



联合卫星 SAR 和地基 SAR 的海螺沟冰川 动态变化及次生滑坡灾害监测

刘国祥^{1,2} 张波¹ 张瑞^{1,2} 蔡嘉伦¹ 符茵¹
刘巧³ 于冰⁴ 李志林^{1,5}

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

2 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室,四川 成都,611756

3 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川 成都,610041

4 西南石油大学土木工程与建筑学院,四川 成都,610500

5 香港理工大学土地测量及地理资讯学系,香港 九龙 红磡

摘要:受全球气候变化的影响,近年来中国藏东南及横断山脉多数冰川物质持续亏损、运动速度减缓,导致泥石流、滑坡等灾害频发。为突破光学遥感受气候条件制约的瓶颈,联合卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)和地基 SAR 两种技术手段,选取海螺沟冰川作为典型研究区域,开展时序监测分析。基于对近 11 a 间获取的 38 景 PALSAR 系列影像的像素偏移统计表明,海螺沟 1 号冰川粒雪盆和冰瀑布上沿区域整体运动最快,最大速度超过 2 m/d;在海拔 2 900~3 900 m 的冰舌区,冰川运动趋缓,速度降至 0.1~0.4 m/d;随着季节更替,海螺沟冰川运动速度呈周期性波动,积累区的夏冬两季差异为 25%~35%,而冰舌段的差异则高达 4 倍。在年际变化方面,海螺沟 1 号冰川的运动速度平均减缓率为每年 7.27%,消融区内减缓率高达每年 15.57%。同时,使用像素偏移追踪和 Stacking-InSAR(interferometric SAR)方法在海螺沟 U 型谷北坡探明了多处不稳定滑坡体,统计分析表明,此类滑坡运动与冰川消融具有强相关性,滑移速度于每年夏季达到峰值,2018 年度最大滑移速度为南北向 100 mm/d、东西向 50 mm/d。进一步分析地基雷达的高频实时监测数据,确定该滑坡体的滑移速度在 2018-07-09 达到峰值(150 mm/d),并于随后失稳垮塌,详细展现了整个蠕变致灾过程。相关研究数据及监测结果可为冰冻圈及山地灾害研究提供参考。

关键词:海螺沟冰川;像素偏移追踪;地基 SAR;冰川运动;滑坡

中图分类号:P237

文献标志码:A

联合国政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告指出^[1],近 100 多年来的全球平均地表温度升高了 0.85℃;在全球气候变暖的背景下,全球冰川面积不断减少,雪线不断上升,退缩和减薄显著加剧。冰川运动是冰川流域物质交换的基础,冰川加速消融及储量减少不仅影响冰川流域水资源供给,破坏陆表生态环境平衡,同时也是诸多冰川泥石流、冰湖溃决以及滑坡灾害的诱因^[2-5]。随着冰川的退化,尤其是冰面的减薄,极易引起山谷冰川谷肩的失稳,并引发滑坡、泥石流等次生地质灾害,给周边及下游流域的安全造成严重威胁。

受季风条件的影响,在中国藏东南的横断山脉和念青唐古拉山脉中东段,发育了占全国冰川面积 22% 的季风海洋型冰川^[6]。与青藏高原大陆型冰川相比,海洋型冰川具有海拔更低、冰体温度更高(消融区内大部分接近 0℃)、动态变化更强(运动速度更快)、对气候变化更敏感的特点^[7-10]。而近半个世纪以来,中国平均温度上升了 1.38℃,变暖速率达到每 10 年 0.23℃^[11]。受区域气候条件影响,近年间高亚洲山谷冰川退化和减薄明显加剧,如喜马拉雅山脉、念青唐古拉山脉、天山山脉、兴都库什山脉以及帕米尔高原等区域的冰川运动减速显著,尤其是念青唐古拉山

收稿日期:2019-03-18

项目资助:国家重点研发计划(2017YFB0502700);国家自然科学基金(41771402,41871069,41601503,41801399);四川省科技支撑计划应用基础面上项目(2018JY0564,2018JY0138)。

第一作者:刘国祥,博士,教授,主要从事永久散射体雷达干涉及区域形变反演。rsgxliu@swjtu.edu.cn

通讯作者:张波,博士生。rsbozh@qq.com

脉的冰川减速最为明显,变化率达到每 10 年 ($-34.3\% \pm 5\%$)^[12]。在此背景下,局部区域地质灾害风险日趋显著,仅以藏东南色东普沟流域为例,近 5 a 间有记录的大规模冰碛碎屑流已达 8 次,造成雅鲁藏布江大规模堵塞致灾事件 4 起^[4]。

对冰川运动进行动态监测可有效反映冰川的动态演变规律,并据此揭示冰川的退化状况,是冰川资源利用、气候变化风险控制与相关灾害预警的重要措施之一,受到各行业部门和学者的高度重视,也是当前的学术热点。目前,针对冰川动态监测的技术途径主要以光学遥感影像解译和分析为主^[13-15],难以对冰川运动场进行准确的量化,且受气候条件制约较为严重。尤其是在中国藏东南多云雾地区,光学遥感数据更是匮乏。而合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)传感器因其具有空间分辨率高、自动化程度高、不受气候条件制约、地表形变提取精度高等突出技术优势^[16],可有效弥补光学遥感手段的不足。近年来,卫星 SAR 遥感已在大范围形变(包括冰川运动)监测与地表覆盖变化监测等方面展现出极好的应用前景^[17-20],已逐渐成为冰冻圈和相关领域研究的重要技术途径。

本文选取贡嘎山海螺沟冰川作为典型研究对象,以卫星 SAR 和地基 SAR 时序影像为数据源,采用像素偏移追踪(pixel offset tracking, POT)与干涉堆叠等方法,从不同的时空尺度揭示海螺沟冰川运动的动态变化,并在此基础上探测消融区内冰川退化所引起的次生滑坡灾害,重点开展实时监测和时序演化分析。

1 研究区域

贡嘎山位于青藏高原东南缘,是横断山脉的最高峰,主峰高 7 556 m,周围共发育有冰川 74 条,围绕主峰呈辐射状分布^[21]。位于东坡的海螺沟冰川(Hailuoguo, HLG)长 13.1 km,宽 250~1 200 m,面积 25.71 km²,是该区域最大的山谷冰川^[22]。海螺沟 1 号冰川(HLG No. 1)自 7 556 m 主峰往下至 4 980 m 之间为冰川粒雪盆地,海拔 4 980~3 700 m 之间为冰瀑布区域,从 3 700 m 延伸至 2 900 m 之间为海螺沟冰川舌区域^[23]。海螺沟 1 号冰川流域南侧还分离出了两个规模较小的海螺沟 2 号冰川(HLG No. 2)和海螺沟 3 号冰川(HLG No. 3),其空间分布如图 1 所示。

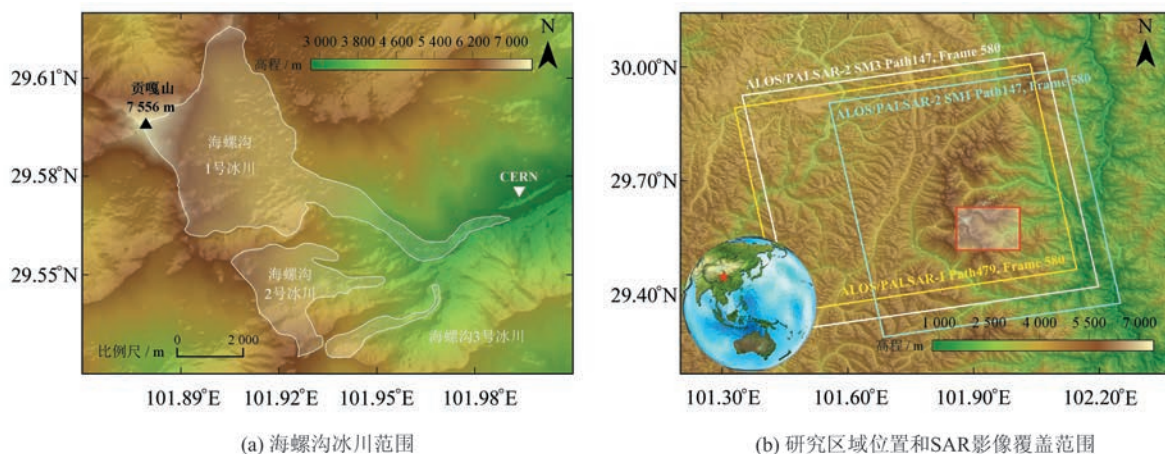


图 1 研究区域和卫星 SAR 影像覆盖范围

Fig. 1 Study Area and Coverage of Satellite SAR Images

海螺沟冰川是中国极具代表性的典型季风海洋型温性冰川,在冰川末端,多年平均气温为 4.1℃。冰川冰面消融开始于每年 3 月,结束于 12 月,其中 5 月—10 月是海螺沟冰川的主要消融期,期间降雨量超过 1 500 mm,占全年降雨量的 80%^[10]。自海拔 3 100 m 以下,为表碛富集区域,冰川末端表碛厚度最厚达到 1 m。由于受季风和地形的影响,海拔 3 000 m 处的年降雨量为 1 956 mm,年平均降水日数多达 251 d,致使海螺沟内常年云雾遮挡,难以获取有效的光学卫星数

据^[10,23-24]。

近些年来,海螺沟冰川退化趋势明显。根据已有观测资料,1966—2008 年,海螺沟冰川共退缩了约 728 m(平均速度为 17.3 m/a),在此期间,冰川面积减少了 4%。冰面消融方面,海螺沟冰川在 1989—2008 年间,其冰川消融区(海拔在 3 582 m 以下)的表面平均减薄了 33.9 m,平均减薄速度为 1.8 m/a,其中冰面减薄速度最大的区域在冰舌末端,减薄速度为 4.3 m/a,据推算,冰舌段的平均减薄约占冰川厚度的 26%^[22]。

2 星载 SAR 和地基 SAR 影像数据

为了监测贡嘎山海螺沟冰川消融区冰川运动变化及冰川退化所引起的次生滑坡灾害,选取星载 SAR 和地基 SAR 两种数据源开展实验。其中,星载 SAR 数据来自两个卫星系统,自 2007-01 至 2018-11 期间,在该区域总计获取 38 景 SAR 卫星影像(覆盖范围如图 1 所示),包括 ALOS/PALSAR-1(简称 P_1) 卫星 2007-01 至 2011-03 期间获取的 20 景 SAR 影像(方位向分辨率 3.18 m,距离向分辨率 4.69 m),以及其后继星 ALOS/PALSAR-2(简称 P_2) 卫星 2014-09 至 2018-11 期间获取的 18 景的 SAR 影像(包括 SM1 模式 8 景,方位向分辨率 1.83 m,距离向分辨率 1.43 m;SM3 模式 10 景,方位向分辨率 3.24 m,距离向分辨率 4.29 m)。各影像数据的成像时间与 POT 组合属性信息如表 1 所示。

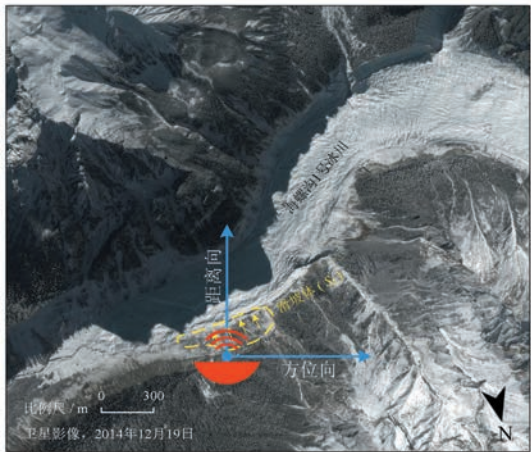
地基 SAR 数据方面,在贡嘎山海螺沟景区内老观景台处布设 1 台 IBIS-L 型号 Ku 波段地基雷达(图 2),自 2018-05-16 至 2018-07-23 期间,以 10 min 为采样间隔,总计获取 9 592 景 SAR 影像数据(空间分辨率为 0.5 m)。

此外,为了实现 SAR 影像几何空间到地理空间的坐标转换以及地形坡度分析,使用 SRTM(shuttle radar topography mission) V3.0 30 m DEM(digital elevation model)作为参考数据;为了分析海螺沟冰川运动和温度变化的关系,使用中国科学院贡嘎山高山生态站(Chinese Ecosystem Research Network, CERN) 3 000 m 的气象观测数据。

表 1 卫星 SAR 影像数据成像时间及 POT 组合属性信息
Tab. 1 Imaging Time of the Satellite SAR Images and the Attribute Information of the POT Combinations

卫星	序号	主影像 成像时间	从影像 成像时间	时间 基线/d	空间 基线/m
P_1	1	2007-01-09	2007-07-12	184	2 403
	2	2007-07-12	2007-08-27	46	263
	3	2007-08-27	2007-10-12	46	329
	4	2007-10-12	2008-01-12	92	398
	5	2008-01-12	2008-04-13	92	781
	6	2008-04-13	2008-07-14	92	—2 670
	7	2008-07-14	2008-08-29	46	—2 067
	8	2008-08-29	2008-11-29	92	1 150
	9	2008-11-29	2009-03-01	92	482
	10	2009-03-01	2009-09-01	184	948
	11	2009-09-01	2009-10-17	46	269
	12	2009-10-17	2010-01-17	92	270
	13	2010-01-17	2010-03-04	46	449
	14	2010-03-04	2010-07-20	138	328
	15	2010-07-20	2010-09-04	46	271
	16	2010-09-04	2010-10-20	46	92
	17	2010-10-20	2010-12-05	46	21
	18	2010-12-05	2011-01-20	46	388
	19	2011-01-20	2011-03-07	46	496
P_2 SM1	20	2017-12-01	2018-01-12	42	186
	21	2018-01-12	2018-02-23	42	—120
	22	2018-02-23	2018-04-06	42	—238
	23	2018-04-06	2018-05-18	42	78
	24	2018-05-18	2018-06-29	42	8
	25	2018-06-29	2018-08-10	42	—73
	26	2018-08-10	2018-09-21	42	225
P_2 SM3	27	2014-09-26	2014-12-05	70	14
	28	2014-12-05	2015-09-25	294	—19
	29	2015-09-25	2015-12-04	70	40
	30	2015-12-04	2016-02-12	70	—8
	31	2016-02-12	2016-07-15	154	—101
	32	2016-07-15	2016-09-23	70	49
	33	2016-09-23	2016-12-02	70	25
	34	2016-12-02	2017-02-10	70	—69
	35	2017-02-10	2018-11-02	630	86
异源	36	2016-12-02	2017-12-01	—	—
	37	2018-09-21	2018-11-02	—	—

说明: P_1 表示 ALOS/PALSAR-1 影像对子集, P_2 表示 ALOS/PALSAR-2 影像对子集



(a) 地基雷达设站位置示意图



(b) 地基雷达设备

图 2 海螺沟 1 号冰川地基雷达设站位置和设备

Fig. 2 Location of Ground-Based SAR in the HLG No. 1 and the Work Equipment

3 像素偏移估计和地基合成孔径雷达干涉测量基本原理

3.1 卫星 SAR 影像偏移估计提取地表位移

基于卫星 SAR 影像的 POT 方法能够获取沿雷达卫星方位向和距离向的二维位移场,而且不需要相位解缠处理,克服了失相关等问题,较大程度上弥补了合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)技术应用的局限性,在本世纪被广泛应用于滑坡位移、地震形变场、冰川流动等大梯度地表形变的监测中^[18-20, 25-30]。

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来确定偏移量,计算获取的偏移量主要由 3 个分量组成^[18-19, 31]:

$$D_{\text{offset}} = D_{\text{def}} + D_{\text{orbit}} + D_{\text{dem}} \quad (1)$$

式中, D_{offset} 为主从影像偏移量; D_{def} 为地表位移引起的偏移量; D_{orbit} 为飞行轨道和成像姿态引起的偏移量; D_{dem} 为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,往往通过多项式拟合(一般使用二阶)来改正轨道偏移和地形起伏的误差分量^[31]。

3.2 地基 InSAR 基本原理

地基雷达干涉测量在卫星 InSAR 的基础上,引入步进频率连续波以提高雷达距离向分辨率。在系统设计与实现方面,主要基于以下 3 项技术^[32-33]:

1) 步进频率连续波技术

地基 SAR 系统采用步进频率连续波技术合成信号,在得到较好分辨率的同时,保持足够的平均发射功率^[34-35]。雷达距离向分辨率为:

$$\delta_r = \frac{C\tau}{2} = \frac{C}{2B} \quad (2)$$

式中, $C = 3 \times 10^8$ m/s 为光速; τ 为脉宽; B 为脉冲带宽。

2) 合成孔径技术

地基 SAR 通过合成孔径技术提高方位向分辨率。主机在滑轨上滑动或者通过偏心旋转合成孔径来采集数据^[34-35],相当于雷达孔径达到 2 m,则方位向分辨率为:

$$\delta_c = \frac{\lambda}{2L_s} r \quad (3)$$

式中, r 为雷达和目标的距离; λ 为雷达波长; L_s 为真实孔径天线长度。

3) 差分干涉测量技术

利用地基 SAR 干涉技术可以获得高精度的形变量,干涉测量技术通过对不同时刻的雷达反射复相位信号共轭相乘,以获得目标的高精度形变信息。

由于地基 SAR 系统使用滑动轨道以较短的工作周期反复成像,能够克服时间和空间失相关问题。另外,它近乎为零的空间基线,使得干涉建模不受基线误差干扰,精度极高。现已广泛应用于滑坡、大坝、露天采矿等形变监测中^[32-37]。

4 结果和分析

4.1 基于卫星 SAR 像素偏移估计的海螺沟冰川表面流速监测

对表 1 所示的影像集完成偏移估计组合解算后,以不同的卫星平台为基准,分成 ALOS/PALSAR-1 影像对子集(简称 P_1 集)和 ALOS/PALSAR-2 影像对子集(简称 P_2 集),分别基于 P_1 集和 P_2 集提取时序位移场。以 P_1 集为例,将全部顺序偏移估计格网堆叠,由于 SAR 影像的配准精度在 0.1 像素内,在不考虑配准误差的前提下,堆叠的偏移格网不存在地理空间偏移。为了获取冰川表面相对稳定的格网点,本文对于偏移格网空间,首先统计每个像素上满足偏移估计信噪比阈值的时序数量,并设置时间连续性阈值(本文使用总偏移估计对数量的 80% 作为时间连续性阈值,即 15),然后分别计算满足阈值的格网点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度。 P_2 集亦然。经解算,最终获得 P_1 集和 P_2 集距离向和方位向的平均位移速度如图 3 所示。

海螺沟 1 号冰川大致呈东西走向,对于距离向位移更加敏感。从图 3 可知,冰川积累区和消融区的速度差异明显,海螺沟 1 号冰川粒雪盆有 3 处运动速度较大区域的多年日平均速度达到 1.2 m/d,局部区域可达到 2 m/d,借助光学遥感影像判断,积累区的冰裂隙广泛发育,雪崩痕迹明显。在海螺沟 1 号冰川大冰瀑布上沿,从粒雪盆发育的 3 个冰川支流汇集于此,冰流通道变窄,如图 4(a) 所示。从粒雪盆最宽处 7 800 m 到冰瀑上沿最窄处仅有 820 m 宽,冰体在挤压作用下运动速度加快,甚至超过 2.5 m/d,这也是海螺沟 1 号冰川冰瀑布冰崩频繁的原因之一。在消融区内,

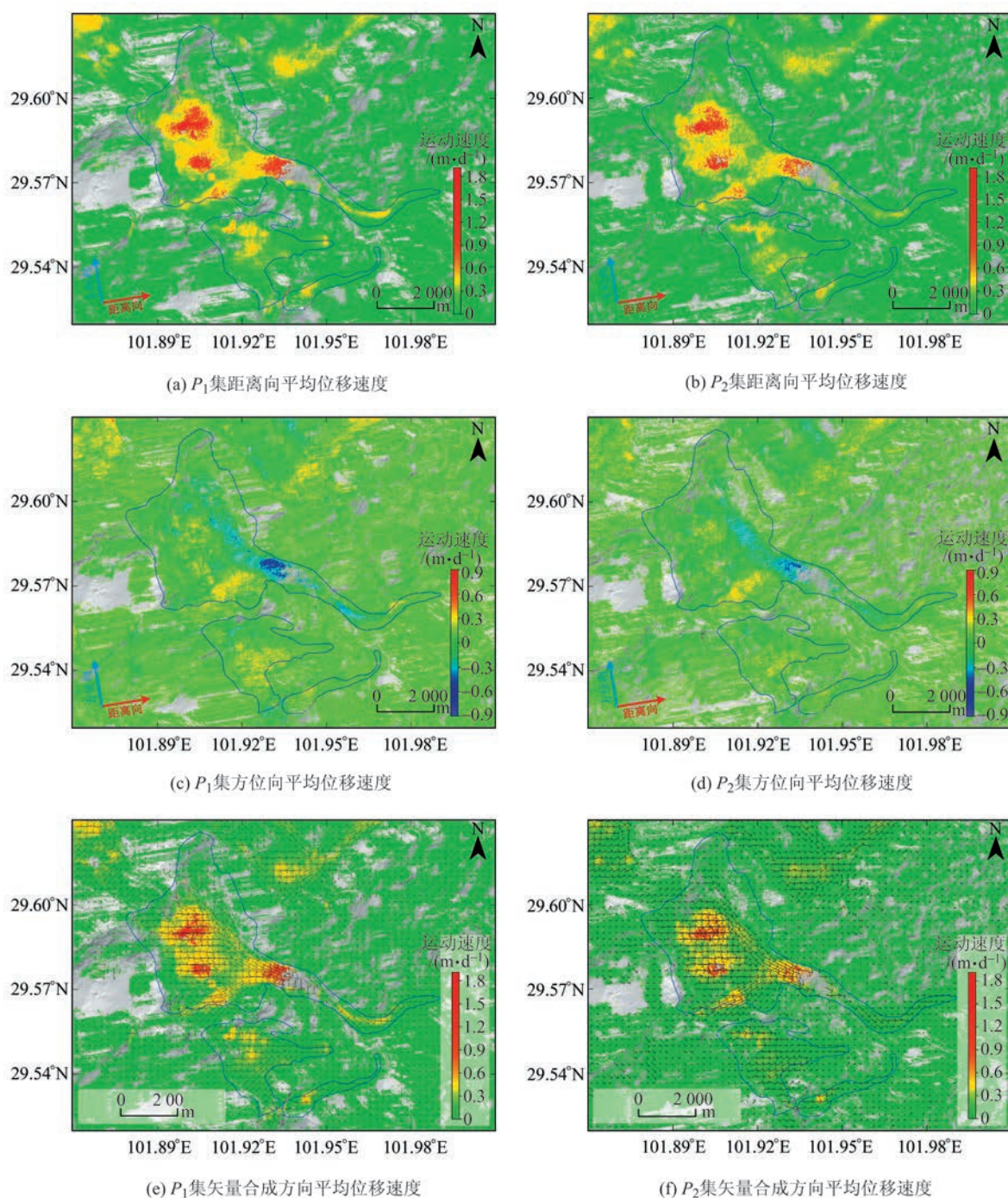


图3 P_1 集和 P_2 集距离向、方位向、矢量合成方向平均位移速度

Fig. 3 Average Displacement Rates in Range, Azimuth and Vector Composition Directions of Sets P_1 and P_2

冰川运动常年平均速度约 0.3 m/d , 运动速度最快的区域集中在海拔 3400 m 的冰川大转弯处, 受山体阻挡, 冰体受到挤压, 速度也随之加快, 导致该区域成为海螺沟 1 号冰川消融区冰裂隙发育最集中的区域。对比海螺沟 1 号冰川, 海螺沟 2 号和 3 号冰川的运动速度相对低一些, 海螺沟 2 号冰川多年位移速度分布在 $0.1 \sim 0.7 \text{ m/d}$, 而海螺沟 3 号冰川的位移速度多分布于 $0.1 \sim 0.5 \text{ m/d}$ 。

为了分析海螺沟冰川运动速度和地形的关系, 借助 SRTM DEM 计算了海螺沟区域的地形

坡度, 如图 4(b) 所示。沿海螺沟 1 号冰川中轴线 $P-P'$ 提取了 P_1 集和 P_2 集的平均速度剖面及其对应的地形坡度剖面, 如图 5 所示。图 5 中蓝色线条和绿色线条分别代表 P_1 集和 P_2 集的海螺沟 1 号冰川中轴线剖面上的运动速度样条拟合曲线, 黄色虚线代表地形坡度。从图 5 可知, 海螺沟 1 号冰川的运动分布和地形坡度有较高的相关性, 在粒雪盆和大冰瀑布运动速度超过 0.8 m/d 的区域, 地形坡度多处于 30° 以上, 反之亦然。此外, 由于大冰瀑布冰崩频繁,

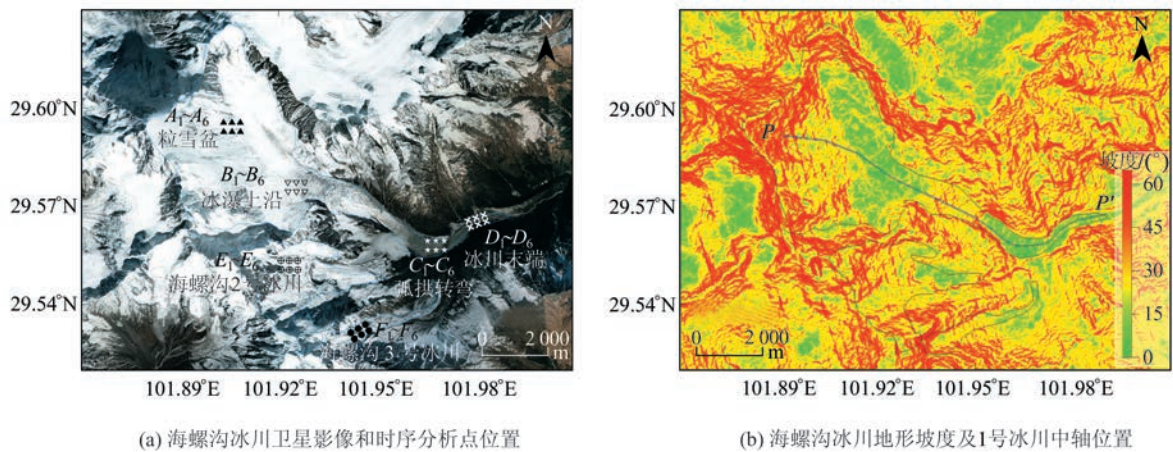
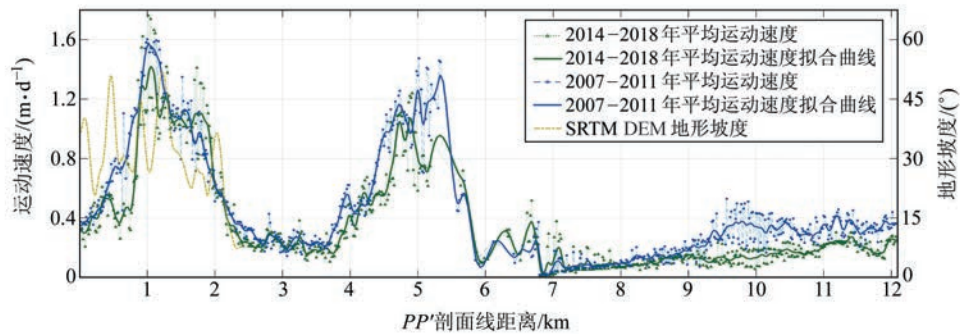


图 4 海螺沟冰川流域时序分析点位置和地形坡度分布

Fig. 4 Location of Time Series Analysis Points and Topographic Gradient Distribution of HLG Catchment

图 5 海螺沟 1 号冰川 P_1 集和 P_2 集平均速度剖面及地形坡度剖面Fig. 5 Average Velocity Profiles of the P_1 and P_2 Sets and Topographic Slope Profiles of HLG No. 1

地形破坏较大,导致偏移估计信噪比较低,获取的有效格网点较少。

从 P_1 集和 P_2 集的剖面位移速度分布可知,海螺沟 1 号冰川 2014—2018 年的平均运动速度相对于 2007—2011 年呈减缓趋势。尤其是消融区,因海拔较低,冰体对气温变暖更加敏感,冰川持续减薄,冰体自重减弱是冰川运动减速的根本原因。经计算,沿 PP' 剖面,海螺沟减速率为 50.9% (平均减速率为每年 7.27%),而消融区内减速率达到了 109% (平均减速率为每年 15.57%)。

为进一步分析海螺沟冰川不同区域 2007—2018 年的运动速度变化,分别在海螺沟 1 号冰川粒雪盆、冰瀑上沿、弧拱转弯处、冰舌末端以及海螺沟 2 号和 3 号冰川各选取 6 个像元分析时序变化,分布如图 6 中的 $A_1 \sim A_6$ 、 $B_1 \sim B_6$ 、 $C_1 \sim C_6$ 、 $D_1 \sim D_6$ 、 $E_1 \sim E_6$ 、 $F_1 \sim F_6$ 所示。在海螺沟 1 号冰川粒雪盆区域,2007—2018 年的运动速度减弱不明显,但随着冰川海拔的降低,冰川运动速度减缓趋势变得显著,尤其是弧拱转弯处和冰川末端,2007—2018 年间,冰川运动速度几乎呈线性减

弱;对于海螺沟 2 号冰川和 3 号冰川,也均呈现出运动速度变缓的趋势。

在全球气候变暖的背景下,季风海洋型冰川对气候变化更加敏感,冰川运动速度随季节变化更加显著。为分析海螺沟冰川的季节性变化规律,考虑到本文研究中 2018 年的影像数量分布相对均匀(时间间隔均为 42 d),使用 2017-12 至 2018-11 的 SAR 数据对海螺沟 1 号冰川粒雪盆、冰瀑布上沿、弧拱转弯处以及冰舌末端分别提取了方位向和距离向的平均运动速度变化,如图 7 所示,结合 CERN 3 000 m 的气象观测数据,分析冰川运动与气温变化的关系。

从图 7 可知,海螺沟 1 号冰川由于坡向的原因,方位向运动速度的改变同温度场的变化相关性相对较弱;而在距离向上,从粒雪盆到冰川末端,4 月份以后,随着气温的增长,冰川运动速度开始加速,特别是海螺沟 1 号冰川弧拱转弯处和冰舌末端,距离向冰川运动速度的变化几乎同温度变化同步发生,值得一提的是,粒雪盆区域由于海拔较高,运动速度的加速有一个短暂的滞后期;8 月份以后,随着气温的降低,冰川运动速度开始减弱。

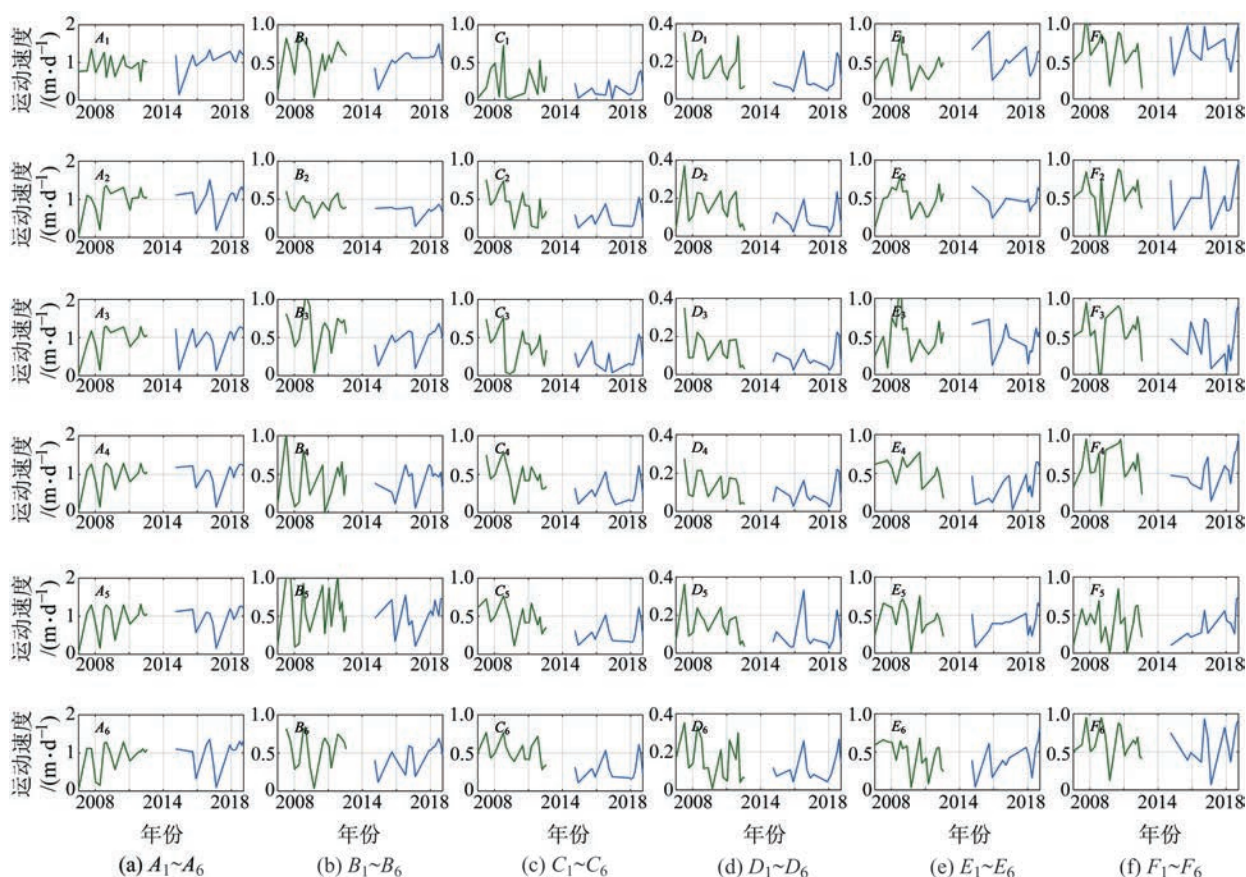


图6 海螺沟冰川流域不同位置的运动速度时序变化曲线

Fig. 6 Time Series Curves of Velocity Variations at Different Locations in HLG Basin

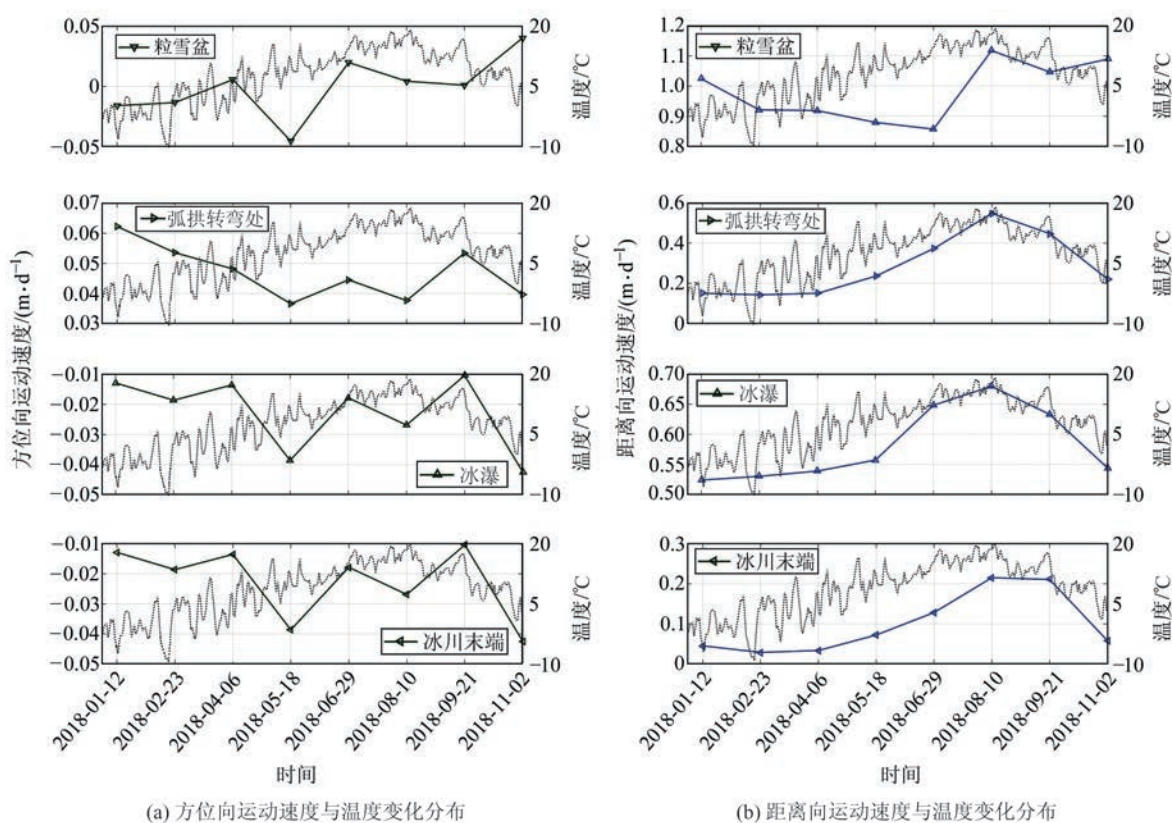


图7 海螺沟1号冰川运动速度季节变化与温度变化分布图

Fig. 7 Seasonal Variations of Glacier Velocities and Distributions of Temperature Changes of HLG No. 1

4.2 基于卫星 SAR 像素偏移估计的海螺沟冰川消融区滑坡探测与时序分析

图 8 和图 9 分别给出了 2017-12 至 2018-11 期间,每 42 d 海螺沟 1 号冰川冰舌弧拱区至冰舌末端卫星距离向和方位向的运动速度分布。结合统计分析不难发现,在冰川 U 型谷中,冰川侧碛堤两侧存在与冰川运动速度方向不符、沿地形坡向蠕变的区域。如图 10 所示,位于冰舌北侧 3 个沿坡向蠕变滑移的区域(从末端开始,分别命名为 S_1 、 S_2 和 S_3)的滑坡体与冰舌区域的冰川运动变化存在一定的相关性,但方向上具有明显的差异,其时空分布特征符合冰川减薄和消融诱发坡体失稳的特点和趋势。

进一步提取 S_1 、 S_2 和 S_3 这 3 处滑坡体 2007—2018 年的时序速度变化,如图 11 所示。从时序曲线可知,3 处滑坡体的运动在时间上和冰川的消融保持一致,尽管 S_1 、 S_2 和 S_3 在运动速度上存在差异性,但 3 处滑坡体每年运动速度的峰值均为 7 月—10 月。在 2007—2011 年,滑坡体 S_3 的滑动更加明显,2009 年夏季,运动速度峰值达到了距离向 0.24 m/d、方位向 0.35 m/d,2014 年以后, S_3 的滑动速度开始减缓;滑坡体 S_1 在 2007—2011 年的滑动速度介于 S_2 和 S_3 之间,而在 2014 年以后,也呈现变缓的趋势;对于滑坡体 S_2 ,2007—2017 年间,滑动速度呈加速的趋势,特别是在 2018-05 以后,滑动速度显著提升。

通过无人机航测影像(图 10)解译,不难确定 3 处滑坡体区域均为不稳定滑坡体。现场调研发现,在海螺沟海拔 2 800 m 以上的冰川 U 型谷中,冰川侧碛堤高出冰面 100~200 m,地形坡度多超过 40°,局部区域可达到 60°。海螺沟流域山体主要由变质岩和中酸性混合岩体组成,岩层节理裂隙发育,受日照和冻融影响,岩石风化、破碎、剥落严重,松散的堆积体、岩锥和冰碛物(由砾石、砂石及亚砂土组成)大量存在,导致边坡失稳严重,落石、泥石流和滑坡灾害发育,滑坡区域泥石流冲刷痕迹较为明显。

由于海螺沟侧碛土质岩石较为松散,每年消融期开始后,一方面,冰川减薄致使滑坡坡脚阻滑段减少、斜坡临空高度增加,导致抗滑力减小;另一方面,由于冰川的切向运动对滑坡体的侵蚀作用引起滑带抗剪强度减弱,同时充沛的降雨也对滑坡的运动产生了促进作用。因此,3 处滑坡体每年滑移速度的峰值出现在 7 月—10 月。

4.3 基于地基 SAR 的海螺沟冰川冰舌末端及 $S_1 \sim S_3$ 滑坡连续监测与演化规律分析

自 2018-05-16 至 2018-07-23 期间,地基 SAR 系统以 10 min 为采样间隔,总计获取了 9 592 景空间分辨率为 0.5 m 的 SAR 影像,按照干涉堆叠方法开展数据处理。经聚焦成像,研究区域内影像平均强度、相干系数、相位稳定性和信噪比分布如图 12 所示。

对成像质量图进行解译分析,冰川表面附着的冰碛物和 U 型谷南侧的岩壁均具有较强的反射信号和较高的信噪比。而 10 min 的采样间隔在时间尺度上也足以保证相位干涉的相关性。考虑到海螺沟冰川末端沟谷内的空气湿度较大,尤其是夏季多雨多雾,为提高雷达干涉测量的准确性,通过选取稳定目标作为地面控制点,估计并校正大气延迟。此方法依赖于地面控制点的稳定性,如果所选择的散射体存在较大形变,则监测位移信号中低频分量的一部分将被视为大气并被过滤。本文研究选取了海螺沟 U 型谷末端南侧的稳定基岩点作为控制点,参与大气相位的校正。

图 13 为经大气校正后的研究区域累积位移图。其中, $GCP_1 \sim GCP_4$ 为实验选取的控制点。经统计,监测周期内(68 d),沿雷达视线方向的正向最大位移为 4 618 mm(远离雷达方向),负向最大位移为 10 050 mm(指向雷达方向)。

为分析地基 SAR 监测冰川和滑坡体位移的时序变化,以图 13 中 a 和 b 矩形框内所示的采样点分别对冰川区和滑坡区提取时序位移变化,对位移时序变化离散差分后,提取采样点 $G_1 \sim G_5$ 、 $L_1 \sim L_5$ 的时间-速度曲线,分别如图 14 和图 15 所示。

从图 14 雷达监测冰川的运动速度变化可知,自 2018 年 5 月中旬到 7 月下旬,海螺沟冰川采样点 $G_1 \sim G_5$ 的运动速度变化趋势一致,均呈波动性增长。受气温、降雨、消融随时间变化的影响,冰川运动速度的变化存在差异性。以 G_1 点为例,监测时间段内的单日最大位移量超过 200 mm,同时也存在不足 50 mm 的情况。 $G_1 \sim G_5$ 点的平均运动速度如粉色曲线所示,从 5 月 22 日开始,冰川运动速度经一段时间的降速后,在 6 月中旬开始加速运动,到 7 月中旬达到峰值。

图 15 展示了对应于冰舌北部侧碛堤滑动速度呈加速趋势的 S_2 滑坡体所在区域 5 个采样点 $L_1 \sim L_5$ 的时序运动速度曲线。由图 15 可知,自 2018 年 5 月中旬到 7 月下旬,该坡体的滑移呈现

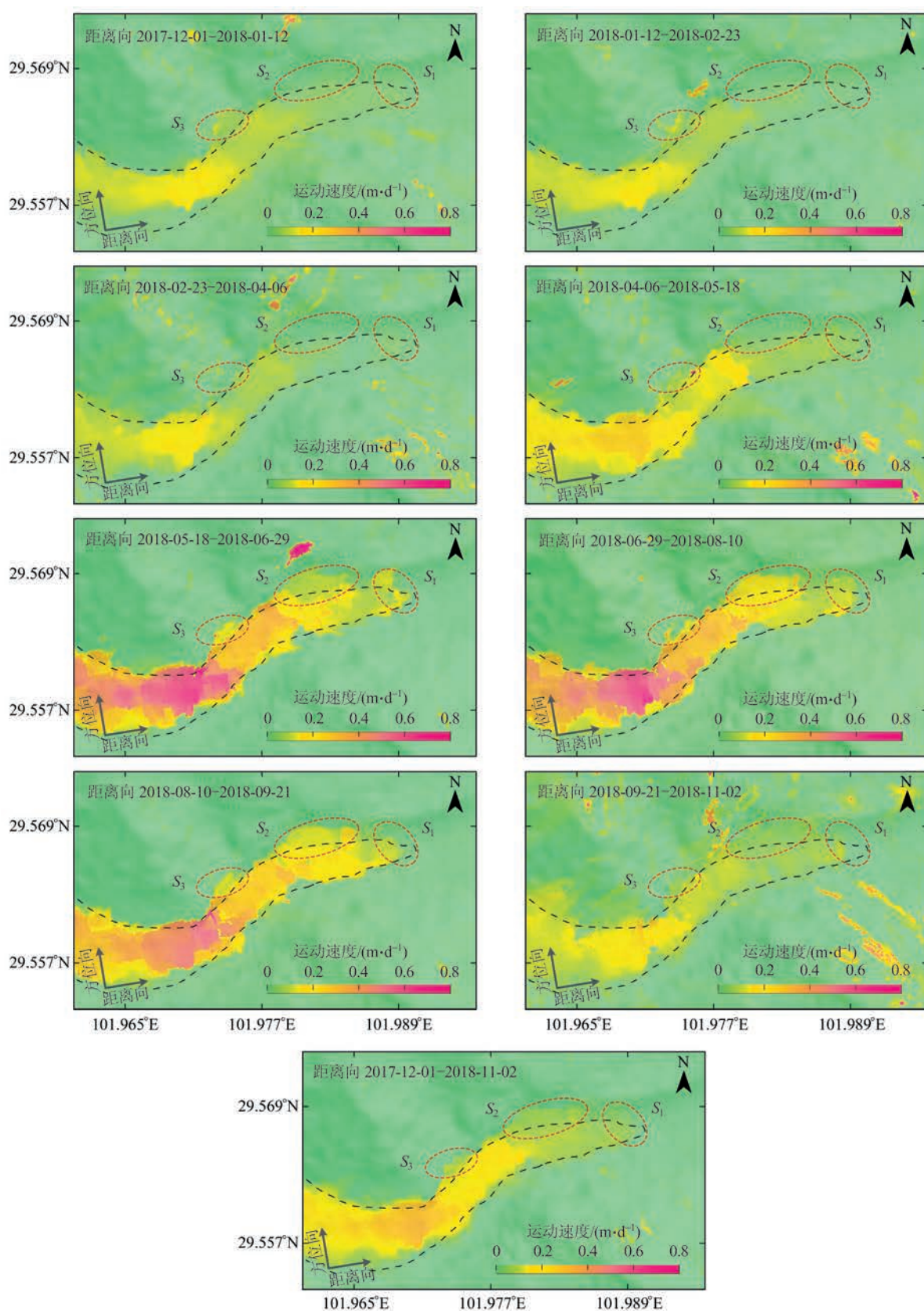


图8 海螺沟1号冰川冰舌区2017-12至2018-11卫星距离向运动速度分布

Fig. 8 Distributions of Range Direction Velocities in Ice Tongue Area of HLG No. 1 from December 2017 to November 2018

出从相对稳定到运动速度最高为 150 mm/d 的加速过程。与冰川运动相似,滑坡体在加速的过程

中,速度也呈现波动增长,而且与冰川的运动变化趋势存在较高的相关性。结合图8和图9所示的

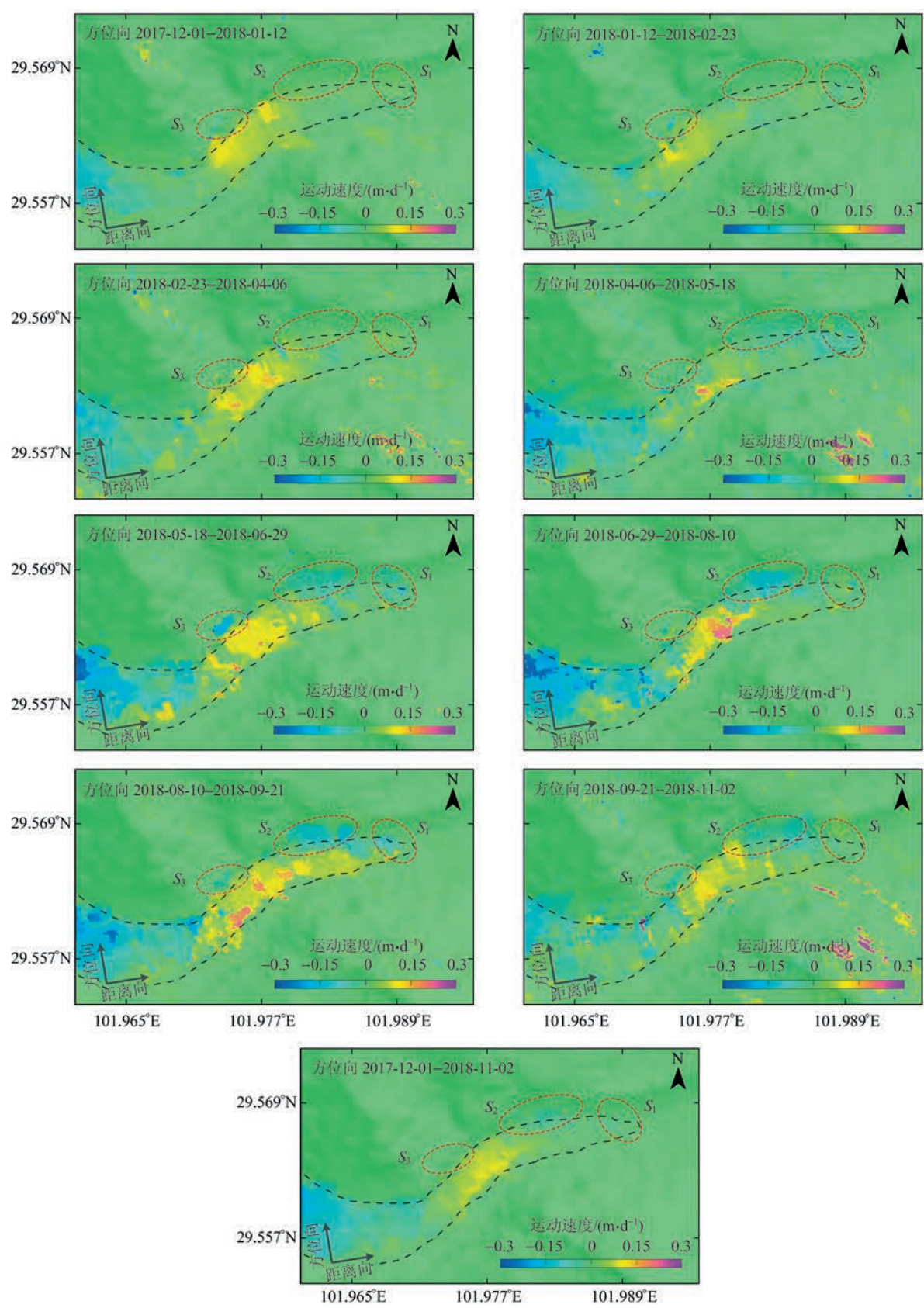
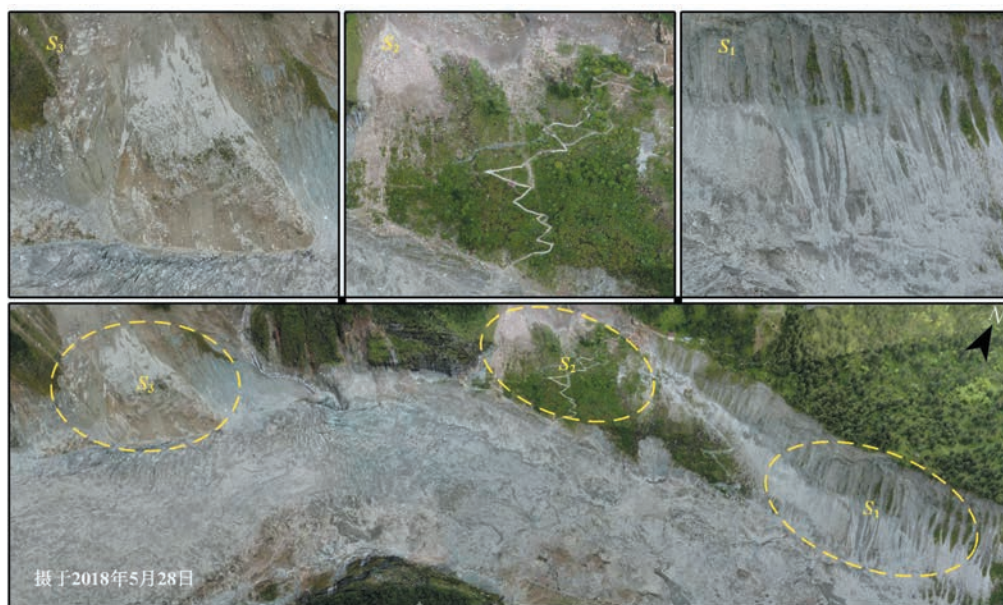
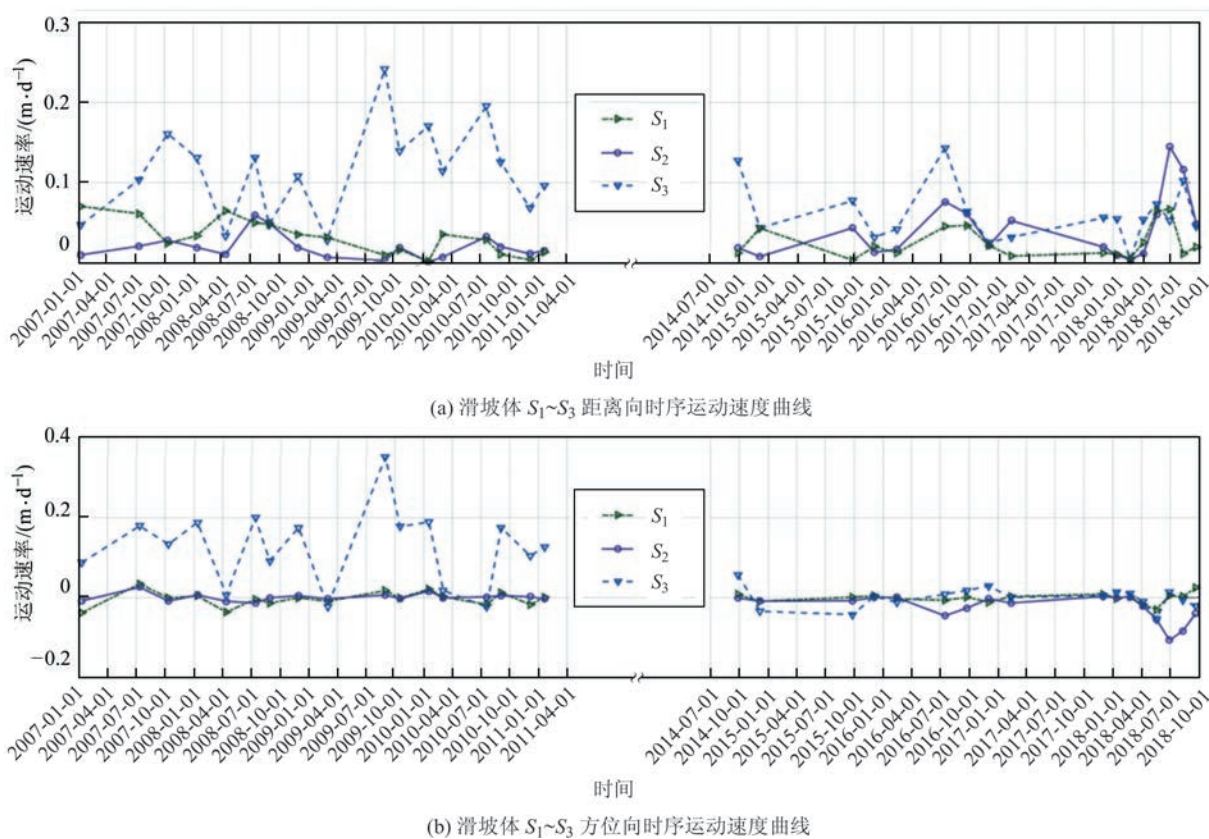


图 9 海螺沟 1 号冰川冰舌区 2017-12 至 2018-11 卫星方位向运动速度分布
Fig. 9 Distributions of Azimuth Direction Velocities in Ice Tongue Area of HLG No. 1
from December 2017 to November 2018

卫星 SAR 监测冰川和滑坡的变化,可推测海螺沟冰川的运动和消融是 S_2 滑坡体滑动的主要诱因。此外,对比冰川和 S_2 滑坡体的变化,尽管 S_2 滑坡体在运动速度上低于冰川,但滑坡体的加速

图 10 滑坡体 $S_1 \sim S_3$ 无人机航拍影像Fig. 10 Unmanned Aerial Vehicle Images of Landslides $S_1 \sim S_3$ 图 11 滑坡体 $S_1 \sim S_3$ 时序速度曲线Fig. 11 Time Series Velocity Curves of Landslides $S_1 \sim S_3$

更加明显。值得一提的是,地基 SAR 监测数据表明,滑坡体自 6 月下旬起开始异常活跃,于 7 月 9 日达到峰值。

经调查验证, S_2 滑坡体位于海螺沟景区内老观景台下方,是景观内老观景台至冰川冰体的栈道修建处,该处确于 2018-07-09 夜晚发生塌方事

件,导致栈道垮塌损毁,后续又连续发生垮塌和落石事件,栈道修缮工作直到 2018-10 才得以完工。由此可见,地基 SAR 系统的实时高精度监测数据不仅能够准确划定滑坡的边界与空间分布,更能够在时域上直观地反映滑坡的蠕变和致灾全过程,这对于高危滑坡和相关地质灾害的监测预

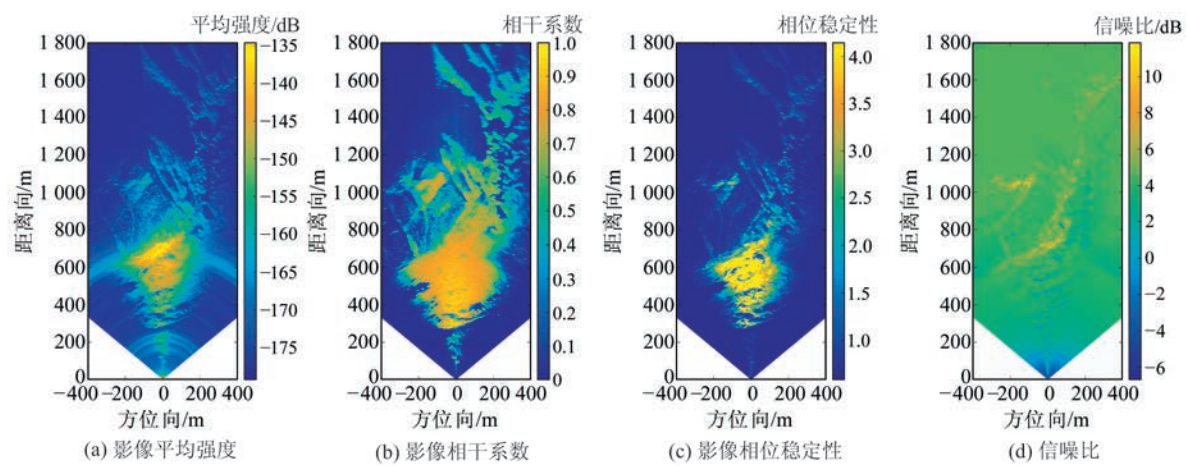


图 12 地基 SAR 监测范围内成像质量图

Fig. 12 Imaging Quality Maps of the Ground-Based SAR Data Within the Monitoring Range

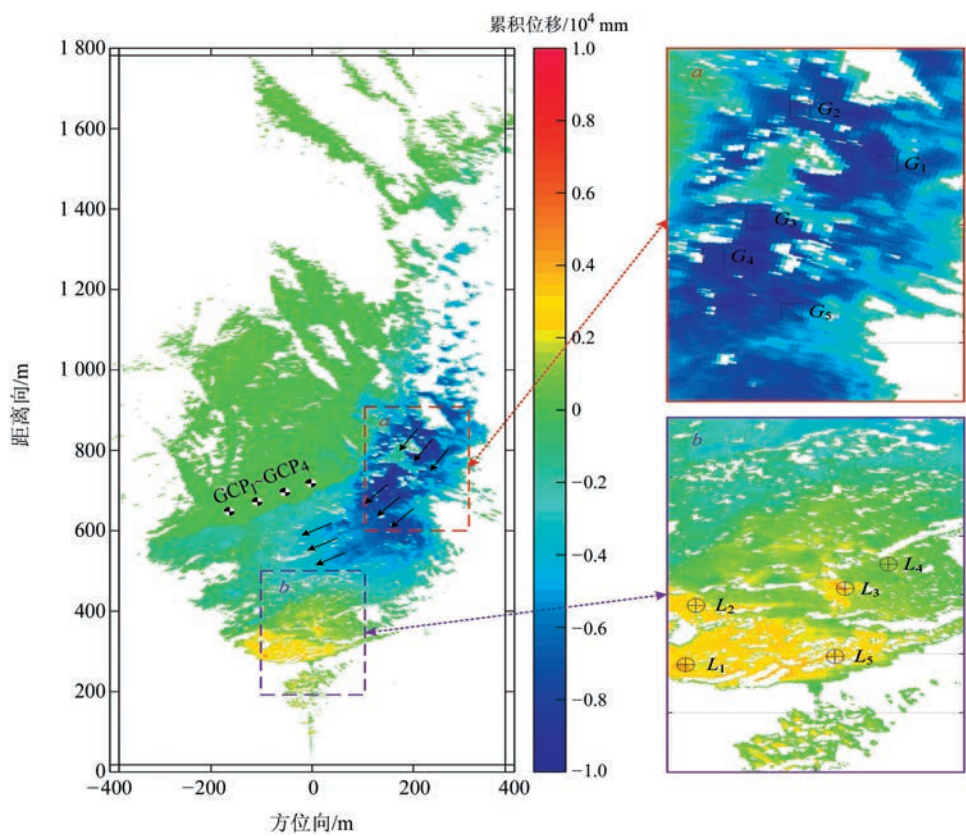


图 13 地基 SAR 监测范围内累计位移分布

Fig. 13 Accumulated Displacement Distribution by Ground-Based SAR Within the Monitoring Range

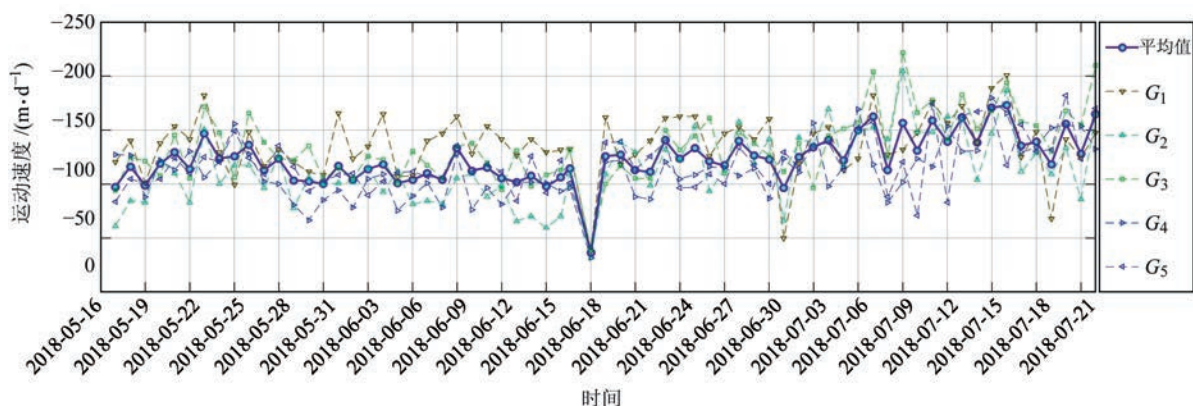
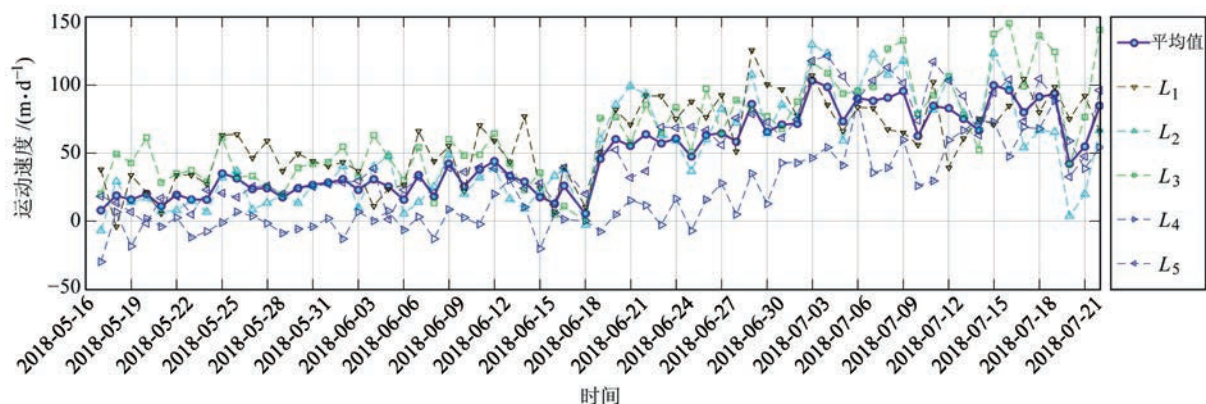
警无疑提供了重大的技术支撑与数据支持。

5 结 语

本文选取卫星 SAR 和地基 SAR 两种系统获取的时序影像数据,基于像素偏移估计与干涉堆叠方法,从不同的时空尺度揭示了海螺沟冰川运动的动态变化,在此基础上探测了消融区内冰川退化所引起的次生滑坡灾害,并重点

开展了实时监测和演化趋势分析。该监测结果及相关技术方法可为冰冻圈相关研究提供样本数据,同时也可为区域性地质灾害研究提供参考案例。

本文基于卫星 SAR 数据对冰川运动实施长时序的运动监测,初步探明了冰川运动的空间分布特征和时间演变规律。海螺沟冰川运动的速度场在空间上和地形坡度有较高的相关性,粒雪盆和冰瀑布上沿是海螺沟 1 号冰川运动最快的区

图 14 采样点 $G_1 \sim G_5$ 时序运动速度曲线Fig. 14 Temporal Velocity Curves of the Sample Points $G_1 \sim G_5$ 图 15 采样点 $L_1 \sim L_5$ 时序运动速度曲线Fig. 15 Temporal Velocity Curves of the Sample Points $L_1 \sim L_5$

域,平均速度约 1.2 m/d ,局部速度超过 2 m/d ;而冰舌区域的整体运动趋缓,速度降至 $0.1 \sim 0.4 \text{ m/d}$ 之间。冰川运动的整体速度在年际变化上随季节更替呈周期性规律消长,相比冬季,积累区的运动速度在夏天提升了 $25\% \sim 35\%$,而冰舌段夏冬的差异达到 $3 \sim 4$ 倍。此外,本研究基于多年的时序统计分析得出,海螺沟 1 号冰川运动的平均减速率为每年 7.27% ,而消融区内的平均减速率更是高达每年 15.57% 。

在此基础上,借助 SAR 卫星数据分辨率高、覆盖范围广的优势,在冰川侧碛堤区域发现了多个因冰川退化引发的次生滑坡灾害体。统计分析表明,该类滑坡与冰川消融具有极强的相关性,滑移速度于每年夏季达到峰值,海螺沟景区老观景台下方坡体 2018 年的最大滑移速度达到了南北向 100 mm/d 、东西向 50 mm/d 。而基于地基 SAR 的实时高精度观测数据则能够准确划定滑坡体的边界,并监测到坡体滑移速度在 7 月 9 日达到 150 mm/d 的峰值,且随后伴随垮塌发生异常波动,从而更加直观地展现了滑坡蠕变致灾的整个过程。随着卫星与地基 SAR 遥感

的进一步推广,必将为高危滑坡的监测预警提供有力的支撑。

致谢:感谢日本宇宙航空研究开发机构日本对地观测中心提供的 ALOS/PALSAR-1 和 ALOS/PALSAR-2 数据支持,感谢贡嘎山高山生态系统观测试验站提供的气象数据。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Report of Working Group of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2014
- [2] Wang W, Yao T, Gao Y, et al. A First-Order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Tibetan Plateau[J]. *Mountain Research and Development*, 2011, 31(2): 122-130
- [3] Wang W, Yao T, Yang X. Variations of Glacial Lakes and Glaciers in the Boshula Mountain Range, Southeast Tibet, from the 1970s to 2009 [J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(58): 9-17
- [4] Tong Liqiang, Tu Jienan, Pei Lixin, et al. Preliminary

- Discussion of the Frequently Debris Flow Events in Sedongpu Basin at Gyalaperi Peak, Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1 552-1 561(童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1 552-1 561)
- [5] Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, et al. Cryospheric Changes and Their Impacts on Regional Water Cycle and Ecological Conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3): 179-186(姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-186)
- [6] Du Jiankuo, He Yuanqing, Li Shuang, et al. Mass Balance of a Typical Monsoonal Temperate Glacier in Hengduan Mountains Region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1 415-1 422(杜建括, 何元庆, 李双, 等. 横断山区典型海洋型冰川物质平衡研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1 415-1 422)
- [7] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimate of the Response of Glaciers in China to the Global Warming-up in the 21th Century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(4): 434-438(施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438)
- [8] Braithwaite R J, Zhang Y. Sensitivity of Mass Balance of Five Swiss Glaciers to Temperature Changes Assessed by Tuning a Degree-Day Model [J]. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(152): 7-14
- [9] Su Zhen, Song Guoping, Cao Zhentang. Maritime Characteristics of Hailuoguo Glacier in the Gongga Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(S1): 51-59(苏珍, 宋国平, 曹真堂. 贡嘎山海螺沟冰川的海洋性特征[J]. 冰川冻土, 1996, 18(S1): 51-59)
- [10] Liu Qiao, Zhang Yong. Studies on the Dynamics of Monsoonal Temperate Glaciers in Mt. Gongga: A Review[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(5): 717-726(刘巧, 张勇. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史, 现状与展望[J]. 山地学报, 2017, 35(5): 717-726)
- [11] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The Contemporary Glaciers in China Based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16(刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16)
- [12] Dehecq A, Gourmelen N, Gardner A S, et al. Twenty-First Century Glacier Slowdown Driven by Mass Loss in High Mountain Asia [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 22, doi:10.1038/s41561-018-0271-9
- [13] Altena B, Scambos T, Fahnestock M, et al. Extracting Recent Short-Term Glacier Velocity Evolution Over Southern Alaska and the Yukon from a Large Collection of Landsat Data[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(3): 795-814
- [14] Scherler D, Leprince S, Strecker M R. Glacier-Surface Velocities in Alpine Terrain from Optical Satellite Imagery-Accuracy Improvement and Quality Assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3 806-3 819
- [15] Dehecq A, Gourmelen N, Trouvé E. Deriving Large-Scale Glacier Velocities from a Complete Satellite Archive: Application to the Pamir-Karakoram-Himalaya[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 55-66
- [16] Zhou Zhiwei, Yan Ziping, Liu Su, et al. Persistent Scatterers and Small Baseline SAR Interferometry for City Subsidence Mapping: A Case Study in Panjin, China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 928-931(周志伟, 鄢子平, 刘苏, 等. 永久散射体与短基线雷达干涉测量在城市地表形变中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 928-931)
- [17] Franceschetti G, Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018
- [18] Zhou Chunxia, E Dongchen, Liao Mingsheng. Feasibility of InSAR Application to Antarctic Mapping[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(7): 619-623(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)
- [19] Deng Fanghui, Zhou Chunxia, Wang Zemin, et al. Ice-Flow Velocity Derivation of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf Using Offset-Tracking Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 901-906(邓方慧, 周春霞, 王泽民, 等. 利用偏移量跟踪测定 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 901-906)
- [20] Berthier E, Vadon H, Baratoux D, et al. Surface Motion of Mountain Glaciers Derived from Satellite Optical Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(1): 14-28
- [21] He Yuanqing, Zhang Zhonglin, Yao Tandong, et

- al. Modern Changes of the Climate and Glaciers in China's Monsoonal Temperate Glacier Region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 550-558 (何元庆, 张忠林, 姚檀栋, 等. 中国季风温冰川区近代气候变化与冰川动态[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 550-558)
- [22] Liu Qiao, Liu Shiyin, Zhang Yong, et al. Surface Ablation Features and Recent Variation of the Lower Ablation Area of the Hailuoguo Glacier, Mt. Gongga [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 227-236 (刘巧, 刘时银, 张勇, 等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 227-236)
- [23] Liu Q, Liu S, Zhang Y, et al. Recent Shrinkage and Hydrological Response of Hailuoguo Glacier, a Monsoon Temperate Glacier on the East Slope of Mount Gongga, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(196): 215-224
- [24] Li Zongxing, He Yuanqing, Jia Wenxiong, et al. Changes in Hailuoguo Glacier During the Recent 100 Years Under Global Warming[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 75-81 (李宗省, 何元庆, 贾文雄, 等. 全球变暖背景下海螺沟冰川近百年的变化[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 75-81)
- [25] Liu Yunhua, Qu Chunyan, Shan Xinjian. Two-Dimensional Displacement Field of the Wenchuan Earthquake Inferred from SAR Intensity Offset-Tracking[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(10): 3 296-3 306 (刘云华, 屈春燕, 单新建. 基于 SAR 影像偏移量获取汶川地震二维形变场[J]. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3 296-3 306)
- [26] Shi X, Zhang L, Balz T, et al. Landslide Deformation Monitoring Using Point-Like Target Offset Tracking with Multi-mode High-Resolution TerraSAR-X Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 105: 128-140
- [27] Michel R, Avouac J P, Taboury J. Measuring Ground Displacements from SAR Amplitude Images: Application to the Landers Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 875-878
- [28] Pathier E, Fielding E J, Wright T J, et al. Displacement Field and Slip Distribution of the 2005 Kashmir Earthquake from SAR Imagery [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20): L20310
- [29] Fielding E J, Lundgren P R, Taymaz T, et al. Fault-Slip Source Models for the 2011 M 7.1 Van Earthquake in Turkey from SAR Interferometry, Pixel Offset Tracking, GPS, and Seismic Waveform Analysis [J]. *Seismological Research Letters*, 2013, 84(4): 579-593
- [30] Schellenberger T, Dunse T, Kääb A, et al. Surface Speed and Frontal Ablation of Kronebreen and Kongsbreen, NW-Svalbard, from SAR Offset Tracking[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2014, 8(6): 6 193-6 233
- [31] Chen Qiang, Luo Rong, Yang Yinghui, et al. Method and Accuracy of Extracting Surface Deformation Field from SAR Image Coregistration [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(3): 301-308 (陈强, 罗容, 杨莹辉, 等. 利用 SAR 影像配准偏移量提取地表形变的方法与误差分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 301-308)
- [32] Noferini L, Pieraccini M, Mecatti D, et al. Using GB-SAR Technique to Monitor Slow Moving Landslide[J]. *Engineering Geology*, 2007, 95(3-4): 88-98
- [33] Nolesini T, Di Traglia F, Del Ventisette C, et al. Deformations and Slope Instability on Stromboli Volcano: Integration of GBInSAR Data and Analog Modeling[J]. *Geomorphology*, 2013, 180: 242-254
- [34] Monserrat O, Crosetto M, Luzi G. A Review of Ground-Based SAR Interferometry for Deformation Measurement[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 93: 40-48
- [35] Yigit E, Demirci S, Unal A, et al. Millimeter-Wave Ground-Based Synthetic Aperture Radar Imaging for Foreign Object Debris Detection: Experimental Studies at Short Ranges[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(12): 1 227-1 238
- [36] Noferini L, Mecatti D, Macaluso G, et al. Monitoring of Belvedere Glacier Using a Wide Angle GB-SAR Interferometer [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(2): 289-293
- [37] Luzi G, Pieraccini M, Mecatti D, et al. Monitoring of an Alpine Glacier by Means of Ground-Based SAR Interferometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 495-499

Monitoring Dynamics of Hailuoguo Glacier and the Secondary Landslide Disasters Based on Combination of Satellite SAR and Ground-Based SAR

LIU Guoxiang^{1,2} ZHANG Bo¹ ZHANG Rui^{1,2} CAI Jialun¹ FU Yin¹
LIU Qiao³ YU Bing⁴ LI Zhilin^{1,5}

1 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

2 State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Chengdu 611756, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

4 School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

5 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China

Abstract: Due to the influence of global climate change, most glaciers in southeastern Tibet and Hengduan Mountains in recent years have been losing weight, deteriorating and thinning, which has caused the variation of glacier movement characteristics, resulting in frequent disasters such as debris flows and landslides. In order to break through the bottleneck of optical remote sensing restricted by climatic conditions, this paper combines satellite and ground-based synthetic aperture radar (SAR) technology and selects Hailuoguo Glacier (HLG) basin as a typical research area to carry out time series monitoring and analysis. Firstly, by using 38 SAR images acquired by PALSAR-1/2 satellites from 2007 to 2018, the temporal and spatial variations and local surface displacements of HLG in Gongga Mountain are monitored by using the pixel offset tracking (POT) method. The average velocity of HLG No. 1 is slowed down by 7.27% per year in recent years, and the slow-down rate reaches 15.57% per year in the ablation areas. At the same time, several unstable landslides are detected by POT and Stacking-InSAR methods at the moraine embankment on the side of the glacier. Statistical analysis confirms that the movement of such landslides is strongly correlated with the melting of the glacier. The sliding speed reaches its peak in summer every year. The maximum sliding speed in 2018 was 100 mm/d in the north-south direction and 50 mm/d in the east-west direction. Subsequently, by utilization of the high-frequency real-time monitoring data of ground-based radar, it is further determined that the sliding speed reaches its peak value of 150 mm/d on July 9, 2018, and abnormal fluctuations occur with the subsequent collapse, which shows in detail the whole process of landslide creep to result in disasters. Relevant research data and the monitoring results can provide a reference for the study of the cryosphere and mountain hazards.

Key words: Hailuoguo Glacier; pixel offset tracking; ground-based SAR; glacier movement; landslide

First author: LIU Guoxiang, PhD, professor, specializes in the persistent scatterer InSAR (PS-InSAR) and inversion of regional ground deformation. E-mail: rsgxliu@swjtu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Bo, PhD candidate. E-mail: rsbozh@qq.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFB0502700; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41771402, 41871069, 41601503, 41801399; the Project on the Application Foundation of Sichuan Science and Technology Support Plan, Nos. 2018JY0564, 2018JY0138.