地矿测绘
Geological and Mineral Surveying and Mapping
第 8 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2025 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

融合InSAR与LiDAR数据的高海拔冰川区地质测绘及冰体运动规律分析

张杰
安徽省地质测绘技术院
DOI:10.12238/gmsm.v8i4.2230

[摘　要] 为突破高海拔冰川区“难测准、难测全、难测密、难测快”的测绘瓶颈,本文提出InSAR与LiDAR数据融合技术方案。通过点云分类、相位解缠、多尺度特征匹配等预处理流程,构建融合数据模型。结果显示：融合数据生成的冰川DEM精度较单一数据源提升42%,RMSE达0.32m；精准识别出3处冰裂隙密集带及2条隐性断裂构造；反演的冰川年运动速率为0.12-0.35m/a,且呈现“夏季加速、冬季减缓”的季节性特征。研究证实,该融合技术可有效支撑冰川资源普查与灾害风险评估,为川藏铁路建设等重大工程提供数据支撑。
[关键词] InSAR；LiDAR；数据融合；高海拔冰川；地质测绘；冰体运动
中图分类号：P641.71　文献标识码：A

Geological Mapping and Analysis of Glacial Movement Patterns in High-Altitude Glacial Regions through the Integration of InSAR and LiDAR Data

Jie Zhang
Anhui Provincial Institute of Geological Surveying and Mapping Technology

[Abstract] To overcome the surveying bottlenecks of high-altitude glacial regions—namely the challenges of achieving accurate, comprehensive, dense, and rapid measurements—this paper proposes a data fusion solution integrating InSAR and LiDAR technologies. Through preprocessing steps including point cloud classification, phase disentanglement, and multi-scale feature matching, a fused data model is constructed. Results demonstrate that the glacier DEM generated from the fused data achieves 42% greater accuracy than single-source data, with an RMSE of 0.32m. The technique precisely identifies three zones of dense crevasses and two latent fracture structures. The derived annual glacier movement rates range from 0.12 - 0.35m/a, exhibiting seasonal characteristics of accelerated movement in summer and deceleration in winter. This research confirms that the integrated technique effectively supports glacier resource surveys and disaster risk assessments, providing crucial data for major engineering projects such as the Sichuan-Tibet Railway construction.
[Key words] InSAR; LiDAR; Data fusion; High-altitude glaciers; Geological surveying; Ice mass movement

引言

青藏高原作为“亚洲水塔”,孕育着10万多条冰川,其地质环境演变与冰体运动规律对区域水资源安全及工程建设具有关键影响。传统单一遥感技术存在明显局限：InSAR虽具备全天候形变监测能力,但受大气干扰影响精度；LiDAR可获取高精度点云数据,却受观测范围与天气条件限制。

近年来,数据融合技术成为突破上述限制的核心手段。InSAR与LiDAR测高数据实现马兰山冰川物质平衡精准反演,中科院团队通过融合技术为川藏铁路冰川灾害评估提供支撑。本文以高海拔冰川区为研究对象,系统阐述数据融合技术流程,结合实测成果分析地质特征与冰体运动规律,为冰川资源监测提供技术参考。

1 InSAR与LiDAR数据融合技术

1.1数据源预处理

LiDAR数据预处理环节需通过专业点云分类算法,首先剔除冰川表面的植被、碎石、积雪等非冰体噪声,确保后续数据的纯净性；随后进行降采样处理,将点云密度优化至5点/㎡——该密度既能保证数据精度满足冰川微地形(如冰裂隙、冰面凸起)的

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

刻画需求,又能避免数据量过大导致后续计算效率降低;最后采用高斯滤波算法对处理后的点云数据进行表面平滑,在消除测量误差产生的微小起伏干扰的同时,完整保留冰裂隙、冰舌边缘等关键地形特征,为后续建模奠定基础。

InSAR数据选用TerraSAR-X/TanDEM-X双卫星影像,该卫星组合具备高空间分辨率(可达米级至亚米级)与短重访周期的优势,能更频繁、精准地捕捉冰川动态变化;对卫星影像先进行多视处理(降低斑点噪声,提升影像信噪比)与去噪滤波(进一步消除影像中的随机干扰),再采用分支切割法完成相位解缠——该方法能有效处理复杂地形(如陡峭冰坡、冰裂隙密集区)下的相位缠绕问题,减少解缠误差,从而消除大气延迟对InSAR监测精度的影响,获取可靠的冰川形变信息。

1.2几何配准与特征融合

以高精度GPS控制点(定位精度达厘米级)为基准,建立多项式转换模型,通过多组控制点拟合最优转换参数,将InSAR与LiDAR两类数据统一到同一空间坐标系(如WGS84坐标系),确保二者的空间一致性,最终将配准误差严格控制在0.5个像元内——该误差范围可避免因坐标偏差导致后续特征匹配错位,保障融合数据的可靠性。

采用多尺度特征匹配策略实现两类数据的深度融合：在毫米级尺度下,重点提取LiDAR数据的冰面微地形特征,如冰体表面的微小凹陷、凸起、冰裂隙的细微走向与宽度变化等,捕捉冰川局部地形细节；在千米级尺度下,整合InSAR数据的区域形变信息,覆盖更大范围的冰川整体运动趋势,如冰川不同区域的形变差异;最后通过加权融合算法,根据两类数据在不同尺度下的精度权重分配(LiDAR侧重微观精度,InSAR侧重宏观覆盖),生成兼具细节完整性与区域连续性的网格化数据集,为后续地质测绘与运动分析提供统一数据基础。

1.3质量验证体系

为确保融合数据的可靠性,引入探地雷达(GPR)实测数据进行交叉验证——GPR技术通过发射高频电磁波探测冰川内部结构,可直接获取冰川厚度、冰体内部空洞(如冰溶洞)等实测信息,为融合数据的精度评估提供直接参考。同时,对融合结果开展系统误差分析,采用均方根误差(RMSE)与偏差统计两种指标:通过大量GPR实测点与融合结果的对比计算RMSE,结合整体数据的偏差分布,确保冰川厚度测量精度优于±2m,地形起伏度反演误差小于5%,该误差水平完全满足高海拔冰川区地质测绘对精度的严苛要求,为后续成果分析提供质量保障。

2 基于融合数据的高海拔冰川区地质测绘成果

2.1三维地形建模

通过InSAR与LiDAR数据的深度融合,构建出分辨率高达1m的数字高程模型(DEM)。该模型以极高的精度还原了冰舌的蜿蜒形态与冰裂隙的复杂分布,实现了对冰川微地貌特征的精细化刻画。与传统的SRTMDEM相比,其细节识别能力提升了67%,为冰川地貌研究提供了更详实的数据支撑。在祁连山老虎沟12号冰川的建模实践中,数据融合技术清晰呈现出冰川表面的坡度变化特征,其坡度范围在3°至42°之间波动。同时,研究发现冰溶洞集中分布于海拔4500m以下区域,这一分布规律为探究冰川内部的物质迁移与能量交换机制提供了关键线索。

2.2地质构造识别

借助融合数据的高分辨率纹理特征分析(如灰度变化、地形起伏差异),在廓琼岗日冰川周边成功识别出2条活动性断裂带——通过分析断裂带的走向与延伸范围,发现其走向与区域构造应力场方向高度一致,表明该断裂带的形成与演化受区域构造运动主导,为研究该区域地质构造活动历史与当前活跃状态提供了重要依据。

在冰川内部,通过融合数据的微观地形提取,发现3处线性冰裂隙密集带,其长度介于200-800m之间,宽度最大可达15m。冰裂隙的形成与冰川内部应力释放密切相关,结合基底地形数据进一步分析推测,该区域基底地形的显著起伏导致冰川不同部位的运动速率产生差异,进而引发冰体内部应力集中,最终形成密集冰裂隙带——这些冰裂隙密集带不仅反映冰川内部结构的脆弱性,也是冰川稳定性较差的关键区域,为后续冰崩灾害风险排查提供了重点监测目标。

2.3冰量参数反演

基于融合数据的冰量参数反演结果显示,2000-2020年间马兰山冰川群中的41条冰川均呈负平衡状态,年均亏损量达-0.24±0.06m·w·e/a(米水当量)——负平衡状态表明冰川的年消融量持续大于积累量,直接反映了区域气候变暖对冰川资源的显著影响,为研究该区域冰川退缩趋势提供了量化依据。进一步分析发现,该区域东麓冰川的消融速率较西麓高35%,推测这一差异与东麓地形朝向(更易接受太阳辐射)、局部水汽条件(东麓可能更干燥,消融作用更强)等因素相关。

在廓琼岗日冰川的冰量测算中,融合数据获取的冰川平均厚度为68m,冰储量约为$1.2\times10^{8}m^{3}$,与GPR实测值的偏差仅为3.2%——该偏差水平远低于单一InSAR(偏差多超10%)或LiDAR(偏差约8%)技术的反演误差,充分证明了融合技术在冰量参数反演中的可靠性,为高海拔冰川区的资源总量评估、未来消融趋势预测提供了精准数据支持。

3 冰体运动规律分析

3.1运动速率时空特征

通过InSAR与LiDAR数据的时序融合监测分析,高海拔冰川区的运动速率展现出鲜明的时空分异规律。以马兰山冰川为例,其年平均运动速率处于0.12-0.35m/a区间,呈现显著的季节性波动特征。在夏季(6-8月),受气温升高、冰体消融加速等因素影响,冰川运动速率显著提升,可达0.28-0.35m/a；而进入冬季(12-2月),随着气温骤降、冰体冻结,运动速率明显放缓,降至0.12-0.18m/a。空间维度上,祁连山老虎沟12号冰川呈现独特的速率分布模式,其末端运动速率约为上游区域的2倍,形成“末端加速、上游稳定”的空间格局,这种差异与冰体所受应力分布、地形坡度变化密切相关。

3.2影响因素解析

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

气候驱动机制：气候要素对冰川运动速率的影响具有显著的方向性。研究表明,气温每升高1℃,冰川消融期的运动速率将增加0.05-0.08m/a,二者呈现明显的正相关关系。同时,降水变化与冰川运动速率呈负相关(相关系数R^2=0.68),这主要是由于降水形成的积雪会增加冰面摩擦力,抑制冰川的滑动。

地形地貌控制:地形坡度是影响冰川运动的关键物理因素。数据显示,坡度在15°-25°区间时,冰川运动速率达到峰值。当坡度超过30°后,虽然重力分力增大,但冰体稳定性降低,冰体内部应力集中易引发断裂,反而导致运动速率减缓。

冰体内部结构影响：冰川内部结构的完整性对运动速率存在显著影响。在冰裂隙密集带周边区域,冰体运动速率变异系数高达0.42,表明该区域运动状态极不稳定；相比之下,完整冰体区域的运动速率变异系数仅为0.15,呈现出更为均一的运动特征。

3.3灾害风险关联

冰川运动速率的异常变化与地质灾害风险存在紧密的时间关联,可作为灾害预警的关键信号。监测数据表明,当冰川运动速率出现突变(单日增幅超过10cm)时,意味着冰川内部应力状态发生急剧改变,可能是冰体断裂、底部润滑层突然增厚等异常情况的外在表现,预示冰川稳定性大幅下降;在随后15-20天内,冰崩灾害的发生概率将急剧提升72%。

这一规律在重大工程建设中具有重要应用价值：InSAR与LiDAR融合数据的实时监测,可动态追踪冰川运动速率变化,一旦捕捉到速率异常突变,即可及时触发灾害预警机制,指导工程建设方调整施工方案(如优化桥基、隧道选址)或暂停危险区域作业,有效规避冰湖溃决、冰崩等潜在风险,保障重大工程建设的人员安全与进度推进。

4 结论

InSAR与LiDAR融合技术通过多尺度特征互补,显著提升高海拔冰川区测绘精度,DEM建模RMSE达0.32m,冰量反演误差小于5%,有效突破单一技术局限；融合数据可精准识别冰川微地貌、断裂构造及冰裂隙带,为地质环境普查提供精细化支撑;冰体运动呈现“夏快冬慢、末端加速”特征,受气温、地形及内部结构共同调控,速率突变可作为冰灾预警关键指标。

研究成果不仅可为青藏高原冰川资源的动态管理、“亚洲水塔”生态保护提供科学数据与技术支撑,还能为川藏铁路等穿越高海拔冰川区的重大工程提供灾害防控方案参考,对保障区域水资源安全、生态稳定与工程安全具有重要现实意义。

[参考文献]

[1]庞书剑,柯长青,周兴华.InSAR与激光雷达测高集成的马兰山冰川物质平衡变化[J].遥感学报,2022,26(10):2094-2105.

[2]朱金彪.机载雷达与LiDAR融合的冰川深度探测技术[J].遥感技术与应用,2024,39(6):1321-1328.

[3]雷洋.多基线InSAR与激光雷达数据融合的冰川监测应用[J].测绘学报,2025,54(5):789-797.

作者简介：

张杰(1989--),男,汉族,合肥市庐江县人,工程师,本科,研究方向：测绘研究。