

引用格式: 张文馨, 王欣, 冉伟杰, 魏俊锋, 刘巧. 基于 PS-InSAR 技术的西藏龙巴萨巴湖冰碛坝表面形变特征分析及影响因素[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 60-69.

ZHANG Wenxin, WANG Xin, RAN Weijie, WEI Junfeng, LIU Qiao. Surface deformation detection of the moraine dam of the Longbasaba Lake in Tibet of China based on PS-InSAR technique and associated influencing factors [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 60-69.

基于 PS-InSAR 技术的西藏龙巴萨巴湖冰碛坝 表面形变特征分析及影响因素

张文馨¹, 王欣^{1*}, 冉伟杰^{1,2}, 魏俊锋¹, 刘巧³

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 长沙天仪空间科技研究院有限公司, 长沙 410000; 3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299)

摘要: 冰碛湖坝体表面形变是指示坝体稳定性的重要参数。针对高寒区冰碛坝形变监测, 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术仍然存在一定的技术缺陷, 而基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)的遥感技术方面应用尚未见报道。西藏龙巴萨巴湖位于中国和印度、尼泊尔交界处, 其冰碛坝具有高溃决风险。本文基于 75 景 Sentinel-1A 影像及 PS-InSAR 技术, 以龙巴萨巴湖冰碛坝为研究对象, 分析 2017 年 2 月至 2023 年 4 月期间, 坝体表面形变特征及影响因素。结果表明: (1) 2017—2023 年龙巴萨巴湖坝体总体呈下沉趋势, 平均形变速率为 -2.76 ± 0.66 mm/a。坝体明显表面下降区主要分布沿湖水岸一带, 占坝体总面积的 43.3%, 平均下沉速率为 16.82 ± 1.55 mm/a, 坝体中部存在东南—西北贯通的显著沉降区, 其中最大形变永久散射点(PS 点)形变速率达到 -81 mm/a; 中部坝体出现抬升现象, 抬升区面积占坝体总面积的 9.8%, 平均抬升速率为 17.38 ± 2.43 mm/a, 其中最大形变 PS 点形变速率达到 43.90 mm/a; 坝体外缘区变形率相对较小, 在 $-4 \sim 4$ mm/a 内波动(平均形变速率为 0.53 ± 0.23 mm/a), 占坝体总面积的 41.11%。(2) 在监测时间段内, 年内不同月份沉降区面积占比为 39.1%~65.8%, 其中, 7 月沉降面积最大, 占坝体总面积的 65.8%; 年内抬升区面积占总面积比的 22.3%~38.3%, 2 月份坝体抬升面积最大。(3) 坝体表面总体形变与坝体热通量年收支盈余、坝体内部埋藏冰发育、内部水分运移冻胀等因素有关。本研究结论可用于评估龙巴萨巴冰碛湖的危险性, 为冰碛湖溃决模拟及防灾减灾提供理论依据。

关键词: 形变监测; 表面沉降; PS-InSAR; 冰碛坝; 龙巴萨巴湖

中图分类号: P237

文献标志码: A

由寒冻风化和冰川拔蚀产生的岩屑, 在冰川退缩过程中, 经不同形式地搬运和堆积, 在冰川末端堆积形成冰碛物。冰川融水被冰碛物阻挡, 在冰舌前端汇集, 形成冰碛湖。形成冰碛湖岸坡的冰碛物被称为冰碛坝, 一般由冰碛松散物、埋藏冰、多年冻土等组成^[1-2]。冰碛坝体形变量是指示冰碛坝体稳定性的重要参数^[3]。冰碛坝形变主要包括坝体的垂直

位移、水平位移和挤压变形。有记录表明^[4], 冰碛坝在埋藏冰发育区最大下沉速度可高达 2.0 m/a。

冰碛坝形变是一个复杂的过程, 受多种因素的影响。在高海拔区, 冰碛坝体多含冻土、埋藏冰^[5]。气候变暖一方面导致坝体冻土(埋藏冰)消融沉降形变^[6], 另一方面导致内部水压等物理场的变化, 激发冰碛坝内部形成潜蚀, 诱发渗透、管涌^[7], 致使

收稿日期(Received date): 2023-12-22; 改回日期(Accepted date): 2024-02-13

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(U23A2011, 42171137)[National Natural Science Foundation of China (U23A2011, 42171137)]

作者简介(Biography): 张文馨(1998-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向: 冰冻圈灾害。[ZHANG Wenxin (1998-), female, born in Linyi, Shandong province, M. Sc. candidate, research on cryospheric disaster] E-mail: 21010104020@mail.hnust.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 王欣(1973-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 教授, 主要研究方向: 地理环境遥感、冰川水文与灾害。[WANG Xin (1973-), male, born in leiyang, Hunan province, Ph. D., professor, research on remote sensing of geographical environment and glacial hydrology and hazards] E-mail: wangx@hnust.edu.cn

坝体的稳定性下降^[1,7-8],增大冰湖溃决的风险^[7],严重威胁下游人民群众生命财产安全^[9]。由于冰碛坝多位于高寒高海拔无人区,交通可达性差,需要结合坝体现场实际情况,开展遥感时空形变监测,进行冰碛湖溃决灾害危险性评价。

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 通过遥感卫星搭载的 SAR 传感器,获取高精度、高时空分辨率且具有长时间序列的地表形变信息和高程信息,有效解决了传统测量时序短、范围小、精度低等问题。基于 InSAR 技术监测多年冻土区的自然环境表面形变已趋向成熟。例如,利用 InSAR 成功监测了阿拉斯加北坡冻土在解冻季节的地表变形^[10]、西伯利亚勒拿河三角洲地区冻土的季节性和多年地面运动^[11]、青藏高原多年冻土的大规模循环^[12]。

永久散射体合成孔径雷达干涉测量 (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR) 是 InSAR 技术的进一步发展。其利用同一地区的多景(一般要求大于 25 景)SAR 影像,统计分析全部影像的幅度信息,确定保持高相干性的控制点作为永久散射体 (Persistent Scatterer, PS)^[13-15]。PS 点在长时间序列上保持良好稳定的散射特性,实现了冰碛坝体持续形变监测的技术优势^[16]。然而,针对高寒区冰碛坝形变监测方面,尚未检索到基于 PS-InSAR 技术的相关报道。

本文以具有高溃决风险的西藏龙巴萨巴湖冰碛坝为研究对象^[8,16],采用 PS-InSAR 技术,对坝体表面实现了长时间序列的形变监测,分析坝体 2017—2023 年期间的形变特征及时空差异,并从冻胀融沉及冰碛坝内部结构角度讨论冰碛坝体形变影响因素,研究结论可用于评估龙巴萨巴冰碛湖的危险性,为冰碛湖溃决模拟及防灾减灾提供理论依据。

1 研究区概况

龙巴萨巴湖 (27°57'17"N、88°04'55"E) 位于中国和印度、尼泊尔交界处,为冰碛阻塞湖。由于印度板块的挤压和四周塔里木、扬子以及中朝地台的滞后阻力,高原内的热力作用、热效应、构造均衡调整对高原隆升的控制作用以及地幔物质的流动和地壳的运动,其地表隆起过程表现为时间和空间上的不均匀性,其隆起速率约为 4 ~ 15 mm/a^[17-18]。2018 年龙巴萨巴冰湖的面积达到了 $1.591 \pm 0.104 \text{ km}^2$,最大湖深为 $102.3 \pm 5.5 \text{ m}$ ^[19-20],较 1988 年面积扩张了 164%。利用龙巴萨巴湖地区无人机实拍影像,通过目视解译结合实地考察确定冰碛坝坝体面积为 590 808.6 m² (图 1a),坝体海拔为 5399 ~ 5499 m。湖盆现出水口位于该湖的西南方向。龙巴萨巴冰湖的坝体为冰川终碛垄,砾石、砂岩占比高,坝体存在凹陷并形成积水湖塘 (图 1a),坝体内

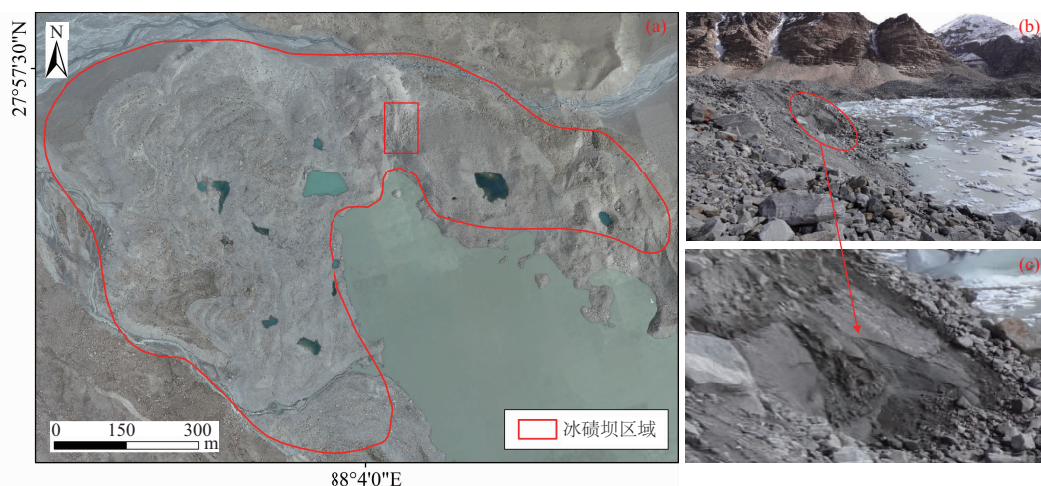


图 1 龙巴萨巴湖冰碛坝概况:

(a) 龙巴萨巴冰碛坝无人机影像 (拍摄于 2021 年 8 月); (b) 裸露冰川冰位置; (c) 裸露冰川冰照片 (拍摄于 2021 年 8 月)

Fig. 1 Overview of the moraine dam of the Longbasaba Lake in China;

(a) UAV image of the moraine dam (taken in August 2021); (b) position of exposed stagnant ice with buried ice inside;

(c) photo of exposed stagnant ice on the waterward slope of the moraine dam (taken in August 2021)

部含有埋藏冰,坝体表面被冰川消融搬运的物质堆积覆盖,坝体稳定性较差,潜在溃决洪水威胁下游定结县琼孜乡、萨尔乡和江嘎镇等区域(图 1b、图 1c)^[21]。

2 数据与方法

本文从 ASF Data Search (<https://search.asf.alaska.edu>) 获得 75 幅 Sentinel-1A 升轨、VV + VH 双极化的龙巴萨巴湖的遥感影像,影像分辨率为 30 m,重访周期为 12 d,观测时间为 2017 年 02 月—2023 年 04 月。选取每月第一幅遥感影像,影像间隔日期为 24 或 36 d, Sentinel-1A 影像参数见表 1。

表 1 Sentinel-1A 影像参数
Tab. 1 Sentinel-1A image parameters

影像名称	参数值
传感器	S1A IW IW1 VV
日期范围	2017-02-04—2023-04-10
时间基线	12 d
中央纬度	27°57'N
中央经度	88°4'E
轨道高度	700 km
空间分辨率	5 m × 20 m

通过 PS-InSAR 技术进行形变计算之前,首先对所获取影像进行差分干涉处理,形成时间序列的干涉对,计算公式^[22]如下:

$$\varphi = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noi}} \quad (1)$$

式中, φ_{ref} 为参考椭球面相位; φ_{top} 为地形相位; φ_{def} 为形变相位; φ_{atm} 为大气相位; φ_{noi} 为噪声相位组成干涉相位 φ 。采用模糊度高算法计算目标高程^[22]:

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{R_1 \sin \theta_0}{B_{\perp}} \varphi_{\text{top}} \quad (2)$$

式中, h 为观测目标高程; λ 为雷达波长; R_1 为对应

于此目标的主影像斜距; θ_0 为对应于此目标的主影像雷达侧视角; B_{\perp} 为干涉垂直基线。

利用 GAMMA 软件及 2000 年航天飞机雷达地形任务 (The Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 数据,对 SAR 影像进行影像配准、差分干涉、相位解缠、相位矫正、大气校正等流程,获得 PS 的 2017—2023 年间的形变量(图 2)。

将 PS 点的逐月形变数据,利用最小二乘法原理线性拟合,获得坝体 PS 点形变趋势;将通过假设检验的 PS 点作为空间插值的样本数据,基于克里金内插法获得坝体形变空间分布。

3 结果分析

3.1 坝体表面形变空间特征

基于 PS-InSAR 的监测的地形形变实验结果如图 3 所示。龙巴萨巴湖坝体区存在相干性的 PS 点共计 369 个,2017—2023 年间 PS 点平均形变速率为 -2.76 ± 0.66 mm/a,坝体总体呈现下沉趋势,但表面形变空间差异显著。2017—2023 年坝体表面形变速率 ≤ -4 mm/a 的区域总面积为 282 946.4 m²,占坝体面积 43.3%,为显著沉降区域(图 3)。显著沉降区域主要分布在距离冰碛湖较近约 0 ~ 150 m 范围内,在坝体中部存在一个东南—西北贯通的显著沉降区;在坝体中央区存在形变速率 ≥ 4 mm/a 的表面显著抬升区,面积为 64 973 m²,占坝体总面积 11%;在坝体外边缘区,形变速率多为 $-4 \sim 4$ mm/a,形变速率相对较小,平均年形变速率为 0.53 ± 0.23 mm/a,总面积 242 889.2 m²,占坝体总面积的 41.1% (表 2)。坝体共有 17 个 PS 点未通过假设检验 ($P > 0.1$),多位于形变较小区的速率内(图 3)。

3.2 坝体表面形变时间差异

统计龙巴萨巴湖坝体沉降区、抬升区、形变较小区内通过假设检验的 370 个 PS 点的逐月形变数据

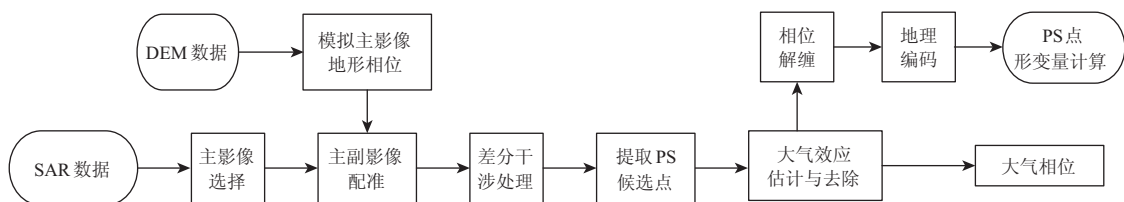
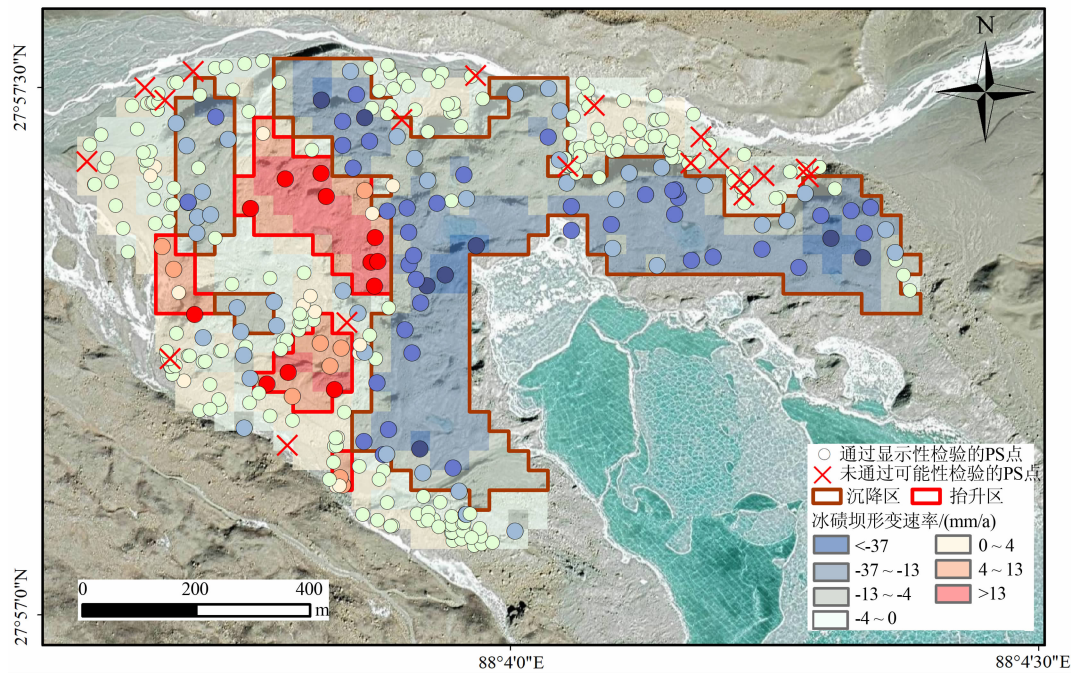


图 2 PS-InSAR 数据处理流程

Fig. 2 Processing flow of PS-InSAR data



红色圆圈为形变速率 $>4\text{ mm/a}$ 的 PS 点;蓝色圆圈为形变速率 $<-4\text{ mm/a}$ 的 PS 点;
黄色圆圈为形变速率为 $-4\sim4\text{ mm/a}$ 的 PS 点。

图 3 2017—2023 年龙巴萨巴湖坝形变速率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of deformation rate of the Longbasaba dam during 2017–2023

表 2 2017—2023 年龙巴萨巴湖坝体形变类型数量特征

Tab.2 Characteristics of Longbasaba dam deformation types during 2017–2023

表面形变类型	平均形变速率/(mm/a)	面积/ m^2	占坝体总面积比例/%
显著沉降区 ($\leq -4\text{ mm/a}$)	-16.52 ± 1.55	282 946.4	47.89
显著抬升区 ($\geq 4\text{ mm/a}$)	17.38 ± 2.43	649 73.0	11.00
形变较小区 ($-4\sim4\text{ mm/a}$)	0.53 ± 0.23	242 889.2	41.11
合计	-2.76 ± 0.66	590 808.6	100

显示,68% 的 PS 点逐月形变数据形变速率为 $-1.29\sim0.84\text{ mm/月}$ 。2017—2023 年,抬升区内的 PS 点形变速率平均为 $+1.37\text{ mm/月}$,累积抬升 107.3 mm ;沉降区内的 PS 点形变速率平均为 -1.40 mm/月 ,累积下降 101.4 mm 。坝体表面不同形变类型区,监测时段内抬升区呈现持续稳定抬升、沉降区呈现持续稳定下降特征,而且抬升和下降

的趋势值较为接近,而形变较小区时变序列趋势不明显(图 4)。从年内变化来看,龙巴萨巴湖坝体表面抬升区、沉降区和形变较小区的范围内年差异较为显著(表 3)。不同月份坝体均有抬升区域,年内抬升区面积占总面积比在 $22.3\%\sim38.3\%$ 波动,2 月份平均抬升范围达到一年中的最大值(38.3%),7 月为一年中抬升范围最小的月份(22.3%);年内

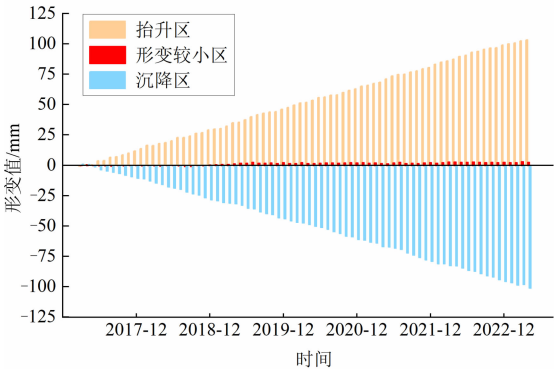


图 4 2017—2023 年龙巴萨巴湖坝体不同形变区 PS 点逐月累积形变

Fig.4 Monthly cumulative deformation values of the Longbasaba dam PS points during 2017–2023

表 3 2017—2023 年龙巴萨巴坝体表面不同形变类型面积的年内变化

Tab. 3 Intra-annual variation in the area of different deformation types on the surface of the Longbasaba dam during 2017 – 2023

月份	坝体形变面积占比/%		
	沉降区	抬升区	形变较小区
01	51.3	33.2	15.5
02	39.1	38.3	22.6
03	49.0	31.8	19.2
04	53.4	30.9	15.8
05	51.6	34.2	14.2
06	49.0	37.4	13.5
07	65.8	22.3	11.9
08	50.2	35.5	14.3
09	50.8	33.6	15.6
10	54.9	31.2	14.0
11	47.9	36.5	15.6
12	51.5	32.6	16.0

注:加粗数值表示沉降/抬升区面积为最大/最小的月份。

不同月份沉降区面积占比变化范围为 39.1% ~ 65.8%,7 月份平均沉降范围达到一年中的最大值

(65.8%),2 月为一年中沉降范围最小的月份 (39.1%)(表 4)。

4 讨论

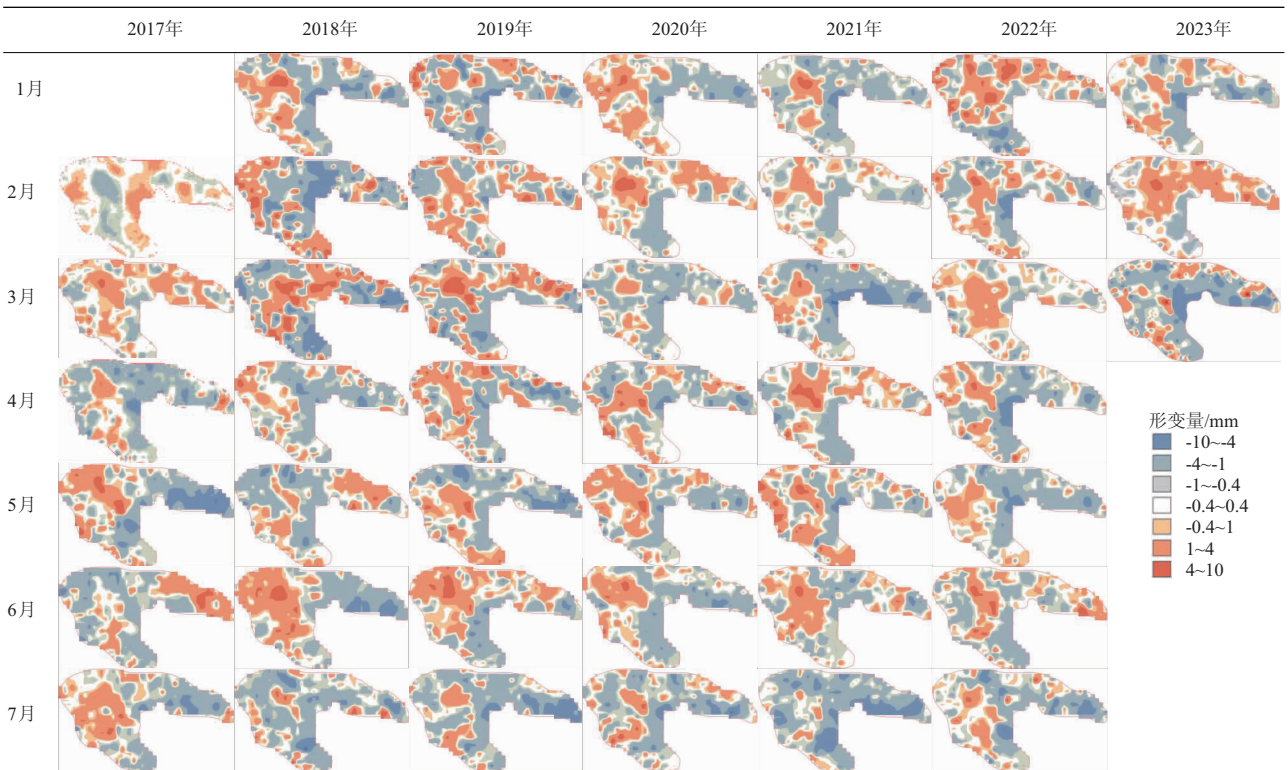
4.1 坝体表面形变不确定性

为了验证 PS-InSAR 监测坝体沉降的准确性和不确定性,在一个地表高程相对不变的平地区域,即参考冻土区,选择了 53 057 个样本点作为验证区(图 5)。验证结果表明,参考区的地表形变值集中在 0 左右,平均值为 -0.11 ± 0.17 mm/a,平地形变误差较小,约占龙巴萨巴坝体形变微小区的形变量(± 4 mm/a)2.5%,说明 PS-InSAR 地表形变监测结果可靠。

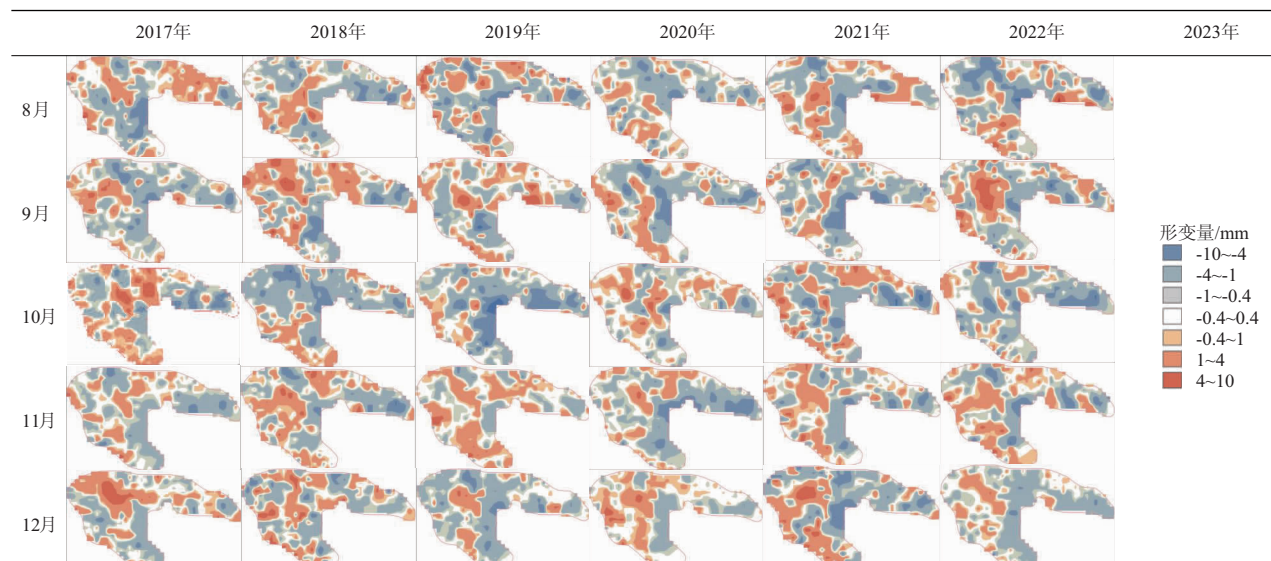
龙巴萨巴湖湖盆区气候环境恶劣、可达性差,现场监测困难。采用 PS-InSAR 技术,可远程、快速获取地表形变信息。PS-InSAR 从时间维度上对地表形变进行监测,将时间与空间进行结合,精确测量龙巴萨巴湖坝体形变情况,为坝体稳定评价提供基础数据。PS-InSAR 地形形变结果需要现场监测数据

表 4 2017—2023 龙巴萨巴湖坝体表面逐月形变时空特征

Tab. 4 Spatial-temporal surface deformation characteristics of the Longbasaba dam during 2017 – 2023



续表 4



红色区域是选定的验证区。

图 5 PS-InSAR 地面沉降检测精度验证

Fig. 5 Accuracy verification of PS-InSAR subsidence results

检验,但当前缺乏坝体现场形变测量数据,未来需要强化利用近景摄影测量等对坝体进行多手段形变监测,对基于 PS-InSAR 形变结果的误差和不确定性进行进一步分析。

4.2 坝体表面形变影响因素

龙巴萨巴湖地处多年冻土区^[16],冰碛坝体内部含有丰富埋藏冰、表面覆盖冰碛,坝体表面形变可能与内部结构及含水量、水压、水分冻融、水分传输与集聚、埋藏冰的冻结与消融等有关^[10, 23-28]。由于埋藏冰的存在,坝体热状态变化成为影响坝体内部结构变化的关键因素^[16, 29-30]。

基于在龙巴萨巴坝体区架设热通量传感仪器(HFP01SC,精度 $\pm 3\%$,Campbell Scientific),测得龙巴萨巴热通量数据,2012—2017年坝体年热通量平均盈余 1.1 W/m^2 ^[24]。统计显示,龙巴萨巴湖坝体

逐月土壤热通量累计值呈增加趋势,与之对应,坝体逐月地形形变累计值呈下降趋势(图6),热量盈余在坝体内不断累积,导致坝体内部埋藏冰/活动层不断消融下沉。从坝体内结构分析,坝体温度降低时,坝体表层水受冷结冰,活动层出现由夏季融化的最大深度往上冻结和地表往下的双向冻结,在冻结过程中,坝体内部的水由液态转变为固态,发生膨胀,造成地表抬升趋势;但也有研究^[28-32]发现坝体受冷收缩导致下沉。坝体温度升高时,埋藏冰消融,融水受水力坡度作用迁移^[33],地表下沉;如果融水在坝体内局部汇集或冻结,也可能导致地表抬升。

根据龙巴萨巴实测气温数据,坝体地温季节性温差(尤其是春秋)、昼夜温差均较大^[24],坝体活动

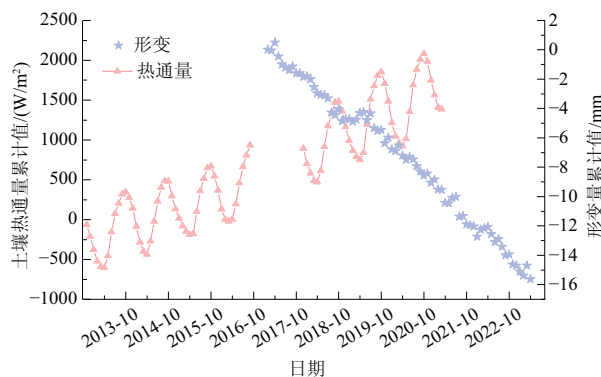


图 6 龙巴萨巴坝体 2013—2021 年坝体热通量与坝体表面形变量变化

Fig. 6 Changes of cumulative value of heat flux of the dam body and deformation of moraine dam surface in 2013-2021

层季节和日间反复冻融^[16],造成研究区抬升与沉降并存且范围存在年际和年内变化。对于冻土冻融过程的实验室实测及数值模拟结果表明,形变与温度的关系是复杂多变的^[31-34],坝体组成和内部结构复杂,冻土和埋藏冰并存,内部含水量时空差异大;此外,当前尽管缺乏对冰碛坝内部冰体对水分流通的影响观测,但有研究显示,在冻土中的埋藏冰和地冰可能会阻碍地下水流动(埋藏冰)或部分限制流动(地冰),并其汇集到无冰区域,加大地下水分含量的不均性^[35]。龙巴萨巴湖坝体富含埋藏冰,内部热卡斯特广泛发育^[8,36]、坝体结构差异大,影响地下水分的运移及水压的变化。这种差异化的内部水分运移,可能导致差异化的潜蚀、渗透、管涌等变形,如水分在运移的过程中遇冷冻胀,影响坝体形变。龙巴萨巴湖坝体中部形成持续的抬升区可能与这种差异化的水分运移有关。

由于观测条件的限制,当前龙巴萨巴坝体内部状态未知,需要加强现场坝体内部结构和物理场的观测,进一步精准探讨形变原因和机理。如对坝体进行钻孔,探究坝体内部埋藏冰的分布,布设物体物理场参数(温度、热通量、水分)观测仪器;使用电阻率成像(Electrical Resistivity Imaging, ERI)和地震折射层析成像等方法描绘了埋藏冰以及冻结和未冻结冰碛物质的区域^[37];采用冰-水相变效应的冻土含冰量监测方法,实现地下多个深度含冰量的准分布式测量,进而掌握坝体中冻结锋面推进和水分时空迁移的内在规律^[38]。未来还可基于 PS-InSAR 监测坝体形变特征,结合冰湖水位温度、冰川融水量、埋藏冰分布及体积等坝体内部结构数据,利用如 COMSOL Multiphysic^[36]等数值模拟软件,模拟坝体形变与坝体内部结构规律,预测不同情境下冰碛坝形变趋势、水热状态及其稳定性,为其他高海拔、易溃冰碛坝提供坝体形变、内部结构及稳定性参考,服务冰湖溃决防灾减灾。

5 结论

(1)龙巴萨巴冰碛坝总体呈现下沉趋势,年形变速率约为 -2.76 ± 0.66 mm/a,最大形变 PS 点达到 -81 mm/a。显著沉降区域平均形变速率约为 -16.82 ± 1.55 mm/a,主要分布在距离冰碛湖较近约 $0 \sim 150$ m 范围内,在坝体中部存在一个东南—

西北贯通的显著沉降区。坝体区抬升区域平均形变速率约为 17.38 ± 2.43 mm/a,最大形变点达到 43.90 mm/a,主要分布在坝体中央区域。冰碛区形变较小区域主要分布在坝体外边缘区,形变速率多为 $-4 \sim 4$ mm/a。

(2)近 7 年来,不同坝体表面形变类型区,在监测时段内抬升区呈现持续稳定抬升、沉降区呈现持续稳定下降特征。年内 7 月份平均沉降范围达到一年中的最大值(占坝体总面积的 65.8%),2 月份抬升范围达到一年中的最大值(占坝体总面积的 38.3%)。

(3)坝体总体沉降主要与坝体热通量年收支盈余、坝体内部埋藏冰发育等因素有关。但是坝体组成和内部结构复杂,今后需要加强对坝体内部结构及变化的监测,进一步探讨坝体表面形变及原因。

参考文献(References)

- [1] HAEBERLI W, KÄÄB A, MÜHLL D V, et al. Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Grubengletscher, Valais, Swiss Alps [J]. *Journal of Glaciology*, 2001, **47** (156): 111 - 122. DOI: 10.3189/172756501781832575
- [2] 石振明, 李建可, 鹿存亮, 等. 堰塞湖坝体稳定性研究现状及展望[J]. *工程地质学报*, 2010, **18** (5): 657 - 663. [SHI Zhenming, LI Jianke, LU Cunliang, et al. Research status and prospect of the stability of landslide dam [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18** (5): 657 - 663] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.05.008
- [3] WANG Xin, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. An approach for estimating the breach probabilities of moraine-dammed lakes in the Chinese Himalayas using remote-sensing data [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, **12** (10): 3109 - 3122. DOI: 10.5194/nhess-12-3109-2012
- [4] WATANABE T, KAMEYAMA S, SATO T. IMJA glacier dead-ice melt rates and changes in a supra-glacial lake, 1989 - 1994, Khumbu Himal, Nepal: Danger of lake drainage [J]. *Mountain Research and Development*, 1995, **15** (4): 293 - 300. DOI: 10.2307/3673805
- [5] 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. *地理学报*, 1989, **44** (3): 343 - 352. [XU Daoming, FENG Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizang Himalayas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, **44** (3): 343 - 352] DOI: 10.11821/xb198903010
- [6] 刘建康, 周路旭. 国内外冰碛湖溃决研究进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, **45** (8): 44 - 50. [LIU Jiankang, ZHOU Luxu. Research progress on moraine dammed lake outburst flood [J]. *Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, **45** (8): 44 - 50] DOI: 10.3969/j.issn.1672

- 7428.2018.08.010
- [7] NEUPANE R, CHEN Huayong, CAO Chunran. Review of moraine dam failure mechanism [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, **10** (1): 1948 – 1966. DOI: 10.1080/19475705.2019.1652210
- [8] 王欣, 蒋亮虹, 刘时银, 等. 喜马拉雅山北坡冰碛湖坝温度特征及其对堤坝稳定的影响[J]. *冰川冻土*, 2014, **36**(6): 1517 – 1525. [WANG Xin, JIANG Lianghong, LIU Shiyin, et al. Temperature features of a moraine-dam on north slopes of the Himalayas and their effect on dam stability [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, **36**(6): 1517 – 1525] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0182
- [9] 张太刚, 王伟财, 高坛光, 等. 亚洲高山区冰湖溃决洪水事件回顾[J]. *冰川冻土*, 2021, **43**(6): 1673 – 1692. [ZHANG Taigang, WANG Weicai, GAO Tanguang, et al. Glacial lake outburst floods on the High Mountain Asia: A review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(6): 1673 – 1692] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0066
- [10] LIU Lin, ZHANG Tingjun, WAHR J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the north slope of Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, **115**: F03023. DOI: 10.1029/2009JF001547
- [11] ANTONOVA S, SUDHAUS H, STROZZI T, et al. Thaw subsidence of a yedoma landscape in northern Siberia, measured in situ and estimated from TerraSAR-X interferometry [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(4): 494. DOI: 10.3390/rs10040494
- [12] DAOUT S, DOIN M P, PELTZER G, et al. Large scale InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw cycles on the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(2): 901 – 909. DOI: 10.1002/2016GL070781
- [13] 王志红, 任金铜, 范成成, 等. Sentinel-1A 在西南煤矿区地表沉陷监测中的适用性分析[J]. *地球物理学进展*, 2021, **36**(6): 2339 – 2350. [WANG Zhihong, REN Jintong, FAN Chengcheng, et al. Applicability analysis of Sentinel-1A in surface subsidence monitoring in southwest coal mining area [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, **36**(6): 2339 – 2350] DOI: 10.6038/pg2021EE0577
- [14] 熊文秀, 冯光财, 李志伟, 等. 顾及时空特性的 SBAS 高质量点选取算法[J]. *测绘学报*, 2015, **44**(11): 1246 – 1254. [XIONG Wenxiu, FENG Guangcai, LI Zhiwei, et al. High quality targets selection in SBAS-InSAR technique by considering temporal and spatial characteristics [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, **44**(11): 1246 – 1254] DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.20140547
- [15] 熊鹏, 左小清, 李勇发, 等. InSAR 技术在高速公路灾害辅助识别中的应用[J]. *测绘通报*, 2020(8): 87 – 91. [XIONG Peng, ZUO Xiaoqing, LI Yongfa, et al. Application of InSAR technology in auxiliary identification of expressway disasters [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(8): 87 – 91] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0254
- [16] WANG Jia, WANG Xin, ZHANG Yanlin, et al. Simulation of freeze-thaw and melting of buried ice in Longbasaba moraine dam in the central Himalayas between 1959 and 2100 using COMSOL multiphysics [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, **128**(3): e2022JF006848. DOI: 10.1029/2022JF006848
- [17] 肖序常, 王军. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述[J]. *地质论评*, 1998, **44**(4): 372 – 381. [XIAO Xuchang, WANG Jun. A brief review of tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geological Review*, 1998, **44**(4): 372 – 381] DOI: 10.16509/j.georeview.1998.04.006
- [18] 汪汉胜, WU Patrick, 许厚泽. 冰川均衡调整 (GIA) 的研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, **24**(6): 1958 – 1967. [WANG Hansheng, WU P, XU Houze. A review of research in glacial isostatic adjustment [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, **24**(6): 1958 – 1967] DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.06.005
- [19] 张特, 魏俊锋, 张勇, 等. 1988 – 2018 年喜马拉雅山中部龙巴萨巴冰川变化数据集[J]. *中国科学数据 (中英文网络版)*, 2021, **6**(4): 84 – 94. [ZHANG Te, WEI Junfeng, ZHANG Yong, et al. A dataset for annual changes of Longbasaba Glacier in the central Himalayas from 1988 – 2018 [J]. *Chinese Science Data (Chinese-English Web Edition)*, 2021, **6**(4): 84 – 94] DOI: 10.11922/11-6035.csd.2021.0051.zh
- [20] WEI Junfeng, LIU Shiyin, WANG Xin, et al. Longbasaba Glacier recession and contribution to its proglacial lake volume between 1988 and 2018 [J]. *Journal of Glaciology*, 2021, **67**(263): 473 – 484. DOI: 10.1017/jog.2020.119
- [21] WANG Xin, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Assessment and simulation of glacier lake outburst floods for Longbasaba and Pida Lakes, China [J]. *Mountain Research and Development*, 2008, **28**(3): 310 – 317. DOI: 10.1659/mrd.0894
- [22] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 160 – 171, 218 – 219. [LIU Guoxiang, CHEN Qiang, LUO Xiaojun, et al. InSAR principles and applications [M]. Beijing: Science Press, 2019: 160 – 171, 218 – 219]
- [23] 刘世博, 赵林, 汪凌霄, 等. InSAR 技术在多年冻土区形变监测的应用[J]. *冰川冻土*, 2021, **43**(4): 964 – 975. [LIU Shibo, ZHAO Lin, WANG Lingxiao, et al. Application of InSAR technology in monitoring deformation in permafrost areas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(4): 964 – 975] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0033
- [24] WANG Xin, YANG Chengde, ZHANG Yanlin, et al. Monitoring and simulation of hydrothermal conditions indicating the deteriorating stability of a perennally frozen moraine dam in the Himalayas [J]. *Journal of Glaciology*, 2018, **64**(245): 407 – 416. DOI: 10.1017/jog.2018.38
- [25] SHAO Yawu, SUO Yonglu, XIAO Jiang, et al. Creep characteristic test and creep model of frozen soil [J]. *Sustainability*, 2023, **15**(5): 3984. DOI: 10.3390/su15053984
- [26] GAO Qiang, WEN Zhi, ZHOU Zhiwei, et al. A creep model of

- pile-frozen soil interface considering damage effect and ice effect [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2022, **31**(1): 3 – 21. DOI: 10.1177/10567895211019067
- [27] WANG Pan, LIU Enlong, ZHI Bin, et al. Creep characteristics and unified macro-meso creep model for saturated frozen soil under constant/variable temperature conditions [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, **17**(11): 5299 – 5319. DOI: 10.1007/s11440 – 022 – 01586 – 6
- [28] TAI Bowen, WU Qingbai, YUE Zurun, et al. Ground temperature and deformation characteristics of anti-freeze-thaw embankments in permafrost and seasonal frozen ground regions of China [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, **189**: 103331. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103331
- [29] ZHANG Peng, CHEN Yan, CHEN Yunping. Permafrost stability and land surface temperature distribution study using multi-source remote sensing data in the Qinghai-Tibet Plateau [C]. *IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 3915 – 3918. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884765
- [30] ZHANG Feng, SHI Sheng, FENG Decheng, et al. Investigation on creep behavior of warm frozen silty sand under thermo-mechanical coupling loads [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, **18**(7): 1951 – 1965. DOI: 10.1007/s11629 – 020 – 6411 – x
- [31] NEAUPANE K M, YAMABE T, YOSHINAKA R. Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**(5): 563 – 580. DOI: 10.1016/S0148 – 9062(99)00026 – 1
- [32] ZHANG Zhongqiong, LI Miao, WEN Zhi, et al. Degraded frozen soil and reduced frost heave in China due to climate warming [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **893**: 164914. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164914
- [33] BLIKRA L H, CHRISTIANSEN H H. A field-based model of permafrost-controlled rockslide deformation in northern Norway [J]. *Geomorphology*, 2014, **208**: 34 – 49. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.11.014
- [34] HARRISON S, KARGEL J S, HUGGEL C, et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods [J]. *The Cryosphere*, 2018, **12**(4): 1195 – 1209. DOI: 10.5194/tc – 12 – 1195 – 2018
- [35] LANGSTON G, BENTLEY L R, HAYASHI M, et al. Internal structure and hydrological functions of an alpine proglacial moraine [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(19): 2967 – 2982. DOI: 10.1002/hyp.8144
- [36] CHEN Wanxin, WU Jianying. Phase-field cohesive zone modeling of multi-physical fracture in solids and the open-source implementation in Comsol Multiphysics [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, **117**: 103153. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103153
- [37] HAUCK C, VIEIRA G, GRUBER S, et al. Geophysical identification of permafrost in Livingston Island, maritime Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, **112**: F02S19. DOI: 10.1029/2006JF000544
- [38] 吴冰, 朱鸿鹄, 曹鼎峰, 等. 基于主动加热光纤法的冻土相变温度场特征分析[J]. *工程地质学报*, 2019, **27**(5): 1093 – 1100. [WU Bing, ZHU Honghu, CAO Dingfeng, et al. Investigation of phase change temperature field in frozen soil based on actively heated fiber optics method [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, **27**(5): 1093 – 1100] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019135

Surface Deformation Detection of the Moraine Dam of the Longbasaba Lake in Tibet of China Based on PS-InSAR Technique and Associated Influencing Factors

ZHANG Wenxin¹, WANG Xin^{1*}, RAN Weijie^{1,2}, WEI Junfeng¹, LIU Qiao³

(1. School of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. Changsha Tianyi Space Technology Research Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China; 3. Chengdu Institute

of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610029, China)

Abstract: Surface deformation of a moraine dam is usually used as an estimation of its stability. For the deformation monitoring of moraine dam in alpine region, the technology of Synthetic Aperture Radar (InSAR) still has some technical defects in spite of its popularity, while the application of remote sensing technology based on Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) has not been reported yet. Located at the border between China and India and Nepal, the Longbasaba Lake is exhibiting the high risk of moraine dam failure.

In this study, based on 75 Sentinel-1A images and PS-InSAR technology, it analyzed the dynamic deformation of the moraine dam of the Longbasaba Lake from February 2017 to April 2023.

(1) In 2017 – 2023, there was a tendency for the Longbasaba Lake dam to subside at an average deformation rate of -2.76 ± 0.66 mm/a. The distinct surface subsidence place in the dam was mainly distributed along the lake bank, accounting for 43.3% of the total surface area of the dam body, with an average subsidence rate of 16.82 ± 1.55 mm/a. In the middle of the dam, there was a noticeable subsidence zone transversally running southeast-northwest, with the maximum deformation permanent scattering point (PS point) at -81 mm/a. The central dam suffered an uplift, with an uplift area accounting for 9.8% of the total area of the dam body. The average uplift rate was 17.38 ± 2.43 mm/a, and the maximum deformation PS point deformation rate reached 43.90 mm/a. On the outer edge of the dam, the deformation rate was relatively low, fluctuating within $-4 \sim 4$ mm/a and an average deformation rate of 0.53 ± 0.23 mm/a, accounting for 41.11% of the total.

(2) In 2017 – 2023, the subsidence area in different months in a year accounted for 39.1% ~ 65.8%, among which the subsidence size in July was the largest, accounting for 65.8% of the total, whereas the uplifting area accounted for 22.3% ~ 38.3% of the total area, with the largest one occurred in February.

(3) Surface deformation of the moraine dam of the Longpasaba Lake had a close connection with some geo-physical settings, including the surplus of annual revenue and expenditure of heat flux of the dam body, the variation of buried ice inside the dam body, and the freezing and swelling of the migrated internal water.

The results above can be applicable in risk evaluation of moraine lake so as to provide a theoretical basis for the simulation of moraine lake outburst and disaster prevention and mitigation.

Key words: deformation monitoring; surface subsidence; PS-InSAR; moraine dam; the Longbasaba Lake

(责任编辑 钟雨倩)