

李佳,李志伟,汪长城等. SAR 偏移量跟踪技术估计天山南依内里切克冰川运动. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1226-1236, doi: 10.6038/cjg20130417.

Li J, Li Z W, Wang C C, et al. Using SAR offset-tracking approach to estimate surface motion of the South Inylchek Glacier in Tianshan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(4): 1226-1236, doi: 10.6038/cjg20130417.

SAR 偏移量跟踪技术估计天山 南依内里切克冰川运动

李 佳¹, 李志伟^{1*}, 汪长城¹, 朱建军¹, 丁晓利^{1,2}

¹ 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

² 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港, 九龙

摘 要 流动性是冰川的一个主要特征, 监测其流速变化可以为冰川物质平衡和冰川灾害研究提供重要信息. 本文研究利用 2007—2008 年的 7 景 ALOS/PALSAR 影像和偏移量跟踪技术提取亚洲最大的山岳冰川之一——南伊内里切克冰川的运动场. ALOS/PALSAR 影像的时间连续性和南伊内里切克冰川的冰碛覆盖为 SAR 偏移量跟踪技术获取连续的冰川表面流速提供了基础, 然而冰川积累区降雪、附加冰带消融、陡坡区域裂缝发育等客观事件的发生对速度的获取仍有局部影响. 尽管如此, 本文仍得到了整个冰川不同季节的平面运动场, 并且在所有 6 个时间段内观测到的运动场非常吻合. 详细地分析揭示南伊内里切克冰川运动具备以下规律: 流速由轴部向两侧递减, 由源头向下至雪线处运动速度逐渐增加, 然后再向末端逐渐递减; 流速大小和坡度大小呈非线性正相关, 坡度从 1° 突变至 16° 时, 冰川运动加速会导致裂缝发育; 夏季受冰川湖影响, 尾部分支流速能激增至 96 cm/d; 暖季速度会高于寒季 5~10 cm/d. 该冰川的冰舌主体日平均速度为 20~50 cm/d, 局部最高速度可以达到 65 cm/d. 在冰舌上提取了一些样点的速度作统计, 结果显示各个时段中所有样点的平均速度最高可达 33.3 cm/d, 最低可至 27.9 cm/d. 冰舌部分的速度和 2004 年的数据相比下降了约 5 cm/d.

关键词 南伊内里切克, 冰川, 偏移量跟踪技术, 流动速度, 物质平衡

doi: 10.6038/cjg20130417

中图分类号 P228

收稿日期 2012-02-22, 2012-06-24 收修定稿

Using SAR offset-tracking approach to estimate surface motion of the South Inylchek Glacier in Tianshan

LI Jia¹, LI Zhi-Wei^{1*}, WANG Chang-Cheng¹, ZHU Jian-Jun¹, DING Xiao-Li^{1,2}

¹ School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

² Dept. of Land Surveying & Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, China

Abstract Glaciers are characterized by their flowability. Measurement of their velocity can provide important information for the study of glacier mass balance and glacier involved hazards. This paper applies seven ALOS/PALSAR images and the offset-tracking method to derive the displacement field of the largest mountain glacier in Asia, i. e., the South Inylchek Glacier. The temporal continuity of SAR images and the debris coverage of South Inylchek Glacier make the offset-tracking method successfully acquire continuous surface displacements. Several natural

基金项目 国家自然科学基金项目(41222027, 40901172), 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NECT-08-0570)和中央高校基本科研业务费(2009QZZD004)资助.

作者简介 李佳, 男, 1986 年生, 研究生, 研究方向为 SAR 监测地表形变及冰冻圈遥感. E-mail: lijia20050710@126.com

* 通讯作者 李志伟, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 主要从事 InSAR 研究. E-mail: zwli@csu.edu.cn

events such as snowfall in the firn basins, ablation of superimposed ice and development of crevasses in steep sections still have some influence on the results. However, the derived surface displacement maps of different periods are highly consistent with each other. The detail analysis reveals the following rules of the South Inylchek Glacier's motion: the velocity reduces from glacier axis to both sides, and increases from its origin to snowline and then reduces towards the end; the velocity is positively and nonlinearly correlated with the slope, especially when the slope increases sharply from 1° to 16° , the surge velocity will give rise to crevasses on the glacier; under the influence of glacial lake level changes, the velocity of tributary at the tail can surge to 96 cm/d; the summer velocity is 5~10 cm/d higher than winter one. Seen from all results, the normal velocity of the glacier trunk is between 20 and 50 cm/d, but can reach 65 cm/d in special place. The statistics of sampling points in the tongue indicates that mean velocity of different periods lies between 27.9 and 33.3 cm/d. Compared to the record in 2004, velocity derived in this research reduces about 5 cm/d.

Keywords South Inylchek, Glacier, Offset-tracking, Flow velocity, Mass balance

1 引言

冰川变化是气候变化最重要的信号之一,是研究全球气候变化的重要标本.在气候变暖的缓慢进程中,冰川可以在短期内显示直观的变化数据.同时冰川作为宝贵的淡水资源,蕴含了巨大的经济效益.目前冰川动态监测已是全球变化研究中的重要内容之一,包括在许多与之相关的国际计划中^[1].冰川的主要特点就是具有流动性,其流动速度与冰川物质分布有密切关系^[2].因此,监测冰川运动可以为研究冰川物质平衡提供重要信息.

合成孔径雷达技术(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种先进的空间信息获取手段,可以全天候地、不受云层干扰地、高时空分辨率地对地表进行监测^[3-9].自1993年Goldstein等人首次利用差分干涉测量(Differential Interferometric SAR, D-InSAR)提取南极格罗夫入海冰川间隔6天的运动场以来,已有许多应用SAR研究冰川的例子,SAR也已成为全球冰川研究最重要的手段之一.然而纵观目前的研究,大多集中在南极^[10-14]和格陵兰^[15-21]两大冰盖,以及挪威斯瓦尔巴特群岛入海冰川^[22-23]等,只有少数研究是关于内陆山岳冰川的^[24-27].中亚地区高海拔和严酷寒冷的环境孕育了大量的山岳冰川,据统计共有114800 km²,其中有52%分布在中国境内^[28].但是大部分中国冰川数据都是20世纪60—80年代获取的,仅有几条冰川被连续监测,分别是天山乌鲁木齐河源1号冰川、祁连山中段的七一冰川、贡嘎山东坡的海螺沟冰川、唐古拉山的小冬

克玛底冰川和东昆仑山的煤矿冰川等.因此,在目前地面观测困难的情况下,借助SAR在我国开展系统的冰川监测很有必要.

但是SAR侧视成像技术使得D-InSAR只能获取雷达视线方向上的形变,而不能获取垂直于视线方向的形变^[6].另外,D-InSAR主要是通过差分干涉相位来计算形变,容易受去相干噪声影响.由于冰川运动速度较快,以及冰面散射特性容易发生变化,间隔较长(如30天以上)的两幅SAR影像往往去相干严重,以至于无法获取有效的干涉相位信息.偏移量跟踪技术(Offset-Tracking)可以弥补这一缺点.该技术通过对两幅SAR强度影像进行精密配准,获取配准点之间偏移量来计算形变.本文利用7景ALOS/PALSAR影像提取了亚洲最大山岳冰川——南伊内里切克冰川连续6个时段内的运动场,并详细讨论了其流动速度在空间和时间上的分布特点.

2 研究区域及数据

天山是有共同山势走向和大气环境背景的亚洲中部最雄伟山系,共有现代冰川15953条,总面积15416 km²,总储量约1048 km³^[29].其中托木尔峰地区的冰川面积占天山山脉冰川总面积的1/4,是中国最大的现代冰川作用区之一.它们以托木尔峰(海拔7435.3 m)为中心呈放射状随斜坡向下流动,其中最大冰川是西侧的南伊内里切克冰川,上游在中国境内,下游向西北流入吉尔吉斯斯坦境内.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 392.84 km², 冰雪体积 149.3 km³, 平均厚度 380 m, 雪线高度 4450 m, 冰舌末端下降到 2900 m. 其下游约海拔 3900 m 处开始被表碛物覆盖, 厚度可达 2 m. 南伊内里切克地区气温 1 月份最低, 2 月份气温在太阳高度角增大和稳固的蒙古高压双重影响下变化剧烈, 温差最大. 3 月和 4 月份气温开始稳定回升, 冰川开始消融; 5 月份气温大幅升高, 白天 0 °C 以上时间变长, 冰川进入主消融期, 7 月份气温最高. 此后开始降低, 9 月末至 10 月初气温大幅回落, 标志着冰川消融期的结束^[30]. 图 1 是南伊内里切克冰川主体部分的三维地形图, 采用的是 90 m 分辨率 SRTM. 可以看出冰川河床深而且长, 是巨大冰川运动塑造出来的典型地貌. 冰舌区域坡度较缓, 为我们实现大面积连续监测提供了有利条件.

本文选取了 2007—2008 年的 7 景(见表 1 中主、从影像)覆盖南伊内里切克冰川的 ALOS/PALSAR 影像来提取运动场. ALOS 卫星由日本空间局于 2006 年 1 月 24 日发射, 轨道为太阳同步, 重复观测周期为 46 天, 主要用于测绘、灾害监测、环境和资源调查等. 该卫星搭载的主动式微波传感器 PALSAR (Phased Array L-band SAR), 性能比 JERS-1 卫星搭载的 SAR 传感器更优越, 具有高分辨率、全极化、扫描三种观测模式. 其中高分辨观测模式获取的影像幅宽 70 km, 方位向采样间隔 3.1 m; 单极化 (Fine Beam Single Polarization, FBS) 模式下斜距向采样间隔 4.7 m; 双极化 (Fine Beam Double Polarization, FBD) 模式下斜距向采样间隔 9.4 m.

表 1 影像组合
Table 1 Details of image pairs

时段	主影像	从影像	时间基线 (天)	垂直基线 (m)	处理模式
1	2007-07-09	2007-08-24	46	126.7	FBD
2	2007-08-24	2007-10-09	46	327.6	FBD
3	2007-10-09	2008-01-09	92	647.2	FBS
4	2008-01-09	2008-02-24	46	645.1	FBS
5	2008-02-24	2008-04-10	46	481.3	FBS
6	2008-04-10	2008-05-26	46	138.4	FBS

3 基于偏移量跟踪技术计算冰川位移场

偏移量跟踪技术利用强度相关对两幅 SAR 影像逐像素配准, 并从配准偏移量估计地表位移. 配准

偏移量是由轨道位置差异、冰川运动、地形起伏、电离层影响等因素引起的. 地形起伏引起的偏移量在基线较短和地形平坦的影像对中很小^[23]. 本文所选影像对基线长都在 650 m 以内, 加上冰川河床坡度较缓, 所以地形引起的偏移量相对冰川移动位移量很小, 本文暂且不考虑. 电离层异常引起偏移量在极地地区比较常见, 一般可以通过高通滤波去除^[31]. 本文研究区域为中纬度地区, 不考虑电离层的影响. 这样配准偏移量 R_{offset} 可以认为是轨道引起的偏移量 R_{orbit} 和冰川运动位移量 R_{motion} 之和^[7]:

$$R_{\text{offset}} = R_{\text{orbit}} + R_{\text{motion}}, \quad (1)$$

影像中除了冰川主体和冰雪覆盖区域, 大部分是稳定的, 其位移量可以假设为零, 这些区域的配准偏移量近似等于轨道引起的偏移量, 即 $R_{\text{offset}} \approx R_{\text{orbit}}$. 基于这些配准偏移量, 采用最小二乘方法就可以拟合出轨道引起的偏移量模型^[22].

$$R_{\text{orbit}} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy, \quad (2)$$

其中, a_0, a_1, a_2 和 a_3 为待定系数; x, y 分别表示 SAR 坐标系下距离向和方位向坐标值. 选取拟合偏差小的点进行多次迭代以提高模型的可靠性. 最后计算模型的拟合标准偏差, 这个标准偏差可以视为直观的配准精度. 一般情况下匹配的精度能达到 1/32 个像素^[32], 由于冰雪区域表面容易发生去相干, 本文的匹配结果都在 0.1 个像素左右. 为了提高估计的准确度, 应该对匹配窗口内像素进行过采样. 估计的置信度可通过信噪比 (SNR) 的大小来衡量, 即最大相关值与平均相关值的比值^[22]. 匹配时需设置一个信噪比阈值, 信噪比低于阈值的匹配结果被认为是不可信的. 本文在南伊内里切克冰川的冰舌区选取大量偏移量连续的点, 将这些点对应的信噪比作为信噪比的阈值. 配准成功的前提是两个匹配窗口中存在相似的目标物. 如果相似度高, 小匹配窗口也能达到很高的精度. 根据 PALSAR 影像距离向与方位向采样间隔的比例关系以及常用匹配窗口大小, 设匹配窗口大小为 64×192 像素 (距离向 \times 方位向), 对应地面约 $480 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 大小的区域. 以这个窗口大小为基准进行了窗口缩放的对比实验. 发现对于给定的信噪比阈值, 窗口越小, 耗时越少, 但偏移量越不连续, 奇异值越多; 匹配窗口越大, 奇异值越少, 但偏移量细节减少, 耗时越多. 为了保证形变图的分辨率足够高, 匹配时距离向每隔 4 个像素、方位向每隔 6 个像素进行一次计算. 采用上述参数计算一个标准单极化 PALSAR 影像对的偏移量大概需要 8 个小时.

将计算的配准偏移量减去公式(2)拟合的轨道偏移量即为冰川位移量,包括斜距离向和方位向两个分量.此结果图位于雷达坐标系下,通过轨道参数和成像几何条件将其转换到地理坐标系下.本文将7幅影像按时间顺序分别配对(具体组合见表1),采用上述偏移量跟踪技术计算每一影像对获取时间间隔内冰川位移.由于2007年10月9日获取的影像是FBD模式,距离向分辨率比FBS影像低50%,必须对距离向像素进行两倍过采样后再和2008年1月9日获取的影像匹配.FBD模式包含HH和HV极化,FBS仅包含HH极化.为统一,本文研究均采用HH极化数据.

4 结果及误差分析

4.1 速度解算

假设冰川运动平行局部坡面并朝向最大坡度方向^[10,12-16,19,23-24],根据图2表示的雷达成像几何关系,我们通过方位向和斜距向的位移量可以计算出冰川在正北和正东方向的位移分量:

$$\begin{aligned} R_{gr} &= \frac{R_{sr}}{\sin\theta}, \\ R_N &= R_{az} \sin(\alpha - 3\pi/2) + R_{gr} \cos(\alpha - 3\pi/2), \\ R_E &= R_{gr} \sin(\alpha - 3\pi/2) - R_{az} \cos(\alpha - 3\pi/2), \end{aligned} \quad (4)$$

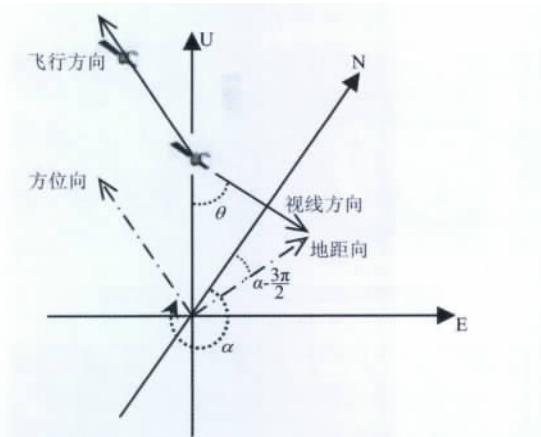


图2 升轨雷达成像几何示意图

方位向和地距向分别为雷达飞行方向和视线方向在地面上的投影; θ 为雷达入射角; α 为飞行方向与正北方向的夹角(顺时针旋转); $\alpha - \frac{3\pi}{2}$ 为地距向和正北方向夹角.图中箭头所指均为正方向.

Fig. 2 Geometry of ascending SAR imaging

The azimuth and range directions are the ground projects of radar flying and look direction; θ is radar incident angle; α is angle between radar flying direction and north (clockwise rotation); $\alpha - 3\pi/2$ is angle between ground range direction and north. All the directions expressed by arrows are positive.

其中 R_{az} 和 R_{sr} 分别表示偏移量跟踪技术计算的方位向和斜距向的位移量; R_{gr} 是地距向位移量;而 R_N 和 R_E 则表示计算出的正北向和正东向位移.

再根据正北和正东向位移量合成二维平面位移矢量.将位移量除以影像获取时间间隔,得到间隔内冰川的日平均运动速度.图3给出了南伊内里切克冰川6个时段的日平均速度分布图,底图为SRTM高程模型.

4.2 误差分析

本文采用偏移量跟踪技术独立地提取了南伊内里切克冰川在6个时间段内的平均流动速度,从图3可以看出各个时间段内的速度分布高度吻合,说明该技术应用于山岳冰川流动监测是可靠的.其主要误差来源是影像配准、地理编码以及地形引起的偏移量.本文中影像配准的误差控制在0.1个像素左右,即对应斜距向和方位向约0.7 m和0.4 m的误差,平均到每天运动速度误差大约是2.02 cm/d,与冰川运动的速度相比(图3),这个误差可以忽略.如果增加信噪比阈值,精度就能得到提高,但合格的样本会减少.本文采用90 m分辨率的SRTM高程数据作为地理编码参考.Rodriguez等曾讨论了SRTM高程数据的误差,认为欧亚大陆90%区域的绝对高程误差在8.7 m左右^[33].托木尔峰区地形较复杂,绝对高程误差可能大于8.7 m,但SRTM高程数据的相对精度要大大优于绝对精度^[24].对于地理编码,相对高程误差的影响要远大于绝对误差,而且冰川主体部分坡度较缓,一般不超过 7° (图6),所以SRTM 90 m分辨率的高程数据在本文研究中是可以满足要求的.由于SRTM是2000年获取的,部分雪域高程发生了变化,地理编码的误差依然存在.此外,冰川平行于局部坡面流动的假设也会带来一定的误差.由于非冰雪覆盖区域点的形变值理论上应该为零,可以作为速度控制点^[10,12-13,22-24],对速度估计值的精度进行粗略评定.本文提取大量控制点作验证,发现90%的控制点速率都在4 cm/d以下,这个误差值比速度观测值要小得多.

5 冰川运动规律分析

5.1 冰川 SAR 强度图解译

图4给出了研究区域2007年7月9日获取的PALSAR影像强度图,冰川的轮廓很清晰.其上游为粒雪盆,即积累区,如图中椭圆区域B、C所指的位置,由于表面主要被分布和大小都均匀的粒雪覆

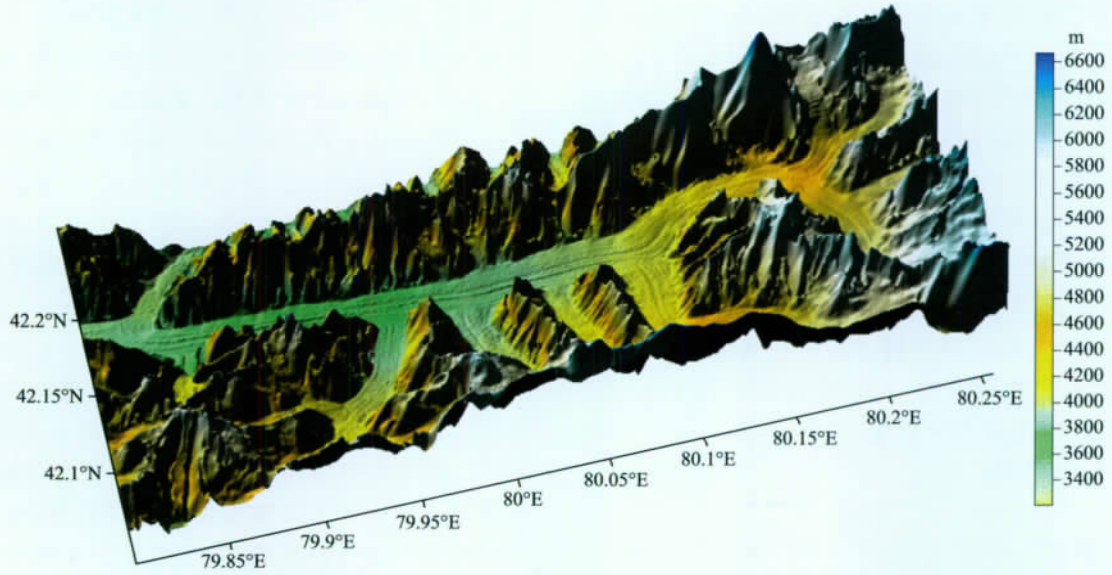


图 1 南伊内里切克冰川主体部分的三维地形图
Fig. 1 3D topography of the South Inylchek Glacier

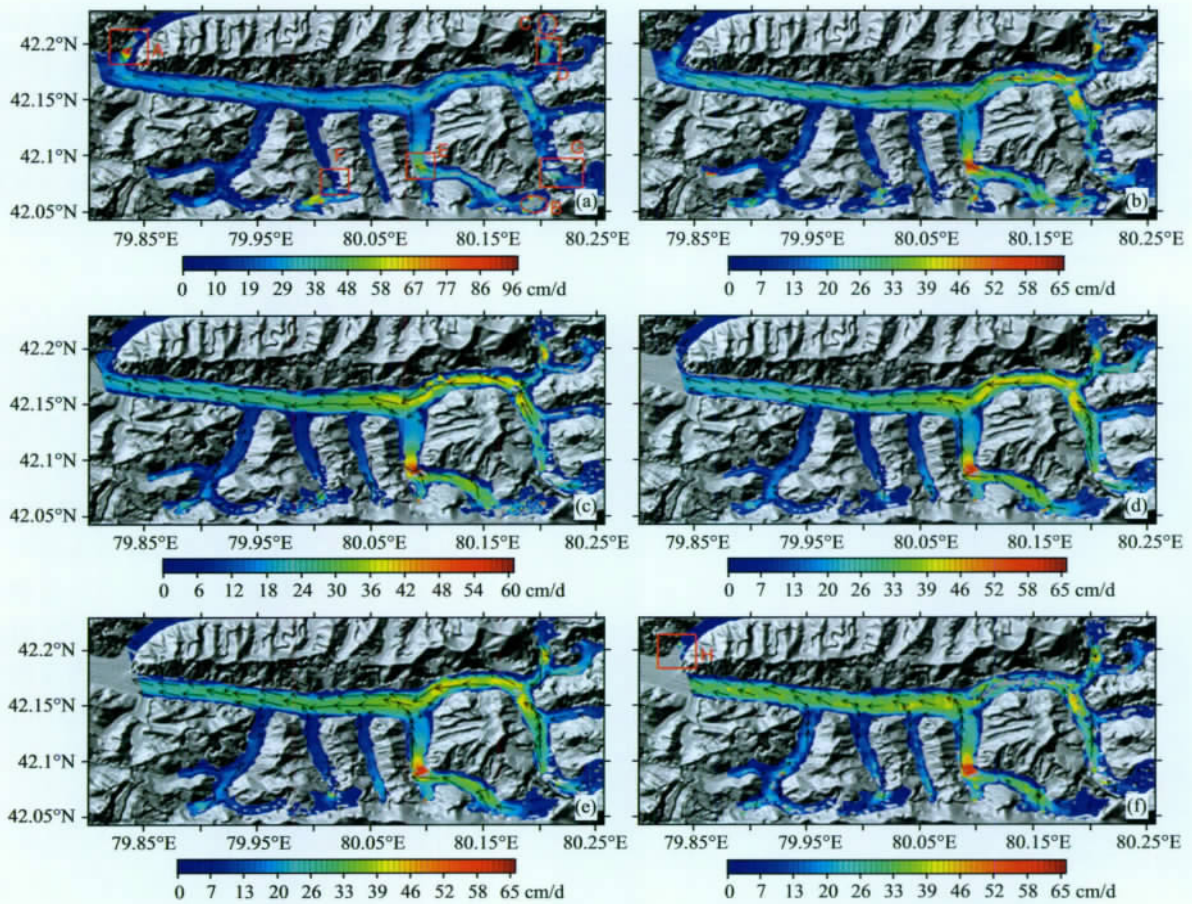


图 3 南伊内里切克冰川各个时间段的日平均速度分布图
底图为 SRTM, 箭头表示流动方向。(a)时段 1; (b)时段 2; (c)时段 3; (d)时段 4; (e)时段 5; (f)时段 6。
Fig. 3 Daily mean velocity maps of the South Inylchek Glacier for each period
Background is the SRTM. The arrows express the flowing directions. (a) Period 1; (b) Period 2;
(c) Period 3; (d) Period 4; (e) Period 5; (f) Period 6.

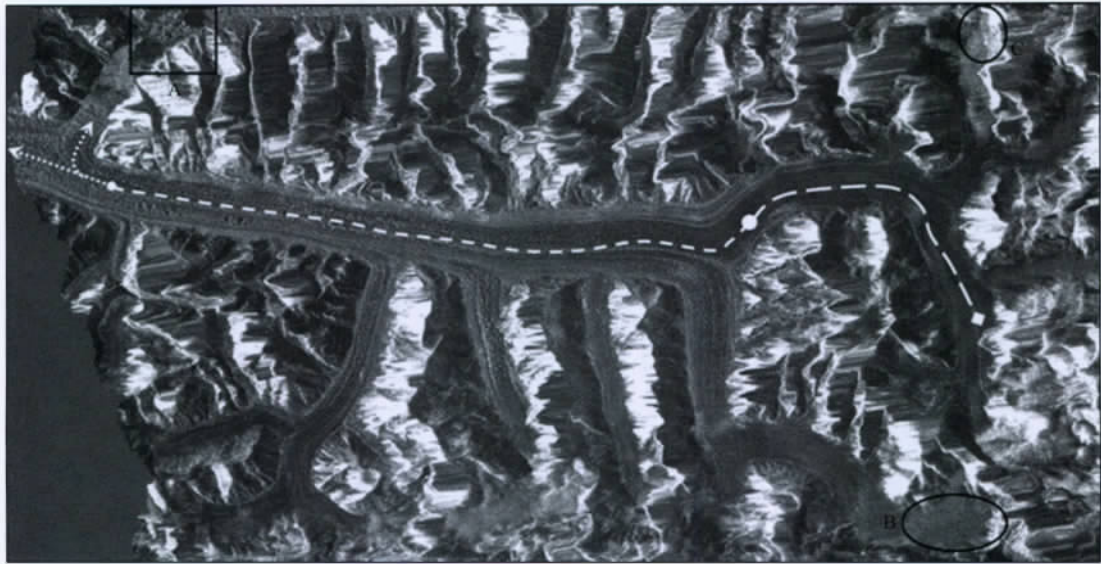


图 4 研究区域 PALSAR 强度影像(2007-07-09)

黑色区域表示无影像覆盖.

Fig. 4 PLASAR intensity map of study area (acquired on July 9, 2007)

Black area indicates data gap.

盖,所以强度图显得很均匀和光滑.其中、下游为冰舌,如图中白色长、短虚线和点线标注处.冰舌表面被夹杂着岩屑和冰块的冰碛覆盖,冰碛体积大小不一,所以强度图显得比较粗糙.尾部有冰川支流阻断冰川融水形成的麦兹巴赫湖(图 4 中矩形区域 A 所指的位置).因为水面的回波信号太低,所以很容易和其它地物区别开来.

5.2 影响冰川流速提取的因素分析

速度结果图中常出现一些“空洞值”或者速度突变点,这是失配准的结果.降雪、消融、风吹雪、雪崩、裂缝等自然现象会使目标散射特性发生变化,进而导致两期 SAR 影像失配准.以图 4 中 B、C 椭圆区域为例,其夏季流速图(图 3a 和 3b 中对应的区域,其位置在图 3a 中进行了标记)几乎为空白,而冬季流速图(图 3d 和 3e 中对应的区域)却十分连续.这是因为图 4 中 B、C 椭圆所在区域是冰川的积累区,夏季降雪密度大,而且新雪容易质变,所以目标表面散射特性在夏季极不稳定;而冬季降雪稀少,表面一层主要是新雪经过缓慢重结晶形成的粒雪,目标表面散射特性相对稳定.又如在冰舌上段(图 4 中白色长虚线所在位置),其夏季流速图(图 3a、3b 和 3f 中对应的位置)断断续续,掺杂着空洞值和奇异值,而冬季流速图(图 3c、3d 和 3e 中对应的位置)则平滑连续,几乎没有噪声.这是因为冰舌上段是附加冰带的生成区,表面的粒雪层在暖季会经过消融产生大量融水或径流,冬季则开始冻结于冰上,形成附加冰

带(图 5).附加冰带一般位于雪线附近,平衡线之上的部分在暖季不会产生径流,对冰川有补给作用,而平衡线之下的部分会在暖季逐渐消融殆尽(图 5a),产生径流,对冰川没有补给作用^[2].冬季附加冰带则不断增厚,处于相对稳定状态(图 5b),所以冰舌上段夏冬两季流速图差别很大.冰舌的中段部分(图 4 中白色短虚线所在位置)表层是被冰碛覆盖着的冰川冰,散射特性较稳定,所以获取的速度保持了很好的连续性.

5.3 南依内里切克冰川的运动特征

河床坡度一定时,大冰川运动要比小冰川快得多^[2].南伊内里切克冰川是世界上最大的山岳冰川之一,其流动速度自然较大(图 3).而冰川厚度一定时,河床坡度越大越有利于冰川流动.我们在 6 个时间段里连续观测到的两个高速区,即图 3 中的 D 和 E 矩形区域(由于 6 个时段速度图覆盖区域一致,只在图 3a 中标注了其位置).为了便于比较,我们作了研究区域的坡度图,显示于图 6,其中的 D 和 E 矩形区域与图 3 的相应区域对应.结合该坡度图来看,这两处的坡度值有一个平稳增大的过程,坡度范围为 $1^{\circ} \sim 18^{\circ}$,但 6 个时间段的速度图非空洞速度值对应的坡度大小均在 16° 以下.图 3 中 F 和 G 矩形区域的坡度从 1° 突变到 16° 以上(参考图 6 中 F 和 G 矩形区域),而坡度为 16° 以上的区域的速度图在 6 个观测时段内均为空白或者奇异值,只能在其外围观测到一些速度增加的信号.通过对比 D、E、F、G

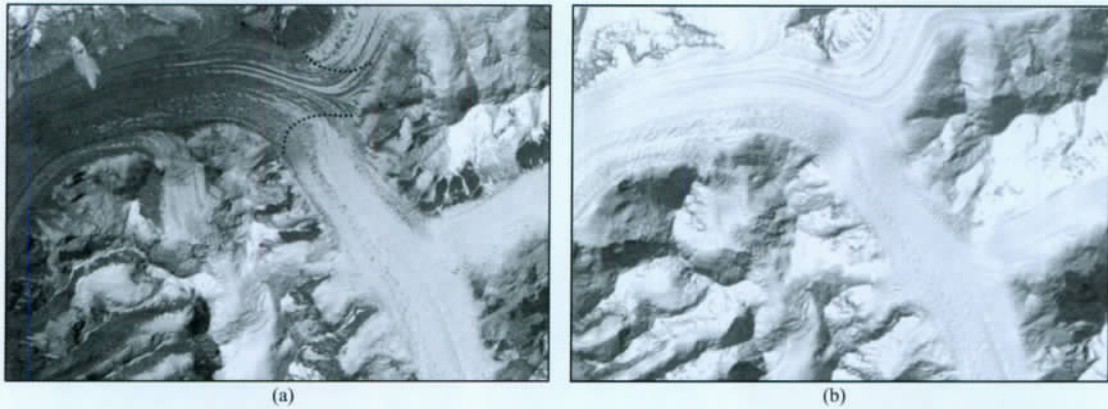


图5 南伊内里切克冰川主要附加冰带所在区域的夏季和冬季 ASTER/3N 波段影像对比(15 m 分辨率)
(a)夏季影像;(b)冬季影像.其中(a)中黑色点线为南伊内里切克冰川概略雪线位置.

Fig. 5 Contrast of summer and winter ASTER images in band 3N (15 meters resolution)
covering the major superimposed ice area of South Inylchek

(a) Summer image; (b) Winter image. The black dotted lines in (a) express the approximate snowlines.

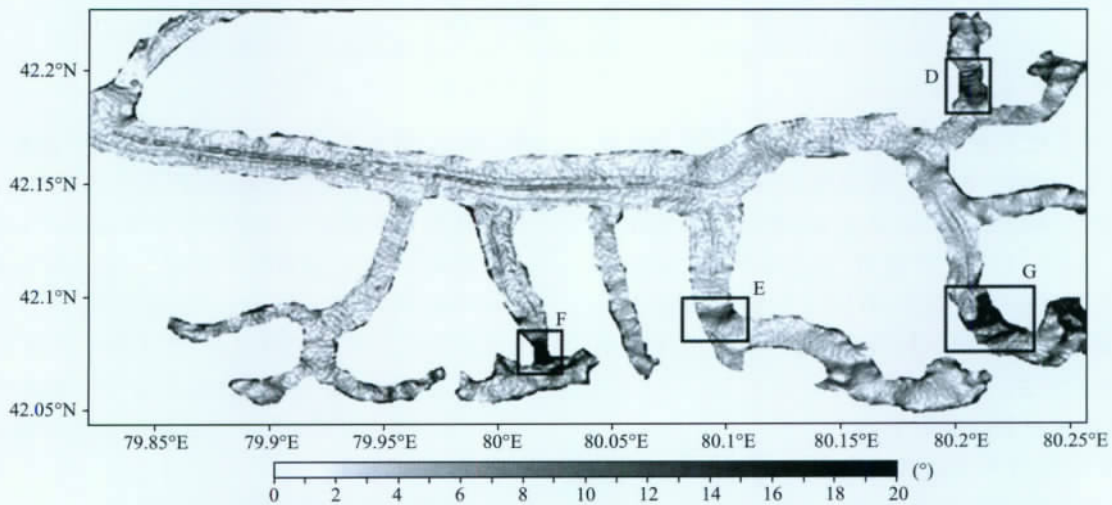


图6 南伊内里切克冰川坡度大小分布图

Fig. 6 Slope map of South Inylchek

矩形框位置的同期光学影像发现:D处表面连续,没有发现明显裂缝;E处在坡度最大的河道转弯处内侧有少数分布较规则的裂缝(图7b圆形区域);而F、G两个大坡度区域冰川表面裂缝密布,裂口长宽不规则(图7c、7d中的圆形区域)。地面坡度增加时,山岳冰川局部剪应力和流动速度随之快速增加,导致冰川裂缝生成和变化,地表样貌被改变,进而使SAR影像局部失配准。此外,冰面裂缝的生成和发育是冰川运动流速变化的重要标志,可以为观测冰川运动周期提供重要依据^[34]。由于上述空白区域在6个观测时段速度图中形状和大小十分接近,可以推测失配准是由坡度从 1° 突变至 16° 引起的。

冰舌尾部有条分支(图4中点线标注)流向北

部。在7月到8月这个时间段内(图3a矩形A),发现该处日平均速度为所有观测值中最大,达到 96 cm/d (图8a)。这主要和北面的麦兹巴赫湖有关。冰川融水径流和浮冰是该湖的主要水源,暖季会有大量的冰消融形成径流注入该湖,导致水位快速上升。水位上升后,冰川前端开始浮动,大量冰体脱落成为浮冰,造成冰川物质亏损。下游物质亏损后需要上游加速补充,所以速度激增。这点与Mayer等人的考察结果一致^[35]。4月到5月在该处(图3f矩形H)也观测到了速度增加的信号(图8b),但这一期的影像没有覆盖冰川分流节点,所以捕捉到的高速区范围很小。而其它时段(图3b、3c、3d、3e)的速度均很小。由此可以推测该湖水位在5—9月连续上升,而在10

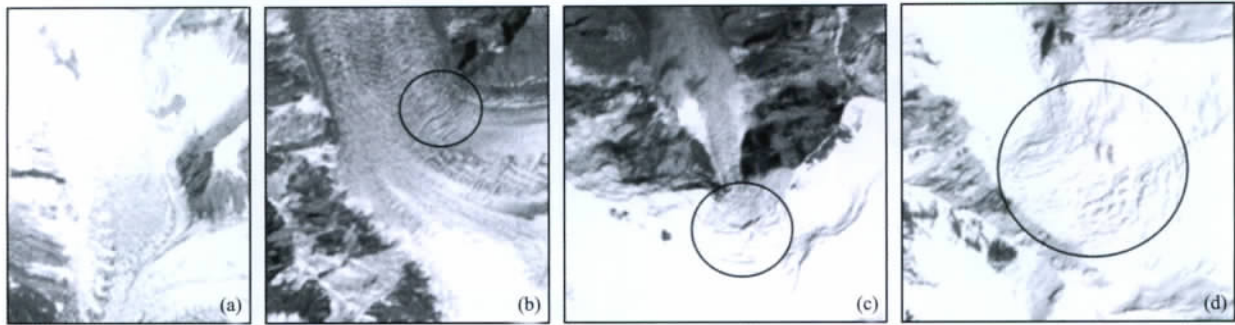


图7 与图6中D、E、F、G矩形位置对应的 ASTER/3N 波段影像(15 m 分辨率)
(a)、(b)、(c)、(d)分别对应 D、E、F、G 矩形。

Fig. 7 Images of ASTER in band 3N (15 meters resolution) covering
the rectangle areas marked with 'D', 'E', 'F', 'G' in Fig. 6

(a), (b), (c), (d) correspond to the rectangle areas of 'D', 'E', 'F', 'G', respectively.

月至次年4月则保持相对平稳。此外,作为山岳冰川的南伊内里切克冰川的运动方式不同于冰盖(南极、格陵兰等),其速度沿冰舌向末端逐渐减小,从40 cm/d 降到20 cm/d,这主要是因为冰川的厚度沿冰舌向下逐渐减薄所致。

5.4 南依内里切克冰川的流速变化

冰川的运动机制十分复杂,本文观测到的是冰川表面运动速度。6个时间段的观测结果均显示冰川运动的主流线在冰川的轴部,流速由轴部向两侧递减;由冰川源头向下至雪线处运动速度逐渐增加,然后再向冰川末端逐渐递减。速度图显示,最高流速(图3a中的E矩形区域)达到65 cm/d。在约一年的时间内该冰川主体日平均速度为20~50 cm/d。为了更详细地了解该冰川运动速度分布,沿冰舌(图4中白色短虚线标注处)连续取49个样点的速度值,通过三次样条拟合作剖面图,显示于图8。各个时段所有采样点的平均速度依次为32.3 cm/d(2007-07-09—2007-08-24),28.9 cm/d(2007-08-24—2007-10-09),27.9 cm/d(2007-10-09—2008-01-09),30.1 cm/d(2008-01-09—2008-02-24),30.8 cm/d(2008-02-24—2008-04-10)和33.3 cm/d(2008-04-10—2008-05-26)。如前文所述,托木尔峰区气温1月最低,2月不稳定,3、4月气温稳定回升,5月气温大幅升高,7月气温最高,此后开始降低,9月末至10月初气温大幅回落^[30]。从数据上看,冰川流速随温度降低而降低,随温度升高而升高,有一个季节起伏过程。从剖面图来看,各期速度值在剖面线上段比较稳定,没有明显季节性差别,但从剖面线7 km处开始分化,暖季速率会高于寒季5~10 cm/d,而且不如寒季稳定。这是因为一方面暖季冰川增温,冰的黏度迅速减小;另一方面暖季冰川内部及底部的融水出现会润滑河床底。但随

着海拔升高,冰川温度迅速降低,而且趋于稳定。另外冰川运动跟冰川厚度有关,不同时期降雪量不同,所以流速表现出来的季节变化并不是严格的周期性变化,只在趋势上和温度变化保持一致。

本文观测到的冰川运动速度和 Esra 等估计的该冰川2004年的速度(采用ASAR数据)相比^[25],在冰舌部分下降约5 cm/d。如前所述,冰川流速主要和冰川自身规模大小相关。一条健康冰川的速度通常是稳定的,而与运动速度减慢相伴的是冰川末端厚度减薄和位置退缩^[2]。在将近一年的时间内,该冰川主体的流动速度较为稳定。在全球变暖的影响下,大部分山岳冰川开始退缩和减薄。20世纪60到80年代天山冰川的运动速度大约为40~50 cm/d^[2],这个速度与本文结果吻合。本文还没有找到关于南伊内里切克冰川运动情况的其它详细记载,单用与 Esra 结果中部分区域流动速度比较尚不能分析该冰川物质亏损的程度。如果可以获取更多的数据,我们就能建立该冰川的运动模型,根据运动变化情况掌握冰川整体进退和物质平衡变化趋势。本研究小组将继续跟踪该区域冰川的运动速度变化情况。另外需要指出的是,由于南伊内里切克冰川在影像中处于边缘位置,而相同轨道编号下的卫星影像覆盖会有轻微错动,因此冰川尾部观测值覆盖面不尽相同,但没有影响对冰川运动规律的研究。

6 结 论

监测冰川物质平衡变化对于保护环境和经济发展具有重要意义,而冰川运动是冰川物质平衡发生变化的一个重要信号,因此监测冰川运动变化可以为研究冰川物质平衡提供重要信息。本文利用偏移

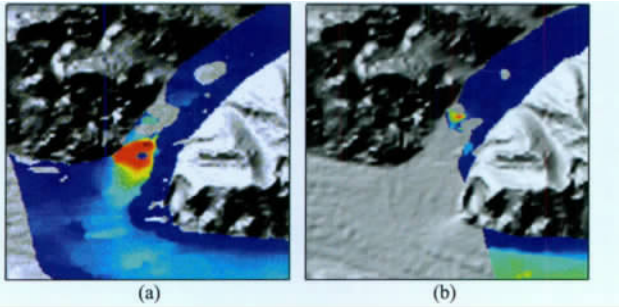


图 8 图 3a 中矩形区域 A 和图 3f 中矩形区域 H 的放大显示
 Fig. 8 Amplifications of rectangle area A in Fig. 3a and H in Fig. 3f

量跟踪技术获取了南伊内里切克冰川 6 个时间段内的二维运动场. 详细分析了影响灰度偏移量技术监测冰川运动的因素, 并结合 SAR 强度影像、坡度图和光学影像分析了南伊内里切克冰川流速的分布特征, 揭示流速大小和地形、季节和冰川湖的关系. 发现在约一年的时间内该冰川主体日平均速度为 20~50 cm/d, 和 Esra 等得到的结果大体一致, 但在冰舌部分略有下降, 幅度约 5 cm/d. 所取冰舌取样点的流动速率为 20~43 cm/d, 暖季速率会高于冬季 5~

10 cm/d. 各观测时段内所有采样点的平均速度最高可达 33.3 cm/d(时段 6), 最低为 27.9 cm/d(时段 3). 这些冰川运动速度特征可以为科考人员提供一定的路线指导, 还能帮助冰芯研究者选择比较理想的冰芯钻孔位置, 为古气候环境特征重建与研究提供参考依据^[36].

SAR 影像已成为获取冰川流动速度的重要信息源, 然而纵观目前的研究, 大多集中在南极和格陵兰两大冰盖, 以及挪威斯瓦尔巴特群岛入海冰川等, 只有少数研究是关于内陆山岳冰川(喜马拉雅、阿尔卑斯、天山). 本文利用 SAR 影像成功提取了南伊内里切克冰川的详细运动信息, 各个时间段内的速度分布特征吻合, 而且符合山岳冰川的运动规律, 说明该技术可以很好地应用于山岳冰川流动监测. 这对加大我国西部冰川监测力度, 保护西部自然环境和研究全球变化具有重要意义.

致谢 感谢日空局提供 ALOS/PALSAR 数据, 国家自然科学基金委员会"中国西部环境与生态科学数据中心" (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 提供中国冰川编目信息系统.

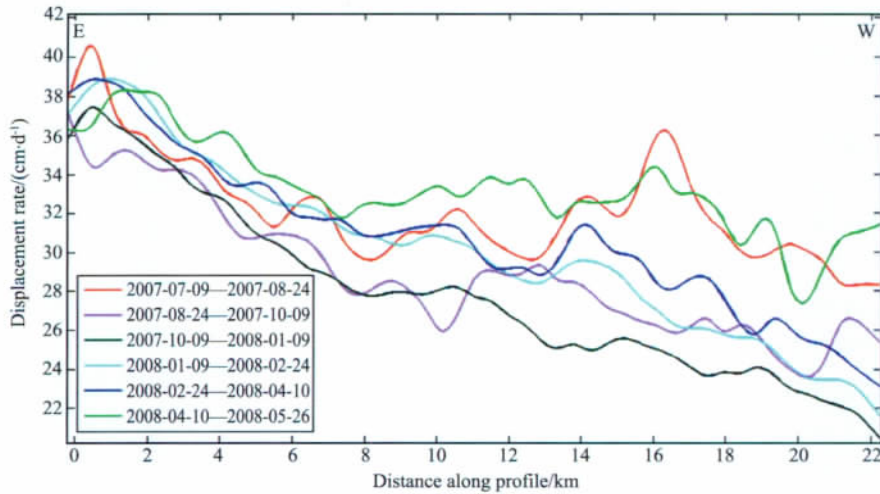


图 9 冰舌部分速度剖面图
 横轴起点为图 4 中白色大实心圆, 终点为白色小实心圆.

Fig. 9 Velocity profiles of glacial tongue
 The origin of horizontal axis corresponds to the big white solid circle in Fig. 4, while the end corresponds to small white solid circle.

参考文献 (References)

[1] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾等. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例. 冰川冻土, 2007, 29 (3): 335-342.
 Li Z Q, Shen Y P, Wang F T, et al. Response of glacier change to climate change—Take Urnumqi Glacier No. 1 as an

example. *J. Glaci. Geocry.* (in Chinese), 2007, 29 (3): 335-342.
 [2] 任炳辉. 中国的冰川. 兰州: 甘肃教育出版社, 1990: 54.
 Ren B H. Chinese Glacier (in Chinese). Lanzhou: Gansu Education Press, 1990: 54.
 [3] Massonnet D, Rossi M, Carmonar C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 1993, 364: 138-142.

- [4] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas; differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [5] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 1998, 36(4): 441-500.
- [6] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B10): 19617-19634.
- [7] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. Two-dimensional co-seismic surface displacement field of the Chi-Chi Earthquake inferred from SAR image matching. *Sensors*, 2008, 8: 6484-6495.
- [8] Feng G C, Hetland E A, Ding X L, et al. Coseismic fault slip of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake estimated from InSAR and GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37, L01302, doi:10.1029/2009GL041213.
- [9] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter. *ISPRS J. Photogramm Remote Sens.*, 2008, 63(6): 621-634.
- [10] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, et al. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion; application to an Antarctic ice stream. *Science*, 1993, 262: 1525-1530.
- [11] Giles A B, Massom R A, Warner R C. A method for sub-pixel scale feature-tracking using Radarsat images applied to the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica. *Remote Sens. Environ.*, 2009, 113: 1691-1699.
- [12] Liu H X, Zhao Z Y, Jezek K. Synergistic fusion of interferometric and speckle-tracking methods for deriving surface velocity from interferometric SAR data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2007, 4(1): 102-106.
- [13] Liu H X, Zhao Z Y, Jezek K. Simultaneous least square adjustment of multiframe velocities derived from interferometric and speckle-tracking methods. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2008, 5(2): 289-293.
- [14] Rignot E J. Fast recession of a West Antarctic Glacier. *Science*, 1998, 281: 549-551.
- [15] Joughin L, Tulaczyk S, Fahnestock M, et al. A mini-surge on the Ryder Glacier, Greenland, observed by satellite radar interferometry. *Science*, 1996, 274: 228-230.
- [16] Joughin L, Abdalati W, Fahnestock M. Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Lsbrae glacier. *Nature*, 2004, 432: 608-610.
- [17] Kwok R, Fahnestock M A. Ice sheet motion and topography from radar interferometry. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1996, 34(1): 189-200.
- [18] Luckman A, Murray T, Strozzi T. Surface flow evolution throughout a glacier surge measured by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(23), 2095, doi:10.1029/2001GL014570.
- [19] Mohr J J, Reeh N, Madsen S N. Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry. *Nature*, 1998, 391: 273-276.
- [20] Rignot E J, Gogineni S P, Krabill W B, et al. North and Northeast Greenland Ice discharge from satellite radar interferometry. *Science*, 1997, 276: 934-937.
- [21] Rignot E J, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet. *Science*, 2006, 311: 986-990.
- [22] Strozzi T, Luckman A, Murray T, et al. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2002, 40(11): 2384-2391.
- [23] Strozzi T, Kouraev A, Wiesmann A, et al. Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data. *Remote Sens. Environ.*, 2008, 112: 636-645.
- [24] Luckman A, Quincey D, Bevan S. The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of Himalayan glaciers. *Remote Sens. Environ.*, 2007, 111: 172-181.
- [25] Esra E, Andreas R, Olaf H, et al. Glacier velocity monitoring by maximum likelihood texture tracking. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2009, 47(2): 394-405.
- [26] Lado W K, Kanfmann V. Estimation of rock glacier surface deformation using SAR interferometry data. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2003, 41(6): 1512-1515.
- [27] 周建民, 李震, 李新武. 基于 ALOS/PALSAR 雷达干涉数据的中国西部山谷冰川冰流运动规律研究. *测绘学报*, 2009, 38(4): 341-347.
- Zhou J M, Li Z, Li X W. Research on rules of valley glacier motion in Western China based on ALOS/PALSAR interferometry. *Acta Geodae. Cartogra. Sinica* (in Chinese), 2009, 38(4): 341-347.
- [28] 刘时银, 丁永健, 李晶等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 762-771.
- Liu S Y, Ding Y J, Li J, et al. Glaciers in response to recent climate warming in Western China. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2006, 26(5): 762-771.
- [29] 王淑红, 谢自楚, 李巧媛. 近期东西天山冰川变化的对比研究. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 946-952.
- Wang S H, Xie Z C, Li Q Y. Comparison study of glacier variations in East and West Tianshan Mountains. *J. Glaci. Geocry.* (in Chinese), 2008, 30(6): 946-952.
- [30] 韩海东, 刘时银, 丁永健等. 科其喀尔巴西冰川的近地层基本气象特征. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 967-975.
- Han H D, Liu S Y, Ding Y J, et al. Near-surface meteorological characteristics on the Koxcar Baxi Glacier, Tianshan. *J. Glaci. Geocry.* (in Chinese), 2008, 30(6): 967-975.
- [31] Wegmuller U, Werner C, Strozzi T, et al. Ionospheric electron concentration effects on SAR and InSAR. Proceeding of IGASS 2006, Denver, USA, July 31-August 4.
- [32] Werner C, Wegmuller U, Strozzi T, et al. Precision estimation of local offsets between pairs of SAR SLCs and

- detected SAR images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS Proceeding, IEEE International*, 2005, 7: 4803-4805.
- [33] Rodriguez E, Morris C S, Belz J E. A global assessment of the SRTM performance. *Photogramm Eng. Remote Sens.*, 2006, 72: 249-260.
- [34] Sund M, Elken T, Hagen J O, et al. Svalbard surge dynamics derived from geometric changes. *Ann. Glaciol.*, 2009, 50(52):50-60.
- [35] Mayer C, Lambrecht A, Hagg W, et al. Post-drainage ice dam response at Lake Merzbacher, Inylchek glacier, Kyrgyzstan. *Geogra. Ann. Ser.*, 2008, 90A (1): 87-96.
- [36] 叶庆华, 陈锋, 姚檀栋等. 近 30 年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究. *遥感学报*, 2007, 11 (4): 511-520.
- Ye Q H, Chen F, Yao T D, et al. Tupu of glacier variations in the Mt Naimona Nyi Region, Western Himalayas, in the last three decades. *J. Remote Sens.* (in Chinese), 2007, 11 (4): 511-520.

(本文编辑 何 燕)