

基于时序SAR影像的贡巴冰川动态变化监测

荆创利^{1,2}, 刘国祥^{1*}, 左明勇^{1,3}, 符茵⁴, 李友兵², 张波⁴, 张瑞¹

¹西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都

²四川省地质调查研究院, 四川 成都

³四川天府新区公园城市建设局, 四川 成都

⁴中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月13日; 录用日期: 2026年7月6日; 发布日期: 2026年7月10日

摘要

受全球气候变化的影响, 近年来藏东南地区多数冰川退化和物质亏损加剧, 运动速度减缓, 易引发冰湖溃决、滑坡等地质灾害。本文选取位于横断山中段贡嘎山西坡的贡巴冰川作为典型研究区域, 使用2007年至2018年间获取的28景ALOS PALSAR-1和ALOS PALSAR-2系列L波段SAR影像集, 基于Stacking-POT方法开展大、小贡巴冰川位移场时序监测和分析, 首次系统揭示了贡巴冰川位移速率的空间分布特征和时间变化规律。监测结果表明, 贡巴冰川位移速率受地形坡度较缓的影响位移速率相对缓慢, 大贡巴冰川粒雪盆和冰瀑区速度最快达到0.25 m/d, 消融区内运动速率最快约0.10 m/d, 而冰舌末端冰川相对稳定位移速率低于0.01 m/d。通过对比贡巴冰川地形坡度分布, 贡巴冰川的运动速率分布和地形存在较高的相关性, 冰川位移速率基本随坡度的增加而增大。此外, 在年际变化方面, 通过对比2007年至2018年间冰川运动速率变化, 贡巴冰川减速平均值约0.005 m/d, 平均减速率达到了4.21%/a。冰川的减速往往意味着冰川的物质亏损, 冰川的持续退化, 会导致所引发的次生灾害频率随之增高, 本文的研究可为冰川的退化评估及其次生灾害监测提供数据和技术支持。

关键词

贡巴冰川, 合成孔径雷达, 像素偏移追踪, 冰川运动

Monitoring Dynamics of Gongba Glacier Based on Time Series SAR Images

Chuangli Jing^{1,2}, Guoxiang Liu^{1*}, Mingyong Zuo^{1,3}, Yin Fu⁴, Youbing Li², Bo Zhang⁴, Rui Zhang¹

¹Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²Sichuan Geological Survey and Research Institute, Chengdu Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 荆创利, 刘国祥, 左明勇, 符茵, 李友兵, 张波, 张瑞. 基于时序 SAR 影像的贡巴冰川动态变化监测[J]. 测绘科学技术, 2026, 14(3): 202-214. DOI: 10.12677/gst.2026.143020

³Park City Construction Bureau of Sichuan Tianfu New Area, Chengdu Sichuan⁴Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan

Received: June 13, 2026; accepted: July 6, 2026; published: July 10, 2026

Abstract

Most glaciers in southern Tibet in recent years have been deteriorating losses of material and movement slow down affected by global climate change, which has caused the geological disasters such as glacial lake outbursts and landslides. This paper selects the Gongba Glacier located on the west slope of Gongga Mountain as a typical research area, by using 28 SAR images acquired by ALOS PAL-SAR serial satellites from 2007 to 2018 to carry out the time series monitoring and analysis of glacier displacement by Stacking-POT method. The results showed that the displacement velocities of the Gongba Glacier were affected by the slower slope of the terrain. The maximum speed of the Dagongba Glacier Basin and Icefall Area is 0.25 m/d, while the movement rate in the ice tongue is less than 0.10 m/d. By comparing the topographic slope distribution of Gongba glacier, there is a high correlation between the movement rate distribution of Gongba glacier and the terrain, and the displacement increases with the slope. In addition, in terms of interannual variation, the average deceleration of the Gongba Glacier is about 0.005 m/d, and the average deceleration rate reaches 4.21%/a. This paper also supports relevant data for glacial degradation and cryosphere research.

Keywords

Gongba Glacier, SAR, Pixel Offset Tracking, Glacier Displacement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

近些年, 随着全球持续变暖, 高亚洲地区冰川退化加剧[1]。已有研究表明, 在高亚洲区域, 除昆仑山冰川保持稳定或有加速趋势外, 在青藏高原区域冰川物质亏损严重、位移速率减速显著, 尤其是藏东南地区的念青唐古拉山脉和横断山脉冰川最为突出[2] [3]。

冰川的运动监测是冰川研究的重要方面之一。对冰川的动态变化监测可有效评估冰川的退化情况, 是冰川资源开发利用、冰冻圈气候变化风险控制以及冰川次生灾害预警的重要措施之一[4]-[6]。长期以来冰川的监测多使用冰面花杆布设重复观测及实地调研, 但是, 冰川多分布在高寒高海拔地区, 致使作业困难或难以到达。

20 世纪 90 年代以后随着卫星遥感技术的发展, 冰川遥感学已成为冰川研究的一个重要分支学科, 广泛应用到冰川编目、位移变化、雪线、物质平衡等监测中, 为冰冻圈研究提供了广泛的基础数据[7]-[9]。然而, 在念青唐古拉山脉和横断山脉, 受印度洋西南季风和太平洋东南季风的影响, 降雨量充沛给冰川的发育提供了便利条件。但雨热同季的气候特征导致该区域常年多云雾, 光学遥感难以获取足够有效的数据[10]-[12]。合成孔径雷达具有高分辨率、高自动化且全天时全天候的成像能力, 已广泛应用于城市地表沉降、滑坡等监测中; 同时, SAR 影像干涉技术及像素偏移估计方法(Pixels Offset Tracking, POT)在冰

川位移场提取表现出极佳的应用前景，已成为冰冻圈研究的重要技术途径[13]-[20]。

本文通过使用不同时段获取的 SAR 影像，选取横断山脉贡嘎山西坡的贡巴冰川作为研究区域，使用 Stacking-POT 技术提取冰川位移速率场，此外，为了完善位移估计结果，引入区间估计进行数据精化[21]，并通过时序分析方法对贡巴冰川的位移场时空变化展开分析，最后结合气象和现场调研的数据系统揭示近十年间贡巴冰川的位移速率的时空演变规律。

2. 研究区域

贡巴冰川位于青藏高原东南缘横断山脉中段大雪山贡嘎山的西侧，如图 1 所示，是环贡嘎山西坡最大的山谷冰川[22]。在 17 世纪至 19 世纪，贡巴冰川退化在末端分离，分别为南侧的大贡巴冰川和北侧的小贡巴冰川[23]。贡嘎山地处四川盆地亚热带湿润季风气候区与青藏高原高寒气候区的过渡地带。受贡嘎山山体的阻挡，贡嘎山东西坡气候差异显著，相对于东坡海螺沟冰川，贡巴冰川的日照更强、气温更低、降雨量更少，呈现出亚热带高原型季风气候的特征。在 1982 年 6 月至 1983 年 6 月间，中国科学院青藏高原综合科考期间(简称青藏科考)对贡巴冰川做了短期的观测，记录显示 3700 m 海拔的贡嘎寺年平均气温为 1.9℃、降雨量 1173 mm，远低于海螺沟冰川 3000 m 处的 4.4℃和 1895 mm，根据推测贡巴冰川雪线高度为海拔 4900 m~5100 m [24] [25]。

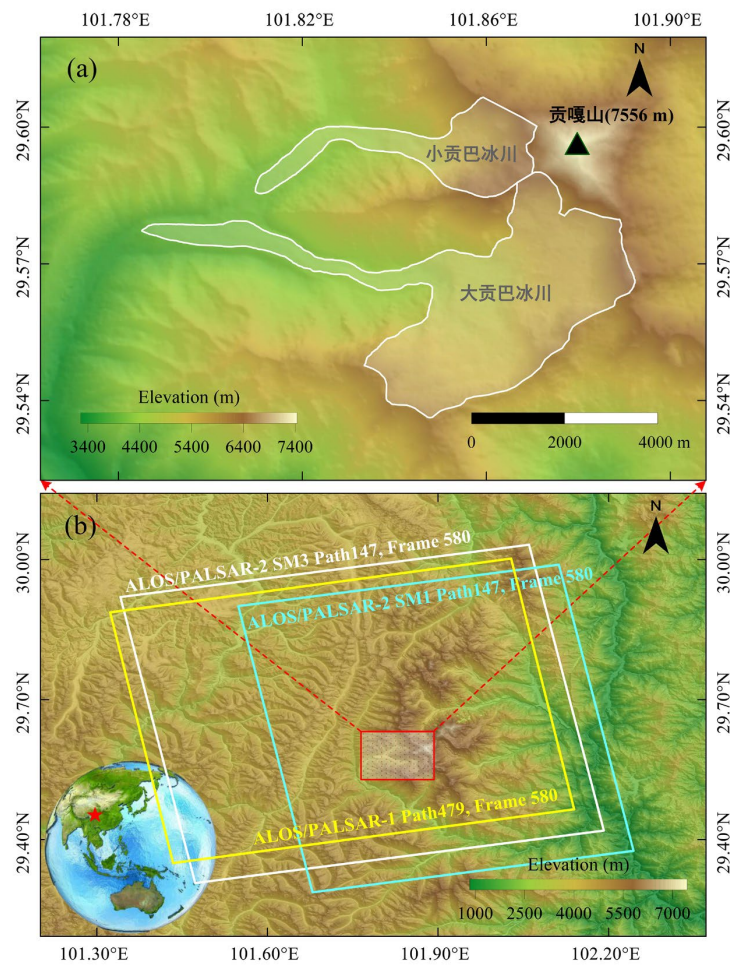


Figure 1. Study area and satellite images coverage
图 1. 贡巴冰川研究区域及实验数据覆盖范围

参考第二次中国冰川编目数据,大贡巴冰川全长 10.6 km,面积 19.1 km²,是贡嘎山西坡唯一的 10 km 及以上长度的冰川[25];借助卫星影像判断,大贡巴冰川从海拔 3950 m 至 4600 m 为冰舌段,海拔 4600 m 至 4900 m 为大贡巴冰川第一阶冰瀑布,自 4970 m 至 5490 m 为第二阶冰瀑布,从海拔 5490 m 往上为冰川粒雪盆区域;小贡巴冰川全长 6.46 km,面积 5.73 km²,冰川发育区从海拔 6000 m 的粒雪盆上沿至 5380 m,在海拔 5380 m 到 4800 m 为冰瀑布区,自 4800 m 延伸至 4150 m 海拔的末端为小贡巴冰川冰舌区域。大、小贡巴冰川消融区均为表碛覆盖型冰川,尤其是冰川末端,富集的冰碛物与冰川终碛堆连接,厚度可达到 1 m 甚至更高[24]。

1982~1983 年青藏科考期间通过在大、小贡巴冰川埋设花杆并通过经纬仪交会法量测记录了该时期内冰川采样点的运动速度,大贡巴冰川年位移速度最大的观测点位于冰舌中上部为 34.8 m/a (0.095 m/d),小贡巴冰川年位移速度最大的观测点位于冰舌上部为 36.6 m/a (0.10 m/d),均远低于同期记录的海螺沟冰川冰舌上部的 188.8 m/a (0.52 m/d) [25]。

3. 数据和方法

3.1. 实验数据

为提取 2007 年至 2018 年间贡巴冰川的位移速度场及其变化,共选取了获取自 2007 年 1 月至 2011 年 3 月的 20 景 L 波段 ALOS-1 PALSAR 卫星 SAR 影像序列(方位向分辨率 3.18 m,距离向分辨率 4.69 m)和获取自 2017 年 12 月至 2018 年 9 月的 8 景 L 波段 ALOS-1 PALSAR 卫星 SAR 影像集(方位向分辨率 3.24 m,距离向分辨率 4.29 m),ALOS-1 和 ALOS-2 影像覆盖如图 1(b)所示,各影像数据的成像时间与偏移估计组合属性信息如表 1 所示。

此外,本文选择使用 SRTM V3.1 30 m 的 DEM 作为参考以实现 SAR 影像几何空间到地理空间坐标的转换以及地形坡度的分析;同时借助已有研究成果的资料如 1982 年至 1983 年青藏科考的观测数据作为对比分析。

Table 1. Imaging time of the satellite SAR images and the attribute information of the POT combination
表 1. SAR 影像数据集成像时间与偏移估计组合属性信息

序号	卫星平台	主影像	从影像	T(d)	B(m)
1	ALOS-1	20070109	20070712	184	2403
2	ALOS-1	20070712	20070827	46	263
3	ALOS-1	20070827	20071012	46	329
4	ALOS-1	20071012	20080112	92	398
5	ALOS-1	20080112	20080413	92	781
6	ALOS-1	20080413	20080714	92	-2670
7	ALOS-1	20080714	20080829	46	-2067
8	ALOS-1	20080829	20081129	92	1150
9	ALOS-1	20181129	20090301	92	482
10	ALOS-1	20090301	20090901	184	948
11	ALOS-1	20090901	20091017	46	269
12	ALOS-1	20091017	20100117	92	270
13	ALOS-1	20100117	20100304	46	449
14	ALOS-1	20100304	20100720	138	328

续表

15	ALOS-1	20100720	20100904	46	271
16	ALOS-1	20100904	20101020	46	92
17	ALOS-1	20101020	20101205	46	21
18	ALOS-1	20101205	20110120	46	388
19	ALOS-1	20110120	20110307	46	496
20	ALOS-2	20171201	20180112	42	186
21	ALOS-2	20180112	20180223	42	-120
22	ALOS-2	20180223	20180406	42	-238
23	ALOS-2	20180406	20180518	42	78
24	ALOS-2	20180518	20180629	42	8
25	ALOS-2	20180629	20180810	42	-73
26	ALOS-2	20180810	20180921	42	225

3.2. 基于卫星 SAR 影像 Stacking-POT 的冰川表面位移提取

SAR 影像全天时、全天候、可穿越云雾的成像特点能够稳定、周期的获取地表数据, 本世纪以后已广泛应用于冰川运动的变化监测。然而, 山谷冰川较快的运动速度(部分冰川可达到 3 m/d)导致时空失相关严重, 目前在冰川位移场提取时多使用像素偏移估计方法获取沿雷达方位向和距离向的二维位移场[7]-[9] [26]-[28]。

SAR 影像 POT 主要基于雷达信号的强度信息通过搜索窗口寻找强度互相干系数的峰值确定偏移量, 计算获取的偏移量主要由三个分量组成[26], 如式(1)所示:

$$D_{\text{offset}}=D_{\text{def}}+D_{\text{orbit}}+D_{\text{dem}} \tag{1}$$

式中, D_{offset} 为主从影像偏移量, D_{def} 地表位移引起的偏移量, D_{orbit} 飞行轨道和成像姿态引起的偏移量, D_{dem} 地形起伏引起的偏移量。

由于 SAR 侧视成像的原因, 地形起伏引起的偏移量主要作用在方位向, 在距离向一般只需要对 D_{offset} 去除轨道偏移分量即可, 对于方位向的改正, 往往通过使用多项式拟合(一般使用二阶)改正轨道偏移和地形起伏的误差分量[29]。

对于冰碛覆盖型冰川, 冰川表面受冷端季节的变化、空气湿度、冰川表面径流、冰碛物改变、冰崖断裂、冰湖的发育和溃决等影响, SAR 影响散射强度会随之相应的变化, 使用 POT 方法提取冰川位移场时因信噪比或 SAR 影像对互相关系数较低常难以获取有效的相干点源导致形变场数据缺失。

在 InSAR 时序处理时, 为去除差分干涉图中大气相位的组成分量, 常使用 Stacking-InSAR 的方法解算时序形变场[30]。在本文研究中通过对 SAR 影像 POT 组合像对做堆叠(Stacking)处理计算时序偏移的位移场, 数据处理流程如图 2 所示, 其主要步骤如下:

- (1) 完成时序 SAR 影像的精确配准后, 对堆栈的 SAR 影像进行基线组合。
- (2) 按照 POT 组合进行偏移估计计算, 获取各个 POT 像对的方位向、距离向及互相关系数分布矩阵。
- (3) 根据时间基线将方位向和距离向的位移量换算成速率, 假定各像元各方向的流速在时域上近似服从高斯分布, 利用区间估计, 见式(2), 其中, μ 和 σ 为 POT 堆栈序列的时域均值和标准差, 对各像元时域异常值进行剔除, 同时针对互相关系数小于给定阈值的像元进行过滤, 以此构建方位向和距离向有

效观测索引矩阵。

$$[\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma] \tag{2}$$

(4) 设定时域堆栈阈值, 过滤有效观测值数量小于阈值的像元, 利用精化后方位向和距离向位移序列计算各像元累计位移, 同时计算对应的累计时间, 获取方位向和距离向速率分布。

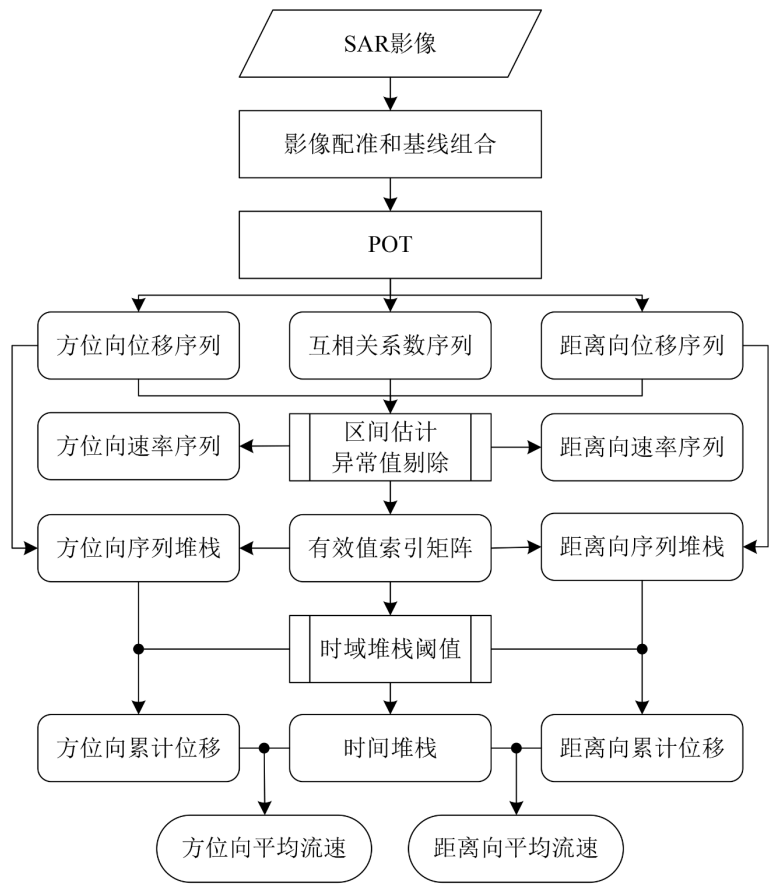


Figure 2. Flowchart of the Stacking-POT method
图 2. Stacking-POT 数据处理流程图

在本文实验中, 首先将不同卫星平台的数据集分成两个子集, 分别是 ALOS-1 PALSAR 子集(简称 P1 集)和 ALOS-2 PALSAR 子集(简称 P2 集), 针对不同子集的数据按照表 1 所示的 POT 像对分别提取位移场, 然后对 P1 集和 P2 集分别做数据堆叠处理。由于 SAR 影像配准精度在 0.1 像素内, 在不考虑配准误差的前提下, 假定堆叠的偏移格网不存在地理空间的偏移。为获取冰川表面相对稳定的格网点, 对于偏移格网空间, 根据区间估计的上限和下限作为阈值, 对每个像素上的时域序列进行过滤, 分别计算满足阈值的格网点的有效累积位移和对应的有效时间, 最后计算该时间段内的平均位移速率。

4. 结果和分析

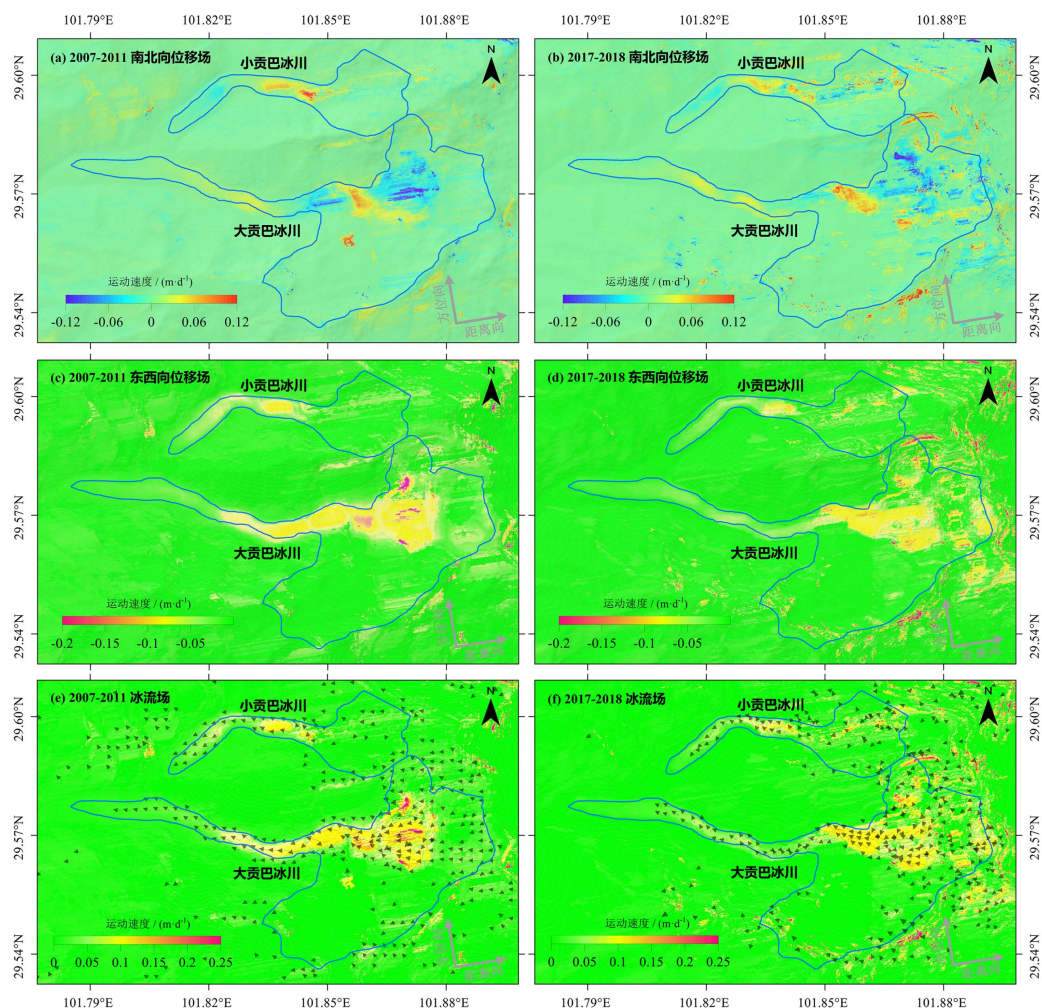
4.1. 贡巴冰川时序位移速率场提取

使用 P1 集和 P2 集数据通过 Stacking-POT 方法提取的贡巴冰川位移速率场如图 3 所示。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)分别为 P1 集和 P2 集的南北向及东西向平均位移速度场, 从图中可知, 大小贡巴冰

川在南北向位移速率分布在 $(-0.12, 0.12)$ m/d 区间, 东西向在 $(0, 0.25)$ m/d 区间。在大贡巴冰川存在两处位移速度较大的区域, 分别为冰川粒雪盆段的积累区和大贡巴冰川冰瀑上沿, 多年平均位移速度约南北向 0.11 m/d、东西向 0.25 m/d; 在小贡巴冰川区域, 由于积累区受南面山脊的影响, 影像覆盖不完整, 自雪线以下小贡巴冰川位移速率最快的区域分布在冰瀑布底部, 最大位移速率为南北向 0.07 m/d、东西向 0.10 m/d。大、小贡巴冰川的消融区的冰舌段, 冰川运动速度最大为南北向 0.04 m/d、东西向 0.5 m/d, 尤其在大、小贡巴冰川末端, 冰川平均位移速率低于 0.01 m/d。

4.2. 贡巴冰川 2007~2018 年位移速率变化监测

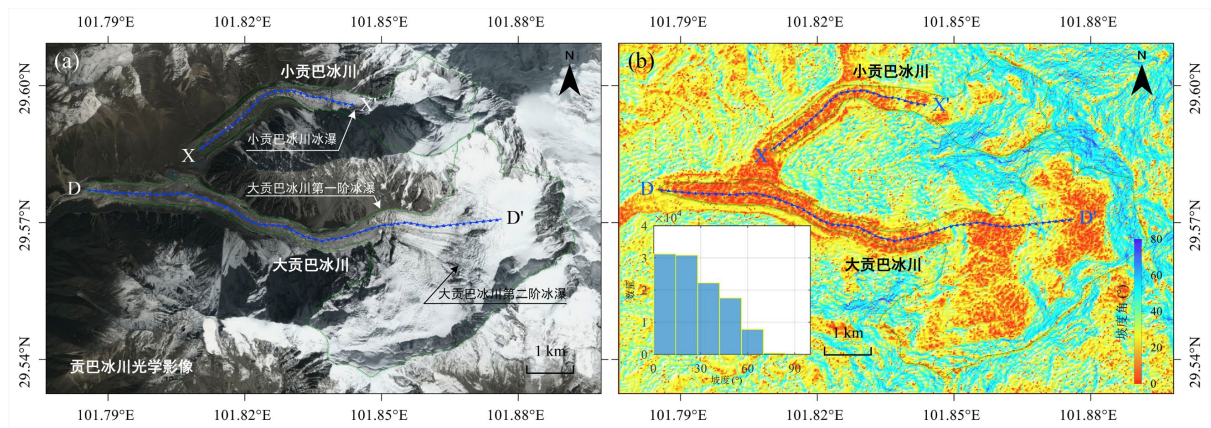
对比图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)、图 3(d), 贡巴冰川在南北向和东西向位移速率分布呈现一致性。然而在位移速率方面贡巴冰川呈现减速的特征, 尤其是大贡巴冰川的东西向位移场, 无论是积累区还是消融区上游, 冰川运动速率变缓明显。图 3(e)和图 3(f)分别给出了 P1 集和 P2 集的位移速率及冰流矢量叠加, 对比图 3(e)和图 3(f), 大贡巴冰川的冰舌中上部、冰瀑区和粒雪盆区域减速更加显著。



(a) P1 集南北向位移速率场, (b) P2 集南北向位移速率场, (c) P1 集东西向位移速率场, (d) P2 集东西向位移速率场, (e) P1 集位移速率场和冰流矢量方向, (f) P2 集位移速率场和冰流矢量方向。

Figure 3. Gongba Glacier displacement rate field

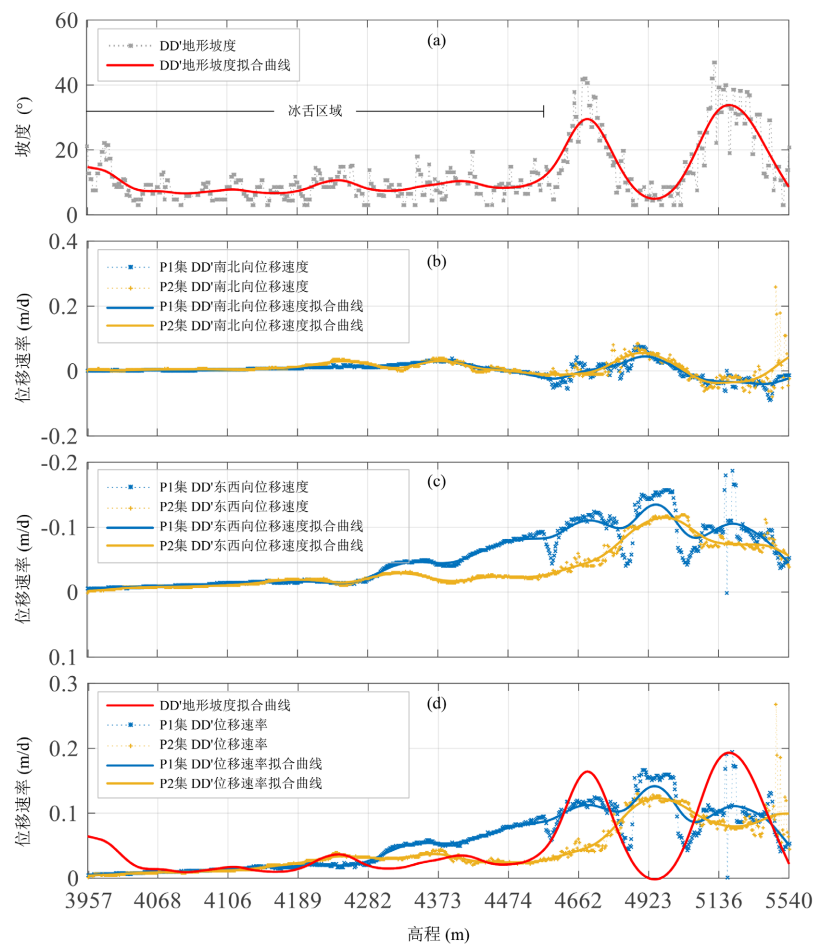
图 3. 贡巴冰川位移速度场



(a) 贡巴冰川光学卫星影像(获取自 2017 年 11 月 12 日); (b) 贡巴冰川区域坡度分布及贡巴冰川范围内直方图统计。

Figure 4. Optical satellite image and topographic gradient of Gongba Glacier

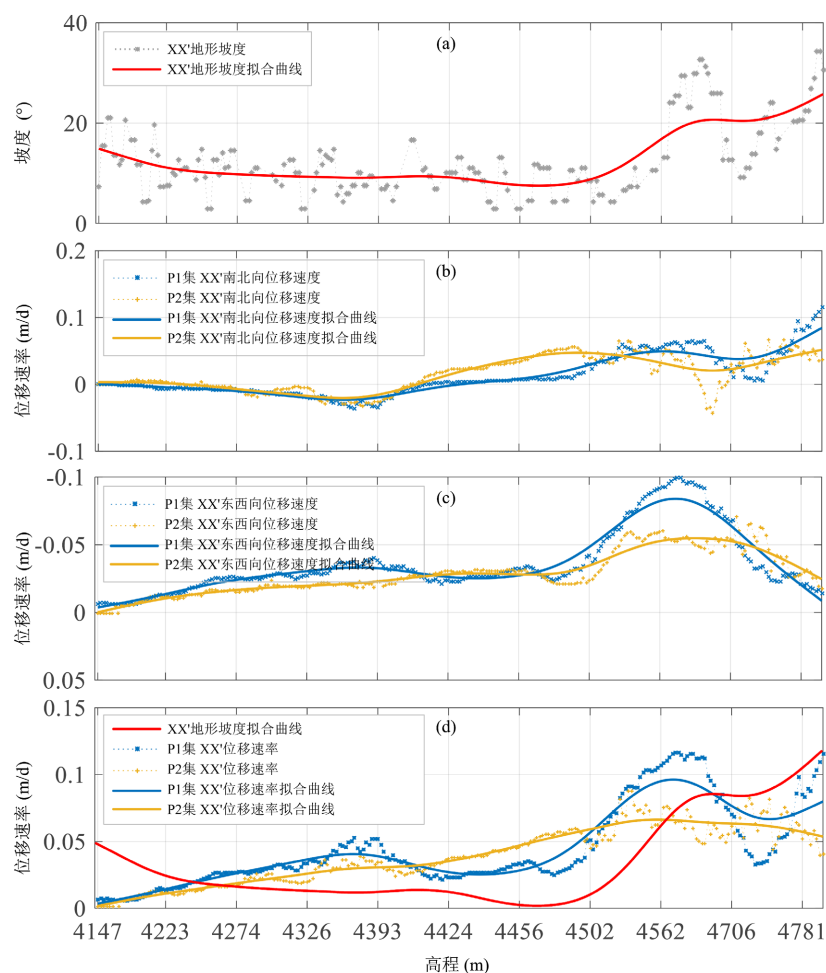
图 4. 贡巴冰川光学影像及坡度分布



(a) DD'剖面地形坡度分布及样条拟合曲线, (b) DD'剖面 P1 集合 P2 集南北向位移速度分布及其样条拟合曲线, (c) DD'剖面 P1 集合 P2 集东西向位移速度分布及其样条拟合曲线, (d) DD'剖面 P1 集合 P2 集水平方向位移速率分布和样条拟合曲线及其地形坡度叠加分布, (注: (a)~(d)横坐标均为 XX 剖面的高程值)。

Figure 5. The topographic slope and displacement rate distribution of DD' profiles of Dagongba Glacier

图 5. 大贡巴冰川 DD'剖面地形坡度和位移速率分布



(a) XX'剖面地形坡度分布及样条拟合曲线, (b) XX'剖面 P1 集合 P2 集南北向位移速度分布及其样条拟合曲线, (c) XX'剖面 P1 集合 P2 集东西向位移速度分布及其样条拟合曲线, (d) XX'剖面 P1 集合 P2 集水平方向位移速率分布和样条拟合曲线及其地形坡度叠加分布。(注: (a)~(d)横坐标均为 XX'剖面的高程值)。

Figure 6. The topographic slope and displacement rate distribution of XX' profiles of Xiaogongba Glacier

图 6. 大贡巴冰川 XX'剖面地形坡度和位移速率分布

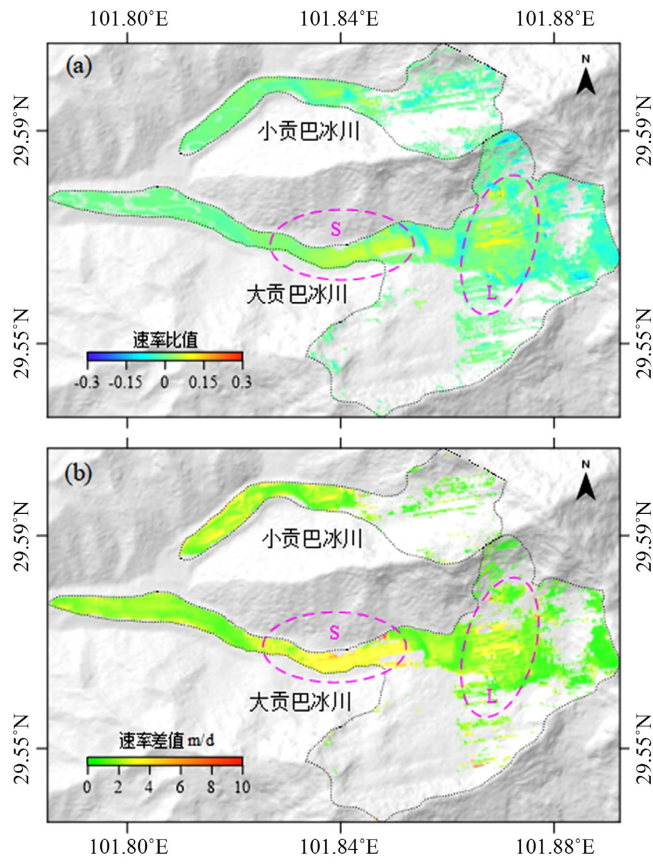
为验证贡巴冰川的运动分布同地形的相关性,借助 SRTM DEM 数据提取了贡巴冰川区域的地形坡度,如图 4(b)所示,从地形坡度晕眩图和坡度直方图分布可知,贡巴冰川平均坡度为 27.60° ,冰舌段坡度角分布在 10° 左右。分别沿大、小贡巴冰川中轴线提取地形高程、地形坡度以及 P1、P2 集的南北向、东西向位移速率场剖面线,其中大、小贡巴冰川的中轴剖面分布如图 4 中蓝色折线 DD'和 XX'所示,大、小贡巴冰川 DD'剖面线高程、地形坡度分布及地形坡度样条拟合曲线、P1 集和 P2 集的各方向位移速率分布及其样条拟合曲线如图 5 和图 6 所示。

从图 5 中可知,大贡巴冰川除冰瀑区和粒雪盆区域外 4600 m 海拔以下的冰舌区基本保持在 10° 的坡度角,在该区域内,由于冰舌呈东西走向,南北向位移速度分量接近于 0;东西方向贡巴冰川从冰舌末端至 4300 m 海拔区间,位移速度相对缓慢最大为 0.03 m/d,从 4300 m 至 4600 m 的冰瀑下沿,大贡巴冰川位移速度随着海拔的升高而递增,一方面是由于冰川在该区域内通道相对狭窄,另一方面是相比冰舌末端靠近冰瀑的区域随着海拔的升高物质的补充更多且消融更少,冰体具有更高的势能和重量也就意味着更高的动能。从第一阶冰瀑底部至冰川粒雪盆上沿,随着地形坡度的骤增贡巴冰川南北向和东西向均不

同程度的加速；值得一提的是，在大贡巴冰川第一阶冰瀑和第二阶冰瀑之间地势相对平坦，但是冰体受上游冰瀑的挤压且冰流通道变窄，造成冰川位移速度激增达到 0.15 m/d，该区域是贡巴冰川雪线以下位移速度最快的区域。

图 5(d)叠加了大贡巴冰川运动速率和地形坡度，从图中可知，除第一阶和第二阶冰瀑之间的区域外，冰川运动速度和地形呈现高相关性，表现在随着海拔的升高和地形坡度的增加冰川位移速度随着增长。此外，对比图 5(b)和图 5(c)中 P1 集和 P2 集 DD' 的位移速度分布，在南北向 P1 集和 P2 集冰川位移速率基本分布趋于一致，但是在东西向 P1 集运动速率明显高于 P2 集速率，尤其是在海拔 4280 m 以上，在近十年间大贡巴冰川减速明显。

图 6 中显示了小贡巴冰川从冰瀑布底部至冰川末端的位移速率 XX'剖面及地形属性关系分布，相比大贡巴冰川，小贡巴冰川的消融区内地形坡度接近，地势均相对平坦；在位移速率方面，小贡巴冰川在 4450 m 海拔存在一个冰流通道的转弯，南北向位移速率分量分布在(-0.02, 0.06) m/d 区间；在弧拱转弯的上游，地形随着海拔的增加变陡，由于小贡巴冰川 4450 m 海拔以上区域大致呈东西走向，冰川东西向位移速率随地形坡度的增加显著提高，最快达到 0.1 m/d。对比图 6(d)中冰川位移速率曲线和地形高度及地形坡度的关系，小贡巴冰川的位移速率分布与地形坡度高度相关；同时分析 P1 集和 P2 集的位移速率变化，从 2007 年至 2018 年小贡巴冰川位移速率减缓明显。



(a) 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率差值分布, (b) 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率比值分布。

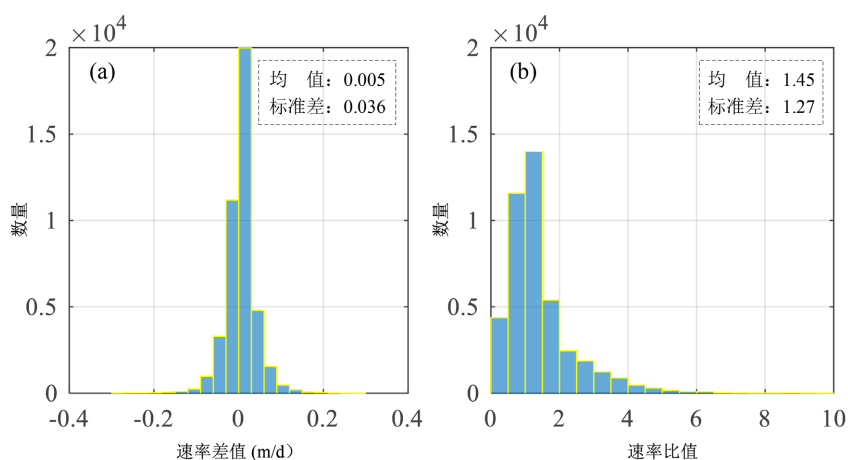
Figure 7. Displacement rate difference and ratio of P1 and P2 sets of Gongba Glacier

图 7. 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率差值和比值

为定量分析贡巴冰川在 2007 年至 2018 年间位移速率变化情况, 通过将 P1 集和 P2 集大、小贡巴冰川平面位移场速率做差和比值, 如图 7 所示, 贡巴冰川自 2007~2018 年间位移速率减缓明显, 尤其以大贡巴冰川更为显著。贡巴冰川减速最多和减速比最大均分布在大贡巴冰川的冰舌上部至第一阶冰瀑区(图 7 中粉色虚线椭圆框所示的 S 区域)以及大贡巴冰川粒雪盆区域(图 7 中粉色虚线椭圆框所示的 L 区域), 减速值约 0.08 m/d, 减速比达到 4.5 倍。经统计, 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率差值和速率比值直方图统计图如图 8 所示, P1 集(2007~2011 年间, 以 2009 年计)和 P2 集(2017 年 12 月~2018 年 11 月, 以 2018 年计)位移速率差均值为 0.005 m/d, 减速比均值达到 145%, 即年减速率为 4.21%。

自 1982 年至 1983 年青藏科考后至今, 贡巴冰川流域一直缺少降雨量和温度场的数据记录, 本文参考在贡嘎山西侧分布的两个气象观测站所监测的降雨和气温数据, 分别是位于康定市的气象观测试验站(简称康定站, 相距约 50 km)以及位于九龙县的气象观测站(简称九龙站, 相距 70 km), 已有资料显示在 2005 年至 2015 年间康定站和九龙站均呈现降雨量减少、气温升高的趋势。考虑贡巴冰川的海拔较高, 推测在贡巴冰川流域内降雨量在近十年间保持稳定或有减弱的情况, 而温度随青藏高原变暖趋势一致约 0.04℃ 的增长。气温的增高导致冰川融化的加速, 而冰川的补充保持稳定或减弱, 导致冰川物质持续亏损, 冰体质量减弱从而致使冰川位移速率的减小。

已有研究表明, 进入 21 世纪后高亚洲区域冰川位移速率整体均呈现减弱的趋势, 以藏东南念青唐古拉山脉冰川减弱最为显著, 平均减速率为 3.21%/a [3]; 在横断山脉, 尽管冰川数量和分布低于青藏高原和帕米尔高原等区域, 但位于青藏高原东南缘且冰川海拔往往更低, 冰川运动减速更加的剧烈。



(a) 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率差值直方图统计, (b) 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率比值直方图统计。

Figure 8. Displacement rate difference and ratio histogram of P1 and P2 sets of Gongba Glacier

图 8. 贡巴冰川 P1 集和 P2 集位移速率差值和比值直方图

5. 结论

本文研究中选取了 2007 年至 2018 年间 28 景 L 波段 SAR 影像数据, 使用 Stacking-POT 方法, 首次揭示了贡巴冰川的位移速率空间分布和随时间的动态变化, 并在此基础上重点开展了冰川位移速率时空差异的趋势分析。该监测结果及相关技术方法可为冰川及水文等相关研究提供基础数据, 同时该方法在常年云雾天气影响的藏东南区域冰川的监测提供借鉴和参考。

首先, 本文基于卫星 SAR 数据集对贡巴冰川开展了长时序的运动速率变化监测工作, 首次系统揭示

了贡巴冰川位移速率的空间分布特征和时间变化规律。贡巴冰川的位移速率受地形坡度较缓的影响, 相比海螺沟冰川其位移速率相对缓慢。在大贡巴冰川粒雪盆和冰瀑区速度最快达到 0.25 m/d, 而在冰舌段运动速率低于 0.10 m/d, 冰舌末端冰川基本保持相对稳定的态势低于 0.01 m/d。此外, 通过对比贡巴冰川地形坡度的分布, 贡巴冰川的运动速率分布和地形存在较高的相关性, 冰川位移速率随坡度的增加而增大。

通过对比 2007 年至 2011 年和 2017 年至 2018 年的冰川运动速率, 贡巴冰川在近十年间减速明显, 在冰川范围内减速平均值约 0.005 m/d, 而平均减速率达到了 45%, 即 4.21%/a。冰川的减速往往意味着冰川的物质亏损; 冰川的持续退化, 会导致所引发的次生灾害频率随之增高, 而随着 SAR 遥感技术的不断提高和推广, 可为冰川的退化及其次生灾害监测提供有力的数据支持。

基金项目

本研究得到国家自然科学基金项目(Nos. 42401101、42501173)、四川省科技计划项目(No. 2025ZNSFSC1157)和国家重点研发计划项目(2024YFB2606100)的联合资助。

参考文献

- [1] Sakai, A. and Fujita, K. (2017) Contrasting Glacier Responses to Recent Climate Change in High-Mountain Asia. *Scientific Reports*, 7, Article No. 13717. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14256-5>
- [2] Dehecq, A., Gourmelen, N., Gardner, A.S., Brun, F., Goldberg, D., Nienow, P.W., et al. (2019) Twenty-First Century Glacier Slowdown Driven by Mass Loss in High Mountain Asia. *Nature Geoscience*, 12, 22-27. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0271-9>
- [3] Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kääb, A. and Treichler, D. (2017) A Spatially Resolved Estimate of High Mountain Asia Glacier Mass Balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience*, 10, 668-673. <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>
- [4] Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., et al. (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- [5] Wang, W., Yao, T., Gao, Y., Yang, X. and Kattel, D.B. (2011) A First-Order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Plateau. *Mountain Research and Development*, 31, 122-130. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-10-00059.1>
- [6] Wang, W., Yao, T. and Yang, X. (2011) Variations of Glacial Lakes and Glaciers in the Boshula Mountain Range, Southeast, from the 1970s to 2009. *Annals of Glaciology*, 52, 9-17. <https://doi.org/10.3189/172756411797252347>
- [7] Berthier, E., Vadon, H., Baratoux, D., Arnaud, Y., Vincent, C., Feigl, K.L., et al. (2005) Surface Motion of Mountain Glaciers Derived from Satellite Optical Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.005>
- [8] Scherler, D., Leprince, S. and Strecker, M.R. (2008) Glacier-Surface Velocities in Alpine Terrain from Optical Satellite Imagery—Accuracy Improvement and Quality Assessment. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3806-3819. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.018>
- [9] Dehecq, A., Gourmelen, N. and Trouve, E. (2015) Deriving Large-Scale Glacier Velocities from a Complete Satellite Archive: Application to the Pamir-Karakoram-Himalaya. *Remote Sensing of Environment*, 162, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.031>
- [10] Du, J.K., He, Y.Q., Li, S., et al. (2015) Mass Balance of a Typical Monsoonal Temperate Glacier in Hengduan Mountains Region. *Acta Geographica Sinica*, 70, 1415-1422.
- [11] Shi, Y.F. and Liu, S.Y. (2000) Estimation on the Response of Glaciers in China to the Global Warming in the 21st Century. *Chinese Science Bulletin*, 45, 668-672. <https://doi.org/10.1007/bf02886048>
- [12] Braithwaite, R.J. and Zhang, Y. (2000) Sensitivity of Mass Balance of Five Swiss Glaciers to Temperature Changes Assessed by Tuning a Degree-Day Model. *Journal of Glaciology*, 46, 7-14. <https://doi.org/10.3189/172756500781833511>
- [13] Su, Z., Song, G.P. and Cao, Z.T. (1996) Maritime Characteristics of Hailuoguo Glacier in the Gongga Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 18, 51-59.
- [14] Kenyi, L.W. and Kaufmann, V. (2003) Estimation of Rock Glacier Surface Deformation Using Sar Interferometry Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1512-1515. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.811996>

-
- [15] Liu, L., Millar, C.I., Westfall, R.D. and Zebker, H.A. (2013) Surface Motion of Active Rock Glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: Inventory and a Case Study Using InSAR. *The Cryosphere*, **7**, 1109-1119. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1109-2013>
- [16] Wang, X.W., Liu, L., Zhao, L., *et al.* (2017) Mapping and Inventorying Active Rock Glaciers in the Northern Tien Shan (China) Using Satellite SAR Interferometry. *The Cryosphere*, **2017**, 1-36.
- [17] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002) A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.803792>
- [18] Liu, S.Y., Yao, X.J., Guo, W.Q., *et al.* (2015) The Contemporary Glaciers in China Based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, **70**, 3-16.
- [19] Strozzi, T., Luckman, A., Murray, T., Wegmüller, U. and Werner, C.L. (2002) Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 2384-2391. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.805079>
- [20] Strozzi, T., Kouraev, A., Wiesmann, A., Wegmüller, U., Sharov, A. and Werner, C. (2008) Estimation of Arctic Glacier Motion with Satellite L-Band SAR Data. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 636-645. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.007>
- [21] Fu, Y., Zhang, B., Liu, G., Zhang, R., Liu, Q. and Ye, Y. (2022) An Optical Flow SBAS Technique for Glacier Surface Velocity Extraction Using SAR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **19**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2022.3200422>
- [22] Su, Z. (1992) The Condition of Development and Distributed Characteristic of the Mt. Gongga Glacier. *Journal of Glaciology and Geocryology*, **15**, 551-558.
- [23] Zhang, N.N., He, Y.Q., Duan, K.Q., *et al.* (2008) Changes of Gongba Glacier in the West Slope of Mt. Gongga during the Past 25 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, **30**, 380-382.
- [24] Kang, J.C. (1989) The Characteristics and Forming Process of Glacial Peripheral Moraines at Gongba Glaciers in Mt. Gongga. *Journal of Glaciology and Geocryology*, **2**, 172-176+193.
- [25] Li, J.J. and Su, Z. (1996) Glacier in Hengduan Mountains. Science Press.
- [26] Pathier, E., Fielding, E.J., Wright, T.J., Walker, R., Parsons, B.E. and Hensley, S. (2006) Displacement Field and Slip Distribution of the 2005 Kashmir Earthquake from SAR Imagery. *Geophysical Research Letters*, **33**, L20310. <https://doi.org/10.1029/2006gl027193>
- [27] Liu, Y.H., Qu, C.Y. and Shan, X.J. (2012) Two-Dimensional Displacement Field of the Wenchuan Earthquake Inferred from SAR Intensity Offset-Tracking. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**, 3296-3306.
- [28] Shi, X., Zhang, L., Balz, T. and Liao, M. (2015) Landslide Deformation Monitoring Using Point-Like Target Offset Tracking with Multi-Mode High-Resolution TerraSAR-X Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **105**, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.017>
- [29] Chen, Q., Luo, R., Yang, Y.H., *et al.* (2015) Method and Accuracy of Extracting Surface Deformation Field from SAR Image Coregistration. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **44**, 301-308.
- [30] Cavalié, O., Lasserre, C., Doin, M.P., *et al.* (2008) Measurement of Interseismic Strain across the Haiyuan Fault (Gansu, China), by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, **275**, 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.057>