

# 基于 SBAS-InSAR 技术的高原地区冰湖堆积体稳定性分析

魏松<sup>1</sup>, 韦志远<sup>2</sup>, 路涵裕<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福州 350003)

**摘要:** 冰湖作为陆地水体的重要组成部分, 能对气候变化做出较敏感的反应, 溃决后将对生态和人们财产安全造成严重威胁。获取覆盖监测区近 3 a 来的 73 景 Sentinel-1 升轨数据, 采用 SBAS-InSAR (短基线干涉测量技术) 对监测区 13 个较大的冰湖堆积体进行形变监测。结果表明: 监测区绝大部分地方形变速率为  $-10 \sim 20$  mm/a, 极少部分地方形变速率较大, 监测区整体处于稳定状态; 冰湖 L9 和 L10 周围有少量大于 30 mm/a 的形变点, 结合典型形变点时序分析结果, 堆积体近 1 a 多来累积形变量发生了收敛, 最终累积形变量较小, 稳定性较好, 其余冰湖堆积体形变较小, 稳定性较好。研究成果可对该区域生态环境保护及防灾减灾方面提供一定的参考。

**关键词:** 冰湖堆积体; SBAS-InSAR; 形变监测; 稳定性

**中图分类号:** X83; X87; X4 **文献标识码:** A

## STABILITY ANALYSIS OF GLACIAL LAKE DEPOSITS IN PLATEAU AREA BASED ON SBAS-INSAR TECHNOLOGY

WEI Song<sup>1</sup>, WEI Zhi-yuan<sup>2</sup>, LU Han-yu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Huadong Engineering Corporation Limited, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** As an important part of terrestrial water bodies, glacial lakes can respond more sensitively to climate change, which will pose a serious threat to ecology and people's property safety after outburst. 73 Sentinel-1 ascending orbit data covering the monitoring area in the past three years were obtained, and SBAS-InSAR (small baseline interferometry) was used to monitor the deformation of 13 large glacial lake deposits in the monitoring area. The results show that the deformation rate of most parts of the monitoring area is  $-10 \sim 20$  mm/a, and the deformation rate of a few parts is large, and the monitoring area is in a stable state as a whole. There are a small number of deformation points greater than 30 mm/a around L9 and L10 in the glacial lake. Combined with the results of time series analysis of typical deformation points, the cumulative deformation of the accumulation body has converged in the past more than one year. Finally, the cumulative deformation is small and the stability is good. The remaining glacial lake deposits have small deformation and good stability. The research results can provide some reference for ecological environment

protection and disaster prevention and mitigation in the region.

**Key words:** glacial lake deposit; SBAS-InSAR; deformation monitoring; stability

## 1 引言

冰湖是指在冰川融化的过程中所形成的湖泊,通常位于冰川表面或内部,是气候变化与冰川消融的指示器<sup>[1-4]</sup>。冰湖的大小不一,从小型的池塘到大型的湖泊都有,有些甚至比一些城市的地理面积还要大<sup>[5-6]</sup>。随着全球气候变暖加剧,冰川融化速度加快,冰湖数量也在不断增加<sup>[7]</sup>。由于冰湖的融化速度过快,使得冰川变得不稳定,可能会引发滑坡、洪水等自然灾害,西藏地区 90 多年来共发生了近 30 次冰湖溃决事件,且进入 21 世纪后,发生的频率愈加频繁<sup>[8-9]</sup>。因此冰湖的稳定性对于保障人们生命财产安全和生态环境稳定来说具有重要的意义。

冰湖多分布在海拔较高、地势较陡的地方,难以进行现场的实地考察,在该类地区飞无人机也有信号差、风大易丢失等困难,而合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)具有测量精度高、能全天时全天候工作、时空分辨率高、经济高效、观测范围大等特点,因此 InSAR 技术在此类地区的运用较为广泛<sup>[10-11]</sup>。InSAR 是对 SAR 技术的一种扩展,其工作原理是利用 SAR 对相同地区拍摄两幅影像,经过干涉获得该区域的干涉条纹图,干涉条纹图中则包含该区域的地形信息,可以得出地表及其下方的物质形变、地表形态、地形等<sup>[12-13]</sup>。科技的进步也推动着 InSAR 技术的快速发展,人们在 D-InSAR 的基础上提出了永久散射体干涉测量(PS-InSAR)、短基线集干涉测量等,在地面沉降监测<sup>[14-16]</sup>、滑坡变形监测<sup>[17-18]</sup>、线路变形监测<sup>[19-20]</sup>等方面取得了较多成果。

因此,针对研究区海拔高、地形陡等困难,获取了近 3 a 来期间覆盖研究区的哨兵一号(Sentinel-1) 73 景升轨数据,使用 SRTM-1V3 分辨率为 30 m 的数字高程模型(DEM)作为参考,采用 SBAS-InSAR 技术对其进行形变监测,得到了研究区近 3 a 来冰湖堆积体的变形特征。

## 2 研究区概况与研究数据

### 2.1 研究区概况

本次冰湖堆积体形变监测区位于西藏自治区山南市一带,工作区范围为:地理坐标位于东经 91°07'24.86"~91°17'00.52"、北纬 27°58'43.04"~28°05'46.73"之间,面积约 170 km<sup>2</sup>,如图 1 所示。

监测区范围内分布有大大小小的冰湖达 20 多处,但限于文章篇幅,在此处仅研究周长在 800 m 以上的冰湖,共有 13 个,各冰湖所在海拔较高,均在 4 000 m 以上,其中冰湖 L6 最大,周长近 4 km,面积达 0.636 km<sup>2</sup>,各冰湖详细信息见表 1。

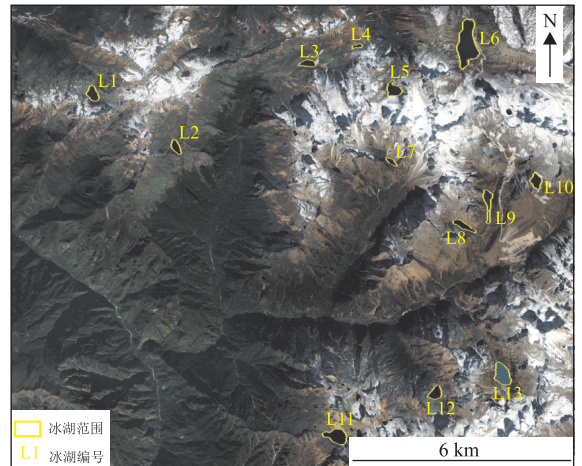


图 1 研究区及冰湖分布图

表 1 各冰湖基本信息

编号	周长/m	面积/km <sup>2</sup>	高程/m
L1	1 337	0.115	4 313
L2	1 161	0.080	4 286
L3	1 215	0.079	4 271
L4	848	0.030	4 544
L5	1 656	0.138	4 691
L6	3 857	0.636	4 630
L7	900	0.041	4 517
L8	1 661	0.095	4 590
L9	2 251	0.132	4 595
L10	1 348	0.106	4 875
L11	1 793	0.181	4 330
L12	1 245	0.097	4 300
L13	1 792	0.201	4 630

### 2.2 SAR 数据来源

本次监测数据来源于欧空局 Sentinel-1A 雷达卫星数据,该卫星于 2014 年 4 月发射升空,与 2016 年 4 月发射升空的 Sentinel-1B 卫星组成双星伴飞的模式,从而将重访周期从原来的 12 d 缩短到 6 d。其 IW 模式能够增强成像辐射性且形变探测能力更强。影像分辨率为 20 m×5 m,选取升轨时间跨度为 2020 年 3 月 10 日~2023 年 3 月 31 日,共 73 景影像,数据覆盖情况如图 2 所示。

使用 SRTM-1V3 分辨率为 30 m 的数字高程模

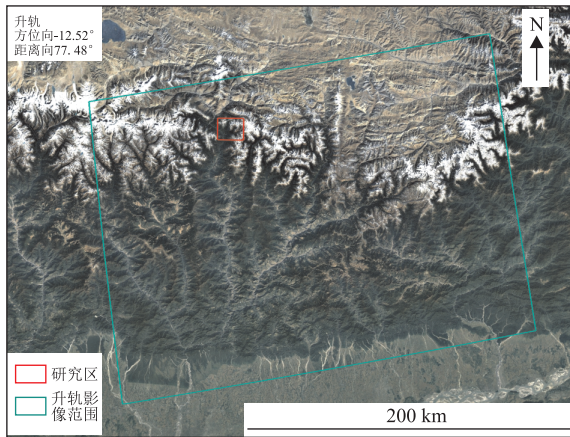


图2 研究区数据覆盖情况

型(DEM)作为参考,该数据是 NASA 对地卫星 Terra 所生成的,其数据覆盖范围十分广阔,包含了地球上几乎所有陆地表面。同时本研究在处理 Sentinel-1A 数据之前,下载与影像日期一一对应的精密轨道文件,以去除因轨道误差所产生的系统误差。

### 3 数据处理方法

#### 3.1 SBAS-InSAR 原理及特点

SBAS-InSAR(Small Baselines Subset InSAR)方法的命名来自于其基线配置方面的考虑:短基线,即最小化时间、视角方面的差异,以最大限度地减小去相关和程误差的影响,这也是其与 PS-InSAR 的最主要区别。与 PS-InSAR 的区别还在于预滤波及多视处理。

其基本原理是把互相独立的 SAR 影像连接起来,组成短基线 SAR 影像数据的集合,由此来提高数据获取的采样率,然后可在已有的集中构成许多小集合,各个小集合中影像之间的基线比较短,但是各个集合之间影像的基线比较长。通过最小二乘法求出每个小子集中的地表变化情况。SBAS 技术不但使地面形变监测的时间分辨率得到了提高,而且可以获得较长时间内、地面缓慢形变的演变规律。基于 SBAS-InSAR 的这些特点,我们常常在建筑稀少的地方,即山区等使用该方法进行形变监测,而 PS-InSAR 多用于城市地表沉降的监测。

#### 3.2 关键参数设置

采用 SBAS-InSAR 技术开展数据处理,时空基线参数的设置是最为重要的,对于试验区而言,因相干性好的点不多,则应当选择恰当的空间范围。依据多次试验结果,最终选择降轨时间基线为 60 d,空间基线为临界基线的 5%,选择 2022/6/28 影像为

超级主影像,共生成 217 组干涉对(图 3 和图 4)。

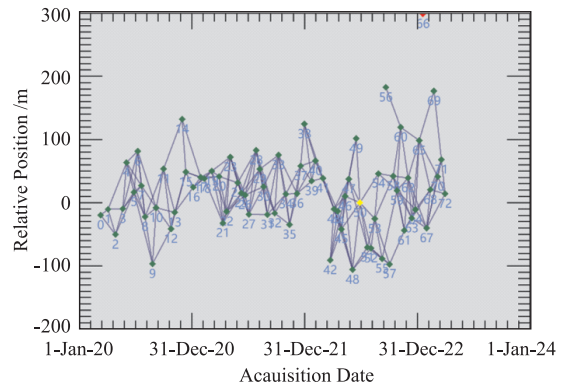


图3 影像时间连接图

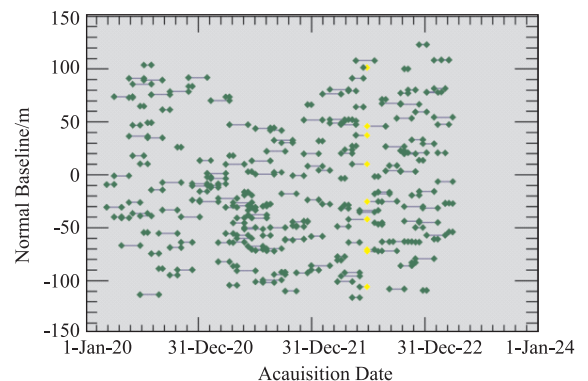


图4 影像空间连接图

相干性的处理及相位解缠等工作叫做干涉 workflow,其目的是对已配对的干涉影像作干涉处理,超级主影像将会与所有辅助影像进行配准,以便为后续 SBAS 反演等步骤做准备。设置多视的视数是干涉中较为重要的一步,合理的视数可缩短计算时间,也可提高干涉图信噪比。此处设置为 4 : 1。制图分辨率为 15 m,解缠方法为 Minimum Cost Flow,解缠相干性阈值为 0.3,滤波方法为 Goldstein。升轨高程精度阈值为 10 m,速率精度阈值为 16。

## 4 冰湖堆积体 InSAR 形变监测结果分析

#### 4.1 全区形变特征分析

通过对监测区 SAR 数据影像进行分析处理,结果可得整个研究区域 LOS 向的年均形变速率,监测区全区卫星影像年均形变速率如图 5 所示,正值表示形变靠近 SAR 传感器视线方向,负值表示远离。从监测区整体形变速率分布图来看少部分区域形变较大,形变速率在  $-102 \sim -30$  mm/a 和  $30 \sim 100$  mm/a,绝大部分形变量较小,形变速率处于  $-30 \sim 30$  mm/a,表明监测区整体处于稳定状态。

图中红色线条区域为冰湖所在位置,为便于分析,将整个监测区分为 4 个大小相等的区域,由于冰湖在南西区域没有分布,故不对该区域进行命名,将其余区域命名为 A、B、C 此 3 个区域。冰湖 L1 和 L2 分布在 A 区,冰湖 L3~L10 分布在 B 区域,冰湖 L11~L13 分布在 C 区。从图中可得知冰湖 L6~L10 及 L13 位于海拔较高处,周围形变点较多,但大多点的形变速率较小,稳定性较好。

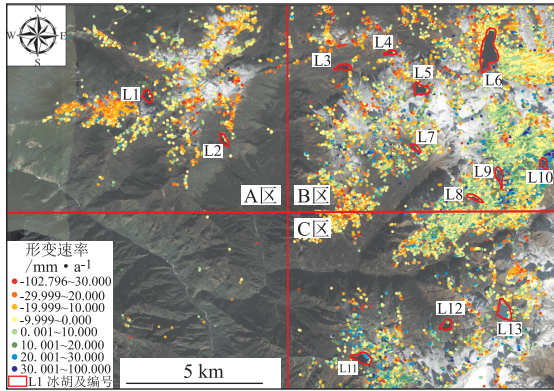


图 5 研究区分区及年均形变速率结果图(LOS 向)

#### 4.2 各区域形变特征及时序分析

A 区位于监测区北西侧,面积约 40 km<sup>2</sup>,海拔位于 3 449~4 672 m,地形较为起伏,植被较多,但均为低矮的草本植物,区内分布有两个冰湖 L1 和 L2。

升轨时序 InSAR 监测结果显示,该区域在 2020 年 3 月至 2023 年 3 月内存在持续形变(图 6),形变大多分布在海拔较高有冰雪覆盖的地方,冰湖 L1 和 L2 周围变形点较少。根据升轨 SBAS-InSAR 监测结果,在冰湖 L1 和 L2 周围分别选取一处典型形变点并绘制其历史形变结果(图 7),A1<sup>#</sup> 和 A2<sup>#</sup> 累计形变量大小相差不大,最大累计形变量分别为 62.8 mm 和 -43.8 mm,年均形变速率为 -9.9~0 mm/a 和 -29.9~-20 mm/a,A2<sup>#</sup> 点变形速率较大。

由于 SAR 传感器是侧视系统,向 SAR 传感器方向发生形变时值为正,远离时值为负。本次研究所用升轨 SAR 传感器影像视线向在地面投影方向为 NE77.48°,A1<sup>#</sup> 形变点沿雷达视线向(LOS 向)累计形变量均为负值,即远离 SAR 传感器,表明该形变点所在地表向 NE77.48°方向发生了位移,而冰湖 L1 地表坡向为 NE 向,则该冰湖堆积体产生了沿斜坡向上的较小形变;A2<sup>#</sup> 形变点形变为正值,表明该形变点所在地表向 SW77.4°方向发生了位移,而冰湖 L2 地表坡向为 SE 向,则堆积体产生了沿斜坡

向下的较小形变。但这两个点的形变均较小,对冰湖整体的稳定性影响不大。

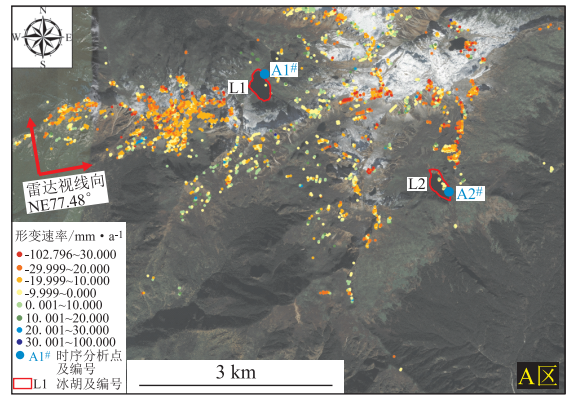


图 6 A 区年均形变速率及时序形变监测点分布

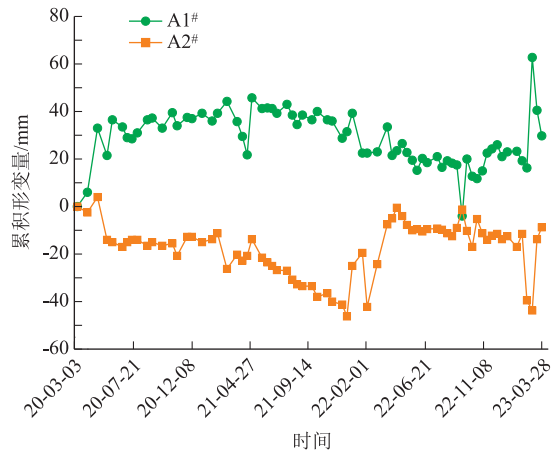


图 7 A1<sup>#</sup>、A2<sup>#</sup> 监测点时序形变曲线

B 区位于监测区北东侧,面积约 42 km<sup>2</sup>,海拔位于 4 280~5 436 m,地形较起伏,区内大多为高海拔地区,冰雪覆盖范围大,形变点多,区内分布有冰湖 L3~L10。

升轨时序 InSAR 监测结果显示,该区域在 2020 年 3 月至 2023 年 3 月内存在持续形变(图 8),形变大多分布在海拔较高有冰雪覆盖的地方,冰湖 L5~L10 周围变形点多。其中冰湖 L6、L9 和 L10 周围形变速率大的点分布最多,说明这几个冰湖堆积体在这 3 a 来形变较大。冰湖 L3~L5 及 L7 周围形变点较少,形变速率较小,这几个冰湖堆积体稳定性较好。冰湖 L6 周围形变速率大多为 -29.9~-10.0 mm/a,少部分形变较大,表明该形变点所在地表向 NE77.48°方向发生了位移,结合该冰湖地表坡向为 NW 向,可知此冰湖堆积体产生了沿斜坡向下较小的形变。L8~L10 周围形变速率点多,速率多为 0~30 mm/a,其中 L9 和 L10 有大于 30 mm/a 的形变点,表明形变点所在地表向 SW77.4°方向发

生了位移,结合该地地表坡向为 NW 向,可知 L8~L10 堆积体产生了沿斜坡向下的形变,其中 L9 和 L10 堆积体的形变较大。

根据升轨 SBAS-InSAR 监测结果,在各冰湖周围分别选取一处典型形变点并绘制其历史形变结果(图 9~图 10),B1#~B4# 监测点的累积形变量为负值,其中 B4# 最大形变量可达-70 mm,表明冰湖 L6 堆积体形变较大,而冰湖 L3~L5 形变较小。截止至 2023 年 3 月,B5#~B8# 监测点最终累积形变为正值,B7# 和 B8# 形变变化较大,这也与该处形变速率较大相符。总的来看,几乎所有监测点都在 2022 年 2 月形变发生了突变,推测可能是由于此时气温低,冰雪堆积所导致。该区冰湖 L6、L9 和 L10 堆积体在最近 3 a 形变速率较大,但最终累积形变量不大,稳定性在发生变化,但仍处于较稳定状态,其余冰湖形变较小,稳定性较好。

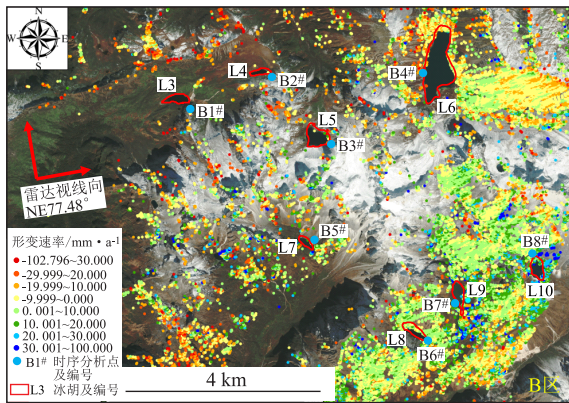


图 8 B 区年均形变速率及时序形变监测点分布

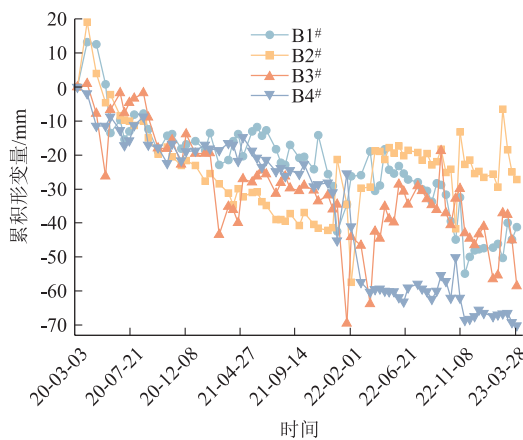


图 9 B1#~B4# 监测点时序形变曲线

C 区位于监测区南东侧,面积约 40 km<sup>2</sup>,海拔位于 3 214~5 174 m,该区域海拔落差较大,冰雪覆盖多,形变点一般,分布有 3 个冰湖 L11、L12 和 L13。

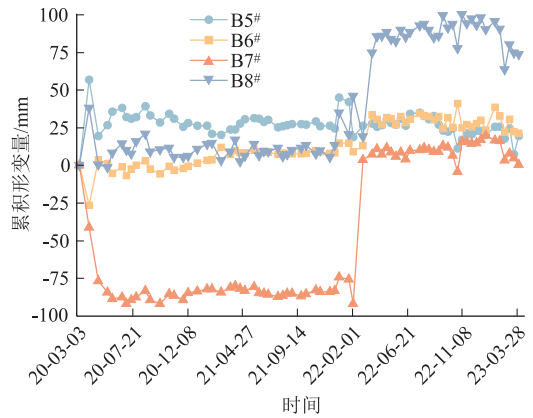


图 10 B5#~B8# 监测点时序形变曲线

升轨时序 InSAR 监测结果显示,该区域在 2020 年 3 月至 2023 年 3 月内存在持续形变(图 11),形变大多分布在海拔较高及有冰雪覆盖的地方,3 个冰湖周围变形点分布均一般。冰湖堆积体形变速率为-20~20 mm/a,变形较小。

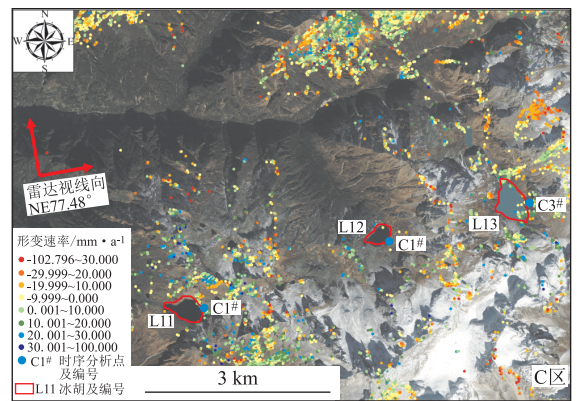


图 11 C 区年均形变速率及时序形变监测点分布

根据升轨 SBAS-InSAR 监测结果,在冰湖 L11、L12 和 L13 周围分别选取一处典型形变点并绘制其历史形变结果(图 12),C1# 和 C2# 最终累计形变量大小相差不大,最终累积形变量为-1.2 mm

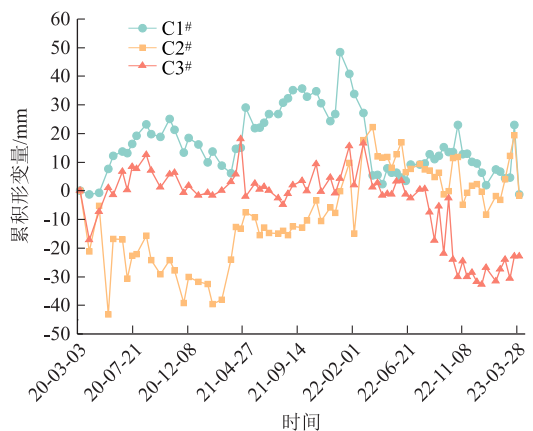


图 12 C1#~C3# 监测点时序形变曲线

和-1.6 mm,最大累计形变量分别为48.4 mm和-39.6 mm,C3#点最终累积形变量稍大,为-22.8 mm。总的来看,3处典型形变点的形变量和形变速率均较小,表明冰湖L11~L13堆积体在最近3a稳定性较好,3处形变点在2021年2月开始有较为明显的形变增大的现象,表明此时有地表累积现象发生,推测应是此时气温低冰雪沉积所导致。

## 5 结论

获取监测区2020年3月至2023年3月共73景Sentinel-1升轨数据,利用SBAS-InSAR技术对监测区13处较大冰湖堆积体进行形变监测,主要得出以下结论:

(1) 监测区绝大部分地方形变速率较小,形变速率为-10~20 mm/a,表明监测区整体处于稳定状态。

(2) A区分布有冰湖L1和L2,周围形变点少,在其周围分别选取一典型形变点绘制历史形变量,得出最终累计形变量和形变速率均较小,这两个冰湖堆积体稳定性较好。

(3) B区分布有冰湖L3~L10,冰湖L3~L5及L7周围形变点较少,形变速率较小,稳定性较好;冰湖L6和L8~L10周围形变点较多,冰湖L6周围形变速率大多为-29.9~-10.0 mm/a,形变较小;L8~L10周围形变速率多为0~30 mm/a,其中L9和L10有大于30 mm/a的形变点,表明形变点所在地表向SW77.4°方向发生了位移,结合该地地表坡向为NW向,可知L8~L10堆积体产生了沿斜坡向下的形变,其中L9和L10堆积体的形变较大。结合典型形变点时序分析结果,L9和L10冰湖堆积体最终累积形变量不大,稳定性虽不断变化但仍处于较稳定状态。

(4) C区分布有冰湖L11~L13,3个冰湖周围变形点分布均一般,冰湖堆积体形变速率为-20~20 mm/a,变形较小,表明冰湖堆积体稳定性较好。

## 参考文献

[1] 姚晓军,刘时银,韩磊,等.冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J].地理学报,2017,72(7):1173-1183.

[2] 殷永胜,王欣,刘时银,等.1990~2020年中国冰湖变化特征及影响因素[J].湖泊科学,2023,35(1):358-367.

[3] 马荣华,杨桂山,段洪涛,等.中国湖泊的数量、面积与空间分布[J].中国科学:地球科学,2011,41(3):394-401.

[4] Liu J, Cheng Z, Su P. The relationship between air temperature fluctuation and glacial lake outburst floods in Tibet, China[J]. Quaternary International, 2014, 321(2):78-87.

[5] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2000, 65/66: 31-47.

[6] 王欣,刘时银,姚晓军,等.我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目[J].地理学报,2010,65(1):29-36.

[7] 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.

[8] 孙美平,刘时银,姚晓军,等.2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害[J].冰川冻土,2014,36(1):158-165.

[9] 姚晓军,刘时银,孙美平,等.20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J].自然资源学报,2014,29(8):1377-1390.

[10] 周春霞,鄂栋臣,廖明生. InSAR用于南极测图的可行性研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(7):619-623.

[11] Zheng Z, Xie C, He Y, et al. Monitoring Potential Geological Hazards with Different InSAR Algorithms: The Case of Western Sichuan[J]. Remote Sensing, 2022, (14):2049.

[12] 余华芬,吴迪,汪建光,等.基于InSAR的地质灾害早期识别与监测技术研究[J].地理空间信息,2023,21(3):44-48.

[13] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966.

[14] 郭炳跃,何敏,刘建东.利用PS-InSAR技术监测南通市地面沉降[J].地质灾害与环境保护,2011,22(4):103-107.

[15] 王勇,田硕,刘严萍,等.融合GPS与DInSAR的区域地表三维形变获取研究[J].灾害学,2020,35(3):82-89.

[16] Zhang L, Lu Z, Ding X, et al. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, (117):429-439.

[17] 何亚东,徐许雄,李林,等.联合北斗与地基InSAR多源数据分析四川茂县特大滑坡[J].测绘通报,2023,(4):159-162.

[18] Shi X, Liao M, Li M, et al. Wide-Area landslide deformation mapping with multi-path ALOS PALSAR data stacks: A case study of Three Gorges area, China[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2):1-14.

[19] 王栋,张广泽,徐正宣,等.基于时间序列InSAR技术的铁路地质灾害识别研究[J].地质灾害与环境保护,2019,30(3):85-91.

[20] 李勇,孙晓鹏,李海亮. InSAR技术在西部山区某高速公路山体变形机理分析研究中的应用[J].地质灾害与环境保护,2020,31(3):88-94.