

对  $t_A$  和  $t_B$  ( $t_A < t_B$ ) 时刻两幅影像生成的第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 幅干涉图, 在去除平地及地形相位影响后, 第  $x$  个像素的干涉相位可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\varphi_{A,B}^i(x, r) = \varphi_{\text{def}}^i(x, r) + \varphi_{\text{topo}}^i(x, r) + \varphi_{\text{aps}}^i(x, r) + \varphi_{\text{orb}}^i(x, r) + \varphi_{\text{noise}}^i(x, r) \quad (2)$$

式中:  $r$ ——斜距;

$\varphi_{\text{def}}^i(x, r)$ —— $t_A$ — $t_B$  对应的斜距向变形;

$\varphi_{\text{topo}}^i(x, r)$ ——地形相位误差;

- $\varphi_{\text{aps}}^i(x, r)$ ——大气相位误差;
- $\varphi_{\text{orb}}^i(x, r)$ ——基线轨道引起的相位误差;
- $\varphi_{\text{noise}}^i(x, r)$ ——噪声误差。

假定  $t_k$  时刻和  $t_{k+1}$  时刻不同干涉图间的形变速率为  $v_{k,k+1}$ , 则  $t_A-t_B$  间的累积形变可表示为式:

$$\delta\varphi_{\text{def}}(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{j=t_A}^{t_B} v_{j,j+1} \quad (3)$$

对  $N$  幅干涉条纹图进行三维时空相位解缠即可求出不同 SAR 获取时间的形变速率。

## 2 研究方法

文中利用 SBAS-InSAR 技术对深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别, 方法的重点有两个关键: ①针对深切割高山峡谷区的滑坡如何识别; ②如何保证识别结果的准确性。

### 2.1 升降轨数据结合的方式对深切割高山峡谷区的滑坡识别

对于深切割高山峡谷区的滑坡早期识别, 由于地形条件等因素的影响, 仅利用 SAR 单轨道数据监测会致使 SAR 成像几何畸变造成部分滑坡不能识别。为此, 在技术上采用升降轨数据结合的方式, 对深切割高山峡谷区滑坡灾害进行早期识别。弥补了 SAR 单轨道数据识别存在的不全面、不准确等弊端。

### 2.2 引入高分辨率光学影像等作为辅助识别保证准确性

为保证识别结果的准确性, 仅凭形变监测结果无法区分是否为潜在的滑坡导致形变, 为此, 引入高分辨率光学影像对形变区域进行辅助识别, 结合形变范围、高程、坡度、植被覆盖和坡体是否具有滑坡特征等进行识别, 避免过度依赖形变结果导致的误判等问题。同时高分辨率光学影像能起到验证识别结果的作用, 早期的滑坡一般会有一定的滑动痕迹, 但不代表所有早期滑坡都有滑动痕迹。综上, 引入高分辨率光学影像等作为辅助识别能有效保证识别结果的准确性。

## 3 滑坡灾害早期识别试验

### 3.1 研究区概况和数据来源

东川小江流域为世界典型暴雨泥石流流区, 被称为“泥石流的天然博物馆”, 该地区泥石流的发生往往与滑坡密切相关, 是属于暴雨型滑坡泥石流, 即先滑坡, 再经暴雨冲刷后形成泥石流<sup>[15]</sup>。文中选取小江沿线两侧高山峡谷作为研究区(图 1), 以小江为界, 河谷凹陷, 形

成“V”字型, 属于典型的深切割高山峡谷, 东侧为牯牛寨山, 最高峰海拔 4 017.3 m; 西部为拱王山, 最高峰海拔 4 344.1 m。该区域地势陡峭, 其独特的地形和地质构造, 致使局部区域暴雨多、土质松软、水土流失严重, 导致该区域内地质灾害频发。

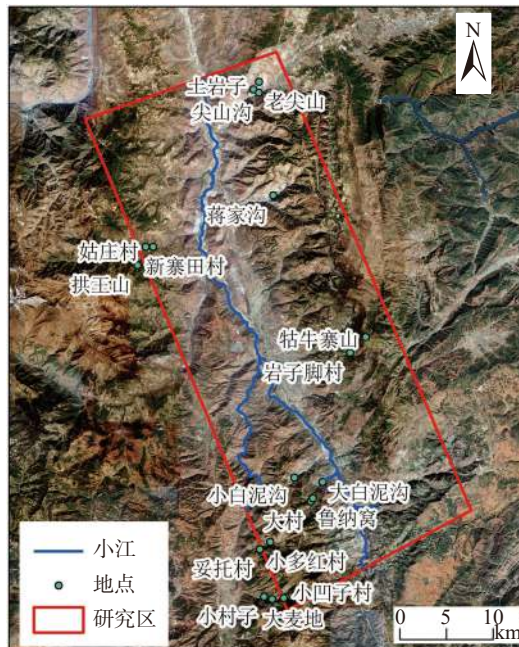


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

研究数据是从欧空局(European Space Agency, ESA)下载的 40 景 C 波段 Sentinel-1A 升降轨影像, 时间跨度为 2018 年 4 月 25 日—2019 年 4 月 20 日, 极化方式为 VV, 成像模式为 IW。数据参数如表 1 所示。为了提高影像轨道精度, 引入了 POD 精密定轨星历数据, 使用 JAXA(日本宇宙航空研究开发机构)提供的 ALOS WORLD 3D 30 m 空间分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM), 用于去除地形相位影响。拼接后的 DEM 如图 2 所示。

表 1 Sentinel-1A 数据参数

Table 1 Sentinel-1A data parameters

轨道方向	成像模式	波段	波长	入射角 / (°)	极化方式	距离分辨率/m	方位分辨率/m	重访周期/d
升轨	IW	C	5.63	34.17	VV	5	20	12
降轨	IW	C	5.63	39.35	VV	5	20	12

### 3.2 地表形变监测试验

选取时间跨度 2018 年 4 月 25 日—2019 年 4 月 20 日的 Sentinel-1A 斜距单视复数 (Single Look Complex, SLC) 影像, 其中升降轨数据各 20 景。利用 SARscape

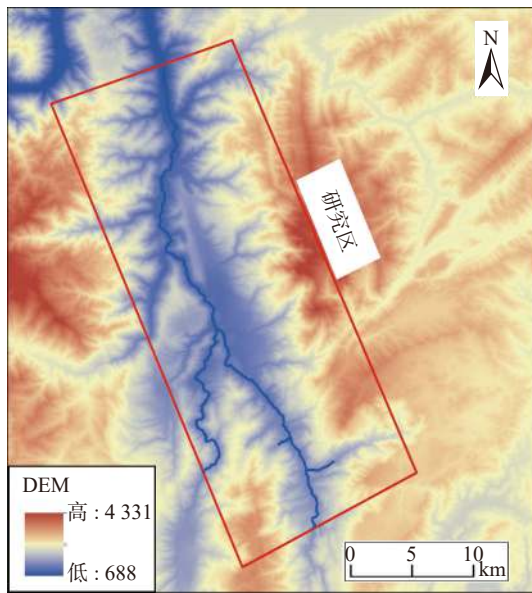


图2 研究区 DEM

Fig. 2 Digital elevation model of study area

软件进行处理,升轨和降轨数据选取日期为 2018-08-11 和 2018-08-13 的影像作为超级主影像,通过设置临界基线和时间基线,生成 103 和 100 对像对,设置多视数为 1:4 可以较好地抑制斑点噪声,采用 Minimum Cost Flow 解缠方法和 Goldstein 滤波方法做干涉 workflow,最终生成干涉图,调整删除不理想的数据,在研究区生成较为理想的部分升降轨干涉图如图 3 所示。从图 3 可以看出,针对山区地区,运用升降轨数据处理后得到的干涉图相干性较为理想。

经过轨道精炼和重去平,估算和去除残余的恒定相位和解缠后还存在的相位坡道,进行第一次反演、第二次反演,最后对序列信息进行地理编码获得研究区域 2018 年 4 月 25 日—2019 年 4 月 20 日雷达视线方向 (LOS) 的形变速率图。如图 4 所示,正值表示形变朝着卫星的方向,负值表示形变沿着远离卫星的方向。图 4(a) 为采用升轨数据获取的地表形变速率图,图 4(b) 表示采

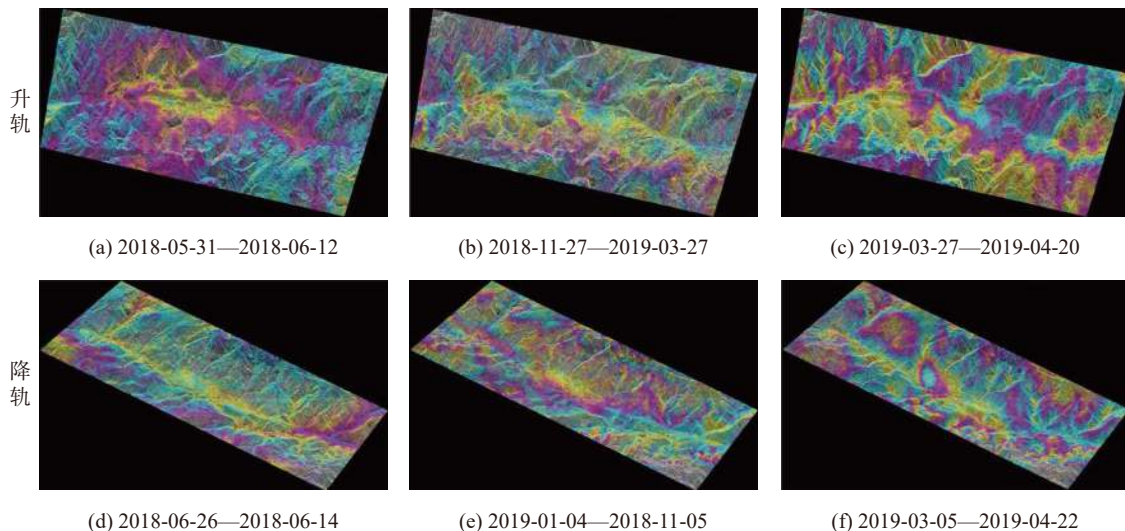
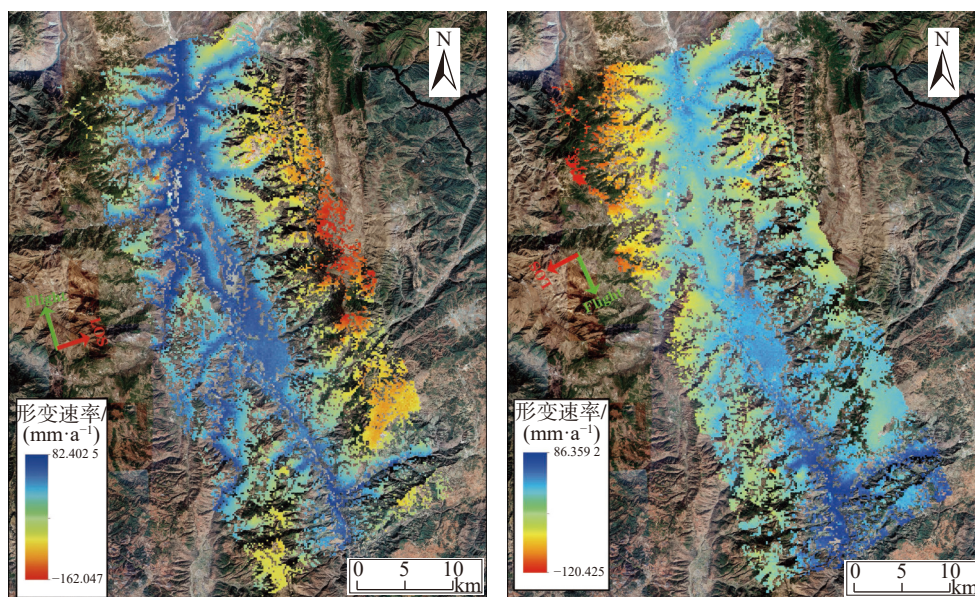


图3 部分升降轨干涉图

Fig. 3 Part of the lifting rail interference diagram

用降轨数据获取的地表形变速率图。从图 4 可以看出,采用升轨获取的形变主要分布在小江东侧,最大形变速率为  $-162.074 \text{ mm/a}$ ,降轨获取的形变主要分布在小江西侧西北方向,最大形变速率为  $-120.425 \text{ mm/a}$ 。致使不同轨道得到的形变结果不同,是由于升轨数据飞行方向大致从南到北,雷达视线 (LOS) 方向位于右侧,能够很好地将峡谷两侧由西向东的地表形变监测出来,相反,降轨数据的飞行方向与之相反,能够将峡谷两侧由东向西的地表形变监测出来。为此,利用不同轨道数据可以互补,使得监测结果更为准确全面,能够避免单一轨道带来的几何畸变等问题。

利用 InSAR 技术在植被覆盖地区进行地形测量非常困难,这主要是因为电磁场和(或)散射体的物理特性随时间的变化而造成的,植被覆盖度高地区,失相干严重,导致监测地面形变信息的能力较差,对形变监测精度的影响较大<sup>[16-17]</sup>。为考虑监测形变结果的有效性,引入归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 对研究区植被覆盖数据进行分析。如图 5 所示,NDVI 结果被限定在  $[-1,1]$ ,负值表示地面覆盖为云、水、雪等,对可见光高反射,0 表示有岩石或裸土等,正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。对比图 4 和图 5 可以发现,升降轨获取的部分形变区处于



(a) 升轨 (b) 降轨

图 4 升降轨获得的地表形变速率图

Fig. 4 Surface deformation rate map obtained by lifting rail

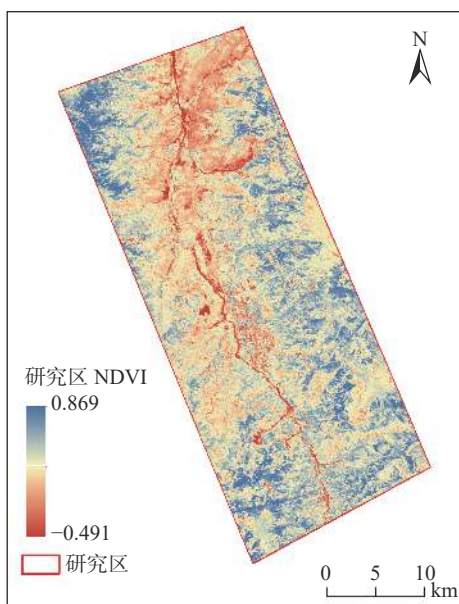


图 5 研究区 NDVI

Fig. 5 NDVI in the study area

植被覆盖较高的地区,这正是由于植被造成失相干严重,致使这些区域监测结果不准确,在分析和识别滑坡时,需把其剔除,避免导致滑坡识别的误判。

### 3.3 滑坡风险区的总体识别

深切割高山峡谷地区同样存在非滑坡原因的沉降变形,为保证获取的形变信息为滑坡灾害,仅凭形变监测结果无法区分是否为潜在的滑坡导致形变,为此,引入高分辨率光学影像对形变区域进行辅助识别,结合形

变范围、高程、坡度、植被覆盖和坡体是否具有滑坡特征等进行识别,避免过度依赖形变结果导致的误判等问题。由于不同轨道获取的形变数据能够对研究区不同方向的滑坡进行早期识别,分别对不同轨道获取的数据结合光学影像解译,升轨数据解译结果如图 6 所示,黑色区域为滑坡形变区域,红色虚线区域为对应光学影像滑坡灾害隐患,黄色箭头代表滑坡方向,共解译出 11 处潜在滑坡,分别用 H01、H02、……、H11 进行编号,其

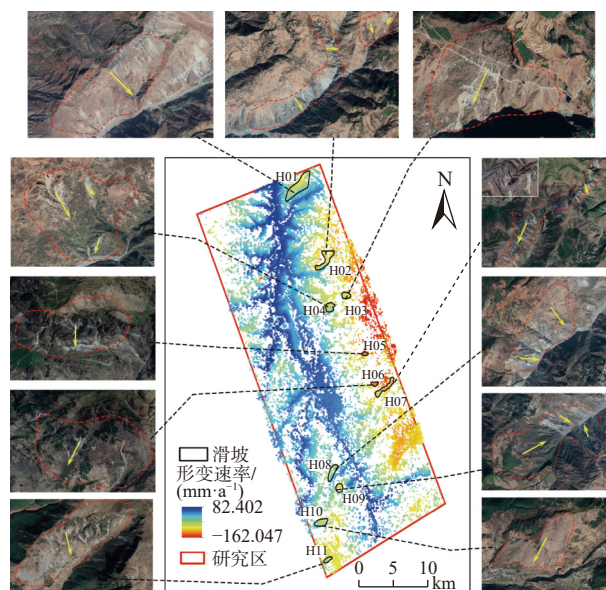


图 6 升轨数据滑坡灾害识别结果

Fig. 6 Landslide disaster identification results of lifting data

中 H01、H02、H08 和 H09 位于现存泥石流沟处, H01 位于尖山沟老尖山、土岩子一带, H02 位于蒋家沟一带, H08、H09 位于大白泥沟和小白泥沟一带, 其他潜在滑坡有一定的滑坡痕迹。识别出来的滑坡区域平均最大形变速率超过  $-40 \text{ mm/a}$ , 最大形变速率  $-120 \text{ mm/a}$ , 位于 H06 岩子脚村上方。根据滑坡是否直接威胁附近周围村落, 对 11 处潜在滑坡进行危险划分, 共识别出 4 处高风险滑坡, 分别是 H06、H09、H10 和 H11, H06 坡体对岩子脚村构成威胁, H09 坡体对大村和鲁纳窝村构成威胁, H10 对小多红村和委托村构成威胁, H11 对小凹子村、厂上村、大麦地、小村子等构成威胁, 这些区域一旦发生滑坡, 极有可能对当地群众造成生命及财产损失。

降轨数据解译结果如图 7 所示, 共解译出 7 处潜在滑坡, 分别用 H12、H13、……、H18 进行编号, 滑坡区域平均形变速率均超过  $-40 \text{ mm/a}$ , 最大形变区域位于 H18 大白泥沟和小白泥沟连接处, 其最大形变速率为  $-94.11 \text{ mm/a}$ 。根据滑坡是否直接威胁附近周围村落, 对 7 处潜在滑坡区进行危险划分, 共识别出 1 处滑坡高风险区, 编号为 H16, 该坡体对姑庄村和新寨田村构成威胁。对比图 6 和图 7 发现, 不同轨道识别出来的潜在滑坡分布不同, 利用升轨获取的滑坡主要分布在小江右侧峡谷中部, 降轨获取的滑坡主要分布在小江左侧西北方向, 其中不同轨道识别到的潜在滑坡有相同位置, 但形变区域不一致, 例如, H01、H13 共处于尖山沟一带, H02、H15 共处于蒋家沟一带, H08、H18 共处于大小白泥沟一带。由此证明, 利用升降轨结合的方式能够有效识别深切割高山峡谷地区不同坡度方向存在的潜在滑坡, 避免了单一轨道存在的识别结果不准确, 不全面等问题。

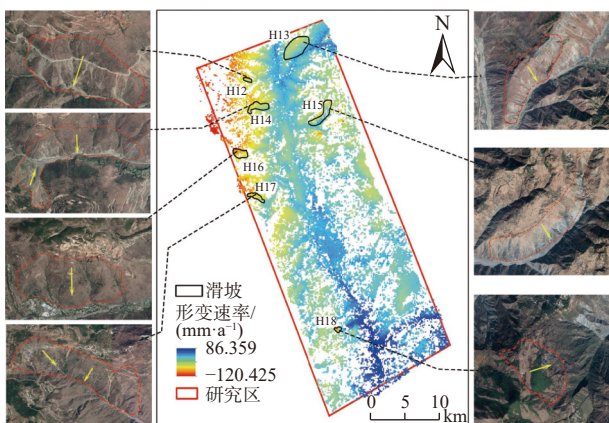


图 7 降轨数据滑坡灾害识别结果

Fig. 7 Landslide disaster identification results of rail descent data

### 3.4 典型灾害滑坡分析

经过对比光学影像发现, 研究区识别出来的潜在滑坡可定义为三种类型, 分别是处于泥石流区域的潜在滑坡 (H09)、有滑坡痕迹的潜在滑坡 (H06) 和无滑坡痕迹的潜在滑坡 (H16)。为有效了解不同类型潜在滑坡的形变趋势, 分别对三种典型的潜在滑坡进行分析。

#### 3.4.1 H09 典型滑坡

H09 属于典型的泥石流区域潜在滑坡, 位于小白泥沟, 该区域为暴雨型泥石流多发区。利用获取的形变速率值与三维光学影像叠置分析, 其形变速率如图 8 所示, 存在 A、B 和 C 三个潜在滑坡区, 呈 V 字型分布, 滑动方向由坡面向下滑动, 在每个潜在滑坡上方能明显的观察到断裂滑动痕迹, 最大形变速率为  $-103.013 \text{ mm/a}$ , 位于潜在滑坡 A 面上方。从图 8 中可以看到, B、C 面分别位于小白泥沟两侧, 其潜在滑坡属于长期滑坡, 潜在滑坡上端形变速率大, 下端由于滑坡堆积物导致一定的抬升。但 A 面潜在滑坡还未形成真正意义的滑坡, 一旦 A 面滑坡, 极有可能威胁大村和鲁纳窝村民的生命及财产安全。为更有效全面地分析该种类型潜在滑坡的特点, 选取 A 面进行详细分析, 可以看到 A 面呈现三处不均匀形变, 有明显的拉张裂缝且有滑坡痕迹, 其中 P1 位于整个潜在滑坡顶端, P2 位于潜在滑坡中部, P3 位于潜在滑坡右侧。三个点均有可能在后期的降雨等因素下发展为新的潜在滑坡区。图 9 为 3 处潜在滑坡特征点形变量与当月降雨量的关系图, 可以看到特征点的形变量与降雨量有一定的相关关系。研究区总体位于小江断裂带沿线, 该区域断裂带宽  $5 \sim 20 \text{ km}$ , 呈现

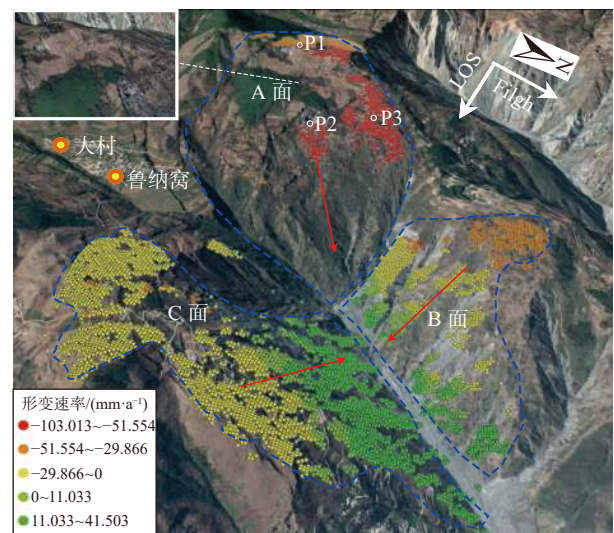


图 8 H09 潜在滑坡形变速率图

Fig. 8 Deformation rate diagram of H09 potential landslide

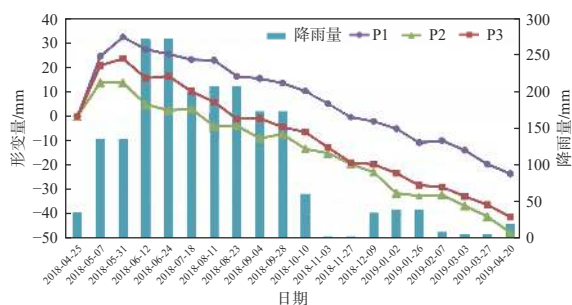


图 9 P1—P3 时间序列曲线与降雨量  
Fig. 9 Time series curve of P1—P3 and rainfall

弱剪切强挤压活动特征<sup>[18]</sup>,以挤压穹起隆升变形为主<sup>[19]</sup>,从形变时序图 9 可以看出,三个特征点在 2018 年 5 月先抬升后沉降,抬升可能是由于断裂带挤压活动致使,后经过雨水冲刷导致后期慢慢滑动沉降。P1、P2 和 P3 点的平均形变量分别为-10.571 mm、-22.564 mm、-19.516 mm,年形变量分别为-49.063 mm、-58.740 mm、-62.635 mm。该区域月均降雨量为 102 mm。随着时间的推移,形变量逐渐增加,到一定临界值便形成真正意义上的滑坡。

### 3.4.2 H06 典型滑坡

H06 属于典型的有滑坡痕迹的潜在滑坡,位于牯牛山岩子脚上方。图 10 为该潜在滑坡形变速率与三维影像的叠置图,从图 10 中可以白色虚线内两处潜在滑坡有明显的滑动痕迹,滑动方向为坡顶沿着坡脚移动。最大形变速率位于 P5 附近,达到-127.093 mm/a。选取特征点 P4、P5 形变量与月降雨量构建关系图(图 11)。随着时间推移,形变量不断增大。特征点的形变量与月降雨量有一定的相关关系,从形变时序图 11 可以看出,两个特征点在 2018 年 5 月先抬升后沉降,该潜在滑坡位于小江断裂带沿线,可能是由于断裂带挤压活动致使其抬升。当月降雨量增多加剧潜在滑坡的形变,这是由于降雨致使表层松散土体随着雨水滚落流失。P4、P5 点的平均累积形变量分别为-37.562 mm、-42.054 mm,年形变速率分别为-105.903 mm/a、-112.469 mm/a。该潜在滑坡区最高形变点高程为 3 606 m,地势陡峭,从年形变量可以看出该区域存在很大安全隐患,一旦发生滑坡,岩子脚村村民将面临极大的生命及财产安全。

### 3.4.3 H16 典型滑坡

H16 属于典型的无滑坡痕迹的潜在滑坡,位于姑庄村和新寨田上方。图 12 为该潜在滑坡区形变速率与三维影像的叠置图,从图 12 中可以看到,位于潜在滑坡上方有明显的形变,最大形变速率为-80.141 mm/a。

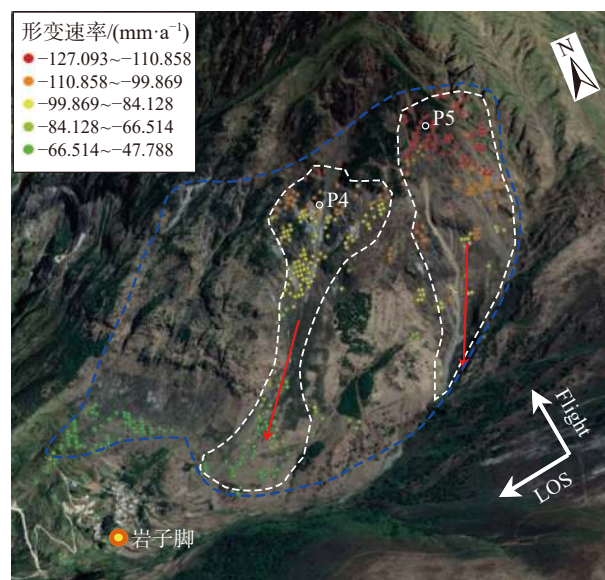


图 10 H06 潜在滑坡形变速率图  
Fig. 10 Deformation rate diagram of H06 potential landslide



图 11 P4—P5 时间序列曲线与降雨量  
Fig. 11 P4—P5 time series curve and rainfall

通过光学影像看到山体表面并无明显的滑动痕迹。该潜在滑坡区最高高程为 2 304 m,坡度大,滑动方向大致沿着山沟滑动。选取特征点 P6、P7 形变量与月降雨量构建关系图,如图 13 所示,形变与降雨有一定关系。从形变时序图 13 可以看出,P6、P7 两个特征点总是先抬升后沉降再抬升这一反复过程,在 2018 年 5 月可能是由于断裂带挤压活动致使其抬升,其他月份抬升微小可能是由于雨水冲刷导致土地堆积抬升,再经雨水冲刷致使微小沉降。P6、P7 平均累积形变量分别为-29.219 mm、-21.281 mm,年形变速率分别为-63.788 mm/a、-53.110 mm/a。两个特征点形变曲线大致一直,从潜在滑坡上方到中部形变速率逐渐减小。该潜在滑坡一旦发生滑坡,将直接威胁姑庄村和新寨田两个村。

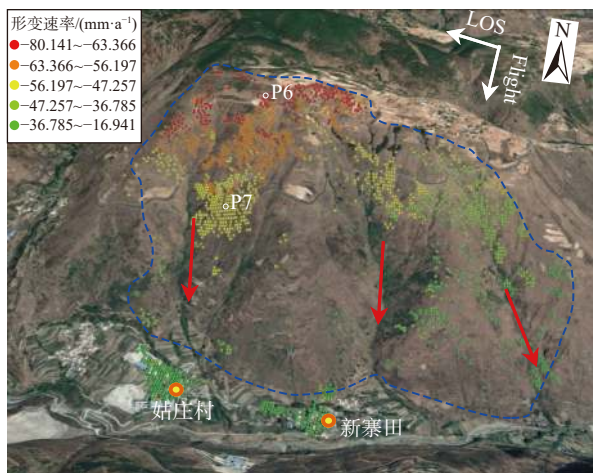


图 12 H16 潜在滑坡形变速率图

Fig. 12 Deformation rate diagram of H16 potential landslide



图 13 P6—P7 时间序列曲线与降雨量

Fig. 13 P6—P7 time series curve and rainfall

## 4 结论

文中基于 SBAS-InSAR 技术, 采用 Sentinel-1 升降轨数据结合互补的方式对东川小江沿线两侧深切割高山峡谷区滑坡灾害进行早期识别实验, 得出以下结论:

(1) 升轨数据识别出的滑坡主要分布在小江右侧, 降轨反之, 这表明相比单一轨道获取的识别结果, 利用升降轨结合的方式能够更全面的监测和识别高山峡谷滑坡, 避免单轨道对高山峡谷区滑坡进行早期识别存在 SAR 成像几何畸变造等问题。

(2) 在高山峡谷地区植被覆盖度过高容易致使失相干, 同时, 有部分地区并不属于滑坡导致的形变, 为此, 引入光学影像, 结合形变范围、高程、坡度、植被覆盖和坡体是否具有滑坡特征等进行识别, 避免过度依赖形变结果导致的误判等问题。

(3) 通过 H09、H06、H16 等 3 个典型潜在滑坡灾害分析, 可以看到滑坡的形成和降雨量有一定的关系。

(4) 文中共识别出 18 处潜在滑坡区, 其中 H06、

H09、H10、H11、H16 等 5 处为滑坡高风险区, 证明利用该方法可作为高山峡谷区滑坡灾害识别的有效手段, 但目前还有一定的不足, 比如在高山峡谷地区 SAR 数据量过少致使部分滑坡并未获取到形变量等问题。

## 参考文献 (References):

- [1] 王之栋, 文学虎, 唐伟, 等. 联合多种 InSAR 技术的龙门山-大渡河区域地灾隐患早期探测 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, 45(3): 451-459. [WANG Zhidong, WEN Xuehu, TANG Wei, et al. Early detection of geological hazards in Longmenshan-Dadu river area using various InSAR techniques [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(3): 451-459. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2018, 43(12): 2039-2049. [ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of West China using time series SAR interferometry: A case study of Danba, Sichuan [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2039-2049. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 石固林, 徐浪, 张璇钰, 等. 西山村滑坡时序形变的 SBAS-InSAR 监测 [J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 93-98. [SHI Gulin, XU Lang, ZHANG Xuanyu, et al. Monitoring time series deformation of Xishanchun landslide with SBAS-InSAR [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(2): 93-98. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443-450. [HUANG Runqiu. Mechanism of large scale landslides in Western China [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 443-450. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张拴宏, 纪占胜. 合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 在地形形变监测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 115(1): 112-117. [ZHANG Shuanhong, JI Zhansheng. A review on the application of Interferometric Synthetic Aperture Radar on surface deformation monitoring [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 115(1): 112-117. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王志勇, 张金芝. 基于 InSAR 技术的滑坡灾害监测 [J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(3): 87-91. [WANG Zhiyong, ZHANG Jinzhi. Landslides monitoring based on insar technique [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(3): 87-91. (in Chinese with English abstract)]
- [7] GUO J M, HU J Y, LI B, et al. Land subsidence in Tianjin for



- 2015 to 2016 revealed by the analysis of Sentinel-1A with SBAS-InSAR [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, 11(2): 026024 – 026024.
- [ 8 ] 代聪, 李为乐, 陆会燕, 等. 甘肃省舟曲县城周边活动滑坡 InSAR 探测 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(7): 994 – 1002. [ DAI Cong, LI Weile, LU Huiyan, et al. Active landslides detection in Zhouqu County, Gansu Province using InSAR technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 994 – 1002. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 123 – 133.
- [ 10 ] DAI K, CHEN G, XU Q, et al. Potential landslide early detection near Wenchuan by a qualitatively multi-baseline dinsar method [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-3: 253 – 256.
- [ 11 ] 韩守富, 赵宝强, 殷宗敏, 等. 基于 PS InSAR 技术的黄土高原地质灾害隐患识别 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(1): 1 – 7. [ HAN Shoufu, ZHAO Baoqiang, YIN Zongmin, et al. The identification of potential geological hazards on the Loess Plateau based on PS InSAR technology [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, 56(1): 1 – 7. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 384 – 393. [ FENG Wenkai, DUN Jiawei, YI Xiaoyu, et al. Deformation analysis of woda village old landslide in Jinsha river basin using sbas-insar technology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 384 – 393. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别——以雅砻江中段为例 [J]. *雷达学报*, 2020, 9(3): 554 – 568. [ DAI Keren, TIE Yongbo, XU Qiang, et al. Early identification of potential landslide geohazards in alpine-canyon terrain based on SAR interferometry: A case study of the middle section of Yalong river [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 554 – 568. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动监测 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(8): 945 – 950. [ YANG Chengsheng, ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, et al. Small baseline subset InSAR technology used in Datong basin ground subsidence, fissure and fault zone monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 945 – 950. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 徐富强. 滑坡转化成泥石流的流态化机理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2003. [ XU Fuqiang. The mechanism research on the fluidization of the landslide translating into debris flow [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, 29(8): 664 – 668. [ LI Deren, LIAO Mingsheng, WANG Yan. Progress of permanent scatterer interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(8): 664 – 668. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 周华云, 赵林, 田黎明, 等. 基于 Sentinel-1 数据对青藏高原五道梁多年冻土区地面形变的监测与分析 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(3): 525 – 536. [ ZHOU Huayun, ZHAO Lin, TIAN Liming, et al. Monitoring and analysis of surface deformation in the permafrost area of Wudaoliang on the Tibetan Plateau based on Sentinel-1 data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(3): 525 – 536. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 张勇, 洪敏, 崔兴平, 等. 小江断裂带近场活动特征分析 [J]. *地震研究*, 2018, 41(3): 375 – 380. [ ZHANG Yong, HONG Min, CUI Xingping, et al. Evaluation of near field activity in Xiaojiang fault zone [J]. *Journal of Seismological Research*, 2018, 41(3): 375 – 380. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 冯金良, 崔之久, 张威, 等. 云南东川地区层状地貌面的成因 [J]. *山地学报*, 2004, 22(2): 165 – 174. [ FENG Jinliang, CUI Zhijiu, ZHANG Wei, et al. Genesis of the layered landform surfaces in Dongchuan, Yunnan Province [J]. *Journal of Mountain Research*, 2004, 22(2): 165 – 174. (in Chinese with English abstract) ]