藏南地区桑谷沟冰川泥石流形变历史分析和运动过程模拟

孙靖宜[1]，杨金[2]，吴永宁[1]，李群[2]，章广成[1*]，周哲晟[1]，徐红剑[1]

1. 中国地质大学（武汉）工程学院，武汉 430074；
2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司，武汉 430058

第一作者，E-mail：973703280@qq.com

* 通信作者，E-mail：zhangguangc@cug.edu.cn

2024-04-19 收稿；2024-08-06 修回；2024-12-09 接受

中图分类号：P642.23　　文章编号：2096-8523(2025)02-0355-13　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240172

摘　要：藏东南雅鲁藏布江流域冰川型泥石流规模大、持续时间长、冲击力强，由于传统方法难以定量描述大尺度泥石流形成机理问题，根据桑谷沟流域泥石流现场实地调研、无人机航拍、卫星影像信息以及地质气象数据，揭示桑谷沟泥石流的暴发与物源、降雨量等因素之间关系，提出了一种联合 InSAR 与 RAMMS 技术全面分析泥石流爆发前物源形变过程与爆发期间泥石流运动特征的方法。基于 SBAS-InSAR 技术，针对桑谷沟泥石流 2 次爆发期间的形变进行分析，结合卫星影像图、无人机影像以及现场勘察，实现了桑谷沟泥石流灾害爆发前形变过程反演和灾变趋势预测；采用 RAMMS 泥石流数值模拟软件对桑谷沟泥石流爆发期间运动过程进行了模拟。研究表明：①通过 InSAR 技术解算桑谷沟泥石流 LOS 向形变，坡体长期处于蠕滑状态；物源区内最大形变速率为 139 mm/a，流通区内速率最大为 46 mm/a，堆积区速率最大为 20 mm/a；降雨作用为泥石流发育提供了大量的松散来源。②根据不同步时状态下泥石流堆积深度和流速状态，将研究区演进过程划分为初始运动、加速运动、减速-最终 3 个阶段。该方法联合冰川泥石流形变历史分析和运动过程模拟，对泥石流发展趋势及预测提供科学依据，并为工程防治设计提供参考。

关键词：冰川泥石流；SBAS-InSAR；RAMMS；无人机航拍；泥石流成因；桑谷沟；藏南地区

冰川泥石流作为中国青藏高原以及世界各地高山冰川地区最为典型的地质灾害，具有规模大、持续时间长、冲击力强等特征[1]。其中，我国藏南地区地貌险峻，地势急变，高山深谷，区域内新构造运动显著，兼具海拔高、温差大、降雨集中等特点[2-3]。其中帕隆藏布流域包含了青藏高原中分布最广、最典型的海洋冰川。为了深入了解该区域泥石流的形成原因，关键在于研究地形地貌的演变[4-5]对泥石流的影响程度。沟道内地貌演化阶段与泥石流流域内物源的关系密切[6]。泥石流的运动过程伴随着侵蚀、运输和堆积，过程中不仅在沟道中引发了强烈的侵蚀和淤积，还改变了河道的沉积过程及其地貌形态，从而影响了河谷地貌的演变[7]。山体的崩滑堆积物、破碎岩土体，冰川周围的冰碛物、散冰等松散物共同为泥石流的形成提供了丰富的物源基础[8-10]，以及在全球气候变暖的大背景下，雪线升高，冰川消融加剧，导致冰川泥石流发生的频次增加与范围扩大[11-12]。区域内直白沟、天摩沟、古乡沟等冰川泥石流地质灾害的发生，对区域建筑物构成严重威胁，造成大量的人员伤亡和财产损失[13-15]。国内外对冰川泥石流的孕育、形成和爆发过程的调查与研究尚不充足。因此，有效准确地探究冰川泥石流形变特征，分析冰

著录信息：孙靖宜，杨金，吴永宁，等. 藏南地区桑谷沟冰川泥石流形变历史分析和运动过程模拟［J］. 地质科技通报，2025，44(2)：355-367.
SUN Jingyi, YANG Jin, WU Yongning, et al. Deformation history analysis and movement process simulation of glacier debris flow in Sanggu Valley in southern Tibet[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 355-367.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

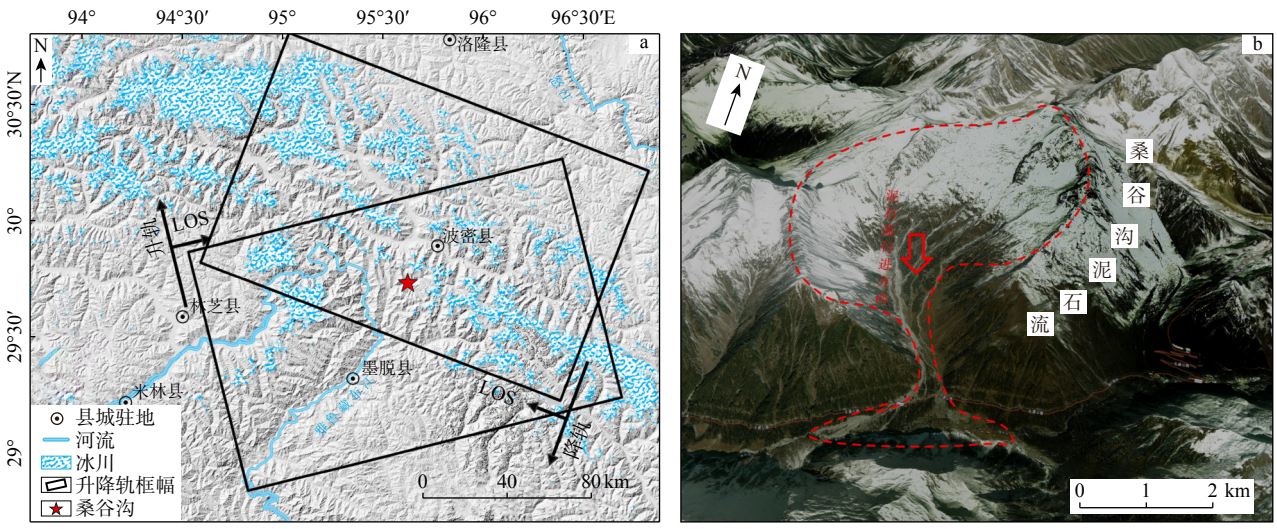
川泥石流与影响因素之间的关系具有十分重要的科学意义[16-18]。

传统的泥石流研究手段，包括地质勘查、气象条件观测、物理模型和数值模拟等技术方法，这些方法表明爆发前地表形变对泥石流灾害的发生具有紧密的联系[19]。冰川泥石流识别精度高，但识别周期较长，对潜在的地质灾害不能够及时发现和预警，并且还存在区域性限制，无法实现大区域内冰川泥石流发育和形变监测，尤其是冰川泥石流存在隐蔽性、瞬时性以及突发性特点，使传统调查有了更大的挑战，而现代遥感(remote sensing，简称 RS)、地理信息系统(geographic information system，简称 GIS)和全球导航卫星系统(global positioning system，简称 GPS)的兴起，从而更直观全面地获取大区域地表形变信息，加深对冰川泥石流灾害的认识，其技术在滑坡形变提取、建筑沉降监测、地震监测等领域取得了良好的效果[20-23]。但在一些复杂的地质灾害环境中，受到云雾和降雨等气候条件的限制，难以满足大型地质灾害识别和预警需求。合成孔径雷达干涉测量(interferometry synthetic aperture radar，简称 InSAR)是一种通过处理合成孔径雷达(synthetic aperture radar，简称 SAR)数据进行地表形变监测和地形测量的技术[24-26]。这项技术通过结合多次雷达观测，比较这些观测来检测地表的微小变化，相较于传统监测技术具有范围广、精度高、全天时观测和低成本等优势[27-29]。对于泥石流而言，可监测其物源区在地质灾害发生前的物源汇集及失稳模式。能够实现泥石流害爆发前形变过程反演和灾变趋势预测[30]。

以藏南地区桑谷沟冰川泥石流为研究对象，通过采用小基线集合成孔径雷达干涉测量(small baseline subset interferometry synthetic aperture radar，简称 SBAS-InSAR)和无人机低空遥感技术，获得该处冰川泥石流爆发前物源区发育特征及形变特征，通过实地勘测综合分析遥感成果的准确性和可靠性。并结合 RAMMS(rapid mass movement simulation)技术对桑谷沟运动过程进行模拟，深入分析桑谷沟冰川泥石流发育的主要影响因素和形变模式，为藏南地区泥石流地质灾害防灾减灾提供基础资料和技术支撑。

1　研究区概况

桑谷沟位于西藏自治区林芝市墨脱县，距离 52K(扎墨公路里程号)以及嘎隆拉隧道出口 3 ~ 4 km，是一处中频率的大型冰川泥石流沟，如图 1。附近地区发育有 NW 向岗日嘎布山南麓山前断裂带和 NE 向马尼翁断裂带，断Ⅲ裂活动导致该地区岩体完整性较低，且节理密集。受板块构造和冰川作用影响，桑谷沟流域地貌呈现出山高、谷深、坡陡的特征，是藏东南地区典型的深切割沟谷地貌之一。桑谷沟泥石流的沟道堆积区高差较小，冲积扇现状相对稳定，但形成区和流通区高差较大。泥石流的主要物源包括高山剥蚀崩塌和沟道物源，物源量丰富。在冰雪消融和丰雨季节，泥石流活跃度较高，而在雨水枯竭期，泥石流沟相对稳定。泥石流爆发时，常携带大量碎块石冲击淤埋路基。该泥石流沟处于壮年期，几乎年年都会爆发，因此需要加强对灾害的监测。其间 2020 年 9 月 26 日桑谷沟爆发泥石流，导致交通中断了 7 d。2021 年 7 月 3 日再次爆发泥石流，使交通再



a. 研究区地理位置及 SAR 覆盖情况；b. 桑谷沟泥石流全貌。LOS. 雷达视线方向

图 1　研究区概况及 SAR 影像覆盖情况

Fig. 1　Overview of SAR image coverage in the study area

次中断了 3 d。

2 桑谷沟泥石流主要影响因素分析

2.1 桑谷沟流域地形地貌特征

桑谷沟位于桑谷流域，该沟呈西南向流入雅鲁藏布江支流之一——噶弄曲。该沟流域面积为 15.6 km^2，主河道长 2.78 km，山顶海拔高达 5 435 m，相对地形起伏达 2 205 m，如图 2a。桑谷沟泥石流汇水面积较大，反映了该流域汇水能力。流域的汇水能力越强，单位时间内流域汇聚雨水和冰川融水的水量越大，泥石流发生的概率和规模也越高。扇形沟谷为雨水、冰川融水和泥沙的汇聚提供了有利的地形地貌条件。同时，主沟谷呈现出 U 形地貌，沟谷宽度达到 200 ~ 1 300 m，在强烈的构造作用下，沟谷两侧形成了数量密集且沟床陡峻的冲沟，如图 2b, c。根据泥石流形成过程，桑谷沟可以自上游至下游划分为形成区、流通区和堆积区。在形成区，海拔高于 3 350 m 的主沟汇水区内发育冰川，常年积雪，季节性雪崩和冰崩频繁发生，形成以岩屑坡、倒石堆、雪蚀洼地和谷槽为特征的山地冰缘地貌，常引发大规模泥石流。在流通补给区，沟谷两侧岸坡陡峭，岸线易垮塌形成临空面，在重力作用下常引发塌方和滑坡，从而形成补给泥石流的松散物源。而在堆积区，坡度较小，沟道高差不大，主要由冲积块石构成，如图 2d。因此，扇形且地形陡峭的形成区有利于泥石流水源和物源的汇集，而深切且顺直的流通区水力断面极易导致“束水攻沙”效应[31-32]，助推泥石流爆发时的突然性和破坏性。

2.2 桑谷沟流域冰川发育特征

桑谷沟泥石流形成区及其周围的流通区域地貌呈现高度发育的高山冰川特征[33-34]。主要的冰川类型包括海洋型山谷冰川，其次是冰斗冰川和悬冰川。这些冰川地貌形态的存在，与雅鲁藏布大峡谷及其支流对印度洋暖湿气流的引导密切相关。由于这一气候条件，周围高山常年覆盖着白雪，冰蚀地貌十分显著，海拔 4 000 m 以上部分盛夏仍有积雪，在每年 3–5 月的冰雪消融期，山体上方常爆发雪崩。冰川与角峰相连的刃脊下展布着形形色色的冰斗，而这些冰斗下的“U”型槽谷内现代冰川的冰舌则伸向沟谷。冰川下部大量的冰雪融水流经冲沟或沟口，形成泥石流的堆积。在高温天气下，冰川融化产生大量的冰川融水。其中一部分冰川融水沿着山体流动，带动着不稳定的松散物质进入沟道，为泥石流的形成和规模增大提供了物源。另一方面，冰川融水渗入松散堆积体内部，削弱了其稳定性，促使其失稳，从而成为桑谷沟泥石流发生的重要因素。根据多期遥感解译、现有科研资料、书籍及调研资料，最终确认桑谷沟流域的冰川面积数据如下：1 号冰川面积为 4.1 km^2，2 号冰川面积为 5.2 km^2，3 号冰川面积为 1 km^2，4 号冰川面积为 2.4 km^2，如图 3。

3 基于 SBAS-InSAR 的桑谷沟泥石流发育特征与形变历史

3.1 小基线集 InSAR 技术原理

小基线集 InSAR 技术是将研究区内的 N 幅 SAR 影像通过配准来得到基线对，并利用奇异值分解法

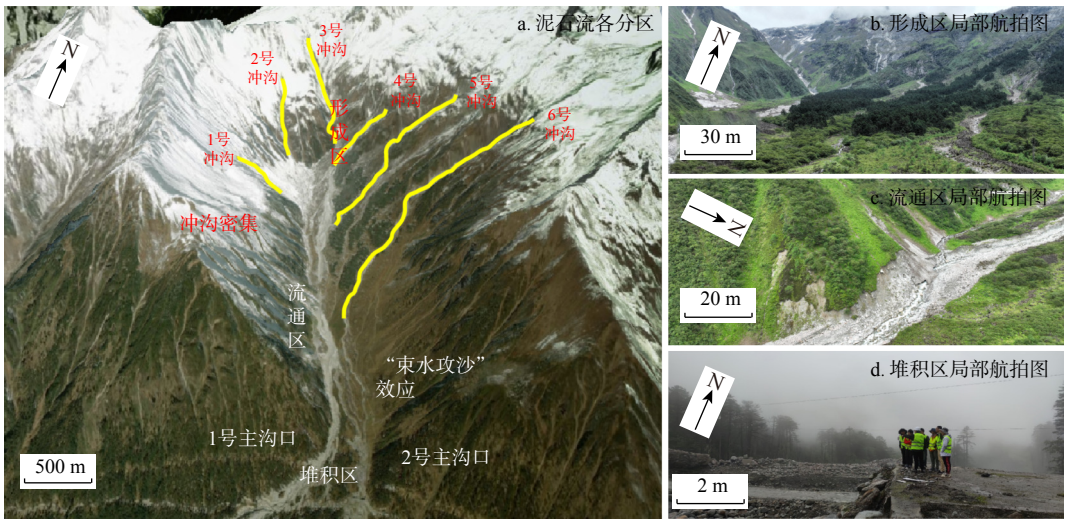


图 2 桑谷沟地形地貌

Fig. 2 Topography of Sanggu Valley

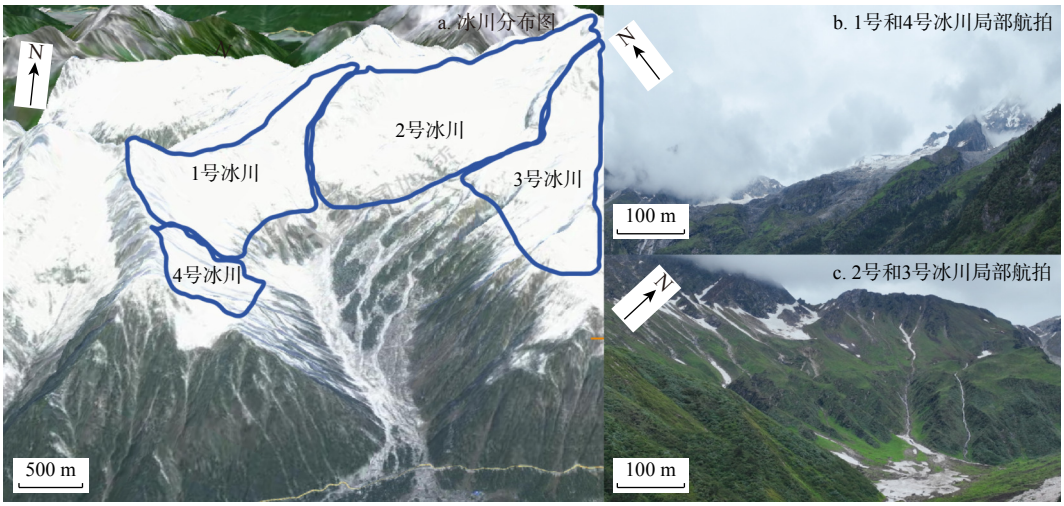
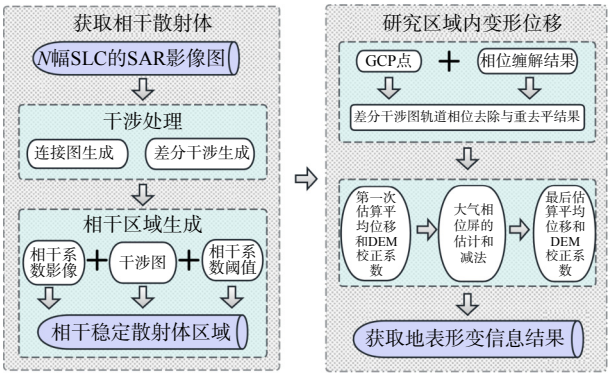


图 3　桑谷沟冰川分布（a）及现场调查冰川情况（b，c）

Fig. 3　Glacier distribution (a) and field investigation (b, c) in Sanggu Valley

(singular value decomposition, 简称 SVD)将基线对联合求解, 以此得到时间段内研究区域的累计时序形变以及地表平均形变速率。具体流程如图 4 所示。



SLC. 单视复数(single look complex); GCP. 地面控制点(ground control point); DEM. 数字高程模型(digital elevation model)

图 4　SBAS-InSAR 技术流程图

Fig. 4　SBAS-InSAR technical flow chart

在研究区内有 N+1 幅影像且按照时间序列 t_0, t_1, ……, t_n 进行配准, 共生成 M 个干涉组合, 并满足以下关系式:

$$\frac{N+1}{2} \leqslant M \leqslant \frac{N(N+1)}{2}。\tag{1}$$

经过 t_A 和 $t_B(t_A>t_B)$ 2 个时刻得到的影像生成的差分干涉图中像元位置坐标 (r, x) 的相位值可以表示为:

$$\delta\varphi_j(r,x) = \varphi(t_A,r,x) - \varphi(t_B,r,x) \approx \frac{4\pi}{\lambda}\left[d(t_A,r,x) - d(t_B,r,x)\right], \tag{2}$$

式中: λ 为雷达波长; $\varphi(t_A, r, x)$, $\varphi(t_B, r, x)$ 分别为生成干涉相位的 2 个影像相位; $d(t_A, r, x)$, $d(t_B, r, x)$ 分别为 t_A 和 t_B 2 个时刻相对于 t_0 的雷达视线方向形变量。

处理后的相位可用矩阵形式表示为:

$$\delta\varphi = \boldsymbol{C}\varphi, \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{C}$ 为一个 $H\times J$ 的矩阵, 利用奇异值分解可得出最小二乘解, 以得到形变信息。

在计算形变量时以 GPS 点作为基准点, 将 NS 向、EW 向及垂向的结果投影到雷达视线方向(LOS 向), 过程表示为:

$$LOS = \left[-\sin\theta\cos\left(a-\frac{3}{2}\pi\right) \quad -\sin\theta\sin\left(a-\frac{3}{2}\pi\right) \quad \cos\theta\right]\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta h\end{bmatrix}, \tag{4}$$

式中: LOS 为雷达视线方向上的形变量; θ 为卫星入射角, (°); a 为卫星飞行角, (°); Δx, Δy, Δh 分别为 GPS 沿着 NS 向、EW 向及垂向的形变量。

3.2　遥感影像预处理

本研究选用数据为 Sentinel-1A 卫星影像, 由欧洲航天局(European Space Agency, 简称 ESA)提供, Sentinel-1 是欧洲航天局哥白尼计划中发射的第一颗用于环境监测的卫星, 该卫星搭载有 C 波段的合成孔径雷达, 重访周期为 12 d, 具有多平台、高精度成像、多极化方式等特点, 数据采用 TOPS 成像模式, 其干涉宽幅高达 250 km。因桑谷沟于 2020 年 9 月 27 日及 2021 年 7 月 3 日爆发过泥石流, 即升降轨的监测时段选取均为 2020 年 10 月至 2021 年 7 月, 其中升轨影像共计 18 幅, 降轨影像 24 幅(表 1)。另外, 本研究选用欧洲航天局提供的 Sentinel-1A 卫星 POD 精密轨道数据开展轨道误差的精炼与矫正, 对于差分干涉处理及地形误差估计, 同时结合由欧洲航天局提供分辨率为 30 m 的 SRTM DEM, 由此消除地形相位造成的影响[35]。经过分析选取最大空间

表 1　Sentinel-1A 升降轨 SAR 影像参数

Table 1　Sentinel-1A ascending and descending orbit SAR image parameters

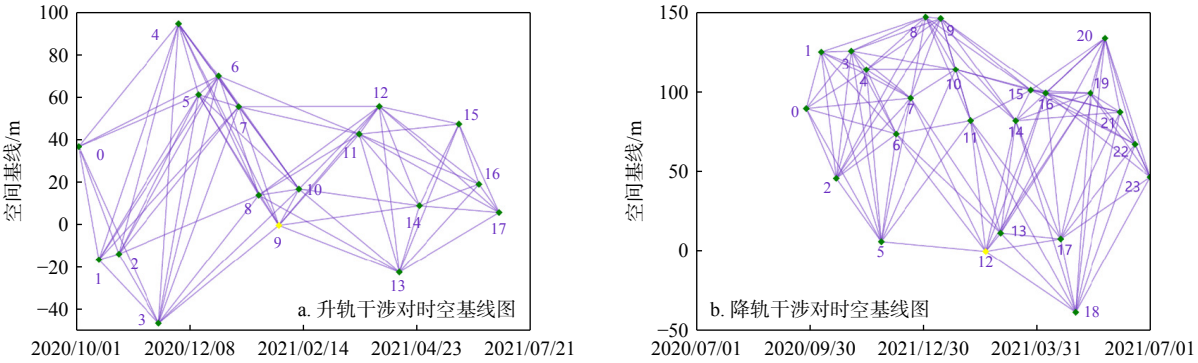
参数类别	SAR传感器Sentinel-1A	
轨道方向	升轨	降轨
空间分辨率/m	5×20	5×20
重访周期/d	12	12
入射角/(°)	40.92	37.03
飞行角/(°)	347.30	192.70
影像数量/个	18	24
监测时间	2020-10-02−2021-06-11	2020-09-27−2021-06-30

基线阈值为 5%，时间基线阈值为 120 d，其中升轨超级主影像日期是 2021 年 1 月 18 日，降轨超级主影像为 2021 年 2 月 6 日，升降轨时空基线情况如图 5。

升、降轨分别设置距离向和方位向的系数比为 4∶1，3∶1 来降低噪声带来的影响，均选取 Goldstein 法进行滤波处理，选取 Minimum Cost Flow 法进行缠解处理，由此完成干涉处理工作，并在 SarScape 模块中删除不理想的数据，保留效果较好的差分干涉影像图。因所处研究区大多为山脉、丘陵，导致选取 GCP 点时存在不确定性，影响结果分析[36]。借助地图软件 Google Earth 选择较为稳定的点来作为 GCP 点极大降低误差，并利用 GCP 点对全部影像数据进行重去平优化。对于合成的干涉图进行第一步以及第二步反演，并进行地理编码获取沿雷达视线方向的累计形变速率以及平均形变速率。

3.3　桑谷沟泥石流发育特征识别

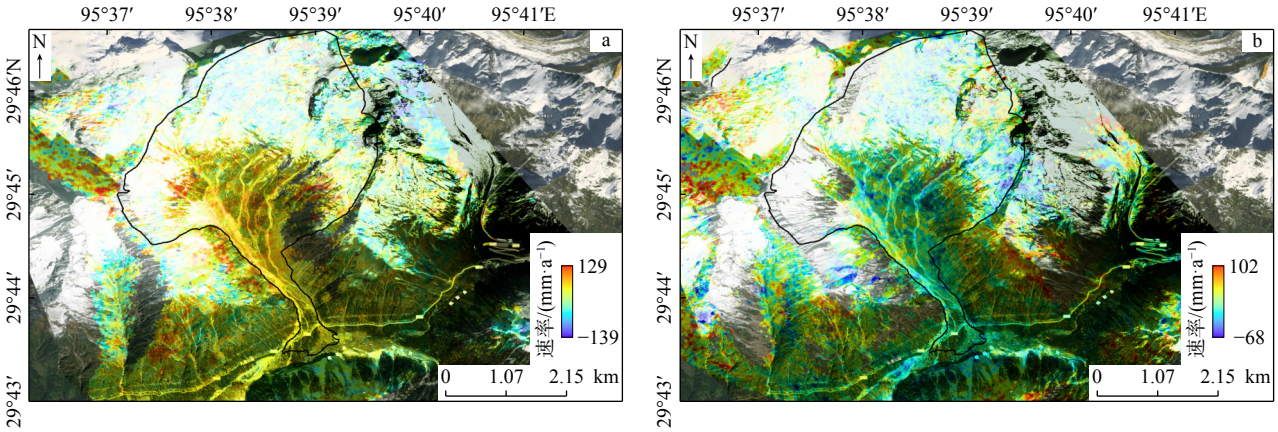
本研究选用 Sentinel-1A SAR 升降轨数据作为数据源，获取研究区时间段为 2 次泥石流爆发期间 2020 年 9 月−2021 年 7 月的升降轨 InSAR 形变场，通过对比升降轨数据发现桑谷沟泥石流的形变结果存在一定差异，造成该现象的原因主要为升降轨数据观测几何不相同。因桑谷沟泥石流为西坡向，即在升轨 LOS 向上的投影能更为真实地反映出地表形变，此时上升代表向卫星传感器靠近运动，下降代表远离卫星传感器运动。泥石流在降轨观测下则会发生几何畸变现象，导致真实形变量压缩，形变在降轨 LOS 向的投影呈现出相反结果(图 6)。泥石流的



图中数字为每个时间节点，且节点个数即为 SAR 影像数量

图 5　升降轨时空基线分布

Fig. 5　Space-time baseline distributions of the ascending and descending orbits



a. 升轨数据解译结果；b. 降轨数据解译结果

图 6　桑谷沟泥石流升降轨 LOS 向位移速率图

Fig. 6　LOS displacement velocity map of the Sangu Valley debris flow in ascending and descending orbits

发育由于松散物源受到重力牵引的作用下由形成区缓慢向流通区移动，通过升轨监测结果，呈现出形成区内后缘速率为负值，为−139 ~ −26 mm/a，前缘速率为正值，为 20 ~ 129 mm/a；而流通区内形变速率在 20 ~ 46 mm/a 之间，且经过现场调查发现流通区左侧坡体有明显历史滑坡现象，与形变信号相符。堆积区内形变速率为 10 ~ 20 mm/a。通过监测时期内的形变信息可知，2020 年 10 月−2021 年 06 月间桑谷沟泥石流随时间正不断发生滑移。

从图 7 可以看出，以泥石流形成区为界，不同区域具有不同的形变特征[37]，为探究这一现象的成因，对桑谷沟泥石流内失稳坡体沿着沟谷的方向作 $A-A'$剖面，且提取累计形变值(图 8)。

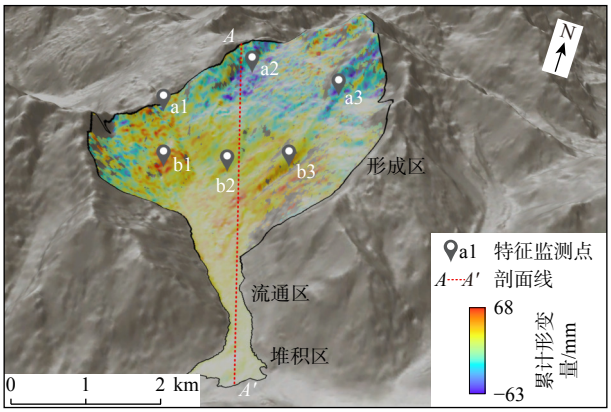


图 7　2020/10/02−2021/06/11 升轨累计形变

Fig. 7　Cumulative deformation in ascending orbit from October 2, 2020 to June 11, 2021

桑谷沟泥石流主要物源为高山剥蚀崩塌物源及沟道物源。桑谷沟形成区地形通常自然坡度为 35° ~ 60°，主要由高位崩滑物质和冰碛物构成；流通区主要由第四系冰碛物组成，这些物质是由冰崩、雪崩或冰川泥石流带来并在坡面堆积而成。其物质组成包括碎砾石夹块石、漂石土和砂质充填，颗粒粒径大小分布不均，形态为次棱角至亚圆状，主要成分包括花岗岩，诺错组变细砂岩、板岩互层夹变石英砂岩、变玄武岩、变安山岩、变安山质晶屑凝灰岩、灰岩及大理岩等，其结构呈松散至中密状。沟底堆积大量由冰川泥石流带来的物质，表层堆积体主要由巨大漂石、块石等构成。

由图 8 坡体累计形变剖面图可知，坡体自上而下呈相反的形变趋势，底侧堆积区内形变趋势呈缓慢上升，该处受径流搬运，物源堆积在扇形口，由于堆积区大部分为地表水流径区域，常年随水流冲蚀，所以形变量较小，累计位移处于 2 ~ 10 mm 之间；随着海拔逐渐升高，该研究时段流通区内气候逐渐回

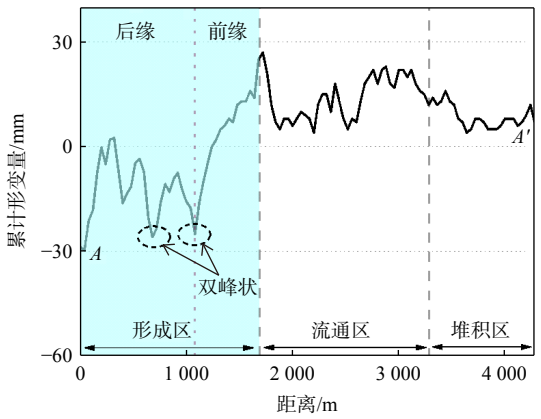


图 8　2020/10−2021/06 坡体累计形变剖面（剖面 $A-A'$位置见图 7）

Fig. 8　Slope cumulative deformation profile from October 2020 to June 2021

暖，上部积雪融化为液态水冲向流通区，同时伴随降雨量逐渐增加，两侧边坡逐渐滑移，即 LOS 向累计形变值为正值，介于 0 ~ 25 mm 间；而形成区内有明显的两极分化，形成区剖面线呈现出双峰状，形成区后缘和前缘形变呈相反趋势[32]。后缘处于峰顶位置，处于或临近积雪区，随着气温逐渐升高，积雪融化下渗过程中导致附近土层饱和，且液态水伴随土体向前缘滑动并贮存于前缘，导致形成区前缘累计位移不断增加，即后缘位移在−30 ~ 0 mm 之间，前缘累计位移在−20 ~ 30 mm 之间。

3.4　桑谷沟泥石流形变历史分析

桑谷沟泥石流位于波密至墨脱沿线段，该段大部分泥石流处于或临近冰川，水动力成为影响研究区不可或缺的因素，为探究桑谷沟泥石流发育规律与降雨量的响应关系，本研究获取了 2020 年 10 月至 2021 年 6 月的降雨量数据，同时在桑谷沟泥石流内形成区的前缘及后缘取 6 个样点进行时序分析，采样点位置如图 7 所示。

通过时序图可以看出，6 个采样点的形变趋势截然不同，2020−2021 年之间，位于后缘的 a1、a2、a3 及前缘 b1、b2、b3 在垂向上持续发生形变。垂向位移情况为：2020 年 11 月−2020 年 12 月有形变加速现象，后缘形变明显高于前缘。2021 年 4 月−2021 年 6 月形变量接近峰值，且前缘形变高于后缘。结合降雨量数据发现，坡体运动与降雨量存在高度关联性，2020 年 10 月−2021 年 3 月为雨水淡季，降雨量较少，月降雨量均少于 10 mm，坡体处于干燥状态，表面产生裂缝。随雨季到来，坡体形变在 2021 年 3 月−2021 年 6 月进入加速阶段，至此降雨量逐渐升高，并伴随积雪冲向前缘，短时期内后缘垂向形变达 40 mm，前缘垂向形变达 20 mm，并使其下滑力增大。

且在 2021 年 6 月后降雨量持续增长(图 9)，期间有大量液态水下渗，坡体自重增大，且物源区坡体含水率激增，坡体饱和松散土体抗剪强度降低，松散堆积体稳定性降低甚至失稳，前缘在卸荷力作用下打破平衡，最终滑动面贯通于 2021 年 7 月 3 日发生泥石流。

由于研究区缺少同期地面监测数据，故未能对 InSAR 结果的绝对精度进行验证。在此采用非显著形变区统计法[26] 和现场调查及无人机影像解译分析法对其结果的内符合精度进行评估。针对于图 7 中非显著形变区域，统计其中累计形变量，得出区域形变量在−5 ~ 5 mm 之间波动，最大值为 4.8 mm，最小值为−4.81 mm，形变均值为 0.04 mm，标准差为 2.31 mm，见图 10a，结果表明 InSAR 监测成果有较好的内符合精度。结合泥石流前后影像数据图 10b, c 可知，泥石流在形成区山顶处可清晰看见由地表水持续冲刷形成的狭长裸露岩面，如图 10d，该区域于研究时段内持续发生形变，且流通区内左侧边坡(图 10e)因历史滑移也持续发生形变，与图 8 InSAR 解译结果较为一致。

4　桑谷沟泥石流运动过程模拟

由于 SBAS-InSAR 技术在反演泥石流瞬间爆发过程中，受自然环境、相位差分等因素影响导致形变产生误差。因此，这里采用 RAMMS(rapid mass movement simulation)软件对桑谷沟泥石流 2021 年 7 月 3 日爆发过程进行模拟，以弥补 SBAS-InSAR 技术无法捕捉泥石流瞬时爆发的不足。

通过《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ-T-0220-2006)[38] 建议方法，计算泥石流容重、流速等特征参数，然后利用 RAMMS 软件泥石流模块对桑谷沟泥石流此次运动过程进行模拟，获取泥石流堆积范围、流动速度、堆积深度等特征参数，并将泥石流计算结果和实地调查进行对比分析。

4.1　RAMMS 软件与基本原理

RAMMS 软件基于 Voellmy-Salm 流变连续介质模型将泥石流流体视为非均质、非稳定流体，以流深、流动速度 2 个主要流量参数表示 x、y 方向上流体深度平衡方程[39]。

$$\partial_t(HU_x)+\partial_x\left(c_xHU_x^{\ 2}+g_zk_{a/p}\frac{H^2}{2}\right)+\partial_y(HU_xU_y)=s_{gx}-S_{fx}, \tag{5}$$

$$\partial_t(HU_y)+\partial_y\left(c_yHU_y^{\ 2}+g_zk_{a/p}\frac{H^2}{2}\right)+\partial_x(HU_xU_y)=s_{gy}-S_{fy}, \tag{6}$$

式中：H 为泥石流深度，m；U_x，U_y 分别为 x、y 方向上速度分量，m/s；c_x，c_y 分别为 x，y 方向上的地形系数，由 DEM 数字高程模型决定；$k_{a/p}$ 为土压力系数；g_z 为 z 方向上的重力加速度，kN/m^3；s_{gx}，s_{gy} 分别为 x、y 方向上有效重力，N；S_{fx}，S_{fy} 分别为 x、y 方向上摩擦阻力，N。

采用 Voellmy-Fluid 摩擦模型将摩擦阻力分为摩擦系数 μ 和湍流系数 ξ 2 个部分，当流体快速运动时湍流系数 ξ 起主导作用，当流体接近停止运动时摩擦系数 μ 起主导作用。

$$s_f=\mu\cdot\rho\cdot Hg\cos(\gamma)+\frac{\rho gU^2}{\xi}, \tag{7}$$

式中：μ 为干摩擦系数；ρ 为流体密度，kg/m^3；g 为重力加速度，kN/m^3；γ 为物质倾斜角度，(°)；U 为泥石流流速，m/s；ξ 为湍流系数。

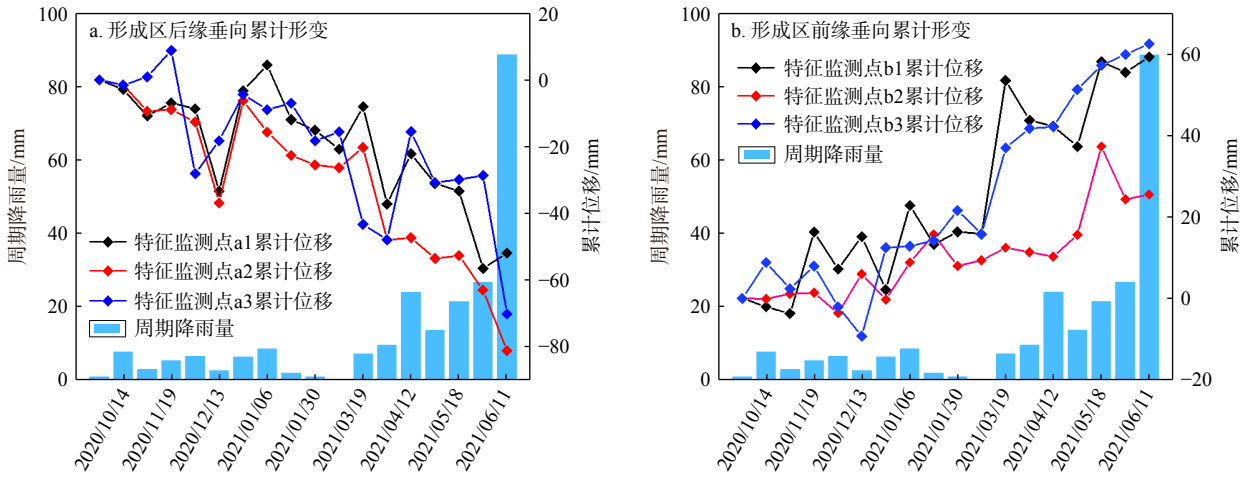
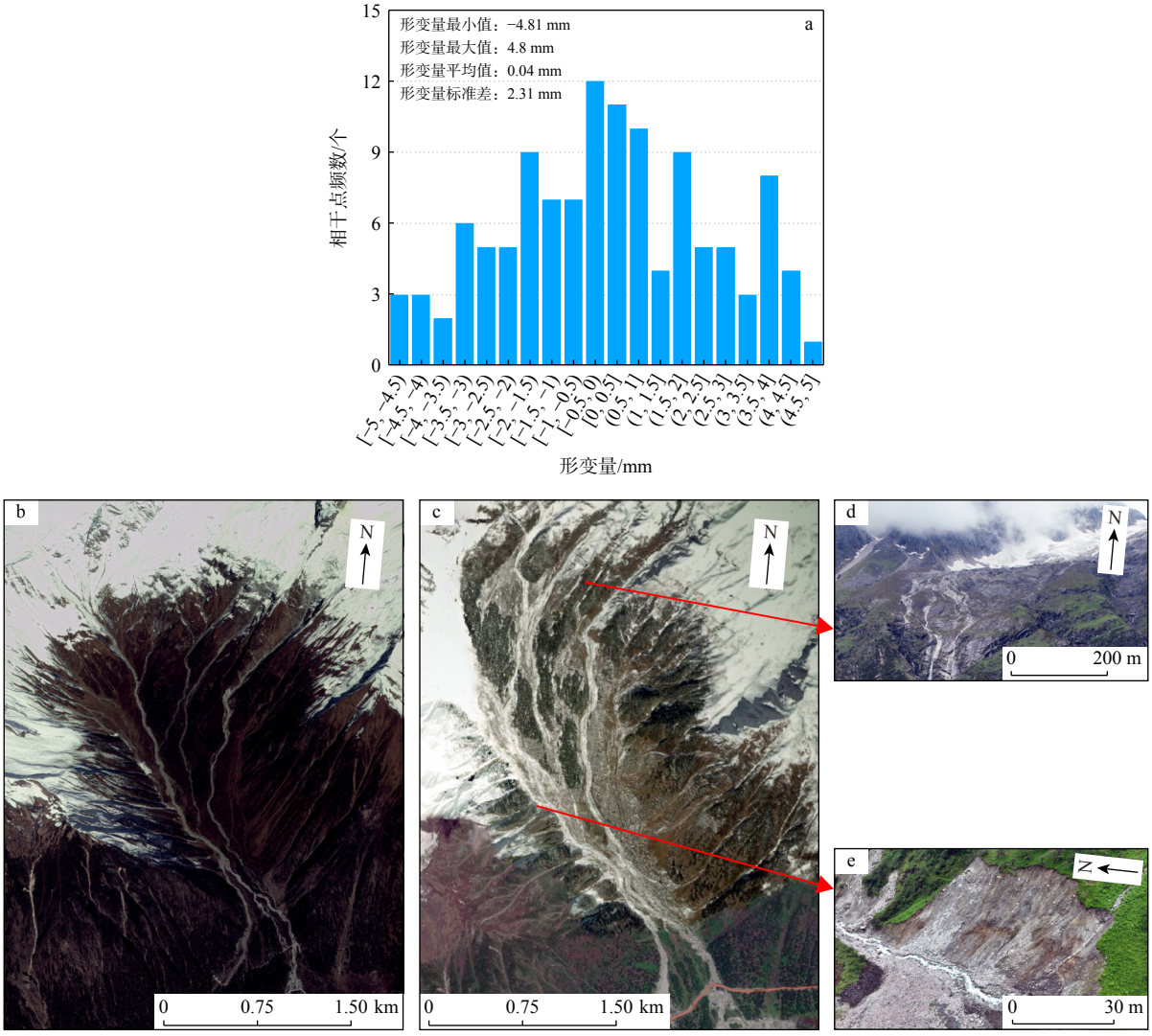


图 9　泥石流形成区时序形变与降雨数据相关性对比（降雨量数据来源于美国国家海洋和大气管理局，源格式为 csv；特征监测点位置见图 7）

Fig. 9　Formation zone time-series deformation of debris flow in relation rainfall data



a. 非显著形变区监测统计直方图；b. 2018 年 Google Earth 影像(桑谷沟泥石流爆发前)；c. 2021 年 Google Earth 影像(桑谷沟泥石流爆发后)；d, e. 无人机拍摄资料。2020 年 9 月 26 日桑谷沟爆发泥石流

图 10　InSAR 精度评估与验证

Fig. 10　Accuracy evaluation and verification of InSAR

4.2　泥石流模拟计算参数

桑谷沟沟谷两侧岸坡陡峭，常引发崩塌和滑坡灾害，冲沟发育，流域内植被覆盖较少，沟谷两侧多为风化、节理发育的硬岩，沟岸山坡坡度大于 30°，流域面积为 15.6 km^2，流域相对高差大于 500 m，河沟堵塞严重，根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ-T-0220-2006)表 G.1[38]，对桑谷沟泥石流易发程度进行打分，得到该泥石流易发程度评分为 119 分，通过查规范表 G.2 进一步可得桑谷沟泥石流重度 γ_c 为 1.929 t/m^3，属于黏性泥石流。根据桑谷沟泥石流性质，参考西藏古乡沟等黏性泥石流的通用公式：

$$V_c = \frac{1}{n_c} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}}, \tag{8}$$

式中：V_c 为泥石流沟口断面流速，m/s；n_c 为黏性泥石流沟床糙率，查阅规范中表 I.5 用内插法得到；H_c 为水力半径，m，计算时采用平均泥深；I_c 为水力坡度，‰，计算时采用断面沟床纵坡度代替。

选取桑谷沟泥石流沟口处作为计算断面，计算得到桑谷沟沟口处泥石流平均流速为 2.21 m/s。

模拟基于西藏自治区 12.5 m 精度 DEM 数字高程数据(源自 ALOS_PALSAR 中 Hi-Res Terrain Corrected 数据)，将 DEM 数据转化为 ASCII 格式导入 RAMMS 软件，采用 10 m×10 m 计算网格进行地形划分，通过多期遥感解译以桑谷沟流域圈定的 1 ~ 4 号冰川区域作为泥石流的物源条件，设置泥石流密度为 1.929 t/m^3，计算时间步长设置为 10 s，土压力系数保持为默认值。在 RAMMS 泥石流数值模拟中，摩擦系数 μ 和湍流系数 ξ 是影响泥石流运动的

两大重要影响因素[40]，以 μ=0.20，ξ=200 m/s^2 作为默认值进行泥石流运动过程初始模拟，通过卫星影像、遥感解译与现场工程地质调查圈定泥石流堆积范围，将模拟范围与泥石流实际堆积范围进行对比并根据软件操作手册建议的经验校核方法得到最终摩擦系数 μ 取值为 0.18，湍流系数 ξ 取值为 230 m/s^2。

4.3 桑谷沟泥石流模拟分析

根据上述设定参数，还原桑谷沟泥石流爆发的运动过程，得到桑谷沟泥石流不同步时堆积特征与最大堆积深度、最大流速模拟结果，见图 11，12。

根据图 11，12 将泥石流运动过程划分为 3 个阶段，在初始运动阶段（步时 400 s）冰川融化产生大量冰川融水，冰川裹挟的崩积物及表层松散物质流入小型冲沟并逐渐汇入主沟，泥石流流速与堆积深度均主要集中于小型冲沟中，平均流速约 7 m/s，平均冲沟堆积深度约为 2 m；在加速运动阶段（步时 2 400 s）泥石流物源物质完全汇聚于主沟，物质汇集后流体流速变慢，泥石流堆积深度在主沟中部明显增加，平均堆积深度约 8 m；在减速−最终阶段（步时 5 000 s）泥石流流速与堆积深度逐渐趋于稳定，最终运动停止于沟口附近形成沟口堆积扇。

根据图 13 可知，桑谷沟泥石流运动全过程中最大流速主要集中在沟谷最上方的 5 条小型冲沟，冲沟内流速均超过 10 m/s，其中最大流速为 17.59 m/s；泥石流物质堆积主要集中于主沟中部，最大堆积深度为 14.69 m，与现场调查的结果，最大块石直径为 10 ~ 14 m 相符。

由模拟结果可知，泥石流沟口处流速 1 ~ 3 m/s，与前文黏性泥石流通用公式所计算的 V_c=2.21 m/s 基本吻合，同时泥石流最终堆积区域与实际调查堆积范围也基本符合，因此认为模拟结果误差较小，可信度较高，具有一定的实际意义。

5 结 论

（1）利用 2020 年 10 月−2021 年 6 月时间段内

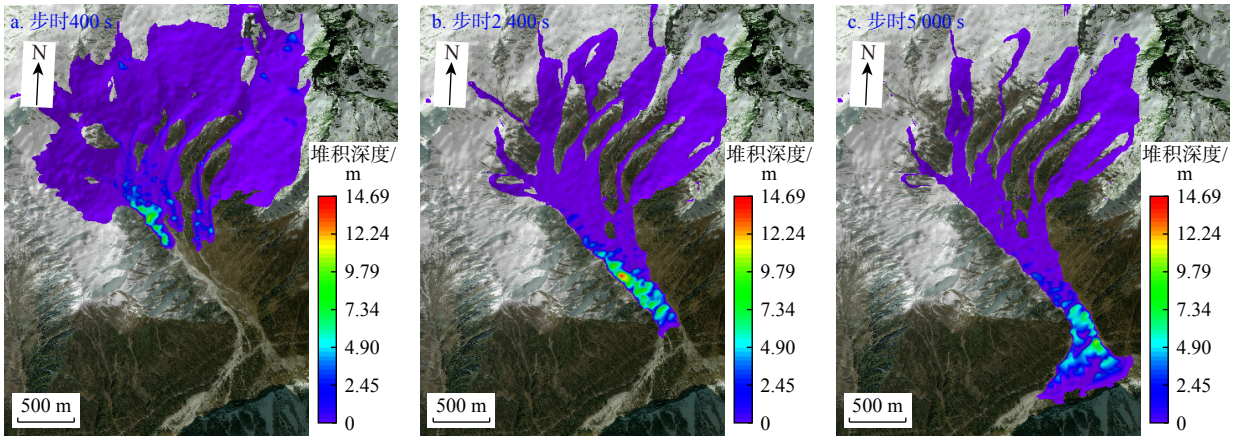


图 11 桑谷沟泥石流不同步时堆积深度状态图

Fig. 11 Map of accumulation depth of Sanggu Valley debris flow when it is not synchronized

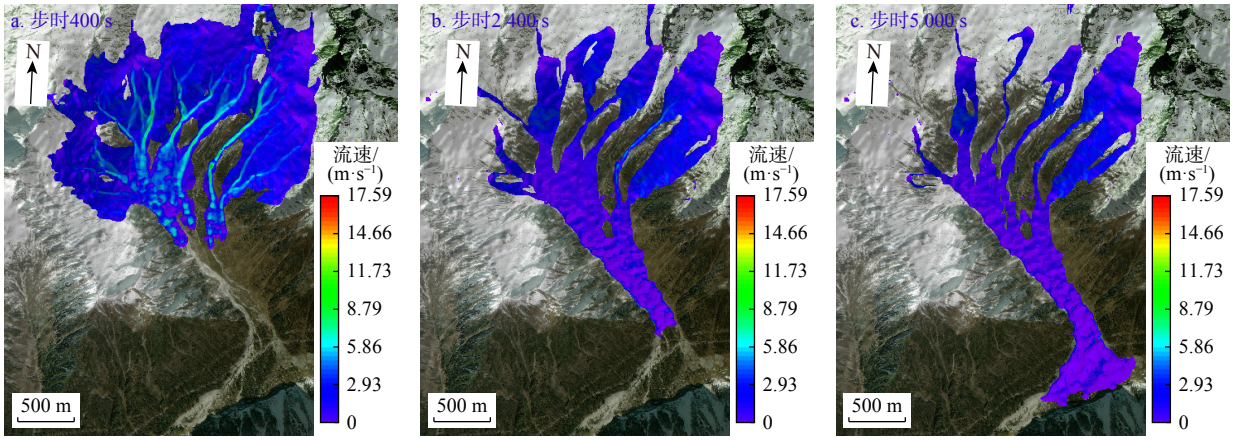


图 12 桑谷沟泥石流不同步时流速状态图

Fig. 12 Flow velocity state diagram of Sanggu Valley debris flow when it is not synchronized

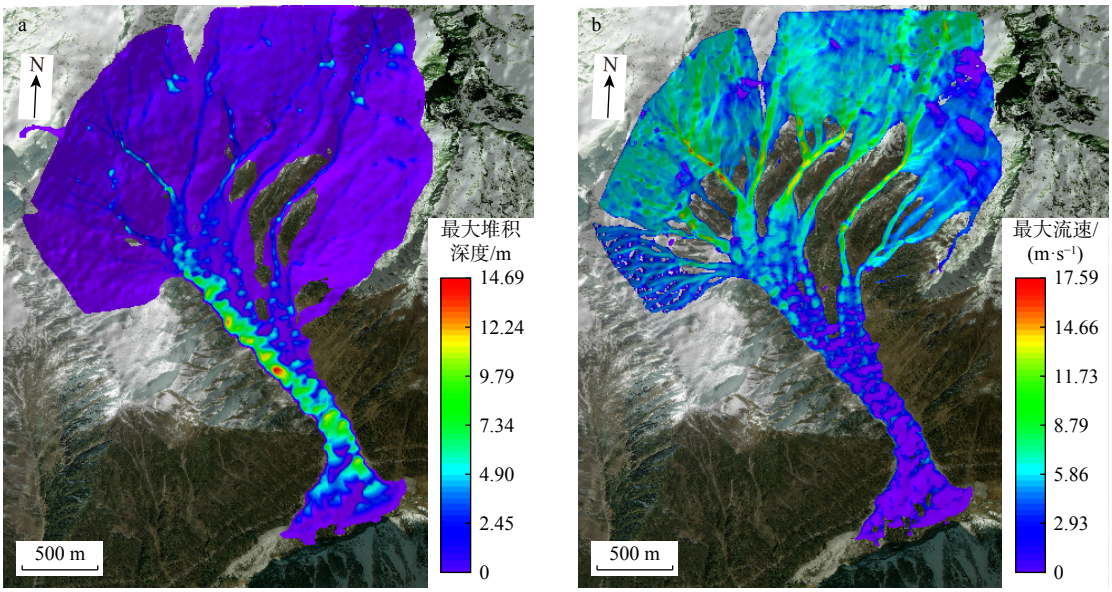


图 13　桑谷沟泥石流最大堆积深度 (a) 与最大流速 (b) 图

Fig. 13　Maximum accumulation depth (a) and maximum velocity (b) of debris flow in Sanggu Valley

Sentinel-1A 数据通过 InSAR 技术，解算了桑谷沟泥石流 LOS 向形变，着重分析在 2 次爆发期间 1 a 内形成区的垂向形变。结果表明：坡体长期处于蠕滑状态；物源区内最大形变速率为 139 mm/a，流通区内速率最大为 46 mm/a，堆积区速率最大为 20 mm/a；降雨作用为泥石流发育提供了大量的松散来源。

(2)阶段性的坡表侵蚀会破坏坡体的稳定性。泥石流爆发前的 4 个月内月降雨量均少于 10 mm，干旱导致土体开裂，随后降雨骤降，物源区坡体含水率激增，坡体饱和松散土体抗剪强度降低，松散堆积体稳定性降低失稳，进而形成泥石流。

(3)基于 SBAS-InSAR 技术实现了桑谷沟泥石流爆发前形变过程反演和灾变趋势预测，基于 RAMMS 泥石流数值模拟软件对桑谷沟泥石流爆发期间运动过程进行了模拟，将研究区演进过程划分为初始运动、加速运动、减速−最终 3 个阶段。

(4)对于藏南地区的冰川泥石流灾害，采用遥感数据解译灾害爆发前后的形变趋势，可有效地节约人力、物力等成本。未来的研究将结合地面监测数据，如 GPS 和地面雷达观测，系统地校准和验证 InSAR 数据的绝对精度。通过这种多源数据的对比分析，从而进一步提高形变监测结果的可靠性。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　徐雨晴，何吉成. 1951−1996 年中国铁路泥石流灾害的时空特征[J]. 水土保持通报，2016，36(1)：337-342.
XU Y Q, HE J C. Spatial and temporal characteristics of debris flow of China railways in 1951-1996[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 337-342. (in Chinese with English abstract)

[2]　黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(3)：433-454.
HUANG R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)

[3]　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.
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. (in Chinese with English abstract)

[4]　侯伟鹏，余国安，岳蓬胜. 典型高山峡谷泥石流堆积扇发育过程及特征：以藏东南帕隆藏布流域天摩沟为例 [J]. 山地学报，2023，41(4)：532-544.
HOU W P, YU G A, YUE P S. Development and geomorphic characteristics of a typical debris flow fan in alpine valley: A case study of the Tianmo gully in the Parlung Tsangpo basin, Southeast Tibet, China[J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 532-544. (in Chinese with English abstract)

[5]　ARMIJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 1986, 91(B14): 13803-13872.

[6]　REN L Y, DUAN K Q, XIN R. Impact of future loss of glaciers on precipitation pattern: A case study from south-eastern Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2020, 242: 104984.

[7] STOCK J, DIETRICH W E. Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature[J]. Water Resources Research, 2003, 39(4): 2001WR001057.

[8] 李尧, 崔一飞, 李振洪, 等. 川藏交通廊道林波段冰川泥石流发育动态演化分析及监测预警方案 [J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1969-1984.
LI Y, CUI Y F, LI Z H, et al. Evolution of glacier debris flow and its monitoring system along Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. Earth Science, 2022, 47(6): 1969-1984. (in Chinese with English abstract)

[9] 翟毅飞. 藏东南地区冰川泥石流分布规律与规模频率特征研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2022.
ZHAI Y F. The distribution and scale and outbreak frequency characteristics of glacial debris flow in Southeast Tibet[D]. Lhasa: Tibet University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[10] 张菊. 冰川泥石流易发性评价方法及应用研究 [D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2021.
ZHANG J. Research on evaluation method and application of the susceptibility of glacial debris flow[D]. Mianyang Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)

[11] DE HAAS T, NIJLAND W, DE JONG S M, et al. How memory effects, check dams, and channel geometry control erosion and deposition by debris flows[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 14024.

[12] 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 103-109.
CUI P, CHEN R, XIANG L Z, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(2): 103-109. (in Chinese with English abstract)

[13] 杨俊, 徐智, 兰立军, 等. 黄土高原典型小流域降水变化特征研究 [J]. 中国水土保持, 2022(8): 25-28.
YANG J, XU Z, LAN L J, et al. The characteristics of precipitation change in the typical small watershed of Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(8): 25-28. (in Chinese with English abstract)

[14] LIU S, HU K H, ZHANG S J, et al. Comprehensive evaluation of satellite-based precipitation at sub-daily time scales over a high-profile watershed with complex terrain[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(12): 2347-2361.

[15] 詹聪聪. 古乡沟泥石流特征及预警分析研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2022.
ZHAN Z Z. Study on the characteristics and early warning analysis of the Guxiangou mudslide[D]. Lhasa: Tibet University, 2022 (in Chinese with English abstract)

[16] 张宇欣, 李育, 朱耿睿. 青藏高原海拔要素对温度、降水和气候型分布格局的影响 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 505-515.
ZHANG Y X, LI Y, ZHU G R. The effects of altitude on temperature, precipitation and climatic zone in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 505-515. (in Chinese with English abstract)

[17] CHEN Y, DONG J L, GUO F, et al. Review of landslide susceptibility assessment based on knowledge mapping[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2022, 36(9): 2399-2417.

[18] 杨春宇, 文艺, 潘星, 等. 基于 SBAS-InSAR 的山体滑坡形变监测分析 [J]. 测绘通报, 2023(11): 12-17.
YANG C Y, WEN Y, PAN X, et al. Monitoring and analysis of landslide deformation based on SBAS-InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(11): 12-17. (in Chinese with English abstract)

[19] 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 D Q, DAI K R, GUO Z C, 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)

[20] 弓永峰, 王辉, 吴学华, 等. 基于时序 InSAR 的宁夏西吉县滑坡灾害隐患识别 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 114-121.
GONG Y F, WANG H, WU X H, et al. Identification of potential landslide hazards using time-series InSAR in Xiji County of Ningxia[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(6): 114-121. (in Chinese with English abstract)

[21] 张晓东. 基于遥感和 GIS 的宁夏盐池县地质灾害风险评价研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
ZHANG X D. Study on geological disaster risk assessment based on RS and GIS in Yanchi County, Ningxia[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)

[22] 耿丹, 涂宽, 谌华, 等. SBAS-InSAR 和高分辨率光学遥感相结合的矿区地表形变时空演化特征研究 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 251-264.
GENG D, TU K, SHEN H, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of surface deformation in mining area based on SBAS-InSAR and high resolution optical remote sensing[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1): 251-264. (in Chinese with English abstract)

[23] 武德宏, 郝利娜, 严丽华, 等. 金沙江滑坡群 InSAR 探测与形变因素分析 [J]. 自然资源遥感, 2024, 36(3): 259-266.
WU D H, HAO L N, YAN L H, et al. InSAR-based detection and deformation factor analysis of landslide clusters in the Jinsha River[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(3): 259-266. (in Chinese with English abstract)

[24] 李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展 [J]. 遥感学报, 2021, 25(2): 614-629.
LI X E, ZHOU L, SU F Z, et al. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(2): 614-629. (in Chinese with English abstract)

[25] 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 Uni-

versity, 2019, 44(7): 967-979. (in Chinese with English abstract)

[26] 张璇钰, 刘桂卫, 孙琪皓, 等. 综合遥感技术在山区铁路泥石流勘察中的应用 [J]. 铁道勘察, 2024, 50(1): 16-22.
ZHANG X Y, LIU G W, SUN Q H, et al. Application of comprehensive remote sensing technology in mountain railway debris flow survey[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(1): 16-22. (in Chinese with English abstract)

[27] 刘桂卫, 李国和, 陈则连, 等. 多源遥感技术在艰险山区铁路地质勘察中应用 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 4-8.
LIU G W, LI G H, CHEN Z L, et al. Application of remote sensing technology for geological investigation in mountain railways[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(8): 4-8. (in Chinese with English abstract)

[28] 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 G L, XU L, ZHANG X Y, et al. Monitoring time series deformation of Xishancun landslide with SBAS-InSAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(2): 93-98. (in Chinese with English abstract)

[29] 樊贵盛, 贾宏骥, 李海燕. 影响冻融土壤水分入渗特性主要因素的试验研究 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 88-94.
FAN G S, JIA H J, LI H Y. Experimental study on main factors influencing water infiltration features of freezing and thawing soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(4): 88-94. (in Chinese with English abstract)

[30] 陈庭轩, 李素敏, 袁利伟. InSAR 在云南德钦县一中河泥石流物源汇集及失稳模式中的探究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(2): 158-164.
CHEN T X, LI S M, YUAN L W. InSAR study on substance source collection and instability mode of Yizhong River debris flow in Deqin, Yunnan Province[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(2): 158-164. (in Chinese with English abstract)

[31] ZEITLER P K, MELTZER A S, BROWN L, et al. Tectonics and topographic evolution of Namche Barwa and the easternmost Lhasa Block, Tibet[M]. New York, USA: Geological Society of America, 2014.

[32] 杨宗佶, 付校龙, 游勇. 气候变化条件下降雨–融水型泥石流流量预测方法 [J]. 人民长江, 2021, 52(12): 34-39.
YANG Z J, FU X L, YOU Y. Discharge prediction method for rainfall-melting water triggered glacial debris flows under climate change scenarios[J]. Yangtze River, 2021, 52(12): 34-39. (in Chinese with English abstract)

[33] 屈永平, 肖进, 潘义为. 藏东南地区冰川泥石流形成条件初步分析: 以天摩沟冰川泥石流为例 [J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 177-184.
QU Y P, XIAO J, PAN Y W. Preliminary analysis on formation conditions of glacier debris flow in Southeast Tibet: A case of glacial debris flow in Tianmo gully[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(12): 177-184. (in Chinese with English abstract)

[34] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.

[35] 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.

[36] 杨沛璋, 崔圣华, 裴向军, 等. 基于 SBAS-InSAR 和光学遥感影像的大型倾倒变形体变形演化 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 63-75.
YANG P Z, CUI S H, PEI X J, et al. Deformation and evolution of large dumping bodies based on SBAS-InSAR and optical remote sensing images[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 63-75. (in Chinese with English abstract)

[37] 李凡, 李素敏, 杨渊, 等. 基于时序 InSAR 的沙湾大沟滑坡型泥石流发育特征研究 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(2): 532-541.
LI F, LI S M, YANG Y, et al. Research on the development characteristics of landslide-type debris flow in Shawandagou based on MT-InSAR[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(2): 532-541. (in Chinese with English abstract)

[38] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范: DZ/T0220-2006[S]. 北京: 地质出版社,2006.
Ministry of Land and Resources, People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T0220-2006[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. (in Chinese)

[39] 陈兰, 范宣梅, 熊俊麟, 等. 藏东南多依弄巴流域冰湖溃决危险性评价 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 258-266.
CHEN L, FAN X M, XIONG J L, et al. Hazard assessment of glacial lake outbursts in the Doyinongba basin, southeastern Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 258-266. (in Chinese with English abstract)

[40] 庞海松, 谢骏锦, 张小明, 等. 基于 RAMMS 数值模拟的短时强降雨型泥石流危险性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 215-225.
PANG H S, XIE J J, ZHANG X M, et al. Hazard assessment of debris flow induced by short-time heavy rainfall based on RAMMS numerical simulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 215-225. (in Chinese with English abstract)

Summary for “藏南地区桑谷沟冰川泥石流形变历史分析和运动过程模拟”

Deformation history analysis and movement process simulation of glacier debris flow in Sanggu Valley in southern Tibet

SUN Jingyi[1]，YANG Jin[2]，WU Yongning[1]，LI Qun[2]，ZHANG Guangcheng[1*]，ZHOU Zhesheng[1]，XU Hongjian[1]

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China；
2. China Communications Second Highway Survey and Design Research Institute Co., LTD., Wuhan 430058, China

First author，E-mail：973703280@qq.com

* Corresponding author， E-mail：zhangguangc@cug.edu.cn

Abstract：Glacial debris flows in the Yarlung Zangbo River basin of southeastern Tibet are characterized by their large scale, prolonged duration, and significant societal and environmental impacts. Investigating the deformation characteristics and influencing factors of Sanggu Valley debris flow offers critical scientific insights for predicting, early warning, and mitigating glacial debris flow disasters in this region. Traditional methods often fall short in quantitatively describing the formation mechanisms of large-scale debris flows. To address this limitation, this study integrates field investigations, unmanned aerial vehicle (UAV) aerial photography, satellite imagery, and geological and meteorological data.[**Objective**] This study aims to elucidate the relationship between debris flow outbreaks in Sanggu Valley and key influencing factors, including material sources and rainfall patterns. [**Methods**] A novel method combining interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and random-access mass spectrometry (RAMMS) techniques is developed to analyze the deformation process of debris flows before and during their initiation. SBAS-InSAR technology is employed to quantify the deformation of Sanggu Valley debris flow during two outbreaks, complemented by satellite images, UAV images, and field investigations. This approach enables the inversion of deformation processes and the prediction of disaster trends prior to the Sanggu Valley debris flow event. Additionally, RAMMS debris flow numerical simulation software is utilized to model the movement dynamics of the Sanggu Valley debris flow during its eruption. [**Results**] This study yields the following key findings: ① InSAR-derived LOS deformation analysis of the Sanggu Valley debris flow reveals the prolonged slope creep, with maximum deformation rates of 139 mm/a in the source area, 46 mm/a in the flow area, and 20 mm/a in the accumulation area. Rainfall is identified as a critical factor in supplying loose materials for debris flow development. ②The evolution process of the debris flow is categorized into three stages: initial motion, accelerated motion, and deceleration. [**Conclusion**] The proposed methodology, which integrates historical deformation analysis and numerical simulation of glacial debris flow dynamics, provides a scientific foundation for predicting debris flow development trends and designing effective engineering control measures.

Key words: glacier debris flow；SBAS-InSAR；RAMMS；drone aerial photography；causes of debris flow；Sanggu Valley；southern Tibet

Received：2024-04-19；Revised：2024-08-06；Accepted：2024-12-09

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240172