

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.025



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



喜马拉雅山脉南坡群发性泥石流的物源形变规律

王苗苗¹, 马超¹, 吕立群¹, 杜翠², 陈雨欣¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 成都信息工程大学 软件工程学院, 成都 610255)

摘要: 绒辖曲位于喜马拉雅山脉南坡, 区域地质构造活跃, 冰湖、冰碛物丰富。叠加 2015 年尼泊尔 Gorkha Ms 8.1 强震影响, 稳定性进一步降低。2021 年 6 月 15 日该区域发生群发性泥石流后, 尚未有针对此次泥石流物源活动规律的深入分析。利用灾前和灾后 GF-1B、BJ-2、Planet 遥感数据对泥石流物源进行解译, 基于 Landsat 5、Landsat 8、Sentinel-2 遥感数据, 通过计算归一化水体指数 (I_{NDW}) 提取典型冰湖边界, 利用 SBAS-InSAR 技术处理 184 幅升轨 Sentinel-1A 数据, 获取该地区 2014—2021 年地表形变。结果表明: 研究区在 2014—2021 年间整体呈缓慢沉降趋势; 滑坡体中上部沉降最显著, 其次是滑坡前缘, 滑坡后缘的形变相对较小, 这种空间分异特征是在前缘牵引和中后部物源推挤共同作用下滑坡体形变向后缘扩展并发生整体滑移所致。冰碛型石冰川季节性形变显著, 其中心区域形变最剧烈, 向冰缘带和末端递减, 这种形变格局主要受控于冻土活跃层冻融循环过程及冰雪融水在中心区域的汇集、释放效应。此外, 雅隆错冰湖 2000—2021 年间面积增长近 43%, 且终碛体处两侧形变较大。区域防灾减灾需要加强雨季对冰湖、石冰川及与沟道系统连通的物源变化监测。

关键词: 喜马拉雅南坡; 滑坡; 泥石流; 石冰川; 形变监测

中图分类号: P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)06-0063-12

Deformation patterns for debris sources of clustered debris flows in the southern flanks of the Himalayas

WANG Miaomiao¹, MA Chao¹, LYU Liqun¹, DU Cu², CHEN Yuxin¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P. R. China; 2. College of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, P. R. China)

Abstract: The Rongxar Qu, located on the southern flank of the Himalayas, is characterized by active tectonics and features abundant glacial lakes and moraines. Its stability was further compromised by the 2015 Nepal Gorkha Ms 8.1 earthquake. Following the clustered debris flows in the region on June 15, 2021, in-depth analysis has been limited, with little focus specifically on the activity patterns of the source materials. This study utilized pre- and post-disaster remote sensing data from GF-1B, BJ-2, and Planet satellites to interpret the debris sources of the debris flows. Additionally, the boundaries of typical glacial lakes were extracted using

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)

作者简介: 王苗苗(1998-), 女, 主要从事山地灾害预测预报研究, E-mail: 1319351380@qq.com。

马超(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: sanguoxumei@163.com。

Received: 2024-10-31

Foundation item: Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No. 2019QZKK0902)

Author brief: WANG Miaomiao (1998-), main research interests: mountain disaster prediction and forecasting, E-mail: 1319351380@qq.com.

MA Chao(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: sanguoxumei@163.com.

Landsat 5, Landsat 8, and Sentinel-2 remote sensing data through the calculation of the Normalized Difference Water Index (I_{NDW}). Furthermore, the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique was applied to process 184 ascending Sentinel-1A data, enabling the acquisition of surface deformation in the region from 2014 to 2021 data. The results indicate that the study area experienced an overall trend of gradual subsidence from 2014 to 2021. In the landslide bodies, the most significant settlement occurred in the mid-upper sections, followed by the front edges, while the rear edges exhibited relatively minor deformation. This spatial differentiation pattern is attributed to the combined effects of frontal traction and middle-rear pushing forces, which caused the deformation to propagate toward the rear edges and resulted in overall slippage. Moraine-type rock glaciers demonstrated pronounced seasonal deformation, with the most intense deformation concentrated in their central zones, gradually decreasing toward the marginal zones and termini. This deformation pattern is primarily controlled by the freeze-thaw cycle of the active permafrost layer and the accumulation and release of meltwater in the central zones. Notably, Yalong Co Glacial Lake expanded by nearly 43% between 2000 and 2021, accompanied by significant deformation on both sides of the terminal moraine. Therefore, regional disaster prevention and mitigation efforts should focus on enhancing the monitoring of cryospheric hazards, including glacial lakes and rock glaciers, as well as the changes in debris sources connected to gully systems, particularly during the monsoon season.

Keywords: southern flanks of the Himalayas; landslide; debris flow; rock glaciers; deformation monitoring

由于印度构造板块俯冲到欧亚板块之下^[1],喜马拉雅造山运动极大地改变了地球历史的面貌,影响了亚洲的气候和水文格局,形成了不同的气候、植被、地貌垂直地带谱^[2]。受高地势梯度、新构造活动和全球变暖影响,高海拔环境带内地质灾害频发,类型多、规模大且具有链式特征^[3],除冰湖扩张、冰崩、冰湖溃决型、冰水混合型泥石流外^[4-7],群发性泥石流灾害日渐凸显^[8]。在喜马拉雅南坡亚热带气候区,群发性地质灾害多集中在小喜马拉雅边缘平均海拔 (0.9 ± 0.4) km 和 (1.2 ± 0.2) km 的山麓地带和大喜马拉雅南部平均海拔 (2.1 ± 0.3) km 的平行山脉,缺少对于海拔 2 400 m 以上地带群发性地质灾害的关注。2013 年 6 月印度北部北阿坎德邦“高温+连续暴雨”导致海拔 3 500 m 的 Chorabari 湖发生漫溢性溃决,一度将 Kedarnath 神龛冲毁,溃决洪水与暴雨洪水叠加,致整个曼达基尼河谷遭到重创^[9]。这是喜马拉雅山脉高海拔山区“高温+极端暴雨”诱发“冰湖溃决+超大洪水”酿成重灾的典型案例^[10]。

地表形变监测是地质灾害早期识别的技术手段之一,精密水准测量、GPS 和地球物理勘探等传统检测手段对环境依赖性强,成本高昂且监测范围有限。21 世纪以来,InSAR 技术以其全天候、穿透性强、覆盖范围大的特点在滑坡^[11]和地面沉降^[12]广泛应用。陈思名等^[13]利用 D-InSAR 技术对宁夏黄土丘陵区西吉县滑坡隐患进行识别,结果与实地核验相吻合。随着滑坡监测需求的不断提升,D-InSAR 技术暴露出易失相干和受大气延迟影响的

局限性,基于此,PS 和 SBAS 两种 InSAR 技术相继问世。张志华等^[14]基于 PS-InSAR 技术获取了上海地区地表沉降信息;Nhu 等^[15]对马来西亚金马仑高原的山体滑坡现象进行了监测和辨识,并将 PS-InSAR 技术运用于评估目标区域的滑坡风险等级。PS-InSAR 技术依赖于研究区内永久散射体密度,在城镇化率低、建筑少的山区表现不佳。而 SBAS-InSAR 技术除了能减小时空基线过长导致的失相干,减缓大气效应和地形影响,还能获取长时间的时序形变信息,更可靠、适用性更强。徐源懋等^[16]将 SBAS-InSAR 技术用于舟曲县潜在滑坡灾害早期识别,分析了其与降水的相关性;Guzzetti 等^[17]采用 SBAS-InSAR 技术对意大利中部的翁布里亚地区进行了全面的地表形变探测和滑坡空间布局分析。

尽管 SBAS-InSAR 技术在城市和矿区的应用已经比较成熟,但在高山峡谷中的研究仍处于起步阶段,现有研究多集中在高原腹地和川藏铁路等^[18]工程走廊沿线。像绒辖曲这样地形复杂,降水充沛,冰川活动频繁,地质灾害频发的地区,亟需更多关注。绒辖曲位于 2015 年尼泊尔 Gorkha Ms 8.1 地震的Ⅶ-Ⅷ级烈度区,地震对山体的稳定性造成了损伤,增加了震后群发性地质灾害的风险。2021 年 6 月 15 日,绒辖乡突降暴雨,诱发绒辖曲河谷群发性泥石流灾害,形成堰塞湖,威胁居民生命财产安全。因此,研究绒辖曲这种典型喜马拉雅山脉南坡大地势梯度大流域的泥石流物源条件及其地表形变规律,对高山峡谷地区的防灾减灾及滑坡灾害早期识别具有重要意义。

1 研究区概况

位于西藏自治区日喀则市定日县的绒辖曲流域(以中尼界碑为界)属于珠峰西侧喜马拉雅南坡聂鲁河流域,紧靠卓奥友峰,地质构造复杂,多高山峡谷,海拔在2 306~7 279 m之间(图1)。整个流域面积1 000.42 km²,主沟长49.399 km,沟源高程5 200 m,沟口高程2 702 m,平均纵比降约61.16‰。主要由中-上元古界各种片岩、片麻岩、变粒岩、混合岩夹大

理岩和震旦-寒武系石英片岩、板岩及千枚岩夹、结晶灰岩、变砂岩组成,还有一部分为高山常年冰雪覆盖区。流域植被和地貌垂直梯度分异非常突出。此外,植被在坡向差异分布上也具有地带性特点。受印度洋季风影响,温湿多雨,总体上属于典型的亚热带至高山冰原喜马拉雅南翼湿润气候区,加之该区构造复杂、高山峡谷的地形、丰沛的降水以及现代冰川的活动,造就了区域内以崩塌、滑坡、冰川泥石流、溜砂坡以及滚石为主要类型的地质灾害^[19]。

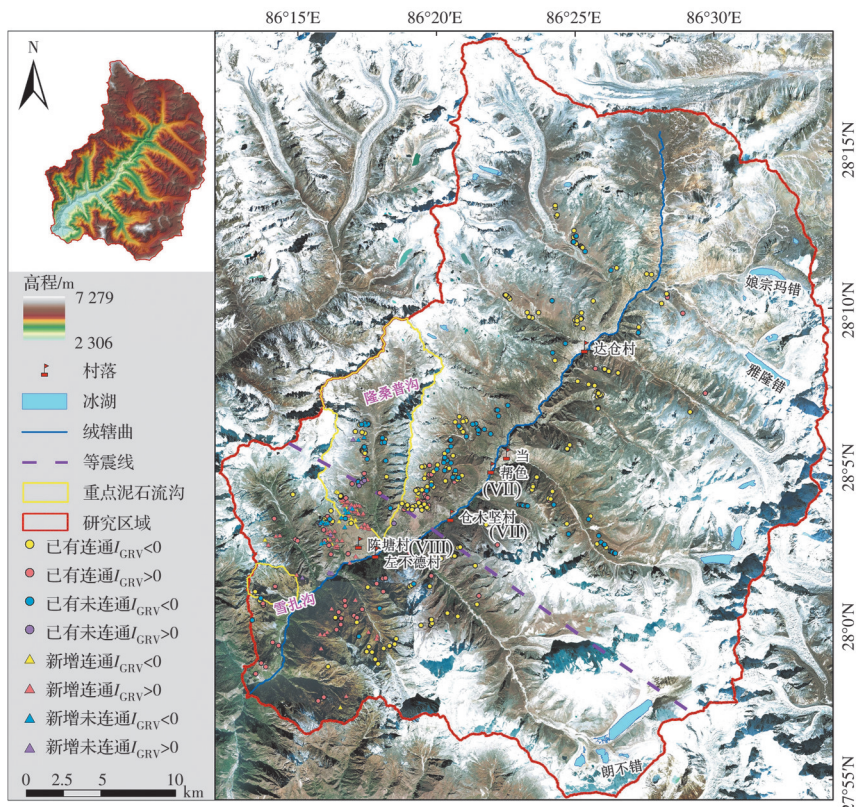


图1 研究区概况

Fig. 1 General situation of the study area

2 研究方法

2.1 滑坡和冰湖解译

2.1.1 滑坡解译

由于研究区地处高山峡谷地形,夏季常有较浓的云雾覆盖,为避免这一干扰因素,选择灾前和灾后的秋冬季节高分辨率图像进行分析。滑坡的遥感解译主要基于图像的形态、色调、纹理以及阴影等判断标志。在遥感影像中,典型滑坡表现为由后壁和侧壁组成的圈椅状或“双沟同源”等微地貌形态,新生的滑坡光谱具有较强的反射率,一般呈浅色调和灰白色调,时间较久的滑坡一般呈土棕色调,与植被色调相比,滑坡体色调较亮,大范围植被色调较暗。这些形态特征在高分辨率卫星影像中清晰可见,因此可通过对2021年6月15日极端暴雨

事件前后的高分辨率遥感影像目视解译,结合现场调查、无人机勘测以及长时间序列的多源遥感数据,获得极端暴雨诱发滑坡群的实际空间分布特征及其随时间的发展趋势。利用绿红植被指数 I_{GRV} 对滑坡点进行分类,计算方法为

$$I_{GRV} = \frac{\rho_G - \rho_R}{\rho_G + \rho_R} \quad (1)$$

式中: I_{GRV} 为绿红植被指数; ρ_G 、 ρ_R 分别为绿波段、红波段的反射率。

2.1.2 冰湖解译

选取2000—2020年目标冰湖上空无云覆盖的影像(来源 Landsat 5、Landsat 8、Sentinel-2)作为数据源,另外,选取灾害发生前(2021-02-05)和灾害发生后(2021-10-13、2021-11-09)的高分辨率遥感影像进行对比,见表1。首先,对于选取的 Sentinel-2 号

影像,在哨兵数据应用平台(sentinel application platform, SNAP)中将全波段重采样至 10 m,对 B2、B3、B4 波段进行融合处理,利用 B3(绿波段)和 B8 波段(近红外波段)计算归一化水体指数 I_{NDW} ;其次,基于高分辨率遥感影像,对冰湖进行手动勾画和提取。因目标区域海拔较高,湖泊表面常年覆盖冰层,因此选定 $I_{NDW} > 0.2$ 作为区分水体的条件,对于有云雾阴影的影像,设定提取阈值为 $I_{NDW} > 0$,并结合目视解译进行冰湖提取。其中,归一化水体指数 I_{NDW} 的计算方法为

$$I_{NDW} = \frac{\rho_G - \rho_{NIR}}{\rho_G + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

式中: I_{NDW} 为归一化水体指数; ρ_G 、 ρ_{NIR} 分别为绿波段、近红外波段的反射率。在 Landsat 5 中 B2 对应绿波段, B4 对应近红外波段; 在 Landsat 8 中 B3 对应绿波段, B5 对应近红外波段。

表 1 遥感数据信息

Table 1 Information of remote sensing data

序号	卫星	分辨率	获取时间	用途
1	GF-1B	2 m × 2 m	2021-02-05	滑坡解译
2	BJ-2	0.8 m × 0.8 m	2021-10-13	滑坡解译、冰湖提取
3	BJ-2	0.8 m × 0.8 m	2021-11-09	滑坡解译、冰湖提取
4	Planet	3 m × 3 m	2017—2020	滑坡解译
5	Sentinel-1A	5 m × 20 m	2014-10-11—2021-12-21	SBAS-InSAR 形变监测
6	Sentinel-2	10 m × 10 m	2021-05-22	COSI-Corr 像素偏移监测
7	Sentinel-2	10 m × 10 m	2021-10-14	COSI-Corr 像素偏移监测
8	Landsat 5	30 m × 30 m	2000、2001、2003—2011	冰湖提取
9	Landsat 8	30 m × 30 m	2013—2015	冰湖提取
10	Sentinel-2	10 m × 10 m	2016—2020	冰湖提取

2.2 SBAS-InSAR 技术原理及形变速率校正

SBAS-InSAR 是由 Berardino 等^[20]提出的一种时序 InSAR 分析方法。该方法通过处理基线更短、去相关较小的干涉图来确定随时间变化的表面变形,使得变形结果更密集、更可靠^[21]。其基本原理为利用具有较短时空基线的影像对产生干涉图提高干涉性,再进行相位解缠干涉相位;依据相干像元相位和观测时间的关系,利用奇异值分解法得到最小二乘解估计时间序列的非线性变形^[22]。主要步骤包括:设置一定的时空基线阈值进行多组影像组合,从而生成差分干涉图;对干涉结果进行滤波、解缠;最后基于像元逐个计算分析并获取时间序列上的位移量^[23-26]。

对于高山峡谷区,利用 SBAS-InSAR 技术获得的视线向(LOS)形变速率难以反映边坡的真实形变信息,通过雷达视线方向与斜坡坡面的夹角将雷达视线方向的形变速率转化为坡度方向的形变速率,以表达斜坡面的地表形变信息。

$$V_{\text{slope}} = V_{\text{los}} / \cos \beta \quad (3)$$

$$\cos \beta = (-\sin \alpha \cos \varphi)(-\sin \theta \cos \alpha_s) + (-\cos \alpha \cos \varphi)(\sin \theta \sin \alpha_s) + \sin \varphi \cos \theta \quad (4)$$

式中: V_{slope} 为沿坡度方向的形变速率, mm/a; V_{los} 为沿雷达视线方向的形变速率, mm/a; β 为雷达视线方向与斜坡坡面的夹角; φ 为斜坡的坡度; α 为斜坡的坡向; θ 为入射角; α_s 为卫星轨道方向和正北方向的夹角。

2.3 像素偏移追踪监测地表形变

光学影像配准和相关性分析方法(co-registration of optically sensed images and correlation, COSI-Corr)能从连续多时相航空和遥感影像中检测地表的亚像素形变^[27-28],依靠自主生成的地面控制点实现正射校正和联合配准的自动化、精准化。COSI-Corr 方法的工作原理:利用滑动窗口检测两幅不同时间采集的航空或遥感影像的纹理相似性,基于傅里叶算法使用 COSI-Corr 中的频率相关器,基于基础影像计算目标影像的相对位移。该软件以其高精度、高效率、覆盖范围广、不受地面条件限制等独特优势,成为地表形变观测的一种重要工具,也是对其他测量手段的有益补充。

2.4 数据源

以 2014-10-11—2021-12-21 共 184 景 Sentinel-1A 升轨 SLC 图像和 12.5 m 分辨率的数字高程模型为数据源(<https://search.asf.alaska.edu>),在 ENVI 软件中通过 SARscape 工具箱得到研究区视线向形变信息。在 ArcGIS10.8 软件中利用 DEM 获得研究区坡度、坡向数据,用来辅助提取沿斜坡方向的地表形变信息。此外,利用 6 景 2021-02-05 的 GF-1B 影像、2 景 2021-10-13 和两景 2021-11-09 的 BJ-2 号影像,经过融合裁剪得到研究区 2021-06-15 极端暴雨事件前后的高分辨率遥感影像,与 2017—2020 年的 Planet 影像相结合,用于滑坡解译。并通过灾害前后 2 期 Sentinel-2 图像进行 COSI-Corr 地表形变监测,见表 1。

3 结果分析

3.1 地表形变总体分布特征

使用 ENVI 中的 SARscape 模块,对 ENVISAT ASAR 进行干涉处理,为减少失相干的影响,时间基线阈值被设定为 180 d,对合成的干涉图重新做相位解缠和精炼,得到时间序列上的最终形变结果。

对最终的形变结果进行地理编码和栅矢转换,获得沿雷达视线方向的地表平均形变速率(mm/a),如图 2(a)所示。

绒辖曲为典型的高山峡谷地貌,湖泊众多,地形复杂、起伏较大,且积雪、苔原密布,导致相干性较低,数据在这些区域覆盖较差。又因为星载 SAR 采用侧视成像的方式,雷达波束斜向照射地表时会导致雷达图像出现距离向透视收缩、阴影或倒置等几何畸变^[29]。形变速率正值(蓝色)代表目标沿雷达视线方向移动,负值(红色)代表目标沿雷达视线方向朝卫星反方向移动。区域虽然整体较为平稳,形变速率较小,集中在-15~15 mm/a,但空间差异较

大,局部出现较大沉降,沉降速率大的区域呈条带状,大体沿山脊线分布在河谷两侧,形变区中心为形变最剧烈的区域,沉降速率最快可达-60.69 mm/a。

根据式(4)得到形变点沿坡度方向的形变速率。为避免在转换过程中存在绝对值的极大异常现象,以 $\cos \beta = \pm 0.3$ 为固定阈值^[30],设 $-0.3 < \cos \beta < 0$ 时, $\cos \beta = -0.3$; $0 < \cos \beta < 0.3$ 时, $\cos \beta = 0.3$ ^[31]。当 V_{slope} 的值为正数时,表示滑坡的移动方向沿坡面向上,这不符合滑坡体的运动规律,因此剔除 V_{slope} 为正值的形变点。沿斜坡坡度方向的年平均形变速率(V_{slope})如图 2(b)所示。

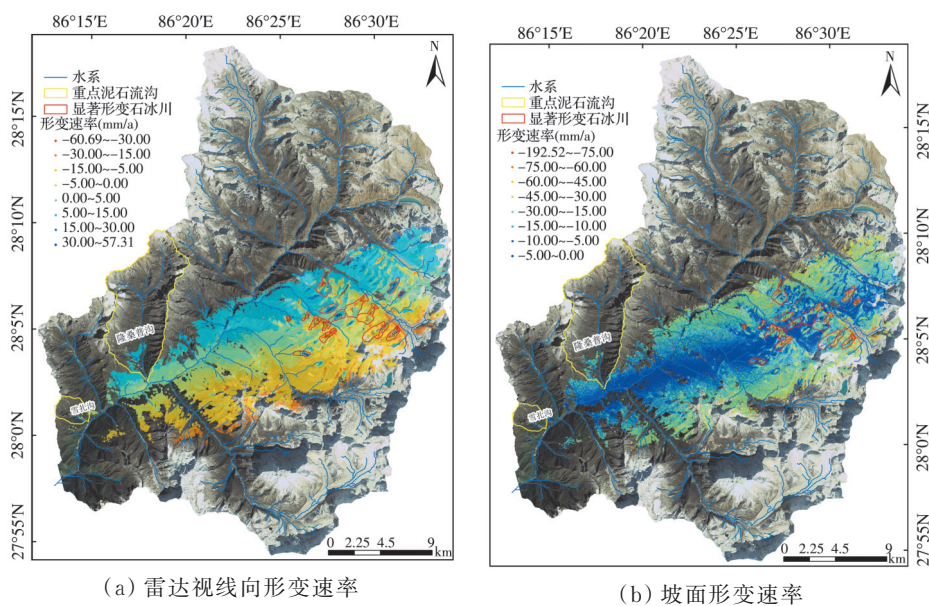


图 2 绒辖曲形变速率

Fig. 2 Radar line-of-sight deformation rate and slope-facing deformation rate of Rongxar Qu

Gorkha Ms 8.1 地震和 2021 年 6 月 15 日极端暴雨都对绒辖曲地表形变造成了一定影响。统计两次灾害事件对整个绒辖曲流域及重点泥石流沟沉降点的平均沉降量,结果表明,地震造成的沉降远大于暴雨事件造成的沉降(表 2)。

表 2 两次灾害事件后沉降点平均沉降量的统计对比

Table 2 Statistical comparison of average subsidence at subsidence points following two disaster events

流域	地震沉降点	暴雨沉降点
	平均沉降/mm	平均沉降/mm
绒辖曲	14.8	8.4
隆桑普沟	12.6	8.7
雪扎沟	30.3	4.0

以绒辖曲为界,左侧山体形变点大多分布在暗针叶林带(50.15%)和灌丛草甸带(49.29%),其中约 61.85% 的形变点坡面沉降速率介于-10~

0 mm/a;右侧山体形变点大多分布在草甸垫状植被带(51.63%)、寒冻冰碛地衣带(25.51%)和灌丛草甸带(17.73%),其中约 40.57% 的形变点坡面沉降速率介于-10~0 mm/a。统计各植被带不同沉降速率范围形变点的分布(图 3),下沉快速($V_{\text{slope}} < -50$ mm/a)的沉降点大多分布在绒辖曲右侧的草甸垫状植被带(65.9%)和寒冻冰碛地衣带(29.4%),灌丛草甸带和高山冰雪带也有少量快速形变点。造成绒辖曲两侧变形规律明显不一致的原因在于坡向差异导致的光照辐射差异。两侧的植被垂直梯带类似,气候也类似,左侧的斜坡受到的光照辐射时间、强度均高于右侧,导致地衣带以上的冰雪带形变较小。而且,左侧基本没有形变 < -50 mm/a 的形变点;相较而言,右侧从草甸带、地衣带和冰雪带均有 < -50 mm/a 的点,说明光照辐射差异可能是导致左侧和右侧变形规律差异的原因。

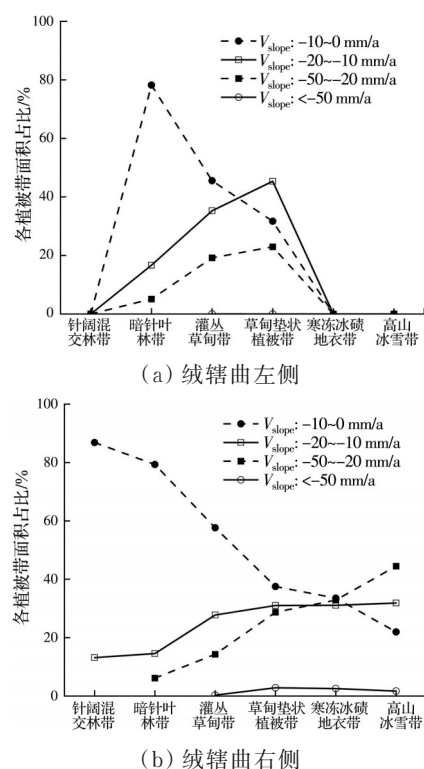


图3 绒辖曲两侧各植被带不同沉降速率形变点面积占比
Fig. 3 Proportional area of deformation points with different subsidence rates in each vegetation zone on both sides of Rongxar Qu

3.2 典型暴雨型滑坡区

根据绒辖曲 2021 年极端暴雨前后的高分辨遥

感影像勾画出滑坡点,这些滑坡是 2021 年泥石流的主要物质来源。将滑坡点按照灾害发生前后及与沟道系统的连通性进行分类,进一步按照是否有植被覆盖分为已有连通 $I_{\text{GRV}} < 0$ 、已有连通 $I_{\text{GRV}} > 0$ 、已有未连通 $I_{\text{GRV}} < 0$ 、已有未连通 $I_{\text{GRV}} > 0$ 、新增连通 $I_{\text{GRV}} < 0$ 、新增连通 $I_{\text{GRV}} > 0$ 、新增未连通 $I_{\text{GRV}} < 0$ 、新增未连通 $I_{\text{GRV}} > 0$ 八种情况。图 4 为上述 8 种滑坡类型及 2017—2021 年滑坡变化情况示意图,图 5 为无人机现场勘探示例。

绒辖曲地区山高沟深,边坡陡峭,地形起伏较大,侧视成像导致部分失相干,因此仅对有明显形变的滑坡体进行分析。根据对泥石流的贡献程度,将滑坡体分为两类:直接贡献物源的滑坡体和非贡献物源的滑坡体。直接贡献物源的滑坡体与沟道系统相连通,例如,支沟沟头(图 6)和主沟两侧滑坡体(图 7),其物质在重力和水流作用下进入沟道,快速堆积,成为泥石流主要固体物质来源。非贡献物源的滑坡体未与沟道直接相连,如平直型坡面(图 8)和凸起型坡面(图 9)滑坡体,难以进入沟道系统,对泥石流的形成和发展无直接影响。在滑坡前缘、中部、后缘分别选取特征点,分析其时间序列形变,从结果可以看出,同一滑坡时序点的形变趋势较为一致,同升同降,总体呈向下沉降趋势,滑坡中上部沉降速率最快,其次是前缘,滑坡后缘沉降速率最

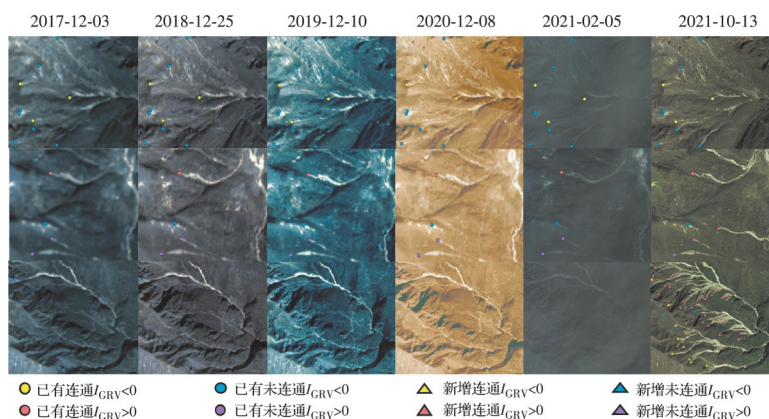


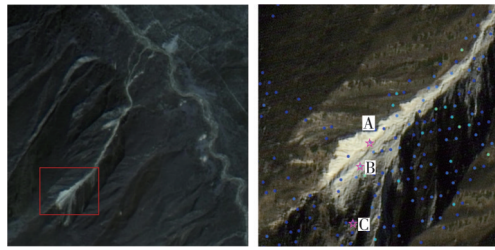
图4 滑坡类型及 2017—2021 年滑坡变化情况示意图

Fig. 4 Schematic diagram of landslide types and the changes in landslides from 2017 to 2021

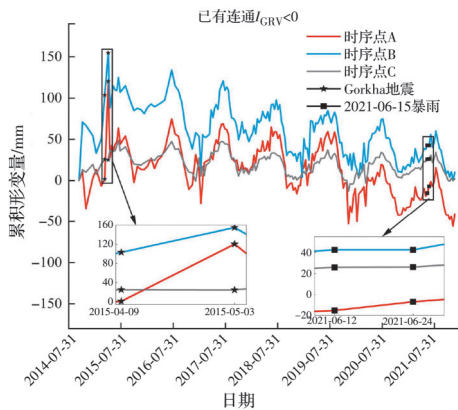


图5 无人机现场勘探滑坡示例

Fig. 5 On-site UAV survey example of landslide



(a) 灾害前后遥感影像

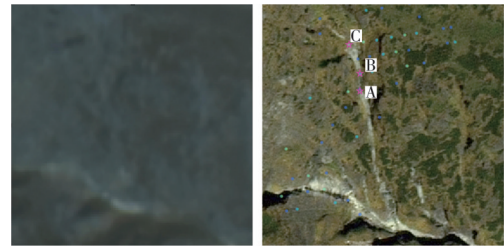


(b) 形变时间序列

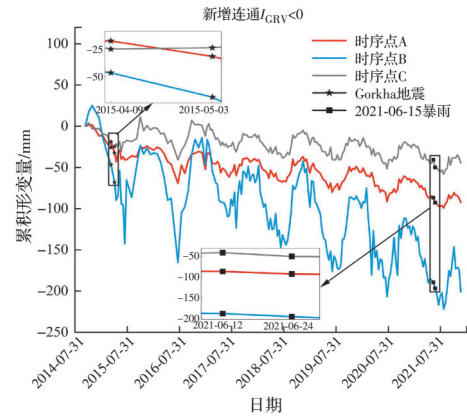
图6 支沟沟头滑坡体灾害前后遥感影像及其特征点形变时间序列

Fig.6 Pre- and post-disaster remote sensing images of landslide bodies at the head of tributaries and time series of deformation at characteristic points

慢。可能是因为在重力作用下前缘物源堆积体受到来自中后部物源的推挤作用,滑坡形变主要受前缘牵引,存在形变向后缘扩展并发生整体滑移。观察发现,支沟沟头滑坡体虽然整体呈沉降趋势,但累积形变量为正值(图6(b)),这一现象可能与地震作用及其后续效应密切相关。具体而言,前期地震活动导致滑坡体在短期内发生显著抬升,地震结束后,滑坡体进入应力调整阶段。地震导致的抬升不稳定,坡体在重力作用下逐渐沉降以恢复平衡状态,但由于地震造成的抬升幅度较大,沉降量未能完全抵消抬升量,因此累积形变量最终为正值。此外,地震可能导致滑坡体上游或周边区域的物质松动并堆积在坡面上,进一步增加了累积形变量。时序分析结果表明,这些滑坡在2015年7月发生了明显形变,这一现象与2015-04-25发生的Gorkha Ms 8.1级地震密切相关。地震导致坡体损伤,产生岩体裂隙,触发断层附近岩土体的持续调整,为滑坡的发生提供了条件,导致滑坡土体变松散,强度降低。尤其在7月降雨高发期,降雨不仅导致岩土体重度增加、岩土软化,入渗水分沿坡向渗透,增加了土壤饱和度,再加上增强的水流冲刷作用,降低了其抗剪强度和潜在滑动面上的有效应力,边坡稳定



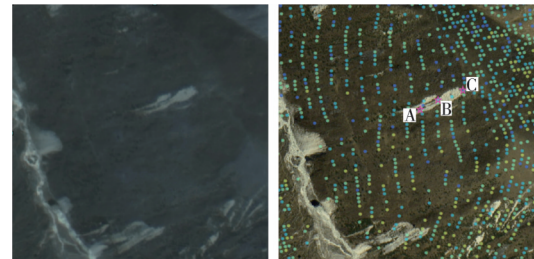
(a) 灾害前后遥感影像



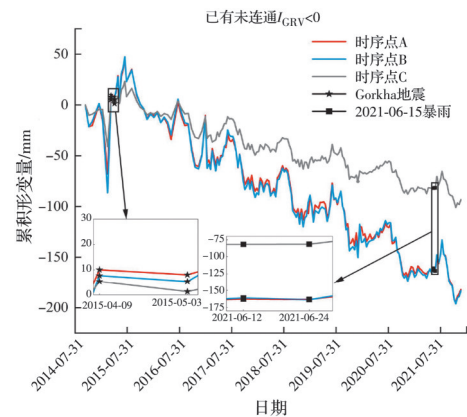
(b) 形变时间序列

图7 主沟两侧滑坡体灾害前后遥感影像及其特征点形变时间序列

Fig.7 Pre- and post-disaster remote sensing images of landslide bodies on both sides of the main channel and time series of deformation at characteristic points



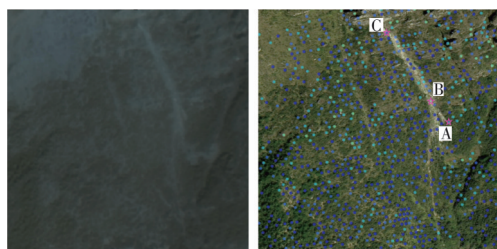
(a) 灾害前后遥感影像



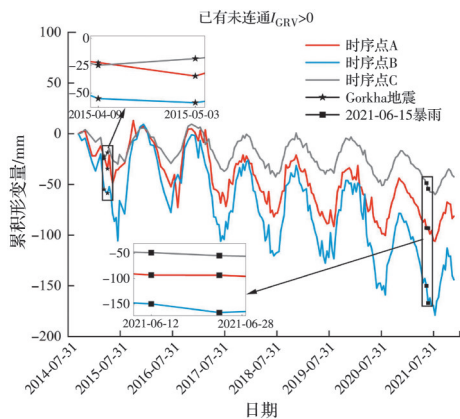
(b) 形变时间序列

图8 平直型滑坡体灾害前后遥感影像及其特征点形变时间序列

Fig.8 Pre- and post-disaster remote sensing images of rectilinear landslide bodies and time series of deformation at characteristic points



(a) 灾害前后遥感影像



(b) 形变时间序列

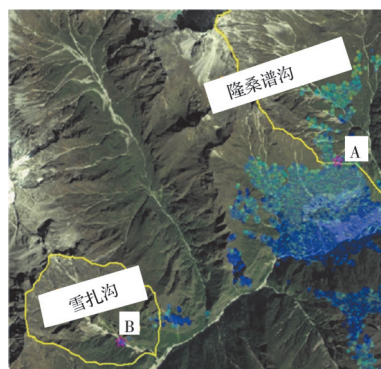
图 9 凸起型滑坡体灾害前后遥感影像及其特征点形变时间序列

Fig. 9 Pre- and post-disaster remote sensing images of convex landslide bodies and time series of deformation at characteristic points

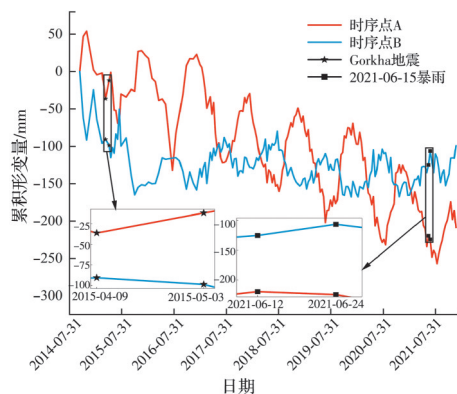
性下降,最终引发大量的滑移,在形变时序图上表现为沉降或抬升。地震与降雨的互促效应显著影响了震损边坡的稳定性,因此,地震发生后,尤其在雨季,防范滑坡泥石流灾害至关重要。

根据历史记录,2021-06-15隆桑普沟发生大规模泥石流,并堵塞绒辖曲主河道,堰塞坝溃决形成的洪水冲毁沿河公路、桥梁、检查站旧址,对下游居民点人员生命财产安全构成威胁;雪扎沟发生小规模泥石流,该流域泥石流频率较高,几乎每年都发生,泥石流堆积扇已经严重挤压绒辖曲主河道,对驻扎在边防廊道的施工人员生命安全构成威胁。在两个流域分别选取特征点,分析其时间序列形变,结果如图 10 所示。

总体来看,随着时间的推移,A、B 两点的形变整体均呈沉降趋势。从长期变化来看,A 点沉降速率更快,表明坡体处于不稳定状态,易积累大量松散物质。由于 A 点物源为主沟附近支沟的新增物源,水流汇集和泥沙启动条件较差,因此,只有在极端暴雨大量松散物质被集中冲刷的条件下,才能形成大规模泥石流。相比之下,B 点位于主沟中,有上游较为稳定的物源补给和较大的沟道纵坡度,有利于水流快速汇集和泥沙启动,导致其所在流域泥石流发生频率较高。但由于流域面积较小,物源总量



(a) 坡面形变速率



(b) 形变时间序列

图 10 重点泥石流沟的坡面形变速率和形变时间序列

Fig. 10 Slope deformation rate and deformation time series of key debris flow gullies

有限,泥石流规模较小。2017 年以前 B 点的沉降量较大,形变量不稳定,波动较大,这主要与地震导致的坡体应力调整有关。2017 年以后,坡体应力调整逐渐完成,沟道中的物质输送趋于稳定,物源补给和堆积达到平衡,形变量趋于稳定。B 点形变量波动趋于稳定的原因在于沟道中水流运动及其物质补充机制。水流侵蚀作用可能带走部分坡体物质,但水流持续将上游物质(如泥沙、碎石等)输送到特征点附近,形成物质补充,部分抵消了坡体的沉降,从而减缓了沉降趋势。此外,夏季降雨为沟道提供了充足水源,水流对沟道内松散堆积物的冲刷作用增强,增加了泥石流发生的可能性,加之陡峭地形的影响,这些因素共同促成了该流域泥石流的频繁发生,因此雨季应加强对该区域的监测防控。

为实现对隆桑普沟流域更加全面和精确的地表形变监测,采用 COSI-Corr 像素偏移技术,对图 2 所示的 SBAS-InSAR 监测结果进行有效补充。通过选取 2021-05-22 和 2021-10-14 的两期影像进行 COSI-Corr 像素偏移追踪计算,减少了季节性地表覆盖变化对计算结果的影响,提高了监测效率。COSI-Corr 技术解决了 SBAS-InSAR 技术在云雾遮挡、空间分辨率低、点位覆盖稀疏、非线性形变监测

及植被覆盖区域信号衰减等方面的问题,也弥补了因数据采集间隔较长而导致的瞬时地质事件监测缺失的不足。且SBAS-InSAR为COSI-Corr提供了时间序列上的补充,确保了形变监测的连续性和完整性,提高了监测精度与可靠性。图11(a)COSI-Corr计算结果表明,隆桑普沟在靠近沟口的支沟处存在明显形变,与图11(b)中两期遥感影像对比所观察到的该区域灾后物源堆积现象相吻合,验证了分析的准确性。COSI-Corr和SBAS-InSAR技术的结合不仅提高了地表形变监测的精度和可靠性,还实现了对不同时间和空间尺度形变的有效捕捉,增强了对复杂地形条件下瞬时地质事件的响应能力,为灾害监测提供了新的解决方案。

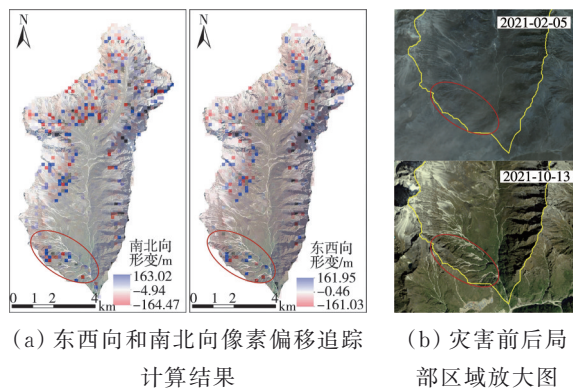


图11 隆桑普沟东西向和南北向像素偏移追踪计算结果和灾害前后局部区域放大图

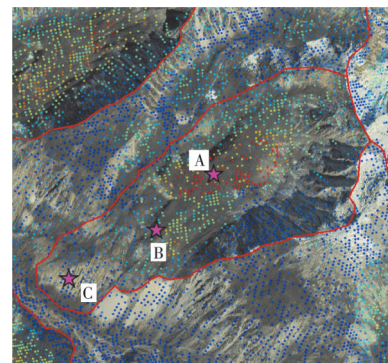
Fig. 11 COSI-Corr results for east-west and north-south directions in Longsangpu Gully and magnified views of local areas before and after the disaster

3.3 典型冰碛型石冰川

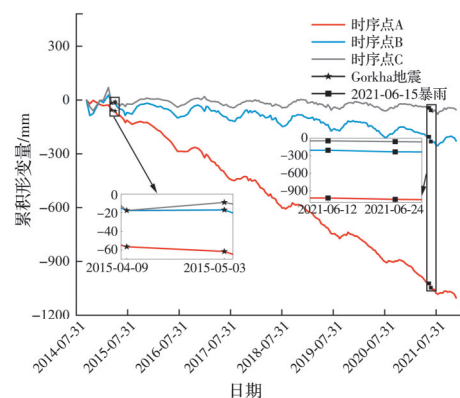
石冰川是青藏高原及其周边广泛分布的一种冰缘地貌类型,是含冰的寒冻风化岩(碎)屑或冰碛物在重力和冻融作用下沿着山谷或坡面向下缓慢蠕动的舌状或叶状堆积体^[32]。冰碛型石冰川主要发育于冰蚀槽谷中,棱角尖锐。作为多年冻土区的一类特殊冰缘地貌,随着气候变暖,在重力作用下沿山谷或山坡缓慢蠕动过程呈加速趋势,其内部冰体的消融可能是流域水量补给的一个重要来源,且舌部松散堆积物逐渐增加,导致垮塌、滑坡和泥石流等灾害风险增加,成为冰冻圈重要的致灾因素之一^[33-34]。

以一具有典型形变的冰碛型石冰川为例(图12(a)),从中心点向外选取3个特征点并提取其形变时间序列,图12(b)为这些特征点随时间推移的累积形变量。结果表明:3个特征点均表现出明显的季节性形变,且中心形变区域A点发生严重加速下沉现象。冰碛型石冰川的存在区域覆盖了冻土的

活跃层,对季节性温度变化非常敏感。春夏季时,活跃层融化导致石冰川内的冰体融化成水,引起地面沉降;秋冬季,活跃层再次冻结时,水分结冰膨胀,可能导致地面隆起。这种季节性的冻融循环是导致冰碛型石冰川形变的重要原因之一。A点位于石冰川中部,B点位于石冰川的边缘,C点位于石冰川末端且接近河谷。A点的特殊在于其既是上方冰雪融水的汇集区也是释放区,这就导致该点的季节性位移和持久性位移高于B点和C点。而B点处于石冰川的冰缘带,是释放区,不在主要的积雪融水汇集区;同样,C点已经远离了石冰川体,所以形变量明显小于A点和B点。随着冻土活跃层的不断变深累积,季节周期性形变程度愈发显著。此外,气温升高或降雨增加导致更多的冰体融化,增加了泥石流发生的风险。冰碛型石冰川的稳定性对泥石流灾害风险评估至关重要。



(a) 坡面形变速率



(b) 形变时间序列

图12 冰碛型石冰川的坡面形变速率及其特征点形变时间序列

Fig. 12 Slope deformation rate and deformation time series of characteristic points of moraine-type stone glaciers

3.4 典型冰湖位移及面积变化

基于SBAS-InSAR的地表形变结果如图13所示,冰湖终碛垄坝体区存在相干性的形变点共计159个,坝体总体呈沉降趋势,平均沉降速率为 -21.63 mm/a ,两侧形变速率相近,靠近溃口处形变速率最大。

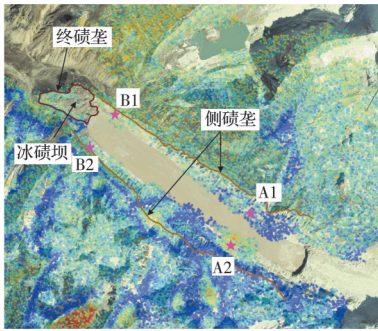
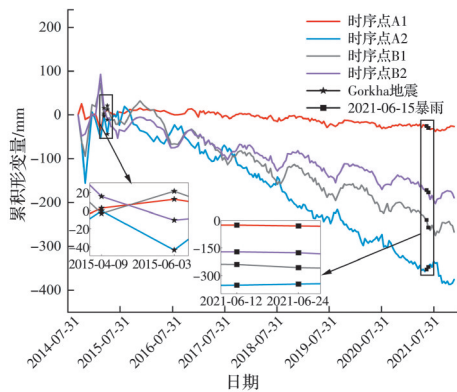


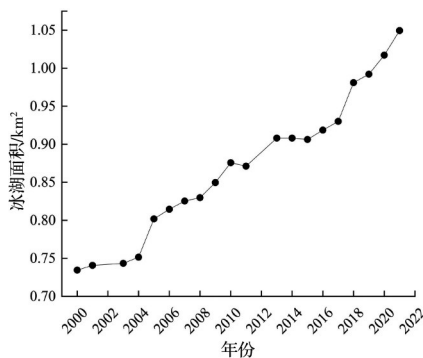
图 13 雅隆错冰湖的坡面形变速率

Fig. 13 Slope deformation rate of Yalong Co Glacier Lake

两侧冰碛垄沉降速率整体上较一致,从前缘到后缘逐渐增大,选取两侧冰碛垄的前后对应位置特征点,分析其时序位移形变速率,如图 14(a)所示,因为 B1 点和 B2 点地理位置接近、地质条件大体相同、沉积物分布均匀、水文条件和气候条件相似,故两者的形变量差异不大。而 A2 点形变量远大于 A1,是由于 A1 侧地形较为平缓, A2 所在的区域高程较大,存在更高的地形起伏和斜率变化。2002、2012 年缺少影像资料,缺失的面积信息通过线性插值法补充。统计结果显示,2004—2005 年,面积变化较大,冰湖面积扩大约 6.7%;2014—2015 年,面



(a) 形变时间序列



(b) 冰湖面积变化

图 14 雅隆错冰湖特征点形变时间序列及冰湖面积变化

Fig. 14 Time-series deformation of characteristic points and area changes of Yalong Co Glacier Lake

积变化较小,湖水面积缩小约 0.2%;自 2000 年以来,冰湖面积增长了近 43%,如图 14(b)所示。冰湖总体上呈扩张趋势,增加了潜在水源供给和冰湖溃决的风险,容易诱发泥石流等次生灾害。

4 结论

基于 SBAS-InSAR 技术对 2014—2021 年期间绒辖曲地区的地表形变进行监测,并通过时序位移分析,观察到研究区整体呈缓慢沉降趋势。在滑坡的不同区域,沉降速率也存在差异,重力作用下前缘物源堆积体受到来自中后部物源的推挤作用,滑坡形变主要受前缘牵引,形变向后缘扩展并发生整体滑移。因此,滑坡中上部的沉降速率最快,前缘次之,后缘最慢。冰碛型石冰川区域沉降速率较快,主要是由于其位于冻土的活跃层,春夏季,活跃层融化引起地面沉降;秋冬季,活跃层冻结引起地面抬升。石冰川中心区域既是上方冰雪融水的汇集区也是释放区,因此,其季节性位移和持久性位移最剧烈,向冰缘带和石冰川末端递减。在雨季特别需要加强对冰湖、石冰川及与沟道系统相连通物源的变化监测。夏季降雨导致岩土软化,增加了土壤饱和度,降低了其抗剪强度和潜在滑动面上的有效应力,容易引发泥石流灾害。对于短期高强度暴雨引发的滑坡和泥石流等突发事件,建议联合使用 COSI-Corr 等像素偏移量追踪技术进行综合监测。在未来的研究中,为应对地形效应引起的几何畸变,可以利用升轨和降轨数据的叠掩和阴影区的互补性来扩大监测覆盖范围。同时,针对云层和大气干扰等数据质量问题,可以通过整合多源遥感数据实现优势互补,以提高监测的准确性和可靠性,为灾害预防和应对提供更全面的科学依据。

参考文献

- [1] 刘操, 饶维龙, 孙文科. 利用大地测量手段推算印度板块与欧亚板块初始碰撞时间[J]. 地球科学进展, 2023, 38(7): 745-756.
LIU C, RAO W L, SUN W K. Estimation of the initial collision time between the Indian and Eurasian plates using geodetic means [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(7): 745-756. (in Chinese)
- [2] 姚令侃, 邱燕玲, 魏永幸. 青藏高原东缘进藏高等级道路面临的挑战[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 719-734.
YAO L K, QIU Y L, WEI Y X. Challenges in construction of railway and highway from Sichuan to Tibet through eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(5): 719-734.

- 719-734. (in Chinese)
- [3] 苏晓军, 孟兴民, 张毅, 等. 中巴经济走廊地质灾害研究进展与展望[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(5): 694-710.
- SU X J, MENG X M, ZHANG Y, et al. Progress in and prospects of study on geohazards in the China-Pakistan Economic Corridor [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(5): 694-710. (in Chinese)
- [4] 丁悦凯, 刘睿, 张翠兰, 等. 喜马拉雅地区叶如藏布流域冰川和冰湖变化遥感监测研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1870-1880.
- DING Y K, LIU R, ZHANG C L, et al. Remote sensing monitoring of glacier and glacial lake changes in Yairu Zangbo Basin, Himalayas [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1870-1880. (in Chinese)
- [5] 龙飞, 龚诚, 黄海, 等. 藏东南直白沟冰崩型泥石流孕灾条件与动力特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 31-38, 46.
- LONG F, GONG C, HUANG H, et al. Formation conditions and dynamic characteristics of debris flow triggered by an ice avalanche at Zhibai gully in southeast Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 31-38, 46. (in Chinese)
- [6] 徐航, 陈宁生, 杨志全. 西藏冰湖溃决频次与径流峰值流量相关性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3641-3647.
- XU H, CHEN N S, YANG Z Q. Correlation analysis between the frequency of glacial lake outburst floods and the peak runoff in Tibet [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3641-3647. (in Chinese)
- [7] 鲁安新, 邓晓峰, 赵尚学, 等. 2005年西藏波密古乡沟泥石流暴发成因分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 956-960.
- LU A X, DENG X F, ZHAO S X, et al. Cause of debris flow in Guxiang valley in Bomi, Tibet Autonomous Region, 2005 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(6): 956-960. (in Chinese)
- [8] 高延超, 龚凌枫, 曹佳文, 等. 西藏边境地区地质灾害分布规律与危险性分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44(3): 467-477.
- GAO Y C, GONG L F, CAO J W, et al. The distribution and risk assessment of geo-hazards in the border areas of Xizang [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(3): 467-477. (in Chinese)
- [9] NAIR A S, SINGH S K. Understanding the causes of Uttarakhand disaster of June 2013: A scientific review [C]// PRADEEPKUMAR A P, BEHR F J, ILLIYAS F T, et al. 2024 Proceedings of the 2nd Disaster, Risk and Vulnerability Conference, 24-26 April, Trivandrum, India. 2014: 57-64.
- [10] CHAMPATI RAY P K, CHATTORAJ S L, BISHT M P S, et al. Kedarnath disaster 2013: Causes and consequences using remote sensing inputs [J]. Natural Hazards, 2016, 81(1): 227-243.
- [11] LI M H, ZHANG L, YANG M S, et al. Complex surface displacements of the Nanyu landslide in Zhouqu, China revealed by multi-platform InSAR observations [J]. Engineering Geology, 2023, 317: 107069.
- [12] ZHAO F M, GONG W P, TANG H M, et al. An integrated approach for risk assessment of land subsidence in Xi'an, China using optical and radar satellite images [J]. Engineering Geology, 2023, 314: 106983.
- [13] 陈思名, 霍艾迪, 张佳, 等. 基于InSAR的宁夏黄土丘陵区(西吉县)滑坡隐患早期识别[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4721-4728.
- CHEN S M, HUO A D, ZHANG J, et al. Identification of potential landslides in the loess hilly area (Xiji county) of Ningxia with InSAR technology [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4721-4728. (in Chinese)
- [14] 张志华, 胡长涛, 张镇, 等. 基于PS-InSAR上海地区地表沉降监测与分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3): 106-111.
- ZHANG Z H, HU C T, ZHANG Z, et al. PS-InSAR-based monitoring and analysis of surface subsidence in Shanghai [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 106-111. (in Chinese)
- [15] NHU V H, MOHAMMADI A, SHAHABI H, et al. Landslide detection and susceptibility modeling on Cameron Highlands (Malaysia): A comparison between random forest, logistic regression and logistic model tree algorithms [J]. Forests, 2020, 11(8): 830.
- [16] 徐源懋, 武震, 刘杰. 基于SBAS-InSAR技术的舟曲县潜在滑坡灾害早期识别及降水相关性分析[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(6): 257-271.
- XU Y M, WU Z, LIU J. Early identification of potential landslide hazards and precipitation correlation analysis in Zhouqu County based on SBAS-InSAR technology [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(6): 257-271. (in Chinese)
- [17] GUZZETTI F, REICHENBACH P, ARDIZZONE F, et al. Estimating the quality of landslide susceptibility models [J]. Geomorphology, 2006, 81(1/2): 166-184.
- [18] 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 等. 川藏高速巴塘—芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 49-60.
- LIU X H, YAO X, YU K B, et al. Remote sensing integrated identification of geological hazards in the Batang-Mangkang section of the Sichuan-Tibet highway [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 49-60. (in Chinese)

- [19] 田海. 西藏波密地区冰川泥石流成因机制分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
TIAN H. Formation mechanism of glacial debris flow in Bomi, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 张亚迪, 李煜东, 董杰, 等. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患 [J]. *遥感学报*, 2019, 23(5): 987-996.
ZHANG Y D, LI Y D, DONG J, et al. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(5): 987-996. (in Chinese)
- [22] TORRES R, SNOEIJ P, GEUDTNER D, et al. GMES sentinel-1 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24.
- [23] XU B, FENG G C, LI Z W, et al. Coastal subsidence monitoring associated with land reclamation using the point target based SBAS-InSAR method: A case study of Shenzhen, China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 652.
- [24] LANARI R, MORA O, MANUNTA M, et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1377-1386.
- [25] STROZZI T, FARINA P, CORSINI A, et al. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry [J]. *Landslides*, 2005, 2(3): 193-201.
- [26] MA C, CHEN Y X, HU K H, et al. Climate warming triggered a glacial lake outburst flood and debris flow events in an alpine watershed, western Himalayas, Tibet Plateau [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(5): 201.
- [27] WANG Z L, MA C, HU K H, et al. Investigation of initiation conditions of periglacial debris flows in Sanggu watershed, Eastern Himalayas, Tibet Plateau (China) [J]. *Landslides*, 2023, 20(4): 813-827.
- [28] SINGH JASROTIA A, AHMAD S, RIDWAN Q, et al. Estimation of surface ice velocity of durung drung glacier, western Himalaya using COSI-corr from landsat images [J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2024, 27(2): 369-381.
- [29] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 967-979.
LI Z H, SONG C, YU C, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979. (in Chinese)
- [30] ZHANG Y, MENG X M, JORDAN C, et al. Investigating slow-moving landslides in the Zhouqu region of China using InSAR time series [J]. *Landslides*, 2018, 15(7): 1299-1315.
- [31] HERRERA G, GUTIÉRREZ F, GARCÍA-DAVALILLO J C, et al. Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 31-43.
- [32] 周宇, 李国玉, 马巍, 等. 石冰川形成机制、运动特征及水文效应研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2023, 45(2): 409-422.
ZHOU Y, LI G Y, MA W, et al. Formation mechanism, movement characteristics and hydrological effect of rock glaciers: A review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 409-422. (in Chinese)
- [33] LIU L, MILLAR C I, WESTFALL R D, et al. Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: Inventory and a case study using InSAR [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(4): 1109-1119.
- [34] 许君利, 刘时银, 王建. 西藏桑日县巴玉水电站上游石冰川分布特征 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1207-1215.
XU J L, LIU S Y, WANG J. Distribution characteristics of rock glaciers in the upstream of Bayu Hydropower Station in Sangri County, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1207-1215. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)