

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0085

JIAO Zhiping, JIANG Liming, NIU Fujun, et al. Monitoring landslides in seasonal frozen regions in eastern Tibet with InSAR: a case study in Aila Mountain section of National Highway 317[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1312-1322. [焦志平, 江利明, 牛富俊, 等. 藏东冻土区滑坡形变时序 InSAR 监测分析——以 317 国道矮拉山为例[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1312-1322.]

# 藏东冻土区滑坡形变时序 InSAR 监测分析 ——以 317 国道矮拉山为例

焦志平<sup>1,2</sup>, 江利明<sup>1,2</sup>, 牛富俊<sup>2,3</sup>, 郭 瑞<sup>1,2</sup>, 周志伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 受气候暖湿化和冻融作用的影响, 近年来西藏东部地区的山体滑坡多发频发, 对人民生命财产安全造成严重威胁, 制约了当地经济社会发展, 因此, 迫切需要利用有效手段对滑坡灾害隐患开展大范围调查与早期识别。以藏东 317 国道矮拉山地区为例, 利用小基线集时序 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术, 分别对 2017 年 3 月—2019 年 7 月期间 Sentinel-1A SAR 升、降轨数据集进行地表形变监测分析, 获取了该地区滑坡体隐患的分布情况, 并讨论了滑坡历史形变演化特征及成因。结果表明: 大部分区域较为稳定, 滑坡隐患主要集中在山谷两侧, 升降轨 InSAR 提高了滑坡监测识别的准确性和覆盖度; 冻融滑坡形变过程与降雨型滑坡存在差异, 呈现平稳期和失稳期交替出现的季节性变化特征; 形变过程主要受冻融和降雨影响, 两者共同作用加速坡体变形。实验结果验证了 InSAR 技术能够有效弥补传统监测手段的不足, 可在高山冻土区滑坡隐患早期识别与监测防治中发挥重要作用。

**关键词:** 冻融作用; 滑坡监测; 时序 InSAR; 藏东地区

**中图分类号:** P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1312-11

## 0 引言

冻融作用是冻土区滑坡发育的重要外动力因素之一<sup>[1]</sup>, 冻融滑坡形态与常规降雨型滑坡相似, 但影响因素和失稳机制更为复杂。位于川藏交界处的西藏自治区东部, 季节性和多年冻土分布广泛、地质环境复杂、地形和气象条件恶劣, 是我国滑坡地质灾害最严重的地区之一。近年来, 随着青藏高原暖湿化加剧, 该地区冻融滑坡灾害呈现多发频发的趋势, 对人民生命财产安全造成严重威胁, 制约了当地经济社会发展<sup>[2]</sup>。因此, 加强冻土区滑坡灾害隐患的监测识别研究, 对藏东地区冻融地质灾害早期识别及风险评估具有重要意义。

目前, 滑坡灾害监测主要采用 GNSS 位移监测、水准测量、裂缝计、无人机与卫星遥感等实地测量与

遥感解译相结合的方式<sup>[3]</sup>。但是, 藏东地区滑坡灾害多位于高海拔、高寒、高陡等艰险山区, 人员难以抵达, 实地测量通常要耗费大量人力财力物力, 监测范围及密度有限, 且难以获取滑坡历史变化信息<sup>[4]</sup>。光学遥感手段以其大范围、高效率的优势在地质灾害调查识别中发挥了重要作用<sup>[5]</sup>, 但数据采取受云雾遮蔽影响、人工解译不确定性大, 在滑坡形变监测中存在错检漏检、难以进行定量分析等问题<sup>[6]</sup>。

作为一种快速发展的空间大地测量技术, 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)具有全天候、高分辨率、高精度、大范围等特点<sup>[7]</sup>, 近年来在滑坡<sup>[8]</sup>、地震<sup>[9]</sup>、冻土<sup>[10]</sup>等自然地表形变监测中应用广泛。特别是随着时序 InSAR 技术的发展, 国内外学者在四川、云南、甘肃、三峡等地开展了大量滑坡监测研究, 取

收稿日期: 2021-04-05; 修订日期: 2021-07-02

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-428; QYZDB-SSW-DQC027)资助

作者简介: 焦志平, 硕士研究生, 主要从事青藏高原冻融灾害 InSAR 监测分析. E-mail: jiaozhiping@asch.whigg.ac.cn

通信作者: 江利明, 研究员, 主要从事影像大地测量与卫星遥感研究. E-mail: jlm@whigg.ac.cn

得一系列重要成果<sup>[11-15]</sup>。但是,对于高山峡谷复杂地形条件下的滑坡监测而言,雷达侧视成像更易受叠掩、透视收缩、阴影等几何畸变的影响,单一轨道方向(升轨或降轨)InSAR 在地形起伏地区导致数据空洞<sup>[16]</sup>,而且对滑坡形变解译提出了挑战<sup>[17]</sup>。欧洲航空局(ESA)分别于 2014 年和 2016 年发射的 Sentinel-1A/B SAR 卫星,具有短重访周期(6/12/24 天)、高分辨、大幅宽、多角度数据获取优势<sup>[18]</sup>,能够获取更丰富的冻融变形过程信息,在高山峡谷区冻融滑坡隐患早期识别和风险评估方面具有很好的应用前景。

本文以藏东地区 317 国道矮拉山段为例,利用小基线集(Small Baseline Subset, SBAS)时序 InSAR 技术,分别对 2017 年 3 月—2019 年 7 月期间 Sentinel-1A55 景升轨、69 景降轨 SAR 数据进行分析,获取该区域高时空分辨率的地表形变速率和滑坡形变时间序列,并结合气象资料和现场调查分析

了典型滑坡体的形变特征及影响因素。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区昌都市江达县岗托镇矮拉山地区(98.43°~98.58° E, 31.6°~31.68° N),是经由 317 国道进入西藏地区的重要通行路段。平均海拔 4 710 m,地势由东南向西北方向倾斜<sup>[19]</sup>,属于青藏高原中高山剥蚀地貌,区域地震活动构造背景较强,崩塌、滑坡等自然灾害严重。地表分布 2 条河流,主要由大气降水和上游冰雪融化水补给<sup>[20]</sup>。该区域年均温差较大,太阳辐射强烈,气温范围为 -15~28℃,平均气温 4.5℃,每年 7—8 月降雨量最多,日最大降雨量达 50 mm 以上,11 月到次年 3 月为冻结期,一般冻土深度为 0.85 m,海拔高于 5 200 m 时为多年冻土区<sup>[20]</sup>。

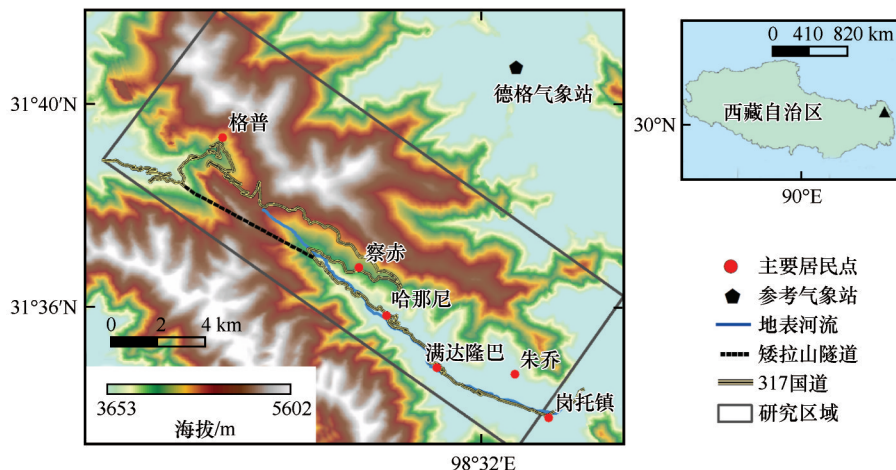


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of study area

### 1.2 实验数据

本文 InSAR 处理选用欧洲空间局(ESA)于 2014 年发射的 C 波段 Sentinel-1A 卫星的干涉宽幅模式 SAR 数据,极化方式为 VV,每景影像幅宽 250 km,由 3 个具有一定重叠度的子条带拼接而成,用于反演滑坡整体形变速率及形变序列。数据时段为 2017 年 3 月—2019 年 7 月,包括升轨数据 55 景(path99),降轨数据 69 景(path106)。采用 ESA 发布的精密轨道数据提高 Sentinel-1A 影像的轨道数据精度;30 m 分辨率的 SRTM DEM 数据去除地形相位和地理编码。

选用与 SAR 数据时间段相对应的气象资料用于分析形变趋势,该气象资料来源于距离矮拉山约

20 公里的德格气象站。通过查询 2017—2019 年温度及降雨历时数据,该地区一年中气温及每月累积降雨量呈现周期性变化,最低气温出现在 1 月份,为 -12℃,最高气温出现在 7 月,达到 29℃,年温差最大为 41℃;6—8 月为雨季,2018 年 7 月降雨量达到 225.3 mm,为近三年最高;每年 11 月至来年 4 月,降雨量普遍低于 20 mm,平均每月降雪天数小于 5 天。

## 2 SBAS 时序 InSAR 方法

小基线集(SBAS)InSAR 是由 Berardino 等<sup>[21]</sup>提出的一种时序 InSAR 分析方法。该方法优点在于采用小基线(时空基线较短)干涉对组合,提高了

表 1 Sentinel-1A 影像数据信息		
Table 1 Image parameters of Sentinel-1A		
参数	升轨	降轨
波长/cm	5.63	5.63
重访周期/d	12	12
空间分辨率/m	5×20	5×20
视角/(°)	33.82	33.85
飞行角/(°)	-12.79	168.34
影像数量	55	69
监测用途	滑坡范围、变化速率、时间序列提取	

SAR 数据使用率和监测点密度,并利用奇异值分解(SVD)方法高效获取监测点的形变速率及形变时间序列<sup>[22]</sup>。SBAS-InSAR 方法详细介绍见参考文献<sup>[23]</sup>,本文简要介绍其主要数据处理步骤:

- (1)计算 SAR 影像的时空基线,选择合适时空基线阈值并生成干涉对;
- (2)对选取的干涉对,进行差分干涉及相位解缠处理;
- (3)采用 SVD 方法对干涉图组成的相位方程进行形变参数解算。

本文数据处理流程如图 2 所示,在数据配准时,选取日期为 20180524 的影像作为主影像,减少因时间基线较长造成相关性降低导致配准失败。在基线连接时,结合已有研究<sup>[24]</sup>,时间基线阈值为 60 天,空间基线阈值为±200 m,时空基线分布情况如图 3 所示(蓝色连接点代表观测影像,线段表示相应的干涉对)。

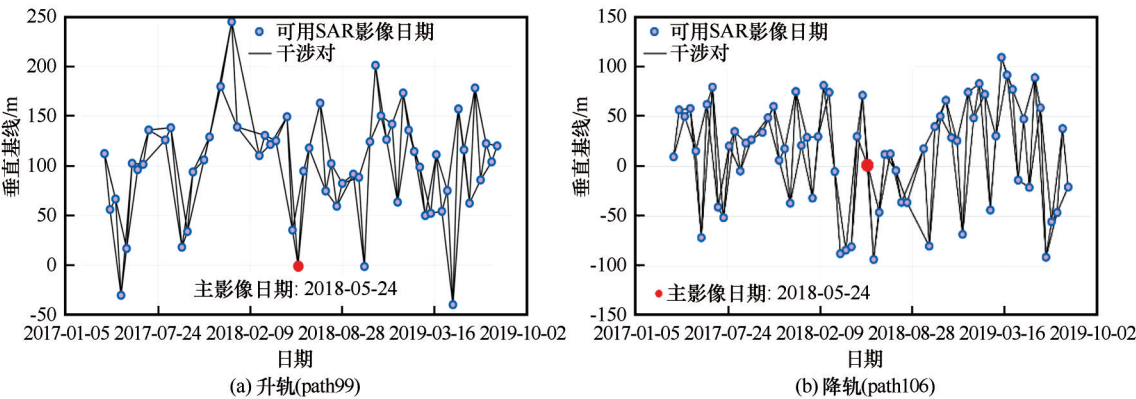


图 3 干涉对时空基线分布:升轨(path99)(a);降轨(path106)(b)

Fig. 3 Temporal-spatial baselines of interferometric pairs: ascending (path99) (a); descending (path106) (b)

升、降轨 InSAR 形变结果的对比分析表明(表 2):(1)地形平坦及地表稳定区域的形变信号较为一致;(2)在部分地表形变信号明显的区域,监测点

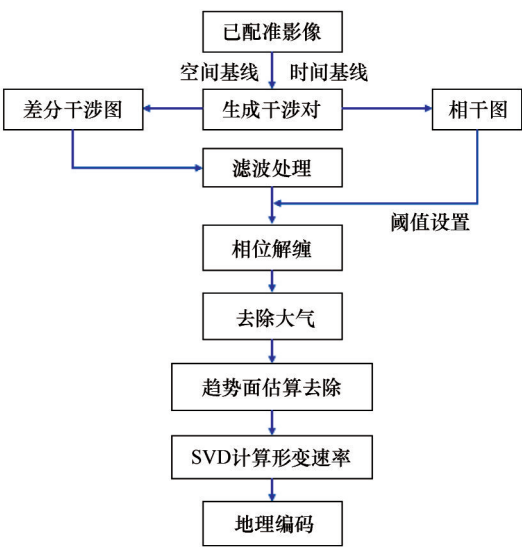


图 2 SBAS 方法技术流程

Fig. 2 Flow chart of SBAS

3 结果与分析

3.1 InSAR 地表形变

利用 SBAS-InSAR 方法处理了 55 景升轨及 69 景降轨 Sentinel-1 SAR 数据,获取了研究区卫星视线向(Line of Sight, LOS)向 2017—2019 年均形变速率和形变时间序列。参考目前基于滑坡形变速度的分类<sup>[25]</sup>,假设沿 LOS 向形变在-10~10 mm·a<sup>-1</sup>之间形变区为稳定区域。本文年均形变速率结果表明(图 4),大部分区域处于稳定状态,存在明显形变信号的区域分布于山谷两侧,最大形变速率达到-78 mm·a<sup>-1</sup>。



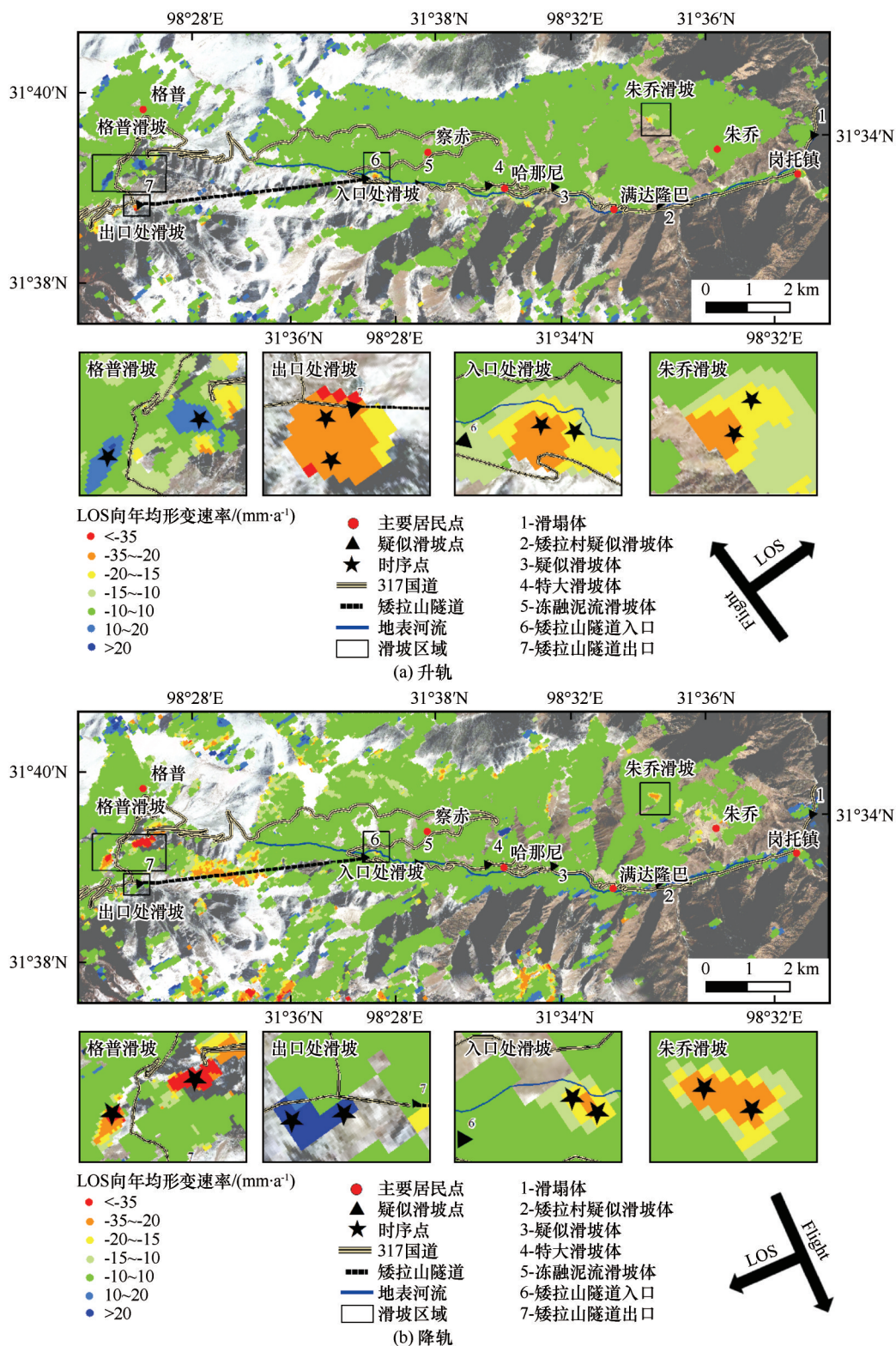


图4 基于SBAS-InSAR方法获取的雷达LOS向年均形变速率:升轨(a);降轨(b)

Fig. 4 Mean ground deformation along radar LOS direction derived by SBAS-InSAR method: ascending track (a); descending track (b)

加了解译的难度。

### 3.2 典型滑坡形变

根据 3.1 分析,下面将结合降轨形变结果、卫星

影像(来源于天地图,图5)以及现场考察情况(图6),重点分析朱乔、格普、隧道出入口四处典型滑坡形变时空特征,并选取四处典型滑坡共8个点位(位



表2 典型区域升、降轨 InSAR 形变统计结果对比  
Table 2 Comparison of deformation statistics of typical landslides along different radar LOS directions

区域	升轨 InSAR 形变速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )			降轨 InSAR 形变速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )		
	均值	最大形变	最小形变	均值	最大形变	最小形变
格普滑坡	20.43	36.12	10.39	-47.93	-73.99	-28.35
隧道出口	-24.88	-39.66	-10.81	16.33	17.13	15.23
滑坡						
隧道入口	-16.46	-25.8	-10.75	-14.78	-23.08	-10.73
滑坡						
朱乔滑坡	-16.83	-23.35	-10.8	-31.54	-33.75	-11.95

置见图4)定量分析滑坡的形变趋势(图7)。

(1)朱乔滑坡范围较小,长度为300 m,宽度为200 m,与山脚高差约560 m。InSAR 结果[图4(b)]表明,2017—2019年期间,滑坡后缘形变速率高于前缘,LOS 向年均形变速率为23~33 mm·a<sup>-1</sup>,发生两次变化,持续时间较长,累计形变值约为100 mm [图7(a)]。变形坡体表面植被稀疏,两侧发育多条冲沟[图5(a)],直通山脚埃曲河。

(2)隧道入口处滑坡位于矮拉山隧道入口西侧,冲沟尽头,长度为240 m,宽度为120 m,坡向近似南北方向[图5(b)],滑坡中部LOS 形变速率达到24 mm·a<sup>-1</sup>,累计形变达到90 mm。该区域国道旁多处设有水泥防护墩,实地调查发现部分已受到冲击

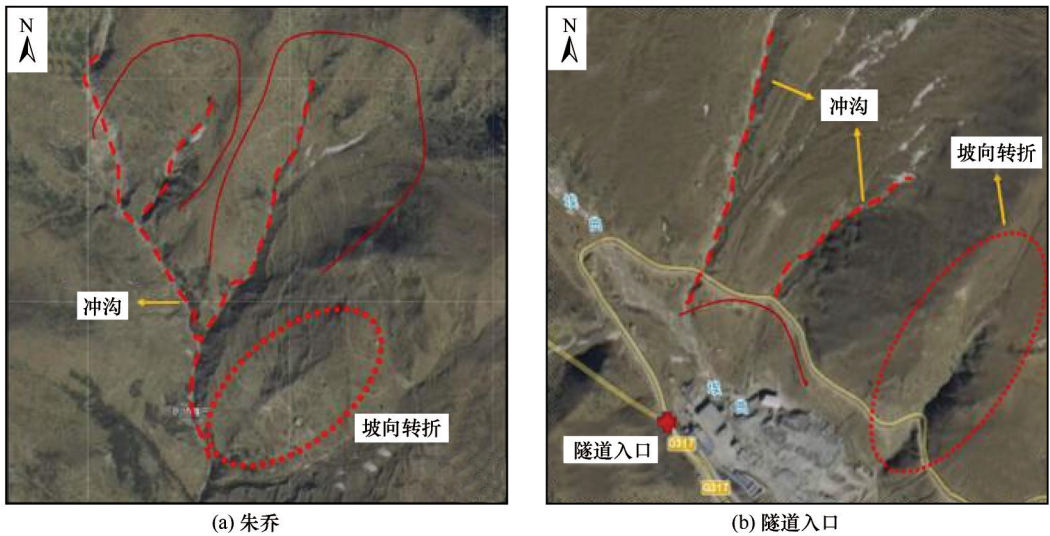


图5 滑坡卫星影像:朱乔(a);隧道入口(b)  
Fig. 5 Satellite image of landslides: ZhuQiao (a); tunnel entrance (b)

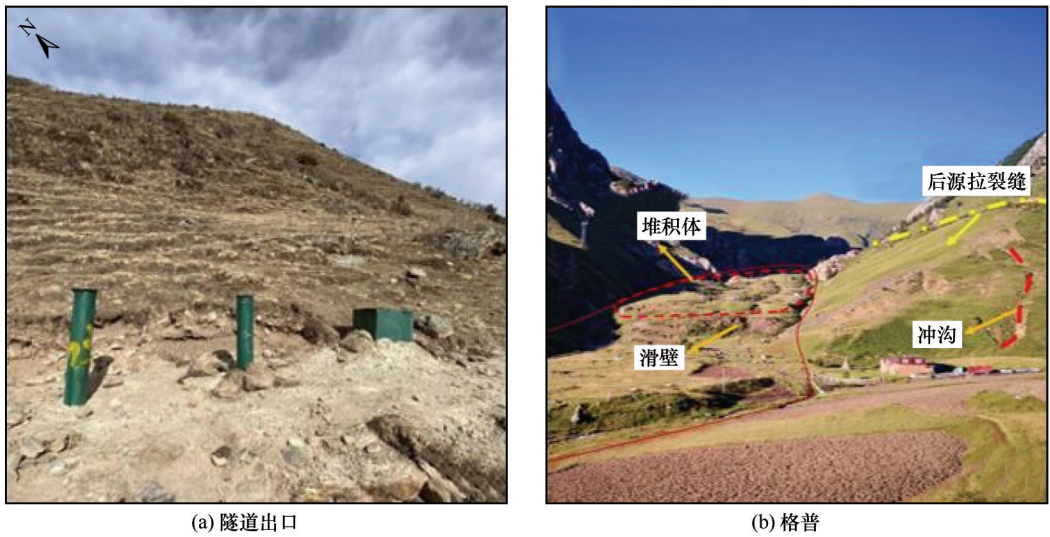


图6 滑坡现场照片:隧道出口(a);格普(b)  
Fig. 6 Field-investigation pictures of landslides: tunnel exit (a); GePu (b)

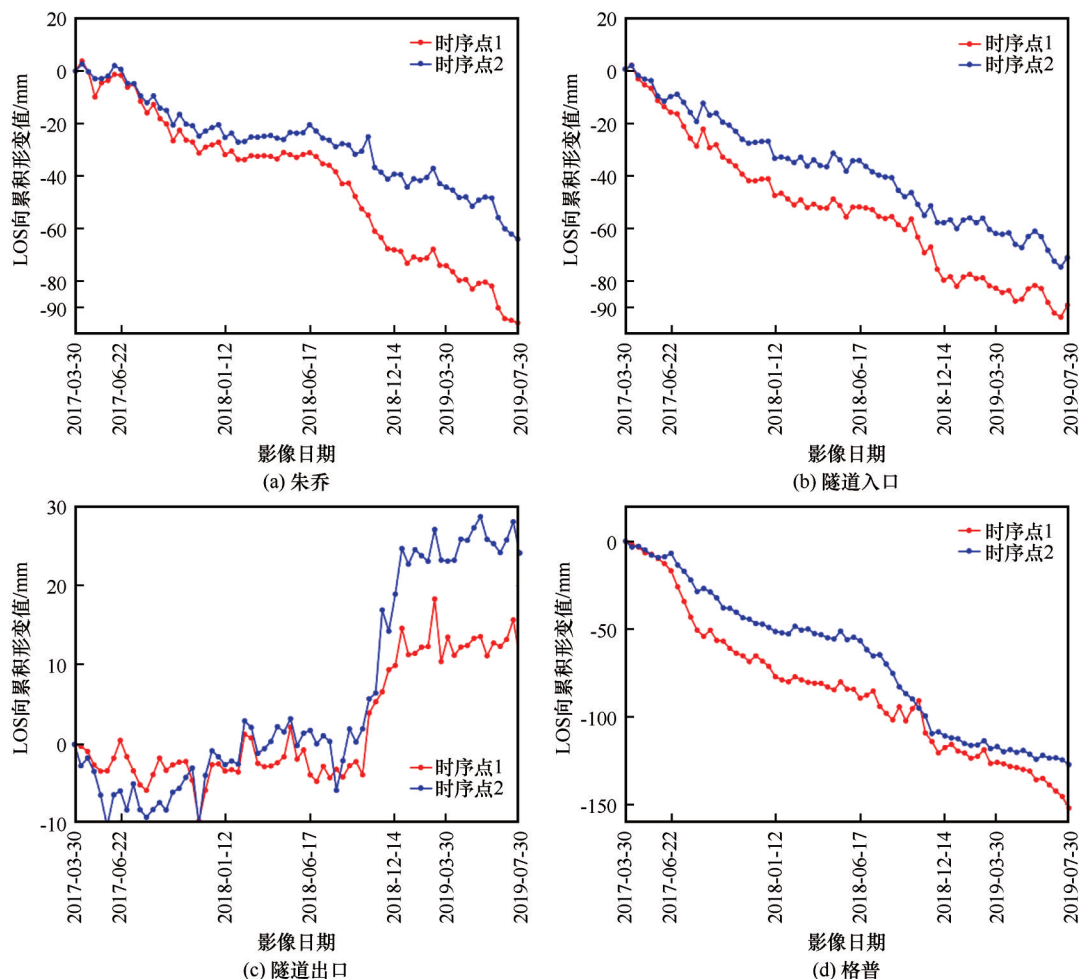


图7 典型滑坡 InSAR 形变时间序列: 朱乔(a); 隧道入口(b); 隧道出口(c); 格普(d)

Fig. 7 Time-series of InSAR-derived ground deformation of typical landslides: ZhuQiao (a); tunnel entrance (b); tunnel exit (c); GePu (d)

破坏。

(3) 隧道出口处滑坡为小型碎石滑坡, 图6(a)表明, 地表风化现象严重, 植被以草甸为主, 最大 LOS 向形变速率约  $20 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 具有突发性, 但变形相对较小[图7(c)]。

(4) 格普滑坡为牵引式堆积体滑坡, 两处形变坡体呈“八”字分布, 每一处长度为 600 m, 宽度为 350 m, 在 InSAR 结果, 最大 LOS 向形变速率为  $74 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。如图7(d)所示, 该滑坡变化期和稳定期存在明显分界线, 累计形变量最大超过 150 mm。现场发现该区域滑坡后缘存在明显张拉裂缝, 西侧伴有发育冲沟, 在谷底滑坡前缘存在松散堆积体[图6(b)]。

## 4 讨论

### 4.1 升、降轨 InSAR 形变的比较

星载 SAR 侧视成像产生的几何畸变不仅导致

在高山峡谷部分地区无法提取有效的结果, 而且也给升、降轨 InSAR LOS 向形变结果的解译带来挑战。如图8所示, 形变表现为靠近卫星还是远离卫星, 取决于坡面的朝向及坡度与入射角的大小, 因此同一目标的位移在升、降轨结果中 LOS 方向形变中可能相同, 也可能相反。另外, 当使用单一轨道数据处理时, 在阴影区会出现无法测量的情况, 因此在山区有必要联合升、降轨 InSAR 结果进行分析。

四处典型滑坡中, 朱乔、隧道入口处滑坡的具有相同的变化方向, 而隧道出口处、格普滑坡变化方向相反(图9)。从定量角度分析, 以格普滑坡为例, 坡向为西, 坡度范围处于  $10^\circ$  到  $30^\circ$  之间。Sentinel-1A 升轨数据飞行方向由南向北, 入射角为  $33.8^\circ$ 。由于坡面朝向卫星, 且坡度角小于卫星入射角, 因此沿坡面向下发生的形变在 LOS 向表现为接近卫星。当使用降轨数据时, 卫星由北向南飞行, 坡面背向卫星, 坡角小于卫星入射角余角, 此时为



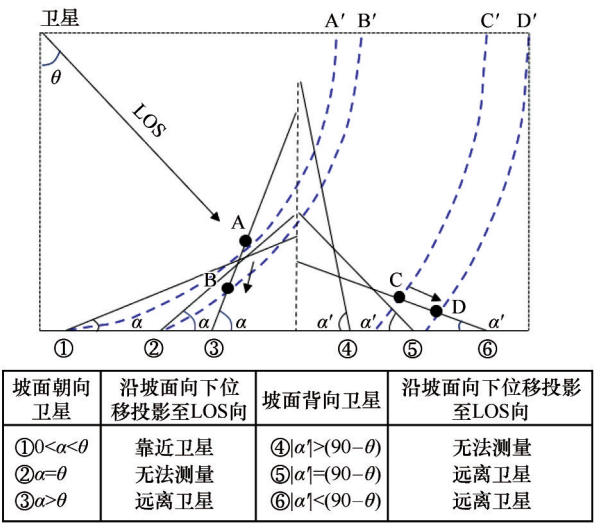


图8 卫星入射角(LOS)观测方向与沿坡向形变关系<sup>[26]</sup>  
Fig. 8 Relationships between the Line of Sight (LOS) and the downslope displacements for different slope orientations<sup>[26]</sup>

最佳观测情况,沿坡面向下的形变在LOS向表现为远离卫星<sup>[26]</sup>。

通常情况下,在青藏高原内陆多年冻土区<sup>[27]</sup>及城区<sup>[28]</sup>等地形平坦区域,同一系列卫星升、降轨 InSAR 结果具有较好一致性。但在藏东高山峡谷地区,由于形变大多位于具有一定坡度且坡向不同的斜坡处,在 SAR 卫星侧视成像及几何畸变影响下,难以通过分析升、降轨形变结果的相关性对两者的一致性做出评判。取决于卫星成像参数与坡体方向之间的几何关系,不同卫星、不同轨道数据,适用

坡体也不同,例如 Sentinel-1 卫星,升轨数据更适用于监测东坡向形变,而降轨数据适用于监测西坡向形变。

对于稳定区及地形平坦的区域,仍然可以通过对升、降轨结果进行交叉验证。而对于失衡斜坡,通过联合升、降轨数据进行反演形变,可以减少因几何畸变造成的观测盲区,有利于判断滑坡实际变化方向及形变序列的提取和分析,在提高滑坡监测识别准确度和覆盖度方面具有一定的应用价值。

4.2 温度和降雨对典型滑坡变形过程的影响

大量研究表明,斜坡失衡主要由降雨、地震、人为活动等外部因素诱发,而在冻土区,季节性冻融作用也是导致斜坡失衡的重要因素,且海拔越高,冻融作用将更加强烈<sup>[29]</sup>。

研究区地表形变普遍存在季节性变形信号特征,为了分析冻融作用对滑坡形变过程的影响,我们重点分析了格普、朱乔、隧道入口三处滑坡形变过程与温度、降水变化的关系。由图 10 可知,随着季节交替,冻融作用反复发生,三处滑坡形变过程呈现“阶梯下滑”形状,存在明显的平稳期和失稳期,与多年冻土地表形变“周期性”变化特征不同<sup>[30]</sup>。

平稳期主要出现在每年 10—11 月至来年 3—4 月,这段时间该地区处于冻结期,温度低于摄氏零度,降雨量普遍低于 20 mm,低温导致地下排水受阻加之气候干燥,在无地震及人类活动影响下,地表保持稳定状态(图 10)。

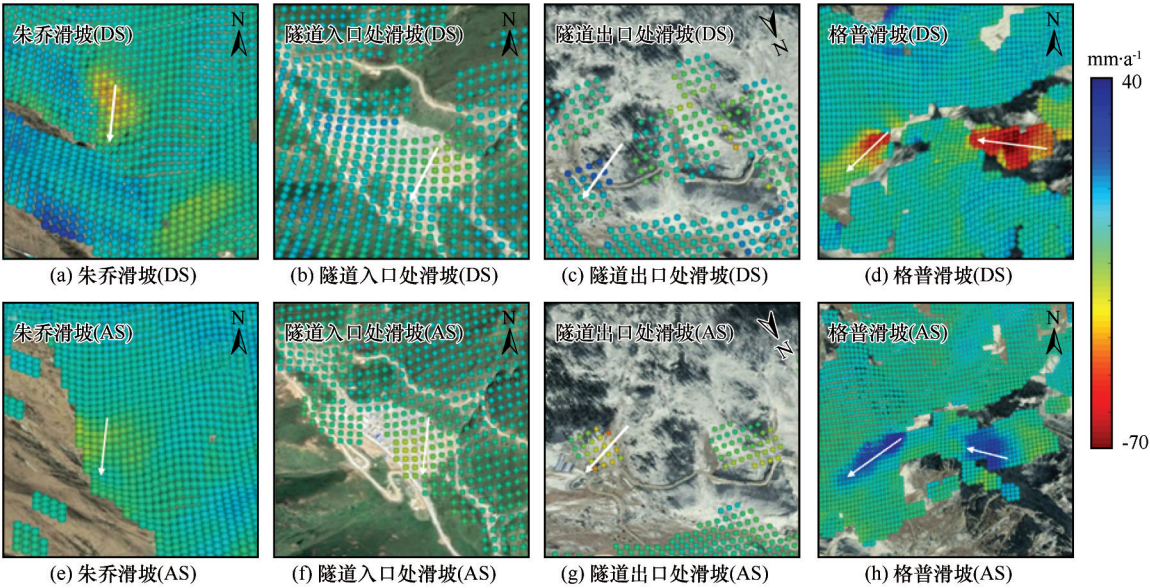


图9 典型滑坡升、降轨 InSAR 形变特征对比  
Fig. 9 Comparison of deformation characters of typical landslides along different radar LOS directions



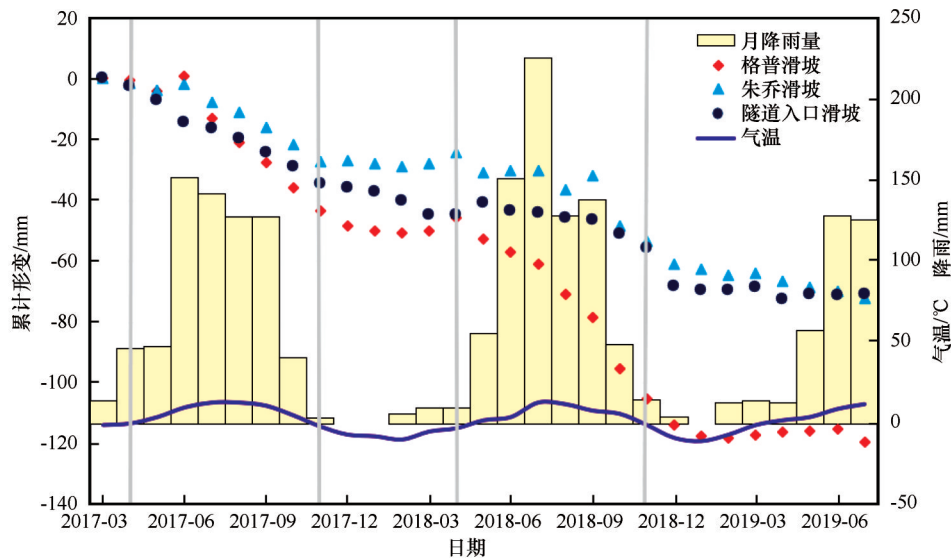


图 10 三个典型滑坡形变过程与气温、降雨的关系(灰色线为零度上下分界线)

Fig. 10 Correlation between landslide deformation and meteorological factors (grey lines are the boundary of the zero degree)

图 10 表明失稳期主要出现在春夏季(4—9月),呈现两个时段的持续变形,均始发于每年的 3 月下旬,最低温度开始从零下转为零上,此时降雨量低于 30 mm,且降雪较少,因此排除降水和融雪作用,冻土融化是诱发滑坡变形的主要因素,其诱发机理为“季节性冻结滞水促滑效应”<sup>[31]</sup>;冻结作用使斜坡内地下水聚集滞留,导致坡体内含水层扩大,增大了斜坡区静、动水压力,影响斜坡土体强度和稳定性<sup>[32]</sup>;当气温持续上升进入解冻期,土体软化,地下水自由流通产生侵蚀作用,从而导致斜坡失衡破坏<sup>[33]</sup>;随着降雨增加,一方面给地面带来额外热量,使冻土进一步融化,另一方面外部水分补给渗透,起到润滑作用,导致坡体形变速度加快,当累计降雨达到最大时,具有最大形变速度。

藏东高山峡谷区气候具有雨热同期的特点,在降雨和冻融共同作用下,相比青藏高原内陆冻土区,该地区滑坡变形失稳机制更为复杂<sup>[34]</sup>,冻融作用对滑坡变形的影响还需进一步研究。另外,同一处滑坡每年的变化趋势并不相同,这也是此类滑坡预测分析的难点。

## 5 结论

本文以青藏高原东部 317 国道矮拉山地区为例,利用 SBAS-InSAR 技术和 55 景升轨、69 景降轨 Sentinel-1A SAR 数据,提取了 2017—2019 年该地区升降轨 InSAR 地表形变信息,据此获取了该地区冻融滑坡体隐患的空间分布情况,并分析讨论了滑

坡历史形变演化特征及影响因素。主要结论如下:

(1) 研究区整体处于稳定状态( $-10 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ),但存在部分明显形变区,主要形变区集中于山谷河流两侧,其 LOS 向形变速率极值达到  $-78 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 对比分析升降轨 InSAR 地表形变范围、速率及形变序列,发现多处滑坡隐患,分别位于格普、矮拉山隧道出入口、朱乔,通过光学影像判读和实地调查验证了 InSAR 结果的可靠性。

(3) 冻融滑坡形变过程呈现平稳期和失稳期交替出现的季节性变化特征,主要受冻融与降雨的综合影响,但具体作用机制还需进一步研究。

本文验证了升降轨时序 InSAR 在高山峡谷冻土区滑坡大范围监测识别方面的有效性,可为此类地区滑坡灾害隐患的早期识别与监测防治提供重要参考。但受植被和积雪的影响,InSAR 失相干导致部分地区的形变信号难以准确提取,随着今后国内外 L 波段 SAR 卫星(如我国“陆探一号”、美国 NISAR)的发射,将为植被和积雪地区地表形变监测提供更加可靠、丰富的研究资料。未来有必要加强滑坡三维形变反演及冻融和降雨影响的研究,更好地揭示冻融滑坡形变模式和形成机理。

## 参考文献(References):

- [1] Hao Junming, Wu Tonghua, Li Ren, et al. A case study on earthflow in Yushu, Qinghai Province on the northeastern Tibetan Plateau: landslide features and cause analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 447-456. [郝君明, 吴通华, 李韧, 等. 青藏高原东北部青海玉树泥石流

- 滑坡特征和成因分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 447-456.]
- [2] Cheng Guodong. Interaction between Qinghai-Tibet Railway engineering and permafrost and environmental effects[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(1): 21-25. [程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(1): 21-25.]
- [3] Zhang Yadi, Li Yidong, Dong Jie, et al. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(5): 987-996. [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.]
- [4] Liao Mingsheng, Zhang Lu, Shi Xuguo, et al. Methods and Practice of Radar Remote Sensing Monitoring of Landslide Deformation[M]. Beijing: Science Press, 2017: 2-4. [廖明生, 张路, 史绪国, 等. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 2-4.]
- [5] Zhou Zhenkai, Yao Xin, Liu Hongyan, et al. Accurate identification of active landslides in region composed with glacier, forest, steep valley: a case study in the lantsang meili snow mountain section [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 61-74. [周振凯, 姚鑫, 刘红岩, 等. 冰川密林陡谷区活动性滑坡 InSAR 精细识别——以澜沧江梅里雪山段为例[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 61-74.]
- [6] Delacourt C, Allemand P, Casson B, et al. Velocity field of the “La Clapière” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(15): L15619.
- [7] Liao Mingsheng, Lin Hui. Synthetic aperture radar interferometry: principle and signal processing [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003: 2-4. [廖明生, 林晖. 雷达干涉测量: 原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003: 2-4.]
- [8] Colesanti C, Ferretti A, Prati C, et al. Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique [J]. Engineering Geology, 2003, 68(1/2): 3-14.
- [9] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [10] Chen Yuxing, Jiang Liming, Liang Linlin, et al. Monitoring permafrost deformation in the upstream Heihe River, Qilian Mountain by using multi-temporal Sentinel-1 InSAR dataset [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(7): 2441-2454. [陈玉兴, 江利明, 梁林林, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的黑河上游冻土形变时序 InSAR 监测[J]. 地球物理学报, 2019, 62(7): 2441-2454.]
- [11] Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, Zhang Qin, et al. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 996-1007. [赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 996-1007.]
- [12] Dai Keren, Zhuo Guanchen, Xu Qiang, et al. Tracing the pre-failure two-dimensional surface displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with radar interferometry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(12): 1778-1786. [戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1778-1786.]
- [13] Lu Huiyan, Li Weile, Xu Qiang. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige Landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(9): 1342-1354. [陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342-1354.]
- [14] 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. [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.]
- [15] Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and modeling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry[J]. Tectonophysics, 1996, 265(3/4): 181-190.
- [16] Guo Rui, Li Sumin, Chen Ya'nan, et al. Identification and monitoring landslides in Longitudinal Range-Gorge Region with InSAR fusion integrated visibility analysis [J]. Landslides, 2021, 18(2): 551-568.
- [17] Dai Keren, Li Zhenhong, Tomás R, et al. Monitoring activity at the Daguanbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 501-513.
- [18] Torres R, Snoeijs P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 9-24.
- [19] Zhe Xiangyi, Li Xiangning. Changdu area along the 317 national highway rock mass stability analysis [J]. Building World, 2013(18): 171-171. [折向毅, 李香凝. 昌都地区 317 国道沿线岩土体稳定性分析[J]. 建筑界, 2013(18): 171-171.]
- [20] Wang Xian. Study on comprehensive exploration technology for new Aila Mountain tunnel of No. 317 National Highway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. [王献. 国道 317 线新建矮拉山越岭隧道综合勘探技术应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.]
- [21] 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.
- [22] Liao Mingsheng, Wang Teng. Time series InSAR technology and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2014: 83-86. [廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社. 2014: 83-86.]
- [23] 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. [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.]
- [24] Hao Junming, Wu Tonghua, Wu Xiaodong, et al. Investigation of a small landslide in the Qinghai-Tibet Plateau by InSAR and absolute deformation model [J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 2126.
- [25] Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, 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. [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(07): 967-979. ]
- [26] 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. [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. ]
- [27] Chen Yuxing. Permafrost monitoring with SAR/InSAR techniques: a case study in the Qilian Mountain region over the upper reaches of the Heihe River basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. [陈玉兴. SAR/InSAR 技术在多年冻土监测中的应用研究——以黑河上游祁连山区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. ]
- [28] Wang Yan, Ge Daqing, Zhang Ling, et al. Inter-comparison and time series fusion of ascending and descending PSInSAR data for land subsidence monitoring [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(4): 125-130. [王艳, 葛大庆, 张玲, 等. 升降轨 PSInSAR 地面沉降监测结果的互检验与时序融合[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 125-130. ]
- [29] Tie Yongbo, Bai Yongjian, Song Zhi. Damage types and hazards effects from freezing-thawing process in plateau of western Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 241-245. [铁永波, 白永健, 宋志. 川西高原的岩土体的冻融破坏类型及其灾害效应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 241-245. ]
- [30] Li Shanshan, Li Zhiwei, Hu Jun, et al. Investigation of the Seasonal oscillation of the permafrost over Qinghai-Tibet Plateau with SBAS-InSAR algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1476-1486. [李珊珊, 李志伟, 胡俊, 等. SBAS-InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1476-1486. ]
- [31] Wu Weijiang. Slide accelerated by water entrapment due to seasonal freezing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 71-77. [吴玮江. 季节性冻结滞水促滑效应——滑坡发育的一种新因素[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 71-77. ]
- [32] Wang Nianqin, Yao Yong. Characteristics and mechanism of landslides in loess during freezing and thawing periods in seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 163-166. [王念秦, 姚勇. 季节冻土区冻融期黄土滑坡基本特征与机理[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 163-166. ]
- [33] Wu Weijiang. Seasonal freeze-thaw action and the entire deformation, failure of slope[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(4): 59-64. [吴玮江. 季节性冻融作用与斜坡整体变形破坏[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(4): 59-64. ]
- [34] Deng Jianhui, Dai Fuchu, Wen Baoping, et al. Investigation on the catastrophic mechanism and risk control measures of major landslides in Tibetan Plateau[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 1-8. [邓建辉, 戴福初, 文宝萍, 等. 青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 1-8. ]



## Monitoring landslides in seasonal frozen regions in eastern Tibet with InSAR : a case study in Aila Mountain section of National Highway 317

JIAO Zhiping<sup>1,2</sup>, JIANG Liming<sup>1,2</sup>, NIU Fujun<sup>2,3</sup>, GUO Rui<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhiwei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Due to the effects of climate warming, wetting, freezing and thawing, landslides occur frequently in eastern Tibet in recent years, which poses a serious threat to the safety of people's lives and property safety and restricts the local economic and social development. Therefore, an effective method of large-scale landslides hazards investigation and early identification is required urgently. In this study, using Small Baseline Subset (SBAS) InSAR method and sentinel-1A ascending and descending SAR images acquired from March 2017 to July 2019, the surface deformation and distribution of landslide hazards in this area is achieved, and the characteristics of historical deformation evolution and causes of landslide are investigated as well. The results show that: (1) Most of the areas are relatively stable, and the potential landslide hazards mainly concentrate on both sides of the valley. The accuracy and coverage of landslide monitoring and identification are improved by combining ascending and descending InSAR. (2) The deformation process of the freeze-thaw landslide is different from that of the rainfall-induced landslide, showing the seasonal variation characteristics of the stable and the instable period alternatively. (3) The deformation development is mainly affected by freeze-thaw and rainfall process, and both of them accelerate the slope displacement. The results suggest that InSAR technology can be an effective alternative for the shortcomings of traditional monitoring methods, and can play an important role in the early identification, monitoring and prevention of landslide hazards in alpine permafrost regions.

**Key words:** freeze-thaw action; landslide monitoring; multi-temporal InSAR; eastern Tibet

(责任编辑: 陈晓清; 编辑: 周成林)