

藏东南则隆弄冰川运动速度长时间季节性变化规律

薛泽远 范宣梅* 邓宇 蒋力洋

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都, 610059

摘要: 研究冰川运动速度对于理解高寒山区冰流的响应机制具有重要意义。然而在藏东南地区, 由于时间和空间上的限制, 许多冰川的运动研究仍不充分。本文利用多源遥感影像, 采用特征追踪方法获取了藏东南则隆弄冰川的表面速度。结合冰川坡度、厚度等地形要素, 以及 30 年平均气温和降水量等气象数据, 分析了其长期流动特征。结果表明, 该冰川流速具有显著的季节性: 夏秋季较快, 春冬季较慢。流速主要受坡度和厚度影响, 并在全球变暖背景下呈现缓慢上升趋势。进一步结合气候数据发现, 冰川流速变化受季节性气温和降水控制, 其中降水的影响存在一定滞后。这种滞后性与降水下渗并传递至冰川底部所需的时间密切相关。长期观测揭示了则隆弄冰川的季节性流动特征和逐渐增强的长期趋势。同时, 研究还探讨了流速异常与地质灾害的关系。总体来看, 本研究为理解气候变化对藏东南地区冰川动态的影响提供了科学依据。

关键词: 冰川运动; 气候变化; 亚洲高山区; 遥感监测

中图分类号: P343.6 ;TP79 **收稿日期:** 2025-07-03

Long-term and Seasonal Variations of Glacier Velocity in Zelongnong, southeastern Tibet

Abstract: Understanding glacier flow velocity is crucial for revealing the response mechanisms of ice dynamics in high-altitude regions. However, in Southeast Tibet, studies on glacier motion remain limited in both temporal and spatial scales. In this study, we derived the surface velocity of the Zelongnong Glacier in Southeast Tibet using multi-source remote sensing images and feature-tracking techniques. By integrating topographic factors (slope and thickness) with 30-year averages of temperature and precipitation, we examined the glacier's long-term flow characteristics. The results show that the glacier exhibits pronounced seasonal variations in flow velocity, with higher values in summer and autumn and lower values in spring and winter. Velocity is strongly influenced by slope and thickness and shows a gradual increase under global warming. Climate analysis further indicates that glacier flow variations are mainly controlled by seasonal temperature and precipitation, with precipitation effects showing a clear time lag. This lag is closely related to the infiltration and transmission of meltwater to the glacier bed. Long-term observations highlight both the seasonal dynamics and the increasing long-term trend of Zelongnong Glacier flow. In addition, potential links between velocity anomalies and geological hazards are discussed. Overall, this study provides new insights into the impacts of climate change on glacier dynamics in Southeast Tibet.

Key words: glacier movement; climate change; high mountain Asia; remote sensing monitoring

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (42125702); 四川省重大科技专项 (2024ZDZX0020); 科学探索奖, 强震和极端气候作用下青藏高原巨灾风险预测 (2027-2023)

作者简介: 薛泽远, 硕士生, 主要从事冰川地质灾害研究。849814088@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4273-2855>

***通讯作者:** 范宣梅, 博士, 研究员。fxm_cdut@qq.com

引言

青藏高原作为地球“第三极”，其冰川变化对全球气候系统和区域水资源安全具有重要影响。青藏高原温度每十年上升 0.44°C ，是全球变暖速率的两倍（Yao et al., 2022），这直接导致冰川加速减薄和冰川退缩（Agarwal et al., 2017; Farinotti et al., 2019）。青藏高原东南缘因构造运动剧烈、降水充足及气候变化强烈，成为冰崩与冰湖溃决洪水等冰川灾害频发的关键区域。（Kääb et al., 2012）。已有研究表明，冰川流速、冰川厚度、面积和长度等形态参数对气候变化敏感，其中冰川流速变化是研究冰川失稳的重要指标（张震等, 2024）。因此，研究冰川流速变化特征，分析冰川运动特征及其气候响应机制，对川藏铁路等重大工程的灾害风险评估具有重要意义。

传统上，冰川速度是通过现场测量获取，例如在冰川表面部署测量杆或 GPS 传感器，然后进行长期的实地观测以跟踪位置变化（管伟瑾等, 2020）。这些方法虽然有效，但人力成本较高，空间覆盖有限，难以实现冰川区的整体流速测量，同时也只能测量现有时间段内冰川的位移变化，无法对冰川历史流速特征进行评估。近年来，卫星遥感技术的应用显著增强了在长时间序列和大空间范围内监测冰川运动的能力。通过该技术，研究者能够系统获取冰川的几何参数、表面速度及厚度变化等关键信息。这些信息为冰川范围、体积以及运动特征的研究提供了坚实的数据支撑，也为深入理解冰川对气候变化的响应机制奠定了基础。由此，遥感技术已成为大尺度冰川监测研究中不可替代的手段（Bhambri et al., 2017; Dehecq et al., 2019; 邹强等, 2024）。这些方法大致可分为两种：差分干涉合成孔径雷达 DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) 和光学特征跟踪（Cheng and Xu., 2006）。DInSAR 可以提供高精度的速度测量，但容易受到时间去相关和大气噪声的限制，导致计算冰川运动时干涉图的质量和地表形变信息的提取精度受损。与其他方法相比，特征跟踪无需依赖冰川表面明显特征即可开展流速估算，既可应用于光学影像，也适用于 SAR 影像，从而实现跨越不同冰川类型和环境的运动反演。这一优势使其在长时间尺度和大范围冰川监测中具有较强的适用性。（管伟瑾等, 2020）。

本研究以藏东南南迦巴瓦地区则隆弄冰川为研究对象（图 1），考虑到原位冰川监测往往需要投入大量人力与经费，而 DInSAR 方法则易受时间间隔影响导致干涉失相关，所以本研究采用特征跟踪的方法估算该了南迦巴瓦地区冰川 1995 年—2024 年期间的冰川流速，并利用现场 GNSS 监测数据对计算结果进行验证。然后利用三十年遥感影像与则隆弄冰川气候数据相结合，分析了则隆弄地区冰川动态流速对气候变化的响应以及冰川地质灾害与冰川流速之间的关系。鉴于高寒地区国家重点工程普遍面临冰川地质灾害的潜在威胁（黄海和龚诚，2024），本文研究成果可为高海拔冰川区的工程建设与灾害预警提供一定的科学支撑。

1 研究区

则隆弄冰川是南迦巴瓦峰西坡发育的大型山谷冰川（图 1），该冰川是一个季风性海洋型冰川。从图 1 可以看出，则隆弄冰川是由两条冰川通道汇合形成。北通道平均流向为 184° ，东通道平均流向为 273° ，两通道相交后流动方向发生变化，平均流动方向为 264° （图 2d）。冰川整体长 10.6 km ，总面积约 17.9 km^2 。则隆弄冰川所在的直白沟流域海拔范围介于 2950 m 至 7787 m 之间，主要冰川分布带集中在 3800 m 以上的高海拔区域。当地雪线海拔高度 4500 m ，其中积雪面积约 11.1 km^2 ，冰川系数为 1.63 。则隆弄冰川在海拔 4500 m 以上的源头及周边地区经常发生冰崩。研究区地层主要为南迦巴瓦群直白组，属于高喜马拉雅地层分区。岩性主要为花岗片麻岩和大理岩等。沟道存在大量碎石和冰碛物，主要来源于历史时期多次地质灾害事件的堆积作用（图 2b，图 2c）。

直白沟地质构造复杂，流域内水源充足，泥石流在此处具有良好的发育条件。近几十年

来，在全球变暖及地震的内外动力耦合作用下，有多起冰川泥石流灾害在研究区内发生。1950 年的冰川跃动导致直白村被夷平，九十三人死亡，同时还堵塞雅鲁藏布江，1968 年和 1982 年也分别发生了冰崩事件。2020 年 9 月 10 日的冰川泥石流由高位冰岩崩诱发，撞击直白大桥（黄海和龚诚，2024），并且导致公路路面被掩埋，交通瘫痪近半年，给居民生命财产安全带来了极大的困扰。

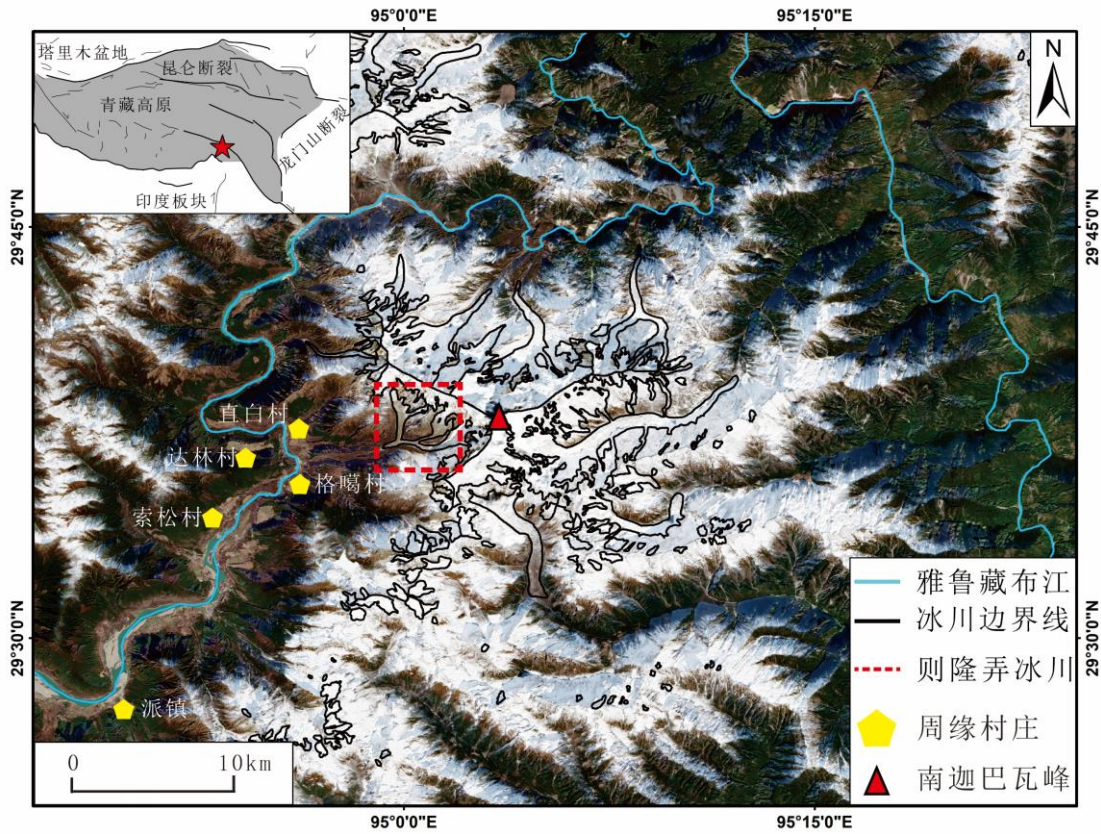


图 1 研究区地理位置及周围部分村落情况

Fig.1 Location of Study Area and the situation of some surrounding villages

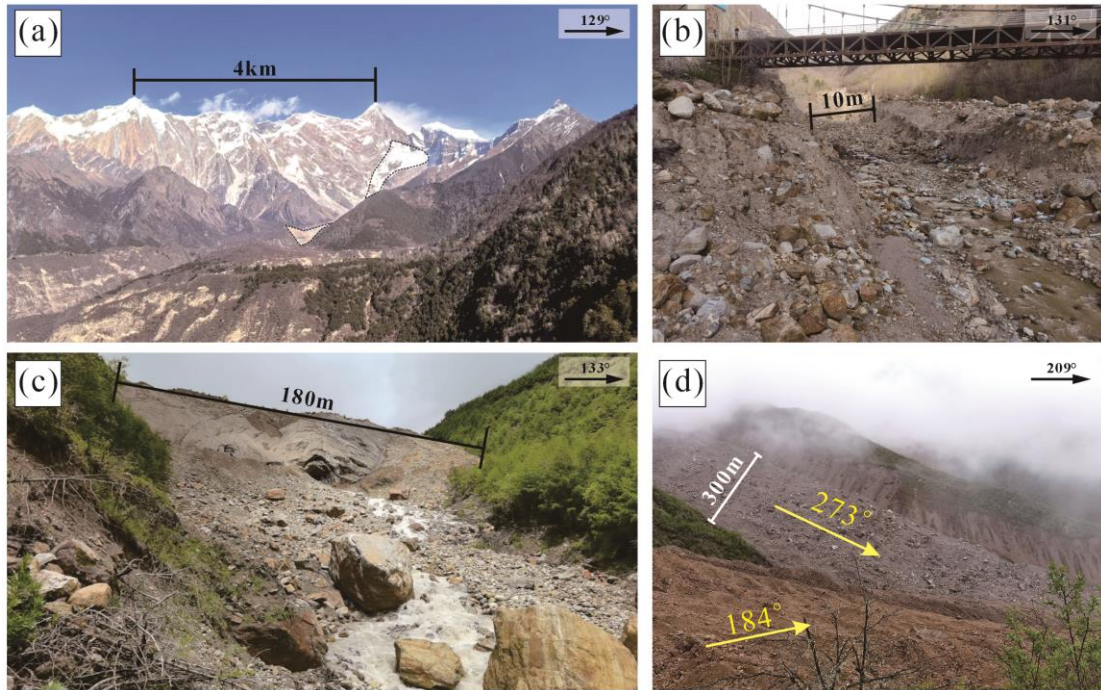


图 2 研究区现场照片 (a) 则隆弄冰川区远景 (b) 直白大桥及下游沟道 (c) 则隆弄冰川冰舌区物源 (d) 则隆弄冰川交汇处表层照片

Fig.2 On-site photos of the Zelongnong Glacier (a) Distant view of the Zelongnong Glacier area (b) Zhibai Bridge and the downstream gully (c) The source of materials in the glacier tongue area of Zelongnong Glacier (d) Surface photos at the junction of the Zhelongnong Glacier

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究利用 Sentinel-2 L2A 以及多代 Landsat 卫星影像（详见表 1），共计 302 景，通过特征跟踪的方法计算了冰川运动速度。由于不同图像来源的误差，本文将这一长期阶段划分为六个不同的短期：分别为 1995-2002 年（Landsat 4-5 TM）、2002-2006 年、2006-2011 年、2011-2016 年（Landsat 7 ETM+）、2016-2020 年、2020-2024 年（Sentinel-2 L2A）。其中研究区内未受到 Landsat7 失效条纹影响，所以计算数据几乎不受影响。为验证基于遥感影像的冰川流速反演结果，本研究在则隆弄冰川表面部署了全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）测站。通过对比 GNSS 获取的高精度原位位移数据与遥感反演流速，评估二者在空间分布和时间变化特征上的匹配程度。

本研究采用欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）发布的 ERA-5 再分析数据集作为主要气象数据源。该数据集提供了研究所需的高时空分辨率气温和降雨参数，数据获取自哥白尼气候变化服务（Copernicus Climate Change Service）平台。已有研究表明，哥白尼数字高程模型（Copernicus Digital Elevation Model, COP-DEM）在青藏高原地区具有较高的精度，其高程误差显著低于其他开源 DEM 产品（Li et al., 2022）。冰川边界数据来源于伦道夫冰川数据库（Randolph Glacier Inventory, RGI）7.0 和第二次中国冰川编目数据集（Guo et al., 2015）。通过整合这两个权威数据库，并且辅以人工目视解译，最终获取研究区完整的冰川边界信息。

表 1 本文使用的遥感数据及冰川数据

Table 1 The remote sensing data and glacier data used in this paper

数据	时间	来源	数量	分辨率	参考文献及数据库
----	----	----	----	-----	----------

	1994.12-2011.08	Landsat 4-5 TM	117 张	10m	
冰川运动速度	2010.12-2017.01	Landsat 7 ETM+	62 张	30m	本文
	2016.11-2024.11	Sentinel-2 L2A	123 张	30m	
数字高程模型	2022	Copernicus 30		30m	European Space Agency and Airbus , (2022)
冰川厚度	2017	RGI6.0			RGI 6.0 Consortium, (2017)
冰川中心线	2023	RGI7.0			RGI 7.0 Consortium, (2023)
GNSS	2022.7-2023.7	监测仪器			本文

2.2 方法原理

光学特征追踪方法通过自动匹配光学或 SAR 影像中的相似特征来提取冰川表面位移，进而计算其流速，是一种当前冰川动力学研究中应用广泛且可靠的技术手段（管伟瑾等，2020）。该方法首先对两幅冰川影像进行配准，然后在设定窗口大小下开展互相关计算。通过在搜索区域内滑动窗口，确定相关系数最高的位置作为匹配点，并据此计算位移。将该过程应用于影像的所有窗口后，即可获得整个冰川区域的位移场（Berthier et al., 2005）。这种方法得益于丰富的数据源、广泛的空间覆盖范围和最小的地形限制，在当前的冰川研究中应用广泛（Agarwal et al., 2017）。此方法适合测量年时间尺度上的冰川运动，尤其在降水季节不同的地区，相似的积累和消融条件有助于识别不同年份同一时期图像中的特征，但其受天气条件影响较大。

本文使用冰川图像速度计算工具箱（Glacier Image Velocimetry, GIV）计算则隆弄冰川的运动速度。GIV 是一个易于使用的开源工具箱，用于计算二维冰川流量（Van Wyk De Vries and Wickert, 2021）。它也被广泛用于计算冰川速度，如北安第斯山脉（Van Wyk De Vries et al., 2022）及印度的锡金喜马拉雅山脉（Sattar et al., 2025）。在计算流速之前，为了纠正代码中任何可能的地理参考错误，首先为每个研究的冰川手动创建一个冰川掩膜和冰川附近的稳定区，减少特征跟踪时的速度误差，同时使用方向过滤器，以减少在计算中产生的方向误差（Van Wyk De Vries and Wickert, 2021）。软件主要参数取值如下：输出数据的理想分辨率为（Ideal resolution of output data）40，信噪比（Signal to noise ratio）为 4，峰值比（Peak ratio）为 1.3，其他均为默认参数。本研究还利用所有无云图像，每年对冰川边界进行人工处理，因为在对冰川的目视解译过程中，人工校正的精度最高。

此外，基于 DEM 计算获得了冰川表面坡度和中心线等形态参数，并采用 Van Wyk De Vries et al.（2022）提出的冰厚度估算方法（公式 1）计算了冰川厚度分布，该方法提出的冰川厚度计算方法通过多方法集成提高了估算的准确性，适用于多种地形和冰川类型，能够为水资源评估和灾害管理提供重要数据支持，并利用卫星数据实现大范围监测。然而，该方法也存在局限性，包括对输入参数准确性的依赖、模型假设的局限性、对冰川动态变化响应能力有限以及实地验证数据的不足等。

$$H = \left(\frac{n+1}{2(f\rho_i g)^n A_c^* \exp\left(\frac{Q_c}{R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T^*}\right]\right)} \right)^{1/(n+1)} \left(\frac{u(H)(1-\beta)}{\sin(\alpha)^n} \right)^{1/(n+1)} \quad (1)$$

公式 1 中， H 为冰川厚度， n 为 Glen 流变指数，描述了冰的非线性粘塑性流动特性，取值为 3； f 为形状因子，主要考虑冰川边缘的侧向阻力，其值为 0.9； ρ_i 为冰的密度，在本研究中为 917kg/m^3 ； g 为重力加速度，在研究区附近值约为 9.695m/s^2 ； A_c^* 是修正版的阿伦尼乌斯变形常数（Arrhenius deformation constant），用来描述冰的蠕变速率，它的值是 2.5×10^{-24} ；

Q_c 是活化能, 值为 115 kg/mol; R 为理想气体常数, 其值约为 0.0083145; T 为绝对温度; 通过 ERA-5 数据库计算的南迦巴瓦峰附近平均温度为 274.65K; T^* 为参考温度, 值为 273K; $u(H)$ 为冰川表面速度, 该值由 GIV 计算得到; 其中 β 是基底滑动的修正因子, 代表基底滑动在冰川运动中的比例, 在本文取值为 0; α 是冰川表面的坡度, 可以从 DEM 文件中提取。其中 $u(H)$ 和 α 二者均需要使用 tif 格式的文件以参与厚度计算。

3 结果

3.1 冰川流动速度的时空分布特征

本研究基于多时相遥感影像数据, 系统分析了研究区过去三十年的冰川流动时空演变特征。通过时序分析发现, 冰川运动性有增强趋势, 高流速区的分布范围呈现扩张态势(图 3)。在 2011 年之前, 冰川运动主要表现为右侧冰川沟道的活跃特征, 而 2011 年之后, 北侧冰川沟道的活动性显著增强, 成为主要的流速增长区域。图 3 的分析结果显示, 冰川最大流速值的波动幅度相对稳定, 但整体动态活动性呈现持续增强的趋势。对比图 3 (a) 与图 3 (f) 可见, 尽管冰川运动速度值在 2011 年后仍维持较低水平, 但活跃区域的扩展范围较前期显著增加, 反映出冰川系统在区域尺度上的动态响应特征。

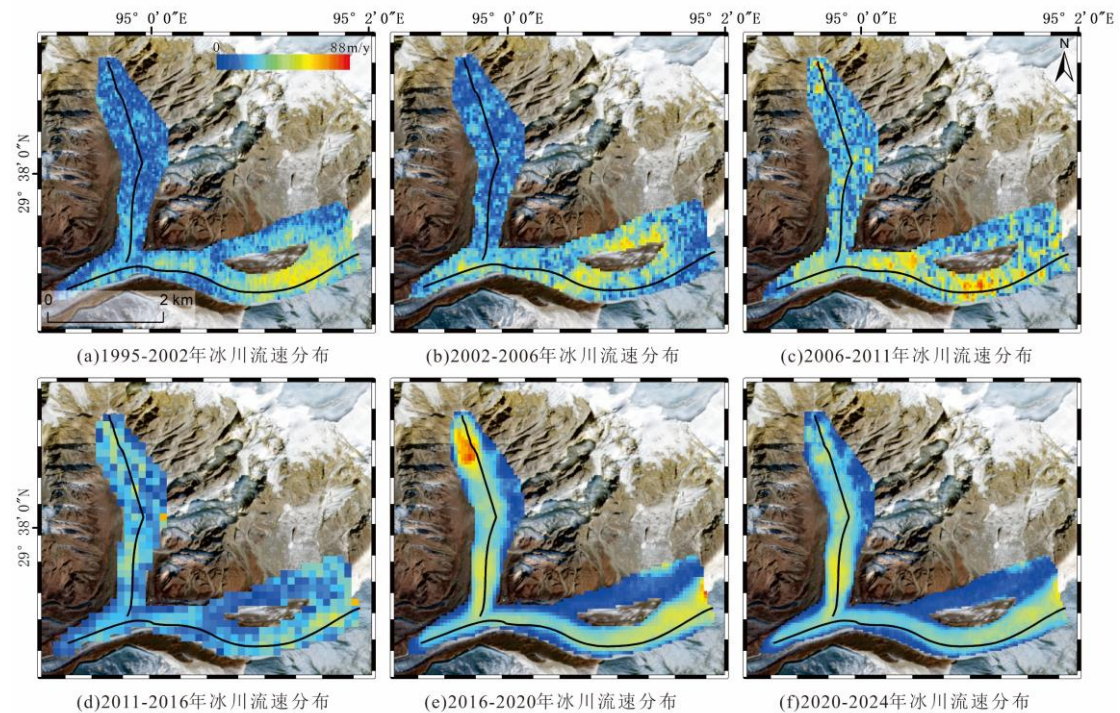


图3 则隆弄冰川不同时期流速图

Fig.3 The velocity distribution of the Zelongnong Glacier at different stages

基于三十年的观测分析, 研究发现则隆弄冰川中心线年平均流动速度呈现出显著的波动趋势(图 4)。2000 年, 冰川流速跌至 28.92m/y 的低谷。然而, 随后三年间, 流速快速上升, 并于 2004 年达到 58.67m/y 的峰值, 这一数值不仅是近三十年来的最高记录, 更是相较于 2000 年的低谷流速几乎翻倍。此后, 冰川流速虽仍在一定范围内波动, 但波动幅度逐年减小。进一步的数据拟合分析表明, 尽管存在年际波动, 研究期间冰川整体流动速度呈上升趋势, 这一现象可能与全球气候变暖导致的冰川融化加速密切相关。这一研究结果与海螺沟冰川的观测趋势相一致(刘国祥等,2019), 该冰川在 2009 年速度达到峰值, 且在 2010 年之后速度逐渐减小, 且峰值也有所降低。以上冰川的变化规律表明, 冰川运动速度受多种因素影响, 具有复杂的时空变化特征。

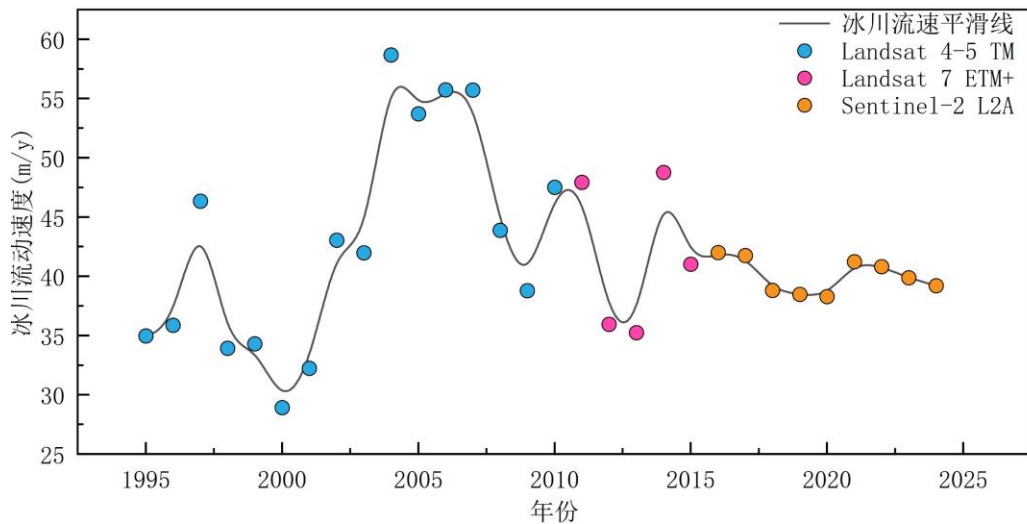


图 4 则隆弄冰川年平均流动速度变化

Fig.4 The annual average flow velocity variation of the Zelongsong Glacier

在季节尺度，各月份冰川运动速度差异显著且存在明显波动。1-3 月，冰川运动速度整体偏低，处于相对较低水平，且每月速度分布较为集中，变异性较小。4 月起，冰川运动速度逐渐提高，同时每月速度的四分位距有所扩大，表明不同年份间同月的速度差异增大，冰川运动的不稳定性增强。6-8 月为冰川运动速度高峰期，且每月速度分布范围较宽，异常值增多，反映出夏季冰川受高温影响，运动速度波动剧烈。不同年份的夏季冰川活动强度差异显著。自 9 月起，冰川运动速度有所降低，但直至 11 月仍维持在相对较高的水平。秋季冰川运动速度的高速特征与持续的热扰动以及研究区的降水密切相关，且每月的速度变异性依然较大。12 月，冰川运动速度进一步降低，其分布趋于集中，这主要是由于降水减少、积雪反照率增加以及冰下裂缝因冻结而关闭所致。

整体来看，研究区冰川运动速度具有显著的季节变化规律，冬季缓慢、夏季快速，且近年来各月份速度的波动性呈增强趋势，暗示冰川对气候变化的响应日益敏感。其动力学过程的复杂性，为深入探究冰川运动机制及气候变化影响提供了重要的研究素材。

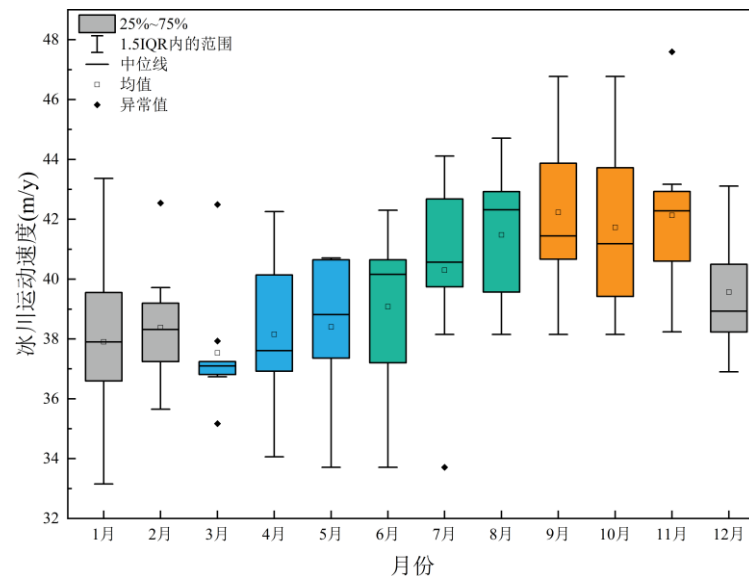


图 5 则隆弄冰川流速季节分布

Fig.5 Seasonal distribution of flow velocity in the Zelongsong Glacier

3.2 近两年冰川速度变化特征

则隆弄冰川由东部和北部两条冰川通道交汇而成（图 6）。东部沟道的平均流速约为 35.92m/y，而北部沟道的流速相对更快，平均流速达到 44.79m/y。这两条冰川河道在冰川的中部区域汇合。由于两者流向存在较大差异，导致交汇后冰川流速减弱，平均流速下降至 31.32m/y。从空间分布来看，近两年冰川上侧的平均流速普遍高于右侧，这可能与上部的冰雪积累量较大、重力作用更显著有关。具体来说，北部冰川通道的流速比东部冰川通道快 24.7%，这表明北部沟道的冰川运动更为活跃。此外，冰川中心线处的流速最大，而随着与中心线距离的增加，流速逐渐减小。图 6 直观地展示了这种流速的空间变化，这种流速的空间变化对于理解冰川的运动规律具有重要意义，也为预测冰川的变化趋势和评估相关地质灾害风险提供了一定数据支持。

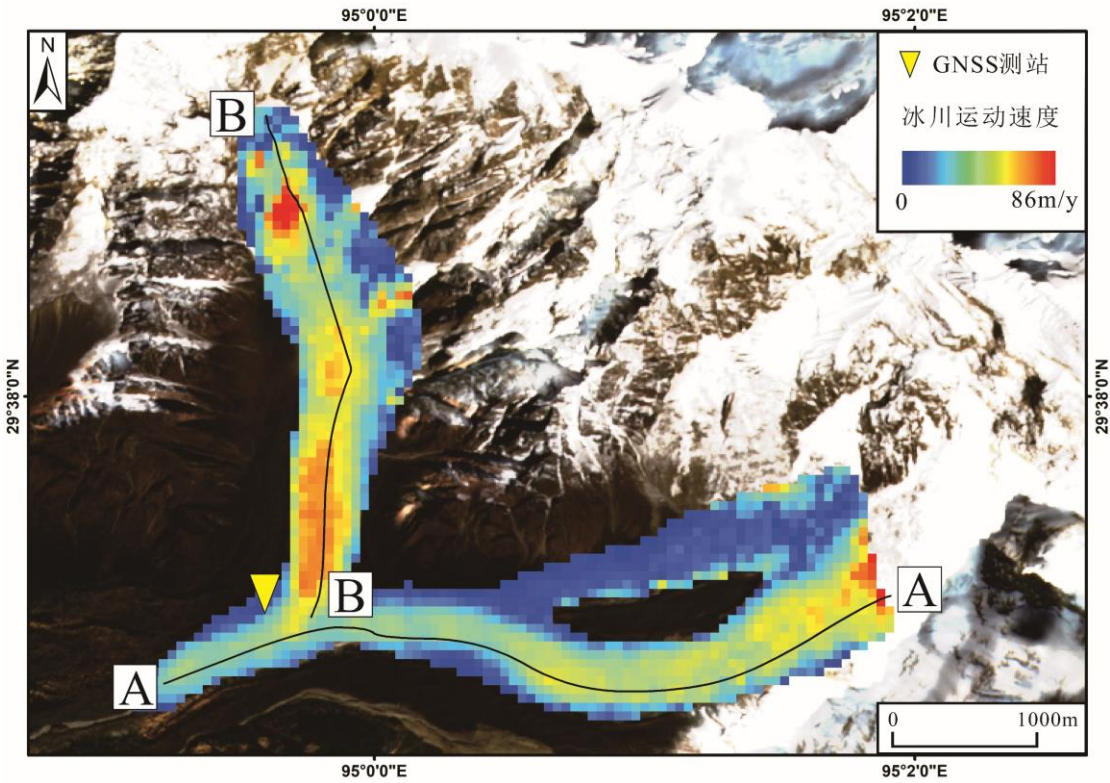


图 6 则隆弄冰川 2022.7-2023.7 平均速度分布差异及 GNSS 测站位置

Fig.6 The velocity distribution differences of the Zelongsong Glacier in 2022.7-2023.7 and the location of GNSS monitoring station

结合实地测站进行深入分析（如图 7 所示），其中红色曲线代表基于遥感图像的冰川流速计算结果，绿色圆点则表示 GNSS 站点的实测数据，所有曲线均呈现出随季节变化的周期性波动特征。对测站数据进行拟合分析，GNSS 测站数据与遥感计算结果的对比验证表明，二者在数值和波动趋势上具有一致性，这显著增强了遥感影像反演流速数据的可信度评估。

尽管季节性波动在调控冰川流速方面占据主导地位，但研究期间的长期趋势并不显著，未显示出持续性的加速或减速。这一现象表明，在研究时段内，冰川流速基本维持在相对稳定的动态平衡状态，未出现加速或减速的明显迹象。

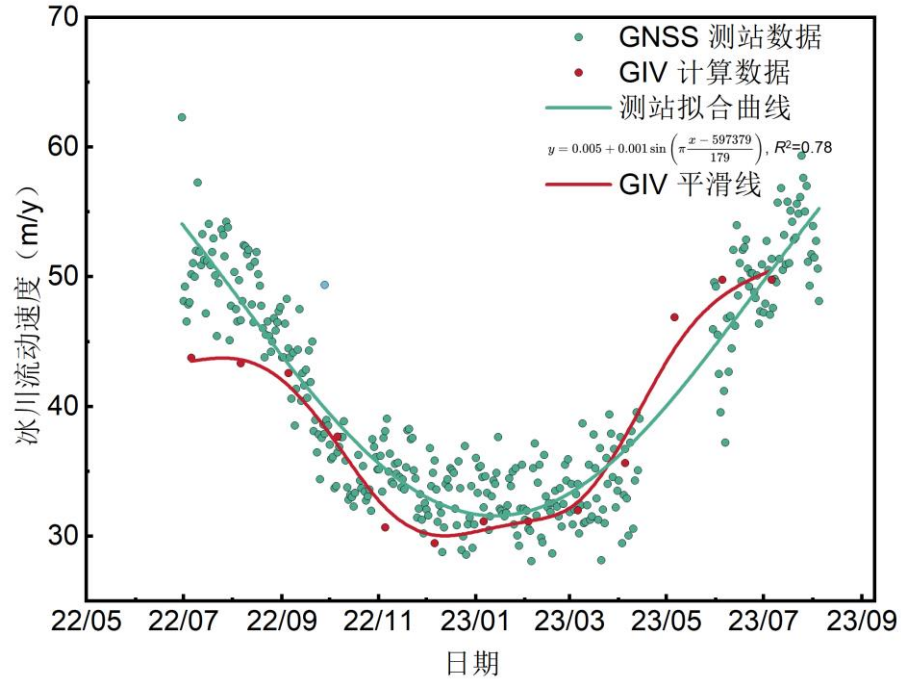


图7 则隆弄冰川流速计算数据与实测数据对比图

Fig.7 A comparison chart of the calculated flow velocity data and the measured data of the Zelongnong Glacier

3.3 冰川厚度反演

通过对冰川流速的反演分析,进一步推算了则隆弄冰川的厚度变化特征。研究结果显示,在1995年至2002年期间,该冰川的年平均厚度为50.82米;而在2006年至2010年期间,年平均冰川厚度上升至53.36米。然而,在2020-2024年期间,年平均冰川厚度减少至51.4米。冰川厚度的这种变化特征与冰川融化过程及物质平衡状况密切相关,这与其他学者关于青藏高原冰川质量变化的分析结果相一致(Dehecq et al., 2019)。

冰川地质灾害的发生往往具有较长的周期性,这使得对其形成机制和发生规律的研究面临一定挑战。在这样的背景下,研究年际冰川运动速度的变化规律显得尤为重要。通过对冰川运动速度及厚度等相关特征的长期监测和分析,可以深入理解冰川的动态变化特征,揭示其内在的运动规律。这些发现不仅揭示了则隆弄冰川流速的变化特征,也为理解冰川对全球气候变化的响应提供了重要依据。

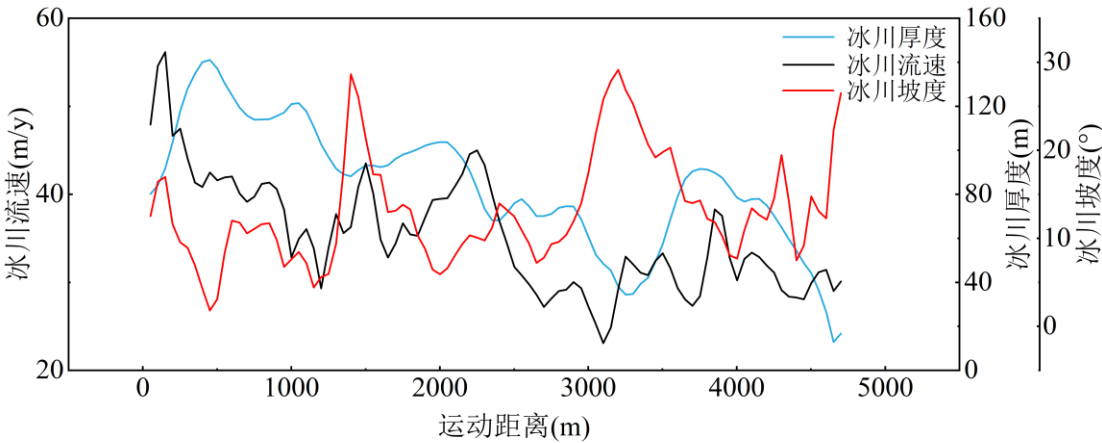
4. 讨论

4.1 流速变化与地形因素的关系

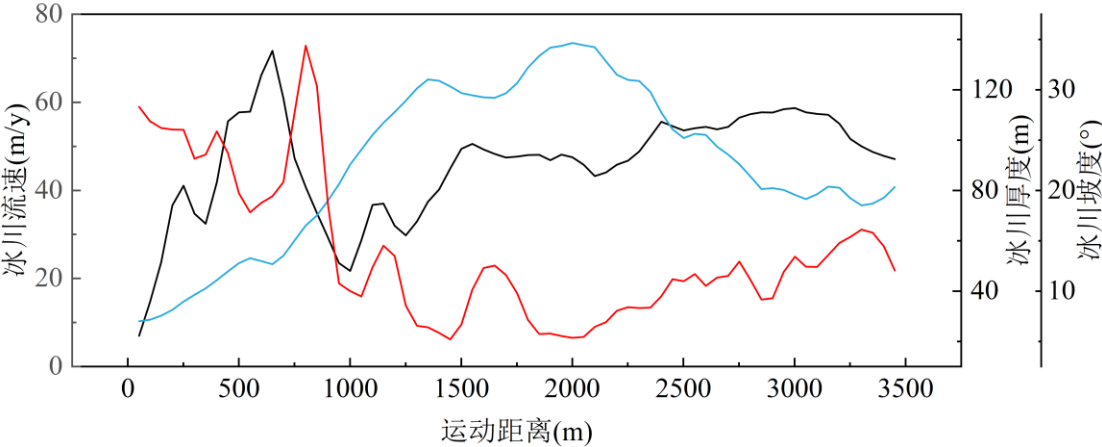
对冰川流速和坡度之间关系的深入研究揭示了一些相关性(Agarwal et al., 2023)。一般来说,在陡坡上流动的冰川表现出更高的流速。则隆弄冰川的流动速度与坡度呈显著相关性(图8),高流速区域主要分布于坡度较大的地段,表明该区冰川运动受地形控制作用明显。在主流线垂直方向的速度剖面中可以看出,冰川边缘的流速接近于零,而中心线位置的流速达到最大值,整体流动速度分布特征与典型冰川的动力学规律一致。

冰川的坡度和厚度也是影响冰川表面速度的两个重要因素。由于前文估算了研究区域的冰川厚度,所以本研究使用RGI冰川多边形的冰川厚度来分析冰川速度与厚度的相关性,并根据冰川中心线确定研究区域。本研究所采用的冰川流速数据来源于哨兵2号影像(2022.7-2023.7)。前文已论述过,冰川厚度的增加将增强冰体自身的重力驱动作用,从而导致冰川流量相应增加:首先,冰川厚度的增加直接导致冰川对坡面滑动力的增加,直接增

加了冰川失稳的可能性；其次，冰川的厚度可以通过增加基底压力来促进融水的形成，增强滑动效果。有研究表明，1000 米厚格陵兰冰盖的基底滑动贡献了 60%以上(Moon et al., 2012)。虽然整体结果显示冰川表面坡度对冰川流速影响不大，但在大中型冰川中，地表坡度与冰川流速之间仍存在正相关关系(图 8)，这一结果与前人的研究结果一致(Agarwal et al., 2023)。由图 8 可以看出，在则隆弄冰川区域，冰川的厚度与冰川的坡度在大部分区域呈反比关系。在 B-B 剖面冰川上部陡峭的区域，冰川厚度较小，流速较大。随着流动距离的增加，冰川逐渐进入一个更宽、更慢的区域，冰川的坡度减小，但厚度增加。最后，随着离冰舌距离的增加，冰舌的厚度和坡度逐渐减小。则隆弄冰川的进退变化为泥石流的形成与演化提供了充足的物源条件；同时，直白沟流域水系分布复杂，为冰川泥石流的发生创造了有利的地形环境。因此，开展冰川运动速度的监测与分析，对则隆弄冰川地区冰川灾害的预测与预警具有重要意义。



(1) A-A剖面冰川流动速度与坡度和厚度的关系



(2) B-B剖面冰川流动速度与坡度和厚度的关系

图 8 则隆弄冰川流速与坡度及冰川厚度对比图

Fig.8 A comparison chart of the flow velocity, slope and thickness of the Zelongsong Glacier

4.2 流速变化与气象因素的关系

研究区域的冰川动态受到气候变量的强烈调节，包括温度、降水和季风驱动的大气模式。冰川速度的季节变化与温度梯度和降水因素密切相关(王璞玉等,2012)，长期气候趋势进一步影响冰川的响应。则隆弄冰川速度的季节变化遵循明显的温度和降水模式。月度 ERA5 分析(图 9)显示，速度在 3 月(早春)最小，9 月(早秋)达到峰值。研究区的季节动态特征是春季流动缓慢，夏季运动加速，由融水输入驱动，秋季最大值与持续的热扰动有关。冬

季减缓是由于降水减少、积雪反照率增加以及冰下裂缝因冻结而关闭造成的。近期的观测结果表明, 尽管存在年际波动, 冰川流速整体仍呈上升趋势(图 4), 这可能反映了区域变暖背景下融水产量增加及热扰动效应的增强。

值得注意的是, 夏季风活动减弱和冬季风条件增强改变了大气环流模式, 间接影响了冰川物质平衡和运动学。在过去的半个世纪里, 西藏气象站的气象记录显示, 西藏东南部夏季降水显著增加(Li et al., 2010), 这通过融水润滑加强了冰川运动。相反, 夏季日照的增强通过雪的反射率增加了地表反照率, 抵消了融化速率(Su and Shi, 2002)。而冬季降水则有利于堆积区冰体的堆积, 加速了 12 月至 2 月间的流速(Zhang et al., 2010)。

温度在调控冰川动力学过程中起着主导作用。青藏高原的持续升温不仅加速了冰川表层积雪的消融, 还在较长时间尺度上持续增加了冰川底部的水压力, 从而降低了基底摩擦系数, 进而强化了冰川的滑动与整体运动。研究区内三十年气温变化在(图 9)中所示, 从季节角度分析, 冰川平均流速符合常见海洋性冰川的运动特征, 呈现夏季流动速度高, 冬季流动速度低的特征。根据以上结论, 则隆弄冰川区气温升高对冰川运动速度的加速作用大于减速作用。全球变暖也是影响冰川运动速度的一个原因。ERA5 再分析数据表明, 南迦巴瓦附近研究区经历了 $0.282^{\circ}\text{C}/10$ 年的年代际变暖速率(Liu et al., 2009)。高海拔地区比低海拔地区受全球变暖的影响更大(Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015)。这种与海拔高度相关的变暖放大了冰川上部地区融水的产生, 由于冰—基岩界面的摩擦减少, 促进了基底滑动。此外, 地表径流与降雨产生的融水可沿裂隙向下渗透, 将热量传递至冰川底部, 进一步强化基底滑动过程。同时, 该区广泛分布的碎屑覆盖冰川削弱了地表反照率效应, 从而加速了冰川的消融。大气气溶胶, 如黑碳和尘埃, 也会进一步降低地表反照率约 15%(Zhang et al., 2017)。

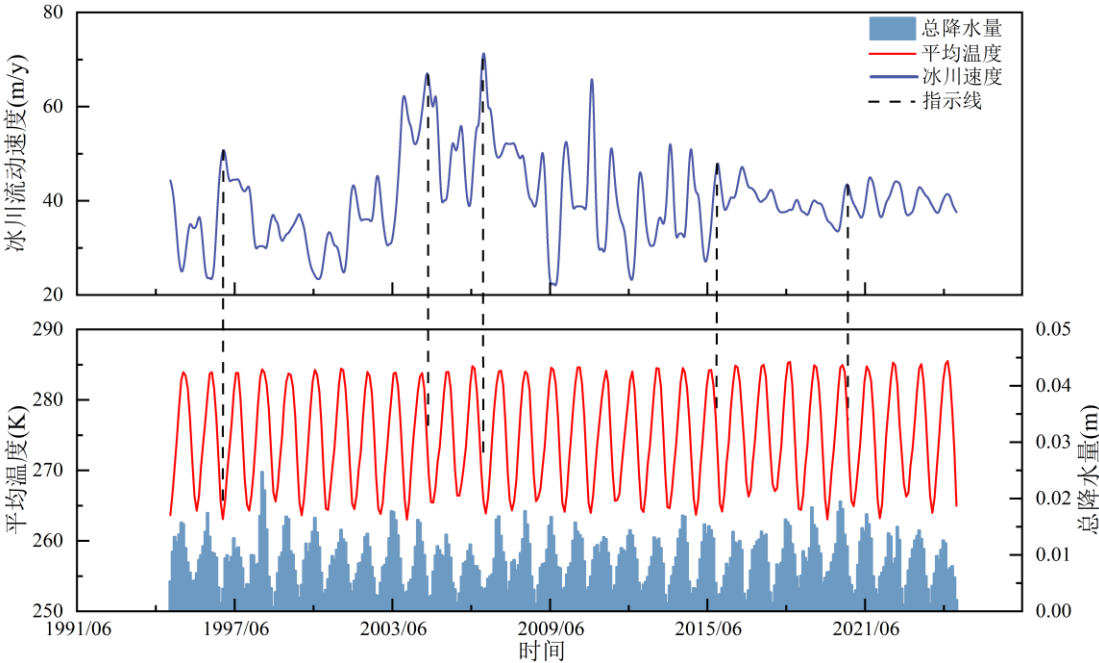


图 9 气候变化与对应时间段平均流速的变化关系

Fig.9 The relationship between climate change and the variation of average flow velocity in the corresponding time period

冰川流动速度的季节性波动不仅受气温变化的主导作用, 还受到降水过程的显著影响。降水入渗后可沿冰体裂隙向下渗透, 最终抵达冰川底部, 在适宜条件下显著降低冰川与基岩之间的摩擦力, 增强基底滑移, 从而加速冰川流动(Zwally et al., 2002)。图 9 展示了研究区自 1995 年至 2024 年间的冰川流速变化趋势及其与同期降水量、气温变化的关系。由图可

见,流速在多个时间段出现显著峰值,主要集中于夏末和初秋,这一时期亦为降水强度较高的阶段,表明降水在调节冰川滑移方面可能起到了重要作用。然而,部分年份中降水峰值并未对应流速的同步上升,这说明冰川运动并非由单一气候因子主导,而是受控于包括冰川几何形态、底部地质条件、冰体结构特征以及排水系统发育程度等多种复杂机制。

此外,本研究还观察到冰川流速响应气候变化过程存在明显的时间滞后效应(图9中虚线所示),该滞后可能与冰川内部水文系统的演化有关。随着夏季气温升高和降水增强,冰川表面融水量迅速增加,但融水从表面渗透至底部并对基底滑移产生实质性影响,往往需要一定时间。这一过程受到冰体内部裂隙发育程度、溶蚀通道建立效率以及冰底通道类型(如管道流或薄膜流)的影响(Millan et al., 2022)。Zwally et al. (2002)的研究亦表明,冰川滑移速率的上升滞后于地表融化时间,这一现象强调了冰川内部水文过程在调节滑移机制中的核心作用。

研究结果揭示了以温度和季风作用为主的气候驱动因素,对喜马拉雅冰川运动模式的深层调控作用。这种影响不仅表现为冰川流速的周期性变化,还通过强化冰体消融与补给之间的不平衡,进一步加剧了冰川系统的不稳定性。值得注意的是,在喜马拉雅构造活跃区,这种气候外动力扰动与地震内动力触发的协同效应,已多次引发沟谷型泥石流灾害链——如研究区直白村历史案例所示,气候变暖导致的冰川退缩与季风强降水叠加,配合地震诱发的岩体松动,在特定地形条件下形成了极具破坏力的地质灾害事件。这种内外动力耦合作用下的灾害演化过程,既凸显了冰川监测数据与气象参数精细化整合对灾害预测的必要性,也揭示了高寒山区地表过程响应多因子驱动的复杂性。因此,深入揭示冰川流速变化机制,评估其潜在灾害风险,对于完善冰川动力模型、预测灾害链条演化过程及开展区域风险管理具有重要意义。

4.3 冰川运动速度和灾害相关关系

冰川流速的异常变化是地质灾害链的重要前兆信号,例如冰川的加速运动可能反应冰川的滑移增强,且导致冰体不稳定,容易诱发冰崩或者冰川跃动事件。例如任锦程等(2025)使用 InSAR 数据详细分析了 2020 年直白沟冰川泥石流的情况,在灾害发生前冰川存在较大的位移,最大位移速率达到 51mm/a,累计形变量达到 106mm,这与我们计算的结果一致。物源区在灾害发生前的运动加快表明,冰川流动速度的异常可能是冰川地质灾害发生的前兆。相同的研究结果同样发生在了色东普。自 2017 年米林发生 6.9 级大地震后,色东普沟的冰川流动速度就从原来的小于 0.5m/d 提升到了 0.5-3m/d (Xin et al., 2024)。且刘传正等(2019)的研究表明,色东普沟位于阳坡,其地理位置使得该区域具有显著的日夜温差。这种温差导致冰雪融水增加,进而促使冰川发生破裂和退缩。此外,冰川裂隙中的渗流现象导致冰川底部的静水压力升高,从而降低了底部的摩擦力,再次增加了冰川的流速。这一系列过程使冰川更易发生垮塌和冰崩等自然灾害。综合来看,冰川地质灾害的发生可以追溯到数月甚至数年之前的冰川流速变化。

由此推测,冰川运动速度的突增在一定程度上反映了冰下水文环境的变化,并可能作为冰川相关灾害发生的重要前兆信号。一方面,冰川运动速度的突然加快往往预示着冰川内部或基底动力学过程的异常活跃,可能是冰川泥石流发生的重要前兆(Chen et al., 2023)。另一方面,加速的冰川运动容易形成冰崩,进而成为冰湖溃决的潜在前兆。以印度凯达尔纳特(Kedarnath)村为例,在 2013 年 5 月中旬至 6 月中旬,持续强降雨不仅让河流流量增大,还使雪覆面积短时间内减少约 50% (Allen et al., 2016)。这些因素促使冰川湖快速积水、冰川运动加速,最终在 2013 年 6 月 16 日引发灾难性泥石流,造成超六千人遇难。由此可见,冰川运动速度异常加快,既是气候变化的响应标志,也是地质灾害前兆。尤其在冰川基底融水积聚且排泄不畅时,易形成冰湖,进而由于冰川速度加快导致冰湖堤坝稳定性降低,最终引发冰湖溃决洪水;滑移增强也可能导致冰体不稳定,诱发冰崩或冰川跃动事件,对下游基

基础设施与人口聚居区构成严重威胁。而在青藏高原及其周边高山峡谷区,冰川地质灾害的频率和强度已呈上升趋势。

由于冰川运动响应周期长且时空异质性强,传统监测手段难以及时捕捉关键预警信号,而遥感技术凭借其高频次、大范围观测优势,可有效识别厘米级流速突变与冰湖扩张动态。这种差异性凸显了建立区域化动态预警阈值的必要性。这种观测能力的差异性不仅弥补了传统监测手段的不足,也凸显出在复杂山地环境中建立预警体系的必要性,以提升对冰川相关灾害的前瞻性识别和风险管控能力。

5 结语

本文通过多源卫星遥感资料与数值模拟相结合,综合评价了青藏高原东南部则隆弄冰川的年代际和季节变化特征。在过去的 30 年中,冰川在表面速度、厚度和空间范围上表现出明显的波动,冰川运动速度在 2000 年运动速度为 28.92m/y,是近三十年的最低值。此后经历了数次波动,并在 2005 年达到了研究期间内的最高运动速度,为 58.67m/y。在之后的二十年则隆弄冰川又经历了数次波动,并于近期波动逐渐平缓。但三十年来,冰川整体运动速度呈缓慢上升趋势,其主导因素为气温升高与季风降水变化等气候因素。这些气象因素主要通过影响冰川的质量平衡和水力平衡对运动速度产生效应,季节性变化和温度的升高是主要影响因素。

本研究还发现,降雨通过多重机制影响冰川运动。其主要途径在于,降雨沿冰体裂隙和孔隙向下渗透,最终到达冰川基底,增加基底水压力,从而降低冰川与基岩之间的摩擦力,促进基底滑移,加速冰川流动。然而,该过程并非即时发生,由于水文传输需经历一定的下渗和汇集过程,降雨对冰川运动的作用通常表现出显著的时滞效应,即冰川流速的变化相较于气候信号存在相位差。观测数据显示的流速波动特征可能主要反映冰下排水系统演化过程中融水可获取性与基底水压状态的动态平衡关系。值得注意的是,研究结果显示研究区冰川流速与坡度及冰厚均呈弱相关关系。这些现象表明,冰川基底运动并非单纯由剪切变形主导,而更可能受到复杂的冰下水文系统调控。本研究的发现为深入认识青藏高原东南部冰川动力学过程及其与气候的相互作用提供了新的视角,也为预测和减轻冰冻圈快速变化地区的冰川灾害提供了有价值的信息。

Reference

- Agarwal, V., Bolch, T., Syed, T. H., et al., 2017. Area and Mass Changes of Siachen Glacier (East Karakoram). *Journal of Glaciology*, 63(237), 148–163. <https://doi.org/10.1017/jog.2016.127>
- Agarwal, V., Van Wyk De Vries, M., Haritashya, U. K., et al., 2023. Long-Term Analysis of Glaciers and Glacier Lakes in the Central and Eastern Himalaya. *Science of The Total Environment*, 898, 165598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165598>
- Allen, S. K., Rastner, P., Arora, M., et al., 2016. Lake Outburst and Debris Flow Disaster at Kedarnath, June 2013: Hydrometeorological Triggering and Topographic Predisposition. *Landslides*, 13(6), 1479–1491. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3>
- Berthier, E., Vadon, H., Baratoux, D., et al., 2005. Surface Motion of Mountain Glaciers Derived from Satellite Optical Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.005>
- Bhambri, R., Hewitt, K., Kawishwar, P., et al., 2017. Surge-Type and Surge-Modified Glaciers in the Karakoram. *Scientific Reports*, 7(1), 15391. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15473-8>
- Chen, J., Gao, H., Han, L., et al., 2023. Susceptibility Analysis of Glacier Debris Flow Based on Remote Sensing Imagery and Deep Learning: A Case Study along the G318 Linzhi Section. *Sensors*, 23(14), 6608. <https://doi.org/10.3390/s23146608>

- Cheng, X., Xu, G. 2006. The Integration of JERS-1 and ERS SAR in Differential Interferometry for Measurement of Complex Glacier Motion. *Journal of Glaciology*, 52(176), 80–88. <https://doi.org/10.3189/172756506781828881>
- Dehecq, A., Gourmelen, N., Gardner, A. S., et al., 2019. Twenty-First Century Glacier Slowdown Driven by Mass Loss in High Mountain Asia. *Nature Geoscience*, 12(1), 22–27. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0271-9>
- European Space Agency and Airbus, 2022. Copernicus DEM, European Space Agency, European Space Agency [data set], <https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>
- Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., et al., 2019. A Consensus Estimate for the Ice Thickness Distribution of All Glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- Guan, W. J., Cao, B., Pan, B. T., 2020. Research of Glacier Flow Velocity: Current Situation and Prospects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(04), 1101–1114 (in Chinese with English abstract).
- Guo, W., Liu, S., Xu, J., et al., 2015. The Second Chinese Glacier Inventory: Data, Methods and Results. *Journal of Glaciology* 61, 357–372. <https://doi.org/10.3189/2015JoG14J209>.
- Huang H., & Gong C., 2024. Spatial-Temporal Evolution of Geohazard Chain Participated by Glacier and Snow in Zhibai Gully, SE Tibetan Plateau. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 49(10), 3784. (in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.140>
- Kääb, A., Berthier, E., Nuth, C., et al., 2012. Contrasting Patterns of Early Twenty-First-Century Glacier Mass Change in the Himalayas. *Nature*, 488(7412), 495–498. <https://doi.org/10.1038/nature11324>
- Li, L., Yang, S., Wang, Z., Zhu, X., et al., 2010. Evidence of Warming and Wetting Climate over the Qinghai-Tibet Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42(4), 449–457. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.4.449>
- Li, H., Zhao, J., Yan, B., et al., 2022. Global DEMs Vary from One to Another: an Evaluation of Newly Released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on Selected Terrains of China Using ICESat-2 Altimetry data. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 1149–1168. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2094002>
- Liu, C. Z., Lü, J. T., Tong, L. Q., et al., 2019. Research on Glacial/Rock Fall-Landslide-Debris Flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet. *Geology of China*, 46(02), 219–234. (in Chinese with English abstract)
- Liu, Y., An, Z., Linderholm, H. W., et al., 2009. Annual Temperatures during the Last 2485 Years in the Mid-Eastern Tibetan Plateau Inferred from Tree Rings. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(3), 348–359. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0025-z>
- Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A., et al., 2022. Ice Velocity and Thickness of the World's Glaciers. *Nature Geoscience*, 15(2), 124–129. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00885-z>
- Moon, T., Joughin, I., Smith, B., et al., 2012. 21st-Century Evolution of Greenland Outlet Glacier Velocities. *Science*, 336(6081), 576–578. <https://doi.org/10.1126/science.1219985>
- Mountain Research Initiative EDW Working Group. 2015. Elevation-Dependent Warming in Mountain Regions of the World. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- RGI Consortium., 2017. Randolph Glacier Inventory (RGI)-A Dataset of Global Glacier Outlines:

- Version 6.0. In: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Digital Media, Boulder, Colorado, USA. [Data Set]<https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
- RGI Consortium., 2023. Randolph Glacier Inventory (RGI)- A Dataset of Global Glacier Outlines. Version 7.0. National Snow and Ice Data Center. Boulder, Colorado USA. [Data Set] <https://doi.org/10.5067/F6JMOVY5NAVZ>.
- Sattar, A., Cook, K. L., Rai, S. K., et al., 2025. The Sikkim Flood of October 2023: Drivers, Causes, and Impacts of a Multihazard Cascade. *Science*, 387(6740), eads2659. <https://doi.org/10.1126/science.ads2659>
- Su, Z., & Shi, Y. 2002. Response of Monsoonal Temperate Glaciers to Global Warming since the Little Ice Age. *Quaternary International*, 97–98, 123–131. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00057-5)
- Van Wyk De Vries, M., Carchipulla-Morales, D., Wickert, A. D., et al., 2022. Glacier Thickness and Ice Volume of the Northern Andes. *Scientific Data*, 9(1), 342. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01446-8>
- Van Wyk De Vries, M., Wickert, A. D. 2021. Glacier Image Velocimetry: An Open-Source Toolbox for Easy and Rapid Calculation of High-Resolution Glacier Velocity Fields. *The Cryosphere*, 15(4), 2115–2132. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2115-2021>
- Wang,P.Y.,Li,Z.Q.,Wu,L.H., et al.,2012.Ice Thickness and Volume Based on GPR,GPS and GIS:Example from the Heigou Glacier No.8, Bogda-Peak Region, Tianshan, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*. 37(S1),179-187. (in Chinese with English abstract)
- Xin, Y., Zhao, C., Li, B., et al., 2024. Activation of Ms 6.9 Milin Earthquake on Sedongpu Disaster Chain, China with Multi-Temporal Optical Images. *Remote Sensing*, 16(21), 4003. <https://doi.org/10.3390/rs16214003>
- Yao, T., Bolch, T., Chen, D., et al., 2022. The Imbalance of the Asian Water Tower. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10), 618–632. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00299-4>
- Zhang, Y., Fujita, K., Liu, S., et al., 2010. Multi-Decadal Ice-Velocity and Elevation Changes of a Monsoonal Maritime Glacier: Hailuoguo Glacier, China. *Journal of Glaciology*, 56(195), 65–74. <https://doi.org/10.3189/002214310791190884>
- Zhang, Y., Kang, S., Cong, Z., 2017. Light-absorbing Impurities Enhance Glacier Albedo Reduction in the Southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13), 6915–6933. <https://doi.org/10.1002/2016JD026397>
- Zhang Z., Hu K., Lu Y., 2024. Glacier Movement Characteristics and Influencing Factors in High Mountain Asia'. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* 49(8):3010 (in Chinese with English abstract). doi:[10.3799/dqkx.2022.482](https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.482).
- Zwally, H. J., Abdalati, W., Herring, T., 2002. Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow. *Science*, 297(5579), 218–222. <https://doi.org/10.1126/science.1072708>
- Zou Q., Zhou B., Yang T., et al. 2024. Spatio-Temporal Differentiation Characteristics of Glacial Lake Outburst in the Himalayas. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 49(11), 4047 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.083>

中文参考文献

黄海, 龚诚, 2024. 藏东南地区直白沟冰雪型地质灾害链时空演化特征[J]. 地球科

学,49(10):3784-3798.

管伟瑾,曹泊,潘保田,2020.冰川运动速度研究:方法、变化、问题与展望.冰川冻土,42(04),1101-1114.

刘传正,吕杰堂,童立强,等.2019.雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究.中国地质,46(02),219-234.

刘国祥,张波,张瑞,等,2019.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[J].武汉大学学报(信息科学版), 44(07):980-995.DOI:10.13203/j.whugis20190077.

任锦程,苏鹏程,张乐乐,等,2025.藏东南直白沟冰川泥石流形成机制和风险评估[J].山地学报,43(03):423-437.DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000902.

王璞玉,李忠勤,吴利华,等.2012.GPR,GPS 与 GIS 支持下的冰川厚度及冰储量分析:以天山博格达峰黑沟 8 号冰川为例.地球科学(中国地质大学学报),37(S1),179-187.

张震,胡克宏,陆艺杰,等,2024.亚洲高山区冰川运动特征及影响因素.地球科学,49(08),3010-3019.

邹强,周斌,杨涛,等,2024.喜马拉雅高海拔山区冰湖溃决时空分异特征[J].地球科学, 49(11):4047-4062.