DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0315
LI Yi, YAN Shiyong, LI Zhiguo, et al. The flow state of South Inylchek Glacier in the Tianshan Mountains in 2016: extraction and analysis based on Landsat-8 OLI image[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1281 – 1288. [李毅, 闫世勇, 李治国, 等. 基于 Landsat-8 OLI 影像的天山南伊内里切克冰川 2016 年冰川表面运动状态提取与分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1281 – 1288.]

基于 Landsat-8 OLI 影像的天山南伊内里切克冰川 2016 年冰川表面运动状态提取与分析

李 毅[1,2], 闫世勇[1,2], 李治国[3], 周洪月[1,2], 郑一桐[1,2], 刘茜茜[1,2]
(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 商丘师范学院 测绘与规划学院, 河南 商丘 476000)

摘 要: 利用 Landsat-8 OLI 传感器获取的 2016 年 3 – 9 月覆盖天山西段托木尔峰 – 汗腾格里地区的 3 期光学遥感影像数据, 基于频谱归一化互相关算法提取并分析了该地区南伊内里切克冰川在最近一年消融期内不同时段的表面运动速度分布及其时空变化特征。研究结果表明: 2016 年消融期内靠近该冰川上游区域可观测到约为 55 cm · d^{-1}最大运动速度; 由于受到冰川下游物质补给量减弱、表碛物增多等因素影响造成冰川末端区域运动速度最小, 整个消融期内冰川主体运动速度基本介于 20 ~ 50 cm · d^{-1}之间, 其平均运动速度约为 35 cm · d^{-1}。而且, 可观测到位于冰川上游区域在 2016 年 3 月 9 日至 9 月 17 日时段内, 冰川运动速度呈递增趋势, 相反位于冰川下游区域冰川运动速度呈现减弱趋势。另外, 与早期研究对比可知, 该冰川运动速度有所减缓且冰川末端明显处于退缩状态。

关键词: 南伊内里切克冰川; 光学遥感影像; 归一化互相关算法; 冰川消融期; 冰川运动速度
中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)06-1281-08

0 引言

当前, 全球依旧面临着气候变暖的严峻问题和应对挑战, 据联合国专门机构世界气象组织 2016 年发布的《全球气候 2011 – 2015 年》气象分析报告指出, 2011 – 2015 年是全球有记录以来最热的五年。冰川作为气候变化的敏感响应因子之一, 相对于高纬度极地冰川, 分布于中低纬度较小规模的山地冰川往往能够对气候变化作出快速地响应, 主要表现在冰川的物质平衡和运动特征等发生变化, 使得冰川出现面积增减和长度变化(末端前进或退缩)[1-2]。因此, 冰川变化对研究区域乃至全球性气候变化具有重要意义。已有研究表明, 在过去数十年的气候变暖背景下, 中国大部分山地冰川普遍呈现出以面积减少和厚度减薄具体表现的退缩状态[3]。其中, 对冰川表面运动速度的监测不仅能及时准确地反映出冰川的动态变化信息, 为冰川动力学和物质平衡的研究提供重要参数, 同时也为冰川运动诱导的冰川灾害预警提供重要依据[4-7], 是研究冰川变化的重要研究内容之一。

传统地面量测冰川运动的方法虽然精度高, 但往往受限于野外恶劣的气候、复杂的地理环境以及冰川分布等因素, 无法满足对山地冰川运动开展大范围、周期性监测要求。随着先进空间信息技术的发展与应用, 利用遥感技术研究冰川的性质和特征、监测冰川的动态变化已成为主要技术手段[8]。当前高性能光学遥感卫星的增多, 如 Landsat-8、Sentinel-2 光学遥感卫星等, 覆盖全球范围内冰川区的海量遥感影像数据不断积累, 为及时、准确对冰川动态变化信息开展周期性研究提供了可能。当然, 丰富的存档数据也有助于研究冰川历史运动信息, 从而能够进一步完善冰川运动信息资料, 为广

收稿日期: 2017-04-27; **修订日期:** 2017-09-27
基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20150189); 中国科学院数字地球重点实验室开放基金项目(2016LDE002); 国家自然科学基金面上项目(41671072)资助
作者简介: 李毅(1993 –), 男, 山西晋中人, 2016 年在山西大同大学获学士学位, 现为中国矿业大学在读硕士研究生, 从事冰川变化及雷达遥感应用研究. E-mail: ly668680@126.com
通信作者: 闫世勇, E-mail: yan_shiyong@163.com.

泛研究冰川运动状态的时空演变过程及动力学模拟提供可能，一定程度上弥补了传统方法监测冰川运动状态存在的局限和不足。

针对当前冰川运动研究主要集中在冰川运动年际变化，对冰川消融期或积累期内运动特征分析的综合认识尚且匮乏，且往往存在忽略冰川运动细节信息等不足，本文将利用 2016 年冰川消融期内获取的 3 期 Landsat-8 OLI 光学影像提取天山南伊内里切克冰川的运动分布信息，为分析该冰川在消融期内运动细节及其变化情况提供数据支持，进而充分认知该冰川在消融期的运动特点，有助于全面了解和掌握该冰川的动力学特征及物质平衡变化状况。

1 研究区概况

天山是世界上七大山系之一，位于亚欧大陆腹地，在这里发育着众多山地冰川。从中国第二次冰川编录数目统计来看，天山山地冰川数量有 7 934 条，面积约为 7 179.77 km^2[9]。天山中部托木尔－汗腾格里地区，由于极高的地形地貌和充沛的降水过程，为冰川发育提供了有利条件，使得该地区成为天山最大的冰川中心之一[10]。本文所研究的伊内里切克冰川（Inylchek Glacier，中国冰川编目编号 5Y673K1）位于天山中部托木尔峰脚下（42°40′ N ~ 79°39′ E，42°15′ N ~ 80°12′ E），其海拔高度在 2 900 ~ 7 400 m 之间，是该地区规模最大的冰川[11-12]。由于冰川中段麦兹巴赫阻塞湖的形成（图 1 中不规则蓝色区域），该冰川分为南伊内里切克冰川和北伊内里切克冰川两条分支，其中北伊内里切克冰川在以往研究中发现处于运动缓慢甚至停滞状态，相反南伊内里切克冰川则表现出了较大规模的高速运动分布[13-15]。因此，本文主要对南伊内里切克冰川在近期内运动状态展开分析研究。根据中国冰川目录记载，该冰川长 63.5 km，冰面宽 2.8 km，面积为 567.2 km^2，是中低纬度地区长度超过 50 km 的八大高山冰川系统之一，其冰川下游区域冰面表碛覆盖严重为显著特点，最大厚度约为 2 m[15-16]。天山托木尔－汗腾格里地区气候特点为亚大陆性气候，根据该地区天山站（海拔高度约 6 184 m）长期监测记录显示，气温 1 月份最低，自 3 月初开始逐渐回升，7 月达到最高点，9 月末开始大幅度回落，年均气温约为 −7.7 ℃[13-14,17]。文献[18]对该地区冰川消融期做过记载，自 3 月下旬出现消融，10 月下旬结束，最长消融天数达 220 天左右，呈冰川消融期稍长特点。因此，本文根据天山托木尔－汗腾格里地区气候特点，结合可利用的遥感数据对南伊内里切克冰川在 3－9 月消融期的运动状况展开分析研究。

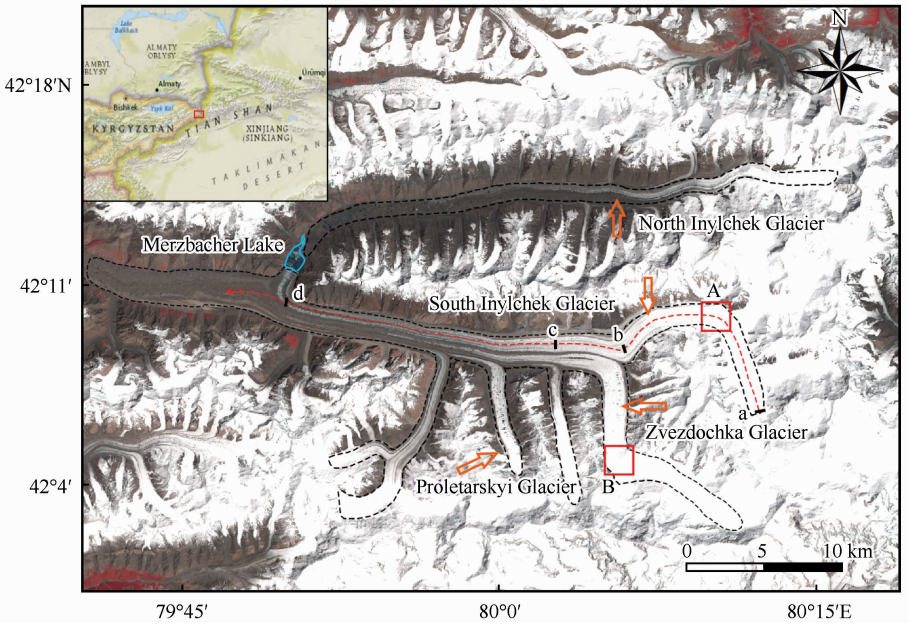


图 1 覆盖南伊内里切克冰川的 Landsat-8 OLI 假彩色遥感影像（成像时间 2016 年 6 月 29 日）

Fig. 1 A false-color remote sensing image of Landsat-8 OLI which covered the South Inylchek Glacier (imaging time: 29 June 2016)

表 1　用于提取南伊内里切克冰川运动的光学影像对(全色波段)

Table 1　The optical image pairs for extracting Southern Inylchek Glacier flow velocity (panchromatic band)

时段	参考影像/yyyy-mm-dd	搜索影像/yyyy-mm-dd	传感器	Path/Row	空间分辨率/m	成像间隔/d
1	2016-03-09	2016-06-29	Landsat-8 OLI	147/31	15	111
2	2016-06-29	2016-09-17	Landsat-8 OLI	147/31	15	81
3	2016-03-09	2016-09-17	Landsat-8 OLI	147/31	15	192

2　数据源与研究方法

2.1　数据源

Landsat 系列卫星 1972 年发射至今，由于其提供连续一致、覆盖范围广且分辨率适中等特点的对地观测数据，成为研究冰川学的重要数据源[19]。本文主要利用 Landsat-8 OLI 光学遥感影像来提取南伊内里切克冰川运动信息。根据该冰川所在区域气候状况特征，3－9 月正处于冰川消融期，从美国地质调查局(USGS)影像数据库中心(http://glovis.usgs.gov)收集并整理了覆盖南伊内里切克冰川的 3 期 Landsat-8 不同时段遥感影像数据(表 1)。而且，本文所采用的 Landsat-8 L1T 产品数据已使用了 GLS 2005(Global Land Survery，2005)地面控制点和 30 m 分辨率的 SRTM DEM 高程数据对辐射校正后的数据统一进行了精确几何校正[20]，对于较短时间内所获取的两幅 Landsat-8 OLI 影像数据具有良好的配准和正射校正精度，可直接用于冰川运动信息提取。另外，空间分辨率的大小直接决定包含与冰川表面运动信息有关特征的详细程度，所以本文选择了空间分辨率为 15 m 的全色波段用于南伊内里切克冰川运动信息提取。

2.2　归一化互相关算法

基于归一化互相关算法提取冰川运动信息是利用经配准后的参考影像和搜索影像通过相关窗口滑动计算这两幅影像在像素级相关下的最大相关系数，进而提取到冰川运动信息。设参考影像为 i_1，搜索影像为 i_2，则发生在所获取两期影像时间段内的冰川位移量(Δx，Δy)可以表述如下：

$$i_2(x,y) = i_1(x-\Delta x,\ y-\Delta y) \tag{1}$$

为了得到精确且置信度较高的冰川运动信息，本文基于傅里叶变换定理，在频率域下采用频谱归一化互相关算法提取冰川运动信息[21]。首先对两幅影像分别进行傅里叶变换，然后根据频谱相位差计算得到在这一时间段内冰川运动位移量：

$$I_2(\omega_x,\omega_y) = I_1(\omega_x,\omega_y)e^{-j(\omega_x\Delta x,\ \omega_y\Delta y)} \tag{2}$$

式中：I_1、I_2 分别为参考影像 i_1、搜索影像 i_2 经傅里叶变换后的频谱影像；ω_x、ω_y 分别为频谱在行和列方向上的变化量，考虑到归一化形式的可靠、简单性，得到影像在频率域频谱归一化互相关值，其中归一化系数如下：

$$C_{i_1i_2}(\omega_x,\omega_y) = e^{j(\omega_x\Delta x,\ \omega_y\Delta y)} = \frac{I_1(\omega_x,\omega_y)I_2^*(\omega_x,\omega_y)}{|I_1(\omega_x,\omega_y)I_2^*(\omega_x,\omega_y)|} \tag{3}$$

式中：* 表示共轭复数。此外，也可以通过对归一化互相关频谱函数经过傅里叶逆变换得到冲激函数，其函数相关峰值相对位置作进一步处理可以计算得到两幅影像冰川表面位移量(Δx，Δy)。

$$F^{-1}\{e^{j(\omega_x\Delta x+\omega_y\Delta y)}\} = \delta(x+\Delta x,\ y+\Delta y) \tag{4}$$

该方法通过相关窗口在参考影像 i_1 和搜索影像 i_2 之间进行滑动相关精确获取到两幅影像冰川相对位移量。实验证明，该方法在图像质量良好的情况下能达到亚像素级影像相关精度[21]。基于频域下归一化互相关算法实现冰川运动信息提取关键在于最佳相关窗口大小(相关尺度)的选择。本文根据以往研究经验，在获取南伊内里切克冰川运动信息时先采用 128×128 相关窗口作为初始相关搜索窗口粗略得到冰川相对位移量，然后采用 32×32 模板窗口作为最终相关搜索窗口获取冰川亚像素级位移量，利用 4×4 像素的滑移步长获得空间分辨率为 60 m 的冰川运动分布信息，确保能够高效地监测到冰川最大位移而不损失冰川运动分布信息。

2.3　误差来源及处理方法

利用光学影像提取冰川表面运动信息，不可避免地会有误差/错误值的产生。其中，主要误差/错误值来源主要有以下几个方面：1）影像配准误差。利用光学遥感影像精确提取冰川运动速度关键在于影像对有足够精度高的配准要求；2）受冰雪区高反射率特性的影响，尤其是冰川上游区域常年积雪覆盖，表现在遥感影像呈亮白色，导致在互相关分析过程中提取到冰川运动“异常值”，甚至无法提取冰川运动信息；3）从影像成像本身而言，由于受不同时相遥感影像时空去相关影响，在获取两幅影像这一时段内出现积雪、消融、雪崩、裂缝等自然现

象，使得冰川表面地物反射波谱特性发生变化，同样也会在互相关分析过程中提取到错误运动信息。针对所产生”空值”、”异常值”可结合冰川实际运动速度通过一定阈值以滤波方式得以剔除。此外，由于配准误差所带来的全局残余位移，可以通过稳健的线性趋势拟合进一步使其残余位移最小化[22]。本文分别对东西方向和南北方向分量的全局残余位移进行了线性趋势拟合，这样做有利于获取因平移或旋转而带来的位移差异，充分保证了整体合成位移的有效合理性。

3 冰川运动结果与分析

3.1 南伊内里切克冰川运动速度变化分析

本文利用 2016 年 3 –9 月之间获取的 3 期完整覆盖南伊内里切克冰川的 Landsat-8 影像基于频谱归一化互相关算法提取到该冰川在 2016 年消融期内不同时段的位移量，将所提取的位移量除以影像获取时间间隔，得到冰川在不同时段下的日平均运动速度分布信息(图 2)。

从图 2 中所显示的南伊内里切克冰川在消融期内不同时段获得的运动速度分布图可以看出，在 2016 年 3 月 9 日至 6 月 29 日时段内，在靠近冰川上游局部区域(图 1 红色框 A 处，海拔高度约 4 408 m)可观测到最大运动速度约为 55 cm · d^{-1}，冰川主体在这一时间段内的运动速度介于 30 ~ 55 cm · d^{-1}之间，其平均运动速度约为 40 cm · d^{-1}。另外，从该时段冰川运动速度分布图可以看出，位于冰川末端分支由冰川支流阻断冰川融水形成的麦兹巴赫阻塞湖区域，在冰川转向湖泊之前冰川运动速度逐渐减弱，而靠近麦兹巴赫阻塞湖区域受到冰裂作用影响，冰川运动速度明显加快，最大运动速度值可达到 50 cm · d^{-1}，其观测结果与 Shangguan 等[6]、Nobakht 等[15]对该区域冰川运动情况描述基本一致，并且可观察到该区域冰川运动形态呈舌状向北流入麦兹巴赫阻塞湖；由于受到冰川下游冰川运动所产生的惯性作用力，位于冰川末端(图 1 中 d 点之后箭头指向区域)表碛物覆盖区域明显存在冰川运动迹象，且可观测到有较大范围冰川运动趋势。对于 2016 年 6 月 29 日至 9 月 17 日时段内，可以看出在这个时段内同样位于冰川上游区域观测到最大运动速度约为 50 cm · d^{-1}，冰川主体在这一时段内的运动速度介于 30 ~ 40 cm · d^{-1}之间，并且从该时段冰川运动速度分布图可以直观看出由于冰川受到两侧山体的阻尼作用以及冰川厚度向两侧减薄

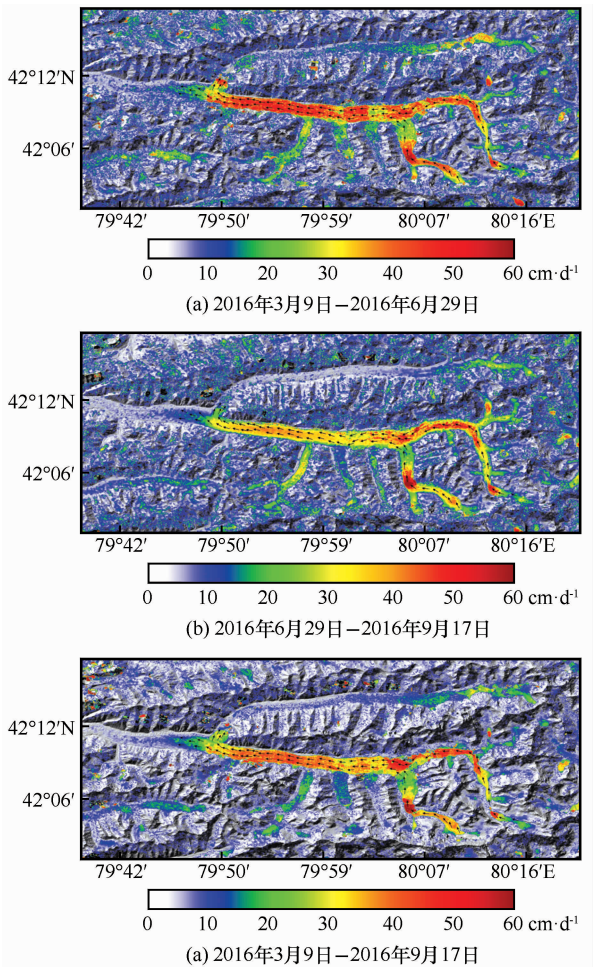


图 2 南伊内里切克冰川在 2016 年消融期内不同时段下的运动速度分布(箭头表示运动方向)

Fig. 2 Distribution of flow velocity on the South Inylchek Glacier from 9 May to 29 June 2016 (a), from 29 June to 17 Sept. 2016 (b) and from 9 May to 17 Sept. 2016 (c) (arrows indicating flow direction)

出现运动速度向两侧逐渐减弱的趋势，与大多数山地冰川一般运动规律特征相符。总体上，在整个消融期内(2016 年 3 月 9 日至 9 月 17 日)，冰川主体运动速度基本介于 20 ~ 50 cm · d^{-1}之间，其平均运动速度约为 35 cm · d^{-1}。

冰川运动机理十分复杂，为进一步分析南伊内里切克冰川运动状况，沿其冰川干流中心线(图 1 红色虚线位置)绘制了不同时段下的运动速度图(图 3)。

对比分析 2016 年 3 月 9 日至 6 月 29 日、2016 年 6 月 29 日至 9 月 17 日两个不同时段下的冰川运动速度，根据不同区域冰川运动速度的变化特征，可以将冰川在运动速度变化趋势分为以下 3 种类型，靠近冰川上游区域 I (图 1 虚线 a ~ b 段)在 2016 年 6 月 29 日至 9 月 17 日时段下的冰川运动速

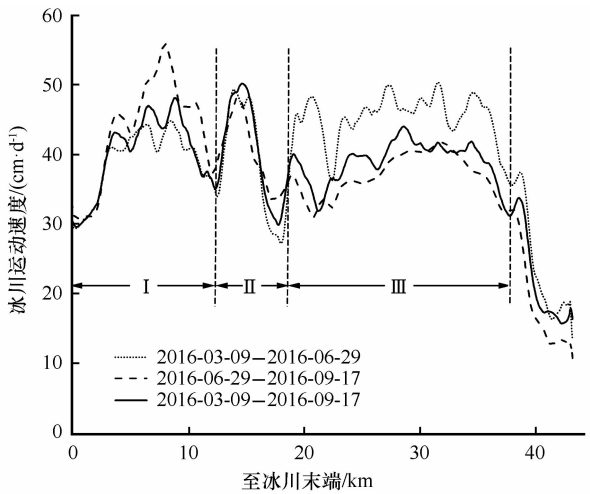


图 3　南伊内里切克冰川沿其干流中心线在消融期内不同时段运动速度曲线

Fig. 3　The curves of flow velocity along the longitudinal profile of the South Inylchek Glacier in the three durations during the ablation period

度要比 2016 年 3 月 9 日至 6 月 29 日时段冰川运动速度高，该区域运动速度呈现出增长趋势；相反位于冰川下游区域Ⅲ（图 1 虚线 c～d 段，不含冰川末端区域），该区域运动速度呈现出减弱趋势，减幅约为 12.5%；值得研究的是，位于冰川中游区域Ⅱ（图 1 虚线 b～c 段）在这两个时段内冰川运动速度相对保持稳定，且冰川运动速度出现骤减情况，冰川物质平衡的改变与冰川运动速度的变化二者紧密联系且互为因果关系[2]，因此可见物质平衡线大致处于该区域，可为该冰川物质平衡研究提供重要参考依据。

本文所获取到南伊内里切克冰川在 2016 年消融期内的日平均运动速度与 Nobakht 等[23]使用 Landsat TM 和 ASTER 光学影像提取到该冰川主体在 2010 年 7 月至 2011 年 8 月时段内日平均运动速度（20～50 cm·d^{-1}）相比，运动速度结果保持一致，考虑到其反映冰川运动速度的年际变化，且相比于冰川消融期，冰川在积累期内保持较小水平运动特征，所测结果往往低于同年冰川消融期实际冰川运动速度，可进一步得出该冰川运动速度有减弱趋势，与其研究结论相符；Neelmeijer 等[12]利用 TerraSAR-X 雷达影像对分析研究了该冰川主体运动速度季节性变化，其获得位于冰川下游区域（图 1 中 c～d 段）在 2009 年 7 月日平均运动速度约为 20～50 cm·d^{-1}，对比同期 2016 年 6 月 29 日至 9 月 17 日时段日平均运动速度，冰川运动速度有所减弱。如前所述，在气候变暖的响应下，天山大部分山地冰川开始呈现退缩减薄状态，这样在冰川自身重力减小的作用下会表现出运动速度减弱，从而导致冰川运动速度总体上呈现出逐渐减弱的趋势。冰川末端位置及其运动范围变化是冰川对气候响应的直接证据，对比前人研究发现[6,12,14-15,23]，由于冰川下游区域运动速度的减弱对冰川末端的物质补给量减弱，该冰川末端运动速度与活动范围都出现明显的减弱现象，进一步验证了该冰川目前处于退缩状态。

3.2　冰川运动结果的精度分析

为验证提取冰川运动速度方法的可靠性，可以对所提取冰川运动结果展开一致性分析，即将 2016 年 3 月 9 日至 6 月 29 日时段的冰川位移量与 2016 年 6 月 29 日至 9 月 17 日时段的冰川位移量累加得到冰川消融期内位移量，对比直接得到 2016 年 3 月 9 日至 9 月 17 日时段的总冰川位移量，绘制沿南伊内里切克冰川干流中心线的位移量曲线（图 4），发现两条曲线拟合效果较好，并在图 4 中底部曲线反映出二者差异水平，其最大偏差值为 5.10 m，偏差均值为 2.14 m，偏差均方根为 2.01 m。根据所采用的 15 m 分辨率遥感影像数据，其位移量偏差小于该影像的最小探测能力，认为其位移量差异在可允许误差范围之内。通过对数据的分析，侧面反映出利用频率域归一化互相关算

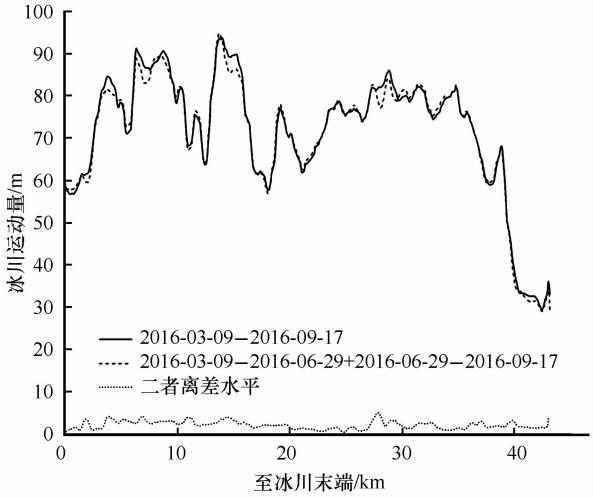


图 4　沿图 1 剖面线冰川位移量（实线为 2016 年 3 月 9 日至 9 月 17 日时段冰川位移量；虚线为两观测时段冰川累加位移量；点虚线反映其位移量水平差异）

Fig. 4　Show the glacier displacement along the longitudinal profile in Fig. 1 (solid line represents glacier displacement from 9 May to 17 Sept. 2016; dash line represents the two periods of glacier accumulate displacement; dot line represents the difference between two lines)

法提取冰川运动的可靠性。

大多数情况下，缺乏冰川运动的地面实测数据无法对遥感影像所获取的冰川运动速度以简单直观的方式进行验证。为进一步验证冰川运动结果的可靠性，非冰川区域运动速度理论上为零，大多数研究基于该方法提取到非冰川覆盖区域运动速度为零的假设，通过对非冰川覆盖区域残余运动的统计分析对所提取的冰川运动展开精度评估。本文提取不同时段下同一非冰川区域残余运动，绘制了相应区域的残余运动频率分布图(图 5)。误差统计分析结果显示(表 2)，非冰川区域平均运动速度远小于冰川实际运动速度(最大不超过遥感图像空间分辨率的 20%)，保证了监测结果的可靠性和准确性。通过以上两方面的分析研究可初步判定频率域利用归一化互相关算法提取冰川运动具有较高的可靠性和监测精度。

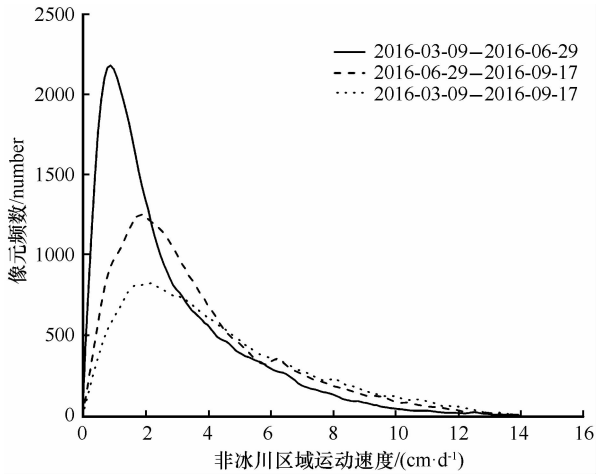


图 5 不同时段下的非冰川区域残余运动频率分布

Fig. 5 The frequency distribution of residual velocity in non-glacierized regions at different periods

表 2 非冰川区域运动速度统计结果(cm · d^{-1})

Table 2 The Mean and RMSE of the velocity in non-glacierized region (cm · d^{-1})

监测时段/yyyy-mm-dd	均值 *Mean*	均方根误差 *RMSE*
2016-03-09 – 2016-06-29	3.24	2.12
2016-06-29 – 2016-09-17	3.72	3.16
2016-03-09 – 2016-09-17	2.39	3.45

4 讨论

4.1 影响冰川运动速度变化因素分析

气候因素对冰川变化有着至关重要的作用，其中，气温变化与冰川运动速度的变化密切相关，气温的趋势性变化会对冰川消融量产生一定程度上的影响[24]，表现在冰川运动速度发生一定的变化。如前面分析得到，靠近冰川上游区域运动速度呈现逐渐增加趋势。由于随着气温逐步升高，对该区域冰川运动速度的影响占主导作用，这不仅促进冰川消融，而且增大冰床底部消融水比重，减弱了冰床与岩石摩擦系数，不利于冰川积累，是气温变暖作用于冰川运动速度增加的具体体现；相反，位于冰川下游区域监测到冰川运动速度有减弱趋势，这可能与上个观测时段该区域冰川消融量较大导致冰储量减少密切相关，使得冰川出现厚度上的减薄，造成其纵应力的变化，从而引起冰川运动速度减弱。此外，也可能有以下原因导致冰川运动速度有所减弱：1）靠近冰川上游区域不断消融，在到达物质平衡线附近，相应地会减少对冰川下游区域物质补给量，使得该区域冰川运动速度减弱；2）通过对遥感影像目视解译发现，位于该冰川下游区域冰面表碛覆盖严重，根据 Hagg 等[11]对南伊内里切克冰川冰碛物覆盖厚度与冰川消融二者关系研究发现，冰碛物的存在一定程度上会减缓该冰川消融情况，从而造成冰川运动速度减弱；3）降水/冰川消融水[12]的存在一定程度上也会减弱冰床底部与岩石之间的摩擦，促进二者之间的滑动，从而加剧冰裂隙发育并改变了原有冰川稳定结构，造成冰川在前一个监测时段表现出较大的运动速度。基于上述可能出现的原因，该区域冰川运动速度呈现出了局部异质性和整体上逐渐减弱趋势。因此，在气候因素和非气候因素共同作用下，冰川运动速度在不同地区不同时段下呈现出多种变化特征。随着遥感数据的不断增多，联合多源遥感数据的冰川运动长期监测将有利于进一步分析冰川运动变化规律，从而可能为气候变化研究提供更加丰富和准确的数据支持。

4.2 南伊内里切克冰川附近冰川运动速度分析

从图 2 所呈现的运动速度分布显示：南伊内里切克冰川作为该地区规模最大的冰川，其运动速度相比于附近冰川，呈现出相对较大的特点。其中，伊内里切克冰川北侧分支北伊内里切克冰川表现出较相当停滞的运动特征，2016 年 3 月 9 日至 6 月 29 日时段可观测到最大运动速度约为 20 cm · d^{-1}；对比分析该冰川在两个不同时段下的冰川运动速度，可以发现其活动范围及运动速度明显减弱；同样，南伊内里切克冰川南侧支流 Proletarskyi 冰川也表现出较为缓慢的运动特征。特别明显的是，从 3 个不同时段冰川运动速度分布图中可看出，位于南伊内里切克冰川南侧支流 Zvezdochka 冰川中部(图 1

红色框 B 处）可观测到最大运动速度约 60 cm · d^{-1}，通过与地形和坡度数据的相关分析可知，地形因素应该是引起该区域冰川运动速度骤增的主要原因，因为此处存在较大坡度特征，所以不同时段下在相应区域均观测到较大运动速度。

5　结论

本文利用 2016 年冰川消融期内获取的 3 幅 Landsat-8 OLI 光学影像，采用频域频谱归一化互相关算法提取得到天山西段托木尔－汗腾格里地区最大的山地冰川南伊内里切克冰川在不同时段下的运动速度分布信息，并结合光学遥感影像，对所获取冰川运动速度分布信息对南伊内里切克冰川运动做了定性、定量的分析研究。研究发现，南依内里切克冰川在 2016 年消融期内靠近冰川上游可观测到最大运动速度约为 55 cm · d^{-1}，整个消融期内冰川主体运动速度介于 20 ~ 50 cm · d^{-1}，其平均运动速度约为 35 cm · d^{-1}。在气候与非气候因子共同作用下，南伊内里切克冰川不同区域冰川运动速度在消融期不同时段内呈现多样变化特征，可大致归结以下特征：

1）受气温逐渐升高影响，对靠近冰川上游区域运动速度占主导作用，使得该区域运动速度呈增长趋势；

2）冰川中游区域运动速度相对保持稳定趋势；

3）冰川下游区域可能受到多重因素影响，运动速度呈现减弱趋势。

对比前人所获取到该冰川主体在 2010－2011 年内的运动速度可知，该冰川主体运动速度有不断减弱的趋势，且通过对比分析冰川末端运动速度与运动范围，可知该冰川目前仍处于退缩状态。

致谢：USGS 为本研究提供了可用的 Landsat-8 OLI 影像数据，在此表示感谢。

参考文献（References）：

[1] Zhou Zaiming, Jing Zhefan, Zhao Shuhui, et al. The response of glacier velocity to climate change: a case ctudy of Ürümqi Heyuan Glacier No. 1 in Tianshan Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 31(2): 237－244. [周在明, 井哲帆, 赵淑惠, 等. 冰川运动速度对气候变化的响应——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 237－244.]

[2] Qin Dahe, Chen Yiyu, Li Xueyong. Climate and environment change in China (Vol. I): climate and environment evolution and prediction[M]. Beijing: Science Press, 2005: 109－110. [秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变(上卷): 气候与环境的演变及预测[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 109－110.]

[3] Ding Guangxi, Chen Caiping, Xie Changwei, et al. Study of the ice tongue ablation features of a large glacier in the south slopes of the Mt. Tuomuer in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 20－29. [丁光熙, 陈彩萍, 谢昌卫, 等. 西天山托木尔峰南麓大型山谷冰川冰舌区消融特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 20－29.]

[4] Wang Kun, Jing Zhefan, Wu Yuwei, et al. Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 537－545. [王坤, 井哲帆, 吴玉伟, 等. 祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 537－545.]

[5] Xu Junli, Zhang Shiqiang, Han Haidong, et al. Change of the surface velocity of Koxkar Baxi Glacier interpreted from remote sensing data, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 268－275. [许君利, 张世强, 韩海东, 等. 天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面运动速度特征分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 268－275.]

[6] Shangguan D H, Bolch T, Ding Y J, et al. Mass changes of Southern and Northern Inylchek Glacier, Central Tian Shan, Kyrgyzstan, during ~ 1975 and 2007 derived from remote sensing data[J]. The Cryosphere, 2015, 9(2): 703－717.

[7] Mayer C, Lambrecht A, Hagg W, et al. Post-drainage ice dam response at lake Merzbacher, Inylchek Glacier, Kyrgyzstan[J]. Geografiska Annaler: Physical Geography, 2008, 90(1): 87－96.

[8] Cao Bo, Wang Jie, Zhang Chen, et al. The remote sensing in research of modern glacier changes[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(1): 52－59. [曹泊, 王杰, 张忱, 等. 遥感技术在现代冰川变化研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(1): 52－59.]

[9] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The current status of Chinese glaciers based on the second glacier cataloging[J]. Journal of Geographical Sciences, 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.]

[10] Li Jia, Li Zhiwei, Ding Xiaoli, et al. Investigating mountain glacier motion with the method of SAR intensity-tracking: removal of topographic effects and analysis of the dynamic patterns[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 179－195.

[11] Hagg W, Mayer C, Lambrecht A, et al. Sub-debris melt rates on southern Inylchek Glacier, Central Tian Shan[J]. Geografiska Annaler: Physical Geography, 2008, 90(1): 55－63.

[12] Neelmeijer J, Motagh M, Wetzel H U. Estimating spatial and temporal variability in Surface Kinematics of the Inylchek Glacier, Central Asia, using TerraSAR-X Data[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9239－9259.

[13] Neelmeijer J, Motagh M, Wetzel H U, et al. Observation of the surface velocity field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by means of TerraSAR-X imagery[C]//Erdblicke-Perspektiven f r die Geowissenschaften. 2012.

[14] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data[J]. Global and Planetary Change, 2007, 56(1): 1－12.

[15] Nobakht M, Motagh M, Wetzel H U, et al. The Inylchek Glacier in Kyrgyzstan, Central Asia: insight on surface kinematics from optical remote sensing imagery[J]. Remote Sensing, 2014, 6(1): 841－856.

[16] Li Jia, Li Zhiwei, Wang Changcheng, et al. Using SAR offset-tracking approach to estimate surface motion of the South Inylchek Glacier in Tianshan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1226 – 1236. [李佳, 李志伟, 汪长城, 1等. SAR 偏移量跟踪技术估计天山南依内里切克冰川运动[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1226 – 1236.]

[17] Osmonov A, Bolch T, Xi C, et al. Glacier characteristics and changes in the Sary-Jaz River Basin (Central Tien Shan, Kyrgyzstan) – 1990 – 2010[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(8): 725 – 734.

[18] Chinese Academy of Sciences Lanzhou Glacier Frozen Soil Research Institute Tuomoer Peak Glacier Investigation Group. The basic characteristics of glaciers in the Tuomulu area of Tianshan Mountains[J]. Science in China: Chimica, 1982(8): 66 – 74. [中国科学院兰州冰川冻土研究所托木尔峰冰川考察组. 天山托木尔峰地区冰川的基本特征[J]. 中国科学: 化学, 1982(8): 66 – 74.]

[19] Sun Yongling, Jiang Liming, Liu Lin, et al. Surface flow velocity of mountain glaciers derived from Landsat-7 ETM + SLC-OFF images: extraction and quantitative evaluation: a case study of the Siachen Glacier in the Karakoram[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 596 – 603. [孙永玲, 江利明, 柳林, 等. 基于 Landsat-7ETM + SLC-OFF 影像的山地冰川流速提取与评估——以 Karakoram 锡亚琴冰川为例[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 596 – 603.]

[20] Chu Qingwei, Zhang Hongqun, Wu Yewei, et al. The application of Landsat-8 satellite data[J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(4): 110 – 114. [初庆伟, 张洪群, 吴业炜, 等. Landsat-8 卫星数据应用探讨[J]. 遥感信息, 2013, 28(4): 110 – 114.]

[21] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(6): 1529 – 1558.

[22] Rosenau R, Scheinert M, Dietrich R. A processing system to monitor Greenland outlet glacier velocity variations at decadal and seasonal time scales utilizing the Landsat imagery[J]. Remote sensing of Environment, 2015, 169: 1 – 19.

[23] Nobakht M, Motagh M, Wetzel H, et al. Spatial and temporal kinematics of the Inylchek Glacier in Kyrgyzstan derived from Landsat and ASTER imagery[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 145 – 149.

[24] Li Chengxiu, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Variation of West Kunlun Mountains glacier during 1990 – 2011[J]. Progress in Geography, 2013, 32(4): 548 – 559. [李成秀, 杨太保, 田洪阵. 1990 – 2011 年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测[J]. 地理科学进展, 2013, 32(4): 548 – 559.]

The flow state of South Inylchek Glacier in the Tianshan Mountains in 2016: extraction and analysis based on Landsat-8 OLI image

LI Yi[1,2], YAN Shiyong[1,2], LI Zhiguo[3], ZHOU Hongyue[1,2], ZHENG Yitong[1,2], LIU Xixi[1,2]

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. National Administration of Surveying Mapping and Geoinformation (NASMG) Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. College of Surveying and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract: In this paper, the three-stage optical Landsat-8 OLI remote sensing imagery from March to September in 2016 were acquired, which covered the Tomur-Khan Tengri area in the western Tianshan Mountains. The flow velocity distribution on the South Inylchek Glacier, extracted by the spectral normalized cross-correlation algorithm, was analyzed for its temporal/spatial variation characteristics during the ablation period. The result showed that the maximum flow velocity up to ~55 cm d^{-1} could be observed in the upper part of the glacier during the ablation period of 2016. Due to the impact of both less ice mass supply and increasing debris cover on the glacier surface, the velocity was smallest at the terminus. During the whole ablation period, the flow velocity of glacier trunk was in between 20 cm d^{-1} and 50 cm d^{-1}, with an average of about 35 cm d^{-1}. Moreover, on the contrary to the decreasing velocity in the lower part of the glacier, the velocity in the upper part of the glacier had been increasing from 9 March to 17 Sept. 2016. In conclude, compared with the earlier studies, the glacier flow velocity has slowed down and the terminus has retreated obviously.

Key word: South Inylchek Glacier; optical remote sensing image; normalized cross correlation algorithm; ablation period of glacier; glacier flow velocity

(本文编辑: 周成林)