2009 年慕士塔格峰山地冰川表面冬季运动分布数据集

闫世勇[1*]，李毅[1]，吕明阳[2, 3]，阮智星[3]

文献 DOI:
10.11922/csdata.170.2017.0119
数据 DOI：
10.11922/sciencedb.375

文献分类：地球科学
收稿日期：2017-01-24
开放同评：2017-02-28
发表日期：2017-06-07

摘　要：慕士塔格峰位于帕米尔高原西部，是我国西部山地冰川的集中分布区之一，长期监测该地区冰川不仅有益于评估水资源状况，也有助于气候变化方面的研究。本文基于日本 ALOS/PALSAR 卫星分别于 2009 年 1 月 14 日和 3 月 1 日获取覆盖慕士塔格峰地区（37°48′18″N ～ 38°35′14″N，74°42′45″E ～ 75°41′50″E）的 SAR 数据，借助改进的像素跟踪算法，通过精确去除卫星轨道和传感器姿态差异带来的全局性位移和地形起伏导致的地形效应误差，得到了该地区山地冰川表面高精度运动分布场（GeoTIFF 格式，32 位浮点型）。其空间分辨率约为 20 m。非冰川区残余运动的统计分析表明其总体精度约为 0.5 m/46 day。冰川运动分布表明，该地区冰川运动主要呈现为积累区速度快，消融区和末端运动速度慢的特点，冰川运动整体上与地形存在一定的相关性，其中个别中小型冰川呈现出较强的活动性。本数据集可以作为该地区山地冰川运动的本底调查资料，为慕士塔格峰地区山地冰川运动研究提供基础数据支撑。另外，山地冰川运动高精度监测将有助于研究其动力学特征和预测冰川运动导致的地质灾害，同时也为我国冰川资源普查提供了一种有效途径。

关键词：冰川表面运动；像素跟踪算法；ALOS/PALSAR；慕士塔格峰

数据库（集）基本信息简介

数据库（集）中文名称	慕士塔格峰地区山地冰川表面 2009 年冬季（1–3 月）运动分布		
数据库（集）英文名称	A dataset of glacier surface motion distribution in Muztagh Ata region during winter 2009 (January – March)		
数据作者	闫世勇、李毅、吕明阳、阮智星		
通讯作者	闫世勇（yan_shiyong@163.com）		
数据时间范围	2009 年 1 月 14 日到 2009 年 3 月 1 日（间隔 46 天）		
地理区域	地理范围为北纬 37°48′18″ ~ 38°35′14″，东经 74°42′45″ ~ 75°41′50″。其中包括：科克萨依冰川、洋布拉克冰川、切尔干布拉克冰川、乔都马克冰川（卡尔塔马克冰川）、扩斯库拉克冰川、扩扩色勒冰川和其木干冰川（部分）等山地冰川。		
空间分辨率	22 m	数据量	87 MB
数据格式	*.tif（GeoTiff）		
数据服务系统网址	http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/375		
基金项目	中国科学院国际合作局对外合作重点项目“泛第三极环境与‘一带一路’协同发展”（131C11KYSB20160061-3）		
数据库（集）组成	本数据集共包含 3 个数据文件，其中： 1.Motion_Final_Range.rar 是距离向位移量数据，数据量 26 MB； 2.Motion_Final_Azimuth.rar 是方位向位移量数据，数据量 26 MB； 3.Motion_Final_Total.rar 是冰川表面总位移量数据，数据量 35 MB。		

1. 中国矿业大学，环境与测绘学院，徐州　221116；
2. 南京大学，地球科学与工程学院，南京　210023；
3. 中国科学院遥感与数字地球研究所，北京　100094
* 通讯作者（Email: yan_shiyong@163.com）

引　言

山地冰川作为气候变化的敏感响应因子之一[1-2]，已经受到社会各界的普遍关注。越来越多的科学家将山地冰川变化作为研究重点，分析山地冰川状态与气候变化之间的关系和预计山地冰川运动相关的地质灾害，开展山地冰川资源调查及灾害预防研究[3]。我国是山地冰川资源最为丰富的国家之一，根据第一和第二次川编目等统计信息，我国现有山地冰川 48571 条，冰川面积约 51766 km^2[4-5]。受全球气候变暖影响，我国多数冰川呈退缩减薄状态，而传统的冰川面积统计方法只能获取冰川在长时间段内的消融情况，无法及时反映冰川的动态信息。而且，随着全球变暖的加剧，一些冰川的加速滑动变薄也会使得冰川面积短期内有所增加，因此不能仅以冰川面积作为冰川遥感监测的指标。冰川运动则能更加及时准确地反映冰川的动态信息和物质平衡情况，逐渐成为冰川研究的重要内容之一[6]。

GPS 等传统冰川运动测量方法往往受限于冰川区恶劣的气候环境，无法对大范围内分布的冰川开展周期性的运动监测，而且监测结果时空分辨率也低，仅仅能获取冰川表面部分采样点的速度信息，无法准确反映冰川表面运动的整体分布[7]。遥感技术的快速发展为山地冰川运动遥感监测提供了丰富的数据源，并且已经成为山地冰川运动的主要监测手段。该方法无需开展野外现场作业，有效地克服了恶劣气候和复杂地形条件的限制，能够快速高效地获取大尺度范围内山地冰川表面运动信息，且能够保持较高的空间采样率，从而获取整个冰川表面的运动分布信息，逐渐成为山地冰川运动研究的主要手段。而基于 SAR 数据的像素跟踪算法，则是遥感冰川运动监测最为常用的方法之一[8-9]。

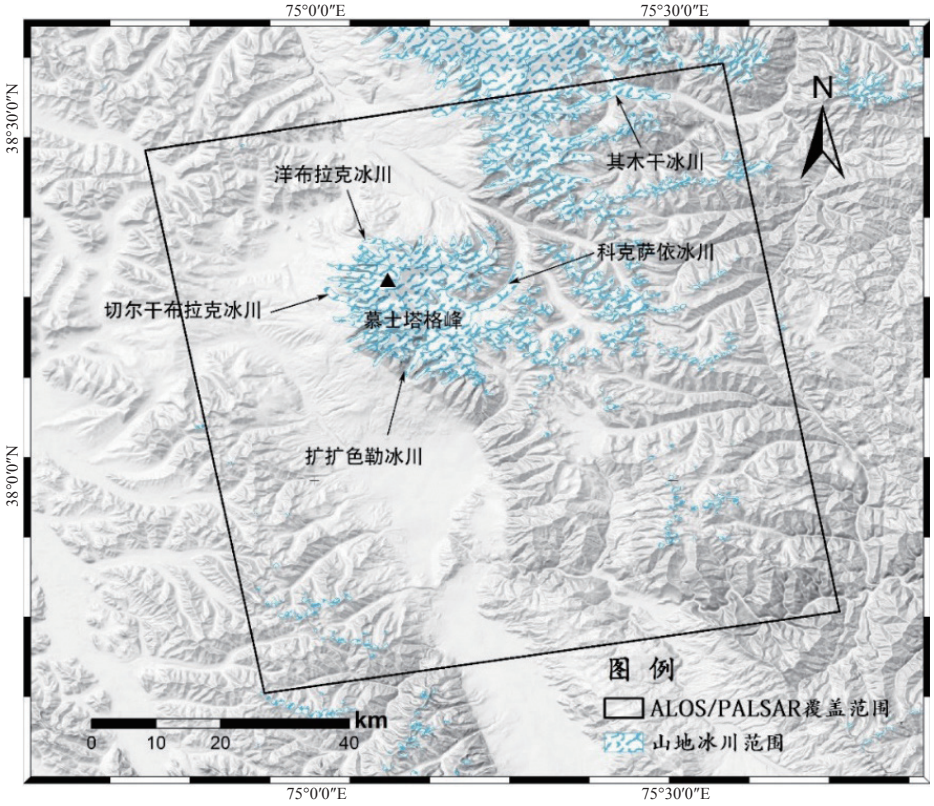


图 1　慕士塔格峰地区山地冰川分布范围示意图

表 1　ALOS/PALSAR 雷达影像对参数信息

成像时间	平行基线(米)	垂直基线(米)	条带号	分幅号	时间基线(天)
2009-01-14	189.3	248.9	525	750	46
2009-03-01					

慕士塔格峰地区作为我国西部重要的山地冰川分布区之一（图 1），其冰川活动性随着全球气候变化加剧也有所增加。冰川运动加速导致该区域发生过多次冰崩等灾害，对下游和冰川实地研究带来了潜在的危险，因此对该地区冰川开展运动普查与长期监测变得日益重要。本文利用日本 ALOS/PALSAR 卫星分别于 2009 年 1 月和 3 月获取的 2 幅覆盖慕士塔格峰地区的 SAR 影像数据（表 1），经过 SAR 成像处理之后得到相应的单视复图像（SLC），然后将二者作为参数输入到像素跟踪算法程序，在去除各项误差和滤波操作之后，得到反映冰川运动的速度分布场。可见，基于 SAR 数据的像素跟踪算法能够快速高效地获取到慕士塔格地区山地冰川的活动性信息，避免了长期艰苦且高风险性的野外实地测量工作，为快速准确掌握该区域冰川运动状况提供了可靠的方法支持。同时，监测结果也表明：该区域冰川运动总体上较为缓慢，且呈现积累区运动比消融区快的特点；个别小型冰川由于地形等因素的影响表现出了较快的运动特征。以通过该方法获取得到的 2009 年冬季（1–3 月）冰川运动分布为本底信息，将有助于与后期冰川运动开展对比分析研究，进而为研究该区域冰川在气候变化背景下的运动变化特征提供必要支撑。

1　数据采集和处理方法

本文所利用的 SAR 数据是由搭载在 ALOS 卫星上的 L 波段 PALSAR 传感器获取。该传感器主要用条带和宽幅扫描模式，其中条带模式主要具有 FBS 和 FBD 两种工作状态，分别获取单极化和双极化数据。其中 FBD 模式 SAR 数据由于其距离向带宽减半，导致其距离向分辨率是 FBS 模式 SAR 数据的一半。本文获取的 2 幅 SAR 影像数据均为 FBS 模式，经过 GAMMA 软件（2010 版）成像处理之后得到的单视复图像的空间分辨率为 3.14 m 距离向，4.56 m 方位向，幅宽约为 70 km，覆盖范围如图 1 中黑色框所示。

为了得到研究区范围内冰川表面运动分布，本文将以间隔 46 天的 2 景 FBS 模式 SAR 数据为基础，借助美国航天飞机雷达地形测绘任务得到的地形数据（SRTM DEM），按照图 2 所示的数据处理流程，对 SAR 影像进行处理，进而得到该区域冰川的运动信息。由于像素跟踪算法得到的监测结果受到多个参数的影响，因此，本文根据以往研究经验、慕士塔格峰地区山地冰川规模大小以及 SAR 数据的空间分辨率，选取并设定了各个窗口采样大小：匹配模板窗口 64×64 像素，搜索窗口 96×96 像素，采样窗口 4×12 像素。将以上参数输入像素跟踪算法程序，能够得到该地区 SAR 影像上每个采样点处的总偏移量，之后根据数据处理流程，去除轨道和传感器姿态相关的全局形变和地形起伏相关的误差，经过滤波处理和地理编码，最终得到冰川表面运动分布场。

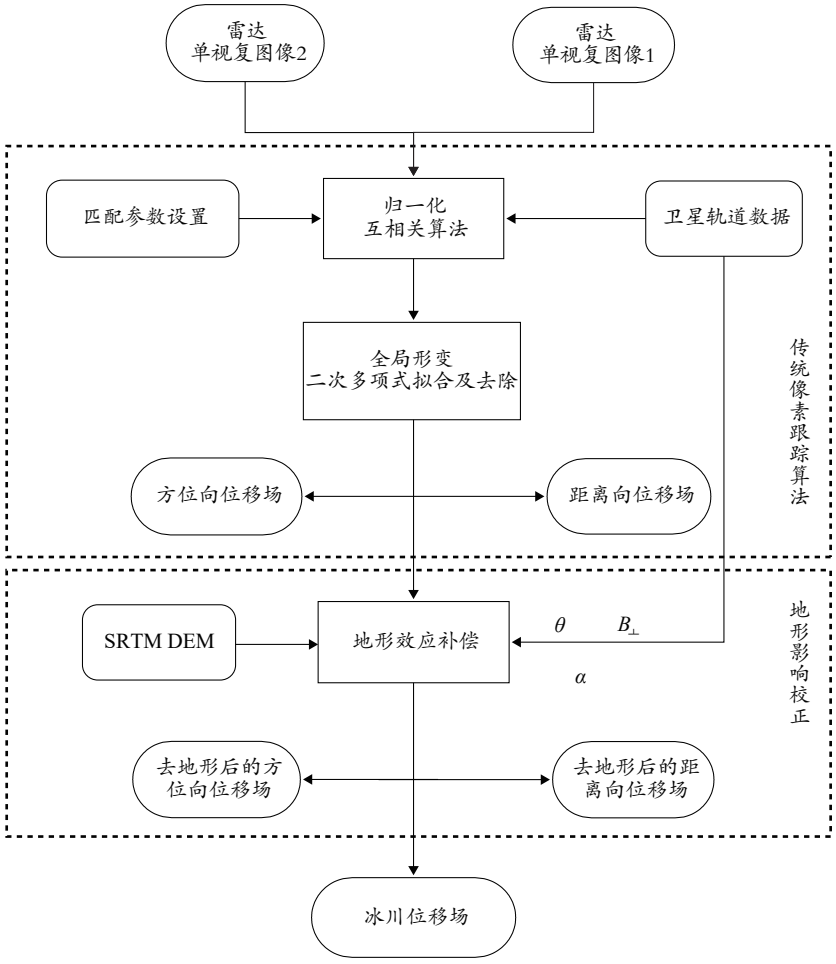


图 2　基于星载 SAR 数据的像素跟踪算法数据处理流程图

1.1　基于 RANSAC 的全局形变估计

为了准确模拟和去除全局形变，本文提出了基于 RANSAC（RANdom SAmple Consensus）即随机采样一致算法的全局形变参数估计方法。该算法由 Fischler 和 Bolles 于 1981 年提出，是目前广泛采用的一种剔除误配点的方法，它可以利用匹配点集合内在的约束关系来去除错误的和不稳定的匹配点，从而提高图像之间转换参数估计的准确性[10]。它是一种用于估计模型参数的鲁棒算法，能够处理数据错误率超过 50%的模型参数估计问题。利用 RANSAC 全局形变参数估计的鲁棒性，避免了传统全局参数估计当中的掩膜操作，能够在提高计算效率的同时保证全局形变参数估计的准确性，从而达到准确模拟和去除卫星轨道和传感器姿态差异导致的整体性位移的目的。一般而言，由于卫星轨道和传感器姿态在成像时间段内往往不会突变，本文采用二次多项式对全局形变进行拟合和补偿，能够准确补偿卫星轨道和传感器姿态差异带来的全局形变。

1.2　基于外部 DEM 的地形校正

我国的山地冰川往往位于地形复杂的高海拔地区，由于卫星多次对研究区成像时存在位置差异，会导致像素跟踪监测结果中存在与地形相关的偏移量，进而降低冰川运动监测的准确性。为了消除地形起伏带来的误差，本文在分析地形相

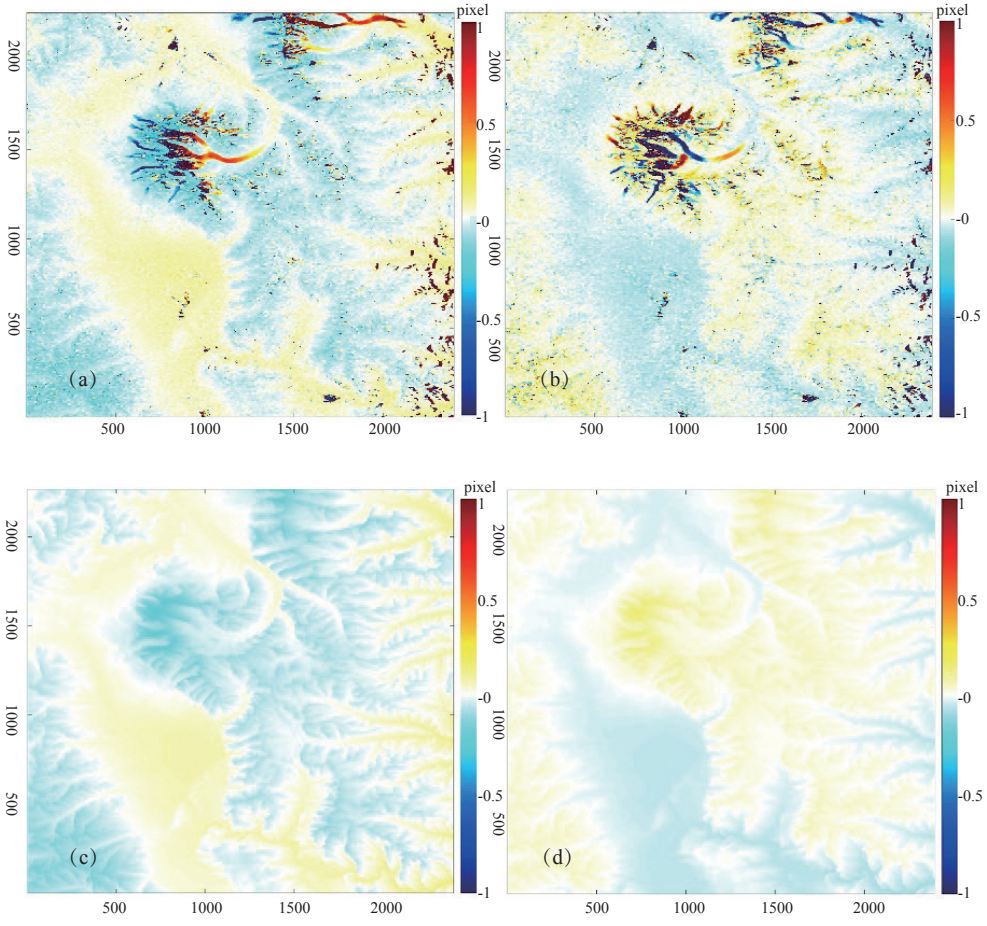
关偏移量与空间基线和地形起伏关系的基础上，基于雷达成像的基本几何关系，建立了地形起伏相关的误差传播模型，并分别给出了方位向和距离向的地形误差计算方法，公式分别如下 [11-12]：

$$\delta(\Delta l') = \sin\alpha\cos(\theta_m - \beta)\frac{\delta h}{\Delta_m^{(az)}\sin\theta_m} \quad (1)$$

$$\delta(\Delta p') \approx -\frac{B_\perp}{\rho\sin\theta}\frac{\delta h}{\Delta_m^{(rg)}} \quad (2)$$

从公式（1）可知，地面目标高程对方位向偏移的影响除了与自身高程变化有关外，还与轨道交角 α、β 下视角 θ 和基线与水平面的夹角 β 有关。公式（2）则描述了地形起伏与距离向偏移之间的关系。其中，$B_\perp$ 是基线 B 垂直于视线向的分量，$\Delta^{(rg)}$ 分别是主辅雷达图像斜距向的像素大小。由上述表达式可知，距离向上地形起伏导致的偏移量大小会随着垂直基线的增大而变大。

通过上述两个方向的地形起伏影响模型，利用获取 2 幅 SAR 影像时的空间基线情况，能够准确计算得到地形起伏在方位向和距离向产生的偏移，并对全局形变校正后的偏移量进行地形效应补偿，从而得到慕士塔格峰地区冰川表面运动的准确估计（图 3）。



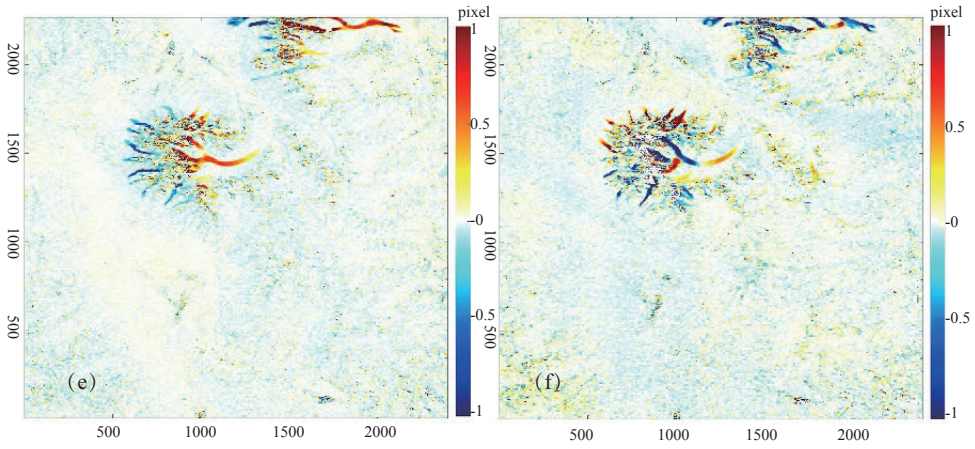
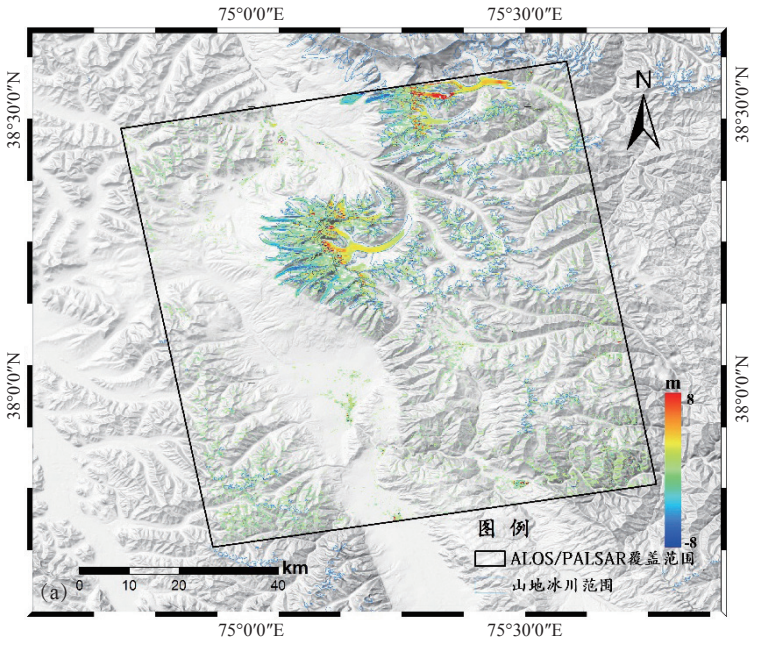


图 3　研究区 2009 年 1–3 月距离向和方位向偏移地形校正对比（雷达坐标系）

注：（a）、（b）为未经过地形校正的偏移量；（c）、（d）为地形起伏所导致的偏移量；（e）、（f）为经过地形校正之后的偏移量。

2　数据样本描述

本文所用 ALOS/PALSAR 数据为 FBS 单极化模式数据，轨道号 525，分幅号 750。冰川运动监测结果存储格式为 GeoTiff 格式，数据类型为 32 位浮点型，分 3 个文件存储，分别为距离向位移量（Motion Final Range geo.tif），方位向位移量（Motion Final Azimuth geo.tif）和总体合成位移量（Motion Final Total geo.tif）。其中前两者除了用于分析冰川在不同方向上的运动特征外，冰川的运动方向也将由二者确定。地理编码结果如图 4 所示，其中（a）和（b）的颜色条正值表示冰川表面沿 SAR 传感器的飞行方向和视线方向运动，负值表示冰川沿其相反方向运动，其中方位向运动量大小介于 8 ~ 9 m 之间，距离向运动量大小介于 7 ~ 16 m 之间。图 4 中（c）的颜色条表示该地区冰川的运动量大小，主要分布于 0 ~ 20 m 之间，图中将低监测误差的值进行了透明化处理。



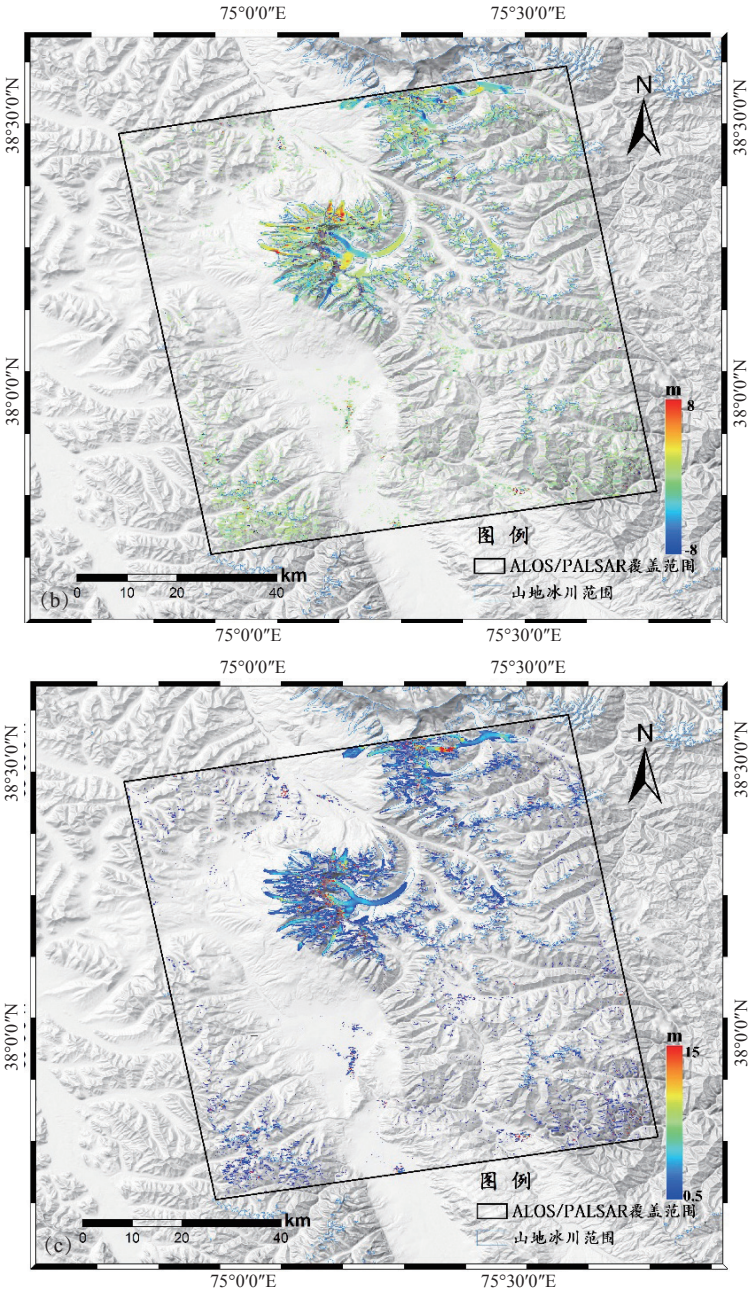


图 4　慕士塔格峰地区冰川表面运动分布图

注：（a）距离向；（b）方位向；（c）总体位移量

3　数据质量控制和评估

为了保证冰川表面运动采样点的可靠性，像素跟踪算法中匹配模板、搜索窗口和搜索步长等关键参数的选择和设定需要充分考虑研究区地表后向散射的稳定性。根据以往研究经验和该地区的冰川规模大小，分别设定为：64 × 64 像素，搜索窗口 96 × 96 像素，采样窗口 4 × 12 像素。在保证匹配结果具有较高可靠性的基础上，能够获取最大约 50 m 的位移量。采样窗口的设置，不仅保证了冰川表面具有一定数量的采样点，而且使得结果能够以更为合理的比例进行展示。

由于 2 次成像存在一定的空间基线，二者的视觉差会使得研究区内复杂地形产生严重的地形相关误差。为了进一步提高监测精度，弥补复杂地形带来的误差，

本文也给出了基于外部 DEM 的地形误差校正方法和相应数据处理流程。

另外，由于积雪覆盖和降水等因素的影响，特别是在高海拔和地形异常复杂的区域，像素跟踪算法往往会受到噪声的干扰，会产生错误的结果，无法正常用于反映该区域运动信息。为此，在数据处理后期，进行了阈值和方向与强度联合约束的滤波方法，较好地削弱了噪声的影响，提高了监测结果的可靠性。

由于研究区地处偏远山区，高寒高海拔的气候条件限制了野外验证工作的有效开展，故本文将通过监测结果的统计特征开展精度分析工作。像素跟踪算法提取山地冰川表面速度的基本假设前提是：在雷达影像覆盖的范围内，除了被冰川覆盖的区域外，其余区域在数据获取间隔期内均没有位移变化。因此，可以利用像素跟踪算法结果中非冰川区的残余位移量，对山地冰川表面运动位移量进行精度分析，常用方法是根据非冰川区残余运动的均方根误差进行评估，其表达式如下：

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\left(x_i^{off}-x_i^{fit}-x_i^{topo}\right)^2+\left(y_i^{off}-y_i^{fit}-y_i^{topo}\right)^2\right)}{N}} \quad (3)$$

公式（3）中 x_i^{off} 和 y_i^{off} 分别表示非冰川区第 i 个匹配点处距离向和方位向的偏移量，x_i^{fit} 和 y_i^{fit} 分别表示第 i 个匹配点处距离向和方位向的偏移拟合量，x_i^{topo} 和 y_i^{topo} 分别表示第 i 个匹配点处的地形起伏对距离向和方位向偏移的影响。

研究区内非冰川覆盖区域的残差统计直方图如图 5 所示。地形校正前后的直方图对比表明了地形校正的有效性，提高了该地区冰川运动监测的精度和可靠性。根据公式（3），能够得到该区域非冰川区地形校正前后的均方根和均值分别为（间隔 46 天）：均方根 0.4 m 和 0.3 m，均值为 0.3 m 和 0.2 m。

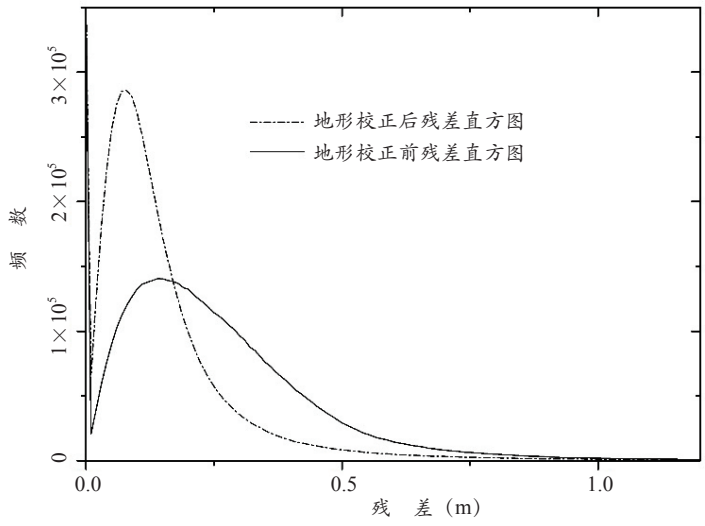


图 5 非冰川区残余误差直方图（间隔 46 天）

4 数据价值

基于 L 波段 ALOS/PALSAR 雷达数据获取了慕士塔格峰地区 2009 年冬季的山地冰川表面运动分布，准确地拟合和去除卫星轨道和传感器姿态差异导致的全局性变形，并借助外部 DEM 和 SAR 成像几何参数，补偿了复杂地形导致的地形效应，进而得到了研究区内冰川表面运动的准确分布信息。该结果可以作为冰川运

动本底调查信息，与以后同期冰川运动监测进行对比分析，研究该地区冰川的运动变化特征；通过冰川运动分布，能够开展冰川运动相关的冰崩等自然灾害的预测，减少因气候变暖给冰川下游带来的危害；通过全面了解冰川运动情况，能够更好地开展研究区内冰川资源的调查，为掌握和合理利用该地区冰川资源提供必要的基础信息。

5 数据使用方法和建议

2009 年 1–3 月慕士塔格峰地区冰川表面运动分布结果数据存储格式为 GeoTiff 格式。ENVI 和 ArcGIS 等常用遥感和 GIS 软件均可以支持该数据的读取和操作。数据集中提供了该区域冰川在距离向、方位向和合成之后的运动分布情况，研究人员可根据需要灵活选择要使用的数据，也可根据当前或后期的冰川运动监测结果，开展慕士塔格峰地区冰川表面应力分布分析与研究工作。另外，由于 SAR 为斜视成像几何关系，而本文并没有对距离向数据进行相应转换，因此，虽然对数据进行了地理编码，但是冰川运动信息依然是由距离向和方位向监测结果构成。

致　谢

感谢 JAXA 提供 ALOS/PALSAR 数据，感谢 CGIAR-CSI 提供 SRTM 90m DEM 数据，感谢寒区旱区科学数据中心提供中国第二次冰川编目数据集。

数据作者分工职责

闫世勇（1982—），男，江苏省徐州市人，博士，讲师，研究方向为冰川运动遥感监测。主要承担工作：SAR 数据处理流程设计。

李毅（1993—），男，山西晋中人，硕士研究生，研究方向为雷达遥感与应用。主要承担工作：SAR 数据预处理。

吕明阳（1991—），男，吉林省松原市人，博士研究生，研究方向为冰川运动遥感提取。主要承担工作：像素跟踪算法。

阮智星（1986—），女，福建省福州市人，博士，助理研究员，研究方向为雷达遥感及其在冰川监测上的应用。主要承担工作：数据分析。

参考文献

[1] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers[J]. Science, 1994, 264: 243–245.

[2] 井哲帆，周在明，刘立．中国冰川运动速度研究进展 [J]. 冰川冻土，2010, 32(4): 749–754.

[3] 井哲帆，刘力，周在明，等．冰川运动速度影响因子的强度分析——以祁连山七一冰川为例 [J]. 冰川冻土，2011, 33(6): 1222–1228.

[4] 刘潮海，施雅风，王宗太，等．中国冰川资源极其分布特征——中国冰川目录编制完成 [J]. 冰川冻土，2000, 22(2): 106–112.

[5] 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.

[6] Leprince S, Berthier E, Ayoub F, et al. Monitoring Earth Surface Dynamics with Optical Imagery[J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(1): 2–3.

[7] Gao J, Liu Y. Application of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2001, 25(4): 520–540.

[8] Strozzi T, Luckman A, Murray T, et al. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2384–2391.

[9] Strozzi T, Kouraev A, Wiesmann A, et al. Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data[J]. Remote Sensing Environment, 2008, 112: 636–645.

[10] Fischler M, Bolles R. Random sample consensus. A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381–395.

[11] Sansosti E, Berardino P, Manunta M, et al. Geometrical SAR image registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2861–2870.

[12] Yan S, Guo H, Liu G, et al. Mountain glacier displacement estimation using a DEM-assisted offset tracking method with ALOS/PALSAR data[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(5): 494–503.

数据引用格式

(1) 闫世勇，李毅，吕明阳，等．慕士塔格峰地区山地冰川表面 2009 年冬季（1–3 月）运动分布 [DB/OL]. Science Data Bank, 2017. DOI: 10.11922/sciencedb.375.

A dataset of glacier surface motion distribution in Muztagh Ata region during winter 2009

Yan Shiyong, Li Yi, Lü Mingyang, Ruan Zhixing

ABSTRACT Muztagh Ata region is one of the glacier concentrated areas in eastern Pamir, China. Long-term monitoring of glaciers over the region is not only helpful for water resource investigation, but also benefits research on climate change. Based on the SAR imagery of the region (37°48′18″N–38°35′14″N, 74°42′45″E–75°41′50″E) acquired by ALOS/PALSAR in January 14 and March 1, 2009, we used an improved pixel-tracking algorithm to extract the distribution of ice surface motion. Accurate data of ice motion (GeoTiff format in 32-bit floating point) was obtained by precisely removing the global deformation caused by orbit and sensor attitude, as well as the topographic effect caused by complex terrain. Final results have a spatial resolution of about 20 m. A statistical analysis of the residual movement in the non-glacial area indicates that the results have an overall accuracy of about 0.5 m/46 day. The results demonstrate that the flow velocity in the accumulation part is generally faster than that in the ablation or terminal part. The ice motion has a relatively positive correlation with topography and some small glaciers show strong activities. The dataset can serve as the basis for investigating the mountain glacier movement in this region, providing statistical support for relevant research. In addition, the accurate monitoring of mountain glacier motion is propitious to both glacier dynamic study and ice flow-related disaster prediction. Meanwhile, it provides an effective way for glacier investigation in China.

KEYWORDS glacier surface motion; pixel-tracking; ALOS/PALSAR; Muztagh Ata

论文引用格式： 闫世勇，李毅，吕明阳，等．2009 年慕士塔格峰山地冰川表面冬季运动分布数据集 [J/OL]. 中国科学数据，2017, 2(2). DOI: 10.11922/csdata.170.2017.0119.